



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2016年 2月

박사학위 청구 논문

펜타포드와 Y블록의  
안정성실험 및 소파성능 평가

조선대학교 대학원

토목공학과

전 화 봉

펜타포드와 Y블록의  
안정성실험 및 소파성능 평가

Evaluation of Breakwater Performance and Stability  
Test of Pentapod and Y-block

2016년 2월 25일

조선대학교 대학원

토목공학과

전 화 봉

# 펜타포드와 Y블록의 안정성실험 및 소파성능 평가

지도교수 김 성 홍

이 논문을 공학박사학위 신청 논문으로 제출함.

2015년 10월

조선대학교 대학원

토목공학과

전 화 봉



## 전화봉의 박사학위논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 김 운 중 (인)

위 원 조선대학교 교수 박 길 현 (인)

위 원 조선대학교 교수 박 정 응 (인)

위 원 호남대학교 교수 송 창 수 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 성 홍 (인)

2015년 12월

조선대학교대학원

# 목 차

## ABSTRACT

제 1 장 서론 .....	1
1.1 연구배경 및 목적 .....	1
1.2 국내외 연구동향 .....	3
1.3 연구의 범위 .....	5
제 2 장 방파제의 특성 및 영향인자 .....	6
2.1 방파제의 특성 .....	6
2.1.1 방파제의 종류 .....	6
2.1.2 국내방파제 시공사례 .....	9
2.1.3 방파제 피해사례 분석 .....	12
2.2 경사제 설계인자 .....	17
2.2.1 중량산정 공식 .....	17
2.2.2 반사율 .....	23
2.2.3 처오름높이 .....	28
2.3 수리모형실험 영향인자 .....	29
2.3.1 상사법칙 .....	29
2.3.2 피해율, 피해모드, 안정계수 .....	30
2.4 CADMAS-SURF 모형 .....	34
2.4.1 CADMAS-SURF 모형의 개요 .....	34

2.4.2 지배방정식 .....	38
<b>제 3 장 수리모형실험 재료 및 방법 .....</b>	<b>46</b>
3.1 모형의 제작 .....	46
3.1.1 모형의 특징 .....	47
3.1.2 실험용 모형 .....	51
3.2 실험장치 및 실험방법 .....	53
3.3 실험조건 .....	57
3.3.1 조파 조건 .....	57
3.3.2 실험과량 .....	59
<b>제 4 장 수리모형 실험결과 및 분석 .....</b>	<b>60</b>
4.1 스펙트럼 발생과 수렴 .....	60
4.1.1 펜타포드 경사제 .....	60
4.1.2 Y블록 경사제 .....	65
4.2 피해량 및 피해계수 분석 .....	70
4.3 반사율 측정 .....	75
4.3.1 펜타포드 경사제 .....	75
4.3.2 Y블록 경사제 .....	76
<b>제 5 장 CADMAS-SURF를 이용한 수치해석 .....</b>	<b>77</b>
5.1 입력자료 및 매개변수 값 .....	77
5.1.1 적용단면 .....	77

5.1.2 모델링 조건 .....	78
5.2 모델링 결과 .....	81
5.2.1 반사율 산정 .....	81
5.2.2 처오름높이 산정 .....	88
5.3 시나리오 설정 및 모의실험 .....	93
5.3.1 시나리오 설정 .....	93
5.3.2 모의실험 결과 .....	94
제 6 장 결 론 .....	95
참 고 문 헌 .....	97
감 사 의 글 .....	103

## 표 목 차

표 2.1 국내 항만별 방파제 시공사례 .....	10
표 2.2 Goda식에서 반사율의 개략치 .....	24
표 2.3 CADMAS-SURF의 기능 일람 .....	35
표 2.4 경계조건 일람 .....	37
표 3.1 피복제의 규격 .....	53
표 3.2 수로 및 조파기 제원 .....	54
표 3.3 수리실험 조건 .....	59
표 4.1 펜타포드의 안정성실험결과 예시(유의파 주기 1.98초) .....	71
표 4.2 펜타포드의 안정성실험사진 예시(유의파 주기 1.98초) .....	72
표 4.3 Y블록의 안정성실험결과 예시(유의파 주기 1.98초) .....	73
표 4.4 Y블록의 안정성실험사진 예시(유의파 주기 1.98초) .....	74
표 4.5 펜타포드의 유의 파고별 반사율 실험 결과 .....	75
표 4.6 Y블록의 유의 파고별 반사율 실험 결과 .....	76
표 5.1 모델링에 사용된 매개변수 및 상수값 .....	78
표 5.2 모델링에 사용된 제어변수 및 모의조건 .....	79
표 5.3 펜타포드의 파고별 반사율 해석 및 실험결과 .....	82
표 5.4 Y블록의 파고별 반사율 해석 및 실험결과 .....	85
표 5.5 펜타포드의 파고별 처오름높이 및 상대처오름높이 .....	90
표 5.6 Y블록의 파고별 처오름높이 및 상대처오름높이 .....	91
표 5.7 심리항 설계에 사용된 설계 파랑 .....	93
표 5.8 시나리오별 반사율 및 처오름높이 .....	94

## 그림 목 차

그림 2.1 방파제의 종류 .....	6
그림 2.2 방파제의 구조 형식에 따른 분류 .....	8
그림 2.3 피복석에 작용하는 외력 .....	18
그림 2.4 파의 치오름 .....	28
그림 2.5 CADMAS-SURF의 개요도 .....	34
그림 2.6 좌표계의 정의와 물리량 .....	39
그림 2.7 VOF법에 의한 자유표면의 모델화 .....	40
그림 3.1 펜타포드의 형상 .....	46
그림 3.2 Y블록의 형상 .....	46
그림 3.3 펜타포드의 입체도 .....	48
그림 3.4 펜타포드의 사시도 .....	48
그림 3.5 평면 인티로킹 연결 지점(xy평면) .....	49
그림 3.6 상하 인티로킹 연결 지점(z방향) .....	49
그림 3.7 2차원의 Y블록 설치 평면도 .....	50
그림 3.8 3차원의 Y블록 설치 사시도 .....	50
그림 3.9 모형의 거푸집 .....	52
그림 3.10 피복재 모형 .....	52
그림 3.11 조파기 사진 .....	55
그림 3.12 협수로 설치 .....	55
그림 3.13 수리모형실험 촬영 과정 .....	56
그림 3.14 파 제어 흐름도 .....	58
그림 4.1 펜타포드 실험에서 스펙트럼 수렴과정 .....	64
그림 4.2 Y블록 실험에서 스펙트럼 수렴과정 .....	69
그림 5.1 모델 방파제의 수치수로 단면도 .....	77

그림 5.2 모형블록을 이용한 공극률 측정실험 .....80  
 그림 5.3 펜타포드의 파고별 반사율 비교 .....84  
 그림 5.4 Y블록의 파고별 반사율 비교 .....87  
 그림 5.5 처오름높이 모의결과 .....89  
 그림 5.6 펜타포드의 파고별 처오름높이 비교 .....92  
 그림 5.7 Y블록의 파고별 처오름높이 비교 .....92

## ABSTRACT

### Evaluation of Breakwater Performance and Stability Test of Pentapod and Y-block

**Jeon, Hwa Bong**

**Advisor : Prof. Kim, Sung Hong, Ph.D**

**Department of Civil Engineering**

**Graduate School of Chosun University**

Pentapod and Y-block which are new shapes of armouring block for the breakwater protection are developed in this study. The two blocks have remarkable feature in interlocking structure. Hydraulic wave test and numerical simulation using the block models were experimented to evaluate the interlocking stability and to determine the design parameters.

Thousands of concrete block models were piled up one by one neatly in a two dimensional wave channel at 1:1.5 slope. Every 200g blocks was stable in the condition of 0.99 to 1.98 second of wave period and 4 to 14cm of wave height. This is because the interlocking feature of the blocks increases the resistance against the wave. Based on similarity laws, these are 25ton blocks which are installed in 18m depth of sea and faced on 7 to 14 seconds of wave period with 2 to 7m of wave height. Reflection rate of the Y-block was ranged 0.513 to 0.853 at the above wave period and wave height condition. Reflection rate of Pentapod block was similar to that of Y-block.

Reflection rate of the two shapes of block calculated from numerical simulation



were similar to the measured rate for the above wave period and wave height. Numerical experiment can simulate overtopping height at a various wave condition. Results showed that overtopping height was directly proportional to the wave height and wave period. Among the 4 to 14cm wave height and 0.99 to 1.98 second of wave period conditions, the highest overtopping was observed as high as 0.2223 at the condition of 1.98 second of wave period and 14cm of wave height which is the highest condition in this experiments. This means overtopping height is 1.6 times higher than wave height. Hydraulic channel tests using model blocks and numerical experiments using CADMAS-SURF showed that design parameters of reflection rate and overtopping characteristics of the two shapes of block were similar to popular tetrapod.

# 제 1 장 서론

## 1.1 연구배경 및 목적

무역중심의 개방형 경제구조를 갖고 있는 우리나라에 있어서 최우선적으로 확보되어야 할 사회간접자본시설 중에 하나가 항만시설이다. 여기에 3면이 바다로 둘러싸여 있고, 전체 수출입 화물의 99.7%가 항만을 통과하고 있어 수출입 산업의 국제 경쟁력 결정에 항만의 효율성이 지대한 영향을 미치고 있는 것이 현실이다. 이러한 현실을 대변하기 위해 항만 및 해안 구조물의 신규 증축은 늘어나고 있다. 하지만 지진, 태풍 등 자연재해로 인하여 끊임없는 위협에 항상 노출되어 있다. 그중 태풍은 자연재해 중 가장 강력하고 파괴적인 기상현상이자 강풍, 호우, 해일 등 피해를 유발시키는 위험기상이다. 이로 인한 자연재해를 방지하기 위하여 연안인근의 개발 시점부터 방재시설의 건설이 수반되어 왔다.

2002년 최악의 태풍으로 여겨지고 있는 '루사'는 단 이틀 만에 국가 총 R&D 예산보다도 많은 당시 5조 1,479억원에 달하는 천문학적 재산피해를 입혔다. 1937년부터 2014년까지 발생한 태풍이 통과할 때 일최대순간.풍속 순위를 살펴보면, 1위 매미(MAEMI, 60m/s, 2003), 2위 프라삐룬(PRAPIROON, 58.3m/s, 2000), 3위 루사(RUSA, 56.7m/s, 2002), 4위 나리(NARI, 52.4m/s, 2007), 5위 볼라벤(BOLAVEN, 51.8m/s, 2012), 6위 테드(TED, 51.0m/s, 1992), 7위 베라(VERA, 49.0m/s, 1986), 8위 나비(NABI, 47.3m/s, 2005), 9위 사라(SARAH, 46.9m/s, 1959), 10위 페이(FAYE, 46.6m/s, 1995)이다 (<http://typ.kma.go.kr/>).

태풍에 의한 구조물 피해는 단순히 시설물의 피해뿐만 아니라 주변의 지역에 위치한 산업 시설물 등의 피해를 유발하여 심각한 인명 및 재산상의 피해가 발생된다. 최근 들어 지구온난화로 인해 더 강력한 태풍의 영향 가능성이 예고되고 있으므로, 태풍에 대한 보다 철저한 대비가 필요하며, 그에 따른 안정성을 확보하여야 한다.

우리나라는 항만개발 및 방파제 보수를 꾸준히 해오고 있으며, 다양한 형상의 신형식 방파제가 개발 적용되고 있다. 이러한 방파제는 항만개발을 위해 가장 먼저 건설되어 점차 열악해지고 있는 해양환경을 극복해야 하는 것이 가장 중요하다. 항만 설계기준(2014)에 따르면 '항만 시설의 건설, 개량 및 유지에 있어서는 자연환경에 대한 영향을 최소화함과 동시에 양호한 자연경관을 창출해 내는데 유의할 필요가 있으며, 항만

에서는 조석, 파랑 등의 작용으로 항만의 자연환경변화 및 생물생식환경의 지배요인이 되므로 항만시설의 건설, 개량 및 유지에 있어서는 해당시설의 건설 등에 따른 이들 작용의 변화가 공간적, 시간적으로 광범위하게 전파되는 것을 적절히 고려할 필요가 있다.’ 라고 명시되어 있다(항만 설계기준, 2014).

국내에 시공되어 있는 방파제의 구조형식은 경사제, 직립제, 혼성제 등으로 이중 국내에서 시공되는 방파제의 약 80% 이상이 경사제 구조형식이다. 이러한 경사식 방파제는 사석이나 이형블록을 이용하여 사다리꼴로 쌓아올린 것으로 사면에서 파 에너지를 감소시키는 형식으로 방파 기능이 탁월하다. 이러한 경사식 방파제는 현존하는 방파제의 종류 중에서 가장 역사가 길며, 많은 경험을 통하여 그 축조 기술이 발전되어 왔다. 초기에는 해변 주변에서 돌을 채집하여 바다에 던져 넣는 원시적인 방법을 이용하였으며, 이에 유래하여 일명 사석식 방파제라고도 칭한다. 이후, 경사식 방파제를 대체할 수 있는 혼성 방파제 및 기타 특수 방파제들이 다수 개발되어 설치되고 있으나 거의 모든 해역조건에서 원만히 설치할 수 있는 경사식 방파제가 아직은 방파제의 주종을 이루고 있으며, 우리나라도 예외가 아니다. 경사식 방파제에 있어서 파고에 대한 내부기초사석 보호 및 소파효과를 높이기 위해 콘크리트 이형블록, 즉 소파블록을 이용한다. 대표적인 것으로는 Akmon, Dolos, Tribar, 테트라포드 (Tetrapod, TTP), Cube, Tripod, Core-Loc, Anitifer Cube, 그리고 Xbloc 등을 들 수 있으며 가장 많이 사용되고 있는 것은 TTP이다(김승우, 2005).

TTP는 1949년 프랑스의 네르빅 수리연구소에서 콘크리트 인공블록으로 처음 개발하였다. TTP의 개발은 해안구조물의 설계에 혁명을 가져왔다 할 수 있다. 해안구조물의 사면경사는 천연 사석을 사용하는 경우보다 급하게 축조할 수 있어 구조물의 체적과 단위 중량이 크게 감소하였다. TTP를 2층으로 피복할 경우 공극률은 50%에 달하였으며, 양압력의 문제와 에너지 소산에 관한 문제점에서도 뛰어난 효과를 얻을 수 있었다. 또한 사석 방파제에서 발생하였던 피복의 문제점들이 안정적으로 해결되었다. 1962년 Danel은 “TTP는 같은 목적을 수행하는 사석들에 비해 가볍지만 더 우수하고 유용한 블록이다”라고 하였다(<http://www.concretelayer.com/>). TTP의 우수성이 입증됨으로 인해 TTP의 사용은 급속도로 증가하였고, 특허의 효력이 종료될 즈음인 20년 후에는 TTP를 이용한 구조물이 300개가 넘었으며, 총 콘크리트 중량이 8백만톤에 이르렀다. 그리고 이 블록은 개발 후 60여년이 경과하였지만 여전히 여러 나라에서 사용이 되고 있다. 또한 TTP는 인공블록의 길을 연 최초의 블록이기도 하다. TTP 개발의 성공이후 소파블록에 대한 연구가 활발해졌으며, 초기 소파블록에 대한 연구는 대부분

블록들 간의 효과적인 결속력을 찾는 쪽에 치중하였다. 따라서 개별 블록의 구조적인 측면에서는 다소 불리하더라도 보다 복잡한 형태를 갖는 형상으로 개발되어 결속력은 증대되었다. 하지만 TTP블록이 개발된 이래 많은 소파블록들이 개발되었으며 이러한 소파블록들은 안정성을 확보하는 것과 소파효과를 높이는 방향으로 진화하였다. 그만큼 TTP의 형상이 소파블록으로서는 이상적이라고도 할 수 있으며, 60여년이라는 긴 기간 동안 TTP가 사용된 것은 TTP를 대체할 수 있는 블록의 개발이 없었다는 것을 의미하기도 한다.

일본의 경우 지형, 시공 여건 등을 고려하여 64종 상당의 소파블록을 선정하여 사용하고 있지만 국내의 경우 본격적인 항만 개발이 이루어진 1960년대부터 현재까지 약 50여년 동안 국내 항만설계기술의 발전과는 달리 TTP가 많은 곳에서 획일적으로 사용되었다. 최근에는 턴키제도로 인하여 특색있는 설계를 하려는 움직임이 있어서 일본에서 사용하고 있는 sealock이나 dimple과 같은 대형 소파블록을 적용한 사례도 있으나 비싼 특허료를 지불해야 하기 때문에 우리의 기술로 만든 제품의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 우리나라의 실정에 적합한 블록으로써 대형화가 가능하고 인터로킹 기능이 구비되어 큰 파랑에도 저항력이 큰 펜타포드 및 Y블록을 개발하여 장차 경사제 피복이나, 소파블록, 직립제 보호용 소파블록으로 사용할 수 있도록 하는데 그 목적이 있다.

## 1.2 국내외 연구동향

이민기(2007)는 CADMAS-SURF를 이용하여 불규칙파를 조파할 경우, 조파지점에서 발생하는 파의 비선형성을 고려하지 않고 있기 때문에 해석시간이 증가와 함께 평균수위가 상승되는 문제가 지적되었다. 이를 보완하기 위하여 CADMAS-SURF를 이용하여 불규칙파를 검토할 경우 조파지점에서 산정되는 물입자의 수평유속에서 질량수송속도를 미리 빼는 방법을 적용함으로써 안정적으로 불규칙파가 조파될 수 있는 새로운 조파시스템을 제안하였다.

고경범(2008)은 단주기성 파랑에 대하여 소파효과가 양호한 유공식 구조물에 대한 연구를 수행하였으며, 진해항에 설치할 유공구조물을 대상으로 CADMAS-SURF와 경계요소법을 이용하여 수치실험을 수행하였다. 최진후(2008)는 우리나라에 내습한 주요 태풍으로 인해 발생되어진 해안구조물(사석방파제)의 단면파괴특성을 주요 어항을 중심으로 검토하였으며, CADMAS-SURF를 수치모형으로 구축하고 단면파괴를 유발하

는 외력환경, 특히 사면상의 최대유속 발생특성을 분석하여 설계를 위한 기초자료를 제공하였다.

박영석(2009)은 CADMAS-SURF에 의해 재현한 유속장으로부터 Morison식에 의해 유체력을 산정한 후 개별요소법(DEM)을 이용한 수치시물레이션에 의해 파괴거동을 재현하고 요소간의 상호작용과 피해위치, 피해형태에 관하여 검토하였다. 윤지성(2012)은 CADMAS-SURF 모형의 비선형 거동을 확인하기 위하여 여러 유형의 실험을 실시하였다. CADMAS-SURF 모형의 적용가능 범위와 특징을 확인하기 위하여 Shuto의 비선형 천수식과 선형모형 등 다른 모형들과 비교하였다. 장윤경(2012)은 불규칙파가 작용하는 실험역에 위치한 해중터널의 파랑하중에 대한 경계요소법 적용을 염두에 두고 경계요소법을 사용하여 일반적 계류상태의 해중터널에 작용하는 파랑하중, 반사·투과율, 부체의 거동 및 계류 장력의 특성에 대하여 고찰하였다. 수치해석을 하기 위하여 경계요소법과 더불어 상용 프로그램인 CADMAS-SURF를 사용하였다.

민용침(2014)은 수중에 고정된 형태의 구조물은 파랑하중과 함께 흐름하중에 대한 고려하고, 물과 유체의 상호작용을 함께 고려할 수 있다면 보다 정확한 해석이 가능할 수 있도록 CADMAS-SURF 프로그램을 수정하여 수치 파랑-흐름 복합수로를 개발하였다. 또한 고정된 구조물에 대한 해석만이 가능한 CADMAS-SURF에서 구조물의 거동을 재현하기 위해 불투과 구조물을 porous 유체 셀로 대체하여 처리를 하였다. 장성철(2014)은 소하천 입구부에서의 하구 폭의 변화에 따른 파랑변형 현상을 살펴보기 위해 수영강 하구역과 같은 실제 해역을 단순화시켜 임의의 가상 수치모의 대상으로 설정하고, 또한 호안에서 계산되는 파랑제원을 이용하여 호안 단면에 대한 월파량을 산정할 때 CADMAS-SURF를 사용하여 수치해석을 수행하였다.

종래의 사석구조물의 안정성에 관한 연구는 초기의 Iribaren(1938), Hudson(1959), Heder(1986), Losada & Gimmenez-Curto(1979) 그리고 Ahrens(1975)의 연구를 통해 논의되었다. 불규칙파에서 주기성을 고려한 Vander Meer et al (1984, 1988, 1992)의 단면 실험 이후에 3차원 평면 수조에서의 공간적인 안정에 대한 연구가 지속되었다.

Hudson(1959)은 파랑 특성에 따른 구조물 피복재의 안정중량 산정공식(SPM,1984)을 개발하여 현재에도 주요 항만구조물 설계시 적용되고 있다. 불규칙파에 대한 사석 구조물의 안정성에 대한 연구는 Tompson and Shuttler(1975)가 최초로 수행하였다. Anderson et al(1992), ; Van djik(2001), ; Verhagen et al(2003), ; Van Gent and Pozueta(2004)는 월파의 거동을 고려하지 않고 파랑 조건에 따른 배후면 피복재의 이탈 여부를 확인하여 안정성을 검토하였다.

구조물 주위의 세굴은 Shen(1969)이 원주 주위의 정상흐름과의 관계를 표현한 이후로 원주주위의 세굴 특성을 실험적으로 규명하고자 하는 노력이 지속되었다. 또한 사석 방파제의 제두부에서의 세굴특성이 Fredsoe. J. (1984, 1993)와 Fredsoe. J. & B.M. Sumer(1997)에 의해 실험적으로 연구 보고 되었다. Goda and Suzuki(1976)는 환경사호안에 대해 수리모형실험을 수행하여 다양한 조건에 대한 월파량 산정 도표를 제안하였으며 이 도표는 현재 항만 및 어항설계기준(해양수산부, 2005)에 제시되어 현재까지 활용되고 있다. Gutman(1979)과 Pilarczak(1995)은 연안침식 방지를 위하여 물체 형태로 설치된 지오텍스타일 튜브에 대하여 연구를 수행한 바 있다. Sbankar and Jayarathe(2003)는 수리모형실험을 통하여 월파량과 처오름에 미치는 입사파고와 주기의 결합 효과를 설명함에 있어 파형경사가 중요한 지표가 된다는 것을 보였다(김하룡, 2014).

### 1.3 연구의 범위

본 연구에서는 국내 해역에 부합되는 새로운 형상의 소파블록인 펜타포드 및 Y블록을 개발하고자 하였으며, 두 가지 블록에 대한 방파제의 사용에 따른 성능 및 안정성을 검토하였다. 블록의 안정성 및 성능 실험은 길이 30m의 수로에 파동발생장치 및 모형블록을 제작, 설치하여 실험하였으며 피해계수 및 반사특성을 검증하였다. 또한 일본 연안기술연구센터에서 개발한 CADMAS-SURF 수치모델링 프로그램을 사용하여 수리모형실험을 시뮬레이션으로 재현하였으며, 시뮬레이션 결과로부터 설계인자인 처오름높이를 계산하였다. 모의실험 결과는 다시 TTP를 대상으로 한 모의실험 결과와 비교함으로써 본 연구에서 개발한 블록의 특성을 검토하였다.

## 제 2 장 방파제의 특성 및 영향인자

### 2.1 방파제의 특성

#### 2.1.1 방파제의 종류

방파제는 구조형식에 따라 일반적으로 다음과 같이 분류할 수 있다.

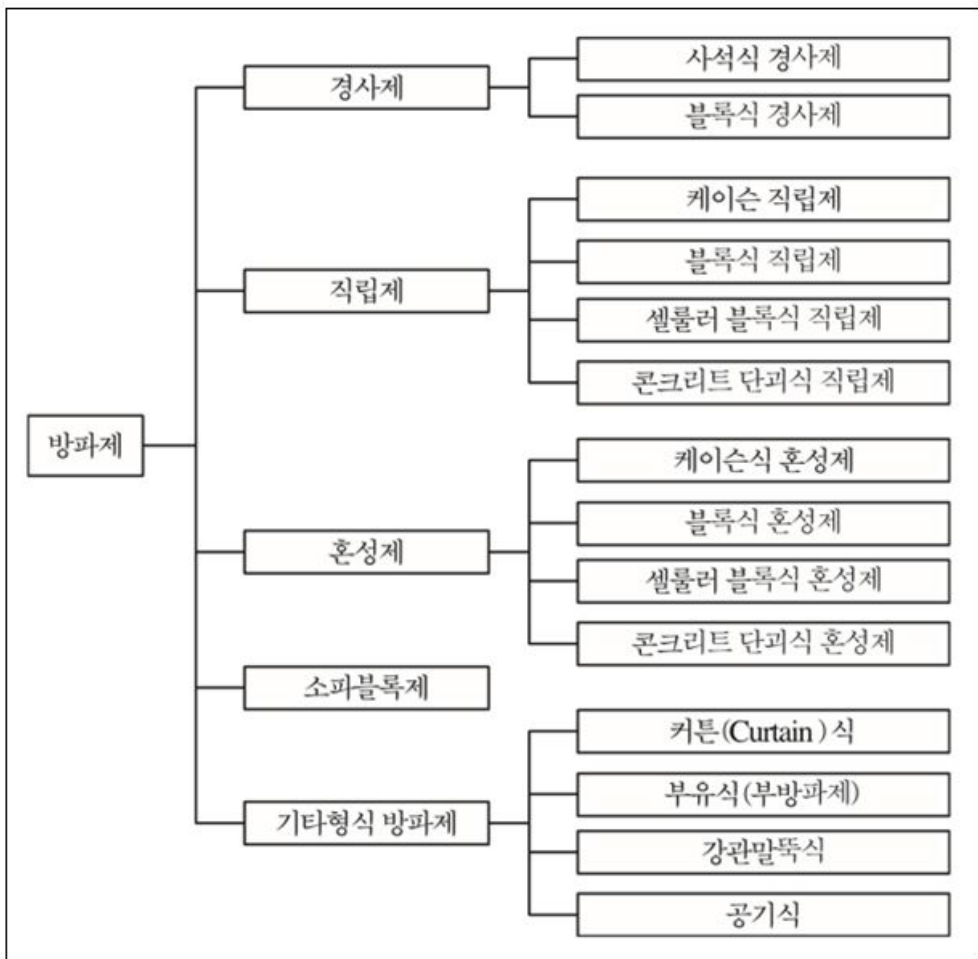
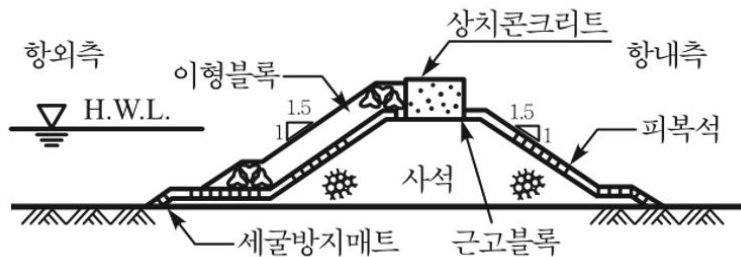


그림 2.1 방파제의 종류(이종형, 2014)

경사제는 그림 2.2에 (a)와 같이 암석이나 콘크리트 소파블록을 사다리꼴 형상으로 쌓아올린 것으로서 주로 사면상의 쇄파 및 투수성과 조도에 의하여 파랑의 에너지를 소산시키거나 반사시켜 향내진입을 차단한다. 직립제는 그림 2.2에 (b)와 같이 전면이 연직인 벽체를 수중에 설치한 구조물로서 주로 파랑의 에너지를 반사시켜 파랑의 향내진입을 차단한다. 혼성제는 그림 2.2에 (c)와 같이 기초 사석부 위에 직립벽을 설치한 것으로 파고에 비하여 사석부 마루가 높은 경우에는 경사제에 가깝고 낮은 경우에는 직립제의 기능에 가깝다. 소파블록 피복제는 직립제 또는 혼성제의 전면에 소파블록을 설치한 것으로 소파블록으로 파랑의 에너지를 소산시키며, 직립부는 파랑의 투과를 억제하는 기능을 가진다.

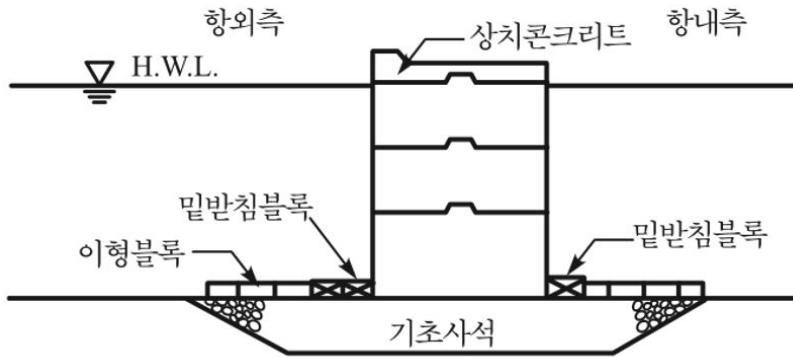
방파제의 구조에 따라서는 반사파가 크기 때문에 항외 항생선박의 안전항행에 장애를 주는 경우가 있다. 특히 소형선박에 미치는 영향이 크므로 항행형태에 따라서는 방파제를 저반사구조로 하는 것이 바람직하다. 항내 수질의 개선 및 청정수역환경을 확보하기 위하여 해수교환을 촉진할 수 있는 통수기능을 가지는 방파제 구조형식을 채택할 수 있다. 이 경우 표사의 유입, 투과파의 증대에 의한 항만 기능의 저하를 충분히 고려하여야 한다. 방파제의 배치 법선이 우각부를 이루고 있는 경우에는 우각부 부근의 파고가 증대된다. 방파제의 선형변화나 지역적 특성에 따라 파랑에너지가 집중하는 곳은 저반사 구조 또는 소파기능을 추가하는 구조형식을 취하는 것이 방파제 설계에 바람직하다(이종형, 2014).

최근 방파제가 대수심 쪽으로 전진 배치되는 추세에 있어 직립제 같은 경우 거대한 케이슨 구조물을 이용하여 중량을 증가시키는 추세이며, 케이슨구조물이 소파기능을 갖도록 케이슨 상단을 유공 구조로 제작하는 경우도 있다. 경사제 같은 경우 피복제의 소파력을 증가시키는 추세이기도 하고, 피복제 상호간에 결합(interlocking)되는 형태로 만들어 작은 중량으로도 큰 파도에 견딜 수 있도록 하기도 한다.

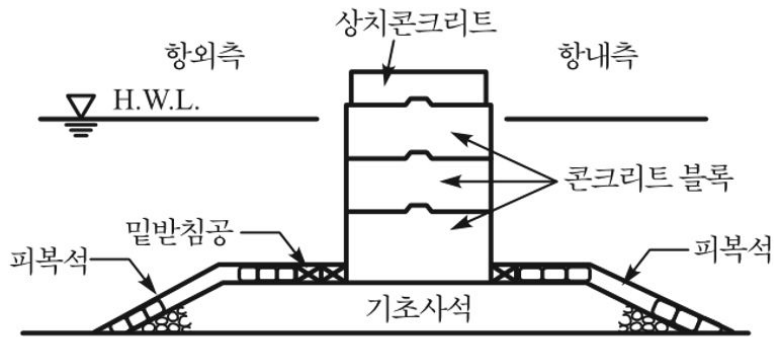


(a) 경사제





(b) 직립제



(c) 혼성제

그림 2.2 방파제의 구조 형식에 따른 분류(이종형, 2014)

## 2.1.2 국내방파제 시공 사례

조사 대상 항은 지정항만인 무역항 28개항, 연안항 22개 항을 포함한 총 50개항으로 하였으며, 이 중 시공된 방파제 중 설계파고가 3m 이상 또는 해상기준, 즉 약최저저조위 (Approximate Lowest Low Water Level) 기준 아래의 수심 5.0m 이상의 지역을 선정하였다. 지정항만의 방파제 설치 수심이 평균이 수심 22.0m인 점을 감안하여 수심별 구분은 수심 20.0m을 기준으로 하였으며, 대상 설계파고가 5.5m에서 7.8m임을 고려하여 설계파고 6.0m 이상과 미만으로 구분하여 조사하였다. 지정항만 50개 항 중 45개 항에 대한 해역별, 구조형식별 국내방파제 시공사례는 다음과 같다.

구조형식별 방파제 시공사례를 보면 조사대상의 60%인 27개소에서는 경사제가 설치되었고 혼성제는 17개소로 나타났으며, 다른 지역 보다 수심이 깊은 동해안에서는 경사제와 혼성제의 시공비율이 52%, 48%로 비슷하게 나타나는데 이는 경사제인 경우 수심이 깊어질수록 공사비가 혼성제에 비해 과다한 것에 기인한다(이성구, 2001).

현재 국내에 시공된 방파제의 경우 수심 20m이상에서는 대부분은 혼성제 (83.3%)을 채택하였으며, 수심 20m 미만에서는 경사제가 67.6%, 혼성제가 32.4%로 나타났다. 설계파고 6.0m 이상의 경우 경사제와 혼성제의 비율은 47%와 53%로 비슷하나 혼성제 채택비율이 점진적으로 증가하는 추세이다. 표 2.1은 국내 항만의 방파제 시공사례를 나타낸 것으로 지역적 차이는 있지만 수심이 20m 이상인 지역에서는 경사방파제보다는 혼성제가 지배적으로 나타났다(이성구, 2001).

표 2.1 국내 항만별 방파제 시공사례(이성구, 2001)

항만명		시설명	구조형식
동해	울산항	동방파제	케이슨 혼성제
	온산항	남방파제	사석경사제
		남방파제	케이슨 혼성제
		북방파제	사석경사제
		북방파제	케이슨 혼성제
	미포항	남방파제	사석경사제
		북방파제	사석경사제
	포항신항	북방파제	케이슨 혼성제
		동방파제	케이슨 혼성제(전면소파블록)
	포항구항	구항방파제	사석경사제
	삼척항	동방파제	사석경사제
		서방파제	사석경사제
	동해항	남방파제	케이슨 혼성제
		북방파제	케이슨 혼성제
	옥계항	동방파제	케이슨 혼성제(전면소파블록)
		동방파제	사석경사제
	묵호항	남방파제	사석경사제
		남방파제두부	케이슨 혼성제
북방파제		사석경사제	
북방파제두부		케이슨 혼성제(전면소파블록)	
속초항	동파제	사석경사제	
남해	여수신항	북방파제	사석 경사제
		서방파제	케이슨 혼성제
		동방파제	사석 경사제

표 2.1 국내 항만별 방파제 시공사례(계속)

항 만 명		시 설 명	구조 형식	
남해	제주항	서방파제	사석경사제	
		구동방파제	사석경사제	
		동방파제	사석경사제	
	서귀포항	동방파제	사석경사제	
		남방파제	사석경사제	
	삼천포항	방파제	사석경사제	
	통영항	방파제	사석경사제	
		동호만방파제	사석경사제	
		도남방파제	셀블록 혼성제	
	옥포항	남북방파제	사석경사제	
	부산항	오륙도방파제	케이슨 혼성제	
		남방파제	사석경사제	
		조도방파제	케이슨 혼성제	
	감천항	서방파제	케이슨 혼성제	
		동방파제	케이슨 혼성제	
	남천항	방파제	사석경사제	
	다대포항	대명목재	사석경사제	
		방파제	사석경사제	
	서해	소흑산도항	방파제	사석경사제
		인천항	남방파제	셀블록 혼성제
군산항		북방파제	사석경사제	

### 2.1.3 방파제 피해사례 분석

#### 가. 방파제 피해현황

방파제의 피해양상은 전면 피복재 및 사석 손상, 상치콘리트 손상, 배면피복재 손상으로 구분할 수 있다. 조사기간은 1976년에서 1999년까지 24년 동안 35개 항만 및 어항에 피해가 발생하였으며, 이중 내습파랑의 직접적인 영향을 받아 전면 피복재 및 사석 손상은 33개항에서 발생하였고 상치콘크리트의 손상은 22개항에서 발생되었다. 배면 피복재 또는 부대시설의 피해 발생항은 2개소로 조사되었다. 2000년 8월 태풍 프라피룬에 의해 발생한 소흑산도항의 경우는 전면피복재 및 사석손상에 속한다. 이러한 경사방파제의 피해의 원인들은 파랑내습에 의한 피복층의 미끌림 현상, 수중부분 사면 경사의 변화, 피복재의 제자리 회전 또는 록킹(Rocking)현상, 피복재의 이탈 후 복원되는 현상 등을 들 수 있다(해양수산부, 2005).

첫 번째로 피복층의 미끌림 현상은 중간피복재에 작용하는 파랑에 대해 불안정한 경우, 또는 피복층의 사면경사 끝에서의 수심이 깊은 구역일 경우 지지력이 부족한 경우에는 피복층이 사면을 따라 미끌어지는 현상이 발생된다. 2000년 8월에 발생한 태풍 프라피룬에 의한 소흑산도항인 경우 태풍에 의해 발생한 내습파가 설계과 이상이어서 제두부로부터 사면의 미끌림 현상이 심화되어 수상부 경사면에 설치된 테트라포드의 밀도가 감소하거나 이탈하였고 이로 인해 상치 구조물에 설계강도 이상의 파력이 작용했을 것으로 판단된다.

두 번째로는 수중부분 사면 경사의 변화를 들 수 있는데, 이는 파력을 받아 피복재가 미끌려 수심이 깊은 구역에서 피복재의 두께가 점차 두꺼워지면서 수중 사면이 불안정하게 변화되는 현상이다.

세 번째로는 사면에서의 피복재간의 상대적 변위를 일부 허용하므로 파력에 의해 피복재가 안정된 자리를 잡는 과정에서 제자리에서 약간 회전하거나 흔들리는 록킹현상이 발생한다. 사면의 피복재를 테트라포드로 사용되는 경우 외력으로 인한 피해양상은 주로 테트라포드의 제자리에서의 이탈 현상이지만 중량이 매우 큰 테트라포드는 피복재의 이탈보다는 먼저 테트라포드가 움직이다 인근 피복재 와 충돌에 의한 테트라포드 자체의 파괴가 시작된다. 2000년 8월에 태풍에 의한 소흑산도항의 피해사례를 보면 방파제 제간부의 64톤급 테트라포드가 4개 다리가 모두가 절반 이상 파괴된 피복재를 볼 수 있었는데 이는 피복재가 제자리에서 발생한 심한 회전 또는 록킹으로 인해 파괴된 것으로 사료된다. 이러한 피복재 자체의 손상은 파괴로 인해 피복재 중량의 감소의 원

인이 되고 중량이 작아진 피복재는 쉽게 제자리를 이탈하게 된다. 피복재의 미끌림현상, 피복재의 제자리회전 및 록킹 현상에 의해 사면에서의 피복재의 밀도가 작아짐에 따라 파력에 의해 피복재의 이탈현상의 피해가 발생하게 된다.

## 나. 피해유발 태풍 및 폭풍

상기에 전술된 방파제의 피해는 강한 바람을 동반하는 태풍 또는 폭풍시에 발생하는 파랑의 내습에 의한 것이 대부분이다. 다음은 피해를 유발시키는 태풍에 대해서 약술하면 다음과 같다.

### ①태풍의 규모

폭풍우는 주로 저기압에 의해서 발생하게 되는데, 이는 여름철에 열대지방의 해상에 많이 발생하는 열대성 저기압 또는 온대 혹은 한대의 경계지대에 흔히 발생하는 온대성 저기압이다. 동경 180°부근 북태평양 서부에 존재하는 열대성 저기압 중에서 중심부근의 최대 풍속이 17.2m/s 이상인 것을 태풍이라고 한다.

바람은 북반구에서 반시계 방향으로 돌면서 중심으로 몰려들고 중심부근에 가까워질수록 비·바람은 점점 강해지며, 중심에서 50 ~ 60km의 거리에 이르면 절정을 이룬다. 태풍중심으로 갈수록 비바람은 점차 약해져서 가장 중심이 되는 부분에는 바람이 약하고 구름도 없는 구역이 원형으로 나타나는데 이것을 ‘태풍의 눈’ 이라고 부른다. 태풍의 눈에 해당하는 구역에는 하강 기류가 있어 하늘은 맑게 개이며 그 크기는 태풍에 따라 직경이 수십 km에서 수백 km에 달하기도 한다. 일반적으로 중심기압은 900 ~ 990hPa의 범위이고 강우현상은 태풍의 눈을 제외한 중심의 전방에서 광범위하게 분포된다. 대부분 전선을 동반하지 않으며 진행방향으로 볼 때 우측이 좌측에 비하여 바람도 강하고 강우량도 2배 정도로 많다(이성구, 2001).

### ②태풍의 경로

태풍은 주로 북태평양의 서부인 필리핀 동쪽의 넓은 해상에서 발생하여 북서쪽으로 서서히 세력이 증가하면서 이동하다가 동중국해 부근에 이르면 진로를 바꾸어 북북동 혹은 북동쪽으로 대략 포물선을 그리면서 이동하는 것이 보통이다. 그러나 태풍의 발생지점과 이동경로는 항상 일정하지 않고 계절에 따라 변하며 때때로 예상외의 경로를 따라 이동하기 때문에 예측하기 어려운 경우도 있다. 태풍의 이동경로에 따라 서해와

남해에서 발생하는 해일 및 기상상황의 차이가 있다.

전술된 태풍에 의한 방파제 피해사례를 보면 동해안 및 남해안의 피해항만이 각각 25건으로 전체의 44%를 차지하고 있고 서해안인 경우는 전체 피해항만의 12%인 8건으로 나타났는데 이는 우리나라를 지나는 태풍의 경로가 남부지방과 동해를 통과하는 태풍이 많은 것에 기인한다고 판단된다. 태풍의 월별 평균 정상항로는 6월에 남해지역으로 통과하고 7월에는 태풍경로가 중부, 이북지방으로 북상하여 8월까지 전국에 걸쳐 태풍경로가 분포하며 9월부터 태풍 경로가 남하하기 시작하여 10월에 다시 남해해역으로 태풍경로가 통과하고 있다.

### ③태풍의 발생 시기

태풍은 매년 그 발생 횟수가 다르지만 평균적으로 일 년에 약 26개 정도가 발생하며 그 중 23개 정도가 우리나라에 영향을 미쳐 인명과 재산의 손실을 초래한다. 우리나라는 비가 많이 내리는 7, 8월과 태풍 내습기간이 겹치기 때문에 피해가 발생한다. 때로는 9월에 태풍이 도달하여 피해를 입기도 하며 6월에도 태풍의 통과로 인한 피해를 받기도 한다. 최다태풍내습 월은 8월, 7월, 9월의 순이고 7월과 8월 두 달 동안에 내습한 태풍 수는 전체의 67%에 달한다.

## 다. 방파제 피해 사례 및 원인 분석

### ① 피해 사례 분석

1976년에서 1999년까지 24년간의 피해사례자료(해양수산부, 2001)에 의하면 총 35개 항에 73건의 항만 및 어항시설 피해가 발생되었다. 방파제의 피해중 대부분인 80%로 해당하는 28개 항이 경사식 사석제로 나타났으며, 피해형태를 보면 사면 피복재 및 사석 유실이 대부분이었다. 피해가 2회 이상 발생한 항이 전체 발생횟수의 약 70%로 되어 있어 반복 피해 사례가 많고, 설계과고에 대한 내습과고의 비율은 70%에서 250%로 나타났으며 설계과고에 대한 내습과고비가 100%에서 140%에서 피해발생이 가장 많은 것으로 조사되었다. 또한 설계과고 이하의 과고에 의한 피해 사례도 전체 발생횟수의 27%에 해당되는데 이러한 현상은 방파제 전면을 따라 형성되는 연파로 인한 두부에서의 파랑에너지의 집중에 의해 피해가 발생되었거나 설계주기보다 더 큰 주기의 파랑내습에 의한 것으로 판단된다.

그러므로 방파제의 피해사례는 크게 설계파고 이상의 파랑내습에 의해 발생하는 피해와 설계파고 이하의 파고에 의한 피해사례로 구분할 수 있으며, 이들 피해사례 중 소혹산도항 및 서귀포항에 대한 피해사례는 다음과 같다.

㉠ 설계파고 이상의 초과확률 파랑에 의한 피해(소혹산도항)

전라남도 신안군 흑산면 가거도리 위치한 소혹산도항의 방파제 길이 500m가 완공된 것이 2000년 3월이었고, 2000년 8월 31일 제10호 태풍 프라피룬이 내습하여 순간 최대 풍속 58.3m/s(최대풍속47.4 m/s, 4시간지속)의 기록적인 풍속을 동반한 이상태풍의 영향으로 파랑내습에 의해 방파제 두부구간 64m가 유실되고 제간부 436m의 부분파손의 태풍피해를 입게 되었다. 소혹산도항 방파제 설계파고는 8.3m, 주기 13초, 경사 1:2로 64톤 테트라포드(실중량 58.88톤)를 방파제 중간부 및 두부에 모두 사용하였으며, 피해율은 5%가 적용되었다. 그러나 프라피룬 태풍 시 최대풍속 47.4m/s의 강한 바람에 의해 발생한 파고는 9.0m, 주기 15초로 설계파고를 상회하는 것으로 이로 인한 방파제 피해가 발생되었고 두부에 파 에너지가 집중되어 피해가 더 크게 발생하였다.

㉡ 설계파고 이하의 파랑에 의한 피해(서귀포항)

1999년 8월에 발생한 제7호 태풍 올가는 중심기압 975hpa, 최대풍속 24m/s, 순간최대풍속 41m/s의 강한 바람을 동반하여 제주도 서측을 통과하였다. 태풍 올가에 의해 발생한 파랑내습 (파고 8.07m)에 의해 서귀포시에 위치한 서귀포항의 외항방파제의 테트라포드(72톤) 유실 및 파손되는 손실이 발생하였다.

서귀포항 외항방파제 시공량 928개에서 테트라포드 유실 및 파손 피해량 173개로 피해율 18.6%로 설계 허용피해율 5~10%을 상회하며 구간별로 보면 곡선부가 76개로 가장 많으며 다음으로 두부구간의 66개의 테트라포드 피해가 발생하였다. 이 들 중 대부분이 경사면 하부에서 피해가 발생하였음을 알 수 있다.

서귀포항 외항방파제의 중간부 피복재는 설계파고 9.1m, 주기 13초로 경사 1:1.5로 소요중량 74.26톤이나 피해율 5~10%을 적용하여 72톤 테트라포드 (실중량 66.24톤)를 사용하였으며 두부인 경우 경사를 1:2.5로 하여 72톤 테트라포드를 적용하였다. 태풍 올가에 의해 발생한 파고가 8.07m는 외항방파제 설계파고 9.1m보다 작은 파랑임에도 불구하고 방파제의 피해가 발생하였는데 피해범위를 보면 곡부 및 두부에 집중되었는데 이는 파 에너지의 집중과 설계주기(13초)보다 큰 주기가 발생된 것으로 사료된다. 이러한 현상은 서귀포항 이외 다른 지역에도 볼 수 있는데, 부산남항의 방파제 피해가



그 대표적인 사례이다. 1985년 10월 태풍 브랜다에 의해 발생된 파랑내습으로 인해 부산남항 서방파제의 피해가 발생하였다. 태풍에 의해 발생된 파랑은 파고 5.5m로 방파제의 설계파고 8.0m보다 작은 값이다.

### ② 피해 원인 분석

피해 사례를 통해서 방파제 피해에 대한 원인은 다음과 같이 요약할 수 있다. 첫째로는 설계파고 이상의 내습파랑에 의한 피해가 73%로 이상파랑에 의한 피해뿐만 아니라 설계파고의 과소평가로 인한 피해가 일부 포함된 것으로 판단되며 설계파고보다 작더라도 설계주기보다 더 큰 주기의 발생으로 인한 파랑에너지의 증가에 따른 것으로 판단되는데, 이는 기존에 피복재 산정시 널리 사용되고 있는 Hudson 공식에 내습파랑의 주기가 고려되지 않아 피복재 규격이 과소평가되거나 설계파고 산정시 파랑에 대한 자료부족에 따른 통계적 처리의 불확실성 등에 의한 과소평가된 것으로 판단된다. 이외에 방파제 두부의 파랑에너지 집중에 따라 설계파고 이하의 파랑내습일 경우라도 제 두부의 피해가 발생된다. 두 번째는 설계파 이하의 내습 파랑시에도 27%의 피해가 발생, 세 번째는 2000년 12호 태풍 피라피룬과 같이 설계파고 이상의 초과확률 파랑내습에 의한 것으로 불가항력적인 피해발생이다. 네 번째로는 지반침하, 지반세굴, 제체구조 재료의 부식, 마모 및 기타 부실시공 등으로 인한 피해 발생이 있다.

### ③ 방파제 전면의 파고분포 특성

방파제와 같은 반사 구조물의 전면에서는 중복파가 형성되고 완전반사일 때는 전면에서 파고가 입사파의 2배로 된다. 그러나 실제상의 구조물에 유한하고 평면상태가 직선상이 아니기 때문에 구조물의 연파는 위치에 따라 변동이 있다. 이러한 방파제 연파의 파고변동은, 방파제에 작용하는 파력도 변화시키는데, 특히 방파제 두부구간에서는 방파제의 배후로 돌아 들어가는 회절파는 전면의 파와 위상이 다르기 때문에 파력은 전면파고 이상으로 크게 변동하고 20% 정도의 파력이 증대되어 두부피해의 원인이 된다. 그러므로 방파제 두부구간의 피복식 산정시 이런 제반 현상을 반영할 수 있는 안전율(1.5배)의 보완이 필요하다고 판단된다.

## 2.2 경사제 설계인자

### 2.2.1 중량산정 공식

사석식 경사제는 내습 파랑의 에너지를 소산시키고, 제방을 보호하기 위하여 중량이 큰 피복재를 이용하여 피복층을 시공하며, 피복재의 중량은 내습 파랑의 조건에 의해 달라진다.

모형실험을 이용한 방파제 피복재의 안정성에 대한 연구는 1930년대 미육군 공병단에 의해 처음 시도되었다. Iribarren(1938)은 사면에서의 사석 안정성에 대한 기초적 개념을 이용하여 파고, 비중, 제체경사 등의 변수로 이루어진 소요중량 산정식을 제안하였고, 이 식은 실험에 의하여 결정되어야 하는 두 가지 계수를 포함하고 있다. Hudson(1959)은 실험에 의해 결정되는 계수를 안정계수 ( $K_D$  : Stability Coefficient)로 통합한 공식을 제안하고, 실험을 통해 여러 가지 단면 형태 및 피복블록에 대한 다양한  $K_D$  값을 제시하였다.

Hudson 공식은 현재 많이 사용되기는 하나, 파랑의 주기를 고려하지 않았으며 안정계수 값의 범위가 너무 광범위하다는 문제점이 있다. Jackson(1968)은 피복재의 형상을 변화시켜서 파고에 따른 피해율을 산정하였으며, Oullet(1972)와 Rogan(1969)은 불규칙 파에서의 사석방파제 거동에 관한 연구를 하였다. Carver(1980)는 Hudson 공식의 안정계수인  $K_D$  값을 다양한 조건의 수리모형실험으로써 산정하였으며, Goda(1982)는 불규칙파와 규칙파를 비교 연구하여 피복석에 대한 설계중량 선정공식을 제안하였다. Van der Meer(1988)는 피복석의 안정성에 관한 수치 연구에서 주기의 영향을 고려하였다. 한편 Mizumura 등(1988)은 피복블록의 피해율을 피복블록의 전체 개수에 대한 이동된 피복블록의 개수로 정의하였다(최현, 2000).

#### 가. Iribarren 공식

예전의 사석식 경사제는 사석을 이용하여 단면을 시공하고 피복층은 중량이 무거운 호박돌을 이용하여 시공하였다. 이때 피복층에 고르게 시공한 호박돌에 작용하는 파력으로는 우선, 사면에 직각방향에 작용하는 양력이 작용하고 사석의 개체를 떠오르게 한다. 이 양력( $P_L$ )은 유속  $v$ 의 제곱 및 사석의 단면적에 비례하며 다음식과 같다.

$$P_L = m\rho Av^2 \quad (2.1)$$

여기서  $P_L$ 은 양력,  $m$ 는 비레상수,  $A$ 는 투영면적,  $v$ 는 유속이다. 식 (2.1)에서  $v$ 는 실험에 의해서  $\sqrt{gH}$ 에 비례하고, 단면적은  $(W/\rho_s g)^{2/3}$ 에 비례한다고 가정한다면  $P_L$ 은 다음과 같아 고쳐 쓸 수 있다.

$$P_L = m\rho g H \left( \frac{W}{\rho_s g} \right)^{2/3} \quad (2.2)$$

여기서  $m$ 은 비레상수,  $W$ 는 사석의 중량,  $H$ 는 파고,  $\rho_s$ ,  $\rho$ 는 사석 및 물의 밀도이다.

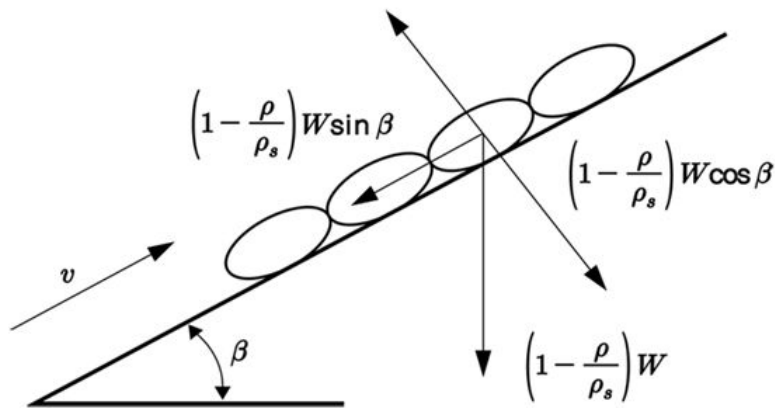


그림 2.3 피복석에 작용하는 외력(이종형, 2014)

이  $P_L$ 을 사용하여 그림 2.3의 사석의 정적인 균형식을 생각하면

$$W \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right) \sin \beta \leq \mu \left\{ W \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right) \cos \beta - P_L \right\} \quad (2.3)$$

가 얻어진다. 여기서  $\mu$ 는 사석간의 마찰계수이고,  $\beta$ 는 사면경사이다. 식 (2.3)에 식 (2.2)를 대입하여 정리를 하면, 식 (2.4)를 얻을 수 있다.

$$W \geq \frac{K\mu^3 \rho_s g H^3}{\{(\rho_s/\rho) - 1\}^3 (\mu \cos \beta - \sin \beta)^3} \quad (2.4)$$

Iribarren이 유도한 식 (2.4)에서 상수  $K$ 는 실험에 의해 정해진 상수이다. 식 (2.4)에서 알 수 있듯이 피복블록의 중량은 파고, 제체경사 및 마찰력 등의 함수이다. 그러나 이 공식은 둥근 형태의 자연석을 피복블록으로 사용한 실험결과에 의하여 얻어진 식이기 때문에 그 외의 다양한 피복블록의 적용에는 한계가 있다.

### 나. Hudson 공식

Hudson은 Iribarren의 공식을 다음과 같이 수정하였다(김승우, 2005).

$$W \geq \frac{\gamma_r H^3}{K_D (S_r - 1)^3 \cot \beta} \quad (2.5)$$

여기서  $K_D$ 는 안정계수(Stability Coefficient)이다.  $H$ 는 입사파고(불규칙파:  $H_{1/3}$ ),  $W$ 는 블록의 중량,  $\beta$ 는 사면경사,  $\gamma_r$ 은 블록의 단위중량,  $S_r$ 은 블록의 비중이다. 이 Hudson공식은 현재까지 경사제 피복블록의 중량 산정 등에 가장 많이 이용되고 있다. 안정계수는 보통 피해율( $D_a$ ) 5% 이내에서 결정되는데, 피해율은 다음 식으로 정의되는 값이다.

$$D_a = \frac{(\text{사면상의 전역에서 이동한 블록의 개수})}{(\text{사면상의 전피복석의 수})} \times 100(\%) \quad (2.6)$$

단, 대수심 경사제의 경우 파랑의 영향이 미치는 수심까지 설치된 블록의 수에 대한 탈락 블록수를 피해율로 산정한다. Hudson공식은 다음과 같은 특징을 갖고 있다.

① 피복석에 작용하는 힘은 유속의 제곱에 비례한다.

Hudson공식은 2층의 피복석에 대해 구해진 것으로 피복석을 움직이는 주요한 파력  $P$ 는 항력이라 생각한다. 즉 파에 의해 물입자가 움직여 피복석 주변에 소용돌이가 일어나기 때문에 발생하는 힘으로 물입자 속도  $v$ 의 제곱에 비례하는 힘이다. 항력  $P$ 는

투영면적( $A$ ), 물의 밀도( $\rho$ ), 항력계수( $C_D$ )으로  $P = \rho C_D v^2 A$ 로 표현된다.

한편 돌의 수중중량 ( $W'$ )에 의한 마찰력 ( $\mu W'$ )이 저항력( $F_p$ )으로 작용하고, 돌의 중량이 부족하여 파력이 마찰력을 상회하면 움직이게 된다(그림 2.3). Hudson공식은 기본적으로 이러한 힘의 균형으로부터 구해지는 식이고, 피복재의 항력계수나 마찰계수의 차이를 안정계수로 간주한다. 실제로 피복재에는 유속의 방향에 직각상향의 양력이나 파랑의 순간적인 충돌에 의해 충격적인 힘도 작용하지만, 이러한 힘도 유속의 제곱에 비례하고 항력에 포함된다. 그림 2.3은 피복재를 수평으로 둔 경우이지만 사면이라면 움직임이 쉽고 그 영향도 Hudson식에 포함되어 있다.

② 안정중량은 파고의 세제곱에 비례한다.

Hudson공식은 파고로부터 직접 필요한 중량을 산정할 수 있도록 되어 있는 실용적이고 편리한 공식이다. 유속  $v$ 는 파고  $H$ 에 비례하므로 필요한 중량  $W$ 는 파고의 제곱이 된다고 생각되지만 중량이 증가하면 투영면적이 증가하여 이미 파력이 증가되기 때문에 결과로서 파고의 6승에 비례한다. 다만 Hudson공식에서는 파가 피복사면 상에서 쇄파하고 쇄파시의 유속  $v$ 가  $(gH)^{1/2}$ 에 비례한다고 생각하여 안정중량은 파고의 세제곱에 비례하는 식이 되었다.

③ 안정계수( $K_D$ )

Hudson식은 간편하게 사용하기 쉬운 식이지만 파고와 단위체적중량, 그리고 사면경사 만으로 표현하며 그 외의 매개변수(parameter)를 전부 안정계수로 간주한다. 그러므로 같은 블록을 사용한 경우라도 거치방법(정적, 난적), 쇄파의 유무(쇄파, 비쇄파), 거치장수(제두부, 제간부)에 의해 다른  $K_D$ 치가 이용된 블록의 중량산정에는 아래에 나열한 요소의 영향을 고려할 필요가 있다.

- 상대파고  $H/h$
- 파형경사  $H/L$
- 파의 연속시간(파수  $N$ )
- 피해의 정도(피해율)
- 파의 불규칙성
- 피복층 하부의 투수성
- 천단고(월파 비월파의 여부)
- 해저경사

#### 다. Van der Meer 공식

Van der Meer(1988)는 Hudson 공식에서 쓰이는  $K_D$  값이 경사제 사면에 작용하는 파랑의 영향을 너무 단순하게 표현하였으며 파주기, 투수성, 파의 불규칙성, 사면에서의 쇄파형태, 피해정도 등을 충분히 고려하지 않은 점을 주목하고, 다양하고도 광범위한 조건에서 실험을 실시하였다. 관측을 바탕으로 투수성, 파의 불규칙성, 쇄파 조건, 피해 정도 등을 고려한 식을 개발하였다. 식 (2.7)과 같이 Iribarren 수에 따라 두 개 구간으로 나누는 독특한 분포특성을 보이는데, 산정은 다음과 같다.

$$\eta = \begin{cases} 6.2P^{0.18}D_N^{0.2}/\sqrt{I_i} & (0.4 < I_i < 2.5) \\ 1.0P^{-0.13}D_N^{0.2}I_i^P\sqrt{R} & (2.5 < I_i) \end{cases} \quad (2.7)$$

여기서  $P$  : 투수 계수,  $D_N = D/\sqrt{N}$ ,  $D$  : 피해정도,  $N$  : 침입된 파의 개수,  $I_i$  : 외빈(inshore) Iribarren 수로서 쇄파계수를 나타낸다.

$$I_i = \frac{S}{\sqrt{M_i}} = M_i^{-1/2}R^{-1} \quad (2.8)$$

여기서  $M_i (= H/L_0 = 2\pi H/gT_m^2)$ 는 파형경사이고,  $S = \tan\theta = R^{-1}$ 이다. Van der Meer는 사면 투수성과 입사파의 수, 피해율에 따라서 여러 결과를 제시하였다. 식 (2.8)을 식 (2.7)에 대입하면 다음 식이 유도된다.

$$\eta = \begin{cases} K_{M1}M_i^{-1.33}S^{1.5} & (0.4 < I_i < 2.5) \\ K_{M2}M_i^{1.5P}S^{1.5-3P} & (2.5 < I_i) \end{cases} \quad (2.9)$$

여기서  $K_{M1} = 0.0042(s-1)^{-3}P^{-0.54}N_s$ ,  $K_{M2} = (s-1)^{-3}P^{0.39}N_s$ ,  $N_s = (\sqrt{N}/D)^{0.6}$  이다. Van der Meer는 사석보호공의 안정성에 관해 발견된 지배 매개변수들에 기초하여 콘크리트 소파제에 대한 실험을 수행하였다. 그러나 각 소파제에 대해서 한가지 단면에 대해서만 수행하였기 때문에 안정공식에서 경사각과 쇄파계수는 언급되지 않았다. 일반적으로 입방체(cubes)와 TTP는 1:1.5의 경사로 시공된다. 콘크리트 블록의 안

정성에 대한 공식은 피해의 정도  $D$ , 파의 수  $N$ , 파형경사  $M_i (= H/L_0)$ 의 매개변수로 표현되며 다음과 같다.

$$\delta = H_s / (s - 1) \phi_n = (6.7D_n^{0.6} + 1.0)M_i^{0.1} \quad \text{입방체} \quad (2.10)$$

$$\delta = H_s / (s - 1) \phi_n = (3.75D_n^{0.5} + 0.85)M_i^{-0.2} \quad \text{TTP} \quad (2.11)$$

피해가 없는 경우, 즉 치환된 개수  $D$ 이 없는 경우는 다음의 공식을 사용한다.

$$\delta = H_s (s - 1) \phi_n 1.0M_i^{-0.1} \quad \text{입방체} \quad (2.12)$$

$$\delta = H_s / (s - 1) \phi_n = 0.85M_i^{-0.2} \quad \text{TTP} \quad (2.13)$$

Van der Meer가 제시한 식은 Hudson 공식에 비해 방파제 사면에서의 쇄파에 대한 영향을 고려한 점에서는 한층 진일보되었다고 할 수 있다. 그러나 적용 가능한 투수계수 범위의 한정, 방파제 전면에서의 수심효과 등이 고려되지 않은 단점이 있다. 또한 파형경사 결정시 파고는 사면 전면부의 파고를 사용하고, 파장은 심해파의 파장을 사용하였기 때문에 수심의 변화에 대한 고려가 미흡하다. 더욱이 Iribarren 수에 따라 산정식의 형태를 달리하기 때문에 일반성이 결여된 것으로 판단되며 경계치의 적절한 수치결정이 곤란한 것으로 추정된다.

### 2.2.2 반사율

파랑이 방파제나 안벽 등에 의해서 반사되면 중복파가 형성되어 전면수역의 동요가 심해진다. 또 반사파는 반대측에 전파해서 항내 정온도를 불안정하게 만들 수 있으므로 가급적 구조물 전면에서 소파시키는 것이 좋다.

구조물의 전면이나 경사면에 파고가 입사하면 그것이 가지고 있는 입사파 에너지의 일부 혹은 전부가 반사되어져 반사파(reflected waves)로서 바다로 되돌아간다. 이 경우 식 (2.14)로 나타낸 입사파고  $H_i$ 에 대한 반사파고  $H_r$ 의 비를 식 (2.14)와 같이 반사율  $K_r$ (ratio of reflection, reflection coefficient)로 정의한다.

$$K_r = H_r/H_i \tag{2.14}$$

투수성을 지닌 구조물의 반사율  $K_r$ 에 영향을 주는 무차원수로서는  $B/L$ ,  $U_r T/d_m$ ,  $U_r d_m/\nu$ ,  $\lambda$  등이 있다. 여기에서  $B$ 는 구조물의 폭,  $L$ 은 파장,  $U_r$ 은 대표적인 수평수립자속도,  $T$ 는 주기,  $d_m$ 은 부재 등의 대표적인 치수,  $\nu$ 는 해수의 동점성계수,  $\lambda$ 은 공극률이고,  $U_r T/d_m$ 은  $KC$ 수(Keulegan - Carpenter number),  $U_r d_m/\nu$ 은 레이놀즈수(Reynolds number)이다.

일정한 사면경사를 갖는 매끄러운 사면에 파고가 내습했을 때의 반사율  $K_r$ 은, Miche에 의하면 식 (2.15)로서 표현되는 파형경사의 임계치  $[H_o/L_o]_{crit}$ 보다 작은 파고는 사면에서 완전히 반사한다. 그러나 이것보다 큰 파고의 반사율은 식 (2.16)에서 얻을 수 있다.

$$\left[ \frac{H_o}{L_o} \right]_{crit} = \left( \frac{2\alpha}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \sin^2 \frac{\alpha}{\pi} \tag{2.15}$$

여기서  $\alpha$ 는 사면이 수평을 이루는 각이며, 단위는 라디안이다.

$$K_r = \frac{\left[ \frac{H_o}{L_o} \right]_{crit}}{\left[ \frac{H_o}{L_o} \right]} \tag{2.16}$$



안벽 구조물 전면에서의 반사율은 부분소파로 인하여 이론적 해석이 어렵기 때문에 일반적으로 수리모형실험 혹은 현지관측에 의해 추정하고 있다. 기존의 모든 자료에 따라 Goda가 정리한 각종 구조물의 반사율 개략치는 표 2.2과 같다. 표에서 나타난 반사율의 범위는 직립벽의 경우 월파의 정도에 의한 것으로 구조물의 천단고에 거의 비례한다. 사면 및 천연 해빈의 경우는 파형경사에 반비례하여 장주기의 파랑이 상한치에 대응된다. 직립소파 구조물의 경우는 위에서 기술한 바와 같이 파장과 구조물의 형상 치수에 따라 변화하므로 주의를 요한다.

반사율은 안벽 구조물의 형상과 파랑 조건 등에 따라서 달라지므로 유공 안벽과 같은 직립 소파구조물의 반사율도 구조물의 형상과 소파 구조물 단면의 입사파장에 상대적인 폭과 기타 요인 등에 따라 변한다. 따라서 모든 조건에 맞는 반사율의 공식이 없기 때문에 구축되는 안벽 구조물에 대해 수리모형실험을 실시하여 반사율을 추정하는 것이 바람직하다.

**표 2.2 Goda식에서 반사율의 개략치(이지훈, 2013)**

구조형식	반사계수
직립벽(천단은 정수위면)	0.7 ~ 1.0
직립벽(천단은 정수면 아래)	0.5 ~ 0.7
사석사면(1:2 ~ 3 경사)	0.3 ~ 0.6
이형 소파블록 사면	0.3 ~ 0.5
직립 소파 구조물	0.3 ~ 0.8
천연해빈	0.05 ~ 0.2

반사파의 측정 방법은 Healy에 의한 1점 관측식 측정방법과 Goda에 의한 2점 관측식, 3점 관측식 등이 있다(이지훈, 2013).

Healy에 의한 1점 관측식 규칙파의 반사율은 주기와 진폭이 일정한 진행파는 안벽과 같은 구조물에서 반사될 경우, 반사파를 생성한다. 되돌아오는 반사파가 진행파와 합성되어 파랑이 정상상태로 되면서 부분 중복파를 발생시킨다. 규칙파에 의한 반사율의 특성 규명은 입사파와 반사파의 수위 스펙트럼을 이용하여 구할 수 있는데 그 원리

는 다음과 같다. 입사파의 파고를  $H_i$ 라하고, 반사되는 파고를  $H_r$ 라 하면, 입사파와 반사파의 파형은 다음의 식 (2.17)와 같이 표현될 수 있다(이지훈, 2013).

$$\eta_t = \frac{H_i}{2} \cos(kx - \sigma t) + \frac{H_r}{2} \cos(kx + \sigma t + \epsilon) \quad (2.17)$$

여기서  $\eta_t$ 는 입사파와 반사파가 합성되었을 때의 수위의 파형이다. 또한, 반사파의 항에 있는  $\epsilon$ 은 입사파와 반사파간의 위상 차이에 해당하는 항이 된다. 식 (2.17)은 각 함수 합의 공식에 따라 전개하면 다음의 식 (2.18)과 같이 표현된다.

$$\eta_t = \left[ \frac{H_i}{2} (\cos kx \cos \sigma t + \sin kx \sin \sigma t) + \frac{H_r}{2} (\cos(kx + \epsilon) \cos \sigma t - \sin(kx + \epsilon) \sin \sigma t) \right] \quad (2.18)$$

여기서 식 (2.18)을 비슷한 항끼리 묶어서 표현하면 식 (2.19)와 같다.

$$\eta_t = \left[ \frac{H_i}{2} \cos kx + \frac{H_r}{2} \cos(kx + \epsilon) \right] \cos \sigma t + \left[ \frac{H_i}{2} \sin kx - \frac{H_r}{2} \sin(kx + \epsilon) \right] \sin \sigma t \quad (2.19)$$

식 (2.19)에서 괄호안의 항을 각각  $I(x)$ 와  $F(x)$ 로 두면 다음의 식 (2.20)와 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$\eta_t = I(x) \cos \sigma t + F(x) \sin \sigma t \quad (2.20)$$

여기서 수위  $\eta_t$ 의 최대점을 구하기 위하여  $\frac{\partial \eta_t}{\partial t} = 0$ 인 점을 구하면 다음의 식 (2.21)과 같다.

$$\frac{\partial \eta_t}{\partial t} = -I(x) \sigma \sin \sigma t + F(x) \sigma \cos \sigma t = 0 \quad (2.21)$$

식 (2.21)의 오른쪽 항을 정리하면 다음의 식 (2.22)과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$\tan(\sigma t)_{\max} = \frac{F(x)}{I(x)} \quad (2.22)$$

여기서 식 (2.22)을 이용하여 표현하면 다음의 두 식 (2.23)과 (2.24)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\cos(\sigma t)_{\max} = \frac{I(x)}{\sqrt{I(x)^2 + F(x)^2}} \quad (2.23)$$

$$\sin(\sigma t)_{\max} = \frac{F(x)}{\sqrt{I(x)^2 + F(x)^2}} \quad (2.24)$$

식 (2.23)과 식 (2.24)를 (2.17)에 대입하여  $\eta_t$ 의 최대값과 최소값을 구하면 다음의 식 (2.25)와 같이 표현할 수 있다.

$$(\eta_t)_{peak} = \frac{I(x)^2 + F(x)^2}{\sqrt{I(x)^2 + F(x)^2}} = \pm \sqrt{I(x)^2 + F(x)^2} \quad (2.25)$$

여기서 식 (2.25)에 식 (2.20)을 대입하면 일정한 점  $x$ 에서의 수위함수의 최대 및 최소값은 다음의 식 (2.26)과 같다.

$$[\eta_t(x)]_{peak} = \pm \sqrt{\left(\frac{H_i}{2}\right)^2 + \left(\frac{H_r}{2}\right)^2 + \frac{H_i H_r}{2} \cos(2kx + \epsilon)} \quad (2.26)$$

식 (2.26)에서  $\eta_t(x)$ 는 점  $x$ 에 대하여 주기 함수의 형태를 지니며,  $(2kx_1 + \epsilon) = 2n\pi$  ( $n=0,1,2,\dots$ )일 때 다음의 식 (2.27)과 같은 최대값을 가진다.

$$(\eta_t)_{\max} = \frac{1}{2}(H_i + H_r) \quad (2.27)$$

또한  $(2kx_1 + \epsilon) = (2n+1)\pi$  ( $n=0,1,2,\dots$ )일 때는 식 (2.28)과 같은 최소값을 가진다.

$$(\eta_t)_{\max} = \frac{1}{2}(H_i - H_r) \quad (2.28)$$

여기서 최대값과 최소값을 가지는 지점의 위상 차이를 구하면 다음의 식 (2.29)와 같다.

$$\left( \begin{array}{l} (2kx_2 + \epsilon) - (2kx_1 + \epsilon) = (2n + 1)\pi - 2n\pi \\ 2k(x_2 - x_1) = \pi \end{array} \right) \quad (2.29)$$

여기서 파수  $k = \frac{2\pi}{L}$  이므로,  $x_2 - x_1 = \frac{\pi}{2k} = \frac{L}{4}$  인 파장의 파형을 구하면 최대값과 최소값을 구할 수 있다. 식 (2.27), (2.28)로부터 입사파와 반사파의 수위를 구하면 각각 식 (2.30), (2.31)과 같다.

$$H_i = (\eta_t)_{\max} + (\eta_t)_{\min} \quad (2.30)$$

$$H_r = (\eta_t)_{\max} - (\eta_t)_{\min} \quad (2.31)$$

따라서, 반사율  $K_r$ 은 다음의 식 (2.32)와 같이 구할 수 있다.

$$K_r = \frac{H_r}{H_i} = \frac{\eta_{\max} - \eta_{\min}}{\eta_{\max} + \eta_{\min}} \quad (2.32)$$

실험실에서 반사율을 측정하고자 할 때에는  $L/4$  파장 이상의 범위에서 파형을 측정하여 측정된 자료를 이용하여 파형을 도시하고 그리고 이때의 최대 파형과 최소파형을 구하여 식 (2.32)에서와 같이 입사파와 반사파의 파고 비를 구함으로써 반사율을 측정할 수 있다.

### 2.2.3 처오름높이

파랑의 처오름높이는 입사파의 파고, 파형경사, 구조물의 형상, 설치위치, 경사면의 조도, 해저지형 등에 따라 변화하므로 실험값을 이용하여 산정하며, 파랑의 처오름높이는 해안구조물, 해안제방, 호안시설 등의 마루높이 산정시 중요한 요소로 작용한다. 처오름높이의 산정식은 상대 깊이에 따라 달라지는데 다음과 같다.

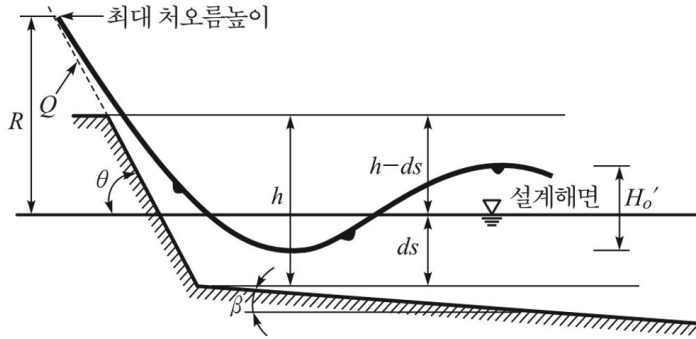


그림 2.4 파의 처오름(해양수산부, 2005)

먼저 상대 깊이( $d_s/H'_0$ ) < 3인 경우 처오름높이 산정식은 식 (2.33)과 같다.

$$(R/H'_0) = (R/H'_0) \cdot \gamma \cdot K \quad (2.33)$$

여기서  $R$ : 처오름높이

$R/H'_0$ : 상대 처오름양

$H'_0$ : 환산심해 파고

$\gamma$ : 조도 조정계수

$K$ : 축척조정계수

또한, 상대 깊이( $d_s/H'_0$ ) > 3인 경우 처오름높이 산정식은 식 (2.33)에서  $\gamma$ ,  $K$  값을 제외한 식이다.

## 2.3 수리모형실험 영향인자

### 2.3.1 상사법칙

해안구조물의 모형에 대해서는 모형과 원형사이에 기하학적 상사가 만족되어 중력이 다른 힘보다 탁월할 때는 모형과 원형의 상사관계는 Froude 법칙의 지배를 받는다.

$$\frac{t_m}{t_p} = \frac{v_m}{v_p} = \sqrt{\frac{l_m}{l_p}} \quad (2.34)$$

식 (2.34)를  $l_m$ 에 관하여 정리하면 식 (2.35)와 같이 나타낼 수 있다.

$$l_m = l_p \times \left(\frac{t_m}{t_p}\right)^2 \quad (2.35)$$

여기서  $t$  : 시간,  $v$  : 속도,  $l$  : 길이, 아래첨자  $m$  및  $p$  : 각각 모형(model) 및 원형(prototype)에 있어서의 물리량을 나타내는 기호이다. 한편 힘 및 구조물의 무게는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{F_m}{F_p} = \frac{w_m}{w_p} = \frac{\gamma_m}{\gamma_p} \quad (2.36)$$

$$w_m = w_p \times \left(\frac{l_m}{l_p}\right)^3 \quad (2.37)$$

여기서  $F$  : 힘,  $w$  : 무게,  $\gamma$  : 비중

식 (2.36) ~ (2.37)에서와 같이 모형 축척의 비를 약간 크게 하여도 이에 따른 힘의 비는 상당히 크다.

### 2.3.2 피해율, 피해모드, 안정계수

#### 가. 피해율

해양수산부(2001)에 따르면 피복층의 피해율( $S$ )을 정의하는 방법은 크게 세 가지로 나뉜다. 첫 번째 방법은 전사면 피복재의 총 개수에 대한 이탈 피복재의 개수의 비율로서 다음과 같이 표현된다.

$$S = \frac{n}{N} \times 100 \% \quad (2.38)$$

여기서  $n$ 은 해당 파고 조건까지의 피복재의 누적 피해 개수,  $N$ 은 전사면 피복재의 총 개수를 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.

두 번째 방법은 Van der Meer(1998)에 의해 제안된 방법으로서, 피해율은 이탈한 총 피복재의 등가길이를 사면 횡폭의 길이로 나눈 비율로서 다음과 같이 정의된다.

$$S = \frac{nD_n}{D_o} \quad (2.39)$$

여기서  $n$  : 이탈 피복재의 개수,  $D_n$  : 피복재의 특성길이,  $D_o$  : 사면의 횡폭이다. 단, 사면의 횡폭은 전체 폭에서 피복재의 특성길이의 폭 만큼은 제외한 값이다. 이 식의 장점은 분모가 방파제의 수심 및 마루높이와 무관하다는 점이다. 그러나 피해율이 피복재의 형상에 따라 변하며 특히 피복재의 모양이 납작할수록 피해율이 크게 증가하는 방향으로 왜곡된다는 단점이 있다. 또한 단층피복과 다층피복의 구분이 명확하지 않다.

마지막으로 세 번째 방법은 피복층의 주된 이탈범위 내에서 피복재의 총 개수에 대한 이탈 개수의 비율로 피해율을 정의하는 것이다. 이때 이탈역은 방파제 마루와 정수면의 중간으로부터 정수면 아래 무손실 파고의 깊이( $H_{D=0}$ )에 이르는 사면의 길이로 정의하는 방법이다. 이 방법은 방파제 피해가 정수면 근처에서 주로 발생한다는 점에 근거한 것으로 피해율의 상대적 비교가 용이한 반면  $H_{D=0}$ 의 값을 사전에 알아야 한다는 단점이 있다.

## 나. 피해모드

해양수산부(2001)에 따르면 피복재의 피해 모드는 다음 세 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째로는 개별 피복재의 과도한 제자리 움직임에 의한 피해이다. 경사식 방파제는 사면에 설치된 개별 피복재 간의 상대적 변위를 일부 허용하는 유연한 구조 형식의 방파제이다. 따라서 파력에 의해 개별 피복재가 안정된 자리를 잡는 과정에서 제자리에서 약간 회전하거나 흔들리는 현상(록킹: Rocking)이 발생하게 된다. 그러나 이러한 움직임이 과도하게 발생하게 되면 해역에서는 피복재의 부재 파괴로 이어질 수 있다. 특히 중량이 큰 피복재를 사면에 피복하였을 경우에는 파력이 작용함에 따라 피복재의 제자리 이탈보다는 피복재 자체의 파괴가 먼저 일어나서 2차적으로 사면 안정성이 저하되는 경우가 많다. 축소 모형실험에서는 일반적으로 피복재의 크기를 Froude 상사법칙에 따라 축소 제작하므로 단위질량은 실 해역에서와 같으며, 재료의 강도도 원형에서와 같게 된다. 따라서 Rocking 현상이 아주 심하게 발생하여도 피복재의 파괴는 발생하지 않는다. 즉, 실 해역에서 피복재의 파괴로 인한 피해는 실험실에서는 피해로 나타나지 않게 된다. 따라서 파괴의 직접적인 원인이 될 수 있는 피복재의 심한 회전 또는 Rocking은 수리모형실험에서 피복재의 안정성을 판단하는 중요한 항목으로 취급해야 한다. 그러나 현재 어느 정도의 제자리 회전이나 Rocking이 발생할 때 이를 피해로 분류해야 하는가에 대해서는 마땅한 기준이 없는 실정이다.

두 번째 피해 모드는 피복재가 제자리에서 이탈된 후에 다시 복원되는 것이다. 큰 파가 사면에 내습하게 될 경우의 작용 중 피복재가 위로 솟구친 후 다시 제자리로 떨어지거나 또는 일단 자리를 이탈하여 사면위에서 머물다가 다음에 내습하는 큰 파에 의해 본래의 자리로 되돌아가는 현상이 발생한다. 통상의 수리모형실험에서는 일정 시간 동안 파를 작용시킨 후에 최종 이탈한 피복재의 개수만을 피해량으로 판정한다. 그러나 수리모형실험에서는 피복재의 표면 마찰력이 실 해역에 비해 크게 왜곡되어 제작되기 때문에 피복재가 제자리를 이탈할 때 위로 솟구치는 속도와 거리는 실제에 비해 작게 평가된 것이라고 판단해야 할 것이다. 따라서 축소 모형실험에서는 이탈 후 제자리로 복원한 피복재의 일부는 원형에서는 제자리로 복원되지 못할 가능성이 있는 것으로 보아야 할 것이다. 따라서 수리모형실험 수행 중 육안 관찰 또는 비디오 촬영을 통해 파 작용 시 피복재가 제자리에서 이탈한 후에 다시 복원되는 개수를 기록하고 이를 피해량으로 산정하는 것이 바람직하다. 다만, 이렇게 피해가 발생한 것으로 평가된 피복재가 후에 자리를 이탈하게 되는 경우에는 피해량을 중복 계산하지 않도록 주의해야



한다.

세 번째 피해 모드는 피복재가 제자리에서 이탈되는 것이다. 일반적으로 피복재가 원래의 위치에서 피복재의 특성길이 이상 이동한 경우 이탈로 간주한다.

#### 다. 안정계수

경사제의 사면피복식의 경우는 적절한 계수( $K_D$ 값)를 사용하는 허드슨식(식 (2.5))으로 질량을 산정하였으나 최근에는 식 (2.40)과 같은 안정계수를 사용하는 허드슨식을 많이 사용하고 있다. 이 식은 혼성제의 사석부나 다른 피복재에도 적용될 수 있는 일반적인 식이다.

$$W = \frac{\gamma_r H^3}{N_s^3 (S_r - 1)^3} \quad (2.40)$$

식 (2.40)과 식 (2.5)을 비교하면

$$N_s = K_D \cot \alpha \quad (2.41)$$

인데,  $K_D \cot \alpha$  값이 바로 안정계수이다. 허드슨의 안정계수는 사면과 수평면이 이루는 각과  $K_D$ 값을 이용하여 안정계수를 쉽게 구하는 방법이지만, 지금까지 제시된 많은  $K_D$ 값들은 구조물이나 파의 특성 등 여러 가지 요인을 충분히 반영하고 있지 않다.

Van der Meer는 천단고가 높은 경사제의 사면 피복석에 관한 체계적인 실험을 실시하고 사면의 경사뿐 아니라 파형경사나 파의 수, 그리고 피해의 정도를 고려하는 다음과 같은 안정계수를 제안하였다.

$$N_s = \max(N_{spl}, N_{sstr}) \quad (2.42)$$

$$N_{spl} = 6.2 C_H P^{0.18} (S^{0.2} / N^{0.1}) I_r^{-0.5} \quad (2.43)$$

$$N_{sstr} = C_H P^{-0.13} (S^{0.2} / N^{0.1}) (\cot \alpha)^{0.5} I_r^P \quad (2.44)$$

여기서

$N_{spl}$  : 쇄파(plunging breakers)에 대한 안정계수

$N_{ssr}$  : 쇄기파(surging breakers)에 대한 안정계수

$I_r$  : 이리바렌수(Iribaren number) ( $\tan\alpha/S_{om}^{0.5}$ )

쇄파 유사성 매개변수(surf similarity parameter)라고도 한다.

$S_{om}$  : 파형경사( $(H_{1/3}/L_o)$ )

$L_o$  : 심해파장( $L_o = gT_{1/3}^2/2\pi, g = 9.81m/s^2$ )

$T_{1/3}$  : 유의파 주기

$C_H$  : 쇄파효과 계수  $\{= 1.4/(H_{1/20}/H_{1/3})\}$

비쇄파영역에서는 1.0

$H_{1/3}$  : 유의파고

$H_{1/20}$  : 1/20 최대파고

$\alpha$  : 사면이 수평면과 이루는 각( $^\circ$ )

$D_{n50}$  : 피복석의 50% 질량에 상당하는 입경

$(= (M_{50}/\rho_r)^{1/3})$

$M_{50}$  : 피복석의 질량누적곡선에서 50%에 해당하는 질량(피복석의 소요질량)

$P$  : 피복층 하부의 투수지수

$S$  : 변형정도( $S = A/D_{n50}^2$ )

$A$  : 침식부의 면적

$N$  : 작용하는 파의 수

$S$ 는 파에 의해 침식된 면적  $A$ 를 피복재의 50% 직경  $D_{n50}$ 의 제곱으로 나눈 것이다.

## 2.4 CADMAS-SURF 모형

### 2.4.1 CADMAS-SURF 모형의 개요

비압축성의 점성유체에 대한 복잡한 자유수면을 효과적으로 수치모의할 수 있는 VOF(Volume of Fluid)법이 제안된 이후, 자유수면을 취급하는 많은 학문분야에서 이를 활용한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히, VOF법은 쇄파과정 및 쇄파후의 파형변형특성을 수치적으로 재현할 수 있어 최근 들어서 해안공학분야에서도 VOF법을 활용한 수치모델의 개발이 다양하게 시도되고 있다. VOF법은 단지 자유수면을 모의하는 기법이므로 해안공학분야에 적용시 파랑의 전달과 반사를 정확하게 모의할 수 있는 효과적인 경계조건과 주기적인 파동장을 위한 조파방법이 필요하다. 이러한 경계조건과 조파방법을 결부시켜 VOF법을 활용한 수치파동수로의 연구개발이 최근 활발하게 이루어지고 있으며, 그 중 항만구조물의 내파설계를 목적으로 일본 연안개발기술연구센터(2001)에서 개발한 수치파동수로 CADMAS-SURF는 실무분야에서 활발히 활용되고 있으며, 사용자가 직접 입출력을 제어할 수 있는 효과적인 2차원파동장의 해석프로그램으로 알려져 있다. CADMAS-SURF에서 적용하는 수치파동수로는 그림 2.5의  $L'$ 은 목표파의 파장,  $La$ 는 부가감쇠영역의 길이,  $\Delta x$ ,  $\Delta z$ 는 수평 및 연직방향의 격자간격이다. 보이는 바와 같이 2차원 수치파동수로 내에 파의 재반사를 방지하기 위한 개경계처리방법으로 해석영역의 양쪽에 부가감쇠영역을 두고, 해석영역내에 조파를 위한 조파소스를 적용하고 있다. CADMAS-SURF의 기능일람 및 경계조건일람을 표 2.3과 표 2.4에 나타냈다.

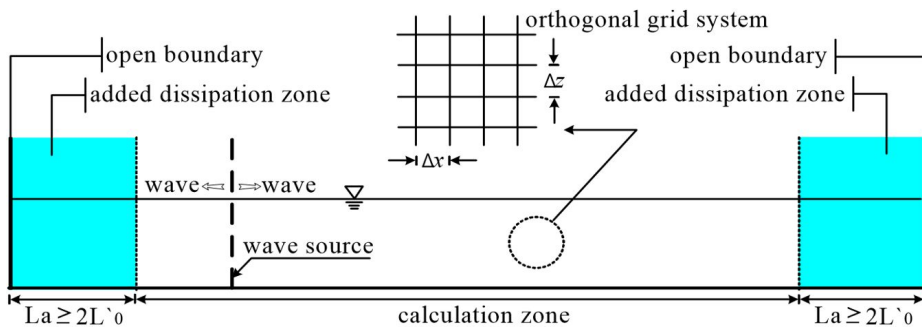


그림 2.5 CADMAS-SURF의 개요도(CADMAS-SURF Manual, 2001)

표 2.3 CADMAS-SURF의 기능 일람(CADMAS-SURF Manual, 2001)

구 분	항 목	기 능
물리 모델	해석대상	· 자유표면이 다가함수로 되는 복잡한 흐름
	기초방정식	· 2차원비압축성점성유체의 Navier-Stokes방정식과 연속식을 Porous모델에 기초하여 확장한 식
	좌표계	· 데카르트좌표계
	자유표면 해석모델	· Volume of Fluid법 (VOF법)
	난류모델	· Re형 $k-\epsilon$ 2방정식모델
	조파모델	· 조파경계 · 조파소스 (각각의 조파모델에 이하의 조파함수를 적용할 수 있음)
	조파함수	· Stokes파 제5차근사해 (정형진행파) · Cnoidal파 제3차근사해 (정형진행파) · 흐름함수 B에 의한 수치해 (정형진행파) · Piston Type (조파판을 모델화) · Flap Type (조파판을 모델화) · Matrix Data (임의파형 : 불규칙 파형)
	무반사 모델	· Sommerfeld의 방사조건 · 에너지감쇠대
	스칼라량의 이류확산	· 다성분 스칼라량의 이류확산 계산이 가능 (단, User Routine의 변경 등, Source Program이 필요)
	일반 경계조건 (조파경계와 반사경계 이외)	· 셀단위로 임의위치에 구조물을 설정할 수 있음 · 구조물표면의 임의위치에 경계조건을 설정할 수 있음 · 경계조건의 중별은 입력데이터로 선택할 수 있음 (표 2.3 참조)

표 2.3 CADMAS-SURF의 기능 일람(계속)

구 분	항 목	기 능
수 치 해 석 과 알 고 리 즘	이산화	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Staggered Mesh(교호격자)를 사용한 차분법</li> <li>· Porous모델을 사용한 형상근사</li> </ul>
	시간적분	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Euler법</li> <li>· Simplified Marker and Cell법 (SMAC법)</li> </ul>
	이류항 (대류항)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· VOF함수 F 이외의 이류항은 이하의 어느 것을 선택               <ol style="list-style-type: none"> <li>① 1차정도 풍상차분</li> <li>② 2차정도 중심차분</li> <li>③ DONOR Scheme (①과 ②의 Hybrid형식)</li> <li>④ QUICK Scheme</li> </ol> </li> <li>· VOF함수 F의 이류항은 DONOR-ACCEPTOR법 이산화</li> </ul>
	표면셀의 유속 설정방법	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 외삽(유체층 2점의 유속으로부터 외삽한다)</li> <li>· 경사 "0" (유체층의 유속과 동일하게 한다)</li> </ul>
	표면방향의 설정방법	<ul style="list-style-type: none"> <li>· NASA-VOF3D의 방법을 채용</li> </ul>
	기포와 물방울의 처리	<ul style="list-style-type: none"> <li>· TimerDoor법</li> </ul>
	연립1차방정식의 해법	<ul style="list-style-type: none"> <li>· M-ILUBCGSTAB법</li> </ul>
	시간간격의 제어	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 입력치 고정</li> <li>· 자동시간간격</li> </ul>
가 시 화 기 능	지정 시각에서 계산 데이터 (가시화부를 이용)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 유속벡터</li> <li>· 각종 물리량의 등가선</li> <li>· 등가선에 의한 자유표면</li> <li>· 유체 존재영역의 착색</li> </ul>
	시계열데이터 (표계산 소프트 이용)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 지정한 장소의 초기수면으로부터 수위변동</li> <li>· 지정장소의 계산치, 기타</li> </ul>

표 2.4 경계조건 일람 (CADMAS-SURF Manual, 2001)

항 목	유 속	압 력	VOF함수 F	난류량
Slip	$u_n = 0$ $\frac{\partial u_t}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial \phi_b}{\partial n} = 0$		
Nonslip	$u_n = 0$ $u_t = 0$	$\frac{\partial \phi_b}{\partial n} = 0$		
값 지정	$u_n = u_{nin}$ $u_t = u_{tin}$	$\frac{\partial \phi_b}{\partial n} = 0$	$F = F_{in}$	$k_b = k_{in}$ $\epsilon_b = \epsilon_{in}$
Free (경사제로)	$\frac{\partial u_n}{\partial n} = 0$ $\frac{\partial u_t}{\partial n} = 0$ ( $u_n$ 은 포텐셜함수로 계산후에 보정된다.)	$\phi_b = 0$	$\frac{\partial F_b}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial k_b}{\partial n} = 0$ $\frac{\partial \epsilon_b}{\partial n} = 0$
대수척	$u_n = 0$ $\frac{u_t}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \log \frac{u^* y}{\nu} + A$	$\frac{\partial \phi_b}{\partial n} = 0$		$k_c = \frac{(u^*)^2}{\sqrt{C_\mu}}$ $\epsilon_c = \frac{(u^*)^3}{\kappa y}$
완전조면	$u_n = 0$ $\frac{u_t}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \log \frac{y}{k_s} + A + 3.0$	$\frac{\partial \phi_b}{\partial n} = 0$		$k_c = \frac{(u^*)^2}{\sqrt{C_\mu}}$ $\epsilon_c = \frac{(u^*)^3}{\kappa y}$

여기서 압력의 경계조건은 포텐셜함수  $\phi$ 의 경계조건으로 표현된다.  $n$ 은 법선방향좌표,  $u^*$ 는 마찰속도,  $\nu$ 는 분자동점성계수,  $k$ 는 0.4,  $A$ 는 5.5,  $y$ 는 벽면으로부터의 거리,  $k$ 는 벽면조도,  $C_\mu$ 는 0.09이다. 첨자  $n$ 은 법선방향의 값,  $t$ 는 접선방향의 값,  $in$ 은 입력치,  $b$ 는 경계치,  $c$ 는 경계면에 접하는 셀 중심의 값을 나타낸다.

## 2.4.2 지배방정식

### 가. 기초방정식

일반적으로 해안역의 파동장 해석에서는 해저사면과 투과성 소파구조물 등과 같은 복잡한 형상을 취급하는 것이 필수적이다. CADMAS-SURF의 기본방정식에는 2차원 비압축성 점성유체를 대상으로 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식을 Porous모델에 근거하여 확장한 식 (2.45) ~ (2.47)을 사용한다.

- 연속방정식

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = S_p \quad (2.45)$$

- 운동방정식

$$\lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z} = \quad (2.46)$$

$$- \frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left( 2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} - D_x u + S_u - R_x$$

$$\lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} = \quad (2.47)$$

$$- \frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left( 2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - D_z w + S_w - R_z - \gamma_v g$$

여기서 좌표계와 주요한 물리량의 기호 정의는 그림 2.6에 나타내는 바와 같으며 다음과 같다.

- $t$  : 시간
- $x, z$  : 수평 및 연직의 좌표
- $u, w$  : 유속의 수평 및 연직 성분
- $\rho$  : 밀도
- $p$  : 압력
- $\nu_e$  : 동점성계수와 와점성계수의 합

- $g$  : 중력가속도
- $\gamma_v$  : 공극률
- $\gamma_x, \gamma_z$  : 수평 및 연직방향의 면적 투과율

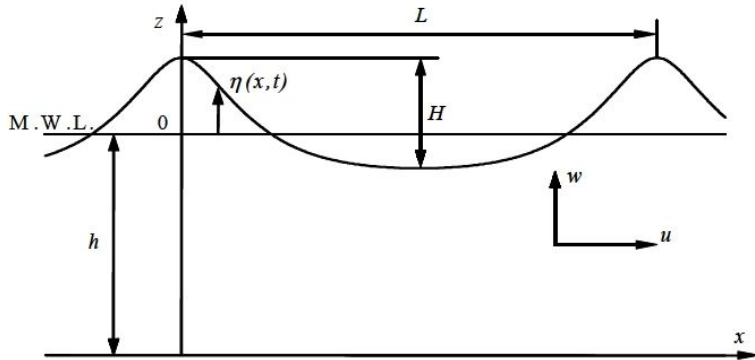


그림 2.6 좌표계의 정의와 물리량 (해양수산부, 2001)

$\lambda_v, \lambda_x, \lambda_z$ 는  $C_M$ 을 관성력계수로 한다면 다음과 같이 나타내며 우변 제 2항이 구조물로부터 받은 관성력의 효과를 나타낸다.

$$\lambda_v = \gamma_v + (1 - \gamma_v)C_M \quad (2.48)$$

$$\lambda_x = \gamma_x + (1 - \gamma_x)C_M \quad (2.49)$$

$$\lambda_z = \gamma_z + (1 - \gamma_z)C_M \quad (2.50)$$

또한 다공질체로부터의 저항력  $R_x, R_z$ 는  $C_D$ 를 저항계수로 하여 유속의 제곱에 비례하는 형으로 나타낸다.

$$R_x = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta x} (1 - \gamma_x) u \sqrt{u^2 + w^2} \quad (2.51)$$

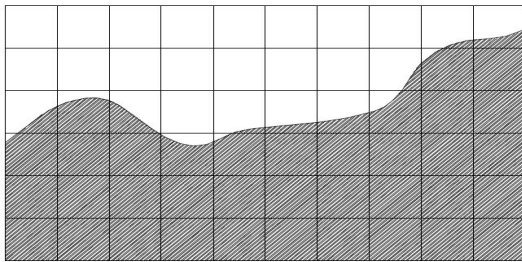
$$R_z = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta z} (1 - \gamma_z) w \sqrt{u^2 + w^2} \quad (2.52)$$

여기서  $\Delta x, \Delta z$ 는 수평 및 연직방향의 격자 간격이다.

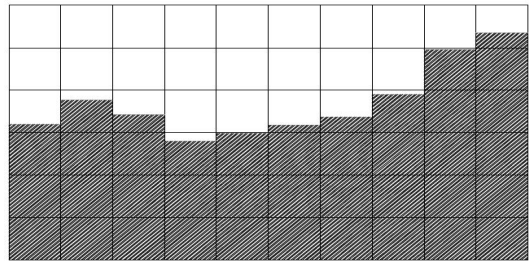


### 나. 자유표면 해석모델

자유표면을 해석함에 있어서는 복잡한 표면형상의 해석이 가능한 Hirt and Nichols(1981)가 제안한 VOF(Volume of Fluid)법을 적용한다. 이는 marker 입자법의 장점을 가지면서 marker 입자법의 결점인 계산의 변잡성 등의 단점을 갖지 않는 방법으로 범용성이 높다. 특히 여기서 VOF함수  $F$ 는 일정 물리량인 유체의 체적율로서 유체영역 뿐만 아니라 기체상태의 영역까지 포함하는 전 영역으로 적용이 가능한 것이 특징이다. VOF법에 의한 자유표면에 모델화의 개념도를 그림 2.7에 나타내었다.



VOF 모델링 전의 표면 형상



VOF 모델링 후의 표면 형상

그림 2.7 VOF법에 의한 자유표면의 모델화(해양수산부, 2001)

VOF함수  $F$ 는 일정 물리량인 유체의 체적율로서의 범위를 가지며,  $F=1$ 일 경우는 유체셀,  $F=0$ 일 경우는 기체셀,  $0 < F < 1$ 일 경우는 표면셀로 각각 판단되어 자유수면을 추적하게 되며  $F$ 에 대한 이류방정식은 다음과 같다.

$$\gamma_v \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u F}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w F}{\partial z} = S_F \quad (2.53)$$

여기서  $S_F$ 는 조파소스를 위한 소스항이다. 그리고 VOF함수  $F$ 는 2상류 해석 등에서 사용되는 간극율과는 다르며, 자유표면을 Sharp하게 표현하기 위한 함수이고, 그 이류방정식의 이산화에는 표면이 흐려지지 않게 하기 위해 특별하게 고안된 DONOR-ACCEPTOR법이 사용된다.

### 다. 난류모델

난류모델은 실용성이 높은 분야에 사용되는 *Re*형  $k-\epsilon$ 모델(Lemos, 1992)을 사용한다.  $k-\epsilon$ 모델에서 유속의 변화량  $\acute{u}$ ,  $\acute{w}$ 는 난류에너지  $k$ 와 난류 에너지 소산율  $\epsilon$ 으로 정의하여 이하의 식 (2.54) ~ (2.55)의 이류-확산 방정식에서 구한다.

$$\gamma_\nu \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u k}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_k \left( \frac{\partial k}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_k \left( \frac{\partial k}{\partial z} \right) \right\} - \gamma_\nu G_s - \gamma_\nu \epsilon \quad (2.54)$$

$$\gamma_\nu \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u \epsilon}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w \epsilon}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_\epsilon \left( \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_\epsilon \left( \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) \right\} - \gamma_\nu G_1 \frac{\epsilon}{k} - \gamma_\nu \epsilon C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2.55)$$

여기서

$$k = \frac{1}{2} (\acute{u}^2 + \acute{w}^2)$$

$$\epsilon = \nu \left\{ 2 \left( \frac{\partial \acute{u}}{\partial x} \right)^2 \right\} + 2 \left( \frac{\partial \acute{w}}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial \acute{w}}{\partial x} + \frac{\partial \acute{u}}{\partial z} \right)^2 \right\}$$

$$C_u = 0.09$$

$$\sigma_k = 1.00$$

$$G_s = \nu_t \left\{ 2 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right\}$$

$$C_1 = 1.44$$

$$C_2 = 1.92$$

와점성계수와 와확산계수는 다음 식 (2.56) ~ (2.58)과 같이 계산된다.

$$\nu_t = \frac{C_u k^2}{\epsilon} \quad (2.56)$$

$$\nu_k = \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \quad (2.57)$$

$$\nu_\epsilon = \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \quad (2.58)$$

그 외 계수로서 통상  $k-\epsilon$  방정식 모델에서 구해진 난류 효과는 동점성계수 식 (2.59)과 또한 압력항의 압력 식 (2.60)에 해석되어진 것에 의해 유속 및 압력을 구한다.  $\nu_\epsilon$ 와  $\dot{p}$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\nu_\epsilon = \nu + \nu_t \quad (2.59)$$

$$\dot{p} = p + \frac{2}{3} \sigma k \quad (2.60)$$

## 라. 조파모델

CADMAS-SURF에서는 조파모델로서 조파경계와 조파소스의 두 가지를 채용하여 각각의 조파모델에 6종류의 조파함수(규칙파용 5종류, 불규칙파용 1종류)를 이용할 수 있다. 조파함수, 조파경계 및 조파소스는 다음과 같다.

### ① 조파함수

CADMAS-SURF에서는 규칙파의 조파함수(조파용의 수위와 유속의 계산방법)로서 Stokes파 제5차 근사해, Cnoidal파 제3차 근사해, 흐름함수법 B에 의한 수치해, Piston Type, Flap Type와 같이 5종류를 사용하였다. 여기서 Dean의 흐름함수법 B의 적용에 있어서는 단면 2차원 조파수로 내에서의 현상을 대상으로 하기 때문에, 파속의 제2정의에 기초하여 유도된 Stokes파와 Cnoidal파의 섭동해와 같이, 파속의 제2정의에 기초한 물리량(수위변동, 유속, 압력, 파속)을 주는 것이다. 또한, 불규칙파의 생성을 목적으로 하여 사용자가 작성하는 임의수위와 유속의 데이터(Matrix Data)로부터 시간방향 및 공간방향으로 보간하면서 계산하는 방법도 채용하였다.

위의 방법으로 구한 수위  $\eta_0(t)$  및 유속  $U_0(z,t)$ 을 사용하여 조파하려고 하면, 특히 조파개시 직후에 상정하고 있는 수위  $\eta_0(t)$ 와 계산상의 수위  $\eta_s(t)$ 에 차이가 발생한다. 따라서, 실제의 계산에 사용하는 조파용유속  $U(z,t)$ 에는 다음과 같은 Scaling을 실시하여 조파위치에서의 유출입량이 맞도록 하였다.

$$U(z,t) = U_0(z^*,t) \left( \frac{\eta_0 + h}{\eta_s + h} \right) \quad (2.61)$$

$$z^* = \frac{\eta_0 + h}{\eta_s + h} (z + h) - h \quad (2.62)$$

### ② 조파경계

조파경계에서는 조파용 유속  $U(z,t)$ 를 유속 지정 경계조건으로서 설정한다. 그리고 파대조건이 되는 것을 방지하기 위하여 VOF함수 F치 및 압력(실제적으로는 압력증분)에 대해서는 경사제로를 설정하는 것으로 하였다.

③ 조파소스

지정한 셀의 중심 위치( $x=x_s$ )에 조파를 위한 소스를 설정한다. 조파소스는 유속과 수위를 직접 지정하는 방법이 아니기 때문에 구조물과 사면 등으로부터 반사파를 통과시킬 수 있어서 후술하는 무반사모델과 조합함으로써 무반사조파가 가능하게 된다. 이하에 식 (2.45) ~ (2.47) 및 식 (2.53)에서 나타낸  $S_p$ ,  $S_u$ ,  $S_w$ ,  $S_F$ 는 조파소스에 관한 항으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_p = q(z, t) \tag{2.63}$$

$$S_u = uq(z, t) \tag{2.64}$$

$$S_w = wq(z, t) + \frac{\nu}{3} \frac{\partial q(z, t)}{\partial z} \tag{2.65}$$

$$S_F = Fq(z, t) \tag{2.66}$$

여기서  $q(z, t)$ 는  $x = x_s$ 의 위치에서의 격자간격을  $\Delta x_s$ 로 하여 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$q(z, t) = 2 \frac{U(x, t)}{\Delta x_s} \tag{2.67}$$

상술한 기본방정식으로부터 수치해를 계산하는 방법은 식 (2.45) ~ (2.47)을 반복 계산하여 매 시간 간격마다 미지수인  $u$ ,  $w$ ,  $p$ 를 결정하며 이들을 난류모델에 입력하여 와점성계수를 구하고  $u$ ,  $w$ 를  $F$ 의 이류방정식 식 (2.53)에 입력하여 수면곡선을 추적한다. 또한 원하는 조파소스를 입력하여 CADMAS-SURF 내에 파동장을  $u$ ,  $w$ ,  $p$ ,  $F$ 로 결정하며 계산종료 시간까지 반복계산을 수행하는 절차를 가진다.

### 마. 무반사모델

불규칙파의 경우는 물론이며, 규칙파에 있어서도 구조물의 반사파와 천수변형 등이 안정하게 형성될 때까지는 장시간의 해석이 필요하게 된다. 이 때, 인위적으로 설정하지 않으면 안 되는 해석영역의 양단의 영향을 적극적으로 억제할 수 있는 모델이 필요하게 된다. 따라서 CADMAS-SURF에선 다음에 기술하는 sommerfeld의 방사경계조건과 에너지 감쇠대를 적용하여 무반사조건을 실현하고 있다.

#### ① sommerfeld의 방사경계

경계조건으로서 이하에 나타내는 sommerfeld의 방사조건을 설정한다.

$$\frac{\partial f}{\partial t} + C \frac{\partial f}{\partial x} = 0 \quad (2.68)$$

여기서  $f$ 는 유속 등의 물리량,  $C$ 는 파속이다.

#### ② 에너지 감쇠대

에너지 감쇠대는 1 ~ 3 파장 정도의 영역을 사용하여 파의 에너지를 서서히 감쇠시키는 것으로서 무반사를 실현하는 것이다. 이 때문에 여분의 계산영역이 필요하지만 여러 파형에 대해 적용가능하고 동시에 안정된 계산결과를 쉽게 얻을 수 있다는 이점이 있다. CADMAS-SURF에서는 에너지 감쇠대로서 식 (2.46)과 식 (2.47)의 운동방정식에 이하에 나타내는 유속에 비례하는 감쇠항을 첨부한 것이다.

- x방향 유속의 감쇠항 :  $-D_x u$

$$D_x = \theta_x \sqrt{\frac{g}{h}} (N+1) \left( \frac{x-x_0}{l} \right)^N \quad (2.69)$$

- z방향 유속의 감쇠항 :  $-D_z w$

$$D_z = \theta_z \sqrt{\frac{g}{h}} (N+1) \left( \frac{x-x_0}{l} \right)^N \quad (2.70)$$

여기서  $h$ 는 수심,  $l$ 과  $x_0$ 는 에너지 감쇠대의 폭과 개시위치,  $N$ 은 분포함수의 차수,  $\theta_x$ 와  $\theta_z$ 는 무차원계수이다.

## 제 3 장 수리모형실험 재료 및 방법

### 3.1 모형의 제작

본 실험에서 사용한 피복재의 명칭은 각각 펜타포드, Y블록 두 가지 형상이다. 모형의 형상은 다음 그림 3.1 및 그림 3.2와 같다.

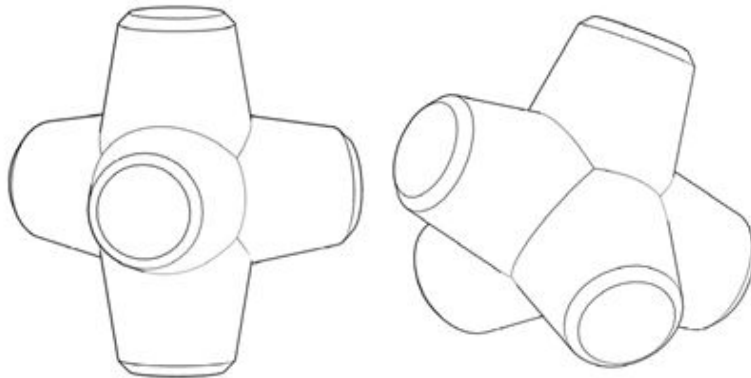


그림 3.1 펜타포드의 형상

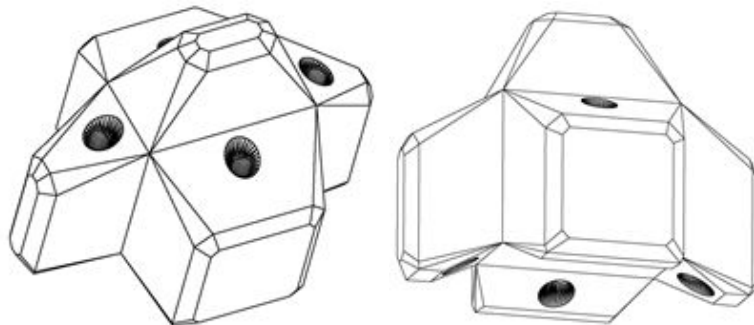


그림 3.2 Y블록의 형상

### 3.1.1 모형의 특징

#### 가. 펜타포드

펜타포드는 그림 3.1와 같이 총 5개의 경사진 원기둥으로 이루어진 형상이다. 테트라포드가 4개의 원기둥이 서로 같은 각도로 배치되어 삼각뿔 형상을 만드는데 반하여, 펜타포드는 수직으로 형성된 원기둥 중간에 3개의 원기둥이 수직 원기둥과 직각 방향으로 서로 등각으로 배치된 것이 특징이다. 5개의 원기둥으로 인해 공극률은 더 커지고, 난적이나 정적을 하는 경우에도 블록 상호간에 서로 결합되는 지점이 많아지므로 서로 맞물리는 블록이 파력을 함께 분산시키므로 더욱 안정되고 견고한 구조를 형성한다.

5개의 홀수 원기둥을 기본 구조로 하면서도, 상하 대칭이고, 3방향 대칭이므로 제작이 매우 용이하다. 기존 테트라포드는 4개의 원기둥구조로서 최소한 4개의 거푸집이 필요하며, 이 중 한 개의 거푸집은 바닥에 놓이고, 그 위에 3개의 거푸집이 결합되므로 인해서 거푸집 탈 형이 어렵고, 블록 본체를 들어 올려야만 바닥 거푸집을 제거할 수 밖에 없으므로, 탈 형을 위해서는 블록이 완전히 굳을 때 까지 기다려야 하므로 제작에 시간이 많이 소요된다. 생산 시간을 줄이기 위해 거푸집 탈 형을 조속히 하는 경우도 많은데, 이때는 블록 내부의 콘크리트가 아직 양생이 완료되지 않은 상태에서 들어 올리거나, 옮기는 과정에서 충격이 가해져서 쉽게 금이 가고 강도가 급격하게 떨어지는 원인이 된다.

펜타포드는 수직으로 세워진 상태에서 제작, 양생 및 탈 형이 이루어진다. 건조 역시 제작하는 그 위치에서 이루어지고, 충분히 양생이 완료될 때 까지 블록을 움직일 필요가 없으므로 매우 견고한 콘크리트 블록을 얻을 수 있다. 또한, 수직으로 세워진 상태에서 건조가 이루어지므로 제작에 필요한 부지가 적게 소요되는 장점이 있다.

이 피복재는 그림 3.5과 같이 수직으로 형성된 원통형 블록이 있고, 중간 지점에 같은 모양의 원통형 블록이 형성되는데 수직 블록과는 90도로 생성되고, 수평으로는 각각 120도로 형성된다.



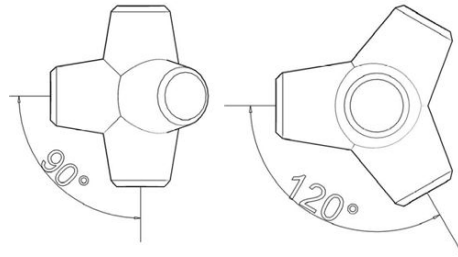


그림 3.3 펜타포드의 입체도

개발된 펜타포드의 제원은 다음과 같다. 전체의 수직 길이를 1이라고 할 때, 블록의 중심에서 원뿔 블록 끝까지의 길이는 0.5가 되는데 이것은 상하 방향의 수직 블록이나 120도로 배치되는 수평 블록도 마찬가지이다. 원뿔의 큰 지름은 0.41이 되며, 원뿔의 길이는 0.29이다. 이 비율은 블록이 서로 좌우뿐만 아니라 좌우로 인터로킹 되면서도 스스로 안정될 수 있는 정도로서 이보다 약간씩 증감이 가능하다. 원뿔의 각도는 중요한데, 본 블록이 인터로킹 되면서 쌓였을 때 서로 부딪히는 각도로서, 중심선 대비 9도의 각도로 원뿔의 끝 점으로 갈수록 점점 줄어든다. 원기둥의 끝은 모따기가 되어있어 깨어짐을 방지하고 물의 분산을 돕는다.

이러한 펜타포드는 다음과 같다. 평면으로 형성되는 블록은 원뿔 하나가 인근 원뿔과 서로 지그재그로 설치되어 인터로킹 된다. 아래 그림 3.6의 예시를 보면 평면상에서 블록과 블록이 서로 맞물리면서 견고하게 결합하는 형태를 잘 보여준다.

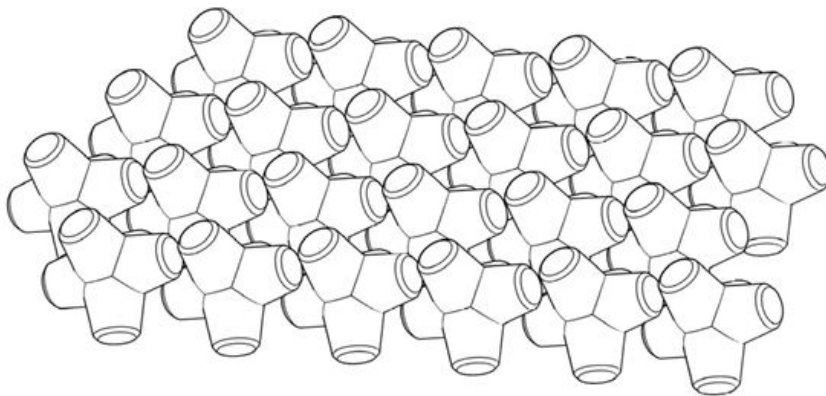


그림 3.4 펜타포드의 사시도

다음 그림 3.7의 점선이 인터로킹 연결되는 지점이다. 설치된 블록을 정면에서 바라

보면 [상하(z방향) 인터로킹]의 형태가 나타난다. D블록의 한 발을 C블록이 누르고, C블록을 B블록이 누르며, 다시 B블록을 A블록이 누르는 식으로 연속적인 인터로킹이 형성된다. 따라서 블록이 받는 부력이나 외력은 한 개가 아니라 서로 결합되는 여러 개의 블록이 받게 되므로 블록이 이탈되기 어려운 매우 견고한 평면을 형성하게 되는 것이다.

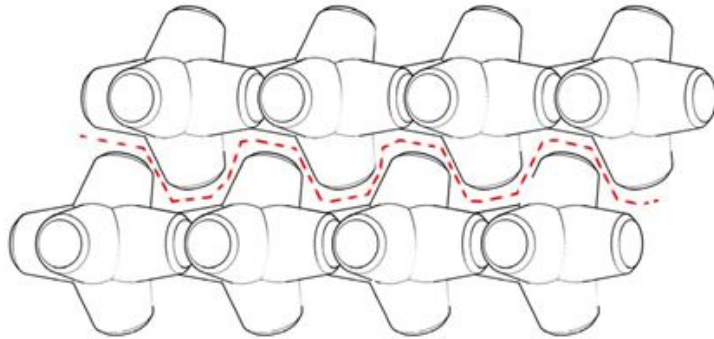


그림 3.5 평면 인터로킹 연결 지점(xy평면)

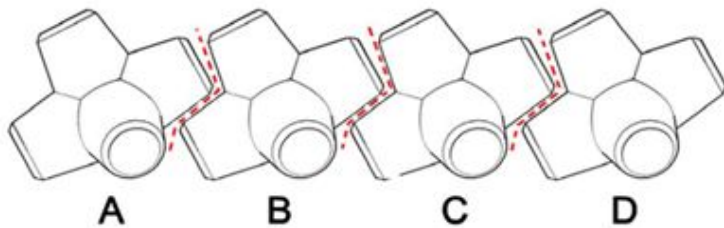


그림 3.6 상하 인터로킹 연결 지점(z방향)

기존 테트라포드는 좌우 인터로킹 효과만 있는데 반해서 본 발명은 좌우뿐만 아니라 상하 인터로킹 기능이 있다. 이것은 특히 블록이 1:1 ~ 1:1.5 정도의 경사면에 설치되는 점을 감안하면 그 효과가 더 증대된다. 즉, 테트라포드는 상하 인터로킹 기능이 없으므로 인해서 경사 각도가 커질수록 블록은 점점 더 불안정해진다.

### 나. Y블록

Y블록은 그림 3.1과 같이 4개의 발과 1개의 뿔로 이루어진 형상이다. 각 발은 완만한 경사를 가진 사각기둥으로서 하부로 경사지게 형성되어 있고, 각 모서리는 최소한 120도 이상의 모서리 각기가 되어 있어 입사하는 파랑의 방향을 바꾸어 반사를 완화시키는 기능과 함께, 충격시 콘크리트가 파편으로 깨어지는 것을 예방하고 있다. 발의 상

하두께는 서로 같으나 좌우 폭은 서로 다른데, 굽은 발과 가는 발이 서로 대칭으로 위치하고 있다. 굽은 발과 가는 발의 폭은 2:1 정도인데 이는 그림 3.3에서 보는 바와 같이 피복재를 2차원으로 배열했을 때 서로 촘촘히 맞물리게 하기 위해서이다.

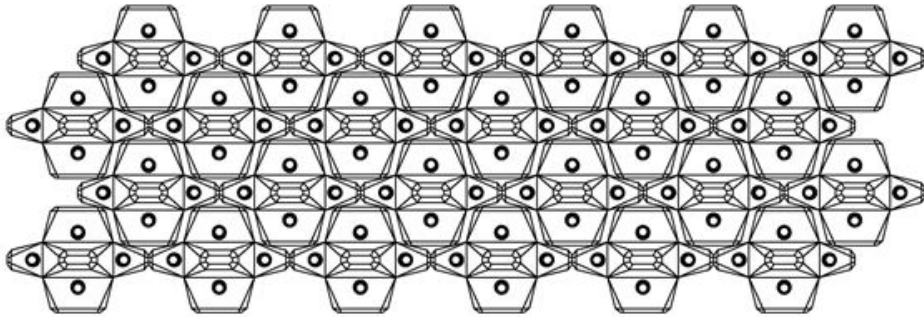


그림 3.7 2차원의 Y블록 설치 평면도

방파제의 경사면과 해저면이 만나는 지점에도 피복재를 연장 설치하여 경사면의 피복재가 미끄러지지 않도록 한다. 그림 3.4는 Y블록을 3차원 배열했을 때의 사시도로서 해저면에 설치된 피복재와 경사면에 설치된 피복재의 요철 부분이 서로 맞물리게 되어 있다. 방파제의 윗단부는 파력이 가장 강하게 도달하는 지점으로서 가장 취약한 부분인데, 이 부분 역시 경사면의 피복재와 서로 맞물리게 되어있어 정면에서 내습하는 파랑 뿐만 아니라 측면 혹은 빗면에서 내습하는 파력에 대해서도 충분히 대항할 수 있는 구조이다.

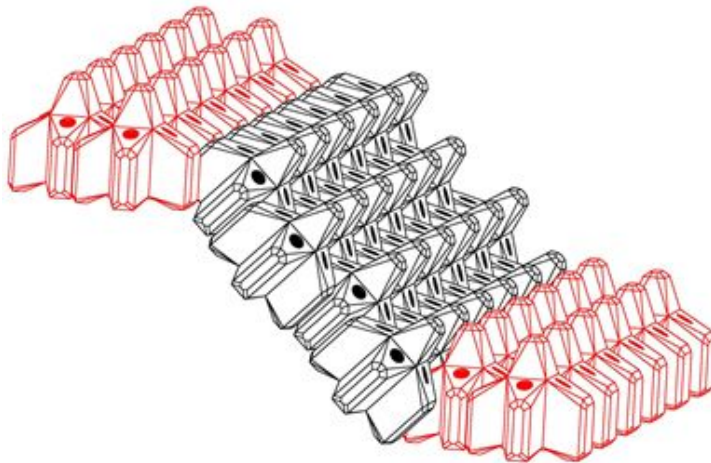


그림 3.8 3차원의 Y블록 설치 사시도

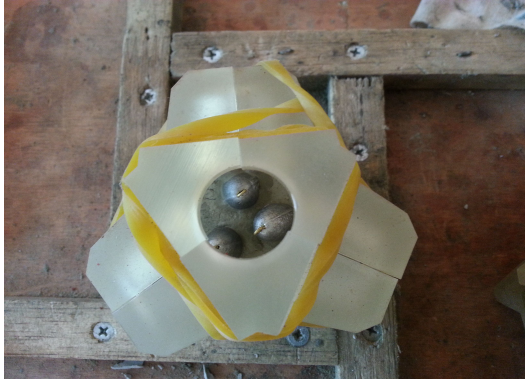
피복재의 발에는 원통형의 구멍(통수구멍)이 있다. 이 통수구멍은 파랑이 내습할 때 해수가 들고 나기를 반복하며 파력이 감소하는 중요한 기능을 갖는다. 또한, 내습한 파랑이 방파제에 부딪힌 후 되돌아갈 때(引波), 해수가 쉽게 빠져나가 피복재에 발생하는 부력을 완화하는 역할도 한다. 통수구멍의 크기는 바로 아래의 굽은 쇠석층의 쇠석이 빠져나오지 않을 정도이어야 한다. 통수구멍의 형상은 출입구가 나팔 모양으로 점차 확대되는 형상이 특징이다. 이것은 원주 모서리가 예각이 되지않도록 하여 통수를 원활하게 하고, 고속고압으로 통과하는 수압에 의해 입구 주변이 파손되는 것을 방지하기 위함이다. 비대칭 타원뿔은 형틀의 발 부분 안쪽에 상하 2개씩 총 8개가 부착되어 있으며, 타원뿔의 안 구멍에 파이프를 관통하여 설치한 후 콘크리트를 타설하면 그림과 같은 나팔형 출입구를 가진 통수구멍이 생성된다.

피복재의 4 발 위에 1개의 뿔이 있다. 이 뿔 역시 경사진 사각기둥 형상이다. 이것은 내습하는 파랑을 쇠파로 분산시켜 피복재에 가해지는 파력을 억제한다. 뿔 역시 모서리 깎기가 되어 있어 정면이나 측면 등 여러 각도에서 내습하는 파랑에 대해서도 방향을 바꾸거나 분산시키는 중요한 역할을 한다. 파도가 내습하면 처오름(Overtopping) 현상이 발생한다. 처오름이란 진입하는 파도가 방파제나 호안 등 구조물을 만났을 때 연직면 혹은 경사면을 타고 급하게 상승하는 현상으로 이로 인해 해안가에 위치한 가옥이나 구조물, 차량 또는 인명이 휩쓸리는 피해를 입게 된다. 그 이유는 처오름의 높이가 파도의 최고 높이보다 훨씬 높고, 지진해일 등이 발생하는 경우 30m에 달하기도 할 만큼 크게 상승하기 때문이다. 뿔은 파도의 처오름을 억제하는 매우 중요한 기능을 한다. 즉, 그림 3.4의 사시도에서 보는 바와 같이 경사면에 대해 직각으로 설치된 뿔은 외해를 향해 나있으므로, 내습하는 파도의 방향을 다시 외해로 되돌리는 기능을 겸비하고 있다. 또한, 전면에서 보았을 때 뿔과 뿔은 서로 교차되어 있어 일부는 외해로 반사시키고, 일부는 쇠파시키는 기능을 동시에 하게 되는 것이다.

### 3.1.2 실험용 모형

수리모형실험을 위한 각각의 피복재 모형은 거푸집에 몰탈을 타설하여 제작되었으며, 조파기의 특성을 고려하여 현장 제원의 1/50 축척 모형을 제작하였다. 모형제작은 시멘트가루(375g), 물(135ml)을 혼합 후 몰탈을 모형거푸집에 60%를 채우고 진동한 후 17g중량 크기의 납 3개와 시멘트(310g), 물(112ml)을 혼합한 몰탈을 나머지 모형거푸집에 40% 채우고 약 3분 ~ 4분 온도 22도에서 양생하여 제작하였다. 일주일 후 수

증포화상태에서의 중량의 평균치는 200g이었으며, 표 3.1에 제시한 바와 같이 이를 현  
 장 조건으로 환산하면 약 25톤에 해당한다. 제작된 피복재의 수증포화상태에서의 비중  
 은 2.25로 계산되었으며, 제작된 피복재는 표면 마찰을 줄이기 위하여 페인트로 칠하였  
 다. 모형의 거푸집은 그림 3.9과 같다. 제작이 완료된 모형을 그림 3.10에 제시하였다.



(a) 펜타포드



(b) Y블록

그림 3.9 모형의 거푸집



(a) 펜타포드



(b) Y블록

그림 3.10 피복재 모형



표 3.1 피복재의 규격

구 분	원 형(prototype)	모 형(model)	비 고
펜타포드의 무게	25ton	200g	
Y블록의 무게	25ton	200g	

### 3.2 실험장치 및 실험방법

펜타포드 및 Y블록의 성능 및 안정성을 검토하기 위하여 각각의 모형으로 축조된 방파제를 만들고 파동 실험을 실시하였다. 실험은 조파기를 제어하여 스펙트럼의 형태를 다양하게 재현할 수 있는 WS(Wave Synthesizer)를 사용하여 목적 스펙트럼과 일치 할 수 있도록 조파를 제어한 후 모형 방파제의 피해계수 및 반사특성을 검토하는 방식으로 진행하였다.

실험에 사용된 수로는 길이 30m, 너비 7m, 깊이 1.5m이다. 조파수로는 조파기 후면과 수로말단부에 경사식 소파장치 시설을 갖추고 있다. 조파기에는 피스톤 형으로 서보 모터 구동 방식이며 조파판에는 파도 게이지가 설치되어 있어 직립구조물의 반사파를 흡수하는 기능을 갖고 있다.

본 시스템은 위치 제어 및 반사파 흡수 방식으로 사용할 수 있으며 연산 프로그램에서 제어한다. 조파 장치의 운전은 컴퓨터 프로그램에 의해 작성된 목적 스펙트럼을 제어판에 전송하고 컴퓨터에서 시작 및 정지를 가능하게 한다. 흡수 센서에 의해 반사파를 계산, 제어장치에서 연산 제어하여 반사파 영향을 최소화한다. 반사파 흡수 시스템은 방파제로부터 반사되어 조파판에 도달한 반사파를 조파판 전면부에 부착된 파고계가 감지하여 조파판의 움직임을 계속적으로 보정하여 주어 조파판에서 재반사를 억제시켜 다중반사에 의한 수조내의 에너지 누적현상을 저감시켜 장시간 불규칙파 발생을 가능하게 하고 있다.

표 3.2 수로 및 조파기 제원

구 분	제 원
수로 크기	길이 30m, 너비 7m, 깊이 1.5m
조파판의 크기	7.0(W)m × 1.4(H)m App.
최대 수심	1.0m
최대 파고	0.3m
주기	0.5 ~ 5sec
구동 방식	AC Servo Motor 구동 방식
제어 방식	Computer에 의한 반사파 흡수식 Program 제어
조파 형식	Piston Type Regular & Irregular

또한, 실험에 사용된 장치는 파고계, 컴퓨터, 캠코더, TV 및 카메라 등을 이용하였다. 파고계는 입사파 평가, 반사계수 분석을 위하여 길이 80cm의 용량식 파고계 3개를 사용하였다. 캠코더 및 카메라를 사용하여 실험과정을 모니터링하고, 촬영된 영상을 가지고 결과 분석에 사용하였다. 다음 그림 3.11 ~ 3.13에서 수리모형실험 과정과 사용된 조파기 및 협수로 사진으로 나타내었다.



그림 3.11 조파기 사진



그림 3.12 협수로 설치





그림 3.13 수리모형실험 촬영 과정

### 3.3 실험조건

#### 3.3.1 조파 조건

조파기 작동방법에 의거 조파를 수행하고 이에 따라 파고를 계측한다. 제어방식은 AWACS(Active Wave Absorber Control System)를 가동하여 반사파의 영향을 저감시킨 상태에서 단면안정실험을 수행하였다. 스펙트럼의 형태를 다양하게 재현할 수 있는 WS(Wave Synthesizer)를 통하여 Bretschneider-Mitsuyasu Type의 스펙트럼을 재현하고 펜타포드 및 Y블록에 대한 파고를 계측하였다. 파랑에너지 밀도를 구하는 방법은 식 (3.1)과 같다.

$$S(f) = 0.205H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f^{-5} \exp[-0.75(T_{1/3}f)^{-4}] \quad (3.1)$$

여기서  $S(f)$  : 파랑에너지 밀도,  $f$  : 주파수,  $H_{1/3}$  및  $T_{1/3}$  : 각각 유의파고 및 유의파 주기를 나타낸다. 특히 설계파랑을 재현하기 위하여 조파기의 stroke을 서서히 증가시켜 파고를 서서히 높이면서 파랑 초기조건을 재현하였다. 일반적으로 작은 파랑은 쇄파가 발생치 않아 스펙트럼이 잘 재현되나, 파랑이 큰 경우 수심의 영향으로 쇄파가 발생하기 때문에 파고조건에 일치하는 스펙트럼을 재현할 수가 없다.

따라서 실제 스펙트럼과 목적 스펙트럼이 서로 일치할 때까지 반복해서 조파제어를 보정하였다. 파랑 통계분석에서 파고 읽는 방법은 Zero-Up-Cross방법을 사용하였고, 파랑은 Bretschneider-Mitsuyasu Type으로 발생시켰다. 조파제어 과정은 다음 그림 3.14와 같다.

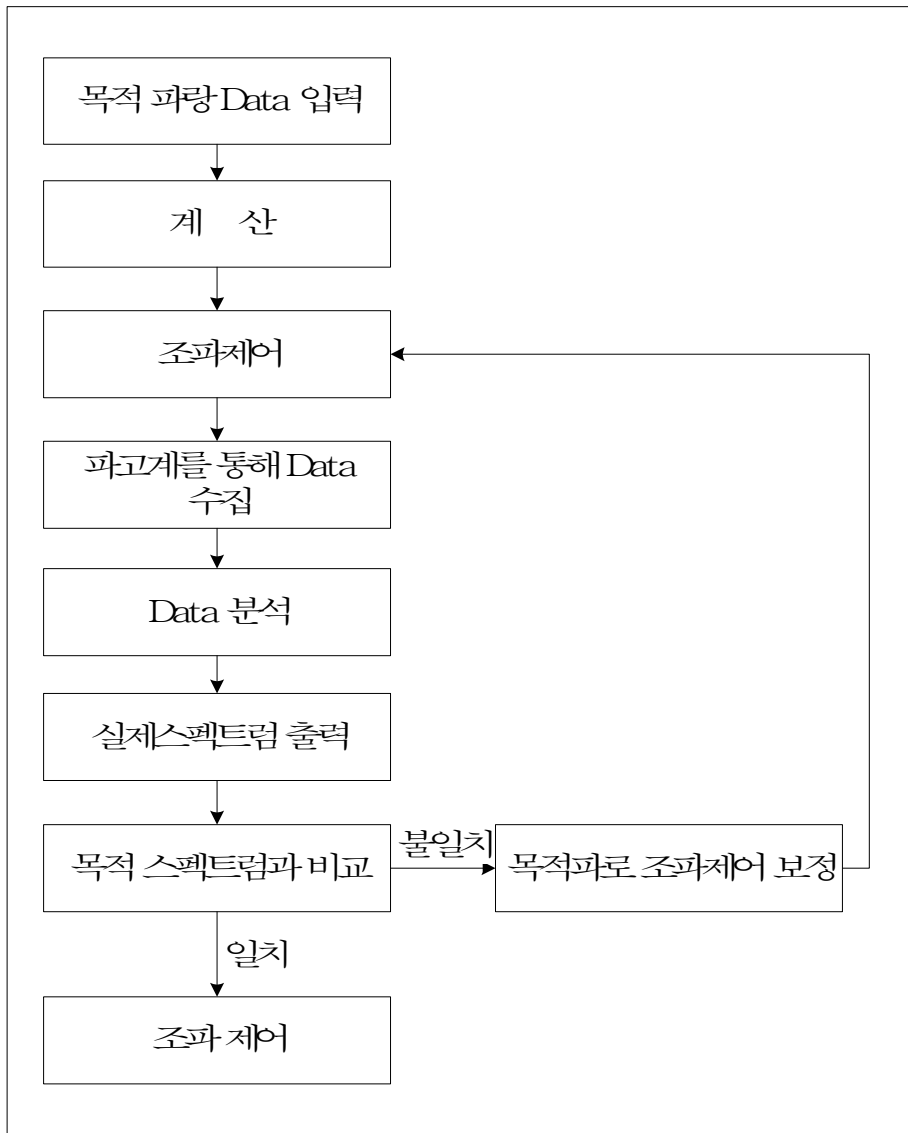


그림 3.14 파 제어 흐름도

### 3.3.2 실험파랑

펜타포드 및 Y블록 모형으로 축조된 방파제의 사면 안정성을 검토하기 위하여 표 3.3과 같이 현장 조건으로 현 해역의 파 주기가 7초, 10초, 14초이고, 유의파고는 2m에서 7m까지 변화하도록 실험파를 결정하였다. 이를 실험수조 및 모형블록의 축척인 1/50로 환산하면 파동의 주기는 각각 0.99초, 1.41초, 1.98초가 된다. 또한 실험 파고는 4 ~ 14cm에 해당한다.

표 3.3 수리실험 조건

구 분	유의파 주기(sec)			유의파고(cm)					
축척을 고려한 파 (실험실)	0.99초	1.41초	1.98초	4cm	6cm	8cm	10cm	12cm	14cm
실제파 (현장)	7초	10초	14초	2m	3m	4m	5m	6m	7m

실험파의 조파 시간은 26분이었고, 조파 후 1분이 경과한 후 25분간의 자료를 수집하였다. 이것은 현장 조건으로는 파의 작용이 3시간 정도 지속됨을 의미한다. 표 3.3에 제시된 실험파를 조파하기 전에 현장에서 2m에 해당하는 파를 동일한 조파 시간 동안 2회 반복 조파하여 사면에 설치된 피복재가 어느 정도 맞물릴 수 있도록 하였다. 이러한 맞물림 과정을 거치지 않고 실험파를 조파할 경우 사면 파괴가 갑작스럽게 발생할 수 있다.

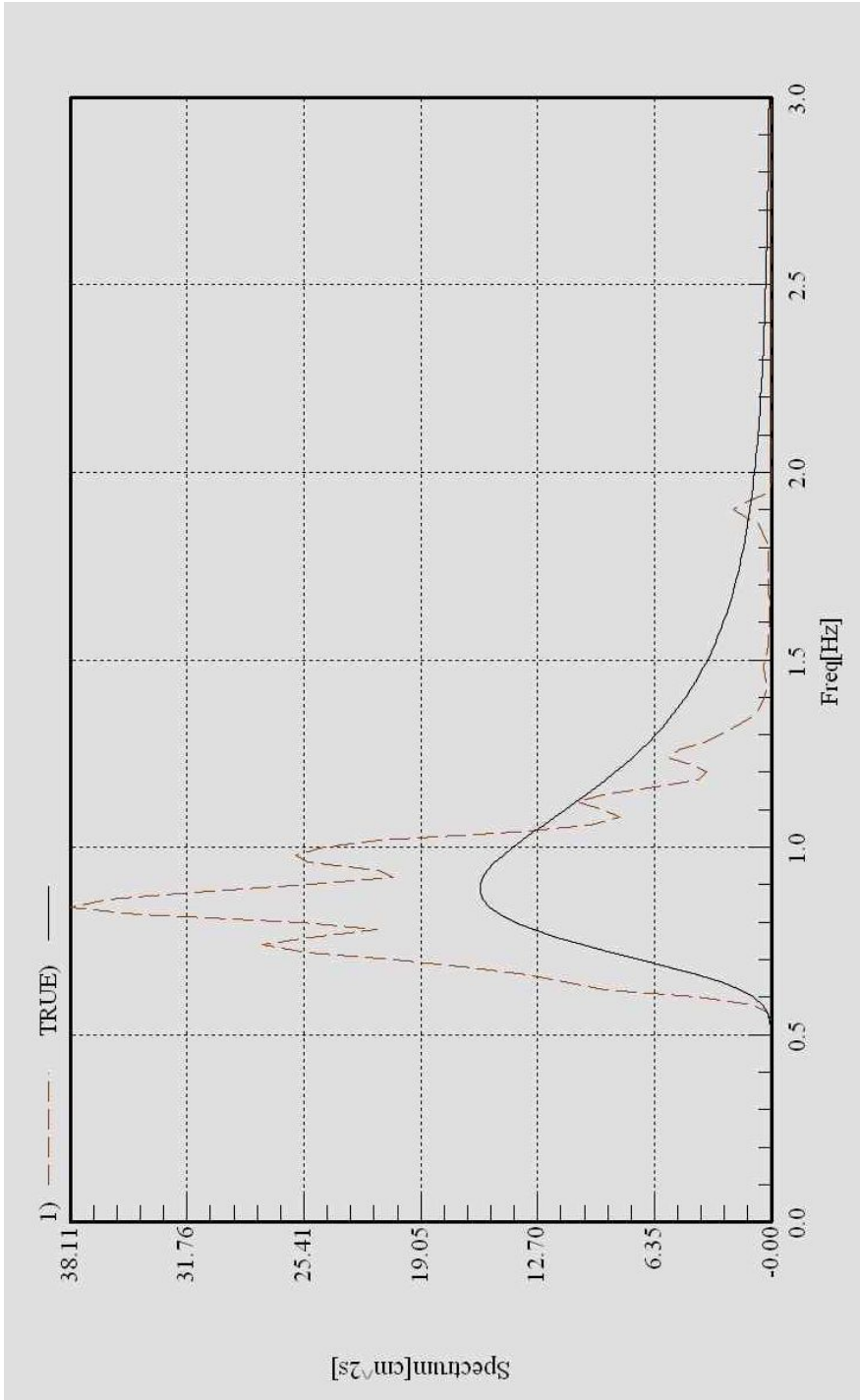
한편, 실험 수위는 현장에 시공되는 방파제를 고려하여 Y블록 모형으로 피복된 방파제 전면에서 60cm로 하였다. 본 실험에서 Y블록이 현장의 1/50 축척으로 제작된 점을 고려하면 현장의 수심은 30m에 해당된다.

## 제 4 장 수리모형 실험결과 및 분석

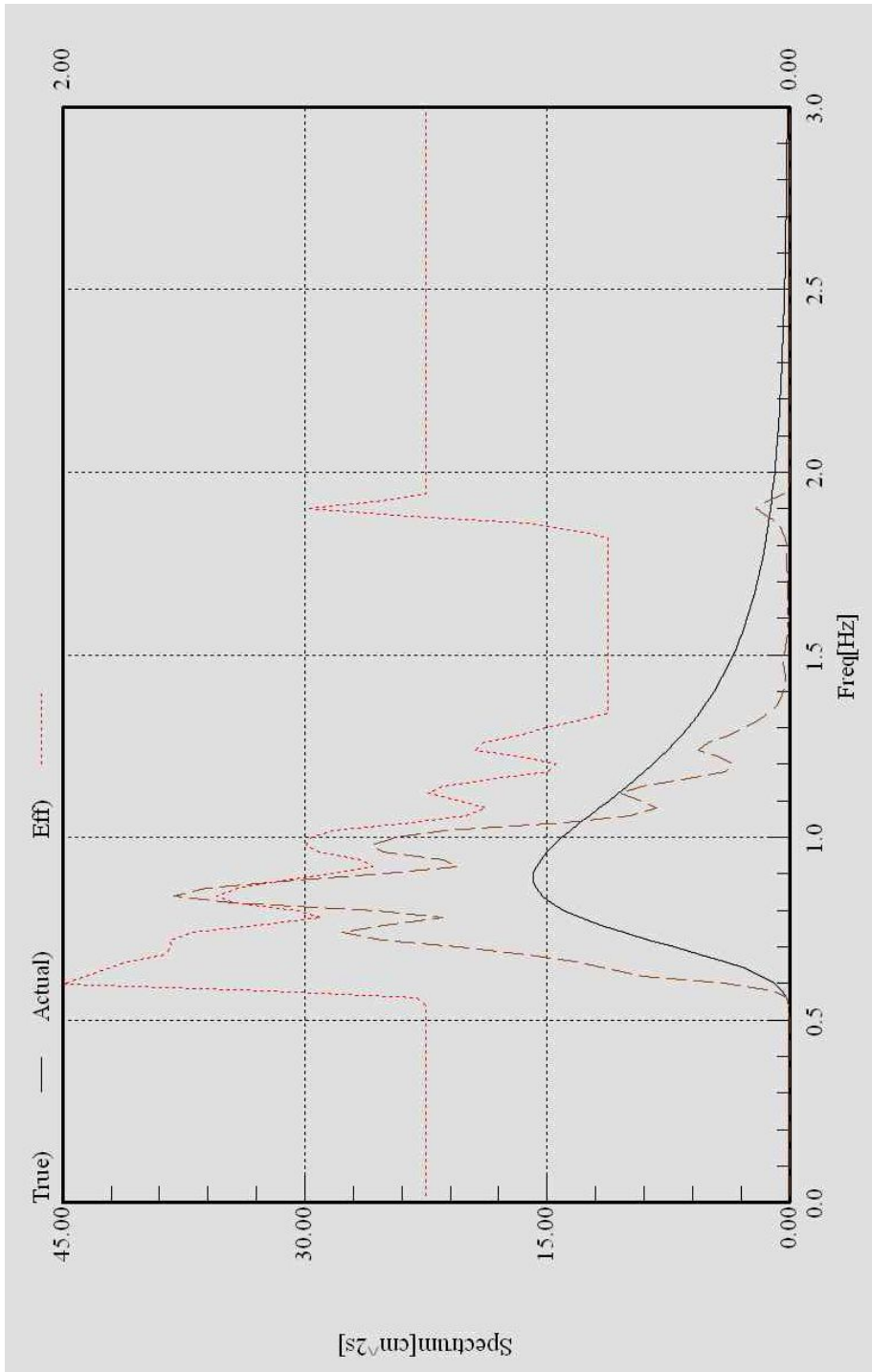
### 4.1 스펙트럼 발생과 수렴

#### 4.1.1 펜타포드 경사제

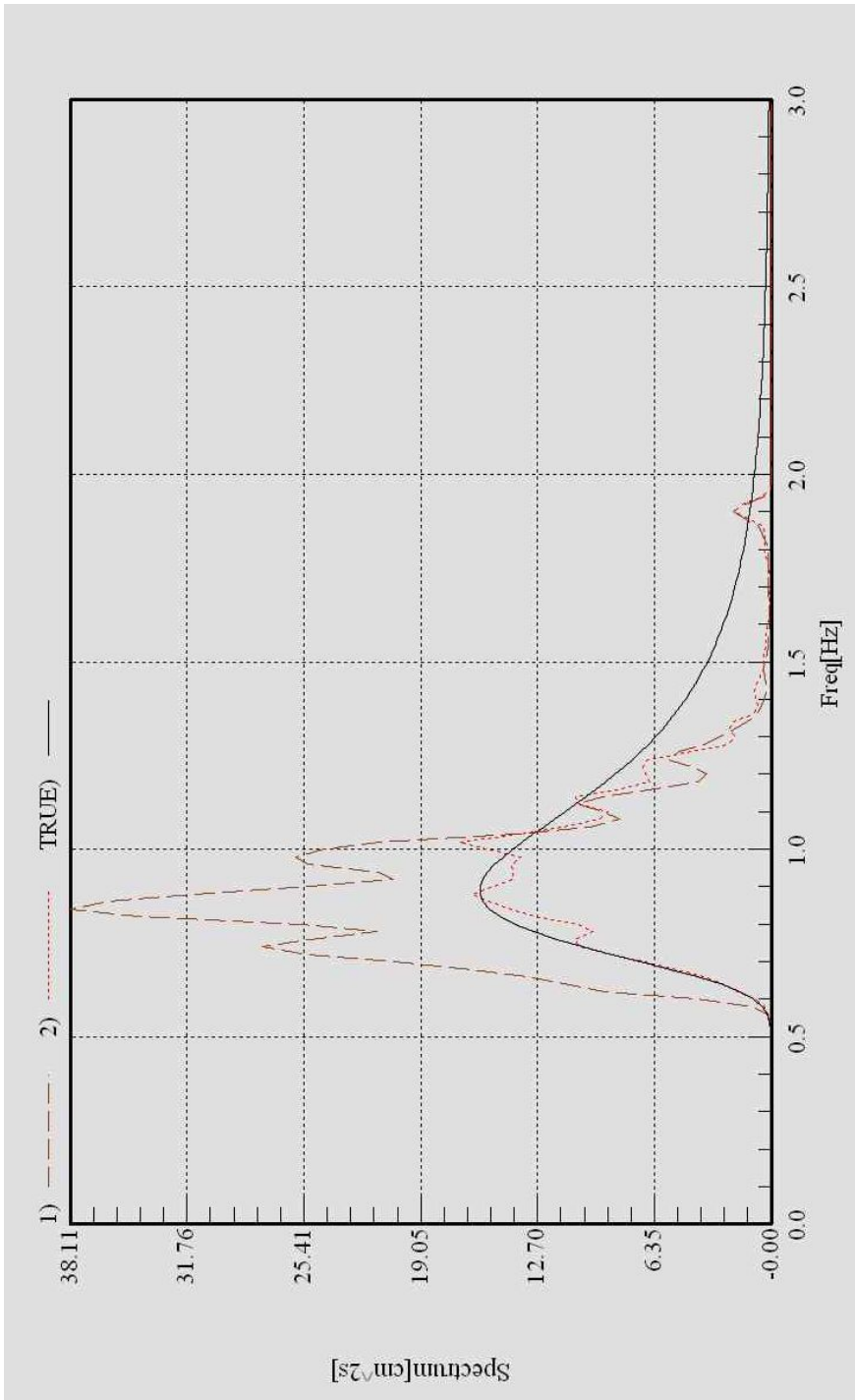
펜타포드 모형으로 축조된 방파제의 사면 안정성을 검토하기 위하여 Y블록과 같이 실험과 주기 0.99 ~ 1.98초, 실험과고 4 ~ 14cm까지 변화를 주면서 실험을 실시하였다. 그림 4.1의 (a)부터 (d)는 이중에서 실험과동 주기 0.99초, 실험과고 12cm일 때 목적파와 발생파의 스펙트럼을 일치시키는 과정을 보여주고 있다. 실선(True)은 조파장치에서 발생시켜야하는 목적파 스펙트럼을 나타내고 점선은 입력해준 유의파고와 유의과 주기를 이용하여 조파장치에서 발생시킨 후 불규칙파의 발생 스펙트럼을 나타낸다. 수렴 과정은 4차에 의하여 수정을 반복하여 수행하여 목적 스펙트럼과 발생 스펙트럼이 매우 유사하게 발생되었고 또한 그래프도 목적 스펙트럼과 발생 스펙트럼이 비슷하게 나타났으므로 발생한 불규칙 파는 주어진 유의 파고와 유의과 주기에 맞게 잘 재현되었다고 할 수 있다.



(a) 1차 수렴

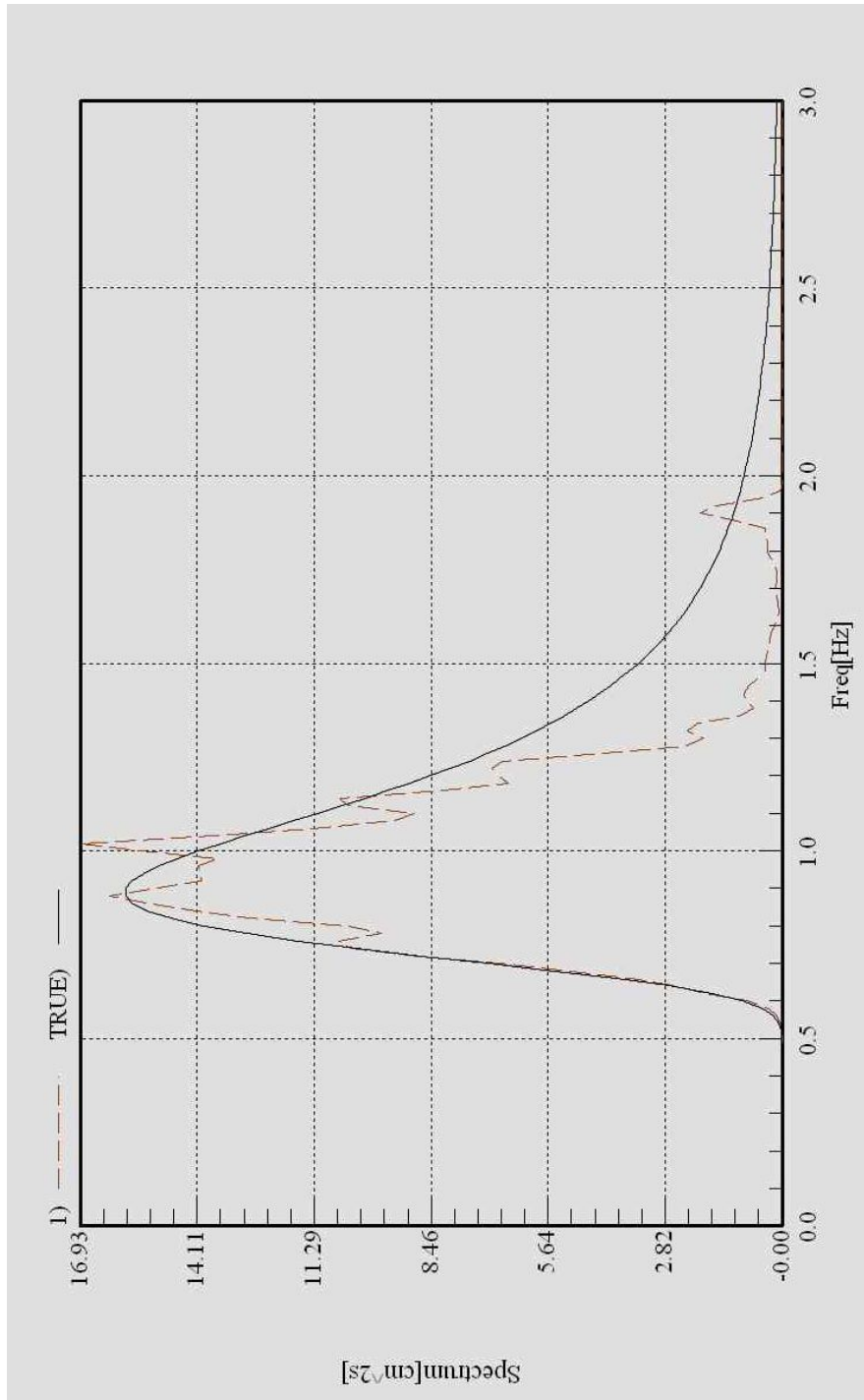


(b) 2차 수렴



(c) 3차 수렴



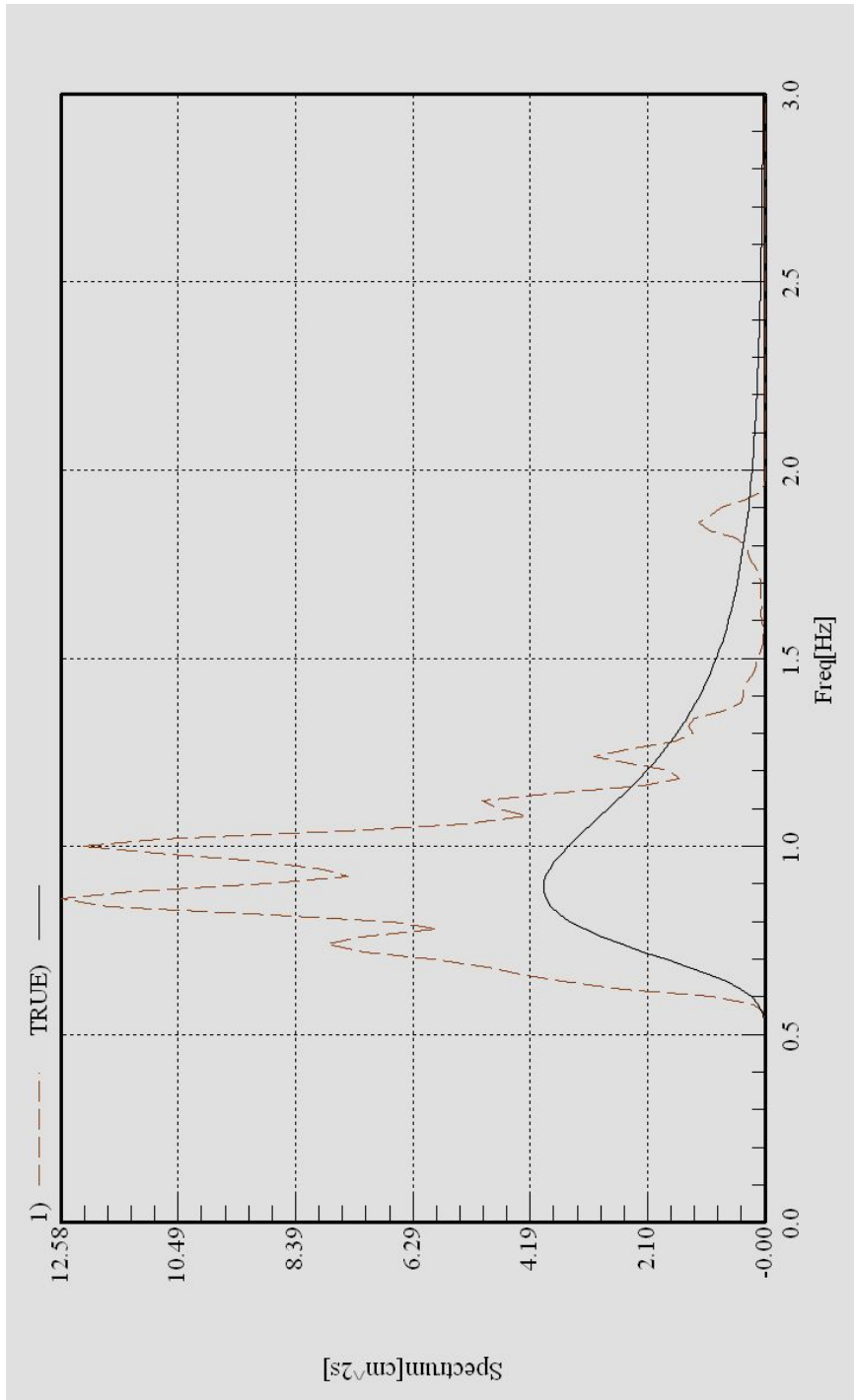


(d) 4차 수렴

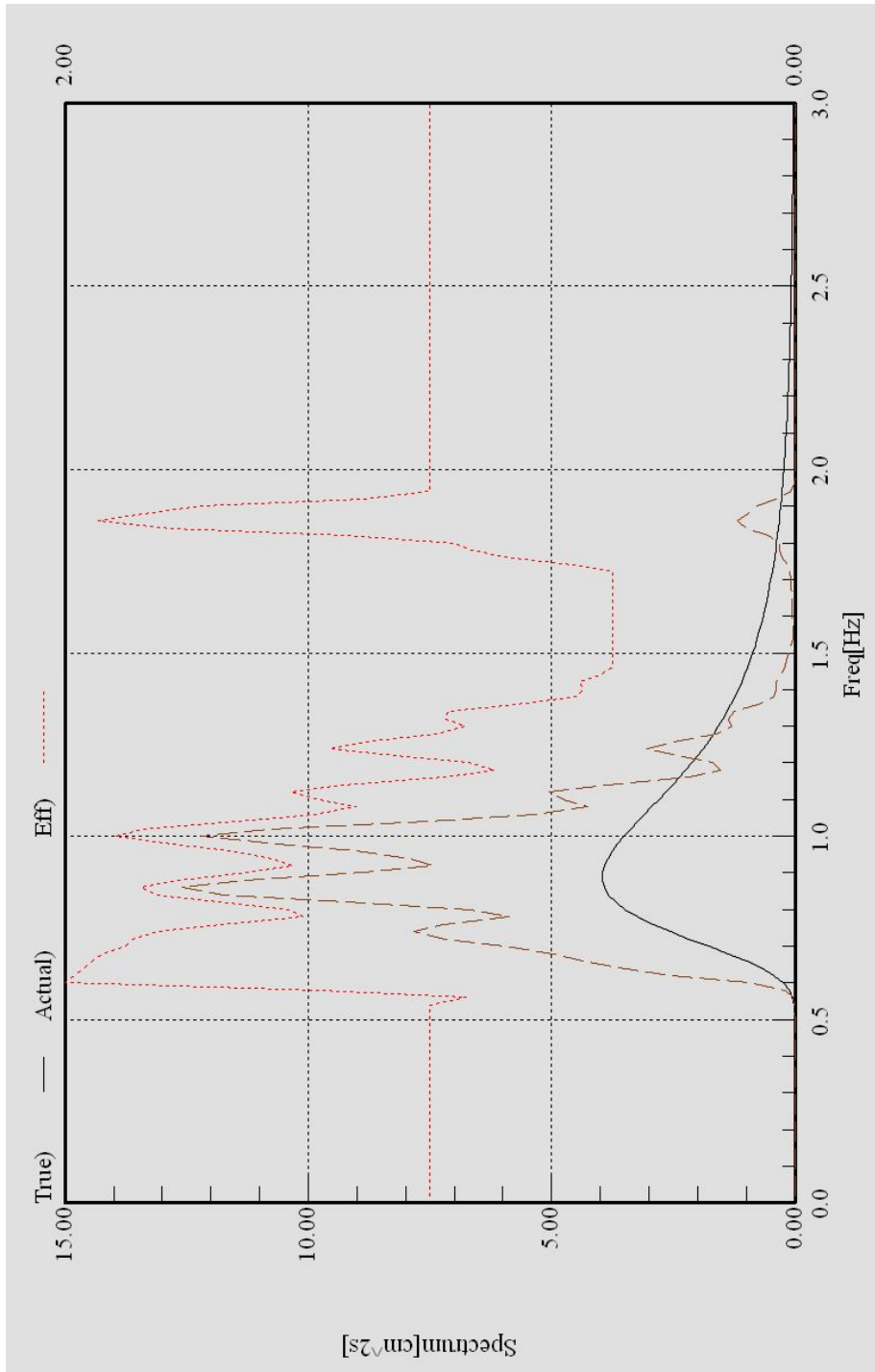
그림 4.1 펜타포드 실험에서 스펙트럼 수렴과정

## 4.1.2 Y블록 경사제

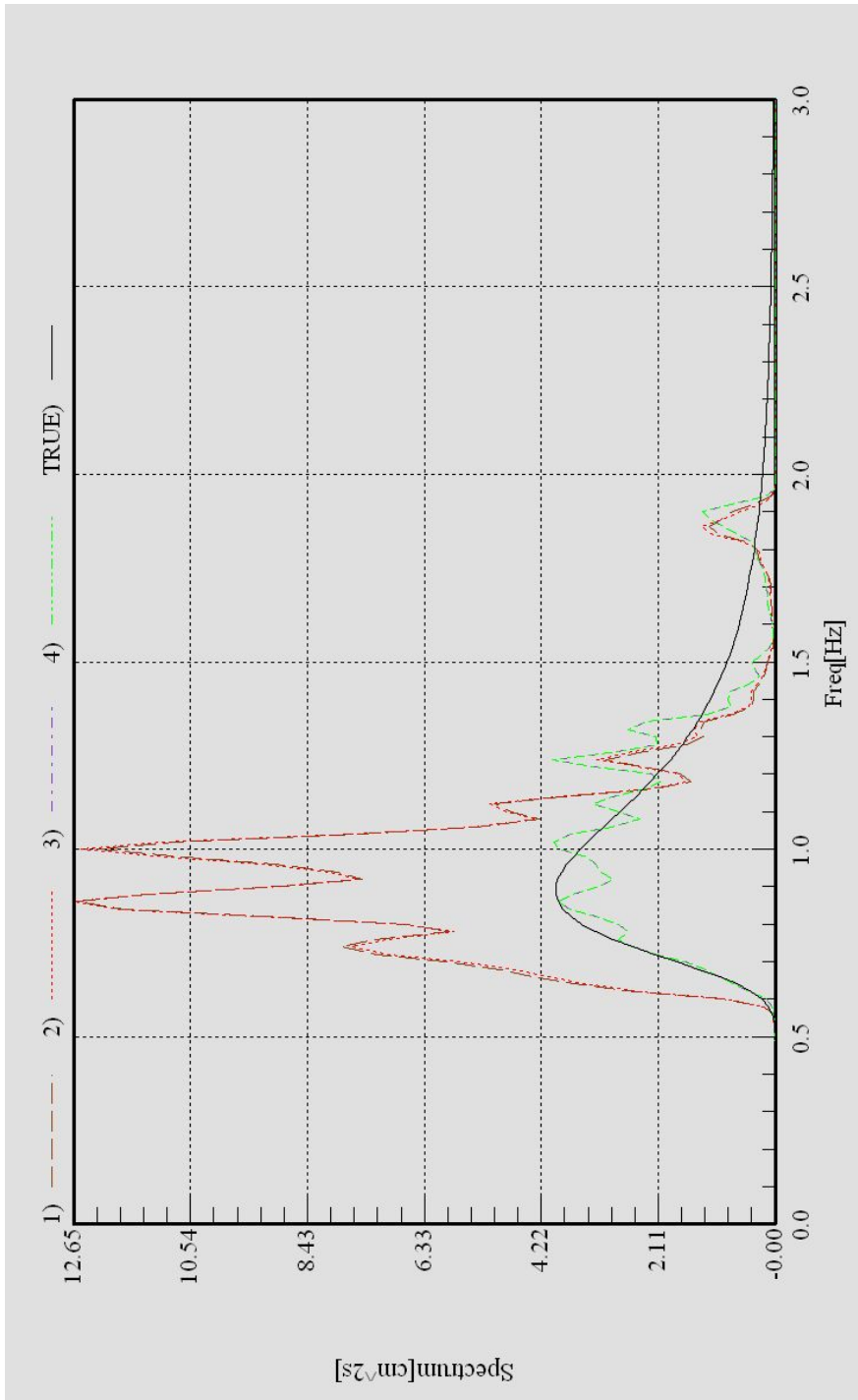
Y블록 모형으로 축조된 방파제의 사면 안정성을 검토하기 위하여 표 3.3과 같은 조건으로 실험을 실시하였는데 파의 주기는 0.99초, 1.41초, 1.98초의 세가지로 변화를 주었고, 실험파고는 4 ~ 14cm까지 2cm씩 증가시키면서 변화를 주었다. 그림 4.2의 (a)에서 (d)는 위의 실험 중에서 실험파동 주기 0.99초, 실험파고 6cm일 때 목적파와 발생파의 스펙트럼을 일치시키는 과정을 보여주고 있다. 실선은 조파장치에서 발생시킨 목적파 스펙트럼을 나타내고 있으며 점선은 입력해준 유의파고와 유의파 주기를 이용하여 조파장치에서 발생시킨 후 불규칙파의 발생 스펙트럼을 나타내고 있다. 4차례의 수정 반복을 통하여 목적 스펙트럼과 발생 스펙트럼이 비슷하게 나타났으며, 발생한 불규칙파는 주어진 유의 파고와 유의파 주기에 맞게 잘 재현되었다고 할 수 있다.



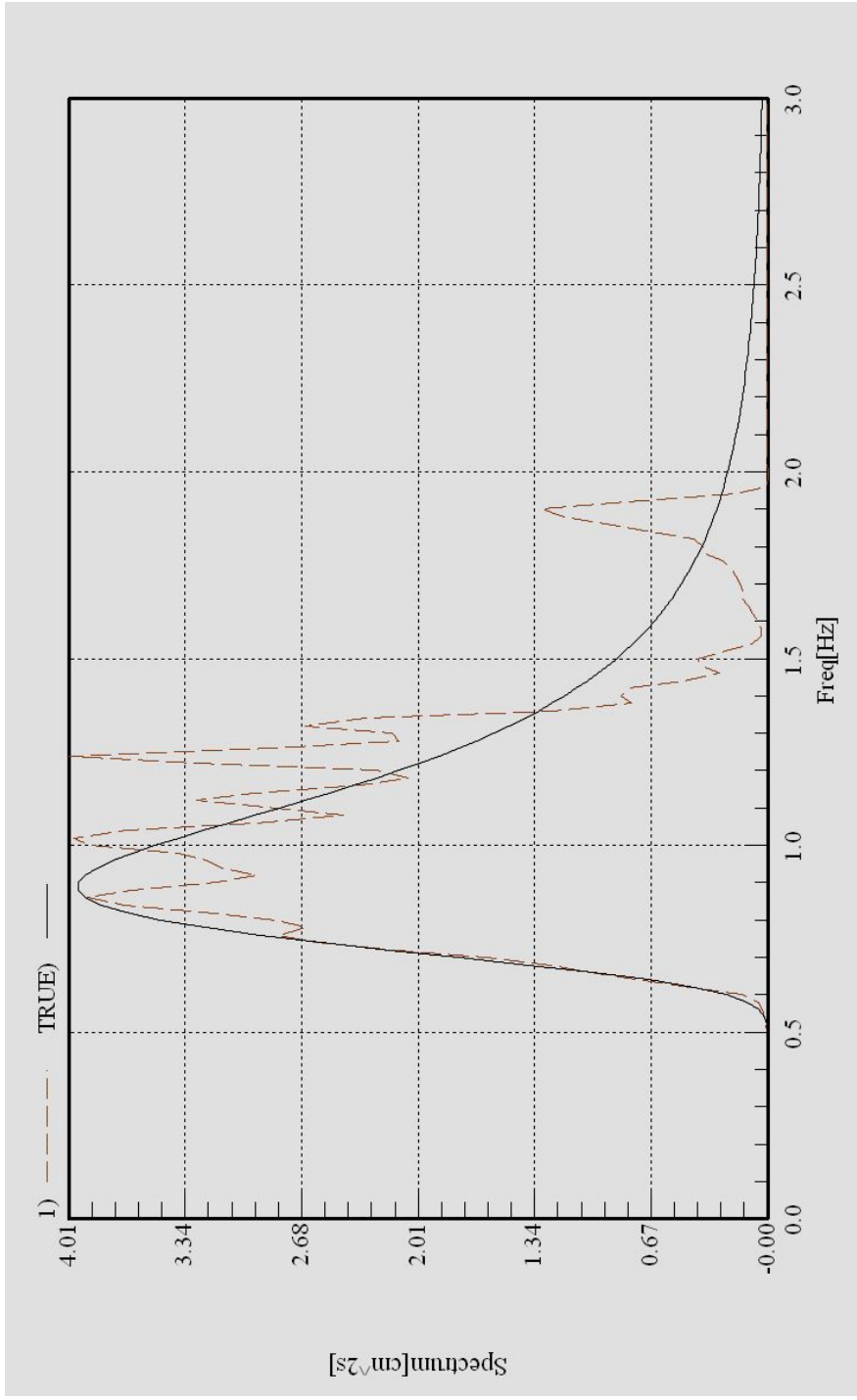
(a) 1차 수렴



(b) 2차 수렴



(c) 3차 수렴



(d) 4차 수렴

그림 4.2 Y블록 실험에서 스펙트럼 수렴과정

## 4.2 피해량 및 피해계수 분석

수리모형실험에서는 피복층의 이동과 미끄러짐을 정량적으로 평가하기 위하여 Y블록의 피복 모형에 노랑, 회색, 파랑, 녹색의 네 종류의 페인트를 칠하였다. 윗면에서부터 색깔별로 6개의 층으로 구분하여 모형을 설치하였으며, 펜타포드는 청색, 녹색, 회색, 노랑, 청색으로 하여 5개의 층으로 구분하여 모형을 설치하였다. 그 후 실험과를 26분간 조파하였을 때 피복층이 사면을 따라 이동과 미끄러져 내려간 거리를 측정하였다.

주기가 0.99초, 1.41초, 1.98초이고, 파고는 4 ~ 14cm까지 변화 하도록 실험과를 발생시키고 실험을 진행하였는데 모든 조건에서 펜타포드 및 Y블록의 이탈이 발생하지 않아 안정하였다. 실험 결과 중 유의파 주기1.98초일 때 펜타포드 및 Y블록의 실험결과를 유의 파고별로 정리하여 다음 표 4.1, 4.3에 예시하였다. 각 조건별로 실시한 수리모형실험의 실측 사진을 표 4.2, 4.4에 표시하였는데 실험 전후에 블록의 이탈이나 전복, 파손이 없었다.

표 4.1 펜타포드의 안정성실험결과 예시(유의과 주기 1.98초)

유의과고 (cm)	유의과 주기 (sec)	구 분	윗면에서 1블록 (청색)	윗면에서 2블록 (녹색)	윗면에서 3블록 (회색)	윗면에서 4블록 (노랑)	윗면에서 5블록 (청색)	피해 계수
		갯수	9줄88개	9줄92개	9줄94개	9줄94개	9줄90개	
4	1.98	최대이동 거리( cm)	-	-	-	-	-	0
		평균이동 거리( cm)	-	-	-	-	-	
6	1.98	최대이동 거리( cm)	-	-	-	-	-	0
		평균이동 거리( cm)	-	-	-	-	-	
8	1.98	최대이동 거리( cm)	-	-	-	-	-	0
		평균이동 거리( cm)	-	-	-	-	-	
10	1.98	최대이동 거리( cm)	-	-	-	-	-	0
		평균이동 거리( cm)	-	-	-	-	-	
12	1.98	최대이동 거리( cm)	-	-	-	-	-	0
		평균이동 거리( cm)	-	-	-	-	-	
14	1.98	최대이동 거리( cm)	-	-	-	-	-	0
		평균이동 거리( cm)	-	-	-	-	-	



표 4.2 펜타포드의 안정성실험사진 예시(유의과 주기 1.98초)

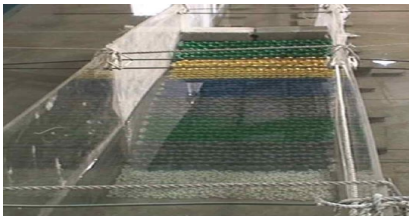
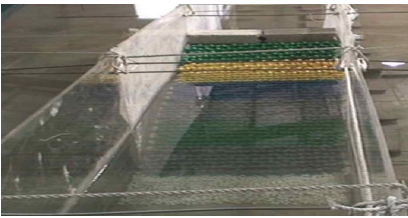
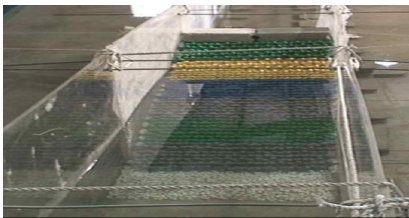
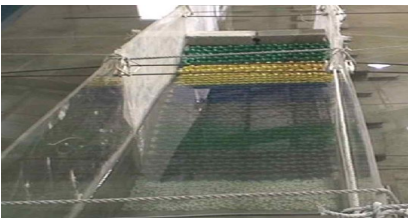
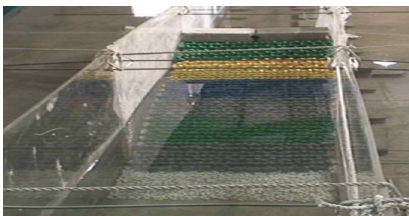
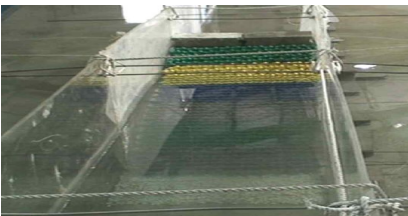
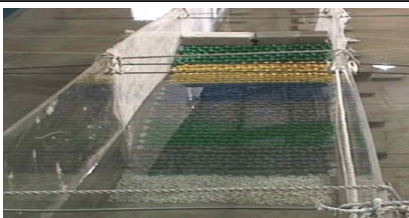
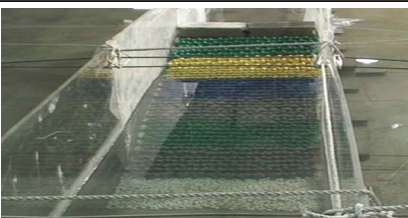
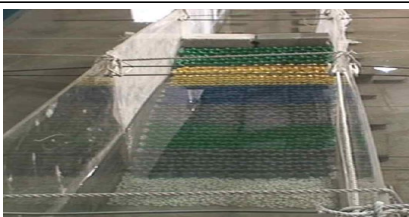
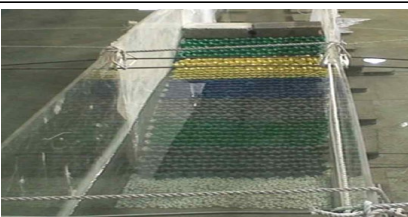

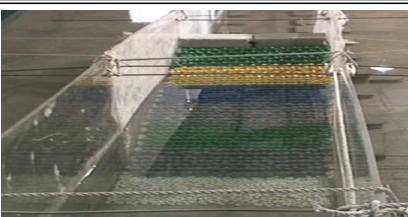
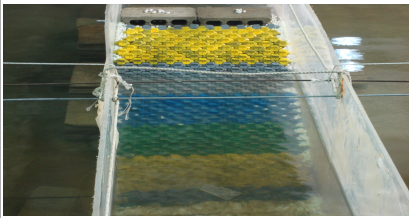
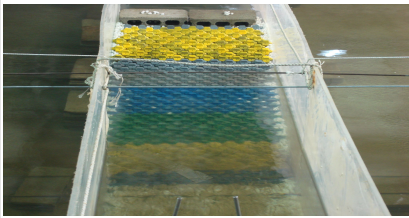
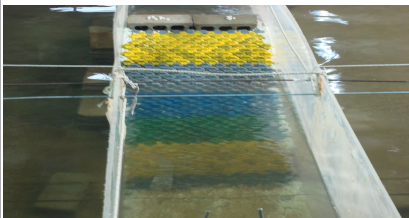
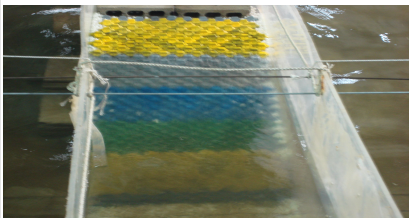
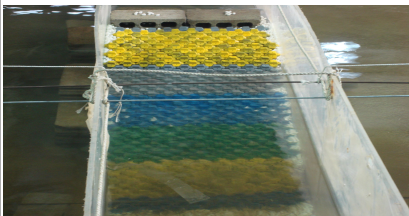
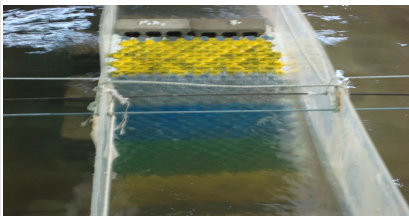
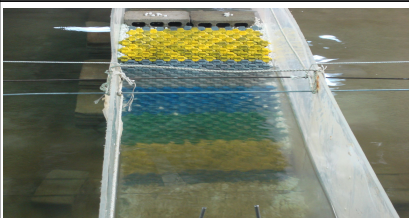

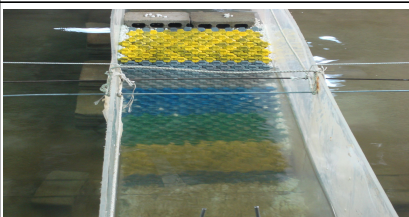
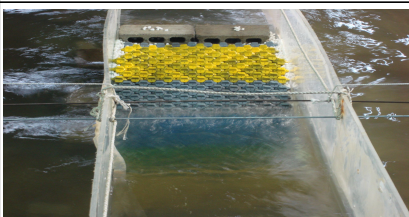
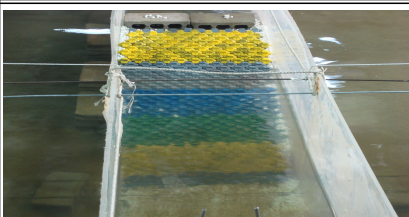
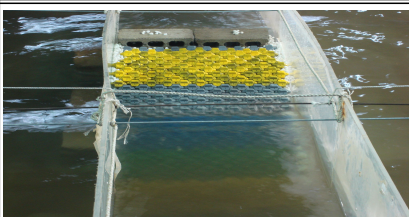
유의과고 (cm)	유의과 주기 (sec)	유의과고	실험전 사진	실험직후 사진
4	1.98	4cm		
6	1.98	6cm		
8	1.98	8cm		
10	1.98	10cm		
12	1.98	12cm		
14	1.98	14cm		

표 4.3 Y블록의 안정성실험결과 예시(유의파 주기 1.98초)

유의파고 (cm)	유의파 주기 (sec)	구 분	윗면에서	윗면에서	윗면에서	윗면에서	윗면에서	윗면에서	피해 계수	
			1블록 (노랑)	2블록 (회색)	3블록 (파랑)	4블록 (녹색)	5블록 (노랑)	6블록 (파랑)		
		갯수	9줄89개	9줄94개	9줄95개	9줄94개	9줄90개	9줄40개		
4	1.98	최대이동 거리( cm)	-	-	-	-	-	-	0	
		평균이동 거리( cm)	-	-	-	-	-	-		
6	1.98	최대이동 거리( cm)	-	-	-	-	-	-	0	
		평균이동 거리( cm)	-	-	-	-	-	-		
8	1.98	최대이동 거리( cm)	-	-	-	-	-	-	0	
		평균이동 거리( cm)	-	-	-	-	-	-		
10	1.98	최대이동 거리( cm)	-	-	-	-	-	-	0	
		평균이동 거리( cm)	-	-	-	-	-	-		
12	1.98	최대이동 거리( cm)	-	-	-	-	-	-	0	
		평균이동 거리( cm)	-	-	-	-	-	-		
14	1.98	최대이동 거리( cm)	-	-	-	-	-	-	0	
		평균이동 거리( cm)	-	-	-	-	-	-		

표 4.4 Y블록의 안정성실험사진 예시(유의파 주기 1.98초)

유의파고 (cm)	유의파 주기 (sec)	유의파고	실험전 사진	실험직후 사진
4	1.98	4cm		
6	1.98	6cm		
8	1.98	8cm		
10	1.98	10cm		
12	1.98	12cm		
14	1.98	14cm		

## 4.3 반사율 측정

### 4.3.1 펜타포드 경사제

유의파 주기 7, 10, 14초에서 유의파고별 반사율 실험결과 유의파주기 7초에서 0.551에서 0.853값을 나타냈고, 평균은 0.63로 나타났으며, 파고가 증가하면 반사율은 감소하는 경향이 나타났다. 유의파 주기 10초에서 유의파고별 반사율 실험결과 유의파 주기 10초에서 0.554에서 0.685값이 나타났고, 평균은 0.61로 나타났다. 유의파 주기 14초에서 유의파고별 반사율 실험결과 유의파주기 14초에서 0.489에서 0.561값을 나타냈고, 평균은 0.540로 나타났다.

유의파 주기 7, 10, 14초에서 유의파고별 반사율 실험결과 유의파주기 7초에서 평균은 0.630, 10초에서 평균은 0.610, 14초에서 평균은 0.540로 나타났으며, 주기가 증가하면 반사율은 감소하는 경향이 나타났다. 반사계수는 파고변화에는 차이가 적고 주기변화에 따라 변하지만 단주기보다 장주기에서 크게 나타나는 경향이 있었다. 주기가 길어짐에 따라 파의 처오름높이가 증가하는 경향이 나타났다.

표 4.5 펜타포드의 유의 파고별 반사율 실험 결과

유의파 주기 (sec)	유 의 파 고 (cm)							비 고
	4	6	8	10	12	14	평균	
0.99	0.853	0.640	0.657	0.562	0.544	0.551	0.630	
1.41	0.581	0.648	0.685	0.657	0.560	0.554	0.610	
1.98	0.561	0.554	0.543	0.549	0.528	0.489	0.540	



### 4.3.2 Y블록 경사제

반사율은 앞의 반사율 계산 방법과 같이 1점법, 2점법 등 여러 가지가 있으며, 실험에서는 자형변화를 자동으로 측정하여 1점법에 의한 반사율을 제공하고 있다. 유의파 주기 7, 10, 14초에서 유의파고별 반사율 실험 결과 유의파 주기에서 0.551에서 0.853값을 나타냈고, 평균은 0.63로 나타났다. 파고가 증가하면 반사율은 감소하는 경향이 나타났다. 유의파 주기 10초에서 유의파고별 반사율 실험결과 유의파 주기 10초에서 0.554에서 0.685값이 나타났고, 평균은 0.61로 나타났다. 유의파 주기 14초에서 유의파고별 반사율 실험결과 유의파주기 14초에서 0.513에서 0.559값을 나타냈고, 평균은 0.530로 나타났다.

유의파 주기 7, 10, 14초에서 유의파고별 반사율 실험결과 유의파주기 7초에서 평균은 0.630, 10초에서 평균은 0.610, 14초에서 평균은 0.530로 나타났으며, 주기가 증가하면 반사율은 감소하는 경향을 나타냈다. 반사계수는 파고변화에는 차이가 적고 주기변화에 따라 변하지만 단주기보다 장주기에서 크게 나타나는 경향이 있었다. 주기가 길어짐에 따라 파의 처오름높이가 증가하는 경향이 나타났다.

**표 4.6 Y블록의 유의 파고별 반사율 실험 결과**

유의파 주기 (sec)	유 의 파 고 (cm)							비 고
	4	6	8	10	12	14	평균	
0.99	0.853	0.640	0.657	0.562	0.544	0.551	0.630	
1.41	0.581	0.648	0.685	0.657	0.560	0.554	0.610	
1.98	0.559	0.555	0.536	0.527	0.518	0.513	0.530	

## 제 5 장 CADMAS-SURF를 이용한 수치해석

### 5.1 입력자료 및 매개변수 값

#### 5.1.1 적용단면

CADMAS SURF에 적용하는 수로는 총 15m로서 높이는 1m이며, 방파제의 경사는 1 : 1.5의 구배를 주었다. 구조물의 높이는 80cm, 수로에서의 수심은 60cm이며, 경사제 방파제의 뒷부분은 삭제를 하였다. 다음 그림은 경사제 방파제의 CADMAS-SURF에 적용하는 수로의 단면도를 나타낸 것이다.

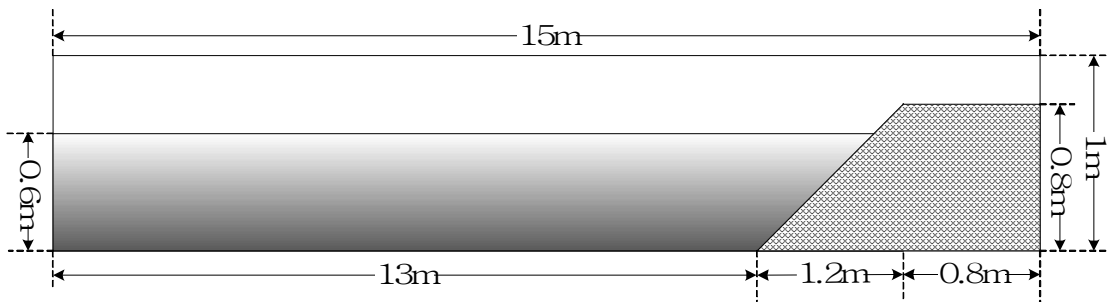


그림 5.1 모델 방파제의 수치수로 단면도

조파판과 구조물의 거리는 7m이고, 에너지 감쇠대(Damping Zone)의 길이는 6m의 길이로 수치수로의 좌측에 설치하여 반사파에 의한 영향을 무시하여 1차 연립방정식 계산시 발산을 방지하였다. 반사율을 측정하기 위하여 조파판에서 6m의 거리에 측정점을 잡아서 구조물에 반사되어져 나오는 수위를 측정하여 Healy에 의한 1점 관측식을 사용하여 반사율을 측정하였다.

### 5.1.2 모델링 조건

수치해석에 사용된 CADMAS-SURF의 가로, 세로방향의 격자간격은  $\Delta x = 0.05m$ ,  $\Delta z = 0.04m$ 로서 x축의 총 격자의 개수는 300개이며, z축의 격자의 개수는 25개로 구성이 된다. 수치계산에 사용된 계산 시간은 해석 시간 및 계산 방정식에 의한 발산을 방지하기 위해 0.006초로 하였으며, 총 계산 시간은 각각의 주기 조건에서 200cycle을 기준으로 설정하였다. 프로그램 구동에 사용된 조건은 수조실험과 같으며 그 조건변수는 다음 표 5.1과 같다. 표에서 제외된 조건들은 기본값을 사용하였다.

표 5.1 모델링에 사용된 매개변수 및 상수값

구 분		변 수
시간 제어	$\Delta t$ (sec)	0.006
	최대반복계산 횟수	999999
	종결시간 (sec)	198
조파 모델	정지수면의 수심 (m)	0.6
	조파형태	STOKES
감쇠영역	감쇠구간의 폭 (m)	6.0
	감쇠구간의 수심 (m)	0.6
물성치	밀도 ( $kg/m^3$ )	1000.0
	동점성계수 ( $m^2/sec$ )	0.000001
	중력가속도 ( $m/sec^2$ )	9.8
관성력	쇄석의 관성력계수	0
저항계수	쇄석의 항력계수	0

표 5.2 모델링에 사용된 제어변수 및 모의조건

구 분	변 수	
파고(cm)	0.04, 0.06, 0.08, 0.10, 0.12, 0.14 (총 6 단계)	
주기(sec)	0.99, 1.41, 1.98 (총 3 단계)	
공극률	펜타포드	0.58, 0.61
	Y블록	0.52, 0.57

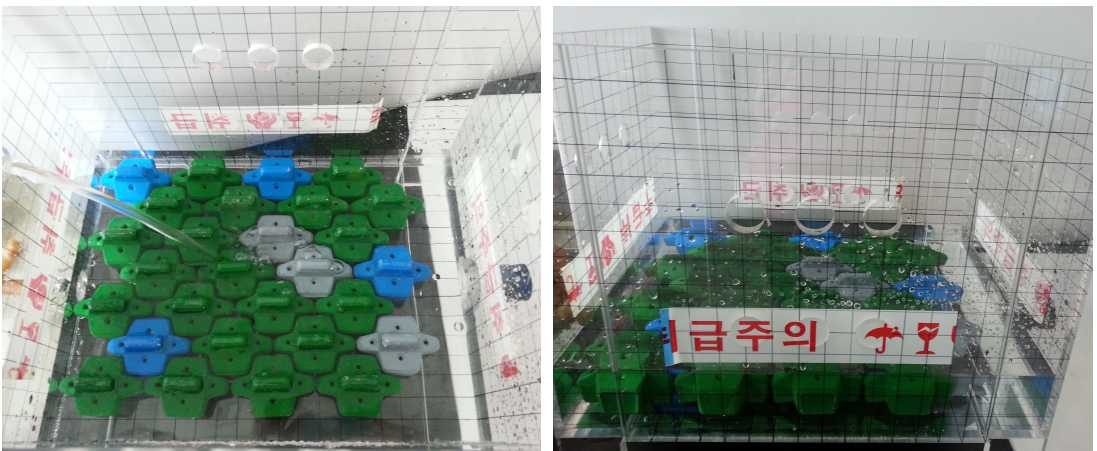
사용된 피복제인 펜타포드 및 Y블록의 공극률을 측정하였다. 실험은 각각의 구조물에 대하여 정적 및 난적일 때의 두 경우로 나누어 측정하였으며, 30cm×40cm×30cm의 수조에 해당 블록 모형을 쌓은 후 물을 채워 전체 부피에 대해 물이 차지하는 부피 비율을 공극률로 간주하였다.

실험결과, 정적 및 난적인 경우에 따라 공극률이 다소 상이하였는데, 펜타포드의 경우 0.58 및 0.61로 측정되었고, Y블록의 경우 0.52 및 0.57로 측정되어 Y블록이 다소 공극률이 큰 것으로 나타났다. 보통의 TTP 공극률이 0.5인 점을 감안하면 이 둘의 공극률은 TTP 보다는 다소 크게 측정되었다.





(a) 펜타포드



(b) Y블록

그림 5.2 모형블록을 이용한 공극률 측정실험

## 5.2 모델링 결과

### 5.2.1 반사율 산정

실제로 바다에서 발생하고 있는 파는 불규칙하게 발생되어 내습하는 경우가 많지만 프로그램 구동을 위해서 규칙적인 파가 입사하는 경우로 하여 2.2장에서 언급한 바와 같이 파고의 분포를 측정하는데 있어서, Healy의 방법을 사용하여 반사율을 계산 하였다. 반사율의 추정 방법은 방파제 전면에서 한곳의 측점을 지정하여 수위를 관찰하였는데 이때, 수위 관찰은 프로그램 구동시 생성되는 Tran 파일에서 지점으로 잡은 곳의 수위가 출력이 되므로 이 출력 파일을 가지고 수위를 측정 할 수 있다. 수위의 측정은 입사파고가 구조물까지의 도달시간을 충분히 고려하여 50주기가 지난 후에 수위를 tran 파일에서 추출하였다.

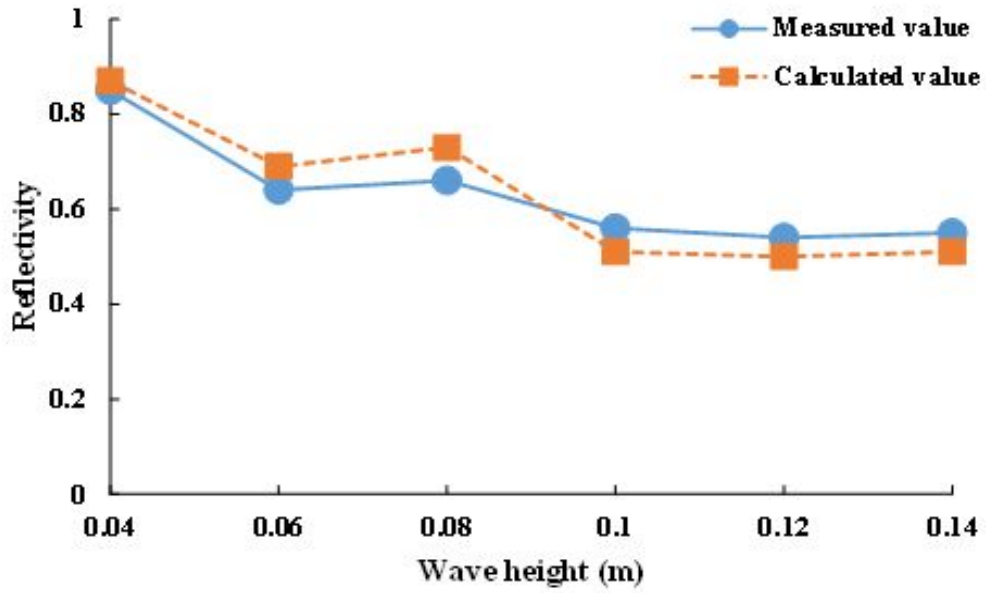
표 5.3은 펜타포드, 표 5.4는 Y블록의 각 주기별 반사율 모델링 결과를 수조실험에서 구한 반사율과 비교하여 나타내었고, 그림 5.3 ~ 5.4에서는 비교한 반사율을 그래프로 나타내었다.

수조 실험 조건을 입력하여 수치 실험을 실시한 결과 대부분의 주기 및 파고에 대하여 반사율 계산값은 측정값과 비슷하게 나타났다. 반사율은 피복재의 공극율 및 반사각의 영향을 받는데 수조 실험의 방파제가 1:1.5로 일정하게 설치된 상황에서 규칙파가 내습하였으므로 반사율에 영향을 미치는 변수가 피복재의 공극율로 제한되었기 때문으로 판단된다.

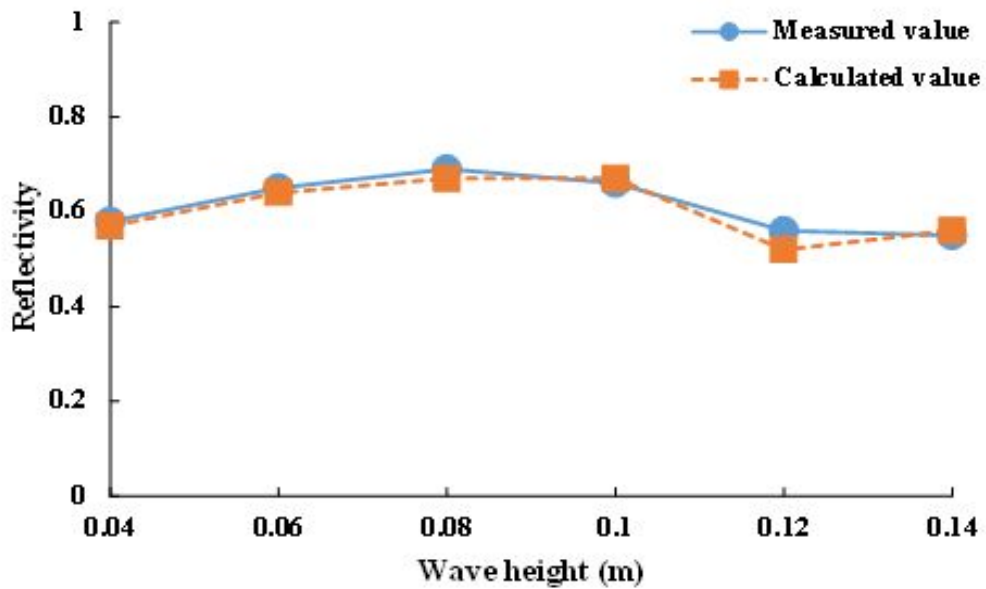
표 5.3 펜타포드의 파고별 반사율 해석 및 실험결과

주기	구분	파고 (cm)	반 사 율	
			측정치	계산치
0.99초		4	0.85	0.87
		6	0.64	0.69
		8	0.66	0.73
		10	0.56	0.51
		12	0.54	0.50
		14	0.55	0.51
1.41초		4	0.58	0.57
		6	0.65	0.64
		8	0.69	0.67
		10	0.66	0.67
		12	0.56	0.52
		14	0.55	0.56
1.98초		4	0.56	0.53
		6	0.55	0.53
		8	0.54	0.50
		10	0.55	0.57
		12	0.53	0.59
		14	0.49	0.60

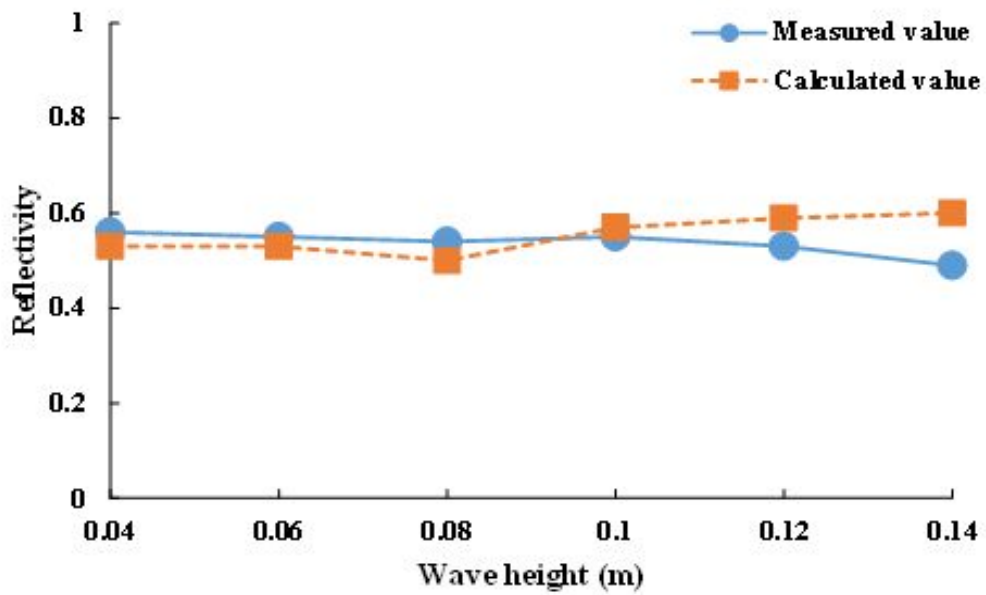
- 공극률 : 0.58(정적)



(a)  $T = 0.99\text{sec}$



(b)  $T = 1.41\text{sec}$



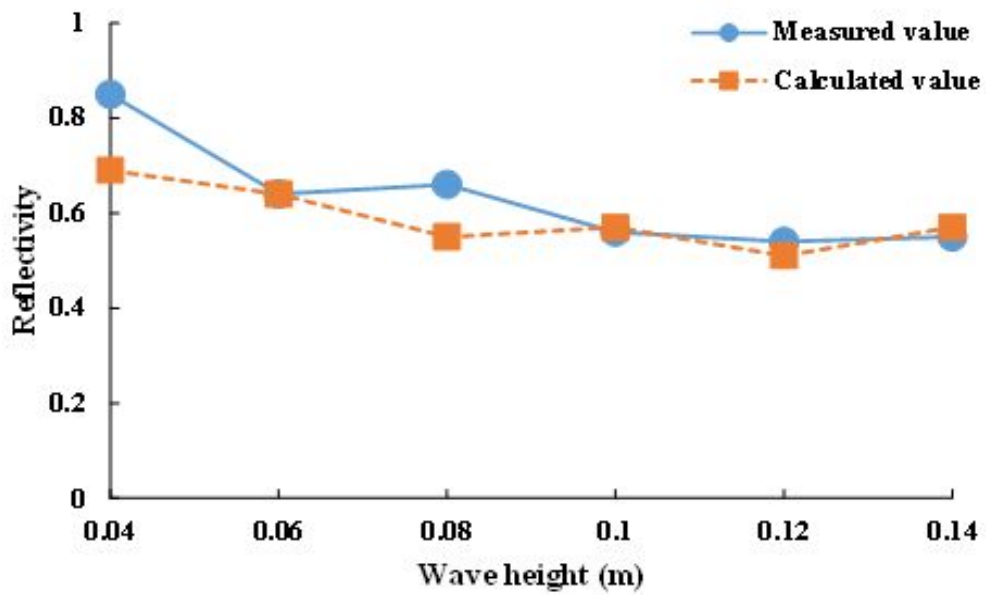
(c)  $T = 1.98\text{sec}$

그림 5.3 펜타포드의 파고별 반사율 비교

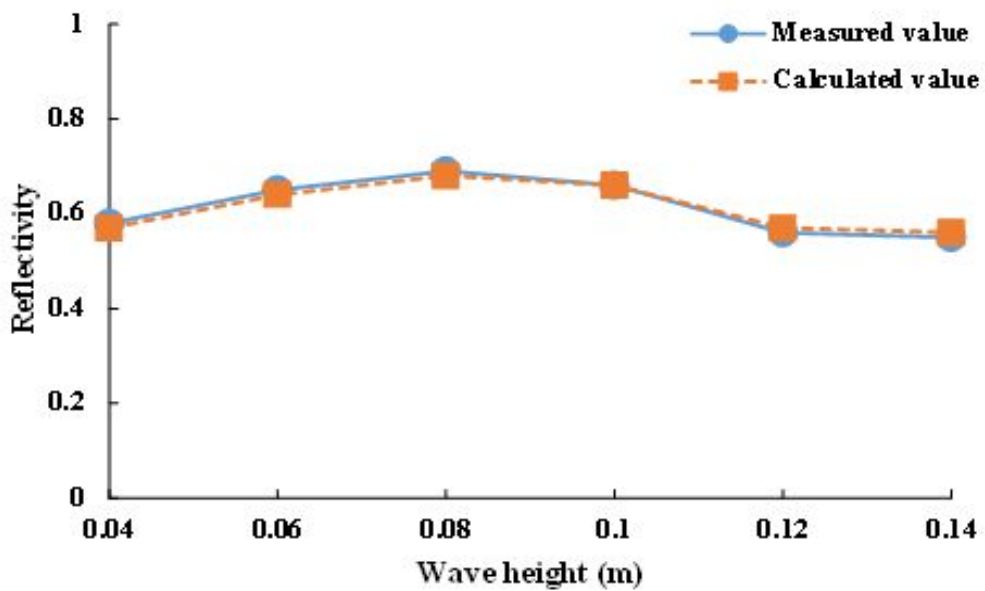
표 5.4 Y블록의 파고별 반사율 해석 및 실험결과

주기 \ 구분	파고 (cm)	반 사 율	
		측정치	계산치
0.99초	4	0.85	0.69
	6	0.64	0.64
	8	0.66	0.55
	10	0.56	0.57
	12	0.54	0.51
	14	0.55	0.57
1.41초	4	0.58	0.57
	6	0.65	0.64
	8	0.69	0.68
	10	0.66	0.66
	12	0.56	0.57
	14	0.55	0.56
1.98초	4	0.56	0.54
	6	0.56	0.53
	8	0.54	0.54
	10	0.53	0.53
	12	0.52	0.55
	14	0.52	0.54

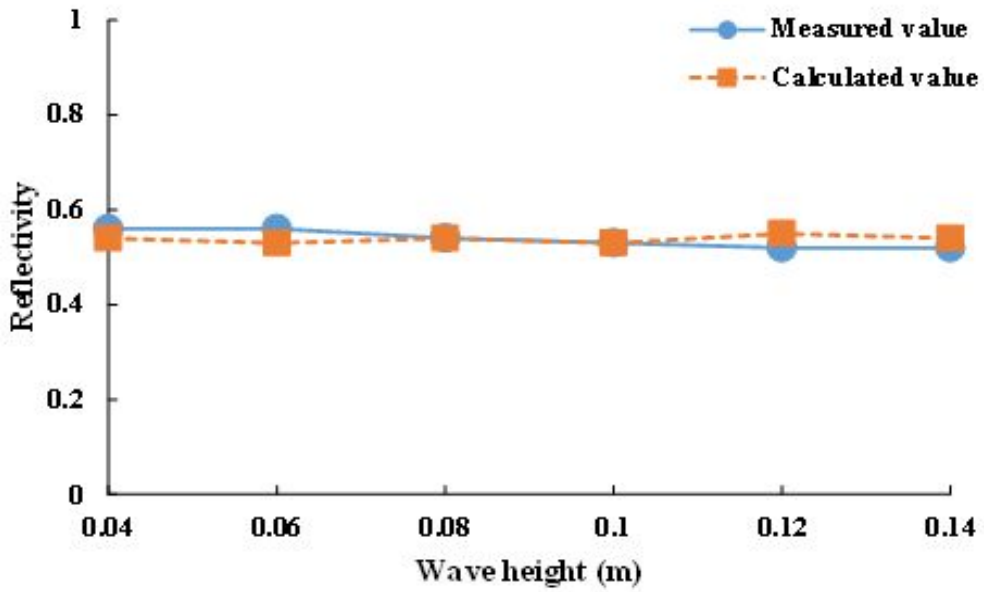
- 공극률 : 0.52(정적)



(a)  $T = 0.99$ sec



(b)  $T = 1.41$ sec



(c)  $T = 1.98\text{sec}$

그림 5.4 Y블록의 파고별 반사율 비교



## 5.2.2 처오름높이 산정

처오름높이 측정을 위해서 MeshGen 프로그램을 사용하여 수조 및 방파제를 격자로 나누어 방파제 전면에 수면높이인 0.6m인 부분부터 방파제 천단 부분인 0.8m부분까지 0.05m마다 측정점을 찍어서 처오름이 가장 많이 일어나는 부분을 찾아 최대 처오름높이를 구하였다.

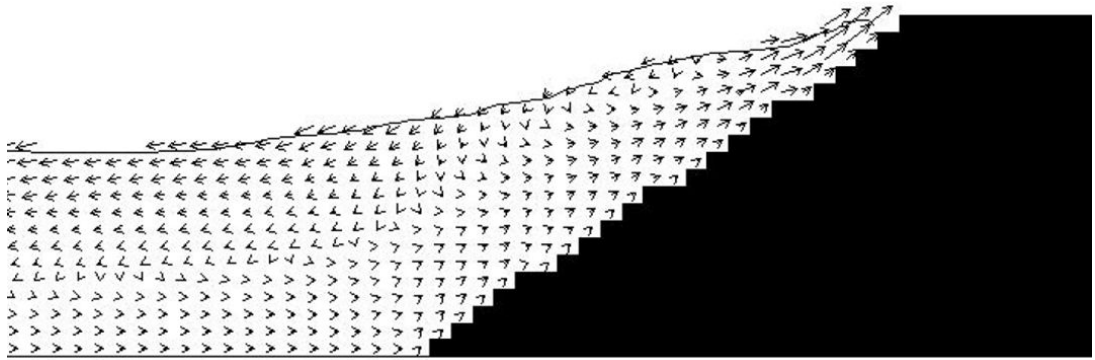
그림 5.5에 특정한 주기와 파고 조건에서 모의한 결과를 예시하였는데 수위 및 파속, 파향이 잘 나타나있다.

표 5.5 ~ 5.6은 각각의 모형별로 주기 0.99, 1.41, 1.98초에서 프로그램에 의해 주기별 처오름높이(R) 및 상대 처오름높이( $R/H_0$ )을 나타내었다.

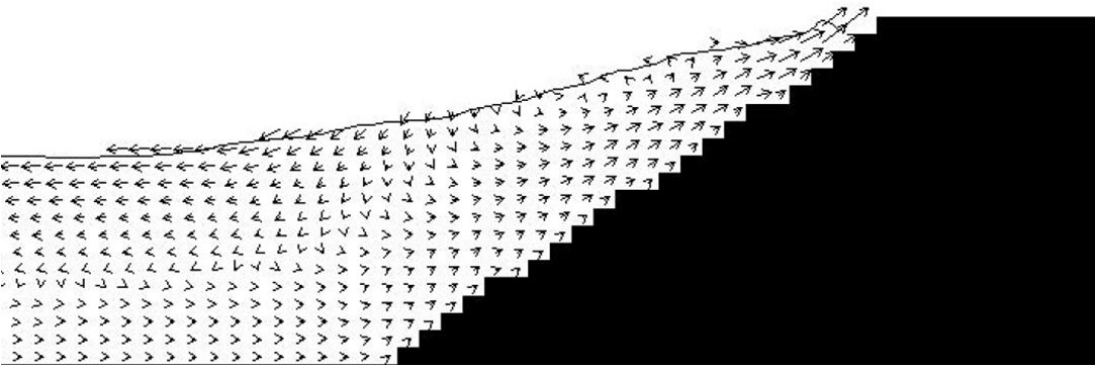
펜타포드는 주기 0.99초에서 처오름높이는 파고 4cm에서 5.67cm나타났으며, 파고 14cm일 때 13.75cm로 나타났다. 주기 1.41초, 파고 4cm에서는 6.45cm로 나타났으며, 파고 14cm에서 19.35cm로 나타났다. 주기 1.98초, 파고 4cm에서 8.05cm로 나타났으며, 파고 14cm에서 처오름높이는 22.22로 나타났다.

Y블록은 주기 0.99초에서 최대 처오름높이는 파고 4cm에서 2.49cm로 나타났으며, 파고 14cm일 때 12.29cm로 나타났다. 주기 1.41초, 파고 4cm에서 6.41cm로 최대 처오름이 발생하였으며 14cm 일 때에는 19.45cm로 최대 처오름높이가 나타났다. 주기 1.98초에서는 4cm에서 8cm로 최대 처오름높이가 나타났으며, 14cm일 때에는 22.23cm로 최대 처오름높이가 나타났다.

그림 5.6 ~ 5.7에서는 각각의 주기에서 파고별 상대 처오름높이를 나타내었으며, 상대 처오름높이는 처오름높이와 비슷한 현상을 보이고 있는데 같은 공극률에서는 파고 및 주기에 비례하여 증가하는 현상을 보인 반면, 동일 주기, 동일 파고에서는 공극률이 증가할수록 점진적으로 감소하는 현상을 보였다.



(a) 펜타포드



(b) Y블록

그림 5.5 처오름높이 모의결과( $T=1.98$ 초,  $H_0=14$  cm)

**표 5.5 펜타포드의 파고별 처오름높이 및 상대처오름높이**

주기 \ 구분	파고( $H_0$ ) (cm)	처오름높이( $R$ ) (cm)	상대처오름높이 ( $R/H_0$ )
0.99초	4	5.67	1.4175
	6	8.25	1.3750
	8	10.70	1.3375
	10	12.27	1.2270
	12	12.82	1.0683
	14	13.75	0.9821
1.41초	4	6.45	1.6125
	6	8.39	1.3983
	8	11.31	1.4138
	10	13.52	1.3520
	12	16.27	1.3558
	14	19.35	1.3821
1.98초	4	8.05	2.0125
	6	10.50	1.7500
	8	13.04	1.6300
	10	16.59	1.6590
	12	19.61	1.6342
	14	22.22	1.5871

- 공극률 : 0.52(정적)

**표 5.6 Y블록의 파고별 처오름높이 및 상대처오름높이**

주기 \ 구분	파고( $H_0$ ) (cm)	처오름높이( $R$ ) (cm)	상대처오름높이 ( $R/H_0$ )
0.99초	4	2.49	0.6224
	6	3.39	0.5650
	8	8.39	1.0488
	10	9.17	0.9170
	12	10.44	0.8700
	14	12.29	0.8779
1.41초	4	6.41	1.6025
	6	8.07	1.3450
	8	11.34	1.4175
	10	13.47	1.3470
	12	16.27	1.3558
	14	19.45	1.3893
1.98초	4	8.06	2.0150
	6	10.41	1.7350
	8	13.04	1.6300
	10	16.60	1.6600
	12	20.00	1.6667
	14	22.23	1.5879

- 공극률 : 0.52(정적)

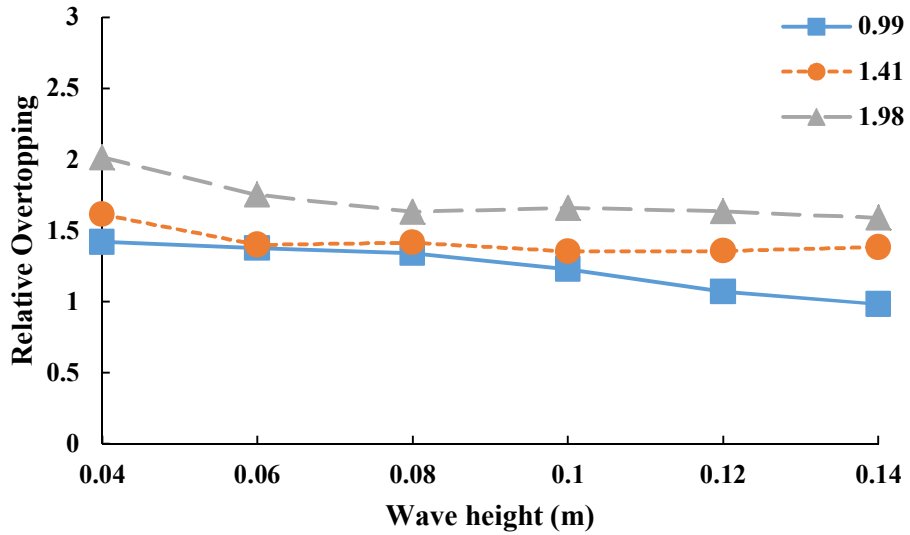


그림 5.6 펜타포드의 파고별 처오름높이 비교

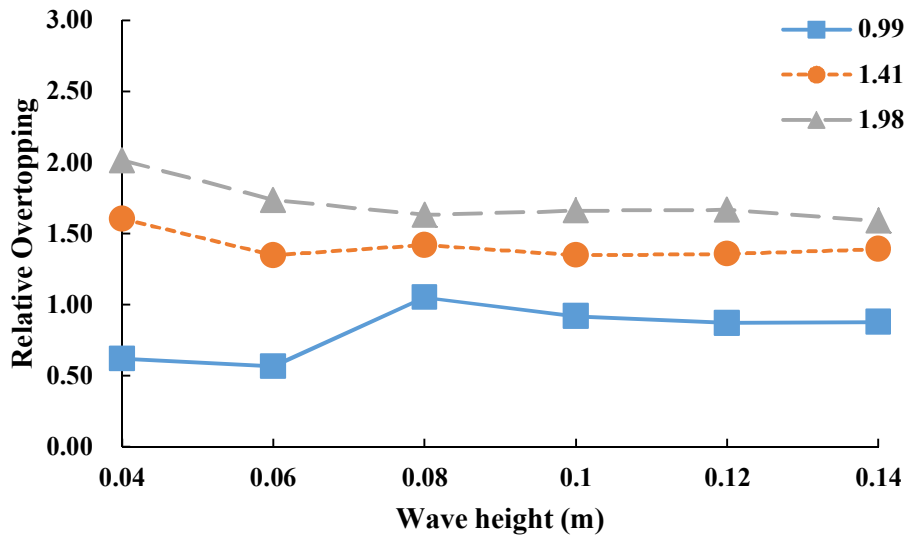


그림 5.7 Y블록의 파고별 처오름높이 비교

## 5.3 시나리오 설정 및 모의실험

수리모형 실험과 모델링 결과값을 비교해보았을 때, 유사한 값이 나오는 것으로 나타났다. 이 모델링을 사용하여 수리모형실험 외 다른 시나리오를 선정하여 각각의 시나리오별로 반사율 및 처오름높이를 예측하여 보았다.

### 5.3.1 시나리오 설정

심리항은 우리나라 서남해의 도서에 위치하고 있고, 행정구역상 전라남도 신안군 흑산면에 속해 있다. 본 항이 속해 있는 신안군은 섬들이 황해에 넓게 흩어져 있어 해역이 넓다. 각 섬에는 구릉성 산지가 많고 평지의 발달은 미약하나 연안의 갯벌을 간척한 평지는 넓다. 심리항은 신안군 흑산면 대흑산도의 남측에 위치하여 동측으로는 예리, 북측에 대둔, 서측에 읍동, 북측에 영산도로 둘러싸여 있다.

심리항에 방파제를 설계하였을 때 사용된 설계 파랑으로 그 값 중 가장 위험한 파랑인 NW 방향에서 오는 파랑으로 파고 7.2m에 13초의 주기로 설정하여 모의 수로와 같이 축척을 고려하여 파고 14.4cm, 주기 1.83초로 결정하였다. 시나리오는 펜타포드 및 Y블록을 정적 및 난적으로 적층하였을 때와 일반적으로 사용되고 있는 TTP를 난적으로 적층하였을 때로 결정하였다.

표 5.7 심리항 설계에 사용된 설계 파랑

구 분	파 고 (m)	주 기 (sec)
NW	7.2	13.0
NNW	7.2	11.0
SW	6.5	12.0
NE	4.2	8.0

### 5.3.2 모의실험 결과

각각의 시나리오별로 반사율과 처오름높이를 계산하여 표 5.8에 표시하였다. 먼저 펜타포드를 정적으로 적재하였을 경우 모의실험을 한 결과 반사율은 0.62, 처오름높이는 18.45cm로 Y블록 보다 좀 더 낮은 값을 보였다. 이 값을 실제 처오름높이로 환산하면 9.2m로 예상된다. 다음 난적일 경우 반사율은 정적일 경우와 동일하게 나타나고, 처오름높이는 비슷한 18.47cm로 계산되었다. 실제 처오름높이로 환산하면 9.2m로 예상된다.

Y블록을 정적으로 적재하였을 경우 모의실험을 한 결과 반사율은 0.61, 처오름높이는 20.04cm가 계산되었다. 계산된 처오름높이를 실제 처오름높이로 환산하면 10.0m로 예상된다. 다음 난적으로 적재하였을 경우 반사율은 정적일 경우와 동일하게 0.61이며, 처오름높이는 조금 높은 20.16cm로 계산되었다. 실제 처오름높이로 환산하면 10.8m로 예상된다.

마지막으로 주변에서 쉽게 볼 수 있는 TTP를 난적으로 적재하였을 경우에는 반사율은 펜타포드를 적재하였을 경우와 같게 계산되었고, 처오름높이는 18.55cm로 계산되었다. 이를 실제 처오름높이로 환산하면 9.3m로 예상된다.

표 5.8 시나리오별 반사율 및 처오름높이

종류	적층	공극률	반사율	처오름높이 (cm)	실제 환산 처오름높이 (m)	비고
펜타포드	정적	0.58	0.62	18.45	9.2	
펜타포드	난적	0.61	0.62	18.47	9.2	
Y블록	정적	0.52	0.61	20.04	10.0	
Y블록	난적	0.57	0.61	20.16	10.8	
TTP	난적	0.5	0.62	18.55	9.3	

## 제 6 장 결 론

방파제 피복재로 사용하기 위하여 펜타포드와 Y블록의 2가지 형상의 콘크리트 블록을 개발하고 설계에 필요한 인자를 도출하기 위하여 모형 수조 실험을 실시하였다. 또한, 수조 실험과 동일한 조건으로 수치실험을 실시하여 설계 인자를 도출한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 200g의 펜타포드 및 Y블록의 모형으로 수조에 방파제를 축조하고 주기 0.99 ~ 1.98초, 파고 4 ~ 14cm의 파도에 대하여 파동 실험을 실시한 결과 모든 실험 조건에서 블록의 이탈이나 피해량 없이 안정하였다. 이것은 25ton 블록에 해당하며, 수심 30m 지점에 주기 7 ~ 14초, 파고 2 ~ 7m의 파도가 내습하는 조건과 같다. 이는 블록이 서로 강하게 인터로킹되는 형상으로 파력에 대한 저항력이 향상되었기 때문이다.
2. 수조 실험을 통해 파고의 변화에 따른 반사율을 측정된 결과 펜타포드는 0.489 ~ 0.853, Y블록은 0.513 ~ 0.853 범위로 나타났다. 파고와 주기를 독립변수로 놓고 반사율을 종속변수로 간주하여 중회귀 분석을 실시한 결과, 파고와 주기는 반사율과 큰 상관성이 없었으나 주기가 길수록 파고의 변화에 따른 반사율의 변동 폭은 더 적은 경향을 보였다.
3. 수조 실험 조건을 입력하여 수치 실험을 실시한 결과 대부분의 주기 및 파고에 대하여 반사율 계산값은 측정값과 비슷하게 나타났다. 반사율은 피복재의 공극율 및 반사각의 영향을 받는데 수조 실험의 방파제가 1:1.5로 일정하게 설치된 상황에서 규칙파가 내습하였으므로 반사율에 영향을 미치는 변수가 피복재의 공극율로 제한되었기 때문으로 판단된다.
4. 수치실험 결과로부터 각 모의 조건별로 처오름높이를 산출하였다. 처오름높이는 동일한 주기에서는 파고가 높을수록, 동일한 파고에서는 주기가 길수록 더 크게 나타났다. 펜타포드의 경우에도 상대처오름높이가 가장 큰 경우는 주기가 가장 길고 파고는 가장 작은 경우에 나타나 동일한 경향을 보였다. Y블록에서 처오름높이가 가장



큰 경우는 주기 1.98초, 파고 14cm인 조건에서 0.2223으로 나타났는데 이는 파고의 약 1.6배에 해당한다. 반면에, 상대 처오름높이가 가장 큰 경우는 주기 1.98초에 파고 4cm인 경우이고 이 때 처오름높이는 파고의 약 2배 정도였다.

- 실제 현장에 적용하는 것을 가정하여 모의한 결과 펜타포드는 반사율은 테트라포드와 동일하고 처오름높이는 약간 더 작게 예상되었으나 그 차이는 미미하였다. 이에 반해 Y블록은 테트라포드 블록을 설치했을 때보다 반사율은 더 작고 처오름높이가 약간 더 크게 산정되었다. 그러므로 펜타포드와 Y블록은 기존의 테트라포드 블록과 동등한 소파 효과를 보이면서도 높은 인터로킹 효과로 구조적으로 안정된 경사제 피복재 혹은 혼성재 직립부 소파제로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

1. 강진성(2011), 경사직 방파제 위에 피복된 테트라포드의 안정성에 대한 실험적 연구, 석사학위논문, 서울대학교
2. 고경범(2005), 유공식 구조물의 수리특성에 대한 수치해석, 석사논문, 건국대학교
3. 김상호, 야마시로 마사루, 요시다아키노리, 신승호, 홍기용(2009), BEM-CADMAS-SURF 결합해석법에 기한수치조수조의 응용, 한국항해항만학회지, 33(1), pp.65-70
4. 김승우(2005), 동해항 방파제를 대상으로 한 신뢰성 설계법의 비교연구, 석사학위논문, 서울대학교
5. 김창일, 이달수, 전인식(2004), 수치과동수로를 이용한 유수실 내장 경사식 해수교환 방파제의 유입유속 특성에 관한 연구, 대한토목학회 학술대회, 2004(10), pp.5543~5549
6. 김하룡(2014), 수리모형실험을 통한 호안형태와 배열별 반사파의 감쇄효과 분석, 박사논문, 공주대학교
7. 민용침(2014), 해중터널의 거동 해석을 위한 파랑-흐름 복합수로의 수치모의, 석사논문, 건국대학교
8. 박승민, 윤종태(2008), 비선형차수에 따른 Boussinesq모형의 천수변형특성, 한국해양공학학회지, 20(1), pp.121~127
9. 박영석(2009), 잠수형 사석구조물의 변형특성에 관한 실험적 연구, 박사논문, 명지대학교
10. 배일로, 마승아, 김영택, 이종인(2015), 콘크리트블록으로 피복된 수중구조물의 안정성 실험, 한국방재학회 학술발표대회논문집, 14, pp.237

11. 정상봉(2005), RANS모델과 경계요소법을 이용한 경사식 방파제의 제체에 작용하는 파력 결정, 박사학위논문, 건국대학교
12. 손병규, 김홍진, 안희춘(2005), 경사식 방파제의 형상에 따른 월파랑 및 반사율 실험연구, 한국해양공학회지, 19(2), pp.34~39
13. 손병규, 류청로(2001), 사석방파제의 안정성에 미치는 방향성 효과에 관한 실험적연구, 한국 해안해양공학회지, 15(4), pp.139~148
14. 신문섭(2014), 고중량 단층 피복재 일층피복에 따른 성능 및 안정성 실험용역보고서, 군산대학교
15. 신문섭(2014), 피복재와 인공어초를 위한 펜타포드형 소파블록의 성능 및 안정성 실험용역, 군산대학교
16. 윤성규, 김태형(2012), 파랑하중에 의한 경사식 방파제의 제체와 그 주변지반의 침하거동, 한국지반환경공학회 학술발표회논문집, 2012(9), pp.299~302
17. 윤종태(2009), 비선형 천수와 쇄파를 고려한 수정완경사방정식의 타원형수치모형, 한국해안해양공학회지, 21(1), pp.39~44
18. 윤종태, 박승민(2004), 수정완경사 방정식의 타원형수치모형, 한국해양공학회지, 18(4), pp.44
19. 윤종태, 박승민(2005), 완전비선형 Boussinesq모형의 천수 및 쇄파특성, 한국해안해양공학회지, 19(2), pp.29~34
20. 윤종태, 박승민(2006), 수정완경사방정식을 위한 반복기법의 효율성 비교, 한국해안해양공학회지, 20(6), pp.61~66
21. 윤지성(2012), 비선형성을 고려한 CADMAS-SURF 모형의 특성 연구, 석사학위논문, 경성대학교

22. 윤한삼, 차종호, 강윤구(2005), 투과성 해안구조물의 Wave Run-up에 대한 CADMAS-SURF의 적용, 한국해안해양공학회지, 19(4), pp.49~55
23. 이광호, 백동진, 김도삼, 김태형, 배기성(2014), 불규칙파-해저지반-혼성방파제의 상호작용에 의한 지반과 구조물의 동적응답에 관한 수치시뮬레이션 2, 한국해안해양공학회 논문집, 26(3), pp.174~183
24. 이민기(2007), CADMAS-SURF에 의한 불규칙파랑의 해석과 월파랑 추산에 관한 연구, 석사논문, 한국해양대학교
25. 이성구(2001), 방파제 두부의 피복재 안정성에 관한 연구, 석사학위논문, 연세대학교
26. 이종인(2003), 경사식 방파제의 피복재 안정성에 대한 비교 실험, 한국해안해양공학회지 15(4), pp.249~258
27. 이종인, 배일로, 김영택(2015), TTP로 피복된 경사제의 처오름높이 산정 실험, 한국방재학회 학술발표대회논문집, 14, pp.182
28. 이종형, 이의탁, 최선호, 김성홍, 한운우(2014), 항만공학, 도서출판 구미서관
29. 이지훈(2013), 2차원 수리모형 실험에 의한 와류블록방파제의 반사율 특성에 관한 연구, 석사학위논문, 부산대학교
30. 이철웅(2011), 직립식 방파제의 마루높이 산정을 위한 최대월파랑에 대한 신뢰성 해석, 한국해안해양공학회 논문집, 23(2), pp.154~162
31. 이태훈(2013), 사석방파제에 피복된 Rakuna-IV의 안정성에 대한 실험적 연구, 석사학위논문, 서울대학교
32. 이호, 김창훈, 황용태, 김도심(2008), CADMAS-SURF에 의한 단파의 수위 및 유속 변화에 대한 예측정도의 검토, 해안·해양공학회지, 22(5), pp.52~60

33. 장성철(2014), 파랑 내습시 하구역 호안의 월파량에 관한 연구, 석사논문, 부경대학교
34. 장윤경(2012), 해중터널의 수리특성에 대한 수치해석, 석사학위논문, 건국대학교
35. 최현(2000), 수리모형실험에 의한 방파제 중간피복블록의 안정성 검토, 석사학위논문, 명지대학교
36. 해양수산부(2001), 항만 및 어항 설계기준, 해양수산부
37. 해양수산부(2003), 경사식 방파제의 최적설계 기술개발4, 해양수산부
38. 해양수산부(2005), 항만 및 어항 설계기준, 해양수산부
39. 해양수산부(2014), 항만 및 어항 설계기준, 해양수산부
40. Ahrens J.P.(1975), Large wave tank tests of riprap stability, CERC echnical Memorandum 51, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
41. Anderson O.H., Juhl J., Sloth p.(1992), Rear side Stability of Berm Breakwaters, Proc. 23rd Coast. Engrg. Conf., ASCE, pp.1,020~1,029.
42. Berkhoff J.C.W.(1972), Computation of Combined Refraction-Diffraction, Proc. 13th Coastal Eng. Conf., Vancouver, 1, pp.471~490
43. Booij N.(1983), A Note on the Accuracy of the Mild-Slope Equation, Coastal Eng., 17, pp.191~203
44. Chamberlain P.G., Porter D.(1995), The Modified Mild-Slope Equation, J.Fluid Mech., 291, pp.393~407
45. Copeland G.J.M.(1985), A Practical Alternative to the Mild-Slope Wave Equation ,Coastal Eng., 19, pp.125~149.

46. Dally W.R., Dean R.G., Dalrymple R.A.(1985), Wave height variation across beaches of arbitrary profile., J.Geophy.Res., 90(6), pp.1917~1927
47. Dong P., Al-Mashouk M.(1989), Comparison of Transient and Steady State Wave Models for Harbour Resonance, Proc.Conf.on Hydraulic and Environmental Modeling of Coastal, Estuarine, and River waters, Bradford, pp.233~244.
48. Fredsoe, J. (1984), Turbulent boundary layer in wave+current motion, J.Hydraul, Eng. ASCE, 110(8), pp.1,103~1,120.
49. Fredsoe, J. (1993), Modelling of Non-cohesive Sediment Transport Processes in the Marine Environment, Coastal Eng., 21, pp.71~103
50. Fredsoe, J.(1997), Scour at the round head of a rubble mound breakwater, Coastal Eng., 29, pp.231~262.
51. Goda Y.(1985), Random Seas and Design of Maritime Structures, University of Tokyo
52. Goda Y., Suzuki Y.(1976), Estimation of incident and reflected waves in random Wave experiments, Proc. of 15th Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, New York, pp.828~865.
53. Gutman A.L.(1979), Low-Cost Shoreline Protection in Massachusetts, Coastal Structures, 79(1), ASCE, N.Y., pp.373~381.
54. Heder P.A.(1986), Stability of rock fill breakwaters, Proc. J. WPC and OE, ASCE, 112(3).
55. Houston J.R.(1981), Combined Refraction and Diffraction of Short Waves Using the Finite Element Method, Applied Ocean Res., 3, pp.163~170.
56. Hudson R.y.(1959), Laboratory Investigation of Rubble-Mound Breakwaters, Journal of the Waterways and Harbors Division, American Society of Civil Engineers, 85(3), PP.93~121.

57. Irribaren R.C.(1938), A formular for the calculation of rock-fill dikes, Revistade Obras Publicas, Madrid.
58. Massel S.R.(1993), Extended Refraction-Diffraction Equation for Surface Waves, Coastal Eng., 19, pp.97~126.
59. Nagayama S.(1983), Study on the Change of Wave Height and Energy in the Surf Zone, Bachelorthesis, Yokohama National University, Japan
60. Oliveira F.S.B.F., Anastasion K.(1998), An Efficient Computational Model for Water Wave Propagation is Coastal Regions, Applied Ocean Research, 20, pp.263~271
61. Panchang V.G., Pearce B.R., Wei G., Cushma-Roisin B.(1991) Solution of the Mild-Slope Wave Problem by Iteration, Applied Ocean Res., 13, pp.187~199.
62. Pilarczak K.w.(1995), Geotextile Systems for Coastal Protection an Overview, Proceedings, 4th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, Rio De Janeiro.
63. Radder A.C.(1979) On the Parabolic Equation Method for Water Wave Propagation, J.FluidMech., 95, pp.159~176.
64. Shuto N.,(1974) Nonliear long waves in a channel of variable section, Coastal Engineering in Japan, 17, pp.1~12.
65. <http://www.concretelayer.com/>
66. <http://typ.kma.go.kr/>

## 감 사 의 글

저를 도와주신 분이 많았음에도 불구하고 일일이 찾아뵙고 감사드리지 못하는 점 용서를 구합니다.

오늘의 제가 있게 해 주신 지도교수 김성홍 교수님의 은혜에 고개 숙여 깊이 감사드립니다.

학문과 삶에 대한 교수님의 진심 어린 말씀 하나하나 새겨가며 최선을 다해 살아가겠습니다.

먼저, 졸업논문 심사를 해주신 박길현 교수님, 김운중 교수님, 박정용 교수님, 송창수 교수님께 감사드립니다.

물심양면으로 도움을 주신 김대현 교수님, 박상준 교수님께도 감사드립니다.

모두 감사합니다.

2015. 02

전화봉 두손모음 ^^