

# 경사식 방파제의 최적설계기술개발(I)

2001. 2

연구기관 / 한국해양연구원



**해양수산부**  
MINISTRY OF MARITIME AFFAIRS & FISHERIES

# 경사식 방파제의 최적설계기술개발 (I)

2001. 2

연구기관 / 한국해양연구원



**해양수산부**

MINISTRY OF MARITIME AFFAIRS & FISHERIES



# 제 출 문

해양수산부 장관 귀하

2000년 6월 13일자로 귀부와 계약 체결한 “경사식 방파제의 최적설계기술개발” 연구용역사업을 계약서에 의거하여 완료하고 본 보고서를 제출합니다.

2001년 2월

한국해양연구원  
원 장 한 상 준



# 목 차

표목차 .....	v
도목차 .....	vii
사진목차 .....	xi
제1장 서론 .....	1
제2장 국내 경사식 방파제의 현황분석 .....	5
제1절 서론 .....	5
제2절 대상자료 및 자료의 정리 .....	10
1. 대상자료 .....	10
2. 기준설정 .....	13
3. 자료의 정리 .....	15
제3절 자료의 분석 .....	17
1. 통계적 특성 .....	17
2. 주문진항의 경우 분석 .....	28
제3장 경사식 방파제의 사면의 안정성 .....	35
제1절 서론 .....	35
제2절 실험조건과 실험단면 .....	36
1. 실험장치와 실험조건 .....	36
2. 실험단면 .....	39
제3절 사면 안정성 평가의 방법 .....	47
1. 실험실 안정성 평가시의 문제점 검토 .....	47
2. 안정성 평가 항목의 설정 .....	47
3. 단계별 안정성 평가 .....	53
제4절 사면의 변형 분석 .....	54
1. 사면 피복층의 미끌림 분석 .....	58
2. 피복층의 수중 사면 경사의 변화 .....	72

제5절 피복층의 피해량 평가 및 Tetrapod의 피해계수 추정 .....	78
1. 피해계수( $K_D$ ) 및 피해율( $S$ )의 정의 .....	78
2. Tetrapod의 피해계수( $K_D$ ) 추정 .....	80
<b>제4장 경사식 방파제의 파동장 해석 .....</b>	<b>85</b>
제1절 서론 .....	85
1. 연구 배경 및 필요성 .....	85
2. 연구목적 및 내용 .....	85
제2절 경사식 방파제의 수리특성 .....	86
1. 개요 .....	86
2. 반사율 .....	88
3. 처오름 .....	89
4. 월파량 .....	92
5. 전달율 .....	94
6. 내부 간극수압 .....	96
7. 요약 .....	96
제3절 제체 내·외의 파동장 결정 .....	99
1. 개요 .....	99
2. 불투과 사면에 대한 외부 파동장 결정 .....	102
3. 투과 사면에 대한 내·외부 파동장 결정 .....	105
제4절 수리모형실험 .....	106
1. 모형 방파제 .....	106
2. 실험장치 및 계측 .....	106
3. 실험조건 .....	109
4. 실험자료의 분석 .....	109
제5절 결과분석 및 토의 .....	111
1. 개요 .....	111
2. 반사율 .....	112
3. 월파량 .....	113
4. 전달율 .....	114

5. 간극수압 .....	116
6. 요약 .....	121
<b>제5장 하프록을 사용한 사면의 시공성 및 경제성 .....</b>	<b>123</b>
제1절 서론 .....	123
1. 개요 .....	123
2. 중간피복블록의 등장배경 .....	123
제2절 하프록의 제작 .....	124
1. 블록제작용 거푸집 설계 및 제작 .....	125
2. 설계안 .....	126
제3절 하프록의 구조해석 .....	129
1. 서론 .....	129
2. 상재하중 결정을 위한 실험 .....	129
3. 구조해석 결과 .....	137
제4절 하프록의 비파괴 특성 .....	140
1. 시험의 배경 .....	140
2. 시험의 범위 및 내용 .....	140
3. 콘크리트 비파괴 시험 .....	141
제5절 시공실험 .....	147
1. 개요 .....	147
2. 방법 및 장비 .....	147
3. 거치결과 및 분석 .....	152
제6절 하프록을 사용한 사면의 경제성 분석 .....	155
1. 거치속도의 비교 .....	155
2. 자연석과 하프록 시공의 단가비교 내역 .....	157
3. 경제성과 안정성의 관계 .....	165
<b>제6장 결론 및 제안 .....</b>	<b>167</b>
제1절 결론 .....	167
1. 경사식 방파제의 사면의 안정성 .....	167



2. 경사식 방파제의 파동장 해석 .....	168
3. 하프록을 사용한 사면의 시공성 및 경제성 .....	169
제2절 제안 .....	171
1. 경사식 방파제의 현황분석 .....	171
2. 경사식 방파제의 사면의 안정성 .....	171
3. 경사식 방파제의 파동장 해석 .....	172
4. 향후 연구계획 .....	173
참고문헌 .....	175
부 록	
A. 국내 경사식 방파제의 현황 .....	179
B. 피복층의 변형 및 피해현황 .....	213
C. 투과 사면에 대한 내·외부 파동장 결정 .....	225
D. 하프록의 제작과정과 현장 설치 .....	245

## 표목차

<표 2.2.1> 1999년 현재 무역항과 연안항의 시설 현황 .....	12
<표 2.3.1> 소단의 형태별 분포 .....	19
<표 2.3.2> 주문진항 방파제의 표준단면도 자료와 설계파고 .....	30
<표 3.2.1> 실험파의 제원 .....	38
<표 3.2.2> 실험단면의 개요와 실험 목적 (피복재:W=277g의 T.T.P.,비중=2.24) ....	40
<표 3.5.1> 안별 파고에 따른 Tetrapod의 피해량(주기=2.21sec) .....	81
<표 3.5.2> 안별 파고에 따른 Tetrapod의 피해량(주기=1.60sec) .....	82
<표 3.5.3> 비쇄파의 경우 Tetrapod의 피해계수( $K_D$ ) .....	83
<표 4.2.1> 피복석의 종류에 따른 변수 $a$ 와 $b$ .....	89
<표 4.2.2> 쳐오름에 대한 변수 .....	90
<표 4.2.3> 사석 방파제의 수리특성에 대한 기존 방법의 적용조건 요약 .....	98
<표 4.2.4> 수치모델의 적용성 .....	98
<표 4.4.1> 간극 수압계의 좌표값 (단위 : cm) .....	108
<표 4.5.1> 수치해석의 입력 변수 .....	111
<표 5.3.1> 상재하중 결정실험을 위한 하프록크와 테트라포드의 중량조정 .....	130
<표 5.3.2> 하프록 1개당 재하된 환산중량 .....	134
<표 5.3.3> 상재하중의 산술평균값 계산 예 .....	135
<표 5.3.4> 누적확률에 따른 상재하중의 크기 .....	136
<표 5.3.5> 최대응력비 및 최대총유효변형율 (4개의 다리 저면을 구속시킨 경우) .....	137
<표 5.3.6> 최대응력비 및 최대총유효변형율 (3개의 다리 저면을 구속시킨 경우) .....	138
<표 5.3.7> 적재형태에 따른 최대응력비 및 최대총유효변형율 .....	139
<표 5.4.1> 초음파 속도에 대한 콘크리트 품질 분석 기준 .....	142
<표 5.4.2> 사용장비 및 시험도구 .....	142
<표 5.4.3> 비파괴 시험 종류 및 빈도 .....	144
<표 5.4.4> 반발경도법에 의한 압축강도 추정 .....	145

<표 5.4.5> 초음파 속도 .....	146
<표 5.6.1> 현장 공극률에 의한 거치시간 비교 .....	156
<표 5.6.2> 1m <sup>2</sup> 당 재료비의 비교 .....	159
<표 5.6.3> 하프록 1개당 재료비의 비교 .....	159
<표 5.6.4> 석산에서 적출장까지 피복석과 기초사석의 단가 .....	160
<표 5.6.5> 피복석 및 기초사석의 고르기 또는 운반투하비 .....	160
<표 5.6.6> 하프록의 개당 제작비 및 운반 거치비 .....	160
<표 5.6.7> 피복석 2단 거치시 단가 산출내역 .....	161
<표 5.6.8> 피복석 1단 거치후 하프록 거치시 단가 산출내역 .....	162
<표 5.6.9> 기초사석 위에 하프록을 거치한 경우의 단가 산출내역 .....	163
<표 5.6.10> 전체수량에 대한 단가비교 .....	164
<표 5.6.11> 1m <sup>2</sup> 당에 대한 공종별 단가 내역 .....	164
<표 5.6.12> 1m <sup>2</sup> 당에 대한 공종별 단가 대조표 .....	164

## 도 목 차

<도 1.1.1> 경사식 방파제의 종류 .....	2
<도 2.1.1> 구조형식에 따른 방파제의 구분(해양수산부, 1999) .....	6
<도 2.1.2> 사석식 경사제 .....	7
<도 2.1.3> 블록식 경사제 .....	7
<도 2.1.4> 케이슨식 직립제 .....	8
<도 2.1.5> 블록식 직립제 .....	8
<도 2.1.6> 케이슨식 혼성제 .....	8
<도 2.1.7> 블록식 혼성제 .....	9
<도 2.1.8> 셀룰라 블록식 혼성제 .....	9
<도 2.1.9> 소파블록 피복제 .....	9
<도 2.2.1> 사석식 경사제의 표준 단면 및 각 부분의 명칭 .....	14
<도 2.2.2> 소단의 형태별 분류 .....	16
<도 2.3.1> 구조형식별 방파제 길이의 비율 .....	18
<도 2.3.2> 구조형식별 방파제 구간수의 비율 .....	18
<도 2.3.3> 항외측 사면 피복층수에 따른 방파제 길이 비율 .....	20
<도 2.3.4> 항내측 사면 피복층수에 따른 방파제 길이 비율 .....	20
<도 2.3.5> 피복재에 따른 방파제 구간의 길이 .....	21
<도 2.3.6> 항외측 피복재로 사용된 피복석의 크기별 방파제 구간 길이 .....	22
<도 2.3.7> 항외측 피복재로 사용된 방파제 구간의 테트라포드의 중량별 비율 ....	22
<도 2.3.8> 항외측 피복층의 경사도 비율 .....	23
<도 2.3.9> 테트라포드의 중량별 경사도 비율 .....	24
<도 2.3.10> 설계파고와 사용된 테트라포드의 중량의 관계 .....	24
<도 2.3.11> 제1중간피복층에 사용된 사석의 크기별 비율 .....	25
<도 2.3.12> 피복재와 제1중간피복재의 중량비별 방파제 구간 길이 비율 .....	26
<도 2.3.13> 테트라포드를 피복재로 사석을 제1중간피복재로 사용한 경우 중량비별 방파제 구간 길이 비율 .....	26
<도 2.3.14> 항내피복재로 사용된 사석의 크기에 따른 방파제 길이 비율 .....	27
<도 2.3.15> 항내피복층의 경사도에 따른 방파제 길이 비율 .....	27

<도 2.3.16> 항내 제1중간피복재로 사용된 사석의 크기에 따른 비율 .....	28
<도 2.3.17> 주문진항의 평면도 .....	29
<도 2.3.18> 주문진항 동방파제 각 부분별 설계조건과 피복재의 크기 및 사면경사 .....	31
<도 2.3.19> 주문진항 방파제 각 부분의 단면도 .....	32
<도 3.2.1> 2차원 조파수조와 모형 및 계측기기 설치도 .....	37
<도 3.2.2> 제1안의 실험단면 .....	41
<도 3.2.3> 제2안의 실험단면 .....	41
<도 3.2.4> 제3안의 실험단면 .....	42
<도 3.2.5> 제4안의 실험단면 .....	42
<도 3.2.6> 제5안의 실험단면 .....	43
<도 3.2.7> 제6안의 실험단면 .....	43
<도 3.2.8> 제7안의 실험단면 .....	44
<도 3.2.9> 제8-1안의 실험단면 .....	44
<도 3.2.10> 제8-2안의 실험단면 .....	45
<도 3.2.11> 제9안의 실험단면 .....	45
<도 3.2.12> 삼각블록(Tri-block)의 배치도 .....	46
<도 3.2.13> 제4안의 지지형 소단으로 사용된 콘크리트 블록의 형상 .....	46
<도 3.4.1> 제1안의 사면 미끌림 및 표고별 변화(경사=1:4/3, 1회차) .....	61
<도 3.4.2> 제1안의 사면 미끌림 및 표고별 변화(경사=1:4/3, 2회차) .....	61
<도 3.4.3> 제2안의 사면 미끌림 및 표고별 변화(경사=1:4/3, 1회차) .....	62
<도 3.4.4> 제2안의 사면 미끌림 및 표고별 변화(경사=1:4/3, 2회차) .....	62
<도 3.4.5> 제3안의 사면 미끌림 및 표고별 변화(경사=1:4/3, 1회차) .....	63
<도 3.4.6> 제3안의 사면 미끌림 및 표고별 변화(경사=1:4/3, 2회차) .....	63
<도 3.4.7> 제5안의 사면 미끌림 및 표고별 변화(경사=1:4/3, 1회차) .....	64
<도 3.4.8> 제5안의 사면 미끌림 및 표고별 변화(경사=1:4/3, 2회차) .....	64
<도 3.4.9> 제6안의 사면 미끌림 및 표고별 변화(경사=1:1.5) .....	65
<도 3.4.10> 제7안의 사면 미끌림 및 표고별 변화(경사=1:1.5) .....	65
<도 3.4.11> 제8-1안의 사면 미끌림 및 표고별 변화(경사=1:1.5) .....	66
<도 3.4.12> 제8-2안의 사면 미끌림 및 표고별 변화(경사=1:1.5) .....	66

<도 3.4.13> 파고에 따른 사면 미끌림의 평균치의 변화(제1안) .....	67
<도 3.4.14> 파고에 따른 사면 미끌림의 평균치의 변화(제2안) .....	67
<도 3.4.15> 파고에 따른 사면 미끌림의 평균치의 변화(제3안) .....	68
<도 3.4.16> 파고에 따른 사면 미끌림의 평균치의 변화(제5안) .....	68
<도 3.4.17> 파고에 따른 사면 미끌림의 평균치의 변화(제6안) .....	69
<도 3.4.18> 파고에 따른 사면 미끌림의 평균치의 변화(제7안) .....	69
<도 3.4.19> 파고에 따른 사면 미끌림의 평균치의 변화(제8-1안, 8-2안) .....	70
<도 3.4.20> 안별 최대 평균 미끌림의 비교(경사=1:4/3) .....	70
<도 3.4.21> 제1안의 파고에 따른 수중 사면경사의 변화(경사=1:4/3) .....	73
<도 3.4.22> 제2안의 파고에 따른 수중 사면경사의 변화(경사=1:4/3) .....	74
<도 3.4.23> 제3안의 파고에 따른 수중 사면경사의 변화(경사=1:4/3) .....	74
<도 3.4.24> 제5안의 파고에 따른 수중 사면경사의 변화(경사=1:4/3) .....	75
<도 3.4.25> 제6안의 파고에 따른 수중 사면경사의 변화(경사=1:4/3) .....	75
<도 3.4.26> 제7안의 파고에 따른 수중 사면경사의 변화(경사=1:4/3) .....	76
<도 3.4.27> 제8-1안과 제8-2안의 파고에 따른 수중 사면경사의 변화 (경사=1:1.5) .....	76
<도 3.4.28> 안별 수중 사면경사의 변화 비교(경사=1:4/3) .....	77
<도 3.4.29> 제3안(경사=1:4/3)과 제6안(경사=1:1.5)의 수중 사면경사 변화율의 비교 .....	77
<도 4.1.1> 연구수행계획 .....	86
<도 4.2.1> 사석 방파제의 수리특성 .....	87
<도 4.3.1> 수치모델의 입력과 출력 .....	99
<도 4.3.2> 수치모델의 흐름도 .....	101
<도 4.3.3> 사석 경사제의 외부 파랑장 .....	102
<도 4.4.1> 모형 방파제와 간극수압계의 위치 (단위 : cm) .....	106
<도 4.4.2> 모형 방파제의 형상과 파고계의 위치 .....	107
<도 4.4.3> 간극 수압계의 전압 시그널의 시간 변화 (Level 2, $H=0.12$ m, $T=1.0$ s) .....	110
<도 4.4.4> 간극 수압계 <a>의 원래 시그널과 filter signal과의 비교 (Level 2, $H = 0.12$ m, $T = 1.0$ s) .....	110

<도 4.5.1> 반사울의 비교 ( $H = 0.08 \text{ cm}$ ) .....	112
<도 4.5.2> 반사울의 비교( $H = 0.12 \text{ cm}$ ) .....	113
<도 4.5.3> 반사울의 비교 ( $H = 0.16 \text{ cm}$ ) .....	113
<도 4.5.4> 월파량의 비교 .....	114
<도 4.5.5> 전달울의 비교 ( $H = 0.08 \text{ m}$ ) .....	115
<도 4.5.6> 전달울의 비교 ( $H = 0.12 \text{ m}$ ) .....	115
<도 4.5.7> 전달울의 비교 ( $H = 0.16 \text{ m}$ ) .....	115
<도 4.5.8> 간극 수압계의 경시 변화 (Level 2, $H = 0.12 \text{ m}$ , $T = 2.0 \text{ s}$ ) .....	116
<도 4.5.9> level 2, 3, 4에서의 파압고의 변화( $H = 0.08 \text{ m}$ ) .....	118
<도 4.5.10> level 2, 3, 4에서의 파압고의 변화( $H = 0.12 \text{ m}$ ) .....	119
<도 4.5.11> level 2, 3, 4에서의 파압고의 변화( $H = 0.16 \text{ m}$ ) .....	120
<도 4.5.12> 주기의 변화에 따른 파압고의 변화; <level 3>, sensor <c> .....	121
<도 5.2.1> 거푸집 부분도 .....	126
<도 5.2.2> 하프록의 형상 및 치수 .....	128
<도 5.3.1> Normal probability plot .....	135
<도 5.3.2> 상재하중비 정규분포곡선 .....	136
<도 5.3.3> 하프록의 유한요소 모델 및 구속조건 .....	138
<도 5.3.4> 하프록의 유한요소 모델 및 구속조건(cantilever action) .....	139
<도 5.4.1> 반발경도 시험 위치 .....	144
<도 5.4.2> 초음파 시험 위치 .....	144
<도 5.5.1> 오산향 평면도 .....	149
<도 5.5.2> 시공실험을 실시한 단면도 .....	150
<도 5.5.3> 거치 계획도 .....	151
<도 5.6.1> 피복석 2단 거치시의 표준단면도(1) .....	161
<도 5.6.2> 피복석 1단 거치후 하프록 거치의 표준단면도(2) .....	162
<도 5.6.3> 기초사석 위에 하프록을 거치한 경우의 표준단면도(3) .....	163

## 사진목차

<사진 3.3.1> 12호 태풍 프라피룬의 영향으로 제두부에서 발생한 64톤급 Tetrapod 및 상치구조물의 피해 장면 .....	51
<사진 3.3.2> 12호 태풍 프라피룬의 영향으로 제간부에서 발생한 64톤급 Tetrapod의 피해 장면 .....	51
<사진 3.4.1> 제1안의 사면변형 평가실험 장면 .....	55
<사진 3.4.2> 제4안의 설치 장면 .....	55
<사진 3.4.3> 제1안의 파고에 따른 피복층의 미끌림양 및 수중 사면 경사의 변화 .....	56
<사진 3.4.4> 제5안의 파고에 따른 피복층의 미끌림양 및 수중 사면 경사의 변화 .....	57
<사진 3.4.5> 제2안의 중간피복층 설치 직후의 장면 .....	71
<사진 3.4.6> 제2안에서 파고 19.0cm를 경험한 중간피복층의 상태 .....	71
<사진 5.3.1> 상재하중 추정을 위한 단면 및 계측장치의 거치 .....	133
<사진 5.3.2> 상재하중 추정을 위한 실험 .....	133
<사진 5.4.1> 하프록위에 T.T.P의 재하시험 .....	143
<사진 5.5.1> 사면에 거치된 하프록 .....	152
<사진 5.5.2> 자연석 위의 하프록 .....	153
<사진 5.5.3> 40ton급 테트라포드의 거치 .....	154





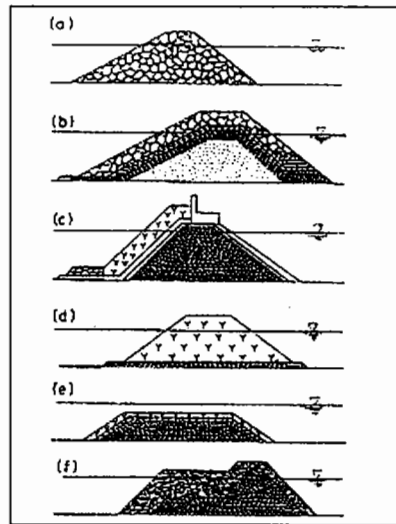
## 제1장 서론

경사식 방파제는 현존하는 방파제의 종류 중에서 가장 역사가 길며 많은 경험을 통하여 그 축조기술이 발전되어 왔다. 초기에는 해변 주변에서 돌을 채집하여 바다에다 던져 넣는 원시적인 방법을 이용하였으며 이에 유래하여 일명 사석식 방파제라고도 칭한다. 이후, 경사식 방파제를 대체할 수 있는 혼성 방파제 및 기타 특수방파제들이 다수 개발되어 설치되고 있으나 거의 모든 해역조건에서 원만히 설치할 수 있는 경사식 방파제가 아직은 방파제의 주종을 이루고 있으며 우리나라도 예외가 아니다.

지금까지 국내외에서 많이 사용되고 있는 경사식 방파제의 형상을 유형별로 나누어 보면 <도 1.1.1>과 같다. 그림에서 보인 바와 같이 경사식 방파제는 경사 마운드를 가지고 있다. 가장 기초적인 형식으로는 (a)와 같이 사석을 난적 형식으로 쌓아놓은 경우이다. 여기에 마운드의 안정성을 높이고 배후 전달율을 낮추며 또한 재료의 비용을 줄이기 위하여 (b)와 같이 다층 사석 마운드 형식이 개발되었다. 이때 마운드의 안정성이 유지되는 한 상치 콘크리트를 설치하여 전달율을 저하시킬 수 있는 (c)의 형식이 등장했다. 한편, 콘크리트 블럭으로만 이루어진 형식(d)도 있다. 이는 주로 이안제인데 해안선 방호를 목적으로 한다. (e)형식은 다른 경사식 방파제의 형식에 비하여 전달율이 크지만 시공이 간단하고 수역의 풍치를 해치지 않는다는 장점이 있어 최근 많이 채택되고 있는 잠제 형식의 방파제이다. (f)형식은 S 形狀을 한 방파제로서 파의 거동과 사석의 경사를 일치시켜 제체의 안정성을 향상시키려는 의도의 방파제이다. 이는 전면부에 큰 소단(berm)을 가지고 있으며, 파의 거동에 의해 제체의 형상이 재형성되면서 安定한 형태로 바뀌어 간다.

현재의 경사식 방파제의 설계 및 건설기술은 거의 성숙된 기술이라 볼 수 있으나 단면 제원의 변화가 안정성에 미치는 영향은 잘 알려지지 않았다. 따라서, ① 피복재, 중간피복재 또는 소단의 이용에 관한 기술을 발전시켜 비탈면 경사를 조절하거나 건설재료를 줄이는 등 경제성과 구조적 안정성을 동시에 확보할 수 있는 기술을 개발하는 연구가 중요하며, ② 수심이 깊을 경우 또는 지반이 연약할 경우 등에 대해서는 신기술에 대한 지속적인 연구가 필요하다. 이러한 기술을 개발하기 위해서는 현재 건설되어 있는 사석경사제의 현황을 파악하고 개선점을 찾아 하나씩 풀어가야 하는 것이 중요하다고 할 수 있다.

경사식 방파제의 안정성과 경제성은 사면의 경사와 피복재나 중간 피복재의 종류에 따라 크게 좌우된다. 사면의 경사는 일반적으로 1:1.5보다 급하게 하지 말 것을 추천(CERC, 1984)하는데 방파제를 설치할 수심이 깊어지면 사면이 완만할수록 공사비는 기하급수적으로 증가한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 사면의 경사를 급하게 해야 하나 자연적으로는 안정을 확보할 수 없으므로 인공 피복재를 사용하여 맞물림(inter-locking)을 증가시키는 방법으로 안정성을 확보하는 것이 일반적이다. 국내에서는 피복재로 테트라포드를 가장 많이 사용하는데 주어진 설계파고에 대하여 1:1.5보다 급한 경사인 1:1.33에 대하여 어느 정도의 중량이 필요한지 세계적으로도 정확한 기준이 불분명한 상태이다. 따라서, 항만시설의 부족으로 인하여 신규 항만의 건설 입지가 대수심화되고 연약지반이 많은 우리 나라의 입장에서는 방파제의 안정은 물론, 공사비를 절감할 수 있는 설계기술의 개발이 절실한 실정이다.



<도 1.1.1> 경사식 방파제의 종류

역사적으로 보면, 방파제의 안정성에 영향을 미치는 요소들, 즉, 파랑조건, 사석의 무게, 그리고 방파제의 형상 등에 대하여 점차 경험적 지식이 쌓이면서 방파제의 유실 사고가 현저히 감소되어 왔다. 경사식 방파제의 설계요소는 피복석의 안정성, 반사율, 전달율, 처오름 등의 수리역학적 요소와 제체의 활동 및 지반 지지력에 관련된 토질역학적 요소로 구성되어 있다. 사실상, 수리역학적 요소와 토질역학적 요소는 상호 밀접한 관련이 있다. 예를 들어, 제체의 사면 안정성과 활동에 대한 안정

성은 제체 내에 형성되는 간극수압과 관련이 있으며 이 간극수압은 제체 내·외에 형성되는 파동장과 관련이 있다. 따라서, 경사식 방파제의 정확한 설계를 위해서는 이 수리역학적 측면과 토질역학적 측면이 상호 유기적인 관점에서 잘 파악되어야 한다.

경사식 방파제의 최적설계 기술을 개발하기 위해서 제1차 년도인 금년도 연구에서는 제2장에 현재까지 우리나라의 무역항과 연안항에 건설된 사석식 경사제에 대한 자료를 주로 제체 단면의 구조를 중심으로 분류, 정리하여 1차적인 데이터베이스를 구축하고, 통계적 특성 등에 대해 분석함으로써 연구 방향 설정에 이용되도록 하였다. 제3장에서는 우선 시급한 연구결과가 필요한 제체 사면의 경사(1:1.5와 1:1.33)와 중간 피복재의 종류에 따른 제체의 안정성을 수리실험에 의하여 검토하고 피복재로서 국내에서 가장 많이 사용되고 있는 테트라포드의 적정 중량 설계를 위하여 필수적인 변수인 피해계수( $K_D$ )를 불규칙파를 이용하여 추정하였다. 제4장에서는 경사식 방파제의 제체에 작용하는 전파력을 추정할 때에 필요한 경사식 방파제에 작용하는 파동장을 해석하기 위한 수치모델을 개발하고 제5장에서는 한국해양연구소(1999)에서 중간 피복용으로 개발한 콘크리트 블록인 half-loc의 현장 시공성을 확인하기 위한 현장실험을 실시하였다. 마지막으로 제6장에서는 위의 연구 결과들을 정리하였다.



## 제2장 국내 경사식 방파제의 현황분석

### 제1절 서론

국내 경사식 방파제의 현황분석은 과거의 설계 및 시공 관행을 분석하여 기술적이나 경제적으로 취약한 면을 파악함으로써 기술개발 방향을 설정하고 시급한 연구수행을 위해 반드시 필요하다. 아울러 향후 시설 관리 측면이나 피해가 발생할 경우 상호 비교함으로써 원인규명 차원에서도 매우 유익하게 사용될 수 있다. 방파제란 외해에서 내습하는 파랑으로부터 내항을 보호하기 위해 설치하는 항만의 외곽 구조물이다. 「항만 및 어항 설계기준」(해양수산부, 1999)에 따르면 방파제는 구조형식에 따라 크게 경사제, 직립제, 혼성제, 소파블록제, 그리고 기타 형식 방파제 등으로 나눌 수 있다(<도 2.1.1> 참조). 경사제는 사석이나 이형블록을 이용하여 사다리꼴 단면을 갖도록 쌓아 올린 것으로(<도 2.1.2>와 <도 2.1.3> 참조), 여러 가지 장점을 갖고 있어 가장 많이 채택되고 있는 형식이다. 이는 외해측 경사면에서 내습해 오는 파랑을 쇄파시켜 파랑에너지를 소산시키며 반사파를 줄일 수 있어 방파의 효과면에서는 탁월하나 월파가 많다는 단점도 있다. 수심이 깊은 곳에 건설할 경우는 단면이 기하급수적으로 커져 비경제적이다. 직립제는 직사각형의 단면구조를 갖도록 콘크리트 케이슨이나 블록을 쌓아 축조한 것으로(<도 2.1.4>와 <도 2.1.5> 참조), 주로 파랑에너지를 반사시켜 내항을 보호하며, 지반이 약할 경우 침하되거나 기초 부분이 세굴되는 경우가 있어 일반적으로 소규모 방파제에 적합한 것으로 알려져 있다. 혼성제는 경사제 위에 직립제를 올려놓은 형식으로(<도 2.1.6>, <도 2.1.7> 및 <도 2.1.8> 참조), 파고에 비하여 사석부 마루가 높으면 경사제에 가깝고 낮으면 직립제에 가깝다. 직립제와 경사제의 장점을 겸하고 있으므로 깊은 수심의 대규모 항만을 건설할 경우 많이 채택된다. 소파블록 피복제는 <도 2.1.9>에서 보는 바와 같이 직립제 또는 혼성제의 전면에 사석 또는 소파블록을 쌓아 경사제와 유사한 형태를 갖도록 한 것으로 기본적으로는 혼성제로 분류할 수 있으며, 전면피복 혼성제 또는 사석전치 케이슨제 등으로도 불리나 여기에서는 「항만 및 어항 설계기준」에 따라 소파블록 피복제로 통일하여 사용하였다. 이 형식의 방파제는 소파블록으로 파의 에너지를 소산시키며 직립부는 파의 투과를 억제하는 기능을 갖도록 설치된다. 기타 형식의 방파제는 위에서 설명한 방파제 이외의 특수한 구조를 갖는 방파제를 말하며, 「항만 및 어항 설계기준」(해양수산

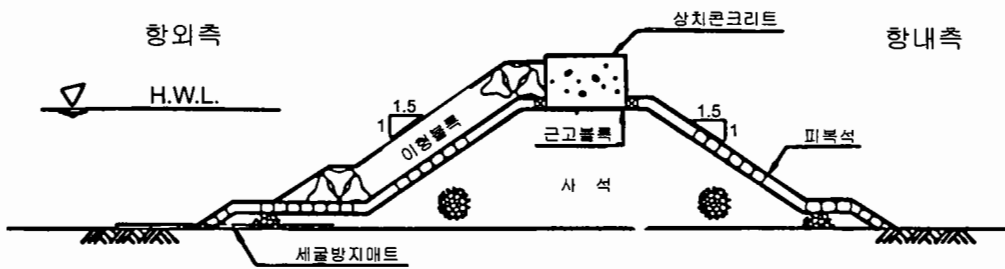
부, 1999)에 의하면 다음과 같이 분류된다. 즉, 크게 중력식 특수 방파제, 말뚝식 방파제, 접촉식 방파제, 부유식 방파제, 공기 방파제, 그리고 이외 형식의 방파제로 나눌 수 있다. 중력식 특수 방파제에는 이형케이슨제, 직립 소파케이슨제 등이 있으며, 말뚝식 방파제에는 커튼식 방파제 및 강관말뚝식 방파제 등이 있다. 부유식 방파제는 부체의 재료 및 형상에 따라 다시 여러 가지로 분류된다. 이러한 특수 방파제는 일반적으로 그 적용조건이 한정되어 일시적 사용 등의 사용목적 또는 자연조건에 따라 특수한 경우 사용된다.



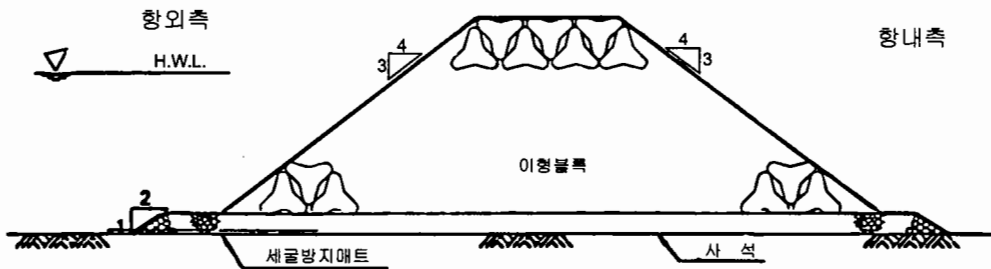
<도 2.1.1> 구조형식에 따른 방파제의 구분(해양수산부, 1999).

경사제는 사다리꼴 또는 삼각형으로 기초사석을 쌓고 그위에 피복석 또는 이형블록으로 피복한 사석식 경사제(<도 2.1.2>)와 블록을 이용해 사다리꼴로 쌓은 블록식 경사제(<도 2.1.3>)로 나눌 수 있다. 이 중 사석식 경사제는 방파제 중 가장 오래된 형식으로, 현재 남아 있는 사석식 경사제 중 가장 오래된 것은 로마시대의 하드리아누스 황제 때 건설된 것이다. 이 형식 방파제는 적용 가능한 수심의 범위가 넓고, 거의 모든 지반에 건

설이 가능하며, 비교적 설계 및 시공이 용이하고, 다른 형식의 방파제에 비해 반사파가 작다는 장점이 있다. 반면, 경사면에서 쇄파되므로 월파가 많을 수 있으며 다른 형식의 방파제에 비해 재료가 많이 소요된다는 단점이 있다. 1940년대까지는 주로 자연 재료인 돌을 이용하여 사석식 경사제가 건설되었으나 파랑에 대한 저항력이 부족하여 사면이 붕괴된 경우가 많았다. 이러한 사석식 방파제의 약점이 파고에 대한 피복재의 중량이 부족한 데 있다는 것을 알게 되었고, 이를 극복하기 위하여 1개당 30~50톤 정도의 콘크리트 블록을 덮어씌우는 방법이 이용되었다.

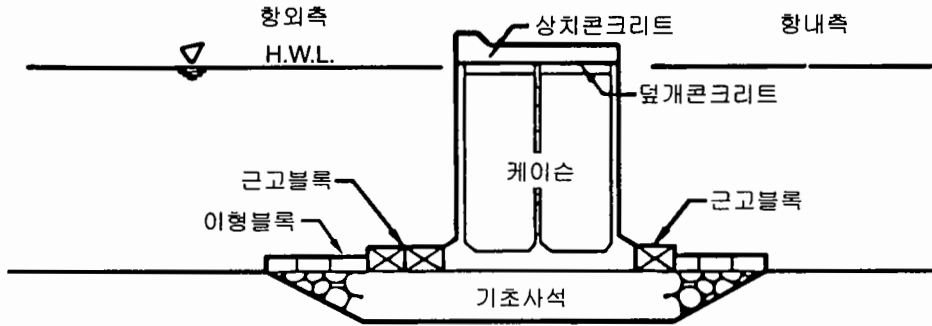


<도 2.1.2> 사석식 경사제.

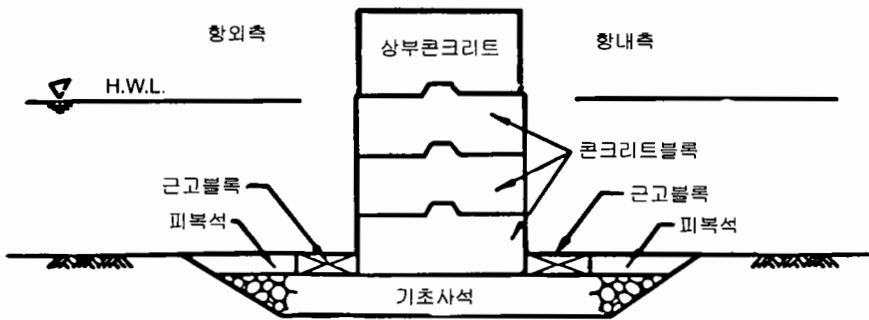


<도 2.1.3> 블록식 경사제.

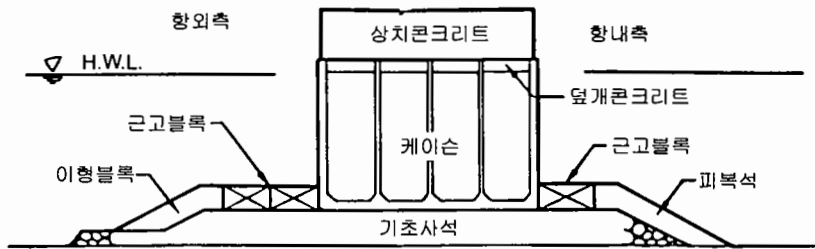




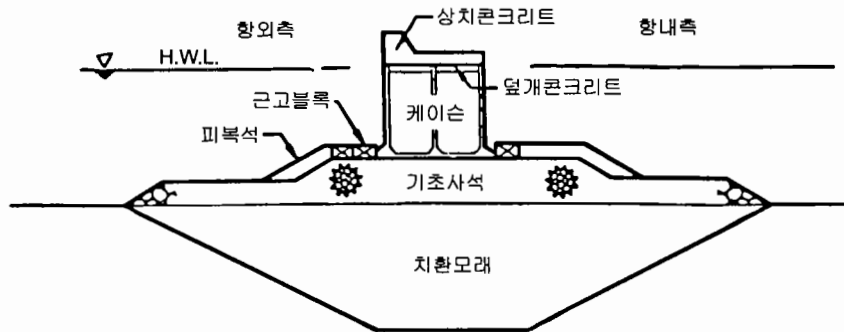
<도 2.1.4> 케이슨식 직립제.



<도 2.1.5> 블록식 직립제.

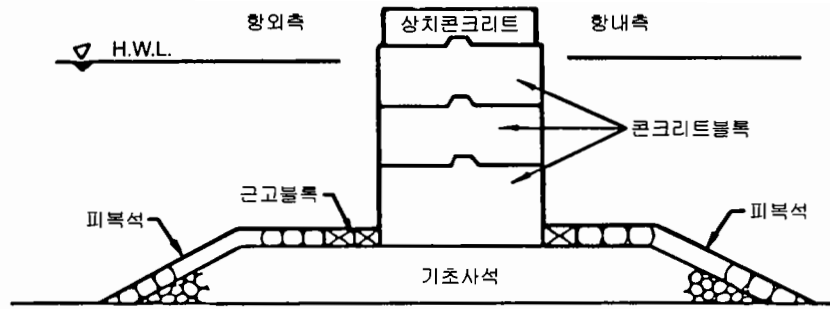


(a) 지반이 양호한 경우

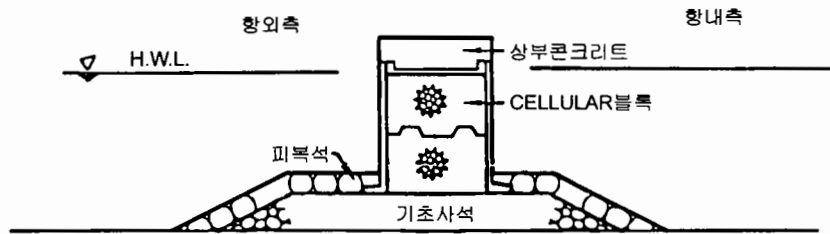


(b) 연약지반일 경우

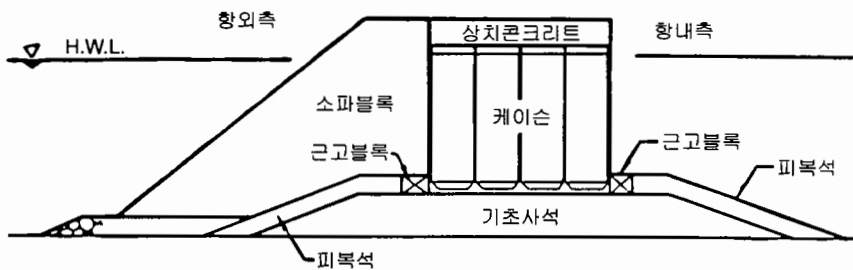
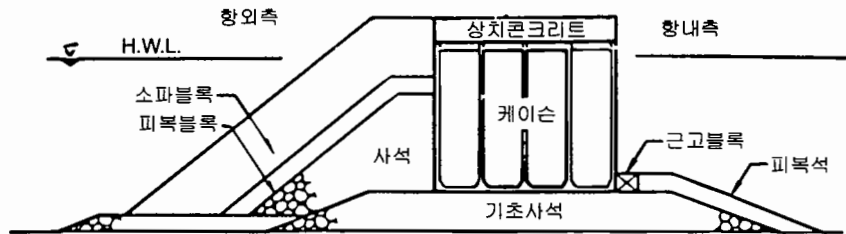
<도 2.1.6> 케이슨식 혼성제.



<도 2.1.7> 블록식 혼성제.



<도 2.1.8> 셀룰라 블록식 혼성제.



<도 2.1.9> 소파블록 피복제.

이런 흐름은 더욱 발전하여 콘크리트블록의 이형성에 착안하게 되었으며, 적당한 공극률을 갖는 이형소파블록을 개발하게 되었다. 1950년 프랑스에서 테트라포드(Tetrapod)가 개발된 후 이형소파블록은 물론 사석식 경사제의 축조기술이 비약적으로 발전하게 되었

으며, 그 안정성 또한 크게 향상되었다. 현재까지 수많은 형태의 이형블록이 개발되었으며, 대표적인 것으로는 Akmon, Dolos, Stabit, Tribar, Toskane, Accropod 등을 들 수 있다. 이들 각각은 장점과 단점을 가지고 있으며, 현재 가장 많이 사용되고 있는 것은 테트라포드이다. 우리나라의 경우 테트라포드를 이용한 사석식 경사제가 가장 많이 건설되었으며, 또한 방파제, 방사제, 돌제 및 호안 등 다양한 용도로 이용되고 있다.

현재의 사석식 경사제의 설계 및 건설기술은 거의 완성된 기술이라 볼 수 있으나, 수심이 깊은 경우 또는 지반이 연약할 경우 등에 대해서는 신기술에 대한 지속적인 연구가 필요하다. 또한 피복재, 중간피복재 또는 소단의 이용에 관한 기술을 발전시켜 비탈면 경사를 조절하거나 건설재료를 줄이는 등 경제성과 구조적 안정성을 동시에 확보할 수 있는 기술을 개발하는 연구 또한 매우 중요하다. 이러한 기술을 개발하기 위해서는 현재 건설되어 있는 사석경사제의 현황을 파악하고 개선점을 찾아 하나씩 풀어 가는 것이 중요하다 할 수 있다. 따라서 금년도 연구에서는 현재까지 우리나라의 무역항과 연안항에 건설된 사석식 경사제에 대한 자료를 주로 체체 단면의 구조를 중심으로 분류, 정리하여 1차적인 데이터베이스를 구축하고, 통계적 특성 등에 대해 분석하였다. 이 장에서는 자료 대상, 자료 정리 및 데이터베이스 구축, 그리고 분석 결과 등에 대해 기술하였다.

## 제2절 대상자료 및 자료의 정리

### 1. 대상자료

우리나라에는 1999년 현재 총 471개의 크고 작은 항만이 건설되어 있다. 이 중 대부분인 421개가 비교적 규모가 작은 어항이며, 나머지 50개가 지정항만이다. 이 연구에서는 비교적 깊은 수심에 건설되는 규모가 큰 사석식 경사제의 건설기술 개선이라는 연구목적에 따라 지정항만의 외곽시설만을 대상으로 하였다. 지정항만이란 항만법의 항만 분류에 따라 국민경제와 공공의 이해에 밀접한 관계가 있는 항만으로서 대통령령으로 그 명칭, 위치 및 구역이 지정된 항만을 말하며 지정항만은 다시 원양구역을 항행하는 선박이 입·출항하는 항만으로서 해양수산부 장관이 개발·관리하는 무역항과 연해구역을 항행하는 선박이 입·출항하는 항만으로서 해양수산부 장관이 개발하고 관할 시·도지사가

관리하는 연안항으로 구분된다. 우리나라에는 1999년 현재 무역항이 28개, 연안항이 22개 지정되어 있으며, 그 시설현황은 <표 2.2.1>과 같다.

사석식 경사제는 항내의 정온도를 유지하거나 항내 시설물의 보호를 위해 설치되는 방파제 뿐만 아니라 방사제, 돌제, 이안제, 도류제, 파제제, 호안 등 다양한 용도로 이용되며, 이러한 시설 모두가 항만과 직접 관련되어 있을 경우 항만의 외곽시설이라 통칭한다. 우리나라의 경우 항만의 외곽시설을 살펴보면 거의 대부분이 사석식 경사제로 건설되어 있음을 알 수 있다. 이는 건설현장 인근에서 기본 재료인 석재를 구하기 쉽고, 구조적으로 비교적 안정성이 높고 경제적이며, 또한 설계 및 건설 기술이 많이 발달되어 있기 때문이라 할 수 있다. 우리나라 지정항만에는 <표 2.2.1>에서 보는 바와 같이 총 51,706m의 방파제가 건설되어 있으며, 이를 무역항과 연안항으로 나누어 보면 각각 34,976m와 16,730m이다. 이들 대부분이 사석식 경사제로 건설되어 있다. 따라서 이 연구에서는 사석식 경사제로 건설된 항만의 외곽시설 중 가장 중요한 역할을 하는 방파제를 중심으로 자료를 정리하였으며, 일부 방사제와 도류제를 포함하였다. 이는 돌제, 호안, 파제제 등은 사석경사제로 건설되었다 하더라도 그 규모가 작거나 기능이 현저하게 다르기 때문이다. 또한 방파제로 건설되었으나 후면이 매립되어 물양장, 안벽, 토지 등 타 용도로 사용되거나 매립 예정으로 실질적으로 호안의 역할을 하는 경우는 포함하였으나 방파제의 전면 및 상부만을 분석대상으로 하였다. 당초 혼성제로 건설되었으나 후에 전면을 사석 또는 이형블록 등으로 보강한 소파블록 피복제는 분석에서 제외하였다.

금년도 연구에서는 우선 1992년 해운항만청에서 발행한 「전국항만구조물도집」을 중심으로 하였다. 이 당시의 지정항만과 현재의 지정항만과는 다르다. 즉, 1992년에 비해 무역항의 경우 태안항이 새로 추가되었으며, 충무항과 고정항이 각각 통영항과 보령항으로 명칭이 바뀌었다. 연안항의 경우 거진항, 임원항, 감포항, 강구항, 그리고 죽변항 등 5개항이 제외되었고, 새로이 애월항과 홍도항이 추가되었으며, 도동항이 울릉항으로 명칭이 바뀌었다. 1992년 자료를 기본자료로 이용한 이유는 우선 데이터베이스에 수록될 자료의 범위, 종류 및 종류별 특성 등을 파악하여 데이터베이스의 기본골격을 구상하고 수립하기 위하여는 일차적으로 종합 정리된 자료를 사용할 필요가 있었으며, 현재의 각 항만에 대한 각각의 설계 및 시공자료를 전체적으로 수집하기에는 많은 시간과 인력이 소요되기 때문이다. 즉, 현재 건설된 시설물이 당초 설계와는 달리 건설 중 설계 변경된 경우도 있으며, 또한 같은 방파제라 하더라도 조금씩 다른 형상으로 순차적으로 연장되거나 보강공

<표 2.2.1> 1999년 현재 무역항과 연안항의 시설 현황

구분 항별	항만시설능력		항 만 별 시 설 현 황						
	선석	천톤/년	안 벽 (m)	방파제 (m)	간 교 (기)	물양장 (m)	상 옥 (동)	창 고 (동)	야적장 (천㎡)
합 계	589	417,561	89,381	51,706	139	52,857	31	26	8,606
무 역 항	549	410,135	85,446	34,976	136	38,829	31	26	8,450
인 천 항	71	56,590	10,802	2,233	21	1,939	11	1	1,848
평 택 항	13	6,951	1,840	240	8	330	-	2	515
대 산 항	14	4,987	-	-	15	707	-	-	-
태 안 항	1	5,483	-	-	1	160	-	-	-
보 령 항	2	10,682	472	-	-	190	-	-	-
장 향 항	2	1,068	-	-	2	968	-	1	6
군 산 항	24	7,596	2,434	500	16	1,239	-	2	592
목 포 항	13	6,271	2,196	-	13	3,170	-	-	145
완 도 항	4	817	620	300	3	2,182	-	-	28
여 수 항	8	3,016	1,034	2,016	5	2,334	1	-	58
광 양 항	54	73,805	8,748	-	7	160	2	-	848
제 주 항	17	3,589	2,416	2,956	-	608	-	2	52
서귀포항	5	1,359	630	1,624	-	817	-	1	35
삼천포항	9	13,581	1,583	2,553	5	2,138	-	-	129
통 영 항	4	172	1,076	1,191	11	2,436	-	-	7
고 현 항	2	901	232	-	3	-	-	-	3
옥 포 항	1	454	100	1,385	1	-	-	-	-
장승포항	-	76	-	231	6	980	-	-	11
마 산 항	26	14,233	4,408	-	11	1,749	-	-	673
진 해 항	7	1,869	883	122	2	123	-	1	137
부 산 항	108	84,764	20,730	3,919	3	9,087	15	-	1,797
울 산 항	81	24,776	8,607	4,650	1	1,886	-	1	379
포 향 항	44	44,542	9,516	4,190	-	1,988	-	10	907
삼 척 항	7	7,286	776	880	-	1,288	-	-	6
동 해 항	15	23,035	3,412	2,110	1	-	1	2	206
목 호 항	6	6,422	1,141	1,251	-	991	1	2	28
옥 계 항	5	4,914	873	1,304	1	-	-	1	15
속 초 항	6	896	917	1,321	-	1,359	-	-	25

<표 2.2.1> (계속)

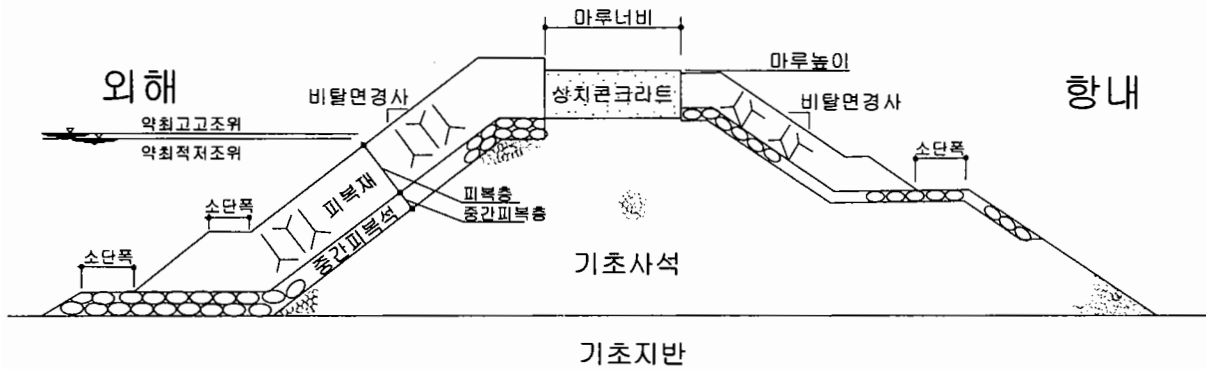
구분 항별	항만시설능력		항 만 별 시 설 현 황						
	선석	천톤/년	안 벽 5(m)	방파제 (m)	잔 교 (기)	물양장 (m)	상 옥 (동)	창 고 (동)	야적장 (천㎡)
연안항	40	7,426	3,935	16,730	3	14,028	-	-	156
연평도항	-	-	-	1,087	-	265	-	-	-
대천항	1	220	-	1,400	1	627	-	-	-
비인항	-	-	-	245	-	110	-	-	-
대후산도항	1	484	140	1,388	2	1,269	-	-	-
녹동신항	-	334	-	-	-	834	-	-	-
나로도항	-	103	-	250	-	513	-	-	-
거문도항	3	188	330	1,814	-	941	-	-	-
애월항	2	472	222	800	-	312	-	-	-
한림항	9	822	790	2,418	-	910	-	-	32
화순항	1	144	82	799	-	100	-	-	-
성산포항	7	920	711	2,144	-	567	-	-	-
부산남항	-	1,116	-	528	-	4,294	-	-	-
구룡포항	12	1,167	1,185	970	-	759	-	-	56
월포항	-	50	-	157	-	250	-	-	10
후포항	2	695	260	1,184	-	927	-	-	54
울릉항	1	148	110	648	-	161	-	-	4
주문진항	1	515	105	898	-	1,069	-	-	-
홍도항	-	48	-	-	-	120	-	-	-

사를 하는 등 이러한 모든 자료를 확보하기에도 어려움이 있었기 때문이다. 한편, 현재는 제외되어 있으나 1992년도에는 연안항에 포함되어 있던 5개 항만의 경우 그 규모가 비교적 크고 중요한 기능을 담당하고 있기 때문에 분석에 포함시키는 것 또한 의미있는 것으로 판단하였다.

## 2. 기준설정

일반적인 사석식 경사제의 단면을 살펴보면 <도 2.2.1>에 보인 바와 같이, 제체 중심부에 사다리꼴로 사석을 쌓고, 그 위에 비교적 일정한 크기의 사석 또는 이형블록을 이용하여 중간피복층을 덮고, 그 위에 외해 쪽 사면에는 큰 중량의 사석 또는 이형블록을 이용

하여 피복하고, 향내 쪽 사면에는 외해 쪽보다는 약간 작은 또는 동일한 크기의 사석 또는 이형블록으로 피복한 것을 알 수 있다. 또한 상부에는 상치콘크리트를 여러 가지 형태로 설치하여 월파를 막고 접근로 등으로 이용하게 된다. 이러한 사석식 경사제의 단면은 건설 수심, 중간피복층의 수, 양쪽 사면의 경사도, 또는 시공방법 등에 따라 약간씩 차이



<도 2.2.1> 사석식 경사제의 표준 단면 및 각 부분의 명칭.

는 있으나 거의 표준화되어 있다.

이 연구에서는 데이터베이스 구축을 위한 여러 가지 기준을 따로 정하였다. 경사제와 소파블록 피복제를 구분하는 기준으로 체체 상부의 상치콘크리트 아래에 근고블록이나 방피블록을 제외한 다른 구조물이 있는 경우 소파블록 피복제로 분류하였다. 그러나 도면 자료만으로 구분이 분명치 않은 경우 일단 경사제에 포함시키고 비고란에 혼성제로 분류할 수도 있다는 뜻에서 혼성제로 표기하였다. 경사제의 마루높이와 마루너비는 사면 피복제의 높이와 너비와 상관없이 상치콘크리트가 있는 경우에는 상치콘크리트의 높이와 너비로, 상치콘크리트가 없는 경우에는 체체 마루의 높이와 너비로 하였다. 피복층의 수는 피복제의 설치 층수에 관계없이 피복층과 제1중간피복층, 제2중간피복층 등으로 구분하였다. 즉, 피복재로 테트라포드를 사용한 경우 난적인 경우를 제외하면 2층적으로 설치하나, 특별히 그 크기가 다르거나 완전히 분리된 층이 아니면 피복층수 항목에서는 1층으로 간주하였고, 오해나 혼돈을 피하기 위해 피복층 및 중간피복층 항목에서 따로 피복제의 설치층수와 피복층의 두께를 기록하였다. 또한 사면의 피복층에 중점을 두었으며 상치콘크리트 하부에 따로 사석층을 둔 경우 또는 하부 소단을 별개의 사석으로 설치한 경우


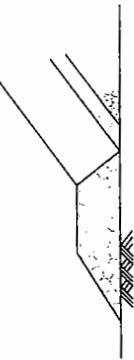

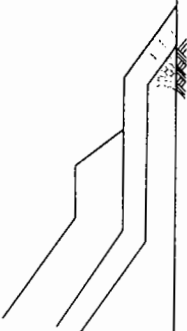


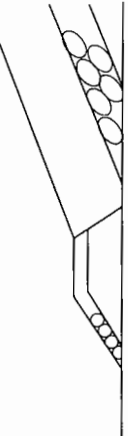
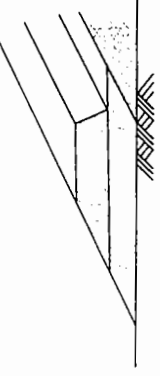
등에 대하여는 고려하지 않았다. 즉 <도 2.2.1>의 경우 외해측 및 항내측 사면의 피복층의 수는 2이고, 소단은 2개 설치된 것으로, 그리고 피복재의 상부높이가 상치콘크리트의 마루높이 보다 높더라도 제체의 마루높이는 상치콘크리트의 높이로 하였다. 또한, 피복재, 중간피복재의 비탈면 경사를 각각 표시하여 간접적으로 방파제의 건설 역사를 짐작할 수 있도록 하였다.

### 3. 자료의 정리

우리나라 지정항만의 사석경사제에 대한 데이스페이스 구축을 목적으로 경사제의 단면을 중심으로 자료를 정리하였다. 우선 대상방파제의 전체적인 상황을 말해주는 항명과 방파제명, 그리고 항만구조물도집에 나타난 도면번호를, 그리고 방파제의 총길이, 마루높이, 마루길이, 그리고 참고로 표준단면도의 지반고에 대해 수록하였다. 각 방파제의 표준단면 구간별 설계조건을 파고, 주기, 파향, 풍향, 풍속, 조위, 그리고 지반조건으로 나누어 정리하였다.

해당 방파제의 구조형식에 따라 사석식 경사제는 사석식으로, 블록식 경사제는 블록식으로, 혼성제는 혼성제로, 그리고 소파블록 피복제는 피복제로 표기하였으며, 대칭성 여부와 각 단면 구간의 특징적인 요소를 간략히 수록하여 상부에 진층콘크리트가 있는지, 지반을 개량했는지 등에 대해 알 수 있도록 하였다. 특히 구조형식에서는 사석식 경사제로 분류하였으나 혼성제 또는 소파블록 피복제로도 분류할 수 있는 방파제에 대하여는 이를 표기하여 차후 이들을 구분하는 명확한 기준을 설정하는 데 이용할 수 있도록 하였다. 또한 현재의 자료가 설계단면인지 아니면 건설 후 보수된 단면인지를 알 수 있도록 하였으며, 제체 하부에 설치된 소단에 대해서도 자료를 정리하였다. 즉, 설치된 소단의 수를 수록하였으며, 제체 외부에는 소단이 없으나 제체 내부 피복층 하부 등에 소단이 있는 경우 음(-)의 부호를 붙여 그 수를 표기하였다. 또한 제체 외부에 소단이 설치된 경우 피복층의 소단이 있으면 '피'로, 중간피복층의 소단인 경우 '중'으로, 기초사석부의 소단은 '기'로 표기하였으며, 이를 모두 포함할 경우 '피/중/기' 등으로 표기하였다. 그리고 <도 2.2.2>에 제시된 바와 같이 소단의 형태를 8가지로 분류하여 그 중 어느 형태에 가장 가까운지를 알 수 있도록 하였다. <도 2.2.2>에 제시된 8가지의 소단 형태는 기준을 따로 정하지는 않았으며, 많이 사용되는 형태를 나누어 구분한 것이다. 이 중 Type-H는 제체



				Type-A	Type-B	Type-C	Type-D
				Type-E	Type-F	Type-G	Type-H

<도 2.2.2> 소단의 형태별 분류.

외부에는 소단이 없으나 내부에 소단을 둔 형식으로 주로 보수단면에서 많이 볼 수 있어 따로 한 형태로 구분한 것이다.

또한, 사석경사제의 단면에서 중요한 요소를 모두 포함하여 자료를 보면 해당 방파제를 그릴 수 있도록 하는 것을 목표로 하였다. 우선 외해측과 항내측의 피복층의 수와, 각 피복층에 사용된 재료, 그 재료의 크기, 경사도, 설치층수 및 설치두께 등을 정리하였다. 또한 상치콘크리트의 형상을 구분하였으며, 상치콘크리트 하부의 상태를 간단히 정리하여 수록하였다. 기초사석부 역시 사용된 재료와 양측 사면의 경사도를 포함하였다. 기초사석에서 기초사석의 규격을 1로 표기한 것은 표준화되어 사용되는 0.015~0.03m' 크기의 사석을 나타낸다. 주의할 점은 피복층수 항목의 층수와 제체 사면항의 층수와는 다르다는 점이다. 예를 들어 피복층수 항목의 외해측 층수가 2이면 피복층과 중간피복층이 있다는 뜻이며, 항외측 사면 항목의 피복층의 피복재가 테트라포드이고 그 층수가 2이면 테트라포드를 2층적인 피복층이며, 중간피복층의 피복재가 사석이고 층수가 2이면 사석을 2층적인 중간피복층을 나타낸다. 따라서 이 경우 총 피복층수를 합하면 4층이 된다.

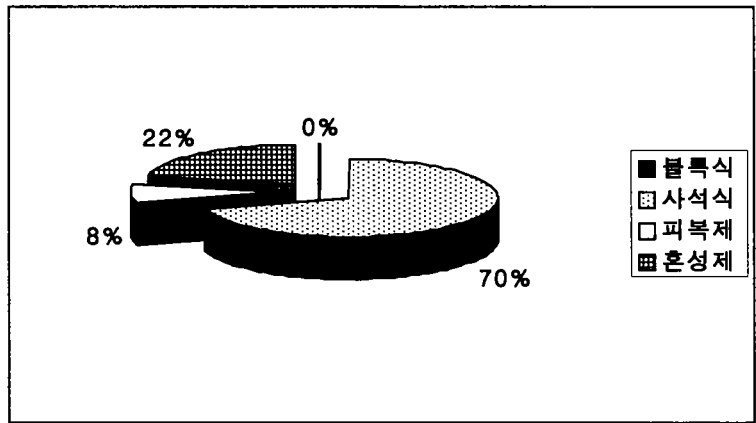
이상과 같이 정리 분류된 자료는 차후의 확장 및 분석이 가능하도록 마이크로소프트사의 엑셀프로그램을 이용하여 입력하여 데이터베이스화하였다. 이상과 같이 정리 수록된 자료를 무역항과 연안항으로 구분하여 부록 A에 수록하였다.

### 제3절 자료의 분석

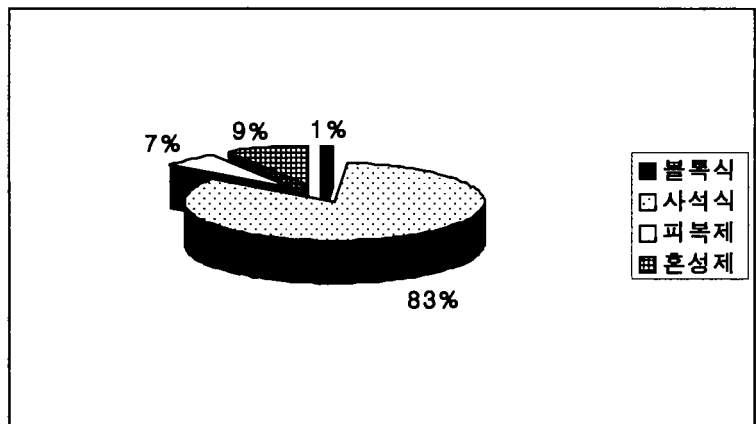
#### 1. 통계적 특성

입력된 단면자료의 방파제 구간은 총 319개였으며, 길이로는 총 54,792.34m이었다. 단 부산 남천항의 경우 방파제 길이에 대한 자료가 없어 분석에서 제외하였다. 이 중 연안항의 방파제의 총연장은 18,486.1m이었으며, 무역항 방파제는 36,306.24m로 약 66%를 차지하였다. 구조형식별로 나누어 보면 <도 2.3.1>에 제시된 바와 같이 사석식 경사제가 대부분을 차지하여 266 구간으로 83%를 차지하였으며, 그 길이로는 38,351.5m로 약 70%를 차지하였다. 나머지는 블록식 경사제가 4개 구간(207.1m), 혼성제가 28개 구간(11,836m), 그리고 소파블록 피복제가 21개 구간(4,397.74m)에 건설되었고, 직립제 형식의 방파제는

없었다. 단일 형태로 가장 길게 건설된 방파제는 옥포항 남북방파제로 그 길이는 1,365m 이었으며, 외해측 사면 상부에 6.3톤급 육각사주블록을 피복재로 사용한 점이 특징이다. 무역항과 연안항에 건설된 사석식 경사제의 길이는 각각 19,828m와 18,523.5m로 비슷하게 나타나 상대적으로 무역항에 혼성제나 소파블록 피복제가 많이 건설되었음을 알 수 있다. 또한 사석식 경사제로 분류된 방파제 구간 중 혼성제 또는 소파블록 피복제로도 분류될 수 있는 구간은 8개 구간 1,614.4m이었다.



<그림 2.3.1> 구조형식별 방파제 길이의 비율.



<그림 2.3.2> 구조형식별 방파제 구간수의 비율.

이 연구가 사석식 경사제를 대상으로 수행되고 있기 때문에 방파제 단면에 대한 통계적 특성은 사석식 경사제만을 대상으로 분석되었으며, 다른 구조형식의 방파제는 차후의 연구 또는 시설물 관리 등의 측면에서 참고자료로 수록하였다.

우선 사석식 경사제 단면의 대칭성을 살펴보면 대칭적 단면을 갖는 구간은 주로 방파제 두부 구간에서 나타났으며 31개 구간, 3,279.1m이었으며, 비대칭적 단면은 235개 구간, 35,072.4m로 대부분을 차지하였다. 이는 항외측과 항내측이 설계조건 또는 이용상황 등이 매우 다르다는 점에서 당연한 결과라 볼 수 있다.

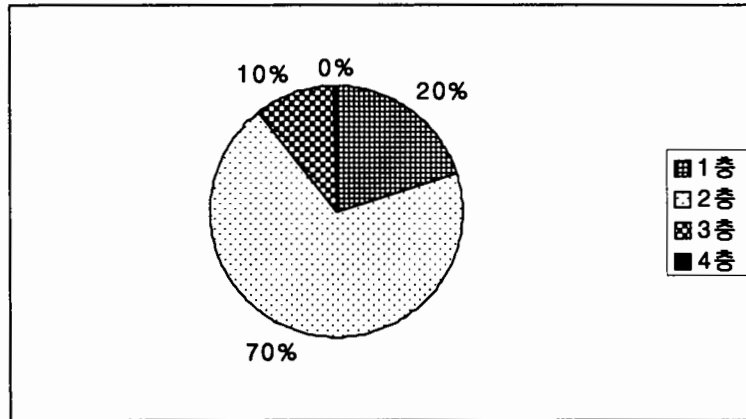
방파제 구간별로 항외측 사면 하부에 소단이 있는 경우와 없는 경우를 살펴보면, 소단이 1단으로 구성된 경우가 51개, 길이로는 8,327.3m이었으며, 2단 구조형식이 23개 구간, 길이는 2,839m로 소단이 있는 경우가 11,166.3m이었다. 소단 없이 일정한 사면으로 건설된 방파제가 대부분을 차지하여 192개 구간, 27,185.2m이었다. 소단의 형태별 분포를 <표 2.3.1>에 수록하였다. 이 표에서 체체 내부에 소단이 있는 H-형의 경우는 집계에서는 제외하고 별도로 취급하였다. 방파제에서 피복층 하부에 설치되는 소단은 세굴방지 기능 외에도 사면의 경사가 급할 경우에도 피복재의 미끌림을 방지해 줄 수 있는 등 방파제의 안정성을 증가시켜 줄 수 있다는 점에서 추후 이에 대한 다양한 연구가 필요하다.

<표 2.3.1> 소단의 형태별 분포.

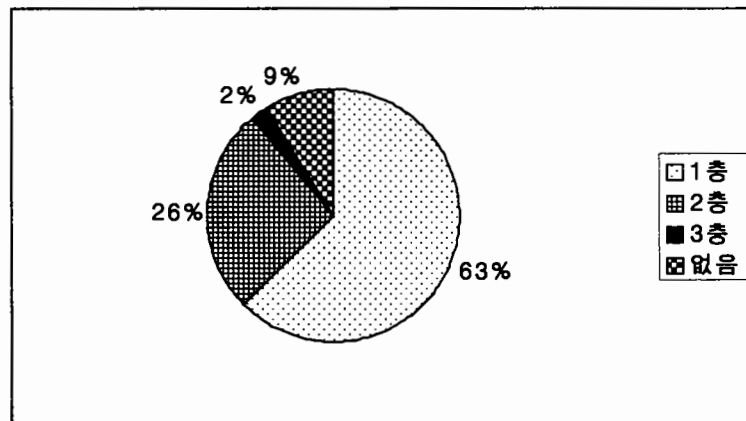
형식	A	B	C	D	E	F	G	합계	H
구간수	7	12	4	26	8	8	9	74	10
길이(m)	1,071.4	1,910.8	369.1	2,889.6	953.8	1,799.3	2,172.6	11,166.3	1,520.0

피복층에 대한 통계적 특성을 보면 항외측 사면의 경우 1층 피복된 경우가 7,652.2m, 2층인 방파제가 26,601.5m, 3층으로 피복된 경우가 3,952.0m, 그리고 4층으로 피복된 경우가 145.8m였다. 이를 <도 2.3.3>과 같이 차지하는 비율로 나누어 보면 3층 이상으로 피복된 경우는 적고 약 70%의 방파제 구간이 2층으로 피복되어 있음을 알 수 있다. 즉, 피복재 아래에 1층으로 중간피복재를 설치한 경우가 많았다. 특이한 경우로는 여수신항 서 방파제를 들 수 있으며, 이 방파제는 소파블록 피복제로 분류할 수 있으며, 기초사석 위에 2개층을 피복하고 케이슨을 설치한 후 육각사주블럭으로 전면을 보호하도록 건설하였으나, 그 후 사석으로 중간피복을 더하고 그 위를 다시 20톤 테트라포드로 피복하여 보강한 경우로 총 5개층으로 피복되어 있다. 한편 항내측 사면을 보면, <도 2.3.4>에서 보는

바와 같이 1층 피복된 경우가 24,017.7m로 약 63%를 차지하였으며, 2층 피복된 경우가 10,096.9m로 이들이 전체의 89%를 차지하였다. 3층으로 피복된 경우는 848.0m였으며, 향내측 사면이 매립되었거나 안벽 또는 물양장 등으로 사용되는 경우 피복되지 않을 것으로 간주하였으며, 그 길이가 3,388.9m에 이르렀다.



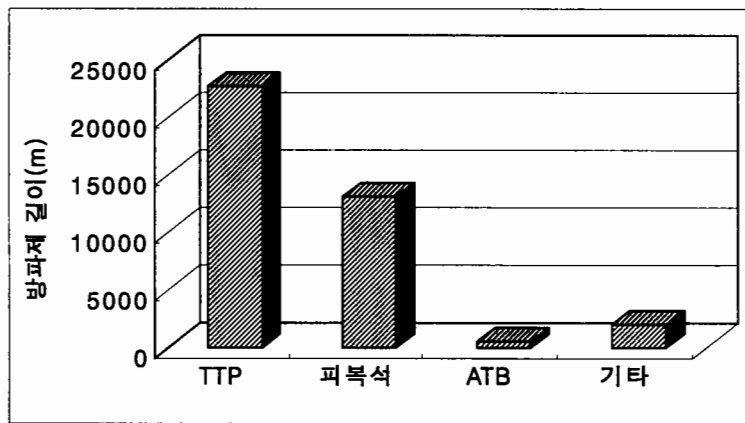
<도 2.3.3> 향외측 사면 피복층수에 따른 방파제 길이 비율.



<도 2.3.4> 향내측 사면 피복층수에 따른 방파제 길이 비율.

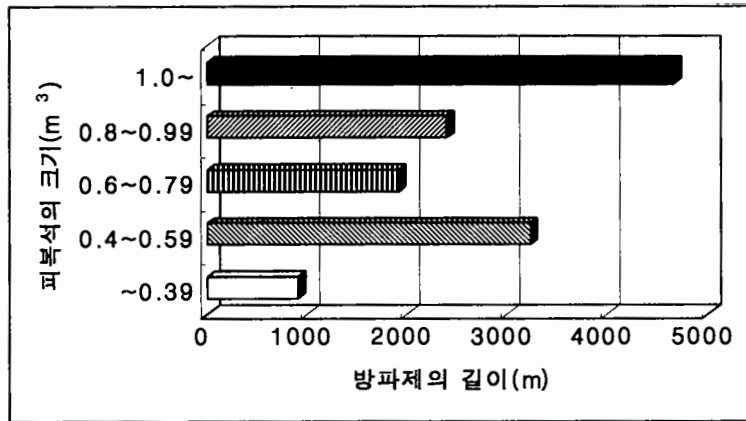
사용된 향외측 피복재를 살펴보면 테트라포드, 4원주블록, 육각사주블록, 중공삼각블록, 아치트라이바, 그리고 사석 등이 사용되었다. 이 중 테트라포드와 사석을 피복재로 이용한 경우가 <도 2.3.5>에 제시된 바와 같이 대부분을 차지하여, 테트라포드를 이용한 구간이 192개 22,675.3m, 사석을 이용한 구간이 61개 13,131.6m였다. 길이에 따른 비율은 각각

59.1%와 34.2%로 이들이 전체의 93.3%를 차지하는 것으로 분석되었다. 4원주블록은 거문도항 제2동방파제 180m 구간과 제2서방파제 165m 구간에서 사용되었으며, 그 크기는 4톤이었다. 육각사주블록은 울릉항 북방파제 23m 구간에서 20톤 크기가, 제주항 구동방파제 219m 구간에서 5톤 크기가, 그리고 옥포항 남북방파제 1,385m 구간의 외해측 사면 상부에서 6.3톤 크기가 사용되었다. 8톤급 중공삼각블록은 성산포항 북방파제 65m 구간에서 사용하였으며, 아치트라이바는 거진항, 삼척항, 묵호항에서 3톤에서 13톤급을 피복재로 사용하였다.



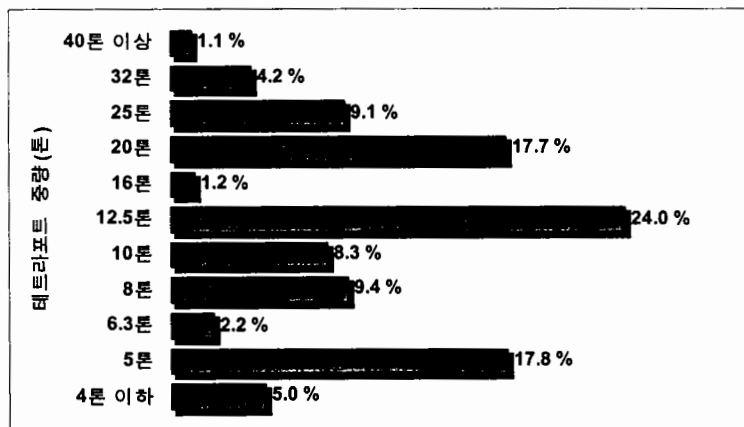
<도 2.3.5> 피복재에 따른 방파제 구간의 길이.

항외측 피복재로 사석을 사용한 경우를 보면 인천항 51번 방파제와 한림항 북방파제 10번 구간의 0.2m<sup>2</sup> 크기의 사석이 가장 작은 것이었으며, 미포항 남방파제에서 사용한 2.0m<sup>2</sup>급이 가장 큰 것이었다. 각 크기별 사석이 사용된 방파제 구간의 거리를 <도 2.3.6>에 도시하였다. 이 그림을 보면 1.0m<sup>2</sup> 이상급 사석이 피복석으로 사용된 경우가 가장 많은 것으로 나타났으며, 0.6m<sup>2</sup> 이상의 사석을 이용한 경우가 68.5%, 그 이하를 사용한 경우가 31.58%를 차지한 것으로 나타나, 0.6m<sup>2</sup>급 이하의 비교적 작은 사석도 항외측 피복재로 상당히 많이 사용되었음을 알 수 있었다. 그러나 0.4m<sup>2</sup> 이하의 사석을 항외측 피복재로 사용한 방파제 구간은 5개 구간, 906m였으며, 많이 사용되지 않았음을 알 수 있다.



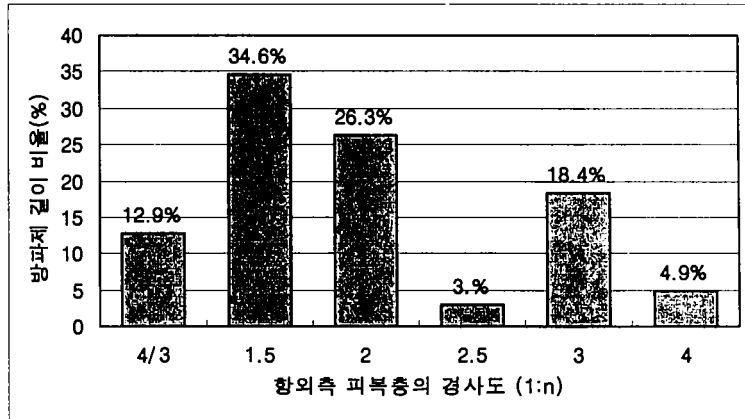
<도 2.3.6> 항외측 피복재로 사용된 피복석의 크기별 방파제 구간 길이.

항외측 피복재로 가장 많이 사용된 테트라포드의 경우를 보면, 총 14가지의 사용된 중량 중 가장 큰 것은 서귀포항 남방파제 두부 구간에서 사용된 64톤급이었으며, 연평도항 동방파제에서 사용된 2톤급이 가장 작은 테트라포드였다. 중량별 사용 방파제 구간거리의 비율이 <도 2.3.7>에 도시되었다. 가장 많이 사용된 것은 12.5톤급의 테트라포드로 24.0% 구간에서 사용되었으며, 그 다음으로 사용빈도가 높은 것은 5톤급과 20톤급이었다.



<도 2.3.7> 항외측 피복재로 사용된 방파제 구간의 테트라포드의 중량별 비율.

한편 항외측 피복층의 경사도 즉, 제체의 경사도는 <도 2.3.8>에서 보는 바와 같이 1:1.5 경사가 가장 많아 34.6%를 나타냈고, 1:2 보다 급한 경사도를 갖는 방파제가 73.8%를 차지하여 대부분 비교적 급한 경사를 갖는 것으로 나타났다.

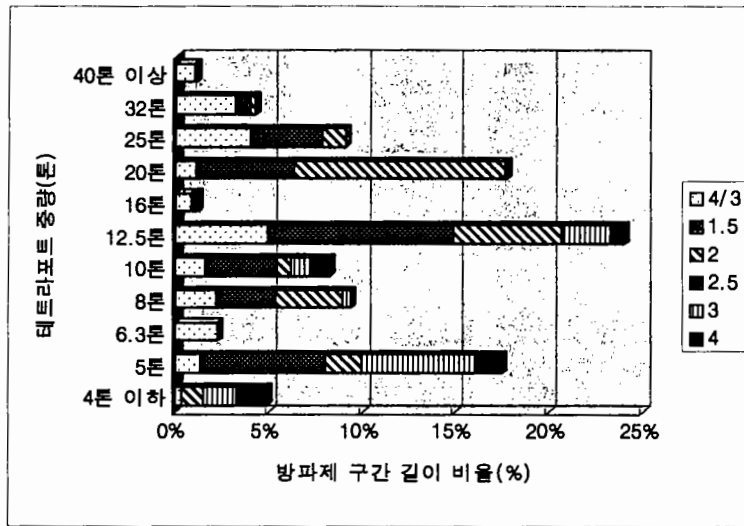


<도 2.3.8> 항외측 피복층의 경사도 비율.

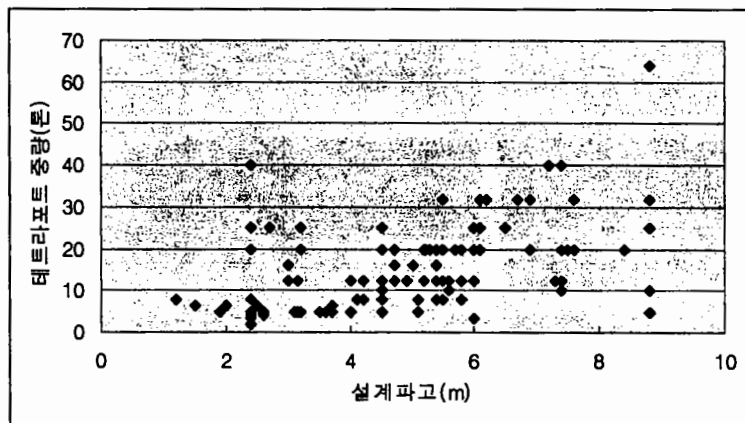
최근에는 피복재로 테트라포드를 사용한 경우 기본적인 경사도로 1:4/3의 비교적 급한 경사가 권장되고 있다. 따라서 일반적인 예상과 같이 테트라포드를 피복재로 사용한 경우 피복석의 경우에 비해 급한 경사를 나타냈으며, 중량이 커질수록 경사는 급해졌다. 이를 좀 더 명확히 알아보기 위해 테트라포드 중량별 경사도를 <도 2.3.9>와 같이 표시하였다. 이 그림을 보면 40톤 이상의 테트라포드를 사용한 경우 그 경사는 1:4/3와 1:1.5였으며, 32톤과 25톤의 비교적 큰 테트라포드를 사용한 경우 뿐 아니라 거의 대부분의 경우 1:1.5보다 급한 경사를 채용하였음을 알 수 있다. 그러나 특이한 것은 20톤급의 테트라포드를 사용한 경우 1:2의 경사가 가장 많이 사용된 것으로 나타나 다른 경우와 약간 다른 양상을 보였다. 이는 많은 보수단면에서 원래의 경사는 그대로 둔 상태로 중량이 큰 테트라포드를 피복했기 때문인 것으로 판단된다.

한편 사석경사체를 설계할 때 피복재의 결정에 가장 영향을 크게 미치는 요소 중 하나인 설계파고와 실제 사용된 테트라포드의 중량과의 상관관계를 알아보기 위해 이들에 관한 자료를 <도 2.3.10>에 정리하였다. 일반적으로는 설계파고와 피복재의 중량이 뚜렷한 상관관계를 보여야 하나 이 도를 보면 상관성이 적은 것으로 나타났다. 이는 수심, 중간 피복재의 사용 여부, 제체의 경사도 등 다양한 요소에 의해 피복재의 중량이 결정된 때문인 것으로 판단되며, 이들의 관계에 대한 좀더 심도 있는 분석과 연구가 요구된다.



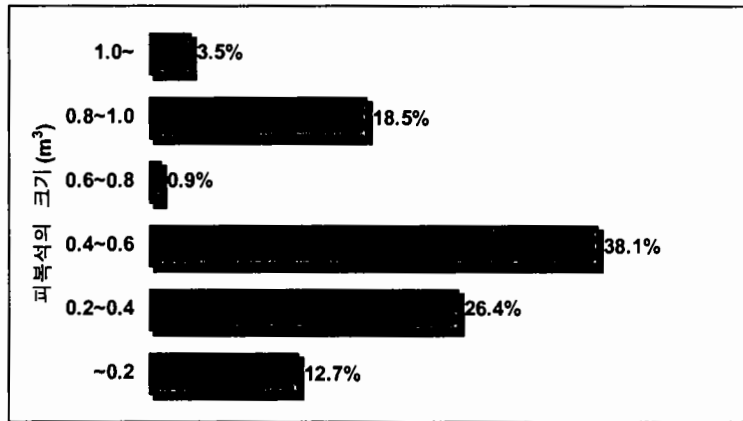


<도 2.3.9> 테트라포드의 중량별 경사도 비율.



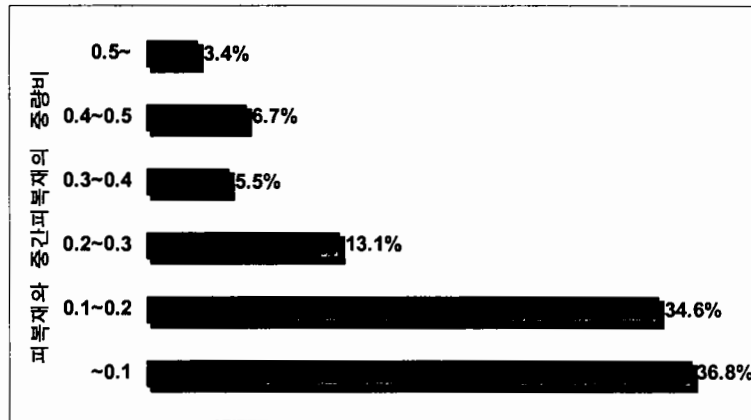
<도 2.3.10> 설계파고와 사용된 테트라포드의 중량의 관계.

항외측 중간피복층의 재료로 사석을 사용하지 않은 경우는 서귀포항 남방파제(20번)에서 64톤급 테트라포드 하부에 중간피복재로 사용된 27톤급 삼각블럭과 삼척항 방파제 17번 단면에서 5톤급 아치트라이바(ATB) 뿐이다. 이 중에서 삼척항 방파제의 경우는 원래 피복재로 5톤급 아치트라이바를 사용하였으며, 그 후 5톤급 테트라포드로 보강한 경우에 해당하므로 실제 설계 당시부터 이형블럭을 중간피복재로 사용한 경우는 서귀포항 남방파제가 유일하다 할 수 있다. 제1중간피복층에서 피복재로 사석이 사용된 경우 <도 2.3.11>에 제시된 바와 같이 0.6㎡ 미만급의 사석이 주로 사용되었으며(77.2%), 0.4㎡ 이상 0.6㎡ 미만급의 사석이 가장 많이 사용되었다.

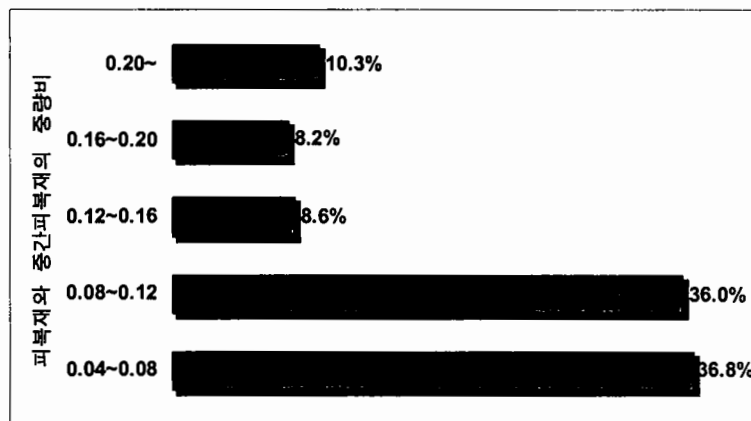


<도 2.3.11> 제1중간피복층에 사용된 사석의 크기별 비율.

피복재와 제1중간피복재의 중량비(= 제1중간피복재의 중량/피복재의 중량)에 대해 살펴 보기 위하여 중량비별 방과제 구간 길이의 비율을 <도 2.3.12>에 도시하였다. 이 그림을 보면 0.1 이하의 중량비를 갖는 방과제 구간이 36.8%로 가장 많았으며, 0.3 이하의 중량비를 갖는 방과제 구간이 대부분을 차지하여 84.5%를 나타내었다. 이는 일반적으로 피복재로 테트라포드를 쓸 경우 0.05~0.1 정도의 중량비를 갖는 중간피복재를 사용하는 것과 비교해 볼 수 있다. 이를 좀더 자세히 분석하기 위하여 보수단면을 제외한 설계단면 구간만을 대상으로 테트라포드를 피복재로 중간피복재로 사석을 사용한 134개 단면 구간에 대하여 중간피복재와의 중량비 분포를 <도 2.3.13>에 도시하였다. 이 그림을 보면 0.04~0.12의 중량비를 갖는 방과제 구간이 72.8%를 차지하고 있으며, 0.12 이상의 비교적 큰 중량비를 갖는 구간도 28.1%로 나타나 상당히 큰 사석을 중간피복재로 사용한 구간도 적지 않음을 알 수 있다.

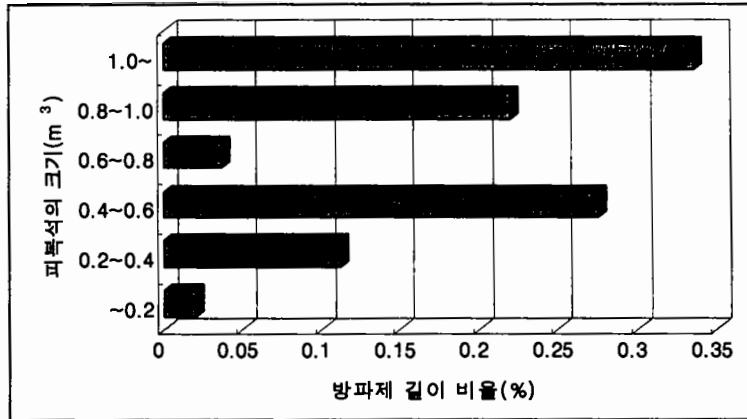


<도 2.3.12> 피복재와 제1중간피복재의 중량비별 방파제 구간 길이 비율.



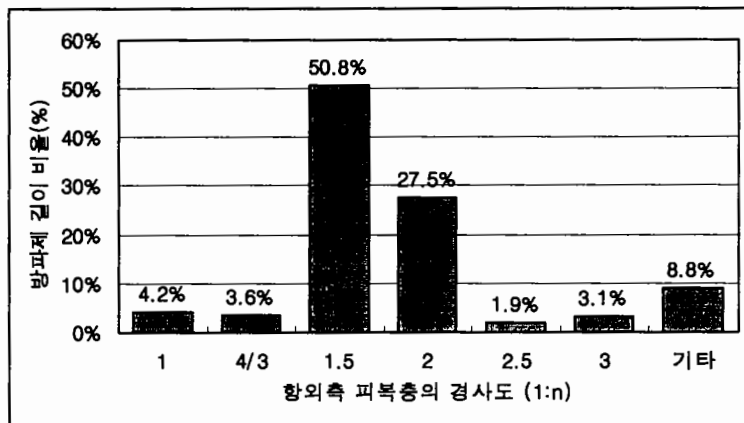
<도 2.3.13> 테트라포드를 피복재로 사석을 제1중간피복재로 사용한 경우 중량비별 방파제 구간 길이 비율.

항내측의 피복재로는 항외측과 같이 육각사주블록, 중공삼각블록, 아치트라이바, 사석, 그리고 테트라포드 등을 사용하였다. 사석의 사용빈도가 가장 높아 91% 정도였으며, 테트라포드는 약 8%의 방파제 구간에서 사용되었으며, 항외측에 비해 사용빈도가 매우 적은 편이었다. 테트라포드를 제외한 다른 형태의 이형블록의 사용빈도는 1% 정도로 미미하였다. 항내측의 피복재로 가장 많이 사용된 사석의 경우 크기별 사용비율을 보면 <도 2.3.14>에 제시된 바와 같이 1.0m<sup>3</sup> 이상급이 33.5%로 가장 컸으며, 그 다음으로 0.4m<sup>3</sup>~0.6m<sup>3</sup>급을 많이 사용한 것으로 나타났다. 항외측에 비해 테트라포드의 사용 비율이 적은 반면, 0.6m<sup>3</sup> 이상급의 사석 이용율이 59.2%로 항외측에 비해 약간 큰 것을 알 수 있다.



<도 2.3.14> 향내피복재로 사용된 사석의 크기에 따른 방파제 길이 비율.

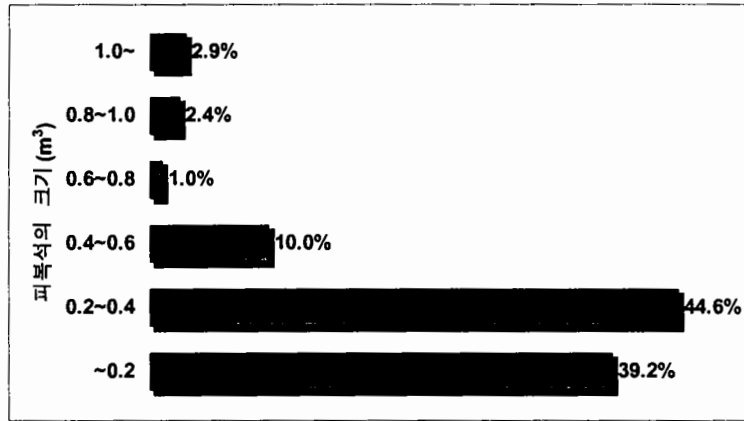
향내 피복층의 경사도를 <도 2.3.15>에 도시하였다. 이 그림에서 기타는 후면이 매립되었거나 안벽 또는 물양장으로 이용되어 사면이 없는 경우를 나타낸다. 이 그림에서 보는 바와 같이 항외측에 비해 오히려 경사가 완만한 것으로 나타났다. 이는 테트라포드 등 이형블록의 사용빈도가 적고 사석을 많이 이용하였으며, 또한 피복석의 크기가 작아짐에 따라 비탈면 경사를 적절히 조절할 필요가 있었기 때문인 것으로 판단된다.



<도 2.3.15> 향내피복층의 경사도에 따른 방파제 길이 비율.

향내측의 중간피복재로는 서귀포항 남방파제 20번 구간에서 사용된 27톤급 삼각블럭을 제외하면 모두 사석만 사용되었으며, 그 크기별 사용비율을 보면 <도 2.3.16>에 도시된

바와 같이 항외측에 비해 작은 사석의 사용빈도가 많은 것을 알 수 있다. 이는 항외측에 비해 설계조건에 덜 민감한 결과라 할 수 있다.



<도 2.3.16> 항내 제1중간피복재로 사용된 사석의 크기에 따른 비율.

이상과 같이 1992년 현재 우리나라 무역항과 연안항에 설치된 사석경사제의 현황에 대해 데이터베이스를 작성하고 통계적 분석을 실시하였다. 이로부터 방파제의 안정성을 높이기 위하여 소단을 적절히 이용할 필요가 있으며, 이에 대한 연구가 더 필요함을 알 수 있었다. 또한 적절한 중간피복재를 사용하면 비탈면 경사를 조절할 수 있어 안정성과 경제성을 높일 수 있을 것으로 예상된다. 한편 항외측 비탈면 경사에 비해 급할 것으로 예상되었던 항내측 비탈면 경사가 비교적 완만한 것을 알 수 있었으며, 이로부터 항내측 비탈면 경사에 대해 연구가 필요하며, 앞으로 사석경사제를 건설할 때 항내측 비탈면 경사에 좀더 주의를 기울일 경우 상당한 재료를 절감할 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 주문진항의 경우 분석

주문진항은 현재 연안항으로 지정되어 개발 관리되고 있는 항으로 그 역사가 깊고 중부 동해안의 물류 또는 어업전진기지로 중요한 역할을 담당하고 있다. 또한 다른 항만과는 달리 <도 2.3.17>에서 보는 바와 같이 방사제, 도류제, 돌제 등 다양한 외곽시설로 보호되고 있어 많은 기술자와 연구자들에 의해 다양한 이유로 주목을 받고 있는 항만이기도 하다. 주문진항의 동쪽에 위치한 방파제의 경우 항세의 확장에 따라 순차적으로 연장

되어 건설되었으며, 그 단면 또한 개량되기도 보강되기도 하였다. 따라서 방파제의 형상이 직선형이 아니라 곡선형에 가까운 형태를 가지고 있으며, 이는 꺾인 부분에 파랑에너지가 집중될 수도 있다는 점에서, 그리고 꺾인 부분이 단면 형상이 서로 다른 구간이 연결된 부분이라는 점에서 취약할 수 있을 것으로 판단된다. 이에 1992년까지의 주문진항 방파제를 대상으로 그 특성을 분석하여 보았다.



<도 2.3.17> 주문진항의 평면도.

주문진항 방파제는 각각 다른 단면을 갖는 8개의 구간으로 축조되어 있으며, 단면형상이 다른 각 부분의 길이와 위치를 기부에서 두부 쪽으로 모식화하고, 각 부분의 중심점에 지반고, 설계파고, 피복석의 중량 및 외해측 비탈면의 경사에 대한 자료를 <표 2.3.2>에 수록하였으며, 이를 <도 2.3.18>에 도시하였다. 또한 각 구간의 표준단면도를 <도 2.3.19>에 수록하였다. <도 2.3.18>에서 A구간은 방파제의 기부이고 H구간은 방파제의 두부이다. A구간과 B구간은 후면이 물양장으로 사용되며, 호안과 같은 역할을 하고 있고, C구간부터 양쪽 사면을 갖는 형태를 보인다 (<도 2.3.19> 참조). 표준단면의 수심은 D구간이 E.L.(-)13m로 가장 깊었으며, 나머지 구간은 E.L.(-)8m부터 E.L.(-)9m로 거의 비슷

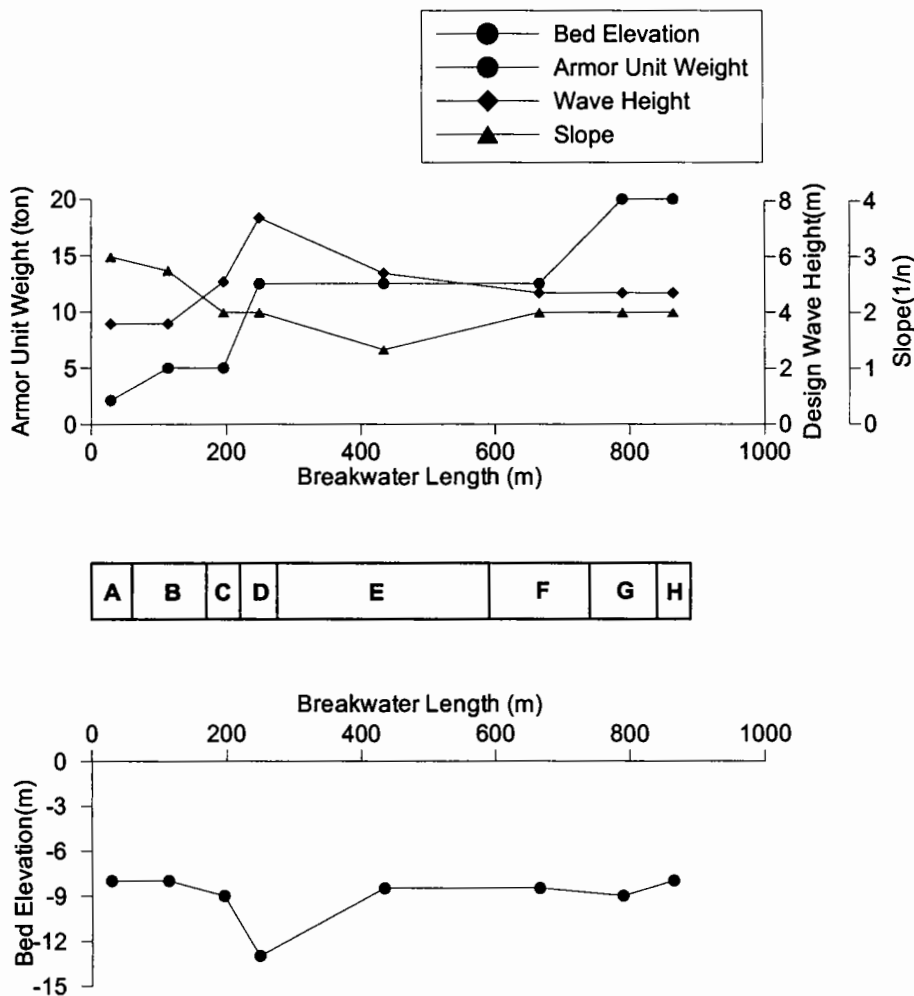
하였다. 피복재로는 기부인 A구간에서 0.8m'급의 사석을 사용했을 뿐 나머지 구간에서는 테트라포드를 사용하였다. 피복석의 중량은 기부에서 두부로 갈수록 순차적으로 커지나, 설계파고는 설치수심이 가장 깊은 D구간에서 7.4m로 가장 컸다. 한편 항외측 비탈면 경사도를 보면 기부인 A구간과 B구간에서 상대적으로 완만하고, E구간이 1:4/3으로 가장 급했으며, 나머지 구간은 1:2로 일정했다. 설계파고가 상대적으로 큰 C, D 및 E구간에서 일반적인 생각과 달리 피복석의 중량도 크지 않고 비탈면 경사도 완만하지 않은 것으로 나타났다. 이는 각 구간의 표준단면도를 참조하면 그 이유를 알 수 있다.

<표 2.3.2> 주문진항 방파제의 표준단면도 자료와 설계파고.

방파제 구간	길이 (m)	지반고 E.L.(m)	피복석 종류 및 중량(톤)	설계파고 (m)	항외측 경사
A	58.0	-8.0	0.8m'급 사석 2.12	3.6	상부 1:4 하부 1:2
B	111.7	-8.0	TTP 5	3.6	상부 1:3 하부 1:2.5
C	52.3	-9.0	TTP 5	5.1	2
D	54.0	-13.0	TTP 12.5	7.4	2
E	316	-8.5	TTP 12.5	5.4	1.33
F	147.5	-8.5	TTP 12.5	4.7	2
G	100	-9.0	TTP 20	4.7	2
H	50	-8.0	TTP 20	4.7	2

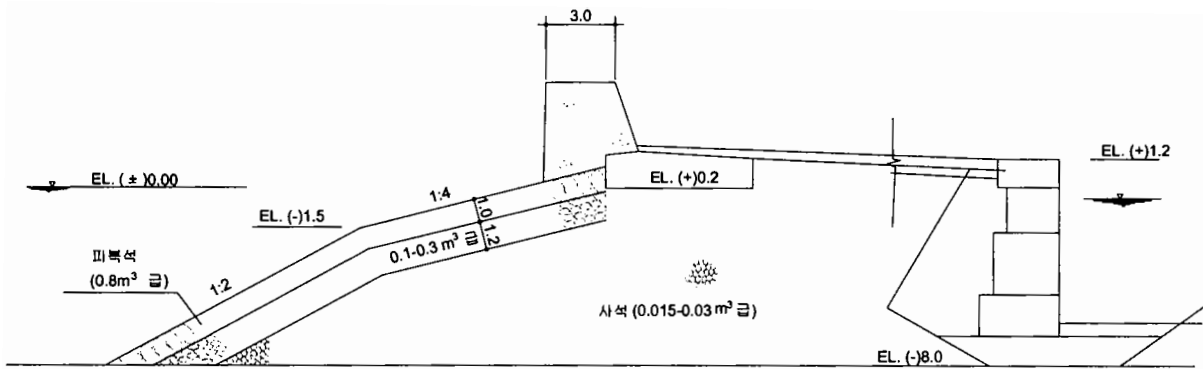
각 구간별 단면도인 <도 2.3.19>를 보면 A와 B 구간은 외해 쪽으로 완만하게 기초사석을 쌓고 1층의 중간피복 후 최종 피복한 형태를 보이며, 구간 E, F, G, 그리고 H는 1층의 중간피복층을 두는 거의 유사한 형상으로 건설된 것을 알 수 있다. 또한 구간 B, C, 그리고 D는 최초 건설된 단면을 테트라포드로 피복하여 보강한 단면이라는 것을 쉽게 짐작할 수 있다. 특히 주목해야 할 것은 C구간과 D구간의 단면이다. C구간의 경우 2층의 중간피복층이 있는 것으로 나타났으나 최초 건설 당시에는 구간 A나 B와 같이 0.8m'급의 사석으로 피복하고 비탈면 상부의 경사를 약간 완만하게 하부의 경사를 약간 급하게 조절하여 피복층과 체체의 안정성을 동시에 향상시킬 수 있도록 고안한 것으로 판단된다. 그 후 테트라포드로 피복하고 상치콘크리트를 더하여 보수한 것이다. D구간의 표준단면도를 보면, 이 구간에서는 3층의 중간피복층을 두었음을 알 수 있다. 또한 제1중간피복재

로 9톤급의 아치트라이바(ATB)를 사용한 점, 제1중간피복층 하부에 1.0m<sup>3</sup>급의 사석으로 소단을 이루도록 한 점등을 특징으로 꼽을 수 있다. 이로부터 현재의 제1중간피복층이 보수되기 이전에는 피복층이었다는 것을 알 수 있으며, 이전의 피복층 위에 12.5톤급의 테트라포드로 보강하고 상치콘크리트를 높이 쌓아 보수한 것을 알 수 있다. 제체 내부의 하부 구조는 보수단면에서 나타날 수 있는 특징을 그대로 보여주고 있으며, 이러한 하부구조로 인해 설계파고가 크에도 비교적 적은 크기의 피복재를 사용할 수 있었던 것으로 판단된다. 이로부터 중간피복층의 수, 중간피복재의 종류 및 소단의 적절한 사용 등이 사석경사제의 안정성 및 경제성을 향상시키는 데 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 판단되며, 이에 대한 지속적인 연구가 요구된다.

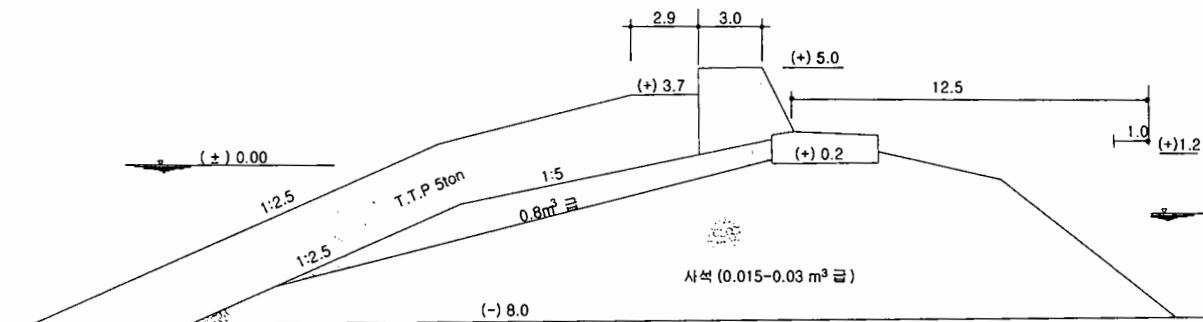


<도 2.3.18> 주문진항 동방파제 각 부분별 설계조건과 피복재의 크기 및 사면경사.

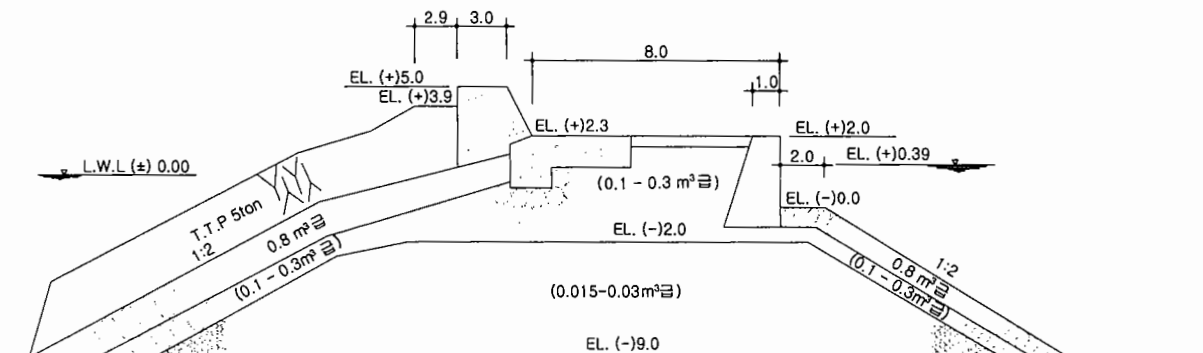




단면 A (연장=58m)

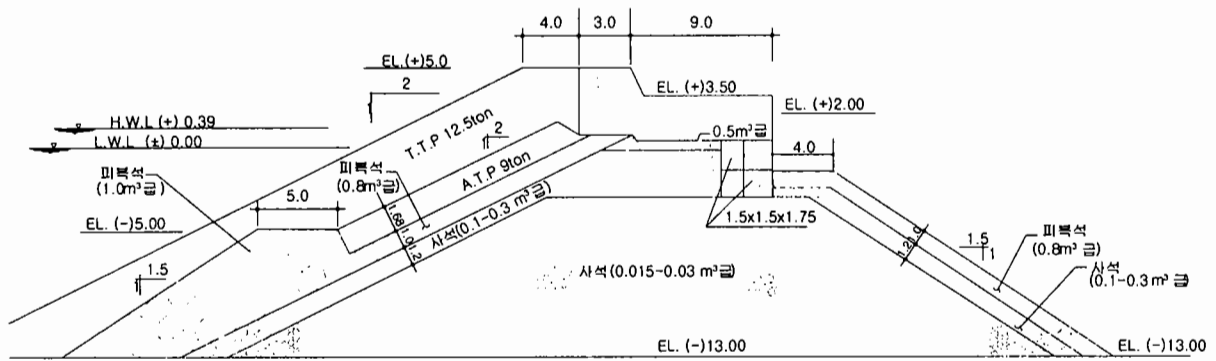


단면 B (연장=111.7m)

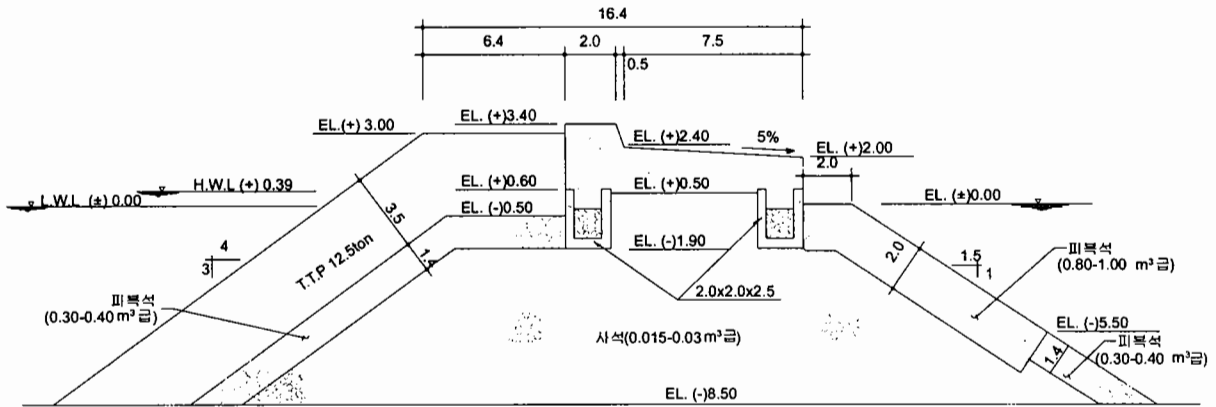


단면 C (연장=52.3m)

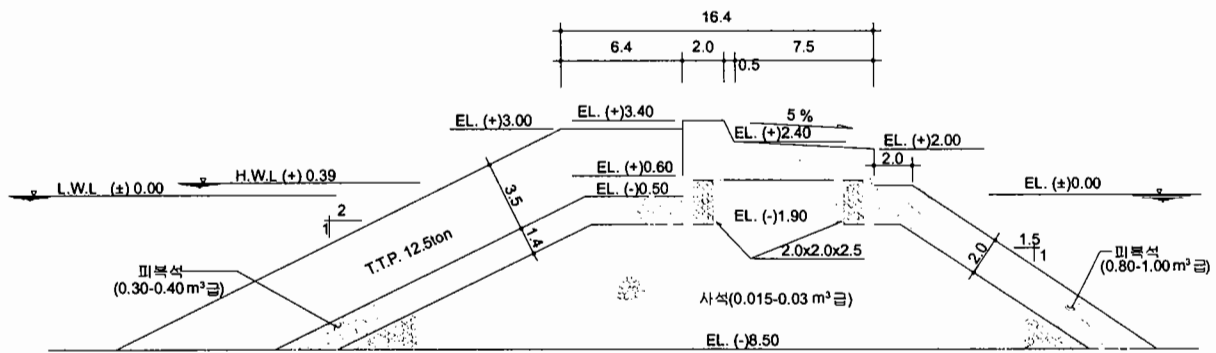
<도 2.3.19> 주문진항 방파제 각 부분의 단면도.



단면 D (연장=54m)

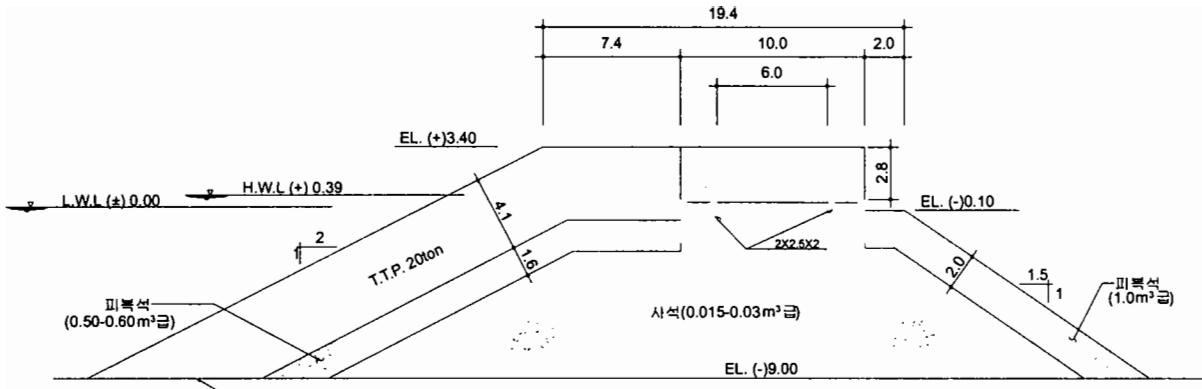


단면 E (연장=316m)

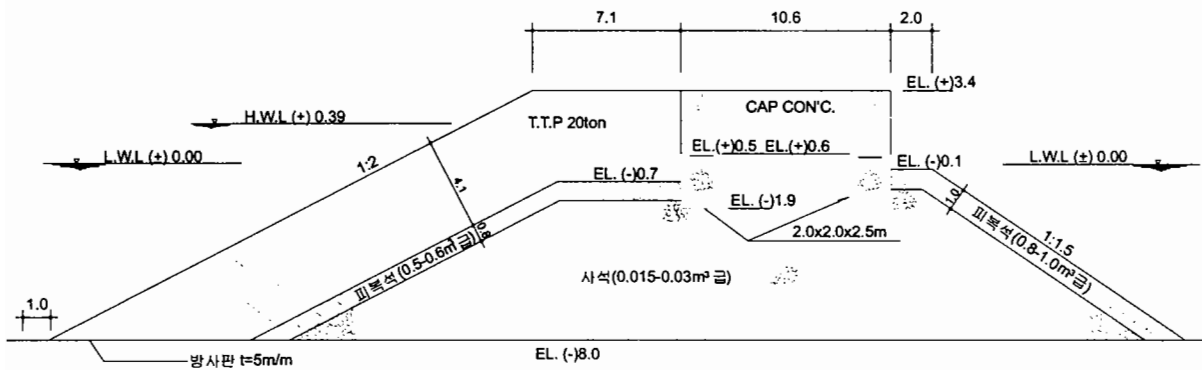


단면 F (연장=147.5m)

<도 2.3.19> 계속.



단면 G (연장=100m)



단면 H (연장=50m)

<도 2.3.19> 계속.

## 제3장 경사식 방파제의 사면의 안정성

### 제1절 서론

경사식 방파제는 파가 제체의 완만한 사면에서 시차를 가지며 소파되도록 함으로써 제체에 가해지는 총파력이 감소되도록 하는 중력식 방파제로서 제체의 사면은 파력에 안정한 개별 피복재로 피복된다. 이 피복재의 하층에는 피복재의 기초가 되며 제체 내의 세굴재의 유출을 억제하는 중간피복층(필터층)을 설치하게 된다. 피복재나 중간피복재로는 자연석이나 콘크리트 인공블록이 사용되고 있다.

제체 사면의 경사는 전체 공사비에 큰 영향을 미친다. 경사가 완만하면 수심이 증가할수록 제체의 단면이 급속도로 증가하므로 공사비도 따라서 크게 증가한다. 사면의 안정 경사는 사용된 피복재나 중간피복재에 따라 차이가 난다. 안정성은 자연석일 경우에는 경사가 완만할수록 증가되는 반면 인공피복재인 경우에는 그 형상에 의한 서로간의 맞물림 정도가 클수록 자연석의 경우보다 급경사인 경우에 증가된다.

우리나라에서는 경사식 방파제의 인공 피복재로 Tetrapod가 주로 쓰이고 있는데 CERC(1984)는 Tetrapod를 피복재로 사용한 경사제에서 사면의 경사를 1: 1.5보다 급하게 하지 말 것을 권하고 있다. 그리고 Hudson식을 이용하여 중량을 산정할 때 필요한 Tetrapod의 피해계수( $K_D$ )도 사면의 경사가 1 : 1.5보다 급하지 않은 경우에 한해 제시하였다. 피해계수로는 제간부에서 쇄파 영역과 비쇄파 영역별로 각각 7.0과 8.0을 제시하고 있다. 이에 반해 “TETRAPOD 설계, 시공(사단법인 한국항만협회)”에서는 일본의 Nihon Tetrapod사가 수리실험을 통해 얻은 결과를 이용하여 Tetrapod의 적정 설치 경사를 1:4/3로 제안하고 있으며, 피해계수로는 쇄파 영역과 비쇄파 영역별로 각각 8.3과 10.2인 큰 값들을 제시하고 있다.

한편, 오늘날의 설계에서는 외력 조건으로 불규칙파를 이용하고 있으나 Tetrapod의 기존 피해계수들은 규칙파 실험으로부터 도출된 것들이다. 따라서 설계 기술자들은, 이용할 수 있는 두 개의 설계기준이 상충되고 있어 사면 경사의 결정은 물론 Tetrapod 중량의 선정에도 어려움을 겪고 있다.

제2장의 국내 경사식 방파제의 현황 분석 결과에 의하면 인공 피복재로서는 거의 Tetrapod만이 사용되고 있으며 제체의 사면 경사는 매우 다양하게 시공되었다. 피복재로

Tetrapod를 사용한 경우 Tetrapod의 중량과 설계파와의 관계도 매우 불규칙하다. 또한 Tetrapod에 대한 중간피복석 중량의 비율도 매우 다양하여 대부분 1/10~1/20의 범위에 있으며 중간 피복재로 인공블록을 사용한 몇몇 예에서는 중량비가 이보다 크게 나타났다. 사면 하부의 소단의 형상도 매우 다양하였다.

따라서 안정성과 경제성을 겸비한 경사식 방파제를 설계하기 위해서는 우선 사면의 형상과 구성 내용의 변화 및 소단의 형상이 제체의 안정성에 미치는 영향을 종합적으로 파악하며, 사면의 경사에 따른 파고와 Tetrapod의 안정중량과의 관계도 보다 심층적으로 검토함이 필요한 실정이다. 그리고 이러한 연구 결과를 반영한 설계기준을 마련할 필요성이 절실하다.

본 연구에서는 이러한 설계상의 문제를 해결하기 위하여 불규칙파를 적용한 수리모형 실험을 통하여 피복재로 Tetrapod를 사용한 경사식 방파제에서 소단의 형상, 사면의 경사, 중간피복층의 내용의 변화에 따른 사면의 안정성을 비교·분석하였다. 그리고 이들 결과를 바탕으로 안정 잠재력이 큰 단면 형상을 대상으로 불규칙파를 이용한 Tetrapod의 피해계수( $K_D$ )를 추정함으로써 안정성과 경제성을 겸비한 단면을 설계하기에 필요한 기술을 개발하였다.

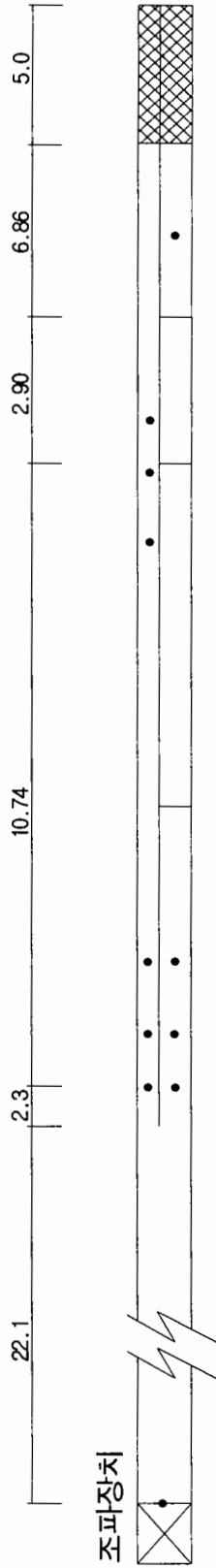
## 제2절 실험조건과 실험단면

### 1. 실험장치와 실험조건

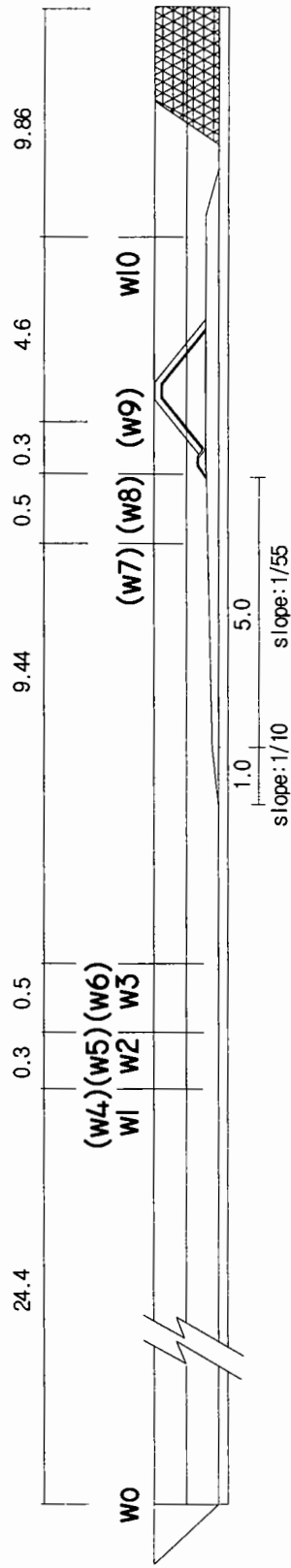
본 연구에서는 특정한 방파제 단면을 대상으로 정해진 설계파 조건에서 안정성을 평가하는 일반적인 방파제의 연구의 경우와는 달리 1차 기초실험 연구결과를 바탕으로 안정 잠재력이 큰 단면형식을 선정한 후 이에 대하여 정밀하게 연구하는 방법을 택하였다. 따라서, 실험 도중에 필요한 경우에는 방파제 위치에 도달하는 소요 통과파를 추가로 작성하기 위하여 조파수조를 종방향으로 분할하였다. 수조를 분할하였음에도 불구하고 조파기는 반사파를 흡수할 수 있도록 구동하였다.

<도 3.2.1>은 조파수조와 계측기기 및 모형의 설치도를 나타낸다. 조파수조는 길이 53.25m, 높이 1.25m, 폭 1.0m로서, 길이 방향으로 분할철판을 경계로 폭 0.6m인 광수로와

Unit : m



(a) 평면도



(b) 측면도

<도 3.2.1> 2차원 조파수조와 모형 및 계측기기 설치도

폭 0.4m인 협수로로 분할하였다. 광수로에는 경사식 방파제의 모형을 설치하였고 협수로에서는 통과파를 측정하였다. 수심은 조파기에 가까운 저면이 수평인 구간에서는 60cm, 방파제 소단의 끝 위치에서는 41cm로 일정하였으며, 방파제 전면의 저면 경사는 1/55이었다. 그림에서 W1~W3(W4~W6)은 광수로(협수로)의 평탄부에 설치된 용량식 파고계로서 입사파를 측정하고 반사율을 분석하는데 사용하였고, W7~W9는 경사 해저면 위에서 방파제의 소단 부분을 통과하는 파를 측정하는데 사용하였으며, W10은 방파제 후면에 설치되어 전달파고를 측정하는데 사용하였다.

모형파는 불규칙파로서 파랑 스펙트럼으로는 다음과 같이 畠田良實(1987)에 의해 수정된 Bretschneider- Mitsuyasu 스펙트럼을 사용하였다.

$$S(f) = 0.205H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f^5 \exp[-0.75(T_{1/3}f)^{-4}] \quad (3.2.1)$$

여기서  $S(f)$ 는 파랑에너지 밀도,  $f$ 는 주파수를 나타내며,  $H_{1/3}$  및  $T_{1/3}$ 은 각각 유의 파고 및 유의파 주기를 나타낸다. 실험파는 협수로에서 작성하였다. 파랑 스펙트럼의 형상은 수심 60cm인 저면이 수평인 구간에서 만족시켰으며, 방파제의 소단 측면에서 입·반사파를 분리하여 얻은 입사파고를 통과파고로 하였다.

<표 3.2.1>은 실험에 사용한 파의 제원을 나타낸다. 실험파는 실험실 시간으로 30분 동안 조파하였으며, 안정성 평가시 파고가 작은 파로부터 큰 파의 순서로 작용시켰다.

<표 3.2.1> 실험파의 제원

주기(s)	저면경사	유 의 파 고(cm)											
		8.1	10.5	11.9	13.0	14.0	15.1	15.8	16.9	17.8	18.5	19.5	21.3
2.21	1/55												
1.60	1/55			12.1	13.1	14.3	15.2	16.0	17.0	17.7			

Tetrapod는 시멘트와 구리가루를 사용하여 비중이 2.24가 되도록 제작하였으며, 실중량이 목표중량인 277g으로부터  $\pm 2\%$  이내에 드는 것들만 사용하였다. 중간피복층의 사석은 중량이 기준 중량의 75~125% 범위에 들도록 선별하였다.

## 2. 실험단면

실험 단면안은 1차적으로 사면의 안정성에 영향을 미치는 중요한 인자들을 발굴하기 위하여 제체의 마루높이가 높으며, 사면의 경사, 소단의 형상, 중간피복층 내용의 변화를 위주로 한 단면안들과, 이에 대한 실험 결과의 분석을 바탕으로 유리한 단면 형상을 선정 한 후 피복층의 피해를 평가하기 위하여 마루높이를 낮춘 안들로 구성하였다.

<표 3.2.2>에는 실험 단면의 개요와 실험목적을 요약하여 제시하였으며, <도 3.2.2> ~<도 3.2.11>에는 본 연구에 이용된 실험 단면들을 도시하였다. <도 3.2.2>~<도 3.2.6>은 사면 경사가 1 : 4/3인 경우에 안정성을 비교한 단면안들이다. 단면의 형식은 마루높이가 과도하게 높은 점만을 제외하면 모두 국내에서 사용되고 있거나 사용할 수 있는 형식들이다. 연구의 목적상 피복재의 미끌림과 수중 사면 경사의 변화를 비교하기 위하여 사면의 한 부분이 밀려 내려감에 따라 그 위 부분에서 피복재가 지속적으로 공급되도록 할 필요가 있었기에 마루높이를 통상의 방파제보다 높게 유지하였다. 그러나 이후 피복층의 피해량(이탈 등)을 증점적으로 평가하는 제2단계 실험에서는 마루높이를 사용 파고에 대해 거의 비월과 조건을 만족하는 만큼 하향 조정하였다.

<도 3.2.7>과 <도 3.2.8>은 사면 경사가 1 : 1.5이며 마루높이가 47.2cm로 공통인 제6안과 제7안의 실험단면들이다. 여기서 제6안에는 수평형 소단이 설치되었고 제7안에서는 지지형 소단이 설치된 점이 다르다. 여기서 지지형 소단이란 피복재를 견고하게 지지함으로써 미끌림을 억제하기에 유리한 형상을 가진 소단을 말하며 수평형 소단과 구별하기 위하여 이름한 것이다. 본 연구에서 지지형 소단의 피복층과 맞닿는 면의 경사는 제4안을 제외하고는 피복층의 경사가 1 : 4/3 및 1 : 1.5인 각 경우에 대해 약 1 : 1.5 및 1 : 4/3로 하였고, 그 마루높이는 피복층 표층의 사면이 지지형 소단과 만나는 선보다 약간 높게 설정하였다.

<도 3.2.9>와 <도 3.2.10>은 사면 경사가 1 : 1.5이며 마루 높이가 30cm로 공통인 제8-1안과 제8-2안의 단면을 나타낸다. 두 개의 안 모두 지지형 소단이 설치되었으나 소단의 높이에 차이가 있다. 제8-1안에서는 소단의 높이가 피복블록 제1열 2층의 높이와 같으나 제8-2안에서는 소단의 높이가 피복블록 제1열의 2층의 높이보다 1cm 더 높았다.

<도 3.2.11>은 사면 경사가 1 : 4/3이며 마루높이가 30cm인 제9안의 단면이다. 여기서,



제5안, 제8-1안, 제8-2안 및 제9안은 지지형 소단을 설치하여 사면의 미끄러움을 억제한

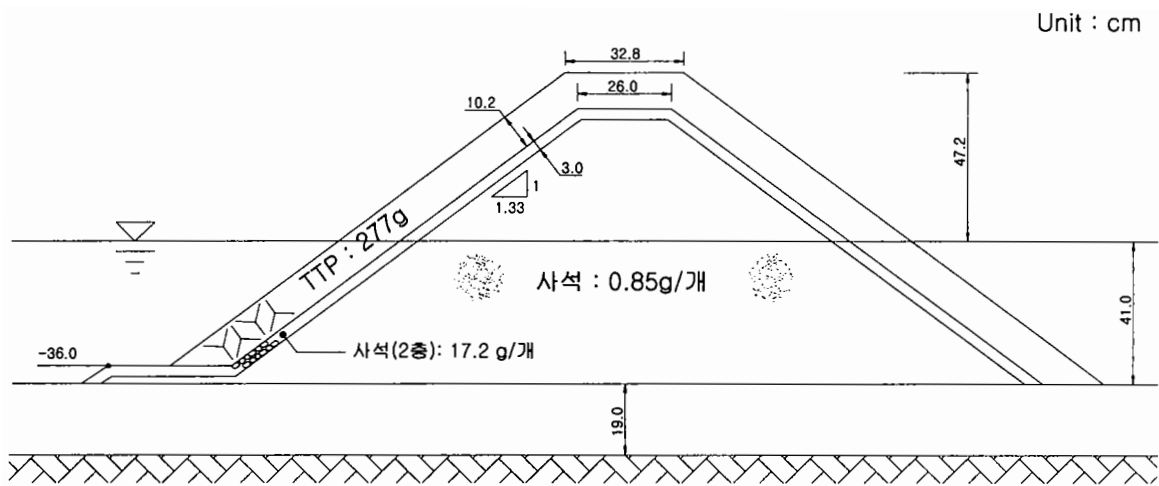
<표 3.2.2> 실험단면의 개요와 실험 목적(피복재 : W=277g의 T.T.P., 비중=2.24)

단면 번호	사면 경사	마루높이 (cm)	전사면 TTP(개)	중간피복층	소 단 (cm)	실험 목적	
						주	종
1	1:4/3	47.2	313 313	사석 W/17 2층	수평형 -36.0	사면경사 미끄러움	피해양상
2	1:4/3	47.2	311 308	삼각블록 17.2g/개, 사석 W/17	수평형 -36.0	사면경사 미끄러움	피해양상
3	1:4/3	47.2	315 312	사석 W/10, 2층	수평형 -36.0	사면경사 미끄러움	피해양상
4	1:4/3	47.2	314	사석 W/10, 2층	지지형 -30.5	사면경사 미끄러움	실험 중단
5	1:4/3	47.2	306 307	사석 W/10, 2층	지지형 -28.0	피해량 평가	사면경사 미끄러움
6	1:1.5	47.2	334	사석 W/10, 2층	수평형 -36.0	사면경사 미끄러움	피해양상
7	1:1.5	47.2	334	사석 W/10, 2층	지지형 -28.0	사면경사 미끄러움	피해양상
8-1	1:1.5	30.0	248	사석 W/10, 2층	지지형 -29.0	피해량 평가	사면경사 미끄러움
8-2	1:1.5	30.0	246 247	사석 W/10, 2층	지지형 -28.0	피해량 평가	사면경사 미끄러움
9	1:4/3	30.0	228 228	사석 W/10, 2층	지지형 -28.0	피해량 평가	사면경사 미끄러움

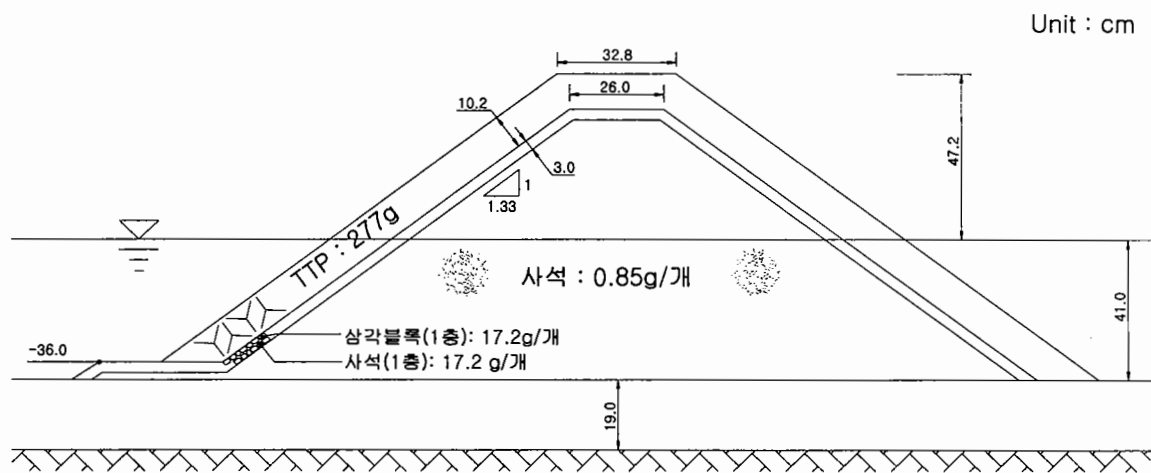
상태에서 주로 사면의 피해량을 추정함에 이용된 단면들이다.

<도 3.2.12>는 제2안에서 중간피복층의 상층에 설치된 삼각블록(Tri-Block)의 형상과 배치도를 나타낸다. 이 삼각블록은 중간피복재로 사용되도록 국내에서 개발되어 중간피복 블록으로는 국내 시공 예가 가장 많으므로 본 연구에서 중간피복재로 사용하는 쇄석과 콘크리트 제품의 마찰력 차이가 사면의 안정성에 미치는 영향만을 검토하기 위하여 채택하였다.

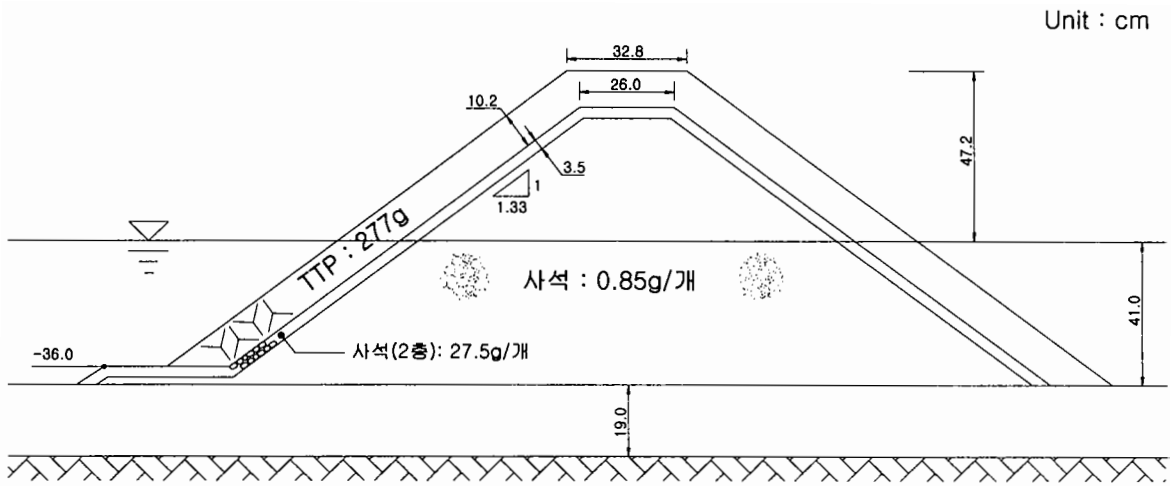
<도 3.2.13>은 제4안에서 소단으로 사용된 콘크리트 블록의 모양을 나타낸다. 제4안은 제3안의 결과를 바탕으로 피복블록의 최하부인 -30.5cm의 표고에서 피복층의 미끄러움을 억제하기 위하여 속이 빈 사다리꼴의 콘크리트 블록으로 지지형 소단을 형성하고 빈 공간에는 쇄석을 채웠으나, 파고 13cm의 파에 의해 이미 미끄러움이 현저하게 시작되어 실험을 중단하였다. 이때 블록의 공기중의 중량은 1,410g이었다.



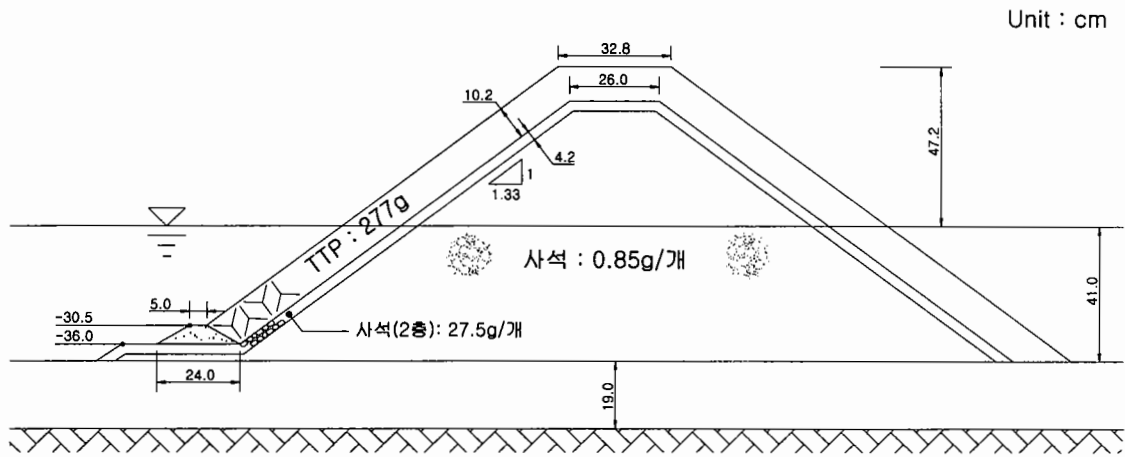
<도 3.2.2> 제1안의 실험단면



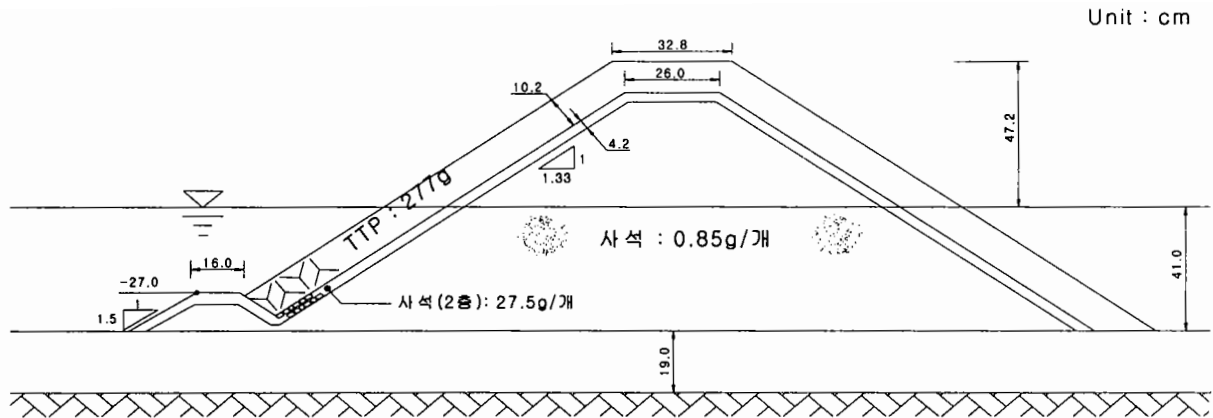
<도 3.2.3> 제2안의 실험단면



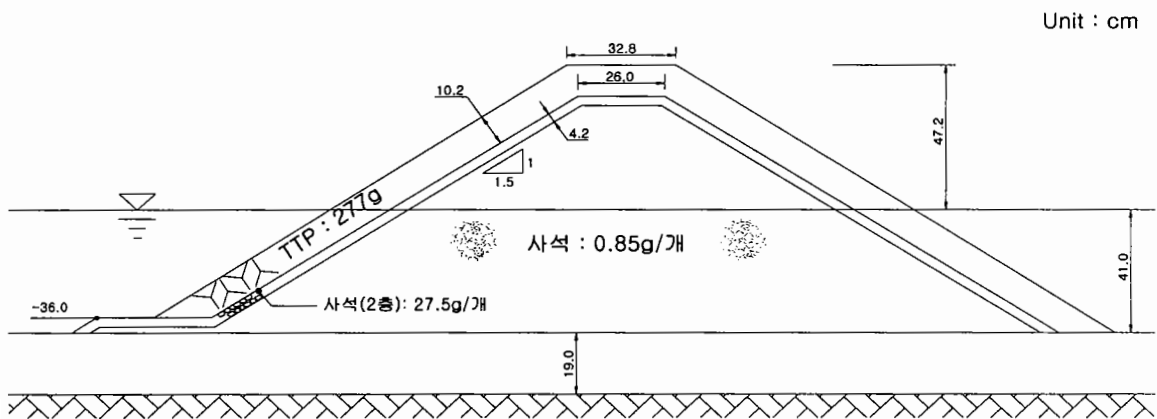
<도 3.2.4> 제3안의 실험단면



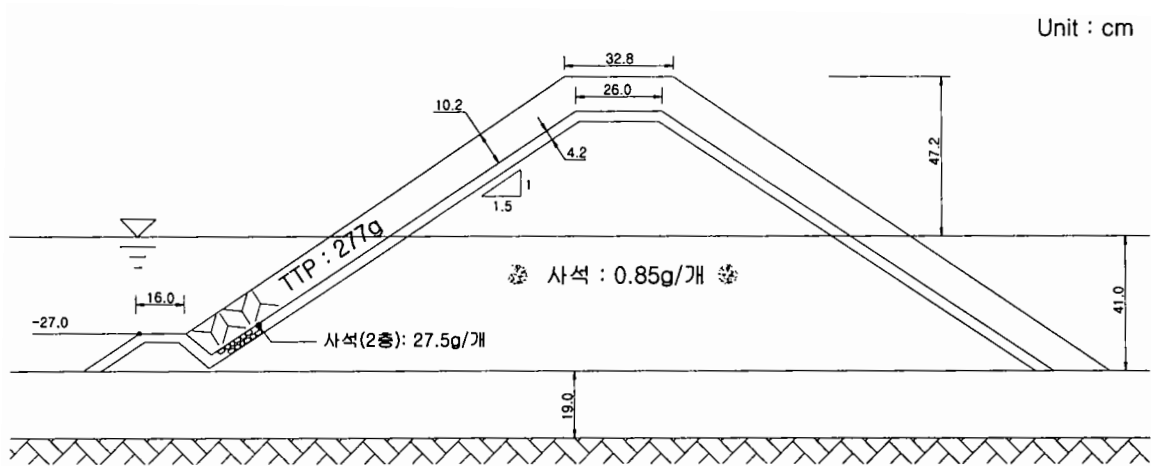
<도 3.2.5> 제4안의 실험단면



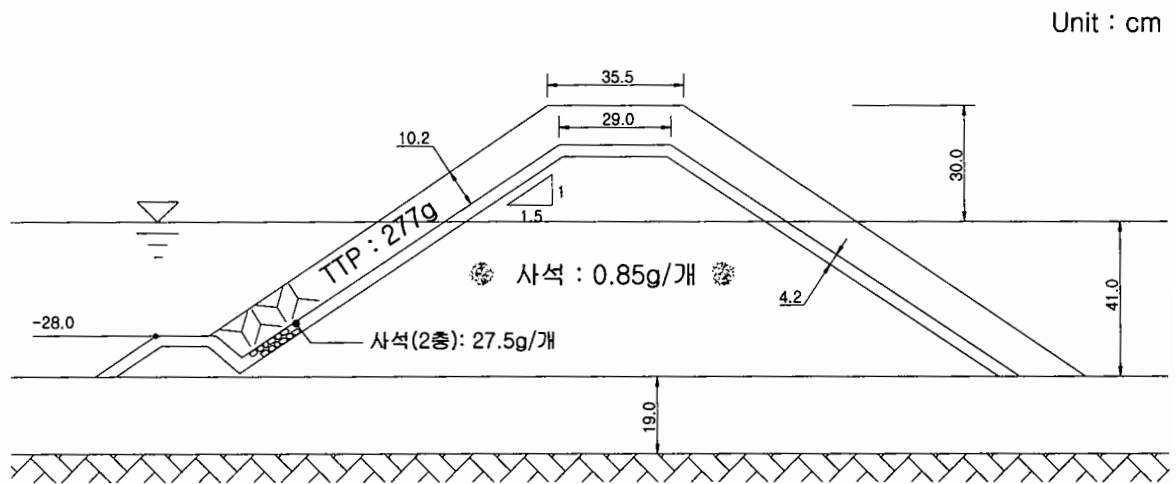
<도 3.2.6> 제5안의 실험단면



<도 3.2.7> 제6안의 실험단면

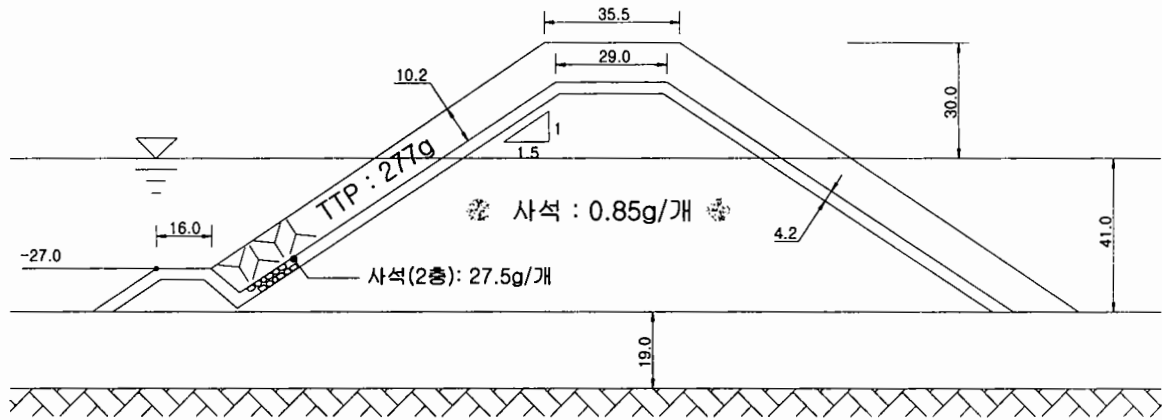


<도 3.2.8> 제7안의 실험단면



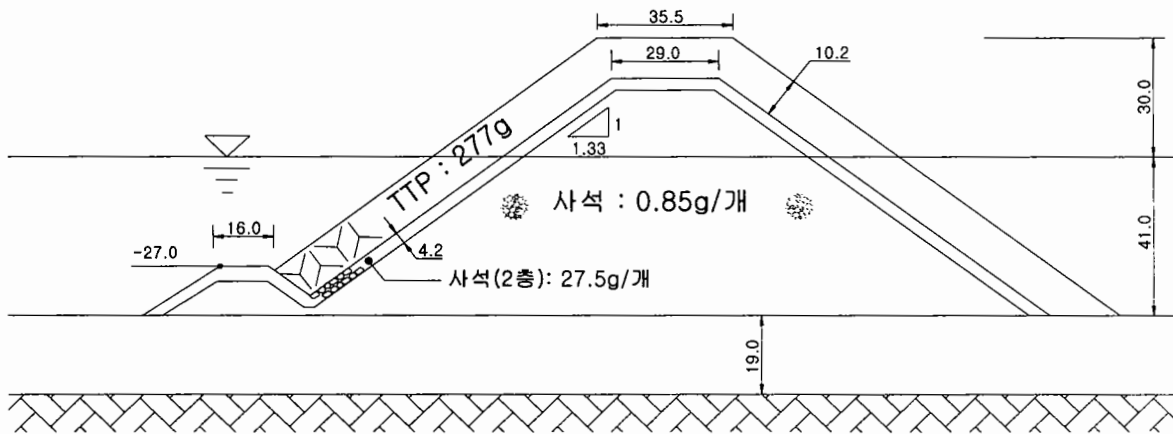
<도 3.2.9> 제8-1안의 실험단면

Unit : cm

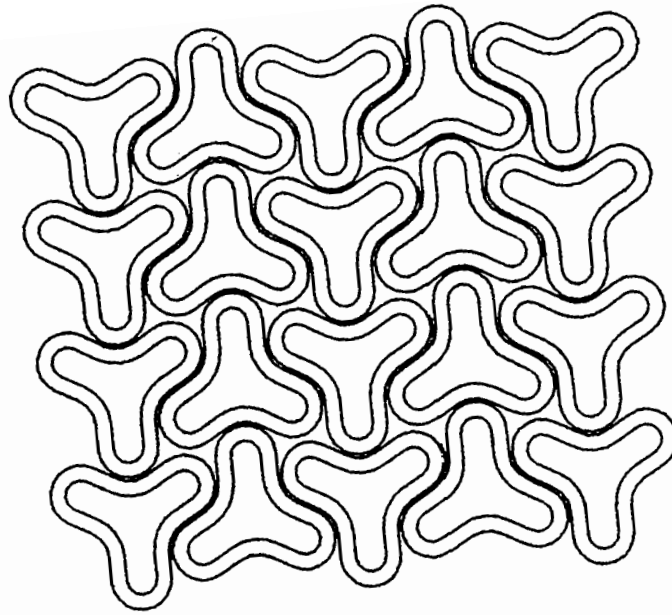


<도 3.2.10> 제8-2안의 실험단면

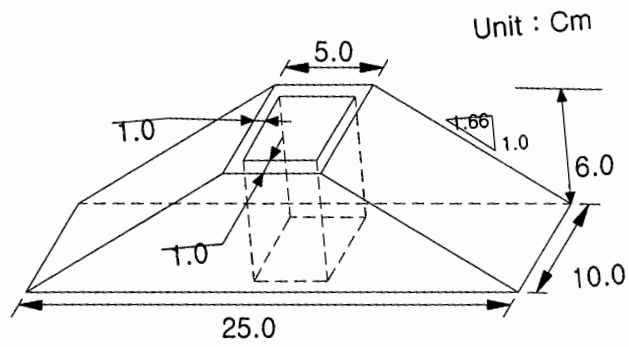
Unit : cm



<도 3.2.11> 제9안의 실험단면



<도 3.2.12> 삼각블록(Tri-block)의 배치도



<도 3.2.13> 제4안의 지지형 소단으로 사용된 콘크리트 블록의  
형상

### 제3절 사면 안정성 평가의 방법

#### 1. 실험실 안정성 평가시의 문제점 검토

실험실에서 경사식 방파제의 피복재의 최종 피해는 일반적으로 피복재가 제자리를 이탈하거나 파괴되는 현상으로 나타난다. 축소 수리모형실험에서 사면의 안정성을 검토할 때에는 일반적으로 피복재의 파괴는 고려하지 않고 단지 피복재가 제자리에서 이탈한 양으로 피해량을 평가한다. 따라서, 실험실에서 경사식 방파제의 사면의 안정성 또는 사면의 피해라 하면 제체의 사면에 설치된 피복층이 파력을 받아 최종적으로 제자리를 이탈하는 정도만을 의미하는 것으로 이해하기가 쉽다. 그러나 이는 사면이 변형되는 과정 후에 나타나는 최종 결과 중 가장 중요한 요소라고 이해함이 바람직하다. 바꾸어 말하면 사면의 피해양상과 피해량은 외력과 단면 제원의 다양한 인자들에 의해 영향을 받으므로 최종 피해량의 평가에 앞서 사면의 안정성 또는 안정 잠재력을 평가하기 위한 보다 다양한 접근 및 해석을 시도할 필요가 있다.

사면 피복층의 내파 안정성은 동일한 중량의 피복재라 하더라도 사면의 경사 정도에 따라 변하며, 피복층은 중간피복층 위에 설치되므로 안정성 또한 그 기초가 되는 중간피복층의 안정성에 큰 영향을 받는다. 피복층은 파력에 의해 짜맞추기가 진행되는 과정에서 공극이 감소될 때 자연스럽게 사면을 미끌어져 내려온다. 그러나 다른 불안정한 요인으로 피복층이 과도하게 미끌리면 이는 제체 전체의 안정성을 크게 저해하는 잠재력으로 작용하게 되므로 피복층의 미끌림 현상에 특별한 관심을 기울일 필요가 있다.

이러한 측면에서, 피복층의 외해측 하부에 설치된 소단의 형태는 피복층의 미끌림 현상과 피복층 제1열의 이탈 여부에 직접적으로 영향을 미치므로 소단 형상의 변화가 사면의 안정성에 미치는 영향의 파악에도 큰 관심을 기울여야 할 것이다.

#### 2. 안정성 평가 항목의 설정

본 연구에서는 위에서 제기한 문제점들을 검토하기 위하여 현장에서 불안정한 사면이 실험실에서 보일 것으로 판단되는 여러 가지의 불안정한 양상을 다음과 같이 구분하여 고려하였다.



## 가. 피복층의 미끌림 현상

피복층의 기초가 되는 중간피복층이 작용파에 대해 불안정한 경우, 또는 피복층의 가장 외해측 수심이 깊은 구역에서 지지력이 부족한 경우에는 작용파고가 작은 경우에도 피복층이 지속적으로 사면을 따라 미끌려 내려가는 현상이 발생한다. 사면에 설치된 피복재가 파력을 받아 짜맞춤이 진행될 때에도 피복재의 공극이 감소되므로 미끌림 현상은 서서히 진행된다. 피복재의 이탈 현상이 심하지 않은 상태에서 미끌림이 심하게 발생하는 현상은 주로 피복재의 외해측 수심이 깊은 구간에서 지지력이 부족한 경우에 많이 발생한다.

본 연구에서와 같이 특정 설계 단면이 제시되지 않은 상태에서 일반 단면을 대상으로 안정성 비교를 수행하는 경우에는 일반적으로 모형에서 방파제의 마루에 상치구조물을 설치하지 않으며 마루높이는 월파가 발생하지 않도록 높게 설정한다. 그러나 실험역 방파제에서는 일반적으로 상치구조물이 설치되므로 피복층의 미끌림이란 곧 상치구조물 전면에서 설치된 피복재의 밀도가 현저히 감소되거나 상치구조물 전면의 상황이 피복재가 설치되지 않은 상태로 변하는 것을 의미한다. 이 경우에는 상치구조물에 작용하는 파력이 설계에서 예측한 값보다 대폭 증대된다. 이는 경사식 방파제에서 상치구조물의 전면을 피복재로 보호함으로써 상치구조물에 작용하는 파력을 대폭 감소시켜 상치구조물의 마루 너비와 제체의 폭을 감소시키려는 당초의 설계 목적을 크게 해치는 현상이다.

<사진 3.3.1>에는 2000년 8월 31일 12호 태풍 프라피룬이 내습했을 때 태풍파로 인하여 소흑산도항(가거항) 방파제의 제두부로부터 약 100m 정도의 구간에 걸쳐 발생한 64톤급의 Tetrapod 및 상치구조물의 피해 장면을 참고로 나타냈다. 방파제의 설치수심은 최대 33m 정도로서 수면하 23m 정도에 폭이 좁은 수평형 소단이 설치되었다. 잠수 조사를 통하여 소단의 상황을 파악하려고 하였으나 피해가 큰 구간을 벗어난 제간부에서조차 소단의 위치를 찾는 일에 실패하였다. 따라서, 이번 피해는 태풍파가 밀려 올 때 파의 작용이 컸던 제두부로부터 사면의 미끌림 현상이 심화되어 수상부의 사면에 설치된 Tetrapod의 밀도가 감소됨과 아울러 동시에 발생하는 Tetrapod의 이탈로 인해 상치구조물에 설계값보다 훨씬 큰 파력이 작용하는 과정으로 진행되었을 가능성이 높은 것으로 추측된다. 이로 미루어 볼 때, 피복층의 미끌림을 비교 단면안별로 정량적으로 비교하는 것은 안정성이 큰 단면 형상을 도출하기 위하여 매우 중요한 기본 사항이라고 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 피복층의 미끌림 현상을 파악하기 위하여 사면상에 설정된 5~6개의 기준점들로부터 Tetrapod의 상층부가 파의 누적 작용에 따라 사면을 따라 미끌려

내려간 누적 거리를 투명한 자를 이용하여 육안으로 측정하였다.

#### 나. 수중 사면 경사의 변화

파력을 받아 피복재가 미끌러 내림에 따라 수심이 깊은 구역에서 피복재의 두께가 점차 두꺼워지는 경우, 또는 정수면 부근의 피복재가 파력을 받아 중간피복층을 파고들면서 기초사석층 쪽으로 이동할 때에는 수중의 사면 경사는 점차 완만하게 변한다. 또한, 피복재의 이탈은 일반적으로 정수면 부근에서 시작되며 이탈된 피복재는 다음의 큰 파에 의해 사면을 굴러 내려가므로 피복재의 이탈이 진행될수록 피복재의 두께는 정수면 부근에서는 감소하고 수심이 깊은 구역에서는 증가하므로 결국 수중 사면의 경사는 점차 완만해진다. 즉, 수중 사면의 경사가 완만해지는 현상은 사면이 불안정하여 변화되는 것을 의미하므로 이를 정량적으로 계측하여 안정성을 상대 비교할 때에 이용할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 파를 작용시킨 후에 수중의 Tetrapod 표층의 수중 사면경사를 투명한 자를 이용하여 육안으로 계측하였다.

#### 다. 피복재의 제자리 회전 또는 록킹

경사식 방파제는 사면에 설치된 개별 피복재간의 상대적 변위를 일부 허용하는 유연한 구조형식의 방파제이다(Flexible structure). 따라서, 파력에 의해 개별 피복재가 안정된 자리를 잡는 과정에서 제자리에서 약간 회전하거나 또는 흔들리는 현상(Rocking)이 발생하는 것은 피할 수 없다.

그러나 실험실에서 피복재의 움직임이 과도하면 실험역에서 이는 곧 피복재가 파괴될 수 있는 것을 의미하므로 결국 사면이 불안정함을 나타낸다고 보아야 한다. 실제로 실험역에서 피복재로 Tetrapod가 사용된 경우 사용 중량에 따라 이의 피해 양상은 다르게 나타난다. 중량이 작은 Tetrapod로 형성된 사면에서는 피해양상이 주로 Tetrapod의 제자리 이탈 현상으로 나타나지만 중량이 매우 큰 Tetrapod로 형성된 사면에서는 피복층의 피해가 Tetrapod의 제자리 이탈보다는 1차적으로 Tetrapod 자체의 파괴로부터 시작되기도 한다. 일단 움직이는 피복재가 인근 피복재에 미치는 충격 파괴력은 피복재의 질량 즉 피복재의 특성길이의 3제곱에 비례하나 피복재의 내부 허용용력의 크기는 이 특성길이의 제곱에 비례하므로 피복재의 중량이 증가할수록 피복재의 록킹에 의한 충격력은 급속히 증가하기 때문이다.

<사진 3.3.2>에는 2000년 8월 31일 12호 태풍 프라피룬이 내습했을 때 태풍파로 인하여 소흑산도항(가거항) 방파제의 제간부에서 발생한 64톤급 Tetrapod의 피해 장면을 참고로 나타냈다. 화면에 돋보이는 Tetrapod는 4개의 다리 모두가 절반 이상 잘려 나갔으며 다른 Tetrapod보다 솟아 나와 있다. 현장을 유심히 관찰하여 Tetrapod의 색깔로 구분한 결과 이 파괴된 Tetrapod는 수상에 설치되었던 것이었다. 그리고 현재의 위치에서 하부에 공극이 큰 점, 또 바로 그 아래의 위치에 있는 Tetrapod의 다리도 파괴된 점 등으로 미루어 보아 이 Tetrapod는 제자리에서 발생한 심한 회전 또는 록킹으로 인해 파괴된 것으로 추측된다.

축소 모형실험에서는 피복재의 크기를 Froud의 상사법칙에 따라 축소하므로 단위질량은 실험역에서와 같으며, 재료의 강도도 일반적으로 원형에서와 같게 하므로 록킹이 매우 심하여도 피복재의 파괴는 발생하지 않는다. 즉, 실험역에서 피복재의 파괴로 인한 피해는 실험실에서는 피해로 나타나지 않는다. 이러한 문제점으로 인해 대형 피복재를 사용할 경우 통상의 실험 결과에서는 안정성을 실제 이상으로 과도하게 평가할 수 있다. 축소 모형실험 결과에서 안정하다고 판정된 단면이 실험역에서는 매우 큰 피해를 보이는 예가 있는 것은 1차적으로 이런 요인에 의한 것으로 추측된다.

파괴로 인해 중량이 감소된 피복재는 쉽게 제자리를 이탈하게 된다. 따라서, 파괴의 직접 원인인 피복재의 심한 회전이나 록킹은 실험실에서 콘크리트 인공 피복재의 안정성을 판단하는 중요한 항목으로 취급해야 할 것이다. 그러나 현재 어느 정도의 제자리 회전이나 록킹이 발생할 때 이를 피해로 분류해야 하는가에 대해서는 마땅한 기준이 없다. 또한 실험실에서도 피복재의 회전이나 록킹이 심하게 발생할 때에는 쇄파에 의하여 수중에 기포가 다량 형성되는 경우가 많으므로 비디오 촬영으로도 중요한 순간 장면을 포착하기가 매우 어려운 실정이다. 이에 관한 정밀 연구를 수행하기 위해서는 전적으로 개별 피복재의 재료와 형상에 따라 피복재 내부에 발생하는 응력의 계측과 아울러 피복재의 움직임을 동시 분석하는 별도의 구조해석적 연구방법을 동원하여야 할 것이다. 그 이전까지는 중량이 큰 Tetrapod를 사용한 과거의 방파제에서 발생한 피해사례를 조사하여 필요한 경우에는 실험실 결과로부터 결정된 안정 중량보다 큰 중량의 Tetrapod를 사용함이 바람직하다.

현 단계에서는 실험실에서 발생하는 피복재의 회전 또는 록킹은 실험역에서의 피해를 간접적으로 나타내는 것으로 간주하여 최소한 이의 일부는 안정성 평가시에 반드시 피해



<사진 3.3.1> 12호 태풍 프라피룬의 영향으로 제두부에서 발생한 64톤급 Tetrapod 및 상치구조물의 피해 장면



<사진 3.3.2> 12호 태풍 프라피룬의 영향으로 제간부에서 발생한 64톤급 Tetrapod의 피해 장면

로 분류하여야 할 것이다. 본 연구에서는 육안 관찰과 비디오 촬영을 통하여 Tetrapod의 록킹 현상을 개략적으로 평가하여 특정 Tetrapod가 순간적으로 180도 이상 회전하는 현상이 반복적으로 발생하는 경우에는 이를 피해량에 포함시킴으로써 실험실의 평가가 실험역에서의 현상에 보다 근접하도록 노력하였다.

#### 라. 피복재의 이탈 후 복원

통상의 축소 모형실험에서는 소정 기간동안 파를 작용시킨 후 최종 이탈한 피복재의 양만을 피해량으로 판정한다. 그러나 파의 작용중에도 피복재가 위로 솟구친 후 다시 제자리로 떨어지거나 또는 일단 자리를 이탈하여 사면위에서 머물다가 다음에 내습하는 큰 파에 의해 본래의 자리로 되돌아가는 현상이 발생한다.

실험역에서는 방파제 건설 재료의 대부분이 수중에서 부력을 받으며 설치됨에 반해 실험실에서는 일반적으로 공기중에서 설치되므로 재료간의 공극율은 실험역에서 보다 실험실에서 작게 유지됨이 일반적이다. 또한 실험역에서 피복재는 육상에서 줄로 매달아 내린 상태에서 잠수부들의 도움으로 거치하므로 시야 및 작업 여건이 불량함에 반해 실험실에서는 육안으로 관찰하며 매우 쉽게 거치 위치를 선정하게 되므로 피복재의 설치 직후의 공극율은 실험역에서보다 실험실에서 작게 유지된다.

이러한 여건의 차이는 결국 축소모형실험에서 Tetrapod간의 표면 마찰력이 실제보다 크게 왜곡되어 재현되는 결과를 초래하는 것으로 보아 Tetrapod의 마찰과 직접 관련된 실험 현상을 해석할 때에는 세심한 주의를 기울임이 마땅하다고 생각된다. 즉, 축소 모형 실험에서 Tetrapod가 파력을 받아 위로 솟구치거나 제자리를 이탈할 때에는 인접 Tetrapod들과의 면접촉을 통해 원형에 비해 다소 크게 재현된 마찰력을 받는 결과가 된다. 따라서 축소 모형실험에서 위로 솟구치는 속도와 솟구친 거리는 원형에 비하여 과도하게 축소된 결과라고 판단하여야 할 것이다. 만일 공극율을 원형과 동일하게 유지했다면 Tetrapod는 보다 일찍 그리고 보다 높이 솟구침으로 인해 제자리로 돌아가지 못할 확률이 증가할 것이다. 또한, Tetrapod가 보다 높이 솟구쳤다가 떨어짐으로 인해 Tetrapod 간에 보다 큰 충격력이 발생하여 Tetrapod 자체가 파괴될 확률 또한 높을 것이다. 자리를 이탈하였다가 다음의 큰 파에 의해 제자리로 돌아가는 경우에도 위에서 기술한 이유로 인해 이탈한 거리가 과도하게 축소 재현된 것으로 간주하여야 하므로 축소 모형실험에서는 이탈 후 제자리로 복원한 Tetrapod 중 일부는 원형에서는 제자리로 복원되지 못할 가

능성이 있는 것으로 보아야 할 것이다.

이와 같은 이유로 이탈 후 복원되는 피복재의 일부는 피해량으로 간주하는 것이 타당하다고 판단된다. 이를 평가하기 위해서는 파의 작용 도중에 나타나는 Tetrapod의 거동을 매우 주의 깊게 관찰하여야 한다. 그리고 일단 이렇게 피해로 간주된 Tetrapod가 후에 자리를 이탈한 경우에는 피해량으로 중복 계산하지 말아야 할 것이다. 본 연구에서는 육안 관찰과 비디오 촬영 결과를 바탕으로 이탈 후 제자리 복원된 Tetrapod의 일부를 피해량으로 가정하였다.

#### 마. 피복재가 이탈되는 경우

피복재가 제자리에서 이탈되는 현상은 피해의 가장 기본적인 양상이다. 일반적으로 피복재가 원래의 위치에서 피복재의 특성길이 이상 이동한 경우 이탈로 간주하는 방법이 이용되고 있다. 본 실험에 사용된 Tetrapod는 중량이 277g, 비중이 2.24 정도이었으므로 Tetrapod의 특성길이는  $(277/2.24)^{1/3} \approx 5\text{cm}$  정도이다.

### 3. 단계별 안정성 평가

사면의 안정성을 검토하기 위하여 고려해야 할 항목은 위에서 기술한 바와 같이 매우 다양하다. 또한 이들의 영향도 단면의 제원에 따라 매우 크게 변한다. 그러므로 단면 형상이 구체적으로 결정되지 않은 상태에서 피복층의 피해량을 평가하거나 피복재의 피해계수를 추정하는 것은 매우 오랜 시간과 많은 실험을 요하게 되어 사실상 범용적인 결과를 얻은 예가 없는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 위에 기술한 현상들을 고려하여 실험을 효율적으로 수행하고 실험 결과간에도 연계성을 유지하기 위하여 다음과 같이 2단계로 나누어 안정성 평가 연구를 수행하였다.

- 제1단계 : 사면의 변형을 파악하는 단계에서는 현재 국내에서 사용되고 있는 단면 형식에 대해 위의 가항 및 나항의 비교에 주안점을 두어 단면안에서 피복재의 외해측 하부에 지지형 소단을 설치하는 경우와 수평형 소단을 설치하는 경우, 피복재의 하층에 설치된 중간피복층의 내용의 변화에 따른 사면의 변형 결과를 비교하였다.
- 제2단계 : 피복층의 피해량 평가 단계에서는 제1단계의 연구 결과 안정 잠재력이 큰 단면 형상을 대상으로 피복재로 사용된 Tetrapod의 중량을 결정할 때 Hudson식에 대입

하기 위하여 필요한 피해계수( $K_D$ )를 산정하기 위한 연구를 수행하였다. 이 때에는 위의 가항 및 나항의 비교는 참고 사항으로 하면서 다항, 라항 및 마항의 관찰 및 비교에 중점을 둔 실험 연구를 수행하였다.

#### 제4절 사면의 변형 분석

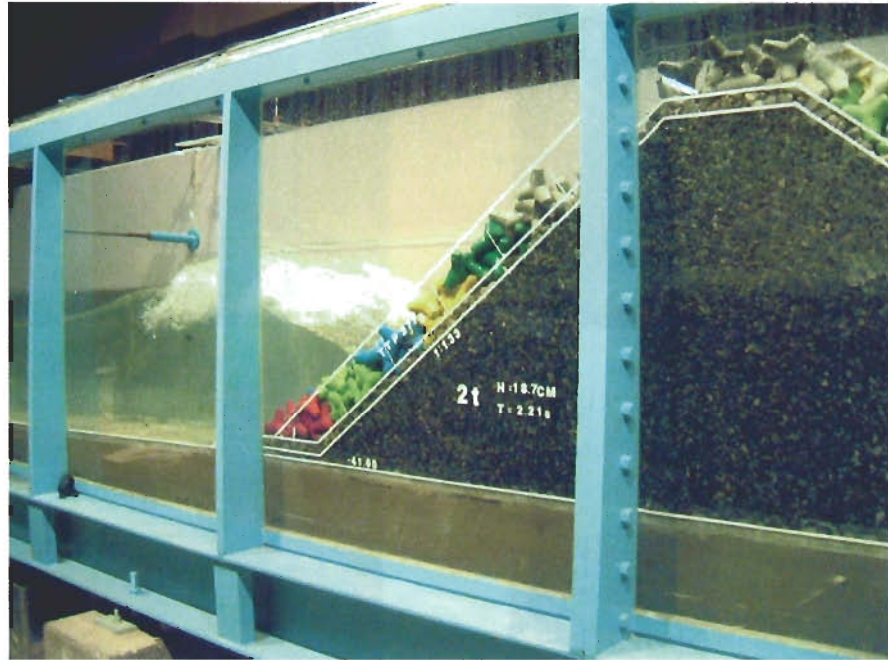
사면의 안정성을 종합적으로 관찰·분석하기 위하여 실험 도중에 발생하는 수리현상과 사면의 변형 결과를 실시간 육안 관찰로 기록하였으며 중요 장면들은 비디오 및 사진촬영을 통하여 비교·분석에 이용하였다. 피복층의 미끌림 양은 안별로 사면의 5~6개 고정점을 기준으로 Tetrapod 상층의 미끌림량을 투명한 자를 이용하여 육안으로 측정하였다. 또한 수중 사면의 경사 변화 결과도 투명한 자를 이용하여 육안으로 측정하였다.

<사진 3.4.1>은 제1안의 실험장면을 나타낸다. 실험파는 <표 3.2.1>에 제시한 바와 같이 주기가 2.21sec인 파로서 파고 11.9cm의 파로부터 시작하여 파고를 점차 증가시키며 작용시켰다. 각 파는 실험실 시간으로 30분간씩 작용시켰다. 특별한 경우 즉, 파고 11.9cm에서 이미 미끌림이나 블록의 이탈이 발생하거나 발생할 우려가 있는 경우에는 블록간의 원활한 짜맞춤이 이루어지게 하기 위하여 초기 작용파의 파고를 위에 제시한 11.9cm보다 작게 하였다.

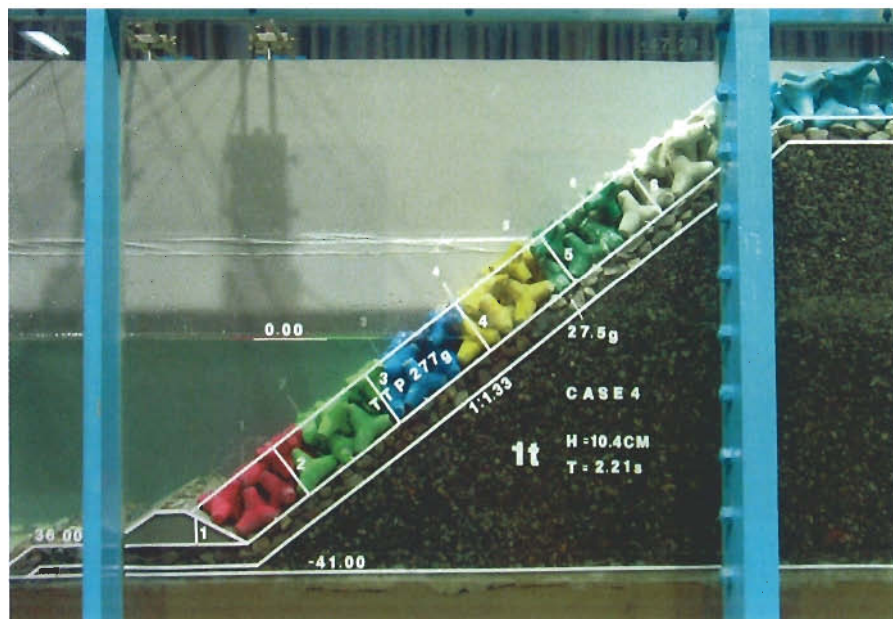
<사진 3.4.2>는 제4안의 설치장면으로서 피복블록의 미끌림을 억제하기 위하여 사다리꼴 모양의 콘크리트 블록으로 소단을 설치한 안이었으나 소단이 파고 13.0cm에서 이미 미끌리기 시작하여 실험을 도중에 중단한 경우를 나타낸다.

<사진 3.4.3>은 파고에 따른 수중 사면경사의 변화 결과를 나타낸다. 여기서 피복블록의 최외측 하부의 수평 백색선 위에 연직으로 짧게 표시된 백색선은 피복블록이 미끌리기 전의 블록 선단의 위치를 나타낸다. 사진으로부터 작용 파고를 증가함에 따라 피복블록의 미끌림이나 수중 사면의 경사가 지속적으로 변화함을 알 수 있다. 또한 피복블록의 제1열에서도 파고 8.1cm에서 이미 미끌림이 발생하며 제1열의 2층에 설치된 Tetrapod가 이탈되어 외해측으로 굴러 떨어지는 것을 알 수 있다.

<사진 3.4.4>는 제5안의 파고에 따른 수중 사면 경사의 변화를 나타낸다. 제1안의 실험 결과와 비교할 때 블록 제1열이 계속 안정된 상태에서 머물 뿐 아니라 전체적으로 사면

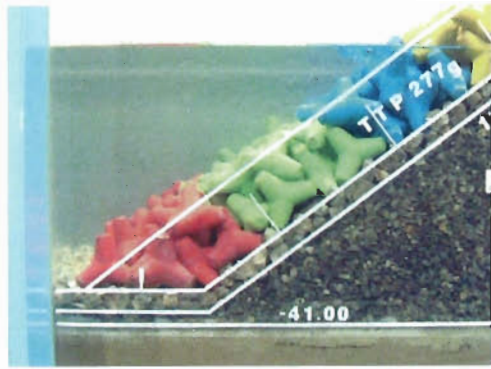


<사진 3.4.1> 제1안의 사면변형 평가실험 장면

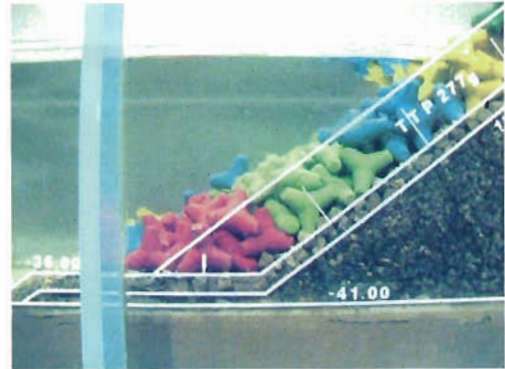


<사진 3.4.2> 제4안의 설치 장면

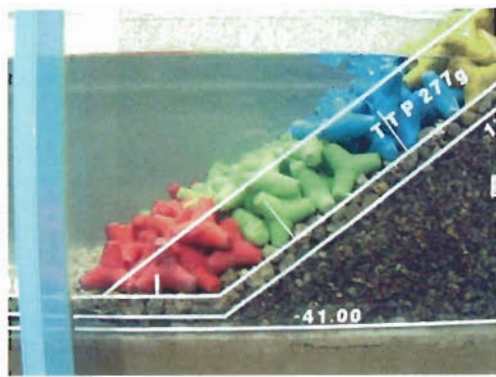




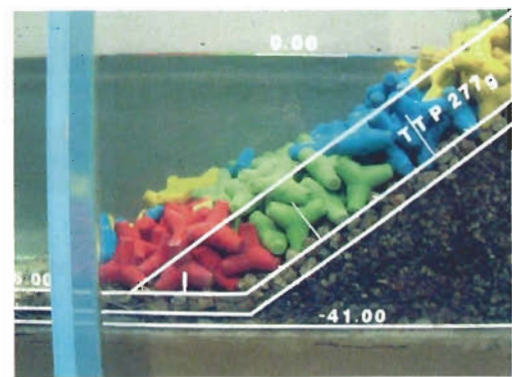
Hs = 8.1cm



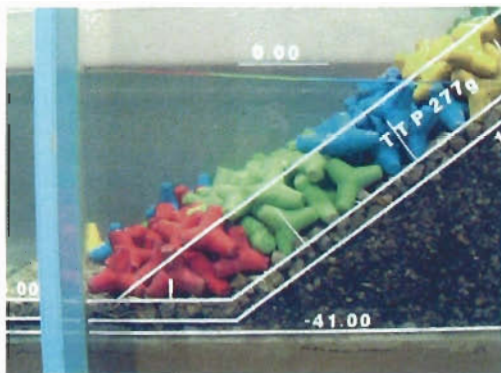
Hs = 16.9cm



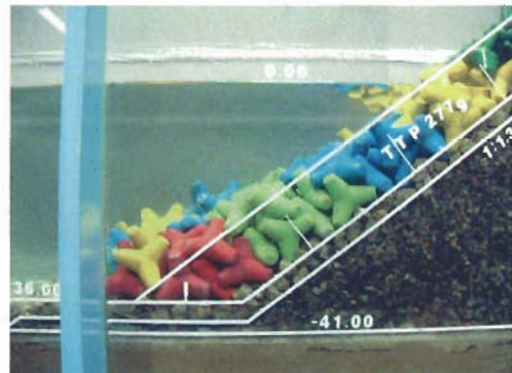
Hs = 10.4cm



Hs = 18.5cm

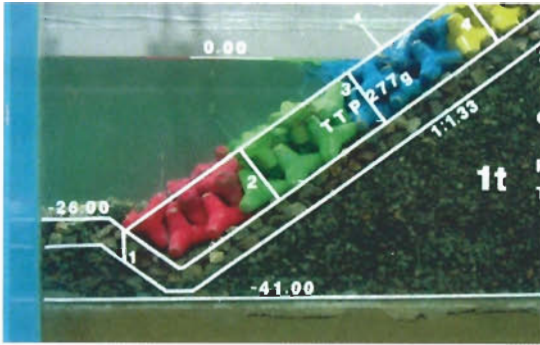


Hs = 14.0cm

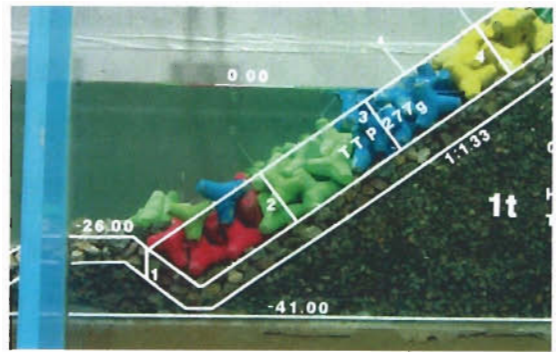


Hs = 21.3cm

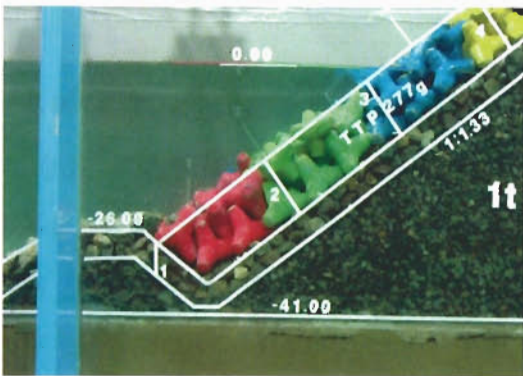
<사진 3.4.3> 제1안의 파고에 따른 피복층의 미끌림량 및 수중 사면경사의 변화



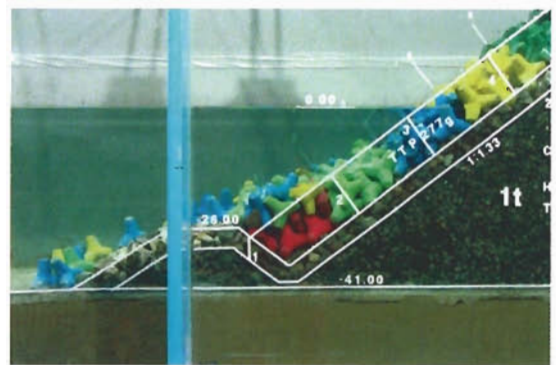
Hs = 11.9cm



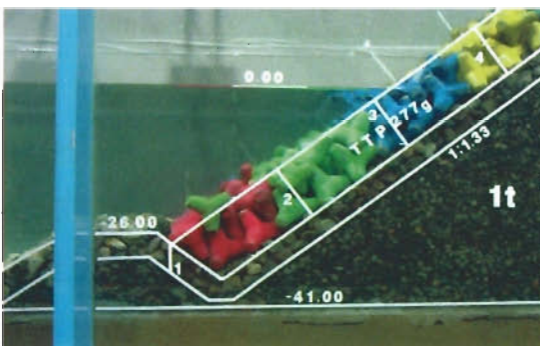
Hs = 17.8cm



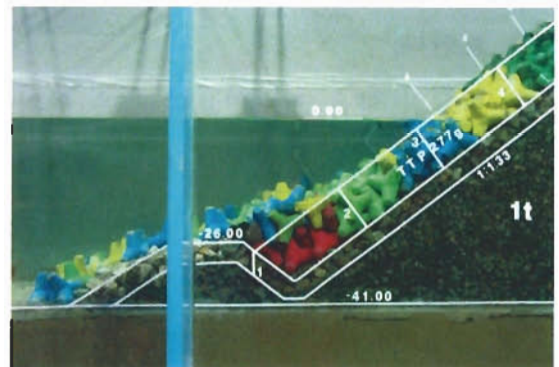
Hs = 14.0cm



Hs = 19.5cm



Hs = 15.8cm



Hs = 21.3cm

<사진 3.4.4> 제5안의 파고에 따른 피복층의 미끌림량 및 수중 사면경사의 변화

의 미끌림이 작으므로 수중 사면의 경사도 상대적으로 덜 완만해짐을 볼 수 있다. 이로부터 단면을 설계할 때 피복층의 제1열이 미끌리지 않게 하며 이와 동시에 피복층의 제1열의 2층에 설치된 블록이 이탈되지 않도록 하기 위하여 적절한 형상의 소단을 설치하는 것은 사면의 안정성을 확보하기 위하여 매우 중요함을 알 수 있다. 제5안에서 사면의 경사가 1 : 4/3인 경우 소단의 피복블록과 맞닿은 면의 경사가 1 : 1.5 정도가 될 때 피복블록의 제1열의 거치 상태가 안정하게 됨을 확인하였다. 실험 단면별 파고 및 주기에 따른 사면의 미끌림, 수중 사면 경사의 변화, 피복재인 T.T.P.의 피해현황은 부록 B에 표로 제시하였으며 아래에서는 이들의 분석결과를 관심항목별로 제시한다.

### 1. 사면 피복층의 미끌림 분석

<도 3.4.1>~<도 3.4.12>에는 비교 단면에 대해 파의 주기가 2.21sec인 경우 작용파에 의한 피복층 사면의 누적 미끌림 양을 도시하였다. 여기서 연직축은 피복층의 표층 사면에서 미끌림을 관측한 위치의 표고를 나타내며, 수평축은 누적 미끌림 양을 피복재인 Tetrapod의 크기(7.5cm)로 나누어 무차원화한 값이다. 그림을 비교할 때 시각적인 왜곡을 피하기 위하여 부록B에 표로 제시한 결과 중 파고가 11.9~19.0cm의 범위에 있는 결과들만을 도시하였다. 이들로부터 다음 사실을 알 수 있다.

- ① 미끌림 양은 작용 파고가 증가함에 따라 지속적으로 증가한다.
- ② 동일한 단면이라 하더라도 실험을 반복 수행할 때 미끌림 양의 크기는 매우 큰 편차를 보인다.
- ③ 미끌림 양은 정수면보다 높은 위치에서 가장 크다.
- ④ 단면 제원이 동일하고 다만 지지형 소단의 높이만 서로 다른 제8-1안과 제8-2안의 미끌림을 비교할 때, 소단의 높이가 피복층의 Tetrapod 제1열의 상부와 같았던 제8-1안에서는 제1열에서 미끌림이 발생하였으며 사면의 전체적인 미끌림량도 제8-2안에서보다 크다. 관찰 및 사진촬영 결과에 의하면 제8-1안에서는 Tetrapod 제1열의 상층이 파의 작용 초기부터 점진적으로 위로 솟아 나와 밀리기 시작하였다. 따라서, 지지형 소단을 설치할 때에는 피복층을 효과적으로 지지하기 위하여 소단의 높이를 사면 피복재의 최하단의 표층보다 최소한 낮지 않게 함이 중요함을 알 수 있다.

미끌림의 양상을 보다 세밀하게 비교하기 위하여 <도 3.4.13>~<도 3.4.19>에는 각 안

별 미끌림량의 공간평균을 파고별로 도시하였다. 여기서, 연직축은 사면의 5~6개의 기준점에서 측정된 미끌림 양을 산술평균한 값을 피복층의 Tetrapod의 크기(7.5cm)로 나누어 무차원화한 값이다. 이로부터 다음 사실을 알 수 있다.

① 미끌림은 수평형 소단이 설치된 안들(1, 2, 3, 6안)에 비해 지지형 소단이 설치된 안들(5, 7안)에서 현저히 작다. 수평형 소단이 설치된 안들에서는 계측된 미끌림 양의 상당부분은 피복층 내의 공극이 축소되는 과정에서 발생하는 자연스러운 미끌림의 양을 초과하여 피복층 전체가 미끄러지는 현상을 포함하고 있다. 또한, 수평형 소단이 설치된 안들에서는 작은 파고의 파의 작용만으로도 미끌림이 쉽게 발생하고 있다. 이로부터 소단의 형태는 피복층의 미끌림을 억제하는 데에 매우 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

② 단면의 다른 제원은 동일하고 사면 경사만이 다른 제5안과 제7안의 미끌림을 비교할 때 사면 경사가 1 : 4/3로 급한 제5안의 경우가 경사가 1 : 1.5로 덜 급한 제7안의 경우에 비해 미끌림 양이 많다. 따라서, 사면의 안정성을 검토할 때 사면의 경사를 급하게 할수록 미끌림에 대해 보다 세심하게 주의할 필요가 있다.

③ 지지형 소단을 설치한 단면들을 비교할 때, 마루높이가 30.0cm인 안들(8-1, 8-2안)에서는 마루높이가 47.2cm인 다른 안들에 비해 미끌림 양이 현저하게 적다. 이로부터 미끌림 양은 사면의 길이가 증가할수록 즉 수심이 증가할수록 증가함을 알 수 있다. 또한, 이 경우 중간피복층과 피복층 사이의 마찰력이 미끌림에 큰 영향을 줄 수 있음도 유추할 수 있다.

④ 제1, 제2, 제3안을 비교할 때 중간피복층에 콘크리트 인공 삼각블록을 사용한 제2안에서 미끌림 양이 상대적으로 적었다. 이는 삼각블록의 형상이 납작하여 중간피복층에 사용된 모양이 비교적 둥근 쇠석에 비하여 사면에서 구름 이동이 적기 때문이라 생각된다.

<도 3.4.20>에는 사면의 경사가 1 : 4/3인 각 안에서 미끌림 양의 공간평균이 큰 실험 결과들만을 함께 도시하였다. 여기서 마루높이는 동일하나 안별로 중간피복층의 내용과 소단의 형상에는 차이가 있다(<표 3.2.2> 참조). 이로부터 다음 사실을 알 수 있다.

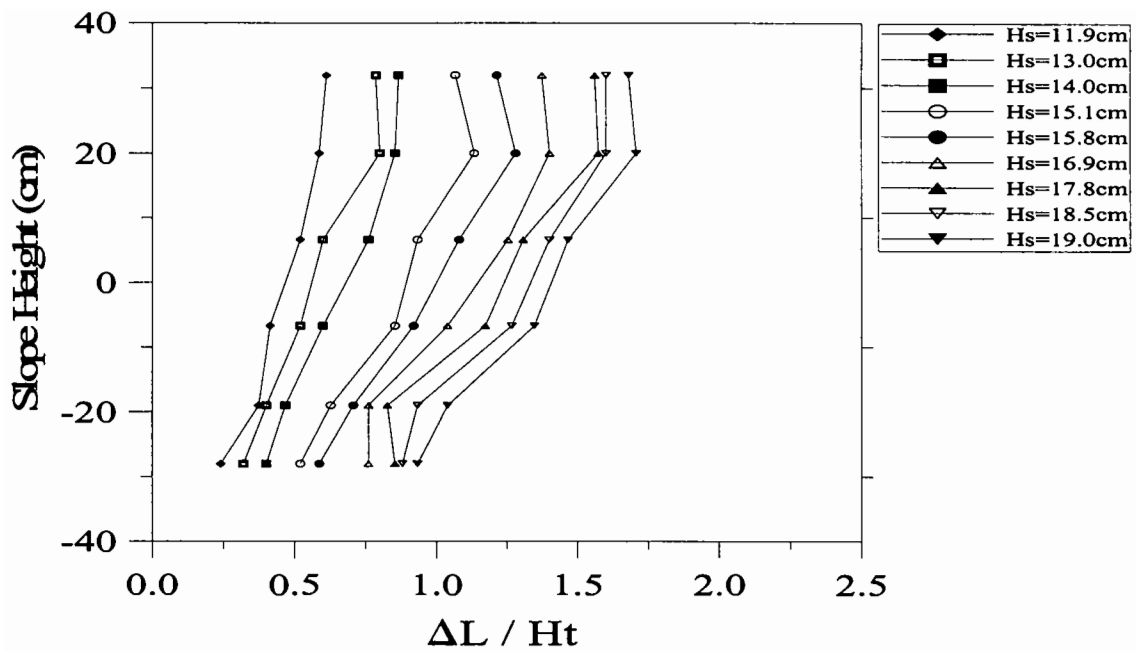
① 미끌림 양의 크기는 제1안, 제3안, 제2안, 제5안의 순으로 크다.

② 제1안과 제3안을 비교하면, 피복층의 Tetrapod의 중량을 W라 할 때 제1안에는 중간피복재로서 중량이 W/17인 쇠석 2층을 그리고 제3안에는 중량이 W/10 인 쇠석 2층을 설치하였다. 즉 중간피복재의 중량은 사면의 안정성에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서, 사면 경사가 1 : 4/3인 경우에는 중간피복재의 중량을 피복재의 중량의 1/10

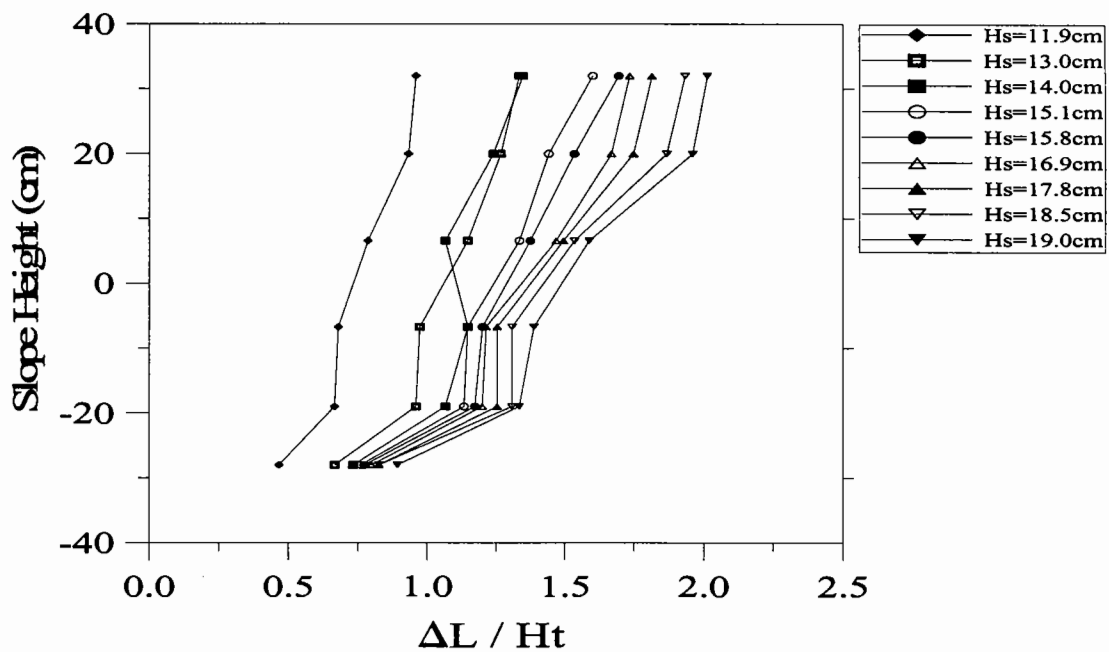
보다 작게 하지 않는 것이 바람직함을 알 수 있다.

③ 제2안과 제3안을 비교할 때, 제2안에서는 중간피복층으로 중량이 W/17 인 모양이 납작한 중간피복용 콘크리트 인공블록과 함께 그 하부에 중량이 W/17 인 쇄석을 설치하여 전체적으로는 2층을 형성한 것이다. 실험의 편차를 고려할 때 현재와 같은 차이만으로는 미끌림에 대한 우열을 판정하기 어렵지만 일단은 별 차이가 없다고 보는 것이 안전측일 것이다. 그러나 실험 결과는 중요한 의미를 가지고 있다. 왜냐하면 콘크리트와 쇄석간의 마찰계수(0.6)가 콘크리트와 콘크리트간의 마찰계수(0.5)보다 크므로 중간피복재로 쇄석을 사용하는 경우가 콘크리트 블록을 사용하는 경우보다 사면의 안정성에 더 기여할 것으로 예상되었으나 미끌림에 관한 한 결과는 그렇지 않기 때문이다. 이러한 결과가 도출된 원인으로서는 아마도 파력이 작용할 때 쇄석은 사면에서 쉽게 구르지만 모양이 납작한 콘크리트 블록은 구르지 못하기 때문이 아닌가 추정된다. 블록이 구르지 않는다고 하여도 파고 19.0cm를 작용한 실험이 종료된 후 Tetrapod를 조심스럽게 걷어내고 콘크리트 블록을 사용한 중간피복층의 형상을 관찰한 결과 <사진 3.4.5>와 <사진 3.4.6>에서 비교한 바와 같이 최초의 설치 형태에 비하여 배열이 변형되었음을 확인하였다. 겹쳐진 블록이나 세워진 블록도 발견할 수 있다. 물론 여기서 최종 적용된 파고 19.0cm는 제2안 단면에 대한 적정한 설계파보다는 과도하게 큰 파이므로 나타난 변형도 분명히 심하게 왜곡되었을 것이다. 또한 안정한 단면을 확보하기 위한 실제의 설계 과정에서는 피복블록에 대한 중량비를 본 실험에서보다 더 크게 할 것이므로 중간피복층의 변형도 본 실험에서보다 크게 감소할 것이다. 그러나 변형의 정도는 작더라도 이와 유사한 변형이 일어나도록 유도하는 피복층의 미끌림이 발생하는 과정에서 쇄석보다 강도가 약한 콘크리트 중간피복블록이 파괴되지 않고 본래의 형상을 유지할 수 있는 지에 관한 연구가 수행되어야 미끌림에 관해 비교적 양호한 결과를 보인 본 실험의 양상이 실제 현상을 대표할 수 있다고 간주할 수 있을 것이다. 이를 위해서는 구조해석 기법을 통해 블록 자체의 구조적 안정성을 별도로 검토하여야 할 것이다. 이는 본 수리모형실험의 범주를 벗어나므로 현 단계에서는 사용하는 중간피복용 인공 콘크리트 블록에 따라서는 미끌림의 측면에 관한 한 쇄석을 2층 사용한 경우보다도 유리할 수 있다는 가능성을 찾은 것으로 만족하여야 할 것이다.

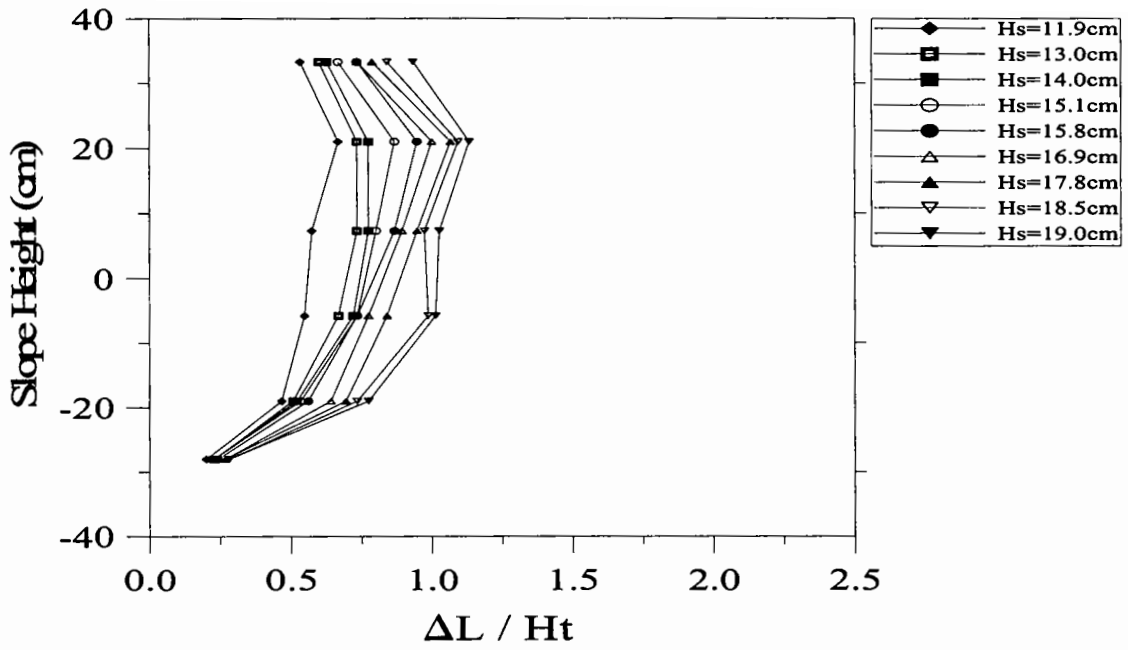
④ 제5안과 다른 안들을 비교할 때 제5안에서 미끌림이 가장 작은 데 이는 제5안만이 지지형 소단을 설치한 경우이기 때문이다. 따라서, 지지형 소단의 설치는 피복층의 미끌림 억제에 결정적으로 기여하고 있음을 알 수 있다.



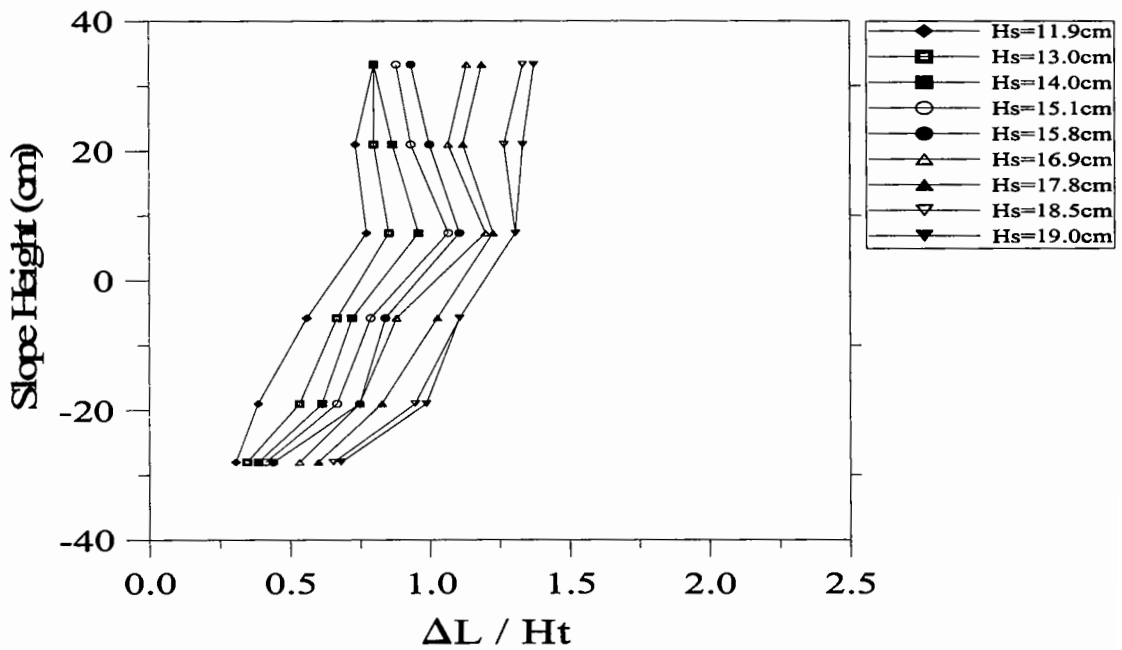
<도 3.4.1> 제1안의 사면 미끌림 및 표고별 변화(경사=1 : 4/3, 1회차)



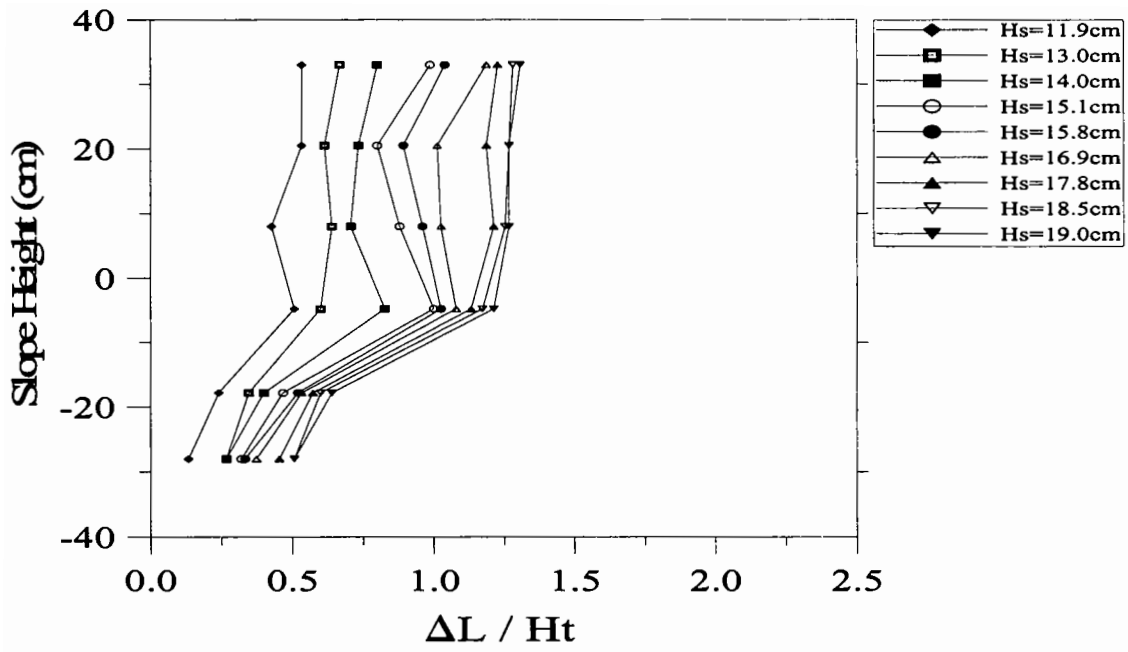
<도 3.4.2> 제1안의 사면 미끌림 및 표고별 변화(경사=1 : 4/3, 2회차)



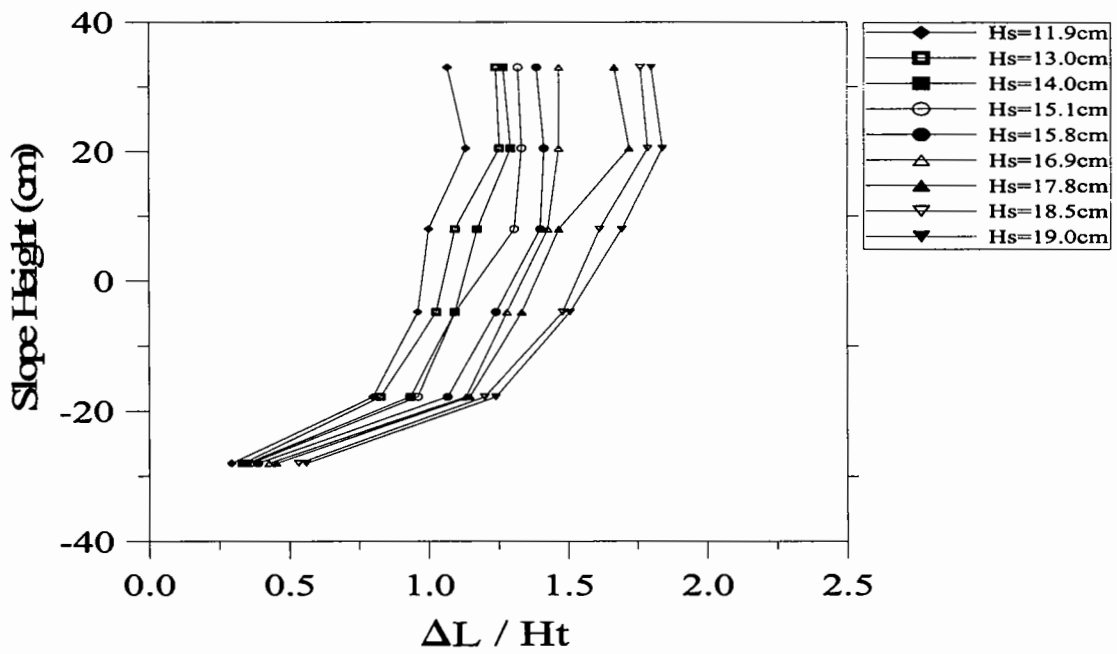
<도 3.4.3> 제2안의 사면 미끌림 및 표고별 변화(경사=1 : 4/3, 1회차)



<도 3.4.4> 제2안의 사면 미끌림 및 표고별 변화(경사=1 : 4/3, 2회차)

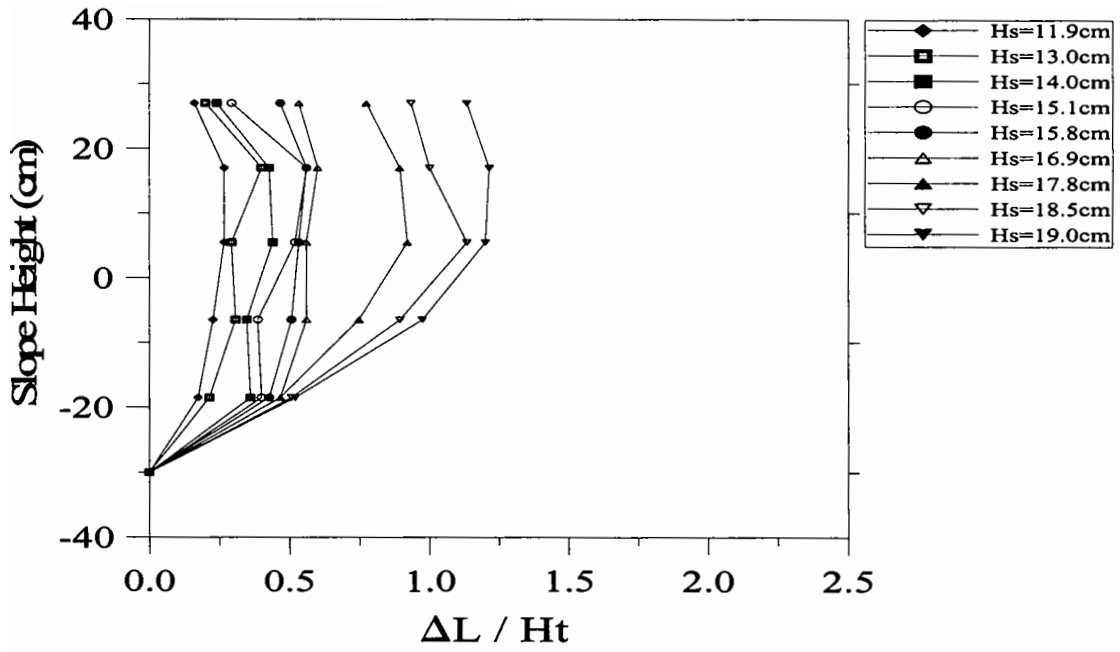


<도 3.4.5> 제3안의 사면 미끌림 및 표고별 변화(경사=1 : 4/3, 1회차)

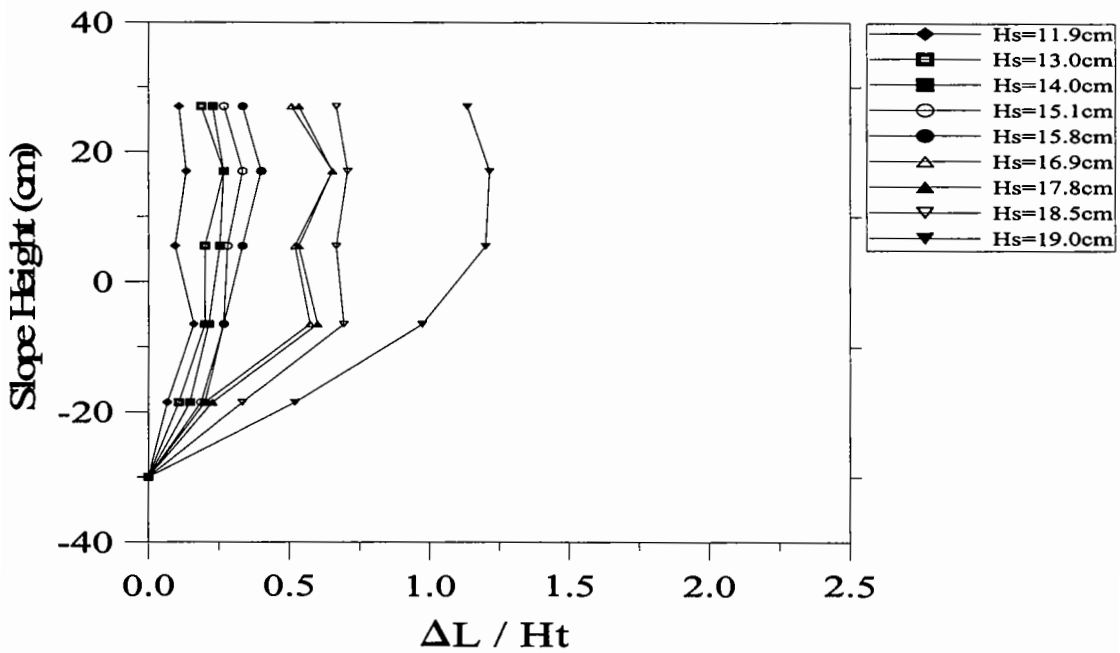


<도 3.4.6> 제3안의 사면 미끌림 및 표고별 변화(경사=1 : 4/3, 2회차)

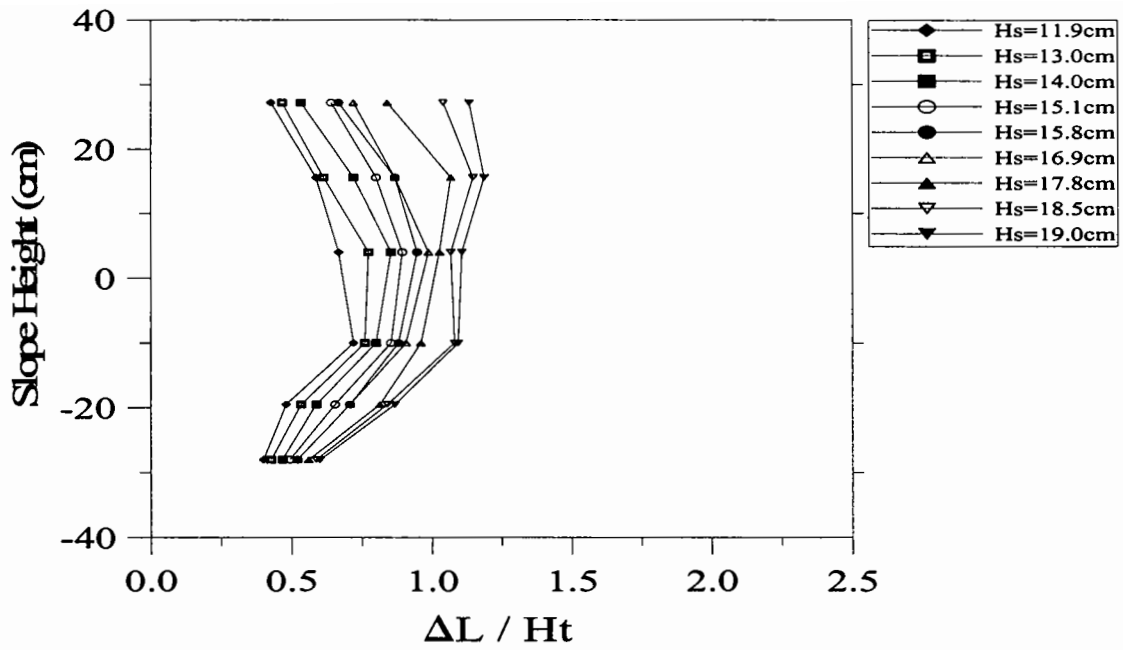




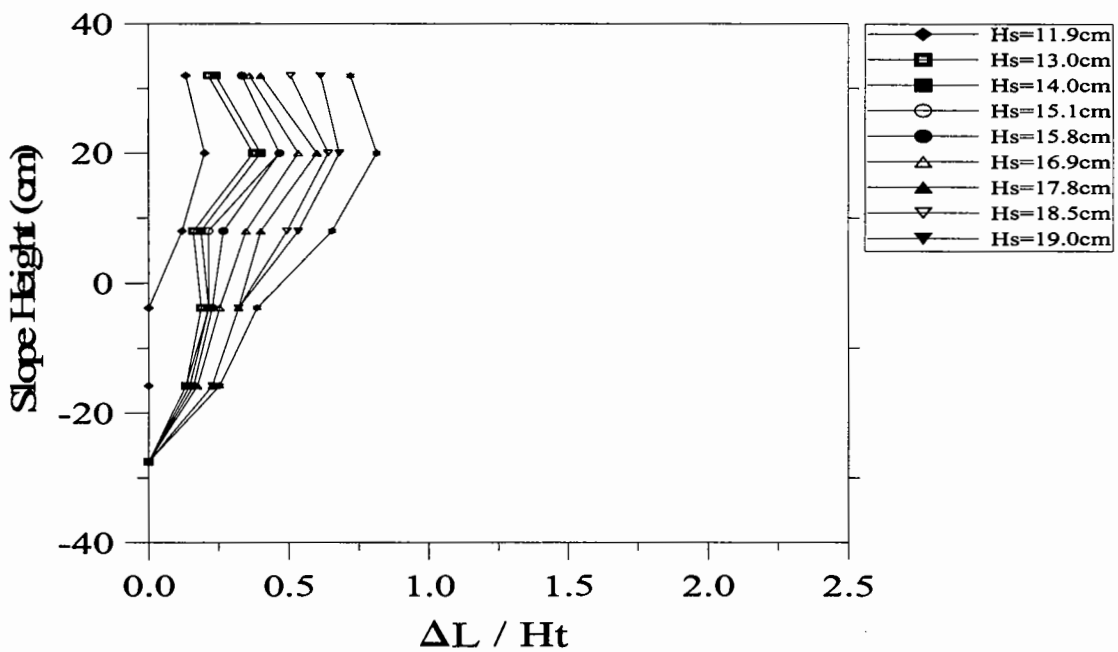
<도 3.4.7> 제5안의 사면 미끌림 및 표고별 변화(경사=1 : 4/3, 1회차)



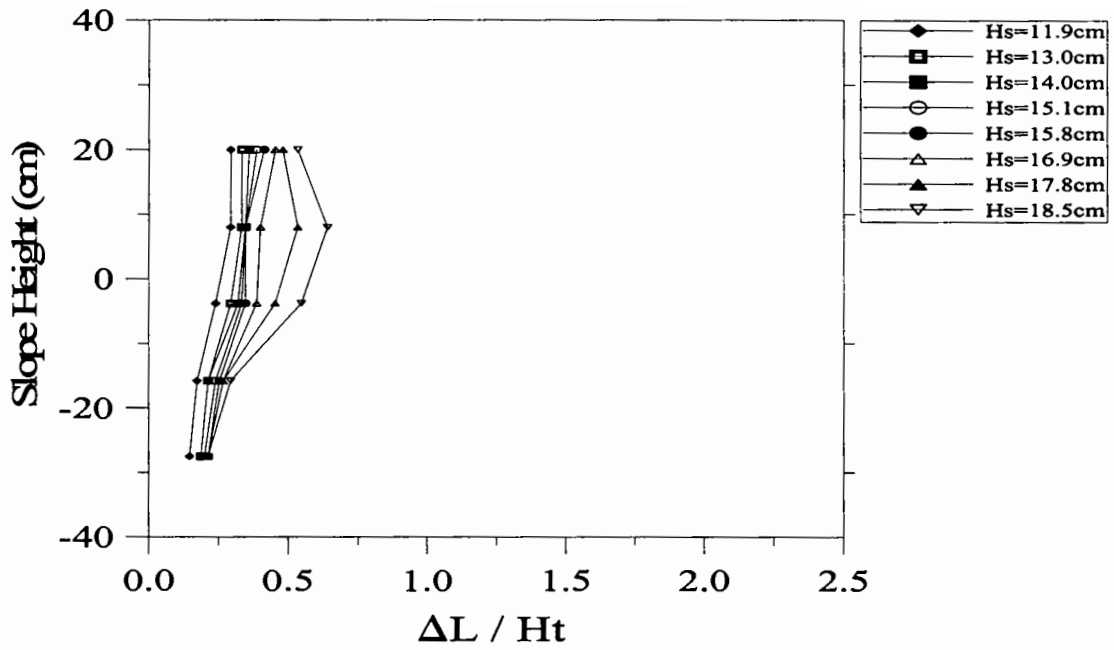
<도 3.4.8> 제5안의 사면 미끌림 및 표고별 변화(경사=1 : 4/3, 2회차)



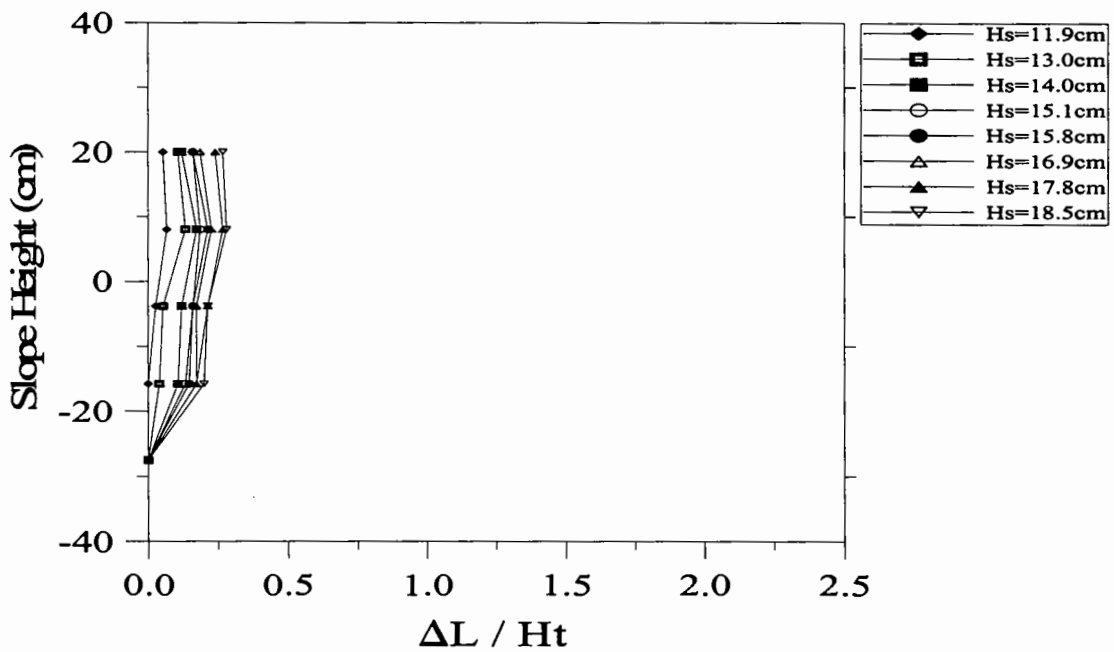
<도 3.4.9> 제6안의 사면 미끌림 및 표고별 변화(경사=1 : 1.5)



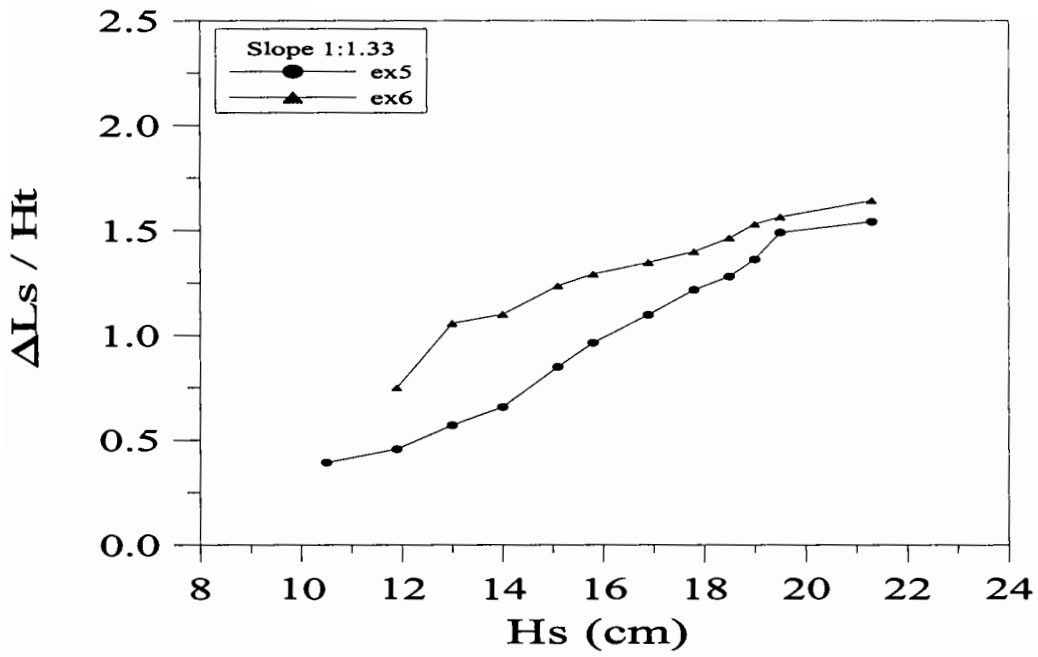
<도 3.4.10> 제7안의 사면 미끌림 및 표고별 변화(경사=1 : 1.5)



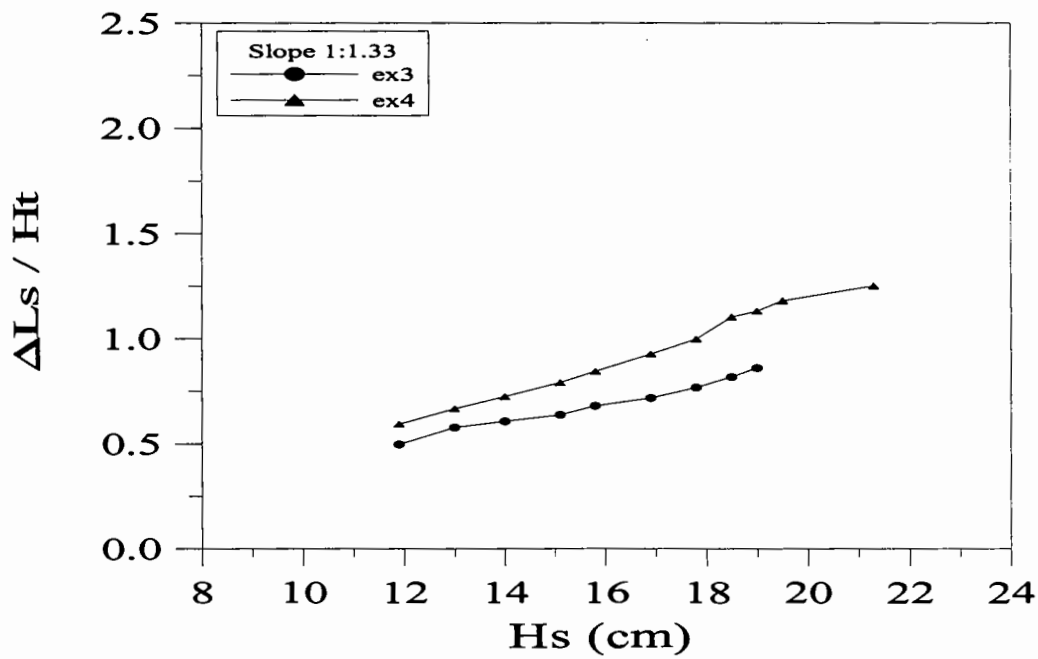
<도 3.4.11> 제8-1안의 사면 미끌림 및 표고별 변화(경사=1 : 1.5)



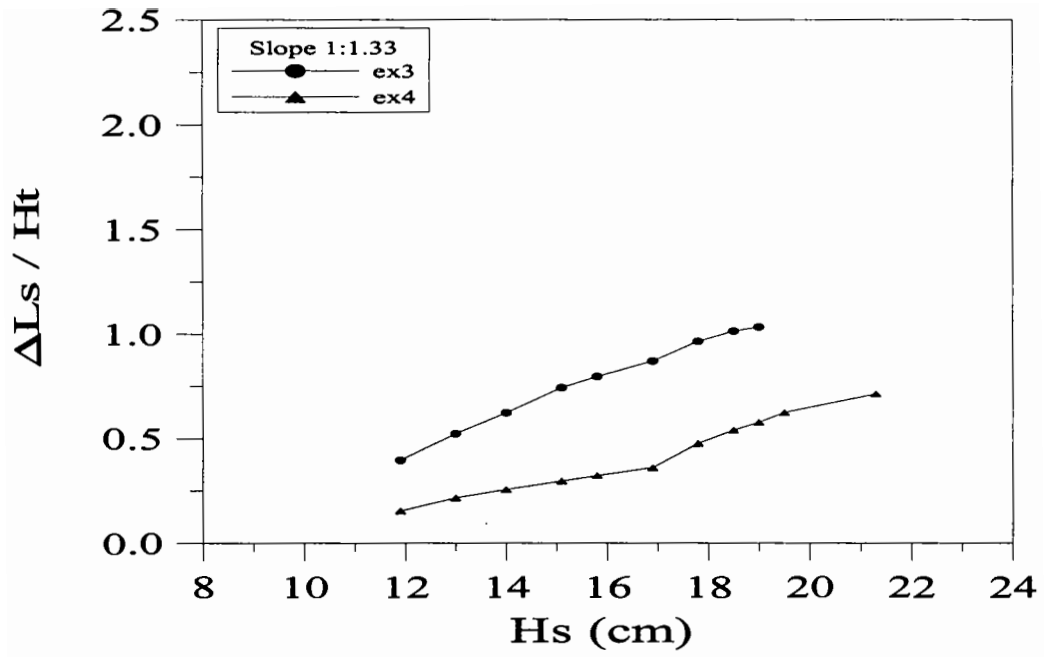
<도 3.4.12> 제8-2안의 사면 미끌림 및 표고별 변화(경사=1 : 1.5)



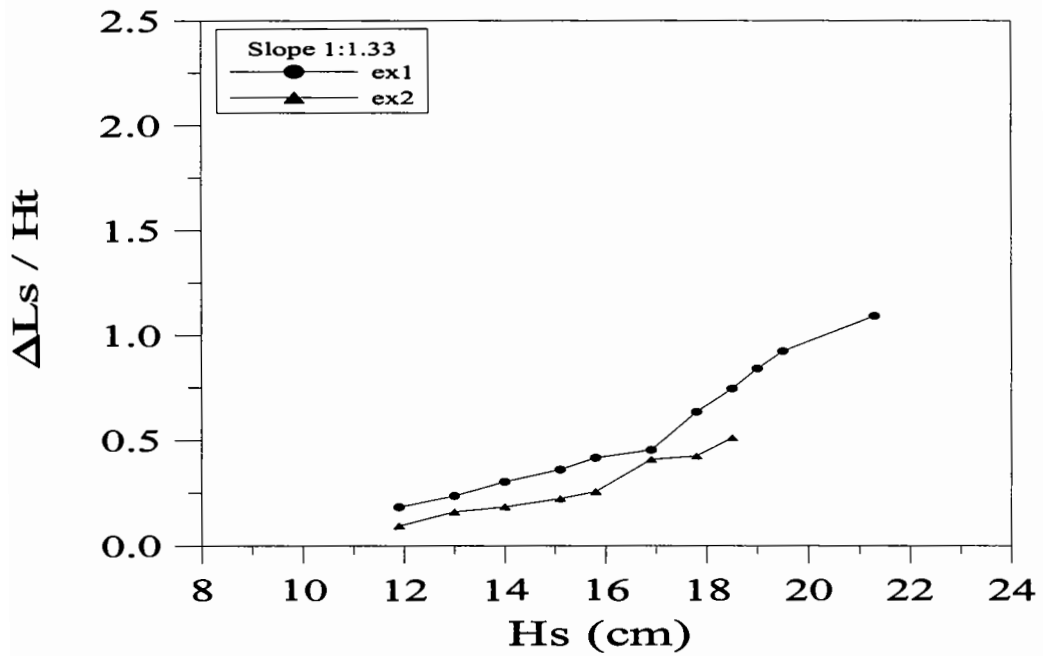
<도 3.4.13> 파고에 따른 사면 미끄럼의 평균치의 변화(제1안)



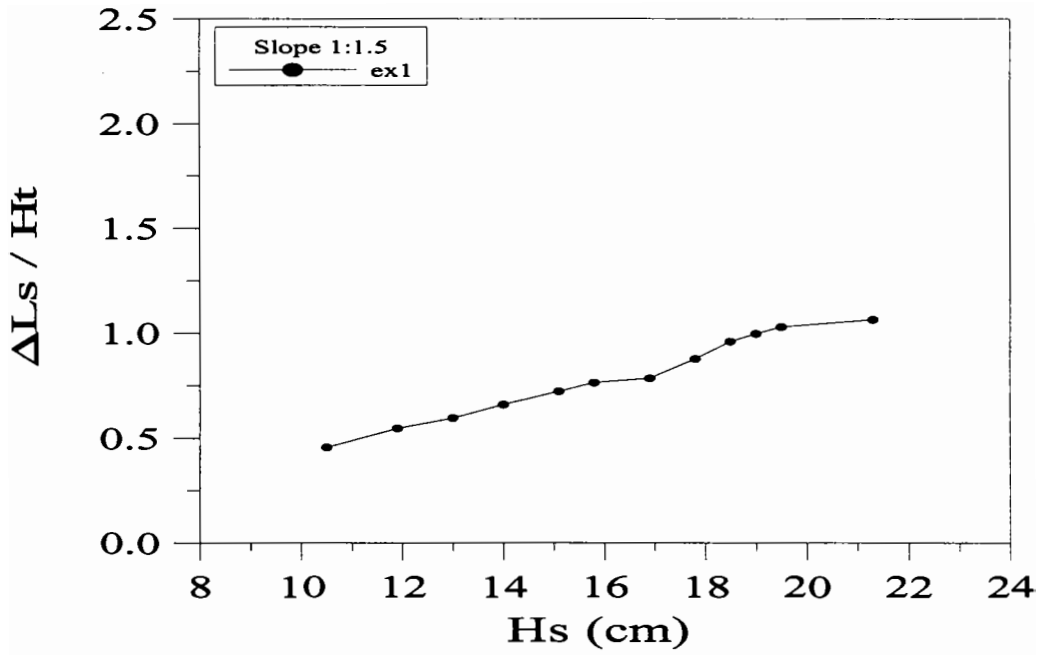
<도 3.4.14> 파고에 따른 사면 미끄럼의 평균치의 변화(제2안)



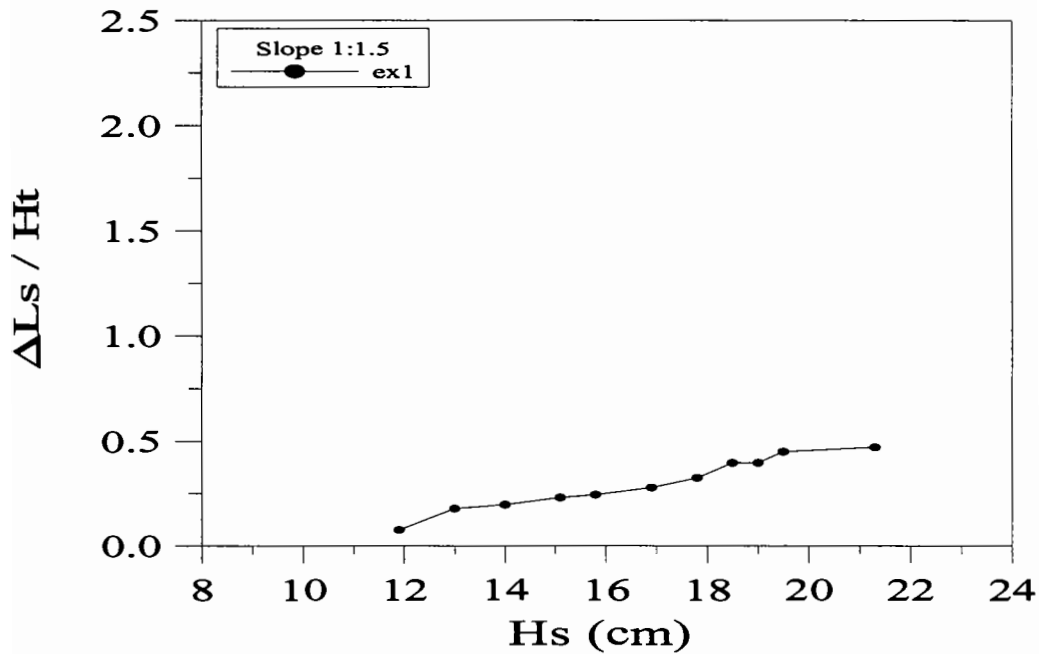
<도 3.4.15> 파고에 따른 사면 미끌림의 평균치의 변화(제3안)



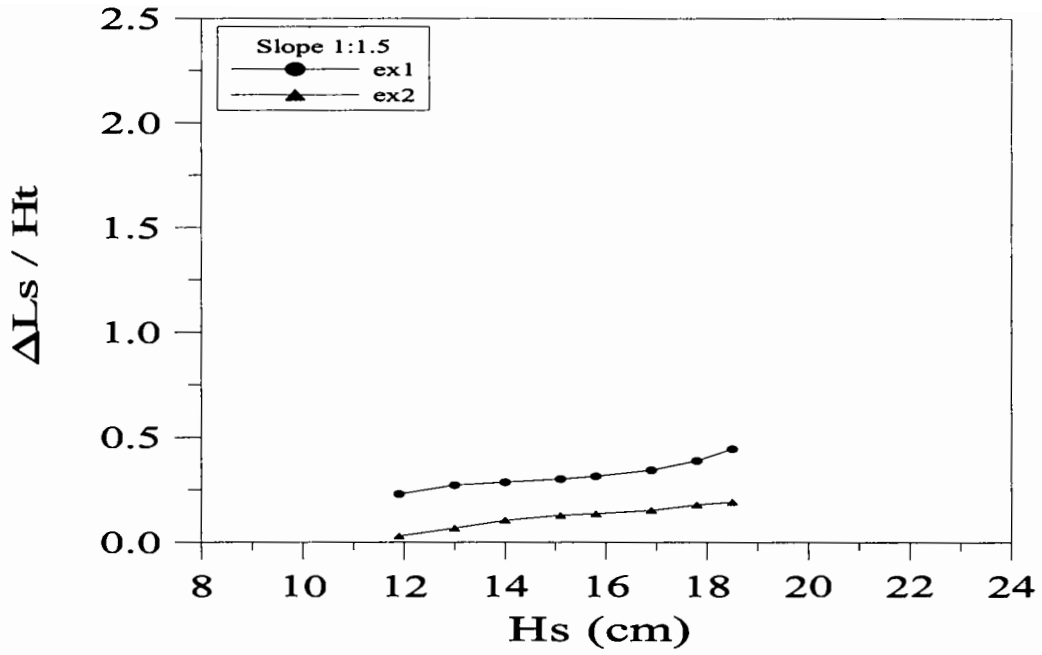
<도 3.4.16> 파고에 따른 사면 미끌림의 평균치의 변화(제5안)



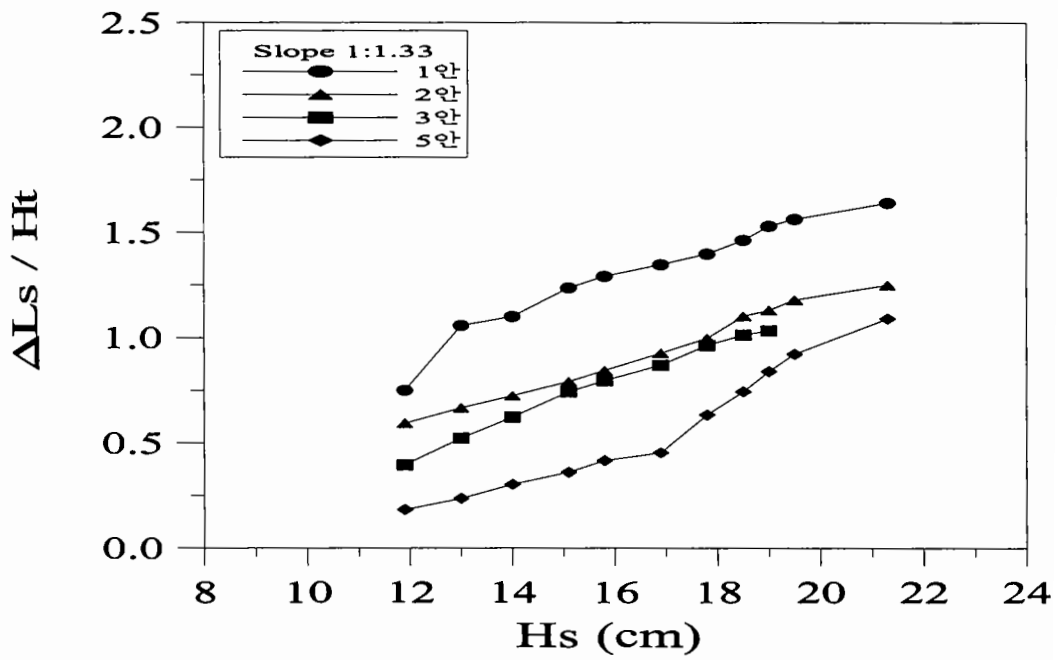
<도 3.4.17> 파고에 따른 사면 미끌림의 평균치의 변화(제6안)



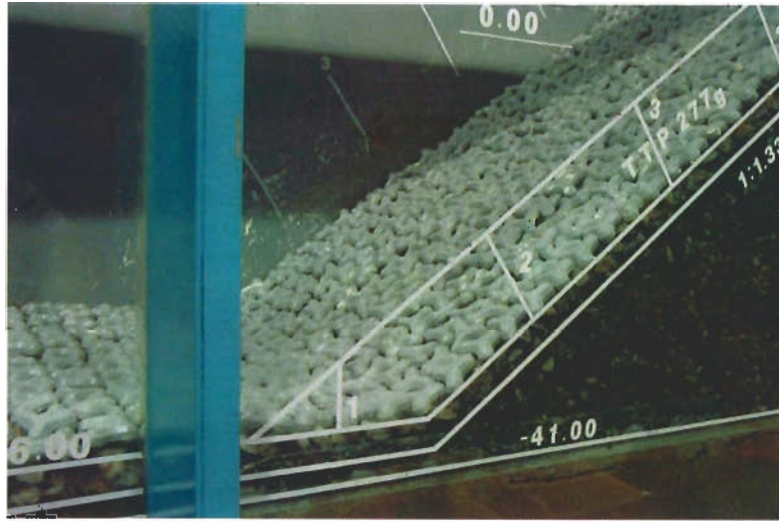
<도 3.4.18> 파고에 따른 사면 미끌림의 평균치의 변화(제7안)



<도 3.4.19> 파고에 따른 사면 미끌림의 평균치의 변화(제8-1안, 8-2안)



<도 3.4.20> 안별 최대 평균 미끌림의 비교(경사=1:4/3)



<사진 3.4.5> 제2안의 중간피복층 설치 직후의 장면



<사진 3.4.6> 제2안에서 파고 19.0cm를 경험한  
중간피복층의 상태



## 2. 피복층의 수중 사면 경사의 변화

<도 3.4.21>~<도 3.4.27>에는 작용 파고에 따른 각 단면안별 수중 사면경사의 변화를 도시하였다. 그림에서 연직축은 사면의 경사를 나타내며,  $\alpha$ 는 사면이 수평과 이루는 각도를 의미한다. 이로부터 다음 사실을 알 수 있다.

- ① 사면 경사의 변화는 동일한 조건의 실험이 반복될 때 큰 편차를 낼 수 있다.
- ② 지지형 소단이 설치된 제5안과 제8-1안 및 제8-2안에서는 반복 실험에 따른 사면 경사의 변화가 미약한 점으로 미루어 지지형 소단을 설치한 단면에서는 안정성 예측의 신뢰도가 높을 것으로 예상된다.

<도 3.4.28>에는 사면의 경사가 1 : 4/3로 동일한 안들의 실험 결과 중 경사의 변화가 큰 경우들만을 함께 도시하였다. 이로부터 다음 사실을 알 수 있다.

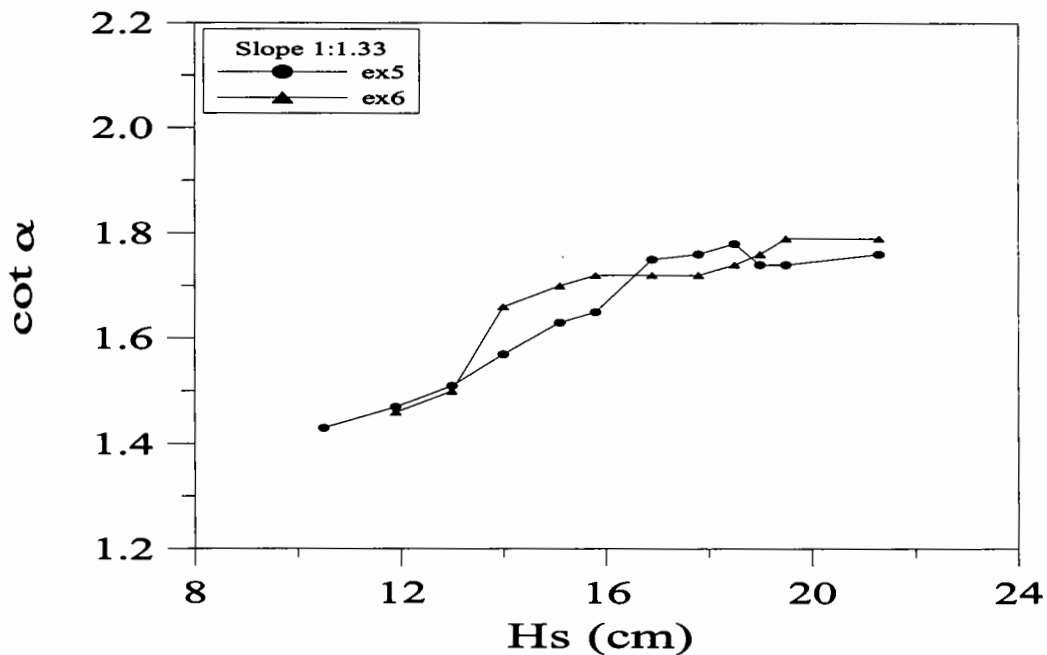
- ① 다음 절에서 기술할 피해율을 고려한 설계파의 범주라는 현실적 관점에서 작용파고가 18cm 이내인 결과들만으로 비교할 때 수평형 소단이 설치된 제1안~제3안의 경우보다 지지형 소단이 설치된 제5안의 경우에서 사면 경사의 변화가 작다.
- ② 수평형 소단을 설치한 안들에서는 파고가 작은 파에 의해서도 경사의 변화가 일찍 시작되며 또 파고가 증가함에 따라 경사가 비교적 지속적으로 변화하는 경향이 강하다. 이는 사면의 미끄럼이 작용 파고의 증가에 따라 점진적으로 진행됨으로써 피복층의 아래부분의 두께가 점진적으로 증가하거나 아니면 피복블록의 피해가 공간적으로 산만하게 분포되어 발생하기 때문이라 판단된다. 이에 반해 지지형 소단을 설치한 제5안의 경우에는 사면의 경사는 파고가 작은 파에 대해서는 변화가 작게 유지되다가 파고가 어느 정도 이상 되면 갑자기 크게 변화한다. 이는 이 파고 이전에는 피복블록의 이탈량이 극히 적다가 이 파고에 이르면 피복블록의 이탈이 수면 부근에서 갑자기 증가하기 때문이다. 즉 사용된 피복블록의 중량에 대해 사면의 피해율이 0% 또는 5% 등을 유발하는 안정한계 파고의 추정이나 파고에 따른 피해량의 추정이 앞의 다른 안들에 비해 용이할 것을 예고하고 있다. 따라서, 단면 형상을 설계할 때 지지형 소단을 설치하는 것이 안정성을 예측하거나 확보하기 위하여 중요한 관건이 될 것이다. 아울러 피복층의 피해량이나 피해율을 평가하는 연구에서 신뢰성 있는 결과를 도출하기 위해서는 지지형 소단을 설치한 단면을 연구 대상으로 선택함이 필요하다 하겠다.

<도 3.4.29>에는 지지형 소단이 설치된 단면안들 중 사면의 경사가 1 : 4/3인 제3안과

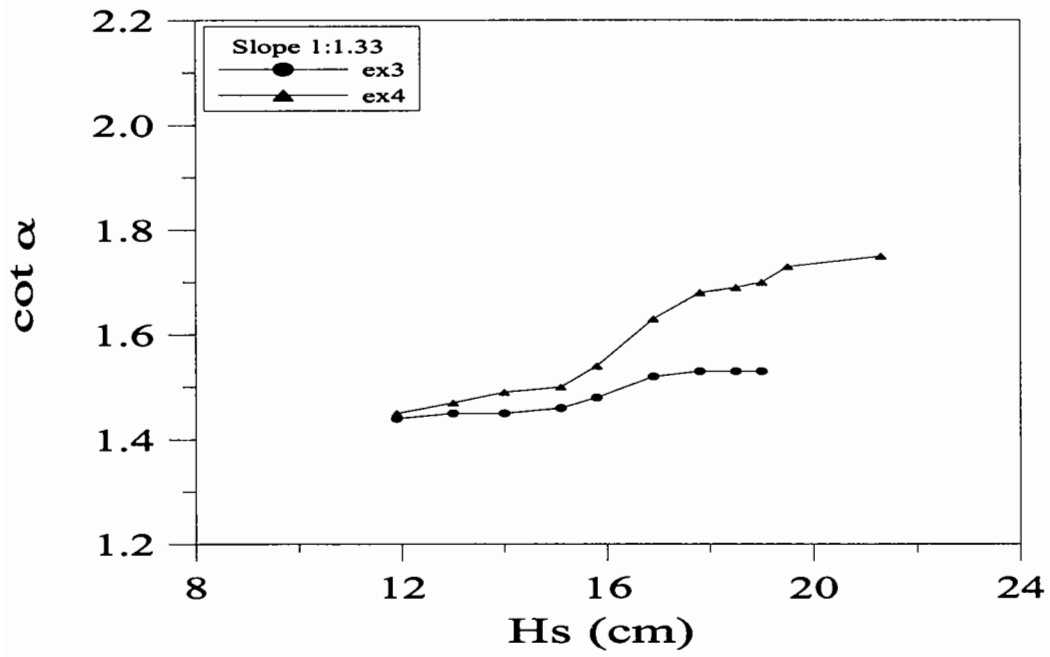
1 : 1.5인 제6안에 대해 사면경사의 초기값에 대한 변화값의 비를 비교하였다. 이 그림에서 연직축의  $\cot \alpha_i$ 는 초기 경사로서 제3안에서는 4/3이며 제6안에서는 1.5이다. 이로부터 다음 사실을 알 수 있다.

① 사면의 경사는 작용파의 파고가 증가함에 따라 지속적으로 완만하게 변하며 초기 경사가 급할수록 변하는 속도가 크다.

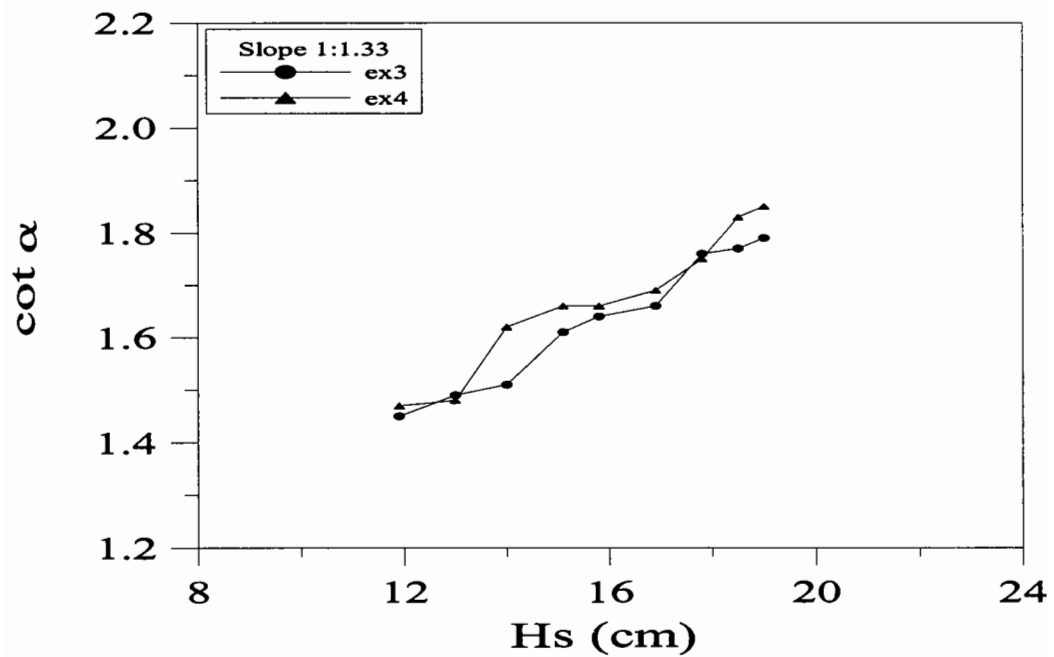
② 사면의 경사가 1 : 4/3인 경우 지지형 소단이 설치된 단면안에서 경사의 변화율이 크다는 사실은 피복재의 이탈 문제와는 별도의 차원에서 사면에 변형이 이루어진다고 보아야 하며, 이러한 현상은 방파제의 설치 수심이 깊어져 사면의 길이가 증가하면 더욱 심해질 것이므로 안정성을 크게 저해하는 요인으로 작용할 가능성이 높다. 실제로 본 수리모형실험에서도 경사 1 : 4/3이며 마루가 높은 경우(즉 사면의 길이가 긴 경우)에는 수중 사면부의 중앙에서 사면이 곡선의 형태로 융기하는 현상이 관찰되었다. 따라서, 수심이 깊은 해역에 설치할 방파제로서 사면의 경사를 급하게 설계하는 경우에는 피복층 내에 사면 방향의 압축력을 감소시키기 위하여 사면의 중간에도 소단을 설치하는 문제를 면밀히 검토할 필요가 있다고 하겠다.



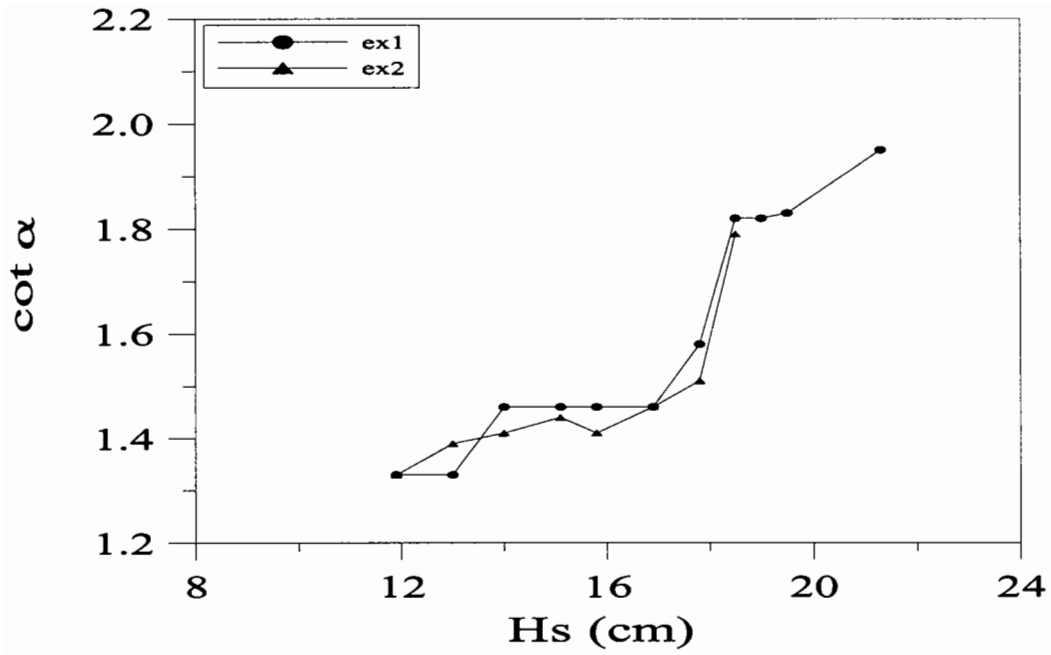
<도 3.4.21> 제1안의 파고에 따른 수중 사면경사의 변화(경사=1:4/3)



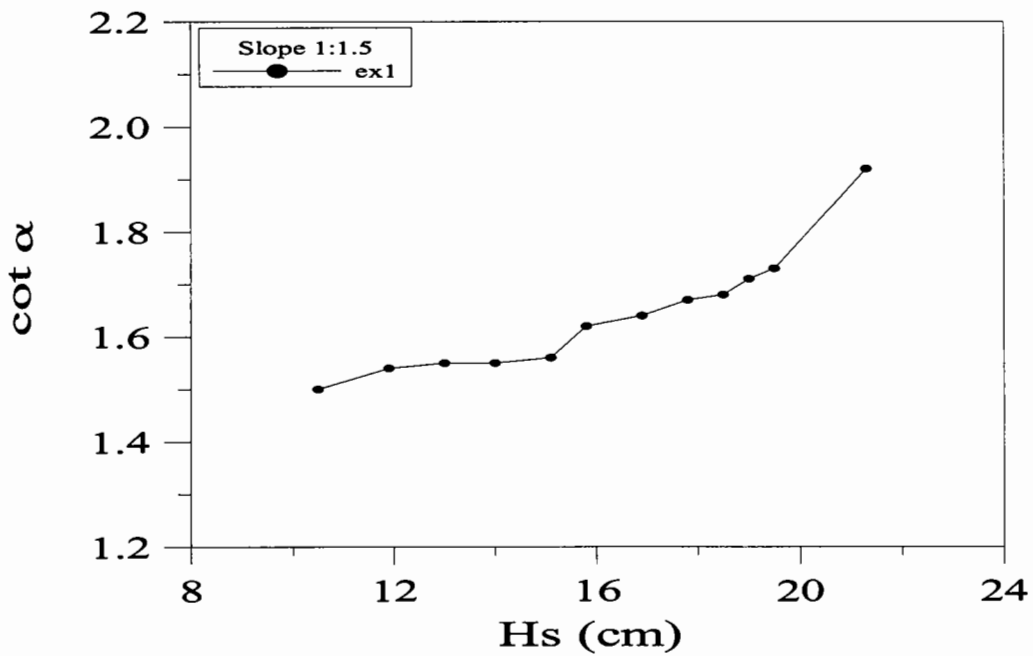
<도 3.4.22> 제2안의 파고에 따른 수중 사면경사의 변화(경사=1:4/3)



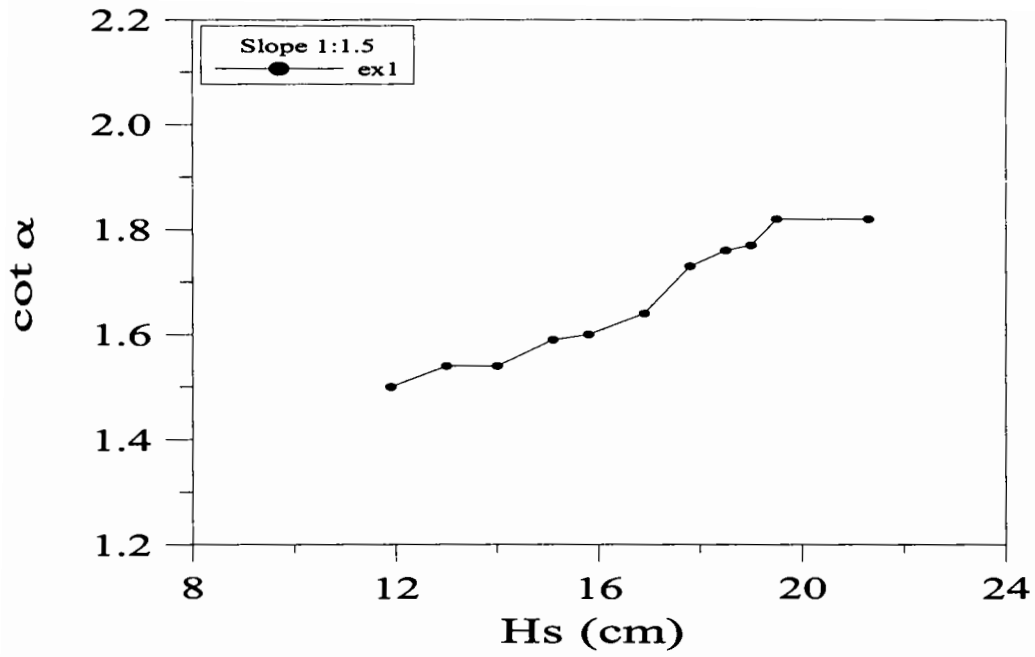
<도 3.4.23> 제3안의 파고에 따른 수중 사면경사의 변화(경사=1:4/3)



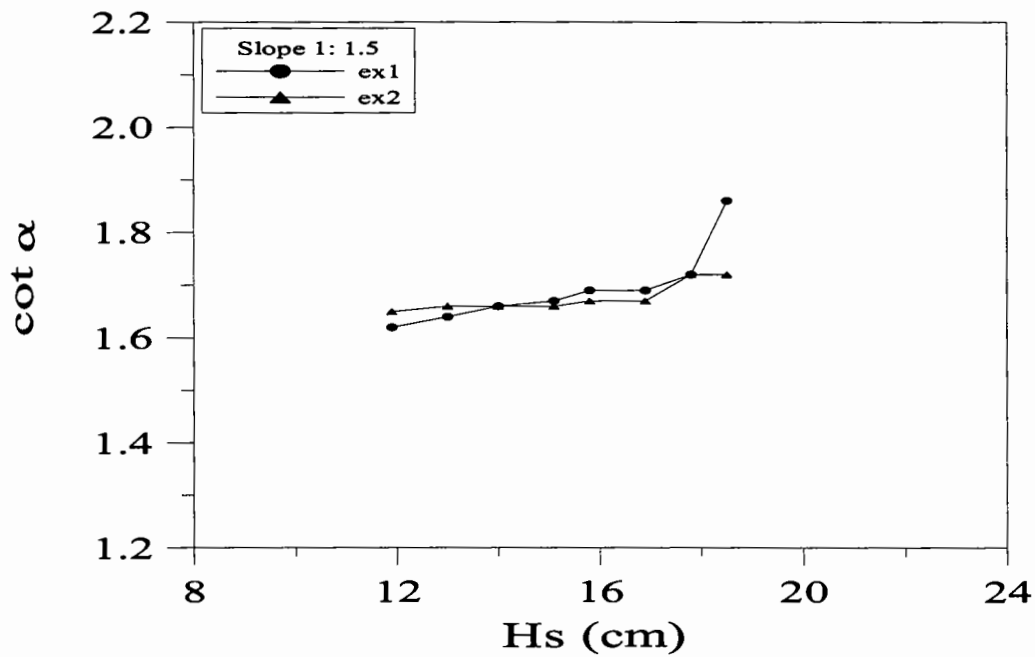
<도 3.4.24> 제5안의 파고에 따른 수중 사면경사의 변화(경사=1:4/3)



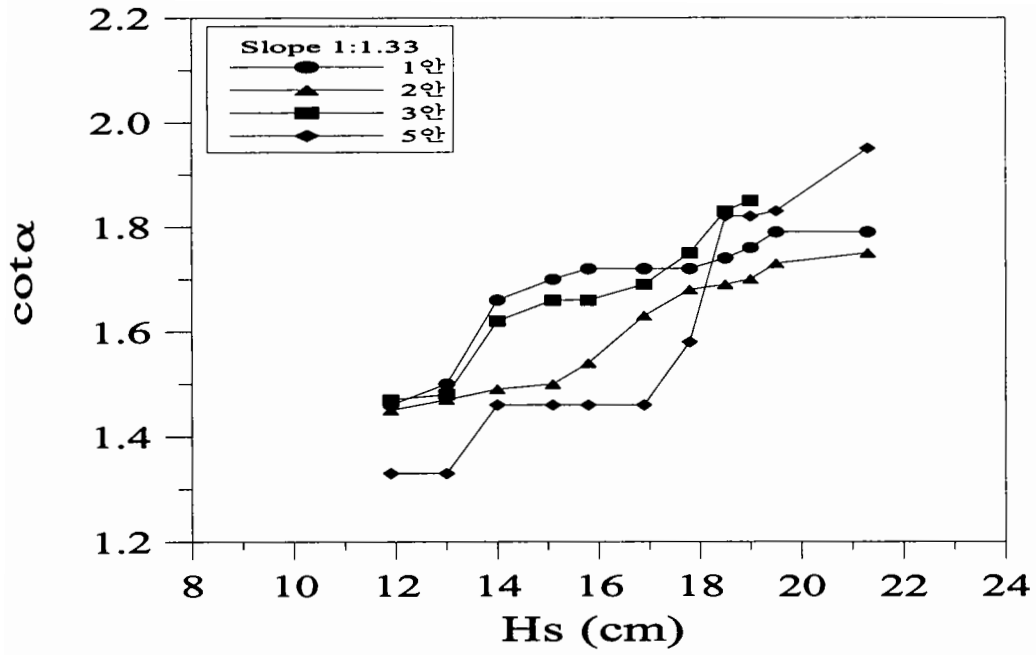
<도 3.4.25> 제6안의 파고에 따른 수중 사면경사의 변화(경사=1:1.5)



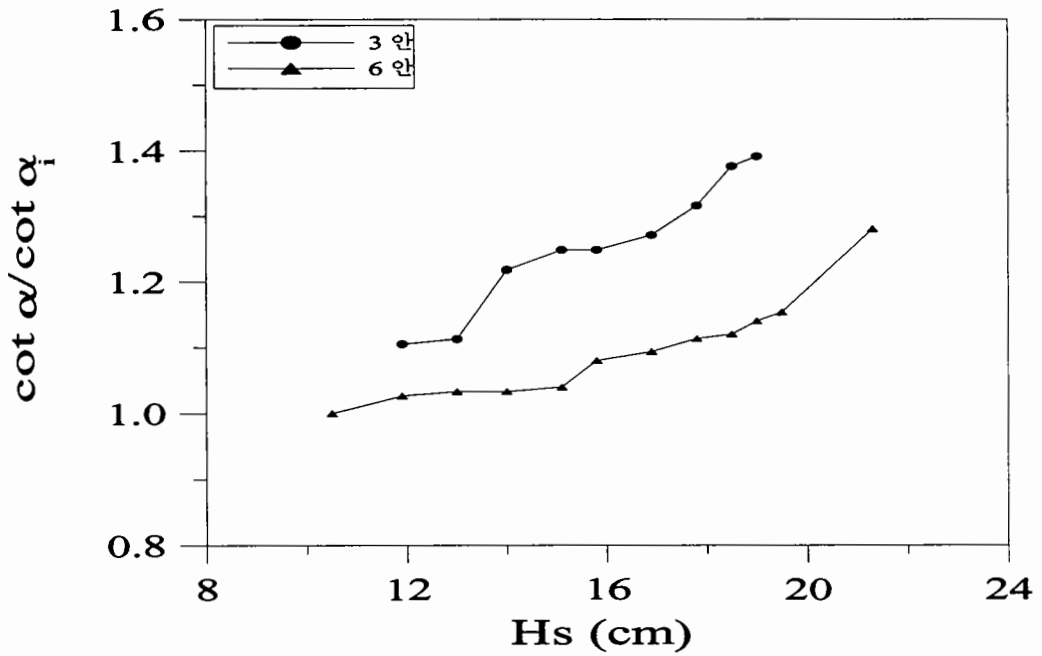
<도 3.4.26> 제7안의 파고에 따른 수중 사면경사의 변화(경사=1:1.5)



<도 3.4.27> 제8-1안과 제8-2안의 파고에 따른 수중 사면경사의 변화 (경사=1:1.5)



<도 3.4.28> 안별 수중 사면경사의 변화 비교(경사=1:4/3)



<도 3.4.29> 제3안(경사=1:4/3)과 제6안(경사=1:1.5)의 수중 사면경사 변화율의 비교

## 제5절 피복층의 피해량 평가 및 Tetrapod의 피해계수 추정

본 절에서는 위의 연구결과를 토대로 비교적 피해량 평가의 신뢰도가 높은 것으로 판명된 지지형 소단을 설치한 단면안들을 대상으로 사면 경사와 파의 주기를 변화시키며 피복층(Tetrapod)의 피해량을 계측하여 Tetrapod의 피해계수를 추정하기로 한다.

### 1. 피해계수( $K_D$ ) 및 피해율( $S$ )의 정의

주어진 파고에 대하여 사면에서 안정한 피복재의 중량을 예측하기 위해서는 식(3.5.1)의 Hudson식을 이용한다.

$$W = \frac{\gamma_r \cdot H^3}{K_D(S_r - 1)^3 \cot \alpha} \quad (3.5.1)$$

여기서,  $W$  = 피복재의 소요 중량,  $\gamma_r$  = 피복재의 단위중량,  $S_r$  = 피복재의 해수에 대한 비중,  $H$  = 파고,  $K_D$  = 피복재의 피해계수,  $\alpha$  = 사면이 수평면과 이루는 각도이다.

이때 피복재에 따라 고유한 피해계수를 알아야 한다. 피해계수란 주어진 파고에서 무손실(zero damage) 범위, 즉, 피해율( $S$ , damage level)이 0 ~ 5 %의 범위로 발생하는 블록의 중량에 해당하는 Hudson식의 계수,  $K_D$  를 말한다. 피해계수가 증가할수록 주어진 파에 대하여 안정한 피복재의 중량은 감소한다. 이때 피해율의 정의는 아래와 같이 다양하다.

정의 1 : 전사면 피복재의 총 개수에 대한 이탈 피복재 개수의 비율로서 다음과 같다.

$$S = \frac{n}{N} \times 100\% \quad (3.5.2)$$

여기서,  $n$ 은 해당 파고 조건까지 누적피해 개수,  $N$ 은 전사면 피복재의 총수를 의미한다. 이탈 피복재의 개수는 원 위치에서 피복재의 특성길이 이상 이동한 개수를 지칭한다.

이 방법은 전통적인 방법으로서 계산이 간단한 반면에 방파제의 수심과 마루높이에 따라서 피해율이 크게 달라지는 단점이 있다.

정의 2 : 이탈한 총 피복재의 등가길이를 사면 횡폭의 길이로 나눈 비율로서 다음 식으로 표시된다(van der Meer, 1988).

$$S = nD_n / D_o \quad (3.5.3)$$

여기서,  $n$  = 이탈 피복재의 개수

$D_n$  = 피복재의 특성길이(=  $(W/\gamma)^{1/3}$ )

$D_o$  = 사면의 횡폭(벽면으로부터 피복재의 특성길이 만큼은 제외)

이 식에서 분모 자체는 방파제의 수심과 마루높이에 관계없다는 장점이 있다. 그러나 피해율이 피복재의 형상에 따라 변하며 특히 피복재의 모양이 납작할수록 피해율이 크게 증가하는 방향으로 왜곡된다는 단점이 있다. 또한, 단층피복과 다층피복의 구분이 명확하지 않다.

정의 3 : 피해율을 주 이탈역 (방파제의 마루와 정수면의 중간으로부터 정수면하의 무손실 파고  $H_{D=0}$ 의 깊이에 이르는 사면의 길이) 내에서 피복재의 총 개수에 대한 이탈개수의 비율로 정의한다(CERC, 1984). 이 방법은 Hudson식에서 이용된 방법으로서  $H_{D=0}$ 를 사전에 알아야 하는 단점이 있다. 이 정의는 방파제의 피해가 정수면 부근에서 집중적으로 발생한다는 사실과 피해율을 이 주이탈역에서 산출한다는 관점에서 볼 때 피해율 산출치간의 상대적 비교가 용이하다는 장점이 있다.

위의 3가지 정의를 좀 더 세밀하게 비교하면 사실상 동일한 피해량에 관한 자료를 식의 분자로 하면서 비율 계산의 기준이 되는 분모만을 다르게 적용함에 개념의 차이가 있음을 알 수 있다. 즉 식의 분모로서 정의 1에서는 사면에 설치된 피복재의 총수를, 정의 2에서는 사면의 수평으로 한 열의 1층에 설치된 피복재의 수보다 일반적으로 증가된 수



를, 그리고 정의 3에서는 피해가 주로 발생하는 사면의 상하 폭이 좁은 구역에 설치된 피복재의 총수를 사용하고 있는 셈이다. 따라서, 각 정의에 따라 산정된 피해율이 만일 동일한 경우에는 실제 피해량은 분모가 큰 순서로 크게 되어 정의 1, 정의 3, 정의 2의 순서로 크게 된다.

## 2. Tetrapod의 피해계수( $K_D$ ) 추정

식(3.5.1)을 다시 정리하면 피해계수( $K_D$ )는 다음 식으로 표시된다.

$$K_D = \frac{\gamma_r \cdot H^3}{W(S_r - 1)^3 \cot \alpha} \quad (3.5.4)$$

피해량을 계측하기 위하여 <표 3.2.1>에 제시된 파 중에서 주기별로 파고가 11.9cm이 상인 파를 파고가 작은 파로부터 파고가 큰 파의 순서로 작용시켰다. 각 파의 작용시간은 실험실 규모로 30분씩이었다.

본 실험에서 Tetrapod는 수평 1열에 하층에는 9개 상층에는 8개씩 설치되었다. 피해량을 판정할 때에는 관찰이 가능한 한 제3절의 가항에서 설정한 바와 같이 파를 작용하는 도중에 피복재의 제자리 회전 및 록킹이 심하게 발생한 경우, 피복재가 완전히 이탈되었다가 복원되는 경우, 그리고 파의 작용이 끝난 후 제자리를 사용 Tetrapod의 특성길이인 5cm이상 이탈한 경우는 피해로 판정하였다. 이탈되었다가 복원된 피복재가 최종적으로 이탈되었을 경우에는 이를 피해로 중복 계산하지 않도록 유의하였다. 그리고 모든 경우에 모형의 양 측벽에서 발생한 피해는 피해량에서 제외하였다.

사면에 파력이 가장 크게 작용하는 높이는 정수면 부근이므로 안정된 단면은 작용 파고가 증가함에 따라 정수면 부근에 설치된 피복블록부터 이탈되기 시작함이 정상이다. 그러나 부록 B의 표들을 살펴보면 수평형 소단을 설치한 단면안들에서는 작용 파고가 매우 작을 때부터 피해가 발생하고 있다. 이는 주로 Tetrapod의 제1열에서 피해가 일찍 발생하기 때문이다. 반면에 지지형 소단을 설치한 제5안, 제8-1안, 제8-2안 및 제9안에서는 파고가 어느 정도까지 증가하기 전에는 피해가 발생하지 않는다. 따라서, 피해량 평가 및 피해계수의 추정은 이들 지지형 소단이 설치된 단면안들만을 대상으로 하였다.

<표 3.5.1>과 <표 3.5.2>에는 본 수리모형실험 결과 파의 주기가 각각 2.21sec인 경우와 1.60sec인 경우에 대해 파고별로 발생한 Tetrapod의 누적 피해량을 제시하였다. 여기서 이용된 안들은 모두 지지형 소단이 설치되었고 중간피복층은 중량 W/10의 쇄석으로 이루어졌으며 마루높이는 +30cm인 점에서 공통점이 있다.

<표 3.5.1>과 <표 3.5.2>에서 피해를 최초로 유발하는 파고를 비교하면 사면 경사가 1 : 1.5인 경우에는 비교적 파고에 균일성이 보이나 사면 경사가 1 : 4/3로 급한 경우에는 이 한계파고는 실험에 따라 크게 차이가 나고 있다. 사면 경사가 급한 경우에는 이렇게 피해결과에 변동성이 크므로 CERC(1984)에서는 사면의 경사를 1: 1.5보다 급하게 하지 말 것을 권고한 것이 아닌가 추측된다.

<표 3.5.1> 안별 파고에 따른 Tetrapod의 피해량(주기=2.21sec)

단면 파고(cm)	8-1안	8-2안	9안	9안
	1:1.5, 30.0cm	1:1.5, 30.0cm	1:4/3, 30.0cm	1:4/3, 30.0cm
11.9	0	0	0	0
13.0	0	0	0	0
14.0	0	0	0	0
15.1	1	1	1	0
15.8	1	1	1	0
16.9	2	1	2	0
17.8	4	3	3	2
18.5	8	4	8	4

<표 3.5.2> 안별 파고에 따른 Tetrapod의 피해량(주기=1.60sec)

안 파고(cm)	8-2안	8-2안	9안	9안
	1:1.5, 30.0cm	1:1.5, 30.0cm	1:4/3, 30.0cm	1:4/3, 30.0cm
12.1	0	0	0	0
13.1	0	0	0	0
14.3	0	0	0	0
15.2	0	0	1	0
16.0	0	2	2	0
17.0	1	4	2	1
17.7	3	5	2	2

#### 가. 사면 경사 1 : 1.5( $\cot \alpha = 1.5$ )인 경우의 피해계수( $K_D$ ) 추정

제8-1안 및 제8-2안에서 파의 주기가 2.21초인 경우 피복재의 피해는 파고  $H=15.1\text{cm}$ 에서 발생하기 시작하였다. 식(3.5.4)에  $W = 277\text{ g}$ ,  $\gamma_r = 2.24\text{ g/cm}^3$ ,  $S_r = 2.24$ ,  $\cot \alpha = 1.5$ , 피해를 유발한 파고  $H=15.1\text{cm}$ 를 대입하면,  $K_D = 9.74$ 가 된다.

$H = 15.1\text{cm}$ 는 실제 피해가 발생하는 파고이므로 동일한 조건의 실험을 수회 더 반복하거나 해저면의 경사를 변경한다든지 또는 파고 및 주기를 변화시키는 등의 다양한 실험을 더 수행하면 피해는 본 실험의 경우보다 더 작은 파고에서도 발생하는 경우를 맞이할 것으로 보인다. 또한, 이 피해계수는 식(3.5.3)의 정의 2에 의하면 피해율이 이미 10%에 해당하는 경우의 결과가 된다. 본 실험에서 주기 2.21초인 경우 실험파고  $H = 15.1\text{cm}$ 보다 한 급 낮으며 안정성이 확인된 파고는  $H=14.0\text{cm}$ 이다.

만일 피해율이 5% 이내 정도 되는 파고에 의한  $K_D$  값을 보정  $K_D$  값으로 하며 위의 두 개 파고의 중앙값으로부터 구한  $K_D$  값을 보정  $K_D$  값으로 가정한다면 중앙 파고는  $H = 14.55\text{cm}$ 가 되어  $K_D = 8.70$ 이 된다. 이 값은 CREC(1984)에서 제시한 사면의 경사가 1 : 1.5보다 급하지 않으며 파가 비쇄파인 경우의 피해계수  $K_D = 8.0$ 보다 8.8% 정도나 큰 값이다. 이와 같이 본 연구에서 피해계수가 크게 결정된 1차적 원인은 축소모형실험에서는 Tetrapod의 파괴현상을 재현하지 못함에 있는 것으로 추측된다. 따라서 피해 중 파

파가 차지하는 비율이 상대적으로 높은 중량이 큰 Tetrapod를 사용할 때에는 실패역의 피해사례를 함께 고려하여 중량을 결정하여야 할 것이다.

#### 나. 사면 경사 1 : 4/3 (cot α = 4/3)인 경우의 피해계수(K<sub>D</sub>) 추정

주기 2.21초의 파고 H=15.1cm에서 피해가 발생하기 시작하였으며 식(3.5.4)를 이용하면 K<sub>D</sub> = 10.95가 된다. 이 경우 본 실험에서 안정성이 확인된 파는 파고 H=14.0cm이다. 위에서와 같은 이유로 인해 보정 K<sub>D</sub> 값으로 두 개 파고의 중앙값 H = 14.55cm로부터 구한 K<sub>D</sub> 값을 보정값으로 택한다면 K<sub>D</sub> = 9.80이 된다. 이 값은 “TETRAPOD 설계, 시공”에서 규칙파를 이용하여 사면의 경사가 1 : 4/3인 경우에 비쇄파에 대하여 사용하도록 제시한 피해계수 K<sub>D</sub>=10.2에 근사하며 3.9%정도 작은 값이다.

여기서 추정된 Tetrapod의 피해계수는 매우 제한된 실험조건에서 추정된 것임을 감안할 때 실제 피해를 유발한 파고를 기준으로 추정된 피해계수를 사용하면 구조물을 과소 설계할 위험성이 크다고 판단된다. 따라서, 추가적인 정밀한 실험 연구 결과를 바탕으로 보다 신뢰성 있는 결과를 얻기 전까지는 위에서 제시한 보정값을 택함으로써 근소하게 하향 보정된 피해계수를 사용함이 바람직하다고 판단된다. 즉, 본 실험의 결과에 의하면 중간피복재로 중량이 W/10인 쇄석을 사용하고, 지지형 소단을 설치한 사면에서 파가 비쇄파인 경우에 사용할 수 있는 Tetrapod의 피해계수(K<sub>D</sub>)는 <표 3.5.3>에 보인 바와 같다.

<표 3.5.3> 비쇄파의 경우 Tetrapod의 피해계수(K<sub>D</sub>)

사면경사	K <sub>D</sub>	층 수	적치방법	소단의 형상	비 고
1 : 1.5	8.7	2	난적	지지형 소단	해저면 경사 1/55
1 : 4/3	9.8	2	난적	지지형 소단	해저면 경사 1/55

제체의 부분 중 파력을 직접 가장 크게 받는 중요한 부분인 피복재의 중량을 결정하기 위하여 축소 수리모형실험을 통해 극히 제한된 조건에서 추정된 피해계수를 현장 여건이 본 실험의 경우와 다를 경우에 검증 없이 사용하는 것은 매우 위험할 수 있다. 따라서,

본 연구에서 도출된 피해계수를 사용할 때에는 구체적인 설계단면을 대상으로 수리모형 실험으로 안정성을 확인하여야 할 것이다. 부득이 수리모형실험을 생략하는 경우는 구조물의 규모가 매우 작거나 파고가 작은 경우 등 극히 제한된 경우로만 한하여야 할 것이다. 아울러 보다 신뢰성 있는 피해계수를 추정하기 위해서는 다음과 같이 조건의 다양화를 통한 정밀한 실험이 필요하다. 이는 매우 오랜 기간동안의 수많은 실험을 요한다.

① 사용 Tetrapod 중량의 다양화

② 해저면 경사의 다양화

③ 작용파의 파고 및 주기의 다양화

이러한 실험조건의 다양화는 국내 보유 수조의 규모로 볼 때 다양화의 폭이 극히 제한적일 수밖에 없다. 또 다른 한편, 쇄파된 파에 의한 피해계수의 추정도 필요한 실정이다. 그러나 이는 비쇄파인 경우보다도 수행하기에 제한 사항이 더욱 많을 것으로 예상된다. 해외에서는 이러한 정밀실험을 위해서는 파고 2-3m를 재현할 수 있는 초대형 수조들이 이용되기도 한다.

참고로 “Tetrapod 설계, 시공”에서 밝힌 일본 Nihon Tetrapod사에서 수행한 수리실험의 조건을 살펴보면 수심, 파고 및 주기가 다양하며 Tetrapod는 중량의 크기에서 최소한 서로 다른 18종을 사용하여  $K_D$  값을 매우 방대한 규모의 실험결과로부터 추정한 것으로 이해된다. 다만 실험파로는 자연에서와 같은 불규칙파가 아니라 규칙파를 사용하였다.

## 제4장 경사식 방파제의 파동장 해석

### 제1절 서론

#### 1. 연구 배경 및 필요성

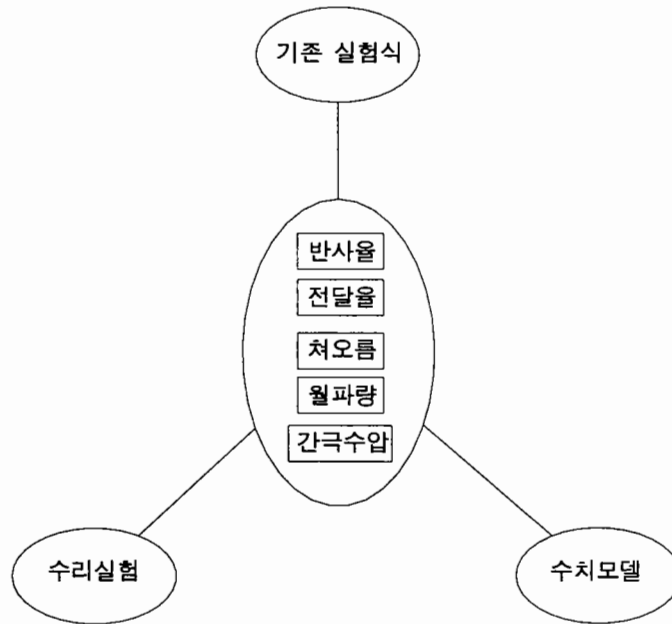
경사식 방파제의 설계요소는 피복재의 안정성, 반사율, 전달율, 처오름 등의 수리역학적 요소와 제체의 활동 및 지반 지지력에 관련된 토질역학적 요소로 구성되어 있다. 수리역학적 요소와 토질역학적 요소는 상호 밀접한 관련이 있으므로 경사식 방파제의 정확한 설계를 위해서는 이 수리역학적 측면과 토질역학적 측면이 상호 유기적인 관점에서 잘 파악되어야 한다.

기존의 경사식 방파제 관련 연구들을 보면, 수리역학적 요소는 실험과 이론적 연구에 의하여 그 예측기법이 꾸준히 발전되어 온 반면, 토질역학적 요소는 아직도 합리적 예측기법이 매우 미흡한 실정이다. 이에 대한 원인은 경사식 방파제의 파동장에 대한 연구가 주로 외부에 치우쳐 있었으며 세부적인 내부파동장에 대한 체계적 연구가 결여되었기 때문이다. 경사식 방파제 내·외부 파동장을 연계하여 방파제의 성능을 예측하고자 했던 시도는 Madsen and White (1976)의 연구가 최초이며 Hannoura and McCorquodale (1986), Hölscher and Barends (1990), Wurjanto and Kobayashi (1994), 그리고 van Gent (1995) 등이 그 뒤를 잇고 있다. 그러나, 이들 연구들은 입사파 조건 및 경사면에서의 쇄파발생 여부에 따른 일부 제한된 조건에서 사용이 가능하며 더욱이 사용된 수치해석적 기법들이 복잡하여 실무에 적용하기는 매우 어려운 실정이다.

#### 2. 연구목적 및 내용

본 연구에서는 제체에 작용하는 전파력을 결정하기 위한 기초 연구로서 방파제의 내·외부 파동장을 파악하기 위한 수치해석적 기법의 수립을 목적으로 한다. 외부 파동장에 관련된 요소는 반사율, 월파량 및 월파전달율이며 내부파동장에 관련된 요소는 제체내 간극수압과 투과전달율이다. 수치해석의 결과들을 검증하기 위하여

이차원 조파수조를 이용한 수리모형실험을 수행한다 (<도 4.1.1> 참조). 본 검증과정에서 수치해석기법에 포함된 관련 파라미터들의 보정 및 축척오차 등이 고려되며 최종적으로 현장 방파제의 내·외부 파동장에 대한 일반적인 예측기법을 수립하기로 한다.



<도 4.1.1> 연구수행계획

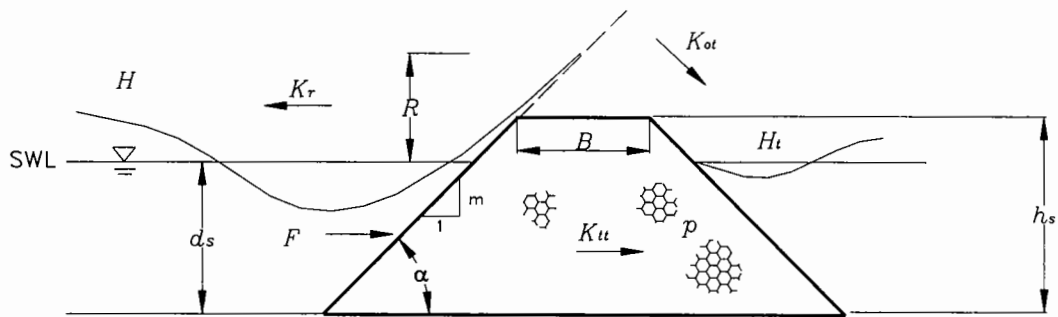
이 보고서에서는 경사식 방파제의 수리특성에 대한 일반적인 검토와 기존 연구들의 조사 내용을 제2절에 기술하고, 경계요소법을 이용한 수치해석 기법을 제3절에, 수리모형실험에 대하여 제4절에, 수치해석결과와 실험결과의 분석 및 검증을 제5절에 각각 기술하기로 한다.

## 제2절 경사식 방파제의 수리특성

### 1. 개요

경사식 방파제의 성능에 관련된 수리특성은 <도 4.2.1>에 나타난 바와 같이 반사

을  $K_r$ , 처오름  $R$ , 월파량  $Q_o$ , 전달율 (월파전달율  $K_{ot}$ , 투과전달율  $K_{ut}$ ), 제체내 간극수압  $p$ , 피복재의 안정성, 그리고 제체에 가해지는 파력  $F$  등으로 구성된다. 방파제에 입사한 파 에너지의 일부는 반사되며 나머지는 월파되거나 제체의 공극을 통과하여 제체 후면에 전달되게 된다. 이 과정에서 전사면에서의 파의 쇄파 및 처오름은 피복재를 교란한다. 월파량은 방파제의 전면 경사면에 형성되는 처오름과 밀접한 관련이 있다. 반사율과 처오름은 공히 입사파의 파형경사, 제체의 전면 경사각 그리고 경사면의 표면상태와 제체의 투과성 정도에 따라 달리 나타난다. 경사식 방파제 내부로의 파에너지 유입은 동수압 형태의 간극수압을 발생시킨다. 또한, 공극에서의 수립자의 유동은 개별 쇄석들에 대하여 마찰력과 관성력을 발생시키며, 방파제 전체에 작용하는 파력은 이들 마찰력과 관성력을 포괄한 것이다.



<도 4.2.1> 사석 방파제의 수리특성

본 절에서는 피복재의 안정성과 제체 파력을 제외한 나머지 수리특성들의 결정을 위한 기존의 방법들을 검토하기로 한다. 사실, 이들 방법들은 주로 실험 및 경험을 통하여 도출된 경우가 대부분이며 이들조차 상당히 제한된 적용범위를 갖고 있다. 따라서, 여기에서는 기존 방법들을 연대적으로 조사하는 일종의 문헌조사의 성격을 띠기보다는 적용범위가 비교적 넓으며, 그리고 제3절에서 제시될 수치해석기법을 검증하는데 필요한 방법들을 선별하여 그 특성을 검토하기로 한다. 대상 방파제는 일정 마루 높이를 갖는 사다리꼴 형태의 사석 경사식 방파제로 하며, 저 마루 경사식 방파제 및 수중 잠제는 고려 대상에서 제외하기로 한다.



## 2. 반사율

반사율은 입사파의 파형경사, 경사식 방파제의 경사도, 그리고 경사면의 거칠기 및 공극에 따라 달라진다. 경사면상에서의 쇄파 발생은 반사율을 현저히 감소시킨다. 동일한 경사도에서 파형경사의 증가, 또는 동일 파형경사에서 경사도의 감소는 경사면에서의 쇄파발생의 가능성을 증가시킨다. 파형경사와 사면 경사도의 효과는 다음과 같이 Irribaren 수로 통합하여 나타낼 수 있다.

$$I_r = \frac{m}{\sqrt{H/L_o}} ; \text{규칙파} \quad (4.2.1)$$

$$I_r = \frac{m}{\sqrt{H_{mo}/L_p}} ; \text{불규칙파} \quad (4.2.2)$$

식 (4.2.1)에서  $L_o = gT^2/2\pi$ ,  $H$  = 방파제 toe에서의 파고이다. 식 (4.2.2)에서  $L_p = gT_p^2/2\pi$ ,  $H_{mo}$  = 스펙트럼에서 계산된 방파제 toe에서의 유의파고,  $T_p$  = 스펙트럼의 첨두주기이다.

쇄파의 형태는 일반적으로 붓파 (spilling breaker), 권파 (plunging breaker) 그리고 쇄기파 (surging breaker)로 나뉘며, 파형경사가 감소할수록, 또는 사면의 경사도가 증가할수록 붓파에서 쇄기파로의 전이가능성이 커지며 반사율이 증가한다. 즉, 식 (4.2.1) 또는 (4.2.2)에서의  $I_r$ 의 값이 증가할수록 쇄기파의 발생가능성이 증가하며 반사율이 증가한다.

기존의 반사율에 대한 연구는 방파제 전면경사가 평탄한 조건에서 수행되었다. Seelig and Ahren (1981)은 많은 규칙파 또는 불규칙파 실험을 통하여 경사 구조물의 반사율을 다음과 같이 제시하였다.

$$K_r = \frac{aI_r^2}{b + I_r^2} \quad (4.2.3)$$

여기서,  $a$ ,  $b$ 는 사면의 표면상태에 관련된 파라미터로서 피복재의 종류에 따라 다르며 <표 4.2.1>과 같다 (Sorensen, 1993; Allsop and Hettiarachchi, 1988).

<표 4.2.1> 피복재의 종류에 따른 변수  $a$ 와  $b$

Armor	Wave condition	$a$	$b$
Stone		0.6	6.6
Dolos	regular	0.56	10.0
Cobs	regular	0.50	6.54
TTP	irregular	0.48	9.62
Sheds	irregular	0.49	7.94

식 (4.2.3)에서 알 수 있듯이  $I_r$ 이 증가하면서 반사율은  $a$ 로 수렴하며 일반적으로 반사율은 0.5를 초과할 수 없다. 한편, Allsop and Hettiarachchi (1988)은 불투과 매끈한 (smooth) 구조물에 대한 반사율에 대하여  $a = 1.08$ ,  $b = 5.7$ 을 권장하였다.

상기 실험식들은 경사면이 무한정 연장되어 월파가 발생하지 않는 조건에서 도출된 것이며 월파조건에서의 반사율에 대한 일반적 식은 현재로서는 가용하지 않다 (Losada, 1990). 이에 대한 체계적 연구가 필요하다.

### 3. 처오름

#### 가. 규칙파 처오름

처오름 역시 반사율과 마찬가지로 입사파의 파형경사, 사면 경사도, 그리고 경사면의 거칠기 및 공극에 따라 달라진다. Hunt (1959)는 규칙파에 대하여 불투과 매끈한 면을 대상으로 다음과 같은 상대 처오름( $R/H$ )을 산정할 수 있는 식을 제시하였다.

$$\frac{R}{H} = \frac{m}{\sqrt{H/L_0}} \quad (4.2.4)$$

여기서,  $H$ 는 방파제 선단부에서의 입사파고이다. 식 (4.2.4)에서 경사도가 완만할수록 ( $m$ 이 작을수록), 파형경사가 커질수록 상대 처오름이 감소함을 알 수 있다. 또한, 사면에서 쇄파 발생 시, 쇄기파로 갈수록 상대 처오름이 증가한다.

규칙파 입사에 대하여 방파제 전면 해저지형의 경사와 경사면 표면조건 및 투과성을 고려한 처오름 결정방법은 CERC (1984)에 제시되어 있다. 이 방법은 상대처오름을  $R/H_o'$ 으로 나타내고 이를 무차원 변수들, 즉,  $\cot \alpha (= 1/m)$ ,  $H_o'/gT^2$ ,  $d_s/H_o'$ 의 함수형태로 나타낸 것이다. 여기서,  $H_o'$ 과  $d_s$ 는 각각 환산심해파고와 방파제 선단부에서의 수심을 의미한다. 여러  $d_s/H_o'$ 의 범위에 대한 도표가 제시되어 있으며 도표에서 독취한 상대 처오름에 수리모형실험에 따른 축척오차와 경사면 표면조건 및 투과성을 보정하기 위한 계수들을 곱하여 사용할 수 있도록 되어있다.

한편, Ahrens and McCartney (1975)는 규칙파에 대하여 다음과 같은 실험식을 제안하였다.

$$\frac{R}{H} = \frac{aI_r}{1 + bI_r} \quad (4.2.5)$$

여기서,  $I_r$ 은 Iribarren 수로서 식 (4.2.1)과 같다. 파라미터  $a$ ,  $b$ 는 방파제의 피복재에 관련된 실험 상수로서 <표 4.2.2>와 같다.

<표 4.2.2> 처오름에 대한 변수

피복재	$a$	$b$
Riprap	0.956	0.398
Rubble (Permeable - No core)	0.692	0.504
Rubble (2 layers - Impermeable core)	0.775	0.361
TTP	1.010	0.910
Quadripods	0.590	0.350
Tribars	1.810	1.570
Dolosse	0.988	0.703

#### 나. 불규칙파 처오름

불규칙파에 대한 처오름이 Rayleigh 분포를 따른다는 가정 하에 다음과 같은 식이 사용된다 (CERC, 1984).

$$\frac{R_p}{R_s} = \left( \ln \frac{(1/p)}{2} \right)^{1/2} \quad (4.2.6)$$

여기서,  $R_p$ 는 초과확률이  $p$ 인 쳐오름,  $R_s$ 는 심해 유의파고 (규칙파)에 대한 쳐오름이다.

매끈한 일정 경사면에 대한 쳐오름에 대하여 Mase and Iwagaki (1984)는 다음과 같은 실험식을 제안하였다.

$$\frac{R}{H_{so}} = a \left( \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H_{so}/L_{so}}} \right)^b \quad (4.2.7)$$

여기서,  $R$ 은 최대 쳐오름  $R_{\max}$ , 유의쳐오름 (significant runup)  $\overline{R}_s$ , 그리고 평균 쳐오름  $R_{\text{mean}}$ 을 의미한다. 각 쳐오름에 대한 파라미터  $a$ ,  $b$ 는 다음과 같다.

$$R_{\max}; a=2.32, b=0.77$$

$$\overline{R}_s; a=1.38, b=0.70$$

$$R_{\text{mean}}; a=0.88, b=0.69$$

Ahrens and Heimbaugh (1988)는 쇄석 경사면에 대한 최대 쳐오름을 구하기 위하여 다음과 같은 실험식을 제안하였다.

$$\frac{R_{\max}}{H_{mo}} = \frac{aI_r}{1 + bI_r} \quad (4.2.8)$$

여기서,  $I_r$ 은 일종의 Iribarren 수로서 다음과 같다.

$$I_r = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H_{mo}/L_p}} \quad (4.2.9)$$

$H_{mo}$ 은 불규칙파의 스펙트럼으로부터 계산된 유의파고,  $L_p$ 는 침두주파수에 대하여

방파제 toe에서 계산된 파장이다.

Wurjanto and Kobayashi (1994)는 불규칙파 조건에서 투과성 구조물에 대한 반사율과 처오름을 결정하기 위한 수치해석기법을 제시하였다. 지배방정식은 천수방정식 (shallow water equation)이며 사면에서 쇄파가 발생하지 않는 입사파 범위에 대하여 적용하였다. 이 수치해석은 정선에서의 경계처리에서 다소 즉흥적인 면이 발견되며 입사파 조건에 따라서 해의 불안정성이 발생하는 문제점이 있다. 더욱이, 구조물 내·외부의 파동장을 연계시키기 위하여 구조물 전사면 내부 일부만을 사용하였으며 경사식 방파제 전체를 대상으로 한 적용례는 발견되지 않는다. 따라서, 본 기법을 실무에 적용하기는 매우 곤란할 것으로 보인다.

#### 4. 월파량

월파량은 호안 등 구조물의 배후 시설의 설계에 중요한 의미를 가지며 경사식 방파제의 성능과 직접적인 관련은 없다. 단, 방파제의 마루 및 항 내측 사면의 안전성에 관련하여 Goda (1977)는 경사식 방파제의 허용 월파량을 다음과 같이 제시하였다 (Herbich, 1990).

마루 비피복 :  $0.048 \text{ m}^3/\text{s}$

마루 피복 :  $0.194 \text{ m}^3/\text{s}$

현재 월파량과 그리고 방파제 배후의 전달파고간의 관계를 직접적으로 나타내는 기법은 제시되고 있지 않다. 그러나, 방파제의 여러 대안간 성능을 상대적으로 비교하기 위하여 월파량을 측정하는 수리모형실험이 다수 수행되고 있는 것이 현실이다. 이하 기술된 월파량 산정방식은 불투과 구조물에 대한 것이며 투과성 구조물에 적용할 경우 실제보다 큰 값을 준다.

##### 가. 규칙파 월파량

월파율  $Q_0$ 는 단위시간에 구조물의 단위 폭당 발생하는 월파량이며, 처오름  $R$ 이 구조물의 건현(free board)  $F$ 보다 클 때 발생한다. Weggel (1976)은 불투과성 구조

물에 대하여 다음과 같은 월파량 산정공식을 제안하였다 (CERC, 1984).

$$Q_o = (gQ_o^*H_o'^3)^{1/2} \exp\left[\frac{-0.217}{\alpha} \tanh^{-1}\left(\frac{F}{R}\right)\right] \quad (4.2.10)$$

여기서,  $Q_o^*$ 와  $\alpha$ 는 실험적 계수로서 주어진 구조물의 형태에 대하여 다음과 같은 함수형태를 갖는다.

$$Q_o^* = f_1\left(\frac{H_o'}{gT^2}, \frac{d_s}{H_o'}\right) \quad (4.2.11)$$

$$\alpha = f_2\left(\frac{H_o'}{gT^2}, \frac{d_s}{H_o'}\right) \quad (4.2.12)$$

CERC (1984)는 여러 구조물에 대하여  $Q_o^*$ 와  $\alpha$ 를 독취할 수 있는 도표를 제시하였다. 본 월파량 산정방법은 도표를 보삽하여 독취할 수 있도록 되어 있기 때문에 정확한 값을 얻기는 어렵다.

Kobayashi and Wurjanto (1989)는 천수방정식 모델을 이용하여 불투과 구조물에 대한 월파량을 산정할 수 있는 기법을 제시하였다. 그러나, 이 기법은 구조물 전사면에서 쇄파가 발생하지 않는 비교적 파고가 작은 조건에서 적용가능하기 때문에 실제 방파제 설계에는 사용되기 어렵다.

van Gent (1995)는 규칙파를 대상으로 경사식 방파제의 내·외부 파동장을 해석하기 위하여 천수방정식을 푸는 1-D 모델 (ODIFLOCS)과 VOF (volume-of-fraction) 방법을 이용하여 Navier-Stokes 방정식을 직접 푸는 2-D 모델을 제시하였다. 동 수치모델은 Kobayashi and Wurjanto (1989)가 불투과 구조물을 대상으로 월파량을 산정한 반면, 제체의 투과성을 감안하여 쳐오름과 월파량을 산정하였다. 그러나, 방파제 전사면 내부의 일부만을 취급한 점은 동일하다. 월파량도 저 마루 구조물과 수중구조물에 대해서는 적용하였으나 일반적 마루 높이를 갖는 경사식 방파제의 월파전달을 그리고 제체투과 전달에 대한 적용례는 발견되지 않는다. 2-D 모델은 비월파조건을 대상으로 적용하였으며 월파량과 전달율의 계산 기법은 제시되지 않았다.

## 나. 불규칙파 월파량

Ahrens (1977)는 식 (4.2.12)를 수정하여 다음과 같은 불투과성 구조물에 대한 불규칙파 월파량을 산정할 수 있는 식을 제안하였다 (CERC, 1984).

$$Q_p = (gQ_o^*(H_{os}')^3)^{1/2} \exp\left[\frac{-0.217}{\alpha} \tanh^{-1}\left(\frac{F}{R_s}\right)\left(\frac{R_s}{R_p}\right)\right] \quad (4.2.13)$$

여기서,  $Q_p$ 는 초과확률  $p$ 를 갖는 월파량,  $H_{os}'$ 는 심해 유의파,  $R_s$ 는  $H_{os}'$  (규칙파 가정)에 대한 চে오름이다.

CERC (1991)는 규칙파와 불규칙파에 대한 월파량을 산정할 수 있는 컴퓨터 프로그램을 제공하였다. 불규칙파에 대한 평균월파량은 식 (4.2.13)의  $Q_p$ 를  $p$ 의 일정 증분마다 계산하여 이들을 합산하여 산정하였다.

## 5. 전달율

### 가. 월파에 의한 전달율

월파는 방파제 배후에 낙하하여 수면교란을 일으켜 전달파고  $H_{ot}$ 를 발생시킨다. Seelig(1980)는 규칙파 입사의 경우에 대하여 월파에 의한 파 전달율  $K_{ot}$  ( $= H_{ot}/H_i$ )을 구하기 위하여 다음과 같은 실험식을 제안하였다.

$$K_{ot} = C\left(1 - \frac{F}{R}\right) \quad (4.2.14)$$

$$C = 0.51 - \frac{0.11B}{d_s + F} \quad (4.2.15)$$

여기서,  $B$ 는 방파제의 마루 폭이다.

불규칙파에 대해서, CERC (1984)는 식 (4.2.14)의 চে오름  $R$ 대신에 유의파고에 대한 চে오름  $R_s$ 를 사용할 것을 권장하였으며 불규칙파의 경우가 규칙파의 경우보다 전달율이 작다고 하였다. 규칙파에 대해서는 유의파 চে오름으로 계산하고 불규칙파

에 대해서는 식 (4.2.14)를 처오름의 확률  $p$ 에 대하여 적분하여 평균 처오름을 구한 다음 이들을 동일  $F/R_s$ 에 대하여 비교한 것으로 사료된다. 한편, Sorensen (1993)은 불규칙파에 대하여 평균파고 즉,  $0.63 H_s$ 의 사용을 제안하였다.

#### 나. 제체 투과에 의한 전달율

제체 투과에 의한 파 전달은 제체 외부의 파동장과 내부 공극매체에서의 파동장의 상호작용에 대한 연구가 선행되어야 한다. 그러나, 기존의 경사식 방파제에 관련된 연구를 검토하여 보면 대부분이 제체 외부에 치중하였으며 내부의 파동장에 대한 집중적인 검토는 매우 드물다. 현재, 투과전달율  $K_H (= H_H/H_i)$ 를 계산할 수 있는 실험식은 없다.

Madsen and White (1976)는 방파제를 불투과 사면으로 가정하고 외부 파동장 (1차 반사율  $K_{r1}$ , 처오름, 월파전달율  $K_{ot}$ )을 결정한 다음, 1차 반사파와 동일한 입사파가 투과성 등가 방파제 (경사식 방파제를 직사각형 단면 방파제로 변환)에 입사한다고 보고 내부 파동장 (2차 반사율  $K_{r2}$ , 투과전달율  $K_H$ )을 해석하였다. 총 반사율과 투과율은 다음과 같이 구하였다.

$$K_r = K_{r1} K_{r2} \quad (4.2.16)$$

$$K_t = \sqrt{K_{ot}^2 + K_H^2} \quad (4.2.17)$$

등가방파제는 장파이론을 적용시키기 위하여 인위적으로 설정되었으며 원 방파제와 비교하여 일방향성 공극매체 흐름에 대한 난류 저항이 동일하도록 설정된다. 그러나, 일방향성 흐름이 아닌 파랑 입사조건에서도 등가방파제의 수리특성이 원 방파제와 동일할지는 의문이며 더욱이 단주기성 파랑의 입사에 대해서 본 장파이론은 정확성을 상실할 것으로 판단된다.

Wurjanto and Kobayashi (1994)와 van Gent (1995)의 수치해석기법에서도 제체 내부의 파동장을 해석하였으나 사석방파제 제체 전체를 대상으로 하여 제체 투과에 의한 전달율을 계산한 적용례는 발견되지 않는다.

Hölscher and Barends (1990)와 Sastry, *et al.* (1991)은 수치모델 (HADEER)을 이용하여 사석 방파제의 제체 투과율을 산정하였다. 본 모델은 본래 제체내의 간극



수압 및 체체의 동적 안정성을 파악하기 위한 Hannoura and McCorquodale (1986)의 방법을 개선시킨 것이다. 그러나, 본 모델은 내부 파동장과 방파제 외측 외부 파동장과의 연계 (coupling)는 고려하지 않았으며 수리모형실험을 통하여 방파제 전사면에서의 동수압을 결정한 다음 이를 내부파동장의 입력조건으로 하였다.

## 6. 내부 간극수압

체체내부의 간극수압을 구하기 위해서는 앞의 체체투과 전달율과 마찬가지로 체체 내·외의 파동장을 연계하여 해석할 필요가 있다. 상기 Wurjanto and Kobayashi (1994)의 수치모델 그리고 van Gent (1995)의 1-D 모델에서도 간극수압이 계산될 수 있으나 모델들이 천수방정식을 근간으로 하고 있기 때문에 정수압의 형태로서 구해지며 단주기성 파랑입사에 의한 동수압과는 많은 차이가 발생할 수 있다. van Gent의 2-D 모델에서는 원리상 간극수압의 계산이 가능하나 모델 자체가 개발 초기단계에 있으며 실제 적용례는 제시되지 않았다.

앞에서 언급한 HADEER 코드 (Hölscher and Barends, 1990)와 그리고 그 이후에 개발된 TITAN 코드 (Barends, *et al.*, 1996)는 간극수압을 계산하여 방파제 체체의 안정성을 파악하는데 이용하고 있으나 앞서 언급한 것처럼 전사면에서의 동수압 (수리모형실험에서 측정)을 입력자료로 이용하고 있다는 측면에서 다소 실용성이 떨어진다고 볼 수 있다. 불규칙파 입사에 대한 간극수압의 계산기법은 아직 개발된 사례가 발견되지 않는다.

## 7. 요약

이상 일정 마루 높이를 갖는 경사식 방파제의 수리특성 및 기존의 관련연구를 고찰하였다. 수리특성은 크게 나누어 4가지 적용조건, 즉, 입사파 특성 (규칙파 또는 불규칙파) 방파제 전사면의 표면상태 (매끈한 면 또는 거친 면), 체체의 투과여부, 월파 여부에 따라서 달라지며 기존의 관련연구도 이들 적용조건을 달리하며 전개되어 왔다. 기존의 연구들은 주로 실험에 의존하여 진행되어 왔으며 투과전달율과 간극수압을 제외하고는 무수히 많은 실험적 연구가 발견되나 (Herbich, 1990), 본 절에서 일반적으로 실무에 많이 적용되는 기법 및 경험식들을 선별하여 그들의 특성

및 적용성을 고찰하였다. <표 4.2.3>은 이들 연구들을 각 적용조건별로 정리한 것이다.

기존의 실험식들은 방파제의 수리특성중에서도 일부를 예측하기 위하여 도출되었다. 물론, 처오름을 알면 월파량과 월파 전달파고를 연쇄적으로 계산할 수 있는 가능성은 있으나 (CERC, 1984), 관련 실험식들이 여러 연구자들에 의하여 개별적으로 도출되었기 때문에 이와 같은 연쇄적 계산이 정확성을 일관되게 유지하기는 사실상 힘들다. 모든 수리특성을 일괄적으로 파악하기 위해서는 방파제 제체 내·외의 파동장을 상호 연계하여 해석할 필요가 있다. 궁극적으로는, 입사파 조건과 방파제의 형태 및 전사면 조건을 입력하여 모든 수리특성을 일거에 계산할 수 있는 수치해석적 기법이 요구된다. 그러나, 현존하는 수치해석적 기법들은 <표 4.2.4>에 나타나 있듯이 수리특성 중에서 일부만 계산 가능하다. 또한, Kobayashi, Barends 그리고 van Gent의 모델들은 비선형 모델로서 원리상 제체 내·외의 파동장을 정확히 계산할 수 있다고 볼 수는 있으나 일부 제한된 입력조건에서만 계산가능하며 계산절차도 매우 복잡하다. 따라서, 현재로서는 본 비선형 수치모델들을 실무적 차원에서 사용하기는 매우 어려울 것으로 판단된다. Madsen and White (1976)의 모델은 선형파 모델로서 <표 4.2.4>에 나타나 있듯이 반사율, 월파전달율 그리고 투과전달율을 계산할 수 있으며 사용이 비교적 간단하다. 본 연구에서는 Madsen and White 모델의 기본적 개념을 따르되 장파 가정의 등가 제체단면을 이용하는 대신 경계요소법을 이용하여 단주기성 파랑의 입사에 의한 제체내의 파동장과 간극수압을 계산하는 식으로 모델을 보완 개선하기로 한다.

<표 4.2.3> 사석 방파제의 수리특성에 대한 기존 방법의 적용조건 요약

수리특성	저자	적용조건							
		입사파 조건		전사면 표면상태		월파 여부		투과성 여부	
		규칙파	불규칙파	매끈한면	거친면	월파	비월파	투과	불투과
반사율	Seelig and Ahren (1981)	o	o		o		o	o	
	Allsop and Hettiarachchi (1988)		o	o			o		o
쳐오름	Hunt (1959)	o		o			o		o
	CERC (1984)	o	o		o		o	o	
	Ahrens and McCartney (1975)		o		o		o	o	
	van Gent (1995)	o			o		o	o	
	Mase and Iwagaki (1984)		o		o		o	o	
	Ahrens and Heimbaugh (1988)		o		o		o	o	
	Wurjanto and Kobayashi (1994)		o		o		o	o	
월파량	Weggel (1976)	o		o		o			o
	Ahrens (1977)		o	o		o			o
	CERC (1984)	o	o	o	o	o		o	o
	Kobayashi and Wurjanto (1989)		o		o				o
월파전달율	Seelig (1980)	o		o	o	o		o	o
	CERC (1984)	o	o	o	o	o		o	o
투과전달율	Madsen and White (1976)	o			o	o		o	
	Hölscher and Barends (1990)	o			o	o		o	
간극수압	Hölscher and Barends (1990)	o			o	o		o	

<표 4.2.4> 수치모델의 적용성

저자 \ 적용성	반사율	쳐오름	월파량	월파 전달율	투과 전달율	간극수압
Madsen and White (1976)	o	o		o	o	
Wurjanto and Kobayashi (1994)	o	o				o
Kobayashi and Wurjanto (1989)			o			
Hölscher and Barends (1990)					o	o
van Gent (1995)	o	o	o			o

### 제3절 제체 내·외의 파동장 결정

#### 1. 개요

본 절에서는 제체 내·외의 파동장을 계산할 수 있는 수치모델을 수립하기로 한다. 수치모델은 제2절에서 기술한 Madsen and White (1976)의 모델을 개선하여 단주기성 파의 입사에 대한 적용성을 향상시킬 수 있도록 하였다. 본 수치모델은 <도 4.3.1>에서 보이는 바와 같이 입사파조건, 방파제의 형상 및 내부쇄석의 제원을 입력하면 방파제의 반사율, 전달율 및 간극수압을 출력하는 기능을 갖는다.



<도 4.3.1> 수치모델의 입력과 출력

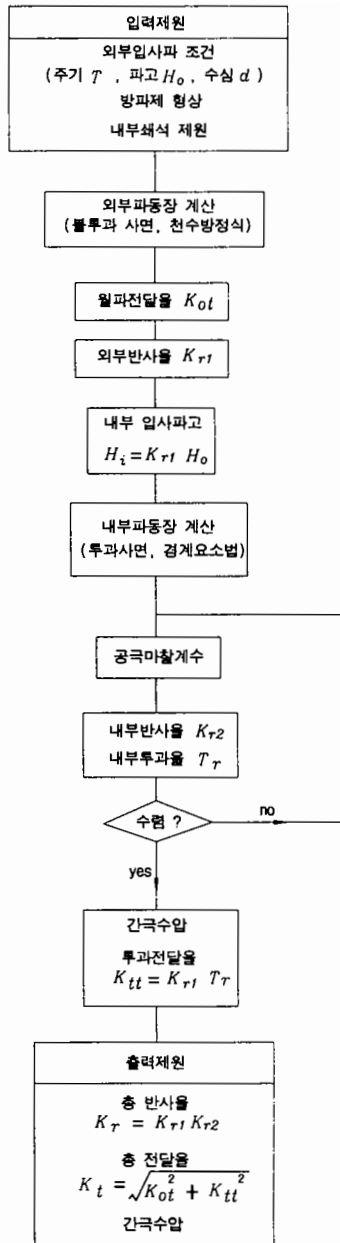
Madsen and White (1976)는 경사식 방파제의 반사율과 투과율을 결정하기 위하여 제체 내·외부의 파동장을 고려하였다. 외부의 파동장은 경사면을 불투과 거친 면으로 가정하고 장파방정식을 해석하여 결정하였으며, 내부파동장은 제체를 직사각형 모양의 등가 단면으로 변환하고 여기에 장파이론을 적용하여 결정하였다. 전체적인 계산과정은 다음과 같다.

- ① 입사파고  $H_0$ 에 대하여 식 (4.2.5)를 적용하여 처오름  $R$ 을 계산
- ② 식 (4.2.14)에  $R$ 을 대입하여 월파전달율  $K_{or}$ 을 계산
- ③ 경사면을 무한 사면으로 가정하고 외부파동장을 해석하여 반사율  $K_{r1}$  및 처오름  $\bar{R}$ 을 계산
- ④  $\bar{R}$ 에 근거하여 등가단면의 설정
- ⑤ 입사파고  $H_i = K_{r1}H_0$ 에 대하여 내부파동장을 해석하여 반사율  $K_{r2}$ 와

내부전달율  $T_r$ 를 결정 ( $H_o$  에 대한 투과전달율  $K_H = T_r K_{r1}$ )

⑥ 총 반사율  $K_r = K_{r1} K_{r2}$ , 총 투과율  $K_t = \sqrt{K_{ot}^2 + K_H^2}$  를 결정.

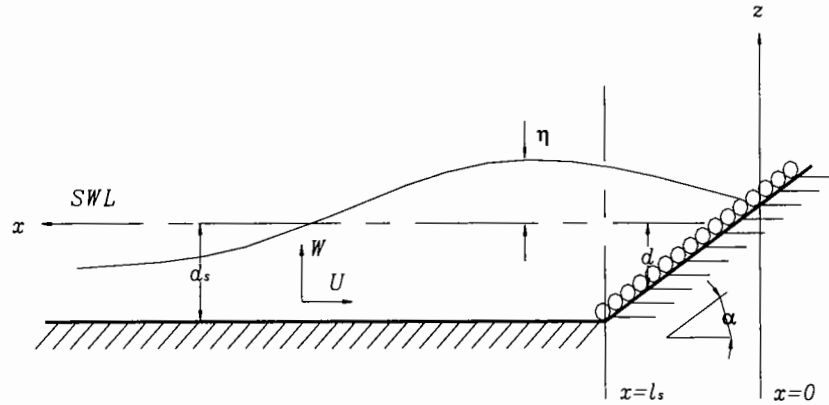
상기와 같이 Madsen and White 모델은 방파제의 반사율과 투과율을 계산하기 위한 것으로서 내부파동장을 해석하되 등가단면을 해석하기 때문에 원 방파제 내부의 간극수압은 계산할 수 없다. 더욱이, 이 모델은 내부파동장 해석에 장파이론을 사용하기 때문에 단주기성 파의 입사에 대해서는 해의 정확성을 기대하기 힘들다. 이와 같은 단점을 극복하기 위하여 본 연구에서는 전체적인 계산과정은 Madsen and White 모델을 따르되 내부파동장을 해석하기 위하여 직접 원 방파제 단면에 경계요소법을 적용하기로 한다. <도 4.3.2>는 본 수치모델의 계산절차를 보여준다.



<도 4.3.2> 수치모델의 흐름도

## 2. 불투과 사면에 대한 외부 파동장 결정

<도 4.3.3>은 불투과 사면에 형성되는 파동장을 보여준다. 파랑이 장파 ( $d/L \ll 1$ )라고 가정하면 지배방정식은 연속방정식과 운동방정식을 수직적분하여 다음과 같이 나타낼 수 있다 (Dean, 1984).



<도 4.3.3> 사석 경사제의 외부 파랑장

$$\frac{\partial}{\partial x} U(d + \eta) + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad (4.3.1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\tau_b}{\rho(d + \eta)} \quad (4.3.2)$$

여기서,

$$U = \frac{1}{d + \eta} \int_{-d}^{\eta} u \, dz \quad (4.3.3)$$

이며  $\tau_b$ 는 바닥에서의 마찰응력을 의미한다.  $\tau_b$ 를 마찰계수  $f_w$ 를 이용하여 나타내면

$$\tau_b = \frac{1}{2} \rho f_w |U| U \quad (4.3.4)$$

이다.

| $\eta$ |  $\ll d$ 의 가정을 도입하면

$$d + \eta \approx 0 \quad (4.3.5)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial x} \approx 0 \quad (4.3.6)$$

이 되며 이들 식을 식 (4.3.1)과 (4.3.2)에 대입하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(dU) = 0 \quad (4.3.7)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + f_b \omega U = 0 \quad (4.3.8)$$

식 (4.3.8)에서

$$f_b = \frac{f_w |U|}{2d\omega} \quad (4.3.9)$$

이며,  $\omega$ 는 입사파의 각 주파수이다.

Madsen and White (1976)는 <도 4.3.3>의 유체영역을  $x \geq l_s$ 의 영역 (바닥 마찰항 무시)과  $0 \leq x \leq l_s$ 의 영역 (마찰항 포함)으로 구분하고 각 영역에서의 일반해를 구한 다음,  $x = l_s$ 에서 이들 해를 접속하여 파 반사와 사면 쳐오름을 계산할 수 있는 다음 식들을 제시하였다.

$$\frac{a_r}{a_i} = \left\{ \frac{J_0(2k_o l_s \sqrt{1 - if_b}) - \frac{i}{\sqrt{1 - if_b}} J_1(2k_o l_s \sqrt{1 - if_b})}{J_0(2k_o l_s \sqrt{1 - if_b}) + \frac{i}{\sqrt{1 - if_b}} J_1(2k_o l_s \sqrt{1 - if_b})} \right\} e^{i 2k_o l_s} \quad (4.3.10)$$

$$\frac{A}{2a_i} = \frac{e^{i k l_s}}{J_0(2k l_s \sqrt{1 - if_b}) + \frac{i}{\sqrt{1 - if_b}} J_1(2k l_s \sqrt{1 - if_b})} \quad (4.3.11)$$

여기서,  $a_i$  = 입사파 진폭,  $a_r$  = 반사파 진폭,  $J_0$  = 1종 Bessel 함수 (차수 : 0),  $J_1$  = 1종 Bessel 함수 (차수 : 1),  $k_o$  = 입사파의 파수,  $i = \sqrt{-1}$  이다. 반사율  $K_r$ 과



쳐오름은 다음과 같다.

$$K_{r1} = \frac{|a_r|}{a_i} \quad (4.3.12)$$

$$R = |A| \quad (4.3.13)$$

식 (4.3.10)과 식 (4.3.11)을 계산하기 위해서는  $\sqrt{1-if_b}$ 의 정보가 필요하며 복소수의 성질을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sqrt{1-if_b} = (1 + \tan^2 2\phi_b)^{1/4} \exp^{-i\phi_b} \quad (4.3.14)$$

여기서,  $\phi_b$ 는 마찰각 (friction angle)이며 다음과 같다.

$$\tan 2\phi_b = f_b \quad (4.3.15)$$

식 (4.3.15)를 (4.3.4)에 대입하면

$$\tau_b = \rho \omega d U \tan 2\phi_b \quad (4.3.16)$$

과 같다.

사면 ( $0 \leq x \leq l_s$ )에 대하여 Lorentz 원리에 근거하여 식 (4.3.4)의 의한 시간평균 에너지 소모율과 식 (4.3.16)에 의한 에너지 소모율을 같게 하면 식 (4.3.15)를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tan 2\phi_b = f_w \frac{|A|}{d_o} \frac{1}{\tan \alpha} F_s \quad (4.3.17)$$

여기서,  $d_o$ 는 평탄부, 즉  $x \geq l_s$ 에서의 수심이다. 함수  $F_s$ 는 다음과 같다.

$$F_s = \frac{4}{3\pi} \frac{\int_0^1 \left| \frac{J_1(2\phi y^{0.5})}{\phi y^{0.5}} \right|^3 dy}{\int_0^1 y \left| \frac{J_1(2\phi y^{0.5})}{\phi y^{0.5}} \right|^2 dy} \quad (4.3.18)$$

여기서,

$$\psi = k_o l_s \sqrt{1 - i \tan 2\phi_b} \quad (4.3.19)$$

이다.

식 (4.3.17)에서의 마찰계수  $f_w$ 에 대해서는 수리실험을 통하여 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$f_w = 0.29 \left( \frac{D_s}{d_o} \right)^{-0.5} \left( D_s \frac{\tan \alpha}{|A|} \right)^{0.7} \quad (4.3.20)$$

여기서,  $D_s$ 는 사면 피복석의 평균입경을 의미한다.

식 (4.3.20)에서  $f_w$ 가 처오름  $|A|$ 에 의존하기 때문에 정확한 처오름을 계산하기 위해서는 다음과 같은 반복계산이 요구된다.

- ① 마찰각  $\phi_b$ 를 가정
- ② 식 (4.3.11), (4.3.13)에 의하여 처오름  $R$  계산
- ③ 식 (4.3.20)에 의하여 파 마찰계수  $f_w$  결정
- ④ 식 (4.3.17) ~ (4.3.19)를 이용하여 새로운 마찰각의 결정
- ⑤ 이전 마찰각과 비교하여 차이가 크면 ② ~ ④의 과정 반복

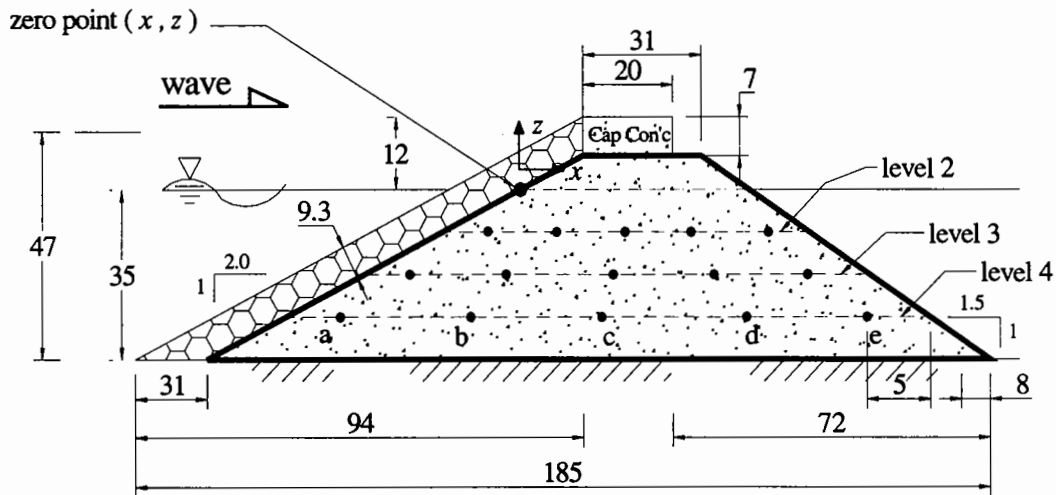
### 3. 투과 사면에 대한 내·외부 파동장 결정

외부 파동장을 결정하기 위해서 유체영역을 경사식 방파제 주변 및 제체 내부에 설정하여 경계요소법을 적용하였다. 유체 영역은 4개로 구분하여 영역 I은 방파제 전면으로부터 일정 거리만큼 떨어져 있는 경계 이전, 영역 II는 경계로부터 방파제 전면, 영역 III은 제체 내부 영역, 그리고 마지막으로 영역 IV는 방파제 후면으로부터 일정 거리만큼 떨어진 영역으로 나누어 수치모형을 구성하였다. 자세한 수식의 유도과정은 부록 C에 수록하였다.

## 제4절 수리모형실험

### 1. 모형 방파제

모형방파제는 <도 4.4.1>에 나타난 바와 같이 전면경사가 1:2, 후면경사가 1:1.5인 경사식 방파제이다. 수심은 0.35 m로서 원형 방파제 대비 약 1/40의 축척을 갖는 모형이며 전사면은 개별 중량이 100 g인 TTP 모형을 2층 난적 (두께 9.3 cm)으로 피복하였다. 본 TTP 모형의 안정성에 대한 임계파고는 Hudson공식에 의거, 약 12 cm이며 이를 원형 값으로 환산하면 약 5 m에 해당한다. 폭이 31 cm인 모형 방파제 상부는 두께 7 cm인 상치콘크리트를 설치하였다. 차후 수치해석 결과와의 검증의 편이를 위하여 중간 피복재는 제외하였으며 내부 쇄석은 평균입경 1.26 cm, 공극률이 0.498인 쇄석으로 하였다.



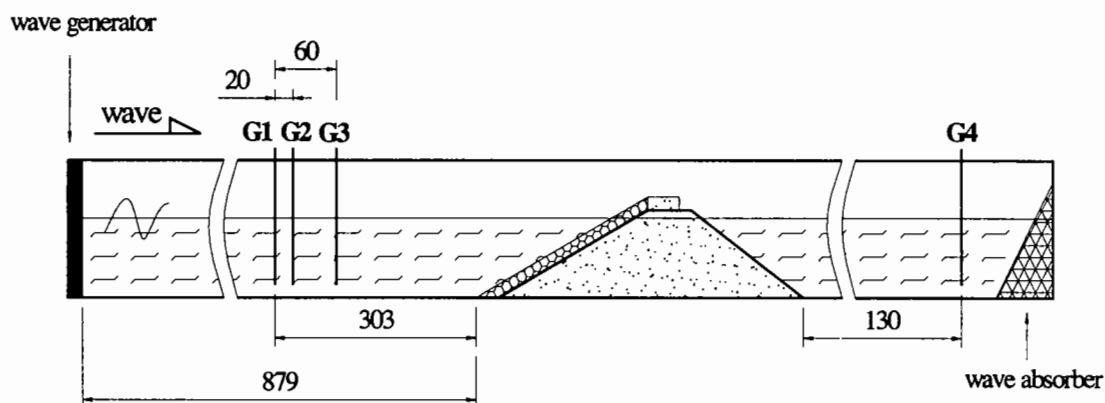
<도 4.4.1> 모형 방파제와 간극수압계의 위치 (단위 : cm).

### 2. 실험장치 및 계측

#### 가. 조파수조

실험 장치로서는 건국대학교 토목공학과에 설치되어 있는 이차원 조파수조 (18 m L x 0.4 m W x 0.6 m H)를 이용하였다. <도 4.4.2>는 수조에 설치되어 있는

모형방파제의 위치와 파고계들의 위치를 보여준다.



<도 4.4.2> 모형 방파제의 형상과 파고계의 위치

#### 나. 반사율, 전달율, 월파량 계측

계측은 반사율, 전달율, 월파량 그리고 간극수압에 대하여 수행하였다. 파고계 G1, G2와 그리고 G3은 방파제의 반사율을 측정하기 위한 것이며, 파고계 W4는 방파제의 전달율을 측정하기 위한 것이다. 각 파고계의 보정은 실험 전후에 실시하였다. 월파량은 모형방파제의 상치콘크리트 후면에 용기를 부착하여 측정하였다. 파고계와 간극수압계의 독취율은 모두 40 Hz로 하였다.

#### 다. 간극수압 계측

제체내 간극수압은 계측한계가  $100 \text{ g/cm}^2$  인 스트레인지식 간극수압계를 이용하였으며 간극수압계는 <도 4.4.1>에서 보이는 바와 같이 모형 방파제 내부에 3층 (level 2, level 3, level 4)으로 각각 5개 (센서 a, b, c, d, e)를 배치하였다. <표 4.4.1>은 수치해석의 좌표계의 원점 (<도 C.2> 참조)을 기준하여 각 센서의 좌표를 보여준다.

<표 4.4.1> 간극 수압계의 좌표값 (단위 : cm)

구 분	a	b	c	d	e
level 2	(-7.7, -8.7)	(5.3, -8.7)	(18.3, -8.7)	(31.3, -8.7)	(44.3, -8.7)
level 3	(-23.5, -17.4)	(-3.0, -17.4)	(17.5, -17.4)	(38.0, -17.4)	(58.5, -17.4)
level 4	(-42.0, -26.1)	(-13.5, -26.1)	(15.0, -26.1)	(43.5, -26.1)	(72.0, -26.1)

간극수압계는 압력의 부하 시 센서내의 변위에 따라 출력 볼티지가 선형으로 변한다. 본 실험에서는 시험계측을 통하여 증폭기내의 변위조정 다이얼과 볼티지 조정노브를 각각 조작하여 계측의 해상도가 최대가 되도록 하였다. 본 실험에서 사용한 수압계의 보정 절차는 다음과 같다.

- (1) 변위조정 다이얼을 조작하여 증폭기내의 변위 ( $\mu S$ )<sub>c</sub>를 맞춘다 (본 실험에서는 3000  $\mu S$ )
- (2) 증폭기의 볼티지 LED를 관찰하면서 조정노브를 조작하여 최대 볼티지가 나타나도록 한다
- (3) 조파기의 가동 스위치를 끈 상태에서 조파 프로그램을 가동하여 수압계 연결 채널에 대한 데이터 독취를 시작한다
- (4) 증폭기의 zero 버튼을 눌러 영점을 맞춘다.
- (5) 프로그램에서 평형상태 (steady state)를 확인한다. 영점이 맞지 않으면 증폭기의 영점 버튼을 누르고 평형상태를 재확인한다.
- (6) 독취 채널의 영점을 저장한다.
- (7) 증폭기의 CAL 스위치를 올린다.
- (8) 조파와 데이터 독취를 시작한다 (F1 키). 조파기를 끈 상태이기 때문에 실제로는 조파기는 작동하지 않는다.
- (9) 각 채널 별 독취된 데이터 (볼티지)의 평균값  $v_c$ 와 (1)에서의 변위 ( $\mu S$ )<sub>c</sub>를 함께 기록한다.

간극수압의 계측은 보정 시 고정하였던 변위조정 다이얼과 볼티지 조정노브를 그대로 둔 채 수행하여야 하며 압력시그널은 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$p(t) = \frac{p_{\max}}{\mu S_{\max}} \frac{(\mu S)_c}{v_c} v(t) \quad (4.4.1)$$

여기서,  $p(t)$ 는 압력의 시계열을,  $p_{\max}/\mu S_{\max}$ 는 시험성적표상의 압력-변위 관계를, 그리고  $v(t)$ 는 컴퓨터에 독취된 볼티지의 시계열을 의미한다.

### 3. 실험조건

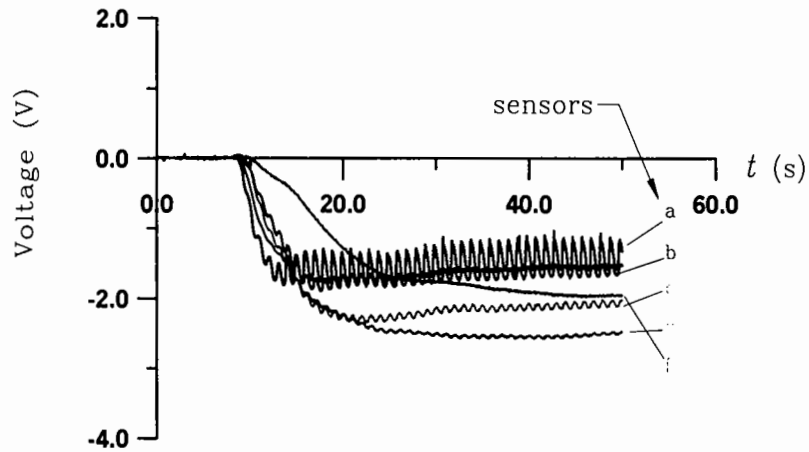
실험에 이용된 파는 모두 규칙파이며 파고  $H$ 를 8 cm, 12 cm 그리고 16 cm의 세 가지로 변화시켰으며 파 주기는  $H = 8$  cm는 0.7초에서 2.0초까지,  $H = 12$  cm는 1.0초에서 2.0초까지,  $H = 16$  cm는 1.6초에서 2.0초까지 각각 0.1초 간격으로 총 30개를 시도하였다. 실험에 사용된 수심은 공히 0.35 m이다.

### 4. 실험자료의 분석

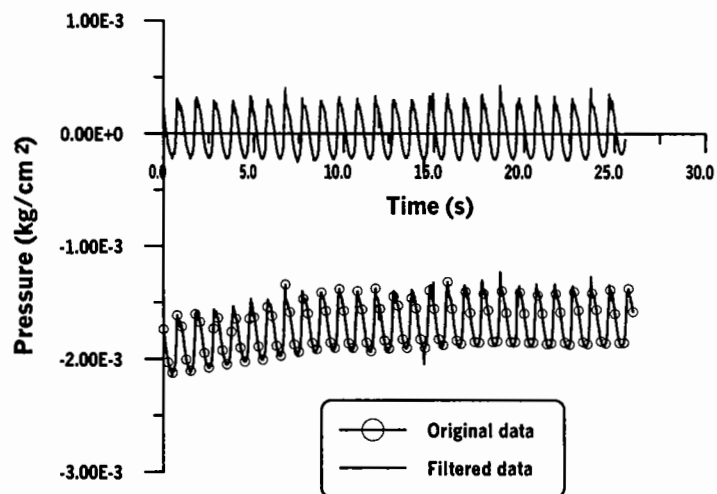
실험결과는 반사율, 월파량, 전달율 그리고 간극수압순으로 분석하였다. 반사율은 삼점법 (박 등, 1992)을 이용하여 계산하였다. 반사율 계측의 시간구간은 원칙적으로 정상적인 진행파가 파고계 센서를 최초 통과한 이후부터 조파기 재반사파의 영향이 도달하기까지의 구간 (균속도 개념을 이용하여 계산)으로 하되, 정확한 구간은 계측시그널을 관찰하여 정하였다. 전달율과 월파량, 그리고 간극수압의 분석구간은 계측 데이터가 안정된 값을 보이는 시간구간으로 하였다.

전달율과 간극수압은 zero-up-crossing 법을 이용하여 계산하였다. 전달율 파고계와 간극수압계의 계측 시계열을 관찰하여 보면 전달율은 (+) 쪽으로, 간극수압계는 (-)쪽으로 치우쳐 진동하는 모습을 보인다 (<도 4.4.3>). 이것은 양단이 폐쇄된 이차원 조파수조에서 방파제의 수리모형실험을 수행할 때 흔히 나타나는 현상으로서 계측 중 센서 위치에서의 평균수심이 시간에 따라 변하기 때문에 발생한다. 이와 같은 경우 계측시그널에 직접 zero-up-crossing 법을 적용하면 큰 오차가 발생하게 된다. 따라서, 여기에서는 zero-up-crossing 법의 적용에 앞서 원 계측 데이터에 하이패스 필터 (high-pass filter)를 적용하여 장주기 성분을 제거하였다. <도 4.4.4>는 본 수리실험에서 얻어진 파압 시그널에 필터를 적용한 결과이다. (-) 쪽으로 치

우쳐 있는 계측 시그널이 필터의 적용에 의하여  $x$ 축에 대하여 진동하는 시그널로 변환된 모습을 볼 수 있다.



<도 4.4.3> 간극 수압계의 전압 시그널의 시간변화(Level 2,  $H = 0.12$  m,  $T = 1.0$  s).



<도 4.4.4> 간극 수압계 <a>의 원래 시그널과 filter signal과의 비교 (Level 2,  $H = 0.12$  m,  $T = 1.0$  s).

## 제5절 결과분석 및 토의

### 1. 개요

반사율, 월파량, 전달율 그리고 간극수압의 실험결과를 수치해석의 결과와 비교하였다. 수치해석은 수리실험과 동일한 조건에 대하여 수행하였으며, <표 4.5.1>은 수치해석에 이용된 파라미터들의 값을 보여준다.

<표 4.5.1> 수치해석의 입력 변수

사양	기호	제원
영역 II의 수면길이	$l$	1 m
영역 IV의 수면길이	$l'$	1 m
경계면에서의 요소 수	$N_{21} \sim N_{44}$	20
영역 I, V에서의 소멸과 성분의 개수		10 개
영역 III 공극률	$n$	0.498
공극매체의 부가질량계수	$C_a$	0
Engelund (1953)의 파라미터	$\alpha_o$	1000.
	$\beta_o$	2.5
Fair and Hatch (1933)의 파라미터	$A$	5.0
	$B$	7.7
	$C_p$	0.6
피복재 (TTP)의 평균입경	$D_s$	3.35 cm
Ahrens and Heimbaugh (1988)의 쳐오름 파라미터	$a$	1.01
	$b$	0.91
Lorentz 적분을 위한 제체의 분할 수		50 개

파라미터 값들은 일반적인 것으로서 본 연구에서는 수치해석 결과와 수리실험결과의 정량적 일치를 기도하기 위한 파라미터 값들의 조정은 일체 시도되지 않았다. 부록 C에서 살펴보았듯이 Engelund (1953)와 Fair and Hatch (1933)의 파라미터들은 영역 III내의 흐름 마찰계수를 구하기 위한 것으로서 본 분석과정에서는 Engelund (1953)의 식 (C.47), (C.48)을 이용하였다.

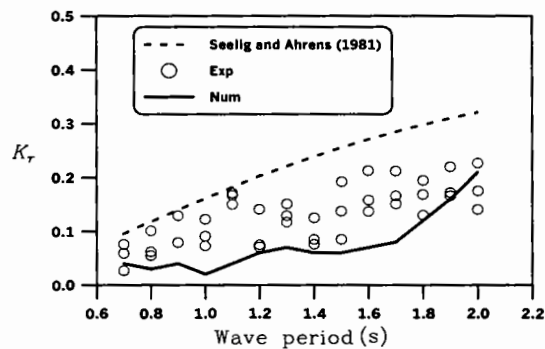
실험결과는 수치해석의 결과와 비교하였으며 아울러 제2절에서 소개한 기존의 실



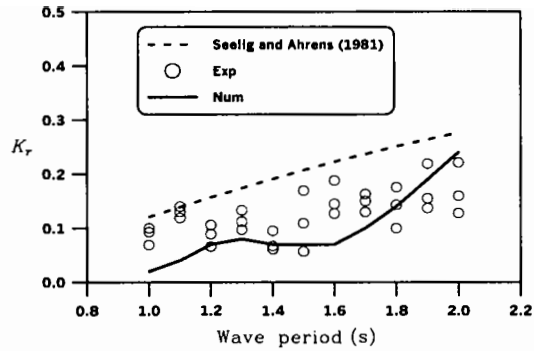
험식들을 이용하여 실험결과의 정확성을 검토하였다. 비교 과정에서 관련 변수들은 효율적인 정량적 비교를 위하여 유차원으로 사용하였다.

## 2. 반사율

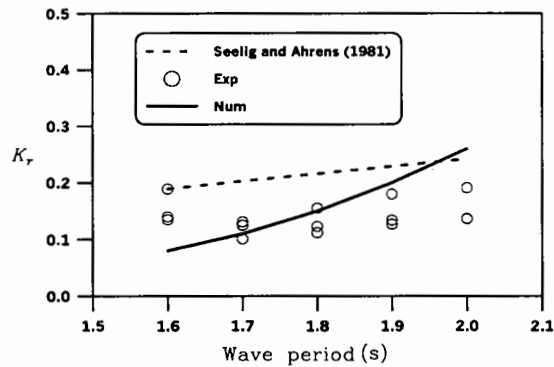
주기변화에 따른 반사율의 변화에 대하여 실험결과, 수치해석결과 그리고 Seelig and Ahren (1981)의 실험식의 적용결과를 <도 4.5.1> ~ <도 4.5.3>에 제시하였다. 주기의 증가에 따라 반사율이 증가하는 성향은 모두 유사함을 볼 수 있다. 그러나, Seelig and Ahrens의 결과가 실험결과와 수치해석결과를 상회한다. 이 원인은 Seelig and Ahrens의 실험식이 무한사면, 즉, 비월파 조건에서 도출되었기 때문에 실제 긴 주기에서 월파가 발생하는 본 실험의 경우보다는 파 반사가 크게 발생하기 때문이다. 수치해석결과는 실험결과보다 다소 작은 반사율 값을 보여주고 있으나 입사파고가 증가할수록 이들간의 차이가 감소함을 볼 수 있다.



<도 4.5.1> 반사율의 비교 ( $H=0.08$  cm)



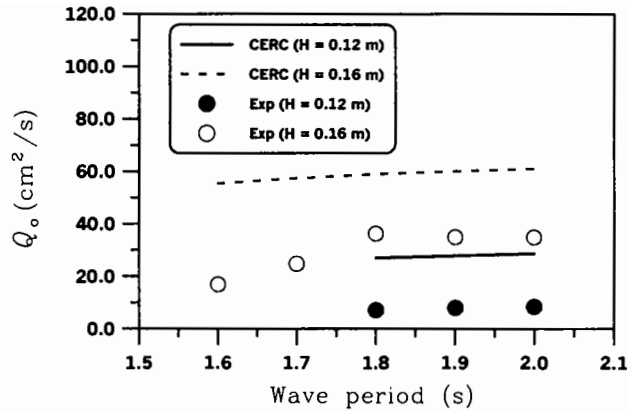
<도 4.5.2> 반사율의 비교( $H=0.12$  cm)



<도 4.5.3> 반사율의 비교( $H =0.16$  cm)

### 3. 월파량

월파량의 실험결과와 CERC (1984)의 실험식 (제2절 참조)의 적용결과를 <도 4.5.4>에 비교하였다. 본 수치해석에서는 월파량은 계산되지 않기 때문에 포함하지 않았다. 파고가  $H=0.08$  m 일 때는 월파가 거의 발생하지 않았으며 파고가  $H = 0.12$  m,  $0.16$  m 일 때에도 주기가 비교적 긴 조건에서 월파가 발생하였다. CERC의 실험식의 결과를 보면 전반적으로 주기가 증가하면서 월파량이 증가함을 볼 수 있으나 증가정도가 매우 미미하다. 실험결과도 전반적으로 이와 유사한 성향을 보인다. 실험식의 결과가 실험결과보다 큰 이유는 실험식이 불투과 구조물을 대상으로 도출되었기 때문이다. 실험결과는 실험식 결과의 약 반정도에 해당하며 제체의 투수성이 월파량에 매우 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

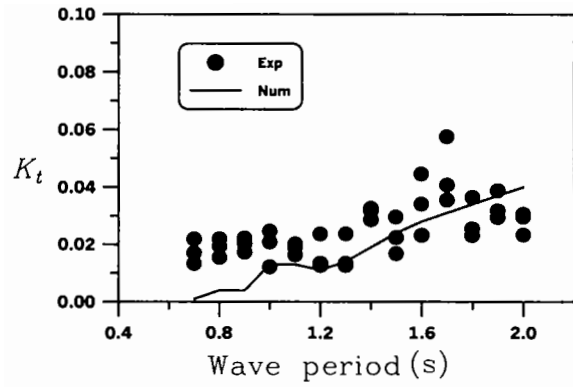


<도 4.5.4> 월파량의 비교

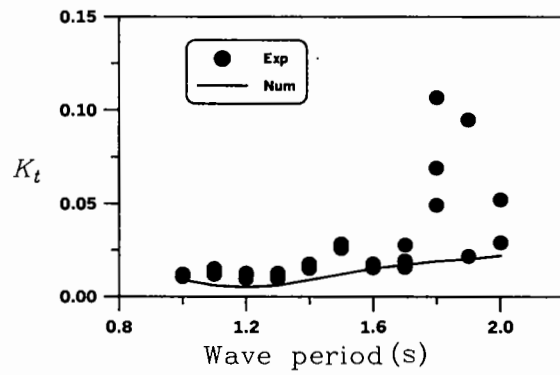
#### 4. 전달율

전달율에 대한 실험결과를 수치해석결과와 함께 <도 4.5.5> ~ <도 4.5.7>에 제시하였다. 전달율은 월파전달율과 투과전달율을 합한 것이다. 전반적으로 주기가 증가할수록, 그리고 파고가 증가할수록 전달율이 증가함을 볼 수 있다. 월파가 발생하지 않는  $H = 0.08$  m에 대해서는 전달율이 대략적으로 0.05 이하이며 실험결과와 수치해석결과가 비교적 잘 일치한다. 그러나,  $H = 0.12$  m 대해서는 주기가 작을 때에는 일치정도가 양호하나 월파가 발생하는 1.6초 이상에서는 실험결과가 수치해석결과를 훨씬 상회한다.  $H = 0.16$  m일 때는 실험결과가 상당정도의 분산을 보이고 있으며 수치해석결과를 훨씬 상회함을 볼 수 있다.

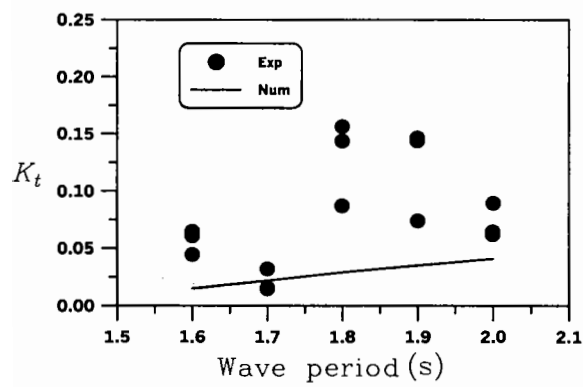
수치해석에서는 월파전달율을 구하기 위하여 Ahrens and McCartney (1975)의 쳐오름에 대한 식 (4.2.5)와 Seelig (1980)의 월파 전달율에 대한 식 (4.2.14)를 결합하여 사용하였다. Seelig의 식은 전사면이 투과성이며 방파제 마루가 쇄석으로 피복되어 있는 경우를 대상으로 하였으며 본 실험에서와 같이 투과성 체체를 사용하였으나 방파제 마루를 상치콘크리트로 설치한 경우 (<도 4.4.1> 참조)보다는 월파량이 월등 증가할 수 있다. 월파량의 차이는 월파전달율의 차이로 연결되며 이와 같은 점이 <도 4.5.6>과 <도 4.5.7>에서 실험결과가 수치해석결과 보다 크게 발생한 원인으로 판단된다.



<도 4.5.5> 전달율의 비교 ( $H = 0.08$  m)



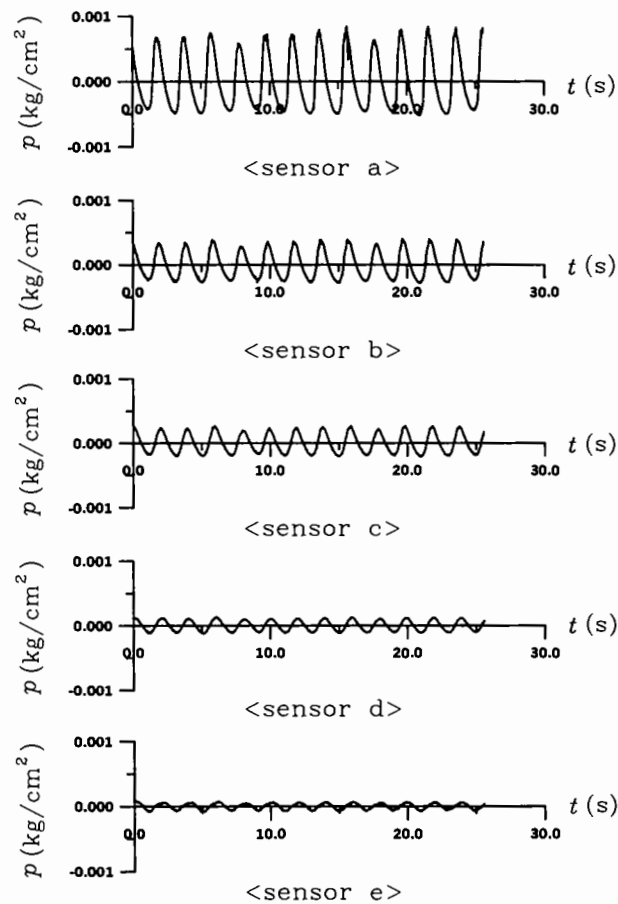
<도 4.5.6> 전달율의 비교 ( $H = 0.12$  m)



<도 4.5.7> 전달율의 비교 ( $H = 0.16$  m)

## 5. 간극수압

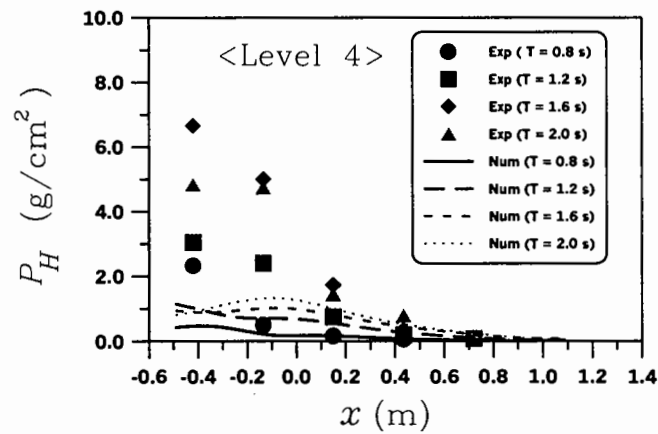
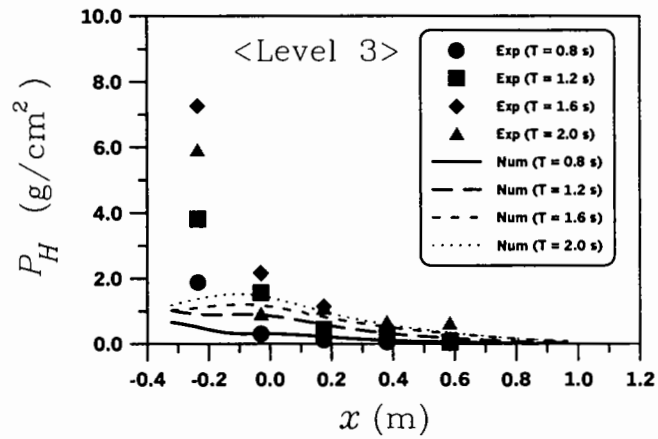
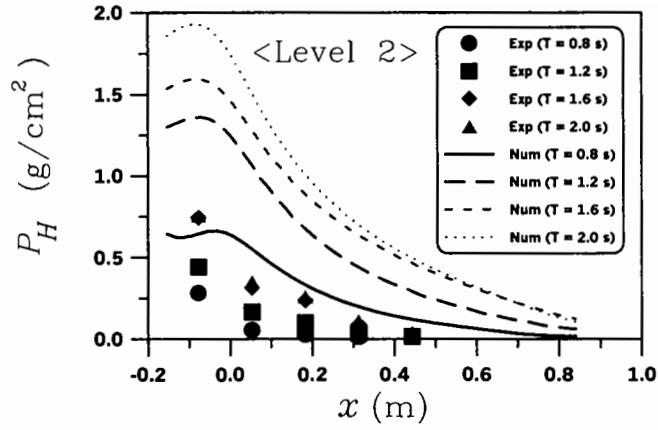
실험결과에서 1개 조건을 선택하여 간극수압계들의 시그널을 <도 4.5.8>에 도시하였다. 이 시그널들은 제4절에서 언급하였듯이 High pass filter에 의하여 처리된 것으로서 안정된 진동 형태의 변화를 보이고 있다. 방과제 전사면에 가장 가까이 있는 센서 <a>의 경우에는 파봉부가 파곡부에 비하여 뾰족한 형태를 보이나 여타 센서의 시그널들은 비교적 상하 대칭형태의 변화를 보이고 있다. 센서 <a>에서 <e>로 갈수록 시그널의 변동폭 (이하 “압력고”로 칭함)은 점차 감소함을 볼 수 있다. 이는 공극에서의 파 에너지 손실에 의한 당연한 결과이다. 이와 같이 방과제 전사면에서 멀어질수록 간극수압이 감소하는 것은 모든 실험조건의 결과에서 공통적으로 발견되었다.



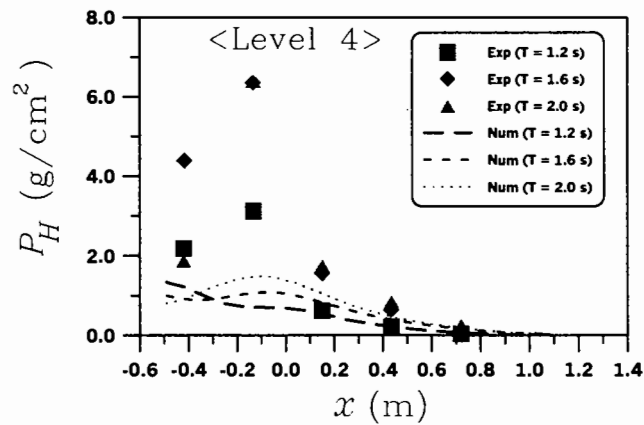
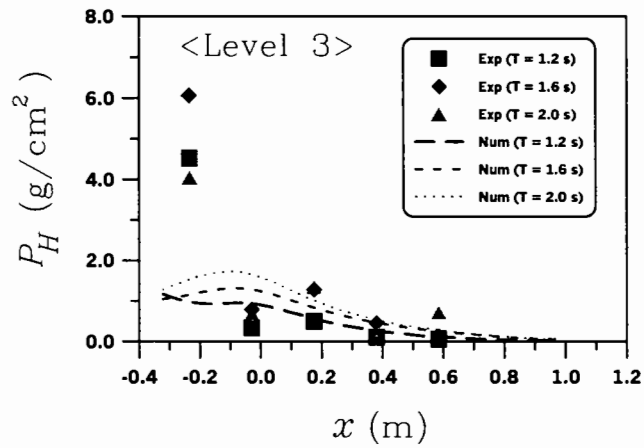
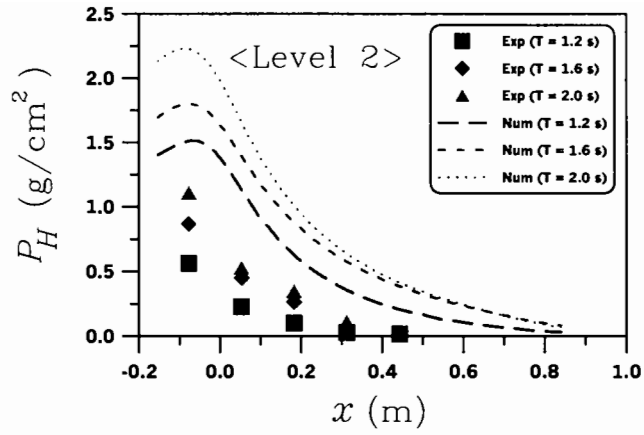
<도 4.5.8> 간극 수압계의 경시 변화(Level 2,  
 $H = 0.12 \text{ m}$ ,  $T = 2.0 \text{ s}$ )

간극수압의 시그널에 대하여 zero-up-crossing 기법을 적용하여 (제4절 참조) 평균 압력고  $P_H$ 를 계산하였으며, 이의 수평방향의 변화를 각 입사파고 별로 <도 4.5.9> ~ <도 4.5.11>에 도시하였다. 각 그림에서 평균압력고의 수평방향 변화는 <level 2>, <level 3> 그리고 <level 4>별로 도시되어 있다. 그림에서 실험결과는 Exp로, 수치해석 결과는 Num로 표시되어 있다.

상기 그림상의 실험결과를 보면 방파제의 후사면으로 갈수록 압력고가 감소한다. 또한 전반적으로 주기가 증가할수록 압력고가 증가한다. 이와 같은 현상은 물리적으로 당연한 결과로서 수치해석 결과에서도 유사한 성향을 발견할 수 있다. 그러나, 실험과 해석결과 사이의 정량적 일치정도는 그다지 양호하지 못하다. <level 2>에서는 해석결과가 크고 <level 3>와 <level 4>에서는 실험결과가 큰 것으로 나타나 있으며 이와 같은 불일치 정도는 전사면에 가까울수록 현저하다. 실험결과를 보면 <level 3>에서의 결과가 <Level 2>과 <level 4>에서의 결과보다 큰 것으로 나타나 있다. 이와 같은 결과는 Oumeraci and Partenscky (1990)의 실험결과에서도 나타나 있다. 그러나 수치해석은 정수면에 가까울수록 파압고가 큰 것으로 나타나 있다.

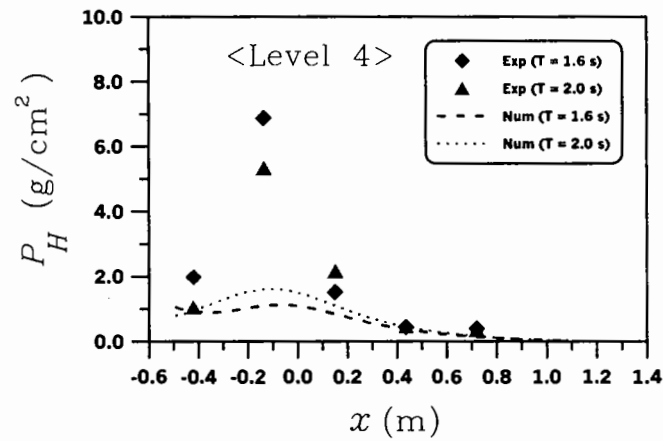
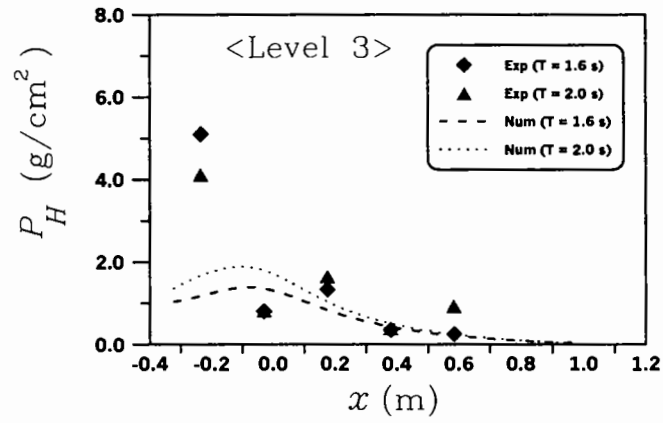
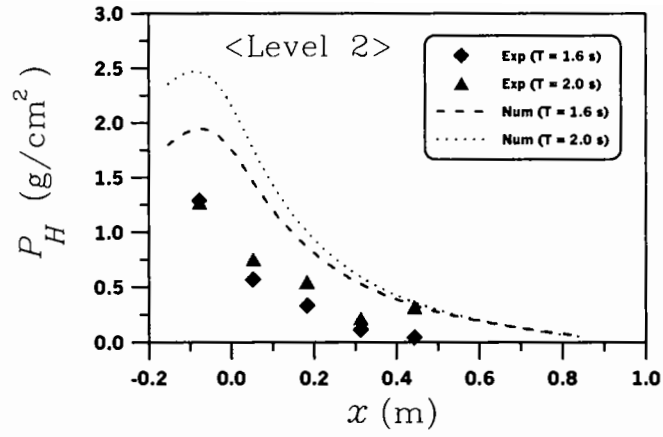


<도 4.5.9> level 2, 3, 4에서의 파압고의 변화  
( $H = 0.08$  m)



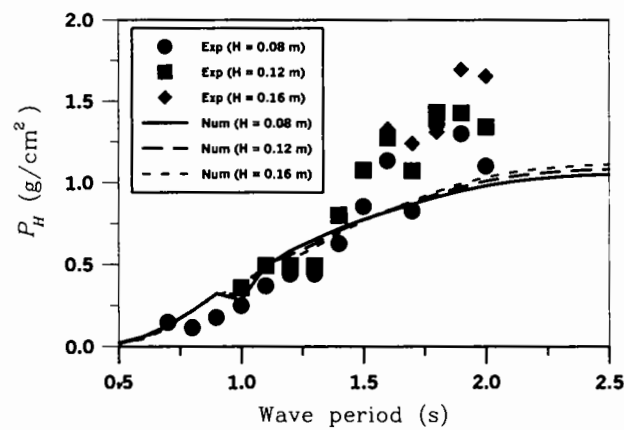
<도 4.5.10> level 2, 3, 4에서의 파압의 변화  
( $H = 0.12$  m)





<도 4.5.11> level 2, 3, 4에서의 파압고의 변화  
( $H = 0.16$  m)

<도 4.5.12>는 주기변화에 따른 압력고의 변화를 입사파고별로 나타낸 것이다. 실험결과와 수치해석결과가 공히 주기가 증가함에 따라 압력고가 증가하는 성향을 보인다. 그러나, 주기가 1.6초 이상으로 증가하면서 이들 결과 사이의 차이가 증가하는 것으로 나타나 있다. 파고증가에 따른 압력고의 증가는 실험결과와 해석결과에서 공히 매우 미미한 것으로 나타났다.



<도 4.5.12> 주기의 변화에 따른 파압고의 변화; <level 3>, sensor <c>

## 6. 요약

이상 수리실험결과와 수치해석결과를 비교하여 본 결과, 반사율과 전달율에서는 이 두 결과들이 거의 정량적으로 유사한 것으로 판단된다. 그러나, 간극수압에서는 성향이 비슷함에도 불구하고 전사면 부근에서 상당한 정량적 차이를 보인다. 이에 대한 원인 및 개선방법을 다음과 같이 고찰하여 볼 수 있다.

- 수리실험에서 방파제 전사면에서의 파랑은 쇄파를 비롯한 심한 비선형 변형이 발생하나 수치해석에서는 기본적으로 선형파 모델을 사용하기 때문에 비선형 변형을 원초적으로 재현할 수 없다. 파의 비선형 변형은 제체내 간극수압에 심대한 영향을 줄 수 있으며 사면에서 쇄파가 발생할 때는 충격압이 상당 부분 간극수압계에 전달되었을 가능성이 있다.

- 수치해석에서는 해의 수렴성을 확보할 목적으로 공극내 마찰계수를 구하기 위하여 Lorentz 원리에 입각한 식 (C.49)를 이용하였다. 그러나, 이 식은 방파제 제체 단면전체에 대한 일종의 단면평균 마찰계수를 구하기 위한 것으로서 이것을 사용할 경우 단면내 임의 위치에서의 국소성을 상실할 가능성이 있다. 엄밀히는 공극단면 (영역 III)의 경계면에서의 유속자료를 사용하여야 하나 해의 수렴성이 확보되지 않는 문제점이 있다. 국소성과 수렴성을 동시에 달성하기 위해서는 공극단면을 수개의 소단면으로 분할하고 Lorentz 기법을 각 소단면에 적용하며 각각의 마찰계수를 구한 다음 경계요소법을 각각의 소단면에 적용하는 것이다. 그러나, 이 경우에는 각 소단면을 경계면에서 접속시켜야 되며 소단면의 개수가 많아질수록 계산시간이 증가하는 문제점이 있다.

- 간극수압계 자체적인 문제에 의하여 <level 3>와 <level 4>에서 파압이 과도하게 계측되었을 가능성이 있다. 사용된 수압계는 용량이  $100 \text{ g/cm}^2$ 이나 본 실험에서 계측된 최대 파압은 개략적으로  $7 \text{ g/cm}^2$  이하이다. 이와 같이 미소한 범위에서는 스트레인 게이지의 선형성이 충분히 확보되지 않았을 가능성이 있다. 본 실험에서는 동수압의 부하 시에는 수압계의 선형성이 확보된다고 가정하고 공장 보정식 (센서 제작자 제공)을 그대로 이용하였으나 이 역시 센서가 노후화되었을 경우에는 이미 변화되었을 가능성이 있다. 동수압 보정실험은 조파수조에서 간극수압계를 수중 임의점에 설치하여 진행파에 의한 출력 볼티지의 값을 독취한 다음 이를 진행파의 동수압 (파동이론 적용)과 비교하는 식으로 진행할 수 있다.

- 월파가 발생할 때 간극수압이 증가될 가능성이 있으나 수치해석에는 이와 같은 점은 고려되지 않았다. 그러나, 월파가 발생하지 않는 파고  $H = 0.08 \text{ m}$ 인 경우 (<도 4.5.9> 참조)에도 실험결과와 해석결과사이에 현저한 차이가 발생한 점을 상기하면 월파의 영향은 크지 않을 것으로 판단된다.

- 수치해석에서 여러 입력 파라미터 값들 (<표 4.5.1> 참조)의 조정을 시도하였으나 실험치들의 횡방향 분포는 정량적으로 재현되지 않았다. 그러나, <표 4.5.1>에서의 파라미터 값들은 과거 많은 실험을 거쳐 축척효과 (scale effect)가 충분히 고려된 값들로 판단되며 이들의 임의적인 변경은 허용되지 않는다. 본 수리실험에서 축척오차가 발생하였을 가능성도 있으나 과축소된 모형에서는 마찰저항이 증가되어 간극수압이 오히려 적어지는 점을 감안하면 이 역시 본 실험결과와 수치해석결과 사이의 정량적 차이를 설명하기는 어려울 것으로 보인다.

## 제5장 하프록을 사용한 사면의 시공성 및 경제성

### 제1절 서론

#### 1. 개요

항만의 외곽 시설물인 방파제는 전사면을 이형블록으로 피복하여 제체를 보호하는 경사식이 많이 채용되어 왔다. 우리 나라는 경사식 방파제의 축조 경험이 풍부하므로 이에 대한 설계 및 시공기술을 확보하고 있다고 할 수 있다. 이러한 기존의 형식에 대한 축조 비용 절감을 위한 요소기술을 확보하는 것은 기존의 기술 및 장비를 그대로 사용할 수 있다는 점에서 우선적으로 검토해 보아야 할 사항이다.

최근 들어 각국은 전사면 단층 피복블록 등을 개발하여 경제적 단면의 축조를 위한 노력을 하고 있다. 또한 국내에서는 중간피복블록을 개발하여 대파랑에 대한 자연석의 중량 증가에 대비하고 있다. 중간피복블록은 대파랑에 대비한 자연석의 대체 축조 재료로써 뿐만 아니라 공기의 단축을 실현할 수도 있다는 점에서 공정에 대한 경제성 분석이 요구된다.

본 연구는 한국해양연구소(1999)에서 중간 피복용으로 개발한 인공 콘크리트 블록인 하프록을 대상으로 블록의 제작, 블록의 구조적 안정성 검토, 현장 거치실험을 통하여 실해역에 적용하기 위한 기술을 확보하며 거치 공정을 통하여 경제적 절감 효과의 여부를 판단하고자 현장실험을 실시했다.

#### 2. 중간피복블록의 등장배경

경사식 방파제 또는 호안의 축조시 이형블록을 전사면에 피복하여 사석부의 제체를 보호하는 형태가 널리 채택되고 있다. 이러한 사석식 경사제의 축조 형식은 오랜 경험 및 피복용 이형블록의 고안과 더불어 변형, 발전된 공법이다. 최근 물동량의 증가 및 선박의 대형화 등으로 인해 기존 항만의 확장시에 방파제가 대수심 쪽으로 전진 배치되는 추세에 있으므로 大波浪에 대응하기 위한 피복제의 중량 증가가 예상된다. 또한 향후 신규항만의 개발은 기존의 항만보다 악조건의 축조 환경 및 대파랑을 대상으로 할 가능성이 높

다. 한편, 연안 구조물에 대해서는 수리학적으로 안정한 단면에 대한 추구뿐만 아니라 경제적으로 유리한 단면에 대해서도 부단한 연구가 수행되어 왔다. 이와 같이 경제적으로 유리한 단면의 고안과 사회적인 요구를 충족시킬 수 있는 새로운 경사 단면의 공법을 위한 기술이 요구되고 있다.

기존의 경사식 방파제와 호안의 경우 제체를 구성하는 주재료는 자연석이다. 기존의 표준 단면 설계법에 의하면 전사면 피복재와 하부 사석의 중량비는 1:1/10에 해당한다 (Coastal Engineering Research Center, 1984). 그러나 대파랑에 상응하는 전사면 피복재는 인공블록을 사용하면 소요중량(W)을 확보할 수 있으나 하부 사석의 경우는 상당중량 (1/10)W의 확보가 쉽지 않다. 중간 피복블록의 개발 예는 찾기 힘들으나 우리나라의 경우 전사면 피복블록의 하층에 기존의 이형블록, 또는 약간의 변형을 한 형태를 거치하여 시공한 예가 있다. 현재 시공된 예로는

- 울진 원자력발전소의 남방파제의 두부에 72ton Tetrapod의 하부에 35ton tri-bar 거치
- 서귀포항 외곽방파제에 72ton Tetrapod의 하부에 29ton tri-block 거치
- 안목항의 외곽방파제에 50ton Tetrapod의 하부에 5ton tri-block 거치
- 수산항(양양) 외곽방파제에 50ton Tetrapod의 하부에 5ton tri-block 거치

등을 들 수 있으나 이러한 시공 단면의 수리적 특성은 충분히 밝혀지지 않았다. 중간 피복블록과 동시에 거치 됐을 때, 단면 전체의 수리적 안정성에 관한 특성을 명백히 밝혀야 한다. 다시 말하면 중간 피복블록의 기초적인 성능 연구에서는 전사면 피복블록의 저층에 위치한 사석을 중간 피복블록으로 대체했을 경우, 전사면 피복블록의 안정성을 확보할 수 있음을 밝혀야 한다.

본 연구에서는 경사식 방파제의 구성 요소 중 전사면 피복블록의 하부에 거치하는 자연석을 대체하기 위하여 하프록을 사용하여 시공성 및 경제성을 향상시킬 수 있는 하나의 요소기술을 제안하고자 한다.

## 제2절 하프록의 제작

하프록은 중간피복용 블록으로서 권 등(1999)이 제안했다. 권 등은 2차원 수조에서 비

쇄파 조건으로 노출안정성에 대한 검토를 위해 테트라포드를 전사면 피복블록으로 사용했을 경우에 대한 4가지의 중량비를 가지고 안정성 실험을 실시하고 그 결과 하프록이 중간피복용 블록으로써 수리적 안정성을 확보할 수 있으며 자연석보다 노출시 더 안정하다는 것을 보인 바 있다.

본 연구에서는 하프록의 제작을 위한 거푸집 설계를 거푸집공작, 블록제작의 전공정, 거치의 과정에 적합하도록 수행했다. 블록의 제작공정은 크게 ① 거푸집 조립 ② 타설 ③ 굳히기 ④ 탈형 ⑤ 전치 ⑥ 적치로 분리할 수 있다. 최종적으로는 적치된 블록을 작업장으로 이동시켜 사면에 거치하게 된다. 이러한 일련의 과정은 거푸집의 설계시 고려해야 할 사항이다. 본 연구에서는 하프록의 거푸집 설계를 위하여 제작공정에서 거치공정까지 뿐만 아니고 사용성과 경제성 등을 고려했다.

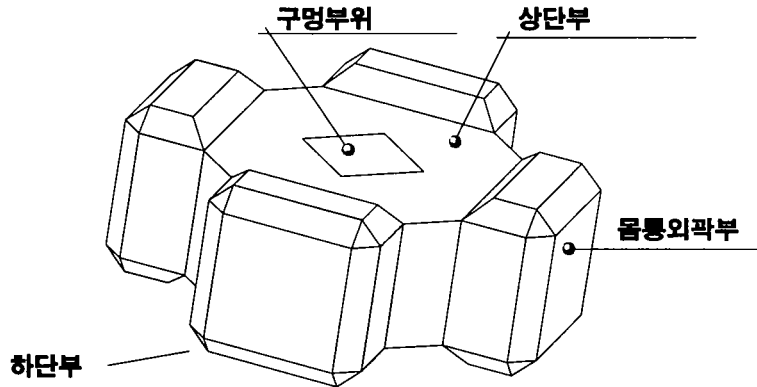
권 등은 수리실험결과를 통하여 테트라포드와 하프록의 중량비  $W/10 \sim W/3.3$ 의 범위에서 사면이 안정했음을 보였다. 제작을 위한 하프록의 크기는 수리적 안정성을 확보한 테트라포드와 하프록의 중량비 범위내에서  $W/8$ 에 해당하는 5ton급으로 정했다. 현장실험에서 사용된 40ton급의 테트라포드는 5톤급의 하프록에 대하여 비교적 큰 상재하중 조건이므로 이하의 상재조건에 대하여 안정성을 확보할 수 있기를 기대했다. 본 연구에서는 제작에서 거치까지의 공정을 확보함과 동시에 상재하중에 대한 구조적 안정성을 확인하였다.

## 1. 블록제작용 거푸집 설계 및 제작

블록의 제작을 위해서는 먼저 거푸집을 제작해야 한다. 본 연구에서는 먼저 <도 5.2.1>에 보이는 바와 같이 하단부, 몸통외곽부, 상단부, 구멍부위 등 4부분으로 분리하여 거푸집의 기본 설계를 시도했다. 몸통외곽부는 블록의 형상 자체가 외부각을 가지고 있어 각각의 몸통외곽부의 중심을 기준으로 4조각으로 구상했으며, 상부는 타설을 위하여 개구부를 4군데 두었다.

하단부는 거푸집의 다른 부위와 다르게 탈형을 하지 않고 위치를 고정하여 블록을 이탈시키는 방법이 타당할 것으로 판단되어 하단부를 1개의 판으로 설계하고, 수평을 유지하기 쉽도록 지지대를 설치하였다. 특히 중앙부에 구멍이 있으므로 탈형 등을 고려하였으며, 각 부위의 설계는 별도로 수행하였고 각각의 접합부위는 연결 및 조임을 편리하게 할

수 있는 경사판을 사용했다. 거푸집 제작용 철판의 두께는 하단부가 하중 5ton을 견딜 수 있으며, 거푸집 제작시 각 부위의 변형이 가능하면 적도록 4.5mm를 사용했다. 거푸집은 일부분을 용접해야 하므로 열에 의한 변형이 가능하면 적도록 기대하면서 두께를 결정했다. 현재 약 5ton규모의 테트라포드의 경우 두께 3.2mm를 사용하는 경우가 있다.



<도 5.2.1> 거푸집 부분도

## 2. 설계안

거푸집의 설계는 각 부위별로 독립적으로 실시했으며, 위에 상술한 바와 같이 각 부위의 연결부는 구멍과 핀으로써 처리했다. 설계안의 검토를 위한 하나의 방법으로 하프록의 체적을 재검토하여 거푸집 제작 후 타설된 콘크리트 물량과 비교하였다.

### 가. 하프록의 재검토

하프록의 형상 및 치수에 대한 검토와 거치 후의 공극률에 대해 재검토했다. 하프록에 대한 정량화는 블록 1개 당의 물량 및 중량을 정확히 산출하는 것과 거치시 실제투입량을 산출하기 위한 공극률이 기본적인 사항이다. 권 등(1999)은 이에 대한 검토를 수행했으나 본 연구에서는 이를 재검토하여 정확한 물량산출의 기초정보를 제공하고자 한다. 하프록의 형상 및 치수는 <도 5.2.2>와 같다. 체적  $V$ 는 장반경  $C$ 에 대하여 아래 식과 같다.

$$V=0.2016C^3$$

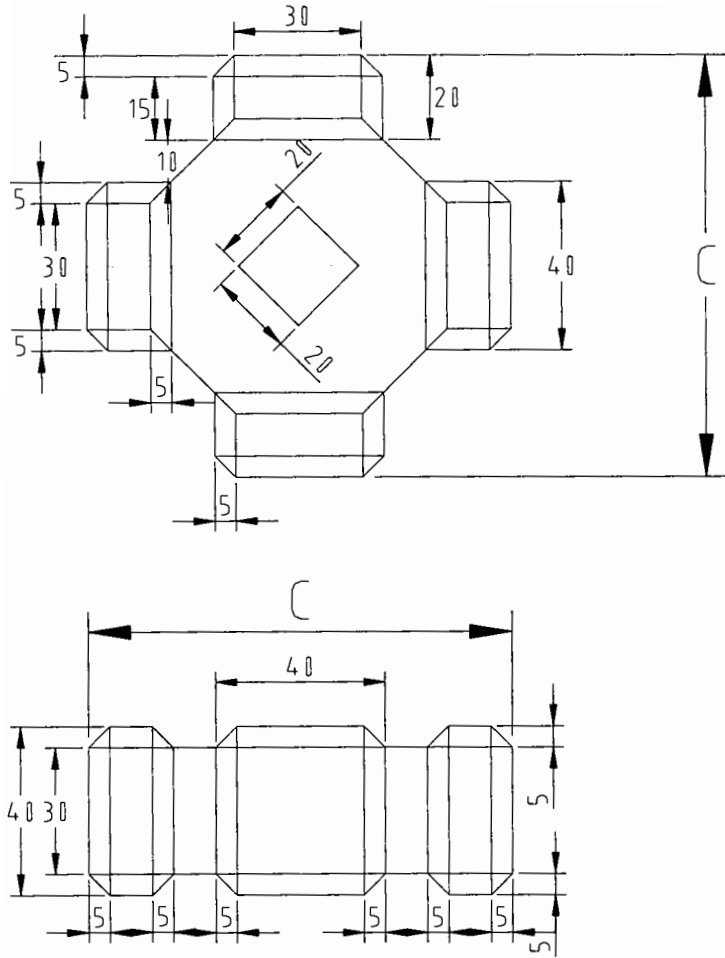
(5.2.1)

블록의 톤수는 체적에 콘크리트의 단위중량( $2.3\text{ton}/\text{m}^3$ )을 곱한다. 체적은 권 등(1999)이 검토한 체적보다 약간 적어졌다. 거치형상에 따른 공극률의 변화는 주어진 체적이나 면적에 대하여 피복갯수를 산출하는 중요한 사항이다. 본 연구에서는 권 등(1999)이 검토한 거치방법 Case I(가운데 네모 구멍이 마름모 형태가 되도록 설치), Case II(가운데 네모 구멍이 정사각형 형태가 되도록 설치), Case III(마름모와 정사각형의 중간이 되도록 비스듬히 설치)에 대하여 각각 공극률을 재검토하여 정량적 검증을 하고자 한다. Case I의 경우는 1) 크기가 같아도 가로와 세로 갯수가 같아야 공극률이 동일하고 2) 크기가 달라도 가로와 세로가 같으면 공극률이 동일하다. Case II의 경우는 크기가 같거나 달라도 가로×세로의 갯수가 동일하면 공극률은 동일하다. Case III의 경우는 1) 같은 크기의 하프록이라도 총갯수에 따라 공극률이 약간씩 다르고 2) 크기가 서로 달라도 가로×세로의 갯수가 동일하면 공극률은 동일하다. 본 연구에서는 각각의 경우에 대하여 최소의 공극률을 제시하였으며, 공극률은 Case I, Case II, Case III 각각 28%, 40%, 30%이다.

#### 나. 각 부위의 설계 및 제작

설계안을 위하여 <도 5.2.1>에서 보인 각 부위의 명칭을 하단부, 몸통외곽부, 상단부, 구멍부위에서 하부 거푸집, 측면 거푸집, 상부 거푸집, core부로 각각 변경했다. 설계안에서는 1) 2인이 거푸집 조립 및 탈형을 한다. 2) 공기의 단축을 위하여 상부 거푸집의 조립 및 탈형은 중장비를 사용하며 탈형시에는 core부와 상부 거푸집을 일체로 처리한다. 3) 사면에 거치할 때는 중장비를 이용하며 특히 걸기를 고려하여 거푸집을 설계해야 한다. 4) 전치 및 거치를 동시에 만족시킬 수 있는 걸기방법을 고안한다 등 4개의 사항에 대한 기술확보에 중점을 두었다. 거푸집 설계안은 현장에서 시험 조립 및 탈형을 한 후 문제점을 개선하였으며 각 부위의 접합부는 핀과 크래프를 1쌍으로 조립하도록 했다. 특히 핀은 테이퍼 형태로 설계하여 작업시 조임의 정도와 구멍과의 위치를 조절할 수 있도록 했다.





$$C = 100$$

<도 5.2.2> 하프록의 형상 및 치수

## 제3절 하프록의 구조해석

### 1. 서론

경사식 방파제 축조시 중간 피복재로 이용될 하프록의 구조적 안정성을 검토하기 위하여 유한요소해석을 실시하였다. 하프록은 그 내구연한동안 테트라포드로 인한 상재하중을 받으며 거치시에는 거치방법에 따라 각기 다른 구조적인 거동을 보인다. 이러한 피복블록의 구조응답을 Drucker-Prager의 항복기준을 사용하여 3차원 탄-소성해석을 실시하였다. 해석에 사용된 요소는 8-절점 육면체로서 총 4,000개의 절점과 3,000개의 요소가 사용되었다. 피복블록을 구성하는 주재료인 콘크리트는 28일 설계기준강도가  $210 \text{ kg/cm}^2$ 로서 해석에 사용된 탄성계수는  $217,370 \text{ kg/cm}^2$ 이며 프와송비는 0.18였다. 하프록이 받는 상재하중은 점하중으로 처리하였고 그 크기는 상재하중실험을 통하여 결정되었다.

본 연구에서는 하프록의 제작 후, 현장에서 1열로 야적할 경우 야적하중 및 거치방법에 따른 구조적 거동과, 피복블록의 현장설치 후 받게 될 상재하중에 대한 구조거동 등 하프록의 제작에서부터 사용수명 동안의 구조적 안전성을 검토하였다.

### 2. 상재하중 결정을 위한 실험

#### 가. 개요

하프록은 전사면 피복블록의 상재하중 하에 있으므로 피복블록의 중량에 의한 파괴여부를 검토해야 한다. 본 실험은 한 개의 하프록에 작용하는 상재 하중을 결정하여 하프록의 배근 및 응력에 대한 검토를 위한 수치모형실험 및 현장실험의 기초자료로 사용하기 위하여 실시됐다. 실험은 경사 1:1.5 그리고 테트라포드 2층 피복상태의 사면에 대한 법선 방향으로 하프록 1개에 작용하는 상재하중의 계측을 실시했다. 실험은 1종류의 하프록에 대하여 중량이 다른 3종류의 테트라포드를 상재하여 중량비 변화에 따른 상재하중의 변화에 대한 특성도 파악하고자 했다. 실험에 사용한 테트라포드 및 하프록의 조건은 아래와 같다.

<표 5.3.1> 상재하중 결정실험을 위한 하프록과 테트라포드의 중량조건

CASE	테트라포드				하프록			중량비 $W_T/W_H$
	대표길이, H (cm)	부피, $V_T$ (cm <sup>3</sup> )	중량, $W_T$ (g)	실험중량, $W_E$ (g)	장반경, C (cm)	부피, $V_H$ (cm <sup>3</sup> )	중량, $W_H$ (g)	
1	8.360	163.598	376.27	423(±2%)	5.4	31.745	73.01	5.15
2	9.197	217.819	500.985	482(±2%)	5.4	31.745	73.01	6.86
3	11.497	425.512	978.677	683(±2%)	5.4	31.745	73.01	13.39

\* 콘크리트의 공중단위중량 : 2.3ton/m<sup>3</sup>, 하프록의 체적 :  $V_H=0.2016*C^3$ ,  
테트라포드의 체적 :  $V_T=0.28*H^3$  으로 계산했다.

<표 5.3.1>에 보인 바와 같이 하프록은 장반경 C=5.4cm를 사용했다. 테트라포드는 대표길이 H=9.197cm 경우 외에 작은 중량과 큰 중량의 것을 각각 1개씩 총 3가지 종류를 사용했다. 그러나, 대표길이 H=9.197cm의 중량은 원래의 체적에 대하여 500.985g이지만 약간 중량이 부족하여 같은 체적의 테트라포드에 대하여 실험중량을 482g으로 정하여 중량이 ±2%내의 블록을 선별하여 실험을 실시했다. 다른 종류의 경우도 동일하게 실험중량을 임의로 결정하여 중량을 선별하여 실험을 실시했다. 단, 분석시 테트라포드 모형의 체적은 기준에 부합하므로 상재하중을 갯수로 환산하여 판단하고자 했다.

현장에서는 테트라포드와 하프록의 실중량비가 36.80ton(공칭중량 40ton)/4.9ton(공칭중량5ton)으로써 약 7.51의 값을 가진다. 이는 상재하중 조건으로써의 40ton급 테트라포드가 약 8배가 되어 <표 5.3.1>에 보인 실험 Case중 Case 2의 중량비가 가장 현장의 조건과 유사하다.

#### 나. 상재하중측정을 위한 모형실험

하프록에 작용하는 상재하중을 정량적으로 측정하기 위하여 실험은 1:1.5사면을 합판으로 설치하고 사전에 하프록의 거치를 실시하여 상재하중을 측정할 한 개의 하프록을 지정했다. 거치방법은 권 등(1999)이 보인 바와 같이 비스듬한 경우를 대상으로 했다. 지정된 하프록의 형상을 거치된 형상대로 구멍을 뚫어 중력계와 연결하였다. <사진 5.3.1>에 보이는 바와 같이 구멍의 크기는 하프록보다 약간 크게 하여 하중을 측정할 때 측면의 접촉으로 인한 하중저하의 영향을 받지 않도록 했다. <사진 5.3.2>는 합판으로 만들어진 고정사면에 대하여 전자저울이 나란히 설치되어 있고 하중전달자인 연결봉은 사면에 대

하여 법선방향으로 설치되어 있음을 보이고 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 측정하고자 하는 블록에 연결봉을 고정시키고 이를 통하여 저울에 하중이 전달되도록 했다.

측정은 <사진 5.3.1>에 보이는 상단측에 노출되어 있는 하프록 부분을 테트라포드로 2층 피복한 후 모든 측정을 실시했다. 테트라포드는 난적 형식으로 사면전체를 피복한 후 중량을 측정하고 이러한 방법을 반복하면서 총 30회 실시하였다. 하프록은 실제의 현장조건을 모의하기 위하여 정지한 거치상태가 아니라 약간 흠어짐이 보이도록 했다.

<표 5.3.2>는 테트라포드의 2층 난적 상태에 대하여 하프록 1개가 지지하고 있는 하중을 측정한 결과이다. Case2의 경우 블록 1개에 상당하는 하중 이하가 전체 20회 중 16회에 달했다. 16회 중의 경우가 최대하중으로 1.127개 분에 해당한다. 평균값은 산술평균에 의한 것이다. 평균값의 타당성을 조사하기 위하여 가상적인 단면을 대상으로 추정값과 비교를 했다. 단면에 대한 하프록에 테트라포드 2층시 전체하중을 하나의 하프록에 재하되는 중량으로 산출했다. 하프록의 공극율은 31%로 했다.

#### 다. 상재하중의 산술평균

상재하중의 측정값에 대한 분석을 위하여 산술평균값을 통하여 경향을 비교하였다. <표 5.3.2>에 보인 바와 같이 실험에서 중량비는 Case 1, 2, 3이 각각 5.15, 6.86, 13.39이다. 본 산술평균값의 산출에 있어서도 가능한 유사한 중량비를 가정하여 검토를 했다. 중량비의 산술평균값의 산출을 위하여 실제로 제작되고 있는 중량급을 대상으로 했으며 테트라포드와 하프록의 비는 각각 5.81, 7.45, 11.92이다. <표 5.3.3>은 재하하중의 평균값을 산출하기 위한 계산 조건을 보인 것이다.

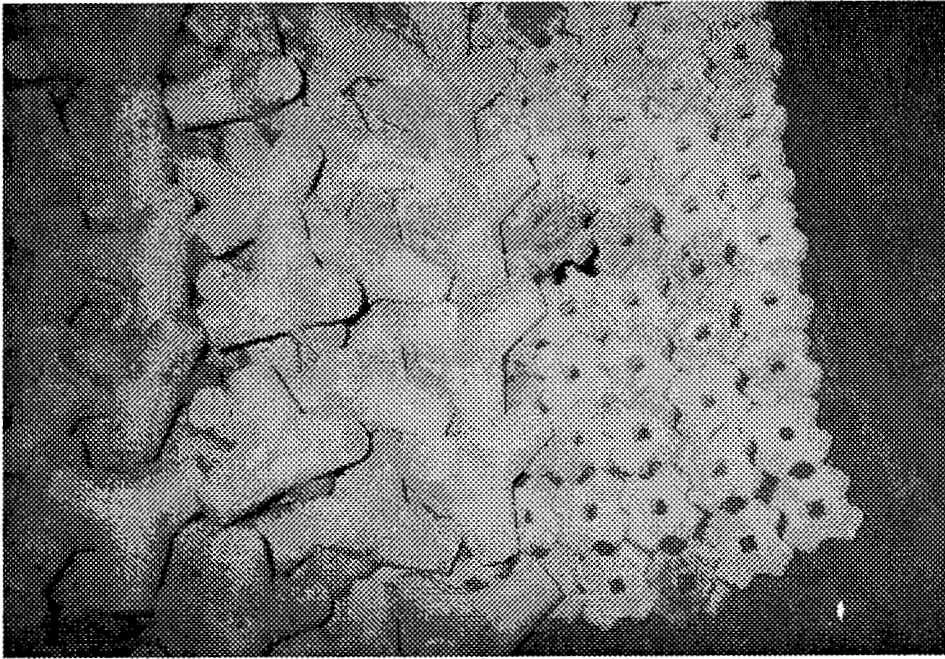
각 Case에 대하여 주어진 면적에 대한 총피복체적으로 구하여 테트라포드의 공극율 50%를 사용하여 총중량을 계산했다. 총중량은 주어진 체적의 각 하프록에 재하하게 되어 한 개당 평균적으로 분담해야할 개당 상재하중을 구할 수 있다. 이때, 개당 상재하중을 각각의 테트라포드 한 개의 실중량으로 나누면 개당환산갯수를 구할 수 있다. 개당 환산갯수는 결국 2층 피복 상태의 테트라포드에 대하여 하프록 한 개가 테트라포드의 몇 개에 해당하는 중량을 부담해야하는 가를 의미한다. <표 5.3.3>에 보인 바와 같이 상재하중의 산술평균에서도 실험과 동일하게 테트라포드의 개당 중량이 커지면 환산갯수가 적어짐을 알 수 있다. 산술평균에 의한 개당환산갯수의 각 Case별 비는 각각의 테트라포드의 갯수비와 거의 일치한다. 이는 테트라포드의 중량이 커지면 커질수록 하중을 전달하는 다

리의 갯수가 줄어들어 하프록 한 개에 상재할 수 있는 기회가 적어지기 때문이다.

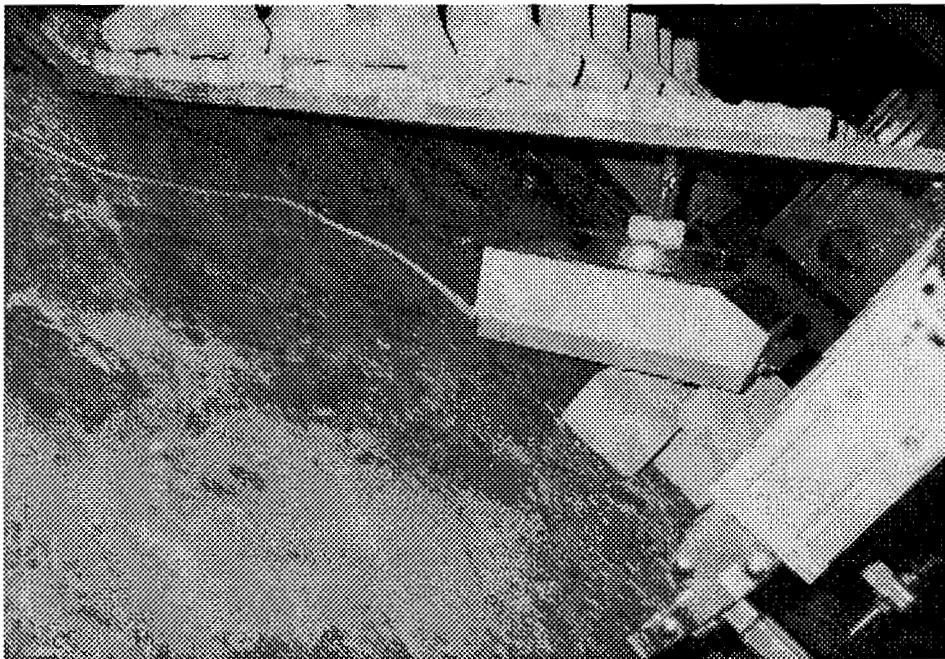
<표 5.3.2>와 <표 5.3.3>을 비교해 보면 중량비가 커지면 커질수록 개당환산갯수의 차이가 작아지는 것을 알 수 있다. 다시 말하면 중량비가 커질수록 실제 상재하중이 산술평균값과 비슷해짐을 알 수 있다. 실험값은 확실적인 의미를 갖으나 산술평균값은 동등한 정도의 중량을 분담한다는 점에서 두 값이 차이가 있다. 중량비가 작아질수록 실험에 의한 상재하중이 산술평균보다 큰 값을 보이는 것은 계측한 위치에서 상부에 거치된 테트라포드의 중량이 영향을 주고 있다고 추측된다. 중량이 작은 경우는 주어진 사면에 대하여 피복갯수가 많으므로 사면에 대한 법선방향의 중량에 갯수로 환산한 경우 더 많은 하중이 영향을 준다고 할 수 있다. 본 연구에서는 이를 명백히 밝히지는 못했으나 추후 이를 밝히고자 한다. 산술평균의 경우는 사면의 효과가 없는 경우이므로 사면효과에 의한 차이를 보이지 않고 일정하게 피복갯수의 효과만 보이고 있다.

#### 라. 실험분석

상재하중결정을 위한 모형실험에서 Case2의 경우가 현장조건과 유사함으로 Case2의 실험결과를 이용하여 한 개의 피복블록이 받는 상재하중을 확률곡선을 이용하여 나타내었다. <도 5.3.1>은 상재하중비(측정무게/ $W_E$ )에 관한 Normal probability 를 도시한 것이다. 그림에서 높은 상관계수가 나타내듯이 한 개의 피복블록이 받는 상재하중은, 상재하중비로 표현할 때, 평균이 0.768 표준편차가 0.19인 정규분포곡선을 따른다. <도 5.3.2>는 상재하중비 정규분포곡선을 도시하였다.



<사진 5.3.1> 상재하중 추정을 위한 단면 및 계측장치의 거치



<사진 5.3.2> 상재하중 추정을 위한 실험

<표 5.3.2> 하프록 1개당 재하된 환산중량

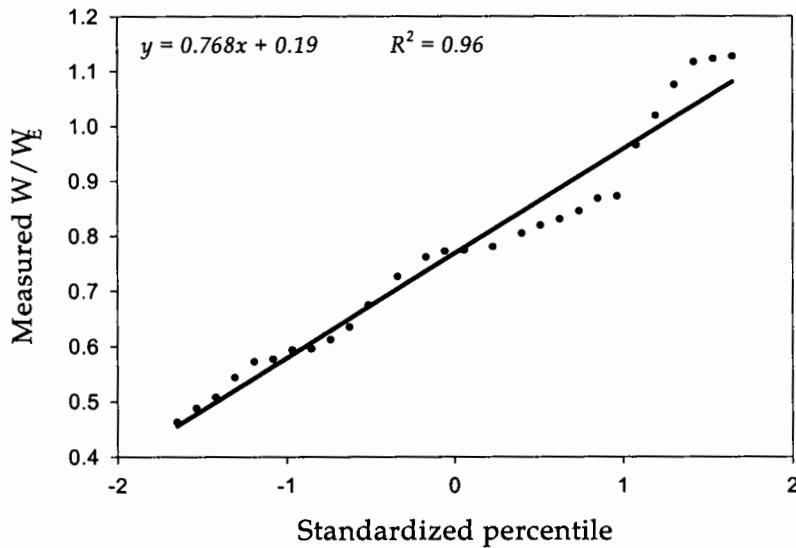
측정횟수 (회)	환산갯수중량, (측정무게/W <sub>E</sub> )		
	Case1	Case2	Case3
1	0.721	1.075	0.278
2	0.454	0.772	0.190
3	0.319	0.488	0.220
4	0.371	0.612	0.205
5	0.654	1.12	0.171
6	0.567	0.595	0.653
7	0.759	0.965	0.366
8	1.076	0.774	0.382
9	0.761	0.867	0.225
10	1.322	0.780	0.555
11	1.265	0.577	0.176
12	1.437	0.573	0.398
13	1.130	0.830	0.641
14	1.272	0.780	0.225
15	0.764	0.726	0.397
16	1.066	1.127	0.382
17	1.215	1.019	0.258
18	1.407	0.871	0.338
19	1.262	0.820	0.202
20	0.835	0.761	0.220
21	0.688	0.508	0.372
22	1.541	0.544	0.290
23	1.213	0.726	0.250
24	1.442	0.593	0.330
25	0.756	0.463	0.242
26	0.804	1.122	0.312
27	1.064	0.674	0.338
28	1.184	0.635	0.410
29	0.939	0.844	0.452
30	0.913	0.805	0.296
평균값	0.970	0.768	0.326

\* 테트라포드 1개의 무게를 실험중량으로 간주했다.

<표 5.3.3> 상재하중의 산술평균값 계산 예

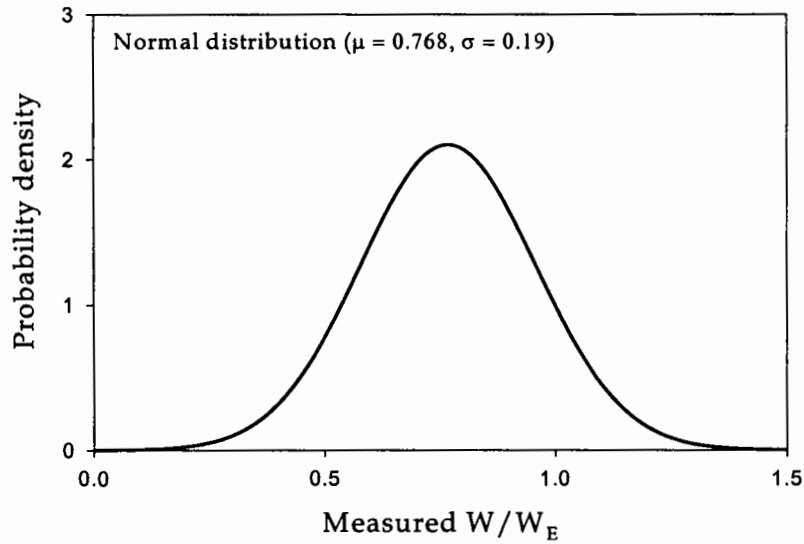
CASE	테트라포드						하프록							
	공칭 중량	실 중량	높이, h	총피복 체적, Vtt	총중 량, Wtt	갯 수	공칭 중량	실중 량	높이, hh	총피복 체적, Vth	총중 량, Wth	갯 수	개당 상재 하중	개당 환산 갯수, Wp
	ton	ton	m	m <sup>3</sup>	ton	개	ton	ton	m	m <sup>3</sup>	ton	개	ton	
1	32	28.75	3.55	17066	19626	683	5	4.94	0.88	3173	5254	1051	18.68	0.65
2	40	36.8	3.86	18557	21340	580	5	4.94	0.88	3173	5254	1051	20.30	0.55
3	64	58.88	4.505	21657	24905	423	5	4.94	0.88	3173	5254	1051	23.70	0.40

\* 사면조건 : 길이 100m, 제체높이 10m, 경사 1:1.5, 2층 피복의 조건으로부터 피복 면적은 3605.55m<sup>2</sup>이다. 사면의 피복두께는 (4/3)h로 하여 Vtt를 계산했다.



<도 5.3.1> Normal probability plot





<도 5.3.2> 상재하중비 정규분포곡선

상재하중에 대한 피복블록의 구조해석에 있어서 상재하중의 크기는 <도 5.3.2>의 정규분포를 이용하여 누적확률분포의 50%, 90%, 99%에 해당하는 상재하중을 사용하였다. 이는 상재하중이 예측한 하중을 넘어설 확률이 각각 50%, 10%, 1%에 해당된다고 볼 수 있다. <표 5.3.4>는 누적확률에 따른 상재하중의 크기를 나타낸다.

<표 5.3.4> 누적확률에 따른 상재하중의 크기

누적확률	P[50%]	P[90%]	P[99%]
상재하중비	0.768	1.006	1.200
Pz*	28.3 ton	37.0 ton	44.2 ton
Px or y	18.9 ton	24.7 ton	29.5 ton

\* 사면에 법선방향으로 작용하는 상재하중

### 3. 구조해석 결과

#### 가. 상재하중에 대한 구조응답

상재하중으로 인한 하프록의 구조해석은 피복블록 4개의 다리 저면을 구속시킨 경우와 3개의 다리 저면을 구속시킨 경우로 나누어 해석하였다. 후자의 경우는 피복블록의 cantilever 거동을 고려한 경우에 해당된다. <도 5.3.3>과 <도 5.3.4>는 유한요소 모델 및 구속조건을 보여주며, 유한요소해석의 결과는 다음과 같다.

피복블록 4개의 다리 저면을 구속시킨 경우, 응력비가 1보다 작은 경우는 피복블록이 탄성거동을 한다고 볼 수 있으므로, 하중이 재하된 일부분을 제외하면 피복블록은 상재하중 하에서 탄성거동을 한다고 볼 수 있다. 그러나 하중이 재하된 부분에 있어서는 콘크리트가 비선형 거동을 보이므로, 유효탄성변형률(effective elastic strain)과 유효 소성변형률(effective plastic strain)의 합을 구하여 총유효변형률(total effective strain)을 구해보았다. 일축압축에서 콘크리트의 파괴시 변형률을 0.003이라고 가정할 때, 피복블록의 총유효변형률이 파괴시 변형률보다 작으므로 피복블록은 모든 상재하중 하에서 안전하다고 예측할 수 있다. <표 5.3.5>는 각 상재하중에 따른 최대 응력비 및 최대 총유효변형률을 나타낸다.

<표 5.3.5> 최대응력비 및 최대총유효변형률 (4개의 다리 저면을 구속시킨 경우)

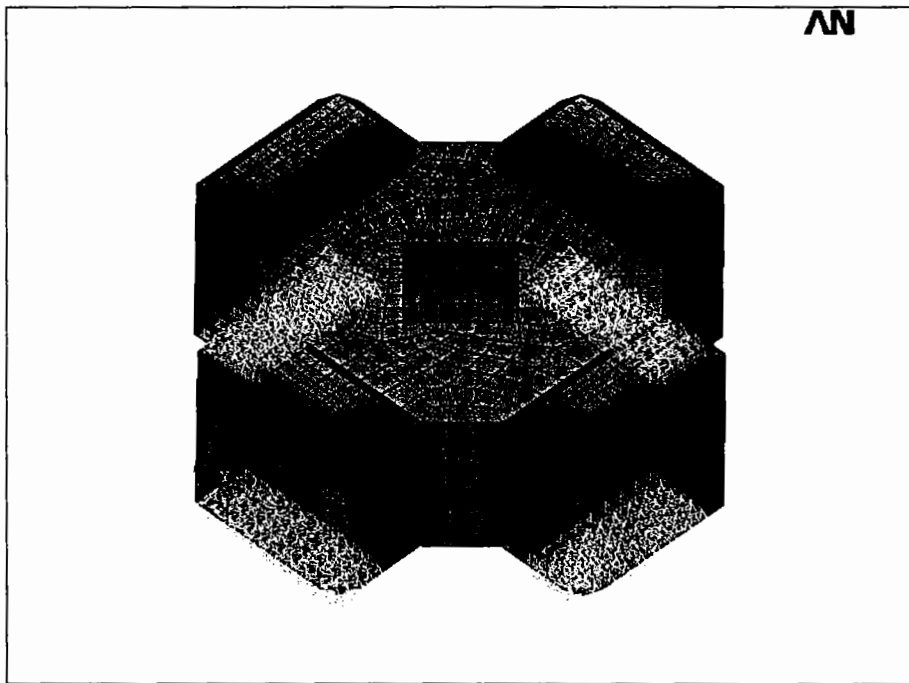
누적확률	P[50%]	P[90%]	P[99%]
최대응력비	1.27	2.06	2.46
최대총유효변형률	0.0008	0.0018	0.0022

피복블록 3개의 다리 저면을 구속시킨 경우, 누적확률 50%에 해당하는 상재하중이 작용할 경우에는 하중이 재하된 일부분을 제외하고 탄성거동을 보이나, 누적확률 90%, 99%의 상재하중이 작용할 경우에는 피복블록 전체가 비선형 거동을 보인다. 누적확률 50% 및 90%의 상재하중이 작용할 경우 작용하중 주위의 총유효변형률이 일축압축에서 콘크리트의 파괴시 변형률을 초과하고 있으므로 국부적인 파괴가 예상된다. 누적확률 99%의 상재하중 작용 시에는 피복블록전체의 총유효변형률이 파괴시 압축변형률을 초과

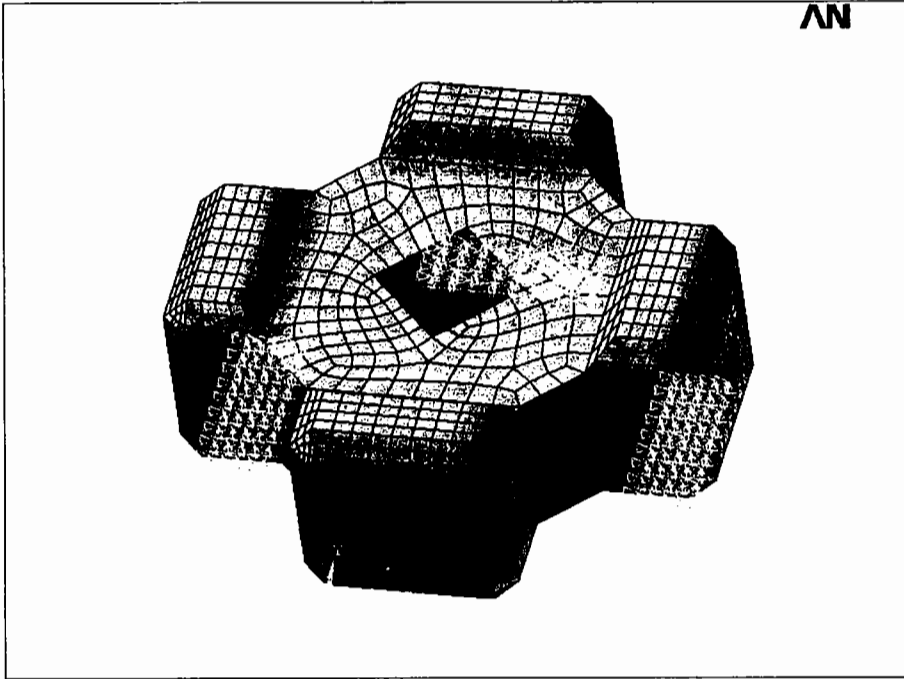
하므로 전반적인 블록파괴가 예상된다. <표 5.3.6>은 각 상재하중에 따른 최대응력비 및 최대총유효변형율을 나타낸다.

<표 5.3.6> 최대응력비 및 최대총유효변형율 (3개의 다리 저면을 구속시킨 경우)

누적확률	P[50%]	P[90%]	P[99%]
최대응력비	6.5	29.2	37.3
최대총유효변형율	0.0036	0.0073	0.0139



<도 5.3.3> 하프록의 유한요소 모델 및 구속조건



<도 5.3.4> 하프록의 유한요소 모델 및 구속조건(cantilever action)

나. 적재하중에 대한 구조응답

하프록을 2단 적재에서 5단까지 적재시의 응력비와 총유효변형율을 수치해석으로 구해보면 <표 5.3.7>과 같다. 응력비가 1보다 적으므로 피복블록은 탄성거동을 한다고 말할 수 있다.

<표 5.3.7> 적재형태에 따른 최대응력비 및 최대총유효변형율

적재형태	2단적재	3단적재	4단적재	5단적재
최대응력비	0.0056	0.0086	0.0115	0.0147
최대총유효변형율	0.00018	0.00026	0.00034	0.00043

## 제4절 하프록의 비파괴 특성

### 1. 시험의 배경

일반적으로 구조물의 안전진단은 육안진단과 정밀진단으로 나눈다. 본 연구에서는 일반적인 경우와 같이 먼저 육안진단으로 외관검사를 통하여 콘크리트 블록의 외부균열상태 및 손상도를 평가한 후, 정밀진단으로 콘크리트 블록에 대하여 비파괴검사를 수행하였다. 즉, 반발경도시험, 초음파시험, 콘크리트 압축강도시험을 실시하고 반발경도 시험과 초음파 시험을 사용한 조합법으로 추정압축강도를 산출하여 하프록의 안정성 및 사용성을 평가하였다.

하프록의 보강공법으로써 강섬유를 콘크리트에 혼입하는 방법을 사용하였다. 유럽에서는 콘크리트에 대한 강섬유의 혼입량을  $30\text{kg/m}^3 \sim 60\text{kg/m}^3$  정도로 사용하는 예가 많다. 본 연구에서도 하프록의 제작시  $30\text{kg/m}^3$ 와  $60\text{kg/m}^3$ 의 2가지 종류를 제작하였으며, 특히 현장타설 직전 및 현장타설 시 강섬유의 뭉침현상이 발생하지 않음을 확인했다. 다만, 무근콘크리트와 같은 Flowing Test 결과를 가져오기 위해 미량의 유동화제를 혼입하여  $30\text{kg/m}^3$ ,  $60\text{kg/m}^3$ 의 강섬유를 배합하여 하프록을 보강하였다.

### 2. 시험의 범위 및 내용

본 시험은 균열을 확인할 수 있는 계측방법의 검증에 위한 시험과 현장에서 균열을 판단하는 시험 등 2가지로 분류된다. 균열확인을 위한 계측방법을 검증하기 위하여 먼저 pilot 콘크리트 및 강섬유콘크리트 블록을 전부  $100\text{cm} \times 40\text{cm} \times 60\text{cm}$  로 각각의 블록에 균열을 설치하여 제작하였다. 이때, 균열을 설치하기 위하여 타설전 얇은 통판을 거푸집 내에 거치하여 타설 후 굳기 전에 제거했다. 계측방법은 응력파 및 초음파검사 등 2가지를 사용하여 균열의 정확한 위치 및 크기를 판별하여 서로 다른 방법에 의한 결과를 비교할 수 있도록 했다. 현장에서 균열을 판단하기 위해서 무근, 철근보강,  $30\text{kg/m}^3$  및  $60\text{kg/m}^3$  혼입의 강섬유 보강 등 총 4개의 종류로 제작된 5톤급 하프록에 대하여 40톤급 테트라포드를 상재하였다. 구체적 방법은 균열이 발생할 가능성이 있는 위치를 선정하여 상재 전후 동일한 위치에 비파괴 시험을 실시한다. 본 시험에서는 파괴여부에 대하여 육

안조사를 기본으로 하고 초음파 시험기에 의한 속도차로 균열 및 내부 파손의 여부를 판단한다.

### 3. 콘크리트 비파괴 시험

#### 가. 개요 및 시험방법

##### (1) 반발경도시험

이 검사법은 콘크리트 표면의 반발경도를 측정하여, 이 측정치로부터 콘크리트의 압축강도를 측정하는 검사방법이다. 반발경도를 구하는 방법으로는 슈미트 해머(Schmidt Hammer)법이 가장 널리 사용된다. 슈미트 해머로 경화된 콘크리트 표면을 타격시, 반발도(R)와 콘크리트의 압축강도( $F'c$ )와의 사이에 특정 상관관계가 있다는 실험적 경험을 기초로 한다. 타격시 해머내의 중추의 반동량을 반발도로 표시하며, 이 반발도의 크기에 따라 콘크리트의 압축강도를 추정한다. 콘크리트와 같은 불균질한 재료는 슈미트 해머로 표면에서 국부적 타격을 하는 경우에 반발도는 타격면에 존재하는 골재의 유무, 표면요철, 먼지, 습윤상태 등에 따라 차이가 난다. 그러나 간편하고 신속한 강도의 추정과 구조물 전체에 대한 강도 측정이 가능하며 국제적으로 표준화된 이점이 있다.

##### (2) 초음파탐사시험

초음파법은 초음파(콘크리트의 경우 보통 주파수가 50~100kHz 정도의 초음파 이용)의 투과속도가 콘크리트의 밀도 및 탄성계수에 따라서 변화하는 것을 이용하며, 이 투과속도로부터 콘크리트의 동적특성, 강도, 균열상태 등을 추정하는 방법이다. 그러나 강도 추정의 정확도는 높지 않으며, 일반적으로 콘크리트의 강도 및 품질비교 또는 균열깊이를 판정하는 수단으로서 이 방법을 사용하고 있다. 강도 추정에 적용할 경우에는 이 방법을 단독적으로 사용하지 않고 반발경도법과 초음파법의 조합식을 이용하는 것이 바람직하다.

<표 5.4.1> 초음파 속도에 대한 콘크리트 품질 분석 기준

초음파 속도(km/sec)	판 정
4.5 이상	EXCELLENT(매우 양호)
3.5~4.5	GOOD(양호)
3.0~3.5	DOUBTFUL(보통)
2.0~3.0	POOR(불량)
2.0 이하	VERY POOR(매우 불량)

나. 사용장비 및 실험도구

본 시험에 사용된 장비 및 시험도구는 다음과 같다.

<표 5.4.2> 사용장비 및 시험도구

사용장비	모델명	사용목적	제조회사	비고
테트라포드	40 ton	하중재하	-	현장타설
크레인	100 ton	하중재하	-	
T.T.P 받침	4 set	경제성 단면	-	현장타설
pilot con'c	6 set	-		
반발경도시험기	NR Type	콘크리트 강도측정	PROCEQ-Swiss	
초음파 시험기	PUNDIT	초음파속도 측정	Electronics C.N.S	
응력과 시험기	Dynamic Signal Analyzer	응력과 전파속도측정	Hewlett Packard	
철근탐사기	Ferrosan	철근탐사	HILTI	
철근탐사기	R/C RADAR (JET 60 B)	철근탐사	JRC 일본무선주식회사	
줄자	5M	제원측정	Komeron	
균열폭현미경	PSM20	균열폭 측정	PIKA SEIKO	
카메라	PUZZY ZOOM 1050	현장조사 사진	삼성	

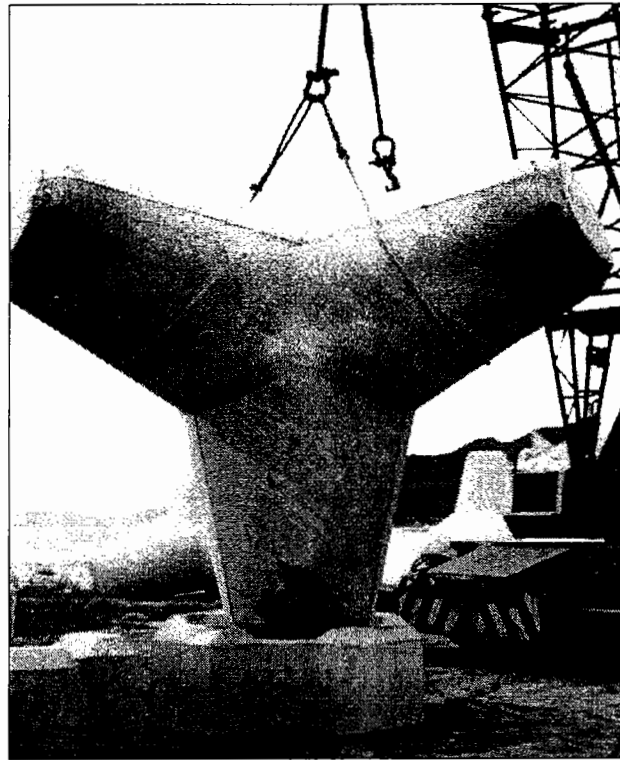
다. 현장조건에 의한 하중 재하 전·후의 비파괴 검사

(1) 시험계획 및 방법

앞서 기술한 시험결과로 콘크리트 블록의 결함을 찾고 균열의 위치와 파괴형상을 예

측하는 기법으로는 Pundit를 이용한 초음파검사가 현장에서 적정한 것으로 판단되었기에 이 시험에서는 Pundit에 의한 초음파의 속도 차이로 T.T.P 재하 전·후의 하프록의 상태 변화를 판단하려 한다.

시험은 실제 제작된 무근 하프록, 철근 하프록, 30kg/m<sup>3</sup> 및 60kg/m<sup>3</sup> 강섬유보강 하프록을 각각 1개씩 총 4종류에 대하여 수행되었다. 먼저 콘크리트 블록 표면 위에 측정위치를 표시하고 T.T.P를 재하하기 전에 그 위치들의 초음파검사를 통하여 콘크리트 블록의 상태를 진단한다. 그 다음에는 T.T.P를 콘크리트 블록에 재하한 후 내려놓고 표시된 콘크리트 블록의 위치를 재측정하여 T.T.P재하 전·후의 콘크리트 블록의 상태변화를 비교·분석한다. (<사진 5.4.1> 참조)



<사진 5.4.1> 하프록위에 T.T.P의 재하시험

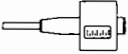

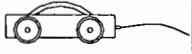
#### ① 비파괴 시험 종류 및 빈도

시험은 실제 제작된 무근 하프록, 철근 하프록, 30kg/m<sup>3</sup> 및 60kg/m<sup>3</sup> 강섬유보강 하프록에 대하여 표면강도를 비교하기 위한 반발경도 시험과, 속도차에 의한 상태변화를 판단하



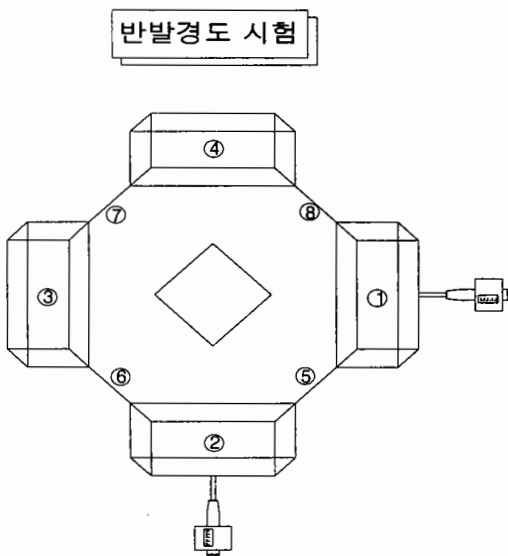
기 위해 초음파 시험을 T.T.P 재하 전후에 실시하였으며, 철근콘크리트의 경우 배근상태를 파악하기 위해 Ferroskan과 R/C Radar를 이용해 철근탐사를 수행하였다.

<표 5.4.3> 비파괴 시험 종류 및 빈도

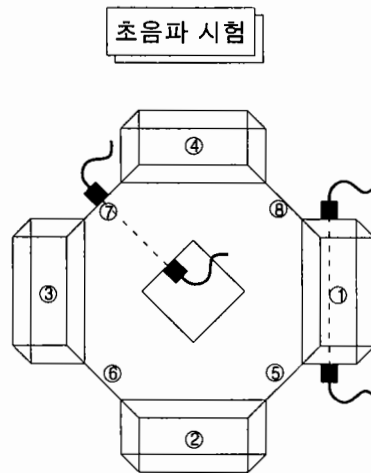
시험위치		반발경도 시험	초음파 강도시험 (직접법)	철근탐사 시험	비고
시험종류					
콘크리트 블록	NO.1(무근)	6	48	-	
	NO.2(철근)	6	48	8	
	NO.3(강30)	6	48	-	
	NO.4(강60)	6	48	-	
	합계	24	192	8	
시험 총갯수 : 220개소					

② 콘크리트 블록 비파괴 시험위치

<도 5.4.1>과 <도 5.4.2>는 각각 콘크리트 블록의 반발경도시험과 초음파시험을 나타낸다.



<도 5.4.1> 반발경도 시험 위치



<도 5.4.2> 초음파 시험 위치

(2) 비파괴 시험 결과

① 반발경도법에 의한 압축강도 추정

본시험을 수행한 콘크리트 블록 재령계수를 타설일자별로 고려하여 반발경도에 의한 추정 압축강도를 T.T.P 재하 전후로 구분하여 아래에 정리하였다.

<표 5.4.4> 반발경도법에 의한 압축강도 추정

구 분	시 험 위 치		추정압축강도(kg/cm <sup>2</sup> )	
			재하전	재하후
콘크리트 블록	NR-1	강섬유30①	183.67	192.43
	NR-2	강섬유30②	180.79	176.96
	NR-3	강섬유30③	182.27	186.00
	NR-4	강섬유60①	216.21	216.21
	NR-5	강섬유60②	196.39	199.47
	NR-6	강섬유60③	193.75	196.39
	NR-7	무근①	188.90	189.07
	NR-8	무근②	188.05	186.76
	NR-9	무근③	191.05	192.76
	NR-10	철근①	215.48	205.32
	NR-11	철근②	218.17	221.28
	NR-12	철근③	226.90	228.08
평 균			198.46 kg/cm <sup>2</sup>	199.22 kg/cm <sup>2</sup>

T.T.P 재하 전후의 콘크리트 표면반발경도를 비교해 본 결과 별다른 차이는 없는 것으로 나타났다.

② 초음파에 의한 재하전후의 속도차

초음파속도법에 의한 비파괴 시험은 직접법을 사용하였으며 재하 전·후의 속도차이를 비교하였다.

<표 5.4.5> 초음파 속도

Block의 종류 시험 위치		강섬유30		강섬유60		철근		무근	
		재하전	재하후	재하전	재하후	재하전	재하후	재하전	재하후
①	1	3.8	3.8	3.8	3.8	3.9	3.9	3.8	3.8
	2	3.8	3.8	3.9	3.9	3.9	3.9	3.8	3.8
	3	3.9	3.9	4.0	4.0	4.0	3.9	3.9	3.9
②	1	3.6	3.7	3.7	3.7	3.9	4.0	3.8	3.8
	2	3.7	3.8	3.8	3.8	4.0	4.0	3.8	3.8
	3	3.8	3.9	3.8	3.8	4.1	4.0	3.9	3.9
③	1	3.6	3.6	3.8	3.8	3.9	3.9	3.8	3.8
	2	3.7	3.7	3.8	3.8	3.9	3.9	3.8	3.9
	3	3.8	3.8	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9
④	1	3.7	3.7	3.9	3.9	3.9	3.7	3.8	3.8
	2	3.7	3.7	3.9	3.9	3.9	3.9	3.8	3.8
	3	3.8	3.8	4.0	4.0	4.0	3.7	3.8	3.8
⑤	1	3.7	3.7	3.6	3.6	3.9	3.9	3.7	3.7
	2	3.8	3.8	3.8	3.8	3.9	3.9	3.7	3.6
	3	4.0	4.0	3.9	3.9	3.9	4.0	3.6	3.5
⑥	1	3.6	3.6	3.7	3.7	3.7	3.7	3.5	3.5
	2	3.7	3.7	3.8	3.7	3.8	3.8	3.7	3.7
	3	3.9	3.9	3.8	3.8	3.8	3.9	3.7	3.7
⑦	1	3.6	3.6	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7
	2	3.7	3.7	3.8	3.8	3.8	3.8	3.7	3.7
	3	3.8	3.8	3.9	3.9	3.8	3.9	3.7	3.7
⑧	1	3.8	3.8	3.8	3.8	3.9	3.9	3.5	3.6
	2	3.8	3.7	3.9	3.9	3.9	3.9	3.6	3.6
	3	3.8	3.8	4.0	4.0	4.0	4.0	3.7	3.7

시험 결과 재하 전·후의 초음파 속도차이는 시험자의 실험오차를 제외하면 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 이는 재하 후에 균열이나 기타 손상이 발생하지 않았음을 나타내고 있다.

## 제5절 시공실험

### 1. 개요

중간 피복블록의 제작에서 거치까지 전공정 사이에서 현장 거치는 최종적인 단계로서 사면상에 하프록과 테트라포드가 기존의 장비 및 경험으로 거치 시공이 가능한지 여부를 판단하고자 실시됐다. 특별한 공정이 필요한 경우에는 별도의 장비 및 인력의 훈련 등으로 인하여 공사비의 증가를 초래할 수 있다. 본 시공실험에서는 기존의 장비를 사용하여 작업자가 지금까지의 경험으로만 본 공정을 확보할 수 있을지에 대한 기대를 가지고 실시됐다.

현장거치실험은 경상북도 울진군 원남면 오산리에 소재한 제1종 어항인 오산항에서 실시됐다. 오산항의 평면도는 <도 5.5.1>에 보이는 바와 같으며 현장실험을 실시한 위치는 북방파제의 금회시공(2000년도) 구간인 63.0m의 먼바다쪽 방향의 일부구간에서 실시됐으며 원으로 표시한 곳이다. 대상단면은 <도 5.5.2>에 보이는 바와 같으며 거치는 단면의 항 내측 후사면에서 실시됐다. 후사면은 수심 약 9m, 사면경사 1:1.5, 자연석 1m<sup>3</sup>급이 2.0m 두께로 피복된 상태이다.

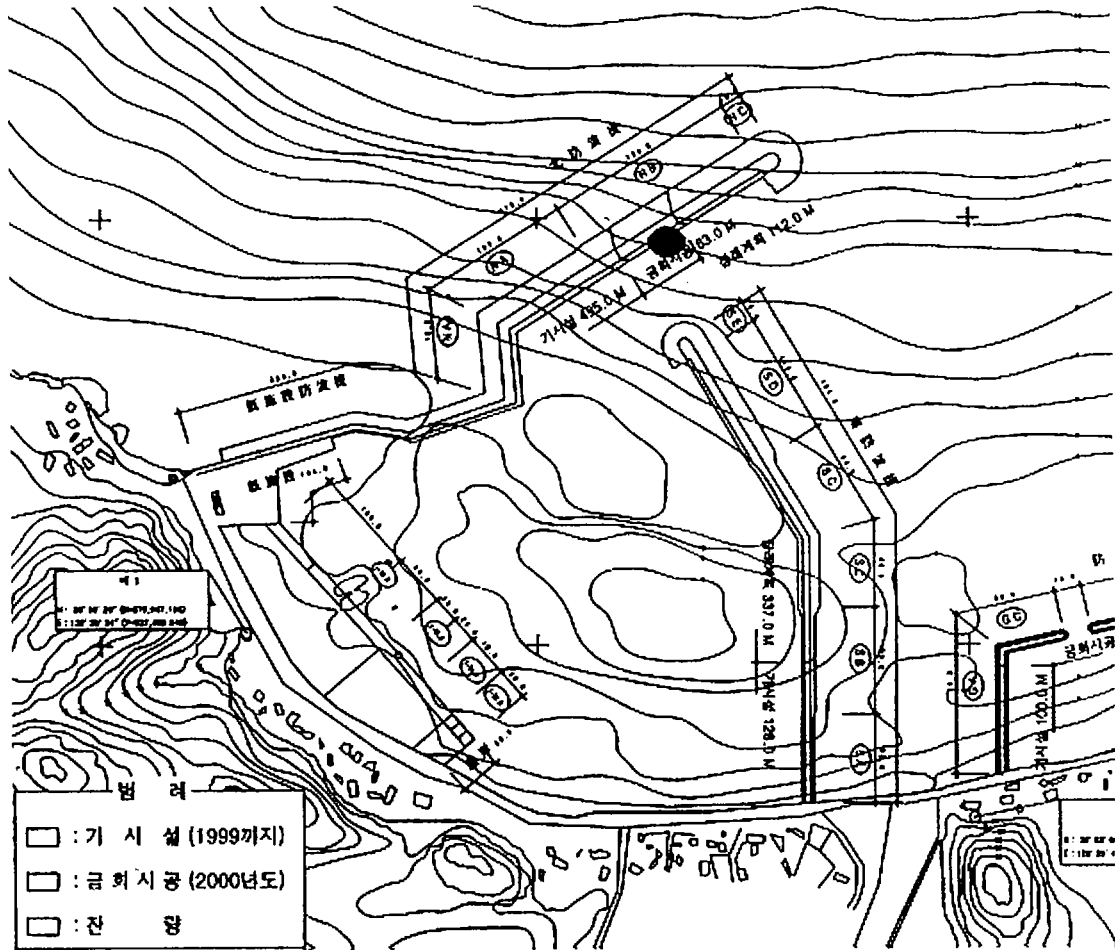
### 2. 방법 및 장비

거치방법은 정형과 비스듬한 거치방법 중 거치를 실시할 작업자들의 의견을 청취한 후 어려운 방법이라고 판단되는 정형을 선택했다. 현장의 거치공정은 작업자들에게 별도의 지시사항 없이 작업자들의 습관과 경험에만 의존하여 수행되었다. 본 시공실험에서는 하프록의 거치후 상태, 거치시간, 테트라포드 설치 후 사면모양 등을 주로 관찰했다. 상부거치 블록인 테트라포드는 1층 피복만 하여 사면의 상태를 관찰했다. 하프록의 거치는 사용할 테트라포드의 개수를 최소한으로 하며 거치시 상부방향으로 맞물려 올라가 미끌림이 없도록 <도 5.5.3> 거치 계획도에 보이는 바와 같이 삼각형 형태로 계획했다. <도 5.5.3>에 보인 바와 같이 본 거치에는 하프록 총42개, 테트라포드 총 10개가 각각 소요된다.

시공실험은 야적지로부터 블록을 부선에 적재할 수 있는 위치까지 운반하고 이를 부선에 선적하여 사면에 거치하고 상부에 테트라포드를 거치하는 순서로 진행되었다. 사용된

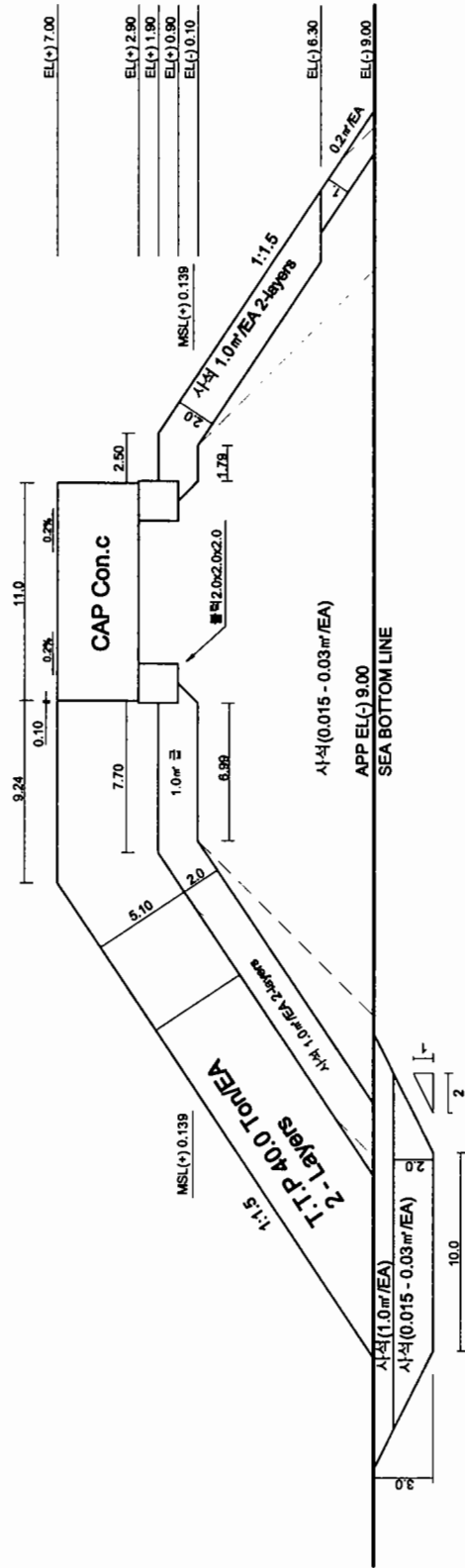
장비는 부선, 부선에 탑재된 기중기, 예인선, 블록운반장비, 하차시 사용된 기중기 등이다. 부선의 제원은 중량 209ton, 길이 34.85m, 너비 13.25m, 깊이 2.75m이며, 예인선은 총톤수 42.70ton, 추진기관은 디젤기관 402P.S. 1대, 길이 20.95m이다. 하차시 사용된 기중기는 규격 150ton, 길이 6.72m, 너비 4.55m, 높이 3.72m, 총중량 70,895kg, 출력 205 H.P., 1250 R.P.M., 주행방식은 무한 궤도식이다. 부선에 탑재된 기중기의 제원은 규격 100ton, 길이 15.50m, 너비 4.50m, 높이 7.80m, 총중량 75,051kg, 출력 282 H.P., 주행방식은 비자주식이다. 블록의 운반 시 15ton 덤프 트럭을 사용했으며 하차 시는 150ton 기중기를 사용했다. 운반 시 사용한 트럭에는 1회에 5ton급 블록 2개씩을 적재했다.

시공실험에 사용된 하프록은 걸개가 있는 경우와 없는 경우가 있는데 걸개가 있는 경우는 크레인의 외줄로부터 2선으로 분리하여 이를 블록의 상부에 설치된 2곳의 걸개부와 연결했다. 걸개가 없는 경우는 체인을 사용하여 블록의 외각 몸통부를 2명이 감아서 이를 외줄걸이로 들어 올린 후 사면으로 이동하여 거치했다. 사면에 거치할 때는 잠수 작업자 1명이 블록의 몸통을 조금씩 거치장소에 맞도록 주로 좌우방향으로 블록의 정위치를 손으로 조절하고 동시에 대선 위의 크레인 작업자 및 대선의 선단부에 위치하고 있는 1명과 대화를 하면서 상하방향을 조절하여 최종적인 위치에 두었다. 하프록의 거치가 완료된 후, 2인의 잠수 작업자가 1개조가 되어 거치된 상태를 조사했다. 거치상태는 주로 전체적인 거치형상, 요철상태, 자연석과 하프록의 접합상태 등을 위주로 수중 사진촬영을 했다. 하프록의 거치시간은 1개의 블록을 대선에서 체인을 감아 사면에 거치할 때까지를 측정했다. 측정자는 시공실험 단면의 상부인 방파제의 상치부분에서 블록 1개당 소요시간을 측정했다. 하프록의 거치를 완료한 후, 테트라포드는 1층 피복만을 시도했다. 본 시공실험은 대선을 사용하여 테트라포드를 거치했으며 2층 피복의 경우는 대선이 사면에 접근하기 어려워 실시하지 못했다. 1층 피복 후에는 사면상의 수면위로 노출된 테트라포드의 모양을 보면서 거치시의 문제점을 판단하고자 했다. 실험의 전 공정은 부록 D에 보이는 바와 같다.



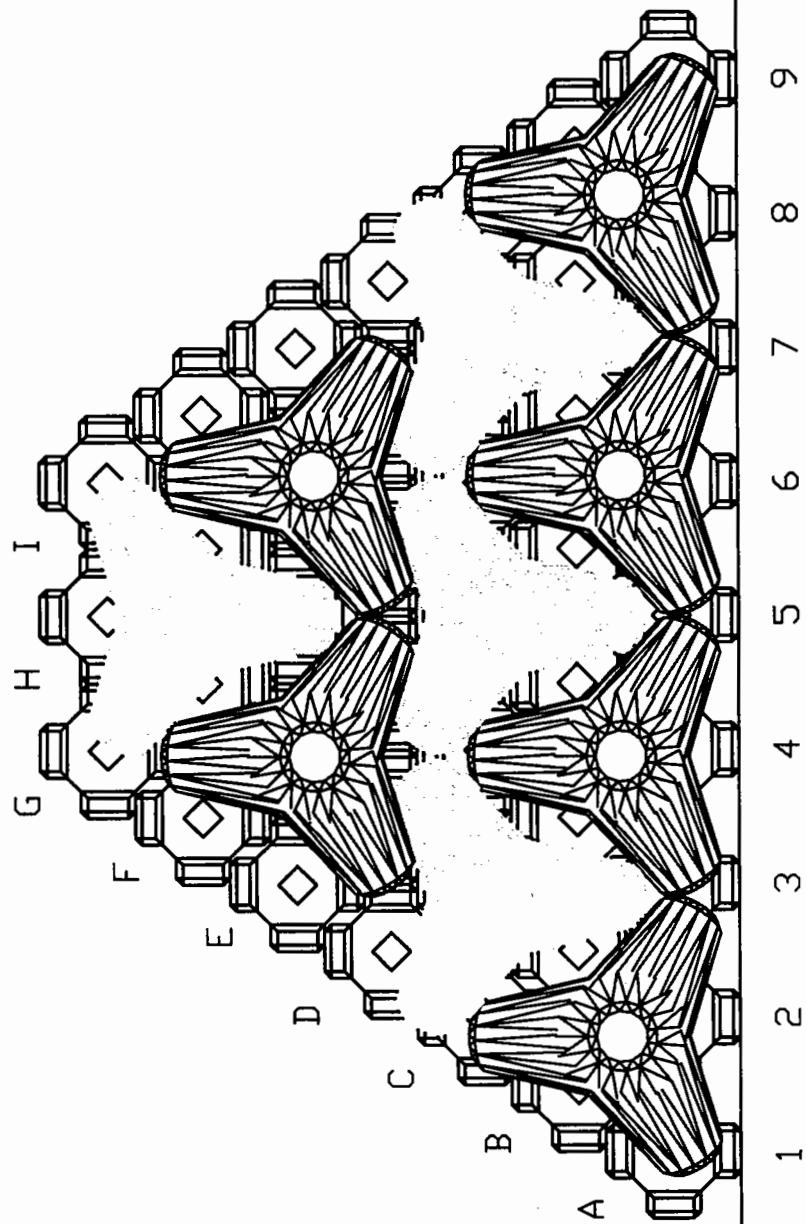
<도 5.5.1> 오산항 평면도

# 북방파제 표준단면도(NB구간)



<도 5.5.2> 시공실험을 실시한 단면도

Water Level



<도 5.5.3> 거치 계획도



### 3. 거치결과 및 분석

하프록의 시공실험에서는 주로 거치 형태 및 거치 시간을 관찰했다. 거치한 형태는 블록들 사이의 반 맞물림 정도, 요철상태, 사석부위의 거치상태 등을 위주로 관찰했다. 하프록의 거치 후 형태는 전사면 피복블록의 거치에 직접적인 영향을 줄 수 있으므로 특별한 경향을 보이지 않는 점이 중요하다. 즉, 하프록의 상부에 거치될 전사면 피복블록은 고유한 맞물림 특성을 가지고 있으므로 이를 저해하는 요철 등 거치 후 경향이 없는 것이 요구된다. <사진 5.5.1>은 사면에 거치된 하프록의 모양을 보인 것이다.



<사진 5.5.1> 사면에 거치된 하프록

사진에서 사면에 거치된 하프록이 정형상태를 유지하고 있음을 알 수 있다. 정형의 경우는 비교적 거치정도의 차이를 명백히 발견할 수 있다. 전체적으로 요철은 눈에 띄지 않을 정도이며 블록들 사이는 약간씩 벌어져 있음을 알 수 있다. 이러한 벌어짐은 거치 설계시 고려되어야 할 사항이다. 사진에 보이는 고리는 블록의 제작공정 중 전치와 사면에 거치할 때 사용할 목적 뿐만 아니라 거치후 이탈한 경우에 다시 걸어올릴 수 있도록 고안됐다. 단, 본 실험에서는 고리를 사용하지 않고도 사면에 거치가 가능했다. 따라서 사용자가 방파제의 선단부 등에 사용할 목적 등을 고려하여 선택적으로 고리를 채택할 수 있을 것이다. 선단부에 하프록을 사용할 경우에는 파에 의해 위치를 이탈할 경우가 발생할

수 있으므로 이를 원래 위치에 이동하고자 할 경우는 고리가 있는 것이 편리하다고 판단된다.

하프록은 상부의 전사면 피복블록과 접합형태로만 생각되어 지고 있으나, 저층의 자연석과의 접합상태도 동시에 중요한 문제이다. 본 시공실험은 후사면에 피복된 1m<sup>3</sup>급의 자연석 위에 5ton의 하프록을 거치한 경우이며 피복석의 사면 고르기를 한 상태이다. 관찰의 주안점은 사면 고르기를 한 1m<sup>3</sup>급의 자연석과 하프록의 반맞물림 정도이다. <사진 5.5.2>는 자연석 위에 거치된 하프록의 모양을 보인 것이다.

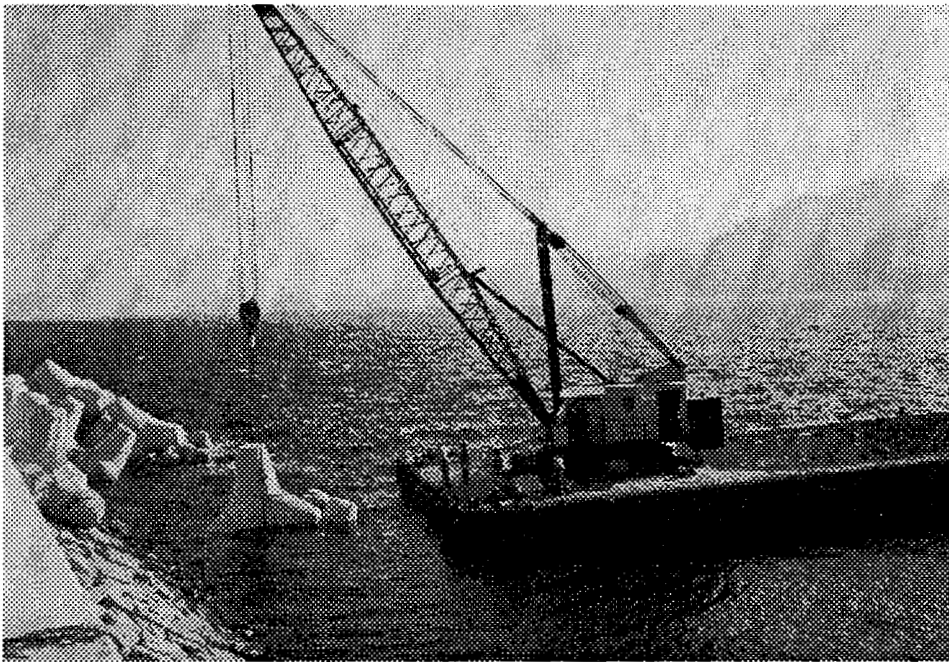


<사진 5.5.2> 자연석위의 하프록

사진에서 저층의 자연석은 1m<sup>3</sup> 이상과 이하의 종류가 분포하고 있음을 알 수 있다. 하프록이 자연석의 양호한 고르기 영향으로 요철상태가 눈에 띄게 보이지 않고 있다. 블록의 저부에 설치된 4개의 돌출부는 자연석에 부분적으로 접촉하고 있음을 알 수 있다. 또한, 몸통부위의 저면 접촉여부는 알 수 없으나 상부 평탄모양을 보면 자연석과 분리됐을 것으로 판단된다.

하프록 위에 테트라포드 40ton급을 거치하여 테트라포드의 고유한 맞물림 정도를 저해하지 않을지를 판단하기 위한 실험도 실시되었다. 또한, 테트라포드의 1층 피복상태를 눈으로 관찰하면서 블록의 상부 끝단의 높이와 간격을 주로 관찰대상으로 했다. <사진 5.5.3>은 시공실험에 사용된 10개의 테트라포드 중 10번째의 블록을 거치시키는 장면이

다. 수면하에 7개가 거치되어 있으며 사진에 보이는 것은 3개 뿐이다. 사진에서 보는 바와 같이 테트라포드 2개의 끝단이 나란하며 높이가 일정함을 알 수 있다. 수면위로 보이는 2개의 테트라포드는 최종적인 거치의 결과이므로 수면하의 테트라포드가 사면상에 계획대로 시공되었다고 판단할 수 있다. 다시 말하면 하프록 상부의 돌출부로 인한 거치의 장애는 없으며 테트라포드는 사면방향으로 미끌림 없이 유지가 되고 있다고 할 수 있다. 실험과정 중 테트라포드는 사면상에서 이탈이나 미끌림을 발견할 수 없었으며 특별한 거치상의 부가적 기술이 필요하지 않았다.



<사진 5.5.3> 40ton급 테트라포드의 거치

본 시공실험의 결과 하프록은 기존의 방파제 축조경험 및 장비로 거치를 할 수 있음을 알았다. 수면하의 사면상에서 정형의 거치형상을 유지할 수 있고 저층의 사석 또는 피복석 고르기가 잘 된다면 요철이 발생하지 않는다. 하프록 상부에 테트라포드를 거치할 경우는 미끌림이나 요철이 발생하지 않음을 알 수 있었다. 거치시간은 5ton급 하프록 1개당 평균 약 13분이 소요됐다.

## 제6절 하프록을 사용한 사면의 경제성 분석

본 연구에서는 중간피복용 블록인 하프록의 사용에 따른 경사식 방파제의 경제성 분석을 실시했다. 경제성 분석은 앞 절을 통하여 하프록의 제작에서 거치까지의 전공정에 대한 기술을 확보했다고 판단하여 실시했다. 경제성 분석은 자연석을 중간피복재로 사용한 기존의 방법과 하프록을 중간피복재로 사용한 경우에 대하여 비교하는 방법을 사용했다. 비교는 거치속도의 관점과 가정한 경사식 방파제 설계안을 대상으로 검토했다. 경제성 분석을 위한 단가산정 등은 품셈규정과 관계에 따라 이루어졌다.

중간피복용 블록의 경제성 분석을 위해서 주어진 체적에 대한 블록의 수량을 결정하는 요소인 현장조건의 하프록 공극율을 결정했다. 제2절에 언급한 하프록의 공극률 재검토에서 권 등(1999)의 거치방법 I, II, III에 대하여 각각 28%, 40%, 30%임을 밝혔다. 그러나, 제5절의 거치 실험에서 보인 바와 같이 현장에서 각 블록사이의 벌어짐이 발생하므로 이를 설계에 반영하고자 했다. 본 연구에서는 현장거치시 가로와 세로 길이의 각각 5%씩 벌어짐을 허용하여 공극률을 검토하여, 거치방법 I, II, III에 대하여 각각 36%, 46%, 37%임을 알았다. 본 절의 경제성 분석은 공극율 37%에 해당하는 거치방법에 대하여 검토를 했다.

### 1. 거치속도의 비교

중간피복재의 거치속도는 현장에서 시공성의 향상 및 시공중 체체보호의 차원에서 가능하면 빠르게 진행되는 것이 요구된다. 거치속도는 품셈으로 경제성을 파악하기가 곤란하므로 별도로 검토했다.

자연석에 비하여 하프록을 시공할 경우 어느 정도의 시간을 절감할 수 있을지에 대하여 알아보기 위하여 주어진 피복 면적에 대하여 비교를 했다. 하프록의 현장 거치실험에서 밝힌 바와 같이 5 ton급의 경우 평균 거치시간이 13분 소요되며 다른 ton수의 자연석 및 하프록도 이와 동일하다고 가정했다. 임의의 면적 100 m<sup>2</sup>를 피복하기 위하여 자연석 몇 개가 필요한지 알아보기 위하여 2.65 ton/m<sup>3</sup>이 1 m<sup>2</sup>을 피복할 수 있다고 가정하고 피복석을 球로 취급하여 반지름을 추정하고 이를 나머지 ton수에 해당하는 자연석에 적용하여 1개당 피복면적을 구한 후, 이를 전체면적에 대하여 나누었다. 하프록은 W가 결정

되면 장반경  $C$ 와 높이  $h$ 가 결정되어 임의의 면적  $A_a$ 에 대한 총피복체적  $V_t$ 가 식 (5.6.1)과 같이 계산된다. 소요블록체적,  $V_n$ 은 공극율 37%를 고려하여 식 (5.6.2)와 같이 계산된다.

$$V_t = A_a h \quad (5.6.1)$$

$$V_n = (1 - 0.37) V_t \quad (5.6.2)$$

$V_n$ 을 하프록의 1개당 체적으로 나누면 전체 피복블록의 갯수가 계산된다.

거치시간을 검토하기 위하여 사면의 조건을 1m<sup>3</sup>급 피복석 2층의 경우와 자연석 1층피복과 상부에 5ton급 하프록을 거치한 경우에 대하여 비교했다. 피복석 2층의 두께는 2.0m이며 1층피복 1.2m와 5ton급 하프록의 0.88m의 두께를 합한 2.08m가 된다. 1층피복과 하프록의 사면두께가 0.08m만큼 피복석의 2층 두께보다 크지만 비교에서는 이를 무시했다. <표 5.6.1>은 현장조건을 고려한 5%의 벌어짐을 허용한 경우에 대하여 자연석과 하프록의 거치시간을 비교한 것이다. 단, 거치방법은 비스듬한 III의 방법에 대하여 검토했다.

<표 5.6.1> 현장 공극률에 의한 거치시간 비교

임의면적, $A_a$	자연석		하프록					거치갯수비교	
	중량, $W$	갯수	장반경, $C$	높이, $h$	총피복체적, $V_t$	소요블록체적, $V_n$	갯수	동일톤수	자연석 1m <sup>3</sup> 기준
m <sup>2</sup>	ton	개	m	m	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	개	배	배
100	5	65.56	2.209	0.884	88.371	55.674	25.61	2.56	3.91
100	4	76.07	2.051	0.820	82.037	51.683	29.72	2.56	3.37
100	3	92.16	1.863	0.745	74.535	46.957	36.00	2.56	2.78
100	2.65	100.10	1.788	0.715	71.516	45.055	39.10	2.56	2.56
100	1	191.70	1.292	0.517	51.680	32.558	74.88	2.56	1.34

<표 5.6.1>는 임의면적 100 m<sup>2</sup>에 대하여 자연석과 하프록의 피복갯수를 산출하여 하프록이 기존의 자연석에 비하여 어느 정도의 거치속도가 가능한지를 거치갯수에 대하여 검토한 것이다. <표 5.6.1>에 보인 바와 같이 하프록은 자연석에 비하여 동일한 톤수에 대

하여 1개당 약 2.56배 면적을 피복할 수 있다. 1m<sup>3</sup>급에 해당하는 중량 2.65ton의 자연석에 비교하면 5ton급의 하프록은 약 4배의 속도로 피복할 수 있음을 알 수 있다. 만약 자연석의 1개당 평균거치속도가 13분 이상이라면 거치속도는 4배 이상이 된다.

## 2. 자연석과 하프록 시공의 단가비교 내역

자연석과 하프록 시공의 단가비교를 위하여 기본조건, 수량산출, 재료비에 대하여 검토했다. 비교는 기존의 피복석 2단 거치시, 피복석 1단 거치후 하프록 거치, 기초사석부 위에 바로 하프록을 거치하는 경우에 대하여 비교했다. 3가지의 비교에서 기초사석의 고르는 공통이므로 이를 검토대상에서 제외했다. 본 비교내역은 기존의 피복석 2단에 대한 하프록 공법의 적용을 대상으로 공사비의 증감 정도를 파악하기 위한 기초자료로써 활용하기 위하여 검토했다.

### 가. 단가산출 기본조건

단가산출을 위해 가정단면을 설정했다. 상술한 바와 같이 비교단면의 기준은 기존의 피복석 2단 거치의 경우이며 이의 단면조건은 사면 1:1.5, 수심 20m, 피복석 1m<sup>3</sup>급 2단 거치시 두께 2.0m, 어깨넓이 6.0m이다. 블록을 거치하는 경우는 1단 피복석의 경우는 두께 1.2m, 사석의 경우는 기준단면과 같이 하프록과 함께 2.0m가 되도록 했다. 3가지의 비교 단면은 높이 20m로 서로 같으며 단면의 각 두께가 다르다. 이외의 기본조건은 아래와 같다.

#### (1) 기본조건

- 재료수급 : 석산개발
- 육상운반 : (석산 → 적출장) : 10km, 20km, 30km, 35km, 40km
- 해상운반 : (적출장 → 투하현장) : 0.3km
- 하프록제원
  - 5ton급(실중량 4.94ton)
  - 현장공극(37%)을 포함하여 1개가 피복하는 면적 : 3.9047m<sup>2</sup>
  - 체적 : 2.17m<sup>3</sup>
- 거푸집 제작 : ₩3,000,000

- 손료 : 60회
- 시공면적 : 42.05m'

(2) 수량산출

① 피복석 거치시

- 피복석 투하량 : 79.9m'
- 피복석 고르기 : 42.05m'

② Block 거치시

<표 5.6.1>에서 하프록 5ton급이 100m<sup>2</sup>의 피복면적에 대하여 25.61개가 필요하므로 1개당 피복면적은 100/25.61이되어 3.9047이 된다. 사면 1:1.5, 높이 20m의 경우에 대하여 하프록 0.88m하단부의 길이는 40.20m가 된다. 이를 단위폭당으로 계산하면 하프록의 피복면적은 40.20m<sup>2</sup>이 된다. 따라서 공극율을 평균적으로 포함한 하프록 1개당 피복면적 3.9047m<sup>2</sup>으로 나누면 10.30개가 필요하다. 피복석 투하량, 피복석 고르기 면적, 하프록의 소요갯수를 다시 정리하면 다음과 같다.

• BLOCK + 피복석(1.0m<sup>3</sup>급 1단)

- 피복석 투하량 : 45.91m'
- 피복석 고르기 : 39.52m'
- BLOCK 소요갯수 : 40.20 ÷ 3.9047 = 10.30EA

• BLOCK + 사석 (0.015~0.03m<sup>3</sup>급)

- 사석투하량 : 42.42m'
- BLOCK 소요갯수 : 40.20 ÷ 3.9047 = 10.30EA

(3) 재료비에 대한 비교

① 1m<sup>2</sup>당에 대한 비교m<sup>2</sup>

- BLOCK 갯수 = 1m<sup>2</sup> ÷ 개당소요면적(3.9047m<sup>2</sup>) = 0.2561개
- 피복석수량 = 1m<sup>2</sup> × 피복석두께(2층피복) = 1 × 2.0 = 2.0m'
- 사석수량 = 피복석두께 - BLOCK두께 = 2.0 - 0.88 = 1.12m'

<표 5.6.2> 1m<sup>2</sup>당 재료비의 비교

구		분	10km	20km	30km	35km	40km	
피복식 (1.0m <sup>2</sup> 급)		수량(m <sup>2</sup> )	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	
		단가	20,992	23,833	26,648	28,06	29,491	
		소계	41,984	47,666	53,296	56,212	58,982	
BLOCK 거치시	BLOCK	소요갯수(EA)	0.2561	0.2561	0.2561	0.2561	0.2561	
		개당제작비	163,867	163,867	163,867	163,867	163,867	
		소계	41,966	41,966	41,966	41,966	41,966	
	사석	수량(m <sup>2</sup> )	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	
		단가	15,393	18,819	22,107	23,938	25,645	
		소계	17,240	21,077	24,759	26,810	28,722	
	계			59,206	63,043	66,725	68,776	70,688

② BLOCK 1개에 대한 비교

- BLOCK 갯수 = 1EA
- 피복석수량 = 개당소요면적(3.9047m<sup>2</sup>) × 피복석두께(2.0m) = 7.8094m<sup>2</sup>
- 사석수량 = 개당소요면적 × (피복석두께 - BLOCK두께)  
= 3.9047 × (2.0 - 0.88) = 4.373m<sup>2</sup>

<표 5.6.3> 하프록 1개당 재료비의 비교

구		분	10km	20km	30km	35km	40km	
피복식 (1.0m <sup>2</sup> 급)		수량(m <sup>2</sup> )	7.8094	7.8094	7.8094	7.8094	7.8094	
		단가	20,992	23,833	26,648	28,106	29,491	
		소계	163,934	186,121	208,104	219,490	230,307	
BLOCK 거치시	BLOCK	소요갯수(EA)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
		개당제작비	163,867	163,867	163,867	163,867	163,867	
		소계	163,867	163,867	163,867	163,867	163,867	
	사석	수량(m <sup>2</sup> )	4.373	4.373	4.373	4.373	4.373	
		단가	15,393	18,819	22,107	23,938	25,645	
		소계	67,313	82,295	96,673	104,680	112,145	
	계			231,180	246,162	260,540	268,547	276,012



나. 단가 산출내역

(1) 공종별 단가 산출금액

① 재료비(석산 → 적출장)

<표 5.6.4> 석산에서 적출장까지 피복석과 기초사석의 단가

공 종	단위수량	피복석		기초사석(0.015~0.03m <sup>2</sup> 급)		비고
		단가	계	단가	계	
1. 사석채취	1.0m <sup>3</sup>	8,273		7,309		
2. 선별 및 적재	1.0m <sup>3</sup>	8,095		3,254		
소 계		16,368		10,563		
육상운반	10km	4,624	20,992	4,830	15,393	
	20km	7,465	23,833	8,256	18,819	
	30km	10,280	26,648	11,644	22,207	
	35km	11,738	28,106	13,375	23,938	
	40km	13,123	29,491	15,082	25,645	

② 고르기 및 운반투하비(적출장 → 투하현장)

<표 5.6.5> 피복석 및 기초사석의 고르기 또는 운반투하비

공종	단위수량	규격	금액
1. 피복석 운반투하	1.0m <sup>3</sup>	1.0m <sup>3</sup>	22,424
2. 기초사석 운반투하	1.0m <sup>3</sup>	0.015~0.03m <sup>2</sup> 급	9,276
3. 피복석 고르기	1.0m <sup>3</sup>	1.0m <sup>3</sup>	82,889

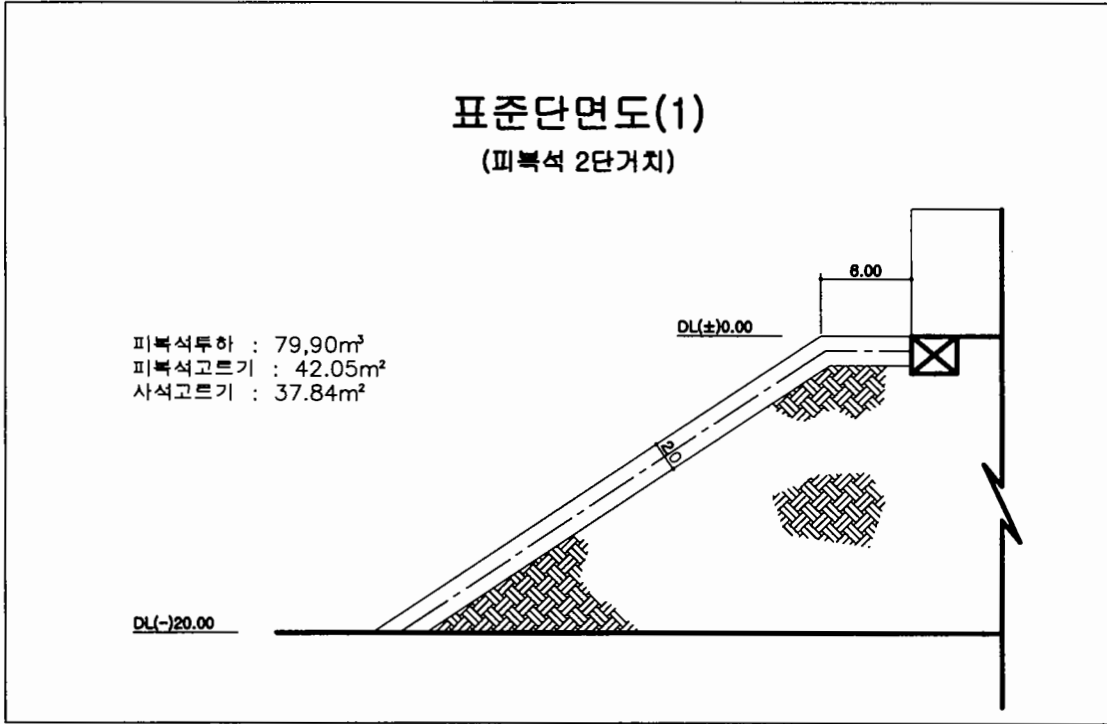
③ BLOCK 제작비 및 운반거치

<표 5.6.6> 하프록의 개당 제작비 및 운반 거치비

공종	단위수량	규격	금액
1. BLOCK 제작비	1EA	2.17m <sup>2</sup>	163,867
2. BLOCK 운반거치	1EA	5.0ton	219,649

(2) 단가 산출내역

① 피복석거치시



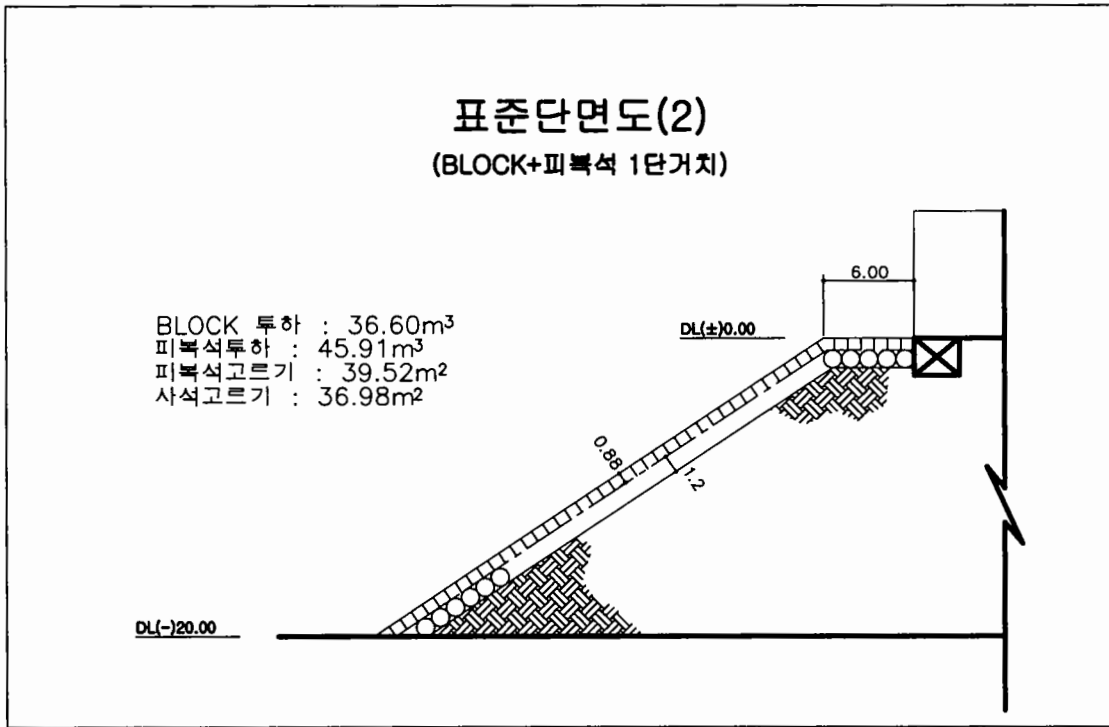
<도 5.6.1> 피복석 2단 거치시의 표준단면도(1)

<도 5.6.1> 에 보인 바와 같이 표준단면도(1)에 대하여 단위폭당 단가를 산출하면 <표 5.6.7>과 같다.

<표 5.6.7> 피복석 2단 거치시 단가 산출내역

공종	단위 수량	단가	전체 수량	금액	비고
1. 피복석 재료비 (1.0m³급)	10km	1.0m³	20,992	79,9m³	1,677,260
	20km	1.0m³	23,833	79,9m³	1,904,256
	30km	1.0m³	26,648	79,9m³	2,129,175
	35km	1.0m³	28,106	79,9m³	2,245,669
	40km	1.0m³	29,491	79,9m³	2,356,330
2. 피복석 운반투하	1.0m³	22,424	79,9m³	1,791,677	
3. 피복석 고르기	1.0m³	82,889	42.05m³	3,485,482	
계	10km	-	126,305	-	6,954,419
	20km	-	129,146	-	7,181,415
	30km	-	131,961	-	7,406,334
	35km	-	133,419	-	7,522,828
	40km	-	134,804	-	7,633,489

② BLOCK+피복석 투하



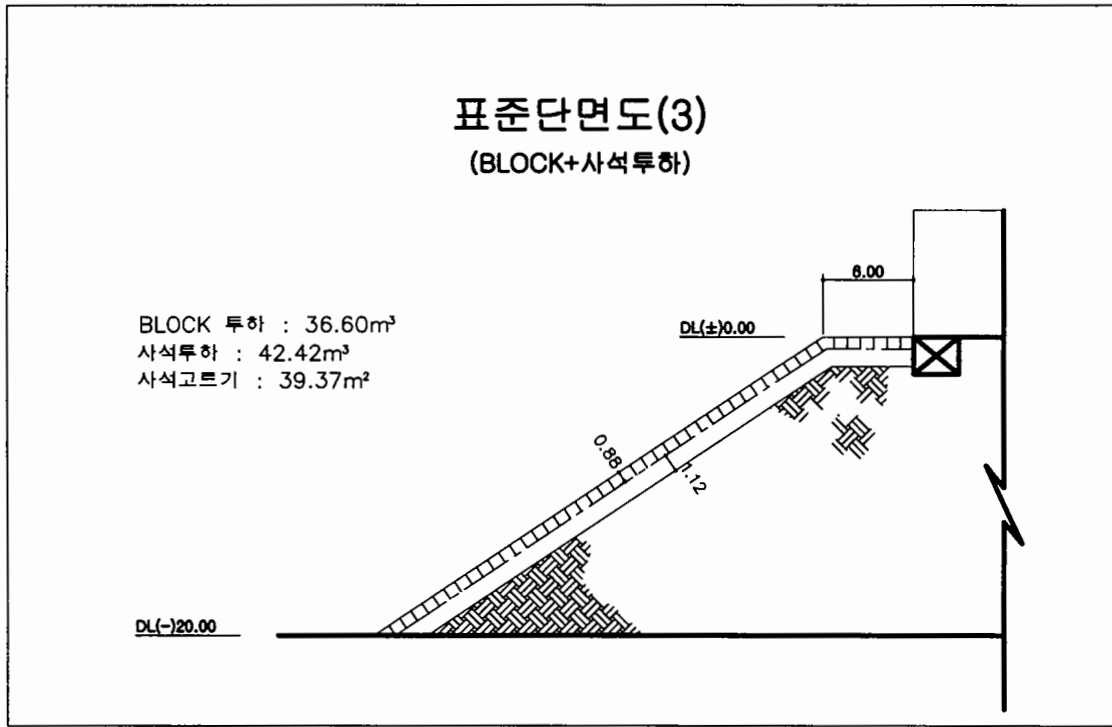
<도 5.6.2> 피복석 1단 거치후 하프록 거치의 표준단면도(2)

<도 5.6.2>에 보인 바와 같이 표준단면도(2)에 대하여 단위폭당 단가를 산출하면 <표 5.6.8>과 같다.

<표 5.6.8> 피복석 1단 거치후 하프록 거치시 단가 산출내역

공종	단위 수량	단가	전체 수량	금액	비고
1. BLOCK	제작비	1개당	163,867	10.30	1,687,830
	운반·거치	"	219,649	10.30	2,262,384
	소계		383,516		3,950,214
2. 피복석 (1.0m'급)	재료비	10 km	20,992	45.91	963,742
		20 "	23,833	45.91	1,094,173
		30 "	26,648	45.91	1,223,409
		35 "	28,106	45.91	1,290,346
		40 "	29,291	45.91	1,353,931
	운반·투하	1m'	22,424	45.91	1,029,485
	고르기	1m'	82,889	39.52	3,275,773
계	10 km	509,821		9,219,214	
	20 "	512,662		9,349,645	
	30 "	525,477		9,478,881	
	35 "	526,935		9,545,818	
	40 "	518,320		9,609,403	

③ BLOCK+사석 투하



<도 5.6.3> 기초사석 위에 하프록을 거치한 경우의 표준단면도(3)

<도 5.6.3>에 보인 바와 같이 표준단면도(3)에 대하여 단위폭당 단가를 산출하면 <표 5.6.9>과 같다.

<표 5.6.9> 기초사석 위에 하프록을 거치한 경우의 단가 산출내역

공종		단위 수량	단가	전체 수량	금액	비고
1. BLOCK	제작비	1개당	163,867	10.30	1,687,830	
	운반·거치	"	219,649	10.30	2,262,384	
	소계		383,516		3,950,214	
2. 사 석 (0.015~ 0.03m³급)	재 료 비	10 km	15,393	42.42	652,971	
		20 "	18,819	"	798,301	
		30 "	22,207	"	942,020	
		35 "	23,938	"	1,015,449	
		40 "	25,645	"	1,087,860	
	운반·투하	1m³	9,276	"	393,487	
계	10 km		408,185		4,996,672	
	20 "		411,611		5,142,002	
	30 "		414,999		5,285,721	
	35 "		416,730		5,359,150	
	40 "		418,437		5,431,561	

(3) 단가산출 내역 비교

① 전체수량에 대한 단가비교

<표 5.6.10> 전체수량에 대한 단가비교

운반거리 (km)	①피복석2층	② BLOCK + 피복석1층	③ BLOCK + 사 석	단 가 비	
				② ÷ ③	③ ÷ ②
10	6,954,419	9,219,214	4,996,672	1.32566	0.71848
20	7,181,415	9,349,645	5,142,002	1.30192	0.71601
30	7,406,334	9,478,881	5,285,721	1.27983	0.71367
35	7,522,828	9,545,818	5,359,150	1.26891	0.71238
40	8,633,489	9,609,403	5,431,561	1.25884	0.71154

② 1m'당에 대한 공종별 단가 내역

<표 5.6.11> 1m'당에 대한 공종별 단가 내역

운반거리 (km)	①피복석2층	② BLOCK + 피복석1층	③ BLOCK + 사 석	시 공 면 적	1m'당에 대한 단가		
					① ÷ ④	② ÷ ④	③ ÷ ④
10	6,954,419	9219214	4,996,672	42.05	165,384	219,244	118,826
20	7,181,415	9349645	5,142,002	"	170,782	222,345	122,283
30	7,406,334	9478881	5,285,721	"	176,131	225,419	125,700
35	7,522,828	9545818	5,359,150	"	1778,901	227,011	127,447
40	7,633,489	9609403	5,431,561	"	181,533	228,523	129,169

③ 1m'당에 대한 공종별 단가 대조표

<표 5.6.12> 1m'당에 대한 공종별 단가 대조표

운반거리 (km)	①피복석2층	② BLOCK + 피복석1층	③ BLOCK + 사 석	단가비		증 감 액	
				② ÷ ①	③ ÷ ①	②-①	③-①
10	165,384	219244	118826	1.32567	0.71849	(+)53,860	(-)46,558
20	170,782	222345	122283	1.30192	0.71602	(+)51,563	(-)48,499
30	176,131	225419	125700	1.27984	0.71367	(+)49,288	(-)50,431
35	178,901	227011	127447	1.26892	0.71239	(+)48,110	(-)51,454
40	181,533	228523	129169	1.25885	0.71155	(+)46,990	(-)52,364

최종적인 경제성 분석결과로써 <표 5.6.11> 1m'당에 대한 공종별 단가 내역과 <표

5.6.12> 1m<sup>2</sup>당에 대한 공중별 단가 대조표를 분석하여 보면, 하프록 저층에 1층 피복석을 두는 경우는 운반거리 10km에 대하여 기존의 공법에 비하여 약 32%증가하며 금액은 53,860원 할증된다. 한편, 하프록 저층에 피복석을 두지 않을 경우는 운반거리 10km에 대하여 약 30%정도 절감되며 금액으로는 46,558원 절감된다. 그러나, 각 안의 동일한 비교를 위하여 사면의 두께 0.08m 만큼의 사석 재료비와 운반·투하비를 제1안과 제3안에 더해주면 <표 5.6.12> 단가비가 약 4~5% 감소한다. 다시말하면, 하프록의 저층에 피복석 1층을 두는 경우에는 운반거리 10km에 대하여 약 28%의 증가, 피복석을 두지 않을 경우는 약 34%정도의 절감효과가 있다.

경제성 분석은 기존의 피복석 2층에 대하여 하프록과 피복석 1층 그리고 하프록과 기초사석의 경우에 대하여 비교·분석했다. 기존의 피복석 2층에 대한 경제성 여부는 피복석의 고르기가 좌우하고 있음을 알 수 있다.

### 3. 경제성과 안정성의 관계

본 경제성 분석에서는 중간피복재로써 기존의 1m<sup>3</sup>급 자연석과 5ton의 하프록과의 비교를 실시했다. 본 경제성 비교안에 대한 사면의 안정성을 비교하기 위하여 Hudson(1969)의 안정 공식을 사용한다. Hudson(1969)의 안정계수  $K_D$ 의 산정 공식은 식(5.6.3)과 같다.

$$K_D = \frac{\omega (H_{1/3})^3}{W (S_r - 1)^3 \cot \theta} \quad (5.6.3)$$

여기서  $W$ 는 피복재의 중량,  $\omega$ 는 재료의 공중단위체적 중량(화강암 2.65g/cm<sup>3</sup>, 콘크리트 2.3g/cm<sup>3</sup>),  $S_r$ 는 재료의 해수에 대한 비중,  $\cot \theta$ 는 사면경사,  $H_{1/3}$ 은 유의파고이다. 식(5.6.3)으로부터 자연석 1m<sup>3</sup>급의 2.65ton/m<sup>3</sup>과 하프록 5ton을 비교하기 위하여 위의 식을 유의파고  $H_{1/3}$ 에 대하여 다시 쓰면 식(5.6.4)과 같다.

$$H_{1/3} = (S_r - 1)^{1/3} \sqrt[3]{K_D \frac{W}{\omega} \cot \theta} \quad (5.6.4)$$

식(5.6.4)에 의해 1m<sup>3</sup>급 자연석과 5ton의 하프록에 대한 각각의  $H_{1/3}$ 를 계산할 수 있다.

이때, 자연석의 안정계수  $K_D$ 는 Shore Protection Manual(1984)에서 2층 난적이며 약간 둥근 쇄석의 경우 1.9로 정하고 있으며 하프록의 경우는 권 등(1999)이 노출안정성 실험을 통하여 약 4.5로 정하고 있다. 식(5.6.4)를 가지고 안정계수를 대입하여 자연석과 하프록의 경우에 대한  $H_{1/3}$ 를 각각 계산하면 2.23m와 3.01m가 된다. 다시 말하면  $1\text{m}^3$ 급 자연석을 5ton의 하프록이 대신하면 축조 공정 중 사면이 노출되는 경우에 하프록의 경우가 약 35% 더 큰 파에 안정하다고 할 수 있다.

## 제6장 결론 및 제안

### 제1절 결론

#### 1. 경사식 방파제의 사면의 안정성

경사식 방파제의 최적 설계기술을 개발하기 위해서는 우선 방파제의 형상이 안정성에 미치는 영향에 대한 깊은 이해와 아울러 적합한 실험실 피해량 평가 연구가 필요하다. 본 연구에서는 이를 위해 우선 사면의 안정성에 영향을 미치는 요인들을 다각적으로 분석·평가함으로써 안정 잠재력이 높은 경사식 방파제의 단면 형상을 대상으로 사면의 피해량을 평가하였다. 피해량을 평가할 때 현장 방파제의 피해 양상을 참조하여 수리모형실험에서 피해로 평가해야 할 Tetrapod의 거동 양상들을 제시하였다. 그리고 Tetrapod의 중량 결정을 위한 기준이 일원화되지 않아 겪는 설계상의 애로의 일부를 해결하기 위하여 비록 제한적인 실험결과를 이용하였지만 비쇄파인 경우에 Tetrapod의 피해계수를 추정하였다. 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

#### 가. 사면의 변형 분석

##### 1) 사면 피복층의 미끌림 분석

- 미끌림은 정수면보다 높은 위치에서 가장 크며, 사면의 경사가 급할수록 그리고 경사면의 길이가 길수록 커진다. 따라서, 단면 설계시 사면 경사가 급할수록 또 수심이 깊을수록 상치구조물에 작용하는 파력을 감소시키기 위해서는 미끌림량을 감소시킴에 각별히 주의하여야 한다..

- 중간피복층에 납작한 모양의 콘크리트 인공블록을 설치하는 방안은 콘크리트가 자연석에 비하여 비중이 작으며 마찰계수도 작음에도 불구하고 미끌림량의 감소에 기여한다. 이는 콘크리트 블록이 모양이 둥근 자연석보다 사면에서 구름 현상이 적기 때문인 것으로 추측된다.

- 미끌림량은 중간피복재로 사용하는 재료의 중량이 적정중량에 미치지 못하면 대폭 증가한다. 특히 사면 경사가 1 : 4/3인 경우에는 피복재에 대한 중간피복재의 중량의 비가 1/10보다 작지 않게 함이 바람직하다.



- 미끌림의 억제를 위해서 지지형 소단을 설치하는 방안은 매우 중요하며 특히 사면 경사가 1 : 4/3인 경우에는 더욱 중요하다. 지지형 소단의 마루높이는 피복재의 표층 표고보다 약간 높게 유지함이 바람직하다. 이때, 지지형 소단의 피복재와 맞닿는 면의 사면 경사는 체체의 사면경사가 1 : 1.5 및 1 : 4/3일 때 각각 1 : 4/3 및 1 : 1.5 정도가 바람직하다.

## 2) 피복층의 수중 사면 경사의 변화 분석

- 사면 경사의 변화는 피복재의 미끌림과 함께 발생한다.
- 중간피복층이 안정하지 못하면 파고가 작은 파에 의해서도 수중 사면의 경사는 지속적으로 완만하게 변한다.
- 사면 경사는 피복재에 피해가 발생하기 시작하면 급속도로 완만하게 변한다.
- 사면 경사의 변형율은 초기 사면경사가 급할수록 크므로 사면경사가 급할수록 경사의 변형을 억제하도록 주의하여야 한다.
- 지지형 소단의 설치하는 사면 경사 변화의 억제에 매우 유의하다.

### 나. Tetrapod의 피해계수 추정

- 2차원 수리모형실험에서 Tetrapod의 피해량을 판정할 때 실험역에서 발생하는 피해 양상으로 미루어 보아 파의 작용 후에 제자리를 이탈한 것뿐만 아니라 파의 작용 중 제자리에서 심하게 회전하거나 록킹을 할 경우, 이탈한 후 다음 파에 의해 제자리로 복원하는 현상을 반복하는 것들은 피해로 간주하여야 할 것이다.
- 사면의 경사가 1:4/3로 급한 경우에는 Tetrapod에 피해를 발생시키는 초기 파고가 실험 간에 큰 편차를 보인다.
- 불규칙파로 Tetrapod의 피해량 평가 실험을 수행하여 중간피복재로 중량이 W/10인 쇄석을 설치하고, 지지형 소단을 설치함으로써 사면의 변형이 적게 되는 단면을 대상으로 파가 비쇄파인 경우에 사용할 수 있도록 Tetrapod의 피해계수( $K_D$ )를 추정하였다. 피해계수는 사면 경사가 1 : 1.5인 경우와 1 : 4/3인 경우에 대해 각각 8.7 및 9.8로 추정되었다.

## 2. 경사식 방파제의 파동장 해석

기존의 경사식 방파제 관련 연구들을 조사한 결과, 대부분이 실험적 연구이며 방파제의 성능 (반사율, 월파량, 전달율)중 일부만을 결정하기 위한 실험식들을 제시하고 있다. 제체내 간극수압의 결정을 위한 실험식은 현재는 없으며 반사율, 전달율 그리고 제체 내 간극수압을 동시에 계산할 수 있는 실용적 수치모델도 없는 실정이다. 본 연구에서는 경사식 방파제 내·외의 파동장 및 성능을 포괄적으로 결정할 수 있는 수치해석기법의 수립을 시도하였으며 이의 결과를 수리실험을 통하여 검증하였다. 수치해석에서는 천수방정식을 이용하여 외부 파동장을 결정하였으며, 내부 파동장은 경계요소법을 이용하여 산정하였다. 수치해석의 입력은 입사파의 파고와 주기, 방파제의 전면 수심, 전사면 피복석의 제원 그리고 제체 내부 공극매체의 제원 등이며, 출력은 반사율, 전달율 그리고 간극수압이다. 수리실험은 규칙파에 대하여 수행하였으며 수치해석과 동일한 조건하에서 수행하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 입사파 주기의 변화에 따른 반사율 변화에 대한 수치해석결과는 수리실험결과와 Seelig and Ahren (1981)의 실험식의 적용결과와 정성적인 유사성을 보였다. 수치해석결과는 실험결과보다 다소 작은 반사율 값을 보여주고 있으나 입사파고가 증가할수록 이들간의 차이가 감소하였다..

- 전달율에 대한 수치해석결과를 보면 입사파 주기가 증가하면서 전달율이 증가하는 경향을 나타냈으며 실험결과와 경향이 일치하였다. 비월파시에는 이들 결과가 정량적으로 잘 일치한 반면 월파가 발생하는 주기대에서는 실험결과가 상당 정도의 분산을 보이며 전반적으로 수치해석결과를 상회하였다.

- 간극수압에 대해서는 수치해석결과와 수리실험결과가 정성적으로는 경향이 유사한 반면 정량적으로는 경우에 따라 상당 정도의 차이를 보였다. 특히, 전사면 부근에서는 이들 차이가 현저하게 나타났다. 그러나, 후사면으로 갈수록 차이는 감소하였으며 각 계측라인의 1/3점 이후에는 비교적 일치정도가 양호하였다.

### 3. 하프록을 사용한 사면의 시공성 및 경제성

중간 피복재인 하프록의 시공성과 경제성을 검토하기 위하여 현장에서 직접 하프록을 제작하고 방파제에 거치하는 현장실험을 수행하였다. 현장에 설치하기 전에

수치모델과 모형 하프록을 이용한 상재 하중실험을 통하여 구조적으로 안전한지의 여부를 검사하였으며, 비파괴 검사를 통하여 40톤급 테트라포드의 재하 전후의 균열 발생 여부를 분석하였다. 이러한 검사를 통하여 하프록의 시공성과 경제성을 검토한 결과는 다음과 같다.

#### 가. 하프록의 거푸집 및 블록제작

블록의 제작을 위해서는 거푸집의 조립, 타설, 탈형 등의 과정이 필요하며 이를 완수하기 위한 물량은 인부 2인 1개조와 중장비 1대면 가능한 것으로 판단된다.

#### 나. 하프록의 상재하중에 대한 구조해석

상재하중에 대해서는 모형실험결과를 분석하여 40ton급의 경우 누적확률 50%, 90%, 99%에 대한 상재 하중비가 각각 0.7, 1.0, 1.2가 됨을 알았다. 누적확률 50%에 해당하는 상재하중이 작용할 경우에는 일부분을 제외하고 탄성거동을 보이거나 누적확률 90% 및 99%의 상재하중이 작용할 경우에는 블록전체가 비선형 거동을 보인다. 파괴는 1/4대칭형상의 단순보의 경우에는 발생하지 않았다. 그러나 1개의 다리가 뜬 상태인 외팔보(cantilever)의 경우에는 50% 및 90%의 하중에 대하여 국부파괴가 발생할 수 있고 99%에 대해서는 전체적인 파괴가 발생할 수 있다.

#### 다. 비파괴 검사

현장에 투입이 용이하고 실무에 널리 보급되어 있는 초음파 속도법을 선택하여 비파괴 검사를 실시했다. 하프록의 비파괴 검사를 위하여 무근, 철근, 강섬유 30% 및 60% 혼입 등 총 4가지 종류에 대하여 40ton급 테트라포드 재하 실험 전후의 균열 발생 여부를 분석한 결과 재하전후 동일하게 균열이 발견되지 않았다. 무근의 경우에도 재하실험에 대한 비파괴 검사를 통하여 안정성이 입증됐다.

#### 라. 시공실험 및 경제성 분석

블록은 고리가 없는 경우에도 사면에 거치할 수 있음을 확인했다. 1m<sup>3</sup>급 자연석 위에 하프록을 총 42개 거치하여 수중촬영 자료를 분석한 결과, 고르기가 양호하여 한 발이 뜨는 외팔보와 같은 경우는 발견되지 않았다. 또한 상부에 테트라포드 40ton급을 거치한 결과 요철 또는 기울어짐 등이 발견되지 않았으며 기존의 장비

및 경험으로 시공이 가능함을 확인했다.

중간피복공정에 대한 경제성 분석결과 기존의 1m<sup>3</sup>급 자연석 피복보다 하프록의 저면에 1층 피복을 할 경우는 약 28% 정도 공사비 상승효과가 있으며 1층피복을 하지 않을 경우는 34%의 절감효과가 있다는 것을 알았다. 그러나 현장에서 기초사석의 고르기면에는 저층보다 비교적 큰 자연석을 거치하는 것을 감안하여 보면 기초사석 위에 바로 하프록을 거치함에 있어 큰 어려움은 없으리라 판단된다.

## 제2절 제안

### 1. 경사식 방파제의 현황 분석

금년도 국내 경사식 방파제의 현황 연구는 주로 기존 자료를 이용한 데이터베이스 구축에 중점을 두고 실시되었다. 그러나 현재와는 상황이 다른 1992년 자료를 이용함에 따른 문제점을 내포하고 있다. 이는 1992년 이후 종합적으로 정리된 자료가 없었기 때문이다. 따라서, 차후의 연구에서는 우선 누락되었거나 자료에 따라 그 값이 서로 다른 자료를 확인하여 수정할 필요가 있으며, 현재의 지정 항만에 추가로 사석 경사제에 대한 자료를 조사 수집하여 작성된 데이터베이스에 포함시켜 확장하여야 한다. 또한 1992년 이후 보강공사를 하였거나 단면을 수정한 자료, 각 방파제의 역사 등을 추적 조사하여, 언제 어느 구간이 어떤 형태로 건설되었으며, 어느 때 어떤 조건에서 어느 부분에 얼마나 손상이 있었는지 등에 대해서도 데이터베이스에 포함시킬 경우 앞으로의 연구 방향 및 연구의 시급성을 요하는 부분 등을 파악하고 이에 대한 장기계획을 마련하는 데 기본자료로 이용될 수 있을 것이다. 이와 같이 수집, 정리 및 보완된 자료는 보안상의 문제만 없다면 인터넷을 통해 누구나 쉽게 이용될 수 있도록 하여 그 활용도를 높일 필요가 있다.

### 2. 경사식 방파제의 사면의 안정성

- 경사식 방파제를 설계할 때 수심이 매우 낮거나 설계파고가 작은 경우를 제외하고는 사면 뿐 아니라 상치 구조물의 안정성을 확보하기 위하여 지지형 소단을 설

치하는 것은 매우 중요하다. 특히 사면의 경사를 1:1.5보다 급하게 하는 경우에는 지지형 소단의 설치를 적극적으로 검토해야 할 것이다.

- 제시된 Tetrapod의 피해계수를 설계에 이용할 경우에는 구체적 단면에 대한 안정성을 수리모형실험으로 확인하여야 할 것이다.

- 본 연구 결과 도출된 경사 1:1.5인 경우의 Tetrapod의 피해계수는 CERC(1984)에서 제시한 값보다 훨씬 크다. 이는 제한된 실험조건 범위 내에서 Tetrapod의 파괴 현상이 전혀 재현되지 않기 때문으로 추측된다. 따라서, 중량이 큰 Tetrapod가 필요한 단면을 설계할 경우에는 축소 수리모형실험에서는 안정성이 확인되더라도 기존 방파제에서 Tetrapod가 파괴된 사례들을 조사하여 필요한 경우에는 실험실에서 도출된 안정 중량보다 중량을 증가시켜야 할 것이다.

### 3. 경사식 방파제의 파동장 해석

수치해석에서 <표 4.5.1>의 여러 입력 파라미터 값들의 조정을 시도하였으나 실험치들의 횡방향 분포는 정량적으로 재현되지 않았다. 그러나 파라미터 값들은 과거 많은 실험을 거쳐 축척효과 (scale effect)가 충분히 고려된 값들로 판단되며 이들의 임의적인 변경은 허용되지 않는다. 본 수리실험에서 축척오차가 발생하였을 가능성도 있으나 과축소된 모형에서는 마찰저항이 증가되어 간극수압이 오히려 적어지는 점을 감안하면 이 역시 본 실험결과와 수치해석결과 사이의 정량적 차이를 설명하기는 어려울 것으로 보인다.

상기와 같은 점들을 포괄적으로 고려하면 현 수치해석기법을 개선하기 위해서는 공극단면을 소단면으로 분할하는 방법이 가장 바람직할 것으로 판단된다. 전사면에서의 파의 비선형 변형을 재현하여 간극수압을 구하기 위해서는 VOF 기법 (van Gent, 1995)의 수립이 필요하다. 제4장 제2절에서 언급하였듯이 Barends *et al.* (1996)은 수리모형실험을 통하여 전사면에서의 파압을 구하고 이를 경계조건으로 하여 제체 내부의 압력장을 해석하였다. 현 실험결과를 토대로 판단하여 볼 때, Barends의 방법은 전사면에서의 파동장 및 파압을 수치해석적으로 결정하는데 따르는 어려움을 우회하기 위한 방법으로 보인다. 따라서, 앞으로의 연구에서는 수치해석적 방법을 기 측정된 전사면 파압자료를 경계조건으로 하여 적용하는 식으로 발전시키는 것도 필요할 것으로 판단된다.

#### 4. 향후 연구계획

본 연구에서 수행할 향후 주요 연구계획은 다음과 같다.

- 지반 조건에 따라서는 경사식 방파제의 안정성 검토에 필수적인 체체에 작용하는 전파력 추정기술 개발
- 설계파고 대비 사면의 일정 수심 하 구간에서 피복석의 속고르기를 생략할 경우가 안정성에 미치는 영향 연구를 통한 공사비 절감 방안 연구
- 기존 피해사례의 조사 분석을 통한 대처 기술개발 연구(한국건설기술연구원과의 협동연구로 평면수리모형실험연구 수행)



## 참고문헌

- 권혁민, 이달수, 1999, 신형 중간 피복블록의 개발, 대한토목학회논문집, 제19권 제 II-2호, pp. 183~194.
- 권혁민, 오영민, 2000, 단층피복블록 사면의 수리적 안정성, 대한토목학회집, 제20권 제1-B호, pp. 45~57.
- 박우선, 오영민, 전인식, 1992, 최소자승법에 의한 입·반사파의 분리방법, 한국해양·해양공학회지, 제4권, 제3호, pp. 139 - 145
- 해양수산부, 1999, 항만 및 어항설계기준, 행정간행물 등록번호 44000-91580-67-9936.
- 해양연구소, 1999, 연안방재 구조물의 설계기술개발(I), BSPE98707-00-1155-2.
- 해운항만청, 1992, 전국 항만구조물도집.
- Ahrens, J.P., 1977, Prediction of irregular wave overtopping, Coastal Engineering Technical Aid 77-7, U.S. Army Coastal Engineering Research Center, Ft. Belvoir, VA.
- Ahrens, J.P. and Heimbaugh, M.S., 1986, Irregular wave overtopping of seawalls, *Proc. Oceans '86 Conference, Institute of Electronic and Electrical Engineers*, Washington, DC, pp. 96-103.
- Ahrens, J.P. and McCartney, B.L., 1975, Wave period effect on the stability of riprap, *Proc. Civil Engineers in The Oceans III*, ASCE, pp. 1019-1034.
- Allsop, N.W.H. and Hettiarachchi, 1988, *Coastal Engineering Conf.*, ASCE, pp. 782 - 794.
- Barends, F.B.J., De Groot, M.B. and Hölischer, P., 1996, Hydro-geotechnical stability of breakwater, (ed.) Clifford, J.E., *Advances in Coastal Structures and Breakwaters*, Thomas Telford, pp. 322 - 335.
- CERC, 1992, Automated Coastal Engineering System, Coastal Engineering Research Center, US Army Engineer, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.



- CERC, 1984, Shore Protection Manual, Coastal Engineering Research Center, US Army Engineer, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Engelund, F., 1953, On the laminar and turbulent flows of ground water through homogeneous sand, *Transactions of the Danish Academy of Technical Sciences*, Vol.3, No.4.
- Fair, G.M. and Hatch, L.P., 1933, Fundamental factors governing the streamline flow of water through sand, *J. of Am. Water Works Assoc.*, vol. 25, pp. 1551-1565.
- Goda, Y., 1977, *Wave analysis for the design of coastal facilities*, Kajima Publishing Co., Tokyo, Japan, 237 p., (in Japanese).
- Herbich, J.B., Handbook of Coastal and Ocean Engineering, Vol. 1-II, pp. 939 - 1050.
- Hannoura, A.A. and McCorquodale, 1986, Rubble mounds: numerical modeling of wave motion, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 5, pp. 800 - 816.
- Hölscher, P. and Barends, B.J., 1990, Finite difference scheme for wave transmission in a rubble mound breakwater, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 30, pp. 1129-1145.
- Herbich, J.B., 1990, Wave run-up and overtopping, (ed.) Herbich, J.B., *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 1-II, pp. 727 - 834.
- Hudson, R. Y.(1958), 'Laboratory investigation of rubble mound breakwater', *Journal of Waterways, Harbour, and Coastal Engineering Division*, Vol. 85, WW3, pp.93-121.
- Hunt, I.A., 1959, Design of sea walls and breakwaters, *J. Waterw. Harbors Div.*, ASCE, pp. 123-152.
- Losada, M.A., 1990, Recent developments in the design of mound breakwater, (ed.).
- Madsen, O.S. and White, S.M., 1976, Reflection and transmission characteristics of porous rubble-mound breakwater, CERC MR 76-5, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

- Mase, H. and Iwagaki, Y., 1984, Run-up of random waves on gentle slopes, *Proc. 19th International Conference of Coastal Engineering*, ASCE, pp. 593-609.
- McWhorter, D.B. and Sunada, D.K., 1977, *Ground-water hydrology and hydraulics*, Water Resources Publications, pp. 65-82.
- Oumeraci, H and Partenscky, H.W., 1990, Wave-induced pore pressure in rubble mound breakwaters, *Proc. 22nd International Conference of Coastal Engineering*, ASCE, pp. 1334-1347.
- Sastry, V.S.L.N., Hölscher, P. and Barends, B.J., 1991, Numerical determination of wave transmission through a rubblemound breakwater at Visakhapatnam, India, *Coastal Engineering*, 15 (41-57).
- Seelig, W.N., 1980, Two-dimensional tests of wave transmission and reflection characteristics of laboratory breakwaters, Technical Report 80-1, U.S. Army Coastal Engineering Research Center, Ft. Belvoir, VA.
- Seelig, W.N. and Ahrens, J.P., 1981, Estimation of wave reflection and energy dissipation coefficients for beaches, revetments and breakwaters, Technical Paper 81-1, U.S. Army CERC, Ft. Belvoir, VA.
- Sollitt, C.K. and Cross, R.H., 1972, Wave transmission through permeable breakwaters, *Proc. 13th Coastal Eng. Conf.*, Vancouver, pp. 1827-1846.
- Sorensen, R.M., 1993, *Basic Wave Mechanics: for Coastal and Ocean Engineers*, John Wiley & Sons, Inc.
- Sulisz, W., 1985, Wave reflection and transmission at permeable breakwaters of arbitrary cross-section, *Coastal Engineering*, 9(371-386).
- van der Meer(1988) "stability of cubes, tetrapod and accropode", Proc. of conf. breakwater, pp.59-68
- van Gent, M.R.A., 1995, *Wave interaction with permeable coastal structures*, Delft University Press.-III, 175 p.
- Wurjanto, A. and Kobayashi, N., 1994, Irregular wave reflection and runup on permeable slopes, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, Vol. 119, No. 5, pp. 537 - 557.

Weggel, J.R., 1976, Wave overtopping equation, *Proc. 15th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp. 2737-2755.

合田良實. (1987). 수치 simulation에 의한 파랑의 표준 spectral과 통계적 성질. 제 34회 해안공학강연회 논문집, pp.131-135.

## 부록 A

### 국내 경사식 방파제의 현황



항명	시설명	번호	연장 (m)	미루높이 E.L.(m)	미루폭 (m)	지반고 E.L.(m)	설계조건				비고					
							파랑		바람		조위(m) HWL	토질조건	구조형식	대형형상	특징	
							파고(m)	주기(초)	파향	풍향						풍속(m/s)
부산항	남북방파제 부두	30	1,050.0	+2.9	14.6	-10.0	7.3	13.0	SE	NNE	34.7	1.282	실트	혼성제	대형	기초치환
	오륙도방파제	35	1,004.0	+6.0	20.0	-22.0	7.1	15.0	SW/NE	SE	34.7	1.5	모래	혼성제	대형	기초치환
	남북방파제	36	1,050.0	+2.9	7.6	-10.0	7.3	13.0	SE	NNE	34.7	1.282	실트	혼성제	비대형	기초치환
	조도방파제A	43	635.0	+5.0	10.0		7.3	13.0	SE	NNE	34.7	1.282	실트	사석식	비대형	
김천항	조도방파제B	44	700.0	+6.0	20.0		6.4	15.0	SW/NE	SE	34.7	1.5	이토	혼성제	대형	기초치환
	서방파제	7	650.0	+6.2	22.0		9.5	15.0	SW	NNE	34.7	1.282	혼토	혼성제	비대형	기초치환
	동방파제	8	500.0	+4.5	17.0	-16.0	6.3	12.0	SE	NNE	34.7	1.282	이토	혼성제	비대형	기초치환
	방파제	7		+4.4	6.5		5.7	13.0	SE	NNE	34.7	1.282		피복제	비대형	혼성제
다대포항	방파제(동명목재)	1	160.0	+3.3	7.0		5.0		SE	NNE	34.7	1.282	사질토	사석식	비대형	
	방파제	44	240.0	+11.5	8.0		2.7	5.9				9.840	실트질모래	혼성제	대형	기초준설
	방파제	45	308.0	+11.5	10.0		2.7	5.9				9.840	실트질모래	혼성제	대형	기초준설
	방파제	51	240.0	+10.0	4.0		2.7	6.3	SW	NNW	40.0	9.27	이토/점토	사석식	비대형	혼성제
인천항	방파제	52	700.0	+12.0	9.0	-16.2	5.1	5.1	SW	NNW	20.0	9.27	이토/점토	혼성제	대형	기초준설
	방파제	53	207.0	+12.5	6.0		2.7	6.3	SW	NNW	40.0	9.27	이토/점토	혼성제	비대형	기초준설
	방파제	54	270.0	+11.0	7.0		2.7	5.9				9.27	이토/점토	혼성제	대형	기초준설
	방파제	55	216.0	+12.5	6.0		2.7	6.3	SW	NNW	40.0	9.27	이토/점토	혼성제	비대형	기초준설
평택항	석천지구 방파제	29	150.0	+11.0	3.0	DL+4.5	1.4	4.3	S	NW	30.0	9.308	이토/중화토	사석식	비대형	
	남방파제	30	80.0	+11.0	4.1	DL+2.0	1.7	5.0	NW	NW	30.0	9.308	이토/중화토	사석식	비대형	
	서방파제	31	300.0	+11.0	3.65	DL+5.50	1.7	5.0	NW	NW	30.0	9.308	이토/중화토	사석식	비대형	
미산항	방파제	9	145.0	+3.3	5.0	-6.0						2.82		사석식	비대형	
	등호만 방파제	14	850.0	+4.5	4.0	-8.0						2.82		사석식	비대형	기초치환
	도남 방파제	15	627.0	+4.0	4.0	-13.0						2.82		혼성제	대형	기초준설
삼천포항	방파제	9	225.0	+5.59	5.0	-2.0	2.0	6.0	SE	WSW	18.5	3.296	모래/사질이토	사석식	비대형	혼성제
	방파제	10	160.0	+6.5	9.0	-4.0	5.4	15.0	S	SW	18.5	3.296	모래/사질이토	사석식	비대형	
	방파제	11	140.0	+6.5	9.0	-10.0	5.4	15.0	S	SW	18.5	3.296	모래/사질이토	사석식	비대형	
	방파제	12	113.0	+6.5	9.0	-15.8	5.4	15.0	S	SW	18.5	3.296	모래	사석식	비대형	
	방파제	13	10.0	+6.5	9.0	-15.8	5.4	15.0	S	SW	18.5	3.296	모래/사질이토	사석식	비대형	상부진층
장승포항	서방파제	7	145.0	+4.5	6.0	-2.0	4.5	12.0	S	NE	13.9	1.934	전석	사석식	비대형	상부진층
	동방파제	8	86.0	+4.5	6.0	-2.5	4.5	12.0	S	NE	13.9	1.934	전석	사석식	비대형	상부진층
진해항	방파제															
	남북방파제	1	1,385.0	+4.0	5.8	-18.0	3.5	7.5	ENE	NNE	13.9	1.934	실트	사석식	비대형	기초치환
동해항	북방파제	7	100.0	+8.0	19.8	-8.0	7.4	13.0	NE/ENE	SSW	23.3	0.392	모래	피복제	비대형	혼성제
	북방파제	8	550.0	+8.0	20.0		7.4	13.0	NE/ENE	SSW	23.3	0.392	모래	피복제	비대형	혼성제
	북방파제	9	151.48	+5.0	19.8		8.0	14.0	E/ENE	SSW	12.5	0.392	모래	혼성제	비대형	혼성제

항명	시설명	번호	연장 (m)	마루높이 E.L.(m)	마루폭 (m)	지반고 E.L.(m)	설계조건				비고					
							파랑		바람		토질조건	구조형식	비대칭	특징		
							파고(m)	주기(초)	파향	풍향					풍속(m/s)	HWL
동해항	북방파제	10	323.83	+5.7	19.8	-16.6	8.0	14.0	E/ENE	SSW	12.5	0.392	혼성제	비대칭		
	북방파제	11	354.69	+5.5	19.8	-18.5	8.0	14.0	E/ENE	SSW	12.5	0.392	혼성제	비대칭		
	남방파제	12	410.0	+5.0	6.7	-6.0	8.0	14.0	E/ENE	SSW	12.5	0.392	피복제	비대칭	혼성제	
	남방파제	13	170.0	+5.0	19.8		6.6	14.0	E/ENE	SSW	12.5	0.392	혼성제	비대칭		
	남방파제	14	50.0	+5.2	19.8	-14.5	8.0	14.0	E/ENE	SSW	12.5	0.392	혼성제	비대칭		
	방파제	17	158.0	+5.5	4.0	-3.0	4.5	14.0	E/ENE	WSW	12.5	0.376	사석식	비대칭	후면매립	
	방파제	18	100.0	+3.5	2.9									사석식	비대칭	후안
	방파제	19	105.6	+5.1	1.0		5.8	14.0	E/ENE	WSW	12.5	0.376	사석식	비대칭	후면매립	
	방파제	20	23.0	+5.1	1.0		5.7	14.0	E/ENE	WSW	12.5	0.376	사석식	비대칭	후면매립	
	방파제	21	188.0	+2.8	11.5		6.9	14.0	E/ENE	WSW	12.5	0.376	피복제	비대칭	혼성제	
	방파제	22	138.0	+2.8	11.5		7.5	14.0	E/ENE	WSW	12.5	0.376	피복제	비대칭	혼성제	
	방파제	23	71.0	+4.0	9.0		5.8	14.0	E/ENE	WSW	12.5	0.376	피복제	비대칭	혼성제	
	방파제	24	24.0	+4.0	9.5		7.5	14.0	E/ENE	WSW	12.5	0.376	피복제	비대칭	혼성제	
	방파제	25	119.0	+4.0	9.5		8.0	14.0	E/ENE	WSW	12.5	0.376	피복제	비대칭	혼성제	
목호항	방파제	26	77.0	+4.0	9.5		7.8	14.0	E/ENE	WSW	12.5	0.376	피복제	비대칭	혼성제	
	방파제	27	38.0	+4.0	10.0		7.5	14.0	E/ENE	WSW	12.5	0.376	피복제	비대칭	혼성제	
	방파제	28	38.0	+4.0	11.5								사석식	비대칭		
	방파제	29	24.0	+4.0	11.5								사석식	비대칭		
	방파제	30	33.0	+4.5	11.5		6.1	14.0	E/ENE	WSW	12.5	0.376	사석식	비대칭		
	방파제	31	39.0	+4.5	11.5	-10.0	6.1	14.0	ESE	WSW	12.5	0.376	사석식	비대칭		
	방파제	32	18.0	+4.5	12.0	-10.0	6.9	14.0	ESE	WSW	12.5	0.376	사석식	비대칭		
	방파제	33	153.0	+3.5	6.0	-8.0	4.5	14.0	E/ENE	WSW	12.5	0.376	사석식	비대칭	방사제	
	방파제	34	45.0	+4.0	9.5		4.5	14.0	E/ENE	WSW	12.5	0.376	사석식	비대칭		
	방파제	35	40.0	+4.0	9.5		5.4	14.0	E/ENE	WSW	12.5	0.376	사석식	비대칭		
	방파제	36	20.0	+4.0	6.5		5.4	14.0	E/ENE	WSW	12.5	0.376	사석식	비대칭		
	방파제	37	6.0	+4.0	6.5		5.4	14.0	E/ENE	WSW	12.5	0.376	사석식	비대칭		
	방파제	25	18.0	+3.4	2.0		4.0	14.0	E/NE	SSW	46.0	0.39	사석식	비대칭	후면매립	
	속초항	방파제	26	25.0	+3.4	10.0	-5.0	4.0	14.0	E/NE	SSW	46.0	0.39	사석식	비대칭	
방파제		27	639.0	+5.5	10.0	-13.0	5.3	14.0	E/NE	W	46.0	0.39	사석식	비대칭		
방파제		28	18.0	+5.5	18.0	-15.0	6.5	14.0	E/NE	SSW	46.0	0.39	사석식	비대칭		
방파제		29	330.0	+2.5	7.0	-10.0	3.0	14.0	E/NE	SSW	46.0	0.39	사석식	대칭		
방파제		30	20.0	+3.5	7.4	-13.0	3.0	14.0	E/NE	SSW	46.0	0.39	사석식	비대칭	방사제	
방파제		16	97.5	+6.0	11.6	-5.0	4.5	14.0	E/NE	WSW	12.5	0.35	사석식	비대칭	방사제	
삼척항	방파제	17	131.0	+6.0	11.6	-6.0	4.5	14.0	E/NE	WSW	12.5	0.35	사석식	비대칭	후면매립	
	방파제	18	55.0	+6.0	11.6	-7.0	4.5	14.0	E/NE	WSW	12.5	0.35	사석식	비대칭	후면매립	
	방파제	19	42.0	+6.0	11.8	-7.0	4.5	14.0	E/NE	WSW	12.5	0.35	사석식	비대칭	후면매립	

항명	시설명	번호	연장 (m)	마루높이 E.L.(m)	마루폭 (m)	지반고 E.L.(m)	설계조건					비고				
							파랑		파향	바람		조위(m) HWL	토질조건	구조형식	대칭형상	특징
							파고(m)	주기(초)		풍향	풍속(m/s)					
삼척항	방파제	20	163.0	+6.0	11.7	-7.0	7.4	14.0	E/NE	WSW	12.5	0.35	모래	사석식	비대칭	후면매립
	방파제	21	41.0	+6.0	11.7	-9.0	7.4	14.0	E/NE	WSW	12.5	0.35	모래	사석식	비대칭	후면매립
	방파제	22	35.0	+6.0	11.7	-9.0	7.4	14.0	E/NE	WSW	12.5	0.35	모래	사석식	비대칭	후면매립
	방파제	23	65.6	+6.0	11.8	-9.0	7.4	14.0	E/NE	WSW	12.5	0.35	모래	사석식	비대칭	후면매립
	방파제	24	17.0	+6.0	11.8	-10.0	7.4	14.0	E/NE	WSW	12.5	0.35	모래	사석식	비대칭	후면매립
	방파제	25	33.0	+6.0	11.8	-9.0	7.4	14.0	E/NE	WSW	12.5	0.35	모래	사석식	비대칭	후면매립
	방파제	26	14.0	+5.5	12.0	-9.0	7.5	14.0	E/NE	WSW	12.5	0.35	모래/자갈	사석식	비대칭	
	방파제	27	87.0	+5.5	12.0	-9.0	7.4	14.0	E/NE	WSW	12.5	0.35	모래/자갈	사석식	비대칭	
	방파제	28	63.0	+5.5	12.0	-9.8	7.5	14.0	E/NE	WSW	12.5	0.35	모래/자갈	사석식	비대칭	
	방파제	29	17.0	+5.5	12.0	-9.0	7.4	14.0	E/NE	WSW	12.5	0.35	모래/자갈	사석식	비대칭	
	방파제	30	19.0	+5.5	18.0	-11.0	7.4	14.0	E/NE	WSW	12.5	0.35	모래/자갈	사석식	비대칭	
	방파제	31	123.0	+2.5	6.0	-4.0	4.0	14.0	E/NE	WSW	12.5	0.35	모래/자갈	사석식	비대칭	후면매립
	방파제	32	20.0	+2.5	6.0	-7.0	4.0	14.0	E/NE	WSW	12.5	0.35	모래/자갈	사석식	비대칭	후면매립
	방파제	33	18.0	+3.3	6.0	-8.0	4.5	14.0	E/NE	WSW	12.5	0.35	모래/자갈	사석식	비대칭	후면매립
	방파제	34	182.0	+2.5	6.0	-7.0	4.9	14.0	E/NE	WSW	12.5	0.35	모래/자갈	사석식	비대칭	
	방파제	35	18.0	+3.5	10.0	-6.5	4.0	14.0	E/NE	WSW	12.5	0.35	모래/자갈	사석식	대칭	
	방파제	4	168.0	+4.5	3.2		1.5	14.0	NE	SSW	21.0	0.38	모래	사석식	비대칭	호안
	방파제	5	100.0	+4.3	1.0		1.5	14.0	E	SSW	21.0	0.38	모래	사석식	비대칭	후면매립
	방파제	6	125.5	+4.7	1.0		2.0	14.0	E	SSW	21.0	0.38	모래	사석식	비대칭	후면매립
	방파제	7	134.5	+5.0	8.0		2.5	14.0	E	SSW	21.0	0.38	모래	사석식	비대칭	
	방파제	8	110.0	+5.0	8.0		3.0	14.0	E	SSW	21.0	0.38	모래	사석식	비대칭	
	방파제	9	40.0	+5.0	18.0		3.5	14.0	E	SSW	21.0	0.38	모래	혼성제	비대칭	후면매립
	방파제	10	135.0	+3.5	3.8		1.0	14.0	NE	SSW	21.0	0.38	모래	사석식	비대칭	후면매립
	방파제	11	105.0	+3.95	1.0		1.0	14.0	NE	SSW	21.0	0.38	모래	사석식	비대칭	후면매립
	방파제	12	65.0	+6.35	1.0		1.5	14.0	NE	SSW	21.0	0.38	모래	사석식	비대칭	후면매립
	방파제	13	185.0	+4.7	8.0		3.7	14.0	NE	SSW	21.0	0.38	모래	사석식	비대칭	
	방파제	14	70.0	+5.5	8.0		5.0	14.0	NE	SSW	21.0	0.38	모래	사석식	비대칭	
	방파제	15	30.0	+5.5	11.0		5.5	14.0	NE	SSW	21.0	0.38	모래	사석식	비대칭	
	방파제	16	55.0	+6.5	11.0		6.1	14.0	NE	SSW	21.0	0.38	모래	사석식	비대칭	
	방파제	17	216.0	+5.5	11.0		6.1	14.0	NE	SSW	21.0	0.38	모래	사석식	비대칭	
	방파제	18	99.0	+5.5	11.0		6.2	14.0	NE	SSW	21.0	0.38	모래	사석식	비대칭	
	방파제	19	120.0	+5.5	11.0		6.2	14.0	NE	SSW	21.0	0.38	모래	사석식	비대칭	
	방파제	20	91.0	+5.5	11.0		6.2	14.0	NE	SSW	21.0	0.38	모래	사석식	비대칭	
	방파제	21	60.0	+5.5	11.0		6.2	14.0	NE	SSW	21.0	0.38	모래	사석식	비대칭	
	방파제	22	40.0	+5.5	11.0		6.2	14.0	NE	SSW	21.0	0.38	모래	사석식	비대칭	
방파제	23	54.0	+5.5	20.0		6.5	14.0	NE	SSW	21.0	0.38	모래	퍼복제	비대칭	혼성제	



항명	시설명	번호	연장 (m)	마루높이 E.L.(m)	마루폭 (m)	지반고 E.L.(m)	설계조건						비고			
							파랑		바람		조위(m)		토질조건	구조형식		특징
							파고(m)	주기(초)	파향	풍향	풍속(m/s)	HWL		이토/사질	사석식	
을산항	방파제	17	200.0	+4.0	7.0	-10.0	3.2	10.3	S	NNE	31.7	0.608	이토/사질	사석식	비대칭	
	동방파제	26	209.0	+6.5	15.0	-18.0	6.5	14.0	SE/SSE			0.608		혼성제	비대칭	
	동방파제	27	190.0	+6.5	18.0	-20.2	6.5	14.0	SE/SSE			0.608		혼성제	비대칭	
	동방파제	28	247.0	+6.5	19.0	-21.5	6.5	14.0	SE/SSE			0.608		혼성제	비대칭	
은산항	남방파제	7	120.0	+5.0	8.7	-5.0	3.2	10.3	S	NNE	31.7	0.608		사석식	비대칭	
	남방파제	8	300.0	+5.0	12.0	-22.0	3.2	10.3	S	NNE	31.7	0.608		혼성제	비대칭	
	남방파제	9	590.0	+5.0	9.4	-6.0	3.2	10.3	S	NNE	31.7	0.608		사석식	비대칭	
	북방파제	10	220.0	+5.0	7.0	-6.0	3.2	10.3	S	NNE	31.7	0.608		사석식	비대칭	
	북방파제	11	200.0	+5.0	8.7	-10.5	3.2	10.3	S	NNE	31.7	0.608		사석식	비대칭	
	북방파제	12	930.0	+5.0	12.0	-10.5	3.2	10.3	S	NNE	31.7	0.608		혼성제	비대칭	
미포항	남방파제	1	550.0	+4.5	6.0		3.2	10.3	S	NNE	31.7	0.608		사석식	비대칭	
	북방파제	2	230.0	+4.0	6.0		3.2	10.3	S	NNE	31.7	0.608		사석식	비대칭	
군산내항																
군산외항	방사제	6	143.0	+8.0	4.0		2.2	6.0	W			7.246	이토	사석식	비대칭	
군장신항	도류제	1	49.0	+8.0	4.3		5.0	8.7	WNW	NNW	31.7	7.246	모래	사석식	비대칭	
	도류제	2	102.0	+8.0	7.0		5.0	8.7	WNW	NNW	31.7	7.246	모래	피복제	비대칭	
	도류제	3	468.0	+8.0	7.0		5.0	8.7	WNW	NNW	31.7	7.246	모래	피복제	비대칭	
장항항																
고정항																
대산항																
목포항																
대불항																
목포북항																
완도항	방파제	10	271.5	+5.5	4.5		2.0	4.0	NNW			4.004		사석식	대칭	
	여수구항															
여수신항	북방파제	12	180.0	+5.5	5.0	-10.0	1.9		S	NE	36.5	3.616	실트	사석식	비대칭	
	북방파제	13	640.0	+5.5	5.0	-9.0	5.29		S	NE	36.5	3.616	실트	사석식	비대칭	
	북방파제	14	10.0	+5.5	5.0	-9.0	5.29		S	NE	36.5	3.616	실트	사석식	비대칭	
	서방파제 보강	16	361.0	+9.0	11.5	-9.0	5.29		S	NE	36.5	3.616	실트	피복제	비대칭	
	서방파제 보강	17	407.0	+8.5	11.5	-8.0	4.96		S	NE	36.5	3.616	실트	피복제	비대칭	
	동방파제	18	315.0	+6.5	5.0	-11.0	5.6		S	NE	36.5	3.616	실트	사석식	비대칭	
광양항	동방파제	19	130.0	+6.5	10.0	-12.0	5.6		S	NE	36.5	3.616	실트	사석식	비대칭	
	방사제	11	488.7	+2.5	5.0	-3.7	4.5	12.0	NE	SW	39.8	0.246	모래	사석식	비대칭	
포항구항	방사제	12	51.3	+2.5	4.0	-6.3	4.2	12.0	NE	SW	39.8	0.246	모래	사석식	대칭	
	방파제	14	303.0	+3.0	6.0	-5.0	4.5	12.0	NE	SW	39.8	0.246	모래	사석식	비대칭	

항명	시설명	번호	연장 (m)	마루높이 E.L.(m)	마루폭 (m)	지반고 E.L.(m)	설계조건						비고			
							파랑		바람		조위(m) HWL	토질조건	구조형식	대칭형상	특징	
							파고(m)	주기(초)	파향	종향						풍속(m/s)
포항구항	방파제	15	143.5	+3.0	6.0	-5.0	4.5	12.0	NE	SW	39.8	0.246	모래	사석식	비대칭	상부진충
	방파제	16	101.5	+2.0	6.0	-5.0	4.5	12.0	NE	SW	39.8	0.246	모래	사석식	비대칭	상부진충
	방파제	17	69.0	+3.5	6.0	-6.0	4.5	12.0	NE	SW	39.8	0.246	모래	사석식	비대칭	
	방파제	18	45.0	+3.5	6.0	-6.5	4.5	12.0	NE	SW	39.8	0.246	모래	사석식	비대칭	
	방파제	19	186.5	+3.5	10.0	-7.4	4.5	12.0	NE	SW	39.8	0.246	모래	사석식	비대칭	
	방파제	20	13.5	+3.5	15.0	-7.4	5.2	12.0	NE	SW	39.8	0.246	모래	사석식	비대칭	
	방파제	21	138.0	+3.5	10.0	-7.7	5.2	12.0	NE	SW	39.8	0.246	모래	사석식	비대칭	
	방파제	22	10.0	+4.0	10.0	-8.0	5.2	12.0	NE	SW	39.8	0.246	모래	사석식	비대칭	
	방파제	30	561.0	+6.8	13.5	-10.6	5.0	10.0	NE	SW	39.8	0.246	모래	사석식	비대칭	혼성제
	방파제	31	456.0	+4.0	13.6		5.0	10.0	NE	SW	39.8	0.246	모래	사석식	비대칭	혼성제
포항신항	방파제	32	126.54	+4.0	3.6		5.0	10.0	NE	SW	39.8	0.246	모래	사석식	비대칭	혼성제
	방파제	33	507.0	+6.0	13.6	-13.0	5.0	10.0	NE	SW	39.8	0.246	모래	사석식	비대칭	
	방파제	34	200.0	+6.0	14.6	-14.0	5.0	10.0	NE	SW	39.8	0.246	모래	사석식	비대칭	
	방파제	35	185.0	+6.0	14.6	-15.0	5.0	10.0	NE	SW	39.8	0.246	모래	사석식	비대칭	
	방파제	36	15.0	+6.0	14.6	-15.0	5.0	10.0	NE	SW	39.8	0.246	모래	사석식	비대칭	혼성제
	등방파제	37	300.0	+4.0	9.3	-13.0	5.6	10.0	NE	SW	39.8	0.246	모래	사석식	비대칭	혼성제
	등방파제	38	250.0	+5.5	11.0	-11.0	5.6	10.0	NE	SW	39.8	0.246	모래	사석식	비대칭	혼성제
	서방파제	16	150.0	+5.0	10.5	-3.0	6.0		NW	NNW	36.5	2.833	모래/현무암	사석식	비대칭	후면애립
	서방파제	17	240.0	+5.5	8.5	-3.0	6.0		NW	NNW	36.5	2.834	모래/현무암	사석식	비대칭	상부진충
	서방파제	18	260.0	+6.0	11.0	-7.0	6.0		NW	NNW	36.5	2.834	모래/현무암	사석식	비대칭	상부진충
제주항	서방파제	19	90.0	+6.0	12.0	-7.5	6.0		NW	NNW	36.5	2.834	모래/현무암	사석식	비대칭	상부진충
	서방파제	20	38.2	+6.0	12.0	-9.5	6.0		NW	NNW	36.5	2.834	모래/현무암	사석식	비대칭	상부진충
	서방파제	21	58.5	+6.0	12.0	-10.0	6.0		NW	NNW	36.5	2.834	모래/현무암	사석식	비대칭	상부진충
	서방파제	22	33.3	+6.0	12.0	-10.0	6.0		NW	NNW	36.5	2.834	모래/현무암	사석식	비대칭	상부진충
	서방파제	23	471.0	+6.0	13.0	-11.0	6.9		NW	NNW	41.5	2.834	모래/현무암	사석식	비대칭	
	서방파제	24	128.5	+6.0	13.0	-13.0	6.0	12.0	NW	NNW	36.0	2.834	모래/현무암	사석식	비대칭	
	서방파제	25	168.7	+6.0	13.0	-13.5	6.0	12.0	NW	NNW	36.0	2.834	모래/현무암	사석식	비대칭	
	서방파제	26	151.8	+6.0	13.0	-15.0	6.0	12.0	NW	NNW	36.0	2.834	모래/현무암	사석식	비대칭	
	서방파제	27	100.0	+6.0	13.0	-16.0	6.0	12.0	NW	NNW	36.0	2.834	모래/현무암	사석식	비대칭	
	구동방파제	28	81.0	+5.0	12.0	-6.0	6.9		NW	NNW	41.5	2.834	모래/현무암	사석식	비대칭	상부진충
	구동방파제	29	219.0	+5.0	6.0	-10.5	6.9		NW	NNW	41.5	2.834	모래/현무암	사석식	비대칭	
	동방파제	30	50.0	+7.0	10.0	-2.5	5.8	11.0	NE	NNW	41.5	2.834	모래/현무암	사석식	비대칭	
	동방파제	31	40.0	+7.0	10.0	-4.0	5.8	11.0	NE	NNW	41.5	2.834	모래/현무암	사석식	비대칭	
	동방파제	32	4.0	+7.5	10.0	-8.0	5.8	11.0	NE	NNW	41.5	2.834	모래/현무암	사석식	비대칭	
동방파제	33	96.0	+7.5	10.0	-9.0	5.8	11.0	NE	NNW	41.5	2.834	모래/현무암	사석식	비대칭		
동방파제	34	260.0	+7.5	10.0	-11.0	5.8	11.0	NE	NNW	41.5	2.834	모래/현무암	사석식	비대칭		

항명	시설명	번호	연장 (m)	마루높이 E.L.(m)	마루폭 (m)	지반고 E.L.(m)	설계조건				토질조건		비고		
							파랑		바람						구조형식
							파고(m)	주기(초)	파향	종향	풍속(m/s)	조위(m) HWL	구조형식	대칭형상	
제주항	동방파제	35	150.0	+7.5	10.0	-14.0	5.8	11.0	NE	NNW	41.5	2.834	사석식	비대칭	
	동방파제	36	130.0	+7.5	12.0	-14.5	5.8	11.0	NE	NNW	41.5	2.834	사석식	비대칭	
	동방파제	37	61.0	+6.0	12.0	-16.0	5.8	11.0	NE	NNW	41.5	2.834	사석식	비대칭	
서귀포항	구동방파제	9	143.0	+6.0	5.0		8.8	12.0	S	NE	40.2	3.032	사석식	비대칭	후연몰양장
	동방파제	10	95.0	+5.0	6.0		8.8	12.0	S	NE	40.2	3.032	사석식	대칭	
	동방파제	11	285.0	+5.2	6.0		8.8	12.0	S	NE	40.2	3.032	사석식	대칭	
	동방파제	12	71.4	+6.0	8.0	-6.0	8.8	12.0	S	NE	40.2	3.032	사석식	비대칭	후면보수
	동방파제	13	59.6	+7.0	11.0	-8.0	8.8	12.0	S	NE	40.2	3.032	사석식	비대칭	
	동방파제	14	73.0	+7.0	12.0	-7.1	8.8	12.0	S	NE	40.2	3.032	사석식	비대칭	
	동방파제	15	133.0	+7.0	12.0		8.8	12.0	S	NE	40.2	3.032	사석식	비대칭	
	동방파제	16	136.6	+7.0	8.9	-7.5	8.8	12.0	S	NE	40.2	3.032	블록식	비대칭	25톤TTP
	서방파제	17	280.0	+4.0	4.0	-2.0	7.4	12.0	SW	NE	40.2	3.032	사석식	비대칭	상부진충
	서방파제	18	280.0	+6.5	6.0		8.8	12.0	S	NE	40.2	3.032	사석식	비대칭	
	남방파제	19	44.0	+7.5	9.7	-21.0	8.8	12.0	S	NE	40.2	3.032	사석식	비대칭	
	남방파제	20	196.0	+8.0	12.7	-21.0	8.8	12.0	S	NE	40.2	3.032	사석식	대칭	



항명	시설명	번호	단면특징	하부소단		피복층수		항의 축 시면																		
				실계/보수	소단수	소단중	형태	항의축	항내축	피복층			중간피복층													
										규격	경사도	층수	두께(m)	중간피복재	규격	경사도	층수	두께								
고원항	북방파제	7																								
	북방파제	8																								
	북방파제	9																								
	북방파제	10																								
동해항	북방파제	11																								
	남방파제	12																								
	남방파제	13																								
	남방파제	14																								
목호항	방파제	17	보수																							
	방파제	18	보수					3							TTP	5	4	2	2.6	피복석	0.55	4	1	0.8		
	방파제	19	보수	1	피	F		2							TTP	5	1.33	2	2.6	피복석	0.2	1.33	1	0.5		
	방파제	20	보수					2							ATB	5	1.5		1.4	피복석	0.4	1.5	2	1.8		
	방파제	21	보수	1	피	F									TTP	20	1.5			사석	0.02	1.5	2	0.6		
	방파제	22	보수	1	피	F									TTP	5	2	2	2.6							
	방파제	23	보수	1	피	F																				
	방파제	24	보수	1	피	F																				
	방파제	25	보수	1	피	F																				
	방파제	26	보수	1	피	F																				
	방파제	27	보수	1	사석T	D																				
	방파제	28	보수	1	중/기	D	2	3	2						TTP	20	2	2	4.1	피복석	0.5	2	2	1.6		
	방파제	29	보수	1	중/기	D	2	1	2						TTP	20	2.5	2	4.1	피복석	0.5	2.5	1	0.8		
	방파제	30	보수				2	1	2						TTP	20	2	2	4.1	피복석	0.5	2	2	1.6		
	방파제	31	보수				2	2	2						TTP	20	2	2	4.1	피복석	0.5	2	2	1.6		
	방파제	32	보수				2	2	2						TTP	32	1.5	2	4.8	피복석	0.8	1.5	1	1.0		
방파제	33	보수	-1		H	3	2	2						TTP	5	3	2	2.6	피복석	0.5	3	2				
방파제	34	보수				2	1	2						TTP	8	1.5	2	3.0	피복석	0.35	1.5	2	1.2			
방파제	35	보수				2	1	2						TTP	8	1.5	2	3.0	피복석	0.35	1.5	2	1.2			
방파제	36	보수				2	1	2						TTP	16	1.5	2	3.8	피복석	0.5	1.5	2	1.6			
방파제	37	보수				2	2	2						TTP	16	1.5	2	3.8	피복석	0.9	1.5	2	2.0			
속초항	방파제	25				1								피복석	0.35											
	방파제	26				2	1	2						TTP	12.5	1.33	2	3.5	피복석	0.35	1.33	2	1.4			

항명	시설명	번호	단면특징		하부소단		피복층수		항의측 사면										
			설계/보수	소단수	소단층	형태	항의측	항내측	피복층			중간피복층							
									피복재	규격	경사도	층수	두께(m)	중간피복재	규격	경사도	층수	두께	
속초항	방파제	27					2	1	TTP	20	2	2	2	4.1	피복석	0.55	2	2	1.6
	방파제	28		1	중/기	D	2	2	TTP	25	2	2	2	4.4	피복석	0.55	2	2	1.6
	방파제	29					2	2	피복석	1.1	2.5	1	1	1.2	피복석	0.1	2.5	1	0.5
	방파제	30	보수				2	2	TTP	12.5	1.33	2	2	3.5	피복석	0.5	1.33	1	0.8
	방파제	16	보수				2		TTP	5	3				피복석	0.8	4	2	2.0
	방파제	17	보수	-1	사석T	H	3		TTP(상)	5	3				ATB	5	3		
	방파제	18	보수				2		피복석(하)	0.8	2.5	M			피복석	0.5	3		
	방파제	19	보수	1	사석T	G	3		TTP	5	4	2			피복석	0.8	4	2	2.0
	방파제	20	보수	1	사석T	G	3		TTP	12.5	2				피복석	0.8	3	1	1.0
	방파제	21	보수	1	사석T	G	3		ATB	11.6	3				피복석	0.8	3	1	1.0
삼척항	방파제	22	보수	1	사석T	G	3		TTP	12.5	2				피복석	0.5	3	2	2.0
	방파제	23	보수	1	사석T	G	3		TTP	12.5	3	2		3.5	피복석	0.5	3	2	2.0
	방파제	24	보수	1	사석T	G	3		TTP	12.5	2				사석	0.2	3		
	방파제	25	보수	1	사석T	C/G	3		ATB	11	3				사석	0.2	3		
	방파제	26	보수	1	사석T	G	3		TTP	12.5	2				피복석	0.3	3	3	2.0
	방파제	27	보수	1	사석T	G	3		TTP	12.5	3	2		3.5	피복석	0.3	3	3	2.0
	방파제	28	보수	1	사석T	G	3		TTP	12.5	2				피복석	0.3	2.5	3	2.0
	방파제	29	보수	1	사석T	G	3		TTP	12.5	2.5	2			피복석	0.3	2	2	1.6
	방파제	30	보수	1	중/기	D	2	2	TTP	20	2	2		4.1	피복석	0.3	2	2	1.9
	방파제	31	보수	1	사석T	B	3		ATB	3	2			1.16	피복석	0.8	2	1	0.8
	방파제	32	보수	1	사석T	B	3		사석	0.2	2				사석	0.2	2	2	1.2
	방파제	33	보수	1	사석T	B	3		ATB	5	2			1.4	피복석	0.5	2	1	0.8
	방파제	34	보수	1	사석T	B	3		ATB	5	2			1.4	사석	0.2	2	2	1.2
	방파제	35	보수	1	사석T	B	3		ATB	5	2			1.4	피복석	0.8	2	1	0.8
	방파제	34	보수	1	사석T	A	2	2	TTP	12.5	1.5	2		3.5	사석	0.2	2	2	1.2
방파제	35	보수	1	기	E	2	2	TTP	12.5	1.5	2		3.5	피복석	0.35	1.5	2	1.4	
방파제	35	보수	1	기	E	2	2	TTP	12.5	1.5	2		3.5	피복석	0.35	1.5	2	1.4	

항명	시설명	번호	단면특징	하부소단		피복층수		항의측 시면				중간피복층								
				소단수	소단중 형태	항의측	항내측	피복층		중간피복재		중간피복층								
								규격	경사도	층수	중수	규격	경사도	층수	중수					
육계항	방파제	4	설계/보수	1	피	F	1		피복석	0.8	1.5	3	3.0							
	방파제	5		1	피	F	1		피복석	0.8	2	2	1.8							
	방파제	6		2	피/중	D	2		TTP	6.3	1.33	2	2.7	피복석	0.15	1.33	2	1.0		
	방파제	7		2	피/중	D	2	2	TTP	6.3	1.33	2	2.7	피복석	0.15	1.33	2	1.0		
	방파제	8		2	피/중	D	2	2	TTP	16	1.33	2	3.8	피복석	0.3	1.33	2	1.3		
	방파제	9																		
	방파제	10		1	피	F	1		피복석	0.8	2	1	0.9							
	방파제	11		1	피	F	1		피복석	0.8	2	1	1.0							
	방파제	12		2	피/중	D	2		TTP	6.3	1.33	2	2.7	피복석	0.15	1.33	2	1.0		
	방파제	13		2	피/중	D	2	2	TTP	6.3	1.33	2	2.7	피복석	0.15	1.33	2	1.0		
	방파제	14		2	피/중	D	2	2	TTP	16	1.33	2	3.8	피복석	0.3	1.33	2	1.3		
	방파제	15		2	피/중	D	2	2	TTP	32	1.33	2	4.8	피복석	0.5	1.33	2	1.7		
	방파제	16		2	피/중	D	2	1	TTP	32	1.33	2	4.8	피복석	0.5	1.33	2	1.7		
	방파제	17		2	피/중	D	2	2	TTP	32	1.33	2	4.8	피복석	0.5	1.33	2	1.7		
	방파제	18		2	피/중	D	2	2	TTP	32	1.33	2	4.8	피복석	0.5	1.33	2	1.7		
	방파제	19		2	피/중	D	2	2	TTP	32	1.33	2	4.8	피복석	0.5	1.33	2	1.7		
	방파제	20		2	피/중	D	2	2	TTP	32	1.33	2	4.8	피복석	0.5	1.33	2	1.7		
	방파제	21		2	피/중	D	2	2	TTP	32	1.33	2	4.8	피복석	0.5	1.33	2	1.7		
	방파제	22		2	피/중	D	2	2	TTP	32	1.33	2	4.8	피복석	0.5	1.33	2	1.7		
	방파제	23		2	피/중	D	2	2	TTP	32	1.33	2	4.8	피복석	0.5	1.33	2	1.7		
	방파제	17		1	사석T	B	2	1	TTP(상) 피복석(하)	5 0.5	1.5 1.5	2 M	2.6 소단	피복석	0.3	1.5	1	0.8		
	울산항	동방파제	26																	
		동방파제	27																	
동방파제		28																		
남방파제		7					2	1	TTP	25	1.33	2	4.4	피복석	0.5	1.33	1	0.9		
온산항	남방파제	8																		
	남방파제	9		1	사석T	B	2	2	TTP	25	1.33		4.5	피복석	0.5	1.33	1	0.9		
	북방파제	10					2	1	TTP	20	1.33	2	4.0	피복석	0.5	1.33	1	0.9		
	북방파제	11					2	1	TTP	25	1.33	2	4.4	피복석	0.5	1.33	1	0.9		
	북방파제	12																		
미포항	남방파제	1		1	피	F	2	2	피복석(상) 피복석(하)	2.0 0.25	4 3	2 M	2.5	피복석	0.25	4	1	1.0		
	북방파제	2		1	기	E	2	2	피복석	1.85	4	2	2.5	피복석	0.15	4	2	1.0		

항명	시설명	번호	단면특징	하부소단		피복층수		항외측 시면													
				소단수	소단층	형태	피복층수		피복층		중간피복층		중간피복층								
							소단수	소단층	규격	경사도	층수	두께(m)	중간피복재	규격	경사도	층수	두께				
군산내항	방사제	6																			
	도류제	1																			
	도류제	2																			
	도류제	3																			
장항항																					
여수신항	방파제	10																			
	복방파제	12																			
	복방파제	13																			
	복방파제	14																			
	서방파제 보강	16																			
	서방파제 보강	17																			
	동방파제	18																			
	동방파제	19																			
	광양항	방사제	11																		
방사제		12																			
방파제		14																			
방파제		15																			
방파제		16																			
방파제		17																			
방파제		18																			
방파제		19																			
포항구항		방파제	20																		
	방파제	21																			
	방파제	22																			



항명	시설명	번호	단면특징	하부소단		피복층수		항의측 사면									
				소단수	소단중 형태	항의측	항내측	피복층		중간피복층							
				설계/보수	형태	피복층수	피복재	규격	경사도	층수	두께(m)	중간피복재	규격	경사도	층수	두께	
포항신항	방파제	30															
	방파제	31															
	방파제	32															
	방파제	33															
	방파제	34															
	방파제	35															
	방파제	36															
	동방파제	37															
제주항	동방파제	38															
	서방파제	16	보수			2	1	TTP	3.2	4	2	2.2	피복석	0.5	4	4	2.5
	서방파제	17	보수			2	1	TTP	3.2	4	2	2.2	피복석	0.5	4	4	2.5
	서방파제	18				2	1	TTP	12.5	3	2	3.5	피복석	0.5	3	1	0.8
	서방파제	19	보수			3	2	TTP	12.5	4	2	3.5	피복석	0.8	4	2	2.0
	서방파제	20											피복석	0.1	4	4	2.0
	서방파제	21	보수										TTP(상)	20	2	2	
	서방파제	22	보수			4	2	ATB(하)	11.5	2	2		피복석	0.3	2	2	1.5
	서방파제	23				4	2	TTP	20	2	2		피복석	0.8	2	1	
	서방파제	24				2	1	ATB	11.5	2	2		피복석	0.3	2	2	1.5
제주항	서방파제	25				2	1	TTP	20	2	2	4.1	피복석	0.8	2	1	1.0
	서방파제	26				2	1	TTP	20	2	2	4.1	피복석	0.8	2	1	1.0
	서방파제	27				2	1	TTP	25	1.5	2	4.4	피복석	0.8	1.5	1	1.0
	서방파제	28				2	2	TTP	25	1.5	2	4.4	피복석	0.8	1.5	1	1.0
	구동방파제	29				2	2	피복석	1.0	3	1	1.5	피복석	0.3	3	2	1.5
	구동방파제	30				2	2	6/4블록(상)	5	1.5		2.4	피복석	0.5	1.5	1	1.0
	동방파제	31				2	1	피복석(하)	1.0	1.5	1	소단	피복석	0.5	1.5	1	0.8
	동방파제	32				2	1	TTP	8	1.5	2	3.0	피복석	0.5	1.5	1	0.8
	동방파제	33				2	1	TTP	12.5	1.5	2	3.5	피복석	0.5	1.5	1	0.8
	동방파제	34				2	1	TTP	20	1.5	2	4.1	피복석	0.8	1.5	1	1.0
	동방파제	35				2	1	TTP	20	1.5	2	4.1	피복석	0.8	1.5	1	1.0
	동방파제	36				2	1	TTP	20	1.5	2	4.1	피복석	0.8	1.5	1	1.0
	동방파제	37				2	1	TTP	20	1.5	2	4.1	피복석	0.8	1.5	1	1.0

항명	시설명	번호	단면특징	하부소단		피복층수		항의측 시면									
				소단수	소단층 형태	항의측	항내측	피복층			중간피복층						
								규격	경사도	층수	두께(m)	중간피복재	규격	경사도	층수	두께	
서귀포항	구동방파제	9	실계/보수			3		피복석	0.5	2	1	1.5	피복석	0.4	2	2	2.0
	동방파제	10				1	1	피복석	1.0	2	1	1.2					
	동방파제	11				1	1	피복석	1.0	2	1	1.2					
	동방파제	12	보수			2	2	TTP	10	2	2	3.2	피복석	0.5	2	1	0.8
	동방파제	13				2	2	TTP	25	2	2	4.4	피복석	0.8	2	1	1.0
	동방파제	14				2	1	TTP	25	2	2	4.4	피복석	0.8	2	1	1.0
	동방파제	15				2	1	TTP	25	2	2	4.4	피복석	0.8	2	1	1.0
	동방파제	16															
	서방파제	17				1	1	피복석	0.4	3	2	2.0					
	서방파제	18	보수			3	1	TTP	5	1.5	2	2.6	피복석	0.4	1.5		
남방파제	19				2	2	TTP	32	2	2	4.8	피복석	0.8	2	1	1.0	
남방파제	20				3	3	TTP	64	1.5	2	6.0	심각물리	27	1.5	1	1.4	
													피복석	0.8	1.5	1	1.0

항명	시설명	번호	기초사석			상치콘크리트		항내측 사면													
			규격	경사도	형상	하부	피복층			중간피복층											
							항외측	항내측	규격	경사도	층수	규격	경사도	층수	규격	경사도	층수	두께			
부산항	남북방파제 부두	30																			
	오륙도 방파제	35																			
	남북방파제	36																			
	조도방파제A	43	1	3	2	L형/피계벽	진층/사석	피복석	0.5	2	1	0.8									
	조도방파제B	44																			
감천항	서방파제	7																			
	동방파제	8																			
남천항	방파제	7																			
	방파제(동명목재)	1	1	2	1.5	역B형	사석/석축	피복석	0.5	1.5	1	1.0									
다대포항	방파제	44																			
	방파제	45																			
	방파제	51	1	2	1.5/2	□형	방괴	피복석	0.2	1.5/2	1										
	방파제	52																			
	방파제	53																			
	방파제	54																			
	방파제	55																			
평택항	석천지구 방파제	29	1	1.5	1.5	□형	기초사석	피복석	0.2	1.5	1	0.6									
	남방파제	30	1	1.5	1.5	B형	기초사석	피복석	0.3	1.5	1	0.7									
	서방파제	31	1	1.5	1.5	□형	기초사석	피복석	0.3	1.5	1	0.7									
마산항	방파제	9	1	2.5	2																
	등호만 방파제	14	1	1.5	1																
충무항	도남 방파제	15																			
	방파제	9	1	2	1.5	L형	방괴	피복석	0.55	1.5	1	1.0									
심천포항	방파제	10	1	1.33	1.5	□형	방괴/속채울	피복석	1.0	1.5	2	2.0									
	방파제	11	1	1.33	1.5	□형	방괴/속채울	피복석	1.0	1.5	2	2.0									
	방파제	12	1	1.33	1.5	□형	방괴/기초	피복석	1.0	1.5	1	1.2									
	방파제	13	1	1.33	1.5	□형	방괴/기초	피복석	1.0	1.5	1	1.2									
	서방파제	7	1	1.33	1.5	역L형	진층/사석	피복석(상)	0.4	1.5											
장승포항	동방파제	8	1	1.5	2	□형	진층/사석	피복석(하)	0.4	3	M										
	동방파제	8	1	1.5	2	역L형	진층/사석	피복석(상)	0.4	1.5											
	동방파제	8	1	1.5	3	□형	진층/사석	피복석(하)	0.4	3	2										
진해항																					
육포항	남북방파제	1	1	1.5	1.5	L형	중간피복	피복석(상)	1.0	1.5	1	1.2									
	남북방파제	1	1	1.5	1.5	L형	중간피복	피복석(하)	0.2	1.5	1	0.6									
고원항																					

항명	시설명	번호	기초사석		상치콘크리트		항내측 사면												
			규격	경사도	형상	하부	피복층			중간피복층									
							피복재	규격	경사도	중수	두께	중간피복재	규격	경사도	중수	두께			
등해항	북방파제	7																	
	북방파제	8																	
	북방파제	9																	
	북방파제	10																	
	북방파제	11																	
	남방파제	12																	
	남방파제	13																	
목호항	남방파제	14																	
	방파제	17	토사	4	L형	토사													
	방파제	18	1	1.33	도로	피복재													
	방파제	19	1	1.5	사다리벽	기초사석													
	방파제	20	1	2	사다리벽	기초사석													
	방파제	21																	
	방파제	22																	
	방파제	23																	
	방파제	24																	
	방파제	25																	
	방파제	26																	
	방파제	27																	
	방파제	28	1	2	□형	방괴/기초	ATB	8	1				1.6		피복석	1.0	1	2	2.4
	방파제	29	1	2.5	2	□형	방괴/기초	피복석	0.5	2			2	1.6					
방파제	30	1	2	1.5	□형	방괴/기초	피복석	0.8	1.5	2	2.0								
방파제	31	1	2	1.5	□형	방괴/기초	TTP	8	1.5	2	3.0			피복석	0.2	1.5	2	1.2	
방파제	32	1	1.5	1.5	□형	방괴/기초	TTP	8	1.5	2	3.0			피복석	0.2	1.5	2	1.2	
방파제	33	1	3	2	□형	방괴/파제벽	피복석	0.5	2	2				피복석	0.2	2	M		
방사제	34	1	1.5	1.5	L형	방괴/기초	피복석	0.5	1.5	2	1.6								
방사제	35	1	1.5	1.5	L형	방괴/셀블럭	피복석	0.5	1.5	2	1.6								
방사제	36	1	1.5	1.5	□형	셀블럭	피복석	0.9	1.5	2	2.0								
방사제	37	1	1.5	1.5	□형	셀블럭	TTP	16	1.5	2	3.8			피복석	0.55	1.5	1	1.0	
방파제	25	1			사다리벽	피복재													
방파제	26	1	1.33	1.5	L형	방괴/기초	피복석	0.9	1.5	2	2.0								
방파제	27	1	2	1.5	□형	방괴/기초	피복석	1.0	1.5	1	1.2								
방파제	28	1	2	2	□형	방괴/기초	TTP	25	2	2	4.4			피복석	0.55	2	2	1.6	
방파제	29	1	2.5	1.5	□형	중간피복	피복석	0.9	1.5	1	1.0			피복석	0.1	1.5	1	0.5	
방파제	30	1	1.33	1.33	□형	방괴/기초	TTP	12.5	1.33	2	3.5			피복석	0.5	1.33	1	0.8	

항명	시설명	번호	기초사석		상처콘크리트		피복층				황내측 시면						
			규격	경사도	형상	하부	피복재	규격	경사도	층수	두께	중간피복재	규격	경사도	층수	두께	
																	황외측
심척항	방파제	16	1	4	L형	진중/파리켓	TTP	5	1.33	2	2.6	피복석	0.35	1.33	2	1.4	
	방파제	17	1	3	L형	진중/파리켓	TTP	5	1.33	2	2.6	피복석	0.35	1.33	2	1.4	
	방파제	18	1	4	L형	진중/파리켓	TTP	5	1.33	2	2.6	피복석	0.35	1.33	2	1.4	
	방파제	19	1	4	L형	진중/파리켓	TTP	5	1.33	2	2.6	피복석	0.35	1.33	2	1.4	
	방파제	20	1	3	L형	파리켓	TTP	25	2	2	4.4	피복석	0.9	2	2	1.9	
	방파제	21	1	3	L형	방괴/파리켓											
	방파제	22	1	3	L형	방괴/파리켓											
	방파제	23	1	3	L형	방괴/파리켓											
	방파제	24	1	2.5	L형	방괴/파리켓											
	방파제	25	1	2	L형	방괴/파리켓											
	방파제	26	1	2	1.33	L형	방괴/기초										
	방파제	27	1	2	1.33	L형	방괴/기초										
	방파제	28	1	2	1.33	L형	방괴/기초										
	방파제	29	1	2	1.33	L형	방괴/기초										
	방파제	30	1	2	2	□형	방괴/기초										
	방파제	31	1	2		역사다리	중간피복										
	방파제	32	1	2		역사다리	중간피복										
	방파제	33	1	2		역사다리	중간피복										
	방파제	34	1	1.5	1.5	□형	방괴/기초	TTP	5	1.5	2	2.6	피복석	0.35	1.5	2	1.4
	방파제	35	1	1.5	1.5	□형	방괴/기초	TTP	12.5	1.5	2	3.5	피복석	0.35	1.5	2	1.4
	방파제	4	1	1.5													
	방파제	5	1	2		사다리벽	기초사석										
	방파제	6	1	1.33		사다리벽	기초사석										
	방파제	7	1	1.33	1.5	L형	기초사석										
	방파제	8	1	1.33	1.5	L형	기초사석										
	방파제	9															
	방파제	10	1	2													
	방파제	11	1	2		사다리벽	기초사석										
	방파제	12	1	1.33		사다리벽	기초사석										
	방파제	13	1	1.33	1.5	L형	기초사석										
방파제	14	1	1.33	1.5	□형	기초사석											
방파제	15	1	1.33	1.5	□형	기초사석											
방파제	16	1	1.33	1.5	□형	기초사석											
방파제	17	1	1.33	1.5	□형	기초사석											
방파제	18	1	1.33	1.5	□형	기초사석											
방파제	19	1	1.33	1.33	□형	기초사석											
옥계항	방파제	16	1	4	L형	진중/파리켓	TTP	5	1.33	2	2.6	피복석	0.35	1.33	2	1.4	
	방파제	17	1	3	L형	진중/파리켓	TTP	5	1.33	2	2.6	피복석	0.35	1.33	2	1.4	
	방파제	18	1	4	L형	진중/파리켓	TTP	5	1.33	2	2.6	피복석	0.35	1.33	2	1.4	
	방파제	19	1	4	L형	진중/파리켓	TTP	5	1.33	2	2.6	피복석	0.35	1.33	2	1.4	
	방파제	20	1	3	L형	파리켓	TTP	25	2	2	4.4	피복석	0.9	2	2	1.9	
	방파제	21	1	3	L형	방괴/파리켓											
	방파제	22	1	3	L형	방괴/파리켓											
	방파제	23	1	3	L형	방괴/파리켓											
	방파제	24	1	2.5	L형	방괴/파리켓											
	방파제	25	1	2	L형	방괴/파리켓											
	방파제	26	1	2	1.33	L형	방괴/기초										
	방파제	27	1	2	1.33	L형	방괴/기초										

항명	시설명	번호	기초사석		상치콘크리트		함내측 시면										
			규격	경사도	형상	하부	피복층					중간피복층					
							피복재	규격	경사도	중수	두께	중간피복재	규격	경사도	중수	두께	
육계항	방파제	20	1	1.33	1.33	□형	기초사석	TTP	6.3	1.33	2	2.7	피복석	0.15	1.33	2	1.0
	방파제	21	1	1.33	1.33	□형	기초사석	TTP	16	1.33	2	3.8	피복석	0.3	1.33	2	1.3
	방파제	22	1	1.33	1.33	□형	기초사석	TTP	32	1.33	2	4.8	피복석	0.5	1.33	2	1.7
	방파제	23	1	1.33	1.33	□형	케이슨	TTP	32	1.33	2	4.8	피복석	0.5	1.33	2	1.7
울산항	방파제	17	1	1.5	1.5	L형	방괴/기초	피복석	0.5	1.5	1	0.8					
	동방파제	26															
	동방파제	27															
	동방파제	28															
온산항	남방파제	7	1	1.33	1.5	□형	중공블럭	피복석	1.1	1.5	1	1.2					
	남방파제	8															
	남방파제	9	1	1.33	1.33			TTP	25	1.33		4.5	피복석	0.5	1.33	1	0.9
	북방파제	10	1	1.33	1.5	□형	중공블럭	피복석	1.1	1.5	1	1.2					
미포항	북방파제	11	1	1.33	1.5	□형	중공블럭	피복석	1.1	1.5	1	1.2					
	북방파제	12															
	남방파제	1	1	4	1.5			피복석(상)	1.2	1.5	2	2.1	피복석	0.25	1.5	1	1.0
	북방파제	2	1	4	3			피복석(하)	0.25	1.5	3	3.1	피복석	0.15	3	2	1.0
군산내항	방사제	6	1	1.5	1			피복석	0.2	1	1	0.6					
	도류제	1	1	1.5													
	도류제	2	1	1.5	1.5	□형	셀블럭	피복석	0.2	1.5	4	3.0					
	도류제	3	1	1.5	1.5	□형	셀블럭	TTP	5	1.5	2	2.6	피복석	0.2	1.5	1	0.4
여수신항	방파제	10	1	1.5	1.5	□형	기초사석	피복석	1.0	1.5	1	1.2					
	북방파제	12	1	1.5	2	L형	방괴/기초	피복석	0.35	2	2	1.4					
	북방파제	13	1	1.5	1.5	L형	기초사석	피복석	0.3	1.5	1						
	북방파제	14	1	1.5	1.5	□형	기초사석	피복석	0.6	1.5	1	0.85					
	서방파제 보강	16															
	서방파제 보강	17															

항명	시설명	번호	기초사석		상처콘크리트		항내측 시면										
			규격	경사도	항상	하부	피복층					중간피복층					
							피복재	규격	경사도	층수	두께	중간피복재	규격	경사도	층수	두께	
여수신항	동방파제	18	1	1.5	1.5	□형	중간피복	피복석(상)	0.8	1.5	1	1.0	피복석	0.05	1.5	2	0.6
	동방파제	19	1	1.5	1.5	□형	방괴/기초	피복석(하)	0.4	2	1	1.0					
광양항	방사제	11	3	2	2	□형	피복석	피복석	1.0	2	1	1.2					
	방사제	12	2	2	2	□형	방괴	TTP	8	2	2	3.0	피복석	0.2	2	1	0.6
포항구항	방파제	14	3	2.5	2.5	L형	방괴/사석	피복석	0.3	2.5	2	1.5					
	방파제	15	3	2	2	역보형	방괴/사석	피복석	0.3	2.5	2	1.5					
	방파제	16	3	2	2	역보형	방괴/사석	피복석	0.3	2.5	2	1.5					
	방파제	17	2	2.5	2.5	L형	진충	피복석	0.5	2.5	1	1.0					
	방파제	18	1	1.33	2	L형	진충/사석	피복석	0.5	2	1	1.0	피복석	0.3	2	1	0.7
	방파제	19	2	1.5	1.5	L형	방괴/사석	피복석	0.8	1.5	1	1.0					
	방파제	20	2	2	2	비형	방괴/사석	피복석	0.35	2	1	0.7					
	방파제	21	2	1.5	1.5	L형	방괴/사석	피복석	0.8	1.5	1	1.0					
	방파제	22	2	2	2	비형	방괴/사석	TTP	20	2	2	4.1	피복석	0.5	2	1	0.8
	방파제	30															
포항신항	방파제	31															
	방파제	32															
	방파제	33															
	방파제	34															
	방파제	35															
	방파제	36															
	동방파제	37															
	동방파제	38															
	서방파제	16	4	1.5	1.5	L형	진충/사석	피복석	0.1	1.5	3						
	서방파제	17	4	1.5	1.5	L형	진충/사석	피복석	0.1	1.5	3						
제주항	서방파제	18	3	1.5	1.5	L형	중간피복	피복석	1.0	1.5	1	1.2					
	서방파제	19	4	3	3	L형	진충/사석	피복석	0.8	3	2	2.0	피복석	0.1	3	4	2.0
	서방파제	20															
	서방파제	21	2	2	2	L형	진충/중간	피복석	1.0	2	1	1.5	피복석	0.3	2	2	1.5
	서방파제	22	2	2	2	L형	진충/중간	피복석	1.0	2	1	1.5	피복석	0.3	2	2	1.5
	서방파제	23	2	2	2	L형	방괴/사석	피복석	1.0	2	1	1.2					
서방파제	24	2	2	2	L형	방괴/기초	피복석	1.0	2	1	1.2						
서방파제	25	2	2	2	L형	방괴/기초	피복석	1.0	2	1	1.2						
서방파제	26	1	1.5	2	L형	방괴/기초	피복석	1.0	2	1	1.2						

항명	시설명	번호	기초사석		상치콘크리트		항내측 사면										
			규격	경사도	형상	하부	피복층					중간피복층					
							피복재	규격	경사도	층수	두께	중간피복재	규격	경사도	층수	두께	
제주항	서방파제	27	1	1.5	1.5	L형	방괴/기초	TTP	20	1.5	2	4.1	피복석	0.8	1.5	1	1.0
	구동방파제	28	1	3	2	L형	진층/사석	피복석	1.0	2	1	1.5	피복석	0.3	2	2	1.5
	구동방파제	29	1	1.5	1.5	L형	중간피복	피복석	1.0	1.5	1	1.5	피복석	0.3	1.5	2	1.5
	동방파제	30	1	1.5	1.5	L형	기초사석	피복석	1.0	1.5	1	1.2					
	동방파제	31	1	1.5	1.5	L형	기초사석	피복석	1.0	1.5	1	1.2					
	동방파제	32	1	1.5	1.5	L형	기초사석	피복석	1.0	1.5	1	1.2					
	동방파제	33	1	1.5	1.5	L형	방괴/기초	피복석	1.0	1.5	1	1.2					
	동방파제	34	1	1.5	1.5	L형	방괴/기초	피복석	1.0	1.5	1	1.2					
	동방파제	35	1	1.5	1.5	L형	방괴/기초	피복석	1.0	1.5	1	1.2					
	동방파제	36	1	1.5	1.5	L형	방괴/기초	피복석	1.0	1.5	1	1.2					
	동방파제	37	1	1.5	1.5	L형	방괴/기초	피복석	1.0	1.5	1	1.2					
	구동방파제	9	1	2		사다리벽	진층/사석										
	동방파제	10	1	2	2			피복석	1.0	2	1	1.2					
	동방파제	11	1	2	2	진층	사석	피복석	1.0	2	1	1.2					
	동방파제	12	1	2	2	L형	방괴/중간	TTP	10	2	2	3.2	피복석	1.0	2	1	1.2
	동방파제	13	1	2	2	L형	방괴/기초	TTP	25	2	2	4.4	피복석	0.8	2	1	1.0
	동방파제	14	1	2	2	L형	방괴/중간	피복석	0.8	2	1	1.0					
동방파제	15	1	2	1.5	L형	방괴/사석	피복석	0.8	1.5	1	1.0						
동방파제	16																
서방파제	17	1	3	2	진층		피복석	0.4	2	2	2.0						
서방파제	18	1	3	2	L형	진층/중간	피복석	0.4	2	2	2.0						
남방파제	19	1	2	1.5	32톤TTP	중간피복	TTP	32	1.5	2	4.8	피복석	0.8	1.5	1	1.0	
남방파제	20	1	1.5	1.5	64톤TTP	중간피복	TTP	64	1.5	2	6.0	삼각블록	27	1.5	1	1.4	
												피복석	0.8	1.5	1	1.0	



항명	시설명	번호	연장 (m)	마루높이 E.L.(m)	마루폭 (m)	지반고 E.L.(m)	설계조건						비고			
							파랑		바람		조위(m)		토질조건	구조형식	대침형상	특징
							파고(m)	주기(초)	파향	풍향	풍속(m/s)	HWL				
부신남항	서방파제	5	440.0	+5.0	10.5		7.3	13.0	SE	NNW	34.7	1.282	사석식	비대침	후면안벽	
	동방파제	6	134.0	+5.0	7.0		7.3	13.0	SE	NNE	34.7	1.282	사석식	비대침		
	동방파제	4	392.4	+8.0	6.0	-0.2	2.4	5.9	SW	NNW	40.0	7.5	사석식	비대침	혼성제	
연평도항	서방파제	5	174.7	+8.0	6.9	+2.8	2.6	11.0	SW	NNW	40.0	7.5	사석식	비대침		
	서방파제	6	174.0	+8.5	6.0	+4.0	2.6	11.0	SW	NNW	40.0	7.5	사석식	비대침		
	남방파제	7	96.9	+9.0	6.5	-1.5	2.4	5.9	SE	NNW	40.0	7.5	사석식	비대침		
거진항	남방파제	8	153.1	+9.0	6.5	-2.0	2.4	5.9	SE	NNW	40.0	7.5	사석식	비대침		
	방파제	9	144.0	+4.5	8.0	-8.0	3.17	14.0	E/NE	W	46.0	0.356	사석식	비대침	TTP난적	
	방파제	10	147.0	+4.5	10.0	-8.0	3.17	14.0	E/NE	W	46.0	0.356	사석식	비대침	TTP난적	
	방파제	11	131.5	+4.5	10.0		4.20	14.0	E/NE	W	46.0	0.356	사석식	비대침	TTP난적	
	방파제	12	97.5	+4.5	10.0	-8.0	4.20	14.0	E/NE	W	46.0	0.356	사석식	비대침		
	방파제	13	203.0	+5.5	10.0	-8.0	5.21	14.0	E/NE	W	46.0	0.356	사석식	비대침		
	방파제	14	120.0	+2.4	6.0	-4.7	1.9	14.0	E/NE	W	46.0	0.356	사석식	비대침	방사제	
	방파제	15	195.0	+2.0	6.0	-5.0	1.5	14.0	E/NE	W	46.0	0.356	사석식	비대침	방사제	
	방파제	8	58.0		3.0	-8.0	3.6		NE	SW	38.0	0.39	사석식	비대침	후면안벽	
	방파제	9	111.7	+5.0	3.0	-8.0	3.6		NE	SW	38.0	0.39	사석식	비대침	후면안벽	
	방파제	10	52.3	+5.0	3.0	-9.0	5.1		NE	SW	38.0	0.39	사석식	비대침		
	방파제	11	54.0	+5.0	3.0	-13.0	7.4	14.0	E, NE	SW	38.0	0.39	사석식	비대침		
	방파제	12	316.0	+3.4	2.0	-8.5	5.4	14.0	NE	SW	38.0	0.39	사석식	비대침		
	방파제	13	147.5	+3.4	2.0	-8.5	4.7	14.0	NE	SW	38.0	0.39	사석식	비대침		
	방파제	14	100.0	+3.4	10.0	-9.0	4.7	14.0	NE	SW	38.0	0.39	사석식	비대침		
방파제	15	50.0	+3.4	10.6	-8.0	4.7	14.0	NE	SW	38.0	0.39	사석식	비대침			
임원항	방파제	16	240.0	+1.0	6.0	-6.0	4.5	14.0	NE	SW	38.0	0.39	사석식	비대침	방사제	
	방파제	6	61.0	+6.0	1.83	-3.5	7.4	14.0			21.0	0.248	사석식	비대침	호안	
	방파제	7	205.0	+5.0	10.0		8.4	14.0			21.0	0.248	사석식	비대침	호안	
	방파제	8	19.0	+5.0	10.0	-13.5	8.4	14.0			21.0	0.248	사석식	비대침		
	방파제	9	148.0	+5.0	10.0	-14.0	7.6	14.0			21.0	0.248	사석식	비대침		
	방파제	10	90.0	+2.5	6.0	-3.5	4.5	14.0	E/NE	W	21.0	0.248	사석식	비대침	방사제	
	서방파제	6	300.0	+7.8	4.0	-4.3			SW	N	19.2	7.682	사석식	비대침	상부진층	
	북방파제	7	250.0	+8.5	4.0				SW	N	17.0	7.682	사석식	비대침		
	북방파제	8	350.0	+8.5	4.0				SW	N	17.0	7.682	사석식	비대침		
	제1동서방파제	6	330.0	+5.0	5.0		1.76		SE		3.4		사석식	비대침	상부진층	
	거문도항	제2동방파제	7	180.0	+5.0	5.9	-5.0	4.0		SE		3.4		사석식	비대침	
제2서방파제		8	165.0	+5.0	5.9	-5.0	4		SE		3.4		사석식	비대침		
동방파제		9	300.0	+6.5	3.7	-2.0	4.1		SE		3.4		사석식	비대침		
동방파제		10	650.0	+6.5	6.4	-8.0	4.7		SE		3.4		사석식	비대침		
동방파제		11	20.0	+6.5	8.5	-10.0	4.7		SE		3.4		사석식	비대침		

항명	시설명	번호	연장 (m)	마루높이 E.L.(m)	마루폭 (m)	지반고 E.L.(m)	설계조건				토질조건		비고	
							파랑		바람		조위(m) HWL	구조형식	대칭형상	
							파고(m)	주기(초)	파향	풍향				풍속(m/s)
니로도항	동방파제	6	100.0	+5.0	6.0	-5.0	4.0	SW			1.94	사석식	대칭	특경
	서방파제	7	150.0	+5.0	4.0	-7.5	4.0	SW			1.94	사석식	비대칭	상부진중
대흑신도항	영산방파제	6	368.0	+5.5	5.8	-2.0		NW	NNW	38.0	3.706	질토/세사	비대칭	상부진중
	북방파제	7	75.5	+6.5	9.0	-7.5		NW	NNW	38.0	3.706	질토/세사	비대칭	지반처판
감포항	남방파제	8	320.0	+6.5	8.8	-7.8		NW	NNW	38.0	3.706	질토/세사	비대칭	
	중앙방파제	9	500.0	+5.5	4.5			NW	NNW	38.0	3.706	질토/세사	비대칭	
	남방파제	9	22.0	+3.2	7.0	-3.8	7.4	E/ENE	SW	39.8	0.28	모래	비대칭	
	남방파제	10	46.0	+3.2	7.0	-4.5	7.4	E/NE	SW	39.8	0.28	모래	비대칭	
	남방파제	11	205.0	+2.0	8.0	-9.5	7.4	E/ENE	SW	39.8	0.28	모래	비대칭	혼성제
	북방파제	12	44.0	+2.5	6.0	-3.2	7.4	E/ENE	SW	39.8	0.28	모래	비대칭	
	북방파제	13	26.0	+2.5	6.0	-3.2	7.4	E/ENE	SW	39.8	0.28	모래	비대칭	
	북방파제	14	85.5	+3.5	7.0	-9.0	7.4	E/ENE	SW	39.8	0.28	모래	비대칭	
	북방파제	15	17.0	+3.5	7.0	-11.0	7.4	E/ENE	SW	39.8	0.28	모래	비대칭	
	북방파제	16	27.5	+5.0	10.0	-10.0	7.4	E/ENE	SW	39.8	0.28	모래	비대칭	
구룡포항	북방파제	17	10.0	+5.0	12.0	-11.0	7.4	E/ENE	SW	39.8	0.28	모래	비대칭	
	북방파제	9	182.0	+5.0	9.0	-6.5	5.5	NE	SW	39.8	0.232	모래	비대칭	후면애벽
	북방파제	10	125.0	+5.0	9.0	-10.0	5.5	NE	SW	39.8	0.232	모래	비대칭	후면안벽
	북방파제	11	150.0	+2.8	8.0	-10.0	5.5	NE	SW	39.8	0.232	모래	비대칭	후면보수
	북방파제	12	110.0	+3.5	7.0	-10.0	5.5	NE	SW	39.8	0.232	모래	비대칭	
	북방파제	13	10.0	+4.1	10.0	-10.0	5.5	NE	SW	39.8	0.232	모래	비대칭	
	남방파제	14	115.0	+2.0	4.0	-2.0	2.7	NE	SW	39.8	0.232	모래	비대칭	
	남방파제	15	215.0	+4.0	10.0	-11.5	6.1	NE	SW	39.8	0.232	모래	비대칭	
	남방파제	16	114.0	+4.0	11.0	-11.5	6.1	NE	SW	39.8	0.232	모래	비대칭	
	남방파제	17	16.0	+4.6	12.0	-11.5	2.7	NE	SW	39.8	0.232	모래	비대칭	
월포항	방파제	3	157.0	+5.0	7.7		4.0	NE	SW	39.8	0.262	사석식	비대칭	상부진중
	방파제	8	80.0	+1.5	5.0	-7.2	4.5	E/NE	NE	19.0	0.264	사석식	비대칭	상부진중
강구항	방파제	9	143.0	+1.5	5.0	-7.5	4.5	E/NE	NE	19.0	0.264	사석식	비대칭	상부진중
	방파제	10	12.0	+3.3	11.0	-6.3	4.5	E/NE	NE	19.0	0.264	사석식	비대칭	혼성제
	방파제	11	40.0	+4.0	9.0	-4.4	4.5	E/NE	NE	19.0	0.264	사석식	비대칭	
	방파제	12	60.0	+4.0	10.0	-5.4	4.5	E/NE	NE	19.0	0.264	사석식	비대칭	
	방파제	13	75.0	+4.0	11.0	-7.3	4.5	E/NE	NE	19.0	0.264	사석식	비대칭	
	방파제	5	370.0	+3.5	9.0	-4.0	3.0	SE	NNW	23.7	0.278	사석식	대칭	방사제
후포항	방파제	6	118.0	+2.0	6.0	-4.0	3.0	E/NE	NNW	23.7	0.278	사석식	대칭	방사제
	방파제	7	64.0	+3.5	9.0	-7.0	4.5	SE	NNW	23.7	0.278	사석식	비대칭	방사제
	동방사제	8	83.0	+2.5	6.0	-5.0	3.5	E/NE	W	21.0	0.278	사석식	비대칭	호안
	방파제	9	70.0				2.6	E/NE	W	23.7	0.278	사석식	비대칭	호안
	방파제	10	70.0	+4.1	6.0	-4.0	2.6	E/NE	W	23.7	0.278	사석식	비대칭	호안

항명	시설명	번호	연장 (m)	마루높이 E.L.(m)	미부록 (m)	지반고 E.L.(m)	설계조건						비고				
							파랑			바람			조위(m) HWL	토질조건	구조형식	대형형상	특징
							파고(m)	주기(초)	파향	종향	풍속(m/s)						
후포항	방파제	11	329.0	+4.1	6.0	-4.0	2.6	14.0	E/NE	NNW	23.7	0.278	모래	사석식	비대칭	후연애립	
	방파제	12	153.0	+5.0	9.0	-2.5	3.1	14.0	E/NE	NNW	23.7	0.278	모래	사석식	비대칭		
	방파제	13	70.0	+5.0	9.0	-5.6	3.1	14.0	E/NE	NNW	23.7	0.278	모래	사석식	비대칭		
	방파제	14	226.0	+5.0	9.0		3.1	14.0	E/NE	NNW	23.7	0.278	모래	사석식	비대칭		
	방파제	15	84.0	+5.0	9.0		4.2	14.0	E/NE	NNW	23.7	0.278	모래	사석식	비대칭	방사판	
	방파제	16	55.0	+5.0	9.0	-13.5	4.2	14.0	E/NE	W	23.7	0.278	모래	사석식	비대칭	방사판	
	방파제	17	89.0	+5.0	9.0		4.2	14.0	E/NE	W	23.7	0.278	모래	사석식	비대칭		
	방파제	18	64.5	+4.5	12.0	-14.0	6.7	14.0	E/NE	NNW	23.7	0.278	모래	사석식	비대칭		
	방파제	19	17.5	+4.6	13.0	-20.0	7.2	14.0	E/NE	NNW	23.7	0.278	모래	사석식	비대칭		
	방파제	11	92.0	+5.0	7.7		3.7	14.0	E/NE	NNW	21.0	0.32	모래	사석식	비대칭	후연애립	
	방파제	12	300.0	+4.0	8.0		4.5	14.0	E/NE	W	21.0	0.32	모래	사석식	비대칭	후연안벽	
	방파제	13	111.0	+3.0	9.0	-5.5	4.5	14.0	E/NE	W	21.0	0.32	모래	사석식	비대칭		
	방파제	14	77.5	+3.0	9.0	-6.5	4.5	14.0	E/NE	W	21.0	0.32	모래	사석식	비대칭		
	방파제	15	114.0	+3.0	9.0	-7.0	4.5	14.0	E/NE	W	21.0	0.32	모래	사석식	비대칭		
	방파제	16	13.5	+3.0	12.0	-7.0	4.5	14.0	E/NE	W	21.0	0.32	모래	사석식	비대칭		
	북방파제	7	18.9	+9.0	3.0	-11.0	7.6		SSW			0.314		불특식	비대칭	호안	
	북방파제	8	44.1			-10.2	7.6		SSW			0.314		불특식	비대칭	호안	
	도동항	북방파제	9	23.0	+4.96	13.8	-13.0	7.6	12.0	S/SW	NE	46.2	0.314	모래	사석식	대칭	TTP코아
		북방파제	10	17.0	+6.0	11.5	-15.0	7.6	12.0	S/SW	NE	46.2	0.314	모래	사석식	대칭	TTP코아
북방파제		11	41.6	+6.0	13.4		7.6		SSW			0.314		사석식	대칭		
남방파제		12	7.5	+6.0	11.5	-4.0	7.6	12.0	S/SW	NE	46.2	0.314	모래	불특식	대칭	TTP코아	
남방파제		13	32.5	+6.0	11.5	-9.0	7.6	12.0	S/SW	NE	46.2	0.314	모래	사석식	대칭	TTP코아	
남방파제		8	75.0	+4.0	4.0		4.5		NW	NNW	41.5	2.712		사석식	비대칭	상부진총	
남방파제		9	125.0	+6.0	4.0	-4.0	4.5		NW	NNW	41.5	2.712		사석식	비대칭	상부진총	
북방파제		10	198.0	+3.0	3.0	+1.0	4.5		NW	NNW	41.5	2.712		사석식	비대칭		
북방파제		11	79.0	+4.0	4.0	+0.1	4.5		NW	NNW	41.5	2.712		사석식	비대칭		
북방파제		12	91.0	+4.0	6.0	0.0	4.5		NW	NNW	41.5	2.712		사석식	비대칭		
북방파제		13	570.0	+4.0	6.0	-2.0	4.5		NW	NNW	41.5	2.712		사석식	비대칭	상부진총	
북방파제		14	156.4	+4.0	6.0	-8.0	4.5		NW	NNW	41.5	2.712		사석식	비대칭		
북방파제		15	173.4	+5.0	6.5	-6.0	4.5		NW	NNW	41.5	2.712		사석식	비대칭		
북방파제	16	6.5	+5.0	6.5	-9.0	4.5		NW	NNW	41.5	2.712		사석식	대칭			
북방파제	17	13.5	+5.0	6.5	-9.5	4.5		NW	NNW	41.5	2.712		사석식	대칭			
북방파제	18	23.5	+5.0	10.0	-9.5	4.5		NW	NNW	41.5	2.712		사석식	대칭			
북방파제	19	215.0	+6.0	8.0	-8.5	4.5		NW	NNW	41.5	2.712		사석식	비대칭			
북방파제	20	15.0	+6.0	9.0	-10.5	4.5		NW	NNW	41.5	2.712		사석식	대칭			
서방파제	21	167.5	+5.0	6.0	-3.0	4.5		NW	NNW	41.5	2.712		사석식	대칭			
서방파제	22	201.0	+6.0	8.0	-7.0	4.5		NW	NNW	41.5	2.712		사석식	비대칭			

항명	시설명	번호	연장 (m)	마루높이 E.L.(m)	마루폭 (m)	지반고 E.L.(m)	설계조건					비고			
							파랑		바람		조위(m) HWL	토질조건	구조형식	대칭형상	특징
							파고(m)	주기(초)	파향	풍향					
한림항	서방파제	23	293.0	+6.0	8.0	-8.5	4.5		NW	NNW	41.5	2.712	사석식	비대칭	
	서방파제	24	12.0	+6.0	8.0	-9.0	4.5		NW	NNW	41.5	2.712	사석식	대칭	
	서방파제	25	362.0		25.0									사석식	대칭
화순항	구동방파제	4	234.0	+4.0	6.0	-8.0	5.1		S	NNW	20.0	3.194	사석식	비대칭	상부진출
	구동방파제	5	33.0	+4.1	6.0	-8.0	5.1		S	NNW	20.0	3.194	사석식	비대칭	상부진출
	동방파제	6	99.0	+4.5	7.0	+0.7	5.1		S	NNW	20.0	3.194	사석식	비대칭	
	동방파제	7	40.0	+5.5	7.0	-2.6	5.1		S	NNW	20.0	3.194	사석식	비대칭	
	동방파제	8	94.0	+7.0	7.0	-4.0	5.1		S	NNW	20.0	3.194	사석식	비대칭	
	동방파제	9	79.5		12.0	-5.0					20.0	3.194	사석식	비대칭	
	구동방파제	7	239.0	+5.7	6.5	-5.0	2.4		ENE	SE	21.0	2.833	사석식	비대칭	상부진출
	구동방파제	8	108.5	+5.7	6.5	-5.0	2.4		ENE	SE	21.0	2.833	사석식	비대칭	상부진출
	서방파제	9	242.0	+4.5	5.0	-5.0	1.2		NNW	SE	21.0	2.833	사석식	비대칭	
성산포항	서방파제	10	70.0	+5.0	6.0	-5.0	1.2		NNW	SE	21.0	2.833	사석식	비대칭	
	서방파제	11	5.0	+4.5	5.0	-5.0	1.2		NNW	SE	21.0	2.833	사석식	비대칭	
	서방파제	12	143.0	+4.0	6.5	-5.0	1.2		NNW	SE	21.0	2.833	사석식	비대칭	
	서방파제	13	64.0	+5.0	8.0	-4.0	2.4		ENE	SE	21.0	2.833	사석식	비대칭	후면보수
	서방파제	14	200.0	+5.0	6.0	-5.0	1.2		NNW	SE	21.0	2.833	사석식	비대칭	
	동방파제	15	70.0	+6.0	8.0	-2.0	2.4		ENE	SE	21.0	2.833	사석식	비대칭	후면매립
	동방파제	16	39.0	+6.0	8.0		2.4		ENE	SE	21.0	2.833	사석식	비대칭	
	동방파제	17	11.0	+6.9	8.0	-5.0	2.4		ENE	SE	21.0	2.833	사석식	비대칭	
	동방파제	18	140.0	+6.6	12.0	-8.5	2.4		ENE	SE	21.0	2.833	사석식	비대칭	
	동방파제	19	422.0	+6.5	12.0	-15.0	2.4		ENE	SE	21.0	2.833	사석식	비대칭	
	동방파제	20	18.0	+6.5	18.0	-15.0	2.4		ENE	SE	21.0	2.833	사석식	대칭	
	북방파제	21	18.2	+5.0	13.1	-6.2	2.4		ENE	SE	21.0	2.833	사석식	대칭	
	북방파제	22	46.8	+5.0	7.5	-6.7	2.4		ENE	SE	21.0	2.833	사석식	비대칭	
	녹등항														
비인항	서방파제	1	244.5	+8.0	4.0	-2.8			SW	N	19.2	7.106	사석식	비대칭	

항명	시설명	번호	단면특징	하부소단		형태	파괴층 수	항의측		파복층		중간파복층		두께		
				소단수	소단중			항의측	항내측	피복지	규격	경사도	중수		두께(m)	중간피복지
부신남향	서방파재	5	설계/보수				2	TTP	12.5	1.5	2	피복석	0.5	1.5	1	
	동방파재	6	보수				2	TTP	12.5	2/1.33	2	피복석	0.5	2	1	
	동방파재	4		2	피/사	A	2	TTP	2	3	2	1.9	피복석	0.3	3	3
연평도향	서방파재	5		1	사석T	C	2	TTP	4	2	2		피복석	0.4	2	3
	서방파재	6		2	사석T	C	2	TTP	5	1.5	2	2.6	피복석	0.2	1.5	1
	남방파재	7		1	사석T	C	2	TTP	4	2	2		피복석	0.4	2	1
	남방파재	8		2	피/중/기	D	2	TTP	5	1.5	2		피복석	0.4	1.6	1
거진항	방파재	9	보수	-1	중	H	3	TTP	6	2			사석	0.2	3	3
	방파재	10	보수	2	피/중	F/H	3	TTP	12.5	2		1.68	피복석	0.8	2	1
	방파재	11	보수	-1	사석T	H	3	ATB	9	2	1		피복석	0.8	2	1
	방파재	12	보수				3	TTP	12.5	1.5	2	1.68	피복석	0.3	1.5	2
	방파재	13	보수				3	TTP	12.5	1.5	1		피복석	0.3	1.5	2
	방파재	13	보수				3	TTP	20	1.5	2		피복석	0.35	1.5	2
	방파재	14					2	TTP	12.5	1.5	2		피복석	0.25	1.33	2
	방파재	15		1	사석T	B	2	TTP	5	1.33	2	2.6	피복석	0.3	2	1
	방파재	8	보수				2	ATB	3	2	1	1.16	피복석	0.2	4/2	2
	방파재	9	보수				2	피복석	0.8	4/2	1	1.0	피복석	0.2	4/2	2
주류진항	방파재	10	보수				3	TTP	5	5/2.5	2		피복석	0.8	5/2.5	1
	방파재	10	보수				3	TTP	5	2/4	2		피복석	0.8	4/4	1
	방파재	11	보수	-1	사석T	H	4	TTP	12.5	2			피복석	0.2	4/2	1
	방파재	12					2	TTP	9	2	1	1.68	피복석	0.8/1.0	2/1.5	1/M
	방파재	13					2	ATB	9	2	2		피복석	0.2	2	2
	방파재	14					2	TTP	12.5	1.33	2	3.5	피복석	0.35	1.33	2
	방파재	14					2	TTP	12.5	2	2	3.5	피복석	0.35	2	2
	방파재	15					2	TTP	20.0	2	2	4.1	피복석	0.55	2	2
	방파재	15					2	TTP	20.0	2	2	4.1	피복석	0.55	2	2
	방파재	16	보수	1	기	E	2	TTP	12.5	1.33	2	4.1	피복석	0.55	2	1
임원항	방파재	6	보수				2	TTP	12.5	5	2	3.5	피복석	0.35	1.33	2
	방파재	7	보수	1		A	1	TTP	12.5	5	2		피복석	0.2	5	1
	방파재	8	보수	2	피/사	A	3	TTP	20.0	2			피복석	0.8	1.5	1
	방파재	9	보수	2	피/사	A	3	TTP	12.5	1.5/2			피복석	0.8	2	1
	방파재	10					1	TTP	20.0	2	2		피복석	0.8	2	1
	서방파재	6					2	피복석	0.45	1.5	2		피복석	0.4	2	1
	북방파재	7		1	피/기	D	1	피복석	0.3	2	2		피복석	0.4	2	1
	북방파재	8		1	피/기	D	1	피복석	0.4	2	1		피복석	0.8	1.5	1
	북방파재	8		1	피/기	D	1	피복석	0.8	1.5	1	1.0	피복석	0.4	2	1
	북방파재	8		1	피/기	D	1	피복석	0.8	1.5	1	1.0	피복석	0.4	2	1

항명	시설명	번호	단면특징	하부소단		형태	피복층수	피복층				항의속시면						
				소단수	소단중			규격	경사도	층수	두께(m)	중간피복재	규격	경사도	층수	두께		
				설계/보수				피복재	피복재	피복재	중간피복재	피복재	경사도	층수	두께			
거문도항	제1동서방파제	6					3	3	피복석	0.4	2	1		피복석	0.1	2	2	1.0
	제2동방파제	7				2	2	4원주돌목(상)	0.4	2	2							
	제2서방파제	8				2	2	피복석(중)	0.4	2	2			피복석	0.1	2	1	0.6
	동방파제	9				2	1	4원주돌목(상)	0.1	2	1							
	동방파제	10				2	1	피복석(중)	0.4	2	2			피복석	0.1	2	1	
	동방파제	11				2	2	피복석(하)	0.1	2	1							
	동방파제	6				2	2	TTP	8	1.5	2	3.1	피복석	0.5	1.5	1	0.8	
	동방파제	10				2	1	TTP	12.5	1.5	2	3.5	피복석	0.5	1.5	1	0.8	
	동방파제	11				2	2	TTP	16	1.5	2	3.8	피복석	0.5	1.5	1	0.8	
	동방파제	6				2	2	피복석	0.7	2.5	1	1.0	피복석	0.2	2.5	1	0.6	
	나로도항	서방파제	7				2	2	피복석(상)	0.7	3	2	2.0	피복석	0.1	3	2	1.0
서방파제		7				2	2	피복석(하)	0.4	3	2	2.0	피복석	0.1	3	2	1.0	
대륙산도항	영산방파제	6				2	1	TTP	5	1.5	2	2.5	피복석	0.1	1.5	1	0.5	
	북방파제	7			D	2	1	TTP	10	1.5	2		피복석(상)	0.5	1.5	1	0.8	
	남방파제	8			B	2	1	TTP	10	1.33	2	3.2	피복석	0.5	1.5	1	0.8	
	중앙방파제	9			H	2	2	피복석	0.6	2.5	1		피복석	0.2	2.5	1		
	남방파제	9				1	1	피복석	0.5	2	1	1.0						
감포항	남방파제	10				1	1	ATB(상)	5.5톤	2	1							
	남방파제	10				1	1	피복석(하)	0.5	2	1	0.8						
	남방파제	11			G	2	1	TTP	10	1.5	2	3.24	피복석	0.5	1.5	1	0.8	
	북방파제	12				1	1	피복석	0.8	3	1	1.0						
	북방파제	13				2	1	TTP	12.5	3	2	3.5	피복석	0.8	3	1	1.0	
	북방파제	14				2	1	TTP	12.5	1.33	2	3.5	피복석	0.5	1.33	1	0.8	
	북방파제	15				2	1	TTP	12.5	1.33	2	3.5	피복석	0.5	1.33	1	0.8	
	북방파제	16				2	1	TTP	20	1.5	2	4.1	피복석	0.6	1.5	1	1.0	
	북방파제	17				2	2	TTP	20	2	2	4.1	피복석	0.6	2	1	1.0	
	북방파제	9				2	2	TTP	8	2	2	3.0	피복석(상)	0.3	2	2		
	북방파제	10				2	2	TTP	12.5	3/2	2	3.5	피복석	1.0	3/2	2	2.5	
	북방파제	11				2	3	TTP	12.5	3/2	2	3.5	피복석	1.0	3/2	2	2.5	
	북방파제	12				2	1	TTP	12.5	2	2	3.5	피복석	1.0	2	1	0.8	
	북방파제	13				2	2	TTP	20	2	2	4.1	피복석	1.0	2	1	1.2	
	북방파제	14				1	1	피복석	1.0	2	1	1.2						
	북방파제	15				2	1	TTP	20	2	2	4.1	피복석	1.0	2	1	1.2	
	북방파제	16				2	1	TTP	25	1.5	2	4.4	피복석	0.8	1.5	1	1.0	
북방파제	17				2	2	TTP	25	2	2	4.4	피복석	0.8	2	1	1.0		
월포항	방파제	3				3	2	TTP	5	3	2		사석	0.2	3	3	2.0	
	방파제	3				3	2	TTP	5	3	2		사석	0.2	3	3	2.0	

항명	시설명	번호	단면특징	하부소단		피복층수		항의측 사면										
				소단수	소단종	형태	피복층		중간피복층									
							피복제	규격	경사도	중수	두께(m)	중간피복제	규격	경사도	중수	두께		
강구항	방파제	8	보수				2	1	TTP	10	4	2	3.2	피복석	1.0	4	2	2.0
	방파제	9	보수				2	1	TTP	10	4	2	3.2	피복석	1.0	4	2	2.0
	방파제	10	보수				2	1	TTP	12.5	4	2		피복석	2.0	4	2	2.0
	방파제	11					2	1	TTP	12.5	1.5	2	3.5	피복석	0.9	1.5	1	1.0
	방파제	12					2	1	TTP	20	1.5	2	4.1	피복석	0.5	1.5	2	1.6
후포항	방파제	13					2	1	TTP	25	1.5	2	4.4	피복석	0.8	1.5	1	1.0
	방파제	5					1	1	피복석	0.8	3	2	2.0					
	방파제	6					1	1	피복석	0.8	3	2	2.0					
	방파제	7					2	1	TTP	10	1.5	2	3.2	피복석	0.2	1.5	2	1.2
	동방사제	8				1	피복T	B	TTP	5	1.33	2	2.6	피복석	0.5	1.33	2	1.4
	방파제	9	보수				1	1	TTP	5		2	2.6					
	방파제	10	보수				2	1	TTP	5	3	2	2.6	피복석	0.8	3	2	2.0
	방파제	11	보수				2	1	TTP	5	3	2	2.6	피복석	0.8	3	2	2.0
	방파제	12					2	1	TTP	5	1.5	2	2.6	피복석	0.55	1.5	1	0.8
	방파제	13				2	피/사	A	TTP	5	2	2	2.6	피복석	0.5	2	1	1.0
	방파제	14				2	피/중	D	TTP	5	2	2	2.6	피복석	0.5	2	1	0.8
죽변항	방파제	15					2	1	TTP	12.5	1.5	2	3.5	피복석	0.5	1.5	1	0.8
	방파제	16				1	사석	A	TTP	12.5	1.5	2	3.5	피복석	0.5	1.5	1	0.8
	방파제	17				2	1	TTP	12.5	1.5	2	3.5	피복석	0.5	1.5	1	0.8	
	방파제	18				1	사석T	C	TTP	32	1.5	2	4.8	피복석	0.8	1.5	1	1.0
	방파제	19				2	1	TTP	40	1.5	2	5.1	피복석	0.8	1.5	2	2.0	
	방파제	11	보수				3	2	TTP	5	3	2	2.6	피복석	0.8	3	2	2.0
	방파제	12	보수				3	2	TTP	5	3	2	2.6	피복석	0.8	3	2	2.0
	방파제	13				1	피복T	B	TTP	12.5	1.5	2	3.5	피복석	0.3	1.5	3	2.0
	방파제	14				2	피T/사T	B	TTP	12.5	1.5	2	3.5	피복석	0.3	1.5	3	2.0
	방파제	15				1	기	E	TTP	12.5	1.5	2	3.5	피복석	0.5	1.5	1	0.8
	도동항	방파제	16				1	기	E	TTP	12.5	2	2	3.5	피복석	0.45	2	1
북방파제		7						TTP	32		2	4.8	TTP	20				
북방파제		8						TTP	32		2	4.8	TTP	20				
북방파제		9				2	2	6/4물록	20	1.33	2	4.1	피복석	1.0	1.33	1	1.2	
북방파제		10				2	2	TTP	20	1.33	2	4.1	피복석	1.0	1.33	1	1.2	
북방파제		11				2	2	TTP	32	1.5	2	4.8	피복석	1.0	1.5	1	1.2	
남방파제		12				1	1	TTP	20	1.5	2	4.1						
남방파제		13				2	2	TTP	20	1.5	2	4.1	피복석	1.0	1.5	1	1.2	
남방파제		8				1	1	피복석	0.4	3	2	2.0						
남방파제		9				1	1	피복석	0.4	3	2	2.0						
한림항		북방파제	10				1	1	피복석	0.2	1.5	1	0.6					
	북방파제	11				2	2	피복석	0.6	2	1	0.8	피복석	0.2	2	1	0.6	

항명	시설명	번호	단면특징	하부소단		피복층수		항외측 시면									
				소단수	소단층 형태	항외측	항내측	피복층					중간피복층				
								규격	경사도	총수	두께(m)	중간피복지	규격	경사도	총수	두께	
한림항	복방파제	12	설계/보수			2	2	피복석	0.6	3	1	0.8	피복석	0.2	3	1	0.6
	복방파제	13			1	1	피복석	0.4	3	2	2.0						
	복방파제	14			2	2	피복석	1.0	2	1	1.2	피복석	0.3	2	1	0.7	
	복방파제	15			2	1	TTP	8	1.33	2	3.0	피복석	0.5	1.33	1	0.8	
	복방파제	16			2	2	TTP	8	2	2	3.0	피복석	0.5	2	1	0.8	
	복방파제	17			2	2	TTP	8	2	2	3.0	피복석	0.5	2	1	0.8	
	복방파제	18			2	2	TTP	8	2	2	3.0	피복석	0.5	2	1	0.8	
	복방파제	19			2	1	TTP	10	1.5	2	3.2	피복석	0.5	1.5	1	0.8	
	복방파제	20			2	2	TTP	10	2	2	3.2	피복석	1.0	2	1	1.2	
	서방파제	21			1	1	피복석	1.0	2	1	1.2						
확순항	서방파제	22			2	1	TTP	8	2	2	3.0	피복석	0.5	2	1	0.8	
	서방파제	23			2	1	TTP	8	1.5	2	3.0	피복석	0.5	1.5	1	0.8	
	서방파제	24			2	2	TTP	10	2	2	3.2	피복석	0.5	2	1	0.8	
	서방파제	25			1	1	피복석	0.6	2	1							
	구동방파제	4		-1	2	2	피복석	1.0	3	1	1.0	피복석	0.07	3	M	2.0	
	구동방파제	5			1	1	피복석	1.0	3	2	2.0						
	동방파제	6			2	2	피복석	1.0	2	2	2.5	피복석	0.3	2	1	0.6	
	동방파제	7			2	2	피복석	1.0	2	1	1.2	피복석	0.3	2	1	0.6	
	동방파제	8	보수		3	2	TTP	8	2	2	3.0	피복석	1.0	2	1	1.2	
	동방파제	9			2	1	TTP	32	1.5	2	4.8	피복석	1.0	1.5	1	1.2	
성산포항	구동방파제	7			2	2	피복석	0.8	3	2	1.0	피복석	0.2	3	3	2.0	
	구동방파제	8	보수		3	2	TTP	8	3	2	3.0	피복석	0.2	3	3	2.0	
	서방파제	9			2	2	피복석	0.8	3	1	1.0	피복석	0.2	3	1	0.6	
	서방파제	10			2	2	피복석	0.8	3	1	1.0	피복석	0.2	3	1	0.6	
	서방파제	11			2	2	피복석	0.8	3	1	1.0	피복석	0.2	3	1	0.6	
	서방파제	12			2	2	피복석	0.8	3	1	1.0	피복석	0.2	3	1	0.6	
	서방파제	13	보수		2	2	TTP	8	1.33	2	3.0	피복석	0.5	1.33	1	0.8	
	서방파제	14			2	1	TTP	8	1.33	2	3.0	피복석	0.5	1.33	1	0.8	
	동방파제	15			2	1	TTP	3.2	1.33	2	2.2	피복석	0.3	1.33	1	0.6	
	동방파제	16			2	1	TTP	8	1.33	2	3.0	피복석	0.5	1.33	1	0.8	
늑등항 비인항	동방파제	17			2	1	TTP	8	1.33	2	3.0	피복석	0.5	1.33	1	0.8	
	동방파제	18			2	1	TTP	20	1.5	2	4.1	피복석	0.8	1.5	1	1.0	
	동방파제	19			2	1	TTP	25	1.5	2		피복석	0.8	1.5	1		
	동방파제	20			2	2	TTP	40	1.5	2	5.1	피복석	0.8	1.5	1	1.0	
	복방파제	21			2	2	중공심각	8	1.5		2.3	피복석	0.5	1.5	1	0.8	
	복방파제	22			2	2	중공심각	8	1.5		2.3	피복석	0.5	1.5	1	0.8	
	서방파제	1			1	1	피복석	0.5	2	2	2.0						



항명	시설명	번호	기초사석		상치콘크리트		항내측 시면									
			규격	경사도	형상	하부	피복층			중간피복층						
							피복재	규격	경사도	층수	두께	중간피복재	규격	경사도	층수	두께
부산남항	서방파제	5	1	1.5	□형	방괴/지반	피복석	1.0	2	2	1.2	사석	0.0225	2		
	동방파제	6	1	2	□형	중간피복	피복석	0.2	2	2	1.5	피복석	0.5	2		
연평도항	동방파제	4	1	3	집형	속채움	피복석	0.2	2	2	1.5					
	서방파제	5	1	2	L형	중간피복	피복석	0.4	2	3						
거진항	서방파제	6	1	1.5	T형	기초사석	피복석	0.2	1.5	1	0.6					
	남방파제	7	1	2	L형	중간피복	피복석	0.4	1.5	2	1.8					
	남방파제	8	1	1.5	L형	기초사석	피복석	0.4	1	1	0.8					
	방파제	9	1	3	L형	방괴/중간	피복석	0.8	2	2	2.0	사석	0.2	2	3	2.0
	방파제	10	1	2	L형	방괴/기초	피복석	0.8	1.5	1	1.0					
	방파제	11	1	2	L형	방괴/기초	피복석	0.8	1.5	1	1.0					
	방파제	12	1	1.5	L형	방괴/기초	피복석	0.3	1.5	2	1.5					
	방파제	13	1	1.5	L형	방괴/기초	피복석	0.9	1.5	2	2.0					
	방파제	14	1	1.33	역L형	방괴/기초	피복석	0.9	1.5	2	2.0					
	방파제	15	1	2	역사다리	방괴/중간	ATB	3	1.5	1	1.16	피복석	0.3	1.5	1	0.7
주요진항	방파제	8	1	4/2	사다리/파체벽	기초사석										
	방파제	9	1	4/2.5	사다리/파체벽	기초사석										
	방파제	10	1	2	역L형/파체벽	중간피복	피복석	0.8	2	1		피복석	0.2	2	1	
	방파제	11	1	2	L형	방괴/중간	피복석	0.8	1.5	1	1.0	피복석	0.2	1.5	2	1.2
	방파제	12	1	1.33	L형	방괴/기초	피복석	0.9/0.35	1.5	2	2.0/1.4					
	방파제	13	1	2	L형	방괴/기초	피복석	0.9	1.5	2	2.0					
	방파제	14	1	2	□형	방괴/기초	피복석	1.0	1.5	2	2.0					
	방파제	15	1	2	□형	방괴/기초	피복석	0.9	1.5	1	1.0					
	방파제	16	1	1.33	□형	방괴/기초	TTP	12.5	1.33	2	2.6	피복석	0.35	1.33	2	1.4
	방파제	6			사다리형											
임원항	방파제	7			비형	방괴/포대										
	방파제	8	1	1.5	L형	방괴/사석	피복석	1.0	1.5	M						
대천항	방파제	9	1	2	L형	방괴/기초	피복석	1.0	1.5	M						
	방파제	10	1	1.5	□형	방괴/중간	피복석	0.45	2	2						
	서방파제	6	1	2	진층	기초사석	피복석	0.4	1.5	1						
	북방파제	7	1	1.5	L형		피복석	0.8	1.5	1	1.0					
거문도항	북방파제	8	1	1.5	L형		피복석	0.8	1.5	1	1.0					
	제1동서방파제	6	1	2	진층		피복석	0.4	2	1		피복석	0.1	2	2	1.0
제2동방파제	제2동방파제	7	1	2	L형	중간피복	피복석(상)	0.4	2	1	0.8	피복석	0.1	2	1	0.6
							피복석(하)	0.1	2	1	0.6					

항명	시설명	번호	기초시설		상치콘크리트		피복층						중간피복층					
			규격	경사도	형상	하부	피복재	규격	경사도	층수	두께	중간피복재	규격	경사도	층수	두께		
																	항의층	항내층
거문도항	제2서방파제	8	1	2	L형	중간피복	피복식(상) 피복식(하)	0.4	1.5	1	0.8	피복식	0.1	1.5	1	0.6		
	동방파제	9	1	1.5	L형	방과/기초	피복식	0.5	1.5	1	0.8							
	동방파제	10	1	1.5	L형	방과/기초	피복식	0.5	1.5	1	0.8							
	동방파제	11	1	1.5	L형	방과/기초	TTP	16	1.5	2	3.8	피복식	0.5	1.5	1	0.8		
	동방파제	6	1	2.5	L형	방과/기초	피복식	0.7	2.5	1	1.0	피복식	0.2	2.5	1	0.6		
나로도항	서방파제	7	1	3	역L형	기초사석	피복식	0.4	2	2	2.0	피복식	0.1	2	2	1.0		
	영산방파제	6	1	1.5	□형	방과/기초	피복식	0.7	1.5	1								
대흑산도항	북방파제	7	1	1.5	□형	방과/기초	피복식	0.5	1.5	1	0.8							
	남방파제	8	1	1.33	□형	방과/기초	피복식	0.5	1.5	1	0.8							
	중앙방파제	9	1	2.5	□형	피복식	피복식	0.6	2	1		피복식	0.2	2	1			
	남방파제	9	1	2	L형	기초사석	피복식	0.5	2	1	1.0							
	남방파제	10	1	2	L형	기초사석	피복식	0.5	2	1	1.0							
	남방파제	11	1	1.5	□형	방과/셀블럭	피복식	0.5	2	2	2.0							
	북방파제	12	1	3	□형	기초사석	피복식	0.5	2	1	1.0							
	북방파제	13	1	3	□형	기초사석	피복식	0.5	2	1	0.8							
	북방파제	14	1	1.33	□형	방과/기초	피복식(상) 피복식(하)	1.0	2	1	1.2							
	북방파제	15	1	1.33	□형	방과/기초	피복식(상) 피복식(하)	0.5	2	1	0.8							
김포항	북방파제	16	1	1.5	□형	방과/기초	피복식(상) 피복식(하)	0.5	2	1	1.2							
	북방파제	17	1	2	□형	방과/기초	피복식(상) 피복식(하)	0.5	2	1	0.8							
	북방파제	9	1	2	□형	방과/기초	피복식(상) 피복식(하)	0.5	2	1	0.8							
	북방파제	10	1	3/2	□형	방과/기초	TTP	12.5	2	2	3.5	피복식	0.6	2	1	1.0		
	북방파제	11	1	3/2	□형	방과/근고	피복식	0.5	2	2	2.0							
	북방파제	12	1	2	□형	방과/기초	피복식	1.0	1.5	1	1.2							
	북방파제	13	1	2	□형	방과/기초	TTP	20	2	2	4.1	피복식	1.0	2	1	1.2		
	남방파제	14	1	2	□형	기초사석	피복식	0.5	1.5	1	0.8							
	남방파제	15	1	2	□형	방과/기초	피복식	1.0	1.5	1	1.2							
	남방파제	16	1	1.5	□형	방과/기초	피복식	1.0	1.5	1	1.2							
월포항	남방파제	17	1	2	□형	방과/기초	TTP	25	2	2	4.4	피복식	0.8	2	1	1.0		
	방파제	3	1	3	L형	방과/진층	피복식	0.8	2	2	2.0	피복식	0.2	2	3	2.0		
	방파제	8	1	4	□형	중간피복	피복식	0.5	2	2	2.0							
	방파제	9	1	4	역L형	방과/진층	피복식	0.5	2	2	2.0							
강구항	방파제	10	1	4	□형	상부/블록	피복식	2.0	2	2	2.0							
	방파제	11	1	1.5	□형	방과/기초	피복식	1.0	1.5	1	1.2							

항명	시설명	번호	기초사석		상치콘크리트		항내측 사면													
			규격	경사도	형상	하부	피복층					중간피복층								
							피복재	규격	경사도	층수	두께	중간피복재	규격	경사도	층수	두께				
강구항	방파제	12	1	1.5	□형	방과/기초	피복석	1.0	1.5	2	2.4									
	방파제	13	1	1.5	□형	방과/기초	피복석	1.0	1.5	2	2.4									
	방파제	5	1	3	□형	피복진층	피복석	0.8	3	2	2.0									
후포항	방파제	6	1	3	진층		피복석	0.8	3	2	2.0									
	방파제	7	1	1.5	□형	방과/기초	피복석	1.0	1.5	2	2.4									
	동방사제	8	1	1.5	□형	사석	피복석	0.8	1.5	1	1.0	피복석	0.5	1.5	1	0.7				
	방파제	9																		
	방파제	10	1	3	L형	진층	피복석	0.8	3	2	2.0									
	방파제	11	1	3	L형	진층	피복석	0.8	3	2	2.0									
	방파제	12	1	1.5	L형	방과/기초	피복석	0.8	1.5	1	1.0									
	방파제	13	1	2	L형	방과/기초	피복석	0.9	1.5	1	1.0									
	방파제	14	1	2	L형	방과/기초	피복석	0.9	1.5	1	1.0									
	방파제	15	1	1.5	L형	방과/기초	피복석	0.9	1.5	1	1.0									
죽변항	방파제	16	1	1.5	L형	방과/기초	피복석	0.9	1.5	1	1.0									
	방파제	17	1	1.5	L형	방과/기초	피복석	0.9	1.5	1	1.0									
	방파제	18	1	1.5	L형	방과/기초	피복석	1.0	1.5	1	1.2									
	방파제	19	1	1.5	□형	방과/기초	피복석	1.0	1.5	2	2.4									
	방파제	11	1	3	L형	방과/진층	피복석	0.8	2	2	2.0	피복석	0.2	2	M	2.0				
	방파제	12	1	3	L형	방과/진층	피복석	0.8	2	2	2.0	피복석	0.2	2	M	2.0				
	방파제	13	1	1.5	L형	방과/중간	피복석	0.8	2	1	1.0									
	방파제	14	1	1.5	L형	방과/중간	피복석	0.8	2	1	1.0									
	방파제	15	1	1.5	L형	방과/기초	피복석	0.8	2	1	1.0									
	방파제	16	1	2	□형	방과/기초	TTP	12.5	2	2	3.5	피복석	0.45	2	1	0.8				
도동항	북방파제	7			사다리															
	북방파제	9	1	1.33		10톤 TTP	6/4돌목	20	1.33	2	4.1	피복석	1.0	1.33	1	1.2				
	북방파제	10	1	1.33		10톤 TTP	TTP	20	1.33	2	4.1	피복석	1.0	1.33	1	1.2				
	북방파제	11	1	1.5			TTP	32	1.5	2	4.8	피복석	1.0	1.5	1	1.2				
	남방파제	12	10톤 TTP	1.5			TTP	20	1.5	2	4.1	피복석	1.0	1.5	1	1.2				
한림항	남방파제	13	1	1.5		10톤 TTP	TTP	20	1.5	2	4.1	피복석	1.0	1.5	1	1.2				
	남방파제	8	1	3	진층		피복석	0.4	2	2	2.0									
	남방파제	9	1	3	파제벽	진층	피복석	0.4	2	2	2.0									
	북방파제	10	1	1.5			피복석	0.1	1	1	0.5									
	북방파제	11	1	2			피복석	0.6	1.5	1	0.8	피복석	0.2	1.5	1	0.6				
	북방파제	12	1	3			피복석	0.6	2	1	0.8	피복석	0.2	2	1	0.6				
	북방파제	13	1	3	진층		피복석	0.4	2	2	2.0									
북방파제	14	1	2			피복석	1.0	1.5	1	1.2	피복석	0.3	1.5	1	0.7					
북방파제	15	1	1.33	여부형		피복석	1.0	1.5	1	1.2										

항명	시설명	번호	기초사석		상치콘크리트		항내측 사면											
			규격	경사도	형상	하부	피복층					중간피복층						
							피복재	규격	경사도	층수	두께	중간피복재	규격	경사도	층수	두께		
한림항	복방파제	16	1	2	2	여벽	중간피복	TTP	8	2	2	2	3.0	피복석	0.5	2	1	0.8
	복방파제	17	1	2	2	□형	중간피복	TTP	8	2	2	2	3.0	피복석	0.5	2	1	0.8
	복방파제	18	1	2	2	□형	중간피복	TTP	8	2	2	2	3.0	피복석	0.5	2	1	0.8
	복방파제	19	1	1.5	1.5	L형	기초사석	피복석	0.5	1.5	1	0.8						
	복방파제	20	1	2	2	□형	기초사석	TTP	10	2	2	2	3.2	피복석	1.0	2	1	1.2
	서방파제	21	1	2	2	□형	사석	피복석	1.0	2	1	1.2						
	서방파제	22	1	2	2	L형	중간피복	피복석	1.0	2	1	1.2						
	서방파제	23	1	1.5	1.5	L형	기초사석	피복석	0.5	1.5	1	0.8						
	서방파제	24	1	2	2	□형	기초사석	TTP	10	2	2	2	3.2	피복석	0.5	2	1	0.8
	서방파제	25	1	2	1.5	도로포장	매립토석	피복석	0.2	1.5		1						
회순항	구동방파제	4	1	3	2	불록/진충	사석	피복석	0.4	2	2	2	2.0	피복석	0.07	2	M	2.0
	구동방파제	5	1	3	2	진충	피복석	피복석	1.0	2	2	2.0						
	동방파제	6	1	2	1.5	□형	사석	피복석	1.0	1.5	2	2.5		피복석	0.3	1.5	1	0.6
	동방파제	7	1	2	1.5	□형	피복석	피복석	1.0	1.5	1	1.2		피복석	0.3	1.5	1	0.6
	동방파제	8	1	2	1.5	□형	중간피복	피복석	1.0	1.5	1	1.2		피복석	0.6	1.5	1	0.8
	동방파제	9	1	1.5	1.5	□형	방괴/기초	피복석	1.0	1.5	1	1.2						
	구동방파제	7	1	3	2	파체벽	피복/진충	피복석	0.8	2	2	1.0		사석	0.2	2	3	2.0
	구동방파제	8	1	3	2	파체벽	피복/진충	피복석	0.8	2	2	1.0		사석	0.2	2	3	2.0
	서방파제	9	1	3	2	□형	피복석	피복석	0.8	2	1	1.0		사석	0.2	2	1	0.6
	서방파제	10	1	3	2	L형	피복석	피복석	0.8	2	1	1.0		사석	0.2	2	1	0.6
성신포항	서방파제	11	1	3	2	□형	피복석	피복석	0.8	2	1	1.0		사석	0.2	2	1	0.6
	서방파제	12	1	3	2	□형	피복석	피복석	0.8	2	1	1.0		사석	0.2	2	1	0.6
	서방파제	13	1	1.33	2	L형	중간피복	TTP	8	2	2	3.0		피복석	1.0	2	1	1.2
	서방파제	14	1	1.33	2	□형	중간피복	피복석	0.8	2	1	1.0						
	동방파제	15	1	1.33	1.5	L형	사석	피복석	0.5	1.5	1	0.8						
	동방파제	16	1	1.33	1.5	L형	사석	피복석	0.8	1.5	1	1.0						
	동방파제	17	1	1.33	1.5	L형	기초사석	피복석	0.8	1.5	1	1.0						
	동방파제	18	1	1.5	1.5	L형	방괴/기초	피복석	1.0	1.5	1	1.2						
	동방파제	19	1	1.5	1.5	L형	방괴/기초	피복석	1.0	1.5	1							
	동방파제	20	1	1.5	1.5	바형	방괴/기초	TTP	40	1.5	2	5.1		피복석	0.8	1.5	1	1.0
능동항	복방파제	21	1	1.5	1.5			중공삼각블럭	8	1.5	2.3			피복석	0.5	1.5	1	0.8
	복방파제	22	1	1.5	1.5			중공삼각블럭	8	1.5	2.3			피복석	0.5	1.5	1	0.8
비인항	서방파제	1	1	2	1.5			피복석	0.3	1.5	2	1.5						



부록 B  
피복층의 변형 및 피해현황



<표 B.1> 피복층의 변형 및 피해현황(제1안, 경사=1:4/3,  $T_s=2.21\text{sec}$ )

파고 (cm)	표고별 T.T.P.의 누적 미끌림(cm)							경사 (cot $\alpha$ )	TTP 이탈	비 고
	-28.0	-19.0	-6.7	6.6	20.0	32.0	평균			
10.5	1.7	2.5	2.7	3.3	3.5	4.0	2.95	1.43	0	
11.9	1.8	2.8	3.1	3.9	4.4	4.6	3.43	1.47	0	
	3.5	5.0	5.1	5.9	7.0	7.2	5.62	1.46	1	
13.0	2.4	3.0	3.9	4.5	6.0	5.9	4.28	1.51	0	
	5.0	7.2	7.3	8.6	9.5	10.0	7.93	1.50	1	
14.0	3.0	3.5	4.5	5.7	6.4	6.5	4.93	1.57	0	
	5.5	8.0	8.6	8.0	9.3	10.1	8.25	1.66	2	
15.1	3.9	4.7	6.1	7.0	8.5	8.0	6.37	1.63	1	
	5.7	8.5	8.6	10.0	10.8	12.0	9.27	1.70	2	
15.8	4.4	5.3	6.9	8.1	9.6	9.1	7.23	1.65	1	
	5.8	8.8	9.0	10.3	11.5	12.7	9.68	1.72	2	
16.9	5.7	5.7	7.8	9.4	10.5	10.3	8.23	1.75	2	1개 수면부 돌출
	6.0	9.0	9.1	11.0	12.5	13.0	10.1	1.72	3	
17.8	6.4	6.2	8.8	9.8	11.8	11.7	9.12	1.76	4	
	6.2	9.4	9.4	11.2	13.1	13.6	10.48	1.72	5	
18.5	6.6	7.0	9.5	10.5	12	12	9.60	1.78	5	
	6.2	9.8	9.8	11.5	14.0	14.5	10.97	1.74	7	
19.0	7.0	7.8	10.1	11.0	12.8	12.6	10.21	1.74	5	
	6.7	10.0	10.4	11.9	14.7	15.1	11.47	1.76	10	
19.5	8.2	8.7	11.0	11.6	13.5	14.0	11.17	1.74	6	
	6.7	10.3	10.8	12.1	15.0	15.4	11.72	1.79	10	
21.3	8.2	8.9	11.3	12.1	14.2	14.6	11.55	1.76	10	
	7.0	10.4	11.5	12.9	15.8	16.2	12.30	1.79	18	



<표 B.2> 피복층의 변형 및 피해현황(제2안, 경사=1:4/3,  $T_s=2.21\text{sec}$ )

파고 (cm)	표고별 T.T.P.의 누적 미끌림(cm)							경사 (cota)	TTP 이탈	비 고
	-28.0	-19.0	-5.8	7.3	21.0	33.3	평균			
10.5										
11.9	1.5	3.5	4.1	4.3	5.0	4.0	3.73	1.44	1	
	2.3	2.9	4.2	5.8	5.5	6.0	4.45	1.45	0	
13.0	1.7	3.8	5.0	5.5	5.5	4.5	4.33	1.45	1	
	2.6	4.0	5.0	6.4	6.0	6.0	5.00	1.47	0	
14.0	1.7	3.9	5.4	5.8	5.8	4.7	4.55	1.45	1	
	2.9	4.6	5.4	7.2	6.5	6.0	5.43	1.49	0	
15.1	1.7	4.0	5.5	6.0	6.5	5.0	4.78	1.46	1	
	3.1	5.0	5.9	8.0	7.0	6.6	5.93	1.50	0	
15.8	1.8	4.2	5.5	6.5	7.1	5.5	5.10	1.48	1	
	3.3	5.6	6.3	8.3	7.5	7.0	6.33	1.54	1	
16.9	2.0	4.8	5.8	6.7	7.5	5.5	5.38	1.52	1	
	4.0	5.6	6.6	9.0	8.0	8.5	6.95	1.63	1	
17.8	2.0	5.2	6.3	7.1	8.0	5.9	5.75	1.53	1	
	4.5	6.2	7.7	9.2	8.4	8.9	7.48	1.68	2	
18.5	2.1	5.5	7.4	7.3	8.2	6.3	6.13	1.53	1	
	4.9	7.1	8.3	9.8	9.5	10.0	8.27	1.69	5	1개 돌출 회복
19.0	2.1	5.8	7.6	7.7	8.5	7.0	6.45	1.53	1	
	5.1	7.4	8.3	9.8	10.0	10.3	8.48	1.70	5	
19.5										
	5.4	7.5	8.7	10.1	10.4	11	8.85	1.73	7	
21.3										
	5.9	8.1	8.9	10.6	11.0	11.8	9.38	1.75	13	

<표 B.3> 피복층의 변형 및 피해현황(제3안, 경사=1:4/3,  $T_s=2.21\text{sec}$ )

파고 (cm)	표고별 T.T.P.의 누적 미끌림(cm)							경사 (cot $\alpha$ )	TTP 이탈	비 고
	-28	-17.8	-4.8	8.0	20.5	33.0	평균			
11.9	1.0	1.8	3.8	3.2	4.0	4.0	2.97	1.45	1	
	2.2	6.0	7.2	7.5	8.5	8.0	6.57	1.47	2	
13.0	2.0	2.6	4.5	4.8	4.6	5.0	3.92	1.49	1	
	2.5	6.2	7.7	8.2	9.4	9.3	7.22	1.48	2	
14.0	2.0	3.0	6.2	5.3	5.5	6.0	4.67	1.51	2	1개 돌출 복원
	2.6	7.0	8.2	8.8	9.7	9.5	7.63	1.62	2	
15.1	2.4	3.5	7.5	6.6	6.0	7.4	5.57	1.61	2	
	2.7	7.2	8.2	9.8	10.0	9.9	7.97	1.66	2	
15.8	2.5	3.9	7.7	7.2	6.7	7.8	5.97	1.64	3	1개 돌출 복원
	2.9	8.0	9.3	10.5	10.6	10.4	8.62	1.66	3	
16.9	2.8	4.0	8.1	7.7	7.6	8.9	6.52	1.66	4	
	3.2	8.5	9.6	10.7	11.0	11.0	9.00	1.69	3	
17.8	3.4	4.3	8.5	9.1	8.9	9.2	7.23	1.76	6	
	3.4	8.6	10.0	11.0	12.9	12.5	9.73	1.75	6	
18.5	3.8	4.5	8.8	9.4	9.5	9.6	7.60	1.77	8	
	4.0	9.0	11.1	12.1	13.4	13.2	10.47	1.83	15	
19.0	3.8	4.8	9.1	9.5	9.5	9.8	7.75	1.79	8	
	4.2	9.3	11.3	12.7	13.8	13.5	10.80	1.85	22	
19.5										
21.3										

<표 B.4> 피복층의 변형 및 피해현황(제5안, 경사=1:4/3,  $T_s=2.21\text{sec}$ )

파고 (cm)	표고별 T.T.P.의 누적 미끌림(cm)							경사 (cota)	TTP 이탈	비 고
	-28.0	-14.8	-2.0	11.8	24.0	34.5	평균(cm)			
11.9	0	1.3	1.7	2.0	2.0	1.2	1.37	1.33	0	
	0	0.5	1.2	0.7	1.0	0.8	0.7	1.33	0	
13.0	0	1.6	2.3	2.2	3.0	1.5	1.77	1.33	0	
	0	0.8	1.5	1.5	2.0	1.4	1.20	1.39	0	
14.0	0	2.7	2.6	3.3	3.2	1.8	2.27	1.46	0	
	0	1.1	1.6	1.9	2.0	1.7	1.38	1.41	0	
15.1	0	3.0	2.9	3.9	4.2	2.2	2.70	1.46	0	
	0	1.4	2.0	2.1	2.5	2.0	1.67	1.44	0	
15.8	0	3.2	3.8	4.0	4.2	3.5	3.12	1.46	0	
	0	1.5	2.0	2.5	3.0	2.5	1.92	1.41	0	
16.9	0	3.5	4.2	4.2	4.5	4.0	3.40	1.46	0	
	0	1.5	4.3	3.9	4.9	3.8	3.06	1.46	2	
17.8	0	3.5	5.6	6.9	6.7	5.8	4.75	1.58	4	2개 이탈 복원
	0	1.7	4.5	4.0	4.9	4.0	3.18	1.51	3	
18.5	0	3.8	6.7	8.5	7.5	7.0	5.58	1.82	9	
	0	2.5	5.2	5.0	5.3	5.0	3.83	1.79	9	
19.0	0	3.9	7.3	9.0	9.1	8.5	6.30	1.82	18	
19.5	0	4.0	7.3	10.0	10.2	10.0	6.92	1.83	34	
21.3	0	4.0	8.0	13.0	13.1	11.0	8.18	1.95	48	

<표 B.5> 피복층의 변형 및 피해현황(제6안, 경사=1:1.5,  $T_s=2.21\text{sec}$ )

파고 (cm)	표고별 T.T.P.의 누적 미끌림(cm)							경사 (cot $\alpha$ )	TTP 이탈	비 고
	-28.0	-19.5	-10.0	4.0	15.6	27.2	평균(cm)			
10.5	2.5	3.0	4.5	5.0	3.5	2.0	3.42	1.50	0	
11.9	3.0	3.6	5.4	5.0	4.4	3.2	4.10	1.54	1	
13.0	3.2	4.0	5.7	5.8	4.6	3.5	4.47	1.55	1	
14.0	3.5	4.4	6.0	6.4	5.4	4.0	4.95	1.55	1	
15.1	3.7	4.9	6.4	6.7	6.0	4.8	5.42	1.56	2	
15.8	3.9	5.3	6.6	7.1	6.5	5.0	5.73	1.62	2	
16.9	3.9	5.3	6.8	7.4	6.5	5.4	5.89	1.64	2	
17.8	4.2	6.1	7.2	7.7	8.0	6.3	6.58	1.67	3	
18.5	4.4	6.3	8.1	8.0	8.6	7.8	7.20	1.68	4	
19.0	4.5	6.5	8.2	8.3	8.9	8.5	7.48	1.71	4	
19.5	4.7	6.7	8.4	8.6	9.0	8.9	7.72	1.73	4	
21.3	4.9	6.8	8.8	8.9	9.2	9.3	7.98	1.92	5	

<표 B.6> 피복층의 변형 및 피해현황(제7안, 경사=1:1.5,  $T_s=2.21\text{sec}$ )

파고 (cm)	표고별 T.T.P.의 누적 미끌림(cm)							경사 (cot $\alpha$ )	TTP 이탈	비 고
	-27.5	-15.8	-3.8	8.0	20.0	32.0	평균(cm)			
11.9	0	0	0	0.9	1.5	1.0	0.57	1.50	0	
13.0	0	1.0	1.4	1.2	2.8	1.6	1.33	1.54	0	
14.0	0	1.0	1.6	1.4	3.0	1.8	1.47	1.54	0	
15.1	0	1.1	1.6	1.6	3.5	2.5	1.72	1.59	0	
15.8	0	1.2	1.7	2.0	3.5	2.5	1.82	1.60	0	
16.9	0	1.3	1.9	2.6	4.0	2.7	2.08	1.64	1	1개 돌출 복원
17.8	0	1.7	2.4	3.0	4.5	3.0	2.43	1.73	3	
18.5	0	1.7	2.4	3.7	4.8	3.8	2.97	1.76	5	
19.0	0	1.7	2.4	4.0	5.1	4.6	2.97	1.77	6	
19.5	0	1.9	2.6	4.9	5.8	5.0	3.37	1.82	7	
21.3	0	1.9	2.9	4.9	6.1	5.4	3.53	1.82	7	

<표 B.7> 피복층의 변형 및 피해현황(제8-1안, 경사=1:1.5,  $T_s=2.21\text{sec}$ )

파고 (cm)	표고별 T.T.P.의 누적 미끌림(cm)						경사 (cota)	TTP 이탈	비 고
	-27.5	-15.8	-3.8	8.0	20.0	평균(cm)			
11.9	1.1	1.3	1.8	2.2	2.2	1.72	1.62	0	
13.0	1.4	1.6	2.2	2.5	2.5	2.04	1.64	0	
14.0	1.4	1.6	2.4	2.6	2.7	2.14	1.66	0	
15.1	1.5	1.8	2.5	2.6	2.9	2.26	1.67	1	1개 돌출 복원
15.8	1.6	1.9	2.6	2.6	3.1	2.36	1.69	1	
16.9	1.6	2.0	2.9	3.0	3.4	2.58	1.69	2	
17.8	1.6	2.0	3.4	4.0	3.6	2.92	1.72	4	
18.5	1.6	2.2	4.1	4.8	4.0	3.34	1.86	8	

<표 B.8> 피복층의 변형 및 피해현황(제8-2안, 경사=1:1.5,  $T_s=2.21\text{sec}$ )

파고 (cm)	표고별 T.T.P.의 누적 미끌림(cm)						경사 (cota)	TTP 이탈	비 고
	-27.5	-15.8	-3.8	8.0	20.0	평균(cm)			
11.9	0	0	0.2	0.5	0.4	0.22	1.65	0	
13.0	0	0.3	0.4	1.0	0.8	0.50	1.66	0	
14.0	0	0.8	0.9	1.3	0.9	0.78	1.66	0	
15.1	0	1.0	1.2	1.4	1.2	0.96	1.66	1	
15.8	0	1.1	1.2	1.6	1.2	1.02	1.67	1	
16.9	0	1.3	1.3	1.7	1.4	1.14	1.67	1	
17.8	0	1.3	1.6	2.0	1.8	1.34	1.72	3	
18.5	0	1.5	1.6	2.1	2.0	1.44	1.72	4	

<표 B.9> 피복층의 변형 및 피해현황(제8-2안, 경사=1:1.5,  $T_s=1.60\text{sec}$ )

파고 (cm)	표고별 T.T.P.의 누적 미끄럼(cm)						경사 (cota)	TTP 이탈	비 고
	-27.2	-15.9	-4.0	8.1	20.0	평균(cm)			
12.1	0	0.4	0.5	0.6	1.8	0.66	1.54	0	
13.1	0	0.7	0.9	1.5	2.1	1.04	1.64	0	
	0	0.6	0.8	0.8	0.8	0.60	1.62	0	
14.3	0	0.8	1.0	1.9	2.3	1.20	1.66	0	
	0	0.6	0.8	0.9	1.0	0.66	1.66	0	
15.2	0	0.9	1.0	2.0	2.3	1.24	1.69	0	
	0	0.6	1.0	1.2	1.5	0.86	1.70	0	
16.0	0	0.9	1.0	2.0	2.5	1.28	1.70	0	
	0	0.7	1.6	1.9	2.0	1.24	1.77	2	
17.0	0	1.0	1.2	2.1	2.7	1.40	1.72	1	돌출후 복원
	0	0.9	1.9	2.3	2.5	1.52	1.80	4	
17.7	0	1.4	1.6	2.6	3.0	1.72	1.74	3	
	0	0.9	2.3	2.8	2.9	1.78	1.82	5	

<표 B.10> 피복층의 변형 및 피해현황(제9안, 경사=1:4/3,  $T_s=2.21\text{sec}$ )

파고 (cm)	표고별 T.T.P.의 누적 미끌림(cm)						경사 (cota)	TTP 이탈	비 고
	-27.2	-14.5	-2.2	10.3	24.8	평균(cm)			
11.9	0	0	0.5	0.5	0.6	0.32	1.33	0	
	0	0.2	0.4	0.5	0.8	0.38	1.33	0	
13.0	0	0.2	0.6	0.6	0.8	0.44	1.38	0	
	0	0.4	0.8	0.8	0.9	0.58	1.38	0	
14.0	0	0.4	0.8	0.8	1.2	0.53	1.41	0	
	0	0.4	1.0	1.1	1.1	0.72	1.39	0	
15.1	0	0.8	0.9	1.2	1.6	0.90	1.42	1	돌출후복원5회
	0	0.7	1.3	1.3	1.4	0.94	1.50	0	
15.8	0	0.8	1.0	1.5	2.1	1.08	1.44	1	15.1의 것 이탈
	0	0.9	1.6	1.6	1.6	1.14	1.55	0	
16.9	0	0.9	1.2	1.6	2.4	1.22	1.49	2	돌출후복원5회
	0	1.0	2.2	2.1	2.3	1.52	1.61	0	
17.8	0	0.9	1.8	2.2	3.0	1.58	1.58	3	
	0	1.5	2.5	2.7	2.8	1.90	1.67	2	
18.5	0	1.1	2.5	2.6	3.5	1.94	1.63	8	
	0	1.6	2.7	2.9	3.0	2.04	1.68	4	

<표 B.11> 피복층의 변형 및 피해현황(제9안, 경사=1:4/3,  $T_s=1.60\text{sec}$ )

파고 (cm)	표고별 T.T.P.의 누적 미끌림(cm)						경사 (cota)	TTP 이탈	비 고	
	-27.2	-14.7	-2.2	10.0	24.5	평균(cm)				
12.1	0	1.0	1.2	0.8	1.5		0.9	1.40	0	
	0	0.3	0.3	0.4	0.6		0.3	1.33	0	
13.1	0	1.3	1.6	1.1	1.9		1.2	1.46	0	
	0	0.5	0.6	0.8	0.8		0.5	1.39	0	
14.3	0	1.5	1.8	1.5	2.2		1.4	1.59	0	
	0	0.6	0.7	1.1	1.2		0.7	1.43	0	
15.2	0	1.7	2.0	1.8	2.5		1.6	1.64	1	
	0	0.6	0.7	1.4	1.6		0.9	1.49	0	
16.0	0	1.9	2.2	2.1	2.9		1.8	1.65	2	
	0	0.7	0.9	1.5	1.9		1.0	1.51	0	
17.0	0	1.9	2.2	2.3	2.9		1.9	1.66	2	
	0	0.7	1.2	1.9	2.2		1.2	1.53	1	
17.7	0	2.0	2.4	2.5	3.2		2.0	1.67	2	
	0	0.8	1.4	2.2	2.5		1.4	1.56	2	





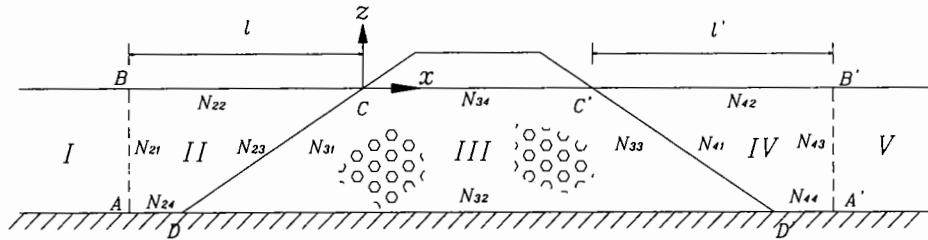
## 부록 C

### 투과 사면에 대한 내·외부 파동장 결정



### 가. 유체영역의 설정

<도 C.1>에서와 같이 유체영역은 경사식 방파제 주변 및 제체 내부에 설정된다. 영역 I은 방파제 전면 C점으로부터 일정거리  $l$  만큼 떨어져 있는 경계 AB 이전의 영역을, 영역 II는 경계 AB로부터 방파제 전면의 경계 CD까지의 영역을, 영역 III은 제체의 내부 영역을, 영역 IV는 방파제 후면 C'점으로부터 일정거리  $l'$  만큼 이격되어 있는 경계 A'B'까지의 영역을, 영역 V는 경계 A'B'이후의 영역을 나타낸다. 여기에서, 경계면 CD는 전사면 피복석의 두께를 제외한 내부 쇄석면으로 한다. 왜냐하면 전사면 피복석의 효과는 이미 외부과동장에 반영되었기 때문이다 (Madsen and White, 1976). 경계요소법은 영역 II, III, IV에 각각 적용된다. 각 영역의 경계들에서 기호  $N_{i,j}$ 는  $i$ 번째 영역에서  $j$ 번째 경계의 절점 수를 나타낸다. 번호부여는 영역 II와 IV는 시계방향으로, 영역 III는 반시계방향으로 취한다. 본 경계요소법의 영역에서 좌표계  $(x, z)$ 의 원점은 전사면과 정지수면의 교점, 즉 C점에 설정한다.



<도 C.1> 경계요소법의 흐름영역

### 나. 지배방정식과 경계조건

#### (1) 영역 I, II, IV, V

비압축성·비점성인 유체의 흐름이 비회전성이라고 가정하면 영역  $i$ 의 속도포텐셜  $\phi_i$ 는 다음의 Laplace방정식을 만족한다.

$$\frac{\partial^2 \phi_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_i}{\partial y^2} = 0 \quad (C.1)$$

시간과 공간의 함수인 속도포텐셜  $\phi_i(x, z; t)$ 를 공간만의 함수인  $\phi_i(x, z)$ 로 나

타내면

$$\Phi_i(x, z; t) = -\frac{ig\zeta_o}{\sigma} \phi_i(x, z)e^{-i\sigma t} \quad (C.2)$$

와 같다. 여기서,  $\zeta_o$ 는 입사파의 진폭,  $g$ 는 중력가속도이다. 식 (C.2)를 식 (C.1)에 대입하면, 간략화된 속도포텐셜  $\phi_i(x, z)$ 도 Laplace 방정식 형태가 된다.

$$\frac{\partial^2 \phi_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_i}{\partial y^2} = 0 \quad (C.3)$$

여기서,  $\zeta_o$ 는 입사파의 진폭,  $\sigma$ 는 각 주파수이다 ( $i = \sqrt{-1}$ ).

유체내의 수평속도 ( $u$ ), 연직속도 ( $w$ ), 압력( $p$ ) 그리고 수면변위( $\eta$ )는 다음과 같이 구해진다.

$$u = \frac{\partial \Phi_i}{\partial x}, \quad w = \frac{\partial \Phi_i}{\partial z} \quad (C.4)$$

$$p = -\rho \frac{\partial \Phi_i}{\partial t} = \rho g \zeta_o \phi_i(x, z) e^{-i\sigma t} \quad (C.5)$$

$$\eta = -\frac{1}{g} \frac{\partial \phi_i}{\partial t} \Big|_{z=0} = \zeta_o \phi_i(x, 0) e^{-i\sigma t} \quad (C.6)$$

식 (C.3)을 해석하여 속도포텐셜을 얻기 위해서는 아래와 같은 경계조건들을 고려하여야 한다. 선형화된 자유표면 경계조건은 식 (C.7)과 같으며, 그 외향 법선 미분치는 식 (C.8)과 같다. 바닥면에 대해서는 식 (C.9)와 같은 불투과 조건을 적용할 수 있다.

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial z} = \frac{\sigma^2}{g} \phi_i; \quad z=0 \quad (C.7)$$

$$\bar{\phi}_i = \frac{\partial \phi_i}{\partial n} = -\frac{\sigma^2}{g} \phi_i; \quad z=0 \quad (C.8)$$

$$\bar{\phi}_i = \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 ; \text{바닥 또는 불투과면} \quad (\text{C.9})$$

여기서,  $g$ 는 중력가속도이다.

(2) 영역 (III)

영역 (III)내의 흐름을 비압축, 비회전흐름이라 가정하면 속도포텐셜  $\Phi$ 를 이용하여 지배방정식을

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0 \quad (\text{C.10})$$

과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 평균유속성분은

$$(u, w) = \left( \frac{\partial \Phi}{\partial x}, \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) \quad (\text{C.11})$$

와 같다.

한편, 운동방정식은 선형파의 가정하에 이류항을 무시하면

$$\frac{C_m}{n} \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{C_f}{n} u \quad (\text{C.12})$$

$$\frac{C_m}{n} \frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{C_f}{n} w - g \quad (\text{C.13})$$

와 같다. 여기서,  $n$  : 공극률이다.  $C_m$ 은 관성력계수이며 공극입자에 대한 부가질량 계수를 이용하여  $C_m = 1 + (1-n)C_a$ 와 같이 나타낼 수 있다.

식 (C.11)을 식 (C.12)와 (C.13)에 대입하여 합성하면 식 (C.14)와 같은 에너지 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{C_m}{n} \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{p}{\rho} + \frac{C_f}{n} \Phi + gz = 0 \quad (\text{C.14})$$

식 (C.14)에서 수면변위  $\eta$ 와 동수압  $p$ 를

$$\eta = -\frac{1}{g} \left( \frac{C_m}{n} \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{C_f}{n} \Phi \right)_{z=0} \quad (\text{C.15})$$

$$\frac{p}{\rho} = -\frac{C_m}{n} \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \frac{C_f}{n} \Phi \quad (\text{C.16})$$

과 같이 구할 수 있다.

식 (C.10)을 풀기 위한 자유수면에 대한 운동학적 경계조건과 동력학적 경계조건은 각각

$$\frac{1}{n} \frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{1}{g} \left( \frac{C_m}{n} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + \frac{C_f}{n} \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right); \quad z=0 \quad (\text{C.17})$$

$$\frac{C_m}{n} \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{C_f}{n} \Phi + g\eta = 0; \quad z=0 \quad (\text{C.18})$$

이며 이들 식을 결합하면

$$\frac{1}{n} \frac{\partial \Phi}{\partial z} = -\frac{1}{g} \left( \frac{C_m}{n} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + \frac{C_f}{n} \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right); \quad z=0 \quad (\text{C.19})$$

를 얻을 수 있다.

속도포텐셜  $\Phi$ 를 간략화된 포텐셜 (reduced potential)  $\phi$ 를 이용하여

$$\Phi = -\frac{ig\zeta_0}{\sigma} \phi e^{-i\sigma t} \quad (\text{C.20})$$

과 같이 나타내고 이를 식 (C.15)와 식 (C.16)에 대입하면

$$\eta = C_2 \zeta_0 \phi e^{-i\sigma t} \quad (\text{C.21})$$

$$\frac{p}{\rho} = g C_2 \zeta_0 \phi e^{-i\sigma t} \quad (C.22)$$

이다. 여기서,  $C_1 = C_m + iC_f/\sigma$ ,  $C_2 = C_1/n$ 이다. 또한, 식 (C.20)을 식 (C.19)에 대입하면 식 (C.23)을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = C_1 \frac{\sigma^2}{g} \phi \quad (C.23)$$

공극내 흐름이 정상류일 경우에는 식 (C.12)는

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \rho \frac{C_f}{n} u \quad (C.24)$$

가 된다. 식 (C.24)의 우측 항을 Forchheimer 식 (McWhorter and Sunada, 1977)을 이용하여 나타내면

$$C_f u = n(\alpha u + \beta |u|u) \quad (C.25)$$

이다. 여기서,  $\alpha = \nu/k_p$ ,  $\beta = \sqrt{C_p/k_p}$ ,  $\nu$  = 물의 동점성계수,  $k_p$  = 고유투수성 (Intrinsic permeability),  $C_p$  = 공극내 흐름의 특성에 관련된 계수 (이하 유로계수로 칭하며 통상 0.6의 값을 가짐)이다. Fair and Hatch (1933)는 고유투수성을 다음과 같이 제시하였다.

$$k_p = \frac{1}{A} \left\{ \frac{(1-n)^2}{n^3} \left( \frac{B}{D_m} \right)^2 \right\}^{-1} \quad (C.26)$$

여기서,  $A \approx 5.0$ ,  $B \approx 7.7$ 이다.

한편, Englund (1953)는 식 (C.25)의  $\alpha$ ,  $\beta$ 를 다음과 같이 제시하였다.



$$\alpha = \alpha_0 \frac{(1-n)^3}{n^2} \frac{\nu}{D^2} \quad (C.27)$$

$$\beta = \beta_0 \frac{1-n}{n^3} \frac{1}{D} \left( \frac{8}{3\pi} \right) \quad (C.28)$$

여기서,

$\alpha_0 = 780 \sim 1500$  또는 그 이상,  $\beta_0 = 1.8 \sim 3.6$  또는 그 이상이다.

식 (C.25)에서  $C_f$ 는 다음과 같이 Lorentz 원리를 이용하여 구할 수 있다 (Sollitt and Cross, 1972; Sulisz, 1985).

$$C_f = \frac{n \int_R \left( \int_t^{t+T} (\alpha V^2 + \beta V^3) dt \right) dR}{\int_R \left( \int_t^{t+T} V^2 dt \right) dR} \quad (C.29)$$

여기서,  $R$ 은 공극률  $n$ 을 갖는 영역을 의미한다.  $V$ 는 공극체 내부에서의 유속으로서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V = \sqrt{(\overline{u_k})^2 + (\overline{w_k})^2} \quad (C.30)$$

$(\overline{u_k}, \overline{w_k})$ 는 내부영역 임의점  $k$ 에서의 유속성분  $(u_k, w_k)$ 의 실수부분이며  $(u_k, w_k)$ 는

$$u_k = -i \frac{g \zeta_o}{\sigma} \frac{\partial \Phi}{\partial x} = -i \frac{g \zeta_o}{\sigma} \frac{\partial \phi}{\partial x} e^{-i\sigma t} \quad (C.31)$$

$$w_k = -i \frac{g \zeta_o}{\sigma} \frac{\partial \Phi}{\partial y} = -i \frac{g \zeta_o}{\sigma} \frac{\partial \phi}{\partial y} e^{-i\sigma t} \quad (C.32)$$

와 같다.  $\partial \phi / \partial x$ ,  $\partial \phi / \partial y$ 는 영역의 경계면에서의  $\phi$ 와  $\partial \phi / \partial n$ 을 이용하여 구할 수 있다.

식 (C.29)를 이용하여  $C_f$ 를 구하기 위해서는 사전에  $V$ 를 알고 있어야 하나 이 역시 본 수치해석을 통하여 구해지는 경계면에서의  $\phi$ 와  $\partial \phi / \partial n$ 의 값에 의존한다. 따라서, 반복계산이 요구되며 본 수치해석에서는 초기치로서 등가단면 (사다리꼴 단

면과 동일면적인 직사각형 단면)에 대하여 Madsen and White (1976)의 장파이론을 적용하여 구한 마찰계수를 이용하였다.

#### 다. 영역 (I)에서의 파동장

속도포텐셜  $\phi_I(x, z)$ 는 입사파, 반사파, 산란파의 영향을 포함하는 식 (C.33)과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi_I(x, z) = & [e^{ik(x+l)} + A \cdot e^{-ik(x+l)}] \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \\ & + \sum_{m=1}^{\infty} A_m e^{k_m(x+l)} \frac{\cos k_m(z+h)}{\cos k_m h} \end{aligned} \quad (C.33)$$

식 (C.33)에서 우측 항은 차례로 입사파, 반사파, 그리고 소멸파 (evanescent mode)를 나타낸다. 여기서, 파수  $k$  와  $k_m$  은 각각 다음과 같은 분산관계식을 이용하여 구할 수 있다.

$$k \tanh kh = \frac{\sigma}{g} \quad (C.34)$$

$$-k_m \tan k_m h = \frac{\sigma}{g} \quad (C.35)$$

접속경계 ( $x=-l$ )에서 포텐셜과 이의 외향 법선벡터는 각각 식 (C.36), (C.37)과 같이 구하여진다.

$$\phi_I(-l, z) = (1 + A_0) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} + \sum_{m=1}^{\infty} A_m \frac{\cos k_m(z+h)}{\cos k_m h} \quad (C.36)$$

$$\begin{aligned} \bar{\phi}_I(-l, z) = \frac{\partial \phi_I(-l, z)}{\partial x} = & \left[ ik(1 - A_0) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \right. \\ & \left. + \sum_{m=1}^{\infty} A_m k_m \frac{\cos k_m(z+h)}{\cos k_m h} \right] \end{aligned} \quad (C.37)$$

식 (C.33)의 소멸파 (evanescent mode)에서 지수를  $e^{k_m x}$  형태로 나타낸 것은 소멸

파가 벽면에서 좌측으로 발달하며 좌측으로 갈수록 발생하는 지수적 감소 (exponential decay)를 나타내기 위한 것이다.

#### 라. 영역 (II)에서의 파동장

접속경계 AB 에서 영역 I, II의 압력과 수립자의 수평방향 속도는 동일하여야 하므로 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\phi_{II}^{(1)}(z) = \phi_I(-l, z) \quad (C.38)$$

$$\overline{\phi}_{II}^{(1)}(z) = -\frac{\partial \phi_{II}^{(1)}(z)}{\partial n} = \frac{\partial \phi_I(-l, z)}{\partial x} \quad (C.39)$$

식 (C.39)에서  $n$  은 외향 법선벡터를 나타내며 우측항의 (-) 부호는  $x$  와  $n$  이 서로 반대방향을 나타내기 때문이다. 상첨자 (1)은 영역 II의 경계번호를 의미한다 (<도 C.1> 참조).

식 (C.38), (C.39)에 식 (C.36), (C.37)을 대입하면,

$$(1 + A_o) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} + \sum_{m=1}^{\infty} A_m \frac{\cos k_m(z+h)}{\cos k_m h} = \phi_{II}^{(1)} \quad (C.40)$$

$$-\left[ ik(1 - A_o) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} + \sum_{m=1}^{\infty} A_m k_m \frac{\cos k_m(z+h)}{(\cos k_m h)} \right] = \overline{\phi}_{II}^{(1)} \quad (C.41)$$

이다. 식 (C.41)의 양변에  $\cosh k(z+h)$ ,  $\cos k_m(z+h)$ 를 각각 곱하고  $\cosh k(z+h)$  와  $\cos k_m(z+h)$ 간의 직교성 (orthogonal property)을 이용하여 수직적 분하면 계수  $A_o$  와  $A_m$  을 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\begin{aligned} A_o &= 1 - i \frac{1}{N_o \sinh kh} \int_{-h}^0 \phi_{II}^{(1)} \cosh k(z+h) dz \\ &= 1 - i \frac{1}{N_o \sinh kh} \sum_{p=1}^{K_{II}} \phi_{II}^{(1)}(p) \cosh k(z_p+h) \Delta z \end{aligned} \quad (C.42)$$

$$\begin{aligned}
A_m &= \frac{1}{N_m \sin k_m h} \int_{-h}^0 \bar{\phi}_{II}^{(1)} \cos k_m(z+h) dz \\
&= \frac{1}{N_m \sin k_m h} \sum_{p=1}^{K_{21}} \bar{\phi}_{II}^{(1)}(p) \cos k_m(z_p+h) \Delta z
\end{aligned} \tag{C.43}$$

여기서,

$$N_o = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \tag{C.44}$$

$$N_m = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2k_m h}{\sin 2k_m h} \right) \tag{C.45}$$

식 (C.42), (C.43)을 식 (C.40)에 대입하면,

$$\begin{aligned}
\phi_{II}^{(1)}(p) &= \left[ 2 - i \frac{1}{N_o \sinh kh} \sum_{r=1}^{K_{21}} \bar{\phi}_{II}^{(1)}(r) \cosh k(z_r+h) \Delta z \right] \\
&\quad - \frac{\cosh k(z_p+h)}{\cosh kh} - \sum_{m=1}^{\infty} \left[ \frac{1}{N_m \sin k_m h} \left\{ \sum_{r=1}^{K_{21}} \bar{\phi}_{II}^{(1)}(r) \right. \right. \\
&\quad \left. \left. \cos k_m(z_r+h) \Delta z \right\} \frac{\cos k_m(z_p+h)}{\cos k_m h} \right] \\
&= 2 \frac{\cosh k(z_p+h)}{\cosh kh} + \sum_{r=1}^{K_{21}} f(r:p) \bar{\phi}_{II}^{(1)}(r) \Delta z
\end{aligned} \tag{C.46}$$

과 같다. 여기서,

$$\begin{aligned}
f(r:p) &= -i \frac{\cosh k(z_r+h) \cosh k(z_p+h)}{N_o \sinh kh \cosh kh} \\
&\quad - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\cos k_m(z_r+h) \cos k_m(z_p+h)}{N_m \sin k_m h \cos k_m h}
\end{aligned} \tag{C.47}$$

이다.

Green's Second Identity formula를 영역 II에 적용하면 식 (C.48)과 같다.

$$\frac{1}{2\pi} \alpha(i) \phi(i) = \sum_{j=1}^{N_r} G_{ij} \bar{\phi}(j) - \sum_{j=1}^{N_r} H_{ij} \phi(j) \tag{C.48}$$

여기서,  $i$ : field point,  $j$ : source point

$\alpha(i)$  :  $i$  절점에서의 내각 (일정요소 경계요소에서는  $\pi$  와 같다)

$G_{ij}$  : Green 함수

$H_{ij}$  : Green 함수의 법선미분치

$N_T$  : 영역내 총 절점수.

식 (C.48)을 영역 II의 각 경계에 나누어 적용하면 (<도 C.1> 참조),

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{2\pi} \alpha(i) \phi_{II}(i) &= \sum_{j=1}^{K_{2,1}} G_{ij} \bar{\phi}_{II}^{(1)}(j) - \sum_{j=1}^{K_{2,1}} H_{ij} \phi_{II}^{(1)}(j) \\
 &+ \sum_{j=K_{2,1}+1}^{K_{2,2}} G_{ij} \bar{\phi}_{II}^{(2)}(j) - \sum_{j=K_{2,1}+1}^{K_{2,2}} H_{ij} \phi_{II}^{(2)}(j) \\
 &+ \sum_{j=K_{2,2}+1}^{K_{2,3}} G_{ij} \bar{\phi}_{II}^{(3)}(j) - \sum_{j=K_{2,2}+1}^{K_{2,3}} H_{ij} \phi_{II}^{(3)}(j) \\
 &+ \sum_{j=K_{2,3}+1}^{K_{2,4}} G_{ij} \bar{\phi}_{II}^{(4)}(j) - \sum_{j=K_{2,3}+1}^{K_{2,4}} H_{ij} \phi_{II}^{(4)}(j)
 \end{aligned} \tag{C.49}$$

여기서,

$$K_{2,j} = K_{2,(j-1)} + N_{2,j}$$

경계조건 (C.8), (C.9) 그리고 (C.46)을 고려하고 식 (C.49)를 절점  $i$ 의 위치에 따라 다시 쓰면 다음과 같다.

①  $i : AB$        $1 \leq i \leq K_{2,1}$

$$\begin{aligned}
 &- \sum_{j=1}^{K_{2,1}} \left( \frac{\alpha(i)}{2\pi} f(j : i) \Delta z - G_{ij} \right) \bar{\phi}_{II}^{(1)}(j) + \sum_{j=K_{2,1}+1}^{K_{2,2}} \left( G_{ij} \frac{\sigma^2}{g} - H_{ij} \right) \phi_{II}^{(2)}(j) \\
 &+ \sum_{j=K_{2,2}+1}^{K_{2,3}} \left( G_{ij} \bar{\phi}_{II}^{(3)}(j) - H_{ij} \phi_{II}^{(3)}(j) \right) - \sum_{j=K_{2,3}+1}^{K_{2,4}} H_{ij} \phi_{II}^{(4)}(j) \\
 &= 2 \frac{\alpha(i)}{2\pi} \frac{\cosh k(z_i + h)}{\cosh kh}
 \end{aligned} \tag{C.50}$$

②  $i : BC$        $K_{2,1} + 1 \leq i \leq K_{2,2}$

$$\sum_{j=1}^{K_{2,1}} \left( G_{ij} - \sum_{k=1}^{K_{2,1}} H_{ik} f(j : k) \Delta z \right) \bar{\phi}_{II}^{(1)}(j)$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{j=K_{2,1}+1}^{K_{2,2}} \left( -\frac{1}{2\pi} \alpha(i) \delta_{ij} + \frac{\sigma^2}{g} G_{ij} \right) \phi_{II}^{(2)}(j) \\
& + \sum_{j=K_{2,2}+1}^{K_{2,3}} \left( G_{ij} \bar{\phi}_{II}^{(3)}(j) - H_{ij} \phi_{II}^{(3)}(j) \right) - \sum_{j=K_{2,3}+1}^{K_{2,4}} H_{ij} \phi_2^{(4)}(j) \\
& = 2 \sum_{j=1}^{K_{2,1}} H_{ij} \frac{\cosh k(z_j + h)}{\cosh kh}
\end{aligned} \tag{C.51}$$

③  $i : CD \quad K_{2,2}+1 \leq i \leq K_{2,3}$

$$\begin{aligned}
& \sum_{j=1}^{K_{2,1}} \left( G_{ij} - \sum_{k=1}^{K_{2,1}} H_{ik} f(j : k) \Delta z \right) \bar{\phi}_{II}^{(1)}(j) + \sum_{j=K_{2,1}+1}^{K_{2,2}} \left( G_{ij} \frac{\sigma^2}{g} - H_{ij} \right) \phi_{II}^{(2)}(j) \\
& + \sum_{j=K_{2,2}+1}^{K_{2,3}} \left[ G_{ij} \bar{\phi}_{II}^{(3)}(j) - \left\{ \frac{1}{2\pi} \alpha(j) \delta_{ij} + H_{ij} \right\} \phi_{II}^{(3)}(j) \right] \\
& - \sum_{j=K_{2,3}+1}^{K_{2,4}} H_{ij} \phi_2^{(4)}(j) \\
& = 2 \sum_{j=1}^{K_{2,1}} H_{ij} \frac{\cosh k(z_j + h)}{\cosh kh}
\end{aligned} \tag{C.52}$$

④  $i : DA \quad K_{2,3}+1 \leq i \leq K_{2,4}$

$$\begin{aligned}
& \sum_{j=1}^{K_{2,1}} \left( G_{ij} - \sum_{k=1}^{K_{2,1}} H_{ik} f(j : k) \Delta z \right) \bar{\phi}_{II}^{(1)}(j) + \sum_{j=K_{2,1}+1}^{K_{2,2}} \left( G_{ij} \frac{\sigma^2}{g} - H_{ij} \right) \phi_{II}^{(2)}(j) \\
& + \sum_{j=K_{2,2}+1}^{K_{2,3}} \left( G_{ij} \bar{\phi}_{II}^{(3)}(j) - H_{ij} \phi_{II}^{(3)}(j) \right) + \sum_{j=K_{2,3}+1}^{K_{2,4}} \left( -\frac{1}{2\pi} \alpha(j) \delta_{ij} \right) \phi_{II}^{(4)}(j) \\
& = 2 \sum_{j=1}^{K_{2,1}} H_{ij} \frac{\cosh k(z_j + h)}{\cosh kh}
\end{aligned} \tag{C.53}$$

마. 영역 (III)에서의 파동장

영역 II와 III사이의 접촉경계 CD에서의 경계조건은 다음과 같다.

$$\phi_{III}^{(1)}(x, z) = \frac{\phi_{II}^{(3)}}{C_2} ; \text{압력의 연속} \tag{C.54}$$

$$\bar{\phi}_{III}^{(1)} = -\bar{\phi}_{II}^{(3)} ; \text{수평유속의 연속} \tag{C.55}$$

- 경계  $CC$  (자유수면)

$$\bar{\phi}_{III}^{(4)} = C_1 \frac{\sigma^2}{g} \phi_{III}^{(4)} \quad (C.56)$$

식 (C.48)의 Green의 정리를 적용하여 절점  $i$ 의 위치에 따라서 구분하여 쓰면 다음과 같다. 단,

$$K_{3,j} = K_{3,(j-1)} + N_{3,j}$$

①  $i : CD \quad 1 \leq i \leq K_{3,1}$

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{K_{3,1}} \left( G_{ij} \bar{\phi}_{III}^{(1)}(j) - \frac{1}{2\pi} \alpha(i) \delta_{ij} \phi_{III}^{(1)}(j) \right) - \sum_{j=K_{3,1}+1}^{K_{3,2}} H_{ij} \phi_{III}^{(2)}(j) \\ & + \sum_{j=K_{3,2}+1}^{K_{3,3}} \left( G_{ij} \bar{\phi}_{III}^{(3)}(j) - H_{ij} \phi_{III}^{(3)}(j) \right) + \sum_{j=K_{3,3}+1}^{K_{3,4}} \left( C_1 \frac{\sigma^2}{g} G_{ij} - H_{ij} \right) \phi_{III}^{(4)}(j) \quad (C.57) \\ & = 0 \end{aligned}$$

②  $i : DD' \quad K_{3,1}+1 \leq i \leq K_{3,2}$

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{K_{3,1}} \left( G_{ij} \bar{\phi}_{III}^{(1)}(j) - H_{ij} \phi_{III}^{(1)}(j) \right) - \sum_{j=K_{3,1}+1}^{K_{3,2}} \frac{1}{2\pi} \alpha(i) \delta_{ij} \phi_{III}^{(2)}(j) \\ & + \sum_{j=K_{3,2}+1}^{K_{3,3}} \left( G_{ij} \bar{\phi}_{III}^{(3)}(j) - H_{ij} \phi_{III}^{(3)}(j) \right) + \sum_{j=K_{3,3}+1}^{K_{3,4}} \left( C_1 \frac{\sigma^2}{g} G_{ij} - H_{ij} \right) \phi_{III}^{(4)}(j) \quad (C.58) \\ & = 0 \end{aligned}$$

③  $i : DC \quad K_{3,2}+1 \leq i \leq K_{3,3}$

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{K_{3,1}} \left( G_{ij} \bar{\phi}_{III}^{(1)}(j) - H_{ij} \phi_{III}^{(1)}(j) \right) - \sum_{j=K_{3,1}+1}^{K_{3,2}} H_{ij} \phi_{III}^{(2)}(j) \\ & + \sum_{j=K_{3,2}+1}^{K_{3,3}} \left( -\frac{\alpha(i)}{2\pi} \delta_{ij} \phi_{III}^{(3)}(j) + G_{ij} \bar{\phi}_{III}^{(3)}(j) \right) \quad (C.59) \\ & + \sum_{j=K_{3,3}+1}^{K_{3,4}} \left( C_1 \frac{\sigma^2}{g} G_{ij} - H_{ij} \right) \phi_{III}^{(4)}(j) \\ & = 0 \end{aligned}$$

④  $i : CC \quad K_{3,3}+1 \leq i \leq K_{3,4}$

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{K_{3,1}} (G_{ij} \bar{\phi}_{III}^{(1)}(j) - H_{ij} \phi_{III}^{(1)}(j)) - \sum_{j=K_{3,1}+1}^{K_{3,2}} (H_{ij} \phi_{III}^{(2)}(j)) \\ & + \sum_{j=K_{3,2}+1}^{K_{3,3}} (G_{ij} \bar{\phi}_{III}^{(3)}(j) - H_{ij} \phi_{III}^{(3)}(j)) \\ & + \sum_{j=K_{3,3}+1}^{K_{3,4}} \left( -\frac{a(i)}{2\pi} \delta_{ij} + C_1 \frac{\sigma^2}{g} G_{ij} \right) \phi_{III}^{(4)}(j) = 0 \end{aligned} \quad (C.60)$$

여기서,  $\phi_{III}^{(1)} = \phi_{II}^{(3)}/C_2$ ,  $\bar{\phi}_{III}^{(1)} = -\bar{\phi}_{II}^{(3)}$

#### 바. 영역 (V)에서의 파동장

속도포텐셜  $\phi_V(x, z)$ 는 투과파와 소멸파의 영향을 포함하는 식 (C.61)의 형태로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi_V(x, z) = & B_0 e^{ik(x-l')} \frac{\cosh k'(z+h')}{\cosh k'h'} \\ & + \sum_{m=1}^{\infty} B_m e^{-k_m'(x-l')} \frac{\cosh k_m'(z+h')}{\cosh k_m'h'} \end{aligned} \quad (C.61)$$

식 (C.61)에서 우측 항은 차례로 투과파, 소멸파 (evanescent mode)를 나타낸다. 여기서, 파수  $k'$  와  $k_m'$  은 각각 다음과 같은 분산관계식을 이용하여 구할 수 있다.

$$k' \tanh k'h = \frac{\sigma}{g} \quad (C.62)$$

$$-k_m' \tan k_m'h = \frac{\sigma}{g} \quad (C.63)$$

접속경계 ( $x=l'$ )에서 포텐셜과 이의 외향 법선벡터는 각각 다음과 같이 구하여 질 수 있다.



$$\phi_V(l', z) = B_0 \frac{\cosh k'(z+h')}{\cosh k'h'} + \sum_{m=1}^{\infty} B_m \frac{\cosh k_m'(z+h')}{\cosh k_m'h'} \quad (C.64)$$

$$\bar{\phi}_V(l', z) = ik' B_0 \frac{\cosh k'(z+h')}{\cosh k'h'} - \sum_{m=1}^{\infty} B_m k_m' \frac{\cosh k_m'(z+h')}{\cosh k_m'h'} \quad (C.65)$$

#### 사. 영역 (IV)에서의 파동장

접속경계  $A'B'$  에서의 압력과 수립자의 수평방향 속도는 동일하여야 한다. 따라서,

$$\phi_{IV}^{(3)} = \phi_V(l', z) \quad (C.66)$$

$$\bar{\phi}_{IV}^{(3)} = \bar{\phi}_V(l', z) \quad (C.67)$$

식 (C.67)에 식 (C.65)를 대입하여 수심 적분하면 계수  $B_0$ 와  $B_n$ 은 각각

$$B_0 = \frac{-i}{N_0' \sinh k'h'} \sum_{q=K_{4,2}+1}^{K_{4,3}} \bar{\phi}_{IV}^{(3)} \cosh k'(z_q+h') \Delta z \quad (C.68)$$

$$B_n = -\frac{1}{N_n' \sinh k_n'h'} \sum_{q=K_{4,2}+1}^{K_{4,3}} \bar{\phi}_{IV}^{(3)} \cosh k'(z_q+h') \Delta z \quad (C.69)$$

와 같이 된다. 여기서,

$$N_0' = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2k'h'}{\sinh 2k'h'} \right), \quad (C.70)$$

$$N_n' = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2k_n'h'}{\sinh 2k_n'h'} \right) \quad (C.71)$$

식 (C.66)에 식 (C.64), (C.68), (C.69)를 대입하면

$$\phi_{VI}^{(3)} = \sum_{q=K_{4,2}+1}^{K_{4,3}} f(q, s) \bar{\phi}_{IV}^{(3)}(q) \Delta z \quad (C.72)$$

$$f(q : s) = \frac{-i \cosh k'(z_q+h') \cosh k'(z_s+h')}{N_0' \sinh k'h' \cosh k'h'} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cosh k_n'(z_q+h') \cosh k_n'(z_s+h')}{N_n' \sinh k_n'h' \cosh k_n'h'} \quad (C.73)$$

와 같이 된다. 이상에서 결정된 접속경계와 바닥경계, 표면경계조건들을 적용하여

식 (C.48)의 Green의 정리를 적용하여 절점  $i$ 의 위치에 따라 구분하여 쓰면 다음과 같다. 단,

$$K_{4,j} = K_{4,(j-1)} + N_{4,j}$$

①  $i : D'C \quad 1 \leq i \leq K_{4,1}$

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{K_{4,1}} \left( -\frac{\alpha(i)}{2\pi} \delta_{ij} \phi_{VI}^{(1)}(j) + G_{ij} \bar{\phi}_{VI}^{(1)}(j) \right) + \sum_{j=K_{4,1}+1}^{K_{4,2}} \left( \frac{\sigma^2}{g} G_{ij} - H_{ij} \right) \phi_{VI}^{(2)}(j) \\ & + \sum_{j=K_{4,2}+1}^{K_{4,3}} \left( G_{ij} - \sum_{k=K_{4,2}+1}^{K_{4,3}} H_{ik} f(j,k) \Delta z \right) \bar{\phi}_{VI}^{(3)}(j) - \sum_{j=K_{4,3}+1}^{K_{4,4}} H_{ij} \phi_{VI}^{(4)}(j) \\ & = 0 \end{aligned} \quad (C.74)$$

②  $i : CB \quad K_{4,1} + 1 \leq i \leq K_{4,2}$

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{K_{4,1}} \left( G_{ij} \bar{\phi}_{VI}^{(1)}(j) - H_{ij} \phi_{VI}^{(1)}(j) \right) + \sum_{j=K_{4,1}+1}^{K_{4,2}} \left( -\frac{\alpha(i)}{2\pi} \delta_{ij} + \frac{\sigma^2}{g} G_{ij} \right) \phi_{VI}^{(2)}(j) \\ & + \sum_{j=K_{4,2}+1}^{K_{4,3}} \left( G_{ij} - \sum_{k=K_{4,2}+1}^{K_{4,3}} H_{ik} f(j,k) \Delta z \right) \bar{\phi}_{VI}^{(3)}(j) - \sum_{j=K_{4,3}+1}^{K_{4,4}} H_{ij} \phi_{VI}^{(4)}(j) \\ & = 0 \end{aligned} \quad (C.75)$$

③  $i : BA' \quad K_{4,2} + 1 \leq i \leq K_{4,3}$

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{K_{4,1}} \left( G_{ij} \bar{\phi}_{VI}^{(1)}(j) - H_{ij} \phi_{VI}^{(1)}(j) \right) + \sum_{j=K_{4,1}+1}^{K_{4,2}} \left( \frac{\sigma^2}{g} G_{ij} - H_{ij} \right) \phi_{VI}^{(2)}(j) \\ & + \sum_{j=K_{4,2}+1}^{K_{4,3}} \left( G_{ij} - \frac{\alpha(i)}{2\pi} f(j,i) \right) \phi_{VI}^{(3)}(j) - \sum_{j=K_{4,3}+1}^{K_{4,4}} H_{ij} \phi_{VI}^{(4)}(j) \\ & = 0 \end{aligned} \quad (C.76)$$

④  $i : A'D \quad K_{4,3} + 1 \leq i \leq K_{4,4}$

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{K_{4,1}} \left( G_{ij} \bar{\phi}_{VI}^{(1)}(j) - H_{ij} \phi_{VI}^{(1)}(j) \right) + \sum_{j=K_{4,1}+1}^{K_{4,2}} \left( \frac{\sigma^2}{g} G_{ij} - H_{ij} \right) \phi_{VI}^{(2)}(j) \\ & + \sum_{j=K_{4,2}+1}^{K_{4,3}} \left( G_{ij} - \sum_{k=1}^{K_{4,2}} H_{ik} f(j,k) \Delta z \right) \bar{\phi}_{VI}^{(3)}(j) \\ & = 0 \end{aligned} \quad (C.77)$$

$$+ \sum_{j=K_{4,3}+1}^{K_{4,4}} \left( -\frac{1}{2\pi} \alpha(i) \delta_{ij} \right) \phi_4^{(4)}(j)$$

$$= 0$$

여기서,

$$\phi_{IV}^{(1)} = C_2 \phi_{III}^{(3)}$$

$$\bar{\phi}_{IV}^{(1)} = -\bar{\phi}_{III}^{(3)}$$

#### 아. 경계요소 행렬의 해석

절점  $i$  의 위치에 따라 구분한 식 (C.50) - (C.53), 식 (C.57) - (C.60), 식 (C.74) - (C.77)을 행렬 형태로 나타내면,

$$A_{ij} B_j = F_i \quad (C.78)$$

와 같다. 식 (C.98)을 풀어서 쓰면,

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1j} & \cdots & A_{1N} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2j} & \cdots & A_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ A_{i1} & A_{i2} & \cdots & A_{ij} & \cdots & A_{iN} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ A_{M1} & A_{M2} & \cdots & A_{Mj} & \cdots & A_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_i \\ \vdots \\ B_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_i \\ \vdots \\ F_N \end{bmatrix} \quad (C.79)$$

과 같으며, 위 식은 경계요소법을 적용한 영역 II, III, IV에 공히 적용된다. 여기서, 미지수 행렬  $\{B\}$ 의 요소는 다음과 같다.

#### <영역 II>

$$\bar{\phi}_{II}^{(1)}(j) ; j=1 \sim K_{21} \quad (N_{21} \text{ 개})$$

$$\phi_{II}^{(2)}(j) ; j=K_{21}+1 \sim K_{22} \quad (N_{22} \text{ 개})$$

$$\bar{\phi}_{II}^{(3)}(j), \quad \phi_{II}^{(3)}(j) ; j=K_{22+1} \sim K_{23} \quad (2N_{23} \text{ 개})$$

$$\phi_{II}^{(4)}(j) ; j = K_{23} + 1 \sim K_{24} \text{ ( } N_{24} \text{ 개)}$$

<영역 III>

$$\phi_{III}^{(2)}(j) ; j = K_{31} + 1 \sim K_{32} \text{ ( } N_{32} \text{ 개)}$$

$$\overline{\phi_{III}^{(3)}}(j), \phi_{III}^{(3)}(j) ; j = K_{32+1} \sim K_{33} \text{ ( } 2N_{33} \text{ 개)}$$

$$\phi_{III}^{(4)}(j) ; j = K_{33} + 1 \sim K_{34} \text{ ( } N_{34} \text{ 개)}$$

<영역 IV>

$$\phi_{IV}^{(2)}(j) ; j = K_{41} + 1 \sim K_{42} \text{ ( } N_{42} \text{ 개)}$$

$$\phi_{IV}^{(3)}(j) ; j = K_{32+1} \sim K_{33} \text{ ( } N_{43} \text{ 개)}$$

$$\phi_{IV}^{(4)}(j) ; j = K_{43} + 1 \sim K_{44} \text{ ( } N_{44} \text{ 개)}$$

상기 미지수의 총 개수는

$$\begin{aligned} N_T &= N_{21} + N_{22} + 2N_{23} + N_{24} \\ &+ N_{32} + 2N_{33} + N_{34} \\ &+ N_{42} + N_{43} + N_{44} \end{aligned}$$

방정식의 개수는

$$\begin{aligned} \overline{N_T} &= N_{21} + N_{22} + N_{23} + N_{24} ; \text{ (영역 II)} \\ &+ N_{31} + N_{32} + N_{33} + N_{34} ; \text{ (영역 III)} \\ &+ N_{41} + N_{42} + N_{43} + N_{44} ; \text{ (영역 IV)} \end{aligned}$$

접속경계면에서  $N_{25} = N_{31}$ ,  $N_{33} = N_{41}$ 임을 고려하면 상기 미지수와 방정식의 개수가 동일하여 해를 구할 수 있다.

자. 수리특성의 결정

방과제 체체투과에 관련한 수리특성은 반사율, 내부전달율, 그리고 간극수압이다.

반사율과 내부투과율을 결정하기 위해서는 먼저 식 (C.79)를 풀어 각 절점에서의 미지수  $\phi$  또는  $\bar{\phi}$ 를 구하고 이들을 식 (C.42)와 식 (C.68)에 대입하여  $A_o$ 과  $B_o$ 를 계산한다. 방파제의 반사율  $K_{r2}$ 와 내부전달율  $T_r$ 은 다음과 같이 결정된다.

$$K_{r2} = |A_o| \quad (C.80)$$

$$T_r = |B_o| \quad (C.81)$$

방파제 내부 임의점  $q$ 에서의 간극수압을 결정하기 위해서는 먼저  $q$ 점에서의 속도포텐셜  $\phi_q$ 를 구해야 하며 이는 영역 III의 경계면 절점에서의  $\phi$ 와  $\bar{\phi}$ 를 이용하여 다음과 같이 결정된다.

$$\phi_{III}(q) = \sum_{j=1}^{K_{34}} G_{qj} \bar{\phi}_{III}(j) - \sum_{j=1}^{K_{34}} H_{qj} \phi_{III}(j) \quad (C.82)$$

간극수압은 식 (C.22)에 근거하여

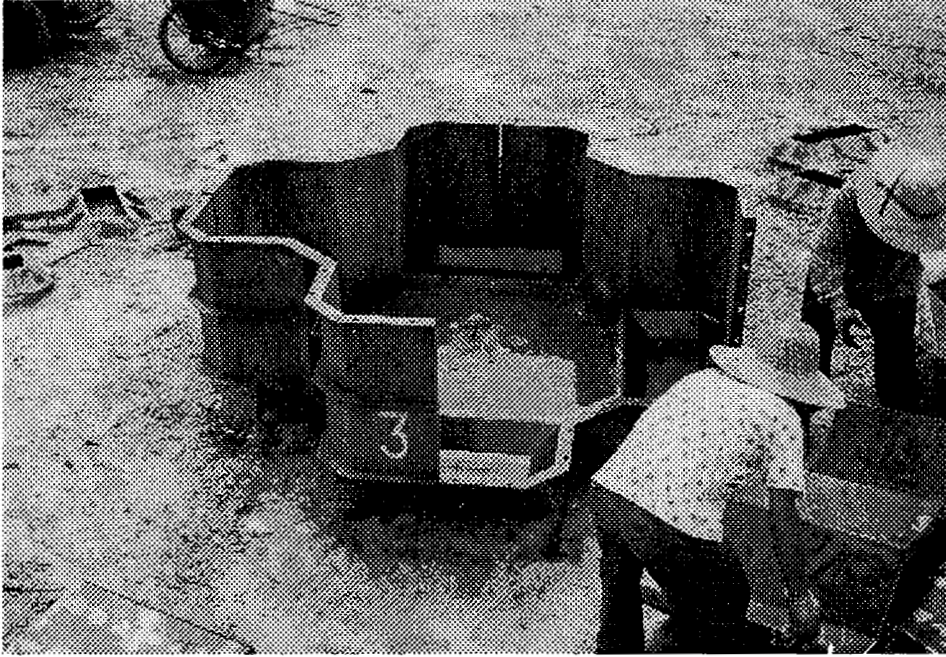
$$p_{III}(q) = \rho g C_2 \zeta_o \phi_{III}(q) e^{-i\sigma t} \quad (C.83)$$

과 같이 구할 수 있다.

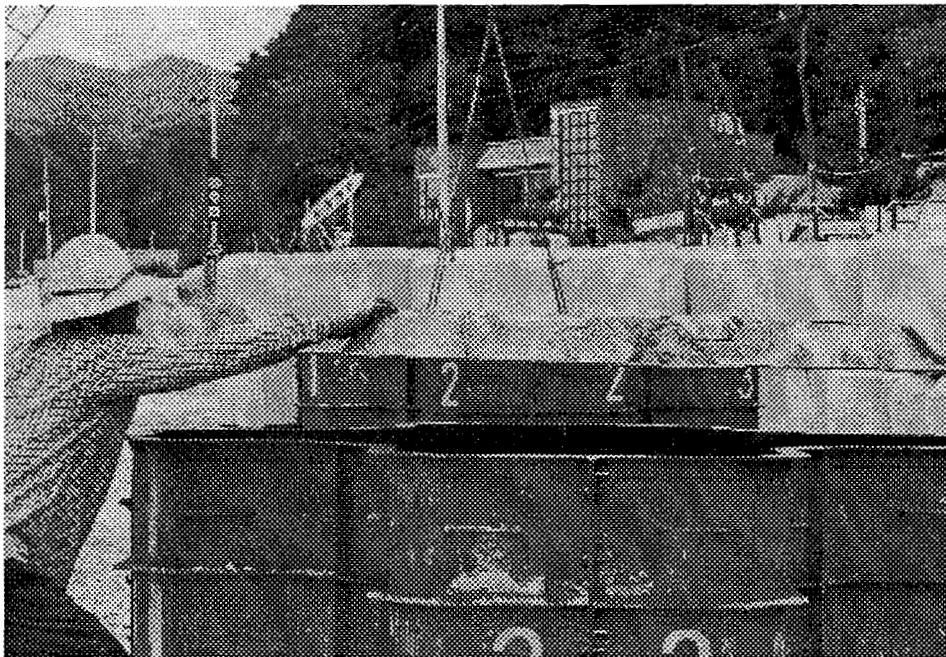
## 부록 D

### 하프록의 제작과정과 현장 설치





<도 D.1> 거푸집 측판 조립

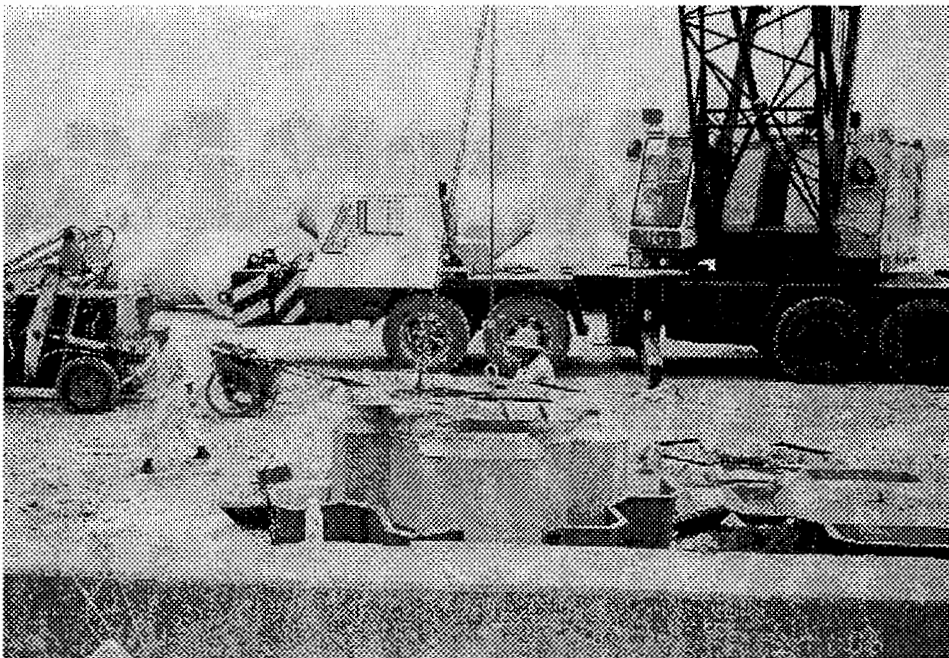


<도 D.2> 거푸집 상판 조립

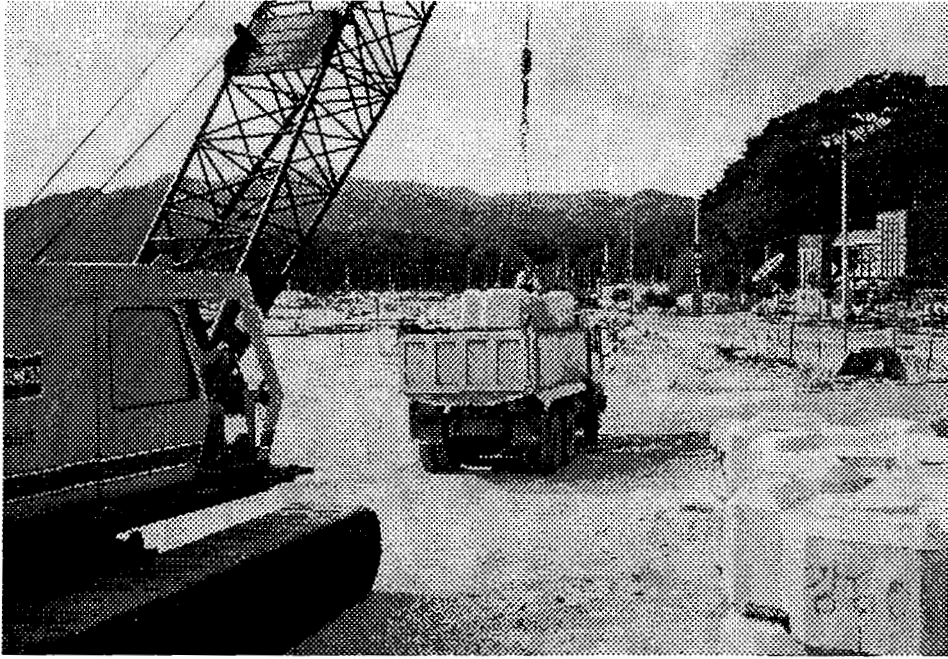




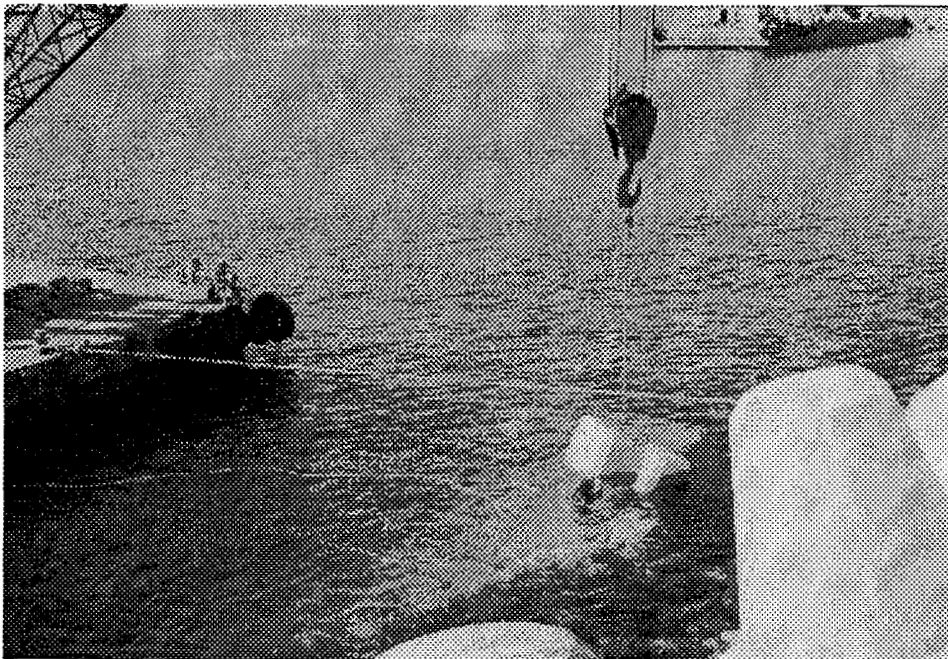
<도 D.3> 타설 및 진동



<도 D.4> 상판 탈형



<도 D.5> 거치장소로 이동하기 위한 적재



<도 D.6> 하프록의 거치



## 참여 연구진

**주관연구기관** : 한국해양연구원 연안항만공학연구본부

**연구책임자** : 이달수

**참여연구원** : 이광수, 오영민, 박우선, 조홍연, 김창일

**연구조원** : 장세철, 백원대, 우선미, 최동숙

**위탁연구기관 1** : 경주대학교 건설환경시스템공학부

**연구책임자** ; 권혁민

**참여연구원** : 강보순, 심형석

**위탁연구기관 2** : 건국대학교 토목공학과

**연구책임자** : 전인식

**참여연구원** : 이두성, 황연호, 최성진

**연구자문** : (주)한아엔지니어링 오세범, 이황주

