

최 종
연구보고서

농업수리 콘크리트 구조물의 내구성 증진을
위한 FRP 리바 개발 및 적용성 평가

Development and Application of FRP
Rebar for Agricultural Hydraulic
Concrete Structure

연구 기관
건국대학교

농림부

제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “농업수리 콘크리트 구조물의 내구성증진을 위한 FRP 리바 개발 및 적용성 평가”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2004년 10월 일

주관연구기관명: 건국대학교
총괄연구책임자: 원 중 필
세부연구책임자: 원 중 필
연 구 원: 박 찬 기
연 구 보 조 원 장 필 성
: 김 명 균
: 공 태 웅
: 서 정 민
: 조 용 진
: 성 상 경
: 윤 중 환
: 황 금 식

참 여 기 업: 동원건설(주)
연 구 원: 최 강 진
: 김 성 환
: 이 선 호

요 약 문

I. 제 목

농업수리 콘크리트 구조물의 내구성 증진을 위한 FRP 리바 개발 및 적용성 평가

II. 연구개발의 목적 및 필요성

현재 사회 간접자본 시설의 건설에 주로 사용되는 철근콘크리트 구조물은 철근의 부식으로 인한 구조성능의 저하가 주요한 관심이 되고 있다. 특히 해양 및 수리구조물, 콘크리트 교량구조물 등과 같이 수분에 직접적으로 접촉해 있는 콘크리트 구조물에서의 철근의 부식으로 인한 문제는 더욱더 심각한 실정으로 그에 대한 방지대책이 요구되고 있으나 명확한 해결책은 제시하지 못하고 있다. 미국의 경우 총 580,000 개의 교량중에 180,000 개의 교량이 결함이 발견되어 즉시 보수 및 보강이 필요하며 전체 교량 구조물의 약 31%정도이다(Alsayed(1995)). 이와 같이 콘크리트 구조물 노후화의 주요원인 또한 보강 철근의 부식에 의한 것으로 보고되었다.(Alsayed(1995)) 현재 보강 철근의 부식에 대한 문제점을 해결하고자 개발된 재료 중 FRP 리바(Fiber Reinforced Polymer rebar)은 콘크리트 보강철근의 부식에 대한 문제점을 해결할 우수한 재료로서 그 사용 가능성이 매우 높다(ACI Report 440R(1996), ACI 440H(2000), Ashour(1993), Benmokrane(1996)) . FRP 리바는 강도가 높으면서도 부식에 대한 우려가 없으며 보강재료로서 사용될 경우 강도/중량비가 커 콘크리트 구조물의 자중을 감소시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.(Dolan(1999), Focacci(2000), Nanni(1993)) 그러나 이러한 특성에도 불구하고 유리(glass)나 탄소(carbon)섬유로 만들어진 일방향 섬유배열의 FRP 리바는 재료의 자체 특성상 보강철근과 달리 소성변형이 없는 취성적 성질과 철근콘크리트 설계시 콘크리트의 파괴변형률인 3%이하의 변형률을 가지는 단점이 있다. 즉 FRP 리바는 선탄성적인 응력-변형률 거동을 하

며 파괴변형률이 3%이하인 단점을 가지고 있는데 반해 보강철근은 초기항복점까지는 선탄성적인 거동을 보여주지만 이후 큰 소성변형과 변형경화거동을 가지며 3% 이상의 파괴변형률을 보여준다. 또한 보강철근의 항복 후에 발생하는 소성변형은 휨부재의 파괴가 발생하기 전에 지속적으로 하중을 전달함과 동시에 큰 연성거동을 발생시킨다(ACI Report 440R(1996), ACI 440H(2000), Ashour(1993), Benmokrane(1996)). 콘크리트구조물에서 보강철근이 갖는 3%이상의 파괴변형률과 소성변형 구간이 없다면 작은 파괴하중의 증가에도 어떠한 사전경고도 없이 급격한 파괴 즉 취성파괴를 발생시킨다(Win Somboonsong(1997), Tamuzs, Tepfer(1999)). 또한 지진하중, 풍하중, 차량하중 등 동적하중을 받는 구조물의 설계에서 소성변형 메카니즘은 꼭 필요한 것으로 재료의 변형에 의한 에너지의 발산과 반복하중에 의한 구조물에 부과된 에너지의 많은 양을 흡수하는데 사용된다(Win Somboonsong(1997), Tamuzs, Tepfer(1999)). 따라서 현재 개발된 FRP 리바는 콘크리트 보강재료로 적합하지 않다.

본 연구의 목표는 크게 두가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 새로운 FRP 리바의 개발이고 두 번째는 FRP 리바의 적용성 평가이다. 이를 자세히 설명하면 다음과 같다.

1. FRP 리바 개발

가. FRP 리바의 설계

나. FRP 리바 생산시스템 개발

다. FRP 리바의 인장거동 예측 모델 개발

라. FRP 리바의 역학적 특성 및 내구성능 평가

마. FRP 리바의 환경영향 계수 제안

바. FRP 리바의 표면형상의 최적화

사. FRP 리바의 부착거동 평가

2. FRP 리바의 적용성 평가

- 가. FRP 리바로 보강된 콘크리트의 휨거동 평가
- 나. FRP 리바로 보강된 콘크리트의 품질기준안 개발

Ⅲ. 연구개발 내용 및 범위

본 연구는 콘크리트 구조물의 내구성 증진을 위한 FRP 리바 개발 및 적용성을 평가하기 위한 것으로 연구의 세부 목표 및 내용은 다음과 같다.

1. 기존 FRP 리바의 제조 방법 및 재료 특성 확보

- 가. 인장 특성
- 나. 응력-변형률
- 다. 전단강도

2. 일반 및 새로운 FRP 리바의 설계방법 및 응력-변형률 예측 모델 개발

- 가. 재료 하이브리드(hybrid) 개념 및 모델 도입
- 나. 기하학적 하이브리드 개념 및 모델 도입
- 다. 재료 및 기하학적 하이브리드 모델의 도입을 통한 응력-변형률 예측 모델 개발
- 라. 응력-변형률 예측 모델을 이용한 FRP 리바의 설계

3. FRP 리바 생산시스템 개발

- 가. 생산시스템 개발 및 설치

4. FRP 리바의 내구성능 검토

- 가. 용빙제, 복합환경, 황산염 영향
- 나. 건조-습윤반복
- 다. 동결-융해 반복
- 라. 수분영향
- 마. 알칼리 및 산 환경에서의 영향
- 바. 염해 환경에서의 영향
- 사. 자외선 노출

5. FRP 리바의 품질기준안 개발 및 치수의 규격화

- 가. 개발될 FRP 리바의 치수의 규격화
- 나. 개발될 FRP 리바의 품질기준(안) 제시

6. FRP 리바의 부착성 향상을 위한 최적 표면 형상 결정

- 가. FRP 리바의 표면의 기하학적 변수 결정
- 나. FRP 리바의 최적 표면형상 결정

7. FRP 리바와 콘크리트 모체와의 외부환경 노출후의 부착성능 검토

- 가. 용빙제, 복합환경, 황산염 영향
- 나. 건조-습윤반복
- 다. 동결-융해 반복
- 라. 수분영향
- 마. 알칼리 및 산 환경에서의 영향
- 바. 염해 환경에서의 영향

8. FRP 리바로 보강된 콘크리트 보의 역학적 거동 평가.

IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

1. 연구결과

- 1) 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 설계기법을 개발하였다.
- 2) 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 생산시스템을 개발하였다.
- 3) 하이브리드 FRP 리바의 인장거동 예측모델을 개발하였다.
- 4) 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 물리·역학적 특성을 평가하였다.
- 5) 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 내구성을 평가하였다.
- 6) 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 환경영향계수를 결정하였다.
- 7) 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 부착성능을 향상을 위하여 표면현상을 최적화하였다.
- 8) 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 부착성능 및 축진 열화환경에 노출하여 부착성능을 평가하였다.
- 9) 일반 및 하이브리드 FRP 리바를 적용한 콘크리트 보의 휨거동을 평가하였다.
- 10) 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 품질기준안을 개발하였다.

2. 연구 결과의 활용방안

- 1) 보강철근을 대체하여 농업수리 콘크리트 구조물에 적용함으로써 내구수명을 증가 시킬 수 있다.

- 2) 농업수리 콘크리트 구조물 이외에 모든 콘크리트 구조물로의 적용분야의 확대가 가능하다.
- 3) 신규 구조물 뿐만 아니라 기존 구조물의 보수·보강재료로 사용확대 가능하다.
- 4) 철근 부식의 가능성이 없는 우수한 내구성을 가진 보강재료 및 공법으로 활용이 가능하다.

SUMMARY

I . TITLE

Development and application of FRP rebar for agricultural concrete structure

II. OBJECTIVES AND SIGNIFICANCE

The deterioration of the structural performance of reinforced concrete structures as a result of the corrosion of steel reinforcement is a major concern. These reinforced concrete structures are used mainly in infrastructures, and the problem is much more serious in concrete structures that are in direct contact with water, such as marine structures and concrete bridges. Although appropriate corrective measures are required, a specific solution has not yet been proposed. In the USA, for example, 180, 000 out of a total of 580, 000 bridges, or 31%, require immediate repair or reinforcement due to corrosion defects. Among the alternatives developed to solve the corrosion problem, FRP reinforcements show great promise as an efficient solution. FRP reinforcements have high strength and present no risk of corrosion. They can reduce the dead load of the structure with their high strength to weight ratio. However, FRP reinforcements are brittle and yield without any prior plastic deformation. In other words, they have linear elastic stress-strain characteristics. Steel reinforcements, on the other hand, have linear elastic characteristics until their initial yield point, which is then followed by a large amount of plastic deformation and by strain-hardening characteristics. The plastic deformation continuously distributes the load and, at the same time, produces a large amount of ductile bending until the member breaks. Without such plastic deformation of the steel reinforcements

within concrete structures, even a slight increase in the breaking load could result in a sudden brittle failure. In addition, plastic deformation is necessary for the design of concrete structures that are subjected to dynamic loads by earthquakes, wind, or vehicles, because the plastic behavior distributes the energy resulting from the deformation of the material and absorbs much of the energy that is applied to the structure by repeated loads. Therefore, existing FRP materials are inappropriate as concrete reinforcement when plastic deformation is required before failure. Thus, the current FRP rebars are not suitable for concrete reinforcement where a large amount of plastic deformation prior to collapse is required.

The purpose of this study can be divided into two parts: development of FRP rebar and Application of FRP rebar. Each of them is as follows:

1. Development of FRP rebar

- a. Design of FRP rebar
- b. Development of FRP rebar manufacturing systems
- c. Development of tensile behavior prediction model
- d. Evaluation of Mechanical and durability performance of FRP rebar
- e. Recommendation of environmental reduction factor for FRP rebar
- f. Optimization of surface deformation pattern of FRP rebar
- g. Evaluation of bond behavior of FRP rebar

2. Applicability of FRP rebar

- a. Evaluation of Flexural performance of FRP rebar reinforced concrete
- b. Development of FRP rebar reinforced concrete quality control method

III. CONTENTS AND SCOPE

The content of this research can be grouped into eight major parts. Each of part is as follows:

1. Evaluation of manufacturing system and material properties of FRP rebar

- a. Tensile strength
- b. Strength vurse strain
- c. Shear strength

2. Development of tensile behavior prediction model of FRP rebar

- a. Introduction of material hybrid model
- b. Introduction of geometry hybrid model
- c. Development of tensile behavior prediction model
- d. Design of FRP rebar

3. Development of manufacturing system of FRP rebar

- a. Pultrusion system
- b. Filament winding system
- c. Braiding system
- d. Development of Pultrusion/filament winding/braiding system

4. Evaluation of durability performance of FRP rebar

- a. Alkaline and acid environmental exposure

- b. Repeated wetting and drying cycles
- c. Repeated freezing and thawing cycles
- d. Water absorption
- e. Salt environmental exposure
- f. UV exposure
- g. CaCl_2 immersion and NaSO_4 exposure

5. Quality control method of FRP rebar

- a. Standard of diameter and length
- b. Recommendation of quality control method

6. Optimization of surface deformation pattern of FRP rebar

- a. Geometry variance of surface deformation pattern
- b. Bond test
- c. Optimization of surface deformation pattern

7. Bond performance of FRP rebar after environmental exposure

- a. Alkaline and acid environmental exposure
- b. Repeated wetting and drying cycles
- c. Repeated freezing and thawing cycles
- d. Water absorption
- e. Salt environmental exposure
- f. UV exposure
- g. CaCl_2 immersion and NaSO_4 exposure

8. Flexural performance of FRP reinforced concrete specimens

IV. RESULTS AND APPLICABILITY

1. Research Results

- a. Development of FRP rebar design methods
- b. Development of FRP rebar manufacturing systems
- c. Development of tensile behavior prediction model of FRP rebar
- d. Evaluation of physical and mechanical properties of FRP rebar
- e. Evaluation of durability performance of FRP rebar
- f. Recommendation of environmental reduction factor of FRP rebar
- g. Optimization of surface deformation pattern of FRP rebar
- h. Evaluation of bond performance of FRP rebar after environmental exposure
- i. Evaluation of flexural performance of FRP reinforced concrete specimens
- j. Development of quality control specification

2. APPLICABILITY

- a. Application of agricultural concrete structure.
- b. Application of civil and architecture concrete structure.
- c. Application of repair and reinforcement materials of concrete structure.
- d. Application of repair and strengthening method of concrete structure.

CONTENTS

Chapter 1: Introduction	1
Section 1: Research needs	1
Section 2: Background of the research	3
Section 3: Objectives and scopes	6
Section 4: Expected effects	10
Section 5: Applicability of research results	11
Section 6: Participated researchers	12
Chapter 2: FRP rebar(Fiber reinforced polymer rebar)	14
Section 1: Introduction	14
Section 2: Composition materials of FRP rebar	17
Chapter 3: Manufacturing systems of FRP rebar	29
Section 1: Introduction	29
Section 2: Analysis of manufacturing systems	29
Section 3: Development of manufacturing system	32
Section 4: Summary and conclusion	46
Chapter 4: Theory and design of FRP rebar	47
Section 1: Introduction	47
Section 2: Theory of hybrid FRP rebar	47
Section 3: Design of hybrid FRP rebar	56
Section 4: Summary and conclusion	75
Chapter 5: Tensile behavior prediction model of FRP rebar	77

Section 1: Introduction	77
Section 2: Background of the tensile behavior prediction model	77
Section 3: Development of the tensile behavior prediction model	82
Section 4: Comparison between analytical prediction and experimental results	82
Section 4: Summary and conclusion	105
Chapter 6: Mechanical properties of FRP rebar	108
Section 1: Introduction	108
Section 2: Experimental program and test method	108
Section 2: Test results	114
Section 4: Summary and conclusion	125
Chapter 7: Durability performance of FRP rebar	127
Section 1: Introduction	127
Section 2: Correlation of accelerated and natural weathering	128
Section 3: Experimental program and test method	129
Section 4: Test results	135
Section 5: Summary and conclusion	196
Chapter 8: Water absorption and recommendation of environmental reduction factor of FRP rebar	197
Section 1: Water absorption	197
Section 2: Environmental reduction factor	209
Section 3: Summary and conclusion	230

Chapter 9: Optimization of surface deformation pattern of FRP rebar	231
Section 1: Introduction	231
Section 2: Experimental program	232
Section 3: Test method	234
Section 4: Test results	238
Section 5: Summary and conclusion	244
 Chapter 10: Bond behavior of FRP rebar	 245
Section 1: Introduction	245
Section 2: Experimental program and test method	246
Section 3: Test results	247
Section 4: Summary and conclusion	270
 Chapter 11: Flexural behavior of FRP rebar reinforced concrete specimens	 273
Section 1: Introduction	273
Section 2: Design theory and analysis of FRP reinforced concrete	273
Section 3: Load verse deflection model	284
Section 4: Test method	290
Section 5: Test results	292
Section 6: Summary and conclusion	304
 Chapter 12: Attainment of the goal and contribution in the related field	 306
Section 1: Evaluation of manufacturing system and properties of FRP rebar	306
Section 2: Development of FRP rebar design methods and tensile behavior	

prediction model	306
Section 3: The optimum mix proportion and materials suggested in economical benefit	307
Section 4: Development of FRP rebar manufacturing systems	308
Section 5: Evaluation of physical and mechanical properties of FRP rebar	292
Section 6: Evaluation of durability performance and recommendation of environmental reduction factor of FRP rebarsion	309
Section 7: Optimization of surface deformation pattern of FRP rebar	310
Section 8: Evaluation of bond performance after accelerated environmental exposure	310
Section 9: Development of quality control specification	311
Section 10: Flexural behavior of FRP rebar reinforced concrete specimens	311
Chapter 13: Plan of utilization for the research results	313
Section 1: Commercial propulsion of develop FRP rebar	313
Section 2: Application as quality control method and design method of FRP rebar	314
Section 3: Using the construction method for new concrete structures	315
Section 4: Application as the data of future development of technique	315
Chapter 14: Summery and conclusion	316
Chapter 15: Reference	332
Appendices	345

목 차

요약문	i
목차	xi v
표목차	xxi
그림목차	xxiv
제 1장 서론	1
제 1절 연구의 필요성	1
제 2절 국내·외 관련기술의 현황과 문제점	3
1. 국내 기술동향	3
2. 국외 기술동향	3
3. 기술동향분석	4
4. 앞으로 전망	4
5. 기술도입의 타당성	5
제 3절 연구개발의 목표 및 내용	6
1. 1차년도(2003)	6
2. 2차년도(2004)	6
3. 최종목표	7
제 4절 기대효과	10
1. 기술적 측면	10
2. 경제·산업적 측면	10
제 5절 활용방안	11
제 6절 연구진의 구성	12

1. 연구원의 편성	12
2. 주요 업무 내용	13
제 2장 FRP 리바(Fiber Reinforced Polymer Rebar)	14
제 1절 개 요	14
제 2절 FRP 리바의 구성재료	17
1. 섬유	17
2. 폴리머 수지(Polymer resin)	24
3. 섬유와 폴리머 수지와의 계면부착	27
제 3장 일반 및 하이브리드 FRP 리바 제조시스템 개발	29
제 1절 개 요	29
제 2절 생산시스템 분석	29
1. 압출성형(pultrusion)	29
2. 필라멘트 와인딩(filament winding process)	30
3. 브레이딩(Braiding process)	31
제 3절 생산시스템 개발	32
1.개 요	32
2. 압출 시스템(Pultrusion system)	33
3. 브레이딩 장치(Braiding machine)	38
4. 필라멘트 와인딩/브레이딩 시스템(Filament winding/braiding system)	43
5. 브레이딩/ 필라멘트 와인딩 섬유의 폴리머수지 함침장치	43
6. 양생장치(Curing system)	44
7. 압축롤러(Puller)	44
8. Cutting 시스템	46
제 4절 요약 및 결론	46
제 4장 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 이론적 고찰 및 설계	47
제 1절 개요	47

제 2절 하이브리드 FRP 리바에 대한 이론적 고찰	47
1. 재료 하이브리드모델	48
2. 기하학적 하이브리드모델	48
3. 섬유실의 배열 차이에 따른 비표면적의 영향	53
4. 혼합법칙(Rule of mixtures)	55
제 3절 하이브리드 FRP 리바의 설계	56
1. 개요	56
2. 하이브리드 FRP 리바의 변수 결정	57
3. 코어 FRP 리바 및 슬리브를 구성하는 섬유의 물리·역학적 특성 결정	68
제 4절 요약 및 결론	75
제 5장 하이브리드 FRP 리바의 응력-변형률 예측 모델	77
제 1절 개 요	77
제 2절 기존 응력-변형률 예측 모델	77
1. Averston과 Kelly의 모델	77
2. Tamuzs 와 Tapfer의 모델	78
3. Phoenix's 모델	79
제 3절 하이브리드 FRP 리바의 응력-변형률 예측 모델 개발	82
제 4절 모델과 실험결과와의 비교 분석	84
1. 인장거동 평가	84
2. 하이브리드 FRP 리바의 파괴 모드	91
3. 시험결과와 인장특성과의 비교	101
제 5절 요약 및 결론	105
제 6장 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 역학적 특성	108
제 1절 개 요	108
제 2절 실험계획 및 방법	108
1. FRP 리바	108
2. 실험방법	109

제 3절 실험결과 및 분석	114
1. 물리적 특성	114
2. 역학적 특성	116
제 4절 요약 및 결론	125
제 7장 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 내구특성	127
제 1절 개요	127
제 2절 자연적인 열화와 촉진열화의 관계	128
제 3절 시험계획 및 방법	129
1. FRP 리바	129
2. 실험계획	129
3. 촉진열화환경	131
4. 실험방법	134
제 4절 실험결과	135
1. 압축강도	135
2. 전단강도(ISS)	155
3. 인장강도	174
제 5절 요약 및 결론	196
제 8장 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 수분흡수특성 및 환경영향계수 결정	197
제 1절 수분흡수 특성	197
1. 개요	197
2. 이론적 고찰	197
3. 시험방법	201
4. 실험결과	202
제 2절 환경영향계수	209
1. 개요	209
2. 일본 토목학회	209

3. 캐나다 고속도로 교량 설계 기준(CHBDC)	210
4. 미국 콘크리트 학회(ACI)	212
5. BISE 및 EUROCRETE	214
6. 노르웨이 기준	214
7. 내구성 설계기준의 요약	215
8. 환경영향계수 결정	216
제 3절 요약 및 결론	230

제 9장 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 부착거동 향상을 위한 최적 표면형상 결정

제 1절 개요	231
제 2절 시험계획 및 방법	232
제 3절 실험방법	234
제 4절 실험결과	238
1. 압축강도	238
2. 표면형상변화에 따른 부착강도와 Slip과의 관계	239
3. Rib의 방향에 따른 부착강도의 영향	239
4. Rib의 폭의 변화에 따른 부착강도의 영향	239
5. Rib의 높이 변화에 따른 부착강도의 영향	239
5절 요약 및 결론	244

제 10장 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 부착거동

제 1절 개요	245
제 2절 실험 계획 및 방법	246
1. 실험계획	246
2. 실험방법	246
제 3절 시험결과	247
1. 압축강도	247
2. 기준공시체	247

3. 여러개의 FRP 리바가 한 묶음으로 배열되었을 때의 부착 특성	249
4. 알칼리 환경	252
5. 산환경	254
6. 염해환경	254
7. 중성환경	255
8. 건조-습윤반복	259
9. 장기오븐 건조	259
10. 동결-융해반복	259
11. 황산염	259
12. 용빙제 환경	264
13. 염해·건조-습윤 반복	266
14. 염해·동결-융해 반복	266
15. 자외선 노출	266
제 4절 요약 및 결 론	270

제 11장 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 휨거동 273

제 1절 개 요	273
제 2절 FRP 리바로 보강된 콘크리트의 해석 및 설계 이론	273
1. FRP 리바의 설계인장강도	274
2. 기본가정사항	275
3. FRP 리바로 보강된 콘크리트 휨부재의 파괴모드	275
4. 연성	278
5. FRP 리바로 보강된 콘크리트 휨부재의 강도감소계수	280
6. 처짐	281
7. 균열	282
제 3절 하중-처짐 예측 모델	284
1. 단면 내력 산정	285
2. 단면 모멘트	287
3. 처짐 계산	288

제 4절 시험방법	290
1. 시험 공시체의 설계 및 제작	290
2. 시험공시체의 제작	291
3. 하중재하 및 측정방법	291
제 5절 실험결과	292
1. 압축강도	292
2. 하중-처짐 거동	293
3. 극한하중 및 연성	296
4. 공칭휨모멘트, 설계휨모멘트 및 파괴모드	298
5. 균열발생 형태	300
제 6절 요약 및 결론	304

제 12장 목표달성도 및 관련분야의 기여도 306

제 1절 해외 상용 FRP 리바에 대한 물성 및 제조방법 분석	306
제 2절 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 설계 방법 및 응력-변형률 거동 예측 모델 개발	306
제 3절 원가절감형 재료의 선택 및 최적 배합비 결정	307
제 4절 일반 및 새로운 FRP 바의 생산시스템 개발	307
제 5절 개발된 일반 및 하이브리드 FRP 리바와 기존의 FRP 리바의 역학적 특성 비교	308
제 6절 개발된 일반 및 하이브리드 FRP 리바와 기존의 FRP 리바의 내구성능 비교 및 환경영향계수 결정	309
제 7절 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 최적표면형상결정	310
제 8절 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 내구성 저하 환경에 노출 후 부착거 동 평가	310
제 9절 개발된 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 품질기준안 및 치수의 규격화	311
제10절 개발된 FRP 리바 및 상용 FRP 리바로 보강된 시험체의 휨성능 평가	311

제 13장 연구개발결과의 활용계획	313
제 1절 개발된 FRP 리바의 상품화 추진	313
제 2절 개발된 FRP 리바의 품질관리기준 및 내구성 기준의 설계 정립	314
제 3절 신규 농업수리 및 일반 콘크리트 구조물의 내구성 증진을 위한 공법으로 이용	315
제 4절 향후 기술개발의 자료로 활용	315
제 14장 종합 결론	316
제 15장 참고문헌	322
부 록	345

표 목 차

Table 1-1 Objective and contents of Research	8
Table 2-1 Advantage and disadvantage of FRP rebar	15
Table 2-2 Qualitative assessment of fibers with respect to chemical resistance	19
Table 2-3 Typical properties of carbon fiber	19
Table 2-4 Typical properties of aramid fiber	21
Table 2-5 Approximate compositions of various glass fibers	22
Table 2-6 Typical properties of glass fiber	22
Table 2-7 Typical properties of PVA fiber	23
Table 2-8 Group of the common plastics used in the construction industry ·	25
Table 2-9 Typical properties of matrix	28
Table 2-10 Fiber-resin interface compatibility	28
Table 4-1 Specific area calculation of unimpregnated fibers	54
Table 4-2 Specific area calculation of impregnated fibers	55
Table 4-3 Mechanical properties of fiber and resin used in parametric studies ·	58
Table 4-4 Mix proportion of hybrid FRP rebars	59
Table 4-5 Input parameter for tensile prediction program	68
Table 4-6 Twisting angle of fiber yarns	69
Table 4-7 Specific area of unimpregnated fibers	70
Table 4-8 Specific area of impregnated fibers	70
Table 4-9 Specific volume of fiber and fiber yarns and packing factor	71
Table 4-10 Strain of fiber, fiber yarn, woven yarn and braided yarn	71
Table 4-11 Tensile force of fiber yarn, woven yarn and braided yarn	72
Table 4-12 Elastic modulus of fiber yarn, woven yarn and braided yarn	72
Table 4-13 Output of fiber and resin properties from prediction program	74
Table 4-14 Output of hybrid FRP rebar mechanical properties from prediction program	75

Table 5-1 Recommendations for tensile test of FRP rebar	88
Table 5-2 Length and diameter specifications	89
Table 5-3 Properties of Epoxy resin	90
Table 6-1 FRP rebar types	109
Table 6-2 Effective diameter, and area of FRP rebars	115
Table 6-3 Specific gravity of FRP rebars	116
Table 7-1 Conditioning and compressive, interlaminar shear stress, tensile test of FRP rebars	130
Table 8-1 Stress limiting factor for FRP reinforcement	211
Table 8-2 Stress limiting factor FRP prestressed Rebar	211
Table 8-3 Condition of use for primary FRP reinforcement and tendons	212
Table 8-4 Environmental reduction factor	213
Table 8-5 Creep/fatigue reduction factors	213
Table 8-6 Materials and environmental factors(EUROCRETE-BISE)	214
Table 8-7 Materials and environmental factors(Norwegian standard)	215
Table 8-8 Materials and environmental factors	216
Table 8-10 Limited of environmental factor	217
Table 8-11 Environmental factor of developed FRP rebars	229
Table 9-1 Geometry of FRP rebar	232
Table 9-2 Physical Properties of Cement	227
Table 9-3 Physical properties of fine and coarse aggregate	237
Table 9-4 Mix proportion	237
Table 9-5 Compressive strength of concrete	238
Table 10-1 Compressive strength of concrete	247
Table 10-2 Geometric properties of normally spaced rebars, bundled rebars and equivalent single rebar	250
Table 10-3 Pull-out cylinder test results of bundled rebars and comparison with two rebar bundle	251
Table 11-1 Reinforcement properties of concrete specimens	291

Table 11-2 Mix proportion	291
Table 11-3 Compressive strength of concrete	292
Table 11-4 Ultimate load of FRP rebar reinforced concrete specimens	297
Table 11-5 Yielding load and deflection of FRP rebar reinforced concrete ..	297
Table 11-6 Failure mode of FRP rebar reinforced concrete specimens	299

그림 목 차

Fig. 2-1 Stress-strain characteristics of current FRP Rebar's compared to steel	16
Fig. 2-2 Chemical structure of PVA fiber	23
Fig. 3-1 The pultrusion process	30
Fig. 3-2 The filament winding process	31
Fig. 3-3 The schematic of braiding process	31
Fig. 3-4 Manufactureing system of FRP rebar	32
Fig. 3-5 Photo of FRP rebar	33
Fig. 3-6 Reinforcement fiber supply	34
Fig. 3-7 Reinforcement fiber impregnation system	35
Fig. 3-8 Heated die system	36
Fig. 3-9 Puller system: (a) side view, (b) plane view	37
Fig. 3-10 Braiding machine system	40
Fig. 3-11 Braiding system: (a) plain view, (b) top view	41
Fig. 3-12 Different method for creating braided structures	42
Fig. 3-13 Curing system	44
Fig. 3-14 Puller system: (a) plane view, (b) side view	45
Fig. 4-1 Structural hierarchy of fibrous assemblies	49
Fig. 4-2 Geometry of 1/1 braid	50
Fig 4-3 Logic flow of integrated design for manufacture	56
Fig. 4-4 Effect of the type of core fibers on properties of FRP rebar	60
Fig. 4-5 Effect of the type of sleeve yarn on the properties of FRP rebars ..	61
Fig. 4-6 Effect of core yarn twist on (a) FRP rebar modulus and (b) ultimate/yield strain	64
Fig. 4-7 Effect of sleeve yarn twist on (a) FRP rebar modulus and (b) ultimate/yield strain	65

Fig. 4-8 Effect of sleeve yarn crimped angle on (a) FRP rebar modulus (b) ultimate/yield strain	66
Fig. 4-9 Effect of sleeve yarn braiding angle on (a) FRP rebar modulus (b) ultimate/yield strain	67
Fig. 5-1 Idealized stress-strain curve for hybrid FRP rebar	78
Fig. 5-2 Stress-strain curve of hybrid FRP rebar for Tepfer model	79
Fig. 5-3 Prediction model of stress-strain curve of hybrid FRP rebar	84
Fig. 5-4 Traditional grip systems used for tensile test	85
Fig. 5-5 Anchorage systems used for tensile test of FPR rebar	87
Fig. 5-6 Anchorage developed by Castro and Carino	87
Fig. 5-7 Tensile strength test specimen	89
Fig. 5-8 Tensile test set-up: (a) tensile test, (b) LVDT	91
Fig. 5-9 Weakest link failure model	94
Fig. 5-10 Cumulative weakening model	94
Fig. 5-11 Fiber break propagation model	95
Fig. 5-12 Elastic constants for high-modulus graphite-epoxy lamina with different fiber orientation	95
Fig. 5-13 Fracture surface of hybrid FRP rebar(A)	98
Fig. 5-14 Fracture surface of hybrid FRP rebar(B)	99
Fig. 5-15 Fracture surface of hybrid FRP rebar(C)	100
Fig. 5-16 Comparison between analytical prediction and experimental results of hybrid FRP rebar(A)	102
Fig. 5-17 Comparison between analytical prediction and experimental results of hybrid FRP rebar(B)	103
Fig. 5-18 Comparison between analytical prediction and experimental results of hybrid FRP rebar(C)	104
Fig. 6-1 Surface characteristics of FRP rebars	110
Fig. 6-2 Compressive strength test set-up	112
Fig. 6-3 Span configuration for 3D span	113

Fig. 6-4 Short beam test set-up	113
Fig. 6-5 Compressive strength of control FRP rebar specimens	117
Fig. 6-6 Compressive failure modes of FRP rebars	118
Fig. 6-7 Interlaminar shear stress-displacement behavior of FRP rebars	120
Fig. 6-8 Interlaminar shear stress of control FRP rebar specimens	120
Fig. 6-9 Tensile strength-strain behavior of FRP rebars and steel rebar ..	121
Fig. 6-10 Tensile strain of hybrid FRP rebars	123
Fig. 6-11 Tensile failure modes of hybrid FRP rebars	124
Fig. 7-1 Compressive test after alkali exposure	136
Fig. 7-2 Compressive test after acid exposure	138
Fig. 7-3 Compressive test after salt exposure	141
Fig. 7-4 Compressive test after deionized water exposure	142
Fig. 7-5 Compressive test after repeated wet-dry cycles exposure	144
Fig. 7-6 Compressive test after long-term oven dry exposure	145
Fig. 7-7 Compressive test after repeated freezing-thawing exposure	147
Fig. 7-8 Compressive test after sulfate(Na_2SO_4) exposure	148
Fig. 7-9 Compressive test after CaCl_2 solution exposure	149
Fig. 7-10 Compressive test after salt and repeated wet-dry cycles exposure ..	152
Fig. 7-11 Compressive test after salt and repeated freezing-thawing cycles exposure	153
Fig. 7-12 Compressive test after salt and UV radiation exposure	154
Fig. 7-13 Interlaminar shear test after alkali exposure	156
Fig. 7-14 Interlaminar shear test after acid exposure	158
Fig. 7-15 Interlaminar shear test after salt exposure	160
Fig. 7-16 Interlaminar shear test after deionized water exposure	162
Fig. 7-17 Interlaminar shear test after repeated wet-dry cycles exposure ..	163
Fig. 7-18 Interlaminar shear test after long-term oven dry exposure	165
Fig. 7-19 Interlaminar shear test after repeated freezing and thawing cycles exposure	166

Fig. 7-20 Interlaminar shear test after sulfate(Na_2SO_4) solution exposure	167
Fig. 7-21 Interlaminar shear test after CaCl_2 solution exposure	169
Fig. 7-22 Interlaminar shear test after salt and repeated wet-dry cycle exposure	170
Fig. 7-23 Interlaminar shear test after salt and repeated freezing and thawing cycles exposure	172
Fig. 7-24 Interlaminar shear test after UV radiation exposure	173
Fig. 7-25 Tensile strength of FRP rebars after alkaline solution	175
Fig. 7-26 Residual tensile strength of FRP rebars after alkaline solution	176
Fig. 7-27 Tensile strength of FRP rebars after acid solution	178
Fig. 7-28 Residual tensile strength of FRP rebars after acid exposure	179
Fig. 7-29 Tensile strength of FRP rebars after acid solution	180
Fig. 7-30 Residual tensile strength of FRP rebars after alkaline solution	181
Fig. 7-31 Tensile strength of FRP rebars after deionized water exposure	183
Fig. 7-32 Residual tensile strength of FRP rebars after deionized water exposure	184
Fig. 7-33 Tensile test of FRP rebars after repeated wet-dry cycles exposure	185
Fig. 7-34 Tensile test of FRP rebars after long-term oven dry exposure	187
Fig. 7-35 Tensile test of FRP rebars after repeated freezing and thawing cycles exposure	188
Fig. 7-36 Tensile test of FRP rebars after sulfate(Na_2SO_4) exposure	190
Fig. 7-37 Tensile test of FRP rebars after CaCl_2 exposure	191
Fig. 7-38 Tensile test of FRP rebars after salt and repeated wet-dry cycles exposure	192
Fig. 7-39 Tensile test of FRP rebars after salt and repeated freezing and thawing cycles exposure	194
Fig. 7-40 Tensile test of FRP rebars after UV radiation exposure	195
Fig. 8-1 Typical absorption behavior of FRP rebar	203
Fig. 8-2 Alkaline solution absorption-days behavior of FRP rebars	203

Fig. 8-3 Alkaline solution absorption of FRP rebars	203
Fig. 8-4 Acid solution absorption-days behavior of FRP rebars	204
Fig. 8-5 Acid solution absorption of FRP rebars	205
Fig. 8-6 Salt solution absorption-days behavior of FRP rebars	206
Fig. 8-7 Salt solution absorption of FRP rebars	206
Fig. 8-8 Absorption behavior in deionized water of FRP rebars	208
Fig. 8-9 Deionized water absorption of FRP rebars	207
Fig. 8-10 Absorption of FRP rebars after environmental exposure	208
Fig. 8-11 Durability test result of CFRP ISO rebar	219
Fig. 8-12 Durability test result of GFRP Aslan rebar	220
Fig. 8-13 Durability test result of AFRP Technora rebar	221
Fig. 8-14 Durability test result of GFRP Aslan rebar	223
Fig. 8-15 Durability test result of GFRP Aslan rebar	224
Fig. 8-16 Durability test result of GFRP Aslan rebar	225
Fig. 8-17 Durability test result of GFRP Aslan rebar	227
Fig. 8-18 Durability test result of GFRP Aslan rebar	228
Fig. 9-1 Photos of geometry of FRP rebar	233
Fig. 9-2 Direct pull-out tests	235
Fig. 9-3 Beam bond test	236
Fig. 9-4 Pullout test set-up of FRP rebar	238
Fig. 9-5 Bond strength-displacement behavior of FRP rebars	240
Fig. 9-6 Bond strength of FRP rebars	241
Fig. 9-7 Effect of crimped width on FRP rebar bond strength	242
Fig. 9-8 Effect of crimped height on FRP rebars bond strength	243
Fig. 10-1 Geometry of hybrid FRP rebar	246
Fig. 10-2 Bond strength-slip behavior of FRP rebars	248
Fig. 10-3 Bond test result of control specimens	249
Fig. 10-4 Geometric properties of bundled FRP rebars	250
Fig. 10-5 Bond test result after alkali exposure	253

Fig. 10-6 Bond test result after acid exposure	256
Fig. 10-7 Bond test result after salt exposure	257
Fig. 10-8 Bond test result after deionized water exposure	258
Fig. 10-9 Bond test result after repeated wet-dry cycles exposure	260
Fig. 10-10 Bond test result after long-term oven dry exposure	261
Fig. 10-11 Bond test result after repeated freezing and thawing exposure ..	262
Fig. 10-12 Bond test result after sulfate(Na_2SO_4) solution exposure	263
Fig. 10-13 Bond test results of FRP rebars after CaCl_2 solution exposure ..	265
Fig. 10-14 Bond test results of FRP rebars after salt and repeated wet-dry cycles exposure	267
Fig. 10-15 Bond test results of FRP rebar after salt and repeated freezing and thawing cycles exposure	268
Fig. 10-16 Bond test results of FRP rebar after UV radiation exposure	269
Fig. 11-1 Perimetric reduction factors for beams with bundled rebars	284
Fig. 11-2 Stress and strain of I block	286
Fig. 11-3 Dividing of section	289
Fig. 11-4 Reinforcing details of concrete specimen	290
Fig. 11-5 Four-point bending test set-up	292
Fig. 11-6 Load-deflection behavior of FRP rebar reinforced concrete specimens	293
Fig. 11-7 Photo of flexure and shear cracks from CFRP ISO rebar reinforced concrete specimens	301
Fig. 11-8 Photo of flexure and shear cracks from GFRP Aslan rebar reinforced concrete specimens	301
Fig. 11-9 Photo of flexure and shear cracks from AFRP Technora rebar reinforced concrete specimens	301
Fig. 11-10 Photo of flexure and shear cracks from CFRP(D) rebar reinforced concrete specimens	302
Fig. 11-11 Photo of flexure and shear cracks from GFRP(D) rebar reinforced	

concrete specimens	302
Fig. 11-12 Photo of flexure and shear cracks from hybrid FRP rebar(A) reinforced concrete specimens	302
Fig. 11-13 Photo of flexure and shear cracks from hybrid FRP rebar(B) reinforce specimens	303
Fig. 11-14 Photo of flexure and shear cracks from hybrid FRP rebar(C) reinforced concrete specimens	303
Fig. 13-11 Flexural test set-up of large size FRP reinforced concrete specimens	314

제 1장 서론

제 1절 연구의 필요성

콘크리트 구조부재에서 인장 축의 보강은 전통적으로 철근 또는 프리스트레싱 와이어에 의해 이루어져 왔다. 콘크리트 내의 철근은 콘크리트 모체내의 높은 알칼리 환경 하에서는 부식에 대한 저항성이 높지만 시간이 지남에 따라 콘크리트 내의 환경변화에 의한 여러 가지 부식이 발생하는 문제점을 지니고 있다. 보강철근의 부식은 콘크리트 구조물의 내구성능 저하를 발생시켜 콘크리트 구조물의 성능저하로 인한 안정성 등의 문제로 근래에 사회적인 문제점으로 대두되고 있다. 또한 철근콘크리트 구조물에서 철근 부식으로 인한 구조성능의 저하는 콘크리트 구조물의 보수 및 보강을 통한 유지관리의 문제를 발생시키고 있는데 미국의 경우 1994년 보고서에 의하면 즉시 보수 및 보강이 필요한 콘크리트구조물은 전체 구조물의 약 26%정도이며 이와 같은 콘크리트 구조물 노후화의 주요원인은 보강 철근의 부식에 의한 것으로 보고되었다. 현재 미국에서는 콘크리트 구조물의 유지관리 및 보수를 위한 비용으로 해마다 약 5억 2천 5백만달러(약 6,825천만원)를 사용하고 있는 것으로 알려지고 있다. 캐나다의 경우 콘크리트 구조물의 보수 중 보강철근의 부식에 의한 파괴로 인한 것이 절반 이상이라고 보고하였다. 또한 유럽에서는 철근의 부식에 의한 콘크리트 구조물의 보수비용으로 연간 약 천만달러(영국화폐) 이상을 쓰는 것으로 보고되었다. 이와 같이 콘크리트의 내구성 저하의 대부분은 콘크리트 내의 철근의 부식으로 인한 것이며, 철근의 부식은 콘크리트 구조물 재료에 포함된 염화물 과 외부환경조건, 높은 습도 및 온도 그리고 철근 콘크리트 구조물이 수분과 접촉하는 위치하였을 때 공기 등이 주원인이 된다. 이러한 관점에서 대부분의 구조물이 수분과 접해 있는 수리 구조물 특히 농업용수 등의 공급을 목적으로 건설된 각종 농업 수리 콘크리트 구조물의 내구성능 저하의 주요원인은 철근 부식으로 인한 열화에 의한 것이라 할 수 있다. 콘크리트내의 철근 부식에 대한 메커니즘은 1920년대 이후에 많은 조사가 이루어졌으며 현재까지 부식을 억제하기 위한 여러 가지 연구결과가 이루어져 왔

다. 그러나 부식을 제어하기 위한 여러 가지 방법 즉 콘크리트 조직을 치밀하게 하는 방법과 콘크리트 덮개의 증가, 폴리머 콘크리트의 사용 및 에폭시로 도막 처리한 철근을 사용하는 방법 등을 사용했지만 장기 내구성 측면에서는 큰 성과를 거두지 못하였다. 이러한 이유로 철근을 대신할 다른 대체재료의 요구는 점점 더 증가하게 되었으며 그 결과로 섬유보강 복합재료(Fiber reinforced polymer rebar)가 개발되었다. FRP 리바는 강도가 높으며 부식에 대한 우려가 없으며 보강재료로서 사용될 경우 강도/중량비가 커 콘크리트 구조물의 자중을 감소시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 이와 같은 특성은 철근콘크리트 구조물에서 보강철근의 대체재료로서 뿐만 아니라 열화된 철근콘크리트 구조물의 보수 및 보강을 통한 내하력 증진에 매우 큰 장점을 가지고 있다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 FRP 리바는 재료의 탄성계수가 작고, 전단에 취약하며, 가격이 높으며 결정적으로 재료 자체 특성상 소성변형이 없는 취성적 성질을 가지고 있는 큰 단점을 가지고 있어 FRP 리바의 사용을 특정한 분야로 한정시키는 결과를 초래하고 있다. 따라서 FRP 리바의 위와 같은 단점을 해결하여 콘크리트 구조물에 적합한 재료를 개발하는 것은 매우 중요하다. 본 연구는 현재 농업수리 콘크리트 구조물의 보강재료로 사용되는 보강 철근의 부식으로 인한 구조성능 저하 및 내구성 저하 문제에 대한 해결방안을 제시하기 위한 것으로 FRP 리바를 콘크리트 보강재료로 사용하였을 때의 큰 문제점으로 대두되고 있는 취성적 성질을 개선하여 보강 철근과 거의 동일한 소성변형을 갖는 동시에 경제성이 우수한 새로운 FRP 리바를 개발하는 것이다. 또한 기존 해외에서 상용화되어 있는 일반 FRP 리바를 국산화하여 재료의 수입 및 기술력 도입 등으로 인한 경제성 악화 및 기술경쟁력 저하의 측면을 해결하는 것이며 개발될 FRP 리바의 품질관리 기준안의 개발 및 치수의 규격화를 통하여 농업수리 콘크리트 구조물의 적용성을 향상시키고자 한다. 또한 개발될 FRP 리바를 농업수리 구조물에 적용하기 위하여 구조성능을 평가하여 새로운 FRP 리바를 이용한 농업수리구조물의 적용성 검증을 통하여 농업수리 콘크리트 구조물의 성능향상에 이리바지 하고자 한다.

제 2절 국내·외 관련기술의 현황과 문제점

1. 국내 기술동향

국내의 경우 보강철근의 부식을 제어하기 위한 여러 가지 방법 즉 콘크리트 조직을 치밀하게 하는 방법과 콘크리트 덮개의 증가, 폴리머 콘크리트의 사용 및 에폭시로 도막 처리한 철근을 사용하는 방법 등을 사용했지만 장기 내구성 측면에서는 큰 성과를 거두지 못하였다. 또한 FRP 리바를 콘크리트 구조물의 철근의 대체재료로 사용하기 위한 연구는 FRP 리바가 취성적 성질을 가지고 있어 전무한 실정이며 다만 열화된 콘크리트 구조물의 보수 및 보강재료에 한정적으로 연구되고 있는 실정이나 기존 국내에서 생산되고 있는 제품이 외국에 비하여 제품의 품질 및 성능이 뒤떨어지고 가격이 비싸 그 사용이 한정적으로 이루어지고 있는 실정이다.

2. 국외 기술동향

해외의 경우 보강철근의 부식으로 인한 구조성능의 저하를 방지할 목적으로 에폭시로 도막 처리한 보강철근(ECRS)이 지난 20년 간 많은 나라에서 콘크리트 구조물에 적용하여 왔다. 그러나 ECRS는 혹독한 외부 환경 하에서는 일반적인 보강철근과 마찬가지로 부식이 발생하여 콘크리트 구조물의 열화의 원인이 된다고 보고되고 있다. ECRS의 부식에 대한 문제는 콘크리트 내에서 ECRS의 성능에 대한 연구보고서인 Transportation research board 370에서 알 수 있다. 보고서 370의 내용을 살펴보면 콘크리트 구조물의 보강재로 사용된 ECRS는 50년 간의 외부 환경노출 후에 부식으로 인한 열화가 발생하였다고 하였다. 이와 같은 문제로 현재 FRP 리바가 미국, 유럽 및 일본 등에서는 토목, 건축물의 철근 및 텐던 대응으로서 많이 적용되고 있으며 또한 보강재로도 사용되고 있는 실정이다. 그러나 FRP 리바의 취성적 성질로 인해 대부분이 열화된 철근콘크리트 구조물 특히 수분과 접촉해 있는 교량 및 수리구조물의 보수 및 보강재료로 한정되어 이용되고 있다.

3. 기술동향분석

콘크리트 구조물에서 철근의 부식으로 인한 성능 저하의 문제는 국내·외 모두 큰 문제점으로 대두되고 있어 이를 해결하기 위한 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히 보강철근의 대체재료로 FRP 리바에 대한 연구는 FRP 리바의 우수한 부식 저항성, 강도 및 내구성을 가지고 있어 국외의 경우는 많은 연구가 이루어져 콘크리트 구조물에 보강재료로 적용되고 있는 실정이다. 그러나 이러한 우수한 특성에도 불구하고 기존 외국에서 상용화되어 있는 FRP 리바는 보강철근과 달리 소성변형 구간이 없는 취성적 성질과 가격이 높아 신규 콘크리트 구조물에는 사용을 꺼려 그 사용이 한정적인 단점을 가지고 있다. 따라서 FRP 리바의 이와 같은 취성적 성질과 경제성의 단점을 해결하여 그 적용성을 확대할 수 있는 연구가 필요하다고 하겠다.

4. 앞으로 전망

보강철근의 부식으로 인한 콘크리트 구조물의 내구성의 저하는 사회적인 큰 문제점으로 특히 수분과 직접적으로 접촉하고있는 농업수리구조물에서는 매우 중요한 문제라 할 수 있다. 국내외적으로 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 개발될 FRP 리바는 재료 자체의 취성적 성질을 가지고 있어 구조물의 안정성에 영향을 미치는 만큼 보강철근과 동일한 소성거동을 갖는 FRP 리바의 개발은 매우 중요하다. 이와 같은 새로운 FRP 리바의 개발은 현재 열화된 콘크리트 구조물의 보수·보강에 한정되어 있는 FRP 리바의 적용성을 확대시킬 것으로 판단되며 이에 대한 연구는 국내외적으로 문제점을 인식한 만큼 크게 확대 될 것으로 판단된다. 또한 새로 개발될 FRP 리바는 기존에 널리 사용되고 있는 보강철근과 재료 특성이 다르기 때문에 기존의 품질관리 기준 및 설계방법을 따를 수 없어 새로운 품질관리 기준 개발 및 치수를 규격화하며 농업수리 콘크리트 구조물의 적용시 이에 따른 설계기준 작성에 대한 연구가 활발하게 이루어질 것으로 판단된다.

5. 기술도입의 타당성

현재 FRP 리바에 대한 연구는 미국, 유럽, 일본 등에서 활발하게 이루어져 각 제품의 설계기준이 이미 개발되어 보강철근 및 텐던 대응으로서 많이 적용되고 있으며 또한 보강재로도 사용되고 있는 실정이다. 그러나 이와 같이 기존에 외국에서 개발될 FRP 리바는 모두 취성적 성질을 가지고 있어 콘크리트 구조물의 보강재료로는 문제점을 노출하고 있다. 또한 제품을 수입하여 국내 농업수리 콘크리트 구조물에 적용하기에는 가격이 비싸 경제성이 악화되는 한편 국가 기술 경쟁력 향상에도 리바람직하지 않다. 따라서 본 연구에서 개발하고자 하는 보강철근과 동일한 거동을 하는 FRP 리바 및 외국 상용 FRP 리바 보다 우수한 성능을 발휘하는 일반 FRP 리바의 개발은 외국에서 도입할 수 없는 신기술이다. 또한 외국에서는 열화된 철근콘크리트 구조물의 내하력 증진을 위한 보강재료로 FRP 리바에 대한 연구가 많이 이루어져 사용화 되어 있는 관계로 설계기준이 구체화되어 있지만 이는 각 제품에 대한 품질기준이 명확하지 않은 관계로 각 제품마다 설계기준을 모두 다르게 적용하고 있다. 따라서 본 연구에서 개발하려는 신개념의 FRP 리바를 사용할 경우의 품질관리 기준 및 설계기준은 기존 외국에서 상용화되어 있는 제품과 다르기 때문에 외국에서 사용하고 있는 품질관리기준 및 설계기준을 직접 적용할 수 없어 기술의 도입은 불가능하다고 하겠다.

제 3절 연구개발의 목표 및 내용

본 연구는 2개년간에 걸쳐 실시되며 실험연구와 이론연구가 병행된다. 본 연구의 단계별 목표 및 최종목표는 다음과 같으며 각각의 연도별 구체적인 연구목표 및 연구 내용은 (표 1-1)과 같다.

1. 1차년도(2003)

- 가. 해외에서 상용화된 FRP 리바에 대한 물성 및 제조방법 분석
- 나. 일반 FRP 리바 및 보강철근과 동일한 거동을 할 수 있는 새로운 FRP 리바의 설 계방법 및 응력-변형률 예측 모델 개발
- 다. 경제성 분석을 통한 개발될 일반 및 새로운 FRP 리바의 원가절감 대책 수립 및 경제성이 우수한 FRP 리바의 개발
- 라. 개발될 일반 및 새로운 FRP 리바의 생산시스템 구축
- 마. 개발될 일반 및 새로운 FRP 리바의 역학적 성능 검토
- 바. 개발될 일반 및 새로운 FRP 리바의 내구성능 검토
- 사. 개발될 일반 및 새로운 FRP 리바의 품질기준안 개발 및 치수 규격화
- 아. 상용 일반 FRP 리바를 사용한 콘크리트 시험체(small beam)의 역학적 거동 파악

2. 2차년도(2004)

- 가. 개발될 일반 및 새로운 FRP 리바의 콘크리트 모체와의 부착성능을 최적화 할 수 있는 리바의 표면형상의 최적화
- 나. 개발될 일반 및 새로운 FRP 리바와 콘크리트 모체와의 외부환경 노출시의 부착성능에 대한 내구성 파악
- 다. 개발될 일반 FRP 리바 및 새로 개발될 FRP 리바를 사용한 콘크리트 시험체 (small beam)의 역학적 거동 파악

3. 최종목표

- 가. 보강철근의 단점인 부식으로 인한 내구성 저하 및 성능 저하를 해결하기 위한 일반 및 새로운 개념의 보강재료인 FRP 리바 개발
- 나. 해외에서 상용화되어 있는 FRP 리바 보다 성능이 우수한 일반 FRP 리바 개발
- 다. 기존의 상용되는 외국 수입품 또는 국내 생산의 FRP 리바의 단점인 취성적 성질을 개선하고 보강 철근과 동일한 거동을 하는 새로운 개념의 FRP 리바 개발
- 라. 원가절감을 통한 경제성이 우수한 새로운 FRP 리바 개발
- 마. 개발될 일반 및 새로운 FRP 리바의 생산시스템 구축
- 바. 개발될 일반 및 새로운 FRP 리바의 품질관리기준 개발 및 치수의 규격화
- 사. 개발될 일반 및 새로운 FRP 리바의 휨실험(small beam test)를 통한 구조 성능 규명

Table 1-1 Objective and contents of Research

구 분	연구 개발 목표	연구개발 내용 및 범위
1 차 년 도 (2003)	· 기존 FRP 리바의 제조 방법 및 재료 특성 확보	· 인장특성 · 응력-변형률 · 전단강도
	· 일반 및 새로운 FRP 리바의 설계방법 및 응력-변형률 예측 모델 개발	· 재료 하이브리드(hybrid) 개념 및 모델 도입 · 기하학적 하이브리드 개념 및 모델 도입 · 재료 및 기하학적 하이브리드 모델의 도입을 통한 응력-변형률 예측 모델 개발 · 응력-변형률 예측 모델을 이용한 FRP 리바의 설계
	· 경제성 향상방안(원가절감대책)	· 경제성이 우수한 재료의 선택 · 경제성이 우수한 최적의 배합 결정 · 경제성이 우수한 설계모델 개발
	· 새로운 FRP 리바 생산 시스템 개발	· 생산시스템 개발 및 설치
	· 개발될 일반 및 새로운 FRP 리바의 역학적 성능 검토	· 응력-변형률(인장특성) · 전단강도
	· 개발될 일반 및 새로운 개발될 FRP 리바의 내구성 검토	· 용빙제, 복합환경, 황산염 영향 · 건조-습윤반복 · 동결-융해 반복 · 수분영향 · 알칼리 및 산 환경에서의 영향 · 염해 환경에서의 영향 · 자외선 노출
	· 개발될 일반 및 새로운 FRP 리바의 품질기준안 개발 및 치수의 규격화	· 개발될 FRP 리바의 치수의 규격화 · 개발될 FRP 리바의 품질기준(안) 제시

	연구 개발 목표	연구개발 내용 및 범위
	<ul style="list-style-type: none"> 개발된 일반 및 새로운 FRP 리바의 부착성 향상을 위한 표면 형상 및 제조변수 결정 	<ul style="list-style-type: none"> FRP 리바의 표면의 기하학적 변수 결정 FRP 리바의 표면처리를 위한 제조 변수
	<ul style="list-style-type: none"> 개발될 일반 및 새로운 FRP 리바의 부착 성능 검토 	<ul style="list-style-type: none"> 부착 강도 최적 표면형상 결정
2차년도 (2004)	<ul style="list-style-type: none"> 개발될 일반 및 새로운 FRP 리바와 콘크리트 모체와의 외부환경 노출후의 부착성능 검토 	<ul style="list-style-type: none"> 용빙제, 복합환경, 황산염 영향 건조-습윤반복 동결-융해 반복 수분영향 알칼리 및 산 환경에서의 영향 염해 환경에서의 영향 자외선 노출
	<ul style="list-style-type: none"> 개발될 일반 및 새로운 FRP 리바로 보강된 콘크리트 보의 역학적 거동 평가(Small beam test) 	<ul style="list-style-type: none"> 개발될 FRP 리바를 이용한 콘크리트 시험체의 휨거동 파악

제 4절 기대효과

농업수리 콘크리트 구조물의 내구성 증진을 위한 일반 및 새로운 FRP 리바 개발과 품질기준안 개발, 치수 규격화와 농업수리 콘크리트 구조물에 적용하기 위한 평가를 통한 본 연구의 기대 효과는 다음과 같다.

1. 기술적 측면

- 가. 새로운 농업수리 콘크리트 구조물의 보강용 FRP 리바의 개발에 따른 기술력 향상
- 나. 새로운 FRP 리바를 사용함으로써 철근의 부식우려가 없는 장기적으로 내구성능을 향상시키는 재료 및 공법의 개발로 인한 기술력 향상
- 다. 균열 및 열화원인에 따른 동일계열의 다양한 재료의 적용이 가능하므로 대상에 따른 품질관리 향상
- 라. 품질관리 방안의 개발을 통한 지속적인 품질관리를 통한 제품 성능의 신뢰성 향상
- 마. 원가를 절감할 수 있는 재료의 결정을 통한 가격 경쟁력 향상
- 바. 보강철근과 동일한 거동을 하는 보강재료를 이용한 농업수리 콘크리트 구조물의 보강공법의 개발로 인한 기술력 향상

2. 경제 · 산업적 측면

- 가. 새로운 농업수리 콘크리트 구조물용 FRP 리바의 개발로 수입 대체 효과로 인한 경제성 향상
- 나. 원가를 절감할 수 있는 재료의 개발을 통한 가격 경쟁력 향상을 통한 적용분야 확대
- 다. 국내 생산 FRP 리바의 개발로 관련 산업체의 재료 개발 및 사업화 촉진
- 라. FRP 리바를 사용함으로써 철근의 부식우려가 없어 장기적으로 내구성능향상으로 인한 경제성 향상

- 마. 농업수리 콘크리트 구조물의 내하력 증진으로 인한 장기성능 향상으로 인한 경제성 향상
- 바. 철근과 거의 동일한 거동을 하는 내구성이 우수한 FRP 리바를 해외 보다 먼저 개발하여 FRP 리바의 재료 수출 효과 및 국가 기술경쟁력 향상

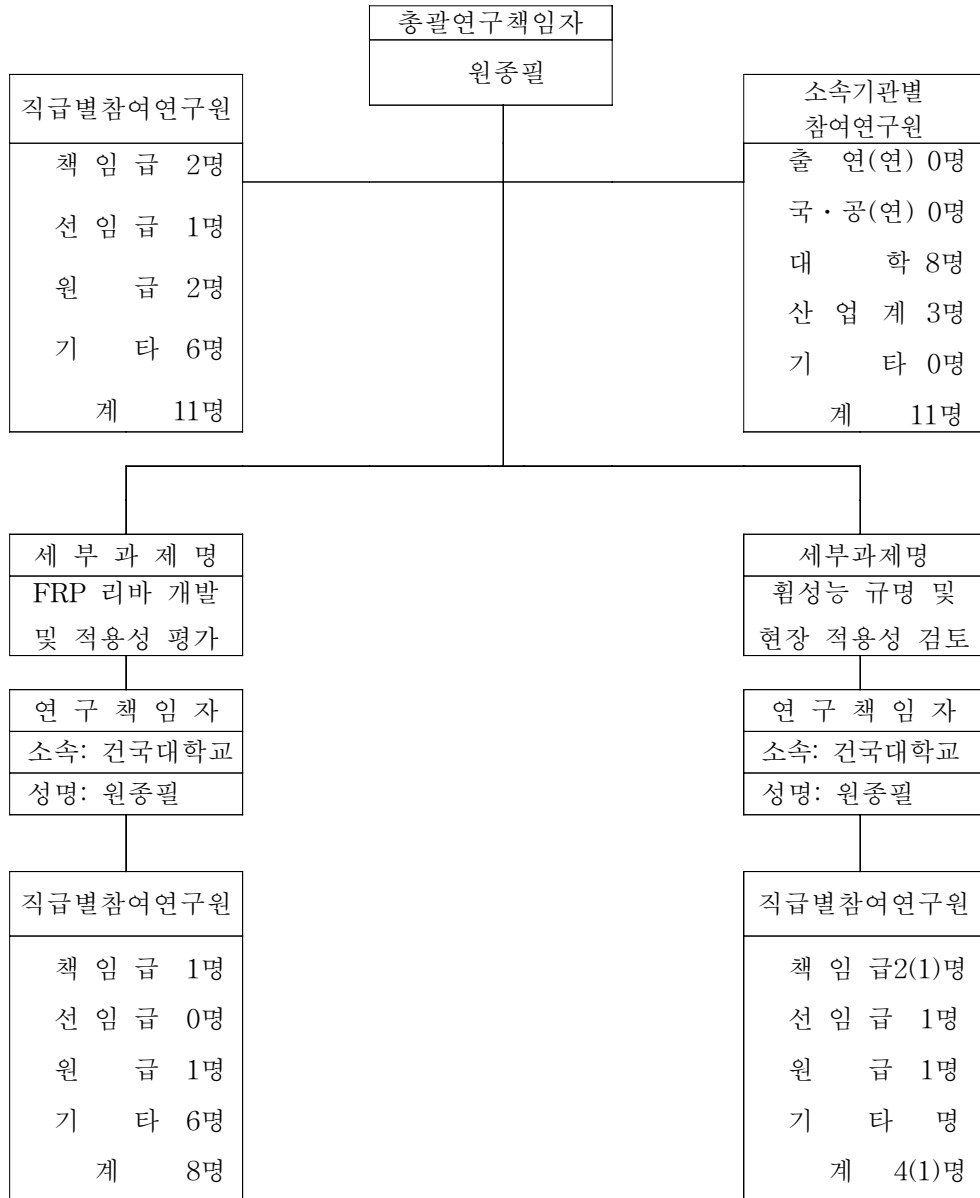
제 5절 활용방안

본 연구는 농업수리 콘크리트 구조물의 내구성 증진을 위한 FRP 리바의 개발 및 적용성 평가를 목표로 하여 2개년간의 연구를 실시하며 본 연구의 결과물의 활용방안을 정리하면 다음과 같다.

1. 개발될 일반 및 새로운 FRP 리바의 농업수리 콘크리트 구조물의 보강재료로 이용
2. 개발될 일반 및 새로운 FRP 리바의 농업수리 콘크리트 구조물 이외의 콘크리트 구조물의 적용을 통한 적용분야 확대
3. 철근 부식의 가능성이 없는 우수한 내구성을 가진 보강재료 및 공법으로 활용

제 6절 연구진의 구성

1. 연구원의 편성



2. 주요 업무 내용

세부과제명 (담당 연구내용)	성명	소속기관 및 부서	연구참여 직 급	최종학위 및 자격사항				참여율 (%)
				학위	년도	전공	학교	
FRP 리바 개발 및 적용성 평가, 휨성능 규명 및 현장 적용성 검토	원종필	건국대	책임연구원 (부교수)	박사	1995	구조공학	(미)미시간 주립대	16
FRP 리바 개발 및 적용성 평가	박찬기	건국대	연구원 (박사후과정)	박사	2000	콘크리트	건국대	60
FRP 리바 개발 및 적용성 평가	윤종환	건국대	기타급 (석사과정)	학사	2001	콘크리트	건국대	35
FRP 리바 개발 및 적용성 평가	황금식	건국대	기타급 (석사과정)	학사	2001	콘크리트	건국대	35
FRP 리바 개발 및 적용성 평가	김명균	건국대	기타급 (석사과정)	학사	2002	콘크리트	건국대	35
FRP 리바 개발 및 적용성 평가	장필성	건국대	기타급 (석사과정)	학사	2002	콘크리트	건국대	35
FRP 리바 개발 및 적용성 평가	서정민	건국대	기타급 (학부4학년)	학사	2003	콘크리트	건국대	35
FRP 리바 개발 및 적용성 평가	조용진	건국대	기타급 (학부4학년)	학사	2003	콘크리트	건국대	40
휨성능 규명 및 현장 적용성 검토	최강진	동원건설(주)	책임연구원 (이사)	학사	1998	농공	건국대	13
휨성능 규명 및 현장 적용성 검토	김성환	동원건설(주)	선임연구원 (부장)	학사	1989	토목	강원대	13
휨성능 규명 및 현장 적용성 검토	이선호	동원건설(주)	연구원 (과장)	학사	1991	토목	조선공업 전문대	14

제 2장 FRP 리바(Fiber Reinforced Polymer Rebar)

제 1절 개 요

FRP 리바는 우수한 부식저항성, 고강도를 가지고 있으며 또한 강도에 대한 중량의 비가 매우 커 신규 구조물 및 내하력이 저하된 콘크리트 구조물에 적용되어 보강에 따른 추가적인 중량의 증가 없이 보강 효과를 얻을 수 장점을 가지고 있다.^{3,4,7,8,31,58,59,60,96)} 기존의 많은 연구자들은 많은 종류의 FRP 리바를 개발하였지만 개발된 FRP 리바는 기존에 사용되던 보강철근이 가지고 있는 휨보강을 위한 연성을 가지고 있지 못하며 가격이 비싸 사용이 한정적으로 이루어지고 있다.^{100,116,132,134,135,136,161)}

FRP 리바의 인장강도는 일반적으로 보강철근과 비교하여 대단히 높으며 프리스트레싱 강봉과 비교하여도 약 2배정도 높으나 압축강도는 FRP 리바가 매우 작은 필라멘트로 구성되어 있기 때문에 보강철근과 비교하여 낮다.^{49,62,63,64,72,97,98)}

FRP 리바의 인장강도는 섬유와 단면적, 크기 및 혼입률 뿐만 아니라 섬유와 매트릭스의 부착성능에 따라 영향을 받는다. 예를 들어 FRP 리바의 인장강도는 리바의 직경이 증가할수록 감소한다.^{62,63,64,72,97,98)} 또한 FRP 리바의 직경이 증가할수록 섬유의 혼입량은 증가하고 섬유와 매트릭스의 부착성능은 감소한다. 또한 FRP 리바의 탄성계수는 보강철근과 비교하여 작다.^{62,63,97,98)} 따라서 프리스트레싱 재료로 사용하였을 때 콘크리트의 크리프와 건조수축에 의한 프리스트레싱의 감소가 작다. 이와 같은 특성은 FRP 리바의 인장강도가 높기 때문에 프리스트레싱 텐던으로 사용되어 매우 우수한 특성을 발휘할 수 있다는 것을 보여준다.^{63,64,72,97,98)} 그러나 다른 한편으로 FRP 리바가 인장강도는 크고 탄성계수가 작기 때문에 콘크리트 부재의 변형이 크게 되어 균열이 발생한 후 콘크리트 부재의 처짐과 균열 폭을 증가시키게 된다.^{62,63,64,72,97,98)} FRP 리바의 전단강도는 보강철근과 비교하여 현저하게 작다.^{1,2,3,4,128)} 따라서 콘크리트 부재의 균열과 처짐을 조절하기 위해서는 FRP 리바의 보강량 또는 콘크리트의 덮개를 증가시킬 필요

가 있다. FRP 리바의 또 다른 문제점 중에 하나는 파괴가 발생하는 최대 응력점까지 응력이 선형적으로 증가하다 급격한 파괴를 발생하는 취성적 성질을 가지고 있다는 것이다. 따라서 FRP 리바를 콘크리트의 보강재료로 사용하였을 때는 보강철근과 달리 파괴되기 전에 소성변형 구간이 없기 때문에 안전성에 영향을 미칠 수 있다.^{27,81,162,165,166)} FRP 리바와 동일한 치수의 보강철근의 중량을 비교하면 FRP 리바의 중량은 보강철근의 약 1/4정도이다. FRP 리바는 중량이 가볍기 때문에 보강철근과 비교하여 설치 및 이동, 저장, 수송이 쉬운 장점을 가진다. 일반적으로 동일한 규격의 보강철근과 비교하여 콘크리트 구조물에 FRP 리바를 적용하였을 때의 중량은 약 25%~50% 감소한다.^{46,49,62,72,97,98)} 위와 같은 내용의 물리·역학적 특성을 포함한 FRP 리바의 장·단점을 보강철근과 비교하면 Table 2-1과 같다.

Table 2-1 Advantage and disadvantage of FRP rebar²⁾

Advantages of FRP rebar	Disadvantage of FRP rebar
· High longitudinal strength(varies with sign and direction of loading relative to fibers)	· No yielding before brittle rupture
· Corrosion resistance(not dependent on a coating)	· Low transverse strength(varies with sign and direction of loading relative to fibers)
· Nonmagnetic	· Low modulus of elasticity(varies with type of reinforcing fibers)
· High fatigue endurance(varies with type of reinforcing fiber)	· Susceptibility of damage to polymeric resin and fibers under ultraviolet radiation exposure
· Lightweight(about 1/5 the weight of steel)	· Durability of glass fibers in a moist environment
· Low thermal and electric conductivity(for glass and aramid fibers)	· Durability of some glass and aramid fibers in an alkaline environment
	· High coefficient of thermal expansion perpendicular to the fibers, relative to concrete
	· May be susceptible to fire depending on matrix type and concrete cover thickness

Fig. 2-1은 현재 사용되고 있는 FRP 리바와 보강 철근 및 철근 와이어의 응력-변형률 거동을 나타낸다.^{3,4)} Fig. 2-1에서 볼 수 있듯이 FRP 리바는 선탄성적인 응력-변형률 거동을 보여주는 반면 보강철근은 항복점까지는 선탄성적인 거동을 보여주나 이후 큰 소성변형을 보여준다.^{3,4)} 보강재의 항복 후에 발생하는 소성 변형은 휨부재의 파괴가 발생하기 전에 계속적으로 하중전달과 큰 처짐을 발생시킨다.^{3,4)} 소성변형이 없다면 작은 하중 증가에도 어떠한 사전경고도 없이 급작스런 취성파괴를 발생시킨다. 내진 설계에서 소성변형 매카니즘은 꼭 필요한 것으로 재료의 변형에 의한 에너지의 소산과 지진하중에 의한 구조물에 부과된 에너지의 많은 양을 흡수하는데 사용된다.^{27,81,85,88,89,100,116)} 따라서 현재 사용되고 있는 FRP 재료는 파괴 전에 많은 양의 소성변형이 필요한 콘크리트 보강재로는 적당하지 않다.

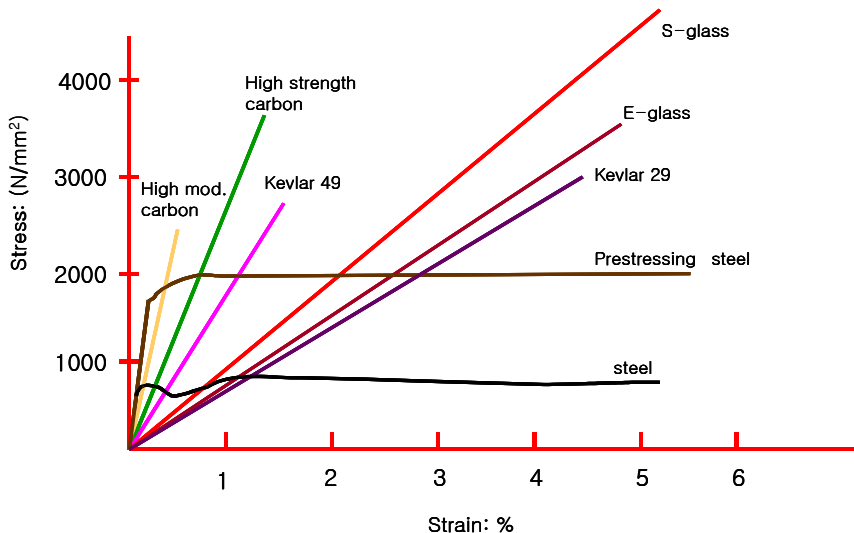


Fig. 2-1 Stress-strain characteristics of current FRP Rebar's compared to steel^{3,4)}

그러나 이와 같은 단점에도 불구하고 FRP 리바는 강도에 비하여 중량이 가볍고 부식에 대한 우려가 없는 등 우수한 역학적 및 내구특성을 가지고 있기 때문에 콘크리트 구조물의 보강재로서 점점 더 관심이 높아지고 있다.^{46,49,62,63,64,72,97,98)} 본

장에서는 FRP 리바의 개념 파악과 콘크리트 구조물에 적용되었을 때의 성능에 대한 전반적인 내용을 논의하였다. 또한 FRP 리바의 주요 관심사인 섬유와 폴리머 수지의 종류 및 섬유와 폴리머 수지 계면특성, 하이브리드 FRP 리바에 대한 기존 연구자들의 연구방향을 분석하였다.

제 2절 FRP 리바의 구성재료

FRP 리바는 섬유로 보강된 폴리머 매트릭스라 정의 할 수 있다.^{46,96,97,98,123,133)} FRP 보강재료는 탄소, 유리, 아라미드 등의 섬유를 폴리머 매트릭스인 비닐에스터, 에폭시, 폴리에스터에 정착시킨 것으로 현재는 리바, 케이블, 2-D 및 3-D 그리드, 쉬트, 판 등의 형태로 사용되고 있다.^{3,46,96,97,98,123)} 콘크리트의 보강재료로서 FRP 리바에 요구되는 주요 성질은 부식저항, 고 인장강도, 낮은 팽창세이션, 고 인성 및 피로저항성, 치수안정성 등이 있다. 비교적 높은 강성을 가지고 있고 고 강도인 섬유를 연속적으로 배열하여 생산된 FRP 리바는 콘크리트의 보강재료로서 가장 유효하게 사용될 수 있는 방법이다.^{98,123,126,127,133)} 본 절에서는 이와 같은 FRP 리바를 구성하는 재료에 대해 자세히 설명하였다.

1. 섬유

FRP 리바의 강도 및 강성, 치수안정성은 주로 보강섬유로부터 결정되기 때문에 보강섬유의 결정은 FRP 리바의 설계에 있어서 가장 중요한 요소이다.^{3,4,123,127,133)} 현재 상업적으로 이용되는 섬유는 적용물의 용도에 맞게 개발되어 왔다. 즉 적용물이 필요로 하는 성능을 만족시키는 섬유를 화학결합을 통하여 인공적으로 개발하였다.^{3,4,123,127,133)} 예를 들어 세계적으로 생산되는 섬유의 절반 정도는 유기폴리머로부터 추출된 인공적으로 만들어진 것으로 인공섬유는 고성능의 공학적 복합체의 재료로 이용된다.^{3,4,123)} 현재 상업용 FRP 리바의 제조에 사용되는 섬유는 유리섬유, 탄소섬유 및 아라미드섬유 등 그 특성에 맞게 조절되어 사용되고 있으며 최근들어 PVA(polyvinyl alcohol) 섬유가 사용되고 있다.^{127,133)} 탄소, 유리, 아라미드섬유는 보강철근과 비교하여 높은 인장강도를 가지고 있지만 파괴되기 전

까지 선형적인 거동을 하는 특성을 가지고 있다.^{123,127,133)} 유리섬유는 알칼리 성분과 수분의 흡수 환경에 매우 약하지만 인성이 크다.^{133,182,185)} 이에 반해 탄소섬유는 강성 및 강도가 크며 알칼리 환경 및 수분흡수환경에 강하지만 인성이 작고 충격저항성에 매우 약한 단점을 가지고 있다.^{3,4,123)} 아라미드섬유는 탄소섬유와 비교하여 작은 강도 및 강성을 보여주지만 유리섬유보다는 강도 및 강성이 크며 유리섬유와 거의 동일한 인성을 가지고 있다.^{3,4,123,127)} 이밖에 FRP 리바의 재료로서 섬유의 특성 중 중요하게 고려되는 사항은 전기전도성, 열팽창계수, 용해점, 자외선노출에 따른 저항성과 경제성이다.^{123,127,133)} Table 2-2는 FRP 리바의 보강 재료로 사용되는 탄소, 유리, 아라미드섬유의 내구성에 대한 일반적인 사항을 보여준다.

가. 탄소섬유

탄소섬유는 토마스 에디슨이 1870년에 백열등을 개발한 이후에 알려졌지만 1960년대 후반까지 많은 양이 사용되지는 않았다. 탄소섬유는 길이 방향으로 매우 높은 강도와 강성을 가지지만 횡방향으로는 매우 약한 특성을 가지고 있다.^{3,4,123,127,133)} 탄소섬유의 탄성계수는 48-828GPa 정도이며 생산과정에서 100°C~3000°C로 열처리를 하여 증가시킬 수 있다.^{3,4,123)} 또한 탄소섬유는 수분을 흡수하지 않으며 다양한 화학적 환경에 거의 영향을 받지 않는다. 따라서 탄소섬유는 산, 알칼리 등에 전혀 영향을 받지 않으며 응력부식에 대한 문제도 고려사항이 아니다.^{127,133)} 일반적으로 FRP 리바의 제조에 사용되는 탄소섬유는 피치-탄소섬유(Pitch-based carbon fibers)와 폴리아크리로나이트릴(PAN)-탄소섬유(Polyacrylonitrile-based carbon fibers) 두 가지 종류가 있다.^{3,4,123)} Table 2-3은 피치와 PAN-탄소섬유의 물리·역학적 특성을 나타낸다. PAN-탄소섬유는 피치탄소섬유에 비하여 인장강도가 높으며 탄성계수는 약간 작은 값을 보여준다. 또한 PAN-탄소섬유의 인성은 피치-탄소섬유와 철근에 비하여 작은 단점을 가지고 있으며 콘크리트의 보강재료로 적용할 경우 경제성이 나빠지는 가장 큰 단점을 가지고 있다.^{3,4,133)} 그러나 탄소섬유의 소비량이 증가하면서 탄소섬유 가격은 역학적 특성 등의 품질이 증가하는데 반하여 감소하고 있다.^{3,133)}

Table 2-2 Qualitative assessment of fibers with respect to chemical resistance¹²³⁾

Environments		Carbon fiber				Aramid fiber		Glass fiber	
		GP-grade pitch	HP-grade pitch	HP-type PAN	HM-type PAN	Kevlar-49	Technora	E-glass	AR-glass
Acid resistance	Hydrochloric acid	B	A	A	A	D	B	D	-
	Sulphuric acid	A	A	A	A	D	B	D	-
	Nitric acid	B	A	A	A	D	B	D	-
Alkali resistance	Sodium hydroxide	A	A	A	A	B	B	C	B
	Brine resistance	A	A	A	A	B	B	C	-
Organic solvent resistance	Acetone	A	A	A	A	A	-	A	-
	Benzene	A	A	A	A	A	B	A	-
	Gasoline	A	A	A	A	A	B	A	-

* A: excellent; B: Good; C: passable; D: poor

Table 2-3 Typical properties of carbon fiber¹⁸⁵⁾

Properties(unit)	Pitch-based carbon		PAN-based carbon	
	HT(high tension)	HM(high modulus)	HT(high tension)	HM(high modulus)
Density(g/cm ³)	1.6~1.7	1.9~2.1	1.7~1.8	1.8~2.0
Tensile strength(MPa)	780~1000	3000~3500	3,500	2500~4000
Elastic modulus(GPa)	380~400	400~800	200~240	350~650
Diameter(μ m)	9~18	9~18	5~8	5~8
Elongation at break(%)	2.1~2.5	0.4~1.5	1.3~1.8	0.4~0.8

나. 아라미드섬유

아라미드섬유는 1930년대 듀폰의 과학자들에 의해서 개발된 유기합성섬유로 폴리아미드 중에서 방향족 폴리아미드를 아라미드(aramid)라고 한다.^{3,4,123,127,133,178,185)}

아라미드섬유는 p-페닐렌디아민과 염화 테레프탈로일(TCD)을 축합하여 얻어지는 폴리-p-페닐렌테레프탈아미드(TCD)이며 벤젠환을 함축한 직선구조를 가지고 있다. 아라미드섬유는 고인성, 고강도 및 높은 내화성을 가지고 있어 1960년 대 후반부터 상업적으로 판매되기 시작하였다. 아라미드섬유는 서로 다른 상품명으로 판매되었는데 상품명은 Kevlar(Dupont, USA), Twaron(Akzo Nobel, Netherlands), Technora(Teijin, Japan) 및 SVM(Russian aramid) 등이다. Kevlar-49와 Twaron은 탄성계수가 높아 현재 가장 널리 사용되고 있다.^{3,4,123,127,133,178,185)} Table 2-4는 현재 사용되고 있는 아라미드섬유의 특성을 나타낸다. 아라미드섬유는 섬유의 축방향으로는 강한 공유결합력을 가지고 있는데 비하여 횡방향으로는 약한 수소결합을 가지고 있다. 아라미드섬유는 정적 및 동적 피로에 우수한 저항성을 가지고 있으나 축방향의 압축과 세로방향의 전단에는 매우 낮은 저항성을 가지고 있다. 아라미드섬유의 파괴경향은 네킹(necking)에 의한 인성파괴로 현저한 단면적의 감소 후 파괴가 발생한다. 이와 같은 파괴는 단면적의 감소 없이 취성적 파괴가 발생하는 탄소섬유 및 유리섬유의 파괴와 차이가 있다. 아라미드섬유는 자외선에 노출되었을 때와 강산에 의해서 화학적으로 파괴되기 쉬우나 대부분의 용액과 화학약품에는 우수한 저항성을 가진다.^{3,4,123,127,133,178,185)}

Table 2-4 Typical properties of aramid fiber¹⁸⁵⁾

Properties(unit)	Kevlar(29/49)	Twaron	Technora	Russian aramid SVM
Density(g/cm ³)	1.44	1.45	1.39	1.43
Tensile Strength(MPa)	2760/3620	3000	3100	2500~3800
Elastic Modulus(GPa)	65/125	80-125	77	130
Diameter(μ m)	12	12	12	15
Elongation at Break(%)	4.0/2.3	2.3-4.1	4.6	3.5
Coefficient of thermal expansion($10^{-6}/^{\circ}$ C)	-2	-2	-	-

다. 유리섬유

유리섬유는 17세기 영국의 과학자 Robert Hooke에 위해서 개발된 섬유로 FRP의 생산에 가장 널리 사용되는 섬유이다.^{3,4,123,127)} 유리섬유의 주성분은 SiO₂이며 Al₂O₃, CaO, MgO, B₂O₃ 등의 성분으로 구성되어 있으며 구성성분에 대한 내용은 Table 2-5와 같다.^{133,182,185)} 상업적으로 이용되는 유리섬유의 장점은 가격이 싸면서도 고강도 및 우수한 절연특성을 가지고 있다는 것이다. 이에 반해 단점으로는 낮은 탄성계수와 밀도가 크고 마모 및 알칼리 환경에 매우 약하며 비교적 낮은 수분 저항성과 정적 및 동적하중에 대한 저항성이 작다는 것이다.^{133,182,183,184,185)} FRP 리바의 생산에 가장 널리 사용되고 있는 유리섬유의 종류는 크게 두 가지 종류로 구분하는데 E(electrical)-유리섬유와 S(silica)-유리섬유이다. E-유리섬유는 우수한 강도와 강성을 가지고 있어 가장 널리 사용된다. S-유리섬유는 E-유리섬유와 비교하여 더욱더 우수한 강도와 강성 및 알칼리 저항성을 가지고 있지만 경제성이 좋지 않다. 따라서 현재 사용되고 있는 유리섬유의 약 90%는 E-유리섬유이다.^{3,4,123,127)} 유리섬유의 직경은 5~25 μ m로 둥근 모양을 가지고 있다.^{3,4,123,127)} 유리섬유의 역학적 특성은 Table 2-6과 같다.

Table 2-5 Approximate compositions of various glass fibers¹⁸⁵⁾

Glass Type	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	B ₂ O ₃
E	55.2	8.0	18.7	4.6	7.3
S	65.0	25.0	-	10.0	-

Table 2-6 Typical properties of glass fiber¹⁸⁵⁾

Properties(Units)	E-Glass	S-Glass	AR-Glass
Density(g/cm ³)	2.54	2.49	2.27
Tensile strength(MPa)	3500~3600	4100	1800~3500
Elastic modulus(GPa)	74~75	85	70~76
Range of diameter(μ m)	8~12	8~13	8~12
Coefficient of thermal expansion(10 ⁻⁶ /°C)	5.0	2.9	-

라. 폴리비닐알코올(Polyvinyl alcohol: PVA) 섬유

PVA섬유는 폴리비닐아세테이트를 가수분해하여 얻을 수 있으며 폴리비닐아세테이트는 비닐아세테이트 모노머의 폴리머화 작용에 의해서 얻을 수 있다.¹³³⁾ 비닐아세테이트는 1912년에 개발되었으며 1972년 W. O . Herman은 비닐아세테이트를 합성하여 1931년에 PVA섬유의 특허를 출원하였다. 일반적인 생산목적은 직물로 이용하기 위해서인데 현재 PVA섬유는 직물로는 매우 작은 양만 사용하고 있으며 주로 다양한 산업용 제품에 적용되고 있다.¹³³⁾ PVA섬유를 산업용 제품에 적용하면 많은 우수한 특징을 가지고 있는데 그 특성을 살펴보면 다음과 같다.¹³³⁾

- 섬유의 강도와 탄성계수가 높다.
- 외부 환경에 대한 우수한 저항성을 가지고 있다.
- 내화학적 특히 알칼리에 대한 저항성이 우수하다.

Fig. 2-2와 Table 2-7은 PVA섬유의 화학 구조와 역학적 특성을 보여준다.

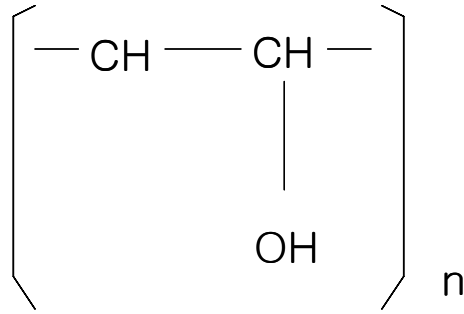


Fig. 2-2 Chemical structure of PVA fiber¹³³⁾

Table 2-7 Typical properties of PVA fiber¹³³⁾

Properties(unit)	PVA fiber
Density(g/cm ³)	1.3
Tensile strength(MPa)	2,254
Elastic modulus(GPa)	59.8
Diameter(μ m)	14.0
Elongation at break(%)	5.0

라. 세라믹섬유(Ceramic fibers)

폴리머복합체의 제조에 널리 사용되고 있지는 않지만 세라믹섬유에는 붕소(boron), 실리콘 카리바이드(silicon carbide), 알루미나(alumina)섬유 등이 있다. FRP 리바를 생산하기 위한 다른 섬유와 비교하여 이와 같은 섬유는 비교적 강성 및 강도가 크고 용해점이 높다.¹³³⁾ 예를 들어 약 1200℃에서 세라믹섬유의 강도는 0.5~2GPa정도를 유지한다.¹³³⁾ 그러나 세라믹섬유는 가격이 매우 높으며 성능 또한 콘크리트의 보강재료로서 사용하기 위한 FRP 리바의 제조에는 적합하지 않아서 거의 이용되고 있지 않다.¹³³⁾

2. 폴리머 수지(Polymer resin)

콘크리트구조물에 사용되는 복합체에 대한 연구는 주로 구조물의 보강재로 사용되었을 때 하중전달의 요소로서 보강섬유의 역할에 초점을 맞추어 왔다. 즉 복합체 내에서 구조요소로 사용되는 섬유에 대한 것이 대부분이었다. 복합체에서 폴리머 수지의 역할은 보강섬유와 콘크리트 사이의 하중을 전달하고 내구성 저하를 발생시킬 수 있는 혹독한 환경과 기계적인 충격으로부터 보강섬유를 보호하는 것으로 매우 중요하다.^{3,4,133)} 특히 휨하중을 받는 구조물에서 내부결합층 전단은 설계에 매우 중요한 요소이며 평면내의 전단은 비틀림하중이 작용할 때 매우 중요하게 고려되어야 한다.^{3,4,133)} 폴리머 수지는 복합체의 내부결합 전단응력 뿐만 아니라 평면 내에 작용하는 전단응력에 모두 영향을 미친다.^{3,4,133)} 또한 폴리머 수지는 압축하중이 작용할 때 보강섬유에 발생할 수 있는 좌굴에 의한 파괴가 발생하지 않도록 저항한다.^{3,4,133)} 이와 같이 폴리머 수지는 FRP 리바에 있어서 결합재료로 적정한 온도와 화학적 조건에서 모노머(monomer)로 만들어진 유기질 재료이며 다음과 같은 중요한 역할을 한다.^{3,4,133)}

- 보강섬유를 결합하는 동시에 복합체에 구조적으로 강성을 부여한다.
- 보강섬유사이의 내부응력을 전달한다.
- 표면의 결합으로부터 보강섬유를 보호한다.

폴리머 수지를 분류하는데는 몇 가지 방법이 있는데 화학적 구성, 온도에 따른 폴리머의 역학적 반응에 따라 분류하는 것이다.^{3,4,133)} 온도에 따른 역학적 분류에 따라 분류하면 열가소성 및 열경화성 수지가 있다. 열가소성수지는 가열하면 유연해지고 소성을 나타내며 성형되어 상온이 되면 딱딱하게 되어 소성이 없어진다. 열경화성수지는 가열하면 연화되어 소성을 가지며 성형이 되지만 가열을 계속 하는 동안에 화학적 반응에 의하여 경화하고 한번 경화한 것은 다시 가열하여도 연화되지 않는 특성을 가진다.^{3,4,133)} 열가소성과 열경화성 수지의 종류는 Table 2-8과 같다.

Table 2-8 Group of the common plastics used in the construction industry^{3,4,133)}

Thermosetting	Thermoplastic
Polyester	PVC
Epoxy	Acrylic
Vinyl ester	Polystyrene
Polyurethane	-
Phenolic	-

가. 열가소성수지

열가소성수지는 선형분자구조로 구성되어 있어 공유결합에 의한 화학적으로 결합되어 있지 않고 반데르발스 부착(Vander Waals bond)과 수소결합(hydrogen bond)에 의해서 약한 2차적인 부착을 가지고 있다.^{3,4,133)} 열과 압력이 가해지면 분자들은 새로운 위치로 이동하며 새로운 위치에서 열이 식으면 동결하게 된다. 열가소성 수지의 특성은 수지가 열을 받을 때 새로운 모양을 형성시키기 위한 것으로 이와 같은 과정을 열을 받을 때마다 반복되며 재료는 부가적인 열반복에 의해서 보다 취성적으로 변하게 된다.^{3,4,133)} 현재 가장 많이 사용되는 열가소성수지는 Table 2-8과 같다.

나. 열경화성수지

열경화성수지는 일반적으로 압출과정에 널리 사용되며 선형분자 사이의 공유결합을 가지고 있어 열을 반복적으로 가해도 모양이 재구성되지 않는다.^{3,4,133)} 열경화성수지는 매우 낮은 점도의 작은 분자 중량의 액체로 구성되어 있다. FRP 리바에 열경화성수지를 사용하는 주요 이유는 섬유와 매트릭스 사이의 우수한 부착력을 가지게 하며 크리프 저항성이 우수하고 초기 생산가격이 싸기 때문이다.^{3,4,133)} 일반적으로 사용되는 열경화성 수지의 분류는 Table 2-8과 같다.

1) 폴리에스터 수지(Polyester resin)

폴리에스터 수지의 장점은 저점도, 빠른 양생시간, 낮은 가격이다. 불포화 폴리에스터 수지는 가격이 싸기 때문에 많은 복합체 재료에서 가장 널리 사용되고 있는 폴리머 수지이다.^{3,4,133)} 현재 미국에서 생산되고 있는 복합체의 약 85%가 폴리에스터 수지를 사용하고 있는 것으로 추정하고 있다. 앞서 언급했듯이 폴리에스터 수지는 일반적으로 생산 및 양생과정에서 점도가 낮은 액체 상태로 되어 있으며 수분과 여러 가지 화학물질, 외부의 환경적 조건 및 열화에 대해 우수한 저항성을 가지며 경제성이 우수하다.^{3,4,133)} 이에 반해 폴리에스터 수지의 단점은 체적변화가 크다는 것이다. 이와 같은 체적의 변화는 최종 FRP 리바에도 그대로 영향을 미쳐 FRP 리바의 강도를 손실할 가능성이 있다. 이와 같은 폴리에스터 수지의 단점을 해결하고자 개발된 것이 부분적으로 열가소성수지를 함유한 저수축 폴리에스터 수지로서 기존 폴리에스터 수지의 단점을 어느 정도 해결할 수 있다.^{3,4,133)} 폴리에스터 수지의 물리·역학적 특성은 Table 2-9와 같다.

2) 에폭시 수지(Epoxy resin)

에폭시 수지는 높은 하중을 받는 구조물의 매트릭스 재료로 널리 사용된다.^{3,4,133)} 에폭시 수지는 재료가 받은 다양한 온도조건에 따라 품질이 결정되며 섬유복합체의 매트릭스로 사용되어 매우 우수한 특성을 보여주는데 그 특성은 아래와 같다.^{3,4,133)}

- 섬유와 우수한 부착특성을 가지고 있다.
- 양생기간 중에 수축이 적어 잔류응력이 감소한다.
- 다른 폴리머 재료와 비교하여 우수한 역학적 특성을 가지고 있다.
- 내화성이 우수하다.
- 모양과 양생조건을 다양하게 선택할 수 있다.

에폭시 수지의 물리·역학적 특성은 Table 2-9와 같다.

3) 비닐에스터 수지(Vinyl ester resin)

비닐에스터 수지는 내화학적 및 고온에서의 저항성이 폴리에스터 수지에 비하여 우수하다. 비닐에스터 수지는 폴리에스터 또는 에폭시 수지와 비교하여 생산과정에서 다루기가 쉽고 또한 상대적으로 작은 공유결합으로 인하여 폴리에스터 수지와 비교하여 탄성이 우수하다. 비닐에스터 분자는 길이 방향으로 수산기 그룹을 형성하여 유리섬유와 같은 그룹과 수소부착을 형성하여 우수한 수분흡수 저항성 및 내부 부착강도를 갖는다.^{3,4,133)} 비닐에스터 수지는 낮은 점성과 짧은 양생기간으로 FRP 리바의 생산에 매우 적합한 재료이지만 에폭시와 비교하여 상대적으로 양생기간 중에 높은 체적변화로 수축하는 단점을 가지고 있다.^{3,4,133)} 비닐에스터 수지는 내화학성이 요구되는 환경적 조건에 가장 널리 사용된다.^{3,4,133)} 비닐에스터 수지의 물리·역학적 특성은 Table 2-9와 같다.

3. 섬유와 폴리머 수지와와의 계면부착

철근과 같은 금속재료는 재료구조 내의 결정질 사이의 강한 부착에 의해서 하중을 전달하지만 FRP 리바의 경우는 화학적 부착과 섬유와 폴리머사이의 마찰력에 의해서 하중을 전달한다. 섬유와 폴리머사이의 계면부착에 관한 많은 연구결과가 있지만 한가지 종류의 섬유에 따른 여러 가지 폴리머의 부착강도가 명백한 차이를 보이기 때문에 섬유와 폴리머의 부착거동을 정량화 시키는 것은 불가능한 것처럼 보인다. 그러나 Hull과 Matthews는 계면 부착강도를 정량화하려는 연구를 시도하였다.^{95,111,112)} 그들에 따르면 계면부착은 섬유와 폴리머의 화학적 및 기계적 적합성에 의존하는 것으로 조사되었다. 화학적 적합성은 섬유와 폴리머사이의 상대적인 표면에너지와 표면화학(surface chemistry)의 영향을 포함한다. 섬유와 폴리머사이의 표면에너지의 차이가 크면 섬유에 폴리머를 부착시키는 것은 매우 어렵다. 탄소섬유와 아라미드섬유는 폴리머와 거의 동일한 표면 에너지를 가지고 있기 때문에 유리섬유보다 섬유에 폴리머를 부착시키는 것이 쉽다.^{95,111,112)} 또한 섬유표면이 거칠면 기계적인 결합력에 의해서 부착력이 증가한다. 탄소섬유와 아라미드섬유는 유리섬유에 비하여 섬유 표면이 거칠기 때문에 결합력이 우

수하다.^{95,111,112)} Table 2-10은 섬유와 폴리머의 계면 적합성을 나타낸다. 또한 계면부착은 생산과정에서 열팽창계수의 차이와 폴리머작용에 의한 수축량의 차이로 인하여 섬유 내에 발생한 잔류응력에 영향을 받는다.^{95,111,112)}

Table 2-9 Typical properties of matrix^{3,4,133,185)}

Material Properties	Polyester	Epoxy	Vinyl ester	PVC	Nylon
Density(g/cm ³)	1.28	1.30	-	1.37	1.14
Tensile strength(MPa)	45-90	90-110	90	58	70
Elastic modulus(GPa)	2.5-4.0	3.0-5.5	3.4	2.4-2.8	1.03-2.76
Possion ratio	0.37-0.40	0.38-0.40	0.37	-	-
Coefficient of thermal expansion(10 ⁻⁶ /°C)	100-120	45-65	-	50	80-150

Table 2-10 Fiber-resin interface compatibility^{95,111,112)}

	Fiber			Matrix	
	E-glass	Aramid	Carbon	Polyester	Epoxy
Surface energy(10 ⁻³ J/m ²)	560	38	70	35	43
Surface roughness	smooth	rough	very rough	N/A	N/A
Shrinkage at curing(%)	N/A	N/A	N/A	4-8	1.5
Coefficient of thermal expansion of fiber/epoxy(in/in/°F×10 ⁻⁶)	4.8	-3	0.24	N/A	N/A

제 3장 일반 및 하이브리드 FRP 리바 제조시스템 개발

제 1절 개요

FRP 리바의 생산에 일반적으로 사용되는 방법은 성형압출(pultrusion)과 필라멘트 와인딩(filament winding), 브레이딩(braiding)과정 등이 있다. 본 연구에서는 이와 같은 세가지 생산시스템의 장점을 이용하여 역학적 특성이 우수한 일반 및 하이브리드 FRP 리바 생산시스템인 압출(pultrusion)/브레이딩(braiding)/필라멘트 와인딩(filament winding) 시스템을 개발하였다. 개발된 시스템은 다양한 종류의 보강섬유를 조합할 수 있으며 표면 및 내부형상의 변화를 통한 일반 및 하이브리드 FRP 리바를 제작할 수 있다. 하이브리드 FRP 리바의 구조는 코어 FRP 리바를 구성하는 섬유로 탄소섬유를 사용하였으며 슬리브를 구성하는 브레이드 및 필라멘트 와인딩용 섬유로 아라미드섬유와 유리섬유를 사용하였다. 일반 FRP 리바는 탄소섬유와 유리섬유를 주로 사용하고 표면형상의 처리는 PVA 섬유를 이용하였다. FRP 리바의 생산방법을 자세히 설명하면 다음과 같다.

제 2절 생산시스템 분석

1. 압출성형(pultrusion)^{25,28)}

압출성형과정은 건설재료로 사용하기 위한 FRP 리바를 제조하는데 가장 널리 이용되는 방법으로 자동공정에 의하여 FRP 리바가 생산된다. Fig. 3-1은 가장 널리 사용되는 압출성형 과정의 모양을 보여준다. 생산공정은 첫 번째로 섬유꾸러미에서 섬유가 자동적으로 풀려 폴리머 탱크로 이동한다. 이때 섬유는 한가지 종류일수도 있고 하이브리드 효과를 이루기 위하여 여러 가지 섬유꾸러미를 설치할 수도 있다. 폴리머탱크에서 폴리머를 함침한 섬유는 초기에 일정한 모양을

형성시키는 틀을 통과하여 가열판으로 이동한다. 가열판에서는 열경화성 폴리머가 사용되었을 경우 양생을 촉진시키며 섬유 함량이 많을 때는 폴리머의 침투를 촉진시켜 FRP 리바의 모양 형성을 촉진시킨다. 압출기는 일정한 형상을 가진 FRP 리바의 표면 형상을 주는 역할과 FRP 리바를 압착하여 밀어내는 역할을 한다. 마지막으로 압출기를 통과한 FRP 리바를 일정한 크기로 잘라낸다. 압출성형방법에 의해서 가장 많이 생산되는 재료는 유리섬유와 폴리에스터 수지를 사용한 GFRP 리바이다. 또한 아라미드와 탄소섬유도 에폭시, 비닐에스터 등 열경화성수지를 사용하여 압출성형과정을 통하여 다양한 단면적과 형상을 가진 AFRP 리바와 CFRP 리바를 생산할 수 있다. 압출성형과정은 FRP 리바를 생산하는 매우 빠른 공정이며 섬유의 체적비가 높은 리바를 제조할 때 효과적인 방법이다.

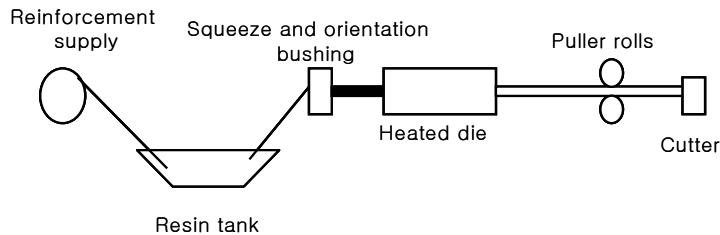


Fig. 3-1 The pultrusion process^{25,28)}

2. 필라멘트 와인딩(filament winding process)⁹⁷⁾

필라멘트 와인딩은 간단하면서도 다목적으로 사용될 수 있는 방법이다. 즉 FRP 리바의 모양과 크기를 다양하게 제조할 수 있고 서로 다른 폴리머와 섬유를 사용할 수 있으며 가장 우수한 역학적 특성을 보여줄 수 있게 섬유의 방향도 선택할 수 있다. 적절한 필라멘트 와인딩의 설계를 위해서는 복합체의 설계, 폴리머의 특성 및 생산과정에 대한 상당한 수준의 공학적 지식 및 기술이 필요하다. 필라멘트 와인딩 과정의 모양은 Fig. 3-2와 같다. 생산공정은 실린더모양의 축이 다양한 속도로 회전하면서 섬유가 실린더모양의 회전축을 감아 외부형상을 만드는 것이다. 필라멘트 와인딩 공정은 압출공정에 비하여 가격이 비싸지만 자동화

를 통한 생산량을 증대시켜 이를 어느 정도는 해결할 수 있다. 필라멘트 와인딩 공정은 대부분의 섬유에 대해 적용이 가능하고 다양한 와인딩 각도를 선택할 수 있어 콘크리트의 보강재료용으로 만들었을 때 부차특성을 향상시킬 수 있다.

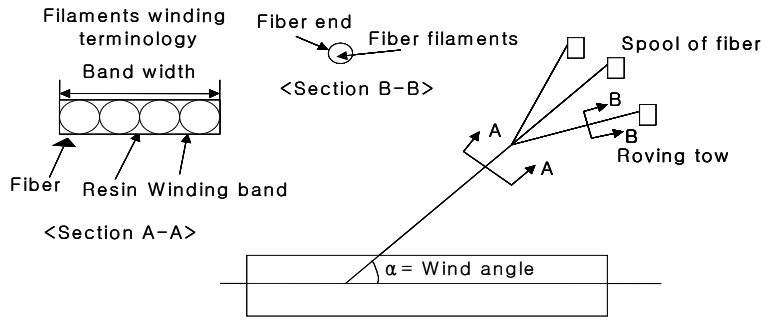


Fig. 3-2 The filament winding process⁹⁷⁾

3. 브레이딩(Braiding process)^{80,81,88)}

브레이딩(braiding)은 FRP 리바를 제조할 때 2차원 및 3차원 제직을 통한 전단에 대한 저항성과 강도를 증가시킬 목적으로 개발한 시스템이다. 이 방법은 브레이딩, 폴리머함침, 일정한 모양을 만드는 장치, 양생, 압출 및 짜르기의 6단계의 생산방법으로 구성된다. 브레이딩방법은 FRP 리바의 생산이 쉽고 다양한 섬유를 사용함으로써 강도 및 전단에 대한 저항성의 향상에 유리한 방법이다. 이 방법의 일반적인 생산과정은 Fig 3-3 같다.

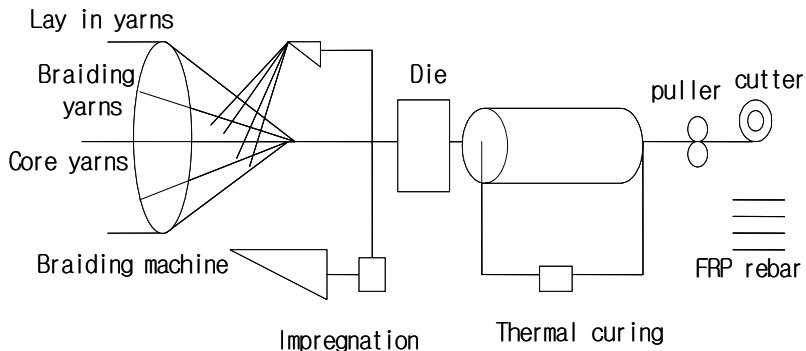


Fig. 3-3 The schematic of braiding process^{80,81,88)}

제 3절 생산시스템 개발

1.개 요

일반 및 하이브리드 FRP 리바의 제조를 위하여 기하학적 변수와 제조 공정상의 변수를 적용하여 탄성계수 및 변형률 등과 같은 역학적 특성을 최적으로 발휘할 수 있는 제조시스템을 개발하였으며 Fig. 3-4는 개발된 제조 시스템의 개념도를 나타낸다. 일반 및 하이브리드 FRP 리바 제조시스템은 리바의 크기에 영향을 받지 않고 원하는 치수의 FRP 리바의 생산이 모두 가능하다. Fig. 3-5는 본 제조시스템을 이용하여 생산된 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 모습을 보여준다. 본 제조시스템의 주요 공정은 압출, 브레이딩, 필라멘트 와인딩의 세가지 공정으로 구성되어 있으며 각 공정의 역할을 살펴보면 다음과 같다. 압출공정의 경우 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 코어 FRP 리바 부분을 생산하는 단계로 이 과정은 슬리브를 구성하도록 하는 공정인 브레이딩 공정시 섬유가 매우 조밀하게 제직되기 때문에 코어로 사용되는 탄소섬유내로 폴리머 매트릭스의 함침이 어려워 이를 해결하기 위하여 구성하였다. 브레이딩 공정은 FRP 리바의 변형률 및 압축강도, 전단강도를 증가시키기 위한 슬리브를 제직하는 과정이며 마지막으로 필라멘트 와인딩 과정은 콘크리트 모체와의 부착성능을 증가시키기 위하여 FRP 리바의 표면에 굴곡을 주는 공정이다.

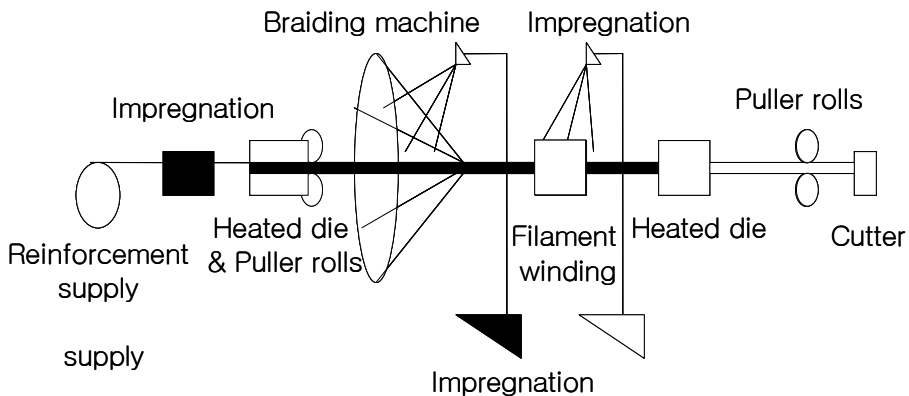


Fig. 3-4 Manufactureing system of FRP rebar



Fig. 3-5 Photo of FRP rebar

2. 압출 시스템(Pultrusion system)^{25,28)}

일반 및 하이브리드 FRP 리바의 중심에 위치한 코어 FRP 리바를 제조하기 위하여 본 연구에서 선택한 압출과정은 연속적으로 섬유를 폴리머 매트릭스에 함침시켜 압출을 통한 복합체의 제조방법에 널리 사용되는 방법이다. 본 연구에서 선택한 압출과정은 크게 섬유의 공급, 폴리머 매트릭스의 함침, 온도 조절이 가능한 압출 롤러를 이용한 성형 및 압출과정으로 구성된다. 그 과정을 자세히 살펴보면 다음과 같다.

가. 보강섬유 공급(Reinforcement supply)

코어를 구성하는 FRP 리바를 제조하기 위한 탄소섬유를 공급하기 위한 장치로서 코어 FRP 리바를 구성하는 섬유의 꼬기는 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 탄성계수를 감소시키는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 특성을 고려하여 코어를 구성하는 섬유인 탄소섬유를 어떠한 비틀림이나 꼬기 등의 영향을 받지 않도록 직선으로 투입할 수 있도록 섬유 얼레로부터 이동하는 섬유를 8개의 노즐을 통하여 직선으로 투입되도록 하였다(Fig. 3-6).



Fig. 3-6 Reinforcement fiber supply

나. 폴리머 매트릭스 함침장치(Impregnation)

건조된 섬유는 수지를 전체적으로 함침시킴으로서 섬유를 결합시켜 FRP 리바를 구성하여야 한다. 이때 FRP 리바의 물리·역학적 특성 및 외형적인 모양은 폴리머 매트릭스의 함침에 의하여 영향을 받는데 섬유에 폴리머 매트릭스를 전체적으로 함침시킴으로써 이러한 결합의 발생 가능성을 제거하여야 한다. 일반적인 성형압출과정에서 섬유는 개방된 폴리머 매트릭스 함침 탱크를 통과시켜 섬유의 표면에 폴리머를 포화시키는 과정을 거치게 된다(Fig. 3-7).^{25,28)} 본 연구에서도 코어 FRP 리바를 구성하는 탄소섬유에 폴리머를 충분히 포화시키기 위하여 개방형 함침 탱크 방식을 적용하였다. 일반적으로 성형압출과정에 사용되는 폴리머는 폴리에스터, 비닐에스터 및 에폭시 수지와 같은 열경화성수지가 열가소성수지에 비하여 압출이 용이하기 때문에 널리 사용되고 있다.^{25,28)} 본 연구에서는 비닐에스터 수지를 사용하였는데 이는 기존에 많은 연구자들의 연구결과 비닐에스터 수지가 역학적 특성이 우수하며 수분흡수 및 알칼리 저항성 등 내구성이 매우 우수한 것으로 알려져 있기 때문이다.



Fig. 3-7 Reinforcement fiber impregnation system

다. 가열 선반장치(Heated die system)

성형 압출과정에서 가열선반장치의 역할은 초과된 수지의 제거, 복합체의 최종 모양의 형성, 적절한 온도와 압력에 의한 수지의 완벽한 양생이다. 본 연구에서 사용한 가열선반장치는 성형압축과정에서 일반적으로 사용되는 것으로 Fig. 3-8에서 볼 수 있는 것과 같이 강(steel)으로 제작되었으며 선반장치에 국부적으로 가열 및 냉각점에 도달함이 없이 균등하게 열을 공급할 수 있다. 가열선반장치의 필요한 길이는 수지의 압출 및 양생시간에 의존하여 결정하는데 그 이유는 선반의 길이가 길어질수록 마찰력은 증가하게 되기 때문이다.⁴⁸⁾ 본 연구에서는 FRP 리바의 생산시 마찰력을 최소화하면서도 FRP 리바에 수지가 충분히 스며들 수 있는 범위에서 최적의 길이를 선정하였다. 가열선반의 크기가 결정되면 약 코어 FRP 리바의 치수에 맞는 크기의 구멍을 뚫어야 한다. 선반으로부터의 압출도 재료를 투입하기 위한 원형구멍과 동일한 크기로 구멍을 뚫어 재료를 압출하도록 한다. 본 연구에서는 가열선반장치의 내부 표면은 마모저항성에 견디기 위하여 0.5cm의 단단한 크롬으로 제조하였으며 제작된 가열선반의 내구성은 FRP 리바를 약 50,000~100,000개 정도를 압출할 수 있을 것으로 판단하고 있다.



Fig. 3-8 Heated die system

라. 압출롤러(Puller)

압출장치는 Fig. 3-9에서 볼 수 있는 것과 같이 FRP 리바를 이동시키기 위해서 강으로 제작된 체인과 같은 활차로 연속적으로 연결된 여러개의 원추형의 롤러로 구성되어 있다. FRP 리바는 이러한 연속적으로 배열된 원추형 롤러를 통과하여 일정한 모양을 가지게 되며 압축으로 인한 FRP 리바 내부의 공극 또한 제거하게 된다. 압축롤러를 작동하는 모터의 속도는 감속기를 연결하여 조절할 수 있게 하였으며 FRP 리바의 생산시 속도를 일정하게 유지할 수 있도록 하였다. 감속기의 동력은 Fig. 3-9에서 볼 수 있는 것과 같이 두 개의 톱니리바퀴형 장치에 의하여 조절된다. 또한 압출기의 속도는 자동화시스템을 이용하여 조절할 수 있게 하였다. 적정한 압출기의 속도는 코어 FRP 리바의 최적 성능을 발휘할 수 있는 속도로 FRP 리바의 생산시 이와 같은 속도를 유지하도록 하였다.



(a) Side view



(b) Plane view

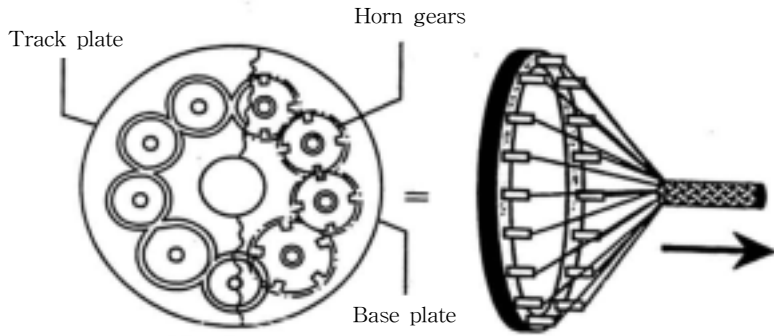
Fig. 3-9 Puller system: (a) side view, (b) plane view

3. 브레이딩 장치(Braiding machine)

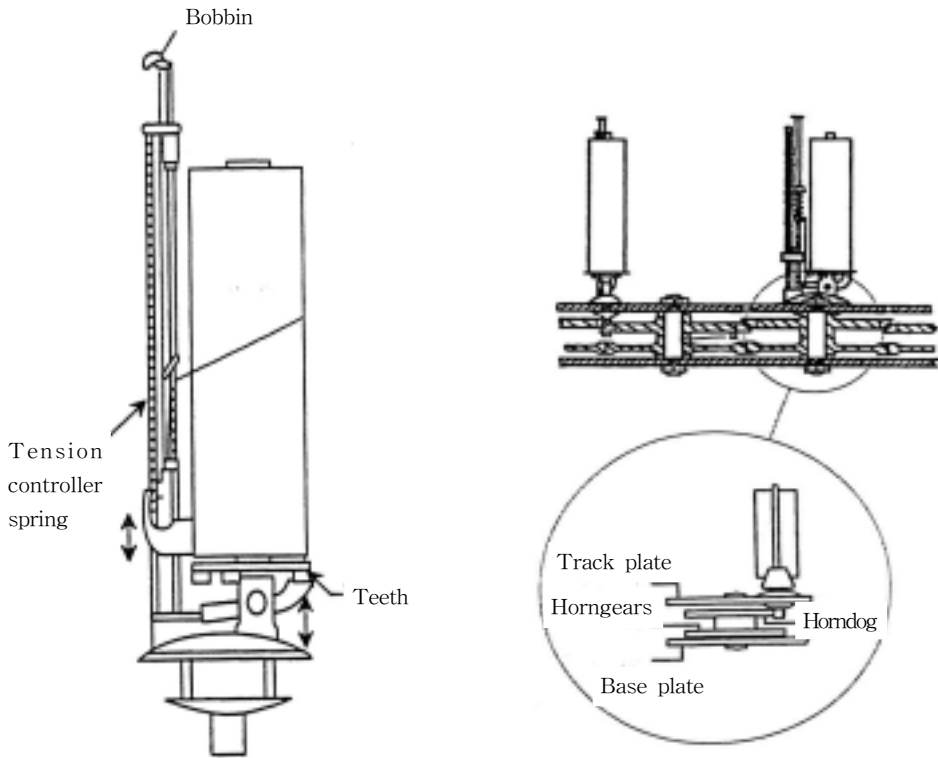
보강섬유제품을 만드는 방법은 여러 가지가 있으며 이들을 크게 나누면 2차원 제직, 3차원 제직, 3축제직, 필라멘트 와인딩, 부직포, 3차원 브레이딩 과정이 있다. 특히 3차원 브레이딩의 경우는 다른 방법과 비교하여 다음과 같은 두 가지의 장점을 가지고 있다. 첫 번째로는 적절한 섬유 운반기(yarn carrier)의 배열과 동작으로 복잡한 형태의 단면을 갖는 복합재료를 쉽게 형성할 수 있으며 두 번째로 보강섬유의 두께방향으로 섬유실이 교차되어 있기 때문에 기존의 라미네이트 복합재료(laminated composites)에서 발생하는 층간분리(delamination)가 발생하지 않는다는 것이다. 그러므로 3차원 브레이드를 쓴 복합재료는 층의 분리가 발생하지 않기 때문에 매우 우수한 역학적 특성을 발휘한다. 본 연구에서는 아라미드 및 유리섬유와 PVA 섬유를 3차원 브레이드 공정을 통하여 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 슬리브를 구성하게 하여 역학적 특성 및 부착성능을 증가시키고자 하였다. 브레이딩은 섬유의 직조과정에서 이미 사용하던 기본적인 생산과정으로 섬유의 직조과정에서 매우 어려운 작업 중에 하나이다. 섬유의 직조과정에 브레이드공정의 도입은 4천년 전 중국에서 수작업을 하면서부터이다. 이후 섬유의 브레이딩을 위한 첫 번째 기계의 설계는 1748년 영국의 Thomas Walford에 의해서 특허를 받았다. 초기의 브레이딩 장치는 필름을 엮어서 만드는 간단한 것이었으며 1950년대 초에 브레이드 슬리브가 전기 전도체의 덮개로서 매우 큰 인기를 얻으면서 공업용 제품에 널리 사용되게 되었다.^{111, 112)} 이와 동시에 보다 빠른 속도를 가진 브레이딩 장치가 필요하게 되었으며 결과적으로 브레이딩 장치는 기존의 장비보다 몇 배 빠른 성능을 발휘할 수 있게 되었다. 1960년대 후반 항공기 구조물의 다양한 방향의 보강물을 찾기 위한 노력의 결과로 3-D의 브레이딩 복합체가 중요하게 고려되었다.^{111, 112)} 3-D 브레이딩에서 섬유실은 섬유실의 두께방향으로 브레이드 되므로 따라서 내부계면의 분리에 대한 저항성이 다른 형태의 섬유제조방법과 비교하여 매우 우수하다.^{111, 112)} 본 연구에서는 16개의 캐리어(carrier)를 가진 3-D 브레이딩 장치를 이용하여 일반 및 하이브리드 FRP 리바를 제조하였다. 브레이딩장치는 기본적인 섬유실 캐리어, 궤도선반(track plate), 압출장치의 3가지 구성요소로 구성되어 있다(Fig. 3-10). 브레이드는 기본적으로

브레이딩 지점에서 서로 다른 반대방향으로 엮어 짜는 두 개의 섬유실 이동활주로 구성되어 있다. 압출기계는 브레이딩 점으로부터 브레이드된 섬유를 이동시킴으로써 새로운 브레이딩 섬유를 형성하는데 사용된다. 섬유실 캐리어는 섬유실의 저장과 섬유실의 인장력을 조절하면서 브레이드를 형성시키는 섬유실을 공급한다. 섬유실 캐리어는 적절한 속도로 섬유실을 운반시키기 위하여 두가지 매카니즘으로 작용한다. 첫 번째 매카니즘은 캐리어와 브레이딩 점 사이로 섬유실을 길이방향으로 접근시키기 위해서 사용되며 궤도선반 위에 꾸불꾸불한 이동 경로를 따라 캐리어의 이동 속도를 지속적으로 변화시킨다. 인장력을 조절하는 스프링은 Fig. 3-10(b)와 같이 운반기의 기둥에 연결되어 있으며 신장 및 압축에 의해서 발생하는 길의 변화를 조절할 수 있다. 새로운 브레이드가 형성되어 감에 따라 섬유실의 길이는 점점 더 짧아지게 된다. 이와 같은 현상이 발생하였을 때 캐리어 스프링은 상승부에서 압축을 받으며 두 번째 매카니즘인 바퀴썰기(ratchet)가 기초판에 도달하여 멈출 때까지 상승하도록 한다. 이 때 바퀴썰기의 첫 번째 또는 두 번째 톱니에서 많은 섬유실을 방출된다. 섬유실 캐리어는 혼도그(horndog)라는 회전장치 판위에 있는 홈 오른쪽 상부에 정착되어 있으며 혼기어(horngear)에 연결되어 있다(Fig. 3-10(c)). 혼기어는 동시에 동일한 각속도에서 전환하도록 되어 있으며 특히 혼도그 부속품은 혼도그의 중앙선에 연결된 점에 있도록 배열하여야 한다. 선 위에 홈이 있을 때 캐리어는 자동적으로 한 혼기어에서 다른 기어로 이동시키게 된다. 규칙적인 전환을 위하여 브레이딩 장치는 여러 개의 혼기어가 필요하며 혼기어는 12.5cm의 압출기에 연결되어 있고 벨트는 속도감속기에 연결되어 이동된다. DC모터는 90~180V DC 모터 조절기를 사용하여 조절한다. 브레이딩 점의 위치 조절과 섬유실의 인장력을 제공하는 위해서 원추형 링 또는 형성기를 사용하여야 한다. 모든 섬유실은 형성기의 내부를 통과하는 동시에 연결부에 힘을 가한다. 따라서 브레이드가 균일한 크기와 균일한 섬유의 분배로 지속적으로 생산된다. 링은 고결정성 폴리에틸렌으로 제작하였으며 크기는 내부직경 30cm이며 외부직경은 32cm이다(Fig. 3-11). 브레이드 제작의 방법은 디스크 위에 설치된 노치(흔)의 수의 변화에 의해서 이루어진다. 예를 들어 1대1 브레이드는 동일한 디스크의 반대편 위에 직각방향으로 두 개의 노치가 필요하며 2대2, 3대3 브레이드는 4개, 6개의 노치(흔)가 각각 필요하다(Fig. 3-12). 본

연구에서는 대칭적인 브레이드 구조를 유지하기 위하여 1대1 브레이드를 사용하였다.



(a) Braiding machine; front and side views^{111, 112)}



(b) Yarn carrier with bobbin

(c) Track plates and gears

Fig. 3-10 Braiding machine system^{111, 112)}

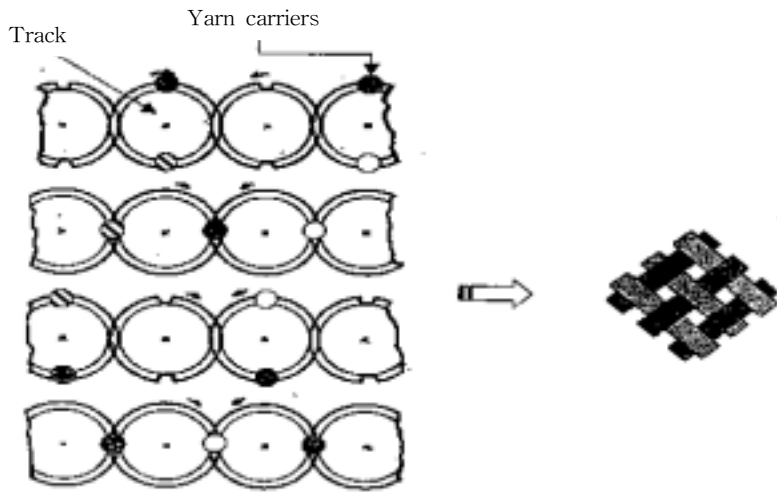


(a) Plane view

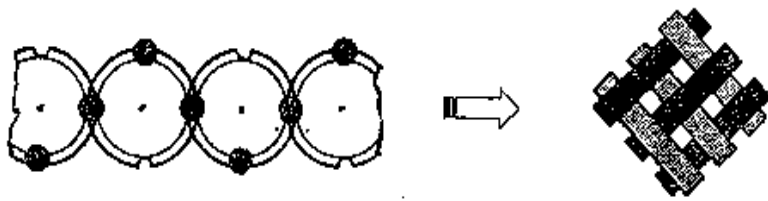


(b) Top view

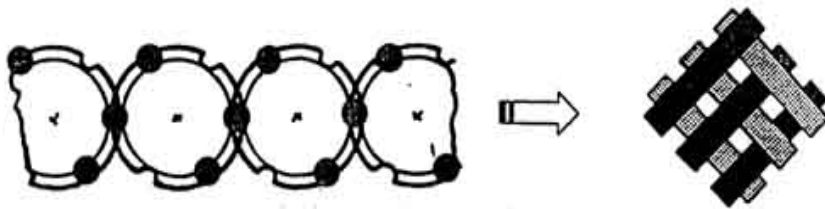
Fig. 3-11 Braiding system: (a) plain view, (b) top view



(a) One to one braid



(b) Two to two braid



(c) Three to three braid

Fig. 3-12 Different method for creating braided structures^{111, 112)}

4. 필라멘트 와인딩/브레이딩 시스템(Filament winding/braiding system)

필라멘트 와인딩 및 브레이딩 시스템은 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 표면의 굴곡을 주어 콘크리트 모체에 정착되었을 때 부착성능을 증가시키기 위하여 실시하였다. 필라멘트 와인딩/브레이딩시스템에 적용된 섬유는 브레이딩 과정에서 적용된 섬유를 사용하였으며 부착력을 최적으로 할 수 있는 높이와 폭을 결정하여 적용하였다. 적정한 높이와 폭으로 제작된 섬유실은 얼레(bobbin)에 미리 감아야 하며 이때 얼레는 플라스틱 관으로 만들었다. 필라멘트 와인딩 섬유실은 브레이딩 과정의 마지막 부분에서 브레이드된 일반 FRP 리바 및 하이브리드 FRP 리바를 적정한 간격으로 감싸게 되며 필라멘트 와인딩 섬유실은 마지막으로 브레이딩 과정을 거치게 되어 브레이드 섬유와 일체를 이루게 되어 콘크리트와의 부착시 부착과피를 방지하는 역할을 하게 된다.

5. 브레이딩/ 필라멘트 와인딩 섬유의 폴리머수지 함침장치

건조된 섬유는 수지를 전체적으로 함침시켜 리바의 물리·역학적 특성의 증가 및 FRP 리바 표면에 어떠한 결함의 발생 가능성을 제거하여야 한다. 일반적인 성형압출과정에서 섬유는 개방된 수지 탱크를 통과시켜 섬유 표면에 매트릭스 폴리머를 포화시키는 과정을 거치게 된다. 그러나 브레이딩 및 필라멘트 와인딩 과정의 폴리머 매트릭스의 함침은 두가지 종류로 구분하여 실시하였다. 첫 번째는 브레이딩 및 필라멘트 와인딩 과정 전에 섬유에 매트릭스 폴리머를 함침시키는 과정과 브레이딩 및 필라멘트 와인딩 과정 후 매트릭스 폴리머 탱크에 함침시키는 공정이다. 이와 같이 공정을 구분하여 사용한 이유는 브레이딩 및 필라멘트 와인딩 공정후 섬유가 매우 밀실하게 짜여 있기 때문에 매트릭스 폴리머의 함침 공정만으로는 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 내부로는 매트릭스 폴리머의 함침이 어렵기 때문이다. 따라서 사전에 브레이딩 및 필라멘트 와인딩 공정에 사용하는 섬유에 충분히 매트릭스 폴리머를 함침시킨 후 브레이딩 및 필라멘트 와인딩 작업을 실시하였으며 브레이딩 및 필라멘트 와인딩 작업후 다시 매트릭스 폴리머를 함침시키면서 FRP 리바가 충분한 매트릭스 폴리머를 함침할 수 있

도록 하였다.

6. 양생장치(Curing system)

FRP 리바는 115℃의 열공급 양생기 내에서 사후 양생을 실시한다. 열공급 양생기의 크기는 5cm 직경의 검정색 강관으로 길이는 200cm로 양생기는 2.5cm두께의 유리섬유 절연 및 알루미늄 테이프로 코팅을 실시하였다(Fig. 3-13). 열공급은 500cm의 전기로프 열공급기를 이용하였으며 양생최대 온도는 485℃였다. 양생기 내부의 온도의 분포와 상태는 온도조절기를 사용하여 조절하였다.

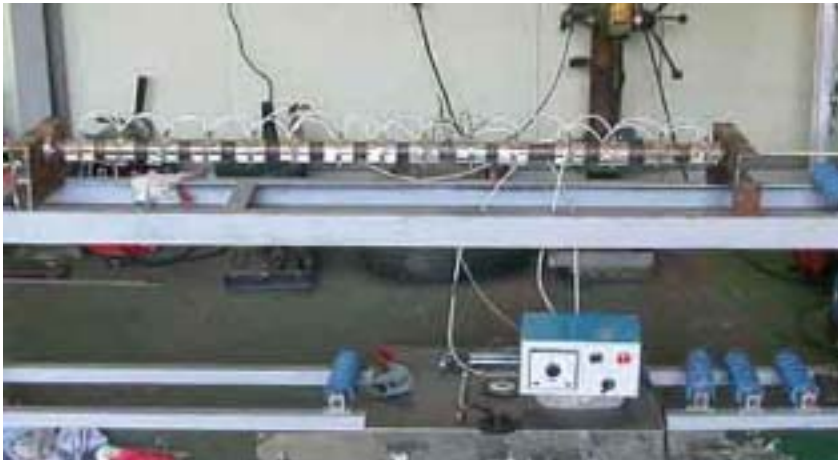


Fig. 3-13 Curing system

7. 압축롤러(Puller)

압축장치는 Fig. 3-14에서 볼 수 있는 것과 같이 FRP 리바를 이동시키기 위해서 표면이 고무로 코팅된 두 개의 원추형 롤러를 장착하여 그 사이로 FRP 리바를 통과시켰다. 모터는 속도 감속기를 연결하여 최고출력 토크를 0.13KN-m로 유지하였다. 감속기의 동력은 Fig. 3-14에서 볼 수 있는 것처럼 고무로 코팅된 두 개의 원추형롤러에 동일한 토크를 분배하기 위하여 체인으로 연결한 활차(pulley)

기어의 일종이다. 압출기장치는 5.08cm의 직경과 길이 11.4cm의 길이의 원추형의 딱딱한 고무이다. 압출기의 속도는 자동화시스템을 이용하여 조절하였다. 적절한 압출기 속도는 FRP 리바가 최적의 성능을 발휘할 수 있는 코어를 구성하는 FRP 리바의 생산속도를 유지하도록 하였다. 또한 생산시 주의 사항은 압출기와 FRP 리바의 완벽한 접촉을 유지하여 기계적으로 발생할 수 있는 미끄러짐을 방지해야 한다.



(a) Plane view



(b) Side view

Fig. 3-14 Puller system: (a) plane view, (b) side view

8. Cutting 시스템

일반적인 압출성형과정에서 FRP 리바의 절단은 다이아몬드 휠 절단기가 일반적으로 사용되며 감지장치에 의해 전기적 신호를 받아 먼저 클래브의 동작이 이루어지고 절단 모터의 동작으로 휠이 상승하며 수직으로 이동하면서 절단이 이루어진다. FRP 리바의 절단기의 속도는 FRP 리바의 생산속도에 의존하여 요구하는 크기로 FRP 리바를 절단한다.

제 4절 요약 및 결론

본 장에서는 역학적 성능이 우수한 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 생산시스템을 개발하였다. 개발된 생산시스템은 기존에 FRP 리바에 생산에 널리 사용되던 성형압출, 브레이딩 및 필라멘트 와인딩 공법의 장점만을 이용한 것으로 물리·역학적 성능이 우수한 FRP 리바의 생산이 가능한 시스템이다. 또한 개발된 압출(pultrusion)/브레이딩(braiding)/필라멘트 와인딩(filament winding) 시스템은 다양한 종류의 보강섬유를 조합할 수 있으며 표면 및 내부형상의 변화를 통한 일반 및 하이브리드 FRP 리바를 제작할 수 있다.

제 4장 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 이론적 고찰 및 설계

제 1절 개요

본 장은 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 설계를 위한 이론적 고찰을 에 대하여 제시하였다. 일반적으로 FRP 리바는 여러 가지 재료로 구성된 복합재료로서 성능은 다양한 요인에 의하여 영향을 받게 된다. 특히 구성재료의 재료적 특성 및 생산과정 상의 각종 요인은 매우 중요하게 고려되어야 한다. 따라서 본 장에서는 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 설계를 위하여 재료 및 기하학적 특성을 고려한 이론적 고찰을 통하여 우수한 성능을 발휘할 수 있는 FRP 리바를 설계하려 한다.

제 2절 하이브리드 FRP 리바에 대한 이론적 고찰

소성변형 구간을 갖는 하이브리드 FRP리바에 대한 이론적 연구는 대부분이 콘크리트 구조물에 적용하기 위한 연구보다는 항공산업이나 복합체 산업에서 대부분이 이루어져 왔다. 하이브리드 FRP 리바를 설계하기 위한 일반적인 가정은 1980년 Averston 과 Kelly 등을 비롯한 대부분의 연구자들이 설정하였던 것으로 다음과 같다.²⁴⁾

- 모든 섬유는 동일한 물리·역학적 특성을 가지고 있으며 Hooke's 법칙을 만족하는 완벽한 탄성거동을 한다.
- 섬유는 어떠한 변화도 없이 FRP 리바의 길이 방향으로 일정한 반경과 각도를 유지하며 나선형으로 배열되어 있다.
- FRP 리바의 단면적이 일정하게 유지될 때 그 단면적에는 일정한 수의 섬유가 FRP 리바의 길이 방향으로 연속적으로 균등하게 분포되어 있다.

이와 같은 기본적인 가정을 통하여 하이브리드 FRP 리바를 설계하기 위한 두 가지의 모델이 있는데 첫 번째는 재료 하이브리드 모델이고 두 번째는 기하학적 하이브리드 모델이다. 재료 하이브리드 모델은 FRP 리바를 제조하기 위한 재료에 대한 것이며 기하학적 하이브리드 모델은 하이브리드 효과를 얻기 위한 FRP 리바의 표면형상 및 제조과정상의 필요한 변수를 고려한 모델이다.

1. 재료 하이브리드모델

FRP 리바의 설계를 위한 재료 하이브리드 모델은 서로 다른 변형률(*LE*: 낮은 변형률, *HE*: 높은 변형률)을 가진 섬유 중 높은 변형률을 가진 섬유의 최적 혼합비를 결정하여 하이브리드의 효과를 발휘하도록 하는 모델로서 1980년 Averston과 Kelly는 식 4-1로 표현하였다.²⁴⁾

$$Critical V_H \geq \frac{f_{LU}}{f_{HU} + f_{LU} - f'_H} \dots \dots \dots (4-1)$$

여기서, f_{LU} , f_{HU} , f'_H 는 각각 *LE*섬유의 극한 강도, *HE*섬유의 극한강도, *LE* 섬유가 파괴되었을 때 *HE*섬유의 응력으로 정의하였다.

2. 기하학적 하이브리드모델

기하학적 하이브리드 모델은 구조 조직(hierarchy)을 기본으로 한 개념이다. 이 모델의 주요 관점은 인성을 확보하기 위한 섬유실(yarn)의 브레이딩(braiding), 뜨기(weaving), 꼬기(twisting)등을 통한 기하학적 변화의 수준이다. 1942년 Hamburger는 세 가지의 기하학적인 변수인 섬유실의 탄성계수, 굴곡, 나선형의 각 (θ)을 고려한 관형 브레이드 구조에 대하여 언급하였다(Fig. 4-1).^{86, 87)} Fig. 4-1에서 섬유의 체적비(V_f)와 브레이드된 섬유의 방향 또는 브레이드 각(θ)을 두 가지의 변수로 하여 브레이드 FRP 리바의 분석을 실시하면 변수들은 브레이딩 과정상의 제조변수들과 밀접한 관계가 있다.^{86, 87)} Fig. 4-1에서 재료 특성

(material property)은 사용된 섬유의 특성을 말하며 결정된 섬유를 가지고 섬유실을 제조하게 되는데 이때 제조과정에서 발생하는 특성(fiber and yarn packing)으로는 기하학적 변수인 섬유실의 꼬인각(twisting effect)과 굴곡각(crimped effect)이 결정 적용된다. 마지막으로 브레이딩과정(braid helix angle)에서 브레이딩 각을 결정하여 슬리브를 구성하는 섬유의 특성을 결정하게 된다. 브레이딩 과정의 지배방정식은 1989년 Ko 등에 의해서 자세히 설명되었는데 예를 들어 브레이딩 FRP 리바에서 섬유의 체적비 V_f 는 브레이딩 각 θ 와 밀접한 관계가 있으며 식 4-2와 같이 표현할 수 있다.^{11), 112)}

$$V_f = K + \frac{2\omega^2 \cos^2 \theta}{x^2} \dots \dots \dots (4-2)$$

여기서, 지배계수 K 는 섬유에 의해서 지배되는 마찰면적이며 ω 와 χ 는 각각 Fig. 4-2에서 나타내는 브레이드 조직의 폭 및 길이라고 하였다. 브레이딩 외면과 제조속도는 FRP 리바 결합구조의 기하학적인 변수에 관계된 제조변수이다.

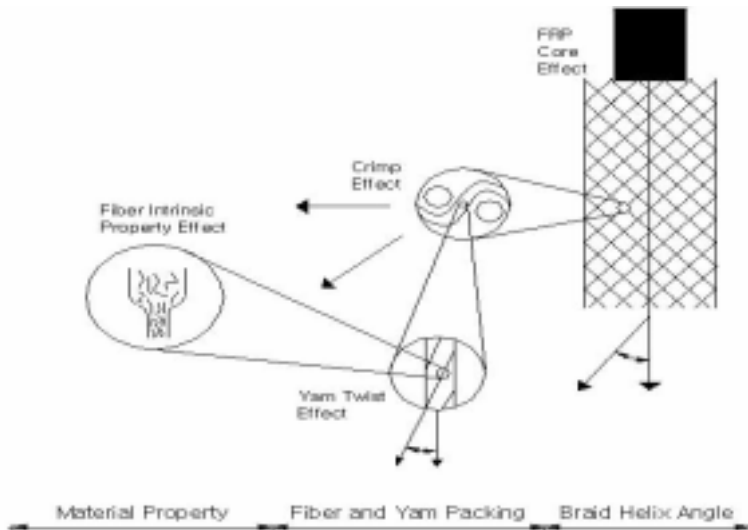


Fig. 4-1 Structural hierarchy of fibrous assemblies^{11), 112)}

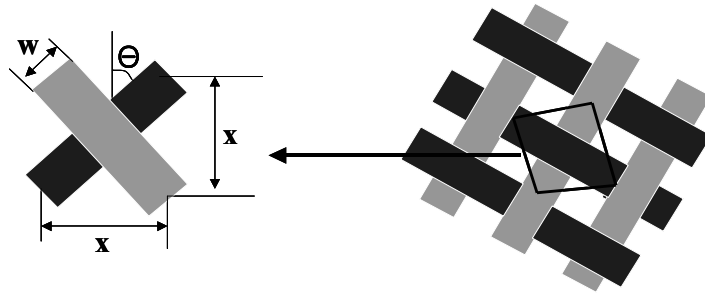


Fig. 4-2 Geometry of 1/1 braid^{111, 112)}

예를 들어 관처럼 생긴 브레이드 리바를 길이 l 을 따라 절단한다면 넓이 $N \cdot x$ 에 길이 l 을 곱한 면적은 직사각형 면적이 된다. 여기서, N 은 브레이딩 기계 중 운반기(carrier)의 수이며 x 는 단위 조직의 폭이다. 브레이드의 폭 Nx 는 코아 FRP 리바의 원주 $2\pi R_c$ 와 같으며 여기서 R_c 는 코아 FRP 리바의 반경이다. x 를 풀기 위한 식은 4-3과 같다.^{111, 112)}

$$x = \frac{2\pi R_c}{N} \dots \dots \dots (4-3)$$

식 4-3에 x 를 대입하여 브레이딩 각 θ 에 대하여 계산하면 식 4-4와 같다.^{111, 112)}

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{1 + \sqrt{1 - kNw}}{2\pi KR_c} \right) \dots \dots \dots (4-4)$$

생산속도는 압출속도와 회전속도의 두 가지 공정으로 표현될 수 있다. 두 생산속도의 비는 서로 다른 브레이딩 각 θ 를 결정한다. 한 브레이드에서 다른 브레이드까지 섬유 방향은 식 4-5와 같다.^{111, 112)}

여기서 D_n 은 데니어(denier)라 불리는 것으로 gm(섬유실의 중량)/9,000m(길이)로 정의하며 T =섬유실의 꼬임(twist)으로 꼬인 수/길이(1/cm)이다. 1937년 Peirce는 모노필라멘트의 거동을 예측하는 모델을 개발하였다.¹³⁹⁾ 그는 7개의 방정식에 사용되는 11가지의 필수적인 변수에 대하여 설명하였으며 7개의 방정식을 풀기 위해서는 4가지의 성질을 물리적으로 얻어야 한다고 하였다. 브레이드 구조는 섬유실의 웹(wrap)방향과 감는(filling)방향이 동일한 치수와 간격, 굴곡을 가지므로 Peirce's의 식은 6개의 미지수를 가진 4개의 방정식으로 줄일 수 있다고 하였으며 그 식은 4-10~4-13과 같다.¹³⁹⁾

$$C = L/P - 1 \dots \dots \dots (4-10)$$

$$P = (L - D\beta) \cos(\beta) + D \sin(\beta) \dots \dots \dots (4-11)$$

$$h = (L - D\beta) \sin(\beta) + D[1 - \cos(\beta)] \dots \dots \dots (4-12)$$

$$D = 2h \dots \dots \dots (4-13)$$

여기서, L 은 연속적인 단면적을 가지고 축방향에 포함되어 있는 섬유실의 길이; P 는 섬유실사이의 공간; D 는 웹방향과 감는 방향에 있는 총 섬유실의 직경; h 는 일방향으로 배열된 섬유실의 수직축 최대 변위이다. 웹방향의 섬유실 및 감는 섬유실은 동일한 치수를 가지고 있으며 섬유실의 총 직경은 브레이딩 섬유실의 직경의 두 배이다. 따라서 식 4-11, 4-12 및 4-13은 D 를 $2d$ 로 치환할 수 있으며 이식을 풀면 미지수는 L 과 β 에 관한 식 4-14 및 4-15로 나타낼 수 있다.¹³⁹⁾

$$\beta = 2 \arctan \left[\frac{1}{3} \frac{P \pm \sqrt{P^2 - 3d^2}}{d} \right] \dots \dots \dots (4-14)$$

$$L = d \frac{[-1 + 4 \sin(2 \arctan(\beta))^2 + \cos(2 \arctan(\beta))]}{\sin(2 \arctan(\beta))} \dots \dots \dots (4-15)$$

d 와 P 는 브레이드의 기하학적인 특성으로 쉽게 측정할 수 있으며 섬유실의 꼬인 구조에서 섬유실의 변형 ϵ_f 와 섬유실의 변형 ϵ_y 는 1950년 Platt에 의해서 식 4-16

과 같이 표현되었다.^{142, 143)}

$$\varepsilon_f = \varepsilon_y \cos^2(\phi) \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (4-16)$$

여기서, ϕ 는 반경 R 에서의 꼬인 각이다. 섬유의 반경 r 이 0인 중앙에서 ϕ 는 0이며 섬유의 반경 $r=R$ 인 외부표면에서 ϕ 는 α 와 같다. 섬유의 탄성계수 E_f 와 섬유의 탄성계수 E_y 의 관계는 1969년 Hearles 등에 의해 식 4-17과 같이 표현되었다.⁹⁴⁾

$$E_y = E_f \cos^2(\alpha) \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (4-17)$$

식 4-16과 4-17의 재료는 Hooke's의 법칙을 따르고 작은 변형만이 발생하며 단지 인장력만 작용하고 어떠한 섬유의 횡방향의 수축이 존재하지 않는다는 가정을 기본으로 하였다. 이와 같은 식은 섬유의 특성과 섬유의 기하학적인 특성을 알고있다면 꼬인(twist) 섬유의 거동을 예측할 수 있다. 예측된 결과는 많은 연구결과에서 실제 실험결과와 거의 동일한 결과를 보여주었다. 일반적으로 섬유의 꼬인(twisting) 효과는 섬유의 탄성계수 및 인장강도에 영향을 미치는데 꼬인 효과가 클수록 극한변형은 증가하고 이에 반해 탄성계수와 인장강도는 감소하여 강성은 더욱더 낮아진다.

3. 섬유의 배열 차이에 따른 비표면적의 영향

섬유(yarn)의 반경 측정은 대부분의 섬유가 근본적으로 연성이 강하고 다짐밀도(packing density)가 차이가나 섬유의 반경을 측정하기보다는 선형밀도(linear density, 체적/단위길이)를 사용하여 측정하고 있다. 1테니어(denier)는 1g/9000m로 정의한다. 예를 들어 1,140테니어는 1.14kg/9km를 의미한다. 한 개의 탄소섬유는 약 2,000개의 섬유로 구성되어 있다. 직선 섬유(straight yarn)의 단면적을 계산하기 위해서 섬유의 테니어를 이에 일치하는 비밀도(specific density, mass/unit volume)로 나누어 Table 4-1과 같이 비 면적(specific area)을

구한다. 만약 모노필라멘트섬유가 일정한 단면적을 가지고 있다면 섬유실의 단면적은 섬유실을 구성하는 섬유의 수와 모노필라멘트섬유의 면적을 곱하여 계산할 수 있다. Table 4-1의 꼬인 섬유실(twist yarns), 뜬 섬유실(woven yarn), 브레이딩 섬유실(braiding yarn)의 단면적은 섬유의 길이방향과 섬유실의 길이 방향 변화의 기하학적 관계를 사용하여 계산할 수 있다. 하이브리드 FRP 리바와 같은 복잡한 구조를 갖는 복합체는 하이브리드 효과에 따른 꼬기 각(twisting angle), 굴곡 각(crimp angle), 브레이딩 각(braiding angle)을 고려하여 매트릭스 수지를 함침한 단면적으로 Table 4-2와 같이 계산할 수 있다.

Table 4-1 Specific area calculation of unimpregnated fibers⁸⁹⁾

Yarn configuration	Specific area in fiber longitudinal direction		Equals to
	Description	Notation	
Fiber	Fiber area	A_f	Monofilament area
Yarn	Specific yarn area	A_{sp}	Denier/(9×10 ⁵ ×ρ), ρ: gm/cm ³
Twist yarn	Specific twist area	A_{\parallel}	$A_{sp}/\cos\alpha$
Woven	Specific crimp area	A_{\parallel}	$A_{sp}/(\cos\alpha \cos\beta) \times \{(1 - (\sin^2\beta)/4)\}$
Braid	Specific braid area	A_{\parallel}	$A_{sp}/(\cos\alpha \cos\beta \cos\theta) \times \{(1 - (\sin^2\beta)/4)\}$

Table 4-2 Specific area calculation of impregnated fibers⁸⁹⁾

Yarn configuration	Specific area in fiber longitudinal direction		Equals to
	Description	Notation	
Fiber	Fiber area	A_f	-
Yarn	FRP specific yarn area	A_{sp}	$A_{sp}/(1-V_m)$
Twist yarn	FRP specific twist area	A_{\parallel}	$A_{\parallel}/(1-V_m)$
Woven	FRP specific crimp area	A_{\parallel}	$A_{\parallel}/(1-V_m)$
Braid	FRP specific braid area	A_{\parallel}	$A_{\parallel}/(1-V_m)$

4. 혼합법칙(Rule of mixtures)

일반적으로 혼합법칙은 하이브리드 FRP 리바의 역학적 특성을 예측하는데 사용할 수 있으며 다음과 같은 식 4-18로 표현할 수 있다.⁹⁵⁾

$$X_c = X_r V_r + X_f V_f \dots \dots \dots (4-18)$$

여기서, X_c, X_r, X_f 는 각각 FRP 리바, 폴리머 수지, 섬유의 탄성계수(E), 인장강도(f_y)와 같은 특성을 나타내며, V_c, V_r, V_f 는 각각 FRP 리바, 폴리머 수지, 섬유의 체적이다. 또한 $V_f = V_{f1}/V_c$, $V_r = V_r/V_c$, $V_f + V_r = 1$ 이다. 혼합법칙의 가정은 섬유와 매트릭스가 모두 선형적인 거동을 하며, 섬유와 매트릭스는 완벽한 부착을 한다는 것을 기본으로 한 것이다. 혼합법칙은 기존의 많은 연구결과나 실험결과를 비교하여 약 98~99%의 신뢰성을 갖는다고 Hull은 주장하였다.⁹⁵⁾

제 3절 하이브리드 FRP 리바의 설계

1. 개요

본 절에서는 하이브리드 FRP 리바를 설계한 이론적 고찰을 토대로 하여 최적의 성능을 발휘할 수 있는 재료 결정과 재료 및 기하학적 하이브리드 모델을 적용하기 위한 변수를 결정하였다. 하이브리드 FRP 리바의 설계는 현재 사용되고 있는 보강철근과 비교하여 거의 동일한 거동을 하는 하이브리드 FRP 리바를 제조하여 콘크리트 구조물에 적용·구조물의 안전성을 향상시키기 위한 것이다. 본 연구에서는 이를 위하여 Fig. 4-3과 같은 기본적인 과정을 통하여 3% 이상의 변형률과 소성변형 구간을 갖는 FRP 리바를 설계하였다.

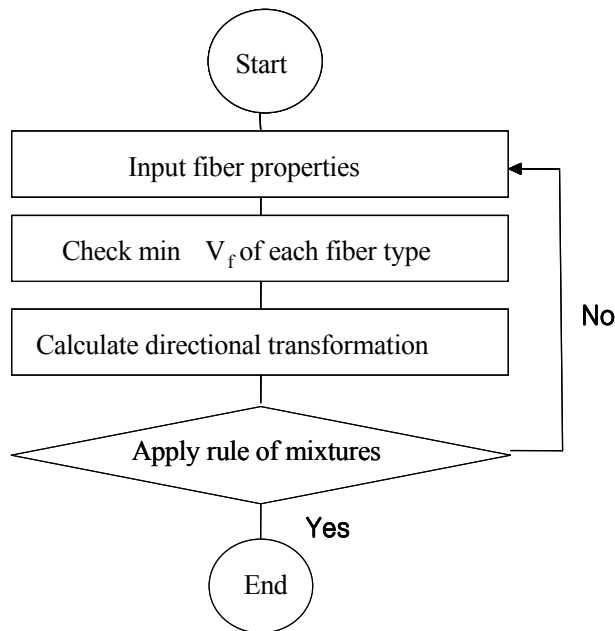


Fig 4-3 Logic flow of integrated design for manufacture

2. 하이브리드 FRP 리바의 변수 결정

가. 재료의 결정

FRP 리바에서 중요한 특성은 강도(strength), 강성(stiffness)과 치수안정성(dimensional stability)이다.^{3,4,133,185)} FRP 리바를 콘크리트 구조물에 적용시키기 위하여 구조물에 요구되는 조건에 맞게 적절한 설계를 실시하여 사용해야 한다. 예를 들어 유리섬유는 알칼리환경과 수분환경 및 내화학성이 매우 약하지만 섬유의 인성은 우수하다.^{35,133,185)} 탄소섬유는 높은 강성과 강도 내화학성이 매우 우수하지만 섬유의 인성은 매우 작은 취성적 성질을 가지며 충격저항성 또한 매우 작다. 아라미드섬유는 탄소섬유에 비하여 강하지 않지만 유리섬유보다는 강하다.^{3,4,133,122,185)} 또한 아라미드섬유는 탄성계수가 탄소섬유보다 작고 유리섬유와 거의 비슷하며 인성은 유리섬유보다 크다. 이와 같이 각 섬유의 특성은 어느 정도 차이가 있다. 따라서 본 연구에서 도출하려는 하이브리드 FRP 리바를 생산하기 위한 섬유의 선택은 이와 같은 모든 특성을 고려하여야 한다. 섬유의 강도, 강성, 치수 안정성 및 내구성과 더불어 고려되어야 할 사항은 전기전도성, 열팽창계수, 용융온도, 자외선에 대한 저항성, 경제성 등이 있다. 본 연구에서는 이와 같은 모든 특성을 고려하여 현재 FRP 리바의 제조에 가장 널리 사용되고 있는 탄소, 아라미드, 유리섬유를 선택하였다. 탄소섬유와 아라미드섬유는 탄성계수가 크고 동적 및 정적 피로에 대한 저항성이 우수하다고 알려져 왔다. 본 연구에서는 아라미드 섬유로 일본의 Teijin사의 technora섬유를 사용하였다. Technora섬유는 현저한 넥킹(necking)현상 후에 최종적으로 파괴가 발생하는 인성파괴의 경향을 보여준다. 탄소섬유는 피치(Pitch)탄소섬유를 사용하였다. 탄소섬유는 수분 및 외부환경 등에 노출되었을 때 거의 영향을 받지 않는 내구성이 우수한 재료이며 피로저항성 또한 우수하다. 유리섬유는 E-유리섬유를 사용하였다. E-유리섬유는 현재 FRP 리바의 제조에 가장 널리 사용되는 섬유이다. 그러나 알칼리 환경 및 내화학성이 매우 약한 것으로 알려져 왔다. 그러나 결합재료로 사용되는 폴리머 수지 등으로 섬유를 코팅하는 방법을 사용하면 외부 환경에 대한 저항성을 높일 수 있다. Nanni 등은 서로 다른 2가지 종류의 폴리머 수지로 결합된 GFRP 리바에

대한 내구성에 대한 연구를 실시하였다.¹³¹⁾ 2가지 종류의 폴리머 매트릭스는 폴리에스터 수지와 비닐에스터 수지였다. 시험결과 FRP 리바의 파괴는 폴리머 매트릭스의 흡수능력에 따라 크게 영향을 받는다고 하였다. 즉 폴리머 매트릭스의 미소균열의 발생으로 인한 체적의 팽창이 FRP 리바의 성능을 감소시킨다는 것이다.¹³¹⁾ 폴리에스터 수지는 알칼리 용액 및 수분 등의 흡수 등으로 인한 체적의 팽창이 현저한 것으로 나타났으며 비닐에스터 수지는 체적의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다.¹³¹⁾ 이와 같은 결과로 볼 때 비닐에스터 수지가 내구성이 매우 우수한 것으로 나타나 본 연구에서도 폴리머 매트릭스로 비닐에스터 수지를 사용하였다. 본 연구에서 사용된 섬유 및 매트릭스 수지의 특성은 Table 4-3과 같다.

Table 4-3 Mechanical properties of fiber and resin used in parametric studies

Mechanical properties	Matrix (Vinylester)	Fiber types		
		E-glass	Aramid	Carbon
Yield stress(MPa)	90	189	3100	3500
Elastic modulus(GPa)	3.4	71	77	244
Ultimate strain(%)	5.2	2.64	4.6	1.2
Fiber density(gm/cm ³)	-	2.62	1.39	2.0
Fiber diameter(10 ⁻⁶ m)	-	16.5	12	10

나. 코어 FRP 리바 및 슬리브를 구성하는 섬유의 결정

하이브리드 FRP 리바에서 코어를 구성하는 FRP리바에 사용되는 섬유는 하이브리드 FRP 리바의 전체적인 탄성계수에 영향을 미치고 슬리브로 사용되는 섬유는 FRP 리바의 극한변형률에 영향을 미친다. Fig. 4-4는 슬리브를 구성하는 섬유를 아라미드섬유로 하고 굴곡각 10°, 브레이딩각 25°로 하였을 때 코어 FRP 리바를 구성하는 섬유가 하이브리드 FRP 리바의 탄성계수에 미치는 영향을 나타내고 있다. 이때 탄성계수와 극한변형률은 슬리브를 구성하는 섬유의 특성을 기하학적 하이브리드 모델(식 4-7~4-17)을 통하여 결정한 후 식 4-18의 혼합법칙을 사용하여 결정하였다. 탄성계수가 2.44×10^5 MPa인 탄소섬유를 사용하였을 때

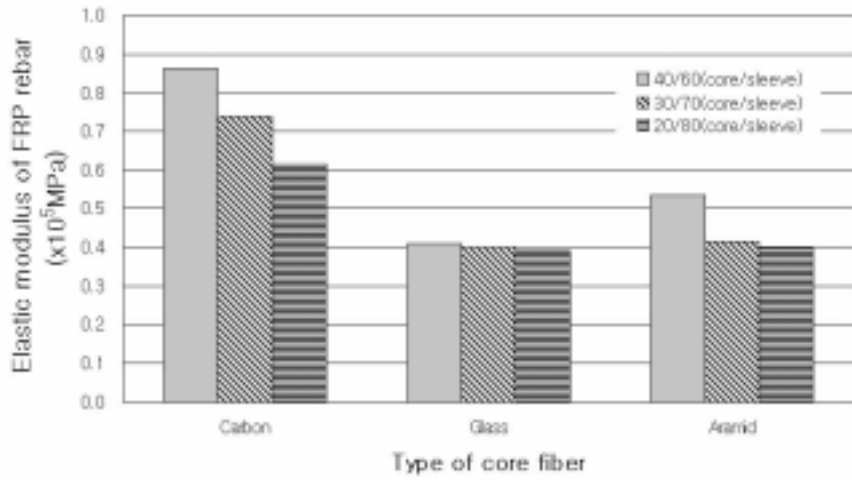
FRP 리바의 탄성계수는 아라미드섬유($0.77 \times 10^5 \text{MPa}$), 유리섬유($0.75 \times 10^5 \text{MPa}$)를 사용하였을 때 보다 크며 탄소섬유의 체적비가 증가할수록 탄성계수는 증가하고 변형률은 감소함을 알 수 있다. 따라서 하이브리드 FRP 리바의 탄성계수를 증가시키려면 코어를 구성하는 FRP 리바에 사용되는 섬유의 탄성계수를 증가시키고 극한변형률을 증가시키려면 슬리브로 사용되는 섬유의 극한변형률을 증가시키면 된다. 본 연구에서는 이와 같은 특성을 고려하여 하이브리드 FRP 리바의 코어 FRP 리바를 구성하는 섬유로 탄소섬유를 슬리브를 구성하는 섬유로 아라미드섬유 및 유리섬유를 선택하였다.

다. 슬리브로 사용되는 섬유의 한계 체적비 결정

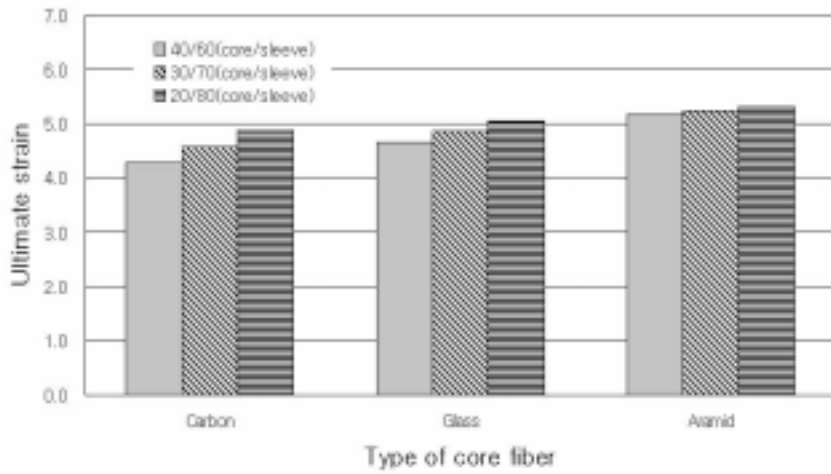
코어 FRP 리바가 파괴된 후 재하 되는 하중은 슬리브를 구성하는 섬유가 저항하여야 한다. 따라서 슬리브를 구성하는데 사용될 섬유와의 한계체적비는 4-1식에 따라 결정하여야 한다. Fig. 4-5는 코어 FRP 리바를 구성하는 섬유를 탄소섬유로 하였을 때 슬리브를 구성하는 섬유의 체적비의 변화에 따른 탄성계수 및 극한변형률의 비를 나타낸 것이다. 슬리브를 구성하는 섬유의 탄성계수 및 변형률은 식 4-7~4-17에 따라 결정하였으며 이를 이용하여 식 2-18의 혼합규칙을 적용하여 하이브리드 FRP 리바의 특성을 결정하였다. 이때 탄소+아라미드+유리섬유를 혼합한 하이브리드 FRP 리바는 슬리브로 사용되는 섬유를 아라미드섬유와 유리섬유를 동시에 고려하였다. 결정된 특성과 한계체적비를 통하여 코어를 구성하는 FRP 리바에 사용된 섬유와 슬리브를 구성하는 섬유의 혼합비는 Table 4-4와 같이 결정하였다.

Table 4-4 Mix proportion of hybrid FRP rebars

Type of FRP rebars	Carbon	Glass	Aramid
Hybrid(A)	27	-	73
Hybrid(B)	19	81	-
Hybrid(C)	13.6	34.6	51.8

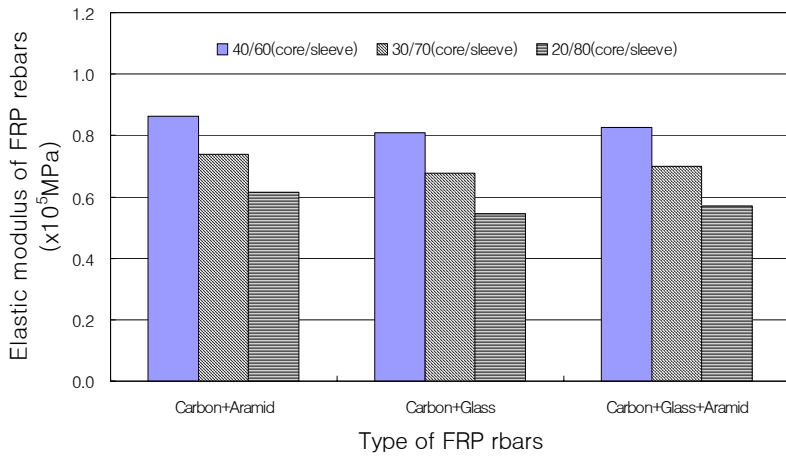


(a) Elastic modulus

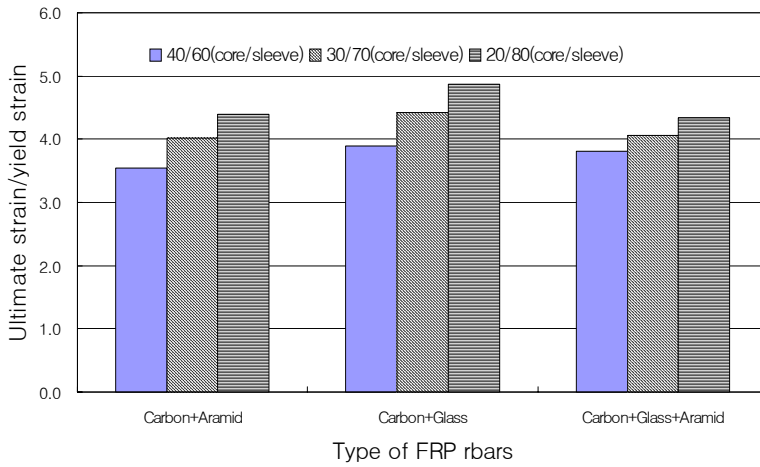


(b) Ultimate strain

Fig. 4-4 Effect of the type of core fibers on properties of FRP rebar: (a) elastic modulus, (b) ultimate strain (sleeve fiber: aramid (crimped angle: 10° , braiding angle: 25°))



(a) Elastic modulus



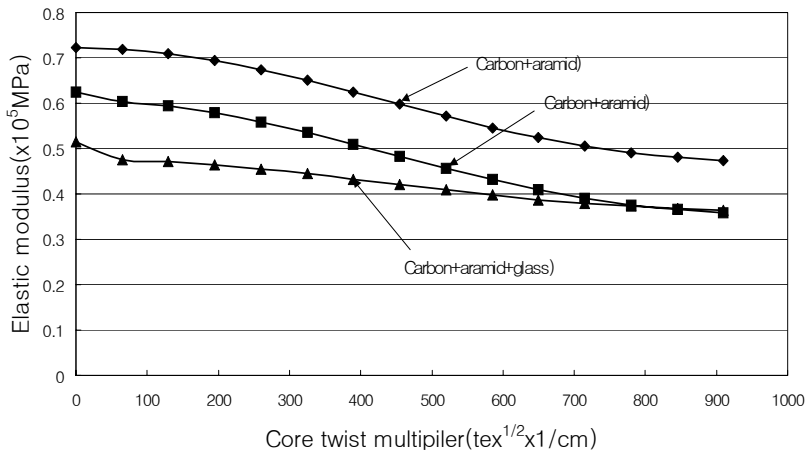
(b) Ultimate strain/yield strain

Fig. 4-5 Effect of the type of sleeve yarn on the properties of FRP rebars;
 (a) rebar modulus (b) ultimate strain/yield strain(core fiber: carbon,
 sleeve fiber: aramid(crimped angle 10°, barading agle 25°),
 glass(crimped angle 30°, braindig angle 25°))

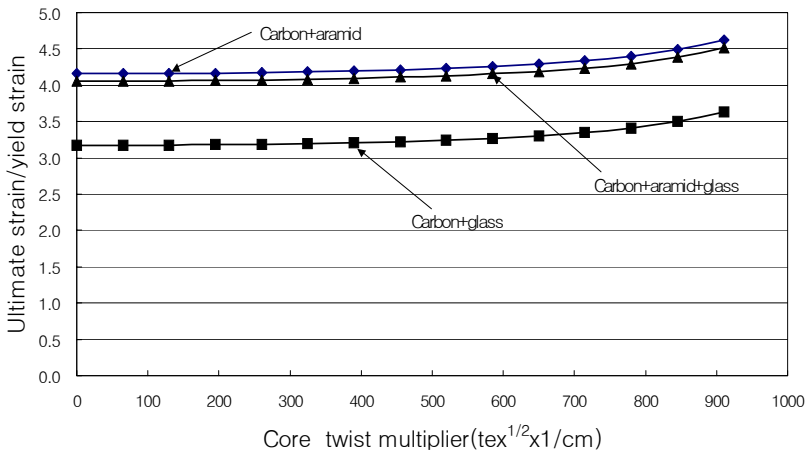
라. 코어 FRP 리바와 슬리브를 구성하는 섬유의 꼬기, 굴곡 및 브레이딩 각의 결정

섬유의 꼬기(twist), 굴곡(crimped), 브레이딩(braiding)의 효과는 코어 FRP 리바 및 슬리브를 구성하는 섬유에 동일한 영향을 미친다. 섬유의 꼬기, 굴곡, 브레이딩 각이 증가할수록 코어 FRP 리바 및 슬리브를 구성하는 섬유의 초기 탄성계수는 감소하고 항복 후 변형률은 증가시키는 효과가 있다. 본 연구에서는 하이브리드 FRP 리바의 꼬기 효과를 결정하기 위하여 하이브리드 FRP 리바에 적용되는 섬유의 특성을 탄소섬유는 굴곡각 및 브레이딩각을 모두 0° 로하고 아라미드 섬유의 경우 굴곡각과 브레이딩 각을 각각 10° , 25° 로 하였으며 유리섬유는 굴곡각과 브레이딩각이 각각 30° , 25° 로 하였을 때 식 4-7~4-17에 따라 구성재료의 특성을 결정하였으며 결정된 특성을 식 4-18의 혼합규칙을 적용하여 탄성계수 및 극한변형률을 결정하였다. 이때 코어 FRP 리바를 구성하는 섬유의 꼬기에 따른 효과는 Fig. 4-6에서와 같이 꼬기 효과가 증가할수록 탄성계수 및 극한변형률이 모두 감소한다. 따라서 본 연구에서는 코어 FRP 리바를 구성하는 섬유의 꼬기 효과 없이 직선으로 배치하여 코어 FRP 리바를 제조하였다. 슬리브를 구성하는 섬유의 꼬기 효과는 Fig. 4-7과 같이 꼬기 효과가 증가할수록 탄성계수는 감소하고 극한변형률은 증가하는 경향을 보여주었다. 또한 생산시스템의 특성상 섬유의 투입시 섬유를 압출성형하는 방법을 제외하고는 섬유를 어떠한 꼬임이 없이 투입하는 것은 매우 어렵다. 특히 브레이딩 장비를 이용한 FRP 리바의 생산시 3차원상으로 섬유를 공급하면서 제작하기 때문에 섬유의 비틀림에 의한 꼬기 효과를 방지하는 것은 거의 불가능하다. 본 연구에서는 FRP 리바의 변형률 증가효과를 슬리브를 구성하는 섬유의 굴곡과 브레이딩 각을 이용하였으며 꼬기 효과는 탄성계수를 증가시키기 위하여 최소화하였다. 따라서 슬리브를 구성하는 섬유의 꼬기 효과 T는 제조장비를 고려하여 최소로 할 수 있는 $10 \text{ tex}^{1/2} \times 1/\text{cm}$ 를 적용하였다. 꼬기효과 T의 단위는 1cm 당 섬유의 비틀림 수로 나타낼 수 있으며 $10 \text{ tex}^{1/2} \times 1/\text{cm}$ 는 1cm당 0.1번의 비틀림 수를 말한다. 슬리브를 구성하는 섬유의 굴곡각에 대한 효과를 알아보기 위하여 탄소섬유는 꼬기효과를 0 으로하고 유리섬유 및 아라미드섬유는 $10 \text{ tex}^{1/2} \times 1/\text{cm}$ 를 적용하였다. 또한 탄소섬유의 브레

이딩 각은 0, 유리섬유 및 아라미드섬유의 브레이딩각은 모두 25°로 식 4-7~4-17에 따라 섬유의 특성을 결정한 후 식 2-18의 혼합규칙을 적용하여 굴곡각의 변화에 따른 하이브리드 FRP 리바의 탄성계수 및 극한변형률/항복변형률의 비는 증가한다(Fig. 4-8). 슬리브를 구성하는 섬유의 브레이딩 과정에서 결정되는 굴곡각은 브레이딩 과정이 3차원 제직으로 이루어짐으로 최소한의 허용치는 발생할 수밖에 없다. 따라서 본 연구에서는 생산시스템에서 허용하는 굴곡각의 범위와 실제 하이브리드 FRP 리바가 요구하는 탄성계수와 3%의 변형률 및 소성변형구간의 확보를 고려하여 아라미드섬유는 10°로 결정하였으며 유리섬유는 30°로 결정하였다. 슬리브를 구성하는 섬유의 브레이딩 각에 따른 하이브리드 FRP 리바의 역학적 특성 변화는 브레이딩 각이 증가할수록 탄성계수는 감소하고 극한변형률/항복변형률의 비는 증가한다(Fig. 4-9). 이때 탄소섬유의 꼬기효과와 굴곡각을 0°로 하였고 아라미드섬유 및 유리섬유의 굴곡각은 각각 10°와 30°로 하여 브레이딩 각의 영향을 평가하였다. 또한 섬유의 특성은 식 4-7~4-17에 따라 결정하여 식 4-18의 혼합규칙을 적용하여 FRP 리바의 특성을 결정하였다. 브레이딩 과정에서 결정되는 브레이딩 각은 3차원 제조시스템을 사용함으로써 구조상 허용치가 존재한다. 본 연구에서는 이와 같은 기계적인 특성과 역학적 특성을 모두 고려하여 3%의 변형률과 소성변형구간을 확보하면서 탄성계수를 최대한으로 증가시킬 수 있는 브레이딩 각을 아라미드 및 유리섬유 모두 25°로 결정하였다.

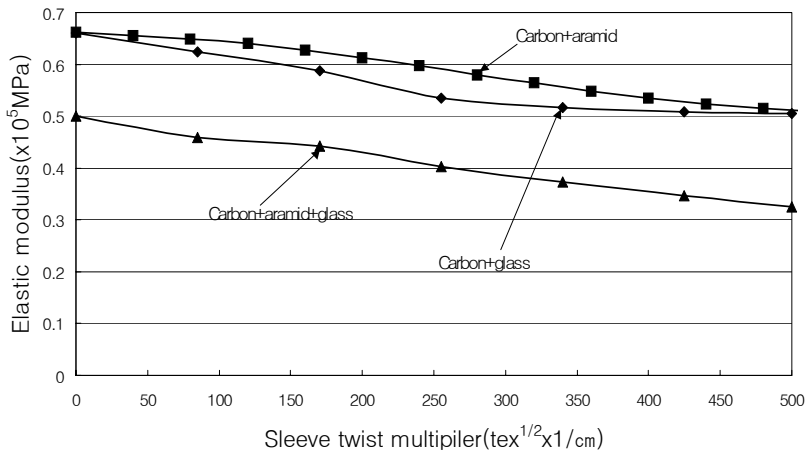


(a) Elastic modulus

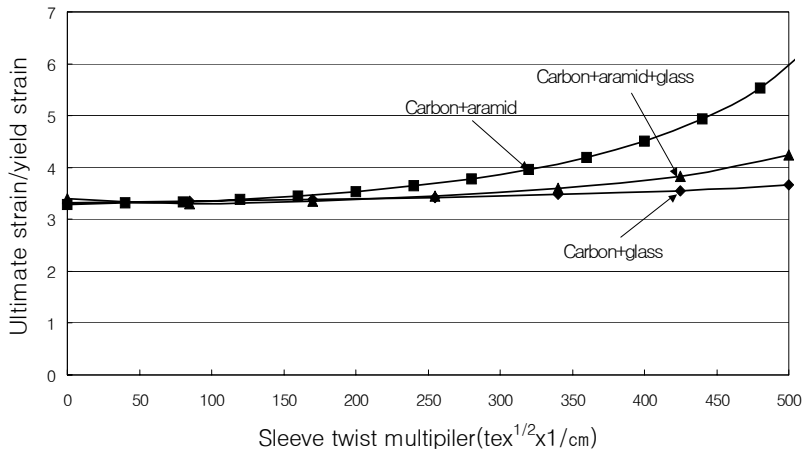


(b) Ultimate/ yield strain

Fig. 4-6 Effect of core yarn twist on (a) FRP rebar modulus and (b) ultimate/ yield strain (assume carbon fiber (braiding angle: 0°, crimped angle: 0°), aramid fiber (crimped angle: 10°, braiding angle: 25°), glass fiber (crimped angle: 30°, braiding angle: 25°))

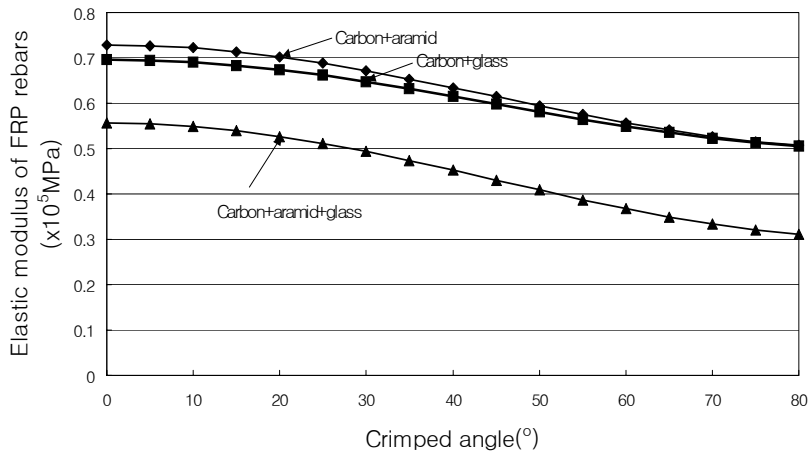


(a) Elastic modulus

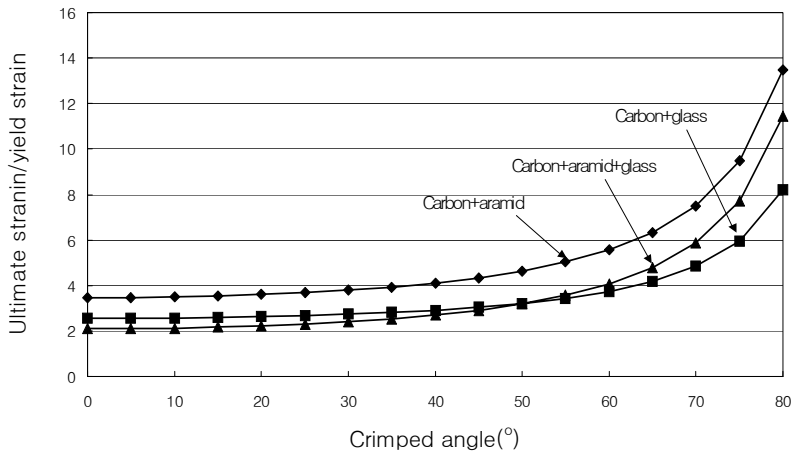


(b) Ultimate/yield strain

Fig. 4-7 Effect of sleeve yarn twist on (a) FRP rebar modulus and (b) ultimate/yield strain (assume carbon fiber (wisting effect: 0, braiding angle: 0°, crimped angle: 0°), aramid fiber (crimped angle: 10°, braiding angle: 25°), glass fiber (crimped angle: 30°, braiding angle: 25°))

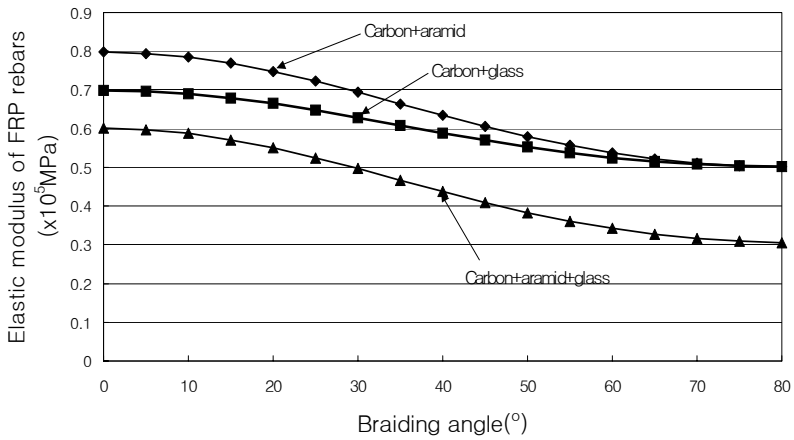


(a) Elastic modulus

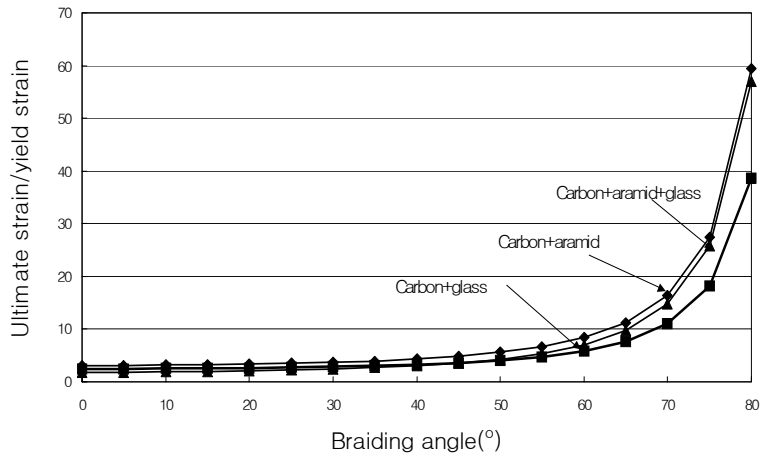


(b) Ultimate/ yield strain

Fig. 4-8 Effect of sleeve yarn crimped angle on (a) FRP rebar modulus (b) ultimate/ yield strain (assume carbon fiber (twisting effect: 0, braiding angle: 0°, crimped angle: 0°), aramid fiber (twisting effect: 10tex^{1/2} × 1/cm, braiding angle: 25°), glass fiber (twisting effect: 10tex^{1/2} × 1/cm, braiding angle: 25°))



(a) Elastic modulus



(b) Ultimate/yield strain

Fig. 4-9 Effect of sleeve yarn braiding angle on (a) FRP rebar modulus (b) ultimate/yield strain (assume carbon fiber (twisting effect: 0, braiding angle: 0°, crimped angle: 0°), aramid fiber (twisting effect: 10tex^{1/2}×1/cm, crimped angle: 10°), glass fiber (twisting effect: 10tex^{1/2}×1/cm, crimped angle: 30°))

3. 코어 FRP 리바 및 슬리브를 구성하는 섬유 물리·역학적 특성 결정

코어 FRP 리바 및 슬리브를 구성하는 섬유의 물리·역학적 특성은 꼬기, 굽곡 및 브레이딩 과정의 기하학적 과정에 의하여 변화하게 된다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 변수에 대한 영향을 평가하고 적정 재료 변수 및 기하학적 변수를 이론적 고찰을 통하여 결정하였다. 결정된 재료변수 및 기하학적 입력변수를 요약하면 Table 4-5와 같다.

Table 4-5 Input parameter for tensile prediction program

Structural level	Mechanical properties	Hybrid FRP Rebar									
		Carbon+Aramid			Carbon+Glass			Carbon+Glass+Aramid			
		Braiding	Core	Matrix	Braiding	Core	Matrix	Braiding	Core	Matrix	
Fibers	Materials	Aramid	Carbon	Vinyl ester	Glass	Carbon	Vinyl ester	Aramid	Glass	Carbon	Vinyl ester
	Elastic modulus (MPa)	0.77×10^5	2.44×10^5	0.034×10^5	0.75×10^5	2.44×10^5	0.034×10^5	0.77×10^5	0.75×10^5	2.44×10^5	0.034×10^5
	Straight yarn strain (%)	460	1.21	400	264	1.21	400	460	264	1.21	400
	Fiber density (g/cm ³)	1.39	2.00	-	2.62	2.00	-	1.39	2.62	2.00	-
	Fiber diameter (10 ⁻⁶ m)	12.0	10.0	-	16.5	10.0	-	12.0	16.5	10.0	-
Yarns	Yarn twist (1/cm)	0.1	-	-	0.1	-	-	0.1	0.1	-	-
	No. of yarns	96	24	-	96	24	-	96	16	8	-
Woven	Crimp angle (°)	10	-	-	30	-	-	10	30	-	-
Braid	Braiding angle (°)	25	-	-	25	-	-	25	25	-	-
	Yarn carriers	24	16	-	33	7	-	23	12	5	-
Composite	Fiber volume fraction(%)	73	27	-	81	19	-	51.8	34.6	13.6	-

가. 코어 FRP 리바 및 슬리브를 구성하는 섬유 비표면적 결정

코어 FRP 리바 및 슬리브를 구성하는 섬유의 비표면적 결정은 Table 4-1과 4-2에 따라 계산하였다. 섬유의 비표면적 결정을 위해서는 꼬인각 α 를 결정하여야 하는데 이는 꼬기효과 T 를 이용하여 식 4-19로 계산할 수 있다.

$$\alpha = \tan^{-1}(\pi \cdot D \cdot k \cdot T) \dots \dots \dots (4-19)$$

여기서, $\pi=3.14$, $D(\text{yarn diameter})$, $k=1-d/D$, $T=\text{yarn twist}$ 이다. 섬유실의 직경 D 는 식 4-20로 구할 수 있다.

$$D = \sqrt{4 \cdot \frac{A_{sp}}{\pi}} \dots \dots \dots (4-20)$$

여기서, A_{sp} (yarn specific area)는 섬유실의 비표면적으로 $Denier/\rho$ 이다.

본 연구에서는 코어 FRP 리바를 구성하는 탄소섬유는 T 값이 0이므로 α 값 역시 0을 적용하였고 유리섬유 및 아라미드섬유는 T 값이 0.1/cm으로 식 4-1식으로 계산하면 α 값은 Table 4-6과 같이 결정된다.

Table 4-6 Twisting angle of fiber yarns

	Carbon fiber	Glass fiber	Aramid fiber
Yarn twist, T(1/cm)	0.000	0.100	0.100
Yarn diameter, D(10^{-3} m)	7.006	0.807	2.052
K	0.995	0.998	0.985
Twist angle(°)	0.000	0.129	0.059

또한 섬유 소성변형률을 고려하여 굴곡각 β 값과 브레이딩각 θ 값은 탄소섬유에서는 모두 0° 로 하였으며 유리섬유에서는 각각 30° 와 25° , 아라미드섬유에서는 각각 10° 와 25° 를 적용하였다. 이와 같은 변수를 적용하여 섬유의 비표면적은 Table 4-1 폴리머 매트릭스를 함침함 섬유의 비표면적은 Table 4-2를 사용하여 계산하였으며 그 결과는 Table 4-7 및 Table 4-8과 같다.

Table 4-7 Specific area of unimpregnated fibers

Yarn configuration	Specific area in fiber longitudinal direction	Fiber types		
		E-glass	Aramid	Carbon
Yarn	Specific yarn area (A_{sp})	0.011	0.001	0.003
Twist yarn	Specific twist area ($A_{\#}$)	0.011	0.001	-
Woven	Specific crimp area ($A_{\#}$)	0.002	0.001	-
Braid	Specific braid area ($A_{\#}$)	0.003	0.001	-

Table 4-8 Specific area of impregnated fibers

Yarn configuration	Specific area in fiber longitudinal direction	Fiber types		
		E-glass	Aramid	Carbon
Yarn	Specific yarn area (A_{sp})	0.015	0.002	0.004
Twist yarn	Specific twist area ($A_{\#}$)	0.015	0.002	-
Woven	Specific crimp area ($A_{\#}$)	0.003	0.001	-
Braid	Specific braid area ($A_{\#}$)	0.004	0.001	-

나. 섬유와 섬유실의 비체적 및 packing factor 결정

본 연구에서는 섬유 및 섬유실의 비체적 및 packing factor을 결정하기 위하여 각각 $v_f = 1/\rho$, $v_y = \tan(\alpha)^2 / 4\pi \cdot \text{Denier}T^2$, 및 $\Phi = v_f/v_y$ 를 사용하여 값을 결정하였으며 그 결과는 Table 4-9와 같다.

Table 4-9 Specific volume of fiber and fiber yarns and packing factor

	Carbon fiber	Glass fiber	Aramid fiber
Specific volume of fiber (v_f)	0.500	0.382	0.719
Specific volume of yarns (v_y)	0.000	0.400	0.738
packing factor (Φ)	-	0.954	0.974

다. 꼬인 섬유실, 뜬 섬유실, 브레이딩 섬유실의 변형률 결정

본 연구에서 하이브리드 FRP 리바를 개발하기 위하여 사용한 탄소섬유, 유리섬유 및 아라미드섬유에 기하학적 변수인 꼬인각, 굴곡각, 브레이딩각을 적용한 꼬인 섬유실, 뜬 섬유실 및 브레이딩 섬유실의 변형률을 결정하기 위하여 각각 $\epsilon_y = \epsilon_f / \cos(\alpha \cdot \text{deg})^2$, $\epsilon_\theta = \epsilon_y / \cos(\beta \cdot \text{deg})^2$ 및 $\epsilon_b = \epsilon_\theta / \cos(\theta \cdot \text{deg})^2$ 를 사용하여 계산하였으며 그 결과는 Table 4-10과 같다.

Table 4-10 Strain of fiber, fiber yarn, woven yarn and braided yarn

	Carbon fiber	Glass fiber	Aramid fiber
Straight yarn(%)	1.210	2.640	4.600
Twist Yarn(%)	-	2.640	4.600
Woven yarn(%)	-	3.049	4.671
Braided yarn(%)	-	3.711	4.707

라. 꼬인 섬유실, 뜬 섬유실, 브레이딩 섬유실의 인장력 결정

탄소섬유, 유리섬유 및 아라미드섬유에 기하학적 변수인 꼬인각, 굴곡각, 브레이딩각을 적용한 꼬인 섬유실, 뜬 섬유실 및 브레이딩 섬유실의 인장력을 결정하기 위하여 각각 $P_y = A_{sp} \cdot E_f \cdot \epsilon_y \cdot \Phi \cdot \cos(\alpha \cdot \text{deg})^2$, $P_\phi = P_y \cdot \cos(\beta \cdot \text{deg})$ 및 $P_b = P_\phi \cdot \cos(\theta \cdot \text{deg})$ 를 사용하여 계산하였으며 그 결과는 Table 4-11과 같다.

Table 4-11 Tensile force of fiber yarn, woven yarn and braided yarn

	Carbon fiber	Glass fiber	Aramid fiber
Twist Yarn(KN)	-	808.920	308.607
Woven yarn(KN)	-	700.526	303.919
Braided yarn(KN)	-	634.887	275.441

마. 꼬인 섬유실, 뜬 섬유실, 브레이딩 섬유실의 탄성계수 결정

본 연구에서 사용한 탄소섬유, 유리섬유 및 아라미드섬유에 기하학적 변수인 꼬인각, 굴곡각, 브레이딩각을 적용한 꼬인 섬유실, 뜬 섬유실 및 브레이딩 섬유실의 탄성계수를 결정하기 위하여 각각 $E_y = P_y / (A_{sp} \cdot \epsilon_y)$, $E_\phi = P_\phi / (A_{sp} \cdot \epsilon_\phi)$ 및 $E_b = P_b / (A_{sp} \cdot \epsilon_b)$ 를 사용하여 계산하였으며 그 결과는 Table 4-12와 같다.

Table 4-12 Elastic modulus of fiber yarn, woven yarn and braided yarn

	Carbon fiber	Glass fiber	Aramid fiber
Twist Yarn ($\times 10^5$ MPa)	-	0.716	0.721
Woven yarn ($\times 10^5$ MPa)	-	0.53674	0.6996
Braided yarn ($\times 10^5$ MPa)	-	0.399561	0.6292

바. 물리·역학적 특성 예측결과 요약

본 연구에서는 Table 4-5의 입력변수를 사용하여 재료 하이브리드 및 기하학적 하이브리드 모델을 이용하여 물리·역학적 특성을 예측하였으며 그 결과를 요약하면 Table 4-13과 같다.

사. 하이브리드 FRP 리바의 물리·역학적 특성 결정

코어 FRP 리바 및 슬리브를 구성하는 섬유역학적 특성을 Table 4-13과 같이 결정한 후 식 4-18의 혼합법칙을 이용하여 하이브리드 FRP 리바의 비표면적, 밀도 및 탄성계수를 결정하였으며 그 결과는 Table 4-14와 같다.

Table 4-13 Output of fiber and resin properties from prediction program

Structural level	Mechanical properties	Hybrid FRP Rebar									
		Carbon+Aramid			Carbon+Glass			Carbon+Glass+Aramid			
		Braiding	Core	Matrix	Braiding	Core	Matrix	Braiding		Core	Matrix
		Materials	Aramid	Carbon	Vinyl ester	Glass	Carbon	Vinyl ester	Aramid	Glass	Carbon
Fiber	Elastic modulus ($\times 10^5$ MPa)	0.77	2.44	0.034	0.75	2.44	0.034	0.77	0.75	2.44	0.034
	Straight yarn strain (%)	4.60	1.21	4.00	2.64	1.21	4.00	4.60	2.64	1.21	4.00
	Fiber density (g/cm ³)	1.39	2.00	-	2.62	2.00	-	1.39	2.62	2.00	-
Yarns	Specific yarn area(Asp; cm ²)	0.000344	0.003222	-	0.002627	0.003222	-	0.000344	0.002627	0.003222	-
	Yarn diameter(10 ⁻³ m)	2.0524	7.0064	-	0.8068	7.0064	-	2.0524	0.8068	7.0064	-
Twist yarns	Specific twist area (A _t ; cm ²)	0.00127	-	-	0.0110	-	-	0.00127	0.0110	-	-
	Constant	0.9851	-	-	0.9976	-	-	0.9851	0.9976	-	-
	Twist angle(°)	0.0592	-	-	0.1285	-	-	0.592	0.1285	-	-
	Specific vol of yarns (cm ³ /gram)	0.738	-	-	0.400	-	-	0.738	0.400	-	-
	Specific vol of fiber (cm ³ /gram)	0.719	-	-	0.382	-	-	0.719	0.382	-	-
	Packing factor	0.9743	-	-	0.9542	-	-	0.9743	0.9542	-	-
	Twist yarn strain(%)	4.6	-	-	2.64	-	-	4.6	2.64	-	-
	Twist yarn tension(KN)	308.60	-	-	808.92	-	-	308.60	808.92	-	-
Twist yarn elastic modulus($\times 10^5$ MPa)	0.721	-	-	0.716	-	-	0.721	0.716	-	-	
Woven yarn	Specific crimp area (A _{cr} ; cm ²)	0.000312	-	-	0.000238	-	-	0.000312	0.000238	-	-
	Woven yarn strain (%)	4.6711	-	-	3.0485	-	-	4.6711	3.0485	-	-
	Woven yarn tension(KN)	303.91	-	-	700.52	-	-	303.91	700.52	-	-
	Woven yarn modulus ($\times 10^5$ MPa)	0.6996	-	-	0.53674	-	-	0.6996	0.53674	-	-
Braided yarns	Specific braid area (A _b)	0.000344	-	-	0.00263	-	-	0.000344	0.00263	-	-
	Braiding yarn strain (%)	4.7068	-	-	3.7114	-	-	4.7068	3.7114	-	-
	Braided yarn tension(KN)	275.44	-	-	634.88	-	-	275.44	634.88	-	-
	Braiding elastic modulus ($\times 10^5$ MPa)	0.6292	-	-	0.399561	-	-	0.6292	0.399561	-	-

Table 4-14 Output of hybrid FRP rebar mechanical properties from prediction program

	Hybrid FRP Rebar												
	Carbon+Aramid				Carbon+Glass				Carbon+Glass+Aramid				
	Core	Braiding yarns	Matrix	Rebar	Core	Braiding yarns	Matrix	Rebar	Core	Braiding yarns	Matrix	Rebar	
Material	Carbon	Aramid	Vinyl ester	-	Carbon	Glass	Vinyl ester	-	Carbon	Glass	Aramid	Vinyl ester	-
Specific area (cm ²)	0.103	0.044	-	0.147	0.103	0.336	-	0.439	0.103	0.336	0.044	-	0.484
Fiber volume fraction (%)	27.0	73.0	-	-	19.0	81.0	-	-	13.6	34.6	51.8	-	-
Elastic modulus (×10 ³ MPa)	2.440	0.623	0.034	0.630	2.440	0.399	0.034	0.437	2.440	0.399	0.629	0.034	0.367

제 4절 요약 및 결론

본 장에서는 일반 및 하이브리드 FRP 리바를 설계하기 위하여 재료하이브리드 모델 및 기하학적 하이브리드 모델을 이용하였다. 재료 하이브리드 모델은 슬리브를 구성하는 변형률이 큰 섬유와 적은 섬유의 최적 혼입률을 결정하기 위하여 사용하였으며 기하학적 하이브리드 모델은 하이브리드 FRP 리바의 생산공정시 적용되는 변수를 결정하여 하이브리드 FRP 리바의 최적의 성능을 발휘하도록 하는데 이용하였다. 하이브리드 FRP 리바의 역학적 특성은 혼합규칙을 적용하여 결정하였다. 본 장의 내용을 요약하여 정리하면 다음과 같다.

1. 일반 CFRP 및 GFRP 리바의 섬유와 수지의 혼합비를 70:30으로 결정하였다.
2. 하이브리드 FRP 리바(A)는 탄소섬유와 아라미드섬유의 혼합비를 재료 하이브리드 모델을 이용하여 27:73으로 결정하였으며, 기하학적 하이브리드 모델을

적용하여 슬리브를 구성하는 아라미드섬유의 꼬인각, 브레이딩각 및 굴곡각을 각각 0.0592° , 10° 및 25° 로 결정하였다.

3. 하이브리드 FRP 리바(B)는 재료하이브리드 모델을 이용하여 탄소섬유와 유리섬유의 혼합비를 19:81로 결정하였으며, 유리섬유의 꼬인각, 브레굴곡각 및 브레이딩각을 기하학적 하이브리드 모델을 이용하여 각각 0.0592° , 30° 및 25° 로 결정하였다.
4. 하이브리드 FRP 리바(C)는 탄소섬유와 유리섬유 및 아라미드섬유를 사용한 리바으로서 탄소섬유를 코어 FRP 리바재료로 사용하였으며 유리섬유와 아라미드섬유를 슬리브를 구성하는 재료로 사용하였다. 이 세가지 섬유에 대한 혼합비는 재료하이브리드 모델을 이용하여 탄소섬유와 유리섬유 및 아라미드섬유의 혼합비를 13.6 : 34.6 : 51.8으로 결정하였으며, 슬리브를 구성하는 섬유의 꼬인각, 브레굴곡각 및 브레이딩각을 기하학적 하이브리드 모델을 이용하여 유리섬유에서는 각각 0.059° , 30° 및 25° 로 결정하였고 아라미드섬유는 각각 0.0592° , 10° 및 25° 로 결정하였다.
5. 재료하이브리드 모델과 기하학적 하이브리드 모델을 적용하여 결정한 변수를 이용하여 제조한 섬유의 역학적 특성을 혼합법칙을 이용하여 하이브리드 FRP 리바(A), (B) 및 (C)의 탄성계수는 각각 $0.630 \times 10^5 \text{MPa}$, $0.437 \times 10^5 \text{MPa}$ 및 $0.367 \times 10^5 \text{MPa}$ 이다.

제 5장 하이브리드 FRP 리바의 응력-변형률 예측 모델

제 1절 개요

하이브리드 FRP 리바의 이론적 모델은 서로 다른 변형률을 가진 섬유 중 높은 변형률을 가진 섬유의 최적 혼입률을 결정하여 원하는 연성을 갖는 응력-변형률을 확보하는 것을 기본으로 하였다. 즉, 인장응력 하에서 변형률이 작은 고탄성계수를 가진 섬유의 파괴 후 변형률이 큰 저탄성계수의 섬유가 파괴되지 않고 소성변형을 발생시키게 된다. 이는 하이브리드 FRP 리바의 초기 파괴후의 거동은 저탄성 계수의 섬유가 지배하며 소성변형 구간은 저탄성계수가 갖는 변형률에 의하여 결정되기 때문이다.^{27,81,88,89,161,162,165,166)}

제 2절 기존 응력-변형률 예측 모델

1. Averston과 Kelly의 모델

1980년 Averston과 Kelly는 일방향으로 배열된 FRP 리바의 이상적인 응력-변형률 곡선은 Fig. 5-1의 OABC와 같다고 하였다.²⁴⁾ f_{LU} , f_{HU} , f'_H (여기서 LU : 낮은 변형률, HU:높은 변형률)는 각각 LU섬유의 극한 강도, HU섬유의 극한강도, LU섬유가 파괴되었을 때 HU섬유의 인장강도이다. 또한 이 곡선에서 HU섬유의 응력-변형률 관계는 OD와 같은 직선적인 관계를 보여준다. Fig. 5-1에서 각 α 는 $E_L V_L / E_H V_H$ 로 표현할 수 있으며 E와 V는 섬유의 탄성계수 및 섬유 혼입률이다. L과 H는 낮은 변형률 및 높은 변형률을 갖는 섬유를 의미한다. 변형률 δl 은 낮은 변형률 및 높은 변형률 섬유 사이의 계면면적과 분산율이 증가할수록 감소한다. 그리고 E_c 는 하이브리드 FRP 리바의 초기탄성계수로 혼합법칙에 의해서 결정된다.

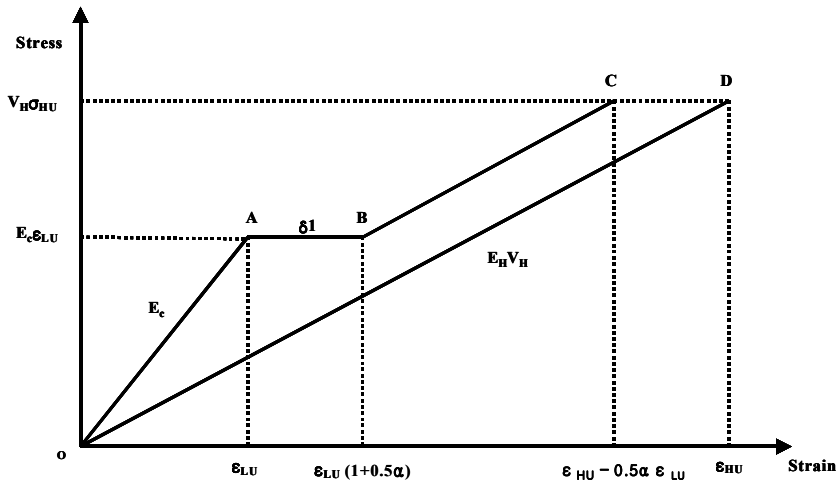


Fig. 5-1 Idealized stress-strain curve for hybrid FRP rebar²⁴⁾

2. Tamuzs 와 Tapfer의 모델

1999년 Tapfer는 변형률이 서로 다른 유리섬유와 탄소섬유, 아라미드섬유와 탄소섬유를 사용하여 하이브리드 FRP 리바를 설계하기 위하여 Fig. 5-2와 같은 모델을 제시하였다.¹⁶⁵⁾ Tapfer가 사용한 모델은 초기 탄성계수를 결정함에 있어 혼합 법칙을 적용하였으며 하이브리드 FRP 리바의 파괴는 리바의 변형률이 고탄성계수를 갖는 섬유의 변형률에 도달하였을 때 파괴가 발생하기 시작하며 이때 강도를 식 5-1과 같이 정의하였다.¹⁶⁵⁾

$$f_c = \mu_H E_H \epsilon_H + \mu_L E_L \epsilon_L \dots \dots \dots (5-1)$$

여기서, 지수 L, H는 각각 저탄성 및 고탄성계수의 섬유이며 μ 는 섬유의 체적비, E는 섬유의 탄성계수, ϵ 는 섬유의 변형률을 나타낸다. Tapfer는 고탄성계수 섬유의 파괴로 인한 충격으로 저탄성계수의 섬유가 약 5%~10% 정도 파괴된다고 하였으며 이로 인해 소성변형 구간의 FRP 리바는 저탄성계수 섬유의 강도에 80% 정도만을 유지한다고 하였다(식 5-2).¹⁶⁵⁾

$$\mu_H E_H \epsilon_H + \mu_L E_L \epsilon_L = 0.8 \mu_L E_L \epsilon_L \dots \dots \dots (5-2)$$

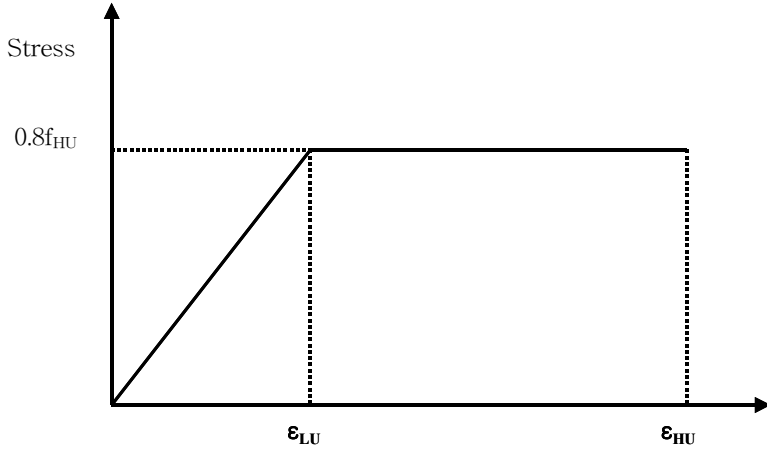


Fig. 5-2 Stress-strain curve of hybrid FRP rebar for Tepfer model¹⁶⁵⁾

3. Phoenix's 모델

Phoenix는 탄성거동을 하는 코어를 가지고 있는 브레이드 구조의 횡축 압축과 전단거동을 고려한 관 모양의 브레이드 복합체의 탄성거동을 예측하는 모델을 개발하였다.¹⁴¹⁾ Phoenix는 브레이드 및 코어를 구성하는 섬유축 방향 변형은 동일하다고 가정하였다. 브레이드-코어 복합체에 인장력이 재하되면 브레이드 슬리브(sleeve)는 신장뿐만 아니라 차이니스 핑거 효과(chinese finger effect)에 의한 횡방향 수축이 발생한다. 횡방향 수축은 코어의 포아슨 효과와 횡압력의 결과이며 Phoenix는 브레이드-코어 복합체에 작용한 인장력을 식 5-3으로 표현하였다.¹⁴¹⁾

$$P_{b-c} = ME'(\beta, \theta) \left(\cos \theta - \nu_c \frac{\sin^2 \theta}{\cos \theta} \epsilon_s' + \pi R_c^2 E_c \epsilon \right) \dots \dots \dots (5-3)$$

여기서, P_{b-c} : 브레이드-코어 복합체 내에 힘

- M : 브레이딩 섬유실의 수
- $E'(\beta, \theta)$: 브레이딩 슬리브의 탄성계수
- θ : 브레이딩 각
- β : 굴곡 각
- v_c : 코어섬유실의 포와스비
- ϵ_s' : 유효브레이딩 섬유실의 변형률
- R_c : 코어 섬유실의 반경
- E_c : 코어 섬유실의 탄성계수
- ϵ : 브레이드-코어의 변형률

이다.

그리고 브레이딩 슬리브의 탄성계수와 유효브레이딩 섬유실의 변형률은 식 5-4, 식 5-5에 의해 정의된다.

$$E'(\beta, \theta) = \frac{E_{11}A_y \cos \beta f(\beta)}{1 + \frac{4E_{11}}{\pi E_{22}} \tan^2(\beta) \sin(2\theta)[1 - f(\beta)]} \dots \dots \dots (5-4)$$

$$\epsilon_s' = \frac{\epsilon(\cos^2 \theta - v_c \sin^2 \theta)}{\left[1 + \frac{ME'(\beta, \theta) \sin^4 \theta (1 - 2v_c)(1 + v_c)}{2\pi R_c^2 \cos \theta E_c}\right]} \dots \dots \dots (5-5)$$

여기서, $f(\beta)$: 2-22식에 표현된 타원궤도의 변수

- E_{11} : 브레이딩 섬유실의 일축탄성계수
- E_{22} : 브레이딩 섬유실의 횡방향의 탄성계수
- A_y : 각 브레이딩 섬유실의 면적

이다.

또한 탄원케도의 변수는 식 5-6으로 표현된다.

$$f(\beta) = \frac{K'(\sin \beta) \cos^2 \beta}{E'(\sin \beta)} \dots \dots \dots (5-6)$$

여기서, $K'(\sin \beta)$ 과 $E'(\sin \beta)$ 은 1차 및 2차 탄원케도 상수로서 식 5-7, 5-8과 같다.

$$K'(\sin \beta) = \int_0^{\pi/2} \frac{dy}{\sqrt{1 - \sin^2(\beta) \sin^2(y)}} \dots \dots \dots (5-7)$$

$$E'(\sin \beta) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - \sin^2(\beta) \sin^2(y)} dy \dots \dots \dots (5-8)$$

식 5-7 및 5-8에서 y 는 sin함수로 정의되는 굴곡형 스트랜드의 중심선의 위치를 말하며 $h \sin(\pi x/b')$ 와 같다. 여기서, h 는 굴곡의 높이이며 b' 는 x 축에서 측정된 스트랜드 단면적 내의 간격을 나타낸다.¹⁴¹⁾ 식 5-3에서 첫 번째 인자는 브레이드 슬리브의 축력을 나타내며 마지막 인자는 코어의 축력을 나타낸다.¹⁴¹⁾ 반대의 효과를 나타내는 인자는 코어의 압착으로 인한 차이니스 핑거 효과의 결과로 횡압력을 받는다. 브레이드-코어 복합체의 탄성계수 E_{b-c} 는 다음 식 5-9와 같이 표현할 수 있다.¹⁴¹⁾

$$E_{b-c} = \frac{\frac{ME'(\beta, \theta) \cos^3 \theta}{[1 + \frac{ME'(\beta, \theta) \sin^4 \theta (1 - 2v_c)(1 + v_c)}{2\pi R^2 \cos \theta E_c}]} (1 - v_c \frac{\sin^2 \theta}{\cos^2 \theta})^2 + \pi R^2 E_c}{A'_{\beta\theta}} \dots \dots \dots (5-9)$$

여기서, $A'_{\beta\theta}$ 는 브레이드의 유효단면적으로 $\frac{2ME'(\sin \beta)A_v}{\pi \cos \beta \cos \theta}$ 이다.

제 3절 하이브리드 FRP 리바의 응력-변형률 예측 모델 개발

본 연구에서는 위에서 설명하였던 Averston과 Kelly의 이상적인 하이브리드 FRP 복합체의 모델과 Tapfer의 응력-변형률 모델을 이용하여 하이브리드 FRP 리바의 응력-변형률 예측 모델 Fig. 5-3을 개발하였다. 이 모델에서 FRP 리바의 초기 항복강도($E_c \epsilon_{LU}$)는 Averston and Kelly 모델에서 제시한 것과 같이 변형률이 작은 고탄성계수의 섬유가 파괴변형률에 도달할 때까지로 하였으며 이때 초기 탄성계수 E_c 는 혼합규칙을 적용하여 식 5-10과 같이 결정하였다.

$$E_c = V_L E_L + V_H E_H + V_m E_m \dots \dots \dots (5-10)$$

여기서, V_m 및 E_m 은 폴리머 매트릭스로 사용된 비닐에스터 수지의 체적비 및 탄성계수이다. 하이브리드 FRP 리바의 탄성계수가 결정되면 초기 항복강도를 결정할 수 있는데 초기 항복강도(f_{fy})는 변형률이 작은 섬유가 파괴될 때로 초기탄성계수와 변형률을 곱하여 계산하며 식 5-11과 같다.

$$f_{fy} = E_c \epsilon_{LF} \dots \dots \dots (5-11)$$

초기 항복점에 도달한 후 고탄성계수의 섬유가 파괴되면서 FRP 리바는 일반적으로 저탄성계수의 섬유의 강도에 약 20% 정도의 강도손실이 발생한다는 Tepfer의 모델을 이용하여 초기 항복강도를 결정하였는데 Tepfer가 제시한 모델에서는 하이브리드 FRP 리바를 구성하는 코아 섬유의 파괴로 인한 충격으로 인해 유리섬유가 약 20%정도 파괴되기 때문이기 때문에 이와 결정하였다. 그러나 본 연구에서 개발한 하이브리드 FRP 리바는 코아를 구성하는 것이 섬유가 아니라 압출성형과정으로 제조한 코아 FRP 리바를 사용함으로써 차이가 있다. 따라서 본 연구에서는 코아 FRP 리바의 파괴로 인한 강도의 손실은 없다고 가정하

고 코아 FRP 리바가 파괴될 때 슬리브를 구성하는 브레이딩 섬유와의 분리로 인한 미끄러짐(slip)이 코아 FRP 리바 파괴변형률의 약 25%로 가정하였으며 식 5-12로 표현할 수 있다.

$$f_{LU} = 0.75 V_F E_H V_{HF} \dots \dots \dots (5-12)$$

여기서 f_{LU} 는 FRP 리바가 유지하는 강도이며, V_F 전체섬유의 혼입률, E_H 변형률이 큰 섬유의 탄성계수, V_{HF} 는 변형률이 큰 섬유의 혼입률이다.

f_{LU} 점 이후 FRP 리바는 슬리브가 지속적으로 하중에 저항하면서 소성변형 구간을 가지게 되는데 이때의 소성변형구간의 기울기는 변형률이 큰 섬유의 탄성계수와 섬유의 혼입률에 의해서 결정되는데 Averston 과 Kelly가 제시한 모델에서 결정된 식을 이용하여 식 5-13과 같다.

$$E_{CHF} = E_{HF} V_F V_{HF} \dots \dots \dots (5-13)$$

여기서, E_{CHF} 는 하이브리드 FRP 리바중 슬리브의 탄성계수이고 E_{HF} 는 변형률이 큰 섬유의 탄성계수이다. FRP 리바의 극한 강도는 변형률이 큰 저탄성계수의 섬유가 파괴될 때로 이때 강도로 $E_{CHF} \epsilon_{HU}$ 이다. 그러나 섬유가 선탄성재료이고 코아 FRP 리바가 파괴되면서 변형률이 큰 저탄성계수로 구성된 슬리브 FRP 리바의 강도 손실률을 25%로 가정하였기 때문에 Averston 과 Kelly 모델에서와 같이 탄성계수가 일정한 상태에서 강도의 손실은 변형률의 감소로 가정할 수 있어 슬리브 FRP 리바의 변형률 손실률은 25%가 된다. 따라서 궁극적으로 FRP 리바의 극한 변형률 역시 $0.75 \epsilon_{HU}$ 으로 하였으며 이때 극한강도는 $E_{CHF} \epsilon_{HU}$ 로 정의하였다.

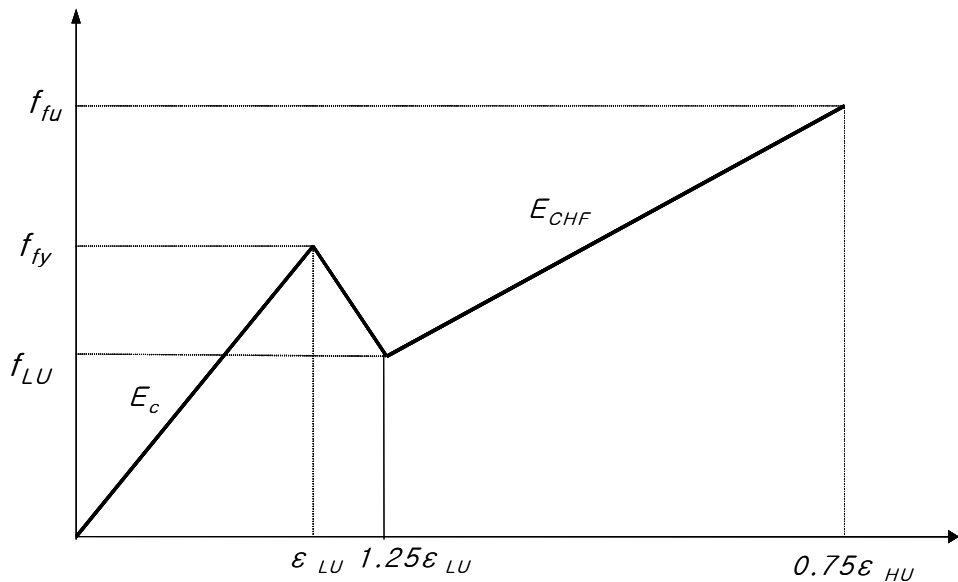


Fig. 5-3 Prediction model of stress-strain curve of hybrid FRP rebar

제 4절 모델과 실험결과와의 비교 분석

1. 인장거동 평가

FRP 리바는 섬유가 일방향으로 배열되어 섬유의 혼입량에 의해서 리바의 인장강도가 결정되고 폴리머 매트릭스에 의하여 횡방향의 전단강도가 결정되기 때문에 인장강도 및 탄성계수를 측정하기 위한 정확한 실험방법이 필요하다.^{15,16,18,69,70,77,79)} 그러나 현재 보강 철근의 인장 특성을 평가하는데 사용되는 인장 시험방법은 FRP 리바의 인장특성을 평가하는데는 많은 문제점을 가지고 있다. 이와 같은 문제점으로는 (1)응력집중과 휨강도에 의한 시험길이를 벗어난 파괴, (2)정착(anchorage) 파괴 또는 항복에 의한 부정확한 측정, (3)약한 마찰력과 높은 인장응력에 의해서 발생할 수 있는 정착부분 밖에서 리바의 미끄러짐(slip), (4)초과된 그립(grip) 응력에 의한 리바의 손상 등을 들 수 있다. 이와 같은 문제점은 일반적인 FRP 리바의 인장시험 방법인 Fig. 5-4와 같은 금속 그립 공시체

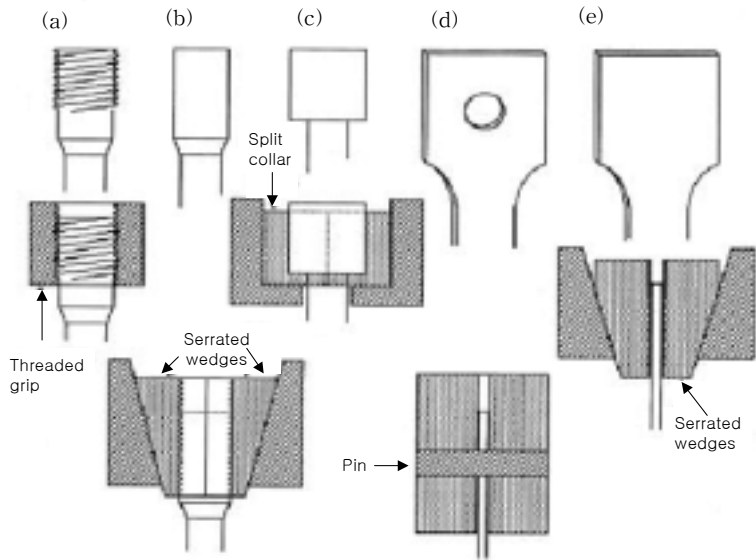


Fig. 5-4 Traditional grip systems used for tensile test^{17, 20, 21)}

를 이용한 방법에서 명백히 알 수 있다. ASTM D 3039 및 ASTM D 638에서는 사각형 모양의 플라스틱 및 복합체 적층쉬트의 인장시험 규정을 자세히 설명하고 있으며 ASTM D 3916은 GFRP 리바의 인장시험 방법을 규정하고 있다.^{17,20,21)} 1993년 Faza와 Ganga Rao의 연구는 ASTM D 3916에 시험규정이 실제 시험에 적용하기가 쉽지 않다는 것을 보여주고 있다.⁷²⁾ 현재 FRP 리바의 인장 시험을 위해서 사용되고 있는 다양한 정착시스템은 Fig. 5-4와 같은 모양으로 개발되어 인장시험에 효과적으로 적용되고 있다.

1996년 Bakis 등은 Fig. 5-5(a)와 같은 정착 시스템을 사용하여 FRP 리바의 인장강도시험을 실시하였다.²⁷⁾ FRP 리바의 끝단에 미세한 모래입자로 코팅된 합성 고무는 원뿔형의 끝단 앵커에 정착하기 위해서 아세톤으로 깨끗이 닦고 원추형의 끝단 앵커에 에폭시를 가득 채우기 전에 미세한 규사를 리바의 미끄러짐을 방지하기 위하여 원추형 관의 내부표면을 코팅하였다. 고무 워셔(washer)는 정착 장치로부터 양생되지 않은 에폭시의 누수를 막기 위하여 원추형 통의 양쪽 끝에 접촉시켰으며 리바의 정착길이는 리바 직경의 10배 이상을 사용한다. 리바에는 마치 인발시험에서처럼 인장하중이 재하되며 이러한 문제점은 정착부분의 높은

측면 압축응력을 제거함으로써 해결할 수 있다. Fig. 5-5(b)는 1993년 Erky와 Ritzkalla에 의해서 제시된 또 다른 인장시험을 위한 정착 시스템이다. 리바의 끝은 외부에 홈이 정착된 강관에 정착시키고 인장시험을 실시한다.⁷¹⁾ 이와 같은 실험방법은 FRP 리바의 양단 그림부분에서 발생하는 압축응력을 방지한다. Fig. 5-5(c)는 Rahman 등에 의해서 개발된 방법으로 내부에 홈이 있는 강관에 리바를 에폭시 페이스트를 이용하여 정착시키는 방법이다.¹⁴⁸⁾ 리바의 정착길이는 직경의 10배 이상으로 충분하게 하여 리바의 인발파괴 또는 미끄러짐을 억제하면서 인장시험을 실시한다. Fig 5-5(d)는 미국 West Virginia 대학에서 개발된 정착 시스템을 보여주고 있다. 내부직경이 FRP 리바와 같은 203mm 길이의 강관을 두 부분으로 잘라내어 조각난 강관의 내부표면에 규사를 에폭시를 이용하여 부착시킨다.¹⁴⁸⁾ 즉 수지가 양생이 완료될 때까지 강관은 FRP 리바를 정착 고정시키는 시스템으로 리바의 길이는 직경과 관계없이 최소 1219mm로 한다. 이 방법은 다른 시험방법과 다르게 리바의 양끝에 압축응력을 재하하는 특징을 갖는다. Fig. 5-5와 같은 시험방법을 발전시켜 1998년 Castro와 Carino는 에폭시 페이스트를 Fig. 5-6에서 볼 수 있는 것과 같이 시멘트 모르타르로 시험을 실시하였다.⁴⁷⁾ Castro 와 Carino의 시험은 GFRP 리바로만 실시되었으며 제안된 정착방법은 FRP 리바 길이/직경비에 관한 표면특성에 따른 영향을 효율적으로 연구하였다. 이 방법의 새로운 관점은 에폭시 수지 및 에폭시 모르타르 대신 시멘트 모르타르를 사용했다는 것이다. 1995년 Nanni는 정착재료로 에폭시를 사용하는 대신에 강관의 내부에 팽창시멘트를 사용하는 방법을 개발하여 시험을 실시하였다.¹³¹⁾ 강관의 크기는 외부직경이 42.4mm, 두께는 9.7mm로 하였다. 강관의 길이는 최소 300 mm이상에서 FRP 리바의 미끄러짐이 발생하지 않고 효과적으로 인장특성을 평가할 수 있었다. 앵커의 양끝은 강관과 동일한 직경과 길이가 20mm인 플라스틱 뚜껑으로 막아 팽창시멘트의 누수를 막고 뚜껑의 한가운데 FRP 리바의 직경과 크기가 같은 구멍을 뚫어 리바가 정 가운데 위치하도록 하였다. 이와 같은 정착장치로 시험을 실시하면 FRP 리바의 미끄러짐에 의한 파괴는 인장하중이 약 2,500MPa를 초과하였을 때만 발견되었다. Nanni는 이와 같은 실험결과를 기본으로하여 CFRP 및 GFRP 리바의 치수에 따른 인장시험시 필요한 FRP 리바의 시험길이와 정착장치의 길이를 제시하였다(Table 5-1).

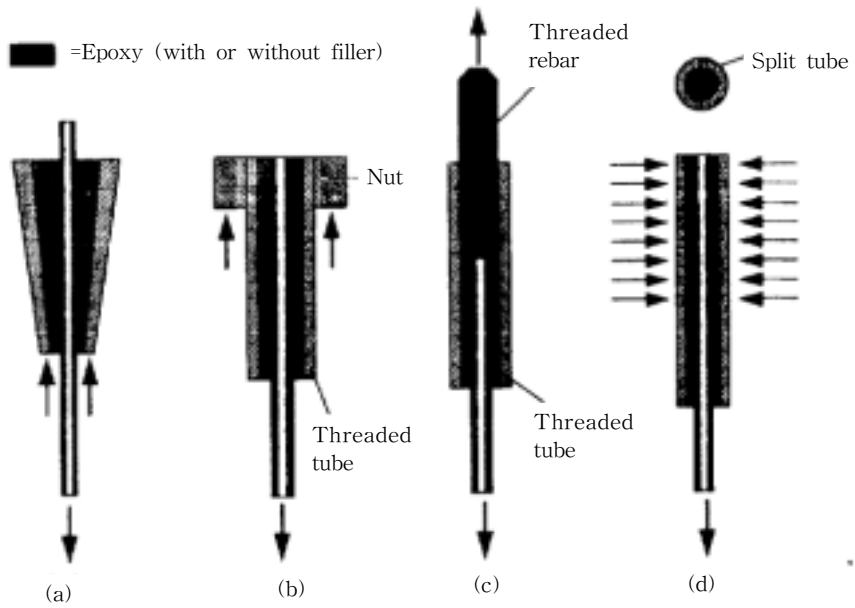


Fig. 5-5 Anchorage systems used for tensile test of FPR rebar^{27,71,148)}

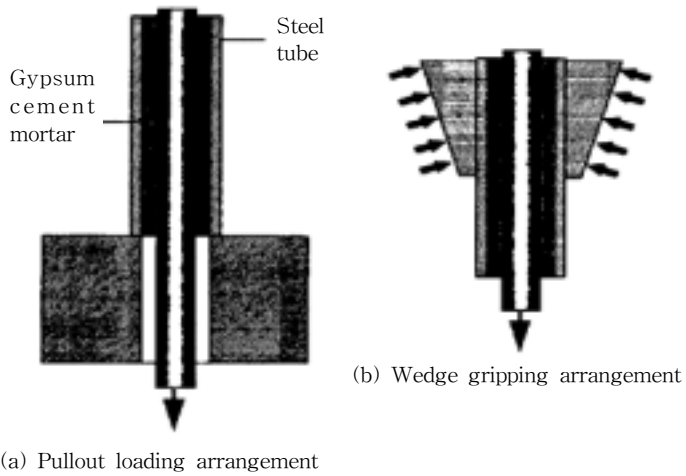


Fig. 5-6 Anchorage developed by Castro and Carino⁴⁷⁾

Table 5-1 Recommendations for tensile test of FRP rebar¹³¹⁾

Type of rebar	Diameter (mm)	Steel tubes		Expected ultimate load(kN)	Anchorage length(mm)
		Min. outside diameter(mm)	Min. wall thickness(mm)		
CFRP	4	42	3.5	15~45	250
CFRP	6	42	4.8	45~80	300
CFRP	8	42	4.8	80~140	350
CFRP	10	48	5.0	140~180	450
GFRP	6	42	3.5	20~40	250
GFRP	8	42	4.8	40~60	300
GFRP	10	42	4.8	60~90	300
GFRP	12	42	4.8	90~120	350
GFRP	14	48	5.0	120~165	400

또한 ACI 440위원회에서는 FRP 리바의 시험길이는 직경의 40배 이상으로 규정하고 있으며 최소 시험길이 역시 100mm 이상으로 규정하고 있다. 또한 정착길이(L_g)는 식 5-12에 따라 결정하며 최소 정착길이는 250mm 이상으로 규정하였다.^{3,4)}

$$L_g = \frac{f_u A}{350} \dots \dots \dots (5-12)$$

여기서, f_u = 극한인장강도, MPa

A = 공시체의 단면적, mm^2 이다.

ACI 440에서는 FRP 리바를 정착시키기 위해서 사용되는 강관의 내부직경은 리바의 공칭직경 보다 적어도 10~14mm 정도 크게 하여야 된다고 규정하고 있다.^{3,4)}

본 연구에서는 인장시험은 ACI 440 위원회에서 제시하고 있는 시험기준에 따라 인장시험을 실시하였으며 규정에 따라 결정한 FRP 리바의 인장시험용 공시체 치수는 Table 5-2 및 Fig. 5-7과 같다.

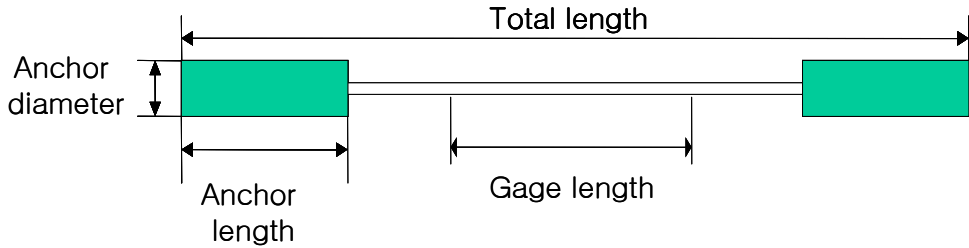


Fig. 5-7 Tensile strength test specimen

Table 5-2 Length and diameter specifications

Type of rebar	Bar size (mm)	Gage length (mm)	Anchor length (mm)	Total length (mm)	Anchor diameter (mm)
Hybrid(A)	4	150	250	800	25.4
Hybrid(B)	4	150	250	800	25.4
Hybrid(C)	8	150	300	900	25.4

가. FRP 리바의 정착

본 연구에서는 부착강도가 매우 우수한 에폭시 수지를 사용하여 FRP 리바를 정착시킴으로써 인장시험시 발생할 수 있는 인발을 방지하여 정확한 인장특성을 평가하고자 하였다. 본 연구에서 사용한 에폭시 수지는 그라우팅용 에폭시 수지로서 물리 역학적 특성을 Table 5-3과 같다.

Table 5-3 Properties of Epoxy resin

Properties	Epoxy resin
Compressive strength(MPa)	38
Tensile strength(MPa)	36
Bond strength(MPa)	9

FRP 리바의 정착은 인장시험 시 발생할 수 있는 인발 및 편심하중을 방지하도록 하기 위하여 강관의 한쪽부분에 비닐테이프를 접착시킨 후 한가운데 FRP 리바의 직경에 해당하는 구멍을 뚫고 FRP 리바를 고정시켰다. 그런 다음 에폭시 수지를 주사기를 이용하여 주입한 후 강관의 나머지 한쪽 부분 역시 가운데 구멍을 뚫은 비닐테이프를 이용하여 접착시켜 최종적으로 FRP 리바가 중앙에 위치하게 하였다. 인장 시험용 FRP 리바 공시체의 양생은 7일간 23 ± 2 °C, 50 % R.H.의 항온항습실에서 기건양생을 실시하였다.

나. 인장 시험

인장특성을 평가하기 위하여 250KN 용량의 변위제어용 UTM을 사용하였다. UTM은 강관에 정착한 FRP 리바 공시체를 유압에 의해서 고정시킬 수 있는 장치를 가지고 있어 UTM에 고정시키기 위한 별도의 장치는 필요로 하지 않았다. 또한 FRP 리바의 변형률을 측정하기 위하여 LVDT를 리바에 고정시켰다(Fig. 5-8). 본 연구에서는 데이터 수집장치와 수집프로그램을 사용하여 UTM 및 LVDT에서 얻어지는 하중 및 변위를 직접 컴퓨터에서 기록하도록 하였다. FRP 리바의 인장시험은 5mm/min의 속도로 하였다. 이와 같은 인장시험 후 결과의 정리는 식 5-13을 적용하여 인장강도를 계산하였다.

$$\sigma = \frac{P}{A} \dots \dots \dots (5-13)$$

여기서, σ : FRP 리바의 응력(MPa), P : 하중(KN), A : FRP 리바의 단면적

(mm²) 이다.

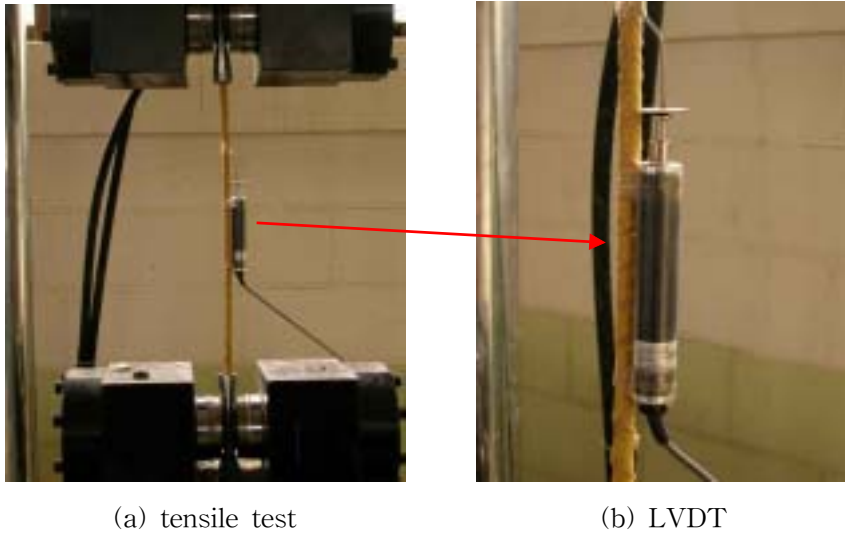


Fig. 5-8 Tensile test set-up: (a) tensile test, (b) LVDT

2. 하이브리드 FRP 리바의 파괴 모드

하이브리드 FRP 리바의 파괴 모드를 분석하기 위해서는 섬유와 매트릭스 수지 사이의 하중 전달과정을 이해하여야 한다. 또한 파괴 분석을 위해서는 첫 번째로 기본적인 파괴 모드를 이해하여야 한다. 보강철근과 같은 균질성 재료의 파괴분석은 재료의 방향성에 영향을 받지 않기 때문에 쉽게 분석할 수 있다. 그러나 하이브리드 FRP 리바의 파괴분석은 리바가 서로 다른 방향성을 가진 섬유로 구성되고 있고 하중이 작용하는 방향이 섬유의 길이 방향이기 때문에 매우 복잡하다. 그럼에도 불구하고 기본적인 복합체의 파괴 모드를 이용하면 하이브리드 FRP 리바의 파괴모드를 분석할 수 있다. 기존 FRP 복합소재의 파괴 모드 분석은 복합체 산업 분야에서 가장 널리 사용되는 방법인 라미네이트 복합체를 이용하여 해석할 수 있다. 하이브리드 FRP 리바를 라미네이트 복합체의 관점에서 보면 코아 FRP 리바는 방향각이 0°인 내부 적층판이며 슬리브를 구성하는 브레이딩 및 필라멘트 와이딩 섬유는 브레이딩 각을 가진 외부 적층판으로 가정할 수 있다.

하중이 작용하면 FRP 리바의 유효강성에 비례하여 코아 라미네이트에 의해서 인장력이 전달되고 슬리브 라미네이트에 의해서 인장력과 평면 전단력(in plane shear)이 전달된다. 따라서 연속적인 섬유 라미네이트 복합체에서 발생 가능한 파괴 모드는 인장파괴 모드와 평면 전단파괴(in plane shear fracture) 두 가지로 요약할 수 있다.¹⁵⁷⁾ 인장 파괴는 주로 섬유, 매트릭스 수지 및 섬유와 수지의 연성에 달려 있다. 유리섬유와 탄소섬유는 주로 어떠한 단면적의 감소 없이 파괴가 발생하는 완벽한 취성 파괴가 발생하며 아라미드섬유는 단면적의 감소가 발생하면서 파괴되는 연성파괴의 경향을 보여준다. 따라서 유리섬유의 파괴표면은 탄소 섬유 및 아라미드섬유와 다르게 파괴 후 표면이 매끈한 특성을 보여준다. 그러나 아라미드섬유의 경우 완벽한 파괴가 발생하기 전에 현저하게 국부적이 단면감소와 넥킹(necking)발생한 후 파괴된다. 또한 탄소섬유의 파괴 표면은 일부분의 섬유가 찢어지면서 파괴되는 경향을 나타낸다. 비닐에스터 수지내에 함침된 유리섬유의 파괴형태는 비교적 평면파괴(planner fracture)가 발생하는데 이는 취성파괴가 발생했다는 것을 의미한다. 따라서 어떠한 단면적의 감소 없이 유리섬유의 파괴에 의한 파괴가 발생하기 때문에 섬유의 인발은 없으며 내부 부착은 매우 강하다.⁹⁷⁾ 반대로 아라미드섬유를 에폭시에 함침한 라미네이트 복합체의 파괴는 인발과 에폭시 수지와 분리되는 섬유의 양이 매우 많이 발생하며 아라미드섬유가 궁극적으로 파괴되기 전에 길이방향으로 현저한 단면적의 감소가 발생한다. 여기서 아라미드섬유와 에폭시 수지와와의 부착의 문제는 아라미드섬유의 단면적 감소에 의해서 설명할 수 있다.⁹⁷⁾ Kelly는 섬유의 인발에 필요한 최대 에너지는 섬유와 매트릭스 수지의 분리에 필요한 에너지보다 더 크다고 하였다.¹¹¹⁾ 따라서 섬유의 인발은 복합체의 에너지 흡수를 발생시키는 근본적인 이유가 된다. 탄소섬유와 에폭시 수지의 파괴 표면은 유리섬유와 비슷하게 거의 평면적이고 매끈하며 파괴 평면에서 섬유의 노출은 어느 정도의 높이 차이를 보여준다. 이와 같은 파괴 표면은 탄소섬유와 에폭시 수지간에 부착이 강하고 탄소섬유의 어떠한 단면적의 감소 없이 발생하며 단지 작은 양의 섬유만이 에폭시 수지와와의 분리가 발생하였다는 것을 의미한다. 일반적으로 섬유의 인발은 부착이 약하다는 것을 의미한다. 그렇지만 아라미드섬유의 파괴 모드에서는 단면적 감소와 길이 방향의 신장과 쪼개짐에 의해서 섬유자체가 강한 부착을 가지고 있음에도 파괴가 발생

할 수 있다. 만약 부착이 나쁘다면 섬유 표면은 매끈하고 깨끗하며 폴리머 매트릭스 내에서 원추형의 모양으로 명백하게 남아 있을 것이다. 인장파괴 모드는 섬유가 어떠한 방법으로 파괴되는지를 설명할 수 있으며 세가지 모드로 정의할 수 있다. 첫 번째는 섬유의 약한 연결에 의해서 파괴가 지배받는 Weakest link 모델이며 두 번째는 Cumulative weakening 모델이며 세 번째는 Fiber break propagation 모델이다. 첫 번째 파괴 모델인 weakest link 모델은 섬유의 첫 번째 파괴 즉시 섬유의 길이 방향의 수직 방향으로 결함이 성장하여 평면파괴가 발생한다. 이와 같은 파괴는 섬유의 체적비가 매우 높고 매우 취성적인 매트릭스 내에서 강한 부착력을 가지고 있을 때 발생하는 파괴 모드이다(Fig. 5-9). Cumulative weakening 모델은 섬유의 결함이 불규칙하게 분포되어 있고 결함의 크기역시 불규칙하게 여러 부분에서 발생한다. 이와 같은 결함은 섬유의 길이 방향에 따라 많은 부분에서 불규칙하고 자유롭게 성장하여 섬유를 파괴시킨다(Fig. 5-10). 섬유의 파괴는 지속적으로 발생하며 작용 하중은 인접한 다른 섬유로 재분배된다. 복합체의 최종 파괴는 하중 전달을 더 이상 할 수 없을 정도까지 단면적을 통과하는 결함층의 성장하여 약해 질 때 발생한다. Fiber break propagation 모델은 파괴의 초기 단계에서는 Cumulative weakening 모델과 비슷하지만 결함은 응력집중 효과에 의해서 결함이 발생한 섬유에서 리바로 이웃한 섬유로 전달되며 파괴되는 국부적인 파괴가 발생한다. 최종 파괴모드는 복합체가 더 이상 하중을 지탱할 수 없을 정도로 복합체의 단면을 통과하는 파괴가 형성되었을 때 발생한다(Fig. 5-11). 브레이딩과 rib을 구성하는 섬유는 방향성이 크기 때문에 인장력이 작용하면 인장력 뿐만 아니라 평면 전단력에도 영향을 받는다. 방향성을 가진 고탄성의 흑연과 에폭시 적층판의 역학적 특성은 플리에(plies) 모서리 방향의 요소로서 각도가 증가할수록 Fig. 5-12에서와 같이 궁극적으로는 감소한다. 따라서 하이브리드 FRP 리바 내에서 브레이딩 및 rib 섬유는 인장력에 의해서 파괴되기전에 흑독한 전단회전(in-plane shear rotation)을 경험하게 된다. 탄소섬유와 에폭시 수지 적층판의 수평방향의 전단파괴는 찢어짐에 의하여 수지가 파괴되는 모드이다. 이와 같은 수지의 파괴모드는 적층판의 인장파괴와 전혀 다르다. 인장파괴 내에서 수지의 파괴는 분리에 의해서 발생한다. 적층판의 파괴에 대한 미소구조연구 또한 섬유가 밀실하게 위치한 장소에서 가

로균열이 집중되는 것을 관찰할 수 있으며 이 부분에서 가로 균열이 성장한다. 섬유 복합체의 간단한 파괴이론으로 하이브리드 FRP 리바의 파괴 특성을 증명할 수 있다. 하이브리드 FRP 리바는 파괴 즉시 많은 양의 에너지를 발산하며 응력-변형률 곡선이 즉시 회복되는 경향을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 섬유의 축압축력이 발생하여 섬유의 비틀림이 발생하기 때문이다. 또한 하이브리드 FRP 리바의 경우 아라미드섬유가 슬리브를 구성하기 때문에 완벽한 파괴가 발생하기 전에 섬유의 국부적인 쪼개짐 또는 큰 신장이 발생하는 경향에 의해서도 직접적으로 영향을 받는다. 또한 하이브리드 FRP 리바의 인장시험시 코아 FRP 리바에 발생하는 인발력으로 인해 chinese finger 효과가 발생하여 코아 FRP 리바에는 압축력이 전달된다.⁹³⁾

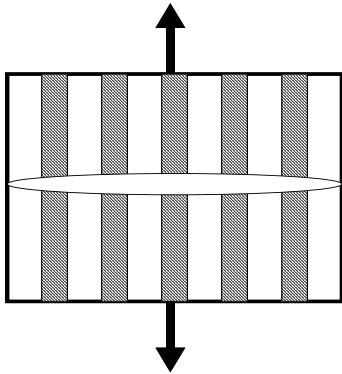
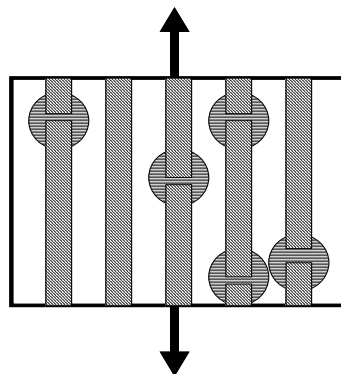


Fig. 5-9 Weakest link failure model

Fig. 5-10 Cumulative weakening model¹⁴⁷⁾



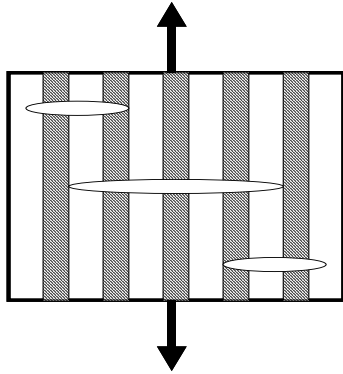


Fig. 5-11 Fiber break propagation model¹⁸⁴⁾

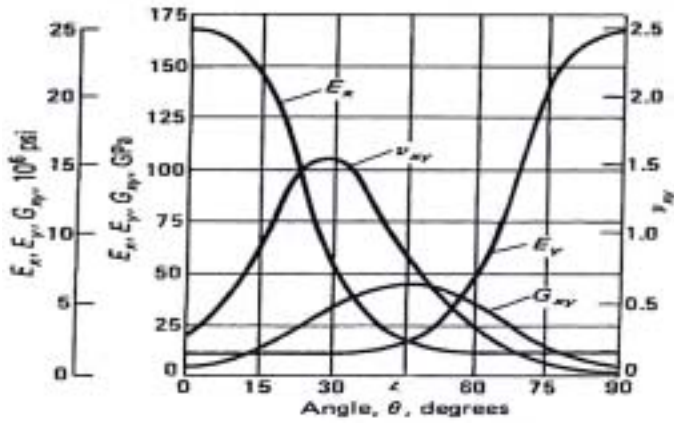


Fig. 5-12 Elastic constants for high-modulus graphite-epoxy lamina with different fiber orientation⁹¹⁾

작용하는 인발력이 증가하게 되면 슬리브를 구성하는 브레이드 섬유는 보다 많은 인발력을 전달력 발생시키게 된다. 재하되는 하중이 작은 단계에서는 chinese finger 효과는 매트릭스 수지에 때문에 어느 정도 구속을 받게 된다. 그러나 인발력이 증가하였을 때 수지의 강도는 평면 전단력에 의해서 약해지며 이와 같은 현상은 섬유를 재배열하게 한다. 따라서 코아 FRP 리바는 인장력과 횡축 압축력을 동시에 받게 된다. 따라서 하이브리드 FRP 리바의 파괴 형상은 독특하다. 하이브리드 FRP 리바의 파괴는 슬리브를 구성하는 섬유의 불규칙적인 파괴, 코아

를 구성하는 섬유는 일반적인 파괴 및 슬리브와 코어 FRP 리바에 사용된 매트릭스 수지의 찢겨짐 파괴 등이 복합적으로 발생한다. 하이브리드 FRP 리바를 구성하는 섬유와 매트릭스 수지의 부착은 리바의 파괴를 견딜 수 있도록 충분히 강하다. 그러나 이와 같은 특성을 가질 때 하이브리드 FRP 리바의 파괴는 인장과 전단이 동시에 발생하여 파괴가 발생하게 된다. 탄소섬유로 구성된 코어 FRP 리바의 파괴는 결함이 발생한 약한 지점으로부터 발생하여 점차적으로 전체 리바로 확장되어 가고 이때 매트릭스 수지는 슬리브를 구성하는 브레이딩 섬유에 의해서 발생하는 평면 전단력에 의해 회전과 변형이 발생하게 된다. 또한 코어 FRP 리바에는 코어 내부의 매트릭스 수지가 극심한 찢김이 발생한 것으로 보아 평면전단력 뿐만 아니라 횡축 압축력 또한 존재한다는 것을 알 수 있다.

슬리브를 구성하는 섬유는 지속적으로 파괴가 발생하면서 하중을 계속적으로 전달하는 동시에 하이브리드 FRP 리바가 완벽한 파괴가 발생할 때까지 소성변형구간을 확보하도록 한다. 이때 아라미드섬유로 슬리브를 구성할 경우 아라미드 섬유의 특성상 국부적인 단면감소와 신장 및 섬유의 찢겨짐 등에 의하여 파괴가 발생하여 하중을 계속적으로 전달하는 역할이 강하며 유리섬유를 슬리브로 구성할 경우 유리섬유의 특성 파괴면이 매끄러운 취성 파괴의 경향을 나타내어 하중의 전달력이 급격하게 감소되어 소성변형 구간의 확보가 쉽지 않은 특성을 나타낸다. 이와 같은 파괴형상은 Fig. 5-13~5-15에 나타내었다. Fig. 5-13은 하이브리드 FRP 리바(A)의 파괴 형상으로 슬리브를 구성하는 아라미드섬유가 꼬인 상태에서 단면적의 감소가 발생하는 상태로 파괴되는 경향을 보여주었다. 또한 하이브리드 FRP 리바(A)가 하중의 증감을 지속적으로 발생시키는 이유도 섬유의 결함이 크게 발생하는 부분부터 단면적 감소가 지속적으로 발생하고 코어 FRP 리바가 파괴되는 부분에서 단면적 감소가 발생하면서 꼬임에 커지며 발생하기 때문에 이와 같은 현상이 발생했다는 것을 알 수 있다. 따라서 브레이딩 섬유를 구성하는 아라미드섬유의 파괴형상 역시 일정한 단면으로 파괴되는 것이 아니라 표면에 노출되는 섬유의 길이로 볼 때 리바의 길이 방향으로 불규칙하게 나타나 있는 것을 알 수 있다. 또한 하이브리드 FRP 리바(A)의 결함제로 사용되는 비닐 에스터수지는 흑독한 균열과 표면의 벗겨짐 등이 발생하였는데 이는 슬리브를 구성하는 섬유가 인장과 평면 전단을 동시에 받았기 때문이다. 하이브리드 FRP

리바(B)의 파괴형상은 슬리브를 구성하는 유리섬유가 어느정도 변형률이 증가할 수 있는 파괴 형상을 보여주며 파괴되지만 아라미드섬유를 슬리브로 구성할 때 보다 그 정도는 작게 나타났다. 특히 이와 같은 특성은 유리섬유의 특성에 따른 것이 아니라 슬리브를 구성하는 섬유로 사용할 때 꼬인각, 굴곡각, 브레이딩 각 등 기하학적 형상에 의해서 늘어난 변형률이 인장시험시 섬유의 기하학적 형상이 격자형에서 직선형으로 변하면서 파괴되는 형상으로 판단된다. 따라서 섬유의 파괴표면은 비교적 매끈하였다. 또한 코아 FRP 리바의 파괴형상이 명백하게 나타날 정도로 슬리브를 구성하는 섬유가 파괴에 대한 저항력을 가지지 못하였다. 따라서 인장강도-변형률 거동이 지속적인 강도의 증감을 보여주지 못하고 점차적으로 감소하면서 파괴되는 경향을 보여준 것으로 판단된다. 또한 하이브리드 FRP 리바(B)의 결합제로 사용되는 비닐에스터수지는 혹독한 균열과 표면의 벗겨짐 등이 발생하였는데 이는 슬리브를 구성하는 유리섬유가 인장과 평면 전단을 동시에 받았기 때문이다. 하이브리드 FRP 리바(C)의 파괴형상을 살펴보면 하이브리드 FRP 리바(A)와 (B)의 파괴형상이 복합적으로 발생하고 있음을 알 수 있다. 즉 비교적 취성인 유리섬유가 섬유의 기하학적 형상에 의해서 어느 정도 변형률을 가지고 파괴되면 섬유의 기하학적 형상 뿐만 아니라 재료적 특성이 우수한 아라미드섬유가 단면적 감소, 신장 및 찢김의 현상을 발휘하면서 지속적으로 하중에 저항하여 파괴됨을 알 수 있다. 따라서 슬리브중 유리섬유의 파괴평면은 비교적 매끈하여 취성파괴가 발생하였다는 것을 알 수 있고 아라미드섬유는 연성 파괴가 발생함을 알 수 있다.



(a) Side view



(b) Plane view

Fig. 5-13 Fracture surface of hybrid FRP rebar(A): (a) side view, (b) plane view



(a) Side view



(b) Plane view

Fig. 5-14 Fracture surface of hybrid FRP rebar(B): (a) side view, (b) plan view



(a) Side view



(b) Plane view

Fig. 5-15 Fracture surface of hybrid FRP rebar(C): (a) side view, (b) plane view

3. 시험결과와 인장특성과의 비교

하이브리드 FRP 리바(A), (B) 및 (C)는 3장의 하이브리드 FRP 리바의 설계에서 결정된 재료(Table 3-1)를 가지고 재료하이브리드 모델을 이용하여 혼합비를 결정하였다(Table 3-2). 또한 기하학적 하이브리드 모델을 이용하여 섬유역학적 변수를 결정하여 최종적으로 하이브리드 FRP 리바를 구성하는 섬유의 역학적 특성을 결정한 후(Table 3-11) 혼합규칙을 이용하여 하이브리드 FRP 리바의 역학적 특성을 Table 3-12와 같이 결정하였다. 본 장에서는 3장에서 설계된 하이브리드 FRP 리바를 4장에서 제시한 생산시스템을 이용하여 생산한 후 본 장에서 개발한 응력-변형률 예측 모델과 비교하였다. 시험결과와 이론적 예측모델을 비교하면 다음과 같다.

가. 하이브리드 FRP 리바(A)

하이브리드 FRP 리바(A)는 탄소섬유와 아라미드섬유를 이용하여 SD45의 보강 철근을 기준으로 f_{LU} (초기 항복 후 첫 번째 강도 감소 점: 저탄성계수 섬유의 파괴강도의 75%)가 450MPa이 되도록 설계되었다. 하이브리드 FRP 리바(A)의 인장시험결과 목표로 한 f_{LU} 450MPa과 3%이상의 변형률 및 소성변형 구간을 확보할 수 있었다. FRP 리바 인장시험결과와 이론적 예측 결과를 비교해 보면 Fig. 5-16과 같다. 실험결과는 변형률이 큰 섬유가 파괴를 거듭하며 점차적으로 파괴되기 때문에 강도의 감소 증가를 반복하는 결과를 보여주었다. 따라서 이론적 예측결과가 정확한 예측결과를 보여주지는 못하지만 초기 항복점까지는 거의 동일한 예측결과를 보여주었다. Tepfer의 모델의 경우 변형률이 작은 섬유의 파괴강도를 낮게 결정하였고 변형률 역시 변형률이 큰 섬유의 전체적인 변형률을 발휘한다고 하여 실험결과와 차이가 발생하였으며, Averston과 Kelly의 모델은 변형률이 작은 섬유의 파괴 후 강도의 손실을 고려하지 않아 실제 실험결과와 차이가 발생하였다. 이와 같은 결과는 FRP 리바(A)의 인장강도는 설계 및 제조 방법상의 공정에도 영향을 받기 때문에 기존의 제품의 설계방법과 생산방법이 다른 본 하이브리드에서는 실제적으로 맞지 않는 결과를 나타낸다고 할 수 있다.

따라서 코어 FRP 리바를 압출성형에 의해서 제조한 후 제직의 방법으로 슬리브를 구성하는 섬유로 외곽의 FRP 리바를 구성하는 하이브리드 FRP 리바의 경우 기존의 예측 모델보다는 본 연구에서 개발한 예측모델을 적용하는 것이 리바람직하다고 판단된다.

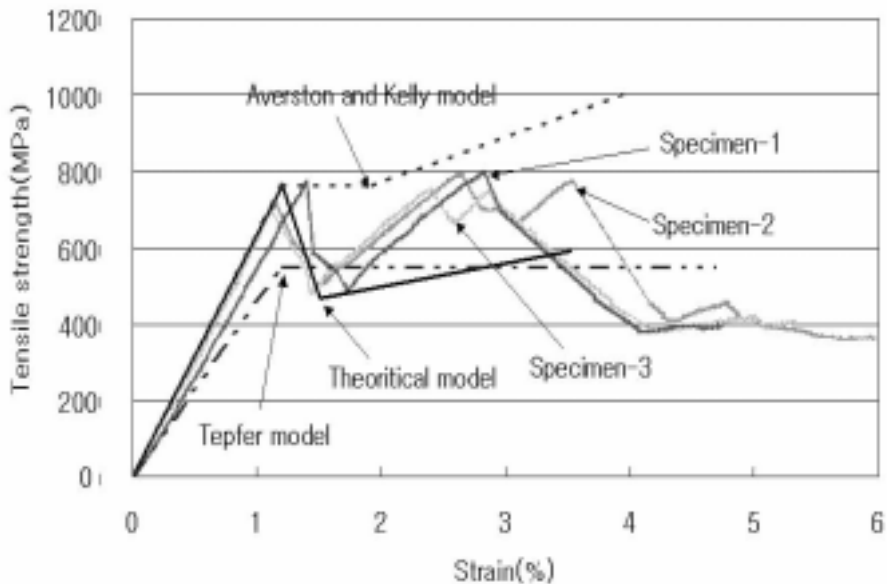


Fig. 5-16 Comparison between analytical prediction and experimental results of hybrid FRP rebar(A)

나. 하이브리드 FRP 리바(B)

하이브리드 FRP 리바(B)는 탄소섬유와 유리섬유를 이용하여 SD30의 보강철근을 기준으로 f_{LU} 가 300MPa이 되도록 설계되었다. 하이브리드 FRP 리바(B)의 인장 시험결과 목표로 한 f_{LU} 300MPa 및 소성변형구간은 확보할 수 있었으나 3%이상의 변형률은 만족하지 않았다. 또한 f_{LU} 이후 변형률이 증가할수록 지속적으로 강도가 감소하는 결과를 보여주고 있다. 그러나 본 연구에서는 Tepfer의 이론적 모델에 사용하였던 방법인 항복강도와 극한 강도를 모두 저탄성계수 섬유의

80%로 가정한 것과 같이 하이브리드 FRP 리바(B)의 f_{LU} 와 극한강도를 모두 300MPa으로 규정하였다. 즉 f_{LU} 이후의 강도가 300MPa 미만으로 떨어지면 이때 FRP 리바가 파괴된 것으로 간주하여 이때의 변형률을 파괴변형률로 결정하였다. 시험결과와 이론적 예측 결과를 비교해 보면 Fig. 5-17과 같다. 이론적 예측결과와 실험결과를 비교해 보면 초기탄성계수 및 항복변형률 및 첫 번째 강도 저하점은 거의 정확히 예측이 가능하였다. 그러나 첫 번째 강도 저하점 이후 소성변형률을 구간이 이론적 예측결과는 변형률이 증가함에 따라 증가하는 것으로 예측되었으나 실제 실험결과는 변형률이 증가할수록 감소하는 결과를 보여주었다. 그러나 Averston과 Kelly 모델 및 Tepfer 모델과 비교해서는 실험결과에 더욱더 근접한 결과를 보여주었다. 따라서 코어 FRP 리바를 압출성형에 의해서 제조한 후 제직의 방법으로 슬리브를 구성하는 섬유로 외곽의 FRP 리바를 구성하는 하이브리드 FRP 리바의 경우 기존의 예측 모델보다는 본 연구에서 개발한 예측모델을 적용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

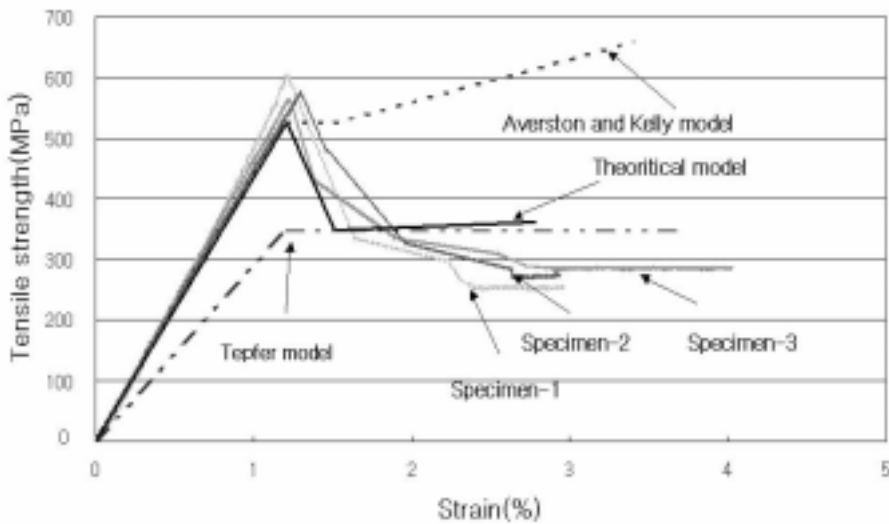


Fig. 5-17 Comparison between analytical prediction and experimental results of hybrid FRP rebar(B)

다. 하이브리드 FRP 리바(C)

하이브리드 FRP 리바(C)는 탄소섬유와 유리섬유 및 아라미드섬유를 이용하여 SD30의 보강철근을 기준으로 f_{LU} 가 300MPa이 되게 설계하였다. 하이브리드 FRP 리바(C)의 인장시험결과 목표로 한 f_{LU} 300MPa 및 3%이상의 변형률과 소성변형구간을 모두 확보하는 결과를 보여주었다. 또한 f_{LU} 이후 변형률이 증가할수록 지속적으로 강도가 증가하는 결과를 보여주어 동일한 강도로 설계된 하이브리드 FRP 리바(B) 보다 우수한 거동을 보여주었다. 이는 아라미드섬유를 슬리브를 구성하는 섬유로 사용하는 것이 유리섬유를 사용하였을 때 보다 우수한 성능을 발휘할 수 있다는 것을 보여주는 결과이다. 실험결과와 이론적 예측결과를 비교해 보면 Fig. 5-18과 같다.

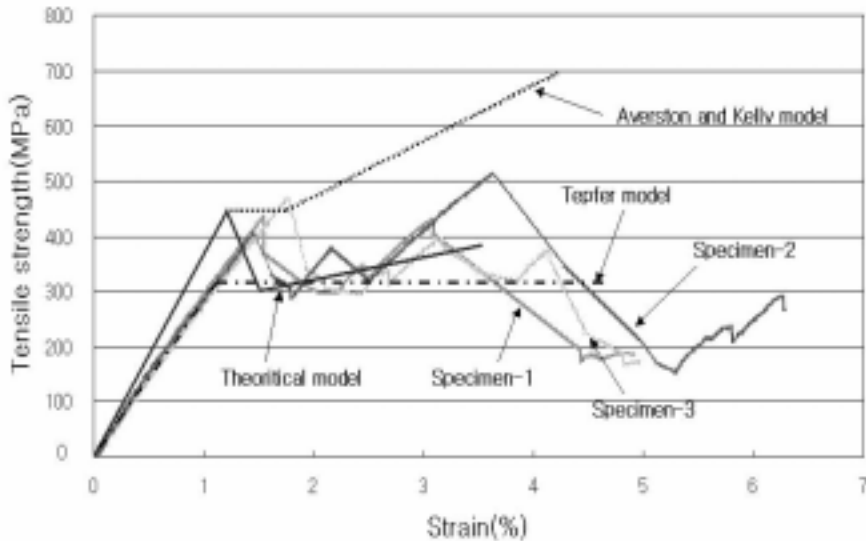


Fig. 5-18 Comparison between analytical prediction and experimental results of hybrid FRP rebar(C)

이론적 예측결과와 실험결과를 비교해 보면 개발된 모델은 Averston과 Kelly 모델 및 Tepfer 모델과 비교해서 실험결과에 근접한 결과를 보여주었다. 따라서 코

어 FRP 리바를 압출성형에 의해서 제조한 후 제직의 방법으로 슬리브를 구성하는 섬유로 외곽의 FRP 리바를 구성하는 하이브리드 FRP 리바의 경우 기존의 예측 모델보다는 본 연구에서 개발한 예측모델을 적용하는 것이 리바람직하다고 판단된다.

제 5절 요약 및 결론

본 연구는 콘크리트 구조물의 안전성 및 신뢰성을 확보하기 위하여 보강철근이 갖는 3%이상의 변형률과 소성변형 구간을 갖는 하이브리드 FRP 리바를 설계하기 위하여 응력-변형률 예측모델을 개발하였다. 이론적 예측모델은 인장실험을 통하여 비교분석 하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 하이브리드 FRP 리바의 인장 거동 예측모델은 초기 항복점까지의 거동은 Averston과 Kelly 모델에서 사용하였던 혼합규칙을 이용하여 예측하였다.
2. 하이브리드 FRP 리바의 인장 거동 예측 모델은 초기 강도감소점은 Tepfer 모델을 이용하여 하이브리드 FRP 리바의 구성 특성을 고려하여 변형률이 큰 섬유의 강도에 75%만을 유지한다고 가정하였다.
3. 초기 항복강도 후 하이브리드 FRP 리바의 인장 거동은 슬리브가 지속적으로 하중에 저항하면서 소성변형 구간을 가지게 되는데 이때의 소성변형구간의 기울기는 변형률이 큰 섬유의 탄성계수와 섬유의 혼입률에 의해서 결정되며 Averston 과 Kelly가 제시한 모델에서 결정된 식을 이용하였다.
4. 하이브리드 FRP 리바(A)는 f_{LU} (항복강도후 첫 번째 강도감소점: 저탄성계수 섬유 파괴강도의 75%)가 보강철근 SD45와 동일한 성능을 발휘하도록 설계된 리바로 인장실험결과 목표로한 f_{LU} 450MPa과 3%이상의 변형률 및 소성변형구간 확보를 모두 만족하는 결과를 보여주었다.

5. 하이브리드 FRP 리바(B)는 f_{LU} 가 보강철근 SD30과 동일한 성능을 발휘하도록 설계된 리바로 인장실험결과 f_{LU} 300MPa과 소성변형구간 확보는 만족하였으나 3%이상의 변형률은 만족하지 않았다. 그러나 본 연구에서는 f_{LU} 와 극한강도를 모두 300MPa으로 하여 설계에 적용하도록 결정하였다. 극한강도 300MPa일 때 변형률을 극한변형률로 하였으며 이때 항복변형률에서 극한변형률에 도달하기 위한 구간을 소성변형구간으로 하였다.
6. 하이브리드 FRP 리바(C)는 f_{LU} 가 보강철근 SD30과 동일한 성능을 발휘하도록 설계되었으며 인장실험결과 목표로한 f_{LU} 300MPa 및 3% 이상의 변형률과 소성변형구간을 모두 확보하는 결과를 보여주어 하이브리드 FRP 리바(B)보다 우수한 성능을 보여주었다. 이와 같은 결과는 슬리브를 구성하는 섬유로 사용된 아라미드섬유가 상대적으로 강도 및 변형률이 유리섬유보다 우수하였기 때문이다.
7. 하이브리드 FRP 리바의 응력-변형률을 예측할 수 있는 모델을 기존의 예측모델을 이용하여 개발한 하이브리드 FRP 리바에 맞게 변형 개발하였다.
8. 본 연구에서 개발한 인장거동 예측 모델은 기존의 예측 모델과 비교하여 실험 결과에 근접한 결과를 보여주었다. 따라서 코어 FRP 리바를 압출성형에 의해서 제조한 후 제직의 방법으로 슬리브를 구성하는 섬유로 외곽의 FRP 리바를 구성하는 하이브리드 FRP 리바의 경우 기존의 예측 모델보다는 본 연구에서 개발한 예측모델을 적용하는 것이 리바람직하다고 판단된다.
9. 하이브리드 FRP 리바의 파괴모드는 슬리브를 구성하는 섬유의 불규칙적인 파괴, 코어를 구성하는 섬유의 일반적인 파괴 및 슬리브와 코어 FRP 리바에 사용된 매트릭스 수지의 찢겨짐 파괴 등이 복합적으로 발생한다.

10. 슬리브를 구성하는 섬유는 지속적으로 파괴가 발생하면서 하중을 계속적으로 전달하는 동시에 하이브리드 FRP 리바가 완벽한 파괴가 발생할 때까지 소성 변형구간을 확보하도록 한다. 이때 아라미드섬유로 슬리브를 구성할 경우 아라미드섬유의 특성상 국부적인 단면감소와 신장 및 섬유의 찢개짐 등에 의하여 파괴가 발생하여 하중을 계속적으로 전달하는 역할이 강하며 유리섬유를 슬리브로 구성할 경우 유리섬유의 특성 파괴면이 매끄러운 취성 파괴의 경향을 나타내어 하중의 전달력이 급격하게 감소되어 소성변형 구간의 확보가 쉽지 않은 특성을 나타낸다.

제 6장 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 역학적 특성

제 1절 개 요

철근콘크리트 구조물의 철근 부식으로 인한 문제점을 해결하기 위하여 현재 사용이 증가되고 있는 FRP 리바(Fiber Reinforced Polymer rebar)는 강도가 높으면서도 부식에 대한 우려가 없고 보강재료로서 사용될 경우 강도/중량비가 커 콘크리트 구조물의 자중을 감소시킬 수 있으며 적은 보강량으로도 큰 인장 보강효과를 발휘할 수 있는 장점과 비중이 작아 운반 및 시공이 쉽다. 또한 개발된 FRP 리바의 물리·역학적 특성은 FRP 리바의 생산시 품질관리 측면에서 매우 중요한 요소이다. 특히 유효직경 및 비중, 인장강도, 전단강도, 압축강도는 쉽게 측정할 수 있으면서도 품질의 변화를 알아보는데 유용한 방법이다. 따라서 본 연구에서는 개발된 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 물리·역학적 성능을 평가하기 위하여 해외에서 사용되고 있는 CFRP ISO 리바, GFRP Aslan 리바 및 AFRP Technor 리바의 물리적 특성으로 유효직경 및 비중 역학적 특성으로 압축강도, 전단강도, 인장성능을 시험을 통하여 비교·분석하여 개발된 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 성능을 평가하려고 한다.

제 2절 실험계획 및 방법

1. FRP 리바

일반 및 하이브리드 FRP 리바의 물리·역학적 특성을 평가하기 위하여 8가지 종류의 FRP 리바를 시험하였다(Table 6-1). 해외에서 현재 사용되고 있는 FRP 리바는 압출성형과정을 통하여 생산된 제품으로 현재 콘크리트 보강재료로서 널리

리 사용되고 있는 CFRP ISO 리바, GFRP Aslan 리바 및 AFRP Technora 리바를 선택하였다.

Table 6-1 FRP rebar types

Manufactures	Fibers	Matrix	Diameter(mm)	Section
Hybrid FRP rebar (A)	Carbon+aramid	Vinylester	4.0	Circular
Hybrid FRP rebar (B)	Carbon+glass	Vinylester	4.0	Circular
Hybrid FRP rebar (C)	Carbon+aramid+glass	Vinylester	8.0	Circular
CFRP(Developed)	Carbon	Vinylester	6.5	Circular
GFRP(Developed)	Glass E	Vinylester	8.3	Circular
CFRP(ISO)	Carbon	Epoxy	9.4	Circular
GFRP(Aslan)	Glass E	Vinylester	9.4	Circular
AFRP(Technora)	Aramid	Vinylester	7.4	Circular

현재 사용되고 있는 FRP 리바의 표면형상 특성은 하이브리드 FRP 리바와의 비교실험을 위해서 표면을 규사 코팅한 CFRP 리바(캐나다 ISO Rod), 규사코팅과 나선형 wrap을 표면에 처리한 GFRP 리바(미국 Aslan rebar) 및 폴리머 매트릭스를 이용하여 이형철근과 동일한 형태로 표면을 처리한 AFRP 리바(일본 Technora)로 결정하였다. 본 연구에서 사용된 FRP 리바의 표면형상은 Fig. 6-1과 같다.



Fig. 6-1 Surface characteristics of FRP rebars

2. 실험방법

가. 물리적 특성

FRP 리바의 물리적 특성은 FRP 리바의 생산시 품질변화를 쉽게 측정할 수 있어 품질관리 측면에서 매우 중요한 특성 중에 하나이다. 특히 FRP 리바의 유효 직경과 비중은 FRP 리바의 성능에 큰 영향을 미칠 수 있어 정확한 측정 및 관리가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 하이브리드 FRP 리바의 물리적 특성 중 유효직경과 비중을 측정하였다.

1) 유효직경

FRP 리바의 유효 직경은 ASTM D3916에서 제안된 정밀 측정기계를 이용하여 FRP 리바의 몇 개의 점을 정하여 평균두께 및 최소두께를 측정하는 것으로 결정하였다. 본 연구에서는 버니어캘리퍼스를 이용하여 약 20cm 정도의 FRP 리바 공시체의 직경을 측정한 평균값으로 FRP 리바 공시체의 유효직경을 결정하였다.

2) 비중

FRP 리바의 비중은 쉽게 측정할 수 있는 특성으로 특히 재료의 특성의 변화를 알아 보는데 이용할 수 있다. 본 연구에서는 ASTM D 792-00의 “Standard Test Method for Density, and Specific Gravity of Plastics by Displacement”에 따라 결정하였다. 이때 시험용 저울은 0.001g의 정밀도를 가진 것을 사용하였으며 각 FRP 리바 공시체의 비중은 6-1식에 따라 결정하였다.

$$SG = \frac{a}{(a+w-b)} \cdot \dots \cdot (6-1)$$

여기서, a =대기중에서 FRP 리바 공시체의 중량

b =물속에서의 FRP 리바 공시체의 중량

c =시험용 용기의 중량

나. 역학적 특성

1) 압축강도

본 연구에서 FRP 리바의 압축강도시험은 FRP 리바의 압축거동과 내구성능을 평가하기 위하여 실시하였다. 시험시편의 길이는 직경의 2.5배로 결정하였는데 이와 같이 결정한 이유는 기존의 연구자들의 연구결과에 나타난 리바와 같이 시험결과와 변화의 정도가 가장 작은 결과를 나타내는 시험시편의 크기이기 때문이다. Fig. 6-2는 압축강도시험 모습이다.



Fig. 6-2 Compressive strength test set-up

2) 전단(ISS: Interlaminar shear stress)특성

전단특성을 평가하기 위하여 ASTM D 4475(Standard Test Method for Apparent Horizontal Shear Strength of Pultruded Reinforced Plastic Rods by in Short-Beam Method)의 방법을 사용하였다. ASTM D 4475의 방법에 의한 실험결과는 설계과정에 직접적으로 사용할 수 없으나 본 연구에서 개발한 하이브리드 FRP 리바와 기존 상용화된 FRP 리바의 전단특성을 비교하기 위하여 사용하였다.

가) 실험 장치 및 방법

ASTM D 4475의 SBT시험은 허용용량 5ton의 변위를 조절할 수 있는 UTM을 사용하여 변위의 속도를 1.3mm/min로 하여 실험을 실시하였다. 본 연구에서 사용한 FRP 리바 시험공시체와 실험장치의 대략적인 설명은 Fig. 6-3과 같다.

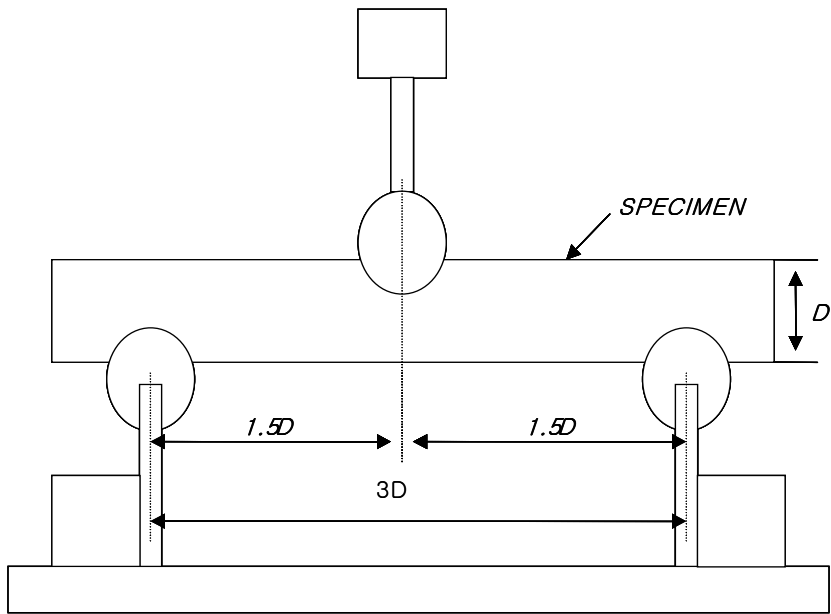


Fig. 6-3 Span configuration for 3D span

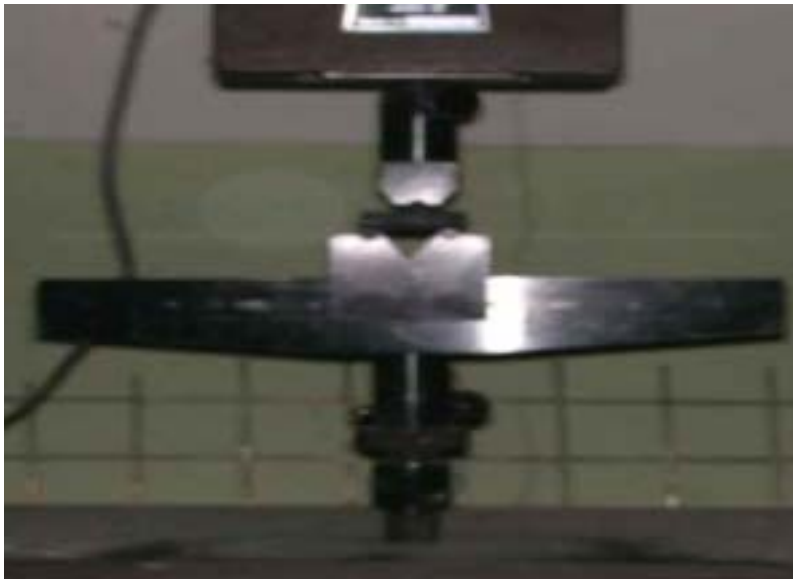


Fig. 6-4 Short beam test set-up

수평전단파괴에 영향을 미칠 수 있는 휨효과를 제거하기 위하여 시험공시체의 길이는 3D로 하였으며 시험공시체는 온도 23±2℃와 상대습도 50±5%의 항온항습실에서 24시간동안 동일한 내·외적인 환경조건을 만든 후 시험을 실시하였다. Fig. 6-4는 SBT 시험을 하는 사진이다. SBT 시험후 ISS(Interlaminar Shear Stress)는 다음과 같은 식 6-2를 사용하여 계산하였다.

$$S=0.849 \frac{P}{D^2} \dots \dots \dots (6-2)$$

여기서, S: 내부결합 전단응력(Interlaminar Shear Stress: MPa)

P: 파괴하중(KN)

D: 리바의 직경(cm)

3) 인장특성

인장시험 방법은 5장의 인장특성 시험방법과 동일하다.

제 3절 실험결과 및 분석

1. 물리적 특성

가. 유효직경

불규칙한 표면 형상을 가지고 있는 하이브리드 FRP 리바의 유효직경을 결정하기 위하여 실시한 유효직경 시험결과는 Table 6-2와 같다. 이와 같은 유효직경 시험결과는 하이브리드 FRP 리바의 생산시 품질관리 측면에서 매우 중요한 특성이 될 것이라 판단된다.

Table 6-2 Effective diameter, and area of FRP rebars

Type of FRP rebars	Diameter(mm)	Area(mm ²)
CFRP(ISO)	0.94	0.69
CFRP(Aslan)	0.94	0.69
AFRP(Technora)	0.74	0.43
CFRP(Developed)	0.65	0.33
GFRP(Developed)	0.83	0.54
Hybrid FRP(A)	0.40	0.13
Hybrid FRP(B)	0.40	0.13
Hybrid FRP(C)	0.83	0.54

나. 비중

FRP 리바가 보강철근과 비교하여 큰 장점 중에 하나가 비중이 철근에 비하여 작아 강도/중량비가 크고 경량이어서 운반 및 시공 등이 쉽다는 것이다. Table 6-3은 하이브리드 FRP 리바의 비중시험결과를 보여주고 있다. 시험결과 모든 FRP 리바의 비중이 보강철근의 1/4정도이며 특히 하이브리드 FRP 리바는 기존의 CFRP ISO 리바, GFRP Aslan 리바와 비교하여 약 1/2의 정도 작음을 알 수 있었다. 이와 같은 결과는 기존의 CFRP ISO 리바 및 GFRP Aslan 리바는 표면이 규사코팅을 실시하여 규사의 비중으로 인한 전체적인 FRP 리바의 중량이 증가하였기 때문이다. 그러나 AFRP Technora 리바의 비중은 본 연구에서 개발한 하이브리드 FRP 리바, CFRP 리바, GFRP 리바와 거의 비슷한 비중을 보여주었다. 이는 개발된 FRP 리바와 AFRP Technora 리바는 모두 섬유와 결합제인 수지로만 구성되어 있기 때문에 거의 동일한 성분이기 때문이다.

Table 6-3 Specific gravity of FRP rebars

Type of FRP rebars	Specific gravity
CFRP(ISO)	2.30
CFRP(Aslan)	2.00
AFRP(Technora)	1.31
CFRP(Developed)	1.60
GFRP(Developed)	1.74
Hybrid FRP(A)	1.35
Hybrid FRP(B)	1.44
Hybrid FRP(C)	1.40
Steel rbar	7.80

2. 역학적 특성

가. 압축강도

일반 및 하이브리드 FRP 리바의 압축강도 시험결과는 Fig. 6-5와 같다. CFRP ISO 리바(193.1MPa)와 GFRP Aslan 리바 (319.6MPa) 및 AFRP Technora 리바 (136.5MPa)에 비하여 하이브리드 FRP 리바의 압축강도는 각각 431.4MPa(A), 348.1MPa(B), 413.0MPa(C)로 상대적으로 GFRP 리바의 압축강도와 비교하여 높은 값을 나타내었다. 또한 개발된 CFRP 리바와 GFRP 리바의 압축강도는 각각 477.6MPa, 415.7MPa을 보여주어 CFRP ISO 리바와 GFRP Aslan 리바 및 AFRP Technora 리바 보다 우수한 결과를 보여주었다(Fig. 6-5). 이와 같은 결과는 하이브리드 FRP 리바의 제조시 3차원제직(3-D 브레이딩)에 의한 생산방법을

선택함으로써 일반적인 FRP 리바에서 발생할 수 있는 쪼개짐에 의한 파괴를 방지하여 지압 파괴가 발생했기 때문이다. 또한 개발된 CFRP 리바 및 GFRP 리바 역시 표면에 부착을 증가시키기 위하여 3차원 제직에 의한 굴곡(Rib)을 주어 파괴시 완벽한 쪼개짐에 의한 파괴를 외부의 제직한 섬유부분이 방지하였기 때문이다(Fig. 6-6).

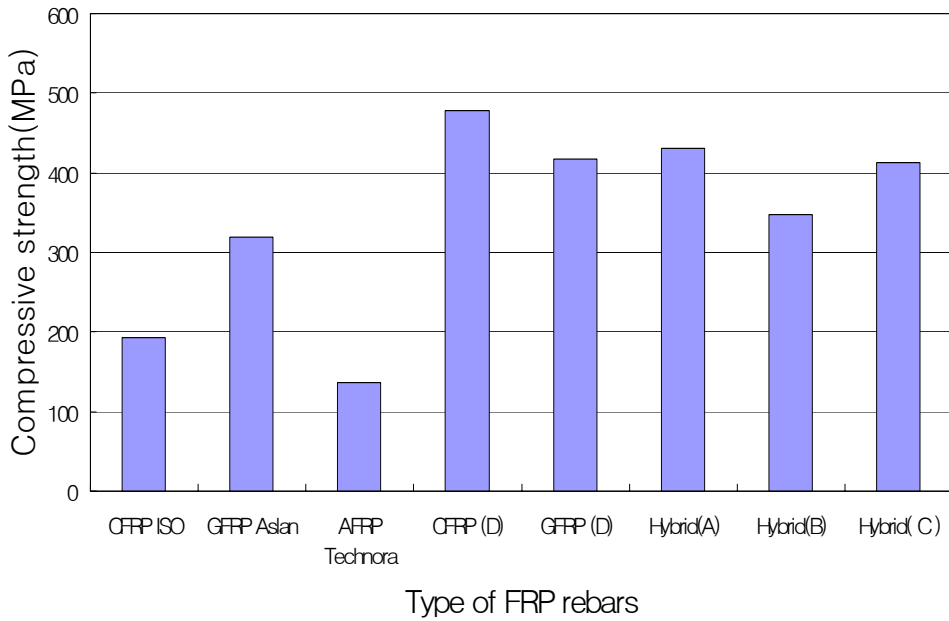


Fig. 6-5 Compressive strength of control FRP rebar specimens



(a) CFRP ISO



(b) GFRP



(c) AFRP



(d) CFRP(D)



(e) GFRP(D)



(f) Hybrid (A)



(g) Hybrid (B)



(h) Hybrid (C)

Fig. 6-6 Compressive failure modes of FRP rebars

나. 전단강도(Interlaminar shear stress: ISS)

하이브리드 FRP 리바의 경우 변위가 지속적으로 증가함에 따라 ISS 역시 지속적으로 증가함을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 기존 FRP 리바가 섬유 방향 배열을 통한 성형압출과정에 의한 생산으로 섬유의 방향으로 쪼개짐 파괴가 발생하는데 비하여 고연성 하이브리드 FRP 리바는 쪼개짐 파괴가 아닌 섬유의 지압에 의한 파괴가 발생하기 때문이다(Fig. 6-7). 또한 하이브리드 FRP 리바(A), (B), (C)의 ISS 시험결과는 각각 119.0MPa, 102.0MPa, 114.5MPa를 나타내었으며 하이브리드 FRP 리바(A)가 상대적으로 (B) 및 (C) 리바 보다 전단강도가 큰 이유는 아라미드섬유가 유리섬유보다 상대적으로 변형률 및 강도가 크기 때문이다. 또한 하이브리드 FRP 리바(C)가 하이브리드 FRP 리바(B)보다 전단강도가 더 큰 이유는 하이브리드 FRP 리바(C)역시 유리섬유를 포함하고 있지만 아라미드섬유를 적용하여 표면을 처리하였기 때문에 하중에 대한 저항력이 증가하였기 때문이다. 개발된 CFRP 리바 및 GFRP 리바는 파괴후 일정한 잔류변형 즉 섬유가 하중에 저항하면서 변형이 증가하는 경향을 보여주고 있다. 그러나 CFRP ISO 리바 및 GFRP Aslan 리바는 쪼개짐에 의한 파괴가 발생하여 하중의 저항 없이 파괴가 발생하는 경향을 보여주었다. 또한 AFRP 리바는 표면의 돌출부를 섬유로 감싼 다음 폴리머 매트릭스로 코팅을 실시하였기 때문에 개발된 CFRP 리바 및 GFRP 리바와 마찬가지로 파괴후 일정한 잔류변형을 가지는 경향을 보여주었다. 그러나 표면을 처리한 섬유의 양과 형상으로 인하여 큰 하중의 증가는 보여주지 않았다. 개발된 CFRP 리바 및 GFRP 리바의 전단강도는 각각 76.8MPa 과 70.1MPa으로 CFRP ISO 리바(46.7MPa), GFRP Aslan 리바(53.2MPa) 및 AFRP 리바(39.7MPa)보다 우수한 결과를 보여주었다. 이는 섬유의 3차원 제직으로 쪼개짐에 의한 파괴보다는 섬유가 횡방향의 힘을 받아 지압하는 형태로 하중을 지속적으로 저항하였기 때문이다.

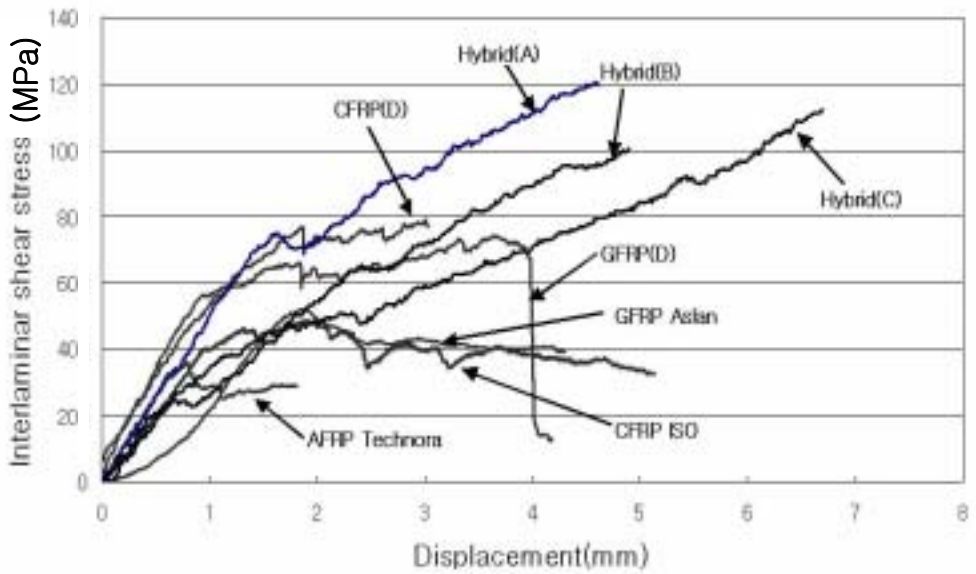


Fig. 6-7 Interlaminar shear stress-displacement behavior of FRP rebars

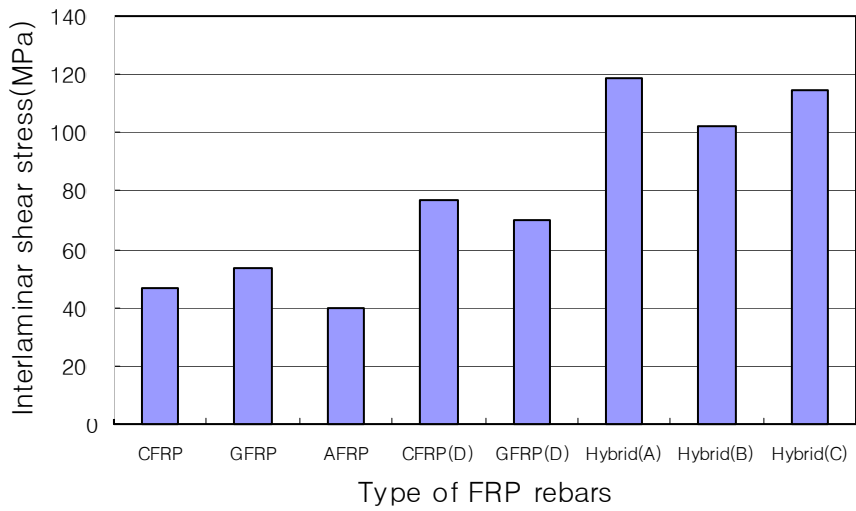


Fig. 6-8 Interlaminar shear stress of control FRP rebar specimens

다. 인장강도

기준환경에 노출된 하이브리드 FRP 리바의 인장시험결과는 일반 FRP 리바 공시체가 응력과 변형률이 선형적으로 증가하다가 급격한 파괴를 발생시키는 취성적 거동을 하는 것과 달리 3%이상의 소성변형 구간을 확보할 수 있었다. 공시체의 응력-변형률 관계는 변형률이 증가하면 응력도 선형적으로 증가하다가 급격한 파괴를 발생시키는 취성적 거동을 하였다(Fig. 6-9).

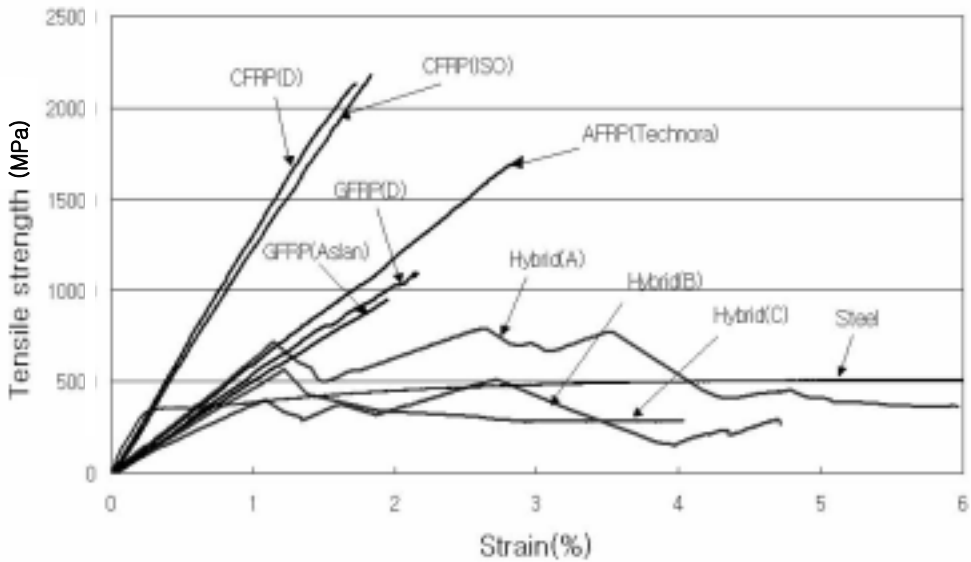
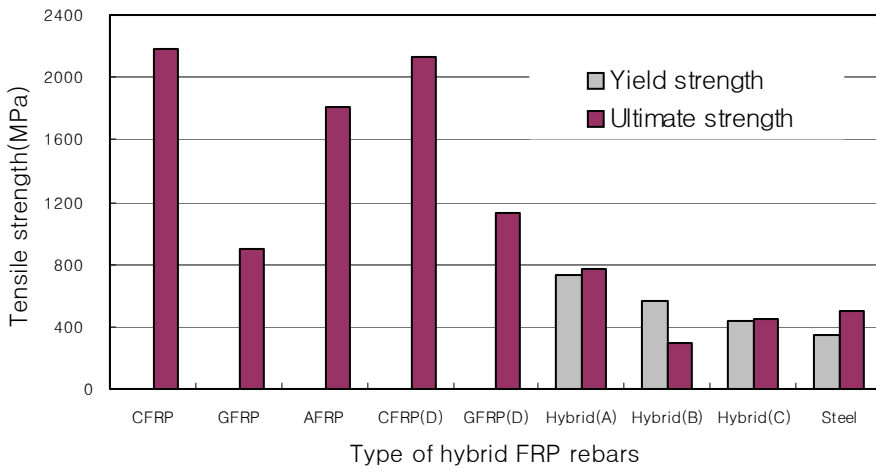


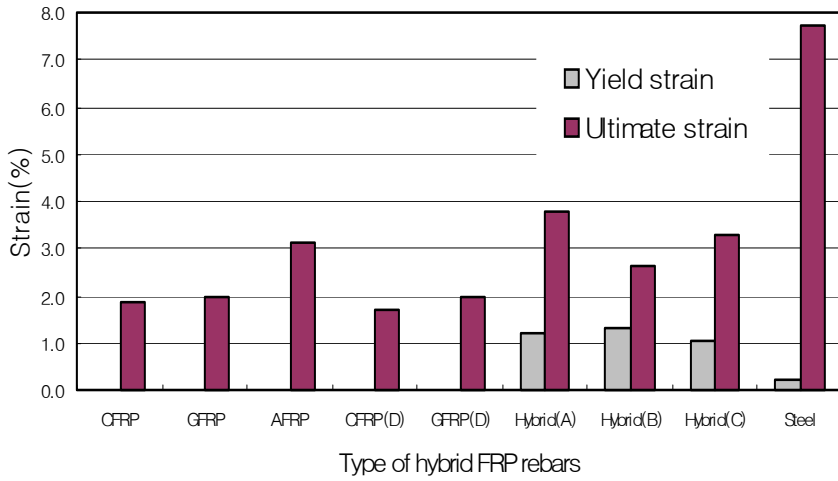
Fig. 6-9 Tensile strength-strain behavior of FRP rebars and steel rebar

하이브리드 FRP 리바와 보강철근의 인장거동을 비교하면 보강철근에 비하여 안정적이지는 않지만 적어도 3%이상의 소성변형구간을 확보할 수 있었다. 특히 하이브리드 FRP 리바(A)의 경우 보강철근보다 높은 강도 이상을 유지하면서도 약 4%이상의 변형률을 보여주었다. 하이브리드 FRP 리바(C) 또한 강도는 작지만 계속해서 하중이 증가하는 모양을 보여주었다. 하지만 하이브리드 FRP 리바(B)의 경우 지속적으로 인장강도가 감소하기 때문에 만족할 만한 응력-변형률 거동은 보여주지 못하였다. 이와 같은 결과는 하이브리드 FRP 리바의 경우 변형률을 증가시키기 위하여 사용된 아라미드섬유 및 유리섬유의 특성에 따른 것으로 아

라미드섬유는 강도 및 변형률이 모두 커 탄소섬유의 파괴가 발생할 때 생기는 충격에 의해 저항하는 능력이 강하지만 유리섬유의 경우 탄소섬유가 파괴할 때 발생하는 충격에 많은 영향을 받기 때문이다. 또한, 하이브리드 FRP 리바의 인장강도 특성은 항복강도와 극한강도를 모두 갖는다. 특히 하이브리드 FRP 리바(A)는 항복강도(735.9MPa) 및 극한강도(765.7MPa)가 매우 높은 값을 보여주었다. 그러나 하이브리드 FRP 리바(B)의 경우는 항복강도는 565.1MPa이었지만 극한강도는 명확히 측정할 수 없어 300.0MPa으로 고정하였다. 하이브리드 FRP 리바(C)는 항복강도가 434.7MPa을 나타내었고 극한강도는 446.5MPa을 나타내었다(Fig. 6-10). 하이브리드 FRP 리바의 파괴형상을 보면 CFRP 리바, GFRP 리바의 파괴형상을 살펴보면 섬유의 일방향 배열에 영향을 받아 파괴될 때 완벽하게 파괴되는 형상을 보여주고 있으며 AFRP 리바 및 개발된 CFRP 리바, GFRP 리바는 완전한 파괴가 파괴된 일부분에서만 파괴되는 경향을 보여주었다. 그러나 하이브리드 FRP 리바의 파괴형상은 인장강도가 증가할수록 파괴되는 부분에서 보강 철근과 비슷하게 극부적인 단면적 감소가 발생하면서 지속적으로 하중에 저항하다가 파괴되는 형상을 보여주었다(Fig. 6-11).



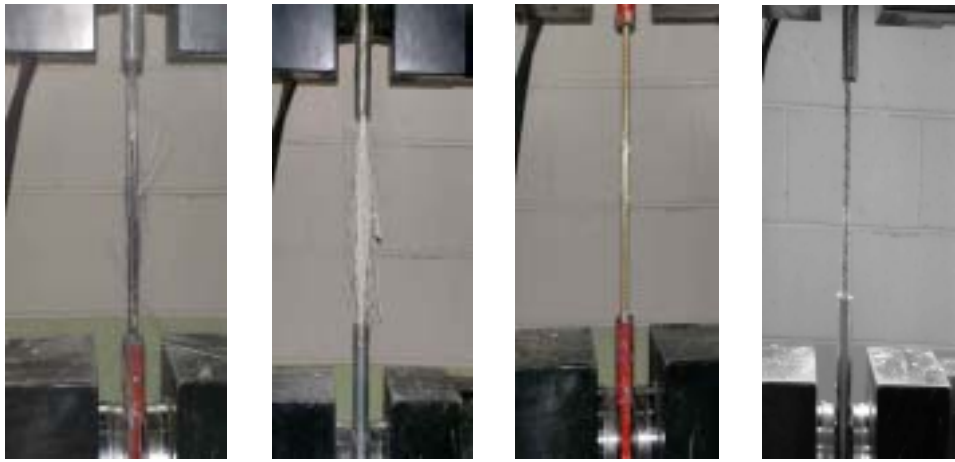
(a) Tensile strength



(b) Tensile strain

Fig. 6-10 Tensile strain of hybrid FRP rebars: (a) tensile strength,

(b) tensile strain

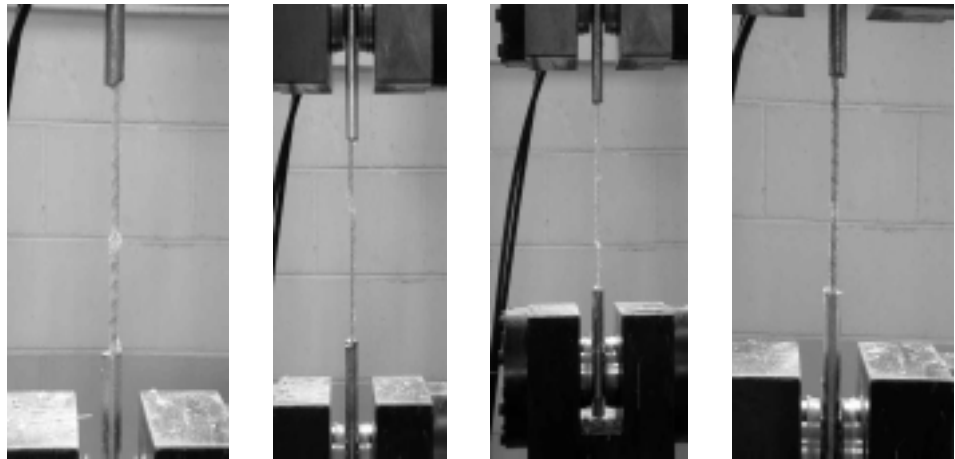


(a) CFRP

(b) GFRP

(c) AFRP

(d) CFRP(D)



(e) GFRP(D)

(f) Hybrid(A)

(g) Hybrid(B)

(h) Hybrid(C)

Fig. 6-11 Tensile failure modes of hybrid FRP rebars

제 4절 요약 및 결론

일반 및 하이브리드 FRP 리바의 물리적 특성 및 역학적 특성을 평가하기 위하여 본 장에서는 물리적 특성으로 FRP 리바의 유효직경 및 비중을 측정하였으며 역학적 특성으로 압축강도, 전단강도, 인장성능을 측정하였다. 시험결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 유효직경 시험결과 하이브리드 FRP 리바 (A), (B), (C)가 각각 0.4cm, 0.4cm, 0.83cm로 나타났으며 개발된 CFRP 리바 및 GFRP 리바는 각각 0.65cm, 0.83cm로 나타났다.
2. 개발된 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 비중은 약 1.4~1.7 정도로 보강철근의 비중인 7.8에 비하여 매우 작은 값을 보여주었다. 이는 운반 및 시공을 쉽게 할 수 있는 매우 유리한 장점이다.
3. 하이브리드 FRP 리바의 비중은 기존의 CFRP ISO 및 GFRP Aslan 리바와 비교하여 작은 값을 나타내었다. 이는 CFRP ISO 및 GFRP Aslan 리바는 부착력을 증가시키기 위하여 표면을 규사코팅을 실시하였기 때문에 이로 인하여 비중이 증가하였기 때문이다.
4. 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 압축강도 및 전단강도 특성은 기존의 CFRP ISO 및 GFRP Aslan 리바와 비교하여 매우 우수한 값을 나타내었다. 이는 CFRP ISO 및 GFRP Aslan 리바가 쪼개짐에 의한 파괴가 주로 발생하는 반면 개발된 일반 및 하이브리드 FRP 리바는 3차원 제직 기술로 FRP 리바의 표면을 처리하였기 때문에 쪼개짐에 의한 파괴를 방지하였기 때문이다.
5. 개발된 일반 FRP 리바의 인장 특성은 기존의 CFRP ISO 및 GFRP Aslan 리바와 거의 동등한 인장강도 및 탄성계수 값을 보여주었다. 또한 하이브리드 FRP 리바는 목표로한 3%이상의 소성변형구간을 가지고 있어 일반 FRP 리바

가 가지는 취성적 파괴성질을 개선할 수 있었다. 따라서 콘크리트 구조물의 보강재로 사용되어 안전성 및 신뢰성을 증가시킬 수 있을 것이라 판단된다.

제 7장 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 내구성

제 1절 개요

철근콘크리트 구조물은 철근의 부식으로 인한 문제점을 해결하기 위하여 현재 사용이 증가되고 있는 FRP 리바(Fiber Reinforced Polymer rebar)는 강도가 높으면서도 부식에 대한 우려가 없고 보강재료로서 사용될 경우 강도/중량비가 커 콘크리트 구조물의 자중을 감소시킬 수 있으며 적은 보강량으로도 큰 인장 보강 효과를 발휘할 수 있는 장점과 비중이 작아 운반 및 시공이 쉽다. 그러나 이와 같은 특성에도 불구하고 FRP 리바는 내구성에 대한 실제적인 시험자료의 부족 및 설계기준의 미정립으로 인하여 그 사용이 제한되어 왔다. 또한 기존에 제시되어 있는 FRP 리바에 대한 대부분의 연구는 크리프, 응력부식, 피로, 환경적 피로, 화학 및 물리적 열화현상에 대한 것에 집중되어 왔다. 그러나 이와 같은 대부분의 연구는 콘크리트 구조물에 적용하기 위한 것이 아니라 항공산업 및 군수 산업에 적용하기 위한 연구로 콘크리트의 보강재료로 사용되는 FRP 리바와는 근본적인 차이가 있다. FRP 리바의 내구성에 대한 평가는 FRP 리바가 널리 사용되고 있는 외국의 선진국을 중심으로 이루어져 왔으며 연구결과를 기본으로 하여 환경적 영향을 고려하는 환경영향계수를 도입하여 설계에 적용시키고 있다. 그러나 적용하는 환경영향계수는 획일화된 기준이 없이 각각 서로 다른 기준으로 사용하고 있다. 이와 같은 이유는 FRP 리바의 생산방법, 품질기준 등이 명확히 제시되어 있지 않기 때문에 각 생산제품에 따라 그 특성이 차이가 발생하기 때문이다. 또한 각 국의 환경조건이 어느 정도 상이한 차이가 발생하기 때문에 적용하는 장소에 따라 열화특성이 또한 다르기 때문이다. 따라서 본 연구에서 개발된 고연성 하이브리드 FRP 리바 역시 기존 제품과 상이한 생산방법을 적용하였고 재료의 특성 또한 다르기 때문에 이를 고려한 환경영향 계수를 결정하는 연구가 필요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 콘크리트 보강용으로 3%이상의 소성변형구간을 갖는 하이브리드 FRP 리바를 촉진열화환경에 노출시켜 압축, 전

단, 인장성능 등의 역학적 특성을 평가하여 기존에 외국에서 제시하고 있는 기준 중 ACI에서 제시하고 있는 환경영향계수와 비교·분석하여 최종적으로 개발된 하이브리드 FRP 리바의 환경영향계수를 결정하고자 한다.

제 2절 자연적인 열화와 촉진열화의 관계

일반적으로 콘크리트 구조물에 필요한 공용연수는 50년 이상이지만 현재 FRP 리바에 대한 측정결과는 몇 년간이 전부이다. 따라서 FRP 리바에 대한 내구성의 평가는 촉진열화 시험에 의하여 평가될 수 있다. 그러나 실제 조건의 공용연수와 촉진조건에서 시간과의 관계는 명백하지 않은 상태이다. FRP 리바의 공용연수를 예측하기 위한 기존의 연구결과를 살펴보면 Katsuki 와 Uomoto는 Fick's 법칙을 이용하여 GFRP 리바의 파괴를 모형화 하였다. 즉, 서로 다른 길이의 GFRP 리바를 알칼리 용액에 침지시킨 후 EPMA(Electron probe microscope analyser)를 사용하여 나트륨(Na)의 관입 깊이를 결정하였으며 알칼리의 확산계수를 동일한 식을 이용하여 계산하였다. 이를 위한 기본적인 가정으로 GFRP 리바 내에서 강도는 나트륨의 관입되는 깊이까지 파괴되기 때문에 이를 이용하면 관입 깊이로써 강도를 계산할 수 있다고 하였다. 이를 이용하여 40℃의 온도와 1.0M 농도를 가진 NaOH 용액에 침지한 촉진열화 시험을 실시한 GFRP 리바의 강도감소를 예측하였다. Saadatmanesh와 Tannous는 다양한 FRP 텐던의 인장강도 감소를 예측하였다. 그들은 텐던의 강도 손실을 예측하는데 Fick's 법칙을 사용하였다. Fick's 법칙을 이용한 접근방법은 FRP 텐던내에 알칼리 이온의 침투를 추정하는 것이다. 그러나 Fick's 법칙을 이용한 이와 같은 접근 방법은 현재 개발된 FRP 리바에 적용하는데는 약간의 문제점이 있다. 왜냐하면, 과학기술의 발달로 FRP 리바의 결합재료로 사용되는 폴리머 재료와 보강섬유의 품질이 매우 높아졌기 때문이다. 현재 이와 같은 문제점을 고려하여 FRP 리바의 공용연수를 예측하는데 많이 사용되는 방법은 시간-온도와의 관계를 이용한 방법이 있다. 이 방법의 주요 접근 방법은 실제 구조물의 노출조건을 시간변환계수를 이용하여 결정하고 결정된 시간변환계수를 이용하여 노출온도 및 노출기간을 결정하는 것이다. 이와 같은 접근 방법의 사용상 장점은 비교적 장기간(약 10년간) 노출된 실제구조물에

서 얻을 수 있는 결과를 결정된 온도와 시간을 사용하면 짧은 시간 내에 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있다는 것이다. 그러나 이 방법 역시 사용상의 한계는 있다. 이 방법을 처음 제안한 Litherland는 이 식을 개발할 때 유리섬유보강 콘크리트의 공용연수를 예측하기 위해서 개발하였기 때문이다. 즉, 이 방법의 처음 도입은 FRP 리바에 적용하기 위해서가 아니라 유리섬유보강 콘크리트에 적용하기 위한 것이기 때문이다. 따라서 명백하게 Litherland의 접근방법이 타당하다고 할 수는 없지만 현재까지 이루어진 대부분의 연구가 같은 방법에 따라 이루어져 왔기 때문에 본 연구에서도 이와 같은 방법에 따라 촉진열화 와 자연열화의 관계를 정립하였다. Litherland 등의 식은 온도와 화학적 반응 또는 확산과의 관계로 주어졌으며 7-1식과 같다.

$$N/C = 0.098 e^{(0.0558T)} \dots\dots\dots(7-1)$$

여기서, N=자연열화기간

C=촉진열화기간

T=촉진온도(°F)

제 3절 시험계획 및 방법

1. FRP 리바

일반 및 하이브리드 FRP 리바의 내구성능을 평가하기 위하여 8가지 종류의 FRP 리바를 시험하였다.

2. 실험계획

일반 및 하이브리드 FRP 리바의 내구성능을 평가하기 위하여 12가지의 환경조건을 고려하였으며 촉진환경에 노출 후 압축, 전단 및 인장시험을 실시하여 그 성능을 평가하였다. 기준 공시체는 22°C의 상온의 실험실환경에 노출시켜 수분흡

수 및 온도변화로 인한 결함의 가능성을 최소화 하였으며 역학적 시험결과에 영향을 미칠 수 있는 운반 및 절단에 의한 손상을 최소화하였다. Table 7-1은 역학적 특성 및 내구성능 시험에 사용된 FRP 리바의 환경조건에 따른 압축, 전단, 인장 시험 공시체의 수를 나타낸 것으로 압축, 전단 및 인장시험 공시체를 AFRP 리바를 제외하고는 모두 각 환경조건마다 5개의 공시체를 시험하여 압축 85개, 전단 85개, 인장 85개의 공시체를 시험하였다. 또한 AFRP 리바의 경우 각 환경조건마다 압축, 전단 및 인장 공시체를 각각 3씩으로 하여 총 51개씩의 공시체를 시험하였다.

Table 7-1 Conditioning and compressive, interlaminar shear stress, tensile test of FRP rebars

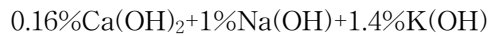
	Temp.	exposure day	CFRP (ISO)	GFRP (Aslan)	AFRP (Technora)	CFRP (D)	GFRP (D)	Hybrid (A)	Hybrid (B)	Hybrid (C)
Control	22℃	-	5	5	3	5	5	5	5	5
Alkaline exposure	60℃	50	5	5	3	5	5	5	5	5
	60℃	100	5	5	3	5	5	5	5	5
Acid exposure	60℃	50	5	5	3	5	5	5	5	5
	60℃	100	5	5	3	5	5	5	5	5
Salt exposure	60℃	50	5	5	3	5	5	5	5	5
	60℃	100	5	5	3	5	5	5	5	5
Deionized water exposure	60℃	50	5	5	3	5	5	5	5	5
	60℃	100	5	5	3	5	5	5	5	5
Repeated freezing and thawing	-10℃ ~ 4℃	75	5	5	3	5	5	5	5	5
Repeated wetting and drying	22℃ ~ 60℃	50	5	5	3	5	5	5	5	5
Long-term over dry	60℃	50	5	5	3	5	5	5	5	5
Repeated Salt wetting-drying	22℃ ~ 60℃	50	5	5	3	5	5	5	5	5
Repeated Salt freezing-thawing	-10℃ ~ 22℃	50	5	5	3	5	5	5	5	5
CaCl ₂ solution immersion	22℃	50	5	5	3	5	5	5	5	5
Na ₂ SO ₄ solution immersion	22℃	50	5	5	3	5	5	5	5	5
UV exposure	22℃	14	5	5	3	5	5	5	5	5
Total			85	85	51	85	85	85	85	85

3. 촉진열화환경

일반 및 하이브리드 FRP 리바의 내구성능을 평가하기 위하여 본 연구에서는 기존 연구자들이 제시한 환경조건을 참고로 하여 콘크리트 보강재료로서 FRP 리바가 받을 수 있는 12가지의 노출조건을 고려하였다. 각 노출 환경을 자세히 설명하면 아래와 같다.

가. 알칼리 환경

일반 및 하이브리드 FRP 리바의 알칼리 환경에 대한 영향은 pH가 높은 알칼리 용액을 사용하기보다는 일반적인 콘크리트 자체의 배합수의 pH를 고려하여 pH 12.6으로 결정하였다. 알칼리 용액에 제조하기 위한 방법은 다음과 같은 세가지 약품을 혼합하였다.



하이브리드 FRP 리바는 알칼리 용액의 온도는 식 7-1을 이용하여 60℃로 하였으며 촉진시험기간은 50일 및 100일간 결정하였다. 이 촉진열화시험기간을 실제 구조물에 적용하면 35년 및 70년과 일치하는 기간이다.

나. 산환경

일반 및 하이브리드 FRP 리바의 산에 대해 영향을 평가하기 위하여 pH 2.92의 0.6% 아세트산용액에 FRP 리바를 침지하였다. 산용액의 온도는 알칼리 환경과 마찬가지로 식 7-1을 사용하여 실제 콘크리트 구조물의 노출기간인 35년과 70년으로 결정하였다.

다. 중성 환경

일반 및 하이브리드 FRP 리바의 중성환경에 대한 영향을 평가하기 위하여 수돗물에 FRP 리바를 침지시키는 방법을 사용하였다. 중성용액의 온도 및 노출기간은 알칼리 및 산환경과 마찬가지로 식 7-1을 사용하여 실제 콘크리트 구조물의 노출기간인 35년과 70년으로 결정하였다.

라. 염해 환경

하이브리드 FRP 리바의 주요 사용목적 중에 하나는 보강 철근의 부식에 대한 문제를 해결하기 위한 것이다. 따라서 본 연구에서는 염해에 대한 영향을 평가하기 위하여 3%의 NaCl 용액에 하이브리드 FRP 리바를 침지하여 그 성능을 평가하였다. NaCl 용액의 온도 및 노출기간은 알칼리 및 산환경과 마찬가지로 식 7-1을 사용하여 실제 콘크리트 구조물의 노출기간인 35년과 70년으로 결정하였다.

마. 건조-습윤반복

건조-습윤 반복의 현상은 뜨거운 여름철에 콘크리트 구조물의 온도가 약 60°C 이상으로 상승하고 소나기 등으로 인하여 급격하여 20°C 정도로 하강하는 조건을 고려하여 결정하였다. 이를 위하여 FRP 리바 공시체를 약 60°C의 오븐에 24시간 건조시킨 후 20°C 물에 24침지하는 조건을 일회 반복으로 하여 50일간 25회 반복하여 실시하였다.

바. 장기 오븐 건조

여름철 콘크리트 구조물은 장기간 온도가 상승되어 유지하는 환경에 노출되게 된다. 따라서 이와 같은 지속적인 고온에 FRP 리바가 노출되었을 때의 영향을

평가해야 한다. 본 연구에서는 60℃의 오븐에 50일간 FRP 리바를 노출시킨 후 그 영향을 평가하였다.

사. 동결-융해반복

일반 및 하이브리드 FRP 리바의 동결융해에 대한 저항성은 수분이 FRP 리바의 내부에 침투되었을 때 동결과 융해가 반복되면서 그에 따른 팽창으로 인하여 FRP 리바의 성능이 감소되는 것을 평가하기 위하여 KS F2456에 따라 시험을 실시하였다.

아. 황산염 침지

일반 및 하이브리드 FRP 리바의 황산염에 대한 저항성을 평가하기 위하여 Na₂SO₄ 10%용액에 50일간 침지시키는 방법을 사용하였다.

자. 용빙제한경

일반 및 하이브리드 FRP 리바가 콘크리트 교량 등의 포장구조물에 적용시 겨울철에 용빙제로 사용되는 염화칼슘에 노출됨으로써 FRP 리바의 성능저하가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 하이브리드 FRP 리바의 염화칼슘에 대한 영향을 평가하고자 4%의 염화칼슘용액에 50일간 하이브리드 FRP 리바를 노출시킨 후 겨울철 용빙제에 대한 영향을 평가하고자 하였다.

차. 염해 건조-습윤반복

염해에 노출시킨 후 건조-습윤 반복은 리바다에 접해 있는 해양 콘크리트 구조물의 경우 파도 및 조석간만의 차에 의하여 건조와 습윤이 반복하는 현상을 경험하게 된다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 현상을 고려하여 하이브리드 FRP

리바를 약 60℃의 오븐에 24시간 건조시킨 후 20℃의 3% NaCl 용액에 24침지하는 조건을 일회 반복으로 하여 50일간 25회 반복하여 실시하였다.

카. 염해 동결-융해

염해에 노출시킨 후 동결-융해 반복은 리바다에 접해 있는 해양 콘크리트 구조물의 경우 직접적으로 리바다에 접해 있거나 근접에 있는 리바람에 의하여 소금 성분이 운반됨으로써 구조물이 동결과 융해를 반복할 때 콘크리트 구조물의 파괴를 촉진시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 현상을 고려하여 하이브리드 FRP 리바를 약 20℃의 4% NaCl 용액에 24시간 침지시키고 -10℃의 냉동고에서 동결시키는 방법으로 50일간 25회 반복하여 실시하였다. Fig.8-3은 염해 동결-융해의 시험 모습이다.

타. 자외선 노출

FRP 리바의 자외선 노출에 대한 저항성의 평가는 콘크리트 구조물의 건설기간에 FRP 리바가 장기간 자외선에 노출될 수 있다.. 일반적으로 자외선에 장기간 노출되면 FRP 리바는 폴리머의 분해로 인하여 그 성능이 감소하는 것으로 알려져 있다. 특히 AFRP 리바의 경우 장기간 자외선에 노출되면 그 성능이 현저히 감소하는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 환경에서 하이브리드 FRP 리바의 영향을 평가하기 위하여 14일간 300~800nm 스펙트럼 주파수대에서 $6.80 \times 10^{-2} \text{W/cm}^2$ 의 방산선에 노출시키는 방법을 사용하여 하이브리드 FRP 리바의 자외선에 대한 저항성을 평가하였다.

4. 실험방법

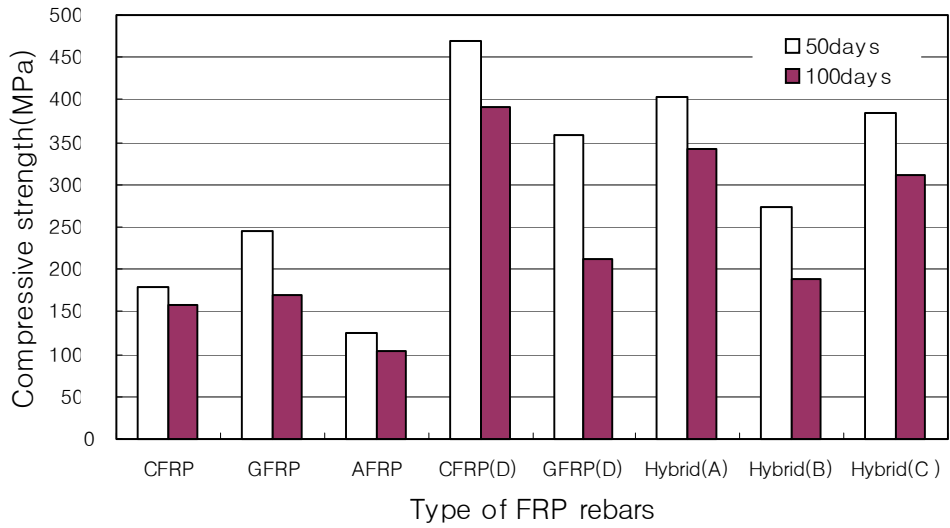
일반 및 하이브리드 FRP 리바의 내구성능은 FRP 리바의 촉진환경에 노출후 압축강도, 전단강도, 인장강도 시험을 실시하여 평가하였다. 시험방법은 6장에서 제시하였던 방법과 동일하다.

제 4절 실험결과

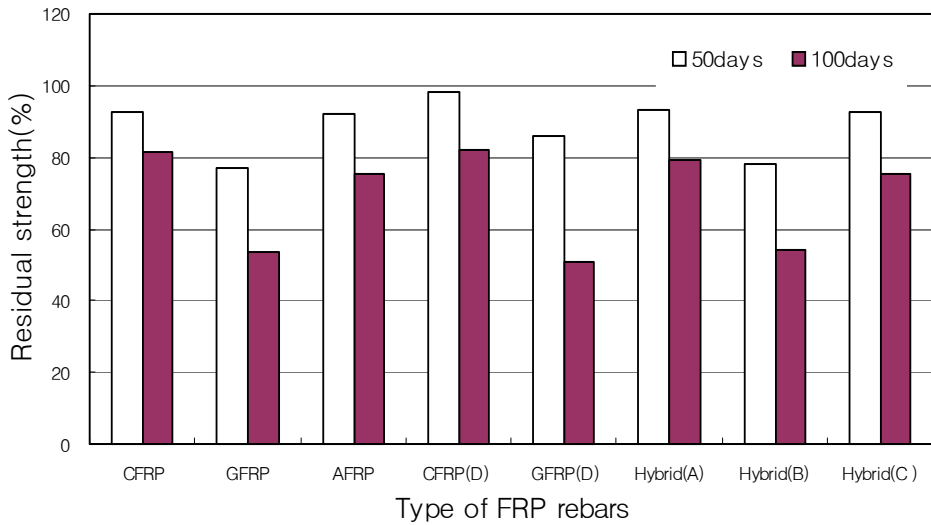
1. 압축강도

가. 알칼리 환경

알칼리환경에 노출시킨 하이브리드 FRP 리바의 압축강도 시험결과 50일 노출 후 잔류압축강도는 76.8%의 GFRP Aslan 리바 와 78.3%의 하이브리드 FRP 리바(B)를 제외하고는 모두 80%이상의 우수한 저항성을 나타내었다. 특히 하이브리드 FRP 리바(A)와 (C) 잔류 압축강도가 93.4%와 92.9%로 CFRP ISO 리바와 개발된 CFRP 리바 및 AFRP 리바와 같이 90%이상의 우수한 값을 보여주었다. 또한 개발된 GFRP 리바 역시 86.0%로 알칼리 용액에 50일 노출후의 우수한 저항성을 보여주었다. 100일간 노출시킨 하이브리드 FRP 리바의 잔류 압축강도는 유리섬유가 포함된 하이브리드 FRP 리바(B)의 경우 50%대의 저항성을 보여주었으며 탄소섬유와 아라미드섬유가 주 구성성분인 하이브리드 FRP 리바(A) 및 (C)의 경우 75%이상의 값을 보여주었다. 또한 개발된 CFRP 리바 및 GFRP 리바는 80%대 초반의 값을 보여주었으며 개발된 GFRP 리바 및 GFRP Aslan 리바는 50%의 낮은 알칼리 저항성을 보여주었다. AFRP Technora 리바는 약 75% 정도의 잔류압축강도를 나타내었다. 알칼리 저항성 시험결과 유리섬유가 사용된 FRP 리바의 경우 알칼리 환경에서 사용될 알칼리 환경에 낮은 저항성을 고려한 설계가 이루어져야 한다. 또한 하이브리드 FRP 리바의 파괴경향을 살펴보면 모두 지압응력에 의한 파괴가 발생하였으며 개발된 CFRP 리바 및 GFRP 리바, AFRP Technora 리바는 지압응력에 의한 영향과 쪼개짐에 의한 파괴가 동시에 발생하는 경향을 보여주었으며 CFRP ISO 및 GFRP Aslan 리바는 쪼개짐에 의한 파괴가 발생하였다.



(a) Compressive strength

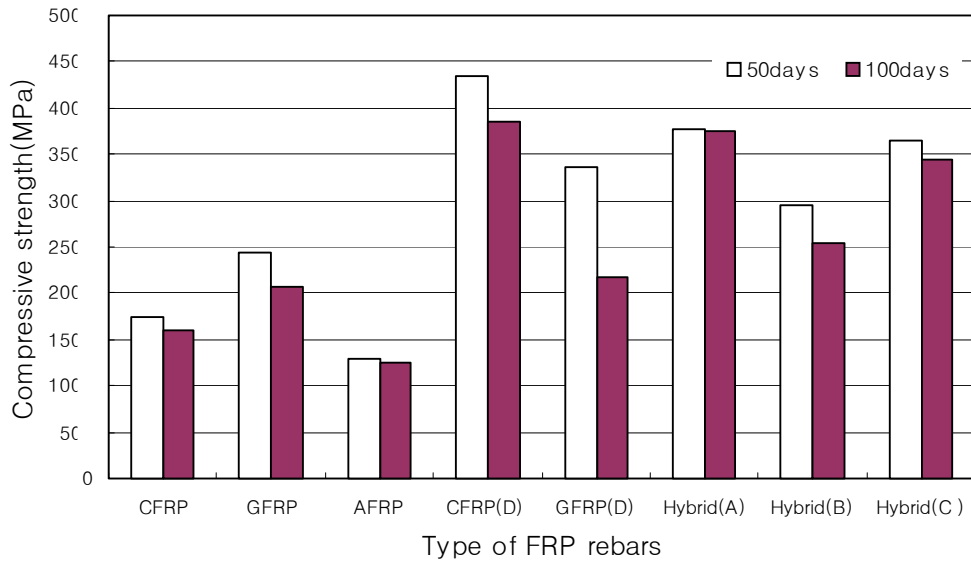


(b) Residual compressive strength

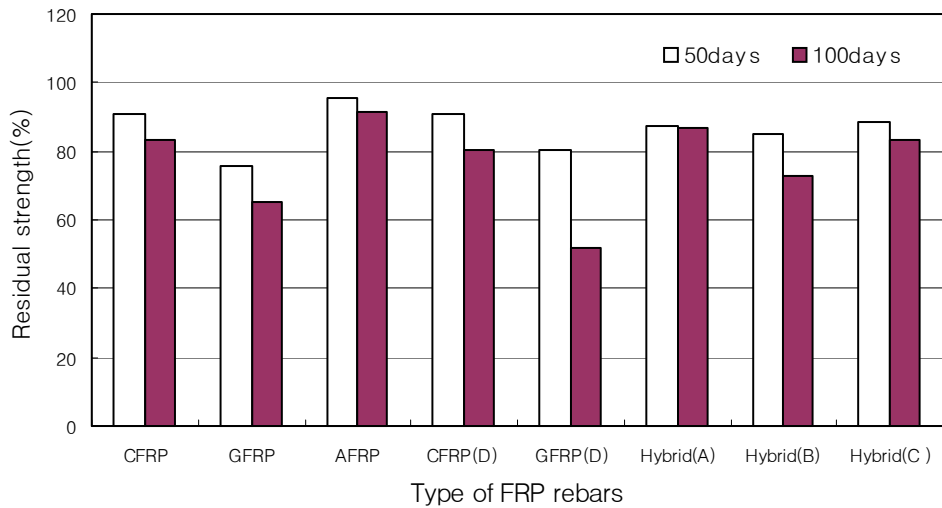
Fig. 7-1 Compressive test after alkali exposure: (a) compressive strength, (b) residual compressive strength

나. 산저항

산환경에 노출시킨 하이브리드 FRP 리바의 잔류압축강도특성은 Fig. 7-2와 같다. 하이브리드 FRP 리바(A)의 경우 50일 및 100일 노출 후 잔류압축강도는 각각 87.3%와 87.0%로 나타났으며 하이브리드 FRP 리바(B)는 각각 84.8%와 73.0%, 하이브리드 FRP 리바(C)는 각각 88.4%, 83.5%로 나타나 산환경에서 80% 이상의 높은 저항성을 보여주었다. 개발된 CFRP 리바 및 CFRP ISO 리바의 잔류압축강도는 50일 노출 후 각각 90.6%와 90.8%를 나타내었으며 100일 노출후에는 83.2%와 80.6%의 잔류압축강도를 보여주어 하이브리드 FRP 리바와 마찬가지로 산환경에서 80%이상의 우수한 저항성을 나타내었다. 개발된 GFRP 리바 및 GFRP Aslan 리바의 잔류압축강도는 50일 노출 후 각각 76.0%와 80.5%를 나타내었으며 100일 노출 후에는 65.0%와 51.9%의 낮은 저항성을 보여주었다. 따라서 산환경에 장기간 노출되는 구조물에 적용할 경우 환경적 영향을 고려하는 설계가 필요하다. AFRP Technora 리바의 잔류압축강도는 50일 및 100일 노출후 각각 95.3%와 91.5%의 매우 우수한 저항성을 보여주어 산환경에 노출되는 구조물에 적용시 큰 영향이 없을 것으로 판단된다. 하이브리드 FRP 리바의 파괴형태는 모두 지압응력에 의한 하중재하점에서 집중에 의한 파괴가 발생하였으며, 개발된 CFRP 리바 및 GFRP 리바, AFRP 리바는 지압응력과 쪼개짐에 의한 파괴가 동시에 발생하였다. 또한 CFRP ISO 리바 및 GFRP Aslan 리바는 쪼개짐에 의한 파괴를 보여주었다.



(a) Compressive strength



(b) Residual compressive strength

Fig. 7-2 Compressive test after acid exposure: (a) compressive strength, (b) residual compressive strength

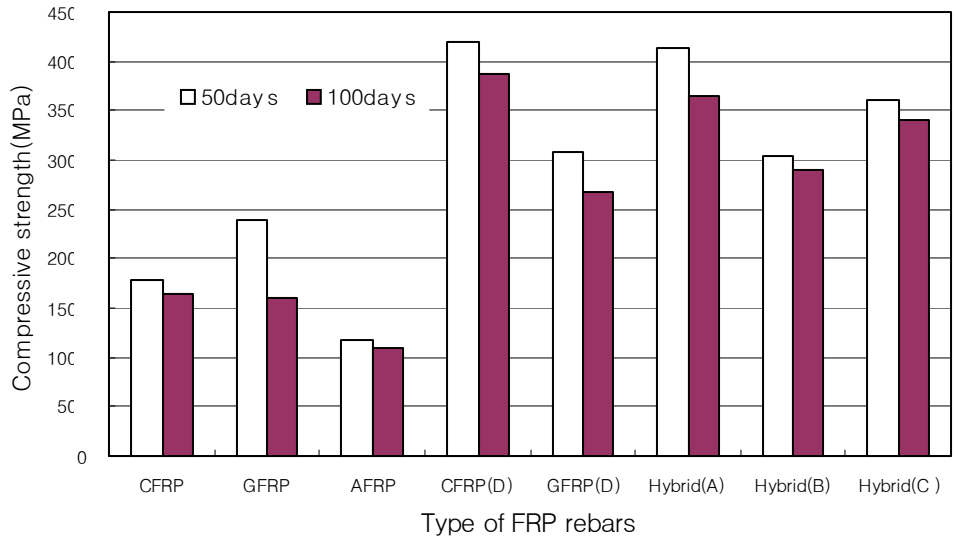
다. 염해환경

염해저항성 시험결과 하이브리드 FRP 리바(A), (B), (C)는 50일 노출후 잔류압축강도가 각각 96.0%, 83.3%, 87.4%를 나타내었으며 또한 100일 노출 후 잔류압축강도는 각각 84.6%, 83.2%, 82.6%로 나타내어 50일 노출 및 100일 노출후 모두 80%이상의 높은 잔류압축강도를 나타내어 염해환경에 노출되는 구조물에는 큰 영향이 없을 것으로 판단된다(Fig. 7-3). 개발된 CFRP 리바 및 CFRP ISO 리바의 50일 노출후 잔류압축강도는 각각 92.8%, 87.8%이며 100일 노출후에는 각각 85.5%와 81.0%로 나타나 하이브리드 FRP 리바와 마찬가지로 80%이상의 높은 잔류압축강도를 나타내었다. 개발된 GFRP 리바 및 GFRP Aslan 리바의 50일 노출 후 잔류압축강도는 각각 75.1%와 73.6%를 나타내었으며 100일 노출 후에는 각각 50.1%와 64.2%의 낮은 저항성을 나타내었다. 따라서 유리섬유를 주원료로 하는 GFRP 리바는 염해환경에 사용시 매우 큰 영향을 받음으로 이런 환경에 사용시 설계에 반영하여야 한다. AFRP Technora 리바의 잔류압축강도는 50일 및 100일 노출 후 각각 86.8%와 80.2%로 염해환경에서 매우 우수한 저항성을 나타내었다. 하이브리드 FRP 리바의 파괴형태는 하중재하점에서 응력집중에 의한 눌림파괴가 발생하였으며, 개발된 CFRP 리바 및 GFRP 리바, AFRP 리바는 지압응력과 쪼개짐에 의한 파괴가 동시에 발생하였다. 또한 CFRP ISO 리바 및 GFRP Aslan 리바는 쪼개짐에 의한 파괴를 보여주었다.

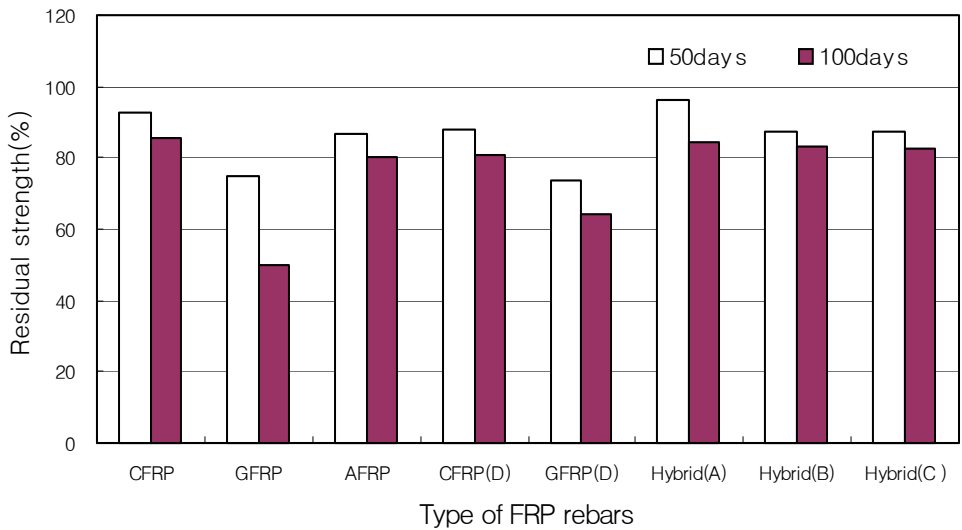
라. 중성환경 및 더운물 침지

하이브리드 FRP 리바의 중성환경에 노출 후 저항성 및 여름철 비가 내린 후 고온의 기온이 장기적으로 이어질 때 빗물이 60℃정도까지 상승하여 장기적으로 노출되었을 때의 영향을 평가한 중성환경 및 더운물 침지 시험결과는 Fig. 7-4와 같다. 하이브리드 FRP 리바(A), (B), (C)의 50일간의 노출후 잔류압축강도는 각각 99.1%, 93.1%, 92.5%이었으며 100일 노출 후에는 각각 83.8%, 66.6%, 78.2%로 나타났다. 특히 하이브리드 FRP 리바(B)는 50일간 노출 후의 잔류압축강도비는 90%이상의 매우 우수한 값을 보여주었으나 100일간 노출후의 잔류압축강도비

는 현저히 감소한 결과를 보여주었다. 이는 장기적으로 온도가 높은 물에 노출되는 콘크리트의 보강재로 하이브리드 FRP 리바(B)가 사용되었을 경우 이를 고려한 설계를 실시하여야 한다는 것을 의미한다. 개발된 CFRP 리바 및 CFRP ISO 리바의 50일 및 100일 후의 잔류압축강도를 살펴보면 50일 노출후에는 90% 이상을 보여주었으며 100일 노출 후에는 각각 90%이상과 85%이상으로 매우 높은 저항성을 나타내었다. 개발된 GFRP 리바 및 GFRP Aslan 리바의 50일 노출 후의 잔류압축강도비는 모두 90%이상의 값을 나타냈으며 100일 간 노출 후에는 각각 60.2%와 57.5%로 급격한 저하를 나타내었다. 따라서 더운물에 오랜기간 동안 노출되는 콘크리트 구조물에 GFRP 리바가 사용될 경우 이를 고려한 설계를 실시하여야 한다. AFRP Technora 리바의 잔류압축강도비는 50일 및 100일 노출 후 각각 81.5%와 79.5%로 우수한 저항성을 나타내었다. 하이브리드 FRP 리바의 중성환경에 노출 후 파괴형태는 하중재하점에서 응력집중에 의한 지압파괴가 발생하였으며, 개발된 CFRP 리바 및 GFRP 리바, AFRP 리바는 지압응력과 쪼개짐에 의한 파괴가 동시에 발생하였다. 또한 CFRP ISO 리바 및 GFRP Aslan 리바는 쪼개짐에 의한 파괴를 보여주었다.

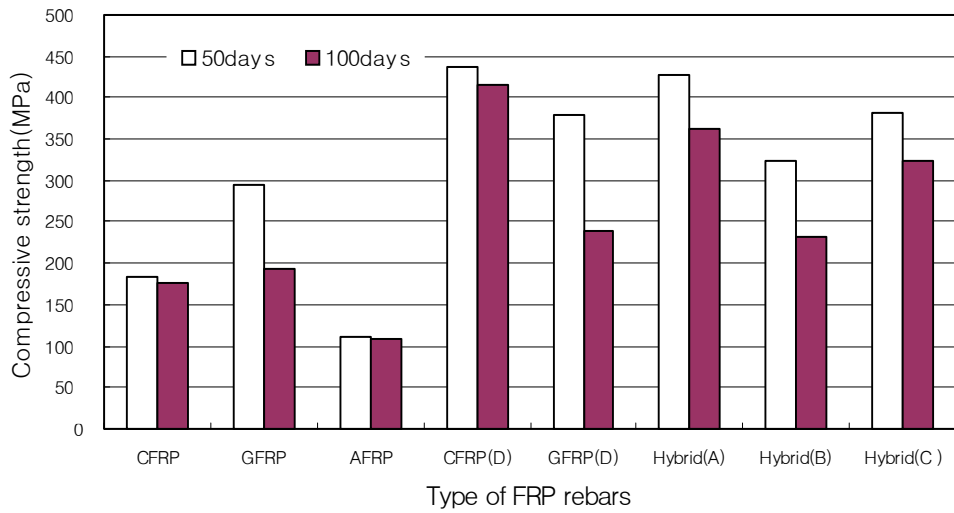


(a) Compressive strength

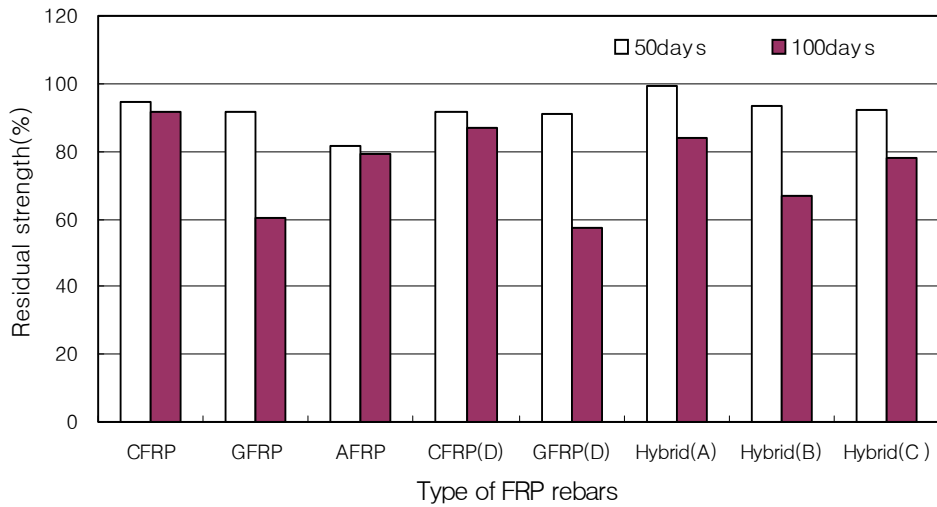


(b) Residual compressive strength

Fig. 7-3 Compressive test after salt exposure: (a) compressive strength, (b) residual compressive strength



(a) Compressive strength



(b) Residual compressive strength

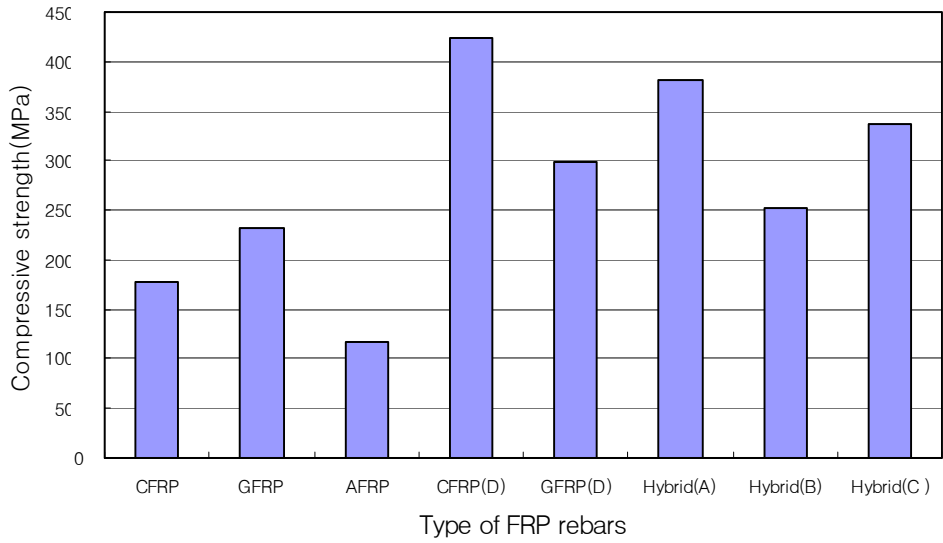
Fig. 7-4 Compressive test after deionized water exposure: (a) compressive strength, (b) residual compressive strength

마. 건조-습윤 반복

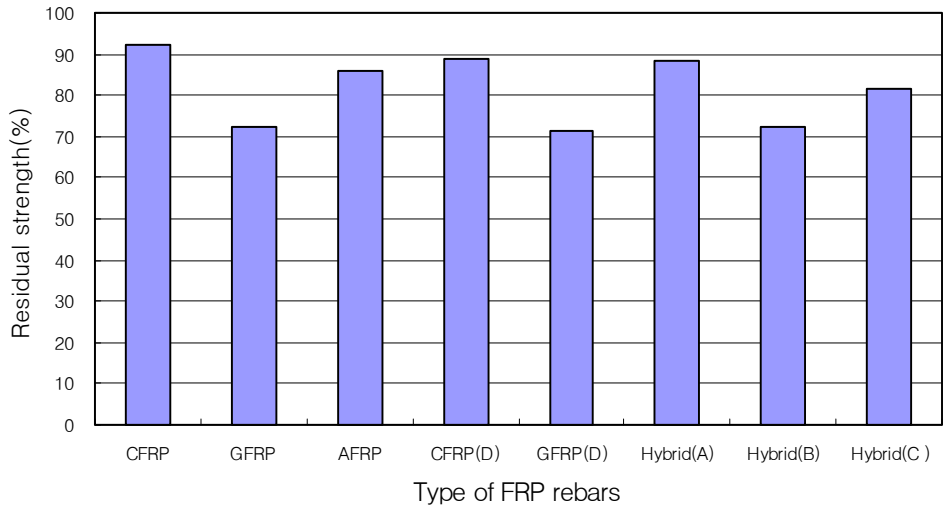
25회의 건조습윤반복 후 탄소섬유와 아라미드섬유가 주요 구성요소인 하이브리드 FRP 리바의 잔류압축강도비는 (A)와 (C)는 각각 88.5%와 81.4%로 매우 우수한 저항성을 보여주었으며 탄소섬유와 유리섬유가 주요 구성요소인 하이브리드 FRP 리바(B)는 72.4%의 잔류강도비를 보여주어 약간 떨어지는 경향을 보여주었다(Fig. 7-5). 또한 개발된 CFRP 리바 및 CFRP ISO 리바는 잔류압축강도비가 각각 92.3%와 88.9%로 매우 높은 잔류압축강도비를 나타내었으며, 개발된 GFRP 및 GFRP Aslan 리바는 각각 72.5%와 71.5%로 다른 종류의 FRP 리바 보다는 떨어지는 저항성을 나타내었다. AFRP Technora 리바는 85.8%로 건조-습윤이 반복되는 환경에서 우수한 저항성을 나타내었다.

바. 장기오븐 건조

여름철 장기간 온도가 상승한 구조물에 노출되는 콘크리트 구조물에 보강재로 하이브리드 FRP 리바가 사용되었을 경우를 고려한 장기오븐 건조 후 잔류압축강도 비는 (A), (B), (C)가 각각 88.3%, 84.8%, 84.9%로 나타나 장기간 고온에 노출되는 구조물에 사용되었을 경우 거의 영향이 없을 것을 판단된다(Fig. 7-6). 개발된 CFRP 리바 및 CFRP ISO 리바, AFRP Technora 리바는 장기오븐 건조 후 80%이상의 잔류압축강도비를 나타내어 장기오븐 건조에 대한 저항성이 매우 높게 나타났으며 개발된 GFRP 리바 및 GFRP Aslan 리바는 각각 77.7%와 73.5%로 다른 종류의 FRP 리바 보다는 잔류압축강도비가 떨어지는 결과를 보여주었다.

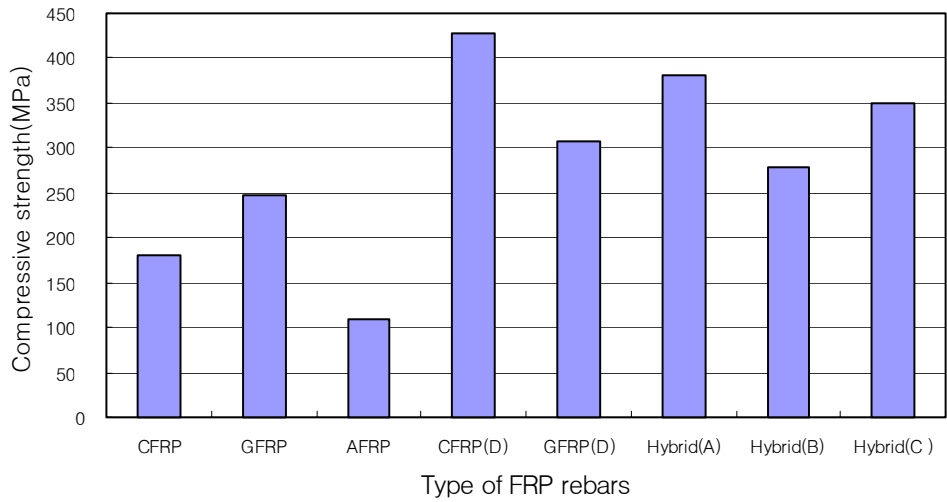


(a) Compressive strength

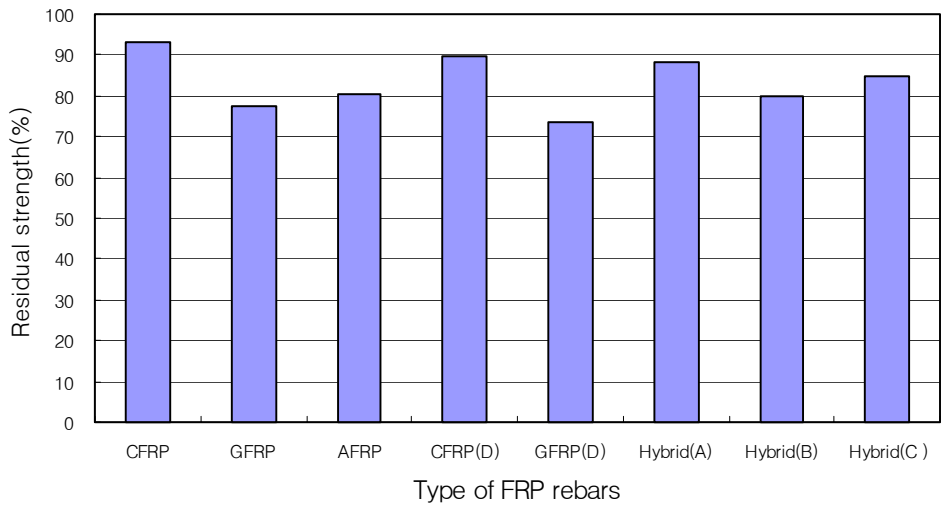


(b) Residual compressive strength

Fig. 7-5 Compressive test after repeated wet-dry cycles exposure: (a) compressive strength, (b) residual compressive strength



(a) Compressive strength



(b) Residual compressive strength

Fig. 7-6 Compressive test after long-term oven dry exposure: (a) compressive strength, (b) residual compressive strength

사. 동결융해

동결융해는 대부분의 콘크리트 구조물이 노출될 수 있는 환경으로 하이브리드 FRP 리바의 동결융해 환경에 노출시켰을 때 성능시험 결과는 Fig. 7-7과 같다. 하이브리드 FRP 리바 (A), (B), (C)의 동결융해 반복 후 잔류압축강도비는 각각 85.0%, 72.3%, 81.6%로 나타나 하이브리드 FRP 리바(B)를 제외하고는 매우 우수한 저항성을 나타내었다. 개발된 CFRP 리바 및 GFRP 리바의 잔류압축강도비는 각각 88.5%와 70.2%를 나타내었다. 또한 CFRP ISO 리바, GFRP Aslan 리바 및 AFRP Technora 리바의 잔류압축강도 비는 각각 88.7%, 72.1%, 80.8%를 보여주었다. 동결융해반복 시험결과 유리섬유를 주 구성성분으로 사용한 하이브리드 FRP 리바(B), 개발된 GFRP 리바 및 GFRP Aslan 리바의 잔류압축강도비가 70%대로 다른 FRP 리바 보다 낮게 나타났는데 이는 유리섬유가 다른 섬유에 비하여 환경적 영향을 더 많이 받기 때문이다. 따라서 설계시 이를 고려한 설계가 필요하다.

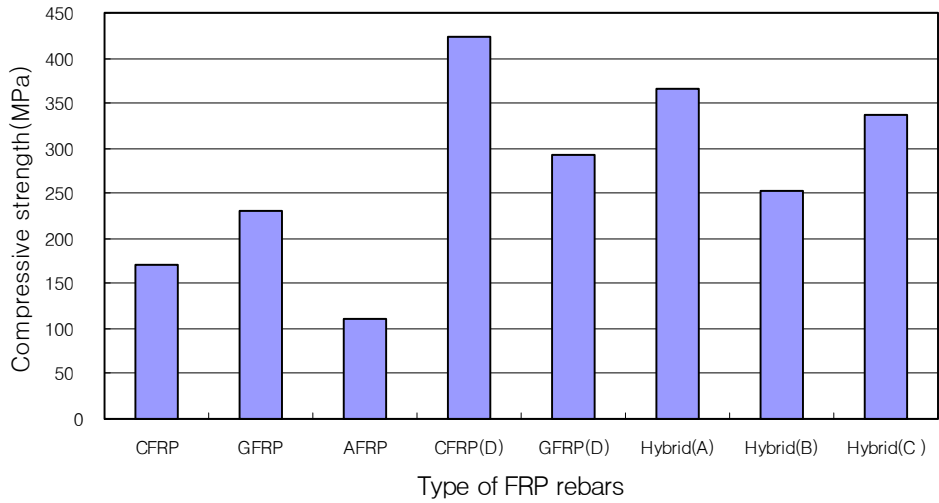
아. 황산염

해양환경에 노출된 콘크리트 구조물에 영향을 평가하기 위하여 실시한 황산염에 노출 후 압축강도 시험결과는 Fig. 7-8과 같다. 시험결과 개발된 CFRP 리바 및 CFRP ISO 리바는 90%이상의 매우 우수한 저항성을 나타내었으며 하이브리드 FRP 리바, 개발된 GFRP 리바 및 GFRP Aslan리바, AFRP Technora 리바는 모두 80%이상의 높은 잔류압축강도비를 보여주어 황산염에 대한 저항성이 매우 우수한 것으로 나타났다.

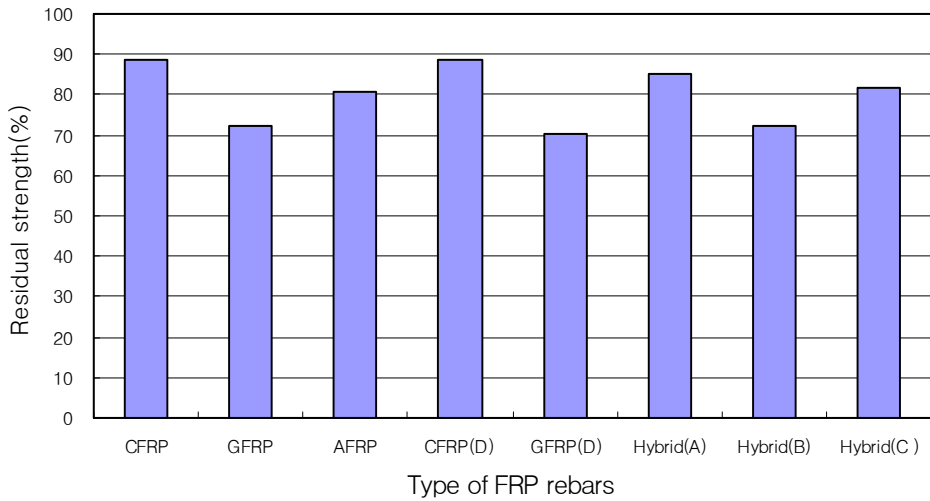
자. 용빙제 저항성

겨울철 콘크리트 교량 구조물에 내린 눈의 용빙제로 염화칼슘이 사용되고 있다. 따라서 이와 같은 교량 구조물에 적용된 하이브리드 FRP 리바의 내구성능을 파악하기 위하여 염화칼슘에 용액에 노출시킨후 압축강도시험결과는 Fig. 7-9와 같

다. 시험결과 모든 시험된 FRP 리바의 잔류압축강도비가 80%이상으로 융빙제로 인한 영향은 크게 발생하지 않을 것으로 판단되며 특히 CFRP 리바의 경우 2종류 모두 90%이상의 높은 저항성을 보여주었다.

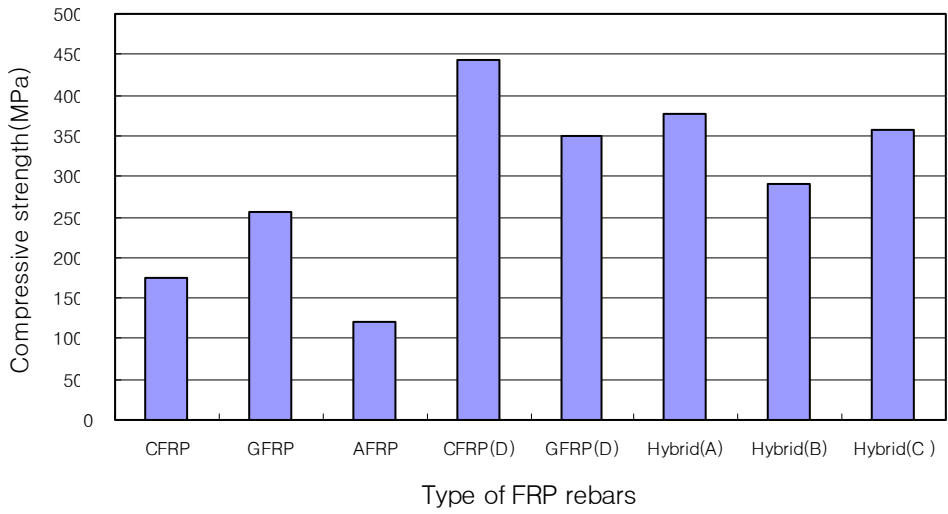


(a) Compressive strength

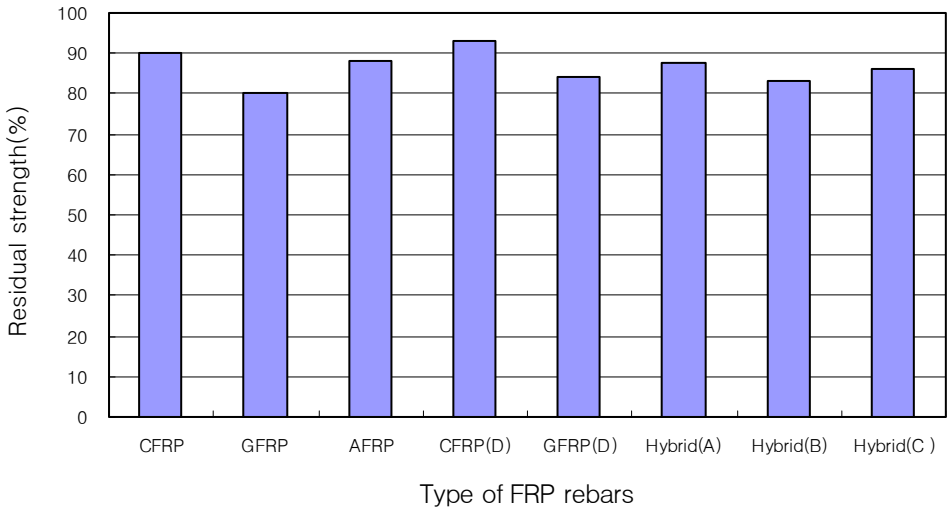


(b) Residual compressive strength

Fig. 7-7 Compressive test after repeated freezing-thawing exposure: (a) compressive strength, (b) residual compressive strength

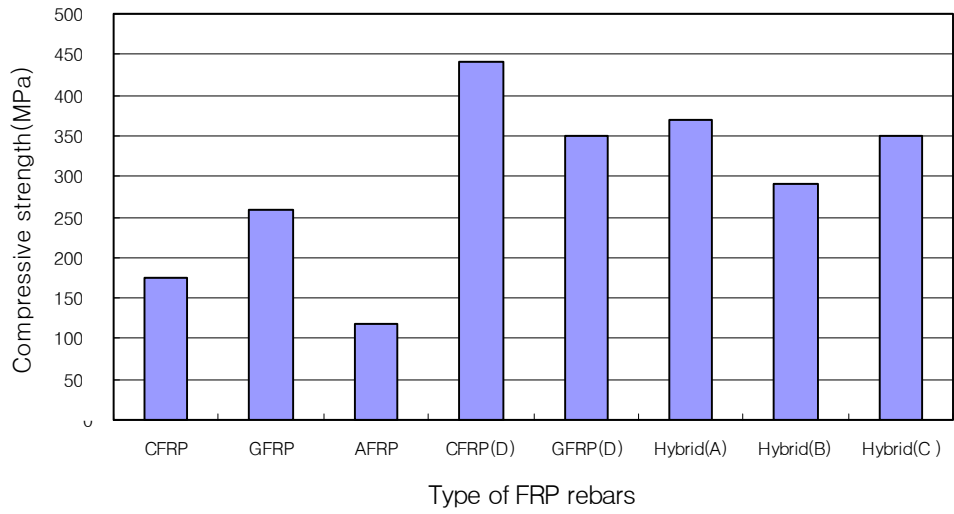


(a) Compressive strength

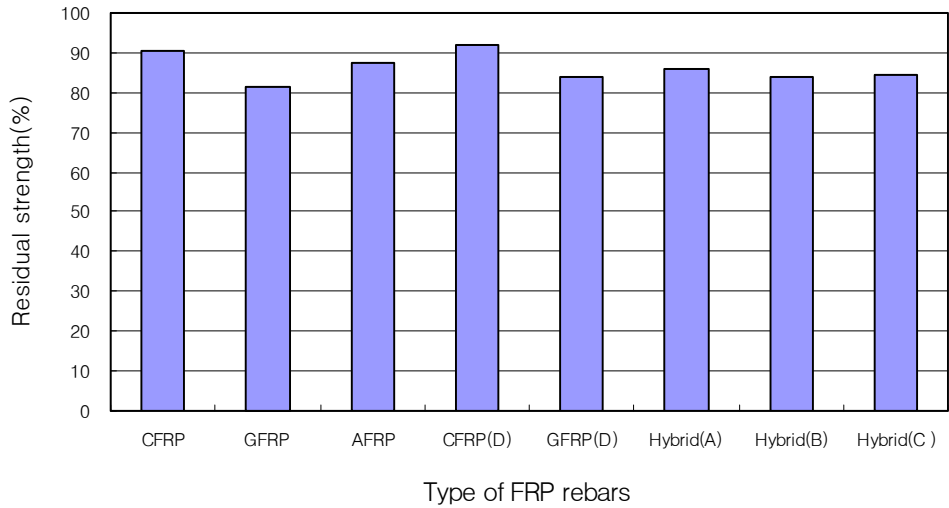


(b) Residual compressive strength

Fig. 7-8 Compressive test after sulfate(Na_2SO_4) exposure: (a) compressive strength, (b) residual compressive strength



(a) Compressive strength



(b) Residual compressive strength

Fig. 7-9 Compressive test after CaCl_2 solution exposure: (a) compressive strength, (b) residual compressive strength

차. 염해 건조-습윤 반복

염해와 건조-습윤 반복의 영향을 복합적으로 고려한 환경에 노출된 콘크리트 구조물에 보강재료로 사용한 하이브리드 FRP 리바의 영향을 고려한 잔류압축시험 결과는 Fig. 7-10과 같다. 실험결과 유리섬유가 주요구성요소로 사용된 하이브리드 FRP 리바(B), 개발된 GFRP 리바 및 GFRP Aslan 리바가 60%정도의 잔류압축강도비를 보여주었다. 따라서 해양에 인접한 해양환경과 건조-습윤 반복을 복합적으로 받는 콘크리트 구조물의 설계시 이를 고려하여야 한다. 이에 반해 하이브리드 FRP 리바 (A), (B) 및 CFRP 리바, AFRP 리바는 모두 80%이상의 잔류압축강도비를 보여주어 염해와 건조-습윤 반복을 복합적으로 받는 환경에서도 우수한 성능을 발휘함을 알 수 있었다.

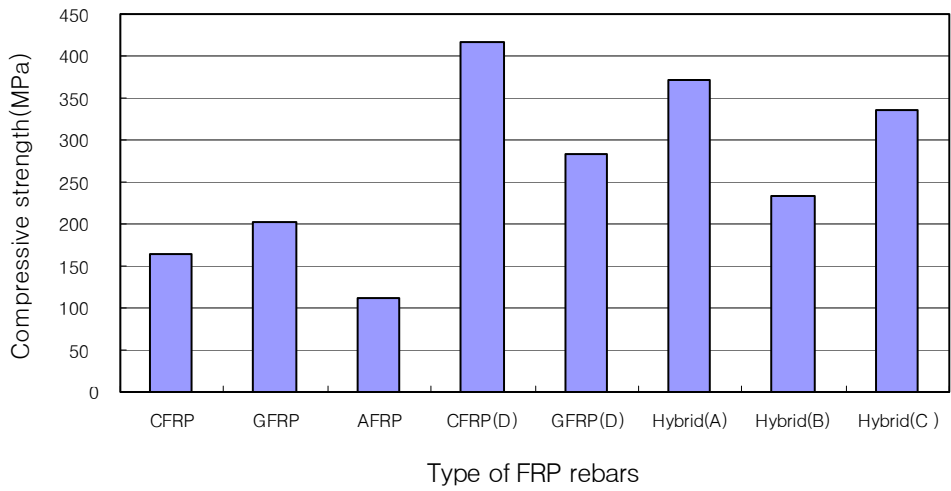
카. 염해 동결융해 반복

염해 와 동결융해 반복을 복합적으로 받는 콘크리트 구조물에 하이브리드 FRP 리바를 적용하였을 때의 영향은 Fig. 7-11과 같다. 하이브리드 FRP 리바(A), (B), (C)는 잔류압축강도 각각 79.1%, 63.6%, 73.9%로 나타났다. 또한 개발된 CFRP 리바 및 CFRP 리바는 각각 85.9%와 80.9%를 보여주었으며, 개발된 GFRP 리바 및 GFRP Aslan 리바는 각각 61.6%, 57.0%를 나타내었다. AFRP Technora 리바는 76.1%의 값을 보여주었다. 시험결과 유리섬유를 사용한 FRP 리바의 경우 모두 65%이하로 낮은 저항성을 나타내었는데 이는 유리섬유가 탄소 섬유와 아라미드섬유에 비하여 내구성이 떨어지기 때문이며 따라서 유리섬유를 사용한 FRP 리바의 경우 염해와 동결-융해를 복합적으로 받는 구조물에 적용시 이를 고려한 설계가 필요하다.

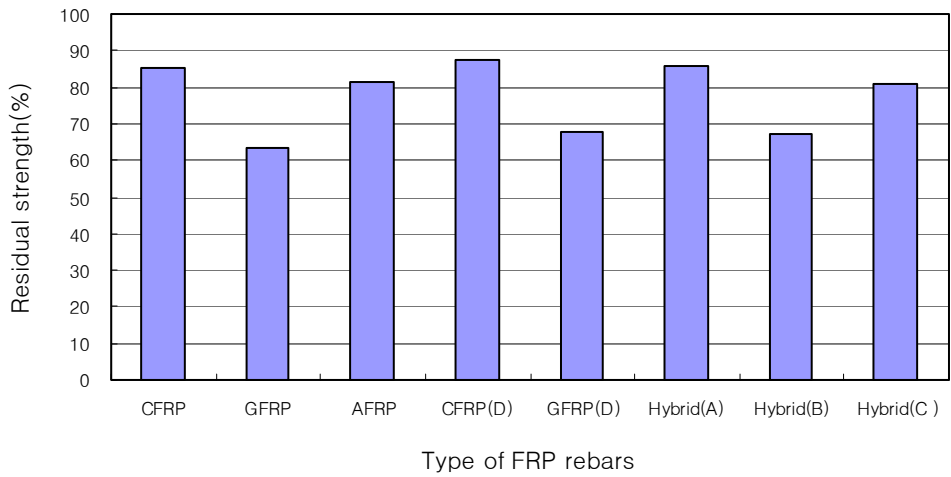
타. 자외선 노출

14일간의 자외선 노출후 잔류압축강도 시험결과는 개발된 CFRP 리바 및 CFRP ISO 리바의 경우 모두 90%이상의 잔류압축강도비를 나타내어 자외선 노출에 거

의 영향을 받지 않았으며 개발된 GFRP 리바 및 GFRP Aslan, 하이브리드 FRP 리바는 80%이상으로 큰 영향을 받지 않았다(Fig. 7-12). 그러나 아라미드섬유를 주요구성요소로 사용한 FRP 리바의 경우 70% 후반의 잔류압축강도비를 나타내어 GFRP 리바 및 CFRP 리바 보다는 영향을 받는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 아라미드섬유가 자외선에 노출되면 약간의 성능감소가 발생하는데 이로 인하여 FRP 리바의 압축강도 역시 영향을 받은 것으로 판단된다.



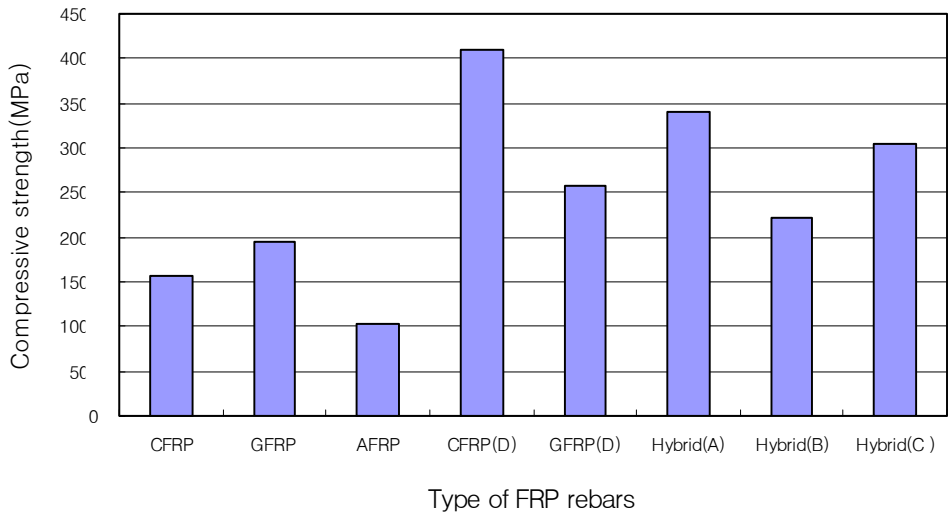
(a) Compressive strength



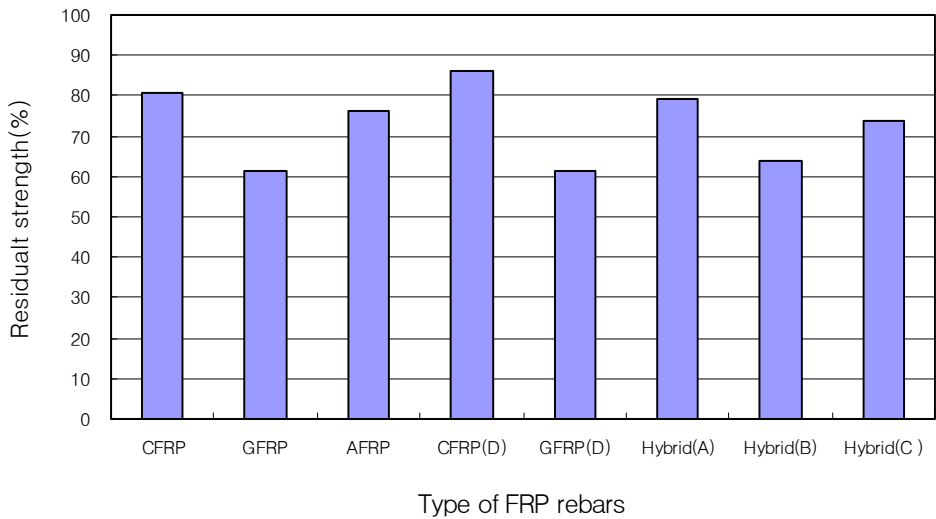
(b) Residual compressive strength

Fig. 7-10 Compressive test after salt and repeated wet-dry cycles exposure:

(a) compressive strength, (b) residual compressive strength

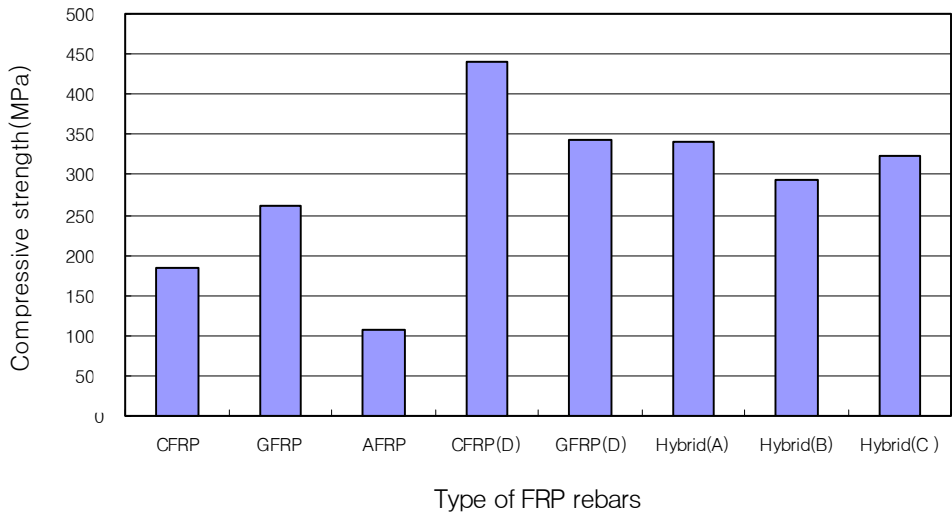


(a) Compressive strength

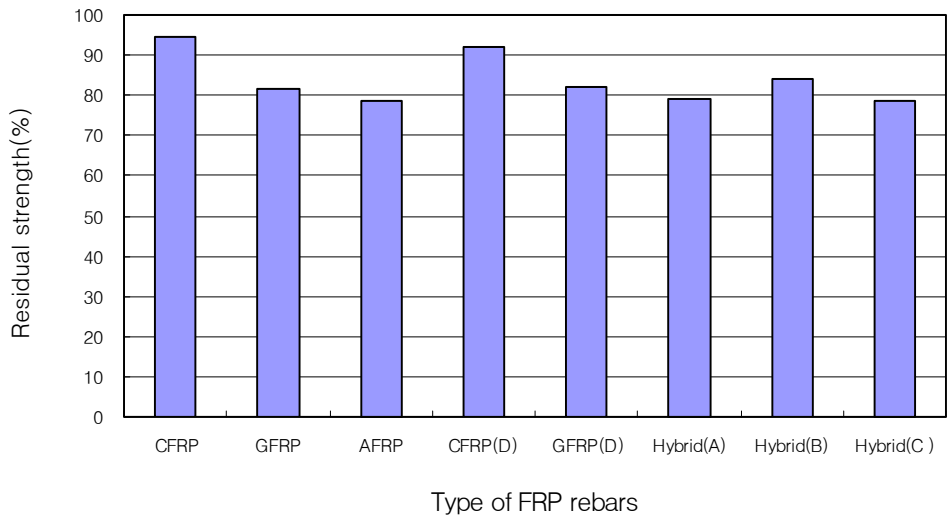


(b) Residual compressive strength

Fig. 7-11 Compressive test after salt and repeated freezing-thawing cycles exposure: (a) compressive strength, (b) residual compressive strength



(a) Compressive strength



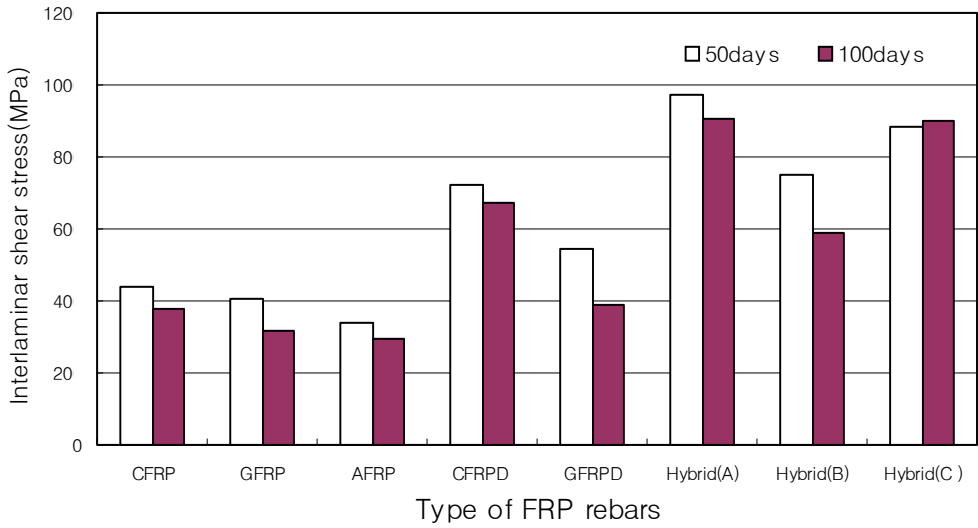
(b) Residual compressive strength

Fig. 7-12 Compressive test after salt and UV radiation exposure: (a) compressive strength, (b) residual compressive strength

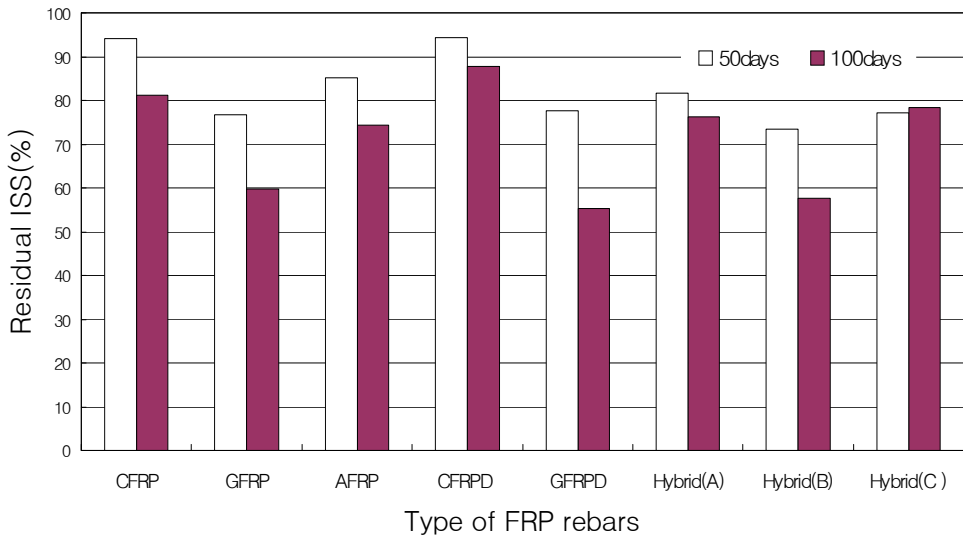
2. 전단강도(ISS)

가. 알칼리 환경

알칼리환경에 노출시킨 FRP 리바의 ISS 시험결과 50일 노출 후 하이브리드 FRP 리바(A), (B), (C)는 각각 81.7%, 73.5%, 77.1%로 나타났으며, 100일 노출 후에는 각각 78.7%, 67.9%, 73.2%를 보여주었다(Fig.7-13). 하이브리드 FRP 리바 (B)가 상대적으로 작은 값을 나타낸 것은 유리섬유가 알칼리 환경에서 성능저하가 아마리드섬유보다 크기 때문이다. 개발된 CFRP 리바 및 CFRP ISO 리바는 50일 노출후에는 모두 90%이상의 잔류 ISS를 보여주었으며 100일 노출 후에는 각각 83.7%, 87.5%의 잔류 ISS를 보여주어 알칼리 환경에서 거의 영향을 받지 않았다. 또한 AFRP Technora 리바는 50일 노출 후 85.2%, 100일 노출 후에는 74.3%의 잔류 ISS를 보여주어 CFRP 리바에 비하여는 다소영향을 받지만 매우 큰 영향을 받지는 않았다. 또한 개발된 GFRP 리바 및 GFRP Aslan 리바는 50일 노출 후 각각 77.6%와 77.7%의 잔류 ISS를 보여주었으며 100일 노출 후에는 각각 59.3%, 60.6%를 보여주었다. 그러나 알칼리 환경에 노출 시킨 FRP 리바의 시험결과 유리섬유를 주요구성요소로 할 경우 알칼리 환경에 영향을 받아 성능이 감소하였으며 따라서 설계시 이를 고려하여야 한다고 판단된다. 또한 하이브리드 FRP 리바의 파괴경향을 살펴보면 모두 지압응력에 의한 파괴가 발생하였으며 개발된 CFRP 리바 및 GFRP 리바, AFRP Technora 리바는 지압응력에 의한 영향과 쪼개짐에 의한 파괴가 동시에 발생하는 경향을 보여주었으며 CFRP ISO 및 GFRP Aslan 리바는 쪼개짐에 의한 파괴가 발생하였다.



(a) Interlaminar shear stress

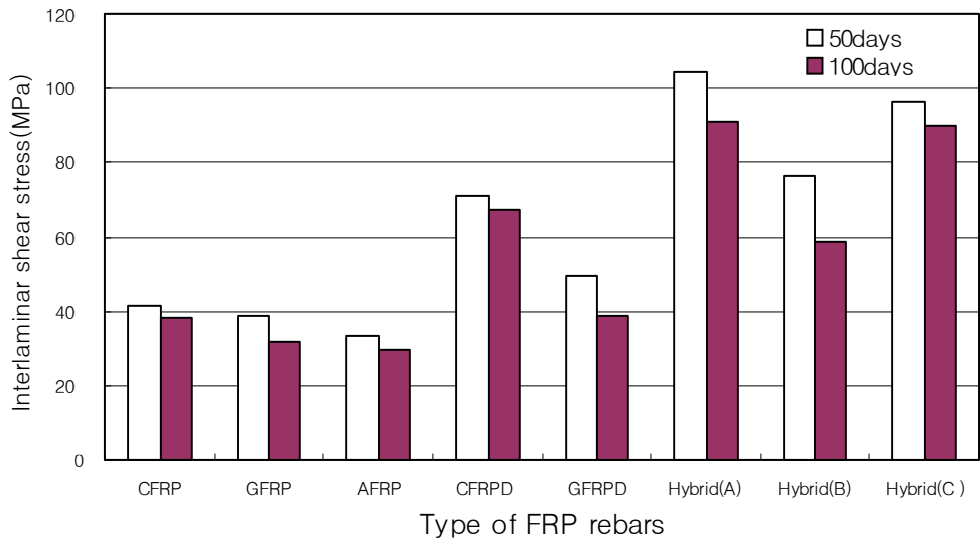


(b) Residual interlaminar shear stress

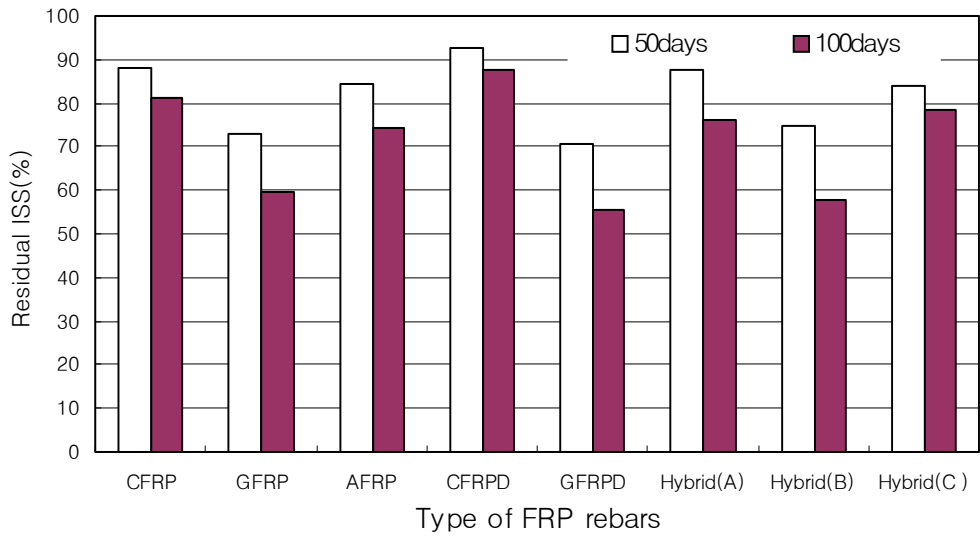
Fig. 7-13 Interlaminar shear test after alkali exposure: (a) interlaminar shear stress, (b) residual interlaminar shear stress

나. 산환경

산환경에 노출시킨 하이브리드 FRP 리바의 잔류 ISS 특성은 Fig. 7-14와 같다. 하이브리드 FRP 리바(A)의 경우 50일 및 100일 노출 후 잔류 ISS는 각각 87.8%와 76.2%로 나타났으며 하이브리드 FRP 리바(B)는 각각 74.7%와 57.7%, 하이브리드 FRP 리바(C)는 각각 84.1%, 78.3%로 나타났다. 하이브리드 FRP 리바(B)의 경우 산환경에서 상대적으로 아라미드섬유보다 낮은 저항성을 가진 유리섬유를 주로 사용하기 때문이다. 개발된 CFRP 리바 및 CFRP ISO 리바의 잔류 ISS는 50일 노출 후 각각 88.1%와 92.6%를 나타내었으며 100일 노출후에는 81.2%와 87.8%의 잔류 ISS를 보여주어 산환경에서 80%이상의 우수한 저항성을 나타내었다. 개발된 GFRP 리바 및 GFRP Aslan 리바의 잔류 ISS는 50일 노출 후 각각 72.7%와 70.6%를 나타내었으며 100일 노출 후에는 59.7%와 55.3%의 낮은 저항성을 보여주었다. 따라서 산환경에 장기간 노출되는 구조물에 적용할 경우 GFRP 리바는 환경적 영향을 고려하는 주의 깊게 고려하는 설계가 필요하다. AFRP Technora 리바의 잔류 ISS는 50일 및 100일 노출후 각각 84.5%와 74.4%의 매우 우수한 저항성을 보여주어 산환경에 노출되는 구조물에 적용시 큰 영향이 없을 것으로 판단된다. 하이브리드 FRP 리바의 파괴형태는 모두 지압응력에 의한 하중재하점에서 집중에 의한 파괴가 발생하였으며, 개발된 CFRP 리바 및 GFRP 리바, AFRP 리바는 지압응력과 쪼개짐에 의한 파괴가 동시에 발생하였다. 또한 CFRP ISO 리바 및 GFRP Aslan 리바는 쪼개짐에 의한 파괴를 보여주었다.



(a) Interlaminar shear stress

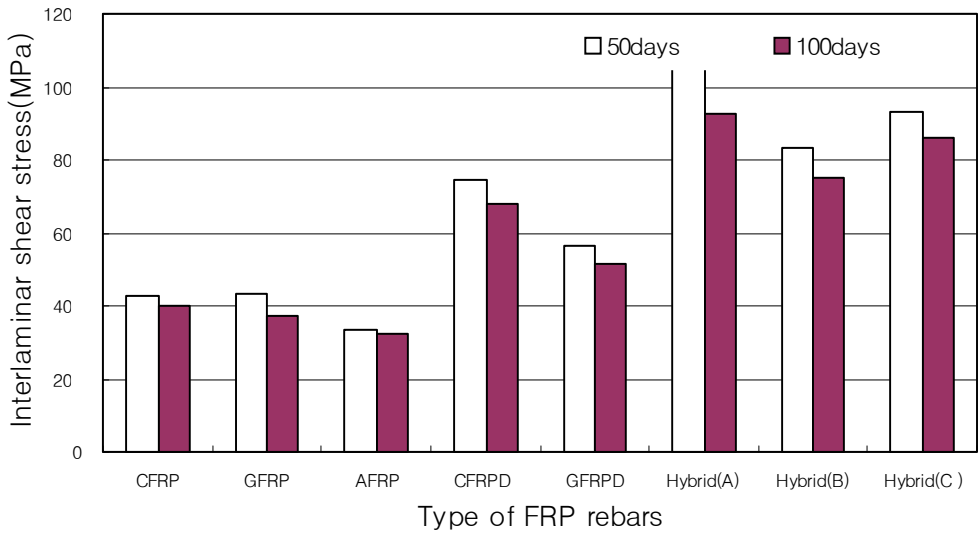


(b) Residual interlaminar shear stress

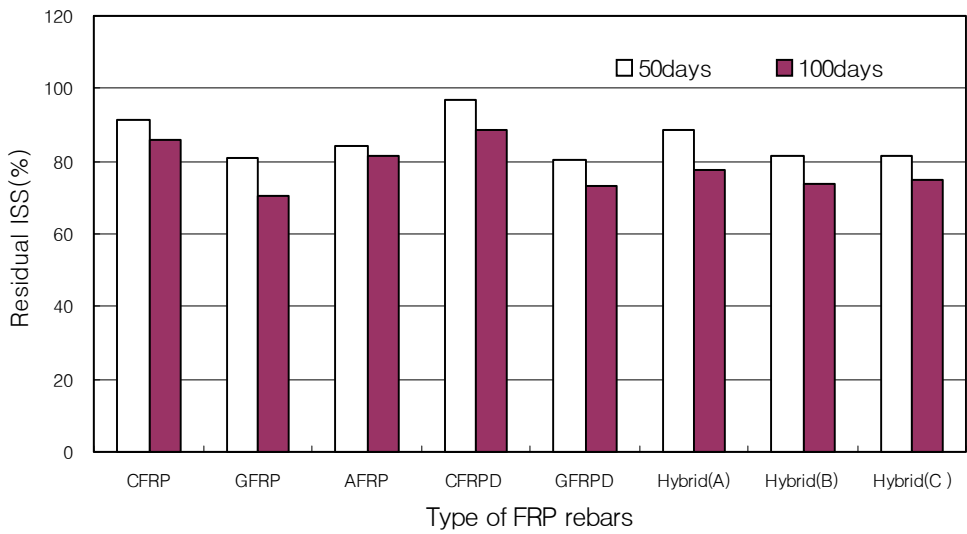
Fig. 7-14 Interlaminar shear test after acid exposure: (a) interlaminar shear stress, (b) residual interlaminar shear stress

다. 염해환경

염해저항성 시험결과 하이브리드 FRP 리바(A), (B), (C)는 50일 노출후 잔류 ISS는 각각 88.4%, 81.5%, 81.4%를 나타내었으며 또한 100일 노출 후 잔류압축강도는 각각 77.7%, 73.7%, 74.9%로 나타나 50일 노출 후에는 80%이상 및 100일 노출 후에는 모두 70%이상의 잔류 ISS를 나타내어 염해환경에 노출되는 구조물에는 큰 영향이 없을 것으로 판단된다(Fig. 7-15). 개발된 CFRP 리바 및 CFRP ISO 리바의 50일 노출후 잔류압축강도는 각각 91.2%, 96.8%이며 100일 노출후에는 각각 85.8%와 88.6%로 나타나 50일 및 100일간의 노출 후 80%이상의 높은 잔류 ISS를 나타내었다. 개발된 GFRP 리바 및 GFRP Aslan 리바의 50일 노출 후 잔류 ISS는 각각 80.9%와 80.5%를 나타내었으며 100일 노출 후에는 각각 70.5%와 73.2%의 저항성을 나타내어 산환경에서는 큰 영향을 받지 않았다. AFRP Technora 리바의 잔류 ISS는 50일 및 100일 노출 후 각각 84.3%와 81.4%로 염해환경에서 매우 우수한 저항성을 나타내었다. 하이브리드 FRP 리바의 파괴형태는 하중재하점에서 응력집중에 의한 눌림파괴가 발생하였으며, 개발된 CFRP 리바 및 GFRP 리바, AFRP 리바는 지압응력과 쪼개짐에 의한 파괴가 동시에 발생하였다. 또한 CFRP ISO 리바 및 GFRP Aslan 리바는 쪼개짐에 의한 파괴를 보여주었다.



(a) Interlaminar shear stress



(b) Residual interlaminar shear stress

Fig. 7-15 Interlaminar shear test after salt exposure: (a) interlaminar shear stress, (b) residual interlaminar shear stress

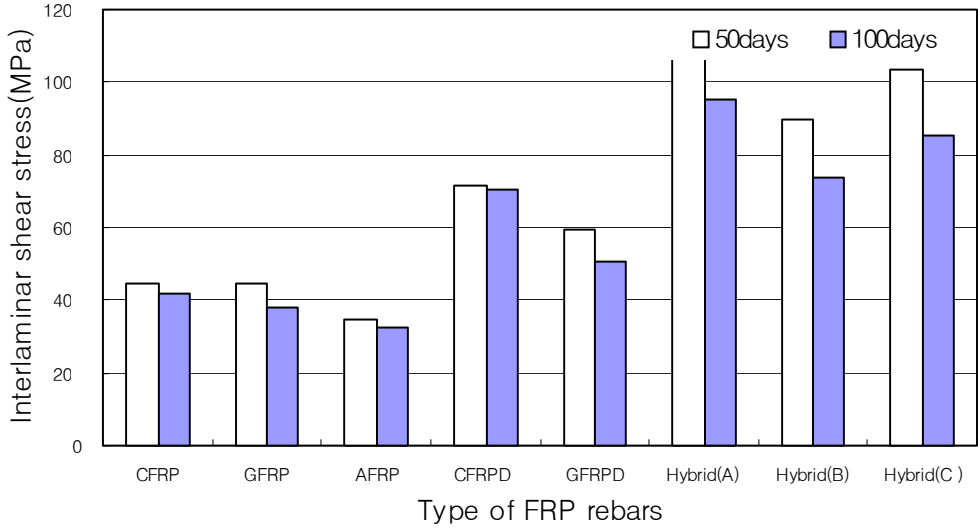
라. 중성환경

하이브리드 FRP 리바의 중성환경에 노출 후 저항성 및 여름철 비가 내린 후 고온의 기온이 장기적으로 이어질 때 빗물이 60℃정도까지 상승하여 장기적으로 노출되었을 때의 영향을 평가한 중성환경 및 더운물 침지 시험결과는 Fig. 7-16과 같다. 하이브리드 FRP 리바(A), (B), (C)의 50일간의 노출후 잔류 ISS는 각각 90.9%, 88.0%, 90.3%이었으며 100일 노출 후에는 각각 79.8%, 72.5%, 74.6%로 나타났다. 하이브리드 FRP 리바는 50일간 노출 후의 잔류 ISS가 모두 85%이상의 매우 우수한 값을 보여주었으나 100일간 노출후의 잔류 ISS는 70% 정도로 감소하는 경향을 보여주었다. 개발된 CFRP 리바 및 CFRP ISO 리바의 50일 및 100일 후의 잔류 ISS를 살펴보면 50일 노출후에는 90% 이상을 보여주었으며 100일 노출 후에는 각각 90%이상과 85%이상으로 매우 높은 저항성을 나타내었다. 개발된 GFRP 리바 및 GFRP Aslan 리바의 50일 노출 후의 잔류 ISS는 모두 80%이상의 값을 나타냈으며 100일 간 노출 후에는 각각 70%정도로 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 유리섬유의 성능감소에 의한 것으로 판단되지만 그 감소효과는 다른 환경에 비해서는 감소량이 작았다. AFRP Technora 리바의 잔류 ISS비는 50일 및 100일 노출 후 각각 86.2%와 81.2%로 우수한 저항성을 나타내었다. 하이브리드 FRP 리바의 중성환경에 노출 후 파괴형태는 하중재하점에서 응력집중에 의한 지압파괴가 발생하였으며, 개발된 CFRP 리바 및 GFRP 리바, AFRP 리바는 지압응력과 쪼개짐에 의한 파괴가 동시에 발생하였다. 또한 CFRP ISO 리바 및 GFRP Aslan 리바는 쪼개짐에 의한 파괴를 보여주었다.

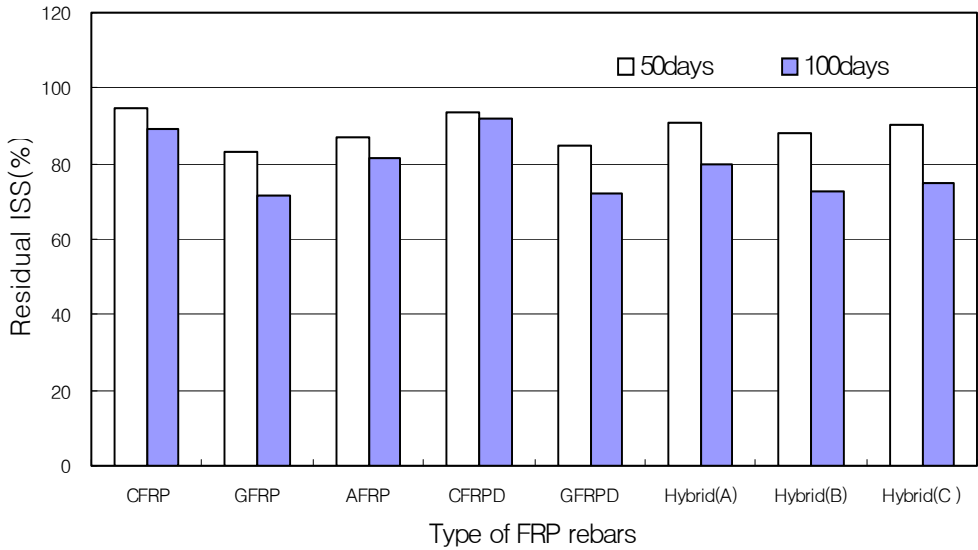
마. 건조-습윤 반복

건조-습윤 반복 후 하이브리드 FRP 리바(A), (B)와 (C)의 잔류 ISS비는 각각 86.5%, 83.3%, 83.6%로 매우 우수한 저항성을 보여주었으며, 개발된 CFRP 리바 및 CFRP ISO 리바는 잔류 ISS비가 각각 89.6%와 89.5%로 매우 높은 잔류압축강도비를 나타내었으며, 개발된 GFRP 및 GFRP Aslan 리바는 각각 83.5%와

81.8%로 나타났다(Fig. 7-17). AFRP Technora 리바는 87.6%로 건조-습윤이 반복되는 환경에서 우수한 저항성을 나타내었다.

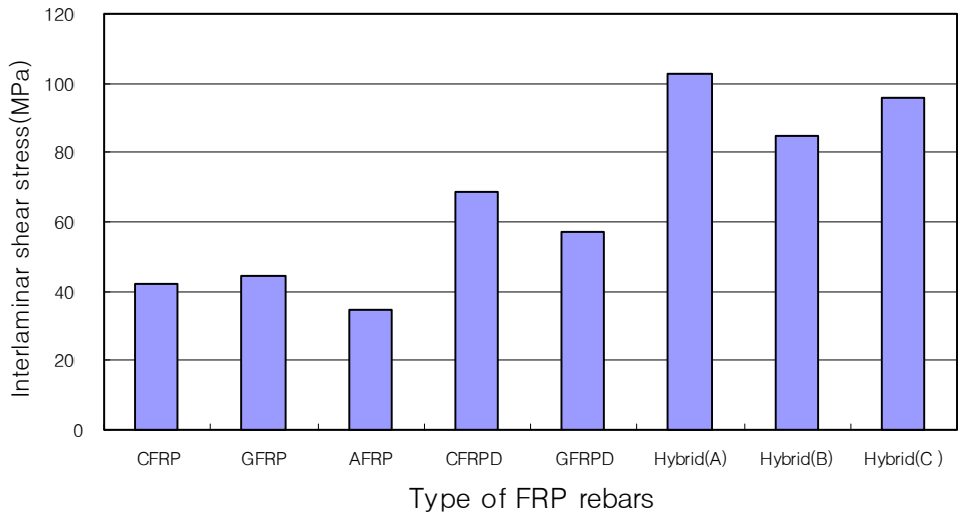


(a) Interlaminar shear stress

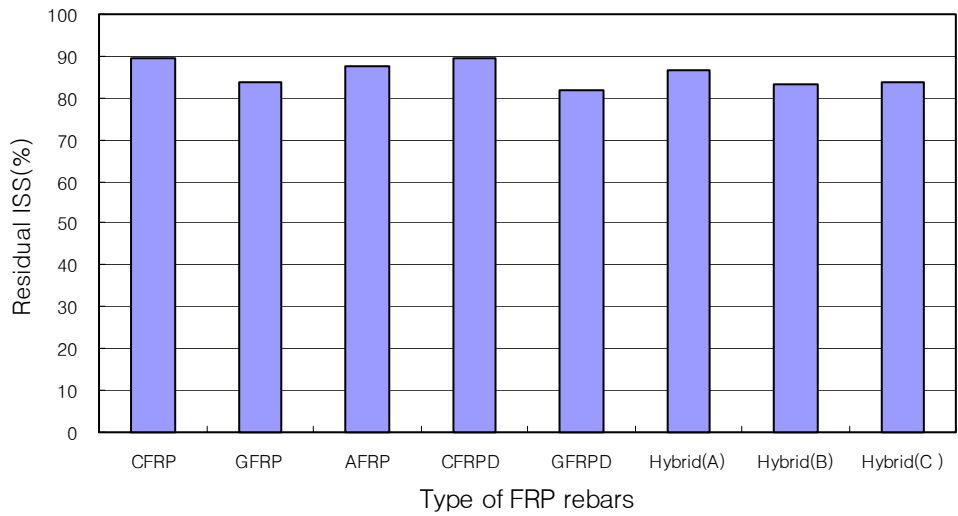


(b) Residual interlaminar shear stress

Fig. 7-16 Interlaminar shear test after deionized water exposure: (a) interlaminar shear stress, (b) residual interlaminar shear stress



(a) Interlaminar shear stress



(b) Residual interlaminar shear stress

Fig. 7-17 Interlaminar shear test after repeated wet-dry cycles exposure: (a) interlaminar shear stress, (b) residual interlaminar shear stress

바. 장기오븐건조

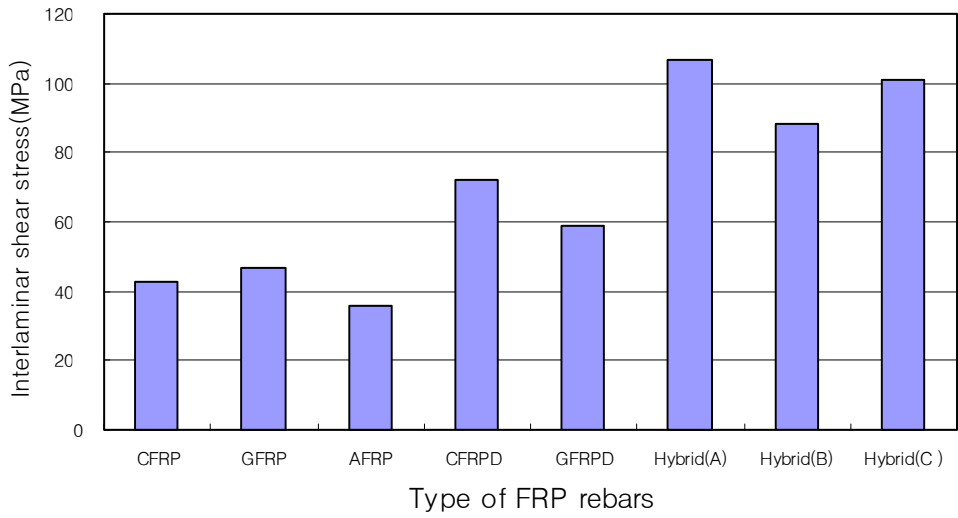
여름철 장기간 온도가 상승한 구조물에 노출되는 콘크리트 구조물에 보강재로 하이브리드 FRP 리바가 사용되었을 경우를 고려한 장기오븐 건조 후 잔류 ISS 비는 (A), (B), (C)가 각각 89.4%, 86.3%, 88.2%로 나타나 장기간 고온에 노출되는 구조물에 사용되었을 경우 거의 영향이 없을 것을 판단된다(Fig. 7-18). 또한 개발된 CFRP 리바 및 CFRP ISO 리바, AFRP Technora 리바, GFRP 리바 및 GFRP Aslan 리바 모두 잔류 ISS비가 80% 이상으로 매우 우수한 결과를 보여주었다.

사. 동결융해

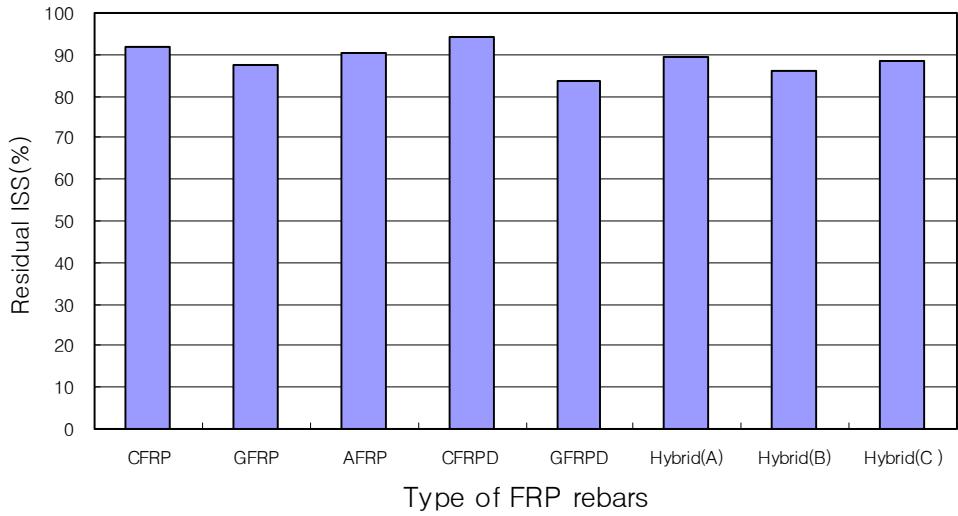
동결융해는 대부분의 콘크리트 구조물이 노출될 수 있는 환경으로 하이브리드 FRP 리바의 동결융해 환경에 노출시켰을 때 성능시험 결과는 Fig. 7-19와 같다. 하이브리드 FRP 리바 (A), (B), (C)의 동결융해 반복 후 잔류 ISS비는 각각 82.3%, 75.9%, 81.9%로 나타나 하이브리드 FRP 리바(B)를 제외하고는 매우 우수한 저항성을 나타내었다. 개발된 CFRP 리바 및 GFRP 리바의 잔류 ISS비는 각각 86.5%와 76.0%를 나타내었다. 또한 CFRP ISO 리바, GFRP Aslan 리바 및 AFRP Technora 리바의 잔류 ISS 비는 각각 83.6%, 80.3%, 82.0%를 보여주었다. 동결융해반복 시험결과 시험된 모든 FRP 리바는 우수한 동결-융해 저항성을 가지고 있었다.

아. 황산염

해양환경에 노출된 콘크리트 구조물에 영향을 평가하기 위하여 실시한 황산염에 노출 후 압축강도 시험결과는 Fig. 7-20과 같다. 시험결과 하이브리드 FRP 리바를 포함한 시험된 모든 FRP 리바에서 잔류 ISS가 80% 이상을 나타내어 황산염에 대한 저항성이 우수한 저항성을 보여주었다.

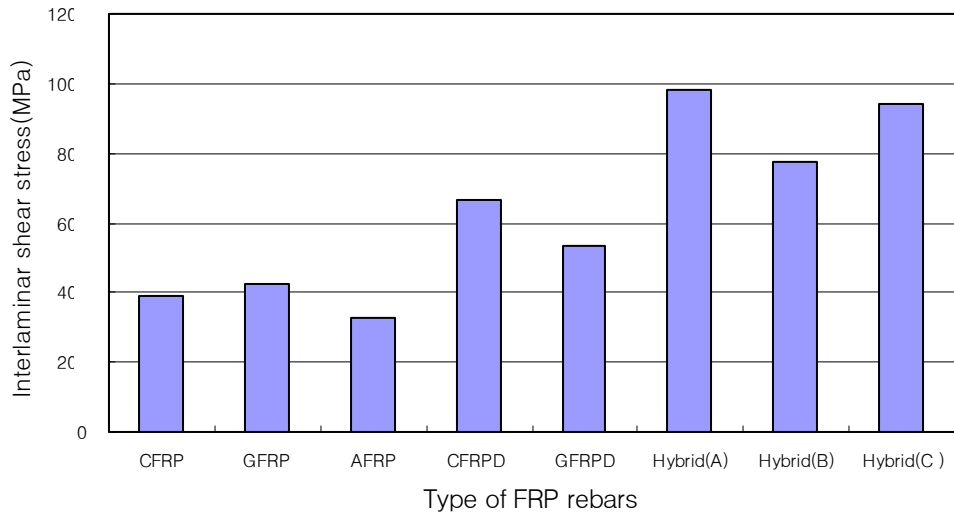


(a) Interlaminar shear stress

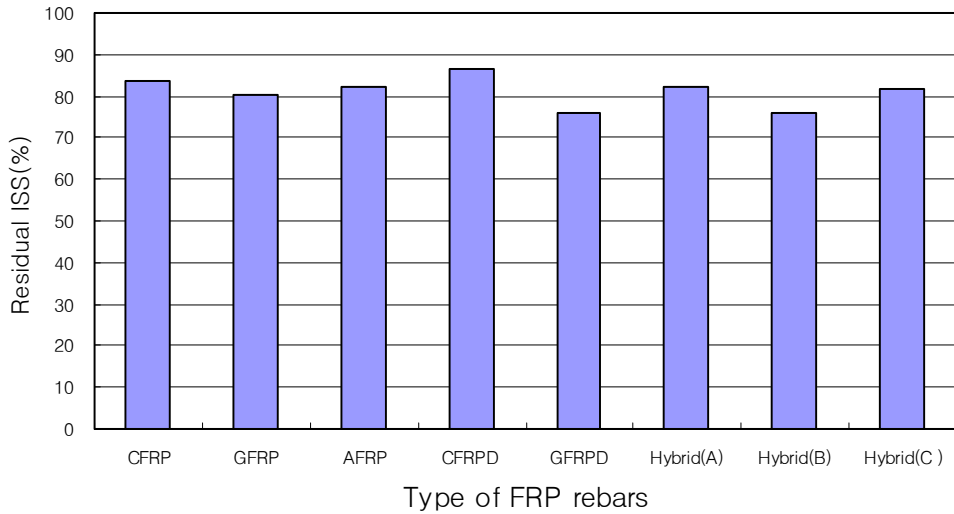


(b) Residual interlaminar shear stress

Fig. 7-18 Interlaminar shear test after long-term oven dry exposure: (a) interlaminar shear stress, (b) residual interlaminar shear stress

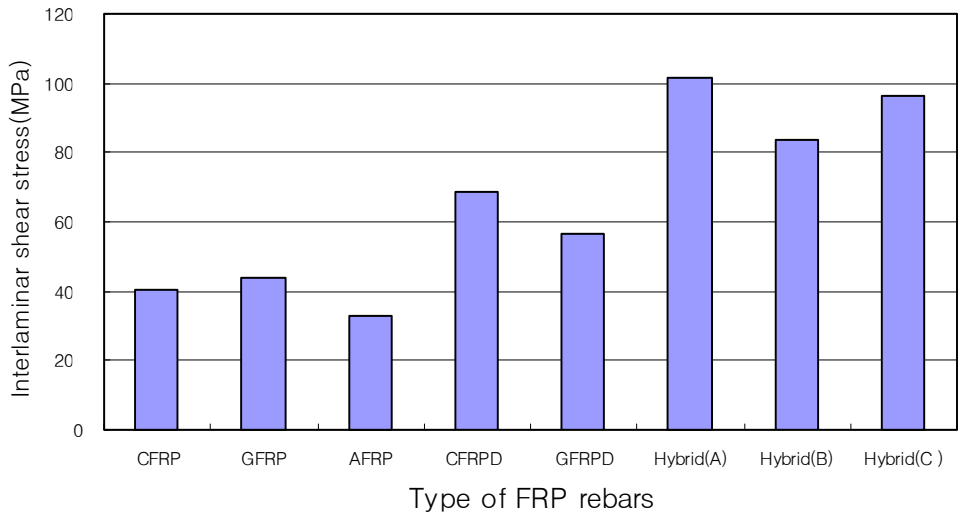


(a) Interlaminar shear stress

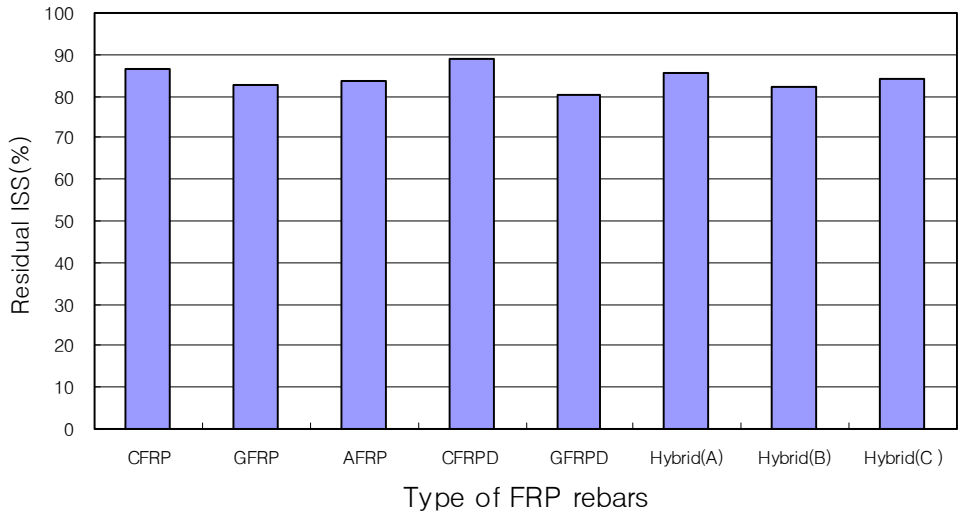


(b) Residual interlaminar shear stress

Fig. 7-19 Interlaminar shear test after repeated freezing and thawing cycles exposure: (a) interlaminar shear stress, (b) residual interlaminar shear stress



(a) Interlaminar shear stress



(b) Residual interlaminar shear stress

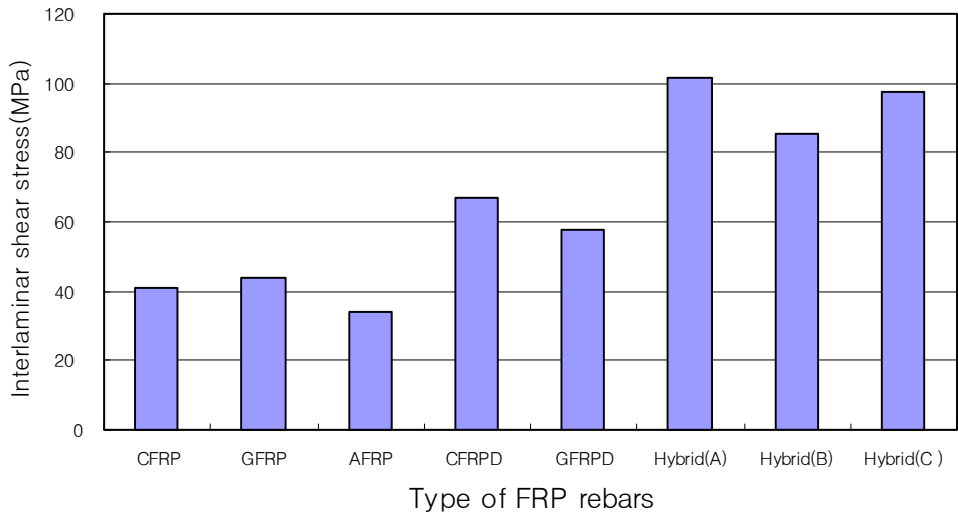
Fig. 7-20 Interlaminar shear test after sulfate(Na_2SO_4) solution exposure: (a) interlaminar shear stress, (b) residual interlaminar shear stress

자. 용빙제 환경

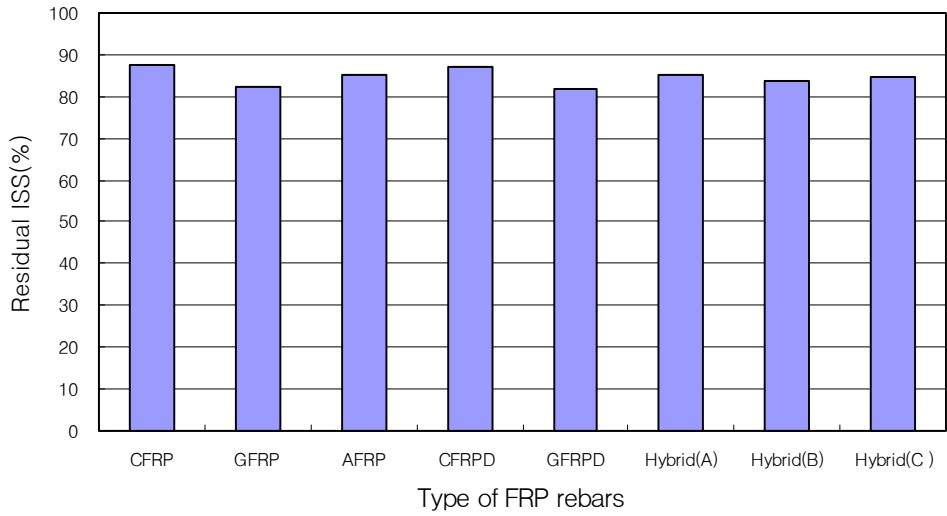
겨울철 콘크리트 교량 구조물에 내린 눈의 용빙제로 염화칼슘이 사용되고 있다. 따라서 이와 같은 교량 구조물에 적용된 하이브리드 FRP 리바의 내구성능을 파악하기 위하여 염화칼슘에 용액에 노출시킨후 ISS시험결과는 Fig. 7-21과 같다. 시험결과 모든 시험된 FRP 리바의 잔류 ISS비가 80%이상으로 용빙제로 인한 영향은 크게 발생하지 않을 것으로 판단된다.

차. 염해 건조-습윤반복

염해와 건조-습윤 반복의 영향을 복합적으로 고려한 환경에 노출된 콘크리트 구조물에 보강재료로 사용한 하이브리드 FRP 리바의 영향을 고려한 잔류 ISS결과는 Fig. 7-22와 같다. 실험결과 유리섬유가 주요구성요소로 사용된 하이브리드 FRP 리바(B), 개발된 GFRP 리바 및 GFRP Aslan 리바가 70%정도의 잔류 ISS비를 보여주었다. 따라서 해양에 인접한 해양환경과 건조-습윤 반복을 복합적으로 받을 때 약간의 성능 감소가 발생한다고 할 수 있다. 이에 반해 하이브리드 FRP 리바 (A), (B) 및 CFRP 리바, AFRP 리바는 모두 80%이상의 잔류 ISS비를 보여주어 염해와 건조-습윤 반복을 복합적으로 받는 환경에서도 우수한 성능을 발휘함을 알 수 있었다.

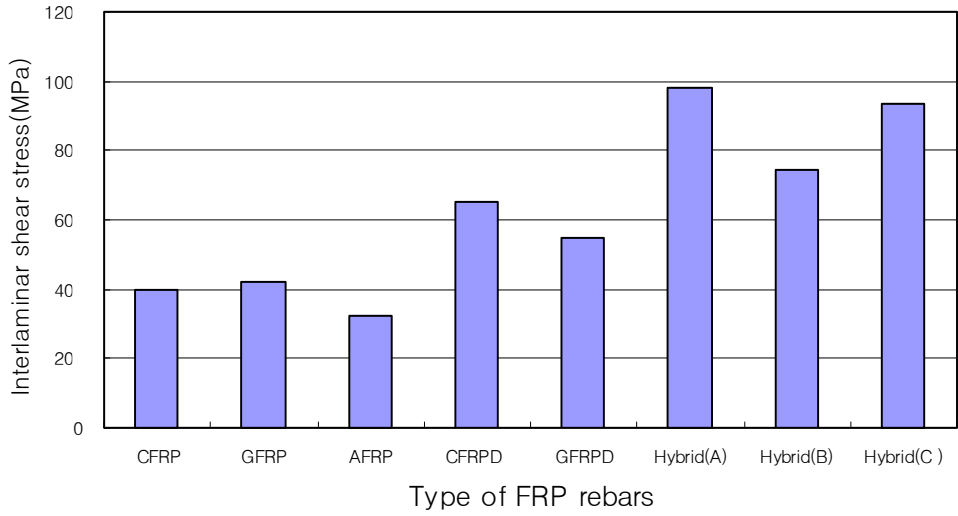


(a) Interlaminar shear stress

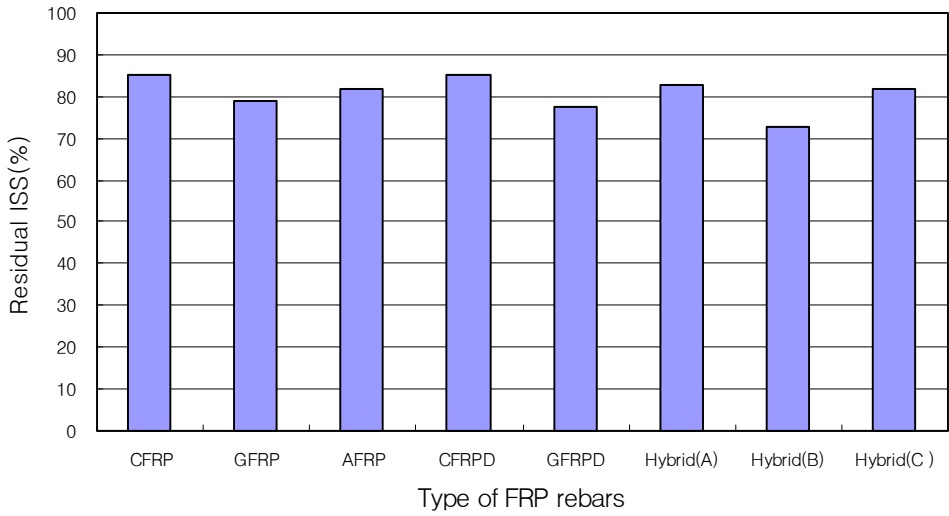


(b) Residual interlaminar shear stress

Fig. 7-21 Interlaminar shear test after CaCl_2 solution exposure: (a) interlaminar shear stress, (b) residual interlaminar shear stress



(a) Interlaminar shear stress



(b) Residual interlaminar shear stress

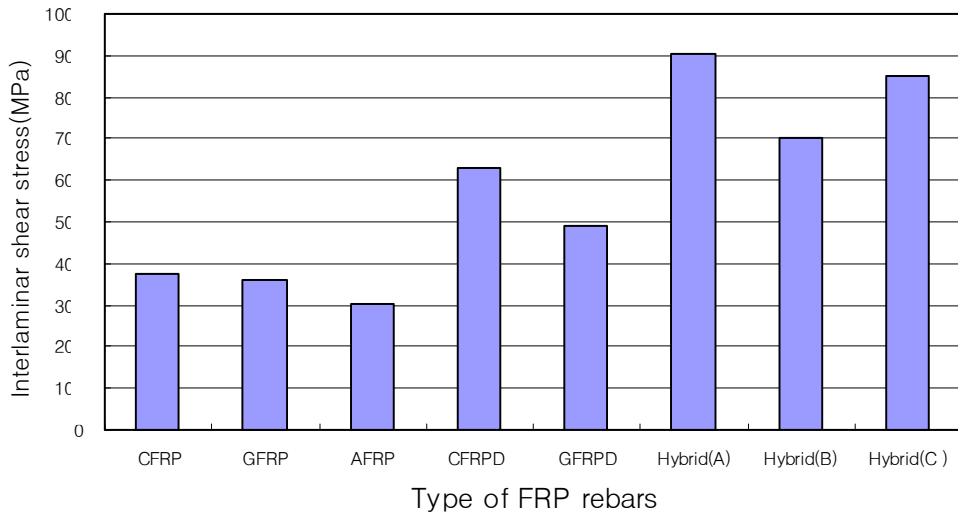
Fig. 7-22 Interlaminar shear test after salt and repeated wet-dry cycles exposure: (a) interlaminar shear stress, (b) residual interlaminar shear stress

카. 염해 동결융해

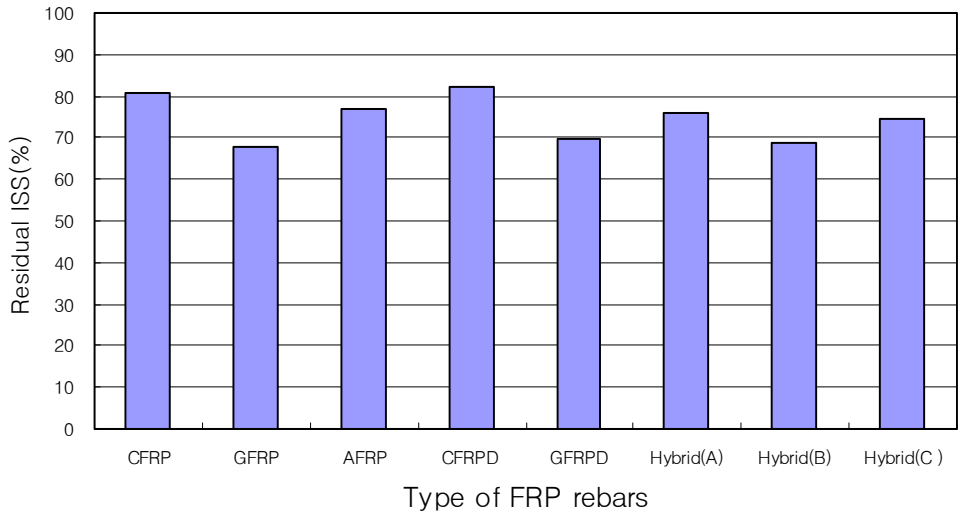
염해 와 동결융해 반복을 복합적으로 받는 콘크리트 구조물에 하이브리드 FRP 리바를 적용하였을 때의 영향은 Fig. 7-23과 같다. 하이브리드 FRP 리바(A), (B), (C)는 잔류 ISS비는 각각 76.1%, 68.8%, 74.4%로 나타났다. 또한 개발된 CFRP 리바 및 CFRP 리바는 각각 82.1%와 80.5%를 보여주었으며, 개발된 GFRP 리바 및 GFRP Aslan 리바는 각각 69.5%, 67.6%를 나타내었다. AFRP Technora 리바는 76.8%의 값을 보여주었다. 시험결과 유리섬유를 사용한 FRP 리바의 경우 모두 70%이하로 낮은 저항성을 나타내었는데 이는 유리섬유가 탄소 섬유와 아라미드섬유에 비하여 내구성이 떨어지기 때문이며 따라서 유리섬유를 사용한 FRP 리바의 경우 염해와 동결-융해를 복합적으로 받은 구조물에 적용시 이를 고려한 설계가 필요하다.

타. 자외선 노출

14일간의 자외선 노출후 잔류 ISS 시험결과는 Fig. 7-24와 같다. 시험결과 모든 FRP 리바 공시체에서 80% 이상의 잔류 ISS를 보여주어 자외선에 노출에 의한 성능감소는 거의 발생하지 하지 않았다. 따라서 현장에서 외부에 노출시킨 후 작업시간을 고려한 자외선 노출에 의한 영향은 거의 없는 것으로 판단된다.

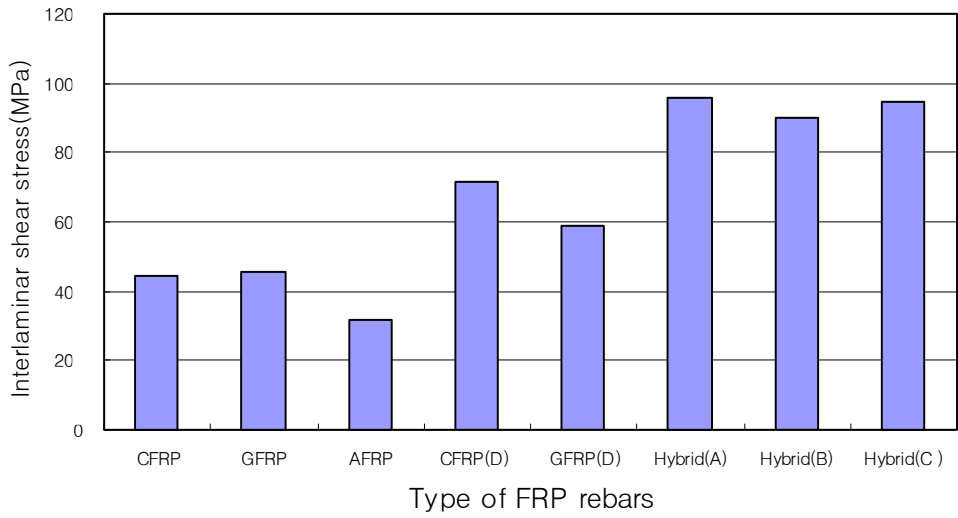


(a) Interlaminar shear stress

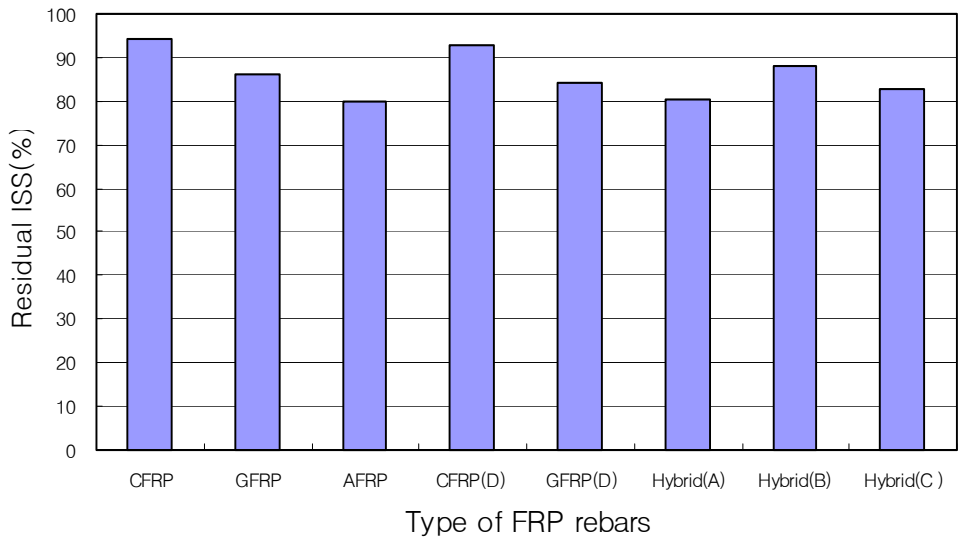


(b) Residual interlaminar shear stress

Fig. 7-23 Interlaminar shear test after salt and repeated freezing and thawing cycles exposure: (a) interlaminar shear stress, (b) residual interlaminar shear stress



(a) Interlaminar shear stress



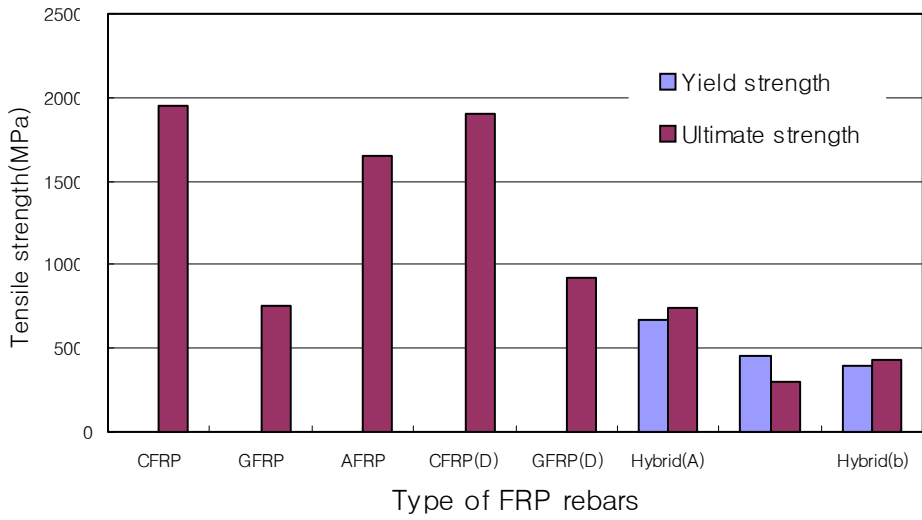
(b) Residual interlaminar shear stress

Fig. 7-24 Interlaminar shear test after UV radiation exposure: (a) interlaminar shear stress, (b) residual interlaminar shear stress

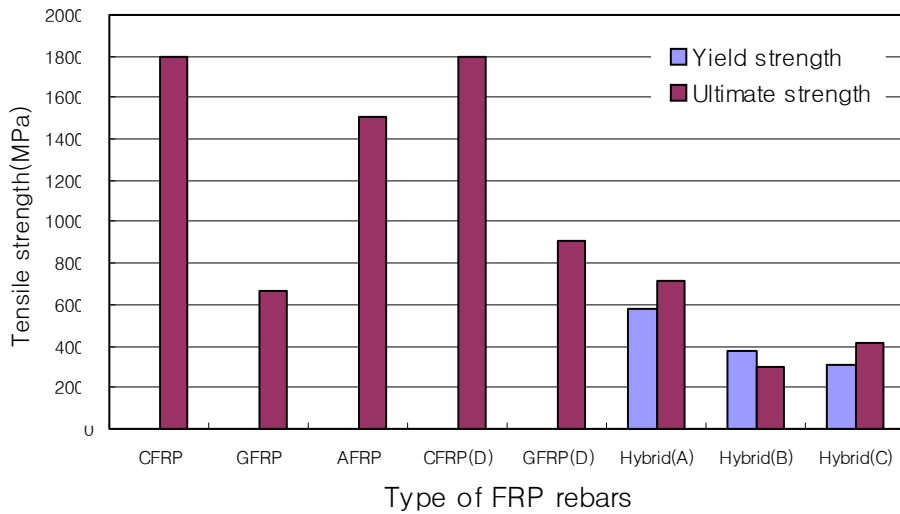
3. 인장강도

가. 알칼리 환경

하이브리드 FRP 리바가 콘크리트에 정착되었을 때의 알칼리에 대한 영향을 알아보기 위하여 실시한 pH 12.6의 60℃의 용액에 100일간 노출시킨 공시체의 인장강도 및 잔류강도 특성을 평가해 보면 Fig. 7-25, 7-26과 같다. 실험결과 하이브리드 FRP 리바(A), (B)는 잔류인장강도가 50일간 노출 후에 모두 90%이상의 높은 인장강도를 보여주었으나 하이브리드 FRP 리바(B)는 80%의 잔류인장강도를 나타내었다. CFRP ISO 리바 및 개발된 CFRP 리바, AFRP 리바 역시 88%이상의 우수한 값을 나타내었다. 그러나 GFRP 리바의 경우 잔류강도가 약간 작게 나타났는데 GFRP Aslan 리바의 경우 85%, 개발된 GFRP 리바의 경우 82% 정도를 나타내었다. 또한 100일간 노출후 잔류인장강도 시험결과를 살펴보면 GFRP Aslan 리바(75%)를 제외하고는 모두 80%이상의 우수한 잔류인장강도를 나타내었다. 특히 하이브리드 FRP 리바(A), (C)의 경우 모두 90%이상의 높은 값을 보여주었다. 그러나 하이브리드 FRP 리바(B)는 유리섬유가 주요구성성분으로 잔류인장강도가 유리섬유가 영향을 받았기 때문에 67%정도의 낮은 저항성을 나타내었다. 따라서 설계시 이를 고려할 필요가 있다. 개발된 CFRP 리바 및 GFRP 리바, CFRP ISO 리바, AFRP Technora 리바는 모두 80%이상의 값을 나타내어 알칼리 환경에 대한 저항성이 우수하게 나타났다.

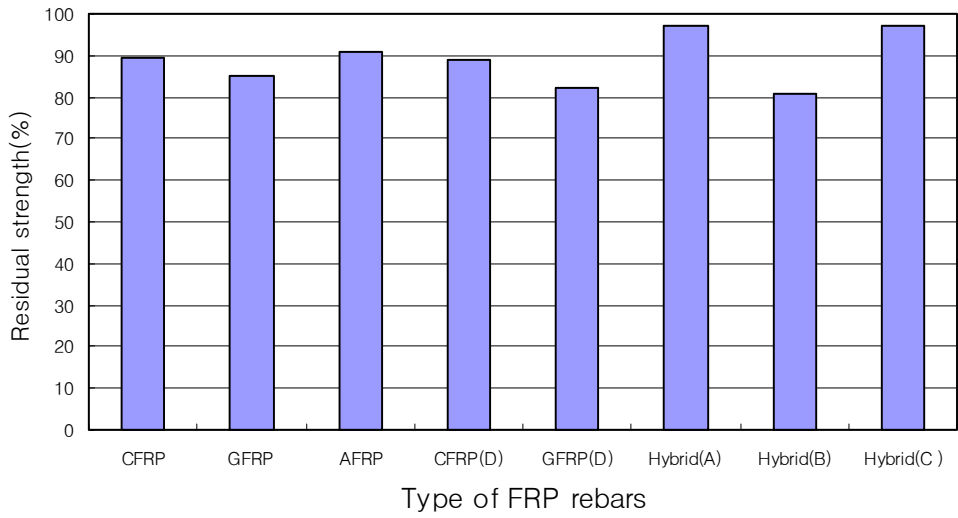


(a) After 50days

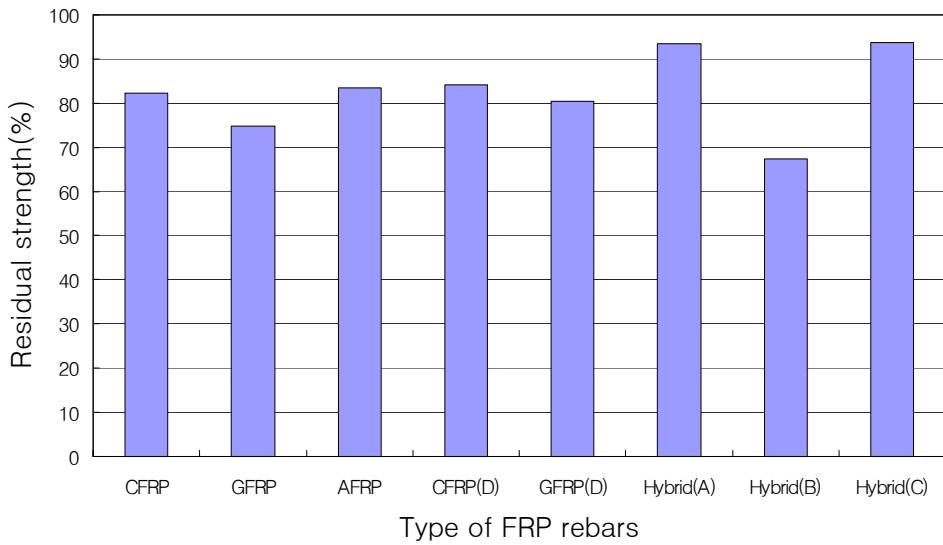


(b) After 100days

Fig. 7-25 Tensile strength of FRP rebars after alkaline solution: (a) After 50days, (b) After 100days



(a) After 50days



(b) After 100days

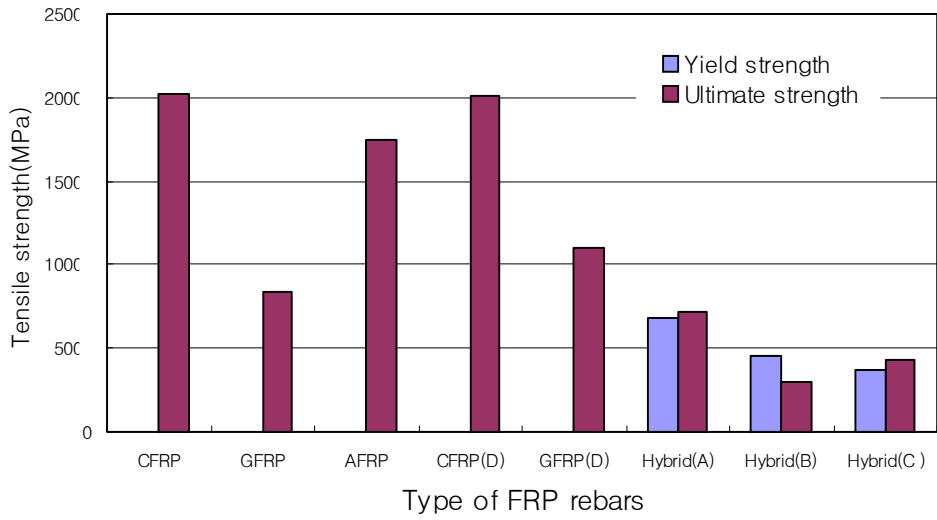
Fig. 7-26 Residual tensile strength of FRP rebars after alkaline solution: (a) after 50 days, (b) after 100 days

나. 산환경

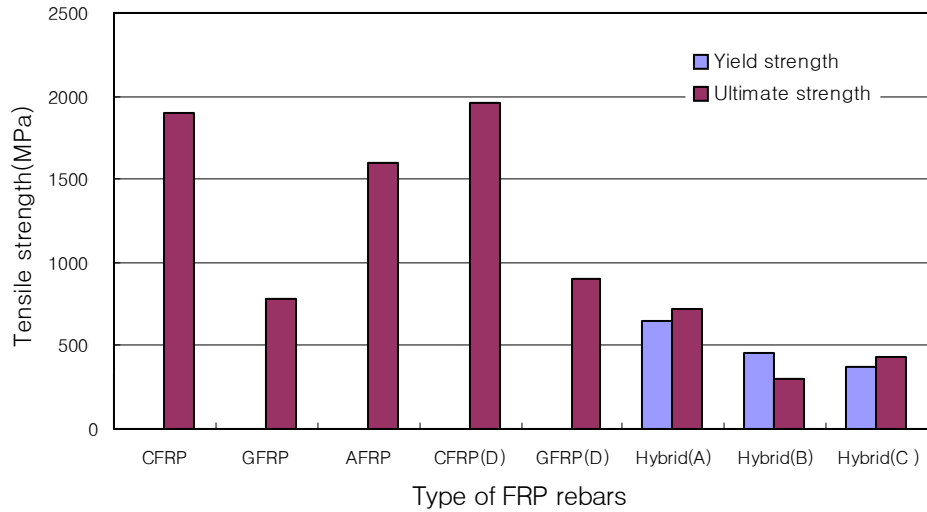
하이브리드 FRP 리바가 산환경에 노출되었을때의 영향을 알아보기 위하여 60℃의 아세트산용액에 50일 및 100일간 노출시킨 공시체의 인장강도 및 잔류강도 특성을 평가하였다(Fig. 7-27 및 Fig. 7-28). 실험결과 시험된 FRP 리바는 잔류인장강도는 50일간 노출 후에는 하이브리드 FRP 리바(B)를 제외하고는 모두 90%이상의 높은 인장강도를 보여주었다. 그러나 하이브리드 FRP 리바(B) 역시 80%이상의 잔류인장강도를 보여주어 50일간 노출은 하이브리드 FRP 리바를 포함한 모두 FRP 리바의 성능에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 또한 100일간 노출후 잔류인장강도 시험결과를 살펴보면 하이브리드 FRP 리바(A), (C)의 경우 90%이상의 높은 값을 보여주었다. 또한 하이브리드 FRP 리바(B), 개발된 CFRP 리바 및 GFRP 리바, CFRP ISO 리바, GFRP Aslan 리바, AFRP Technora 리바 등 시험된 모든 FRP 리바의 잔류인장강도는 80%이상의 값을 나타내어 산환경에 대한 저항성이 우수하게 나타났다.

다. 염해환경

하이브리드 FRP 리바가 염해환경에 노출되었을때의 영향을 알아보기 위하여 60℃의 NaCl용액에 50일 및 100일간 노출시킨 공시체의 인장강도 및 잔류강도 특성을 평가하였다(Fig. 7-29 및 Fig. 7-30). 실험결과 시험된 FRP 리바는 잔류인장강도는 50일간 노출 후에 모두 약 90%정도의 높은 인장강도를 보여주었다. 따라서 50일간 노출은 하이브리드 FRP 리바를 포함한 모두 FRP 리바의 성능에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 또한 100일간 노출후 잔류인장강도 시험결과를 살펴보면 하이브리드 FRP 리바(A), (B)의 경우 90%이상의 높은 값을 보여주었다. 또한 하이브리드 FRP 리바(B)와 개발된 CFRP 리바 및 GFRP 리바, CFRP ISO 리바, GFRP Aslan 리바, AFRP Technora 리바 등 시험된 모든 FRP 리바의 잔류인장강도는 80%이상의 값을 나타내어 염해환경에 대한 저항성이 우수하게 나타났다.

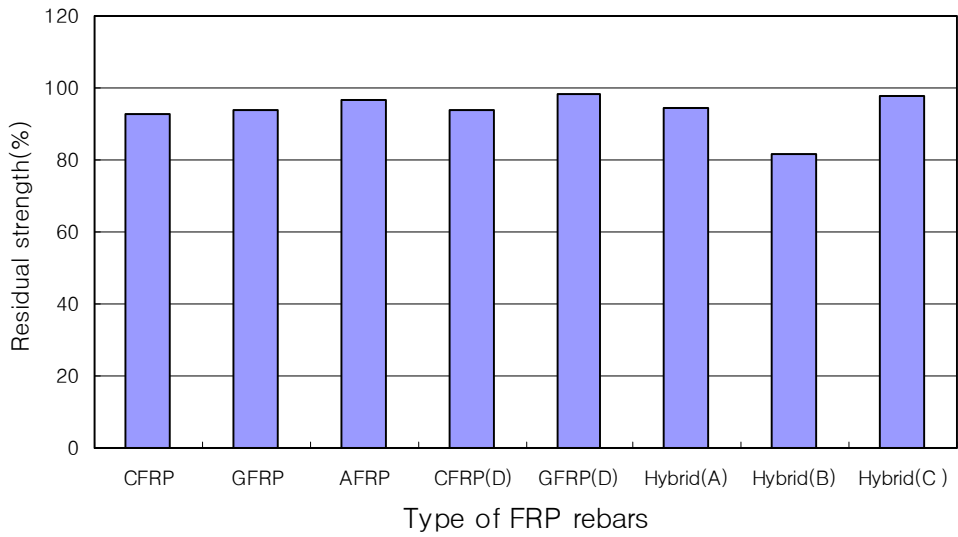


(a) After 50days

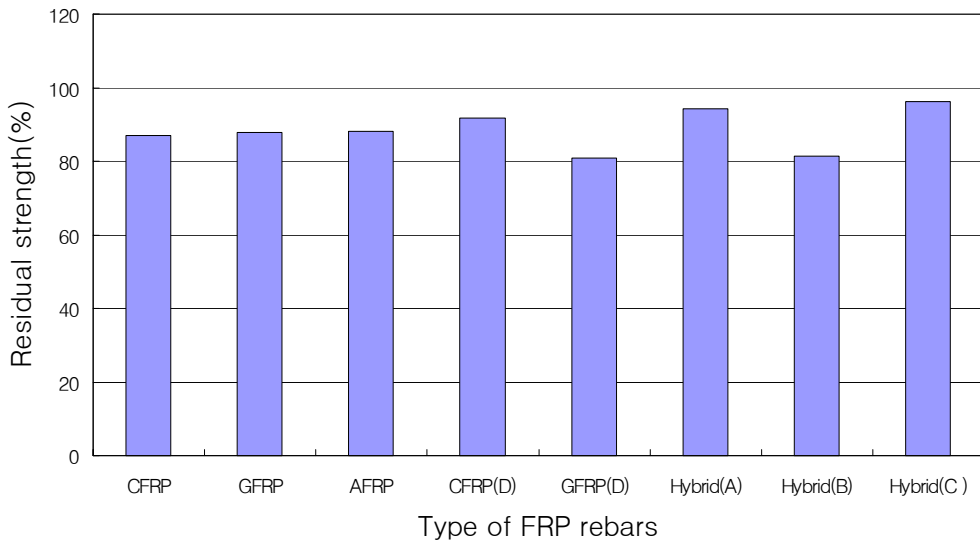


(b) After 100days

Fig. 7-27 Tensile strength of FRP rebars after acid solution: (a) after 50 days, (b) after 100 days

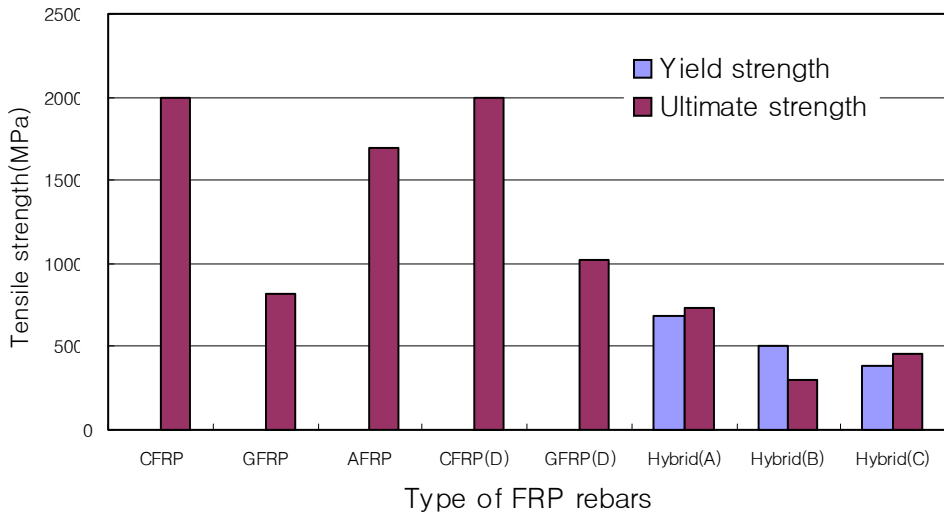


(a) After 50days

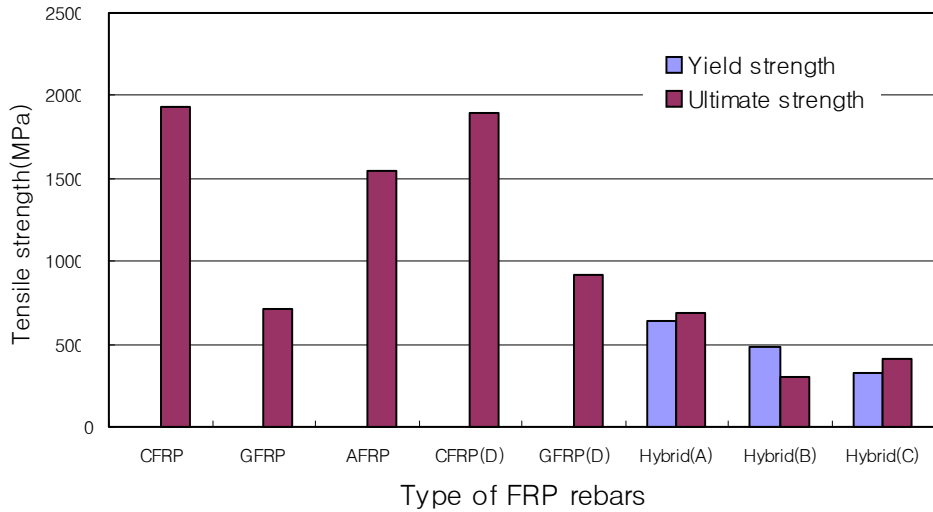


(b) After 100days

Fig. 7-28 Residual tensile strength of FRP rebars after acid exposure: (a) after 50 days, (b) after 100 days

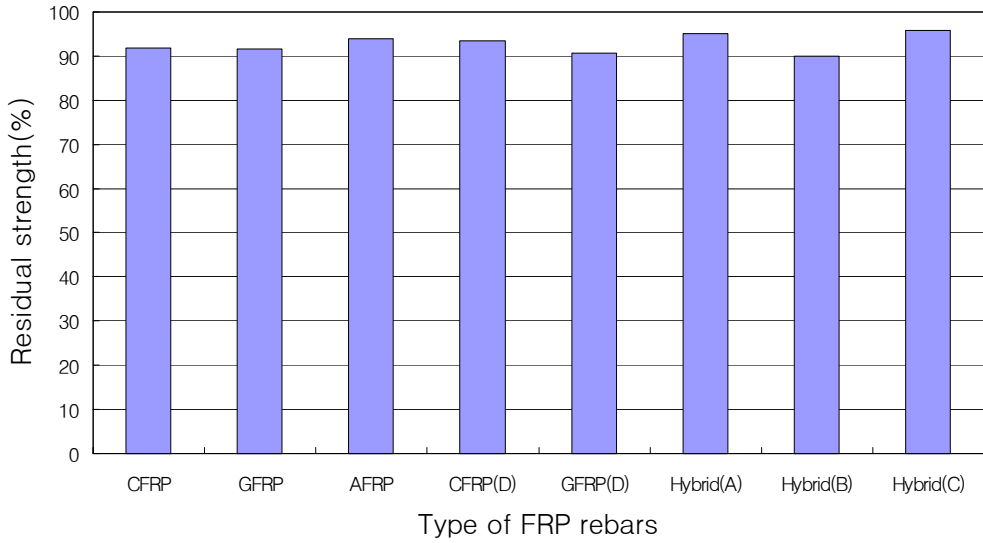


(a) After 50days

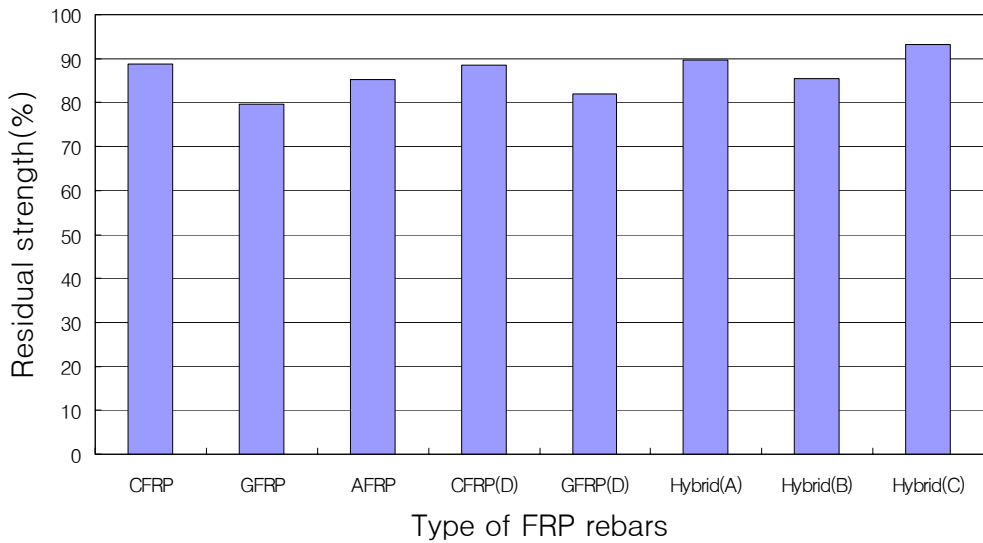


(b) After 100days

Fig. 7-29 Tensile strength of FRP rebars after acid solution: (a) after 50 days, (b) after 100 days



(a) After 50days



(b) After 100days

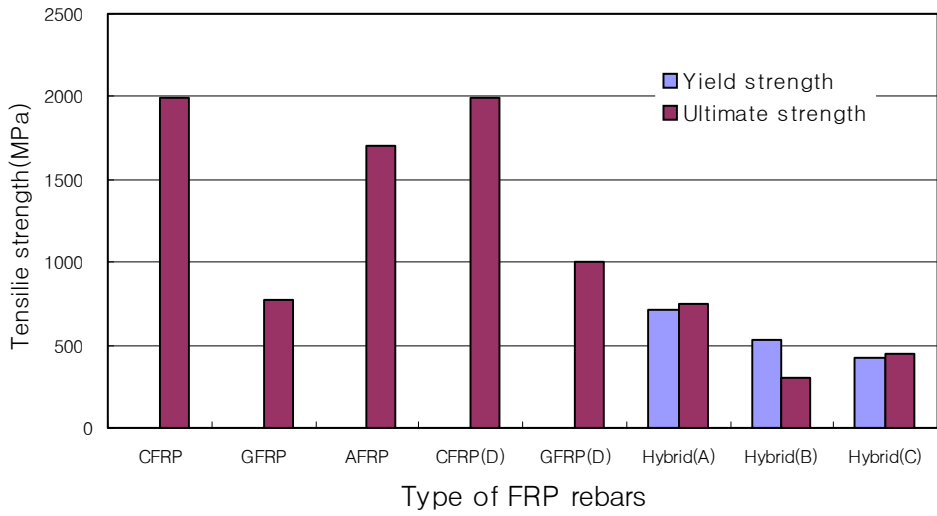
Fig. 7-30 Residual tensile strength of FRP rebars after alkaline solution: (a) after 50 days, (b) after 100 days

라. 중성환경

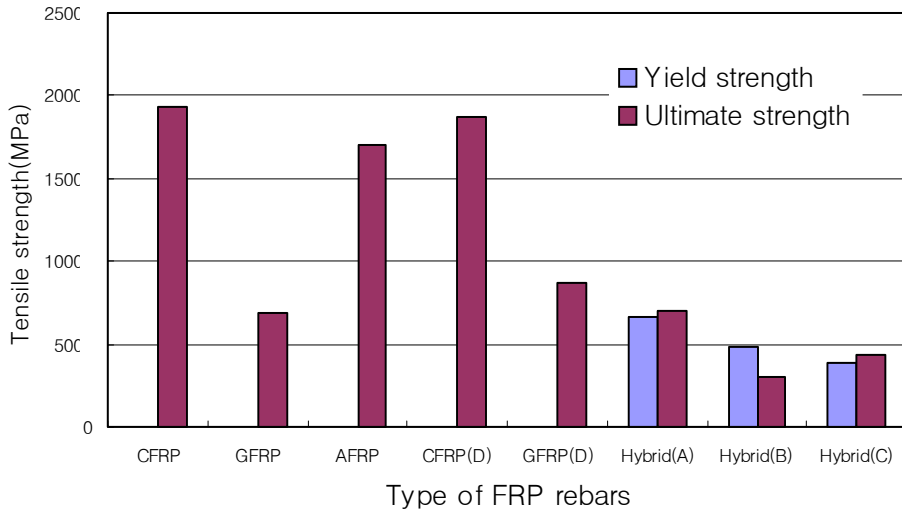
하이브리드 FRP 리바가 산환경에 노출되었을때의 영향을 알아보기 위하여 60℃의 수돗물에 50일 및 100일간 노출시킨 공시체의 인장강도 및 잔류강도 특성을 평가하였다(Fig. 7-31 및 Fig. 7-32). 실험결과 시험된 FRP 리바는 잔류인장강도는 50일간 노출 후에 모두 GFRP Aslan 리바(87%) 및 개발된 GFRP 리바(89%)를 제외하고는 모두 90%이상의 높은 인장강도를 보여주었다. 따라서 50일간 노출은 하이브리드 FRP 리바를 포함한 모두 FRP 리바의 성능에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 또한 100일간 노출후 잔류인장강도 시험결과를 살펴보면 GFRP Aslan 리바 및 개발된 GFRP 리바를 제외하고는 모두 80%이상의 값을 보여주었다. 그러나 GFRP Aslan 리바 및 개발된 GFRP 리바는 각각 77% 정도를 나타내어 약간의 저항성이 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 ACI 기준에서 제시하고 있는 잔류인장도 75%는 모두 만족하는 결과를 보여주었다.

마. 건조습윤반복

건조-습윤 반복 후 하이브리드 FRP 리바(A), (B)와 (C)의 잔류 인장강도비는 각각 88%, 85%, 92%로 매우 우수한 저항성을 보여주었으며, 개발된 CFRP 리바 및 CFRP ISO 리바는 잔류 인장강도비가 각각 96%와 93%로 매우 높은 잔류 인장강도비를 나타내었다(Fig. 7-33). 또한 개발된 GFRP 및 GFRP Aslan 리바는 각각 95%와 97%로 나타났다. AFRP Technora 리바는 97%로 건조-습윤이 반복되는 환경에서 우수한 저항성을 나타내었다.

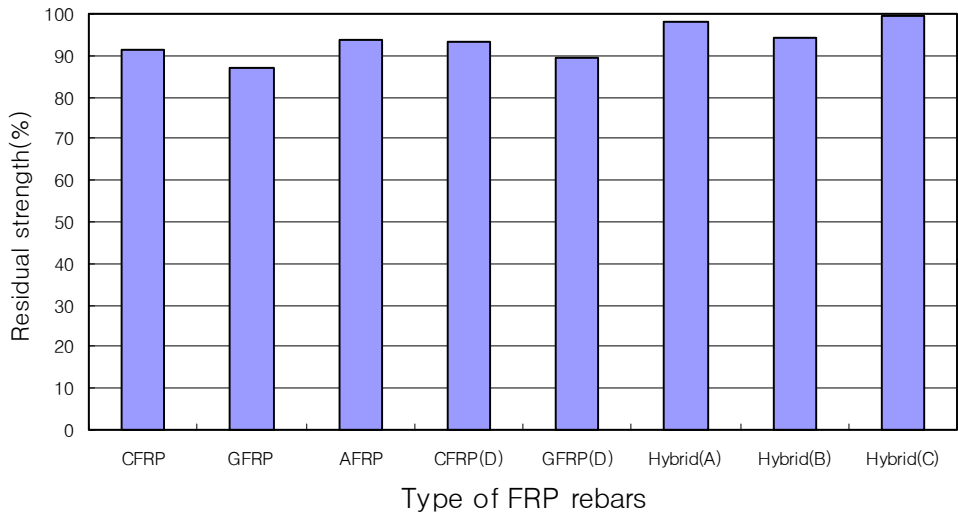


(a) After 50days

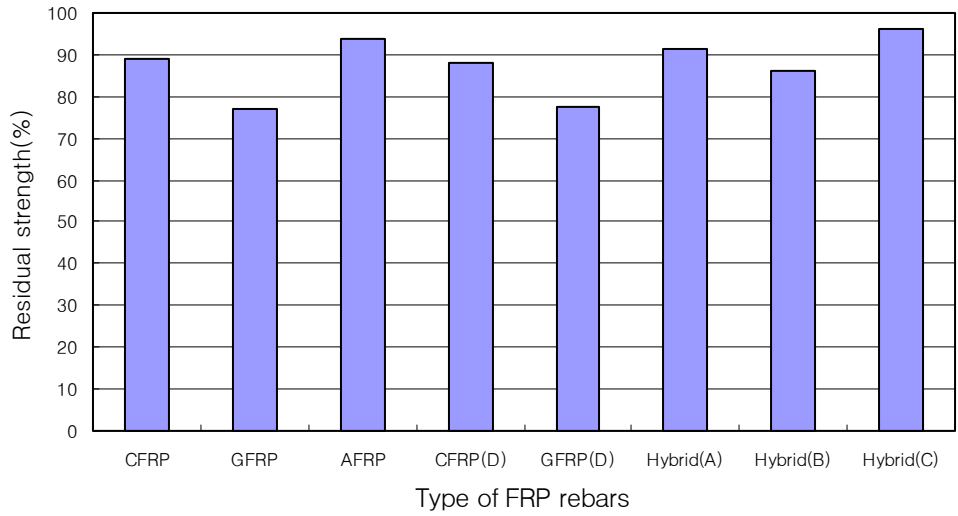


(b) After 100days

Fig. 7-31 Tensile strength of FRP rebars after deionized water exposure: (a) after 50 days, (b) after 100 days

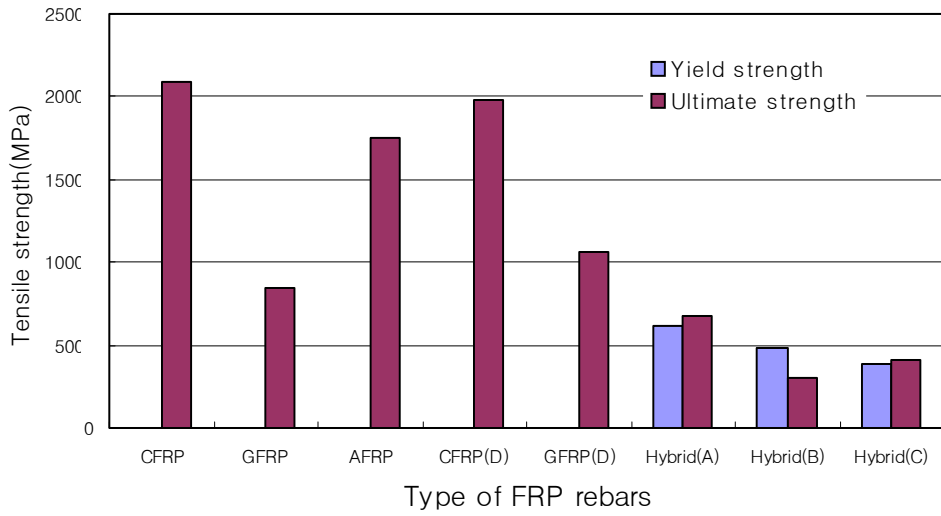


(a) After 50days

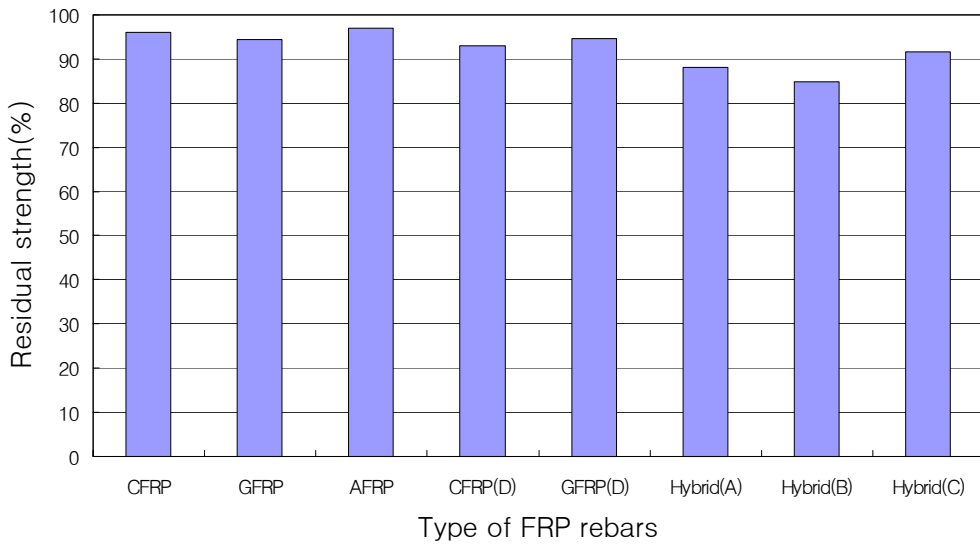


(b) After 100days

Fig. 7-32 Residual tensile strength of FRP rebars after deionized water exposure: (a) after 50days, (b) after 100days



(a) Tensile strength



(b) Residual strength

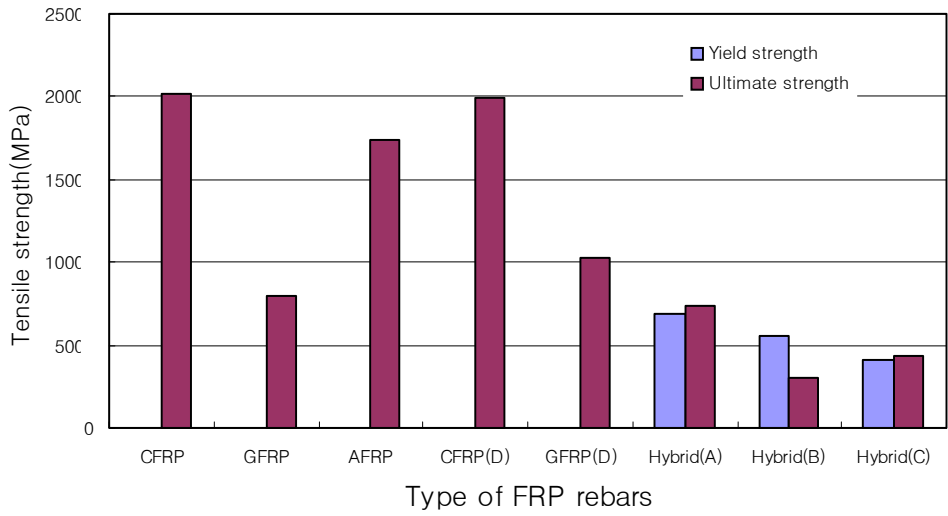
Fig. 7-33 Tensile test of FRP rebars after repeated wet-dry cycles exposure:
(a) tensile strength, (b) residual strength

바. 장기오븐 건조

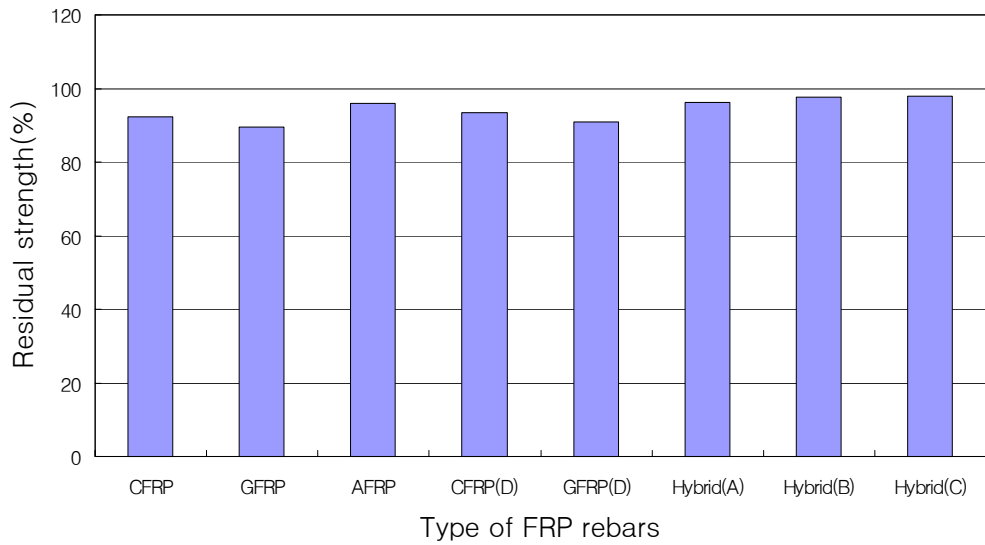
하이브리드 FRP 리바가 여름철 장기적으로 높은 온도에 영향을 받을 수 있는 환경을 고려한 장기오븐 건조 환경 노출시험결과 시험된 하이브리드 FRP 리바를 비롯한 모든 공시체가 잔류인장강도 90% 이상의 우수한 내구성을 보여주었다. 따라서 여름철 장기간의 고온에 노출된 콘크리트의 보강재로 사용된 하이브리드 FRP 리바의 성능에 영향을 미치지 않는다(Fig. 7-34).

사. 동결융해반복

동결융해는 대부분의 콘크리트 구조물이 노출될 수 있는 환경으로 하이브리드 FRP 리바의 동결융해 환경에 노출시켰을 때 성능시험 결과는 Fig. 7-35와 같다. 하이브리드 FRP 리바 (A), (B), (C)의 동결융해 반복 후 잔류 인장강도비는 각각 92%, 85%, 91%로 나타나 매우 우수한 저항성을 나타내었다. 개발된 CFRP 리바 및 GFRP 리바의 잔류 인장강도비는 각각 93%와 84%를 나타내었다. 또한 CFRP ISO 리바, GFRP Aslan 리바 및 AFRP Technora 리바의 잔류 인장강도비는 각각 91%, 89%, 95%를 보여주었다. 동결융해반복 시험결과 시험된 모든 FRP 리바는 우수한 동결-융해 저항성을 가지고 있었다.

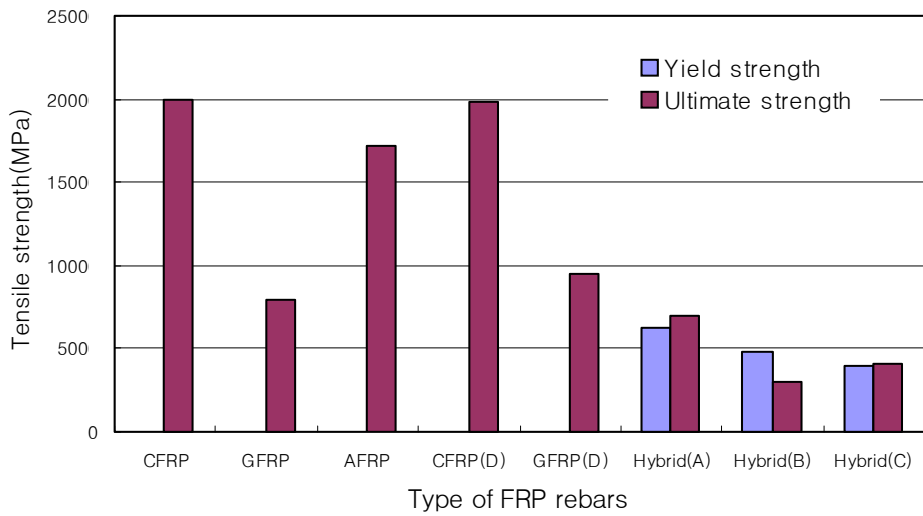


(a) Tensile strength

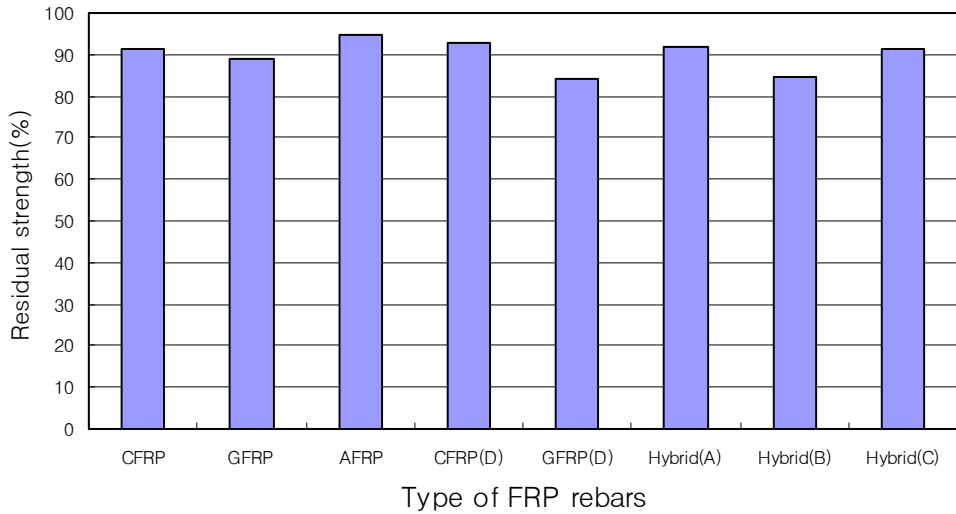


(b) Residual strength

Fig. 7-34 Tensile test of FRP rebars after long-term oven dry exposure: (a) tensile strength, (b) residual strength



(a) Tensile strength



(b) Residual strength

Fig. 7-35 Tensile test of FRP rebar after repeated freezing and thawing cycles exposure: (a) tensile strength, (b) residual strength

아. 황산염

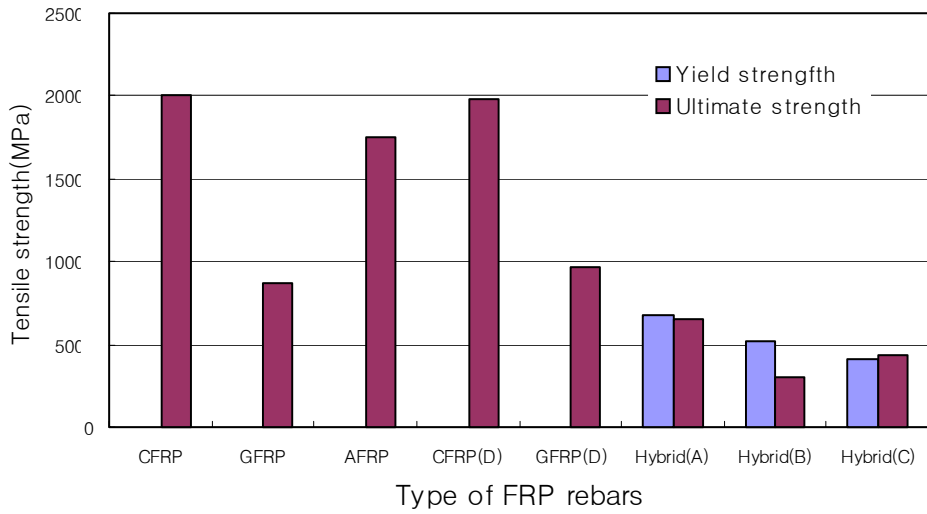
해양환경에 노출된 콘크리트 구조물에 영향을 평가하기 위하여 실시한 황산염에 노출 후 압축강도 시험결과는 Fig. 7-36과 같다. 시험결과 하이브리드 FRP 리바(B)와 개발된 GRRP 리바가 80%이상의 잔류 인장강도비를 나타내었으며 이밖에 모든 시험된 FRP 리바는 90%이상의 잔류 인장강도비를 보여주어 황산염에 대한 저항성이 우수한 저항성을 보여주었다.

자. 용빙제

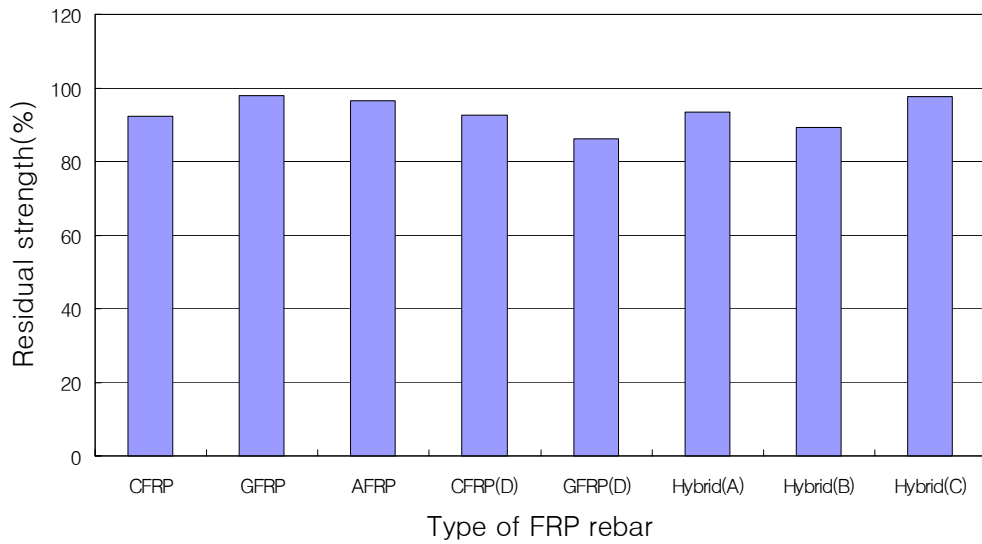
겨울철 콘크리트 교량 구조물에 내린 눈의 용빙제로 염화칼슘이 사용되고 있다. 따라서 이와 같은 교량 구조물에 적용된 하이브리드 FRP 리바의 내구성능을 파악하기 위하여 염화칼슘에 용액에 노출시킨 후 잔류 인장강도 시험결과는 Fig. 7-37과 같다. 시험결과 개발된 GFRP 리바 및 GFRP Aslan 리바를 제외하고는 모든 시험공시체가 잔류 인장강도비가 90%이상으로 용빙제로 인한 영향은 크게 받지 않았다. 또한 개발된 GFRP 리바 및 GFRP Aslan 리바 역시 80% 이상의 잔류 인장강도비를 보여주어 높은 용빙제에 대한 저항성을 보여주었다.

차. 염해와 건조-습윤반복

염해와 건조-습윤 반복의 영향을 복합적으로 고려한 환경에 노출된 콘크리트 구조물에 보강재료로 사용한 하이브리드 FRP 리바의 영향을 고려한 잔류 인장강도 시험결과는 Fig. 7-38과 같다. 시험결과 유리섬유가 주요구성요소로 사용된 하이브리드 FRP 리바(B), 개발된 GFRP 리바, GFRP Aslan 리바가 약 80%정도의 잔류 인장강도비를 보여주었고, 아라미드섬유와 탄소섬유를 주요구성 요소로 하는 하이브리드 FRP 리바(A), (B) 및 CFRP 리바, AFRP 리바는 모두 85%이상의 잔류 인장강도비를 보여주어 염해와 건조-습윤 반복을 복합적으로 받는 환경에서도 우수한 성능을 발휘함을 알 수 있었다.

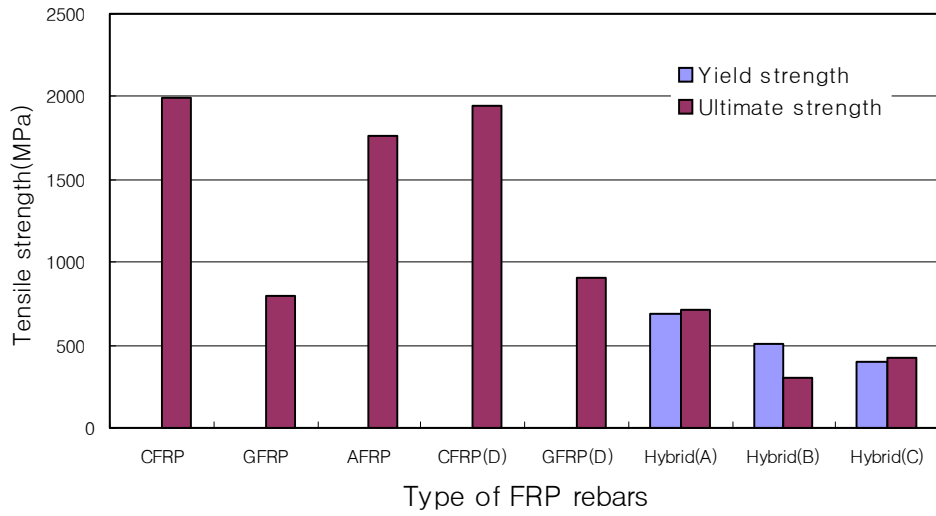


(a) Tensile strength

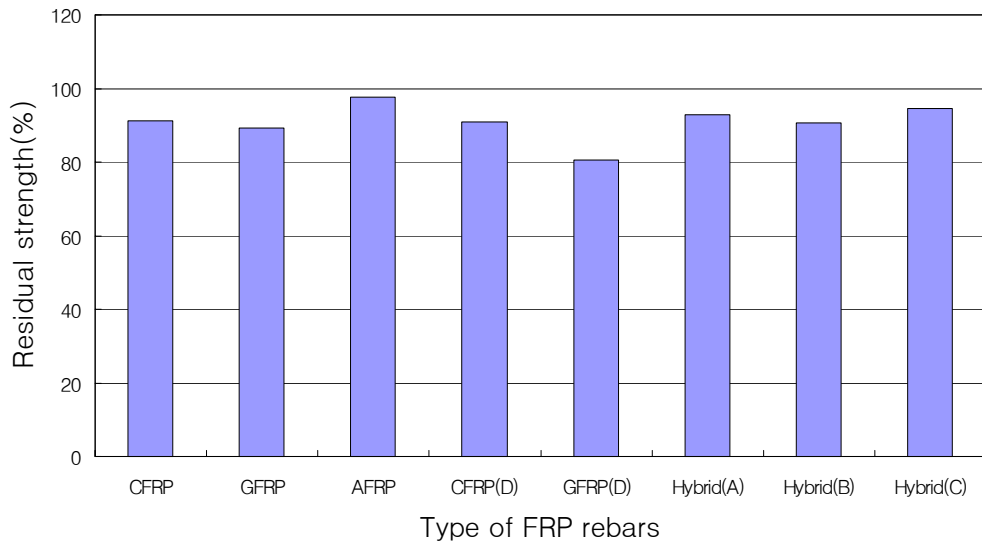


(b) Residual strength

Fig. 7-36 Tensile test of FRP rebars after sulfate(Na_2SO_4) exposure: (a) tensile strength, (b) residual strength

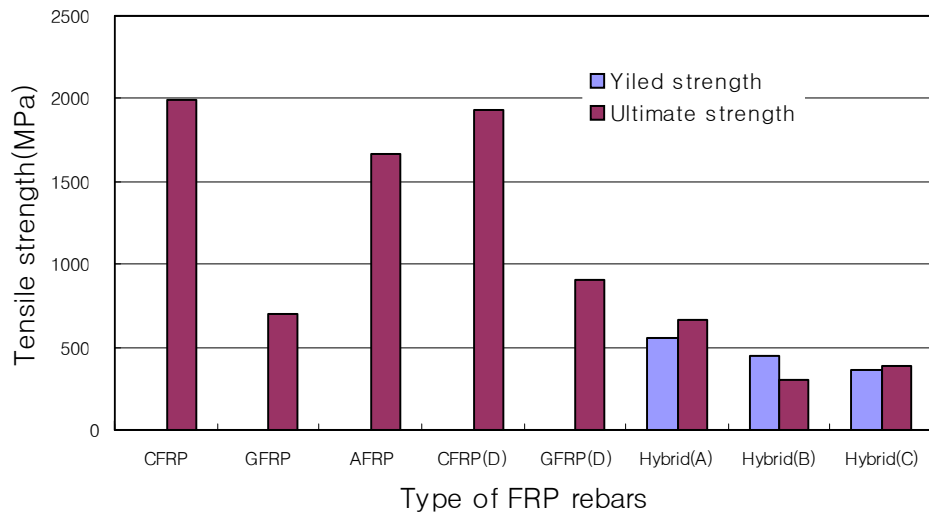


(a) Tensile strength

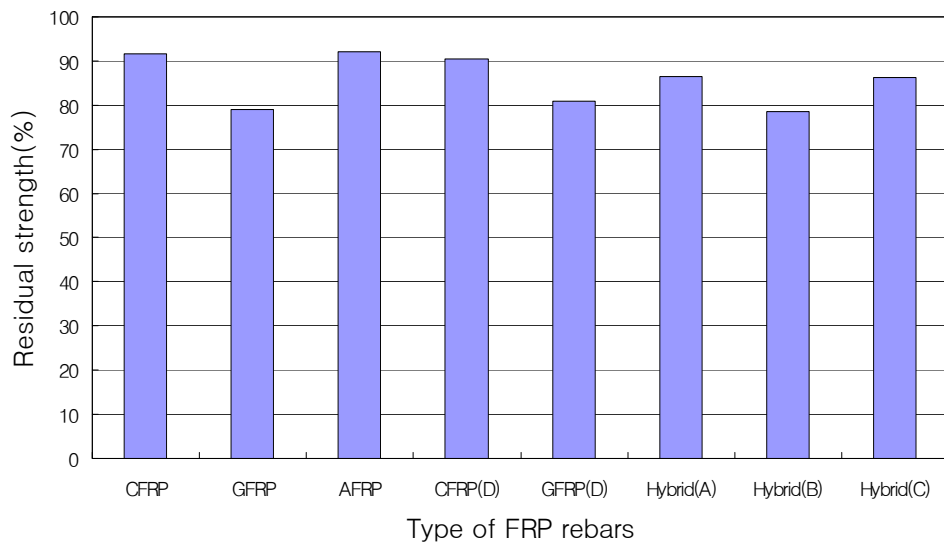


(b) Residual strength

Fig. 7-37 Tensile test of FRP rebars after Ca_2Cl_2 exposure: (a) tensile strength, (b) residual strength



(a) Tensile strength



(b) Residual strength

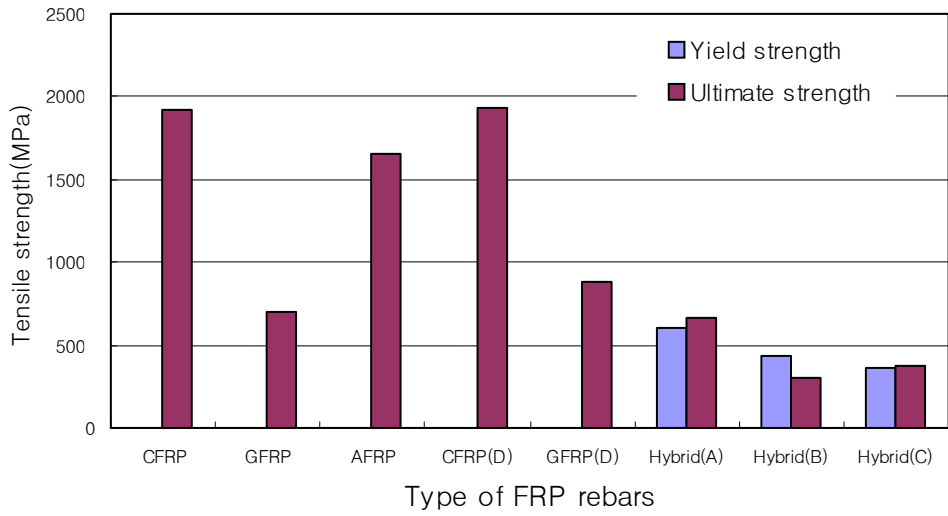
Fig. 7-38 Tensile test of FRP rebar after salt and repeated wet-dry cycles exposure: (a) tensile strength, (b) residual strength

카. 염해와 동결융해반복

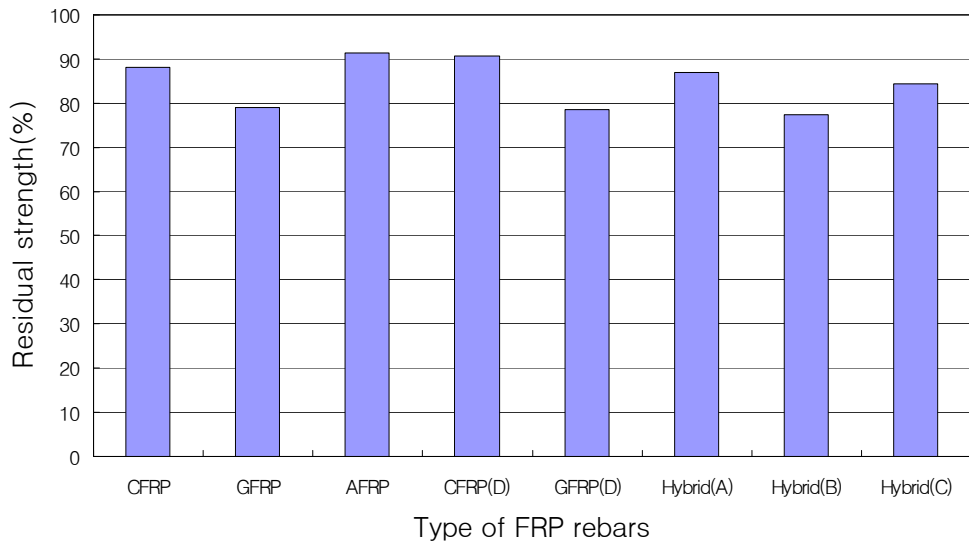
염해 와 동결융해 반복을 복합적으로 받는 콘크리트 구조물에 하이브리드 FRP 리바를 적용하였을 때의 영향은 Fig. 7-39와 같다. 하이브리드 FRP 리바(A), (B), (C)는 잔류 인장강도비는 각각 87%, 77%, 84%로 나타났다. 또한 개발된 CFRP 리바 및 CFRP ISO 리바는 각각 91%와 88%를 보여주었으며, 개발된 GFRP 리바 및 GFRP Aslan 리바는 모두 79%를 나타내었다. AFRP Technora 리바는 91%의 값을 나타내어 우수한 저항성을 보여주었다. 시험결과 유리섬유를 주요구성성분으로 한 FRP 리바의 경우 70%대의 잔류 인장강도비를 나타내어 설계시 이를 고려할 필요가 있다고 판단된다.

타. 자외선노출

14일간의 자외선 노출후 잔류 ISS 시험결과는 Fig. 7-40과 같다. 시험결과 모든 FRP 리바 공시체에서 85% 이상의 잔류 인장강도비를 보여주어 자외선에 노출에 의한 성능감소는 거의 발생하지 하지 않았다. 따라서 현장에서 외부에 노출시킨 후 작업시간 중 자외선 노출에 의한 영향은 거의 없는 것으로 판단된다.

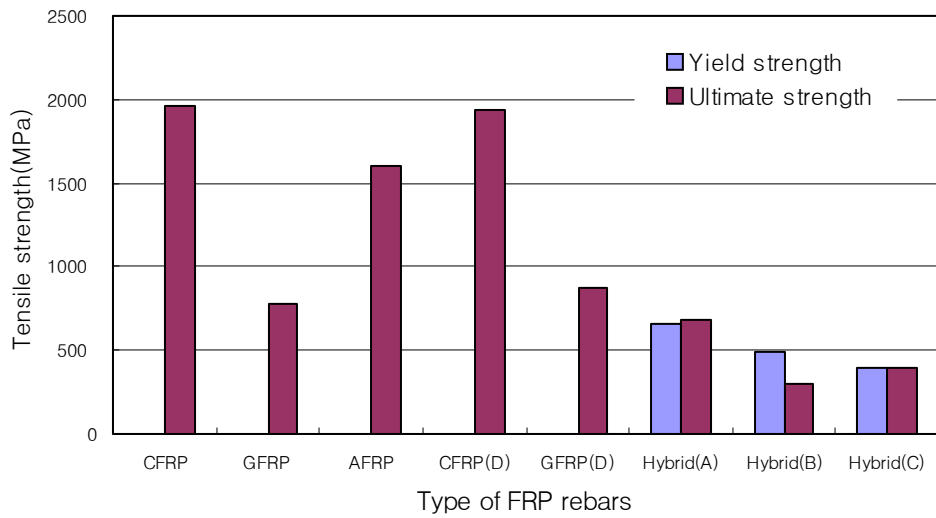


(a) Tensile strength

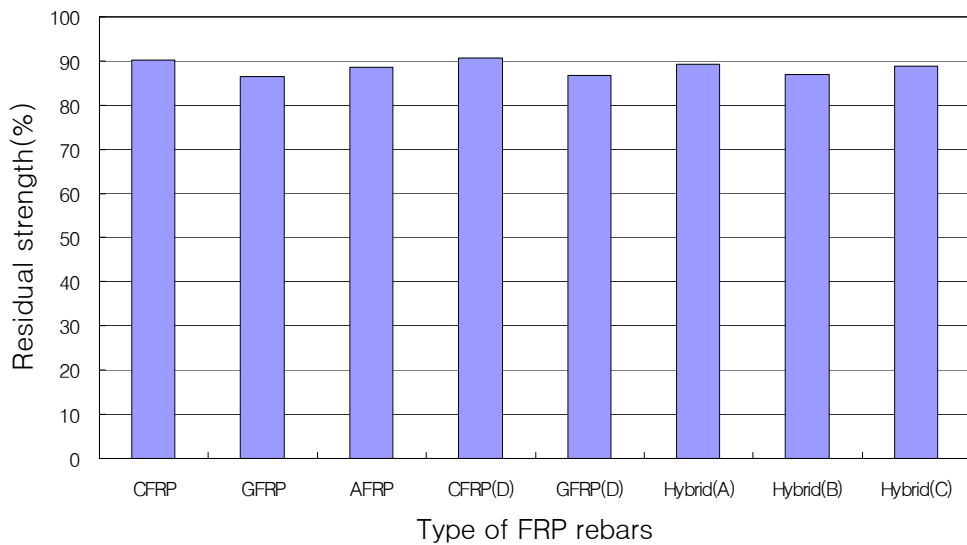


(b) Residual strength

Fig. 7-39 Tensile test of FRP rebars after salt and repeated freezing and thawing cycles exposure: (a) tensile strength, (b) residual strength



(a) Tensile strength



(b) Residual strength

Fig. 7-40 Tensile test of FRP rebars after UV radiation exposure: (a) tensile strength, (b) residual strength

제 5절 요약 및 결론

일반 및 하이브리드 FRP 리바의 내구성능을 평가하기 위하여 12가지의 환경조건에 노출후 압축, 전단, 인장시험을 실시하였으며 시험을 통한 결과를 요약 하면 다음과 같다.

1. 잔류압축강도 및 잔류전단강도 시험결과 개발된 CFRP 리바 및 GFRP 리바는 기존의 해외에서 사용되고있는 CFRP ISO 리바 및 GFRP Aslan 리바와 비교하여 내구성능이 동등하거나 우수한 것으로 나타났다.
2. 하이브리드 FRP 리바의 잔류압축강도 및 잔류전단강도는 탄소와 아라미드섬유를 주요 구성성 요소로 사용할 경우 CFRP 리바와 동등하거나 우수한 내구성을 발휘하였으나 유리섬유를 주요 구성성분으로 사용한 섬유는 내구성이 현저히 감소하였다. 그러나 GFRP 리바와 비교해서는 거의 동등한 내구성능을 나타내었다.

제 8장 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 수분흡수 특성 및 환경영향계수 결정

제 1절 수분흡수 특성

1. 개요

FRP 리바가 수분에 노출되면 물리·역학적 특성이 변한다는 것은 이미 알려진 사실이다. 서로 다른 환경에 노출된 FRP 리바의 내구성에 대한 관점은 아직까지는 완벽하게 이해되지 못하고 있다. FRP 리바는 서로 다른 환경에 노출되었을 때 강도 및 강성의 변화가 발생하고 높은 pH(알칼리) 환경에 노출되었을 때는 상당한 강도 및 강성의 감소가 발생한다고 알려져 왔다. 이와 같은 문제는 내구성이 강하고 침투성이 작은 폴리머 매트릭스를 사용하면 환경에 대한 저항성을 상당히 증가시킬 수 있다. 각종 사회간접시설에 사용되는 콘크리트 구조물의 보강재로 사용하기 위하여 개발된 하이브리드 FRP 리바의 장기적인 수분흡수반응에 대한 연구는 구조물의 설계 및 적용에서 반드시 필요한 특성이다. 따라서 본 연구에서는 알칼리, 산, 중성 및 해수환경 등에 노출된 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 수분흡수반응을 평가하였다.

2. 이론적 고찰

수분함량 C_a 의 FRP 리바 공시체를 온도 T_a 에 t 시간 동안 노출시켰을 때 수분흡수거동을 설명하기 위해서는 일반적으로 다과 같은 변수가 필요하다.

- 1) 위치와 시간의 인자로서 FRP 리바 내부의 온도분포 $T(x, t)$
- 2) 위치와 시간의 인자로서 FRP 리바 내부의 수분농도 $C(x, t)$
- 3) 시간의 인자로서 FRP 리바 내부의 총 수분함량 $m(t)$

4) 시간의 인자로서 FRP 리바의 성능(물리, 화학적 및 역학적 특성)의 변화 $P(t)$

위와 같은 변수중 1)~3)은 FRP 리바가 Fickian의 확산과정에 따라서 수분흡수 거동을 한다면 쉽게 적용하여 분석할 수 있다. 이때 Fickian의 확산과정은 일반적으로 다음과 환경조건일 때 적용이 가능하다.

1) FRP 리바의 열전달은 단지 전도에 의해서만 발생할 때이며 Fourier's 법칙에 따른다. 즉 다음과 같은 8-1식을 만족시켜야 한다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial T}{\partial x} \dots \dots \dots (8-1)$$

여기서, ρ =밀도, C 는 비열, T =온도, t =시간, x =거리, K_x =열전도

2) 수분확산은 Fick's 법칙 concentration-dependent form의 형태로 표현할 수 있다. 즉, Fick's 의 중량전달식(식 8-2)의 형태로 표현 할 수 있다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} D_x \frac{\partial c}{\partial x} \dots \dots \dots (8-2)$$

여기서, c =수분집중, D_x =확산계수, x =거리, t =시간

- 3) 에너지(fourier)와 체적전달(fick)식을 조합하여 적용할 수 있다.
- 4) 열전도와 체적확산은 모두 온도와 수분의 농도 및 작용 받는 응력의 크기에 의존한다.

Fickian 확산을 이용한 FRP 리바의 내구수명의 이론적 예측은 FRP 리바의 형상, 경계조건, 초기조건 및 밀도(ρ) 비열(C), 열전도(K) 최대수분함량(M_m)과 같

은 재료특성, 최대수분함량과 대기조건과의 관계를 인자로 하여 표현할 수 있다. 그러나 다음과 같은 경우 일반적으로 Fickian을 적용할 수 없다.

- 1) 구조물의 특성을 변화시키는 FRP 리바에 균열이 발생하거나 계면박리가 발생하였을 때
- 2) 수분의 흡수특성이 섬유와 매트릭스의 부착표면에서 결정될 때

그러나 대부분의 환경조건에서는 대부분의 FRP 리바가 Fickian의 확산 법칙을 따른다. 이와 같은 과정을 고려하면 FRP 리바의 수분흡수특성에 대한 이론적 모델을 만들 수 있다.

가. 수분함량(M)

FRP 리바의 수분함량 M 은 중량을 기본으로하여 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$M = \frac{\text{FRP 리바의 습윤중량}(w) - \text{FRP 리바의 건조중량}(w_d)}{\text{FRP 리바의 건조중량}(w_d)} \times 100 \dots (8-3)$$

M_m 은 주어진 환경에서 최대 수분함량이라고 정의한다. 즉, M_m 은 곡선의 기울기가 시간 t_2 이후에 급격하게 변화하는 점으로 이때 수분의 침투가 급격하게 변화하여 FRP 리바의 성능이 급격하게 감소하게 된다(Fig. 8-1). 다시 말하면 M_m 은 FRP 리바에 균열이 발생하여 빠른 수분의 침투를 가능하게 하며 2차로 급격한 곡선의 기울기의 증가를 가져오게 한다. 또한 M_m 은 온도의 변화에 민감하지 않지만 환경조건에 영향을 받는다. 즉, FRP 리바를 습윤 대기 중에 노출하였을 때 M_m 은 상대습도(ϕ)에 의존하며 다음과 같은 8-4식으로 표현할 수 있다.

$$M_m = a \phi^b (\text{습윤대기 노출조건에서}) \dots \dots \dots (8-4)$$

여기서, a 와 b 는 지수이다. 액체에 침지한 복합재료에서 M_m 은 재료가 포화상태에 도달한 후에 시간에 따른 지수로서 남아 있다.

나. 확산계수 (D_c)

확산계수는 FRP 리바의 내부를 통한 수분의 전달 속도를 나타낸다. 수분에 노출된 사각형 FRP 리바의 확산계수는 온도에 의존하며 다음과 같은 8-5식으로 표현할 수 있다.

$$D_c = D_o \exp^{-E_d/RT} \dots \dots \dots (8-5)$$

여기서, D_o 는 온도에 관계된 확산계수이며 E_d 는 확산을 위한 활성화에너지이다. R과 T는 각각 국제 기체지수와 절대 온도이다. 확산계수 (D_c)는 아래와 같은 8-6식으로 계산 할 수 있다.

$$D_c = \pi \left[\left(\frac{h}{4M_m} \right)^2 \left(\frac{M_2 - M_1}{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}} \right)^2 \right] \dots \dots \dots (8-6)$$

여기서, h 는 복합체의 두께이며, M_m 은 최대 수분함량, t_1 과 t_2 는 수분함량 M_1 과 M_2 에 도달했을 때의 시간이다(Fig. 8-1).

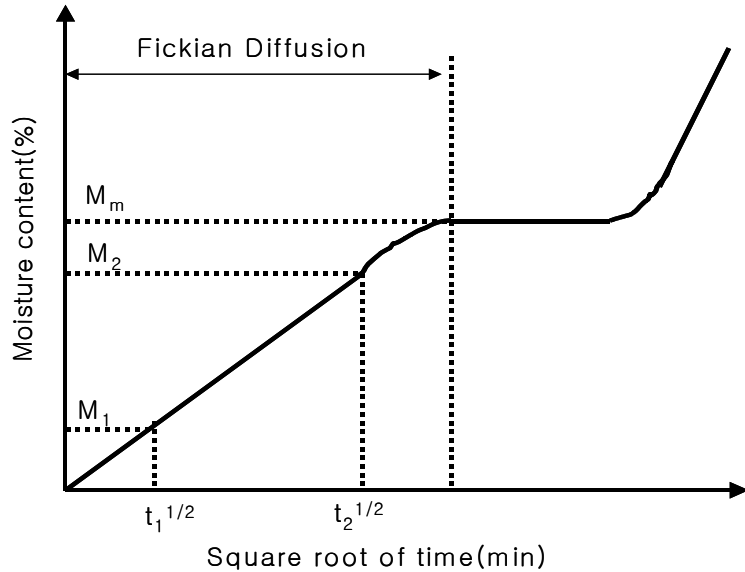


Fig. 8-1 Typical absorption behavior of FRP rebar

그러나 알칼리 환경 등 기타 다른 환경에 노출된 FRP 리바의 확산계수는 액체의 관입깊이 (r_d), 액체의 농도 (mol/ltr) 및 노출시간(t)과 FRP 리바의 직경에 따라 영향을 받는다.

3. 시험방법

수분흡수실험은 4cm의 FRP 리바 공시체를 이용하였다. 수분 흡수특성은 5개의 공시체를 사용하여 5일에 마다 중량변화를 측정하는 방법으로 50, 100일간 실험을 실시하였다. 실험환경은 네가지로 고려하였으며 첫 번째로 0.6%의 아세트용액에 침지시켜 산에 대한 영향, 0.2%Ca(OH)₂+1.0%Na(OH)+1.4%KOH로 하여 만든 알칼리 용액에 침지시켜 알칼리 환경에 대한 영향, NaCl을 3%첨가하여 만든 용액에 침지시켜 해수 환경에 대한 영향, 마지막으로 중성에 대한 영향을 평가하기 위하여 일반수돗물을 이용하였다. 용액의 온도는 공시체를 침지시킨 용기를 60℃의 오븐에 넣어 용액의 온도를 60℃를 유지하게 하였다. 수분흡수율은 중량변화로 측정하여 FRP 리바 내에서 수분의 흡수와 확산 특성을 평가하였으며 본 연구에서는 식 8-3으로 계산하였다.

4. 실험결과

FRP 리바의 수분흡수 및 내구성에 대한 명확한 평가 기준은 지금까지 제시되고 있지 않으나 본 연구에서는 ACI 440위원회에서 제시하고 있는 수분흡수 기준 및 촉진환경에 노출시킨 후 잔류강도의 정도에 따라 그 성능을 평가하는 방법에 따라 개발된 CFRP 리바 와 GFRP 리바 및 상용 FRP 리바의 성능을 평가하고자 하였다. ACI 440위원회에서는 수분흡수 특성 기준을 CFRP 리바의 경우 2.5%, GFRP 리바의 경우 2%를 초과하여서는 안된다고 규정하고 있다.

가. 알칼리환경

알칼리 환경에 노출된 하이브리드 FRP 리바의 노출기간에 따른 수분흡수 거동을 살펴보면 Fig. 8-2와 같다. 초기에 모든 FRP 리바는 거의 일정한 정도의 수분흡수 거동을 보여주지만 10일 후 약 15일 이후가 되면 급속하게 수분흡수량이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 FRP 리바의 표면에 균열 등의 결함이 발생하여 이를 통한 수분흡수량이 급격하게 증가하였기 때문이다. 또한 수분흡수 거동은 CFRP ISO 리바가 가장 늦게 수분흡수량이 증가하는 것을 볼 수 있다. 즉 초기에 CFRP ISO 리바의 결합재료로 사용되고 있는 에폭시 수지가 알칼리 용액에 대한 저항성이 높아 균열 등의 결함 발생을 억제하였기 때문이다. 나머지 FRP 리바의 경우 대부분이 비닐에스터 수지를 사용하여 거의 비슷한 경향의 저항성을 나타내었다. 50일 후 및 100일 후의 최종적인 수분흡수량을 살펴보면 모든 FRP 리바는 2%이하의 수분흡수 거동을 나타내어 ACI에서 제시하고 있는 기준을 모두 만족하였다(Fig. 8-3). 하이브리드 FRP 리바의 경우 유리섬유가 포함되어 있는 B리바가 수분흡수량이 약간 크게 나타내어 약 1.84%이상의 증가율을 보여주었으며 또한 C리바 역시 유리섬유가 포함되어 있어 약 1.83% 정도의 수분흡수율을 나타내었다. 또한 개발된 GFRP 리바 가자은 큰 흡수율을 보여주어 1.92% 정도의 수분흡수율을 보여주었고 대부분의 FRP 리바는 1.8%이하의 수분흡수율을 나타내었다. 따라서 시험결과 개발된 하이브리드 FRP 리바 와 CFRP 리바 및 GFRP 리바는 알칼리 용액에 대한 수분흡수 저항성이 우수하였다.

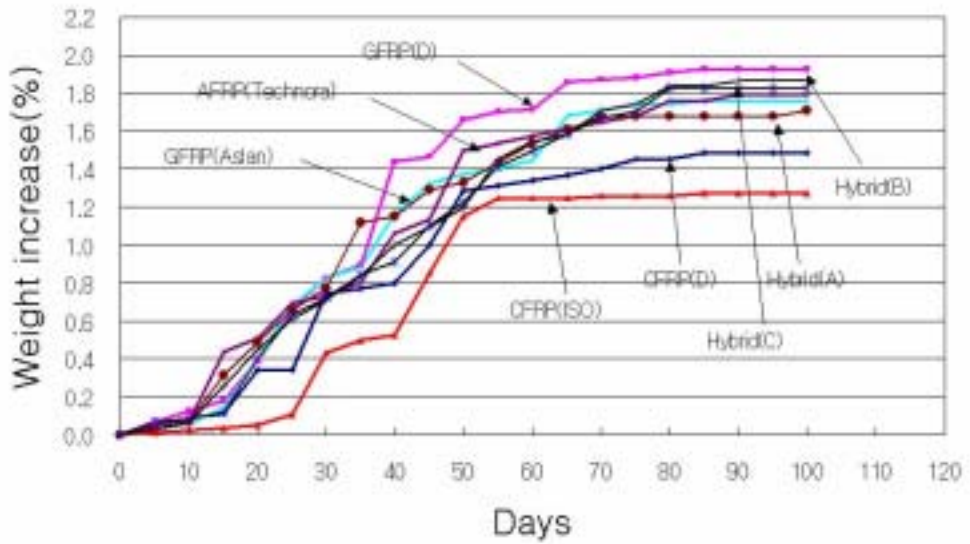


Fig. 8-2 Alkaline solution absorption-days behavior of FRP rebar

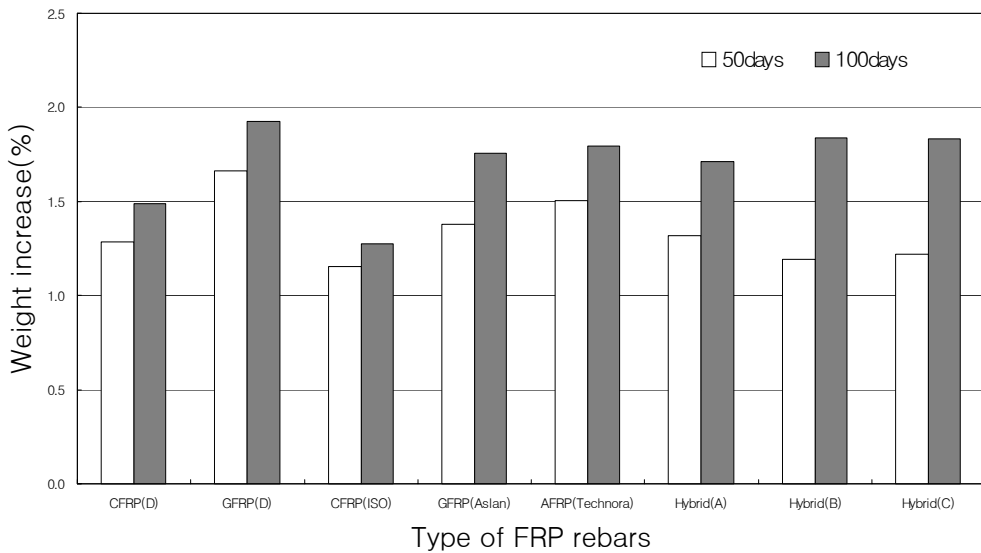


Fig. 8-3 Alkaline solution absorption of FRP rebar

나. 산환경

산환경을 모형화한 아세트산(acetic acid)용액에 노출시킨 하이브리드 FRP 리바의 흡수거동은 Fig. 8-4와 같다. 산환경에 노출시킨 후 약 15일 후부터 급격한 흡수율이 증가하여 약 60~70일 사이에서 흡수율이 안정화되는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 약 15일 정도에 FRP 리바의 결합재료인 폴리머 수지에 균열 및 박리 등의 결함이 발생하여 수분흡수가 증가하였으며 60일 후에는 더 이상의 균열이 발생하지 않고 일정하게 유지되었다. 50일 및 100일 후의 산환경에 노출시킨 하이브리드 FRP 리바의 수분흡수 특성 실험결과 하이브리드 FRP 리바 (B)가 1.89%로 가장 높은 흡수율을 보여주었으며, 하이브리드 FRP 리바 A와 C는 각각 1.74%, 1.84%이었다(Fig. 8-5). 그러나 ACI 기준에서 제시하고 있는 2% 이하의 흡수량 결과를 모두 만족하는 결과를 보여주었다. 따라서 하이브리드 FRP 리바 와 CFRP 리바, GFRP 리바는 모두 산환경에서 흡수특성이 매우 우수하다.

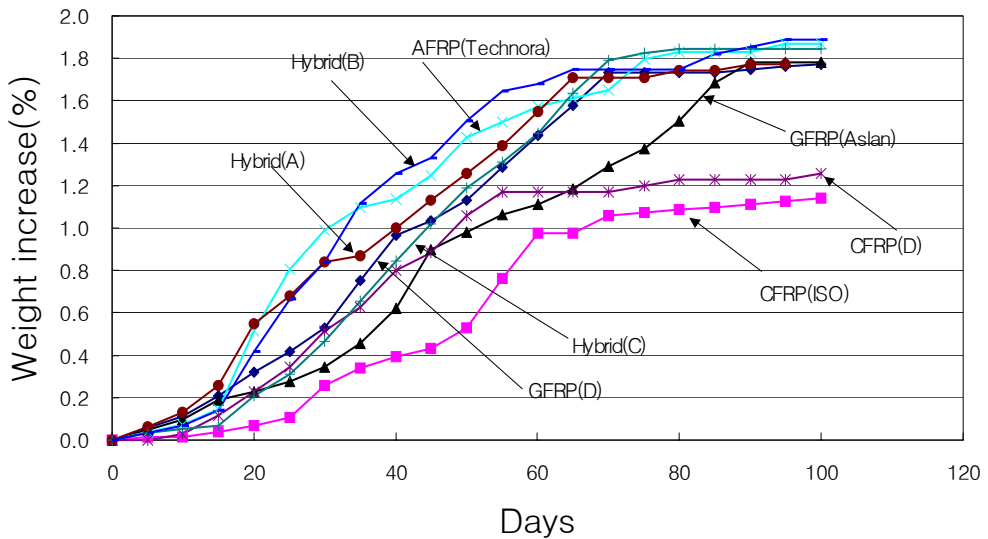


Fig. 8-4 Acid solution absorption-days behavior of FRP rebars

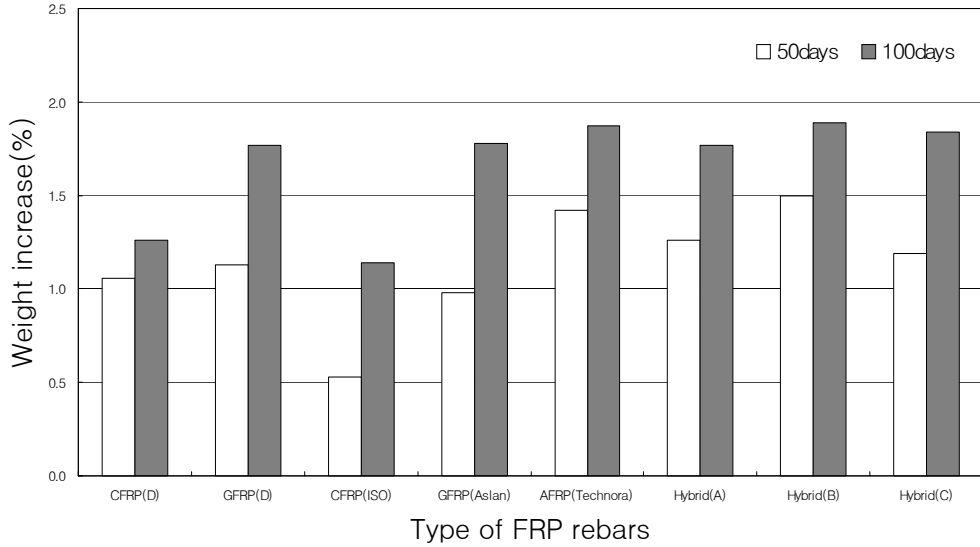


Fig. 8-5 Acid solution absorption of FRP rebars

다. 염해환경

염해환경에 노출된 하이브리드 FRP 리바의 흡수거동은 약 15일 이후 수분흡수가 급격히 증가하여 60~80일 이후에 안정화되는 경향을 보여주고 있다(Fig. 8-6). 염해환경에 노출된 하이브리드 FRP 리바의 경우 A 리바가 1.71%로 가장 높은 흡수율을 보여주었으며 그 다음으로 B, C 리바가 각각 1.68%, 1.67%의 흡수율을 보여주었다(Fig. 8-7). 그러나 하이브리드 FRP 리바를 포함한 모든 시험된 FRP 리바는 ACI 기준인 2.0%의 기준을 모두 만족하여 염해환경에 대한 수분흡수에 대한 저항성은 우수하다고 할 수 있다.

라. 중성환경

중성환경에 노출시킨 하이브리드 FRP 리바의 수분흡수거동을 살펴보면 중성용액에 침지시킨 후 약 20일 정도 후에 급격한 수분흡수 거동이 나타나 약 60일 정도가 되면 거의 흡수량의 증가 없이 거의 안정화되는 경향을 보여주었다(Fig. 8-8). 이는 초기에 FRP 리바의 표면에 균열이 발생하여 수분흡수가 증가하지만

60일이 되면 FRP 리바의 내부에 결합의 발생이 더 이상 발생하지 않아 수분흡수량이 일정하게 유지되었기 때문이다. 하이브리드 FRP 리바의 최종 100일 후의 수분흡수량을 살펴보면 하이브리드 FRP 리바(B)리바의 수분흡수량이 1.29% 정도로 가장 크게 나타났으며 C리바가 그 다음으로 약 1.26% 정도의 수분 흡수율을 나타내었다(Fig. 8-9). 그러나 실험결과 모든 FRP 리바의 중성환경용액에 대한 수분흡수율은 ACI 기준인 2.0% 보다 매우 낮은 흡수량을 나타냄으로써 매우 우수한 수분흡수 저항성을 가지고 있음을 알 수 있었다.

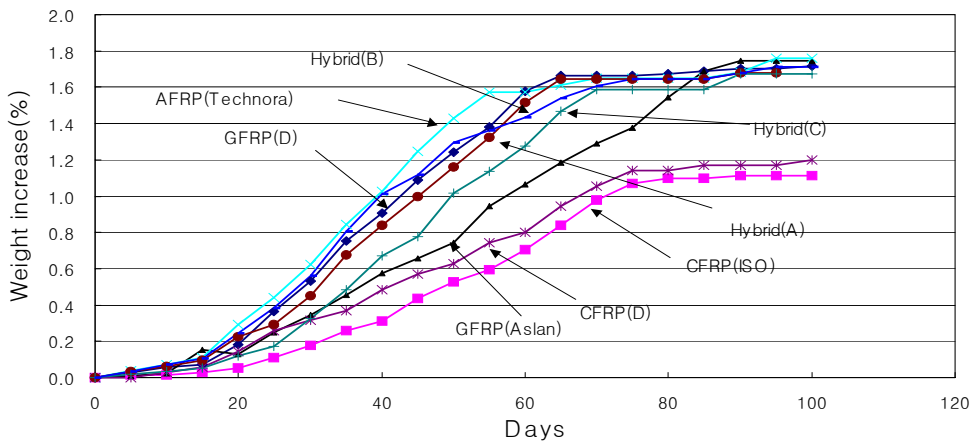


Fig. 8-6 Salt solution absorption-days behavior of FRP rebars

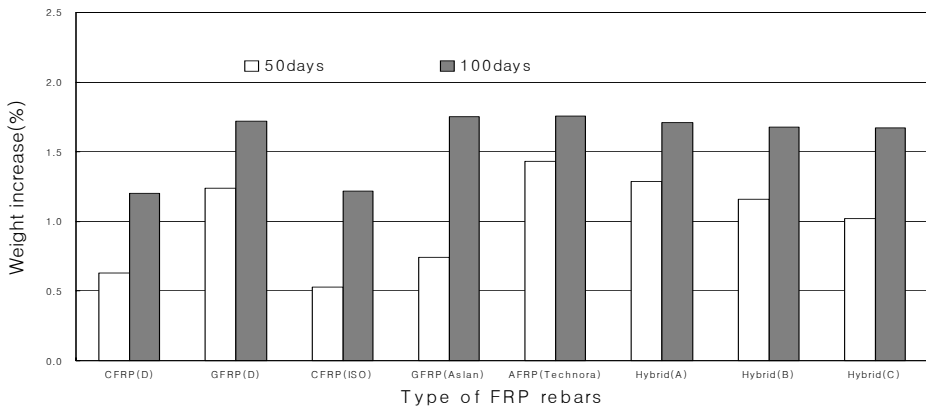


Fig. 8-7 Salt solution absorption of FRP rebars

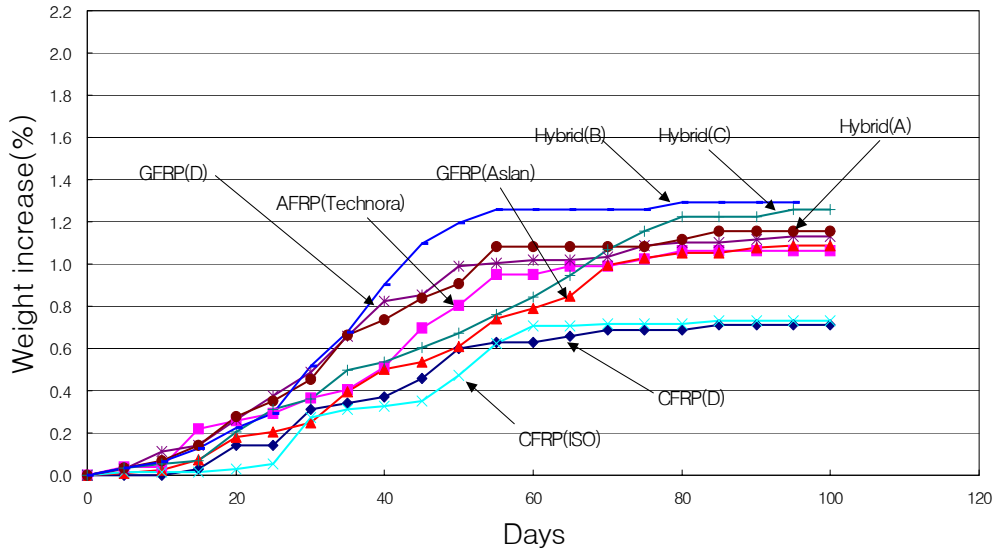


Fig. 8-8 Absorption behavior in deionized water of FRP rebars

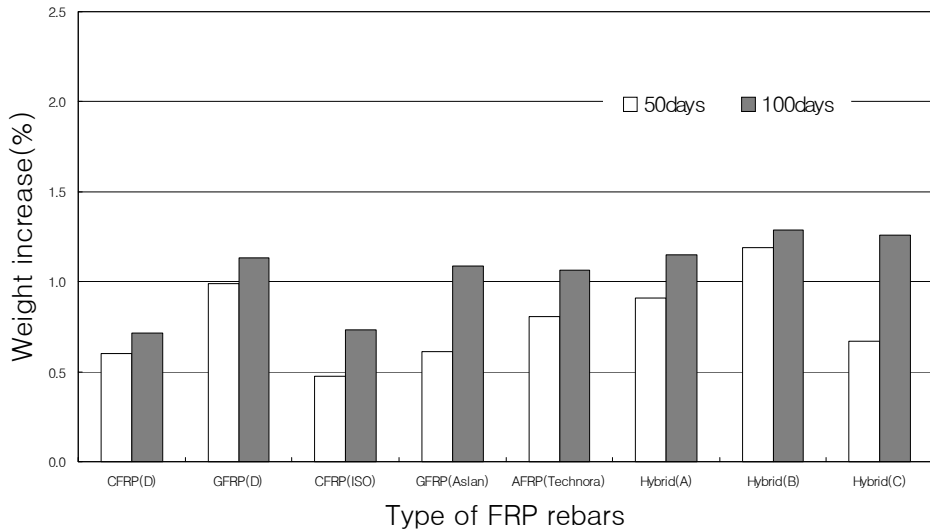


Fig. 8-9 Deionized water absorption of FRP rebars

마. 흡수특성 비교

60℃의 알칼리, 산, 염해, 중성환경에 100일간 노출시킨 후 최종 FRP 리바의 수분흡수특성 실험결과 모든 종류의 FRP 리바에서 알칼리 용액과 산용액에 대한 흡수율이 가장 크게 나타났다. 특히 CFRP(D) 리바와 GFRP(D) 리바 및 CFRP ISO 리바의 경우 알칼리 용액에 대한 수분흡수율이 가장 크게 나타났으며 산용액과 비교해서도 흡수율의 차이가 크게 나타났다. 그러나 그밖에 FRP 리바인 하이브리드 FRP 리바(A), (B), (C) 및 AFRP, GFRP Aslan 리바의 경우 산용액의 흡수율이 알칼리 용액보다 약간 크게 나타났으나 그 차이는 미소하였다(Fig. 8-10). 염해환경에 노출후 흡수율은 알칼리 및 산용액 보다는 약간 작게 나타났으나 거의 비슷한 수준의 흡수량을 보여주었다. 그란 중성용액에 대한 저항성은 알칼리 용액 및 산용액에 1/2수준의 흡수율을 나타내었다. 그러나 이와 같은 모든 환경에서의 흡수율 역시 ACI에서 제시하고 있는 기준인 흡수율 2%이하는 모두 만족하였다.

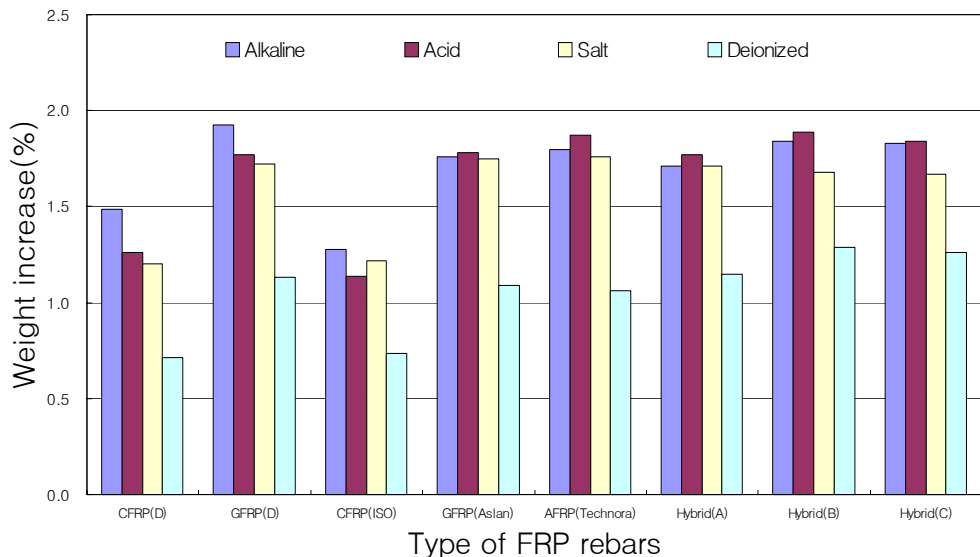


Fig. 8-10 Absorption of FRP rebars after environmental exposure

제 2절 환경영향계수

1. 개요

하이브리드 FRP 리바가 외부 환경에 노출되면 기후조건, 온도조건 등 각종 환경 조건에 의하여 성능감소가 발생할 수 있다. 따라서 이를 고려한 환경영향계수를 결정하여 설계시 이를 적용하여야 하이브리드 FRP 리바를 보강재로 사용한 콘크리트의 안전성 및 신뢰성을 증가시킬 수 있다. 그러나 환경영향계수는 현재 일정한 규정이 없이 각 나라마다 각 종류의 FRP 리바 마다 다양하게 적용하고 있다. 따라서 본 연구에서 개발한 하이브리드 FRP 리바 역시 환경영향 계수를 결정하여 설계시 적용하여야 한다. 현재 외국에서 적용되고 있는 환경영향계수를 분석·요약하면 다음과 같다.

2. 일본 토목학회

FRP 재료에 대한 일본 토목학회의 설계기준은 “Recommendation for design and construction of concrete structures using fiber reinforced materials”에 제시되었다. 설계기준에 대한 연구는 두 개의 소위원회 즉 한분야의 소위원회는 FRP 재료에 대한 관점에서의 연구 결과를 다른 한 분야는 설계기준에 대한 연구 결과를 종합하여 설계기준을 출판하였다. 일본의 설계기준은 1996년 출판되어 1997년 영어로 번역되어 콘크리트의 보강재료로 사용하기 위하여 세계로 배포하였다. 일본의 설계기준에서는 FRP 보강재료의 설계강도를 계산하기 위하여 재료 계수 γ_m 을 고려하였으며 γ_m 은 CFRP 및 AFRP에서는 1.15를 사용하며 GFRP에서는 1.3을 사용하였다. 또한 일본의 설계기준에서는 알칼리저항성 실험방법에 대한 기준도 제시하였는데 FRP 리바 공시체의 끝을 통한 알칼리 용액의 침투를 막기 위하여 끝단을 코팅한 FRP 리바를 60℃의 알칼리 용액에 노출하여 약 1달 간 시험을 실시하도록 하였으며 특별한 목적을 가지고 있을 때는 7일에서 1년간 노출하도록 규정하였다. FRP 리바에 어떠한 인장응력을 재하하지 않더라도 FRP 리바를 외부환경에 노출하면 응력을 받게 된다. 이와 같은 특성 때문에 일

본토목학회 기준에서는 인장강도, 중량측정, 시각적인 관찰을 통해서 FRP 리바의 결함을 조사하도록 하고 있다. 그러나 이에 대한 허용 값에 대한 명확한 기준은 제시하지 않고 있다. 프리텐션텐던에 사용되는 FRP 리바는 크리프파괴에 대한 잠재적 위험성을 고려하여 설계를 하여야 한다. 일본토목학회 기준에 따르면 텐던의 인장응력의 한계값은 일반적으로 크리프파괴강도 값(f_{fck})을 고려하여 0.8의 강도감소계수를 사용해야 한다고 하였다. 이 한계 값은또한 인장강도의 70%이상이면 안된다고 하였으며 크리프파괴강도의 측정은 JSCE-E 533의 “Testing method for creep failure of continuous fiber reinforcing materials”에 제시되어 있다.

3. 캐나다 고속도로 교량 설계 기준(CHBDC)

교량과 구조물에 FRP를 적용하기 위한 캐나다의 설계기준은 1989년 캐나다 토목학회의 기술위원회에서 제정하였다. 1991년 FRP에 대한 기술보고서가 출판되었고 1998년 FRP를 보강재료로서 사용하기 위한 설계기준이 제정되었다. 설계기준에서 가장 중요시한 내용은 RC 구조물 내에서 FRP 보강재료의 장기내구성에 대한 것이다. FRP 보강재료가 지속적인 하중을 받을 때 강도가 감소한다는 사실을 고려하여 캐나다의 설계기준에서는 프리스트레싱 재료가 아닌 일반 보강재료에서 최대 응력을 $\phi_{FRP} \cdot F \cdot f_{pu}$ 로 제한하였다. 여기서, f_{pu} 는 FRP 리바의 특별한 강도(specific strength: FRP 리바 강도의 5%)이며 ϕ_{FRP} 은 저항계수로 GFRP, AFRP, CFRP에서 각각 0.75, 0.85, 0.85이다. F계수는 강도 한계 계수로서 FRP 리바의 활하중에 의해서 발생하는 응력과 사하중에 의해서 발생하는 강도 R의 비이다. R의 값은 Table 8-1과 같다.

Table 8-1 Stress limiting factor for FRP reinforcement

R	0.5	1.0	2.0 or more
F for GFRP	1.0	0.9	0.8
F for AFRP	1.0	0.6	0.5
F for CFRP	1.0	0.9	0.9

FRP 재료의 응력 한계 값 뿐만 아니라 강도감소의 값도 캐나다 기준에서는 제시하고 있는데 GFRP, AFRP 및 CFRP에서 각각 0.60~0.75, 0.42~0.85, 0.76~0.85이며 이와 같은 값은 사하중과 활하중의 비에 의존한다. 또한 캐나다의 기준에서는 프리스트레스트 부재에서 FRP 텐던의 최대 허용응력 값은 Table 8-2와 같다.

Table 8-2 Stress limiting factor FRP prestressed Rebar

Prestressing Rebar	Pre-tensioning	Post-tensioning
GFRP	NA	$0.48 f_{pu}$
AFRP	$0.38 f_{pu}$	$0.35 f_{pu}$
CFRP	$0.60 f_{pu}$	$0.60 f_{pu}$

FRP 재료의 파괴를 발생시키는 환경적 요인은 캐나다의 설계기준에는 명확히 명시하지 않았다. 그러나 콘크리트의 보강재료로서 FRP를 사용하기 위해서는 일정한 기준을 필요로 한다. 열가소성폴리머는 높은 온도와 환경적 요인에 의하여 안정성이 작기 때문에 FRP 보강재료의 매트릭스 재료로 사용해서는 안된다. 부적절한 FRP 보강재료의 사용을 피하기 위하여 FRP 리바, 그리드(grid), 텐던의 허용치를 Table 8-3에 제시하였다.

Table 8-3 Condition of use for primary FRP reinforcement and tendons

	Applications							
	Prestressed concrete beams and slabs							
	Pre-tensioned	Post-tensioned				Deck slabs	Stressed wood decks	Rebarrier walls
		Grouted		UngROUTED internal	UngROUTED internal			
Alkaline		Cement-based						
GFRP	I	P	I	P	P	I	P	P
CFRP	P	P	P	P	P	P	P	P
AFRP	P	P	P	P	P	P	P	P

I: inadmissible, P: permissible

철근, FRP 보강재료, FRP 텐던 등은 콘크리트 설치기간에 부가적인 프리스트레싱력을 받을 수 있다. 무엇보다도 FRP 텐던으로 보강된 콘크리트 보 또는 슬래브는 정의되지 않은 사하중계수에 포함되지 않은 지속적인 하중을 받을 가능성을 가지고 있다. 열가소성폴리머를 사용한 2차 보강재료로서 FRP는 알칼리 환경에서 파괴될 가능성이 없다.

4. 미국 콘크리트 학회(ACI)

1991년 미국 콘크리트학회는 섬유보강폴리머 보강재료에 대한 440 위원회를 설립하여 1996년 콘크리트의 보강재료로서 FRP의 사용에 대한 기술보고서(ACI 440R 96)을 출판하였다. 2000년 1월에는 “Guide for the design and construction of concrete reinforcement with FRP Rebars”를 출판하였으며 2001년 2월에는 FRP 재료의 시험방법에 대한 기준으로 ”Recommended test methods for FRP rod and sheets”를 출판하였다. 이와 같은 연구의 결과는 콘크리트 구조물에 적용하기 위한 FRP 리바의 역학적 시험방법과 적용기준을 제안하는데 많은 공헌을 하였다. ACI는 FRP 보강재료의 장기적인 환경노출 후에 인장강도의 감소를 고려하기 위하여 환경감소 계수를 제시하였다. 환경감소계수는 FRP 보강재료의 생산자에 의해서 주어진 강도에 곱하여 설계극한인장강도

$f_{fu} = C_E \cdot f_{fu}^*$ 를 획득하는데 사용하였다. 여기서, f_{fu} 는 설계극한인장강도이며 C_E 는 환경계수, f_{fu}^* 는 생산자에 의해서 제시된 설계극한인장강도이다. 환경감소 계수는 섬유 종류와 노출조건에 크게 의존한다. ACI에서는 두 가지의 환경조건을 고려하여 Table 8-4 같은 환경감소계수를 제시하고 있다.

Table 8-4 Environmental reduction factor

Exposure Conditions	Rebars	C_E
Enclosed condition space	CFRP	1.00
	GFRP	0.80
	AFRP	0.90
Unenclosed condition space	CFRP	0.90
	GFRP	0.70
	AFRP	0.80

ACI는 구조물에 안전성에 영향을 미칠 수 있는 크리프 현상을 피하기 위한 Table 8-5과 같은 허용 크리프 파괴응력을 규정하였으며 감소계수는 허용 피로 응력에 사용되는 값과 동일하다.

Table 8-5 Creep/fatigue reduction factors

Rebars	Creep rupture stress limit
GFRP	$0.20 f_{pu}$
AFRP	$0.30 f_{pu}$
CFRP	$0.55 f_{pu}$

5. BISE 및 EUROCRETE

EUROCRETE는 콘크리트의 보강재료로서 FRP의 사용을 위한 설계기준을 제시하기 위하여 1993년 pan-European 연구를 시작하였다. 이 연구의 결과로 1996년 “Modification of design rules to incorporate non-ferrous reinforcement”를 출판하였으며 지속적인 연구결과로 1999년 BISE는 “Interim guidance on the design of reinforced concrete structures using fibre composite reinforcement”를 출판하였다. 이와 같은 설계기준에서 강도특성은 비 프리스트레스트 보강재료에서 최소평균값의 표준편차를 1.67이하로 제안하였으며 프리스트레스트 보강재료에서는 3.0으로 제안하였다. 재료 계수 γ_m 은 시공적 결함과 장기적인 외부 환경노출에 의한 영향에 의한 유효 강도 감소를 포함하기 위하여 고려하였다. 또한 환경적 영향을 고려한 안전계수를 FRP 보강재료의 유효강도에 영향을 미칠 수 있는 환경적인 인자를 고려하여 도입하였다. Table 8-6은 FRP 보강재료의 종류에 따른 재료 계수 및 환경계수의 값을 나타낸다.

Table 8-6 Materials and environmental factors(EUROCRETE-BISE)

Rebars	Material factor	Environmental factor
GFRP(E-glass)	3.60	3.30
AFRP	2.20	2.00
CFRP	1.80	1.67

6. 노르웨이 기준

노르웨이의 기준인 NS 3473의 설계기준은 비철금속 보강재의 사용에 대한 보충 설명을 하고 있다. 이 기준의 주요목적은 FRP 보강재료 사용하기 위하여 필요한 규정의 변화를 설명하는 것이다. 이 연구는 EUROCRTE의 세부과제로 연구되었으며 “EUROCRETE Modifications to NS 3473 when using fiber reinforced plastic(FRP) reinforcement”에 자세하게 설명되어있다. NS 3473에서 변환계수

η_{lt} 는 일반대기온도의 건조한 환경에 장기간 노출된 FRP 보강재료의 강도감소를 나타내는 계수로 이 값은 노출시간 및 섬유 종류에 따라 결정되며 그 값은 Table 8과 같다. 그러나 Table 8의 η_{lt} 값은 노출시간에 영향을 받지 않는 구조물에서는 1.0까지 증가하여 사용할 수 있다. 콘크리트 환경을 고려한 FRP 리바의 인장강도의 파괴는 변환계수 η_{env} 로 설명할 수 있으며 그 값은 Table 8-7과 같다.

Table 8-7 Materials and environmental factors(Norwegian standard)

Rebars	η_{lt}	η_{env}
GFRP(E-glass)	0.8~1.0	0.5*
AFRP	0.7~1.0	0.9
CFRP	0.9~1.0	1.0

* GFRP 리바는 비부착 프리스트레싱 시스템과 같은 곳에 사용되는 것처럼 고무 호스 등으로 외부 환경에 대하여 보호를 받고 있다면 η_{env} 는 0.9를 사용할 수 있다.

7. 내구성 설계기준의 요약

FRP 보강재료의 영향을 미칠 수 있는 주요 환경으로 고려되는 요인은 CFRP의 경우 매우 무더운 날씨, AFRP는 수분이 존재하는 환경, GFRP는 알칼리 및 수분 용액이 가장 혹독한 노출조건으로 고려된다. 이와 같이 FRP를 콘크리트 구조물의 보강재료로 이용하기 위한 연구는 많은 나라에서 이루어져 실제 설계기준이 작성되어 적용되고 있다. 지금까지 살펴본 각 나라들의 기준의 감소계수와 허용인장강도를 요약하면 Table 8-8와 같다.

Table 8-8 Materials and environmental factors

	ACI	CHBDC	JSCE	BISE
Environmental	GFRP: 0.70~0.80 AFRP: 0.80~0.90 CFRP: 0.90~1.00	GFRP*: 0.75 AFRP*: 0.85 CFRP*: 0.85	GFRP: 0.77 AFRP: 0.87 CFRP: 0.87	GFRP: 0.30 AFRP: 0.50 CFRP: 0.60
Sustained stress	-	GFRP: 0.80~1.00 AFRP: 0.50~1.00 CFRP: 0.90~1.00	-	
Total strength reduction due to environmental agents and sustained stress	GFRP: 0.70~0.80 AFRP: 0.80~0.90 CFRP: 0.90~1.00	GFRP: 0.60~0.75 AFRP: 0.42~0.85 CFRP: 0.76~0.85	GFRP: 0.77 AFRP: 0.87 CFRP: 0.87	GFRP: 0.3 AFRP: 0.5 CFRP: 0.60
Specific upper tensile stress limits due to permanent load	GFRP: 0.14~0.16 AFRP: 0.16~0.18 CFRP: 0.44~0.50	GFRP: 0.60~0.75 AFRP: 0.42~0.85 CFRP: 0.76~0.85	GFRP: ≤0.70 AFRP: ≤0.70 CFRP: ≤0.70	-

* CHBDC는 아직까지 환경적 영향을 고려한 계수가 설계기준에 정의되지 않았다. 따라서 환경적 영향의 고려가 이 계수의 크기에 영향을 크게 미친다.

8. 환경영향계수 결정

본 연구에서는 하이브리드 FRP 리바의 내구성 시험결과를 기본으로하여 기존의 ACI 440위원회에서 제안하고 있는 규정 및 환경영향계수를 토대로 하이브리드 FRP 리바의 환경영향 계수를 결정하고자 하였다. ACI 440 위원회에서는 FRP 리바의 결합재료로 사용되는 폴리머 수지의 영향을 평가하기 잔류전단강도 (Residual interlaminar shear stress)를 평가하여 잔류전단강도가 65%이상이고, 잔류인장강도(Residual tensile strength)의 경우 FRP 리바가 콘크리트의 인장보

강재료로 주로 사용됨으로써 75% 이상이 되었을 때 환경영향 계수를 0.8이상으로 사용할 수 있다고 규정하고 있다. 본 연구에서 ACI의 이러한 기준에 따라 내구성능을 비교·분석한 후 최종적으로 콘크리트 구조물의 설계시 환경의 영향을 고려한 환경영향계수를 결정하였다. ACI 440위원회의 기준을 기본으로하여 본 연구에서 사용한 하이브리드 FRP 리바의 환경영향계수를 결정하기 위한 기준은 Table 8-10과 같이 그 범위를 결정하였다.

Table 8-10 Limited of environmental factor

Residual compressive strength(%)	Residual Interlaminar shear stress strength(%)	Residual tensile strength(%)	Environmental factor
50~57	50~57	50~62	0.70
58~65	58~65	63~74	0.75
65~72	65~72	75~80	0.80
72~80	72~80	81~85	0.85
80~87	80~87	85~90	0.90
87~95	87~95	91~95	0.95
95~100	95~100	96~100	1.00

가. CFRP ISO 리바

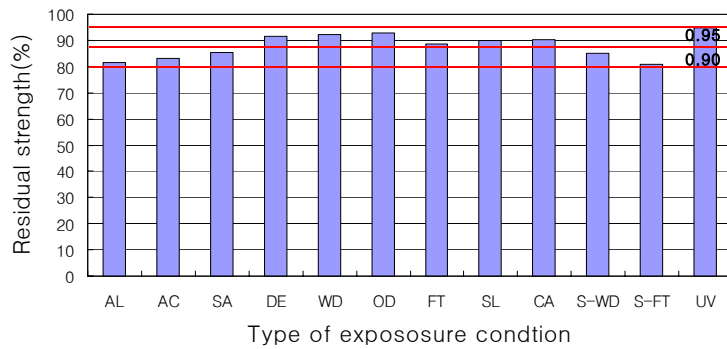
콘크리트 구조물이 노출될 수 있는 환경조건을 고려하여 환경영향계수를 결정하기 위한 잔류 압축, 잔류 ISS 및 잔류인장시험결과는 Fig. 8-11과 같다. 시험결과 압축 및 ISS의 경우 환경영향계수의 범위상 0.90을 모두 상회하고, 0.95이하의 범위를 나타내었다. 잔류 인장강도 역시 알칼리 환경조건을 제외하고는 모두 0.90이상이고 0.95이하인 결과를 나타내었다. 그러나 콘크리트 내에서 가장 큰 영향을 미칠 수 있는 알칼리환경조건에서 잔류인장강도시험결과 환경영향계수가 0.85의 범위 포함되어 본 연구에서는 CFRP ISO 리바의 환경영향계수를 0.85로 결정하였다.

나. GFRP Aslan 리바

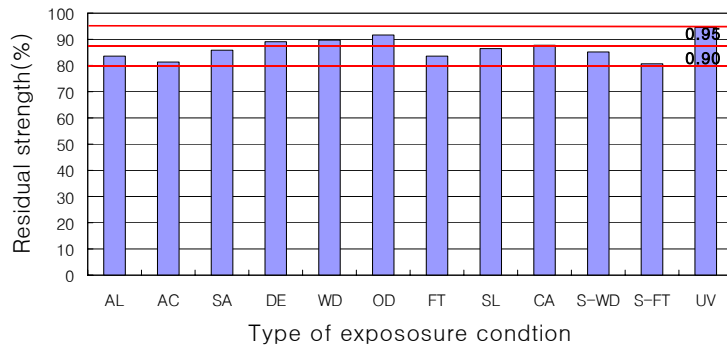
GFRP Aslan 리바의 환경영향계수를 결정하기 위한 잔류 압축, 잔류 ISS 및 잔류인장시험결과는 Fig. 8-12와 같다. 시험결과 압축강도는 알칼리 및 염해환경에서 0.70의 범위를 나타내었고 그 외의 환경에서는 0.75이상의 범위를 나타내었다. 또한 ISS의 경우 알칼리 및 산환경에서 0.75의 범위를 나타내었으며 그 외의 환경에서는 모두 0.80이상의 범위를 나타내었다. 잔류 인장강도의 경우 모든 환경에서 0.80이상의 범위를 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 GFRP Aslan 리바의 환경영향계수를 0.70으로 결정하였다.

다. AFRP Technora 리바

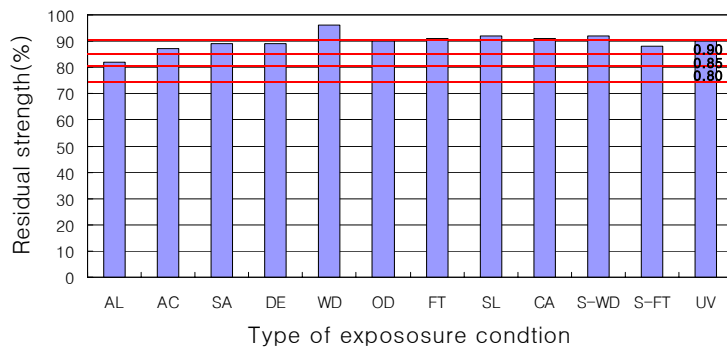
AFRP Technora 리바의 환경영향계수를 결정하기 위한 잔류 압축, 잔류 ISS 및 잔류인장시험결과는 Fig. 8-13과 같다. 시험결과 압축강도는 알칼리 및 염해와 동결융해반복을 복합적으로 고려한 환경에서 0.85의 범위를 나타내었고 그 외의 환경에서는 0.90이상의 범위를 나타내었다. 또한 ISS의 경우 알칼리, 산환경 및 염해와 동결융해반복을 복합적으로 고려한 환경에서 0.85의 범위를 나타내었으며 그 외의 환경에서는 모두 0.90이상의 범위를 나타내었다. 잔류 인장강도의 경우 모든 환경에서 0.90이상의 범위를 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 AFRP Technora 리바의 환경영향계수를 0.85로 결정하였다.



(a) Residual compressive strength

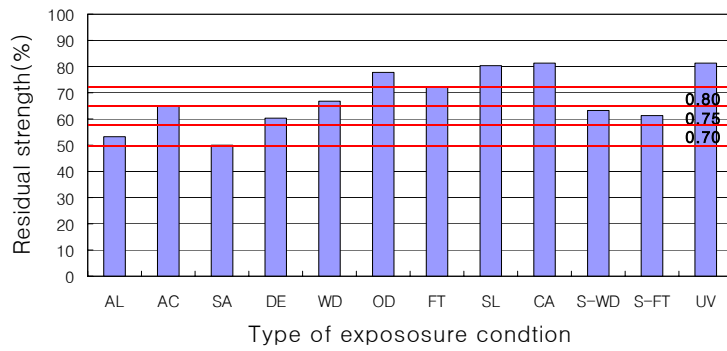


(b) Residual interlaminar shear stress

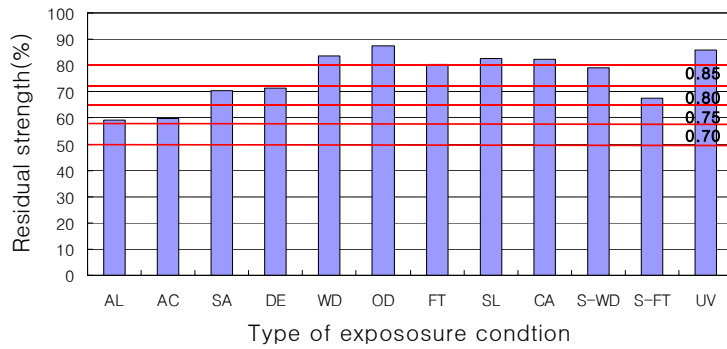


(c) Residual tensile strength

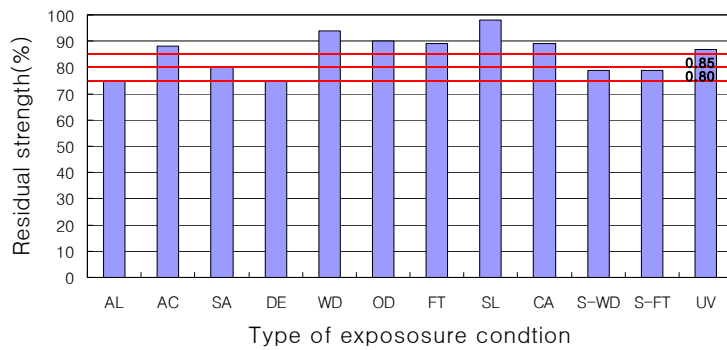
Fig. 8-11 Durability test result of CFRP ISO rebar: (a) Residual compressive strength, (b) Residual interlaminar shear stress, (c) Residual tensile strength



(a) Residual compressive strength

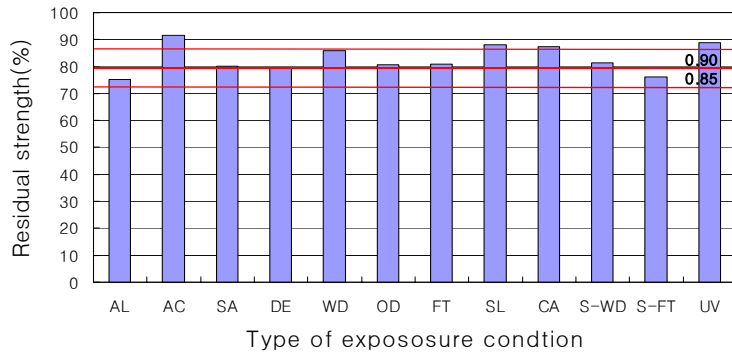


(b) Residual interlaminar shear stress

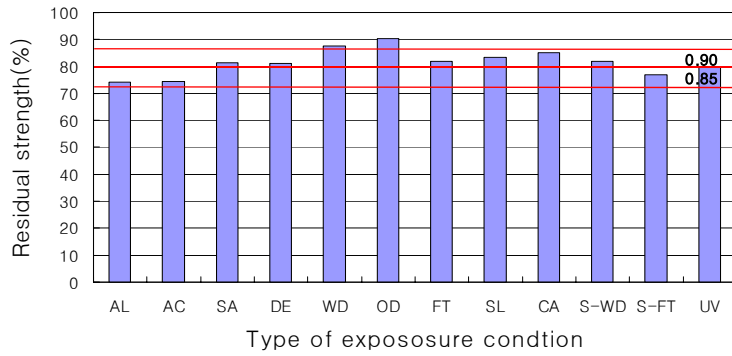


(c) Residual tensile strength

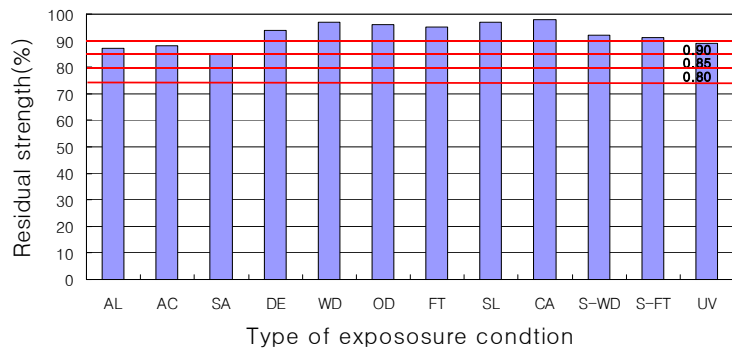
Fig. 8-12 Durability test result of GFRP Aslan rebar: (a) Residual compressive strength, (b) Residual interlaminar shear stress, (c) Residual tensile strength



(a) Residual compressive strength



(b) Residual interlaminar shear stress



(c) Residual tensile strength

Fig. 8-13 Durability test result of AFRP Technora rebar: (a) Residual compressive strength, (b) Residual interlaminar shear stress, (c) Residual tensile strength

라. CFRP(D) 리바

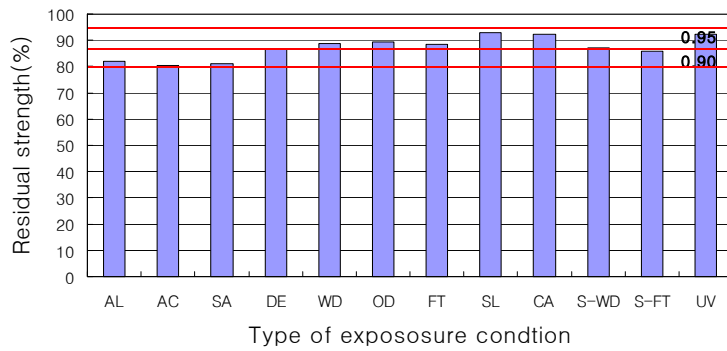
개발된 CFRP 리바의 환경영향계수를 결정하기 위한 잔류 압축, 잔류 ISS 및 잔류인장시험결과는 Fig. 8-4와 같다. 시험결과 잔류 압축강도 및 잔류 ISS는 고려한 환경에서 0.90의 범위를 나타내었고 그 외의 환경에서는 0.90이상의 범위를 나타내었다. 잔류 인장강도의 경우 알칼리환경에서 0.85의 범위를 나타내었고 그 이외의 모든 환경에서는 0.90이상의 범위를 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 개발된 CFRP 리바의 환경영향계수를 0.85로 결정하였다.

마. GFRP(D) 리바

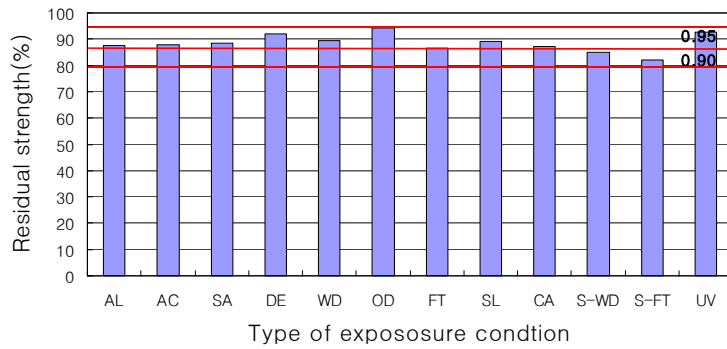
개발된 GFRP 리바의 환경영향계수를 결정하기 위한 잔류 압축, 잔류 ISS 및 잔류인장시험결과는 Fig. 8-15와 같다. 시험결과 압축강도는 알칼리 및 산환경에서 0.70의 범위를 나타내었고 그 외의 환경에서는 0.75이상의 범위를 나타내었다. 또한 ISS의 경우 산환경에서 0.70의 범위를 나타내었으며 그 외의 환경에서는 모두 0.75이상의 범위를 나타내었다. 잔류 인장강도의 경우 모든 환경에서 0.80이상의 범위를 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 개발된 GFRP 리바의 환경영향계수를 0.70으로 결정하였다.

바. Hybrid FRP 리바(A)

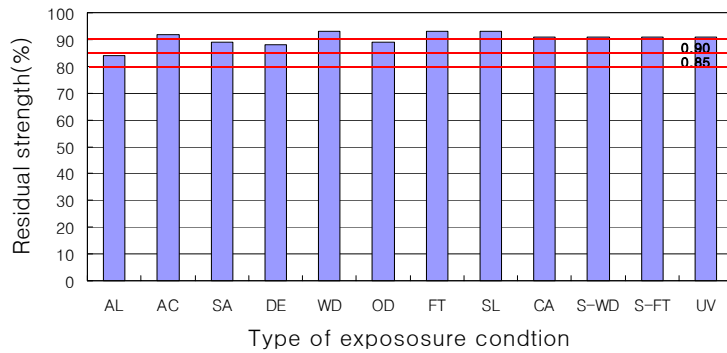
탄소섬유와 아라미드섬유를 주요구성요소로 하는 하이브리드 FRP 리바(A)의 환경영향계수를 결정하기 위한 잔류 압축, 잔류 ISS 및 잔류인장시험결과는 Fig. 8-16과 같다. 시험결과 압축강도는 알칼리, 염해와 동결융해반복 복합환경 및 UV 노출환경에서 0.85의 범위를 나타내었고 그 외의 환경에서는 0.90이상의 범위를 나타내었다. 또한 ISS의 경우 모든 환경에서 0.85의 범위를 나타내었다. 잔류 인장강도의 경우 모든 환경에서 0.90이상의 범위를 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 탄소섬유와 아라미드섬유를 주요구성요소로 하는 하이브리드 FRP 리바(A) 리바의 환경영향계수를 0.85으로 결정하였다.



(a) Residual compressive strength

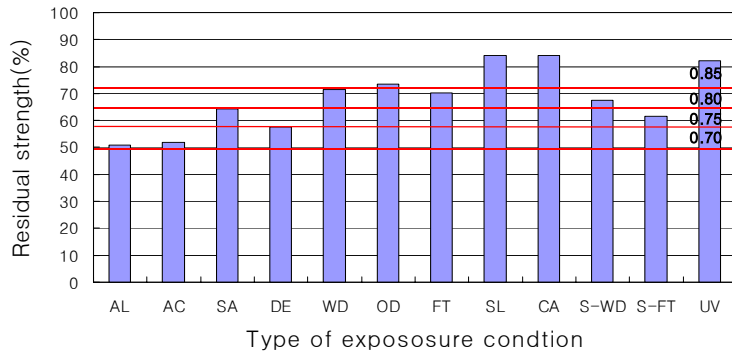


(b) Residual interlaminar shear stress

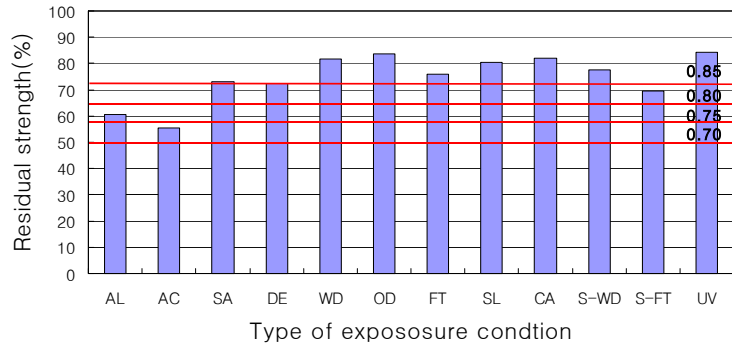


(c) Residual tensile strength

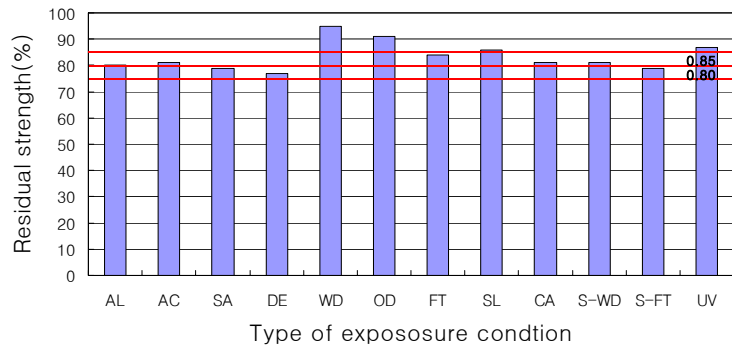
Fig. 8-14 Durability test result of GFRP Aslan rebar: (a) Residual compressive strength, (b) Residual interlaminar shear stress, (c) Residual tensile strength



(a) Residual compressive strength

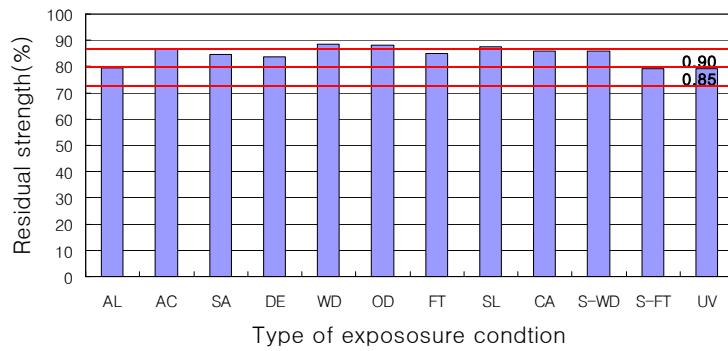


(b) Residual interlaminar shear stress

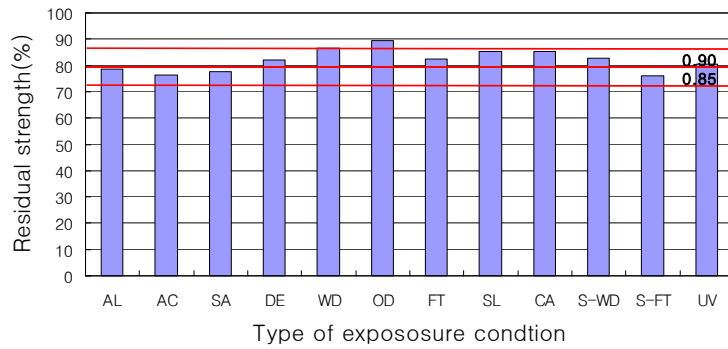


(c) Residual tensile strength

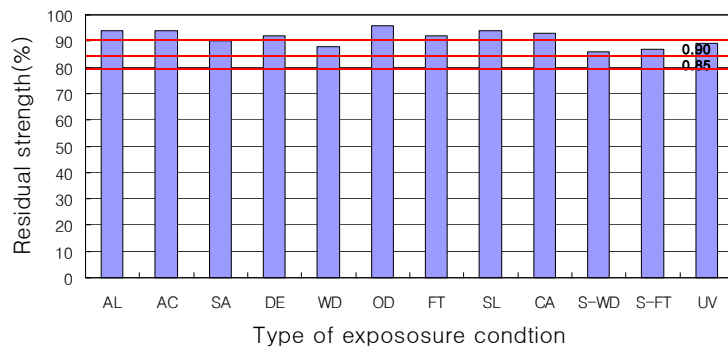
Fig. 8-15 Durability test result of GFRP Aslan rebar: (a) Residual compressive strength, (b) Residual interlaminar shear stress, (c) Residual tensile strength



(a) Residual compressive strength



(b) Residual interlaminar shear stress



(c) Residual tensile strength

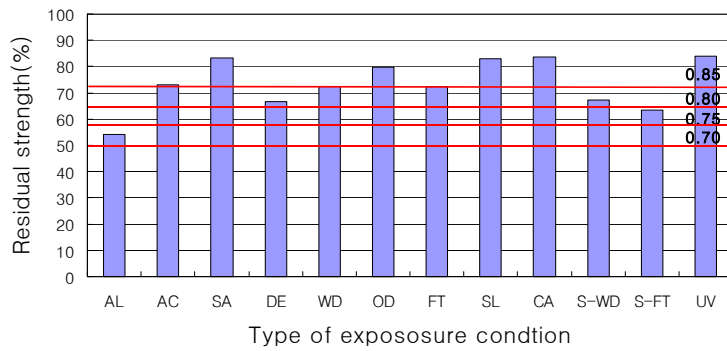
Fig. 8-16 Durability test result of GFRP Aslan rebar: (a) Residual compressive strength, (b) Residual interlaminar shear stress, (c) Residual tensile strength

사. Hybrid FRP 리바(B)

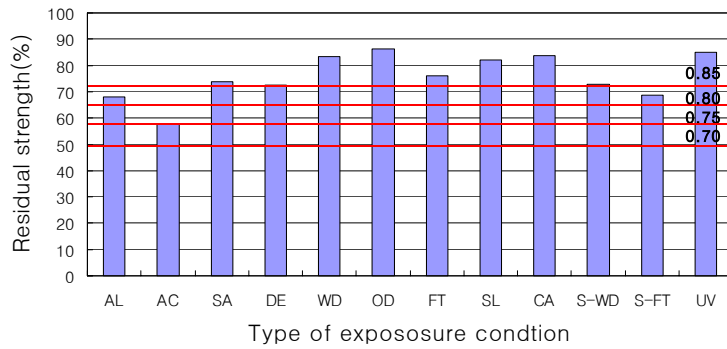
탄소섬유와 유리섬유를 주요구성요소로 하는 하이브리드 FRP 리바(B)의 환경영향계수를 결정하기 위한 잔류 압축, 잔류 ISS 및 잔류인장시험결과는 Fig. 8-17과 같다. 시험결과 압축강도는 알칼리환경에서 0.70의 범위를 나타내었고 그 외의 환경에서는 0.75이상의 범위를 나타내었다. 또한 ISS의 경우 산환경에서 0.75의 범위를 나타내었고 그 밖에 환경에서는 0.80 이상의 범위를 보여주었다. 잔류인장강도의 경우 알칼리 환경에서 0.75를 나타내었고 그밖에 모든 환경에서는 0.80이상의 범위를 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 탄소섬유와 아라미드섬유를 주요구성요소로 하는 하이브리드 FRP 리바(A) 리바의 환경영향계수를 0.70으로 결정하였다.

아. Hybrid FRP 리바(C)

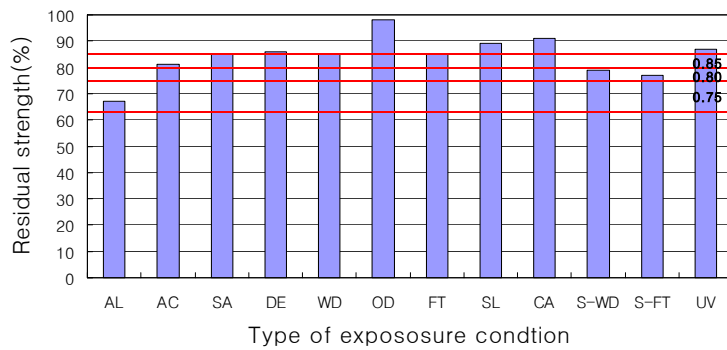
탄소섬유와 아라미드섬유를 주요구성요소로 하고 유리섬유를 일정량 혼합한 하이브리드 FRP 리바(C)의 환경영향계수를 결정하기 위한 잔류 압축, 잔류 ISS 및 잔류인장시험결과는 Fig. 8-18과 같다. 시험결과 압축강도는 알칼리, 염해와 동결융해를 복합적으로 받는 환경, UV 노출환경에서 0.85의 범위를 나타내었고 그 외의 환경에서는 0.90이상의 범위를 나타내었다. 또한 ISS의 경우 모든 환경에서 0.85 이상의 범위를 나타내었다. 잔류 인장강도의 경우 염해와 동결융해 반복을 복합적으로 받는 구조물이 0.85의 범위를 나타낸 것을 제외하고는 모두 0.90이상의 범위를 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 탄소섬유와 아라미드섬유를 주요구성요소로 하고 유리섬유를 일정량 포함한 하이브리드 FRP 리바(C) 리바의 환경영향계수를 0.85로 결정하였다.



(a) Residual compressive strength

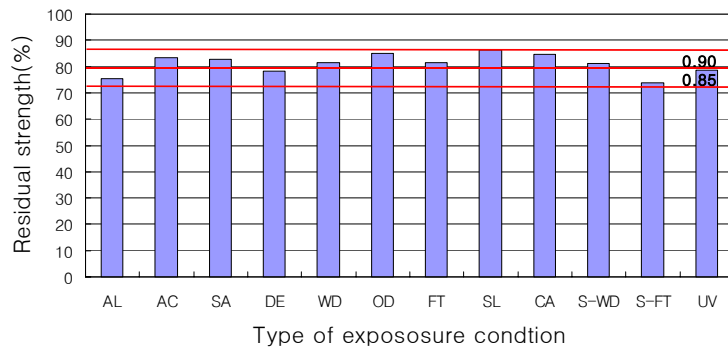


(b) Residual interlaminar shear stress

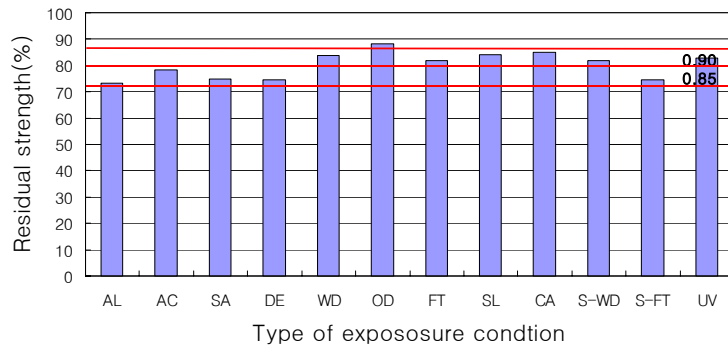


(c) Residual tensile strength

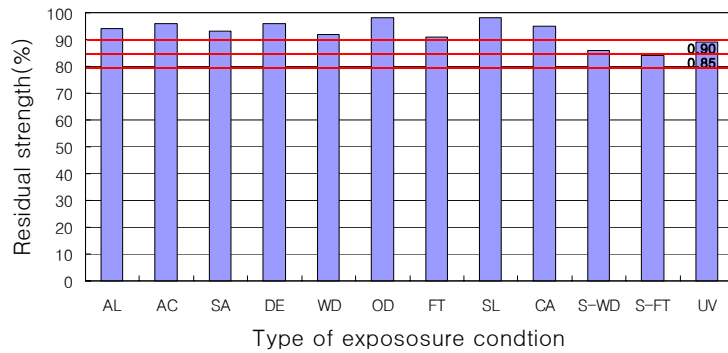
Fig. 8-17 Durability test result of GFRP Aslan rebar: (a) Residual compressive strength, (b) Residual interlaminar shear stress, (c) Residual tensile strength



(a) Residual compressive strength



(b) Residual interlaminar shear stress



(c) Residual tensile strength

Fig. 8-18 Durability test result of GFRP Aslan rebar: (a) Residual compressive strength, (b) Residual interlaminar shear stress, (c) Residual tensile strength

자. FRP 리바 종류에 따른 환경영향계수의 비교·평가

콘크리트의 노출환경을 고려하여 결정된 FRP 리바의 종류에 따른 환경영향계수를 요약정리하면 Table 8-11과 같다. 본 연구에서는 개발된 GFRP 리바와 GFRP Aslan 리바 및 개발된 CFRP 리바와 CFRP ISO 리바를 각각 내구성 실험을 실시하여 환경영향계수를 결정하였으나 결정된 환경영향계수가 동일하게 나타내어 제품을 따로 규정하지 않고 하나의 환경영향계수로 나타내었다. 또한 하이브리드 FRP 리바(A)는 탄소섬유와 아라미드섬유를 주요구성 요소로 하기 때문에 CFRP 리바와 AFRP 리바와 동일한 우수한 내구성을 나타내어 CFRP 리바와 AFRP 리바가 가지는 0.85의 환경영향계수를 나타내었으며 하이브리드 FRP 리바(B)는 탄소섬유와 유리섬유를 주요구성요소로 하기 때문에 유리섬유에 영향을 받아 환경영향계수가 GFRP 리바와 동일한 0.75로 나타났다. 그러나 하이브리드 FRP 리바(C)는 유리섬유가 사용되었으나 FRP 리바의 구조상 유리섬유를 아라미드섬유가 보호하는 구조를 가지고 있어 유리섬유에 의한 성능감소가 적어 0.85의 환경영향계수를 사용할 수 있는 우수한 내구성을 나타내었다.

Table 8-11 Environmental factor of developed FRP rebars

Type of FRP rebars	Environmental factor
CFRP	0.85
GFRP	0.70
AFRP	0.85
Hybrid FRP(A)	0.85
Hybrid FRP(B)	0.70
Hybrid FRP(C)	0.85

제 3절 요약 및 결론

개발된 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 수분흡수 특성 및 환경영향계수를 결정하였다. 수분흡수 특성은 4가지 환경에 노출후 중량변화를 측정함으로써 평가하였고 환경영향계수의 결정은 8장의 내구성능 시험결과를 기본으로하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 수분흡수율 시험결과 모든 환경에서 ACI 위원회에서 규정하고 있는 2%이하의 수분흡수율을 보여주어 수분흡수에 대해서는 큰 영향이 없을 것이라 판단된다.
2. 내구성능 시험결과를 기본으로하여 환경영향계수를 결정하였다. 즉 CFRP 리바와 GFRP 리바는 각각 0.85, 0.70이며 하이브리드 FRP 리바의 경우 유리섬유를 주요성분으로 구성하고 있는 하이브리드 FRP 리바의 경우 0.70을 적용하여야 하며 아라미드섬유를 주요구성요소로 하면 0.85를 적용할 수 있다.

제 9장 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 부착거 동 향상을 위한 최적 표면형상 결정

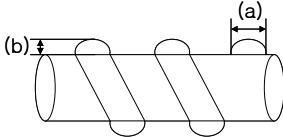
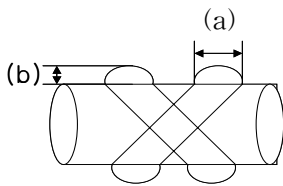
제 1절 개 요

FRP 리바(Fiber Reinforced Polymer rebar)는 강도가 높으면서도 부식에 대한 우려가 없고, 보강재료로서 사용될 경우 강도/중량비가 커 콘크리트 구조물의 자중을 감소시킬 수 있으며, 적은 보강량으로도 큰 인장효과를 발휘할 수 있는 장점과 비중이 작아 운반 및 시공이 쉽다. 그러나 이와 같은 특성에도 불구하고 FRP 리바를 콘크리트 보강재로 사용될 경우 보강철근과 비교하여 콘크리트 모체와 부착성능이 현저히 저하된다는 문제점을 가지고 있다.^{2),3),4),5),10)} 이와 같은 이유는 FRP 리바는 표면의 rib와 FRP 리바 모체와의 완전한 일체 거동은 불가능하기 때문이다.^{6),7),8),9)} 왜냐하면 보강철근의 rib은 보강철근의 부착력 향상을 위해서 생산 당시부터 일체화 시켜 생산되지만 FRP 리바의 경우 FRP 리바의 모체를 압출성형에 의해서 생산한 후 부착력 향상을 위해서 표면에 규사코팅을 실시하거나 또는 섬유로 rib 처리를 하는 방법 등을 사용함으로써 FRP 리바 모체와 표면처리 부분의 분리로 인한 부착성능 저하가 나타날 수 있다.^{1),7)} 이와 같은 이유로 현재 FRP 리바는 보강철근의 부착강도에 약 60% 정도를 발현하는 것으로 알려져 있다.^{7),8),9)} 현재 이와 같은 부착성능의 향상을 위하여 다양한 방법으로 연구가 진행되고 있다. 특히 표면 규사코팅의 두께를 조절하여 FRP 리바의 모체와 분리를 최소화 할 수 있는 방법이 주로 사용되고 있다. 그러나 FRP 리바의 부착성능을 향상시키기 위한 근본적인 해결방법은 아니다. 따라서 본 연구에서는 FRP 리바의 부착성능을 향상시키기 위하여 표면처리의 변화를 통하여 최적의 rib의 형상을 결정하고 표면처리부분과 FRP 리바 모체와의 분리를 최소화 할 수 있는 제조방법을 개발하여 FRP 리바의 생산시 적용함으로써 FRP 리바와 콘크리트 모체와의 부착성능을 증가시키려고 한다.

제 2절 시험계획 및 방법

FRP 리바의 기본표면형상의 결정은 기존에 널리 사용되고 있는 FRP 리바의 표면형상을 기본으로하여 18가지의 표면형상 및 치수를 결정하였다. FRP 리바의 기본 표면형상은 크게 일방향의 rib처리와 양방향 rib처리를 기본으로하여 각각 치수를 9가지로 결정하였다. 본 연구에서 사용된 FRP 리바의 18가지의 치수는 Table 9-1과 같으며 Fig. 9-1은 시험에 사용된 FRP 리바의 사진이다.

Table 9-1 Geometry of FRP rebar

Geometry	Height: a(mm)	Width: b(mm)	Type of Geometry
 <p><one orientation rib></p>	0.63mm	1.9mm	A-1
		3.8mm	A-2
		5.7mm	A-3
	1.3mm	1.9mm	B-1
		3.8mm	B-2
		5.7mm	B-3
	2mm	1.9mm	C-1
		3.8mm	C-2
		5.7mm	C-3
 <p><two orientation rib></p>	0.63mm	1.9mm	D-1
		3.8mm	D-2
		5.7mm	D-3
	1.3mm	1.9mm	E-1
		3.8mm	E-2
		5.7mm	E-3
	2mm	1.9mm	F-1
		3.8mm	F-2
		5.7mm	F-3



(a) One orientation



(b) Two orientation

Fig. 9-1 Photos of geometry of FRP rebar: (a) one orientation, (b) two orientation

제 3절 실험방법

FRP 리바의 부착성능은 리바의 설계 및 생산과정, 역학적 성능과 환경조건에 의하여 결정된다. 콘크리트에 FRP 리바가 정착되었을 때 부착력은 다음과 같은 요인에 의해서 결정된다.^{22,26,29,38,144,145,181)}

- 부착표면에 점착 저항력 즉 화학적 부착
- 부착표면의 마찰저항력
- 표면의 불균일성에 의한 기계적 결합력

FRP 리바에서 부착강도는 폴리머 매트릭스를 통해서 보강섬유로 전달되며 부착 전단파괴는 폴리머에 의해서 또한 발생한다.^{26,29,38)} 콘크리트에 부착된 이형 FRP 리바에 인장하중을 증가시키면 리바 표면의 변형이 발생하여 리바와 리바 주위 콘크리트의 결합력은 감소되며 FRP 리바와 콘크리트 사이의 부착은 파괴된다. FRP 리바 표면에서의 응력은 정착방향으로 작용하는 힘의 결과로 FRP 리바와 콘크리트 사이의 부착응력으로 고려된다.^{26,29,38)} 또한 FRP 리바는 보강철근과 다르게 길이 방향으로 쪼개짐이 발생하여 콘크리트 덮개로부터 얻을 수 있는 압축강도로 인한 부착력의 증가를 얻을 수 없다.^{26,29,38,169,170)} 현재 FRP 리바의 부착성능을 측정하기 위한 시험방법에는 일반적으로 두 가지 방법이 사용되고 있다. 첫 번째 방법은 직접부착시험으로 많은 연구자들이 사용한 방법이다.^{32,33,39,52,54)} Fig. 9-2는 직사각형 공시체를 이용한 직접 부착시험의 일반 적인 공시체 및 시험장치를 보여준다. 두 번째 시험방법은 1991년 Faza와 1998년 B. Tighiouart 등에 의해서 사용된 RILEM 기준에 따른 것으로 Fig. 9-3과 같은 콘크리트 보를 이용한 시험방법이 등이 있다.^{73,174)} FRP 리바의 직접부착시험방법은 미국콘크리트학회(ACI) 440에서 제정한 FRP 로드 및 슈트의 시험방법에 대한 기준에 따라 일반적으로 실시한다.^{3,4)} FRP 로드의 부착강도를 결정하기 위한 ACI 440에서는 직접부착강도시험을 사용한 기준 시험방법은 150×300mm의 원추형 콘크리트 공시체 또는 콘크리트 블록을 이용하여 일정한 길이의 FRP 리바를 정착시킨 후 일정기간의 양생 기간을 거친 후 UTM을 이용하여 FRP 리바를 인발하는 실험을

실시하여 하중과 변위를 측정하는 방법을 선택하였다. 이와 같은 방법으로 FRP 리바의 부착시험을 실시하면 리바 주위의 콘크리트는 압축응력을 받게 된다.^{3,4)} 실제 휨부재에서 리바 주위의 콘크리트가 인장을 받는 경우와 정반대의 현상이 발생한다. 만약 콘크리트가 인장을 받는다면 FRP 리바 주위의 콘크리트 압축은 일반적으로 균열의 발생을 억제한다고 한다. 결과적으로 직접부착시험은 실제의 부착응력보다 큰 결과를 나타낸다.^{3,4)} 직접부착시험의 이와 같은 비 현실적인 결과로 인하여 새로운 부착시험방법을 개발하려는 연구가 이루어졌다. 그러나 직접 부착시험이 부착거동을 평가하는데 비록 실제 조건과 다르지만 일반적으로 부착 응력을 결정하는데 널리 사용되어 왔다.^{3,4)}

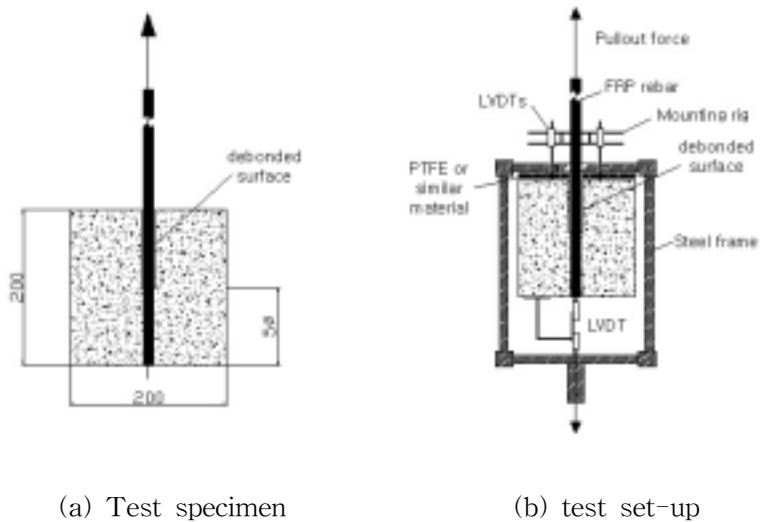
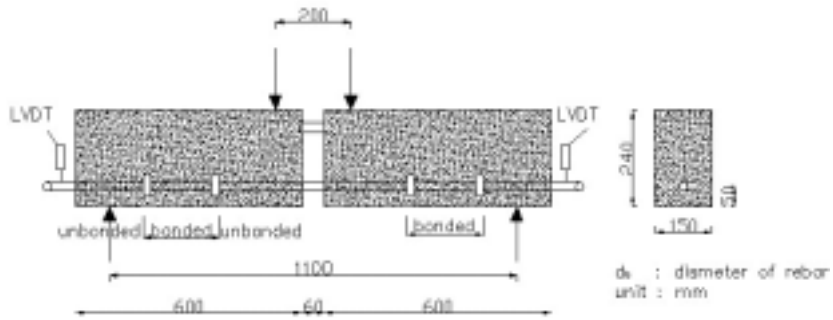


Fig. 9-2 Direct pull-out tests: (a) test specimen; (b) test set-up^{32,33,39,52,54)}

보 부착시험은 직접부착시험을 대체할 수 있는 시험방법이다. 보 부착시험에서 리바의 주위 콘크리트는 인장을 받는다. 이와 같은 결과로 FRP 리바 주위의 콘크리트에서는 인장미소균열이 발생하여 부착강도를 감소시킨다.^{73,174)} 결과적으로 보부착시험이 실질적인 구조물의 조건을 반영한다고



(a) Test beam bond specimen



(b) Test set-up for beam bond test

Fig. 9-3 Beam bond test: (a) test beam bond specimen; (b) test set-up for beam bond test^{73,174)}

할 수 있다. 그러나 보 부착시험을 공시체의 제작 및 시험에 많은 시간과 주위가 필요하다. 보 시험에 사용되는 FRP 리바의 1/2을 보 공시체에 정착시키기 위해서 몰드를 제작하여야 하며 시험도중에 발생할 수 있는 전단력을 고려해야 한다.^{73,174)} 또한 보 시험은 일반적인 UTM을 사용할 수 없으며 시험 플레임을 제작하여 설치 한 후 규정된 하중을 재하 하여 시험을 실시한다.^{73,174)} 본 연구에서는 하이브리드 FRP 리바의 부착성능을 최적화하기 위하여 ACI 440위원회가 제시하고 있는 직접부착시험을 실시하였다. 부착시험용 배합설계는 Table 9-4와 같으며 시멘트는 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였고 잔골재는 조립율 2.99의 강사를 굵

은 골재는 최대치수 13mm의 부순돌을 사용하였다. 시멘트 및 골재의 물리적 특성은 Table 9-2 및 9-3과 같다.

Table 9-2 Physical Properties of Cement

Fineness (cm ² /g)	Specific gravity	Stability (%)
3,488	3.14	0.08

Table 9-3 Physical properties of fine and coarse aggregate

	Specific Gravity			Absorption (%)	F.M.
	Bulk	Bulk(SSD)	Apparent		
Fine agg.	2.59	2.61	2.63	0.67	2.99
Coarse agg.	2.61	2.62	2.7	0.70	-

Table 9-4 Mix proportion

W/C (%)	S/a (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	SP (kg/m ³)
45	60	202.5	450	1000	600	2.52

부착시험공시체는 $\varnothing 150\text{mm} \times 300\text{mm}$ 의 원추형 콘크리트 공시체를 이용하여 FRP 리바 직경의 5배를 매립하여 제작하였다. 시험은 28일간의 양생 후 25KN 용량의 변위를 조절할 수 있는 UTM을 이용하였는데 하중 재하속도는 5mm/min으로 시험을 실시하였다(Fig. 9-4). 시험결과는 하중과 변위를 직접 측정하여 식 9-1으로 부착강도를 결정하였다^{3,4)}.

$$\tau = \frac{P_{\max}}{2\pi rL} \dots \dots \dots (8-1)$$

여기서, τ = 부착강도, P_{max} = 최대부착하중, r = FRP 리바의 직경, L = FRP 리바의 정착길이 이다.

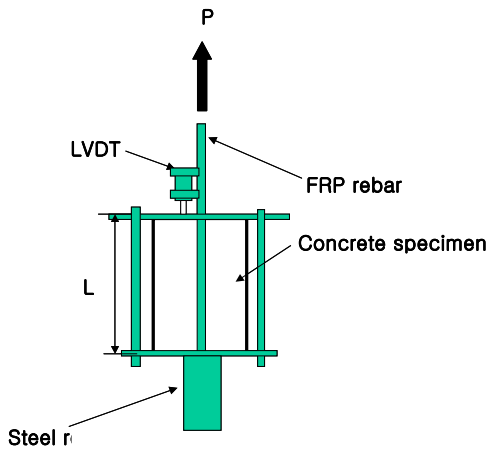


Fig. 9-4 Pullout test set-up of FRP rebar

제 4절 실험결과

1. 압축강도

부착시험을 위하여 사용된 콘크리트의 압축강도는 Table 9-5와 같이 30.6MPa의 강도를 나타내었다.

Table 9-5 Compressive strength of concrete

Specimens No.	Compressive strength (MPa)
1	31.4
2	31.1
3	29.7
4	29.2
5	31.8
Mean	30.6

2. 표면형상변화에 따른 부착강도와 Slip과의 관계

FRP 리바의 형상에 따른 부착강도-변위 거동의 관계는 Fig. 9-5와 같다. Fig. 9-5에서 볼 수 있듯이 일방향과 양방향의 rib 모두 높이가 2mm이상이면 부착강도의 급격한 감소가 발생하는 경향을 보여주고 있다. 이와 같은 결과는 rib 높이가 2mm이상인 되면 rib부분에서 전단파괴가 발생하여 급격한 부착강도의 감소가 발생하기 때문이다. 이외에 모든 rib에서는 FRP 리바이 인발에 의한 파괴를 발생함을 알 수 있었다.

3. Rib의 방향에 따른 부착강도의 영향

표면형상 변화에 따른 FRP 리바의 부착강도 시험결과는 Fig. 9-6 같다. 시험결과 일방향 rib의 경우 B-2(폭 3.8mm 높이 1.3mm)의 부착강도가 16.3MPa으로 가장 우수한 값을 보여주었으며 양방향의 경우 rib의 폭과 높이가 각각 3.8mm, 1.3mm인 E-2 형상이 가장 우수한 부착강도인 21.9MPa의 부착강도를 보여 주었다. 또한 부착강도는 일방향보다는 양방향에서 더 우수한 결과를 보여주었다.

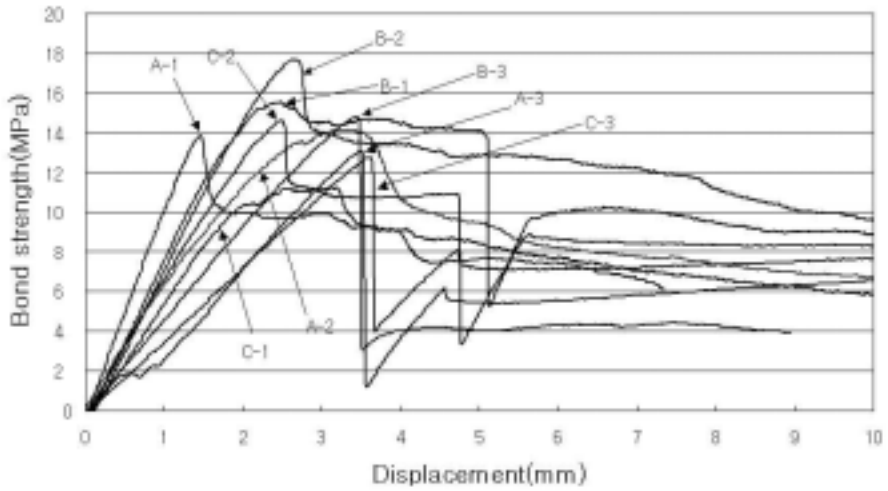
4. Rib의 폭의 변화에 따른 부착강도의 영향

rib의 폭의 변화에 따른 FRP 리바의 부착강도 시험결과를 살펴보면 rib의 폭이 3.8mm일 때 가장 큰 부착강도를 보여주었으며 rib의 폭이 5.7mm가 되면 rib과 rib사이의 간격이 좁아져 콘크리트 매트릭스와 충분한 부착계면을 확보하지 못하여 부착강도가 감소하는 경향을 보여주고 있다(Fig. 9-7).

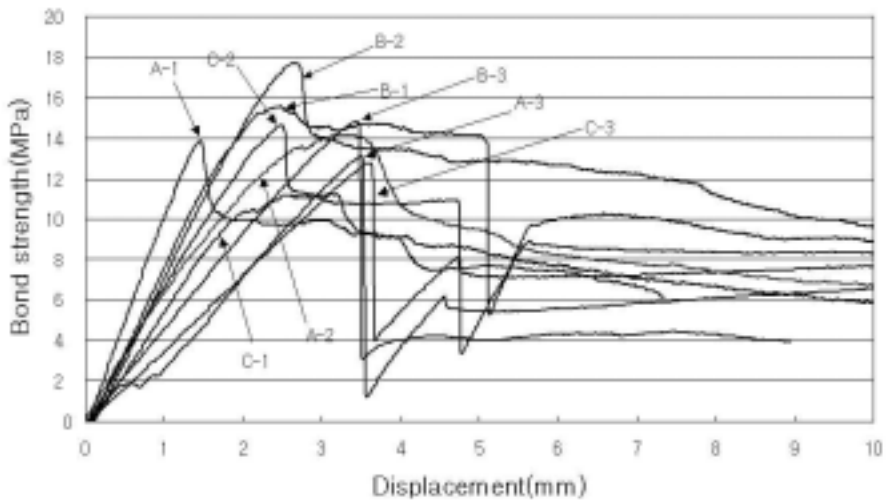
5. Rib의 높이 변화에 따른 부착강도의 영향

rib의 높이 변화에 따른 FRP 리바의 부착강도 시험결과를 살펴보면 rib의 높이가 1.3일 때 가장 큰 부착강도를 보여주었으며 높이가 2mm 가 되면 rib 부분의 전단파괴로 인하여 부착강도가 감소하는 경향을 보여주었다(Fig. 9-8). 위와 같은

부착강도와 rib 높이 및 폭의 관계를 고려하여 본 연구에서는 콘크리트 매트릭스와 충분한 계면을 확보하고 rib 부분의 전단파괴가 발생하지 않은 높이 1.3mm, 폭 3.8mm를 최종 rib의 형상으로 결정하였다.

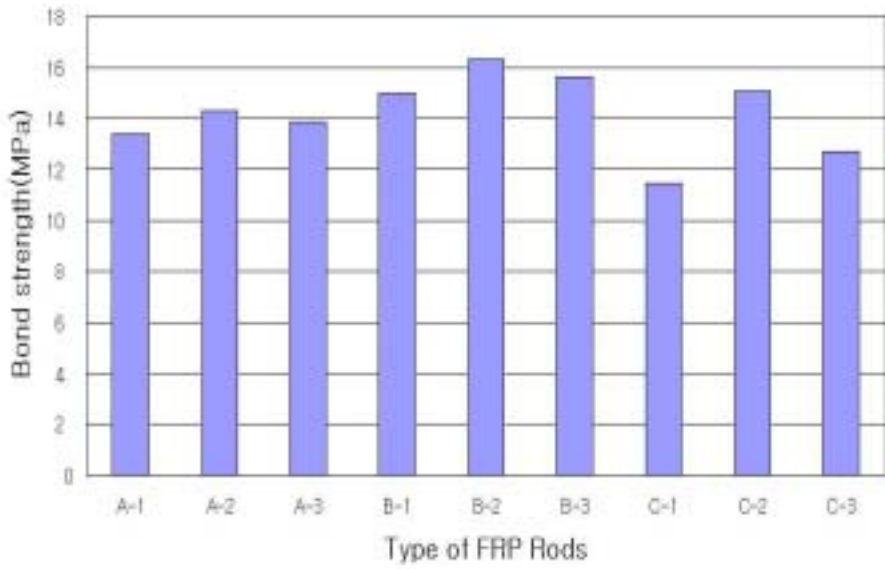


(a) One orientation

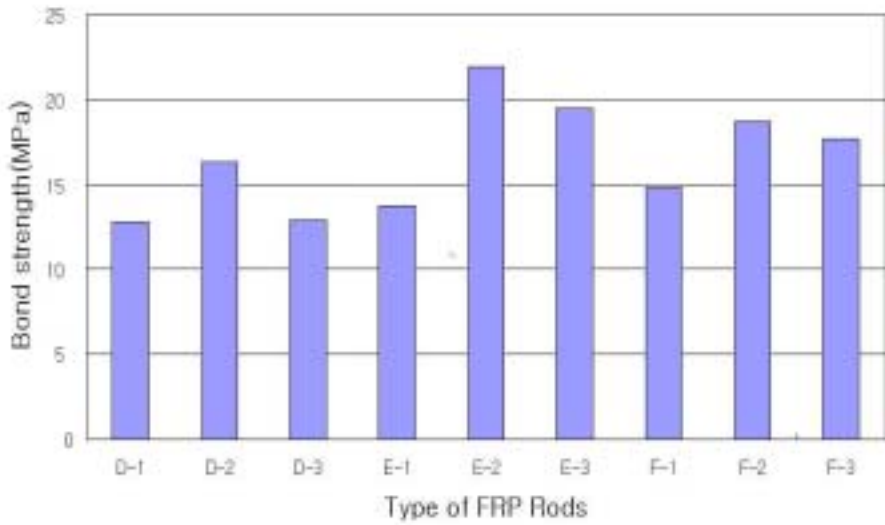


(b) Two orientation

Fig. 9-5 Bond strength-displacement behavior of FRP rebars: (a) one orientation, (b) two orientation

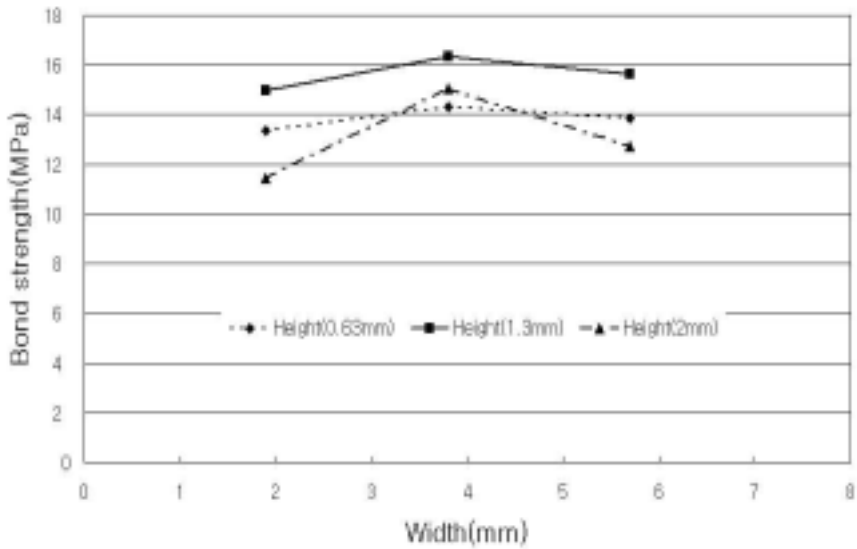


(a) One orientation

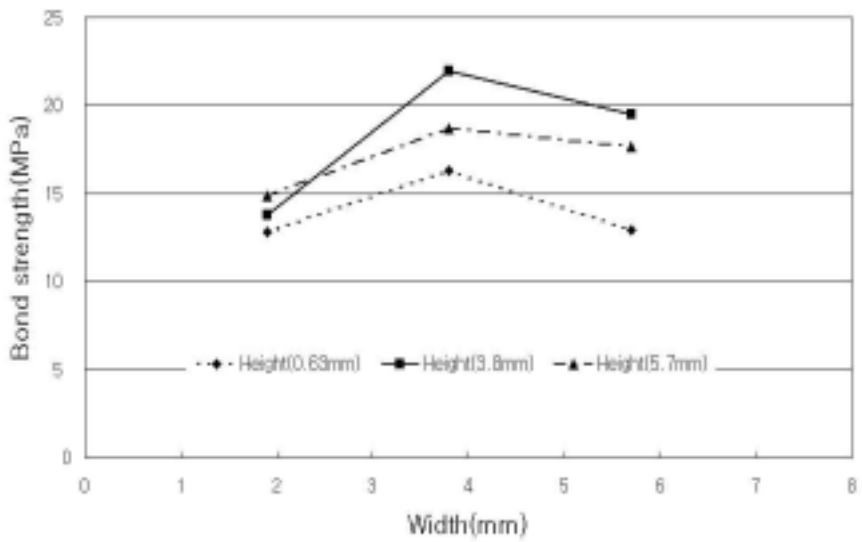


(b) Two orientation

Fig. 9-6 Bond strength of FRP rebars: (a) one orientation, (b) two orientation

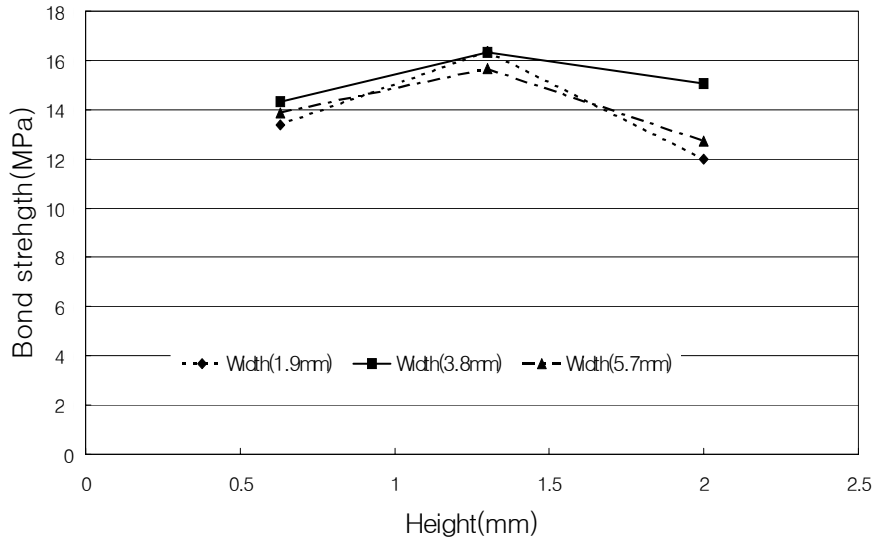


(a) One orientation

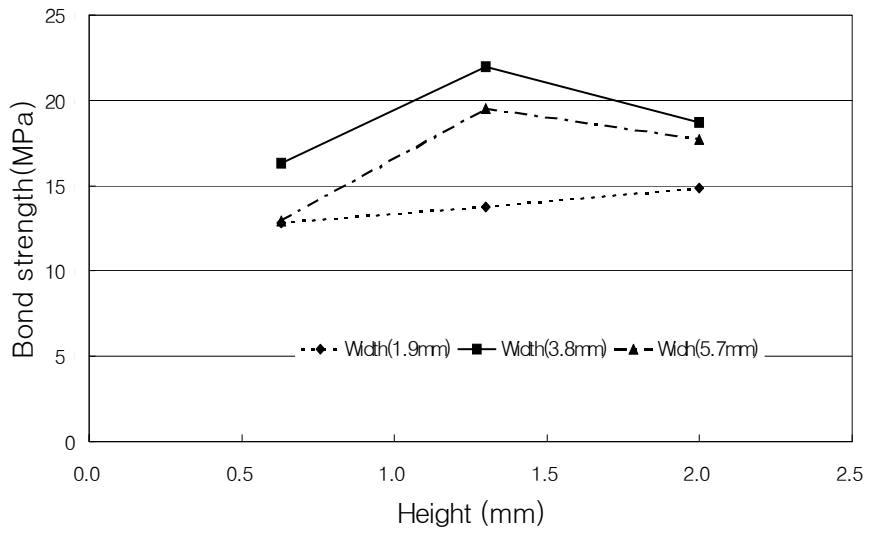


(b) Two orientation

Fig. 9-7 Effect of crimped width on FRP rebar bond strength: (a) one orientation, (b) two orientation



(a) One orientation



(b) Two orientation

Fig. 9-8 Effect of crimped height on FRP rebars bond strength: (a) one orientation, (b) two orientation

5절 요약 및 결론

FRP 리바의 부착성능의 최적화를 위하여 18가지 형상을 가진 FRP 리바의 부착 시험을 실시하여 FRP 리바의 표면형상을 결정하였으며 시험을 통한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. FRP 리바의 부착시험 결과 rib의 폭과 높이가 증가하면 부착강도는 증가하나 폭이 5.7mm가 되면 콘크리트 매트릭스와 FRP 리바사이의 부착계면이 감소하여 오히려 부착강도가 감소하며 높이 역시 2mm가 되면 rib부분에 전단파괴가 발생하여 부착강도가 감소하는 경향을 보여주었다.
2. 부착강도 시험결과 부착강도와 rib 높이 및 폭의 관계를 고려하여 콘크리트 매트릭스와 충분한 계면을 확보하고 rib 부분의 전단파괴가 발생하지 않은 높이가 1.3mm, 폭 3.8mm를 최종 rib의 형상으로 결정하였다.

제 10장 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 부착 거동

제 1절 개 요

보강철근과 달리 FRP 리바는 표면의 rib과 FRP 리바 모체와의 완전한 일체 거동은 불가능하다. 왜냐하면 보강철근의 rib은 보강철근의 부착력 향상을 위해서 생산당시부터 일체화 시켜 생산되지만 FRP 리바의 경우 FRP 리바의 모체를 압출성형에 의해서 생산한 후 부착력 향상을 위해서 표면에 규사코팅을 실시하거나 또는 섬유로 rib 처리를 하는 방법 등을 사용함으로써 FRP 리바 모체와 표면 처리 부분의 분리로 인한 부착성능 저하가 나타날 수 있다. 이와 같은 이유로 해서 현재 FRP 리바는 보강철근의 부착강도에 약 60% 정도를 발현하는 것으로 알려져 있다. 또한 콘크리트 구조물 실제 환경조건에 노출되었을 때 FRP 리바의 성능저하는 FRP 리바의 재료 자체의 성능 저하뿐만 아니라 FRP 리바 모체와 표면형상 처리부분의 분리, FRP 리바와 콘크리트 모체 사이의 부착성능 저하로 인해 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 개발된 3가지 종류의 하이브리드 FRP 리바와 두가지 종류의 일반 FRP 리바의 부착성능 향상을 위하여 9장에 결정된 최적 표면형상을 적용하여 부착성능의 향상을 도모하고자 하였다. 또한 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 경우 rib은 브레이딩을 구성하는 섬유를 그대로 사용하여 구성하기 때문에 현재 해외에서 상용화되고 있는 FRP 리바의 폴리머 수지를 이용한 rib을 사용함으로써 발생하는 rib의 전단파괴를 최소화 할 수 있으며 rib의 방향을 한쪽 방향이 아닌 양쪽방향으로 함으로써 한쪽방향에서 발생할 수 있는 rib의 전단파괴 또한 최소한으로 하였다. 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 표면형상은 Fig. 10-1과 같다.

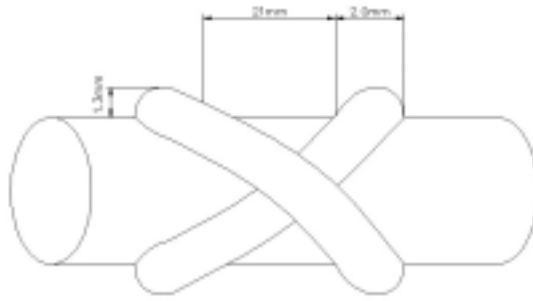


Fig. 10-1 Geometry of hybrid FRP rebar

일반 및 하이브리드 FRP 리바의 부착성능은 기존의 GFRP 리바와 부착시험을 통하여 비교·평가하였으며 또한 13가지 환경조건에 노출한 공시체에 부착시험을 실시함으로써 FRP 리바 모체와 표면형상 처리부분과의 분리 및 FRP 리바와 콘크리트 모체의 계면에서 발생할 수 있는 성능저하를 평가하였다.

제 2절 실험 계획 및 방법

1. 실험계획

일반 및 하이브리드 FRP 리바의 축진환경 노출 후 부착성능의 평가는 내구성능을 평가하기 위하여 사용하였던 12가지의 환경조건을 동일하게 적용하였다. 그러나 알칼리, 산, 염해 및 중성환경은 용액의 온도를 60℃로 유지하면서 100일간 노출시킬 경우 부착강도를 평가하기 위한 콘크리트 공시체가 대부분의 강도를 잃기 때문에 노출 기간을 25일과 50일로 결정하였다.

2. 실험방법

일반 및 하이브리드 FRP 리바의 부착시험은 9장에서 사용하였던 부착시험 방법을 그대로 사용하였다.

제 3절 시험결과

본 장에서는 FRP 리바의 부착성능을 현재 사용되고 있는 상용 FRP 리바와 비교·평가하였다. 또한 실제 콘크리트 구조물이 노출되는 환경에서 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 표면형상에 미치는 환경적 영향을 분석하기 12가지 환경에 노출 후 부착시험을 실시하여 그 영향을 평가하였다. 시험결과는 본문의 Figure 및 부록 C의 Table에 제시하였다.

1. 압축강도

부착시험을 위하여 사용된 콘크리트의 압축강도는 Table 10-1과 같이 37.3MPa의 강도를 나타내었다.

Table 10-1 Compressive strength of concrete

Specimens No.	Compressive strength(MPa)
1	36.1
2	37.7
3	37.5
4	37.4
5	37.9
Mean	37.3

2. 기준공시체

일반 및 하이브리드 FRP 리바의 부착성능을 알아보기 위하여 실시한 부착강도-slip 거동의 관계는 Fig. 10-2와 같다. 하이브리드 FRP 리바의 경우 GFRP 리바와 달리 최대 부착강도에 도달하기 전에 slip이 크게 발생함을 알 수 있다. 특

히 하이브리드 FRP 리바(A)와 (C)의 경우 slip은 거의 9mm~10mm 정도 발생하여 거의 보강철근과 동일한 slip 거동을 보여주었다. 그러나 일반 FRP 리바의 경우 최대부착강도에 도달하기 전에 slip이 작게 나타남을 알 수 있다. 또한 개발된 일반 FRP 리바는 해외에서 상용화되어 있는 FRP 리바 보다 slip이 크게 나타났다. 그러나 하이브리드 FRP 리바 보다는 작게 발생하였다. 또한 하이브리드 FRP 리바(B)의 경우 slip이 약 6mm정도로 나타나 하이브리드 FRP 리바(A), (C) 보다는 작게 나타났는데 이와 같은 이유는 표면에 rib을 처리한 유리섬유가 아라미드섬유보다 강도가 작기 때문에 실제적으로 아라미드섬유로 구성할 때 보다 표면형상의 파괴가 조기에 발생하기 때문이다. 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 부착 시험결과는 Fig. 10-3과 같다. 시험결과 해외에서 상용화되고 있는 FRP 리바가 보강철근과 비교하여 약 60% 정도의 부착강도를 발현하는데 비하여 본 연구에서 개발한 하이브리드 FRP 리바는 약 80%~90% 정도의 부착강도를 보여주었으며 개발한 FRP 리바 역시 70%~80%로 기존 제품보다는 우수한 특성을 보여주었다. 이와 같은 결과는 개발된 일반 및 하이브리드 FRP 리바가 기존 FRP 리바의 부착성능 저하를 발생시켰던 rib 부분의 전단파괴와 규사코팅부분의 분리파괴를 표면형상 처리에 의하여 최소화하였기 때문이다.

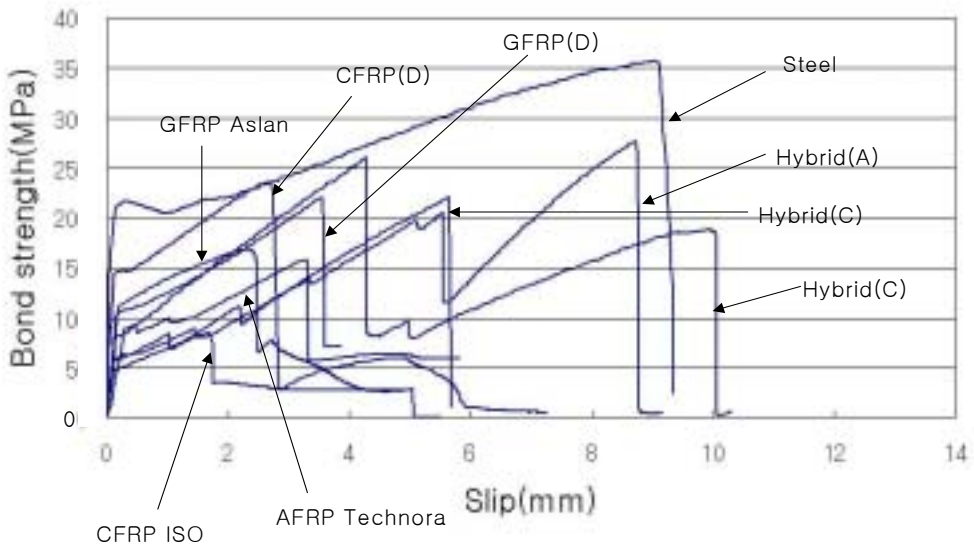


Fig. 10-2 Bond strength-slip behavior of FRP rebars

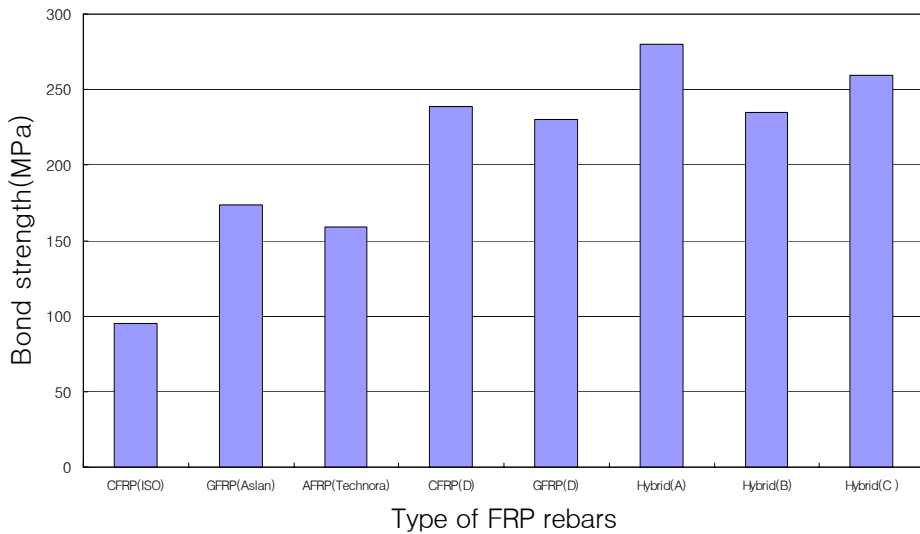


Fig. 10-3 Bond test result of control specimens

3. 여러개의 FRP 리바가 한 묶음으로 배열되었을 때의 부착 특성

콘크리트 구조물에 FRP 리바가 배열되었을 때 콘크리트와 FRP 리바 사이의 부착강도는 휨균열의 간격과 나아가 균열의 폭에 영향을 미치는 중요한 변수이다. 따라서 콘크리트 구조물에 FRP 리바를 배열시 각각의 FRP 리바를 배열하는 경우와 여러개를 한묶음으로하여 배근하였을 때의 부착특성을 고려하여야 한다. 일반적으로 FRP 리바를 각각 한 개씩 배열하였을 때보다는 한묶음으로 배열하였을 때 전체적인 콘크리트 모체와의 부착면적은 감소하게 된다. FRP 리바의 이와 같은 특성을 고려하여 Naway는 한계감소계수(perimetric reduction factor)결정하여 설계에 적용하였다.^(135, 183) FRP 리바를 한묶음으로 배열하였을 때 부착 특성은 각각의 실험을 실시하여 결정 하여한다. 그러나 실제적으로 실험을 실시하지 않았을 경우 한 개의 FRP 리바의 부착실험 결과를 가지고 여러개 다발로 고려하였을 때의 부착강도를 추정할 수 있다. 여러개의 FRP 리바를 한묶음으로한 부착 실험은 부착시험시 콘크리트 공시체의 쪼개짐(splitting)에 의한 파괴를 방지하기 위하여 공시체의 제작시 보강철근으로 나선형 철근을 배근하는 방법으로 원추형 콘크리트 공시체를 감싸주게 하여 제작 하여야한다. 본 연구에서는 기존

의 한개의 FRP 리바의 부착시험을 실시하여 여러개의 FRP 리바를 한묶음으로 하였을 때(Fig. 10-4)의 부착특성을 알아보기 위하여 Nawy가 Table 10-2와 같이 제시한 한계계수(Perimeter)와 FRP 리바 묶음과의 관계와 Table 10-3과 같은 Vijay의 실험결과를 이용하여 여러개의 하이브리드 FRP 리바를 한묶음으로 적용하였을 때 부착강도에 대한 관계를 알아보고자 한다.

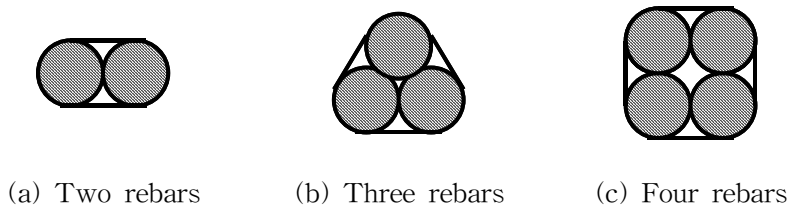


Fig. 10-4 Geometric properties of bundled FRP rebars⁽¹³⁵⁾

Table 10-2 Geometric properties of normally spaced rebars, bundled rebars and equivalent single rebar^(135, 183)

Bundle type	Normal spacing	Bundled rebar	Equivalent single rebar	Perimeter comparison of bundled rebar with normally spaced and equivalent single rebar
I	II	III	IV	
2 Rebars	$A_f = \frac{\pi d^2}{2}$	$A_f = \frac{\pi d^2}{2}$	$A_f = \frac{\pi d^2}{2}$	<ul style="list-style-type: none"> · Perimeter % same as normally spaced · 30% more than equivalent single rebar
	$P = 2\pi d$	$P = 2\pi d$	$P = \sqrt{2}\pi d$	
3 Rebars	$A_f = \frac{3}{4} \pi d^2$	$A_f = \frac{3}{4} \pi d^2$	$A_f = \frac{3}{4} \pi d^2$	<ul style="list-style-type: none"> · Perimeter 16.7% less than normally spaced · 44% more than equivalent single rebar
	$P = 3\pi d$	$P = 2\frac{1}{2} \pi d$	$P = \sqrt{3}\pi d$	
4 Rebars	$A_f = \pi d^2$	$A_f = \pi d^2$	$A_f = \pi d^2$	<ul style="list-style-type: none"> · Perimeter 25% less than normally spaced · 50% more than equivalent single rebar
	$P = 4\pi d$	$P = 3\pi d$	$P = 2\pi d$	

A_f =c/s area of the FRP rebar

P=Perimeter of the rebar

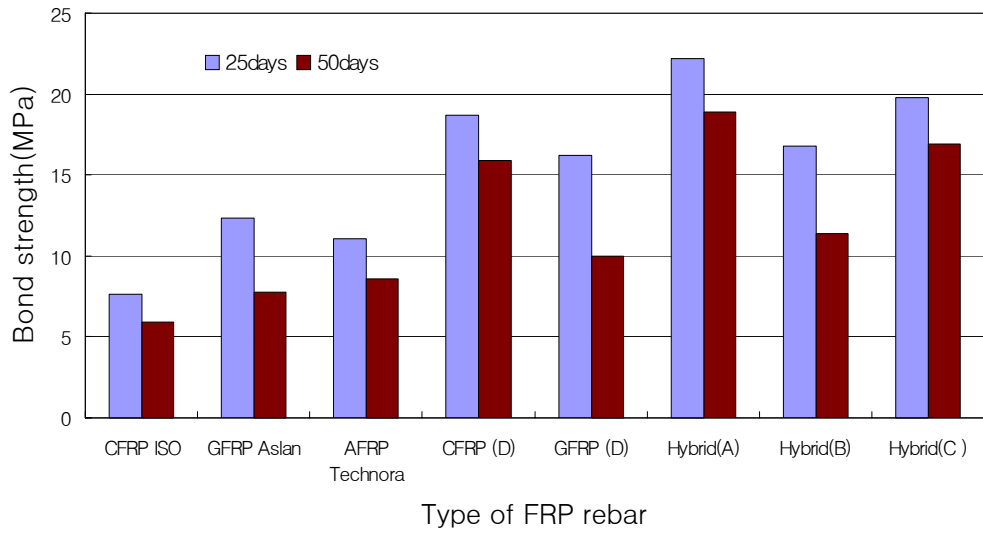
Table 10-3 Pull-out cylinder test results of bundled rebars and comparison with two rebar bundle⁽¹⁸³⁾

Type of bundle	Perimeter of bundled rebars	Perimeter of equivalent rebars	Pull-out load(KN)	Ratio of loads carried	Ratio of perimeter of bundled rebars	Ratio of perimeter of equivalent rebar
2-rebar	$P=2\pi d$	$\sqrt{2}\pi$	48.48	1	1	1
3-rebar	$P=3\pi d$	$\sqrt{3}\pi$	63.164	1.30	1.25	1.22
4-rebar	$P=4\pi d$	2π	69.39	1.43	1.50	1.41

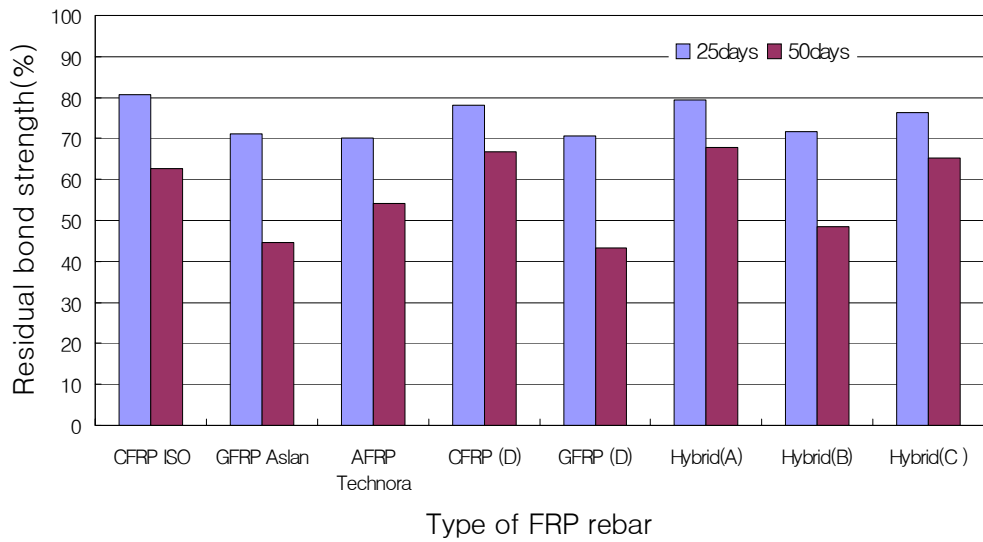
Table 10-2로부터 Vijay는 몇 개의 FRP 리바를 한 묶음으로 하였을 때 부착하중과 한 개의 FRP 리바를 실험하였을 때 부착하중과의 비는 한 묶음의 FRP 리바의 한계계수 또는 동일한 면적을 가진 한 개의 FRP 리바와 상응하는 한계계수에 비례한다고 하였다. 그러나 실제로 Vijay의 부착시험결과 한 개의 FRP 리바에 대한 부착시험결과는 약 39.58KN으로 두개를 한묶음한 FRP 리바로 하였을 때 적용한 한계계수를 적용한 값과 비교하여 약 38.8% 작게 나타났으며 동일한 단면적을 가진 한 개의 리바로 고려하였을 때 한계계수를 적용한 값에 비하여 약 13.4% 정도 작게 나타났다.⁽¹⁸³⁾ 따라서 여러개의 FRP 리바 묶음과 동일한 단면적을 가진 FRP 리바의 부착강도는 적당한 감소계수 또는 변동계수를 적용하면 계산할 수 있다. 그러나 현재 이와 같은 감소계수나 변동계수를 결정되지 않았다. 따라서 이와 같은 관계를 적용하기 위해서는 더 많은 FRP 리바 묶음의 부착시험을 실시하여야 할 필요가 있다.⁽¹⁸³⁾ 따라서 본 연구에서 역시 한 개의 FRP 리바의 부착시험을 통해서 여러개의 FRP 리바의 묶음으로 사용되었을 때와 동등한 면적으로 FRP 리바가 사용되었을 때 부착강도를 Naway가 제시한 한계계수를 이용하여 예측할 수 있지만 감소계수나 변동계수가 결정되지 않아 한계계수와 부착강도와의 관계만을 Naway가 제시한 Table 10-3과 같이 제시하였다.

4. 알칼리 환경

알칼리 환경에 노출시 콘크리트 모체와 FRP 리바의 부착거동에 대한 영향을 평가하기 위하여 pH 12.6의 60℃ 알칼리 용액에 노출시킨 FRP 리바의 25일 노출 후 잔류 부착강도는 모든 공시체가 약 70%정도를 나타내었다(Fig. 10-5). 이와 같은 결과는 알칼리 용액이 FRP 리바 공시체에 침투되어 FRP 리바 공시체와 표면형상 층을 분리시키는 동시에 FRP 리바와 콘크리트 모체의 부착표면에도 침투하여 부착성능을 조기에 파괴시키기 때문이다. 또한 아라미드섬유를 주요 구성성분으로 한 FRP 리바 보다는 유리섬유를 주요 구성성분으로 한 FRP 리바의 파괴가 더욱더 현저한 것은 유리섬유가 아라미드섬유 보다 알칼리 환경에 대한 저항성이 낮기 때문에 FRP 리바가 인발되면서 표면에 rib을 형성하는 유리섬유의 파괴를 촉진시켰기 때문이다. 50일간의 알칼리환경에 노출시킨 FRP 리바 부착공시체의 잔류 부착강도는 유리섬유를 주요 구성 요소로 하는 GFRP 리바의 경우 잔류 부착강도는 약 40%의 낮은 값을 나타내었다. 이와 같은 결과는 알칼리 용액에 노출된 콘크리트 모체의 강도 감소뿐만 아니라 알칼리 용액이 FRP 리바의 표면형상 층을 구성하는 유리섬유를 파괴시켜 인발시 rib을 파괴시킴으로써 부착강도의 현저한 저하를 발생시켰다. 이에 반해 CFRP 리바는 60%이상의 잔류 부착강도를 보여주었고 AFRP 리바는 50% 이상의 잔류 부착강도를 보여주었으며 아라미드섬유가 주로 표면형상 층을 구성하는 하이브리드 FRP 리바(A)와 (C)는 rib의 파괴가 상대적으로 적어 약 60% 정도의 잔류 부착강도를 나타내었다.



(a) Bond strength



(b) Residual strength

Fig. 10-5 Bond test result after alkali exposure:(a) bond strength, (b) residual strength

5. 산환경

산환경에 노출되었을 때 콘크리트 모체와 FRP 리바의 부착성을 평가하기 위하여 60℃의 산용액에 25일 및 50일 간 노출 후 직접부착시험을 실시한 결과는 Fig. 10-6과 같다. 부착강도 시험결과 25일간의 노출 후 하이브리드 FRP 리바(A), (C) 및 CFRP 리바 및 AFRP 리바의 잔류 부착강도가 약 80%이상으로 부착성의 감소가 크지 않았으나 하이브리드 FRP 리바(B) 및 GFRP 리바의 경우 잔류 부착강도가 약 70%정도로 부착강도가 상대적으로 크게 감소함을 알 수 있었다. 이와 같은 이유는 유리섬유로 구성된 FRP 리바의 모체와 부착강도를 향상시키기 위하여 사용된 규사코팅 부분에 산용액이 침투하여 분리를 촉진함으로써 조기에 부착성능 저하가 발생하였기 때문이다. 그러나 상대적으로 하이브리드 FRP 리바(A) 및 (C)는 표면형상 층이 두껍고 내구성이 강한 아라미드섬유를 사용함으로써 유리섬유를 사용하였을 때보다는 분리에 대한 저항성이 크기 때문에 부착강도의 감소가 크지 않았다고 판단되며 CFRP 리바 및 AFRP 리바 역시 산환경에 대한 내구성이 우수하기 때문에 강도의 감소가 작게 발생하였다. 50일간 산환경에 노출 후 부착강도 시험결과 모든 시험공시체가 약 50%의 잔류 부착강도를 보여주어 부착강도가 현저히 감소하는 결과를 보여주었다. 이와 같은 결과는 FRP 리바의 표면형상에 산 용액의 침투가 촉진되어 FRP 리바 모체와의 분리를 촉진시키는 동시에 산환경에 장기간 노출됨으로써 콘크리트 모체의 강도감소와 FRP 리바와 콘크리트 모체와의 부착표면에 산용액이 침투하여 콘크리트 모체와 FRP 리바 사이의 부착력을 감소시켰기 때문이다. 특히 모든 FRP 리바에서 50%대의 잔류 부착강도를 나타낸 것은 FRP 리바의 표면형상의 파괴보다는 콘크리트 모체의 강도감소와 부착표면의 분리에 의한 파괴가 주로 발생하였음을 알 수 있다.

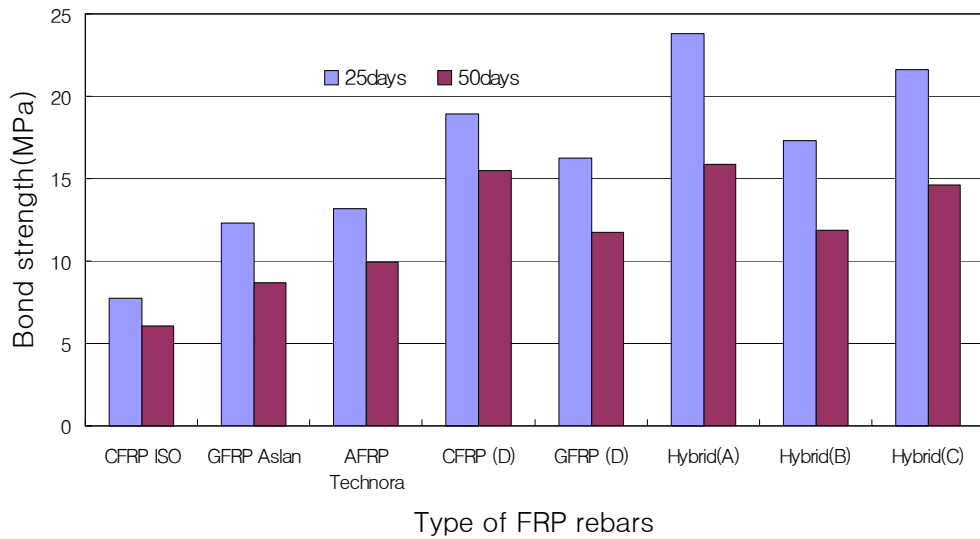
6. 염해환경

염해환경에 노출된 FRP 리바의 영향을 평가하기 위하여 4%의 NaCl 용액을 60℃로 유지하여 부착시험 공시체를 노출한 후의 시험결과는 Fig. 10-7과 같다.

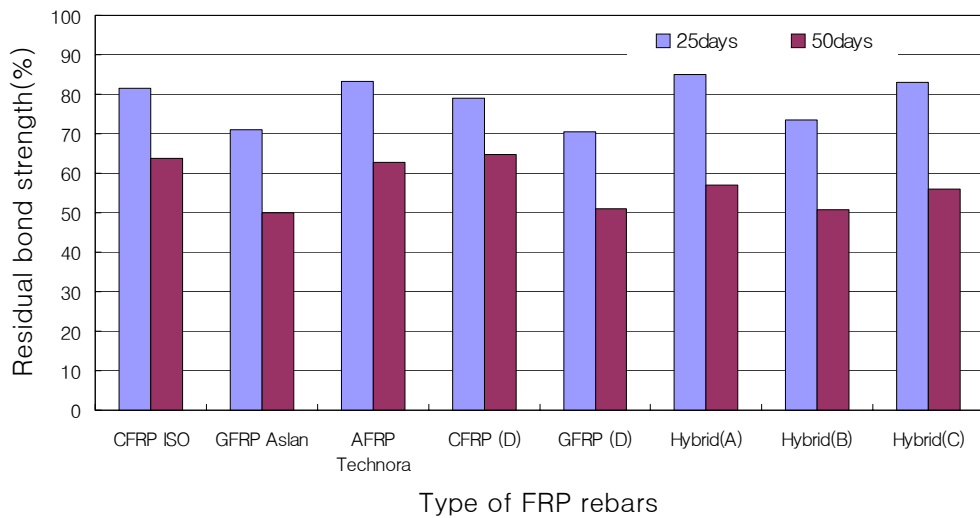
시험결과 25일 노출 후 모든 공시체가 약 70%의 잔류 부착강도를 나타내었으며 50일 노출 후에는 모든 공시체가 50% 정도의 잔류 부착강도를 나타내었다. 그러나 하이브리드 FRP 리바(B)의 경우 약 48% 정도의 잔류 부착강도를 나타내었다. 이와 같은 결과는 50일간의 염해환경에 노출은 하이브리드 FRP 리바(B)의 경우 표면 rib을 구성하는 섬유인 유리섬유가 염해환경에 노출시 표면의 성능 저하가 쉽고 특히 인발시 rib을 구성하는 유리섬유가 콘크리트 모체와의 마찰력으로 인해 쉽게 파괴되기 때문에 인발시 rib의 저항력이 급속히 감소하기 때문이다.

7. 중성환경

60℃의 수돗물에 25일 및 50일간 침지한 FRP 리바 공시체의 부착강도시험결과는 Fig. 10-8과 같다. 25일간 노출 후 잔류 부착강도는 아라미드섬유가 주요 구성성분인 하이브리드 FRP 리바(A)와 (C) 및 CFRP 리바와 AFRP 리바는 약 80%정도를 보여주었으며 유리섬유가 주요 구성성분인 하이브리드 FRP 리바(B)와 GFRP 리바의 경우 70%의 잔류 부착강도를 보여주어 약간 작은 부착강도를 보여주었다. 이는 유리섬유가 아라미드섬유 및 탄소섬유에 비하여 내구성이 약하기 때문으로 판단된다. 50일간 노출 후 모든 부착시험공시체는 50% 정도의 잔류 부착강도를 나타내었다. 이와 같은 결과는 산환경에 노출한 시험결과와 마찬가지로 중성용액에 노출시 콘크리트 모체와 FRP 리바 사이 계면에 용액이 침투하여 FRP 리바와 콘크리트 모체와의 분리를 촉진시켰기 때문이다.

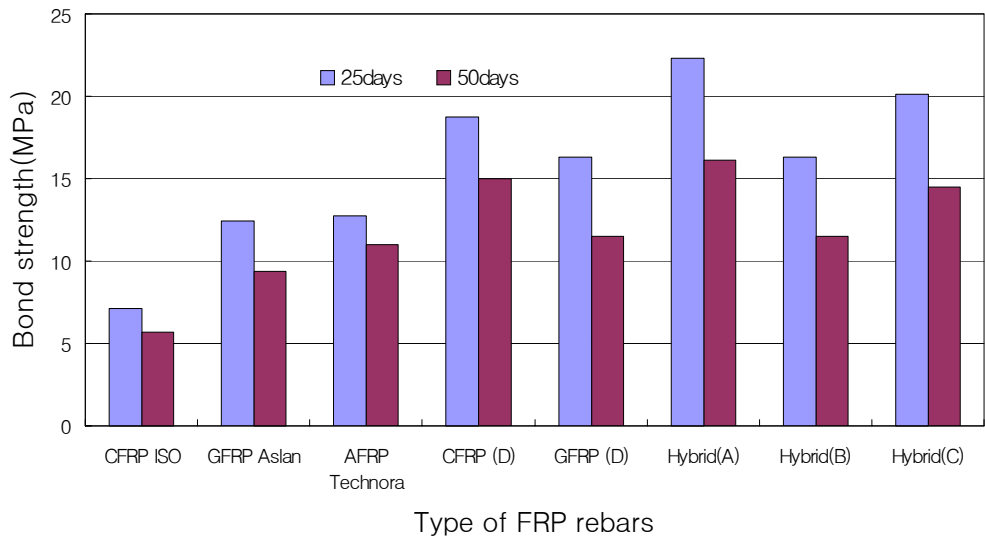


(a) Bond strength

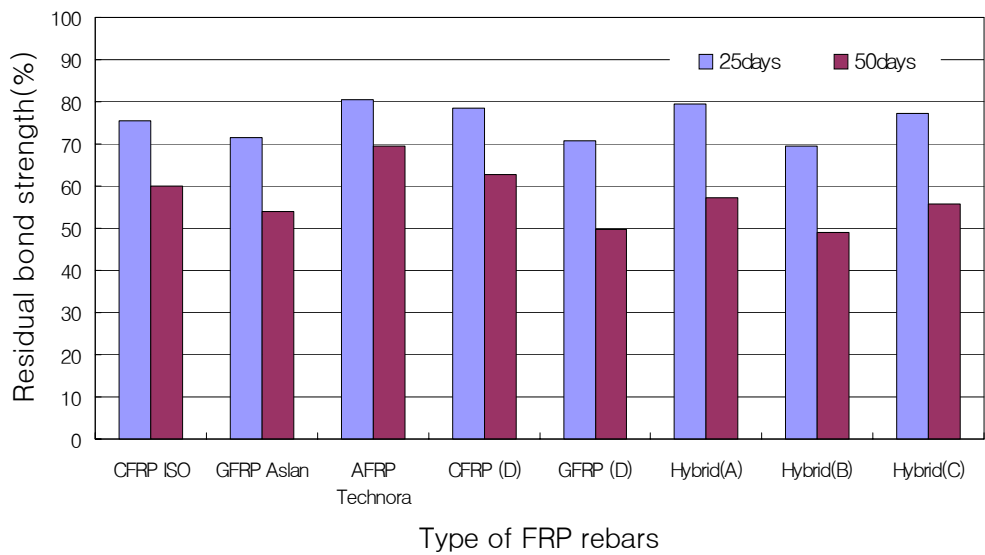


(b) Residual strength

Fig. 10-6 Bond test result after acid exposure: (a) bond strength, (b) residual strength

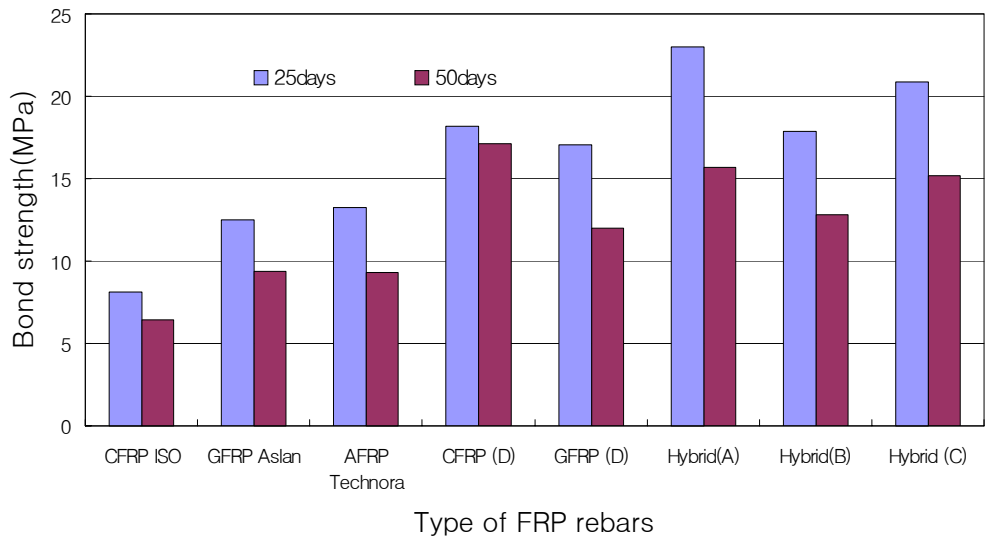


(a) Bond strength

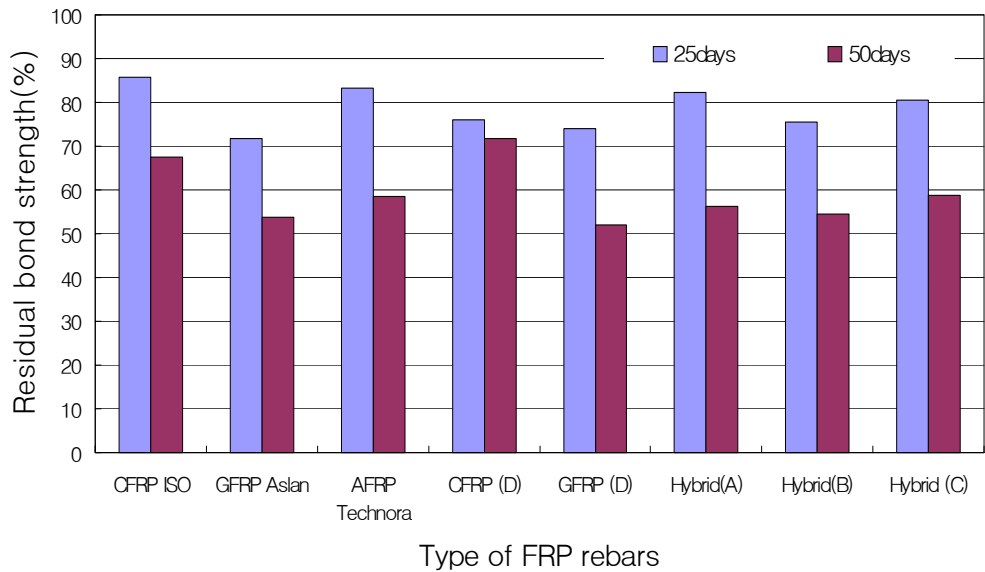


(b) Residual strength

Fig. 10-7 Bond test result after salt exposure: (a) bond strength, (b) residual strength



(a) Bond strength



(b) Residual strength

Fig. 10-8 Bond test result after deionized water exposure: (a) bond strength, (b) residual strength

8. 건조-습윤반복

건조-습윤반복에 따른 FRP 리바의 부착강도 시험결과는 Fig. 10-9와 같다. 시험결과 잔류 부착강도는 모든 시험공시체에서 80%이상을 나타내어 건조-습윤 반복은 FRP 리바의 부착강도에 큰 영향을 주지 않은 것으로 나타났다.

9. 장기오븐 건조

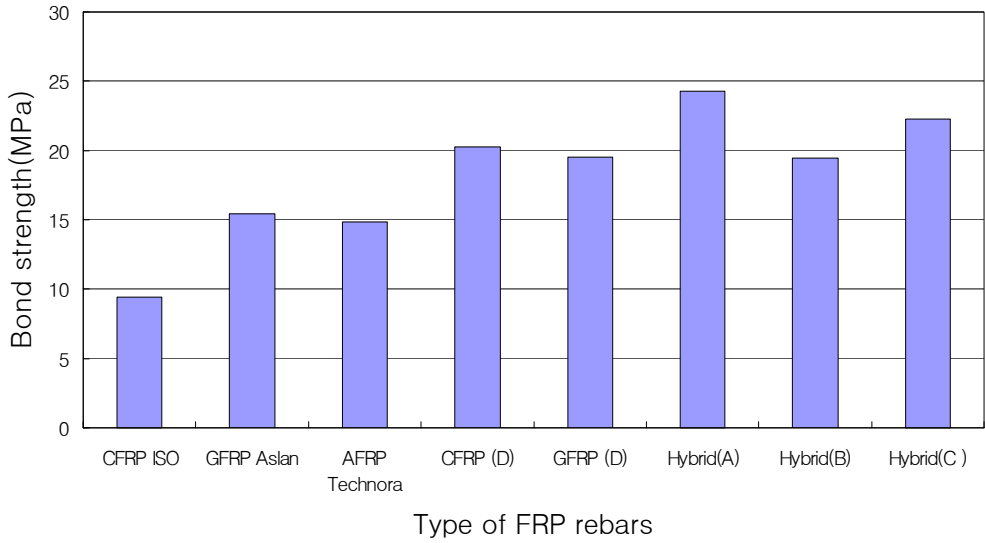
여름철 장기간 햇빛에 노출된 콘크리트에 적용된 FRP 리바의 부착성능을 평가하기 위한 장기오븐 건조 시험결과 잔류 부착강도는 FRP 리바의 부착성능에 거의 영향을 미치지 않았다. 특히 하이브리드 FRP 리바(B)의 82.5%를 제외한 모든 FRP 리바에서 90%이상의 잔류 부착강도를 보여주어 장기간 고온에 노출되는 환경조건은 FRP 리바와 콘크리트의 부착성능에 미치는 영향은 매우 미미함을 알 수 있었다(Fig. 10-10).

10. 동결-융해반복

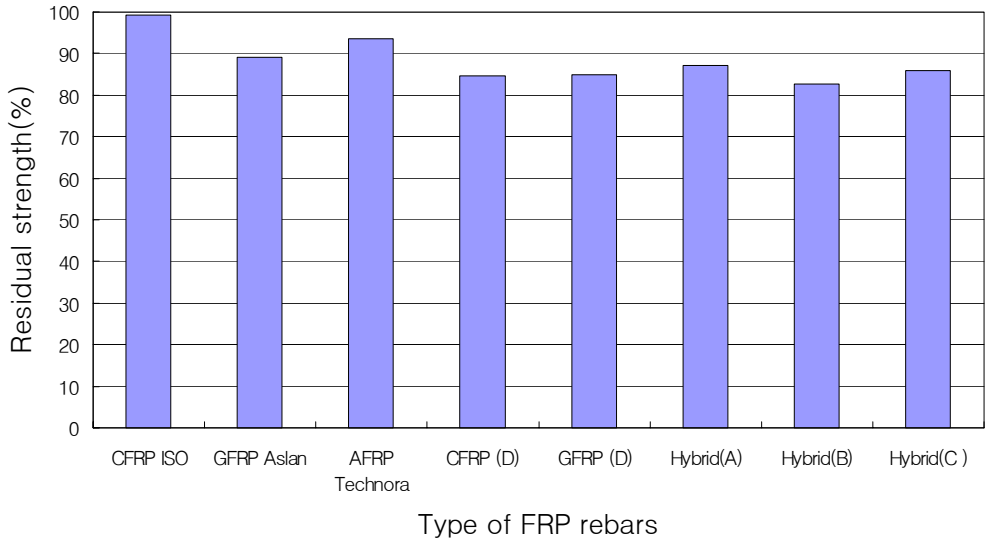
일반 및 하이브리드 FRP 리바의 동결-융해 반복 후 부착성능을 평가한 결과 시험결과는 Fig. 10-11과 같다. 시험결과 모든 FRP 리바의 잔류 부착강도는 80% 이상으로 영향은 미미하였다. 따라서 동결-융해 반복을 받는 구조물에 사용된 하이브리드 FRP 리바는 매우 우수한 부착 저항성을 가지고 있음을 알 수 있었다.

11. 황산염

황산염에 대한 저항성을 평가하기 위한 Na_2SO_4 용액에 침지시킨 후 FRP 리바의 부착성능 시험결과는 Fig. 10-12와 같다. 시험결과 모든 FRP 리바가 황산염에 노출 후 80%이상의 잔류 부착강도를 보여주어 황산염에 대한 저항성이 매우 우수함을 알 수 있었다. 따라서 황산염에 대한 큰 영향을 받을 수 있는 구조물인 상하수도 구조물의 보강재로 사용되어 도 큰 영향이 없을 것으로 판단된다.

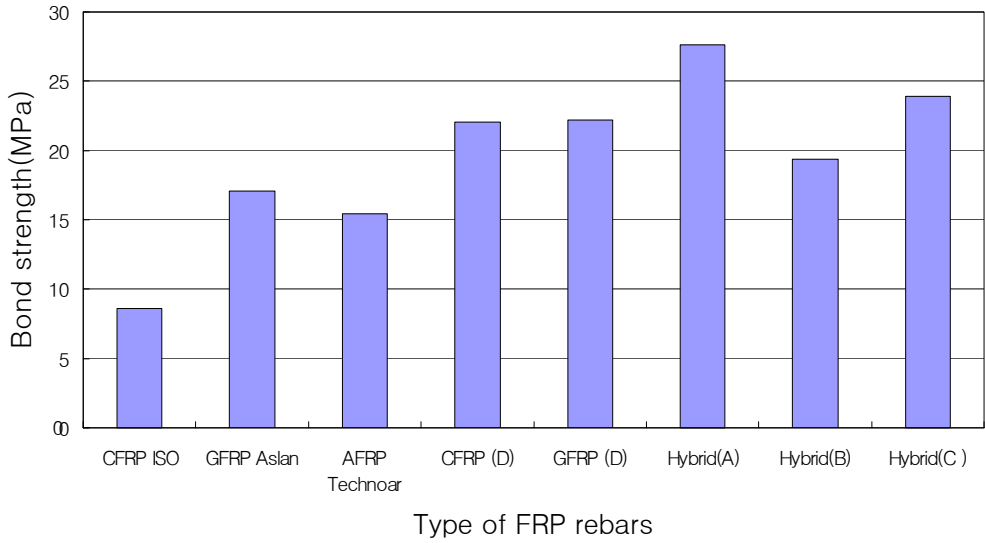


(a) Bond strength

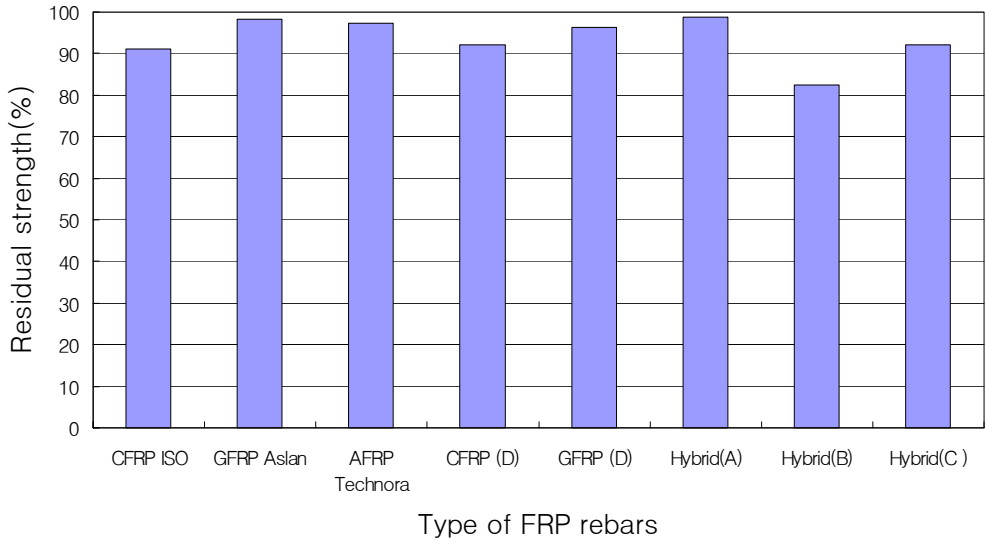


(b) Residual strength

Fig. 10-9 Bond test result after repeated wet-dry cycles exposure: (a) bond strength, (b) residual strength

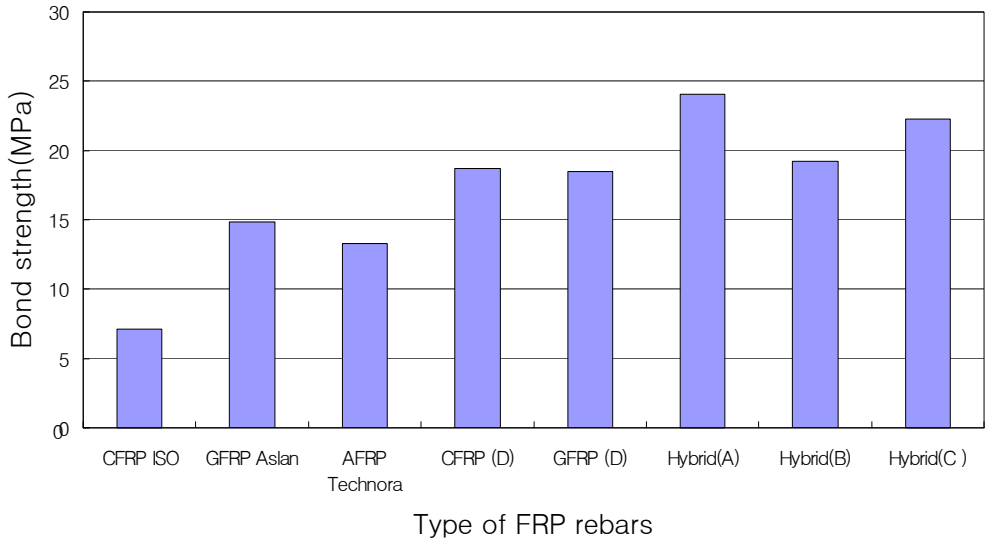


(a) Bond strength

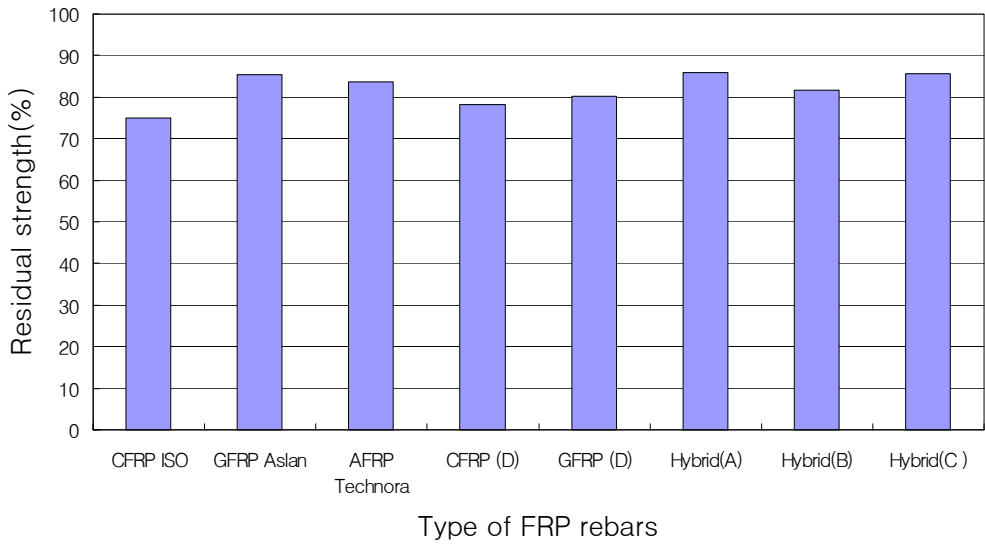


(b) Residual strength

Fig. 10-10 Bond test result after long-term oven dry exposure: (a) bond strength, (b) residual strength

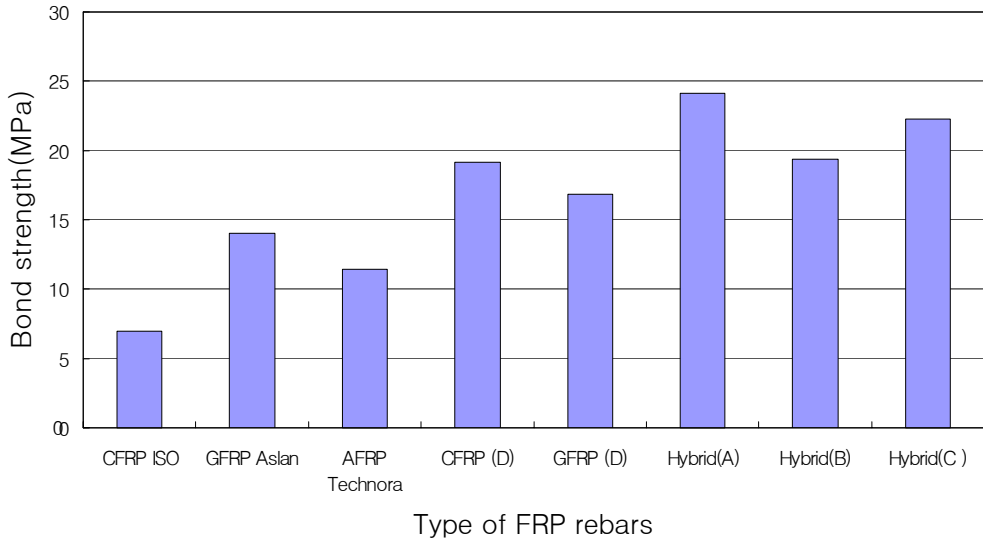


(a) Bond strength

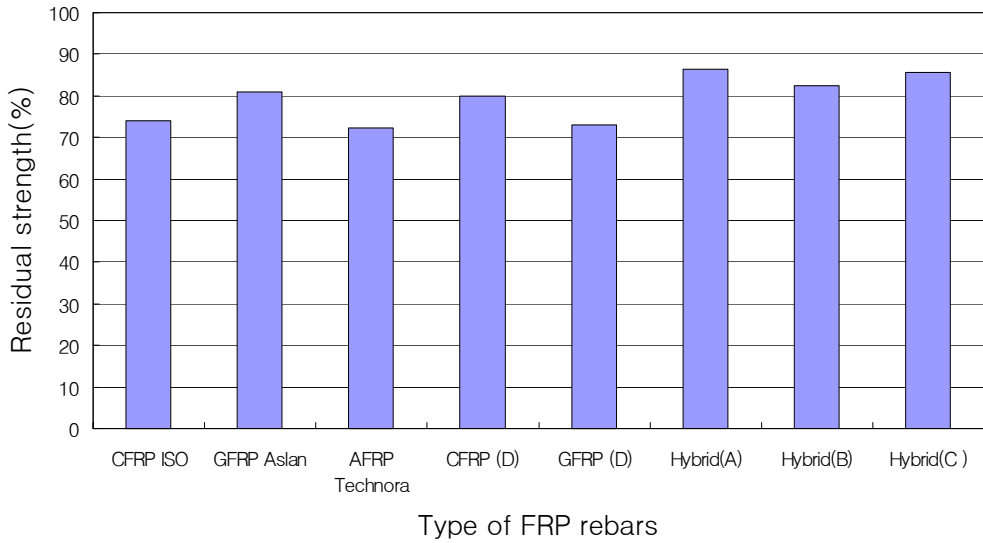


(b) Residual strength

Fig. 10-11 Bond test result after repeated freezing and thawing exposure: (a) bond strength, (b) residual strength



(a) Bond strength

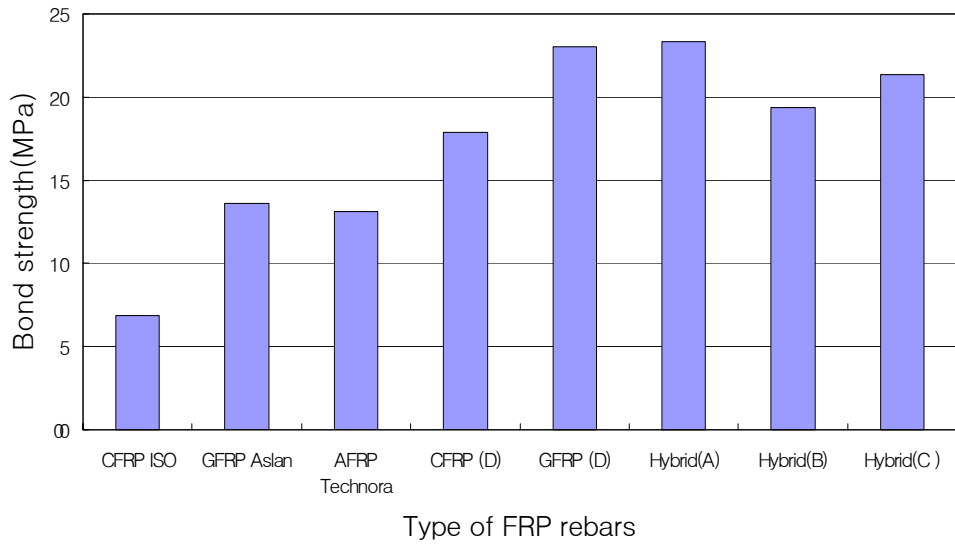


(b) Residual strength

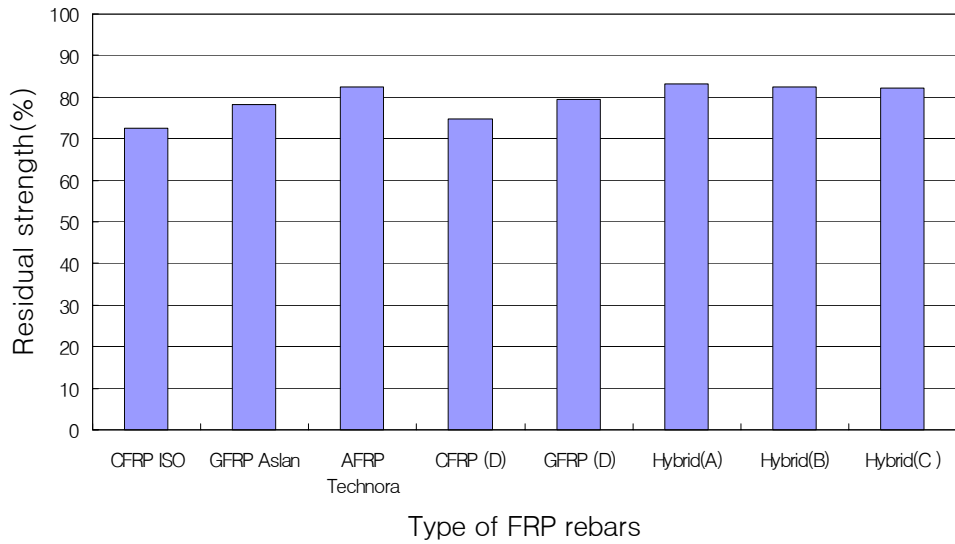
Fig. 10-12 Bond test result after sulfate(Na_2SO_4) solution exposure: (a) bond strength, (b) residual strength

12. 용빙제 환경

겨울철 용빙제로 사용되는 염화칼슘이 FRP 리바와 콘크리트 모체와의 부착성능에 미치는 영향을 평가하기 위하여 실시한 CaCl_2 용액에 노출 후 부착 시험결과는 Fig. 10-13과 같다. 시험결과 GFRP 리바를 제외한 일반 및 하이브리드 FRP 리바는 모두 80%대의 잔류 부착강도를 보여주었다. 이와 같은 결과는 GFRP 리바를 구성하는 주요성분인 유리섬유가 용빙제로 사용되는 염화칼슘에 의하여 표면 부식등이 발생하여 콘크리트 모체와의 분리를 촉진 시켰기 때문이다. 또한 유리섬유를 주요 구성성분으로 하는 하이브리드 FRP 리바(B)가 80%이상의 잔류 부착강도를 나타낸 것은 리바의 표면을 부착성능의 향상을 위하여 제직 및 굴곡처리를 실시하였으며 이 표면형상처리를 파괴할 정도로 염화칼슘용액이 큰 영향을 미치지 못하였기 때문이다. 따라서 개발된 하이브리드 FRP 리바는 용빙제로 사용되는 염화칼슘에 대하여 우수한 저항성을 가지고 있다고 할 수 있다.



(a) Bond strength



(b) Residual strength

Fig. 10-13 Bond test results of FRP rebars after CaCl_2 solution exposure: (a) bond strength, (b) residual strength

13. 염해 · 건조-습윤 반복

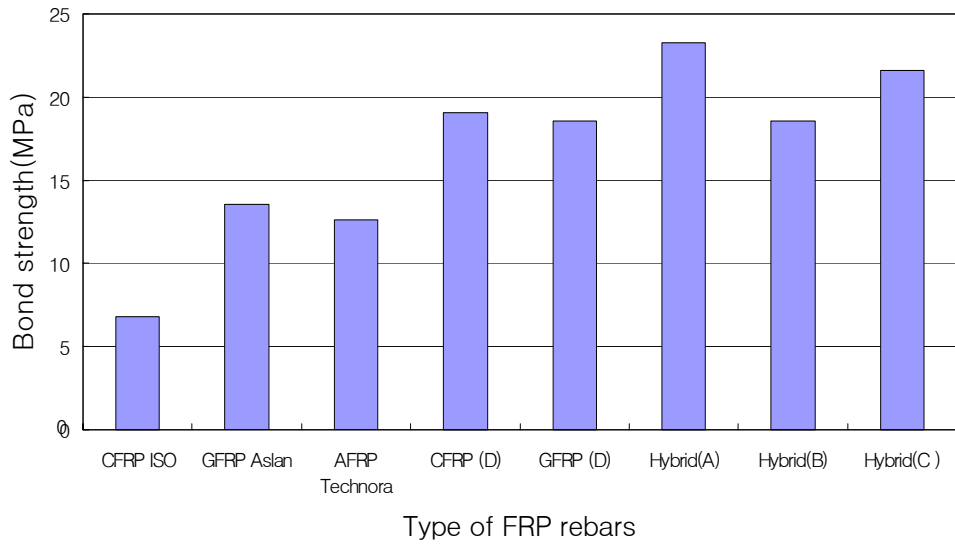
60℃의 오븐에서 12시간 건조 후 23±3℃의 온도에서 4%의 NaCl 용액에 12시간 동안 침지시키는 방법으로 염해와 건조-습윤을 복합적으로 받는 구조물에 노출된 FRP 리바의 부착성능에 대한 영향을 평가한 시험결과는 Fig. 10-14와 같다. 시험결과 염해와 건조-습윤반복을 복합적으로 받는 콘크리트 구조물에 적용된 FRP 리바의 부착 시험결과는 잔류 부착강도가 GFRP 리바 및 하이브리드 FRP 리바(B)를 제외하고는 모두 80% 이상으로 염해와 건조-습윤 반복을 복합적으로 받는 구조물에서 큰 내구성의 저하는 발생하지 않았다. GFRP 리바와 하이브리드 FRP 리바(B)역시 약 70% 후반으로 큰 강도감소는 보여주지 않았다. 따라서 염해와 건조-습윤을 복합적으로 받을 수 있는 해안에 인접한 구조물에 사용되어 부착에 대한 내구성의 감소는 발생하지 않을 것으로 판단된다.

14. 염해 · 동결-융해 반복

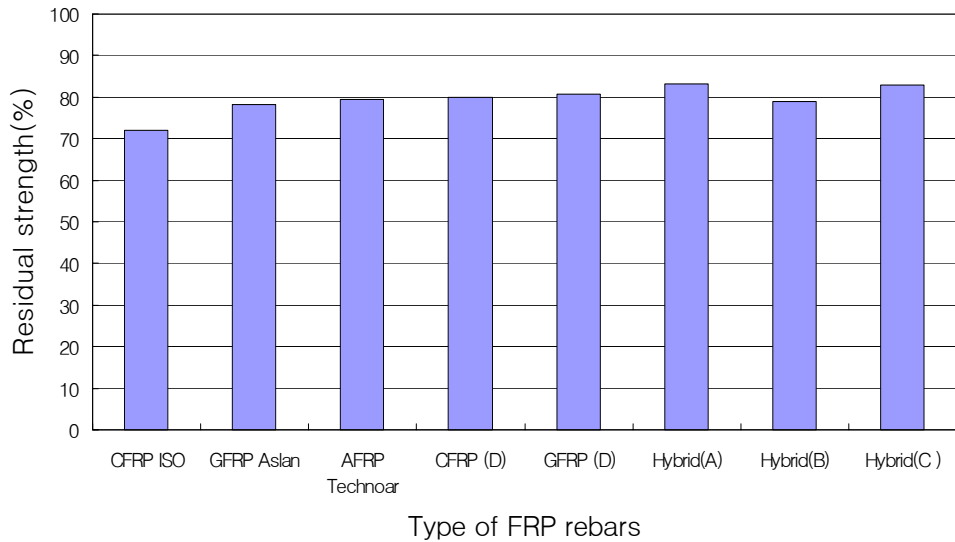
해안근처 구조물의 겨울철 환경적 영향을 고려하여 염해와 동결-융해 반복을 동시에 받는 구조물에 적용된 FRP 리바의 부착성능 저하를 평가한 시험결과는 Fig. 10-15와 같다. 시험결과 GFRP 리바와 하이브리드 FRP 리바(B)를 제외하고는 모든 시험공시체에서 80%이상의 잔류 부착강도를 보여주어 염해와 동결-융해 반복을 동시에 받는 구조물에 적용되어 큰 영향은 받지 않는 것으로 판단된다. 또한 GFRP 리바와 하이브리드 FRP 리바(B) 역시 70% 후반의 잔류 부착강도를 보여주어 부착성능 감소가 크게 발생하지는 않았다.

15. 자외선 노출

14일간의 자외선 노출 후 부착강도 시험결과는 Fig. 10-16과 같다. 시험결과 모든 FRP 리바 공시체에서 80% 이상의 잔류 부착강도를 보여주어 자외선 노출에 의한 성능감소는 거의 발생하지 않았다. 따라서 현장에서 외부에 노출시킨 후 작업시간 중 자외선 노출에 의한 영향은 거의 없는 것으로 판단된다.

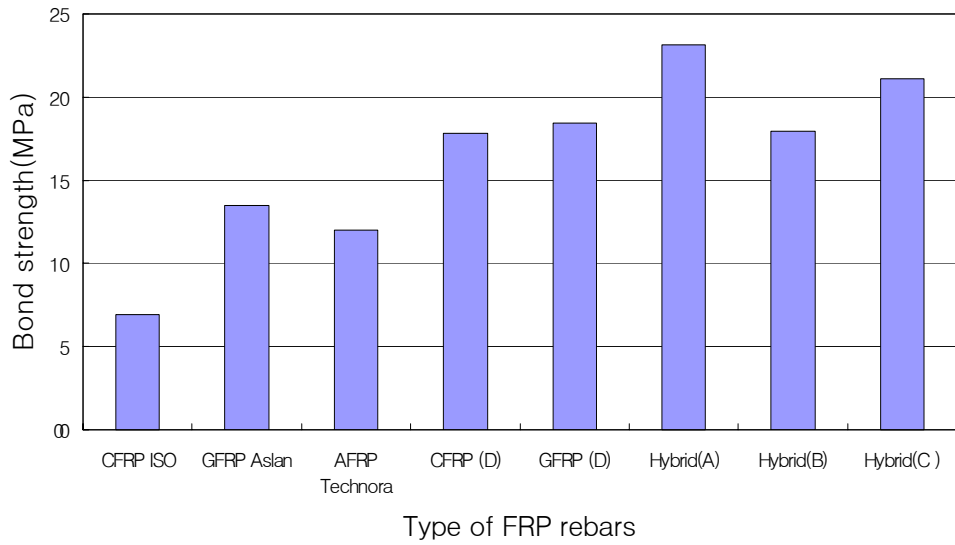


(a) Bond strength

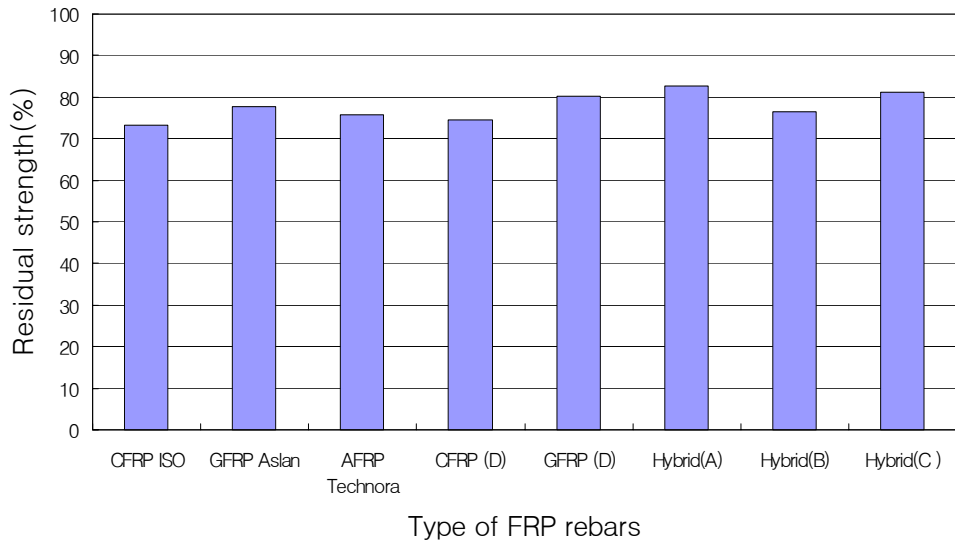


(b) Residual strength

Fig. 10-14 Bond test results of FRP rebars after salt and repeated wet-dry cycles exposure: (a) bond strength, (b) residual strength

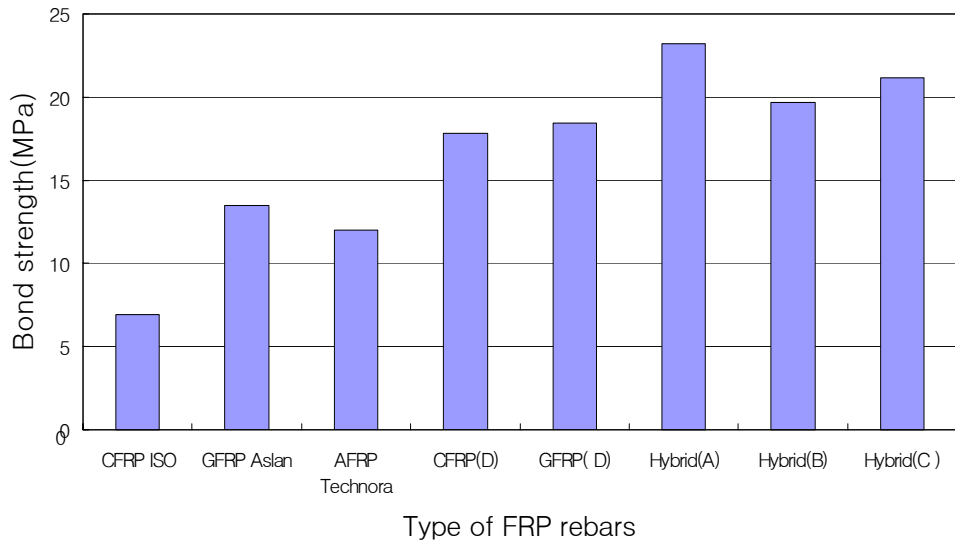


(a) Bond strength

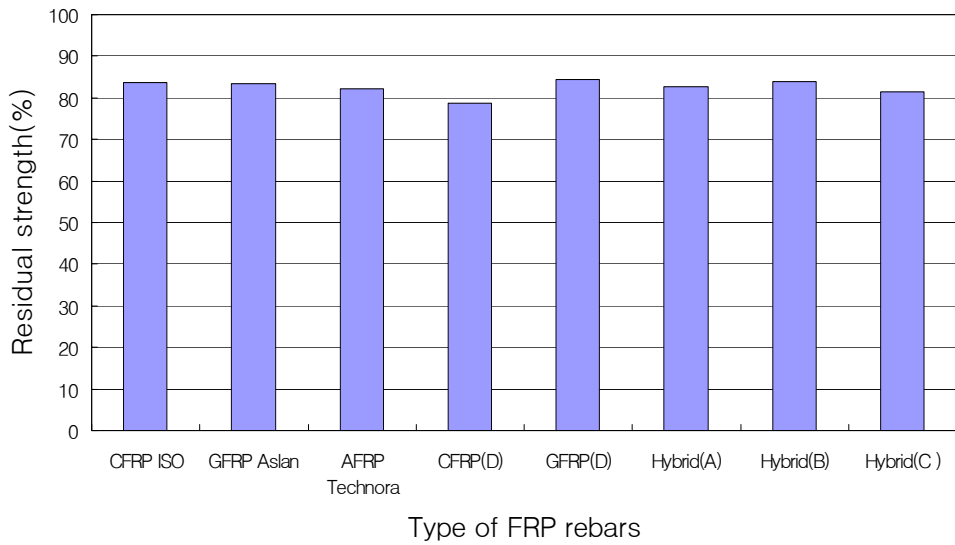


(b) Residual strength

Fig. 10-15 Bond test results of FRP rebar after salt and repeated freezing and thawing cycles exposure: (a) bond strength, (b) residual strength



(a) Bond strength



(b) Residual strength

Fig. 10-16 Bond test results of FRP rebar after UV radiation exposure: (a) bond strength, (b) residual strength

제 4절 요약 및 결론

FRP 리바는 모체를 압출성형에 의해서 생산한 후 부착력 향상을 위해서 표면에 규사코팅을 실시하거나 또는 섬유로 rib 처리를 하는 방법 등을 사용함으로써 FRP 리바의 모체와 표면처리 부분의 분리로 인한 부착성능 저하가 나타날 수 있다. 특히 콘크리트 구조물이 노출되는 실제환경조건에 FRP 리바가 적용되었을 경우 FRP 리바의 부착 파괴는 FRP 리바 모체와 표면형상처리부분의 분리, rib의 전단파괴 및 FRP 리바와 콘크리트 모체 사이의 부착성능 저하로 인해 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 특성을 고려하여 13가지 환경조건에 노출한 공시체에 부착시험을 실시함으로써 FRP 리바 모체와 표면형상 처리 부분과의 분리, rib의 전단파괴 및 FRP 리바와 콘크리트 모체의 계면에서 발생할 수 있는 성능저하를 평가하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 하이브리드 FRP 리바의 표면 rib의 높이 및 폭은 1.3mm와 2mm이며 rib과 rib 사이의 간격은 21mm로 현재 사용되고 있는 FRP 리바의 표면형상을 분석·평가한 후 결정하였다. 하이브리드 FRP 리바의 부착 시험결과는 기존의 일반 FRP 리바가 보강철근과 비교하여 약 60% 정도의 부착강도를 가지고 있는데 비하여 80%~90%까지 부착강도가 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 하이브리드 FRP 리바가 표면제직을 통하여 부착성능을 증가시키기 위한 rib의 전단파괴와 FRP 리바의 모체와 표면처리 층과의 분리를 방지하였기 때문이다.
2. 여러개의 FRP 리바를 한 묶음으로 하여 올 때 부착강도는 동일한 면적을 가진 한 개의 FRP 리바의 한계계수(perimeter)를 이용하여 계산할 수 있으며 이때 부착강도는 여러개의 FRP 리바를 한 묶음으로 하였을 때의 한계계수와 비례 관계를 가지고 있다.
3. 실제적으로 한 개의 FRP 리바의 부착강도를 측정하여 여러개의 FRP 리바를 한 묶음으로 하였을 때 부착강도를 추정하기 위한 식을 개발하기 위해서는 많

은 실험을 통하여 적당한 감소계수를 결정하면 쉽게 측정할 수 있으나 현재까지 이와 같은 식은 결정되지 않았다.

4. GFRP 리바는 부착성능을 향상시키기 위하여 규사코팅과 나선형 웹으로 표면 형상을 처리하였으나 인발시험 후 표면의 규사코팅 층은 완전히 파괴되었으며 나선형 웹 역시 부분적으로 파괴되는 경향을 보여주었다. 이와 같은 결과는 규사코팅 층의 경우 인발시 콘크리트 모체와의 마찰저항력을 감당하지 못하였기 때문이며 나선형 웹은 규사코팅 층이 파괴되면서 그 영향으로 나선형 웹 역시 부분적으로 분리되는 경향을 보여주었다.
5. 부착시험 후 표면층의 파괴형상을 살펴보면 하이브리드 FRP 리바(B)의 경우 표면층을 구성하는 rib이 유리섬유로 구성되어 부착시험시 발생하는 rib과 콘크리트 모체와의 마찰저항력으로 인해 rib이 대부분 파괴되는 경향을 보여주었다. 이는 유리섬유가 아라미드섬유보다 역학적 성능이 작고 양생시 발생하는 수분의 침투로 인해 부분적으로 유리섬유의 역학적 성능이 감소하였기 때문이다.
6. 하이브리드 FRP 리바(A)와 (C)의 부착시험 후 표면의 파괴형상을 살펴보면 콘크리트 모체와 인발시 발생하는 마찰저항력으로 인해 rib이 부분적으로 파괴되지만 하이브리드 FRP 리바(B)의 경우보다는 파괴의 정도가 현저히 감소하였다. 이와 같은 결과는 하이브리드 FRP 리바(A)와 (C)의 rib을 구성하는 아라미드섬유가 하이브리드 FRP 리바(B)의 rib을 구성하는 유리섬유보다 역학적 성능이 우수하기 때문이다.
7. 하이브리드 FRP 리바의 알칼리, 산, 염해, 중성용액에 25일간 노출 후 잔류 부착강도는 70% 정도를 나타내어 큰 영향을 받지 않았으나, 50일 노출 후에는 50%~60%의 잔류 부착강도를 나타내어 부착강도가 현저히 감소함을 알수 있었다. 이와 같은 이유는 FRP 리바는 FRP 리바 모체와 표면처리층과의 결합층이 존재하고 rib을 구성하는 재료 역시 섬유재료로서 환경에 대하여 영향을

받을 수 있기 때문이다. 또한 부착시험공시체의 강도감소도 어느정도 영향을 미쳤다고 판단된다.

8. GFRP 리바의 알칼리, 산, 염해, 중성용액에 25일간 노출 후 잔류 부착강도 60%~70%를 나타내었으나 50일 노출 후에는 40%~50%의 잔류 부착강도를 나타냄으로써 환경노출에 큰 영향을 받았다. 이와 같은 이유는 유리섬유의 경우 환경노출 후 내구성의 저하에 대한 문제를 가지고 있으며 FRP 리바의 표면형상 역시 환경 노출에 영향을 크게 받을 수 있는 유리섬유와 직접적으로 접촉해 있으므로 해서 더욱더 영향이 크게 나타났다.
9. 건조-습윤 반복, 장기오븐건조, 동결-융해 반복, 황산염 환경 노출 후 부착강도 시험결과 하이브리드 FRP 리바와 GFRP 리바 모두 80% 이상의 우수한 잔류 부착강도를 나타내어 이와 같은 환경에서는 큰 영향을 받지 않았다.
10. 용빙제 환경에 노출시킨 하이브리드 FRP 리바의 부착강도는 80%이상의 잔류 부착강도를 나타내어 용빙제 환경에 큰 영향이 없었다. 그러나 GFRP 리바는 70%정도의 잔류 부착강도를 나타내어 하이브리드 FRP 리바 보다는 약간 크게 영향을 받았다.
11. 염해와 건조-습윤 및 동결-융해 반복을 복합적으로 받는 환경에 노출된 하이브리드 FRP 리바의 잔류 부착강도는 70% 후반에서 80%대로 환경적 영향에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 또한 GFRP 리바 역시 70% 정도의 잔류 부착강도를 나타내어 하이브리드 FRP 리바 보다는 영향을 받지만 화학적 환경에 노출시 보다는 잔류 부착강도가 크게 나타났다.

제 11장 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 휨거 동

제 1절 개 요

콘크리트의 인장보강재로 FRP 리바는 파괴전 까지 선탄성거동을 함으로써 하중의 재하시 국부적인 응력집중, 설계하중 이상의 하중 재하, 지진하중, 풍하중 등의 피로하중 재하시 모멘트의 재분배 및 초과된 변형률 또는 파괴하중에 도달하기 전에 균열이 발생하자마자 급격한 파괴를 발생시킨다.^{27,81,136,161,162,165,166)} 그러나 철근콘크리트 구조물은 파괴에 대한 징후 이후에도 지속적인 하중의 증가와 파괴하중에서 큰 소성변형률을 확보하여 안전성을 높이고 있다. 철근콘크리트 구조물의 이와 같은 거동은 동일한 목적으로 사용되는 FRP 리바에서도 안전성을 확보하기 위하여 반드시 필요하다. 따라서 일반적으로 일반 FRP 리바는 설계시 강도감소계수를 보강철근을 사용하였을 때 와 비교하여 작은 값을 사용함으로써 안전성을 확보하고 있다. 그러나 하이브리드 FRP 리바의 경우 보강철근과 같이 충분한 연성과 소성변형구간을 가지고 있어 보강철근과 동일한 강도감소계수를 적용하여도 충분한 안전성을 확보할 수 있을 것이라 판단된다. 본 장에서는 이와 같은 판단아래 일반 및 하이브리드 FRP 리바로 보강된 콘크리트 구조물의 휨거동을 평가하였다. 또한 본 연구에서는 개발된 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 휨거동을 비교·분석하기 위하여 CFRP ISO 및 GFRP Aslan, AFRP Technora 리바로 보강된 콘크리트 공시체의 휨시험을 동시에 실시하였다.

제 2절 FRP 리바로 보강된 콘크리트의 해석 및 설계 이론

FRP 리바로 보강된 콘크리트가 휨부재로 사용될 경우 설계에 필요한 주요사항은 1) 휨하중을 받을 때의 파괴, 2) 압축, 균형, 인장파괴 과정에 대한 이해와

고려, 3) 처짐의 조절, 4) 균열 폭 조절, 5) 연성 이다.^{3,4,45)} FRP 리바로 보강된 콘크리트의 설계기준은 일본, 유럽, 미국 등 많은 나라에서 제시되어 있다.^{3,4,45,46,96)} 본 장에서는 하이브리드 FRP 리바로 보강된 콘크리트 공시체의 설계 및 부재해석을 위해서 ACI 318 및 440에 제시된 기준을 이용하여 하이브리드 FRP 리바로 보강된 콘크리트 휨부재의 해석 및 설계방법에 대해 설명하였다.

1. FRP 리바의 설계인장강도

FRP 보강 콘크리트 휨부재의 공칭 휨강도(nominal moment capacity)를 결정하기 위해서는 먼저 설계에 적용하기 위한 FRP 리바의 설계인장강도(specific tensile strength)와 극한변형률(ultimate tensile strain)을 결정하여야 한다.^{3,4,45)} 본 연구에서는 하이브리드 FRP 리바의 경우 항복강도와 극한강도가 모두 존재하므로 철근콘크리트에서 보강철근과 마찬가지로 항복강도와 항복변형률을 설계에 사용하였으며 GFRP 리바의 경우 극한강도와 극한변형률을 설계에 반영하였다. FRP 리바의 설계인장강도 및 변형률은 식 11-1과 11-2를 사용하여 결정한다.^{3,4,45)}

$$f_{fu} = f_{fu,ave}^* - 3\sigma \dots \dots \dots (11-1)$$

$$\epsilon_{fu} = \epsilon_{fu,ave}^* - 3\sigma \dots \dots \dots (11-2)$$

식 9-1과 9-2에서 f_{fu} 와 ϵ_{fu} 는 각각 설계인장강도와 설계 인장변형률이고, f_{fu}^* 와 ϵ_{fu}^* 는 각각 시험으로부터 얻은 평균 설계인장강도와 평균 설계인장변형률이며, σ 는 표준편차(standard deviation)이다.^{3,4,45)} 또한, FRP 리바의 탄성계수 (E_f)는 식 11-1과 11-2식을 사용하여 구한 설계인장강도와 설계인장변형률을 사용하여 식 11-3과 같이 계산하여 이 값을 설계에 적용하였다.^{3,4,45)}

$$E_f = \frac{f_{fu}}{\epsilon_{fu}} \dots \dots \dots (11-3)$$

ACI 440에서 FRP 리바는 환경적 요인에 의하여 장기거동하에서 인장강도가 감소될 수 있으며, 이러한 장기거동하에서의 강도감소의 영향을 고려하기 위하여 식 11-1로 계산된 인장강도에 환경영향계수를 곱하여 설계인장강도를 계산하도록 하고 있다.^{3,4)} 본 연구에서는 7장에서 하이브리드 FRP 리바 및 GFRP 리바의 환경영향계수를 결정하였다. 따라서 실제 설계시에는 인장강도에 환경영향계수를 곱하여 설계에 반영하여야 한다. 그러나 본 연구에서는 실험실 환경하에서 하이브리드 FRP 리바의 휨성능에 대한 평가를 하기 위한 것으로 설계에 환경영향계수는 고려하지 않았다.

2. 기본가정사항

FRP 보강 콘크리트 휨부재의 설계를 위한 기본가정 사항은 다음과 같다. 여기서, 모든 가정사항은 철근콘크리트 휨부재의 설계를 위한 기본 가정사항과 동일하나, 마지막 가정사항 (6)은 FRP 리바의 특성을 고려한 것으로 FRP 리바의 응력-변형률 관계를 고려한 것이다.^{3,4,45)}

- 콘크리트와 FRP 리바의 변형률은 중립축으로부터의 거리에 비례한다.
- 콘크리트의 극한변형률은 0.003이다.
- 콘크리트의 인장강도는 무시한다.
- 콘크리트의 압축응력 분포는 크기가 $0.85 f_{ck}$ 인 직사각형 분포로 가정할 수 있다.
- 콘크리트와 FRP 리바는 완전히 부착되어 있다.
- FRP 리바의 응력은 설계인장강도에 도달하기 전까지 변형률에 비례한다.

3. FRP 리바로 보강된 콘크리트 휨부재의 파괴모드

콘크리트 구조물의 설계시 주어진 휨모멘트에서 파괴형태를 압축 파괴 또는 인장파괴를 선택하여야 한다. 일반적으로 철근콘크리트 구조물은 큰 연성을 발생시키는 보강철근의 탄-소성 거동의 장점을 이용하여 인장파괴가 발생하도록 설계한다. 그러나 FRP 리바로 보강된 콘크리트의 경우 FRP 리바가 선형의 응력-변형률 거동을 함으로써 파괴모드, 에너지 흡수 및 기타 장단점을 고려하여 설계하여야 한다. 본 연구에서는 하이브리드 FRP 리바의 경우 보강철근과 같이 소성 변형구간을 가지고 있기 때문에 인장파괴를 발생시키기 위한 저보강설계를 실시하였으며 GFRP 리바의 경우는 압축파괴로 휨공시체를 설계하였다. FRP 리바로 보강된 콘크리트 구조물의 세가지 파괴 모드를 설명하면 다음과 같다.

가. 균형 파괴

FRP 리바로 보강된 콘크리트 구조물의 균형파괴조건은 콘크리트의 변형률과 FRP 리바의 변형률이 궁극적으로 한계 값에 도달하여 동시에 파괴되는 것이다. 실제적으로 균형파괴는 설계상 사용하기 힘들며 인장 및 압축파괴를 결정하기 위하여 기준점으로 사용된다. 균형파괴 조건은 다음과 같다.^{3,4,45)}

- 보강량(ρ)을 이용하여 결정하는 방법: FRP 리바의 재료특성을 이용하여 보강철근과 마찬가지로 식 11-4를 이용하여 결정한다.^{3,4,45)}

$$\rho_{b-b} = \frac{0.85\beta_1 f_{ck}}{f_f} \cdot \frac{0.003 E_f}{f_f + 0.003 E_f} \dots \dots \dots (11-4)$$

- 중립축의 깊이와 유효깊이의 비(c/d)로 결정하는 방법: FRP 리바와 콘크리트를 선형 응력-변형률 거동으로 가정하여 식 11-5로 결정한다.^{3,4,45)}

$$\left[\frac{c}{d} \right]_{b-b} = \frac{0.003}{0.003 + \frac{f_f}{E_f}} \dots \dots \dots (11-5)$$

나. 인장 파괴

FRP 리바로 보강된 콘크리트에서 리바의 파단은 급작스런 파괴를 발생시킨다. 철근콘크리트에서의 인장파괴 모드는 보강철근이 항복 후에도 보강철근의 거동 특성상 보강효과를 발휘하여 2차 압축파괴 및 보강철근의 파단 등이 발생하여 궁극적으로 파괴되는 경향을 갖지만 FRP 리바로 보강된 콘크리트의 경우 리바의 파단으로 발생하는 인장파괴모드 또는 압축파괴모드가 주로 발생한다.^{3,4,45)} 힘의 평형조건 및 선형변형률 변화를 고려하여 획득한 인장파괴 모드시 허용모멘트의 산정은 식 11-6 및 11-7에 의해서 결정한다.^{3,4,45)}

$$M_n = A_f f_f \left[d - \frac{a}{2} \right] \dots \dots \dots (11-6)$$

$$a = \left[\frac{A_f f_f}{0.85 f_{ck} b} \right] \dots \dots \dots (11-7)$$

다. 압축파괴

압축파괴모드는 인장파괴를 피할 수 있는 보강량에서 최소 보강량을 선택한다.^{3,4,45)} 나아가 압축파괴시의 최소 보강량은 $\rho_{b-b} / [l - (3\sigma)]$ 으로 여기서 σ 는 FRP 리바로 보강된 콘크리트 공시체의 압축파괴시 극한허용모멘트의 표준편차로 압축파괴를 발생시키기 위한 최소 보강비를 결정하기 위한 기초 자료로 사용된다. FRP 리바로 보강된 콘크리트 구조물은 균열이 발생한 부분에서 연성기준을 만족시키기 위한 최소 보강비를 만족시키도록 하여야 한다.^{3,4,45)} 압축파괴를 발생시키는 콘크리트 부재의 허용모멘트는 평형조건과 콘크리트의 파괴변형률에 대응하는 FRP 리바의 변형률을 이용하는 식 11-8과 11-9로 계산할 수 있다.^{3,4,45)}

$$M_n = 0.85 f_{ck} a b \left[d - \frac{a}{2} \right] \dots \dots \dots (11-8)$$

$$\left[\frac{0.85f_{ck}b}{A_f E_f \epsilon_{cu}} \right] a^2 + a - \beta_1 d = 0 \dots \dots \dots (11-9)$$

만약 식 11-8과 11-9에서 압축 보강을 고려하면 식 11-10 및 11-11을 사용할 수 있다.^{3,4,45)}

$$M_n = 0.85f_{ck}ab \left[d - \frac{a}{2} \right] + A_f' \epsilon_f' E_f' (d - d') \dots \dots \dots (11-10)$$

여기서, a 는 평형조건식에 의해서 식 11-11과 같이 쓸 수 있다.^{3,4,45)}

$$\left[0.85f_{ck}b \right] a^2 + \left[(0.003) \left[A_f' \epsilon_f' E_f' \right] \right] a - \left[(0.003\beta_1) \left[A_f' \epsilon_f' E_f' \right] \right] = 0 \dots \dots \dots (11-11)$$

4. 연성

철근콘크리트의 연성은 에너지 흡수능력으로 평가되며 철근콘크리트에서는 극한 처짐/항복처짐의 비 및 극한강도에서 곡률반경/항복강도에서 곡률반경의 비 등으로 나타낸다.^{3,4,45)} 이와 같은 정의는 주로 보강철근의 항복 후 변형경화 거동을 함에 따라 결정될 수 있다. 그러나 현재 FRP 리바로 보강된 콘크리트 공시체의 경우는 FRP 리바가 파괴까지 선형거동을 하기 때문에 철근콘크리트에서 사용하던 정의를 사용할 수 없다. 그러나 본 연구에서는 하이브리드 FRP 리바가 항복강도와 극한강도를 모두 가지는 보강철근과 같은 거동을 함으로써 동일하게 적용할 있다. 즉 하이브리드 FRP 리바로 보강된 콘크리트의 연성은 다음과 같이 정의할 수 있다.^{3,4,45)}

$$\text{처짐}(\Delta) \text{을 기본으로할 때 } \mu = \Delta_u / \Delta_y \dots \dots \dots (11-12)$$

$$\text{회전}(\theta) \text{을 기본으로할 때 } \mu = \theta_u / \theta_y \dots \dots \dots (11-13)$$

$$\text{곡률}(\phi) \text{을 기본으로할 때 } \mu = \phi_u / \phi_y \dots \dots \dots (11-14)$$

식 11-12에서 11-14의 u , y 는 극한과 항복조건에서의 값을 의미한다. 그러나 일반 FRP 리바로 보강된 콘크리트의 연성은 금속재료에서 적용하기 위하여 접근하였던 소성론을 이용하여 에너지 흡수능력으로 계산할 수 있다. 에너지를 기본으로 한 연성지수는 11-15식으로 표현할 수 있다.^{3,4,45)}

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} = \frac{1}{2} \left[\frac{E_{total}}{E_{elastic}} + 1 \right] \dots \dots \dots (11-15)$$

여기서, E_{total} = 하중재하중 하중-처짐 곡선 아래의 면적

$E_{elastic}$ = E_{total} - {하중을 재하한 후 하중을 제거하였을 때 발생하는 하중-처짐 곡선 아래의 면적} 이다.

탄성에너지($E_{elastic}$)가 0일 때는 FRP 리바로 보강된 콘크리트 공시체가 연성과 파괴를 발생시키는 경우로 FRP 리바가 과단되었을 때이며 이때 에너지는 11-15식을 적용하면 80%~90% 정도의 하중이 작용할 때이다.^{3,4,45)} FRP 리바로 보강된 콘크리트의 연성지수를 결정하기 위한 또 다른 접근은 허용 모멘트와 곡률을 이용하여 계산하는 방법이다. 모멘트 지수와 곡률지수는 콘크리트의 변형률이 0.001일 때 대응하는 모멘트 및 곡률과 최대 모멘트 및 곡률의 비로 표시하는 방법이다. 즉 연성지수는 식 11-16 또는 식 11-17로 나타낼 수 있다.^{3,4,45)}

$$\frac{M_u}{M_{0.001}} \dots \dots \dots (11-16)$$

$$\frac{\varphi_u}{\varphi_{0.001}} \dots \dots \dots (11-17)$$

식 11-16 및 11-17에서 M_u 및 φ_u 는 각각 극한모멘트, 극한 곡률반경 이며 $M_{0.001}$ 과 $\varphi_{0.001}$ 은 콘크리트의 변형률이 0.001일 때 모멘트와 곡률반경이다.^{3,4,45)} 콘크리트의 변형률 0.001은 압축상태에서 콘크리트가 선형 응력-변형률 거동을

하는 단계이다. 에너지흡수개념과 처짐 및 균열폭의 기준을 적절히 계산하면 일반 FRP 리바로 보강된 콘크리트의 공용연수의 개념에 쉽게 접근할 수 있다.

5. FRP 리바로 보강된 콘크리트 휨부재의 강도감소계수

일반 FRP 리바로 보강된 콘크리트는 두 재료 모두 극한 상태에서 급작스런 취성파괴거동(brittle failure)을 보이므로, FRP 리바로 보강된 콘크리트 부재의 강도감소계수는 부재의 충분한 예비강도(reserve strength)를 확보하기 위해 철근 콘크리트 부재보다 안전한 감소계수를 적용해야 한다. 일본의 경우 FRP 리바로 보강된 콘크리트 휨부재의 휨모멘트에 대한 강도감소계수로 1/1.3(0.769)사용하도록 권장하고 있다.^{3,4)}

ACI 440에서는 식 11-18과 같이 FRP 리바의 파단에 의한 파괴($\rho_f \leq \rho_{fb}$)와 콘크리트의 압축파쇄에 의한 파괴거동($\rho_f \geq 1.4\rho_{fb}$)을 구분하여 강도감소계수를 적용하였다. 또한 두 파괴거동 사이($\rho_{fb} \leq \rho_f < 1.4\rho_{fb}$)에서 강도감소계수가 선형으로 변하는 선형변형구간(linear transition zone)을 적용하였으며, 이 선형변환구간 내에서는 계산에 의해 강도감소계수를 결정하도록 하고 있다.^{3,4)}

$$\begin{aligned} \phi &= 0.50 && \text{for } \rho_f \leq \rho_{fb} \\ \phi &= \frac{\rho_f}{2\rho_{fb}} && \text{for } \rho_{fb} \leq \rho_f < 1.4\rho_{fb} \dots \dots \dots (11-18) \\ \phi &= 0.70 && \text{for } \rho_f \geq 1.4\rho_{fb} \end{aligned}$$

본 연구에서는 하이브리드 FRP 리바가 기존 FRP 리바의 취성적 문제를 해결하고 보강철근과 같은 연성적인 거동을 하도록 하는 목적으로 개발되어 인장시험 결과 3% 이상의 변형률과 소성변형률을 확보할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 하이브리드 FRP 리바를 사용한 콘크리트 공시체의 설계에는 강도감소계수를

보강철근과 마찬가지로 0.85를 적용하였고 GFRP 리바로 보강된 콘크리트 공시체에는 ACI 440의 기준을 이용하여 0.70의 강도감소계수를 적용하였다.

6. 처짐

철근콘크리트 휨부재의 처짐에 대한 제한은 보통 부재의 최소두께를 규정함으로써 제한하고 있다.^{3,4,45)} 그러나, FRP 리바로 보강된 콘크리트 휨부재의 처짐은 탄성이론을 적용하여 계산하며 이를 단면설계과정에 반영하고 있다. 부재의 총처짐은 탄성처짐(elastic deflection)과 장기처짐(long-term deflection)으로 구분한다.^{3,4,45)} 장기처짐은 콘크리트의 크리프(creep) 및 건조수축(drying shrinkage) 등과 관련되며, 본 연구에서는 탄성처짐에 대해서만 이론적 해석결과와 실험결과를 비교·분석하였다. FRP 리바로 보강된 콘크리트 휨부재의 탄성처짐은 부재의 휨강성과 밀접한 관계가 있으며, 콘크리트를 등방성으로 가정하였으므로 작용하중의 크기에 따른 부재의 단면 2차모멘트의 변화에 주로 영향을 받게 된다.^{3,4,45)} 철근콘크리트보와 마찬가지로 균열이 발생하기전 FRP 리바로 보강된 콘크리트 보의 단면 2차모멘트는 총 단면에 대한 단면 2차모멘트($I_g = bh^3/12$)와 같다. 작용하중에 의한 휨모멘트(M_a)가 균열모멘트(M_{cr})를 초과하면 콘크리트의 인장부에 균열이 발생하면서 부재의 강성이 감소되는데, 이 때의 단면 2차모멘트는 균열 단면 2차모멘트(I_{cr})를 기준으로 산출하게 되며 I_{cr} 은 식 11-19와 같다. 식 11-19에서 n_f 는 FRP 리바와 콘크리트의 탄성계수비이고, k 는 식 11-20를 사용하여 계산한다.^{3,4,45)}

$$I_{cr} = \frac{bd^3}{3} k^3 + n_f A_f d^2 (1-k)^2 \dots \dots \dots (11-19)$$

$$k = -\rho_f m_f + \sqrt{(\rho_f m_f)^2 + 2\rho_f m_f} \dots \dots \dots (11-20)$$

FRP 리바로 보강된 콘크리트 휨부재의 휨강성은 철근콘크리트 휨부재와 마찬가지로 작용하중이 증가함에 따라 균열이 발생하기 전의 휨강성과 균열이 발생

한 후의 휨강성 사이에 존재한다. FRP 리바로 보강된 콘크리트의 사용성에 대한 기존의 연구결과를 살펴보면 철근콘크리트 휨부재의 사용성 검토에 사용되는 Branson의 유효단면 2차모멘트를 FRP 리바로 보강된 콘크리트 휨부재에 적용할 경우 단면의 능력이 과대 평가되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 FRP 리바의 탄성계수가 철근에 비해 작고, 부착강도가 상대적으로 작기 때문이므로 ACI 440에서는 철근콘크리트 휨부재에 적용하던 Branson이 유도한 유효단면 2차모멘트 식을 수정하여 식 11-21을 제안하였다.^{3,4,45)}

$$I_e = \alpha I_{cr} + \left(\frac{I_g}{\beta} - \alpha I_{cr} \right) \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \leq I_g \dots \dots \dots (11-21)$$

식 11-20에서 α 와 β 는 FRP 리바가 철근에 비해 강성이 작은 영향을 반영하는 감소계수로서 실험에 의하여 결정된다. ACI 440에서는 이러한 연구결과를 리바탕으로 식 11-22와 같은 FRP 리바로 보강된 콘크리트 휨부재의 유효단면 2차모멘트 식을 제안하였으며 이때 β_d 는 식 9-23과 같다.^{3,4,45)}

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right) \beta_d I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \leq I_g \dots \dots \dots (11-22)$$

$$\beta_d = \alpha_b \left[\frac{E_f}{E_s} + 1 \right] \dots \dots \dots (11-23)$$

식 9-23에서 E_s 는 철근의 탄성계수이며, α_b 는 콘크리트와 FRP 리바의 부착력과 관계된 계수이다. 여기서, 식 11-23에서 E_f 대신에 E_s 를 대입하면 β_d 는 1이 되므로 식 11-23는 기존의 Branson의 식과 같게된다.^{3,4,45)}

7. 균열

FRP 리바의 최대 장점 중의 하나는 부식에 대한 저항성이 우수하다는 것이다. 철근콘크리트 부재에서 철근의 부식이 콘크리트의 균열폭을 제한하는 주 요인이

라 할 때 FRP 리바로 보강된 콘크리트 부재는 철근콘크리트 부재에 비하여 허용균열폭에 대한 규정을 완화 시킬 수 있다.^{3,4,45)} FRP 리바로 보강된 콘크리트 부재의 허용균열 폭에 관한 규정은 일본의 경우 0.5mm 이며 캐나다의 경우에는 외부환경에 노출된 경우 일본규정과 동일하게 0.5mm 를 적용하나 실내의 경우에는 0.7mm 로 규정하고 있다.^{3,4,45)} Faza와 GangaRao는 FRP 리바로 보강된 콘크리트 부재의 균열폭을 예측하기 위한 계산식을 Gergely-Lutz에 의해 철근콘크리트 부재를 대상으로 개발된 균열폭 계산식을 수정하여 식 11-24와 같이 제안하였다.^{3,4,45)}

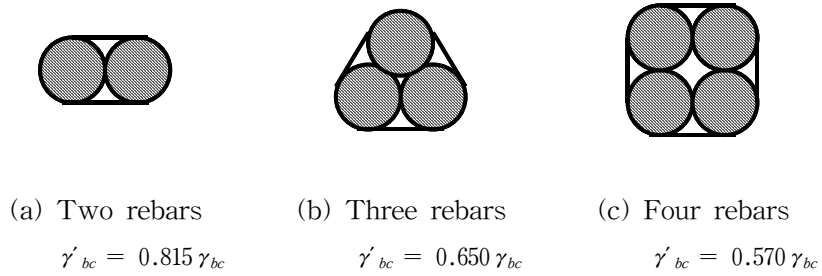
$$w = 0.076\beta \frac{E_s}{E_f} f_f^3 \sqrt{d_c A} \dots \dots \dots (11-24)$$

식 9-23에서 E_s 는 철근의 탄성계수이고, A 는 콘크리트의 유효인장면적을 리바의 수로 나눈 값이며, d_c 는 중립축으로부터 콘크리트의 인장연단까지의 거리에 대한 중립축으로부터 리바의 도심까지의 거리의 비이다.^{3,4,45)} ACI 440에서는 식 11-24에 FRP 리바와 콘크리트의 부착강도의 영향을 고려한 보정계수를 적용하여 11-25식 같이 FRP 리바의 균열폭 계산식을 제안하였다.^{3,4,45)}

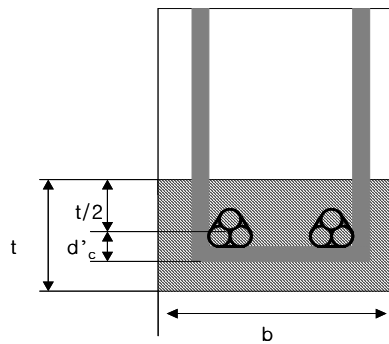
$$w = \frac{2.2}{E_f} \beta k_b f_f^3 \sqrt{d_c A} \dots \dots \dots (11-25)$$

식 9-24에서 f_f 와 E_f 의 단위는 MPa이며, d_c 의 단위는 mm, A 의 단위는 mm²이다. k_b 는 FRP 리바와 콘크리트의 부착정도를 반영한 계수로서, FRP 리바의 종류에 따라 달라질 수 있다.^{3,4,45)} 또한 다발 FRP 리바의 균열폭과의 관계는 한계감소계수(perimetric reduction factor)를 사용하여 균열과의 관계를 유도할 수 있다.¹³⁵⁾ A 를 A' 으로 변환시켜 식 11-25에 적용하여 계산할 수 있다. 여기서, $A' = \frac{bt}{r'_{bc}}$ 이며 r'_{bc} 는 동일한 직경의 FRP 리바를 사용할 경우 사용된 리바의 수이며 사용된 FRP 리바의 직경이 다르다면 FRP 리바의 총면적을 가장 큰 직

경의 FRP 리바의 단면적으로 나눈 값을 의미한다. 다만 FRP 리바의 종류에 따른 한계감소계수는 Fig. 11-1과 같다.



(a) Perimetric factors



(b) Section geometry of the concrete area in the tension

Fig. 11-1 Perimetric reduction factors for beams with bundled rebars:

(a)perimetric factors, (b) section geometry of the concrete area in the tension¹⁸³⁾

제 3절 하중-처짐 예측 모델

철근으로 보강된 콘크리트 공시체의 하중-처짐 거동을 예측하기 위하여 이차돈 및 Namman, A가 Couple Method를 이용하여 제시한 예측모델을 이용하였다.^{1,2)}

제시한 모델은 보의 길이 방향으로 임의 단면들에 대하여 단면에 작용하는 축력의 합이 영이 되고 단면에 작용하는 모멘트와 같은 내력을 갖는 단면 변형률을 찾음으로서 이때의 하중과 처짐을 산정하는 방법이다.^{1,2)} 제시한 모델에 대한 이론을 정리하면 다음과 같다.

1. 단면 내력 산정^{1,2)}

Fig. 11-2에 나타난 리바와 같이 임의 블록 i 에 대하여 이 블록에 작용하는 축력과 모멘트를 식 11-26과 같이 산정할 수 있다.

$$F_{i,j}^k = b_i \cdot \left(\frac{h_i}{\epsilon_{i,j}^k - \epsilon_{i-1,j}^k} \right) \cdot \int_{\epsilon_{i-1,j}^k}^{\epsilon_{i,j}^k} \sigma_{m(i)} d\epsilon \dots \dots \dots (11-26)$$

여기서,

$F_{i,j}^k$ = 하중단계 k 에 대한 j 단면에서의 i 번째 블록의 축력

$\epsilon_{i,j}^k$ = 하중단계 k 에 대한 j 단면에서의 i 번째 블록의 최상단 변형률

$\epsilon_{i-1,j}^k$ = 하중단계 k 에 대한 j 단면에서의 i 번째 블록의 최하단 변형률

$\sigma_{m(i)}$ = i 번째 블록의 재료에 대한 응력 이다.

Fig. 11-2에서 블록 i 는 보 길이에 따라 구분된 단면 중 j 번째 단면에 해당되며 k 단계의 하중을 받고있는 상태를 나타낸다. 본 연구에서는 인장변형률이나 응력에 대하여는 (+)부호를 적용하였으며 압축변형률이나 응력에 대하여는 (-)부호를 적용하였다. 만일에 주어진 단면의 최상단 및 최하단의 변형률이 주어지게 되면 선형으로 변화하는 변형률의 특성을 이용하여 동일 단면내 임의의 높이(y)에 위치한 단면의 변형률(ϵ)을 식 11-27과 같이 산정할 수 있다.

$$\epsilon = \frac{(\epsilon_{NDB,j}^{t,k} - \epsilon_{1,j}^{b,k})}{(y_{NDB} - y_0)} (y - y_0) \dots \dots \dots (11-27)$$

여기서,

$\epsilon =$ 단면의 변형률

$\epsilon_{NDB,j}^{t,k} =$ 하중단계 k에 대한 j 단면에서의 최상단 변형률

$\epsilon_{1,j}^{b,k} =$ 하중단계 k에 대한 j 단면에서의 최하단 변형률

$y_{NDB} =$ 단면의 최상단 y 좌표

$y_0 =$ 단면의 최하단 y 좌표

$y =$ y 좌표

$NDB =$ 단면에서의 각기 다른 블록의 총 개수 이다.

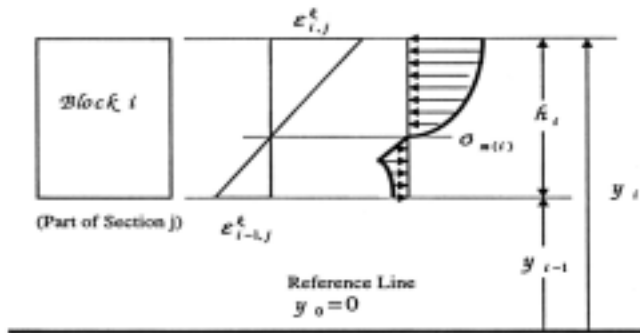


Fig. 11-2 Stress and strain of I block^{1,2)}

보 길이를 따라 구분되어진 모든 단면($j=0,1,2, \dots, N$)에서 임의 단면 j 에서의 내력의 합은 식 11-28과 같은 평형조건을 만족하여야 한다.

$$F_j^k = \sum_{i=1}^{NDB} F_{i,j}^k = 0, (j=0,1,2, \dots, N) \dots \dots \dots (11-28)$$

여기서,

$F_j^k =$ 하중단계 k에 대한 j 단면의 각 블록 I에서의 축력의 합

$F_{i,j}^k =$ 하중단계 k에 대한 j 단면의 I 번째 블록의 축력 이다.

Couple method에서는 주어진 단면의 최하단 변형률에 대하여 식 11-28의 조건을 만족하는 단면에 최상단 변형률을 찾고자 하였다.

2. 단면 모멘트^{1,2)}

만일 k 단계 하중에서 보길이를 따라 나누어진 N 개의 단면 중 j 번째 단면에서 최상단 변형률이 결정되면 이 단면에서의 휨저항 모멘트를 식 11-29식과 같이 산정할 수 있다.

$$M_j^k = \sum_{i=1}^{NDB} M_{i,j}^k \dots \dots \dots (11-29)$$

여기서,

M_j^k = 하중단계 k 에 대한 j 단면에서의 휨저항 모멘트

$$M_j^k = -\alpha_{i,j}^k \cdot \left[\int_{\epsilon_{i-1,j}^k}^{\epsilon_{i,j}^k} \sigma_{m(i)} \cdot \epsilon \cdot d\epsilon + \beta_{i,j}^k \int_{\epsilon_{i-1,j}^k}^{\epsilon_{i,j}^k} \sigma_{m(i)} \cdot d\epsilon \right]$$

= j 단면에서의 I 번째 블록 휨 모멘트

$$\alpha_{i,j}^k = \frac{b_i \cdot h_i^2}{(\epsilon_{i,j}^k - \epsilon_{i-1,j}^k)^2}$$

$$\beta_{i,j}^k = \frac{y_{i-1} \cdot \epsilon_{i,j}^k - y_i \cdot \epsilon_{i-1,j}^k}{h_i}$$

$\epsilon_{i-1,j}^k$ = 하중단계 k 에 대한 j 단면에서의 y_{i-1} 의 변형률

= 하중단계 k 에 대한 j 단면에서의 블록 I 의 최하단 변형률

$\epsilon_{i,j}^k$ = 하중단계 k 에 대한 j 단면에서의 y_i 의 변형률

= 하중단계 k 에 대한 j 단면에서의 블록 I 의 최상단 변형률

y_i = I 번째 블록의 최상단 y 좌표

y_{i-1} = 휨 저항선으로부터 측정된 최하단에서의 I 번째 블록의 높이

$h_i = y_i - y_{i-1} = I$ 번째 블록의 높이

$\sigma_{m(i)} = I$ 번째 블록과 일치하는 응력 이다.

k 번째 하중 단계초기에 $k-1$ 번째 하중 단계로부터 수렴한 최하단 변형률을 미소크기 만큼 증가시킨다. 이 증가된 최하단 변형률에 대하여 보 중앙에서 최상단 변형률의 크기를 반복적인 수치해석 방법을 이용하여 산정하였다. 수렴한 최상단 변형률과 미리 주어진 최하단 변형률을 이용하여 보 중앙에서의 모멘트 ($M_N^K = M_{j=N}^K$)를 산정한다. 이를 이용하여 보길이 방향의 모멘트 크기를 정역학적 조건으로부터 산정할 수 있다.

3. 처짐 계산^{1,2)}

보 중앙 처짐 (δ_c)은 Fig. 11-3과 같이 분할된 보 경간을 따라 Simpson's rule과 모멘트 면적법을 이용하여 식 11-30으로 산정하였다.

$$\begin{aligned} \delta_N^k &= \int_0^L \Phi^k \cdot \chi dx \dots \dots \dots (11-30) \\ &= \int_{\chi_0}^{\chi_N} \Phi^k \cdot \chi dx \\ &= \int_{\chi_0}^{\chi_{Nc}} \Phi \cdot \chi dx + \int_{\chi_{Nc}}^{\chi_N} \Phi^k \cdot \chi dx \\ &= \Delta \frac{L_0}{3} \left(\Phi_0^k \cdot \chi_0 + 2 \sum_{j=1}^{(Nc-2)/2} \Phi_{2j}^k \cdot \chi_{2j} + 4 \sum_{j=0}^{(Nc-2)/2} \Phi_{2j+1}^k \cdot \chi_{2j+1} \right) \\ &\quad + \frac{\Delta L_i}{3} \left(\Phi_{Nc}^k \cdot \chi_{Nc} + \Phi_N^k \cdot \chi_N + 2 \sum_{j=1}^{(N-Nc-2)/2} \Phi_{Nc+2j}^k \cdot \chi_{nc+2j} \right) \\ &\quad + 4 \sum_{j=Nc}^{(N-Nc-2)/2} \Phi_{Nc+2j+1}^k \cdot \chi_{Nc+2j+1} \end{aligned}$$

여기서,

$$\Phi_j^k = \text{하중단계 } k \text{에 대한 } j \text{ 단면의 곡률} = \left(\frac{\epsilon_{1,j}^{b,k} - \epsilon_{NDB,j}^{t,k}}{h} \right)$$

$h =$ 보의 높이

x_j = 지지점에서부터 j 단면까지의 거리

NC = 내부와 외부 부분 사이의 경계에서의 단면 갯수

N = 보 중앙의 단면 개수 이다.

ΔL_i and ΔL_0 = 내부와 외부 부분에서 가정한 균열 간격 (또는 인접 단면 사이의 거리)

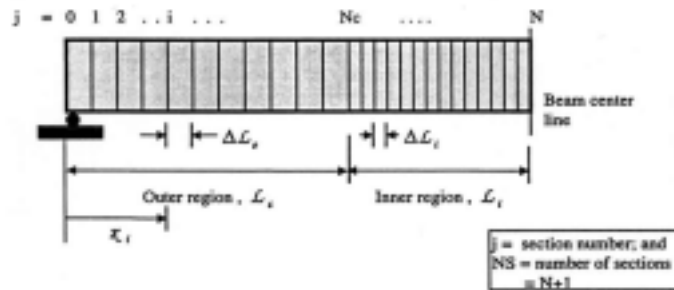


Fig. 11-3 Dividing of section^{1,2)}

제 4절 시험방법

1. 시험 공시체의 설계 및 제작

시험체는 ACI 318 및 ACI 440을 이용하여 설계하였다. 시험체의 단면치수는 150mm×150mm로 하였고 시험체의 길이는 550mm로 하며 시험체의 순길이는 450mm로 하였다. 휨보강 및 전단보강 용 FRP 리바는 동일한 하계 사용하였다. 또한 상부 및 하부에 동일한 치수의 FRP 리바 설계를 실시하여, 전단보강을 위한 FRP 리바의 설치를 쉽게 하였으며, 설계에 사용된 FRP 리바의 특성은 Table 11-1과 같으며 시험체의 형상은 Fig. 11-4와 같다.

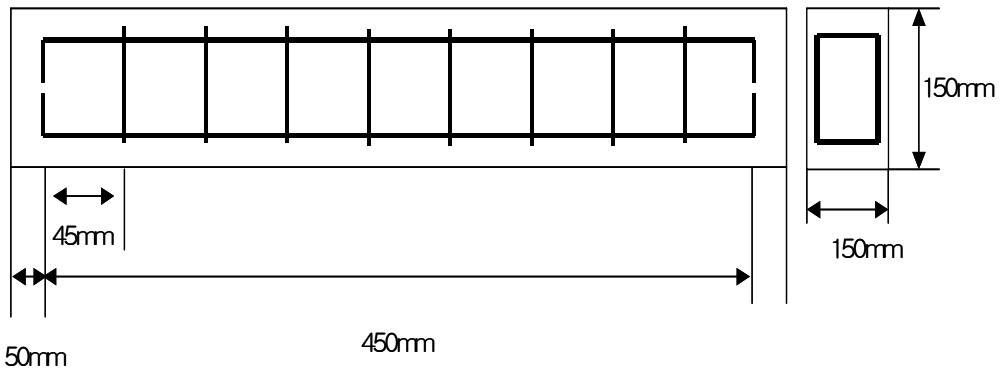


Fig. 11-4 Reinforcing details of concrete specimen

Table 11-1 Reinforcement properties of concrete specimens

	CFRP (ISO)	GFRP (Aslan)	AFRP (Technora)	CFRP (D)	GFRP (D)	Hybrid FRP(A)	Hybrid FRP(B)	Hybrid FRP(C)
No. of flexural reinforcement	2	4	2	2	4	9	12	4
No. of shear reinforcement	10	10	10	10	10	10	10	10
Diameter(mm)	9.4	9.4	7.4	9	9.4	4.0	4.0	8.0
Yield strength(MPa)	-	-	-	-	-	500.0	300.0	300.0
Ultimate strength(MPa)	2,100	842.5	1,750	2,120	1,200	560.0	300.0	360.0
Yield strain(%)	-	-	-	-	-	1.20	1.34	1.05
Ultimate strain(%)	1.7	1.96	3	1.72	2.00	3.70	2.62	3.50
Elastic modulus(MPa)	110,643	42,982	74,332	110,876	50,002	61,321.7	42,176.9	41,618.0

2. 시험공시체의 제작

휨시험 공시체의 제작을 위하여 사용된 배합은 11-2와 같다.

Table 11-2 Mix proportion

W/C (%)	S/a (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	SP (kg/m ³)
55	37	174	316	856	931	3.792

3. 하중재하 및 측정방법

하중재하는 4점 재하방법을 사용하였으며 시험체의 단부에는 철제 롤러를 설치하여 수평방향 변위와 회전에 대한 구속이 없는 단순지지가 되도록 하였다. 하중재하속도는 1.0mm/min으로 하였으며 시험결과의 측정방법은 시험체의 휨 성능 평가를 위하여 각 하중단계별로 하중-중앙점 처짐량을 LVDT를 이용하여 측정하였다. 실험장치 구성도는 Fig. 11-5와 같다.

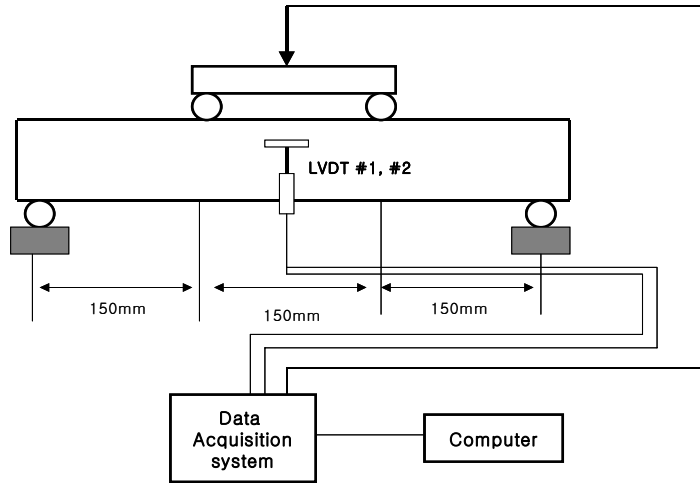


Fig. 11-5 Four-point bending test set-up

제 5절 실험결과

1. 압축강도

휨거동 측정을 위하여 사용된 콘크리트의 압축강도는 Table 11-3과 같이 30.6MPa의 강도를 나타내었다.

Table 11-3 Compressive strength of concrete

Specimens No.	Compressive strength(MPa)
1	31.4
2	31.0
3	29.7
4	29.1
5	31.7
Mean	30.6

2. 하중-처짐 거동

일반 및 하이브리드 FRP 리바의 하중-처짐 거동을 살펴보면 하이브리드 FRP 리바는 일반 FRP 리바가 취성적 파괴형태를 보여주는 것과 달리 연성적인 거동을 보여줌을 알 수 있다(Fig. 11-6). 일반 FRP 리바의 경우 초기 하중이 증가하면서 처짐 역시 직선적으로 증가하다가 콘크리트의 균열이 발생하면서 그 기울기가 작아지지만 하중-처짐 관계는 거의 선형적으로 변하는 것을 알 수 있었다. 이것은 콘크리트의 균열이 발생하기 전까지는 콘크리트가 하중에 저항하지만 콘크리트에 균열이 생기면 FRP 리바 이 하중에 저항하기 때문에 하중-처짐 곡선의 기울기의 변화가 생긴 것이다. 또한 일반 FRP 리바로 보강된 콘크리트 공시체의 최종파괴는 취성의 FRP 리바가 파괴되는 취성파괴의 형태를 보여주었다. 그러나 하이브리드 FRP 리바로 보강된 콘크리트 공시체의 거동은 일반 FRP 리바로 보강된 콘크리트와 다른 형태의 거동을 보여주었다. 하이브리드 FRP 리바(A)로 보강된 콘크리트는 균열이 발생하기 전까지는 일반 FRP 리바로 보강된 콘크리트와 동일한 거동을 보여주었으나 콘크리트의 균열이 발생한 후 기울기의 감소가 발생하고 그 이후 어느 정도 까지 처짐의 증가에 따른 하중

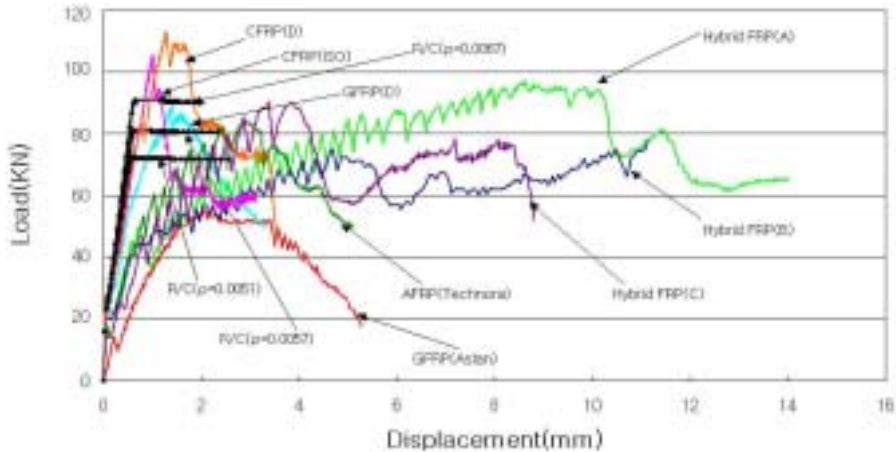


Fig. 11-6 Load-deflection behavior of FRP rebar reinforced concrete specimens

의 증가가 발생하다가 또 한번의 기울기의 감소가 발생한 후 처짐과 하중이 지속적으로 증가하는 경향을 보여주었다. 첫 번째 기울기의 감소는 콘크리트의 균열이 발생한 후 하이브리드 FRP 리바 만이 인장하중에 저항하기 때문에 기울기가 감소한 것이며 두 번째의 기울기 감소는 하이브리드 FRP 리바(A)의 코어 FRP 리바로 사용된 탄소섬유의 파괴에 따른 기울기 변화이다. 또한 하이브리드 FRP 리바로 보강된 콘크리트의 최종파괴는 슬리브를 구성하고 있는 아라미드섬유가 지속적으로 인장하중에 저항하다가 최종적으로 파괴됨으로써 파괴되었다. 이것은 일반 FRP 리바로 보강된 콘크리트에서 얻을 수 없는 연성확보의 개념으로 슬리브를 구성하는 아라미드섬유가 하중에 지속적으로 저항하면서 발생하는 처짐 및 하중의 증가가 하이브리드 FRP 리바로 보강된 콘크리트의 충분한 연성을 확보하여 구조물의 안전성을 증가시킬 수 있는 것이다. 하이브리드 FRP 리바(B)로 보강된 콘크리트의 하중-처짐 거동은 하이브리드 FRP 리바(B)가 역학적 특성 실험에서 3%의 변형률을 만족하지 못하는 거동을 보여주었음에도 불구하고 하이브리드 FRP 리바(A)와 비교해서는 작지만 어느 정도의 연성을 확보하는 것을 알 수 있었다. 하이브리드 FRP 리바(B)로 보강된 콘크리트 공시체의 하중-처짐 거동을 살펴보면 하이브리드 FRP 리바(A)로 보강된 콘크리트와 거의 동일한 거동을 보여주나 코어 FRP 리바를 구성하는 탄소섬유가 파괴된 후 하중의 감소가 크게 발생한다는 것이다. 이는 하이브리드 FRP 리바(B)의 인장시험시에 코어 FRP 리바가 파괴된 후 인장강도의 감소가 크게 발생하였던 것과 마찬가지로 하이브리드 FRP 리바(B)의 특성에 따른 것이다. 하이브리드 FRP 리바(C)로 보강된 콘크리트 공시체의 하중-처짐 거동은 하이브리드 FRP 리바(A)와 (C)의 거동 특성을 복합적으로 고려할 수 있는 거동을 보여주었다. 즉 코어 FRP 리바를 구성하는 탄소섬유가 파괴된 후 하중의 감소가 하이브리드 FRP 리바(A) 보다 크고 하이브리드 FRP 리바(B) 보다 작은 경향이 보강된 콘크리트 공시체에서도 볼 수 있었다. 이와 같은 결과는 유리섬유에 의한 하중 지지력의 감소를 슬리브의 최종 외곽을 구성하는 아라미드섬유가 완화시켰기 때문이다. 또한 슬리브를 최종적으로 구성하는 아라미드섬유의 변형률 특성으로 인해 파괴시 처짐 역시 하이브리드 FRP 리바(A)와 마찬가지로 매우 크게 발생함을 알 수 있었다.

또한 본 연구에서는 철근으로 보강된 콘크리트 공시체와의 비교를 위해서 이차돈과 Namman, Antoine. E 가 개발한 Nonlinear Flexural Analysis of Structural Concrete Beam 프로그램을 이용하여 하이브리드 FRP 리바에서 사용하였던 보강비를 적용하여 보강비에 따른 하중-처짐 거동을 예측하였다. 이때 철근의 항복강도와 하이브리드 FRP 리바의 항복강도가 다르기 때문에 본 연구에서는 이를 보정하기 위하여 하이브리드 FRP 리바의 항복강도를 보강철근의 항복강도로 나누어 준(f_{FRP} / f_{steel}) 다음 그 값을 하이브리드 FRP 리바의 보강비에 적용하여 궁극적으로 보강철근의 보강비($(f_{FRP} / f_{steel}) \times \rho_{FRP}$)를 결정하였다. 이때 보강철근의 항복강도는 모두 400MPa를 적용하였다. 예측결과와 시험결과를 비교해 보면 하이브리드 FRP 리바(A)와 동일한 보강비($\rho = 0.0051$)를 사용한 철근콘크리트 공시체의 경우 하이브리드 FRP 리바가 항복강도가 높아 높은 하중에서 항복이 발생하였고 처짐의 경우 역시 많은 연성을 보이며 파괴되는 경향을 보여주었다. 또한 하이브리드 FRP 리바(B)로 보강된 콘크리트 공시체의 경우 동일한 보강비($\rho = 0.0051$)를 적용하였을 때 보다 항복강도가 예측 값보다 높게 나타났으며 처짐 역시 많은 연성을 보이며 파괴되는 경향을 보여주었다. 특히 연성적인 측면에서는 하이브리드 FRP 리바(B)로 보강된 콘크리트 공시체가 매우 우수한 결과를 보여주었다. 하이브리드 FRP 리바(C)로 보강된 콘크리트 공시체와 동일한 보강비($\rho = 0.0067$)를 사용한 철근콘크리트 공시체의 하중-처짐관계는 하이브리드 FRP 리바(C)로 보강된 콘크리트 공시체와 비교하여 하중은 약간 높게 나타났다. 그러나 연성적인 측면에서는 하이브리드 FRP 리바(C)로 보강된 콘크리트가 매우 우수한 결과를 나타내었다. 또한 예측 결과 철근으로 보강된 콘크리트 공시체와의 하중-처짐 관계를 비교해 보면 철근으로 보강된 콘크리트 공시체의 경우 콘크리트에 균열이 발생한 후 곡선의 기울기의 감소가 거의 없이 높은 강성을 가지며 증가함으로써 급격히 기울기가 감소하는 하이브리드 FRP 리바과는 상이한 결과를 보여주었다. 그러나 전체적으로 연성적인 측면에서는 하이브리드 FRP 리바로 보강한 콘크리트 공시체가 상당한 연성의 증가를 기대할 수 있다.

3. 극한하중 및 연성

일반 및 하이브리드 FRP 리바로 보강된 콘크리트의 설계 극한 하중과 실험결과와의 비를 살펴보면 일반 FRP 리바로 보강된 콘크리트 공시체는 모두 1.0이하를 나타냈다. 그러나 하이브리드 FRP 리바(A), (B) 및 (C)로 보강된 콘크리트에서 각각 1.06, 1.21 및 1.03으로 나타나 설계된 극한 하중 보다 높게 나타났다(Table 11-4). 따라서 하이브리드 리바는 충분한 안전성을 확보할 수 있다고 판단되며 일반 FRP 리바로 보강된 콘크리트의 경우 안전성을 확보하기 위하여 강도감소계수를 더 낮게 적용하거나 본 휨시험 공시체에서는 적용하지 않았지만 환경영향계수를 적용하여 설계하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다. 하이브리드 FRP 리바는 기존 FRP 리바의 취성적인 단점을 해결하기 위하여 개발된 것으로서 콘크리트 구조물에 보강재로 사용될 경우 연성적인 측면에서 매우 우수한 결과를 얻을 수 있다. 본 연구에서 사용된 일반 FRP 리바로 보강된 콘크리트의 취성거동을 하기 때문에 최대 하중 및 최대 처짐과 항복 하중 및 항복 처짐이 같아 본 연구에서는 항복하중 및 항복 처짐으로 간주하여 설명하였다. 하이브리드 FRP 리바로 보강된 콘크리트는 경우 일반 FRP 리바로 보강된 콘크리트와 달리 항복과 파괴점이 다르기 때문에 항복 하중과 항복 처짐 및 최대 하중 및 최대 처짐이 존재하였다. 하이브리드 FRP 리바로 보강된 콘크리트 공시체의 최대 하중은 항복 하중과의 비로 나타내면 하이브리드 FRP 리바(A), (B) 및 (C)로 보강된 콘크리트에서 각각 1.57, 1.39 및 1.42로서 항복 하중보다 증가하는 결과를 나타내었으며 최대 처짐은 항복 처짐과의 비로 나타내면 각각 12.85, 12.13 및 14.21배로 증가하였다(Table 11-5). 따라서 하이브리드 FRP 리바로 보강된 콘크리트는 보강철근과 마찬가지로 항복 및 파괴점을 모두 가지는 동시에 하이브리드 FRP 리바의 항복 후 파괴 전까지 충분한 연성을 확보할 수 있어 기존 일반 FRP 리바로 보강된 콘크리트 구조물에서 얻을 수 없었던 충분한 안전성을 확보할 수 있다고 판단된다.

Table 11-4 Ultimate load of FRP rebar reinforced concrete specimens

	Load (KN)		Experiment/theory
	Theory	Experiment	
CFRP (ISO)	134.40	105.52	0.79
GFRP (Aslan)	113.3	97.31	0.86
AFRP (Technora)	107.73	76.89	0.72
CFRP (D)	136.45	108.43	0.81
GFRP (D)	102.53	82.45	0.81
Hybrid (A)	77.43	84.24	1.06
Hybrid (B)	62.80	76.08	1.21
Hybrid (C)	74.20	76.59	1.03

Table 11-5 Yielding load and deflection of FRP rebar reinforced concrete specimens

	Yielding		Ultimate		Yielding/ultimate	
	Deflection (mm)	Load (KN)	Deflection (mm)	Load (KN)	Deflection	Load
CFRP (ISO)	-	-	1.01	105.52	-	-
GFRP (Aslan)	-	-	2.51	97.31	-	-
AFRP (Technora)	-	-	3.56	76.89	-	-
CFRP (D)	-	-	1.10	108.43	-	-
GFRP (D)	-	-	2.94	82.45	-	-
Hybrid (A)	0.81	53.64	10.41	84.24	12.85	1.57
Hybrid (B)	0.67	54.71	8.13	76.08	12.13	1.39
Hybrid (C)	0.71	53.78	10.09	76.59	14.21	1.42

4. 공칭휨모멘트, 설계휨모멘트 및 파괴모드

Table 11-6은 하이브리드 FRP 리바로 보강된 콘크리트의 이론적 파괴모드, 공칭휨강도 및 설계휨강도를 실험결과와 비교하여 나타낸 것이다. 일반 FRP 리바로 보강된 콘크리트의 이론적으로 예측한 파괴모드는 콘크리트의 압축파쇄에 의한 것이지만 실제로는 전단균열이 발생하여 압축부까지 연결되다가 갑작스런 파괴를 일으켰다. 하이브리드 FRP 리바 (A), (B) 및 (C)로 보강된 콘크리트 공시체의 이론적으로 예측된 파괴모드는 모두 하이브리드 FRP 리바가 항복한 후 지속적으로 하중에 저항하다가 궁극적으로 파괴되는 저보강 설계가 이루어 졌으나 실제적인 파괴는 전단균열이 발생하여 압축부까지 성장하여 궁극적으로 파괴가 발생하였다. 일반적으로 FRP 리바로 보강된 콘크리트의 경우 전단에 취약한 것으로 알려져 왔다. 본 연구에서도 이와 같은 결과가 나타난 것으로 전단파괴를 방지하기 위해서는 충분한 전단보강이 이루어져야 할 것으로 판단된다. 또한 이론적으로 계산한 공칭휨모멘트에 대한 실험에서의 최대 휨모멘트비는 일반 FRP 리바로 보강된 콘크리트에서 모두 1.0이하를 나타내었지만 이론적으로 계산한 설계휨모멘트에 대한 실험에서의 최대휨모멘트 비는 모두 1.0보다 약간 우수한 값을 나타냈다. 또한 하이브리드 FRP 리바(A), (B) 및 (C)로 보강된 콘크리트 공시체의 이론적으로 예측된 공칭휨강도와 실험에서의 최대 휨모멘트의 비는 각각 1.09, 1.21 및 1.03이었으며 이론적으로 계산한 설계 휨강도와 실험에서의 최대휨모멘트의 비는 각각 1.28, 1.42 및 1.21이었다. 실험결과 일반 및 하이브리드 FRP 리바로 보강된 콘크리트의 경우 실제 최대휨모멘트가 설계휨모멘트 보다 크게 나타나 충분한 안전성을 확보할 수 있을 것이라 판단된다.

Table 11-6 Failure mode of FRP rebar reinforced concrete specimens

	Failure mode		ρ_f/ρ_{fb}	ϕ	Moment capacity(N-m)			$M_{EXP.}/M_n$	$M_{EXP.}/M_d$
	Theory	EXP.			M_n	M_d	$M_{EXP.}$		
CFRP (ISO)	C	FS	5.14	0.7	15,133.7	10,593.6	11,871.0	0.78	1.12
GFRP (Aslan)	C	FS	1.797	0.7	12,142.2	8,499.6	10,947.3	0.90	1.28
AFRP (Technora)	C	FS	1.537	0.7	12,133.0	8,493.1	8,650.1	0.71	1.02
CFRP (D)	C	FS	4.49	0.7	15,364.0	10,754.8	12,198.3	0.79	1.13
GFRP (D)	C	FS	1.862	0.7	11,548.2	8,038.7	9,275.6	0.80	1.15
Hybrid (A)	L	FS	0.578	0.85	5,807.8	4,936.6	6,318.0	1.09	1.28
Hybrid (B)	L	FS	0.504	0.85	4,711.7	4,004.9	5,706.0	1.21	1.42
Hybrid (C)	L	FS	0.555	0.85	5,562.9	4,728.5	5,744.3	1.03	1.21

EXP. : experimental result

ϕ : strength reduction factor

C : concrete crushing

L : FRP rebar yielding

FS : fracture after shear crack

5. 균열발생 형태

일반 및 하이브리드 FRP 리바로 보강된 콘크리트 공시체의 균열발생 형상은 Fig. 11-7에서 11-14와 같다. 실험결과 하중재하 초기에는 부재의 중앙부에서 길이방향과 수직인 방향으로 초기균열이 발생하였으며 휨균열은 부재의 중앙부분에서 대부분 발생하였다. 그러나 하중이 지속적으로 작용하면서 Fig. 11-7~11-14에서 볼 수 있는 것과 같이 전단균열이 발생하여 궁극적인 파괴가 발생하였다. 특히 하이브리드 FRP 리바로 보강된 콘크리트 공시체의 경우 균열의 발생수가 크고 궁극적으로 전단균열이 현저하게 발생하여 파괴되는 경향을 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 하이브리드 FRP 리바가 코어 FRP 리바가 파괴된 후 슬리브를 구성하는 섬유가 지속적으로 하중에 저항하면서 하중이 증가와 감소가 지속적으로 발생하기 때문에 콘크리트 공시체 역시 하이브리드 FRP 리바의 거동 특성에 영향을 받아 균열의 현저한 발생으로 나타난 것이라 판단된다.

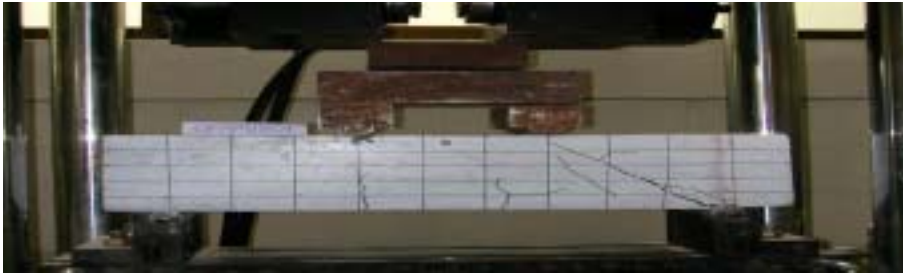
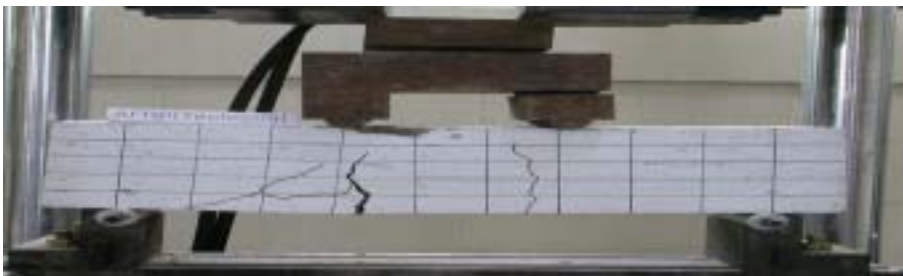


Fig. 11-7 Photo of flexure and shear cracks from CFRP ISO rebar reinforced concrete specimens



Fig. 11-8 Photo of flexure and shear cracks from GFRP Aslan rebar reinforced concrete specimens



(c) AFRP Technora

Fig. 11-9 Photo of flexure and shear cracks from AFRP Technora rebar reinforced concrete specimens

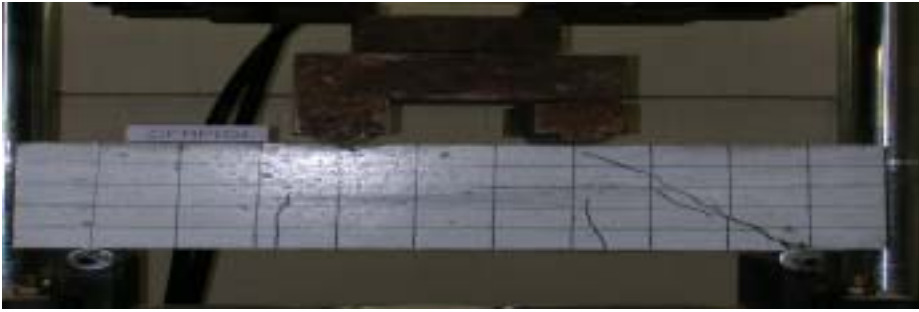


Fig. 11-10 Photo of flexure and shear cracks from CFRP(D) rebar reinforced concrete specimens



Fig. 11-11 Photo of flexure and shear cracks from GFRP(D) rebar reinforced concrete specimens



Fig. 11-12 Photo of flexure and shear cracks from hybrid FRP rebar(A) reinforced concrete specimens

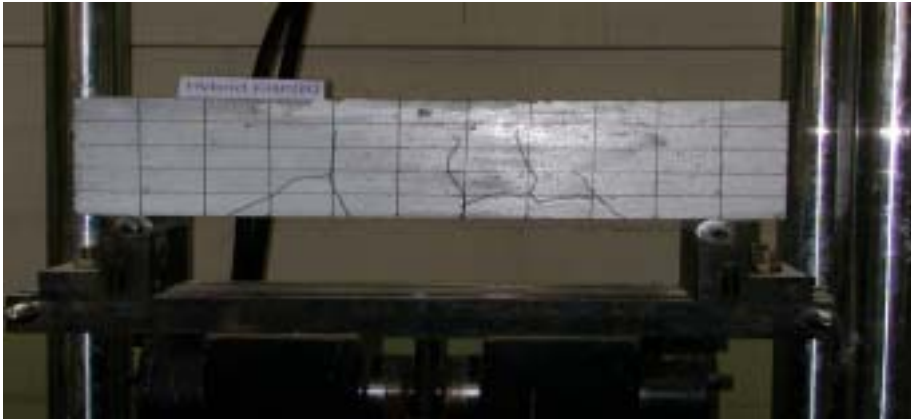


Fig. 11-13 Photo of flexure and shear cracks from hybrid FRP rebar(B) reinforced concrete specimens

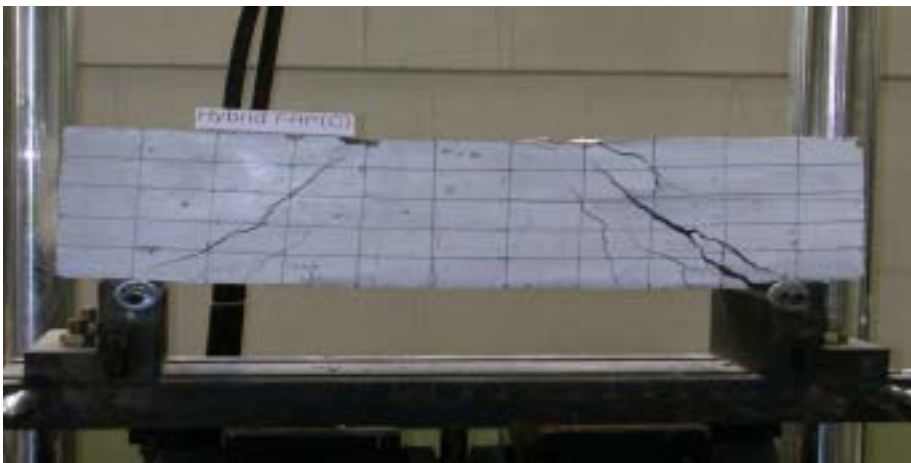


Fig. 11-14 Photo of flexure and shear cracks from hybrid FRP rebar(C) reinforced concrete specimens

제 6절 요약 및 결론

본 장에서는 일반 및 하이브리드 FRP 리바로 보강된 콘크리트 공시체의 휨성능에 대하여 연구하였다. 휨공시체는 ACI 318 및 440 위원회의 규정에 따라 설계하였고 설계시 고려하였던 이론적 예측결과와 시험결과를 비교하였다. 시험결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 하이브리드 FRP 리바로 보강된 콘크리트 공시체의 하중-처짐 거동은 철근 콘크리트에서 보강철근이 항복 후 발생하는 연성변형구간과 동일한 거동을 하는 것을 알 수 있었다. 그러나 일반 FRP 리바로 보강된 콘크리트 공시체의 경우 일반 FRP 리바가 파단되면서 급격한 파괴가 발생하였다.
2. 하이브리드 FRP 리바의 하중-처짐 거동과 동일한 보강비로 보강된 철근콘크리트 공시체의 하중-처짐 예측 값과 비교하면 하이브리드 FRP 리바는 예측 값 보다 항복하중이 높게 나타났으며 충분한 연성확보가 가능하였다.
3. 하이브리드 FRP 리바로 보강된 콘크리트 공시체의 경우 설계 극한 하중보다 높은 하중에서 파괴되었으나 일반 FRP 리바로 보강된 콘크리트 공시체의 경우 설계 극한 하중보다 작은 하중에서 파괴되는 경향을 보여주었다.
4. 하이브리드 FRP 리바로 보강된 콘크리트 공시체의 항복하중/극한하중의 비 및 항복 처짐/극한 처짐의 비는 철근콘크리트 부재에서 연성을 나타내는 중요한 요소로 일반 FRP 리바로 보강된 콘크리트에서는 적용할 수 없지만 하이브리드 FRP 리바가 항복강도 및 극한강도를 모두 갖는 특성을 가지고 있어 철근콘크리트와 동일하게 연성지수를 계산할 수 있었다. 연성지수 결과 하이브리드 FRP 리바로 보강된 콘크리트의 경우 모두 연성지수 12~14정도의 값을 나타내었다.

5. 하이브리드 FRP 리바로 보강된 콘크리트 공시체의 실험에서 구한 휨모멘트/설계 극한 휨모멘트와의 비는 1.21~1.42를 나타내었으며 일반 FRP 리바로 보강된 콘크리트공시체 역시 모두 1.0 보다 약간 높은 값을 보여주었다. 따라서 일반 및 하이브리드 FRP 리바로 보강된 콘크리트는 안전성을 모두 확보할 수 있을 것이라 판단된다.
6. 하이브리드 FRP 리바로 보강된 콘크리트 공시체의 경우 (A), (B) 및 (C) 모두 저보강설계를 하여 하이브리드 FRP 리바가 콘크리트보다 먼저 파괴되도록 하였고, 일반 FRP 리바로 보강된 콘크리트의 경우 모두 콘크리트의 압축파쇄에 의한 파괴가 발생하도록 과보강 설계를 실시하였으나 하이브리드 FRP 리바 및 일반 FRP 리바로 보강된 콘크리트 공시체의 경우 휨균열에 의한 파괴가 발생하기 전 전단균열의 성장에 의한 파괴가 발생하였다.
7. 하이브리드 FRP 리바로 보강된 콘크리트 공시체의 설계시 강도감소계수를 철근콘크리트와 마찬가지로 0.85로 적용하여 휨시험을 실시한 결과 충분한 연성을 확보하여 기존 일반 FRP 리바에서 적용하였던 0.70의 강도감소계수 보다 높은 값을 사용함으로써 안전성 및 경제성을 동시에 확보할 수 있을 것이라 판단된다.
8. 하이브리드 FRP 리바로 보강된 콘크리트 공시체는 휨에 의한 파괴보다는 전단에 의한 파괴가 현저하게 발생됨으로써 전단에 대한 저항성을 높이기 위하여 전단보강에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

제 12장 목표달성도 및 관련분야의 기여도

제 1절 해외 상용 FRP 리바에 대한 물성 및 제조방법 분석

해외에서 상용화되어 있는 FRP 리바의 물성 및 제조방법을 분석하였다. 해외에서 상용화되어 있는 FRP 리바의 제조방법은 대부분이 압출성형방법(Pultrusion)에 의하여 생산되고 있다. 압출성형 제품 중 표면을 규사코팅하여 생산되는 제품의 대표적인 것으로 캐나다의 Pultrall 사의 CFRP ISO Rod가 있으며 압출성형 방법을 사용하지만 FRP 리바의 표면은 매트릭스 수지와 섬유를 동시에 이용하여 표면이 이형철근과 동일한 모양을 대표적인 제품인 일본의 Technora 리바 등이다. 또한 규사코팅과 섬유의 wrap을 동시에 이용하여 표면을 처리한 대표적인 제품으로는 미국의 GFRP Aslan 리바가 있다. 이밖에 생산방법으로 필라멘트 와인딩 방법과 braiding 방법이 있다. 본 연구에서는 위와 같은 해외에서 상용화되어 있는 FRP 리바의 물성 및 제조방법을 분석함으로써 국내 FRP 리바 생산시장에 기초자료를 제공함으로써 향후 FRP 리바의 시장형성에 큰 도움을 줄 것으로 판단된다.

제 2절 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 설계 방법 및 응력-변형률 거동 예측 모델 개발

일반 및 하이브리드 FRP 리바의 응력-변형률 거동 예측 모델 개발은 콘크리트 구조물의 내구성 증진 및 안전성을 향상시킬 수 있는 고연성의 하이브리드 FRP 리바 및 외국의 상용 FRP 리바 제품과 비교하여 성능이 향상된 CFRP 리바와 GFRP 리바를 설계하고 생산하기 위하여 실시하였다. 응력-변형률 거동 예측 모델은 FRP 리바를 제조하기 전 그 성능을 예측하고 결정할 수 있어 목표로 한 성능의 FRP 리바를 생산할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 재료 하이브리드 모델과 기하학적 하이브리드 모델을 기본으로하여 응력-변형률 거동 예측 모

델을 개발하였으며 하이브리드 FRP 리바 및 일반 FRP 리바의 인장시험을 통하여 모델의 적합성을 평가하였다. 그 결과는 매우 우수하여 하이브리드 FRP 리바와 일반 FRP 리바의 설계시 적용하여 이를 기본으로하여 FRP 리바를 생산하였다.

제 3절 원가절감형 재료의 선택 및 최적 배합비 결정

FRP 리바의 사용을 꺼려왔던 중요 이유 중에 하나가 FRP 리바의 가격이 비싸 경제성이 나빴기 때문이며 또한 국내의 경우 FRP 리바의 품질이 외국 제품에 비하여 낮기 때문에 이를 해결하기 위하여 외국 제품을 수입함으로써 발생하는 재료비 상승으로 최종적으로 공사비의 증가를 발생시켰다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하고자 외국제품과 비교하여 성능이 우수하면서도 경제성을 향상시킬 수 있는 방법으로 원가절감형 재료를 선택하고 이 재료를 이용하여 최적의 성능을 발휘할 수 있는 최적배합비를 결정하고자 하였다. 연구의 추진방향은 기존의 일반 FRP 리바(CFRP, GFRP 및 AFRP 리바)와 동일한 성능을 발휘하면서도 경제성이 우수한 FRP 리바를 개발하는 한편, 외국에서 실용화되어 있지 않은 3% 이상의 소성변형률을 가지고 있는 고연성의 하이브리드 FRP 리바를 실용화시키기 위하여 다양한 방법으로 원가절감형의 재료를 선택하여 경제성을 향상시키고자 하였다. 연구결과 일반 FRP 리바(CFRP, GFRP 리바)의 경우 약 50% 정도의 원가절감 효과를 얻을 수 있었으며 하이브리드 FRP 리바의 경우 최종적으로 성능이 우수하면서도 경제성이 우수한 3가지 종류의 FRP 리바를 개발하였는데 이 제품들은 외국의 일반 CFRP 리바와 비교하여 약 25~70% 정도의 원가절감 효과를 얻을 수 있었다.

제 4절 일반 및 새로운 FRP 리바의 생산시스템 개발

일반 및 하이브리드 FRP 리바의 생산과정은 압출과정(pultrusion)과 브레이딩(braiding), 필라멘트 와인딩 과정의 장점을 결합하여 개발하였다. 이와 같은 공법은 다양한 종류의 보강섬유를 조합할 수 있으며 표면 및 내부형상의 변화를

통한 일반 및 하이브리드 FRP 리바를 제작할 수 있다. 하이브리드 FRP 리바의 구조는 코아 FRP 리바를 구성하는 섬유로 탄소섬유를 사용하였으며 슬리브를 구성하는 브레이드(Braid), 및 필라멘트 와인딩을 구성하는 섬유로 아라미드, 유리섬유를 사용하였다. 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 생산시스템은 설계시 적용하였던 재료 변수 및 기하학적 변수와 제조 공정상의 변수를 적용하여 탄성계수 및 변형률 등과 같은 역학적 특성을 최적으로 발휘 할 수 있는 제조시스템이다. 또한, 개발된 제조시스템은 FRP 리바의 크기에 영향을 받지 않고 원하는 치수의 모든 FRP 리바의 생산이 가능하다. 개발된 생산시스템의 주요 공정은 압출, 브레이딩, 필라멘트와인딩의 세가지 공정으로 구성되어 있으며 각 공정의 역할은 압출공정의 경우 하이브리드 FRP 리바의 코아 FRP 리바 부분을 생산하는 단계로 이 과정은 슬리브를 구성하도록 하는 공정인 브레이딩과정시 섬유가 매우 조밀하게 제직되기 때문에 코아로 사용되는 탄소섬유의 폴리머 매트릭스의 함침이 어렵기 때문에 이를 해결하기 위하여 구성하였다. 브레이딩과정은 하이브리드 FRP 리바의 변형률을 증가시키기 위한 슬리브를 제직하는 과정이며 마지막으로 필라멘트 와인딩 과정은 콘크리트 모체와의 부착성능을 증가시키기 위하여 FRP 리바의 표면에 굴곡을 주는 공정이다.

제 5절 개발된 일반 및 하이브리드 FRP 리바와 기존의 FRP 리바의 역학적 특성 비교

개발된 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 성능을 평가하기 위하여 압축, 전단, 인장시험을 통하여 기존의 해외에서 사용되고있는 CFRP ISO 리바(캐나다), GFRP Aslan 리바(미국), AFRP Technora 리바(일본)제품과 비교시험을 실시하였다. FRP 리바는 압출성형과정에 의하여 대부분 생산됨으로써 섬유를 일방향으로 놓고 수지를 결합하는 형태가 되기 때문에 궁극적으로 전단 및 압축 하중을 받을 때 섬유와 수지층의 분리에 의한 쪼개짐 파괴가 주로 발생한다. 따라서 전단에 대하여 매우 약하다. 그러나 개발된 일반 CFRP 리바 및 GFRP 리바의 경우 브레이딩 및 필라멘트 와인딩 고정에 의하여 표면처리를 실시함으로써 기존 CFRP

리바 및 GFRP 리바, AFRP 리바에 비하여 압축강도 및 전단강도의 경우 2~3배 이상의 성능 향상을 보여주었다. 또한 인장강도 및 탄성계수의 경우 거의 동등한 성능을 발휘하였다. 따라서 국내의 기술로 FRP 리바의 성능 향상을 이루어 외국 제품과 품질 경쟁력에서도 우위를 점할 수 있을 것으로 판단된다. FRP 리바의 사용을 제한하였던 가장 큰 이유 중에 하나는 취성적 파괴성질을 가지는 것으로서 본 연구에서는 이를 해결하기 위하여 3% 이상의 소성변형률을 가지는 고연성의 하이브리드 FRP 리바를 개발하였다. 시험결과 일반 FRP 리바와 달리 목표로 한 3%이상의 소성변형률을 확보하였으며 보강 철근과 비교하여 인장강도가 커 콘크리트 구조물에 적용되어 안전성 및 내구성 증진에 매우 큰 효과를 발휘할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 압축 및 전단강도 역시 브레이딩과 필라멘트 와 인딩 공정에 의하여 외국에서 사용되고 있는 FRP 리바에 비하여 약 2~4정도의 성능 향상을 보여주었다.

제 6절 개발된 일반 및 하이브리드 FRP 리바와 기존의 FRP 리바의 내구성능 비교 및 환경영향계수 결정

개발된 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 내구성능을 평가하기 위하여 12가지의 축진환경에 노출 후 압축, 전단, 인장시험을 통하여 기존의 해외에서 사용되고 있는 CFRP ISO 리바(캐나다), GFRP Aslan 리바(미국), AFRP Technora 리바(일본) 제품과 비교시험을 실시하였다. 또한 4가지 환경조건에 노출 후 수분흡수율을 측정하여 FRP 리바의 내구성능에 큰 영향을 미치는 수분에 대한 영향을 평가하였다. 콘크리트의 노출환경을 고려하는 FRP 리바의 환경영향계수는 일정한 기준이 없어 각 제품마다 다르게 사용되고 있다. 따라서 본 연구에서 개발된 일반 및 하이브리드 FRP 리바 역시 환경영향계수의 결정이 반드시 필요하다. 수분흡수율 및 내구성능의 평가결과를 개발된 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 환경영향계수를 결정하였다. 내구성 시험결과 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 경우 일반 FRP 리바와 비교하여 모든 환경에서 내구성능이 우수하였다. 또한 궁극적으로 콘크리트가 노출될 수 있는 환경조건을 고려한 환경영향계수는 CFRP 리바가 0.85, GFRP 리바가 0.70, 탄소섬유와 아라미드섬유를 주요 구성요소로 하는

하이브리드 FRP 리바는 0.85, 유리섬유를 주요구성요소로 하는 하이브리드 FRP 리바는 0.70으로 결정하였다.

제 7절 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 최적표면형상결정

FRP 리바를 콘크리트 보강재로 사용될 경우 보강철근과 비교하여 콘크리트 모체와 부착성능이 현저히 저하된다는 문제점을 가지고 있다. 이와 같은 이유는 FRP 리바는 표면의 rib와 FRP 리바 모체와의 완전한 일체 거동은 불가능하기 때문이다. 왜냐하면 보강철근의 rib은 보강철근의 부착력 향상을 위해서 생산 당시부터 일체화 시켜 생산되지만 FRP 리바의 경우 FRP 리바의 모체를 압출성형에 의해서 생산한 후 부착력 향상을 위해서 표면에 규사코팅을 실시하거나 또는 섬유로 rib 처리를 하는 방법 등을 사용함으로써 FRP 리바 모체와 표면처리 부분의 분리로 인한 부착성능 저하가 나타날 수 있다. 또한 FRP 리바는 플라스틱 재료의 특성을 가지고 있어 표면의 마찰저항력이 작기 때문에 부착성능 확보에 어려움이 있다. 현재 이와 같은 부착성능의 향상을 위하여 다양한 방법으로 연구가 진행되고 있다. 특히 표면 규사코팅의 두께를 조절하여 FRP 리바의 모체와 분리를 최소화 할 수 있는 방법이 주로 사용되고 있다. 그러나 기대했던 충분한 부착성능을 확보하지는 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 FRP 리바의 부착성능을 향상시키기 위하여 표면형상의 변화를 통하여 최적의 rib의 형상을 결정하고 표면처리부분과 FRP 리바 모체와의 분리를 최소화 할 수 있는 제조방법을 개발하여 FRP 리바의 생산시 적용함으로써 FRP 리바와 콘크리트 모체와의 부착성능을 증가시켜 보강철근의 부착성능과 비교하여 약 80~95% 정도의 부착력을 발휘할 수 있도록 하였다.

제 8절 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 내구성 저하 환경에 노출 후 부착거동 평가

일반 및 하이브리드 FRP 리바의 부착성능을 감소시킬 수 있는 또하나의 원인

은 각종 환경적 요인 때문이다. 따라서, 설계 당시 이와 같은 환경조건을 고려하지 않으면 콘크리트 모체와 FRP 리바 간의 부착파괴로 전체 구조물의 성능이 조기에 저하 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 FRP 리바가 노출될 수 있는 환경조건을 고려하여 FRP 리바와 콘크리트 모체간의 부착성능을 평가하였다. 연구 결과 개발된 일반 및 하이브리드 FRP 리바는 기존 해외에서 상용화되어 있는 FRP 리바에 비하여 우수한 부착성능을 나타내었다. 또한, 부착강도의 성능저하를 평가함으로써 설계시 부착에 대한 내구성설계가 가능할 것으로 판단된다.

제 9절 개발된 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 품질기준 안 및 치수의 규격화

품질이 우수한 개발된 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 지속적인 생산 및 적용을 위하여 품질기준안의 마련은 매우 중요하다. 또한 현장에 적용하기 위해서는 FRP 리바의 치수와 역학적 성능을 규격화함으로써 현장 적용성을 향상시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 개발된 일반 및 하이브리드 FRP 리바를 현장 조건에 맞게 치수를 규격화하고 품질기준안을 마련하여 지속적으로 우수한 제품의 생산과 현장적용성을 향상시키고자 하였다.

제 10절 개발된 FRP 리바 및 상용 FRP 리바로 보강된 시험체(small beam specimen)의 휨 성능 평가

해외에서 상용화되어 있는 FRP 리바와 본 연구에서 개발된 FRP 리바의 휨성능을 평가하였다. 휨공시체의 설계는 강도설계법을 이용하였으며, 휨거동의 해석은 ACI 440위원회와 비선형 해석프로그램인 Nonflex 프로그램을 이용하였다. 특히, 해외 및 본 연구에서 개발된 일반 FRP 리바는 설계시 강도감소계수를 ACI 기준에서 제시하고 있는 0.7을 적용하였으며, 하이브리드 FRP 리바의 강도감소계수는 0.85를 적용하였다. 휨 성능 평가결과 개발된 일반 및 하이브리드 FRP 리바

는 목표로 한 성능을 충분히 발휘하여 충분한 안전성을 확보할 수 있을 것으로 판단되었다. 또한 하이브리드 FRP 리바의 경우 보강철근과 동일한 강도감소계수를 적용하여도 충분한 연성을 확보할 수 있는 거동을 하였다.

제 13장 연구개발결과의 활용계획

제 1절 개발된 FRP 리바의 상품화 추진

본 연구에서 개발된 일반 및 FRP 리바의 상품화 추진을 위하여 참여기업에 기술이전을 실시하고, 개발된 생산시스템을 대형화하여 생산량을 대용량화 한다면 국내 FRP 리바의 시장이 현재 도입 및 활성화 되고 있는 단계이므로 시장을 선점 할 수 있을 것으로 판단된다. 특히, 본 연구에서 개발된 FRP 리바는 농업수리 콘크리트 구조물뿐만 아니라 일반 콘크리트 구조물에도 적용이 가능하여 그 시장 규모는 상당히 크다고 할 수 있다. 또한, 현재 콘크리트 구조물의 내하력 저하로 인한 성능감소를 해결할 수 있는 보수·보강재료에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있는데 본 연구에서 개발된 FRP 리바는 내하력이 저하된 콘크리트 구조물에도 적용이 가능하기 때문에 지속적인 시장형성을 위한 투자가 이루어진다면 큰 성과를 달성할 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 13-1은 본 연구에서 개발된 일반 및 하이브리드 FRP 리바를 콘크리트 구조물의 보수 보강재료로 사용하기 위해서 실시된 실물구조물 시험이다.



Fig. 13-1 Flexural test set-up of FRP rebar reinforced concrete beam

제 2절 개발된 FRP 리바의 품질관리기준 및 내구성 기준 의 설계 정립

본 연구에서 개발된 FRP 리바의 품질관리기준 및 환경영향계수를 포함한 내구성기준은 지금까지 콘크리트 구조물에 보수·보강재료로 사용되던 FRP 복합재료의 내구성 설계를 위한 기준을 제시함으로써 개발된 FRP 리바의 사용성 향상에 큰 도움을 줄 것으로 판단된다.

제 3절 신규 농업수리 및 일반 콘크리트구조물의 내구성 증진을 위한 공법으로 이용

본 일반 및 하이브리드 FRP 리바를 이용한 신규 콘크리트 구조물의 적용공법은 보강철근의 부식에 대한 문제를 해결할 수 있는 공법으로 콘크리트 구조물의 내구성 향상을 위한 우수한 공법으로 적용이 가능할 것으로 판단된다.

제 4절 향후 기술개발의 자료로 활용

콘크리트 구조물의 내구성 증진을 위하여 개발된 FRP 리바는 적용공법은 현재 사회간접시설인 콘크리트 구조물의 내구성저하에 의한 문제점을 해결하기 위하여 다양한 연구가 이루어지고 있는 시점에서 매우 우수한 성과를 얻은 결과라 할 수 있다. 특히, 현재 국내에서는 해외에서 상용화되어 있는 FRP 리바의 국내 적용 및 국산화를 위하여 많은 연구가 이루어지고 있다. 따라서, 본 연구의 결과는 이와 같은 연구의 우수한 자료로서 향후 추진되는 많은 연구의 큰 기여를 할 것이라 판단된다.

제 14장 종합 결론

본 연구는 보강철근의 부식에 대한 문제점을 해결할 수 있는 FRP 리바의 개발 및 적용성을 평가하기 위한 것으로 일반 취성의 FRP 리바 및 3%이상의 변형률과 소성변형구간을 가지는 하이브리드 FRP 리바를 개발하고 콘크리트의 보강재로서 적용성을 평가하였다. 이를 위하여 본 연구는 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 설계방법 및 인장거동 예측모델을 개발하였으며 설계된 일반 및 하이브리드 FRP 리바를 생산할 수 있는 생산시스템을 개발하였다. 생산된 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 각종 환경노출 후 촉진시험을 실시하여 환경영향계수를 결정하였다. 또한 FRP 리바의 콘크리트 모체와의 부착성능 실험결과 보강철근과 거의 동등한 수준까지 향상시켰다. 그리고 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 부착시험 공시체를 촉진환경에 노출 후 실제 환경이 콘크리트와 FRP 리바의 부착성능에 미치는 영향도 평가하였다. 마지막으로 일반 및 하이브리드 FRP 리바로 보강된 콘크리트 공시체의 휨시험을 통하여 휨거동을 파악하였다. 이와 같은 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 일반 FRP 리바의 섬유와 수지의 혼합비는 70:30으로 결정하였다.
2. 하이브리드 FRP 리바(A)는 탄소섬유와 아라미드섬유의 혼합비를 재료 하이브리드 모델을 이용하여 27:73으로 결정하였으며, 기하학적 하이브리드 모델을 적용하여 슬리브를 구성하는 아라미드섬유의 꼬인각, 브레이딩각 및 굴곡각을 각각 0.0592° , 10° 및 25° 로 결정하였다.
2. 하이브리드 FRP 리바(B)는 재료하이브리드 모델을 이용하여 탄소섬유와 유리섬유의 혼합비를 19:81로 결정하였으며, 유리섬유의 꼬인각, 브레굴곡각 및 브레이딩각을 기하학적 하이브리드 모델을 이용하여 각각 0.0592° , 30° 및 25° 로 결정하였다.

3. 하이브리드 FRP 리바(C)는 탄소섬유와 유리섬유 및 아라미드섬유를 사용한 리바으로서 탄소섬유를 코어 FRP 리바재료로 사용하였으며 유리섬유와 아라미드섬유를 슬리브를 구성하는 재료로 사용하였다. 이 세가지 섬유에 대한 혼합비는 재료하이브리드 모델을 이용하여 탄소섬유와 유리섬유 및 아라미드섬유의 혼합비를 13.6:34.6:51.8으로 결정하였으며, 슬리브를 구성하는 섬유의 꼬인각, 브레굴곡각 및 브레이딩각을 기하학적 하이브리드 모델을 이용하여 유리섬유에서는 각각 0.0592° , 30° 및 25° 로 결정하였고 아라미드섬유는 각각 0.0592° , 10° 및 25° 로 결정하였다.
4. 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 생산시스템을 개발하였다.
5. 하이브리드 FRP 리바의 인장시험결과 3%이상의 변형률과 소성변형구간을 모두 확보할 수 있었다.
6. 개발한 인장거동 예측 모델은 기존의 예측 모델과 비교하여 실험결과에 근접한 결과를 보여주었다. 따라서 코어 FRP 리바를 압출성형에 의해서 제조한 후 제직의 방법으로 슬리브를 구성하는 섬유로 외곽의 FRP 리바를 구성하는 하이브리드 FRP 리바의 경우 기존의 예측 모델보다는 본 연구에서 개발한 예측모델을 적용하는 것이 바람직하다고 판단된다.
7. 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 흡수특성 실험결과 알칼리환경, 산환경, 염해환경 및 중성환경 모두에서 평가기준인 2%이하를 모두 만족하는 우수한 흡수저항 특성을 나타내었다.
8. 개발된 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 압축 및 ISS 시험결과 기존 해외에서 이용되고 있는 FRP 리바 보다 매우 우수한 결과를 나타내었다. 이와 같은 결과는 개발된 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 생산시 기존의 FRP 리바의 생산방법인 압출성형 FRP 리바에서 받을 수 있는 쪼개짐 파괴(층간분리)에 의

한 파괴를 표면처리로 방지하여 재료의 특성을 발휘한 후 파괴되게 함으로써 압축 및 ISS를 증가시킬 수 있었다.

9. 개발된 CFRP 리바 및 하이브리드 FRP 리바(A)의 환경노출 후 잔류 강도결과는 모든 촉진환경에서 매우 우수한 내구성을 보여주었다. 이와 같은 이유는 하이브리드 FRP 리바(A)를 구성하는 탄소섬유와 아라미드섬유 및 비닐에스터 수지가 환경에 노출 후 우수한 저항성을 갖기 때문이다.
10. 개발된 GFRP 리바 및 하이브리드 FRP 리바(B)의 환경노출 후 잔류 강도시험결과는 알칼리 및 산환경에 노출 후 잔류 강도가 가장 낮은 경향을 보여주었다. 특히 알칼리 환경에 노출 후 잔류 인장강도가 60%정도로 특히 낮은 저항성을 보여주었다. 또한 염해와 건조-습윤 반복 및 동결-융해 반복을 복합적으로 받는 환경에서도 약간의 영향을 받는 것으로 나타났다. 이와 같은 이유는 하이브리드 FRP 리바를 구성하는 유리섬유가 알칼리 환경에 노출되어 영향을 받기 때문이다.
11. 개발된 하이브리드 FRP 리바(C)의 환경노출 후 잔류 강도결과는 모든 촉진 환경에서 매우 우수한 내구성을 보여주었다. 이와 같은 이유는 하이브리드 FRP 리바(C)를 구성하는 탄소섬유와 아라미드섬유 및 비닐에스터 수지가 환경에 노출된 후 우수한 저항성을 갖기 때문이다. 또한 하이브리드 FRP 리바(C)는 유리섬유가 사용되었지만 유리섬유를 내구성이 우수한 아라미드섬유가 둘러싸는 형태를 가지고 있어 유리섬유에 의한 FRP 리바 전체의 내구성 감소에는 크게 영향을 미치지 못하였다.
14. 본 연구에서는 탄소섬유와 아라미드섬유를 주요 구성성분으로 하는 하이브리드 FRP 리바(A) 및 (C)는 및 CFRP 리바의 환경영향계수를 0.85로 결정하였으며 유리섬유를 주요 구성성분으로 하는 GFRP 리바 및 하이브리드 FRP 리바(B)의 환경영향계수는 0.70으로 결정하였다. 특히 하이브리드 FRP 리바

(C)는 유리섬유를 포함하고 있지만 유리섬유가 아라미드섬유의 안쪽에 위치하고있어 큰 영향을 받지 않아 환경영향계수를 0.85로 결정하였다.

15. 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 부착성능의 향상을 위하여 표면 rib의 높이 및 폭을 변화시켜 가며 최적의 형상을 결정한 결과 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 표면 rib의 높이 및 폭은 1.3mm와 2mm이며 rib과 rib 사이의 간격은 21mm로 결정하였다.
16. 개발된 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 부착 시험결과 기존의 일반 FRP 리바가 보강철근과 비교하여 약 60% 정도의 부착강도를 가지고 있는데 비하여 80%~90%까지 부착강도가 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 하이브리드 FRP 리바가 표면제직을 통하여 부착성능을 증가시키기 위한 rib의 전단파괴와 FRP 리바의 모체와 표면처리 층과의 분리를 방지하였기 때문이다.
17. 부착시험 후 표면층의 파괴형상을 살펴보면 GFRP 리바 및 하이브리드 FRP 리바(B)의 경우 표면층을 구성하는 rib이 유리섬유로 구성되어 부착시험시 발생하는 rib과 콘크리트 모체와의 마찰저항력으로 인해 rib이 대부분 파괴되는 경향을 보여주었다. 이는 유리섬유가 아라미드섬유보다 역학적 성능이 작고 양생시 발생하는 수분의 침투로 인해 부분적으로 유리섬유의 역학적 성능이 감소하였기 때문이다.
18. 개발된 CFRP 리바 및 하이브리드 FRP 리바(A)와 (C)의 부착시험 후 표면의 파괴형상을 살펴보면 콘크리트 모체와 인발시 발생하는 마찰저항력으로 인해 rib이 부분적으로 파괴되지만 개발된 GFRP 리바 및 하이브리드 FRP 리바(B)의 경우보다는 파괴의 정도가 현저히 감소하였다. 이와 같은 결과는 하이브리드 FRP 리바(A)와 (C)의 rib을 구성하는 아라미드섬유가 하이브리드 FRP 리바(B)의 rib을 구성하는 유리섬유보다 역학적 성능이 우수하기 때문이다.

19. 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 알칼리, 산, 염해, 중성용액에 25일간 노출 후 잔류 부착강도는 70% 정도를 나타내어 큰 영향을 받지 않았으나, 50일 노출 후에는 50%~60%의 잔류 부착강도를 나타내어 부착강도가 현저히 감소함을 알 수 있었다. 이와 같은 이유는 FRP 리바는 FRP 리바 모체와 표면 처리층과의 결합층이 존재하고 rib을 구성하는 재료 역시 섬유재료로서 환경에 대하여 영향을 받을 수 있기 때문이다.
20. 건조-습윤 반복, 장기오븐건조, 동결-융해 반복, 황산염, 용빙제 환경 과 염해와 건조-습윤 및 동결-융해 반복을 복합적으로 받은 환경에 노출 후 부착강도 시험결과 일반 및 하이브리드 FRP 리바는 70% 후반에서 80% 이상의 우수한 잔류 부착강도를 나타내어 이와 같은 환경에서는 큰 영향을 받지 않았다.
21. 하이브리드 FRP 리바로 보강된 콘크리트 공시체의 하중-처짐 거동은 철근 콘크리트에서 보강철근이 항복 후 발생하는 연성변형구간과 동일한 거동을 하는 것을 알 수 있었다.
22. 하이브리드 FRP 리바의 하중-처짐 거동과 동일한 보강비로 보강된 철근콘크리트 공시체의 하중-처짐 예측값과 비교하면 하이브리드 FRP 리바는 예측값보다 항복하중이 높게 나타났으며 충분한 연성확보가 가능하였다.
23. 하이브리드 FRP 리바로 보강된 콘크리트 공시체의 경우 설계 극한 하중보다 높은 하중에서 파괴되었다.
24. 하이브리드 FRP 리바로 보강된 콘크리트의 경우 연성지수는 12~14정도의 값을 나타내었다.

25. 일반 및 하이브리드 FRP 리바로 보강된 콘크리트 공시체의 실험에서 구한 휨모멘트/설계 극한 휨모멘트와의 비가 모두 1.0이상을 나타내어 충분한 안전성을 모두 확보할 수 있었다.
26. 하이브리드 FRP 리바로 보강된 콘크리트 공시체의 경우 (A), (B) 및 (C) 모두 저보강설계를 하여 하이브리드 FRP 리바가 콘크리트보다 먼저 파괴되도록 하였으나 실험결과 휨균열에 의한 파괴가 발생하기 전 전단균열의 성장에 의한 파괴가 발생하였다.
27. 하이브리드 FRP 리바로 보강된 콘크리트 공시체의 설계시 강도감소계수를 철근콘크리트와 마찬가지로 0.85로 적용하여 휨시험을 실시한 결과 충분한 연성을 확보하여 기존 일반 FRP 리바에서 적용하였던 0.70의 강도감소계수보다 높은 값을 사용함으로써 안전성 및 경제성을 동시에 확보할 수 있을 것이라 판단된다.
28. 일반 및 하이브리드 FRP 리바로 보강된 콘크리트 공시체는 휨에 의한 파괴보다는 전단에 의한 파괴가 현저하게 발생됨으로써 전단에 대한 저항성을 높이기 위하여 전단보강에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

제 15장 참고문헌

1. 김민경, 이차돈, Namman, Antoine, (1998), “복합소재 프리스트레스트 콘크리트 보의 비선형 휨 모델링”, 한콘크리트학회지 제10권6호, pp. 269-280
2. 김민경, 이차돈, “부착과 비부착된 프리스트레스트 콘크리트 보의 휨 모델”, 콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, 제11권, 2호, pp.467-470
3. ACI, (2000), “Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP bars”, American Concrete Institute Committee 440.
4. ACI Report 440R(1996), “State-of-the-art report on fiber reinforced plastic reinforcement for concrete structure”, reported by ACI Committee 440, report chair M.R. Ehsani, ACI, Box 19150, Redford Station, Detroit, Mi
5. Alsayed, S. H and T.H., Al-Salloum(1995), “Flexural behavior of concrete elements reinforced by GFRP bars”, Nonmetallic(FRP) reinforcement for concrete structures, edited by L. Taerwe, Proc. of second international RILEM symposium(FRPRCS-2), E & FN Spon, 23-25 August, Univ. of Ghent, Belgium, pp. 219-226
6. Alsayed, S.H., Almusallam, T.H., Al-Salloum, Y.A. and Amjad, M.A.(1995), “Flexural behavior of concrete elements reinforced by GFRP bars, Nonmetallic (FRP) reinforcement for concrete structures”, edited by L. Taerwe, Proc. of the second international RILEM Symposium(FRPRCS-2), E & FN Spon, 23-25 August, Univ. of Ghent, Belgium, pp. 219-226
7. Aiello M. A. and Ombres L., (2000), “Load-Deflection Analysis of FRP Reinforced Concrete Flexural Members”, J. Comp.Constr., ASCE, Vol. 4, No. 4, pp. 164-171.
8. Alkhrdaji, T.; Nanni, A.; Chen, G.; and Barker, M. (1999), “Upgrading the transportation Infrastructure: Solid RC Decks Strengthened with FRP”, Concrete International, ACI, Vol. 21, No. 10, October, pp. 37-41.
9. Al-Dulaijan, S.U., Nanni, A., Al-Zahrani, M.M., and Bakis, C.E., (1996), “Bond Evaluation of Environmentally Conditioned GFRP/Concrete

- System”, Proceedings of the Second International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures (ACMBS-2), M. M. El-Badry, Ed., Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, Quebec, pp. 845-852. 29
10. Al-Sulaimani, Kaleemullah, Basubal and Rasheed. (1990), “Influence of Corrosion and Cracking on Bond Behavior and Strength of Reinforced Concrete”, ACI Structural Journal, Vol. 87, No. 2, March-April, pp. 220-231
 11. Al-Zahrani, M. M., Nanni, A., Al-Dulaijan, S. U., and Bakis, C. E., (1996), “Bond of Fiber Reinforced Plastic (FRP) Rods to Concrete”, Proc. 51st Ann. Conf. of the Composites Institute, Soc. Plastics Engineers, New York, 1996, pp. 3A.1-3A8.
 12. Al-Zahrani, M. M., Al-Dulaijan, S. U., Nanni, A., Bakis, C. E. and Boothby, T. E. (1999). “Evaluation of Bond Using FRP Rods with Axisymmetric Deformations”, Construction and Building Materials, 13, pp. 299-309.
 13. Apinis R., Modniks J., Tamuzs V., Tepfers R.,(1998), “Ductility of Hybrid Fiber Composite Reinforcement FRP for Concrete”, Institute of Polymer Mechanics, Riga, Latvia. Chalmers University of Technology, Division of Building Technology, Work No 23. Riga, p. 16.
 14. Apinis R., Modniks J., Tamuzs V., Tepfers R.(2000), “Creep tests using hybrid composite rods for reinforcement in concrete”. 3rd International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, August 15-18, Ottawa, Canada
 15. ASTM (2000), “ASTM A 312/A 312M Standard specification for seamless and welded austenitic stainless steel pipes”.
 16. ASTM, (1982), “American Society for Testing Materials E 632 Standard Practice for Developing Accelerated Tests to Aid Prediction of the Service Life of Building Components and Materials”.

17. ASTM, (1994), "American Society for Testing Materials D 3916 Standard Test Method for Tensile Properties of Pultruded Glass-Fiber-Reinforced Plastic Rod".
18. ASTM, (1996 A), "American Society for Testing and Materials C1198 Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio for Advanced Ceramics by Sonic Resonance".
19. ASTM, (1996 B), "American Society for Testing and Materials D 4475 Standard Test Method for Apparent Horizontal Shear Strength of Pultruded Reinforced Plastic Rods By The Short Beam Method".
20. ASTM, (1999), "American Society for Testing and Materials D 638 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics".
21. ASTM, (2000), "American Society for Testing and Materials D3039/D 3039 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials".
22. ASTM A 944-95, (1995), "Standard Test Method for Comparing Bond Strength of Steel Reinforcing Bars to Concrete Using Beam-End Specimens".
23. ASTM D-20,(2000), "Standard Test Method for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement; D 792".
24. Averston, J., and Kelley, A.(1980), "Tensile First Cracking Strain and Strength of Hybrid Composites and Laminates", Phil. Trans., London, A294, pp. 519~534
25. Awa, T. W.(1991), Design of a Pultrusion Die Using a Design Optimization Technique, M.S. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, pp. 128
26. Bakis, C. E., Nanni, A., Boothby, T. E. Huang, H., Al-Zaharani, M. M., and Al-Dulaijan, S. U., (1995), "Measurement of Bond of FRP Composite Reinforcement in Concrete Structures," Proc. 10th Intl. Conf. on Composite

- Materials, Vol. 6, A. Poursatip and K. Street, Eds., Woodhead Publishing, Ltd., 1995, pp. 635-642.
27. Bakis, E. C., Nanni, A., and Terosky, J. A., Smart, Pseudo-Ductile, Reinforcing Rods for Concrete: Manufacture and Test, First International Conference on Composites in Infrastructure, ICCI'96, Tucson, Arizona, January 1996, pp. 95-108
 28. Bakis, C. E., 1993, "FRP Composites: Materials and Manufacturing, in Fiber-Reinforced- Plastic for Concrete Structures: Properties and Applications", A. Nanni, Ed., Elsevier, Amsterdam, pp. 13-58.
 29. Bakis, C. E., Freimanis, A. J., Gremel, D., and Nanni, A., (1998), "Effect of Resin Material on Bond and Tensile Properties of Unconditioned and Conditioned FRP Reinforcement Rods", Proceedings of the First international Conference on Durability of Composites for Construction, B. Benmokrane, and H. Rahman, Eds., Sherbrooke, Quebec, pp. 525-535.
 30. Bank, L. C., Puterman, M. and Katz, A. (1998), "The Effect of Material Degradation on Bond Properties of Fiber Reinforced Plastic Reinforcing Bars in Concrete", ACI Materials Journal, 95(3), pp 232-243.
 31. Bank, L.C., (1993), "Properties of FRP Reinforcement for Concrete, in Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Properties and Applications", Developments in Civil Engineering, V. 42, A. Nanni, Ed., Elsevier, Amsterdam, pp. 59-86.
 32. Bank, L. C., and Puterman, M., (1997), "Microscopic Study of Surface Degradation of Glass Fiber-Reinforced Polymer Rods Embedded in Concrete Castings Subjected to Environmental Conditioning", High Temperature and Environmental Effects on Polymeric Composites: 2nd Volume, ASTM STP 1302, T. S. Gates and A.-H. Zureick, Eds., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA., pp. 191-205
 33. Bank, L.C.; Puterman, M.; and Katz, A., (1998), "The Effect of Material

- Degradation on Bond Properties of FRP Reinforcing Bars in Concrete", ACI Materials Journal, V. 95, No. 3, pp. 232-243.
34. Bascom, W.D., (1974), " The Surface Chemistry of Moisture-Induced Composite Failure, Interfaces in Polymer Matrix Composites", Ed. Plueddemann E.P., Academic Press, New York, 1974, pp. 79-108.
 35. Benmokrane, B., and Rahman, H., Eds., (1998), "Durability of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction", Proceedings of the First International Conference (CDCC 98), Quebec, Canada, 692 pp.
 36. Bentz, D.P., Garboczi, E. J.(1996),"Multi-Scale Models of the Diffusivity of Concrete", Edited by Ken P. Chong, Materials for the New Millenium, Proceedings of the Fourth Materials Engineering Conference, on Composites in Infrastructure, Tuscon, AZ, pp. 389-400
 37. Blontrock, Hendrik, Luc Taerwe and Stijn Matthys., Properties of Fiber reinforced Plastics at Elevated Temperatures with Regard to Fire Resistance of Reinforced Concrete Members, Fourth International Symposium on Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures (SP-188). Ed. by Antonio Nanni, Charles Dolan, Sami Rizkalla. Farmington Hills: ACI International, 1999.
 38. Boothby, T.E., Nanni, A., Bakis, C.E., and Huang, H., (1995),"Bond of FRP Rods Embedded in Concrete," Engineering Mechanics, Proc. 10th Conf., Vol. 1, S. Sture, ed., American Soc. Civil Engineers, New York, 1995, pp. 114-117.
 39. Boyle, H.C. and Karbhari, V.M., (1994), "Investigation of Bond Behavior Between Glass Fiber Composite Reinforcements and Concrete", Journal of Polymer-Plastic Technology Engineering, Vol. 33, No. 6, pp. 733-753.
 40. Bott, T.R., Barker, A.J., (1969), "The behavior of Model Composites in Contact with Different Environments", Transactions of the Institute of Chemical Engineers, Vol. 47, pp. T188-T193.

41. Brunnschweiler. D. (1953), "Braids and braiding", Journal of Textile Institute, Vol. 44, pp. 666-686
42. Brunnschweiler, D. (1954), "The structure and tensile properties of braids", Journal of Textile Institute, Vol. 45, pp. T55-87.
43. Brown, V., Bartholomew, C., (1996), "Long-term Deflections of GFRP -Reinforced Concrete Beams", Proceedings of the First International Conference on Composites in Infrastructure (ICCI-96), Tucson, Arizona, pp. 389-400.
44. Buck, S.E., Lischer D.W., Nemat-Nasser, S.,(1998), "The Durability of E Glass/Vinylester Composite Materials Subjected to Environmental Conditioning and Sustained Loading", Journal of Composite Materials, Vol. 32, No. 9/1998.
45. Building Code Requirements for Structural Concrete (318-99) and Commentary(318R-99) (1999)., American Concrete Institute Committee 318, Farmington Hill, MI.
46. Canadian Standards Association, (1996), "Canadian Highways Bridge Design Code", Section 16, Fiber Reinforced Structures, 28 pp.
47. Castro, P.F., and Carino, N.J., (1998), "Tensile and Non-Destructive Testing of FRP bars", J. Comp. Constr., Vol. 2, No. 1, February 1998, pp. 17-27
48. Chachad, Y. R. (1989), "Prediction of Thermal and Curing Characteristics for the Manufacture of Composite Materials by Pultrusion", M.S. Thesis, The University of Mississippi, Blacksburg, Mississippi, pp. 99
49. Chambers, R.E. (1965), "Strutural Fiber Glass-Reinforced Palstics for Building Applications", Plastics in Buildings, I. Skeist Ed., Reinhold Publishing Co., New York, pp.72-118.
50. Chateauminois, A., Chabert, B., Soulier, J. P., and Vincent, L., (1993), "Effects of Hygrothermal Aging on the Durability of Glass/Epoxy Composites". Physico-Chemical Analysis and Damage Mapping in Static Fatigue, Proceedings of the 9th International Conference on Composite

- Materials (ICCM/9), pp. 593-600.
51. Chin J.W., Aouadi K., Nguyen T., (1997), "Effects of Environmental Exposure on Fiber-Reinforced Plastic (FRP) Materials Used in Construction", *Journal of Composites and Technology Research*, Vol. 19, No. 4, pp. 205-213.
 52. Chaallal, O. and Benmokrane, B. (1993), "Pullout and Bond of Glass -Fibre Rods Embedded in Concrete and Cement Grout", *Materials and Structures*, 26, pp.167-175.
 53. Clear, K. C., Hartt, W. H., McIntyre, J., and Lee, S. K.(1995), "Performance of Epoxy-Coated Reinforcing Steel in Highway Bridges", National Cooperative Highway research Program, Report 370, TRB, National Academy Press, Washington, D.C.
 54. Clark, C. R. and Johnston, D. W. (1983). "Early Loading Effects on Bond Strength", *ACI Journal*, Nov-Dec., pp. 532-539.
 55. Clarke, J., and Sheard, P., (1998), "Designing Durable FRP Reinforced Concrete Structures", *Proceedings First International Conference on Durability of Composites for Construction*, B. Benmokrane, and H. Rahman, Eds., Sherbrooke, Quebec, pp. 13-24.
 56. Conrad, J. O., Bakis, C. E., Boothby, T. E., and Nanni, A., (1998), "Durability of Bond of Various FRP Rods in Concrete", *Proceedings of the First International Conference on Durability of Composites for Construction*, B. Benmokrane, and H. Rahman, Eds., Sherbrooke, Quebec, Canada, pp. 299-310.
 57. Coomarasamy, A., and Goodman, S., (1997), "Investigation of the Durability Characteristics of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Materials in Concrete Environment", *American Society for Composites Twelfth Technical Conference*, Dearborn, Michigan.
 58. De Lorenzis (B), L., A. Nanni, and A. La Tegola, (2000), "Flexural and Shear Strengthening of Reinforced Concrete Structures with Near Surface

- Mounted FRP Rods", Proc., 3 rd Inter. Conf. on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Humar and A.G. Razaqpur J., Editors Ottawa, Canada, 15-18 Aug. 2000, pp. 521-528.
59. De Lorenzis, L.(A), A. Nanni, and A. La Tegola, (2000), "Strengthening of Reinforced Concrete Structures with Near Surface Mounted FRP Rods", Proc. International Meeting on Composite Materials, PLAST 2000, Advancing with Composites 2000, Ed. I. Crivelli- Visconti, Milan, Italy, May 9-11, 2000, pp. 419-426.
60. De Lorenzis, L., D. Tinazzi, A. Nanni, A., (2000), "Near Surface Mounted FRP Rods for Masonry Strengthening: Bond and Flexural Testing", Symposium, Meccanica delle Strutture in Muratura Rinforzate con FRP Materials , Ed. Ceriolo L., Venezia, Italy, December 7-8, 2000, pp.7-18.
61. Devalapura, R.K., Gauchel, J.V., Greenwood, M.E., Hankin, A., and Humphrey, T. (1997), "Long-Term Durability of GFRP Composites in Alkaline Environments", Proc. 3rd Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, International Symposium, Sapporo, Japan, October 14-16th 1997, Sapporo Japan, Vol.2, pp. 83-90.
62. Devalapura, R. K., Greenwood, M. E., Gauchel, J. V., and Humphrey, T. J., (1996), "Advanced Composite Materials in Bridges and Structures", M.M. El-Badry, Ed., Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, Quebec, pp. 107-116.
63. Dowden, D.M., and Dolan, C.W., (1997), "Comparison of Experimental Shear Data With Code Predictions For FRP Prestressed Beams", Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), Japan Concrete Institute, Sapporo, Japan, V. 2, pp. 687-694.
64. Dolan, C.W.; Rizkalla, S.; and Nanni, A., Editors (1999), "Proceedings of the Fourth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures", American Concrete

Institute SP-188

65. Dutta, P.K.,(1998), "Structural Fiber Composite Materials for Cold Regions", Journal of Cold Regions Engineering, no. 3, 2:124-132, September 1988.
66. Dutta, P.K., D. Hui., (1995), "Low-Temperature and Freeze-Thaw Durability of Thick Composites", Composites Engineering, No. 27, pp. 371-380.
67. Ehsani, M.R.; Saadatmanesh, H.; and Tao, S., (1996), "Design Recommendation for Bond of GFRP Rebars to Concrete", Journal of Structural Engineering, V. 122, No. 3, pp. 247-257.
68. Ehsani, M.R.; Saadatmanesh, H.; and Tao, S., (1996 b), "Bond Behavior and Design Recommendations for Fiber-Glass Reinforcing Bars", Proceedings of the First International Conference on Composites in Infrastructure (ICCI-96), Tucson, Arizona, pp. 466-476.
69. EN ISO/F-DIS 527-4, (1996 A), "Plastics - Determination of tensile properties". Part 4-Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites".
70. EN ISO/F-DIS 527-5(1996 B), "Plastics - Determination of tensile properties. Part 5 -Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites".
71. Erki, M.A., and Ritzkalla, S.H., (1993), "Anchorage for FRP Reinforcement", Concrete Int., Vol. 15, No. 6, pp. 54-59.
72. Faza, S.S, and Ganga Rao, H. (1993), "Glass FRP Reinforcing Bars for Concrete", Fiber-Reinforced Plastics (FRP) Reinforcement for Concrete Structures Properties and Applications, A. Nanni Ed., Elsevier Pub. Co. Inc., NY, pp. 167-188.
73. Faza, S.S., and GangaRao, H.V.S., (1990), "Bending and Bond Behavior of Concrete Beams Reinforced with Plastic Rebars", Transportation Research Record 1290, pp. 185-193.

74. Focacci, F; Nanni, A.; and Bakis, C.E. (2000), "Local Bond-Slip Relationship for FRP Reinforcement in Concrete", Journal of Composites for Construction, Vol. 4, No. 1, pp. 1-9.
75. Franke, L. and Meyer, H. J., (1992), "Predicting the Tensile Strength and Creep-Rupture Behaviour of Pultruded Glass-Reinforced Polymer Rods," Journal of Materials Science, Vol. 27, pp. 4899-4980.
76. Franke, L. and Overback, E., (1987), "Loss in strength and damage to glass fibers in alkaline solutions and cement extracts", Dur. Build. Mat., No.5, 1987, pp.73-79.
77. Freimanis, A. J., Bakis, C. E., Nanni, A., and Gremel, D.,(1998), "A Comparison of Pull-Out and Tensile Behaviors of FRP Reinforcement for Concrete," Proc. 2nd International Conference on Composites in Infrastructure, Vol. II, H. Saadatmanesh and M. R. Ehsani, Eds., 5-7 Jan. 1998, University of Arizona, Tucson, AZ, pp. 52-65.
78. Fried N., (1967), "Degradation of Composite Materials: The Effect of Water on Glass Reinforced Plastics", Proc. 5th Symposium on Naval Structural Mechanics, Philadelphia, USA, pp. 813-837.
79. Freimanis, A.J.; Bakis, C. E.; Nanni, A.; and Gremel, D., (1998), "A Comparison of Pullout and Tensile Behaviors of FRP Reinforcement for Concrete", Proceedings of the Second International Conference on Composites in Infrastructure (ICCI-98), Tucson, Arizona, V. 2, pp. 52-65.
80. Fujita, A. and Hamada, H.(1996), "Tensile Properties of Braided Composite Rod", Proc. First International Conf. on Composite in Infrastructure, Edited by Saadatmanesh, H. and Ehsani, M. R., Tucson, AZ, Jan. 15-17. pp. 451-465
81. Fujita, A. and Chou, T. W.(1982), "A Statistical Approach to the Strength of Hybrid Composites", Progress in Science and Engineering of Composites, ICCM-IV, Fourth International Conference on Composite, Tokyo, Japan, pp. 1145-1152

82. Ganga Rao, H.V.S., and, Vijay P.V., (1997), "Aging of Structural Composites Under Varying Environmental Conditions", Proc. 3rd Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, International Symposium, Sapporo, Japan, October 14-16th, Sapporo Japan, Vol.2, pp.91-98.
83. Gentry, T.R., Bank, L.C., Barkatt, A., and Prian, L., (1998), "Accelerated Test Methods to Determine the Long-Term Behavior of Composite Highway Structures Subject to Environmental Loading", J. Composites Technology & Research, V. 20, No. 1, pp. 38-50.
84. Gopalakrishnan, T. N(1992), "On the Numerical Modeling of Fluid Flow and Heat Transfer in Fiber-Filled Pultrusion", M.S. Thesis, West Virginia Univ., Morgantown, West Virginia, pp. 93
85. Gutans, J., V.Tamuzs, V.,(1997), "Strength probability of unidirectional hybrid composites". Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 7, pp. 193-200.
86. Hamburger, W. J. (1942), "Effect of Yarn Elongations on Parachute Fabric Strength", Rayon Textile Monthly, March. pp. 51-53
87. Hamburger, W. J. (1942b), "Effect of Yarn Elongations on Parachute Fabric Strength", Rayon Textile Monthly, May. pp. 85-86
88. Harris, H. G., Somboonsong, W., Ko, F. K., and Huesgen, R., A, (1998), "Second Generation Ductile Hybrid Fiber Reinforced Polymer (FRP) for Concrete structures", Second International Conference on Composites in Infrastructures, ICC'98, Tucson, Arizona, January, pp. 66-79
89. Hayes, M.D.; Garcia, K.; Verghese, N.; and Lesko, J., (1998), "The Effect of Moisture on the Fatigue Behavior of a Glass/Vinyl Ester Composite", Proceedings of the Second International Conference on Composites in Infrastructure (ICCI-98), Tucson, Arizona, V. 1, pp. 1-12.
90. Holte, L.E., Dolam, C. W., and Schmidt, R.J. (1993), "Glass FRP Reinforcing Bars for Concrete", Fiber-Reinforced Plastics (FRP) Reinforcement for

- Concrete Structures Properties and Applications, A. Nanni Ed., Elsevier Pub. Co. Inc., NY, pp. 167- 188.
91. Humphreys, E. A., (1993), "Properties Analysis of Laminates", Engineered Materials Handbook, Vol. 1: Composites, ASTM International, pp. 218-235
 92. Hearle, J. W., Grosberg, P. and Backer, S. (1969), "Structural mechanics of fibers, yarns and fabrics", wiley-interscience, New York.
 93. Hull, D., (1992), "An introduction to composite materials, Cambridge solid state science series", Cambridge University Press, Cambridge, UK.
 94. Japan Society of Civil Engineers (JSCE) Subcommittee on Continuous Fiber Reinforcement, (1992), Proceedings of the Utilization of FRP-Rods for Concrete Reinforcement, Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, Japan, 314 pp.
 95. Japan Society of Civil Engineers (JSCE), (1997a), Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), Japan Concrete Institute, Sapporo, Japan, V. 2, pp. 511-518.
 96. Japan Society of Civil Engineers (JSCE), (1997b), "Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials", Concrete Engineering Series, No. 23, pp. 325
 97. Jiang, C.(1998), "Manufactureing and Process Modeling of FRP Rebars By A Combined Pultrusion/Filament Winding Process", M.S Thesis, University of Missouri-Rolla, January 1998, pp. 50
 98. Ji, X.(1982), "On the Hybrid Effect and Fracture Mode of Interlaminated Hybrid Composites", Progress in Science and Engineering of Composites, ICCM-IV, Fourth International Conference on Composite, Tokyo, Japan, pp. 1137-1144
 99. Jones, F.R., Rock J.W., Wheatley, A.R., (1983), "Stress Corrosion Cracking and its Implications for the Long-Term Durability of E-Glass Fiber Composites, Composites", Vol. 14, No. 3, July 1983, pp. 262-269.

100. Johnston, D.W. and Zia, P. (1982). "Bond Characteristics of Epoxy Coated Reinforcing Bars", Report No. FHWA/NC/82-002, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina.
101. Jokela J., Tepfers R., (1982), "Bond of bundled prestressing steel strands", Nordic Concrete Research, Publication No 1. The Nordic Concrete Federation. Oslo 1982. pp. 12.1-12.19.
102. Karbhari V.M., Zhao L., Murphy K., and Kabalnova L., (1998), "Environmental Durability of Glass Fiber reinforced Composites Short Term Effects", Proc. 1st Conference on Durability of FRP Composites for Construction (CDCC'98), Sherbrooke (Canada), August 5-7th 1998, pp.513-524.
103. Karbhari, V.M. and D.A. Eckel., (1994), "Effect of Cold Regions Climate on Composite Jacketed Concrete Columns", Journal of Cold Regions Engineering, no. 3, 8:73-86, September 1994.
104. Kato Y., Mishimura T., and Uomoto T., (1998), "The Effect of Ultraviolet Rays to FRP Rods", Proc. 1st Conference on Durability of FRP Composites for Construction(CDCC'98), Sherbrooke (Canada), August 5-7th, pp. 487-497.
105. Katz, A., Berman, N., and Bank, L.C., (1999), "Effect of High Temperature on Bond Strength of FRP Rebars", J. Comp. Constr., Vol. 3, No. 2, pp. 73-81.
106. Katz, A. (1999). "Bond Mechanism of FRP Rebars to Concrete", Materials and Structures, 32, pp 761-768.
107. Keesler, R. J., and Powers, R. G.(1998), "Corroision of Epoxy-Coated Rebars Key Segmental Bridge-Monroe County", Report No. 88-8a, Florida Department of Transportation, Materials Office, Gainesville, Florida.
108. Khin, M., Harada, T., Tokumitsu, T., and Idemitsu, T., (1996), "The Anchorage Mechanism for FRP Tendons Using Highly Expansive

- Materials", Proc. 2nd Int. Conf. on Adv. Comp. Mat. in Bridges and Struct., El-Badry M.M. Ed., CSCE, Montreal, Canada, 959-964.
109. Ko, F. K.(1987), "Braiding, Engineered Materials Hand book", Vol. 1: Composites, ASM International, pp. 519-528
110. Ko, F. K.(1989), "Three Dimensional Fabrics for Composites, Textile Structural Composites: Series 3", Chou, T. W. and Ko, F. K., Editors, Elsevier, New York
111. Kelly, A, (1970), "Interface Effects and the Work of Fracture of a Fibrous Composite", Proceedings of Royal Society, London A319, pp. 95-116
112. Krishnamoorthy, R. K., Belarbi, A., Chandrashekhara, K., and Watkins, S.,(1997), "Hybrid Composite Rebars for Smart Concrete Structures", Proceedings of the International Composite Expo' 97, Nashville, Tennessee, January, pp. 69
113. Kumahara, S., Masuda, Y., and Tanano, Y., (1993), "Tensile Strength of Continuous Fiber Bar Under High Temperature", International Symposium on Fiber-Reinforced-Plastic Reinforcement for Concrete Structures, SP-138, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 731-742.
114. Larralde, J. and Silva-Rodriguez, R. (1993), "Bond and Slip of FRP Rebars in Concrete," Journal of Materials in Civil Engineering, 5(1), pp. 30-40.
115. Larralde, J., Silva-Rodriguez, R., Burdette, J. and Harris, B. (1994). "Bond Tests of Fiberglass-Reinforced Plastic Bars in Concrete", Journal of Testing and Evaluation, 22(4), pp. 351-359.
116. Lutz, L.A. and Gergeley, P. (1967), "Mechanics of Bond and Slip of Deformed Bars in Concrete", ACI Journal, Proceedings, American Concrete Institute, Vol. 64, No. 11, November, pp. 711-721.

117. Larsson, F. (1986), "The effect of ultraviolet light on mechanical properties of Kevlar 49 composites", *J. Reinf. Plas. Comp.*, No.5, pp. 19-22.
118. Liao, K., Schlthseisz, C.R., Hunston, D.L., and Brinson, C.L. (1998) "Long-Term Durability of FRP-Matrix Composite Materials for Infrastructure Applications: A Review", *J. Adv. Mat.*,; Vol. 30 No. 4, pp. 3-40.
119. Litherland, K.L., Oakley, D.R., and Proctor, B.A., (1981), "The Use of Accelerated Ageing Procedures to Predict the Long Term Strength of GRF Composites", *Cement and Concrete Research*, Vol. 11, pp. 455-466.
120. Lo, S. Y., Hahn, H. T. and Chiao, T. T.(1982), "Swelling of Kevlar 49/Epoxy and S2/Glass/Epoxy Composites, *Progress in Science and Engineering of Composites*", ICCM-IV, Fourth International RILEM Symposium (FRPRCS-2), E & FN Spon, 23-25 August, Univ. of Ghent Belgium, pp. 616-624
121. Machida A., (1993), "State-of-the-Art Report on Continuous Fiber Reinforcing Materials", Society of Civil Engineers(JSCE), Tokyo
122. Masguna, M., and K. Iwamoto., (1993), "Bond Characteristics of FRP Rod and Concrete After Freezing and Thawing Deterioration", *Fiber-Reinforced-Plastic Reinforcement for Concrete Structures: International Symposium*. Ed. Antonio Nanni and Charles Dolan. Detroit: ACI.
123. Mathey, R. G. and Watstein, D. (1961). "Investigation of Bond in Beam and Pull-Out Specimens with High-Yield-Strength Deformed Bars", *Journal of the American Concrete Institute*, 57(9), pp. 1071-1090.
124. Mallick, P.K., (1988), "Fiber Reinforced Composites, Materials, Manufacturing, and Design", Marcell Dekker, Inc., New York, New York, 469 pp.
125. Mukae, K., S. umacai, H. Nakai, H. Asai., (993), "Characteristics of Aramid FRP Rods" *Fiber-Reinforced-Plastic Reinforcement for Concrete*

- Structures: International Symposium. Ed. Antonio Nanni and Charles Dolan. Detroit: ACI.
126. Nagasaka, T., Fukuyama, H., and Tanigaki, M., (1993), "Shear Performance of Concrete Beams Reinforced with FRP Stirrups, Fiber-Reinforced-Plastic Reinforcement for Concrete Structures, SP-138, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 789-811.
 127. Nanni A., Rizkalla, S., Bakis, C.E., Conrad, J.O., and Abdelrahman, A. A., (1998), "Characterization of GFRP Ribbed Rod Used for Reinforced Concrete Construction", Proceedings of the International Composites Exhibition (ICE-98), Nashville, Tennessee, pp. 16A/1-6. 26
 128. Nanni, A., Francesco, M.,(2001), "Mechanical properties and durability of FRP rods", CIES 00-22, Department of Civil Engineering, University of Missouri-Rolla, U.S.A.
 129. Nanni, A., Micelli, F., and La Tegola, A., (2001), Durability of GFRP Bars Subjected to Aggressive Environment,¹⁸ Proc., 22nd International SAMPE Europe Conference, CNIT, "Making the Difference with Innovative Materials and Processes,"¹⁹ Paris, France, March 27-29, pp. 431-443.
 130. Nanni, A.; Nenninger, J.; Ash, K.; and Liu, J., (1997), "Experimental Bond Behavior of Hybrid Rods for Concrete Reinforcement", Structural Engineering and Mechanics, V. 5, No. 4, pp. 339-354.
 131. Nanni, A., Ed. (1993), "Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Properties and Applications", Developments in Civil Engineering, Vol. 42, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
 132. Nanni, A., Henneke, M. J. and Okamoto, T.,(1994), "Behavior of Concrete Beams with hybrid reinforcement", Construction and Building Materials, Vol. 8, No. 2, pp. 89-95
 133. Nanni, A., Henneke, M. J. and Okamoto, T.,(1994), "Tensile Properties of Hybrid Rods for Concrete Reinforcement", Construction and Building

- Materials, Vol. 8, No. 1, pp. 27-34
134. Nanni, A., Tanigaki, M and Osakada, S., (1993), "Tensile Properties of Braided FRP Rods for Concrete Reinforcement", *Cement & Concrete Composites*, Vol. 15, Elsevier Science Publishers, England, pp. 121-129
 135. Naway, E. G., (1990), "Reinforced concrete: Fundamental Approach", Pentice Hall Publication.
 136. Okamoto, T., Matsubara, S., Tanigaki, M., and Jasuo, K. (1993), "Practical Application and Performance of PPC Beams Reinforced with Braided FRP Bars", *Proceedings Fiber-Reinforced-Plastic Reinforcement for Concrete Structures*, SP-138, A. Nanni, and C. W. Dolan, Eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 875-894.
 137. Peirce, F. T. (1937), "Geometry of cloth structure", *Journal of Textile Institute*, Vol. 28, pp. T45
 138. Phillips, M. G. (1983), "Prediction of Long-Term Stress-Rupture Life for Glass Fiber-Reinforced Polyester Composites in Air and in Aqueous Environment," *Composites*, July, pp. 271-275.
 139. Phoenix, S. L.(1978), "Mechanical Response of a Tubular Braided Cable with Elastic Core", *Textile Research Journal*, Feb., pp. 81-91
 140. Platt M. M. (1950), "Mechanics of elastic performance of textile materials. Part IV: Influence of yarn twist on modulus of elasticity", *Textile Research Journal*, Volume 20, pp. 665-667
 141. Platt M. M. (1950), "Mechanics of elastic performance of textile materials. Part III: Some aspects of stress analysis of textile structure-continuous filament yarns" *Textile Research Journal*, Volume 20, pp. 1-15
 142. Pleimann, L.G., (1987), "Tension and Bond Pullout Tests of Deformed Fiberglass Rods", Final report for Marshall-Vega Corporation, Marshall, Arkansas, Civil Engineering Department, University of Arkansas, Fayetteville, Arkansas, pp. 5-11.

143. Pleimann, L.G., (1991), "Strength, Modulus of Elasticity, and Bond of Deformed FRP Rods", Proceedings of the Specialty Conference on Advanced Composite Materials in Civil Engineering Structures, Material Engineering Division, American Society of Civil Engineers, pp. 99-110.
31
144. Porter, L., Mehus, J., Young, A.K., O Neil, E.F., and Barnes B.A. (1997), "Aging of Fiber Reinforcement in Concrete", Proc. 3rd Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures", International Symposium, Sapporo, Japan, October 14-16th 1997, Sapporo Japan, Vol.2, pp.59-66.
145. Porter, M.L., and Barnes, B.A., (1998), "Accelerated Aging Degradation of Glass Fiber Composites", 2nd Intl. Conf. on Composites in Infrastructure, Vol. II, H. Saadatmanesh and M.R. Eshani, Eds., Univ. Arizona, Tucson, pp. 446-459.
146. Rahman, A. H., Kingsley, C. Y., and Crimi, J. (1996), "Durability of FRP Grid Reinforcement", Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, M.M. El-Badry, Ed., Canadian Soc. for Civil Engrg., Montreal, Quebec, pp. 681-690.
147. Rosen, W. B., (1965), "Mechanics of Composites Strengthening", Fibre Composite Materials, ASTM, Metals Park, Ohio
148. Roylance, M., and Roylance, O., (1981), "Effect of Moisture on the Fatigue Resistance of an Aramid-Epoxy Composite", Organic Coatings and Plastics Chemistry, American Chemical Society, Washington, D.C., V. 45, pp. 784-788.
149. Sen, R., Shahawy, M., Rosas, J., and Sukumar, S., (1998), "Durability of Aramid Pretensioned Elements in a Marine Environment", ACI Structural Journal, V. 95, No. 5, pp. 578-587.
150. Saadatmanesh, H and Fares E. Tannous.(1999), "Long-Term Behavior of Aramid Fiber-Reinforced Plastic (AFRP) Tendons", ACI Materials Journal, 96:297-305. May-June

151. Sasaki, I., Nishizaki, I., Sakamoto, H., Katawaki, K., and Kawamoto, Y., (1997), "Durability Evaluation of FRP Cables by Exposure Tests", Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, FRPRCS-3, Vol. 2, Japan Concrete Institute, Tokyo, pp. 131-137.
152. Sen, R., Shahawy, M., Rosas, J., Sukumar, S., (1998), "Durability of AFRP & CFRP Pretensioned Piles in a Marine Environment", Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Proceedings of the Second International Conference on Fiber Composites in Infrastructure ICCI'98, Vol. 2, Tucson, pp. 512~523
153. Sen, R., Shahawy, M., Sukumar, S., and Rosas, J., (1998b), "Effect of Tidal Exposure on Bond of CFRP Rods", Second International Conference on Composites in Infrastructure, Vol. II,
154. Sekijima, Kenzo, Yasushi Otsuka and Tomohiro Konno., (1999), " Durability of Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement Embedded in Concrete", Fourth International Symposium on Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures (SP-188). Ed. by Antonio Nanni, Charles Dolan, Sami Rizkalla. Farmington Hills: ACI International, 1999.
155. Schutte, C.L. (1994), "Environmental Durability of Glass-Fiber Composites", Mat. Sci. Eng., R13, No. 7, November 15th.
156. Sheard, P., Clarke, J., Dill, M., Hammersley, G., Richardson, D., (1997), "Eurocrete-Taking Account of Durability for Design of FRP Reinforced Concrete Structures", Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Proceedings of the Third International Symposium, Vol. 2, Sapporo, Oct. 1997, pp. 75~82
157. Smith, B. W., (1993), "Fractography for Continuous Fiber Composites", Engineered Materials Handbook, Vol. 1: Composites, ASTM International, pp. 787-793

158. Steckel, G. L., Hawkins G. F., Bauer J. L., (1998), "Environmental Durability of Composites for Seismic Retrofit of Bridge Column", Fiber Composites in Infrastructure, Proceedings of the Second International Conference on Fibre Composites in Infrastructure ICC'98, Vol. 2, Tucson, pp. 460-475
159. Tamuzs V., Apinis R., Vilks U., Modniks J., Tepfers R., (1995), " Ductility tests with hybrid fiber composite reinforcement FRP for concrete", Chalmers University of Technology, Division of Building Technology, Work No 4. Göteborg, 1995-04-18. p. 15.
160. Tamuzs V.(1999), "Tepfers R., Hybrid Composites with nonlinear behavior for reinforcing of concrete", International Conference on Recent Developments in Durability Analysis of Composite Systems, DURACOSYS July 11-14 1999 in Brussels, Belgium, July.
161. Tannous F.E., and Saddatmanesh H., (1999), "Durability of AR Glass Fiber Reinforced Plastic Bars", J. Comp. Constr., Vol. 3 No. 1, pp.12-19.
162. Takewaka, K., and Khin, M., (1996), "Deterioration of Stress-Rupture of FRP Rods in Alkaline Solution Simulating as Concrete Environment", Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, M.M. El-Badry, Ed., Canadian Soc. for Civil Engineering, Montreal, Quebec, pp. 649-664.
163. Tamuzs V., Tepfers R., Apinis R. and Modniks J.,(1999), "Pull-out, flexural rotation capacity and creep tests using hybrid composite rods and CFCC rods for reinforcement in concrete", Institute of Polymer Mechanics Latian Academy of Sciences Aizkraukles 23, Riga, LV-1006 S-412 96, Latvia, Work No: 32, Publication: 99:4, pp.7~11
164. Tamuzs, V., and Tepfers, R.,(1999), "Ductility of Non-Metallic Hybrid Fiber Composite Reinforcement for concrete", Proceedings of the Second International RILEM Symposium, Ghent, Belgium, August, pp. 18-25

165. Tannous, F. E., and Saadatmanesh, H., (1999), "Durability of AR- Glass Fiber Reinforced Plastic Bars", *Journal of Composites for Construction*, V. 3, No. 1, pp. 12-19.
166. Tanano, H., Masuda, Y., Kage, T., Fukuyama, H., Nishida, I. and Hashimoto, T., (1995), "Fire Resistance of Continuous Fiber Reinforced Concrete, Nonmetallic(FRP) Reinforcement for Concrete Structures", Edited by L. Taerwe, Proc. of the Second International RILEM Symposium (FRPRCS-2), E & FN Spon, 23-25 August, Univ. of Ghent, Belgium, pp. 368-376
167. Tepfers R., Olsson P-Å.(1992), "Ring Test for Evaluation of Bond Properties of Reinforcing Bars" International Conference "Bond in Concrete - From Research to Practice", Riga Latvia October 1992. pp.1-89 - 1-99.
168. Tepfers R., Karlsson M.(1997), "Pull-out and tensile reinforcement splice tests using FRP C-BARs", Chalmers University of Technology, Division of Building Technology. Work No: 13. Publication No: 97:2, Göteborg June. pp. 8.
169. Tepfers R.(1998), "Bond Between FRP-bars and Concrete", Chalmers University of Technology, Division of Building Technology, Work No. Publication 98:3. Göteborg, 1998-03-03. p. 16.
170. Tepfers R., Hedlund G., Rosinski B.(1997), "Pull-out and tensile reinforcement splice tests with GFRP bars", Chalmers University of Technology, Division of Building Technology. Work No: 18. Publication No: 97:3, Göteborg September.
171. The status of the nation's highway bridges: highway bridge replacement and rehabilitation program and national bridge inventory, Thirteenth report to the united states congress, Federal Highway Administration, US Department of Transportation, 1997.

172. Tighiouart, B., Benmokrane, B. and Gao, D. (1998). Investigation of Bond in Concrete Member with Fibre Reinforced Polymer (FRP) Bars, *Construction and Building Materials*, 12, pp. 453-462.
173. Tighiouart, B., Benmokrane, B., and Gao, D., (1998), "Investigation of Bond in Concrete Member With Fiber Reinforced Polymer (FRP) Bars", *Construction and Building Materials Journal* December, p. 10.
174. Tomosawa, F., and Nakatsuji, T., (1996), "Evaluation of the ACM Reinforcement Durability by Exposure Test", *Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, M.M. El-Badry, Ed., Canadian Soc. for Civil Engineering, Montreal, Quebec, pp. 699-706.
175. Tomosawa, F., and Nakatsuji, T., (1997), "Evaluation of the ACM Reinforcement Durability by Exposure Test", *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, FRPRCS-3, Vol. 2, Japan Concrete Institute, Tokyo, pp. 139-146.
176. Tudos, F. and David, P.K., (1996), "Comments on the Interpretation of Temperature Dependence of Processes in polymer", *Journal of Thermal Analysis*, Proceedings of the 1995 Symposium on thermal Analysis, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, England, Vol. 47, No. 2, pp. 589-593.
177. Uomoto, T., (2000), "Durability of FRP as Reinforcement for Concrete Structures", *Proceedings 3rd International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, ACMBS-3, J. L. Humar and A. G. Razaqpur, Eds., Canadian Soc. Civil Engineering, Montreal, Quebec, pp. 3-17.
178. Uomoto, Taketo and Tsugio Nishmura., (1999), "Deterioration of Aramid, Glass, and Carbon Fibers Due to Alkali, Acid, and Water in Different Temperatures", *Fourth International Symposium on Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures (SP-188)*. Ed. by Antonio Nanni, Charles Dolan, Sami Rizkalla. Farmington Hills: ACI International, 1999.

179. Uppuluri, V. S., Bakis, C. E., Al-Dulaijan, S. U., Nanni, A., and Boothby, T. E., (1996), "Analysis of the Bond Mechanism in FRP Reinforcement Rods: The Effect of Rod Design and Properties." Proc. ACMBS-II, 2nd International Conf. on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, M. M. El-Badry, ed., Canadian Soc. for Civil Engineering, Montreal, Quebec, Canada, pp. 893-900.
180. Van Den Ende, C. A. M., and Ven Den Dolder, A., (1991), " Comparison of Environmental Stress Corrosion Cracking in Different Glass Fiber Reinforced Thermoset Composites," in Durability of Polymer Based Composite Systems for Structural Applications, A. H. Cardon and G. Verchery Eds., Elsevier Applied Science.
181. Vijay, P.V., and GangaRao, H.V.S., (1998), "Creep Behavior of Concrete Beams Reinforced with GFRP Bars", Proceedings of the First International Conference (CDCC 1998), Durability of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction, pp. 661-667.
182. Vijay, P.V., and Ganga Rao H.V.S., (1999), "Accelerated and Natural Weathering of Glass Fiber Reinforced Plastic Bars", Proc. FRPRCS-4, November 1-4th, 1999, Baltimore, USA, pp. 605-614.
183. Vijay, P.V.,(1999), "Aging and design of concrete members reinforced with GFRP bars", Ph. D thesis, Department of civil engineering, West Virginia University, Morgantown, West Virginia, USA.
184. Zweben, C., Rosen, B. W., (1970), "A Statistical Theory of Material Strength with Application to Composite Materials", Journal of Mechanics Physics Solids, Vol. 18, pp. 189-206

부 록

APPENDIX A: 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 품질기준 및
치수의 규격화

APPENDIX B: 하이브리드 FRP 리바의 내구성 시험결과

APPENDIX C: 일반 및 FRP 리바의 부착 시험결과

APPENDIX D: Nonflex 비선형 해석 프로그램을 이용한 철근
콘크리트 공시체의 휨 해석 결과

APPENDIX E: 학술논문집 및 학술발표회 논문집 게재 논문

APPENDIX A: 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 품질기준 및 치수의 규격화

성능이 우수한 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 지속적인 생산과 현장 적용시 안전성을 향상시키기 위하여 품질관리는 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 품질기준안을 작성하여 공장에서 제품 생산시 지속적인 관리를 통하여 우수한 성능의 FRP 리바를 생산하도록 하였다.

1. 품질기준안

일반 및 하이브리드 FRP 리바는 콘크리트 구조물에서 보강철근의 부식에 대한 문제를 해결할 수 있는 제품으로 비중이 작으면서도 강도가 높고 각종 환경에 노출되어 우수한 내구성을 가진다. 본 FRP 리바의 품질기준안 이러한 특성을 가진 FRP 리바를 현장에 적용하기 위하여 FRP 리바의 품질 및 규격을 엄격하게 관리하여 품질관리 지침을 확립하는데 있다.

1) FRP 리바의 치수규격 및 인장성능

- (1) 시험방법: ACI 440위원회
- (2) 품질기준:

Type of FRP 리바	치수 (직경)	항복강도 (MPa)	극한강도 (MPa)	항복변형률 (%)	극한변형률 (%)	탄성계수 (MPa)
CFRP	3mm	-	1,700 이상	-	2.0이하	100,000 이상
	4.5mm					
	6mm					
	9mm					
	10mm					
GFRP	3mm	-	800이상	-	3.5 이하	320,000 이상
	4.5mm	-				
	6mm	-				
	9mm					
	10mm					
	13mm	-				

Hybrid(A)	6m	500 이상	500 이상	1.55 이하	3.3 이상	50,000 이상
	9mm					
	10mm					
	13mm					
Hybrid(B)	6m	300이상	300 이상	1.55 이하	3.3 이상	32,000 이상
	9mm					
	10mm					
	13mm					
Hybrid(C)	6m	350 이상	300 이상	1.55 이하	3.3 이상	40,000 이상
	9mm					
	10mm					
	13mm					

2) Interlaminar shear stress: ISS

- (1) 시험방법: ASTM D 4475
- (2) 품질기준:

	CFRP	GFRP	Hybrid(A)	Hybrid(B)	Hybrid(C)
ISS	350 이상	350 이상	400 이상	350 이상	350 이상

3) 유효직경

- (1) 시험방법: ASTM D 3916
- (2) 품질기준: 5회 실시하여 평균값으로 결정한다.

4) 비중

- (1) 시험방법: ASTM D 792-00
- (2) 품질기준:

	CFRP	GFRP	Hybrid(A)	Hybrid(B)	Hybrid(C)
비중	1.60	1.74	1.35	1.44	1.40

5) 수분흡수율

- (1) 시험방법: 내구성능 평가 참조
- (2) 품질기준:

	CFRP	GFRP	Hybrid(A)	Hybrid(B)	Hybrid(C)
흡수율	2%이하	2%이하	2%이하	2%이하	2%이하

6) 내구성 평가

- (1) 시험방법: FRP 리바의 내구성 평가기준은 각각의 환경에 축진 열화환경 (알칼리, 동결융해, 동결융해반복 등)에 노출 시킨 후 기준 공시체의 강도에 비하여 다음과 같은 잔류강도비를 유지하여야 한다.
- (2) 품질기준

	CFRP	GFRP	Hybrid(A)	Hybrid(B)	Hybrid(C)
잔류 인장강도비	0.75	0.75	0.75	0.75	0.65
잔류 ISS 비	0.65	0.65	0.65	0.75	0.65

APPENDIX B: 하이브리드 FRP 리바의 내구성 시험결과

Table B-1 Compressive strength of FRP rebar specimens

Type of FRP rebars	Repeated No.	Compressive strength (MPa)	Residual strength (%)	Plain of failure
CFRP	1	236.94	122.7	vertical
	2	150.83	78.1	vertical
	3	148.28	76.8	vertical
	Mean	178.68	92.5	vertical
GFRP	1	239.24	74.8	vertical/horizontal
	2	263.57	82.5	vertical/horizontal
	3	233.38	73.0	vertical/horizontal
	Mean	245.39	76.8	vertical/horizontal
AFRP	1	110.27	80.8	vertical/bearing
	2	124.92	91.5	vertical/bearing
	3	128.41	94.1	vertical/bearing
	4	140.51	102.9	vertical/bearing
	Mean	126.03	92.3	vertical/bearing
CFRP(D)	1	361.78	75.7	vertical/bearing
	2	503.95	105.5	vertical/bearing
	3	543.18	113.7	vertical/bearing
	Mean	469.64	98.3	vertical/bearing
GFRP(D)	1	390.82	93.6	vertical/bearing
	2	369.90	88.6	vertical/bearing
	3	316.43	75.8	vertical/bearing
	Mean	359.05	86.0	vertical/bearing
Hybrid(A)	1	419.6	-	bearing
	2	434.6	-	bearing
	3	410.3	-	bearing
	4	460.6	-	bearing
	Mean	431.3	-	
Hybrid(B)	1	372.2	-	bearing
	2	340.0	-	bearing
	3	331.7	-	bearing
	Mean	348.0	-	
Hybrid(C)	1	410.1	-	bearing
	2	406.1	-	bearing
	3	421.0	-	bearing
	4	415.5	-	bearing
	5	412.3	-	bearing
	Mean	413.0	-	

Table B-2 Compressive test after alkali exposure(50days, T=60°C)

Type of FRP rebar	Repeated No.	Compressive strength(MPa)	Residual strength (%)	Plain of failure
CFRP	1	125.10	64.8	vertical
	2	116.94	60.5	vertical
	3	229.43	118.8	vertical
	Mean	157.15	81.4	
GFRP	1	175.16	54.8	vertical/horizontal
	2	162.80	50.9	vertical/horizontal
	3	173.50	54.3	vertical/horizontal
	Mean	170.49	53.3	
AFRP	1	112.59	82.5	vertical/bearing
	2	112.83	82.7	vertical/bearing
	3	82.82	60.7	vertical/bearing
	Mean	102.75	75.3	
CFRP(D)	1	375.03	84.4	vertical/bearing
	2	381.15	84.0	vertical/bearing
	3	398.47	78.2	vertical/bearing
	Mean	384.88	82.2	
GFRP(D)	1	182.90	43.8	vertical/bearing
	2	242.20	58.0	vertical/bearing
	3	-	-	
	Mean	212.55	50.9	
Hybrid(A)	1	390.1	90.4	bearing
	2	412.4	95.6	bearing
	3	406.0	94.1	bearing
	Mean	402.8	93.4	
Hybrid(B)	1	233.9	67.2	bearing
	4	227.3	65.3	bearing
	Mean	230.6	66.3	
Hybrid(C)	1	350.4	84.8	bearing
	2	417.0	101.0	bearing
	Mean	383.7	92.9	

Table B-3 Compressive test after alkali exposure(100days, T=60°C)

Type of FRP rebars	Repeated No.	Compressive strength(MPa)	Residual strength (%)	Plain of failure
CFRP	1	146.49	75.8	vertical
	2	174.77	90.5	vertical
	3	150.31	77.8	vertical
	4	163.05	84.4	vertical
	5	240.89	124.7	vertical
	Mean	175.11	90.6	
GFRP	1	210.06	65.7	vertical/horizontal
	2	234.01	73.2	vertical/horizontal
	3	204.96	64.1	vertical/bearing
	4	192.22	60.1	vertical/bearing
	5	373.12	116.7	vertical/bearing
	Mean	242.87	76.0	
AFRP	1	140.51	102.9	vertical/bearing
	2	149.34	109.4	vertical/bearing
	3	147.25	107.9	vertical/bearing
	4	83.04	60.8	vertical/bearing
	Mean	130.04	95.3	
CFRP(D)	1	454.52	95.2	vertical/bearing
	2	405.60	84.9	vertical/bearing
	3	440.76	92.3	vertical/bearing
	Mean	433.63	90.8	
GFRP(D)	1	341.27	81.7	vertical/bearing
	2	369.89	88.6	vertical/bearing
	3	314.06	75.2	vertical/bearing
	4	319.57	76.5	vertical/bearing
	Mean	336.20	80.5	
Hybrid(A)	1	274.6	63.7	vertical/bearing
	2	328.0	76.0	bearing
	Mean	301.3	69.9	
Hybrid(B)	1	181.9	52.3	bearing
	2	194.4	55.9	bearing
	Mean	188.2	54.1	
Hybrid(C)	1	357.4	86.5	bearing
	2	331.7	80.3	bearing
	Mean	311.2	75.3	

Table B-4 Compressive test after acid exposure(50days, T=60℃)

Type of FRP rebars	Repeated No.	Compressive strength(MPa)	Residual strength (%)	Plain of failure
CFRP	1	169.30	87.6	vertical
	2	158.98	82.3	vertical
	3	153.76	79.6	vertical
	Mean	160.68	83.2	
GFRP	1	203.95	63.8	vertical/horizontal
	2	215.03	67.3	vertical/horizontal
	3	203.95	63.8	vertical/horizontal
	Mean	207.64	65.0	
AFRP	1	122.13	89.5	vertical/bearing
	2	126.78	92.9	vertical/bearing
	3	125.85	92.2	vertical/bearing
	Mean	124.92	91.5	
CFRP(D)	1	375.03	78.5	vertical/bearing
	2	381.15	79.8	vertical/bearing
	3	398.47	83.4	vertical/bearing
	Mean	384.88	80.6	
GFRP(D)	1	220.02	52.7	vertical/bearing
	2	203.51	48.7	vertical/bearing
	3	227.10	54.4	vertical/bearing
	Mean	216.88	51.9	
Hybrid(A)	1	383.8	88.9	bearing
	2	379.2	87.9	bearing
	3	365.2	84.7	bearing
	Mean	376.1	87.3	
Hybrid(B)	1	298.6	85.8	bearing
	2	273.8	78.7	bearing
	3	295.1	84.8	bearing
	4	312.8	89.8	bearing
	Mean	295.1	84.8	
Hybrid(C)	1	377.3	91.3	bearing
	2	366.0	88.6	bearing
	3	361.7	87.6	bearing
	Mean	368.3	89.2	

Table B-5 Compressive test after acid exposure(100days, T=60°C)

Type of FRP rebars	Repeated No.	Compressive strength(MPa)	Residual strength (%)	Plain of failure
CFRP	1	169.30	87.6	vertical
	2	158.98	82.3	vertical
	3	153.76	79.6	vertical
	Mean	160.68	83.2	
GFRP	1	203.95	63.8	vertical/horizontal
	2	215.03	67.3	vertical/horizontal
	3	203.95	63.8	vertical/horizontal
	Mean	207.64	65.0	
AFRP	1	122.13	89.5	vertical/bearing
	2	126.78	92.9	vertical/bearing
	3	125.85	92.2	vertical/bearing
	Mean	124.92	91.5	
CFRP(D)	1	375.03	78.5	vertical/bearing
	2	381.15	79.8	vertical/bearing
	3	398.47	83.4	vertical/bearing
	Mean	384.88	80.6	
GFRP(D)	1	220.02	52.7	vertical/bearing
	2	203.51	48.7	vertical/bearing
	3	227.10	54.4	vertical/bearing
	Mean	216.88	51.9	
Hybrid(A)	1	388.6	90.1	bearing
	2	379.1	87.9	bearing
	3	357.9	82.9	bearing
	Mean	375.2	86.9	
Hybrid(B)	1	259.9	74.7	bearing
	2	239.1	68.7	bearing
	3	263.3	75.7	bearing
	Mean	299.5	73.0	
Hybrid(C)	1	331.6	80.3	bearing
	2	357.3	86.5	
	3	345.4	83.6	bearing
	Mean	298.5	83.5	

Table B-6 Compressive test after salt exposure(50days, T=60℃)

Type of FRP rebars	Repeated No.	Compressive strength(MPa)	Residual strength (%)	Plain of failure
CFRP	1	167.01	86.5	vertical
	2	195.54	101.2	vertical
	3	175.50	90.9	vertical
	Mean	179.35	92.8	
GFRP	1	291.34	91.1	vertical/horizontal
	2	275.92	86.3	vertical/horizontal
	3	297.07	92.9	vertical/horizontal
	4	95.29	29.8	vertical/horizontal
	Mean	239.90	75.1	
AFRP	1	65.83	48.2	vertical/bearing
	2	144.90	106.0	vertical/bearing
	3	144.93	106.2	vertical/bearing
	Mean	118.49	86.8	
CFRP(D)	1	447.39	93.7	vertical/bearing
	2	429.55	89.9	vertical/bearing
	3	440.76	92.3	vertical/bearing
	4	360.25	75.4	vertical/bearing
	Mean	419.49	87.8	
GFRP(D)	1	290.48	69.6	vertical/bearing
	2	311.87	74.7	vertical/bearing
	3	319.26	76.5	vertical/bearing
	Mean	307.20	73.6	
Hybrid(A)	1	419.6	97.3	bearing
	2	408.4	94.7	bearing
	Mean	414.0	96.0	
Hybrid(B)	1	302.6	86.9	bearing
	2	318.2	91.4	bearing
	3	290.1	83.3	bearing
	Mean	303.6	87.2	
Hybrid(C)	1	360.8	87.4	bearing
	2	334.5	81.0	bearing
	3	387.6	93.8	bearing
	Mean	361.0	87.4	

Table B-7 Compressive test after salt exposure(100days, T=60°C)

Type of FRP rebars	Repeated No.	Compressive strength(MPa)	Residual strength (%)	Plain of failure
CFRP	1	160.51	83.1	vertical
	2	175.24	90.7	vertical
	3	159.49	82.6	vertical
	Mean	165.08	85.5	
GFRP	1	140.38	43.9	vertical/horizontal
	2	180.13	56.4	vertical/horizontal
	3	0.0	0.0	vertical/horizontal
	Mean	160.25	50.1	
AFRP	1	122.13	89.5	vertical/horizontal
	2	103.52	75.8	vertical/bearing
	3	102.59	75.2	vertical/bearing
	Mean	109.41	80.2	
CFRP(D)	1	398.98	83.5	vertical/bearing
	2	392.36	82.1	vertical/bearing
	3	369.94	77.5	vertical/bearing
	Mean	387.09	81.0	
GFRP(D)	1	216.88	51.9	vertical/bearing
	2	311.08	74.5	vertical/bearing
	3	276.32	66.2	vertical/bearing
	Mean	268.09	64.2	
Hybrid(A)	1	370.9	86.6	bearing
	2	375.0	86.9	bearing
	3	348.8	80.2	bearing
	Mean	364.9	84.4	
Hybrid(B)	1	289.1	83.0	bearing
	2	294.3	84.5	bearing
	3	285.9	82.2	bearing
	Mean	289.8	83.2	
Hybrid(C)	1	352.6	85.4	bearing
	2	326.8	79.1	bearing
	3	344.2	83.3	bearing
	Mean	341.2	82.6	

Table B-8 Compressive test after deionized water exposure
(50days, T=60°C)

Type of FRP rebars	Repeated No.	Compressive strength(MPa)	Residual strength (%)	Plain of failure
CFRP	1	144.71	74.9	vertical
	2	105.61	54.7	vertical
	3	244.08	126.4	vertical
	4	237.83	123.1	vertical
	Mean	183.06	94.8	
GFRP	1	315.92	98.8	vertical/horizontal
	2	218.09	68.2	vertical/horizontal
	3	341.02	106.7	vertical/horizontal
	4	300.13	93.9	vertical/horizontal
	Mean	293.79	91.9	
AFRP	1	106.08	77.7	vertical/bearing
	2	145.16	106.3	vertical/bearing
	3	118.41	86.7	vertical/bearing
	5	137.95	101.1	vertical/bearing
	Mean	111.24	81.5	
CFRP(D)	1	374.52	78.4	vertical/bearing
	2	330.19	69.1	vertical/bearing
	3	418.85	87.7	vertical/bearing
	4	500.38	104.8	vertical/bearing
	5	558.98	117.0	bearing
	Mean	436.59	91.4	
GFRP(D)	1	387.20	92.7	bearing
	2	363.14	87.0	bearing
	3	388.14	93.0	bearing
	Mean	379.49	90.9	
Hybrid(A)	1	406.9	94.3	bearing
	2	429.1	99.5	bearing
	3	427.6	99.1	bearing
	4	446.7	103.5	bearing
	Mean	427.6	99.1	
Hybrid(B)	1	320.3	92.0	bearing
	2	330.7	95.0	bearing
	3	321.3	92.3	bearing
	Mean	324.1	93.1	
Hybrid(C)	1	371.8	90.0	bearing
	2	386.2	93.5	
	3	382.4	92.6	
	4	390.5	94.6	bearing
	5	378.7	91.7	bearing
	Mean	381.9	92.5	

Table B-9 Compressive test after deionized water exposure
(100days, T=60°C)

Type of FRP rebars	Repeated No.	Compressive strength(MPa)	Residual strength (%)	Plain of failure
CFRP	1	190.20	98.5	vertical
	2	163.31	84.5	vertical
	Mean	176.76	91.5	
GFRP	1	154.14	48.2	vertical/horizontal
	2	230.57	72.1	vertical/horizontal
	Mean	192.36	60.2	
AFRP	1	111.43	81.6	vertical/horizontal
	2	100.50	73.6	vertical/horizontal
	3	113.52	83.2	vertical/horizontal
	Mean	108.48	79.5	
CFRP(D)	1	468.28	98.0	vertical/bearing
	2	411.21	86.1	vertical/bearing
	3	364.84	76.4	vertical/bearing
	Mean	414.78	86.8	
GFRP(D)	1	243.93	58.4	vertical/bearing
	2	237.79	57.0	vertical/bearing
	3	237.95	57.0	vertical/bearing
	Mean	239.89	57.5	
Hybrid(A)	1	349.5	81.0	bearing
	2	373.4	86.6	bearing
	Mean	361.5	83.8	bearing
Hybrid(B)	1	234.9	67.5	bearing
	2	221.5	63.6	bearing
	3	219.3	65.7	bearing
	Mean	225.2	65.6	
Hybrid(C)	1	359.8	87.1	bearing
	2	294.3	71.2	bearing
	3	314.6	76.2	bearing
	Mean	322.9	78.2	

Table B-10 Compressive test after repeated wet-dry cycles

Type of FRP rebars	Repeated No.	Compressive strength(MPa)	Residual strength (%)	Plain of failure
CFRP	1	168.66	87.3	vertical
	2	187.39	97.0	vertical
	3	179.11	92.7	vertical
	Mean	178.39	92.3	vertical
GFRP	1	249.43	78.0	vertical/horizontal
	2	213.76	66.9	vertical/horizontal
	Mean	231.59	72.5	
AFRP	1	115.62	84.7	vertical/horizontal
	2	123.53	90.5	vertical/horizontal
	3	112.13	82.1	vertical/horizontal
	Mean	117.09	85.8	
CFRP(D)	1	439.24	92.0	vertical/bearing
	2	424.97	89.0	vertical/bearing
	3	409.68	85.8	vertical/bearing
	Mean	424.63	88.9	
GFRP(D)	1	303.22	72.6	vertical/bearing
	2	283.09	67.8	vertical/bearing
	3	309.51	74.1	vertical/bearing
	Mean	298.60	71.5	
Hybrid(A)	1	384.6	89.1	bearing
	2	386.2	89.5	bearing
	3	375.0	86.9	bearing
	Mean	381.9	88.5	
Hybrid(B)	1	256.9	73.8	bearing
	2	255.8	73.5	bearing
	3	243.3	69.9	bearing
	Mean	252.0	72.4	
Hybrid(C)	1	363.7	88.0	bearing
	2	333.0	80.6	bearing
	3	312.2	75.6	bearing
	Mean	336.3	81.4	

Table B-11 Compressive test after long-term oven dry exposure

Type of FRP rebars	Repeated No.	Compressive strength(MPa)	Residual strength (%)	Plain of failure
CFRP	1	165.86	85.9	vertical
	2	192.10	99.4	vertical
	3	181.27	93.8	vertical
	Mean	179.75	93.0	
GFRP	1	246.24	77.0	vertical/horizontal
	2	238.73	74.7	vertical/horizontal
	3	259.87	81.3	vertical/horizontal
	Mean	248.28	77.7	
AFRP	1	106.54	78.0	vertical/horizontal
	2	109.80	80.4	vertical/horizontal
	3	113.76	83.3	vertical/horizontal
	Mean	110.03	80.6	
CFRP(D)	1	447.90	93.8	vertical/bearing
	2	420.38	88.0	vertical/bearing
	3	414.27	86.7	vertical/bearing
	Mean	427.52	89.5	
GFRP(D)	1	308.25	73.8	vertical/bearing
	2	305.42	73.2	vertical/bearing
	Mean	306.83	73.5	
Hybrid(A)	1	391.7	90.8	bearing
	2	403.7	93.6	bearing
	3	347.1	80.5	bearing
	Mean	380.8	88.3	
Hybrid(B)	1	254.8	73.2	bearing
	2	283.9	81.6	bearing
	3	295.3	84.8	bearing
	Mean	278.0	79.9	
Hybrid(C)	1	349.9	84.7	bearing
	2	315.6	76.4	bearing
	3	386.6	93.6	bearing
	Mean	350.7	84.9	

Table B-12 Compressive test after repeated freezing–thawing exposure

Type of FRP rebars	Repeated No.	Compressive strength (MPa)	Residual strength (%)	Plain of failure
CFRP	1	153.25	79.3	vertical
	2	181.91	94.2	vertical
	3	178.73	92.5	vertical
	Mean	171.30	88.7	
GFRP	1	220.51	69.0	vertical/horizontal
	2	225.99	70.7	vertical/horizontal
	3	244.97	76.6	vertical/horizontal
	Mean	230.49	72.1	
AFRP	1	114.45	83.8	vertical/horizontal
	2	106.54	78.0	vertical/horizontal
	3	109.80	80.4	vertical/horizontal
	Mean	110.27	80.8	
CFRP(D)	1	437.71	91.6	vertical/bearing
	2	419.36	87.8	vertical/bearing
	3	411.72	86.2	vertical/bearing
	Mean	422.93	88.5	
GFRP(D)	1	284.66	68.2	vertical/bearing
	2	300.86	72.1	vertical/bearing
	3	294.41	70.5	vertical/bearing
	Mean	293.31	70.2	
Hybrid(A)	1	348.7	80.8	bearing
	2	395.7	91.7	bearing
	3	355.1	82.3	bearing
	Mean	366.5	85.0	
Hybrid(B)	1	231.9	66.6	bearing
	2	261.0	75.0	bearing
	3	262.1	75.3	bearing
	Mean	251.7	72.3	
Hybrid(C)	1	336.9	81.6	bearing
	2	312.2	75.6	bearing
	3	361.9	87.6	bearing
	Mean	337.0	81.6	

Table B-13 Compressive test after sulfate(Na_2SO_4) exposure

Type of FRP rebars	Repeated No.	Compressive strength (MPa)	Residual strength (%)	Plain of failure
CFRP	1	169.94	88.0	vertical
	2	184.33	95.4	vertical
	3	167.26	86.6	vertical
	Mean	173.84	90.0	
GFRP	1	243.57	76.2	vertical/horizontal
	2	256.43	80.2	vertical/horizontal
	3	269.94	84.5	vertical/horizontal
	Mean	256.65	80.3	
AFRP	1	119.34	87.4	vertical/horizontal
	2	116.55	85.4	vertical/horizontal
	3	124.69	91.3	vertical/horizontal
	Mean	120.19	88.0	
CFRP(D)	1	409.68	85.8	vertical/bearing
	2	449.48	94.1	vertical/bearing
	3	472.87	99.0	vertical/bearing
	Mean	444.01	93.0	
GFRP(D)	1	335.30	80.3	vertical/bearing
	2	348.04	83.4	vertical/bearing
	3	369.27	88.4	vertical/bearing
	Mean	350.87	84.0	
Hybrid(A)	1	351.9	81.6	bearing
	2	392.5	91.0	bearing
	3	389.4	90.3	bearing
	Mean	377.9	87.6	
Hybrid(B)	1	282.9	81.3	bearing
	2	295.3	84.8	bearing
	3	290.1	83.3	bearing
	Mean	289.4	83.1	
Hybrid(C)	1	374.1	90.6	bearing
	2	358.3	86.7	bearing
	3	336.2	81.4	bearing
	Mean	356.2	86.2	

Table B-14 Compressive test after CaCl₂ solution exposure

Type of FRP rebars	Repeated No.	Compressive strength (MPa)	Residual strength (%)	Plain of failure
CFRP	1	167.77	86.9	vertical
	2	176.31	91.3	vertical
	3	179.02	92.7	vertical
	Mean	174.37	90.3	
GFRP	1	238.47	74.6	vertical/horizontal
	2	282.55	88.4	vertical/horizontal
	3	257.83	80.7	vertical/horizontal
	Mean	259.62	81.2	
AFRP	1	116.78	85.5	vertical/horizontal
	2	119.34	87.4	vertical/horizontal
	3	121.90	89.3	vertical/horizontal
	Mean	119.34	87.4	
CFRP(D)	1	419.36	87.8	vertical/bearing
	2	446.88	93.6	vertical/bearing
	3	455.03	95.3	vertical/bearing
	Mean	440.42	92.2	
GFRP(D)	1	327.75	78.5	vertical/bearing
	2	363.61	87.1	vertical/bearing
	3	361.25	86.5	vertical/bearing
	Mean	350.87	84.0	
Hybrid(A)	1	364.7	84.5	bearing
	2	371.8	86.2	bearing
	3	375.0	86.9	bearing
	Mean	370.5	85.9	
Hybrid(B)	1	294.3	84.5	bearing
	2	288.1	82.7	bearing
	3	292.2	83.9	bearing
	Mean	291.5	83.7	
Hybrid(C)	1	389.7	94.3	bearing
	2	338.8	82.0	bearing
	3	320.6	77.6	bearing
	Mean	349.7	84.7	

Table B-15 Compressive test after salt and repeated wet-dry cycles exposure

Type of FRP rebars	Repeated No.	Compressive strength (MPa)	Residual strength (%)	Plain of failure
CFRP	1	155.16	80.3	vertical
	2	171.85	89.0	vertical
	3	166.37	86.1	vertical
	Mean	164.46	85.1	
GFRP	1	196.56	61.5	vertical/horizontal
	2	209.04	65.4	vertical/horizontal
	3	201.15	62.9	vertical/horizontal
	Mean	202.25	63.3	
AFRP	1	103.99	76.2	vertical/horizontal
	2	119.34	87.4	vertical/horizontal
	3	110.27	80.8	vertical/horizontal
	Mean	111.20	81.5	
CFRP(D)	1	429.04	89.8	vertical/bearing
	2	416.82	87.3	vertical/bearing
	3	404.08	84.6	vertical/bearing
	Mean	416.65	87.2	
GFRP(D)	1	280.41	67.2	vertical/bearing
	2	270.35	64.8	vertical/bearing
	3	295.98	70.9	vertical/bearing
	Mean	282.25	67.6	
Hybrid(A)	1	375.0	86.9	bearing
	2	373.4	86.6	bearing
	3	364.7	84.5	bearing
	Mean	371.0	86.0	
Hybrid(B)	1	229.8	66.0	bearing
	2	245.4	70.5	bearing
	3	226.7	65.1	bearing
	Mean	233.9	67.2	
Hybrid(C)	1	321.3	77.8	bearing
	2	319.5	77.4	bearing
	3	363.5	88.0	bearing
	Mean	334.8	81.0	

Table B-16 Compressive test after salt and repeated freezing-thawing cycles exposure

Type of FRP rebars	Repeated No.	Compressive strength (MPa)	Residual strength (%)	Plain of failure
CFRP	1	143.31	74.2	vertical
	2	158.60	82.1	vertical
	3	167.13	86.5	vertical
	Mean	156.35	80.9	
GFRP	1	204.08	63.8	vertical/horizontal
	2	200.38	62.7	vertical/horizontal
	3	182.04	57.0	vertical/horizontal
	Mean	195.50	61.2	
AFRP	1	110.03	80.6	vertical/horizontal
	2	97.94	71.7	vertical/horizontal
	3	103.75	76.0	vertical/horizontal
	Mean	103.91	76.1	
CFRP(D)	1	426.50	89.3	vertical/bearing
	2	403.06	84.4	vertical/bearing
	3	401.53	84.1	vertical/bearing
	Mean	410.36	85.9	
GFRP(D)	1	272.08	65.2	vertical/bearing
	2	251.95	60.3	vertical/bearing
	3	247.39	59.3	vertical/bearing
	Mean	257.14	61.6	
Hybrid(A)	1	320.9	74.4	bearing
	2	359.9	83.4	bearing
	3	343.2	79.5	bearing
	Mean	341.3	79.1	
Hybrid(B)	1	210.1	60.3	bearing
	2	231.9	66.6	bearing
	3	222.5	63.9	bearing
	Mean	221.5	63.6	
Hybrid(C)	1	325.8	78.9	bearing
	2	306.3	74.1	bearing
	3	284.2	68.8	bearing
	Mean	305.4	73.9	

Table B-17 Compressive test after UV radiation exposure

Type of FRP rebars	Repeated No.	Compressive strength (MPa)	Residual strength (%)	Plain of failure
GFRP	1	243.6	76.2	vertical/horizontal
	2	280.6	87.8	vertical/horizontal
	3	256.6	80.3	vertical/horizontal
	Mean	260.3	81.4	
Hybrid(A)	1	340.8	79.0	bearing
	2	338.4	78.4	bearing
	3	344.8	79.9	bearing
	Mean	341.3	79.1	
Hybrid(B)	1	303.7	87.2	bearing
	2	275.6	79.2	bearing
	3	299.5	86.0	bearing
	Mean	292.9	84.1	
Hybrid(C)	1	328.4	79.5	bearing
	2	336.4	81.4	bearing
	3	307.8	74.5	bearing
	Mean	324.2	78.5	

Table B-18 Interlaminar shear stress of FRP rebar specimens

Type of FRP rebars	Repeated No.	ISS (MPa)	Residual strength(%)	Plain of failure
CFRP	1	47.37	-	vertical
	2	47.37	-	vertical
	3	46.10	-	vertical
	4	43.55	-	vertical
	5	49.41	-	vertical
	Mean	46.76	-	
GFRP	1	34.63	-	vertical/horizontal
	2	41.09	-	vertical/horizontal
	3	62.82	-	vertical/horizontal
	4	51.95	-	vertical/horizontal
	5	65.20	-	vertical/horizontal
	Mean	53.22	-	
AFRP	1	39.90	-	vertical/bearing
	2	43.65	-	vertical/bearing
	3	35.57	-	vertical/bearing
	Mean	39.71	-	
CFRP(D)	1	92.37	-	vertical/bearing
	2	74.71	-	vertical/bearing
	3	64.52	-	vertical/bearing
	4	63.84	-	vertical/bearing
	5	98.48	-	vertical/bearing
	6	68.32	-	vertical/bearing
	7	75.39	-	vertical/bearing
	Mean	76.80	-	
GFRP(D)	1	63.09	-	vertical/bearing
	2	63.30	-	vertical/bearing
	3	73.63	-	vertical/bearing
	4	67.81	-	vertical/bearing
	5	68.54	-	vertical/bearing
	6	81.23	-	vertical/bearing
	7	73.68	-	vertical/bearing
	Mean	70.18	-	
Hybrid(A)	1	126.1	-	bearing
	2	111.7	-	bearing
	3	119.3	-	bearing
	Mean	119.1	-	
Hybrid(B)	1	138.6	-	bearing
	2	99.8	-	bearing
	3	108.1	-	bearing
	4	98.4	-	bearing
	Mean	102.0	-	
Hybrid(C)	1	109.4	-	bearing
	2	122.7	-	bearing
	3	101.5	-	bearing
	4	119.4	-	bearing
	5	116.6	-	bearing
	6	113.4	-	bearing
	7	118.9	-	bearing
	Mean	114.6	-	

Table B-19 Interlaminar shear stress of FRP rebar after alkali exposure
(50days, T=60°C)

Type of FRP rebars	Repeated No.	ISS (MPa)	Residual strength (%)	Plain of failure
CFRP	1	47.20	100.9	vertical
	2	42.53	91.0	vertical
	3	42.28	90.4	vertical
	Mean	44.01	94.1	
GFRP	1	43.04	80.9	vertical/horizontal
	2	40.16	75.5	vertical/horizontal
	3	39.14	73.5	vertical/horizontal
	Mean	40.78	76.6	
AFRP	1	33.02	83.2	vertical/horizontal
	2	32.25	81.2	vertical/horizontal
	3	36.28	91.4	vertical/horizontal
	Mean	33.85	85.2	
CFRP(D)	1	74.03	96.4	vertical/bearing
	2	69.62	90.6	vertical/bearing
	3	73.69	95.9	vertical/bearing
	Mean	72.45	94.3	
GFRP(D)	1	53.04	75.6	vertical/bearing
	2	54.92	78.3	vertical/bearing
	3	55.66	79.3	vertical/bearing
	Mean	54.54	77.7	
Hybrid(A)	1	105.1	88.2	bearing
	2	90.7	76.2	bearing
	3	96.0	80.7	bearing
	Mean	97.3	81.7	
Hybrid(B)	1	74.2	72.7	bearing
	2	75.5	74.0	bearing
	3	75.2	73.7	bearing
	Mean	74.9	73.5	
Hybrid(C)	1	91.7	80.0	bearing
	2	89.4	78.0	bearing
	3	83.9	73.3	bearing
	Mean	88.4	77.1	

Table B-20 Interlaminar shear stress of FRP rebar after alkali exposure
(100days, T=60°C)

Type of FRP rebars	Repeated No.	ISS (MPa)	Residual strength (%)	Plain of failure
CFRP	1	40.92	87.5	vertical
	2	34.72	74.3	vertical
	3	41.77	89.3	vertical
	Mean	39.14	83.7	
GFRP	1	30.22	56.8	vertical/horizontal
	2	32.86	61.7	vertical/horizontal
	3	0.0	0.0	vertical/horizontal
	Mean	31.54	59.3	
AFRP	1	30.39	76.5	vertical/horizontal
	2	28.22	71.1	vertical/horizontal
	3	29.92	75.3	vertical/horizontal
	Mean	29.51	74.3	
CFRP(D)	1	68.94	89.8	vertical/bearing
	2	65.20	84.9	vertical/bearing
	3	67.24	87.5	vertical/bearing
	Mean	67.13	87.4	
GFRP(D)	1	41.82	59.6	vertical/bearing
	2	43.18	61.5	vertical/bearing
	3	0.0	0.0	vertical/bearing
	Mean	42.50	60.6	
Hybrid(A)	1	95.1	79.8	bearing
	2	96.0	80.7	bearing
	3	90.1	75.7	bearing
	Mean	93.7	78.7	
Hybrid(B)	1	70.0	68.6	bearing
	2	68.6	67.3	bearing
	Mean	69.3	67.9	
Hybrid(C)	1	91.7	80.0	bearing
	2	88.1	76.9	bearing
	3	72.0	62.9	bearing
	Mean	83.9	73.2	

Table B-21 Interlaminar shear stress of FRP rebar after acid exposure(50days, T=60°C)

Type of FRP rebars	Repeated No.	ISS (MPa)	Residual strength (%)	Plain of failure
CFRP	1	37.44	80.1	vertical
	2	48.14	102.9	vertical
	3	37.95	81.2	vertical
	Mean	41.18	88.1	
GFRP	1	38.80	72.9	vertical/horizontal
	2	40.67	76.4	vertical/horizontal
	3	36.68	68.9	vertical/horizontal
	Mean	38.71	72.7	
AFRP	1	32.40	81.6	vertical/horizontal
	2	33.18	83.5	vertical/horizontal
	3	35.04	88.2	vertical/horizontal
	Mean	33.54	84.5	
CFRP(D)	1	66.90	87.1	vertical/bearing
	2	77.09	100.4	vertical/bearing
	3	69.28	90.2	vertical/bearing
	Mean	71.09	92.6	
GFRP(D)	1	50.73	72.3	vertical/bearing
	2	49.47	70.5	vertical/bearing
	3	48.42	69.0	vertical/bearing
	Mean	49.54	70.6	
Hybrid(A)	1	105.1	88.2	bearing
	2	104.0	87.4	bearing
	Mean	104.5	87.8	
Hybrid(B)	1	79.0	77.4	bearing
	2	73.5	72.0	bearing
	Mean	76.2	74.7	
Hybrid(C)	1	89.5	78.2	bearing
	2	103.2	90.1	bearing
	Mean	96.4	84.1	

Table B-22 Interlaminar shear stress of FRP rebar after acid exposure(100days, T=60°C)

Type of FRP rebars	Repeated No.	ISS (MPa)	Residual strength (%)	Plain of failure
CFRP	1	35.74	76.4	vertical
	2	42.20	90.2	vertical
	3	35.97	76.9	vertical
	Mean	37.97	81.2	
GFRP	1	30.99	58.2	vertical/horizontal
	2	32.60	61.3	vertical/horizontal
	3	0.0	0.0	vertical/horizontal
	Mean	31.80	59.7	-
AFRP	1	29.92	75.3	vertical/horizontal
	2	29.15	73.4	vertical/horizontal
	3	-	-	
	Mean	29.54	74.4	
CFRP(D)	1	66.22	86.2	vertical/bearing
	2	68.60	89.3	vertical/bearing
	3	0.0	0.0	vertical/bearing
	Mean	67.41	87.8	
GFRP(D)	1	39.93	56.9	vertical/bearing
	2	37.73	53.8	vertical/bearing
	3	-	-	-
	Mean	38.83	55.3	
Hybrid(A)	1	94.5	79.3	bearing
	2	93.4	78.4	bearing
	3	84.4	70.9	bearing
	Mean	90.7	76.2	
Hybrid(B)	1	65.2	63.9	bearing
	2	52.7	51.6	bearing
	Mean	58.9	57.7	
Hybrid(C)	1	89.5	78.2	bearing
	2	89.9	78.5	bearing
	Mean	89.7	78.3	

Table B-23 Interlaminar shear stress of FRP rebar after salt exposure(50days, T=60°C)

Type of FRP rebars	Repeated No.	ISS (MPa)	Residual strength (%)	Plain of failure
CFRP	1	41.86	89.5	vertical
	2	43.55	93.1	vertical
	3	42.53	91.0	vertical
	Mean	42.65	91.2	
GFRP	1	45.17	84.9	vertical/horizontal
	2	43.64	82.0	vertical/horizontal
	3	40.41	75.9	vertical/horizontal
	Mean	43.07	80.9	
AFRP	1	33.49	84.3	vertical/horizontal
	2	33.95	85.5	vertical/horizontal
	3	33.02	83.2	vertical/horizontal
	Mean	33.49	84.3	
CFRP(D)	1	68.26	88.9	vertical/bearing
	2	79.81	103.9	vertical/bearing
	3	75.05	97.7	vertical/bearing
	Mean	74.37	96.8	
GFRP(D)	1	54.61	77.8	vertical/bearing
	2	55.76	79.4	vertical/bearing
	3	59.22	84.4	vertical/bearing
	Mean	56.53	80.5	
Hybrid(A)	1	104.5	87.8	bearing
	2	107.7	90.5	bearing
	3	103.5	86.9	bearing
	Mean	105.2	88.4	
Hybrid(B)	1	86.3	84.6	bearing
	2	78.0	76.5	bearing
	Mean	82.2	80.6	
Hybrid(C)	1	89.0	77.7	bearing
	2	97.5	85.1	bearing
	Mean	93.3	81.4	

Table B-24 Interlaminar shear stress of FRP rebar after salt exposure(100days, T=60°C)

Type of FRP rebars	Repeated No.	ISS (MPa)	Residual strength (%)	Plain of failure
CFRP	1	42.03	89.9	vertical
	2	41.18	88.1	vertical
	3	37.10	79.3	vertical
	Mean	40.10	85.8	
GFRP	1	45.08	84.7	vertical/horizontal
	2	29.97	56.3	vertical/horizontal
	3	0.	0.0	vertical/horizontal
	Mean	37.53	70.5	
AFRP	1	33.95	85.5	vertical/horizontal
	2	30.70	77.3	vertical/horizontal
	3	0.0	0.0	vertical/horizontal
	Mean	32.33	81.4	
CFRP(D)	1	69.28	90.2	vertical/bearing
	2	66.90	87.1	vertical/bearing
	3	0.0	0.0	vertical/bearing
	Mean	68.09	88.6	
GFRP(D)	1	51.67	73.6	vertical/bearing
	2	51.04	72.7	vertical/bearing
	3	0.0	0.0	vertical/bearing
	Mean	51.36	73.2	
Hybrid(A)	1	83.3	70.0	bearing
	2	96.0	80.7	bearing
	3	98.2	82.5	bearing
	Mean	92.5	77.7	
Hybrid(B)	1	72.5	71.1	bearing
	2	77.9	76.3	bearing
	Mean	75.2	73.7	
Hybrid(C)	1	84.8	74.0	bearing
	2	86.8	75.7	bearing
	Mean	85.8	74.9	

Table B-25 Interlaminar shear stress of FRP rebar after deionized water exposure(50days, T=60°C)

Type of FRP rebars	Repeated No.	ISS (MPa)	Residual strength (%)	Plain of failure
CFRP	1	46.86	100.2	vertical
	2	39.48	84.4	vertical
	3	46.61	99.7	vertical
	Mean	44.32	94.8	
GFRP	1	37.70	70.8	vertical/horizontal
	2	45.42	85.3	vertical/horizontal
	3	49.84	93.6	vertical/horizontal
	Mean	44.32	83.3	
AFRP	1	34.73	87.4	vertical/horizontal
	2	32.71	82.4	vertical/horizontal
	3	35.97	90.6	vertical/horizontal
	Mean	34.47	86.8	
CFRP(D)	1	71.66	93.3	vertical/bearing
	2	73.35	95.5	vertical/bearing
	3	70.30	91.5	vertical/bearing
	Mean	71.77	93.4	
GFRP(D)	1	61.53	87.7	vertical/bearing
	2	57.86	82.4	vertical/bearing
	3	58.80	83.8	vertical/bearing
	Mean	59.40	84.6	
Hybrid(A)	1	106.7	89.6	bearing
	2	107.7	90.5	bearing
	3	110.4	92.7	bearing
	Mean	108.3	90.9	
Hybrid(B)	1	95.6	93.8	bearing
	2	83.9	82.2	bearing
	Mean	89.8	88.0	
Hybrid(C)	1	104.0	90.8	bearing
	2	103.7	90.5	bearing
	3	102.5	89.5	bearing
	Mean	103.4	90.3	

Table B-26 Interlaminar shear stress of FRP rebar after deionized water exposure (100days, T=60°C)

Type of FRP rebars	Repeated No.	ISS (MPa)	Residual strength (%)	Plain of failure
CFRP	1	41.86	89.5	vertical
	2	40.92	87.5	vertical
	3	41.94	89.7	vertical
	Mean	41.57	88.9	
GFRP	1	36.00	67.6	vertical/horizontal
	2	35.83	67.3	vertical/horizontal
	3	42.20	79.3	vertical/horizontal
	Mean	38.01	71.4	
AFRP	1	31.63	79.6	vertical/horizontal
	2	31.16	78.5	vertical/horizontal
	3	33.95	85.5	vertical/horizontal
	Mean	32.25	81.2	
CFRP(D)	1	68.26	88.9	vertical/bearing
	2	69.96	91.1	vertical/bearing
	3	73.69	95.9	vertical/bearing
	Mean	70.64	92.0	
GFRP(D)	1	45.91	65.4	vertical/bearing
	2	53.67	76.5	vertical/bearing
	3	52.32	75.0	vertical/bearing
	Mean	50.73	72.3	
Hybrid(A)	1	96.0	80.7	bearing
	2	91.3	76.7	bearing
	3	97.6	82.0	bearing
	Mean	94.9	79.8	
Hybrid(B)	1	74.2	72.7	bearing
	2	72.1	70.7	bearing
	3	75.5	74.0	bearing
	Mean	73.9	72.5	
Hybrid(C)	1	83.3	72.7	bearing
	2	85.2	74.3	bearing
	3	87.9	76.8	bearing
	Mean	85.5	74.6	

Table B-27 Interlaminar shear stress of FRP rebar after repeated wet-dry cycles exposure

Type of FRP rebars	Repeated No.	ISS (MPa)	Residual strength (%)	Plain of failure
CFRP	1	40.84	87.3	vertical
	2	42.37	90.6	vertical
	3	42.53	91.0	vertical
	Mean	41.91	89.6	
GFRP	1	45.08	84.7	vertical/horizontal
	2	44.40	83.4	vertical/horizontal
	3	43.89	82.5	vertical/horizontal
	Mean	44.46	83.5	
AFRP	1	33.95	85.5	vertical/horizontal
	2	35.04	88.2	vertical/horizontal
	3	35.35	89.0	vertical/horizontal
	Mean	34.78	87.6	
CFRP(D)	1	72.33	94.2	vertical/bearing
	2	66.22	86.2	vertical/bearing
	3	67.58	88.0	vertical/bearing
	Mean	68.71	89.5	
GFRP(D)	1	57.86	82.4	vertical/bearing
	2	57.54	82.0	vertical/bearing
	3	56.81	80.9	vertical/bearing
	Mean	57.40	81.8	
Hybrid(A)	1	99.2	83.3	bearing
	2	107.7	90.5	bearing
	3	101.9	85.6	bearing
	Mean	102.9	86.5	
Hybrid(B)	1	89.4	87.6	bearing
	2	81.8	80.2	bearing
	3	83.9	82.2	bearing
	Mean	85.0	83.3	
Hybrid(C)	1	98.0	85.6	bearing
	2	93.4	81.5	bearing
	3	95.9	83.7	bearing
	Mean	95.8	83.6	

Table B-28 Interlaminar shear stress of FRP rebar after long-term oven dry exposure

Type of FRP rebars	Repeated No.	ISS (MPa)	Residual strength (%)	Plain of failure
CFRP	1	41.43	88.6	vertical
	2	43.98	94.0	vertical
	3	43.21	92.4	vertical
	Mean	42.87	91.7	
GFRP	1	47.63	89.5	vertical/horizontal
	2	46.53	87.4	vertical/horizontal
	3	45.76	86.0	vertical/horizontal
	Mean	46.64	87.6	
AFRP	1	35.81	90.2	vertical/horizontal
	2	37.05	93.3	vertical/horizontal
	3	34.57	87.1	vertical/horizontal
	Mean	35.81	90.2	
CFRP(D)	1	72.33	94.2	vertical/bearing
	2	70.98	92.4	vertical/bearing
	3	73.69	95.9	vertical/bearing
	Mean	72.33	94.2	
GFRP(D)	1	57.23	81.5	vertical/bearing
	2	60.69	86.5	vertical/bearing
	3	57.86	82.4	vertical/bearing
	Mean	58.59	83.5	
Hybrid(A)	1	103.5	86.9	bearing
	2	105.1	88.2	bearing
	3	110.9	93.2	bearing
	Mean	106.5	89.4	
Hybrid(B)	1	84.9	83.2	bearing
	2	88.3	81.6	bearing
	3	90.8	89.0	bearing
	Mean	88.0	86.3	
Hybrid(C)	1	98.8	86.3	bearing
	2	103.2	90.1	bearing
	3	101.2	88.3	bearing
	Mean	101.1	88.2	

Table B-29 Interlaminar shear stress of FRP rebar after repeated freezing and thawing cycles exposure

Type of FRP rebars	Repeated No.	ISS (MPa)	Residual strength (%)	Plain of failure
CFRP	1	38.29	81.9	vertical
	2	38.97	83.3	vertical
	3	39.99	85.5	vertical
	Mean	39.08	83.6	
GFRP	1	42.53	79.9	vertical/horizontal
	2	43.55	81.8	vertical/horizontal
	3	42.20	79.3	vertical/horizontal
	Mean	42.76	80.3	
AFRP	1	32.40	81.6	vertical/horizontal
	2	31.47	79.3	vertical/horizontal
	3	33.80	85.1	vertical/horizontal
	Mean	32.56	82.0	
CFRP(D)	1	68.94	89.8	vertical/bearing
	2	62.83	81.8	vertical/bearing
	3	67.58	88.0	vertical/bearing
	Mean	66.45	86.5	
GFRP(D)	1	54.08	77.1	vertical/bearing
	2	53.35	76.0	vertical/bearing
	3	52.62	75.0	vertical/bearing
	Mean	53.35	76.0	
Hybrid(A)	1	91.8	77.1	bearing
	2	101.9	85.6	bearing
	3	100.3	84.2	bearing
	Mean	97.9	82.3	
Hybrid(B)	1	81.8	80.2	bearing
	2	73.5	72.0	bearing
	3	76.9	75.4	bearing
	Mean	77.4	75.9	
Hybrid(C)	1	96.6	84.3	bearing
	2	91.8	80.1	bearing
	3	93.3	81.4	bearing
	Mean	93.9	81.9	

Table B-30 Interlaminar shear stress of FRP rebar after sulfate(Na_2SO_4) solution exposure

Type of FRP rebars	Repeated No.	ISS (MPa)	Residual strength (%)	Plain of failure
CFRP	1	39.65	84.8	vertical
	2	40.16	85.9	vertical
	3	41.52	88.8	vertical
	Mean	40.44	86.5	
GFRP	1	44.57	83.8	vertical/horizontal
	2	44.06	82.8	vertical/horizontal
	3	43.21	81.2	vertical/horizontal
	Mean	43.95	82.6	
AFRP	1	33.33	83.9	vertical/horizontal
	2	32.40	81.6	vertical/horizontal
	3	33.64	84.7	vertical/horizontal
	Mean	33.13	83.4	
CFRP(D)	1	69.28	90.2	vertical/bearing
	2	66.90	87.1	vertical/bearing
	3	68.94	89.8	vertical/bearing
	Mean	68.37	89.0	
GFRP(D)	1	55.13	78.5	vertical/bearing
	2	55.24	78.7	vertical/bearing
	3	58.91	83.9	vertical/bearing
	Mean	56.43	80.4	
Hybrid(A)	1	98.2	82.5	bearing
	2	99.8	83.8	bearing
	3	107.2	90.0	bearing
	Mean	101.7	85.4	
Hybrid(B)	1	88.0	86.3	bearing
	2	77.6	76.1	bearing
	3	85.9	84.2	bearing
	Mean	83.9	82.2	
Hybrid(C)	1	96.7	84.4	bearing
	2	98.0	85.6	bearing
	3	94.6	82.6	bearing
	Mean	96.4	84.2	

Table B-31 Interlaminar shear stress of FRP rebar after CaCl₂ solution exposure

Type of FRP rebars	Repeated No.	ISS (MPa)	Residual strength (%)	Plain of failure
CFRP	1	42.70	91.3	vertical
	2	41.35	88.4	vertical
	3	38.97	83.3	vertical
	Mean	41.01	87.7	
GFRP	1	46.27	86.9	vertical/horizontal
	2	42.70	80.2	vertical/horizontal
	3	42.37	79.6	vertical/horizontal
	Mean	43.78	82.3	
AFRP	1	31.63	79.6	vertical/horizontal
	2	33.64	84.7	vertical/horizontal
	3	36.28	91.4	vertical/horizontal
	Mean	33.85	85.2	
CFRP(D)	1	72.33	94.2	vertical/bearing
	2	62.83	81.8	vertical/bearing
	3	65.54	85.3	vertical/bearing
	Mean	66.90	87.1	
GFRP(D)	1	56.50	80.5	vertical/bearing
	2	59.01	84.1	vertical/bearing
	3	56.91	81.1	vertical/bearing
	Mean	57.47	81.9	
Hybrid(A)	1	93.9	78.9	bearing
	2	107.7	90.5	bearing
	3	102.9	86.5	bearing
	Mean	101.5	85.3	
Hybrid(B)	1	93.6	91.7	bearing
	2	81.8	80.2	bearing
	3	80.4	78.8	bearing
	Mean	85.6	83.6	
Hybrid(C)	1	99.8	87.1	bearing
	2	96.0	83.8	bearing
	3	95.9	83.7	bearing
	Mean	97.2	84.9	

Table B-32 Interlaminar shear stress of FRP rebar after salt and repeated wet-dry cycles exposure

Type of FRP rebars	Repeated No.	ISS (MPa)	Residual strength (%)	Plain of failure
CFRP	1	38.29	81.9	vertical
	2	40.16	85.9	vertical
	3	40.92	87.5	vertical
	Mean	39.79	85.1	
GFRP	1	31.63	76.9	vertical/horizontal
	2	32.40	78.8	vertical/horizontal
	3	33.64	81.2	vertical/horizontal
	Mean	32.56	79.0	
AFRP	1	33.95	79.6	vertical/horizontal
	2	35.04	81.6	vertical/horizontal
	3	35.35	84.7	vertical/horizontal
	Mean	34.78	82.0	
CFRP(D)	1	68.94	89.8	vertical/bearing
	2	64.18	83.6	vertical/bearing
	3	62.83	81.8	vertical/bearing
	Mean	65.32	85.0	
GFRP(D)	1	53.67	76.5	vertical/bearing
	2	55.24	78.7	vertical/bearing
	3	54.71	78.0	vertical/bearing
	Mean	54.54	77.7	
Hybrid(A)	1	94.9	79.8	bearing
	2	102.4	86.0	bearing
	3	97.6	82.0	bearing
	Mean	98.3	82.6	
Hybrid(B)	1	75.5	74.0	bearing
	2	70.0	68.6	bearing
	3	76.9	75.4	bearing
	Mean	74.2	72.7	
Hybrid(C)	1	94.7	82.7	bearing
	2	92.2	80.5	bearing
	3	93.9	82.0	bearing
	Mean	93.6	81.7	

Table B-33 Interlaminar shear stress of FRP rebar after salt and repeated freezing and thawing cycles exposure

Type of FRP rebars	Repeated No.	ISS (MPa)	Residual strength (%)	Plain of failure
CFRP	1	37.61	80.4	vertical
	2	37.10	79.3	vertical
	3	38.29	81.9	vertical
	Mean	37.67	80.5	
GFRP	1	36.59	68.8	vertical/horizontal
	2	35.91	67.5	vertical/horizontal
	3	35.40	66.5	vertical/horizontal
	Mean	35.97	67.6	
AFRP	1	29.30	73.8	vertical/horizontal
	2	29.92	75.3	vertical/horizontal
	3	32.25	81.2	vertical/horizontal
	Mean	30.49	76.8	
CFRP(D)	1	65.54	85.3	vertical/bearing
	2	57.39	74.7	vertical/bearing
	3	66.22	86.2	vertical/bearing
	Mean	63.05	82.1	
GFRP(D)	1	48.84	69.6	vertical/bearing
	2	50.21	71.5	vertical/bearing
	3	47.38	67.5	vertical/bearing
	Mean	48.81	69.5	
Hybrid(A)	1	87.6	73.5	bearing
	2	94.5	79.3	bearing
	3	89.7	75.3	bearing
	Mean	90.6	76.1	
Hybrid(B)	1	74.2	72.7	bearing
	2	66.5	65.2	bearing
	3	70.0	68.6	bearing
	Mean	70.2	68.8	
Hybrid(C)	1	85.4	74.6	bearing
	2	83.7	73.1	bearing
	3	86.6	75.6	bearing
	Mean	85.3	74.4	

Table B-34 Interlaminar shear stress of FRP rebar after UV radiation exposure

Type of FRP rebars	Repeated No.	ISS (MPa)	Residual strength(%)	Plain of failure
GFRP	1	47.9	86.9	vertical/horizontal
	2	45.3	80.2	vertical/horizontal
	3	43.9	79.6	vertical/horizontal
	Mean	45.7	82.3	
Hybrid(A)	1	85.4	78.9	bearing
	2	102.4	90.5	bearing
	3	99.2	86.5	bearing
	Mean	95.7	85.3	
Hybrid(B)	1	86.6	84.9	bearing
	2	95.6	93.7	bearing
	3	87.3	85.6	bearing
	Mean	89.8	88.1	
Hybrid(C)	1	97.2	87.1	bearing
	2	94.2	83.8	bearing
	3	93.3	83.7	bearing
	Mean	94.9	84.9	

Table B-35 Tensile test results of hybrid FRP rebars

Type of FRP rebars	Repeated No.	Yield strain (%)	Ultimate strain(%)	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)
GFRP	1	-	1.98	-	886.7
	2	-	1.95	-	898.2
	Mean	-	1.96	-	842.5
Hybrid(A)	1	1.30	3.70	762.8	760.9
	2	1.10	3.80	731.9	747.9
	3	1.10	3.60	712.9	788.8
	Mean	1.20	3.70	735.9	765.9
Hybrid(B)	1	1.31	2.51	576.4	300.0
	2	1.37	2.91	554.1	300.0
		1.33	2.46	564.9	300.0
	Mean	1.34	2.62	565.2	300.0
Hybrid(C)	1	1.09	3.09	404.5	486.2
	2	1.01	3.55	465.4	424.3
	3	1.04	3.29	434.1	429.3
	Mean	1.05	3.31	434.7	446.6

Table B-36 Tensile strength of FRP rebars after alkali exposure FRP rebars (50days, T=60°C)

Type of FRP rebars	Repeated No.	Ultimate strength (MPa)	Residual strength (%)
CFRP	1	2021.1	92
	2	1944.5	89
	3	1932.1	88
	4	1918.9	88
	Mean	1954.1	89
GFRP	1	770.5	86
	2	794.5	89
	3	713.2	79
	Mean	759.4	85
AFRP	1	1627.5	89
	2	1609.8	88
	3	1695.6	93
	4	1660.1	91
	Mean	1648.2	91
CFRP(D)	1	1903.2	89
	2	1848.6	86
	3	1934.2	90
	4	1912.0	89
	Mean	1899.5	88
GFRP(D)	1	944.5	84
	2	900.1	80
	3	928.0	82
	4	918.5	81
	Mean	922.8	82
Hybrid(A)	1	748.9	97
	2	705.8	92
	3	721.0	94
	4	789.8	100
	Mean	742.1	96
Hybrid(B)	1	300.0	77
	2	300.0	83
	Mean	300.0	80
Hybrid(C)	1	430.8	96
	2	436.7	97
	Mean	433.7	97

Table B-37 Tensile strength of FRP rebars after alkali exposure FRP rebars (100days, T=60°C)

Type of FRP rebars	Repeated No.	Ultimate strength (MPa)	Residual strength (%)
CFRP	1	1843.2	85
	2	1813.9	83
	3	1724.0	79
	4	1793.3	82
	Mean	1793.6	82
GFRP	1	578.6	65
	2	741.3	83
	3	632.4	71
		720.2	81
	Mean	668.1	75
AFRP	1	1549.0	86
	2	1530.1	85
	3	1641.4	91
	4	1601.3	88
	Mean	1580.5	87
CFRP(D)	1	1823.5	85
	2	1765.4	83
	3	1801.0	84
		1802.3	84
	Mean	1798.1	84
GFRP(D)	1	897.4	80
	2	880.4	78
	3	923.7	82
	4	914.0	81
	Mean	903.9	80
Hybrid(A)	1	709.4	93
	2	715.1	93
	3	724.3	95
	Mean	716.3	94
Hybrid(B)	1	300.0	68.5
	2	300.0	69.1
	3	300.0	64.6
	Mean	300.0	67.4
Hybrid(C)	1	361.7	81
	2	412.1	92
	3	420.7	94
	4	441.0	99
	Mean	418.6	94

Table B-38 Tensile strength of FRP rebars after acid exposure
(50days, T=60°C)

Type of FRP rebars	Repeated No.	Ultimate strength (MPa)	Residual strength (%)
CFRP	1	2003.3	92
	2	1995.6	92
	3	2104.1	97
	4	1994.3	92
	Mean	2024.3	93
GFRP	1	852.4	96
	2	799.7	90
	3	864.2	97
	4	-	-
	Mean	838.8	94
AFRP	1	1840.2	102
	2	1695.1	94
	3	1743.5	96
	4	1700.2	94
	Mean	1744.7	96
CFRP(D)	1	1981.8	93
	2	2001.2	94
	3	2112.6	99
		1920.2	90
	Mean	2004.0	94
GFRP(D)	1	1036.0	92
	2	1146.6	102
	3	1153.1	103
	4	1159.0	103
	5	1023.7	91
	Mean	1103.7	98
Hybrid(A)	1	657.5	86
	2	759.5	99
	3	810.8	106
	4	663.1	87
	Mean	722.7	94
Hybrid(B)	1	300.0	82.1
	2	300.0	79.2
	3	300.0	83.5
	4	300.0	80.9
	Mean	300.0	81.4
Hybrid(C)	1	430.3	96
	2	437.2	98
	3	438.7	98
	Mean	435.4	98

Table B-39 Tensile strength of FRP rebars after acid exposure(100days, T=60°C)

Type of FRP rebars	Repeated No.	Ultimate strength (MPa)	Residual strength (%)
CFRP	1	1790.1	82
	2	1873.1	86
	3	1986.3	91
	4	1923.2	88
	Mean	1893.2	87
GFRP	1	7899.1	89
	2	797.9	89
	3	760.5	85
	4		0
	Mean	782.8	88
AFRP	1	1628.2	90
	2	1548.7	86
	3	1686.1	93
	4	1514.1	84
	Mean	1594.3	88
CFRP(D)	1	1970.6	92
	2	1943.9	91
	3	2018.3	95
	4	1893.8	89
	Mean	1956.6	92
GFRP(D)	1	103.6	84
	2	938.6	82
	3	927.1	81
	4	911.9	-
	Mean	907.1	81
Hybrid(A)	1	790.5	103
	2	627.2	82
	3	742.0	97
	4	731.9	96
	5	720.3	94
	Mean	722.4	94
Hybrid(B)	1	300.0	79
	2	300.0	82
	3	300.0	84
	4	300.0	81
	5	300.0	81
	Mean	300.0	81
Hybrid(C)	1	436.4	98
	2	475.4	106
	3	433.6	97
	Mean	429.3	96

Table B-40 Tensile strength of FRP rebars after salt exposure
(50days, T=60°C)

Type of FRP rebars	Repeated No.	Ultimate strength (MPa)	Residual strength (%)
CFRP	1	1998.5	92
	2	2004.1	92
	3	1986.2	91
	4	2011.4	92
	Mean	2000.1	92
GFRP	1	816.5	91
	2	796.3	89
	3	832.1	93
	4	821.2	92
	Mean	816.5	91
AFRP	1	1849.3	102
	2	1639.7	91
	3	1638.9	91
	4	1673.2	92
	Mean	1700.3	94
CFRP(D)	1	1939.8	91
	2	2054.1	96
	3	2034.6	95
		1965.5	92
	Mean	1998.5	94
GFRP(D)	1	1005.9	89
	2	1034.5	92
	3		0
	4		0
	Mean	1020.2	91
Hybrid(A)	1	726.4	94.8
	2	701.2	91.6
	3	742.7	98.1
	4	746.0	97.4
	Mean	729.1	95.5
Hybrid(B)	1	300.0	96
	2	300.0	91
	3	300.0	80
	Mean	300.0	89
Hybrid(C)	1	424.9	95
	2	415.4	93
	3	445.8	100
	4	424.8	95
	Mean	427.7	96

Table B-41 Tensile strength of FRP rebars after salt exposure
(100days, T=60°C)

Type of FRP rebars	Repeated No.	Ultimate strength (MPa)	Residual strength (%)
CFRP	1	1926.3	88
	2	2000.1	92
	3	1899.6	87
	4	1910.4	88
	Mean	1934.1	89
GFRP	1	678.0	76
	2	743.8	83
	3	710.9	80
	4	706.4	79
	Mean	709.8	80
AFRP	1	1648.9	91
	2	1467.6	81
	3	1534.8	85
	4	1513.5	84
	Mean	1541.2	85
CFRP(D)	1	1767.2	83
	2	1965.8	92
	3	1900.2	89
		1934.8	91
	Mean	1892.0	89
GFRP(D)	1	940.5	84
	2	954.2	85
	3	899.0	80
	4	890.5	79
	Mean	921.0	82
Hybrid(A)	1	693.8	90.6
	2	698.0	91.1
	3	675.1	88.1
	4	678.3	88.6
	Mean	686.3	89.6
Hybrid(B)	1	300.0	83.7
	2	300.0	88.1
	3	300.0	82.9
	Mean	300.0	84.9
Hybrid(C)	1	415.3	95.5
	2	395.2	90.9
	3	424.7	97.8
	4	427.7	98.4
	Mean	415.7	95.7

Table B-42 Tensile strength of FRP rebars after deionized water exposure (50days, T=60°C)

Type of FRP rebars	Repeated No.	Ultimate strength (MPa)	Residual strength (%)
CFRP	1	2040.2	94
	2	1854.3	85
	3	2148.3	99
	4	1935.9	89
	Mean	1994.7	92
GFRP	1	754.4	85
	2	796.0	89
	3		0
	4		0
	Mean	775.2	87
AFRP	1	1620.0	90
	2	1647.9	91
	3	1798.3	99
	4	1728.2	96
	Mean	1698.6	94
CFRP(D)	1	1995.7	93
	2	1946.5	91
	3	1996.5	93
		2019.6	95
	Mean	1989.6	93
GFRP(D)	1	1019.9	91
	2	985.6	88
	3		0
	4		0
	Mean	1002.7	89
Hybrid(A)	1	763.6	100
	2	706.6	92
	3	782.7	102
	Mean	751.0	98
Hybrid(B)	1	300.0	92
	2	300.0	96
	Mean	300.0	94
Hybrid(C)	1	462.1	103
	2	441.3	99
	3	388.3	87
	4	485.3	109
	Mean	443.8	99

Table B-43 Tensile strength of FRP rebars after deionized water exposure (100days, T=60°C)

Type of FRP rebars	Repeated No.	Ultimate strength (MPa)	Residual strength (%)
CFRP	1	1997.2	92
	2	1859.6	85
	3	1949.5	89
	4	1931.8	89
	Mean	1934.5	89
GFRP	1	734.1	82
	2	664.2	74
	3	679.9	76
	4	669.8	75
	Mean	687.0	77
AFRP	1	1710.5	95
	2	1622.9	90
	3	1711.8	95
	4	1745.1	96
	Mean	1697.6	94
CFRP(D)	1	1931.9	90
	2	1837.1	86
	3	1868.4	87
		1866.1	87
	Mean	1875.9	88
GFRP(D)	1	967.5	86
	2	902.1	80
	3	886.6	79
	4	723.8	64
	Mean	870.0	77
Hybrid(A)	1	667.4	87
	2	771.3	101
	3	670.6	88
	Mean	701.3	92
Hybrid(B)	1	300.0	74
	2	300.0	98
	Mean	300.0	86
Hybrid(C)	1	421.3	94
	2	421.6	94
	3	469.2	105
	4	404.0	90
	Mean	429.0	96

Table B-44 Tensile strength of FRP rebars after repeated wet-dry cycles exposure

Type of FRP rebars	Repeated No.	Ultimate strength (MPa)	Residual strength (%)
CFRP	1	2169.3	100
	2	1989.4	91
	3	2119.5	97
	Mean	2092.7	96
GFRP	1	855.5	96
	2	830.0	93
	3		0
	4		0
	Mean	842.7	94
AFRP	1	1754.4	97
	2	1723.6	95
	3	1785.3	99
	4		0
	Mean	1754.4	97
CFRP(D)	1	1973.6	92
	2	1993.5	93
	3	1992.7	93
			0
	Mean	1986.6	93
GFRP(D)	1	1020.3	91
	2	1116.8	99
	3	1080.1	96
	4	1035.7	92
	Mean	1063.2	95
Hybrid(A)	1	721.1	94
	2	632.7	83
	3	669.9	87
	Mean	674.5	88
Hybrid(B)	1	300.0	82.7
	2	300.0	82.2
	3	300.0	89.4
	Mean	300.0	84.8
Hybrid(C)	1	450.1	101
	2	418.5	94
	2	394.1	88
	3	373.6	84
	Mean	409.0	92

Table B-45 Tensile strength of FRP rebars after long-term oven dry exposure

Type of FRP rebars	Repeated No.	Ultimate strength (MPa)	Residual strength (%)
CFRP	1	2117.1	97
	2	1996.0	92
	3	1985.7	91
	4	1959.9	90
	Mean	2014.7	92
GFRP	1	818.6	92
	2	854.9	96
	3	726.3	81
	4		0
	Mean	799.9	90
AFRP	1	1758.7	97
	2	1715.4	95
	3	1731.9	96
	4	1729.3	96
	Mean	1733.8	96
CFRP(D)	1	2095.3	98
	2	1893.8	89
	3	2082.7	98
		1899.8	89
	Mean	1992.9	93
GFRP(D)	1	1019.0	91
	2	1024.7	91
	3		0
	4		0
	Mean	1021.9	91
Hybrid(A)	1	733.3	95.7
	2	763.4	99.7
	3	746.6	97.4
	4	701.1	91.5
	Mean	736.1	96.1
Hybrid(B)	1	300.0	105
	2	300.0	100
	3	300.0	75
	4	300.0	111
	Mean	300.0	98
Hybrid(C)	1	408.8	92
	2	433.7	97
	3	473.2	106
	4	431.7	97
	Mean	436.9	98

Table B-46 Tensile strength of FRP rebars after repeated freezing and thawing cycles exposure

Type of FRP rebars	Repeated No.	Ultimate strength (MPa)	Residual strength (%)
CFRP	1	1919.2	88
	2	1983.4	91
	3	2076.9	95
	Mean	1993.2	91
GFRP	1	790.3	89
	2	778.8	87
	3	816.9	92
	Mean	795.3	89
AFRP	1	1863.9	103
	2	1562.7	86
	3	1722.8	95
	Mean	1716.5	95
CFRP(D)	1	2004.1	94
	2	1897.2	89
	3	2032.8	95
	Mean	1978.0	93
GFRP(D)	1	958.6	85
	2	933.2	83
	Mean	945.9	84
Hybrid(A)	1	728.5	95
	2	759.0	99
	3	621.5	81
	Mean	703.0	92
Hybrid(B)	1	300.0	87
	2	300.0	82
	3	300.0	85
	Mean	300.0	85
Hybrid(C)	1	402.9	90
	2	377.3	85
	3	444.8	100
	Mean	408.3	91

Table B-47 Tensile strength of FRP rebars after sulfate(Na_2SO_4) exposure

Type of FRP rebars	Repeated No.	Ultimate strength (MPa)	Residual strength (%)
CFRP	1	1930.7	89
	2	1973.9	91
	3	2085.4	96
	4	2050.6	94
	Mean	2010.1	92
GFRP	1	837.6	94
	2	911.0	102
	Mean	874.3	98
AFRP	1	1788.4	99
	2	1705.3	94
	Mean	1746.8	97
CFRP(D)	1	1835.8	86
	2	2072.8	97
	3	1909.7	89
	4	2087.5	98
	Mean	1976.5	93
GFRP(D)	1	991.1	88
	2	945.0	84
	Mean	968.1	86
Hybrid(A)	1	707.7	92.4
	2	736.3	97.4
	3	704.4	92.0
	Mean	716.1	93.9
Hybrid(B)	1	300.0	87.6
	2	300.0	87.4
	3	300.0	92.7
	Mean	300.0	89
Hybrid(C)	1	435.0	97.4
	2	427.3	95.7
	3	421.3	94.3
	Mean	436.0	95.8

Table B-48 Tensile strength of FRP rebars after Ca_2Cl_2 exposure

Type of FRP rebars	Repeated No.	Ultimate strength (MPa)	Residual strength (%)
CFRP	1	1979.9	91
	2	2081.4	95
	3	1899.6	87
	Mean	1987.0	91
GFRP	1	830.5	93
	2	708.1	79
	3	852.9	96
	Mean	797.2	89
AFRP	1	1799.0	99
	2	1730.1	96
	Mean	1764.6	98
CFRP(D)	1	1977.8	93
	2	1910.8	89
	Mean	1944.3	91
GFRP(D)	1	898.7	80
	2	913.6	81
	Mean	906.1	81
Hybrid(A)	1	728.3	95.1
	2	686.7	89.7
	3	731.7	95.5
	4	697.8	91.1
	Mean	711.1	92.8
Hybrid(B)	1	300.0	87
	2	300.0	94
	Mean	300.0	91
Hybrid(C)	1	409.8	92
	2	434.8	97
	Mean	422.3	95

Table B-49 Tensile strength of FRP rebars after salt and repeated wet-dry cycles exposure

Type of FRP rebars	Repeated No.	Ultimate strength (MPa)	Residual strength (%)
CFRP	1	1888.1	87
	2	2178.5	100
	3	1920.3	88
	4		0
	Mean	1995.6	92
GFRP	1	725.8	81
	2	688.1	77
	3	699.9	78
	4		0
	Mean	704.6	79
AFRP	1	1660.6	92
	2	1587.8	88
	3	1748.6	97
	4		0
	Mean	1665.7	92
CFRP(D)	1	1922.8	90
	2	1963.5	92
	3	1914.5	90
	4		0
	Mean	1933.6	91
GFRP(D)	1	913.6	81
	2	911.1	81
	3	905.3	81
	4		0
	Mean	910.0	81
Hybrid(A)	1	657.0	86
	2	666.1	87
	Mean	661.5	86
Hybrid(B)	1	300.0	80
	2	300.0	77
	Mean	300.0	79
Hybrid(C)	1	407.3	91
	2	363.7	81
	Mean	385.5	86

Table B-50 Tensile strength of FRP rebars after salt and repeated freezing and thawing cycles exposure

Type of FRP rebars	Repeated No.	Ultimate strength (MPa)	Residual strength (%)
CFRP	1	2000.8	92
	2	1827.9	84
	3	2016.1	93
	4		0
	Mean	1922.0	88
GFRP	1	693.1	78
	2	735.1	82
	3	685.5	77
	4		0
	Mean	704.5	79
AFRP	1	1690.8	93
	2	1623.6	90
	3	1648.0	91
	4		0
	Mean	1654.1	91
CFRP(D)	1	1874.7	88
	2	2019.0	95
	3	1857.4	87
	4		0
	Mean	1934.0	91
GFRP(D)	1	857.2	76
	2	908.8	81
	3		0
	4		0
	Mean	883.0	79
Hybrid(A)	1	675.7	88.2
	2	665.6	86.9
	3	653.4	85.3
	Mean	664.9	86.8
Hybrid(B)	1	300.0	75.2
	2	300.0	73.8
	3	300.0	81.6
	4	300.0	78.9
	Mean	300.0	77.4
Hybrid(C)	1	380.9	85
	2	352.4	79
	3	396.0	89
	Mean	376.4	84

Table B-51 Tensile strength of FRP rebars after UV radiation exposure

Type of FRP rebars	Test No.	Yield		Ultimate		Residual	
		strength (MPa)	strain (%)	strength (MPa)	strain (%)	strength (MPa)	strain (%)
GFRP	1	-	-	810.5	1.83	90.8	92.7
	2	-	-	712.1	1.58	79.8	81.3
	3	-	-	795.3	1.79	89.1	92.6
	Mean	-	-	772.6	1.73	86.6	88.5
Hybrid(A)	1	695.7	1.22	718.3	3.47	93.8	93.9
	2	630.0	0.94	656.7	3.26	85.7	88.2
	3	683.3	0.99	691.7	3.27	90.3	88.4
	4	641.8	1.05	667.8	3.21	87.2	87.0
	Mean	662.7	1.07	683.6	3.32	89.2	89.8
Hybrid(B)	1	474.4	1.09	300.0	2.10	83.9	80.3
	2	507.2	1.23	300.0	2.61	89.7	99.8
	Mean	490.8	1.15	300.0	2.13	86.8	81.5
Hybrid(C)	1	374.4	0.95	389.8	2.71	87.2	82.0
	2	403.2	1.170.91	404.3	3.22	90.3	97.5
	Mean	388.8	0.92	397.0	2.92	88.9	88.3

APPENDIX C: 일반 및 하이브리드 FRP 리바의 부착 시험결과

Table C-1 Bond test result of FRP rebar specimens

Type of FRP rebars	Test No.	Diameter (mm)	Embedment Length (mm)	Max bond stress (MPa)	Residual bond stress(%)
CFRP	1	9.4	47.0	9.44	-
	2			1016	-
	3			8.85	-
	Mean			9.48	-
GFRP(A)	1	9.4	47.0	16.74	-
	2			17.86	-
	3			17.53	-
	Mean			17.37	-
AFRP	1	9.4	47.0	14.04	-
	2			14.86	-
	3			15.53	-
	Mean			15.86	-
CFRP(D)	1	9.4	47.0	23.94	-
	2			23.42	-
	3			24.35	-
	Mean			23.91	-
GFRP(D)	1	8.3	41.5	23.83	-
	2			23.16	-
	3			22.13	-
	Mean			23.04	-
Hybrid(A)	1	4.0	20.0	28.9	-
	2			27.4	-
	3			27.7	-
	Mean			27.9	-
Hybrid(B)	1	4.0	20.0	23.7	-
	2			22.6	-
	3			24.2	-
	Mean			23.5	-
Hybrid(C)	1	8.3	41.5	28.0	-
	2			26.6	-
	3			23.3	-
	Mean			25.9	-

Table C-2 Bond test result after alkali exposure (60°C, after 25days)

Type of FRP rebars	Test No.	Diameter (mm)	Embedment Length (mm)	Max bond stress (MPa)	Residual bond stress(%)
CFRP	1	9.4	47.0	7.18	75.7
	2			8.02	84.6
	3			7.76	81.9
	Mean			7.65	80.1
GFRP(A)	1	9.4	47.0	12.01	69.0
	2			11.23	64.6
	Mean			12.34	70.9
AFRP	1	9.4	47.0	11.54	72.7
	2			10.67	67.2
	Mean			11.10	69.9
CFRP(D)	1	9.4	47.0	17.34	72.5
	2			20.49	85.7
	3			18.23	76.2
	Mean			18.69	78.1
GFRP(D)	1	8.3	41.5	16.40	71.3
	2			15.98	69.5
	Mean			16.25	70.6
Hybrid(A)	1	4.0	20.0	19.8	70.6
	2			26.6	94.9
	3			20.4	72.8
	Mean			22.2	79.4
Hybrid(B)	1	4.0	20.0	17.3	73.7
	2			16.9	72.1
	3			16.2	69.0
	Mean			16.8	71.6
Hybrid(C)	1	8.3	41.5	20.4	78.4
	2			21.9	84.4
	3			17.1	65.8
	Mean			19.8	76.2

Table C-3 Bond test result after alkali exposure (60°C, after 50days)

Type of FRP rebars	Test No.	Diameter (mm)	Embedment Length (mm)	Max bond stress (MPa)	Residual bond stress(%)
CFRP	1	9.4	47.0	5.98	63.0
	2			6.23	65.7
	3			5.60	59.1
	Mean			5.94	62.7
GFRP(A)	1	9.4	47.0	7.95	45.7
	2			7.51	43.1
	3				0.0
	Mean			7.73	44.4
AFRP	1	9.4	47.0	8.79	55.4
	2			8.35	52.6
	Mean			8.57	54.0
CFRP(D)	1	9.4	47.0	17.47	73.1
	2			15.86	66.3
	3			14.47	60.1
	Mean			15.93	66.6
GFRP(D)	1	8.3	41.5	9.91	43.1
	2			9.81	42.6
	3			10.21	44.4
	Mean			9.98	43.4
Hybrid(A)	1	4.0	20.0	19.9	71.3
	2			18.6	66.7
	3			18.2	65.2
	Mean			18.9	67.7
Hybrid(B)	1	4.0	20.0	11.6	49.5
	2			11.1	47.2
	Mean			11.4	48.4
Hybrid(C)	1	8.3	41.5	16.4	63.3
	2			16.8	64.9
	3			17.7	68.3
	Mean			16.9	65.2

Table C-4 Bond test result after acid exposure (60°C, after 25days)

Type of FRP rebars	Test No.	Diameter (mm)	Embedment Length (mm)	Max bond stress (MPa)	Residual bond stress(%)
CFRP	1	9.4	47.0	7.06	74.4
	2			8.41	88.7
	Mean			7.73	81.5
GFRP(A)	1	9.4	47.0	12.01	69.0
	2			12.68	72.9
	Mean			12.34	70.9
AFRP	1	9.4	47.0	13.60	85.7
	2			12.65	79.7
	Mean			13.12	82.7
CFRP(D)	1	9.4	47.0	18.10	75.7
	2			19.72	82.5
	Mean			18.91	79.1
GFRP(D)	1	8.3	41.5	16.40	71.3
	2			16.09	69.9
	Mean			16.25	70.6
Hybrid(A)	1	4.0	20.0	23.6	84.2
	2			25.0	91.9
	3			22.2	79.1
	Mean			23.8	85.1
Hybrid(B)	1	4.0	20.0	18.4	78.3
	2			16.2	68.9
	Mean			17.3	73.6
Hybrid(C)	1	8.3	41.5	19.7	75.8
	2			22.6	87.0
	3			22.5	86.6
	Mean			21.6	83.1

Table C-5 Bond test result after acid exposure (60°C, after 50days)

Type of FRP rebars	Test No.	Diameter (mm)	Embedment Length (mm)	Max bond stress (MPa)	Residual bond stress(%)
CFRP	1	9.4	47.0	5.95	62.7
	2			6.15	64.8
	Mean			6.05	63.8
GFRP(A)	1	9.4	47.0	8.25	47.4
	2			9.15	52.1
	Mean			8.70	50.0
AFRP	1	9.4	47.0	10.33	65.1
	2			9.54	60.1
	Mean			9.94	62.7
CFRP(D)	1	9.4	47.0	14.00	58.6
	2			16.95	70.9
	Mean			15.47	64.7
GFRP(D)	1	8.3	41.5	12.89	56.0
	2			10.50	45.9
	Mean			11.73	51.0
GFRP(A)	1	9.4	47.0	8.3	47.4
	2			9.2	52.1
	Mean			8.7	50.0
Hybrid(A)	1	4.0	20.0	16.1	57.4
	2			15.9	56.7
	Mean			15.9	57.0
Hybrid(B)	1	4.0	20.0	11.6	49.4
	2			12.3	52.3
	Mean			11.9	50.8
Hybrid(C)	1	8.3	41.5	14.5	55.9
	2			14.6	56.3
	Mean			14.6	56.1

Table C-6 Bond test result after salt exposure (60°C, after 25 days)

Type of FRP rebars	Test No.	Diameter (mm)	Embedment Length (mm)	Max bond stress (MPa)	Residual bond stress(%)
CFRP	1	9.4	47.0	7.78	82.1
	2			6.53	68.9
	Mean			7.15	75.4
GFRP(A)	1	9.4	47.0	14.10	81.0
	2			11.74	67.4
	3			11.44	65.8
	Mean			12.43	71.4
AFRP	1	9.4	47.0	13.02	82.1
	2			12.49	78.7
	Mean			12.76	80.4
CFRP(D)	1	9.4	47.0	17.97	75.2
	2			19.56	81.8
	Mean			18.77	78.5
GFRP(D)	1	8.3	41.5	16.82	73.1
	2			15.77	68.6
	3			0.0	0.0
	Mean			16.29	70.8
Hybrid(A)	1	4.0	20.0	21.4	76.6
	2			23.1	82.3
	Mean			22.3	79.5
Hybrid(B)	1	4.0	20.0	16.6	70.5
	2			17.9	76.3
	3			14.4	61.3
	Mean			16.3	69.4
Hybrid(C)	1	8.3	41.5	21.1	81.2
	2			19.1	73.3
	Mean			20.1	77.3

Table C-7 Bond test result after salt exposure (60°C, after 50 days)

Type of FRP rebars	Test No.	Diameter (mm)	Embedment Length (mm)	Max bond stress (MPa)	Residual bond stress(%)
CFRP	1	9.4	47.0	6.05	63.8
	2			5.31	56.0
	Mean			5.68	59.9
GFRP(A)	1	9.4	47.0	8.01	46.1
	2			10.77	61.9
	3			0.0	0.0
	Mean			9.39	54.0
AFRP	1	9.4	47.0	11.59	73.1
	2			10.47	66.0
	Mean			11.03	69.5
CFRP(D)	1	9.4	47.0	14.78	61.8
	2			15.22	63.7
	Mean			15.00	62.7
GFRP(D)	1	8.3	41.5	11.10	48.3
	2			11.86	51.6
	3			0.0	0.0
	Mean			11.48	49.9
Hybrid(A)	1	4.0	20.0	16.5	59.0
	2			15.6	55.7
	Mean			16.1	57.3
Hybrid(B)	1	4.0	20.0	12.3	52.3
	2			10.6	45.1
	Mean			11.5	48.9
Hybrid(C)	1	8.3	41.5	14.6	56.1
	2			14.4	55.4
	Mean			14.5	55.7

Table C-8 Bond test result after deionized water exposure
(60°C, after 25days)

Type of FRP rebars	Test No.	Diameter (mm)	Embedment Length (mm)	Max bond stress (MPa)	Residual bond stress(%)
CFRP	1	9.4	47.0	7.81	82.3
	2			8.43	88.9
	Mean			8.12	85.7
GFRP(A)	1	9.4	47.0	11.77	67.7
	2			13.16	75.6
	3			0.0	0.0
	Mean			12.47	71.6
AFRP	1	9.4	47.0	13.53	85.3
	2			12.91	81.4
	Mean			13.22	83.4
CFRP(D)	1	9.4	47.0	18.21	76.2
	2			18.13	75.8
	Mean			18.17	75.9
GFRP(D)	1	8.3	41.5	16.98	73.8
	2			17.35	75.4
	3			0.0	0.0
	Mean			17.16	74.6
Hybrid(A)	1	4.0	20.0	23.5	83.9
	2			22.6	80.7
	Mean			23.0	82.3
Hybrid(B)	1	4.0	20.0	17.9	76.3
	2			17.5	74.4
	Mean			17.7	75.4
Hybrid(C)	1	8.3	41.5	21.1	81.0
	2			20.8	80.1
	Mean			20.9	80.5

Table C-9 Bond test result after deionized water exposure
(60°C, after 50days)

Type of FRP rebars	Test No.	Diameter (mm)	Embedment Length (mm)	Max bond stress (MPa)	Residual bond stress(%)
CFRP	1	9.4	47.0	6.81	71.8
	2			6.01	63.4
	Mean			6.41	67.6
GFRP(A)	1	9.4	47.0	9.61	55.2
	2			9.10	52.3
	3			0.0	0.0
	Mean			9.35	53.8
AFRP	1	9.4	47.0	9.69	61.1
	2			8.88	55.9
	Mean			9.29	58.6
CFRP(D)	1	9.4	47.0	16.31	68.2
	2			17.98	75.2
	Mean			17.15	71.7
GFRP(D)	1	8.3	41.5	11.05	48.1
	2			12.94	56.3
	3			0.0	0.0
	Mean			12.00	52.2
Hybrid(A)	1	4.0	20.0	16.1	57.5
	2			15.4	55.0
	Mean			15.7	56.2
Hybrid(B)	1	4.0	20.0	14.5	61.5
	2			11.2	47.7
	Mean			12.8	54.6
Hybrid(C)	1	8.3	41.5	15.5	59.8
	2			14.9	57.5
	Mean			15.2	58.7

Table C-10 Bond test result after repeated wet-dry cycles exposure

Type of FRP rebars	Test No.	Diameter (mm)	Embedment Length (mm)	Max bond stress (MPa)	Residual bond stress(%)
CFRP	1	8.3	41.5	8.19	86.4
	2			10.60	106.1
	3				
	Mean			9.40	99.2
GFRP(A)	1	9.4	47.0	15.19	87.3
	2			15.72	90.4
	3			0.0	0.0
	Mean			15.46	88.8
AFRP	1	9.4	47.0	15.33	96.6
	2			14.32	89.7
	3				
	Mean			14.83	93.5
CFRP(D)	1	9.4	47.0	20.45	85.5
	2			20.02	83.7
	3				
	Mean			20.24	84.7
GFRP(D)	1	8.3	41.5	15.24	66.3
	2			25.81	112.2
	3			17.63	76.7
	Mean			19.56	85.0
Hybrid(A)	1	4.0	20.0	25.4	91.0
	2			24.0	86.0
	3			23.6	84.6
	Mean			24.3	87.2
Hybrid(B)	1	4.0	20.0	19.9	84.7
	2			18.9	80.4
	Mean			19.4	82.6
Hybrid(C)	1	8.3	41.5	24.7	95.0
	2			19.8	76.3
	3			22.4	86.1
	Mean			22.3	85.8

Table C-11 Bond test result after long-term oven dry exposure

Type of FRP rebars	Test No.	Diameter (mm)	Embedment Length (mm)	Max bond stress (MPa)	Residual bond stress(%)
CFRP	1	8.3	41.5	13.48	-
	2			10.49	-
	3			9.64	-
	Mean			11.21	-
GFRP(A)	1	9.4	47.0	14.89	85.6
	2			17.87	102.7
	3			18.43	105.9
	Mean			17.07	98.1
AFRP	1	8.3	41.5	16.00	-
	2			16.84	-
	3				-
	Mean			16.42	-
CFRP(D)	1	8.3	41.5	21.02	87.9
	2			19.71	82.4
	3			19.34	80.9
	Mean			20.02	83.7
GFRP(D)	1	8.3	41.5	19.47	84.6
	2			23.71	103.1
	3			23.33	101.4
	Mean			22.17	96.4
Hybrid(A)	1	4.0	20.0	27.3	97.3
	2			27.6	98.9
	3			27.1	97.1
	Mean			27.3	97.8
Hybrid(B)	1	4.0	20.0	20.9	88.9
	2			29.9	84.7
	3			17.4	73.9
	Mean			19.4	82.5
Hybrid(C)	1	8.3	41.5	22.3	85.7
	2			25.6	98.3
	Mean			23.7	92.0

Table C-12 Bond test result after repeated freezing and thawing exposure

Type of FRP rebars	Test No.	Diameter (mm)	Embedment Length (mm)	Max bond stress (MPa)	Residual bond stress(%)
CFRP	1	9.4	47.0	8.38	88.4
	2			5.71	60.2
	3				
	Mean			7.01	73.9
GFRP	1	9.4	47.0	14.92	85.8
	2			14.73	84.6
	3			0.0	0.0
	Mean			14.83	85.2
AFRP	1	9.4	47.0	13.72	86.5
	2			12.84	80.9
	3				
	Mean			13.28	83.7
CFRP(D)	1	9.4	47.0	17.42	72.4
	2			19.99	83.6
	3				
	Mean			18.71	78.3
GFRP(D)	1	8.3	41.5	17.13	74.5
	2			19.80	86.1
	3			0.0	0.0
	Mean			18.46	80.3
Hybrid (Aslan)	1	4.0	20.0	23.4	83.4
	2			24.8	88.4
	Mean			24.1	85.9
Hybrid(B)	1	4.0	20.0	20.0	85.2
	2			18.4	78.3
	Mean			19.2	81.8
Hybrid(C)	1	8.3	41.5	21.0	80.8
	2			23.5	90.5
	Mean			22.3	85.6

Table C-13 Bond test result after sulfate(Na_2SO_4) solution exposure

Type of FRP rebars	Test No.	Diameter (mm)	Embedment Length (mm)	Max bond stress (MPa)	Residual bond stress(%)
CFRP	1	9.4	47.0	7.80	82.2
	2			6.21	65.5
	3				
	Mean			7.01	73.9
GFRP(A)	1	9.4	47.0	14.67	84.3
	2			13.47	77.4
	3			0.0	0.0
	Mean			14.07	80.8
AFRP	1	9.4	47.0	12.12	76.4
	2			10.83	68.2
	3				
	Mean			11.47	72.3
CFRP(D)	1	9.4	47.0	18.98	79.4
	2			19.29	80.7
	3				
	Mean			19.14	80.0
GFRP(D)	1	8.3	41.5	17.81	87.1
	2			15.83	77.5
	3			0.0	0.0
	Mean			16.82	82.3
Hybrid (A)	1	4.0	20.0	22.9	81.8
	2			25.4	90.8
	Mean			24.2	86.3
Hybrid(B)	1	4.0	20.0	18.2	77.5
	2			20.6	87.4
	Mean			19.4	82.5
Hybrid(C)	1	8.3	41.5	22.3	85.8
	2			22.2	85.3
	Mean			22.3	85.6

Table C-14 Bond test results of FRP rebars after CaCl₂ solution exposure

Type of FRP rebars	Test No.	Diameter (mm)	Embedment Length (mm)	Max bond stress (MPa)	Residual bond stress(%)
CFRP	1	9.4	47.0	7.21	76.0
	2			6.53	68.8
	3				
	Mean			6.87	72.5
GFRP(A)	1	9.4	47.0	13.76	79.1
	2			13.45	77.3
	3				
	Mean			13.60	78.2
AFRP	1	9.4	47.0	12.61	79.5
	2			13.57	85.5
	3				
	Mean			13.09	82.5
CFRP(D)	1	9.4	47.0	18.95	79.2
	2			16.81	70.3
	3				
	Mean			17.88	74.8
GFRP(D)	1	8.3	41.5	19.74	85.8
	2			16.84	73.2
	3			0.0	0.0
	Mean			18.29	79.5
Hybrid (A)	1	4.0	20.0	24.4	87.3
	2			22.2	79.1
	Mean			23.3	83.2
Hybrid(B)	1	4.0	20.0	20.2	86.1
	2			18.5	78.5
	Mean			19.5	82.3
Hybrid(C)	1	8.3	41.5	21.1	81.1
	2			21.6	83.1
	Mean			21.4	82.1

Table C-15 Bond test results of FRP rebars after salt and repeated wet-dry cycles exposure

Type of FRP rebars	Test No.	Diameter (mm)	Embedment Length (mm)	Max bond stress (MPa)	Residual bond stress(%)
CFRP	1	9.4	47.0	6.59	69.5
	2			7.08	74.7
	3				
	Mean			6.83	72.0
GFRP(A)	1	9.4	47.0	13.56	77.9
	2			13.58	78.0
	3				0.0
	Mean			13.57	78.0
AFRP	1	9.4	47.0	11.69	73.7
	2			13.53	85.3
	3				
	Mean			12.61	79.5
CFRP(D)	1	9.4	47.0	19.36	81.0
	2			18.84	78.8
	3				
	Mean			19.09	79.8
GFRP(D)	1	8.3	41.5	18.59	80.8
	2			18.56	80.7
	3				
	Mean			18.58	80.8
Hybrid(A)	1	4.0	20.0	21.4	76.4
	2			25.2	90.0
	Mean			23.3	83.2
Hybrid(B)	1	4.0	20.0	16.8	71.6
	2			20.3	86.5
	Mean			18.6	79.0
Hybrid(C)	1	8.3	41.5	20.6	79.4
	2			22.5	86.6
	Mean			21.6	83.0

Table C-16 Bond test results of FRP rebar after salt and repeated freezing and thawing cycles exposure

Type of FRP rebars	Test No.	Diameter (mm)	Embedment Length (mm)	Max bond stress (MPa)	Residual bond stress(%)
CFRP	1	9.4	47.0	6.95	73.3
	2			6.93	73.1
	3				
	Mean			6.94	73.2
GFRP(A)	1	9.4	47.0	14.52	83.4
	2			12.47	71.7
	3				
	Mean			13.49	77.5
AFRP	1	9.4	47.0	11.25	70.9
	2			12.78	80.1
	3				
	Mean			12.02	75.8
CFRP(D)	1	9.4	47.0	18.13	75.8
	2			17.51	73.2
	3				
	Mean			17.82	74.5
GFRP(D)	1	8.3	41.5	19.12	83.1
	2			17.80	77.4
	3				
	Mean			18.46	80.3
Hybrid(A)	1	4.0	20.0	22.3	79.6
	2			24.0	85.8
	Mean			23.2	82.7
Hybrid(B)	1	4.0	20.0	17.8	75.7
	2			18.1	77.0
	Mean			17.9	76.4
Hybrid(C)	1	8.3	41.5	21.5	82.8
	2			20.7	79.6
	Mean			21.1	81.2

Table C-17 Bond test results of FRP rebar after UV radiation exposure

Type of FRP rebars	Test No.	Diameter (mm)	Embedment Length (mm)	Max bond strength (MPa)	Residual bond strength(%)
GFRP	1	9.4	47.0	15.5	89.3
	2			13.7	78.8
	Mean			14.6	84.1
Hybrid(A)	1	4.0	20.0	23.4	83.6
	2			22.9	82.0
	Mean			23.2	82.8
Hybrid(B)	1	4.0	20.0	18.9	80.2
	2			20.6	87.4
	Mean			19.7	83.8
Hybrid(C)	1	8.3	41.5	22.9	88.2
	2			19.4	74.6
	Mean			21.2	81.4

APPENDIX D: Nonflex 비선형 해석 프로그램을 이용한 철근콘크리트 공시
체의 휨 해석 결과

D-1. 보강비($\rho = 0.0057$)

- B E A M T Y P E -

Beam Type = Reinforced Concrete Beam

- E F F E C T S I N C L U D E D -

* Shear effects are not included.

* Effects of reinforcement area are included.

- B L O C K D A T A -

Total Number of Blocks = 1

Block No.	Height	Width	Material ID
1	5.90E+00	5.90E+00	1

- R E I N F O R C E M E N T A R R A N G E M E N T -

* Tensile Rebars

Total Number of Tensile Rebars = 1

Rebar No.	Depth	Sectional area/bar	No. of bars/layer	Material ID
1	4.33E+00	6.80E-02	3	1

- L O A D S -

Self-Weight = 0

Load Type = 4-Point Load (Shear Span = 5.9)

- D A T A F O R M A T R I X M A T E R I A L S -

* No. of different matrices = 1

* Matrices in Compression

Matrix ID. = 1 Matrix Type No.= 2

Modulus of Elasticity = 3.64E+03

At peak : stress = 4.00E+00 strain = 2.10E-03

At inflection pt.: stress = 3.20E+00 strain = 2.88E-03

At asymptotic pt.: stress = 1.00E+00

* Matrices in Tension

- Matrix ID. =1 Matrix Type = linear ascending

- concave descending

Modulus of Elasticity = 0.00E+00

At peak: stress = 2.37E-01 strain = 8.00E-05

- D A T A F O R R E I N F O R C I N G R E B A R S -

* No. of different rebars = 1

* Rebar Properties

- RebarID = 1 Type = strain-hardening

strain at yield = 0.002037 yield stress = 60

strain at strain hardening = 0.00859 strain at failure = 0.0716

stress at failure = 107.5

initial modulus = 29450 hardening modulus = 1168

- S P A N -

* Span = 17.7

* Inner Span = 4.425 Outer Span = 4.425

* Number of Integraion Points in : (1).Inner Span = 10 and (2).

Outer Span = 10

- F L E X U R A L R E S P O N S E S O F T H E B E A M -

load	deflection
0.00E+00	0.00E+00
3.56E+00	9.15E-04
5.21E+00	2.30E-03
5.82E+00	3.48E-03
6.54E+00	4.75E-03
7.35E+00	6.18E-03
8.22E+00	7.60E-03
9.13E+00	9.08E-03
1.01E+01	1.06E-02
1.10E+01	1.21E-02
1.19E+01	1.35E-02
1.28E+01	1.50E-02
1.37E+01	1.64E-02
1.47E+01	1.79E-02
1.56E+01	1.94E-02
1.66E+01	2.09E-02
1.75E+01	2.24E-02
1.79E+01	2.35E-02
1.79E+01	2.36E-02
1.79E+01	2.36E-02
1.79E+01	2.37E-02

1.79E+01	2.37E-02
1.79E+01	2.38E-02
1.79E+01	2.38E-02
1.79E+01	2.39E-02
1.79E+01	2.39E-02
1.79E+01	2.40E-02
1.79E+01	2.40E-02
1.79E+01	2.41E-02
1.79E+01	2.41E-02
1.79E+01	2.42E-02
1.79E+01	2.42E-02
1.79E+01	2.43E-02
1.80E+01	2.43E-02
1.80E+01	3.72E-02
1.80E+01	3.80E-02
1.79E+01	3.88E-02
1.79E+01	3.96E-02
1.79E+01	4.04E-02
1.79E+01	4.12E-02
1.79E+01	4.19E-02
1.79E+01	4.27E-02
1.79E+01	4.35E-02
1.79E+01	4.43E-02
1.79E+01	4.50E-02
1.79E+01	4.58E-02
1.79E+01	4.66E-02
1.79E+01	4.74E-02
1.79E+01	4.82E-02
1.79E+01	4.90E-02

1.79E+01	4.98E-02
1.79E+01	5.05E-02
1.79E+01	5.13E-02
1.79E+01	5.21E-02
1.79E+01	5.29E-02
1.79E+01	5.37E-02
1.79E+01	5.45E-02
1.79E+01	5.52E-02
1.79E+01	5.60E-02
1.79E+01	5.68E-02
1.79E+01	5.76E-02
1.79E+01	5.84E-02
1.79E+01	5.91E-02
1.79E+01	5.99E-02
1.79E+01	6.00E-02
1.79E+01	6.00E-02
1.79E+01	6.01E-02
1.79E+01	6.01E-02
1.79E+01	6.39E-02
1.79E+01	6.40E-02
1.79E+01	6.41E-02
1.79E+01	6.42E-02
1.79E+01	6.42E-02
1.79E+01	6.81E-02
1.79E+01	6.81E-02
1.79E+01	6.82E-02
1.79E+01	6.83E-02
1.79E+01	6.83E-02
1.79E+01	6.84E-02

1.79E+01	7.30E-02
1.79E+01	7.55E-02
1.79E+01	7.55E-02
1.79E+01	7.56E-02
1.79E+01	7.97E-02
1.79E+01	7.98E-02
1.79E+01	8.51E-02
1.79E+01	8.52E-02
1.79E+01	8.53E-02
1.79E+01	8.53E-02
1.79E+01	8.54E-02
1.79E+01	8.55E-02
1.79E+01	8.55E-02
1.79E+01	9.18E-02

D-2. 보강비 ($\rho = 0.0051$)

- B E A M T Y P E -

Beam Type = Reinforced Concrete Beam

- E F F E C T S I N C L U D E D -

* Shear effects are not included.

* Effects of reinforcement area are included.

- B L O C K D A T A -

Total Number of Blocks = 1

Block No.	Height	Width	Material ID
1	5.90E+00	5.90E+00	1

- R E I N F O R C E M E N T A R R A N G E M E N T -

* Tensile Rebars

Total Number of Tensile Rebars = 1

Rebar No.	Depth	Sectional area/bar	No. of bars/layer	Material ID
4.33E+00	5.96E-02		3	1

- L O A D S -

Self-Weight = 0

Load Type = 4-Point Load (Shear Span = 5.9)

- D A T A F O R M A T R I X M A T E R I A L S -

* No. of different matrices = 1

* Matrices in Compression

Matrix ID. = 1 Matrix Type No.= 2

Modulus of Elasticity = 3.64E+03

At peak : stress = 4.00E+00 strain = 2.10E-03

At inflection pt.: stress = 3.20E+00 strain = 2.88E-03

At asymptotic pt.: stress = 1.00E+00

* Matrices in Tension

- Matrix ID. =1 Matrix Type = linear ascending

- concave descending

Modulus of Elasticity = 0.00E+00

At peak : stress = 2.37E-01 strain = 8.00E-05

- D A T A F O R R E I N F O R C I N G R E B A R S -

* No. of different rebars = 1

* Rebar Properties

- RebarID = 1 Type = strain-hardening

strain at yield = 0.002037 yield stress = 60

strain at strain hardening = 0.00859 strain at failure = 0.0716

stress at failure = 107.5

initial modulus = 29450 hardening modulus = 1168

- S P A N -

* Span = 17.7

* Inner Span = 4.425 Outer Span = 4.425

* Number of Integraion Points in : (1).Inner Span = 10 and (2).

Outer Span = 10

- F L E X U R A L R E S P O N S E S O F T H E B E A M -

load	deflection
0.00E+00	0.00E+00
3.54E+00	9.13E-04
5.09E+00	2.28E-03
5.59E+00	3.42E-03
6.19E+00	4.66E-03
6.89E+00	6.02E-03
7.65E+00	7.43E-03
8.44E+00	8.86E-03
9.25E+00	1.03E-02
1.01E+01	1.18E-02
1.08E+01	1.32E-02
1.17E+01	1.46E-02
1.25E+01	1.61E-02
1.33E+01	1.76E-02
1.42E+01	1.90E-02
1.50E+01	2.05E-02
1.58E+01	2.20E-02
1.61E+01	2.30E-02
1.61E+01	2.38E-02
1.61E+01	2.46E-02
1.60E+01	2.54E-02
1.60E+01	2.62E-02
1.60E+01	2.70E-02
1.60E+01	2.78E-02
1.60E+01	2.86E-02

1.60E+01	2.94E-02
1.60E+01	3.02E-02
1.60E+01	3.10E-02
1.60E+01	3.18E-02
1.60E+01	3.25E-02
1.60E+01	3.33E-02
1.60E+01	3.41E-02
1.60E+01	3.49E-02
1.60E+01	3.57E-02
1.60E+01	3.65E-02
1.60E+01	3.72E-02
1.60E+01	3.80E-02
1.60E+01	3.88E-02
1.60E+01	3.96E-02
1.60E+01	4.04E-02
1.60E+01	4.11E-02
1.60E+01	4.19E-02
1.60E+01	4.20E-02
1.60E+01	4.35E-02
1.60E+01	4.43E-02
1.60E+01	4.50E-02
1.60E+01	4.58E-02
1.60E+01	4.66E-02
1.60E+01	4.74E-02
1.60E+01	4.81E-02
1.60E+01	4.89E-02
1.60E+01	4.97E-02
1.60E+01	5.05E-02
1.60E+01	5.12E-02

1.60E+01	5.20E-02
1.60E+01	5.28E-02
1.60E+01	5.35E-02
1.60E+01	5.43E-02
1.59E+01	5.51E-02
1.59E+01	5.59E-02
1.59E+01	5.66E-02
1.59E+01	5.74E-02
1.59E+01	5.82E-02
1.59E+01	5.82E-02
1.59E+01	5.83E-02
1.59E+01	5.83E-02
1.59E+01	5.84E-02
1.59E+01	5.84E-02
1.59E+01	6.29E-02
1.59E+01	6.30E-02
1.59E+01	6.31E-02
1.59E+01	6.31E-02
1.59E+01	6.32E-02
1.59E+01	6.69E-02
1.59E+01	6.70E-02
1.59E+01	6.71E-02
1.59E+01	6.71E-02
1.59E+01	6.95E-02
1.59E+01	7.32E-02
1.59E+01	7.33E-02
1.59E+01	7.34E-02
1.59E+01	7.34E-02
1.59E+01	7.35E-02

1.59E+01	7.77E-02
1.59E+01	8.29E-02
1.59E+01	8.30E-02
1.59E+01	8.30E-02
1.59E+01	8.31E-02
1.59E+01	8.32E-02
1.59E+01	8.32E-02
1.59E+01	8.85E-02
1.59E+01	8.85E-02
1.59E+01	8.86E-02
1.59E+01	8.87E-02
1.59E+01	8.88E-02
1.59E+01	8.88E-02
1.59E+01	9.41E-02
1.59E+01	9.41E-02
1.59E+01	9.42E-02
1.59E+01	9.43E-02
1.59E+01	9.44E-02
1.59E+01	9.45E-02
1.59E+01	9.45E-02
1.59E+01	1.01E-01

D-3. 보강비($\rho = 0.0061$)

- B E A M T Y P E -

Beam Type = Reinforced Concrete Beam

- E F F E C T S I N C L U D E D -

* Shear effects are not included.

* Effects of reinforcement area are included.

- B L O C K D A T A -

Total Number of Blocks = 1

Block No.	Height	Width	Material ID
1	5.90E+00	5.90E+00	1

- R E I N F O R C E M E N T A R R A N G E M E N T -

* Tensile Rebars

Total Number of Tensile Rebars = 1

Rebar No.	Depth	Sectional area/bar	No. of bars/layer	Material ID
4.33E+00	7.79E-02		3	1

1

- L O A D S -

Self-Weight = 0

Load Type = 4-Point Load (Shear Span = 5.9)

- D A T A F O R M A T R I X M A T E R I A L S -

* No. of different matrices = 1

* Matrices in Compression

Matrix ID. = 1 Matrix Type No.= 2

Modulus of Elasticity = 3.64E+03

At peak : stress = 4.00E+00 strain = 2.10E-03

At inflection pt.: stress = 3.20E+00 strain = 2.88E-03

At asymptotic pt.: stress = 1.00E+00

* Matrices in Tension

- Matrix ID. =1 Matrix Type = linear ascending

- concave descending

Modulus of Elasticity = 0.00E+00

At peak : stress = 2.37E-01 strain = 8.00E-05

- D A T A F O R R E I N F O R C I N G R E B A R S -

* No. of different rebars = 1

* Rebar Properties

- RebarID = 1 Type = strain-hardening

strain at yield = 0.002037 yield stress = 60

strain at strain hardening = 0.00859 strain at failure = 0.0716

stress at failure = 107.5

initial modulus = 29450 hardening modulus = 1168

- S P A N -

* Span = 17.7

* Inner Span = 4.425 Outer Span = 4.425

* Number of Integraion Points in : (1).Inner Span = 10 and (2).

Outer Span = 10

- F L E X U R A L R E S P O N S E S O F T H E B E A M -

load	deflection
0.00E+00	0.00E+00
3.58E+00	9.17E-04
5.34E+00	2.33E-03
6.09E+00	3.56E-03
6.93E+00	4.92E-03
7.88E+00	6.34E-03
8.88E+00	7.80E-03
9.92E+00	9.30E-03
1.10E+01	1.08E-02
1.20E+01	1.23E-02
1.31E+01	1.38E-02
1.41E+01	1.53E-02
1.52E+01	1.68E-02
1.62E+01	1.83E-02
1.73E+01	1.98E-02
1.84E+01	2.14E-02
1.94E+01	2.29E-02
2.00E+01	2.41E-02
2.00E+01	2.42E-02
2.00E+01	2.42E-02
2.01E+01	2.43E-02
2.01E+01	2.43E-02
2.01E+01	2.44E-02
2.01E+01	2.44E-02
2.01E+01	2.45E-02

2.01E+01	2.45E-02
2.01E+01	2.46E-02
2.01E+01	2.46E-02
2.01E+01	2.47E-02
2.01E+01	2.47E-02
2.01E+01	2.48E-02
2.01E+01	2.48E-02
2.01E+01	2.49E-02
2.01E+01	2.49E-02
2.01E+01	2.50E-02
2.01E+01	2.50E-02
2.01E+01	2.51E-02
2.01E+01	2.51E-02
2.02E+01	2.52E-02
2.02E+01	2.52E-02
2.02E+01	2.53E-02
2.02E+01	2.53E-02
2.02E+01	2.54E-02
2.02E+01	2.54E-02
2.02E+01	4.60E-02
2.02E+01	4.68E-02
2.02E+01	4.75E-02
2.02E+01	4.83E-02
2.02E+01	4.91E-02
2.02E+01	4.99E-02
2.01E+01	5.07E-02
2.01E+01	5.15E-02
2.01E+01	5.23E-02
2.01E+01	5.31E-02

2.01E+01	5.39E-02
2.01E+01	5.47E-02
2.01E+01	5.55E-02
2.01E+01	5.63E-02
2.01E+01	5.71E-02
2.01E+01	5.79E-02
2.01E+01	5.87E-02
2.01E+01	5.94E-02
2.01E+01	6.03E-02
2.01E+01	6.11E-02
2.01E+01	6.11E-02
2.01E+01	6.12E-02
2.01E+01	6.12E-02
2.01E+01	6.13E-02
2.01E+01	6.13E-02
2.01E+01	6.60E-02
2.01E+01	6.60E-02
2.01E+01	6.61E-02
2.01E+01	6.83E-02
2.01E+01	6.83E-02
2.01E+01	6.84E-02
2.01E+01	7.31E-02
2.01E+01	7.32E-02
2.01E+01	7.32E-02
2.01E+01	7.33E-02
2.01E+01	7.34E-02
2.01E+01	7.34E-02
2.01E+01	7.35E-02
2.01E+01	7.91E-02

APPENDIX E: 학술논문집 및 학술발표회 논문집 게재 논문

1. 하이브리드 FRP 리바의 역학적 특성, 한국농공학회지 제45권 제2호, 2003, 3. pp. 58~67
2. 화학적 환경에 노출된 콘크리트 보강용 FRP 보강근의 장기 효과, 콘크리트학회논문집 제 15권 제 6호 2003.12 pp. 811~819
3. 콘크리트 보강용 고연성 하이브리드 FRP 보강근의 인장 및 파괴 특성, 한국농공학회지 제 46권 제 1호, 2004, 1. pp. 41~51
4. 콘크리트 보강용 FRP 보강근의 수분 민감성 및 열화 특성, 대한토목학회논문집 제 24권 제 2A호, 2004년 3월, pp 381~390
5. 고연성 하이브리드 FRP 보강근 및 인장 거동 예측 모델 개발, 대한토목학회 논문집 제 24권, 제 3A호, 2004년 5월, pp 491~500
6. 화학적 환경에 노출된 콘크리트 보강용 FRP 보강근의 부착 성능, 한국농공학회논문집 제 46권 제 3호, 2004년 5월 pp. 73~81
7. 콘크리트 보강용 FRP 보강근의 내구성 설계를 위한 환경영향계수의 제안, 한국콘크리트학회 논문집 제 16권 제 4호 2004년 8월, pp.529~539
8. 축진 열화 환경에 노출된 콘크리트 보강용 고연성 하이브리드 FRP 보강근의 부착 특성, 대한토목학회 논문집 제 24권 제 5A호 2004년 9월, pp.969~979
9. 콘크리트 보강용 FRP 보강근의 표면형상변화에 따른 부착특성, 한국농공학회지, 제 46권 제 5호, 2004년 9월 게재확정
10. 콘크리트 보강용 하이브리드 FRP 보강근의 특성, 2003년도 콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집 제 15 권 1 호, 2003, 5 pp. 255~260
11. 고연성 하이브리드 FRP 보강근의 전단 및 인장 거동, 2003년도 대한토목학회 학술발표회 논문집 2003, 10, 25 pp.1229~1234
12. 콘크리트 보강용 FRP 보강근의 개발 및 내구 특성, 2003년도 한국농공학회 학술발표논문집 pp 371~374
13. 표면형상변화에 따른 FRP 리바의 부착거동 평가, 2004년도 대한토목학회 학

술발표회 논문집 2004, 10, 22 발표확정

14. 고연성 하이브리드 FRP 리바의 화학적 환경에 노출후 부착성능, 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 2004년 11월 발표확정
15. 콘크리트 보강용 하이브리드 FRP 보강근의 설계 및 적용, 2004 년 2월, 건국대학교 박사학위 논문
16. 콘크리트 보강용 FRP 보강근의 내구성 평가에 의한 환경영향계수 결정 및 부착거동 연구, 2005년 2월, 건국대학교 박사학위 논문 심사중

하이브리드 FRP 리바의 역학적 특성

Mechanical Properties of Hybrid FRP Rebar

박찬기* · 원종필**

Park, Chan-Gi · Won, Jong-Pil

Abstract

Over the last decade fiber-reinforced polymer (FRP) reinforcement consisting of glass, carbon, or aramid fibers embedded in a resin such as vinyl ester, epoxy, or polyester has emerged as one of the most promising and affordable solutions to the corrosion problems of steel reinforcement in structural concrete. But reinforcing rebar for concrete made of FRP rebar has linear elastic behavior up to tensile failure. For safety a certain plastic strain and an elongation greater than 3% at maximum load is usually required for steel reinforcement in concrete structures. The same should be required for FRP rebar. Thus, the main object of this study was to develop new type of hybrid FRP rebar. Also, this study was evaluated to the mechanical properties of Hybrid FRP rebar. The Manufacture of the hybrid FRP rebar was achieved by pultrusion, and braiding and filament winding techniques. Tensile and interlaminar shear test results of Hybrid FRP rebar can provide its excellent tensile strength-strain behavior and interlaminar stress-strain behavior.

Keywords : Aramid fiber, Carbon fiber, Glass fiber, Hybrid FRP rebar, Tensile behavior, Interlaminar shear stress

I. 서 론

현재 사회 간접자본 시설의 건설에 주로 사용되는 철근콘크리트 구조물은 철근의 부식으로 인한 구조성능의 저하가 주요한 관심이 되고 있다. 특히 해양 및 수리구조물 교량구조물 등과 같이 수분에

직접적으로 접촉해 있는 콘크리트 구조물에서의 철근의 부식으로 인한 문제는 유지관리가 우수한 새로운 보강재료의 개발을 요구하고 있다.^(1,10,11) 현재 수분과 접촉해 있는 콘크리트의 내구성 저하의 대부분은 콘크리트 내의 철근의 부식으로 인한 것이며 철근의 부식은 콘크리트 구조물 재료에 포함된 염화물과 외부환경조건, 높은 습도 및 온도 그리고 철근 콘크리트 구조물이 수분과 접촉하는 위치하였을 때 공기 등이 주원인이 된다.^{(4,5),(6,7)} 이러한 관점에서 대부분의 구조물이 수분과 접해 있는 수리 구조물 특히 농업용수 등의 공급을 목적으

* 건국대학교 대학원
** 건국대학교 생명환경과학대학
** Corresponding author. Tel: +82-2-450-3750
fax: +82-2-2201-0907
E-mail address: jwron@konkuk.ac.kr

화학적 환경에 노출된 콘크리트 보강용 FRP 보강근의 장기 효과

박찬기¹⁾ · 원종필²⁾ · 유정길³⁾

¹⁾ 건국대학교 지역건설환경공학과

(2003년 5월 2일 원고접수, 2003년 10월 15일 심사완료)

Long-Term Effect of Chemical Environments on FRP Reinforcing Bar for Concrete Reinforcement

Chan-Gi Park¹⁾, Jong-Pil Won²⁾, and Jung-Kil Yoo³⁾

¹⁾ Dept. Rural Engineering Hanyang Konkuk University, Seoul, 143-704, Korea

(Received May 2, 2003, Accepted October 15, 2003)

ABSTRACT

The corrosion of steel reinforcing bar(re-bar) has been the major cause of the reinforced concrete deterioration. FRP(Fiber-reinforced polymer) reinforcing bar has emerged as one of the most promising and affordable solutions to the corrosion problems of steel reinforcement in structural concrete. However, FRP re-bar is prone to deteriorate due to other degradation mechanisms than those for steel. The high alkalinity of concrete, for instance, is a possible degradation source. Other potentially FRP re-bar aggressive environments are sea water, acid solution and fresh water/moisture.

In this study, long-term durability performance of FRP re-bar were evaluated. The mechanical and durability properties of two type of CFRP-, GFRP re-bar and one type of AFRP re-bar were investigated. The FRP re-bars were subjected to alkaline solution, acid solution, salt solution and deionized water. The mechanical and durability properties were investigated by performing tensile, compressive and short beam tests. Experimental results confirmed the desirable resistance of FRP re-bar to aggressive chemical environment.

Keywords : acid solution, alkaline, corrosion, deionized water, FRP re-bar, salt solution

1. 서 론

사회 간접자본 시설의 건설에 주로 사용되는 철근콘크리트 구조물은 철근의 부식으로 인한 구조성능의 저하가 주요한 관심이 되고 있다. 특히 해양 및 수리구조물, 교량 구조물 등과 같이 수분에 직접적으로 접촉해 있는 콘크리트 구조물에서 철근의 부식으로 인한 문제는 더욱더 심각한 실정으로 그에 대한 방지대책이 많이 요구되어 오고 있으나 명확한 해결책은 제시하지 못하고 있다.^{1,2)}

현재 보강 철근의 부식에 대한 문제점을 해결하고자 개발된 재료 중 FRP 보강근(fiber reinforced polymer re-bar)은 콘크리트 보강철근의 부식에 대한 문제점을 해결할 우수한 재료로서 그 사용 가능성이 매우 높다. FRP 보강근은 강도가 높으면서도 부식에 대한 우려가 없으며 보강재료로서 사용될 경우 강도/중량비가 커 콘크리트 구조물의 자중을 감소시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.¹⁻⁸⁾

이러한 특성에도 불구하고 FRP 보강근은 고가이며 내구성에 대한 실제적인 시험자료의 부족 및 설계기준의 미정립화로 인하여 그 사용이 제한되어 왔다.^{3,4)} 또한 기존에 제시되어 있는 FRP 보강근에 대한 대부분의 연구는 크리프, 응력부식, 피로, 환경적 피로, 화학 및 물리적 열화현상에 대한 것에 집중되어 왔다. 그러나 이와 같은 대부분의 연구는 콘크리트 구조물에 적용하기 위한 것이 아니라 항공산업 및 군수산업에 적용하기 위한 연구로 콘크리트의 보강재료로 사용되는 FRP 보강근과는 근본적인 차이가 있다.^{5,6)} 따라서 본 연구에서는 콘크리트 보강용으로 FRP 보강근을 개발하고 개발된 FRP 보강근이 콘크리트 구조물의 보강재료로 적용되어 장기적인 환경조건에 노출되었을 때의 내구성능을 평가함으로써 FRP 보강근의 내구성에 대한 기초적인 자료가 활용하고자 하며 이를 통하여 장기적으로 환경영향계수를 결정할 수 있는 자료로 사용하고자 한다. 본 연구에서는 이를 위하여 FRP 보강근을 4가지 종류의 화학적 열화환경에 노출시킨 후의 장기 내구성능을 평가하였다.

* Corresponding author
Tel : 02-40-3750 Fax : 02-224-0307
E-mail : jpwon@konkuk.ac.kr

콘크리트 보강용 고연성 하이브리드 FRP 보강근의 인장 및 파괴 특성

Tensile Behavior and Fracture Properties of Ductile Hybrid FRP Reinforcing Bar for Concrete Reinforcement

박 찬 기* · 원 종 필**

Chan-Gi Park · Jong-Pil Won

Abstract

FRP re-bar in concrete structures could be used as a substitute of steel re-bars for that cases in which aggressive environment produce high steel corrosion, or lightweight is an important design factor, or transportation cost increase significantly with the weight of the materials. But FRP fibers have only linearly elastic stress-strain behavior, whereas, steel re-bar has linear elastic behavior up to the yield point followed by large plastic deformation and strain hardening. Thus, the current FRP re-bars are not suitable concrete reinforcement where a large amount of plastic deformation prior to collapse is required.

The main objectives of this study is to evaluate the tensile behavior and the fracture mode of hybrid FRP re-bar. Fracture mode of hybrid FRP re-bar is unique. The only feature common to the failure of the hybrid FRP re-bars and the composite is the random fiber fracture and multilevel fracture of sleeve fibers, and the resin laceration behavior is both the sleeve and the core areas. Also, the result of the tensile and interlaminar shear stress test results of hybrid FRP re-bar can provide its excellent tensile strength-strain and interlaminar stress-strain behavior.

Keywords : Corrosion, Cure, Fracture mode, Hybrid FRP re-bar, Interlaminar shear stress, Sleeve fiber, Tensile behavior

1. 서 론

철근 부식에 의한 철근콘크리트 구조물의 구조상
능 저하는 기존 보강철근의 단점을 극복 할 수 있
는 새로운 대체재료를 개발하기 위한 많은 연구로
이어지고 있다.^(1,2) 미국의 경우 총 580,000개의
교량 중에 180,000개의 교량이 결함이 발견되어
즉시 보수 및 보강이 필요하여 이와 같은 많은 건

* 건국대학교 대학원 지역건설환경공학부

** 건국대학교 지역건설환경공학부

Corresponding author. Tel.: +82-2-480-3158

Fax: +82-2-2204-8907

E-mail address: jwon@konkuk.ac.kr

콘크리트 보강용 FRP 보강근의 수분 민감성 및 열화 특성

Moisture Sensitivity and Aging Properties of Fiber Reinforced Polymer Reinforcing Bar for Concrete Structures

원종필* · 박찬기**

Won, Jong-Pil · Park, Chan-Gi

Abstract

Fiber reinforced polymer (FRP) reinforcing bar (rebar) consisting of glass, carbon, or aramid fibers embedded in a resin such as vinyl ester, epoxy, or polyester has emerged as one of the most promising and affordable solutions to the corrosion problems of steel reinforcement in structural concrete. FRP rebar offers excellent corrosion resistance, as well as the advantages of high stiffness to weight ratio when compared to conventional steel rebar. Other advantages of FRP rebar include good fatigue properties, damage tolerance, non-magnetic properties, ease of transportation and handling, low energy consumption during fabrication of raw materials. This study aims at evaluation of the water absorption, moisture sensitivity and accelerated aging performance of FRP rebar. Two types of CFRP-, GFRP rebar and one type of AFRP rebar were evaluated. The effect of moisture and weathering on performance of FRP rebars were investigated through accelerated tests simulating the effects of wet-dry and freeze-thaw cycles as well as warm water and oven dry. The water absorption behavior was observed by means of simple gravimetric measurements in order to study the diffusion of the deionized water and alkaline solution. Also, the accelerated aging performance was investigated through the tensile, compressive, and short beam tests. They were shown to possess acceptable moisture sensitivity, water absorption and aging performance.

Keywords : corrosion, FRP rebar, freezing-thawing, long-term oven-dry, moisture sensitivity, wet-dry, water absorption, warm water immersion

요 지

섬유보강 폴리머 보강근(FRP 보강근)은 유리, 탄소, 아라미드섬유를 에폭시, 비닐에스터 및 폴리에스터 수지를 경합제로 이용하여 만들어진 보강재로 콘크리트 구조물에서 보강철근의 부식에 대한 문제를 해결할 수 있는 우수한 재료이다. FRP 보강근은 부식에 대한 우수한 저항성뿐만 아니라 강도/중량비가 크고 우수한 피로 및 충격저항성, 운반 및 시공성이 우수하고 FRP 보강근의 생산에 필요한 에너지가 작은 장점을 가지고 있다. 본 연구는 이와 같은 특성을 가진 FRP 보강근의 수분흡수 특성 및 수분민감성, 촉진열화특성을 평가하였다. 시험은 두 가지 종류의 CFRP 보강근과 GFRP 보강근 및 한가지 종류의 AFRP 보강근을 건조, 습윤, 대기환경 조건에 노출하여 수분흡수특성을 평가하였고 촉진열화 특성으로 건조-습윤순환, 동결-융해순환 시험을 실시하였다. FRP 보강근의 수분흡수특성은 중성수 및 알칼리 용액에 침지하여 중앙변위를 측정하였다. 또한 수분민감성 및 촉진열화특성은 인장, 압축 및 전단강도 시험을 통하여 평가하였다. 시험결과 FRP 보강근은 수분 및 촉진열화환경에서 매우 우수한 성능을 발휘함을 알 수 있었다.

핵심용어 : 건조-습윤순환, 동결-융해순환, 부식, 수분흡수율, 수분 민감성, FRP 보강근

1. 서 론

철근콘크리트 구조물에서 보강 철근의 부식에 대한 문제점을 해결하고자 개발된 재료 중 FRP 보강근(Fiber Reinforced Polymer rebar)은 보강철근의 부식에 대한 문제점을 해결할 우수한 재료로서 그 사용 가능성이 매우 높다(원종필 외(2003), ACI Repon 440R(1996)). FRP 보강근은 강도가 높으면서도 부식에 대한 우려가 없으며 보강재료로서 사용될 경우 강도/중량비가 커 콘크리트 구조물의 자중을 감소

시킬 수 있는 장점을 가지고 있다(ACI Repon 440R 2000; Nanni, 1993). 그러나 이러한 특성에도 불구하고 FRP 보강근은 고가이며 내구성에 대한 설계적인 시험자료의 부족 및 설계기준의 미정립으로 인하여 그 사용이 제한되어 왔다(Chia(1997)). 이 중 환경적 영향을 고려한 내구성에 대한 충분한 검토 자료의 부족은 FRP 보강근을 콘크리트의 보강재료로 사용하였을 때 성능저하에 대한 의구심을 갖게 되어 FRP 보강근의 사용을 막는 중요한 이유가 되어 왔다(GangaRao, 1995, 1997). FRP 보강근의 내구성 중

*정회원 - 한국대학교 환경에너지공학연구소 E-mail: jwon@konkuk.ac.kr

**정회원 - 한국대학교 환경에너지공학연구소 E-mail: wuhun@hama.net

고연성 하이브리드 FRP 보강근 및 인장 거동 예측 모델 개발

Development of Ductile Hybrid FRP Reinforcing Bar and Prediction Model of Tensile Behavior

원종필* · 박찬기**

Won, Jong-Pil · Park, Chan-Gi

Abstract

The corrosion of steel rebars has been the major cause of the deterioration in reinforced concrete structures. FRP reinforcing bar (rebar) was developed to solve the problem of such steel rebar. FRP rebar in concrete structures may be used as a substitute of steel rebars for the cases in which aggressive environment produce high steel corrosion, or lightweight is an important factor in design and construction. FRP rebar has only linearly elastic behavior; whereas, steel rebar has linear elastic behavior up to the yield point followed by large plastic deformation and strain hardening. Without plastic deformation, a small increase in load in concrete structures using FRP rebars can cause catastrophic collapse without any warning. Thus, the current FRP rebars are not suitable for concrete reinforcement which a large amount of plastic deformation prior to collapse is required. This study represents the development of ductile hybrid FRP rebar. The desirable mechanical property of ductile hybrid FRP rebar was obtained from the integrated design based on the material hybrid and geometric hybrid concepts. Using these concepts, analytical model was developed to predict the stress-strain curves with different combination of fiber materials and geometric configuration. This model was used to optimize the design of hybrid FRP rebar. Hybrid FRP rebar was tested for tensile strength and the test results compared with the analytical model. The test results showed that the hybrid FRP rebar stress-strain curves are linearly elastic with a definite yield point followed by plastic deformation. Also, analytical model of hybrid FRP rebar can closely predict the behavior of the hybrid FRP rebar.

Keywords : analytical model, ductile hybrid FRP rebar, geometric hybrid, material hybrid, plastic deformation, steel rebar

요 지

철근콘크리트 구조물의 주요 과제로인한 철근의 부식에 의한 것이다. 이와 같은 보강철근의 문제점을 해결하고자 개발된 FRP 보강근은 가혹한 환경하에서 보강철근의 대체재료로 사용되어 높은 부식저항성, 질적 및 운반에서 중요한 요소인 경량의 특성을 가지고 있다. 그러나 FRP 보강근은 보강철근과 다르게 소성변형 및 변형경화 구간이 없는 선형적인 거동을 하는 단점을 가지고 있다. 콘크리트 구조물에서 소성변형이 없다면 위상과괴를 발생시켜 안전성에 문제점을 발생시킨다. 따라서 현재 사용되고 있는 FRP 보강근은 콘크리트 구조물의 보강재료로서 적당하지 않다. 본 연구에서는 3%이상의 변형률과 소성 변형구간을 갖는 고연성 하이브리드 FRP 보강근을 설계하였고 인장거동 예측모델을 개발하여 인장시험을 실시하였다. 하이브리드 FRP 보강근은 재료하이브리드 및 기하학적 하이브리드 개념을 사용하여 만족할 만한 연성을 확보하였으며 이와 같은 개념을 사용하여 용력-변형률 거동을 예측할 수 있는 모델을 개발하였다. 이 모델을 이용하여 하이브리드 FRP 보강근의 설계를 최적화하였다. 설계된 FRP 보강근은 인장시험을 통하여 그 성능을 평가하였으며 이론적 예측모델과 그 결과를 비교하였다. 시험결과 하이브리드 FRP 보강근은 초기 항복후 소성변형 및 변형경화 구간을 갖는 우수한 특성을 보여주었다. 또한 이론적 모델과 비교하여 비슷한 결과를 보여주었다.

핵심어 : 이론적 모델, 고연성 하이브리드 FRP 보강근, 기하학적 하이브리드, 재료적 하이브리드, 소성변형

1. 서 론

현재 사회 간접자본 시설의 건설에 주로 사용되는 철근콘크리트 구조물은 철근의 부식으로 인한 구조성능의 저하가 주요한 과제가 되고 있다. 특히 해양 및 수리구조물, 콘크리트 교량구조물 등과 같이 수분에 직접적으로 접촉해 있는

콘크리트 구조물에서의 철근의 부식으로 인한 문제는 더욱 더 심각한 실정으로 그에 대한 방지대책이 요구되고 있으나 명확한 해결책은 제시하지 못하고 있다. 미국의 경우 총 580,000개의 교량중에 30% 정도인 180,000개의 교량에 결함이 발견되어 즉시 보수 및 보강이 필요한 실정이다 (Abayed, 1995; Sreenivas, 2002). 이와 같이 콘크리트 구

*정회원 · 건국대학교 /원주대학교(원주) 교수(전-mail: jwon@konkuk.ac.kr)

**정회원 · 건국대학교 /원주대학교(원주) 석사후 교정교수-mail: wuyun@hanmail.net

화학적 환경에 노출된 콘크리트 보강용 FRP 보강근의 부착 성능

Bond Performance of FRP Reinforcing Bar for Concrete Structures after Chemical Environmental Exposure

박찬기* · 원종필**

Park, Chan-Gi · Won, Jong-Pil

Abstract

FRP reinforcing bars(rebars) are produced through a variety of manufacturing process includes pultrusion, and filament winding and braiding etc. Each manufacturing method produces a different surface condition of FRP rebar. The surface properties of FRP rebar is an important property for mechanical bond with concrete. Current methods of providing surface deformation to FRP rebars include helical wrapping, surface sand coating and rib molding. The problem with the helical wrapping method is that it can not provide enough surface deformation for good bond and it can be easily sheared off from the FRP rebars. Sand coating and rib molding provide surface deformation only to the outer FRP skins. Therefore, FRP rebar has about 60% of bond strength of steel rebar.

The main objective was to evaluate the bond properties of FRP rebar after environmental exposure. Five types of FRP rebar includes CFRP ISO, GFRP Aslan, AFRP Technora, CFRP(Korea), and GFRP(Korea) rebars performed direct bond tests. Also, FRP rebar bond specimens were subjected to exposure conditions including alkaline solution, acid solution, salt solution and deionized water etc. According to bond test results, CFRP(Korea) and GFRP(Korea) rebars were found to have better bond strength with concrete than previous FRP rebars. Also, FRP(Korea) rebar had more than about 70% in bond strength of steel rebar.

Keywords : Bond, Braiding, Helical wrapping, Pultrusion, Filament winding, Rib, Sand coating

* 전국대학교 사회환경시스템공학과 박사후 과정

** 전국대학교 사회환경시스템공학과

Corresponding author. Tel.: +82-2-450-3750

Fax: +82-2-2201-6907

E-mail address: jrwon@kontak.ac.kr

콘크리트 보강용 FRP 보강근의 내구성 설계를 위한 환경영향계수의 제안

박찬기¹⁾, 천종필¹⁾, 김주원²⁾

¹⁾ 건국대학교 사회환경시스템공학과 ²⁾ 영남대학교 건축학부

(2004년 3월 5일 원고접수, 2004년 7월 15일 심사완료)

Recommendations of Environmental Reduction Factor of FRP Rebar for Durability Design of Concrete Structure

Chan-Gi Park¹⁾, Jong-Fil Wun¹⁾, and Joo-Won Kang²⁾

¹⁾ Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University, Seoul, 143-701, Korea

²⁾ School of Architecture, Yeungnam University, Gyongsan, 712-749, Korea

(Received March 5, 2004, Accepted July 15, 2004)

ABSTRACT

The corrosion of steel rebars has been the major cause of reinforced concrete deterioration. FRP(Fiber-reinforced polymer) rebar has emerged as one of the most promising and affordable solutions to the corrosion problems of steel reinforcement in structural concrete. However, FRP rebar is prone to deteriorate due to other degradation mechanisms than those for steel. The high alkalinity of concrete, for instance, is a possible degradation source. Therefore, the USA, Japan, Canada, UK, etc are using environmental reduction factor. Although difference design guidelines were drawn in many, including USA, Japan, Canada, UK, etc, recommendations and coefficients that could take into account the long-term behavior of FRP reinforcement were not well defined.

This study focuses on recommendation of environmental reduction factor of FRP rebar. Environment reduction factor were decided using durability test result. FRP rebars were subjected to twelve type of exposure conditions including alkaline solution, acid solution, salt solution and deionized water etc. The water absorption behavior was observed by means of simple gravimetric measurements and durability properties were investigated by performing tensile, compressive and short beam tests. Based on the experimental result, environmental reduction factor of hybrid FRP rebar(A) and IC) and CFRP rebar was decided as 0.85. Also, hybrid FRP rebar(B) and GFRP rebar were decided as 0.7 for the environmental reduction factor.

Keywords : alkaline, acid solution, corrosion, design guidelines, deionized water

1. 서 론

철근콘크리트 구조물은 철근의 부식으로 인한 문제점을 해결하기 위하여 FRP 보강근의 사용이 증가되고 있다. 장도가 길으면서도 부식에 우려가 없는 FRP 보강근(Fiber Reinforced Polymer rebar)은 보강재로서 사용될 경우 강도/질량비가 커 콘크리트 구조물의 자중을 감소시킬 수 있으며 적은 보강량으로도 큰 인장 보강효과를 발휘할 수 있고 밀도가 작아 용한 및 시공이 쉬운 장점이 있다^{1,2)}. 그러나 이와 같은 특성에도 불구하고 FRP 보강근은 내구성에 대한 실제적인 시험자료의 부족 및 설계기준의 미결함으로 인하여 그 사용이 제한되어 왔다³⁾. FRP 보강근의 내구성에 대한 평가는 FRP 보강근이 널리 사용되고

있는 미국의 선진국을 중심으로 이루어져 왔으며 연구결과를 기본으로 하여 환경적 영향을 고려하는 환경영향계수를 도입하여 설계에 적용시키고 있다^{4,5)}. 그러나 적용하는 환경영향계수는 확립된 기준이 없어 각각 서로 다른 기준으로 사용하고 있다. 이와 같은 이유는 FRP 보강근의 생산방법, 품질기준 등이 명확히 제시되어 있지 않기 때문에 각 생산제품에 따라 그 특성이 차이가 발생하기 때문이다^{6,7)}. 또한 각국의 환경조건이 어느 정도 상이한 차이가 발생하기 때문에 적용하는 장소에 따라 내구성 저하특성이 다르기 때문이다^{8,9)}. 따라서 국내에서 생산된 FRP 보강근 역시 기존 제품과 상이한 생산방법을 적용하고 있으며 재료의 특성 또한 다르기 때문에 이를 고려한 환경영향계수를 결정하는 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 국내에서 제조된 5가지 종류의 FRP 보강근을 주된 내구성 저하환경에 노출시켜 수분흡수 특성과 역학적 특성을 평가하여 기존에 외국에서 제시하고 있는 내구성 시험기준과 비교하여 환경영향계수를 결정하고자 한다.

* Corresponding author
Tel : 02-430-370 Fax : 02-234-3807
E-mail : jwun@konkuk.ac.kr

촉진 열화 환경에 노출된 콘크리트 보강용 고연성 하이브리드 FRP 보강근의 부착 특성

Bond Performance of Ductile Hybrid FRP Reinforcing Bar After Accelerated Environmental Exposures

원종필* · 박찬기**

Won, Jong-Pil · Park, Chan-Gi

Abstract

The most obvious benefit of the FRP material is perhaps the fact that it does not corrode in the same way as steel. But, FRP rebar has lower bond performance than steel rebar. Usually, FRP rebar has about 60% of bond strength of steel rebar. Without adequate bond to concrete, the full composite action between reinforcement and concrete matrix can not be achieved. Therefore, FRP rebars must also have surface deformations that provide good bond to concrete. Current methods of providing surface deformation to FRP rebars include helical wrapping, surface sand coating and rib molding. The problem with the helical wrapping method is that it can not provide enough surface deformation for good bond and it can be easily sheared off from the FRP rebars. Sand coating and rib molding provide surface deformation only to the outer FRP skins.

In this study focuses on bond properties of hybrid FRP rebar after environmental exposure. Hybrid FRP rebar bond specimens were subjected to twelve type of exposure conditions including alkaline solution, acid solution, salt solution and deionized water etc. Bond properties were investigated by direct bond test. According to bond test results, hybrid FRP rebars were found to have better bond strength with concrete than currently using GFRP rebar. Also, hybrid FRP rebar had more than about 80% in bond strength of steel rebar.

Keywords : alkaline, acid solution, corrosion, bond performance, hybrid FRP rebar

요 약

FRP 보강근은 보강철근과 비교하여 작은 부착강도를 가지고 있다. 일반적으로 FRP 보강근의 부착강도는 보강철근의 약 60% 정도이다. 따라서 FRP 보강근은 콘크리트와의 적절한 부착강도를 획득하기 위하여 표면형상처리를 실시하여 우수한 부착에 효과를 얻을 수 있도록 하고 있다. 현재 FRP 보강근의 표면형상처리 방법으로는 나선형철을 주는 방법과 표면을 굴삭 또는 코팅하는 방법, 표면에 사를 주는 방법이 있다. 그러나 나선형철 방법은 쉽게 벗겨져 충분한 부착강도를 획득할 수 없으며 굴삭 및 코팅하는 단계 FRP 보강근의 표면면을 저하한 것으로 부착강도의 증가에는 한계가 있다. 본 연구의 주요 관심사는 환경노출 후에 하이브리드 FRP 보강근의 부착특성을 평가하는 것이다. 하이브리드 FRP 보강근 공시체는 알칼리, 산, 염화, 중성 물에 12가지 촉진환경에 노출시켰다. 부착특성은 직접부착시험을 실시하였다. 시험결과 하이브리드 FRP 보강근은 기존 GFRP 보강근에 비하여 우수한 부착강도를 나타내었다. 또한 하이브리드 FRP 보강근은 보강철근에 비하여 약 80% 이상의 부착강도를 나타내었다.

핵심용어 : 알칼리, 산용해, 부식, 부착강도, 하이브리드 FRP 보강근

1. 서 론

철근콘크리트 구조물은 철근의 부식으로 인한 문제점을 해결하기 위하여 현재 사용이 증가되고 있는 FRP 보강근(Fiber Reinforced Polymer rebar)은 강도가 높으면서도 부식에 대한 우려가 없고 보강재료로서 사용할 경우 강도/중량비가 콘크리트 구조물의 자중을 감소시킬 수 있으며 적은 보강량으로도 큰 인장 보강효과를 발휘할 수 있는 장점

과 비중이 작아 운반 및 시공이 쉽다(ACI(1996), ACI(2000)).

FRP 보강근의 이와 같은 특성에도 불구하고 콘크리트 보강재로 사용할 경우 보강철근과 비교하여 콘크리트 모재와 부착강도가 현저히 저하된다(Akkadjan(1996), Bakis(1998), Bank(1998)). 이와 같은 이유는 FRP 보강근은 표면의 rib와 FRP 보강근 모재와의 완전한 일체 거동이 불가능하기 때문이다(Chadhak(1993), Faza(1990), Freeman(1998)).

*원종필 - 건국대학교 건축환경시스템공학과 부교수(E-mail: gwon@knu.ac.kr)
**박찬기 - 건국대학교 건축환경시스템공학과 석사과정(E-mail: wupark@knu.ac.kr)

콘크리트 보강용 FRP 보강근의 표면형상 변화에 따른 부착 특성

Bond Performance of FRP Reinforcing Bar by Geometric Surface Change

박친기* · 원종필**

Chan-Gi Park* · Jong-Pil Won**

Abstract

FRP rebar has low bond performance than steel rebar. Usually, FRP rebar has about 80% of bond strength of steel rebar. Without adequate bond to concrete, the full composite action between reinforcement and concrete matrix can not be achieved. Therefore, FRP rebars must also have surface deformations that provide good bond to concrete.

The purpose of this research was decided the optimum surface deformation patterns through bond test of FRP rebar. Eighteen surface deformation patterns FRP rebar with widely different geometries were investigated. Based on the test results, optimum rib width and height decided 3.0mm and 1.3mm respectively. Also, evaluated bond performances of FRP rebar that apply decided rib using braiding process. Bond test performed three types of surface deformation patterns for FRP rebar including sand coated rebar, ribbed rebar and wrapped and sand coated rebar that commercially available and three types of FRP rebar including CFRP, GFRP rebars that apply decided rib. According to bond test results, braiding ribbed FRP rebars were found to have better bond strength with concrete than currently using FRP rebar.

Keywords : Bond, FRP rebar, Helical wrapping, Rib, Sand coated, Surface deformation

1. 서론

FRP 보강근(Fiber Reinforced Polymer rebar)은 강도가 높으면서도 부식에 대한 우려가 없고, 보강재료로서 사용될 경우 중도/중량비가 커 콘크리트 구조물의 차중을 감소시킬 수 있으며, 적은 보강량으로도 큰 인장효과를 발휘할 수 있는 장점과 세장이 주어 무한 및 시공이 쉽다. 그러나 이와 같은 특성에도 불구하고 FRP 보강근을 콘크리트 보강제로 사용될 경우 보강률과 강도 확보에 콘크리트 모체와 부착성능이 원천히 저하된다는 문제점을 가지고 있다.^{1,2,3,4,5,6} 이와 같은 이유는 FRP 보강근 표면의 rib와 FRP 보강근 모체와의 완전한 밀착 거동이 잘 되지 않기 때문이다.^{7,8,9} 해나클링 보강률과 rib는 보강률과 부착력 향상을 위해서 일단 양이부터 밀착화 시켜 연관적이면 FRP 보강근의 경우 FRP 보강근의 도제를 적용방법에 의해 생산된 후 부착력 향상을 위해서 표면에 구사코팅을 실시하거나

* 한국대학교 사립대학원 석사과정

** 한국대학교 사립대학원 석사과정

** Corresponding author. Tel. +82-2-400-3290

fax. +82-2-234-0862

E-mail address: jwon@hokai.ac.jp

콘크리트 보강용 하이브리드 FRP 리바의 특성

The properties of hybrid FRP rebar for concrete structures

원종필* 박찬기** 황금식* 윤종환*

Won, Jong-Pil Park, Chan-Gi Hwang, Kum-Sik Yoon, Jong-Hwan

ABSTRACT

The corrosion of steel rebars has been the major cause of the reinforced concrete deterioration. It is FRP rebar that is developed to solve problem of such steel rebar. FRP rebar in concrete structures should be used as a substitute of steel rebars for that cases in which aggressive environment produce high steel corrosion, or lightweight is an important design factor, or transportation cost increase significantly with the weight of the materials. But FRP rebar have only linearly elastic behavior; whereas, steel rebar has linear elastic behavior up to the yield point followed by large plastic deformation and strain hardening. Thus, the current FRP rebars are not suitable concrete reinforcement where a large amount of plastic deformation prior to collapse is required.

The main objective of this study was to develop new type of hybrid FRP rebar. The manufacture of the hybrid FRP rebar was achieved pultrusion, braiding and filament winding techniques. Tensile and interlaminar shear test results of hybrid FRP rebar can provide its excellent tensile strength-strain behavior and interlaminar stress-strain behavior.

1. 서론

철근콘크리트 구조물에 있어서 철근의 부식은 구조성능 저하의 주요 원인이다. 특히 해양 및 수리구조물, 교량구조물 등과 같이 수분에 직접적으로 접촉해 있는 콘크리트 구조물에서 철근의 부식으로 인한 문제는 더욱더 심각한 실정으로서 그에 대한 방지대책이 많이 요구되어 오고 있으나 명확한 해결책은 제시하지 못하고 있다.^{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100} FRP 리바는 선탄성적인 용역-변형률 거동을 가지고 있는데 반해 보강철근은 초기항복점까지는 선탄성적인 거동을 보여주지만 이후 큰 소성변형과 변형경화거동을 보여준다.¹⁹ 보강철근의 항복 후에 발생하는 소성변형은 휨부재의 파괴가 발생하기 전에 지속적으로 하중을 전달함과 동시에 큰 연성거동을 발생시킨다. 콘크리트 구조물에서 보강철근이 갖는 소성변형 구간이 없다면 작은 파괴하중의 증가에도 어떠한 사전경고도 없이 급격한 파괴 즉 취성파괴를 발생시킨다.¹⁹ 또한 지진하중, 풍하중, 차량하중 등 동적하중을 받는 구조물의 설계에서 소성변형 메카니즘은 꼭 필요한 것으로 재료의 변형에 의한 에너지의 흡수와 반복하중에 의한 구조물에 부과된 에너지의 많은 양을 흡수하는데 사용된다. 따라서 현재 개발된 FRP 재료는 파괴 전에 소성변형이 필요한 콘크리트 보강제로서는 적당하지 않다.¹⁹ 따라서 본 연구에서는 FRP 리바의 취성의 성질을 갖는 단점을 해결하고자 재료복합 모델과 기하학적 복합 모델을 적용하여 3%이상의 소성변형 구간을 갖는 하이브리드 FRP 리바(hybrid FRP rebar)를 개발하고 그 성능을 평가하고자 한다.

* 정회원 건국대학교 지역건설환경공학과 교수

** 정회원 건국대학교 대학원

고연성 하이브리드 FRP 보강근의 전단 및 인장 거동

Interlaminar Shear Stress and Tensile behavior of Ductile Hybrid FRP
(Fiber Reinforced Polymer) Reinforcing Bar

원종필* · 박찬기** · 황금식*** · 윤종환*** · 김영균***

1. 서 론

최근 부식에 의한 철근콘크리트 구조물의 구조성능 저하는 기존 보강철근의 단점을 극복 할 수 있는 새로운 대체재료를 개발하기 위한 많은 연구로 이어지고 있다. 대체 재료 중 FRP 보강근은 경량이고 강도가 우수하며 각종 환경조건에서의 내구성이 우수하다고 알려져 그 사용 가능성이 가장 높다(원종필, A. Nanni, 2003, 1993). 그러나 FRP 보강근은 취성적 성질과 전단 및 압축하중에 의한 단점을 가지고 있다. 특히 FRP 보강근의 취성적 성질은 신규 철근콘크리트 구조물의 보강재료 사용되었을 경우 사용성 및 안전성에 매우 큰 영향을 미친다(A. Nanni, 1995). 또한 FRP 보강근은 섬유를 일방향으로 배열하고 매트릭스 수지를 이용하여 섬유를 결합시키는 압출성형방식에 의하여 주로 생산됨으로써 섬유와 배열방향인 인장강도는 매우 우수하나 섬유배열방향의 수직 방향의 압축하중 및 전단하중에 대해서는 매우 약한 특성을 가지고 있다(원종필, A. Nanni, 2003, 1993). 따라서 FRP 보강근의 취성적 성질과 전단 및 압축하중에 의한 문제는 FRP 보강근의 사용성을 증가시키기 위하여 해결하여야 할 중요한 문제이다. FRP 보강근의 취성적 특성은 FRP 보강근을 구성하는 재료인 보강섬유가 선단성거동을 하는 재료이기 때문이며 FRP 보강근이 전단 및 압축하중을 받을 때 보강재 파괴가 발생하는 주요 원인은 FRP 보강근을 구성하는 매트릭스 수지의 부확강도, FRP 보강근을 구성하는 재료의 혼합비 및 섬유를 일방향으로 배열하고 매트릭스 수지를 결합재료로 사용하여 압출성형하는 생산방식이 주요 원인이다(A. Nanni, 1993). 따라서 본 연구에서는 FRP 보강근의 취성적 문제를 해결하기 위하여 변형률이 서로 다른 섬유를 혼합하여 변형률이 작은 섬유가 파괴된 후 변형률이 큰 섬유가 하중에 저항하면서 소성변형구간을 확보하게 하였으며, 전단 및 압축하중을 받을 때 섬유와 매트릭스 수지의 분리에 의하여 발생하는 파괴를 방지하기 위하여 기존의 압출성형(Pultrusion) 방법에 의한 FRP 보강근의 생산을 개량 FRP 보강근의 표면을 제외하여 전단 및 압축에 대한 저항성을 증가시켜 그 성능을 평가하였다.

2. 고연성 하이브리드 FRP 보강근 설계

고연성 하이브리드 FRP 보강근은 변형률이 서로 다른 섬유를 혼합하여 변형률이 작은 섬유가 파괴된 후 변형률이 큰 섬유가 파괴될 때까지 소성변형을 갖는 개념을 도입하였다. 본 연구에서는 변형률이 서로 다른 탄소섬유, 유리섬유, 아라미드섬유와 결합재료로 에피에스터 수지를 사용하였다. 에피에스터 수지는 원래 FRP 보강근의 제조에 사용되는 결합재료 중 역학적 특성 및 내구성 그리고 경제성이 가장 우수하다고 알려져 있다. 본 연구에서 사용된 재료의 특성은 표 1과 같다. 고연성 하이브리드 FRP 보강근의 생산을 위하여 본 연구에서는 압출, 브레이딩, 필라멘트 와인딩의 세가지 공정으로 구성된 생산시스템을 이용하였다. 각 공정을 살펴보면 다음과 같다. 압출공정의 경우 고연성 하이브리드 FRP 보강근의 코어 FRP 보강근 부분을 생산하는 단계로 이 과정은 슬러브를 구성하도록 하는 공정한 브레이딩 과정시 섬유가 매우 조밀하게 배치되

*정회원: 건국대학교 지역건설환경공학과 교수 · 공학박사 · E-mail:jwon@konkuk.ac.kr

**정회원: 건국대학교 지역건설환경공학과 박사과정 · E-mail:bauchy@hanmail.net·날보자

***정회원: 건국대학교 지역건설환경공학과 석사과정

콘크리트 보강용 FRP 리바의 개발 및 내구 특성

Development and Durability Characteristics of FRP Reinforcing Bar for
Concrete Structures

원종필 · 박찬기^{*} · 윤종환 · 황금식 · 조용진(건국대)

Won, Jong Pil · Park, Chan Gi · Yoon, Jong Han · Hwang, Kum Sik · Cho, Yong Jin

Abstract

The corrosion of steel reinforcing bar(re-bar) has been the major cause of the reinforced concrete deterioration. FRP(Fiber-reinforced polymer) reinforcing bar has emerged as one of the most promising and affordable solutions to the corrosion problems of steel reinforcement in structural concrete. In this study, long-term durability performance of FRP re-bar were evaluated. The mechanical and durability properties of two type of CFRP- and GFRP re-bar were investigated; the FRP re-bars were subjected to alkaline solution, acid solution, salt solution and deionized water. The mechanical and durability properties were investigated by performing tensile and short beam tests. Experimental results confirmed the desirable resistance of FRP re-bar to aggressive chemical environment.

1. 서론

사회 간접자본 시설의 건설에 주로 사용되는 철근콘크리트 구조물은 철근의 부식으로 인한 구조성능의 저하가 주요한 관심이 되고 있다. 특히 해양 및 수리구조물 등과 같이 수분에 직접적으로 접촉해 있는 콘크리트 구조물에서 철근의 부식으로 인한 문제는 더욱더 심각한 실정으로 그에 대한 방지대책이 많이 요구되어 오고 있으나 명확한 해결책은 제시하지 못하고 있다.^(1,2) 현재 보강 철근의 부식에 대한 문제점을 해결하고자 개발된 재료 중 FRP 보강근(Fiber Reinforced Polymer re-bar)은 콘크리트 보강철근의 부식에 대한 문제점을 해결할 우수한 재료로서 그 사용 가능성이 매우 높다. FRP 보강근은 강도가 높으면서도 부식에 대한 우려가 없으며 보강재료로서 사용될 경우 강도/중량비가 커 콘크리트 구조물의 자중을 감소시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.^(1,2) 그러나 이러한 특성에도 불구하고 FRP 보강근은 고가이며 내구성에 대한 실제적인 시험자료의 부족 및 설계기준의 미정립화로 인하여 그 사용이 제한되어 왔다.^(1,2) 따라서 본 연구에서는 콘크리트 보강용으로 FRP 보강근을 개발하고 개발된 FRP 보강근이 콘크리트 구조물의 보강재료로 적용되어 장기적인 환경조건에 노출되었을 때의 내구성능을 평가함으로써 FRP 보강근의 기초적인 자료로 활용하고자 한다. 본 연구에서는 이를 위하여 FRP 보강근을 4가지 종류의 화학적 열화 환경에 노출시킨 후의 장기 내구성능을 평가하였다.

2003년도 한국농공학회 학술발표회 논문집 (2003년 11월 1일)

표면형상 변화에 따른 FRP 리바의 부착특성

Bond Performance of FRP Rebar by Geometric Surface Change

원승원* · 박찬기* · 서정민** · 공태웅**

Won, Jong Pil · Park, Chan Gi · Seo, Jung Min · Kong, Tae Woong

1. 서 론

FRP 리바(Fiber Reinforced Polymer rebar)는 강도가 높으면서도 부식에 대한 우려가 없고, 보강재료로서 사용될 경우 강도/중량비가 저 콘크리트 구조물의 재중을 감소시킬 수 있으며, 적은 보강량으로도 큰 연장률과도 발휘할 수 있는 장점이 제공되어 점차 운반 및 시공이 쉽다(원승원 외, ACI 440, 2004, 2000) 그러나 이와 같은 특성에도 불구하고 FRP 리바를 콘크리트 보강제로 사용될 경우 보강철근과 비교하여 콘크리트 모체의 부착성능이 현저히 저하된다는 문제점을 가지고 있다. 이와 같은 이유는 FRP 리바는 표면의 rb 와 FRP 리바 모체와의 완전한 위해 거동은 불가능하기 때문이다. 왜냐하면 보강철근의 rb 은 보강철근의 부착이 발생을 위해 필요한 당시부터 미세화 시작 발생되지만 FRP 리바의 경우 FRP 리바의 모체와 압축성형에 의해서 생산된 후 부착이 발생을 위해서 표면에 굽이코팅을 실시하거나 또는 필름로 rb 처리를 하는 방법 등을 사용함으로써 FRP 리바 모체와 표면처리 부분의 분리로 인한 부착성능 저하가 나타날 수 있다(Abdulkader, S.R., Bark, 1996, 1998) 또한 FRP 리바는 플라스틱재료의 특성을 가지고 있어 표면의 마찰계수까지 작기 때문에 부착성능 확보에 어려움이 있다(Chauhan D, Freimanis, A, 1993, 1998) 현재 이와 같은 부착성능의 향상을 위하여 다양한 방법으로 연구가 진행되고 있다. 특히 표면 굽이코팅의 두께를 조절하여 FRP 리바의 모체와 분리를 최소화 할 수 있는 방법이 주로 사용되고 있다. 그러나 기대했던 충분한 부착성능을 확보하지는 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 FRP 리바의 부착성능을 향상시키기 위하여 표면형상의 변화는 통하여 처리의 rb 의 형상을 결정하고 표면처리부분과 FRP 리바 모체와의 분리를 최소화 할 수 있는 굽이코팅을 개발하여 FRP 리바의 생산시 적용함으로써 FRP 리바와 콘크리트 모체와의 부착성능을 증가시키고 있다.

2. 시험계획

본 연구에서는 FRP 리바의 부착성능을 향상시키기 위하여 부착시험을 통한 표면 rb 의 형상을 결정하려 한다. 이를 위하여 18가지의 기본 표면형상을 가진 FRP 리바를 생산하여 부착시험을 실시하여 부착성능이 가장 우수한 rb 의 높이 및 폭을 결정하였다. FRP 리바의 기본표면형상의 결정은 기존에 널리 사용되고 있는 FRP 리바의 표면형상을 기본으로하여 18가지의 표면형상 및 치수를 결정하였다. FRP 리바의 기본 표면형상은 크게 원형상의 rb 치리와 알맹형 rb 치리를 기본으로하여 각각 치수를 5가지로 결정하였다. 본 연구에서 사용한 FRP 리바의 18가지의 치수는 Table 1과 같으며 Fig. 1은 시험에 사용된 FRP 리바의 사진이다. FRP 리바의 표면형상을 적용하기 위한 생산방법은 브레이딩 및 권라멘드 와인딩 공정의 생산시스템을 적용하였다. 브레이딩 및 권라멘드 와인딩 공정은 표면을 채워하는 동시에 rb 를 구성하고 rb 의 전단폭 및 FRP 리바의 모체와의 분리에 의한 크리프 방지할 수 있는 생산공정으로 부착성능을 향상시킬 수 있는 공정으로 개발되었다.

*동해원: 건국대학교 사회환경시스템공학과 교수 · 공학박사 · E-mail:won@konkuk.ac.kr

**정희원: 건국대학교 사회환경시스템공학과 박사후 과정 · E-mail:juhyun@konkuk.ac.kr

***정희철: 건국대학교 지역건설환경공학과 석사과정 · E-mail:seop@kmail.net-영표자

****정희철: 건국대학교 지역건설환경공학과 석사과정 · E-mail:genkong@empal.com

고연성 하이브리드 FRP 리바의 화학적 환경 노출 후

부착 성능

Bond Performance of Ductile Hybrid FRP Rebar After Chemical Environmental Exposures

원종필¹⁾ 박찬기²⁾ 서정민³⁾ 공태홍⁴⁾ 송상경⁵⁾ 최석현⁶⁾
Woo, Jong-Pil Park, Chan-Gi Seo, Jung-Min Kong, Tae-Hong Sung, Sang-Kyoung Choi, Suk-Hyun

ABSTRACT

In this study focuses on bond properties of hybrid FRP rebar after chemical environmental exposure. Hybrid FRP rebar load specimens were subjected to four type of exposure conditions. Bond properties were investigated by direct bond test. Bond test results, hybrid FRP rebars were found to have better bond strength with concrete than currently using GFRP rebar. Also, hybrid FRP rebar had more than about 80% in bond strength of steel rebar.

1. 서론

최근콘크리트 구조물은 일군의 부식으로 인한 문제점을 해결하기 위하여 현재 사용이 증가되고 있는 FRP 보강근(Fiber Reinforced Polymer rebar)은 침도가 높으면서도 부식에 대한 우려가 없고 보강 재료로서 사용될 경우 강도/중량비가 커 콘크리트 구조물의 자중을 감소시킬 수 있는 장점이 제공되어 차에 관한 및 시공이 쉽다.¹⁾ 그러나, 콘크리트 구조물이 실제 환경조건에 노출되었을 때 FRP 보강근이 침투에 의한 FRP 보강근의 재료 자체의 성능 저하뿐만 아니라 FRP 보강근 모체와 포면접합 저리 부분이 분리, FRP 보강근과 콘크리트 모체 사이의 부착성능 저하로 인해 발생할 수 있다. 이와 같이 FRP 보강근은 보강근에 비하여 부착강도 작으며 환경노출시 부착강도의 감소가 더욱더 감소할 가능성이 대보하고 있다. 본 연구는 국내에서 개발된 3가지 종류의 하이브리드 FRP 보강근의 부착성능 및 환경노출 후 부착성능의 영향을 평가하였다. 국내에서 개발된 3가지 종류의 하이브리드 FRP 보강근은 부착강도를 향상시키고 FRP 보강근의 표면을 브레이딩이라는 3차원 제직기술을 이용하여 생산함으로써 r의 결단과 및 분리를 방지하고자 하였다. 또한 현재 외국에서 상용화되어 있는 GFRP 보강근과 비교성능을 실시하여 국내에서 생산된 하이브리드 FRP 보강근의 부착성능 향상경도를 평가하고자 하였다.

2. 실험계획 및 방법

- ¹⁾ 성희원, 건국대학교 사회환경시스템공학과 교수
- ²⁾ 성희원, 건국대학교 사회환경시스템공학과 박사 후, 4차원
- ³⁾ 성희원, 건국대학교 사회환경시스템공학과 석사과정

博士學位 請求論文

指導教授 元 鍾 弼

콘크리트 보강용 고연성 하이브리드 FRP 보강근의
설계 및 적용

Design and Application of Ductile Hybrid FRP
Reinforcement for Concrete Structure

建國大學校 大學院

地域建設環境工學科

朴 讚 基

博士學位 請求論文

指導教授 元 鍾 興

콘크리트 보강용 FRP 보강근의 내구성 평가에 의한
환경영향계수 결정 및 무작거동

Bond Behavior and Environmental Reduction Factor of Fiber Reinforced
Polymer Reinforcing Bar for Concrete Structure

建國大學校 大學院

地域建設環境工學科

柳 正 吉

주 의

1. 이 보고서는 농림부에서 시행한 농림기술개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 농림부에서 시행한 농림기술개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.