

수산특정연구개발사업

다열 커튼월-파일 방파제의 수리 특성
Hydraulic Characteristics of Multiple-Row
Curtainwall-Pile Breakwater

서울대학교

농림수산식품부

제 출 문

농림수산식품부 장관 귀하

본 보고서를 수산특정연구개발사업 “다열 커튼월-파일 방파제의 수리 특성” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2008 년 10 월 30 일

주관연구기관명 : 서울대학교

주관연구책임자 : 서 경 덕

책 임 연 구 원 : 이 정 렬

연 구 원 : 지 창 환

연 구 원 : 이 주 용

연 구 원 : 박 건 형

요 약 문

I. 제 목

다열 커튼월-파일 방파제의 수리 특성

II. 연구개발의 목적 및 필요성

중력식 방파제들이 가지는 경제적, 환경적 기반공학적 문제를 해결하기 위해서 새로운 형식의 방파제 개발이 요구되고 있다. 또한 최근 환경 친화적인 어항 및 항만 리모델링이 추진되면서 해수가 소통되는 투과성 방파제에 대한 관심도 늘어나고 있다. 따라서 장주기파에 취약한 투과성 방파제의 단점을 보완하기 위한 새로운 형식의 투과성 방파제의 개발이 필요하다.

해수 유동이 가능한 방파제는 수학적 해석의 어려움으로 2차원 수치모형의 개발에는 한계가 있었다. 또한 수질개선에는 분명한 효과가 기대되나 토사이동 측면에서는 연구의 전례가 없어 실용화의 걸림돌이 되고 있다. 따라서 투과성 방파제에 의한 항만의 정온도를 평가하고 방파제 주변의 토사 이용 및 항 내 매물 저감 능력을 평가할 수 있는 2차원 모형의 개발이 필요하다.

III. 연구개발 내용 및 범위

본 연구개발과제에서는 다열 커튼월-파일방파제의 1차원 모형, 2차원 모형 및 정온도 모형, 해안선 변화 및 토사이동 수치모형 등을 수행했으며 각각의 내용 및 범위를 요약하면 다음과 같다.

□ 다열 커튼월-파일 방파제 1차원 모형

고유함수전개법을 이용하여 다열 커튼월-파일 방파제에 대한 1차원 규칙파 모형을 개발하였으며, 이를 검증하기 위한 규칙파 수치모형실험도 실시하였다. 규칙파 모형을 이용하여 파의 주기를 불규칙파 스펙트럼에서 각각의 주파수 성분으로 하고 모든 주파수에 대하여 제곱평균제곱근 파고를 사용하여 불규칙파 모형으로 확장하였다. 또한 수치모형을 검증할 수 있는 불규칙파 수치모형 실험도 실시하였다.

□ 다열 커튼월-파일 방파제 2차원 모형 및 정온도 모형

SPIV를 이용하여 다열 커튼월-파일 방파제에 의한 산란파의 영향을 보기 위해 수직벽의 잠금깊이와 조파 조건을 다르게 하여 6가지 경우에 대하여 3차원 수치실험을 실시하였다. GUI 환경의 WADEM을 이용하여 항 내 정온도를 평가할 수 있는 수치모형을 개발하였다.

□ 해안선 변화 및 토사이동 수치모형

WADEM_PB 및 DICEM_R을 이용하여 토사이동 수치모형을 개발하였고, One-line 모델을 통해 해안선 변화 수치모형을 개발하여 수리실험 및 실지역 적용을 통해 검증하였다. 3차원 수리실험을 통해서 다열 커튼월-파일 방파제 후면의 해저지형 변화 및 해안선 변화 실험을 방파제 하단부 공극의 차에 따라 3가지 경우에 대하여 실시하였다.

IV. 연구개발 결과

다열 커튼월-파일 방파제의 수리학적 특성을 알 수 있는 규칙파 1차원 모형을 개발하였고 이를 불규칙파 모형으로 확장하였다. 모형의 검증을 위해 규칙파 및 불규칙파에 대해 수치모형실험을 실시하였으며 수치모형은 수리실험결과를 잘 예측하고 있었다. 또한 1차원 모형을 이용하여 방파제 형상에 관계된 각종 변수들의 변화에 따른 특성도 예측할 수 있었다.

해수 유동이 가능한 방파제에 대한 2차원 수치모형을 개발하였으며, 수질 개선 및 토사이동에 대한 연구에 사용될 수 있다. 특히 GUI 환경이 제공되어 환경 설정 및 각종 변수의 입력과 수정이 쉬우며 결과 확인을 바로 할 수 있어서 빠른 피드백이 가능하다.

항 내 및 연안역에서의 토사이동 수치모형 및 해안선 변화 수치모형이 사용자 편의 모형인 GUI형태로 개발되었으며, 이를 토대로 토사 유입 또는 유출량이 고려되어 장기간의 예측이 가능(토사이동 수치모형)하고, 장시간의 해양 환경에 실제로 반응하며 평형에 도달되는 해안선 예측이 가능(해안선 변화 수치모형)하다.

V. 연구개발 결과의 활용계획

본 연구개발 결과는 중력식 방파제의 단점을 보완하여 방파제 구조형식과 방파제 건설 재료의 다변화에 기여할 것으로 생각된다. 또한 투과성 방파제의 해수 교환 능력 평가와 방파제 주변의 토사 이용 및 항 내 매물 저감 능력을 평가하는데 활용할 수 있으며, 수질 및 토사이동에 대한 환경영향 평가의 기술 수립에 활용할 수도 있다.

최근 관심이 높아지는 마리나에서의 항 배치 및 방파제에 활용할 수 있는 수치모형을 개발하였으며, 이는 사회적 추세인 친환경성에도 부합한다. 항만 이용객에게 친수 및 여가 공간을 제공하여 항만 구조물에 대한 사회적인 인식 개선의 효과도 기대한다.

목 차

제1장 연구개발과제의 개요	1
제1절 연구개발의 목적	1
제2절 연구개발의 필요성	2
제2장 국내외 기술개발 현황	3
제3장 연구개발 수행내용 및 결과	7
제1절 1차원 수치모형과 수리실험	7
1. 규칙파 수치모형 개발	7
2. 규칙파 수치모형실험 실시	14
3. 규칙파 모형 검증	16
4. 불규칙파 모형으로 확장 및 수치모형실험 실시	24
5. 불규칙파 모형 검증	25
제2절 해수교환용 방파제의 파향 민감도 및 에너지 소산 미캐니즘 연구	34
1. 서론	34
2. 수직벽에 의한 산란파	34
3. 수직벽에 의한 평면파	38
4. 다중벽에의 적용	39
5. 에너지 손실의 고려	42
6. 수직벽에 적용한 환경사 방정식	46
7. 빗각 입사에 대한 검토	51
8. 직사각형 항에서의 적용 (부진동 해석)	53
제3절 다열 커튼월-파일 방파제에 의한 산란파 영향 평가를 위한 3차원 수리실험 (SPIV법 이용) 실시	64
제4절 3차원 수리실험과 수치모형 결과와의 비교	68
제5절 다열 커튼월-파일 방파제로 인한 정온도 수치모형 개발	78
1. 사용자 편의 모형의 필요	78
2. 파랑 모형	78
3. WADEM의 사용법	80

제6절 항내 및 연안역 토사이동 수치모형 개발	87
1. 서론	87
2. 모형의 개요	89
제7절 해안선 변화 수치모형 개발	112
1. 개요	112
2. 사질 해안선의 특징	113
3. 수학적 모형	115
4. 해안선 변화 수치 모형의 검증	124
제8절 커튼월-파일형의 이안제 설치로 인한 후면 해저지형 변화 및 해안선 변화 수리실험	129
1. 3차원 수조에서의 투과율 산정	130
2. 파랑장 관측치와 수치모형 결과와의 비교	131
3. 3차원 수조에서의 해저지형 변화 수리실험	135
4. 3차원 수조에서의 해안선 변화 수리실험	139
제4장 연구개발 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	142
제5장 연구개발결과의 활용계획	144
제6장 참고문헌	145

제1장 연구개발과제의 개요

제1절 연구개발의 목적

선박이 정박할 수 있는 정온 수역을 제공하고 파랑의 피해로부터 항만 시설을 보호하기 위하여 사석, 콘크리트 블록, 케이슨 등을 이용한 중력식 방파제가 널리 사용되어져 왔다. 이러한 중력식 방파제들은 수심이 증가함에 따라 방파제 폭이 증가하여 큰 수심에 건설될 경우 많은 양의 건설 재료가 필요하게 되어 경제성이 떨어지게 된다. 또한 때때로 이들은 연안 표사의 이동을 방해하여 주변 해안에 심각한 침식 또는 퇴적을 야기하기도 하고, 해수의 순환을 저해하여 항 내 수질을 악화시키기도 하며 어떤 곳에서는 어류 및 저서생물의 이동을 방해하기도 한다. 그리고 이러한 무거운 구조물을 지탱하기 위해서는 양호한 지반 조건이 필요하다.

중력식 방파제의 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 새로운 형식의 방파제 개발이 요구되며, 최근 환경 친화적인 어항 및 항만 리모델링이 추진되면서 해수가 소통되는 투과성 방파제에 대한 관심이 늘어나고 있다. 특히 에너지 소산 능력이 탁월하고 시공이 간편한 커튼월-파일 방식이 새로운 형태의 방파제 중에서 대안이 되고 있다. 하지만 이러한 투과성 방파제에 대한 정온도 평가를 위한 수치모형이 3차원적으로 개발되어 실용성이 떨어진다. 따라서, 효율적인 정온도 평가를 위한 2차원적 파랑 모형의 수립이 절실하고 이를 수립하기 위한 구조물-파랑 상호작용 실험이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 다열 커튼월-파일 방파제를 이용한 항 내 정온 확보 기술 및 환경 영향평가 기술을 개발하는 것을 최종 목적으로 아래와 같은 연구를 수행 하였다.

□ 1차년도:

- 다열 커튼월-파일 방파제의 수리학적 특성 계산을 위한 1차원 수치모형 개발
- 수리학적 및 구조학적 특성 파악을 위한 1차원 수리실험 실시
- 1차원 수리실험과 수치모형 결과의 비교
- 커튼월의 홀수, 파일의 개구율, 열 사이의 간격 등의 영향 검토

□ 2차년도:

- 다열 커튼월-파일 방파제로 인한 정온도 영향 평가를 위한 2차원 수치모형 개발
- 항 내 정온도 영향 평가를 위한 2차원 수리실험 실시
- 2차원 수리실험과 수치모형 결과의 비교

□ 3차년도:

- 다열 커튼월-파일 방파제 주변 PIV 해수유동 실험 및 수치모형 개발
- 다열 커튼월-파일 방파제로 인한 해수 교환 능력의 평가
- 방파제 주변 토사이동 및 항 내 매물 저감 능력의 평가

제2절 연구개발의 필요성

지금까지 국내의 방파제는 대부분 중력식 구조물로 모래, 돌 등의 자연 재료와 콘크리트를 주로 사용하여 경제적 또는 환경적인 측면에서 불리한 면이 많았다. 또한 항만이 대형화되면 에너지의 충격력이 커지는 장주기에 대하여 취약한 항만 배치 구조가 되어왔다. 본 연구에서 제안하는 커튼월-파일 방파제는 철강을 이용하여 건설할 수도 있기 때문에 방파제 건설 재료의 다변화에 기여할 것으로 생각된다. 특히 요즈음 국내에서도 관심이 집중되고 있는 석션 파일을 이용할 수도 있어서 시공 면에서도 개선의 효과가 기대된다. 따라서 이러한 중력식 방파제의 경제적, 환경적, 지반공학적 문제들을 해결할 뿐만 아니라 장주기파에 취약한 투과성 방파제의 단점을 보완함으로써 방파제 구조 형식의 다변화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 본 연구를 통하여 검증된 수치모형을 이용하여 여러 가지 방파제 제원 및 다양한 파고, 특히 단주기는 물론 장주기에 대하여도 수치 모의를 실시하여 부진동으로 인한 피해 가능성도 타진한다.

동해 해안의 경우 계절별 토사 이동량의 변화가 심하여 대규모 불투과성 방파제를 따라 깊이 10 m 이상까지 이동할 가능성이 높아졌다. 그러나 토사는 수심 10 m 이상인 해역에 일단 도달하면 파랑의 작용으로 다시 해안에 복귀할 기회를 크게 상실하여 주변 해안에 재공급되지 못하므로 심각한 해안 침식 및 해안 도로 유실을 일으키고 있다. 따라서 토사를 인위적으로 포집할 목적으로 토사유통로가 확보되는 방파제의 건설이 요구되고 있다. 하지만 해수 유동이 가능한 방파제는 수질개선에는 분명한 효과가 기대되나 토사이동 측면에서는 연구의 전례가 없어 실용화의 걸림돌이 되었으나 본 연구를 통하여 수질 및 토사이동에 대한 환경영향 평가의 기술 수립이 확립됨. 특히 해수 유동이 가능한 방파제에 대한 연구는 최근 20년간 더욱 활발하게 수행되고 있으나 수학적 해석의 어려움으로 2차원 수치모형 개발에는 한계가 있다. 본 연구에서는 구조물의 설치에 따른 경계처리의 수치해석 면에서 효과적인 기법을 수립하는 것으로 본 연구가 성공적으로 수행된다면 실용적인 2차원 해석법의 창출이 가능하다.

제2장 국내외 기술개발 현황

커튼월-파일 방파제는 친환경적인 항만 및 해안 구조물로 항내 정온도 확보는 물론 해안선 보호 및 해안 공간 유지 차원에서 활용 가능성이 커지고 있다. 최근 이상기후로 인하여 규모가 커진 태풍의 내습으로 해안이 침식되고 범람하며 큰 피해를 일으키고 있으므로 이에 대한 방재 및 유지관리 차원에서 투과성 이안제의 활용이 적극 검토되고 있다.

항만에 기존의 완전 차단식 방파제가 축조되면 항내 퇴적이 지속적으로 발생하여 선박의 운행에 지장을 초래한다. 그러나 투과성 방파제로 대체된다면 저면부를 따라 토사의 유출입이 허용되므로 항내 퇴적 문제를 근본적으로 해결할 수 있으리라고 본다.

기존의 차단식 방파제나 해수 유출입을 허용하거나 호안의 축조로 발생하는 퇴적문제는 일단 유입된 토사가 재배출 될 수 있는 미케니즘을 허용하지 못하여 발생하는 것으로 항내 퇴적문제 또는 이안제 배후의 퇴적문제의 경우, 투과성 방파제나 이안제가 항구나 하구 등을 통하여 유입된 토사를 배출하도록 해주는 통로로서의 역할을 하리라 기대한다.

태풍이 통과하면 해수면이 상승하고 풍랑의 크기와 내습 방향이 빠르게 변하므로 해안선은 물론 해저면이 어떻게 변하는지 살펴볼 필요가 있다. 폭풍해일이 닥치면 해안은 그림 1과 같이 침식 과정을 겪어 해안선이 후퇴하고 다시 잠잠해지면 일반적으로 원래의 해변 단면으로 회복된다(Edelman, 1968; Dean, 1967; Sonu and van Be다, 1971). 투과성 해안 구조물이 설치되려면 이에 대한 실험 자료 획득 및 모의 기술의 개발이 필요하다.

직선적인 해안이 아닌 해안에서는 지형적인 조건과 파랑의 입사각이 해안에 대하여 빗각을 이루는 경우 그림 2와 같이 일정 지역의 모래가 다른 지역으로 이동되었다가 다시 서서히 회복되는 좀 더 장기적인 이동 과정을 겪는다. 고파랑의 내습에 의한 longshore sand bar의 형성 과정은 빠르지만 다시 해안으로의 회복 과정은 상당한 시일을 요할 수 있다. 이러한 토사 이동 과정은 물론 투과성 방파제와 같은 새로운 방재 기술에 대해서도 잘 모의하도록 지역 맞춤형 수치 모형을 수립하는 것이 대상 해안의 지속적 이용 및 효율적 관리를 위하여 절실하다.

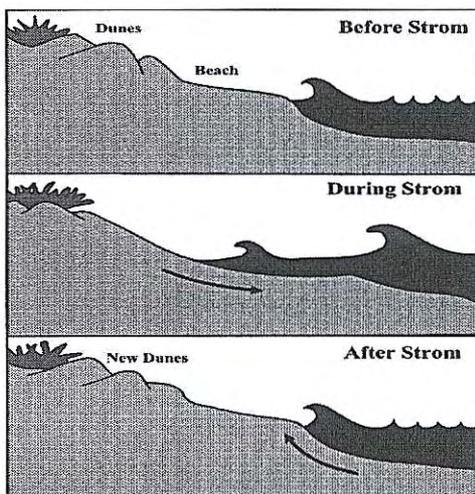


그림 1. 폭풍 해일시 해변단면의 변화

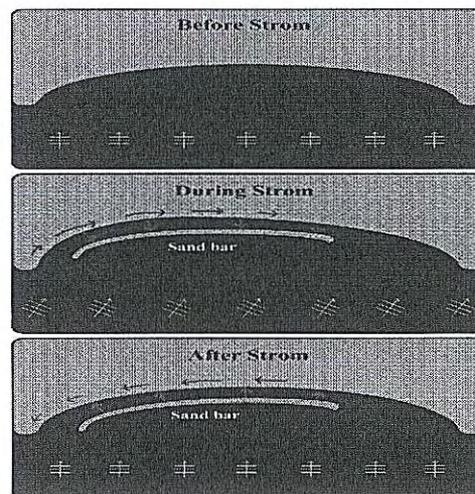


그림 2. 해안선 방향으로의 변화

투과성 방파제로 인한 해안선 및 해저면 변화 모형의 필요

해안 침식으로 문제가 되고 있는 대부분의 국내 해안에는 그동안 양빈, 바이패싱과 같은 연성 기법보다는 돌제, 이안제 등과 같은 강성 기법이 주로 사용되었고 그 중에서도 시공성이 용이한 관계로 돌제의 이용이 주를 이루었다. 양빈, 바이패싱과 같은 연성 기법은 부족한 토사를 침식 해안에 공급하는 기술로서 오래 유지만 된다면 가장 효율적인 친환경 기법이다. 그러나 돌제, 이안제 등과 같은 강성 기법은 토사를 공급하는 기술이라기보다는 주변 토사를 모으는 기술로서 주변 지역에 그만큼의 해안 침식을 유발하고 더욱이 rip current와 같은 외해로 향하는 흐름을 유발시켜 외해로 모래를 방출하는 등 모래 손실을 초래하기도 한다. 그러나 양빈된 모래를 오래 유지하기 위한 보조 수단으로 연성 기법과 함께 강성 기법을 사용하는 것은 바람직하다. 표 1은 자연환경의 변화, 배후 연안역의 개발, 유역 개발 등에 따라 구별한 해안선 변화 유발 요인을 정리한 것으로 그 중 돌제는 소용이 없거나 적합하지 않은 저감 기술로 평가된다. 대표적인 곳이 속초 영랑호 주변 해안과 주문진 해수욕장 남측 해안, 그리고 포항 송도 해수욕장 등이 있다. 이들 지역의 해안침식은 항만구조물 축조로 인하여 발생한 것으로 연안 토사 이동이 차단되어 모래의 유출입의 평형상태가 파괴되었기 때문이다.

돌제는 연안류를 따라 흐르는 모래를 막아 가두는 구조물로 해수면 상승과 해안도로 건설로 인하여 발생하는 cross-shore 방향으로의 해빈 단면 변화나 토사의 공급이 감소되어 발생하는 해안 침식에는 아무 소용이 없으며 특히 연안 토사량의 변화로 침식이 발생하는 경우에는 더 큰 문제를 야기시킬 수 있으므로 적합하지 않다.

표 1 침식 저감 기술 분석

변화유발유형	기본조사 항목	변화유발 요인	분석 기술	저감 기술			
				양빈	바이패싱	이안제/관제	돌제/관제
1 자연환경	해안선 및 평탄면 육상	파랑	EOF분석	△	+	△	-
		해수면	자료분석	+	X	△	X
2 연안역개발	해안구조물 축조	포시랑 추산모형	포시랑 추산모형	△	+	△	-
		배후지 개발	해빈단면 변화모형	+	X	△	X
3 유역개발	유역조사	공급원 감소	유역모형	+	X	△	X

*: 효과적이고, 적합함, △: 국지효과, -: 적합하지 않음, X: 소용없음

해안구조물 축조로 발생하는 침식해안에 가장 바람직한 방법은 바이패싱 기술이다. 바이패싱 기술은 구조물이 설치되기 전인 자연 상태로 복귀시키기 위한 인위적인 노력으로 연안 상류에 퇴적되는 모래를 연안 하류로 공급하는 방법이다.

그러나 불가피하게 어느 해안의 기존 시설이나 거주 지역을 일시적으로 보호하려면 강성 기술의 적용이 검토될 수 있으며 그 중에서 가장 바람직한 방법은 연안 토사의 이동을 허용하여 주변 해안의 침식을 완만하게 발생시키고 후면에 회절파를 발생시켜 모래를 모으는 기술인 이안제 방법이 될 것이다. 특히 투과성 유공 이안제와 같이 구조물인 경우는 해수의 교환을 허용하고 차지하는 부피가 작으므로 친환경적이며 미학적으로 받아들여질 수 있다.

사용자 편의 모형 개발

최종 GUI 사용자 편의 모형은 WADEM과 SADEM, ONE-LINE MODEL로 구성되며 파랑-구조물 상호작용을 포함한 투과성 항만 및 해안 구조물 설치 해역에서의 파랑 산정, 토사이동 및 해저면/해안선 변화를 모의하도록 개발된다. SADEM을 통해서도 파랑, 해빈류, 침·퇴적에 따른 해저면 변화를 평가할 수 있다. ONE-LINE MODEL은 해안구조물의 건설에 따른 해안선 변화를 예측, 평가할 수 있다.

해안 공간의 효율적 관리를 위하여 본 모형 시스템이 사용될 수 있으며 추후 강원 및 영남권 해안의 특징에 맞는 구역별 관리 체계의 중추 기술로서 역할을 한다. 관리 체계가 제대로 수립되면 효과적인 관리를 위하여 필요한 평균 파향, 연간 표사이동량 등과 같은 지역 특성 계수를 파악할 수 있으며, 이러한 계수들은 과학적인 해안선의 진단 및 평가 시스템을 수립하는 데 꼭 필요한 입력이 된다. 아직 대상 해안에 대한 관리 체계가 수립되지 못하여 해안 구조물 축조에 따른 정확한 해안선 변화 예측이 어려우나 항공사진을 이용하여 기존의 해안 구조물 축조 후의 해안선 변화로부터 지역 특성 계수를 추정하고 개발된 회절 파랑장에서의 해안선 변화 모형으로부터 해안선 변화를 예측한다.

국내외 사례

프랑스의 Dieppe 항 방파제, 미국 샌프란시스코항의 Pier#39 구조물, 미국 시애틀의 Everett 항의 접안시설 등에 신개념의 투수식 소파판을 설치한 잔교식 구조형식을 채택한 바 있다. 특히 미국 시애틀 Everett Homeport 해군기지 항공모함 접안시설 구조물은 투수식 소파판을 적용하여 항내의 정온도, 접안 및 계류시설의 안정성을 확보하고, 파랑의 반사율을 감소시켜 외측 기존 항로에의 영향을 최소화 하도록 설계 되었다 (Rusten 과 Zahn 2000).

국내에서도 급증하는 해양관광의 수요에 대처하고 항만 이용객에 대한 친수 및 여가

공간을 제공하기 위하여 투수식 소파판을 이용한 방파제가 부산항 국제여객 및 해경부두에 도입된 바 있다.

제3장 연구개발 수행내용 및 결과

제1절 1차원 수치모형과 수리실험

1. 규칙파 수치모형 개발

가. 경계치 문제

그림 1.1에 다열 커튼월-파일 방파제의 개략적인 모습을 나타내었다. 그림에서 수평좌표 x 는 파봉선에 직각으로, 파가 진행하는 방향으로 양의 값을 가지며, 수직좌표 z 는 정수면에서 연직 상방으로 양의 값을 가진다. 수심은 h 로 일정하고, 방파제 각 열의 중심은 $x = x_j$ 에 있다. d_j 는 커튼월이 정수면 아래로 연장된 길이이며, b_j 는 방파제 각 열의 두께이다. $2A_j$ 는 인접한 두 파일의 중심거리, $2a_j$ 는 인접한 두 파일 사이의 간격, 그리고 $r_j = a_j / A_j$ 는 파일 부분의 유공율(porosity)이다. 아래첨자 j 는 방파제의 열을 나타낸다. J 개의 방파제 열에 의해 유체는 $J+1$ 개의 유체영역으로 나뉘며, j 번째 열에 대해서 파가 입사하는 방향의 영역을 Ω_{j-1} , 반대방향의 영역을 Ω_j 로 정의한다. 입사파는 파고가 H_i 인 규칙파이며, x 값이 커지는 방향으로 진행한다.

유체를 비압축성, 비회전 흐름이라고 가정하면 속도포텐셜은 라플라스 방정식을 만족시킨다. 자유수면 경계조건들을 선형화하면, 각 유체영역에서의 속도포텐셜 $\Phi_j(x, z, t)$ ($j = 0, 1, 2, \dots, J$)에 대한 다음과 같은 경계치 문제를 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \Phi_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_j}{\partial z^2} = 0 \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial \Phi_j}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \Phi_j = 0 \quad \text{at } z = 0 \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial \Phi_j}{\partial z} = 0 \quad \text{at } z = -h \quad (1.3)$$

여기서, ω 는 파의 각주파수이고, g 는 중력가속도이다. 시간 t 에 대한 주기적인 운동을 가정하면, 위의 경계치 문제의 해를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\Phi_j(x, z, t) = \text{Re} \left\{ -\frac{igH_i}{2\omega} \frac{1}{\cosh(kh)} \phi_j(x, z) \exp(-i\omega t) \right\} \quad (1.4)$$

여기서, Re 는 복소수의 실수부를 나타내며, 파수 k 는 다음과 같은 분산관계식을 만족시킨다.

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (1.5)$$

해석해를 구하기 위해서는, 각각의 유체영역에서 속도포텐셜의 공간변화 $\phi_j(x, z)$ 를 결정하여야 한다.

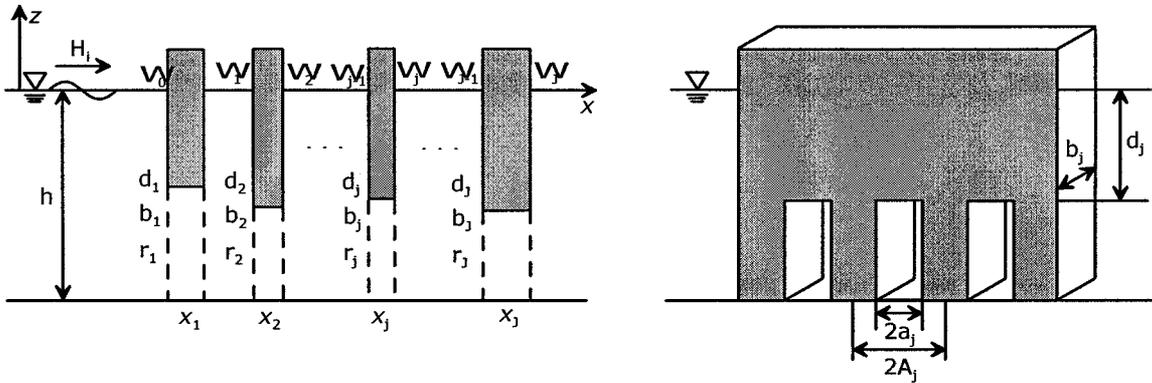


그림 1.1 다열 커튼월-파일 방파제의 개략도

나. 고유함수전개법

경계치 문제를 풀기 위해 고유함수전개법을 사용하며, 이 방법에서는 속도포텐셜이 무한히 많은 해들의 합으로 나타내어진다. 영역 Ω_0 와 Ω_j 에서 식 (1.2)와 (1.3)을 만족하는 식 (1.1)의 해는

$$\phi_0 = A_{00} \cos[\mu_0(h+z)] \exp[-\mu_0(x-x_1)] + \sum_{m=0}^{\infty} B_{0m} \cos[\mu_m(h+z)] \exp[\mu_m(x-x_1)] \quad (1.6)$$

$$\phi_j = \sum_{m=0}^{\infty} A_{jm} \cos[\mu_m(h+z)] \exp[-\mu_m(x-x_j)] \quad (1.7)$$

와 같다. 여기서 A_{jm} 은 입사파의 진행방향, B_{jm} 은 반사파의 진행방향 성분과의 파고를

나타내는 계수이며, 두 개의 아래첨자 중 앞의 것(j)은 방파제의 열을, 뒤의 것(m)은 성분파를 나타낸다.

파수 μ_m 은 다음과 같은 분산관계식

$$\omega^2 = -g\mu_m \tan(\mu_m h) \quad (1.8)$$

의 해이다. 이 때, 파수 μ_m 은 비진행파(non-propagating wave)에 대해서는 무수하게 많은 실근, $\pm\mu_m$ ($m \geq 1$)을 가지고, 진행파(propagating wave)에 대해서는 한 쌍의 허근, $\mu_0 = \pm ik$ 을 가진다. 식 (1.6)과 (1.7)에서의 진행파가 각각 반사파와 투과파가 되려면 $\cos[\mu_0(h+z)] = \cosh[k(h+z)]$ 이 되어야 하므로 $\mu_0 = -ik$ 를 택한다. 또한 비진행파는 방파제에서 떨어진 거리에 따라 지수함수적으로 증가해서는 안되므로 $m \geq 1$ 일 경우는 양의 근을 선택한다. 위의 식 (1.6)과 (1.7)에서 $A_{00} = 1$, $|B_{00}| = \text{반사율}$, $|A_{j0}| = \text{투과율}$ 이다. 영역 Ω_1 부터 Ω_{j-1} 까지 에서 식 (1.1)을 만족하는 해는

$$\phi_j = \sum_{m=0}^{\infty} \{A_{jm} \exp[-\mu_m(x-x_j)] + B_{jm} \exp[\mu_m(x-x_{j+1})]\} \cos[\mu_m(h+z)] \quad (1.9)$$

$$j = 1, 2, \dots, J-1$$

이다.

파장에 비해 방파제의 두께는 아주 작기 때문에, 수학적으로 방파제는 두께를 가지지 않는다고 생각할 수 있으며, 이 때 ϕ_{j-1} 과 ϕ_j 는 $x = x_j$ ($j = 1, 2, \dots, J$)에서 다음의 정합 조건을 만족시켜야 한다.

$$\frac{\partial \phi_{j-1}}{\partial x} = \frac{\partial \phi_j}{\partial x} = 0 \quad \text{for } -d_j \leq z \leq 0 \quad (1.10)$$

$$\frac{\partial \phi_{j-1}}{\partial x} = \frac{\partial \phi_j}{\partial x} = iG_j(\phi_{j-1} - \phi_j) \quad \text{for } -h \leq z \leq -d_j \quad (1.11)$$

첫 번째 정합조건은 방파제 상부에 있는 불투과성 커튼월의 양쪽에서 수평방향 유속이 0이 된다는 것을 의미한다. 두 번째 정합조건은 방파제 하부의 파일 부분에서 방파제 양쪽의 수평방향 유속이 같으며, 그 값은 양쪽의 속도포텐셜의 차, 즉 압력 차에 비례한다

는 것을 의미한다. 비례상수인 투수계수 G_j 는 일반적으로 복소수로 나타내어진다. 상수 G_j 를 나타내는 방법은 여러 가지가 있으나(Isaacson et al., 1998), 본 연구에서는 Mei et al.(1974)의 방법을 사용하며, 그 값은 다음과 같이 표현된다.

$$G_j = \frac{1}{\frac{\gamma_j}{\omega} - il_j} \quad (1.12)$$

여기에서 γ_j 는 운동방정식에서 비선형 항인 이류가속도 항을 선형화하여 유도된 에너지 소산계수이고, l_j 는 파일 사이 간격을 통과하여 흐르는 제트(jet)의 길이이다. 식 (1.12)에서 분모의 실수부는 파일 사이의 흐름 분리에 따른 저항에 해당되며, 허수부는 관성 저항에 의한 파일 방파제 전후의 위상차와 관계가 있다.

Kim(1998)에 의하면 선형화된 소산계수 γ_j 는

$$\gamma_j = \frac{8\alpha_j}{9\pi} H_i A_{j-1,0} \omega \frac{1}{\sqrt{(R_j + 2)^2 + P_j^2}} \frac{5 + \cosh(2kh)}{2kh + \sinh(2kh)} \quad (1.13)$$

이며, $P_j = l_j k$, $R_j = \gamma_j k / \omega$ 그리고 α_j 는 수두 손실계수이다. 식 (1.9)를 정리하면 γ_j 에 관한 4차 방정식이 되며, 이것을 고유치 방법(예로서, Press et al., 1992)으로 풀 수 있다.

Suh et al.(2002)은 제트의 길이 l_j 가 차단계수 C_j 와

$$l_j = 2C_j \quad (1.14)$$

의 관계가 있다고 했으며, Kakuno and Liu(1993)는 직사각형 파일의 차단계수가

$$C_j = \frac{b_j}{2} \left(\frac{1}{r_j} - 1 \right) + \frac{2A_j}{\pi} \left[1 - \log(4r_j) + \frac{1}{3} r_j^2 + \frac{281}{180} r_j^4 \right] \quad (1.15)$$

라고 제안했다. 직사각형 파일에서의 수두손실계수 α_j 는 윤 등(2005)에 의해 수정된 다음 식을 사용하였다.

$$\alpha_j = 0.6 \left(\frac{1}{r_j C_{c_j}} - 1 \right)^2 \quad (1.16)$$

여기서, C_{c_j} 는 Mei et al.(1974)가 다음 공식을 사용하여 제안한 수축계수이다.

$$C_{c_j} = 0.6 + 0.4r_j^2 \quad (1.17)$$

식 (1.13)과 (1.16)은 커튼월이 없는 파일 방파제에서 유도되었으나, 파일 사이에서의 에너지 소산 메커니즘이 동일하기 때문에 커튼월 상부를 가진 커튼월-파일 방파제에서도 사용할 수 있을 것이다. 파일 방파제에서는 자유수면에서 추가적인 에너지 소산이 발생하지만, 파일 사이에서의 에너지 소산에 비해 작다고 가정하고 무시하였다.

식 (1.13)에서 $A_{j-1,0}$ 는 입사파고 H_i 에 대한 j 번째 방파제에 입사하는 파의 파고비를 나타낸다. 그러나 $j=1$ 일 때, 즉, $A_{00} = 1.0$ 을 제외하고는 $A_{j-1,0}$ 의 값을 알지 못한다. 따라서 반복 계산을 통하여 이 값들을 구해야 한다. 에너지는 전 수심에 대해 일정하며 파일 사이의 틈을 통해서 전달된다는 가정 하에 $A_{j-1,0}$ 의 초기값을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_{j-1,0} = A_{j-2,0} \left(\frac{h - d_{j-1}}{h} r_{j-1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.18)$$

투수계수 G_j 를 구하는 위의 방법은 투수계수를 구하기 위한 매개변수들(입사파고, 주기 그리고 방파제의 형상과 관계된 변수)을 모두 알고 있다는 점에서 다른 방법들에 비해 유리하다. 예를 들면, Isaacson et al.(1998)의 방법에서는 마찰이나 부가질량계수를 연역적으로 알 수 없기 때문에 반사율 및 투과율의 예측치와 측정치를 비교하여 이들이 잘 맞도록 계수들을 조정한다.

만일 M 개의 파 성분(1개의 진행파와 $M-1$ 개의 소멸파)만 선택한다면, 미지수의 개수는 $2JM$ 개가 되며, 이를 구하기 위해서는 $2JM$ 개의 방정식이 필요하다. 부록에 제시한 방법에 따라 다음과 같은 연립 방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
& \sum_{m=0}^{\infty} [\{\mu_m f_{mn}(-d_1, 0) + (\mu_m - iG_1) f_{mn}(-h, -d_1)\} B_{0m} + iG_1 f_{mn}(-h, -d_1) A_{1m} \\
& + iG_1 \exp(-\mu_m \Delta x_1) f_{mn}(-h, -d_1) B_{1m}] \\
& = \mu_0 A_{00} \{f_{0n}(-d_1, 0) + f_{0n}(-h, -d_1)\} + iG_1 A_{00} f_{0n}(-h, -d_1) \\
& \text{for } n = 0, 1, 2, \dots, \infty
\end{aligned} \tag{1.19}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{m=0}^{\infty} [\mu_m \{f_{mn}(-d_1, 0) + f_{mn}(-h, -d_1)\} B_{0m} + \mu_m \{f_{mn}(-d_1, 0) + f_{mn}(-h, -d_1)\} A_{1m} \\
& - \mu_m \exp(-\mu_m \Delta x_1) \{f_{mn}(-d_1, 0) + f_{mn}(-h, -d_1)\} B_{1m}] \\
& = \mu_0 A_{00} \{f_{0n}(-d_1, 0) + f_{0n}(-h, -d_1)\} \\
& \text{for } n = 0, 1, 2, \dots, \infty
\end{aligned} \tag{1.20}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{m=0}^{\infty} [\exp(-\mu_m \Delta x_{j-1}) \{-\mu_m f_{mn}(-d_j, 0) + \mu_m f_{mn}(-h, -d_j) + iG_j f_{mn}(-h, -d_j)\} A_{j-1,m} \\
& + \{\mu_m f_{mn}(-d_j, 0) - \mu_m f_{mn}(-h, -d_j) + iG_j f_{mn}(-h, -d_j)\} B_{j-1,m} \\
& - iG_j f_{mn}(-h, -d_j) A_{jm} - iG_j \exp(-\mu_m \Delta x_j) f_{mn}(-h, -d_j) B_{jm}] = 0 \\
& \text{for } n = 0, 1, 2, \dots, \infty
\end{aligned} \tag{1.21}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{m=0}^{\infty} [\mu_m \exp(-\mu_m \Delta x_{j-1}) \{f_{mn}(-d_j, 0) + f_{mn}(-h, -d_j)\} A_{j-1,m} \\
& - \mu_m \{f_{mn}(-d_j, 0) + f_{mn}(-h, -d_j)\} B_{j-1,m} - \mu_m \{f_{mn}(-d_j, 0) + f_{mn}(-h, -d_j)\} A_{jm} \\
& + \mu_m \exp(-\mu_m \Delta x_j) \{f_{mn}(-d_j, 0) + f_{mn}(-h, -d_j)\} B_{jm}] = 0 \\
& \text{for } n = 0, 1, 2, \dots, \infty
\end{aligned} \tag{1.22}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{m=0}^{\infty} [\exp(-\mu_m \Delta x_{j-1}) \{-\mu_m f_{mn}(-d_j, 0) + \mu_m f_{mn}(-h, -d_j) + iG_j f_{mn}(-h, -d_j)\} A_{j-1,m} \\
& + \{\mu_m f_{mn}(-d_j, 0) - \mu_m f_{mn}(-h, -d_j) + iG_j f_{mn}(-h, -d_j)\} B_{j-1,m} \\
& - iG_j f_{mn}(-h, -d_j) A_{jm}] = 0 \\
& \text{for } n = 0, 1, 2, \dots, \infty
\end{aligned} \tag{1.23}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{m=0}^{\infty} [\mu_m \exp(-\mu_m \Delta x_{j-1}) \{f_{mn}(-d_j, 0) + f_{mn}(-h, -d_j)\} A_{j-1,m} \\
& - \mu_m \{f_{mn}(-d_j, 0) + f_{mn}(-h, -d_j)\} B_{j-1,m} - \mu_m \{f_{mn}(-d_j, 0) + f_{mn}(-h, -d_j)\} A_{JM}] \\
& = 0
\end{aligned} \tag{1.24}$$

for $n = 0, 1, 2, \dots, \infty$

여기서,

$$\Delta x_j = x_{j+1} - x_j \quad (1.25)$$

$$f_{mn}(p, q) = \int_p^q \cos[\mu_m(h+z)] \cos[\mu_n(h+z)] dz$$

$$= \begin{cases} \frac{1}{2} \left[\frac{\sin[(\mu_m + \mu_n)(h+z)]}{\mu_m + \mu_n} + \frac{\sin[(\mu_m - \mu_n)(h+z)]}{\mu_m - \mu_n} \right]_p^q & \text{for } m \neq n \\ \frac{1}{4\mu_m} [2\mu_m(h+z) + \sin[2\mu_m(h+z)]]_p^q & \text{for } m = n \end{cases} \quad (1.26)$$

이다.

$m = 0 \sim M-1$, $n = 0 \sim M-1$ 일 때, 식 (1.19)부터 (1.24)로부터 $2JM$ 개의 방정식을 얻게 되며, 이들을 연립해서 풀면 $2JM$ 개의 미지수를 구할 수 있다. 이로부터 반사율과 투과율을 계산할 수 있으며, 이는 각각

$$C_r = |B_{00}| \quad (1.27)$$

$$C_t = |A_{J0}| \quad (1.28)$$

으로 주어진다.

2. 규칙파 수리모형실험 실시

다열 커튼월-파일 방파제의 수학적 모형을 검증하기 위한 수리모형실험을 서울대학교 해안공학연구실의 2차원 조파수조(길이 30 m, 폭 0.6 m, 높이 1 m)에서 수행하였다. 방파제 모형은 가로, 세로가 각각 30 mm 인 정사각형 알루미늄 봉을 이용하여 하부의 파일 부분과 상부의 커튼월 부분을 분리하여 제작하였으며, 두 부분을 결합하여 사용하였다. 파일 부분의 유공율이 각각 50%, 40%, 25% 가 되도록 제작하였으며, 파일 부분의 높이가 125 mm, 200 mm, 250 mm 가 되도록 하여 커튼월의 홀수를 조절하였다. 커튼월 부분은 알루미늄 봉으로 뼈대를 만든 후 두께 3 mm 인 플라스틱 재질의 판재를 뼈대 양쪽에 부착하였으며, 높이는 650 mm 로 하여 파일 부분의 높이가 낮아지는 경우에도 월파가 일어나지 않게 제작하였다.

방파제 모형은 그림 1.2에서 보는 것과 같이 방파제의 첫 번째 열이 조파기로부터 17 m 떨어진 곳에 위치하도록 설치하였다. 방파제 모형과 수조벽면은 클램프를 이용하여 고정시켰으며, 그림 1.3은 방파제 모형이 설치된 모습을 정면과 측면에서 본 사진이다. 파고계는 총 5개를 설치하였는데, 입사파를 측정하기 위하여 조파기에서 5 m 떨어진 곳에 1개, 반사파를 측정하기 위하여 소멸파의 영향을 거의 받지 않는 위치인 방파제 첫 번째 열의 전면으로부터 5 m 이상 떨어진 위치에 총 3개, 그리고 투과파를 측정하기 위하여 방파제의 첫 번째 열의 후면으로부터 3.3 m 떨어진 곳에 1개를 설치하였다. 반사파 측정을 위한 파고계 사이의 간격은 G2와 G3가 0.3 m, G3와 G4가 0.5 m 떨어지도록 파고계를 설치하였다. 이는 최소자승법에 기초한 3점분리법(Suh et al., 2001)을 이용하기 위한 것으로 입, 반사파를 분리하여 반사율을 산정할 때 모든 실험 파랑조건에 대해 적용이 가능하고 정확도 면에서도 타당한 결과를 줄 수 있도록 설정한 것이다.

조파수조의 수심은 0.5 m 로 일정하게 하였으며, 파형경사가 $H/L = 0.03$ 으로 고정된 규칙파를 조파하되 월파 및 쇄파가 발생하지 않도록 하였다. 파의 주기를 1.0초에서 2.0 초까지 0.2초 간격으로 증가시켜 총 6가지 파랑조건에 대해 실험을 실시하였다.

파고계 G1에서는 입사파, G2 ~ G4에서 입·반사파 그리고 G5에서는 투과파를 측정하였으며, 3점분리법으로 분리한 입사파를 G1에서 측정된 입사파와 비교하여 입·반사 분리가 정확하게 되었는지도 확인하였다. 파랑관측은 각각의 파고계에서 1초에 20개의 데이터를 취득하였으며, 조파기 가동 후 1500개의 데이터를 취득하였다. 입·반사파고 및 투과파고의 계산에서 입사파는 조파기를 가동하여 파가 생성된 후 파가 파고계 G1을 지나 커튼월 방파제에서 반사되어 다시 G1까지 되돌아오는 시간을, 반사파는 커튼월 방파제에서 반사된 파가 G2를 지나 조파판에서 재반사되어 G2에 도달하는 시간을 각각 파의 주기 별로 계산하여 파랑 관측 후 그 시간 동안의 데이터만을 이용하였다.

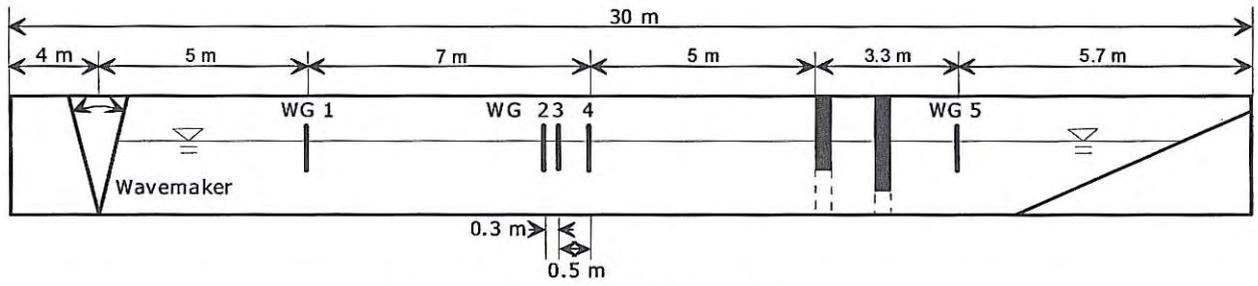


그림 1.2 수리모형실험을 위한 장비의 설치도

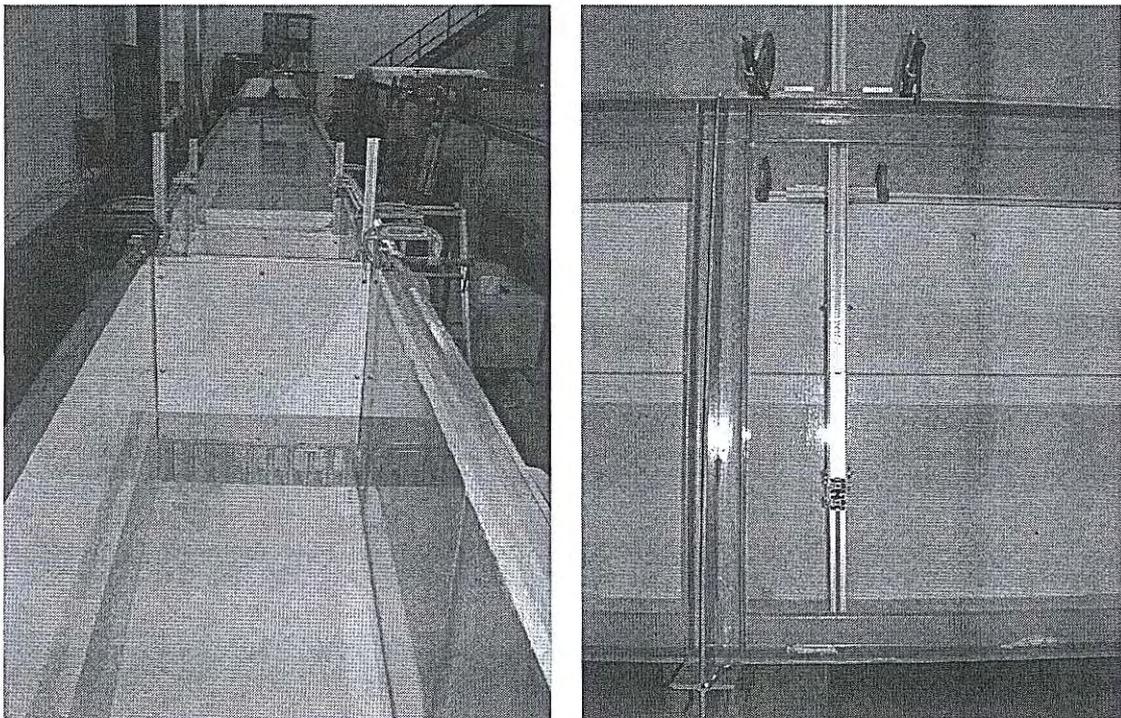


그림 1.3 방파제 모형의 정면도 및 측면도

3. 규칙과 모형 검증

가. 수치모형과 수리모형실험 결과 비교

수리모형실험의 결과와 수학적 모형에 의한 결과를 비교하기 위하여 파의 반사율과 투과율을 상대수심(kh)의 함수로 나타내었다. 식 (1.13)의 에너지 소산계수 γ_j 는 상대수심 kh 가 0으로 가까워지면 무한대로 커지게 된다. 이 때, 투수계수 G_j 는 γ_j 와 역수관계이므로 아주 작아지게 되는데, 이는 장파로 갈수록 투과율이 감소하고 반사율이 증가하는, 실제 물리현상과는 반대의 결과를 초래한다. 식 (1.13)의 적용가능구간을 결정하는 것은 쉽지 않다. 본 실험은 $kh \geq 0.75$ 에 대하여 실시하였기 때문에 수치계산 결과도 $kh \geq 0.75$ 의 범위에 대해서만 제시한다.

그림 1.4와 그림 1.5에는 $d_1 = 0.5h$, $r_1 = 0.5$, $r_2 = 0.5$, $x_2 - x_1 = 0.5h$ 로 고정하고, d_2 만 각각 $0.6h$ 와 $0.75h$ 로 다르게 한 경우의 파의 반사율과 투과율을 나타내었다. 전체적으로 수리모형실험의 결과들이 수학적 모형에서의 반사율 및 투과율의 특성들을 잘 재현하고 있다. 장파의 경우, 수학적 모형으로 얻은 예측치보다 수리실험을 통해 얻은 관측치가 투과율에서 조금 작게 측정되었다. 두 그림의 비교를 통해서 2열에서의 커튼월의 홀수가 커짐에 따라 반사율은 조금 더 커지며, 투과율은 조금 더 작아지는 것을 확인할 수 있다.

그림 1.6에는 그림 1.4의 실험조건에서 두 열 사이의 간격($x_2 - x_1$)만 $2.0h$ 로 바뀐 경우의 결과를 나타내었다. 이 두 그림을 비교해 보면 반사율 및 투과율의 크기가 두 열 사이의 간격에 크게 영향을 받지 않은 것을 알 수 있다. 다만 특정 상대수심($kh \cong 1.7$)에서 반사율과 투과율이 급격하게 변하는 것을 볼 수 있는데, 이러한 현상은 파의 파장과 방파제 두 열 사이의 간격이 거의 일치하면서 방파제 열 사이에서 파의 공명이 발생하여 나타나는 것이다.

유공율의 변화에 따른 반사율 및 투과율의 변화를 살펴보기 위하여 $d_1 = 0.5h$, $d_2 = 0.5h$, $r_1 = 0.5$, $x_2 - x_1 = 0.5h$ 이고, r_2 만 0.4와 0.25인 경우의 결과를 각각 그림 1.7과 그림 1.8에 나타내었다. 이 두 그림을 비교해보면 2열에서의 유공율이 더 작은 경우에 반사율은 더 크게 그리고 투과율은 더 작게 나타난다. 이것은 유공율은 일정하고 커튼월의 홀수만 달라졌을 경우의 결과와 유사한 결과이다. 물론 이러한 현상은 복잡한 수학적 모형을 사용하거나 수리실험을 수행하지 않아도 직관적으로 얻을 수 있는 결과이지만, 본 연구에서의 수학적 모형 및 실험결과가 물리적 현상을 잘 모의하고 있음을 보여주는 증거이기도 하다.

한편, 방파제가 3열로 구성되어 있을 경우에 대한 실험도 실시하였다. 3열 방파제에서 파일 부분의 유공율은 일정하게 고정시키고 커튼월의 홀수만을 변화시킨 경우와 커튼월의 홀수를 고정시키고 유공율을 변화시킨 경우에도 2열 방파제에서 나타나는 현상들이 거의 동일하게 재현되었으며, 관측값과 모형의 예측값이 2열 방파제에서와 마찬가지로

서로 잘 일치하였다. 그림 1.9에는 $d_1 = 0.5h$, $d_2 = 0.5h$, $d_3 = 0.5h$, $r_1 = 0.5$, $r_2 = 0.4$, $r_3 = 0.25$, $x_2 - x_1 = 0.5h$, $x_3 - x_2 = 1.5$ 인 경우의 결과를 도시하였다. 이는 그림 1.7의 조건에 3열을 더 붙인 경우로, 투과율이 상당히 줄어들었음을 볼 수 있다. 또한, 이 밖의 다른 경우에서도 수학적 모형이 수리모형실험의 결과를 잘 반영함을 볼 수 있었다(지, 2005).

일반적으로 투과성 방파제의 투과율 및 반사율은 파의 주기의 영향을 주로 받는다. 본 연구에서 제안한 다열 커튼월-파일 방파제의 주기에 따른 방파 성능을 개략적으로 검토하기 위하여 2열 방파제에 대한 모든 실험 결과를 주기의 함수로 그림 1.10에 제시하였다. 실험 축척은 1:20으로 가정하여 현장에서의 수심은 10 m, 파고는 0.9 ~ 2.4 m, 주기는 4.5 ~ 8.9초 가 된다. 동일한 주기에 대해서도 커튼월의 홀수, 파일 부분의 유공율, 방파제 열 사이의 간격 등이 다르기 때문에 반사율 및 투과율이 큰 범위에서 변동한다. 전체적인 경향은 주기가 증가함에 따라 반사율은 감소하고 투과율은 증가하는 경향을 보인다. 평균적으로 보았을 때 주기 6초 이하에서는 투과율이 0.2 미만이며, 주기 9초에서도 약 0.4의 투과율을 보인다.

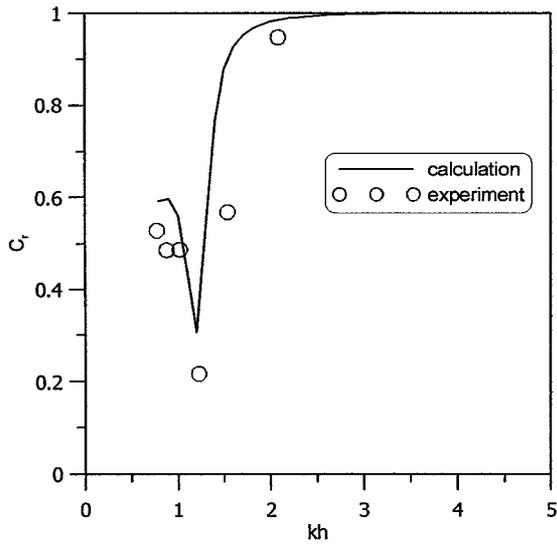


그림 1.4 상대수심에 따른 반사율

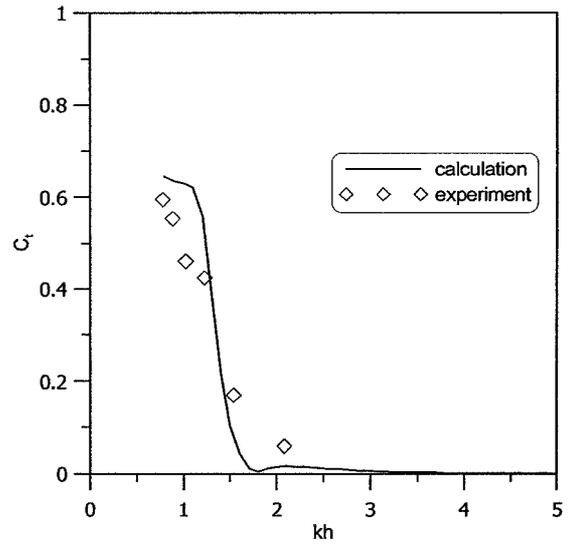


그림 1.5 상대수심에 따른 투과율

$$(d_1 = 0.5h, d_2 = 0.75h, r_1 = 0.5, r_2 = 0.5, x_2 - x_1 = 0.5h)$$

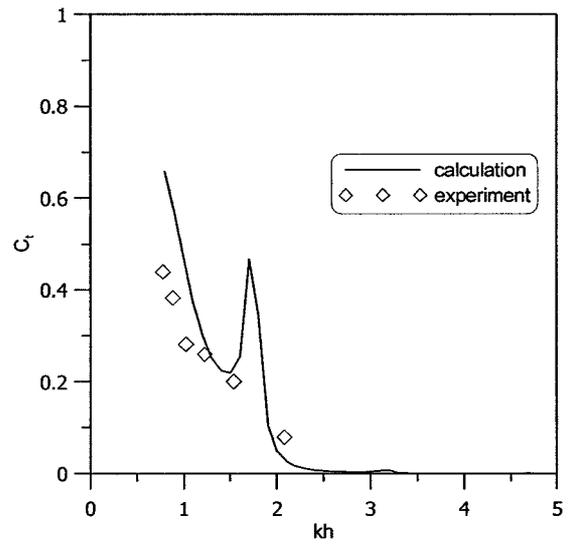
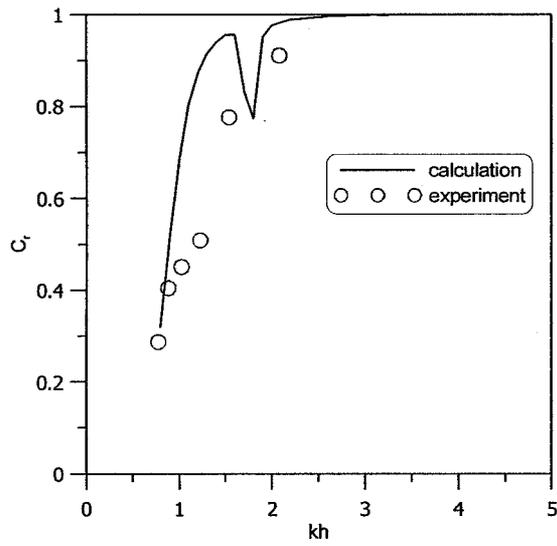


그림 1.6 상대수심에 따른 반사율과 투과율

$$(d_1 = 0.5h, d_2 = 0.6h, r_1 = 0.5, r_2 = 0.5, x_2 - x_1 = 2.0h)$$

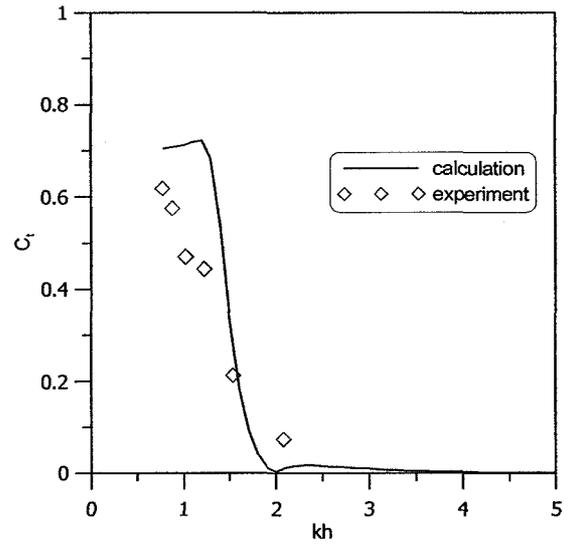
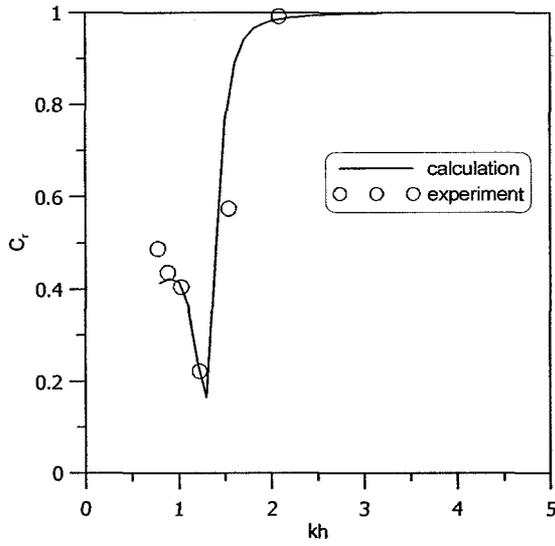


그림 1.7 상대수심에 따른 반사율과 투과율
 $(d_1 = 0.5h, d_2 = 0.5h, r_1 = 0.5, r_2 = 0.4, x_2 - x_1 = 0.5h)$

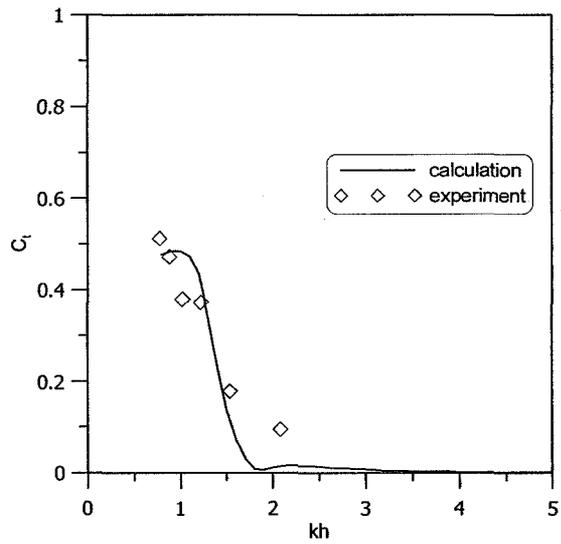
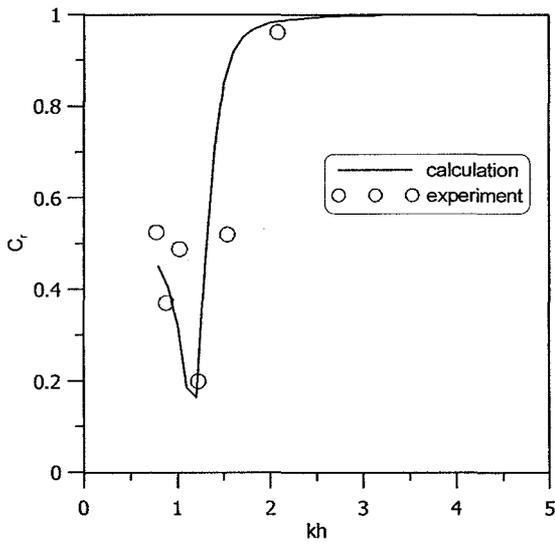


그림 1.8 상대수심에 따른 반사율과 투과율
 $(d_1 = 0.5h, d_2 = 0.5h, r_1 = 0.5, r_2 = 0.25, x_2 - x_1 = 0.5h)$

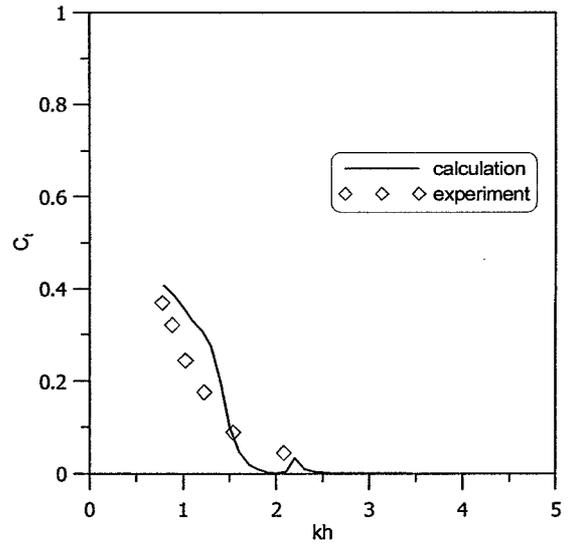
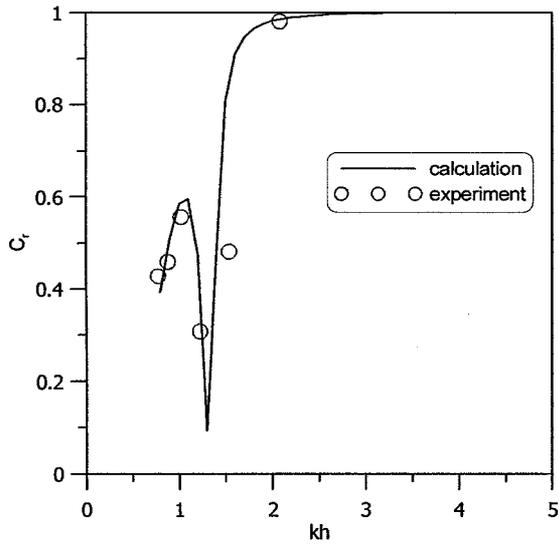


그림 1.9 상대수심에 따른 반사율과 투과율

$$(d_1 = 0.5h, d_2 = 0.5h, d_3 = 0.5h, r_1 = 0.5, r_2 = 0.4, r_3 = 0.25, x_2 - x_1 = 0.5h, x_3 - x_2 = 1.5h)$$

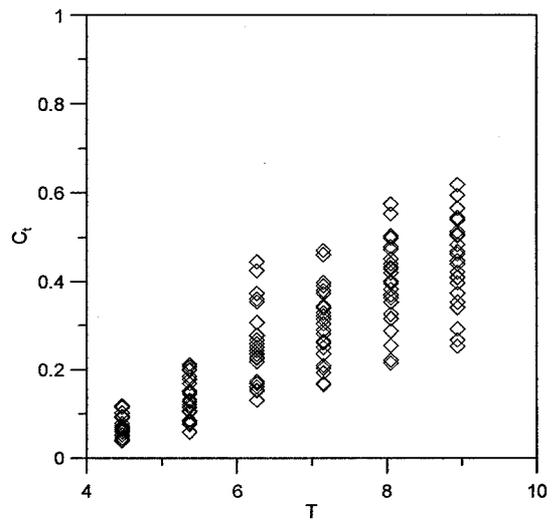
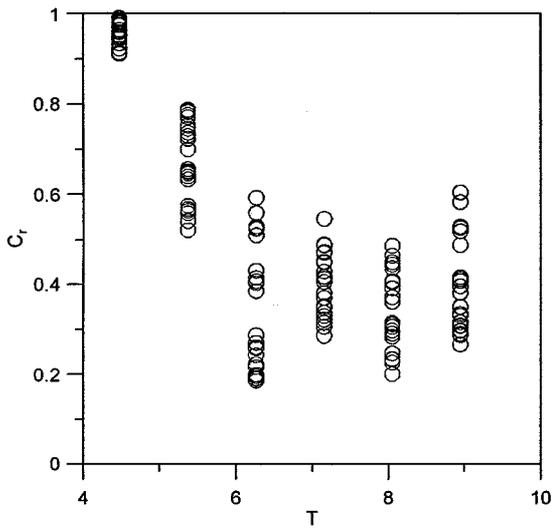


그림 1.10 실제 주기로 환산했을 경우의 반사율과 투과율의 분포

나. 각종 변수들의 영향 검토

수학적 모형을 이용하여 다열 커튼월-파일 방파제의 특성을 좀 더 자세히 살펴보기 위해 $d_1 = 0.5h$, $d_2 = 0.5h$, $r_1 = 0.5$, $r_2 = 0.5$ 그리고 $x_2 - x_1 = 0.5h$ 를 기준이 되는 열의 배치로 설정하고 d_2 , r_2 그리고 $x_2 - x_1$ 을 각각 변화시키면서 반사율 및 투과율의 변화를 알아보았다.

우선 그림 1.11에서는 방파제 두 번째 열에서의 커튼월의 홀수(d_2)의 변화에 따른 반사율 및 투과율의 변화를 나타내었다. 반사율과 투과율의 전반적인 경향을 살펴보면, 파의 주기가 감소할수록, 즉 파의 상대수심이 증가할수록 반사율은 증가하고, 투과율은 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한, 반사율은 상대수심이 감소함에 따라 감소하다가 다시 증가하는 것을 볼 수 있다. 특히 반사율에 비해서 투과율이 홀수의 변화에 따른 값의 상대적인 차이가 크다는 것도 알 수 있다. 상대수심(kh)이 약 3.2인 곳에서 반사율과 투과율이 다소 크게 변하는 것을 볼 수 있는데 이 때의 파장을 계산해보면 두 방파제 사이의 간격이 입사파 파장의 1/2이 되어 공명하는 지점임을 알 수 있다. 이를 확인하기 위하여 두 열 사이의 간격과 파장의 비에 따른 파의 반사율 및 투과율을 그림 1.12에 나타내었다. 이 그림에 나타난 모든 계산결과에 대해 반사율과 투과율이 $(x_2 - x_1)/L = 0.5$ 부근에서 급격하게 변화하는 것으로 보아 이러한 현상은 공명에 의한 증폭이라는 것을 다시 확인할 수 있었다.

그림 1.13에 방파제 두 번째 열의 파일부분의 유공율(r_2)에 따른 반사율 및 투과율을 나타내었다. 파일의 유공율이 감소할수록 파의 반사율은 증가하고 투과율은 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 그림 1.10에 도시한 커튼월의 홀수를 증가시키는 경우와 유사한 결과이다. 그림 1.11과 그림 1.13으로부터 반사율보다 투과율이 방파제 변수들의 변화에 더 민감한 것을 볼 수 있다

방파제 두 열 사이의 간격($x_2 - x_1$)의 변화에 따른 반사율 및 투과율의 변화는 그림 1.14에 나타내었다. 두 열 사이의 간격이 커질수록 반사율 및 투과율을 나타낸 그래프가 전체적으로 저주파수 쪽으로 이동하는 현상을 보인다. 이는 두 열 사이의 간격이 달라지면서 이와 공명하는 파의 파장이 다르게 되어 반사율 및 투과율이 증폭되는 상대수심이 달라지기 때문이다. 또한, 반사율 및 투과율의 증폭 비율이 상대수심이 얇은 곳에서 더 크다. 이로 미루어 보아 장주기파의 경우는 파장과 열 사이 간격에 의한 공명이 반사율 및 투과율에 미치는 영향이 단주기파에 비해 상대적으로 크다는 것을 알 수 있다. 하지만, 공명에 의해 증폭된 부분을 제외하고는 각각의 경우에서 반사율과 투과율의 크기는 그다지 다르지 않음을 알 수 있다.

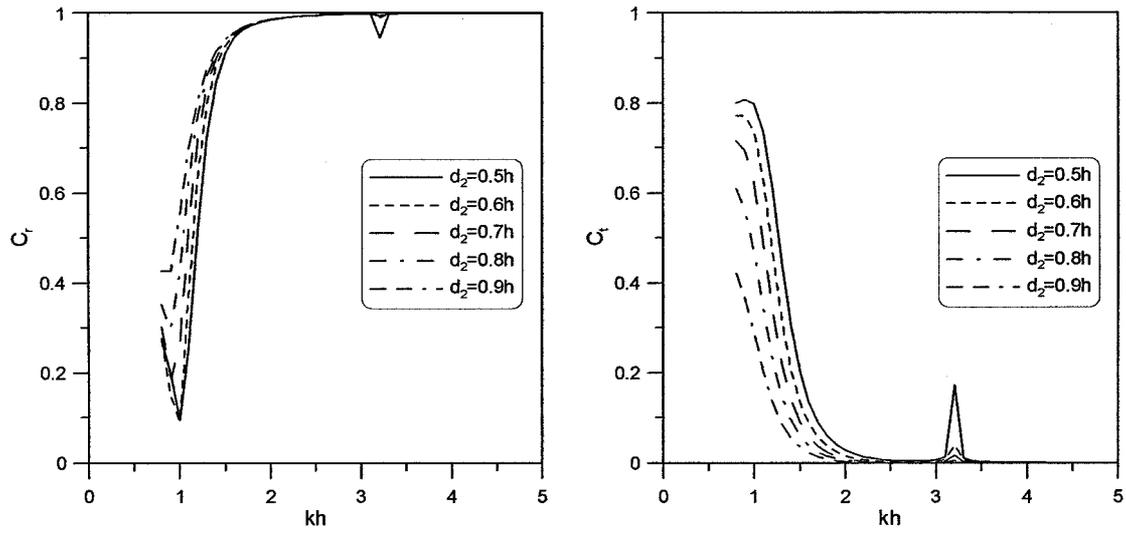


그림 1.11 두 번째 열의 흡수 변화에 따른 예상 반사율 및 투과율

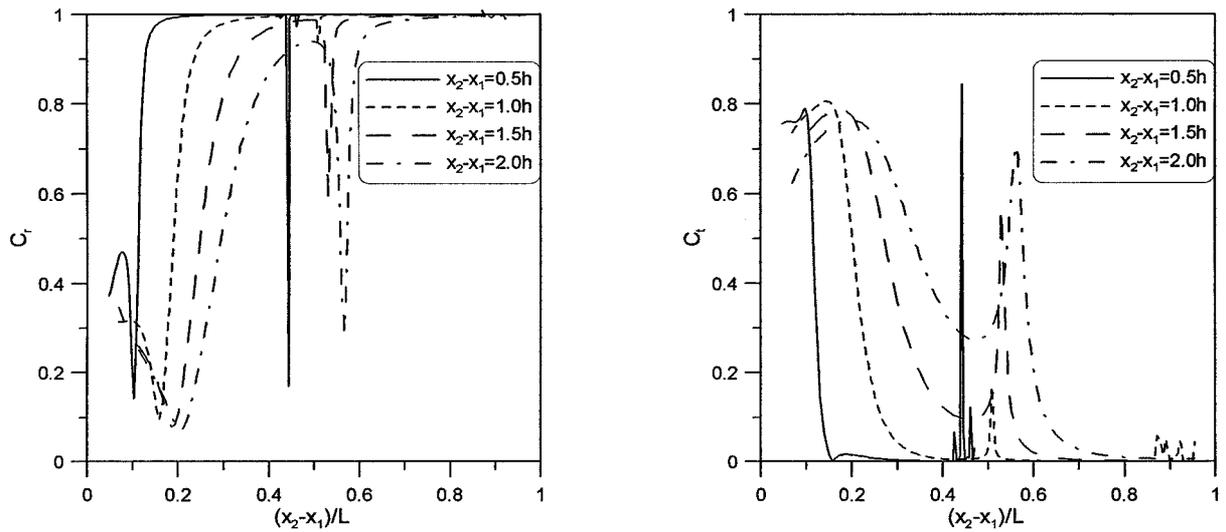


그림 1.12 두 열 사이의 간격과 파장비에 따른 예상 반사율 및 투과율

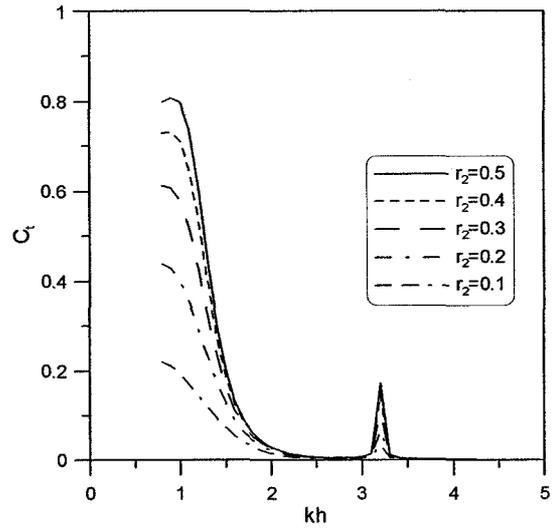
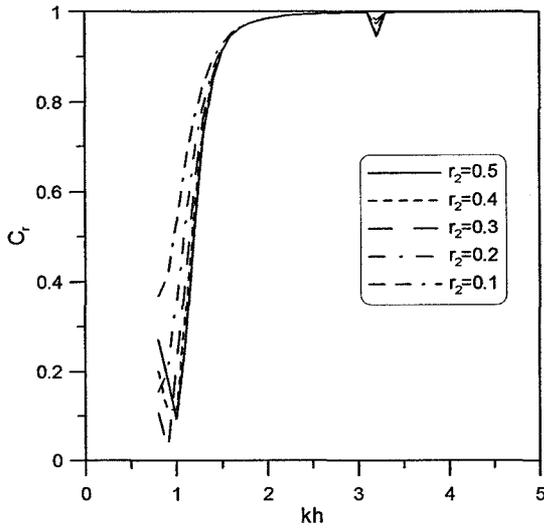


그림 1.13 두 번째 열의 개구율 변화에 따른 예상 반사율 및 투과율

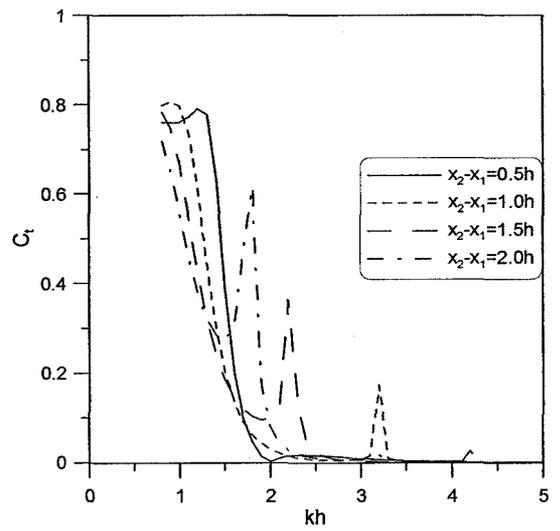
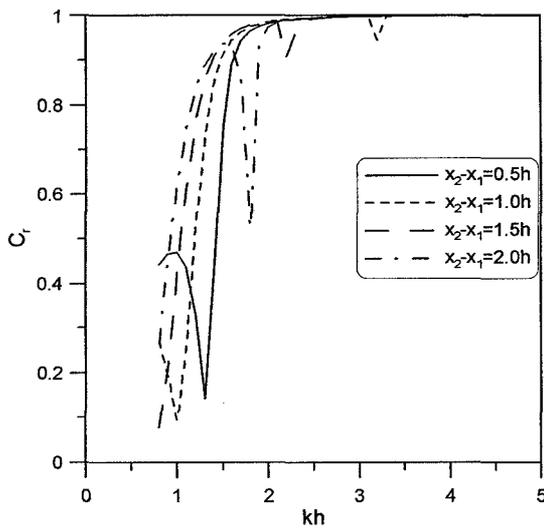


그림 1.14 두 열 사이의 간격 변화에 따른 예상 반사율 및 투과율

4. 불규칙파 모형으로 확장 및 수리모형실험 실시

Suh et al.(2002)은 규칙파 모형을 불규칙파 모형으로 확장하는 방법으로 3가지 방법을 제시하였다. 첫 번째 방법은 불규칙파를 파고와 주기가 각각 제공평균제곱근 파고(H_{rms})와 유의파 주기(T_s)인 규칙파로 가정하는 것이다. 두 번째와 세 번째 방법은 불규칙파 스펙트럼에서 각각의 주파수 성분에 규칙파 모형을 사용하는 방법이다 이 방법들에서 파의 주기는 각각 성분파의 주파수에 따라 결정되지만 모든 주파수에 대해서 제공평균제곱근 파고를 사용하면 두 번째 방법, 각각의 주파수 성분의 에너지에 따른 파고를 사용하면 세 번째 방법이 된다. Suh et al.(2002)에 의하면 이들 중에서 두 번째 방법을 이용한 결과가 가장 좋았으며, Suh et al.(2006)도 두 번째 방법을 이용한 불규칙파 모형을 제안하였다. 본 연구에서도 세 가지 방법 중 두 번째 방법을 이용하여 다열 커튼월-파일 방파제에서의 불규칙파의 반사율 및 투과율을 계산한다.

반사파와 투과파의 스펙트럼 밀도는 각각 특정 주파수 성분별로 다음 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$S_{\eta,r}(f) = |C_r(f)|^2 S_{\eta,i}(f) \quad (1.29)$$

$$S_{\eta,t}(f) = |C_t(f)|^2 S_{\eta,i}(f) \quad (1.30)$$

여기서 $S_{\eta,i}(f)$ 는 입사파의 에너지 밀도이다.

수리모형 실험의 조건은 규칙파 실험과 동일하다. $\gamma=3.3$ 인 JONSWAP 스펙트럼을 이용하여 불규칙파를 생성했으며, 여섯 개의 피크주기($T_p = 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0$)에 대하여 파형경사(H_p/L_p)가 0.03 이 되는 유의파고를 사용하였다.

입반사파 스펙트럼을 측정하기 위한 파고계는 방파제 첫 열의 전면으로 각각 3.5, 3.8, 4.0 m 떨어진 곳에, 투과파 스펙트럼을 측정하기 위한 파고계는 방파제 첫 열에서 후면으로 3.5 m 떨어진 곳에 설치하였다. 경사식 소파장치에서의 반사율은 충분히 작았으므로 반사파는 무시하였다. 처오름을 확인하기 위한 파고계도 방파제 첫 열의 앞뒷면에 설치하였다. 조파기를 작동시킨 후 300초 동안 초 당 20개의 파고자료를 얻은 다음 최초 60초 동안의 자료를 제외한 4,096개의 자료를 이용하여 스펙트럼을 분석하였다. 입반사파 스펙트럼 분리는 Suh et al. (2001)의 분리법을 사용하였다.

5. 불규칙파 모형 검증

불규칙파 모형에서 사용된 고유함수 전개법에서는 1개의 진행파와 49개의 소멸파를 이용하여 계산했으며, 소멸파 개수가 약 30개 이후로는 일정한 값으로 수렴하는 것을 확인하였다. 또한 여기서 제시하는 모든 결과에서, 방파제 첫 열 커튼월의 홀수 및 파일부분의 유공율은 $0.5h$ 및 0.5 로 고정하였다.

두 번째 열의 홀수 및 유공율의 변화 두 열 사이의 거리에 변화가 방파제의 반사와 투과에 미치는 영향을 살펴보았다. 표 1.1에는 2열 커튼월-파일 방파제에서의 반사율과 투과율의 관측값을 나타내었다. 커튼월의 홀수가 작아지거나 파일부분의 유공율이 커질수록, 입사파의 주기가 길어질수록 투과율은 높아지고 반사율은 낮아지는 것을 볼 수 있다. 열 사이의 간격은 주파수 평균한 반사율과 투과율에 별 다른 영향을 미치지 않는다는 사실을 알 수 있다. 표 1.1의 결과에서 수치 모형의 상대오차는 다음 식으로 계산된다.

$$error = \frac{A^p - A^o}{A^p} \times 100 \% \quad (1.31)$$

여기서 A 는 실험변수 \bar{C}_r 과 \bar{C}_t 를 뜻한다.

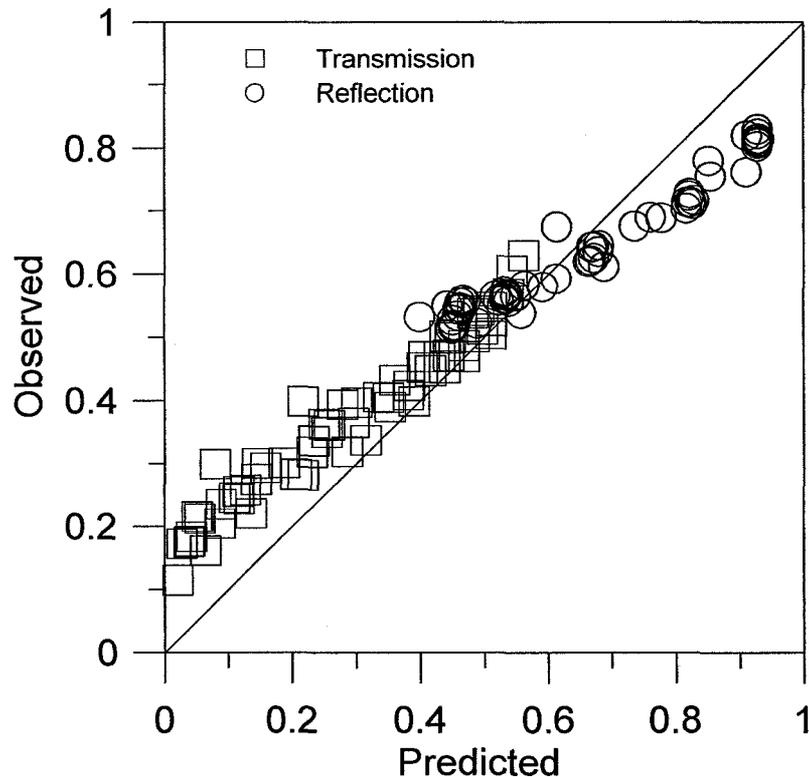


그림 1.15 2열 커튼월-파일 방파제에서 주파수 평균한 투과율과 반사율의 계산값과 측정값의 비교

그림 1.15는 주파수 평균한 반사율과 투과율의 관측값과 예측값을 비교한 것이다. 예측값이 관측값에 비해 반사율에서는 약간 과대예측을, 투과율에서는 과소예측을 하였지만 전체적으로 두 결과가 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 두 값의 일치정도를 수치화하기 위해 Index of Agreement (I_a)를 이용 하였다. I_a 는 반사율에서는 0.917, 투과율에서는 0.897 이었다.

$$I_a = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{a}| + |O_i - \bar{a}|)^2} \quad (1.32)$$

표 1.1 2열 커튼월-파일 방파제에 대한 수리실험 결과

T_p	H_s	$\frac{x_2 - x_1}{h}$	$\frac{d_2}{h}$	r_2	Predicted		Observed		$\frac{x_2 - x_1}{h}$	$\frac{d_2}{h}$	r_2	Predicted		Observed	
					\bar{C}_r	\bar{C}_t	\bar{C}_r	\bar{C}_t				\bar{C}_r	\bar{C}_t	\bar{C}_r	\bar{C}_t
1.0	4.54	1.00	0.50	0.50	0.927	0.005	0.814	0.213	0.50	0.50	0.50	0.910	0.079	0.762	0.299
1.2	6.14				0.816	0.158	0.704	0.293				0.760	0.217	0.690	0.399
1.4	7.71				0.663	0.301	0.620	0.397				0.613	0.390	0.675	0.399
1.6	9.23				0.535	0.630	0.569	0.470				0.562	0.491	0.582	0.542
1.8	10.71				0.470	0.511	0.556	0.526				0.534	0.543	0.567	0.606
2.0	12.17				0.458	0.537	0.534	0.569				0.522	0.561	0.558	0.630
1.0	4.54	1.00	0.60	0.50	0.928	0.042	0.808	0.184	1.50	0.50	0.50	0.928	0.087	0.830	0.205
1.2	6.14				0.820	0.127	0.724	0.258				0.854	0.144	0.755	0.275
1.4	7.71				0.668	0.254	0.643	0.350				0.735	0.250	0.676	0.363
1.6	9.23				0.532	0.381	0.573	0.409				0.612	0.360	0.593	0.433
1.8	10.71				0.462	0.468	0.555	0.470				0.517	0.447	0.566	0.499
2.0	12.17				0.452	0.497	0.516	0.513				0.488	0.482	0.522	0.538
1.0	4.54	1.00	0.75	0.50	0.929	0.027	0.811	0.173	2.00	0.50	0.50	0.911	0.110	0.820	0.246
1.2	6.14				0.825	0.089	0.711	0.236				0.851	0.206	0.780	0.283
1.4	7.71				0.679	0.187	0.646	0.301				0.777	0.258	0.689	0.361
1.6	9.23				0.538	0.296	0.557	0.365				0.678	0.335	0.636	0.406
1.8	10.71				0.461	0.383	0.547	0.424				0.591	0.406	0.580	0.470
2.0	12.17				0.453	0.416	0.517	0.448				0.557	0.439	0.538	0.502
1.0	4.54	1.00	0.50	0.40	0.927	0.051	0.803	0.216	1.00	0.60	0.40	0.928	0.038	0.815	0.175
1.2	6.14				0.817	0.145	0.714	0.300				0.822	0.116	0.714	0.256
1.4	7.71				0.666	0.279	0.622	0.394				0.671	0.234	0.626	0.336
1.6	9.23				0.535	0.403	0.565	0.453				0.533	0.353	0.562	0.390
1.8	10.71				0.466	0.484	0.559	0.501				0.459	0.438	0.544	0.452
2.0	12.17				0.453	0.511	0.519	0.548				0.448	0.468	0.514	0.487
1.0	4.54	1.00	0.50	0.25	0.928	0.040	0.823	0.177	1.00	0.75	0.25	0.930	0.020	0.815	0.115
1.2	6.14				0.821	0.117	0.728	0.244				0.828	0.064	0.717	0.162
1.4	7.71				0.671	0.231	0.644	0.318				0.687	0.136	0.612	0.221
1.6	9.23				0.531	0.350	0.560	0.405				0.549	0.217	0.565	0.282
1.8	10.71				0.443	0.444	0.550	0.472				0.464	0.286	0.546	0.319
2.0	12.17				0.399	0.510	0.532	0.506				0.450	0.315	0.527	0.337

그림 1.16과 1.17에는 관측값과 예측값을 비교하기 위하여 반사파 및 투과파 스펙트럼을 그렸다. 여기서 실선은 관측값이고 파선은 예측값이다. 반사파 스펙트럼과 투과파 스펙트럼은 관측된 입사파 스펙트럼의 피크 에너지 밀도로 정규화 했다. 모든 스펙트럼은 입사파 스펙트럼의 피크 주파수로 정규화된 주파수(f/f_p)의 함수로 나타내었다.

그림 1.16은 $(x_2 - x_1)/h = 0.5$, $r_2 = 0.5$, $d_2/h = 0.5$, $T_p = 1.4$ s, $H_s = 7.71$ cm인 경우의 결과이며, 상대오차가 6.21 % 로 가장 작은 경우이다. 모든 주파수 영역에서 수치결과가 약간 과소예측을 하고 있지만 주파수에 따른 파의 특성은 잘 재현되고 있다.

그림 1.17은 $(x_2 - x_1)/h = 1.0$, $r_2 = 0.5$, $d_2/h = 0.75$, $T_p = 1.0$ s, $H_s = 4.54$ cm인 경우의 결과이며, 상대오차가 276.72 % 로 가장 큰 경우이다. 반사파 스펙트럼에서 피크에서를 제외하고는 예측값의 에너지 밀도가 관측값보다 조금 작았다. 투과파 스펙트럼에서 두 값이 비교적 잘 맞지만 예측값이 너무 작아서 상대오차가 쉽게 커지는 경향이 있다.

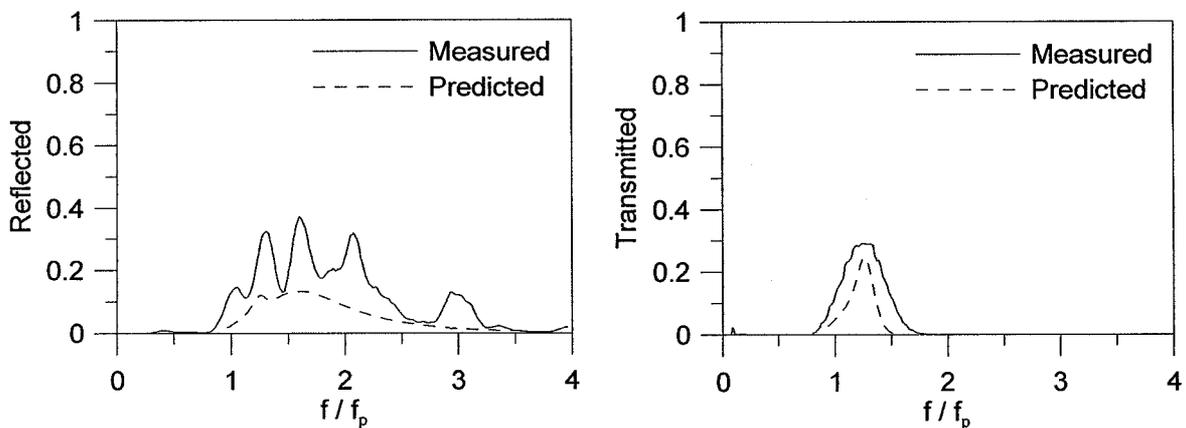


그림 1.16 $T_p = 1.4$ s 인 입사파 스펙트럼에 대한 $\overline{C_r^p} = 0.613$, $\overline{C_r^o} = 0.675$, $\overline{C_t^p} = 0.390$, and $\overline{C_t^o} = 0.399$ 인 반사파 및 투과파 스펙트럼 .

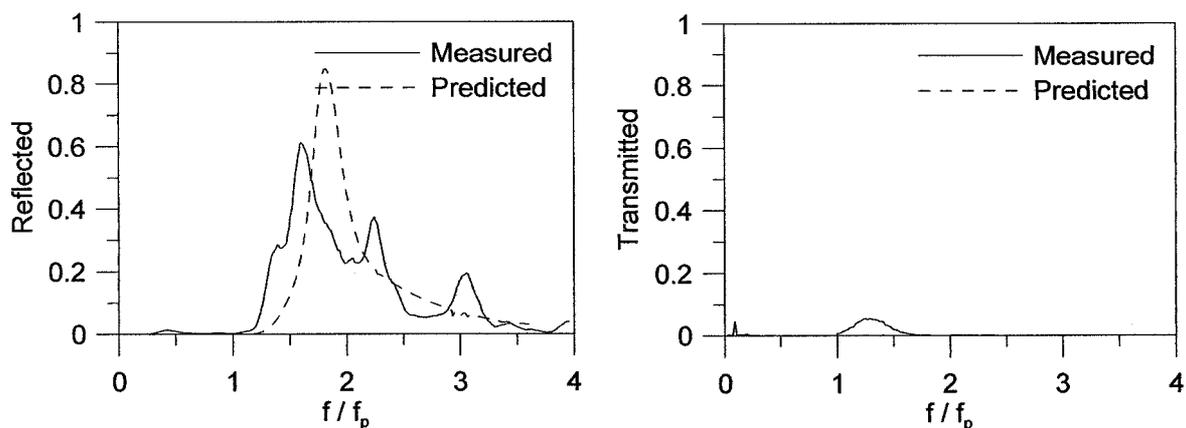


그림 1.17 $T_p = 1.0$ s 인 입사파 스펙트럼에 대한 $\overline{C_r^p} = 0.929$, $\overline{C_r^o} = 0.811$, $\overline{C_t^p} = 0.027$, and $\overline{C_t^o} = 0.173$ 인 반사파 및 투과파 스펙트럼.

부록: 연립 방정식의 유도

$x = x_1$ 일 때, 즉 $j = 1$ 일 때, 식 (1.6)과 (1.9)를 식 (1.10)에 대입하면,

$$-\mu_0 A_{00} \cos[\mu_0(h+z)] + \sum_{m=0}^{\infty} \mu_m B_{0m} \cos[\mu_m(h+z)] = 0 \quad (\text{A.1})$$

$$\begin{aligned} & \sum_{m=0}^{\infty} -\mu_m A_{1m} \cos[\mu_m(h+z)] + \sum_{m=0}^{\infty} \mu_m B_{1m} \exp[\mu_m(x_1 - x_2)] \cos[\mu_m(h+z)] \\ & = -\mu_0 A_{00} \cos[\mu_0(h+z)] + \sum_{m=0}^{\infty} \mu_m B_{0m} \cos[\mu_m(h+z)] \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

이 성립한다. 식 (A.1)와 식 (A.2)에 $\cos[\mu_n(h+z)]$ 를 곱하여 적분구간 $-d_1$ 에서 0까지 적분하면,

$$\begin{aligned} & \sum_{m=0}^{\infty} B_{0m} \mu_m \int_{-d_1}^0 \cos[\mu_m(h+z)] \cos[\mu_n(h+z)] dz \\ & = \mu_0 A_{00} \int_{-d_1}^0 \cos[\mu_0(h+z)] \cos[\mu_n(h+z)] dz \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

$$\begin{aligned} & \sum_{m=0}^{\infty} \{B_{0m} + A_{1m} - B_{1m} \exp[\mu_m(x_1 - x_2)]\} \mu_m \int_{-d_1}^0 \cos[\mu_m(h+z)] \cos[\mu_n(h+z)] dz \\ & = \mu_0 A_{00} \int_{-d_1}^0 \cos[\mu_0(h+z)] \cos[\mu_n(h+z)] dz \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

가 된다. 같은 방법으로 식 (1.6)과 (1.9)를 식 (1.11)에 대입하면,

$$\begin{aligned} & -\mu_0 A_{00} \cos[\mu_0(h+z)] + \sum_{m=0}^{\infty} \mu_m B_{0m} \cos[\mu_m(h+z)] \\ & = iG_1 \left\{ A_{00} \cos[\mu_0(h+z)] + \sum_{m=0}^{\infty} B_{0m} \cos[\mu_m(h+z)] - \sum_{m=0}^{\infty} A_{1m} \cos[\mu_m(h+z)] \right. \\ & \quad \left. - \sum_{m=0}^{\infty} B_{1m} \exp[\mu_m(x_1 - x_2)] \cos[\mu_m(h+z)] \right\} \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

$$\begin{aligned}
& -\mu_0 A_{00} \cos[\mu_0(h+z)] + \sum_{m=0}^{\infty} \mu_m B_{0m} \cos[\mu_m(h+z)] \\
& = \sum_{m=0}^{\infty} -\mu_m A_{1m} \cos[\mu_m(h+z)] + \sum_{m=0}^{\infty} \mu_m B_{1m} \exp[\mu_m(x_1 - x_2)] \cos[\mu_m(h+z)] \quad (A.6)
\end{aligned}$$

가 된다. 역시 같은 방법으로 식 (A.5)과 식 (A.6)에 $\cos[\mu_n(h+z)]$ 를 곱하여 적분구간 $-h$ 에서 $-d_1$ 까지 적분하면,

$$\begin{aligned}
& \sum_{m=0}^{\infty} \{B_{0m}(\mu_m - iG_1) + iG_1 A_{1m} + iG_1 B_{1m} \exp[\mu_m(x_1 - x_2)]\} \\
& \cdot \int_{-h}^{-d_1} \cos[\mu_m(h+z)] \cos[\mu_n(h+z)] dz \\
& = (\mu_0 + iG_1) A_{00} \int_{-h}^{-d_1} \cos[\mu_0(h+z)] \cos[\mu_n(h+z)] dz \quad (A.7)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{m=0}^{\infty} \{B_{0m} + A_{1m} - B_{1m} \exp[\mu_m(x_1 - x_2)]\} \mu_m \int_{-h}^{-d_1} \cos[\mu_m(h+z)] \cos[\mu_n(h+z)] dz \\
& = \mu_0 A_{00} \int_{-h}^{-d_1} \cos[\mu_0(h+z)] \cos[\mu_n(h+z)] dz \quad (A.8)
\end{aligned}$$

이 된다.

다음으로 $x = x_2 \sim x_{j-1}$ 일 때, 식 (1.9)를 식 (1.10)에 대입하면,

$$\sum_{m=0}^{\infty} \{-\mu_m A_{j-1,m} \exp[-\mu_m(x_j - x_{j-1})] + \mu_m B_{j-1,m}\} \cdot \cos[\mu_m(h+z)] = 0 \quad (A.9)$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{m=0}^{\infty} \{-\mu_m A_{jm} + \mu_m B_{jm} \exp[\mu_m(x_j - x_{j+1})]\} \cdot \cos[\mu_m(h+z)] \\
& = \sum_{m=0}^{\infty} \{-\mu_m A_{j-1,m} \exp[-\mu_m(x_j - x_{j-1})] + \mu_m B_{j-1,m}\} \cdot \cos[\mu_m(h+z)] \quad (A.10)
\end{aligned}$$

와 같이 된다. 마찬가지로 식 (A.9)과 식 (A.10)에 $\cos[\mu_n(h+z)]$ 를 곱하여 적분구간 $-d_j$ 에서 0까지 적분하면,

$$\begin{aligned}
& \sum_{m=0}^{\infty} \{-A_{j-1,m} \exp[-\mu_m(x_j - x_{j-1})] + B_{j-1,m}\} \mu_m \cdot \int_{-d_j}^0 \cos[\mu_m(h+z)] \cos[\mu_n(h+z)] dz \\
& = 0 \quad (A.11)
\end{aligned}$$

$$\sum_{m=0}^{\infty} \left\{ -A_{jm} + B_{jm} \exp[\mu_m(x_j - x_{j+1})] + A_{j-1,m} \exp[-\mu_m(x_j - x_{j-1})] - B_{j-1,m} \right\} \mu_m \cdot \int_{-d_j}^0 \cos[\mu_m(h+z)] \cos[\mu_n(h+z)] dz = 0 \quad (\text{A.12})$$

가 된다. $x = x_2 \sim x_{j-1}$ 일 때, 식(1.9)를 식 (1.11)에 대입하면,

$$\begin{aligned} & \sum_{m=0}^{\infty} \left\{ -\mu_m A_{j-1,m} \exp[-\mu_m(x_j - x_{j-1})] + \mu_m B_{j-1,m} \right\} \cos[\mu_m(h+z)] \\ &= iG_j \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} A_{j-1,m} \exp[-\mu_m(x_j - x_{j-1})] \cos[\mu_m(h+z)] + \sum_{m=0}^{\infty} B_{j-1,m} \cos[\mu_m(h+z)] \right. \\ & \quad \left. - \sum_{m=0}^{\infty} A_{jm} \cos[\mu_m(h+z)] - \sum_{m=0}^{\infty} B_{jm} \exp[\mu_m(x_j - x_{j+1})] \cos[\mu_m(h+z)] \right\} \end{aligned} \quad (\text{A.13})$$

$$\begin{aligned} & \sum_{m=0}^{\infty} \left\{ -\mu_m A_{jm} + \mu_m B_{jm} \exp[\mu_m(x_j - x_{j+1})] \right\} \cos[\mu_m(h+z)] \\ &= \sum_{m=0}^{\infty} \left\{ -\mu_m A_{j-1,m} \exp[-\mu_m(x_j - x_{j-1})] + \mu_m B_{j-1,m} \right\} \cos[\mu_m(h+z)] \end{aligned} \quad (\text{A.14})$$

가 된다. 다시 식 (A.13)과 식 (A.14)에 $\cos[\mu_n(h+z)]$ 를 곱하여 적분구간 $-h$ 에서 $-d_j$ 까지 적분하면,

$$\begin{aligned} & \sum_{m=0}^{\infty} \left\{ \mu_m A_{j-1,m} \exp[-\mu_m(x_j - x_{j-1})] - \mu_m B_{j-1,m} + iG_j A_{j-1,m} \exp[-\mu_m(x_j - x_{j-1})] \right. \\ & \quad \left. + iG_j B_{j-1,m} - iG_j A_{jm} - iG_j B_{jm} \exp[\mu_m(x_j - x_{j+1})] \right\} \\ & \cdot \int_{-h}^{-d_j} \cos[\mu_m(h+z)] \cos[\mu_n(h+z)] dz = 0 \end{aligned} \quad (\text{A.15})$$

$$\begin{aligned} & \sum_{m=0}^{\infty} \left\{ -A_{jm} + B_{jm} \exp[\mu_m(x_j - x_{j+1})] + A_{j-1,m} \exp[-\mu_m(x_j - x_{j-1})] - B_{j-1,m} \right\} \\ & \cdot \mu_m \int_{-h}^{-d_j} \cos[\mu_m(h+z)] \cos[\mu_n(h+z)] dz = 0 \end{aligned} \quad (\text{A.16})$$

가 된다.

마지막으로 $x = x_j$ 일 때, 정합방정식 (1.10)은

$$\sum_{m=0}^{\infty} \left\{ -\mu_m A_{J-1,m} \exp[-\mu_m(x_J - x_{J-1})] + \mu_m B_{J-1,m} \right\} \cos[\mu_m(h+z)] = 0 \quad (\text{A.17})$$

$$\begin{aligned} & \sum_{m=0}^{\infty} -\mu_m A_{Jm} \cos[\mu_m(h+z)] \\ &= \sum_{m=0}^{\infty} \left\{ -\mu_m A_{J-1,m} \exp[-\mu_m(x_J - x_{J-1})] + \mu_m B_{J-1,m} \right\} \cos[\mu_m(h+z)] \end{aligned} \quad (\text{A.18})$$

가 된다. 이 두 식에 $\cos[\mu_n(h+z)]$ 를 곱하여 적분구간 $-d_J$ 에서 0까지 적분하면,

$$\begin{aligned} & \sum_{m=0}^{\infty} \left\{ -A_{J-1,m} \exp[-\mu_m(x_J - x_{J-1})] + B_{J-1,m} \right\} \mu_m \int_{-d_J}^0 \cos[\mu_m(h+z)] \cos[\mu_n(h+z)] dz \\ &= 0 \end{aligned} \quad (\text{A.19})$$

$$\begin{aligned} & \sum_{m=0}^{\infty} \left\{ A_{J-1,m} \exp[-\mu_m(x_J - x_{J-1})] + B_{J-1,m} - A_{Jm} \right\} \mu_m \\ & \cdot \int_{-d_J}^0 \cos[\mu_m(h+z)] \cos[\mu_n(h+z)] dz = 0 \end{aligned} \quad (\text{A.20})$$

가 된다. $x = x_J$ 일 때, 정합방정식 (1.11)은

$$\begin{aligned} & \sum_{m=0}^{\infty} \left\{ -\mu_m A_{J-1,m} \exp[-\mu_m(x_J - x_{J-1})] + \mu_m B_{J-1,m} \right\} \cos[\mu_m(h+z)] \\ &= iG_J \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} A_{J-1,m} \exp[-\mu_m(x_J - x_{J-1})] \cos[\mu_m(h+z)] \right. \\ & \quad \left. + \sum_{m=0}^{\infty} B_{J-1,m} \cos[\mu_m(h+z)] - \sum_{m=0}^{\infty} A_{Jm} \cos[\mu_m(h+z)] \right\} \end{aligned} \quad (\text{A.21})$$

$$\begin{aligned} & \sum_{m=0}^{\infty} -\mu_m A_{Jm} \cos[\mu_m(h+z)] \\ &= \sum_{m=0}^{\infty} \left\{ -\mu_m A_{J-1,m} \exp[-\mu_m(x_J - x_{J-1})] + \mu_m B_{J-1,m} \right\} \cos[\mu_m(h+z)] \end{aligned} \quad (\text{A.22})$$

로 나타낼 수 있다. 식 (A.21)와 식 (A.22)에 $\cos[\mu_n(h+z)]$ 를 곱하여 적분구간을 $-h$ 에서

$-d_J$ 로 적분하면

$$\begin{aligned} & \sum_{m=0}^{\infty} \{ \mu_m A_{J-1,m} \exp[-\mu_m(x_J - x_{J-1})] - \mu_m B_{J-1,m} + iG_J A_{J-1,m} \exp[-\mu_m(x_J - x_{J-1})] \\ & + iG_J B_{J-1,m} - iG_J A_{Jm} \} \cdot \int_h^{d_J} \cos[\mu_m(h+z)] \cos[\mu_n(h+z)] dz = 0 \end{aligned} \quad (A.23)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{m=0}^{\infty} \{ -A_{Jm} + A_{J-1,m} \exp[-\mu_m(x_J - x_{J-1})] - B_{J-1,m} \} \mu_m \\ & \cdot \int_h^{d_J} \cos[\mu_m(h+z)] \cos[\mu_n(h+z)] dz = 0 \end{aligned} \quad (A.24)$$

가 된다.

식 (A.3)과 식 (A.7)를 더하면

$$\begin{aligned} & \sum_{m=0}^{\infty} [\{ \mu_m f_{mn}(-d_1, 0) + (\mu_m - iG_1) f_{mn}(-h, -d_1) \} B_{0m} + iG_1 f_{mn}(-h, -d_1) A_{1m} \\ & + iG_1 \exp(-\mu_m \Delta x_1) f_{mn}(-h, -d_1) B_{1m}] \\ & = \mu_0 A_{00} \{ f_{0n}(-d_1, 0) + f_{0n}(-h, -d_1) \} + iG_1 A_{00} f_{0n}(-h, -d_1) \end{aligned} \quad (A.25)$$

for $n = 0, 1, 2, \dots, \infty$

이다. 같은 방법으로 식 (A.4)와 식 (A.8)을 더하면,

$$\begin{aligned} & \sum_{m=0}^{\infty} [\mu_m \{ f_{mn}(-d_1, 0) + f_{mn}(-h, -d_1) \} B_{0m} + \mu_m \{ f_{mn}(-d_1, 0) + f_{mn}(-h, -d_1) \} A_{1m} \\ & - \mu_m \exp(-\mu_m \Delta x_1) \{ f_{mn}(-d_1, 0) + f_{mn}(-h, -d_1) \} B_{1m}] \\ & = \mu_0 A_{00} \{ f_{0n}(-d_1, 0) + f_{0n}(-h, -d_1) \} \end{aligned} \quad (A.26)$$

for $n = 0, 1, 2, \dots, \infty$

을 얻을 수 있으며, 식 (A.11)와 식 (A.15), 식 (A.12)과 식 (A.16)를 각각 더하면,

$$\begin{aligned} & \sum_{m=0}^{\infty} [\exp(-\mu_m \Delta x_{j-1}) \{ -\mu_m f_{mn}(-d_j, 0) + \mu_m f_{mn}(-h, -d_j) + iG_j f_{mn}(-h, -d_j) \} A_{j-1,m} \\ & + \{ \mu_m f_{mn}(-d_j, 0) - \mu_m f_{mn}(-h, -d_j) + iG_j f_{mn}(-h, -d_j) \} B_{j-1,m} \\ & - iG_j f_{mn}(-h, -d_j) A_{jm} - iG_j \exp(-\mu_m \Delta x_j) f_{mn}(-h, -d_j) B_{jm}] = 0 \end{aligned} \quad (A.27)$$

for $n = 0, 1, 2, \dots, \infty$

$$\begin{aligned}
& \sum_{m=0}^{\infty} \left[\mu_m \exp(-\mu_m \Delta x_{j-1}) \{f_{mn}(-d_j, 0) + f_{mn}(-h, -d_j)\} A_{j-1, m} \right. \\
& \quad - \mu_m \{f_{mn}(-d_j, 0) + f_{mn}(-h, -d_j)\} B_{j-1, m} - \mu_m \{f_{mn}(-d_j, 0) + f_{mn}(-h, -d_j)\} A_{jm} \\
& \quad \left. + \mu_m \exp(-\mu_m \Delta x_j) \{f_{mn}(-d_j, 0) + f_{mn}(-h, -d_j)\} B_{jm} \right] = 0 \quad (\text{A.28})
\end{aligned}$$

for $n = 0, 1, 2, \dots, \infty$

을 얻을 수 있다. 마지막으로, 식 (A.19)과 식 (A.23), 식 (A.20)과 식 (A.24)를 각각 더하면, 다음 식을 얻는다.

$$\begin{aligned}
& \sum_{m=0}^{\infty} \left[\exp(-\mu_m \Delta x_{J-1}) \{-\mu_m f_{mn}(-d_J, 0) + \mu_m f_{mn}(-h, -d_J) + iG_J f_{mn}(-h, -d_J)\} A_{J-1, m} \right. \\
& \quad + \{\mu_m f_{mn}(-d_J, 0) - \mu_m f_{mn}(-h, -d_J) + iG_J f_{mn}(-h, -d_J)\} B_{J-1, m} \\
& \quad \left. - iG_J f_{mn}(-h, -d_J) A_{Jm} \right] = 0 \quad (\text{A.29})
\end{aligned}$$

for $n = 0, 1, 2, \dots, \infty$

$$\begin{aligned}
& \sum_{m=0}^{\infty} \left[\mu_m \exp(-\mu_m \Delta x_{J-1}) \{f_{mn}(-d_J, 0) + f_{mn}(-h, -d_J)\} A_{J-1, m} \right. \\
& \quad \left. - \mu_m \{f_{mn}(-d_J, 0) + f_{mn}(-h, -d_J)\} B_{J-1, m} - \mu_m \{f_{mn}(-d_J, 0) + f_{mn}(-h, -d_J)\} A_{JM} \right] \quad (\text{A.30}) \\
& = 0
\end{aligned}$$

for $n = 0, 1, 2, \dots, \infty$

제2절 해수교환용 방파제의 파향 민감도 및 에너지 소산 미캐니즘 연구

1. 서론

방파제는 일반적으로 투과되는 파 에너지를 감소시켜 후방을 보호하기 위함이다. 수심이 깊어진다면 해저면까지 이어지는 방파제는 비경제적일 것이므로 수중방파제나 surface-piercing 방파제가 이를 대신할 것이다. 많은 방파제들 중에 틸을 가진 수직벽은 칸막이와 같이 바다를 나누는 것이 아니기 때문에 해양환경의 관점에서 좋은 평가를 받고 있다. 자유로운 해수의 순환으로 오염을 방지할 수 있기 때문이다. 틸을 가진 수직벽은 수중벽과 surface-piercing 방파제로 구성되어 있다. 수중벽은 해저면에서 수위아래까지의 부분이고 이는 해빈을 보호하기 위함이거나 임시 수중구조물을 보호하기 위함이다. surface-piercing 벽은 수면부터 그 아래까지의 부분이고 이는 파랑 작용이 가장 현저한 해수면에 가깝게 보호벽을 제공함으로써 상대적으로 효과적일 것이다.

이러한 구조물에 의한 파의 산란은 많은 학자들에 의해서 연구되었지만 framework of linearized potential theory의 수학적 어려움에 부딪혀있다. 그러므로 수직벽에 대한 이론해는 파의 투과와 반사 성질만을 고려한 2차원 영역에서 행해진다. 그러나 실제로 항이나 마리나로의 입사파는 회절과 발산이 발생하고 반사파도 발생시킨다. 이를 해결하기 위해서는 항내 파랑변형효과를 수치적으로 고려해야만 한다.

파와 구조물의 상호작용에 대한 수학적 접근을 여러 학자들이 시도했지만, 환경사 방정식과 같은 2차원 파랑방정식에서는 무시되는 소멸항 때문에 구조물 주변에서 엄청 많은 양의 계산 시간과 저장공간이 필요한 실정이었다. 이 연구에서는 반사율을 예측할 때를 제외하고는 소멸항을 배제하고 대신 새로운 항을 추가하여 수직벽 해석에 보다 간단한 접근법을 소개하도록 하겠다.

2. 수직벽에 의한 산란파

이 장에서는 딱딱하고 아주 가는 surface-piercing 수직벽에 들어오는 수면파의 투과와 반사를 다룰 것이다. 이런 형태의 방파제는 Wiegel(1960)과 Jones외(1979) 등에 의해 연구된 적이 있다. Wiegel(1960)은 power method에 기반하여 투과파에 대한 해법을 대략적으로 제시했었고, Ursell(1947)은 심해에서 투과파에 대한 정확한 식을 제시하였다. Drimer외(1992)는 부방파제의 2차원 선형 수리학적 문제를 분석하기 위한 간소화된 모형을 제시하였으며, Losada외(1992), Abul-Azm(1993)과 Kriebel과 Bollmann(1996)는 eigenfunction 전개에 기초하여 수치해를 도출했다. 이에 반해 Liu 와 Abbaspour(1980)은 boundary integral equation method(BIEM)을 사용했다. 이 장에서는 반사율을 예측하기 위해 무엇이 가장 효율적인 방법인지를 알기 위해 네 가지의 이론적 접근법 (Wiegel, 1960; Ursell, 1947; Drimer 외, 1992; Kriebel 과 Bollmann, 1996)을 시험, 비교하였다. $D/h=0.2, 0.5, 0.8$ 각각에 대하여 투과율과 반사율이 그림 2.2와 2.3에 각각 kD 의 함수로 그려져 있다.

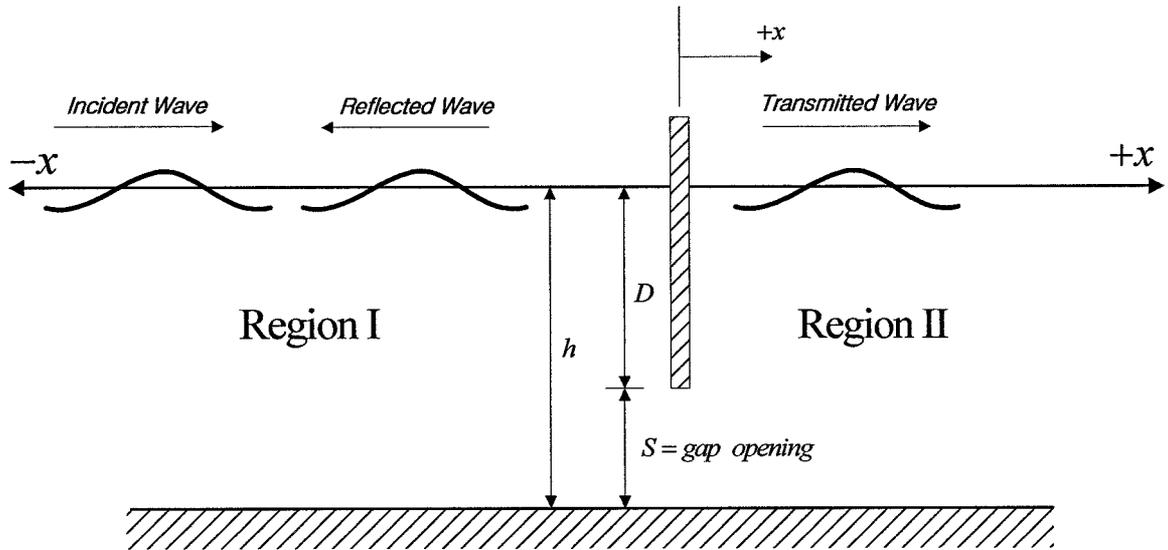
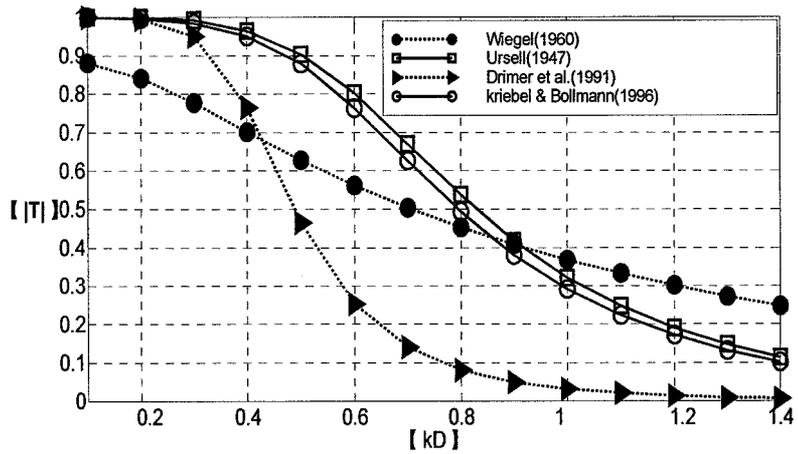


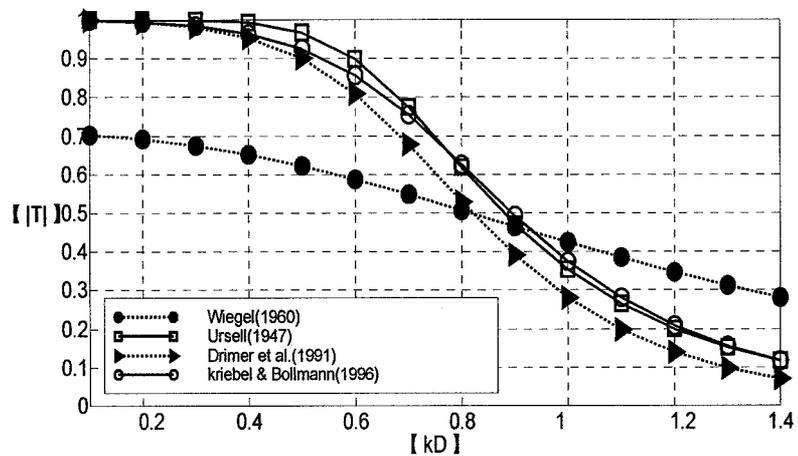
그림 2.1 surface-piercing 수직벽의 개념도

eigenfunction 이론이 정확도 면에서 가장 뛰어났고, Ursell의 방법은 D/h 의 값이 작을 때만 좋은 결과를 나타냈다. 이에 반해, Drimer의 방법은 D/h 의 값이 클 때만 좋은 결과를 나타냈다. 소멸항이 중요한 조건에서는 Drimer의 방법은 투과율을 과대평가하는 경향이 나타났고, Wiegel의 이론은 천해에서는 과대평가를 했고, 심해에서는 과소평가를 하는 최악의 결과를 초래했다.

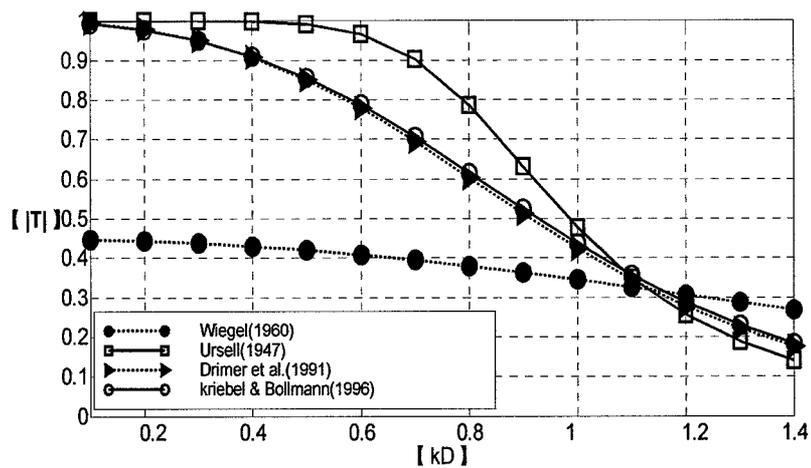
소거변수 N 은 높은 침투조건에서 150 mode까지 증가했으나, 낮은 침투조건에서는 $N=50$ 으로 비교적 만족스러운 결과를 나타냈다.



(a) ($D/h=0.2$)

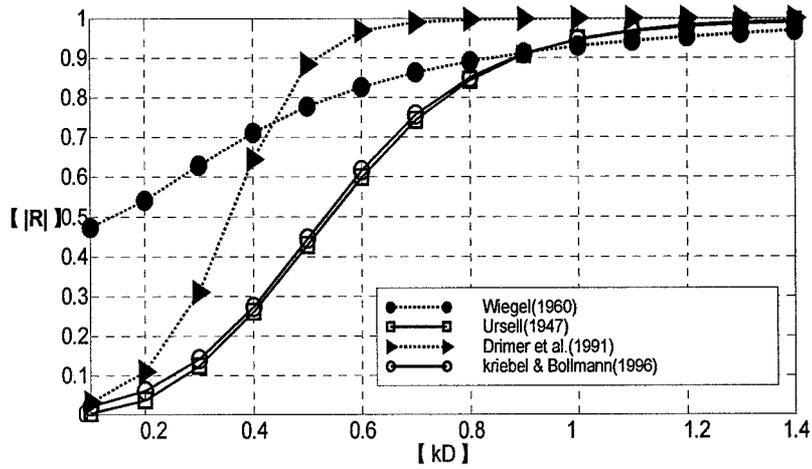


(b) ($D/h=0.5$)

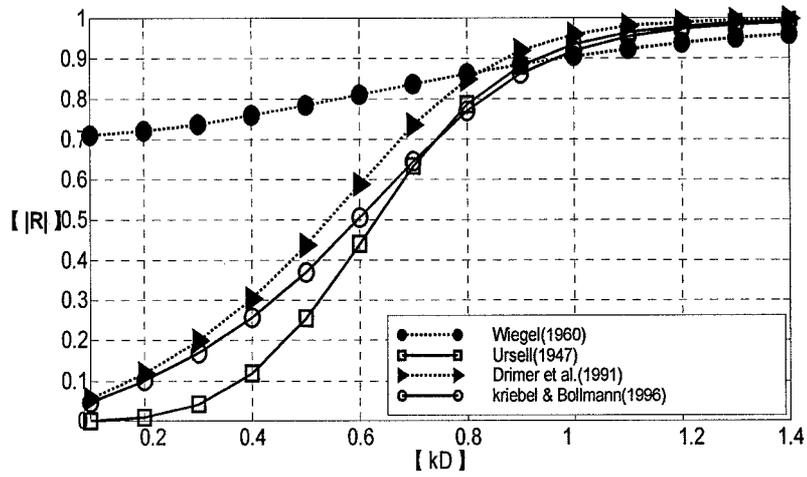


(c) ($D/h=0.8$)

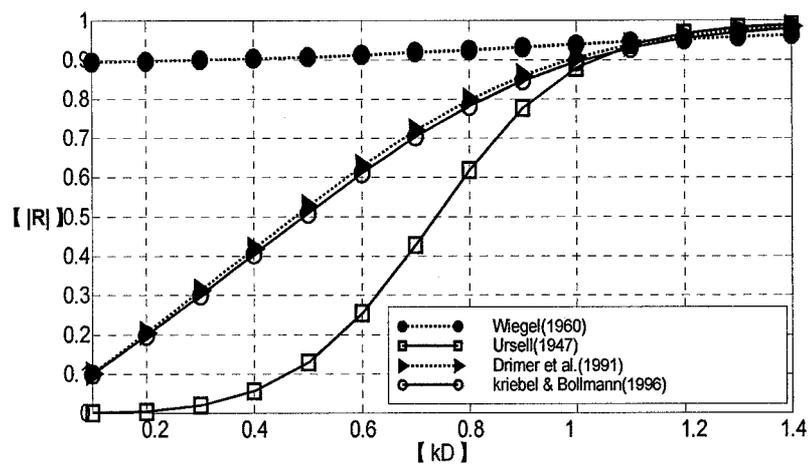
그림 2.2 일반적인 입사파의 경우 surface-piercing 벽에 대한 투과율



(a) ($D/h=0.2$)



(b) ($D/h=0.5$)



(c) ($D/h=0.8$)

그림 2.3 일반적인 입사파의 경우 surface-piercing 벽에 대한 반사율

3. 수직벽에 의한 평면파의 산란

다중 수직 벽에 대한 산란 파를 평면 파(plane wave) 개념으로 근사 해를 구하는 이론을 제시한다. 우선 파의 단일 산란 문제를 고려한다. 파의 움직임은 2차원적인 분석에 따라 세로 방향에서 형성된다고 가정된다. 선형이론이 적용되기 위하여 파의 움직임은 작다고 가정된다. 분석에 따르면, z축 양의 상 방향과 평균자유 수면에서 원점인 Cartesian 좌표계가 사용된다. 가정된 이상유체와 주기의 고조파의 움직임, 속도 포텐셜은 $(x,y,z,t)=\text{Re}[(x,z)\exp(-it)]$ 와 같이 쓰여 진다.

구조물이 $x=0$ 에 위치한 경우 구조물로부터 멀리 떨어진 곳에서의 입사파와 산란파는 다음과 같이 표현된다.

$$\phi^-(x) = A_- e^{ik_x x} + B_- e^{-ik_x x}, \quad x \rightarrow -\infty \quad (2.1)$$

$$\phi^+(x) = A_+ e^{ik_x x} + B_+ e^{-ik_x x}, \quad x \rightarrow +\infty \quad (2.2)$$

여기서 ϕ 는 자유 수면에서 정의된 전파형의 속도 포텐셜이고, k_x 는 x 방향으로의 파수 k 이고, A_- 와 B_+ 는 양쪽으로부터 입사되는 파에 해당되고 각각 A_+ 와 B_- 는 경계가 위치하는 $x=0$ 로부터 양쪽으로 산란되는 파에 해당된다. 구조물에 의하여 반사되는 반사율이 r 일 경우 전체 포텐셜은 선형중첩에 의하여 다음과 같다.

$$\phi^-(x) = A_- e^{ik_x x} + B_+ t e^{-ik_x x} + A_- r e^{-ik_x x}, \quad x \rightarrow -\infty \quad (2.3)$$

$$\phi^+(x) = B_+ e^{-ik_x x} + A_+ t e^{ik_x x} + B_+ r e^{ik_x x}, \quad x \rightarrow +\infty \quad (2.4)$$

t 는 투과계수이고, r 은 반사계수일 때, 복소수 t 의 투과계수는 얇은 직립장벽에 대해 $1-r$ 로 주어진다. x 는 경계가 위치한 지점이지만 속도는 양측에서 유지된다. 식 (2.1)과 (2.2)로부터 다음 결과를 얻는다.

$$A_+ = tA_- + rB_+, \quad B_- = rA_- + tB_+ \quad (2.5)$$

식 (2.5)는 Jost 함수를 사용함으로 얻어진다. $r+t=1$ 로 재배열되는 식 (2.1)과 (2.2)는 다음과 같다.

$$\phi^-(x) = A_- e^{ik_x x} + B_- e^{-ik_x x} + r(A_- - B_+) e^{-ik_x x}, \quad x \rightarrow -\infty \quad (2.6)$$

$$\phi^+(x) = A_- e^{ik_x x} + B_- e^{-ik_x x} - r(A_- - B_+) e^{-ik_x x}, \quad x \rightarrow +\infty \quad (2.7)$$

그러므로 연결된 산란 상수 R는 $r(A_- - B_+)$ 이 된다. 첫째로 두 항은 입사파항이고 마지막 항은 산란 항이다. 넓은 격자의 근사치는 그 효과는 무시된다는 가정이 이 연구에서 사용된다.

그러므로 산란함수는 구조물을 경계로 속도 포텐셜의 경사로 표현된다.

$$R = \frac{\alpha}{ik} \frac{\partial \phi}{\partial x}(0) \quad (2.8)$$

여기서 $\alpha = rt^{-1}$ 로 정의되고 단, 비에너지 소산의 경우이다. 이 $-ik|t|^{-1}$ 이다(Mei, 1983). $|r|$ 과 $|t|$ 는 반사와 단일 구조물에 대한 투과계수이다. 그러므로, 산란함수는 장벽을 넘는 속도 포텐셜의 경사의 향으로 표현된다. 각각의 식 (2.6)과 (2.7)은 구조물이 위치한 지점에서의 경계조건을 나타낸다.

$$\phi^+(0) - \phi^-(0) = -2 \frac{\alpha}{ik} \frac{\partial \phi}{\partial x}(0) \quad (2.9)$$

식 (2.8)과 (2.9)는 직립경계 또는 벽이 무시될 만큼의 얇은 경우 적용될 수 있다.

4. 다중벽에의 적용

단일 입사파에 의한 직립파 경계 N의 상호작용을 고려하여야 한다. 경계는 한계수심에서 고정적이고 그림 2.4에서 보이는 것처럼 surface-piercing 수치를 가진다. 그러므로 임의의 길이 α_i 와 위치 l_i , ($i=1,2,\dots,N$)의 경계에 대해 이송계수는 다음과 같이 역행렬로 주어진다 (Lee와 Cho, 2003).

$$T = \frac{1}{\Delta} \quad (2.10)$$

Δ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 + \alpha_1 & \alpha_1 e^{ik(l_2 - l_1)} & \alpha_1 e^{ik(l_3 - l_1)} & \dots & \alpha_1 e^{ik(l_N - l_1)} \\ \alpha_2 e^{ik(l_2 - l_1)} & 1 + \alpha_2 & \alpha_2 e^{ik(l_3 - l_2)} & \dots & \alpha_2 e^{ik(l_N - l_2)} \\ \alpha_3 e^{ik(l_3 - l_1)} & \alpha_3 e^{ik(l_3 - l_2)} & 1 + \alpha_3 & \dots & \alpha_3 e^{ik(l_N - l_3)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_N e^{ik(l_N - l_1)} & \alpha_N e^{ik(l_N - l_2)} & \alpha_N e^{ik(l_N - l_3)} & \dots & 1 + \alpha_N \end{vmatrix} \quad (2.11)$$

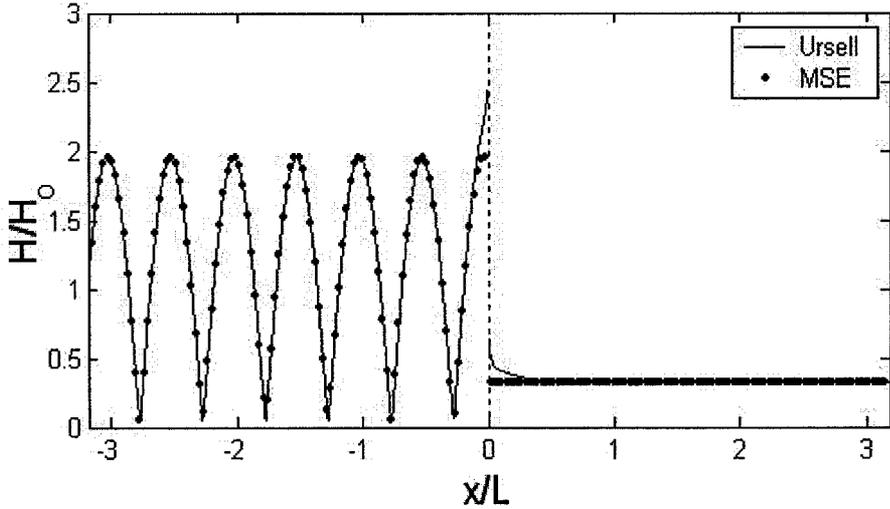


그림 2.4 $x=0$ 에 위치한 직립 경계에 대한 Ursell의 해석과 비교

식 (2.8)은 얻어지는 위의 식 (2.11)에서 사용된다. 이 식은 직벽의 수와 관계없이 가능하다. 만약 에너지가 소실 없이 유지된다면, 반사계수 $|R|$ 는 다음과 같다.

$$|R| = \sqrt{1 - TT^*} \quad (2.12)$$

기술된 산란항을 이용한 상호작용 처리법이 타당한 지를 검증하기 위하여 그림 2.5와 같이 1차원적인 경우에 대한 다점 원천법(multiple source method)에 의한 결과와 이론치와의 결과를 비교한다.

현재의 방법이 2개의 경계문제에 대해 적용함으로써 이전의 점근적인 풀이에 대해 전적으로 동등한 결과를 나타낸다. 식 (2.10)은 r/t 를 사용하여 단일 경계의 이송과 반사계수의 항에서 표현되는 이송계수를 산출한다.

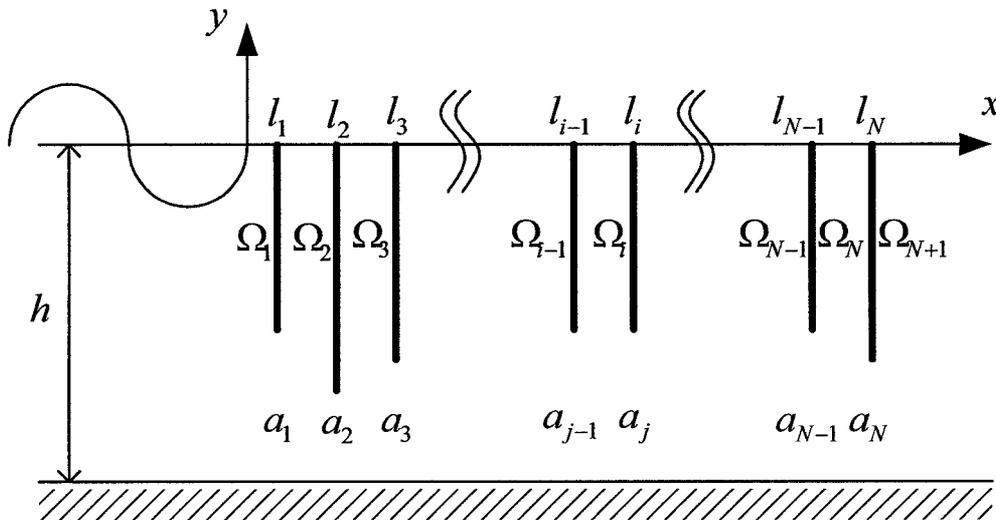


그림 2.5 일련의 수면 거치 방파제에 1차원 다중 원천법 적용

$$T = \frac{t_1 t_2}{1 - r_1 r_2 e^{2ikd}} \quad (2.13)$$

하첨자 1, 2는 우측으로부터 계산되는 경계의 수에 적용된다. 이 식은 에너지 소실의 경우에서 유효하다(Lee와 Cho, 2003). 비점성 유체의 해석하는 경계의 쌍에 대한 Evan과 Morris(1972)에 의한 식과 동일하다. 3개의 경계에 대한 투과계수의 방정식은 다음과 같다.

$$T = \frac{t_1 t_2 t_3}{1 - r_1 (t_2 - r_2) r_3 e^{2ik(l_3 - l_1)} - r_1 r_2 e^{2ik(l_3 - l_2)}} \quad (2.14)$$

5. 에너지 손실의 고려

수직판의 하단에서의 와류의 발생으로 인한 에너지 손실의 영향을 감안하는 방법에 대하여 기술한다. 이 방법은 부방파제에 의한 파랑 에너지 흡수 미캐니즘에도 적용가능한 방법이다.

r/t 은 부방파제의 파랑 제어 특성으로부터 결정되는 것으로 수학적 모형으로부터 직접 산정할 수 있으나 대부분의 부방파제는 수학적으로 산정하는 데 한계가 있으므로 본 절에서는 주어진 파랑 조건 하에서 t_+ 과 t_- 또는 r_+ 과 에너지 흡수나 소산 e 가 관측된 상태에서 복소수 값으로서의 r/t 을 산정하는 방법에 대하여 기술한다. 부방파제는 고정되어 있지 않아 파랑 작용 하에서 운동을 함으로써 파랑 에너지를 흡수하고 또 파랑 에너지를 감쇠 시키는 역할도 하는 데 이로 인한 파랑 에너지 소산 계수 e 는 다음과 같이 복소수의 반사계수와 투과계수로부터 산정될 수 있다.

$$r_+ t_+^* + r_- t_-^* = e \quad (2.15)$$

여기서 (*)는 공액 복소수를 나타내고 +기호의 하첨자는 좌측에서 우측으로 진행되는 파랑 전파시의 계수라면 -기호는 그 반대방향인 우측에서 좌측으로 진행되는 파랑 전파시의 값들이다. 식 (2.15)에 $t_+ r_+$ 을 곱하면

$$|t_+|^2 r_+ r_+ + |r_+|^2 t_+ t_+ = e t_+ r_+ \quad (2.16)$$

식 (2.16)을 $t_+ t_+$ 로 나누면,

$$|t_+|^2 \frac{r_+ r_+}{t_+ t_+} - e \frac{r_+}{t_+} + |r_+|^2 = 0 \quad (2.17)$$

여기서 투과계수에 관한 한 구조물의 대칭성과 관계없이 $t_- = t_+ = t$ (Mei, 1983)이지만 반사율은 대칭구조의 경우만 $r_- = r_+ = r$ 이 성립된다. 따라서 대칭 구조라면 식 (2.17)은 다음과 같이 된다.

$$|t_+|^2 \frac{r^2}{t^2} - e \frac{r}{t} + |r|^2 = 0 \quad (2.18)$$

이 식의 해는 다음과 같다.

$$\frac{r}{t} = \frac{e/2 \pm \sqrt{e^2/4 - |r|^2 |t|^2}}{|t|^2} \quad (2.19)$$

소산이 없는 특별한 경우에는 식 (2.19)는 다음과 같이 된다.

$$\frac{r}{t} = \pm i \frac{|r|}{|t|} \quad (2.20)$$

식 (2.19)와 (2.20)에 있는 +와 -부호 중 이론적인 완전 해 (Ursell, 1947)와 비교하여 ‘-’ 부호가 선정된다. 식 (2.19)를 흡수나 손실이 없을 때의 반사율과 투과율, $|r_0|$ 와 $|t_0|$ 로 표현하는 것이 편리할 경우가 있다. 할당율이라는 새로운 변수를 도입하여 $|r|^2 + |t|^2 + e = |r_0|^2 + |t_0|^2 = 1$ 라는 관계를 이용하면 아래 두 관계를 수립할 수 있다.

$$|r|^2 = |r_0|^2 + \varepsilon - e/2, \quad |t|^2 = |t_0|^2 - \varepsilon - e/2 \quad (2.21)$$

따라서 $\varepsilon = 0$ 는 에너지 흡수 또는 소산이 반사와 투과계수에 동등하게 할당됨을 의미한다. 반면, $\varepsilon = e/2$ 는 모든 에너지 소산은 파가 전파될 때 발생한다는 것을 의미한다. 식 (2.19)에 (2.21)을 대입하면, 다음과 같다.

$$\frac{r}{t} = \frac{e/2 - i\sqrt{(|r_0|^2 + \varepsilon)(|t_0|^2 - \varepsilon)} - e/2}{|t_0|^2 - \varepsilon - e/2} \quad (2.22)$$

$|r_0|$ 과 $|t_0|$ 는 일반적으로 고정된 구조물의 경우 속도포테셜을 이용한 기존의 수학적 해로부터 구할 수 있다. 부방파제의 경우 할당율이 보통 어떻게 주어지는 지 연구된 바가 없으나 반사와 투과 계수에 동등하게 할당되지 않을 까 추정된다. 고정판의 경우에는 소산이 반사율에 미치는 영향은 없고 전적으로 투과율의 감소에 영향을 미치는 것으로 관측되었으므로 $\varepsilon = e/2$ 이 된다.

Stiassnie (1984)의 소산을 공식은 단일벽에서 와류의 움직임 때문에 발생하는 에너지 소산계수를 산정하기 위해 사용된다. 그림 2.6은 Stiassnie et al. (1984)의 반사율, 투과율 및 소산율에 대한 실험 결과를 도시한 것이다.

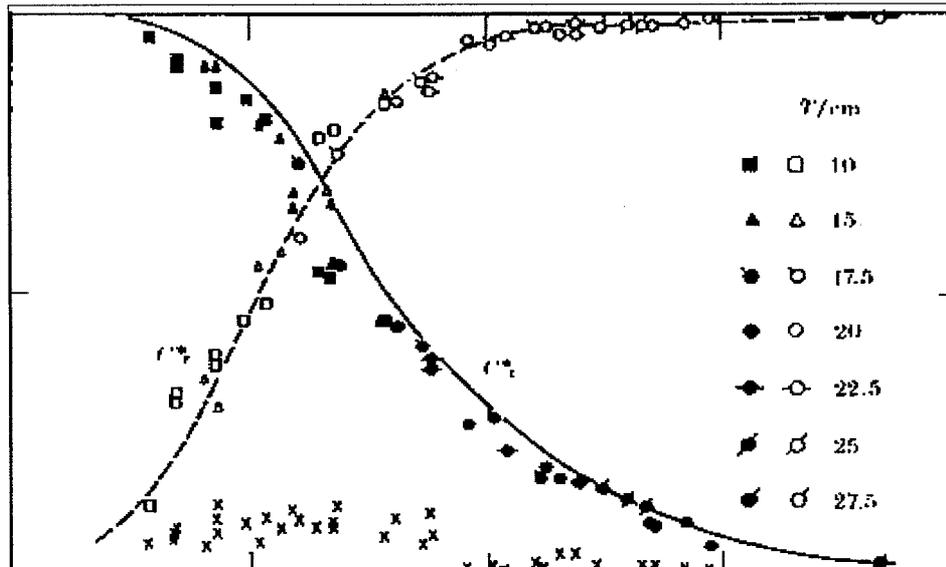
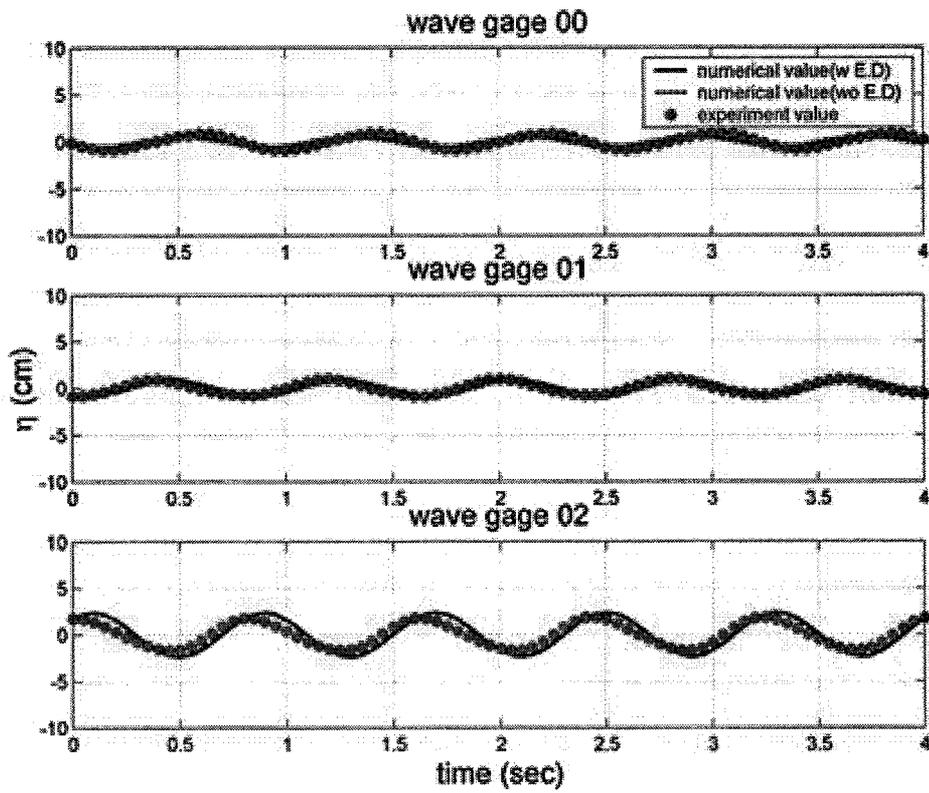


그림 2.6 수직의 얇은 벽에 대한 반사계수와 투과계수.

[Full symbols : 투과, Hollow symbols : 반사, Crosses : 에너지 소산 (Stiasnie at al., 1984)]

또한 다중 산란시 각 벽에서의 반사계수와 투과계수에 대한 아주 간단한 양해법식을 소개한다. 이론해는 그림 2.7에서와 같이 실험결과와 비교된다. 실험은 두 개의 벽에 의해서 보호되는 좁고 길다란 파랑 수조에서 시행되었다. 결과는 에너지 소산효과를 반영하지 않는 경우보다 반영하는 경우 실측치와 비교하여 상당히 근접한 결과를 보였고, 이는 제시한 방법이 에너지 소산을 적절하게 설명해줄 수 있음을 나타낸 것이다. 이상으로 제시된 방법은 임의 소산이나 에너지 흡수 문제에 대해서도 적용될 것이다.

(a)



(b)

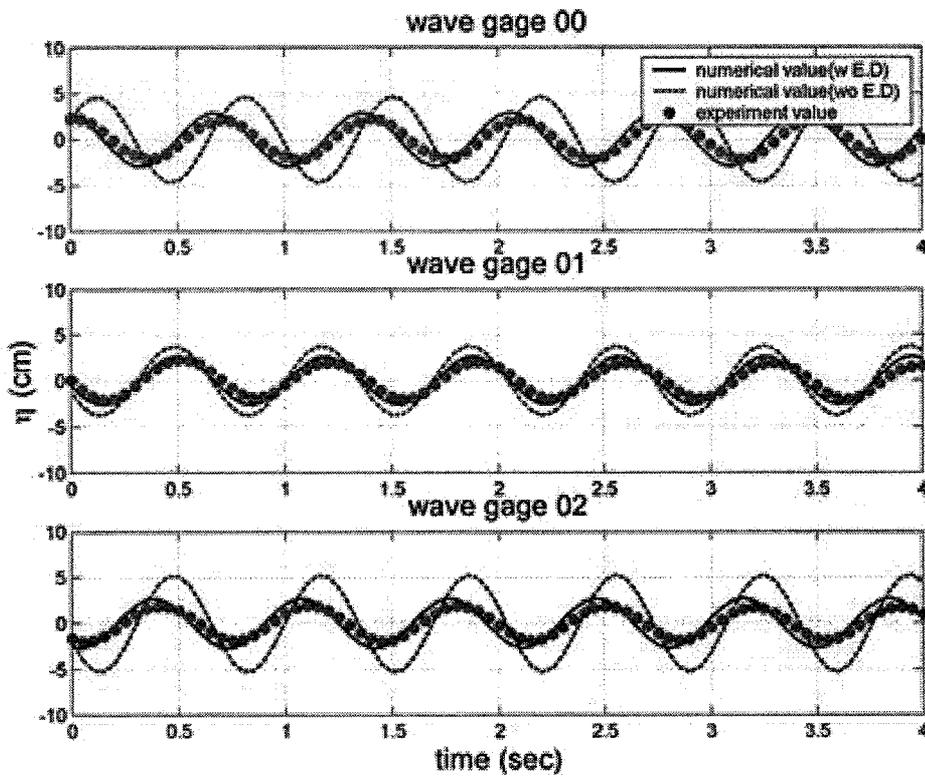


그림 2.7 해석해와 실험관측값의 비교

(a) 주기 0.8초, (b) 주기 0.69초

6. 수직벽에 적용한 환경사 방정식

Berkhoff(1972)의 환경사 방정식은 기존 형태인 타원형 방정식 뿐만 아니라 포물선형 방정식(Radder, 1979)과 쌍곡선형 방정식(Smith와 Sprinks, 1975; Copeland, 1985; Madsen and Larsen, 1987)과 같이 다른 형태의 파랑 방정식의 전개를 위한 지배방정식으로도 사용되어진다. 최근에는 환경사 방정식이 급경사, 파와 구조물의 상호작용, 그리고 비선형 파의 전파 등 여러 목적으로 그 범위를 확대하고 있다.

Smith와 Sprinks(1975)는 식 (2.23)과 같은 시간 의존 환경사 방정식을 제안하였다.

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - \nabla \cdot (CC_g \nabla \eta) + (\sigma^2 - k^2 CC_g) \eta = 0 \quad (2.23)$$

여기서 η 는 수면위치, C 는 파속, C_g 는 군속이며 σ 는 각주파수, k 는 파수이다. 항 내에서는 직립 항만 구조물로 인하여 반사파가 우월하게 형성되므로 경계 조건을 효과적으로 처리하기 위하여 속도 벡터를 매개 변수로 두어 식 (2.23)을 분리한다. 운동학적 자유수면경계조건을 이용하면 $\nabla \eta$ 는 자유수면에서 다음과 같이 정의되는 속도벡터 u_0 로 표현될 수 있다.

$$\nabla \eta = -\frac{1}{g} \frac{\partial \nabla \hat{\Phi}}{\partial t} = -\frac{1}{g} \frac{\partial u_0}{\partial t} \quad (2.24)$$

$\hat{\Phi}$ 는 자유수면에서의 속도포텐셜을 의미한다. 그러므로 식 (2.23)을 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left[\frac{CC_g}{g} \frac{\partial u_0}{\partial t} \right] + [\sigma^2 - k^2 CC_g] \eta = 0 \quad (2.25)$$

식 (2.24)와 조합하면 다음과 같아진다.

$$\frac{\partial u_0}{\partial t} + g \nabla \eta = 0 \quad (2.26)$$

Madsen과 Larsen(1987)이 규칙파에 대해 행했던 것과 같이 $\eta = S \exp(-i\sigma t)$ 으로 $u_0 = U_0 \exp(-i\sigma t)$ 으로 두고 위 방정식을 다음과 같이 재구성할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 S}{\partial t^2} - 2i\sigma \frac{\partial S}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\frac{CC_g}{g} \left(\frac{\partial U_0}{\partial t} - i\sigma U_0 \right) \right] - k^2 CC_g S = S_s \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial U_0}{\partial t} - i\sigma U_0 + g\nabla S = iU_s \quad (2.28)$$

여기서 S_s 는 입사파를 발생시키는 생성항이고, U_s 는 수직벽에 의해 산란되는 파에 적용하기 위한 산란항이다. 이러한 접근법은 주기를 찾기 위한 시간을 절약할 수 있으므로 빠르게 해에 접근할 수 있다. 식 (2.27)과 (2.28)은 Copeland(1985)의 파랑모형과는 달리 균속도로 파 에너지가 전달된다.

생성항인 S_s 는 $\Delta x \times \Delta y$ 격자망에서 입사파 조건 S_I 에 의해서 주어진다.

$$S_s = 2i C_g S_I \frac{\Delta s}{\Delta x \Delta y} \quad (2.29)$$

Δs 는 격자망 내부의 전방파의 폭을 나타내고, S_I 는 입사파고의 함수로서 다음과 같다.

$$S_I = \frac{H_I}{2} \exp\left(i \int k \cos \theta_I dx + i \int k \sin \theta_I dy\right) \quad (2.30)$$

H_I 는 입사파고, θ_I 는 입사파향이다.

얇은 벽에 의한 산란파는 또다른 파의 생성으로 간주된다. 그러나 식 (2.29)과는 달리 그 파의 강도는 미리 정할 수 없고, wave flux, U 에 의해 주어진다. 그래서 산란항인 U_s 는 다음과 같다.

$$U_s = 2i \frac{\gamma}{\sqrt{1-\gamma^2}} CU \frac{\Delta s}{\Delta x \Delta y} \quad (2.31)$$

γ 는 반사계수이고 우변에서 반사계수 γ 에 의해 수직벽의 존재가 인식된다. 식 (2.31)의 분모에 투과율이 있는 이유는 수직벽에서의 wave flux가 투과파의 wave flux를 생성하기 때문이다.

여기서 주어진 환경사 방정식의 수식은 처리의 완벽함을 나타낸다. 지배방정식은 음해법을 이끄는 대략적인 인수분해 기법에 의해서 해결된다. 이 방식은 space-staggered 직사각형 격자에서 정의되는 복소수에 적용된다. 미분방정식을 나타내는 행렬계수들은 tridiagonal matrix를 형성하기 때문에 그것들은 tridiagonal 알고리즘을 통해 해를 찾을 수 있다. flux 변수인 P , Q 는 경계부분과 접해 있고, 경계조건에 따라 격자의 중앙에 위치한 S 를 통해 나타낼 수 있다.

그림 2.8은 주어진 반사계수에 대한 파의 반사정도를 나타낸다. $x=0$ 에 위치한 반사율 0.7의 수직벽에 대하여 반사파와 투과파의 공간적 변화량은 그림 2.9에서 나타난다. 반사파와 투과파의 성분 분해는 Lee(1998)의 접근법에 의해 해결되었다.

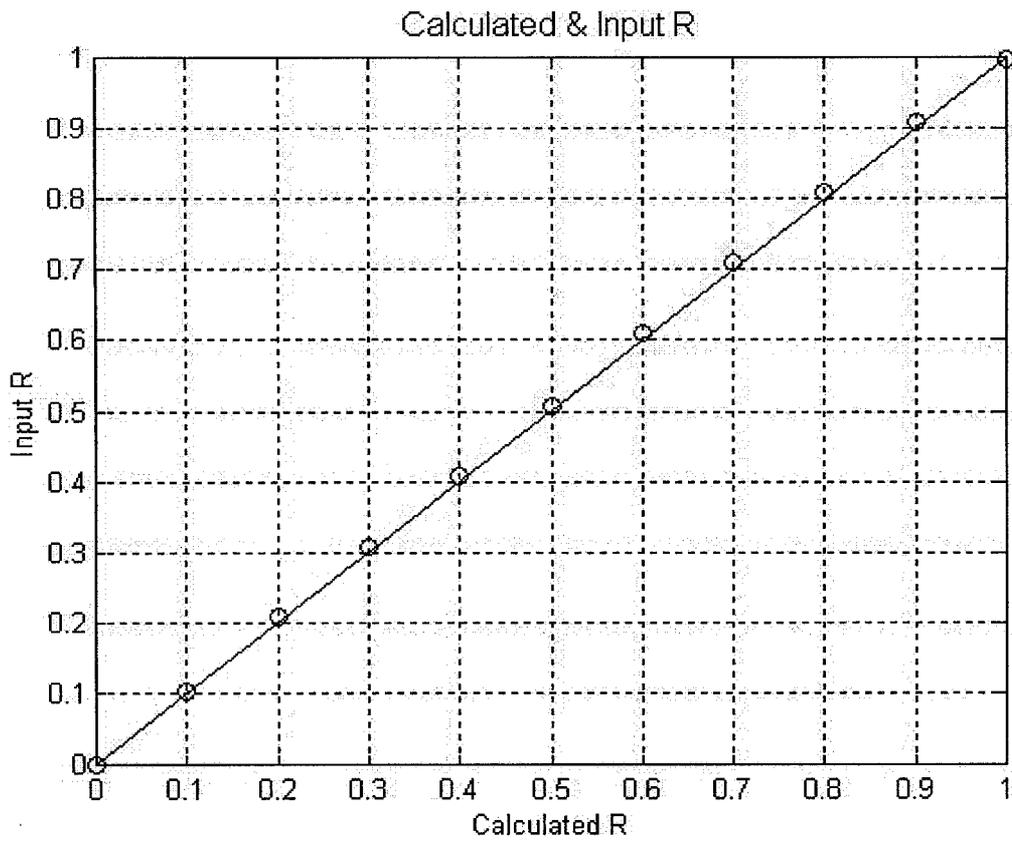


그림 2.8 수직벽에 의한 파의 반사율 Test

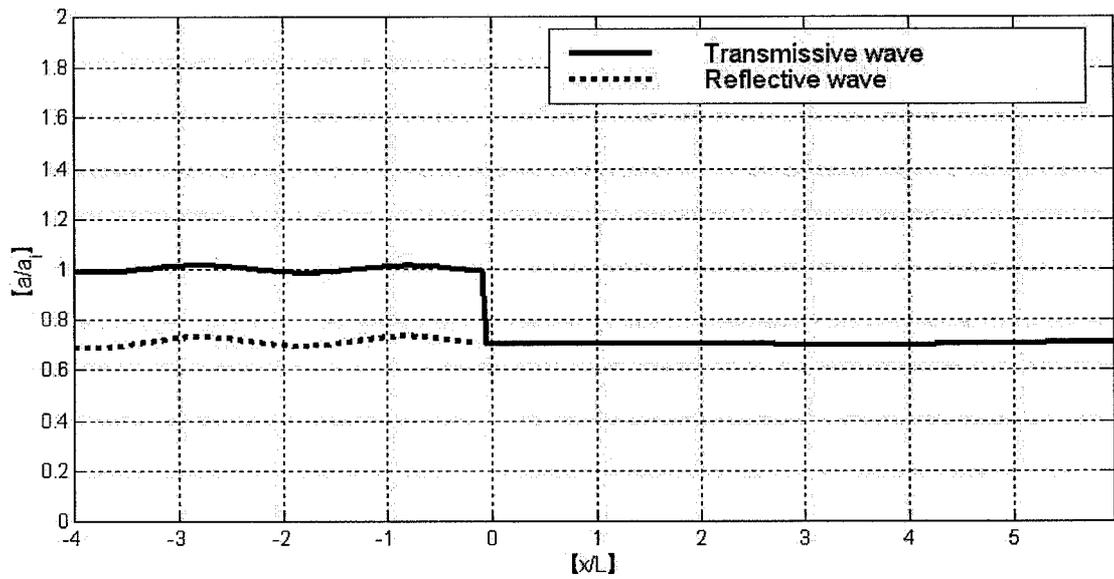
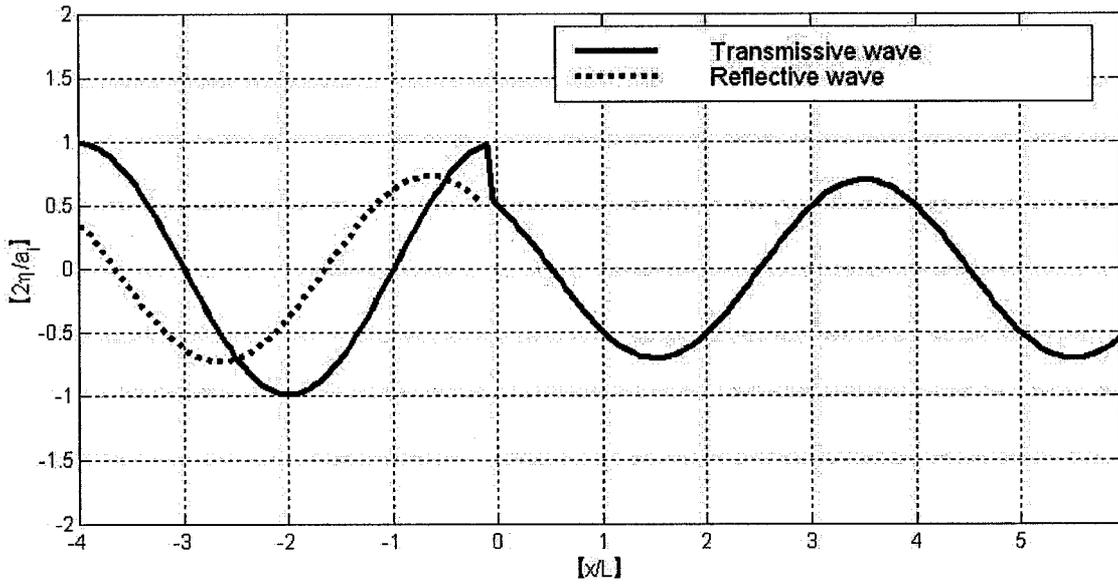


그림 2.9 ($x=0$)에서 수직벽에 대한 반사파와 투과파 (파의 종단면 (위), 파고 (아래))

일정 깊이의 직립 수면 거치 방파제가 일정 간격으로 2, 3개 놓인 경우 이론치와 비교결과
 파는 다음과 같다.

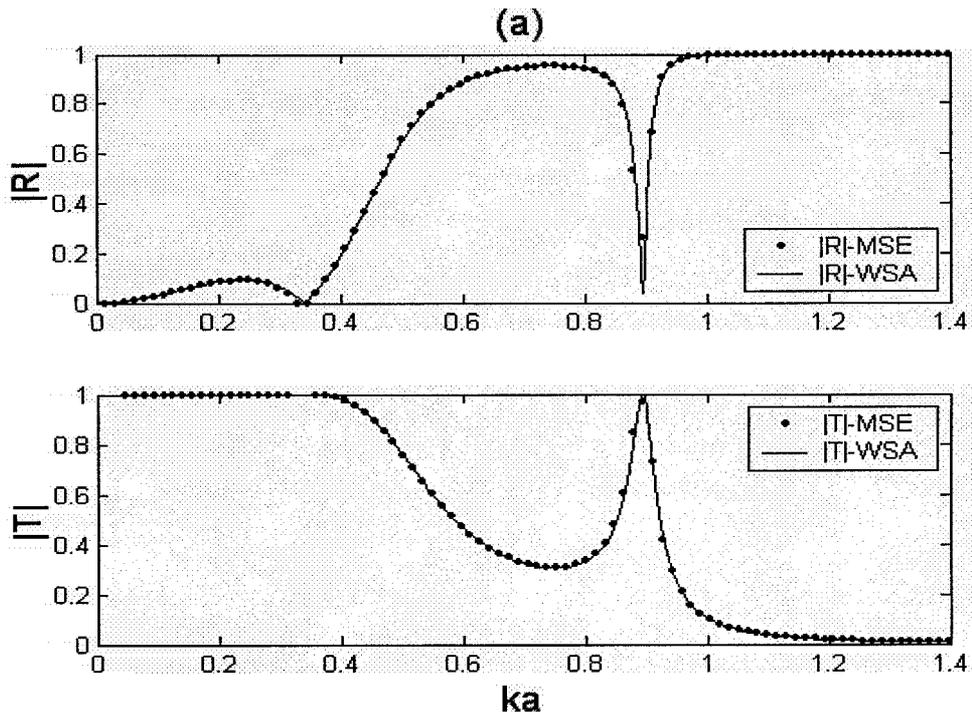


그림 2.10 2개의 방파제에 대한 비교 (WSA:wide space approximation; MSE: mild-slope equation)

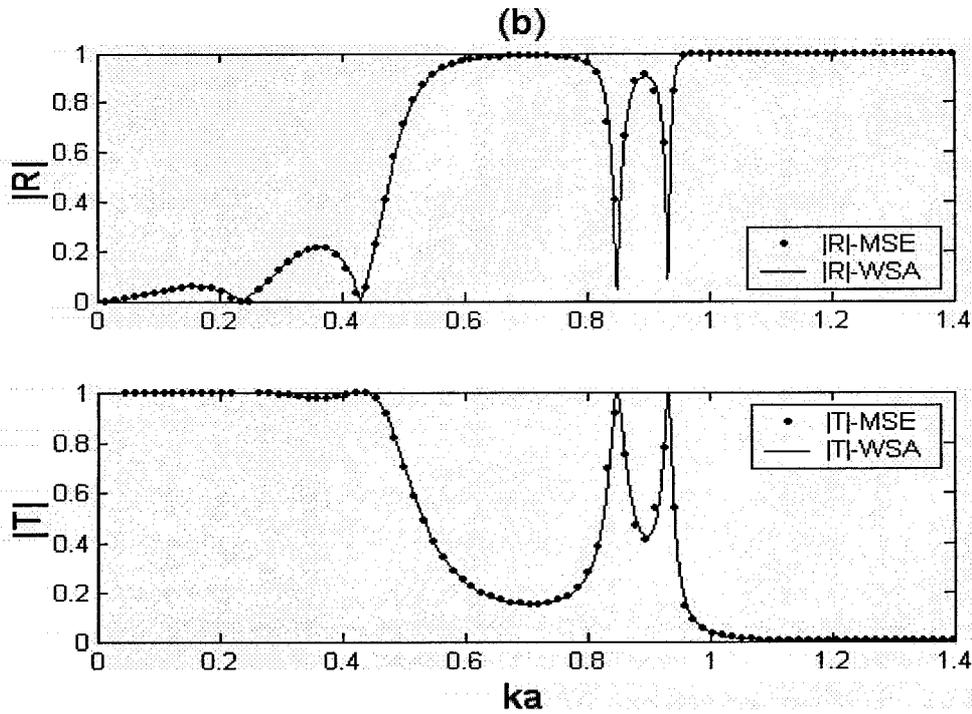


그림 2.11 3개의 방파제에 대한 비교 (WSA:wide space approximation; MSE: mild-slope equation)

7. 빗각 입사에 대한 검토

빗각 입사(oblique incident)시 입사각에 따른 수직벽의 반사율 및 투과율을 일일이 산정한다는 것은 실지형의 모형 운용시 상당히 비효율적인 방법이다. 따라서 정면으로 입사하는 경우에 대한 투과율과 반사율을 이용하여 입사각 정보로부터 결정됨을 보일 수 있으면 바람직하다. 평면파 근사 이론을 이용하여 반사율이 작은 경우의 유공성 수직벽에 의한 반사율 $|R|$ 은 다음과 같이 근사적으로 산정할 수 있다.

$$|R| = |R_o| \cos \theta \quad (2.32)$$

여기서 하첨자 ‘o’는 normal incident에 대한 값을 의미한다.

빗각 입사에 대한 심해 조건에서의 이론적인 정확해와 투과성 수직벽의 경계조건을 적용하여 환경사 방정식으로부터 얻은 모형 결과와 비교하면 표 2.1과 같이 상당히 유사한 결과를 얻는다. 수직벽이 존재하는 경계에서의 투과율과 반사율은 파랑이 정면으로 입사할 때의 값이 적용되었다. $\mu=0.6$ 인 경우 입사각 30도와 60도에 대한 주기 0.5초 파랑의 위상도와 등파고도가 그림 2.12-1과 2.12-2에 각각 도시되었다.

표 2.1 빗각 입사에 대한 이론해와 수치 모형 결과와의 비교

$\mu \backslash \theta$	0	30		60		75	
	이론해	이론해	수치해	이론해	수치해	이론해	수치해
0.2	0.066	0.057	0.058	0.033	0.035	0.017	0.021
0.4	0.282	0.243	0.245	0.140	0.131	0.072	0.080
0.6	0.603	0.539	0.559	0.334	0.352	0.178	0.192
0.8	0.845	0.797	0.807	0.583	0.579	0.343	0.365
1.0	0.947	0.925	0.914	0.794	0.823	0.551	0.548

여기서 $\mu = \omega^2 h / g$

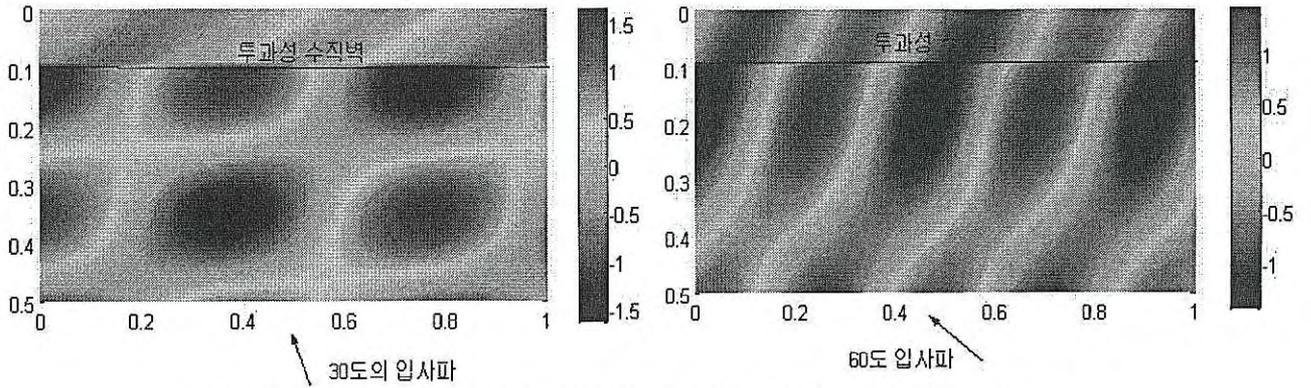


그림 2.12-1 $\mu=0.6$ 인 경우 입사각 30도(a)와 60도(b)에 대한 0.5초 파랑 위상도

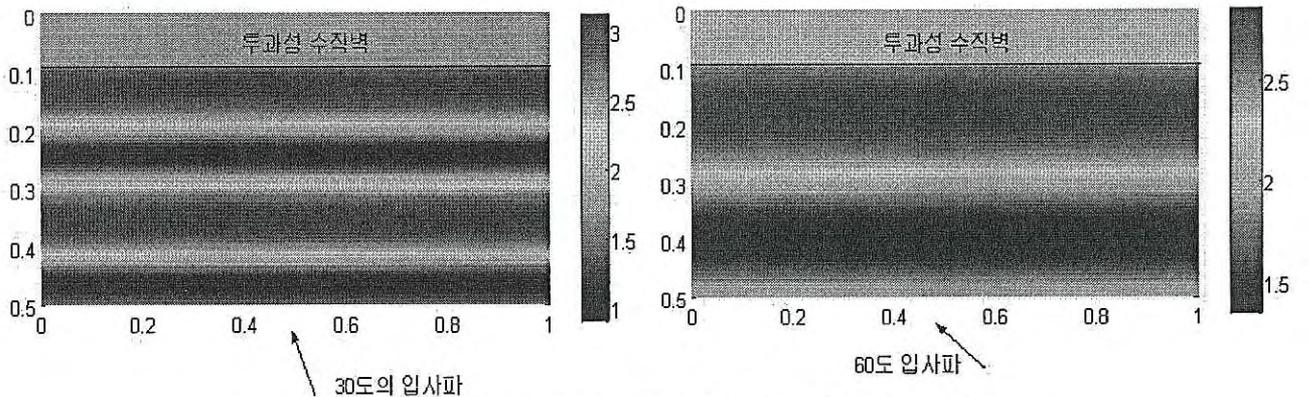


그림 2.12-2 $\mu=0.6$ 인 경우 입사각 30도(a)와 60도(b)에 대한 0.5초 등파고선도

8. 직사각형 항에서의 적용 (부진동 해석)

가. 분석해

그림 2.13에서와 같은 직사각형 항에서의 적용을 위해서 부진동 문제를 고려해야 한다. 항 밖에서의 해와 항 내에서의 해 Lee(1971) 를 항 입구에서의 경계조건을 이용해서 결합한다. 수심은 전 지역에서 일정하다고 가정한다. $(b_0, 0)$ 부터 $(b, 0)$ 까지의 벽이 a 라는 수심만큼 잠겨 있다면 벽이 없을 때와 비교했을 때, 항 내에서의 반응은 많이 달라질 것으로 예상된다. 변수 분리법을 이용하고 항 경계조건에 따라 flux가 없다고 가정하여 정규 입사파에 대한 Helmholtz 방정식의 해는 다음과 같은 무한급수 형태로 나타내어진다.

$$f_2(x, y) = \sum_{m=0}^{\infty} A_m \cos \frac{m\pi}{b} x \cosh \beta_m (y+l) \quad (2.33)$$

$\beta_m = [(m\pi/b)^2 - k^2]^{1/2}$ 일 때, Fourier cosine 변환법에 의해서 A_m 은 다음과 같아진다.

$$A_0 = - \frac{\int_0^b \frac{\partial f_2}{\partial y}(x, 0) dx}{bk \sin kl} \quad (2.34a)$$

$$A_m = - \frac{\int_0^b \frac{\partial f_2}{\partial y}(x, 0) \cos \frac{m\pi}{b} x dx}{b\beta_m \sinh \beta_m l}, \quad (m=1, 2, 3, \dots) \quad (2.34b)$$

항 바깥지역의 해로부터 항 입구에서의 파랑함수를 구하면 다음과 같아진다. Lee(1969)

$$f_1(x, 0) = 1 + \left(\frac{i}{2}\right) \int_0^b \frac{\partial f_3}{\partial y}(x_o, 0) H_0^{(1)}(k|x-x_o|) dx_o \quad (2.35)$$

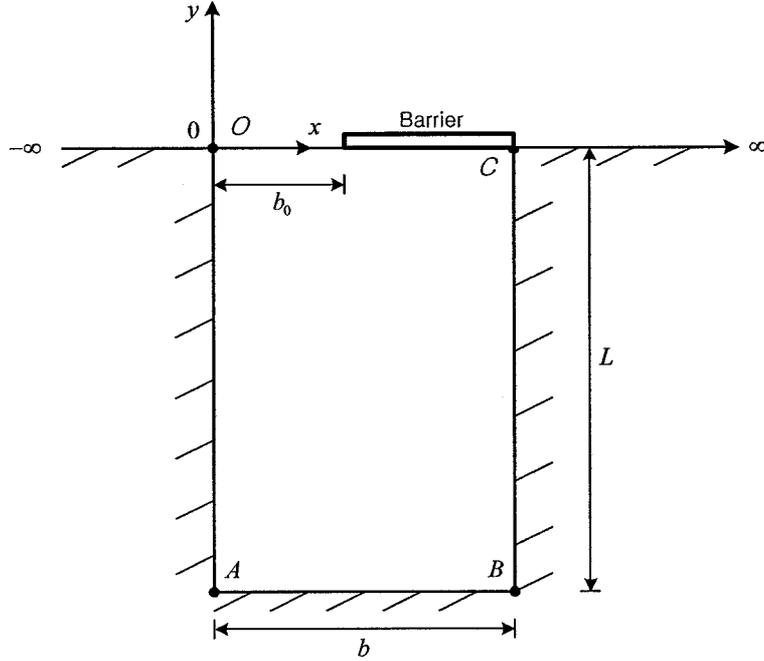


그림 2.13 직사각형 항의 개략도

항 입구에서의 두 해는 다음과 같이 합쳐질 수 있다.

$$f_1(x, 0) - f_2(x, 0) = 0 \quad 0 \leq x \leq b_0 \quad (2.36)$$

그리고 만약 지역적 효과를 무시하고 전파만을 고려한다면, 벽에서 항 내외의 파랑함수 차는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$f_1(x, 0) - f_2(x, 0) = 2 \frac{|r|}{k|t|} \frac{\partial f_2}{\partial y}(x, 0) \quad b_0 \leq x \leq b \quad (2.37)$$

반사율 $|r|$ 은 eigenfunction expansion method에 의해 계산된다. 만약 입구 손실 효과를 고려한다면, 식 (2.36)과 (2.37)의 우변을 추가해야 할 것이다 (Unluata and Mei, 1975; Murakami and Noguchi, 1977). 입구의 폭과 벽의 길이는 파장에 비해서 작다고 가정한다면 항 입구에서의 파랑함수와 벽에서의 파랑함수는 각각 상수 C_e 와 C_b 로 유도된다. 그러면 f_1 과 f_2 는 다음과 같다.

$$f_1(x, 0) = 1 + B_e(x, 0)C_e + B_b(x, 0)C_b \quad (2.38a)$$

$$f_2(x, y) = [b_0 S_0(x, y) + S_m(x, y)] C_e + [(b - b_0) S_0(x, y) - S_m(x, y)] C_b \quad (2.38b)$$

여기서,

$$B_e(x, 0) = -\frac{i}{2} \int_0^{b_0} H_0^{(1)}(k|x-x_0|) dx_0$$

$$B_b(x, 0) = -\frac{i}{2} \int_{b_0}^b H_0^{(1)}(k|x-x_0|) dx_0$$

$$S_0(x, y) = -\frac{\cos k(y+l)}{bk \sin kl}$$

$$S_m(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2 \sin \frac{m\pi d}{b} \cos \frac{m\pi}{b} x \cosh \beta_m(y+l)}{m\pi \beta_m \sinh \beta_m l}$$

이다.

식 (2.38a)와 (2.38b)를 식 (2.36)과 (2.37)에 대입하면 C_e 와 C_b 는 다음 행렬식을 풀어서 해결 할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} b_0 \bar{S}_0 + \frac{\bar{S}_m}{b_0} - \bar{B}_e^e & (b - b_0) \bar{S}_0 - \frac{\bar{S}_m}{b_0} - \bar{B}_b^e \\ b_0 \bar{S}_0 - \frac{\bar{S}_m}{b - b_0} - \bar{B}_e^b & (b - b_0) \bar{S}_0 + \frac{\bar{S}_m}{b - b_0} - \bar{B}_b^b + 2 \frac{|r|}{k|t|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_e \\ C_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.39)$$

$$\bar{B}_e^e = \frac{1}{b_0} \int_0^{b_0} B_e(x, 0) dx$$

$$\bar{B}_e^b = \frac{1}{(b - b_0)} \int_{b_0}^b B_e(x, 0) dx$$

$$\overline{B}_b^e = \frac{1}{b_o} \int_0^{b_o} B_b(x,0) dx$$

$$\overline{B}_b^b = \frac{1}{(b-b_o)} \int_{b_o}^b B_b(x,0) dx$$

$$\overline{S}_0 = -\frac{\cos kl}{bk \sin kl}$$

$$\overline{S}_m = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2b \sin^2 \frac{m\pi b_o}{b}}{(m\pi)^2 \beta_m \tanh \beta_m l}$$

그림 2.13은 gap을 포함한 벽으로 완벽히 보호되는 직사각형 항의 이론적 해를 도시하였다. 파수의 범위를 감안하여 충분한 정확도를 갖도록 $M=10$. 항의 폭은 2.38in, 길이는 12.25in, 수심은 0.844ft로 Lee (1971)의 실험과 같게 하였다. 이 그림에서 알 수 있는 것은 radiation damping의 감소로 인해 잠금깊이가 증가함에 따라 증폭계수가 증가하는 것이다. 이러한 경향은 주기가 커지면 더 확연해 진다. anti-resonance 영역은 벽의 투과가 막히기 때문에 증폭계수가 감소하지만, 완벽하게 차단된 자연수조모형근저에서는 sharp한 resonance가 발생한다. 증폭계수는 항의 파고와 항내 파고의 비로 정의 된다. 그림 2.14는 잠금깊이의 증가에 따라 peak resonance에서 kL 값의 감소경향을 보여준다.

Eigenfunction expansion 방법(Abul-Azm, 1993)을 이용하여 얻어진 반사율과 투과율은 그림 2.15에 도시되었다. 여기서 우리는 이 직사각형 항의 지역적 영향을 무시할 수 있는 지를 실험해본다. 그림 2.16-1은 error contour와 파장 (L/L_w)에 의해서 규정되는 상대적인 항의 길이를 점선 곡선으로 나타냈다.

부분적으로 보호되는 항을 생각해보자. 그림 2.16-2는 3가지 잠금 깊이 ($a/h=0.25, 0.5, 0.75$) 에 대한 경우를 보여준다. 기하학적으로, 완전히 보호되는 항의 경우와 차이점은 항의 폭이 2배이고 항 입구가 5분의 1이라는 것이다. 그 감소는 더 큰 파수영역에서 더 현격해진다.

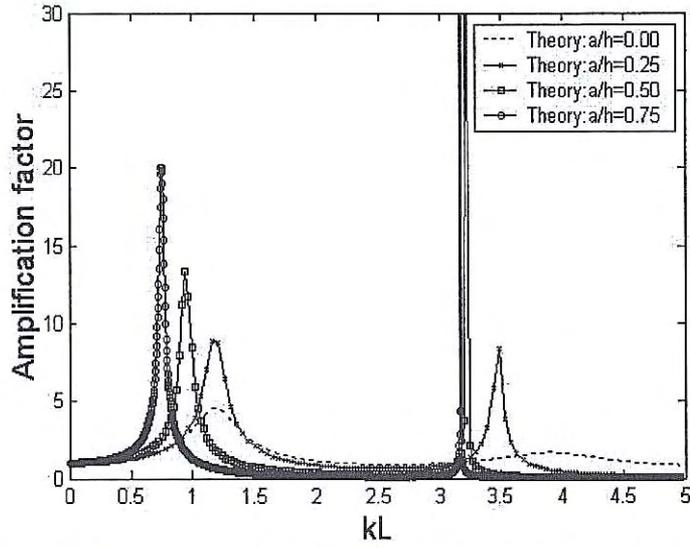


그림 2.14 Response curves of a rectangular harbor fully protected by a barrier with a gap.

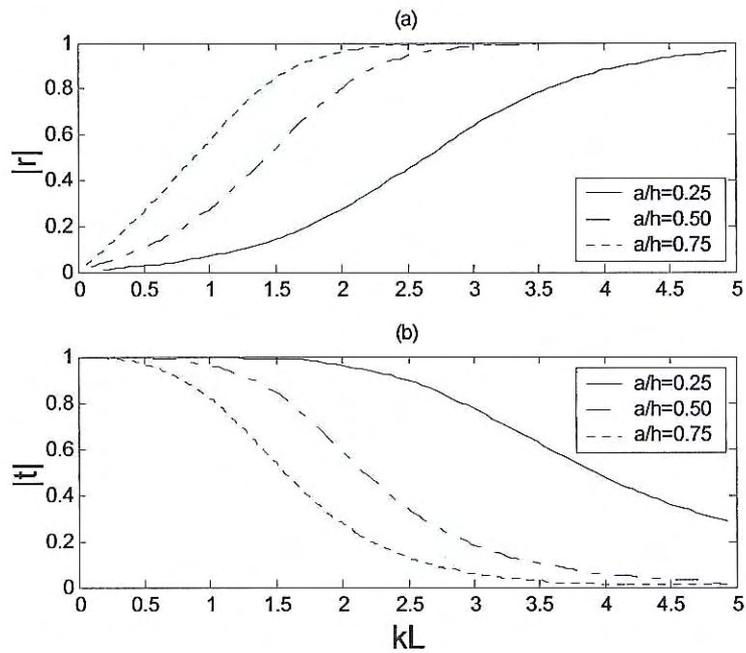


그림 2.15 Coefficients of reflection and transmission obtained by an eigenfunction expansion method; (a) reflection coefficient; (b) transmission coefficient.

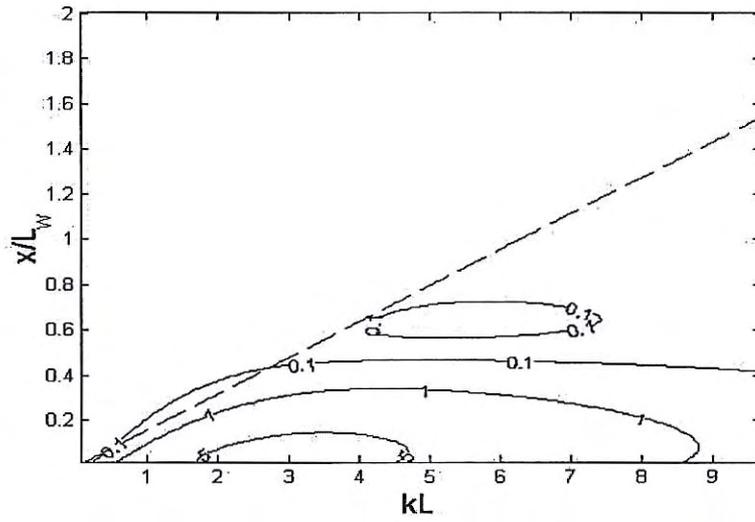


그림 2.16-1 Relative harbor length plotted by a dotted line on error contours for $a/h=0.5$.

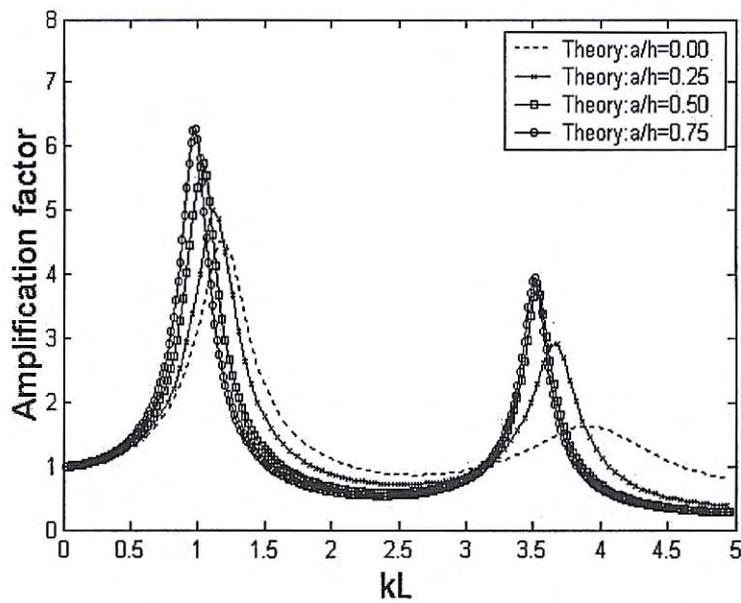


그림 2.16-2 Response curves of a rectangular harbor partly protected by a barrier ($b_0/b=1/5$).

나. 환경사방정식에 의한 수치해

정규 입사파에 대하여 2차원영역에서 환경사방정식에 의한 접근을 해본다. 그림 2.17은 완전히 열려있는 항에 대한 수치해석 결과와 이론해의 비교를 나타낸다. 아주 잘 일치한다. 그림 2.18부터 2.20까지는 벽에 의해 완전히 차단된 항에서의 이론해와 수치해석해 비교이다.

수치해석해는 이론해와 거의 일치한다. 수치해석은 $\Delta x = 0.467 \text{ in}$ (항폭의 1/5), $\Delta y = 0.6125 \text{ in}$ (항 길이의 1/20)의 격자를 사용했다. $NX=59$, $NY=50$ 의 메쉬를 이용해 계산하였다. 그래서 계산영역은 $-1.0491 \leq x/L \leq 1.2434$, $-1 \leq y/L \leq 1.5$ 이다. 시간 간격은 $dt = 0.5/c$ 이다. 여기서 c 는 phase velocity 이고, 결과는 150 time steps가 지난 후의 값들이다.

부분적으로 차단된 항의 경우는 그림 2.21부터 2.23까지 비교되어 있다. 이 계산에서 항 폭 b 는 4.76 in 로 완전히 차단된 항의 경우보다 두 배 긴 값이다. $NX=60$, $NY=50$ 의 메쉬를 이용했다. 그래서 x 축의 계산영역이 $-0.9714 \leq x/L \leq 1.36$ 으로 바뀌었다. 점 A와 점 B의 차는 kL 이 6보다 큰 값이므로 현격하다고 볼 수 있다. $kL=9.07$ 에 대한 파고분포를 보여주는 수치해석 결과는 그림 2.24의 (a)에 제시되어 있다. 이에 대한 이론해는 2.19b에 제시되어 있다. 비록 수치해석상에서 상수 C_e 와 C_b 의 값을 가정했지만 두 경우 모두 여전히 적절한 분포형태를 나타낸다. 그림 2.12에서와 같이 점 A와 점 B는 후방의 두 모서리를 말하고 점 O와 점 C는 입구 부분의 두 모서리를 말한다. 이 파수영역에서, 점 B의 파고는 점 A에서의 파고 보다 더 큰 것으로 나타났다. 이는 비록 점 A가 항 입구를 통하여 직접적으로 충격을 받지만 벽으로부터의 공명효과가 점 B에 영향을 주기 때문이다.

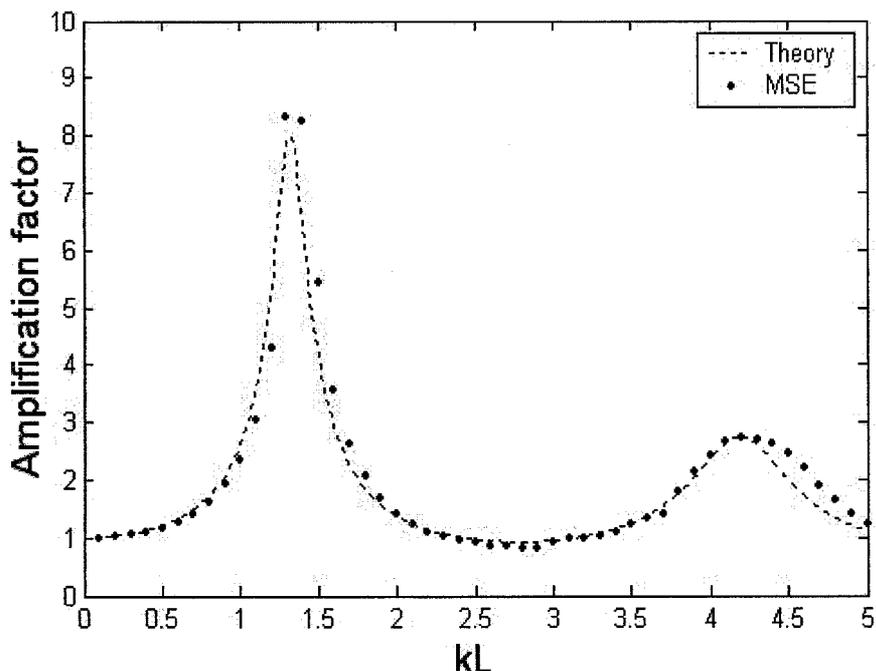


그림 2.17 Comparison between theoretical and numerical results calculated without a barrier.

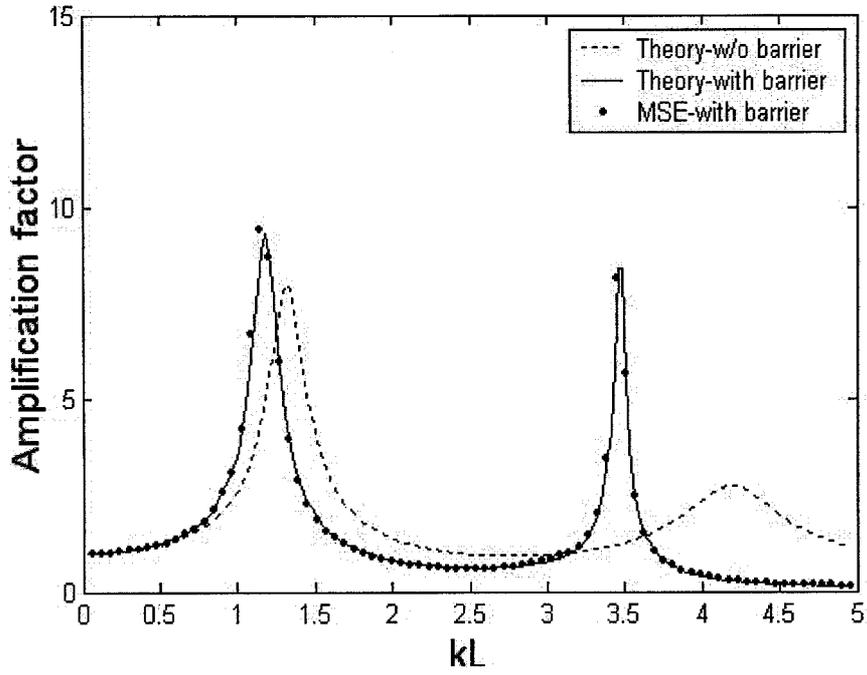


그림 2.18 Comparison between theoretical and numerical results calculated for $a/h=0.25$.

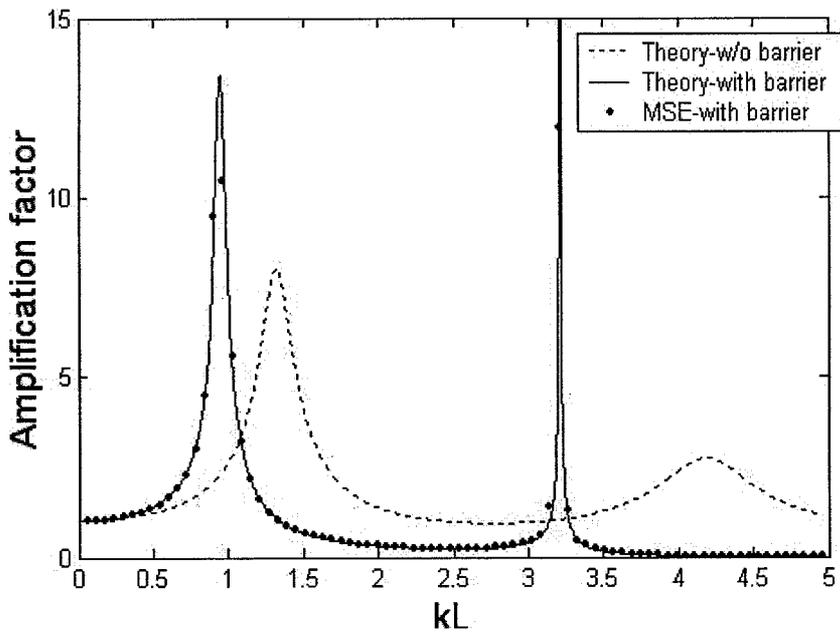


그림 2.19 Comparison between theoretical and numerical results calculated for $a/h=0.5$.

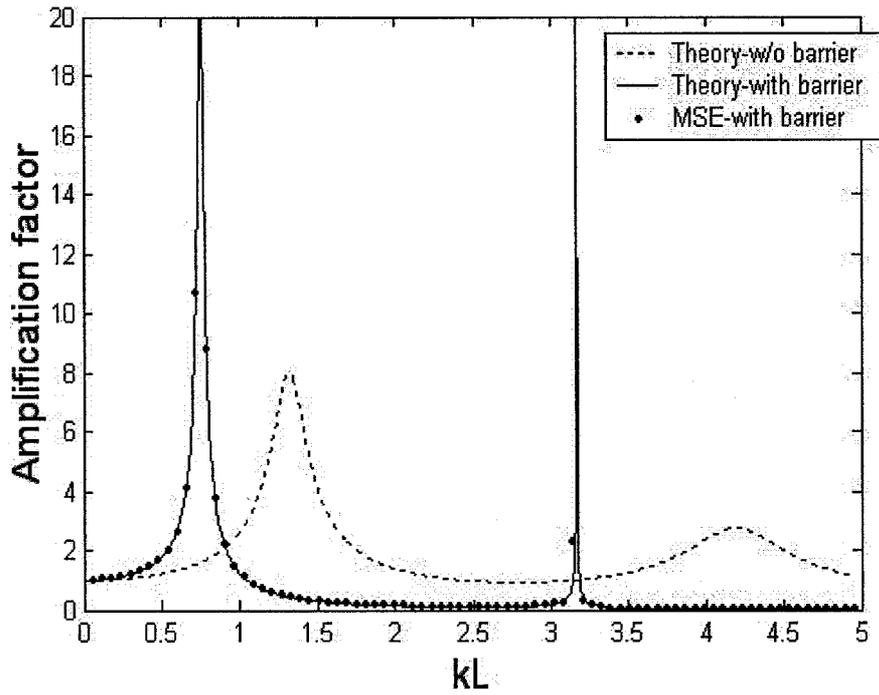


그림 2.20 Comparison between theoretical and numerical results calculated for $a/h=0.75$.

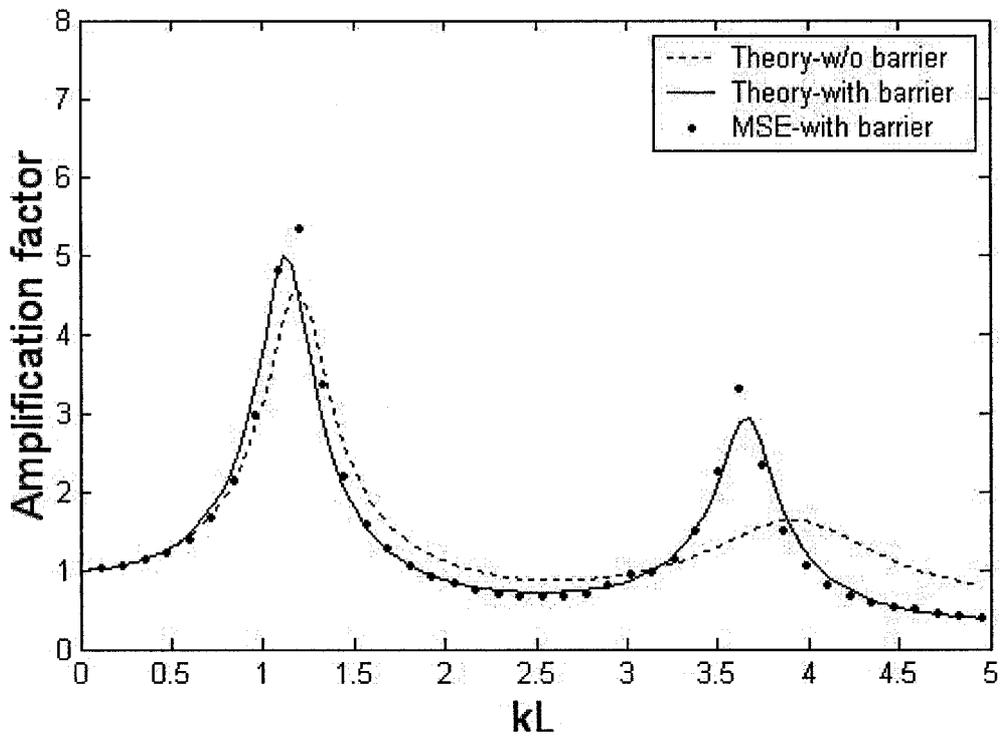


그림 2.21 Comparison between theoretical and numerical results calculated for $a/h=0.25$ for the partly protected harbor.

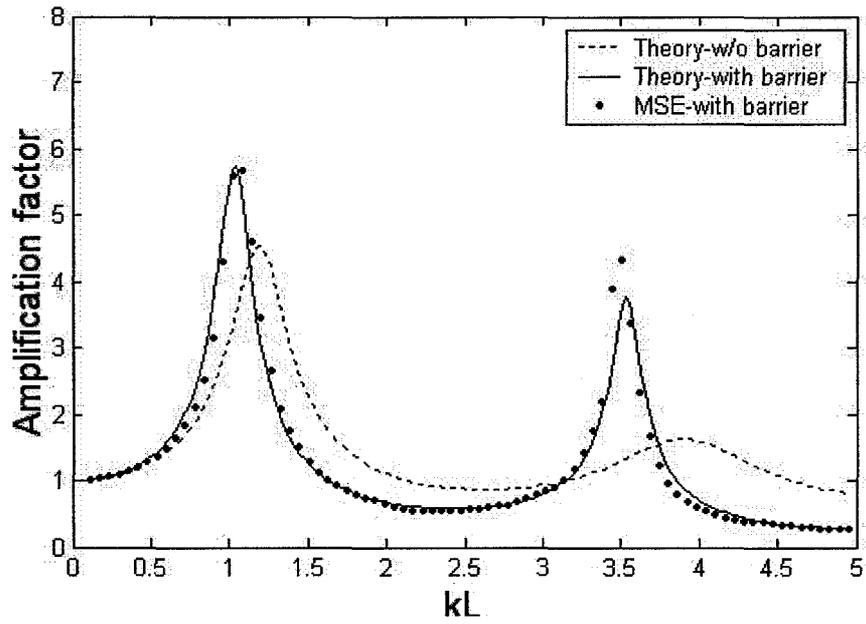


그림 2.22 Comparison between theoretical and numerical results calculated for $a/h=0.50$ for the partly protected harbor.

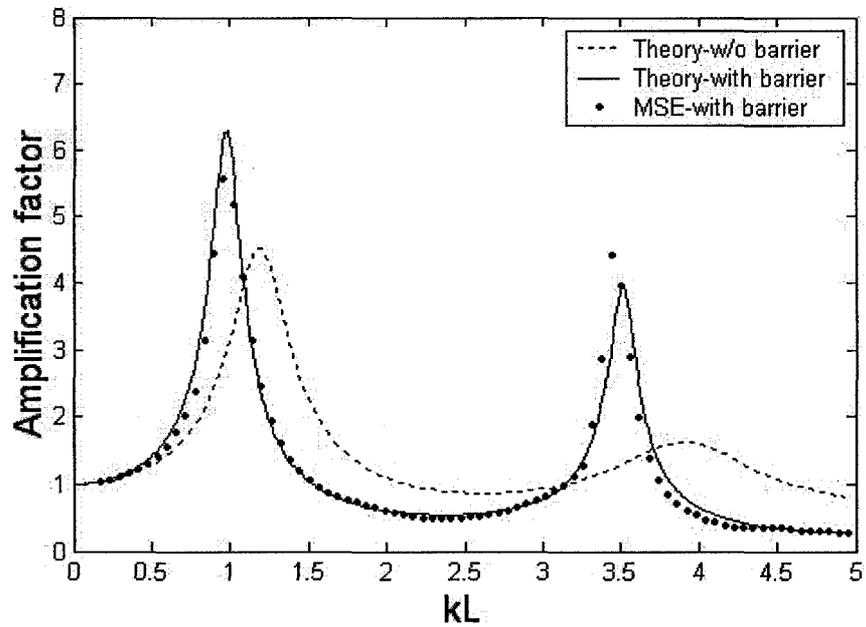


그림 2.23 Comparison between theoretical and numerical results calculated for $a/h=0.75$ for the partly protected harbor.

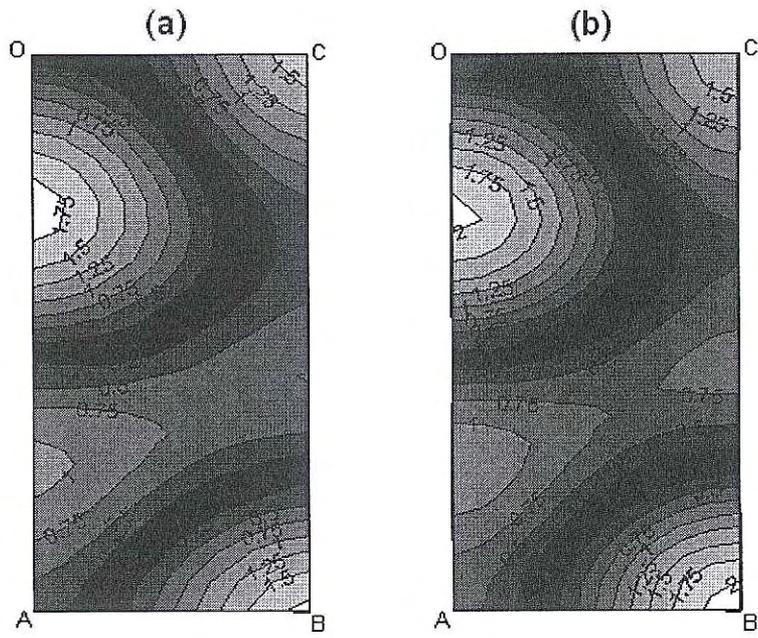


그림 2.24 Comparison of wave height distribution for $kL=9.07$ and $a/h=0.25$:
 (a)numerical result (b)theoretical result.

제3절 다열 커튼월-파일 방파제에 의한 산란파 영향 평가를 위한 3차원 수리실험 (SPIV법 이용) 실시

수치모형의 검증을 위해서 수치해와 수리실험결과를 비교하였다. 이 실험의 주요 착안점은 수직벽을 통하여 항내로 투과되는 파를 관찰하고 측정하는 것이다. 실험은 성균관대학교 수리실험실의 파랑수조에서 진행되었으며 수조는 깊이 50cm, 폭 40cm, 길이 12m이고 관찰하기 용이하도록 바닥과 벽면은 모두 유리로 되어 있다. 수조의 양 끝부분에는 각각 piston-type의 wave generator와 경사 1/19 정도의 beach로 구성되어 있다. 입자의 움직임 궤도가 공간적으로 어떠한 분포를 갖는지 관측하기 위해서 PIV (Particle Image Velocimetry)를 사용하였다. 기록은 50mm Nikon 렌즈의 SMD-1M60 CCD 카메라를 이용하였다. 자료 저장은 CCD 카메라를 통해 1024×1024 해상도의 흑백 사진을 기록하도록 AM-MTD frame grabber를 이용하였다.

수리실험은 표 3.1에서와 같이 10가지 경우 (2개의 파랑조건과 5개의 수직벽 조건의 경우)에 대해서 진행되었다. 그림 3.1에 수리실험을 위한 배치도의 모습이 소개되어 있다. 각 경우에 대한 실험은 정확성을 위해 두 번 이상씩 관측되었으나 얻어진 자료에서 큰 산란은 발견되지 않았다. 입사 파고는 파고의 높이가 너무 작아서 wave gauge에 의해 탐지될 수는 없어서 파랑이론에 의해 계산되었다. 일련의 실험은 파랑 타원도를 그려 수치 모형과 비교되었다. 실험에 사용된 모형항의 모습이 그림 3.2부터 그림 3.4까지 정리되어 있다. 그리고 커튼월-파일 방파제의 파일 부분의 유공율(porosity) $r=a/A$ 이며 이에 대한 정의가 그림 3.5에 도시되었다.

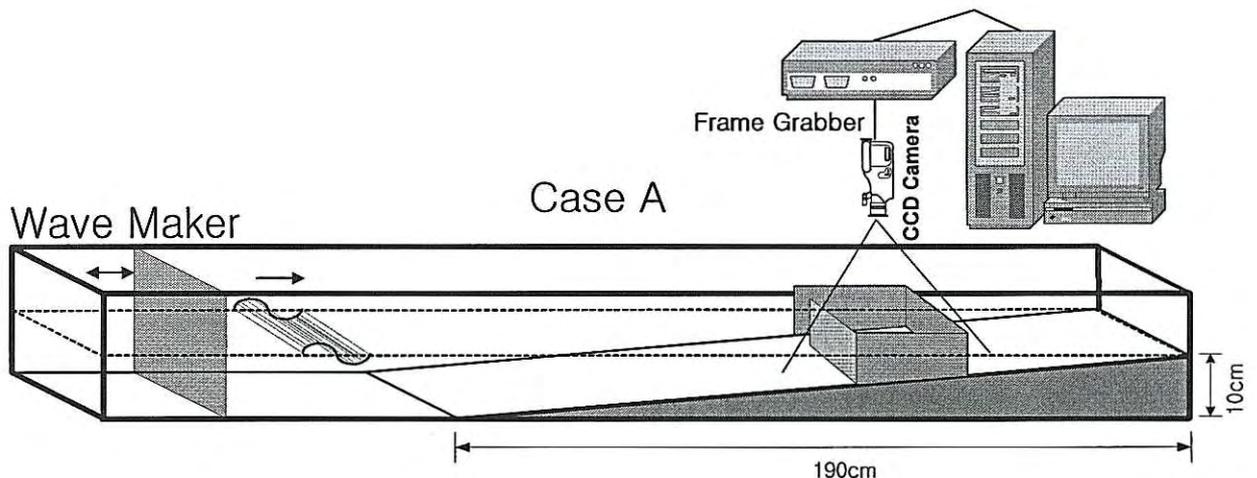


그림 3.1 PIV System을 위한 실험 구성

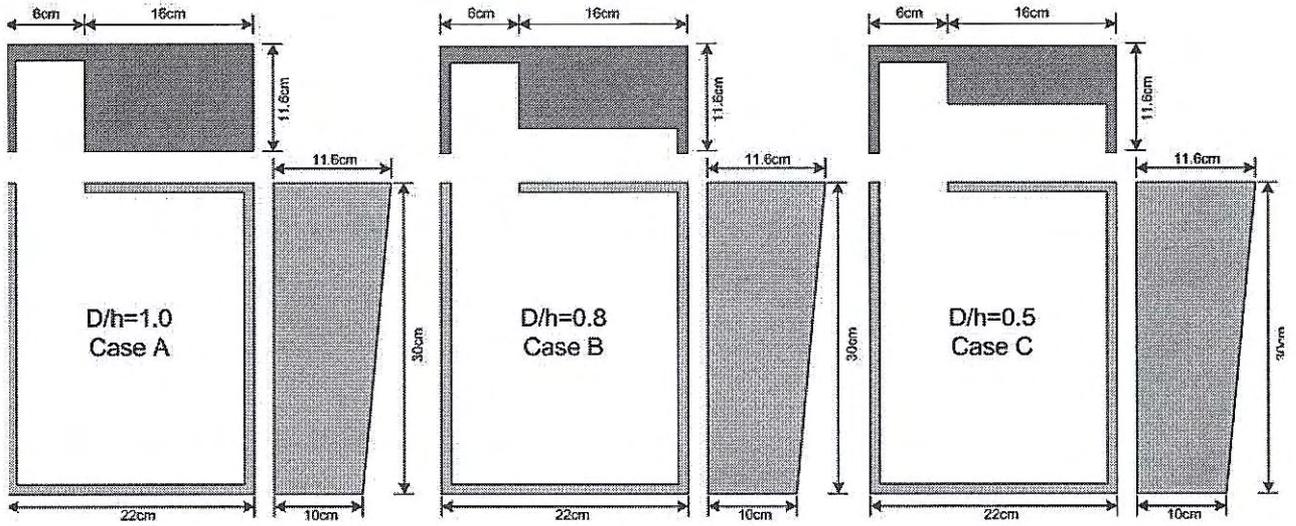


그림 3.2 Case A, B, C 각각의 경우 모형 항의 모습

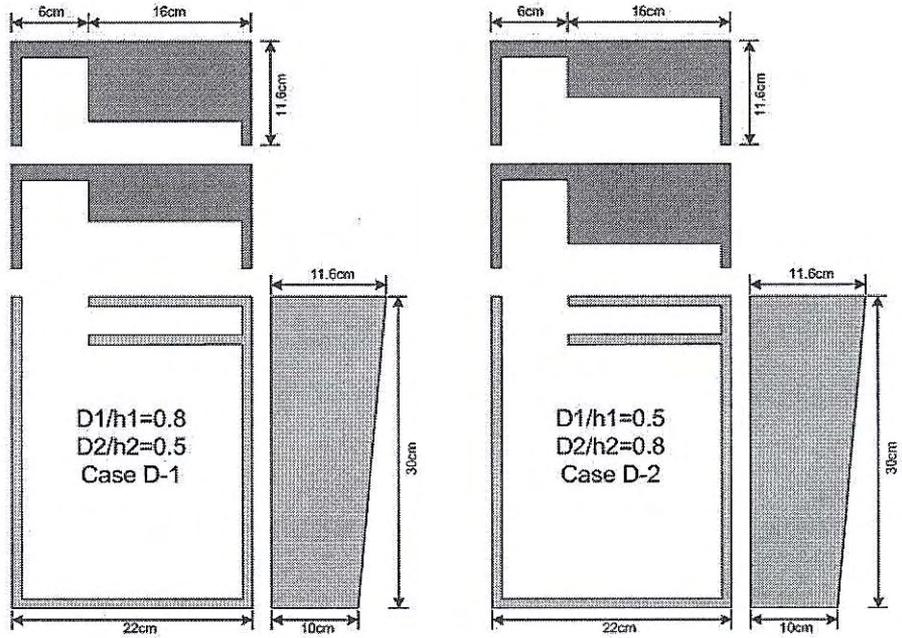


그림 3.3 Case D 각각의 경우 모형 항의 모습

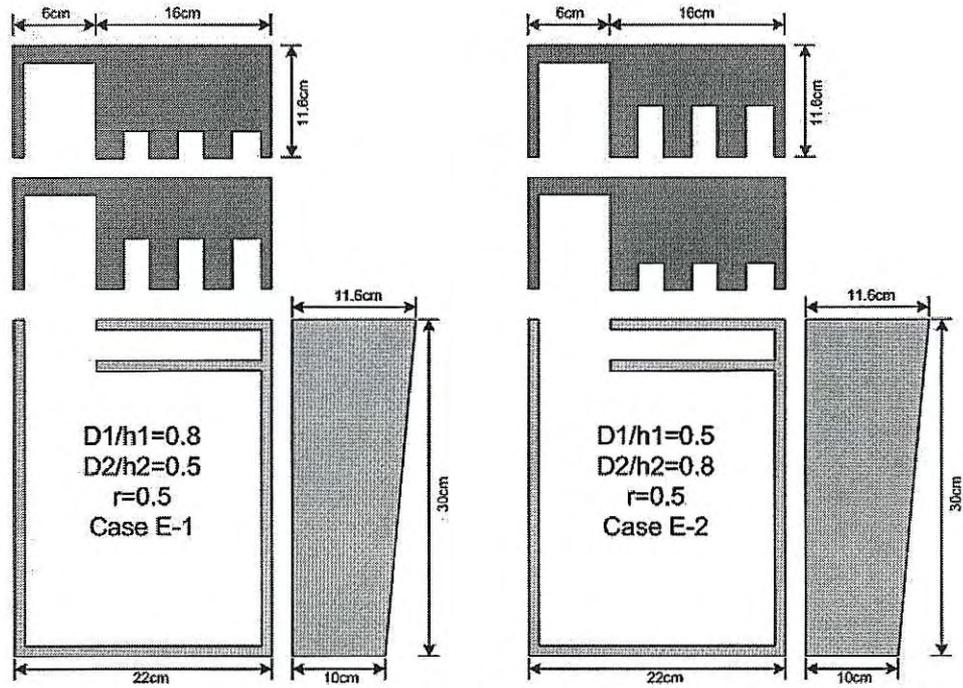


그림 3.4 Case E 각각의 경우 모형 항의 모습

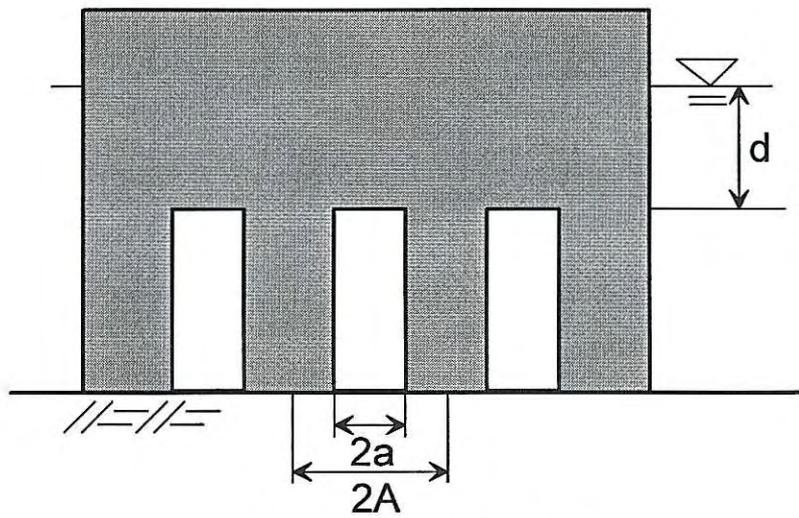


그림 3.5 유공율($r=a/A$)에 대한 정의도

표 3.1 실험 조건 표

Case	D/h	r	T (sec)
Case A-1 Case A-2	1.0	1.0	0.8 0.9
Case B-1 Case B-2	0.8	1.0	0.8 0.9
Case C-1 Case C-2	0.5	1.0	0.8 0.9
Case D-1 Case D-2	D1/h1=0.8, D2/h2=0.5 D1/h1=0.5 D2/h2=0.8	1.0	0.8
Case E-1 Case E-2	D1/h1=0.8, D2/h2=0.5 D1/h1=0.5 D2/h2=0.8	0.5	0.8

제4절 3차원 수리실험과 수치모형 결과와의 비교

유공율이 1인 경우 Kriebel과 Bollmann (1996)의 결과를 이용하였고 에너지 산란율은 심해 조건에서 얻은 Stiasnie et al.(1984)의 실험 결과보다 다소 큰 값을 사용하였다. 유공율이 0.5인 커튼월 파일 수직벽의 경우는 1년차 과제의 연구결과인 Suh et al.(2006)의 결과를 이용하였다. 그 결과를 정리한 것이 표 4.1에 제시된다.

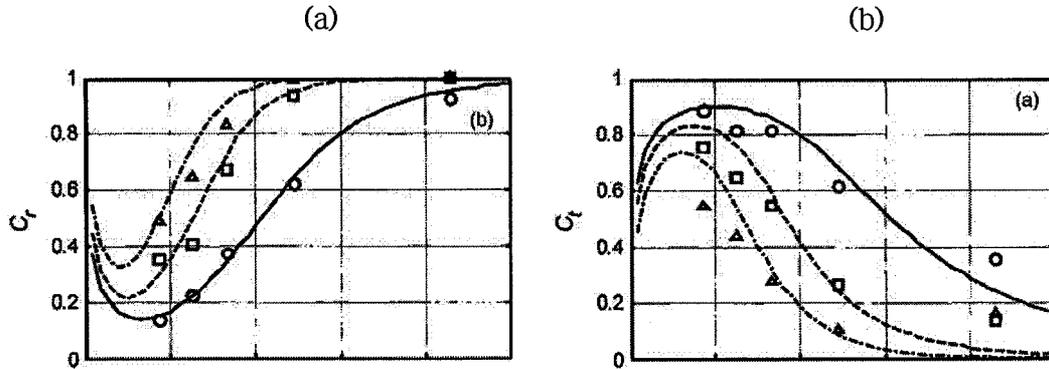


그림 4.1 유공율 0.5의 커튼월 파일 수직벽에 대한 반사율(그림 a) 및 투과율(그림 b) (circle: D/h=0.2; square: D/h=0.4; triangle: D/h=0.6)

표 4.1 수직벽에 대한 반사 및 투과율

	kh	D/h	r	Cr	Ct	Cl
1	0.77	0.5	1.0	0.22	0.87	0.20
2	0.77	0.8	1.0	0.60	0.66	0.20
3	0.77	0.5	0.5	0.35	0.65	0.455
4	0.77	0.8	0.5	0.65	0.38	0.433

그림 4.2에서는 Case A-1에 대한 수리실험의 결과와 수치모형의 결과가 비교 되어있다. 수리실험 결과로부터 그린 타원도는 1/13초의 시간간격으로 관측된 PIV 결과를 조화 분석을 통해 얻어낸 것이고, 수치모형의 타원도는 복소수 값으로 얻어진 flux 변수를 이용해 그려진 것이다.

수리실험을 통한 타원도는 수치모형을 통한 타원도보다 더 선형적인 것으로 보인다. 특히 항내 가장 깊은 부분 부근이 더욱 그러하다. 또한 표면궤도 움직임의 크기는 항 입구 부근을 제외한 부분에서 아주 좋은 일치를 보여주고 있다.

Case A-2에 대한 타원도의 비교는 그림 4.3에 나타내었다. 약간의 주기 차이에도 불구하고 전체적인 타원도 패턴은 Case A-1의 경우와 확연히 차이가 난다. 이는 항내 에너지

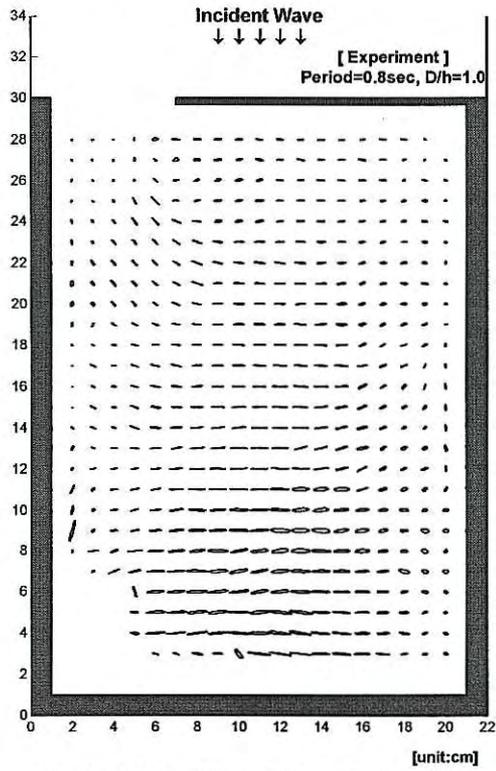
지를 전체적으로 감소시키는 공명효과 (resonance effect)에 의한 것으로 보인다. 항의 중앙을 제외하면 수리실험에 의해 그려진 타원도는 거의 선형에 가까워 보인다. 표면 계도 움직임은 그 경향이 다소 불일치 하지만 전반적인 크기는 어느 정도의 일치를 보인다. 이는 항내 에너지가 커진다면 일치를 보일 것으로 예상된다.

그림 4.4과 4.5는 Case B의 경우를 나타낸다. 전체적으로 Case A의 경우보다 더 좋은 일치를 나타낸다. 이는 방파제의 gap을 통해 더 많은 파랑 에너지의 투과에 따른 것으로 보인다.

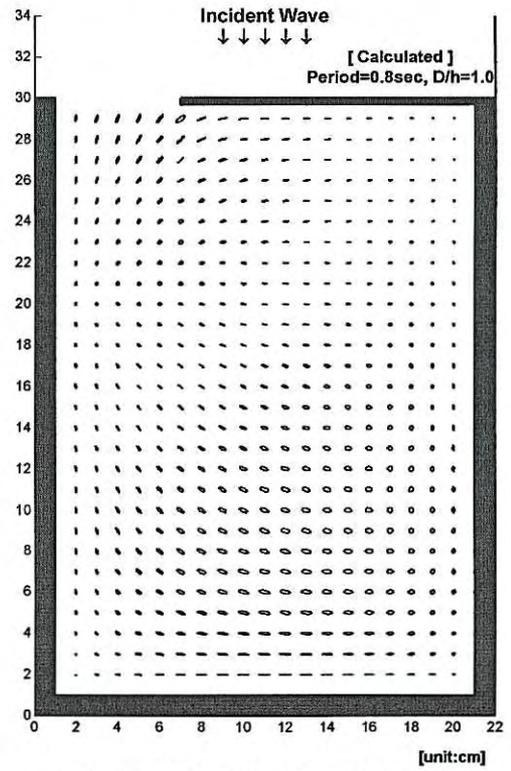
그림 4.6와 4.7은 Case C의 경우를 나타낸다. 전반적으로 좋은 일치를 나타낸다. 짧은 수직벽을 통한 파의 투과 정도가 우세하여 파랑도는 선형적이고 좌우벽에 대하여 평행하다. 그러나 수리실험 결과가 수리모형 결과보다는 파장이 더 짧게 나타난다. 이는 항 내 측에 위치한 속도가 0인 지점들 때문에 그렇다고 판단된다.

그림 4.8과 4.9에는 이중 수직벽이 있는 유공을 1과 0.5인 경우로서 각각 Case D와 E에 대한 실험 및 수치 결과가 도시되었다. 유공을 0.5인 경우는 커튼월 파일의 경우에 해당된다. 각 실험 경우마다 D/h 가 0.5와 0.8인 두 개의 이중 수직벽을 앞뒤로 번갈아 두고 실험하였다. 두 수직벽의 간격은 5cm이고 항 내측 수직 벽이 놓인 위치에서의 수심은 8cm이다. 이중 수직 벽이 있는 경우에도 소멸항의 직접적인 반영없이 단일 수직벽에 대한 반사 및 투과 또는 에너지 소산을 정보만으로도 전반적으로 좋은 일치를 나타내고 있다.

(a) 수리실험 결과 파랑도



(b) 수치모형 결과 파랑도



(c) 수리실험 결과의 진폭크기 등고선도

(d) 수치모형 결과의 진폭크기 등고선도

그림 4.2 수리실험 결과와 수치모형 결과의 비교 (Case A-1)

- 70 -

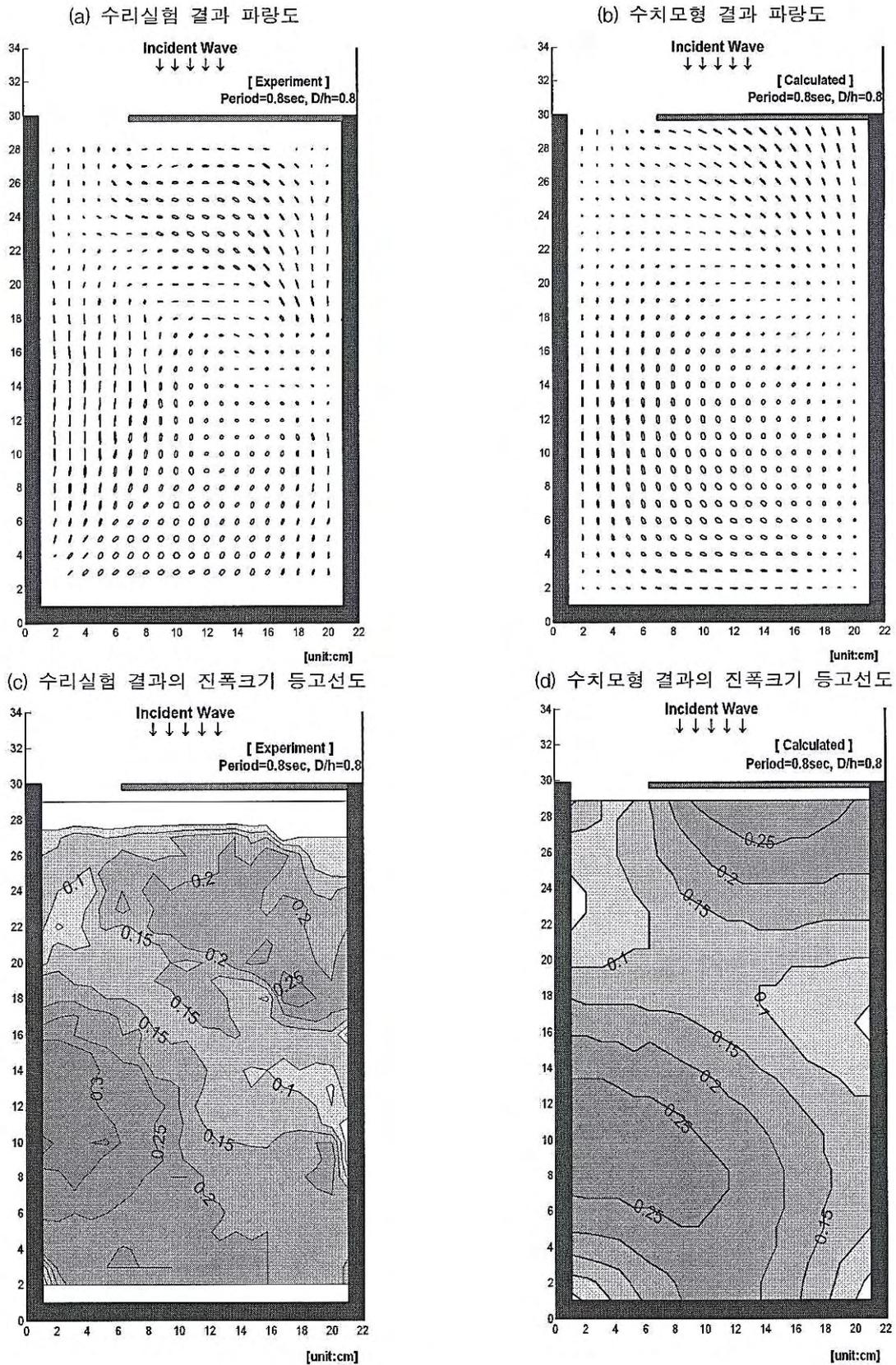


그림 4.4 수리실험 결과와 수치모형 결과의 비교 (Case B-1)

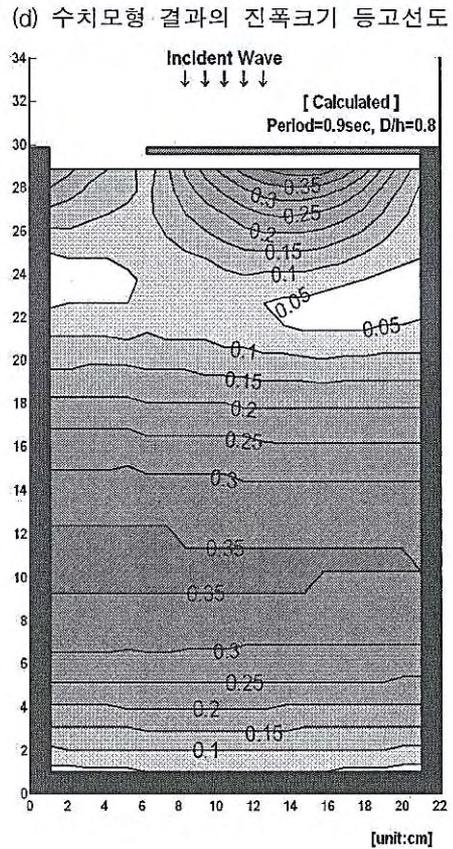
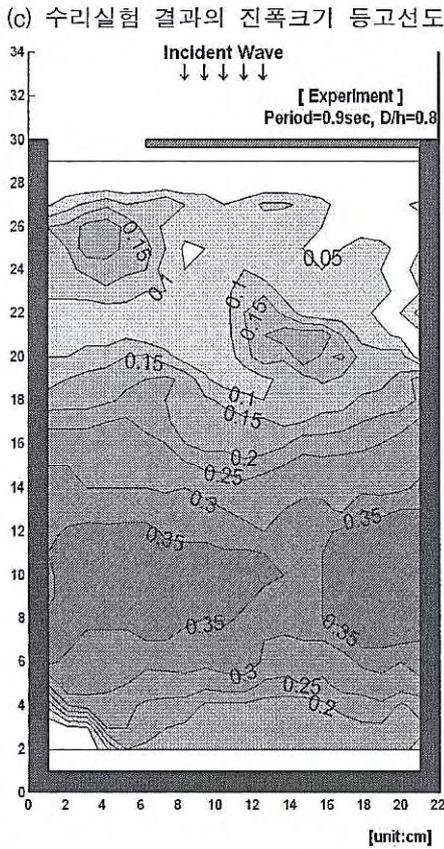
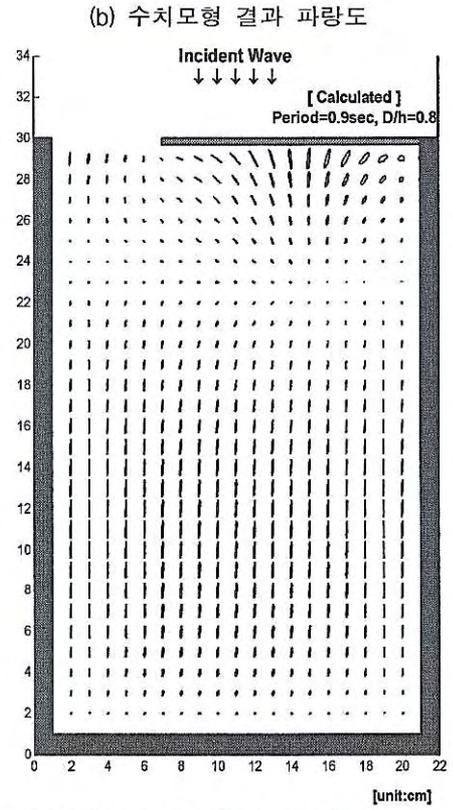
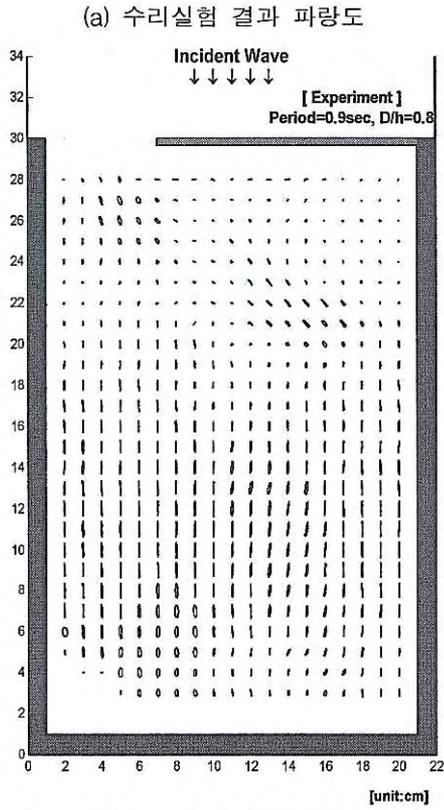


그림 4.5 수리실험 결과와 수치모형 결과의 비교 (Case B-2)

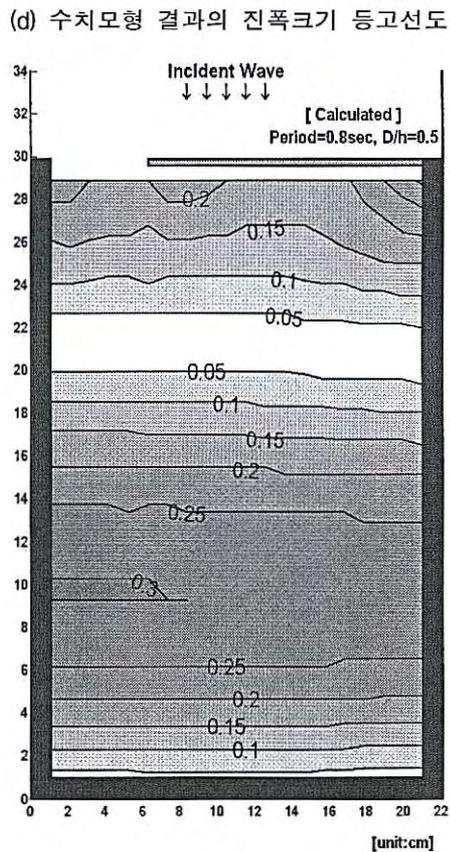
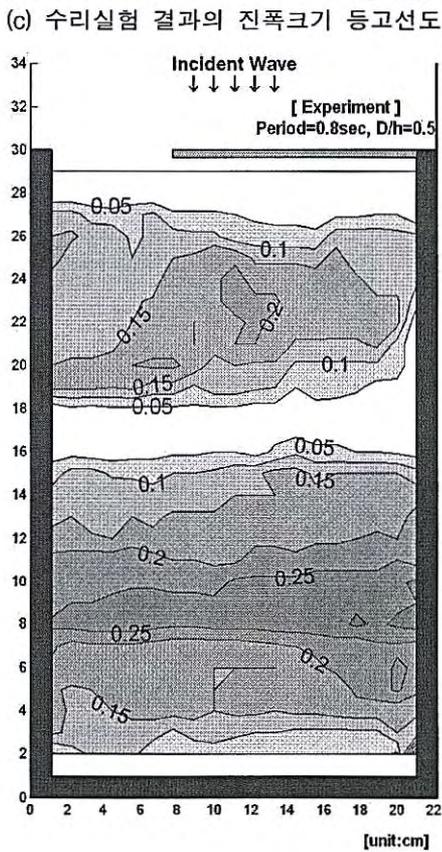
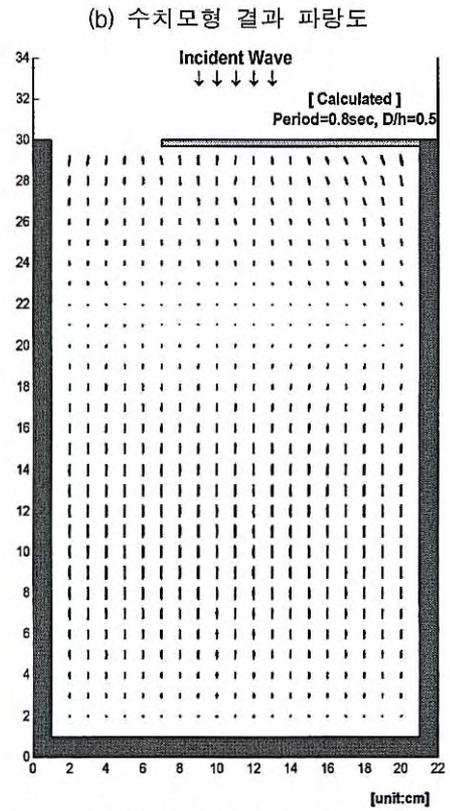
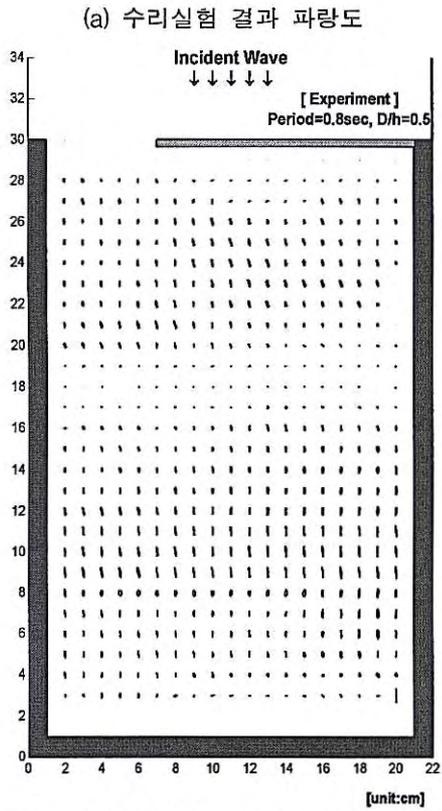
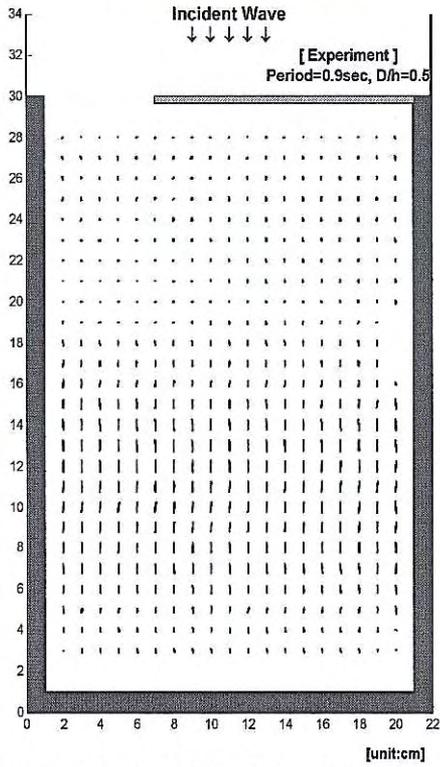
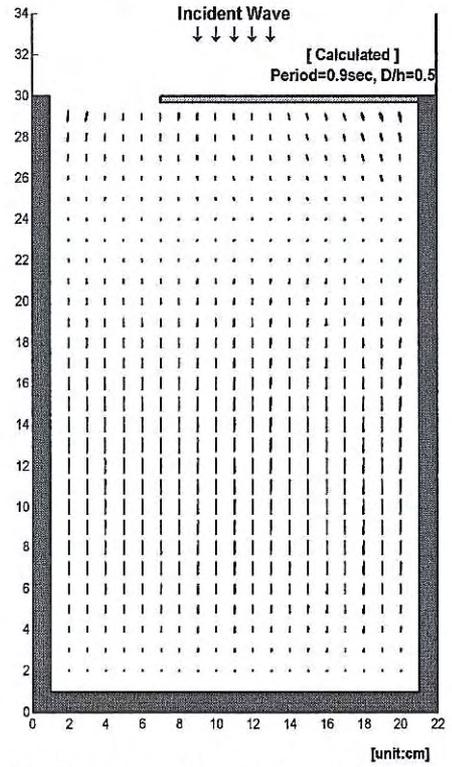


그림 4.6 수리실험 결과와 수치모형 결과의 비교 (Case C-1)

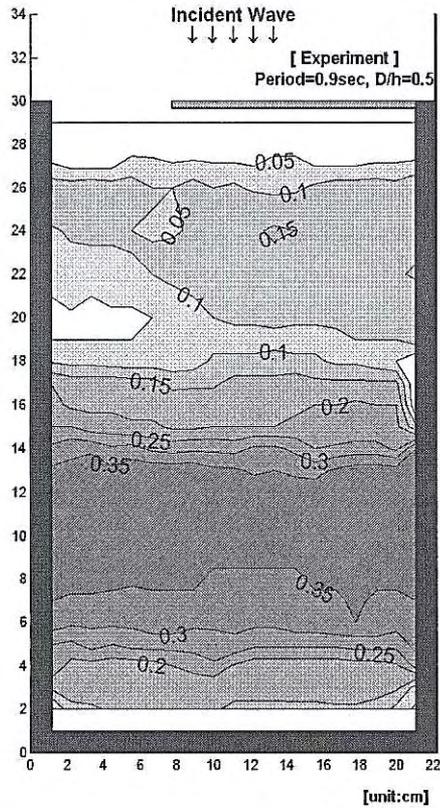
(a) 수리실험 결과 파랑도



(b) 수치모형 결과 파랑도



(c) 수리실험 결과의 진폭크기 등고선도



(d) 수치모형 결과의 진폭크기 등고선도

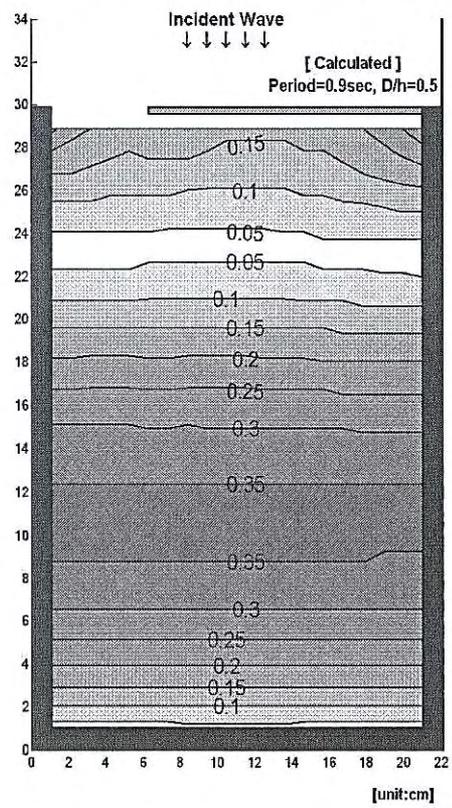


그림 4.7 수리실험 결과와 수치모형 결과의 비교 (Case C-2)

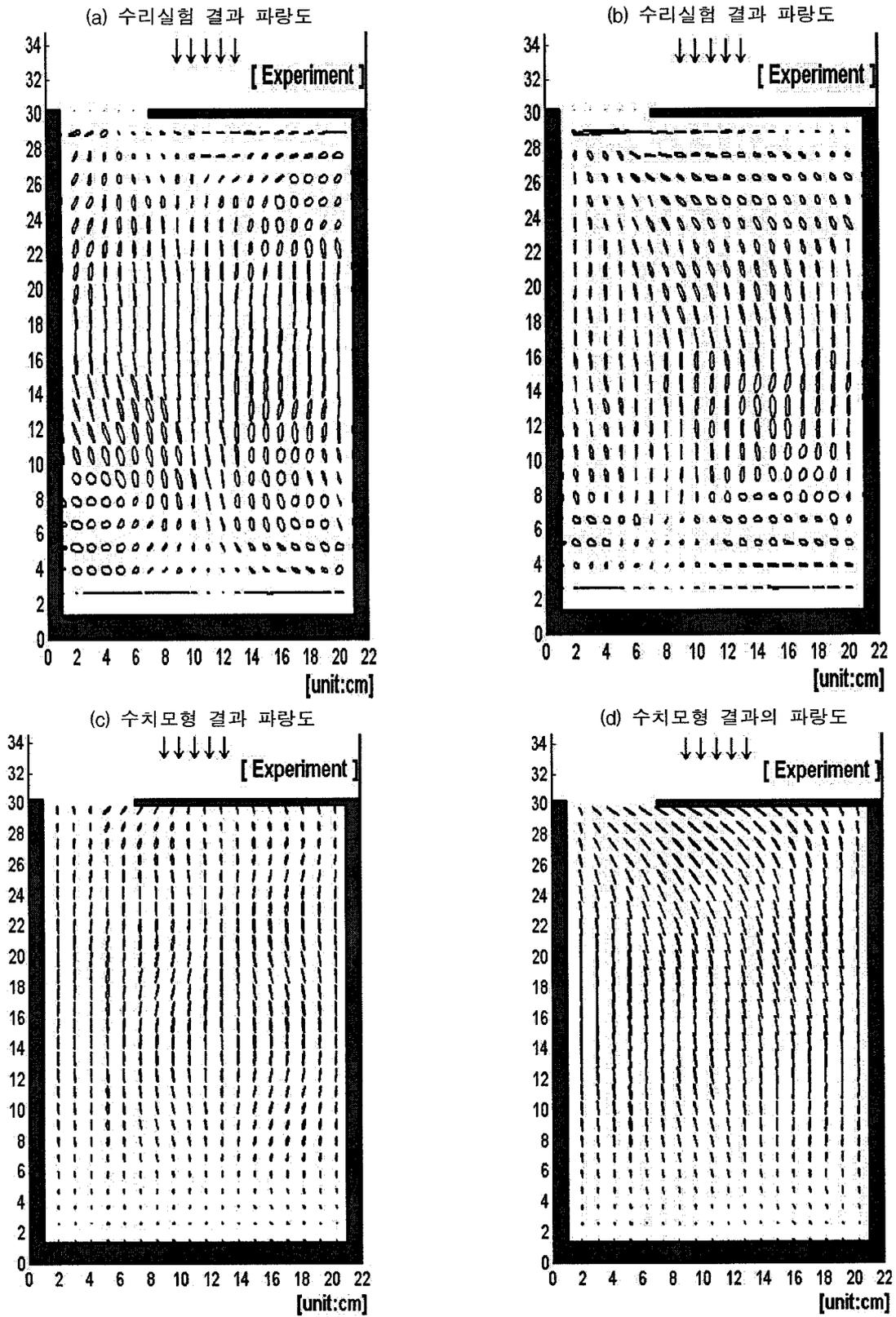


그림 4.8 수리실험 결과와 수치모형 결과의 비교 (Case D-1&2)

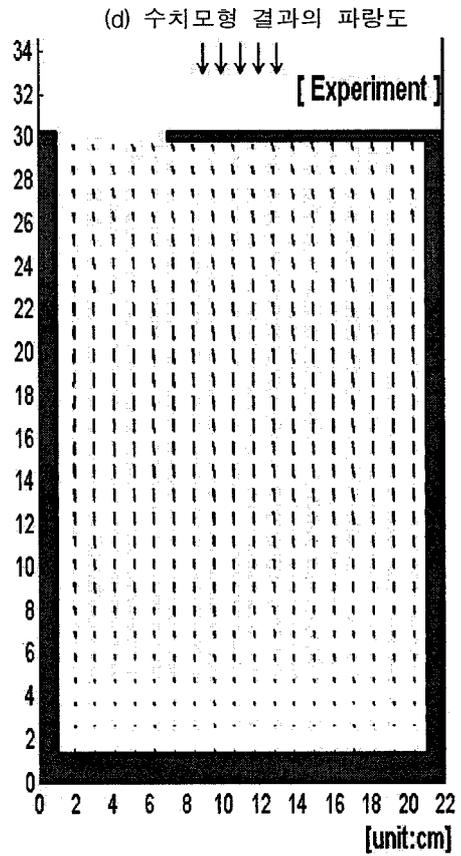
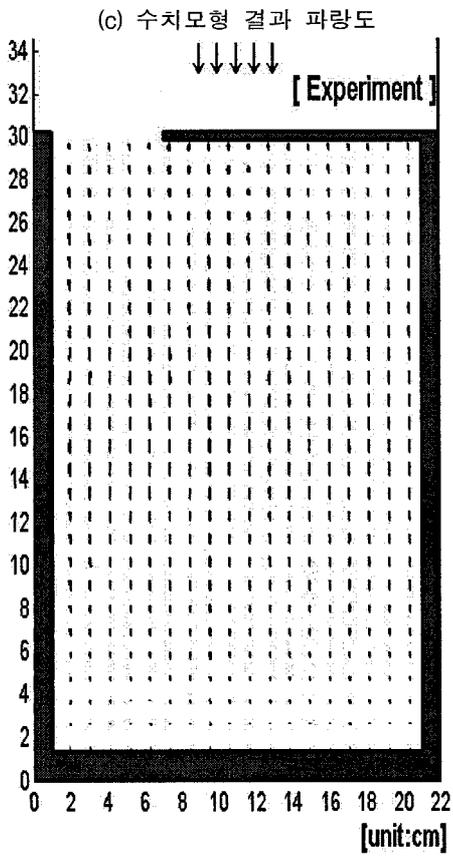
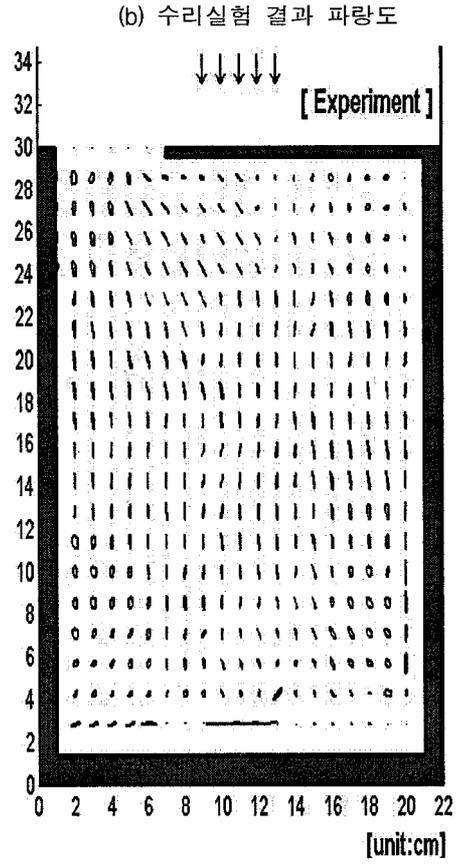
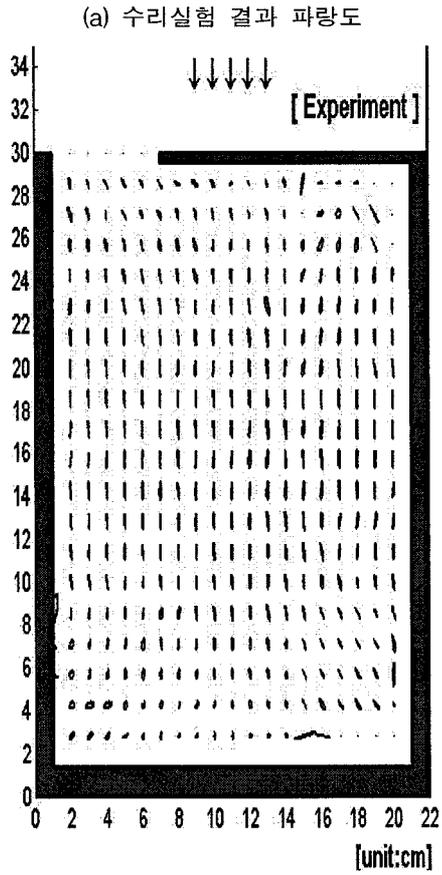


그림 4.9 수리실험 결과와 수치모형 결과의 비교 (Case E-1&2)

제5절 다열 커튼월-파일 방파제로 인한 정온도 수치 모형 개발

1. 사용자 편의 모형의 필요

최근 기후온난화로 우리 이웃의 아까운 인명과 귀중한 재산을 앗아가는 연안 재해가 빈번히 발생하고 있지만 사실 이 분야의 연구 성과가 제대로 반영되지 못하고 유사한 재해는 속수무책으로 계속 반복되고 있다. TV에서 방영해주는 피해 상황을 안타깝게 보는 것 이외에는 과연 우리가 할 수 있는 아무 것도 없는지 되돌아보게 한다. 단기적으로 살펴보면 우선 이용 가능한 관측 자료를 분석하여 인명 및 재난의 피해를 줄일 수 있는 방법이 혹시 있었는지 살펴보는 것이 중요하다. 그리고 재앙의 규모를 단순 계급별로라도 예보하는 데 당장 적용할 만한 예보기술이 있는 지 살펴보고 있다면 하나의 예보시스템으로 구축해 나갈 필요가 있다. 그래서 당장 유사한 재앙이 닥칠 경우 일선 방재 실무자들이 직접 운용하여 단 1명, 1원의 재산 피해라도 줄일 수 있는 비전문가용 예보 시스템 또는 초기 적용 단계로서는 경계 시스템의 구축이 절실히 필요하다. 그리고 단계적으로 예보의 수준을 높이는 데 필요한 관측 장비 또는 수치예보시스템이 있는 지 조사하고 필요하다면 전문가로서 이에 대한 설치 필요성을 강력히 성토했을 의무가 있다고 본다. 그리고 연구개발의 필요성이 있다면 원인 규명 정도에 그치는 hindcast용 연구가 아니라 실제 비전문적 인력이 운용하여 연구 성과가 당장 실무에 적용될 수 있는 실용 연구가 되도록 하여야 한다. 그런 면에서 이제 실용 연구는 프로그램 수립에 끝나지 않고 연구의 결과를 비전문가인 과제 관리 공무원이 확인 가능하고 실무 사용자가 사용하기 편하도록 GUI까지 제공할 필요가 있다고 본다. GUI 모형의 대표적인 특징을 나열하면 아래와 같다.

1. 사용자 편의
2. 비전문가의 사용상 오류 방지
3. 모형 contents의 훼손 방지
4. 모형 performance의 완전 개방

본 연구에서는 파랑의 천수, 굴절, 회절, 반사 현상을 신속히 모의할 수 있고 비전문가인 사용자도 전문 지식 없이도 편하게 사용할 수 있는 사용자 편의 파랑 모형을 소개한다. 각 해양 및 해안 관련 대학 연구실, 관련 분야 설계용역회사 등에서 다양한 파랑 모형이 운영되고 또는 실무에 적용되고 있지만 아직 검증 과정이 open되지 않아 각 모형의 결과에 대한 신뢰도가 충분히 확인된 바가 없다. 또 전문가 이외에 사용이 어려울 정도로 사용자가 편하게 모형이 운영되고 있지 못한 실정이므로 본 연구에서는 사용자가 사용하기 편하도록 MATLAB에서 프로그램되고 MATLAB의 GUI를 이용하여 개발된 파랑 모형인 WADEM을 소개한다.

2. 파랑 모형

파랑 변형 현상으로는 천수(shoaling), 굴절(refraction), 회절(diffraction), 반사(reflection) 현상 등이 있으며 비선형을 제외한 대부분의 현상이 완경사 방정식을 이용한 모델로 재

현되고 있다. 소위 완경사 방정식(mild-slope equation)은 Berkhoff(1972)에 의하여 처음 유도된 식으로 수치계산을 효율성을 위한 수학적인 형태는 다르지만 모든 선형 파랑의 모형에 적용되고 있다. 일정 수심 하에서 Berkhoff(1972)의 타원형 방정식은 Helmholtz 방정식이 된다. Helmholtz 방정식은 항내 부진동을 해석하는 경우 일정수심이라는 가정하에 경계요소법(Lee, 1971)으로 수치해석되었는데 완경사 방정식을 사용하므로써 수심이 변하는 항내에서의 부진동 해석도 가능하게 되었다. 아직도 방사조건을 적용하는 데 있어 몇 가지 제한이 있지만 완경사 방정식의 항내 부진동 해석에는 유한요소법(Chen, 1983; 정 등, 1992)이 가장 성공적으로 적용되고 있다. 그러나 타원형 완경사 방정식은 유한차분에 의한 수치해석이 어려워 포물선형(Radder, 1979), 쌍곡선형(Nishimura 등, 1983; Copeland, 1985; Madsen과 Larsen; 1987) 방정식 등 다양한 형태의 편미분 방정식으로 변형된 후 수치모형화 되었다.

본 모의 시스템에서는 그 동안 타원형, 포물선형, 쌍곡선형의 다양한 모델 기법을 수립하여 검토한 결과, 광역에 적용가능한 Radder(1979)의 포물선형 방정식과 정온도 구현에 탁월한 Madsen과 Larsen(1987) 형태의 쌍곡선형 파랑 모형으로 구성되었다.

가. 포물선형 파랑 모형

포물선형 모형은 구조물 후면에서의 회절과 모의가 과소평가되지만 광역의 천수, 굴절은 물론 파의 교차 현상에 대하여 정확한 결과를 제공하며 또한 수치계산의 안정성, 계산 시간이 빠른 모델이므로 본 모형 시스템에서 구현하는 파랑 모형의 하나로 선정하였다.

$$2ik_o \frac{\partial A}{\partial x} + (k_c^2 - k_o^2)A + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = 0 \quad (5.1)$$

여기서 $k_c^2 = k^2 + \nabla^2(CC_g)^{0.5} / (CC_g)^{0.5}$ 이며 수치 해석은 tridiagonal matrix를 이용하여 음해법으로 수치해석되며 투과 경계 처리의 기본 개념은 이(1998)에 소개되었다.

나. 쌍곡선형 파랑 모형

그 중 쌍곡선형 방정식이 구조물이나 해저 경사면으로부터의 반사파도 고려할 수 있고 회절 현상을 정확하게 예측하므로 항내 정온도 해석을 하는 데 가장 애용되고 있는 형태이다. 1차 미분식으로 구성된 쌍곡선형 모델은 국내에서도 최근 준 3차원적 해빈류 산정을 위한 파랑 모델로 Madsen과 Larsen(1987)의 파랑모델을 적용한 Lee(1994), Copeland(1985)의 식에 수심경사와 수심곡률의 효과를 가미한 Lee와 Park(1997)과 경계처리의 개선을 위한 연구로서 윤 등(1996), 이 등(1997), 그리고 이(1998)의 연구가 계속되고 있다.

본 모형에서는 그 동안 타원형, 포물선형, 쌍곡선형의 다양한 모델 기법을 수립하여 검

또한 결과, Madsen과 Larsen(1987) 형태의 파랑 모형이 가장 신속하고 안정적이며 신뢰도가 높아 궁극적으로 천해파랑 산출 시스템에서 활용하기에 가장 우수한 수치모형으로 평가되었다. 다양한 지형, 다양한 경계조건, 주기, 파향 등의 제 조건하에서 신속성, 정확성, 안정성은 물론 실무차원에서의 효율성도 확보되도록 하였고 여러 검증 과정을 거쳐 산출 결과의 신뢰도가 입증되었다. 모형은 음해법으로 유한차분되는 데 유리하도록 유도된 한 쌍의 쌍곡선형 1계 연립 방정식을 지배 방정식으로 한다.

본 모형에서 사용한 모형의 지배방정식은 Madsen과 Larsen(1987)의 모형과 달리 균속도로의 파랑 에너지 전파가 보장되는 다음 식이 적용되었다(Lee와 Park, 2001).

$$\frac{\partial^2 S}{\partial t^2} - 2i\sigma \frac{\partial S}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\frac{CC_g}{g} \left(\frac{\partial U}{\partial t} - i\sigma U \right) \right] - k^2 CC_g S = S_w \quad (5.2)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} - i\sigma U + g \nabla S = U_s \quad (5.3)$$

Madsen과 Larsen (1987)이 적용한 바와 같이 주기적인 운동을 제거한 다음 얻은 결과이다. 수치 해석은 tridiagonal matrix를 이용하여 음해법으로 수치해석되며 경계의 처리는 이(1998)에 소개되었다.

3. WADEM의 사용법

가. WADEM 설치

WADEM은 stand-alone 화되어 MATLAB 없이도 수행되도록 설치 파일이 제작되었다. 설치 실행 파일을 실행하면 program files에 wadem directory를 생성하고 WADEM을 모형을 설치하며 바탕화면에서 실행할 수 있도록 WADEM icon을 만든다.

나. 수심파일 불러오기

WADEM icon을 click하면 아래와 같이 초기 화면이 뜨고 enter하면 아래와 같이 'dep' 라는 확장자를 갖는 수심파일들이 제시되며 디렉토리를 바꾸어 다른 수심을 선정할 수 있다.

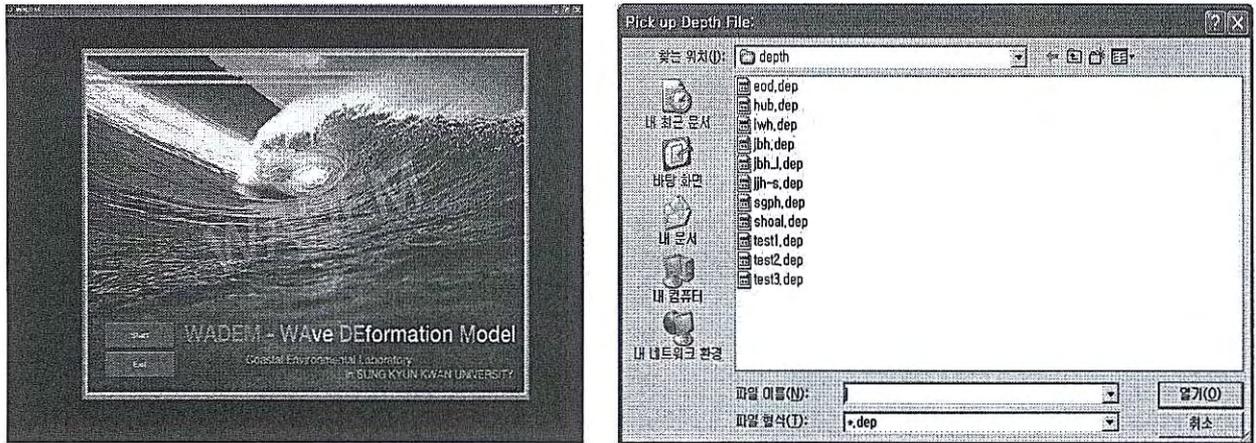


그림 5.1 초기화면 (왼쪽)과 수심 파일 선택 (오른쪽)

본 모형에 적용하려는 수심 파일은 왼쪽이 북쪽이고 오른쪽이 동쪽이 되도록 격자망을 구성하되 우선 동서방향의 격자수, NX, 남북방향의 격자수, NY, 그리고 각 방향의 격자 간격, DX, DY가 먼저 입력되어야 한다. 다음에 북측열로부터 서에서 동으로 각 열의 행에 해당되는 수심을 북에서부터 남쪽으로 읽어 내려오도록 수심자료가 정렬되어 있으면 된다. 어느 방향에서든 파랑의 입사가 가능하므로 수치계산상 입사가 가능한 방향으로 수심을 돌릴 필요가 없다. 그리고 특별히 수심 값에 대한 format이 정해지지 않았으므로 단지 각각의 수심 값마다 서로 구별이 되도록 띄어져 있기만 하면 된다.

다. 수심도의 smoothing과 다양한 가시화

Depth Window에서는 수심 자료가 읽을 수 있는 format을 갖추었는지를 확인하게 되며 아래와 같이 수심을 보여주는 다양한 가시화가 가능하도록 하였다.

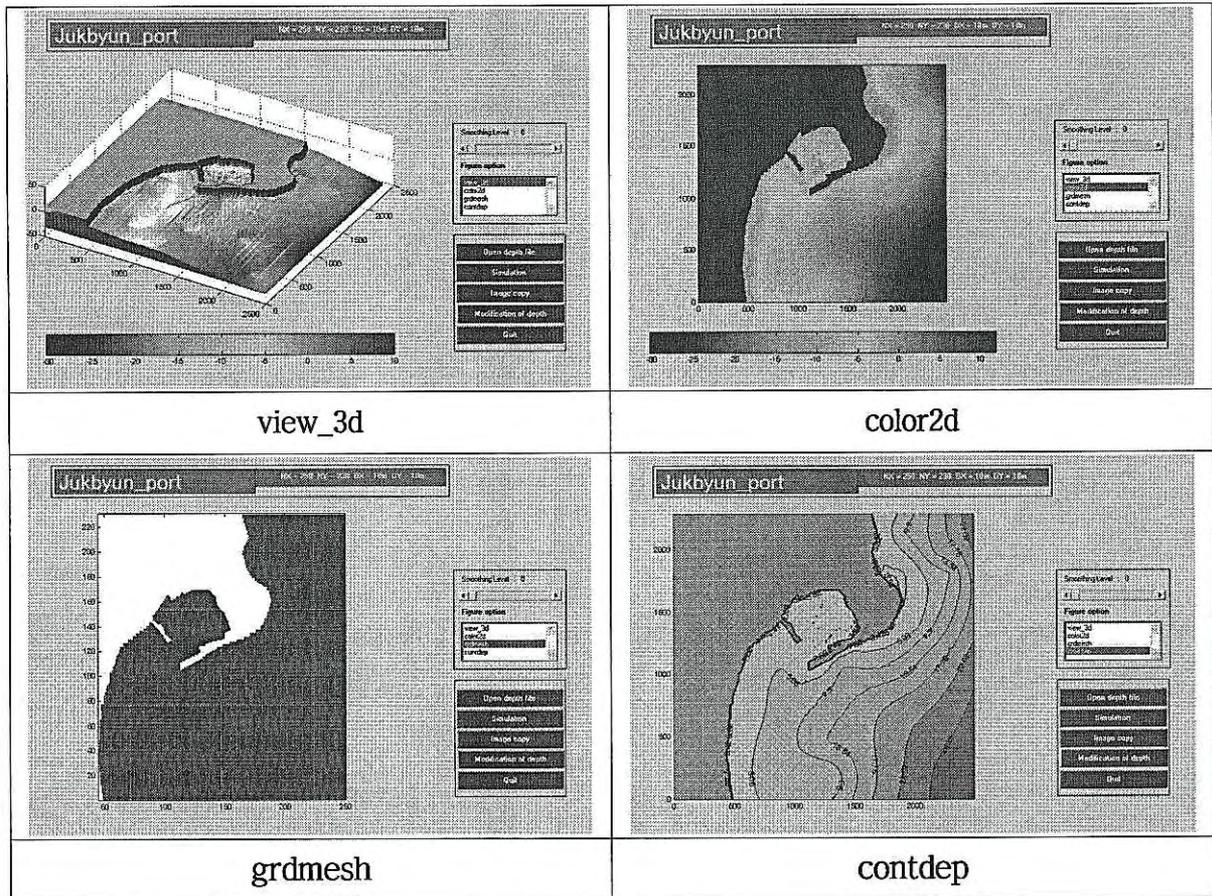


그림 5.2 수심을 보여주는 여러 가지 figure option

라. 수심의 변경/해안구조물 설치

Depth Window에서는 또한 수심 자료를 smoothing 하거나 준설로 인한 수심 조정, 방파제와 같은 해안 및 항만 구조물을 설치로 인한 수심 변경 작업을 취할 수 있다.

마. 파랑 조건 입력

Depth Window에서 Simulation을 click하면 Simulation Window로 전환되며 우측 상단에 입사 면에서의 파랑 조건인 진폭(m 단위), 주기(sec 단위), 파향(degree 단위; 정북 N으로부터 시계방향)을 입력하도록 되어 있다. 만약 격자 조건에 비하여 파장이 너무 짧으면 실행 시 popup창이 떠서 경고를 하도록 되어 있다.

바. 반사율 입력

Depth Window에서 반사율 button을 click하면 다음 쪽 하단의 그림과 같이 반사율을 마우스를 이용하여 쉽게 가시적으로 변경할 수 있도록 하였다. 또한 부분적인 변경은 물론 전체를 하나의 반사율로 쉽게 조정하도록 하였다.

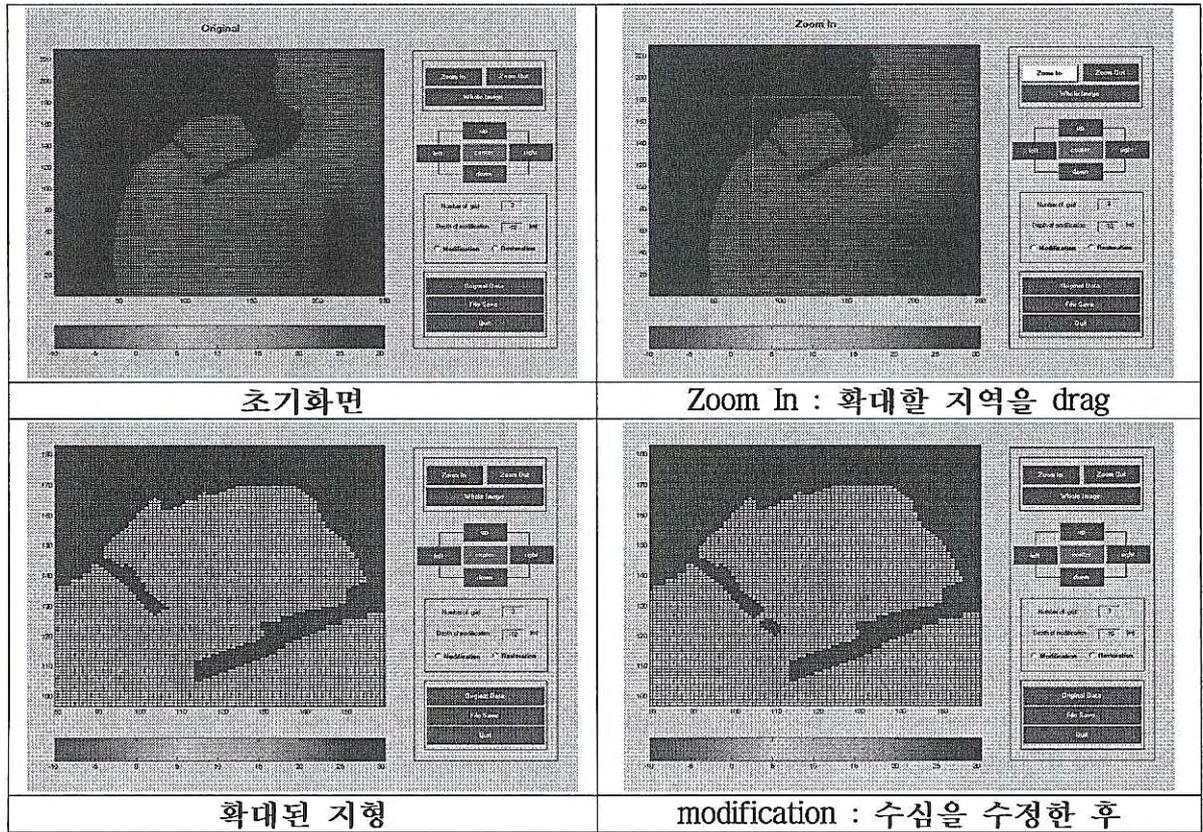


그림 5.3 수심 수정하기 (modification of depth)

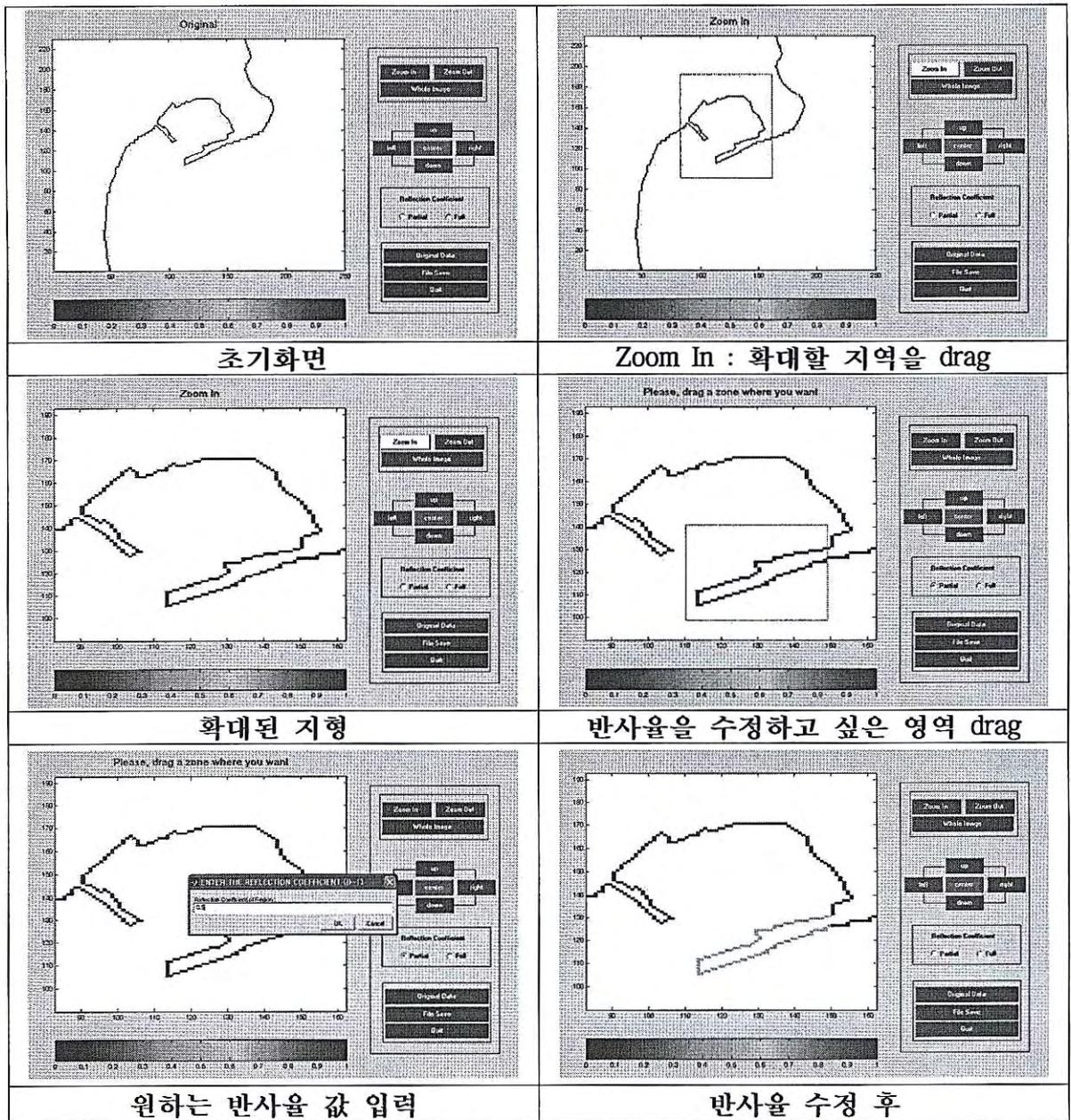
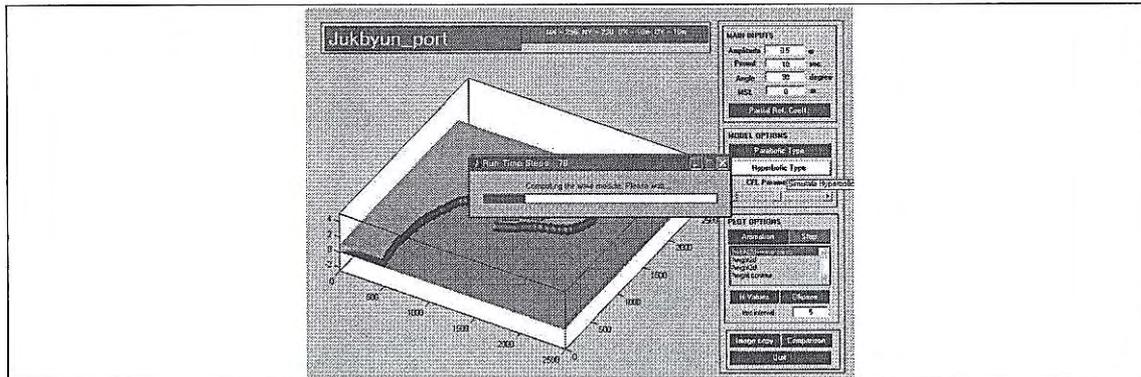


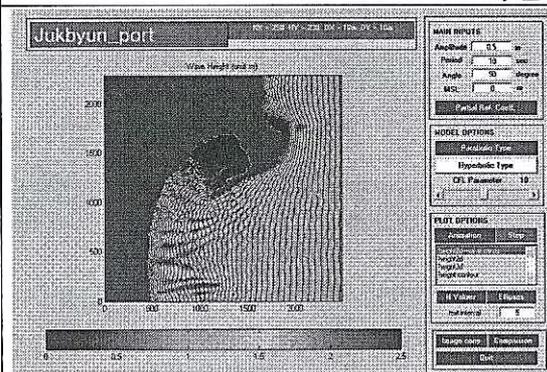
그림 5.4 반사율 입력

사. 모형의 실행

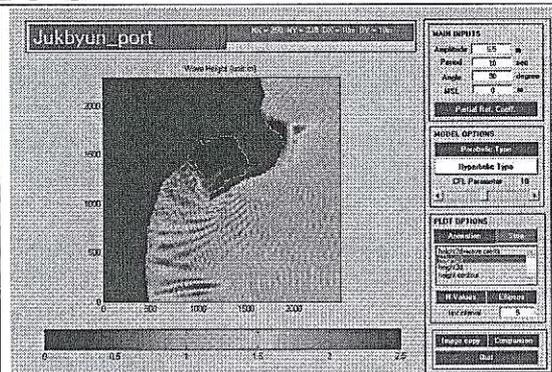
Depth Window에서 반사율 button을 click하면 다음 쪽 하단의 그림과 같이 반사율을 마우스를 이용하여 쉽게 가지적으로 변경할 수 있도록 하였다. 또한 부분적으로의 변경은 물론 전체를 하나의 반사율로 쉽게 조정하도록 하였다.



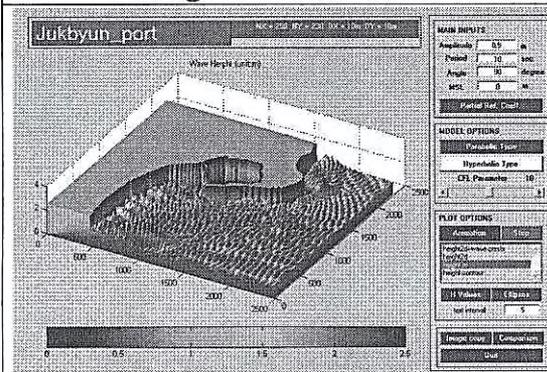
계산 진행 중



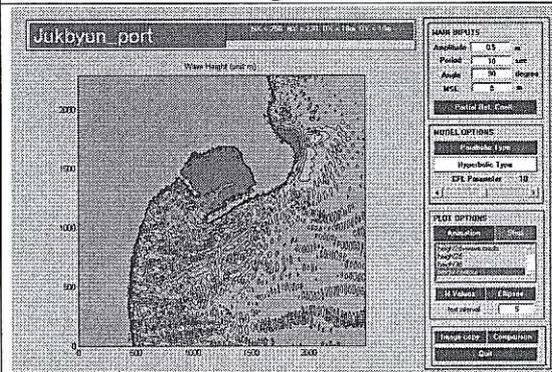
height2d+wave crests



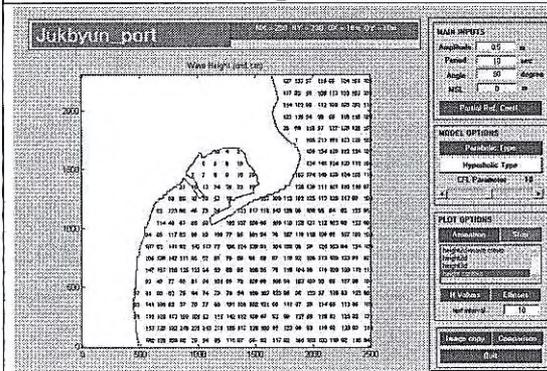
height2d



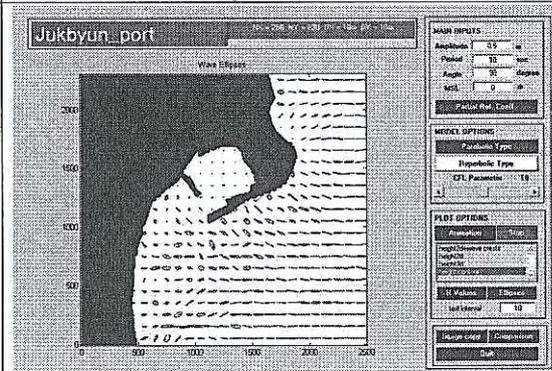
height3d



height contour



H values



Ellipses

그림 5.5 Simulation (Hyperbolic Type)

아. 모형 검증

모형 검증을 위하여 대표적인 실험실 자료에 대하여 검증이 쉽게 이루어지도록 Comparison mode를 두었다. WADDEM에서 현재 제공되는 검증 자료는 아래 표와 같다.

표 5.1 수치 모형 검증을 위한 실험실 자료

		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
		Circular Shoal	Elliptic Shoal	Ideal Port	Detached BW	Groin
Previous Physical Model		Ito & Tanimoto (1972)	Berkhoff (1982)	Isobe (1986)	Watanabe & Maruyama (1986)	
Incident Wave	H_i (cm)	1.0	4.64	9.1	1.53	1.53
	T (sec)	0.51059	1.0	0.83	1.2	1.2
	θ_i (°)	0.0	0.0	-18.0	0.0	28.3

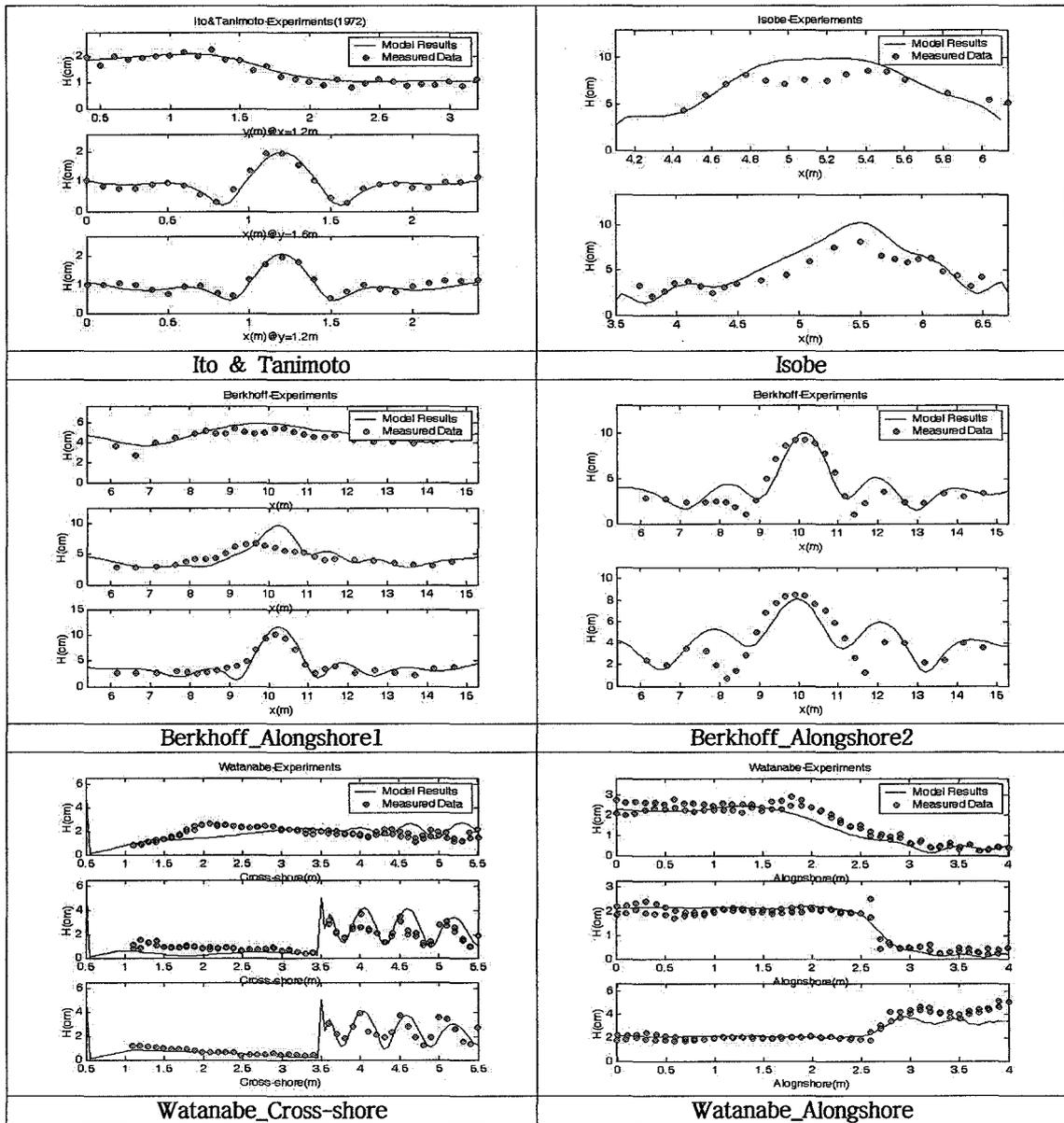


그림 5.6 수치모형 검증 결과

제6절 항내 및 연안역 토사이동 수치모형 개발

1. 서론

최근 항 내 매몰이나 구조물에 의한 주변 해안의 침식 문제를 해결하기 위하여 투과성 방파제에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 투과성 방파제는 항 내 수질 향상에 기여하는 바가 크며 항 내 흐름을 자연스럽게 유도하여 정온하면서도 매몰 문제를 해결할 수 있는 방안으로 연구되고 있다. 또한 이안제는 연안을 따라 흐르는 토사 이동을 방해하지 않는 장점이 있으나 특히, 투과성 이안제의 경우 파랑 환경의 급격한 공간적 변화를 완화시켜 주변 해안 침식을 완화시키면서도 최적의 배후 해안 공간을 확보할 수 있다는 점에서 가장 유용한 강성 공법으로 간주되고 있다. 본 연구에서는 이러한 투과성 방파제의 건설로 인한 토사 이동 환경을 모의할 수 있는 수치 해석 기법을 개발하며 3차원 수조 실험을 통하여 제한적이지만 검증과정을 수행한다.

해안 지형변화는 오래 전부터 사람들을 혼란스럽게 만들곤 했다. 해안선은 사람들의 기대를 넘어서 전진하거나 후퇴를 거듭한다. 지나친 해안선의 퇴각이나 해안의 침식은 그 주변에 거주하는 사람들을 당혹스럽게 하며, 항만 내 모래의 예기치 않은 퇴적은 항구의 수심이 얕아지게 하고, 따라서 궁극적으로 항구가 배를 수용하는 기능을 마비시켜 항만의 기능을 정지시키기에 이른다.

해안의 지형을 변화시키는 입자의 이동에 대한 과학적인 연구는 1940년대에 시작되었다. 파도와 해류에 의한 입자 이동의 현상을 이해하는 노력은 반세기 이상 지속되었다. 과거에 수천건의 논문과 보고서가 출판되었음에도 불구하고, 우리는 여전히 신뢰도를 지닌 해안선의 변화를 예견할 수 없다. 우리의 불가능의 주된 이유는 정확하게 파도가 치는 지역에서의 부서지는 파도에 의한 힘을 받는 부유입자의 역할을 평가하는데 있어서 아직 어려움이 있다고 생각한다.

표 6.1은 연안이동에 의한 입자운동의 다양한 형태의 역할을 나타낸다. 그것은 몇 개월이나 몇 계절, 몇 년의 시간동안 해변의 지형학적 변화를 야기시킨다. 다양한 입자운동 형태의 상대적인 중요성에 대한 판단은 자료의 양이 불충분하다는 상황에서 개인적인 시각으로 본 것이다.

강이나 해안에서의 입자들의 이동은 2가지 형태가 있다. 즉, 소류사와 부유사의 이동이다. 소류사의 이동은 입자 개개의 운동이나 층의 흐름운동의 형태를 발생시킨다. 현재, sand ripple의 형태를 포함하여 전자의 형태는 많은 연구의 노력에 의해 뚜렷해진 상태이다. 반면에 입자의 층 흐름의 현상은 조금 알려진 상황이다. 그러나, 연안이동에 있어서 그것들(입자의 층흐름 현상)의 기여의 정도는 정밀한 조사가 필요하다. 아마 그것들은 해안가를 교차하는 입자의 이동에 있어서 중요한 역할을 할 것이다. 그러나, 소류사 하중의 이동 형태에 있어서 개개의 입자들은 연안 입자의 이동에 크게 기여하지 않는다. 층흐름 형태는 연안이동에 있어서 지배적인 영향을 미치지 않을 것이다.

바다 저면에 깔려있는 토사는 파랑의 작용, 특히 쇄파 현상으로 부유하며 부유된 토사는 다시 해저면으로 가라앉는 동안 연안역에서 발생하는 흐름에 의하여 그 위치를 이동하며 확산되는데 연안역에서의 흐름에는 기인력이 서로 다른 해류, 조류, 취송류, 파랑류

등이 존재하며, 또한 이 해역은 복잡한 과정을 거치면서 생성, 전파, 변형된 파랑이 쇄파라는 마지막 변형 과정을 거치면서 소멸되는 해역으로서, 다양한 흐름과 파랑변형 현상의 복합적 상호작용에 의한 결과로 연안역 해수 순환현상이 나타난다. 이 흐름은 해안류와 해빈류로 대별된다.

연안역에는 그 기인력이 서로 다른 다양한 흐름(coastal currents)이 존재한다. 이러한 흐름으로는 조석현상에 의한 조류, 계절적으로 변화하며 공간적으로도 그 스케일이 비교적 큰 해류, 바람의 영향에 의한 취송류, 그리고 파랑의 직접적 영향으로 발달되는 해안류 등을 들 수 있다. 이 중 단기간에 지역적으로 연안역에 가장 큰 영향을 미치는 것은 파랑의 변형으로부터 비롯되는 해빈류라 할 수 있다. 즉, 심해에서 주로 바람에 의해 발생 발달된 파랑은 연안역으로 전파함에 따라 상대적으로 급격히 변하는 수심 및 흐름에 의해 천수, 굴절, 회절현상으로 변형되고, 그리고 해안선 가까이에서 쇄파되어 결국 소멸되는 과정을 거치게 된다. 이러한 파랑의 변형과정에서 수반되는 파랑의 잉여에너지의 변화에 따라 해안류도 발생 발달하게 된다. 따라서 연안역 해수순환 현상 및 해저 퇴적물 이동현상을 연구하기 위해서는 보다 정확한 파랑장 재현 및 해석이 필수적이며 해빈류의 실측을 통하여 검증할 필요가 있다. 쇄파대에서의 유속이 3차원적인 변화를 갖고 있지만 항 내에서는 유속이 3차원적인 변화가 미약하므로 비유절감을 위하여 3차원 모형의 적용보다는 2차원 모형을 수립하고 해빈류의 관측은 표면 유속으로만 실시한다.

표 6.1 연안입자운송 형태의 역할의 가설적 판단

형태		현재 형태	전체 기여
소류사	입자	거의 알려져있다	미미
	층	흐름다소 알려져있다	보통
부유사	Sand ripple로부터	거의 알려져있음	거의 없음
	파도로부터	알려지지 않음	지배적임

입자 분자는 작용하는 두개의 힘에 의해서 부유된 채 놓이게 된다. 하나는 소류층(bed layer)에서 작용하는 진동하는 흐름의 전단력이고, 다른 하나는 파도에 의해서 생성되는 물 기류의 수직 모멘트이다. Sand ripple의 침투로부터 부유하는 입자는 전자의 전형적인 예이고, 이것은 잘 연구가 이루어져왔다. 그러나, 이러한 형태의 부유입자의 연안 운송 총량은 파도에 의해서 부유되는 입자의 양과 비교했을 때 매우 작다고 고려된다. 파도에 의한 입자부유의 중요성은 우리가 쇄파대까지 쪽 뺨은 방파제로부터 바다의 바닥을 내려다 보았을 때 쉽게 이해된다. 우리는 돌진하는 파도가 해변을 향해서 이동한 후에 물속에서 솟아오르는 뿌연 입자의 파열을 관측할 수 있다. 그 입자의 흐름은 엄청난 양의 부유된 하층을 운반하면서 천천히 파도가 치는 지역내의 해안가를 따라서 이동한다.

부유된 입자들이 특히 태풍이 부는 시기에 소류사들보다 더 연안운송을 지배한다고 하

는 몇몇 보고서들이 있다. 그럼에도 불구하고, 파도에 의한 양적인 부유입자들의 해석은 아직까지 성공적이지 못하다. 왜냐하면, 관련된 현상들이 복잡하기 때문이다. 해안선 가까운 연안에서는 상당량의 토사이동이 지속적으로 이루어지고 있어 해양 환경의 미세한 변화에도 해안선의 변화로 인한 침식 문제가 발생하고 있다. 또한 항 내 매물 문제는 이와 같이 토사의 지속적인 이동의 단적인 증거가 되고 있으나 해안을 따라 이동되는 표사량을 추정하는 것은 해양 환경의 변화와 연안 흐름의 결과로 발생하는 복잡한 현상으로부터 귀결되는 것으로 상당히 변화무쌍하다. 따라서 그로 인한 해안 침식 폭이나 항 내 토사 매물량을 추정하는 것은 상당히 어려운 문제일 수 밖에 없으며 투과성 방파제의 경우는 아직 기본이 되는 파랑 환경에 대한 모의조차 어려웠었다.

2. 모형의 개요

본 모형은 전후처리는 물론 계산처리까지도 MATLAB을 이용하여 수립되었다. MATLAB은 아직 우리나라 토목분야에서 많이 사용되고 있지 않지만, 전세계적으로 500,000명 이상의 사용자를 보유하고 있는 언어로서 고도의 수학적 technique 및 각종 advanced tool을 통해 neural network, system identification, wavelet, optimization, statistics, time-series analysis, simulation 등의 기능을 수행할 뿐만 아니라, 편리한 GUI-building, web-application, C언어 개발, excel-link를 통한 data의 연결, graphic visualization을 통해 application의 개발을 수행할 수 있는 4세대 technical 컴퓨팅 언어이기 때문에 앞으로 머지 않은 미래에 전 분야에 널리 이용될 수 있으리라 기대한다. 성균관대학교 해안환경 실험실에서 이 언어를 이용하여 여러 해안 수치 모형들을 개발하여 왔으며 여기서는 파랑 및 부유사 이동 예측 모형을 결합하고 Matlab GUI를 이용하여 사용자가 편리하게 사용할 수 있는 수심변화 예측 모형시스템인 WAVETOSED라는 프로그램을 소개한다. Matlab은 포트란이나 C언어와 달리 일반적으로 계산이 느리다고 인식되고 있으나 대개 고급 Matlab 프로그램은 벡터라이징되므로 계산시간이 상당히 단축된다. 또한 벡터라이징하면 프로그램이 수식처럼 간단하여 프로그램상의 오류를 최소화할 수 있고 또한 프로그램을 이해하는 데도 유리하다. 그리고 필요한 입력을 그래픽 유저 인터페이스(GUI)를 사용하여 처리할 수 있으므로 쉽게 입력 자료를 부여할 수 있고 파랑 전파 및 부유사 이동, 수심 변화 등의 계산 결과를 동영상으로 제공할 수 있으므로 시간에 따라 어떻게 변화하는 지를 면밀히 살펴볼 수 있다.

본 연구에서는 WAVETOSED는 2가지 version 모두를 사용한다. 하나는 토사이동을 모의하는데 잉여응력을 이용하여 해빈류를 구하는 방법과 비선형 파랑모형으로부터 직접 파랑의 주기적인 운동뿐만 아니라 해빈류와 같은 잔차류 성분으로의 평균운동을 동시에 반영하는 방법이다. 첫 번째 방법에서는 정온도 구현에 탁월한 Madsen과 Larsen(1987)의 쌍곡선형 선형 파랑 모형으로부터 잉여응력을 구하여 해빈류를 예측하는 모형(WICM)이 사용된다. 파랑작용 하에서의 표사이동은 주로 부유사에 의하여 이루어지므로 표사이동은 부유사 농도의 이송 및 확산에 의하여 예측하는 모형(FOTADIM-SS)을 적용하였다 (Goda, 2001). 그림 6.1은 후자에 대한 것으로 크게 파랑모형과 부유사 이송확산모형으로

구성되어 있다. 파랑 수치모형은 비선형 환경사방정식(Lee와 Park, 2000)을 이용하여 음해법으로 수치해석하였으며, 파랑을 계산하는 수치모형명은 'WADEM-N (Wave DEformation Model-Nonlinear version)'이라고 이름 붙여져 있다. 격자정보의 입력과 함께 수치계산을 위하여 읽는 수심자료를 선택하고, 유입 파랑 정보인 진폭, 주기, 입사각의 입력에 대한 파랑장을 해석한다. 다음은 산출된 파랑 정보를 이용하여 부유사의 이동 및 확산을 예측하는 데 이 모형을 'SADEM(SAnd Deposition and Erosion Model)'이라고 이름을 지었으며, 이 모형에서는 수심 적분된 2차원 이송 및 확산 방정식을 이용하며 이송은 전방입자 추적법으로, 확산은 유한차분 ADI 음해법으로 수치해석된다(Lee, 1998). 이 수치해석은 이송이 우월한 흐름 또는 확산계수가 적은 영역에서도 수치확산이 작은 방법으로 토사와 같이 확산 거동이 적고 흐름의 영향력이 우세한 경우에 적용성이 우수하다. 수심 변화와 관련하여 그 동안 다양한 형태로 침식과 퇴적 과정이 모의되고 있지만 본 모형시스템에서는 아직 충분히 제공되고 있지 않으므로 앞으로 더 다양한 여러 형태의 모듈이 선택될 수 있도록 할 필요가 있다.

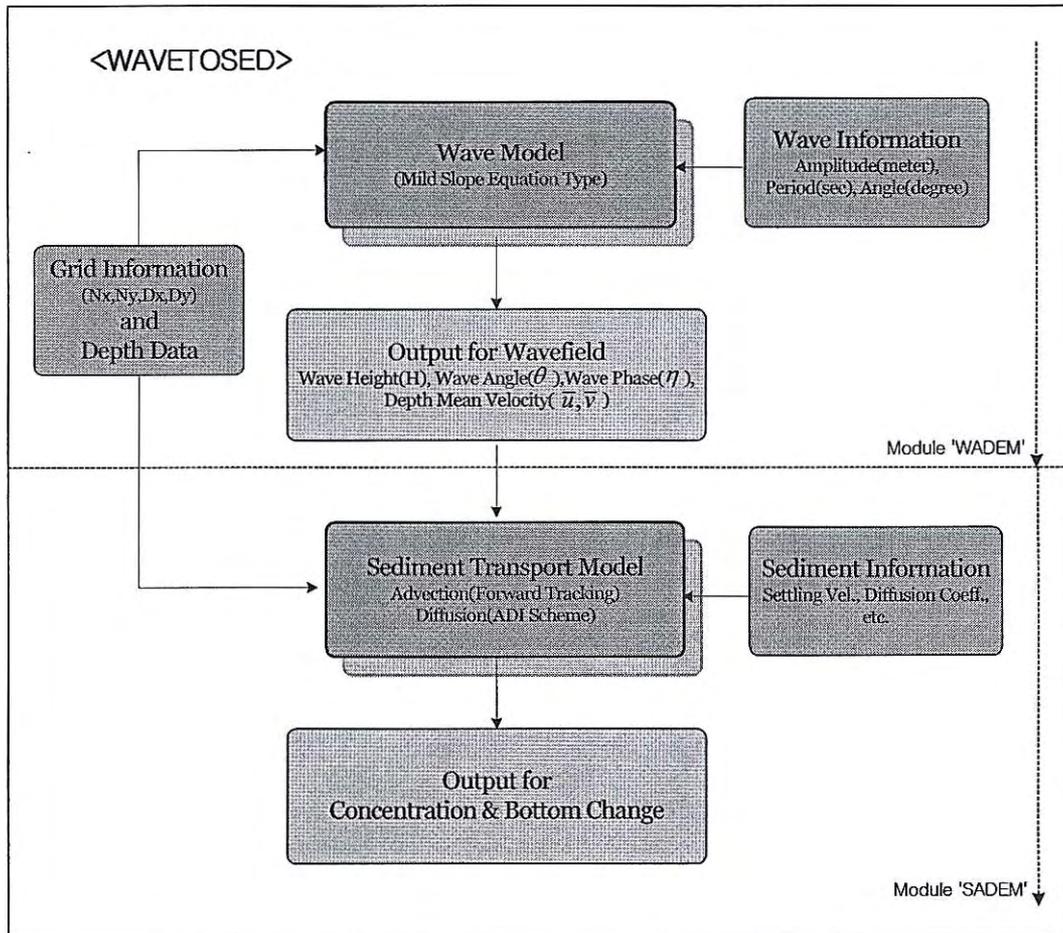


그림 6.1 WAVETOSSED의 흐름도

가. 파랑모형

파랑 변형 현상으로는 천수(shoaling), 굴절(refraction), 회절(diffraction), 반사(reflection) 현상 등이 있으며 비선형을 제외한 대부분의 현상이 환경사 방정식을 이용한 모델로 재현되고 있다. 소위 환경사 방정식(mild-slope equation)은 Berkhoff(1972)에 의하여 처음 유도된 식으로 수치계산을 효율성을 위한 수학적 형태는 다르지만 모든 선형 파랑의 모형에 적용되고 있다. 일정 수심 하에서 Berkhoff(1972)의 타원형 방정식은 Helmholtz 방정식이 된다. Helmholtz 방정식은 항내 부진동을 해석하는 경우 일정수심이라는 가정 하에 경계요소법(Lee, 1971)으로 수치해석되었는데 환경사 방정식을 사용함으로써 수심이 변하는 항내에서의 부진동 해석도 가능하게 되었다. 아직도 방사조건을 적용하는데 있어 몇 가지 제한이 있지만 환경사 방정식의 항내 부진동 해석에는 유한요소법(Chen, 1983; 정 등, 1992)이 가장 성공적으로 적용되고 있다. 그러나 타원형 환경사 방정식은 유한차분에 의한 수치해석이 어려워 포물선형(Radder, 1979), 쌍곡선형(Nishimura 등, 1983; Copeland, 1985; Madsen과 Larsen; 1987) 방정식 등 다양한 형태의 편미분 방정식으로 변형된 후 수치모형화 되었다.

그 동안 타원형, 포물선형, 쌍곡선형의 다양한 모델 기법을 수립하여 검토한 결과, 광역에 적용가능한 Radder(1979)의 포물선형 방정식과 정온도 구현에 탁월한 Madsen과 Larsen(1987) 형태의 쌍곡선형 파랑 모형으로 구성되었다. 쇄파조건으로 Miche의 식을 사용하는데 이는 간단하면서도 충분히 정확하고, 안정성이 보장되는 쇄파모델이기 때문이다.

1) 포물선형 파랑 모형

포물선형 모형은 구조물 후면에서의 회절과 모의가 과소평가되지만 광역의 천수, 굴절은 물론 파의 교차 현상에 대하여 정확한 결과를 제공하며 또한 수치계산의 안정성, 계산시간이 빠른 모델이므로 본 모형 시스템에서 구현하는 파랑 모형의 하나로 선정하였다.

$$2ik_o \frac{\partial A}{\partial x} + (k_c^2 - k_o^2)A + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = 0 \quad (6.1)$$

여기서 $k_c^2 = k^2 + \nabla^2(CC_g)^{0.5}/(CC_g)^{0.5}$ 이며 수치 해석은 tridiagonal matrix를 이용하여 음해법으로 수치해석되며 투과 경계 처리의 기본 개념은 이(1998)에 소개되었다. 포물선형 모형은 반사파를 고려하지 않으므로 투과 정보만 투과성 구조물 후면에 적용된다.

2) 쌍곡선형 파랑 모형

쌍곡선형 방정식이 구조물이나 해저 경사면으로부터의 반사파도 고려할 수 있고 회절 현상을 정확하게 예측하므로 항내 정온도 해석을 하는 데 가장 애용되고 있는 형태이다. 1차 미분식으로 구성된 쌍곡선형 모형은 국내에서도 최근 준 3차원적 해빈류 산정을 위

한 파랑 모델로 Madsen과 Larsen(1987)의 파랑모델을 적용한 Lee(1994), Copeland(1985)의 식에 수심경사와 수심곡률의 효과를 가미한 Lee와 Park(1997)과 경계처리의 개선을 위한 연구로서 윤 등(1996), 이 등(1997), 그리고 이(1998)의 연구가 계속되고 있다.

본 모형에서는 그 동안 타원형, 포물선형, 쌍곡선형의 다양한 모델 기법을 수립하여 검토한 결과, Madsen과 Larsen(1987) 형태의 파랑 모형이 가장 신속하고 안정적이며 신뢰도가 높아 궁극적으로 천해파랑 산출 시스템에서 활용하기에 가장 우수한 수치모형으로 평가되었다. 다양한 지형, 다양한 경계조건, 주기, 파향 등의 제 조건하에서 신속성, 정확성, 안정성은 물론 실무차원에서의 효율성도 확보되도록 하였고 여러 검증 과정을 거쳐 산출 결과의 신뢰도가 입증되었다. 모형은 음해법으로 유한차분되는 데 유리하도록 유도된 한쌍의 쌍곡선형 1계 연립 방정식을 지배 방정식으로 한다.

본 모형에서 사용한 모형의 지배방정식은 Madsen과 Larsen(1987)의 모형과 달리 균속도로의 파랑 에너지 전파가 보장되는 다음 식이 적용되었다(Lee와 Park, 2001).

$$\frac{\partial^2 S}{\partial t^2} - 2i\sigma \frac{\partial S}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\frac{CC_g}{g} \left(\frac{\partial U}{\partial t} - i\sigma U \right) \right] - k^2 CC_g S = S_w \quad (6.2)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} - i\sigma U + g\nabla S = U_s \quad (6.3)$$

Madsen과 Larsen (1987)이 적용한 바와 같이 주기적인 운동을 제거한 다음 얻은 결과이다. 수치 해석은 tridiagonal matrix를 이용하여 음해법으로 수치해석 되며 경계의 처리는 이(1998)에 소개되었다.

나. 수심평균 해빈류 및 부유사 전단응력

단순화된 자연해빈 주변 연안역의 해수 순환 현상을 재현하고자 하는 연구가 지난 20년 동안 광범위하게 진행되어 왔다. 이와 관련한 문헌조사 및 평가가 Basco(1983) 및 Battjes(1988)에 의해 수행된 바 있다. 대부분의 연구들이 수심적분(depth integrated)된 형태이거나 수심평균(depth averaged)된 형태의 방정식을 기초로 수행되었으며, 이는 수심에 따라 유속이 일정하다는 가정을 내포하고 있다. 때로는 해안류의 수심에 따른 유속분포가 개수로 정상류의 경우에 적용되는 로그 함수적 분포를 갖는다는 가정하에 수행되기도 하였다.

최근 이론적으로, 그리고 수리모형실험을 통한 연구결과, 연안역에서의 향안류 또는 이안류에 대한 구조 및 해석방법에 많은 발전이 이루어졌다. 즉 수면부근에서는 해안을 향해 흐르나 해저면에서는 반대 방향(외해방향)으로 흐르는 흐름, 저층 이안류(undertow)의 생성이유 및 발달과정 등을 이해할 수 있게 되었으며, 연안역 해저퇴적물 이동 분석 시 수심 평균된 이안류 등을 이용하는 것은 큰 오류를 범할 수 있으며, 3차원적 해석을 통해보다 정확한 유속분포를 파악하는 것이 중요하다는 것이 입증되었다(De Vriend, 1986).

해안환경 및 해안건설에서 기본이 되는 바다에 대한 기본적인 정보는 파랑 에너지이며 이 파랑에너지는 해수에 잉여응력을 일으켜 특히, 쇄파대 인근에서 해안선 변형 및 주변 토사의 이동에 상당한 영향을 끼치는 해빈류를 일으킨다. 해빈류의 발생역학에 대한 연구는 잉여응력의 소개와 함께 급진전 되었으며 대부분의 해빈류 모형은 천수방정식에 잉여응력을 포함시켜 해석함으로써 파랑작용으로 인한 잔차류인 해빈류를 모의하고 있다.

수치모형 실험은 앞서 언급된 쌍곡선형 파랑 변형 모형인 WADEM_PB(WAVE DEformation Model for Permeable Breakwater)와 잉여응력을 이용하여 해빈류 및 수면 변화를 산출하는 모형인 DICEM-R(Depth-Integrated Currents and Elevation Model including Radiation stress)로 수행되었다(Lee 등, 2004). 파랑 모형으로부터 산정된 파랑의 질량이송 및 잉여응력은 수심적분된 연속방정식의 원천(source)으로 그리고 운동방정식의 외력으로 작용하여 연안역에서 해빈류를 발생시킨다.

해변의 형태학적인 변화의 예측에 대하여 현 모형을 적용하기 위하여 2차원 영역에서 천수와 굴절 그리고 회절과 같은 작용들에 영향을 받는 쇄파에 따른 에너지 소산의 비율을 정의하는 것이 필요하다. 간편한 접근방법은 쇄파조건을 고려한 파랑 에너지 쇄파조건과 그렇지 않은 것의 차이를 쇄파에 의해 소산되는 파랑 에너지 플럭스의 양, W_s 으로 간주하는 것이다. 즉,

$$W_s = W_0 - W_b,$$

여기서

$$W_0 = \frac{1}{8} \rho g (H_{rms})_0^2 C_g \cos \alpha \quad (6.4a)$$

$$W_b = \frac{1}{8} \rho g (H_{rms})_b^2 C_g \cos \alpha \quad (6.4b)$$

여기서 W_0 는 쇄파가 없는 플럭스, W_b 는 쇄파에 의해 소산된 후 남아 있는 파랑 에너지의 플럭스이다. 최소자승 파고인 $(H_{rms})_0$ 와 $(H_{rms})_b$ 는 각각 쇄파조건을 고려한 것과 하지 않은 경우에 대한 파고이다. x 축은 해안선에 위치해 있고, 해역에서 양의 값을 취한다. α 는 파전파 방향과 x 축에 직각인 선이 이루는 사이 각이다.

다. 비선형 파랑 모형

해빈류 모델은 환경사방정식에 의한 선형파 정보를 이용하여 잉여응력을 구하고 천해방정식에 적용하여 구하는 것이 기존의 방법이다. 따라서 흐름에 의한 굴절과 파의 고립과 같은 파랑과 흐름의 상호작용의 영향은 반복적인 계산 수행으로 이루어진다. 또한 잉여응력은 진행파에 대하여 산정되므로 반사파 영역에서는 적용이 어렵다는 단점이 있다. 최근들어 이러한 문제점을 해결하기 위하여 직접적으로 문제를 접근한 방법들이 Kabiling 와 Sato (1993) 그리고 Sorensen 등 (1994)에 의해 제안되었다. 이 접근법은 비선

형 모형이므로 비선형항으로부터 생기는 라디에이션 응력을 포함할 필요가 없으므로 파랑과 파랑, 파랑과 흐름의 상호작용의 결합된 효과를 포함하는 부시네스크 모델의 사용으로 완성되었다. 잉여응력을 사용하는 접근법은 반사된 파가 존재하지 않는 조건에서만 사용할 수 있다는 제한이 있다. 왜냐하면 전형적인 잉여응력은 진행되는 파랑장 하에서 유도되기 때문이다. 그러나 비선형 모형을 사용하는 직접적인 접근법은 수립자의 비대칭적인 파랑의 궤도를 따라 움직이는 부유사 원래의 거동을 예측할 수 있게 한다. 따라서 본 연구과제에서는 이러한 직접적인 접근법은 연안영역에서 부유사 물질의 이동을 결정하는데 사용한다. 그러나 대부분의 적용영역은 방대하며 일부 항내를 제외하고는 잉여응력을 이용한 접근방법이 가능한 진행파 우세 영역이므로 해지면 변화를 예측하는 경우 아직 비선형 파랑모형을 이용한 접근방법보다는 잉여응력을 이용한 모형을 적용하여 수치 실험하고 있다.

파랑과 해빈류를 동시에 모의하는 수치모형으로 'WADEM (WAve DEformation Model-Nonlinear Version)'의 비선형 version이 또한 사용된다(Lee와 Park, 2000).

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left[\left(\frac{CC_g}{g} + \eta \left(\frac{\partial \vec{u}_o}{\partial t} \right) \right) \right] + \nabla \cdot \left(\frac{-\partial \eta}{u_o \partial t} \right) + \frac{\sigma^2 - k^2 CC_g}{g} \left[\frac{1}{2} \vec{u}_o^2 + g\eta + \frac{3}{2} \left(\frac{\partial \eta}{\partial t} \right)^2 \right] + 2 \frac{\sigma^4}{g} \eta^2 = 0 \quad (6.5a)$$

$$\frac{\partial \vec{u}_o}{\partial t} + g \nabla \eta + \vec{u}_o \cdot \nabla \vec{u}_o + 3 \frac{\partial \eta}{\partial t} \nabla \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad (6.5b)$$

본 연구에서는 투수성 방파제나 부방파제의 경우 적용하도록 2차년도 연구와 같은 개념을 도입하여 확장되었다. 여기서 쇄파조건으로 Miche의 식(Miche, 1951)을 사용하는데 이는 간단하면서도 충분히 정확하고, 안정성이 보장되는 쇄파모델이기 때문이다. 질량보존법칙에 의해, 쇄파에 의해 깨진 질량은 실제 앞으로 이동될 것이나 편의상 부서진 각 격자에서 다음 시간 단계의 질량으로 부여되어 결국 수면 상승을 초래하는 효과를 발휘한다. 평형상태에서 수위 및 수심 평균 속도벡터의 시간적 변화를 얻으면, 파랑의 한 주기에 대하여 그 것들의 평균 값을 구하여 평균 수위 및 해빈류를 산정한다.

지배방정식(식 6.5a와 식 6.5b)는 근사인수분해법 및 fractional step method를 사용하여 음해 유한차분 기법에 의하여 수치해석 된다. 양해법의 시간 간폭은 Courant - Friedrichs - Lawy(CFL)조건에서는 제한되기에 음해법의 사용으로 시간 간폭에 대한 제한을 벗어 계산시간을 단축시킨다.

현장 자료가 충분하지 않은 관계로 범용적으로 사용되고 있는 파라메타를 사용하였다. 추후 현장 자료와의 비교를 통하여 수치 모의시스템이 신뢰를 쌓도록 해야 할 것이다.

라. 해저면 변화 예측모형

하천이나 해안에서의 토사의 이동에는 2가지 형태로 소류사 이동과 부유사 이동이 있다. 소류사 이동에는 개별 입자의 이동과 sheet flow에 의한 이동이 있으나 최근의 관측 분석 결과 파랑작용 하에서는 Komar(1978)의 소류사 우월설과 달리 그리 크지 않은 것으로 알려지고 있으며 부유사 이동에는 sand ripple로부터의 부유와 쇄파에 의한 부유 등이 있는데 쇄파로 인한 부유가 가장 큰 비중을 차지하는 것으로 최근 보고 되고 있다. Goda(2001)는 CERC 공식과 비교한 Kana와 Ward(1980)의 결과를 토대로 유의파고가 1.3~1.6m이상인 경우 부유사 모형으로 해안선 및 해저면 변화를 예측할 수 있다고 판단하고 있다. 또한 소류사모형은 양해법이라 계산시간이 오래 걸리며 현재 수치계산상의 불안정이 근본적으로 해결되지 않고 있으므로 그로 인한 영향은 무시하였다. 따라서 표사이동에 따른 해저면의 수심 변화는 침식량과 퇴적량의 차이에 따라 결정되며 다음 관계로부터 산정된다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = S_E - S_D \quad (6.6)$$

여기서 h 는 평균해수면으로부터 해저면까지의 깊이인 수심이다.

해저면은 식 6.6에서 주어진 바와 같이 토사의 재부상과 중력에 의한 침강의 비율의 차이로 결정되는데, 연안역에서 토사는 쇄파에 의하여 재부상되고 중력에 의해 점차적으로 가라앉는 동안해빈류에 의하여 이송된다. 따라서 강한 쇄파작용으로 인해 토사 재부상율이 침강율을 초과하는 곳에서는 해저지형이 침식되고 수심은 깊어진다. 재부상율이 침강율보다 적은 곳에서는 토사가 쌓여 수심이 낮아진다. 부유토사에 대한 연속방정식은 다음과 같이 된다.

다음은 산출된 파랑 운동 정보를 이용하여 부유사의 이동 및 확산을 예측하는 데 이 모형을 'SADEM (SAnd Deposition and Erosion Model)'이라고 한다. 수평성분 유속과 확산 계수의 수직적 변화가 없다면 수심 평균 농도 \bar{C} 로 부유사 이동을 식 6.7과 같이 정리할 수 있다. 이 모형에서는 식 6.7과 같이 수심 적분된 2차원 이송 및 확산 방정식을 이용하며 이송은 전방입자 추적법으로, 확산은 유한차분 ADI 음해법으로 수치해석된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} \right) + \frac{S_E - S_D}{h} \end{aligned} \quad (6.7)$$

여기서 S_E 와 S_D 는 각각 단위 면적당 침식율과 퇴적율로 상향 토사 플럭스와 하향 토사 플럭스이다.

식 6.7은 이송이 우월한 흐름 또는 확산계수가 적은 영역에서도 수치확산이 작은 방법으로 수치해석되며 토사와 같이 확산 거동이 적고 흐름의 영향력이 우세한 경우에 적용성이 우수하다. 수심 변화와 관련하여 그 동안 다양한 형태로 침식과 퇴적 과정이 모의되고 있지만 본 모형시스템에서는 아직 충분히 제공되고 있지 않으므로 앞으로 더 다양한 여러 형태의 모듈이 선택될 수 있도록 할 필요가 있다.

해저면의 수심변화는 소류사의 이동벡터 (q_x, q_y)의 차이 뿐만 아니라 침식량과 퇴적량의 차이에 따라 다음과 같이 결정된다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + S_E - S_D \quad (6.8)$$

한쪽 방향 흐름인 하천에서의 토사이동과 달리 파랑 작용에 의한 토사이동에 있어 소류사의 토사 이동량은 부유사 이동량에 비하여 작아 수심 변화율에 미치는 영향이 작거나 부유사 이동으로 대체될 수 있다고 보고 본 과제에서는 무시하였다(Goda, 2001). 또한 파랑과 흐름이 공존하는 해역에서 현재 널리 통용되거나 인정되는 마땅한 소류사 이동벡터 식이 없다는 것도 소류사 이동 항을 무시하는 이유 중 하나가 된다. 그러나 추후 무시할 수 없는 경우에 대한 검토가 이루어져야 한다고 본다.

$$S_E - S_D + \frac{\partial(\bar{c}uh)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{c}vh)}{\partial y} = D_x \frac{\partial^2(\bar{c}h)}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2(\bar{c}h)}{\partial y^2} \quad (6.9)$$

여기서 D_x 와 D_y 는 각각 x 와 y 방향에 대한 수평 확산 계수이고, u 와 v 는 각각 x 와 y 방향에 대한 해빈류의 유속 성분이다. 식 6.9에서 퇴적율은 부유사 모형의 농도로부터 추정한다. 해저퇴적물은 교란에 의해서 부유하면 약한 흐름에 의해서도 쉽게 그 방향으로 운반된다. 따라서 해저퇴적물이동현상을 명백히 하기 위해서는 해저면의 흐름도 충분히 파악하여야 한다. 연안에서의 퇴적물이동 현상은 대상해역이 해저퇴적물의 분포와 수리적 환경, 주변으로부터의 퇴적물 공급상태에 따라 매우 다양하게 나타난다. 하천에서의 퇴적물이동과 비교하면 연안역에서는 조석과 파랑이 퇴적물 이동에 큰 영향을 미친다. 따라서 지역적 특성에 따라 퇴적물이동 현상을 재현 또는 예측하기 위한 방법도 다양하게 발전해 왔다. 본 연구에서 식 6.9의 S_D 와 S_E 는 다음과 같이 적용되었다.

$$S_D = w_s C_b \quad (6.10)$$

$$S_E(x,y) = \begin{cases} \frac{\beta_s}{(\rho_s - \rho)gh} \frac{\partial}{\partial x} W_s(x,y), & \frac{\partial W_s}{\partial x} \geq 0 \\ 0, & \frac{\partial W_s}{\partial x} < 0 \end{cases} \quad (9.11)$$

식 6.9은 파랑 수치모형으로부터 얻는 해빈류장과 토사 발생률을 입력으로 하여 평균

토사 농도($\bar{c}(x,y)$) 에 대해서 본다. 그래서 일단 우리가 파랑에너지 플럭스 $W_s(x,y)$ 의 소산양의 공간적인 분포를 계산하면 쇄파에 의해 해저지형으로부터 토사발생률을 예측할 수 있다.

여기서 해저면 농도 C_b 는 해저면에서의 농도이다. 본 연구에서는 C_b 을 평균 농도 값에 1보다 작은 보정계수 γ 를 곱하는 데 본 과제에서는 보정계수를 추정할 관련자료도 부족하므로 Peters와 Dette (1999)의 관측 결과를 토대로 편의상 $\gamma=1$ 을 대입하여 추정한다. 파가 쇄파되지 않는 경우 부유사는 대부분 해저면 가까이 치우쳐 있게 되지만 파가 쇄파되는 경우 부유사는 수면까지도 부유하게 된다. 최근 Peters와 Dette (1999)의 관측 결과에 의하면 시간 평균된 부유사 농도는 쇄파대 내에서 거의 일정한 수직 분포를 보이고 있다. 침강을 q_d 는 침강속도 w_f 와 평균농도 $\bar{C}t$ 의 함수로 $q_d = w_f \bar{C}$ 가 적용된다.

$$S_D = \gamma w_s \bar{C} \quad (6.12)$$

침강 속도 w_s 는 입경 d (meter unit)의 함수로 레이놀즈의 수에 따라 다음과 식들이 사용될 수 있다.

$$w_s = \frac{g}{18} (S_s - 1) \frac{d^2}{\nu} = k_3 d^2, \quad Re < 0.5$$

$$w_s = \left[\frac{g}{18} (S_s - 1) \right]^{0.667} \nu^{-0.333} d = k_2 d, \quad 30 < Re < 500$$

$$w_s = [3.3g(S_s - 1)d]^{1/2} = k_1 d^{1/2}, \quad 500 < Re < 10^4$$

여기서 ν 는 동점성 계수이며 S_s 는 입자의 비중이다. 첫 번째 식이 Stokes의 식이고 두 번째가 Allen의 식, 세 번째가 Newton의 식이다.

마. 확산계수

쇄파대 확산계수 또한 아직도 정량적인 산정이 불충분하며 많은 연구가 요구되는 분야이다. Longuet-Higgins(1970)의 가정은 너무 단순하면서도 물리적인 원인을 충분히 파악치 않은 표기이나 아직까지 실험조건이나 현장조건에 대한 실적용에 많이 이용되고 있다. 그의 산정식은 다음과 같다.

$$\nu = N x \sqrt{gh} \quad (6.14)$$

여기서 ν 는 쇄파대에서의 확산계수(lateral mixing coefficient), N 는 경험상수, x 는 해안으로부터의 거리, h 는 수심이다. 상기 식은 속도 대응치이고 해안으로부터의 거리는 길이 대응치를 취한 형태이다. 한편 Battjes(1972)는 확산계수의 속도 대응치로 쇄파에너지손실률의 3승근으로 취할 것을 제안하였으며, 길이 대응치로 수평거리 보다 수직거리인 수심을 취할 것을 제안하였다. 이후 난류에너지 방정식($k-\epsilon$ 또는 $k-l$)을 도입하여 쇄파대 확산계수를 산정하는 방법이 개발되었다.

바. 해저 침·퇴적

일방향 흐름에 표면파가 중복하여 작용할 때 해저면 평균마찰력이 증가하고 파의 일주기동안 발생하는 최대마찰력은 평균마찰력 보다 몇 배 이상 크기 때문에 토사이동량의 상당한 증대가 예상된다. 표면파는 왕복운동 특성을 갖고 있으며, 유속과 해저전단력간의 위상차와 해저전단력과 토사이동발생 시간간의 위상차가 존재하기 때문에 토사이동량 산정에 많은 어려움이 따른다. 이러한 위상차는 파의 진행방향과 같은 전진운동시 세굴되었던 토사가 후진운동시에만 이동되어 잔여 이동량은 후진방향으로만 작용하는 등 토사이동양식의 복잡성을 더하여 준다. 그러나 이렇게 복잡한 현상이 내포되어 있음에도 불구하고 일반적인 기법으로 하천 토사이동량 산정식을 수정하거나 비례상수를 재조정하여 파와 해류에 의한 토사이동량을 산정해 왔다. 이러한 기법은 천해파의 조건이 전방과 후방 모두 세굴임계조건을 충분히 초과할 때 성립하는데 본 연구도 이러한 조건에 한정하여 파와 해류에 의한 합성류 소류사량 산정식 개발에 주안점을 두었다.

최근 Woo와 Yoo(1990), Lee와 Lee(1992) 등은 기존의 하천 소류사량 산정식들을 실험자료나 현장 관측자료에 비교하여 각 산정식의 유효적용범위, 특징과 우열 등을 판단하고자 하였으며, 비교대상 산정식들은 Einstein식, Engelund-Hansen식, van Rijn식, Yang식 등 10여개에 이르렀다.

토사이동량 산정에 있어 파와 해류가 동시에 작용할 때 고려해야 될 사항은 여러 가지가 있다. 모래결(ripple)의 발생 여부와 모래결 주위에서의 와운동 특성, 파운동의 비대칭성, 각 작용력과 결과로 나타나는 현상간의 위상차 등이다. 이러한 미세 수리특성에 대한 현상 파악은 매우 어려울 뿐만 아니라 토사이동에 미치는 영향도에 대하여 단일식으로서의 정량화가 매우 곤란한 것으로 인식된다. 따라서 합성류 소류사량 산정에 있어 파와 해류가 해저면에 미치는 작용특징을 어느 정도 대표할 수 있으며, 정량화가 용이한 관련변수를 도출하여 하천토사량 산정식에 도입하는 방법이 일반적으로 흔히 사용되는 방법이다.

Bijker(1966)는 Kalinske-Frijlinke의 하천소류사량 산정식에 평균마찰력과 모래결상수를 도입하여 파와 해류에 의한 토사이동량을 산정하고자 하였으며, 그의 실험자료와 비교하여 보았다. 유와 이(1992)는 모래결상수를 도입하는 대신에 평균마찰력을 계산할 때 모래결의 형상과 크기를 산정하여 유효조고의 증폭을 고려하였다. 그들은 Kalinske-Frijlinke식, Einstein식, Shields식 등을 적용하여 Bijker의 실험자료와 비교하여 보았으나 계산결과와는 크게 만족스럽지 못하였다.

파와 해류가 동시에 작용하여 토사가 이동될 때, 증폭된 평균마찰력은 토사이동에 중요

한 요인으로 작용하지만 이에 못지않게 중요한 요인은 최대마찰력과 최소마찰력이다. 특히 최대마찰력은 임계세굴력과 대비하여 평균마찰력과 버금갈 정도로 중요한 요인으로 판단된다. 파와 해류에 의한 토사이동에 관한 관측자료로 Bijker(1966)의 실험자료를 이용하여 선택된 제 산정식의 관련상수를 결정하였다.

사. 침퇴적 지배방정식

1) 기본 방정식

파랑과 흐름의 공존장에서 소류사 및 부유사 이동에 의한 해저 지형의 변동량은 표사 보존식을 기본 방정식으로 사용한다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} \right) + S_D + S_E \quad (6.15)$$

여기서,

h : 수심

λ : 공극율

r : 부유사가 지형변동에 미치는 기여율

s : 부유사를 나타내는 첨자

b : 소류사를 나타내는 첨자

q_x, q_y : 각 격자점에서 표사 flux의 x,y 성분

2) 침식, 퇴적항

침식·퇴적항(Sink/Source)은 난류에 의한 해저면으로부터 퇴적물의 유체내로의 유입(해저면의 침식)과 유체내의 입자들의 중력에 의한 해저면으로의 침강(해저면의 퇴적) 두 가지 항을 나타낸다. 조류의 영향에 의한 침식·퇴적률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

가) 침식

Partheniades(1962)에 의하면 침식률은 다음과 같다.

$$S_E = E \left(\frac{\tau_b}{\tau_{ce}} - 1 \right), \quad \tau_b > \tau_{ce} \quad (6.16)$$

여기서, E : 하상 침식률 ($0.00001 \sim 0.00004 \text{ kg/m}^2/\text{sec}$, Van Rijn, 1990)

τ_{ce} : 침식한계 하상전단응력 ($0.2 \sim 0.4 \text{ N/m}^2$)

τ_b : 하상 전단응력 (N/m^2)

나) 퇴적

Krone(1962)에 의해 제시된 퇴적률은 다음 식과 같다.

$$S_D = W_s C \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}} \right), \quad \tau_b < \tau_{cd} \quad (6.17)$$

여기서, W_s : 퇴적물입자의 침강속도(m/s)

C : 해수중의 퇴적물 농도(g/m³)

τ_{cd} : 퇴적한계 하상전단응력 (0.06~0.15 N/m²)

Thorn(1981)의 연구결과에 따르면 미세 점착성 퇴적물의 침강속도는 다음과 같은 농도와의 관계에 따라 결정된다.

$$W_s = k_1 C^n \quad (0.3 \text{ kg/m}^3 \leq C \leq 3.5 \text{ kg/m}^3) \quad (6.18)$$

$$W_s = W_{s0} (1 - k_2 C)^\beta \quad (3.5 \text{ kg/m}^3 < C) \quad (6.19)$$

여기서, $k_1=0.513$, $k_2=0.008$, $n=1.29$, $\beta=4.65$ 이며, 기준침강속도 W_{s0} 은 2.6mm/ sec의 값을 갖는다.

아. 모형의 검증

1) 토사이동 모형의 검증

토사이동 수치모형의 검증을 위하여 이안제 후면에 대한 Goda(2001)의 수치결과와 비교한다. 1/50의 일정수심에 수심 4m에 길이 200m, 폭 10m의 불투수성 이안제를 두고 유역과 2m, 주기 8초의 파가 이안제에 직각으로 유입될 때 이안제 후면에 형성되는 해빈류 및 그에 따른 3일 후의 수심변화를 비교 검토한다. 토사이동은 0.2mm로 2.4cm/s의 침강속도를 갖는 것으로 주어졌으며, 수평확산계수는 0.01m²/s로 동일하게 두었다.

해빈류는 그림 6.2에서 보는 바와 같이 이안제 후면에서 해안으로부터 이안제로 향하는 방향의 2중 와류가 거의 동일하게 유사한 크기로 형성되고 있으며 그림 6.3에 제시된 해저면의 변화는 표사침식율에 대한 식이 다름에도 유사한 경향을 보이고 있다. 현재 다양한 침식율 산정식이 제공되고 있는데 수심변화에 대한 관측 자료와의 비교를 통하여 침식율에 대한 좀더 명확한 설정이 요구된다. 근본적인 표사이동의 원리를 규명하기에 충분하고 널리 사용되고 있는 산정식을 사용하였다. 따라서 관측 자료와 비교하여 계수가 적으므로 정확성이 떨어질 수 있으나 실지형에서 잘못된 결과를 산출할 가능성은 적다고 판단된다.

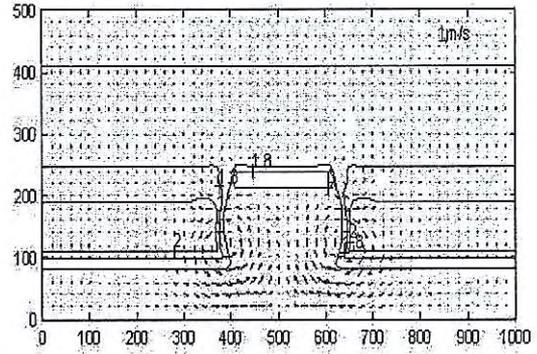
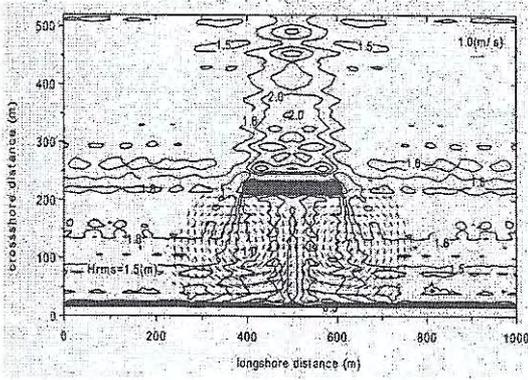


그림 6.2 Goda(2001)의 해빈류 결과(좌)와 수치모형 결과(우)의 비교

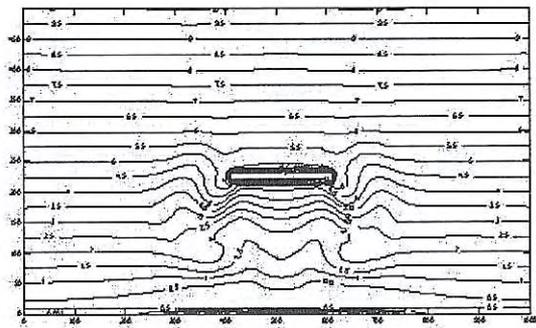
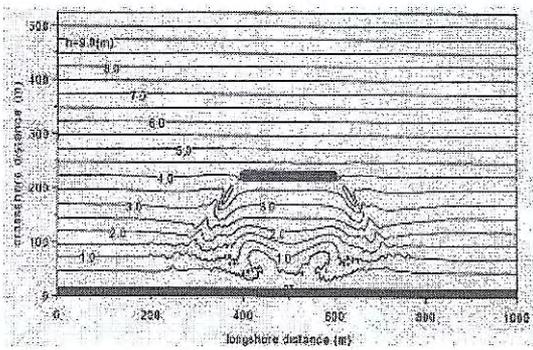


그림 6.3 Goda(2001)의 해저면 변화 결과(좌)와 수치모형 결과(우)의 비교

2) 투과성 이안제와 불투과성 이안제에 대한 수치모형의 비교

해안선 및 수심이 직선적이고 평행한 경우에 대하여 불투과성 이안제와 투과성 이안제가 해안선에 평행하게 설치되는 경우 파랑 및 해저면 변화에 대한 수치 결과가 그림 6.4와 그림 6.5에 도시되었다. 불투과성 이안제가 설치된 경우 이안제 후면에서 상당한 퇴적 현상이 발생하고 있다. 그러나 50%를 투과하는 조건에서도 후면에서 충분한 퇴적 현상이 발생하고 있으므로 특히 이안제 양단을 따라 퇴적 사주가 발생하는 현상이 수치모의에서 발생하고 있다.

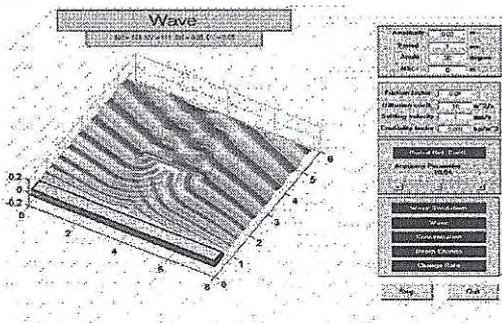


그림 6.4a 완전 반사 조건에서의 파랑

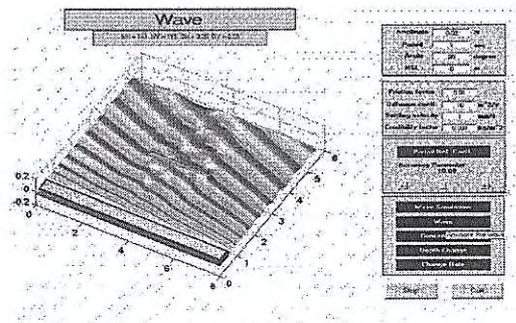


그림 6.4b 투과율 50%인 조건에서의 파랑

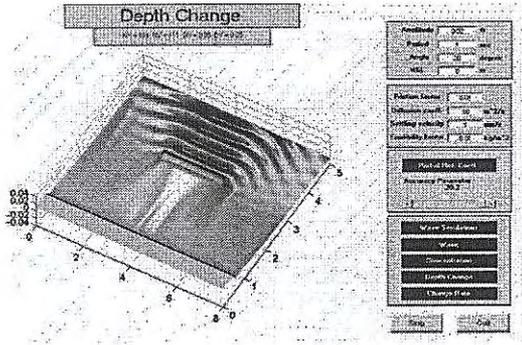


그림6.5a 완전 반사 조건에서의 해저면 변화

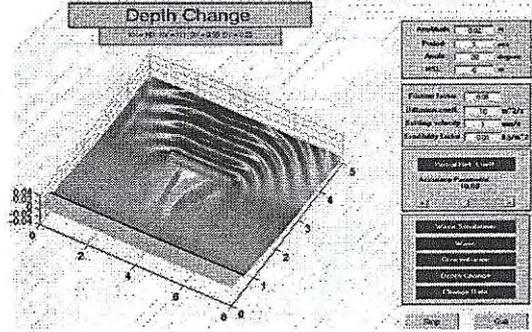


그림6.5b 투과율 50%인 조건에서의 해저면 변화

3) 투과성 방파제 설치시의 모형검증

가) 수리실험 개요

투과성 방파제 설치시의 모형 검증을 위해서 2차원 파랑수조에서의 수리실험을 실시하였다. 실험은 성균관대학교 수리실험실의 파랑수조에서 진행되었으며, 수조는 길이 12m, 폭 40cm, 깊이 50cm이고 수심은 20cm로 유지되었다. 항내의 수심은 항 저면의 두께의 영향으로 18cm이고, 피스톤 타입의 조파기에서 규칙파를 발생하였다. 수조는 관찰하기 용이하도록 바닥과 벽면이 모두 유리로 되어 있고, 조파기의 반대쪽 수조 끝에는 지속적인 에너지 흡수와 반사파를 억제하기 위한 소파지대가 설치되어 있다.

파랑수조에서는 파고계를 통해서 파의 정보를 획득하는데 파고계는 증폭기와 연결이 되어있고, A/D 컨버터가 이 신호들을 ASCII 형식으로 변환해주어 데이터를 획득할 수 있다. 지형변화는 50mm 렌즈를 사용한 SMD-1M60 CCD 카메라로 촬영하였고, 촬영된 이미지들은 AM-MTD를 통해서 1024×1024 혹은 512×512 픽셀의 흑백 이미지 정보로 전환될 수 있다. 본 실험에서는 초당 30회 촬영이 가능한 CCD 카메라로 512×512 픽셀의 흑백 이미지를 획득하였다. 그림 6.6은 수리실험시 관측할 이미지의 영역을 보여준다.

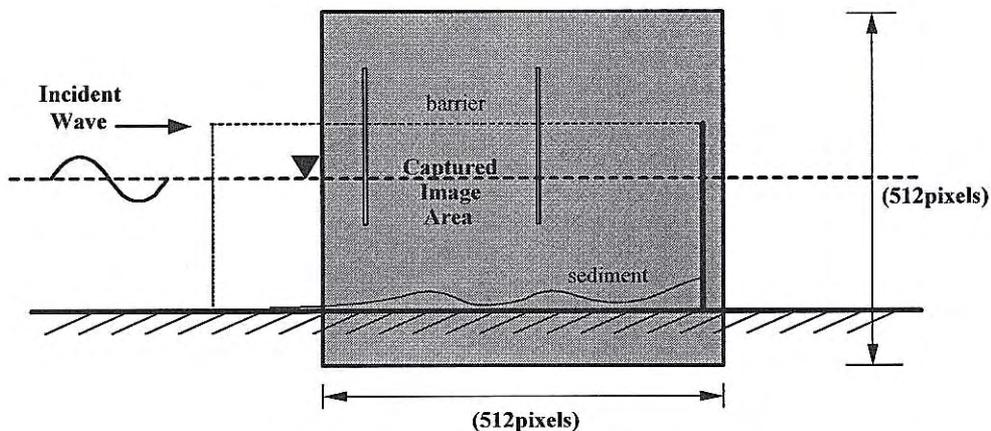


그림 6.6 CCD 카메라로 획득한 이미지 영역

나) 수리실험 관측치와 수치결과의 비교

수리실험은 표 6.2과 같이 4가지 Case에 대해서, 두 가지 파의 조건하에서 구조물의 변화를 주면서 수행되었다. 입사파고는 항 모형이 없는 상태에서 측정되었고, 항 입구의 방벽은 제거되었다.

수리실험의 전반적인 모습이 그림 6.7에 제시되었다. 모형은 290×52 격자, 격자 간격 8mm상에서 계산되었다. 그림 6.8과 그림 6.9은 파고계로부터 획득한 파형에 대한 수치결과(에너지 손실 유무 모두 고려)와 수리실험 결과를 비교한 것이다. 에너지 손실을 포함하여, 수리실험과 수치실험결과가 잘 일치함을 알 수 있다. 주기 0.8초의 장파의 경우, 에너지 손실의 영향은 상대적으로 적고 파의 위상은 내항에서 가장 크다. 주기 0.69초의 경우 파의 위상은 세 개의 파고계에서 유사하게 나타났다.

표 6.2 수리실험시 입력조건

		Period (sec)	$H(cm)$	a/h	ka	반사율 계수	에너지 손실
Case 1	Single barrier	0.80	3.9	0.21	0.2227	0.073	0.178
Case 2		0.69	5.5		0.2734	0.112	0.352
Case 3	Double barrier	0.80	3.9		0.2227	0.073	0.178
Case 4		0.69	5.5		0.2734	0.112	0.352

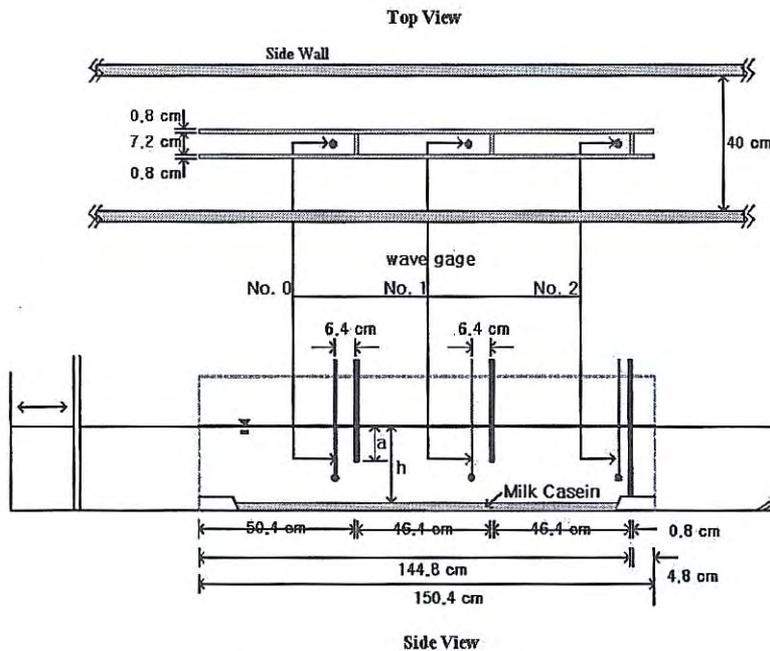


그림 6.7 2차원 파랑수조의 수리실험 세팅

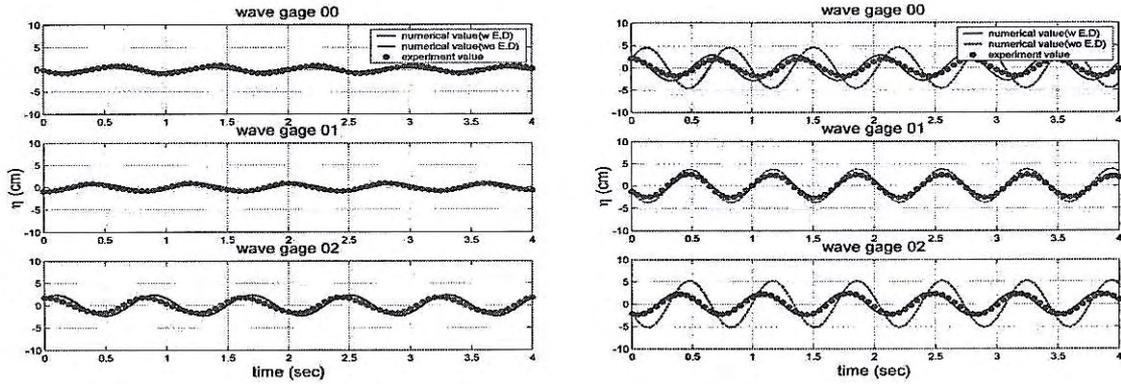


그림 6.8 파형의 수치실험 관측치와 실험치 비교(Case1, Case2)
 (Solid line : 에너지 손실 고려, Dashed line : 에너지 손실 미고려)

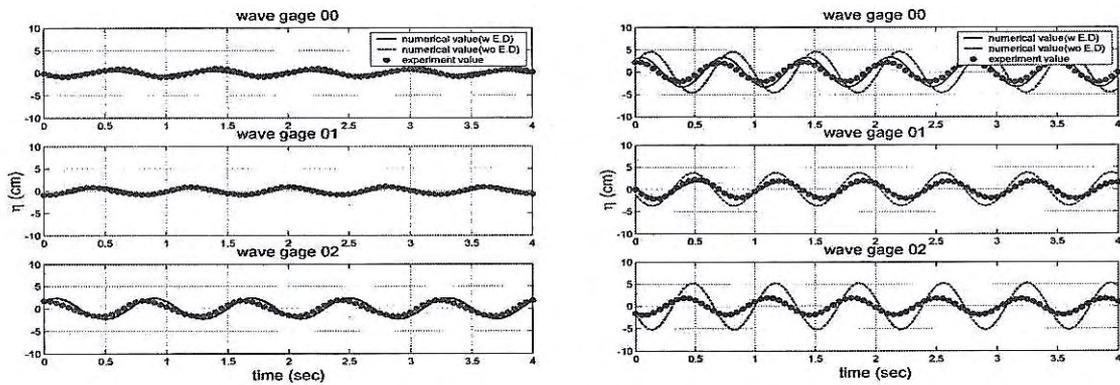


그림 6.9 파형의 수치실험 관측치와 실험치 비교(Case3, Case4)
 (Solid line : 에너지 손실 고려, Dashed line : 에너지 손실 미고려)

해저지형 변화를 관측하기 위한 수치실험에서는 항구 모형의 아크릴 저면에 2cm 두께의 밀크카세인을 이용한 토사층을 만들었다. 밀크카세인은 2차원 파랑수조에서의 수치실험 결과를 위하여 사용한 토사대체물로 d_{50} 은 0.24mm이고, 평균 침강속도는 0.64cm/sec이다. 해저지형은 CCD 카메라에 의해 촬영된 이미지들로부터 산출하였다. 그림 6.10과 같이 파가 재현될 때 두 개의 층이 관측되었다. 질량보존이 보다 잘되는 것처럼 관측된 윗 층의 표면을 수치결과와 비교하였다(에너지 손실을 고려한 값). 수치실험의 데이터들은 디지털이징을 통해 획득되었다. 해저지형 변화 수치실험 역시 표 6.2과 같은 4가지 경우에 대해서 수행하였다.

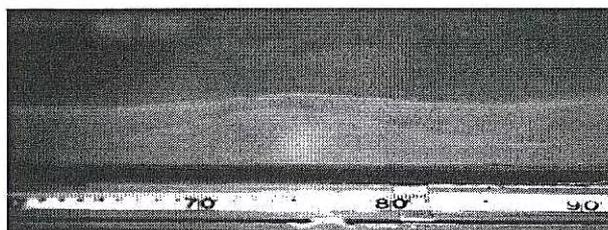


그림 6.10 파가 진행될 때 관측된 두 개의 토사층

그림 6.13 ~ 그림 6.16은 각 케이스별로 관측된 5분, 10분 그리고 15분 후의 해저면 변화율을 보여준다. 그림 6.17과 그림 6.18에서 나타나듯이 수치결과는 실험데이터와 잘 일치한다($M=2s/m$, $K_x=K_y=1m^2/s$, $K_z/ws=0.05m$). 밀크카세인의 침식계수는 일반적인 토사에 비해서 매우 크게 추정된다.

수직 방벽은 $x=-5.5cm$ 에 위치하고, 해저면의 단면은 초기 평평한 상태에서 5분후에 관측된다. 측정된 데이터는 저면의 토사가 파의 에너지가 높은 지역에서 침식되고, 파의 에너지가 낮은 지역에서 퇴적됨을 나타낸다. 수치실험에서 평판이 잠긴 깊이가 깊지 않아도 와류가 지형변화를 예측하는데 중요한 역할을 하였다. 그림 6.11과 그림 6.12에서 보듯이 0.8초의 주기에서 이미지 좌측 끝의 아크릴 바닥(항의 저면부)이 5분후에 드러났다. 0.8초 주기에서 가장 파의 에너지가 큰 항내의 부유사는 상대적으로 농도가 낮은 곳으로 이동했다. 그렇기에 토사의 농도는 중간지역에서 가장 높다. 0.69초의 주기에서 3개 지역의 파의 에너지는 서로 비슷했고, 이에 항내가 침식되었다.

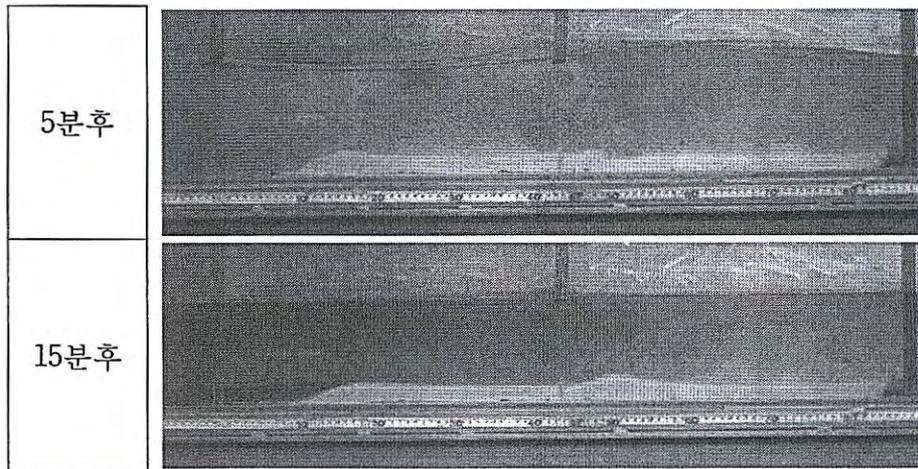


그림 6.11 5분, 15분후의 해저면 이미지(Case3)

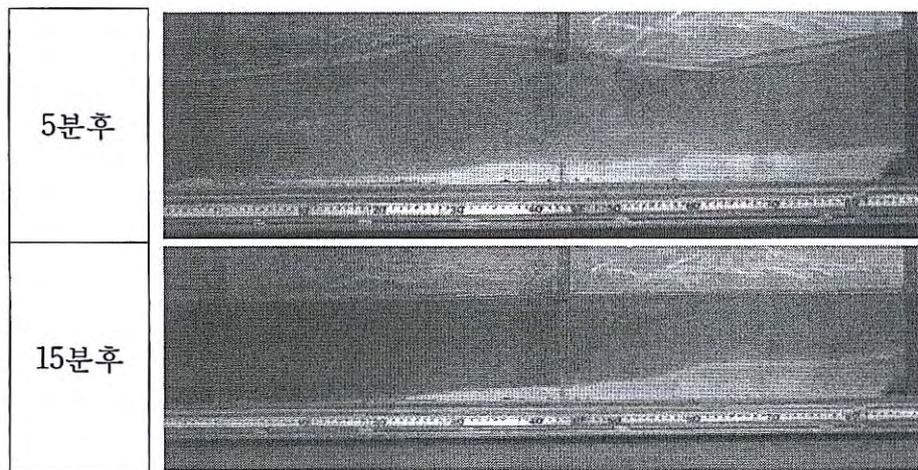


그림 6.12 5분, 15분후의 해저면 이미지(Case4)

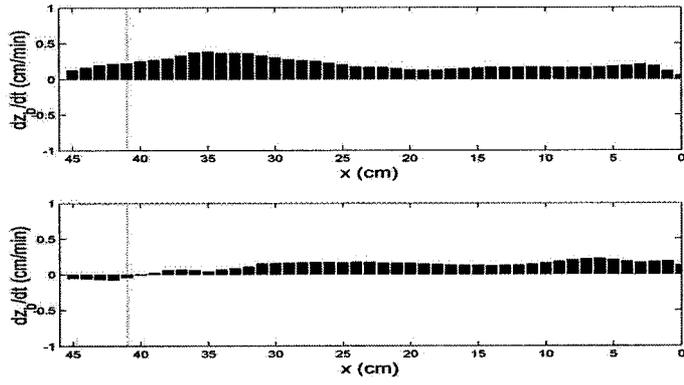


그림 6.13 관측된 5분, 10분후의 분당 해저면 변화율(Case1)
(점선 : 장벽의 위치)

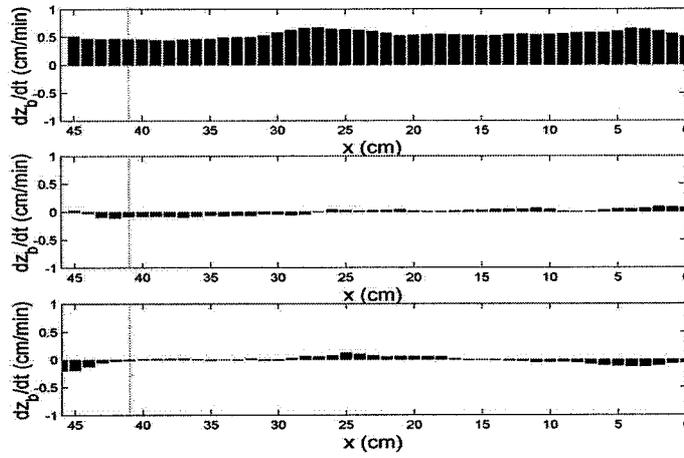


그림 6.14 관측된 5분, 10분, 15분후의 분당 해저면
변화율(Case2)
(점선 : 장벽의 위치)

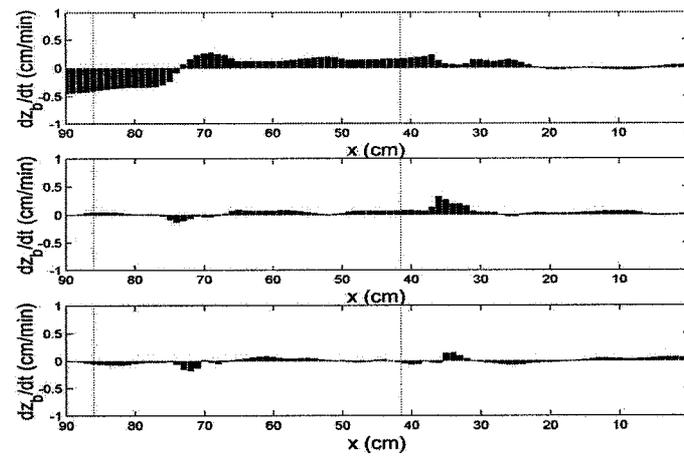


그림 6.15 관측된 5분, 10분, 15분후의 분당 해저면
변화율(Case3)
(점선 : 장벽의 위치)

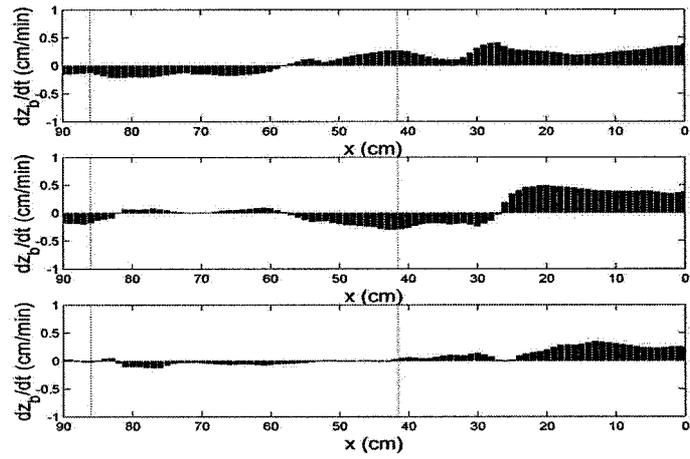


그림 6.16 관측된 5분, 10분, 15분후의 분당 해저면
변화율(Case4)
(점선 : 장벽의 위치)

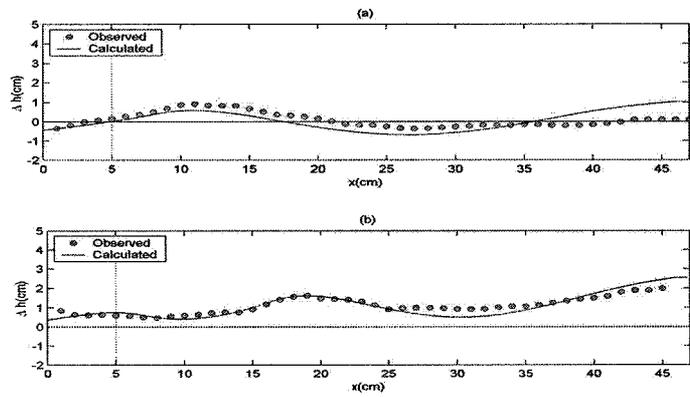


그림 6.17 수리실험과 수치결과와의 비교(5분후 저면)
(a) Case1 (b) Case2

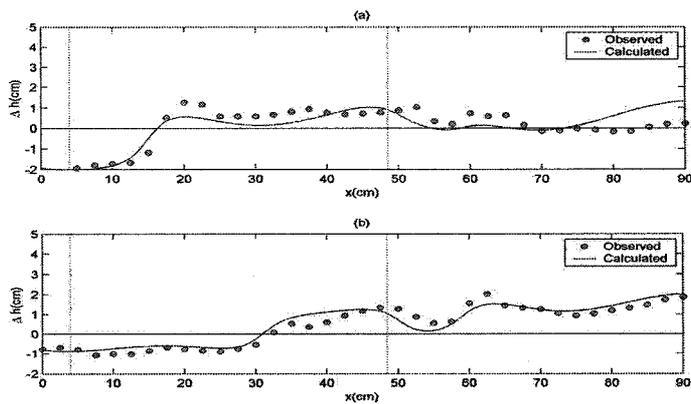


그림 6.18 수리실험과 수치결과와의 비교(5분후 저면)
(a) Case3 (b) Case4

4) 수치모형의 실지형 적용 ; 울진 나곡항 부근

수치모형이 실지형에 적용된 경우로 울진 나곡항 부근에 적용된 경우의 CASE study 결과를 제시한다. 적용지역에 도달하는 파랑 환경은 표 6.3과 같이 여름형과 겨울형으로 대별된다.

표 6.3 SADEM 수치모형 개요

구 분	계절별	
	CASE1(여름)	CASE2(겨울)
파고	1.5 m	2 m
파향	67.5° (ENE)	22.5° (NNE)
주기	10 sec	10 sec
MSL	0 m	0 m

ENE 계열(CASE1)에 대한 해빈류, 해저면 변화 결과가 그림 6.19 ~ 6.22에 도시되었다. 파향이 정북으로부터 시계 방향으로 67.5도이고 주 해안선 방향이 정북으로부터 시계반대 방향으로 57도인 관계로 북측으로의 연안류가 발생하고 있다. 파가 쇄파되는 쇄파대에서 모래가 쌓이고 쇄파대 내에서 침식되는 전형적인 모습을 보이고 있으며 배수구 북측과 취수구 입구에 모래가 쌓이는 경향을 보여주고 있다. ENE 파향의 파랑으로 인하여 특히 나곡항 남측 해안에서 쇄파대에서 침식이 크게 발생하고 있다.

NNE 계열(CASE 2)에 대한 해빈류, 해저면 변화 결과가 그림 6.23 ~ 6.26에 도시되었다. 파향이 정북으로부터 시계 방향으로 22.5도이고 주 해안선 방향이 정북으로부터 시계 반대방향으로 57도인 관계로 남측으로의 연안류가 발생하고 있다. 역시 파가 쇄파되는 쇄파대에서 모래가 쌓이고 쇄파대 내에서 침식되는 전형적인 모습을 보이고 있으며 부구천 하구에서 모래가 쌓이고 배수구 남측 모해 해안에서 침식되는 경향을 보여주고 있다. 나곡 해수욕장과 나곡항 남측 해안에서 전형적인 longshore bar가 발생하고 있으며 원전 전면 해안에서 구조물로 인하여 모래가 외해로 밀려나는 현상을 보여주고 있다. 특히 배수구 남측 해안은 모래가 쌓이는 단면이 없이 쇄파대 내에서 침식이 이루어지고 있다.

Case 1 (Wave Induced Current)

파고	1.5 m
파향	67.5° (ENE)
주기	10 sec
MSL	0 m

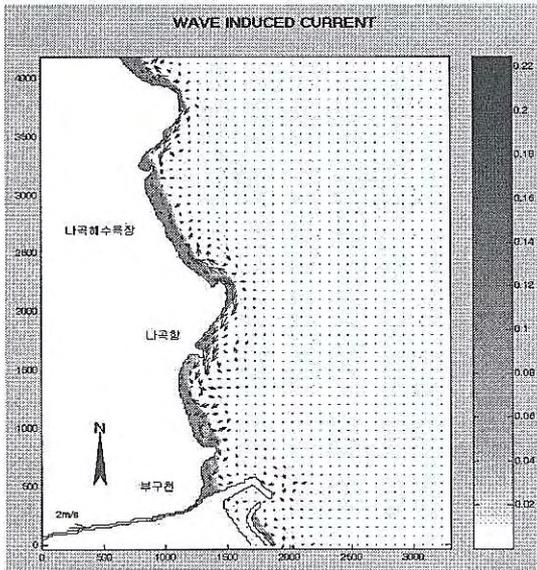


그림 6.19 해빈류
($H_0=1.5\text{m}$, $T=10\text{sec}$, $\theta=\text{ENE}$)

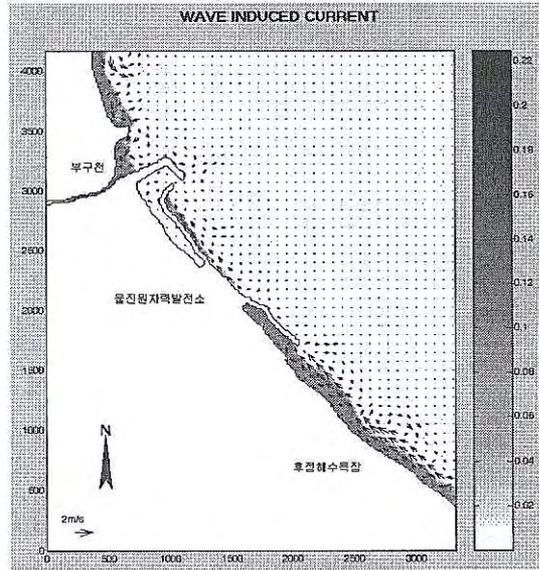


그림 6.20 해빈류
($H_0=1.5\text{m}$, $T=10\text{sec}$, $\theta=\text{ENE}$)

Case 1 (Sediment Simulation)

파고	1.5 m
파향	67.5° (ENE)
주기	10 sec
MSL	0 m

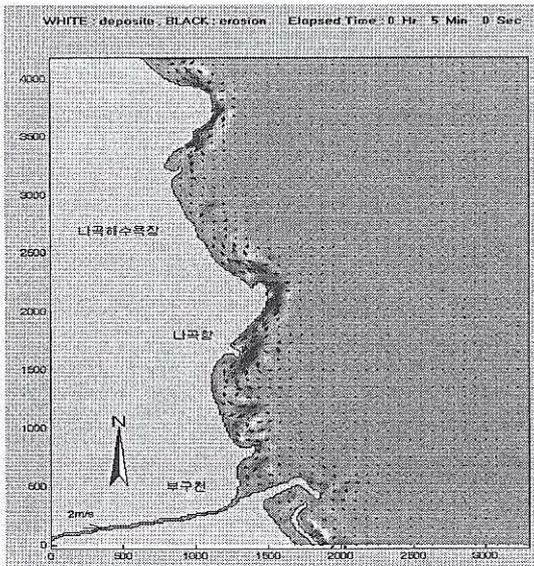


그림 6.21 해저침퇴적
($H_0=1.5\text{m}$, $T=10\text{sec}$, $\theta=\text{ENE}$)

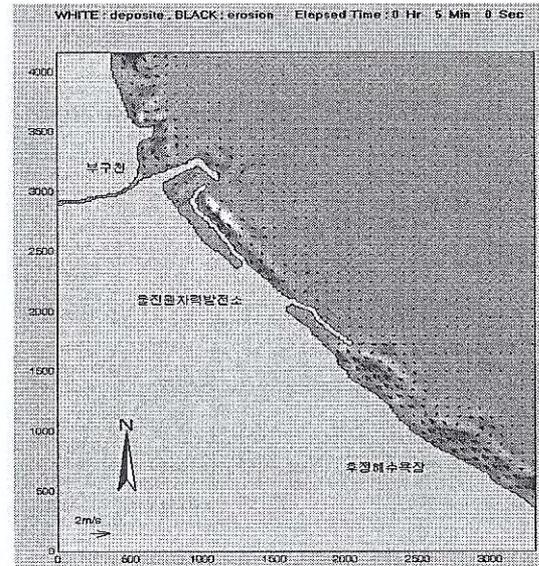


그림 6.22 해저침퇴적
($H_0=1.5\text{m}$, $T=10\text{sec}$, $\theta=\text{ENE}$)

Case 2 (Wave Induced Current)

파고	2 m
파향	22.5° (NNE)
주기	10 sec
MSL	0 m

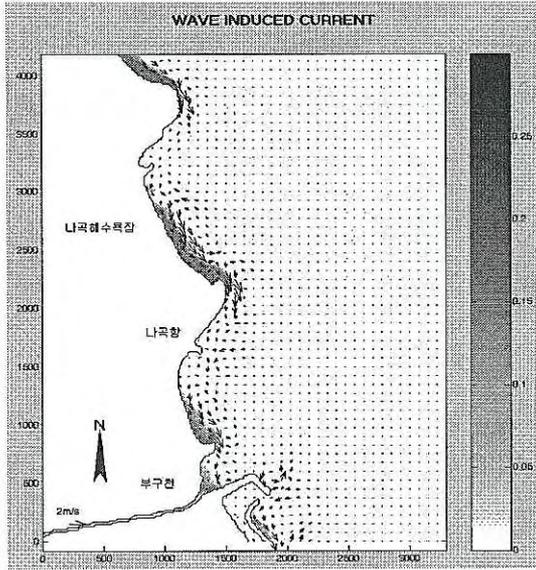


그림 6.23 해빈류
($H_0=2m$, $T=10sec$, $\theta=NNE$)

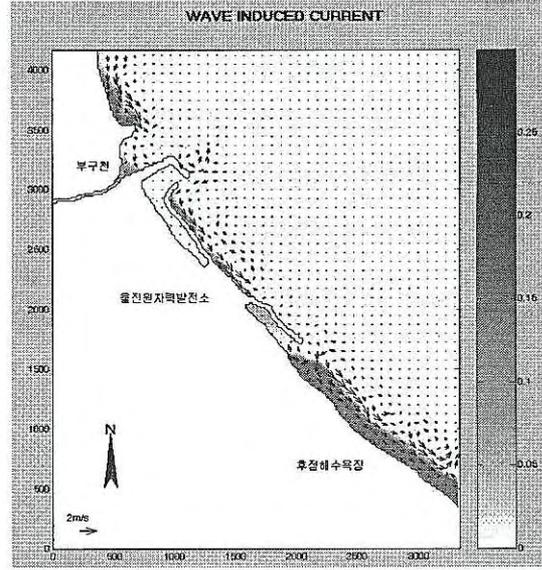


그림 6.24 해빈류
($H_0=2m$, $T=10sec$, $\theta=NNE$)

Case 2 (Sediment Simulation)

파고	2 m
파향	22.5° (NNE)
주기	10 sec
MSL	0 m

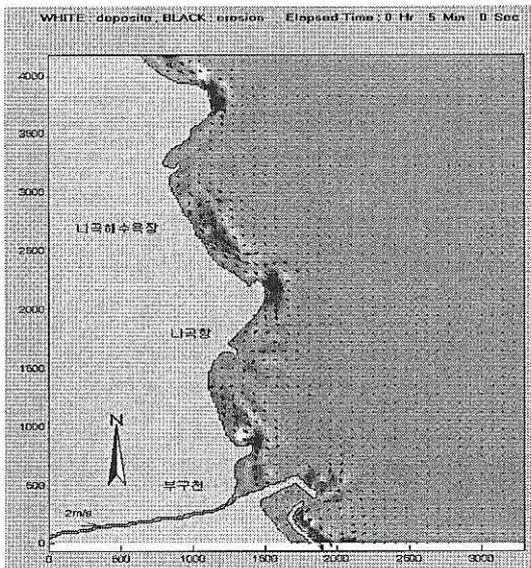


그림 6.25 해저침퇴적
($H_0=2m$, $T=10sec$, $\theta=NNE$)

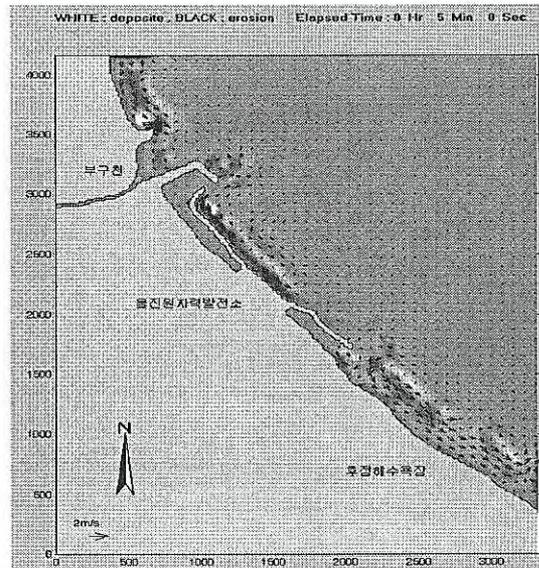


그림 6.26 해저침퇴적
($H_0=2m$, $T=10sec$, $\theta=NNE$)

제7절 해안선 변화 수치모형 개발

1. 개요

전 세계 해안선의 총연장 약 11,914km의 약 6.74%인 802.5km가 모래 해안인 것으로 나타났다. 해안은 그 퇴적물의 구성물질 성상에 따라 암석해안(Rocky coast), 모래해안(Sandy coast)과 점성미세퇴적물해안(Cohesive sediment coast 또는 muddy coast), 즉 갯벌의 세 가지로 구분할 수 있다. 암반해안은 적어도 우리의 수명기간 동안에는 크게 변하지 않는다. 반면 모래해안 또는 해변(Beach)은 물의 흐름에 따라 쉽게 변형된다. 모래해안의 해안선의 위치는 흐름 또는 파랑의 작용에 따라 전진하기도 하고 후퇴하기도 하며 끊임없이 변한다. 주로 하구 또는 만 등에서 파랑의 직접적 영향이 적은 곳에 발달하는 점성미세퇴적물해안의 경우 입자간 또는 입자군간의 전기 화학 상호작용을 포함하는 좀 더 복잡한 양상을 띠게 된다.

해안 침식으로 문제가 되고 있는 국내 해안은 속초 영랑호 주변 해안과 강릉 남대천 남측의 남향진 해수욕장, 그리고 포항 송도 해수욕장 등이 있다. 이들 지역의 해안침식은 인위적인 구조물의 설치로 파랑 환경이 달라지거나 모래 유출입의 평형상태가 파괴되었기 때문이다. 돌제나 항만 등 인위적인 해안 구조물이 들어서지 않고 하천으로부터의 토사유입이 유지되는 한 현재의 해안은 장기적으로 유입되는 모래와 유실되는 모래의 양이 같은 평형 상태로 봐도 무방하다. 그러나 해안 구조물의 건설은 차폐지역에서 파랑 회절과 같은 현상을 유발하여 파봉선의 변화를 초래한다. 또한 구조물이 연안토사 이동을 차단하는 경우 연안 하류로 유입되던 모래의 양을 줄여 유입되는 모래의 양보다 유실되는 모래의 양을 많게 하는 경우에도 침식 해안이 발생한다.

백사장 모래의 이동에 가장 큰 영향을 미치는 것은 끊임없이 해변에 영향을 미치는 파도이며 그중에서도 파고(파도의 크기)보다는 파향에 더욱 민감하다. 모래 해안선은 파봉선과 평행한 경우에 비로소 연안 토사 이동이 멈추므로 이 상태에 도달될 때까지 해안의 침식 및 퇴적은 꾸준히 진행된다. 따라서 해양환경의 변동으로 파향(파도가 전파되는 방향)이 약간 변하는 경우에도 예기치 않은 침식이나 퇴적이 자연적으로 발생할 수 있다. 그러나 이런 경우 몇 년 또는 몇 십 년이 지나면 자연스럽게 다시 평형에 도달하므로 당장 해안 배후 지역의 침수 또는 붕괴의 우려가 있지 않는 한 선부른 처방은 오히려 악영향을 미칠 수도 있고 무용지물이 될 수도 있으니 신중할 필요가 있다.

해빈이란 해안선에서 외해 쪽으로 모래 또는 자갈이 분포된 부분을 말하며, 조석과 파랑조건에 따라 그림 7.1과 같이 분류된다. 외해에서 육지쪽으로 보면 쇄파대의 외해측 한계선에서 대륙붕으로 연장되는 부분으로 해저면 경사가 완만한 지역을 원빈이라 하고, 원빈의 육지쪽 끝부터 간조정선까지의 구간을 외빈(inshore, nearshore)이라 한다. 이곳에 연안사주(longshore bar)나 단(step)이 형성되기도 한다. 간조정선에서 파랑의 쳐올림(uprush)의 상한선까지의 경사진 부분을 전빈(foreshore)으로, 이곳에서부터 해안선까지를 후빈(backshore)으로 구분한다. 해안선과 인접한 전빈의 경우 침식이 발생하지만 해안선과 인접하지 않는 지역인 후빈은 침식이 거의 발생하지 않는다.

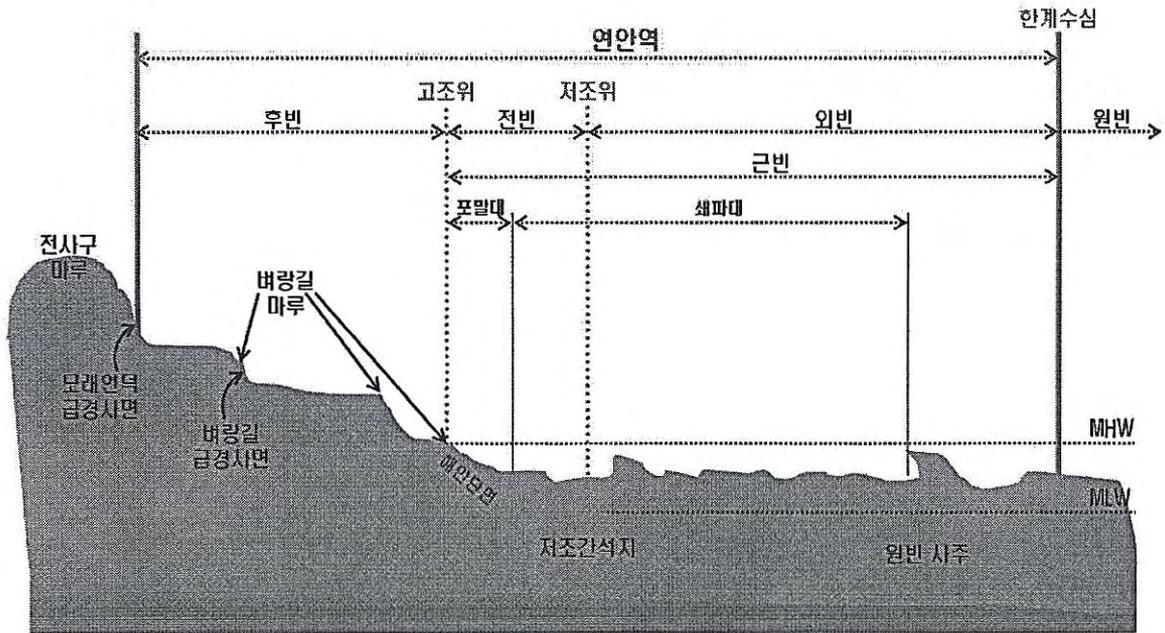


그림 7.1 해변의 분류

후빈은 일명 경빈이라고도 하며, 흔히 해수욕장으로 이용되는 해변을 경빈이라 일컫는다. 연안사주는 원빈과 외빈의 경계에 해안선과 평행하게 형성되는 사주로서 보통 폭풍시에 생겼다가 파랑이 약해지면 사라진다. 한편 파랑의 전파 변형과정으로 구분하면, 심해에서 발달한 파랑이 수심이 낮은 천해로 전파해 들어와 천수현상이 일어나는 시작점에서 쇄파되기 시작하는 지점까지를 천수역(shoaling zone)이라 하고, 쇄파 시작점에서 종료점까지를 쇄파대(breaker zone)라 한다. 또한 쇄파시작점에서 파랑의 처울림이 시작되는 점까지를 통칭하여 쇄파대(surf zone)이라 하기도 한다. 쇄파대를 지나 파랑의 처울림과 처내림(backwash)이 반복되는 지역을 포말대(swash zone)라 한다.

평형 해안 종단면은 해안에 작용하는 파괴적인 힘과 건설적인 힘의 평형을 나타낸다. 많은 다른 종류의 파괴적인 힘과 건설적인 힘이 해안에 영향을 주고 있지만, 이러한 개별적인 힘들의 완벽한 일치나 양적 동일함은 아직도 잘 이해되는 부분이 아니다. 그러나 경험적 방법을 통해 평형 해안 종단면을 형성하거나 그 반대의 경우에 대해 필요한 양을 정하는 것은 가능한 일이다.

파괴적인 힘 가운데, 중력은 평형 종단면을 수평면으로 만들기 때문에 가장 중요하다. 매우 현저하게 나타나는 부가적인 파괴력은 포말대 내에 존재하는 몹시 격한 난류이다. 쇄파는 유기적인 파 에너지를 몹시 혼돈된 파동속으로 이동시킨다. 이러한 격한 난류는 안정되어있는 토사를 들뜨게 하고, 중력과 같이 작용하여 해안에서 바다쪽으로 밀어내는 작용을 한다. 난류의 중요성은 다른 해안 종단면의 포말대에서 수영을 해보면 명백히 알 수 있다. 비교적 완만한 해안 경사의 종단면에서는 상대적으로 적은 난류의 영향을 받는다. 왜냐하면 쇄파과정이 넓은 포말대 전역에 대해서 분포하기 때문이다. 경우에 따라서

는 실제로 난류가 토사의 동요를 야기할만한 충분한 힘이 있는지조차 의심스러워진다. 급한 경사의 해안 종단면의 포말대에서는 파도가 극히 제한된 공간에서 그 에너지를 분산시킨다. 그래서 난류파동의 크기가 훨씬 크고 물기둥이 훨씬 깊이 확장된다. 우리는 그것이 다양한 난류 에너지층 아래에서 안정성을 유지하기 위함이라는 것을 안다. 미세한 토사나 굵은 토사로 구성된 해안은 울진 인근 해역의 해저지형과 해저면의 경사처럼 각각 완만한 경사와 급한 경사로 이루고 있다.

2. 사질 해안선의 특징

백사장 모래의 이동에 가장 큰 영향을 미치는 것은 끊임없이 해변에 영향을 미치는 파도이며 그 중에서도 파도의 크기인 파고보다는 파도가 밀려오는 방향에 더욱 민감하다. 즉, 사질 해안선은 그림 7.2와 같이 해안선과 가장 가깝게 연한 파봉선과 나란해지려는 경향이 있다. 우리나라 강원도 동해안의 경우 평균적인 파봉선과 주 해안선이 거의 나란하여 긴 백사장이 형성될 수 있었다.

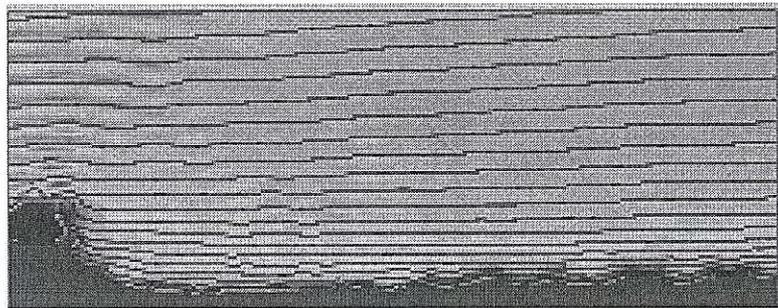


그림 7.2a 해안선과 주 유입 파랑의 파봉선과의 상관

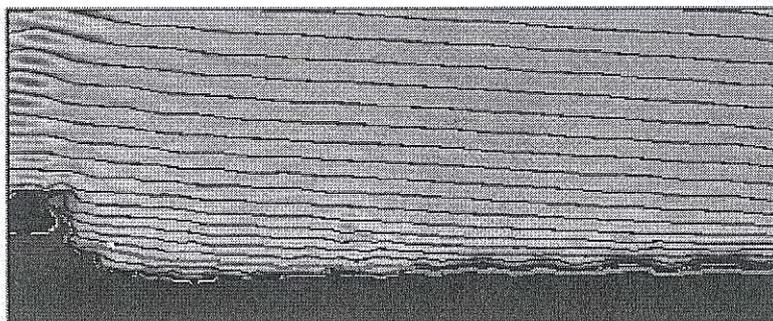


그림 7.2b 파랑환경의 변화로 주 유입 파랑의 파봉선 변화가 발생하는 경우 새로이 형성되리라 예상되는 해안선(녹색 선)

해안선과 파봉선이 평행하다면 해빈표사는 해안을 따라 이동되지 않지만 파향이 변하면 연안을 따라 표사가 이동되며 파봉선과 나란한 해안선을 이루려 한다. 해양환경이 변하여 장기간 파봉선의 방향이 그림 7.3과 같이 바뀐다면 화살표 방향으로 토사의 이동이 발생하여 한쪽의 해안선은 후퇴하고 다른 쪽은 전진하게 된다. 따라서 해양환경의 변동으

로 파향이 약간 변하는 경우에도 예기치 않은 침식이나 퇴적이 자연적으로 발생할 수 있다. 그러나 이런 경우 몇 년 또는 몇 십 년이 지나면 자연스럽게 다시 회복되곤 하는 것이므로 선부른 처방은 오히려 악영향을 미친다.

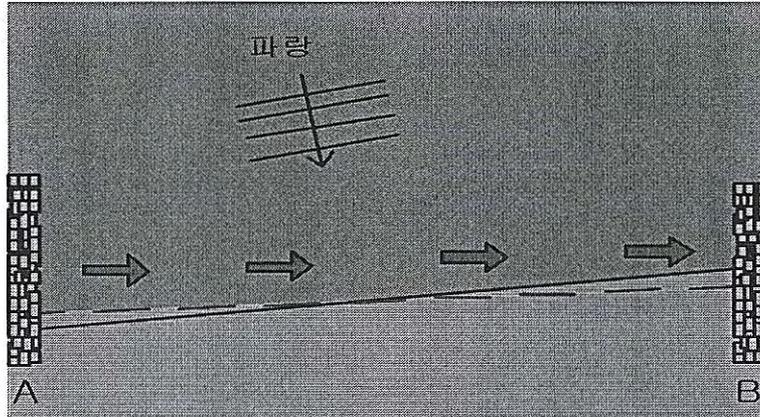


그림 7.3 파향의 변화에 따른 사질 해안선의 반응

동해안의 경우 계절적으로 파향이 크게 변하여 겨울철에는 NE 계열, 여름철에는 SE계열의 파향을 갖는다. 그러나 월별 파향 출현율을 보여주는 표 7.1에서 보는 바와 같이 거의 모든 계절에서 NE 계열의 파가 유입되고 있다.

표 7.1 월별 파향 출현율

GRID POINT : 4028		PERIOD : 1986 - 1995												
DIR \ Mon		Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Tot.
N (%)		1.7	2.1	3.5	3.5	2.4	1.4	0.6	1.2	2.3	3.7	2.6	2.5	2.3
NNE (%)		15.6	17.4	13.3	7.4	5.1	6.5	3.8	4.8	10.2	15.1	15.4	16.2	10.9
NE (%)		15.8	14.3	16.2	10.0	12.3	20.8	17.5	21.6	25.8	22.5	15.6	14.1	17.2
ENE (%)		3.2	5.7	9.6	6.1	8.2	12.7	11.0	14.4	17.9	12.5	5.7	2.7	9.1
E (%)		1.6	5.3	6.9	6.5	7.7	8.4	6.3	10.0	12.5	7.8	3.2	1.0	6.4
ESE (%)		0.3	2.3	4.2	4.3	5.9	5.2	5.2	4.3	4.8	2.9	0.3	0.7	3.4
SE (%)		0.9	0.8	3.1	5.0	5.7	5.7	7.2	6.8	2.4	1.6	0.7	0.5	3.4
SSE (%)		0.5	1.6	2.8	7.0	7.7	8.3	8.6	7.8	3.5	1.0	0.4	0.4	4.1
S (%)		0.6	0.9	4.5	8.7	11.3	16.8	16.3	11.2	5.0	1.5	1.0	0.4	6.5
SSW (%)		0.6	0.8	1.9	4.5	4.0	3.6	6.0	6.3	2.1	1.5	1.7	1.0	2.9
SW (%)		1.2	2.8	3.1	5.7	5.7	3.0	8.9	5.6	1.2	2.8	4.2	2.3	3.9
WSW (%)		3.3	4.0	4.5	8.0	7.9	2.6	5.9	2.5	2.5	5.0	7.6	6.0	5.0
W (%)		9.3	8.5	8.3	10.7	8.7	2.6	1.8	1.5	3.1	6.1	12.0	13.1	7.1
WNW (%)		25.6	16.6	10.4	7.3	4.0	1.2	0.5	1.3	4.1	9.4	16.5	22.7	10.0
NW (%)		15.7	13.6	5.2	3.2	1.9	0.5	0.1	0.4	1.5	4.9	9.8	13.2	5.8
NNW (%)		4.2	3.3	2.4	2.3	1.4	0.8	0.4	0.2	1.0	1.7	3.2	3.2	2.0
No.		2480	2256	2480	2400	2480	2400	2480	2480	2400	2480	2400	2480	29216

3. 수학적 모형

가. 지배 방정식

해안선 위치를 결정하기 위한 지배방정식으로 다음과 같은 연속방정식을 산정해 보자.

$$\frac{\partial x_s}{\partial t} + \frac{1}{D_s} \left(\frac{\partial Q}{\partial y} - q \right) = 0 \quad (7.1)$$

여기서 Q 는 단위시간당 표사이동량(m^3/s)으로 식 7.1에서 주어진 바와 같이 외해 조건에 따라 연안을 따라 흐르는 표사이동량 Q_1 과 해안 및 항만 구조물의 영향에 의하여 발생하는 국지 회절파로 인한 표사이동량 Q_d 로 구성된다. 또한 q 는 육지 방향(q_s) 및 외해 방향(q_o) 성분으로 구성되는 단위시간 단위폭당 육지 방향 및 외해 방향으로 유출입되는 표사이동량($m^3/s/m$)이다.

해안 및 항만 구조물의 영향에 의하여 발생하는 해안선의 변화는 logarithmic 만(bay)의 형태(Yasso, 1965)와 같이 구조물 후면에서 발생하는 파랑의 회절로 인하여 해안선이 파봉선에 나란해지려는 경향에서 발생한다고 본다.

평형 상태에서의 해안을 표현하는 Logarithmic 만 형태는 그림 7.4에서와 같이 사이각 θ 에 대하여 반경의 비율이 아래 식 7.2와 같은 특정 계수인 α 의 함수로 표현될 수 있다.

$$\frac{R_2}{R_1} = \exp(\theta \cot \alpha) \quad (7.2)$$

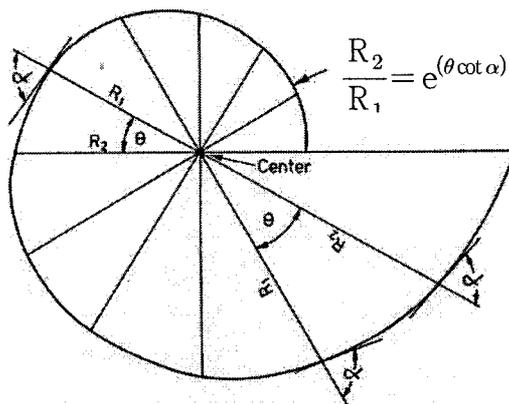


그림 7.4 Logarithmic 만의 형태(Yasso, 1965)

식 7.2의 근사식을 θ 에 대하여 미분을 취하면 식 7.3과 같이 표현되고 그림 7.5에서와

같이 확인되었다.

$$\frac{\partial R}{R \partial \theta} = \cot \alpha \quad (7.3)$$

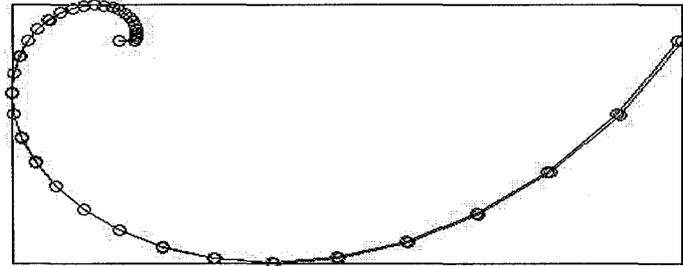


그림 7.5 식(7.2)와 식(7.3) 비교

여기서 특정 계수인 α 는 주 유입 파향에 지배되는 지역 특성 계수이며 일정한 값이며 R 은 회절파를 일으키는 구조물의 끝단에서 해안까지의 거리, θ 는 구조물 끝단에서 이루어진 각이다. 특정 계수 α 에 대한 한 예가 그림 7.6에 도시되었다. 따라서 평형 단면을 이루도록 Q_d 가 결정된다.

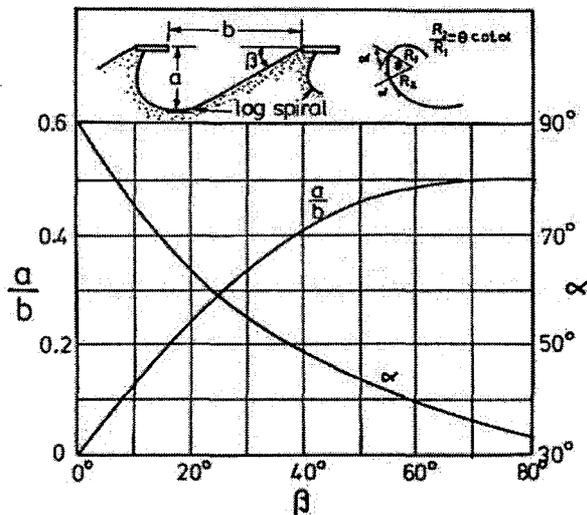


그림 7.6 연속 헤드랜드에 따른 평형 해안

해안선 변형에 대한 지배방정식인 식 7.1은 파랑특성자료, 초기조건, 구조물 관련자료 및 경계조건 등을 입력하여 풀 수 있다. 이 식은 해안선 좌표 x_s 에 따라 비선형이며 a_{Bs} 와 Q 와의 관련성이 내재되어 있다. 극도로 단순화된 가정(예를 들어 균일한 파 분포, 작은 입사파 경사, 이상화된 경계조건 등)을 부여할 경우 파랑모형과 해안선변형모형의 수

치해석은 불필요하게 된다. 이 경우 식 7.1은 아래에 보이는 바와 같이 1차원 분산방정식이 되며 Pelnard-Cinsifere (1956)가 제시한 수학적 모형으로 귀착된다. 이에 대한 해석적 해로서 Bakker (1968), Le Méhauté and Soldate (1978), Walton and Chiu (1979), 그리고 Larson, Hanson, and Kraus (1987) 등에 제시되어 있다. 이들 해석적 해를 통해 해안선 변형에 관한 기본적인 이해가 가능하다. 그러나 공학적 응용을 위해서는, 실제 파 조건 및 경계조건, 그리고 해안과 파랑의 상호작용 등과 같은 실제적 상황에 대한 해석이 필요하기 때문에 수치해석적 방법을 사용하여야 한다.

나. 유한차분방정식

식 7.1은 쉽게 차분식으로 전개시킬 수 있다. Kraus and Harikai (1983)가 제시한 방법을 토대로 하여 양해법 및 음해법으로 차분하는 과정을 다음에 소개한다. 또 다른 방법에 대해서는 다음 문헌을 참고할 수 있다. 양해법에 대해서는 Price, Tomllinson, and Willis (1972), 그리고 Le Méhauté and Soldate (1980) 등이 있고, 음해법에 대해서는 Hashimoto and Uda (1980) 등, 그리고 양해법과 음해법 모두를 사용한 것에 대해서는 Perlin and Dean (1978) 등이 있다.

식 7.1은 그림 7.7에 보인 격자망(i 는 격자번호를 의미함)과 같이 $\{x\}$ 와 $\{Q\}$ 가 교차적으로 정의되는 'staggered grid'를 사용하여 차분화한다. 해안선 방향 표사이동량 Q 는 각 격자의 경계선상에서 정의되는 반면 해안선 위치는 격자의 중앙에서 정의된다. 차분식 표현의 편의를 위하여 각 변수의 프라임(')은 다음 시간단계에서의 값을 의미하며 프라임이 없는 변수는 현재 시간단계에서의 값이라 정의한다. 식 7.1은 다음 식을 통해 t 시간단계에서 $t + \Delta t$ 시간단계로 표현된다.

$$x'_{si} = x_{si} + \Delta t \left\{ \lambda \left(\frac{\partial X_s}{\partial t} \right)_i + (1 - \lambda) \left(\frac{\partial X_s}{\partial t} \right)'_i \right\} \quad (7.4)$$

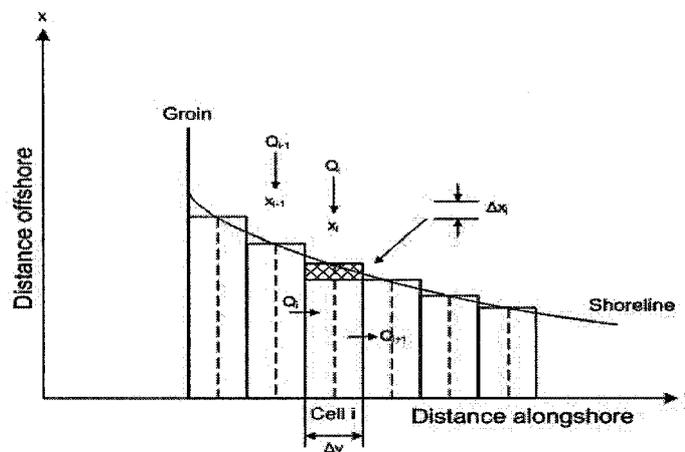


그림 7.7 유한차분격자상에서 해안선과 표사이동량의 위치

여기서 Δt 는 시간간격이며, λ 는 수치해석방법을 결정하게 되는 매개변수로서 $0 \leq \lambda \leq 1$

범위의 값을 갖는다. 식 7.4의 미분항은 다음과 같이 차분화된다.

$$\left(\frac{\partial x_s}{\partial t}\right)_i = -\frac{1}{D_s} \left(\frac{Q_{i+1} - Q_i}{\Delta y} - q_i \right) \quad (7.5)$$

$$\left(\frac{\partial x_s}{\partial t}\right)_i' = -\frac{1}{D_s} \left(\frac{Q'_{i+1} - Q'_i}{\Delta y} - q'_i \right) \quad (7.6)$$

다. 양해법

식 7.4에서 $\lambda=1$ 일 경우 다음 시간단계의 해안선 위치 x_s' 는 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$x_{si}' = x_{si} + \frac{\Delta t}{D_s \Delta y} (Q_i - Q_{i+1} + \Delta y q_i) \quad (7.7)$$

앞에서 살펴본 바와 같이 양해법은 새로이 결정되는 해안선 위치를 구하기 위해서 과거값을 사용하게 된다. 모형에서는 해안선 위치가 Δy 의 불연속인 격자점에서만 정의된다. Δt 는 임의로 산정할 수 있는데, 길게 잡을수록 전체적인 계산시간은 짧아지지만 너무 긴 값을 선택하게 되면 수치적 및 물리적 정확성은 떨어지게 되므로 6시간 내지 24시간의 값을 사용하는 것이 일반적이다. 양해법은 다음에 보인 바와 같이 한 시간 단계에서 음해법보다 빠른 방법이며 경계조건을 비롯한 제반 조건이 쉽게 표현되는 방법이다.

그러나 양해법에서는 시간간격을 일정값 이상으로 선택할 수가 없다. 주어진 파랑조건과 물리적 상황 하에서 특정값을 초과하게 되면 양해법은 발산하게 되면 곧 불안정한 결과를 보이게 된다. 식 7.7은 x_s 와 관련되어 있는 α_{Bs} 에 대해서 비선형이기 때문에 시간간격의 최대값이 얼마인지는 정확하게 산정할 수 없고 단지 시행착오를 통해 결정될 수 있다. 그렇지만 식 7.7을 x_s 에 대해서 선형화시키면 근사적이지만 유용한 안정조건을 도출할 수 있다. 쇄파각도가 작다는 가정하에 선형화가 가능해지며, 이럴 경우 Pelnard-Consideré (1956)의 해안선 모형과 일치하게 된다. 선형화 과정은 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} \sin 2\alpha_{Bs} &= \sin 2\alpha_B (2\cos^2 \alpha_s - 1) - 2\cos 2\alpha_B \cos^2 \alpha_s \tan \alpha_s \\ \cos 2\alpha_{Bs} &= \cos 2\alpha_B \cos \alpha_s + \sin \alpha_B \cos \alpha_B \tan \alpha_B \end{aligned} \right\} \quad (7.8)$$

y축에 대한 쇄파각도가 작다(α_B 가 작음)고 가정하고 α_s 역시 작다고 가정하면,

$$\left. \begin{aligned} \sin 2\alpha_{Bs} &\doteq -2 \tan \alpha_s = -2 \frac{\partial x_s}{\partial y} \\ \cos 2\alpha_{Bs} &\doteq 1 + \sin \alpha_B \tan \alpha_s = 1 + \sin \alpha_B \frac{\partial x_s}{\partial y} \end{aligned} \right\} \quad (7.9)$$

쇄파고 H_B , 군파의 파속 c_{gB} , 그리고 쇄파고의 변화율 $\frac{\partial H_B}{\partial y}$ 등이 상수라 가정하면 식 7.1은 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial x_s}{\partial t} = e \frac{\partial^2 x_s}{\partial y^2} \quad (7.10)$$

여기서,

$$\left. \begin{aligned} e &= e_1 + e_2 \\ e_1 &= 2(H^2 c_g)_B \widehat{K}_1 / D_s \\ e_2 &= (H^2 c_g)_B \widehat{K}_2 \frac{\partial H_B}{\partial y} \sin \alpha_B / D_s \end{aligned} \right\} \quad (7.11)$$

식 7.10은 1차원 확산방정식 또는 열전달 방정식 형태이다. 이 식에 대한 수치해석방법은 널리 알려져 있다. 양해법을 사용할 경우 시간간격은 다음 식을 만족해야 한다.

$$R_B = \frac{\Delta t (e)_{\max}}{(\Delta y)^2} \leq \frac{1}{2} \quad (7.12)$$

여기서, $(e)_{\max}$ 는 최대 공간격자간격이고 e 는 확산계수 형태인데 시간에 따른 해안선 변형률의 의미를 갖고 있다. R_B 는 안정조건과 관련된 매개변수이다. 이는 수치기법의 정확도를 평가하는 기준이 되기도 해서 이 값이 작을 경우 식 7.7의 정확성을 담보하게 된다. 실제로는 전체시간을 줄이기 위해 Δt 를 크게 선택하는 것이 바람직하다. 따라서 양해법의 경우 식 7.12를 이용하여 허용되는 최대 Δt 를 산정할 수 있다.

e_2 와 e_1 의 비를 살펴보는 것도 흥미로운 일인데 \widehat{K}_1 과 \widehat{K}_2 를 소거하면

$$\frac{e_2}{e_1} = \frac{K_2 \sin \alpha_B (\partial H_B / \partial y)}{K_1 \tan \beta} \quad (7.13)$$

$\sin \alpha_B$ 와 $(\partial H_B / \partial y)$ 의 값은 매우 작으므로 $\frac{e_2}{e_1} \ll 1$ 이다. 이는 경사지게 입사하는 파에 의한 해안선 방향 표사량이 통상적으로 안정성을 결정짓는 주요 인자가 됨을 시사한다.

라. 음해법

식 7.4로 돌아가서 $\lambda = \frac{1}{2}$ 인 경우를 살펴보자. 식 7.5와 식 7.6의 시간 미분항이 t 와 $t + \Delta t$ 두 시간 준위에서 같은 가중치를 갖는 경우이다. Q 를 식 7.4에 대입하면 다음 식이 얻어진다.

$$x'_{si} = B(Q'_i - Q'_{i+1}) + G_i \quad (7.14)$$

여기서,

$$\left. \begin{aligned} B &= \Delta t / (2D_s \Delta y) \\ G_i &= x_{si} + B(Q_i - Q_{i+1} + 2\Delta y q_i) \end{aligned} \right\} \quad (7.15)$$

현재시간 단계에서의 값만을 포함하고 있기 때문에 G_i 값은 기지값이 된다. 그리고 $q'_i = q_i$ 라 가정한다. 문제를 선형화시키기 위하여 해안선 방향 표사이동량 Q 를 α_s 를 분리하여 x_s 축에 관한 항으로 표현하면 다음과 같이 된다.

$$Q'_i = E_i(x'_{si-1} - x'_{si}) + F_i \quad (7.16)$$

여기서,

$$\left. \begin{aligned} E_i &= (H^2 c_g) B_i \left\{ 2K_1 \cos 2\alpha_B \cos^2 \alpha_s + K_2 \frac{\partial H_B}{\partial y} \sin \alpha_B \cos \alpha_s \right\}_i / \Delta y \\ F_i &= (H^2 c_g) B_i \left\{ K_1 \cos 2\alpha_B (2\cos^2 \alpha_s - 1) - K_2 \frac{\partial H_B}{\partial y} \cos \alpha_B \cos \alpha_s \right\}_i \end{aligned} \right\} \quad (7.17)$$

식 7.14와 식 7.16은 두 종류의 미지값 x' , Q 를 포함하고 있는데, 경계조건은 보통 표사이동량으로 설정되기 때문에 Q 를 먼저 풀 수 있게 된다. 식 7.14를 식 7.16에 대입하면 다음과 같다.

$$-BE_i Q'_{i-1} + (1 + 2BE_i)Q'_i - BE_i Q'_{i+1} = E_i(G_{i-1} - G_i) + F_i \quad (7.18)$$

표사이동을 Q'_i 과 Q'_{i+1} 은 경계조건으로 부여되어야 하며, 이러한 경계조건을 사용하면 내부 모든 격자점에서 Q'_i 을 계산할 수 있다. 해당 행렬식은 삼중대각행렬로 표현되는데 적절한 수치알고리즘으로 풀 수 있다. 이렇게 Q'_i 가 계산되면 이 값을 이용하여 다음 시간단계에서의 해안선 위치를 결정할 수 있다.

마. 경계조건

해안선 위치를 계산하기 전에 해안선 방향 표사이동량에 대한 경계조건이나 해안선 위치에 대한 경계조건을 먼저 입력해야 한다. 이 경계조건들은 상수값이나 시간에 따라 변하는 값으로 입력할 수 있다. 또한 방조제와 같은 구조물이 있을 경우 이에 대한 조건을 부여해야 한다. 해안선 위치가 방조제 보다 더 육지쪽으로 후퇴할 수는 없기 때문이다.

a) 불투수성 돌제 또는 도류제의 경우 표사이동이 구조물을 통과할 수 없다.

$$Q_g = 0 \quad (7.19)$$

b) 돌제 또는 도류제에서 바이패싱이 가능한 경우 일정 부분이 통과할 수 있게 한다. 통과되는 양은 쇄파대를 가로지르는 이동량 분포 및 구조물 주변의 순환양상과 해빈경사 등과 밀접한 관계가 있다. 직사각형 분포라 가정할 경우, 즉 통과량이 구조물을 관통하지 않는 부분의 길이에 비례할 경우 다음과 같이 설정할 수 있다.

$$Q_g = \begin{cases} Q_{g0}(1-D_g/D_s), & D_g \leq D_s \\ 0, & D_g > D_s \end{cases} \quad (7.20)$$

여기서, Q_{g0} 는 돌제가 위치한 격자점에서의 이동량이며 돌제가 존재하지 않는 것과 같이 계산은 수행된다.

c) 고정된 해안선의 경우, 이 경우는 구조물에서 멀리 떨어져 있어 평형상태에 있는 것으로 간주된다. 해안선이 고정된 경우 이동량의 공간적 변화율은 0으로 설정한다. 즉, 다음 식으로 부여할 수 있다.

$$Q_b = Q_{b\pm 1} \quad (7.21)$$

여기서, Q_b 는 고정된 경계지점의 이동량이고 $Q_{b\pm 1}$ 은 경계에 접한 내부에서의 이동량이다.

d) 자유 경계, 이 경우는 내부 계산치를 이용하여 외삽의 형태로 경계를 다음과 같이 설정한다.

$$x_{sb} = 2x_{sb \pm 1} - x_{sb \pm 2} \quad (7.22)$$

여기서, x_{sb} 는 경계지점에서 해안선 위치를 나타내며 우변의 두 변수는 경계에 인접한 두 격자점에서의 값을 나타내고 있다. 이러한 경계설정 은 내부에서의 표사이동이 경계에 영향을 미치고 있을 때를 의미한다. 이 경우는 매우 큰 구조물이 계산영역 내부에 존재하고 있으며 멀리 떨어진 경계에서의 값을 확실히 파악하기 힘든 경우에 유용하다.

바. 제약조건

‘방조제’란 인위적 또는 자연적으로 형성된 영구 구조물을 의미하며 해안선이 그 이상 후퇴할 수 없는 상황이다. 여기에는 실제 방조제를 비롯하여 해일방호용 수문, 방파제, 그리고 암반으로 구성된 절벽 등이 해당된다. 해안선 모형에서는 이러한 구조물의 파괴는 감안하고 있지 않으므로 주의를 요한다.

이러한 방조제 조건을 다룬 문헌은 별로 없는 실정이다. Ozasa and Brampton(1979)은 해안선과 방조제 사이의 상호작용에 대한 몇 가지 특성에 대하여 검토하였으나 Tanaka and Nadaoka(1982)가 지적한 바 있듯이 완벽한 해법을 제시하고 있지는 못하다. Hanson and Kraus(1985, 1986)는 해안선변형 모형에서 방조제 처리에 대하여 좀더 구체적으로 검토한 바 있다. 방조제에서 모래이동에 대한 현지 관측자료를 근거로 하여, 쇄파대가 방조제 전면에서 위치할 경우 표사이동은 방조제를 지나 해안선 방향으로 발생한다고 가정하였다. 알고리즘 역시 표사량 보존 및 해안을 따른 이동에 근거하고 있다.

그림 7.8에 도시된 바와 같이 해안선이 방조제 후면에 위치하고 있을 때, 격자점 i 에서 해안선 위치 x_{si} 는 방조제 위치인 x_{wi} 보다 더 육지쪽으로 이동할 수는 없는 것이다. 만일 이러한 경우가 발생되면 이는 비현실적인 현상이 야기되어 허구의 표사이동량 Q_{fic} 를 발생시킨다.

$$\Delta Q_{fic} = \frac{D_s \Delta y}{\Delta t} (x_{wi} - x'_{si}) \quad (7.23)$$

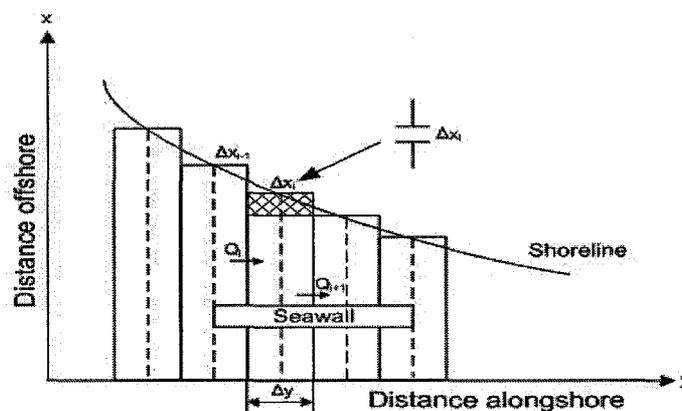


그림 7.8 해안선 모형에서 안벽의 위치

해안선에서의 제한조건을 만족시키기 위하여 해당 시점에서의 이동량은 Q_{fic} 를 제거하기 위해 적당한 방향으로 조정되어야 한다. 이러한 과정은 매우 복잡하며 Hanson and Kraus(1986) 등을 참고할 수 있다.

4. 해안선 변화 수치 모형의 검증

해안선의 평형 형태로부터 회절파가 해안선 변화에 미친 영향을 파악하고 이를 새로운 해안 구조물 축조 시 주변 해안에 미치는 영향을 평가하는데 반영하는 해안선 모형이 개발되었다. 따라서 본 모형은 기존 구조물이 축조된 후의 해안선 변화 자료를 토대로 예측하므로 한 특정 상황에 대한 해안선 변화 모의가 아니라 그 지역에 구조물이 들어선 후 받을 1년 이상의 장시간의 해양 환경에 실제로 반응하며 평형에 도달되는 해안선을 예측하는 모형으로 예측 결과에 대한 신뢰성이 높다. 수치 실험 결과는 우선 장기 파랑 예측 결과를 토대로 장기 평형 해안선을 예측하며 그리고 특정 파향에 대한 해안선 변화를 살펴본다.

가. 구조물의 결합 형태에 따른 해안선 변화 수치모형의 검증

해안 구조물로 인한 파향의 국지적인 변화는 해안선의 형태를 심각하게 변화시키며 이로 인하여 해안 구조물 인근의 어떤 지역은 심각하게 퇴적이 발생하고 또 멀리 떨어지지 않은 인근 지역에서는 침식이 발생하는 현상이 예외 없이 일어나곤 한다. 특히 구조물로 인하여 회절이 발생하는 구조물 인근에서의 해안선 변형에 대하여 모형을 적용하므로 침식 유발 구조물의 결합 형태에 따라 표 7.2와 같이 4가지 경우에 대하여 수치 모형을 수행하였고 각각의 결과가 그림 7.9 ~ 그림 7.12에 도시되었다.

표 7.2 해안선 변형 모형 Case

Case	구조물의 결합 형태
I	방파제 + 헤드랜드
II	이안제
III	방파제 + 헤드랜드 + 이안제
IV	방파제 + 헤드랜드 + 이안제 + 이안제

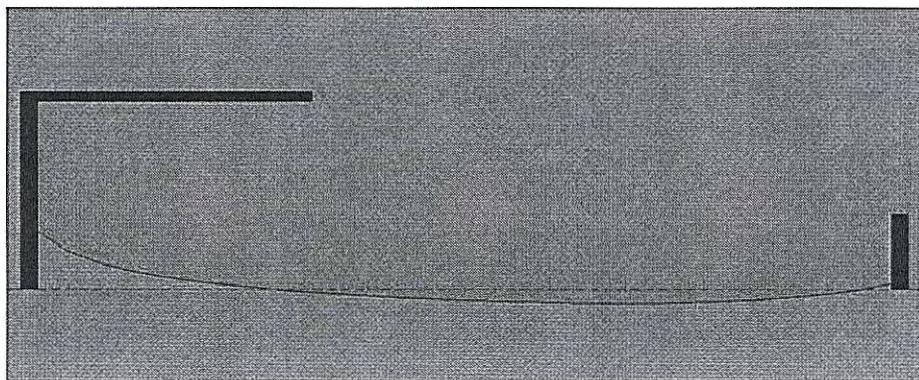


그림 7.9 Case1 : 방파제 + 헤드랜드

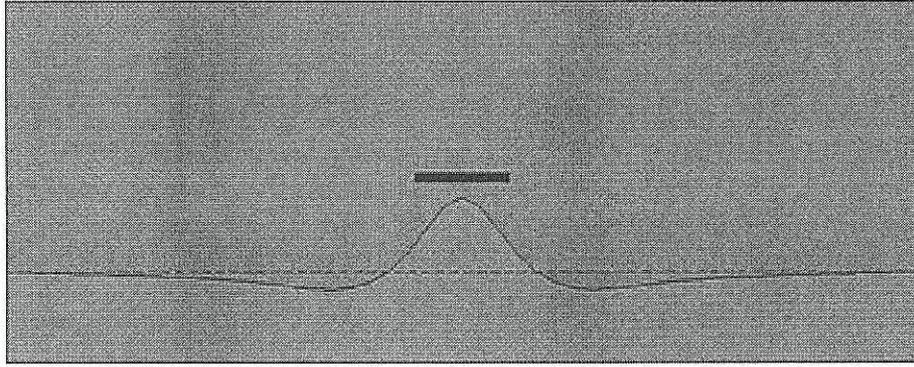


그림 7.10 Case2 : 이안제

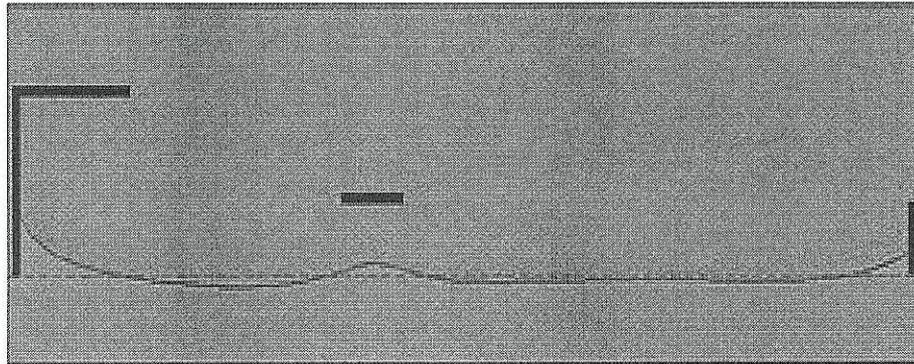


그림 7.11 Case3 : 방파제 + 이안제 + 헤드랜드

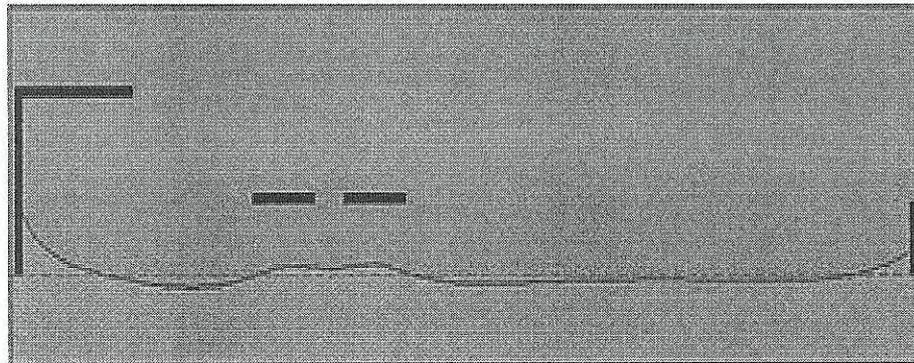


그림 10.7 Case4 : 방파제 + 이안제 + 이안제 + 헤드랜드

나. 수치모형의 실지형 적용 ; 울진 나곡항 부근

수치모형 적용 대상지역은 울진 나곡항 부근일대이고, 해안구조물로서 나곡해수욕장 방파제와 나곡항, 원전 구조물이 있다. 해안구조물이 없을 경우의 수치실험은 돌출 차폐 해안에 의한 모래 해안선의 주축 경사를 검증 하는 차원에서 α 값을 구하기 위하여 수행되었다. 파향은 정북으로부터 시계방향의 값이다.

표 7.3 해안선 변형 수치 실험 개요

CASE	주 과향	α (degree)	해안구조물	비고
NE-OR	NE	80	없음	검증
NE-BW	NE	80	나곡해수욕장 방파제 나곡항	원전 구조물 이외 구조물의 영향력 평가
NE-NP	NE	80	원전구조물	기존 원전구조물의 영향력 평가
NNE-NP	NNE	65	기존해안구조물	남향우월연안 표사이동
ENE-NP	ENE	60	기존해안구조물	북향우월연안 표사이동

그림 7.13은 CASE NE-BW에 대한 수치 실험 결과로 기존 나곡 해수욕장 방파제와 나곡항 방파제에 의한 해안선 변화를 보여 주고 있다. 그림 7.14는 CASE NE-NP에 대한 수치 실험 결과로 기존 원전 구조물에 의한 해안선 변화만을 보여준다. 원전 건설로 부구천 단위표사계가 유역크기보다 해안선 길이가 짧은 관계로 새로운 평형의 모래 해안 쪽을 찾아가고 있다.

계절별로 특성을 갖는 해양 환경에 대한 영향력 평가를 위하여 계절간 수치 모의를 통한 변화량으로 방파제 확장 공사에 대한 계절적 영향력을 검토하였다. 남향우월연안토사 환경은 겨울철에 주로 이루어지는 조건으로 CASE NNE-NP에 해당하는 기존 원전 방파제에 대한 결과가 그림 7.15에 도시되었다. 기존 원전 구조물에 대하여 계절적 변화가 크게 두드러지지 않은 결과가 도출되었다. 이 경우 하천으로부터의 토사 유입은 고려되지 않는다.

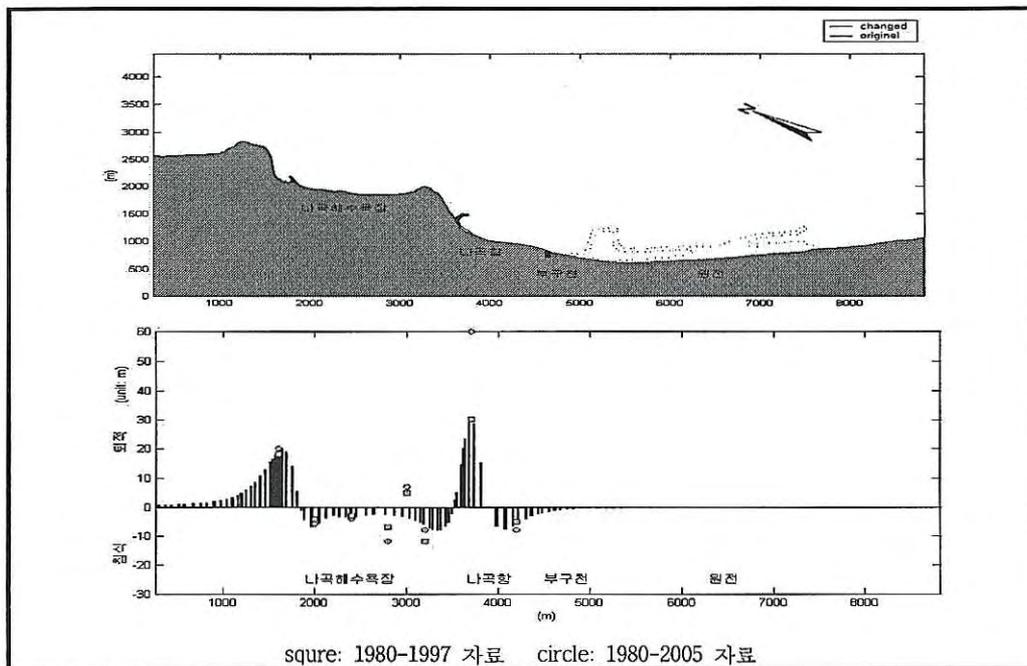


그림 7.13 나곡해수욕장 방파제와 나곡항 방파제에 의한 해안선 변화(CASE: NE-BW)

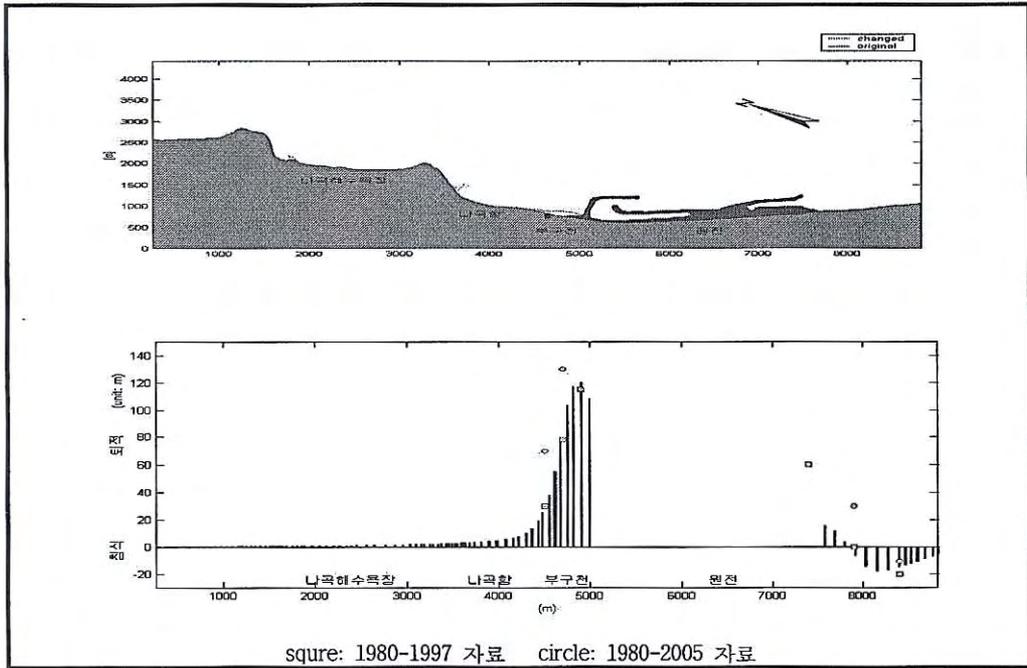


그림 7.14 기존 원전 구조물에 의한 해안선 변화 (CASE: NE-NP)

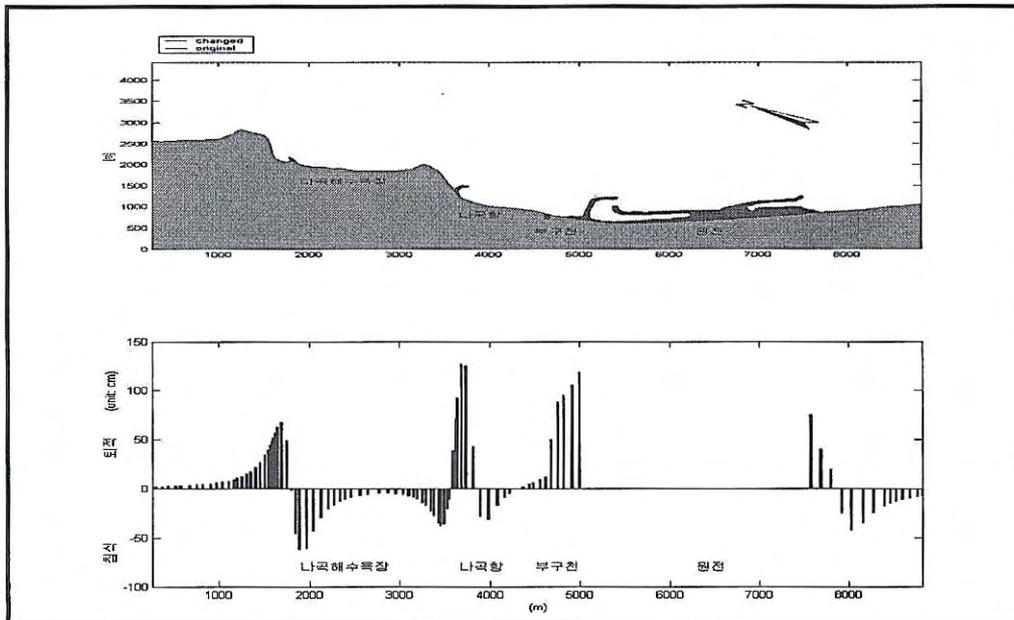


그림 7.15 남향 우월 연안토사환경(겨울철)에서 기존 원전 방파제에 의한 계절간 해안선 변화 (CASE: NNE-NP)

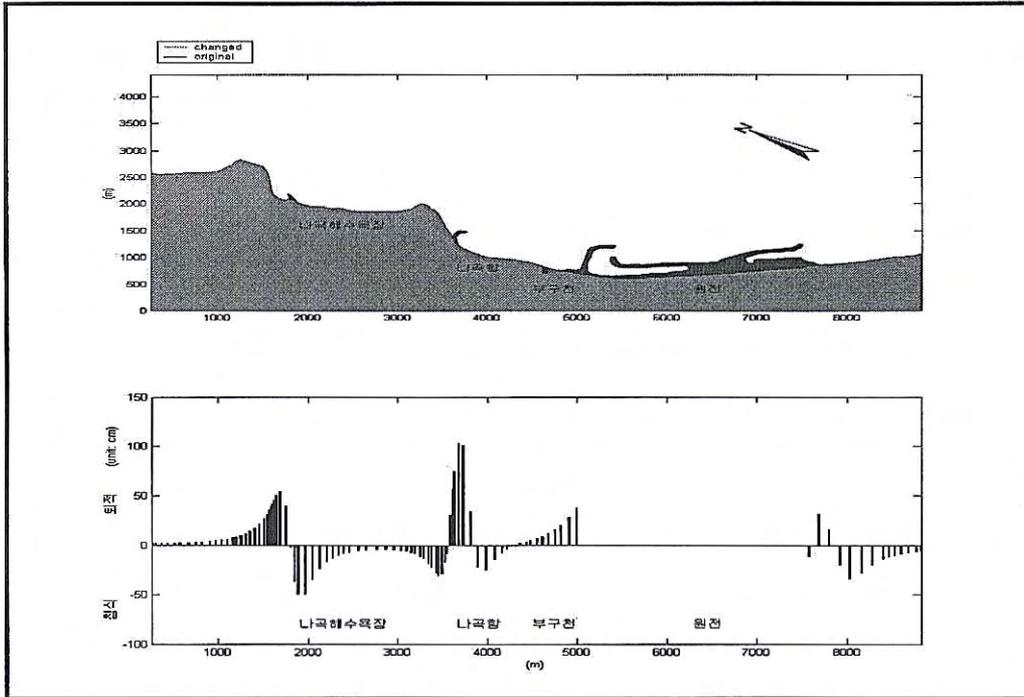


그림 7.16 북향 우월 연안토사환경(여름철)에서 기존 원전 방파제에 의한 계절간 해안선 변화 (CASE: ENE-NP)

제8절 커튼월-파일형의 이안제 설치로 인한 후면 해저지형 변화 및 해안선 변화 수리실험

수치모형의 검증을 위해서 국립해양연구원에 있는 3차원 파랑수조에서 수리실험을 실시하였으며 기술한 수치모형 결과와 비교하였다. 수조는 30m×30m의 평면수조중 길이 24m, 폭 9.2m의 일부분만 사용하였다. 수심은 9cm이고, 해당영역의 양 끝부분에는 각각 조파기(총 5대중 2대 사용)와 경사 1/19정도의 소파장치로 구성되었다. 입자의 움직임 궤도가 공간적으로 어떠한 분포를 갖는지 관측하기 위해서 PIV(Particle Image Velocimetry)를 사용하였다. 기록은 35mm Canon 1ds markIII 카메라와 ef 16-35mm f2.8L렌즈를 이용하였다. 자료 저장은 카메라를 통해 해당영역에 800×800 해상도의 흑백 사진을 기록하였다. 3차원 파랑수조의 기본구성은 그림 8.1과 같다.

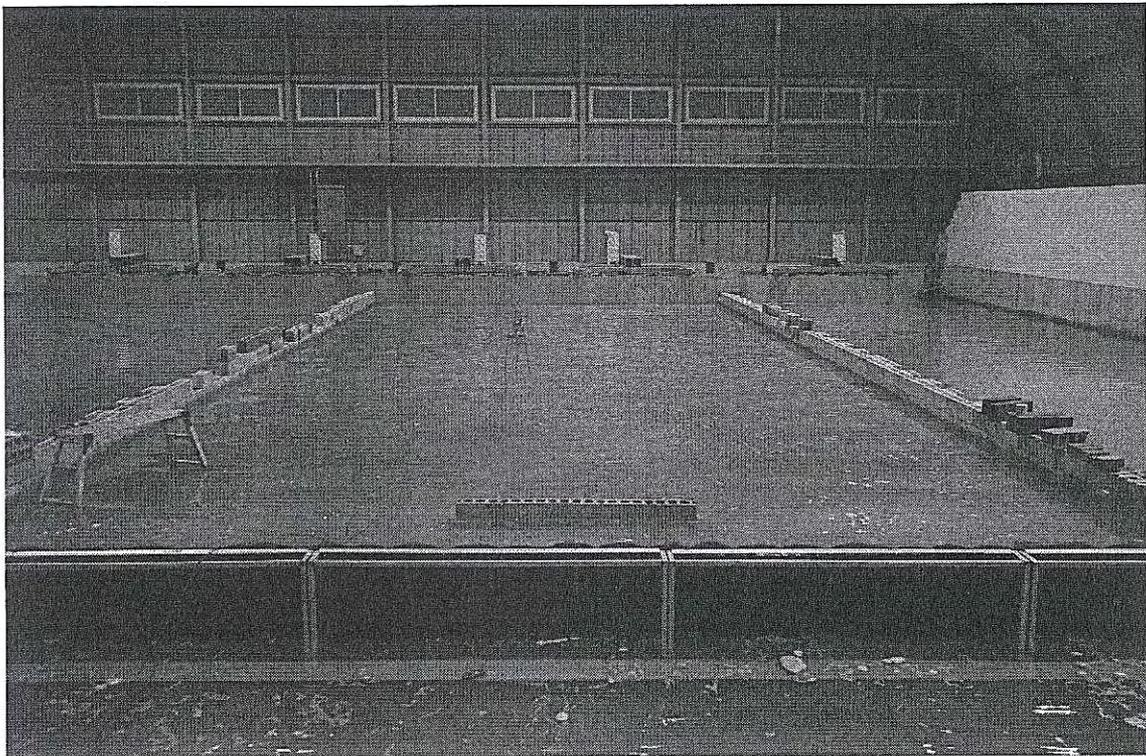


그림 8.1 3차원 파랑수조 기본 구성

1. 3차원 수조에서의 투과율 산정

3차원 수조에서의 공극율에 따른 파고의 투과율을 산정하기 위해 그림 8.2와 같이 수조를 구성하였다. 방파제의 측면은 주변에서 반사되어 들어오는 파를 차단하기 위해서 차단막을 설치하였다. 파고계는 방파제의 전면부 1개와 방파제 후면의 1개로 총 2개를 설치하여 입사파와 투과파를 각각 관측하였다. 방파제의 단면은 그림 8.3과 같이 구성되어 있다. 방파제의 총 길이는 189cm이고, 공극율은 폭 9cm에 높이 4.5cm, 9cm로 2가지 case에 대해서 실험하였다.

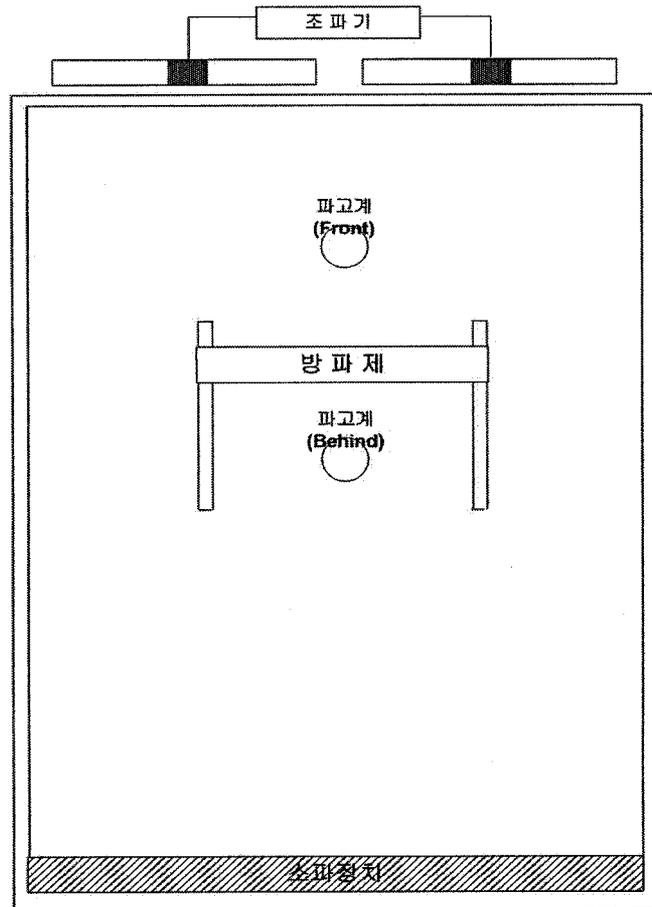


그림 8.2 투과율 산정 실험 구성

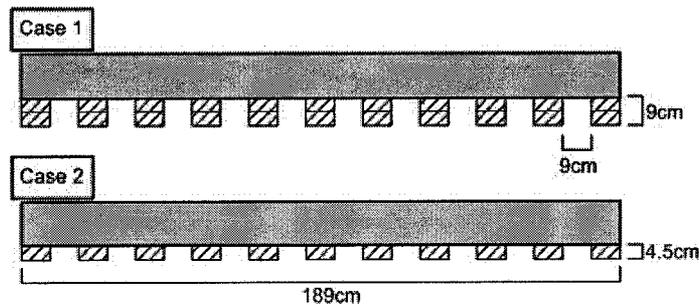


그림 8.3 방파제 하단부의 단면 (C1: 9cm / C2: 4.5cm)

주기 1sec, 파고 4cm의 파랑조건으로 60초동안 규칙파를 발생시켰다. 방파제 전면부의 입사파와 방파제 후면의 투과파의 결과가 그림 8.4에 제시되었다. Front의 값이 방파제 전면부의 입사파고이고, Behind값이 방파제 후면의 투과파고이다. 그래프에서 22초에서 28초 사이에 기록된 값이 다른 파의 간섭이 없는 입사파와 투과파의 값이다.

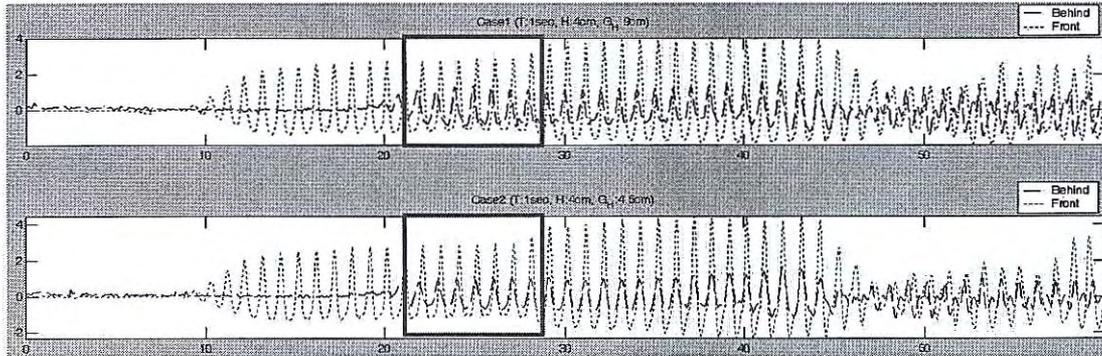


그림 8.4 파고계 수치(투과율 산정)

Case1의 경우 입사파고 4cm에 투과파고가 2.5cm로 투과율이 62.5%이고, Case2의 경우 입사파고 4cm에 투과파고가 2cm로 투과율이 50%이다.

2. 파랑장 관측치와 수치모형 결과와의 비교

가. 수리실험 결과

3차원 파랑수조 수심 9cm의 조건에서 그림 8.3의 Case1과 Case2에 대해서 PIV실험을 하였다. 파랑조건이 안정화된 상태에서 직경 1cm의 스티로폼 구형 입자를 수면에 뿌리고 CCD 카메라 연속촬영을 하였다. 촬영된 이미지들을 그림 8.5와 같이 최적화하여 파랑도를 산출하였다.

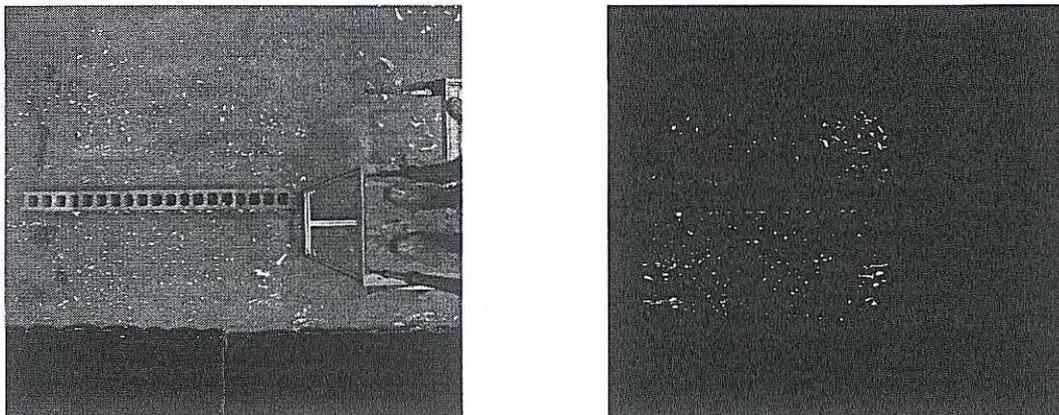


그림 8.5 수리실험후 파랑도 산출을 위한 이미지 최적화 과정

나. 관측된 PIV결과와 수치모형 결과의 비교

그림 8.6과 8.7은 그림 8.3의 Case1과 Case2에 대해서 앞서 투과율 산정에서 실험을 통해서 관측한 투과율 하에서 두 가지 경우에 대해서 모의된 수치실험과 수리실험의 파랑도를 비교한 것이다. 수치실험과 수리실험 모두 투과율이 작은 경우에 방파제 후면에서 파랑의 유입이 차단되는 모습을 잘 구현하고 있다. 수리 모형 결과가 수치모형에 비하여 비교적 직선적이기 보다는 더 타원형적인 궤적을 보이고 있으나 이는 관측 시 파고가 비교적 커 비선형 효과도 크게 작용하였던 것으로 판단된다.

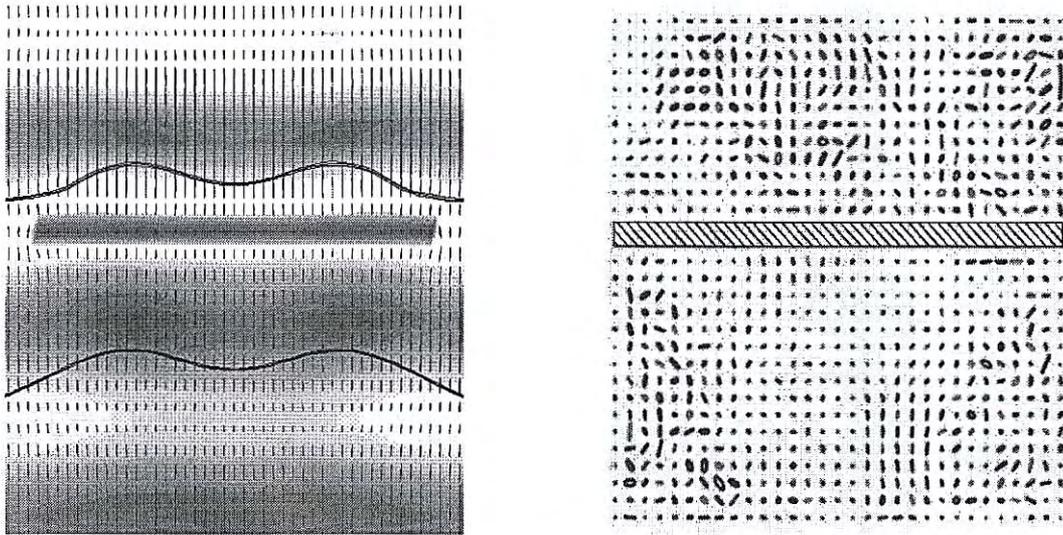


그림 8.6 수치실험 결과 파랑도(좌)와 수리실험 결과 파랑도(우) ; Case1

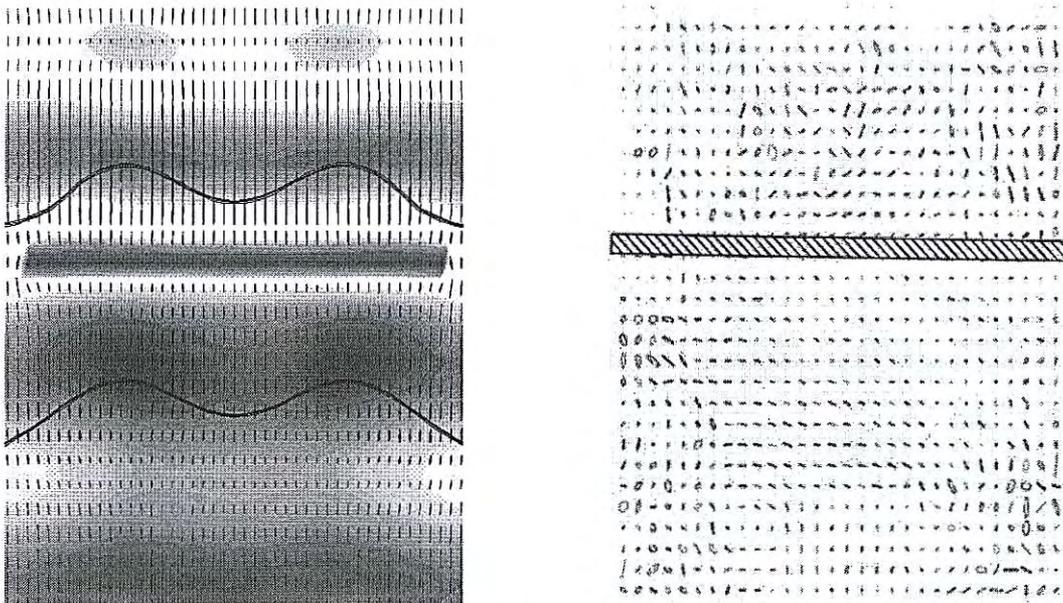


그림 8.7 수치실험 결과 파랑도(좌)와 수리실험 결과 파랑도(우) ; Case2

다. 수치실험 과정

성균관대 해안환경연구실에서 개발한 WADEM(WAVE DEformation Model) 사용자 편의모형을 이용하여 3차원 수치실험시 PIV 결과와 비교할 수치모형 결과를 산출하였다. 이때 수심파일은 그림 8.8과 같이 3차원 파랑수조와 동일하게 제작한 9cm의 수심을 사용하였다.

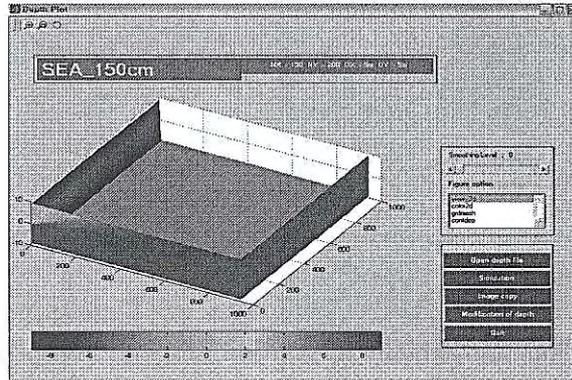


그림 8.8 수치모형에 적용한 9cm 수심

실제 3차원 파랑수조에서는 좌우측으로 guideline이 있고, 조파장치의 반대편에 소파장치가 있으므로(그림 8.1참조) 다음의 절차에 따라 반사율을 조정하였다.

(1) WADEM을 실행시키고, 해당수심을 선택한 다음 Simulation 버튼을 누르면, 해당창으로 전환이 된다.

(2) 반사율 조정(Ref.Coeff 버튼)

전환된 창에서 Ref.Coeff 버튼을 누르면 그림 8.9와 같이 반사율을 마우스를 이용하여 쉽게 가지적으로 변경할 수 있도록 되어있다. 여기서 파랑수조의 양쪽 guideline의 반사율을 0.9, 소파장치의 반사율을 0.5로 조정한다(Default는 전체영역 반사율 1로 지정).

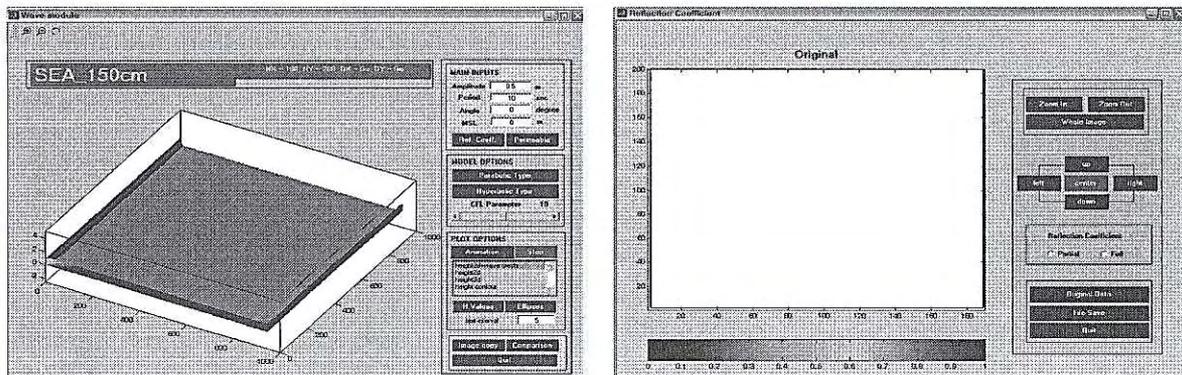


그림 8.9 Simulation Window(좌)와 반사율 입력창(우)

(3) 투과율 조정(Permeable 버튼)

반사율이 반영된 Simulation창에서 반사율을 조정하는 버튼 옆의 Permeable 버튼을 누르면 그림 8.10과 같이 투과율을 가시적으로 조정할 수 있는 투과율 입력창이 나타난다. 커튼 월-파일 수직벽의 경우 1년차 과제 연구결과인 Suh et al.(2006)의 연구결과를 이용하여 반사율을 적용하였다.

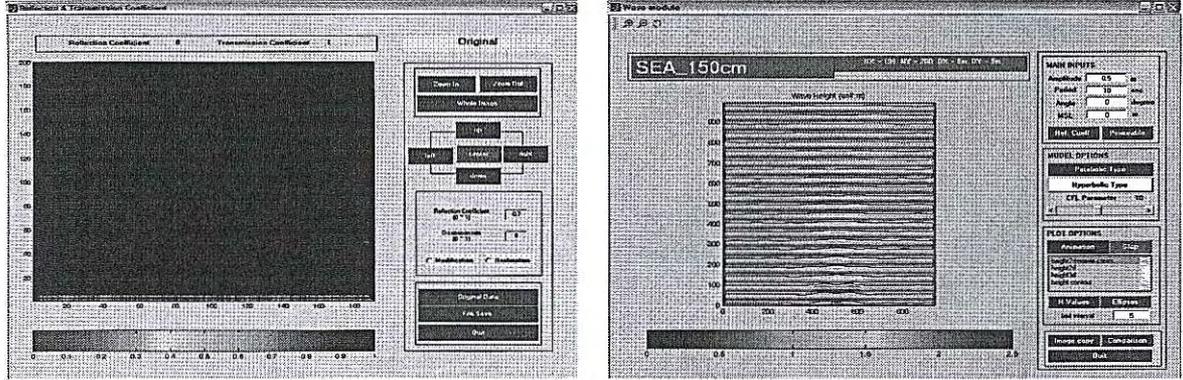


그림 8.10 투과율 입력창(좌)과 반사율, 투과율이 반영된 결과(우)

3. 3차원 수조에서의 해저지형 변화 수리실험

3차원 수조에서의 해저지형 변화 및 해안선 변화 수리실험을 위해서 그림 8.1의 기본 구성에 주문진 규사로 해안선을 형성하였다. 실험에 사용한 토사에 대한 특성정보는 표 8.1에 제시되어있고, 그림 8.11은 토사의 체분석 그래프를 나타낸 것이다. 본 실험에 사용한 균질한 토사의 d_{50} 는 0.26mm이다.

표 8.1 토사의 구성과 조직변수

Sample No.	Composition(%)				Textural Parameter				Sediment Type
	Gravel	Sand	Silt	Clay	Mean (ϕ)	Sort. (ϕ)	Skew.	Kurt.	
1	0.14	99.79	0.07	0.00	0.939	0.617	0.109	0.748	(g)S

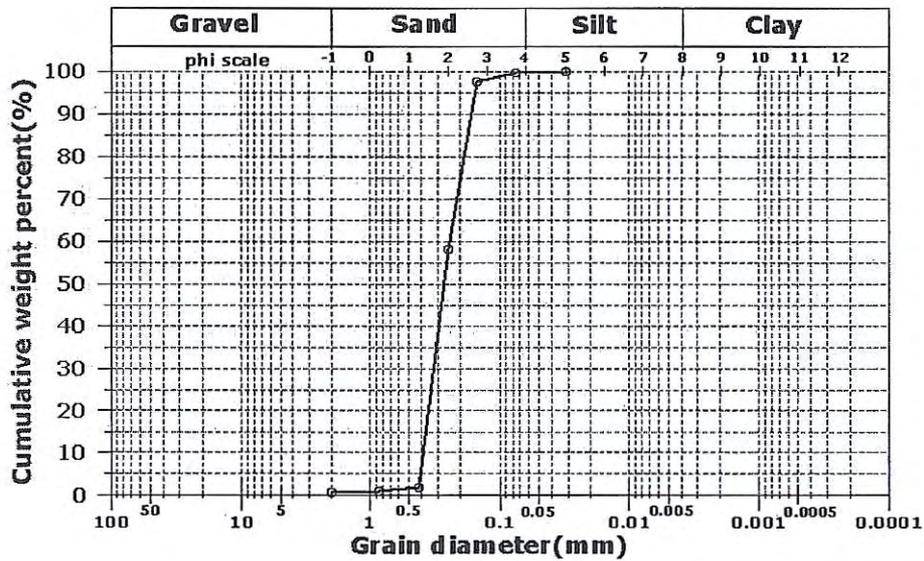


그림 8.11 주문진 규사의 체분석 그래프

토사를 수조의 소파장치 부분에 일정하게 공급하여 해안선 형태를 만들고, 방파제 하단의 공극의 높이를 바꾸어 해저지형 변화 및 해안선 변화에 대한 수리실험을 하였다. 그림 8.12는 해저지형 변화 및 해안선 변화 수리실험의 모식도이다.

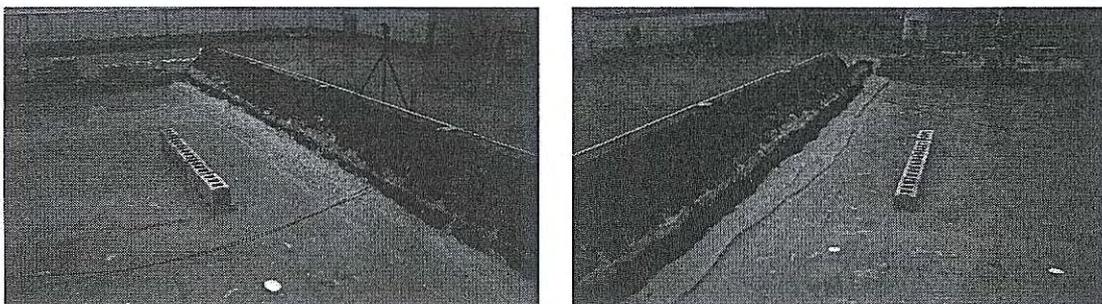


그림 8.12 해저지형 변화 및 해안선 변화 수리실험 모식도

가. 해저지형 변화 수리모형 실험 결과

해저지형 및 해안선 변화의 관측을 위해 소파장치 위에 토사를 그림 8.13과 같은 단면으로 제작하였다. 또한, 단면 변화의 정확한 관측을 위해 해당위치(①', ②')에 각각 선을 표시하여 동일위치에서 ①과 ②의 높이를 관측할 수 있게 하였다. 그림 8.14는 3차원 파랑수조의 평면도를 나타낸 것이다. 해안선의 소파장치쪽 끝지점에서 방파제까지의 거리는 1m이고, 그림 8.14의 아래부분의 기호는 단면의 높이와 해안선의 길이를 측정할 기준점이다. 방파제를 중심으로 ㉠부터 ㉡까지 5개의 지역을 측정하였다.

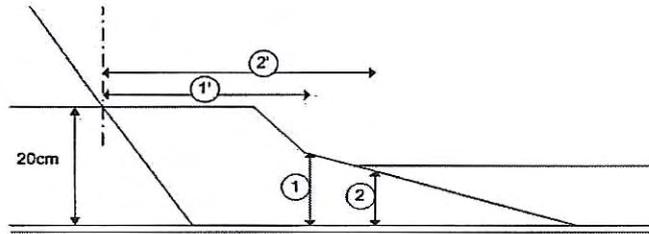


그림 8.13 수리실험을 위한 지형 단면도

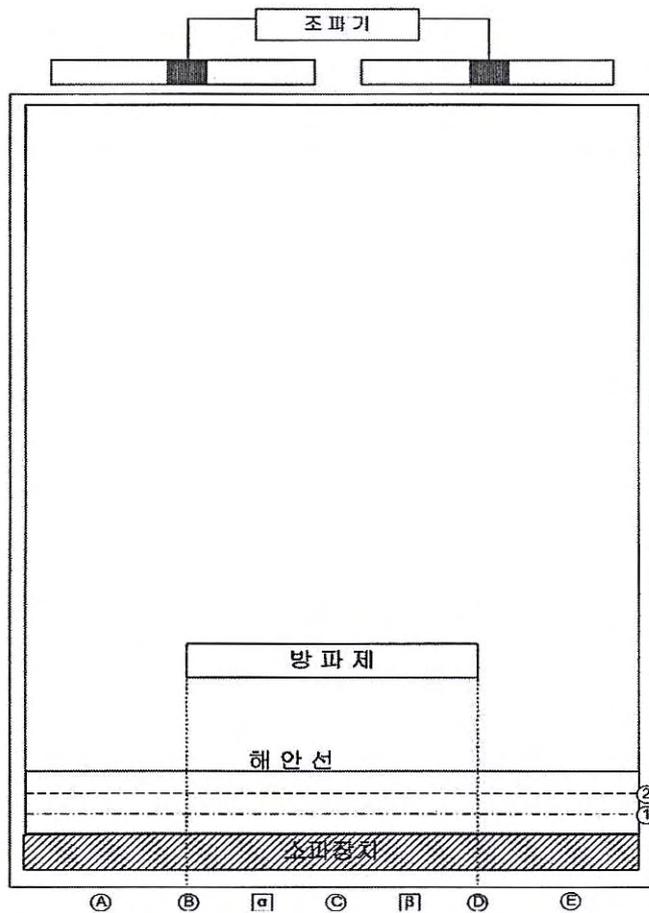
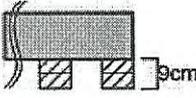
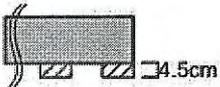


그림 8.14 3차원 파랑수조의 평면도(해저지형 변화)

방파제의 파일부분과 파일부분의 사이의 90cm로 그 간격을 동일하게 하였고, 파일부분 공극의 높이를 9cm, 4.5cm, 0cm의 3개의 경우에 대해서 실험하였다(표 8.2). 파랑조건은 주기 1sec, 파고 4cm의 규칙파를 20분(1200sec)동안 조파하였다.

표 8.2 수리실험의 각 case

Case	파일 공극의 높이	모식도	기 타
I	9cm		※파일간 공극간격 : 90cm로 동일
II	4.5cm		
III	0cm		

해저지형 변화에 대한 수리실험 결과가 표 8.3에 제시되었다.

표 8.3 해저질 변화 수리실험 결과

Case	(mm)	Ⓐ	Ⓑ	Ⓒ	Ⓓ	Ⓔ
I	①	133	144	135	149	122
	②	65	65	68	65	68
II	①	120	120	123	119	121
	②	68	68	68	69	68
III	①	124	134	130	125	119
	②	70	70	71	70	68

※ ①': 230mm, ②':540mm(그림 8.13 참조)

나. 해저지형 변화 수치모형 실험과의 비교

해저지형 변화 모형의 검증을 위하여 실시한 수치모형 실험 결과가 수치모형 결과와 비교되었다. 실험 결과와 유사하게 투과율이 0.625인 CASE I에서는 해안을 따라 공간적 변화가 작으나 투과율이 0.5인 CASE II에서 오히려 불투과성 방파제보다 방파제 후면 중앙에서 퇴적이 더 우월하게 발생하는 것을 잘 모의하고 있다. 분산계수는 $10\text{cm}^2/\text{s}$ 가 적용되었으며 침강속도는 d_{50} 는 0.26mm에 대하여 3cm/s를 갖는 것으로 간주하였다.

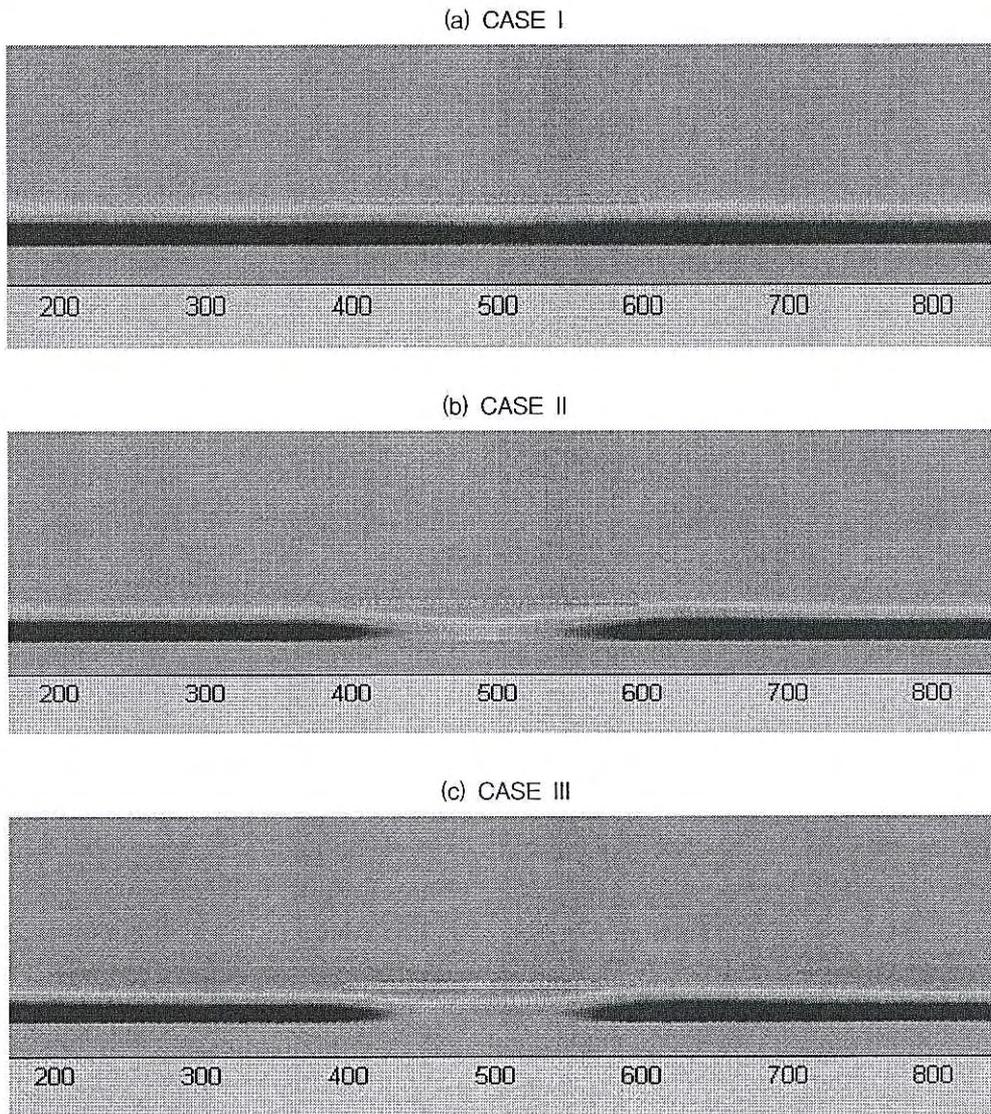


그림 8.15 해저지형 변화 수치모형 실험 결과

4. 3차원 수조에서의 해안선 변화 수리실험

가. 해안선 변화 수리모형 실험 결과

커튼 월-파일형 방파제 후면에서의 해안선 변화 수리모형 실험을 위해서 해저지형변화 수리실험과 동일한 파랑수조의 조건하에서 그림 8.16의 ③에 해당되는 해안선의 위치를 해저지형 변화 시 관측의 기준이 되었던 지점과 동일한 지점에서 관측하였다. 변화를 더욱 자세히 살피기 위해서 방파제의 중심과 양 끝사이에 α 와 β 의 두지점을 추가로 측정하였다. 해안선 변화의 수리실험결과는 표 8.4에 제시되었다.

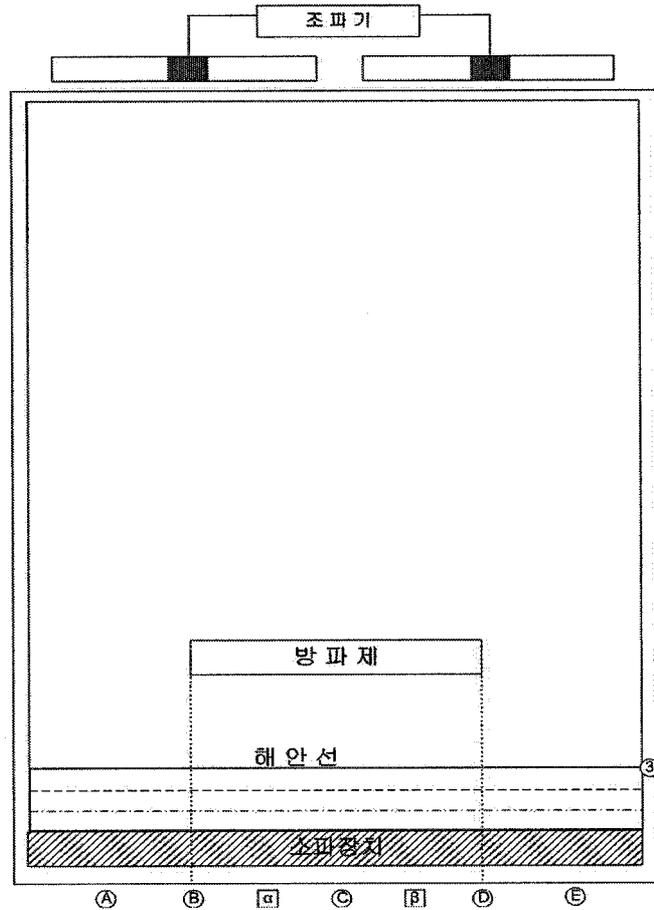


그림 8.16 3차원 파랑수조의 평면도(해안선 변화)

표 8.4 해안선 변화 수리실험 결과

Case	(mm)	Ⓐ	Ⓑ	α	Ⓒ	β	Ⓓ	Ⓔ
I	③	480	465	480	470	435	465	470
II	③	490	480	510	465	455	465	470
III	③	500	510	520	480	475	485	495

나. 해안선 변화 수치모형 실험과의 비교

기술한 회절우월 해역에서의 oneline 모형을 이용하여 각 CASE에 대한 해안선 oneline 수치모형 결과가 그림 8.17에 도시되었다. CASE I의 경우 해안을 따라 해안선의 변화가 크지 않은 경향과 CASE II의 경우 방파제 후면의 중앙보다는 양쪽에서 더 해안선이 전진하는 경향을 대체로 잘 보여주고 있다. 이는 방파제가 파랑에너지의 일부를 투과시켜 줌으로 인하여 파랑의 급격한 변화가 방파제 후면 중앙보다는 방파제 양 끝으로 치우치게 된다는 점이 반영되었다고 판단된다. CASE III의 수치모형 실험 결과는 관측치와 경향이 다소 다르지만 그림 8.18에 도시된 바와 같은 관측치와 상당히 유사한 경향을 수치모형 결과가 제시하고 있다. 다소 차이가 발생한 이유는 방파제가 정 중앙에 위치하지 않아 해저면 변화 모형 결과와 같이 양 guide 벽으로 인한 비대칭적 반사파가 영향을 미쳤다고 판단된다.

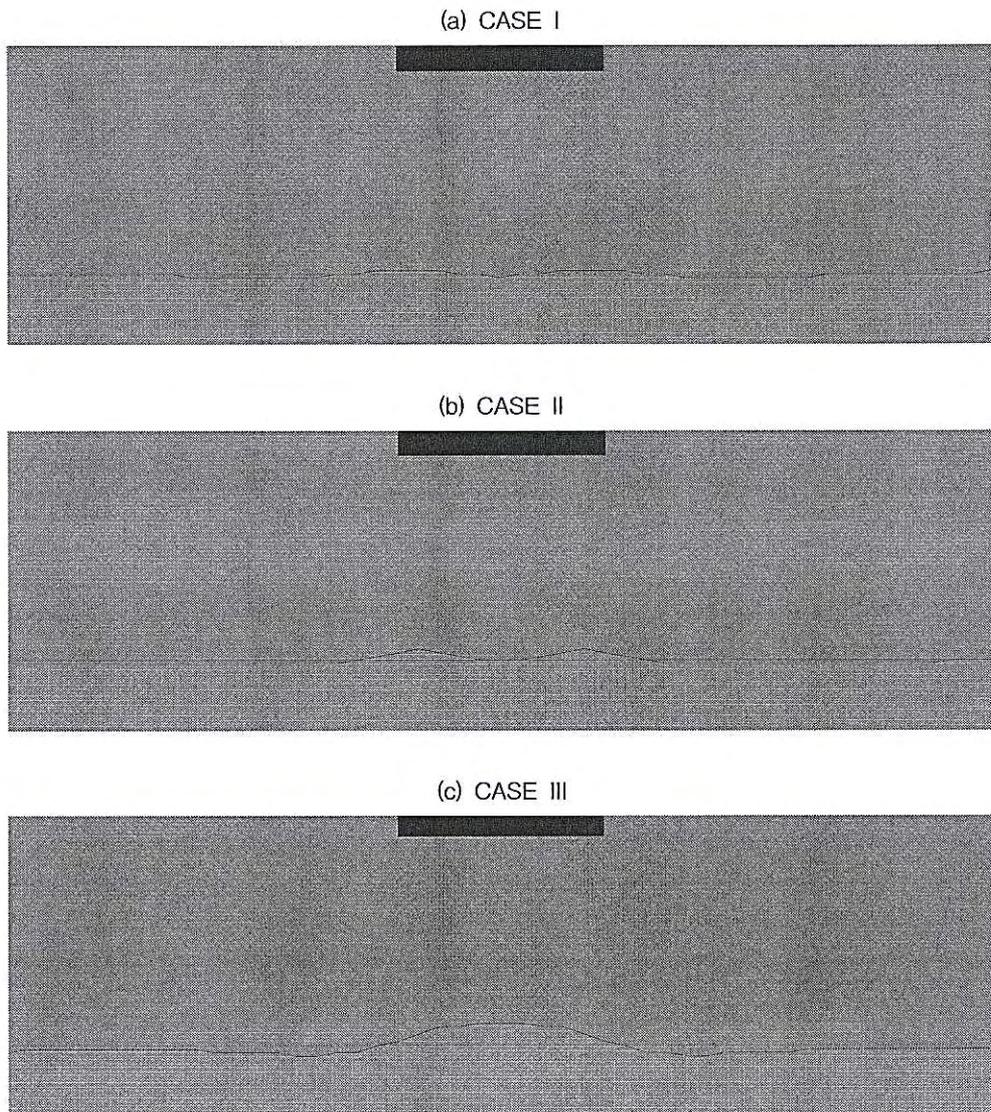


그림 8.17 해안선 변화 수치모형 실험 결과

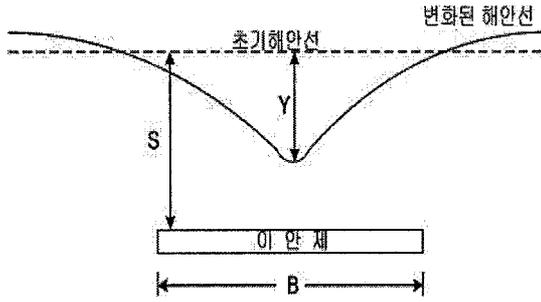


그림 8.18 이안재 후면에서의 해안선 변형

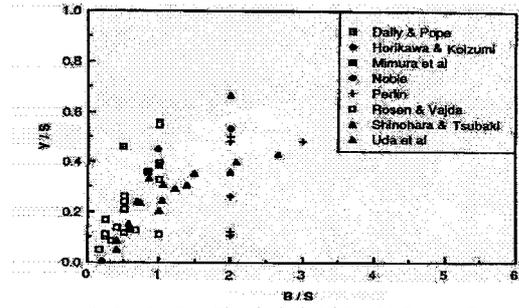


그림 8.19 무차원 해안선 반응: Y/S vs. B/S
(Silvester와 Hsu, 1993)

제4장 연구개발 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

본 연구의 내용은 크게 다음의 세 가지로 나뉘며 각 분야에 대한 목표달성도 및 관련 분야에의 기여도를 기술하면 다음과 같다.

다열 커튼월-파일 방파제 1차원 모형

고유함수 전개법을 이용하여 기존에 개발된 1열 커튼월-파일 방파제 모형을 다열 커튼월-파일 방파제로 확장하는 1차원 수치모형 개발하고 구조물의 형상변화에 따른 커튼월의 흘수, 파일의 개구율을 변화시키면서 수리학적 및 구조학적 특성 파악을 위한 1차원 수리 실험 실시하였다. 다양한 파 조건에서 구조물의 거동을 살펴보기 위해 파의 초오름 높이와 파압 등을 동시에 측정하였으며, 커튼월-파일 방파제에 의한 파의 반사율 및 투과율에 관한 정보를 제공할 것이다.

다열 커튼월-파일 방파제 2차원 모형 및 정온도 모형

수직벽 해석이 간단 용이한 여러 가지 접근법을 비교하고 이를 적용하기 위한 여러 가지 파랑 모형을 비교한 후 단일 벽에서의 결과를 이송계수를 이용하여 다중 벽에 적용하였다. 고유함수전개법과 완경사방정식을 이용하여 직사각형 항에서의 부진동을 해석하고, 해수교환용 방파제의 파양 민감도 및 에너지 소산 미케니즘 연구하였으며, 다열 커튼월-파일 방파제에 의한 산란파 영향 평가를 위한 2차원 수리실험(SPIV법 이용) 실시하였다. 광역 모형에 적용 가능한 포물선형 방정식과 정온도 구현에 탁월한 쌍곡선형 파랑모형으로 구성된 WADEM을 이용하여 다열 커튼월-파일 방파제에 의한 정온도 수치모형 개발하여 투과성 방파제가 설치된 항만에서의 정온도 평가에 적절한 정보를 제공할 것이다.

해안선 변화 및 토사이동 수치모형

쌍곡선형 파랑 변형 모형과 잉여응력을 이용하여 해빈류 및 수면변화를 산출하는 모형을 이용하여 항 내 및 연안역 토사이동 수치모형 개발하고 2차원 수리실험 및 실지형 적용으로 모형을 검증하였다. 또한 해안선의 평형 형태로부터 회절파가 해안선 변화에 미치는 영향을 파악하는 해안선 변화 수치모형을 개발하고 구조물의 결합 형태에 따른 해안선 변화 수치모형 및 실지형 적용으로 모형을 검증하였다. 3차원 파랑수조에서 이안제 설치로 인한 후면 해저지형 변화 및 해안선 변화 수리실험을 실시하고 파랑타원도를 이용한 수리실험 결과와 수치모형 결과를 비교하였다. 투과성 구조물에 의한 인근 해안의 해안선 변화 및 토사이동에 관한 영향을 평가하는데 효과적으로 응용될 수 있을 것이다.

년차	연구목표	달성내용	달성도 (%)
1차 년도	1차원 수치모형 개발	고유함수전개법을 이용한 1차원 수치모형 개발 완료	100
	1차원 수리실험 실시	수리학적 및 구조적학 특성을 알아보기 위한 1차원 수리실험 실시 완료	100
	수리실험과 수치모형 결과 비교	수리실험과 수치모형의 결과를 비교하여 두 결과가 잘 일치함을 확인	100
	각종 변수들의 영향 검토	방파제의 형상에 관한 각종 변수들의 영향을 검토하여, 이에 따른 수리특성 확인	100
2차 년도	다열 커튼월-파일 방파제에 의한 산란파 수리모형 실험	SPIV를 이용하여 다열 커튼월-파일 방파제에 의한 산란파의 영향을 보기 위해 3차원 수리실험을 실시 커튼월의 홀수와 조파 조건을 다르게 하여 6가지 경우에 대하여 실험	100
	항 내 정온도 수치모형 개발	GUI 환경의 WADEM을 이용하여 항 내 정온도를 평가할 수 있는 수치모형을 개발 수리실험 결과와 비교하였을 때 서로 잘 일치함	100
3차 년도	항내 및 연안역 토사이동 수치모형 및 해안선 변화 수치모형 개발	WADEM_PB 및 DICEM_R을 이용하여 토사이동 수치모형의 개발을 하였고, One-line 모델을 통해 해안선 변화 수치모형을 개발하여 수리실험 및 실지역 적용을 통해 검증	100
	이안제 후면 해저지형 변화 및 해안선 변화 3차원 수리실험	3차원 수리실험을 통해서 다열 커튼월-파일 방파제 후면의 해저지형 변화 및 해안선 변화 실험을 방파제 하단부 공극의 차에 따라 3가지 경우에 대하여 실험	100

제5장 연구개발결과의 활용계획

본 연구개발결과는 다열 커튼월-파일 방파제의 1차원 모형, 2차원 모형 및 정온도 모형, 해안선 변화 및 토사이동 수치모형 등이며 이를 각 분야별의 활용도를 살펴보면 다음과 같다.

다열 커튼월-파일 방파제 1차원 모형

본 연구에서 제안하는 다열 커튼월-파일 방파제는 중력식 방파제의 경제적, 환경적, 지반공학적 문제들을 해결할 뿐만 아니라 장주기파에 취약한 투과성 방파제의 단점을 보완함으로써 방파제 구조형식의 다변화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

또한 지금까지의 방파제 건설에는 모래, 돌 등의 자연 재료와 콘크리트를 주로 사용하였다. 본 연구에서 제안하는 방파제는 철강을 이용하여 건설할 수도 있기 때문에 방파제 건설 재료의 다변화에도 기여할 것으로 생각된다. 특히 요즈음 국내에서도 관심이 집중되고 있는 석션 파일을 이용할 수도 있어서 시공 면에서도 개선의 효과가 기대된다.

다열 커튼월-파일 방파제 2차원 모형 및 정온도 모형

다열 커튼월-파일 방파제에 의한 산란파를 이용한 항만 정온도 평가 수치모형은 다열 커튼월-파일 방파제로 인한 해수 교환 능력을 평가하고, 방파제 주변의 토사 이동 및 항내 매몰 저감 능력을 평가하는데 활용한다. 최근 관심이 높아지는 마리나에서의 항 배치 및 방파제에 활용할 수 있는 수치모형을 개발하였으며, 이는 사회적 추세인 친환경성에도 부합한다. 항만 이용객에게 친수 및 여가 공간을 제공하여 항만 구조물에 대한 사회적인 인식 개선의 효과도 기대한다.

해안선 변화 및 토사이동 수치모형

해수 유동이 가능한 방파제에 대한 연구는 최근 20년 동안 더욱 활발하게 수행되고 있으나 수학적 해석의 어려움으로 2차원 수치모형 개발에는 한계가 있었다. 본 연구에서는 구조물의 설치에 따른 경계처리의 수치해석 면에서 효과적인 기법을 수립하여 실용적인 2차원 해석법을 창출 하였다. 해수 유동이 가능한 방파제는 수질개선에는 분명한 효과가 기대되나 토사이동 측면에서는 연구의 전례가 없어 실용화의 걸림돌이 되었다. 하지만 본 연구를 통하여 수질 및 토사이동에 대한 환경영향 평가의 기술 수립에 활용할 수 있다.

제6장 참고문헌

- 오미란, 2004. Transport of Suspended Sediments Underneath Surface Breakwaters and Its Numerical Simulation, 석사학위논문, 성균관대학교
- 윤성범, 남두현, 한상철, 이종인, 2005. 유공벽의 파에너지 소모계수, 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, pp.1890-1895.
- 이대환, 2008. 해안공간 보전을 위한 진단 및 평가 프로그램의 개발, 석사학위논문, 성균관대학교
- 지창환, 2005. 파일 지지된 다열 연직벽 방파제로부터의 규칙파의 반사 및 투과, 석사학위논문, 서울대학교
- 환동해출장소, 2007. 해안침식지역물리조사를 위한 기본계획수립보고서.
- Abul-Azm R.G., 1993. Water diffraction through submerged breakwaters, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng. : 119(6), pp.587-605.
- Bailard, J.A., 1981. An energetics total load sediment transport model for a plane sloping beach, J. Geophys. Res., 86(C11): pp.10938-10954.
- Berkhoff, J.C.W., 1972. Computation of combined refraction diffraction, Proc. 13th Conf. Coastal Eng., pp.471-490.
- Chamberlain, P.G. and Porter, D., 1995. The modified mild-slope equation, J. Fluid Mech., 291, pp.393-407.
- Copeland, G.J.M., 1985. A practical alternative to the mild slope wave equation, Coastal Engrg., 9, pp.125-149.
- Dean, R.G. 1976. Beach erosion: Causes processes and remedial measures, CRC Critical Reviews in the Environmental Control, 6(3).
- Drimer et al., 1992. A simplified analytical model for a floating breakwater in water of finite depth, Applied Ocean Res., 14, pp.33-41.
- Edelman, T. 1968. Dune erosion during storm conditions, Proc. the 11th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, New York, p.719.
- Evans D.V., and Morris, C.A.N., 1972. Complementary approximations to the solution of a problem in water waves. J. Inst. Maths Applics. 10, pp.1-9.
- Evans, D. V., 1990. The wide-spacing approximation applied to multiple scattering and sloshing problems. J. Fluid Mech., 210, pp. 647-658.
- Garder, A.O., Peaceman, D.W., and Pozzi, A.L., 1964. Numerical calculation of

- multidimensional miscible displacement by the method of characteristics, Soc. Pet. Eng. J., 4, pp.26-36
- Holly, F.M., and Preissmann, A., 1977. Accurate calculation of transport in two dimensions, J. Hyd. Div., ASCE, 103, pp.1259-1277.
- Isaacson, M., Premasiri, S., and Yang, G., 1998. Wave interactions with vertical slotted barrier, J. Waterw., Port, Coastal Ocean Eng., ASCE, 124(3), pp.118-126.
- Isobe, M., 1994. Time-dependent mild-slope equations for random waves, Proc. 24th Int. Conf. Coastal Engrg., ASCE, pp.285-299.
- Jones, D.B., Lee, J-J and Raichlen, F., 1979. A transportable breakwater for near shore applications, Proc. Specialty Conference Civil Engineering in Ocean IV, pp.433-456.
- Jun, K.S., and Lee, K.S., 1994. An Eulerian-Lagrangian hybrid numerical method for the longitudinal dispersion equation, J. KAHS, 26(3).
- Kakuno, S. and Liu, P.L.-F., 1993. Scattering of water waves by vertical cylinders, J. Waterw., Port, Coastal Ocean Eng., ASCE, 119(3), pp.302-322.
- Kim, B.H., 1998. Interactions of waves, seabed and structures, Ph.D. Dissertation, Seoul National University.
- Kirby, J.T., 1986. A general wave equation for waves over rippled beds. J. Fluid Mech., 162, pp.171-186.
- Kirby, R. (1988) High concentration suspension (fluid mud) layers in estuaries, in Physical Processes in Estuaries, (eds J. Dronkers and W. van Leussen), Springer-Verlag, Berlin, pp.463-87.
- Kriebel, D.L., 2000. Performance of vertical wave barriers in random seas, Proc. Coastal Structures' 99, A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 525-532.
- Kriebel, D.L. and Bollmann, C.A., 1996. Wave transmission past vertical wave barriers, ICCE, pp.2470-2483.
- Kriebel, D.L., 1992. Vertical wave barriers: wave transmission and wave forces, Proc., 23rd Int. Conf. Coast. Engrg., ASCE, Reston, Va., pp. 1313-1326.
- Krone, R.R., 1962. Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes, Internal Report. Hydraulic Engineering Laboratory University of Berkeley, California.
- Lee, J.J., 1969. Wave-induced oscillations in harbors of arbitrary shape, W.M. KECK Lab. Hydraulic and Water Resources. California Inst. of Technology, No. KH-R-20.

- Lee, J.J., 1971. Wave-induced oscillations in harbors of arbitrary geometry. *J. Fluid Mech.*, 45, pp.375-394.
- Lee, J.L., 1994. Derivation of nonlinear model for irregular waves on mild slope, *J. Korea. Soc. Coast. and Ocean Eng.*, KSCOE, 6(3), pp.281-289.
- Lee, J.L., 1998. A high-accuracy approach for modeling flow-dominated transport, In C.A. Brebbia ed., *Environmental Coastal Regions, Proc. of Second Int. Conf. on Envir. Coastal Region*, Cancun, pp.277-286.
- Lee, J.L., 1998. Boundary treatment in a hyperbolic wave model. *J. of Korean Society of Civil Engineers*, 18(II-6), pp.601-612.
- Lee, J.L., 1998. Decomposition of reflecting waves by hyperbolic model, *J. Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 10(4), pp.197-203.
- Lee, J.L. and Cho, I.H., 2003. Analysis of energy loss on waves scattering by vertical permeable barriers. submitted to *Journal of Ocean Research*.
- Lee, J.L. and Lee, K.J., 2001. Effect of a surface-piercing vertical thin breakwater to harbor tranquility. *The First Asian and Pacific Coastal Engineering Conference*, pp.186-195.
- Lee, J.L. and Lee, D.Y. 2003. Modeling of wave scattering by vertical barriers. *Proc. of 13th International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE*, 3, pp.773-780
- Lee, J.L. and Oh, M., 2005. Fine sediment accumulation in a port protected by a piercing-type barrier, *J. Coastal Research*, SI(37)
- Lee, J.L. and Park, C.S. 2000. Development of weakly nonlinear wave model and its numerical simulation, *J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 12(4), pp.181-189.
- Lee, J.L. and Park, C. 2001. A weakly nonlinear wave model of practical use, *Proc. the 4th International Symposium Waves 2001, ASCE, San Francisco*, 894-903.
- Lee, J.L. and Teng, M.H. 2006. A hurricane wave and surge forecasting system in Hawaii, *Proc. the 30th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, San Diego*.
- Lee, J.L., and Wang, H., 1994. One-D model prediction of pollutant transport at a canal network, *J. Kor. Soc. Coast. Ocean Eng.*, KSCOE, 6(1).
- Leonard, B.P., 1979. A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation, *Computer Method in Applied Mechanics and*

- Engineering, 19, pp.59-98.
- Liu, P.L.F. and Abbaspour, M., 1982. Wave scattering by a rigid thin barrier, *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Div.*, ASCE, 108, pp.479-91.
- Losada, I, Losada, M., and Roldan, A., 1992. Propagation of oblique incident waves past rigid vertical thin barrier, *Applied Ocean Res.*, 14, pp.191-199.
- Madsen, P.A., and Larsen, J., 1987. An efficient finite-difference approach to the mild-slope equation, *Coastal Engrg*, 11, pp.329-351.
- McIver, P., 1985. Scattering of water waves by two surface-piercing vertical barriers. *IMA J. of Applied Mathematics* 35, pp.339-355.
- Mehta, A.J., and Lott, J.W., 1987. Sorting of fine sediment during deposition, *Proc. Int. Conf. Coastal Sediments*, ASCE, pp.348-362.
- Mehta, A.J., Parchure, T.M., Dixit, J.G. and Ariathurai, R. 1982. Resuspension potential of deposited cohesive sediment beds, in *Estuarine Comparison*, (ed. V. S. Kennedy), Academic Press, New York, pp.591-609.
- Mehta, A.J. (1989) On estuarine cohesive sediment suspension behavior. *Journal of Geophysical Research*, 34(010), pp.14303-14.
- Mei, C.C., 1983. *The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves*. Wiley, NewYork.
- Mei, C.C., Liu, P.L.-F., and Ippen, A.T., 1974. Quadratic loss and scattering of long waves, *J. Waterw., Harbors, and Coastal Eng. Div.*, ASCE, 100(3), pp.217-239.
- Migniot, C., 1989. Tassement et rhéologie des vases-Parties 1 et 2, *La Houille Blanche*, 1 and 2, (inFrench).
- Morris, C. A. N., 1975. A variational approach to an unsymmetric water-wave scattering problem. *J. of Engng Math.*, 9, pp.291-300.
- Murakami and Noguchi, 1977. Effects of entrance loss on wave-induced oscillations in rectangular harbors. *Coastal Engineeringin Japan*, 20, pp.27-42.
- Nadaoka, K., Beji, S., and Nakagawa, Y., 1994. A fully-dispersive weakly nonlinear wave model and its numerical solutions, *Proc. 24th Int. Conf. On Coastal Engrg.*, ASCE, pp.427-441.
- Ohyama, T. and Tsuchida, M., 1997. Expanded mild-slope equations for the analysis of wave-induced ship motion in a harbor. *Coastal Engineering*, 30, pp.77-103.
- Parker, W.R. (1984) On the observation of cohesive sediment behavior for engineering purposes, in *EstuarineCohesiveSedimentDynamics*(ed. A. J. Mehta), Springer-Verlag,

- Berlin, pp.270-89.
- Partheniades, E., 1956, Erosion and deposition of cohesive solids, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol.91, No.HY1, Paper4204, Jan., pp.105-139.
- Porter, R. and Evans, D. V., 1995. Complementary approximations to wave scattering by vertical barriers. J. of Fluid Mech., 294, pp.155-180.
- Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., and Flannery, B.P., 1992. Numerical Recipes in FORTRAN: the Art of Scientific Computing, Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Radder, A.C., 1979. On the parabolic equation method for water wave propagation. J. Fluid Mech., 95, pp.159-176.
- Roelvink, J.A., and Stive, M.J.F., 1989. Bar-generating cross-shore flow mechanics on a beach, J. Geophys. Res., 94, C4:pp.4785-4800.
- Sawaragi, T., Aoki, S., and Hamamoto, S., 1989. Analysis of hydrodynamic forces due to waves acting on a ship in a harbor of arbitrary geometry. Proc. 8th Int. Conf. Offshore Mech. and Arctic Eng., ASME, pp.117-123.
- Seo, I.W., and Kim, D.G., 1995. Numerical modeling of one-dimensional longitudinal dispersion equation using Eulerian-Lagrangian method, J.KASHS,27(2).
- Smith, R., and Sprinks, T., (1975). "Scattering of surface waves by a conical island." J. Fluid Mech., 72, pp.373-384.
- Stiassnie, M., Naheer, E., and Boguslavsky, I., 1984. Energy losses due to vortex shedding from the lower edge of a vertical plate attacked by surface waves. Proc. R. Soc. Lond. A396, pp. 131-142.
- Suh, K.D., Park, W.S., and Park, B.S., 2001. Separation of incident and reflected waves in wave-current flumes, Coastal Engineering, 43, pp.149-159.
- Suh, K.D., Shin, S., and Cox, D.T., 2006. Hydrodynamic Characteristics of Pile-Supported Vertical Wall Breakwaters. J. Waterw., Port, Coastal Ocean Eng., 132(2), pp.83-96.
- Suh, K.D., Son, S.Y., Lee, J.I., and Lee, T.H., 2002. Calculation of irregular wave reflection from perforated-wall caisson breakwaters using a regular wave model, Proc., 28th Int. Conf. Coast. Engrg., ASCE, Reston, Va., pp.1709-1721.
- Tanaka, H., and Shuto, N., 1981. Friction coefficient for a wave-current coexisting system, Coastal Engrg. in Japan, 24, pp.105-128.
- Ünlüata, Ü. and Mei, C.C., 1975. Effects of entrance loss on harbor oscillations. Journal

of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, ASCE, 101, pp.161-180.

Ursell, F., (1947). "The effect of a fixed vertical barrier on surface waves in deep water." Proc. Camb. Phil. Soc.43, 374. 25(8), pp.621-637.

Wiegel, R. L., (1960). "Transmission of waves past a rigid vertical barrier." J. Waterways and Harbors Div., ASCE, WW1, pp.1-12.

Yasso, W.E 1965. Plan Geometry of Headland Bay Beaches. Journal of Geology, 73, 702-714.