

627.5  
L2937

최 종  
연구보고서

GOVP 12001065

## 간척지 개발과 연안의 친수 환경 조성 연구

Studies on Tidal land Reclamation and  
Creation of Environmental Amenity

1999. 10

연 구 기 관

농어촌진흥공사 농어촌연구원

농 립 부

## 제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “간척지 개발과 연안의 친수환경 조성에 관한 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

1999 . 10 .

주관연구기관명 : 농어촌진흥공사

총괄연구책임자 :	박	상	현
연구원 :	황	종	서
연구원 :	송	태	관
연구원 :	어	대	수
연구원 :	조	진	훈
연구원 :	박	영	욱
연구원 :	김	원	장

# 요 약 문

## I. 제 목

간척지 개발과 연안의 친수 환경 조성 연구

## II. 연구 개발의 목적 및 필요성

간척사업은 주곡의 자급과 산업의 선진화를 위한 토지와 수자원을 확보하기 위하여 주로 수심이 얇은 해안과 하구에서 시행되어 왔다. 근래에 이르러, 산업화에 따른 토지와 수자원의 요구가 증대됨에 따라서 심해지역에서 대규모의 형태로 개발되고 있지만, 시설물의 안정성과 경제적 가치를 높이는데 주력하고, 연안의 생태 서식 공간을 조성하거나 주민에게 쾌적한 공간을 제공하는데 있어서 부족한 경향이 있다. 더구나, 지금까지 적용되어온 경험적인 기술만으로는 간척지 연안에서 발생하는 조석과 파랑, 퇴적 및 수질, 생태 특성을 정확히 예측하고, 간척 개발에 따른 환경변화와 부정적인 피해를 규명하고 합리적인 대책을 수립하는데 있어서 미흡하다.

본 연구는 간척지 개발에 따른 부정적인 환경변화를 최소화하기 위한 수리시설물을 개발코자한다. 간척지 수질을 보존하기 위한 오염물 침전지와 산화수로, 연안 어류의 담수호 소상을 위한 어도, 해안 파도의 진입에 따른 월류 높이를 줄여서 방조제의 바다 쪽 경관을 개선하고 친수성을 높이기 위한 환경사 방조제, 연안의 퇴적 조성을 위한 양팔형 수제공 등 환경친화적인 수리구조물을 수리모형시험을 통하여 개발코자 한다. 또한, 방조제 외곽 연안의 조위 상승, 해일 피해, 갯벌 지역의 퇴적과 세굴 변화, 수질 변화 등을 컴퓨터 수치모형을 도입하여 간척지 연안의 전반적인 수

리환경 변화를 종합적으로 분석코자한다.

궁극적으로 본 연구는 간척사업을 통하여 토지와 수자원을 확보하고 연안의 쾌적한 환경을 조성하는데 기여하도록 추진되었다.

### III. 연구 개발 내용 및 범위

- 간척지 연안의 조석, 파랑, 퇴적과 침수피해, 담수호 수질 조사
- 서해안 간척 개발 구역의 친수 환경 조성 현황 조사
- 미국, 일본, 화란 등 선진 간척지의 친수 환경 조성 현황 조사
- 담수호 내 퇴적 오염물 정화와 수질 개선을 위한 침전지와 산화수로에 대한 수리모형시험 개발
- 조석 간만의 차이가 큰 간척지에서 소하성 어류를 위한 어도 개발
- 환경사 방조제, 수제공, 어도 등 환경 친화적인 수리시설 개발 분석
- 배수갑문 하류의 세굴을 방지하며 어류 서식 공간을 확보하기 위한 물방석과 수제공 구조물 시험
- 간척지 연안의 조석, 파랑, 유사 이동, 수질 변화 조사 및 컴퓨터 수치 모형의 적용

### IV. 연구 개발 결과의 활용에 관한 건의

국토가 협소한 우리 나라의 형편상, 간척사업은 주곡의 자급을 위한 불가피한 사업이더라도, 간척지 연안은 인간과 자연이 공존하는 쾌적한 공간으로 조성되어야 한다. 이에 관한 연구 결과는 다음과 같다.

- 간척지 연안의 환경사 방조제는 종래의 급경사 제방보다 진입 파도의 에너지를 줄이며, 특히, 심해지역의 높은 파고가 발생하는 간척지에서 효과적이다. 또한, 도파고를 줄이고 제방 높이를 낮추므로 해안 경관을 개선하고



편안한 쉼터를 제공하며, 완만한 제방 주변의 수중 공간은 어류 서식 공간을 제공하므로 향후, 심해지역의 방조제 설계에 활용되도록 요망된다.

○ 본 방조제와 연결하는 양팔형 수제공은 조석의 변화와 파랑의 진입이 큰 연안에서 세굴을 억제하거나 새로운 갯벌을 조성하는데 효과적이다. 이는 방조제 물막이 공사 중 제방을 따라서 개방구간으로 출입하는 흐름의 유속을 줄여서 세굴을 억제하며, 완공 후에는 새로운 갯벌을 창출하거나, 어류와 조류의 서식지로서 활용될 수 있으므로 영구적인 구조물로서 설치토록 요망된다.

○ 배수갑문 공사를 위하여 설치되는 임시물막이 제방은 수문 공사 후, 수문 양측의 제방 일부를 남기어서 파랑의 진입을 억제하여 수문 구조물이 파력에 견디도록 요망된다. 이는 갑문 하류의 흐름과 세굴을 완화하며 어류의 서식 공간을 제공하는데 기여할 수 있다. 또한, 배수갑문 하류에서 적절한 깊이의 물방석을 설치하여, 세굴을 억제하고 어류의 휴식공간으로 활용토록 요망된다. 이에 관한 연구결과는 새만금지구 배수갑문 및 화옹지구 배수갑문의 현장 기술자들과 협의된 바 있으며, 이들 보완 공사 등에 실용화되도록 요망된다.

○ 침전지와 산화 수로는 담수호 상류에서 유입되어 퇴적된 중금속을 준설·운반하여 침전시킨 후, 상층부는 부유된 오염물을 정화하는데 효과적이다. '99년도에 시험수조를 설치하여 3개월 간 실험한 결과, 부유물질(SS)은 90% 제거되며, COD는 80%, TN은 40%, TP은 60% 각각 제거되었다. 향후, 장기간에 걸쳐서 실험한다면, 수조내에 미생물이 더욱 번성하여 제거 효율은 더욱 증가되며, 산화수로내에 새로운 여과재료를 설치하여 실험한다면, 오염 처리능력은 현저히 증가하고, 수로 규모도 적절한 규모로 보완할 수 있을 것으로 전망된다. 따라서, 본 연구에서 개발한 이 시설은 오염물질의 유입량이 큰 담수호와 용수로에서 실용화되도록 요망된다.

○ 간척지 연안에서 적절한 규모의 자연 환경 보존구역은 자연적인 생태 서식 공간을 제공하는데 있어서 바람직하다. 이는 새만금지구의 인공습지, 금강호내에 생성된 사구 환경보존적 활용 방안, 영암호내의 뜬섬의 적정 관리 방안등을 마련하는데 실용화되도록 요망된다.

○ 간척지 연안의 조석, 파랑, 유사 이동, 수질 변화에 대한 수리설계는 관용적인 경험 공식을 지양하고, 본 연구에서 도입된 컴퓨터 수치 모형과 수리모형시험을 통하여 과학적으로 분석토록 요망된다. 특히, 대규모 간척지 수리시설의 설계와 환경보존 계획은 수치모형에 의하여 종합적인 방안을 구상하고, 세부적인 시설의 계획은 세부적인 설계에 앞서서 수리모형시험에 의하여 분석하여 최적의 설계 방향을 추진토록 요망된다.

본 연구에 의한 수리 시설과 전산 모형은 새만금, 시화, 영산강, 화용, 홍보지구 등 대규모 방조제 시설과 담수호 수질 정화 시설의 설계 등 간척지 환경을 보존하는데 활용되도록 요망된다.

이와 같이 본 연구 결과는 간척 사업을 통하여 선진 사회로 진입하는데 필요한 토지와 수자원을 개발하고, 연안의 환경을 쾌적하게 보존하는데에도 기여하도록 추진되었다.

## Summary

### 1. Subject

Studies on Tidal land Reclamation and Creation of Environmental Amenity

### II. Objectives and Importances of the Study

For the purposes of self-supply of main crops together with land and water resources, tidal land reclamation projects have been developed during last decades, in river mouths and shallow coastal area. Recently, owing to the necessity of more land and water resources, large scaled development projects are being carried in the deep sea area. Tidal reclamation projects need optimal mitigation schemes to compensate the negative environmental change and create amenity space to access in the near shore.

The simple imperial design methods are still applied to measure the environmental changes as before, however, these kinds of method is not proper way to estimate the environmental factors and derive optimal schemes to mitigate the negative effect after the development of the projects.

On this bases, a study have been performed for three years(1996-1999) to design and assess the environmental changes and create amenity after the development project. In the study, field data have been collected to estimate the results on environmental conservation and social contribution from project sites in Korea and

other developed countries.

Hydraulic model studies have been performed to develop a depot to purify the polluted water in the fresh water lake, fish-lock, sluice gate to be attached in the tidal barrier dam and mild slope seadike to provide resting place for visitors and habitat for migratory fishes and birds.

The study aims that the tidal land reclamation might contribute to supply proper land and water resources and create amenity in the near future

### III. Contents and Scopes of the Study

- Field investigation and data collection on tide, wave, sedimentation, water quality characteristics in the tidal reclamation project in Korea and other developed countries.
- Hydraulic model study on depot encircled with contact oxidation canal to purify the heavy materials and pollutants in the lake
- Ecological and hydraulic study on migratory fishes in the tidal area and assesment of fish ladder and fish lock type to be used in the tidal reclamation project
- Creation of Nature resources in the tidal reclaimed area.
- Hydraulic model study on amenity use of mild slope seadike and open arms groin to prevent scouring phenomena and create tidal flat in the near shore
- Hydraulic model study on cofferdam of sluice gate and adaptability of the dam as break water and shelter for fishes and

ships.

- Two dimensional numerical model study on tidal changes, wave intrusion, sedimentation and water quality changes after the tidal reclamation in the coastal area.

#### IV. Results and Recommendations

Tidal land reclamation policy have been contribute to self supply of the main crops i.e., rice, water and land resources. It is unavoidable to be continued in the circumstance of the high population density and to prepare reunification of divided Korea.

A Study on Tidal land Reclamation and Creation of Amenity have been resulted and to be recommended as follows,

1. Tidal reclaimed area might be created that human kind and natural species can be harmonized and access together.
2. The depot encircled with contact oxidation canal can be useful to purify the fresh water lake where heavy materials and suspended pollutants released from the upstream river basin.
3. For the migratory fishes, fish way using navigation lock is comparatively efficient than fish ladder to be operated for the entrance of the fishes during high tide and to decrease the construction cost of fish way.
4. The nature reserve is recommended to provide resting shelter for the wild animals and vegetation to be allowed in the project area.

5. Mild slope seadike is comparatively efficient than rapid slope seadike to decrease the wave run up height and dam crest height.

It create amenity and provide resting space for the visitors and habitat for fishes in the coast.

6. open arms groin is efficient to prevent scouring phenomena and create new tidal flat in the nearshore of seadike area where tidal difference and wave force are significant.

7. Stilling basin and groin at the downstream of sluice gates contribute to dissipate rapid flow energy and prevent local scouring phenomena during flood release. It also provides a shelter for the fishes.

8. Numerical models induced in the study are more reliable than existing imperial formulas to estimate the tidal changes, wave intrusion, sedimentation and water quality changes in the wide range of coastal area after the tidal reclamation.

The mitigation schemes derived from the results can be applied to design of seadike, creation of nature reserve, purifying water quality in the tidal reclamation project. It is to be disseminated in the Saemankeum, Shiwha, Yongsangang, Hongbo and Whaong tidal land reclamation project.

Conclusionally, The results can be contributed to take measures and improve the balance between optimal development of natural resources and create environmental amenity in the tidal reclamation area.

## Contents

<b>Chapter 1. Introduction</b> .....	25
<b>Chapter 2. Survey on Tidal Reclamation and Amenity Uses</b> .....	27
Part 1. Tidal reclamation in Korea .....	27
1. History of Tidal land reclamation .....	27
2. Recent Tidal reclamation projects .....	29
3. Assessment of present value on Tidal land reclamation .....	31
Part 2. Sedimentation and Water Quality in the Tidal Area ...	35
1. Sedimentation in the of GangHwaDo Tidal Flat .....	35
2. Sedimentation in the nearshore of Keum Estuary dam .....	39
3. Sedimentation and Inundation Problem in Komso Bay and Jangku Bay .....	41
4. Sedimentation in the Saemankeum Tidal Reclaiming area .....	45
5. Water Quality Control in ShiHwa Flash water Lake .....	46
6. Fish ladder in YoungAm Flash water Lake .....	49
7. Groin and Breakwater in Asan Bay .....	55
8. Investigation of water quality at Mankyung river .....	71
Part 3. Tidal reclamation in Developed Countries .....	80
1. Creation of Nature Reserves in America .....	80
2. Tidal Reclamation in the Netherlands .....	81
3. Tidal Reclamation in Japan .....	88
<b>Chapter 3. Mitigation Schemes</b> .....	100
Part 1. Introduction .....	100
Part 2. Settling pond encircled with Oxidation Canal .....	101
1. treatment of polluted water in Settling pond .....	101

2. treatment in the Gravel contact Oxidation canal .....	110
<b>Part 3. Fish Way .....</b>	<b>124</b>
1. Migratory Fishes in the Tidal Area .....	124
2. Classification of Fish Way .....	133
3. Improvement of Fish way structure .....	136
4. Improvement of Flow in the Fish way .....	144
<b>Part 4. Nature Reserves and Artificial Wetlands .....</b>	<b>153</b>
1. Nature Reserves in the Tidal Reclamation Area .....	153
2. Creation of Artificial Wetlands .....	154
<b>Part 5. Supplemental Dikes for Environmental Friendly Uses .....</b>	<b>166</b>
1. Mild sloped Seadike .....	166
2. Offshore Breakwater .....	172
3. Submerged Breakwater .....	172
4. Open Arms Groin .....	175
5. Remains of Cofferdam as Wave and Scour protection .....	180
6. Amenity and Environmentally Sound Space Creation using Complex Breakwater System .....	184
<b>Chapter 4. Application of Mathematic models .....</b>	<b>196</b>
Part 1. Tidal reclamation in Korea .....	196
Part 2 Tidal Flow Model .....	197
1. Basic theory and Configuration of Model .....	197
2. Tidal Changes in Tidal Reclamation Areas .....	207
Part 3 Water Quality Model .....	250
1. Basic theory and Configuration of Model .....	250
2. Modeling in Saemankeum Project .....	263
Part 4. Wave model .....	287



1. Configuration of Model .....	287
2. Modeling in Saemankeum Project .....	288
Part 5. Morphology model .....	332
1. Configuration of Model .....	332
2. Modeling in Damyung reclamation project .....	336
3. Morphological changes due to Saemankeum dike construction .....	346
<b>Chapter 5 Conclusions and Recommendations for</b>	
<b>Dissemination of the Results .....</b>	<b>351</b>
1. Tidal Reclamation and Amenity Uses .....	351
2. Sustainable Development of Hydraulic Structures in the Tidal Reclamation Projects .....	353
3. Application of Mathematic models .....	355
4. Recommendations for Dissemination of the Results .....	357
 References .....	 361
 Appendices .....	 367
Appendix 1. History of tidal reclamation in Korea and Netherland .....	367
Appendix 2. Fishes in the upstream of YoungAm Lake .....	370
Appendix 3. Design map of Depot and oxidation canal .....	381

## 목 차

제 1장 머리말 .....	25
제 2장 간척지 개발과 연안의 친수 환경 조성 현황 .....	27
제 1절 우리 나라 간척 현황 .....	27
1. 간척의 역사 .....	27
2. 간척사업 개발 현황 .....	29
3. 간척 사업의 부가가치 평가 .....	31
제 2절 간척지 연안의 퇴적과 수질 .....	35
1. 강화도 연안의 퇴적 특성 .....	35
2. 금강 하구 연안의 퇴적조사 .....	39
3. 곰소만과 장구만의 퇴적에 의한 침수피해 .....	41
4. 새만금 간척지 연안의 파랑과 퇴적 특성 조사 .....	45
5. 시화 담수호의 수질 보존과 배수갑문의 운영 .....	46
6. 영암호 갑문식 어도 이용 .....	49
7. 아산만 걸매리 연안의 침식방지 제방현황 .....	55
8. 만경강 수질 조사 .....	71
제 3절 선진 간척지의 친수환경 조성현황 .....	80
1. 미국의 해안 친수 공간 조성 .....	80
2. 화란의 간척 .....	81
3. 일본의 간척사업 현황 .....	88
제 3장 간척지 친수 환경 조성 시설의 개발 .....	100
제 1절 서론 .....	100
제 2절 담수호 오염물 침전지와 산화수로 .....	101
1. 담수호의 오염물 침전지 .....	101
2. 자갈점축 산화공법 .....	110
제 3절 어도 .....	124

1. 어도가 필요한 어류 .....	124
2. 어도의 형식 .....	133
3. 어도 현황과 이용에 관한 개선 사항 .....	136
4. 어도의 수리적 특성 개선 .....	144
<b>제 4절 자연보존지역과 인공습지의 조성</b> .....	153
1. 간척지 자연 보존 현황 .....	153
2. 인공 습지의 조성 .....	154
<b>제 5절 환경친화적 방조제 보조 제방 개발</b> .....	166
1. 환경사 방조제 .....	166
2. 이안제 .....	172
3. 잠제 .....	172
4. 양팔형 보조 방파제 .....	175
5. 임시물막이 제방을 이용한 배수갑문 주변의 친수환경 조성 .....	180
6. 면적방호방식에 의한 환경친화적인 연안공간 구성 .....	184
<b>제 4장 수치해석</b> .....	196
<b>제 1절 서론</b> .....	196
<b>제 2절 조석 변화 예측 모형</b> .....	197
1. 모형의 기본이론과 구성 .....	197
2. 서해안 간척지구의 조석변화 분석 .....	207
<b>제 3절 수질 변화 예측 모형</b> .....	250
1. 모형의 기본이론과 구성 .....	250
2. 새만금 방조제 수질 변화 예측 .....	263
<b>제 4절 파랑 변형 예측 모형</b> .....	287
1. 서론 .....	287
2. 간척지 해역의 모델링과 설계해면 .....	288
<b>제 5절 연안 퇴적 변화 예측 모형</b> .....	332
1. 모형의 기본 이론과 구성 .....	332
2. 김포 대명포구지역 지형변화 수치해석 .....	336
3. 새만금 방조제 공사로 인한 장기 해저지형 변화 .....	346

<b>제 5장 결론 및 연구결과의 활용에 관한 건의</b> .....	351
1. 간척지 친수환경 현황 조사 .....	351
2. 친수환경 조성시설의 개발 .....	353
3. 수치모델의 도입 .....	355
4. 연구 결과의 활용에 관한 건의 .....	357
<b>참고문헌</b> .....	361
<b>부록</b> .....	367
1. 강화도 간척지와 화란 간척지의 역사 .....	367
2. 영암호 상류 어류상 .....	370
3. 침전지와 접촉산화수로 설계도면 .....	381

## 표 차 례

표 2.1.1	연대별 간척개발 실적 .....	30
표 2.1.2	간척개발 시행 중 지구 현황 .....	31
표 2.1.3	간척지 방조제 건설에 따른 부대 효과 .....	32
표 2.2.1	장지평의 방조제 (길이 단위 : m) .....	36
표 2.2.2	배수갑문 퇴적토 제거방안 검토 .....	43
표 2.2.3	'99년 영암호 어도에서 채집한 어류(개체/1시간) .....	52
표 2.2.4	기설 통선겸용어도의 통선현황 .....	53
표 2.2.5	퇴적판 측정결과 .....	58
표 2.2.6	수질 조사 지점 .....	73
표 2.2.7	1차 수질 측정 현황 .....	74
표 2.2.8	2차 수질 측정 현황 .....	75
표 2.2.9	Boundary 설정 .....	75
표 2.2.10	Loads .....	76
표 2.2.11	Initial conditions .....	76
표 2.3.1	미국의 해안 매립과 친수 환경 및 위락 공간 조성 .....	80
표 2.3.2	화란과 우리 나라의 간척공사비 비교 .....	83
표 3.2.1	외국의 준설을 통한 수질개선 사례 .....	109
표 3.2.2	접촉산화공법의 장단점 .....	111
표 3.2.3	자갈접촉산화수로 설계변수 .....	113
표 3.2.4	수질분석 결과 .....	116
표 3.2.5	정화효율 분석결과 .....	117
표 3.4.1	수질 분석 결과 .....	163
표 3.5.1	방조제 경사별 파고의 계산 .....	168
표 4.2.1	Monitoring stations of Regional Model .....	213
표 4.2.2	Model performance at 31 water level stations .....	215
표 4.2.3	Tidal amplitudes before and after the project .....	218
표 4.2.4	Tidal phases before and after the project .....	218
표 4.2.5	Map list used to define the bathymetry of model .....	223

표 4.2.6	Model performance at 17 water level stations .....	226
표 4.2.7	Monitoring stations of Yongsangang Regional Model .....	239
표 4.2.8	Model performance for the Case A3 .....	240
표 4.2.9	사업 시행전에 대한 계산결과 .....	245
표 4.2.10	사업 시행후에 대한 계산결과 .....	246
표 4.3.1	유한 격자의 종합 모델에서 일반적인 분산값의 범위 .....	261
표 4.3.2	조류 모형의 입력 자료 .....	266
표 4.3.3	확산 모형의 입력 자료 .....	280
표 4.3.4	관측 SS농도 .....	281
표 4.3.5	저조일 때 SS의 관측 농도와 모의 농도 .....	284
표 4.3.6	고조일 때 SS의 관측 농도와 모의 농도 .....	285
표 4.4.1	Comparison between different sources of offshore wave data .....	309
표 4.4.2	Distribution of wave height at Maldo and from the WAM ....	310
표 4.4.3	High and extreme wave condition offshore: Winter and .....	311
표 4.4.4	Transformed high and extreme wave condition: Dyke .....	311
표 4.4.5	Transformed high and extreme wave condition: Dyke .....	312
표 4.4.6	Transformed high and extreme wave condition: Dyke No2, Point2 ...	313
표 4.4.7	Transformed high and extreme wave condition: Dyke .....	314
표 4.4.8	Transformed high and extreme wave condition: Dyke .....	315
표 4.4.9	Transformed high and extreme wave condition: Dyke .....	315
표 4.4.10	Transformed high and extreme wave condition: Dyke .....	316
표 4.4.11	Transformed high and extreme wave condition: Dyke .....	317
표 4.4.12	Transformed high and extreme wave condition: Dyke .....	318
표 4.4.13	Transformed high and extreme wave condition: Dyke .....	318
표 4.4.14	Transformed 1000 year wave condition at 4.52m MSL: at .....	319
표 4.4.15	Low, high and extreme water levels: Kunsan and Wido .....	320
표 4.4.16	Extreme combinations of waves and water levels .....	320
표 4.4.17	1000 year return period joint probability combinations for Dyke 1 ...	321
표 4.4.18	1000 year return period joint probability combinations for Dyke 2 ..	322
표 4.4.19	1000 year return period joint probability combinations for Dyke 3 ...	323
표 4.4.20	1000 year return period joint probability combinations for Dyke 4 ...	324
표 4.4.21	1000 year return period joint probability combinations at the structure toe ...	325
표 4.5.1	Major tidal constituents .....	340

## 그림 목 차

그림 2.1.1	강화도의 주요 간척지 위치 .....	28
그림 2.1.2	영암호 방조제 연안의 낚시 광경('98, 10월) .....	34
그림 2.2.1	장지방조제 부근 횡단면 개념도 .....	36
그림 2.2.2	장지평 방조제 단면도 .....	37
그림 2.2.3	금강 연안의 부유물과 퇴적 피해 위치 .....	40
그림 2.2.4	곰소만의 해안 퇴적 지역 .....	42
그림 2.2.5	장구배수문의 퇴적현황 .....	44
그림 2.2.6	퇴적토 제거를 위한 수리모형 .....	44
그림 2.2.7	시화 담수호와 연안의 지점별 TN, TP, SS, COD 변화 .....	48
그림 2.2.8	영암호 유입하천에서 채집된 어류 .....	52
그림 2.2.9	보조방조제가 설치된 아산시 걸매리 해역전경 .....	55
그림 2.2.10	아산시 걸매리에 설치한 퇴적판과 목항 .....	56
그림 2.2.11	퇴적판 설치위치 .....	56
그림 2.2.12	퇴토적판 설치 현황('98. 9. 24) .....	57
그림 2.2.13	조사 시기별 축점의 퇴적추이 변화 .....	59
그림 2.2.14	ST1의 조사시기별 퇴적변화 추이 .....	59
그림 2.2.15	ST2의 조사시기별 퇴적변화 추이 .....	60
그림 2.2.16	ST3의 조사시기별 퇴적변화 추이 .....	60
그림 2.2.17	ST5의 조사시기별 퇴적변화 추이 .....	61
그림 2.2.18	ST6의 조사시기별 퇴적변화 추이 .....	62
그림 2.2.19	ST7의 조사시기별 퇴적변화 추이 .....	62
그림 2.2.20	ST8의 조사시기별 퇴적변화 추이 .....	63
그림 2.2.21	ST9의 조사시기별 퇴적변화 추이 .....	64
그림 2.2.22	ST10의 조사시기별 퇴적변화 추이 .....	64
그림 2.2.23	ST11의 조사시기별 퇴적변화 추이 .....	65
그림 2.2.24	ST12의 조사시기별 퇴적변화 추이 .....	66
그림 2.2.25	ST13의 조사시기별 퇴적변화 추이 .....	66
그림 2.2.26	ST14의 조사시기별 퇴적변화 추이 .....	67

그림 2.2.27 ST15의 조사시기별 퇴적변화 추이 .....	68
그림 2.2.28 ST16의 조사시기별 퇴적변화 추이 .....	68
그림 2.2.29 ST17의 조사시기별 퇴적변화 추이 .....	69
그림 2.2.30 ST18의 조사시기별 퇴적변화 추이 .....	69
그림 2.2.31 ST19의 조사시기별 퇴적변화 추이 .....	70
그림 2.2.32 결매리 선척장의 퇴적 형태 .....	70
그림 2.2.33 만경강 유입 지천 및 조사지점 .....	72
그림 2.2.34 1차 수질 측정 결과 .....	73
그림 2.2.35 2차 수질 측정 결과 .....	74
그림 2.2.36 만경강 수질 예측 결과 .....	77
그림 2.2.37 BODC의 검정 결과 .....	77
그림 2.2.38 DO의 검정 결과 .....	78
그림 2.2.39 T-P의 검정 결과 .....	78
그림 2.2.40 T-N의 검정 결과 .....	79
그림 2.3.1 화란 Zuiderzee 간척지와 Ketelmeer projects 위치도 .....	85
그림 2.3.2 Ketelmeer 침전지 단면도 .....	86
그림 2.3.3 일본의 간척지 조성 현황 .....	90
그림 2.3.4 비와꼬 유역현황 .....	92
그림 2.3.5 갈대 숲의 조성 공법 .....	95
그림 2.3.6 비와꼬의 어류 인공산란 수로 구성 평면도 .....	96
그림 2.3.7 나가라가와와 자연 하천식 어도 현황 .....	98
그림 2.3.8 나가라가와 하구둑 수로 계단식 어도 .....	99
그림 3.2.1 수중에서 유기성 퇴적물의 거동 .....	102
그림 3.2.2 담수호 호변의 침전지조성 계획도 .....	106
그림 3.2.3 화란 Ketelmeer 호수에 시공중인 침전지형 매립지 .....	107
그림 3.2.4 화란 Ketelmeer 호수의 침전지 공사구역의 준설 현황('97.11) ...	109
그림 3.2.5 침전지와 자갈접촉산화수로 모형 실험 .....	114
그림 3.2.6 접촉산화수로 모형의 측정 .....	114
그림 3.2.7 유입농도별 COD 처리효율 .....	119
그림 3.2.8 유입농도별 SS 처리효율 .....	120
그림 3.2.9 유입농도별 T-N 처리효율 .....	121



그림 3.2.10	유입농도별 T-P 처리효율 .....	121
그림 3.2.11	1차 침전지 통과후 각 항목별 처리효율 .....	122
그림 3.2.12	접촉산화수로 통과후 각 항목별 처리효율 .....	122
그림 3.3.1	플타입어도 .....	134
그림 3.3.2	금강 하구둑 어도 .....	135
그림 3.3.3	탐진강 하구의 계단식 어도구조 .....	138
그림 3.3.4	갑문식 어도 수문의 개방순서 .....	143
그림 3.3.5	Boland식 어도 수리모형(수리시험장) .....	144
그림 3.3.6	계단식 어도의 수리시험 .....	147
그림 3.3.7	계단식 어도의 설계안과 보완에 관한 수리시험 .....	148
그림 3.3.8	영산강 하구둑 통선문을 이용한 갑문식 어도 설치현황 .....	150
그림 3.3.9	금강하구둑에서 흐름 측정('97년 8월4일) .....	151
그림 3.4.1	곰소만 해안(구식포)의 달뿌리풀 분포 .....	158
그림 3.4.2	아산시 결매리 갯벌에 설치한 시험조 .....	161
그림 3.4.3	아산시 결매리 논에 설치한 시험조 .....	162
그림 3.4.4	현장 수질 측정 장면 .....	162
그림 3.4.5	소조기 갯벌과 논에서의 COD 변화 .....	164
그림 3.4.6	대조기 갯벌과 논에서의 COD 변화 .....	165
그림 3.5.1	방조제 경사와 파고비 및 도파 특성( $R/H_0$ )의 관계( $H_0/L=0.03$ ) ...	168
그림 3.5.2	완경사 방조제 수리시험 .....	169
그림 3.5.3	화옹방조제 피복석에 서식하는 굴과 조개 채취 현황 .....	169
그림 3.5.4	방조제 연안의 이안제와 잠제형식의 보조제방 구성 .....	174
그림 3.5.5	잠제의 형태별 월파와 소파 효과(일본 堀川, 田中の 실험결과) .....	175
그림 3.5.6	양팔형 보조 방조제 배치도 .....	177
그림 3.5.7	새만금방조제 물막이 개방구간의 양팔형 수제공 수리모형시험 .....	178
그림 3.5.8	보조방조제의 설치에 따른 물막이 구간의 유속 감소 효과 .....	179
그림 3.5.9	배수갑문 임시물막이를 이용한 도류제 모형 시험 현황 .....	180
그림 3.5.10	배수갑문 임시물막이를 이용한 도류제 배치 평면도 .....	181
그림 3.5.11	배수갑문 임시물막이 도류제 유무에 따른 배수갑문 내외측의 유속분포(창조시) .....	182
그림 3.5.12	간척지 연안의 친수공간 구조물 배치 구상도 .....	183
그림 3.5.13	선적방호방식에 의한 호안의 피해상황 .....	186

그림 3.5.14	방호방식의 비교 .....	187
그림 3.5.15	새로운 면적방어방식 .....	188
그림 3.5.16	인공리프의 모식도 .....	190
그림 3.5.17	인공리프의 효과의 개념도 .....	192
그림 4.2.1	인천 국제공항과 시화 방조제 축조 후 지형도 변화 .....	208
그림 4.2.2	아산만 모형의 계산 격자망 .....	210
그림 4.2.3	조위 측정지점의 위치 (아산만 모형) .....	212
그림 4.2.4	수로단면(s1-s3)과 유속측점(v1-v10)의 위치 .....	214
그림 4.2.5	인천 및 안흥지점의 조위의 관측값과 계산값 .....	216
그림 4.2.6	인천지점에서 사업시행 전후의 대조기의 조위 계산결과 .....	217
그림 4.2.7	인천과 팔미도에서의 대조기의 시간대비 조류속과 조류향의 대조 .....	220
그림 4.2.8	모형의 범위 및 경계 .....	222
그림 4.2.9	최종 확정된 각 격자점의 수심 분포 .....	224
그림 4.2.10	금강 하구 모형에서의 조위 측정점의 위치 .....	227
그림 4.2.11	지점별 조위 및 조류속 .....	229
그림 4.2.12	방조제 건설 전후의 조류속 및 조위 비교 (방조제 전면) .....	230
그림 4.2.13	방조제 건설 전후의 조류속 및 조위 비교 (방조제 노선 7km 전방) .....	233
그림 4.2.14	영산강 지역모델(YERM)의 격자망 .....	236
그림 4.2.15	4개 주요분조에 대한 진폭비와 지각차 .....	241
그림 4.2.16	홍보지구 방조제 건설후의 격자망 구성도 .....	247
그림 4.2.17	방조제 건설 전후의 조위 비교(소조기) .....	248
그림 4.2.18	방조제 건설 전후의 조위 비교(대조기) .....	249
그림 4.3.1	점에서의 극미량 .....	251
그림 4.3.2	수질 model에서 부유물질과 오염물질의 거동 .....	254
그림 4.3.3	y, z방향으로 평균화된 횡단면적의 분할 .....	256
그림 4.3.4	수송망에서 교란파동 의 영향 .....	258
그림 4.3.5	단면으로 분할된 강 모델에서 불균등한 흐름의 분산 .....	260
그림 4.3.6	컴퓨터화된 요소와 이의 표면을 통한 이동 .....	262
그림 4.3.7	조류 모형의 구성 .....	264
그림 4.3.8	모형의 개방경계 .....	268
그림 4.3.9	계산영역의 격자구성 .....	269

그림 4.3.10	각 지점별 평균 수심 .....	270
그림 4.3.11	주요분조의 등조석도 .....	271
그림 4.3.12	조류속의 현장 관측치와 모의 발생치(측점 R2) .....	272
그림 4.3.13	관측조위와 모의조위(야미도, 군산외항) .....	273
그림 4.3.14	모의 조류속 벡터도(after 2700min) .....	274
그림 4.3.15	확산모형의 구성 .....	279
그림 4.3.16	새만금지구 수질조사 위치도 .....	282
그림 4.3.17	조시(潮時)별 관측 SS농도 .....	282
그림 4.3.18	저조위일 때의 등농도 곡선(Low flow) .....	284
그림 4.3.19	고조위일 때의 등농도 곡선(High flow) .....	285
그림 4.4.1	Location map .....	326
그림 4.4.2	Location of wave refraction points .....	327
그림 4.4.3	Distribution of offshore wave height: Winter and Summer ...	328
그림 4.4.4	Ratio of breaker wave height to water depth .....	329
그림 4.4.5	Scatter diagram of wave height and water level: Winter	330
그림 4.4.6	Scatter diagram of wave height and water level: Summer	331
그림 4.5.1	지형 변화 예측 모형의 구성 .....	335
그림 4.5.2	Bottom topography .....	338
그림 4.5.3	Velocity distribution (spring, flood tide) .....	342
그림 4.5.4	Velocity distribution (spring, ebb tide) .....	343
그림 4.5.5	Computed bed level change (spring, deposition) .....	344
그림 4.5.6	Computed bed level change (spring, erosion) .....	345
그림 4.5.7	새만금 방조제 완공후 시간에 따른 장기 지형변화(1,2호 방조제 전면) ...	349
그림 4.5.8	새만금 방조제 완공후 시간에 따른 장기 지형변화(3,4호 방조제 전면) ...	350
그림 5.1	간척지 연안의 친수환경 및 수치모델의 구성 시스템 .....	359

# 여 백

## 제 1장 머리말

국토 면적에 비하여 인구 밀도가 높은 우리 나라는 고래로부터 서남 해안의 간척지에서 농지를 개발하여 식량을 자급하고 수자원을 조달하여 왔다. 우리의 농지는 매년 3만 ha씩 감소하고 식량 자급도가 30%를 밑돌며 농산물 수입액은 연간 120억 달러에 이른다. 무역 수지가 열악한 현실에서, 수출로 벌어들인 외화로서 외국 농산물을 수입하는 비교 우위론적인 정책은 무역 적자를 가중시킨다. 국제시장에서 거래되는 쌀은 총 생산량의 10% 정도인 200만 톤에 불과하고, 우리 국민이 즐기는 끈기 있는 쌀은 거래량의 15%, 총생산량의 1.5%인 200만톤으로서 우리 국민의 식량으로는 3개월치에 불과하다. 남북통일에 대비하여 FAO가 추정하는 북한에서는 곡물 부족량이 120만 톤에 이르고 200만명이 굶주리고 있기 때문에, 이에 부응하기 위한 대책이 필요하다. 서해안의 간척 가능지역은 약 63만 ha로 추정되지만 환경 보존적인 관점에서 이중 8만 ha 미만을 개발 대상지로 계획하고 있다. 또한, 간척 개발은 불가피한 해안 환경의 변화를 야기하게 되므로 환경변화를 최소화하고 부정적인 변화를 완화하기 위한 기술 개발이 요망된다.

지금까지 간척사업은 경제적인 효과에 주력하여 개발되었지만, 쾌적성(Amenity value)를 창출하거나 수질과 생태 보존을 위한 기능이 미흡한 편이다. 그러나, 지금까지 간척지 공사에 사용한 석재와 토사는 콘크리트 등 인공 재료에 비하여 쾌적성과 환경 보존적인 가치는 우수하다. 어류들에게 방조제 석재에 부착한 미생물은 먹이를 제공하며, 돌 틈새는 우수한 서식 공간을 제공한다. 또한, 방조제 연안은 조수에 섞여서 이동하는 부유물이 침강되어 퇴적된 경우가 많다. 이러한 간척지의 환경보존적인 기능을 배가하여, 앞으로 간척사업은 연안의 식물과 어류와 철새 서식 등 생태적 가치

와 위락 공간으로서 쾌적성을 높이는 방향으로 추진되어야 한다.

본 연구는 간척지 연안의 환경변화 현황을 파악하기 위하여, 우리나라 간척의 효시인 강화도 간척지의 퇴적 현황과 조석과 유사 이동을 조사하고, 전북 곰소만 연안의 퇴적과 이에 따른 상류 농지의 침수 피해, 금강 하구둑 설치에 따른 연안의 퇴적, 아산만 간척사업에 따라 조성된 걸매리 해안의 퇴적 유도 제방, 그리고 해남 간척지와 영암호의 자연보존 가능지역을 조사하였다. 이와 함께, 간척의 선진국인 화란의 Ketelmeer 침전지, South Flevoland의 자연 보존 지구(nature reserves) 현황, 일본 교토지방의 비야꼬와 나고야 부근의 나가라가와 하구둑 어도 등의 현지를 농어촌진흥공사의 지원과 화란 델프트연구소 및 일본 비야꼬 연구소의 협조로 답사하였다.

또한, 해안의 친수 공간을 조성하기 위한 완경사 방조제, 긴팔형 수제공, 갑문식 어도, 담수호 오염물 침전지와 산화수로, 배수갑문의 정수지를 수리모형시험을 통하여 개발하였다.

간척지 연안의 환경 변화를 정확히 예측하고 대안을 수립하기 위하여 화란 델프트수리연구소가 개발한 동수역학 수치 모형(TRISULA-3D), 수질 변화 수치모형(DELWAQ), 파랑 변형 수치모형(WAVE) 및 연안의 지형변화 예측모형(MOR)을 도입하여 분석하였다.

본 연구 결과는 새만금 방조제, 화옹방조제, 시화배수갑문, 홍보지구 배수갑문, 금강하구둑, 영산강 하구둑 등의 간척 공사 구역에서 이의 신뢰성을 수리모형시험과 수치모형분석을 병행하여 종합적으로 검토하고 부분적으로 실용화되었다.

궁극적으로 본 연구는 21세기에 선진 사회로 진입하는데 필요한 토지와 수자원 개발 공간과 연안의 쾌적한 공간을 조화롭게 개발하고 보존하는데 기여하도록 추진되었다.

## 제 2장 간척지 개발과 연안의 친수 환경 조성 현황

### 제 1절 우리 나라 간척 현황

우리 나라의 간척은 1232년에 몽고의 침입 시, 고려조가 강화도로 파천하고 섬의 해안에 방조제를 쌓아 간척지를 조성하여 30 여 년간의 항쟁을 위한 식량을 조달한 것이 효시이다. 조선시대에도 연안의 낮은 제방을 쌓고 소류지 및 농지를 조성하는 형태로 간척지가 개발되었다. 일제시대에 산미증산계획에 의하여 1917년부터 1938년까지 시행한 간척사업은 178개 지구이며 개발면적은 약 4만ha이다. 해방 후, 1997년까지 준공된 간척지 면적은 74,891ha이며, '98년도 시행 중인 면적은 60,299ha이다.

#### 1. 간척의 역사

우리의 간척 사업은 고려 고종 19년(1232년)에 몽고의 침입에 따라 이곳에 10만호의 군인들이 파천해온 후, 권신 최우가 1238년 연안에 제방을 수축한 것이 효시이다. 1254년에는 강화읍에서 북쪽으로 10km 지점의 우측 해안인 승천포 부근에 고려 별궁과 함께 제포(梯浦)둑을 설치하였다. 또한, 서편의 석모도의 상주산 동편에 있는 상주둑은 길이가 4km인 제방으로서 상고시대에 교동도까지 연속되었다고 한다. 중세에는 남쪽 간사지인 매음도에 어류정둑을 만들고 이를 송가도와 연결하여 현재의 석모도를 이루게 되었다. 손들목 맞은 편이 있는 광성보(廣城堡)는 고려시대에 쌓은 외성을 1618년(광해군 10년)에 보수한 1636년 병자호란의 격전장이었다. 광성돈대의 절벽 아래에는 해안을 따라서 작은 석괴로 1km정도 둑과 소류지가 있으며, 그 주변에는 좁다란 논자락들이 펼쳐져 있는데 이는 강화섬에 조성된 간척지의 전형적인 모습이다. 강화의 중요한 간척지 현황은 그림 2.1.1과 같다. 정약용

은 목민심서 천택편 (牧民心齋 川澤編)에는 방조제를 해언(海堰)이라고 정의하고 있다. 즉, 바닷가에 조수를 방지하는 제방을 쌓고 안에 농지를 만들면 이것이 해언이다. 다산록(茶山錄)에는 방조제 축조에 있어서 석재의 운반은 기증기를 이용하며, 방조제 설치구역 중앙에 미리 삼각대 구조를 설치하여 조수의 충격을 완화하는 등 방조제 축조 기술이 설명되어있다. 현재까지 관리되는 간척제방은 40 여개소에 이른다. 현재 강화도의 방조제는 86 개소로서 총 연장은 100km를 넘는다. 강화도 해안 제방의 역사는 부록에 나타나 있다. 이와 같이 강화도 간척은 몽고의 외침 등 국가적으로 위급한 시기에 조성되었지만, 자연과 친화적으로 잘 보존되고 있다.

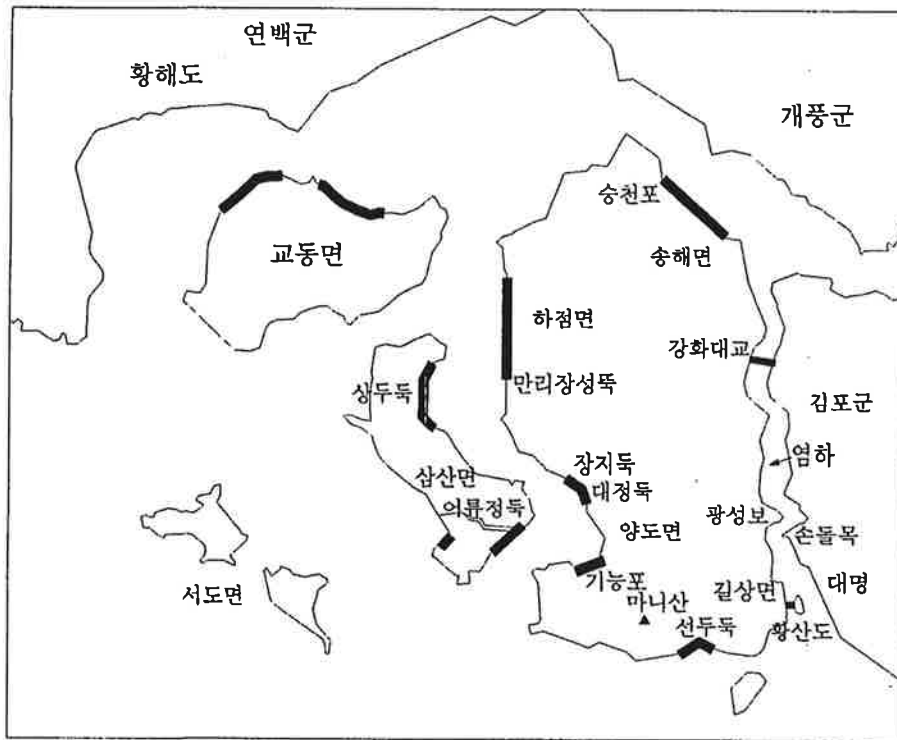


그림 2.1.1 강화도의 주요 간척지 위치



## 2. 간척사업 개발 현황

### 가. 준공지구 현황

1945년 이후 1997년까지 개발된 매립면적은 104,077ha이며, 이중 농지면적은 74,691ha로서 정부가 시행한 개발 면적은 34,610ha이며, 민간 사업은 40,081ha이다. 1950년대 개발지구의 평균 면적은 36ha에 불과하며, 일제시대에 착수된 간척사업을 마무리하는 정도이었다. 1961년 5.16 혁명 이후, 미국의 양곡 지원과 FAO 등의 기술 지원에 따라서 간척사업이 착수되었다. 1962년 2월부터 1년간 서남해안 간척 대상지 조사에 따라서 개발된 간척지는 17,215ha이며, 지구당 면적은 9ha이다. 1970년대에 건설된 간척지 233지구의 개발 면적은 19,372ha이다. 1974년 아산방조제와 1979년 삽교호의 준공 이후, 외곽 연안은 새로운 갯벌과 어장이 조성되었다. 이들 담수호는 농업용수와 연안 공단의 공업용수를 제공하며, 호수에 퇴적된 모래는 건설자재로 이용된다. 또한, 서해안 고속도로와도 인접되어 있다.

1980년대에 개발된 63개 지구의 개발 면적은 9,199ha로서 1970년대에 개발된 규모의 47%에 불과하지만, 지구당 개발면적은 146ha로서 70년대에 비하여 76%가 증대되었다. 1990년 이후 1997년까지 15개 지구가 준공되었으며 개발면적은 22천ha로서 지구당 개발 면적은 약 1,100ha이다. 이 기간 중 영산강, 대호지구 등의 대규모 사업과, 김포와 서산지구 등 민간 단체의 대규모 사업이 완료되었다.

### 나. 간척사업 시행 중 지구

1998년 현재, 총 19개 지구의 60,299ha의 간척 농지 개발이 추진되고 있다. 이중, 1976년에 착공한 영산강 2단계사업이 1998년에 완공되고, 새만금 방조제 물막이 공사는 2004년에 완료될 예정이다. 사업 지구당 평균 개발면

적은 3,173ha로서 1980년대까지 개발한 간척지구에 비하여 증대되었다.

이와 같이 간척사업의 규모가 증대되고 담수호 유입수의 오염 처리에 관한 뚜렷한 대안이 없는 상태에서, 갯벌을 보존하여 자연 환경을 그대로 유지하려는 의견이 대두되었다.

표 2.1.1 연대별 간척개발 실적

연대별	계			정부 시행			민간시행		
	지구	면적 (ha)	지구당 (ha)	지구	면적 (ha)	지구당 (ha)	지구	면적 (ha)	지구당 (ha)
'50 이전	177	6,329	36	39	3,777	97	138	2,552	18
'60	1,136	17,215	15	58	7,634	132	1,078	9,581	9
'70	233	19,372	83	50	8,245	165	183	11,127	61
'80	63	9,199	146	25	5,266	211	38	3,933	104
'90	15	22,576	1,102	10	9,688	968	5	12,888	2,578
계	1,624	74,691	46	182	34,610	190	1442	40,081	28

#### 다. 간척사업 예정 지구

향후 간척사업은 51지구에서 73천ha가 개발 가능하다. 이는 1995년에 계획된 27만ha를 환경의 보존적 관점에서 축소한 것이다.

영산강 4단계지구의 방조제 설치 계획은 환경 보존적인 관점에서 보류되었다. 영산강 4단계사업으로 안개 일수가 증가되어 농작물 재배와 공항 운항에 지장이 우려된다는 주장이 있으나, 사방이 트여 있으며 개발 후 갯벌이 노출되므로 기온 상승이 빠르고 수면이 줄어들어 공기의 유통이 원활할 것이라는 의견도 있다. 영산강 하구둑 설치 전·후의 안개일수 조사결과 연평균 10일 정도 감소된 것으로 알려져 있다.

표 2.1.2 간척개발 시행 중 지구 현황

구 분	지구명	위 치		착공 년도	준공 년도	매립지 (ha)	농지 (ha)
		도	시군				
계	19지구					97,870	60,299
정부시행	19지구					97,870	60,299
○ 대단위	5지구					68,426	41,908
	영산강Ⅱ	전남	목포, 나주, 영암, 무안,	'76	'88	6,431	1,108
	영산강Ⅲ-1	전남	영암, 해남,	'85	2003	12,816	7,960
	영산강Ⅲ-2	전남	해남	'89	2005	7,433	4,540
	새만금	전남	, 김제, 부안	'91	2004	40,100	28,300
	홍보	전북	홍성, 보령	'91	2001	1,646	
○ 서남해안	14지구	충남				29,444	18,391
-서남해안	13지구		화옹, 시화, 석문 등			28,940	18,068
-미완공	1지구	인천	옹진, 진촌	'90	2000	504	323

### 3. 간척 사업의 부가가치 평가

#### 가. 개요

해양수산부(1998)와 환경부(1996)는 갯벌의 수질 개선 능력을 미국 조지아대학의 Odum 교수 팀의 연구 결과를 인용하여 갯벌의 1 ha당 BOD 정화 능력을 21.7 kg/ha라고 간주하고 새만금 갯벌 2만ha는 하루 10만톤을 처리하는 전주하수 종말처리장 40개소의 정화능력과 같고, 이를 포함한 수산물 생산, 서식지, 심미적인 기능을 고려한 갯벌의 생산성은 농지의 미곡 생산성에 비하여 3.3배라고 주장한 바 있다. 이에 대하여, 한국산업경제연구원

은 영산강 4단계사업 타당성 보고서에서 농지의 가치는 연간 17,371천원으로  
 로서 갯벌보다 2배 이상이라고 분석하였다. 임종완(1999) 등은 방조제 건설  
 에 따른 교통개선과 보전 휴양, 토지 대체, 관광수입, 재해 방지 효과는 연  
 간 6,496억원이며 지구 당 연 평균 1,300억원로 계량화한 바 있다.

표 2.1.3 간척지 방조제 건설에 따른 부대 효과

간척지	총 계 (억원/년)	교통량 (천대/년)	교통편익 (억원/년)	관광객수 (천명/년)	휴양 및 지역진흥 (억원/년)	토지창출 (억원/년)	홍수조절 (억원/년)
계	6,496	35,059	1,654	3,876	1,542	2,349	948
아산호	2,600	9,727	280	1,252	497	1,650	172
삽교호	1,213	3,891	287	1,180	470	365	90
금강호	1,183	7,173	562	1,075	428		192
영산호	909	10,296	333	259	103	150	324
영암호	591	3,972	192	110	44	184	170

(자료) : 임종완 외(1999) 농공기술지 No.62, 농림부, 농어촌진흥공사

#### 나. 농업의 환경 보존과 공익적 기능

농업은 식량생산과 공산품의 원료공급 등과 같은 경제적 기능 이외에도  
 환경을 보전하는 외부경제효과 즉, 공익적 기능이 있다. 오세익·강창용등  
 (한국농촌경제연구원 연구보고 283/'93. 12)에 의하면, 농업의 공익적 기능  
 은 재해예방, 토양보전, 대기 및 오수정화, 자원함양, 휴양 및 문화적 기능  
 등이 있다

우리나라 논외의 홍수조절능력은 36억톤이며, 농작물의 연간 탄산가스 제거  
 량은 벼의 1,600만톤을 비롯한 총 2,146만톤에 달하며 산소 생산량은 총  
 1,230 ~ 1,560만톤으로 추정된다(농업기술연구소, 1993 : 김복영, 1992). 산

림은 용적이 크고 일단 탄수화물로 합성된 탄산가스는 수십년 동안 분해되지 않고 남아 있기 때문에 탄산가스 제거 및 산소생산 능력이 크다. 논 의 관개용수로 쓰이는 물은 연간 194억톤 인데 이 관개수에 함유된 비료, 농약, 중금속, 합성세제, 유기물 등을 비롯한 각종 유해물질은 논에 머무르는 동안 비와 논토양에 의하여 정화된다. 논은 또한 질소질비료를 유실되기 어려운 암모니아태로 유지하여 지하수 오염을 감소시키는 기능도 있다.

농업은 수자원을 함양한다. 논 의 지하침투량은 연간 약 350억톤으로 추정되는데 그중 45%인 157억톤은 지하수로 저장된다. 김복영은 농업의 공익적 기능 중 홍수조절, 토양보전, 산소공급 및 탄산가스 제거기능을 대체법을 이용하여 측정하고 그 평가액을 약 8조원이라 발표하였다. 농업기술연구소는 수도작의 토양보전, 산소생산, 오수정화 및 비료성분 공급기능의 가치를 평가하고 그 합계를 약 11조 5천억원이라 하였고, 성진근은 홍수조절 및 산소공급기능의 경제적 가치가 1조 4천억원에 달한다고 하였다. 한편 일본의 경우에는 수도작의 보전 휴양 기능을 비롯한 4개 기능을 평가하고 그 경제적 가치를 약 4조 6천억엔(한화 약 35조 4천억원)이라 발표하였다. 이와 같이 농업의 공익적 기능에 대한 평가액이 연구에 따라 큰 차이를 보이는 것은 연구마다 평가대상 기능이 같지 않으며 평가기준, 대체물량 산출 및 가격적용에 많은 격차가 있기 때문이다.

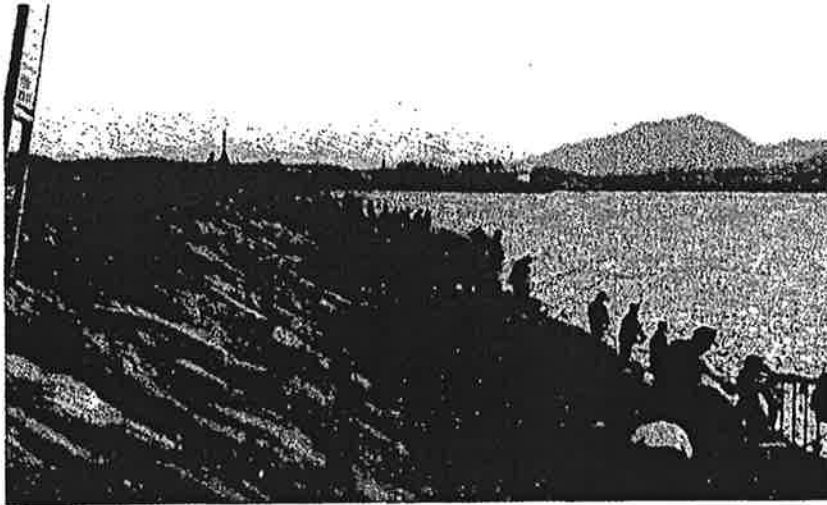
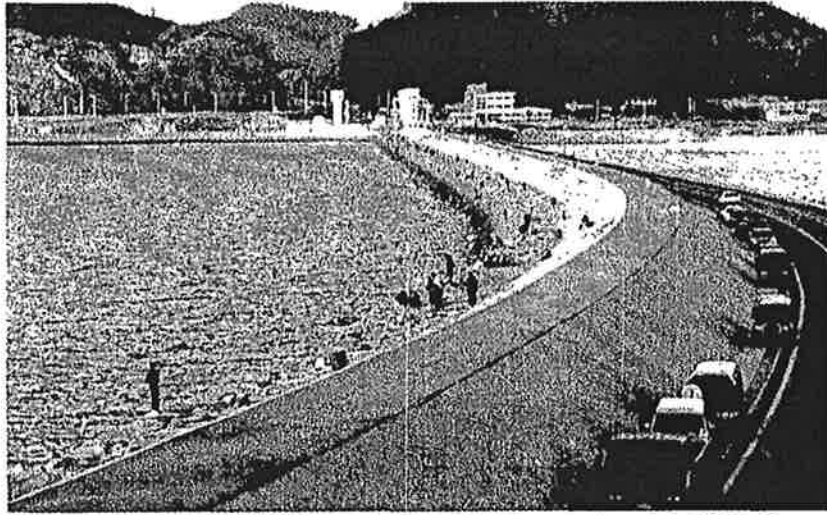


그림 2.1.2 영암호 방조제 연안의 낚시 광경('98.10월)

## 제 2절 간척지 연안의 퇴적과 수질

### 1. 강화도 연안의 퇴적 특성

강화도의 총 면적은  $42.4\text{km}^2$ 이며 한강과 임진강 하구에서 공급되는 진흙과 모래는 조석 간만의 차에 의한 침강으로 조성하는 천혜의 간척지를 이룬다. 김포 반도 사이의 좁은 해협인 염하에는 빠른 조수가 입출한다. 강화 서해안의 대조시 조위차가  $8.4\text{m}$ 이며 북쪽 해안은 이의 반 정도이다. 서해안의 조류는 동서 방향으로 흐르지만, 섬 주위의 창조류는 강화 본도 서쪽에서 교동도 남북 해협과 진두해협을 통해 북으로 흐르고, 다른 한쪽에서는 영종해협을 지나 갑곶진을 거쳐 강화 본도와 김포반도 사이의 좁은 해협인 염하를 통해 북편으로 흐르며, 낙조류는 이와 반대 방향으로 흐른다. 강화 해협에서 최강 유속은 약  $3.5\text{ m/sec}$  에 이른다.

#### 가. 장지 방조제 연안의 갯벌

장지 방조제는 강화군 내가면 외포리 포구에 있으며, 이곳은 석모도 등 도서 지방을 연결하는 교통의 요지이다. 장지 방조제는 강화농지개량조합 관할 시설로서 그림 2.2.1와 같이 2중의 독으로 되어 있다. 외측 방조제는 제정 폭이  $0.5\text{m}$  정도이며, 내측 방조제는 제정 폭이  $2\text{m}$ 로서 내·외측 방조제의 사이는  $30 \sim 40\text{m}$  폭의 논이며 논 바닥은 갯벌보다 낮다. 내측 방조제의 안쪽에는 담수호가 조성되어 있는데, 이 호는 1665년 건설된 장지포둑의 일부로 생각되며 현재는 장지평 논 지역의 관개용수원과 배수지의 역할을 담당하고 있다. 외측 방조제 밖은 갯벌이 조성되고 상부 조간대는 반 고화되고 남단 노고산쪽에는 양식장 조성을 위한 공사 중이다. 방조제 내외측의 횡단면을 보여주는 그림 2.2.1는 갯벌의 상부 조간대를 지나 바다쪽으로 갈

수륙 경사가 급해지는 것을 볼 수 있다.

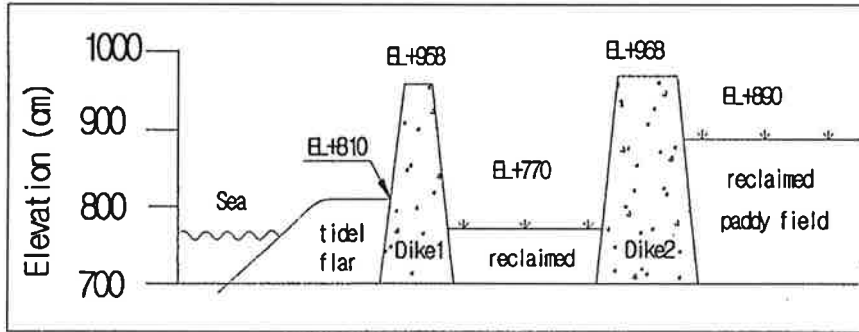


그림 2.2.1 장지방조제 부근 횡단면 개념도

표 2.2.1 장지평의 방조제 (길이 단위 : m)

명 칭	위 치	관 리	준공연도	길이	몽리면적 (ha)	높이	폭
장지둑	내가면 외포리-건평리		1665				
장지방조제	내가면 외포리	시도	1960	1,096	7.4	2.4	2.7
대정방조제	내가면 외포리	시도	1961	1,250	5.5	2.0	1.0

해안은 좁고 깊으며 경사가 급하며 조류속이 빠르다. 해협을 따라 위로부터 7개의 기선을 선정하고 그 축선을 따라 측정한 수심을 측량한 결과, 외포리와 건평리 전면의 수심이 30 ~ 40m로서 매우 깊다. 1997년 6월, 장지둑에 대하여 퇴적 과정을 조사하였다. 장지둑 해안의 퇴적물은 오거를 이용하여 수직으로 7.5m까지 굴진하여 불교란 상태의 주상 시료로 채취하였다. 시료는 퇴적구조 X선 분석(24개), 퇴적을 분석(Subsamples 60개, 코아 길이 50cm), 입도분석 저질시료 분석(60개) 등이다. 갯벌의 표층 시료는 해안선



에 직각 방향으로 일정한 간격으로 선정된 정점에서 10cm 깊이까지 채취하고, 퇴적물의 주상 시료는 수동 시추기로 채취하고 1997년 11월부터 2개월간 실험실에서 입도, 퇴적구조, 광물조성 등을 분석하였다. 장지독 연안 갯벌은 방사성 동위원소를 이용한 퇴적물 분석(Pb-210) 결과, 육지에서 간조선 쪽으로 갈수록 입도가 커진다. 갯벌 표면에서 400cm의 깊이까지 관통한 시추공에서 채취된 주상 시료는 상부로 갈수록 세립화되었다. 코아의 최저부에서 모래 함량이 15%정도이나 상부로 갈수록 낮은 에너지 환경으로 천이함에 따른 퇴적의 영향으로 감소하였다. 표층에서 7.5m을 관통한 두번째 시추공에서도 상향 세립화 층서가 나타나며, 7.5m 이상의 퇴적층을 형성하고 있다. 근래에 형성된 퇴적층 상부 형상을 분석하기 위해 채취된 5개의 시추공 시료는 해안선에 수직 방향으로 일렬로 배열하여 퇴적상의 수평적인 변화를 추정하였다. 퇴적층 상부 1m의 범위에 2개의 불연속면이 있으며 그 깊이는 각각 60cm와 90cm이다. 퇴적율은 연평균 수cm 이상으로 높다.

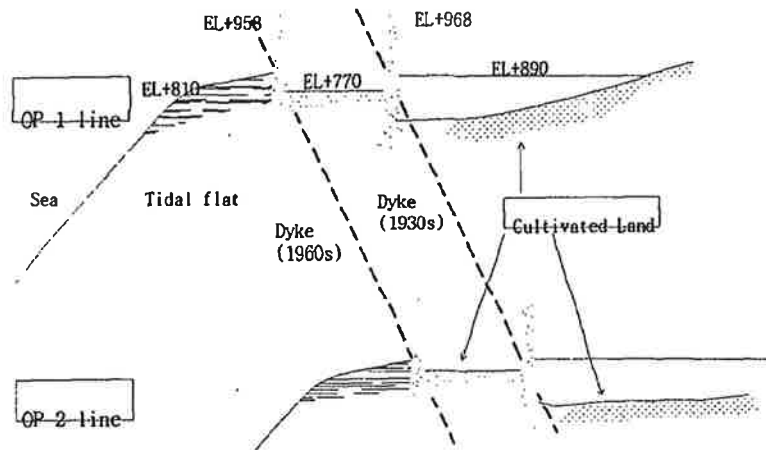


그림 2.2.2 장지평 방조제 단면도

#### 나. 가능포 방조제 전면의 갯벌

가능포 방조제는 강화군 남서쪽인 양도면 포구에 있으며 장지 방조제와 같이 2중의 독으로 되어 있다. 방조제 내측은 가능평 간척 농지의 일부로서 17세기에 가능포둑과 1706년에 축조된 선두포둑에 의하여 조성되었다. 조선 시대에 제작된 고지도에서 확인한 결과, 가능포 둑이 만들어지기 전에 이 해역은 강화 본도와 화도로 분리되어 조수가 출입하였으나 두 둑의 건설로 강화 본도와 이어졌다. 선두둑은 현재 자동차 도로로 이용되고 있다. 방조제 외측 해역에는 새로운 갯벌이 광범위하게 퇴적되어 있으며 방조제 남단의 내리에는 매립공사가 예정되어 있다. 부록의 표A.1은 가능평 방조제의 현황을 요약한 것이다.

#### 다. 선두리 방조제 전면의 갯벌

선두리 방조제는 강화군 길상면 선두리의 선두포구에 있으며 소형 어선들의 출입이 많다. 선두둑은 1706년 축조되었으며, 현재는 화도면 사기리와 길상면 선두리를 연결하는 자동차 도로로 이용되며, 배수갑문 내측은 관개용수를 저류하는 시설로 이용된다. 선두둑 해안의 간사지를 농지로 이용하기 위하여 1980년대에 개인이 현재의 선두 방조제를 축조하였다. 이 지역은 장지둑 해안에 비해 상부 조간대의 고화 정도가 약하다.

#### 라. 염하 수로

1998년 4월에 김포와 강화도 사이를 흐르는 염하 수로에서 조석과 부유물을 조사하였다. 염하는 연장이 25km이며 폭은 300~1,300m 이며 급격히 굽어지는 해협으로서 하상 경사가 크며, 낙조시 남하하는 흐름은 창조보다 우세하며 창조가 시작된 이후에도 표층에는 낙조류가 존재한다. 인천항의 조차는 대조기에 7.98m, 소조기에 3.47m이며 평균해면( $Z_0$ )은 4.635m이다. 수

로의 남단에 있는 황산도에서 대조차는 8.46m, 소조차가 3.86m 이며 평균해면( $Z_0$ )은 4.87m이다. 황산도에서 북측으로 18km에 위치한 강화대교의 대조차가 5.64m, 소조차가 2.46m이며 평균해면( $Z_0$ )은 3.33m로서 황산도보다 약 30% 정도 작다. 황산도의 조석 시차는 인천항보다 15분 늦지만 강화대교에서 1시간 30분 정도 늦다. 손돌목과 황산도 사이의 조류속을 부표로 추적한 결과, 대조시 최대 유속은 3.52 m/s이다. 이러한 강한 유속으로 인하여 주 수로부의 바닥은 입경이 크고 모서리가 날카로운 쇄석 또는 풍화대로 이루어져 있다. 해수의 부유물 농도를 측정한 결과, 창조시 부유사는 585 mg/l로부터 846 mg/l 정도로서 손돌목 부근이 가장 크며 황산도 부근이 가장 작다. 낙조시 부유사는 232 mg/l로부터 602 mg/l 정도로서 손돌목 부근에서 황산도 부근으로 갈수록 농도가 증가한다. 이는 창조시 황산도 남쪽의 갯벌이 부유하여 북쪽으로 이동할 때 염하의 하상토가 함께 부유하며, 낙조시에도 하류로 갈수록 하상 물질이 부유하며 농도를 증가시키는 데에 기인한다.

주 수로 내에는 퇴적물이 적고 수로 양측에 퇴적물이 많다. 수로 양안의 퇴적토를 채취한 결과, 실트질이 70~83%이다. 이러한 강화도 연안의 조석과 부유물 분석 결과는 강화도 연안의 간척지 갯벌 형성 분석과 대명포구 등 인근 해안의 매립사업에 따른 조석과 퇴적 형태 분석에 활용되었다.

## 2. 금강 하구 연안의 퇴적조사

금강하구둑은 4대강 유역 농업종합개발사업으로 1983년부터 1990년까지 군산 상류 5km지점에 조성되었다. 하구둑의 연장은 1,841m이다.

이의 저류 용량은 130백만 $m^3$ 로서, 연간 수자원 이용량은 365백만 $m^3$ 으로서 농업용으로 244백만 $m^3$ 를 43,000ha의 관개면적에 급수되며, 군산시 생공업 용수로 121백만 $m^3$ 를, 군장광역 국가공단 약 1,300ha에도 수자원을 공급한

다. 하구둑은 육운 거리를 110km 단축하였으며, 하루 20천대의 차량이 통과하는 산업 도로이며 군산 장항간의 철도 부지로 제공하며, 담수호 상류 3km 지점에는 서해안 고속도로가 통과한다. 하구둑은 강경까지 침입되던 해수를 차단하여 7,000ha에 이르는 농경지의 염수 피해를 막는다. 바다 쪽으로 탁 트인 하구둑 위의 도로는 쾌적한 산책 공간이며, 퇴적 연안은 새로운 식물 군락지이며, 해오라기 등 철새들의 중간 기착지이다. 금강의 유역 면적은 9,885km<sup>2</sup>이며, 매년 1백만m<sup>3</sup>의 유사가 서해로 유송되었으나, 1989년 하구둑이 체결된 후 하구로 공급되던 퇴적물의 상당 부분이 차단되었고 조석량도 감소하였다. 군산항의 항로유지를 위해 매년 0.5~1.3×10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>의 준설이 계속된다.

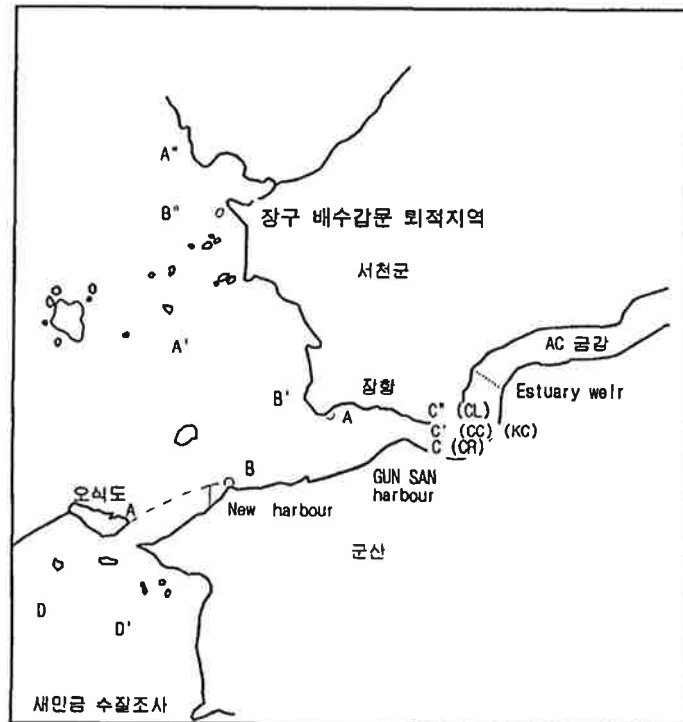


그림 2.2.3 금강 연안의 부유물과 퇴적 피해 위치

하구둑 축조 후의 평균 퇴적률을 조사하기 위하여 1997년 10월 금강하구둑 외측 퇴적지역에 20여개의 집적판을 설치하고, 1년에 4회 정도 조사한 결과, 장항 측의 방조제 체절구간에는 현저한 퇴적으로 넓은 갯벌이 형성되고, 군산 측 배수갑문 구간에는 하상 세굴에 의하여 새로운 유로가 형성되었다. 하구둑 건설 후 평균 두께가 3m에서 최대 9m까지 퇴적층이 방조제 전면에 형성되었다.

하구둑의 외측 갯벌에서 9년간 조사된 결과, 이 지역의 퇴적량은  $5.8 \times 10^6$  m<sup>3</sup>로서 연평균 퇴적율은 44.2cm로서 서해안 갯벌의 평균 퇴적율이 수mm 정도인 것과 비교하면 100배 정도로 높은 값이다. 이는 체절 후 유속의 감소로 형성된 것으로 주변 환경과 평형을 이루기까지 단기간에 발생한 현상이다. 하구에서 염분의 변화로 나타나는 세립입자의 응집작용(flocculation)으로 퇴적율이 높은 데에도 기인한다. 그림 2.2.3은 금강하구둑 설치 이전인 1983년도에 조석별 유속과 수위 및 염도에 따른 부유물의 농도를 조사한 위치를 나타내고 있으며, 이의 조사 결과, 이구역의 부유물 농도는 수심이 낮고 유속이 2 m/s 정도로 높은 경우, 600ppm이며, 유속이 0.5m/s이고 수심이 높은 만조시에는 100ppm 정도로 나타났다.

### 3. 곰소만과 장구만의 퇴적에 의한 침수피해

전라북도 고창군의 총 유역면적은 603.84km<sup>2</sup>로서 내륙의 홍수는 서북쪽 해안인 곰소만으로 유입된다. 곰소만에 설치된 배수갑문 밖에는 해안에 입출하는 조석과 파랑 및 해안유사의 영향으로 토사가 쌓여져 있으며, 내측 농지는 홍수시 내수가 지체되어 침수 구역이 늘어가고 있다. 본 조사는 이 구역의 배수개선 방향을 검토하기 위하여 1997년 4월부터 1998년 6월까지 시행되었다. 이들 피해 구역은 그림 2.2.4와 같이 곰소만의 남쪽 경계인 구시포 해수욕장으로부터 부안군의 경계구역인 갈곡천 말단까지로서 퇴적토는

파도의 침투 영향으로 바다쪽이 내륙 측보다 굽다. 퇴적토 입도는 평균 0.28mm 정도로서 점성력이 없기 때문에 0.8 m/sec 정도의 유속에서 이동된다. 퇴적토 제거는 준설 방법과 하류에 제수문을 설치하는 방안 등을 비교 검토할 수 있다. 준설은 배수로 규모가 작은 구역에서 공사비가 저렴하고 수로를 청결하게 유지할 수 있기 때문에 '95년부터 '97년까지 매년 3천만원 씩의 준설 공사비가 집행되었다. 하류에 제수문을 설치하는 방안은 간만조 수위 차가 높은 대조시 바다 물을 제수문 내측으로 유입시킨 다음, 간조시 수문을 개방하여 유출수와 함께 퇴적토를 바다 쪽으로 밀어내는 방법으로서 고액의 공사비와 유지관리비가 소요된다. 또한, 해안 사구지역에 방파제를 조성하고 수문을 설치하는 방안도 검토될 수 있다.



그림 2.2.4 곶소만의 해안 퇴적 지역

자동 문비 하류에 분사공 설치하여 퇴적토를 제거하는 방안은 배수문의 하류 문비 하류 바닥에 유공관 또는 소형 문비등을 설치하고 내수와 해수의 수위차에 의하여 퇴적 구역에 분사하여 제거하는 방안이다. 구조물 상단에 침전되는 유사를 제거하고, 분사 압력 분포와 시설의 규모에 관하여는 1998년부터 그림 2.2.6과 같이 V자형의 다중 분사문을 배수갑문 하층에 설치하고 상류에 도류벽을 설치하는 시설물을 개발하고 이를 수리모형을 제작하여 별도 연구사업으로 추진되고 있으며, 이의 퇴적토 배제 능력은 V자형 다중 분사문의 각도, 상하류의 수위차이 모래 입경등에 따라서 영향을 받는다.

표 2.2.2 배수갑문 퇴적토 제거방안 검토

안 별	내 용	장 점	단 점
1. 준설 장비 이용	준설 장비로 문비 주변 준설	공사비 저렴	매년 준설비 소요
2. 하류 방수문	수문 하류에 방수문 설치	해수 유입 및 유사 차단으로 퇴적 방지	○ 공사비 고액 소요
3. 분사 시설 설치	수문 하류 바닥에 유공관, 노즐 설치, 퇴적토 분사 제거	공사비 저렴 및 유지관리 용이	○ 분사시설의 파랑, 결빙, 막힘 등의 대책 필요
4. 상하류 수위차에 의한 방류	상류 저류수위를 높인 후 간조시 일시 방류	공사비 저렴	○ 물수지 분석 및 관리지침 필요
5. 방사 제방	배수로 말단 해안에 방사제 설치	해측에서 유입되는 퇴적토 유입 방지	○ 매년 부분적인 준설 필요

곰소만 서쪽의 구시포 배수문 하류에는 선착장이 있으며 바다쪽에는 석재

방파제도 있다. 수로의 퇴적은 상류 농경지 150ha를 침수 피해를 주며, 해안 퇴적은 방파제 설치 후 조수의 입출량과 유속의 감소에도 기인한다.

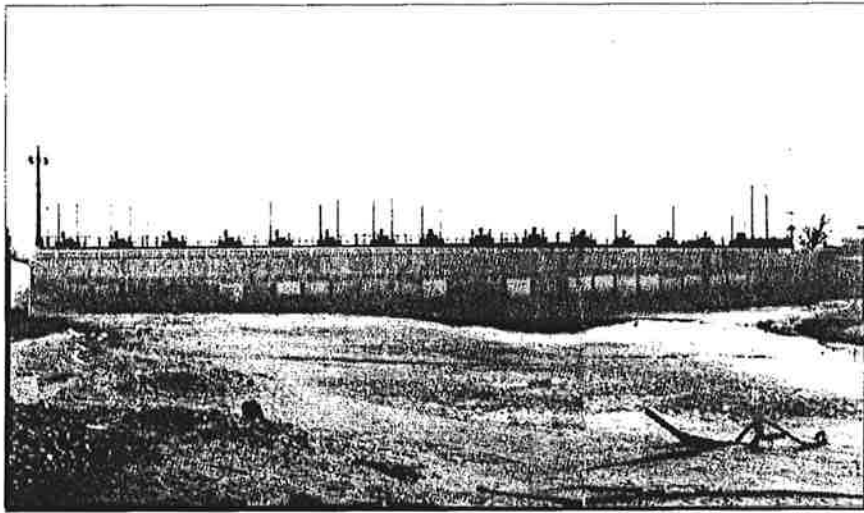


그림 2.2.5 장구배수문의 퇴적현황

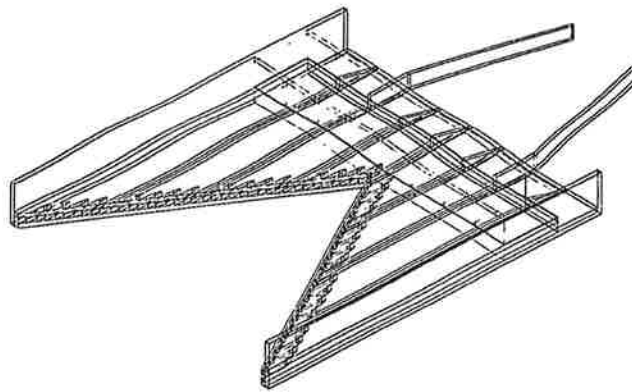


그림 2.2.6 퇴적토 제거를 위한 수리모형



구시포 배수문의 약 9km 북쪽 해안에는 용두지구 상류측 수문은 5련의 인양 문비이며 바다 쪽에 자동문비 5련이 설치되어 있으며, 관광도로가 통과할 계획이다. 해안에는 파도에 의하여 형성된 높이 2m 정도의 모래 언덕이 해안에 평행으로 쌓여져 북쪽 육지부에 접하며, 남쪽 수로를 통하여 해수가 입출된다. 퇴적토의 입도는 0.28mm 정도의 굵은 모래이다. 동호해수욕장 남쪽 해안의 삼정사지구에는 배수압거 1개소가 설치되어 있다. 해안의 모래 언덕은 배수로의 퇴적을 조장하고 3ha의 농지에 염해를 준다.

해안의 깊은 곳까지 연장된 배수압거는 말단에 자동 문비를 설치하였으나 홍수 배제가 어렵다. 퇴적토의 평균 입도는 0.27mm 이다. 하전지구 해안은 파도가 심하여 인근 부락의 피해가 빈번하지만, 1996년 고창군에서 기존의 방조제 외곽 7m 정도의 해안에 설치한 수중 방파제는 파도를 막아준다.

한편, 충청남도 서천군 장구만에 있는 장구배수갑문은 퇴적 심도를 예측하여 상층과 하층에 2층 문으로 설치하였으나, 겨울철 파랑과 조석에 의한 유사에 의한 해안 퇴적 심도가 설계시 예측된 것보다 높아서 배수문이 열리지 않기 때문에 하절기 홍수량의 배제에 어려움을 겪고 있다. 임시적인 대안으로서 1998년도에는 준설장비를 투입할 수 있는 도로를 설치하여 퇴적토를 제거할 계획이며, 준설 장비의 진입과 작업을 위하여 배수문 밖에 설치하는 도로 시설의 직경 규모와 배치 계획에 관한 기술 검토가 현지 기술자와 본 연구진과의 1998년에 현지 및 연구원에서 실행되었다.

#### 4. 새만금 간척지 연안의 파랑과 퇴적 특성 조사

새만금 해역은 한반도 서쪽의 황해에서 발달하여 진입하는 파랑에 직접 노출되어 있다. 해역의 바람은 10월~3월 중에 강한 북서풍의 지배를 받고 4월~8월 사이에 남동 또는 남서풍의 비교적 온화한 바람의 영향을 받는다. 따라서 겨울철의 주 파향은 서향 또는 북서향이고 여름철에는 남서향이다.

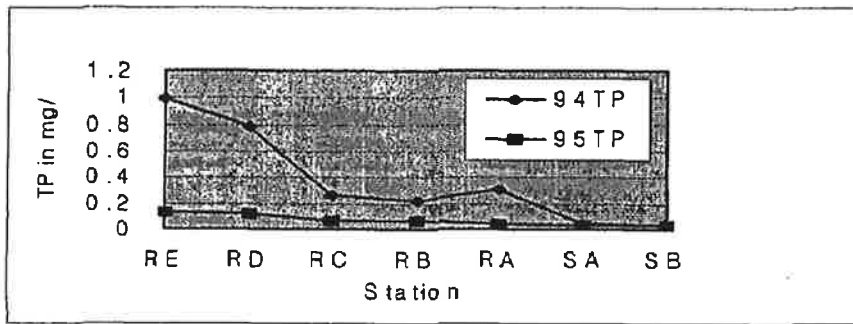
1992년부터 1997년까지 새만금 해역에서 관측한 파랑자료에 의하면 평균 주기가 10초에 이르고, 외해의 파고가 7m에 이른다. 새만금 연안에서 여름철 남서향의 파고는 낮으나 높은 해수위 상태에서 발생하고, 반대로 북서향의 겨울철 파랑은 파고는 높으나 이상 조위(surge)와는 상관성이 없는 경향이 다. 이 두 가지 형태의 파랑은 파랑과 해수위 사이의 결합 확률 분석을 필요로 하게 된다. 이와 같이 해역에서 관측 수집한 파랑정보는 외해에서의 진입하는 파랑의 변형을 예측하는 모델 검토에 이용하였다.

새만금 방조제 연안을 조사한 결과, 미사질의 퇴적토가 조성되어 있다. 방조제 남쪽 해안에 있는 변산 해수욕장의 해사 이동에 관하여 1992년 6월부터 현재까지 조사한 결과에 의하면, 변산 해수욕장의 모래 입자는 당초 약 0.15mm의 직경이던 것이 다소 굵어지고 있다. 이러한 변화에 관하여 전북일보가 '96년 7월 31자 보도한 자료에 의하면, 변산 해수욕장은 제 기능을 회복하고 있다. 이는 새만금사업이 진행되면서 조류가 변하여 모래사장을 잠식하던 벌 흙의 유입이 줄고 모래가 밀려오면서 해수가 맑아진데 따른 것으로 판단된다. 간척지 해안의 유사이동과 퇴적 과정은 1차년도 연구에서 방조제 완공후의 조석변화에 관하여 전산 프로그램(TRISULA)을 이용한 수치해석을 수행하고 2차년 이후 별도의 지형변화 수치모형(MOR)에 의하여 간척지 외곽의 퇴적변화를 분석하였다.

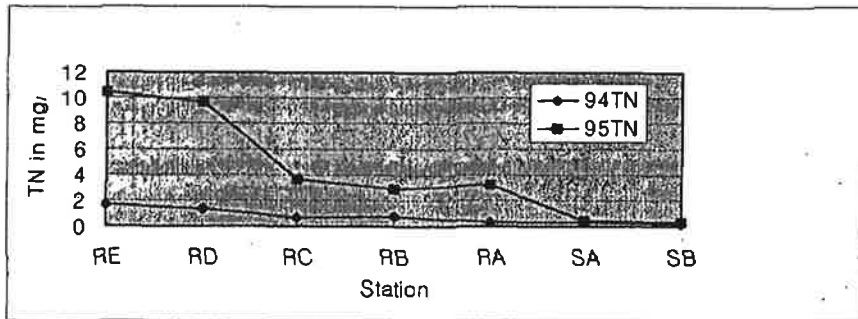
##### 5. 시화 담수호의 수질 보존과 배수갑문의 운영

시화 담수호와 간척지 주변의 인구증가와 산업화로 인하여 담수호로 유입되는 하천의 수질이 악화되고 있다. 1995년 담수호의 DO는 7.1 mg/l로서 기준치인 2 mg/l 이상으로 양호하지만 1년 전보다 감소하였으며, 담수호의 COD와 SS, T-N, T-P 등은 기준치를 초과한다. 그러나, 시화호의 수질은 상류에서 하류로 갈수록 개선되는 경향이 있다. DO의 경우, 담수호 상류에서

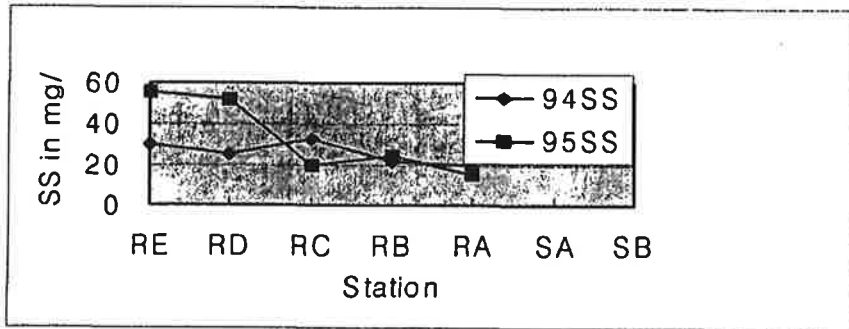
4.5 mg/l 인데 비하여 하류는 6.8로서 50% 가량 증가하며, COD도 상류의 19.0 mg/l 이 하류에서 9.1 mg/l로 50% 개선되고 있다. 또한, SS, T-N 및 T-P도 하류로 갈수록 300% 정도 개선되었다. 이는 담수호 상류의 오염 물질이 담수호에 유입하여 하류로 흐르면서 희석, 침전 및 생물학적으로 분해되기 때문이다.



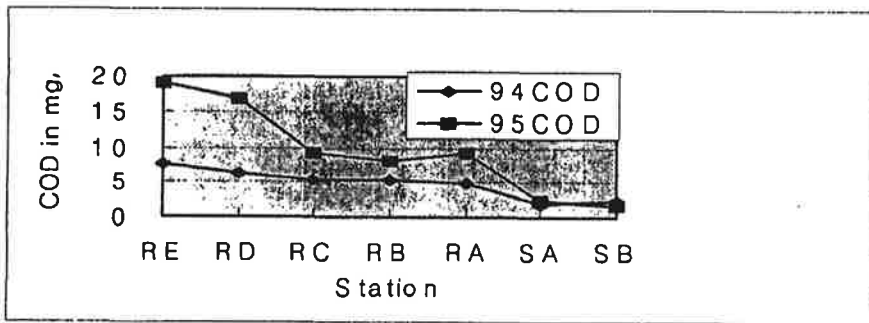
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 2.2.7 시화 담수호와 연안의 지점별 TN, TP, SS, COD 변화

한편, 시화호의 수질 악화에 따라서 담수화되지 못하고 배수갑문은 항상 열려진 채로 바다물이 입출되도록 관리되어 왔다. 이에 따라서 대조시의 높은 수위조건에서 배수갑문으로 유입되는 흐름은 매우 빠르며, 구조물의 안전에 위험을 초래하게되었다. 이에 관한 수리모형시험 결과, 최대 유속은 12 m/s에 이르는 것으로 나타났다. 따라서, 담수호 내측의 배수문 유입부 수로의 바닥은 수중콘크리트로 보강하고, 배수갑문은 담수호와 바다 수위차가 1m 이상될 때는 수문을 닫도록 현장에 촉구한 바 있다.

## 6. 영암호 갑문식 어도 이용

### 가. 서론

우리나라 하구에 설치된 어도는 1938년 부산 대동갑문에 설치한 어도가 최초일 것으로 추정되며(황, 1999), 1960년대부터 수산자원보호령이 제정 공포되어 어도설치를 의무화하기 시작하여 동해로 유입하는 하천에 간단한 도벽식 어도를 설치하기 시작하였다. 하구언에 본격적으로 어도를 설치하기 시작한 것은 1980년대 초반 농어촌진흥공사에서 금강하구둑, 수자원공사에서 낙동강 하구둑에 계단식어도를 설치하고부터이다. 이들 어도는 각각 일본의 SANYOO와 네델란드의 NEDECO의 기술로 설계했기 때문에 우리나라의 조석상황과 어류생태를 충분히 고려하지 못하여 어류의 이용이 크지 못하였다.

우리나라 하구(河口)는 조차(潮差)가 9m에 달하여 하구언(河口堰)을 막을 경우 내외수위 변화가 심하고 내수위보다 외조위가 높은 시간이 많으며, 소하(溯河)하는 물고기의 종이 다양하여 기존의 계단식 어도나 수로식 어도만으로 설치하기가 매우 어렵다. 따라서 우리나라의 하구의 조석과 어종에 맞는 새로운 어도가 필요하여 통선겸용갑문식어도(특허 42218호)를 개발하여 1990년대부터 시공되는 방조제에 설치하기 시작하여 현재 금호호, 석문호, 영산호에 완공되고 화옹지구, 새만금지구, 홍보지구 등에 시공중이다.

본 연구에서는 이렇게 많이 시공되고 있고, 그들 중에서 처음으로 운영하고 있는 전남 영암군 영암방조제의 통선겸용갑문식어도의 이용을 조사한 결과이다.

### 나. 어류의 조사

전남 영암군에 위치한 영암호 통선겸용갑문식 어도에서 '98년에는 어도

갑실에 모인 어류를 목측에 의해 많은 순서로 정리하였고, '99년에는 매월 대조 소조 각각 2회씩 어도 외측갑문에 폭 3m의 망을 설치하여 진입하는 어류를 2시간씩 채집하여 정리하였다.

물고기가 갑실(閘室)내에 충분히 모이면 하류측 갑문을 닫고 상류측 갑문을 열어 물고기가 상류로 올라가게 하는 방법의 어도이다. 새로 개발한 통선겸용 갑문식 어도는 은어, 승어 등 유영력(遊泳力)이 큰 물고기는 물론 웅어, 황복 등 물고기의 유영력에 관계없이 이용할 수 있으며 조위(潮位)의 변화나 내수위의 변화에 관계없이 시공이 가능하여 농진공의 황중서에 의해 특허 42218호로 등록된 새로운 어도이다.

갑실 크기 6.6m × 30.0m

유인수 : 방류 양수기 : 20Kw 2대

유인수 방류관 : 0.30m

유인수량 : 0.2m<sup>3</sup>/sec

통선겸용갑문식 어도는 영암군의 영암호, 금호호, 당진군의 석문호에 시공됐으며 공사중인 것으로 화성군의 우정방조제, 새만금지구의 동진강 배수갑문과 만경강 배수갑문, 보령방조제, 홍성방조제에 시공중이다. '98년에는 어도가 없고 통선문만 있는 영산강 하구둑에 2억원 내외의 적은 비용으로 유인수 공급시설을 설치하여 어도로 개조하여 사용하고 있다.

영암호 통선겸용갑문식 어도에서 '98년에는 어도 갑실에 모인 어류를 목측에 의해 많은 순서로 정리하였고, '99년에는 매월 대조 소조 각각 2회씩 어도 외측갑문에 폭 3m의 2각망을 설치하여 진입하는 어류를 2시간씩 채집하여 표 2에 정리하였다.

'98년 어도에서는 줄공치, 승어, 웅어, 빙어, 뱀장어, 꺾정어, 전어, 감성돔, 농어의 9종이 조사되었고, 3월부터 7월까지 개체수로는 줄공치가 우점

종이고, 중량으로는 용어가 많았다. 8월부터 10월까지는 승어가 우점종이었다. '99년에는 표 2.2.3에서 보는 바와 같이 동정이 된 종이 줄공치, 용어 등 10종 109,050개체를 조사하였다.

개체수로는 줄공치가 71,906 (66%)개체로 가장 많았고, 빙어16,334(15%)개체, 용어15,263(14%)개체, 승어4,934(5%)개체의 순이었다. 월별로는 '98, '99년 모두 5월에 가장 많았으며, 4월부터 7월까지 주로 채집되고, 12월부터 2월사이는 거의 채집되지 않았다.

4월부터 8월까지의 시간당 평균 6,287개체를 채집하여 1일 15만 개체가 어도로 진입하는 것이 가능하고 월평균으로는 450만 개체가 소상하는 것으로 계산할 수 있다. 물론 1일 중에서도 주야와 시간별로 차이가 있다. 개체수로는 줄공치가 66%를 차지하여 우점종이지만 시간당 진입하는 중량으로는 줄공치가 14.0kg인 반면 용어는 43.2kg이 소상하여 중량으로는 용어가 50% 이상이 소상하였다. 4월부터 8월까지 1일로 환산하면 용어는 1.0ton, 줄공치는 0.3ton씩 소상하는 것으로 계산된다.

1일 최대 소상은 줄공치는 5월 6일 시간당 25,468(80.2kg)개체가 소상하여 1일로 환산하면 611,232(1.9ton)개체이고, 용어는 5월 10일 시간당 8,279(515kg)개체가 소상하여 1일로 환산하면 198,696(12.4ton)개체까지 소상가능한 것으로 계산된다 (체중은 당일 실측 평균치로 5월 6일 줄공치 3.15g, 5월 10일 용어 62.25g 적용).

어종별로 소상하는 개체수는 줄공치는 5월과 6월에 대부분이 소상하고 5월 6일(25,468개체, 35%)이 가장 많았으며, 용어는 5월에 대부분 소상하고 5월 10일(8,279개체, 54%)이 가장 많았으며, 빙어와 승어는 7월에 대부분 소상하고 빙어는 7월 20일(10,743개체, 66%)에 가장 많았고 승어는 7월 15일(2,324개체, 47%)에 가장 많은 개체가 소상하였다(괄호안의 숫자는 시간당 개체수이고, %는 1회 채집 개체수를 총 채집개체수로 나눈 값임).

표 2.2.3 '99년 영암호 어도에서 채집한 어류(개체/1시간)

종	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	평균
줄공치	4,930	7,605	6,431	963	602	225			4,106
빙어			1	5,388	33	26			1,084
옹어	259	2,472	688	17	411	2			770
송어		1	13	1,034	356	61			281
송사리	93		1						37
농어			6	1	3	7			3
검정망둑						9			
문절망둑	1	1		2		1			2
뱀장어		1	1						1
천어					1	3			1
별망둑						1			
붕어						1			
망둥어류			1						1
미동정(13종)	3(1)	-	4(5)	115(7)	30(8)	7(2)			30
계	5,286	10,078	7,144	7,520	1,406	362			6,287

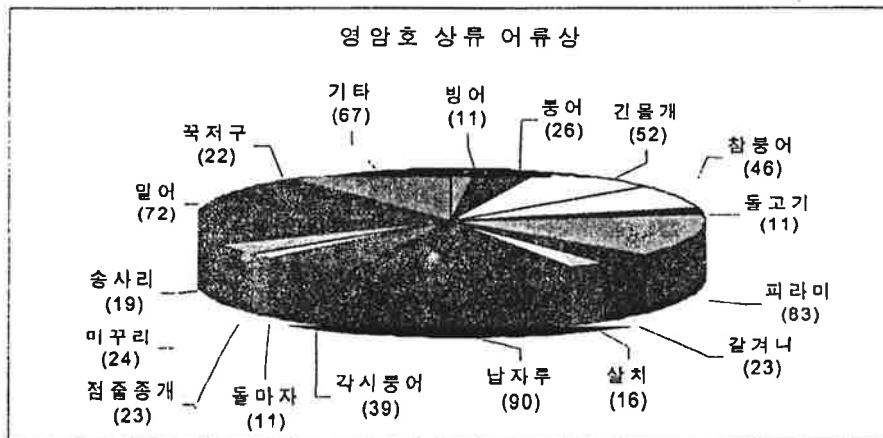


그림 2.2.8 영암호 유입하천에서 채집된 어류



영암호의 상류 둔주포에서 조사한 어류는 총 34종이었으며, 이 중에서는 은어, 빙어, 큰가시고기, 꼭저구, 꺾정이, 뱀장어 6종의 소하성어류와 참게가 조사되었다. 이 중에서 가장 많이 채집된 것은 빙어로 이 종은 호내에서 번식이 가능하기 때문일 것이며 다음은 꼭저구가 많이 채집되는데 이 종도 또한 육붕이 가능한 종이다. 육붕이 안되는 종 중에서 채집된 것은 은어, 뱀장어, 꺾정이 3종과 참게이다.

#### 다. 통선의 영향

표 2.2.4에서 보는 바와 같이 기설 통선겸용어도의 통선 실적은 영암호와 금호호는 많고, 영산호와 금강호는 적었다. 1회 통선에 쓰이는 시간은 20분 내외의 시간이 소요되므로 금강호와 영산호는 연간 5시간 내외이고, 통선량이 많은 간척초기의 금호호와 영암호의 경우에도 연간 20시간 내외이다. 이렇게 통선겸용갑문식어도가 통선문으로 쓰이는 시간이 작기 때문에 어도의 기능에 큰 문제가 없다. 또한 소상하는 물고기는 담수호에 들어오지 못하면 산란 혹은 성장을 못하므로 본능적으로 들어오기 때문에 통선시 소음도 크게 문제되지 않는다. 실제로 영암호 통선겸용어도에서 조사한 바에 의하면 통선할 때도 물고기가 같이 움직이고 있었다.

표 2.2.4 기설 통선겸용어도의 통선현황

지 구	개방일	연간개방회수	통과선박수
영산호	월. 금요일	14	14
영암호	월. 금요일	48	85
금호호	월. 금요일	69	69
금강호	필요시	10	10

영암호와 금호호에 통선량이 많은 것은 담수호화 과정에 있어 승어, 재첩, 새우 등이 많이 잡히기 때문에 이들을 잡으러 배들이 많이 들어오는 것이고, 담수호화가 끝난 금강이나 영산호는 호에서 경제성 어종이 잡히지 않기 때문으로 판단된다.

#### 라. 결론

통선문과 어도를 따로 설치할 때 보다 통선겸용갑문식 어도는 구조물을 하나로 통합하였으므로 지구당 100억원 가까이 예산을 절약할 수 있고 어류의 생태로 보아도 하구에 기존의 계단식어도보다 적당하므로 새로 시공하는 하구둑에는 물론 통선겸용갑문식 어도를 설치하고, 통선문이 있고 갑문식 어도가 없는 금강 하구둑, 시화 방조제, 낙동강 하구언에 영산강 하구둑에 서와 같이 통선문을 통선겸용갑문식 어도로 개수하면 어류의 소상효과를 높일 수 있으며, 어도가 없이 이중배수갑문이 있는 아산호, 삼교호, 남양호 등에도 이중갑문을 이용하여 아주 적은 비용으로 갑문식 어도를 설치할 수 있다.

따라서, 조석의 간만의차이가 큰 서해안 간척지 방조제의 어도는 갑문식과 같은 어도의 형태가 바람직하다. 수로식 어도를 선호하는 어류를 위한 시설은 간조시에 어도 유인수로의 빠른 유속에 대응하여 힘찬 도약력을 발휘하여 소상하도록 어류 중간 지점에 적절한 쉼터를 설치하거나, 완경사의 수로를 설치하는 것이 바람직하며, 어도 상단의 수위보다 높은 만조시에는 소형의 갑실을 마련하여 조위가 하강한 후 담수호로 유입할 수 있는 시설이 필요하다. 여기서, 소하성 어류를 어도 부근으로 유인하는 유인수량은 조석의 흐름 규모에 따라서 결정하여야 한다. 즉, 소규모 하구의 유인수량보다 대규모 해안의 유인수량은 좀더 많이 확보하여 공급하여야 한다. 이는 본 연구에서 개발하는 흐름모형과 수질모형에 의하여 개괄적으로 판단할 수 있다.

### 7. 아산만 걸매리 연안의 침식방지 제방현황

방조제 건설 후 새로운 갯벌이 조성되고 있는 아산만 지역중 연안의 침식 방지를 위하여 보조방조제를 건설한 아산만 걸매리 해안에 대한 현장 조사 연구가 수행되었다.

충남 아산시 걸매리 지역은 90년대초 농경지 관리와 해수의 침입을 막기 위해 콘크리트 구조의 제방을 건설하였다. 아울러 주제방의 구조적 안정을 위해 석재를 이용한 보조방조제도 그림 2.2.9와 같이 건설하였다.

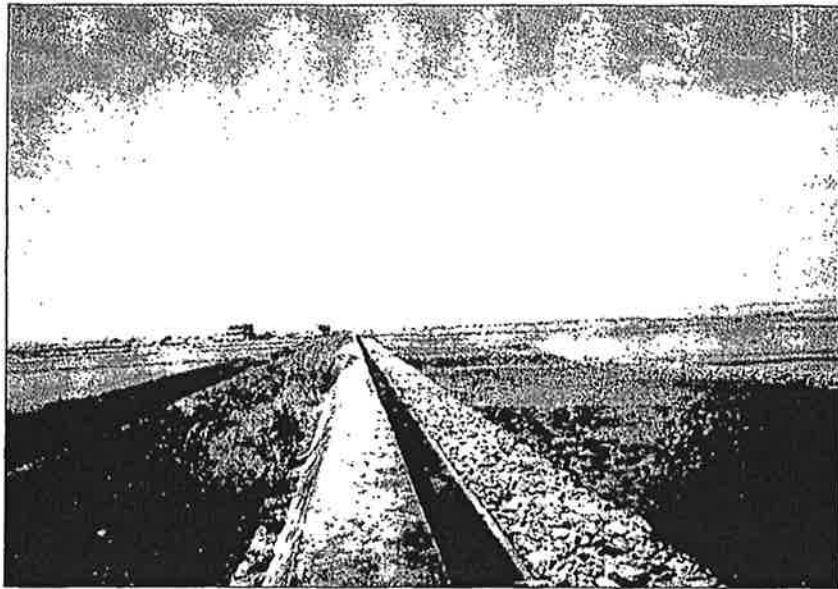


그림 2.2.9 보조방조제가 설치된 아산시 걸매리 해역전경

이들 보조방조제의 설치로 파도의 쳐오름 높기와 월파랑 등이 감소되며, 해빈의 안정화를 꾀할 수 있다. 보조방조제의 소파기능으로 내측에 퇴적을 유도하고 새로운 갯벌을 조성하게 된다.

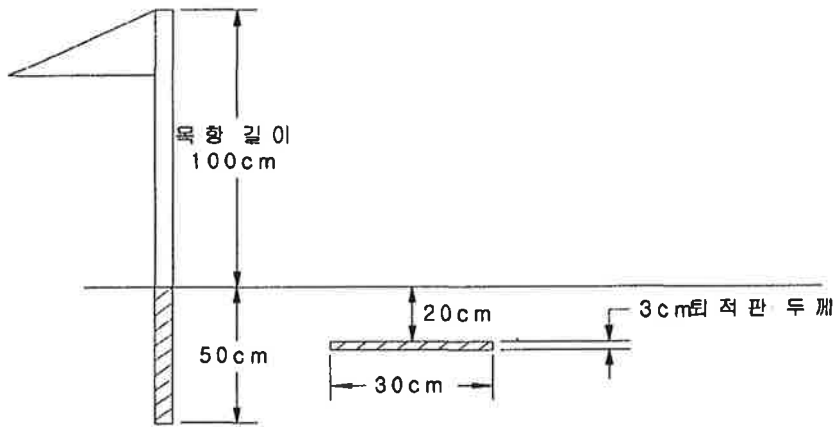


그림 2.2.10 아산시 걸매리에 설치한 퇴적판과 목항

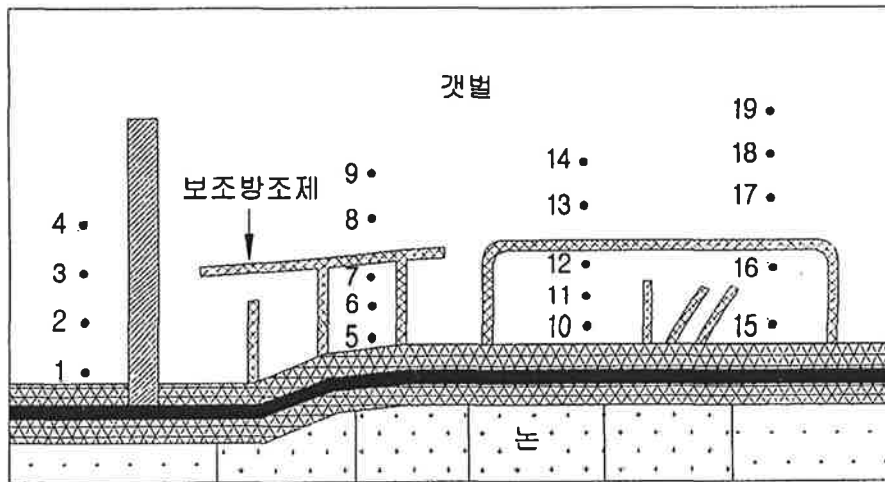


그림 2.2.11 퇴적판 설치위치

본 연구에서는 1998년 9월부터 보조방조제에 의한 퇴적유도 현상을 조사하기 위해 아산시 갈매리 일원에 퇴적판을 설치하고 그 추이를 분석하였다. 퇴적판과 함께 정확한 조사지점의 표시 및 보조적인 측정 도구로 1.5m 길이의 목향을 설치하였다. 그림 2.2.10는 갯벌에 설치한 퇴적판과 목향이고, 그림 2.2.11은 퇴적판의 설치위치를 나타내고 있다. 퇴적유도 현상 분석은 총 6회에 걸쳐 시행되었으며, 초기 1차 조사때 퇴적판을 갯벌에 설치한후 30여일의 안정화 기간을 설정하였다. 1998년 10월에 시행된 2차 조사시의 측정값을 기준값으로 정한 후 4회에 걸친 추가적인 측정을 시행하였다. 표 2.2.5은 1998년 9월부터 1999년 7월까지 시행된 퇴적판의 측정 결과이다.



그림 2.2.12 퇴적판 설치 현황('98. 9. 24)

표 2.2.5 퇴적판 측정결과

구분	측정결과(cm)											평균 증감
	2차 기준	3차	증감	4차	증감	5차	증감	6차	증감	7차	증감	
station1	15.0	17.0	-2.0	18.2	-3.2	20.8	-5.8	21.2	-6.2	21.0	-6.0	-4.64
station2	14.0	17.5	-3.5	19.0	-5.0	21.5	-7.5	21.0	-7.0	20.5	-6.5	-5.90
station3	18.5	19.0	-0.5	19.0	-0.5	21.5	-3.0	20.5	-2.0	16.5	2.0	-0.80
station4	17.7	14.0	3.7	유실	유실	유실	유실	유실	유실	유실	유실	유실
station5	20.5	18.0	2.5	18.0	2.5	18.8	1.7	22.0	-1.5	22.0	-1.5	0.74
station6	15.5	20.0	-4.5	20.5	-5.0	20.5	-5.0	21.5	-6.0	20.5	-5.0	-5.10
station7	21.0	21.5	-0.5	20.5	0.5	20.3	0.7	21.0	0	21.0	0	0.14
station8	19.5	13.5	6.0	14.5	5.0	14.6	4.9	15.0	4.5	14.0	5.5	5.18
station9	18.0	18.0	0	19.3	-1.3	18	0	15.6	2.4	15.5	2.5	0.72
station10	15.5	16.5	-1.0	유실	유실	18.5	-3.0	15.2	0.3	16.0	-0.5	-0.84
station11	15.7	17.5	-1.8	18.7	-3.0	18.5	-2.8	16.0	-0.3	15.5	0.2	-1.54
station12	18.0	15.5	2.5	15.2	2.8	16.0	2.0	13.0	5.0	13.0	5.0	3.46
station13	18.5	15.0	3.5	16.2	2.3	16.2	2.3	13.5	5.0	11.5	7.0	4.02
station14	17.5	15.0	2.5	15.5	2.0	16.5	1.0	13.0	4.5	10.5	7.0	3.40
station15	15.5	19.0	-3.5	유실	유실	17.3	-1.8	17.0	-1.5	17.0	-1.5	-1.66
station16	14.0	14.5	-0.5	18.0	-4.0	18.3	-4.3	15.0	-1.0	14.5	-0.5	-2.06
station17	15.5	15.0	0.5	15.0	0.5	15.0	0.5	19.0	-3.5	13.5	2.0	0.00
station18	15.0	13.5	1.5	17.3	-2.3	20.0	-5.0	15.5	-0.5	11.5	3.5	-0.56
station19	19.0	14.0	5.0	16.4	2.6	19.0	0	16.5	2.5	15.0	4.0	2.82

1차조사:1998. 9, 2차조사:1998.10, 3차조사:1998.11, 4차조사:1999. 1

5차조사:1999. 3, 6차조사:1999. 7, 7차조사:1999.11

- : 기준점 이하로 세굴되는 표시

Station 4의 퇴적판은 선착장 초입에 위치하여 4차 조사시부터 유실되어 측정이 불가능하게 되었다. Station10과 Station15의 퇴적판은 4차 조사시 유실상태에서 5차 조사시 복구 재측정 하였고, 평균 퇴적심도는 3회 측정값을 평균하여 나타내었다. 그림 2.2.13은 각 지점의 조사시기별 퇴적추이 변화를 종합적으로 나타낸 것이다.

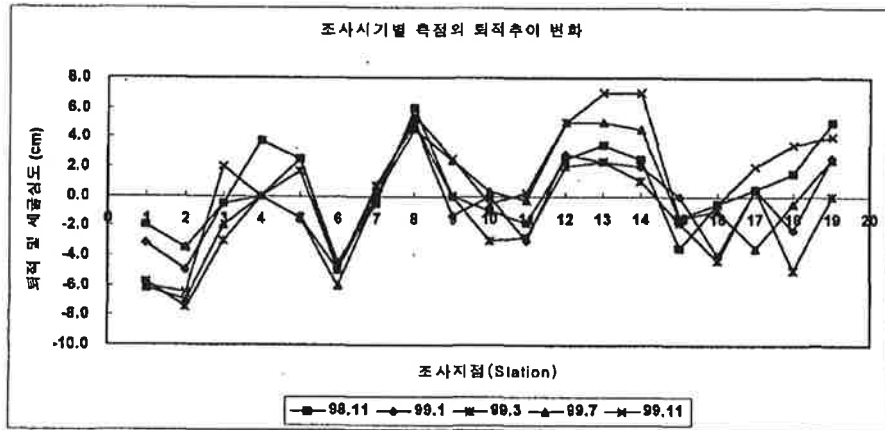


그림 2.2.13 조사 시기별 측정의 퇴적층이 변화

조사 결과를 각 측정별로 분석해 보면 다음과 같다. 먼저 측정 ST1, ST2, ST3는 보조방조제가 이미 설치된 선착장 외곽에 위치해 있다. 그림 2.2.14, 그림 2.2.15, 그림 2.2.16의 조사시기별 퇴적변화 추이를 보면 세 지점 모두 심도의 차이만 있을 뿐 겨울에 해당하는 98년 11월과 99년 1월 세굴현상이 나타나고 있다.

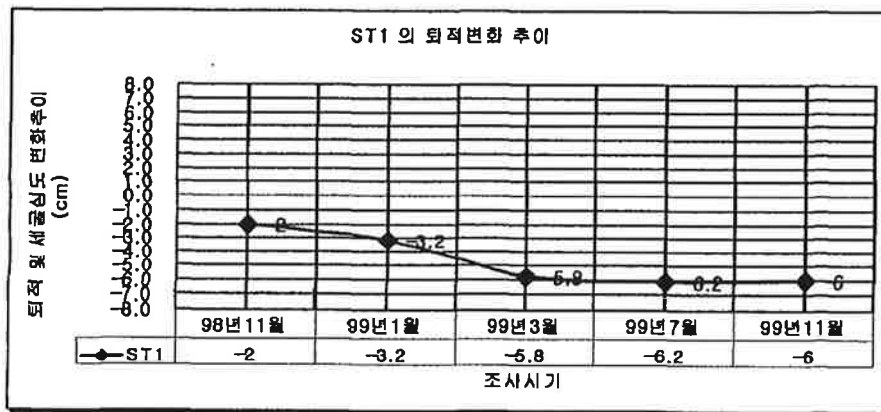


그림 2.2.14 ST1의 조사시기별 퇴적변화 추이

또한, 봄에 해당하는 99년 3월에는 세굴심도가 더욱 깊어지고 있다. 99년 7월 여름 측정값을 보면 세굴심도는 상당히 완화 되고 있다. 이후로 세굴현상은 안정화 되거나 퇴적 현상으로 반전되고 있다. 겨울부터 봄 까지 진행되던 세굴현상이 여름을 정점으로 안정화 되고 점진적으로 퇴적이 진행되는 것을 알 수 있다. 선착장 말단부는 상당량의 퇴적현상이 진행 됨을 보여주고 있다. 주방조제에서 가장 멀리 떨어진 ST3이 세지점 중 가장 세굴정도가 작은걸로 나타났다.

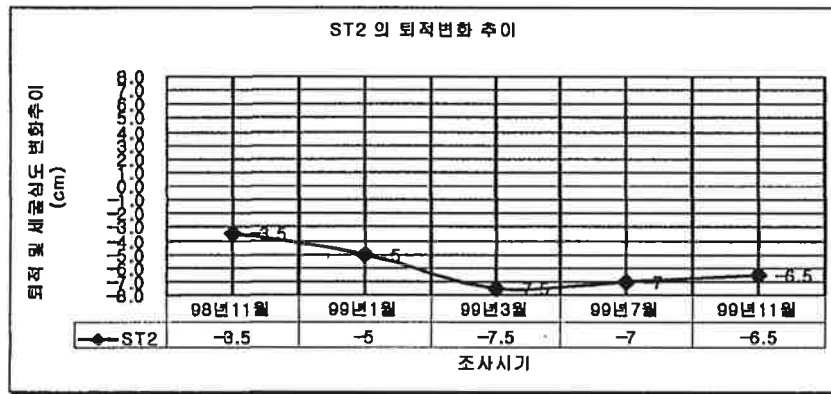


그림 2.2.15 ST2의 조사시기별 퇴적변화 추이

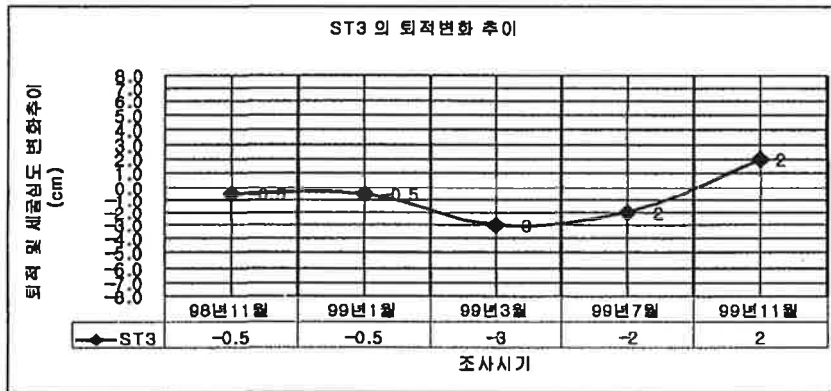


그림 2.2.16 ST3의 조사시기별 퇴적변화 추이



측점 ST5는 주방조제에 가장 가까운 조사지점이다. 그림 2.2.17 에서 볼 수 있듯이 겨울에는 퇴적현상이 진행되는데 일정 퇴적심도 이후 평형된 상태를 보여주고 있다. 이후 봄에 해당하는 99년 3월까지 퇴적심도가 조금씩 줄다가 99년 7월에는 세굴현상을 나타내고 있다. 여름에는 세굴현상이 완화되는 ST1, ST2, ST3 와는 상반된 경향을 보이고 있다. 이후 11월까지는 상당히 안정된 상태를 유지한다. 겨울철 안정화 현상이 다시 반복되는지 여부를 판단하기 위해서는 보다 장기적인 조사가 요구된다.

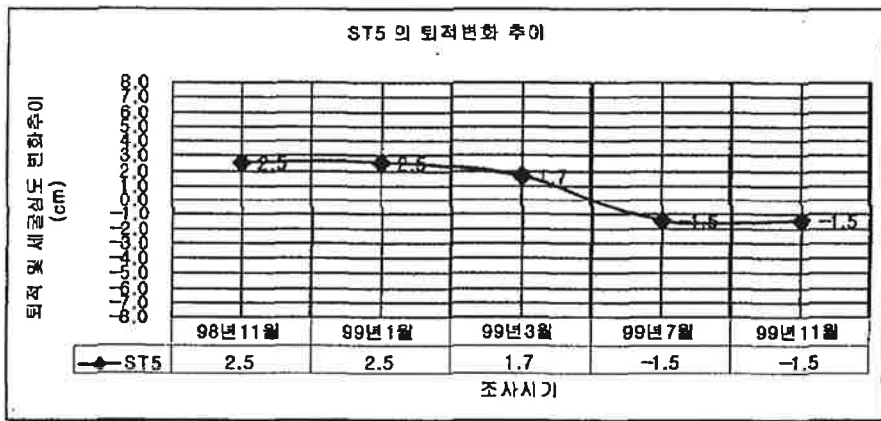


그림 2.2.17 ST5의 조사시기별 퇴적변화 추이

ST6은 98년 11월과 99년 1월 까지 세굴이 계속진행되다가 99년 3월까지의 평형상태를 이루고 이후 99년 7월까지 1cm의 세굴이 진행된다. 이후 99년 11월에는 원래의 세굴심도인 -5cm까지 퇴적된다. 보조 방조제 내측에 위치한 ST6은 본 조사 지구중 가장 안정화 된 지역으로 퇴적 및 세굴 현상의 진행 조건이 거의 한계에 도달한 지점으로 추측된다. 그림 2.2.18은 ST6에서의 시기별 퇴적변화 심도를 나타낸다.

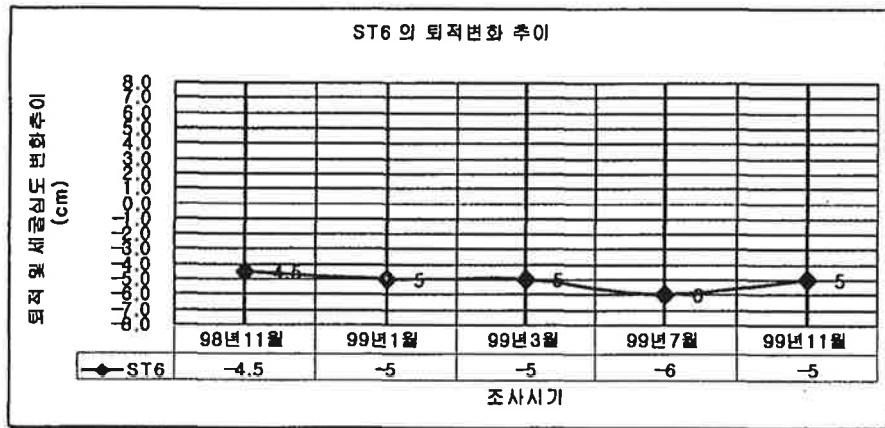


그림 2.2.18 ST6의 조사시기별 퇴적변화 추이

보조방조제 내측으로 근접한 ST7은 초기에 약간의 세굴심도가 나타나고 이후 0.7cm 정도의 퇴적변화를 나타낸후 안정화된다. 조사지점 중 ST6과 함께 계절에 상관없이 평형상태를 유지하는 지점이다.

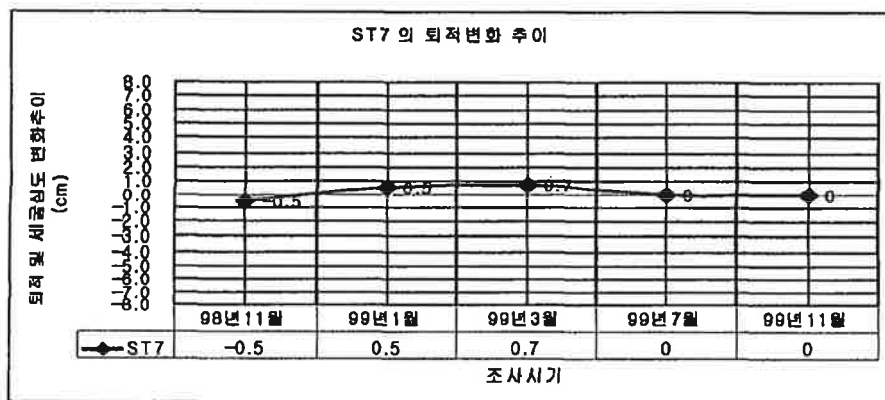


그림 2.2.19 ST7의 조사시기별 퇴적변화 추이

ST8은 외측 측점 중 보조방조제와 가장 인접한 위치에 있는 조사지점이다. 이 지점은 초기 30여일간 6cm 급격한 퇴적이 이루어진 후 99년 7월 여름까지 1.5cm 완만한 세굴 현상을 나타낸다. 그러나 초기 기준점에 비하면 여타 지점보다 많은 4.5cm의 퇴적현상을 나타내고 있다. 99년 11월의 최근 측점에서 0.5cm 정도의 미미한 퇴적현상을 나타내는 것으로 조사되었다.

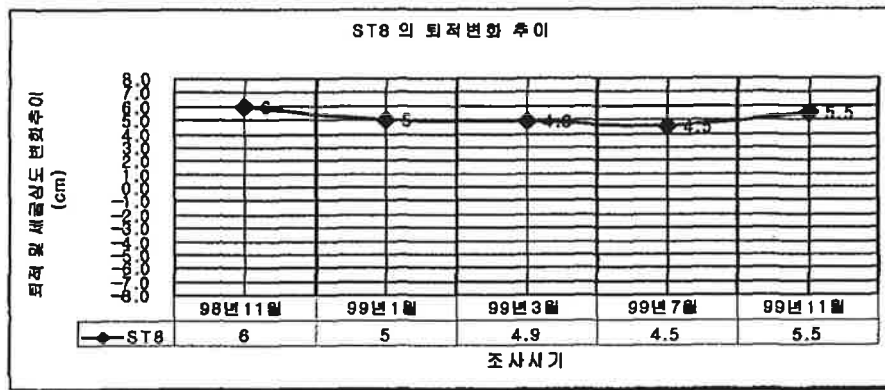


그림 2.2.20 ST8의 조사시기별 퇴적변화 추이

ST9는 보조방조제에서 해역쪽으로 가장 멀리 떨어진 지점이다. 이 지점은 초기 측정시 안정된 평형 상태를 나타내다가 99년 1월 겨울에 1.3cm의 세굴 현상을 나타내고 있다. 99년 3월 측정시는 점진적인 퇴적현상을 보여주었고, 99년 7월 까지 퇴적 현상은 이어졌다. 99년 7월부터 11월까지는 동일선상의 다른 측점과 마찬가지로 미미한 퇴적 변화를 보여주고 있다. 측정 시는 2.4cm의 퇴적심도를 나타내었다.

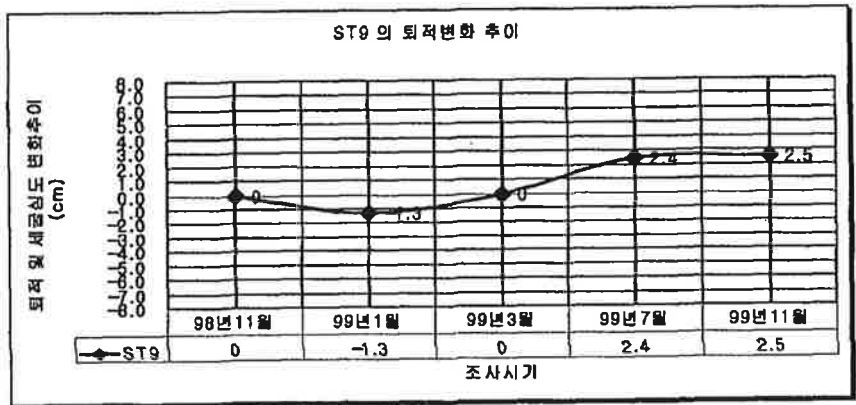


그림 2.2.21 ST9의 조사시기별 퇴적변화 추이

ST10은 선착장 내측의 두 번째 라인에 위치한 측정이다. 보조방조제 바로 앞의 측정으로 초기 측정시 1cm의 세굴현상을 나타내고, 99년3월 측정시는 보다 많은 세굴현상을 보이면서 3.0cm의 세굴심도를 나타냈다. 이후 99년 7월 여름 측정까지는 점진적인 퇴적현상을 보이며 최종적으로 0.3cm의 퇴적 현상을 보였다. 이 지점은 겨울철 퇴적 진행, 봄철 세굴 진행, 여름철 퇴적 진행, 겨울철 다시 세굴 시작 등 규칙적인 퇴적과 세굴의 반복 현상을 보이는 지점이다. 99년 11월의 측정 심도는 전년 11월과 비슷한 -0.5 cm 였다.

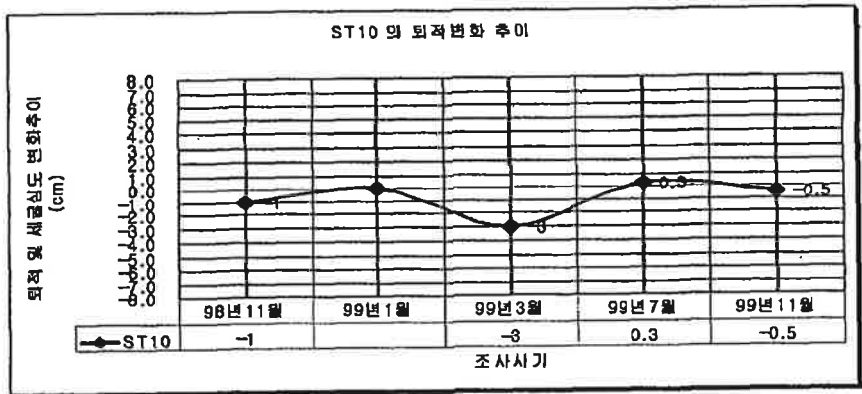


그림 2.2.22 ST10의 조사시기별 퇴적변화 추이

ST11은 보조방조제 내측 지점으로 초기 1.8cm의 세굴현상을 보이고, 99년 1월에는 보다 많은 3.0cm의 세굴현상을 보인다. 99년 3월 봄 측정시에는 세굴 심도가 조금 줄었고, 99년 7월 측정시에는 기준점과 거의 평행한 상태인 0.3cm의 세굴 심도를 보여주고 있다. 이후 99년 11월 까지 약간의 퇴적현상이 진행됨을 보여주고 있다.

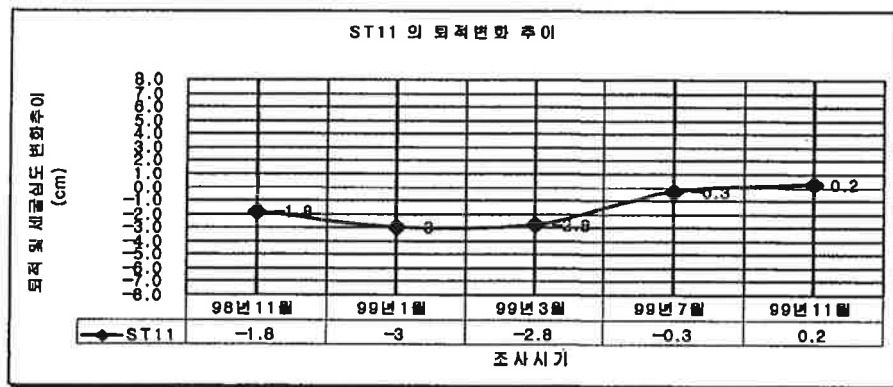


그림 2.2.23 ST11의 조사시기별 퇴적변화 추이

ST12는 ST7과 같이 보조방조제 내측 측점 중 방조제와 가장 가까운 지점이며 횡으로 이웃한 측점이다.

초기에는 ST7과 달리 2.5cm의 퇴적이 진행되고, 이후에 약간의 퇴적심도 증가와 감소가 반복되다 99년 7월 최종 측정시에는 5.0cm의 많은 퇴적현상을 보여주고 있다. 그러나 ST7과 마찬가지로 가을에서 겨울철까지는 안정된 상태로 퇴적 및 세굴 현상이 진행되지 않고 있음을 보여준다.

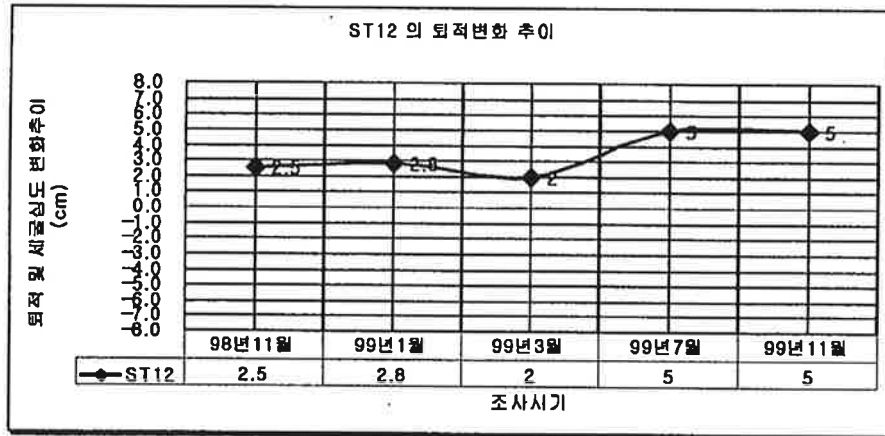


그림 2.2.24 ST12의 조사시기별 퇴적변화 추이

ST13은 초기측정시부터 많은 퇴적심도를 보여주고 있으며, 이후 1.2cm정도의 퇴적심도 감소를 보여주며 안정화되었다. 그러나, 봄철 측정 이후 퇴적 현상이 진행되며 11월 까지 지속적인 퇴적 현상이 진행된다. 99년 11월 측정값을 보면 초기 기준점으로부터 7cm 정도 퇴적이 진행되었는데, 이는 1년 전인 99년 11월에 비해서 2배의 퇴적이 진행되었음을 나타낸다.

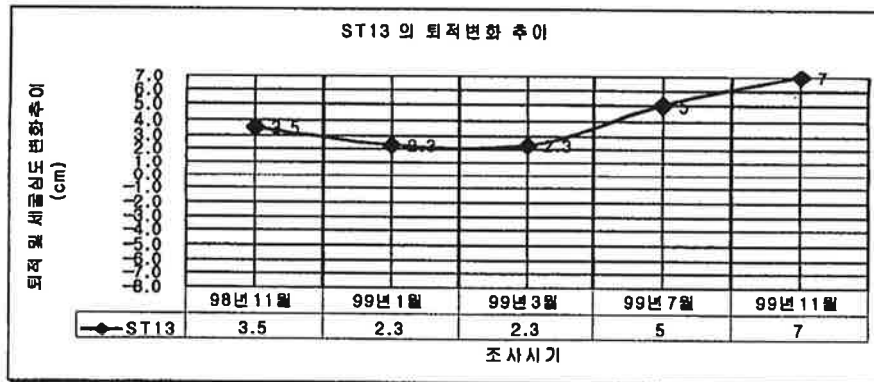


그림 2.2.25 ST13의 조사시기별 퇴적변화 추이

ST14는 앞에 기술한 ST13과 같이 보조방조제 최외곽의 축점으로 아주 유사한 심도 변화를 보인다. 초기에 2.5cm의 퇴적이 이루어진 후 지속적으로 퇴적심도가 줄다가 여름에 해당하는 99년 7월에는 다시 퇴적심도가 급격히 증가하는 모습을 보여주고 있다. 이후 11월 까지 퇴적이 진행되는데 퇴적 심도나 경향은 ST13과 거의 흡사하다. ST13과 ST14는 동일한 퇴적 환경 조건에 속한 것으로 추측된다.

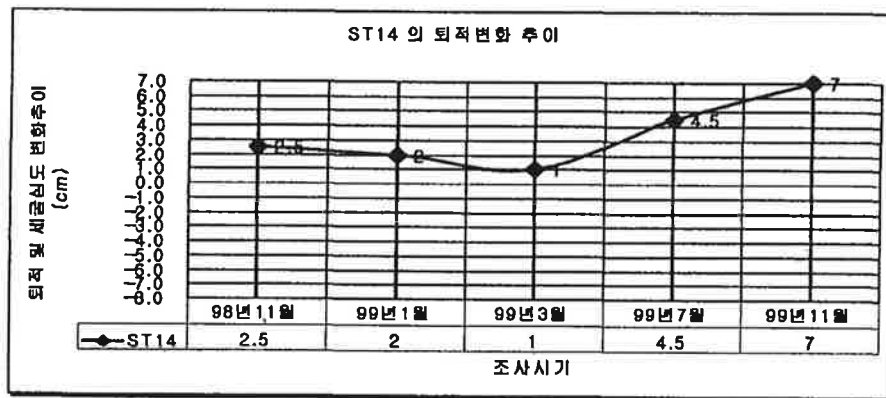


그림 2.2.26 ST14의 조사시기별 퇴적변화 추이

ST15는 보조방조제 내측 중 ST5, ST10과 같이 주방조제와 가장 인접한 축점이다. 초기에는 비교적 많은 세굴심도를 보이나 그후 점차적으로 세굴심도가 낮아지면서 봄, 여름에 걸쳐 퇴적현상을 나타내고 있다. 이후 11월까지는 안정된 평형 상태를 유지한다. 횡방향으로 같은 라인에 위치한 ST5, ST10, ST15의 경향을 비교해보면 ST5는 지속적으로 겨울부터 여름까지 세굴이 진행되나, ST10, ST15는 여름에는 퇴적현상으로 반전하는 공통된 특성을 보여주고 있다.

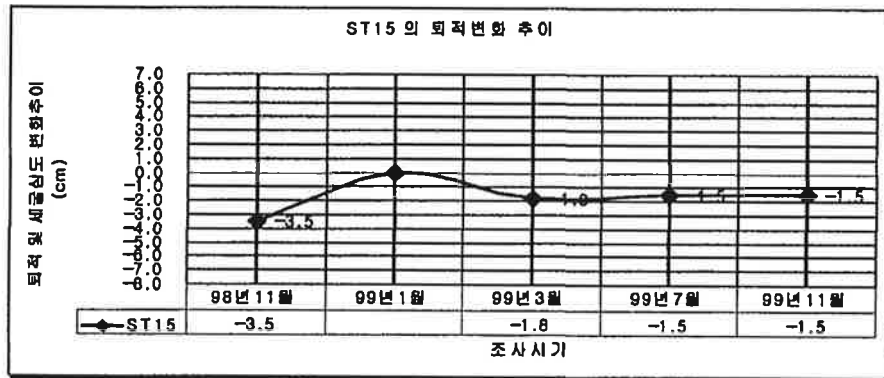


그림 2.2.27 ST15의 조사시기별 퇴적변화 추이

ST16은 겨울에서 봄까지는 지속적인 세굴현상을 보여주면서 -4cm까지 세굴된다. 이후 세굴 심도는 급격히 줄고, 3월 이후에는 퇴적 현상으로 반전된다. 99년 7월에서 11월까지는 거의 안정화된 상태로 약간의 퇴적 현상을 보인다. ST15와 ST16은 모두 보조 방조제 내측에 위치해 있고, 해양을 향해 종단으로도 동일선상에 위치해 있다. 이 두지점은 초기에 세굴과 퇴적이라는 상반된 현상을 보인 이후로는 거의 유사한 퇴적 심도 및 경향을 보인다.

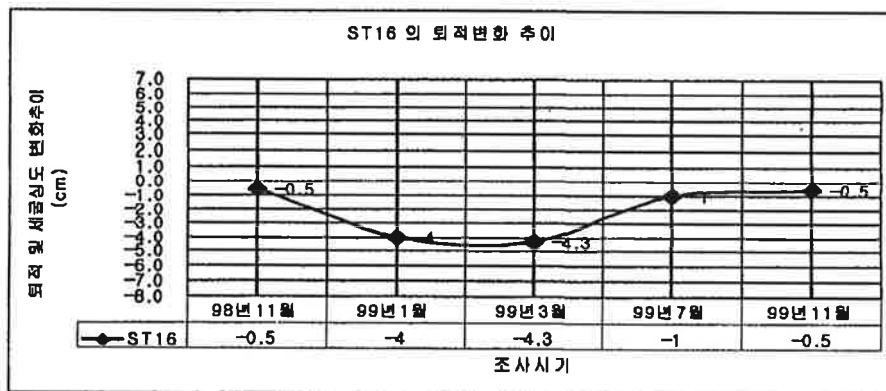


그림 2.2.28 ST16의 조사시기별 퇴적변화 추이



ST17은 보조방조제 외측으로 가장 근접한 측점이다. 이 지점은 겨울에서 봄까지 극히 안정화 된 모습을 보여주다가, 여름에 급격한 세굴현상을 보여 주고 있다. 이후 겨울철 까지 5cm 이상의 퇴적 현상을 보이며 교란이 심화 되고 있다.

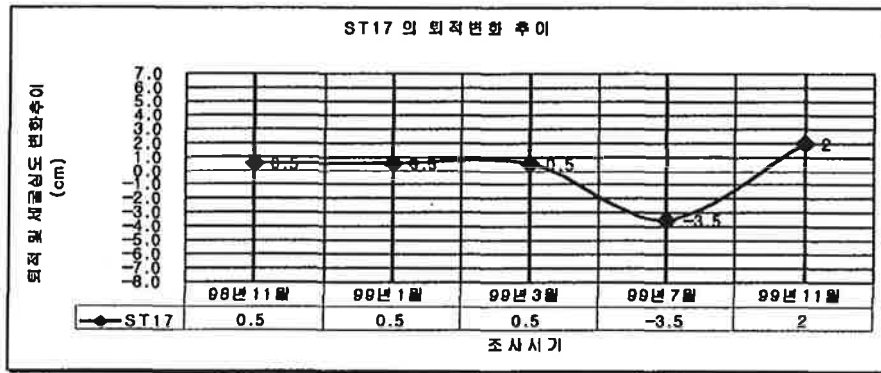


그림 2.2.29 ST17의 조사시기별 퇴적변화 추이

보조방조제 외측에 위치한 ST18과 ST19는 퇴적 및 세굴의 심도차이만 있을 뿐 겨울까지 세굴 심도가 감소하다가 봄부터 겨울까지 다시 퇴적이 진행되는 유사한 경향을 나타내고 있다.

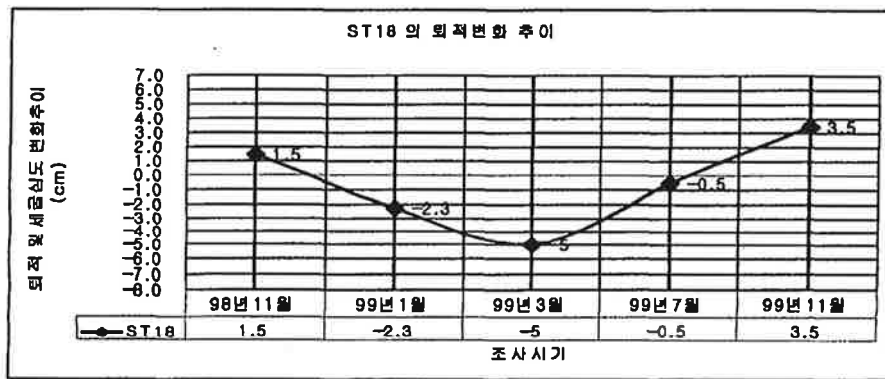


그림 2.2.30 ST18의 조사시기별 퇴적변화 추이

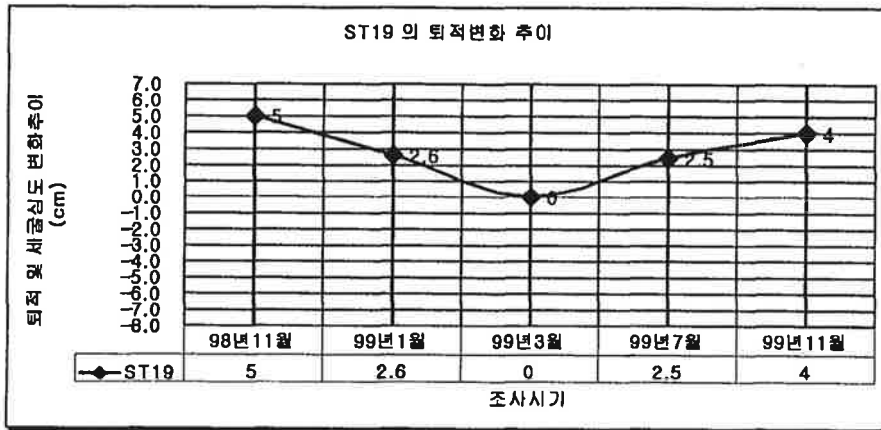


그림 2.2.31 ST19의 조사시기별 퇴적변화 추이

1990년도에 설치된 아산시 결매리의 퇴적유도 보조방조제는 초기에는 많은 퇴적이 이루어졌고, 지금은 내측 대부분의 지역이 안정화 된 상태로 추정된다. 각 지점별 퇴적 및 세굴현상의 특성을 분석해보면 겨울에 세굴현상이 우세하게 진행되고, 봄에는 안정화를 이루다가 여름에 점진적인 퇴적현상을 진행하는 것으로 나타났다.

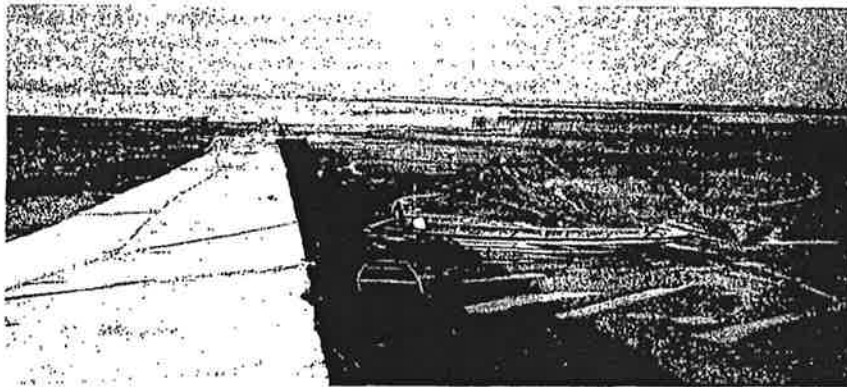


그림 2.2.32 결매리 선척장의 퇴적 형태

걸매리 해안의 퇴적은 평형 상태에 이른 것으로 판단되며, 보조 제방 구역의 서쪽 해안에 설치된 선착장 주변에는 당초보다 매몰이 심하여, 간조시에 선착장 말단에 선박을 정박 할 수 없는 상태이다.

## 8. 만경강 수질 조사

### 가. DELWAQ 모형

DELWAQ는 간척지 연안의 수질변화 예측을 위하여 화란의 델프트 수리시험소에서 1996년 개발한 수질변화 예측 모델로써 본 연구사업비로 1차년도에 구입된 모형이다. 본 모형은 담수호와 간척지 연안의 흐름특성 변화를 파악하고 이에 따른 종합적인 유사이동과 수질변화를 예측하도록 구성되어 있다.

DELWAQ 가동을 위해 우선적으로 1차원의 소규모 시험 지구에 대하여 몇 가지 수질 항목을 선정, Input file작성과 함께 Pre-processor(DELWAQ1P)를 운영하고, DELWAQ2의 출력 자료에 대한 검정 작업을 시행하였다.

또한, Post-processing 과정과 연계하여 다양한 형식으로 분석 항목을 도식화하기 위한 작업을 시행하였다. 실제 사업 지구(화옹, 새만금)를 대상으로 적용하기 위해서 사업지구내 Boundary Condition 설정하고 mapping 작업을 수행할 수 있는 기법을 도입하여 간척 사업 지구에 정확하게 적용하였다. 또한 DELFT3D의 hydrodynamics module, wave module, morphological module과 연계하여 해역에서의 종합적인 환경 예측 모델을 구성할 것이다.

다음은 새만금 유입하천인 만경강에 대해서 DELWAQ을 적용한 결과이다. 적용 대상 지역은 새만금 유입 하천인 만경강으로 주로 본류를 중심으로 수질을 비교 예측하였으며 지류인 소양천과 전주천을 Load로 설정하였다.

현장 수질Data는 '새만금지구 유역 오염원 관리대책 1997. 농어촌진흥공

사.’ 보고서를 인용하여 97년 4월에서 97년 5월까지 45일간 측정자료를 입력하였다. 만경강은 완주군 동상면에서 발원하여 서해로 유입하기 전까지 유로연장 74.1km이며 소양천, 전주천, 익산천, 목천포천, 탑천 등이 주요 지천을 구성하고 있다.

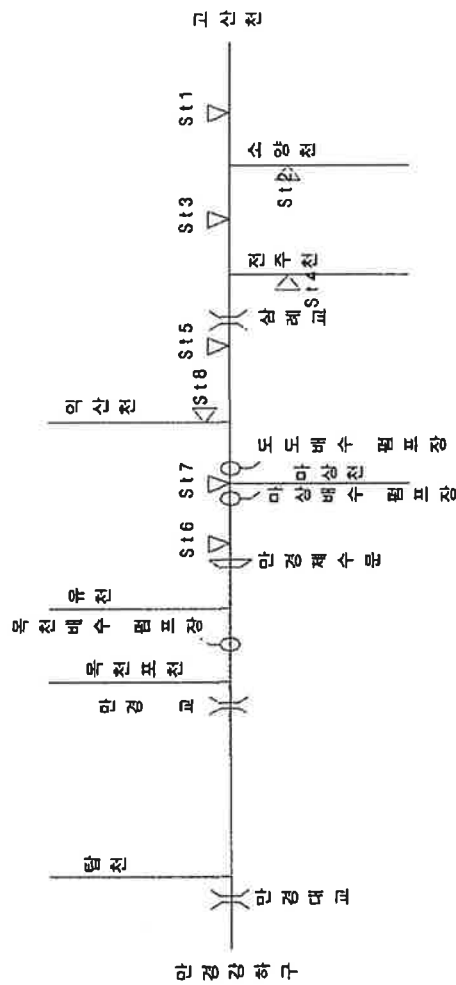


그림 2.2.33 만경강 유입 지천 및 조사지점

표 2.2.6 수질 조사지점

DELWAQ segment No.	수질 측정망 No.	지점명	Station No.
-1	w7	완주군 신성리 봉동교	-
1	w8	완주군 서계리보(하리)	1
3	w28	완주군 신평리마을	2
Load1(소양천)	w15	전주시 전미동 신봉마을	-
Load2(전주천)	w25	전주공단	-
5	w27	삼례대교	3
6	w29	익산시 화전동 삼선철교	4
15	w33	신유장 마을 신교	5
-2	w35	만경교	-

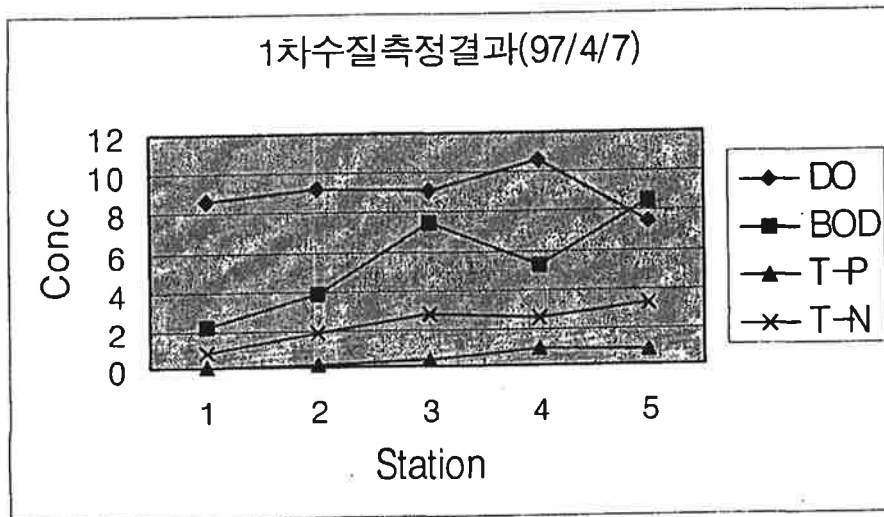


그림 2.2.34 1차 수질 측정 결과

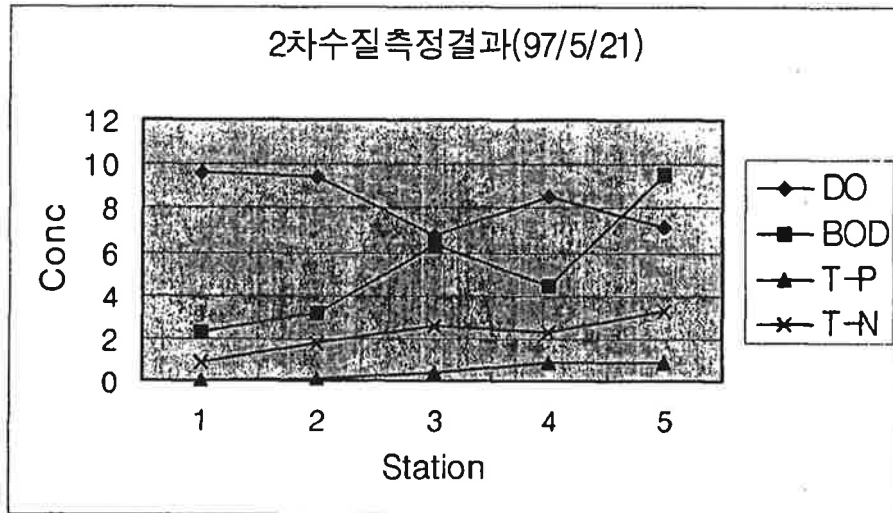


그림 2.2.35 2차 수질 측정 결과

표 2.2.7 1차 수질 측정현황

DELWAQ segment No.	수질 측정망 No.	지점명	1차 수질측정 Data(97/4/7) (mg/l)			
			DO	BOD	T-P	T-N
-1	w7	봉동교	9.3	1.1	0.01	0.69
1	w8	서계리보	8.6	2.2	0.02	0.83
3	w28	신흥리마을	9.2	3.9	0.07	1.81
Load1(소양천)	w15	신흥마을	9.3	3.0	0.15	2.17
Load2(전주천)	w25	공단	4.2	20.8	0.89	2.83
5	w27	삼례교	9.1	7.5	0.32	2.80
6	w29	삼선철교	10.6	5.2	0.96	2.61
15	w33	산유강마을	7.5	8.5	0.79	3.25
-2	w35	만경교	3.9	15.0	1.04	4.6

표 2.2.8 2차 수질 측정현황

DELWAQ segment No.	수질 측정망 No.	지점명	1차 수질측정 Data(97/4/7) (mg/l)			
			DO	BOD	T-P	T-N
-1	w7	봉동교	8.7	0.9	0.01	0.71
1	w8	서계리보	9.6	2.3	0.01	0.87
3	w28	신흥리마을	9.4	3.2	0.06	1.75
Load1(소양천)	w15	신봉마을	6.6	3.5	0.06	1.94
Load2(전주천)	w25	공단	3.3	19.0	0.63	4.04
5	w27	삼례교	6.7	6.3	0.43	2.58
6	w29	삼선철교	8.5	4.5	0.88	2.26
15	w33	산유강마을	7.1	9.5	0.88	3.29
-2	w35	만경교	3.9	16.8	1.01	4.96

표 2.2.9 Boundary 설정

Boundary name	지점	조사 항목	start time Conc(mg-l)	stop time Conc (mg/l)
-1	봉동교	BOD	1.1	0.9
		DO	9.3	8.7
		T-P	0.01	0.01
		T-N	0.69	0.71
-2	만경교	BOD	15.0	16.8
		DO	3.9	3.9
		T-P	1.04	1.01
		T-N	4.6	4.96

표 2.2.10 Loads

load number	지점	조사 항목	start time Conc (mg/l)	stop time Conc (mg/l)	flow (m <sup>3</sup> /sec)
1	소양천	BOD	3.0	3.5	0.2700
		DO	9.3	6.6	0.2700
		T-P	0.15	0.06	0.2700
		T-N	2.17	1.94	0.2700
2	전주천	BOD	20.8	19.0	0.3943
		DO	4.2	3.3	0.3943
		T-P	0.89	0.63	0.3943
		T-N	2.83	4.04	0.3943

표 2.2.11 Initial conditions

No. segment	BOD(mg/l)	DO(mg/l)	T-P(mg/l)	T-N(mg/l)
1	2.2	8.6	0.02	0.83
3	3.9	9.2	0.07	1.81
5	7.5	9.1	0.32	2.80
6	5.2	10.6	0.96	2.61
15	8.5	7.5	0.79	3.25



나. 수질 예측 결과

만경강에서의 수질 예측결과를 그림 2.2.36에 나타냈다.

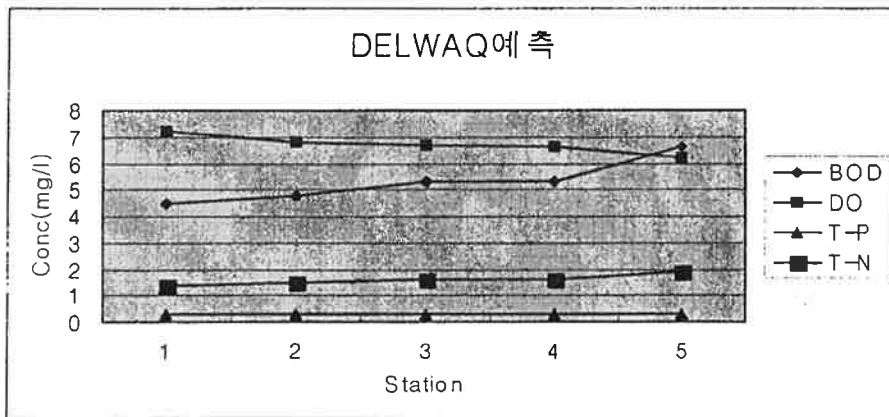


그림 2.2.36 만경강 수질 예측 결과

다. 수질 항목별 농도 변화

수질 항목별 검정 결과는 아래 그림과 같다.

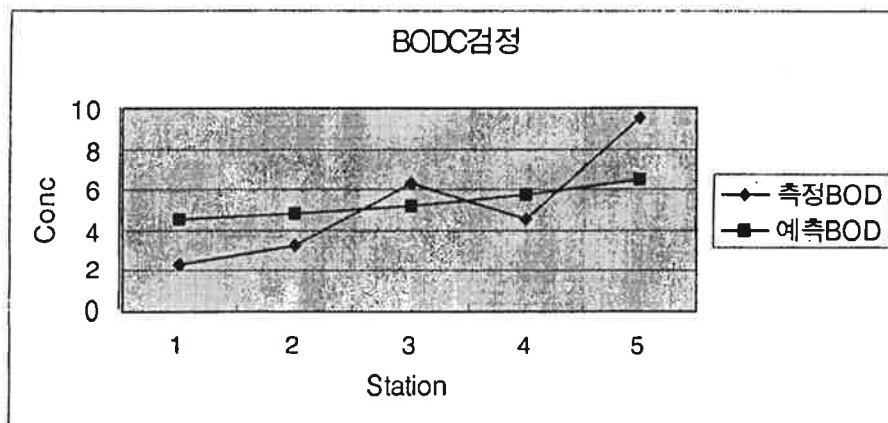


그림 2.2.37 BODC의 검정 결과

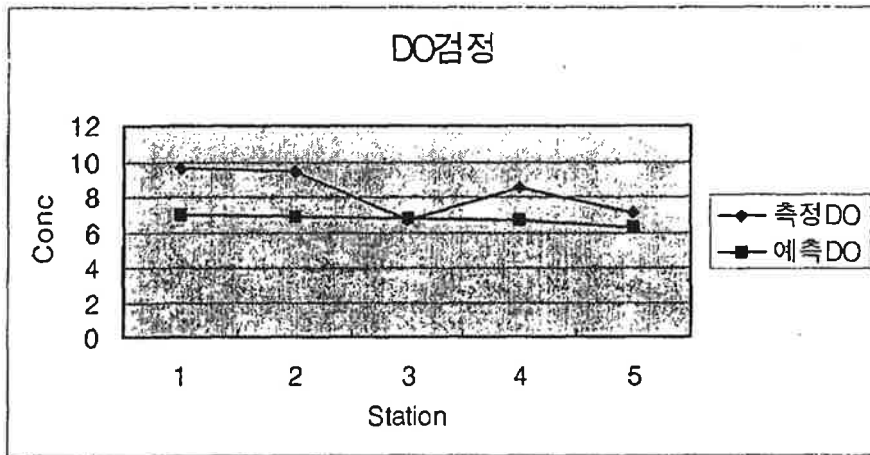


그림 2.2.38 DO의 검정 결과

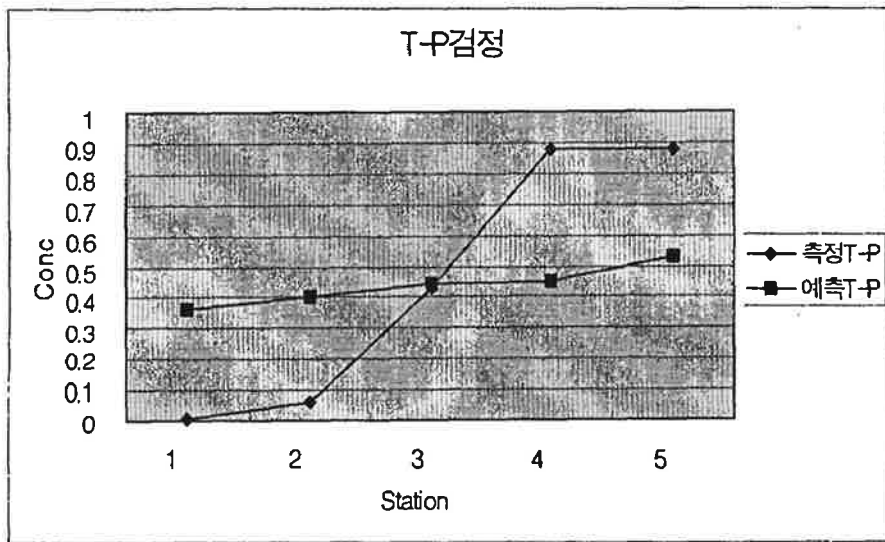


그림 2.2.39 T-P의 검정 결과

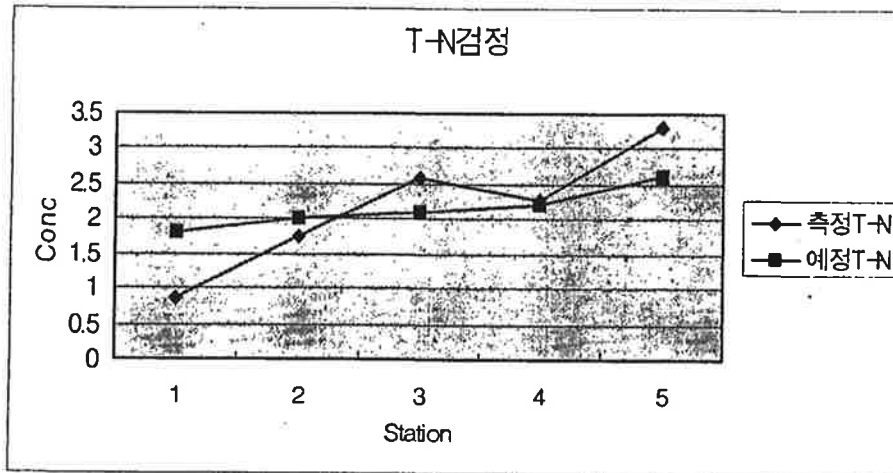


그림 2.2.40 T-N의 검정 결과

라. 결론

금번 만경강 지구에 대한 수질 예측에서는 항목별로 모의 결과와 실측치에서 많은 오차가 나타났다. 이는 만경강의 많은 지천중 상류의 소양천과 전주천만을 지천으로 설정하여, 오염 부하량과 유량을 입력하였기 때문이다. 실제 만경강 하류까지는 수많은 지천으로부터 오염 부하가 유입되면서 구간별로 수질에 많은 영향을 미치고 있다. 만경강 수계의 여러 지천들의 유량을 비롯한 수문 자료와 지속적이고 체계적인 양질의 수질 자료 수집이 선행되지 못한 상태에서 모델을 set up 했다.

DELWAQ모델의 적용성이 인정 될 수 있도록 현장 조사를 통한 충분한 자료 수집과 수질 예측 항목에 대한 분석등이 지속적으로 수행 될 것이다.

### 제 3절 선진 간척지의 친수환경 조성현황

#### 1. 미국의 해안 친수 공간 조성

미국의 환경 문제는 1950년경부터 급속한 공업화에 의한 臨海지역의 해양 오염에 따라서 대두되었다. 샌프란시스코만 등 하구 지역에서 개발이 진행되어 연안의 늪지대가 소실되고 수질 악화와 함께 수생물이 멸종되고, 시민의 접근으로 경관도 손상되면서 연안 보존에 대한 관심이 고조되었다.

표 2.3.1 미국의 해안 매립과 친수 환경 및 위락 공간 조성

지구명	공사 내역	사업 시행자
1. Asbury Park, the New Jersey coast	- 심해에서 4백만 <sup>m</sup> 의 준설에 의한 해안 매립에 의한 지형 보존 - 해변 위락공간 조성	- 미공병단 뉴욕지부
2. Sandy hook, the New Jersey coast	- 항로에서 2.5백만 <sup>m</sup> 준설에 의한 수로폭 243m 유지 - 해안 위락공간 34ha 매립 조성	- 미공병단 뉴욕지부 -미국 국립공원 서비스
3. Pier J: Port of Long Beach, California	- 항로 준설에 의한 LA 항 50ha 매립 확장(준설깊이 27.4m) - 갑문식 제방 3.5km 설치 - 공사비 8천만\$	- Port of Long Beach
4. San Francisco Bay의 보존과 개발사업	- 1965년까지 매년 1,000ha 씩 매립 되던 면적을 6ha 씩으로 축소 시행 - '77 Suisun Marsh preservation Act에 의한 40,000ha의 습지와 야생동물 보존, 농지 이용, - 해변의 위락 공간과 항만 조성 - 사업비('93-'94 : 2.2백만\$)	- 샌프란시스코 만 개발보존 위원회 (BCDC)

1957년, 샌프란시스코만 보전개발위원회(Bay of San Francisco Conservation and Development Committee: BCDC)가 매립과 해안도로의 건설을 억제하기 위하여 시민의 힘으로 조직되었다. 그러나, 매립 수요를 억제하는 것만으로는 지역의 발전을 이룰 수 없기 때문에, 물 행정을 담당하는 육군 공병대와 BCDC는 mitigation기법을 만들게 되었다. 한편 1969년에 국가 환경행정법 NEPA가 제정되고 환경보호국 EPA가 설립되며, 1972년에는 연안역 관리법이 정비됨에 따라 mitigation 개념이 정착되었다. 1978년에 NEPA가 제시한 mitigation의 정의는 개별 사업의 계획 단계에서 환경 영향을 최소화하고 부득이한 영향에 대해 수복, 보상하기 위한 구체적 기술을 가리킨다. 그러나, 환경변화의 파악이 어렵고 현재의 환경 상태, 인위적인 환경의 손실, mitigation에 의한 환경 회복의 정량적 평가 또는 파악이 기술적으로 불확실한 문제가 있다. 표 2.3.1은 미국 해안에서 조성된 위락공간과 해안 보존사업 내용을 정리한 것으로서, 선진국은 해안을 농지와 항만 시설 등으로 개발하고, 준설 등을 통하여 해안 지형의 환경적인 가치를 보존하기 위한 투자가 병행됨을 나타내고 있다.

## 2. 화란의 간척

### 가. 배경

화란은 12세기부터 간척사업을 시행하여 홍수시 물에 잠기는 65%의 국토를 침수피해로부터 보존하게되었다. 1932년에 세계 최대인 Zuiderzee 간척사업을 착수하여 32km의 방조제를 막아 개발된 35만 ha의 Polder 지역은 대부분 농지와 삼림지역으로 활용된다. 190만ha의 대단위 농지는 낙농업과 화훼 작물의 주산단지를 이루며, 농산물의 수출액은 화란 총 수출액의 25%를 차지한다. 화훼작물의 세계 교역량의 60%가 화란에서 수출되며, 버섯 등의 통조림 수출량은 세계 4대 수출국에 포함된다. 농민의 가구당 영농면적이

24ha로서 넓고 평탄하다.

화란의 간척 사업은 석재 등의 공사 재료를 외국에서 구입하고, 파도의 규모가 크며, 조석의 차이가 적은 공사 여건이 우리 나라에 비하여 열악하기 때문에 투자비용이 크며, 조사설계비와 연구비도 상대적으로 고액으로 투자되는 편이다. 표 2.3.2은 화란의 Delta project와 우리 나라 간척 사업비를 화란 Delft 수리연구소가 제공한 자료에 의하여 비교한 것이다.

화란과 우리의 간척 공사비를 각국의 대표적인 사업지구를 대상으로 비교한 결과, 우리보다 2배에서 10배가 소요되었다

화란의 담수호에서 수질은 1980년대까지 라인강과 하류지역의 공업화에 따라 오염된 바 있으나 그 동안의 노력으로 맑아져 암스테르담과 인근 지역의 식수와 산업용수로서 사용되며 여름철에는 수영도 즐긴다. 일부 기계배수 비용이 고액 소요되는 낮은 지역의 농지는 방수제를 제거하고 담수호에 포함시키거나 자연공원 등으로 변환되기도 한다.

본 연구진은 KBS TV 기자단 등 4인과 함께 1997년 11월에 공사 현장을 시찰하여 간척지의 환경 친화적인 정책의 추진 현황을 파악하였다.

#### 나. 자연 보존공간과 Ketelmeer 호수의 오염물 침전지 조성

Zuiderzee 간척으로 조성된 IJsselmeer호수 내륙의 Flevoland에 조성된 Oostvaardersplassen 지역의 자연 공원(nature reserves)에는 약 5,600ha의 면적에 소와 말 등이 방목되고 철새가 도래하며, 어류의 서식지를 조성한다. 골프장과 경마장 그리고 보우트장 등도 곳곳에 있다. 이러한 자연공원의 면적은 전체 개발면적 350,000ha의 1.6%이다. 화란의 Ketelmeer 호수는 라인강의 하류인 IJssel강 하구이며 1932년 Zuiderzee 간척사업에 의하여 조성된 IJsselmeer 호수의 상류에 위치한다.

표 2.3.2 화란과 우리 나라의 간척공사비 비교

구 분	화란 간척지구		한 국	
	Haringvliet	E. scheldt	새만금방조제	금강하구둑
○총 연 장	5,300m	9,000m	29,415m	1,841m
- 댐 "	4,000m	5,000m	28,759m	1,127m
- 갑문 "	1,300m	4,000m	656m	714m
○총 공사비	267 백만 \$	3,132 백만 \$	950,000 백만원	79,828 백만원
- 제방	30 "	50 "	537,962	6,446"
- 배수갑문	237 "	2,944 "	272,554	60,689"
- 부대공사	-	137 "	139,484	12,693"
○m당 공사비 (백만원/m)	50 천 \$/m (70백만원/m)	348 천 \$/m (487백만원/m)	(32 "/m)	(43 "/m)
○공사기간	'71 완공	'86 완공	(공사중)	'90 완공

이곳에서 현재 호수에 침전된 오염 물질을 준설하여 저장할 목적으로 대형 침전물 저류지 공사가 시행 중에 있다. IJsselmeer 호수는 그림 2.3.2과 같이 1919년 북부 해안인 Waddenzee에서 착수된 Zuiderzee project에 의하여 조성된 간척지의 일부이다. Zuiderzee project에 의하여 북부 육지와 Wieringen 섬의 서안을 연결하는 길이 2.5km의 방조제가 1924년 완공되었으며, 이 섬과 Friesland 해안을 연결하는 길이 30km의 방조제가 1932년 완공되므로서 IJsselmeer호수가 조성되었다. Wieringen 섬의 방조제가 완공된 후, 제방 안쪽 호수에는 1927년부터 3년간 방수제를 건설하여 1940년까지 20,000ha의 토지를 조성하였다.

호수 동쪽에 있는 Northeast polder(Noordoostpolder) 지구는 1936년부터 5년간 호수 내에 방수제를 설치 한 후, 1942년부터 21년간 48,000ha의 토지를 조성하였으며, Eastern Flevoland(Oostelijkflevoland) 지역도 1950년부터 7년간 내방수제가 건설되고 1957년부터 20년간 54,000ha의 토지를 조성하였다. 호수 남쪽의 Southern Flevoland는 1959년부터 9년간 방수제를 건설하여 1968년부터 현재까지 43,000ha의 토지를 조성하였으며, 먼저 개발된 지역에서 실행되어온 환경 보존 시책이 도입되었다. Southern Flevoland의 북서쪽 호수변인 Oostvaardersdijk에 1972년부터 5,600ha의 개발 지역을 호수와 습지 및 갈대 숲 그리고 버드나무 숲으로 조성하여 기러기와 왜가리, 해오라기 등 철새의 서식지를 제공하며 소와 말을 방목하여 야생화하는 자연 생태 공간(Nature Resources)이 조성되었다. Zuiderzee project에 의하여 조성되는 토지는 225,000ha로서 개발지역의 75% 이상을 농지로 사용한다. 최근 개발된 Southern Flevoland는 약 50%를 농지로 사용하며 주거지역은 18%, 삼림과 자연보존지역은 25%이다. IJsselmeer 호수 면적은 125,000ha이며, Northeast polder와 Eastern Flevoland 사이의 호수에는 Ketelmeer 호수가 조성되었다. 이 지역은 라인강과 IJssel강이 유입되며 1959년대부터 1980년대까지 공업화 과정에서 많은 오염물이 스위스와 독일 그리고 화란에서 호수 내로 유입되었다. 라인강 유출수의 20%는 Ketelmeer 호수로, 나머지 80%는 서해안의 Harlingvliet 호수로 유입된다. 라인강의 수질은 인접 국가 간의 수질 보존 협정인 북해 자율협약에 의하여 관리된다. 라인 액션 플랜에 따라서 상류의 스위스나 독일의 공장이나 가정에서 배출되는 폐수를 처리하여 강으로 흘려보내며, 농지의 비료나 농약의 사용을 규제하며, 문제가 발생될 때마다 관련국들이 협의한다. 평상시, 호수의 수질은 여름철 수영이 가능한 수준이다.





그림 2.3.1 화란 Zuiderzee 간척지와 Ketelmeer projects 위치도

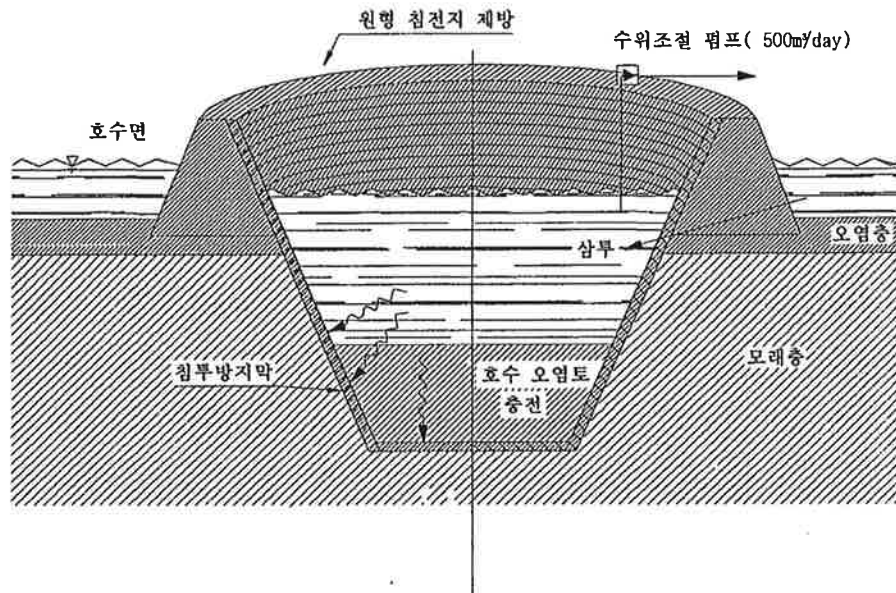


그림 2.3.2 Ketelmeer 침전지 단면도

그러나, 1980년대 이전에 Ketelmeer 호수 면적 3,800ha 중 2,800ha를 오염시켰으며, 침전 두께는 50cm이며 총량은 15백만 $m^3$ 에 이른다. 퇴적오염물은 윤활유 성분의 분할이 안되는 물질인 PCBs(polychlorobiphenyls)와 증유 성분인 다환성 탄화수소(PAHs : polycyclic aromatic hydrocarbons) 그리고 농약 폐기물 등이며 이를 섭취하며 서식하는 일부 모기 유충의 치아가 기형화되는 등 동물의 생태 환경이 악화되었다. 이러한 오염물은 지하로 침투된 후 용출되어 바람과 난류 흐름에 따라서 확산되거나, 선박이 지나갈 때 프로펠러의 작용으로 교란되어 호수의 물이 혼탁해지는 경우가 많다. 그러나, 오염물을 처리하는 화학적인 방법은 아직까지 개발되지 못하고 있다. 오염물이 처리된 후 다시 침출되어서 환경을 오염시키지 않도록 격리 관리 기법(IMC Condition : Insulation Manageability and Control)의 최적 방안

으로서 오염물 정화 처리 후의 오염물의 두께를 가급적 크게 하고 접촉면은 최소화하는 방안인 칸막이가 없는 원형 침전지가 검토되었다. 결과적으로, Ketelmeer 호수 중심부는 준설된 오염물을 침전시켜서 저장하기 위하여 그림 2.3.2와 같이 대형의 저류지 공법이 채택되었다. 이는 직경이 1,000m이고 깊이가 48m인 원주형 저류지로서 2천만<sup>3</sup>의 오염물을 저장할 수 있는 공간이다. 이 저류지는 호수 바닥(표고 약 -5.0m) 위로 높이가 10m인 원형 제방으로 쌓여지며 저류지 내부의 바닥의 모래를 파내고 바닥면은 점토 지수벽을 설치하며 제방의 사면의 기울기는 1:4로 하고 호수의 침투수가 원활하게 유입되도록 침투막(filter screen)을 설치한다. 침전지의 내수위는 오염물이 호수로 배출되지 않도록 호수면보다 낮추어 관리되며, 이를 위하여 침전지 내부에 1일간에 500<sup>3</sup>를 양수하는 펌프 시설이 갖추게 된다. 준설 공사가 1995년에 착수되고, 환경 친화적인 준설 기법(Environmental friendly dredging techniques)에 대하여 검토하였다. 침전지에서 굴착되는 토사는 약 14백만<sup>3</sup>로서, 인근 간척지의 자연 공원과 위락 공간의 조성 또는 도로 공사의 기초 지반 재료로 활용된다. 침전지의 동쪽 제방 밖에는 녹지가 조성되며, 남쪽 제방 밖에는 침전물 관리를 위한 정박 시설이 설치되었다. 침전지 준설 공사 기간은 1996년부터 1998년까지 3년간이다. 침전지의 내용적 중에서 표고 6m까지는 준설된 오염 토사로 채워지며, 일부 여유 공간은 다른 사업 지구에서 발생한 폐기물로 채울 예정이다. 침전지를 채운 후에는 깨끗한 토사로 덮고 그 위는 물로 채워서 오염 물질이 공기와 접촉되지 않는 방안이 검토되었다. 침전지 공사가 완료되면 호수 안에 있는 Schokkerhaven과 Ketelhaven 항과 조화를 이루는 관광지로 조성되며, 호수 상류의 Ijssel 강의 하구에도 인공 습지와 초지가 생성될 전망이다. 이곳은 아프리카와 북극을 매년 왕래하는 알락 오리(Gadwall)과 가마우지(Cormorants)등의 철새들에게 서식지로서 라인강 하구의 생태 서식지는 더

육 확장된다. 이와 같이 화란은 전 국토의 60%를 간척 사업으로 개발한 후 농지와 산업 용지로 활용하여 경제적 이익이 최대화되고, 일부는 생태 환경 개선과 시민의 위락 공간으로 조성하여 환경을 가꾸는데 노력하고 있다.

한편, 1997년 12월, 텔레비전 방송에서 화란은 간척사업에 의하여 쌓은 제방을 헐어내는 소위 역간척을 진행 중이라고 방영한 바 있다. 화란의 역간척이 시행된다는 블라우에카머와 밀링어바드(Millingerward) 지구는 내륙의 Utrecht 지방에 있는 네아더(Neder)강변의 저습지로서 Zuiderzee 방조제로부터 내륙으로 90km 정도 내륙에 위치하는 농촌지역으로서 우리나라에서 개발되는 간척지와는 근본적으로 환경적인 특성이 다르다. 이 지역은 강변 제방 내측에 조성된 120ha 정도의 농지로서 강의 수위가 낮은 여름에는 습한 농지의 잉여수를 강으로 양수 배제하여 옥수수 등의 사료 작물을 재배하고, 비가 많은 겨울에는 농지를 침수시키며 영농한다. 이는 기계 동력비와 영농비가 많이 필요하여 생산성이 낮기 때문에 이제는 이곳 뿐만 아니라 여러 곳에서 제방을 헐고 강물을 흘러들도록 하여 인공 습지를 조성하게 되었다. 이러한 경우는 유럽 연합(EC)이 농산물의 과잉 생산을 억제하고 생산 조절을 위하여 농지의 15%를 휴경지로 권장하는 정책의 영향이기도 하다.

### 3. 일본의 간척사업 현황

#### 가. 간척 사업의 배경

일본의 간척은 2차 세계대전 후 식량 증산을 위하여 전개되어, 1960년 이후, 북서해안의 하찌로가다(八郎灣) 간척사업 등으로 쌀 자급을 이루는데 기여하였다. 규슈지방의 이사하야 간척지는, 1987년 착공후 자연보존을 주장하는 의견에 따라서 간척 면적을 축소하고 1997년 4월에 완공하여 3,550ha의 간척지를 조성하게 되었다. 서남 해안에 있는 나카오미(中海) 간척지구는 1968년 착공하여 851ha의 농지를 조성하였으나, 천연의 협만인 나카오미

해안에 인접한 혼조 공구(工區)는 해수가 드나들도록 방조제 12km 중 400m를 막지 않고 있다. 총 경지면적 524만ha 중 간척면적은 27만ha이며 농가당 경지면적은 1.5ha로서 선진국 중 가장 규모가 작고 경제성도 낮다. 일본 정부는 농지의 보존과 효율적인 이용을 위하여 1994년부터 2000년까지 농촌 정비사업과 농업구조개선사업에 7,700억 엔을 투자할 예정이다. 채소와 축산 농산물은 외국에서 수입되며 연간 농산물의 수입액은 580억 달러에 이른다. 이러한 농업보존 정책은 일본의 연간 무역수지가 1500억 달러가 되기 때문에 가능하다. 일본 국회는 1997년 말에 NPO(비영리) 법안을 제정하므로서 자발적인 민간 환경보존 활동을 강화할 방침이다. 영국 대처수상 시절에 시작된 ground work로 알려진 민간의 환경보존 기금 조성 활동이 일본에서도 활발하며, 도요다자동차회사 등의 기업들이 참여하며, 헌납금은 세금이 면제된다.



그림 2.3.3 일본의 간척지 조성 현황

## 나. 비와꼬의 지속가능한 개발 현황

### 1) 비와꼬의 환경 변화

비와꼬의 환경 보존 현황을 파악하기 위하여 농어촌진흥공사의 지원으로 KBS기자단과 함께 1997년 12월에 일본 비와꼬연구소의 나카지마(中島拓男) 박사의 안내로 현장을 방문하게 되었다. 시가현(滋賀縣)의 비와꼬(琵琶湖)는 경제 성장 과정에서 주민들이 대량의 폐기물을 배출하므로 환경오염이 심화되었다. 시가현(滋賀縣)은 1997년 4월에 비와꼬 환경부를 설치하여 환경기본조례에 의한 주민의 환경자치기구도 구성하였다.

비와꼬는 500 만년 전에 생겼다고 하며, 호수면적은  $670.5\text{km}^2$ 이고 저수량이  $275\text{억}\text{m}^3$ 인 호수로서 전체의 물이 교체되는데 19년이 걸린다. 호수 유역 면적은  $3,174\text{km}^2$ 로서 새만금호의 유역  $3,319\text{km}^2$ 보다도 작다. 비와꼬에는 460개의 하천이 흘러들지만, 유일한 방수로인 세다천(瀬田川)의 통수능력이 부족하여 홍수시 침수 피해가 크다. 이곳은 긴끼(近畿)지방 1,400만 명의 식수, 농업용수, 공업용수 등을 제공하지만, 가뭄 시에는 수위가 낮아져서 주민이 식수 곤란을 겪기도 하였다. 이를 극복하기 위하여 홍수시  $800\text{ m}^3/\text{s}$ 를 배제하는 수문(Seta River Submerged weir)을 설치하였다. 호수에 60여 종의 어류, 40종의 패류가 서식하며, 비와 송어, 세다(瀬田)조개 등의 고유종도 많다. 1995년 어획량은 2,441 ton이며, 은어의 양식용 치어는 전국의 약 70%이고 담수 진주 등이 유명하다. 이곳에는 80개의 물놀이장이 있으며 관광객은 연간 3,583 만 명에 이른다. 비와꼬는 가장 좁은 곳에 설치된 길이 1350 m의 교량에 의하여 남호(南湖)와 북호(北湖)로 구분된다.

북호는 빈영양호로 10m를 넘는 투명도를 자랑하였으나, 1955년경부터 호수에 흘러드는 오탁물이 증가되고 1972년경에 악화의 절정에 이르고, 1980년대 후반에 개선경향을 보였다. 남호는 수심이 약 4m이고 북호는 약 43m로서, 북호의 남서쪽이 제일 깨끗하며 이의 동쪽 기슭에서 남호의 서쪽으로

오염이 진행되었다. 북호의 최대 수심이 103.58m로서, 봄과 여름의 따뜻한 수면은 찬물 위에 언치는 수온 성층을 형성한다. 하층에는 용존 산소가 적고 인이 축적되며, 표층에서 초산 질소가 플랑크톤의 이용에 의해 감소된다. COD와 총 질소(TN)는 전체적으로 기준 이하이고, 총인(TP)은 남호에서 환경기준에 달성하지 못하였다. 1987년 이후 4월부터 6월까지 *Urogrena*, *Americana*라는 식물 플랑크톤이 대량 발생하고 물이 적갈색으로 변하고 비린내나는 부영양화 현상이 나타난다. 푸른 김가루인 식물성 플랑크톤이 증식되는 현상이 1983년부터 발생되고 있다.

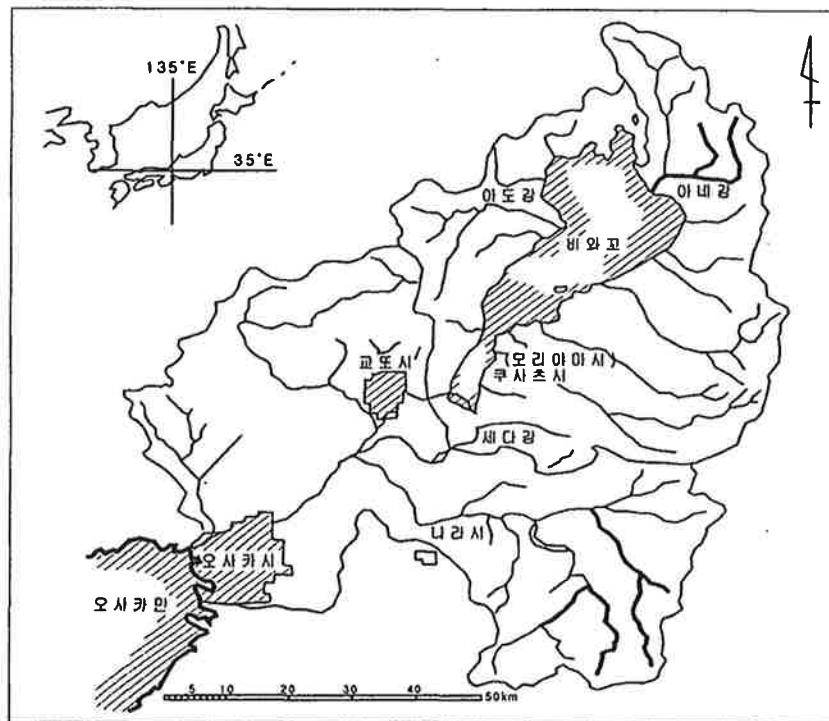


그림 2.3.4 비와고 유역현황



## 2) 환경보존 정책과 시민운동 전개

비와꼬는 호소수질보전특별조치법에 의해 1985년 12월에 지정호소로 정하여진 후, 1986년부터 5년간을 수질보전 기간으로 정하고, 1997년 3월에 비와꼬 종합개발사업에 의하여 1조 9천억엔의 사업비를 투자하여 수질보전 대책을 실시하였다. 1979년 10월에 비와꼬 부영양화 방지조례를 만들어, 질소와 인의 유입을 감소하였다. 생활 오배수 대책의 추진에 관한 미즈스마시조례가 1996년 7월에 시행됨에 따라서, 주민들은 합병처리정화조를 설치하여 찌꺼기를 처리하고 세제는 적당량을 사용하였다. 정부는 수세식 정화조를 설치할 때 80만엔을 보조한다. 1996년, 25개 하천의 BOD를 조사한 결과, 18개 하천이 환경기준을 달성하였다. 최근에 남호·세다(瀬田川)의 하수도가 정비되고 소류지 등을 이용한 오염물 침전지 사업을 하였다. 1996년 3월, 하루 배수량이 10~30㎡인 소규모 오배수사업장에도 배출기준을 적용하는 조례를 개정하였다. 1979년, 부영양화 방지조례로서 인을 포함하는 가정용 합성세제의 사용을 금지하였다. 1995년 10월, 생활 오배수처리율(처리 혜택 인구 비율)은 45.9%(하수도 31.8%, 농촌하수도 3.8%, 합병처리정화조 9.3%)이다.

비와꼬 동부 호안의 수병지구는 모리야마 시역소(守山市役所)에서 지원한 집락배수지구로서 1,230인의 주민이 참여한다. 활성오니법(回分式 活性汚泥法 : JARUS XII型)으로 매일 처리되는 오염량은 333m<sup>3</sup>으로서 유입수의 BOD 수준은 200mg이며 20mg으로 개선되어 유출된다. 총 공사비 9억2천만엔 중 95%를 국가가 부담하고 5%를 주민이 부담하였다. 이 시설은 위탁관리회사에서 자동화 운영되며, 유지관리비는 수돗물 사용량을 기준으로 부과되며, 1가구당 평균 2,200 엔을 납부한다. 한사람이 하루 사용하는 물은 200ℓ이며 거의 같은 양을 배출한다. 남호에서 한사람이 하루 40g의 BOD를 배출하며 농도는 200 mg/ℓ 로서 북호보다 300배도 넘는다. 1977년에 비와꼬에서 발

생된 적조와 부영양화의 원인으로 인을 함유한 합성세제가 지적됨에 따라서, 「비와꼬를 살리자」라는 주부 운동으로 인을 제거한 비누의 개발되고, 1978년 8월 비와꼬를 지키기 위한 가루비누 사용 추진 주민운동」연락회의가 결성되었다. 1988년에는 주민 단체와 지방 행정조직의 불환경 협의회가 구성되고 「비와꼬 비누 에코그린」을 개발하여 1992년 7월부터 판매하였다.

#### 다. 환경 보전 공법의 실행

##### 1) 갈대 숲의 조성

호변의 갈대 군락은 어류와 조류의 번식처이며, 침식을 방지하며 수질을 보전한다. 1953년에 260ha이던 갈대밭은 130ha로 반감됨에 따라서, 「비와꼬 갈대군락의 보전에 관한 조례」가 1992년 7월에 시행되었다. 갈대는 갈대지붕과 문발(簾), 논의 암거 배수의 보조재료, 「담해 갈대 종이」로 제작되어 환경백서용지와 엽서로 사용된다. 일본수자원개발공단(Water Resources Development Public Corporation) 비와꼬 개발총합관리소는 1972년부터 호수 주변에 5ha의 갈대밭을 조성하였다. 갈대는 사질토양과 0.8m 이상의 수심을 선호한다. 그림 2.3.5는 호수에서 갈대 숲으로 내습하는 파도를 감소시키는 방파 공법으로서, 나무 말뚝과, 돌제방, 강시판 등의 파랑 감소 효과를 비교 시험한 결과, 나무 말뚝이 공학적이거나 경제적인 관점에서 가장 우수하였다.

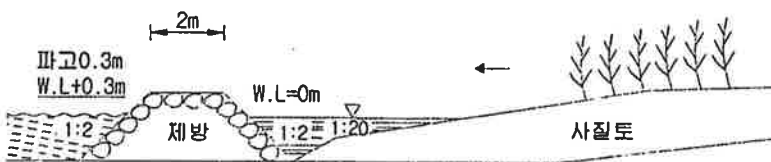
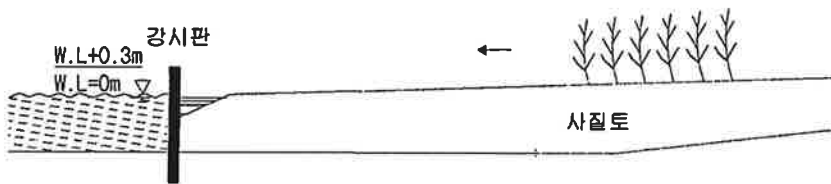
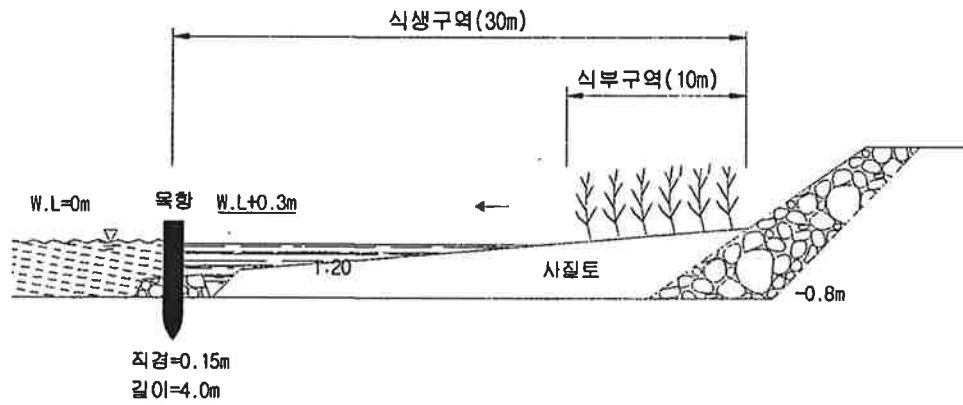


그림 2.3.5 갈대 숲의 조성 공법

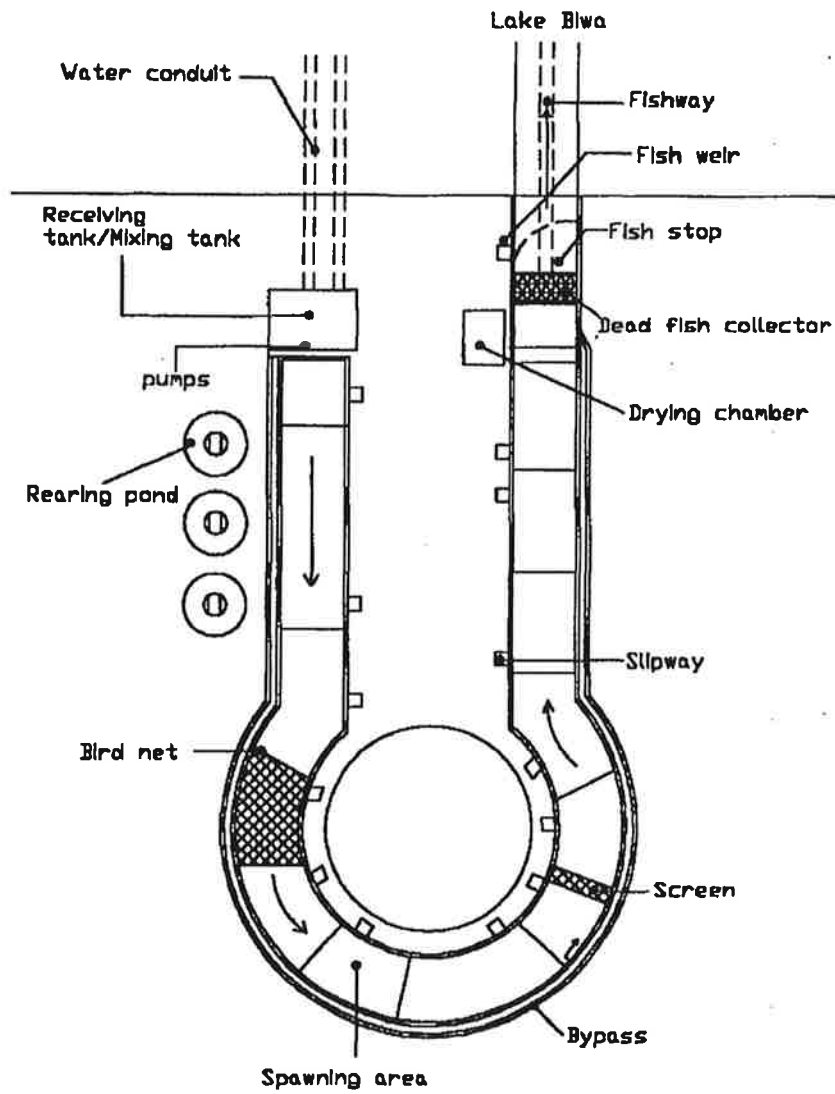


그림 2.3.6 비와코의 어류 인공산란 수로 구성 평면도

## 2) 어류 산란 수로의 조성

비와꼬에서 은어(Ayu)는 가장 중요한 어류로서 연간 어획량은 600 톤 이상이다. 은어는 가을에 산란을 위하여 비와꼬 상류 하천으로 소상하는데 수위가 낮으면 산란에 영향을 준다. 이에 따라서 시가현과 WARDEC는 호수 북쪽의 아도강과 아네강에 인공적인 산란 수로를 구상하고, 은어의 산란 조건인 수온, 수심, 유속, 성어의 밀도, 포획 어종에 대응하여 인공수로가 그림 2.3.6과 같이 설치되었다. Takuro Kegai(1994)의 연구 결과, 인공수로에서 산란되는 알의 수는  $1\text{m}^2$  당 1백만 개로서 자연적인 산란량의 10배이며, 부화율은 90%로서 자연수로의 부화율 60%보다 크다. 자연수로에서 30%의 알이 포획되는데 비하여 인공 수로의 간단한 수리구조로서 피해를 막는다. 야간 조명시설에 의하여 산란 조건을 조정하여 한 계절에 세 번을 산란할 수 있다. 인공수로 유입부의 호수 수심은 10 - 20m이며 수온은 섭씨 18도 정도이다. 유입수로의 유속은 0.5 m/s, 수심은 0.2m 기울기는 1/700이며, 산란장의 자갈 두께는 0.2m, 직경은 5- 25mm이다. 포획성 어류의 침투 방지막(fish stop)을수로 끝에 설치하고, 고기의 성장을 촉진하기 위하여 12개의 전등이 양식장(rearing pond)에 설치되었다. 산란 후 죽은 고기의 수거 장치도 설치되었다. 인공수로를 통하여 유하된 은어는 전체 은어의 26%를 차지한다. 이와 같은 정부의 강력한 법적 규제와 수질 정화시설의 설치 지원 및 주민의 호응으로 양호한 수질을 유지하며, 홍수 피해도 격감되었으며, 호수에서 생성되는 275억 $\text{m}^3$ 의 수자원은 오사카와 고베 지역의 14백만 주민의 생활 용수로 이용하게되었다.

## 라. 나가라가와 하구언의 어도

나고야의 남쪽 해안에 위치한 나가라가와(長郎川)하구언도 홍수 방지와 해일 피해 방지(파도 높이 : 3.9m) 및 용수 확보( $22.5 \text{ m}^3/\text{s}$ )를 목적으로

설치되어 67만 명의 주민에게 혜택을 준다. 이 곳에는 바다송어(Ayu)등의 소상을 돕기 위하여 자연 하천식, 계단식, 갑문식 어도 등을 다양하게 부설하였다. 자연하천식 어도는 자연 하천과 유사한 흐름을 유지하기 위하여 바닥에 자갈을 깔고 양쪽 제방에는 갈대 등을 심었으며, 중간에는 “기역자” 자형의 콘크리트 블록과 갈대 숲을 설치하여 새들의 공격을 피하고 휴식하는 공간도 있다. 어도의 상류에 설치된 고무댐은 바다쪽의 조석과 담수호내의 수위 차이에 따라서 물고기가 원활하게 소상되도록 높이를 조절한다.



그림 2.3.7 나가라가와의 자연 하천식 어도 현황

하천식 어도는 이 곳의 조위차이가 3m 정도로 적기 때문에 설치 가능하다. 갑문식 어도는 바다 쪽 조위가 높을 때 이용되며 일부 물고기는 갑실 내에

서 머무르며 담수호 쪽으로 소상하길 꺼리는 경우가 있기 때문에 소음을 발생하여 상류로 쫓기도 한다. 계단식 어도의 중간부에는 관측실을 설치하여 어류의 소상을 확인하고 방문객들에게도 개방되어 간척사업의 친화와 자연 보존을 위한 교육의 장소로 이용된다. 어도에서 어류의 이동이 많은 봄철에는 11 m<sup>3</sup>/s의 담수를 방류한다. 대부분의 어종은 자연 하천식의 어도를 이용하며, 초봄의 기온이 낮은 때는 깊은 수심을 유지하는 그림 2.3.8과 같이 갑문식 어도를 이용한다.

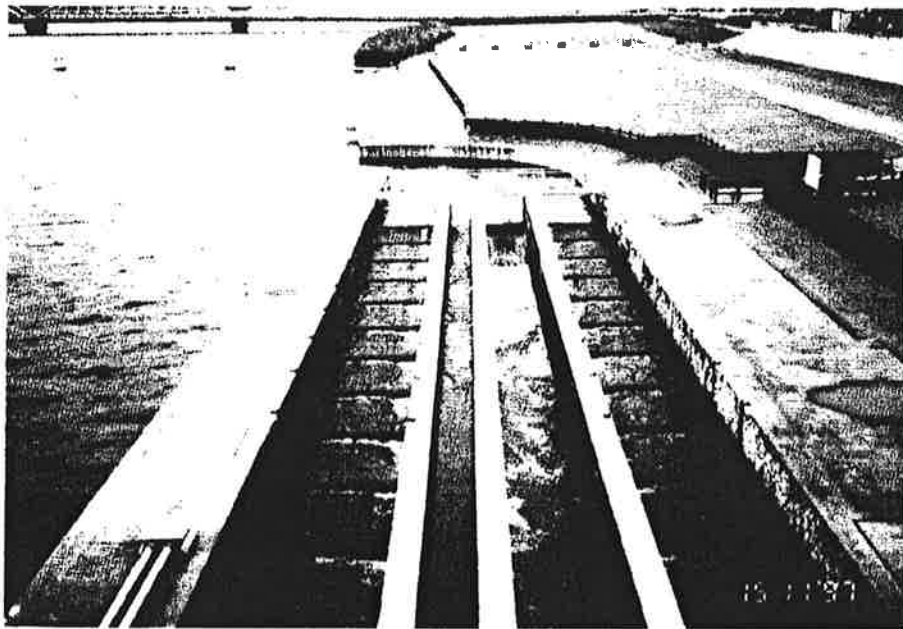


그림 2.3.8 나가라가와 하구둑 수로 계단식 어도

## 제 3장 간척지 친수 환경 조성 시설의 개발

### 제 1절 서론

최근 환경에 대한 인식이 고조됨에 따라서 국토개발사업에서 사업비는 좀 중대하더라도 자연 환경을 보존하고 아름다운 국토보전시설을 만들도록 하는 요구가 점점 커지고 있다. 간척사업의 시행으로 감소되는 갯벌을 인공적으로 조성하고 담수호 수질과 연안의 어류 생태를 더욱 건강하게 만드는 공법을 연구 개발하여 시행한다면, 간척사업에 대한 인식은 좀더 긍정적으로 개선되고 아름답고 친숙한 해안으로 창조될 수 있다. 이에 따라서, 간척지 연안의 환경 친화적인 가치를 높이기 위하여 방조제와 담수호 연안에 부대시설을 개발하는 방안이 연구되었다. 이는 강화도 연안의 역사적인 간척지와 아산만 등 근래에 조성된 지역 및 화란과 일본의 선진 간척지 연안에 설치된 시설 현장을 답사한 결과를 토대로 검토되었다.

우선, 간척지 수질 환경 보존을 위하여 담수호에 유입되는 오염물을 효과적으로 처리하는 침전지와 산화수로를 수리시험을 통하여 개발하였다. 이는 화란의 Ketelmeer 호수에 있는 원주형의 침전지 시설과 경주에 있는 포석정의 물길 형태를 복합하여 구상한 시설로서 담수호 입구에 침강되는 중금속 오염물을 준설하여 투기한 후, 상층의 여유 공간은 담수호에서 방류되는 용수를 침전지에서 부유물질들을 침강 처리한 후 이의 외곽을 따라서 설치한 접촉산화수로에서 다시 정화하는 시설이다.

또한, 간척지 연안에서 담수호로 소상하는 소하성 어류의 이동을 원활히 하기 위한 어도에 관한 연구는 우리나라 해안에 서식하는 어류의 이동특성을 조사하고 서해안의 심한 조석 간만의 차이를 극복할 수 있는 새로운 형태의 어도를 개발하였다. 이를 위하여 지금까지 우리나라의 방조



제에서 활용되어온 계단식 어도를 조석 간만의 차이가 큰 서해안에서 적용할 때 야기되는 문제점과 이를 극복하기 위한 갑문식 어도의 효율성을 분석하였다. 간척 개발지역이 보유하던 천연적인 가치를 부분적으로나마 회복하기 위하여 자연 보존지역(nature reserves)의 조성 방향에 관하여, 전라남도 해남지구와 영암호 간척지의 야생의 생태 서식지와 인공 습지 등을 조사하고, 미국 등에서 개발한 자연보존지역 조성 기법에 관한 적용방향이 검토되었다. 방조제 물막이 공사 중 방조제 외곽 연안에 수제공(groin) 등 보조 방조제를 설치하여 물막이 개방구간으로 유입되는 조수 흐름에 의하여 방조제 외곽의 바닥에 세굴되지 않도록하고, 방조제 공사 완료 후에는 새로운 갯벌을 창출하는데 기여토록 보조방조제 시설이 수리모형시험을 통하여 개발되었다. 본 연구에서 개발된 수리시설은 새만금 방조제 물막이 공사와 영산강 하구둑의 어도 설치등에 이미 활용되거나, 활용되도록 협의 중에 있다.

## 제 2절 담수호 오염물 침전지와 산화수로

### 1. 담수호의 오염물 침전지

#### 가. 연구의 필요성

근래 연안의 대규모 담수호 배후지는 산업발달과 인구의 증가로 산업폐수 및 생활오수의 부하량이 나날이 증가하고 있다. 상류지역의 오염부하는 하천을 통해 비교적 유속이 느린 호소 만입부에 많이 침전·퇴적된다.

호소 내부의 수질을 개선하기 위해서는 하수처리장을 설치하여 상류의 오염부하량을 저감하는 방법이 효과적이다. 그러나 오염물질이 많이 퇴적된 호소의 경우에는 상류의 오염원 뿐만 아니라 호소내부의 오염된 퇴적층이

또다른 오염원이 될 수 있다. 호소 퇴적물은 질소(N), 인(P) 등 다량의 영양염류와 유기성 오염물질, 중금속 등을 함유하고 있다. 이러한 오염된 퇴적물은 유속과 파랑에 의한 전단력, 또는 수온차이에 의한 대류현상에 의하여 수중으로 다시 떠오르게 된다. 떠오른 퇴적물은 물과의 접촉면적이 커지면서 호소 저층에 퇴적돼 있을 때보다 더많은 산소를 소비하고 궁극적으로 수질악화를 초래한다. 따라서 호소 수질의 근본적인 개선을 위해서는 상류 오염부하량 저감과 더불어 오염퇴적층의 제거도 병행되어야 한다.

본 연구에서는 호소퇴적층의 제거를 위해 준설을 실시하고 준설된 퇴적물을 침전지형 매립지에 처분하는 공법을 호소 수질개선을 위한 구체적인 방법으로 제시하였다.

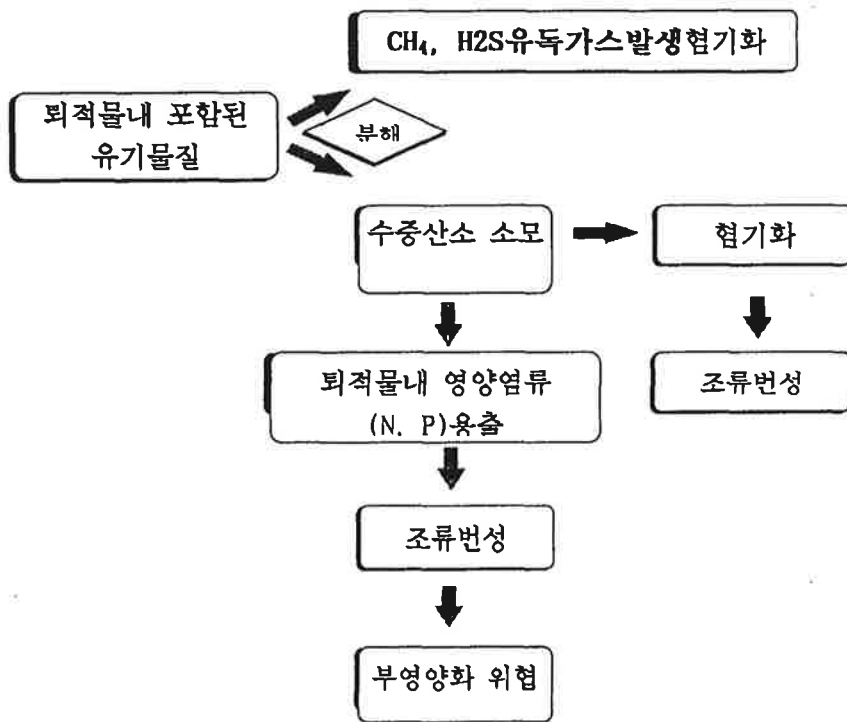


그림 3.2.1 수중에서 유기성 퇴적물의 거동

## 나. 준설퇴적물의 처리현황 및 문제점

### 1) 처리현황

현재 준설퇴적물은 일반 사업장 폐기물로 분류되어 유용토로 재활용되거나 육상매립장 또는 해상에 투기처리 되고 있다.

### 2) 문제점

현재 준설퇴적물은 퇴적물내 유해물질이 포함되어 있어도 추가적인 처리없이 폐기물 관리법의 일반사업장 폐기물 수집·운반·보관·처리 기준 및 방법에 따라 처분되고 있다. 이러한 일반적인 육상 매립의 경우 준설퇴적물에 함유된 유해물질이 강우 및 매립지 노후화 등에 의해 침출되어 상수원이나 부근 지하수맥에 2차적인 오염원으로 작용한다.

## 다. 기존 퇴적물 처리 공법

기존 호소내 퇴적물 처리공법은 크게 현장처리법과 준설후 처리공법으로 분류할 수 있다.

현장처리 공법에는 자연정화, 표면피복, 중성화(Neutralization), 고형화(Solidification), 봉입 등이 있고, 준설후 처리공법에는 개방수계에 처리, 재활용, 격리처분, 매립 등이 있다. 자연정화 처리법은 자연의 정화능력에 전적으로 의존한 처리법으로 미국환경청에서 가장 기본적인 처리법으로 간주하고 있다. 그러나 자연의 정화능력을 초과한 오염상태에서는 적용하기 어렵다. 표면피복은 오염물질의 퇴적이 진행된 지역에 모래, 자갈, 인공매트 등의 피복재를 이용하여 오염물질을 피복처리하는 방법이다. 표면피복의 장점은 일단 시공 후 처리효과가 빠르다는 점이다. 그러나 수중에서 하는 작업으로 비용이 많이 들고 오염된 부분만 정확하게 피복하기가 어려운 단점이 있다. 중성화는 화학물질을 주입하여 오염된 퇴적층이 더 이상 수중과 반응하지 못하도록 중성화 시키는 방법이다. 중성화 공법은 퇴적층의 화학

적 성상을 변화시켜 빠른시간내에 효과를 볼 수 있다는 장점이 있다. 그러나 약품 살포에 따른 비용이 많이 소요되고, 인위적인 약품 주입으로 수중의 생지화학적 반응에 의한 2차적인 오염우려가 있다. 고형화는 시멘트 등으로 퇴적물을 고형화 시켜 더이상 반응이 일어나지 않도록 처리하는 방법이다. 이 방법은 한번 시공으로 영구적인 그러나 수중에서 고형화 시킬수 있는 재료가 한정돼 있고, 퇴적층의 고형화에 의한 생태계 파괴가 우려된다. 준설후 처리 중 개방수계에 투기는 준설된 퇴적물을 해역에 투기하여 희석 및 정화 처리하는 방법이다. 해역에 투기하는 방법은 비용이 비교적 저렴하여 널리 사용되어왔으나 인근국가와 연안해역에 대한 이해관계 대립시 분쟁을 야기할 수 있으며, 국부적인 해양오염을 일으키는 단점이 있다. 재활용 처리법은 준설된 퇴적물을 제방 및 고수부지 매립시 성토재로 활용하거나 퇴적물내 함유된 유기성분을 퇴비화 하여 농경지에 시비하는 방법이다. 그러나 성토재로 활용시 유출수 등에 의한 인근수역의 오염이 우려되고, 비료로 재활용 할 경우에는 퇴적물내 유해물질이 작물의 성장을 저해할 가능성이 있다. 또한 작물에 농축된 중금속 성분이나 인체 유독성물질들은 인간에게 직접적인 위해를 가할 수 있으므로 경제성 및 안정성에 문제가 있다. 격리처분장 투기법은 육상 및 해역에 주위환경과 차단된 투기장을 만들어 준설된 퇴적물을 처분하는 방법이다. 격리처분장 투기의 장점은 하천 및 호소 주변의 유희부지 활용이 비교적 용이하고, 퇴적물의 영구적인 분리 처리가 가능하다는 점이다. 또한 퇴적물의 성상에 따른 추가적인 처리가 가능하다. 그러나 영구적인 분리처리장을 인공적으로 건설하기 위해서는 대규모 토목공사가 선행되어야 하고, 지하수위나 지반 등 주변환경에 대한 정밀조사가 선행되어야한다. 매립처리 공법은 일반 매립장에 준설된 오염퇴적물을 처분하는 방법이다. 운반비외에는 추가적인 경비가 소요되지 않기 때문에 내륙의 호소 준설시 많이 사용하는 공법이다. 그러나 매립지 침출수에 의한

주변의 환경오염이 우려되고, 대규모 준설시 가용 매립장 확보가 어렵다. 또한 유해물질을 함유한 퇴적물의 경우 향후 새로운 규제 적용시 일반 매립장 처분이 어렵다.

#### 라. 침전지형 매립지

본 연구에서는 호소내 오염된 퇴적물을 준설하여 처분하는 시설로 침전지형 매립지를 설계하여 제안하였다. 앞절에서 설명하였듯이 침전지형 매립지는 퇴적된 오염물질을 준설하여 호안에 조성한 침전지에 최종적으로 처분하는 공법이다. 이러한 침전지형 매립지공법은 화란의 Ketelmeer 호수에서 그 적용성을 찾아볼 수 있다. 이는 오염물질을 담수호에서 격리하여 저류하는 최적 방안(IMC Condition : Insulation Manageability and Control)으로서, 정화 처리 후 오염물의 저류 두께를 크게하고 접측면은 최소화하는 원형 침전지이다. 화란의 침전지는 호수 가운데 설치되었으나, 공사 중 준설선 등 시공장비들이 대부분 수중에서 운행되어야 하므로 공사비가 고액 소요되고, 완공 후에도 유지관리를 위하여 선박을 이용해서 접근해야 하는 어려움이 있다. 그림 3.2.2는 담수호 호변의 침전지 조성계획도이고, 그림 3.2.3 화란 Ketelmeer 호수에 시공중인 침전지형 매립지의 모습이다.

침전지의 규모는 담수호 내에 오염된 면적과 두께에 의하여 다음과 같이 그 용량을 정할 수 있다.

$$V_d = V_{is} * f_b * f_c * f_g * f_u \quad 3.2.1$$

여기서  $V_d$  = 침전지 소요 용적,  $V_{is}$  = 오염물의 용적,  $f_b$  = 운송 과정에서 증가하는 체적 증가율(약1.8),  $f_c$  = 침전지에 장기간 침전 압밀된 후의 체적 변화율(20년 정도 경과 후, 약 0.45),  $f_g$  = 침전지 내에서 가스 발생에

의한 체적 변화율 (약1.1),  $f_u$  = 기타 불확실한 요인에 의한 체적 증가율 (약 1.25)이다. 담수호 만수면적은 현재 공사중인 새만금호가 97㎢으로 가장 크며, 시화호가 56㎢, 영산호가 23㎢이다. 공장지대에 인접한 담수호는 호수 상류의 하천 유입부에 구리, 납, 카드뮴, 망간, 아연 등의 중금속을 함유한 오염물의 퇴적층이 약 0.50m 정도 형성된 경우도 있다.

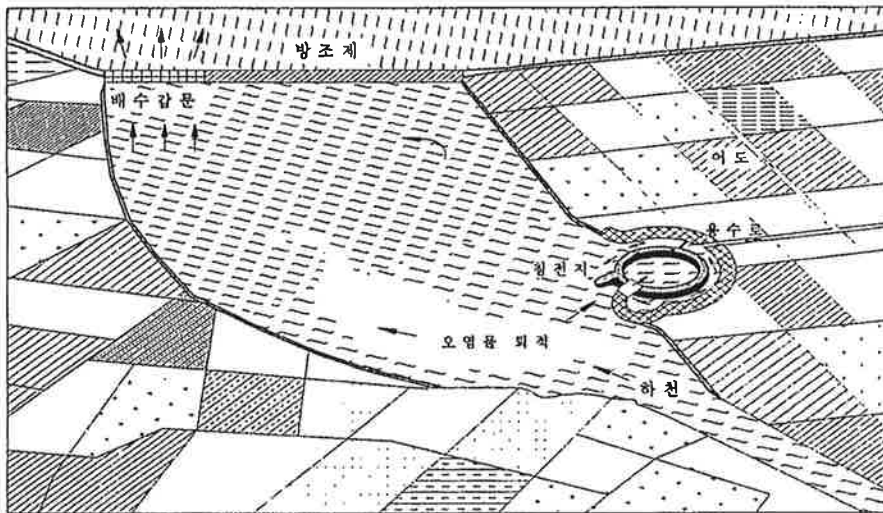


그림 3.2.2 담수호 호변의 침전지조성 계획도

이들 담수호에서 오염물의 퇴적면을 10㎢로 가정하고, 오염층의 두께를 0.3m로 가정하면 오염물의 용적( $V_{is}$ )은 300,000 $m^3$ 이다. 이에 따른 오염물의 침전에 필요한 용적은 식(5)에 의하여 다음과 같이 산정 된다.

$$V_d = 300,000 * 1.8 * 0.45 * 1.25 = 3,341,000m^3$$

여기서, 침전지의 바닥 직경을 460m로 하고 침전지 제방 높이를 23m, 사면 기울기를 1:4로 정하면, 침전지 제방 상단의 직경은 644m이며 내용적은

5,501,000m<sup>3</sup> 이다. 침전지의 유효수심을 18m로 정하면, 유효 내용적은 4,000,000m<sup>3</sup>이므로 오염물 침전에 필요한 용량 3,341,000m<sup>3</sup> 이외의 651,000m<sup>3</sup>은 타 지역에서 발생하는 오염물을 운송하여 저류시킬 수 있다. 이 저류지는 호수 바닥(표고 약-5.0m)위로 높이가 8m인 원형 제방으로 구상되며, 저류지 바닥의 흙을 파내고 바닥면은 점토 지수벽을 설치하고 제방 주변은 침투수가 원활하게 유입되도록 침투막(filter screen)을 설치할 수 있다. 침전지에 처분된 퇴적오니는 인공매트 또는 점토질 재료 등의 차수재에 의해 영구히 차단 격리된다.

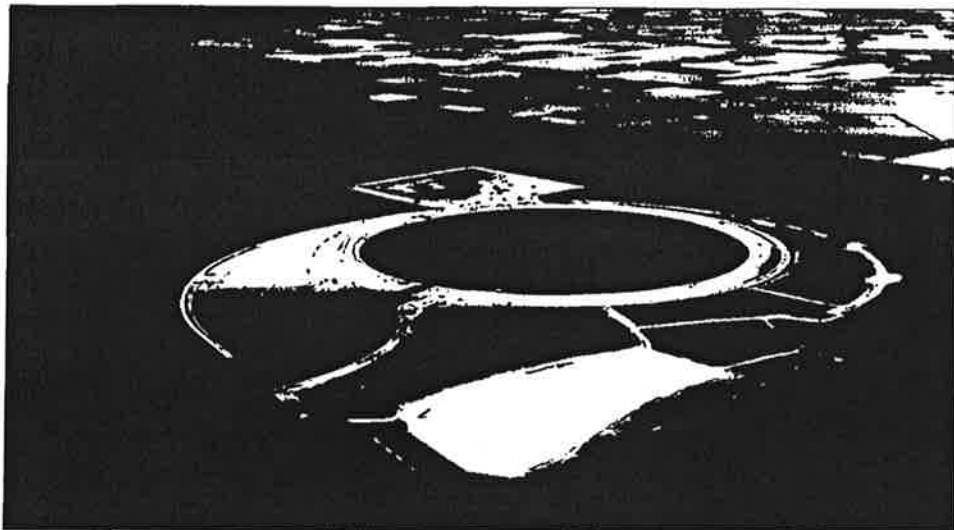


그림 3.2.3 화란 Ketelmeer 호수에 시공중인 침전지형 매립지

이러한 침전지의 설치는 용수량을 미리 저류한후 필요한 수량만큼 방류함으로써 양수시설의 운전효율을 높이는데에도 기여할 수 있다. 호수 바닥의 준설은 환경친화적인 준설기법(Environmental friendly dredging techniques)에 대하여 다양하게 검토될 수 있다. 대부분의 하구를 체질하여 조성한 담

수호의 경우 규모가 크기 때문에 정밀한 깊이로 준설할 수 있는 장비가 필요하다. 예컨대, 오염된 호수 면적이 1,000에서 1cm과다하게 준설한다면 100,000m<sup>3</sup>의 운송경비와 저장공간이 낭비되기 때문이다. 침전지 건설중 내부의 토사를 파내기 위하여 화란에서는 Modified Auger Dredger, Environmental Discutter, Scoop dredger 등의 준설공사 장비가 운영된 바 있다. 침전지에서 굴착되는 토사는 침전지 제방과 수로공사, 인근 간척지의 자연보존공간(Nature reserves), 위락공간의 조성 또는 도로 공사의 기초지반 재료로 활용될 수 있다.

침전지 완공 후, 오염물이 호수로 배출되지 않도록 침전지의 내수위는 호수 수면보다 낮도록 유지하여야 한다. 침전지의 내수면적 326,000m<sup>2</sup>에, 하루 300mm의 비가 오면 약 97,000m<sup>3</sup>의 잉여 수량이 생기지만 침전지 밖의 담수호 수위는 상류 하천의 유입량에 의하여 설치되는 양수시설을 활용할 수 있다. 침전지가 채워진 후에는 깨끗한 토사를 덮고 그 위에는 물로 다시 채워서 오염된 물질이 공기와 접촉되지 않도록 하면 쾌적한 환경을 유지할 수 있으며, 침전지 주변은 관광지로서도 각광을 받을 수 있다. 대략 추정하면 침전지형 매립지를 시공하는데는 약3년정도가 소요될 것으로 판단된다.

1980년대부터 미국, 일본 등의 선진국에서도 준설에 의한 호소정화 노력이 경주되어왔다. 표 3.2.1은 각국의 준설사례를 나타내고 있다. 이들 호소의 준설을 통한 개선 사항을 살펴보면 영양염류의 순환이 감소되고, 수화 현상 미발생, 질소, 인 등의 영양염류 증가 억제, BOD 저감 등의 수질 개선 효과를 보고하고 있다.



표 3.2.1 외국의 준설을 통한 수질개선 사례

국가	미국			일본		
	호소명	지역	준설방법	호소명	지역	준설방법
	Liberty	Vancouver	Gilbralar	諏訪湖	中海	和歌川
	워싱턴	남서부	캘리포니아	長野縣	松江市	-
	Booster pump	바지선 수송선	Pneuma pump	pump	pump	-
준설시기	1981	1982	1981	1979~1983	1987	1969~1973 1984
수질변화	영양염류 순환감소	조류감소 SS감소	수화현상 미발생 DO 증가 Hg, N, P 증가 없음	수질개선	수질개선	BOD대폭 개선
준설면적 (ha)	20	-	-	373.6	17	-
준설량 (m <sup>3</sup> )	-	6,500,000	153,000	2,117,600	400,000	-
총예산 (\$,1000₩)	-	-	1,728,000	3,850,000	-	-
준설토 처리	농경지에 처리	-	투기장 처리	매립	-	-

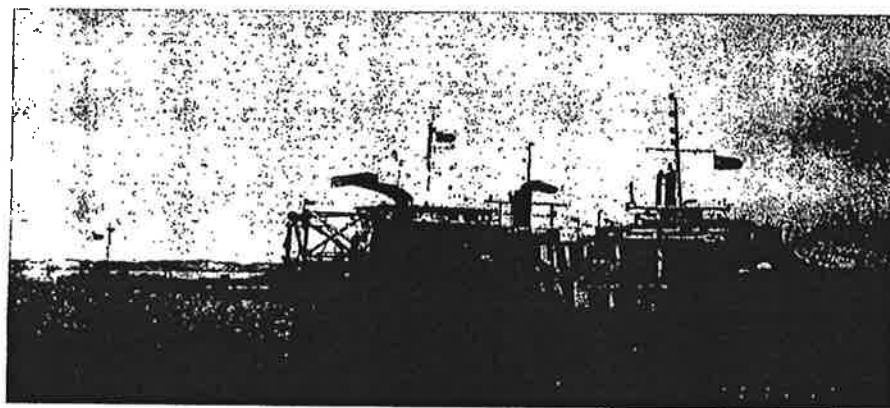


그림 3.2.4 화란 Ketelmeer 호수의 침전지 공사구역의 준설 현황('97.11)

## 2. 자갈접촉 산화공법

### 가. 개론

앞절에 기술하였듯이 오염된 퇴적층의 제거를 통한 호소내 수질개선과 아울러 호소로 유입되는 하천의 오염부하량을 저감시키는 것도 중요하다.

상류 오염부하량 저감을 위해 많은 수처리공정이 개발되었고, 그 적용성을 검증받고 있다. 본 연구에서는 상류 하천의 오염부하량 저감을 위해 자갈여재를 사용한 접촉산화수로 공정을 제안하였다.

이미 다양한 형태의 접촉산화 공정이 현장에 적용되어왔고, 또한 접촉여재의 효율 향상을 위해 많은 여재가 개발되어왔다. 근래에는 자갈여재의 공급 부족과 자연환경보존 측면에서 인공적인 대체여재를 많이 개발하고있다.

기존의 유기성 오염물질 제거뿐만 아니라 질소나 중금속 등의 추가적인 처리가 가능하도록 고효율 여재가 개발되고 있다.

그러나 일부 공정은 접촉여재가 지하에 매설되어 있어 여재의 폐색 발생시 교체가 어렵고 홍수시 범람에 의한 여재폐색에 대비해 고무보나 취수구와 같은 추가적인 시설을 필요로 하게 됐다. 이에 본 연구에서는 지하에 위치한 접촉여재 구간을 지상으로 옮겨서 여재교체가 용이하고 식생 정화처리와 같은 자연정화공정과 연계처리가 가능하도록 설계하고 그 효율을 실험하였다.

접촉산화공법은 회전원판법이나 살수여상공법 등과 같이 생물막을 이용하여 유기성 폐수를 처리하는 부착 성장식 공정의 하나이다. 접촉산화공정은 폭기조내에 접촉여재를 충전하여 폐수를 매체표면에 생성된 생물막과 순환 접촉시키면서 폐수중의 유기물을 미생물의 분해작용을 이용하여 제거시키는 공정이다. 이러한 공정은 기존 활성슬러지공정의 단점인 반응조내 미생물군을 안정하게 유지하기 힘들고 고액분리가 어려운 점을 보완하기 위하여 개발되었다. 충전여재로는 자갈, 파쇄석, 페콘크리트, 페타이어, 플라스틱여

재 등을 사용하고 있다. 기존의 활성슬러지 공정은 부하변동, 슬러지 및 송기량의 조절에 전문적인 관리를 요하며, 슬러지 벌킹 등의 문제점을 갖고 있고, 살수여상공정은 동결문제 및 파리번식 등의 문제점을 지니고 있다. 접촉산화공법은 이들의 장점을 살려 접촉재 표면에 형성된 생물막을 이용하여 오염물질을 분해·정화 시킨다.

표 3.2.2 접촉산화공법의 장단점

구분	내용
장점	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 유지관리가 용이하다.</li> <li>- 조내에 슬러지 보유량이 크고 생물상이 다양하다.</li> <li>- 분해속도가 낮은 기질의 제거에 효과적이다.</li> <li>- 부하와 수량변동에 대하여 완충능력이 있다.</li> <li>- 난분해성 물질 및 유해물질에 대한 내성이 높다.</li> <li>- 수온의 변동에 강하다.</li> <li>- 슬러지의 반송이 필요없고, 슬러지의 발생량이 적다.</li> <li>- 소규모 시설에 적합하다.</li> <li>- 고농도폐수 이차처리수의 후처리로도 이용될 수 있다.</li> </ul>
단점	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 반응조내 여재를 균일하게 폭기 교반하기가 어렵다.</li> <li>- 폭기비용이 비교적 많이 든다.</li> <li>- 여재에 생성되는 생물량은 부하조건에 의하여 결정된다.</li> <li>- 고부하시 여재의 폐쇄 위험이 크기 때문에 부하조건에 한계가있다.</li> <li>-초기 건설비가 높다.</li> </ul>

나. 접촉산화수로의 설계

산화수로는 오염물과 접촉면을 증가시켜서 오염 농도를 감소하는 접촉 산화법이 적용될 수 있다. 여기서, 접촉 여재는 우선, 자갈을 선정하였으나,

플라스틱, 타이어, 콘크리트 벽돌 등 건축 폐자재 등이 사용될 수 있다.

이 방법은 담수호에서 공급되는 물의 오염 부하가 클 때, 자갈 층 속으로 물이 느린 상태로 스며들게 하여 오염 물질과 자갈의 접촉 면적과 접촉시간을 증대하여 침전시키고, 미생물을 번성시키고 이와 흡착을 통한 산화 분해를 도모하고, 수압에 의한 자연적인 슬러지 양을 감소하는 방안이다. 농업 용수의 수질은 BOD가 20 mg/l 이하이고 용존 산소가 5 mg/l 정도이면 인위적인 산소 공급 장치가 없더라도 호기성 미생물의 번식이 가능하다. 그러나, 오염 수준이 높으면 인위적인 폭기 장치를 설치하여야 한다. 이 방법은 BOD와 SS를 제거하는데 효과적이다. 산화수로의 수심은 1.2m, 1차침전 체류시간 60분 접촉여재 체류시간 90분, 유하 거리는 20m 정도가 적합한 것으로 알려져 있다. 따라서, 수로에서 자갈 층을 통과하는 유속은 0.004m/s 이하로 유지하는 것이 바람직하다. 한편, 접촉 산화 수로를 통과하는 동안, 미생물에 의한 산화 분해의 과정에서 대부분의 용존 산소가 소모되기 때문에 이를 보충할 수 있는 시설이 필요하다. 수리시험 결과, 자갈을 쌓아서 만든 빠른 흐름의 여울 수로 또는 펌프시설에 의한 폭기 장치가 효과적이다. 이 공법은 안양시 학의천과 경남 창원시의 가음정천 등에 설치되어 있다. 산화수로에서 자갈 층을 통과하는 흐름 속도와 손실 수두의 변화는 층류 흐름으로 가정하여 Darcy의 공식과 Leps (1973)의 식을 적용할 수 있다.

$$v = k i \quad (3.2.2)$$

$$i = K v^2 / gdn^2 \quad (3.2.3)$$

여기서,  $v$ 는 유속,  $k$ 는 투수계수,  $i$ 는 에너지 손실 수두의 기울기,  $g$ 는 중력 가속도,  $d$ 는 자갈의 평균 직경,  $n$ 는 공극률이다.  $K$ 는 마찰 영향 계수로써 Reynolds수의 영향을 받으며 이는 다음 식으로 계산된다.

$$Re = v d / n \nu \quad (3.2.4)$$

여기서,  $\nu$ 는 시험수의 동점성 계수이다. 모형에서 유속은 0.002 m/s, 직경  $d$ 는 0.1m, 공극율  $n$ 은 0.4로 가정하고, 동점성계수  $\nu$ 를  $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 가정하면 모형의 Reynolds수는 44이다. David Stevenson(1979)에 의하면, Reynolds수가 44 정도에서, 마찰 영향 계수  $K$ 는 50정도이다. 식 3.2.2에 의하여 에너지 손실 수두의 기울기는 1/1,270 정도이다. 산화수로를 통과한 하류 구간은 산소 공급을 높이기 위하여 약 1 m/s의 빠른 유속과 여울을 발생시키도록 수로 기울기를 1/500로 증대시키고 수로 폭을 50% 줄이며, 수로의 침식을 막기 위하여 수로 표면은 두께 0.3m, 직경 20mm 자갈로 설치한다. 산화 수로의 하류에 폭기 장치를 설치하여 산소를 공급하거나 이곳에 갈대 등의 초생 수로를 조성하여 은어 등, 담수호에 서식하는 어류들에게 좋은 산란장소를 제공하게 할 수 있다.

표 3.2.3 자갈접촉산화수로 설계변수

구분	설계변수	비고
유입유량	200m <sup>3</sup> /day	
1차침전지 체류시간	60min	
자갈접촉산화수로 체류시간	80min	
여재공극률	30%	

#### 다. 처리효율 분석

오염물의 침전과 자갈접촉산화수로의 처리효율 분석을 위해 안산시에 있는 농어촌진흥공사농어촌연구원 배수로 옆에 일처리 200톤 규모의 자갈접촉산화수로 모형을 제작하였다. 모형의 개괄적인 모습은 그림 3.2.5 와 같다. 설계된 접촉산화수로의 처리효율을 분석하기 위해 유량조정조와 자갈접촉

산화수로 전반부 및 후반부에 각각 측점을 설치하고 수질분석을 시행하였다. 모형에서의 측점은 그림 3.2.6에 나타내었다.

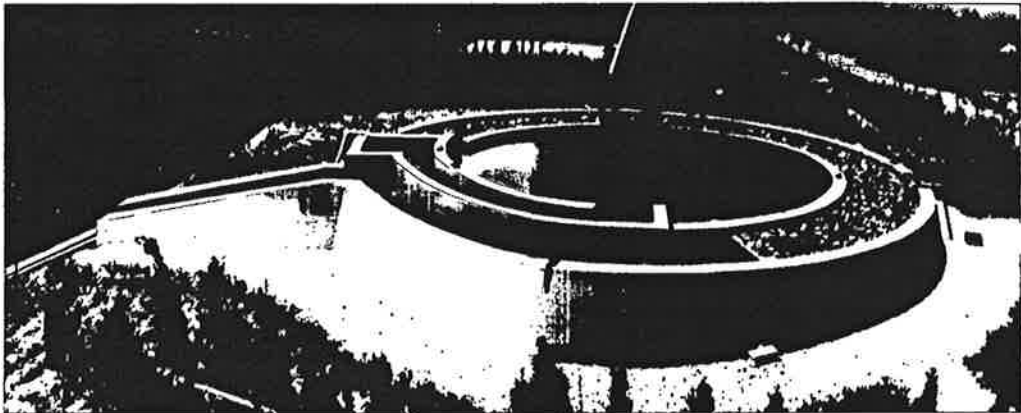


그림 3.2.5 침전지와 자갈접촉산화수로 모형 실험

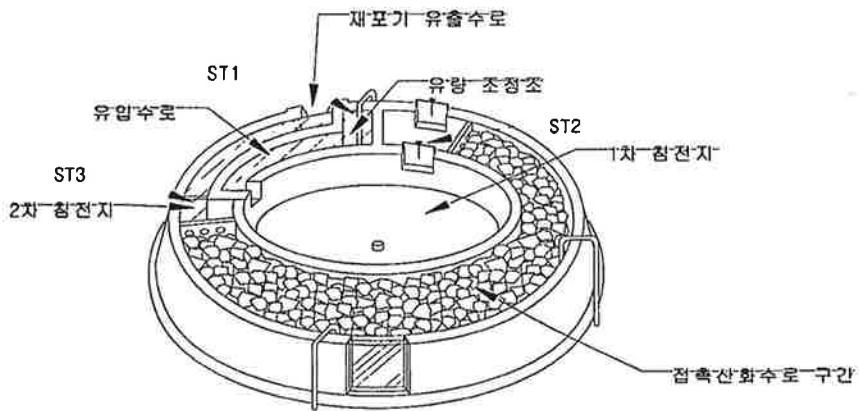


그림 3.2.6 접촉산화수로 모형의 측점

유기성 오염물질의 처리효율을 분석하기 위해서는 COD를 선정하여 그 효율을 분석하였다. 또한 호소 부영양화의 원인이 되는 영양염류의 처리효율을 분석하기 위해서 T-N, T-P를 선정하여 분석하였고, 오염원의 시간에 따른 성장변화를 분석하기 위해 NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P를 분석하였다. 수질 항목의 측정 방법은 실내분석항목은 공정시험방법에 따라 시행하였고, 현장 수질측정항목은 WTW F/SET-3 멀티측정기를 사용하였다. 항목별 측정방법은 다음과 같다.

#### <수질항목별 분석방법>

- ◇수온 : WTW F/SET-3 현장 수질측정장비의 멀티센서를 사용하여 현장 측정
- ◇pH : WTW F/SET-3 현장 수질측정장비의 멀티센서를 사용하여 현장 측정.
- ◇EC : WTW F/SET-3 현장 수질측정장비의 멀티센서를 사용하여 현장 측정.
- ◇DO : WTW F/SET-3 현장 수질측정장비의 멀티센서를 사용하여 현장 측정.
- ◇COD(화학적산소요구량) : 산성 및 알칼리성 KMnO<sub>4</sub> 산화법으로 실내분석
- ◇SS(부유물질) : 유리섬유여지(GF/C)로 여과후 중량법에 의해 산출
- ◇NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N(질산성질소, 아질산성질소, 암모니아성질소) : 흡광광도법으로 실내분석
- ◇T-P, PO<sub>4</sub>-P(총인, 인산염인) : 흡광광도법으로 실내분석
- ◇TKN(총질소) : Kjiedahl-N 분해법으로 실내분석

#### 라. 시험결과

모형의 수질시험 분석은 3개월간의 미생물식중 기간이 경과한 후 10월8일부터 10월 17일 까지 10회에 걸쳐 COD, T-N, T-P, SS 항목에 대하여 시행하였고, 그 분석결과는 표 3.2.4와 같다.

표 3.2.4 수질분석 결과

구분		pH	EC ( $\mu\text{mhos/cm}$ )	COD ( $\text{mg/l}$ )	T-N ( $\text{mg/l}$ )	T-P ( $\text{mg/l}$ )	SS ( $\text{mg/l}$ )
1회	ST1	8.5	420	2.7	0.584	0.085	6.0
	ST2	8.3	426	2.2	0.532	0.055	2.0
	ST3	8.1	426	1.7	0.594	0.038	0.4
2회	ST1	7.5	425	8.5	1.116	0.084	0.8
	ST2	7.4	422	4.7	1.002	0.073	0.8
	ST3	7.5	425	1.7	0.575	0.052	0.2
3회	ST1	7.6	655	13.6	0.982	0.123	8.8
	ST2	7.6	433	5.4	0.583	0.093	11.6
	ST3	7.5	378	2.9	0.432	0.064	1.8
4회	ST1	8.4	583	12.5	0.968	0.108	5.6
	ST2	8.0	597	4.1	0.745	0.082	8.4
	ST3	7.8	604	1.9	0.659	0.053	0.4
5회	ST1	6.9	569	9.6	0.709	0.090	3.6
	ST2	7.1	608	4.3	0.371	0.078	4.4
	ST3	7.1	614	2.0	0.662	0.054	0.8
6회	ST1	7.6	720	15.0	1.618	0.127	10.8
	ST2	7.6	692	4.7	0.878	0.034	8.0
	ST3	7.6	717	2.1	0.769	0.022	0.4
7회	ST1	7.3	529	11.1	1.270	0.078	7.6
	ST2	6.9	598	4.2	0.977	0.055	5.6
	ST3	7.1	604	2.3	1.071	0.026	0.2
8회	ST1	7.4	501	16.2	1.482	0.131	4.4
	ST2	7.4	576	3.4	0.700	0.044	3.6
	ST3	7.5	585	2.4	0.661	0.030	0.2
9회	ST1	8.1	558	-	2.011	0.519	21.2
	ST2	8.0	541	2.7	0.610	0.041	2.0
	ST3	7.8	551	2.0	0.556	0.023	0.2
10회	ST1	8.5	572	15.2	1.341	0.164	14.8
	ST2	7.5	541	2.5	0.624	0.041	2.0
	ST3	7.3	549	2.3	0.606	0.026	0.4



표 3.2.5 정화효율 분석결과

구분	COD		T-N		T-P		SS		
	농도 (mg/ℓ)	처리 효율(%)	농도 (mg/ℓ)	처리 효율(%)	농도 (mg/ℓ)	처리 효율(%)	농도 (mg/ℓ)	처리 효율(%)	
1회	ST1	2.7	37	0.584	-2	0.085	55	6.0	93
	ST2	2.2		0.532		0.055		2.0	
	ST3	1.7		0.594		0.038		0.4	
2회	ST1	8.5	80	1.116	48	0.084	38	0.8	75
	ST2	4.7		1.002		0.073		0.8	
	ST3	1.7		0.575		0.052		0.2	
3회	ST1	13.6	79	0.982	56	0.123	48	8.8	82
	ST2	5.4		0.583		0.093		11.6	
	ST3	2.9		0.432		0.064		1.8	
4회	ST1	12.5	85	0.968	32	0.108	51	5.6	93
	ST2	4.1		0.745		0.082		8.4	
	ST3	1.9		0.659		0.053		0.4	
5회	ST1	9.6	79	0.709	7	0.090	40	3.6	78
	ST2	4.3		0.371		0.078		4.4	
	ST3	2.0		0.662		0.054		0.8	
6회	ST1	15.0	86	1.618	52	0.127	83	10.8	96
	ST2	4.7		0.878		0.034		8.0	
	ST3	2.1		0.769		0.022		0.4	
7회	ST1	11.1	79	1.270	16	0.078	67	7.6	97
	ST2	4.2		0.977		0.055		5.6	
	ST3	2.3		1.071		0.026		0.2	
8회	ST1	16.2	85	1.482	55	0.131	77	4.4	95
	ST2	3.4		0.700		0.044		3.6	
	ST3	2.4		0.661		0.030		0.2	
9회	ST1	-	-	2.011	72	0.519	96	21.2	99
	ST2	2.7		0.610		0.041		2.0	
	ST3	2.0		0.556		0.023		0.2	
10회	ST1	15.2	85	1.341	55	0.164	84	14.8	97
	ST2	2.5		0.624		0.041		2.0	
	ST3	2.3		0.606		0.026		0.4	
평균처리 효율(%)		77.2		39.2		63.8		91	

자갈 접촉산화수로 가동후 그 처리효율을 분석해본 결과 COD의 경우 평균 77%의 처리효율을 보였다. 초기 시료의 처리효율이 평균이하로 극히 낮는데 측정방법이나 시료채취시 오차가 발생한 것으로 추정된다. 1회 측정값을 제외하고 9회 측정시 희석범위를 벗어난 결과를 제외하면 80%를 상회하는 처리효율을 보인다. 여타 생물학적 처리공정의 처리효율과 비교해 볼 때 평균 이상의 처리효율을 나타낸다. 표 3.2.5에 나타난 처리효율 중 특히 SS(부유물질)는 90%를 상회하는 결과를 나타냈다. 일반적으로 접촉산화공법이 미생물 부착여재를 사용하기 때문에 유기물질의 산화분해 효과와 Filtering효과가 우세하게 나타나는데 금번 시험결과에서도 이를 입증하고 있다. 영암영류 처리효율에서 질소와 인의 처리효율은 각각 39%와 63%의 처리효율을 나타냈다. 인의 경우는 단순 폭기에 의한 처리공정이 추가되었을 뿐인데 60%를 상회하는 처리효율이 나왔다.

아래 그래프는 유입농도별 처리효율과 분석항목별 처리효율을 나타내고 있다. 그림 3.2.7에 나타난 COD의 유입수질은 2.7~16 ppm의 분포를 보이고 유출수는 1.7~2.9ppm 정도로 처리되고 있다. 처리효율을 보면 초기 2.7ppm의 저농도 유입수 효율이 37%로 가장 낮다. 그러나 8.5~16ppm 농도의 유입수 경우 80%내외의 안정적인 양호한 처리효율을 보였다.

일반 자갈접촉산화법과는 달리 본 시설은 악취발생 방지와 유기물질 처리 효율 개선을 위해 상시폭기 공정을 채택했는데 인의 처리에도 효과가 있는 것으로 추정된다. 또한 본 연구원에서 제안하는 접촉산화수로공법은 자갈여재가 지상에 노출되어 있기 때문에 여재의 교체가 용이하고, 지하 매설시 발생가능한 심층부 혐기화 현상이 대폭 개선되었다. 아울러 인공여재 개발시 여재 자체에 요구되는 강도가 현저히 저감되어 여재의 생산비용을 크게 저감할 수 있으며, 보다 다양한 형태의 여재를 개발하여 사용할 수 있게 되었다.

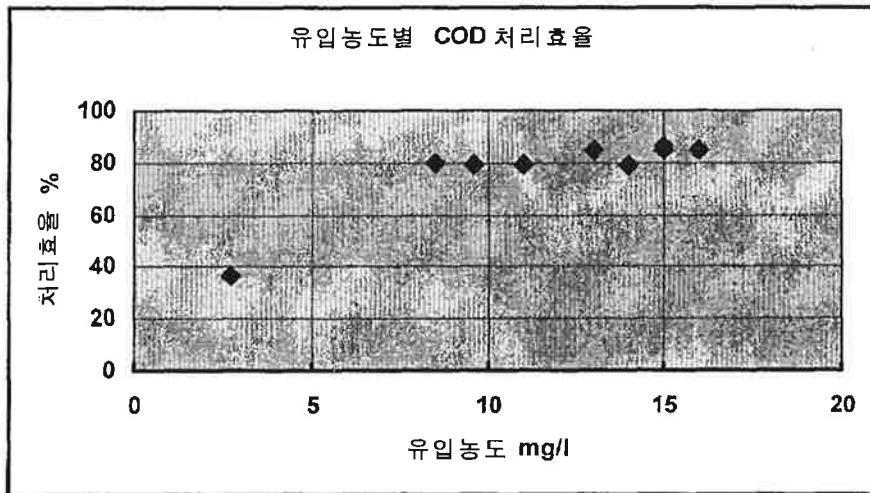


그림 3.2.7 유입농도별 COD 처리효율

그림 3.2.8의 SS(부유물질) 처리효율을 보면 0.8~21.2ppm의 다양한 유입 농도 범위에서도 평균 90%대의 높은 처리효율을 나타낸다. 처리수의 농도도 대부분 1ppm 미만의 극히 양호한 상태이다. 그러나 지속적인 오염수의 유입으로 전반부 여재의 경우 급격한 폐색현상이 진행되었다. 자갈 여재의 여과 기능을 극대화 시키고 지속적으로 처리효율을 유지하기 위해서는 보다 공극이 크고, 접촉면적이 큰 인공여재를 개발하여 전반부에만이라도 설치하는 것이 효과적이라 생각된다.

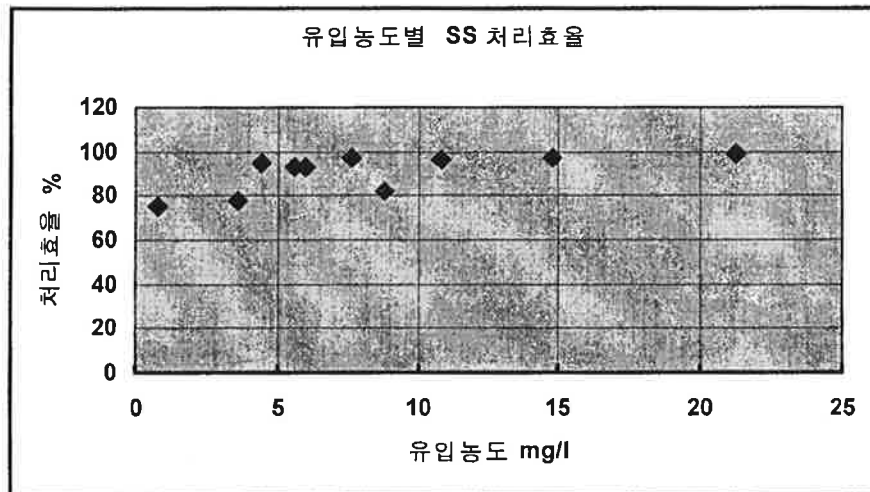


그림 3.2.8 유입농도별 SS 처리효율

그림 3.2.9의 T-N 처리효율을 보면 평균 40% 미만의 처리효율을 보인다. 유입 농도별 처리효율도 다른 수질항목에 비해 변화폭이 상당히 크다. 자연 정화 처리 공정 중 영양염류 제거는 식생에 의한 정화가 가장 효과적이라고 보고되고 있다. 자갈여재에 부착된 미생물은 질소제거를 위한 질산화 미생물과 전혀 다른 생지화학적 반응을 보이므로, 본 처리공법으로 질소 성분을 제거하는데는 일정한 한계가 있다. 1차 침전지를 부유식생 재배공간으로 활용할 경우 보다 나은 질소제거 효율이 기대된다.

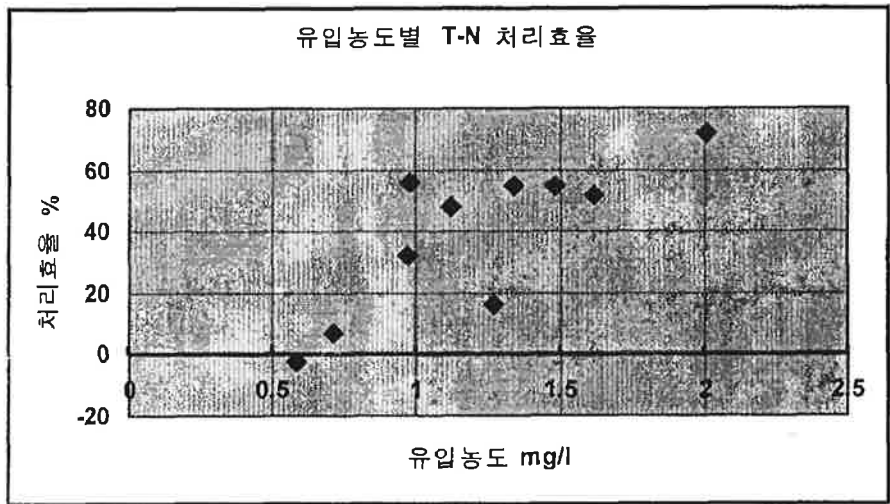


그림 3.2.9 유입농도별 T-N 처리효율

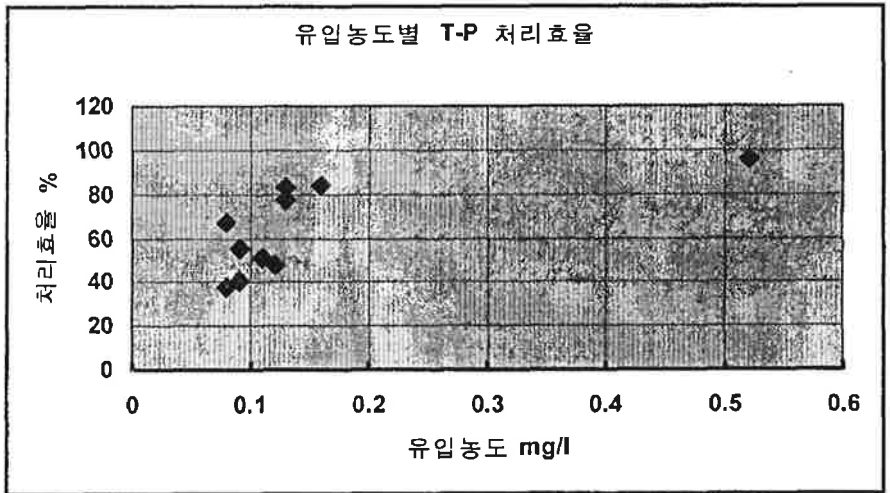


그림 3.2.10 유입농도별 T-P 처리효율

그림 3.2.10의 T-P 처리효율을 보면 60% 내외의 처리효율을 안정적으로 보여주고 있다. 유입수의 농도 분포는 크지않지만 처리수질은 일정한 범위내에서 안정적인 값을 나타내고 있다.

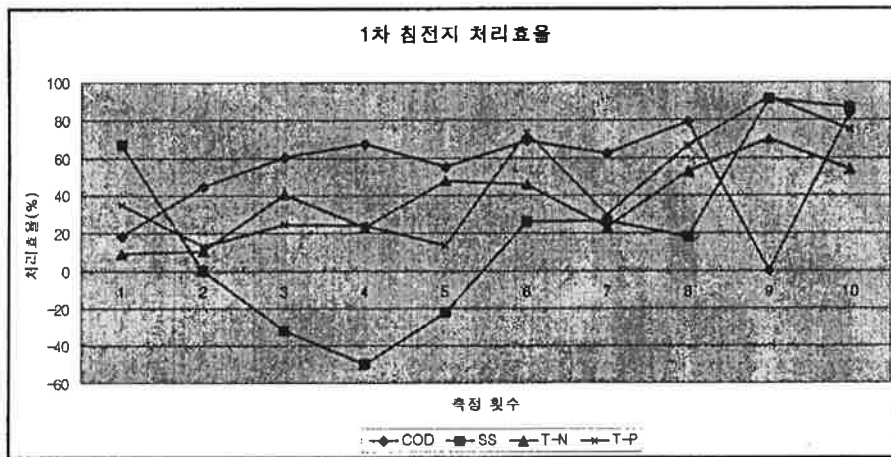


그림 3.2.11 1차 침전지 통과후 각 항목별 처리효율

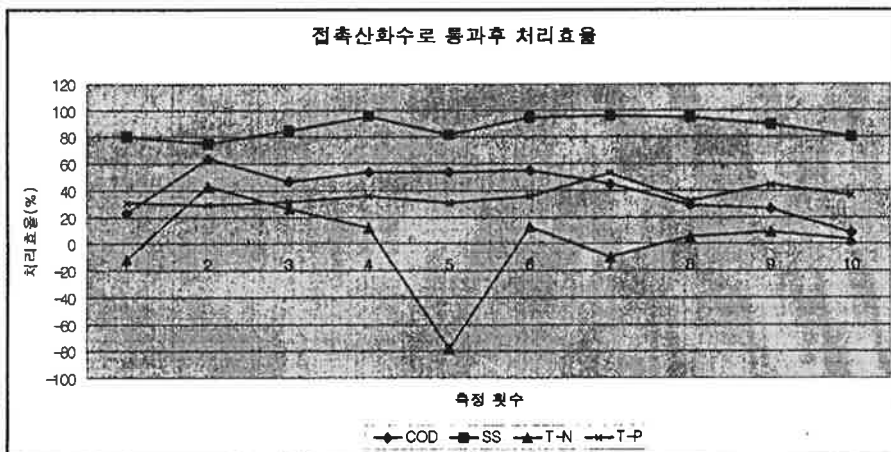


그림 3.2.12 집축산화수로 통과후 각 항목별 처리효율

#### 마. 침전지와 산화수로의 운영 방안

본 시험 시설에서 폭기 장치의 운용을 위하여 블로어를 설치하였으며 이에 필요한 전력은 2.5kw가 소요된다. 용수 공급에 필요한 양수시설로서 0.5마력의 수증펌프 1대와 예비 시설로서 1대가 추가로 설치되었다. 이들 시설의 운영에 필요한 전력은 5 kw 이하이다. 이를 대규모 용량이 필요한 간척지 현장에 설치하는 경우, 침전지와 산화수로 시설의 동력원은 용수시설의 운영을 위하여 설치하는 전기 설비를 활용하는 것이 운영비를 절감할 수 있는 바람직한 방안이다. 또한, 해안에는 바람이 많으므로 풍력을 이용하는 방안도 검토할 필요가 있으며, 충전시설을 구비한다면, 야간에 부는 바람이나 겨울철의 강한 바람을 효과적으로 이용할 수 있다.

또한, 침전지에 쌓이는 퇴적물은 농지의 비료로 활용할 수 있는지를 검토할 필요가 있다. 본 시설은 퇴적물이 침전지 중앙에 모이도록 원추형의 바닥 형태로 제작되었으며, 배수관이 수면에서 약 2m 정도 하부에 위치하므로 퇴적물을 수압에 의하여 쉽게 배출하도록 구성하였다. 자갈 여재는 오염물로 막힐 수 있으므로 주기적으로 꺼내어 세척할 필요가 있으며, 세척 작업을 쉽게 하기 위하여 들망태 등으로 자갈을 묶어서 설치하는 것이 바람직하다. 따라서, 침전지의 높이를 설정하는 방안은 동력원의 공급과 자갈의 세척, 홍수시 퇴적 가능성, 침전지에 쌓인 퇴적물의 수거와 활용성 등을 종합하여 검토하여야 한다. 본 연구에서 사용한 자갈 여재는 접촉산화 효과를 높이기 위하여 인공 여재로 대체하거나, 적절한 비율로 혼합하여 사용할 수 있다. 혼합 여재를 사용하는 경우, 자갈은 상류부에 설치하고, 인공 여재는 하류부에 설치하여 조립의 오염물은 상류에서 처리하고 미세한 입자의 오염물은 하류에서 처리하는 방안도 검토할 수 있다. 이에 관한 세부적인 연구는 향후, 별도의 연구과제로 추진토록 요망된다.

## 제 3절 어도

### 1. 어도가 필요한 어류

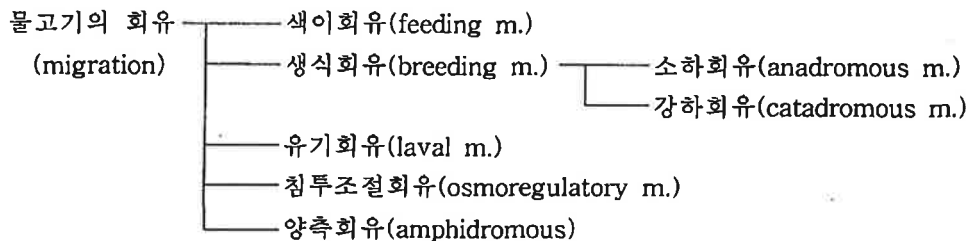
본 연구에서 조사된 어종은 142종으로서 환경부에서 조사된 170 여종의 어종보다 조금 적다. 이는 본 조사에서 파랑볼우럭, 큰입우럭 등의 최근 도입종과 민물검정망둑, 임실납자루 등의 최근에 신종으로 기재된 종과 서호납줄갱이, 모섬치, 다비라납지리 등 멸종이 거의 확실한 종이 조사되지 않았기 때문이다. 금강에서는 93종의 담수어가 조사되고, 낙동강 75종, 한강 71종 순서로 많이 조사되었다. 양양 남대천 같은 곳은 어도 설치를 위하여 '96 -97년 사이에 6회나 조사되었다. 칠성장어, 연어, 산천어, 송어, 황어, 북방종개, 큰가시고기, 가시고기, 잔가시고기 등은 낙동강 동쪽의 하천에만 서식하고 반면에 통사리, 새코미꾸리, 배가사리, 두우쟁이, 꾸구리, 들상어, 새미 등은 서해로 유입하는 하천에만 서식하는 종이다.

#### 가. 회유성 어류의 이동 특성

조사된 142종의 어류는 이동성을 중심으로 분류하면 표 3.3.1에서 보는 바와 같이 붕어, 메기 등 일생동안 한곳에 정착하여 서식하는 정착성 어류와 이동하면서 서식하는 이동성 어류로 분류할 수 있다. 이동성 어류는 다시 이동의 목적에 따라서 국지회유(局地回遊)어종과, 소하성(溯河性)어류, 강하성(降下性)어류 및 우래성(偶來性) 어류로 나눌 수 있다. 국지회유성 어종은 계절에 따라 하류에서 상류로, 상류에서 하류로 오르내리면서 서식하는 어종을 말하며, 여기에는 산천어, 열목어처럼 냉수성(冷水性) 어종인 경우 봄철에 수온이 올라가면 수온이 찬 상류로 올라갔다가 가을에 물이 줄고 수온이 내려가면 월동을 위하여 하류로 내려오는 종이다. 바다와 하천을 왕래하면서 살아야 되는 종을 회유성(回遊性) 어류라고 하는데 이는 다



시 알을 낳으러 하천에 올라오는 종을 소하성 어류라 하고 알을 낳으러 하류나 바다로 가야되는 것을 강하성 어류라 하며 산란과 상관 없이 담수를 왕래하는 종을 우래성 담수어로 분류하였다. 소하성 어류에는 연어, 송어, 황어, 칠성장어, 황복 등이 있으며 이들은 하천에 올라오지 못하면 산란을 하지 못하는 종이다. 강하성 어류로 대표적인 것은 뱀장어와 은어인데 이들은 하천에 올라와서 성장한 다음 하구로 내려와 산란을 하고 치어는 바다로 떠내려가 바다에서 치어기를 지낸 후 하천에 올라와 성장하는 종이다. 그런데 이들 회유성 어류 가운데 빙어나 은어 같은 종은 치어가 바다까지 내려가지 않고 하류에 큰 저수지가 있으면 여기서 치어기를 보내고 다시 하천에 올라가 성장할 수 있는 육봉이 가능한 종이다. 우래성 담수어는 번식과 관계없이 수시로 하천을 왕래하나 꼭 하천에 올라오지 않아도 일생을 마칠 수 있는 종으로 전어, 송어, 농어 등이 이에 속한다.



이들 어류 중에 하천에 댐을 막으면 정착성 어류는 거의 영향이 없으나 이동성 어류는 통로가 막혀서 치명적이다. 따라서 이들 어류를 위해서 어도를 설치해야 한다. 우리나라 수산자원보호령 12조 2항에는 “하천의 전유폭을

차단하는 공작물을 설치하고자 하는 자는 해양수산부 장관과 협의하여 하천의 일부를 개방하거나 어도를 설치하여 소하어류의 통로를 확보해야 한다"라는 규정이 있고 동법 31조에 12조를 위반한 자는 300만원이하의 벌금에 처하도록 처벌규정도 있다. 그런데 '96년 12월 30일까지는 12조 2항에 "단 구조물이 댐인 경우는 예외로 한다"라는 예외규정이 있어 댐에는 어도를 설치하지 않아도 되었으나 '97년부터 하천을 가로막는 수리구조물에 의무적으로 어도를 설치하도록 규정하고 있다.

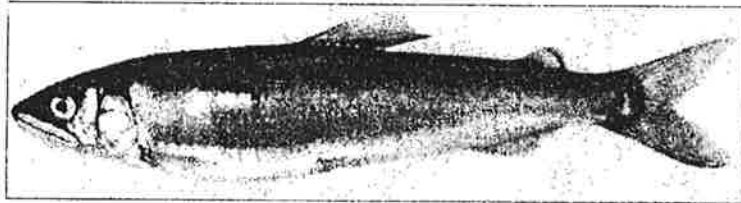
표 3.3.1 수계별 이동성 어류

수계별	정착성 어류	이동성 어류			
		국지회유	소하성	강하성	우래성
서해로 유입	붕어, 잉어, 메기 등	열목어, 돌고기, 버들치, 쉬리, 피라미, 갈겨니, 납자루류	잉어, 빙어, 황복, 줄공치	은어, 뱀장어, 꺾정어, 꼭저구, (참게)	전어, 송어, 농어, 학공치, 실고기, 망둥어류 대부분
남해로 유입	대부분 호소성	열목어, 쉬리, 피라미, 갈겨니, 납자루류	잉어, 빙어, 뱀어, 큰가시고기, 황복, 줄공치, 사백어	은어, 뱀장어, 꺾정어, 꼭저구, (참게)	전어, 송어, 농어, 학공치, 망둥어류 대부분
동해로 유입	담수어	산천어, 버들치, 버들개, 버들가지, 피라미	연어, 빙어, 황어, 뱀어, 큰가시고기, 가시고기, 한독중개, 송어, 도화뱅어, 젓뱅어	은어, 뱀장어, 꼭저구, (참게)	송어, 망둥어류 대부분

나. 회유성 어류의 서식 특성

1) 은어(*Plecoglossus altivelis* TEMMINCK et SCHLEGEL)

은어는 전국적으로 분포하나 서해안으로 유입하는 하천에서는 서산 가로림만으로 유입되는 방길천, 보령 웅천천 등에서만 약간씩 채집되고 주로 남



해안과 동해  
안으로 유입  
하는 하천의  
기울기가 커

서 바닥이 돌과 자갈로 된 하천에 많이 서식한다. 안동댐에는 영덕오십천의 은어를 이식하여 상당히 많이 서식하게되었다. 산란기는 대체로 그 지역의 단풍 최성기와 일치하며 산란장소는 하천의 하류의 바닷물과 해수의 경계쯤 되는 곳에 바닥이 돌과 모래로 된 곳이다. 산란중에는 성어는 먹지 않고 산란이 끝나면 어미는 죽는다. 가끔 산란하지 못한 개체는 월동하여 2년을 사는 것도 있으나 보통은 수명이 만 1년이다. 부화된 자어(子魚)는 바다나 호수로 내려가 연안에서 서식하다 봄철 하천으로 소상한다. 부화초기 난황(卵黃)이 남아 있을 때부터 유기물조각을 먹고 점차 커짐에 따라 부유동물을 먹고산다. 은어는 바닷물의 온도와 하천수의 온도가 비슷할 때부터 소상하기 시작하므로 섬진강이나 탐진강에서는 2 - 3월로 빠르고 동해안의 간성 북천처럼 위도가 높은 곳의 것은 늦게 시작한다. 소상 성기의 하천 수온은 13 - 16℃이고 시간은 주로 낮 시간에 소상한다. 일본 어도설계지침에 따르면 은어는 유영력이 매우 뛰어나 순항속도는 체장의 6.1 - 7.6배이고 돌진속도는 체장의 12.4배 - 18배라고 하였다. 따라서 6 - 9cm의 치은어의 유영력은 1.20 - 1.80m/sec이고, 폭포를 오를수 있는 도약력은 최고 0.6m이고 평균 0.35m를 뛰어 오를 수 있다고 하였다. 성어가 되면 뛰어 오르는 높이는 1.0 - 1.2m 가되고 거리는 1.5 - 2.9m까지 된다. 이렇게 은어는 유영력이나 도약력이 매우 좋으므로 도벽식(導壁式) 어도나 계단식 어도를 잘 이용한다. 소상기의 체장은 6cm내외이고 하천에서 하천바닥의 바위나 큰돌에 붙은 부착조류를 먹고 성장하여 8월이면 다 자라서 체장이 30cm 정도까지 자란다. 그러나 먹이의 부족 등으로 23cm 이상의 개체는 흔하지 않다.

## 2) 뱀장어 (*Anguilla japonica* TEMMINCK et SCHLEGEL)

뱀장어는 전국의 하천에 분포하나 한강은 팔당댐, 낙동강은 남강댐에 어도가 없어 그 상류에는 분포하지 않는다. 동해안에서 삼척 오십천까지는 많이 있으나 수온이 찬 강릉 남대천 북쪽의 하천에는 적게 소상한다. 산란은 북위 30° 이남의 대만 동쪽 유구열도의 남쪽의 수심 300 - 400m의 깊은 바다로 추정하고 있다. 부화된 자어는 뱀장어와는 형태가 완전히 다른 렘토씨 팔루스이며 1년정도 성장하고 변태하여 실뱀장어가 되어 근해의 바다 밑에서 저생조류나 그 반분해물을 먹고 겨울을 난다. 다음해 2 - 5월 하천으로 소상한다. 소상기의 체장은 50 - 60mm정도이고 소상은 초저녁에 많이 이루

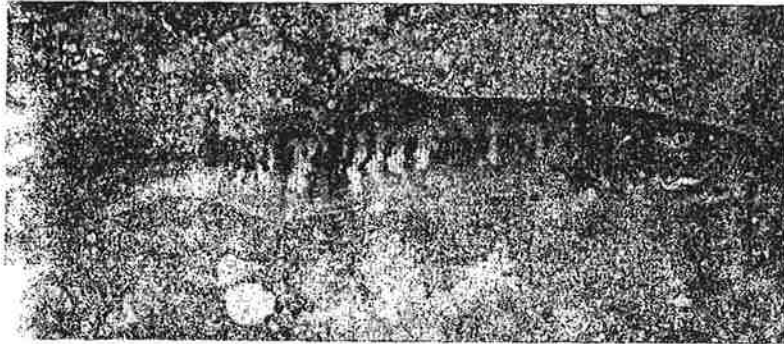


어진다. 실뱀장어의 유영력은 매우 낮으나 70 - 100mm의 실뱀장어는 돌진속도가 0.6m/sec가 되고 점차

성장하면서 빨라져 15cm 이상의 것은 150cm/sec 이상이 된다. 유영력은 떨어지지만 오르는 면이 젖어 있기만 하면 경사가 90° 가까운 면도 올라갈 수 있어 흙관에 들을 채운 것을 보에 수직으로 세워서 어도로 하기도 한다. 성어의 식성은 새우, 게, 조개 등의 동물성이고 강, 호수 등에서 5 - 12년을 성장한 후 8 - 10월경에 바다로 내려가고 이때부터 굽어 소화관이 퇴화한다. 성어의 체장은 수컷은 40 - 60cm, 암컷은 50 - 90cm 인데 70cm 이상의 것은 드물다.

### 3) 연어 (*Oncorhynchus keta* (WALBAUM))

현재는 양양 남대천을 중심으로 소하하지만 예전에는 낙동강 동쪽의 모



든 하  
천에  
소하  
하던  
어종  
이다.  
소상(

溯上)시기는 9월부터 12월까지이고 소상한 후 바로 산란한다. 산란장은 하류의 수심 30cm, 유속 0.2m/sec정도되는 여울로 바닥은 동전만한 작은 돌로 되어 연어가 몸으로 산란장을 팔수 있는 지역이어야 한다. 산란후 바로 작은 돌로 덮으며 이때 산소가 충분히 공급될 정도의 공간과 유속이 있어야 하며 부화된 자어는 산란장에서 지내고 치어가 되면 바다로 내려가기 시작하여 6cm 이상의 크기가 되면 먼바다로 나간다. 바다로 간 연어는 북태평양까지 가서 3 - 5년 성장한 후 산란을 위하여 모천으로 회귀하는 모천회귀(母川回歸)성이 매우 강한 어종이다.

### 4) 황어 (*Tribolodon hakonensis* (STEINDACHENER))

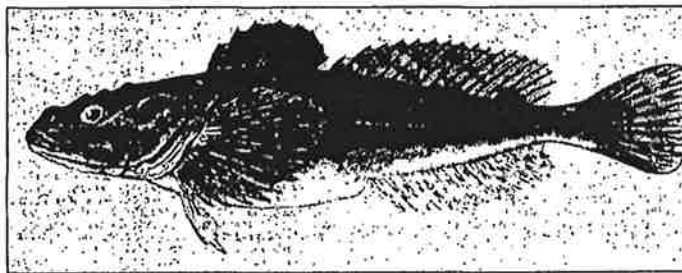
황어는 잉어과 황어아과에 속하는 2차담수어로 현재는 동해안으로 유입하는 하천에만 서식하지만 전에는 충남 웅천천에서도 조사된 적이 있는 대표적인 소하성 어류였다. 우리나라에서는 소하성 어류지만 일본에서는 피라미와 같은 담수어로 같은 종인데도 생태가 완전히 다른 종이다. 소상기는 보리가 필무렵(4월)이 최성기이고 산란은 소상후 바로 하고 산란장은 바닥이 모래나 자갈로된 수심 20 - 70cm 의 여울이다. 부화된 치어는 하천에서



가을까지 10  
cm 내외로 자  
란 후 바다로  
가서 2년 정  
도 자란후 산  
란을 위하여

소하하는 종이다. 소상기의 체장은 40cm 까지 자라는 대형 어종이나 담수에서만 서식하는 일본의 황어는 우리나라 피라미만큼 밖에 자라지 않는다. 소상기의 체장이 크고 유영력이 좋아 어도를 설치하기는 비교적 쉬운 종이다.

#### 5) 걱정이 (*Trachydermus facsiatus* HECKEL)



독중개과에  
속하며 주로 서  
남해안으로 유입  
하는 하천에 분  
포하며 산란기는  
2 - 3월 하구나  
간석지(干潟地)

의 조개껍질에 산란한다. 체장 2 - 3cm가되면 3 - 5월 하천으로 소상한다. 2년에 17cm까지 자라면 하구로 내려와 산란하고 죽는 2년생 어류이다. 부화 초기에는 중층이나 표층에서 생활하다 소상을 시작하는 3cm정도가 되면 저서생활을 하기 때문에 소상기의 걱정은 모두 저서생활을 한다. 따라서 유영력과 도약력이 크지 않아 계단식 어도는 잘 이용하지 않고 영암호나 남양호에서 갑문식(閘門式) 어도를 잘 이용한다. 금강어도에서는 돌망태식어도를 이용한다.

6) 꼭저구(*Chaenogobius urotaenia* GILL )

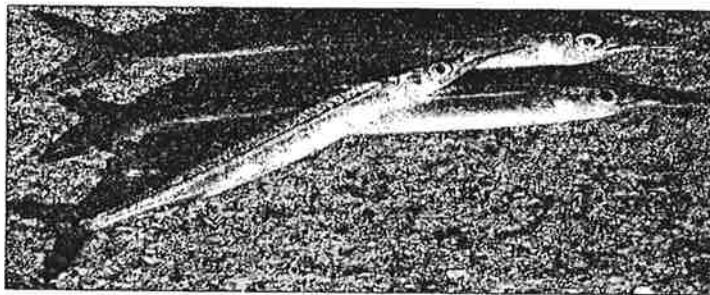


망둥어과  
에 속하는  
전국적으로  
분포하는 소  
하성 어류이  
나 청평호에

서는 육봉(陸封)된 것이 조사되기도 하였다. 하천의 하류에 주로 서식하나 중류까지 올라가기도 하며 먹이는 수생곤충이나 어린 물고기이다. 산란기는 5 - 7월이고 하류의 돌밑에 붙여 놓고 숫놈이 보호한다. 부화된 자어(子魚)는 바로 바다로 떠내려가 연안에서 서식하며 3cm가되면 저서생활로 들어가고 봄철에 하천으로 소상한다. 체장 13cm 까지 성장하는 소형종으로 가슴지느러미가 빨판으로 변하여 벽에 부착할 수 있으므로 소상능력이 좋다. 동해안의 짧은 하천에서는 폭포를 올라와 상류까지 소상하기도 한다.

7) 줄공치(*Hemiramphus kurumeus*(JORDAN et STARKS))

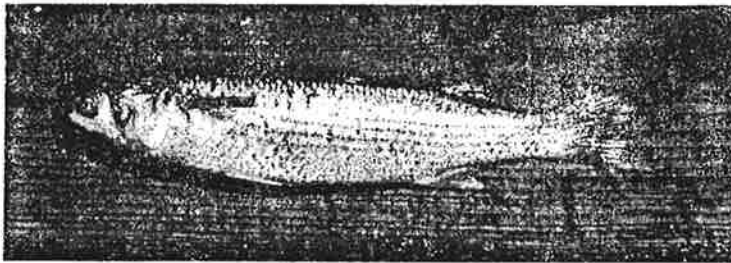
줄공치는 서해와 남해로 유입하는 하천의 하류에 분포하는 소형 소하성 어류이다. 학공치와 형태가 매우 비슷하나 학공치는 체장이 300 - 400mm까지



자라는데 비  
하여 줄공치  
는 180mm까  
지밖에 자라  
지 않아 크  
기가 줄공치

가 월등히 작다. 몸은 길고 길으며 아래턱이 침처럼 길게 나와 있다. 연안에 서식하다 4월부터 강으로 올라와 5 - 6월 강 하류위 수초에 산란한다. 부화된 치어는 가을에 50 - 140mm까지 자라서 바다로 내려간다.

#### 8) 송어(*Mugill cephalus* LINNAEUS)



송어는  
800mm까지  
성장하는  
대형 어종  
으로 우리  
나라 전

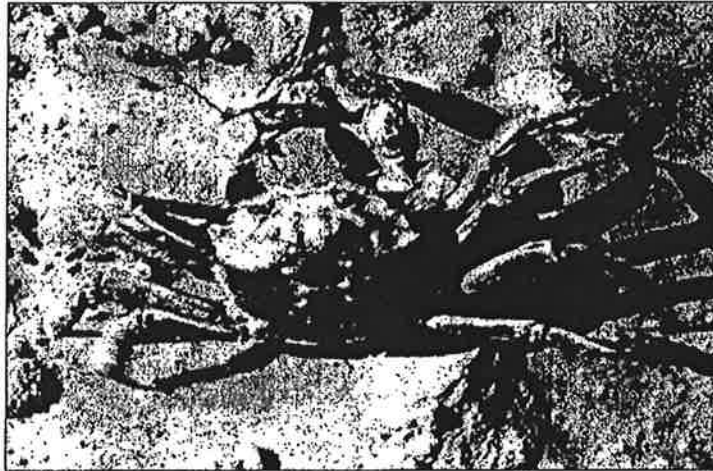
해안으로 유입하는 하천에 올라오는 회유성 어종으로 은어, 연어 등의 회유성 어종과는 달리 하천에 올라오지 않고도 바다에서만 산란이나 성장을 할 수 있는 주연성 담수어이다. 은어는 하천에 올라오지 않으면 성장하지 못하고 연어는 하천에 올라오지 못하면 산란을 할수 없는 종들이다. 산란은 비교적 깊은 바다에서 이루어지며 2월부터 손가락만한 치어가 하천에 올라오며 바다와 하천을 왕래하면서 400mm까지 성장하는 4년생부터는 하천에 올라오지 않고 바다에서만 서식한다. 식성은 어린 송어는 동물성 플랑크톤을 먹고살다가 성어는 뱀에 포함된 규조류를 먹고산다.

#### 9) 참 게(*Eriocheir sinensis*(H. Miln Edward))

부화된 유생(zoea)은 4월경 부유생활과 부착생활을 겸할 수 있는 메가로파(Megalopa)가 되어 4월 중순부터 하천 상류로 올라가 담수에서 성장한다. 성장한 참게는 8 - 9월 강하하기 시작하여 하구에 도달하는 11월 초순부터 북부부속지에 방란하여 보육하는 것이 보이며 Zoea의 탈출은 1월부터 4월



사이에 이루어 진다. 참게의 수명은 1년으로 보이거나 2년까지 생존하는 것도



있다. 성체의 갑장은 큰 것이 암컷은 66mm, 수컷이 68mm 정도로 수컷이 약간 크게 자란다.

## 2. 어도의 형식

### 가. 풀타입 어도

풀(pool)이 계단식으로 연결된 형태의 어도로서 물고기가 주로 격벽을 월류하는 흐름을 뛰어넘어 올라가는 형식을 계단식이라 하고 격벽 전체로 물이 넘는 것을 전면월류형, 노치가 양측에 있는 것을 Iceharbor식이라 한다. 격벽에 설치된 수직의 틈새(vertical slot)를 통하여 이동하는 형식을 버티칼슬롯식이라 하며, 격벽에 뚫어놓은 잠공을 통하여 이동하는 형식을 잠공식이라고한다. 이는 설치가 비교적 쉽고 공사비도 적게 들지만 풀타입 어도는 유속이 빠르고, 낙차가 있으므로 수영력(遊泳力), 도약력(跳躍力)이 좋은 일부 어종만이 이용할 수 있는 단점이 있다. 풀타입 어도는 격벽(隔壁) 부분이 유속이 크고 수심이 최소이기 때문에 이 부분이 소상이 가장 어려운 곳이므로 이 부분의 설계가 중요하다. 풀타입 어도는 풀이 있어 소상

중인 어류가 수시로 실 수 있고, 어도로 보낼 물이 적을 때도 가능하며, 댐의 높이가 높고 구배가 큰 곳에서 설치할 수 있는 장점이 있다.

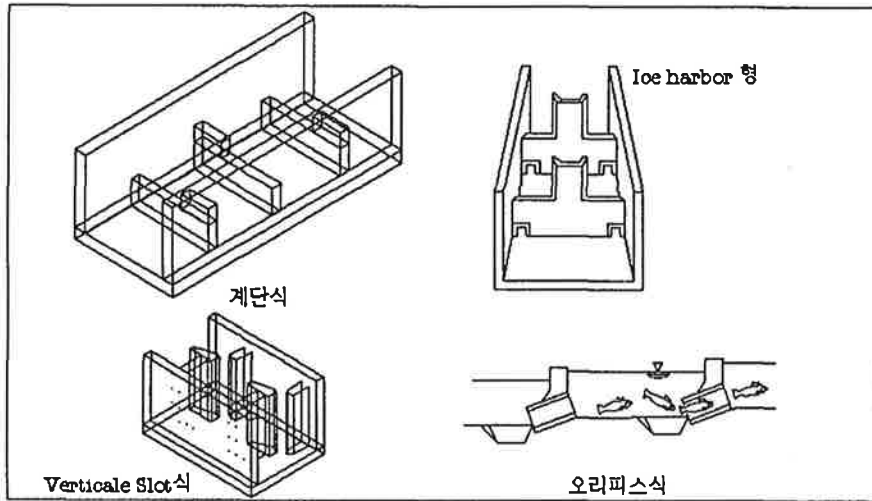


그림 3.3.1 플타입어도

#### 나. 수로식 어도

어도 수로내의 유속을 줄여 물고기를 소상(遡上)하도록 하는 방법으로 유속을 줄이는 방법에 따라 수로에 적당한 조류판(阻流板)을 만들어 유속을 줄이는 것을 데널식이라하고 조류판의 형태나 배치에 따라 표준데널식, 스티프패스(Steep pass)형, 통선(通船)형이 있는데 우리나라에는 설치한 예가 없다. 좁은 공간에서 경사를 완만하게 하기위하여 도류벽을 설치한 것을 도벽식이라 하고 삼척오십천에서는 가장 흔한 형식이다. 인공적으로 1/100정도의 흐름이 완만한 하도를 만들어 어도로 활용하는 것을 인공하도식이라 하며 우리나라에는 설치한 예가 없다. 평면의 경사가 급한 인공수로를 만들어

물을 흘려보내는 아주 원시적인 방법을 평면식이라 하며 동해안으로 유입하는 영덕오십천에 남아있다.

#### 다. 조작형 어도

물고기가 소상하려면 항상 인위적인 조작을 해야만 되는 것을 조작형 어도라 하며 이 형식은 댐의 높이가 높아 수로식으로 충분한 소상효과를 낼수 없을 때 사용하는 방법이다. 물고기가 든 용기를 제방 사면을 따라 설치한 궤도로 끌어 올려 저수지에 붓는 형식을 리프트(Lift)식, 수직으로 설치한 엘리베이터로 물고기를 끌어올리는 것을 엘리베이터(Elevator)식이라 한다.

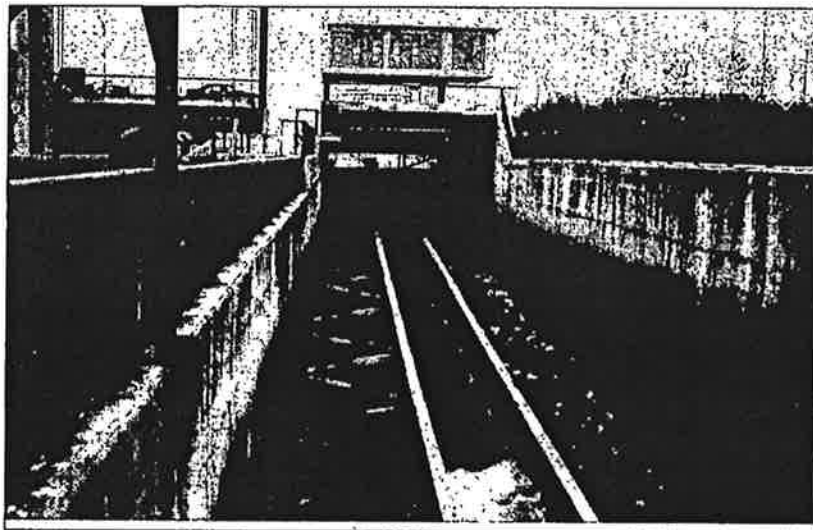


그림 3.3.2 금강 하구둑 어도

통선문(通船門)에 배가 드나드는 것과 마찬가지로 원리로 어도 갑실(閘室)을 만들고 내외측 갑문을 만들어 갑문조작으로 물고기가 올라갈 수 있는 어도를 갑문식이라 하고, 낙차가 큰 댐에서는 갑문의 높이를 무한정 키울 수 없

으므로 댐의 진수지 부근에 하부풀을 만들고 댐위에 상부풀을 만들어 각 풀을 샤프트(Shaft)로 연결하고 갑문을 만들어 갑문식과 마찬가지로 물고기를 올라가게 하는 방법을 Borland식이라 한다.

조작형 어도는 이용할 어종의 유영력(遊泳力), 도약력(跳躍力)에 상관 없이 다양한 어종이 이용 가능하고, 댐에서 방류할 물이 적을 때도 적용 가능하며, 하구(河口)에서는 조차(潮差)에 상관 없이 적용이 가능하다. 댐의 높이가 높고, 저수지의 수위변동이 클 때도 편리하게 적용할 수 있다. 그러나 인위적 조작을 해야 물고기가 올라갈 수 있고, 운영비가 많이 드는 단점이 있다.

높이 20m내외의 댐에 영국에서는 볼랜드타입의 갑문식어도와 계단식 어도를 많이 채택했으며, 프랑스에서는 계단식 어도를 많이 설치하고 있으나 특히 계단식어도로 물고기가 잘 올라오지 않을 때 대안으로 엘리베이터식 어도를 설치한 예가 있다. 미국 태평양측에서는 15m이상의 높은 댐에도 대체로 계단식 어도를 설치하고 있으나 이는 대상 어종이 King salmon이기 때문에 가능하며 대서양측에서는 엘리베이터식 어도도 많이 채택하고 있다.

### 3. 어도 현황과 이용에 관한 개선 사항

우리나라에서 전국적인 어도(魚道)현황을 조사한 것은 '91년 농진공의 담수호(淡水湖)의 어도 이용에 관한 연구가 효시이다. 이 연구에서는 전국적으로 총 64개소의 어도가 조사되었다. 이들은 대부분이 동해안으로 흐르는 하천에 은어, 황어를 위한 도벽식(導壁式)어도였다. 강원도 외의 하천에 설치한 어도는 전남 장흥의 탐진강에 은어와 뱀장어를 위하여 설치한 계단식(階段式), 수로식(水路式) 등 여러 가지 형식의 어도로 한 수원공에 설치한 어도가 7개였다. 우리나라의 어도는 대부분 보(淤)에 설치된 도벽식어도로 평균 규모는 높이가 1.34m, 폭이 3.2m, 길이가 13.6m의 소형 어도였으며 규

모가 가장 큰 것은 금강하구둑에 설치한 유인수로(誘引水路)와 뱀장어용 어도를 갖춘 계단식 어도로 폭 9.0m, 길이 78m이다. 그 외의 형식의 어도로는 영덕오십천에 터널식 어도가 있는데 파손되어 기능을 하지 못하고 있었으며 영암방조제와 석문방조제에는 갑문식(閘門式)어도가 시공 중이었다. 당시 시공된 어도의 문제점은 위치의 선정이 잘못된 것이 가장 많았으며, 다음은 경사도가 높고, 어도의 입구가 세굴(洗掘)되어 낙차가 커져서 물고기가 어도에 들어올 수 없으며, 보(湫)를 높이면서 어도는 높이지 않아 어도의 출구에서 낙차가 큰 것과 물이 보 전체로 넘고 어도로만 흐르지 않아 물고기가 어도 입구를 찾을 수 없는 것 등이었다.

'98년 현재 농진공에서는 하구에 설치한 어도의 이용에 관한 연구의 일환으로 전국의 어도 현황을 조사중인데 하구에 설치된 어도만도 200개정도 조사되어 '91년보다 크게 늘어났다.

'97년 6월, 8월과 9월 한 하천에서는 가장 많고 다양한 형식의 어도가 있는 전남 강진의 탐진강을 대상으로 어도 현황, 이용 및 문제점을 조사하였다.

#### 가. 탐진강 어도

탐진강 하류의 4개 보에 설치한 어도는 총 21개소이며 형식별로는 풀(Pool)이 있는 계단식 어도가 6개소, 풀이 있어도 깊이가 너무 얇아 도약을 할 수 없는 계단식 어도가 2개, 사람용 계단 비슷하게 생긴 수로식 2개소, 경사수로에 유속을 줄이기 위한 감세공(減勢工)을 설치한 수로식 어도가 8개소, 방조망이 설치된 수로식어도 1개소 있는데 여기는 검은당기해오라비 등의 조류의 피해를 방지하기 위한 방조망이 설치되어 있다. 유속을 줄이기 위한 시설이 전혀 없는 어도가 2개소 있다. 탐진강에 있는 보의 어도를 하구에서 가까운 것부터 설명하면 하구에서 첫 번째와 세 번째 보에는 계단

식어도가 있는데 규모는 2개 보에 있는 6개 어도 모두 폭 6m, 길이 9m이고 폭 4m, 길이 2m의 풀이 4개있고 옆에는 폭 1.5m의 수로가 있다. 이 어도는 모두 어도로만 물이 흐르지 않고 보 전체로 흐르게 되어 어류가 어도 입구를 찾기가 힘들게 되었으며 대부분이 보의 경사진 에프런위에 그대로 설치하여 하류는 수심이 얕고 상류는 홍수 때 파손되어 어류가 이용할 수 없었다.

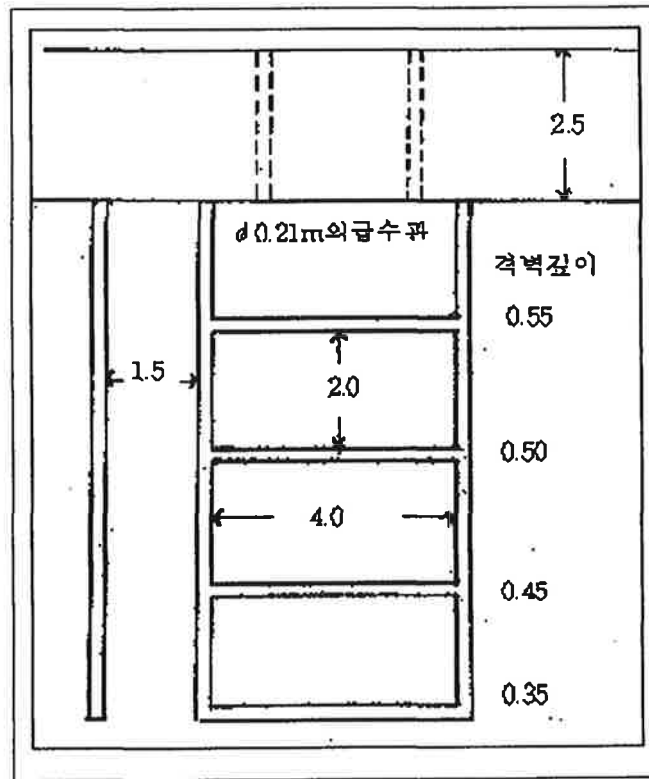


그림 3.3.3 탐진강 하구의 계단식 어도구조

계단식 어도 옆의 폭 1.5m짜리 평면 수로는 지금이라도 돌망태를 채우고 보

에 구멍을 뚫으면 뱀장어나 참게가 이용할 수 있는 어도로 개조가 가능할 것이다. 탐진강 하구에서 2번째 보(戕)인 관선보에는 총 9개소의 어도가 있어 한 보(戕)에 설치된 어도의 개소수로는 제일 많아 이 지역의 은어와 뱀장어의 중요성을 알수 있었다. 물고기가 어도를 이용하나를 조사하기 위하여 하구로부터 어류상을 조사한 결과 탐진강 하류의 4개보 상하류에서는 총 36종 727개체의 어류를 채집하였다. 이중 바다에서 강으로 왕래하며 서식하는 어종은 은어, 뱀장어, 꼭져구, 꺾정어, 전어의 5종이 었다. 이들 소하성(溯河性) 어류 외의 피라미, 갈겨니, 납자루 등 대부분의 담수어는 어도를 이용하여 상하류로 이동하는 국지회유성 어종들이다. 조사된 어종 가운데 꺾정어는 환경부 특정야생동식물 목록에 포함된 종으로 최근 천연기념물 지정을 검토하고 있는 종이며 현재 우리나라에는 탐진강과 인근의 해남 삼산천, 구산천에만 약간 서식하는 희귀종이다.

설치된 어도가 위의 소하성 어류가 제대로 이용하나를 검토한 결과 하구에서 첫 번째인 상수취수원 보(戕) 하류에는 전어, 은어, 뱀장어, 꼭져구, 꺾정어 모두가 채집 되었으며 이 보의 상류에서 조사한 결과 여기에는 은어와 뱀장어는 세 번째 보 하류까지 채집되어 하류의 2개 보를 올라온 것이 확인 되었으며 세 번째 보에는 3개의 계단식 어도가 설치되었는데 심하게 파손되어 은어가 이용할 수 없었다. 전어는 첫 번째 보의 하류에서만 채집되었는데 전어의 특성으로 보아 계단식 어도를 통하여 상류로 소상하지는 않을 것이다. 꼭져구와 꺾정어는 저서성 어류로 소상능력이 뛰어나서 순지리 보 아래까지 올라올 수 있었다.

소하성 어류는 바다에서 올라오므로 보의 상류에서 조사하여 채집되면 그 어도를 통하여 올라온 것으로 볼 수 있지만 피라미, 납자루, 각시붕어 등의 1차담수어는 담수역에서 분포 범위가 넓으므로 어도 상류에서 채집된다고

표 3.3.2 탐진강 어도 현황

보	위 치	형 식	높 이 (m)	폭 (m)	길 이 (m)	계단 수	어도 수	비 고
상수도 취수원보	강진군 군동 면 석교리	계단식A	0.9	6.0	6.8	4	3	평면수위가 달린 계단식 파손 심함
관선보	강진군 군동 면 남산리	수로식A	1.8	2.7	8.7	-	1	얕은 수지형 감세공이 있음
		"		5.0	9.3	-	1	"
		"		2.8	13.4	-	6	"
		수로식B		4.6	11.0	14	1	사람계단과 비슷한 형태
장 리보	강진군 군동 면 장산리	계단식A	1.2	6.0	9.0	4	3	21cm파이프 2개로 급수됨 3개 모두 파손, 이용불가
순지리보	장흥군 장흥 읍 순지리	계단식B	2.0	5.0	29.2	8	1	풀이 너무 얇음(0.2m)
		수로식C		2.0	27.0	-	1	유량을 각나판으로 조절 하고, 방조망 있음
		계단식C		15.0	23.0	6	1	풀이 얇고(0.35)격벽이 넓음
		수로식D		5.0	12.0	11	1	계단뒷쪽이 깊은 계단형
		수로식E		10.0	10.2	-	1	단순한 평면 경사로
		"		5.4	11.3	-	1	"
계							21	

어도를 통하여 올라갔다고 볼수가 없으므로 어도의 출구에서 올라오는 물 고기를 조사한 결과 피라미와 납자루가 소상하는 것을 확인 할 수 있으나 그 양은 매우 적다.

이와 같이 어도의 구조가 나쁘고 대부분이 파손되었는데도 은어, 뱀장어, 걱정이 등의 소하성(溯河性) 어류가 어도를 통하여 소상하는 것은 하천으로 올라오지 못하면 성장을 하지 못하고 내려가지 못하면 산란을 하지 못하여



일생을 마칠 수 없기 때문에 필사적으로 올라오는 것이다. 피라미, 납자루 등의 1차담수어가 어도를 통하여 상류로 올라가는 것은 주류성(走流性)이 매우 강하기 때문으로 판단된다. 하류에서 두 번째 보인 관선보에서는 은어가 어도 입구를 찾지 못하고 2m 정도의 높은 보를 흐름을 타고 넘으려는 것을 많이 볼 수 있어 어도의 입구가 잘 못된 것도 확인할 수 있었다.

이와 같이 탐진강에는 어도를 설치하느라고 노력은 많이 했지만 제대로 만든 것은 1개소도 없고 따라서 이용도 충분하지는 못하였다. 이들 어도의 문제점과 개선방향을 요약하면 다음과 같다.

- 어도입구와 보의 높이가 같아 어도로 물이 흐르지 않는 것이 대부분이며 어도에 유량 조절장치가 설치되어야 한다.
  - 계단식 어도의 경우 풀이 너무 얇아 물고기가 도약할 수 없는 것이 대부분이며, 어도의 하류가 세굴되어 낙차가 커서 물고기가 어도에 접근할 수 없는 것이 많다.
  - 보를 시공한 뒤 어도를 추가로 설치하면서 구조를 보와 연결하지 않아 설치한 후 홍수가 지나면 바로 파손되고 있었다. 따라서 어도의 높이를 좀더 줄이고 바닥 세굴을 방지하는 돌망태 등의 시설이 필요하다.
- 또한, 조사된 21개의 어도중 완전한 것은 1개소도 없고 모두 위의 문제점 중 몇 가지씩을 갖고 있어 어도설계기준의 보급이 절실하다.

#### 나. 우리나라의 어도 개선 방향

'91년 이후 도벽식 어도는 계단식 어도로 바뀌었으며 길어도 길어져 물고기가 이용하기에 좋아지고 소하성 어류가 올라오지 못하는 경기도 용인, 포천, 전남 남원시, 강원도 인제, 홍천, 평창 등지의 내륙의 하천에도 어도를 많이 시공하고 있어 그 수는 200개소는 훨씬 넘을 것으로 보이며 '96년 말

수산자원보호령이 개정되어 모든 댐에 어도를 설치하도록 되었으므로 그 수는 증가할 전망이다. '90년대 들어와서 하구 담수호에 설치된 어도는 대부분 갑문식 어도인데 현황을 보면 영암군의 영암호, 금호호, 당진군의 석문호에 시공됐으며, 화성군의 우정방조제, 보령방조제, 홍성방조제에는 시공 중이고 새만금지구의 동진강 배수갑문과 만경강 배수갑문에는 설계를 완료했다. 갑문식 어도는 모두 황중서에 의해 특허 42218호로 등록된 통선겸용 갑문식(通船兼用閘門式) 어도로 농어촌진흥공사가 시공한 것들이다. 갑문식 어도는 수위의 변화가 심하고 이용하는 물고기의 종이 다양할 때 시공하는 어도로 은어, 송어 등 유영력이 큰 물고기는 물론 용어, 줄공치, 꺾정어, 황복 등 유영력이 약한 어종도 유영력에 관계없이 이용할 수 있으며 조위(潮位)나 내수위의 변화에 관계없이 시공이 가능하다. '95년 봄부터 운영이 시작된 영암방조제 어도의 경우 '95년 3월, 5월, 7월, 1월, '97년 3월, 5월, 6월의 조사에서 송어, 꺾정어, 줄공치, 학공치, 용어, 두줄망둑, 꼭저구, 은어 등 유영력에 관계없이 모두 이용한다. 매년 봄에는 어도를 통하여 소상한 송어를 어민들이 호내에서 어획할 정도로 많은량이 소상하였다.

일본의 나카무라(中村)교수는 하천에 설치된 갑문식 어도의 문제점은 갑실 내에 모인 물고기가 상류측 갑문을 열면 올라가지 않는 것이라 하는데 영암호에서는 바다에서 담수를 따라 올라온 소하성 어류이기 때문에 문비(門扉)를 열면 곧바로 담수호로 소상하여 일반 하천의 갑문식어도와 같은 문제는 없었다. 우리나라에는 댐에 설치된 어도가 없으나 한국전력에서 양양양수발전소 하부댐을 막으면서 어도를 설치하기로 하고, 수리모형시험을 우리 연구팀에서 실시하였다. 이 댐은 높이가 53m나 되는 높은 댐이어서 일반적으로 시공하는 계단식 등 수로식 어도는 설치할 수가 없으므로 갑실과 관로를 병합한 Borland식 어도를 설계하였으며 그 원리는 그림 3.3.5와 같다.

표 3.3.3 우리나라 갑문식 어도 현황

지 구	폭 (m)	길이 (m)	통선규모 (ton)	이용어종	비 고
석문호	4.0	20.2			'96 완공
영암호	6.6	30.0	30	옹어, 즐공치, 승어	'94 완공
금호호	6.6	30.0	30	옹어, 즐공치, 승어	'96 완공
우정지구	6.0	24.0	10		시공중
홍보 홍성호	4.6	15.0			시공중
홍보 보령호	4.6	15.0			시공중
새만금 만경강	16.0	62.0			계획
새만금 동진강	4.0	30.0			시공중

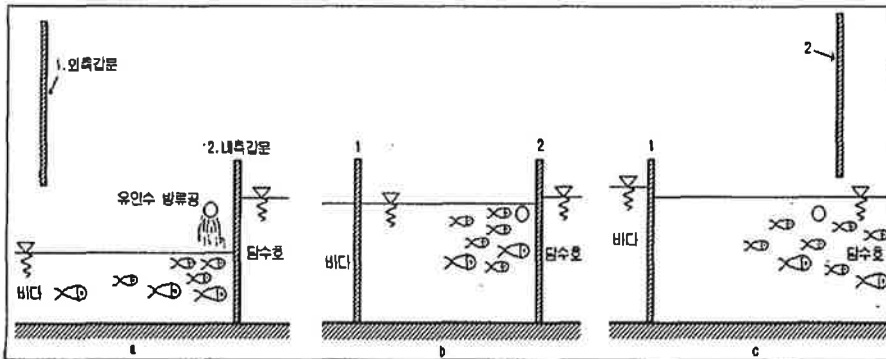


그림 3.3.4 갑문식 어도 수문의 개방순서

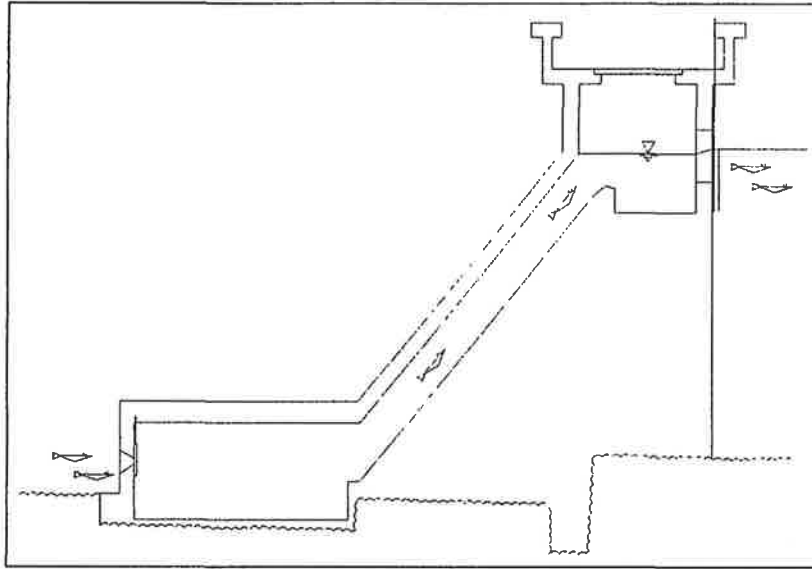


그림 3.3.5 Boland식 어도 수리모형(수리시험장)

Boland식 어도는 댐의 높이가 높고, 계단식 어도 등 수로식 어도를 설치할 적당한 부지가 없을 때, 저수지의 수위 변화가 클 때, 소상하려고 하는 어종의 유영력에 관계 없이 모든 어종이 이용할 수 있는 어도형식으로 1949년 Ireland의 Borland 에 의해 Leixlip댐에 처음 설치된 이래 영국과 유럽에서 주로 시공되고 있는 새로운 형식의 어도이다. 이 어도를 조위차가 큰 방조제에 부설할 경우, 갑실을 상류측으로 옮기어 설치한다면 효과적일 것으로 판단된다.

#### 4. 어도의 수리적 특성 개선

방조제 부설 어도 연구는 서해안의 심한 조석 간만의 차이를 극복할

수 있는 새로운 형태의 어도를 개발코자 한다. 이를 위하여 지금까지 우리나라의 방조제에서 활용되어온 계단식 어도의 문제점과 갑문식 어도의 효율성을 분석하고자 한다. 대부분의 물고기는 유속이 1m/s 이하의 완만한 흐름을 선호한다. 격벽식 어도는 금강하구둑과 동해안의 여러 곳의 하구에 설치된 형태로서, 홍수와 갈수시 유량의 차이가 심하고 구간별로 유속의 기복이 심한 단점이 있다. 1999년 4월, 동해와 남해안의 하천에 설치된 어도 시설을 답사한 결과, 대부분의 어도가 수로 중앙부에 1: 10 정도의 수면 기울기로 설치되어 유속이 2 m/s 이상으로 빠르고, 어도 하류부에서 세굴 깊이가 1m 정도로서 물고기의 소상이 어렵고, 구조가 파손되어 있었다. 또한, 격벽식 어도의 경우, 부분적인 유속이 2.5m/s 나 되고 와류가 심한 곳이 있어서 물고기의 소상이 힘들며, 어떤 계단식 어도는 계단 사이가 크고 유인수가 계단 양쪽으로 분산되도록 설치되어서 물고기가 올라갈 수 없는 곳도 있다. 물고기의 크기가 0.05-0.8m의 범위일 때 유영 유속은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$U = 0.7 L/2t \quad (3.3.1)$$

여기서, U는 물고기의 유영속도(m/s), L은 물고기 체장(m), t는 물고기의 꼬리 운동 주기와 관련한 근육 팽창 시간으로서 이는 다음 식과 같다.

$$t = 0.17 L^{0.43} + (0.0028 - 0.0425 L^{0.43}) \ln T - 0.0077 \quad (3.3.2)$$

여기서, T는 수온으로서 이 식의 적용 범위는 섭씨 2-18도이다. 또한, 물고기가 지속적으로 유영할 수 있는 시간( $t_m$ )은 다음 식과 같다.

$$t_m = E/(P_c - P_i) \quad (3.3.3)$$

여기서, E는 물고기의 보유 에너지( $19,400L^3$ ),  $P_c$ 는 물고기가 잠재하는 힘 ( $0.97e^{-0.0052T}U^{2.8} L^{-1.15}$ ),  $P_i$ 는 공급되는 힘( $48 L^3$ )이다. 이들 식은 설계 단계에서 개략적으로 추정할 수 있는 식으로서만 사용될 수 있다. 어류의 소상이 어렵고 흐름이 빠른 어도 구조물들은 부분적으로 격벽을 쌓고 계단을 세분하거나, 하류에 돌망태 등의 세굴 보호공을 적절한 규모로 설치함으로써 어도의 기능을 향상시킬 수 있다. 수로의 흐름 속도를 완화하면, 각종 오염물을 침전시켜서 물을 맑게 하므로 어류의 생태와 수질의 보존적 관점에서 바람직하다. 방조제 부대 시설로 널리 사용되는 계단식 어도의 고조위 상태에서 활용상 제약이 많으므로 이를 극복하기 위하여 갑문식 어도의 활용성을 높이기 위한 연구가 수행되었다. 계단식 어도는 1982년 금강하구둑 계획과 환경영향평가 과정에서 일본 Sanyo 용역단이 추천한 어도로서 중앙부에 유인수로를 설치하여 바다 쪽의 어류를 모은 후 좌우측에 설치되는 계단식 어도와 돌망태 어도를 거쳐서 담수호로 올라오도록 하는 방식이다. 이와 함께, 방조제에 부설되는 통선문을 활용하여 어류의 소상을 조장하는 방법이 영산강 하구의 영암호와 금호호에 설치되어 활용되고 있다.

#### 가. 계단식 어도

방조제에 부설되는 어도는 대체로 1/20 정도의 완만한 기울기를 형성하고 유인수는  $0.2 m^3/s$ 로 계획하여 어류의 소상을 돕는다. 본 연구에서 축척 1:10의 어도에 관한 수리모형이 그림 3.3.6과 같이 시행되었다. 어도에서 물고기의 소상을 돕고 퇴적토를 제거하기 위하여 격벽을 상하 2단 승강식으로 설치하는 방안을 검토하였으나, 어도의 흐름은 고정식 격벽에서도 안정되어 어류의 소상에 어려움이 없으며, 금강하구둑 어도를 조사한 결과, 어도 내의 퇴적은 적다. 어도 수문의 폭을 줄이면 수심이 높아져 물고기가 담수호로 흘러드는데 유리하다. 장어가 소상하는 돌망태 어도에서 돌망태가

유실되지 않도록 적절한 규모를 설정하여 바닥에 잘 부착되어야 한다. 또한, 담수호 수위가 낮을 때, 어도 수문의 관리는 외조위의 영향을 받는다. 뱀장어, 농어등은 만조시간 2시간 전에 약 80%가 소상하므로 이들이 어도를 이용하려면 어도의 최상단 격벽의 수위를 높이고 담수호의 물을 양수하여 어도에 흘려보내 물고기가 올라오도록 해야 한다. 어도 수문 하류에 갑실을 만들고, 담수측에 펌프를 설치하여 갑실내로 유인수를 방류하면 어류의 소상을 도울 수 있다. 수리모형시험 결과, 어도 하류단의 조위가 낮은 간조시, 바닥면의 마찰력이 작용하여 난류가 심해진다.

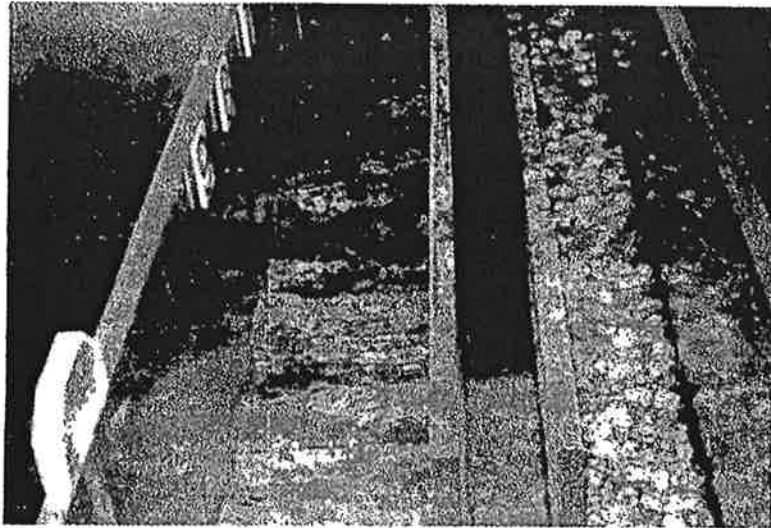


그림 3.3.6 계단식 어도의 수리시험

이는 그림 3.3.8과 같이 유량이 많은 하류단에서 도수가 발생하고 수위가 더욱 낮으면 낙차류의 형태도 발생한다. 따라서, 어도의 하류부는 적절한 수심이 유지되어 도수를 방지하고 흐름을 원활히 하여야 한다. 이는 수심

을 증대하고 유속을 완화하여 Froude 수를 줄이는 것이 중요하다. 그러나, 유속을 완화하려면, 기울기가 완만하고 어도 폭도 증가하여야 하며 이에 따른 어도 길이가 증대되어 공사비가 증가한다.

이를 개선하기 위하여 어도의 기울기를 줄이지 않고 어류가 도약할 수 있는 유속으로 거슬러 올라가도록 어도를 설정하고 일부 구간은 휴식 공간으로 조성하는 것이 바람직하다.

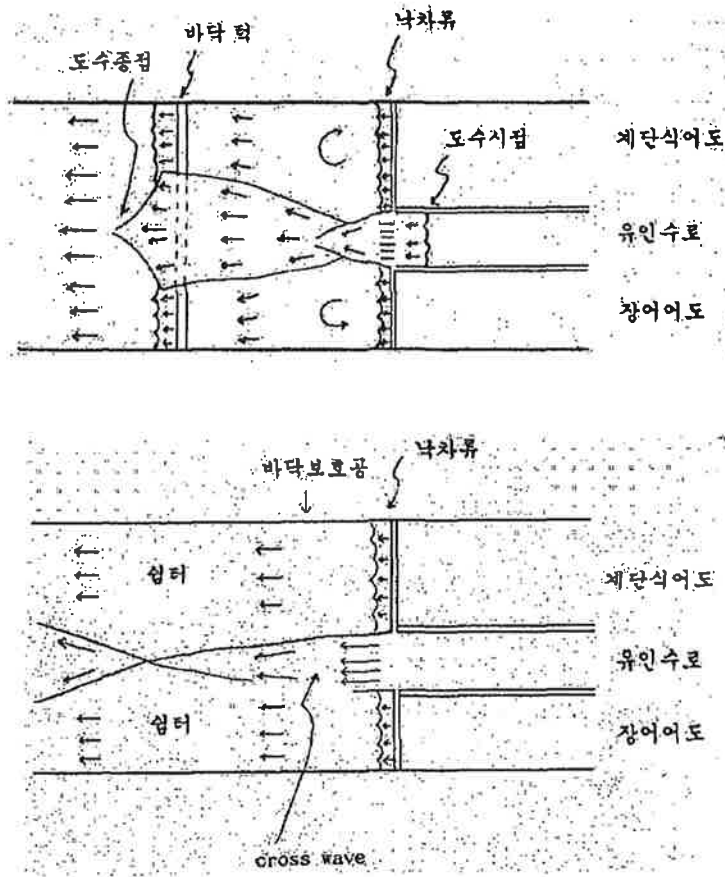


그림 3.3.7 계단식 어도의 설계안과 보완에 관한 수리시험



또한, 어도의 말단부 구조물이 강한 흐름의 영향으로 파손되지 않도록 완화구간을 설치하거나 대조 간조위 이하의 어도 말단은 수심을 증가시켜서 물방석을 만들고 돌망태와 같은 바닥보호공을 설치하여 흐름의 저항력을 증가하고 바닥 세굴을 방지토록하였다. 유인수로의 말단부도 유속에너지를 감소할 수 있도록 블록을 설치하는 것이 바람직하다. 계단식 어도와 장어 어도에도 유속을 감소할 수 있는 블록 또는 완경사 구조물로 보완하는 것이 바람직하다. 또한, 어도의 말단 웅덩이를 조성하고 수초등으로 조성된 심터를 조성하여 짧은 구간은 도약하여 소상하게 하는 방안도 바람직하다.

금강하구둑의 어도에서 유속을 측정한 결과 유속이 2m/sec 이상으로 매우 빠르며, 뱀장어등의 어류가 소상하도록 설치된 돌망태 어도구간은 수심이 매우 낮기 때문에 이의 흐름을 원활히 하도록 수심을 증가하며 유속을 감소하거나 휴식공간을 조성할 수 있는 방안과 흐름을 증가할 때 돌망태가 안정적으로 유지될 수 있는 고정장치 등의 보완 방안이 검토되어야 한다. 이에 관하여는 향후 현장 기술자들과 좀더 세부적인 협의를 추진할 예정이다. 특히, 유인수로의 유량을 증가할 필요가 있는 경우, 빠른 유속에서 구조물이 안정되고, 간조시 하류 말단부에서 난류가 심하지 않도록 감세공을 개발하는 방안이 필요하다.

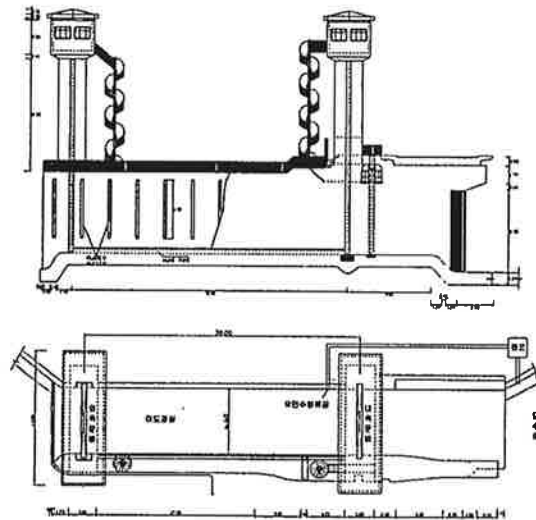
#### 나. 갑문식 어도

조위 변화가 심한 우리나라 서해안에서 수로식 어도는 만조시 운용시간에 제약을 받을 수 있다. 전라남도의 영암호와 금호호에서는 통선문에 어도 기능을 부가하여 운영하고 있으며 송어, 잉어, 객정어 등 많은 어종이 이 어도를 이용하고 있다. 그러나, 심해 방조제 해역은 영암호가 위치한 목포구 연안의 특성과 상이하다. 즉, 영암호 연안은 유속이 느리며, 해역이 목포구 내의 폐쇄된 형태이므로 소하성 어류가 다른 구역으로 이동할 공간이 제한

되어 있다. 그러나, 심해 방조제 해역은 조석량이 많기 때문에 소량의 유인수만 방류한다면 고기들은 갑문으로 집중하는데 어려움이 있다. 따라서, 갑문식 어도는 방조제 완공 후 조석 체계를 고려하여 유인수 규모에 따른 담수의 확산에 관한 검토가 필요하다.

본 연구 결과에 따라서 그림 3.3.8과 같이 영산강 하구둑에 통선문을 이용한 갑문식 어도의 설치에 기술 지원을 실행하였으며, 이에 따라서 송어, 줄공치 등 다양한 어류가 담수호로 소상하고 있다. 또한, 새만금 방조제의 계단식 어도는 조석의 영향으로 가동시간이 부족하므로 통선문을 이용한 갑문식 어도로 변경하였다.

한편, 어도를 설치하기 어려운 구역에서는 그림 2.3.6과 같이 비와꼬 담수호내에 설치된 어류산란장과 같은 인공 산란시설에 의하여 어류를 보호할 수 있다.



〈영암호통선문갑문어도〉

그림 3.3.8 영산강 하구둑 통선문을 이용한 갑문식 어도 설치현황

# 내 용 누 렷

# 내 용 누 락

## 제 4절 자연보존지역과 인공습지의 조성

### 1. 간척지 자연 보존 현황

자연 보존지역(nature reserves)은 간척 개발지역이 보유하던 천연적인 가치를 부분적으로나마 회복하기 위하여 조성되는 구역으로서 야생의 생태 서식지와 인공 습지 등을 포함한다. 전라남도 해남군에 있는 해남지구 간척지는 1988년에 방조제를 막고 3,711ha의 농지를 개발하여 16만석의 미곡을 생산하고 21km의 육운을 개선한 사업이다. 담수호는 만수면적이 649ha이고 저수량은 1,920m<sup>3</sup>인 비교적 작은 호수이어서 바닥을 준설하여 내용적을 확보하고 준설토는 호수 내에 50ha의 섬을 만들었다. 1998년 겨울, 이 섬에 가창오리 등 18만 마리의 철새가 찾아와서 겨울을 지내고 떠났다. 조류학자들은 이곳을 철새 도래지로서 지정하길 원하며, 인근 농민들은 철새들이 농작물을 해치므로 이를 반대하고 있다. 해남지구 간척지 종합개발사업 사후 환경영향조사보고서(1997)에 따르면, 담수호 상류에는 참새, 중대 백로, 흰뺨 검둥오리 등 9종 이상의 새가 서식하며 피라미, 참붕어, 흰줄 납줄게, 각시 붕어 등 200종 이상의 어류가 발견되었다. 전라남도 영암군에 있는 영암호는 길이 2.2km인 방조제를 축조하고 12,800ha를 매립하고 8,000ha의 농지를 개발한 사업이다. 담수호의 만수면적은 4,286ha로서 호수 내에는 면적이 약 100ha인 뜬섬이라고 알려진 섬이 생겨나서 농지로 이용되며, 겨울철에는 청둥오리와 가창오리 등이 도래한다. 영산강3지구 간척지 종합개발사업 사후 환경영향조사보고서(1996)에 따르면, 담수호 조성 후 섭금류의 무리는 감소하였으나, 담수호에는 논병아리, 중대 백로 등 434종 이상의 새가 서식하며 동자개, 두줄망둑 등 4,542개 이상의 어류가 발견되었다. 1999년 4월 23일 오전 10시경에 영암호 어도에서 뜰채로 물고기를 채집한 결과, 두줄망둑어, 꺾정어, 줄공치, 송어, 용어 등이 잡혔으며, 이 중 용어가 가

장 많았다. 이날 담수호와 연안에서 수온을 측정한 결과, 담수호는 섭씨 14.8도로서 바다 쪽은 섭씨 13.3도보다 1.5도 정도 높았다. 간척지의 다양한 생태 균형을 보존하려면 일부 철새 등 공격적인 경쟁자(competitive)의 수를 제한하고 다양한 동식물이 함께 서식하도록 조성하여야 한다.

## 2. 인공 습지의 조성

### 가. 습지의 특성

국제 천연자원 보존 협회(the International Union for the Conservation of Nature and Nature Resources(IUCN)가 1971년 이란의 Ramsar에서 개최한 물새 서식지로서 습지의 국제적 중요성에 관한 회의에서 습지를 다음과 같이 정의하였다. 즉, 습지(wetland)는 수심 6m 이내의 늪지와 탄지로서 담수 또는 염수가 흐르거나, 물이 고여진 지역이다. 그러나, 이는 식생과 토양 상태를 포함하여 규정하지 않았다. 미국과 카나다는 수심이 6m를 넘더라도 습지에 포함하기도 한다. 미국 공병단의 규정(33 CFR328.3(b):1984)에 의하면, 습지는 빈번한 수분 공급에 의하여 침수되거나, 포화된 토양 조건에서 식물이 자랄 수 있는 지역이다. 따라서, 습지에서 흐름(wetland hydrology), 토양(wetland soil), 식생(vegetation)은 습지를 구분하는 가장 중요한 요소이다.

### 나. 습지 조성 설계

#### 1) 흐름의 수문학적 특성(Hydrology)

간척지 연안의 습지 조성에서, 조석 흐름의 이동과 하천 유입량의 시간적 또는 계절적인 변화, 지체 시간(retention time), 지형 형태(morphology)의 변화 등 흐름의 수문학적인 특성은 가장 중요한 사항이다.

이의 분석 결과에 따라서 동식물의 생태, 토양 특성의 변화 그리고 수질 정화 능력 등이 분석되어야 한다. 담수호와 해안에서 수심의 변화는 식물의 성장과 동물의 서식, 생화학적인 특성을 결정하는 요인이다. 습지의 수심이 깊으면 갈대, 미나리, 줄, 골풀, 벼풀, 큰고랭이, 택사와 같은 정수 식물(emergent vegetation)은 없지만 어류의 서식 공간이 조성되며, 질산화(nitrification) 효과가 커져서 질소의 제거가 필요하게 되면 탈질화(denitrification) 과정이 요구된다. 또한, 지체공간이 생겨서 흐름의 재분배가 이루어진다. 수심이 얕으면 물과 흙의 접촉에 의하여 탈질화 등의 화학 반응이 활발해지고 다양한 맥관 식물(vascular plants)이 번성하게 된다. 미국의 매리랜드 주는 홍수 조절을 위하여 만든 습지 면적의 75% 구역에서 수심을 30cm 이하로 제한하였으며, 나머지 구역도 1m 이하의 수심으로 유지하도록 규정하였다.

담수호에서 바람직한 식물이 번성하고 그렇지 못한 식물이 사라지도록 배수구조물로서 수위를 조절한다. 습지가 조성된 후 초기 단계와 발아기에는 수심을 낮추고, 부레옥잠과 개구리밥과 같은 부엽식물(floating leaved macrophyte) 또는 검정말, 붕어마름, 말즘, 민나자스말과 같은 침수식물(submerged macrophyte)이 번성되기 위하여 지속적으로 침수시키는 것이 바람직하다. 식물이 군락을 이루는 데에 3년 정도가 필요하며 습지가 적절하게 퇴적되는 데에도 3년 정도가 소요된다. 염습지를 조성하는데 있어서 수문학적 설계 지침은 아직까지 미흡하지만 식물 군락을 이루는데 적절한 조위와 침수 기간 및 염분 농도가 정해져야 한다. William J. Mitsch 등(1993)에 의하면, 습지로 유입되는 오폐수의 부하율(loading rate)은 단위 면적 당 유량으로 설정된다. 오염수를 처리하는 습지는 지표수 습지와 근근역으로 흐르는 지하수 습지로 구분되며 이들의 설계 부하율은 1.3 - 26cm/day 정도이다. 미국 EPA 설계지침에서 오염수를 받는 자연 습지의 부

하율은 0.7cm/day로 제한하였으며, 일리노이 주의 Des Plaines 강 정비 사업에서 부하율을 1-8cm/day로 설정하였다. 이러한 제한 규정은 비점원 오염물과 홍수가 유입되는 하천과 호수의 습지에서 너무 제한적이다. 또한, 습지에서 오염수의 지체시간은 5-14일 정도로 설정된다. Florida 지역에서 건기에는 21일, 습한 계절에는 7일 정도가 적절하다고 한다.

### 2) 습지의 지형 형태

해안 습지의 비탈면 기울기는 1: 6 정도가 바람직하며, 수심이 60cm 되는 곳까지는 완만한 기울기로 조성되어야 한다. 홍수 유출에 따른 지형 변화를 막고 오염물을 처리하기 위하여, 습지 바닥의 기울기는 1: 200 (0.5%) 이하가 되도록 한다. 또한, 영양물질과 유사가 효과적으로 침전되고 예기치 못한 수로가 형성되지 않도록 습지의 흐름은 완만하여야 한다. 습지의 길이와 폭의 비율(L/W)은 10 이상이 되어야 한다. 호안의 구조는 홍수 시 침식되지 않아야 한다. 습지 조성 후, 침전물이 퇴적되면, 적절한 준설이 필요하다.

### 3) 화학물질의 유입

농지에서 습지로 유입되는 물에는 질소와 인 등의 영양물질과 농약 살충제, 기름 등의 화학물질이 섞이게 된다. 습지에서 화학물질의 반응과 거동에 관한 수치모델이 개발되고 있으나, 아직까지 이의 적용성은 신뢰하기 어렵다. 습지에서 이러한 화학 물질이 지체하며 변화하는 과정은 물질의 특성에 따라서 다양하다. 습지에서 질소의 농도가 100 gN/m<sup>2</sup>yr이면 탈질화 반응에 의하여 약 40-50 정도가 지체된다. 인의 경우는 현장 여건, 특히, 토양 특성에 따라서 많이 달라진다. 지하로 흐르는 고농도의 오염수가 부하되는 습지는 좀 더 많은 물질을 지체시킨다. 한편, 지표수 흐름의 오염수는 부하량이 많기 때문에 이를 처리하는 인공 습지는 자연 습지 또는 보강 습지(restored wetland)에 비하여 좀 더 많은 유사와 인을 지체시킨다. 결과적



으로 습지의 정화 능력은 영양물질과 유사량, 유기 탄소 등을 제거할 수 있는 용량에 따른다.

#### 4) 지반 토양

습지의 토양은 식물의 뿌리 활동을 조장하는데 있어서 중요하다. 습지의 완만한 흐름과 포화상태의 토양 조건에서도 충분히 투수성이 낮아야 한다. 습지의 토양은 임의의 화학 성분을 지탱하여야 하며, 유입된 퇴적토가 동식물의 서식에 주는 영향은 설계의 중요한 사항이다. 유기토양은 철분을 함유한 흙에 비하여 이온 교환능력이 크기 때문에 여러 가지 오염물질의 제거 능력이 크며, 적절한 탈질화 수행을 위한 혐기성 조건과 에너지를 공급하여 질소를 효율적으로 제거한다. 유기 토양은 늪지대에 많으며, 철분이 많이 공급되거나 침식성인 호안 바닥에서는 적게 분포한다. 그러나, 유기토양은 습지 조성에 있어서 영양물질이 적고, pH가 낮으며, 수생식물의 뿌리 활동에 부적합하므로 기피된다. 점토 토양은 지표수의 침투를 막기 때문에 활용하는 경우가 많지만, 뿌리가 확장하고 수분을 받는데 지장이 많기 때문에 식양토가 이를 대신하기도 한다. 사질토는 영양분이 적지만 식물의 정착과 뿌리의 수분 공급이 쉽다. 바닥으로 수분이 침투되지 않도록 점토를 깔고 약 60cm의 깊이로 지역의 흙을 사용하여 식물이 자라게 하는 것이 최선인 경우가 많다. 기반층의 영양조건을 규정하기는 어렵지만 생육 단계별로 적절한 영양 공급을 위하여 비료를 사용하기도 한다.

#### 5) 식물

인공 습지의 식물 품종은 습지의 조성 목적과 기후 조건에 따라서 결정된다. 담수 습지에서는 큰고랭이, 부들, 사초와 같은 정수식물을 비롯하여 황 수련과 같은 부엽식물이 널리 애용되며, 침수 식물은 쓰이지 않으며 이들은 흐린 물에서 번성하기 어렵다. 해안 습지를 조성하는데 있어서 현화식물은 유럽과 중국 등지에서 사용되는 기본적인 품종이다.

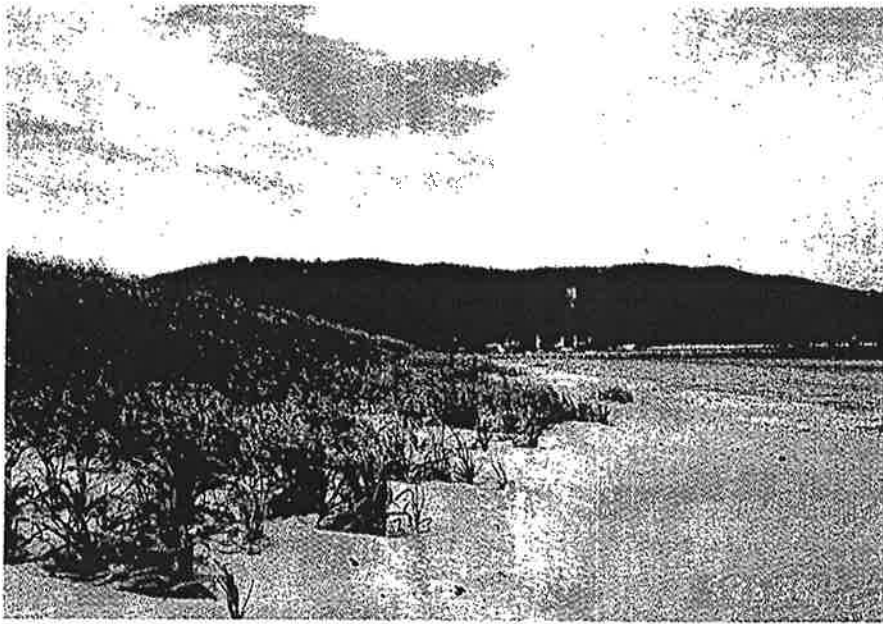


그림 3.4.1 곶소만 해안(구식포)의 달뿌리풀 분포

식물 품종의 선택과 번성케 하는 가장 중요한 요인은 퇴적 높이를 결정하는 일이다. 식생 위치는 조간대 이상의 표고에 있어야 한다. 퇴적물의 구성은 쉽게 마르는 모래질이 아니면 식물이 번성하는데 크게 중요하지 않다. 파력이 큰 곳에서는 식물이 번성할 수 없다.

대부분의 평균 해면 이상의 조간대에 형성되는 퇴적지는 파도가 크지 않으면 식물이 자연적으로 파종되고 번성한다. 갈대는 미국에서 애용되지 않지만 유럽과 우리나라 지역에서 선호하는 식물이다. 공격적인 경쟁력이 강한 식물은 애호되지 않는다. 그러나, 습지의 선호식물이 자연적으로 번성하고

관리비용도 저렴하도록 설계되어야 한다. 이를 위하여 초기에는 담수조건으로 식물을 번성하게 한 후 유입수로를 설치하여 염수를 점진적으로 혼입하여 염습지를 조성하는 예도 있다. 우리 나라 서남해안에 자생하는 내염성 작물 중에, 잘피, 또는 왕거머리말(zostera)로 알려진 침수성 현화식물은 키가 2-3m로서 영산강 하구의 영암호 연안, 완도군 고금도 간척지 연안에 서식하며, 이의 줄기는 농촌의 퇴비로 이용된다. 1999년 6월 14일 고금도의 고금방조제 연안의 왕거머리말 서식처를 방문한 결과, 이의 뿌리 밑둥이 간조위 정도에 있으며, 간조시에는 누워있다가 수위가 높아지면 거머리처럼 입사귀 끝이 수면 아래에서 팔랑거리는 형태를 보여주었다. 이곳 방조제 연안은 약산면 조약도와 신지면으로 둘러싸여서 파도가 적기 때문에 식생에 양호한 여건을 갖추고 있다. 이 식물은 충남 태안군 이원 간척지 공사 전에는 내부 연안에서도 서식되었기 때문에 보조 제방 등에 의하여 파랑의 영향을 감소할 수 있게되면 수온이 낮은 중서부 연안에서도 조성할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 전라북도 고창군 곰소만의 구식포 해수욕장 부근에는 내염성 식물인 달뿌리풀(벼과 식물)이 만조위 부근에 분포되어 있으며, 이의 북쪽에 있는 하전리 해안의 평균 해만 부근에는 내염성 식물인 천일사초(사초과)가 분포되어 있음을 현장 조사를 통하여 알 수 있다.

#### 다. 논외 인공습지 기능

논외 인공 습지로서의 필요 충분 조건을 갖추고 있다. 앞서 언급한 인공 습지의 설계 조건인 흐름과 토양과 식물의 특성상, 논외 흐름은 매우 완만하다. 부하량(loading rate)의 규모는 벼의 증발산량과 삼투량을 포함한 소비수량인 7-8mm/day를 기준할 때, 인공습지의 기준인 20mm/day 이하로서, 오염수의 체류기간은 간단 관개에 의한 관개일수가 5일 정도로서 미국의 인공 습지 기준인 15일 이내이다. 따라서, 논외 생육기간인 180일 정도의 영

농기간 중의 상류에서 유입하는 영양물질의 분해 능력과 유사의 침전 효과가 크다. 논외 수심은 15cm 이하로서 람사 조약에 의한 기준인 6m 보다 적 으며, 미국 매리랜드 주가 엄격하게 규정하는 인공 습지의 이상적인 수심인 1m 이내의 우수한 흐름 조건을 갖추고 있기 때문에 산소의 공급과 식물과 토양 접촉에 의한 영양물질의 반응이 유리하다.

간척지의 기반 토양은 다년간의 퇴비 살포 등에 의하여 점질의 식양토로 개량되어 식물 생장에 유리하며 지하 삼투(percolation)를 억제하는 데에도 효과적이다. 벼는 정수식물로 구분되는 현화식물로서 질소와 인의 흡수 분 해 기능이 크다. 논 바닥에 서식하는 미생물과 붕어 미꾸리지 등의 어류는 유기물 분해능력이 크다.

우리 나라의 갯벌은 간만 조위 차이가 크고 파도의 내습이 심하며, 토양 비효분이 부족하여 만조위 이하의 해역에서 식물이 거의 자라기 어려우므로 식물에 의한 질소 인 등의 분해능력은 논에 비하여 미천하다. 조간대에 서 식하는 미생물의 호흡에 의한 유기물 분해 능력이 있는 것으로 판단되지만, 조위가 높은 시간에는 갯벌의 면적이 줄어들고 분해 활동이 영향을 받게되므로, 시간과 공간적으로 논외 분해 능력과 비교할 필요가 있다. 따라서, 갯벌의 정화능력이 간척사업에 의하여 상실된다는 의견은 미국과 우리나라 해안의 조석과 파랑, 하천수 유입에 관한 수문학적 흐름 특성과 해안의 토 양 및 식물 서식 형태를 좀더 세부적으로 파악하고 우리 나라 논과 갯벌의 이러한 특성을 비교한 후 재고되어야 한다.

또한, 간척지의 인공습지 형태와 규모는 이와 같은 논외 습지로서의 기능 을 포함한 종합적인 환경 보전적인 가치와 능력을 고려하여 계획하여야 할 것이다.

## 라. 논과 갯벌의 정화능력 비교

### 1) 개요

2장에 기술된 퇴적량 변화 조사지구인 아산시 결매리의 갯벌과 주변 농경지에 시험조를 설치하고 시간에 따른 수질 변화를 측정하였다.

### 2) 시험방법

가로×세로×높이 1.0m×1.0m×0.4m 의 철제 시험조를 제작하여 갯벌과 논에 0.2m 깊이로 설치하고, 시간에 따른 COD 변화 농도를 측정하였다.

시험 원수는 부근 하천수를 사용하였다. 측정 시기는 대·소조기로 구분하여 측정하였고, 설치된 시험조는 그림 3.4.2, 그림 3.4.3과 같다.

시험조에 주입하기 직전의 하천수를 채수하고, 시험조에 주입된 직후에 채수한 시료와 농도변화를 비교하였다. 이와 함께 간조 저조 사이의 6 시간 동안 드러난 갯벌에서의 수질 변화도 측정하여 비교 분석 하였다.

수질 측정 결과는 표 3.4.1에 나타냈다.



그림 3.4.2 아산시 결매리 갯벌에 설치한 시험조

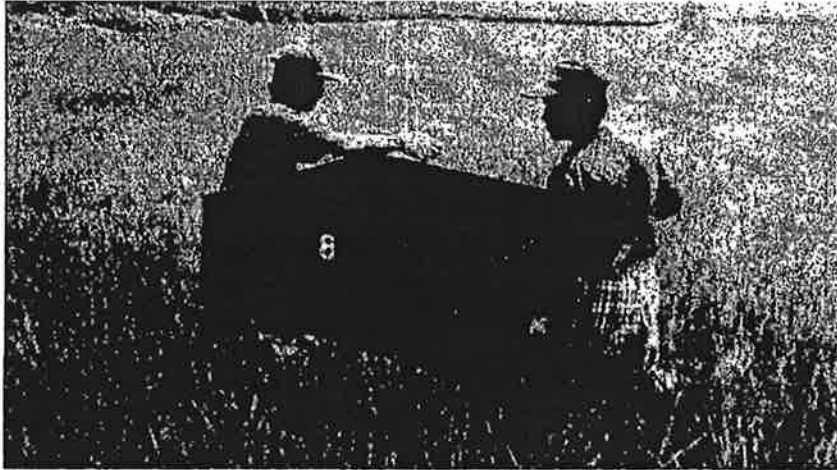


그림 3.4.3 아산시 결매리 논에 설치한 시험조



그림 3.4.4 현장 수질 측정 장면

표 3.4.1 수질 분석 결과

구 분			pH	EC ( $\mu\text{S/cm}$ )	COD ( $\text{mg/l}$ )	비 고	
소조기	초기농도	갯벌	LF1	7.2	22,800	11.6	
			LF2	7.3	8,240	20.8	
			LF3	7.7	18,000	13.6	
	after 6hr	갯벌	LF4	7.3	22,000	62.0	
			LF1-1	7.3	22,800	12.0	
			LF2-1	7.5	10,240	19.6	
		LF3-1	7.5	21,600	11.6		
	오염원수		LF4-1	7.5	580	15.2	
LF0			7.1	421	9.6		
대조기	초기농도	갯벌	HF1	7.0	2,670	40.0	
			HF2	7.1	4,610	14.8	
			HF3	7.1	5,120	19.6	
			HF4	7.1	1,950	50.4	
	after 6hr	갯벌	HF5	6.9	283	18.8	
			HF1-1	7.3	21,200	13.5	
			HF2-1	7.4	13,500	15.2	
			HF3-1	7.4	21,700	28.8	
		오염원수		HF4-1	7.5	17,460	16.5
	HF5-1			6.9	330	14.0	
	HF0	6.7	241	9.4			

### 3) 결과

그림 3.4.5는 소조기 각 시험조에서의 수질 변화를 그래프로 나타낸 것이다. LF1~LF3까지는 갯벌에 위치한 시험조이고 LF4는 논에 위치한 시험조이다.  $I_i$ 는 초기 시험원수 농도고,  $I_o$ 는 시험조 주입후의 농도를 나타낸다.  $I_t$ 는 시험조에 원수를 주입하고 6시간 후의 수질 농도이다.

시험원수의 초기 COD 농도는 9.6ppm이었으나, 각 시험조에 주입한 후에는 모두 농도가 증가하였다. 논인 경우는 62ppm까지 증가하였는데, 이는 시험원수 주입시 바닥층의 교란으로 인한 측정 오차라고 추정된다. 1회의 측정값과 검증되지 않는 시험 방법으로 갯벌과 논인 정확능역을 비교하기는 어려우나 소조시, 논인 COD 농도가 감소되었으며 갯벌인 경우는 시간이 지남에 따라 COD 농도가 다소 감소하는 경향을 보였다. 논에 설치된 시험조에서의 농도 변화는 초기 시험 원수 주입시 교란에 의한 측정오차로 정확능역을 비교하기가 어렵다.

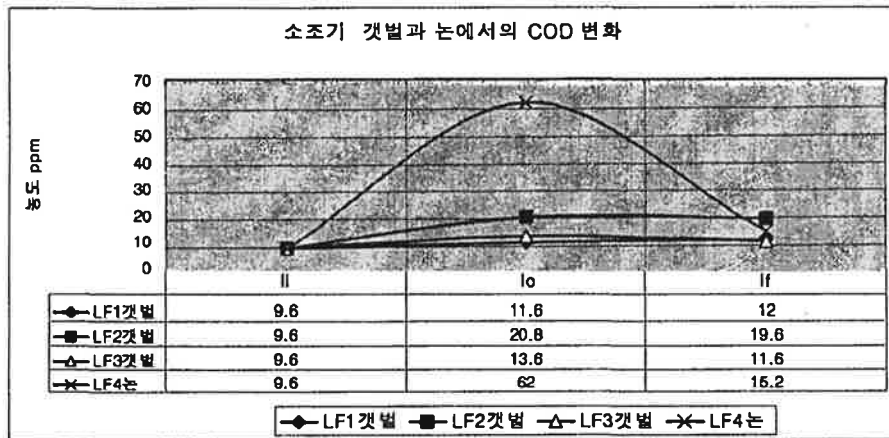


그림 3.4.5 소조기 갯벌과 논에서의 COD 변화



그림 3.4.6은 대조기 갯벌과 논에서의 COD 농도변화를 나타낸 것이다. 일반적인 경향은 논과 갯벌에서 모두 시간 경과에 따라 COD 농도가 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 일부 갯벌에 설치된 측정에서는 농도 증가가 관측되었다. 금번 1회의 측정결과로 갯벌과 논의 정화 능력을 비교하기는 어렵다. 우선 기존 환경에 영향을 최소화 하는 측정방법의 연구가 선행되어야 하고, 논과 갯벌의 정화능력을 상징하는 분석항목의 선정이 보다 면밀히 검토되어야 한다.

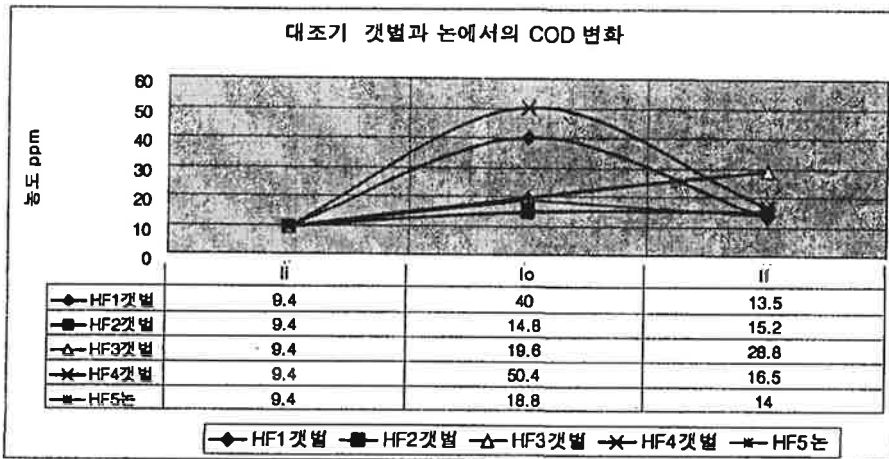


그림 3.4.6 대조기 갯벌과 논에서의 COD 변화

## 제 5절 환경친화적 방조제 보조 제방 개발

최근 환경에 대한 인식이 급격히 고조됨에 따라서 국토개발사업에서 사업비는 좀 증대하더라도 자연 환경을 보존하고 아름다운 국토보전시설을 만들어야 한다는 요구가 커지고 있다. 간척사업에 있어서도 황량한 갯벌 해안을 건강하게 만드는 공법을 시험 연구하여 수리시설 설치 계획에 포함하여 시행한다면, 간척사업에 대한 인식은 좀더 긍정적으로 개선되고 아름답고 친숙한 해안으로 창조될 수 있다. 우리나라는 석재를 이용하여 간척사업을 시행할 수 있는 천혜의 조건을 구비하므로, 방조제 외곽에 석재 구조물을 이용한 수제공을 설치하면 산보나 낚시 애호가들에게 좋은 친수 공간을 제공한다. 석재 재료의 사용은 공사비를 줄일 뿐 만 아니라, 목재 등을 사용하는 경우 벌목에 따른 생태계의 파괴를 줄일 수 있으며, 콘크리트 구조물에 비하여 내구성이 크다. 석재로 된 방조제는 토사나 콘크리트 구조물에 비하여 어류의 서식공간으로서 탁월한 기능을 갖는다. 또한, 철새들의 중간 기착지와 물고기의 휴식 공간을 제공하며, 방문객들은 낚시를 즐기거나 바다를 향하여 길게 뻗은 제방 위를 걸으며 미래의 꿈을 키울 수 있다. 석재로 구성되는 해안 수리구조물은 주변에 새로운 생태 서식처를 제공하도록 조장되어야 한다. 즉, 식물이 번성하고 계와 어류 등 낚시와 수산자원의 서식을 조장하며, 섭금류 등의 새들의 서식과 철새들의 중간 기착지를 제공하는데 기여하여야 할 것이다.

### 1. 환경사 방조제

지금까지 방조제 공사는 공사비를 절감하기 위하여 제방 경사를 1:1.5 정도의 매우 급하게 하고 방조제 노선도 성토량을 줄이기 위하여 지형이 높거나 암반이 있는 구간에서 거리를 짧게 설정하여 왔다. 그러나, 새만금 방조

제의 비탈면을 1:6 이상으로 설정하여 공사하게 된 것은 매우 획기적인 기술의 도약이라고 할 수 있다. 새만금 4호 방조제의 경우, 당초 설계파고는 5.2m이었으나, 1990년부터 현재까지 현장에서 파도를 관측하여 분석한 결과 7.3m로 2m 나 높아졌지만, 본 연구진이 수행한 수리모형시험 결과, 현재와 같은 해안 지형이 유지된다면, 제방을 높일 필요는 없으며, 이는 제방 기울기를 1:6으로 설정한 효과이다.

#### 가. 완경사 방조제의 특징

급경사의 기존 방조제의 기울기를 낮추는 새로운 해안공법의 하나로 종래의 급경사 제방 전체를 안으로 포장하듯이 넣어 제방 어디서라도 해변까지 걸어갈 수 있도록 제방 경사면의 기울기가 5~6할인 완경사 피복 호안 공법을 고안하게 되었다. 제방 기울기를 완경사로 하면 도파고가 작아지는 것이 사빌의 수리모형 실험 결과이다. 그림 3.5.1에서 종축은 상대 도파고비(Relative Runup Height  $R/H_o$ )이고 횡축은 제방 경사면 기울기(2.0은 2할의 의미)이며 해저 기울기는 1/10이고 파형 기울기(Wave Steepness  $H_o/L_o$ )는 0.03의 경우에 대한 것이다. 그림 중  $d/H_o$ 는 제방의 선단부 전면 수심( $d$ )에 대한 파고( $H$ )의 비로서 무차원화한 것이다. 호안의 前面수심이 0일 경우, 도파고 계수는 5분 기울기(0.5)에서 4할 기울기까지 거의 같고 5~6할만이 조금 낮다. 전면 수심이 파고의 0.45 정도로 되면 도파도비는 급격히 크게 되고 5분~1할 5분까지는 2.0의 값을 가진다. 1할 5분부터 3~4할로 점차 적게 되지만 5~6할의 값은 수심이 0인 경우와 큰 차이가 없다.

前面수심이 더욱 크게 되어 파고( $H_o$ )의 0.8이 되면 1.5할 기울기보다 급한 호안은 도파고가 파고의 3배를 넘어 3~4할 기울기로도 1.5~2.0의 값을 가지게 된다.

표 3.5.1 방조제 경사별 파고의 계산

d/Ho		0		0.45		0.80	
		R/Ho	R(m)	R/Ho	R(m)	R/Ho	R(m)
경 사 도	2할	1.0	3.0	1.7	5.1	2.5	7.5
	3할	1.0	3.0	1.4	4.2	1.9	5.7
	4할	1.0	3.0	1.3	3.9	1.5	4.5
	5할	0.9	2.7	1.0	3.0	1.2	3.6
	6할	0.8	2.4	0.9	2.7	0.9	2.7

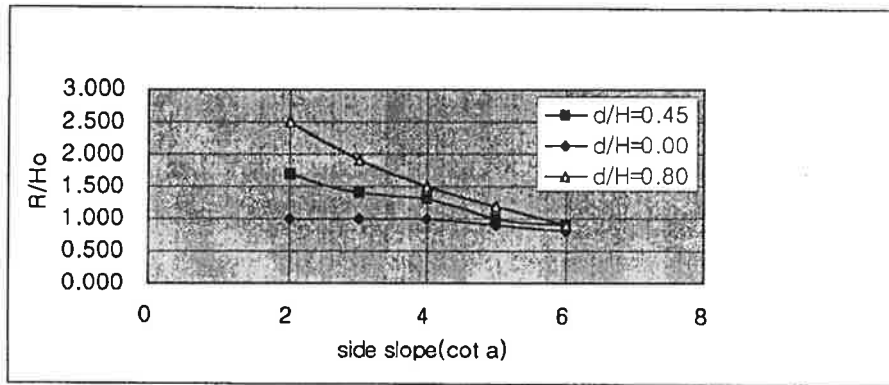


그림 3.5.1 방조제 경사와 파고비 및 도파 특성(R/Ho)의 관계(Ho/L=0.03)

한편, 경기도 화성군에 있는 화용방조제는 '99년 10월 현재 물막이 공사가 진행 중이며, 외곽 비탈면이 완만한 제방 구간에서는 그림 3.5.3과 같이 주민들이 굴을 채취하는 광경을 볼 수 있다. 이와 같이 간척 사업지구에서 완경사의 석재 구조물은 어류의 서식 공간으로 활용되는 것을 입증하는 것이다.

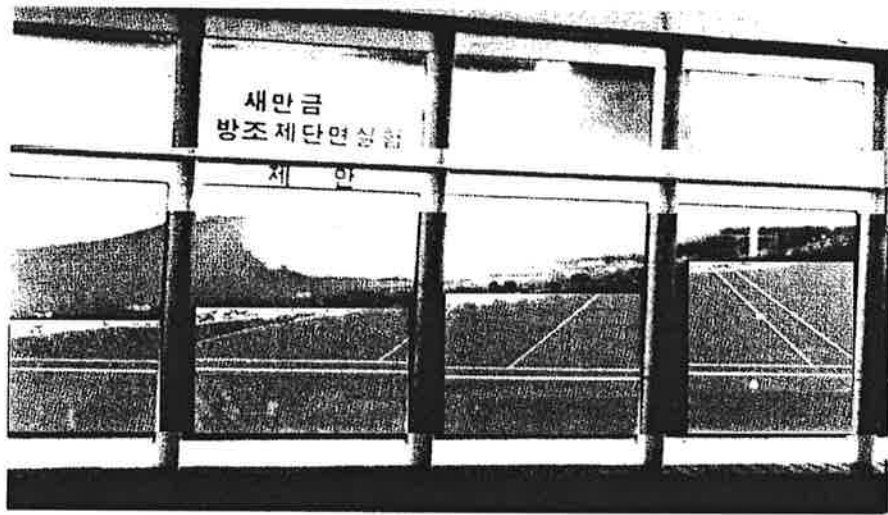


그림 3.5.2 완경사 방조제 수리시험

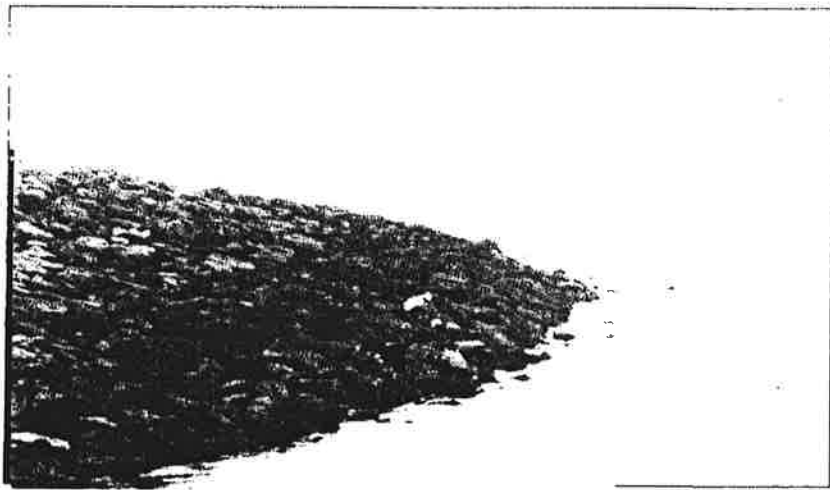


그림 3.5.3 화용방조제 피복석에 서식하는 굴과 조개 채취 현황

그러나 5~6할에서는 거의 1.0 이하이다. 여기서  $H_0$ 를 3m로 가정하여 계산한 결과, 파고가 3m정도에서도 제방 전면 수심이 깊게 되면 2~3할 기울기의 호안에는 소파공이 없이는 호안 높이가 부족한 경우가 대부분이지만 5~6할에는 소파공이 꼭 필요하지 않다. 두 번째는 물보라의 문제로서, 악천후 시에는 2~3할 기울기에서 수심이 깊으면 상당량의 물보라가 예상된다. 다음으로 波力의 문제이다. 제방 전면의 쇄파 시, 파압으로 작용하는 파력이 경사면의 각 피복 재료와 충돌하는 경우에는 자그마한 시간차가 유효하게 작용한다. 동시 파압은 집중적 파력이 작용하기 어렵기 때문에 불력 하나 하나가 파괴되는 듯한 파력으로 되지 않는 것이 실제의 태풍내습 시에도 확인되었다.

#### 나. 수리 모형실험

경사가 급한 방조제의 도파고에 관한 모형실험 결과는 많으나, 완경사 방조제에 관한 결과는 적용 가능한 것은 없기 때문에 본 연구에서는 새만금지구 4호 방조제 모형을 활용하여 다음과 같이 수리모형시험을 수행하였다.

실험 수로 : 길이 66m, 폭 1.5m, 높이 1.5m,  
 조 파 기 : 피스톤식, 조파폭 60cm  
 해저 모형 : 콘크리트 블록(지반고 -10.0m), 해저기울기 : 1/40  
 모형 축척 : 1/20, 제방 모형 : 석재, 기울기 2~6할  
 실험 수심 : -2.96m 2.8m, 2.8m 2.8m 3.3m  
 실험 파고 : 4.2m, 4.3m, 5.3m, 7.0m, 7.3m  
 주 기 : 9.2sec, 9.2sec 10sec, 11.5sec 11.5sec

연구 분석 결과는 다음과 같다.

- 1) 2할 기울기에 비하여 6할 기울기에서 월파 높이는 상당히 작다.
  - 2) 비수심(d/Lo)이 크면 기울기의 차에 의한 파고 차가 커진다. 따라서 제체의 전면 수심이 깊어지면 완경사 호안은 현저하게 유리하다.
  - 3) 2할 기울기에서 비수심(d/Lo)이 클수록 최대 월파 높이는 점차로 파형 기울기(Ho/Lo)의 큰 쪽으로 움직이지만 5~6할의 경우에는 피크의 이동 형태가 없다. 이것은 제방 앞에서 쇠파되는 파도에 대하여 2할 기울기에서는 충돌형의 파도 마루로 되는 것에 비해서 5~6할 기울기는 평시에 기어오르는 도파 형태이기 때문이다.
  - 4) 2할과 6할 기울기는 발생하는 물보라(파도 飛沫)의 양에 큰 차이가 있다. 또한, 경사면 피복 재료의 안정에 대하여 실험하였다. 모형은 6할 기울기 제방 모형 위에 채움재로서 자갈을 깔고 그 위에 모형 축척이 1/30인 피복 재료 모형을 이중으로 깔아 피복층을 형성하여 해저 모형 위에 고정시킨다.
- 해안 제방과 호안공의 상단고는 有義파(1/3최대파)에 의한 월파 높이와 월파랑에서 피해를 입는 정도에 따라서 경험적으로 결정하기 때문에 다소의 월파와 물보라는 존재한다. 그러나 소파공을 사용하지 않는 완경사 제방에서는 물보라가 대폭으로 감소하는 대신 파도가 기어 올라오기 때문에 설치 장소의 중요성에 대응하여 상단고를 생각할 필요가 있다. 월류되는 파도는 불규칙 파도로서 有義 파고는 충분한 높이로 되지만 파도 중에 몇 개가 가끔 기어올라와 월파된다. 충돌형의 월파에서는 명확한 경계가 없지만 기어오르는 형태의 파도는 월파할 것인지 아닌지가 확실히 보인다. 완경사 호안을 시공할 때는 다소의 월파가 문제되지 않으나, 배후에 부락이 근접하거나 중요한 도로의 옆에 설치할 때는 허용 월파량 이하로 되도록 상단고를 결정해야 한다. 이러한 완경사 제방은 제방으로 업습하는 파력을 줄이고 침식 대책으로서 충분한 효용을 발휘하므로, 일본 등에서 피해 복구 사업에도 완

경사 호안 공법이 점차로 활용되고 있으며, 종전의 2할 기울기를 대신하여 3할 기울기가 증가하여 반 이상을 차지하며, 4~5할 기울기의 것도 증가하고 있다. 이 제방은 경사면 길이가 다소 길게 되어도 해변의 유지와 월파의 감소 등 완경사에 의한 효력이 점차 긍정적으로 평가되기 때문이다.

## 2. 이안제

이안제(offshore breakwater)는 퇴사 효과가 크기 때문에 그동안 세계 여러 곳에서 침식 대책 사업에 널리 활용되어 왔다. 그러나, 그림 3.5.3과 같이 이안제에 의해 사빈이 회복되고 월파, 물보라의 피해를 면하게 되었지만 인공 블럭과 이안제가 친수적이지 못하다는 의견도 있다. 즉, 싸고 튼튼하고 내구적인 것을 추구하는 시대에서 아름답고 환경에 어울리는 시설을 만들어야 하는 시대로 변화되어 왔다. 전북 고창군 골소만 해안에 파도의 내습을 막기 위하여 낮은 돌 제방 형태의 이안제가 설치된 경우가 있다.

## 3. 잠제

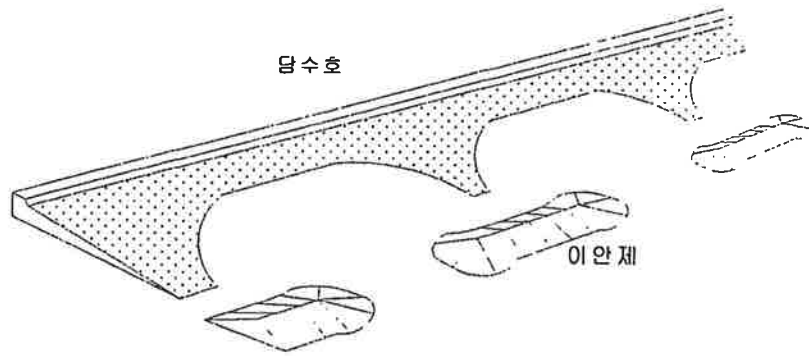
하와이 제도의 섬들이 대양의 가운데 있지만 큰 파도가 내습하여도 피해를 받지 않는 이유는 섬을 감싸고 있는 산호초의 소파 기능에 있다고 한다. 이 산호초의 효용을 인공적으로 만들어내려는 것이 인공 리후(reef) 공법 또는 잠제(submerged breakwater)이다. 이는 이안제보다 상단 폭을 넓혀야 한다. 일반적으로 잠제의 상단폭(B)은 40~60m이고, 파장( $L_0$ )과의 비인  $B/L_0$ 은 0.3정도 이하이다. 이의 상단고는 항해의 안전성 등을 고려하여 간조위에서 1m를 내려서 계획된 경우가 많지만 상단고와 간조위의 차가 2~3m로 되어 있는 사례가 대부분이다. 이러한 제한성 때문에 조석의 간만의 차이가 큰 우리 나라 서해안에서 활용하는데 신중해야한다. 잠제는 댐 마루를 낮추어 쇄파 작용을 촉진하여 입사파도를 감쇄시켜서 표사 활동을 규제하고 침식을



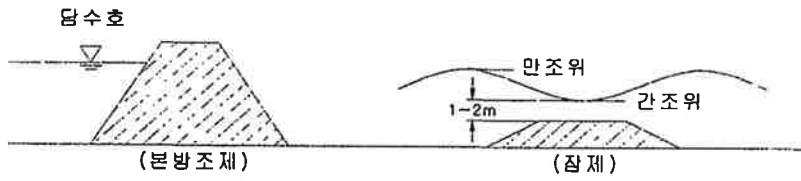
방지하며 배후 모래 유실을 방지하여 해변을 보호하는 것이다. 잠재의 상단 고와 폭 및 길이는 명쾌한 기준은 세워져 있지 않기 때문에 절대적으로 수리모형시험에 의하여 규모를 결정하여야 한다. 이는 이안제에 비해 단면적이 크므로 축제 재료를 건설 공사에서 남는 흙이나 폐기물을 이용하는 방안을 고려하여야 한다. 아직까지는 잠재는 실험 시행의 단계라고 할 수 있으며, 우리 나라의 서해안과 같이 조석 간만의 차이가 큰 경우, 만조 시에는 감쇄 효과가 저하되고 선박 항해에 지장을 주기 때문에 이를 적용할 경우에는 신중한 검토 시험이 요구된다.

또한, 그림 3.5.5에서 왼쪽 그림은 일본의 堀川이 실험한 결과로서 잠재의 형태별 입사파( $H_i$ )와 투수파고( $H_t$ )의 비인 파고전달율에 대한 수심( $d$ )와 잠재 높이의 비에 대한 상호관계를 나타내고 있다. 그림에서 B는 잠재의 상단 폭이다. 실험에서 파장(L)에 대한 B의 비율은 0.1~0.2 정도이다. 시험결과  $h/d$ 가 0.6정도에서 파고 전달율이 급격히 증대된다. 또한 田中の 실험결과는 잠재 상단표고로부터 수면까지의 수심(R)에 대한 입사파고( $H_i$ )의 비에 대한 파고 전달율로서 수심이 파고보다 작아질수록 이 값이 감소하는 것으로 나타났다.

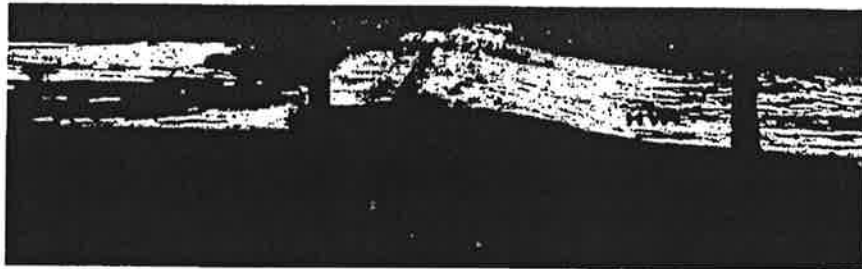
잠재에 대한 보다 구체적인 활용 방안은 6항의 면적방호방식에 의한 환경 친화적인 연안 공간 조성에서 분석되어 있다.



a. 이안제



b. 잠제 단면



c. 이안제 단면의 월파에 관한 수리모형시험

그림 3.5.4 방조제. 연안의 이안제와 잠제형식의 보조제방 구성

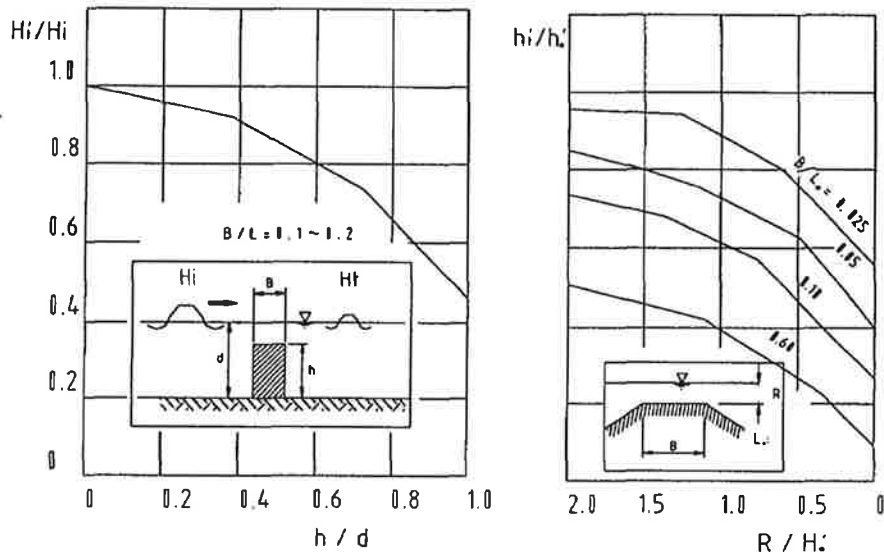


그림 3.5.5 잠제의 형태별 월파와 소파 효과(일본 掘川, 田中の 실험결과)

#### 4. 양팔형 보조 방파제

영국의 동남부의 Clacton 해안에는 1986년부터 1988년까지 3 km 구간에 폭 1 km 간격으로 보조 방파제(fish tailed breakwater)가 설치되어 1,000년 빈도의 해일 피해를 방지하여 200 ha의 토지를 보호한다. 이 제방은 갯벌의 손상이 우려되는 연안에서 유용한 기법이다. 양팔형 보조방조제는 이를 응용한 보조방조제로서 이안제(Offshore Breakwater)가 갖는 접근성의 어려움을 보완하고 이안제 사이로 진입하는 조석과 파랑에 의한 세굴 영향을 줄이는 "y"자형 수제공(groyne) 형태이다. 잠제는 조석 간만의 차이가 큰 해안에서 만조시 파랑이 진입하는 경우, 파도의 소파 기능이 반감되는데 비하여 긴팔형 보조방조제는 여러 방향에서 진입하는 파랑의 영향을 감소하여 세굴을 억제하고 퇴적을 촉진하여, 본 방조제의 바다쪽 제방 높이를 축소하므로서 방조제를 통과하는 차량에서 해안 전경을 볼 수 있다. 이 방조제는 부유

물의 농도가 큰 해안에서 자연적인 침전을 조장하거나, 인공적으로 모래를 공급하여 퇴적지를 조성하는데 기여할 수 있다. 이 구조물은 지형과 조류 및 파도의 진입 형태에 따라서 배치 형태가 정해진다. 즉, 방파제 외측의 방파제의 OA와 OB의 구간의 V자형 구간은 진입 파랑을 감쇠하며 AOC 구간은 방조제와 수평으로 이동되는 연안류에 의한 퇴적토의 이동을 방지한다. 따라서 상류 측의 퇴적은 수제공이 조류 이동을 제어하여 발생하며 하류측 퇴적은 방파제가 파랑을 제어하여 조성된다. 방파제 AC 구간은 조류 이동에 따른 하상 물질의 이동과 세굴을 억제하기 위하여, 흐름 방향에 직각이며 방조제와 연결되는 C점은 해안선 방향에 직각으로 놓이게 된다. COA의 곡선 형태는 방파제의凸형부에서 파도의 반사(reflection)와 바닥 세굴을 최소화하도록 설치하여야 한다. 제방 OB구간은 최강의 파랑 진입 방향에 직각으로 설치되며 연안에서 파랑의 영향으로 변화되는 연안류의 영향으로부터 벗어나기 위하여 방조제 쪽으로 가까이 배치되어야 한다. OB의 길이는 OC의 길이에 따라서 결정되지만 파랑의 회절(diffraction) 효과에도 영향을 받는다. 따라서, 이 제방의 규모는 파랑의 높이와 방향 및 주기 그리고 조류의 수위차, 해안 지형 그리고 해안 공간의 활용 정도에 영향을 받는다. 방조제에서 방파제의 말단점인 A점까지의 길이는 이러한 인자들을 고려하여 결정하여야 하지만 파장의 3배 정도, 또는 유사한 이동되는 구간(littoral zone) 폭의 반 정도로 설정된다. 이는 서해안과 같이 조석의 차이가 크고 다양한 방향에서 진입하는 파도 조건에서 적용할 수 있다. 이 구조물의 형태는 본 연구에서 도입한 조석, 파랑, 퇴적에 관한 수치모델 또는 수리모형 시험을 통하여 세부적인 규모를 설정할 수 있다. 방파제 피복재료는 석재로 구성될 수 있지만 파도가 큰 경우에는 인공 재료의 사용이 불가피하다. 수리시험 결과, 돌망태는 마찰저항력이 독립적으로 투하되는 석재에 비하여 약 1.5배 정도 흐름에 대한 저항력이 크기 때문에 수리구조물로서 장점을

갖고 있으나, 해안에 설치될 때 내구성이 적다. 이와 관련하여 돌망태를 이용한 수리시설물의 개발 연구가 농림부의 지원으로 1999년부터 3년간 연구 중에 있으며, 해수에 잘 견디는 철선이나 인공 섬유 망태를 개발 중에 있다. 파도에 면하는 제방 구간은 방괴석 등의 대형 재료가 필요하지만, 뒷면과 바닥은 작은 돌과 콘크리트 폐자재 등도 활용될 수 있다.

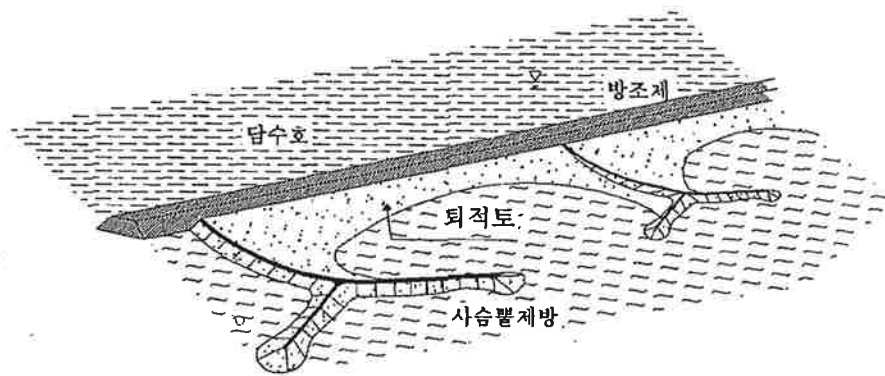


그림 3.5.6 양팔형 보조 방조제 배치도

특히, 수도권 아파트 단지의 재건축 공사 등에 따라서 발생하는 대규모의 콘크리트 폐자재는 본 제방의 속채움 재료로서 유용한 공사재료로서 활용될 수 있다. 그림 3.5.7 은 양팔형 보조방조제를 새만금 방조제 물막이 공사에 활용하기 위하여 사방 100m의 새만금수리시험장에서 수행한 수리모형시험 결과이다.

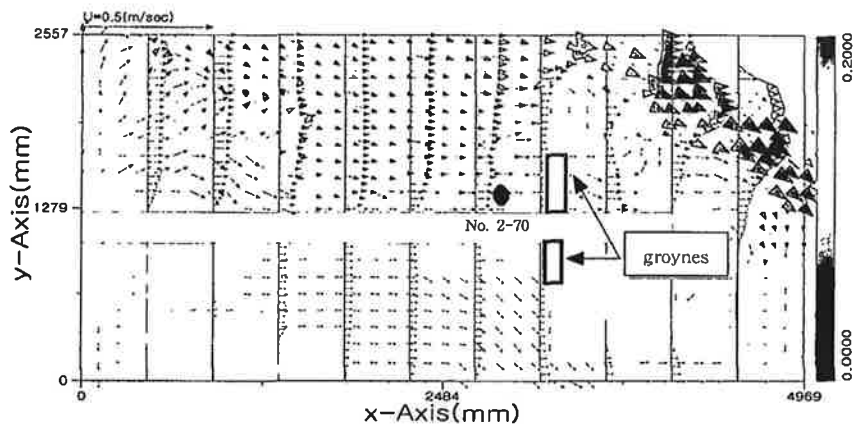
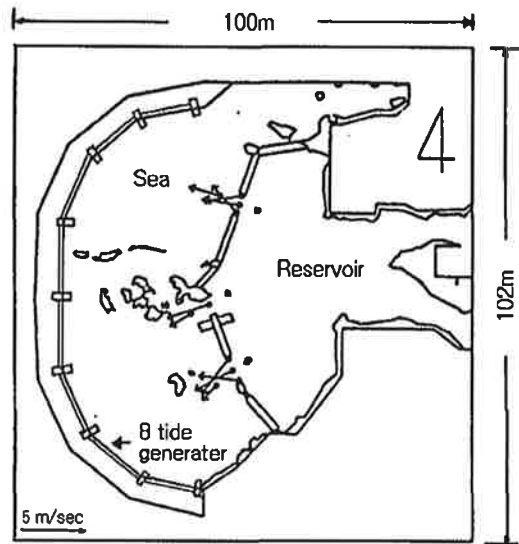


그림 3.5.7 새만금방조제 물막이 개방구간의 양팔형 수제공 수리모형시험

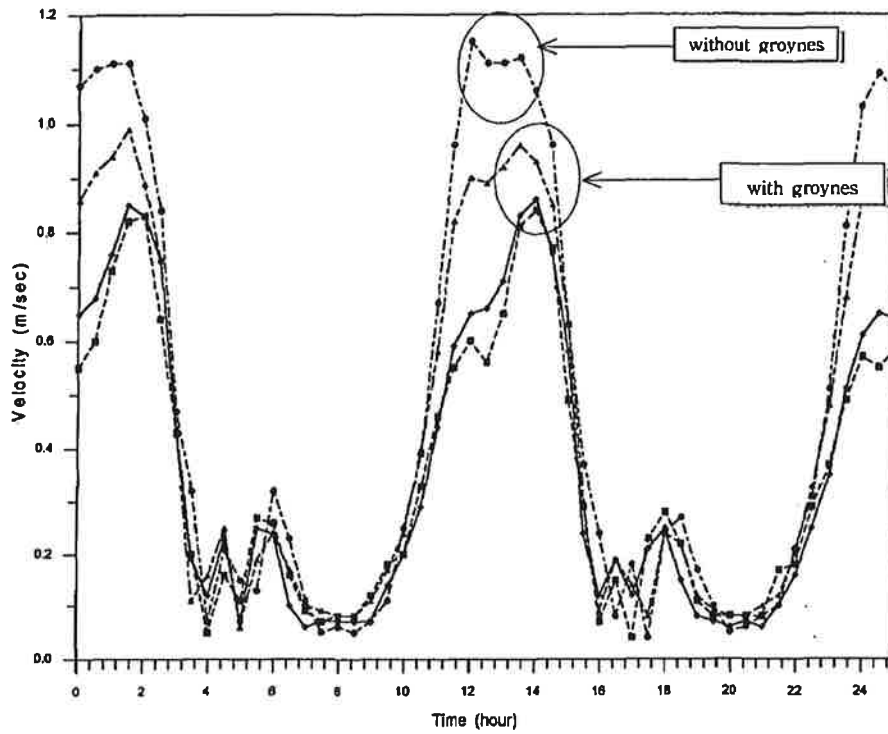


그림 3.5.8 보조방조제의 설치에 따른 물막이 구간의 유속 감소 효과

시험 결과, 수제공 설치에 방조제를 따라서 개방구간으로 진입하는 조류는 수제공 선단부 쪽으로 이동하므로 방조제 인근의 세굴을 막을 수 있다. 본 모형시험에서 바다쪽 수제공의 길이는 500m, 담수호 쪽은 300m를 대상으로 시험하였으며, 좀더 구체적인 시험은 별도로 시행할 예정이다. 이러한 시설은 물막이 공사의 안정성을 확보하고, 완공 후에는 제방 연안의 친수 공간을 조성하는데 기여할 수 있다.

### 5. 임시물막이 제방을 이용한 배수갑문 주변의 친수환경 조성

간척지구의 배수갑문 주변은 담수와 해수의 교환이 빈번하고 파랑의 진입 형태가 수려하기 때문에 친수환경 조성에 유리한 입지 조건을 갖는다. 또한, 배수갑문 공사를 시행하기 위하여 둘러쌓는 임시 물막이 댐은 공사 완료 후, 댐체를 헐어서 다른 방조제 구간의 축조 재료로 활용토록 계획되지만, 바다 쪽의 물막이 댐 구간 중 배수갑문 수로의 양단부를 남기고 방조제 끝물막이 공사를 시행하는 경우, 밀물시 방조제를 따라서 유입하는 조류의 흐름과 내습하는 파력을 완화할 수 있다. 본 연구에서는 임시물막이 댐의 일부를 도류제로 활용하는 방안에 대하여 새만금방조제 전구역모형을 활용하여 그림 3.5.9와 같이 실험하였다.

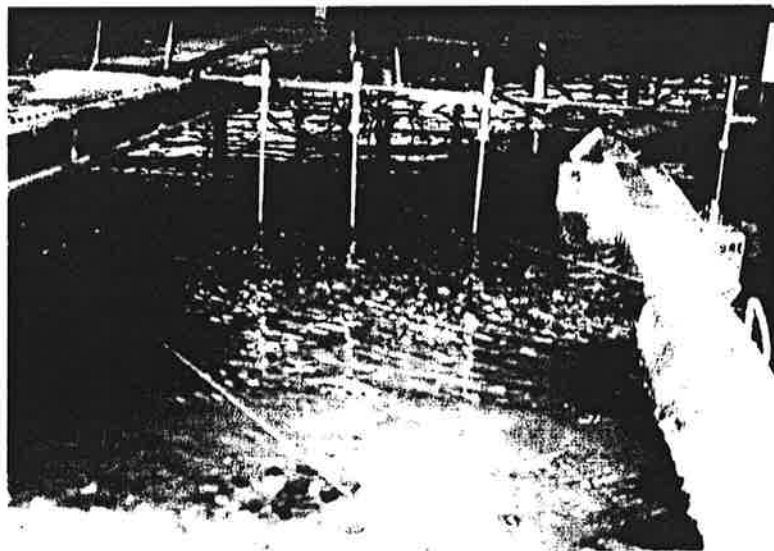


그림 3.5.9 배수갑문 임시물막이를 이용한 도류제 모형 시험 현황



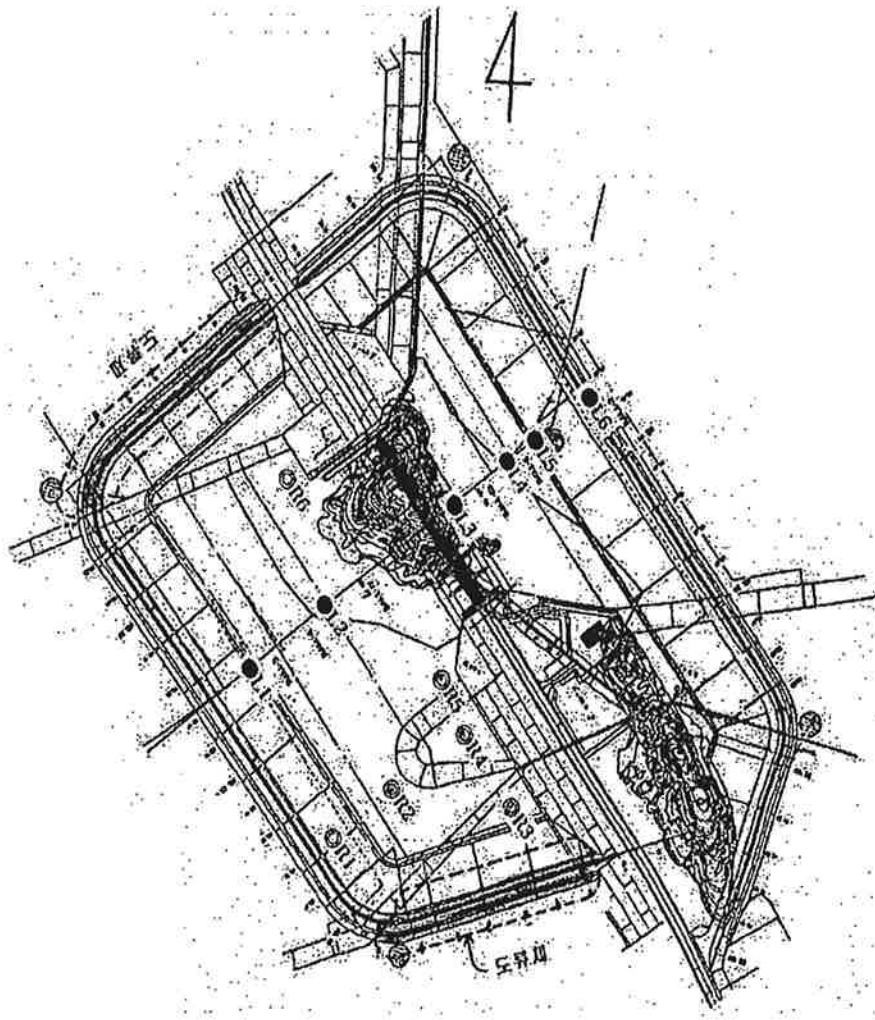


그림 3.5.10 배수갑문 임시물막이를 이용한 도류제 배치 평면도

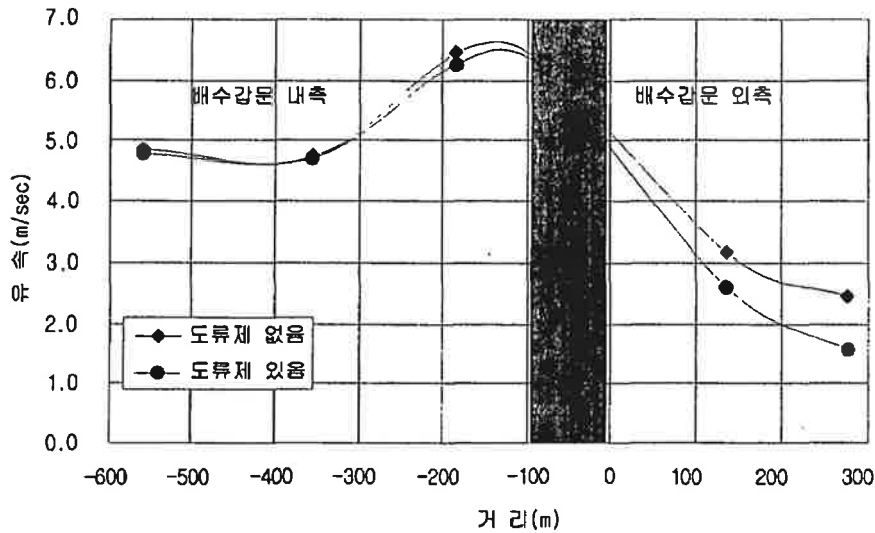


그림 3.5.11 배수갑문 임시물막이 도류제 유무에 따른 배수갑문 내외측의 유속분포(창조시)

그림 3.5.11은 새만금 방조제 공사 수리모형 시험 결과로서, 물막이 개방 구간을 1,000m 남긴 상태에서 임시물막이 댐(도류제)의 유무에 따라서, 배수갑문 유로 중 흐름이 가장 빠른 곳의 창조시와 낙조시에 유속 변화를 나타낸다. 도류제를 남긴 경우, 창조시 바다 쪽의 접근 유속은 1.6m/s 정도로서 도류제가 없는 경우의 유속 2.5 m/s에 비하여 67% 정도의 완만한 흐름이다. 밀물시 갑문 외해쪽의 유속이 6%로부터 83%까지 구역에 따라서 감소된다. 낙조시의 유속은 말단부에 도류제가 있는 경우 큰 변화가 없으며 이는 도류제가 낙조 흐름을 방해하지 않기 때문이다. 또한, 이 댐을 남기므로 진입 파랑을 감쇠하여 수문 구조의 안정성을 높이고 선박의 정박을 위한 공간을 제공할 수 있다. 물막이 공사 중 방조제와 배수갑문 주변의 흐름이 완화되고 석재 제방이 조성됨에 따라서 어류 서식 환경이 개선되고 제방 외측의 퇴적지역은 철새의 기착지로서 생태 공간을 제공할 수 있다. 이러한 결과는 향후, 새만금 방조제 등 공사 구간의 여건을 고려한 세부적인 수리모

형시험 분석을 통하여 구체적인 구조 계획과 사업의 적용 가능성을 설정하는데 활용할 예정이다.

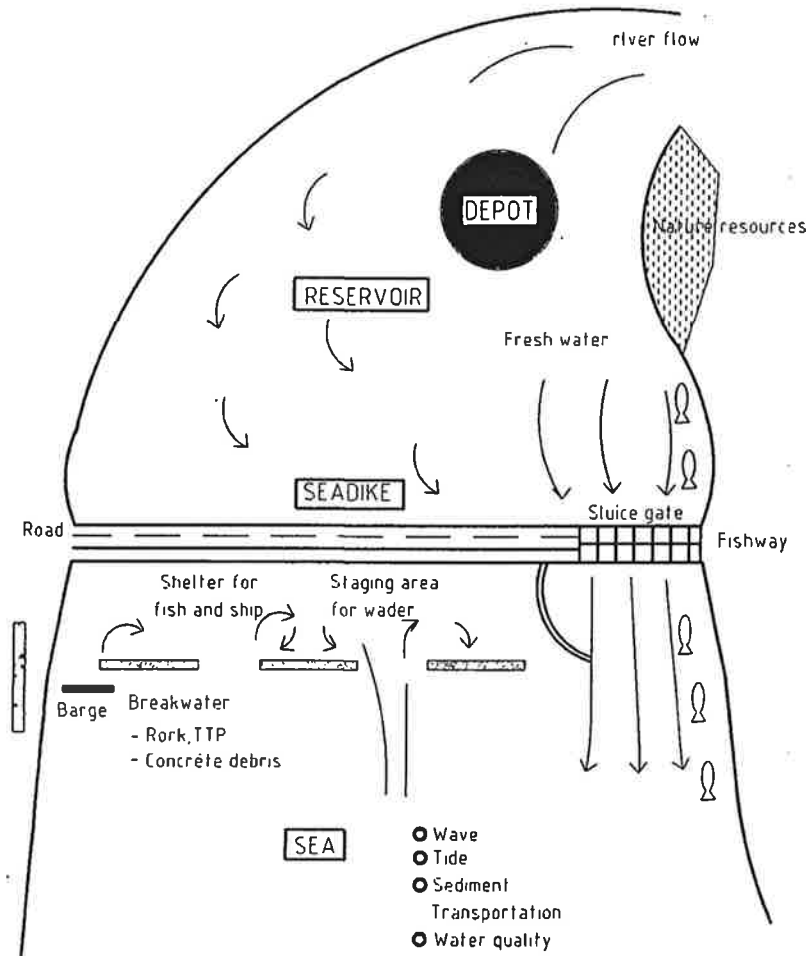


그림 3.5.12 간척지 연안의 친수공간 구조물 배치 구상도

결론적으로 그림 3.5.12는 간척지 개발에 따른 연안의 공간을 친수환경을 조성하는데 활용하는 방안과 본 연구에서 검토된 담수호의 오염물 침전산화수로(depot), 방조제 부설 어도(fishway), 자연보존 공간(nature reserves), 방조제 양팔형 수제공(long arms groin) 등의 보조 제방에 관한 친수 공간 시설물의 배치 계획을 나타내고 있다. 이러한 시설은 담수호 연안의 수질, 생태 및 퇴적 환경을 개선하고 새로운 갯벌을 창출하도록 간척지 현장 여건에 부합하도록 수리모형시험 등을 활용하여 계획하는 것이 바람직하다. 또한, 간척지 개발에 따른 연안의 조석, 파랑, 퇴적, 수질에 관한 광역적인 평가는 본 연구를 통하여 2차원 수치모델을 활용하여 종합적으로 수행하고, 시설물 주변의 세부적인 흐름 특성에 관하여는 수리모형시험에 의하여 정밀하게 분석하는 것이 바람직하다.

## 6. 면적방호방식에 의한 환경친화적인 연안공간 구성

### 가. 서론

인간은 자연과 더불어 살면서 공존의 균형을 중요시 해왔다. 균형이라는 의미는 한국, 일본, 중국 등 극동 3국의 기본적인 생활 철학이기도 하다. 그러나 최근의 인간 행위는 자연에 악영향을 주어 결국 인간 자체의 생존에 필요한 환경에 위대한 결과를 초래해 왔다. 이는 전 지구적 차원의 문제로써 국소적이라고 할 수 있는 해안환경 분야도 예외일 수는 없다. 이러한 의미에서 최근들어 沿岸防災개념에 있어서도 환경요소 등을 위시한 부가적인 요소들이 추가되면서 자연과 인간의 공존을 강조하여 궁극적으로는 인간의 질적 삶의 향상을 꾀하고 있다. 여기서 말하는 부가적인 요소로서는 環境親和的, 親水性, 景觀的인 요소 등을 들 수 있다. 자연환경의 유지는 인위적인 요소를 배제하는 것이 최상이라고 할 수 있으나, 공존의 의미로 보면

인간으로부터 가해지는 부하를 가능한한 작게하는 행위가 현실적인 방향이라고 할 수 있다. 좋은 환경의 회복, 유지, 관리는 다가오는 21세기의 전 산업에 있어서 최고의 가치가 될 것이며 인간의 삶을 향상시키는 중요한 요소가 될 것이다.

해안 보전의 목적은 3가지의 측면에 있다. 첫 번째는 국토보전의 관점에서로부터 파랑, 고조, 또는 쓰나미 등의 자연적인 외력이 해안에 작용하여 침수, 보전시설, 일반시설의 파괴, 유실, 침식에 의한 국토상실 등을 미연에 방지하려는 측면이 있다. 두 번째는 정온한 평상시의 해안을 유효하게 이용하고자 하는 측면, 세 번째는 연안역의 경관 및 생태계 환경이라고 할 수 있는 해안환경을 지키려는 측면이다. 최근에 들어 위의 3가지 측면을 고려한 기능을 고르게 갖출 수 있는 해안 보전 시설이 요망된다.

본 글에서는 파의 제어를 목적으로하는 연안 구조물을 중심으로 환경 친화적인 요소를 추가하는 방법에 대하여 하나의 구체적인 예를 통하여 환경 친화적인 연안공간 구성의 가능성을 생각해 보도록 한다. 구체적인 예로서 “面積防護方式”이라는 防災 개념을 중심으로 출발해 본다. 面積防護方式(zonal protective complex)이란 複數의 넓은 시설을 有機的으로 배치하여 이들의 複合的인 기능에 의해 해안 배후 지역의 인명 및 재산을 고조, 침식 등의 재해로부터 防護함과 동시에 해안의 면적인 이용을 촉진하여 環境保수를 도모하는 방식이라고 정의한다. 본 글은 면적방호방식의 1) 기술적인 측면을 살펴보고 현재 우리나라 근해역에 본 개념의 2) 적용 가능성 그리고 3) 한국의 해역 특성을 고려한 기술적인 추가 검토내용 등을 생각해 보았다.

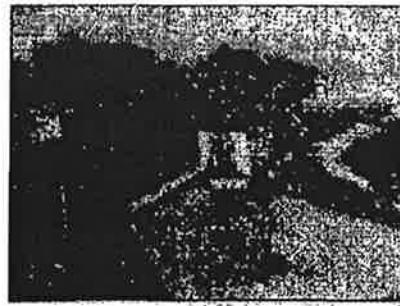
#### 나. 면적방호개념의 등장 배경

지금까지의 해안선 보호 또는 배후지 차폐를 위한 연안 구조물의 축조 양

식은 대부분 해안선에 직립형으로 설치된 線的防護方式이었다고 할 수 있다. 그러나 이러한 공법은 파에너지를 제어함에 있어서 순간적으로 파랑장에 강한 충격을 줌으로서 주변 해역환경을 국소적이고 급격한 변화를 야기시킬 가능성이 높다. 이로 인한 주변해역의 파랑장 변화는 기존의 평형상태를 파괴함으로써 예측하기 어려운 환경재해를 초래할 수 있어 이를 완화하기 위한 별도의 비용이 또 발생할 수 있다. 하지만, 분산시켜 줌으로서 주변해역에 미치는 영향을 완화할 수 있을 것이다. 더구나 방재의 측면으로만 봤을 때도 충격적인 파에너지를 제어는 피해를 속출시킬 가능성이 높다. 그림 3.5.13의 (a)는 1991년 7월에 촬영한 것이며 (b)는 1991년 7월 30일 촬영한 것으로서 일본의 高知(kochi)현에 있는 長浜(nagahama) 해안이다. 그림 3.5.13의 (b)를 보면 알 수 있듯이 호안의 일부에 피해가 발생했다.



(a) 파랑장



(b) 파랑후

그림 3.5.13 선적방호방식에 의한 호안의 피해상황

그림 3.5.13의 (a)에서 보인 바와 같이 호안의 제체 앞에는 해빈이 있으나 감소하는 추세에 있으며 호안 하부가 노출되어 있다. 그림 3.5.13의 (b)를 보면, 일본에 태풍 9109호의 통과 후에는 제방이 부서져 해빈도 명백히 감소하여 파가 직접적으로 제체에 작용하고 있음을 알 수 있다. 그림

3.5.13이 보여준 하나의 예로부터 알 수 있듯이 線的防護方式으로는 보전시설 전면의 침식방지에 관해서는 효과가 없으므로 전면 해빈이 소실이 되어 파의 쳐오름 높이 및 월파량의 증가를 초래하게 됐다. 즉, 배후지를 지키기 위하여 堤防의 천단고 상승 및 테트라포드와 같은 블록을 쌓게 되었다. 이로 인한 해안선 및 경관의 변화로 인하여 연안역을 이용하기 어려운 상황으로 만들어 버렸다. 이러한 단점을 개선하기 위하여 面積防護方式이 제안되었다. 면적방호방식의 모식도는 그림 3.5.14에 보인다. 이 방식은 파랑과 침식의 양쪽으로 대처하려는 생각이다. 즉, 突堤, 이완제, 완경사제, 양빈, 인공리프, 인공 Headland 등의 보전시설을 복합적으로 연결함으로써 파력을 감쇄시켜 표사를 제어하고 침식을 방지하여 해빈을 회복하는 것이다. 이 생각에 의해 고조 대책과 침식대책을 동시에 고려한 海岸防災를 실시할 수 있고 더욱이 양질의 해안환경을 보전 및 창출을 실현할 수 있다.

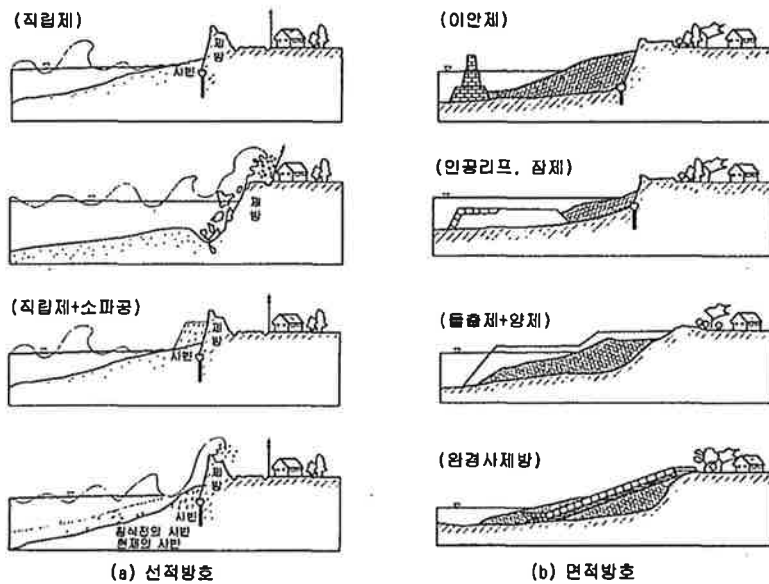


그림 3.5.14 방호방식의 비교

그러나 급격한 수심의 변화 및 연약지반의 해안에 있어서 종래의 블록을 쌓는 것과 같은 소파구조물을 이용할 경우 제체의 안정성을 확보하기가 곤란하거나 불가능하므로 면적방호방식을 적용할 수 없다는 판단을 하게 됐다. 또한 이안제 및 인공리프에 의한 소파를 유도하는 경우는 일반적으로 설치수심을 깊게 할 수 없으므로 이용 가능한 해역이 넓어지지 않는다는 결점도 있었다. 이러한 결점을 보완하기 위하여 해역 제어 구조물을 이용한 새로운 면적방호방식이 탄생했다. 모식도를 그림 3.5.15에 보인다. 이 방식은 대수심 설치형 소파구조물을 이용한 보전방식이며 이를 이용함으로써 종래의 소파 구조물을 적용할 수 없는 깊은 해저에 소파 구조물을 설치할 수 있게 되었다. 또한 종래로부터 더욱 깊은 해저에 소파 구조물을 설치하는 것이 가능해짐으로서 넓은 정온역을 형성하여 다목적의 해양 이용공간을 창출할 수 있게 된다.

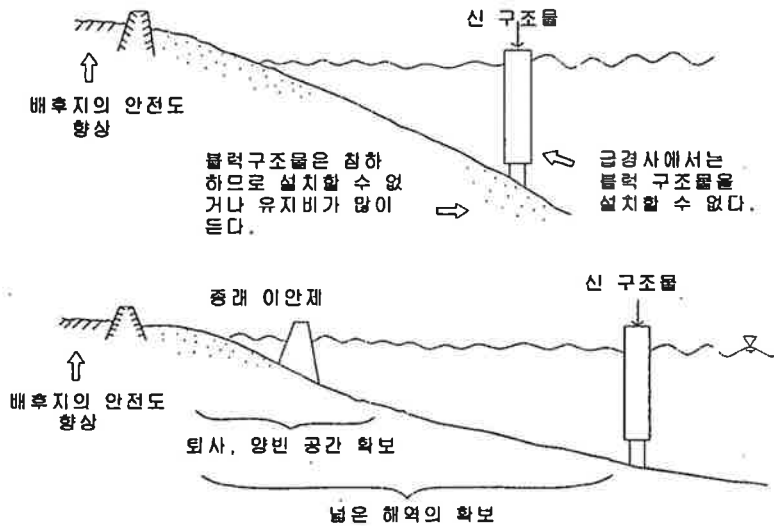


그림 3.5.15 새로운 면적방어방식



이와 같은 해안보전사업은 시대의 요구에 따라 공간적으로는 선으로부터 면으로 더욱이 심해로 대상범위를 넓히는 방향으로 이동하고 있다. 그리고 국토보전, 방재면이라는 목적뿐 만아니라 해안역의 이용, 경관, 생태계의 보전 등의 부가적인 목적을 동시에 달성하려는 다목적의 사업으로 이행되고 있다.

#### 다. 면적방호방식에 의한 보전공법 예

최근들어 해안보전사업에 사용되어온 시설·공법으로서는 호안·제방·소파공·돌제·이안제·양빈공·완경사제·인공리프공법·Headland공법 등을 들 수 있다. 여기서 비교적 새로운 공법인 면적방호방식의 일환으로 사용된 인공리프공법에 관하여 설명한다.

##### 1) 특징 및 기능

인공리프는 산호초의 우수한 소파기능을 모방한 소파구조물이다. 이의 소파 원리는 그림 3.5.16에 보인 바와 같이 입사파를 리프 전면의 사면과 리프상의 얇은 부분에서 쇄파시켜 에너지를 감쇠시킨다. 인공리프는 평균수위보다 낮은 천단고를 가지고 있으므로 해역의 경관에 악영향을 거의 주지 않고 수영 및 Boat-sailing 등의 해역이용을 저해하는 경우가 매우 적다. 인공리프는 이안제와 같은 보전기능을 가지지만 구조형식은 이안제와 달라 리프의 천단은 수면하에 들어가 있으며 넓은 천단폭을 가진다. 또한 천단수심을 비교적 깊게 처리할 수 있으므로 반파율을 작게 할 수가 있다.

##### 2) 효과

인공리프를 적절히 배치함으로써 다음과 같은 효과를 기대할 수 있다.

- ① 처오름 높이, 월파량 등이 감소

- ② 연안 표사량을 감소
- ③ 인공리프의 해안측에 퇴적하여 연안선이 전진
- ④ 인공리프의 해안측의 심해방향 유출을 억제

일반적으로 위에 열거한 효과는 단독으로 발휘되는 것이 아니고 각각의 상호작용에 의해 달성된다. 예를들어 인공리프의 소파기능에 의해 해안측에 퇴적이 되면 저오름 높이의 저감효과가 더욱 향상된다. 이상의 효과에 의해 해빈의 안정화를 꾀할 수 있고 더욱이 저오름 높이를 저감시킴으로서 월파에 의한 피해를 줄일 수 있다. 한편, 위에 설명한 것과는 다른 효과도 기대할 수 있다. 예를들어 인공리프와 해빈과의 사이에 형성되는 정온역은 매우 좋은 해양 레크레이션장으로 되어 이의 이용을 촉진할 수 있다. 또한 인공리프를 설치함으로써 발생하는 해안방향 흐름에 의해 주변해역의 수질개선 효과도 기대할 수 있다. 더욱이 인공리프의 표면은 석재나 콘크리트블록으로 구성되어 어초효과를 기대할 수 있다.

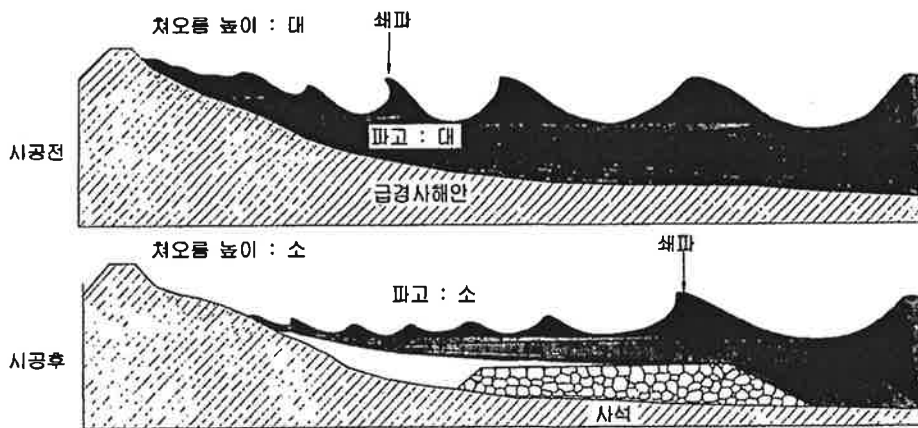


그림 3.5.16 인공리프의 모식도

### 3) 인공리프의 적용예

#### ① 침식대책에 대한 적용

인공리프는 이안제와 같이 해반의 안정화를 피할 수 있으나 인공리프에 의한 파랑이 저감되어도 인공리프의 배후가 바로 퇴적되는 상태로는 되지 않는다. 왜냐하면 강제쇄파를 시킴으로 인해 천단 수심이 얕은 인공리프의 상부에는 강한 해안방향 흐름이 발생하여 인공리프 배후의 퇴적을 억제하는 경우가 있기 때문이다. 해반의 안정화를 위한 인공리프의 적용법은 다음의 3가지를 들 수 있다.

- 인공리프 군에 의한 연안표사량의 저감 : 개구부를 가지는 인공리프를 군으로 설치함으로써 연안표사량을 저감시켜 해반의 안정화를 꾀함.
- 안정해반의 형성 : 매우 높은 소파효과를 가지는 인공리프를 넓은 간격으로 설치함으로써 동적인 안정해반을 형성할 수 있다.
- Headland 및 이안제에 둘러싸인 해안에 있어서 정선의 전진 : Headland나 이안제를 설치할 경우는 국부적으로 합입하는 곳이 발생할 수 있어 월파랑이 증대할 수 있다. 이러한 장소에 잠제를 설치하여 전체적으로 정선이 전진할 수 있도록 유도할 수 있을 것이다.

#### ② 환경사 호안과 함께 해반의 창출

면적방호의 관점으로부터 인공리프는 다른 연안 구조물과 함께 사용되는 경우가 있다. 특히 그림 3.5.17과 같이 환경사 호안과 같이 조합하는 경우는 다음과 같은 효과를 기대할 수 있다. 먼저, 인공리프를 설치함으로써 배후역의 쳐오름 높이 및 월파랑을 저감할 가능성이 있으므로 제방, 호안의 천단고를 종래의 것보다 낮게 할 수 있다. 더욱이 종래의 제방을 대신하여 퇴적효과가 높은 환경사 호안을 사용하면 리프의 퇴적효과와 함께 넓은 사빈이 형성된다. 이와 같이 인공리프와 환경사 호안의 의해 창출된 해안환경

은 종래보다도 천단고가 낮으므로 접근하기가 용이하고 구조물의 주변경관에 가해지는 충격을 저감시킨다. 더욱이 리프 배후의 정온역과 새롭게 창출된 사빈은 종래보다 넓은 다목적의 이용공간을 주게 된다.

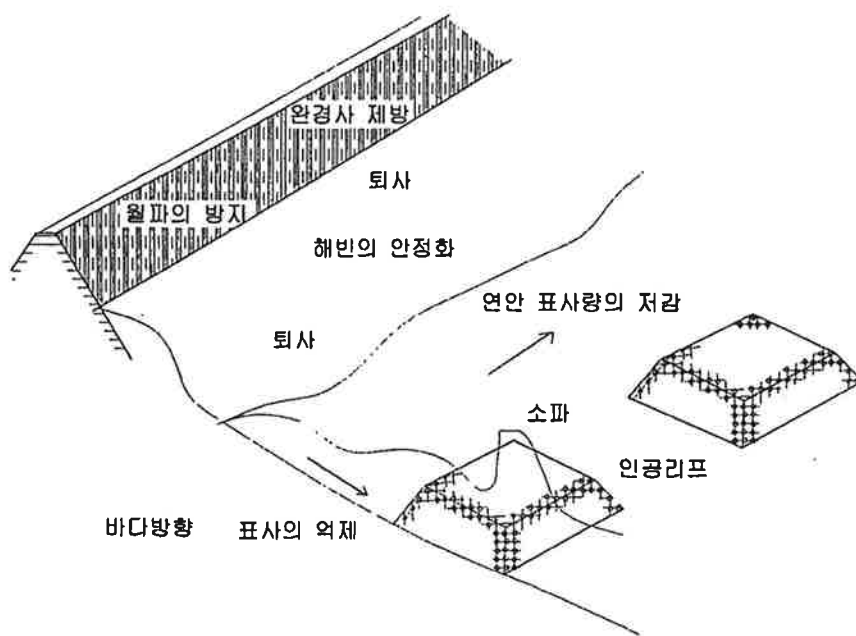


그림 3.5.17 인공리프의 효과의 개념도

라. 한국해역에 적용시 해결해야할 기술적 과제

상술한 면적방어공법을 위한 가장 이상적인 해역조건은 해저경사가 완만하고 저반이 안정된 사질로 형성된 곳이다. 그러나 이러한 조건이 만족되지 못하는 경우는 다음과 같은 부가적 기술을 확보해야 한다. 먼저 가장 현실적으로 적용이 용이하다고 판단되는 인공리프의 경우는 쇄파를 유도하므로 평균수위 상승을 가져와 연안류를 발생시키는 점이 단점으로 지적되고 있

다. 이를 해결하기 위해서는 근본적으로 쇄파를 억제하는 것보다 평균수위를 공간적으로 분산시킴으로서 연안류의 크기를 감소시키는 방향이 유리하다.

#### 1) 동해안

우리나라 동해안의 특성상 위의 개념과 적용을 위해 생각해야 할 것이 대수심에 대응할 수 있는 구조물의 고안이다. 기본적으로 대수심의 경우 기존의 연안 구조물을 적용하려면 공사비가 매우 높아질 것이므로 이를 극복하기 위해서는 다음의 2가지 사항에 대한 집중적인 기술개발이 필요할 것이다.

- 대수심 방파제의 축조 비용절감을 위한 구조형식으로 수정

- 대수심에 유리한 신형 구조물 개발

#### 2) 서해안

면적방호방식의 적용 효과면에서 보면 쇄파대가 넓어서 선적방호방식에 의한 주변해역 변형이 크다고 판단되는 경우가 유리할 것이다. 이는 쇄파대 내에서 물리적인 표사이동이 강하고 이를 국부적으로 제어할 경우 주변해역의 급격한 변화를 예측하기가 매우 어렵다. 따라서 넓은 공간에서 서서히 쇄파를 유도하거나 평균수위 상승을 공간적으로 분포시켜 연안류 발생을 억제하는 방향으로 생각하는 것이 하나의 방법이라고 사료된다.

공사비 관점에서 보면 가능한 수심이 낮고 쇄파대가 긴 지역을 대상으로 하는 것이 유리하다. 쇄파대가 넓은 경우는 좀더 먼 바다에서 먼저 쇄파가 시작하도록 하면 천해역에서 안정파가 형성될 가능성이 높아진다. 따라서 우리나라 서해안과 같이 쇄파대가 넓고 대조차가 큰 경우 잠제를 이용하여 파랑의 방향 및 에너지를 감쇠시킬 수 있다. 즉 간조시는 해수면보다 높은 천단고를 가지는 방파제로 기능하며 만조시는 잠제로 역할을 할 수 있을 것이다. 설계는 만조시 잠제를 기준으로 해야할 것이다. 이때 잠제는 단지 방

제적 기능에만 국한 시키지 말고 어업 협조형으로 축조하는 것이 좋을 것이다.

우리나라 서해안 일대는 최근 새만금 방조제를 비롯한 대규모적인 개발사업이 활발히 진행중에 있다. 서해는 수심이 100m이하가 대부분으로서 천해역의 수심은 조간대의 영향으로 수m내외의 차가 형성되고 해저면은 매우 완만한 경사를 가지고 있다. 이와같이 서해안 일대의 해저 지형은 동해안과는 상이한 조건을 가지고 있으므로 파 제어의 방식도 달리해야 할 것이다. 서해안에 적용가능한 구조 형태로 잠제형식의 방파제를 고려해 볼 수 있다. 여기서 잠제식 방파제는 면적방호개념에서 볼 때 방조제와의 연결개념으로 생각할 수 있다. 그러나 잠제형식의 방파제는 강제적인 쇄파를 유도하므로 평균수위가 상승하여 연안류 발생을 야기할 것이다. 이러한 문제점을 해결할 수 있는 방법으로 광폭잠제, 또는 굴절을 이용한 점차적 쇄파유도 및 연안류 발생 억제 형식을 추천할 수 있다. 서해안 일대는 수심의 변화가 심하므로 간조시에는 방파제나 고마운드 방파제가 되고 만조시에는 잠제가 되는 형식으로 천단고를 결정하면 될 것이다. 이때, 잠제에 의한 퇴적물의 이동 상황을 예측하기 위한 실험을 해야 한다. 아래의 그림은 우리나라 서해안 일대의 면적방호방식을 적용할 경우 잠제에 관한 사항을 검토하기 위한 접근 방식을 보인 것이다.

#### 마. 기존의 면적방호공법의 추가사항

위에서 설명한 점은 전면 해안선을 방호하는 개념으로서 이를 더욱 안정화 시킬 수 있는 공법이 배후지의 일대의 연안역을 식생 지대로 확보하고자 하는 방법이다. 해빈의 유실은 비단 파랑에 의한 영향 뿐만 아니라 바람에 의한 비사의 발생으로 인하여 해빈이 감소한다. 이를 억제하기 위한 식생지의 개발을 통하여 방재 및 쇄적한 연안역 일대를 조성할 수 있을 것이다.

## 바. 결론

면적방호방식에 사용될 수 있는 개별적인 연안 구조물로서는 이안제, 고조 방파제, 잠제, 돌제, 인공해빈, 인공 리프, 제방호안 등을 들 수 있다. 이러한 구조물들은 각각의 수리학적 특징을 가지고 있으면서 내파설계법이 어느 정도 완성되어 있다고 할 수 있으며 특정한 목적을 위하여 개별 구조물의 연구를 보완하는 것이 좋을 것이다. 이러한 개별 구조물을 공간적으로 배치하여 파랑을 목적하는 바로 제어하는 방법이 면적방호방식이다. 이때, 중요한 점이 위에서 지적한 바와 같이 주변해역에 미치는 영향을 최소화하기 위한 노력이 각각의 요소적 구조물의 설계에 반영되어야 할 것이다.

본 면적방호방식의 핵심은 각각의 요소기술을 목적하는 바에 따라 얼마나 잘 배열하는가에 달렸다. 그러나 우리나라의 경우는 각각의 요소기술이 충분히 확립됐다고 할 수 없으므로 외국의 연구결과를 이용할 수 밖에 없다. 단, 적용면에서는 전체의 요소기술의 접합을 요구하므로 현재의 우리나라 파랑해석 및 수리실험 기술수준으로도 충분하다고 사료된다. 이의 근거는 최근 우리나라의 경우는 해안공안 분야의 선진국에 비하여 젊고 유능한 연구자가 상대적으로 많은 편이다. 이들의 연구성과 중 최근 괄목한 성장을 하고 있는 분야가 파랑 변형 및 실험분야라고 할 수 있다. 이 두 가지의 기술이 본 면적방호방식을 현실화하기 위한 핵심기술이라고 할 수 있다.

기존의 선적방호공법으로부터 탈피하여 면적방호공법을 적용함으로써 인공갯벌, 백사장의 유지 및 조성의 효과가 있으며 장기간 해안유실 및 연안 구조물의 안정성을 향상할 수 있을 것으로 기대된다.

## 제 4장 수치해석

### 제 1절 서론

간척지를 합리적으로 개발하고 연안의 친수환경을 효율적으로 조성하기 위해서는 개발 구역 연안으로 입출 하는 조석 특성과 담수호에서 유출되는 유량이 조석 운동에 의하여 확산되는 과정에서 변화되는 수질, 방조제 연안으로 내습하는 파랑의 변형, 그리고 조석과 파랑 및 유사 이동에 따른 퇴적 변화를 분석하는 기법이 필요하다. 본 연구에서는 화란 델프트 연구소에서 개발한 조석 변화 예측 모형(TRISULA), 수질 예측 모형(DELWAQ), 파랑 모형(WAVE), 그리고 퇴적 변화 예측 모형(MOR)을 도입하여, 간척지 연안의 수리 환경 변화를 종합적으로 예측할 수 있는 수치 모형 System을 구축하였다.

본 연구에서 개발되는 수치 모형 시스템은 간척지 연안의 수리 환경 특성을 광역적이고, 종합적으로 분석하며, 수리 모형 시험의 경계 조건을 설정하는데 활용토록 연구되었다.



## 제 2절 조석 변화 예측 모형

### 1. 모형의 기본이론과 구성

#### 가. 이론적 배경

동수역학 수치 모형인 "TRISULA" 는 조석과 기상학적인 원인에 의하여 발생된 부정류 흐름 및 유동현상을 계산한다. 그 주요 목적은 얇은 바다, 연안지역, 하구지역 및 강과 호수에서의 불규칙한 온도와 염도 분포에 기인하는 밀도차이의 영향 또는 조석 및 바람에 의하여 발생된 흐름을 2차원 및 3차원적으로 수치 해석을 하는데 있다. 모형은 수평방향 스케일이 수직 방향의 스케일보다 훨씬 큰 흐름을 그 해석 대상으로 한다. 2차원 깊이 방향의 평균적 흐름에 대한 적용대상은 조석, 파랑, 태풍, 해일, 항만 안쪽의 진동, 오염물질의 이동 등이 있다. 3차원의 흐름에 대한 적용은 확산 문제의 경우 수직방향의 변화가 큰 경우에 효율적이다. 이러한 변화는 바람, 바닥마찰력, Coriolis force, 지형 또는 층화등에 의하여 발생된다. 이러한 경우에 대한 예로서는 호수 및 해안지역에서 배출된 오폐수 및 냉각수의 확산, 물 속에 존재하는 영양염류의 상하 이동, 하구지역에서 하천수의 유출 및 염분의 침투, 그리고 호수와 해양에서의 층화 현상 등이 있다.

#### 1) 물리학적 측면

모형은 운동량 방정식, 연속 방정식 및 확산 방정식들로 구성되어 있다. 이들 방정식은 직교 좌표계 또는 구체 좌표계로서 표현되며 염분과 열의 이동은 확산 방정식에 의하여 해석된다. "TRISULA"는 다음의 사항들을 포함하는 공식 및 방정식 및 방정식들로 구성되어 있다.

- o 조석조건, 수면경사(barotropic effects), 지구 자전효과 (Coriolis force)

- 밀도변화 및 수평방향의 밀도 경사 (baroclinic effects), 난류해석
- 바람, 바다, 거친 벽면, 파랑에 의한 마찰력과 바다 마찰력에 의한 파랑의 영향
- 기조력, 유량의 유입 및 유출, secondary flow 효과
- 염분, 온도의 이동 및 확산과 자유 수면을 통한 열의 교환 등

## 2) 기본 가정

모형은 상대적으로 얇은 수심에서 적용되므로 천수 방정식의 가정을 도입한다. 즉 수직 방향의 운동량 방정식은 정수력학적 압력 변화로 단순화시키고 수직 방향의 가속도는 중력 가속도에 비하여 무시할 정도로 작다고 가정한다. 유체는 비압축성이라 정하고 Boussinesq의 가정을 사용하여 밀도 변화의 영향은 단지 수평 방향의 압력 경사항 내에서만 고려한다. 그리고 다음과 같은 사항들이 기본적으로 가정된다.

- 지형과 흐름의 변화 사이에 동력학적 연관성은 존재하지 않는다.
- 직각 좌표계 내에서 지구의 곡면 효과는 고려되지 않으며 중력가속도와 Coriolis 변수는 일정하다고 가정한다.
- 유입 흐름에 대한 운동량과 폐쇄된 측면 경계에서의 직각방향 전단력은 무시될 수 있으며 수평방향의 점성항은 Biharmonic operator로 줄일 수 있다.
- 한 유속 발생지점에서의 수심은 사용자가 정의한 값 이하로 될 경우 건조한 것으로 간주하며 수심이 그 값의 2배 이상이 될 경우에 물에 잠긴 것으로 간주한다.

TRISULA모형은 문제 처리 과정에 다음과 같은 4개의 계산 모듈이 있다.

- o. The Shell module (구조적 모듈, 하드웨어와 관련 사항 및 연결)
- o. The Pre-processor module (전처리 과정, 입력 데이터 발생)

- o. The Execution module (실행과정, 문제 해석 및 계산)
- o. The Post-processor module (후처리 과정, 결과분석)

### 3) 지배방정식

TRISULA-2D 모형의 지배방정식은 운동량방정식과 연속방정식으로 구성되어 있다. 수평방향의 좌표로서 다음의 3가지가 이용될 수 있다.

직각좌표계 (x, y), 곡선좌표계 (ξ, η), 지구좌표계 (λ, φ)

수직 방향의 좌표계로는 σ 좌표계가 이용된다. σ 값의 분포는 바닥에서 σ = -1이며 수면에서 σ = 0 이다. σ 좌표계는 수직 단면에서 경계면에 따라 유도적으로 변화된 시스템이다.

가) 수평 방향의 운동량 방정식 :

ξ 및 η 방향의 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{(d+\zeta)} \frac{\partial u}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - \frac{vv}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - fv$$

$$= - \frac{1}{\rho \sqrt{G_{\xi\xi}}} \left( - \frac{\partial P}{\partial \xi} + \frac{\partial P}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \xi} \right) + F_{\xi} + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \Xi \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{(d+\zeta)} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi}$$

$$-\frac{uu}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + fu$$

$$= -\frac{1}{\rho\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left( \frac{\partial P}{\partial \eta} + \frac{\partial P}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \eta} \right) + F_{\eta} + \frac{1}{(d+\xi)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \varepsilon \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right)$$

입력항을 제외하면 밀도는 일정하게 된다. 이를 Boussinesq 가정이라 한다.

나) 연속방정식 :

수직방향의 속도  $\omega$ 는 연속방정식으로부터 계산된다. 수면에서 바닥까지 접근하면 연속방정식은 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial [(d+\xi)u\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi}$$

$$+ \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial [(d+\xi)v\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0$$

다) 정수력학적 압력 분포 가정

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -g\rho H$$

천해 방정식 가정 아래서 수직 방향의 운동량 방정식은 정수력학적 압력분포방정식으로 단순화된다. 부력 및 갑작스러운 바다 지형의 변화에 의한 수직 방향의 가속도는 고려하지 않는다. 적분을 하면 정수력학적 압력은 다음과 같다.

$$P = P_{atm} + gH \int_0^\sigma \rho(\xi, \eta, \sigma', t) d\sigma'$$

라) 확산 방정식 (염분, 온도 및 에너지의 확산)  
 물질의 이동은 다음의 확산 방정식에 의하여 계산된다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial [(d+\xi)C]}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left( \frac{\partial [(d+\xi)w\sqrt{G_{\eta\eta}}C]}{\partial \xi} + \frac{\partial [(d+\xi)w\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} \right. \\ & \left. \frac{\partial (\omega C)}{\partial \sigma} \right) = \frac{d+\xi}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left( -\frac{\partial}{\partial \xi} \left[ D_h \frac{\sqrt{G_{\eta\eta}}}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial C}{\partial \eta} \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} \right. \\ & \left. \left[ D_h \frac{\sqrt{G_{\xi\xi}}}{G_{\eta\eta}} \frac{\partial C}{\partial \eta} \right] - \frac{1}{d+\xi} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ Dv \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right] \right) + (d+\xi)S \end{aligned}$$

마) 상태 방정식

물의 밀도( $\rho$ )는 염도(s)와 온도(t)의 함수이다. Eckart(1958)가 제안한 경험 공식을 사용하여 물의 밀도를 계산한다.

$$\rho = \frac{1000P_0}{\lambda + \alpha_0 P_0}$$

여기서  $\lambda = 1779.5 + 11.25t - 0.0745t^2 - (3.80 + 0.01t)s$

$$\alpha_0 = 0.6980$$

$$P_0 = 5890 + 38t - 0.375t^2 + 3s$$

위 공식에서 사용된 계수의 특성은 아래와 같다.

C = 바닥 마찰에 대한 Chezy 계수

Dh, Dv = 수평, 수직 방향의 와류 확산 계수

d = 평균 해수면을 기준한 수심

f = Coriolis 파라메타

G = 곡선 직교 좌표를 직각 좌표로 변환시 보정 계수

g = 중력가속도

H = 총 수위 (H = d +  $\xi$ )

- h = 바다부터 기준면까지의 거리
- k = 흐름방향에 대한 확산계수
- P = 정수압
- S = 생성과 소멸(source and sink)에 대한 항
- u = x 방향에 대한 수심평균 유속
- v = y 방향에 대한 수심평균 유속
- $\xi, \eta$  = 수평 곡선 직교 좌표의 양 방향
- $\zeta$  = 기준면에서 수면까지의 수위
- $\tau_x^s, \tau_y^s$  = x-와 y-방향에 대한 바람 응력항
- $\sigma$  = 수직 좌표 계수 (수면  $\sigma = 0$ , 해저  $\sigma = -1$ )
- $\rho$  = 물의 밀도
- $\omega$  = 조석의 주기

## 나. 경계조건

### 1) 수직면과 바닥의 경계조건

$\sigma$  좌표계에서 자유수면과 바닥은 s-평면이다. 연속방정식에 대한 수직 단면상의 경계조건은 다음과 같다.

$$\omega(-1) = 0, \quad \omega(0) = 0$$

해저에서 운동량 방정식에 대한 바닥 경계 조건은 다음과 같다.

$$\frac{V_v}{H} \frac{\partial U}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=-1} = \frac{\tau_{bx}}{\rho}$$

$$\frac{V_v}{H} \frac{\partial V}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=-1} = \frac{\tau_{by}}{\rho}$$

여기서  $\tau_{bx}$  와  $\tau_{by}$ 는  $\xi$  와  $\eta$  방향의 바닥 마찰력이다.

수직방향 평균흐름에 대한 바닥 마찰력은 다음과 같다.

$$\tau_b = \rho \frac{g}{C_{2D}^2} |\bar{U}|^2$$

여기서 U는 수직 방향의 평균흐름에 대한 속도이다. 또한 Chezy 계수인 C<sub>2D</sub>는 다음의 공식들에 의하여 결정된다.

Chezy 공식 : C<sub>2D</sub> = Chezy 계수

$$\text{Manning 공식 : } C_{2D} = \frac{6\sqrt{H}}{n}$$

H : 전체수심, n : Manning 계수

$$\text{White Colebrook 공식 : } C_{2D} = 18 \log_{10} \left( \frac{12H}{K_s} \right)$$

여기서 k<sub>s</sub> = Nikuradse 조도계수

## 2) 폐쇄 경계에서의 전단응력

모든 측면 경계에 대하여는 전단 마찰력을 0으로 하는 free slip 조건을 적용하며 모든 폐쇄 경계에 대하여는 partial slip 조건을 적용한다. 대규모 스케일 모형에서는 측면경계에 대한 전단 마찰력의 영향은 무시될 수 있다. 따라서 이 경우 모든 측면 경계에 free slip 조건이 적용된다. 소규모 스케일 모형에서는 측면의 영향은 무시될 수 없다. 측면에 대한 수직 방향 마찰력은 다음의 공식에 의하여 계산된다.

$$\tau_{\xi\eta} = \tau_{\eta\xi} = \rho U_*^2$$

전단속도 U<sub>\*</sub>는 조도길이 Z<sub>0v</sub> 와 경계까지의 거리 x에 의하여 로그형태로 결정된다.

$$u(x) = \frac{U_*}{\kappa} \ln \left( \frac{x}{Z_{0v}} \right)$$

## 3) 측면 경계조건

개방된 측면 경계에서는 수위, 유속, 유량의 조건들이 적용된다.

○ 수위 : S = F<sub>s</sub>(t) ,

○ 유속 (x- 방향) :  $U = F_u(t)$

○ 유량 :  $Q = F_q(t)$

어떠한 경계조건을 선택할 것인가는 파악하고자 하는 현상이 어떤 것인가에 달려있다. 예를 들면 하구의 내륙 깊숙한 지점에서 수위에 대한 모의발생을 하는 경우 바깥쪽에 이미 알고 있는 수위를 결정하여야 한다. 직선 수로의 양단에 두 가지 유속경계를 설정하는 경우 유량이 양립할 수 없다면 연속성 문제가 생길 수 있다. 이 경우 한쪽에는 유속경계조건을 적용시키고 다른 쪽에는 수위 경계조건을 적용시키는 것이 바람직하다. 경계조건으로서 수위만을 사용하게 하는 경우 수위는 일반적으로 변화하는 변수이며 전혀 다른 반응이 나타날 수도 있다. 즉 그리 멀지 않은 지점들의 수위 사이에는 상당한 연관성이 존재한다. 이는 수위에 있어서 작은 오차라도 비교적 큰 내부 힘, 즉 큰 유속으로 결과가 나올 수 있음을 의미한다. 따라서 경계조건에서의 작은 오차로 인하여 결과에 중대한 영향을 미치는 것을 피하기 위하여 모형의 경계는 가능한 한 분석 대상 지역으로부터 멀리 설정하는 것이 바람직하다.

#### 4) 기조력

해안지역의 조석 수치모형은 일반적으로 직접적인 국부 기조력의 영향은 고려하지 않는다. 이들 모형에 있어서 전체 물의 부피는 비교적 작으며 따라서 기조력의 영향은 무시될 수 있다. 이들 모형에 대하여 조석의 발생은 개방 경계조건으로 충분히 정확한 조석 현상을 재현 할 수 있다. 그러나 최근에는 넓고 깊은 해안에 대한 모형의 필요성이 증가하고 있다. 이들 대부분의 모형에서는 물의 유동에 대한 중력의 영향이 중요하며 이 경우 천체의 인력으로부터 생겨나는 기조력은 무시될 수 없다. 이들 힘의 근원에 따라 조석은 지구 전체가 물로 덮여 있다고 가정한 경우에 발생하는 조석(Equilibrium tide)과 지구 탄성에 따른 지각의 변화에 의한 조석(Earth



tide)로 구분된다.

#### 다. 수치 해석 기법 및 처리순서

##### 1) Staggered grid system

수치모형 격자망을 구성할 때 수위와 유속 계산 지점의 위치가 교차되어 설정되는 것을 staggered grid라 부른다. 수위 계산 지점은 하나의 격자 중심에서 정의되는 반면 유속 성분은 이 격자의 가장자리에서 정의되므로 수위와 유속 성분이 계산되는 지점은 서로 엇갈리게 된다. Staggered grid 는 경계 조건이 비교적 단순하게 적용될 수 있고 Non-staggered grid 에 비하여 더 많은 변수를 이용하고 수면의 공간적인 진동을 방지한다는 장점이 있다.

##### 2) 모형 경계의 정의

수치 모형의 범위는 격자상의 계산 경계에 의하여 결정된다. 격자상의 계산 경계는 모형 안에서 육지 경계를 나타내는 하나 또는 그 이상의 다각형들로 구성된다. 이들 다각형들은 격자 위에서 사용자가 정의한 수위 계산 지점들을 연결하여 구성된다. 특별히 지정되지 않는 경우 기본적인 계산 경계는 (1,1) (1, Mmax), (Nmax, Mmax) 및 (Nmax, 1)의 연결선상에 있는 격자들의 수위계산 지점들로 구성된다. 이들 경계상의 격자점들 중 개방 경계는 별도로 정의되어야 하며 별도로 정의되지 않는 부분은 육지경계로 간주한다.

##### 3) 격자번호의 정의

격자 발생 프로그램인 RGGRID는 수심 계산 지점들을 연결한 선들의 번호로 격자점의 번호를 지정한다. 수치모형 "TRISULA"는 경계조건이 모형 경계의 밖에서 정의되도록 요구하므로 격자발생 프로그램에 의하여 격자크기보다 양쪽 방향으로 하나씩 더 증가한 격자 크기를 갖는다.

#### 4) 수직 방향 격자

수직 방향의 격자는 Phillips가 대기 모형에 사용하여 소개한  $\sigma$  좌표계를 이용하여 구성되었다. 이 좌표계에 의하면 수직 방향의 격자는 바닥과 표면의 두  $\sigma$ 면을 경계로 한 사이에서 구성된다. 이는 전체 계산 영역에 걸쳐서 수심의 변화에 관계없이 층수의 구분이 일정함을 의미한다. 따라서 지형의 변화에 따라 유연한 표현이 가능하게된다. 또한 수심이 낮은 지역 및 표면 부근과 같이 중요한 부근에서는 보다 높은 정밀도를 얻을 수 있다.

#### 5) 2D 천수 방정식의 계산방법

인접한 수직층의 수평방향 속도는 수직방향의 이류(advection)항과 수직방향의 점성항들과 결합된다.  $\sigma$  좌표계는 수심이 얇은 지역에서는 매우 얇은 층들을 발생시킨다. 수직방향의 점성항에 의한 불안전성을 방지하기 위하여 수직방향 교환항의 계산에 대하여는 완전 음해법(implicit)이 사용된다. 각 층들의 속도는 Gauss elimination 에 의하여 수위의 형태로 표현된다. 그 다음 각 층들의 속도는 수심 평균 연속 방정식에 대입된다. 수위에 대한 방정식은 Alternating Direction Implicit (ADI) 기법으로 계산된다. 수위는 격자선상의 x 및 y 방향에서 교대로 음해법으로 계산된다.

#### 6) 이류항

ADI 기법에 의한 이류항의 적분에 있어서 두가지 가정이 사용된다. 수위 계산시 처음의 음해법 반시간스텝 뒤에는 이류항에 대하여 양해법(explicit) 2차 central approximation이 사용된다. 다음의 양해법 반시간스텝에는 이류항에 대하여 음해법에 의한 고차 upwind approximation이 사용된다.

#### 7) 초기 조건과 spin-up 효과

모형에 이용되는 변수들은 즉 이전에 실행된 데이터의 이용하거나

(hot start), 사용자가 규정한 데이터의 이용하는 방법(cold start)에 의하여 초기화될 수 있다. 사용자가 규정한 초기 값들은 대개의 경우 실제 경계 조건과 일치하지 않으므로 모형 안에 큰 파동이 발생하게 되며 이 파동은 내측 경계에서 반사되어 다시 외측 경계에 영향을 미치게 된다. 이러한 파동은 그 에너지가 바다 또는 내부 마찰력에 의하여 완전히 소멸될 때까지 계속된다. 이를 spin-up 효과라 한다. 이 spin-up 시간을 줄이기 위하여 적절한 적응 과정이 필요하게 된다.

## 2. 서해안 간척지구의 조석변화 분석

### 가. 경기·아산만 해안개발에 따른 조석변화

#### 1) 인천 연안해역의 지형 및 개발현황

인천 연안해역은 인천을 사이에 두고 영흥도와 영종도를 잇는 선의 내측 해안을 중심으로 한 지역으로서 기존의 인천 연안의 공단 매립을 비롯하여 인천 국제공항과 시화방조제 건설 등 해안개발이 활발히 이루어지고 있는 지역이다. 그림4.2.1은 인천 국제공항과 시화방조제가 완공된 이후의 지형도이다.

인천국제공항은 영종도와 용유도를 잇는 호안 및 방조제를 축조하고 그 내부에 발달한 넓은 간척지를 주변의 절토지역에서 확보한 육상토와 해저 퇴사(堆沙)지역에서 준설한 해사를 이용하여 매립한 지역에 건설되며 총 부지 조성면적은 56,168,000 m<sup>2</sup>(약 1,700만평)에 달한다. 방조제는 동측, 북측 및 남측으로 구분되며 그 길이는 각각 3.93 km, 7.3 km 및 6.0 km이고 1994년 10월에 제철되었다. 이 지역의 조위차는 인천항보다 다소 작고 조류속은 그다지 크지 않으며 외해의 파랑은 주변의 섬과 간척지에 의하여 대부분 차폐되는 등 공항건설에 적합한 조건을 구비하고 있다. 그러나 두 섬 사이

에서 조류의 통로 역할을 하던 넓은 면적의 간척지가 육지화함에 따라 이 지역의 조류 유동패턴이 달라지게 되며 조석특성에도 변화를 가져올 것으로 추측된다.

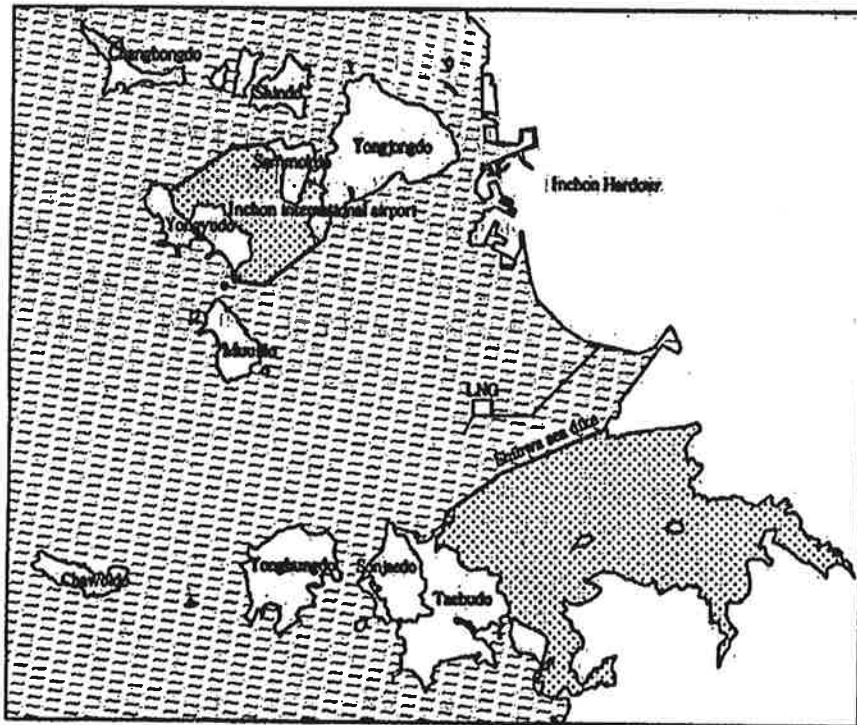


그림 4.2.1 인천 국제공항과 시화 방조제 축조 후 지형도 변화

시화방조제는 시화지구 개발사업의 일환으로 시흥시와 화성군을 잇는 방조제로서 총 길이는 12.7km에 달한다. 시화지구 개발사업은 경기도 안산시, 시흥시, 화성군 등 3개 시군을 연계 개발하는 사업으로 시흥만내의 간척지 17,300ha와 배후지 7,130 ha 등 총 24,430ha를 개발하여 공업용지와 도시용지를 공급하고 대규모 우량농지 및 첨단 복합영농단지 등을 조성하기 위하

여 시행되는 사업이다. 1987년 6월에 착공하여 7년여의 공사끝에 1994년 1월 방조제 끝막이 공사를 완료하였다. 이에 앞서 대부도와 선감도 사이의 대선방조제, 선감도와 불도 사이의 불도방조제 그리고 서수도와 동수도를 통하여 올라오는 조류는 영흥도와 무의도 사이에서 만나게 되며 다시 북쪽 방향의 인천항으로 유입되는 흐름과 동쪽방향의 반월천으로 유입되는 흐름으로 갈라지게 된다. 시화방조제는 이중 조석량의 비중이 더 큰 동쪽방향의 흐름을 차단하게 되므로 이 지역의 조류패턴 및 조석특성의 변화가 예상된다.

## 2) 모델의 구성

모델은 인천지역 서해안과 아산만지역 서해안을 모두 포함하도록 그림 4.2.2와 같이 구성하였다. 모델의 범위는 북으로 강화도와 한강 하류지역 전체를 포함하며 남으로 태안반도의 남쪽에 위치한 안면도를 포함하도록 구성하였다. 북쪽경계는 조류의 유출입 방향과 해저지형을 고려하여 결정하였으며 이는 해저퇴사의 발달방향과 일치한다. 모델의 목적을 충족시키기 위하여 모델의 해측 경계는 해안에서 충분한 거리를 두고 있는 외해에 설정하였다. 모델은 수심방향의 평균적흐름에 대한 계산과정에 의하여 계산되었다. 이러한 계산과정은 연구대상지역이 대부분 천수지역의 흐름특성을 나타내며, 이와 아울러 수직단면상에서 밀도차에 의한 수평방향의 속도성분의 차가 작으므로 타당성을 갖는다. 해안 및 해저 지형의 영향을 받은 조석은 매우 큰 조류속을 유발하며 잘 혼합된 밀도분포를 나타낸다. 모델은 조간대에서 물이 들어오고 나가는 현상을 재현한다. 이와 아울러, 바람과 기압경사 및 수평방향의 밀도경사의 영향을 고려할 수 있다.

각종 변수값 결정 해수밀도는  $1,024 \text{ kg/m}^3$ 의 균일값을 사용하였으며, 중력가속도는  $9.79 \text{ m/s}^2$ 을 사용하였다. Coriolis 계수는  $37^\circ\text{N}$ 에 해당하는 값을 사용하였다. 바닥조도는 고정된 Manning 계수값  $0.026$ 을 사용하였다.

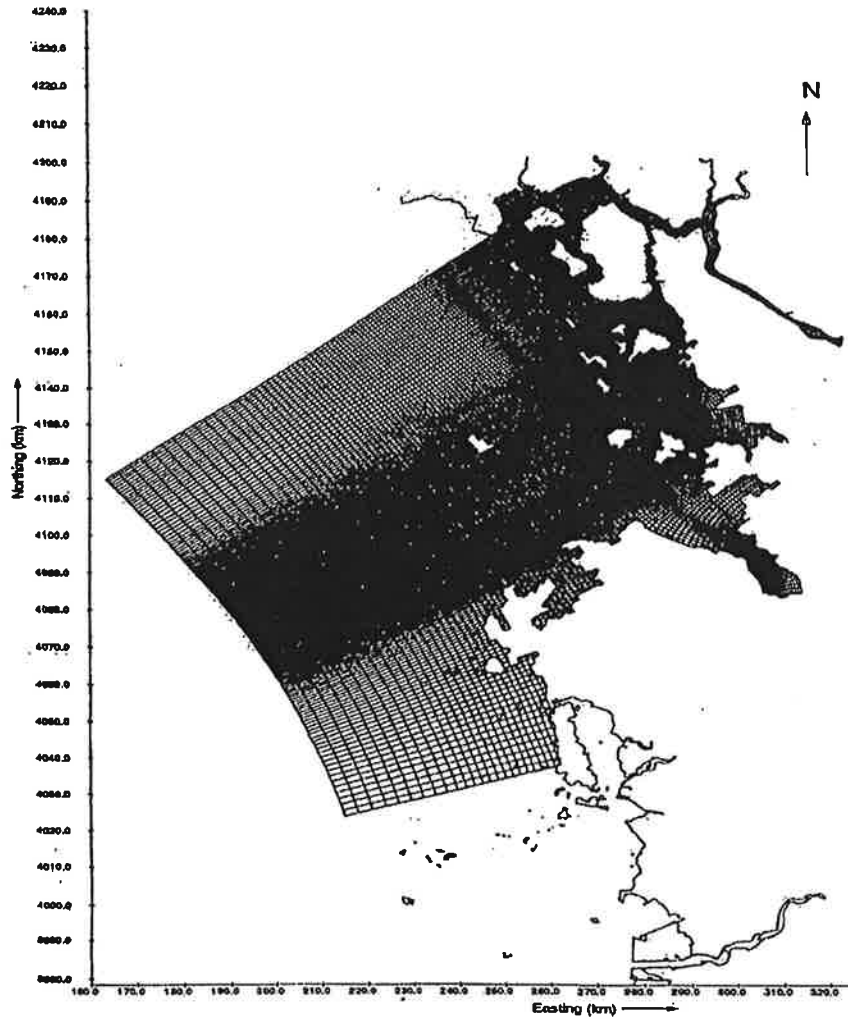


그림 4.2.2 아산만 모형의 계산 격자망

### 3) 모형의 보정 및 검증

모형의 보정 및 검증은 사업이 시행되기 이전의 조건에 대하여 실시하였

다. 여러 가지 변수들은 변경 가능한 범위 내에서 실제 관측자료들과의 비교를 통하여 최적의 결과를 얻을 수 있도록 조정하였다. 보정과정에서는 고정 및 안흥에서의 관측자료를 주로 이용하여 광역모델에서 확보된 경계조건이 지역모델에 적합하도록 조정하는 데 중점을 두었다. 검정과정에서는, 결정된 변수를 이용하여 모델의 내측 지점들에서 여러 가지 조석조건(대조, 소조, 또는 중조)에 대하여 얻어진 계산결과를 관측결과와 비교하였다.

모델링의 초기 3일간은 모델의 안정화 기간으로서 결과분석 대상에서 제외되었다. 이러한 방법은 전체 영역에 걸쳐서 양호한 보정결과를 얻는 데 적합한 방법이다. 전체 영역에서 조석의 진폭과 주기가 정확하게 표현된다면 대조기나 소조기에 관계없이 조석특성을 잘 재현할 것이다. 별도의 수위 또는 유속에 대한 검정이 불필요하나 별도의 비교를 통해서 결과의 확인이 가능하다.

모델은 주로 조석 조화상수들을 기준으로 하여 보정되었다. 조화상수 자료는 수로국 자료와 각종 문헌들, 특히 최(1980)로부터 확보되었다. 모델의 보정 및 검정을 위하여 각 실험 Case 별로 최적의 조화상수자료를 선정하였다. 가급적 계절적인 변화를 제거하기 위하여 연평균자료를 우선적으로 이용하였다. 모델의 보정 및 검정에 사용된 지점(stations)들의 목록이 표 4.2.1과 같으며 그 위치는 그림 4.2.3에서 보는 바와 같다.

조류속의 검정을 위하여 1982년의 인천항 그 부근에 대한 조류도와 수로국 조류관측결과를 이용하였다. 조류속 검정을 위하여 설정한 지점들과 통과유량을 판단하기 위하여 설정한 수로단면의 위치는 그림 4.2.4에 표시되어 있다. 그림 4.2.4에서 s1은 영종도와 인천항 사이의 수로이며, s2는 덕적도와 이작도 사이의 서수도 구간이며 s3는 평택항 앞 한진각과 노미각 사이의 구간이다.

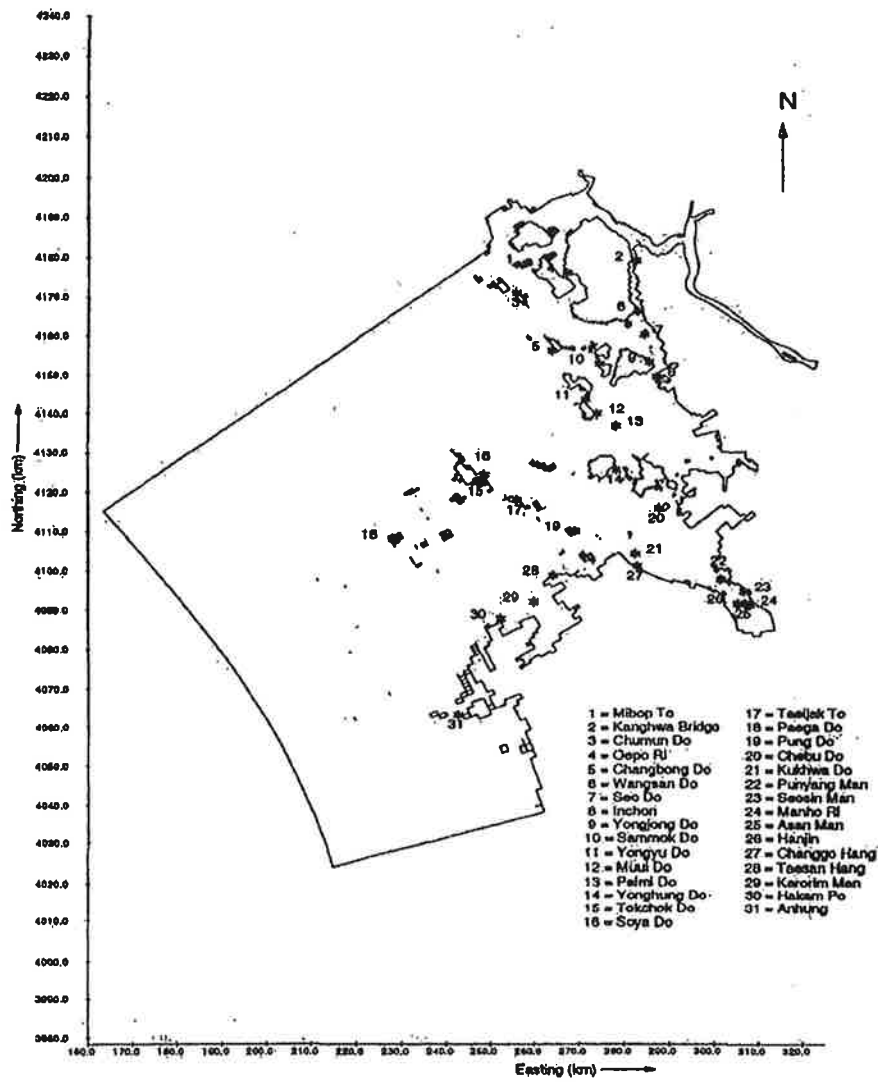


그림 4.2.3 조위 측정지점의 위치 (아산만 모형)



표 4.2.1 Monitoring stations of Regional Model

no.	Geographical coordinates		Grid coordinates		Station name
	lon(dgr)	lat(dgr)	M	N	
1	126-16	37-43	107	153	Mibop-do
2	126-31	37-44	147	139	Kanghwa-bridge
3	126-14	37-30	94	148	Chumun-do
4	126-22-48	37-41-54	119	146	Oepo-ri
5	126-20	37-15	89	132	Changbong-do
6	126-33	37-37	130	126	Wangsan-do
7	126-34	37-34	124	115	Seo-do
8	126-35-51	37-28-08	113	93	Inchon
9	126-34	37-30	116	102	Yongjong-do
10	126-27-13	37-29-47	100	117	Sammok-do
11	126-25-36	37-25-11	85	107	Yongyu-do
12	126-27	37-23	84	99	Mui-do
13	126-31	37-21-16	85	88	Palmi-do
14	126-30-12	37-15-18	74	73	Yonghung-do
15	126-08-48	37-13-06	44	104	Tokchok-do
16	126-10	37-14	46	105	Soya-do
17	126-14-30	37-10-30	48	86	Taeijak-do
18	126-57	37-04	23	100	Paega-do
19	126-23-42	37-06-36	54	60	Pung-do
20	126-37	37-10	75	46	Chebu-do
21	126-33	37-03	60	38	Kukhwa-do
22	126-47	37-00	69	21	Punyang-man
23	126-50	36-59	72	15	Seosin-man
24	126-51	36-57	70	11	Manho-ri
25	126-50	36-57	68	12	Asan-man
26	126-49	36-57	64	13	Hanjin
27	126-34	37-02	58	36	Changgo-hang
28	126-21-15	37-00-16	45	47	Taesan-hang
29	126-19	36-57	39	41	Karorim-man
30	126-13	36-54	32	41	Hakam-po
31	126-08-06	36-40-12	18	20	Anhung

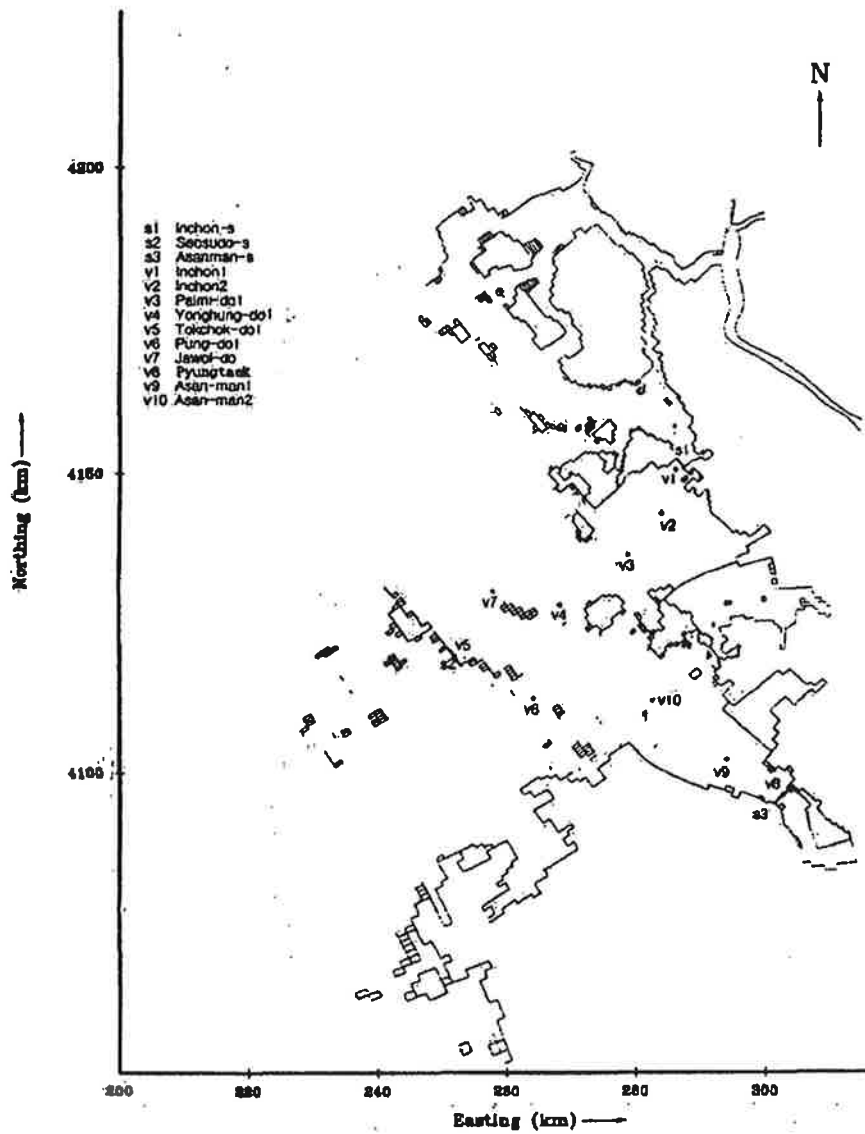


그림 4.2.4 수로단면(s1-s3)과 유속측점(v1-v10)의 위치

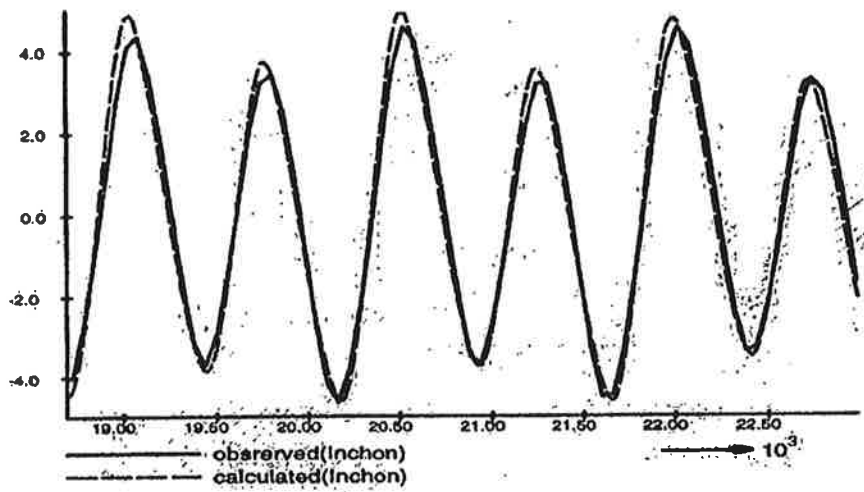
#### 4) 보정 및 검증결과

조석 계산결과는 각각 31지점에서 분석되었으며 각 지점에서 가장 중요한 일주조분조인  $O_1$ 과  $K_1$ , 그리고 반일주조분조인  $M_2$ 와  $S_2$ 에 대하여 계산치와 관측치를 비교하였다. 표 4.2.2는 분석결과를 나타낸다.  $O_1$ ,  $M_2$  및  $S_2$ 분조의 경우, 계산 진폭값은 관측치와 평균적으로 5% 이내의 오차를 보이며  $K_1$ 분조의 경우는 11% 정도의 오차를 나타내나 4개 분조중에서 영향이 가장 작은 분조로서 결과의 정확성에 기여하는 정도는 다른 3개 분조들에 비하여 매우 작다. 지각의 경우 일주조의 경우 평균적으로 8° 이내의 오차를 나타내며, 반일주조의 경우 평균적으로 10° 이내의 오차를 나타낸다. 따라서 진폭과 지각 모두 허용오차 범위내에 있다.

표 4.2.2 Model performance at 31 water level stations

$H_c$ = computed amplitude $H_o$ = observed amplitude $G_c$ = computed phase $G_o$ = observed phase		$O_1$	$K_1$	$M_2$	$S_2$
Mean $H_c - H_o$ (m)		-.002	.036	.125	-.018
Abs. mean $ H_c - H_o $ (m)		.019	.046	.145	.073
Mean $H_c/H_o$ (-)		1.001	1.114	1.051	.995
Mean $G_c - G_o$ (°)		.1	7.3	2.7	6.9
Abs. mean $ G_c - G_o $ (°)		6.7	10.9	4.6	8.6

그림 4.2.5은 1987년 5월 14일에서 16일 사이에 인천과 안흥지점에서 계산한 조위를 관측치와 비교한 곡선이다. 그림에서 보면 두 지점에서 모두 계산조위곡선이 관측결과와 유사하게 재현되고 있음을 알 수 있으며 따라서 조위의 재현은 계산영역 전반에 걸쳐 비교적 정확하게 이루어지고 있다.



(a)

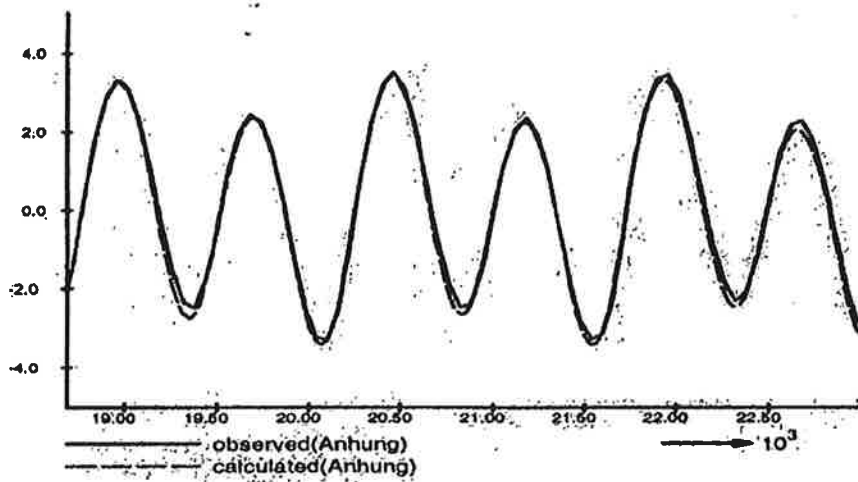


그림 4.2.5 인천 및 안흥지점의 조위의 관측값과 계산값

## 5) 수치모델링 분석결과

### 가) 개발이후의 조위특성변화

수치모델분석결과 인천연안해역에서 개발 이후 최대 조위가 감소하였으며 아산만 연안해역 개발 이후에도 최대 조위가 감소하였음을 알 수 있다. 다만 아산만 연안해역 개발로 인한 조위감소량은 인천 연안해역 개발로 인한 조위감소량에 비하여 작다. 인천지점(station 8)에서의 사업시행전후에 대한 대조기의 조위 계산결과는 그림 4.2.6과 같다. 정량적인 분석을 위하여 31개 지점(station)에서 1개월간의 계산결과를 조화분해하였다.

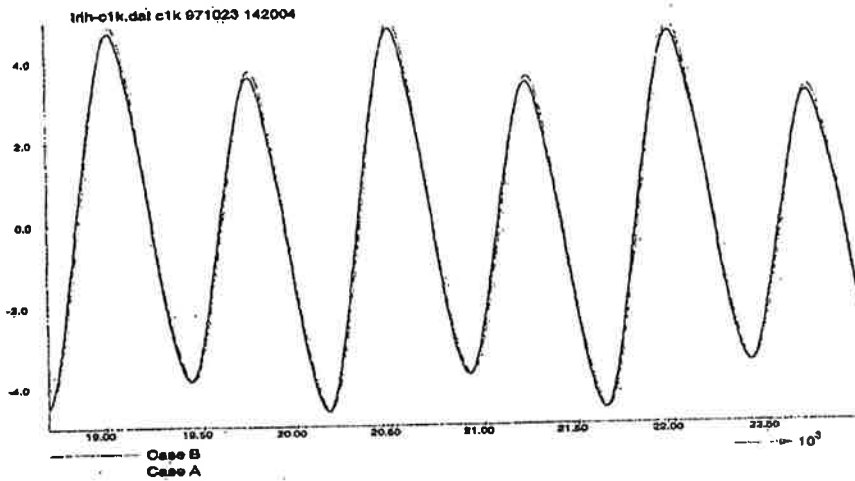


그림 4.2.6 인천지점에서 사업시행 전후의 대조기의 조위 계산결과

표 4.2.3는 사업시행전후에 대하여 인천 연안지역 6개지점에서  $M_2$ 와  $S_2$ 분조 및 반조차( $Z_0$ )를 비교한 것이며 표4.2.4는 지각을 비교한 것이다.

덕적도 지점은 인천연안으로부터 멀리 떨어져 있으나 여기서 함께 고찰하였다.

표 4.2.4에 의하면 인천, 영종도 및 팔미도지점에서 인천 연안해역 개발 이후  $Z_0$ 가 8 cm 정도 감소하였음을 알 수 있다. 반면에 장봉도와 삼목도 지점에서는 상기 지점들과 인접지역임에도 불구하고 2~4 cm 정도만 감소하였다. 이로써 개발에 의한 조석변화는 주로 주수로상에서 발생함을 알 수 있다. 인천, 영종도 및 팔미도지점의 경우  $M_2$ 와  $S_2$ 분조의 합의 차이와  $Z_0$ 의 차이가 동일하며 이는  $O_1$ 과  $K_1$  분조는 개발이후에도 변화하지 않았음을 의미한다.

표 4.2.3 Tidal amplitudes before and after the project

Station	$M_2$ (m)		$S_2$ (m)		$Z_0$ (m)	
	Case A	Case B	Case A	Case B	Case A	Case B
Changbong-do	2.78	2.76	0.97	0.97	4.44	4.42
Inchon	3.00	2.94	1.06	1.04	4.76	4.68
Yongjong-do	3.00	2.94	1.06	1.04	4.76	4.68
Sammok-do	2.90	2.87	1.02	1.01	4.61	4.57
Palmi-do	2.89	2.83	1.02	1.00	4.60	4.52
Tokchok-do	2.47	2.46	0.86	0.86	4.01	4.00

표 4.2.4 Tidal phases before and after the project

Station	$M_2$ (°)		$S_2$ (°)	
	Case A	Case B	Case A	Case B
Changbong-do	135.1	133.7	188.5	186.6
Inchon	136.4	133.0	190.9	186.5
Yongjong-do	138.4	135.9	193.5	190.2
Sammok-do	136.4	135.0	190.6	188.7
Palmi-do	133.7	130.6	187.4	183.3
Tokchok-do	124.7	124.0	175.2	174.2

#### 나) 개발이후의 조류특성변화

그림 4.2.7은 인천 연안해역 개발 전후에 대조기에 대하여 인천 (station 1)과 팔미도지점(station 3)에서의 조류속과 조류향의 변화를 비교한 것이다. 그림 4.2.7(a)는 인천연안해역 개발후 인천항지점에서 창조시 최대유속이 약 1.20 m/s에서 1.40 m/s로 0.2 m/s(17%) 가량 증가하였음을 보여준다. 조류향은 개발이후에도 거의 변화가 없었다. 반면에, 그림 4.2.7(b)는 팔미도지점에서 최대유속이 1.55 m/s에서 1.10 m/s로 0.45 m/s(30%) 정도 감소하였음을 보여준다. 이 지점에서의 조류향은 개발이후에 더욱 왕복성 흐름이 강해졌음을 보여준다. 이는 주수로상의 흐름이 개발 이후에 주위로 분산될 수 있는 지역이 크게 제한 되었기 때문이다.

#### 다) 분석결과

연구를 통하여 얻은 주요 결과는 다음과 같다.

- 인천연안해역의 최대조위는 인천연안해역의 개발이후 다소 감소하였다. 인천연안해역의 개발 이후 인천항 및 팔미도부근과 같은 주수로상에서 반조차( $Z_0$ )는 8 cm 정도 감소한 반면 주수로 이외의 지역에서는 상기지점의 인접지역임에도 불구하고 2~4 cm 정도만 감소하였다. 이로써 개발에 의한 조석변화는 주로 주수로상에서 발생함을 알 수 있다.

- 인천연안해역의 조류속은 개발이후 크게 변화하였다. 인천연안해역의 개발이후 인천항 부근에서 창조시 최대유속이 1.20 m/s에서 1.40 m/s로 약 17% 증가한 반면, 팔미도에서는 1.55 m/s에서 1.10 m/s로 약 30% 감소하였다. 개발이후에는 주수로상의 흐름이 주위로 분산될 수 있는 지역이 크게 제한되어 팔미도 지점의 유향은 개발 전보다 더욱 강한 왕복성을 띄게 되었다.

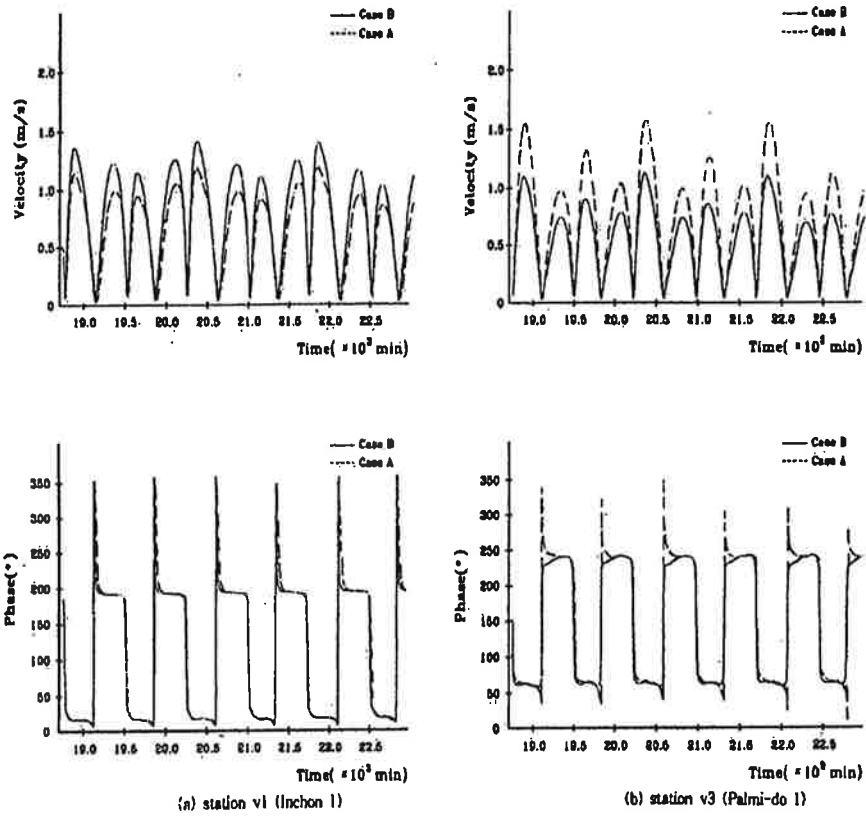


그림 4.2.7 인천과 팔미도에서의 대조기의 시간대비 조류속과 조류향의 대조

- 본 연구결과는 광범위한 구역을 대상으로 분석한 결과이므로 작은 지역에서의 세밀한 조석 및 수리특성 변화를 파악하고자 하는 경우에는 높은 해상도를 갖는 국지모형을 구성하여 정밀한 분석이 요구된다.

이 경우 본 연구결과는 국지모형의 경계조건 및 검증자료로 이용될 수 있다. 인천 국제공항과 아산신항, 그리고 시화 및 화옹방조제의 세부연구를 위하여 각각에 대한 국지모형의 구성이 필요하며 본 연구에서 개발된 아산



만 지역모델은 이들 국지모델의 구성을 위한 기본 자료를 제공하게 된다.

## 나. 금강하구와 새만금 방조제 건설 후 조석변화

### 1) 모형의 구성

#### 가) 모형의 범위 및 개방경계의 결정

금강하구 지역모형은 아산만 지역모형과 영산강 지역모형의 중간지역에 대하여 구성되며 모형의 북측경계는 아산만 지역모형의 남측경계와 일치하며 남측경계는 영산강 지역모형의 북측경계와 일치하도록 구성하였다. 이에 따라 금강하구 지역모형의 범위로서 남측은 법성포(영산강 지역모형의 북측경계, 북위 35° 20' 부근)에서 북쪽으로는 천수만(북위 36° 37' 부근)으로 정하였다.

개방경계도 아산만 지역모형과 영산강 지역모형을 연계하여 구성할 수 있는 위치에 설정하였다. 이에 따라 새만금 및 군장 외곽방조제로부터 서쪽으로 약 60Km 연장된 동경 125° 45' 근처로 정하였다. 따라서 대상범위는 남북으로 약 120Km, 동서로 90Km에 이른다(그림 4.2.8).

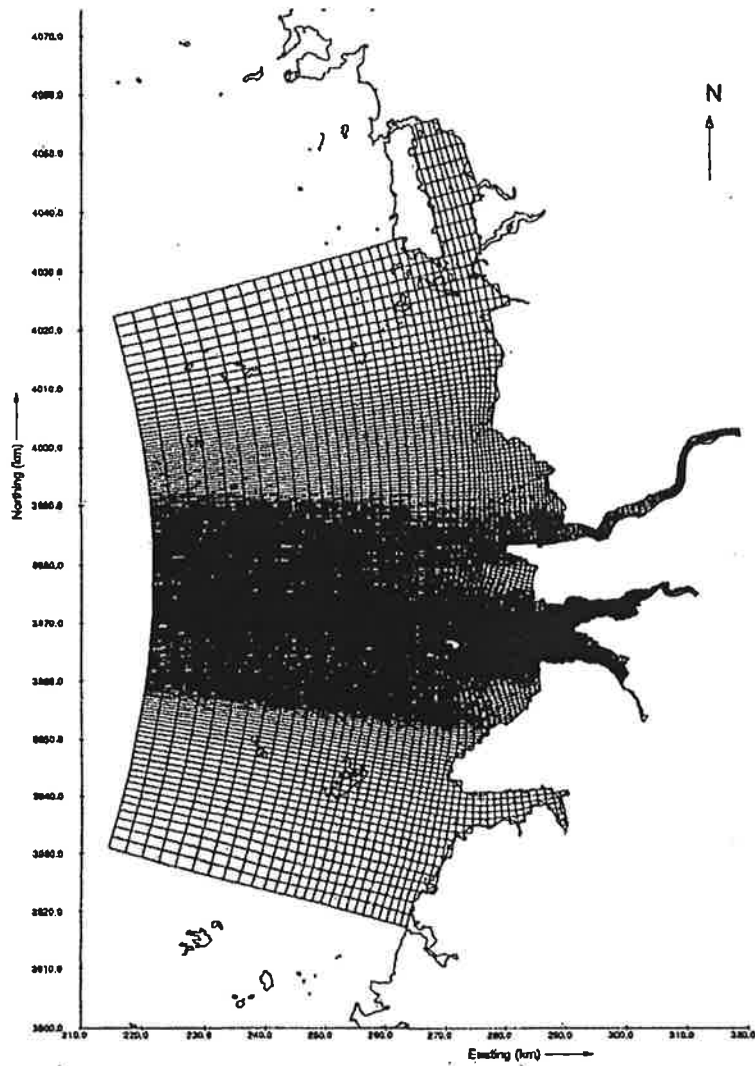


그림 4.2.8 모형의 범위 및 경계

## 나) 격자망구성

구성된 격자망은 Curvilinear Orthogonal Grid를 적용하여 지형표현이 직교 Grid보다는 용이하도록 하였다. 격자망은 서에서 동쪽방향을 M-방향, 남에서 북쪽을 N-방향으로 하여 각 격자요소의 좌표에 대해 고유번호를 부여하였으며, 최대 (M,N)값은 (73,198)이다. 따라서 전체 Grid Point는  $73 \times 198 = 14,454$  Points이나 실제로 활용된 격자점은 약 6,700 point 이다. 격자망의 정밀도는 최대  $300 \times 300m$ 를 넘지 않도록 하였으며 관심지역은 보다 세밀하게 나누었다.

## 다) 지형 및 수심자료의 입력

지형 및 수심자료는 대상지역을 포함하거나, 대상지역에 포함되는 해도 및 연안해역도를 AutoCAD 및 Digitizer를 이용하여 입력하고, 각 격자점의 수심으로 보간하여 사용하였으며, 격자점의 좌표는 UTM좌표계로 변경하여 사용하였다. 해도의 수심은 평균해면하 수심으로 보정(Datum Level +  $Z_0$ )하여 사용하였으며 모형보정 및 검증단계에서 약간의 수정을 가하였다. 그림 4.1.9는 최종적으로 확정된 각 격자점의 수심분포를 나타낸다. 수심의 입력은 소축척의 도면을 우선으로 하였다. 표4.2.5은 지형 및 수심결정에 사용된 해도 및 연안해역도를 나타낸다.

표 4.2.5 Map list used to define the bathymetry of model

해 도			연 안 해 역 도		
도엽번호	도엽명	축 척	도엽번호	도엽명	축 척
해도 No. 302	대흑산군도에서 격렬비열도	1:250,000	NJ52-13-24-3	개 야	1:25,000
			NI52-1-03-1	오 식	"
			NI52-1-03-2	군 산	"
해도 No. 336	상왕릉도에서 어청도	1:75,000	NI52-1-03-3	계화도	"
			NI52-1-03-4	심 포	"
			NI52-1-04-3	만 경	"
해도 No. 302	군산항 부근	1:30,000	NI52-1-09-2	비안도	"

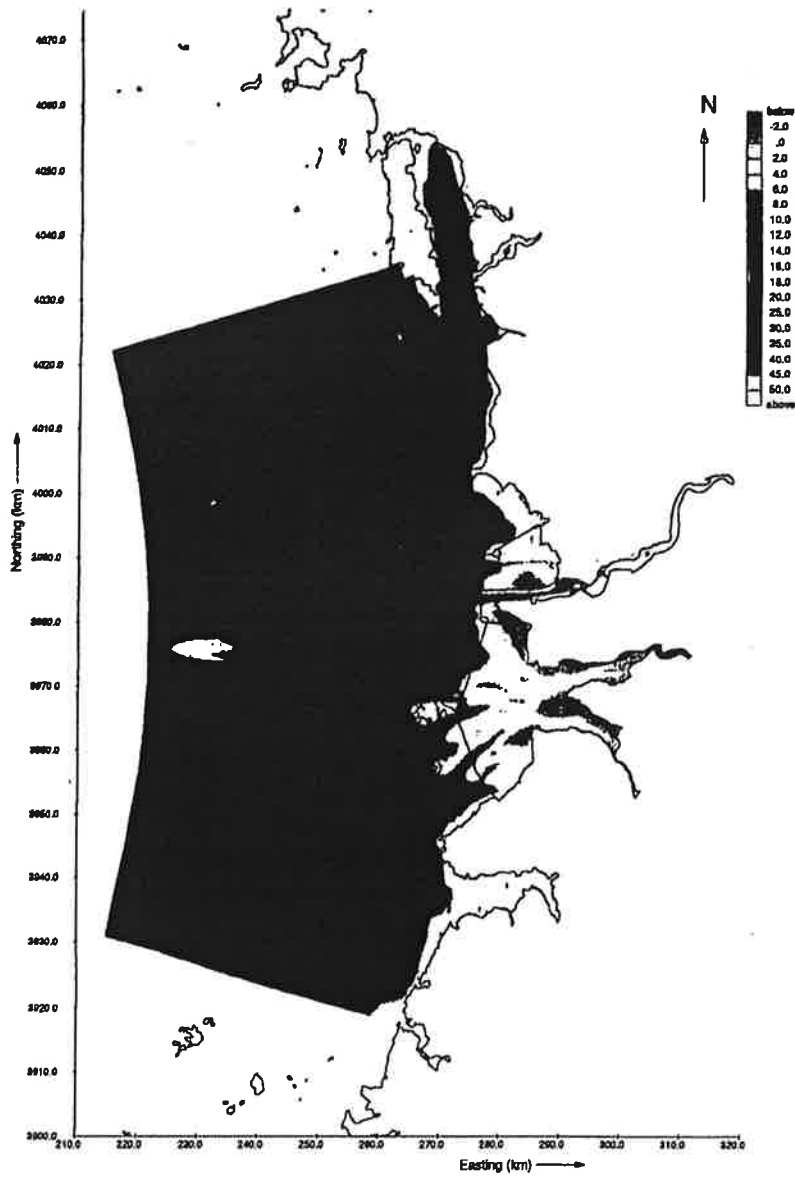


그림 4.2.9 최종 확정된 각 격자점의 수심 분포

## 라) 각종 변수의 결정

### (1) 계산시간간격 (Computation Time Increment)

계산시간간격은 해의 안정성이 유지되는 범위 내에서 길수록 계산시간이 짧아지므로 시간상 유리하다. 따라서 계산시간간격을 0.5, 1, 2, 5분의 4가지경우로 예비실험을 실시하여 상기조건에 맞는 2분으로 선정하였다.

### (2) 바닥마찰계수, 와류점성계수 및 해수의 밀도

해역의 바닥마찰계수산정에는 Manning의 조도계수  $n$ 값을 이용하였는데, 기존의 연구결과 및 영산강 모형을 참고하고 또 전해역에 걸쳐 큰 변화가 없는 것으로 가정하여 0.026을 적용하였다. 그리고 각 방향의 와류점성계수 및 해수의 밀도는 기존의 연구결과를 참고하여 각각  $10.00 \text{ m}^2/\text{sec}$ 와  $1.024 \text{ t/m}^3$ 의 값을 사용하였다. 또한 중력가속도는  $9.797 \text{ m/sec}^2$ 를, 지구편향력(Coriolis force) 계산을 위한 위도는 대상해역의 중간 위도인 북위  $35^\circ 49' 20''$  을 적용하였다.

## 마) 경계조건설정

모형의 입력자료 중 개방경계조건으로는 조위, 조류속, 유량자료 및 조화상수 등이 사용될 수 있다. 조석모형의 경우 외해측 개방경계를 따라 시간에 따라 변화하는 조위가 개방경계조건으로 적용되며 따라서 본 시험의 외해측 개방경계조건은 델프트 수리시험소가 보유하고 있는 황해모형 (Yellow Sea Model)을 이용하여 그 실행결과를 조화분해한 조화상수(38개 조화상수)를 지역모형의 개방경계조건으로 사용하였다. 조위의 계절적 변화에 영향을 미치는 Sa분조(1년 주기) 및 Ssa분조(반년 주기)는 제외하였다. 하천유입량은 금강의 평수량보다 조금 적은  $200\text{m}^3/\text{sec}$ 를 금강측 경계에 유하시켰으며 만경강 및 동진강의 하천유입량은 금강에 비하여 상대적으로 작은 값이므로 모델링과정에서 고려하지 않았다.

2) 모형의 보정 및 검증결과

사업시행전에 대한 조석계산결과는 각각 17지점에서 분석되었다. 그림 4.2.10은 이들 station들의 위치를 나타낸다. 각 지점에서 가장 중요한 일주조분조인  $O_1$ 과  $K_1$ , 그리고 반일주조분조인  $M_2$ 와  $S_2$ 에 대하여 계산치와 관측치를 비교하였다. 표 4.2.6는 분석 결과를 나타낸다. 분석결과에서 보면 4개 주요 분조 모두 계산 진폭값은 이상적인 값과 평균적으로 1% 정도의 오차를 나타낸다. 지각의 경우  $K_1$ 의 경우 약 5° 정도의 오차를 나타내나, 다른 3개 주요분조의 경우 평균적으로 2° 이내의 오차를 나타낸다. 이는 진폭과 지각 모두 양호한 결과로서 조위변화에 대한 정량적인 분석이 가능하다.

표 4.2.6 Model performance at 17 water level stations

$H_c$ = computed amplitude		$O_1$	$K_1$	$M_2$	$S_2$
$H_o$ = observed amplitude					
$G_c$ = computed phase					
$G_o$ = observed phase					
Mean $H_c-H_o$	(m)	-.010	.003	.025	-.001
Abs. mean $ H_c-H_o $	(m)	.024	.023	.069	.037
Mean $H_c/H_o$	(-)	0.981	1.014	1.012	.998
Mean $G_c-G_o$	(°)	-1.234	5.302	-1.768	-.054
Abs. mean $ G_c-G_o $	(°)	6.047	6.458	3.646	4.127

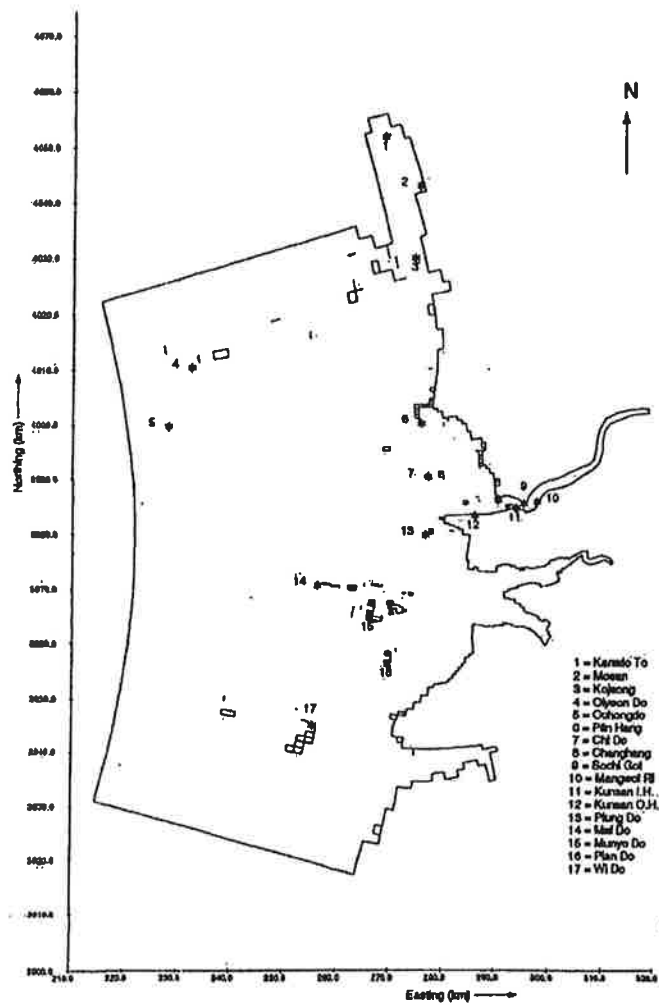


그림 4.2.10 금강 하구 모형에서의 조위 측정점의 위치

### 3) 모형의 적용

#### 가) 새만금 방조제의 영향 추정

본 지역모형에서는 금강상류경계를 금강하구둑 위치에서 가까운 곳에 설정한 관계로 금강하구둑의 설치가 조위변화에 미치는 영향을 파악하기에 적절치 않다고 판단되어 보다 넓은 영역을 사업대상으로 하는 새만금방조제의 영향만을 파악하였다. 새만금방조제 건설후의 조석계산은 방조제 노선을 고정경계로 변환하여 방조제 외해측에 대해서만 모형을 수행하였다. 그리고 방조제 건설후의 바다마찰계수, 지형조건 및 기타 계수들은 방조제 건설전의 검증에 사용한 값과 동일한 것으로 가정하였다. 그림 4.2.11은 조위 및 조류속을 분석한 지점들을 나타낸다.

#### 나) 방조제 노선 전면

그림4.2.12(a)와 (b)는 방조제 노선 바로 전면에서의 각 지점별 방조제 건설 전후의 조류속 및 조위변화를 나타낸다. 각 지점별 조류속 및 조위의 변화를 요약하면 다음과 같다.

1) 1호 방조제 전면 (L2 지점) : 1호 방조제 전면에서의 조류속의 변화는 0.8 m/s 정도에서 0.25 m/s로 약 75% 정도 감소하는 것으로 추정되며, 조위의 변화는 방조제 건설후 만조시는 건설전보다 약 10 cm 정도 낮은 반면에 간조시는 약 7 cm 정도 상승하는 것으로 추정된다. 그러나 위상의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다.

2) 3호 방조제 전면 (L6 지점) : 3호 방조제 전면에서의 조류속의 변화 0.5 m/s 정도에서 0.25 m/s로 약 50% 정도 감소하는 것으로 나타났으며, 조위의 변화는 만조시 약 5 cm 정도 하강하였거나, 간조시는 약 3 cm 정도 증가하는 것으로 나타났다.



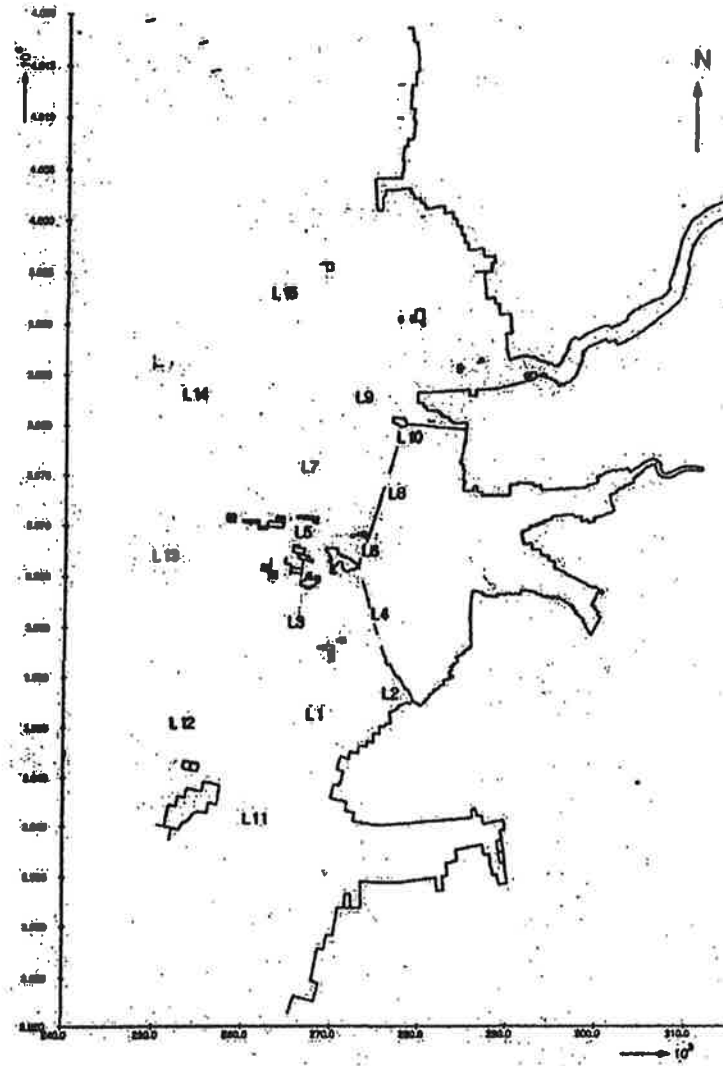
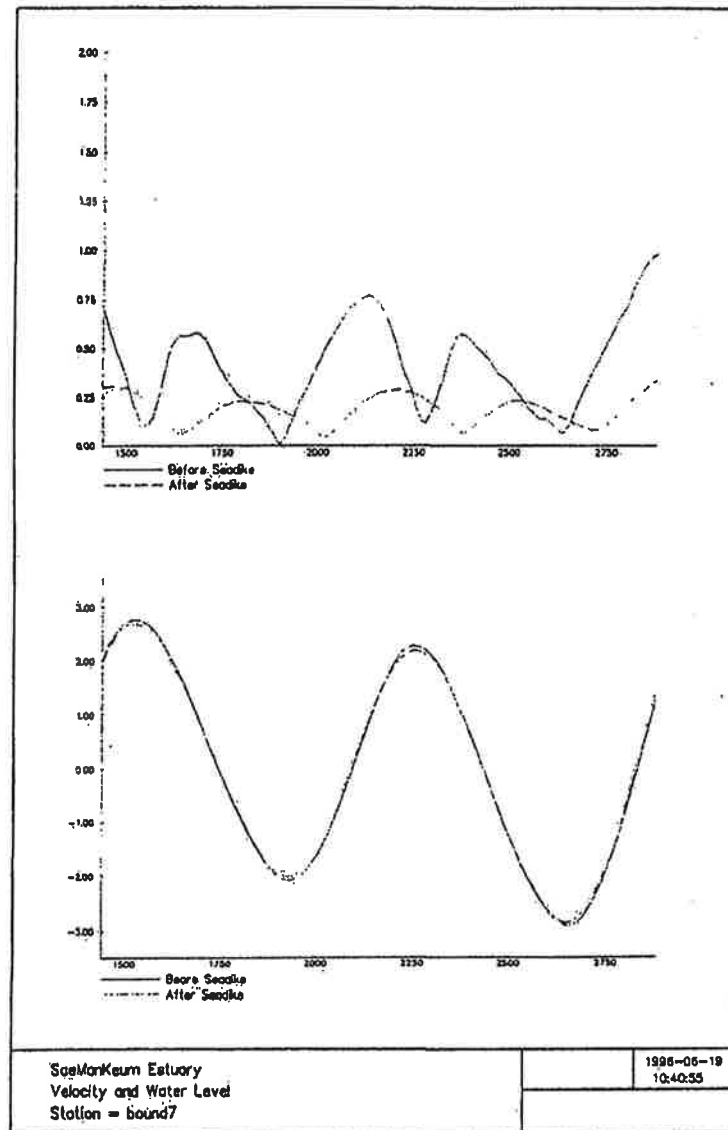
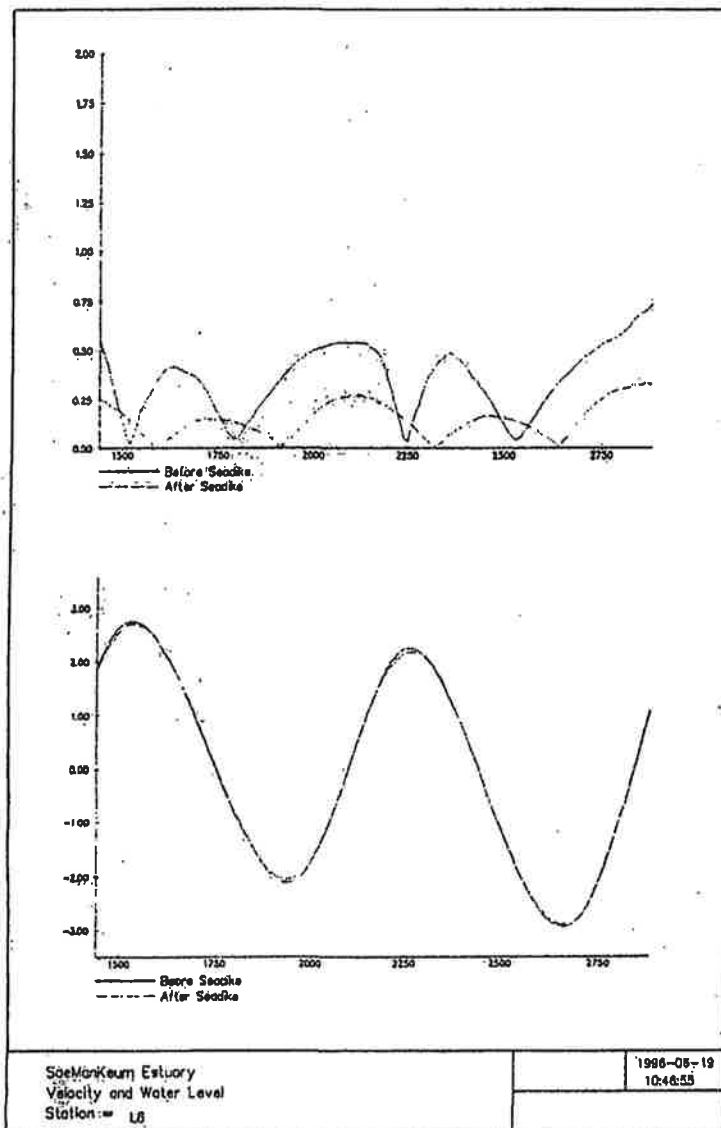


그림 4.2.11 지점별 조위 및 조류속



(a) L2 지점

그림 4.2.12 방조제 건설 전후의 조류속 및 조위 비교 (방조제 전면)



(b) L6 지점

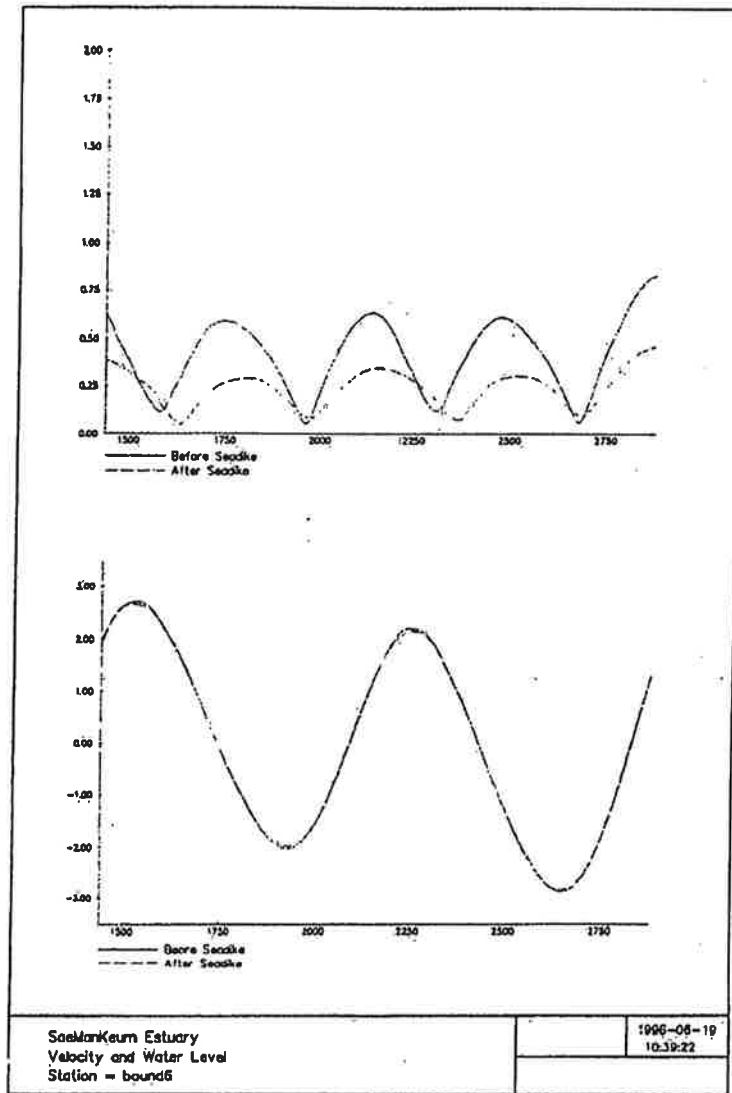
그림 4.2.12 continued

#### 다) 방조제 노선 7 km 전방

그림 4.2.13(a)와 (b)는 방조제 노선으로부터 약 7 km 전면에서의 방조제 건설전후의 조류속 및 조위변화를 보여주고 있다. 각 지점별 조류속 및 조위의 변화를 요약하면 다음과 같다.

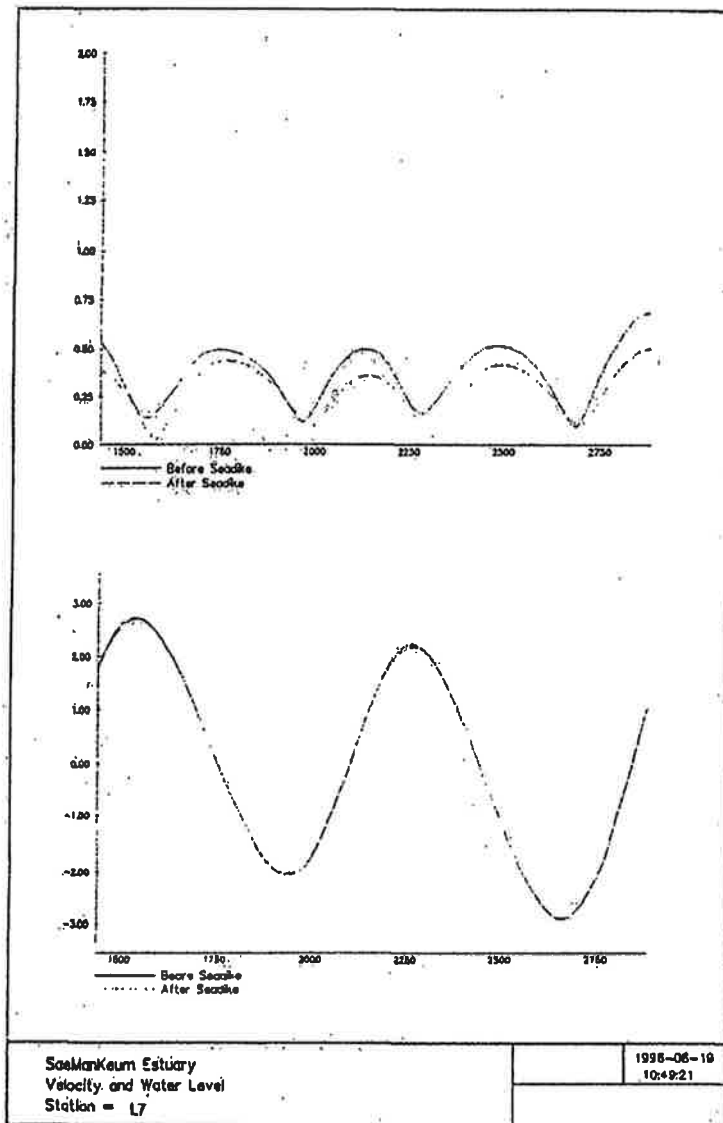
1) 1호 방조제 약 7 km 전방 (L1 지점) : 1호 방조제 전방에서의 조류속의 변화는 약 0.55 m/s 정도에서 0.25 m/s로 약 55% 정도 감소하는 것으로 나타났으며, 조위의 변화는 만조시는 약 5 cm 정도 낮은 반면, 간조시는 약 3 cm 정도 상승하는 것으로 나타났다.

2) 4호 방조제 노선 22 km 전방 (L7 지점) : L7 지점에서의 조류속의 변화는 0.5 m/s에서 0.45 m/s 정도로 다른 지점과 마찬가지로 다소 감소하였으며, 조위의 변화는 3호 방조제 전방에서와 유사하게 1 cm 내외로 진폭이 줄어드는 것으로 나타났다.



(a) LI 지점

그림 4.2.13 방조제 건설 전후의 조류속 및 조위 비교 (방조제 노선 7km 전방)



(b) L7 지점

그림 4.2.13 continued

#### 4) 요약 및 결론

새만금방조제 건설에 따른 방조제 전면 및 인근해역에서의 수리적 특성을 검토한 결과, 새만금방조제 건설후 방조제 인근해역에서의 조류속과 조위는 조기별 및 위치에 따라 다르나 전체적으로 다소 변하는 경향을 보였다. 특히, 새만금방조제 바로 전면에서의 조류속은 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 이와 같이 방조제 건설후 조류속의 변화는 조석의 상류로의 전파가 차단되면서 반사효과의 증대 및 조석운동에 대한 마찰저항의 증가 등에 따른 복합적인 원인에 의한 것으로 추정된다.

#### 다. 영산강 4호 방조제 건설영향

##### 1) 모델의 구성

영산강 하구모델은 영산강, 해남강, 화원강의 하구와 조류의 주요 출입통로인 목포구, 중구, 북구를 포함하며 장래의 개발계획 대상지역인 함평만 일대를 포함하도록 구성하였다. 모델의 목적을 충족시키기 위하여 모델의 해측 경계는 해안에서 충분한 거리를 두고 있는 외해에 설정하였다. 위와 같은 조건을 고려하여 설정된 모델의 범위는 그림 4.2.14과 같다. 영산강 지역모델(YERM)은 남쪽으로는 추자도 부근까지 포함하며 북으로는 안마도 부근까지 포함한다.

모델은 UTM 좌표계 상에서 curvilinear orthogonal 격자망을 채택하였다(그림 4.2.14). 구성된 격자망은  $122 \times 147 = 17,934$ 개의 격점으로 구성되며 실제 계산에 이용되는 격점수는 7,500개이다. 격자망의 해상도는 공간 상에서 변화한다. 개방경계부근의 최대 격자크기는 약  $3,000 \times 3,000$  m 정도이나 목포구 및 명향수도 등과 같은 중요한 수로에서는 비교적 높은 해상도를 가지게 되어 이 지역에서의 격자크기는 수로의 횡단방향으로는 125~250 m를 나타내며 흐름방향으로는 약 200~600 m의 크기를 갖는다.

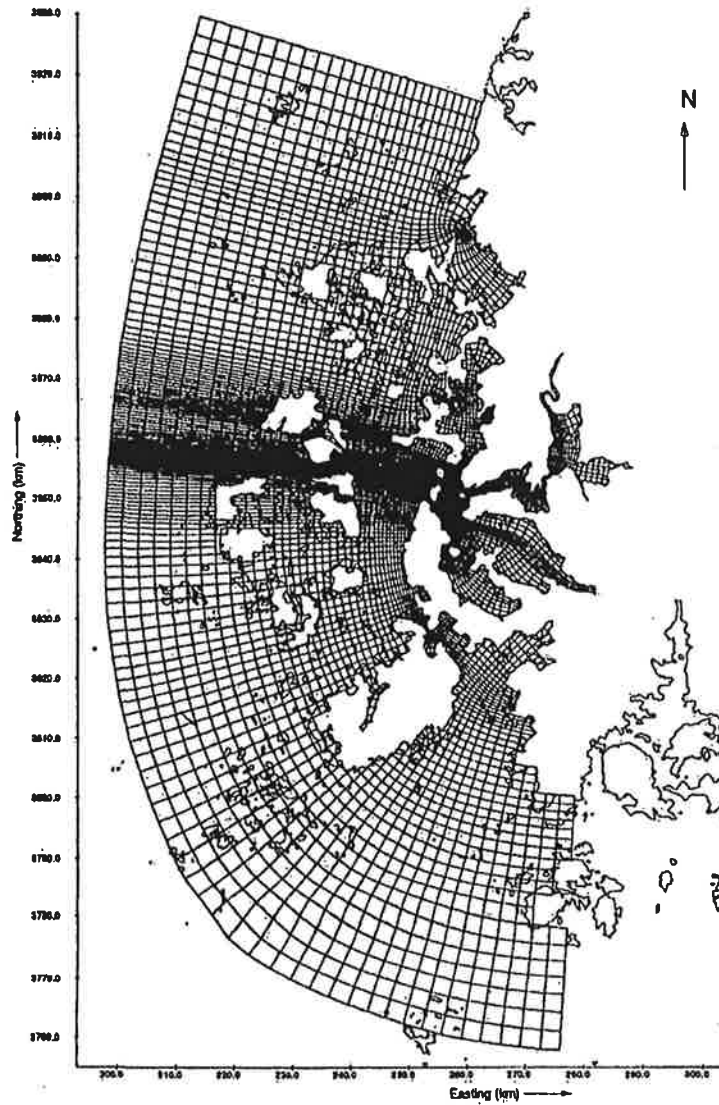


그림 4.2.14 영산강 지역모델(YERM)의 격자망



모델내에서 조석의 동적인 거동은 개방경계에 조석의 분조들을 설정하여 조석을 발생시킴으로써 이루어진다. 개방경계조건을 확보하기 위하여 황해 지역에 대하여 모델링을 실시하였다. 목포에서의 조화상수와 황해모델링 결과를 고려하여 영산강 지역모델의 경계조건과 결과분석을 위하여 38개의 조석분조를 선정하였다. 조석의 계절적 변화에 기여하는 분조인 Sa분조(1년 주기)와 Ssa분조(반년 주기)는 경계조건에서 제외되었다.

해수밀도는  $1.024 \text{ kg/m}^3$ 의 균일값을 사용하였으며, 중력가속도는  $9.79 \text{ m/s}^2$ 을 사용하였다. Coriolis 계수는  $34^\circ 46' 80'' \text{ N}$ 에 해당하는 값을 사용하였다. 바닥조도는 고정된 Manning 계수값 0.026을 사용하였다.

## 2) 모델의 보정 및 검증

### 가) 보정 및 검증조건

모델의 보정 및 검증은 현재 상태를 기준으로하여 실시되었다. 보정과정에서는 여러 가지 변수들을 변경 가능한 범위 내에서 실제 관측자료들과의 비교를 통하여 최적의 결과를 얻을 수 있도록 조정하였다. 검증과정에서는, 결정된 변수를 이용하여 여러 가지 조석조건(대조, 소조, 또는 중조)에 대하여 얻어진 계산결과를 관측결과와 비교하였다.

모델링의 초기 3일간은 모델의 안정화 기간으로서 결과분석 대상에서 제외되었다. 이러한 방법은 전체 영역에 걸쳐서 양호한 보정결과를 얻는데 적합한 방법이다. 전체 영역에서 조석의 진폭과 주기가 정확하게 표현된다면 대조기나 소조기에 관계없이 조석특성을 잘 재현할 것이다.

별도의 수위 또는 유속에 대한 검정이 불필요하나 별도의 비교를 통해서

결과의 확인이 가능하다. 모델의 보정은 분조의 진폭과 지각에 대한 정확한 계산을 하는 것에 초점을 맞추었다. 영산강 지역모델의 보정 과정에서 다음과 같이 물리적 및 수치적 변수가 조정되었다:

- 시간 스텝을 여러 가지로 변경하였으며 최종적으로 0.5분으로 결정하였다.
- 개방경계의 조석조건이 조정되었다. 경계조건의 조정은 다른 변수들은 고정시킨 상태에서 실시되었다.
- 수평방향의 동점성계수를 변경하였으며 최종적으로  $10.0\text{m}^2/\text{s}$ 으로 결정하였다.
- 수심자료의 조정은 다음 두 가지 과정에 의하여 이루어졌다.

먼저, 조류의 유입부(목포구, 중구 및 북구)에 대하여 가능한 최소단면을 설정하여 얻어진 결과를 검토하여 재조정하였다. 다음으로, 조간대의 수심이 불확실한 지역, 특히 영산강 하구지역, 무안강 지역, 화원강 및 해남강 지역에 대한 보정을 실시하였다.

표 4.2.7 Monitoring stations of Yongsangang Regional Model

no.	Geographical coordinates		Grid coordinates		Station name
	lon(dgr)	lat(dgr)	M	N	
1	126.299	33.959	1	9	Chujado
2	126.567	34.167	11	3	Nohwa Island
3	126.483	34.350	22	6	Oran Jin
4	126.350	34.400	23	14	Mok Do
5	126.417	34.450	31	11	Sangma Do
6	126.347	34.537	38	21	Byeokpajin
7	126.315	34.585	40	30	Wusuyeong I
8	126.315	34.585	39	30	Wusuyeong II
9	126.917	34.250	3	22	Seogeocho Island
10	126.050	34.300	8	21	Hajo Do
11	126.067	34.333	9	22	Sangjo Island
12	126.133	34.367	13	22	Pangmokri
13	126.200	34.500	22	28	Chindo
14	126.050	34.533	13	33	Hatae Do
15	126.050	34.567	13	36	Haeui Island
16	126.152	34.585	20	33	Pyongsa Do
17	126.250	34.700	33	45	Siha Do I
18	126.242	34.698	32	45	Siha Do II
19	126.288	34.753	38	59	Wolnae
20	126.313	34.749	46	61	Yanghwa
21	126.367	34.700	61	53	Kumho-DK
22	126.391	34.779	61	88	Mokp'o I
23	126.393	34.778	61	87	Mokp'o II
24	126.450	34.779	70	82	Yongsangang dike
25	126.533	34.883	112	88	Mongtan
26	126.937	34.713	9	49	Bikeum Sudo I
27	126.083	34.850	17	89	Bikeum Sudo II
28	126.083	35.050	14	122	Imza Island
29	126.350	35.150	32	132	Hampyeong Man
30	126.017	35.350	7	143	Anma Do
31	126.306	34.759	43	63	Mokpo Ku

표 4.2.8 Model performance for the Case A3

$H_c$ = computed amplitude $H_o$ = observed amplitude $G_c$ = computed phase $G_o$ = observed phase		$O_1$	$K_1$	$M_2$	$S_2$
Mean $H_c-H_o$	(m)	-.007	-.011	.043	-.003
Abs. mean $ H_c-H_o $	(m)	.012	.019	.059	.017
Mean $H_c/H_o$	(-)	.972	.969	1.039	.997
Mean $G_c-G_o$	(°)	1.7	-6.0	-2.4	-7.0
Abs. mean $ G_c-G_o $	(°)	4.1	7.1	4.1	9.6

나) 보정 및 검정결과

검정 Case에 대한 조석계산결과는 각각 22지점과 19지점에서 분석되었다. 각 지점에서 가장 중요한 일주조분조인  $O_1$ 과  $K_1$ , 그리고 반일주조분조인  $M_2$ 와  $S_2$ 에 대하여 계산치와 관측치를 비교하였다. 이들 4개 주요분조에 대한 진폭비와 지각차들이 그림4.2.15(a~d)에 제시되었으며 분석 결과는 표 4.2.8과 같다. 계산 진폭값은 이상적인 값과 평균적으로 6% 이내의 오차를 나타낸다. 지각의 경우 일주조의 경우 평균적으로 7° 또는 30분 이내의 오차를 나타내며, 반일주조의 경우 평균적으로 11° 또는 20분 이내의 오차를 나타낸다.

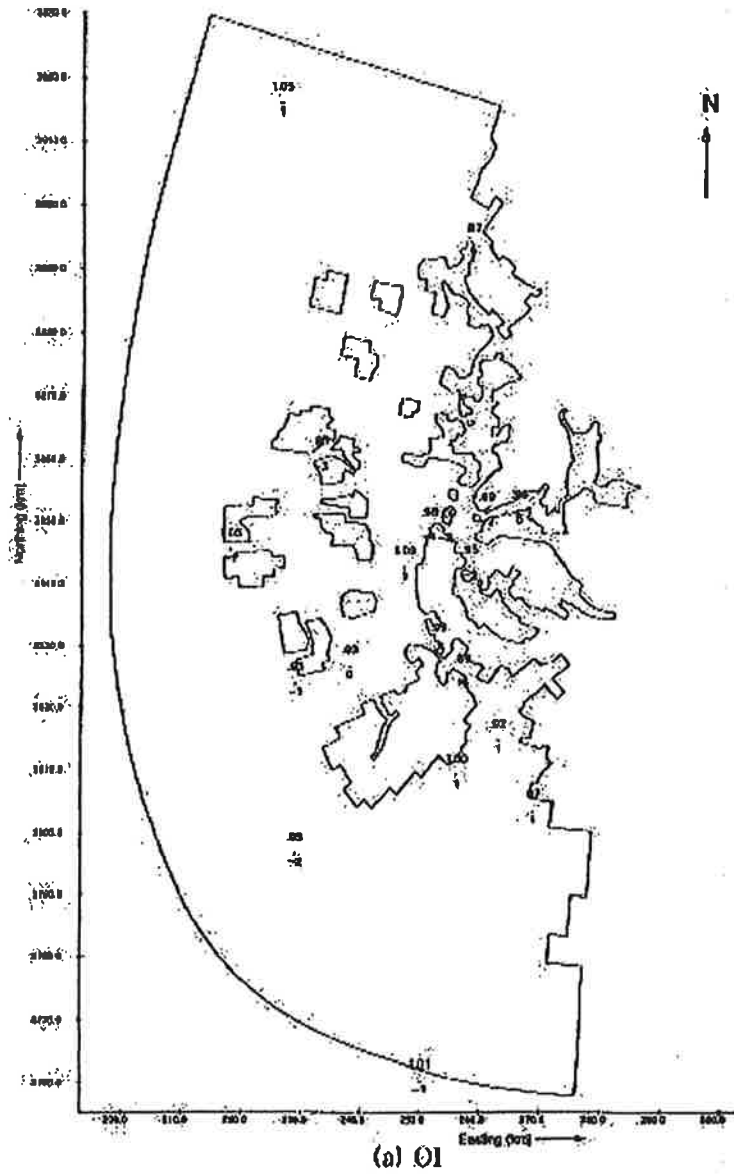


그림 4.2.15 4개 주요분조에 대한 진폭비와 지각차

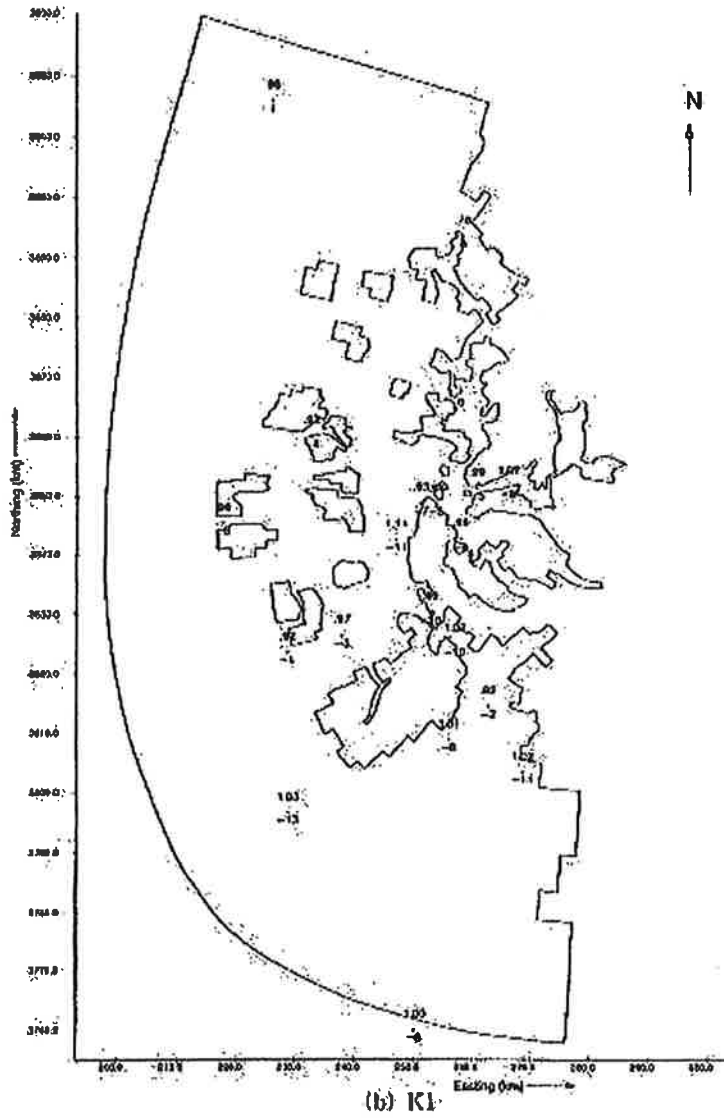


그림 4.2.15 contined

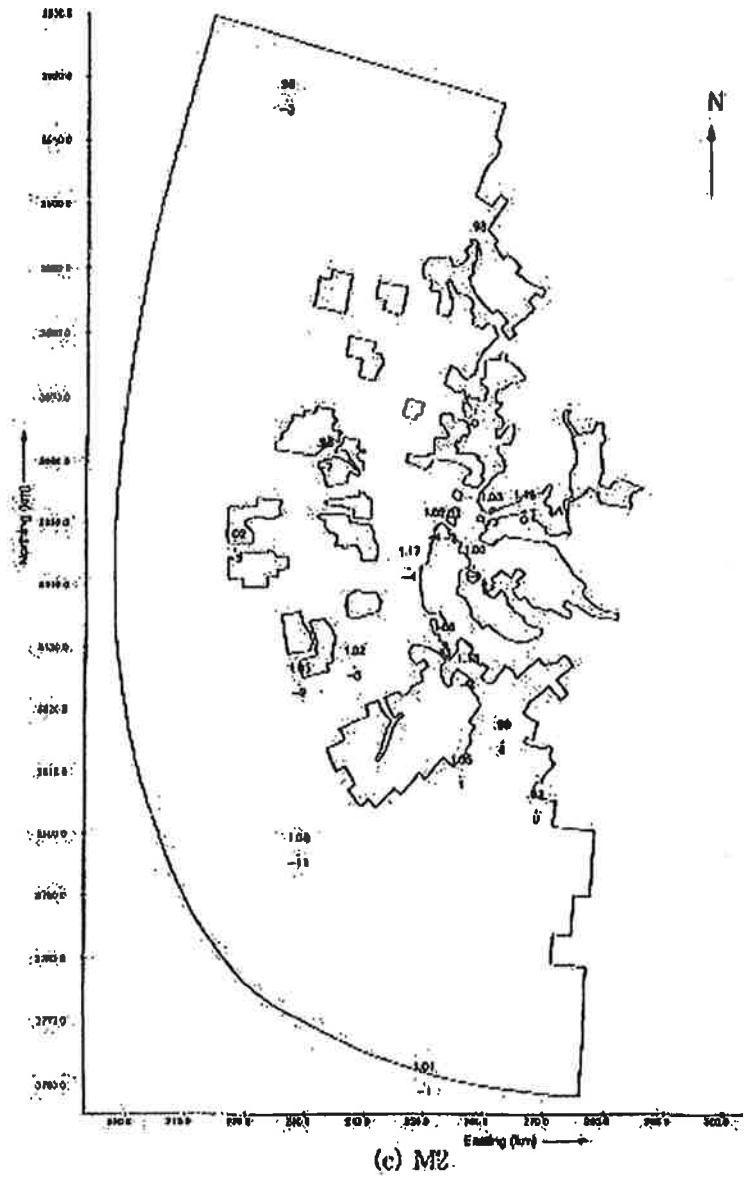


그림 4.2.15 continued

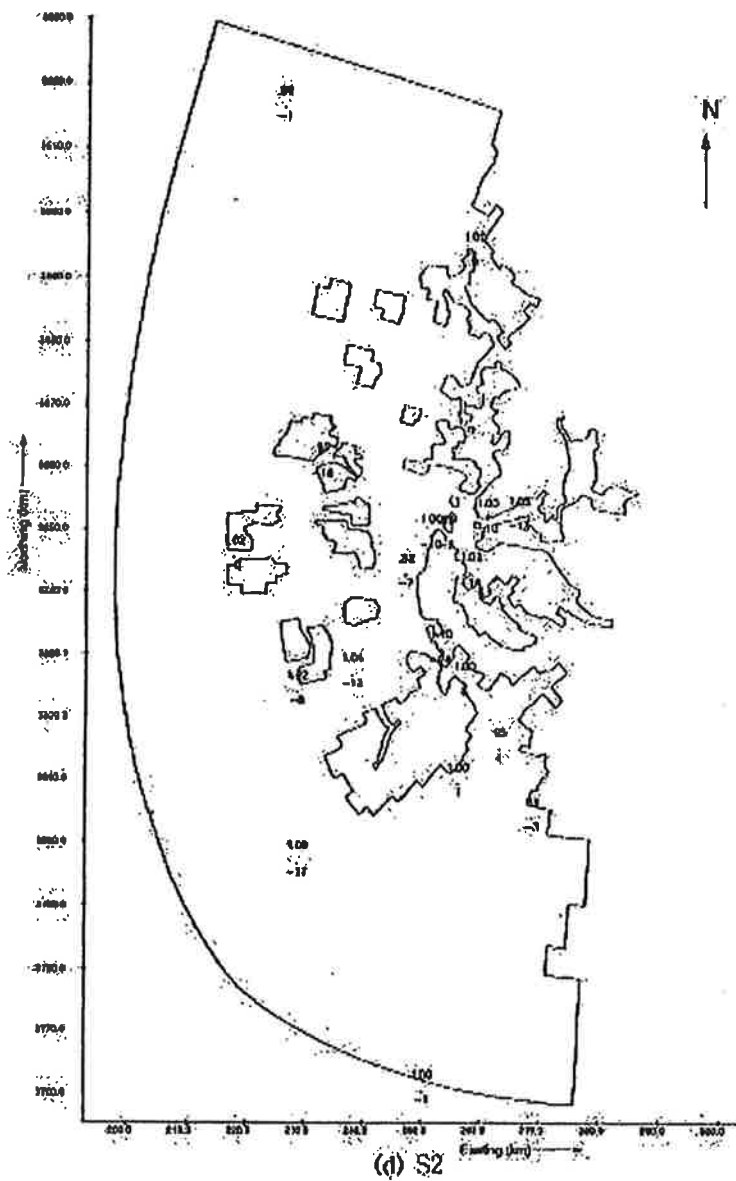


그림 4.2.15 continued



### 3) 수치모델링 결과 분석

Case A4에 대한 조석계산결과는 18지점에서 분석되었다. 각 지점에서 가장 중요한 일주조분조인 O1과 K1, 그리고 반일주조분조인 M2와 S2에 대하여 사업시행전과 후에 대한 결과를 비교하였다. (표 4.2.9, 표 4.2.10) 계산결과에서 보면 영산강 4호 방조제 건설 이후 목포 연안 해역의 각 지점에서의 조석 진폭의 변화는 거의 없거나 아니면 수 cm 정도의 작은 값에 불과하므로 영산강 4호 방조제가 주변해역의 조석변화에 미치는 영향은 매우 작음을 알 수 있다.

표 4.2.9 사업시행전에 대한 계산결과

지점	O1		K1		M2		S2		계
	진폭(m)	지각(도)	진폭(m)	지각(도)	진폭(m)	지각(도)	진폭(m)	지각(도)	
상마도	0.21	188.3	0.28	211.8	1.15	329.9	0.43	2.9	2.07
벽파진	0.21	191.4	0.29	215.7	1.19	338.7	0.43	12.1	2.12
우수영	0.22	206.6	0.29	233.9	1.20	12.7	0.40	51.1	2.11
하조도	0.21	194.8	0.28	218.9	1.04	341.8	0.38	14.9	1.92
하태도	0.22	207.4	0.28	234.3	1.14	10.1	0.39	47.9	2.04
평사도	0.22	208.4	0.29	235.7	1.20	13.8	0.40	52.6	2.11
시하도	0.23	214.6	0.29	242.8	1.33	26.0	0.44	67.8	2.28
월내	0.23	215.7	0.30	244.3	1.40	29.3	0.47	71.8	2.39
양화	0.23	217.9	0.30	247.3	1.42	34.0	0.47	78	2.41
금호DK	0.24	217.8	0.30	247.3	1.43	34.7	0.46	78.8	2.43
목포	0.24	218.5	0.30	248.0	1.45	35.6	0.47	80	2.46
비금수도	0.23	214.6	0.29	243.2	1.27	25.6	0.43	65.9	2.21
북강수도	0.23	217.7	0.29	247.8	1.39	34.5	0.47	77.1	2.39
안마도	0.25	229.6	0.31	266.7	1.63	65.4	0.56	111	2.75

표 4.2.10 사업시행후에 대한 계산결과

지점	O1		K1		M2		S2		계
	진폭(m)	지각(도)	진폭(m)	지각(도)	진폭(m)	지각(도)	진폭(m)	지각(도)	
상마도	0.21	188.2	0.28	211.8	1.15	329.8	0.43	2.9	2.08
벽파진	0.21	191.3	0.29	215.5	1.19	338.5	0.43	11.9	2.13
우수영	0.22	206.4	0.29	233.4	1.21	11.3	0.41	49.7	2.12
하조도	0.21	194.8	0.28	218.9	1.04	341.8	0.38	14.9	1.92
하태도	0.22	207.3	0.29	234.1	1.15	9.6	0.39	47.6	2.05
평사도	0.22	208.1	0.29	235.3	1.20	12.8	0.41	51.6	2.12
시하도	0.23	213.7	0.29	241.7	1.33	23.5	0.45	64.9	2.29
월내	0.23	214.2	0.29	243.0	1.39	26.4	0.47	68.4	2.39
양화	0.23	215.1	0.30	244.1	1.42	28.3	0.48	71.1	2.43
급호DK	0.23	215.0	0.30	244.1	1.43	28.6	0.48	71.4	2.45
목포	0.23	215.4	0.30	244.5	1.45	29.1	0.49	72.1	2.47
비금수도	0.23	214.5	0.29	243.1	1.27	25.4	0.43	65.7	2.21
북강수도	0.23	217.3	0.29	247.2	1.39	33.3	0.47	75.6	2.39
안마도	0.25	229.6	0.31	266.7	1.63	65.3	0.56	110.9	2.75

라. 홍보지구 방조제 건설전후의 조석변화

보령방조제 건설은 홍보지구 농업종합개발사업의 일환으로 갯벌을 농지로 조성하는 대규모 간척사업이 아니고 깊은 갯골의 바다를 막아 농업용수를 확보하는 사업이다. 보령방조제는 천수만으로 부터 약 14Km 길이로 내륙 깊숙히 협소하게 형성되어 있는 내만(內灣)을 3Km 정도 들어온 위치에 축조되며 방조제 외측 약 500m 거리에 비교적 큰 어항인 오천항이 위치하고 있어서 방조제 축조후 발생될 수 있는 조위변화등으로 인하여 인근해역 및 오천항에 영향이 미칠것으로 예상되었다. 이러한 조위상승에 대한 대책으로설계시 오천항의 조위피해 방지공이 계획되어 있었으나 조위상승 규모에 대한 정확한 검증이 되지 아니하였기에 설계의 적정성 검토가 이루어져야 했다. 이에따라 본 연구에서는 보령방조제 건설후의 오천항 및 연안해역에서의 조석특성 변화등에 대한 검토가 수행되었다. 이러한 방조제 건설전후의 조석

특성 변화는 비선형 2차원 유한요소 수치모형에 의하여 방조제 건설전 지형에 대해서 모형의 적용성을 검정하고 그 검정된 결과를 바탕으로 방조제 건설후 조위변화를 예측하는 것으로 하였다.

1) 개방경계의 결정 및 격자망 구성

본 대상해역에 대한 개방경계는 해의 왜곡을 최소화하고 방조제 건설후 반사파의 영향이 미치지 않는 경계영역을 설정코자 하였다. 이에따라 본 연구에서는 기존의 연구결과를 참조하여 해안선에 대하여 타원형의 방사형 외해측 개방경계를 택하였다. 최종적으로 결정된 외해측의 개방경계는 동경  $126^{\circ} 29' 10''$  를 지나도록 하였으며 그림 4.2.16 에서와 같다.

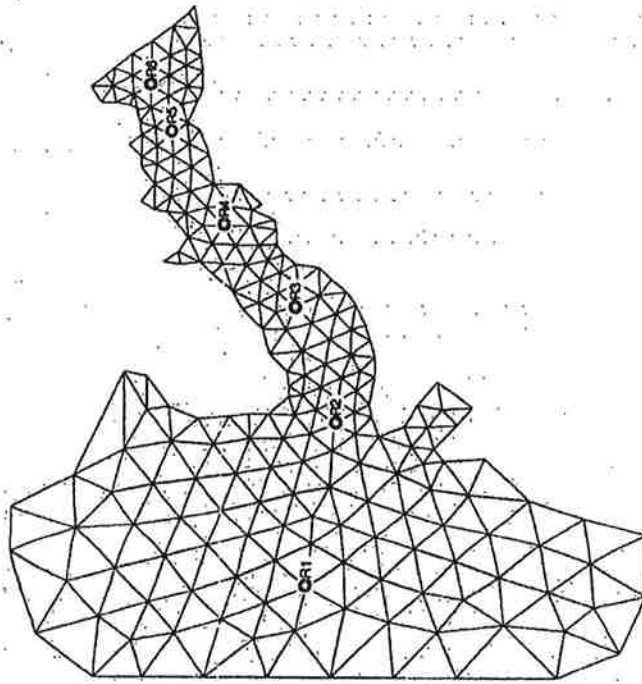


그림 4.2.16 홍보지구 방조제 건설후의 격자망 구성도

## 2) 경계조건

본 연구에서 경계조건은 개방경계지점에서의 조위자료가 없기 때문에 개방경계지점 부근에 있는 고정항의 조위자료와 오천항의 조위관측자료를 선형보간법으로 산정하여 경계조건을 추정하였다. 하천유입량에 대한 경계조건자료도 입력이 가능하나 모의발생 검증기간에는 하천유입량이 거의 없었기 때문에 무시하였다.

## 3) 방조제 건설전후 조위변화 산정결과

방조제 건설후 조위의 시간적 공간적 변화는 이 해역일대의 조석현상에 의하여 지배된다는 기본원칙에는 변화가 있을수 없다.

그러나 방조제 건설로 인한 조량의 감소등 조류특성의 변화는 조석의 공명작용과 마찰저항등의 변화로 말미암아 조위변화율에 영향을 미칠수 있다. 다음은 2차원 조류해석모형을 이용한 소조기와 대조기에 대한 보령방조제 건설전후의 주요 위치별 조위의 변화를 대비한 결과는 그림 4.2.17과 그림 4.2.18과 같다.

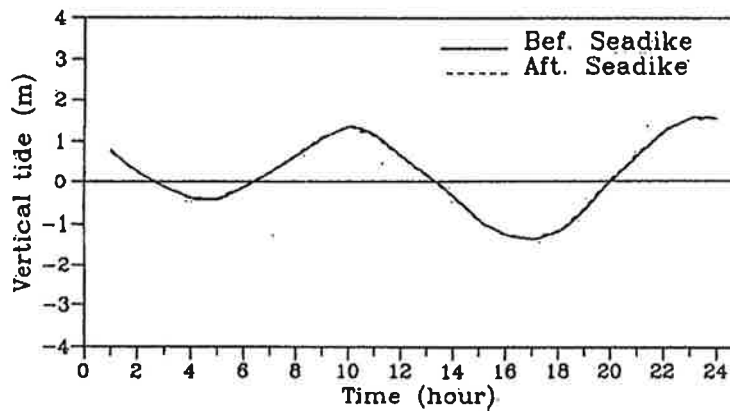


그림 4.2.17 방조제 건설전후의 조위 비교(소조기)

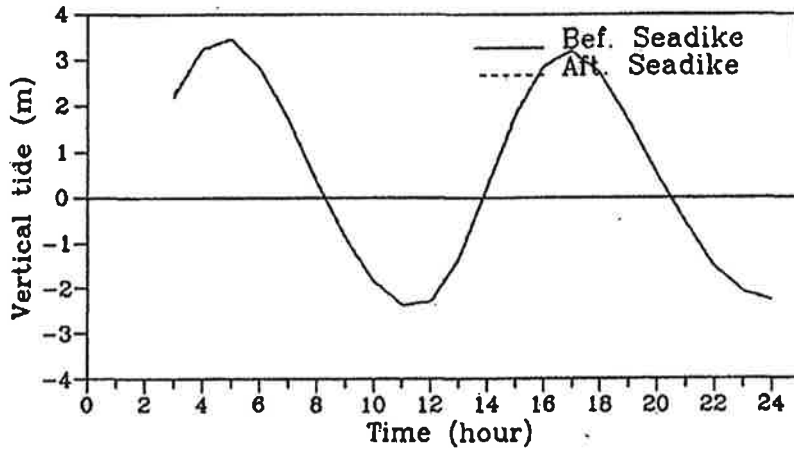


그림 4.2.18 방조제 건설전후의 조위 비교(대조기)

그림에 나타난 바와 같이 소조기나 대조기 방조제 건설후 조위의 진폭에 있어서 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 이러한 결과로 방조제 건설로 인한 오천항 전면과 방조제 외해측에서의 조위 특성에 미치는 영향은 거의 무시할 수 있기 때문에 당초 설계된 높이 1m, 길이 수km의 조위 방지벽 설치계획을 취소하게 되었으며, 이에 따라서 공사비 5억원을 절감하게 되었다.

## 제 3절 수질 변화 예측 모형

### 1. 모형의 기본이론과 구성

#### 가. 개요

본 연구에서 도입된 수질 변화 예측모형(DELWAQ)은 광대한 양의 옵션, 지형, 여러 가지 다양한 사용에 따른 양식으로 이루어진 모델링 형태이다.

DELWAQ 모델링 패키지는 모델이라기보다는 도구상자라 함이 적당하다. 흐르는 물에 대한 수질의 모델을 원하는 사용자는 물질은 이동하고 그것은 수질과정에 의해서 지배받는다라는 사실에 접하게 된다. 이 모델은 이런 두 가지 문제 모두에 관한 도구를 제공한다.

또한, 유체역학을 계산하지는 않지만 1-D SOBEK 또는 ZWENDL 모델, 2D DISTRO 모델 또는 2D WAQUA 모델 또는 3D 곡선 TRISULA 모델들과 접속이 가능하며, 계산된 흐름이 질량보존의 법칙을 따른다면 다른 모델과도 접속이 가능하다. 물질의 이동은 이류(移流) 확산 방정식에 의해서 해석된다.

모형에서 수질과 이동 과정은 라이브러리 설립을 가능하게 하였다. 모형의 입력 파일을 통해서 라이브러리로부터 다른 어떠한 프로그램을 수행하지 않고 선택을 할 수가 있다. 라이브러리를 제외하고 물질의 이동에 관해서 방해받지 않고 포트란 컴퓨터 프로그램을 통해서 처리를 할 수 있다. (예를 들어, 생태학 처리) 모델에서 통합을 원하는 처리는 이동도 포함한다. DELWAQ를 제한하는 유일한 요소인 흐름 모델은 질량보존적인 것이어야 하고, 연속 방정식의 용어(이것은 물의 흐름 모델에서 질량보존법칙을 지배한다)는 DELWAQ에 올바른 정보를 제공하기 위해서 접속 프로그램인 TRISULA module에 의해서 분석되도록 하였다.

## 나. 이동의 모델링

본 모델에서 흐름 입자의 이동(transport of substances)은 이류(移流)-확산 방정식이 논의되며, 계산되는 요소들은 다음과 같이 구성되었다.

### 이류(移流)-확산 방정식

물질의 이동을 모델링하기 위해서, 미소 부피의 물을 그림 4.3.1에서와 같이 택한다. 이 부피는  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ 를 치수로 하며, 세 가지 방향을 지닌다. 편의를 위하여 우선 한가지 방향에 관해서 함수화하고, 나중에 세 가지 방향에 관해서 확장시키기로 한다.

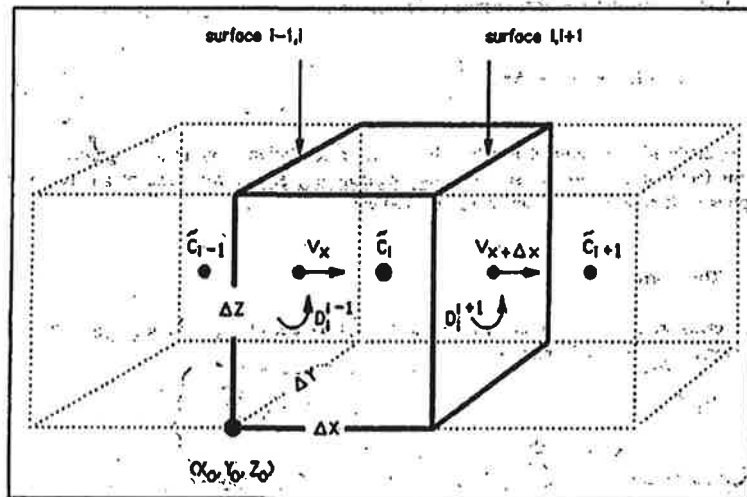


그림 4.3.1 점  $(x_0, y_0, z_0)$ 에서의 극미량  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$

### 이류(The advective)에 의한 이동

미소 단면(surface)  $i-1, i$  를 통과할 때 이류(移流)에 의한 이동은 다음과 같다.

$$Tx_0^A = v_{x_0} * \Delta y * \Delta z * C_{x_0} \quad (1)$$

여기서,

$T_{x_0}^A$  =  $x$ 가  $x_0$  지점에 이를 때 이류(移流)이동

$v_{x_0}$  =  $x_0$  지점에서 속도

$C_{x_0}$  =  $x_0$  지점에서 농도

이다.

### 확산(The diffusive transport)에 의한 이동

단면  $i-1, i$  를 통과할 때 확산에 의한 이동은 농도 변화도 (concentration gradient)와 이동면에 대해 식(2)와 같이 비례식으로 나타낼 수 있다.

$$Tx_0^D = -K_{x_0} * \Delta y * \Delta z * \left. \frac{dC}{dx} \right|_{x=x_0} \quad (2)$$

비례상수  $K$ 는 확산 계수라고 불린다. 음수 부호는 확산이 높은 농도로부터 낮은 농도로의 이동으로 인하여 생기는 것이다. 즉, 농도 기울기는 반대 방향을 향하고 있음을 나타낸 것이다.

### 결합된 결과

단면  $i, i+1$ 에서 만약 두 가지가 합산된다면, 식 (3)과 같은 일차방정식이 도출된다.



$$M_i^{t+\Delta t} = M_i^t + \Delta t * [ \nu_{x_0} * C_{x_0} - \nu_{x_0 + \Delta x} * C_{x_0 + \Delta x} - K_{x_0} \frac{dC}{dx} \Big|_{x=x_0} + K_{x_0 + \Delta x} \frac{dC}{dx} \Big|_{x_0 + \Delta x} ] * \Delta y * \Delta z$$

(3) 여기서,

$M_i^t$  = 시간 t에서 물질부피 i ( $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ )

$\Delta t$  = 미소 시간의 간격

이다.

만약 (3)식이 부피  $V(= \Delta x * \Delta y * \Delta z)$ 와 시간 간격  $\Delta t$ 에 대해서 나누어지면, 일차 방정식 (4)가 도출된다.

$$\frac{C_i^{t+\Delta t} - C_i^t}{\Delta t} = \frac{K_{x_0 + \Delta x} \frac{dC}{dx} \Big|_{x_0 + \Delta x} - K_{x_0} \frac{dC}{dx} \Big|_{x_0} - \nu_{x_0 + \Delta x} C_{x_0 + \Delta x} + \nu_{x_0} C_{x_0}}{\Delta x} \quad (4)$$

$\Delta t \rightarrow 0, \Delta x \rightarrow 0$  이 되면 식(5)가 도출된다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K \frac{\partial C}{\partial x} \right] - \frac{\partial}{\partial x} (\nu C) \quad (5)$$

#### 오염 부하(Waste loads)

오염 부하는 외부 경계 조건을 포함하여 검토하고 이를 모델 및 처리 구역 안으로 이동하여 검토 되어야 한다. 이의 처리 과정은 물리적 작용과 기타의 과정으로 나뉜다.

물리적 과정의 예:

- 부유물질의 침전:
- 어류의 이동과 같은 물체의 자발적인 이동:
- 증발과 같은 물질에 영향을 받지 않는 물의 이동:
- 수면에서의 물질 자체의 휘발성.

기타의 과정의 예:

- 암모니아와 산소의 아질산염의 생성과 같은 생화학적 전환:
- 조류(Algae)의 성장(일차적 생성물):
- 다른 동물에 의한 포식:
- 화학적 반응.

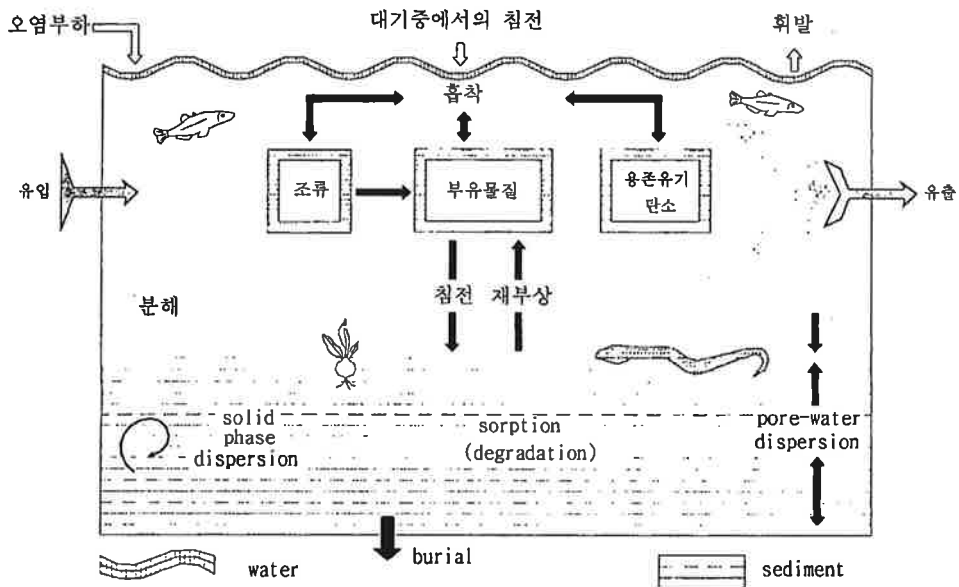


그림 4.3.2 수질 model에서 부유물질과 오염물질의 거동

본 모델에서는 (6)과 같은 편미분방정식의 형태로 쓰여질 수 있는 과정만을 검토하기로 한다.

$$\left[ \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} \right]_p = f \left[ \bar{C}, t, e, \frac{\partial \bar{C}}{\partial x, y, z}, \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x, y, z^2} \right] \quad (6)$$

여기서,

e = 기타 외부의 처리 과정

$\bar{C}$  = 모든 모델화된 농도의 벡터

f = 임의의 작용 인자에 대한 함수

t = 시간

이다.

비록 이것이 매우 일반적인 공식이지만, 중요한 것은 화학의 동적인 평형 조건에서 단지 비교적 느린 화학 과정만이 (6)과 같이 서술될 수 있다.

#### 수질모델 방정식 구성

수질모델 방정식은, 만약 (4)가 세 가지 방향으로 확장되고 만약 모든 거리  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 의 한계가 영으로 얻어진다면, 3차원적 특성이 얻어질 수 있다. 이것이 (7)에 나와 있고 이것은 등방성(等方性) 매개물로 가정된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left[ D \frac{\partial C}{\partial x} - v_x C \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ D \frac{\partial C}{\partial y} - v_y C \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left[ D \frac{\partial C}{\partial z} - v_z C \right] + f \left[ \bar{C}, \frac{\partial \bar{C}}{\partial x, y, z}, \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x, y, z^2}, t, e \right] \quad (7) \end{aligned}$$

**유한 격자의 구성(Finite grid in space)**

위의 미분 방정식은 공간에서는 유한 격자에서, 유한 시간 단계에서 계산된다. 방정식 (7)은 예로 주어진(그림 4.3.3) 일차원적인 강물 모델로 변형될 것이다. 이러한 목적에서 (7)의 모든 용어는, 강물의 x축이 강물의 방향에서 점으로 간주되어 진다면, y와 z에 관하여 적분되어야 한다.

(7)의 모든 y와 z에 관한 계산 항목은 y와 z축에 관한 적분에 의하여 모두 사라졌음을 알 수 있다. x축 흐름의 방향과 수직인 수평방향의 y에 관한 예:

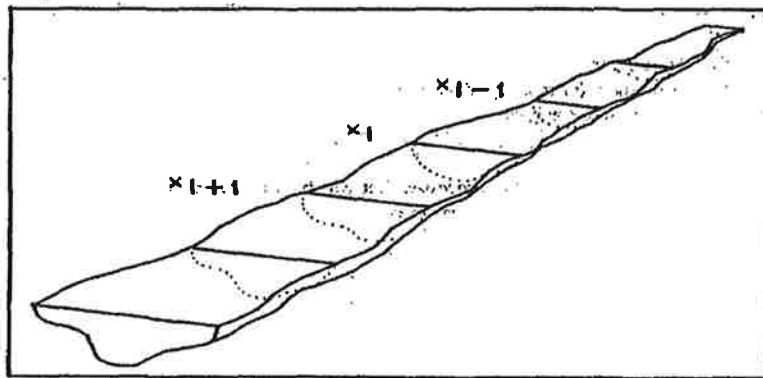


그림 4.3.3 y, z방향으로 평균화된 횡단면적의 분할

$$T_y = \int_{y_r}^{y_1} \left[ D \frac{\partial C}{\partial y} - v_y C \right] dy = \left[ D \frac{\partial C}{\partial y} - v_y C \right] \Big|_{y=y_r}^{y=y_1} = 0 \quad (8)$$

여기서,  $y_r$  = 제방의 오른쪽에서의 y,  $y_1$  = 제방의 왼쪽에서의 y,  
 $T_y$  = y에서의 이동

(8)에서  $\delta/\delta y$  가  $y$ 에 관한 적분 이후 소거되는데 이는 가정된 강물의 제방을 통해서는 이동이 없었기 때문이다. 같은 이유에서  $\delta/\delta z$  도 바닥 으로부터 표면까지를 나타내는  $z$ 의 적분 이후 소거된다. 미분과 적분의 계산 이후 남아 있는 것은(9)이다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(A \bar{C}) = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D \frac{\partial A \bar{C}}{\partial x} \right] - \frac{\partial}{\partial x} \int_y \int_z v_x C + A \bar{f}(\bar{C}, \dots) \quad (9)$$

여기서,

$\bar{C}$  = 통수 단면에서의 평균 농도

$A$  = 통수 단면

$D$  = 분자의 확산

$f$  = 단면의 평균화된 수질 처리 과정

이다.

#### 교란에 의한 확산(Turbulent diffusion)

방정식 (9)에서  $x$ 축 방향의 확산속도  $v_x$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$v_x = \bar{v}_x + \Delta v_x, \quad C_x = \bar{C}_x + \Delta C_x,$$

(9)의 이류(移流)항은 (10)으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_y \int_z v_x C = \frac{\partial}{\partial x} (\bar{v}_x A \bar{C}_x) + \frac{\partial}{\partial x} \int_y \int_z \Delta v_x \Delta C_x dy dz \quad (10)$$

만약  $y$ 와  $z$ 의 함수인  $\Delta v_x$ 와  $\Delta C_x$ 가 상관성이 없다면 (10)의 마지막 항은

소거된다.

그러나 물에는 항상 작은 교란작용이 있다. 그들은 어떤 장소에서는  $\Delta v_x$  이 양수 값으로 나타나고, 이웃하는 장소에서는 음수값으로 나타난다. 만약 상류의 농도가 하류의 농도보다 높다면, 이런 작은 교란작용이 추가적인 이동을 야기시킨다. (그림 4.3.4)

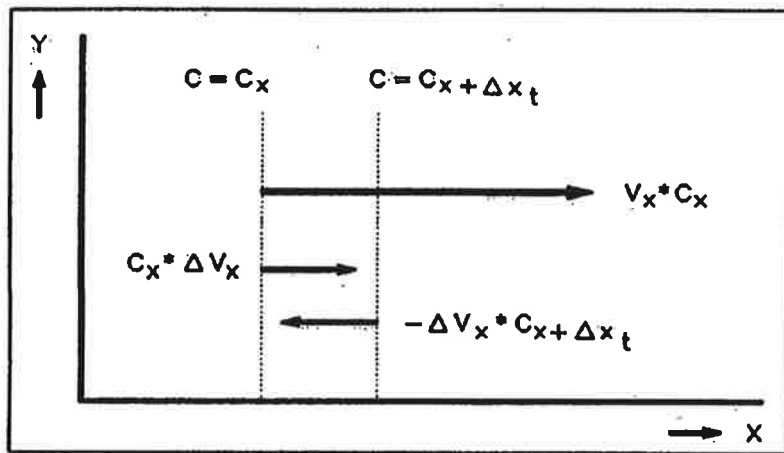


그림 4.3.4 수송망에서 교란파동  $\Delta v_x$ 의 영향

이 때문에, 이런 이동은 교란 거리에 의한 농도 차이에 의한 비례식으로 나타낼 수 있다. (11)

$$T_{add} = -K * \frac{(C_{x+\Delta x_t} - C_x)}{\Delta x_t} \approx -K \frac{\partial C}{\partial x} \quad (11)$$

여기서,

$\Delta x_t$  = 교란되는 미소 길이

$k$  = 비례 상수 (=  $\Delta v_x * \Delta x_t$ )

이다.

이 공식은 크기가  $K$ 인 식이며, 확산 공식(2)와 동일하다. 공간에서 교란거리의 적분에 의해서 생성된 부가적인 계산항은 교란에 의한 확산(Turbulence diffusion)이라고 불린다. 이것은 일반적으로 방정식(7)의 분자 확산의 것보다 큰 수치를 갖는다.

#### 분산(Dispersion)

위에서 주어진 교란에 의한 확산항  $K$ 는 단순히 교란 범위 뿐만아니라 강물이 뻗어진 전체 단면에 걸쳐서 적분이 된다면 다소 다르게 도출될 수 있다.

그림 4.3.5는 단면에 걸쳐 초기 물질의 양이 균일하게 분포된 강물 범위를 보여준다. 시간이 지난 후, 물질은 단면에 대해서 더 이상 균일하게 분포되지 않는다. 이는 단면에 관해서 적분을 했기 때문이다. 그러나 단면의 평균 농도의 결과는 흐름의 축을 따르는 형태를 보인다. 이것은 확산 과정에 의해서 얻어진 형태와 매우 흡사하다.

강물의 단면에 따른 혼합은 그림 4.3.5에 나타난 시간 간격보다 더 길어질 수 있다. 그러나 강물의 폭에 따른 차이는 일차원적인 모델에서는 나타나지 않는다.

이러한 현상은  $\Delta v_x$ 와  $\Delta C_x$ 가 서로 연관되어 있고, 그들의 생산물의 적분은 식(10)에서와 같이 영이 아니기 때문이다. 잘 정의된 매우 특별한 상황에 서만 결과의 정확한 계산이 나올 수 있다.

강의 커다란 가장자리 부분은  $x$ 축을 따라서 비대칭의 농도곡선으로 나타냈

다. 이것은 일차원적인 이류(移流) 확산 방정식에서는 완전하게 설명될 수가 없다.

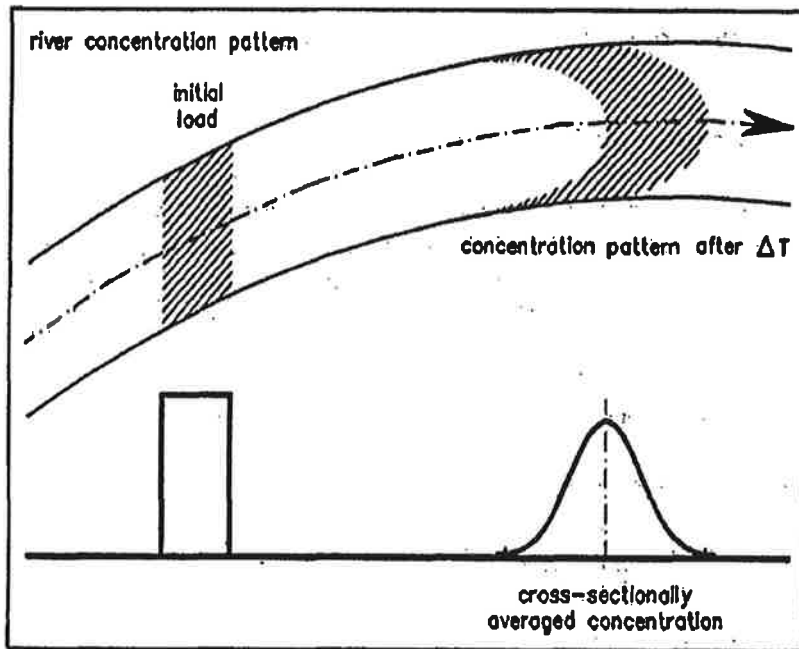


그림 4.3.5 단면으로 분할된 강 모델에서 불균등한 흐름의 분산

부가적인 확산항은 종종 분산이라고 불린다. 이 계산항은 위에서 언급된 교란에 의한 확산보다 매우 큰 규모이다.

2차원의 수평적 적용의 분산항은 평균깊이로 계산되며, 또한 각각의 컴퓨터화된 격자망의 크기에 걸친 수평적 적분식으로 나타내기도 한다. 만약 수평적 격자망이 크면 이 수평적 요소도 커질 것이다. 만약 수평적 격자망이 작아지면, 흐름의 균질성이 작아진다. 결과적으로 분산항의 값은 작아질 것이다. 만약 수평적 격자망이 매우 커지게 되면, 그때는 격자 그 자체가 상



당히 강렬하게 혼합되어 첨가된 분산계수는 더 작게 얻어지거나, 또는 오히려 혼합이 너무 커서 영에서 정해진다.

### 시간에 대한 적분

지금까지는 시간에 대한 정확한 적분이 이루어졌다고 가정했었다. 그러나 시간은 이산(離散)단계가 적용되고, 완전한 조수의 순환 시간 단계가 맞추어지고 단지 잔차류의 만이 고려되는 특수한 조석구간이 존재할 수 있다. 표 4.3.1에 일반적인 확산과 분산값이 주어졌다.

표 4.3.1 유한 격자의 종합 모델에서 일반적인 분산값 범위

mixing phenomena	$D(m^2/s)$
molecular diffusion	$10^{-9}$
turbulent diffusion	1-1.0
depth integration estuaries and seas	10-1000
tidal and depth integration estuaries and seas	100-1000
one dimensional rivers	100-1000

### 수식 해결(Numerical solution)

그림 4.3.1에서 미소 부피의 물에 관해서 계산하여, 등방성 매개물에 대한 완전한 3차원의 이류(移流) 확산 방정식을 유도하였다. 더욱이 이 방정식을 몇 가지 방향에 대해서 그리고 시간과 공간에서 유한 격자를 유도하기 위하여 시간의 간격에 대해 적분한다.

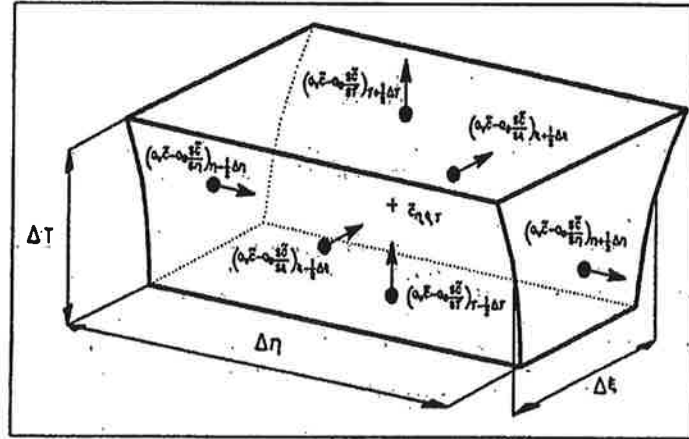


그림 4.3.6 컴퓨터화된 요소와 이의 표면을 통한 이동

명확한 구역과 명확한 시간에서만 농도를 계산할 수 있기 때문에 이러한 격자가 필요하다.

그림 4.3.6은 소위 컴퓨터화된 요소이다. 이는 농도의 상태 다양성을 이루는 화학적 요소와의 더 명확한 구별을 위해서 모델의 "단편(segment)"이라고도 불리어진다.  $Q_v$ 와  $Q_b$ 는 각각 이류(移流)와 분산의 흐름을 뜻한다.

식 (7)은 DELWAQ모델에서 어떤 범위나 방향으로든 적분될 수 있다. 이것은 국부적으로 영차, 일차, 이차의 적분에 의해서 일차, 이차, 삼차를 구분할 수 있게 되었다. 또한 어떠한 형태로도 컴퓨터화된 요소를 가질 수 있다.

그림 4.3.6에서 컴퓨터화된 요소가 그림 4.3.1의 미소 부피와 흡사하더라도 거기에는 중요한 차이가 있다. 부가적인 난류 확산항, 누가된 분산항의 차이가 그것이다. 그림 4.3.1에서의 더 큰 차이는 부피가 충분히 작아지므로 인하여  $C_{x, \Delta x}$ 와  $C_x$ 는 거의 같아진다. 그러나 그림 4.3.6의 컴퓨터화된 요소는 공간에서 미소 부피를 지니며  $C_{x, \Delta x}$ 는 거의  $C_x$ 와 다르다. 컴퓨터화된 시간과 구획은 가능한한 크게 선택되기 때문이다.

그림 4.3.6에서, 농도는 컴퓨터화된 요소에 대해 모델에 의해서 계산된다고 가정된다. 그러나 컴퓨터화된 요소의 표면에서의 이동을 계산하기 위해서는, 두 단면 사이의 표면 위치에서 가지고 있는  $c$ 와  $\delta c / \delta x$ ,  $\delta c / \delta y$ 와  $\delta c / \delta z$  값을 알아야 한다.

더욱이 이러한 값들은 그림 4.3.6에서,  $t = t_0$  와  $t = t_0 + \Delta t$  사이의 시간 간격에 대한 평균으로 알아야 한다. 여기서  $\Delta t$ 는 시뮬레이션 시간 간격이다.

DELWAQ프로그램은 몇 가지 방법을 단면 표면과 평균값을 계산하기 위하여 적용한다. 그들 중에는 간단하고 계산하는 데에 시간이 얼마 걸리지 않는 것도 있다. 또 다른 것들은 더 정확한 것도 있지만 계산시간이 좀더 요구되거나 어떤 특별한 상황에 적용이 되지 않는 것도 있다.

결과적으로 가장 효율적인 모델 활용 방법은 문제의 성격과 계산시간의 고려, 정확도와 컴퓨터 용량의 한계 등을 고려하여 선택 되어야 한다.

## 2. 새만금 방조제 수질 변화 예측

### 가. 조류 모의

#### 1) 조류 모형

새만금 지구의 조석 특성을 고려한 수질 예측에 활용된 조류 모형은 Delft 수리연구소에서 개발한 TRISULA를 사용하였다.

조류 모의에 적용된 기본 계산식은 Laplace의 동역학적 조석 이론에 근거한 2차원 유체 운동 방정식과 연속 방정식이다. 조류의 모의를 수행하기 위하여 표층에서 해저 경계층까지 조류의 유속이 같으며, 해저 경계층이 매우 작다는 가정인 천해 장파 이론을 도입하여 2차원 유체 운동 방정식과 연속 방정식을 제 4장 제1절에서 2차원의 운동 방정식과 연속 방정식으로 나타내

었다.

## 2) 모형의 구성 및 입력자료

### 가) 모형의 구성

TRISULA 모형은 다음과 같이 컴퓨터의 하드웨어와 관련된 Shell module과 입력 데이터를 발생시키는 Pre-processor module, 문제를 풀고 해석하는 Execution module, 결과를 분석하는 Post-processor의 네 부분으로 구성되어 있다. 각 부분별 세부내용은 그림 4.3.7과 같다.

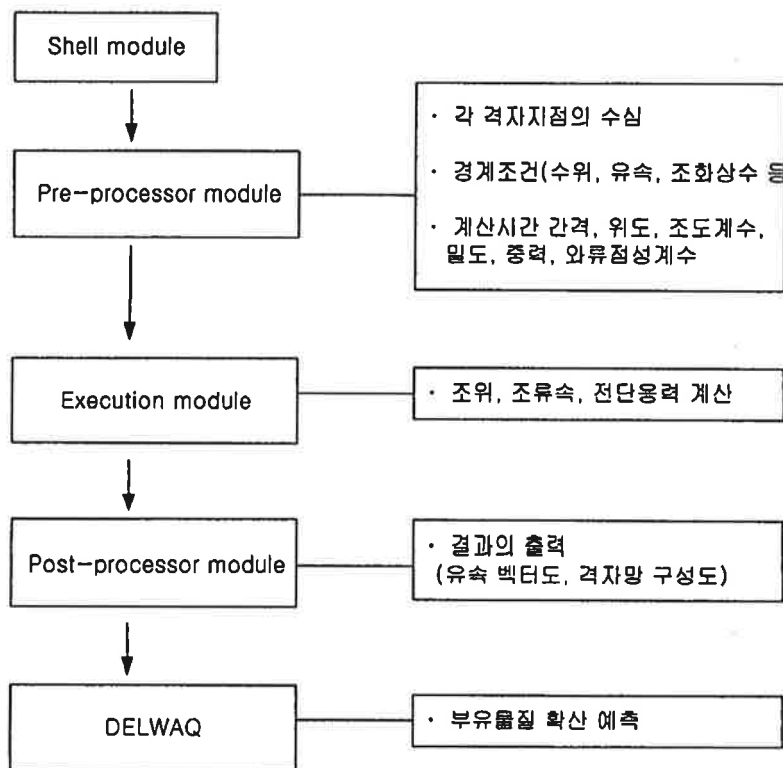


그림 4.3.7 조류 모형의 구성

### (1) The Shell module

이 과정은 TRISULA sub-system 에 통합되어 있으며, 하드웨어 대한 프로그램으로 워크스테이션이나 메인프레임과 PC에 설치되어 진다.

### (2) The Pre-processor module (전처리 과정)

이 과정은 조류 모의를 수행하기 위해 필요한 입력 데이터를 메뉴 방식에 의하여 입력하는 부분이다. 전처리 과정에서는 각 격자 점의 수심 값, 계산 영역을 둘러싸는 격자 경계, 경계 조건(수위, 유속, 유량, 조화상수), 계산 시간 간격, 위도, 조도계수, 밀도, 중력, 와류 점성계수 등이 입력된다.

### (3) The Execution module (실행 과정)

실행 과정에서는 연속 방정식, 운동량 방정식 등을 사용하여 계산 영역내에 주어진 조건에 따라 조위나 조류속 등을 계산한다.

### (4) The Post-processor module (후처리 과정)

후처리 과정은 모의 발생 결과를 시각적으로 볼 수 있도록 출력하는 곳이다. 이곳에서는 유속에 대한 벡터도 및 대상 영역에 대한 격자망 구성도, 입력 자료에 의한 지형도 등을 출력한다.

#### 나) 입력 자료

새만금 지구의 조류 특성을 재현하기 위해 입력되는 자료는 표4.3.2와 같다. 대상 해역에 대한 개방 경계는 그림 4.3.8과 같으며 외해 측의 경계는 동경 126° 10', 북위 36° 10'와 35° 30'를 지나는 구역의 가로 60km, 세로 80km의 영역으로 하였다.

모형의 적용을 위한 각 격자의 크기는 양방향에 대하여 각각 750m로 하였

으며 X-방향 76격자, Y-방향 86개의 완성된 격자망을 근거로 각 격자별 모의 발생을 실시하였다. 계산 영역의 격자 구성은 그림 4.3.9에 도시하고 있다.

모형에 입력되는 격자 지점별 수심은 평균 해면으로부터의 수심이다. 각 격자 지점별 수심은 교통부 수로국 해도의 등고선도를 기준으로 작성하였다. 그림 4.3.10은 입력 자료로써 완성된 대상 해역의 각 격자 지점별 수심 평균을 도시한 것이다.

표 4.3.2 조류 모형의 입력 자료

Variables	Input Data	Description
NX, NY	X방향: 76개, Y방향: 86개	격자 수
DX, DY	750.0(m)	격자 간격
DT(sec)	150.0	계산시간 간격
CL1(sec)	14400.0	계산시작 시간
CL2(sec)	28800.0	계산종료 시간
PRT(sec)	1800.0	출력시간 간격
n	0.018	조도계수
H	수로국 해도 등고선도 기준	수심
$\mu$	1.0m <sup>2</sup> /sec	점성계수
$\rho$	1030kg/m <sup>3</sup>	밀도
Tidal Components	4개분조 (M <sub>2</sub> , S <sub>2</sub> , K <sub>1</sub> , O <sub>1</sub> )	조화상수
경·위도 좌표	동경 126° 10' 북위 35° 30'	

### 3) 조류 모형의 보정과 검증

#### 가) 모형의 보정

수치 모형을 이용해서 대상 해역에 대한 조류 특성의 재현을 위해서는 그

모형의 계산 결과와 현장에서의 실측치를 비교하는 작업이 필요하다.

이러한 모형의 재현성을 검증 하기 위하여, 본 연구에서는 조류 모형을 새만금 해역에 적용하여 그 결과를 측정 자료와 비교해 봄으로써 본 모형의 적용성을 검토하였다.

우선 모형의 검증에 앞서 새만금 해역에 맞게 조류 모형을 보정 해야 한다. 모형의 보정은 박영욱(1996)에 의해 동일 지역인 새만금 해역에 대해 실시되어 그 적용성이 검토되었다. 보정에 사용된 계수는 조도계수  $n=0.018$ , 점성계수  $1.0\text{m}^2/\text{sec}$ , 밀도  $1030\text{kg}/\text{m}^3$  이다.

#### 나) 모형의 검증

조위 및 조류속에 대한 모형의 검증은 1995년 7월 6일 관측된 자료를 사용하여 실시하였다. 방조제 공사 진도는 가력도 측에서 1.2km, 야미도 측에서 1.2km, 비응도 측에서 1.7km 체질이 완료된 상태이다. 모형의 발생은 7월 5일 0:00시부터 실시하여 4주기가 포함되도록 하였으며, 모의 발생 결과와 현장 관측 치의 비교는 7월 6일 0:00시에서 시작하여 24시간 동안에 대하여 수행하였다.

조류속에 대한 모형의 검증에서 조도계수  $n$ 의 값 0.018을 그대로 사용하였다. 그림4.3.12는 3호 물막이 구간인 축점R2 에서의 조류속에 대한 현장 관측치와 모의 발생치의 비교 결과로서 조류속의 크기나 유향(流向)에 있어서 대체로 양호한 결과를 보여주고 있다. 그리고 모의 발생 조위의 검증도, 보정에 사용된 동일한 4개 지점에 대하여 조류속의 보정에 사용된 파라메타를 변화시키지 않고 그대로 사용하여 시행하였다. 그림4.3.13은 조위에 대한 현장 관측치와 모의 발생치의 비교 결과로서 진폭이나 위상에 있어서 유사한 경향을 가지고 비교적 잘 일치하고 있다.

그림 4.3.14은 모형의 검증 기간에 대한 새만금 해역에서의 조류속 벡터

도를 나타낸 것이다. 이러한 모형의 검증 결과로 미루어 조류모형의 해수유  
 동 현상에 대한 재현능력이 인정되어 수질 모형에 적용토록 하였다.

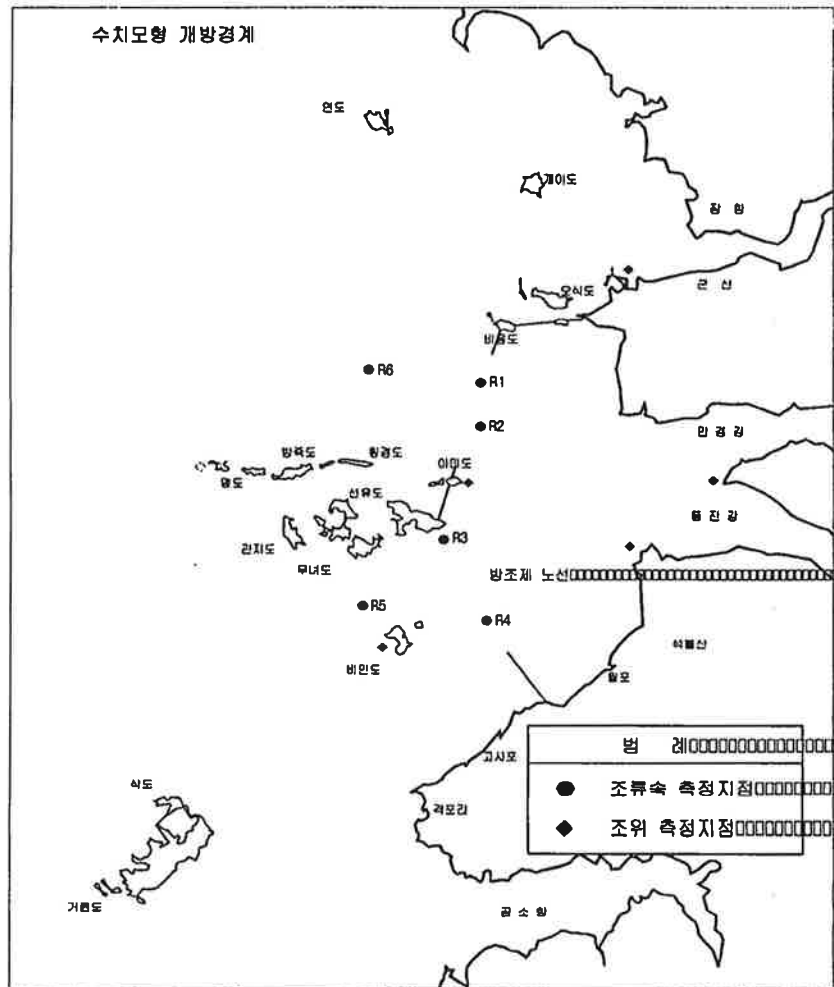


그림 4.3.8 모형의 개방경계



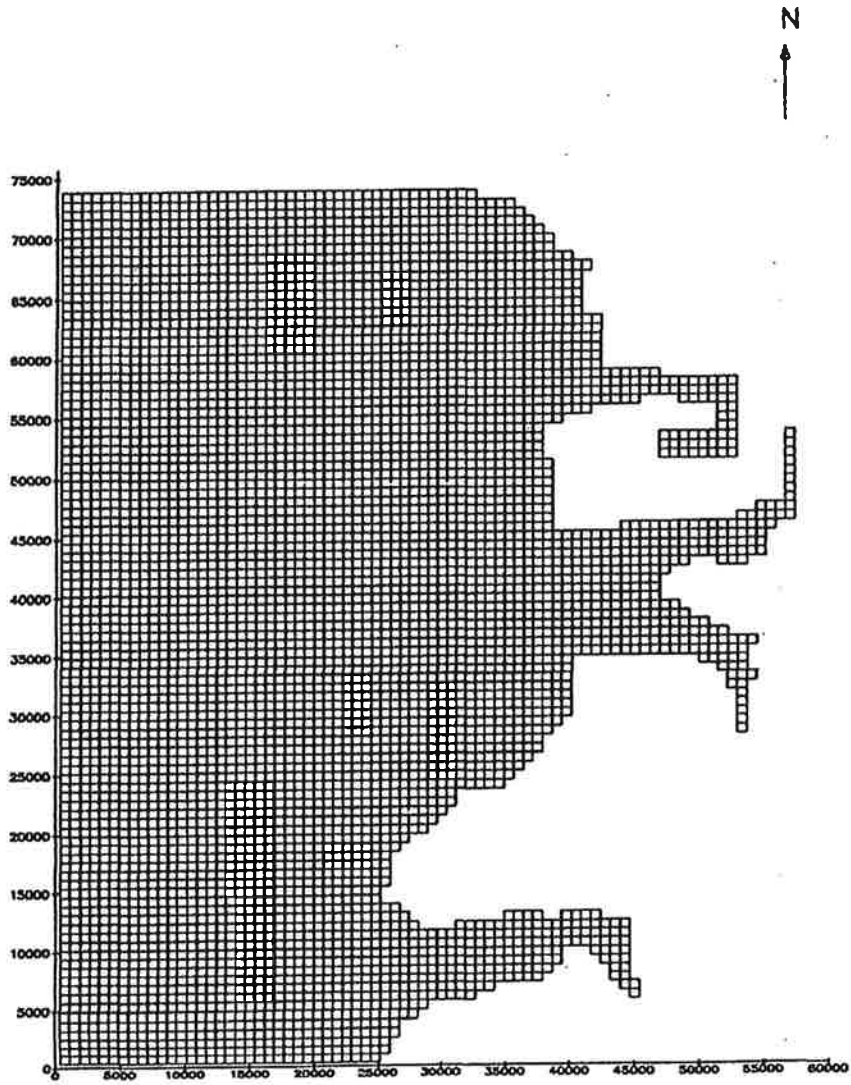


그림 4.3.9 계산영역의 격자구성

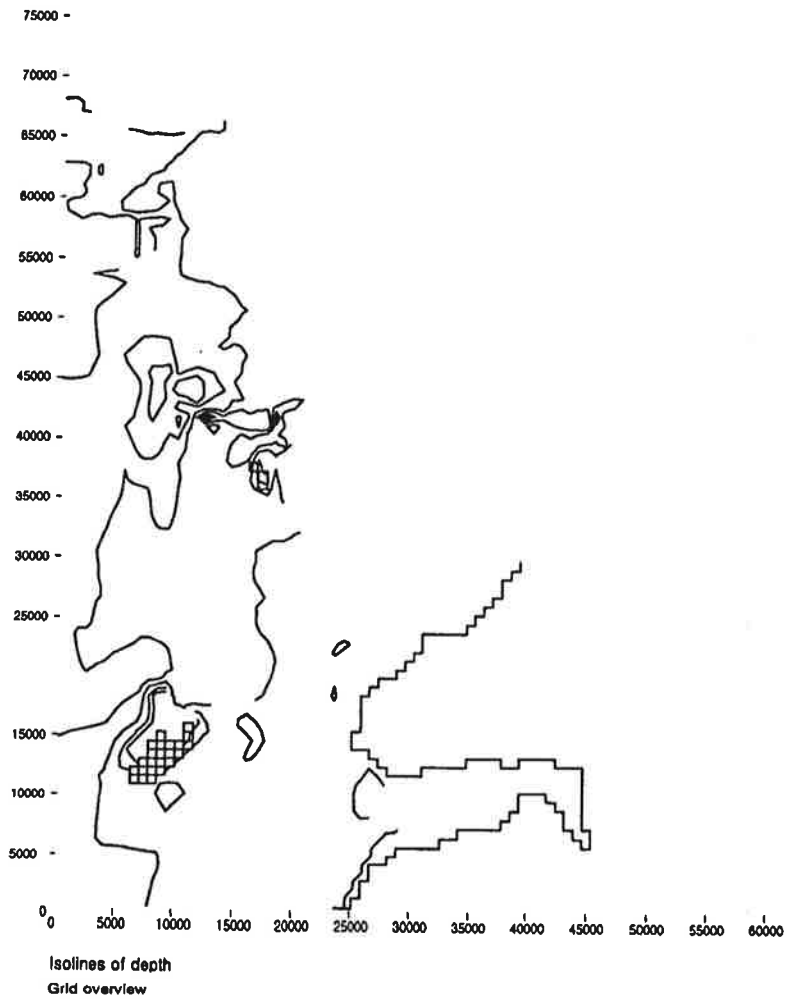


그림 4.3.10 각 지점별 평균 수심

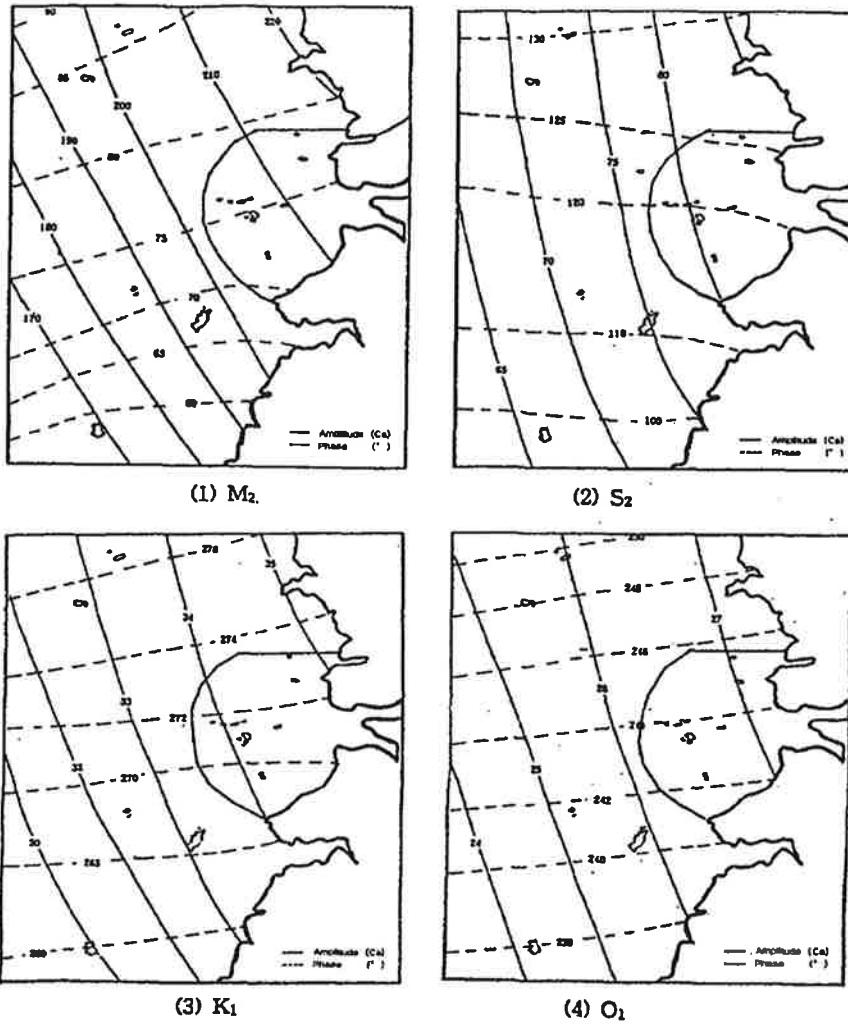


그림 4.3.11 주요분조의 등조석도

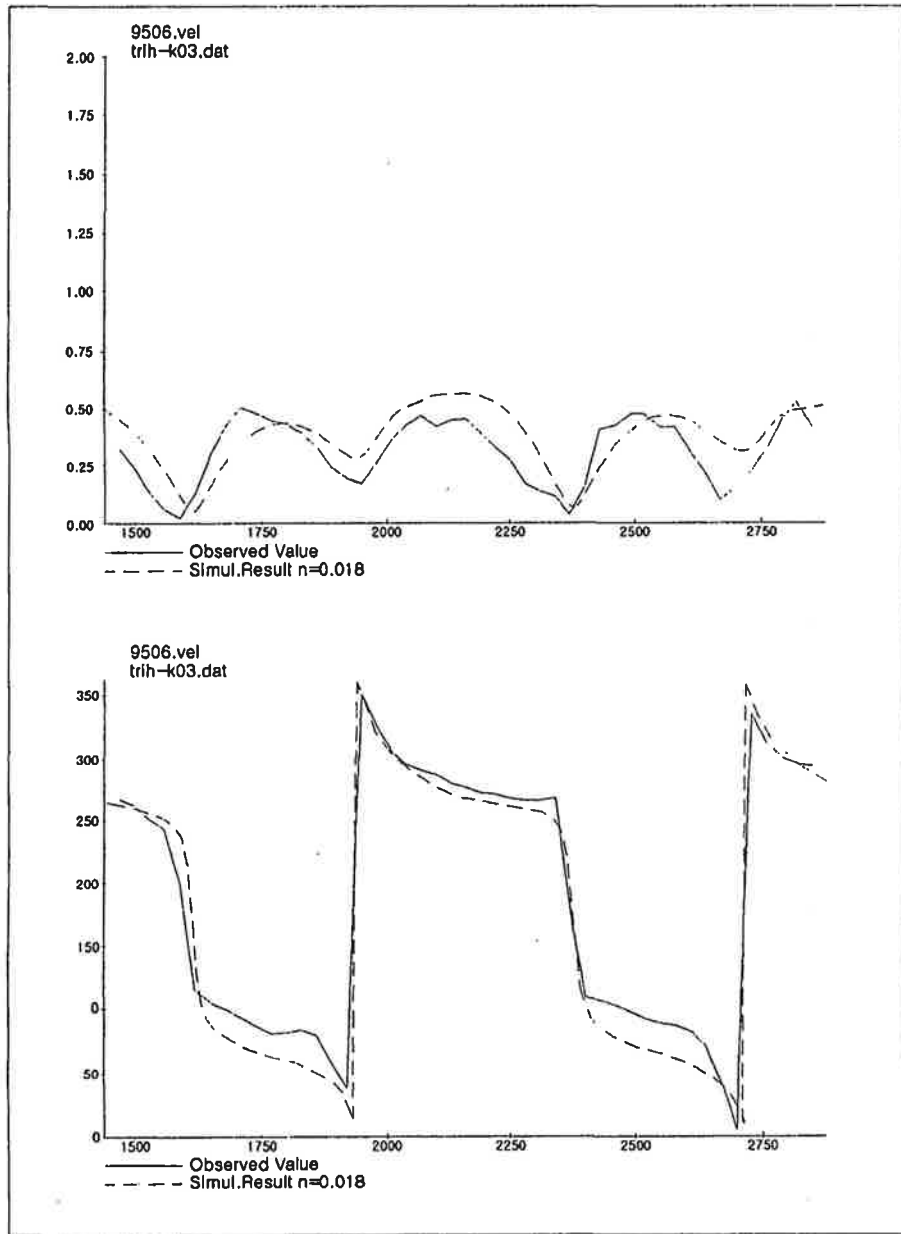


그림 4.3.12. 조류속의 현장 관측치와 모의 발생치(측점 R2)

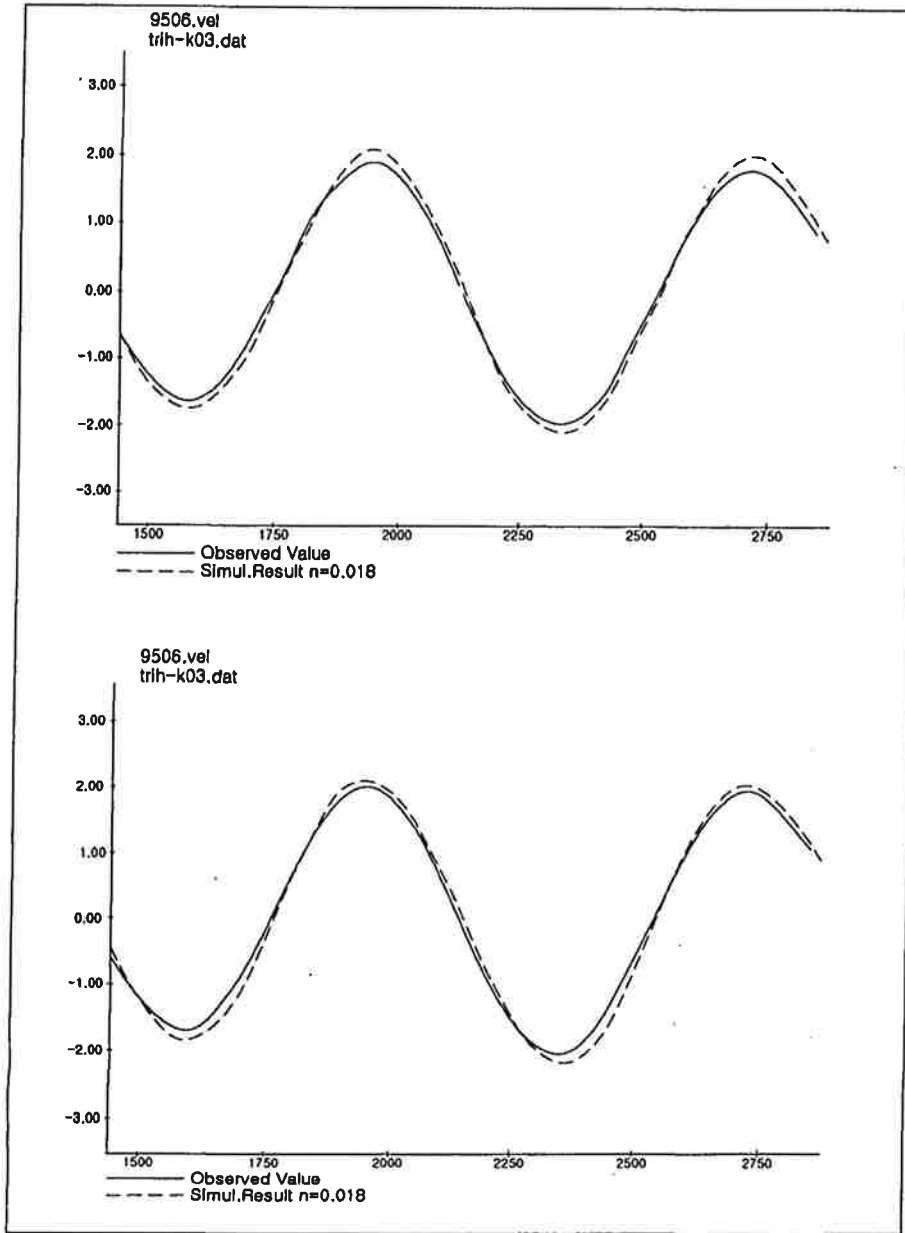


그림 4.3.13 관측조위와 모의조위(야미도, 군산외항)

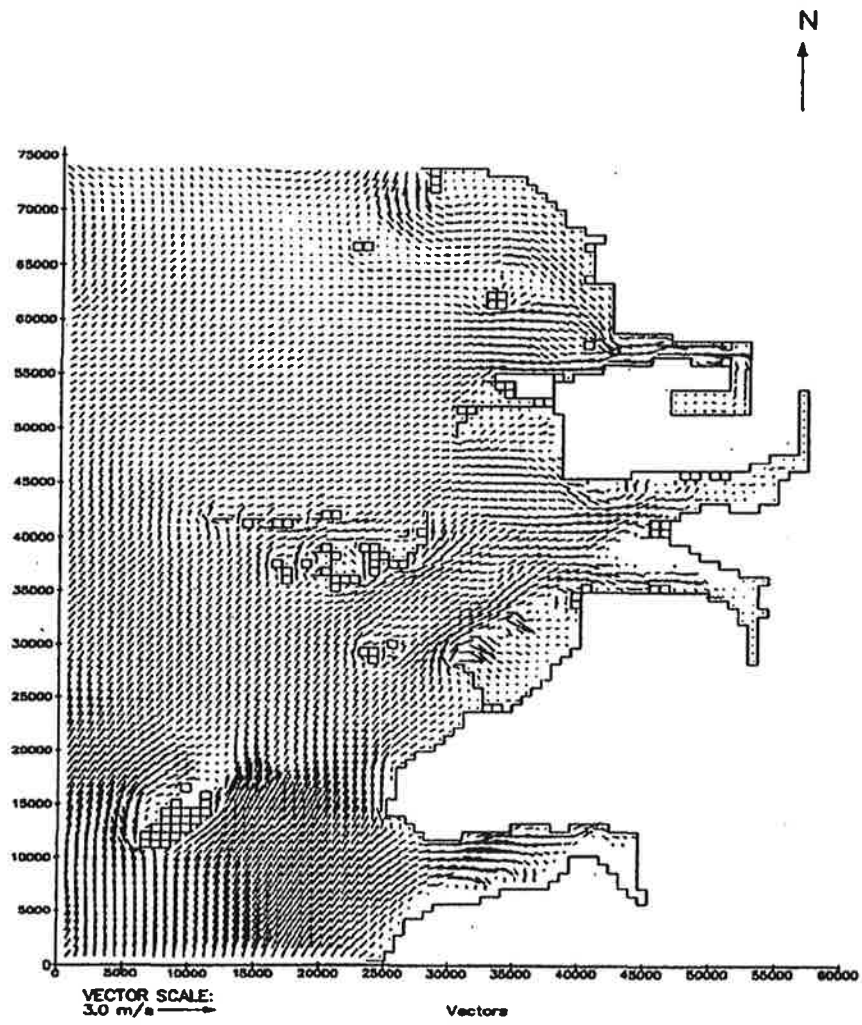


그림 4.3.14 모의 조류속 벡터도(after 2700min)

## 나. 확산 모의 분석

### 1) 확산 모형의 개요

확산 현상을 해석하는 방법은 해석적 해를 구하는 방법, 입자의 움직임이 random walk하다는 가정 하에 수립된 Monte Carlo 방법(Dway & Sullivan, 1982; Dimou, 1989), 물질 수송에 관한 지배 방정식(이류·확산 방정식)을 수치적으로 풀이하여 근사해를 구하는 방법으로 크게 구분 할 수 있다 이은주(1995).

일반적으로 확산 현상을 해석할 때 이류·확산의 기본 방정식이 주어지면 이에 경계 조건과 초기 조건을 주어 해를 구하게 된다. 그렇지만 이류·확산의 편미분방정식에서 직접적인 형태의 해를 구하는 것은 불가능하다. 이것을 구하기 위해 기본 방정식을 적당한 형태의 이산적인 양(implicit or explicit)으로 치환해서 반복계산하여 해를 구하는 수치계산법이 필요하다. 이 기본 방정식의 연속량에서 이산량(discrete quantity)으로의 치환 과정의 수법에 따라 각종 수치모형을 수립할 수 있다 최병옥(1994). 연안 수질 모델의 기본 방정식인 이류·확산 방정식은 근본적으로 방정식 내에 이류항인 쌍곡형 연산자와 확산항인 포물형 연산자가 함께 존재하며, 이류항이 확산 항에 비하여 1 order 이상 유의한 결과를 산출한다. 이들 방법에 의하여 확산방정식을 풀면 이류 항의 계산 과정에서 농도 분포의 spatial wiggle이 나타난다 이문진(1991). spatial wiggle는 상류차분법을 사용하여 없앨 수 있지만, 상류차분법을 사용하면 물리적 확산 이외에도 수치적 확산이 발생된다 Baptista et al(1984).

이문진(1991), 황재동(1993) 등은 수영만 지역에 적용한 바 있는 Q-dis 프로그램(Monte Carlo 방법에 의한 입자 추적법)을 사용하여 확산 모의 분석을 실행하였다.

확산의 문제는 기초 방정식을 이산량(discrete quantity)으로 변환하여 수치적으로 구하는 것이 일반적이지만, 차분화에 따른 오차와 안정성의 문제가 있다. Monte Carlo 방법은 확산 현상의 random walk 개념에 의한 입자 추적모형의 기본 개념은 용존질량이 다수의 입자들 집합으로 이루어 졌다고 간주하고, 이 입자들의 운동이 확정적인 이송역학에 의하여 움직이는 것과 어떤 특정 분포를 따르는 확률론적인 확산의 운동으로 구성되었다고 보는 것이다 서승원(1998).

이 방법은 난류의 강도, 시간 scale, 입자수 등을 고려하여 난수를 발생 시키면서 분산 입자의 확산을 구하는 것이다. 근본적으로는 대상영역내에 농도 개념이 아닌 입자가 존재한다고 고려한 것이다. 이와 같은 입자의 움직임은 매 계산시간 단계에서 농도로 전환되는데, 입자의 총량을 그 입자가 위치하는 점에 대한 주위의 지배면적으로 나누어 환산한다.

경우에 따라서는 이 방법이 보다 자연적이고 물리적인 것처럼 인식될 수 있다. 그러나 단점은 질량 보존을 만족하기 어렵다는 것이고, 입자의 수가 너무 많을 때 tracking하는 과정에서 이들의 수와 위치를 환산하는데 상당한 계산상의 노력이 요구되는 것이다.

시간  $t$  때에 위치  $(x_0, y_0)$ 에 있던 입자가 시간이  $\delta t$  만큼 경과 후 조류와 난류에 의해 이동한 후 놓이게 되는 새로운 위치를  $(x_0 + \delta x, y_0 + \delta y)$ 라 할 때  $\delta t$  동안의 변위  $(\delta x, \delta y)$ 는

$$\delta x = (U + u')\delta t \quad (1)$$

$$\delta y = (V + v')\delta t \quad (2)$$

로 주어진다. 여기서  $(U, V)$ 는 조류의 유속이고,  $(u', v')$ 는 난류에 의한



유속이다. 난류성 유속 성분  $u'$ 과  $v'$ 는 난류장의 강도에 따라 결정되는 난류적 특성유속인  $U_b$ 와  $V_b$ 의 범위폭 내에서 불규칙적으로 분포하므로, 난류적 유속을 몬카르토 방법으로 모델링하면 시간  $\delta t$  동안의 변위는

$$\delta x = (U + \mu U_b) \delta t \quad (3)$$

$$\delta y = (V + \nu V_b) \delta t \quad (4)$$

로 표현된다. 여기서  $\mu$ 와  $\nu$ 는 각각  $[-1, 1]$  구간 내의 값을 가지는 임의의 난수이다.

난류적 특성유속  $U_b$ 와  $V_b$ 의 크기는 각각 x와 y방향의 와동확산계수  $D_x$ 와  $D_y$ 의 관계로부터

$$U_b = \sqrt{\frac{6D_x}{\delta t}} \quad (5)$$

$$V_b = \sqrt{\frac{6D_y}{\delta t}} \quad (6)$$

의 관계에 있다(Maier-reimer and sundermann, 1982). 따라서 와동확산계수를 알면 난류적 유동에 따른  $\delta t$  동안의 변위를 알 수 있으며, 난류적 변위를 알면 와동확산계수를 계산할 수 있다.

입자 추적에 사용한 유속중 이류·확산의 유속은 조류모형에서 얻은 조류속을 사용하고, 난류 확산의 유속은 난수(random number)발생에 의한 유속을 사용하였다.

해역의 다양한 오염물질 중 본 연구에서는 부유물질(SS)을 오염물질 자료

로 하여 확산모의를 수행하였다.

SS의 농도 증가는 아래와 같이 계산된다. 단위시간당  $Q$  Kg의 오염물질(SS)이 방출되는 것을 확산모델에서 단위시간당  $m$  개의 입자를 방출하는 것으로 모델화할 경우, 한 입자는  $Q/m$  Kg의 오염물질량을 나타낸다. 가로, 세로 및 수심이 각각  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  및  $\Delta z$ 인 격자망에  $N$ 개의 입자가 놓여 있을 경우 이 격자망 안에 있는 오염물질의 질량은  $NQ/m$  Kg 이므로, 농도  $C$ 는

$$C = \frac{NQ}{m\Delta x\Delta y\Delta z} \quad (7)$$

와 같이 계산된다.

해수 중에 있는 오염물이 분해됨으로 인한 단위면적 수주당의 수치적 추적자 개수  $N$ 은

$$\frac{dN}{dt} = -aN \quad (8)$$

의 관계를 만족하는데, 감쇠계수  $a$ 는 침강속도가 빠를수록 큰 값을 가진다. 이 식에 의하면 시가  $t$  때의 부유물질 입자 갯수  $N(t)$ 는

$$N(t) = N_0 e^{-at} = N_0 e^{\frac{-t}{t_e}} \quad (9)$$

로 주어진다. 여기서  $N_0$ 는 초기의 입자 개수이고,  $t_e$ 는 입자의 개수가 원래보다  $1/e$  배 (0.368배)로 줄어드는데 걸리는 지수적 반감기 또는 체류시간이다. 한편, 해수중 입자 개수에 대한 지수적 감쇠식  $dM/dt = -aN$ 을

유한차분화하면 시간  $(t + \delta t)$  때의 입자 개수  $N^{(N+1)}$ 과 시간  $t$  때의 입자 개수  $N^{(N)}$  사이에는

$$N^{(N+1)} = N^{(n)}(1 - \alpha\delta t) \quad (10)$$

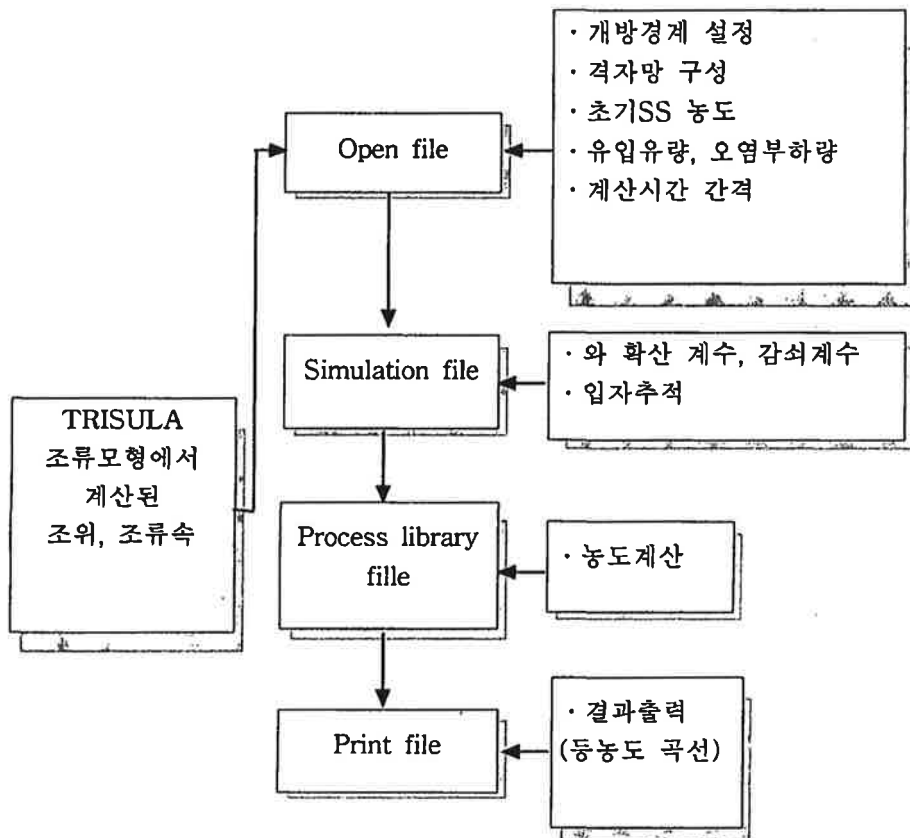


그림 4.3.15 확산모형의 구성

## 2) 입력자료

입자추적을 통한 확산 모의시 입력된 자료는 표 4.3.3과 같다.

표 4.3.3 확산 모형의 입력 자료

Variables	Input Data	Description
NX, NY	X방향 : 76개, Y방향 : 86개	격자 수
$\Delta X, \Delta Y$	750.0(m)	격자 간격
DT(sec)	150.0	계산시간 간격
Dx, Dy	1 m <sup>2</sup> /sec	와확산계수
L	만경강 91ton/day 동진강 31ton/day	SS 부하량
Q	만경강 2,528,000 m <sup>3</sup> /day 동진강 1,616,000 m <sup>3</sup> /day	하천 유입유량
C <sub>0</sub>	만경강 36mg/ℓ 동진강 22mg/ℓ	초기 SS 농도
$\alpha$	$\alpha = 3 \times 10^{-5}$ /sec	감쇠계수

계산시 격자의 구성은 조류모형과 같이 하였고 계산 시간 간격은 150sec로 하였다. 와확산계수는 이문진(1991), 황재동(1993) 등이 우리나라 연안 해역에 적합한 값을 추정 한 바 있다. 본 연구에서는 복잡한 해양상태를 고려하여 1 m<sup>2</sup>/sec를 사용하였다. SS의 부하량은 하구의 순유입량을 만경강 2,528,000 m<sup>3</sup>/day, 동진강 1,616,000 m<sup>3</sup>/day로 설정하고, 초기유입농도 만경강 36mg/ℓ, 동진강 22mg/ℓ를 만경강, 동진강에 각각 적용하여 계산하였다. 농어촌진흥공사(1997). SS의 감쇠계수는  $3 \times 10^{-5}$ /sec를 사용하였다.

## 3) 모형의 적용 및 결과

### 가) 현장 관측 결과

현장 관측된 SS의 농도는 농어촌진흥공사에서 시행중인 방조제 예상  
체질선을 기준으로 외해역으로 8개 지점의 관측된 자료를 사용하였다.

표4.3.4의 현장 관측 결과를 보면 소조기 저조때 SS의 농도는 각 측정별로  
외해역으로 가면서 줄어들었고, 3호 방조제(측점:SS5,6)와 4호 방조제 (측  
점:SS7,8)측의 농도가 1호 방조제(측점:SS1,2), 2호 방조제(측점:SS3,4)보  
다 높은 강도를 나타냈다. 이는 저조시 만경강 수계 유향이 4호 방조제 구  
간으로 물리면서 상류의 SS부하가 이 곳으로 이류, 확산되기 때문이다.

표 4.3.4 관측 SS농도

조사측점	조사위치	구분	소조기
SS1	1호 방조제 중앙부에서 외해로 직선거리 1km	고조	18.7
		저조	19.3
SS2	1호 방조제 중앙부에서 외해로 직선거리 2km	고조	11.8
		저조	15.6
SS3	2호 방조제 중앙부에서 외해로 직선거리 1km	고조	19.7
		저조	21.4
SS4	2호 방조제 중앙부에서 외해로 직선거리 2km	고조	10.1
		저조	12.8
SS5	3호 방조제 중앙부에서 외해로 직선거리 1km	고조	17.3
		저조	22.1
SS6	3호 방조제 중앙부에서 외해로 직선거리 2km	고조	18.2
		저조	21.5
SS7	4호 방조제 중앙부에서 외해로 직선거리 1km	고조	18.7
		저조	22.4
SS8	4호 방조제 중앙부에서 외해로 직선거리 2km	고조	19.6
		저조	18.3

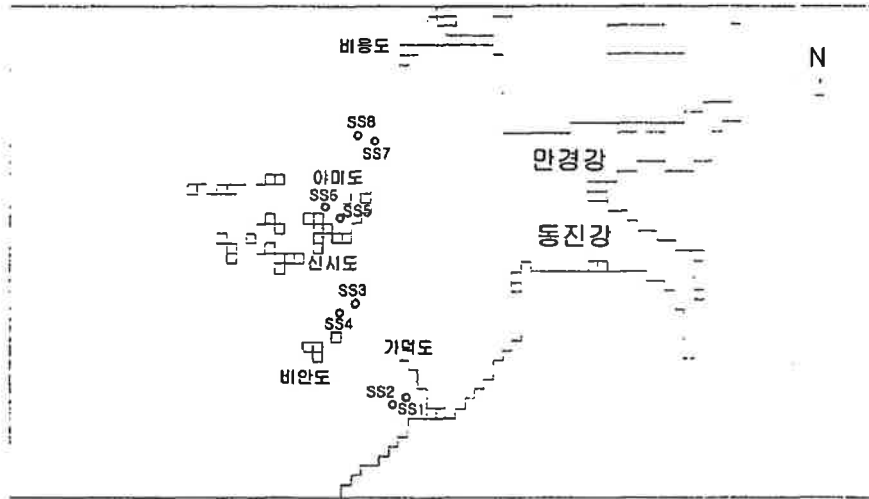


그림 4.3.16 새만금지구 수질조사 위치도

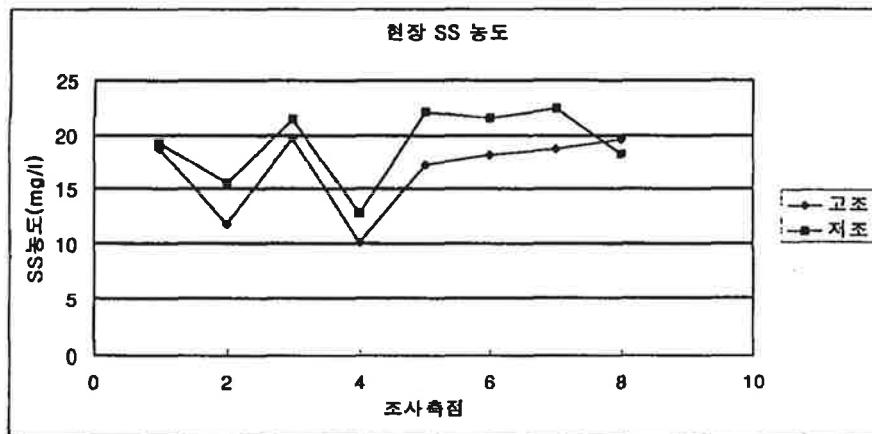


그림 4.3.17 조시(潮時)별 관측 SS농도

#### 나) 모형의 적용

모형의 계산 결과와 현장 실측치를 비교하여 새만금 현장에서의 적용성을 검토하였다. 모형의 적용성 검토는 소조기인 1995년 7월 6일 15:00의 저조 시와 7월 6일 21:00의 고조시 모의 발생 결과를 사용하여 실시하였다.

#### 다) 모의 결과

표 4.3.5와 표 4.3.6을 보면, 부유물질 농도는 확산 모의 결과 저조시 2,3호 방조제 측이 1,4호 방조제 보다 적게 나타나고, 전 지점 18 ~ 20mg/l의 근사한 농도분포를 나타냈다. 이는 분석 대상 측정 구간이 1km로 전체 모의 영역에 비해 너무 짧아서 확산의 차이를 뚜렷하게 나타내지 못했기 때문이다. 고조 밀물시 조류속은 SS 부하 유입 지점인 만경강, 동진강 상류를 향해 점진적으로 증가하는 경향을 나타낸다. 따라서 상류의 SS부하가 저조시 때보다는 해역으로 확산되는 범위가 줄어든 것으로 나타났고, 그만큼 밀물시에는 외해역의 SS 농도분포에 더 많이 영향을 받는다는 것을 추정할 수 있었다.

현장 관측치에서 각 측정점의 SS농도는 썰물 저조일 때가 밀물 고조일 때보다 높게 나타났는데 그림 4.3.18과 그림 4.3.19에 나타낸 등농도 곡선을 보면, 확산 모의 결과에서도 상류의 오염부하 이송 속도가 줄어든 고조때가 저조시 보다 낮은 농도분포를 나타냈다.

표 4.3.5 저조일 때 SS의 관측 농도와 모의 농도

측점	현장실측 SS농도(mg/l)	확산모의 SS농도(mg/l)	Seadike no
SS1	18.7	18	Dike 1
SS2	11.8	18	Dike 1
SS3	19.7	16	Dike 2
SS4	10.1	16	Dike 2
SS5	17.3	16	Dike 3
SS6	18.2	16	Dike 3
SS7	18.7	18	Dike 4
SS8	19.6	18	Dike 4

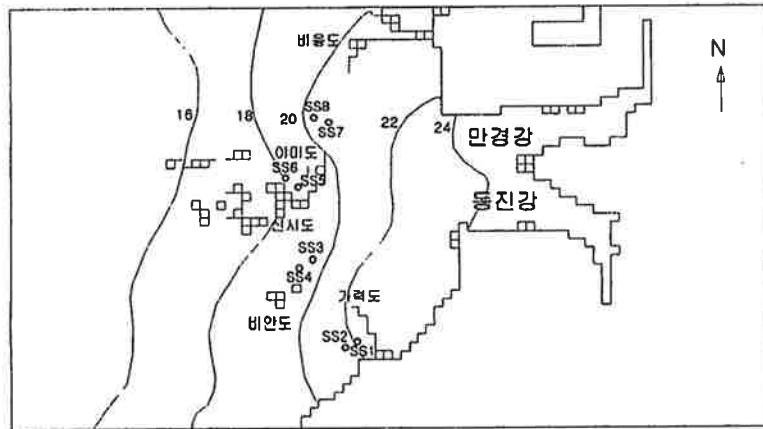


그림 4.3.18 저조위일 때의 등농도 곡선(Low flow)



표 4.3.6 고조일 때 SS의 관측 농도와 모의 농도

측점	현장실측 SS농도(mg/l)	확산모의 SS농도(mg/l)	Seadike no
SS1	19.3	22	Dike 1
SS2	15.6	20	Dike 1
SS3	21.4	18	Dike 2
SS4	12.8	18	Dike 2
SS5	22.1	18	Dike 3
SS6	21.5	18	Dike 3
SS7	22.4	20	Dike 4
SS8	18.3	20	Dike 4

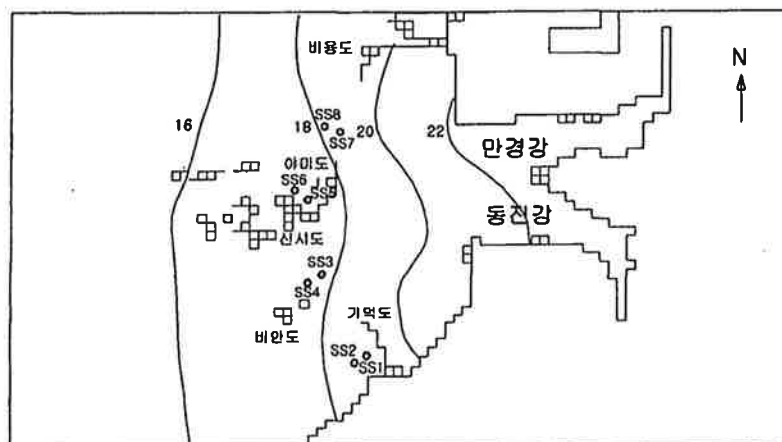


그림 4.3.19 고조위일 때의 등농도 곡선(High flow)

#### 다. 결론

본 연구에서 수질 예측모델을 사용하여 만경강, 동진강에서의 부유물질 부하가 방조제 연안으로 유입되었을 경우 조석에 의해 인접 해역에 미치는 영향을 분석하고 조석 주기에 따른 해역에서의 부유물질 확산 범위와 확산 형태를 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. TRISULA 조류 모형으로부터 조위와 조류속을 입력받아 수질 확산 모형으로 새만금 지구내 SS의 확산을 모의해 적용성을 검토한 결과 측정 자료와 유사한 확산 형태를 보이므로 조석 현상이 있는 연안 해역에서 오염물질 이동을 정성적으로 평가할 수 있었다.
2. TRISULA 조류 모형에서 조도계수  $n=0.018$ , 점성계수  $\mu=1.0\text{m}^2/\text{sec}$ 을 사용하여 조위와 조류속을 계산한 결과 현장 관측값과 잘 일치하므로 수질 확산 모형에 입력자료를 제공하는데 적합한 모형임을 알 수 있었다.
3. 수질 확산 모형에서 와확산계수  $D_x=D_y=1\text{m}^2/\text{sec}$ , 감쇠계수  $\alpha=3 \times 10^{-5}/\text{sec}$ 를 적용하여 SS의 농도를 계산한 결과 16 ~ 22mg/l의 농도 분포를 보이며 현장 관측치와 유사한 확산형태를 보였다.
4. SS 부하 유입 지점인 만경강, 동진강에서 해역으로 유입되는 유속이 감소하는 고조때는 해역으로의 유입 유속이 강한 저조때보다 SS 농도가 더 낮게 나타나므로 새만금 인근 해역의 수질은 만경강, 동진강에서의 오염부하량에 많은 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다.
5. 수질 확산 모의에서 부유물질과 같은 보전성(conservative) 물질은 침강속도를 감쇠계수로 사용한 계산 결과와 현장 관측치가 비교적 유사한 경향을 나타내었다.

## 제 4절 파랑 변형 예측 모형

### 1. 서론

#### 가. 배경

본 연구에서 파랑 모델은 미국 공병단이 개발한 RCPWAVE model, 영국 Wallingford 수리 연구소가 개발한 model 그리고, 새만금 간척종합개발 사업을 통하여 도입된 파랑 변형 예측모형(WAVE)을 비교 분석하였다.

본 연구는 방조제 설계에 채택된 설계파랑의 결정과정과 방법을 검증하고 단면설계 대안을 찾기 위하여 다음의 연구분석을 수행하게 되었다. 특히, 조석간만의 차이가 큰 서해안에서 조위 변화에 따른 파랑의 영향을 결합 확률 개념을 도입하여 검토하였다.

#### 나. 연구 내용

1. 설계 파랑을 검토하기 위하여 적용한 일반 결정 과정과 방법에 대한 검토.
2. 결합확률에 따른 새로운 설계파랑을 결정하여 제시
3. 새로 결정한 설계파랑을 근거로 기 설계된 방조제 단면의 대안이나 피복석 보강 대안을 제시.

## 2. 간척지 해역의 모델링과 설계해면

### 가. 서론

간척사업에서 설계파랑 조건을 설정하고자 할 때 우선 검토가 필요한 사항은 다음과 같다.

- ① 방조제 노선을 따른 파랑의 분포
- ② 천해파랑변형과 주위 섬의 영향
- ③ 대상해역에 부는 바람의 시간적, 공간적 변화
- ④ 큰 파랑과 고조위의 상호 연관성
- ⑤ 현장관측과 예측으로부터 수집한 이용 가능한 자료의 분석 및 활용
- ⑥ 각기 다른 풍향과 파향을 갖는 여러 파랑조건의 비교분석
- ⑦ 단일 해상상태에서 에너지스펙트럼의 주파수 및 방향 범위
- ⑧ 극치분석을 위한 적절한 자료와 효율적인 방법의 이용
- ⑨ 기타 이용가능한 파랑 모델링
- ⑩ 천해파랑변형 모델링에 적용할 해수위와 조위에 따른 파고의 변화
- ⑪ 방조제 노선을 따라 어느 위치에서의 파랑조건에 대한 수심제한
- ⑫ 방조제 축조 후 기존 조수로가 퇴적됨으로서 야기되는 지형변화 때문에 발생할 해저 지형변화의 정도.

해저를 구성하는 세립질의 유사특성과 깊이로 미루어 보아, 심한 파랑의 굴절현상과 부분적 집중현상 때문에 기존의 조수로는 매우 빠르게 퇴적될 것이며, 이 퇴적현상은 방조제를 따라 나타나는 파고분포의 변화를 감소시킬 것이다.

## 나. 파랑 모델링

### 1) 새만금 지역의 특성

본 연구의 대상 지역인 새만금 해역은 한반도 서쪽의 황해에서 발달하여 진입하는 파랑에 직접 노출되어 있다. 해역에서의 바람은 강한 계절적 변화와 함께 비교적 안정되어 있으며, 10월~3월 사이는 강한 북서풍의 지배를 받고 4월~8월 사이에는 남동 내지 남서풍의 비교적 온화한 바람의 영향을 받는다. 그러므로 겨울철의 주 파향은 서향 또는 북서향이고 여름철에는 남서향이다.

방조제는 수심이 낮은 지역과 주위의 섬 때문에 서로 다른 정도의 보호를 받고 있으며 부분적으로 각기 다른 방향을 갖는 몇 개의 구간으로 구분된다.

본 연구에서는 현장 관측자료(1994)와 좀 더 종합적인 모델링기법을 사용하여 최근 당초 설계파랑을 다시 검토하였고, 그 결과 설계조건외 재검토가 필요함을 지적하였다. 특히, 방조제 월파랑 결정에 중요한 요소인 설계파랑의 주기가 너무 작다는 것이 드러났다.

우선 방조제 설계파랑 조건을 유도하기 위해 사용한 방법, 가정 및 자료 등이 적절하였는가 하는 것이 검토되었다. 또한, 연구를 수행하는 동안에 기존 계산값을 검증하고 보완하기 위하여 파랑과 해수위에 대한 모델링을 추가로 수행하였다.

### 2) 검토내용

새만금방조제 사업지구의 서쪽 끝 지점에서, 최대 취송거리와 극치풍속을 근거로 이용하는 SPM(1973)의 브렐슈나이더(Bretschneider)법을 사용하여 설계파랑이 결정되었다. 천해역에서의 파랑변형 과정은 계산에 포함되지 않았으나, 공식 중의 수심항은 수심이 제한되어 있는 지역에서의 파랑추정에 직접 이용할 수 있도록 되어 있다. 브렐슈나이더법을 사용하여 결정된 1000년 빈도 설계파랑은 유의파고( $H_s$ ) 5.2m와 유의파 주기( $T_s$ ) 7.5s 였

다.

설계해수위 +4.52m MSL은 측정한 조위자료를 직접 외삽하여 결정한 것은 아니지만, 나름대로 몇 개의 자료에 근거하여 결정되었다. 설계파랑과 설계해수위는 동시에 발생한다고 가정하였으나, 이것은 어떤 경우의 위험성도 배제할 수 있는 매우 안전측에 드는 가정이다.

당초설계파랑 추정 과정은 앞절에 나열한 12가지 주요 검토사항 중 2가지 (⑧, ⑨)를 반영하고 있다.

농어촌진흥공사 농어촌연구원이 새만금 해역에서 관측한 파랑자료에 따르면 주기가 10초에 이르고, 외해에서의 파고가 7m에 이르는 큰 파랑(비록 연안에서는 20% 정도 줄어들지만)이 기록되었다. 설계파랑 보다 큰 파랑이 관측된 것을 계기로 농어촌연구원은 당초 설계파랑 계산을 재검토하게 되었다(RDC, 1996).

설계파랑 검토를 위한 문헌조사에서, 제 4호 방조제의 설계파랑 조건에 대한 다른 연구기관의 관련 연구기록을 요약 정리하였다. 육군사관학교 화랑대연구소, 서울대학교 해양연구소, 그리고 한국해양연구소등의 연구결과가 포함되어 있다. 세 연구결과 모두 당초 설계파랑 보다 상당히 큰 파고를 제시하였고, 그 중 두 연구기관은 파랑의 주기도 설계파랑의 주기 보다 훨씬 큰 값을 제시하고 있었다.

새로운 파랑 모델링은 외해에서의 파랑을 예측하는 기법으로 당초 설계자가 이용한 방법과 유사한 방법을 적용하였지만, 예측모델을 검정(calibration)하기 위하여 최근 해역에서 관측 수집한 파랑정보를 이용하였다. 검정 방법은 예측값이 관측자료와 좀 더 잘 일치할 수 있도록 각 폭풍(storm)에 대하여 취송거리를 조정한 다음, 대표값을 극치조건에 적용하는 것이었다. 모델에 입력자료로 이용되는 풍속은 모델의 특성에 따라 적용을 위하여 바람 응력으로 환산되었다. 방향에 따른 풍속조정 인자를 적용하는

방법으로 실제 이용한 분석보다 좀더 타당한 검정을 할 수 있었을 것이다.

우선 새만금지구 연안에서의 파랑을 추정하기 위하여 RCPWAVE(미국 해안 공학연구센터) 모델을 기본으로 한 천해파랑변형 모델을 사용하였다. 이 모델은 파랑에 영향을 미치는 대부분의 중요한 파랑변형과정을 포함하고 있고 모델링을 실시하는 전체 지역에 걸쳐 결과를 제공하는 하지만, 일방향 진행파를 사용한다는 점에서 해역상태를 적절히 표현하는 데 제약을 받는다.

RCPWAVE모델을 사용하여 추정한 파랑은 다음 두 가지 결과를 보여 주었다. 즉, 당초 설계파랑과 비교하여 큰 연안파랑 주기와 방조제 노선을 따라 분포하는 파고의 변화다.

연구결과 다시 제시된 설계파랑은 유의파고( $H_s$ )가 5.2~8.0m 범위(방조제 노선에 따라 변화)에 있고 유의파주기( $T_s$ )는 11.6초를 나타내고 있어, 파고 자체는 당초 설계파고 보다 파랑의 주기는 훨씬 크다.

### 3) 모델링의 기본방향

기존 방법과 결과를 개선시키기 위하여 경제적으로 효과적이라고 생각되는 방법을 제시하고, 그 내용을 열거하면 다음과 같다.

- ▶ 이용 가능한 다른 방법 / 바람의 기원 / 파랑자료 / 예측값 개선 / 신뢰도 검증
- ▶ 이용 가능한 보조 연안파랑 변형모델의 이용
- ▶ 방조제 노선을 따라 선정하는 파랑예측지점과 해수위 분포
- ▶ 방조제 노선을 따라 선정한 지점에서의 설계파랑조건과 해수위의 재평가
- ▶ 극치파랑과 고조위 결합확률 분석

본 연구에서는, '가.1'에서 언급한 12가지 주요 검토사항 중 10가지(③)

과 ⑫만 제외)에 대한 사항을 포함하고 있으며, ⑬은 외해에서 관측한 파랑 자료를 이용함으로써 직접적인 방법은 아니지만 간접적으로 고려하고 있다고 할 수 있다.

#### 다. 파랑 모델링의 내용

##### 1) 파랑 모델링 개요

파랑 모델링의 주요 과정은 다음 세 가지로 구성되어 있다.

- ▶ 방조제로부터 멀리 떨어진 지점의 심해파랑과 극치 유도
- ▶ 연근해 섬의 영향과 천해파랑변형을 반영하여, 방조제 노선을 따라 쇄파 대 바로 바깥에 선정하는 몇 개의 지점에서 연안파랑 계산
- ▶ 수심제한조건의 영향과 해수위와의 결합확률을 고려하여, 방조제 노선을 따라 선정한 몇 개의 지점에서 구조물 설계를 위한 파랑 계산

##### 2) 분석에 사용된 파랑관측자료

세만금 해역에서 1991년 12월부터 1997년 3월까지의 파랑관측 자료와 그 중앙질의 3년 관측 자료를 확보하였고, 파랑예측모델로 후측한 좀 더 긴 기간의 자료가 있었다. 파랑관측자료를 이용할 수 있는 중요한 사업지구에서의 설계 파랑 결정과정에 대한 통상적인 방법은, 관측자료 자체를 이용할 뿐만 아니라 자료를 수치모델의 검증(validation)자료로도 이용하는 것이다.

농어촌진흥공사가 말도에서 관측한 파랑자료는 1991년 12월 22일부터 1997년 3월 21일까지의 시간별 파고 및 주기를 표시하는 기록(약 60%의 회수율)과 1993~1995년 3년 동안의 디지털 기록(약 50%의 회수율)을 포함하고 있다. 파향은 기록되지 않았다. 이 자료는 농어촌연구원에서 설계파랑을 검토할 때 검정(calibration)과 검증(validation)자료로 이용된 바 있고, 본 연구에서도 동일한 목적으로 사용되었다.



### 3) 심해파랑의 계산

한국해양연구소(KORDI)는 최근 한국 해역에서의 장기파랑을 후측하는 모델 WAM을 개발하고, 이 모델을 이용하여 후측한 장기(1986~1995)자료를 사용할 수 있도록 해 주었다. 제 3세대 모델인 파랑생성과 소멸 모델은 시·공간적으로 변화하는 현장의 풍역을 사용한다는 장점을 가지고 있다. 이 자료는 동 해역에서의 여러 가지 다르게 나타나는 기상상태를 포함하여, 해상풍과 심해파랑 조건에 대하여 훌륭한 자료를 제공하고 있다. 자료는 계절별 혹은 년별로 분석되어, 유의파고와 평균주기 및 방향 등의 형태로 제공되었다.

영국기상청(UK Met Office)의 파랑모델자료는 KORDI가 사용한 모델과 비슷한 유형의 모델을 사용하여 작성한 자료이나, WAM 모델 보다 간격이 큰 격자를 가진 제 2세대 후측 모델을 사용한 것이다.

JONSEY 파랑예측모델 또한 새만금지구 외해의 한 지점에서 파랑을 계산하는 데 사용되었다. 이 모델은 대상해역의 형상과 크기를 반영하여, 어느 특정한 바람/파랑조건에 대한 방향스펙트럼을 제공한다.

새만금 해역에서의 파랑조건에는 일반적으로 받아들여지는 두 가지 가정이 있다. 즉, 여름철 남서향의 파랑은 파고는 낮으나 높은 해수위 상태에서 발생하고, 반대로 북서향의 겨울철 파랑은 파고는 높으나 이상조위(surge)와는 상관성이 없는 경향이 있다는 것이다. 파랑모델링에 이어서 수행한 파랑과 해수위 사이의 결합확률분석은 이 두가지 형태의 특징적인 파랑집단으로 구분하여 시행하였다.

### 4) 연안역에서의 파랑

연안역에서의 천해파랑변형 모델링을 대략 중요도 순으로 나열해 보면 다음과 같다.

- ▶ 방조제 바로 바깥에 산재해 있는 섬에 의한 영향
- ▶ 방조제 노선을 따라 각기 다른 외해쪽 개방도와 수심의 영향
- ▶ 한반도 서해 개방된 해역에서 발생하는 파랑조건의 3차원적 특성과 변화 현상
- ▶ 수심에 의한 굴절
- ▶ 섬 배후에서의 파랑생성
- ▶ 섬 주위에서의 회절
- ▶ 조류에 의한 굴절
- ▶ 천수효과

하나의 파랑 모델로 위에 나열한 모든 현상을 고려하여 해석할 수는 없다. 또한, 어느 한 가지 특성을 포함시키느냐 하지 않느냐 하는 것은(예를 들어 조류), 부분적으로는 이용 가능한 자료의 질과 양에 달려있다.

그러므로 본 연구는 주어진 기간 내에 가장 경제적인 방법으로 원하는 결과를 얻을 수 있도록 하는 방법을 채택하였다.

- ▶ 방조제 바로 바깥에 산재해 있는 섬에 의한 영향
- ▶ 방조제 노선을 따라 각기 다른 외해쪽 개방도와 수심의 영향
- ▶ 한반도 서해 개방된 해역에서 발생하는 파랑조건의 3차원적 특성과 변화 현상
- ▶ 수심에 의한 굴절
- ▶ 섬 배후에서의 파랑생성
- ▶ 천수효과

돌출부 주위에서의 회절은 섬 바로 뒤편에서 가장 큰 영향을 받는 경향이 있으므로 전체 모델링과 관련해서는 아주 지역적인 문제로 생각할 수 있다. 파봉을 따라 일어나는 약한 회절은 일방향 단순파랑 모델의 경우와 달리 임의파랑 모델에서는 크게 중요하지 않다(파랑 에너지의 공간적 피크는 횡방향으로 퍼지는 경

향이 있음). 그러므로 본 연구에서는 회절현상에 대한 전체적인 모델링 대신에 한 두 가지 경우에 대해서만 수계산으로 검토하였다.

#### 5) 구조물 위치에서의 파랑

쇄파대 외측과 구조물 위치에 도달하는 파랑 사이에서 고려되는 주된 파랑변형 효과는 파랑이 부서지는(바닥마찰 포함) 쇄파대 내에서의 전파과정이다. 해수위, 해수위와 파랑의 결합확률 및 방조제 근고공 부위에서의 수심제한 효과 등이 또한 중요한 문제가 될 것이다.

### 라. 파랑모델링 결과

#### 1) 자료의 비교

외해 파랑 조건을 추정하기에 앞서 우선 서로 다른 5가지의 외해 파랑자료를 비교 분석하였다.

- ▶ 말도에서 관측된 파랑자료
- ▶ 한국해양연구소 WAM 모델에 의해 No. 2831에서 후측된 자료
- ▶ 기 설계된 설계파랑 조건
- ▶ 농어촌연구원(1996)에 의해 검토된 파랑조건
- ▶ 영국 기상청 파랑모델에 의해 35.3° N, 124.7° E 과 35.4° N, 125.6° E 지점에서 후측한 파랑자료

표4.4.1은 각 자료를 비교해 놓은 표로 정리가 가능한 자료(말도, KORDI, UKMO)는 관측기간 중 10%와 1%를 초과하는 파랑의 파고와 주기를 나타내었다. 또한, 1000년 빈도의 극치파랑조건이 이용 가능한 자료(기존 설계 및 연구원)를 표시하였다.

각 자료 사이의 비교 결과 두 가지 점을 제외하고는 대체로 일관성이 있다. 그 첫 번째는 UKMO모델에 의한 파고는 다른 모든 자료보다 약 50% 정도 높아 자료의 대표성 부족으로 무시하였다. 이 자료의 값이 큰 이유

는 모델의 격자점이 다른 자료에 비해 개방된 외해로 훨씬 멀리 위치하여, 남쪽과 남서쪽 방향의 파랑을 모두 포함하고 있기 때문으로 생각된다.

## 2) 외해파랑 추정과 극한값

말도와 WAM 모델의 유의파고  $H_s$ 에 대한 여름(4월~9월)과 겨울(10월~3월) 및 전체 분포도는 자료에서 직접 얻을 수 있었다. 말도의 경우, 제공된 모든 디지털자료를 이용하였으나, 파고의 상위 몇 %에 해당되는 자료는 기록지 자료를 참고하여 재조정하였다. WAM 모델 자료의 경우, 여름과 겨울철로 나누어 직접 정리되어 있는 대신, 방향별로 E-WSW 파향이 여름철 파랑을 대표하고 있었으며 W-ENE 파향이 겨울철을 대표하는 것으로 사용되었다. 두 자료 사이에는 놀라운 정도의 일관성이 있었으며 그 결과를 표 4.4.2에 요약해 놓았다.

재현기간으로 표현되는 극치값을 얻기 위하여 대응하는 확률로 변환시킬 수 있는 재현기간에 해당하는 파랑의 지속시간을 선정할 필요가 있다. 본 연구에서는 두 가지 지속시간을 선정하였다. 하나는 극치분석에 흔히 이용되며 폭풍지속시간의 대표적인 값이라고 할 수 있는 표준 3시간 지속시간이다. 다른 하나는 12시간 지속시간으로, 이 자료는 높은 파랑이 고조위와 함께 발생한다는 가정 아래 결합확률분석에 필요한 자료이다.

재현기간이 1, 10, 100, 500, 1000년인 3시간 지속파랑과 함께 유의파고가 10%와 1%를 초과하는 자료도 나타내었다. 표 4.4.3과 그림 4.4.2는 자료를 정리해 놓은 표와 그림이다(12시간 지속파랑은 표 4.4.3의 괄호 속에 표시하였다).

남쪽 방향(E~WSW)에 해당되는 파랑의 WAM자료에 의하면 대략 SSW, SW 및 WSW 방향에 걸쳐 균등하게 분포해 있고, 북쪽 방향(W~ENE)에 해당하는 높은 파랑은 NW와 WNW 방향에 분포해 있음을 알 수 있었다. 그러므로, 새만금해역의 해안선 형태로부터도 예상할 수 있듯이, 여름철(남쪽 파향) 파랑

은  $210^{\circ}$  N,  $230^{\circ}$  N, 또는  $250^{\circ}$  N의 방향에서 균등하게 진입해 들어오는 것으로 가정하였고, 겨울철(북쪽 파향) 파랑은  $290^{\circ}$  N 또는  $315^{\circ}$  N의 방향에서 전파해 오는 것으로 가정하였다. 표 4.4.3의 주석에 이 부분의 설명을 부기해 놓았다.

### 3) 외해 다방향스펙트럼 모의분석 모델 JONSEY

표 4.4.3의 외해 파랑조건은 유의파고( $H_s$ ), 평균주기( $T_s$ ) 및 방향( $\theta$ )으로 표현하고 있다. 파랑변형모델인 OUTRAY는 외해 파랑조건을 입력자료로 여러 가지 주파수와 방향성분으로 에너지 분포를 표현하는 다방향스펙트럼을 필요로 한다. 모델 JONSEY가 필요한 40가지 경우(여름철 3가지 및 겨울철 2가지 파향에 대한 각 경우의 8가지 재현기간)의 외해 파랑조건에 대한 각각의 스펙트럼을 계산하기 위하여 사용되었다.

취송거리는 방조제 밖 외해의 한 지점에서 서해의 파랑역 형상과 크기에 따라 측정하였다. 그 다음 각 파랑조건에 대하여, 모델은 요구되는  $H_s$ ,  $T_s$  및  $\theta$ 에 대한 적절한 바람조건을 결정하였고, 파향  $10^{\circ}$  간격과 주기 1초 간격의 대응하는 파랑에너지 스펙트럼을 계산하였다. 이와 같이 결정된 스펙트럼을 다음의 파랑변형모델의 입력자료로 사용하였다.

## 마. 파랑모델링 결과

### 1) 파랑변형모델의 수립

모델 OUTRAY는 수심 약 30m인 외해쪽까지 방조제와 섬근해 지역을 포함하여 계산하였다. 효율적인 계산을 위하여 외해에서는 큰 격자를 사용하였고, 굴절의 효과가 커지게 되는 방조제 부근에서는 좀 더 작은 격자를 사용하였다. 모델에 사용된 해저지형은 방조제 공사전의 조건이며,

따라서 방조제 자체는 모델링에 포함되지 않았다.

모델링 구역은 동서쪽으로 31km, 남북 방향으로 50km를 덮고 있다. 수심을 입력한 격자점의 총 수는 약 40,000개였고, x축은 동쪽으로 y축은 북쪽 방향을 향한다. 아래 표는 사용된 격자시스템을 요약해 놓은 것이다.

Grid Number	Distance between grid points (m)		Number of grid points	
	X	Y	Columns	Rows
1	300	300	29	166
2	300	300	111	175
3	100	100	29	175
4	100	100	29	175
5	300	300	111	46

표의 칸(column)은 y축과 평행하고 줄(row)은 x축에 평행하다.

스펙트럼을 나누기 위해 선택한 파랑의 주기는 JONSEY 모델에 적용한 것과 같은 값인 1초 간격의 3.0~17.0초 사이로 결정하였다. 파향선은 연안에 선정한 각 예측점으로부터 바깥 외해쪽을 향하여 주어진 추적각에 따라 역방향으로 추적(backward tracing)해 간다. 다음 표는 파랑의 주기에 따라 적용한 파향선 추적각을 요약해 놓은 것이다.

Wave periods (s)	3 ~ 6	7 ~ 9	10 ~ 17
Ray spacing (°)	1.0	0.5	0.25

파랑을 예측하기 위하여 방조제 쇄파대 바로 밖의 연안에 선정한 10개의 지점은 그림 4.4.1에 표시되어 있다. 연안파랑 예측점에 붙인 번호는, 예

를 들어 Dyke Number 4 Point 3는 제 4호 방조제를 따라 북쪽으로 3번째 예측점이라는 것을 나타낸다.

## 2) 파랑변형 모델의 계산결과

표 4.4.4~4.4.13은 각각 선정한 10개의 지점에서 계산된 파랑계산 결과를 보여주고 있다. 외해파랑과 마찬가지로 수심에 대한 영향을 고려하지 않은 3시간 지속시간의 극치파랑 계산결과를 나타내었다. 괄호 속의 숫자는 이어지는 결합확률분석에 사용할 12시간 지속시간의 극치값이다. 주의할 점은:

▶ 표 4.4.4~4.4.13에서 재현기간 0.3년과 0.03년을 가지는 3시간 극치값은 각각 0.1%와 1%의 외해파랑 조건에 해당한다.

▶ 재현기간 0.03년을 가지는 12시간 극치값은 일년에 약 400시간(=12/0.03)을 초과할 조건, 즉 1년 중 총 시간의 약 4.5%에 해당하는 조건이다.

▶ 모델 OUTRAY는 쇄파를 고려하지 않고 있는 모델이며, 표 4.4.4~4.4.13에 \*로 표시된 극치파랑조건은 연안 예측지점에 파랑이 도달하기 전에 쇄파가 시작될 것이라는 것을 나타낸다.

열 개의 예측지점 모두에서 설계해수위가 재현기간 1,000년일 때, 쇄파가 되지 않은 상태의 파고를 표 4.4.14 칸 1, 2, 4에 요약해 놓았다(칸 3은 4)에서 설명한 바와 같이 방조제 끝단에서의 파고를 나타낸다).

1000년 빈도의 파랑조건은 제 1, 2호 방조제에서 좀 더 낮고, 제 2호 방조제 북쪽 부분과 제 3호 방조제에서 제일 낮다.

## 3) 회절, 지역적 파랑생성 및 수심의 영향

주변의 섬들로 잘 보호받고 있는 지역의 배후에서는 한정된 지역에서의 파랑생성이 중요하게 작용하는 경우가 있다. 이 조건을 검토해 보기 위해

제 2호 방조제 2번 지점에서의 북서향 파랑조건을 선정하였다. 지역 JONSEY 모델의 입력자료로 파랑예측지점으로 부터 주변 섬까지 방사상으로 각각의 취송거리를 측정하였고, 바람조건은 외해 파랑을 계산할 때 JONSEY 모델에 사용하였던 북서향의 조건을 다시 사용하였다. 이 계산으로부터 구한 1000년 빈도 파고는 0.8m 였고, 외해에서 진입하는 굴절된 파랑에너지에 합할 경우의 파고 증가는 0.6%에 지나지 않았다. 표4.4.6은 상기 계산을 요약한 표이며, 파고 계산에 섬 배후에서 생성되는 파랑을 포함시키는 것이 계산결과에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알았다. 그러므로 이후 다른 지점에서의 파고계산에는 더 이상 고려하지 않았다.

표 4.4.7은 계산을 요약한 표이며, 파고 계산에 회절의 영향을 포함시키는 것이 계산결과에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 설명하고 있다.

해수위 변화에 대한 모델 OUTRAY의 민감도 분석을 위하여 제 4호 방조제 2번 지점을 선정하고, 설계해수위 4.52m MSL외에 -2.2m MSL과 0.0m MSL일 때의 수심조건에 대하여도 계산하였다. 표4.4.10에서 보여주는 계산결과는 모델 OUTRAY로 예측한 쇄파 파랑조건에 대한 해수위 변화의 영향이 상당히 작음을 알 수 있다.

#### 4) 설계해수위 4.52m MSL에서의 방조제 파랑조건

##### 파랑모델링 결과

방조제 위치에서의 설계파랑 조건 및 피복석 안정이나 월파랑 계산을 수행하기 전에, OUTRAY 모델로 계산한 예측지점에서의 파랑을 방조제까지 짧은 거리 내에서의 변형 계산이 필요하다.

완만하고 편평한 경사위에서의 쇄파는 그림 4.4.3에 도시한 쇄파곡선을 사용하여 계산할 수 있다. 이 곡선은 쇄파된 파고와 수심 사이의 비인 쇄파비( $\gamma$ )를 해저바닥경사( $m_f$ ), 구조물 끝단에서의 수심( $d_s$ ) 및 파랑 주기의 함수로 나타내고 있다. 곡선 상에서의 최소값은 약 0.52를 보이나, 보통



수계산에서의 실제 응용에서는 파랑 set-up에 의한 해안에서의 수위상승을 고려하여 최소값으로 0.55를 사용한다.

각 OUTRAY 계산지점에 대하여, 방조제에 수직한 선을 따라 해저바닥종단을 그리고 그 지점에서 MSL 기준으로 바닥표고를 구하였다. 설계해수위인 4.52m를 수심에 더한 다음, 쇄파곡선으로부터 수심제한파고를 추정하였다. 표 4.4.14의 세 번째 칸은 방조제 끝단에서의 수심제한파고와, 수심에 따라 천수변형된 OUTRAY 계산파고 중 작은 값을 보여주고 있다. 표의 네 번째 칸에 표시된 파랑의 주기는 OUTRAY 계산지점에서의 주기와 같은 것으로 가정하였다.

#### 바. 결합확률분석을 통한 설계해수위 계산

##### 1) 조위

기준수준면은 평균해수면(0.0m MSL)이다. 하지만 해도상의 기준수준면은 약최저간조위로 평균해면을 기준으로 할 때 지역적으로 차이가 있다. 저조위, 고조위, 극조위의 분석평가는 그림 4.4.1에 나타낸 군산외항과 위도관측소에서 측정한 자료로, 3년간의 디지털 포맷 조위관측자료를 근거로 하였다. 이 지역의 대조차는 약 6m이며 새만금지구에 대해 일반적으로 인정되고 있는 조위는 아래와 같다.

▶ 평균 저조위	-2.20m MSL
▶ 대조 평균저조위	-2.96m MSL
▶ 설계해수위	4.52m MSL

제 1호와 2호 방조제는 여름철 남서향의 높은 파랑조건을 형성할 것으로

기대하였기 때문에 위도에서의 조위 관측 자료를 사용하였으며, 겨울철에는 군산측 자료가 대표성을 보일 것으로 생각되어 제 3호와 4호 방조제는 군산의 자료를 사용하였다. 각각 2개의 자료집단을 각각 두 개의 3개년 자료로부터 분리하였다. 군산측에 대하여, 겨울철(10월~3월) 조위자료를 분리하였으며 또한 말도에서 3년 동안 관측한 디지털 자료로부터 같은 기간의 파랑자료를 분리하였다. 같은 방법을 위도자료에도 동일하게 적용하였다. 두 개 3개년 자료의 상위 5%와 4개 부분집단의 상위 7.5%를 아래의 일반화된 Pareto 분포를 사용하여 도정한 다음, 극치값으로 외삽하였다. 분석자료를 검토하기 전에는 최고해수면은 여름철에 발생할 것으로 예상하였다.

$$F(X) = 1 - \lambda \left\{ 1 + \frac{\xi(x-u)}{\sigma} \right\}^{-\frac{1}{\xi}} \quad (x > u)$$

여기서  $\lambda = \Pr(X > u)$  (0.05 혹은 0.75) 이며,  $\xi$ 와  $\sigma$ 는 결정되어야 할 미지수이다.

자료 분석결과 군산과 위도 두 지점 모두에서 파랑과 겹쳐지는 기간이 더 긴 기간의 조위자료를 대표하고 있다.

설계해수위는 세 가지 계산값의 합 즉, 대조평균만조위, 장기 관측된 이상고조위 및 바람에 의한 해수면상승을 계산하여 더한 값으로 하였다. 기존 4.52m MSL의 설계해수위가 타당한 값으로 널리 인정되고 있기 때문에, 본 공동연구에서도 그 값을 그대로 1000년 빈도값으로 인정하여 사용하였고, 여름철에 발생한다고 가정하였다. 반면에, 겨울철의 극치해수위는 주어진 자료를 직접 분석하여 결정한 값으로, 1000년 빈도 해수위는 4.07m MSL 이었다.

## 2) 높은 파랑과 고조위의 결합확률

결합확률 분석은 동시에 발생한 일련의 해수위 자료와 파랑자료의 상관 관계를 통계 분석한 것이다. 상관관계는 파랑과 이상조위의 원인이 되는 폭풍과 같은 기상효과와, 파고와 어느 특정한 해수면을 연결시키는 수리적 효과에 기인할 수 있다.

자료분석 과정은 다음과 같다.

- ▶ 파고의 상위 7.5%와 해수위자료의 상위 7.5%를 일반화된 Pareto 분포에 적용(하위 92.5%는 주어진 자료의 분포에 따르는 것으로 가정)
- ▶ 파고의 상위 7.5%에 대한 파형경사를 표준정규분포(비록 파형 경사가 본 분석과 관련이 없지만)에 적용 (하위 92.5%는 주어진 자료의 분포에 따르는 것으로 가정)
- ▶ 실제 파고와 해수위 자료를 등가의 Bi-Variate 정규분포로 환산
- ▶ 여러가지 다른 분석 한계치(threshold levels)에 대한 파고와 해수위 사이의 상관관계 결정

적용한 분포와 장기간의 자료를 바탕으로 한 한계치를 기초로, 각 자료의 조합치에 대하여 다음 과정을 거쳐 10000년 자료집단을 만든다.

- ▶ 난수(random number) 발생법을 이용하여 적용된 분포(상위 7.5%) 또는 실제자료(하위 92.5%)로부터 파고를 선정
- ▶ 난수발생법을 이용하여, 선정한 파고에 대한 파형경사 분포(상위 7.5%) 또는 실제자료(하위 92.5%)로부터 파랑의 주기를 선정
- ▶ 난수발생법을 이용하여, 선정한 파고에 의해 제한을 받고 있는 해수위 분포(상위 7.5%) 또는 실제자료(하위 92.5%)로부터 해수위를 선정
- ▶ 파고와 해수위에 대한 Bi-Variate 정규분포를 이용하여 실제값으로 변환
- ▶ 장기자료를 기초로 설정한 극치값에 일치하는 값을 다시 결정한다.

### 3) 결합확률분석 결과

당초 제공된 자료집단에서 조위에 대한 파고의 개별 조합이 산포도(scatter diagram)의 형태로 그림 4.4.4(겨울철)과 그림 4.4.5(여름)에 도식화 되어있다. 만일 두 변수들이 서로 양(positive)의 상관관계에 있다면 도표상의 점은 왼쪽아래에서 오른쪽 위를 향하는 형태의 경향을 보일 것이다. 두 도표에서 명백하게 나타나는 일정한 경향은 보이지 않으며, 시각적으로 판단한 일반적 경향은 조위와 파고의 상관관계는 존재하지 않는다는 것이다.

결합확률분석 프로그램으로 수행한 통계분석은 두 자료집단 모두 미약하나마 파고와 해수위 사이에 음(negative)의 상관관계가 있음을 보여주고 있다. 이 경향은 모든 경우에 대하여, 즉 모든 자료를 한꺼번에 고려하거나, 상위 50% 또는 상위 10%등에 대한 분석에 대하여도 같은 경향을 보인다는 것이다. 겨울철 자료에 대한 상관계수는 약 -0.13의 상수로 어떤 기준계치를 사용하여도 거의 동일한 값을 보였다. 여름철 자료의 상관계수는 전체 자료에 대해서는 -0.05이고 상위1/3에 대해서는 -0.2까지 어느정도 다양한 값을 보였다. 그림 4.4.4와 그림 4.4.5를 조금 주의해 보면 그와 같은 경향을 알아볼 수 있다. 만일 이 결론이 사실이라면, 그 의미는, 해수위에 대한 사전 정보가 없을 경우, 높은 해수위 상태일 수록 높은 파고가 발생할 확률은 더욱 작아진다는 것이다.

음의 상관관계에 있는 두 변수의 관계(비록 최적의 분석결과라 하더라도), 특히 짧은 기간의 자료를 분석하여 얻은 결과일 경우에는 적용할 때 세심한 주의를 필요로 한다. 본 연구에서는 두 가지 경우를 상정하여 검토하였는데, 첫째는 자료를 분석하여 얻은 최적의 상관계수를 그대로 이용하는 것이고, 또 하나는 두 변수가 독립이라고 가정한 것이었다. 겨울철 상관계수는 -0.13과 0.0을 사용하였고 여름철 상관계수로는 -0.18과 0.0을 사

용하였다.

비교적 짧은 기간의 자료 분포도를 적용하기 위하여 다음 과정의 극한치 재조정과정을 거쳐 자료를 적용하였다.

▶ 파고는 표4.4.3의 괄호에 주어진 12시간 지속 외해파랑 극한값에 일치하도록 조정하였다.

▶ 겨울철 해수위는 3년 동안 관측된 자료에 근거한 극치와 일치하도록 재조정하였다.

▶ 여름철 해수위는 낮은 재현기간에 대하여 실제 관측된 자료와, 1000년 재현기간은 설계해수위인 4.52m MSL의 조건에 맞추어 극치와 일치하도록 재조정하였다.

파고와 해수위 극한값의 조합은 겨울과 여름철의 경우에 대하여 각각 독립적인 경우와 음의 상관관계에 있는 경우 등 4개의 자료집단으로부터 결정하였다.

분석결과 두 변수가 독립적으로 발생한다고 가정하여 분석한 것을 사용하는 것이 좋을 것으로 생각된다. 그 경우라면, 두 변수 각각의 극한확률 곱으로 표현되는 결합확률을 기초로 적절한 파고와 해수위의 조합을 결정하는 정확한 해석적 방법이 있다. 예를 들어 여름동안 1년의 재현기간을 가지는 고조위 발생확률은 여름기간 동안의 총 고조위 발생 횟수 중 1번 일어날 확률이므로  $1/354 = 0.0028$  이다. 따라서 재현기간 10년의 파랑과 1년의 고조위가 한꺼번에 일어날 결합확률은  $0.0028 \times 0.00028 = 0.00000078$  또는 3600년에 1회 발생한다.

표 4.4.16은 두 변수가 독립이라고 가정하고 한계재현기간으로 표시한 파고와 조위의 조합을 나타낸다. 표에 따르면 0.1년의 재현기간을 가진 파랑은 28년의 재현기간을 가지 조위와 평균적으로 1,000년에 1회 동시에 발생할 가능성이 있다. 어느 특정지점에 대하여 이 조합을 실제 파랑조건과 해

수위 값으로 변환시키려면 표 4.4.4~4.4.15에 있는 극한값 예상치를 사용하면 된다. 우선 어느 예측지점과 변수 및 계절에 대하여 해당되는 표를 선택한 다음, 극한 재현기간(표 4.4.16으로부터)을 상응하는 해면상태의 값으로 변환시킨다. 파랑 조건의 경우, 12시간 지속기간 예측값(표 4.4.4~4.4.13의 괄호안에 표시)을 사용하는 것이 좋다.

표 4.4.16에 짝을 이룬 파랑과 해수위에 대한 모든 조합은 같은 결합재현기간을 가지고 있는 것으로, 평균적으로 1000년에 1회 발생할 확률이다. 따라서 어떤 특정 구조적 계산에서, 구체적으로 나타나지 않은 어떤 중간값을 사용한 조합과 함께, 주어진 결합재현기간에 대하여 잠재적으로 위험한 경우로 모두 고려해야 한다.

표 4.4.17~4.4.20은 각 연안에서의 파랑 예측지점에 적용한 결합확률 분석결과(각 방조제 별로)를 보여주고 있다. 각 예측점에 대하여 결합재현기간 1000년에 해당하는 파랑과 조위의 조합을, 예측지점과 방조제 끝단, 3시간 지속시간과 12시간 지속시간 파랑을 구분하여 나타내고 있다.

표 4.4.16의 결과를 적용하는 어떻게 적용할 것인가의 예로, 제 4호 방조제 3번 지점(표 4.4.20의 중앙)의 실제 파랑과 조위의 조합을 어떻게 이끌어 내었는가 하는 예를 들어보자. 표 4.4.20의 칸 1과 3은 표 4.4.16의 한계재현기간을 다시 써 놓은 것이다. 표 4.4.15의 2번째 칸은, 조위에 대한 한계재현기간을 표 4.4.20의 2번째 칸에 있는 군산에서의 상응하는 실제값으로 변환시키기 위하여 사용되었다. 유사한 방법으로, 표 4.4.11의 4, 5번째 칸의 숫자는 제 4호 방조제 3번 지점의 OUTRAY점에 대해 상응하는 실제 파랑조건을 찾기 위하여 사용되었고, 그 결과를 표 4.4.20의 4번째 칸과 7번째 칸에 나타내었다. 표 4.4.20의 각 칸에 대한 윗쪽 2줄은, 해수위의 한계재현기간이 낮은 조위의 극치값을 표현하는 저조위 대응값을 표시해 주고 있다. OUTRAY 지점에서의 파고는 표 4.4.17~4.4.20에

비쇄파조건으로 인용되었으나, 쇄파가 일어날 것으로 예상되는 지점은 \* 로 표시하였다.

표 4.4.17~4.4.20의 8~11번째 칸은 파랑이 방조제 끝단까지 전파해 오는 경험하게 되는 천수변형과 쇄파변형을 고려한 파랑조건을 보여주고 있다. 각각의 계산은 해수위를 고려한 그 지점에서의 수심과 방조제 끝단의 표고에 대하여 수행한 것이다.

표 4.4.16~4.4.20은 조위에 따라 변화하는 일련의 구조적 계산에 사용하기 위해 결정하는 주어진 결합재현기간을 가진 파랑조건과 조위의 실제 조합을 보여주고 있다. 표 4.4.3~4.4.14의 값은 조위와는 관련 없이 단지 파랑의 극치에 근거를 두어야 한다.

표 4.4.14는 가정한 해수위 4.52m MSL에서의 1000년 빈도 파랑조건에 대한 방조제 도달파고를 보여주고 있다. 결합확률분석은 이 해수위에 대한 조합이 매우 안전측에 있음을 보여주고 있으며, 실제로는 훨씬 낮은 해수위 조건이 현실적임을 나타낸다. 표 4.4.21은 파랑과 해수위가 서로 독립이라는 가정에 근거를 두고 방조제 위치에서 계산한 결과를 포함하고 있다. 이제 1,000년 빈도의 파랑조건이 단지 2.8m의 조위에서 발생될 것으로 예상되므로, 표 4.4.18의 2번째 칸은 (필요할 경우) 이 조위에 대한 새로운 수심제한조건의 파랑을 보여주는 것이다. 그러나 1000년 빈도의 파고가 수심제한조건인 장소에서, 표 4.4.16~4.4.20을 근거로 한 다른 조건(즉, 낮은 외해파고와 높은 해수위)의 조합이 구조물에 더 나쁜 경우가 될 수도 있다.

표 4.4.21의 3번째 칸은 파고와 조위의 조합 중 가장 악조건에 해당하는 방조제 끝단에서의 파고(그때의 조위와 함께)를 보여주고 있다. 이 결과는 해면상태 모델링 프로그램의 전반적인 결과를 보여주는 것으로, 구조물 위치에서의 설계 파랑조건을 가장 잘 나타내는 것이다.

## 사. 결 론

방조제 설계를 위하여 제 1차적 수리적 조건인 파랑을 포함한 해면상태를 결정할 때는 일반적으로 3가지의 계산 및 예측과정을 거쳐야 한다.

즉, 심해파랑의 결정, 천해파랑 변형 및 파랑과 고조위와의 결합확률 분석이다. 그외 4번째로, 쇄파의 효과를 포함하여, 방조제 근고공(toe)에 직접 영향을 미치는 파랑의 변형을 생각할 수 있다. 쇄파를 고려한 파랑 변형을 계산하기 위하여 사용할 예정이었던 모델은 검토과정에서 방조제 전면 해저경사가 너무 완만하고 수심이 낮은 지역에서는 부적합한 것으로 판명되었고, 대안으로 쇄파설계곡선을 사용하는 것이 보다 적절한 것으로 생각되었다.

세만금해역에 결합확률 분석 기법을 적용한 결과 기존 방조제 설계에 적용한 설계해면의 위치(+4.52m MSL)는 매우 높게 설정되었다. 농어촌진흥공사에서 제공한 조위자료를 직접 분석하여 계산한 1000년 빈도 극치해면은 기존 설계해면의 위치 보다 약 0.5m 낮은 값을 보여 주었다. 또한, 고조위와 극치파랑 사이의 결합확률 분석은 두 변수가 미약하나마 음의 상관관계(negative correlation)에 있음을 보여 주었다. 그러나 이와 같은 결과는 단지 3년 동안의 짧은 기간의 자료만을 분석한 결과이기 때문일 수도 있다. 그러므로 극치해수위를 상향 조정하여 기존의 설계해수면 위치와 동일하도록 조정하였고, 고조위와 극치파랑의 상관관계는 서로 독립(independence)이라고 가정하였다.

표 4.4.17~4.4.20에 주어진 결합확률 분석결과는 1000년 빈도의 파랑이 올 수 있는 해수위는 설계 해수면의 위치 보다 약 1.5m 정도 낮음을 나타내고 있다.

결론적으로, 조석 간만의 차이가 큰 서해안의 간척지에서 설계 파랑은 조위 예측 모델과 파랑 변형 모델에 의한 결합확률 분포에 의하여 설계 하므로서



합리적인 구조물 설계와 연안의 파랑 내습에 대처할 수 있을 것으로 전망된다.

표 4.4.1 Comparison between different sources of offshore wave data

Source of data	Distance off dykes	Number of years of data	Significant wave height(m);period(s)				1000 year	Approx. relative value
			Summer		Winter			
			10%	1%	10%	1%		
Maldo measured	20km	3	1.2; T <sub>z</sub> =5	2.5; T <sub>z</sub> =6	1.8; T <sub>z</sub> =5	3.7; T <sub>z</sub> =7	10	
KORDI (1998)	20km	10	1.35; T <sub>z</sub> =7	2.2; T <sub>z</sub> =71/2	2.05; T <sub>z</sub> =71/2	3.2; T <sub>z</sub> =9	7	
Design wave	0					5.2; T <sub>z</sub> =71/2	5	
RDC (1996)	0					5.2-8.0 T <sub>z</sub> =111/2	6	
UKMO model	100km (over exposed)	10	2.0; T <sub>z</sub> =61/2	4.0; T <sub>z</sub> =71/2	3.0; T <sub>z</sub> =7	5.5 T <sub>z</sub> = 91/2	2	

표 4.4.2 Distribution of wave height at Maldo and from the WAM model

H <sub>s</sub> range	Number (or %) of significant wave height records								
	Maldo measurements						WAM model		
	Summer		Winter		Annual		E-WSW	W-ENE	Annual
	No.	%	No.	%	No.	%	No.	No.	%
0.0-0.5	3252	61.7	2065	29.1	5317	45.4	5020	6696	40.0
0.5-1.0	1379	26.2	2098	29.6	3477	27.9	4601	5495	34.6
1.0-1.5	474	9.0	1334	18.8	1808	13.9	1902	3918	14.0
1.5-2.0	91	1.7	821	11.6	912	6.6			5.92
2.0-2.5	42	0.95	437	6.2	479	3.6	72	1261	3.11
2.5-3.0	14	0.27	166	2.3	180	1.3			1.50
3.0-3.5	4	0.07	102	1.27	106	0.68	8	237	0.60
3.5-4.0	4	0.03	33	0.50	37	0.27			0.18
4.0-4.5	1	0.04	14	0.27	15	0.23			0.06
4.5-5.0	4		4	0.15	8				0.01
5.0-5.5	3	0.03	10	0.12	13	0.10		6	0.02
5.5-6.0	1		4	0.05	5				
6.0-6.5	1	0.01	3	0.04	4	0.02			
6.5-7.0			2		2				
Total	5270	100.0	7090	100.0	12363	100.0	11603	17613	100.0

- Notes: 1) Columns 2, 4 and 6 are based on all digital data for Maldo 1993-95.  
 2) Columns 3, 5 and 7 are refined above 2m for Summer and 3m for Winter by using additional Maldo data in paper format for 1991-92 and 1996-97.  
 3) Columns 8-10 are based on 3-hourly synthetic data 1986-95: E-WSW is assumed to be "Summer" and W-ENE to be "Winter".

표 4.4.3 High and extreme wave condition offshore: Winter and Summer

Return period	Offshore		Inshore	
	Hs(m)	Tm(s)	Hs(m)	Tm(s)
0.03	2.2(1.1)	5.8(3.8)	1.3(0.7)	5.9(3.9)
0.3	3.4(2.2)	7.0(5.5)	1.9(1.1)	7.0(5.5)
1	3.7(2.8)	7.2(6.2)	2.1(1.6)	7.2(6.2)
10	5.0(4.1)	8.3(7.5)	2.9(2.4)	8.1(7.3)
100	6.4(5.5)	9.3(8.6)	3.8(3.2)	8.9(8.2)
500	7.4(6.5)	10.0(9.4)	4.4(3.9)	9.7(9.1)
1000	7.9(6.9)	10.4(9.7)	4.7(4.1)	10.0(9.0)

Depth at refraction point is 17.02m

Figures in brackets are 12-hour duration extremes

표 4.4.4 Transformed high and extreme wave condition: Dyke Number 1

Return Period (or %)	Significant wave height and mean period			
	Summer		Winter	
	H <sub>s</sub> (m)	T <sub>z</sub> (s)	H <sub>s</sub> (m)	T <sub>z</sub> (s)
10%>than	1.11	4.5	2.03	5.5
1%>than	2.21	5.8	3.57	7.1
0.1%>than	3.44	7.0	5.00	8.3
1 year	3.66(2.84)	7.2(6.2)	5.23(4.38)	8.5(7.7)
10 years	5.00(4.11)	8.3(7.5)	6.58(5.77)	9.5(8.9)
100 years	6.41(5.46)	9.3(8.6)	7.88(7.10)	10.4(9.8)
500 years	7.44(6.45)	10.0(9.4)	8.77(8.00)	10.9(10.4)
1000 years	7.89(6.89)	10.4(9.7)	9.15(8.39)	11.1(10.7)
Direction	210° N, 230° N, 250° N		290° N, 315° N	

- Notes: 1) The directions are based on the range of directions present in the WAM(KORDI) data.
- 2) The extreme conditions listed are assumed to have a 3-hour duration.
- 3) This table provides the basis for the wave conditions used throughout the remainder of the report.
- 4) The figures in brackets are equivalent extreme conditions with a 12-hour duration, needed for the subsequent joint probability analysis.

표 4.4.5 Transformed high and extreme wave condition: Dyke

Number 2: Point 1

Return period	Offshore		Inshore	
	Hs(m)	Tz(s)	Hs(m)	Tz(s)
0.03	2.2(1.1)	5.8(3.8)	1.4(0.7)	7.1(5.3)
0.3	3.4(2.2)	7.0(5.5)	2.2(1.4)	8.4(7.1)
1	3.7(2.8)	7.2(6.2)	2.4(1.8)	8.5(7.7)
10	5.0(4.1)	8.3(7.5)	3.2(2.6)	8.1(7.3)
100	6.4(5.5)	9.3(8.6)	4.1(3.5)	8.7(8.0)
500	7.4(6.5)	10.0(9.4)	4.8(4.2)	9.5(8.9)
1000	7.9(6.9)	10.4(9.7)	5.1(4.4)	9.5(8.9)

Depth at refraction point(12.52m)

Figures in brackets are 12-hour duration extremes

☞ 4.4.6 Transformed high and extreme wave condition: Dyke Number 2  
Point 2

a)

Return period	Offshore		Inshore	
	Hs(m)	Tm(s)	Hs(m)	Tm(s)
0.03	3.6(2.1)	7.1(5.3)	2.5(1.4)	7.1(5.3)
0.3	5.0(3.6)	8.3(7.0)	3.7(2.6)	8.4(7.1)
1	5.2(4.4)	8.5(7.7)	3.9(3.2)	8.5(7.7)
10	6.6(5.8)	9.5(8.9)	4.9(4.3)	9.6(8.9)
100	7.9(7.1)	10.4(9.8)	6.0(5.3)	10.2(9.6)
500	8.8(8.0)	10.9(10.4)	6.7(6.0)	10.8(10.3)
1000	9.2(8.3)	11.1(10.6)	6.9*(6.3)	11.1(10.6)

\* denotes wave heights unsustainable in depth of water(12.52m)

Figures in brackets are 12-hour duration extremes

b)

Return period	Offshore		Inshore	
	Hs(m)	Tm(s)	Hs(m)	Tm(s)
0.03	3.6(2.1)	7.1(5.3)	2.5(1.4)	7.1(5.3)
0.3	5.0(3.6)	8.3(7.0)	3.7(2.7)	8.4(7.1)
1	5.2(4.4)	8.5(7.7)	3.9(3.2)	8.5(7.7)
10	6.6(5.8)	9.5(8.9)	4.9(4.3)	9.6(9.0)
100	7.9(7.1)	10.4(9.8)	6.0(5.4)	10.2(9.6)
500	8.8(8.0)	10.9(10.4)	6.7(6.1)	10.8(10.3)
1000	9.2(8.3)	11.1(10.6)	6.9*(6.3)	11.1(10.6)

\* denotes wave heights unsustainable in depth of water(12.52m)

Figures in brackets are 12-hour duration extremes

표 4.4.7 Transformed high and extreme wave condition: Dyke

Number 2: Point 3

a)

Return period	Offshore		Inshore	
	Hs(m)	Tm(s)	Hs(m)	Tm(s)
0.03	2.2(1.1)	5.8(3.8)	1.0(0.5)	5.1(3.3)
0.3	3.4(2.2)	7.0(5.5)	1.4(0.9)	5.8(4.6)
1	3.7(2.8)	7.2(6.2)	1.5(1.1)	5.9(4.8)
10	5.0(4.1)	8.3(7.5)	1.7(1.4)	6.3(5.7)
100	6.4(5.5)	9.3(8.6)	2.1(1.8)	7.2(6.7)
500	7.4(6.5)	10.0(9.4)	2.3(2.0)	7.3(6.9)
1000	7.9(6.9)	10.4(9.7)	2.5(2.2)	7.8(7.3)

Depth at refraction point is 24.52m

Figures in brackets are 12-hour duration extremes

b)

Return period	Offshore		Inshore	
	Hs(m)	Tm(s)	Hs(m)	Tm(s)
0.03	3.6(2.1)	7.1(5.3)	0.92(0.5)	5.8(4.3)
0.3	5.0(3.6)	8.3(7.0)	1.17(0.8)	6.4(5.3)
1	5.2(4.4)	8.5(7.7)	1.23(1.0)	6.5(5.9)
10	6.6(5.8)	9.5(8.9)	1.45(1.3)	7.0(6.6)
100	7.9(7.1)	10.4(9.8)	1.67(1.5)	7.4(7.0)
500	8.8(8.0)	10.9(10.4)	1.8(1.6)	7.7(7.3)
1000	9.2(8.3)	11.1(10.6)	1.87(1.7)	7.8(7.4)

Depth at refraction point is 24.52m

Figures in brackets are 12-hour duration extremes

표 4.4.8 Transformed high and extreme wave condition: Dyke

Number 3

Return period	Offshore		Inshore	
	Hs(m)	Tm(s)	Hs(m)	Tm(s)
0.03	3.6(2.1)	7.1(5.3)	1.6(0.9)	5.7(4.3)
0.3	5.0(3.6)	8.3(7.0)	2.0(1.4)	6.0(4.9)
1	5.2(4.4)	8.5(7.7)	2.1(1.8)	6.2(5.6)
10	6.6(5.8)	9.5(8.9)	2.5(2.2)	6.5(6.1)
100	7.9(7.1)	10.4(9.8)	2.8(2.5)	7.0(6.6)
500	8.8(8.0)	10.9(10.4)	3.0(2.7)	7.0(6.7)
1000	9.2(8.3)	11.1(10.6)	3.1(2.8)	7.2(6.9)

Depth at refraction point is 11.02m

Figures in brackets are 12-hour duration extremes

표 4.4.9 Transformed high and extreme wave condition: Dyke

Number 4: Point 1

Return period	Offshore		Inshore	
	Hs(m)	Tm(s)	Hs(m)	Tm(s)
0.03	3.6(2.1)	7.1(5.3)	3.1(1.8)	7.1(5.3)
0.3	5.0(3.6)	8.3(7.0)	4.5(3.2)	8.0(6.6)
1	5.2(4.4)	8.5(7.7)	4.7(4.0)	8.2(7.4)
10	6.6(5.8)	9.5(8.9)	6.1(5.4)	9.0(8.4)
100	7.9(7.1)	10.4(9.8)	7.3(6.7)	10.0(9.4)
500	8.8(8.0)	10.9(10.4)	8.2*(7.5)	10.1(9.6)
1000	9.2(8.3)	11.1(10.6)	8.6*(7.8)	10.3(9.8)

Depth at refraction point is 14.52m

Figures in brackets are 12-hour duration extremes

표 4.4.10 Transformed high and extreme wave condition: Dyke

Number 4: Point 2

a)

Return period	Offshore		Inshore	
	Hs(m)	Tm(s)	Hs(m)	Tm(s)
0.03	3.6(2.1)	7.1(5.3)	3.1(1.8)	7.1(5.3)
0.3	5.0(3.6)	8.3(7.0)	4.4(3.2)	8.0(6.6)
1	5.2(4.4)	8.5(7.7)	4.6(3.9)	8.3(7.5)
10	6.6(5.8)	9.5(8.9)	6.0*(5.3)	9.3(8.7)
100	7.9(7.1)	10.4(9.8)	7.2*(6.5)	10.0(9.4)
500	8.8(8.0)	10.9(10.4)	8.2*(7.5)	10.2(9.7)
1000	9.2(8.3)	11.1(10.6)	8.5*(7.7)	10.4(9.9)

\* denotes wave heights unsustainable in depth of water(14.52m)

Figures in brackets are 12-hour duration extremes

b)

Return period	Offshore		Inshore	
	Hs(m)	Tm(s)	Hs(m)	Tm(s)
0.03	3.57(2.1)	7.1(5.3)	3.0(1.8)	7.1(5.3)
0.3	5.0(3.6)	8.3(7.0)	4.4(3.2)	8.3(6.8)
1	5.23(4.4)	8.5(7.7)	4.7(3.9)	8.4(7.9)
10	6.58(5.8)	9.5(8.9)	6.1*(5.4)	9.4(8.8)
100	7.88(7.1)	10.4(9.8)	7.2*(6.5)	10.0(9.4)
500	8.77(8.0)	10.9(10.4)	8.2*(7.5)	10.4(9.9)
1000	9.15(8.3)	11.1(10.6)	8.6*(7.8)	10.6(10.1)

\* denotes wave heights unsustainable in depth of water(10m)

Figures in brackets are 12-hour duration extremes



c)

Return period	Offshore		Inshore	
	Hs(m)	Tm(s)	Hs(m)	Tm(s)
0.03	3.6(2.1)	7.1(5.3)	3.0(1.8)	7.1(5.3)
0.3	5.0(3.6)	8.3(7.0)	4.4*(3.2)	8.3(6.8)
1	5.2(4.4)	8.5(7.7)	4.6*(3.9)	8.4(7.9)
10	6.6(5.8)	9.5(8.9)	6.0*(5.3)	9.3(8.8)
100	7.9(7.1)	10.4(9.8)	7.1*(6.4)	10.0(9.4)
500	8.8(8.0)	10.9(10.4)	8.0*(7.3)	10.4(9.9)
1000	9.2(8.3)	11.1(10.6)	8.3*(7.5)	10.6(10.1)

\* denotes wave heights unsustainable in depth of water(7.8m)

Figures in brackets are 12-hour duration extremes

표 4.4.11 Transformed high and extreme wave condition: Dyke

Number 4: Point 3

Return period	Offshore		Inshore	
	Hs(m)	Tm(s)	Hs(m)	Tm(s)
0.03	3.6(2.1)	7.1(5.3)	3.1(1.8)	7.1(5.3)
0.3	5.0(3.6)	8.3(7.0)	4.4(3.2)	8.1(6.8)
1	5.2(4.4)	8.5(7.7)	4.7(3.9)	8.4(7.6)
10	6.6(5.8)	9.5(8.9)	6.0(5.3)	9.1(8.5)
100	7.9(7.1)	10.4(9.8)	7.2(6.5)	10.1(9.5)
500	8.8(8.0)	10.9(10.4)	8.3*(7.6)	10.3(9.8)
1000	9.2(8.3)	11.1(10.6)	8.6*(7.9)	10.5(10.0)

\* denotes wave heights unsustainable in depth of water(14.52m)

Figures in brackets are 12-hour duration extremes

표 4.4.12 Transformed high and extreme wave condition: Dyke

Number 4: Point 4

Return period	Offshore		Inshore	
	Hs(m)	Tm(s)	Hs(m)	Tm(s)
0.03	3.6(2.1)	7.1(5.3)	3.3(1.9)	7.3(5.4)
0.3	5.0(3.6)	8.3(7.0)	4.8(3.5)	8.3(6.8)
1	5.2(4.4)	8.5(7.7)	5.0(4.2)	8.5(7.7)
10	6.6(5.8)	9.5(8.9)	6.5(5.7)	9.3(8.7)
100	7.9(7.1)	10.4(9.8)	7.8(7.0)	10.3(9.7)
500	8.8(8.0)	10.9(10.4)	8.8*(8.0)	10.4(9.9)
1000	9.2(8.3)	11.1(10.6)	9.2*(8.4)	10.6(10.1)

\* denotes wave heights unsustainable in depth of water(14.52m)

Figures in brackets are 12-hour duration extremes

표 4.4.13 Transformed high and extreme wave condition: Dyke

Number 4: Point 5

Return period	Offshore		Inshore	
	Hs(m)	Tm(s)	Hs(m)	Tm(s)
0.03	3.6(2.1)	7.1(5.3)	3.2(1.9)	7.1(5.3)
0.3	5.0(3.6)	8.3(7.0)	4.8(3.5)	8.3(6.8)
1	5.2(4.4)	8.5(7.7)	5.1(4.3)	8.5(7.7)
10	6.6(5.8)	9.5(8.9)	6.6*(5.8)	9.5(8.9)
100	7.9(7.1)	10.4(9.8)	8.1*(7.3)	10.4(9.8)
500	8.8(8.0)	10.9(10.4)	9.1*(8.3)	11.0(10.5)
1000	9.2(8.3)	11.1(10.6)	9.5*(8.6)	11.2(10.7)

\* denotes wave heights unsustainable in depth of water(11.02m)

Figures in brackets are 12-hour duration extremes

표 4.4.14 Transformed 1000 year wave condition at 4.52m MSL: at the OUTRAY points and at the toe

Prediction point	Significant wave height(m)		Mean wave period(s)
	at the OUTRAY points	at the toe	
Dyke Number 1	5.1	5.1	9.5
Dyke Number 2 point 1	4.7	4.7	10.0
Dyke Number 2 point 2	6.9	5.8	11.1
Dyke Number 2 point 3	2.5	2.5	7.8
Dyke Number 3	3.1	3.1	7.2
Dyke Number 4 point 1	8.6(8.0 after breaking)	6.3	10.3
Dyke Number 4 point 2	8.5(8.0 after breaking)	6.9	10.4
Dyke Number 4 point 3	8.6(8.0 after breaking)	8.0	10.5
Dyke Number 4 point 4	9.2(8.0 after breaking)	6.9	10.6
Dyke Number 4 point 5	9.5(6.1 after breaking)	5.8	11.2

- Notes: 1) Columns 1, 2 and 4 summarise results for a 1000 year return period offshore wave condition directly from the OUTRAY model runs.  
 2) Column 3 is the same data taken on to the toe of the structure.

표 4.4.15 Low, high and extreme water levels: Kunsan and Wido

Description/Return period(yrs)	Kunsan m (MSL)	Wido m (MSL)
1	-4.0	-3.5
MLWS	-2.96	-2.7
MHWS	3.1	2.8
0.1	3.6	3.4
1	3.9	3.6(3.8)
10	4.0	3.6(4.1)
100	4.1	3.7(4.3)
1000	4.1	3.7(4.52)

Figures in brackets are re-scaled values(see Section 2.6.2)

For fuller details see purple lines in Figure 2.8 for Kunsan and yellow liens in Figure 2.9(light blue for re-scaled values) for Wido.

표 4.4.16 Extreme combinations of waves and water levels, in terms of marginal return periods

Water level return period(years)	Wave height return period(years)
0.0028	1000
0.009	325
0.01	280
0.1	28
1	2.8
10	0.28
100	0.028

표 4.4.17 1000 year return period joint probability combinations for  
Dyke 1

Water Level	Water Level	Wave Height	Nearshore refraction point				Toe of structure			
			3 hr duration		12 hr duration		3 hr duration		12 hr duration	
			Hs	Tm	Hs	Tm	Hs	Tm	Hs	Tm
Return period (years)	m msl	Return period (years)								
1	-3.5	2.8	2.6*	7.5	2.2*	6.6	2.5	7.5	2.2	6.6
0.009	-2.7	325	4.6*	9.1	4.0*	8.5	3.5	9.1	3.5	8.5
0.0028	2.7	1000	5.1	9.5	4.4	8.9	5.0	9.5	4.4	8.9
0.009	2.8	325	4.8	9.1	4.0	8.5	4.6	9.1	4.0	8.5
0.01	2.9	280	4.5	9.0	3.9	8.4	4.5	9.0	3.9	8.4
0.1	3.4	28	3.6	8.4	2.8	7.6	3.6	8.4	2.8	7.6
1	3.8	2.8	2.6	7.5	2.2	6.6	2.6	7.5	2.2	6.6
10	4.1	0.28	2.2	6.8	1.4	5.3	2.2	6.8	1.4	5.3
100	4.3	0.028	1.4	5.8	0.7	3.8	1.4	5.8	0.7	3.8

\*denotes wave heights that would have broken (assuming 0.55\*depth breaking ratio)

NB: waves at the toe of the structure have been broken, if necessary, assuming 0.55 breaking ratio.

The refraction point contour: -8 m (msl)

Bed elevation at the toe of the structure: -9 m (msl)

Shaded cells correspond to joint probability for low water levels

표 4.4.18 1000 year return period joint probability combinations for  
Dyke 2

Water Level Return period (years)	Water Level m msf	Wave Height Return period (years)	Nearshore refraction point				Toe of structure			
			3 hr duration		12 hr duration		3 hr duration		12 hr duration	
			Hs	Tm	Hs	Tm	Hs	Tm	Hs	Tm
Dyke 2.1										
1	-3.5	2.8	2.5	7.6	2.0	6.9	2.5	7.6	2.0	6.9
0.009	-2.7	325	4.3	9.5	3.7	8.6	4.2	9.5	3.8	8.8
0.0028	2.7	1000	4.7	10.0	4.1	9.0	4.7	10.0	4.1	9.0
0.009	2.8	325	4.3	9.5	3.7	8.6	4.3	9.5	3.7	8.6
0.01	2.9	280	4.2	9.3	3.6	8.5	4.2	9.3	3.6	8.5
0.1	3.4	28	3.3	8.5	2.8	7.8	3.3	8.5	2.8	7.8
1	3.8	2.8	2.5	7.6	2.0	6.9	2.5	7.6	2.0	6.9
10	4.1	0.28	1.9	7.0	1.1	5.5	1.9	7.0	1.1	5.5
100	4.3	0.028	1.3	5.9	0.7	3.9	1.3	5.9	0.7	3.9
Dyke 2.2										
1	-4.0	2.8	4.2*	9.0	3.9*	8.3	1.1	8.0	1.1	8.3
0.009	-2.98	325	6.4*	10.7	5.6*	10.1	1.7	10.7	1.7	10.1
0.0028	2.8	1000	6.9*	11.1	6.3*	10.6	4.8	11.1	4.8	10.6
0.009	3.1	325	6.4*	10.7	5.8	10.1	5.0	10.7	5.0	10.1
0.01	3.3	280	6.3*	10.6	5.7	10.0	5.1	10.6	5.1	10.0
0.1	3.6	28	5.4	9.8	4.8	9.3	5.3	9.8	4.9	9.3
1	3.9	2.8	4.2	9.0	3.9	8.3	4.3	9.0	4.0	8.3
10	4.0	0.28	3.6	8.4	2.5	7.0	3.7	8.4	2.5	7.0
100	4.1	0.028	2.4	7.1	1.4	5.3	2.4	7.1	1.4	5.3
Dyke 2.3										
1	-3.6	2.8	1.6	6.1	1.2	6.2	1.6	6.1	1.2	5.2
0.009	-2.7	325	2.3	7.2	2.0	6.9	2.4	7.2	2.1	6.9
0.0028	2.7	1000	2.5	7.8	2.2	7.3	2.6	7.8	2.3	7.3
0.009	2.8	325	2.3	7.2	2.0	6.9	2.4	7.2	2.0	6.9
0.01	2.9	280	2.2	7.2	2.0	6.9	2.3	7.2	2.0	6.9
0.1	3.4	28	1.9	6.7	1.6	6.2	1.9	6.7	1.6	6.2
1	3.8	2.8	1.6	6.1	1.2	6.2	1.6	6.1	1.2	5.2
10	4.1	0.28	1.4	5.8	0.9	4.6	1.4	5.8	0.9	4.6
100	4.3	0.028	1.0	5.1	0.5	3.3	1.0	5.1	0.5	3.3

\*denotes wave heights that would have broken (assuming 0.55\*depth breaking ratio)  
NB: waves at the toe of the structure have been broken, if necessary, assuming 0.55 breaking ratio

The refraction point-contour, dyke 2.1: -12.5 m (msf)  
Bed elevation at the toe of the structure, dyke 2.1: -14.5 m (msf)  
The refraction point-contour, dyke 2.2: -8 m (msf)  
Bed elevation at the toe of the structure, dyke 2.2: -6 m (msf)  
The refraction point-contour, dyke 2.3: -20m (msf)  
Bed elevation at the toe of the structure, dyke 2.3: -26 m (msf)

Shaded cells correspond to joint probability for low water levels

표 4.4.19 1000 year return period joint probability combinations for  
Dyke 3

Water Level	Water Level	Wave height	Nearshore refraction point †				Toe of structure			
			3 hr duration		12 hr duration		3 hr duration		12 hr duration	
Return period (years)	m msl	Return period (years)	Hs	Tm	Hs	Tm	Hs	Tm	Hs	Tm
1	-4.0	2.8	2.3*	6.4	2.0*	5.9	1.1	6.4	1.1	5.9
0.009	-2.96	325	3.0*	7.0	2.7*	6.7	1.7	7.0	1.7	6.7
0.0028	2.8	1000	3.1	7.2	2.8	6.9	3.1	7.2	2.8	6.9
0.009	3.1	325	3.0	7.0	2.7	6.7	3.0	7.0	2.7	6.7
0.01	3.3 ✓	280	2.9	7.0	2.8	6.7	2.9	7.0	2.6	6.7
0.1	3.6 ✓	28	2.7	6.7	2.4	6.4	2.7	6.7	2.4	6.4
1	3.9	2.8	2.3	6.4	2.0	5.9	2.3	6.4	2.0	5.9
10	4.0	0.28	2.0	6.0	1.4	4.9	2.0	6.0	1.4	4.9
100	4.1	0.028	1.6	5.7	0.9	4.3	1.6	5.7	0.9	4.3

\*denotes wave heights that would have broken (assuming 0.55\*depth breaking ratio)

NB: waves at the toe of the structure have been broken, if necessary, assuming 0.55 breaking ratio

The refraction point-contour, dyke 3: -6.5 m (msl)

Bed elevation at the toe of the structure, dyke 3: -6 m (msl)

Shaded cells correspond to joint probability for low water levels

표 4.4.20 1000 year return period joint probability combinations for

Dyke 4

Water Level Return period (years)	Water Level m msf	Wave Height Return period (years)	Nearshore refraction point				Toe of structure			
			3 hr duration		12 hr duration		3 hr duration		12 hr duration	
			Ha	Tm	Ha	Tm	Ha	Tm	Ha	Tm
Dyke 4.1										
1	-4.0	2.8	0.4*	8.8	4.7*	7.9	1.7	8.8	1.7	7.9
0.009	-2.96	325	8.0*	10.3	7.3*	9.8	2.2	10.3	2.2	9.8
0.0028	2.8	1000	8.6*	10.8	7.8*	9.8	5.4	10.8	5.4	9.8
0.009	3.1	325	8.0*	10.3	7.3*	9.8	5.6	10.3	5.6	9.8
0.01	3.3	280	7.9*	10.2	7.1*	9.5	5.7	10.2	5.7	9.5
0.1	3.8	28	6.8*	9.7	6.0*	8.9	6.8	9.7	6.8	8.9
1	3.9	2.8	5.4	8.8	4.7	7.9	5.8	8.8	4.8	7.9
10	4.0	0.28	4.8	8.3	3.1	6.6	4.8	8.3	3.1	6.6
100	4.1	0.028	3.1	7.1	1.8	5.3	3.1	7.1	1.8	5.3
Dyke 4.2										
1	-4.0	2.8	6.3*	8.9	4.6*	8.0	3.2	8.9	3.2	8.0
0.009	-2.96	325	7.9*	10.3	7.2*	9.7	3.8	10.3	3.8	9.7
0.0028	2.8	1000	8.5*	10.8	7.7*	9.9	5.9	10.8	5.9	9.9
0.009	3.1	325	7.9*	10.3	7.2*	9.7	6.1	10.3	6.1	9.7
0.01	3.3	280	7.8*	10.3	7.1*	9.6	6.2	10.3	6.2	9.6
0.1	3.8	28	6.5*	9.7	5.9	9.1	6.4	9.7	6.0	9.1
1	3.9	2.8	6.3	8.9	4.6	8.0	6.4	8.9	4.8	8.0
10	4.0	0.28	4.4	8.3	3.2	6.8	4.4	8.3	3.4	6.8
100	4.1	0.028	3.0	7.1	1.8	5.3	3.0	7.1	1.9	6.3
Dyke 4.3										
1	-4.0	2.8	5.3*	8.7	4.4*	6.1	3.3	8.7	3.3	6.1
0.009	-2.96	325	7.8*	10.2	7.1*	9.8	3.9	10.2	3.9	9.8
0.0028	2.8	1000	8.5*	10.8	7.6*	10.0	7.0	10.8	7.0	10.0
0.009	3.1	325	7.9*	10.2	7.1*	9.8	7.2	10.2	7.1	9.8
0.01	3.3	280	7.8*	10.2	7.0	9.7	7.3	10.2	7.0	9.7
0.1	3.8	28	6.8	9.6	6.8	9.0	6.6	9.6	5.8	9.0
1	3.9	2.8	5.3	8.7	4.4	6.1	5.3	8.7	4.4	6.1
10	4.0	0.28	4.4	8.1	3.1	6.0	4.4	8.1	3.1	6.0
100	4.1	0.028	3.1	7.1	1.8	5.3	3.1	7.1	1.8	5.3
Dyke 4.4										
1	-4.0	2.8	5.7*	8.9	4.9*	6.2	2.2	8.9	2.2	6.2
0.009	-2.96	325	8.7*	10.4	7.7*	9.9	2.6	10.4	2.6	9.0
0.0028	2.8	1000	9.2*	10.8	8.4*	10.1	6.9	10.8	6.9	10.1
0.009	3.1	325	8.7*	10.4	7.7*	9.9	6.1	10.4	6.1	9.9
0.01	3.3	280	8.6*	10.4	7.6*	9.8	6.2	10.4	6.2	9.8
0.1	3.8	28	7.1*	9.8	6.3	9.2	6.4	9.8	6.0	9.2
1	3.9	2.8	5.7	8.9	4.9	6.2	6.8	8.9	4.9	6.2
10	4.0	0.28	4.8	8.3	3.4	6.8	4.8	8.3	3.4	6.8
100	4.1	0.028	3.3	7.3	1.9	5.4	3.3	7.3	1.9	5.4
Dyke 4.5										
1	-4.0	2.8	5.3*	8.0	5.1*	6.3	1.1	8.0	1.1	6.3
0.009	-2.96	325	8.0*	10.8	8.0*	10.5	1.7	10.8	1.7	10.8
0.0028	2.8	1000	9.5*	11.4	8.6*	10.7	4.8	11.4	4.8	10.7
0.009	3.1	325	8.8*	10.8	8.0*	10.5	5.0	10.8	4.9	10.5
0.01	3.3	280	8.7*	10.7	7.9*	10.4	5.1	10.7	5.1	10.4
0.1	3.8	28	7.3*	9.9	6.6*	9.6	6.3	9.9	6.3	9.6
1	3.9	2.8	6.3	9.0	6.1	8.3	5.3	9.0	5.2	8.3
10	4.0	0.28	4.8	8.3	3.4	6.7	4.8	8.3	3.4	6.7
100	4.1	0.028	3.2	7.1	1.9	5.3	3.2	7.1	1.9	5.3

\*denotes wave heights that would have broken (assuming 0.56\*depth breaking ratio)

NB: waves at the toe of the structure have been broken, if necessary, assuming 0.55 breaking ratio

- The refraction point-contour, dyke 4.1: -10 m (msf)
- Bed elevation at the toe of the structure, dyke 4.1: -7 m (msf)
- The refraction point-contour, dyke 4.2: -10 m (msf)
- Bed elevation at the toe of the structure, dyke 4.2: -8 m (msf)
- The refraction point-contour, dyke 4.3: -10 m (msf)
- Bed elevation at the toe of the structure, dyke 4.3: -10 m (msf)
- The refraction point-contour, dyke 4.4: -10 m (msf)
- Bed elevation at the toe of the structure, dyke 4.4: -8 m (msf)
- The refraction point-contour, dyke 4.5: -8.5 m (msf)
- Bed elevation at the toe of the structure, dyke 4.5: -6 m (msf)

Shaded cells correspond to joint probability for low water levels.



표 4.4.21 1000 year return period joint probability combinations at the structure toe

Prediction point	Significant wave height at the toe(m)		Mean wave period(s)
	water level of 2.8m MSL	worst toe	
Dyke Number 1	4.4		8.5
Dyke Number 2 point 1	4.1		9.0
Dyke Number 2 point 2	4.8	5.2(at 3.45m MSL)	10.5
Dyke Number 2 point 3	2.0		6.9
Dyke Number 3	2.8		6.9
Dyke Number 4 point 1	5.4	5.8(at 3.6m MSL)	9.8
Dyke Number 4 point 2	5.9	6.2(at 3.30m MSL)	9.9
Dyke Number 4 point 3	7.0		10.0
Dyke Number 4 point 4	5.9	6.4(at 3.60m MSL)	10.1
Dyke Number 4 point 5	4.8	5.3(at 3.60m MSL)	10.7

- Note: 1) Columns 1,2 and 4 summarise results for a 1000 year return period offshore wave condition depth-limited at the structure for a water level of 2.80m MSL
- 2) Column 3 give the equivalent wave height at the structure(and the corresponding water level) for the worst case combination of waves.

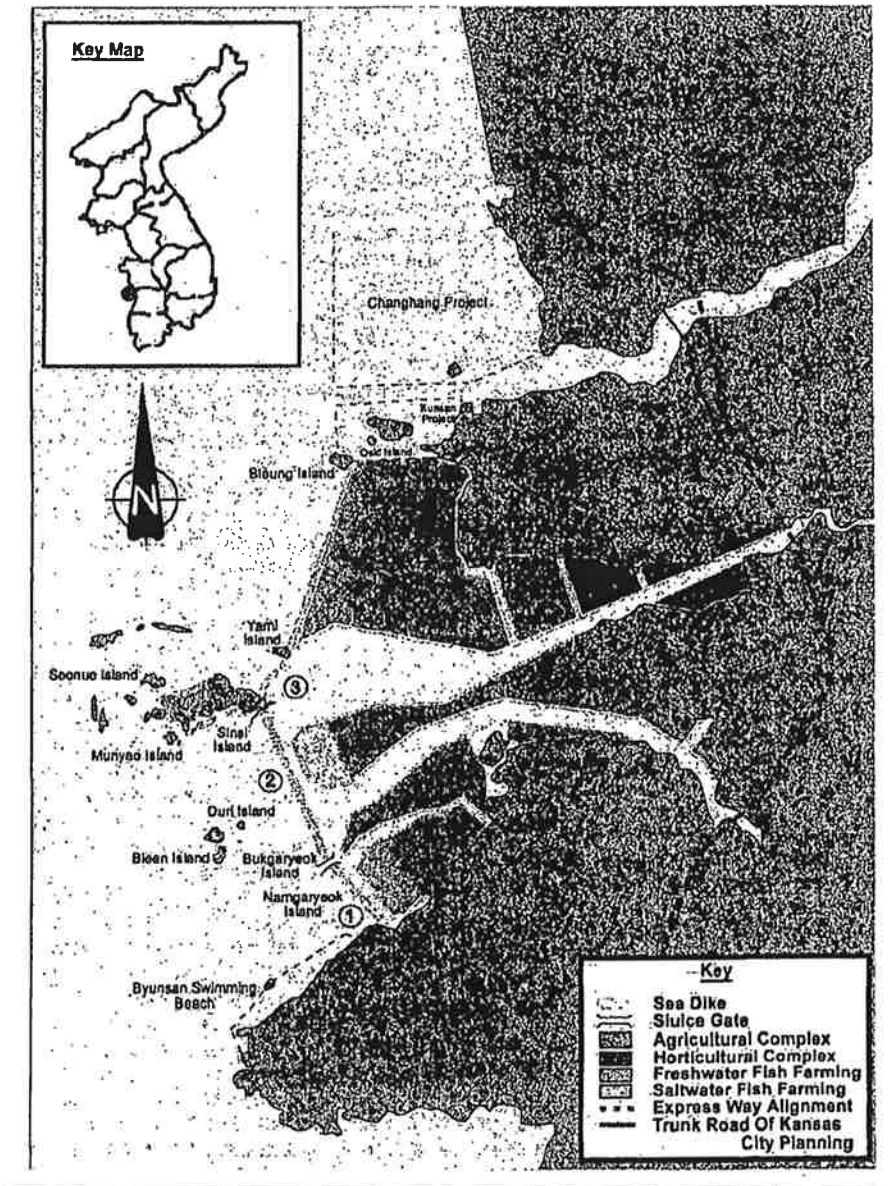


그림 4.4.1 Location map

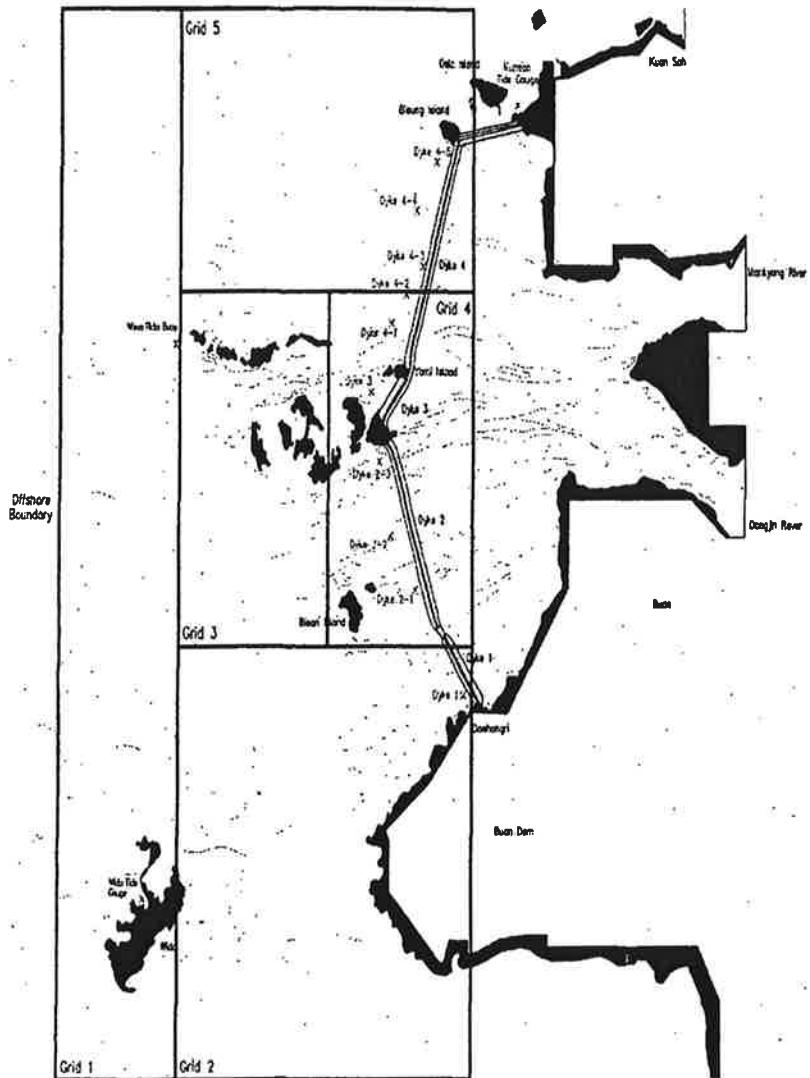


그림 4.4.2 Location of wave refraction points

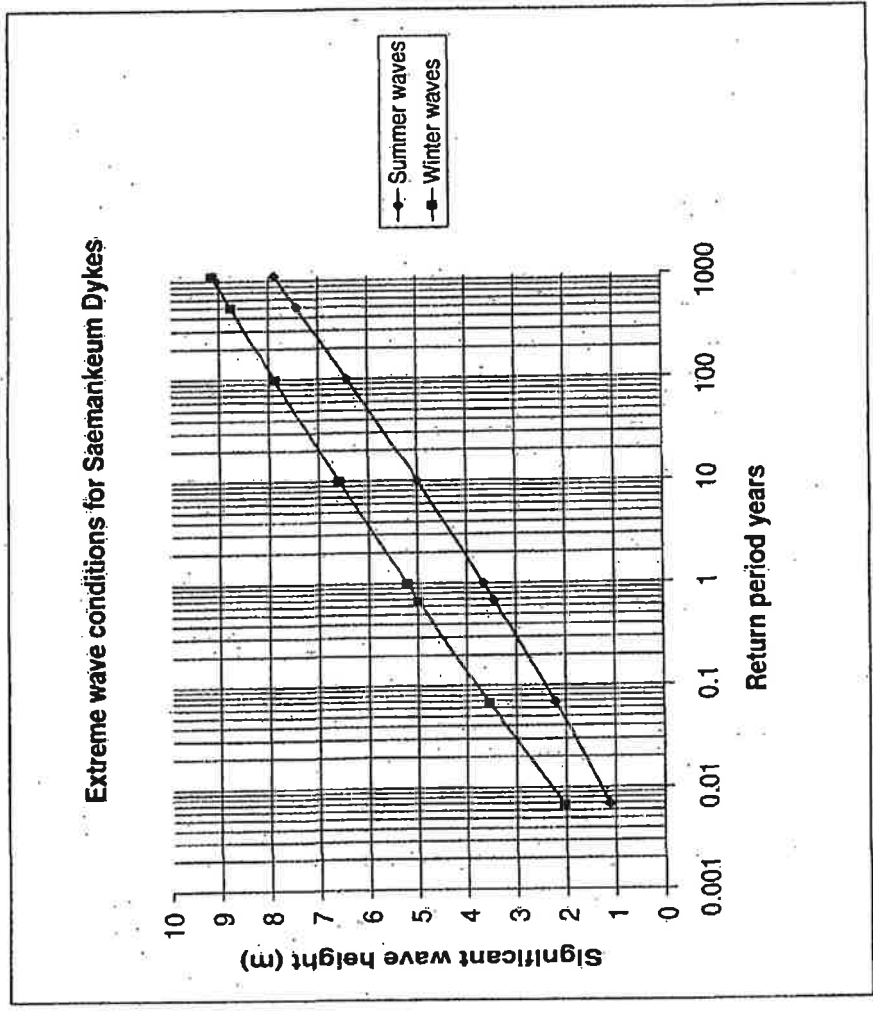


그림 4.4.3 Distribution of offshore wave height: Winter and Summer

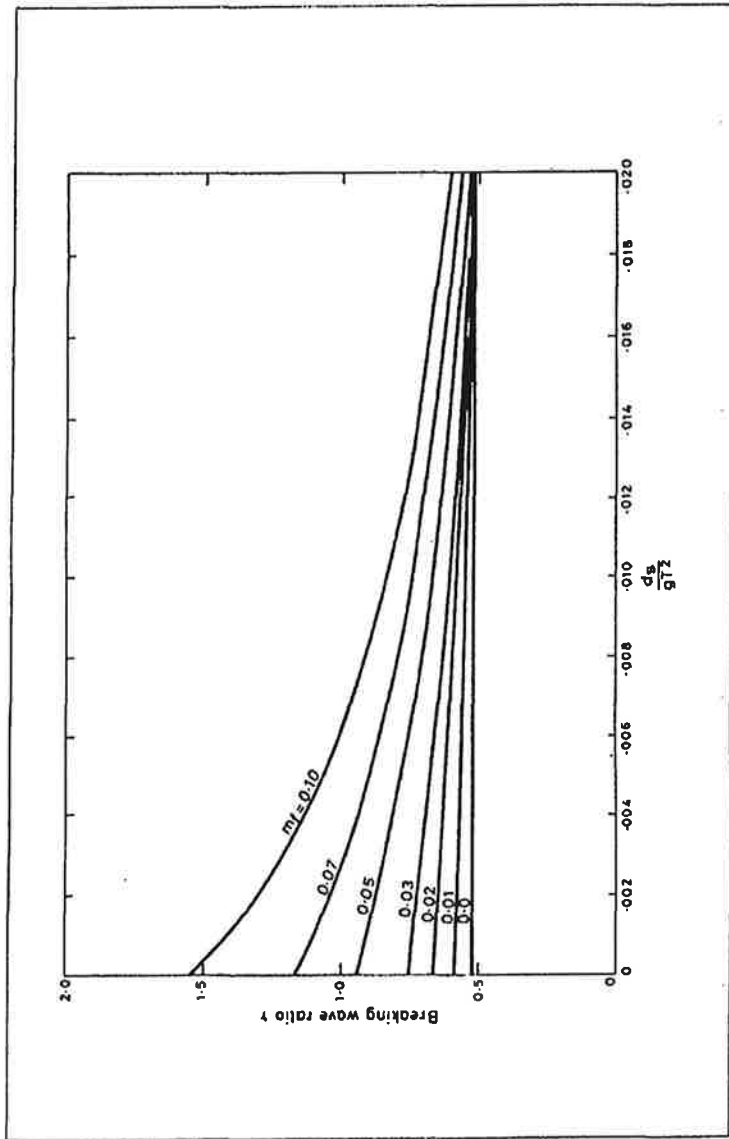


그림 4.4.4 Ratio of breaker wave height to water depth

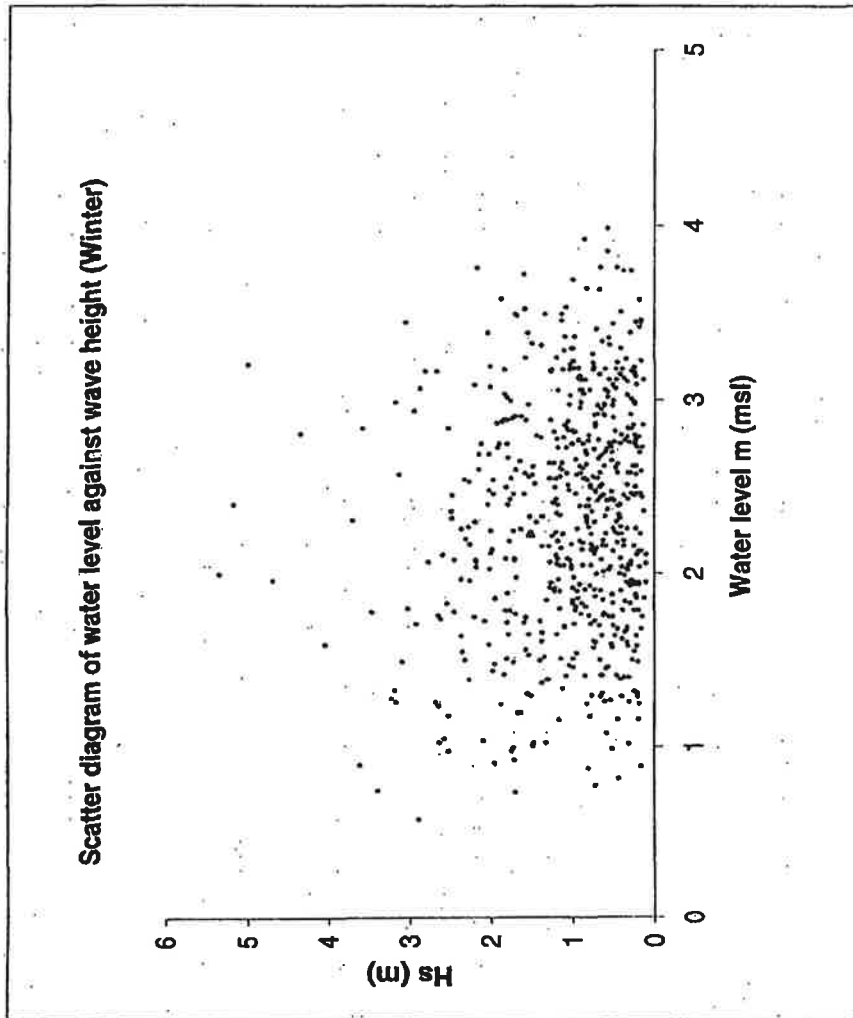


그림 4.4.5 Scatter diagram of wave height and water level: Winter

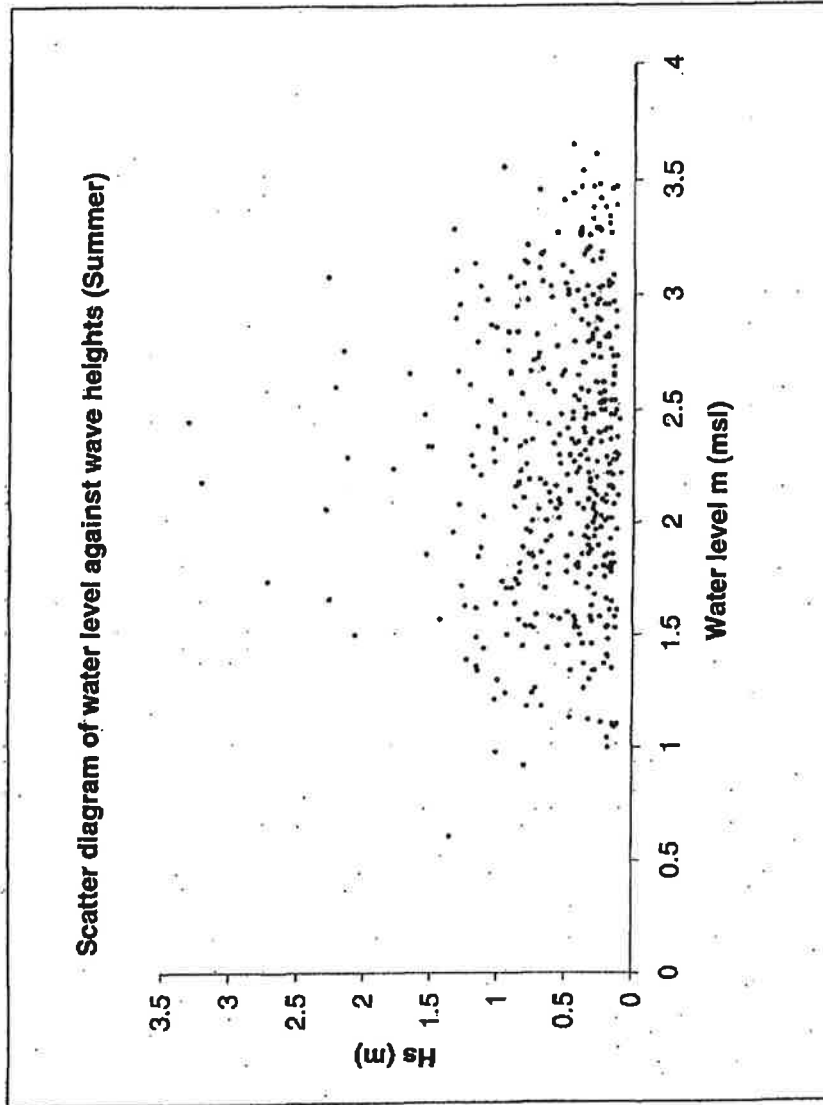


그림 4.4.6 Scatter diagram of wave height and water level  
Summer

## 제 5절 연안 퇴적 변화 예측 모형

### 1. 모형의 기본 이론과 구성

간척개발사업의 외곽시설인 대규모 방조제나 연안에 건설되는 해안 구조물은 연안에서의 수리현상을 변화시킨다. 수리현상의 변화는 기존의 동적 평형상태를 교란시키게 되므로 어느 지역에서는 침식, 또 다른 지역에서는 퇴적현상을 유발시킬 수 있다. 방조제 건설로 인한 해안수리환경의 변화, 즉 조석과 파랑의 변화를 수치모델링을 통하여 미리 예측해 보고 방조제 축조 후 외측에 발생할 해저지형 변화를 규명하여, 인위적 구조물 건설로 인한 자연환경의 변화를 평가하는 기초자료로 삼게 된다.

방조제나 연안에 건설되는 해안 구조물의 건설 후 연안의 지형변화를 예측하려면 우선 조석운동 및 파랑 등 해안수리특성의 변화를 평가해야 하며, 그 결과 나타나는 유사이동을 계산하여야 한다. 이를 위해 대상해역의 조석운동, 파랑 및 유사이동의 상호 관계를 평가할 수 있는 도구, 즉 수치모델의 활용이 필요하다. 이와 관련된 수리학적 기초이론과 유사이동 및 지형변화 예측 모델링의 과정은 여러 연구자를 통해 이미 잘 알려져 있고, 농어촌진흥공사 농어촌연구원은 본 연구를 위해 단계적으로 네덜란드 델프트 수리연구소(Delft Hydraulics)의 지형변화 계산 모듈을 도입하였다.

#### 가. 모형의 개요

연안 퇴적 변화 예측 모형(DELF3D-MOR)은 해안에서의 수리현상 변화를 수학적으로 해석하여 실제 일어날 수 있는 지형변화를 모의하는 수치모델시스템으로 다음의 물리적 현상이나 각 현상들의 조합을 적용할 수 있다.



- 파랑
- 흐름(조석, 파랑에 의해 발생하는 흐름 등)
- 유사이동
- 해저지형의 변화

모델은 2차원 수치모델로 평면에서의 시·공간적 변화량을 계산할 수 있으며 국부적 세굴과 같은 문제의 해석에는 적합하지 않고 광범위한 지역의 지형변화 계산에 적합하다. 실제 응용이 가능한 분야는 다음 사항을 포함하고 있다.

- 조위 및 조류흐름의 계산
- 흐름과 파랑의 상호작용
- 해저 바닥의 지형학적 변화

#### 나. 모형의 활용

지형변화 모델시스템인 DELFT3D-MOR를 도입함으로써 간척사업 이후 주요 문제점으로 지적되었으면서도 그 동안 종합적 해석에 어려움을 겪고 있었던 공사 후 지형변화 문제, 공사 중의 영향, 퇴적체의 이동, 적정 준설이격거리의 결정 등에 활용할 수 있게 되었다. 또한 파랑 변형 해석 모델(DELFT3D-WAVE)은 새만금 제 4호 방조제 설계파랑 검토를 위해 개발되었던 HRWAVE 및 해안선과 수직인 방향의 유사이동 모델 SBEACH 등과 조합하여 주요 해빈의 변형계산 및 예측도 가능하게 되었다.

#### 다. 모형의 구성

방조제 공사 후 변화하는 수리현상을 모의하고, 또한 공사 후 일어날 지형변화를 예측하기 위한 도구로 이용될 모델은 2차원 운동방정식과 연속방정식을 해석하는 동역학흐름모듈(FLOW)과, 해역에서의 파랑생성과 소멸 및

천해파랑변형과정을 모의하고 파랑에 의한 해빈류(wave induced current)를 계산할 파랑모듈(WAVE), 유사이동량을 계산할 유사이동모듈(TRANS) 및 해저 지형의 변화를 계산하게 될 지형모듈(BOTTOM) 등 4개의 모듈로 구성되어 있다. 지형변화 모델과 파랑모듈의 특징은 다음과 같다.

### 1) 지형 변화 예측 모형 (DELFT3D-MOR)

#### ○ 활용분야

- 방조제 공사로 인한 해저지형 변화
- 항내 퇴적 (harbour siltation and accretion)
- 퇴적물의 침식 (lee erosion)
- 시설물에 의한 해안침식 및 퇴적 영향

#### ○ 유사이동 모듈

- 총유사량(TRSTOT) 계산 : EH, MPM, AW, Bijker, van Rijn
- 부유사량(TRSSUS) 계산 : Bijker, Bailard, van Rijn

#### ○ 지형변화 계산 모듈 (BOTTOM) 기본 방정식

$$(1 - \epsilon) \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial S_x}{\partial x} + \frac{\partial S_y}{\partial y} = T$$

#### ○ 제한분야

- 유사의 왕복운동
- wave induced undertow
- 해저질의 입경 변화

#### ○ 지형 변화 예측 모형 DELFT3D-MOR의 구성

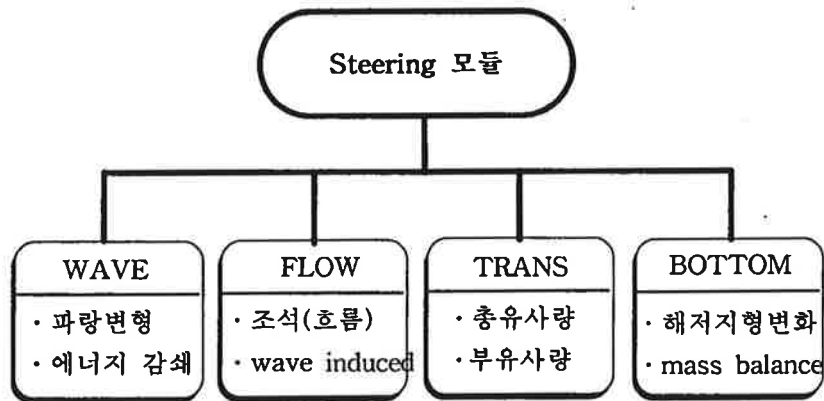


그림 4.5.1 지형 변화 예측 모형의 구성

2) 파랑변형 모형 WAVE

○ 기본 방정식 : spectral action balance

$$\frac{\partial}{\partial x} c_x A + \frac{\partial}{\partial y} c_y A + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta A = T$$

○ Physical Processes

좌 변	우 변
천수(shoaling) 굴절(refraction) 흐름에 의한 굴절	바람에 의한 생성 바다마찰에 의한 감쇄 쇄파에 의한 감쇄 wave blocking

○ 특징 : Graphical Ueser Interface, Nesting 기능

○ 사용상 제한사항

- Stationary 조건에 적용
- 회절(diffraction)에 의한 변형

그림 4.5.1은 해저지형 변화 모델링의 계산과정 흐름도로 모델링을 하고자 하는 자연현상에 따라 각기 다른 순서와 과정을 택할 수 있음을 보여주고 있다.

## 2. 김포 대명포구지역 지형변화 수치해석

### 가. 사업지역 주위의 지형특성

대명포구는 경기도 김포와 강화도 사이에 위치한 염하수로 중간의 김포측에 위치하며 강화도 남측의 초지포구와 마주하고 있다. 염하수로는 경기만에서 인천항까지 발달된 수도가 북쪽으로 연장된 구간으로서 인천항에서 강화도 북측의 한강하류와 연결되는 지점 사이에 수심이 깊게 연결된 지역을 말한다. 수로의 길이는 약 30여 km이며 수로의 폭은 250~2000 m의 범위로서 인천항에서 북측으로 갈수록 좁아진다. 수심은 한강 하류지역인 수로 북단에서 약최저저조면하 약 0 m이고 인천항 부근에서 약 10 m 정도이며 수로내에서는 대체로 선형변화를 한다. 따라서 수로의 바닥경사는 약 1/3000 정도로서 다른 하구지역에 비하여 매우 크다.

강화도와 김포 사이의 수로 구간은 수로폭이 좁고 급만곡부가 존재한다. 수로 북측 지점인 범머리에서 수로폭은 250 m 정도로 최소이며 손들목과 광성지점에서는 각기 다른 방향으로 돌출된 지형으로 인하여 수로가 급격한 만곡을 이루고 있다. 이러한 지형특성으로 인하여 낙조시 강한 난류를 발생시키며 북측과 남측지점간에 서로 다른 조석 특성을 나타낸다.

낙조시 발생하는 강한 난류로 인하여 주 수로내에는 퇴적물이 매우 적게 존재하고 바닥은 입경이 크고 모서리가 날카로운 쇄석 또는 풍화대로 이루어져 있다. 수로 양측의 만곡부에는 면적은 좁으나 상당한 두께의 퇴적물이 쌓여 있다.

## 나. 수치격자 구성 및 모형 입력자료

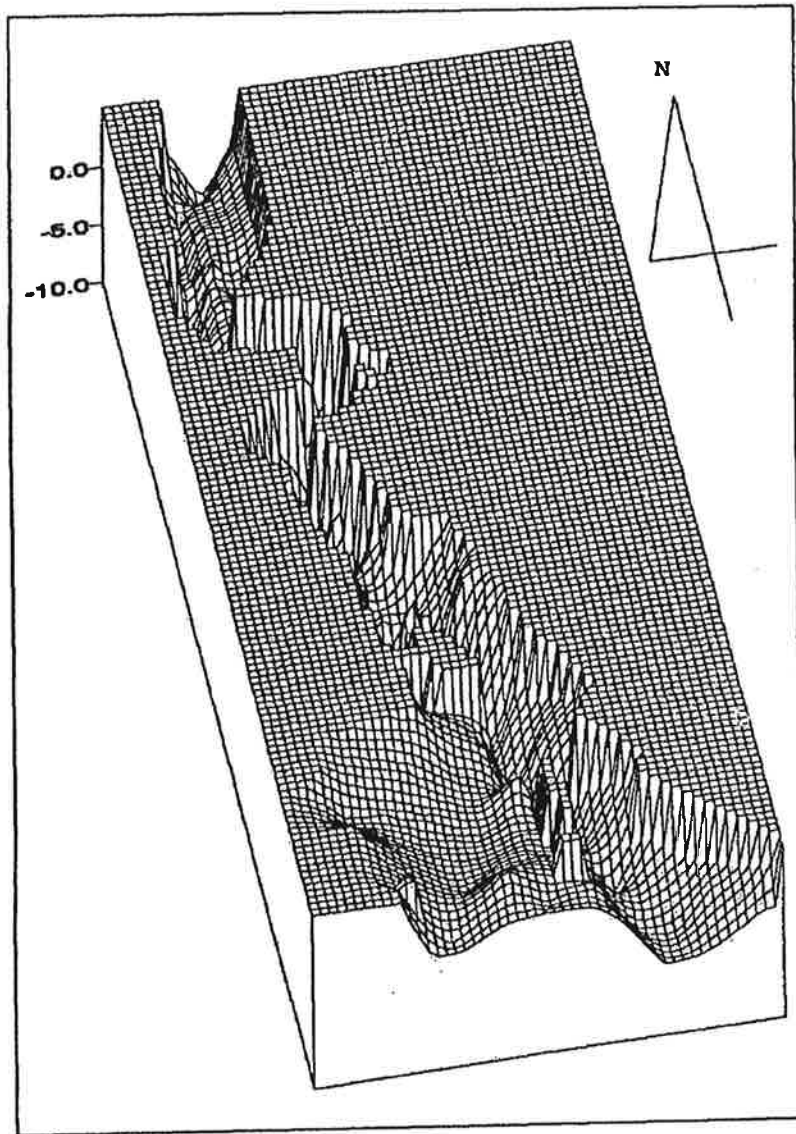
적용대상구역의 격자망 구성은  $53 \times 128$  개의 유한차분격자로 구성하였다. 흐름 모형 및 이송확산모형의 계산 시간간격  $\Delta t$ 는 수치모형의 안정성을 고려하여 10초를 선택하였으며, 공간격자는 간격이  $\Delta x = \Delta y = 100$  m인 정사각형 격자를 사용하였다. 수치실험 대상구간의 남쪽 경계는 북위 37도 35분선을 연결하는 선으로 서쪽으로는 동검도와 연결된다. 북쪽 경계는 대나무와 고양리를 잇는 북위 37도 42분 12초 지점을 상류 경계로 설정하였으며, 대상영역의 길이는 남북방향으로는 12.8 km, 동서방향 5.3 km가 된다. 그림 4.5.2는 수치모형 적용영역의 해저면 지형의 표면도 자료를 도시한 것이다.

## 다. 초기 및 경계조건

### 1) 흐름모의

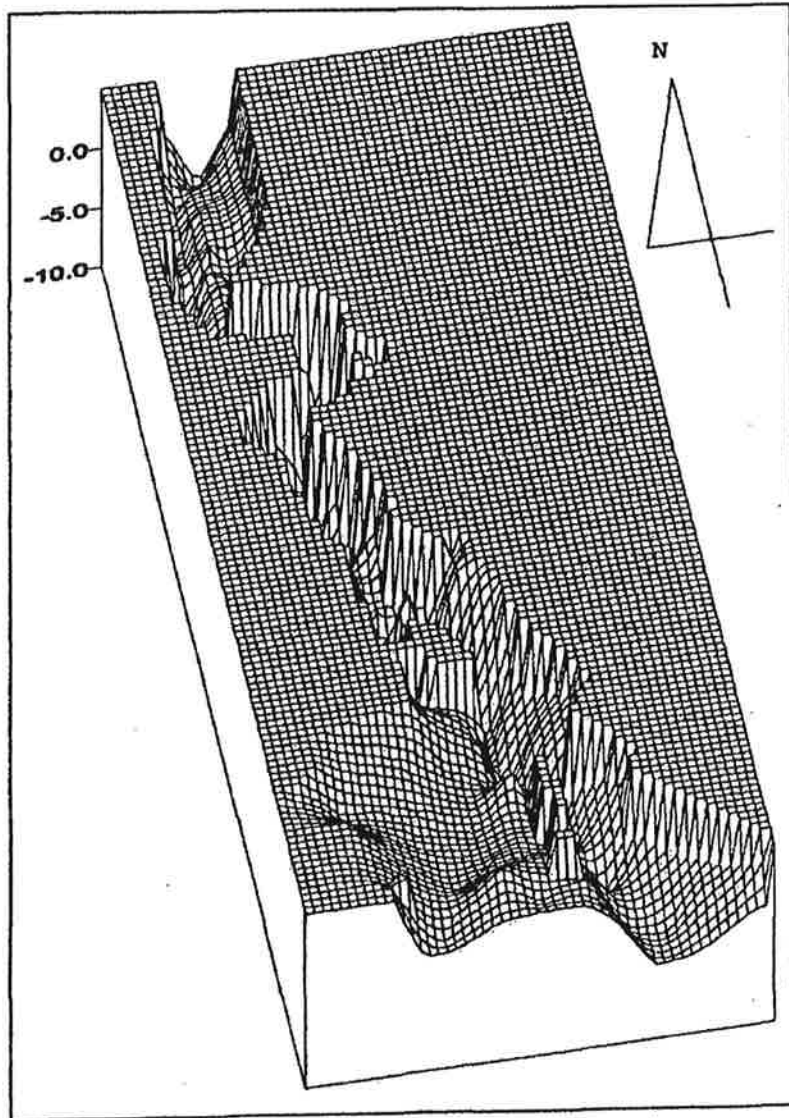
계산영역 내부에 유속이 존재하지 않는다는 가정(Cold start)을 사용한다. 모형에 의한 수치실험에는 초기조건과 경계조건이 요구된다. 초기 조건은 경계조건(표4.5.1)으로는 개방경계(Open boundary)와 폐경계(Closed boundary)로 구분된다.

상류 및 하류에서의 경계조건으로 실측자료를 이용하지 않고, 서해안 광역격자를 이용한 TRISULA 모형의 수치실험에 의해 얻어진 4대 조석상수를 이용하여 조석을 발생시킨 값을 이용하였다. 사업지구 주변인 인천항의 조차는 대조기에 7.98 m, 소조기에 3.47 m이다. 사업지구 주변의 하류경계인 황산도에서는 대조차가 8.46 m, 소조차가 3.86 m이고, 사업지구 상류경계인 강화대교에서는 대조차가 5.46 m, 소조차가 2.46 m로 작아지며 한강하구에 가까워질수록 조차는 점차 감소한다.



(a) 공유수면 매립전

그림 4.5.2 Bottom topography



(b) 공유수면 매립후

그림 4.5.2 Continued

표 4.5.1 Major tidal constituents

구 분	동경도(황산도)		대명포구 상류 용골둔대		비 고
	반조차, H(m)	지각. K(°)	반조차, H(m)	지각. K(°)	
M2	2.988	142.719	2.527	160.504	
S2	0.986	201.793	0.746	223.787	
K1	0.444	296.824	0.383	305.188	
O1	0.294	272.337	0.251	278.374	

2) 부유사 이동 모의

부유사 농도 계산을 위한 이송확산모형의 초기조건 및 경계조건은 현장의 부유물질 조사결과를 사용하였다. 초기 부유사 농도는 대명포구 상단부 및 하단부의 평균 부유물질 농도를 사용하였다. 개경계에서는 유속의 방향에 따라 계산 영역 내부로 유입하는 경우는 농도경계조건을 사용하였으며, 유출되는 경우는 외삽 농도 경계조건을 사용하였다.

3) 유사이동모형 적용

염하수로의 지형변화 예측을 위해 평면 이차원 유사이동모형을 사용하여 공유수면 매립공사 전·후 두 가지 경우에 대하여 약 30일간 수치모의하였다. 유사이동모형을 이용한 예측 결과는 유속장, 저면 전단응력, 부유사 농도장, 지형 변화로 구분하여 분석하였다. 그림 4.5.3~4는 대조기에 창조와 낙조시에 대하여 매립공사 전·후의 흐름계산 결과를 보여 주고 있다. 각 경우의 전반적인 공통점은 공유수면 매립공사 이후에 수로폭의 감소로 인해 대명포구 부근에서 매립 이전 보다 유속이 증가하는 현상이 발생한다.

염하수로의 지형변화는 부정류 흐름 계산결과를 이용하여 비정상 상태의 이송확산모형 및 유사상 모형을 이용하여 계산하였다. 계산 결과는 소조기(모의시작 222



시간 후)와 대조기(모의시작 384 시간 후)의 하상변동 경향을 도시하였다.

그림 4.5.5는 대조기의 퇴적량을 도시한 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 매립 공사 전·후의 지형 변동의 차이는 거의 나타나고 있지 않으며, 대부분의 영역에서 퇴적 깊이는 0.01 m 이하이다. 본 연구의 관심영역인 황산도에서 손들목까지 구간에서 지형변화의 차이가 나타나는 영역은 대명포구 동남쪽 연안부(신설 포구에 인접한 부분)에서 국부적으로 퇴적이 발생하지 않는 부분이 나타나고 있다. 이는 창·낙조시 이 영역을 유출입하는 유속이 큰 값을 가지기 때문에 유속 및 저면 전단응력 계산 결과로부터 예측할 수 있는 현상이다.

그림 4.5.5~6은 대조기까지 지형변동을 모의한 결과로 각각 이 기간동안의 퇴적량과 침식량을 보여 주고 있다. 침식량 및 퇴적량은 소조기까지의 결과와 비교할 때 동일한 경향을 보이고 있으며, 단지 시간이 경과된 만큼의 양적 차이만 보이고 있다.

그림 4.5.5~6은 대조기 및 소조기를 각 1회씩 포함하는 시간인 384시간(16 일)을 수치모의한 결과로서 모의시간을 길게 하면 수로 중앙부에는 실트질 토사는 모두 침식될 것으로 예측할 수 있으며, 염하수로 연안은 유속이 작아서 토사의 퇴적이 지속될 것으로 예측할 수 있다.

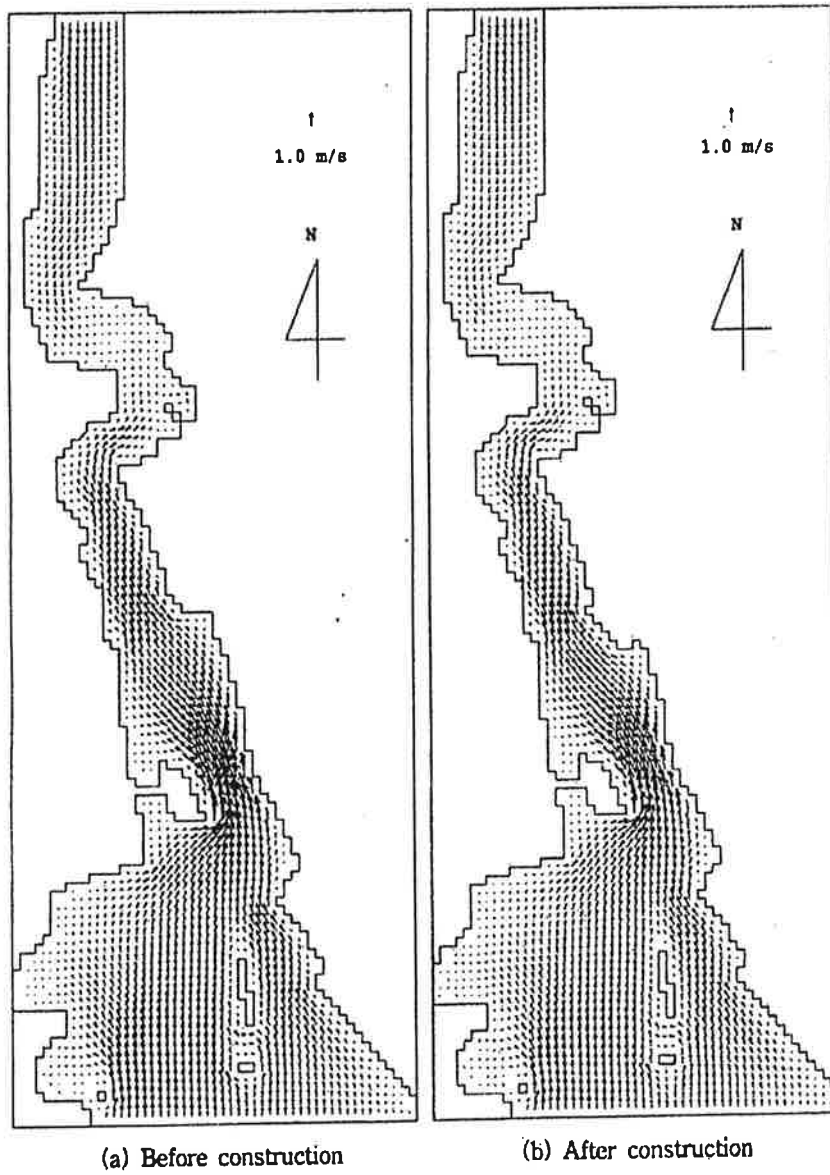


그림 4.5.3 Velocity distribution (spring, flood tide)

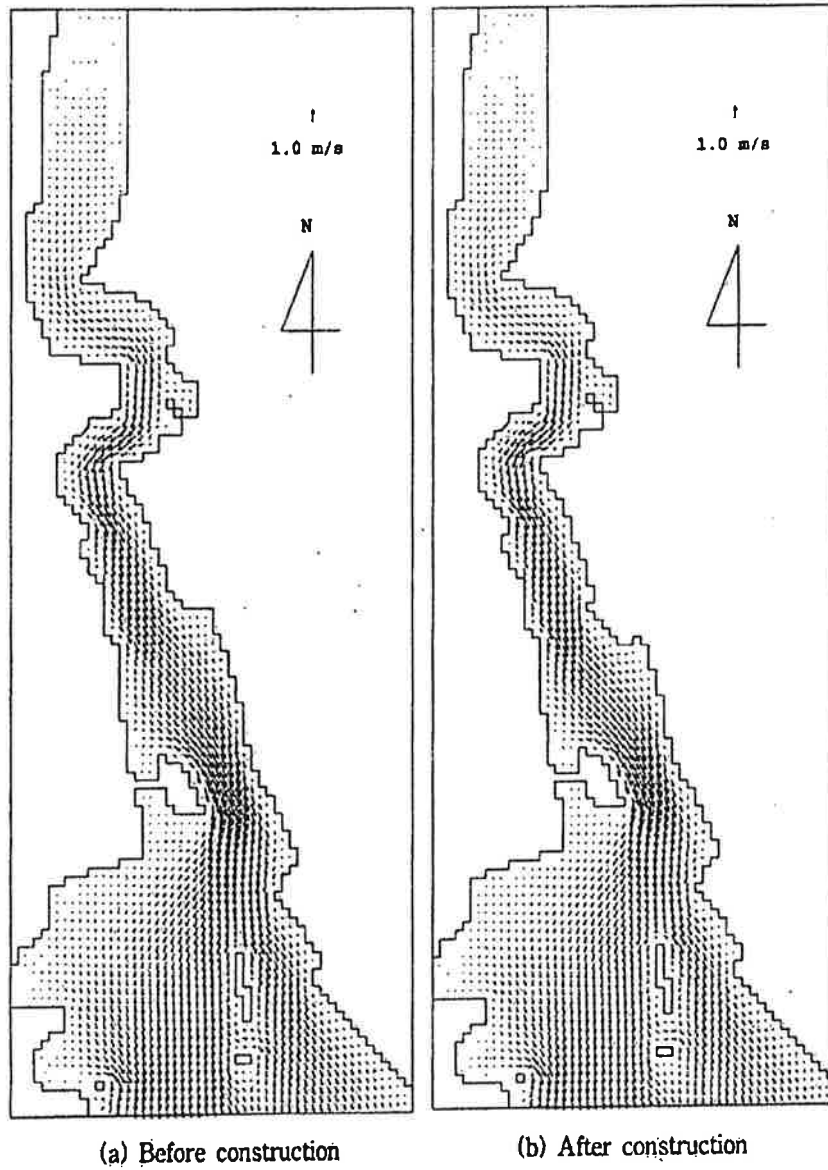


그림 4.5.4 Velocity distribution (spring, ebb tide)

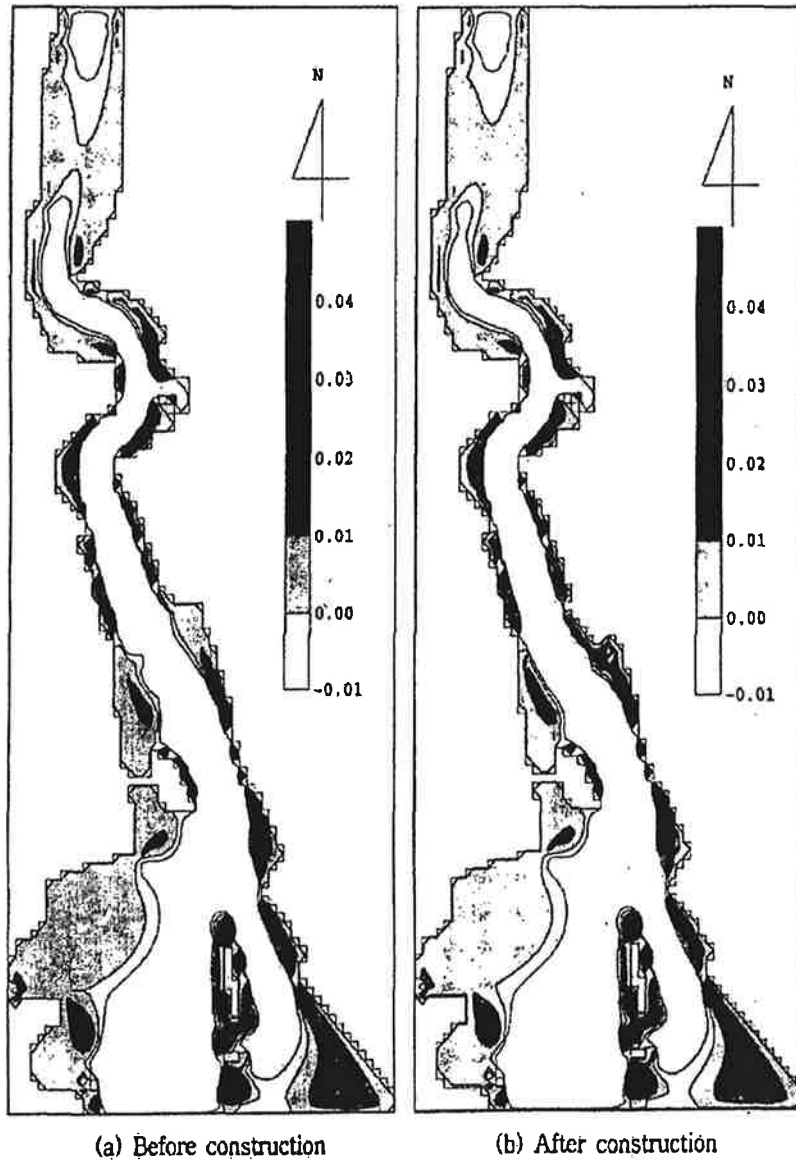


그림 4.5.5 Computed bed level change (spring, deposition)

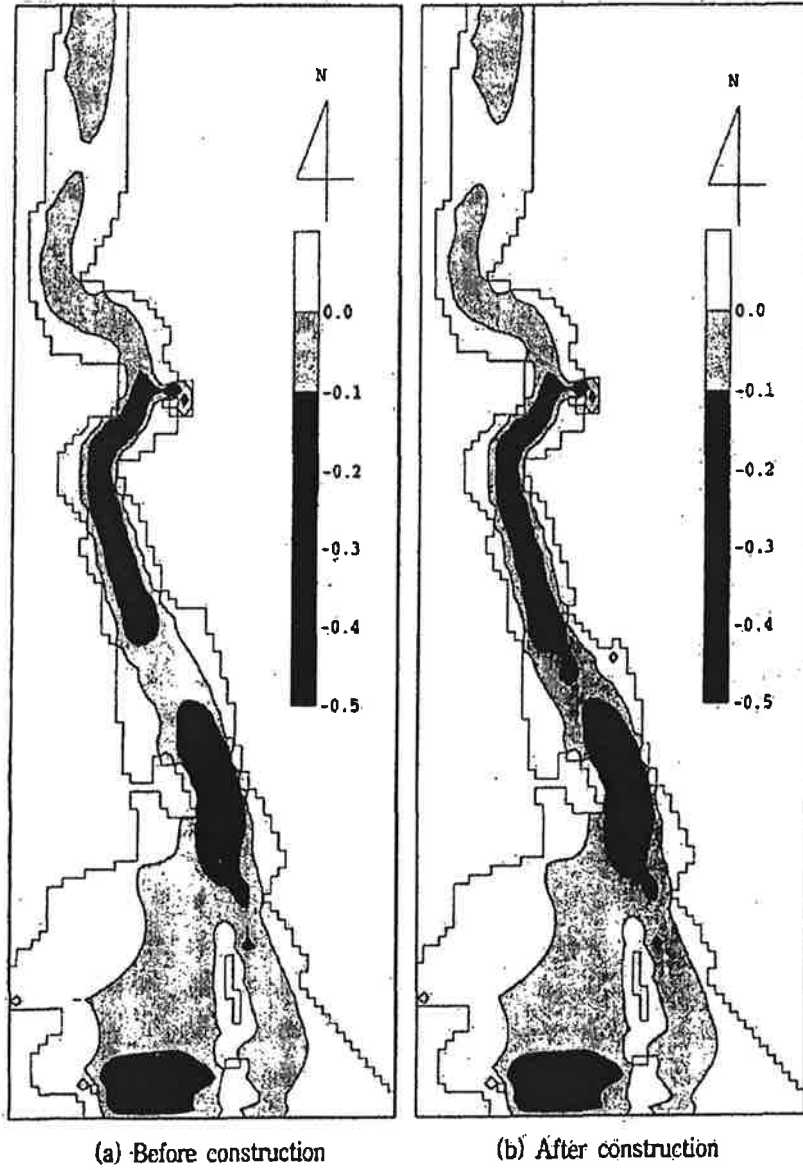


그림 4.5.6 Computed bed level change (spring, erosion)

### 3. 새만금 방조제 공사로 인한 장기 해저지형 변화

#### 가. 연구배경

현재 전라북도 연안역에서 실시하고 있는 새만금 간척사업으로 인한 환경 변화의 주된 초점은 첫째 방조제 내측에 인공적으로 조성되는 담수호의 수질오염문제와, 둘째 인근 해역의 생태계 변화에 집중되고 있다. 이에 따라 문제점으로 제기되는 환경변화 요인들의 악영향 저감방안을 강구하기 위한 구체적인 작업들이 시작되고 있다.

인근 해역의 생태계 변화는 퇴적환경의 변화와 밀접한 관련이 있으며 이는 일차적으로 해안선 및 해저지형의 변화로 나타난다. 특히 갯벌과 해변 지형을 포함한 방조제 외측에서의 극심한 변화가 예상된다. 그러나 이 같은 퇴적환경 및 연안지형의 변화는 매우 느리게, 또한 장기적이고 지속적으로 나타나므로, 변화의 정도 및 그 피해영향의 심각성이 쉽게 인지되지 않는 특징을 지니고 있다. 이에 따라 단기간에 걸친 관측과 조사자료에 근거하여 변화방향을 예측하는 것은 해석상의 한계가 있다. 따라서 퇴적환경 전반에 대한 보다 광범위하고 체계적이며 지속적인 조사 및 검토작업이 필수적인 것이다.

#### 나. 새만금 해역의 기존 환경

새만금 간척사업지구는 대조차 환경에 속하며, 조석에 의한 퇴적물의 운반 및 집적작용이 우세하게 나타난다. 또한 금강, 만경강, 동진강 등의 인접 하천으로부터 많은 양의 퇴적물이 직접 공급되어 집적되는 지역으로서, 이들 하천으로부터의 퇴적물 공급 수지의 영향이 크게 나타난다. 주로 금강을 통해 공급된 육상기원 퇴적물의 대부분은 남쪽방향으로 운반되어 만경강-동진강 하구역에 집적되는 것으로 해석된다. 그러나 금강하구언 갑문이

폐쇄되어 금강으로부터의 퇴적물 공급이 차단되는 경우 인접한 새만금 해역의 퇴적작용은 크게 변화할 것이며, 단기적으로는 방조제 외해역에서 지역적인 침식작용이 예상되기도 한다.

한편 외양으로부터 내만역으로의 퇴적물 공급도 충분히 예상된다. 비록 세립한 부유물질 형태로 운반되는 외양성 퇴적물이 강한 조석작용이 수반된 현재의 환경조건에서 새만금 연안역에 퇴적될 가능성은 희박하다. 그러나 방조제 건설로 인하여 퇴적환경조건이 저에너지 상태로 변화한 경우에는 이들 세립물질이 우세하게 집적될 것으로 예상된다.

한반도 서해해역은 계절적 몬순기후의 영향으로 퇴적작용의 계절적 변화가 매우 뚜렷하게 나타나는 동력학적으로 활동적인 퇴적환경에 해당한다. 특히 새만금 지역에서는 하계의 퇴적물 공급과 동계의 재부유-이동 현상으로 뚜렷이 특징지워진다. 따라서 방조제 건설로 인한 파랑의 생성 및 전파 과정이 변화하는 경우 강한 북서계절풍이 우세한 동계동안의 퇴적물 운반 및 집적양상은 현재의 상태와 뚜렷하게 상이할 것으로 예상된다. 새만금 방조제가 건설되면, 북부(제 4호) 방조제(비응도-야미도)의 외측은 북서계절풍의 영향에 직접 노출되는 반면, 남쪽(제 1호) 방조제(신시도-변산반도)의 외측에서는 파랑의 강도가 뚜렷하게 약화될 것으로 예상된다. 이러한 경우 북쪽 방조제에서는 침식작용이 우세하며, 남쪽 방조제에서는 퇴적작용이 우세할 것으로 예상된다. 그러나 금강으로부터 공급되는 퇴적물의 운반경로 및 세립퇴적물의 집적작용을 고려하면, 장기적으로는 북부 방조제를 따라 서쪽방향으로 흐르는 연안류가 강화되어 고군산군도 방향으로 퇴적물의 운반경로가 바뀔 것으로 보인다.

#### 다. 수치모델링

새만금 방조제 건설로 인한 방조제 외측 해역의 장기 지형변화를

DELFT3D-MOR를 사용하여 수치모델링하여 약 20년 동안의 퇴적 및 침식을 예측하였다. 사용한 모델은 네덜란드 델프트수리연구소에서 개발한 모델로 방조제 축조로 인한 조석의 변화, 파랑의 변화 및 복합효과를 계산할 수 있고 유사이동을 모의할 수 있는 종합모델이다.

#### 라. 연구결과

그림 4.5.7과 그림 4.5.8은 준설을 시행하지 않았을 경우 방조제 건설 후 5년, 10년, 20년이 경과한 시점의 변화된 해저지형을 보여 주고 있으며, 그림 4.5.7은 1호와 2호 방조제 전면, 그림 4.5.8은 3호와 4호 방조제 전면 해저에서의 장기 지형변화를 각각 보여주고 있다. 그림 4.5.7은 신시도 남측 기존 조수로에서 최대 10m 가 상회하는 퇴적과, 그 남쪽의 현재 지반이 높은 지역에서 약 2m 에 이르는 침식을 보여주고 있다. 지반이 높은 지역에서 침식된 토사가 수심이 깊은 조수로를 메꾸는 것으로 지극히 자연적인 현상이다. 그림 4.5.8은 제 4호 방조제를 따라 부분적으로 퇴적되는 구간과 침식되는 구간을 보여주고 있으나, 방조제 북쪽 현재 지반이 높은 지역에서 약 2m 에 달하는 침식현상을 볼 수 있다.



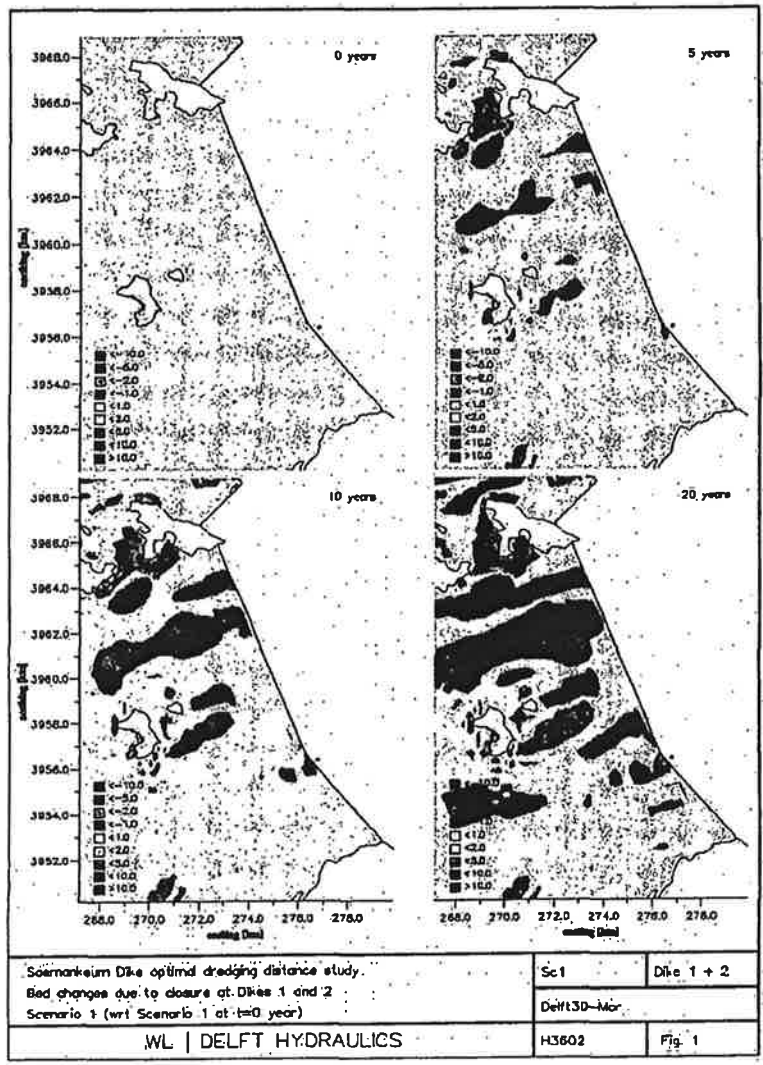


그림 4.5.7 새만금 방조제 완공후 시간에 따른 장기 지형 변화 (1,2호 방조제 전면)

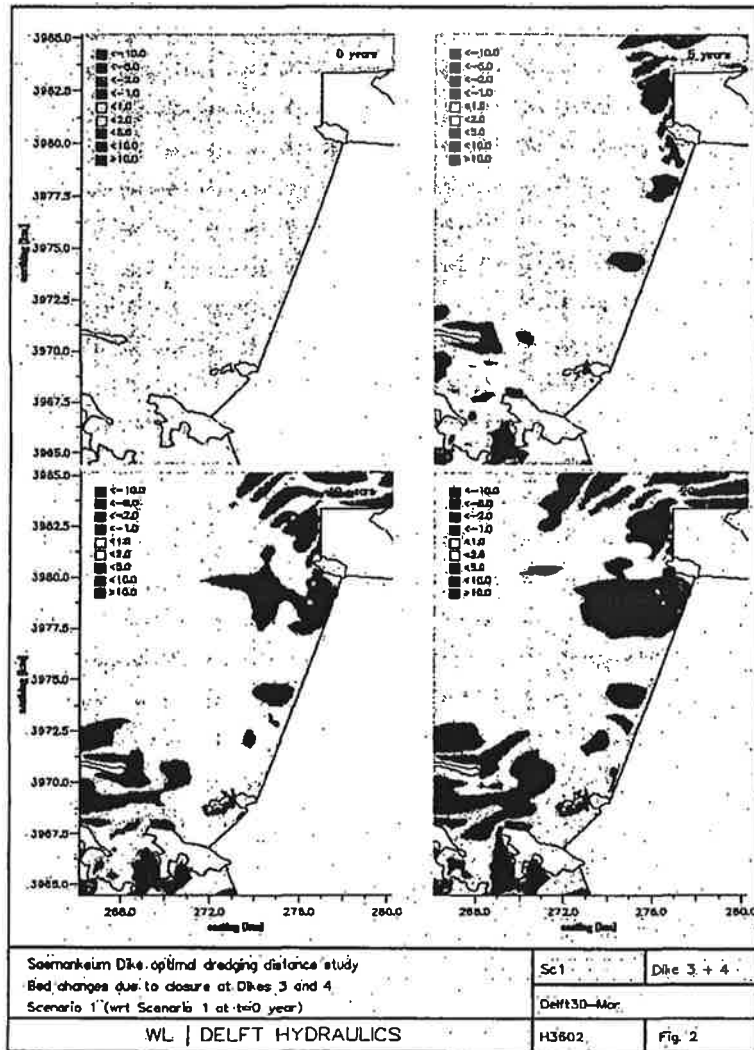


그림 4.5.8 새만금 방조제 완공후 시간에 따른 장기 지형 변화  
(3,4호 방조제 전면)

## 제 5 장 결론 및 연구결과의 활용에 관한 건의

간척 개발과 연안의 친수환경 조성에 관하여 1996년부터 3년간 수행된 연구 결과, 국토가 협소한 우리나라의 형편상, 간척사업은 주곡의 자급을 위한 불가피한 사업이다. 그러나, 개발되는 토지와 수자원의 지속적인 이용과 보존을 위하여 간척지 연안은 인간과 자연이 공존하는 쾌적한 공간으로 조성되어야 한다. 우리의 간척사업은 개발과 보존의 모순성을 극복하는 건전한 사업으로서 추진될 수 있는 기술 개발과 자연 환경을 사랑하는 주민들의 성숙된 의식이 필요하다.

### 1. 간척지 친수환경 현황 조사

#### ○ 우리나라 간척사업의 추진 현황

우리나라의 간척사업은 1980년대에 1지구당 146ha이었으나, 1990년대에 와서는 1100ha로 개발면적이 증가하고 있으며, 개발 지역은 수심이 얕은 하구로부터 심해지역으로 이동되고 있기 때문에 사업 개발에 따른 환경보존적인 대책이 필요하며, 이를 과학적으로 평가 보완할 수 있는 조석과 파랑 및 유사 이동에 관한 종합적인 기술 개발이 요망된다.

#### ○ 간척지 연안의 퇴적

서해안 간척지 연안의 부유사 농도는 200ppm 이상이며, 고려시대 이후 많은 방조제가 설치된 강화도 간척지 연안은 담수호 내측보다 높은 해안 갯벌이 조성되어 있으며, 하구에 설치된 금강하구둑과 아산호등의 연안에는 수십 cm의 퇴적 갯벌이 조성되어 있다.

곰소만 연안과 장구만의 간척지 해안은 파도와 조석의 영향으로 겨울철에 퇴적이 심하여 여름철 홍수시 배수문을 열지 못하는 경우가 많아서 이를 제거하기 위한 기술 개발이 요망된다. 본 연구에서는 이를 극복하기 위한 기술을 현지 기술자들과 협의하고 준설과 토사제거 암거 시설을 제안하였으

며, 1998년에 세부적인 별도 연구사업을 추진하게되었다.

◦ 담수호 수질 보존과 배수갑문 운영

시화방조제 건설 후 담수호 연안의 수질 보존을 위하여 배수갑문을 개방한 체로 운영 중에 있다. 담수호 구역의 수질 변화를 상류에서 하류까지 측정한 결과, 담수호 상류는 유입수의 오염 부하가 크지만 하류로 갈수록 수질은 침전과 산화 작용에 의하여 50% 이상 개선되는 것으로 나타났다.

수질 보존을 위하여 항상 개방되어온 배수갑문은 대조시 배수문 내측의 유속이 12m/s 정도로 매우 빠르고 하상 세굴이 심하여 구조물의 안전 위험이 높기 때문에 해수와 담수호 수위차이가 1m 이상될 때는 수문을 닫도록 제안하였다.

◦ 어도 운영

'99년도 4월부터 9월까지 영암호의 갑문식 어도에서 어류의 이동을 조사한 결과, 월별로 줄공치 4천마리, 빙어 1000마리, 웅어 770마리, 송어 280마리 등 소하성 어류가 담수호로 소상하였다.

◦ 걸매리 해안 퇴적 갯벌

아산만의 걸매리 해안에 설치한 보조 방조제 구역의 퇴적 현황을 조사한 결과, 1990년 설치 이후 9년이 지낸 시점에서 해안 지형은 평형상태에 이른 것으로 평가된다. 거절적인 변화를 조사한 결과, 여름에는 홍수시 상류에서 공급되는 유사에 의하여 퇴적이 우세하고 겨울에는 강한 파도에 의하여 세굴되는 것으로 나타났다.

걸매리 논과 갯벌에서 가로 1m, 세로 1m, 높이 0.6m의 장방형 시험상자를 설치하여 '99년 7월 13시간동안 오염물 정화 능력을 측정한 결과,

COD는 10% 정도의 범위 내에서 상승하거나 저감되었다. 이는 갯벌과 논이 정화능력을 단기간 내에 파악하는 것이 매우 어려우며, 새만금 갯벌과 하수종말처리장의 정화능력을 비교한 일부 환경단체의 의견을 입증하기는 어려

왔다.

◦ 선진국의 간척사업

미국, 일본, 화란 등의 선진국 간척 사업은 인간과 자연의 공생을 목표로 한 자연보존공간의 조성, 오염물 정화시설, 다양한 어도와 어류 산란시설, 갈대숲 조성 등 환경보존사업을 포함하여 개발되고 있다. 화란과 우리의 간척공사비를 검토한 결과, 화란은 우리나라보다 간척 사업비를 2-10배 정도 투자된 것으로 평가되었으며 이는 환경보존 시설의 설치에 따른 것으로 판단된다.

2. 친수환경 조성시설의 개발

◦ 침전지와 산화수로

본 연구에서 침전지와 산화수로 모형을 제작하여 오염수를 유입하여 '99년 7월부터 10월까지 3개월간 시험한 결과, 시험수로의 SS의 제거 효율은 평균 90%, COD는 80%, TN은 40%, TP 는 50%를 상회하였다. 이는 담수호 상류에서 유입되는 유량과 오염 부하정도에 따라서 적절한 규모로 설계하여 설치하는 경우, 담수호에 퇴적된 증금속과 부유 오염물을 정화하는데 효과적이다.

◦ 어도

기존의 간척지의 어도에 관한 어류 생태와 수리적 특성에 관한 조사 분석 결과, 갑문식 어도는 계단수로식 어도에 비하여 조위차이가 큰 서해안의 간척지에서 효율적인 것으로 나타났다. 그러나, 어도시설의 하류에는 어류가 소상하기 전에 육식성 조류의 공격을 피하고 충분한 휴식을 취할 수 있는 쉼터를 설치하는 것이 바람직하다. 본 연구 결과는 영산강하구둑과 새만금 방조제의 통선문을 이용하여 갑문식 어도를 설치하도록 기술 지원되었다.

○ 자연보존구역

간척지 연안에서 적절한 규모의 자연 환경 보존구역은 자연적인 생태 서식 공간을 제공하는데 있어서 바람직하다. 담수호 내에도 갈대 숲과 생태 공간을 확보하여 주민들의 위락 공간과 야생의 동식물들의 서식 공간을 제공토록 요망된다.

○ 환경사 방조제

간척지 연안의 환경사 방조제에 관한 수리시험 결과, 환경사 방조제는 지금까지 설치되어온 급경사 제방보다 진입 파도의 높이를 줄여서, 연안의 바다 쪽 경관을 개선하고 편안한 쉼터를 제공하며, 어류 서식 공간을 제공한다. 환경사 방조제는 수심이 깊고 파고가 높을수록 감세효과가 큰 것으로 나타났다. 본 연구 결과는 새만금지구 4호 방조제 비탈면 보완에 실용화되었다.

○ 잠제

잠제는 방조제를 월류하는 파고를 줄이는데 유리하지만, 조위차이가 큰 서해안에서 만조시 파도의 감세효과가 매우 저감된다. 또한, 이는 방조제에서 격리되므로 접근성이 적다.

○ 긴팔형 수제공

본 방조제와 연결하는 긴팔형 수제공은 조석의 변화와 파랑의 진입이 큰 연안에서 세굴을 억제하거나 새로운 갯벌을 조성하는데 효과적이다. 이는 새만금 물막이 공사구역의 세굴 방지와 친수 공간을 확보하기 위하여 제안되었다.

○ 임시물막이댐의 활용

방조제 배수갑문 외곽에 임시물막이 댐의 일부 시설은 배수갑문 공사

후에도 남겨서, 물막이 단계에서 바다물이 호수쪽으로 유입될 때 유속을 감소하고 진입 파랑을 감쇄하는 것으로 나타났다. 이러한 시설의 설치는 어류의 서식처와 철새들의 중간 기착지 그리고 소형 선박의 대피처로 활용될 수 있다. 배수갑문 하류에서 적절한 깊이의 물방석은 갑문 하류의 흐름과 세굴을 완화하여 어류의 서식 공간을 제공한다. 새만금지구 가력배수갑문과 화옹방조제 배수갑문 및 시화지구 등은 방조제 물막이 공사 후에도 수질보존을 위하여 배수갑문을 개방할 가능성이 높으므로 배수갑문 내측에도 물방석을 설치하는 방안을 본 연구 결과를 활용하여 각 지구별로 수리모형시험을 수행하여 시설물들을 보완토록하였다.

◦ 석재의 환경친화적 가치

친수 공간 확보를 위한 구조물의 계획은 석재 자원과 돌망태 및 콘크리트 폐자재 등을 이용이 가능하며 천연 자원의 훼손을 최소화하는 방안이 필요하다. 특히, 새만금과 화옹지구등 방조제 물막이구간의 제방과 바닥보호공으로 설치된 돌과 돌망태는 어족 자원의 보호와 서식에 있어서 콘크리트 구조물에 비하여 탁월한 것으로 판단되며, 지금까지 간척사업에 주로 사용되어온 돌과 흙 재료는 지속가능한 환경 보존에 기여한 것으로 판단된다.

3. 수치모델의 도입

간척지 연안의 조석변화와 파랑 변형 유사 이동 및 수질 변화 예측에 관한 수치모형은 현장 검정과 시범지구에 대한 활용을 통하여 신뢰성이 높은 기법으로 개발하였다.

◦ 조석변화 예측 모형

조석변화 예측 모형은 시화지구와 영종도 개발에 따른 조석 변화 구역에 대한 검정을 거친 후, 새만금지구, 영산강 하구등 조석변화 예측 및 홍보지구 방조제 구역의 조석 변화 예측 등에 활용되었다. 결과적으로, 인천만의 해안 개발에 따라서, 인천만 연안은 8cm 정도 조위가 저하되며, 인천항

의 유속은 최대 유속은 1.4m/s로서 개발 전보다 0.2m/s 정도 상승하는 것으로 예측되었다. 새만금 방조제 건설후, 방조제 중심부인 고군산 군도 연안의 만조위는 5cm 정도 저하되며 유속은 공사전의 0.5m/s에서 0.25m/s로 감소할 것으로 전망된다. 환경보존적인 배경에서 유보된 영산강 4단계지구의 방조제가 건설되는 경우, 조위변화는 매우 미미하다. 홍보지구는 방조제 건설 후 조위 상승에 대비하여 조위 방지벽을 설치토록 설계되었으나, 수치모델 분석 결과, 조위 변화가 미미한 것으로 판단되어 조위방지벽 설치계획을 취소하여 공사비 약 5억원을 절감하였다.

○ 수질 예측 모형

수질변화 예측모형은 새만금 방조제 구역의 수질과 부유사 농도 변화 예측을 위하여 분석되었다. 이는 조석모형 분석 결과를 이용하여, 방조제 설치에 따른 조석별 유속 형태의 변화를 고려하여 방조제 공사중 또는 완공 후의 조석 흐름의 지체구역 파악 및 연안의 수질 변화 예측에 활용토록 개발되었다.

○ 파랑 예측 모형

파랑변화 예측모형은 새만금 방조제 구역에 설치한 파고계 관측 자료와 바람자료에 의하여 방조제 완공 후 내습하는 파랑이 굴절되거나 회절되는 변화를 예측하기 위하여 분석되었다. 이는 조석모형 분석 결과를 이용하여, 방조제 설치 구역에서 조석과 파랑의 상관성을 고려한 결합확률 개념을 도입하여 방조제 공사중 또는 완공 후의 방조제 월파 안전 파악 및 연안의 지형 변화 예측에도 활용토록 개발되었다.

○ 지형 예측 모형

지형변화 예측모형은 새만금 방조제 구역에서 조사된 조석 관측자료, 파고계 관측 자료 및 지형 조사자료에 의하여 방조제 완공 후 연안의 갯벌 조성 및 세굴 영향을 예측하기 위하여 분석되었다. 이는 조석모형과 파랑 모



형 분석 결과를 이용하고, 방조제 설치에 따른 조석 형태와 유사이동 변화를 고려하여 방조제 공사중 또는 완공 후의 방조제 안전과 갯벌의 생성 예측에도 활용토록 개발되었다.

간척지 연안의 조석, 파랑, 유사 이동, 수질 변화에 대한 수리설계는 관용적인 경험 공식을 지양하고, 본 연구에서 도입된 컴퓨터 수치 모형과 수리모형시험을 통하여 과학적으로 분석토록 요망된다.

#### 4. 연구 결과의 활용에 관한 건의

연구 결과의 일부는 연구 기간 중 새만금지구, 화옹지구, 홍보지구 등 방조제 공사구역의 시공에 실용화 되었으며, 국내외 학술회의 논문 발표 및 실무자 교육 등으로 다음과 같이 활용되었다.

'98. 4. 전북 고창군 곰소만 해안의 퇴적피해 공동 조사 및 대책 수립

'98. 5 충남 서천군 장구만 배수문 퇴적토 제거를 위한 도로 계획 기술 지원

'98. 7. 새만금방조제 가력배수갑문 물방석 구조 개선 계획 협의

'98. 8 영산강 하구둑의 통선문을 이용한 갑문식 어도 설치 기술 지원

'98. 8 새만금 방조제의 계단식 어도는 만조시 운영이 곤란하므로  
통선문을 이용한 갑문식 어도로 변경토록 기술 지원

'99.10 환경친화적 수리시설물 개발에 관하여 농지개량조합 및 공무원  
교육 (강의 : 박 상현 , 국가 전문 행정 연수원 )

'99.10 국제 수리환경 학술대회( Water Environment, Ecology,  
Socio-Economics and Health Engineering)에 수치모형 개발 연구  
결과 발표 (발표자 : 조진훈, 장소 :서울대 호암 콘벤션 홀)

본 연구를 통하여 개발 도입된 수리 시설과 전산 모형은 새만금, 시화, 영산강, 화옹, 홍보지구 등 대규모 방조제 시설과 담수호 수질 정화 시설의 설계 등 간척지 환경을 보존하는데 있어서 다음과 같이 활용

되도록 요망된다.

- 심해 방조제 등 간척지 연안의 환경변화 예측 및 피해 저감대책 수립
- 간척지 연안의 친수공간 조성을 위한 수리시설물 계획 수립
- 간척 사업에 따른 개발 효과와 환경보존의 균형 있는 관리방안 수립

결론적으로 우리의 간척사업의 개발과 보존은 토지와 수자원 및 식량의 자급체계가 열악한 현실에서 불가피하지만 해안 환경을 보존하고 개선하기 위한 기술의 개발과 보급이 절실하다.

이러한 배경에서 수행된 본 연구 결과는 간척사업에 따라서 변화되는 연안의 조석, 파랑, 유사 이동 및 이에 따른 해안수리 및 수질 환경 변화를 수치모형에 의하여 종합적으로 예측 평가하고 개발에 따른 토지와 수자원 확보, 교통개선, 접근성과 쾌적성 등의 긍정적인 효과를 극대화하고, 갯벌의 감소, 연안 어류의 이동과 서식 공간과 생태 환경의 다양성 감소, 흐름 정체구역에서의 오염물 퇴적 등 부정적인 변화를 최소화하거나 개선할 수 있는 기법(mitigation)으로 활용되도록 요망된다.

또한, 이러한 기술의 적용을 위하여 추가적인 공사비가 소요되므로 사업의 타당성 평가에 있어서, 환경의 회복기능 및 부정적인 피해를 최소화하는데 따른 효과를 반영할 수 있는 기술 정책의 지원 환경이 조성되도록 요망된다.

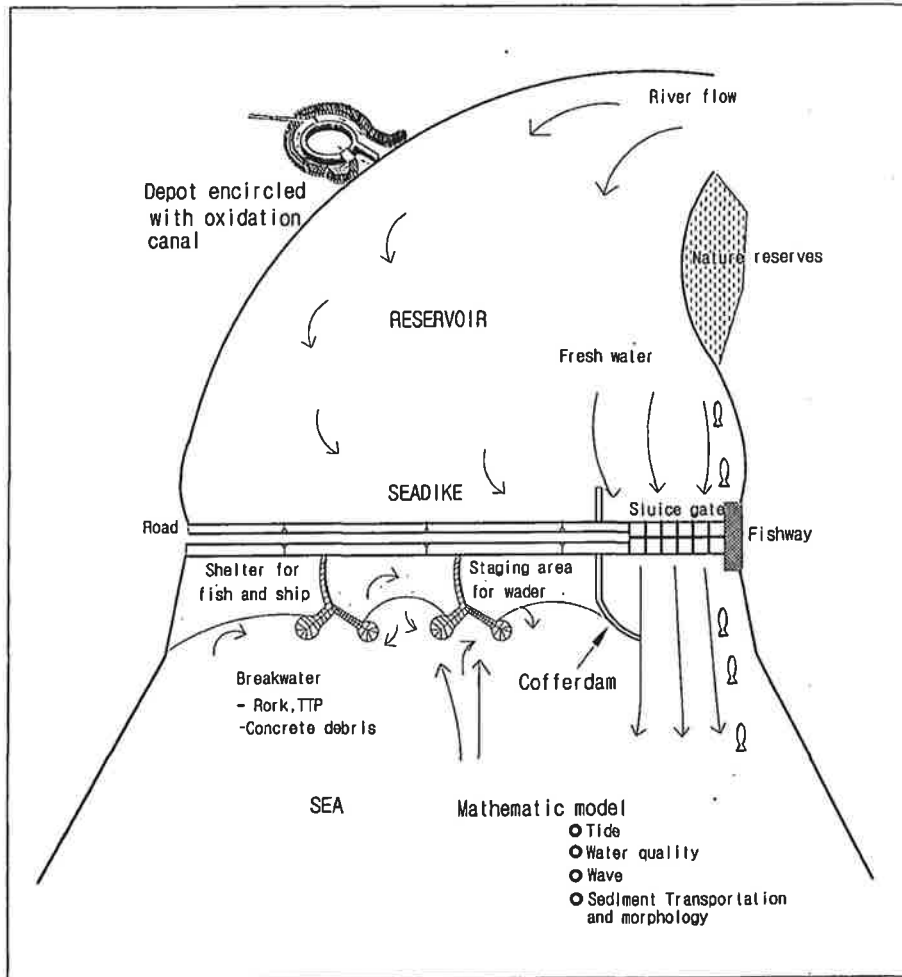


그림 5.1 간척지 연안의 친수환경 및 수치모델의 구성 시스템

# 여 백

## 참고문헌

- 농어촌진흥공사, 1985, 금강하구둑 수리모형시험보고서, 85-10-05 농어촌진흥공사
- 농어촌진흥공사, 1996, 새만금지구 수리실험 및 파랑관측보고서.4, 방조제 축조재료 수리시험, 농어촌진흥공사 농어촌연구원
- 농어촌진흥공사, 1996, 한국의 간척, 농어촌진흥공사
- 농어촌진흥공사, 1997, 어도의 설계지침, 농어촌진흥공사
- 농어촌진흥공사, 1999, 일본과 네덜란드의 친환경 간척, 농어촌진흥공사 농어촌연구원
- 박 상현, 1999, 비와꼬의 지속가능한 개발 현황, 한국관개배수지 Vol. 5 No.2, 한국관개배수위원회
- 박 상현, 1997, 방조제 개방구간의 루하 석재와 돌망태 안정성 수리시험 연구, 한국관개배수지 Vol. 4 No.2, 한국관개배수위원회
- 박상현, 1999, 환경친화적 수리시설 개발, '99. 10 국가 전문 행정연수원 강의교재
- 박상현, 김원장, 1999, 담수호 수질 개선을 위한 침전지와 산화수로 조성, 농공기술지 No.62, 농림부, 농어촌진흥공사
- 박영옥 외, 1997, 유한요소법을 이용한 방조제 건설전후의 조석특성 변화 예측, 한국관개배수지 Vol.4 No.1, 한국관개배수위원회
- 다산연구회, 1985, 역주 목민심서(5권), 다산연구회
- 어대수, 1999, 간척사업의 통합적 관리, 간척사업의 평가 이대로 좋은가, 한국농공학회
- 일본 건설성, 1995, 실무자를 위한 해안공학, 山海堂

- 조진훈, 박상현 외, 1997, 하구둑 설치연안의 조석특성 연구, 농어촌진흥공사
- 임종완, 임상봉, 1999, 대단위 간척사업의 간접효과 분석, 농공기술지 No. 62, 농림부, 농어촌진흥공사
- 해양수산부, 1998, 우리나라의 갯벌, 해양수산부
- 환경부, 1996, 갯벌보전과 이용의 경제성 평가
- 황중서, 1986, 錦江 河口둑에 施工中인 魚道와 魚類生態. 자연보존 54: p 32-40.
- 황중서, 1988, 防潮堤 建設과 魚道. 農工技術 5(1):12-25.
- 황중서, 김미옥, 1991, 淡水湖의 魚道利用에 關한 研究. 연구보고서, 농어촌진흥공사 농어촌연구원.
- 황중서, 1996, 하구어도 현황과 이용 농공기술 NO. 50 농어촌진흥공사
- 황중서, 1998, 하구에 설치한 어도 이용에 관한 연구 1차년도 보고서, 농어촌진흥공사 농어촌연구원
- 황중서, 허협 1999, 양양 남대천과 영덕오십천의 어도현황과 어류의 이용, 한국농공학회 학술발표회 논문집
- 농어촌진흥공사, 1997, 어도(魚道)의 설계지침. 188p. 농어촌진흥공사 .
- 水野信彦, 1995, 魚にやさしい川のかたち. 信山社.
- 玉井信行, 水野信彦, 中村俊六, 1995, 河川生態環境工學[魚類生態と河川計劃]. 東京大學出版會.
- 유봉석, 1979, 참게의 이동과 성장에 관하여. 부산수대 논문집 9집, 351-361.
- 中村俊六, 1993, 人工化が進む河道内で生態環境をより良くするための河川構造物に關する研究 科學研究費補助金 研究報告書 研究番號 03650420.
- 中村俊六, 1995, 魚道のはなし(魚道設計のためのガイドライン) 山海堂.

- 최기철. 1994. 우리 민물고기 백가지. 532p. 현암사 .
- 환경부. 1997. 제2차 자연환경 전국 기초조사 지침, 환경부.
- 황종서외 5인. 1997. 양양양수발전소 1-4호기 설계기술용역 하부댐 어도설  
치 연구용역 보고서. 173p. 농어촌진흥공사 농어촌연구원, 삼안기술공사.
- 황종서, 1996. 하구의 어도 현황과 이용. 농공기술. 50 : p109 - 118.
- 황종서, 1997. 한국형 어도모델 개발. 농진공 기술설명회 발표집. p589 -  
620.
- 이종섭, 김차겸, (1991), 하구에서 TWO-LEVEL 모델에 의한 해수 유동 및  
확산에 관한 수치실험, 한국수산학회지, 21(1)
- 이문진, (1991), 연안역 확산 수치모델에 적합한 와확산계수의 추정, 부산  
수산대학교 석사학위 논문
- 이종섭, 김차겸, (1991), 하구에서 TWO-LEVEL 모델에 의한 해수유동 및  
확산에 관한 수치실험, 한국수산학회지, 21(1)
- 정연철, (1992), 수영만의 수질 모델링에 관한 연구, 부산수산대학교 석사  
학위 논문
- 최병욱, Eulerian-Lagrangian Analysis(ELA), (1994), 모형을 이용한 오염  
물질 이동 예측, 서울대학교 석사학위 논문
- 이은주, (1995), 수영만해역에 있어서의 오염물질 거동에 대한 수치모델  
개발, 부산대학교 석사학위 논문
- 황재동, (1993), 수영만으로 유입되는 하천수들이 수영만과 인접해에  
미치는 영향, 부산수산대학교 석사학위 논문
- 이문진, (1997), 연안역 활동확산 관측 및 프렉탈 확산 모델링, 한국해안·  
해양공학회지, 25(2)
- 정연철, (1992), 수영만의 해수순환 및 확산에 대한 수치모델링, 한국수산  
학회지, 25

- 서승원, (1998), 근역에서 부력입자추적모형을 적용한 Eulerian-Lagrangian 결합에 의한 은수확산, 한국해안·해양공학회지, 10(2)
- 이시진, 수질모형과 관리, 동화기술
- 농어촌진흥공사, 1997, 새만금지구 단수호 수질보전대책수립 조사연구( I )
- 농어촌진흥공사, 1995, 새만금지구 간척 종합개발사업 사후환경영향조사 보고서
- 박영욱, 1996, 델프트 수리시험소 해외연수 귀국 보고서
- 박재용, 1997, Random Walk 입자추적법에 의한 1차원 하구 염분도 모델링. 관동대학교 석사학위 논문
- Dimou, K. N. 1989, Simulation of mixing using a two-dimensional random walk model, S. M. Thesis, Department of Civil Engineering, MIT, Cambridge, Massachusetts
- Dimou, K. N., and Adams, E. E., 1993, A Random-walk, Particle Tracking Model for Well-mixed Easuaries and Coastal Waters, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol 37, pp. 99-110
- Tompson, A. F. B. & Gelhar, L. W., 1990, Numerical simulation of solute transport in three-dimensional randomly heterogeneous porous media, Water Resourecs Research, Vol. 26, pp. 2541-2562
- Heemink, A. W., 1990, Stochastic modelling of dispersion in shallow Water, Stochastic Hydrology and Hydraulics, Vol. 4, pp. 161-174
- Heemink, A. W., 1993, Tidally Averaged Models for Dispersion in Shallow Water, Water Ressources Research, Vol. 29, No. 3, pp. 607-617
- Dyer (editor), Esturine Hydrography and Sedimentation, Cambridge Univ. Press, pp. 87-130
- Choi, B. H. 1980. A Tidal Modal of the Yellow sea and Eastern china



- sea, KORDI Report BSPI 00019(3).-36-2
- Baptista, A. E. de M., E. E. Adams and K. D. Stalzinbach, 1984, Eulerain-Lagrangian analysis of pollutant transport in shallow water. MIT Rep. MI-R84-11., pp 140
- Maier-Reimer, E. and J. Sundermann, 1982, On tracer Methods in Computational Hydrodynamics. In: M.B. Abbott and J.A. Cunge (eds.), Engineering Applications of Computational Hydraulics, Vol. 1, pp. 198-217
- Mesinger, F. and A. Arakawa, 1976, Numerical Methods used in atmospheric Models, Global Atmospheric Research Programe, WH00-ICSU Organixing Committe, Vol. 1
- Kim, Y. S. and Han, Y. H., 1982, A Study in the characteristics of the Circulation and Diffusion in Suyeong Bay. Bull. Korea Fish. Tech, Soc. 18(2):55-61
- Charls H. Clay. 1995, Design of Fishways and Other Fish Fascilities. 248p. Lewis Publishers.
- 滋賀 環境, 1995, 日本 滋賀縣
- 水環境創造研究會, 1997, Mitigation과 第三의 國土空間, 日本共立出版 株式會社
- Centre for Civil Engineering Research and Codes, 1995, Manual on the Use of Rock in Hydraulic Engineering, Ministry of Transport, Public Works and Water Management, Netherland.
- J. D. Simm, 1996, Beach management manual, CIRIA Report 153
- Simons and Senturk, 1976, Sediment Transport Technology, Water Resources Publications Fort Collins, Colorado, USA

A.A. Balkema 등, 1995, Manual on the use of Rock in Hydraulic Engineering, Center for Civil Engineering Research and Codes, the Netherlands

G.P. Van De Ven, 1996, Man-Made Lowlands History of Water Management and Land Reclamation in the Netherlands. International Commission on Irrigation and Drainage.

William J. Mitsch and James G. Gosselink, 1993, Wetlands, Van Nostrand Reinhold, New York

## 부록

### A1. 강화도 해안 제방의 역사

- 1235년 해안제방 축조(해상방어용)
- 1238년 최우, 강화도 연안에 제방을 축조
- 1248년 북방의 유민을 이주
- 1253년 간척제방 축조(군량미확보 목적)
- 1256년 계포(梯浦), 와포(瓦浦), 초포(草浦), 이포(狸浦) 제방축조
- 1636년 삼간포둑 축조
- 1659년 간척제방 굴곶둑(屈串둑) 축조
- 1660년 간척제방 대청둑(大靑둑) 축조
- 1665년 간척제방 장지둑(長池둑) 축조
- 1680년 간척제방 굴간포둑(屈干浦둑) 축조 (각 도 난민을 수용)
- 1696년 간척제방 기포둑(紀浦둑) 축조
- 1706년 간척제방 선두둑(船頭둑) 축조
- 1715년 간척제방 선두중둑(船頭中둑) 축조
- 1777-1800 사곡남북둑(沙谷南北둑) 등 21개 축조

표 A.1.1 가능평의 방조제

명 칭	위 치	관 리	준공 연도	길이(m)	높이(m)	폭(m)
진강 (가능)둑	내가면 외포리 - 건평리		1665			
하일둑	양도면 하일리	민축	?			
가능포 방조제	하일리 진남지구	국가	1963	2,100	2.0	2.0
후포 방조제	화도면 내리 진남지구	국가	1963	1,206	2.0	2.0

표 A.1.2 화란 Zuiderzee 간척지 polder의 개발 현황

지역별	개발면적(ha)	방조제 공사기간	개발 기간
Wieringmeer	20,000	1927-1929	1930-1940
Northeast Polder	48,000	1936-1940	1942-1962
Eastern Flevoland	54,000	1950-1956	1957-1976
Southern Flevoland	43,000	1959-1967	1968-
Markerward	41,000	1941, 1956 1963-1975	

표 A.1.3 화란과 한국의 간척사업비 구성 비교

금액	화란 간척 (금액:백만 \$)		한 국 (금액:십억원)	
	Haringvliet	E. scheldt	새만금 방조제	금강하구둑
총 공사비	267	3,132	950	80
조사설계비	21.5(8%)	219(7%)	8(0.9%)	2.6(3.2%)
시험 연구비	13.5(5%)	282(9%)	17(1.8%)	0.2(0.3%)
공 사 비	218.5(82%)	2412(77%)	909(95.6%)	71.6(89.5%)
공사관리비	13.5(5%)	219(5%)	16(1.7%)	5.6(7.0%)

표 A.1.4( 6) polder지역의 토지 이용을 현황

이용을	Wieringmeer	Northeast Polder	Eastern Flevoland	Southern Flevoland
농업	87 %	87 %	75 %	50 %
주거	1	1	8	18
삼림 자연지역	3	5	11	25
도로,수로	9	7	6	7

## A2. 영암호 상류 어류상

Date: '98.3 - 10

Scientific name	Common name	조사일자						Total	%	Rem
		3/1	4/15	5/2	8/2	9/20	10/23			
Osteichthyes 경골어강										
Clupedia 청어목										
Plecoglossidae 은어과										
<i>Plecoglossus altivelis</i>	은어	-	-	-	-	1	-	1	0.2	P
Osmeridae 바다빙어과										
<i>Hypomesus olidus</i>	빙어	8	3	-	-	-	-	11	1.7	P
Cypriniformes 잉어목										
Cyprinidae 잉어과										
<i>Cyprinus carpio</i>	잉어	-	-	-	-	4	1	5	0.8	F
<i>Carassius auratus</i>	붕어	3	-	11	2	9	1	26	4.1	F
<i>Pseudogobio esocinus</i>	모래무지	-	1	2	1	-	-	4	0.6	F
<i>Squalidus gracilis majimae</i>	긴물개	21	12	6	13	-	-	52	8.2	F
<i>Pseudorasbora parva</i>	참붕어	-	17	8	7	-	14	46	7.2	F
<i>Pungtungia herzi</i>	돌고기	6	-	1	1	-	3	11	1.7	F
<i>Aphyocypris chinensis</i>	외물개	-	-	1	-	-	-	1	0.2	F
<i>Moroco oxycephalus</i>	버들치	3	2	1	-	-	-	6	0.9	F
<i>Zacco platypus</i>	피라미	16	8	12	-	21	26	83	13.1	F
<i>Zacco temminckii</i>	갈겨니	8	-	3	3	4	5	23	3.6	F
<i>Hemiculter leucisculus</i>	살치	-	8	2	-	3	3	16	2.5	F
<i>Acheilognathus lanceolatus</i>	납자루	4	31	27	7	1	20	90	14.2	F

<i>Rhodeus ocellatus</i> 흰줄납줄개	-	-	4	-	1	1	6	0.9	F
<i>Rhodeus uyekii</i> 각시붕어	1	3	13	18	3	1	39	6.1	F
<i>Microphysogobio yaluensis</i> 돌마자	-	-	1	-	10	-	11	1.7	F
<i>Cobitis taenia lutheri</i> 점줄종개	3	-	2	10	6	2	23	3.6	F
<i>Cobitis longicarpus</i> 왕종개	-	3	3	-	2	-	8	1.3	F
<i>Misgurnus anguillicaudatus</i> 미꾸라지	-	5	6	-	8	5	24	3.8	F
<i>Misgurnus mizolepis</i> 미꾸라지	-	-	-	-	1	-	1	0.2	F
Siluridae 메기과									
<i>Silurus asotus</i> 메기	-	1	-	-	1	-	2	0.3	F
Bagridae 등자개과									
<i>Pelteobagrus nitidus</i> 밀자개	-	-	3	1	-	-	4	0.6	F
<i>Anguilla japonica</i> 뱀장어	-	1	-	-	1	-	2	0.3	P
Gadiformes 대구목									
Gasterosteidae 큰가시고기과									
<i>Gasterosteus aculeatus</i> 큰가시고기	2	-	-	-	-	-	2	0.3	P특
Cyprinodontiformes 송사리목									
Oryziidae 송사리과									
<i>Orizias latipes</i> 송사리	-	-	19	-	-	-	19	3.0	S
Symbranchiformes 드렁허리목									
Symbranchidae 드렁허리과									
<i>Monopterus alba</i> 드렁허리	-	-	-	-	1	-	1	0.2	F
Perciformes 농어목									
Gobiidae 망둥어과									
<i>Rhinogobius brunneus</i> 밀어	23	5	27	5	-	12	72	11.3	P
<i>Chaenogobius urotaenia</i> 꼭저구	10	2	3	4	3	-	22	3.5	P

<i>Acanthogobius elongata</i> 왜푼망둑	2	-	-	-	-	-	2	0.3	M
<i>Acanthogobius ommaturus</i> 가실망둑	1	-	-	-	-	-	1	0.2	M
<i>Tridentiger brevispinis</i> 민들검정망둑	1	-	2	-	-	6	9	1.4	P
<i>Tridentiger trigonocephalus</i> 두줄망둑	-	-	1	-	4	-	5	0.8	P
<i>Trachydermus fasciatus</i> 걱정이	2	3	-	2	-	-	7	1.1	P
<b>Total</b>	<b>114</b>	<b>105</b>	<b>158</b>	<b>74</b>	<b>84</b>	<b>100</b>	<b>635</b>	<b>100.0</b>	

---

Habitat analysis	3/1	4/15	5/2	8/2	9/20	10/23	Total
F:Freshwater fish(1st):	9	11	18	10	15	12	22 Species
S:Freshwater fish(2nd):	-	-	1	-	-	-	1 Species
P:Peripheral fish:	6	5	4	3	4	2	9 Species
M:Marine fish:	2	-	-	-	-	-	2 Species
Total species number:	17	16	23	13	19	14	34 Species



### 수계별 어류상

Scientific name	Common name	Station													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Cyclostomi 원구강															
Myxinida 떡장어목															
Paramyxinidae 피장어과															
	<i>Lamperta japonica</i> 칠성장어	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	<i>Lamperta reissneri</i> 다묵장어	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Osteichthyes 경골어강															
Clupedia 청어목															
Dorosomatidae 전어과															
	<i>Konosirus punctatus</i> 전어	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Engraulidae 멸치과															
	<i>Coilia ectenes</i> 용어	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Salmonidae 연어과															
	<i>Brachymystax lenox</i> 열목어	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	<i>Oncorhynchus keta</i> 연어	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	<i>Oncorhynchus masou v. ishikawai</i> 산천어	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	<i>Oncorhynchus masou</i> 송어	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	<i>Salmo gairdneri irleus</i> 무지개송어	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Plecoglossidae 은어과															
	<i>Plecoglossus altivelis</i> 은어	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Osmeridae 바다빙어과															
	<i>Hypomesus olidus</i> 빙어	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

Salangidae 뱀어과	
<i>Salangichthys microdon</i> 뱀어	. . . . . + . . . +
<i>Neosalanx andersoni</i> 도화뱀어	. . . . . + . . . .
<i>Neosalanx jordani</i> 갯뱀어	. . . . . + . . . .
Cypriniformes 잉어목	
Cyprinidae 잉어과	
<i>Cyprinus carpio</i> 잉어	+ + + + + + + + + + . . . +
<i>Cyprinus carpio specularis</i> 유럽잉어	. . . . . + . . . . . . . . . .
<i>Carassius auratus</i> 붕어	+ + + + + + + + + + + + + +
<i>Hemibarbus labeo</i> 누치	+ + . . + + + + . + + . . . .
<i>Hemibarbus longirostris</i> 참마자	+ + . + + + + + + + + . . . .
<i>Hemibarbus mylodon</i> 어름치	+ + . . + . . . . . . . . . .
<i>Pseudogobio esocinus</i> 모래무지	+ + + + + + + + + + + . . . .
<i>Abbotina rivularis</i> 버들매치	+ + . . + + + + + . . . . .
<i>Abbotina springeri</i> 왜매치	. + + . + + + . . . . . . . .
<i>Gnathopogon strigatus</i> 즐물개	. + . . + . + * . . . . . . . .
<i>Squalidus chankaensis suchigae</i> 참물개	. + . . . . + . . . . + . . . . .
<i>Squalidus japonicus coreanus</i> 물개	. + . . + + + + . + * * . . . .
<i>Squalidus gracilis majimae</i> 긴물개	+ + + + + + + + + + + + . . . .
<i>Squalidus multimaculatus</i> 점물개	. . . . . + . . . . + . . . . .
<i>Pseudorasbora parva</i> 참붕어	. + + + + + + + + + + + . . . .
<i>Sarcocheilichthys nigripinnis morii</i> 중고기	+ . . + . + * . + * . . . . .
<i>Sarcocheilichthys variegatus wakiyae</i> 참중고기	+ + . . + . + + * * + . . . . .
<i>Pungtungia herzi</i> 돌고기	. + . + + + + + + + . . . . .





<i>Barbatula toni</i> 종개	. + . . . . . +
Siluridae 메기과	
<i>Silurus asotus</i> 메기	+ + . . + + + + . . + . . +
<i>Silurus microdorsalis</i> 미유기	. + . . . . + . . . . . +
Bagridae 동자개과	
<i>Pelteobagrus fulvidraco</i> 동자개	. + . . + + + + . . . . +
<i>Pelteobagrus nitidus</i> 밀자개	+ + . . + . + . . . . . . .
<i>Pseudobagrus ussuriensis</i> 대농갱이	. + . . + . . . . . + . . . .
<i>Pseudobagrus</i> sp. 눈동자개	+ + . . + + + + . . + . . . .
<i>Coreobagrus brevicorpus</i> 꼬치동자개	. . . . . . . . . . + . . . .
Amblicipitidae 뿔가리과	
<i>Liobagrus andersoni</i> 뿔가리	+ + . . . . . . . . . . +
<i>Liobagrus mediadiposalis</i> 자가사리	. . . . + + + + + + + . . . .
<i>Liobagrus obesus</i> 통사리	. . . . + + . . . . . . . . . .
Anguilliformes 뱀장어목	
Anguillidae 뱀장어과	
<i>Anguilla japonica</i> 뱀장어	+ + . . + + + + + + + . . +
Beloniformes 동갈치목	
Hemiramphidae 학공치과	
<i>Hemiramphus sajori</i> 학공치	. . . . + . . . . + . . . . .
<i>Hemiramphus kurumeus</i> 줄공치	. . . . + + . . + . . . . . .
Gadiformes 대구목	
Gasterosteidae 큰가시고기과	
<i>Gasterosteus aculeatus</i> 큰가시고기	. . . . . . . . . + + + +
<i>Pungitius sinensis</i> 가시고기	. . . . . . . . . . . + . . . .

<i>Pungitius sinensis kalbarae</i> 찬가시고기	. . . . . + . . . .
Syngnathiformes 실고기목	
Syngnathidae 실고기과	
<i>Syngnathus schlegelli</i> 실고기	. . . . + . . . . .
Cyprinodontiformes 송사리목	
Oryziidae 송사리과	
<i>Orizias latipes</i> 송사리	. + + + + + + + . + . . . +
Symbranchiformes 드렁허리목	
Symbranchidae 드렁허리과	
<i>Monopterus alba</i> 드렁허리	. . . . + + . + . . + . . . .
Perciformes 농어목	
Mugilidae 송어과	
<i>Mugil cephalus</i> 송어	+ . . . . + + . + . + . . . +
<i>Mugil haematocheila</i> 가송어	. . . . + . . . . + . . . .
Channidae 가물치과	
<i>Channa argus</i> 가물치	. + . . + + + + + + . . . +
Sarranidae 농어과	
<i>Lateolabrax japonicus</i> 농어	. . . . + . . . . + . . . .
<i>Coreoperca herzi</i> 썩지	+ + . . + + . + + + + . . . +
<i>Coreoperca kawamebari</i> 썩저기	. . . . + . . . . + . . . .
<i>Siniperca scherzeri</i> 쏘가리	+ + . . + . . . . + . . . .
Callionymidae 돛양태과	
<i>Repomucenus olidus</i> 강주걱양태	. . . . + . + . . . . .
Belontiidae 귀락어과	
<i>Macropodus chinensis</i> 버들붕어	. + . . + + + + . . . + . . . .

Eleotridae 구굴무치과

<i>Odontobutis obscurus</i> 동사리	+	+	+	.	+	+	+	.	+	+	+	+	.	.
<i>Odontobutis obscurus Interupta</i> 얼룩동사리	+	+	+	.	+	.	.	.	+	.	.	.	.	.

Gobidae 망둥어과

<i>Rhinogobius brunneus</i> 밀어	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Fabonigobius gymnauchen</i> 날개망둑	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	+	.
<i>Rhinogobius giurinus</i> 갈문망둑	.	+	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Chaenogobius castanea</i> 날망둑	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.
<i>Chaenogobius urotaenia</i> 꼭저구	+	.	.	.	+	.	.	.	+	.	.	.	+	+
<i>Chaenogobius murorana</i> 얼룩망둑	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.
<i>Acanthogobius flavimanus</i> 문결망둑	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+
<i>Acanthogobius hasta</i> 풀망둑	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+	+	.	.	+
<i>Acanthogobius elongata</i> 왜풀망둑	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.
<i>Acanthogobius latipes</i> 흰발망둑	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	+
<i>Acanthogobius luridus</i> 비늘흰발망둑	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.
<i>Acanthogobius ommaturus</i> 가실망둑	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+	+	.	.	.
<i>Chaeturichthys stigmatias</i> 쉬쉬망둑	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.
<i>Lophiogobius ocellicauda</i> 오셀망둑	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.
<i>Mugilogobius abei</i> 모치망둑	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+
<i>Triacnopus barbatus</i> 아좌망둑	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+	.	.	.
<i>Tridentiger obscurus</i> 검정망둑	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	+
<i>Tridentiger trigonocephalus</i> 두줄망둑	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+	.	.	+
<i>Tridentiger nudicervicus</i> 황줄망둑	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	+
<i>Leucopsarion ptersi</i> 사백어	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+
<i>Boleophthalmus pectinirostris</i> 짱뚱어	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.

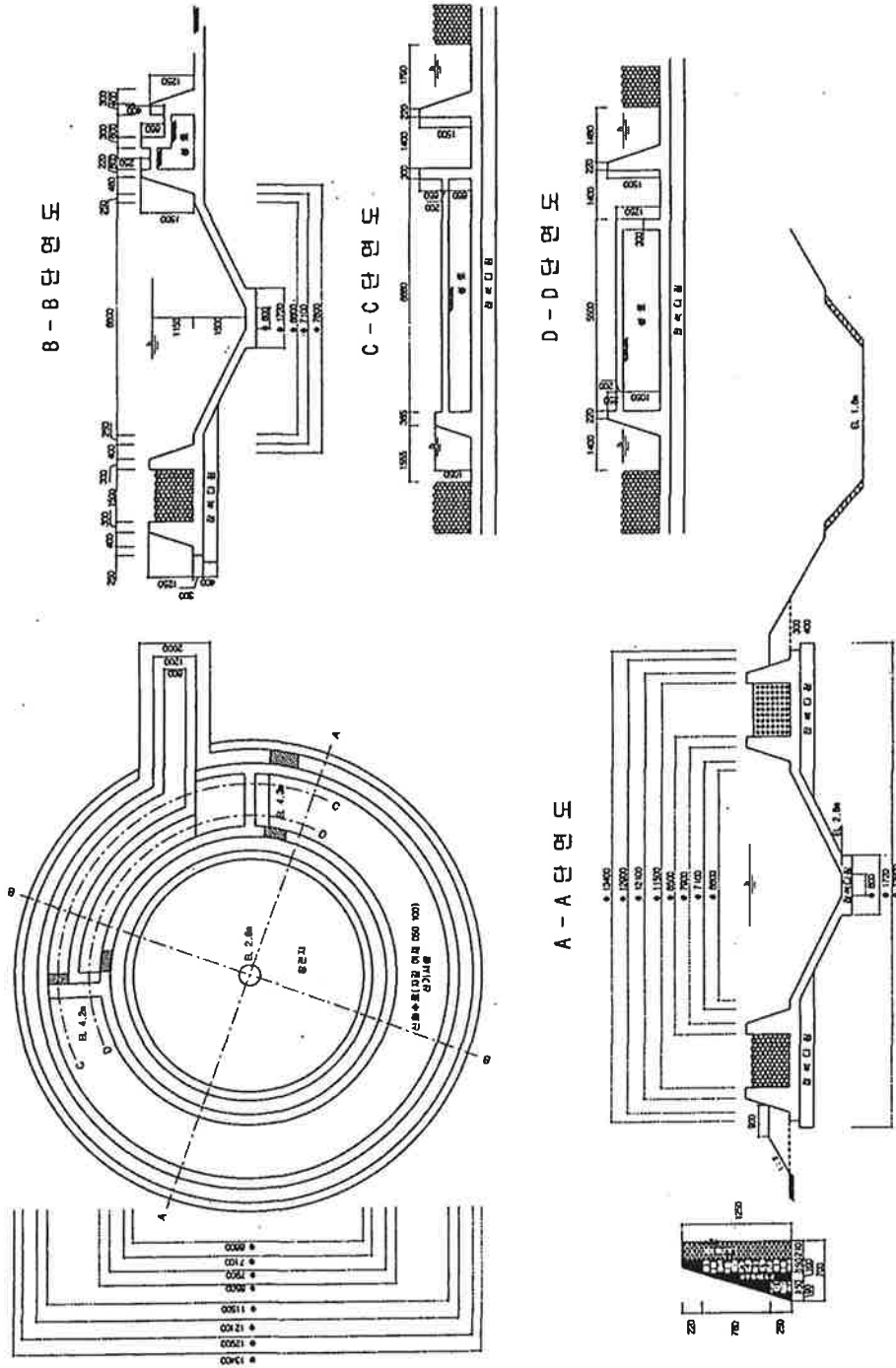
<i>Perlophthalmus cantonensis</i> 밑쪽망둑	. + + + + + . . * . + . . .
Taenioididae 개소경과	
<i>Odontamblyopus rubicundus</i> 개소경	. . . . + . . . . . . . . . .
<i>Trypauchen microcephalus</i> 빨갱이	. . . . + . . . . . . . . . .
Scorpaeniformes 횃대목	
Cottidae 독중개과	
<i>Cottus poecilopterus</i> 독중개	+ + . . . . . . . . . . . . . .
<i>Cottus hangiongensis</i> 한독중개	. . . . . . . . . . . . . . + +
<i>Trachydermus facsiatus</i> 걱정이	+ . . + + + + + + . . . . . . . .
Pleuronectiformes 가자미목	
Pleuronectidae 가자미과	
<i>Kareius bicoloratus</i> 둘가자미	. . . . + . . . . . + . . . .
Tetraodontidae 참복과	
<i>Takifugu niphobles</i> 북섬	. . . . + . . . . . + . . . +
<i>Takifugu ocellatus</i> 황복	+ . . . + . . . . . + . . . .
Species No.: (Total : 142)	44 71 23 35 93 46 57 51 45 40 75 15 11 36

Station: 1: 입진강 2: 한강 3: 안성천 4: 용천천 5: 금강 6: 만경강 7: 동진강 8: 영산강 9: 탐진강  
10: 섬진강 11: 낙동강 12: 영덕오십천 13: 강릉남대천 14: 양양남대천

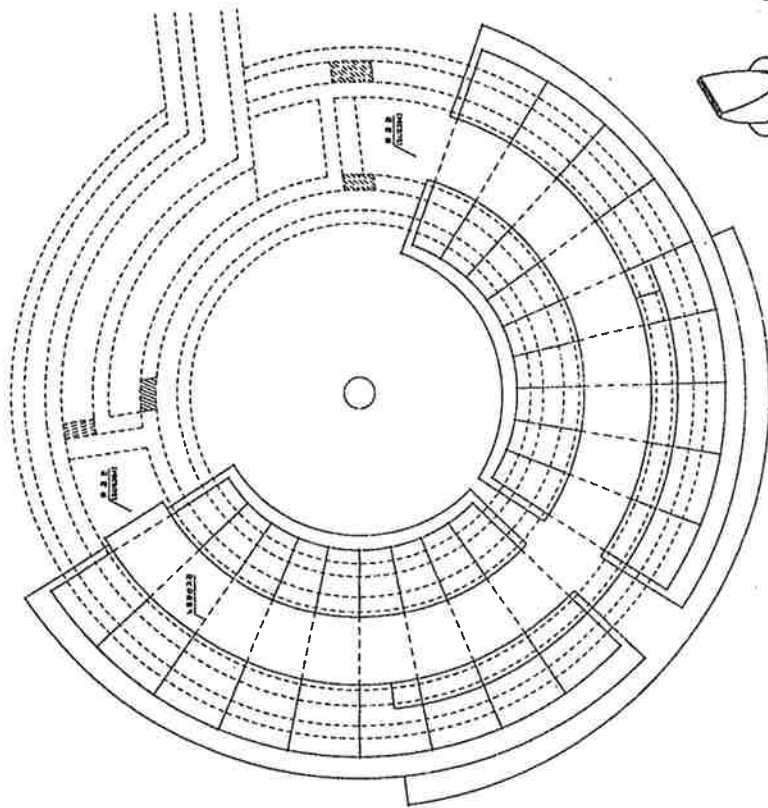


# 침전지와 점축산화수로 설계도면

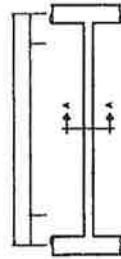
## 평면도



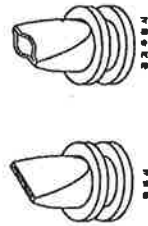
산기시설계획평면도



곡기부 AIR LINE ISOMETRIC



PIPE HOLE 상세도



연류방지용 노즐  
(FLOW PREVENTION NOZZLE)



A - A SECTION