

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

'이상고파랑 대비 방파제의 안정성 및 공사비 10% 절감이 가능한 회절 고려 파력식 개발'(연구개발 기간 : 2014. 07. ~ 2016. 07.) 과제의 최종보고서 2부를 제출합니다.

2016. 10. 14.

주관연구기관명 : 세종대학교 산학협력단

(대표자) 김 선 채



공동연구기관명 : 한국농어촌공사 농어촌연구원

(대표자) 이 용



주관연구기관책임자: 이 창 훈

공동연구기관책임자: 정 재 상

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

[illegible]

〈요약문〉

연구의 목적 및 내용	- 회절을 고려하여 반무한방파제에 작용하는 새로운 파력식을 제안함으로써 해안 구조물의 안정성 향상 도모 - 규칙파 및 다방향 불규칙파의 모든 파랑 조건에 적용 - 반무한방파제와 이안제에 작용하는 파력을 각각 구함 - 해석해와 환경사방정식의 수치해를 써서 선형파의 파력 구함 - Boussinesq 방정식과 FLOW-3D의 수치해를 써서 비선형파의 파력 구함 - 3차원 수리모형실험을 수행하여 해석해와 수치해의 정확성 검증				
연구개발성과	- 모든 회절성분을 포함하고, 반무한방파제 및 이안제에 대해 규칙파 및 다방향 불규칙 파랑의 경사각과 방파제의 위치에 따른 파력 및 장대구조물에 작용하는 파력을 계산할 수 있는 해석해 및 수치해				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	- 본 과제 의 성과물은 “회절이 고려된 해양구조물에 작용하는 파력식” 임 - 이 식은 국내외 실무자들이 해양구조물 관련 설계하는데 적용될 것임				
핵심어 (5개 이내)	파력	회절	장대구조물	해석해, 수치해	수리모형실험

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	- Improve stability of coastal structures by suggesting new formulas of wave forces acting on a semi-infinite breakwater considering diffraction - Apply for both regular waves and directional irregular waves - Get wave forces on both a semi-infinite breakwater and a detached breakwater - Get linear wave forces using analytical solutions and numerical solutions with the mild-slope wave equations - Get nonlinear wave forces using numerical solutions with the Boussinesq equations and the FLOW-3D - Verify analytical and numerical solutions by conducting 3-dimensional hydraulic experiments				
Results	- Analytical and numerical solutions to calculate wave forces on a semi-infinite and detached breakwaters which depend on oblique angles and horizontal positions by considering all diffraction components for monochromatic and multi-directional random waves				
Expected Contribution	- Final outcome is “Wave force formulas acting on coastal structures considering diffraction” - These new formulas can be internationally used in designing coastal structures				
Keywords	wave force	diffraction	long structure	analytical and numerical solutions	hydraulic experiment

< Contents >

1. Research and Development Project Overview	6
2. Domestic and Overseas Technology Development Status	13
3. Implementation and Results of Research and Development	19
4. Achievement of Research Objectives and Contribution of Related Areas	112
5. Future Plans of Research and Development Result	115
6. International Scientific and Technical Informations Collected during Research Process	116
7. Research and Development Results of Security Rating	117
8. Research Facilities and Equipment Status Registered in National Science Technology Information System	118
9. Safeguards Carried out of Laboratory According to the Research Procedure	119
10. Main Results of Research and Development	121
11. Others	122
12. References	123

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	6
2. 국내외 기술 개발 현황	13
3. 연구 수행 내용 및 성과	19
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	112
5. 연구개발성과의 활용 계획	115
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	116
7. 연구개발성과의 보안등급	117
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	118
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	119
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	121
11. 기타 사항	122
12. 참고 문헌	123

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

본 연구과제는 **회절효과를 고려하여 방파제, 해상교량, 해중터널 등 해안구조물에 작용하는 다방향 불규칙파의 파력**을 규명한다. 본 연구에서 제시된 경사 입사각에 따른 파력의 감소율을 활용하여 **해안구조물 건설시 공사비 10% 이상의 절감**이 가능하며, 이는 국가 재정의 건전화에도 크게 이바지 할 것으로 판단된다.

본 연구 결과물은 우리나라 **해안구조물 설계 기술향상**에도 크게 기여하여 **국제적인 경쟁력 향상**에도 큰 도움이 될 것이다. 또한 이를 통하여 국내 건설 기업의 해외 시장 진출에도 큰 역할을 담당할 것이다.

2. 연구개발의 필요성

가. 연구개발의 중요성

(1) 연구개발의 배경

최근 태풍의 대형화 추세와 더불어 이상 고파랑으로 방파제가 유실되고, 연안지역에 인명 및 침수 피해가 발생하고 있다(그림 1 참조). 태풍의 진로가 서해안으로 진출하기도 하여 그 피해가 가중되고 있다. 태풍의 길목에 있는 제주도, 거제도 및 고파랑이 내습하는 동해안의 방파제에 피해가 증가하고 있는 실정이다. 방파제에 피해를 주는 파력을 정확히 이해하여 **파력 감소요인을 규명하면 10% 이상 공사비를 줄일 수 있을 것이다.**

해외 항만건설시장 진출 시 국내 기업이 해외 선진국들보다 경쟁력을 갖기 위해서는 보다 원천적인 기술이 필요한데, 국내 항만관련 기술력은 해외 선진국에 비해 낮은 수준이다. 국내 항만설계기준은 일본의 항만설계기준, 미국의 CEM, 유럽의 Eurotop 등을 거의 차용하고 있다. 본 과제에서 제안하는 “**이상 고파랑 대비 방파제의 안정성 및 공사비 10% 절감**이 가능한 회절 고려 파력식 개발” 연구는 국내에서 개발한 **세계적 경쟁력을 갖춘 원천기술**이다.



(a) 가거도항 방파제 피해 사례



(b)일본 고베항 피해 사례

<그림 1> 이상 고파랑 내습에 따른 방파제 피해 사례

(2) 기술적 측면에서의 기술개발 중요성

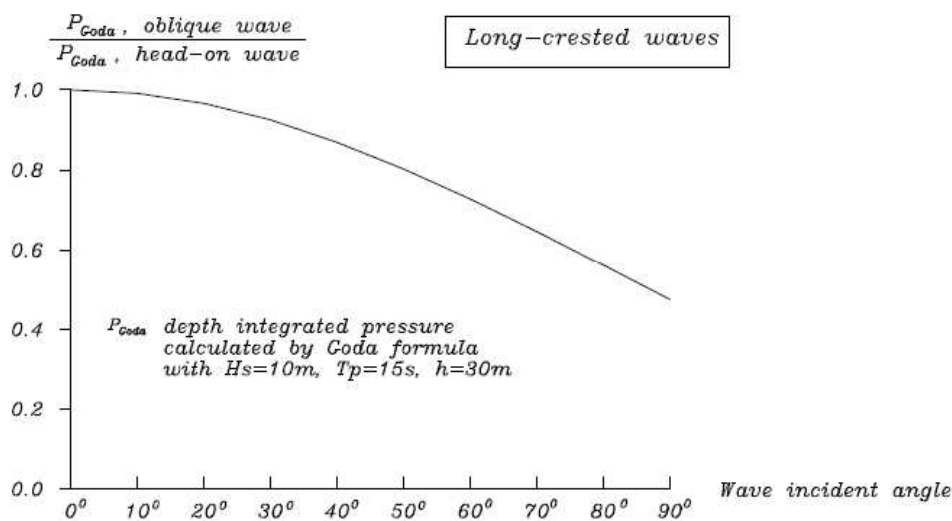
(가) 해양구조물에 작용하는 파력의 감소 요인

방파제와 같은 해양구조물에 작용하는 파력 감소요인은 크게 두 가지로 구분한다. 첫 번째는 파랑이 비스듬히 입사하여 내습함에 의해 생기는 파력 감소요인이 있으며, 두 번째로 구조물의 길이가 긴 경우 구조물 위치별 파랑의 위상차에 의해 발생하는 파력감소 요인이 있다(Burcharth and Liu, 1999).

① 파랑의 경사각에 따른 파력 감소

Tanimoto et al.(1976)은 수리모형실험 결과를 통해 파향선이 방파제의 법선과 이루는 경사각(β)이 15° 이상인 경우(즉, 경사지게 입사하는 경우) 구조물에 작용하는 파력이 수직 입사시 파력에 비해 $0.5(1 + \cos\beta)$ 배 만큼 감소한다고 제안하였다. 이후 Goda(2000)는 Tanimoto et al.(1976)의 제안식을 받아들여 경사 입사각을 고려한 파압식을 제안하였고, 국내는 물론 전 세계적으로 Goda의 파압식을 사용하고 있다.

그림 2는 경사입사각에 따른 감소된 파력비를 보여준다. 파랑이 수직으로 입사하는 경우(즉, 경사각이 $\beta = 0^\circ$) 파력의 감소효과는 없으며, 경사각이 $\beta = 90^\circ$ 인 경우 파랑의 반사가 발생하지 않아 감소파력비는 0.5로 나타났다. 이와 같이 경사각에 따른 파력의 감소효과를 기존의 연구자들은 단순히 힘의 분력 개념만을 적용하였다.

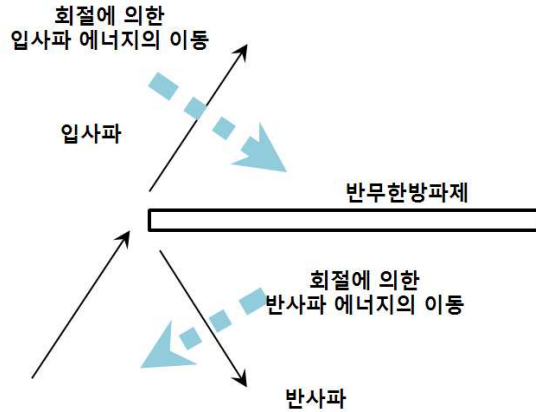


<그림 2> Goda 식에서 파랑의 입사각에 따른 감소파력비(Burcharth and Liu, 1990)

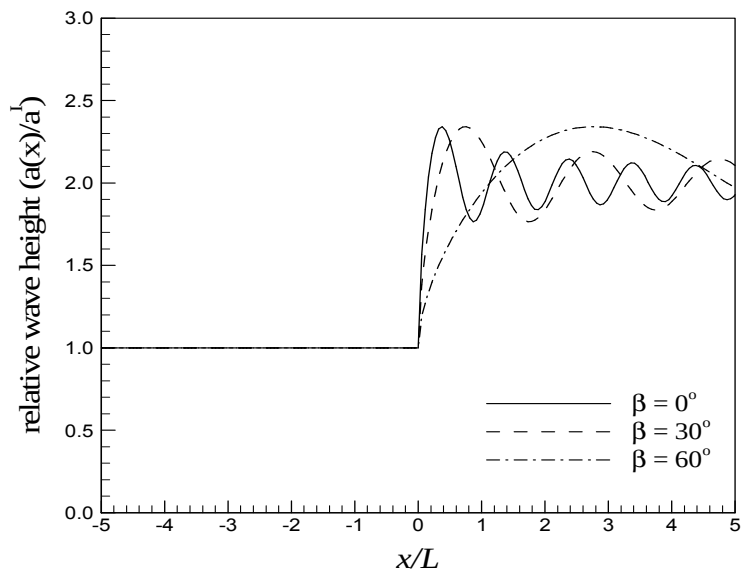
본 연구팀(정재상 등, 2013; 나유리 등, 2014; 정재상 등, 2014)은 경사각에 따른 **파력감소요인이 파랑의 회절로 발생하는 것으로** 확인하였다(그림 3 참조). 즉, 구조물의 전면에서 파가 회절되면서 전면의 파압이 감소하고, 구조물의 배후에 입사파가 회절되면서 후면의 파압이 증가하게 된다. 구조물의 파압은 전·후면의 파압차이기 때문에 결국 두 회절파의 파압 감소 효과가 모두 다 가중하는 쪽으로 발생하게 되는 것이다. 정재상 등(2013)은 해석해(Penney and Price, 1952)를 써서 경사각이 클수록 방파제 두부에 작용하는 파력이 감소함을 밝혔다. 기존 연구에서 경사각이 일정할 경우 방파제의 위치에 관계없이 동일한 감소파력비를 적용하였으나, 정재상 등(2013)은 방파제 위치에 따라서 파력이 달라짐을 보였다(그림 4

참조).

Tanimoto et al.(1976)이 사용한 수리모형실험에는 파력을 계측한 방파제의 위치조차 명확히 제시되어 있지 않아서 그들이 제안한 이론치와 실험치를 서로 명확히 비교하기도 힘든 상황이다. 따라서, 경사각에 따른 파력감소효과의 규명을 위해서는 새로운 이론식의 제안과 수치해석 및 수리모형실험을 할 필요가 있다.



<그림 3> 반무한방파제 주위의 파랑성분 분포 및 에너지 이동 개념도



<그림 4> 입사각에 따른 방파제 전면의 상대파고 분포

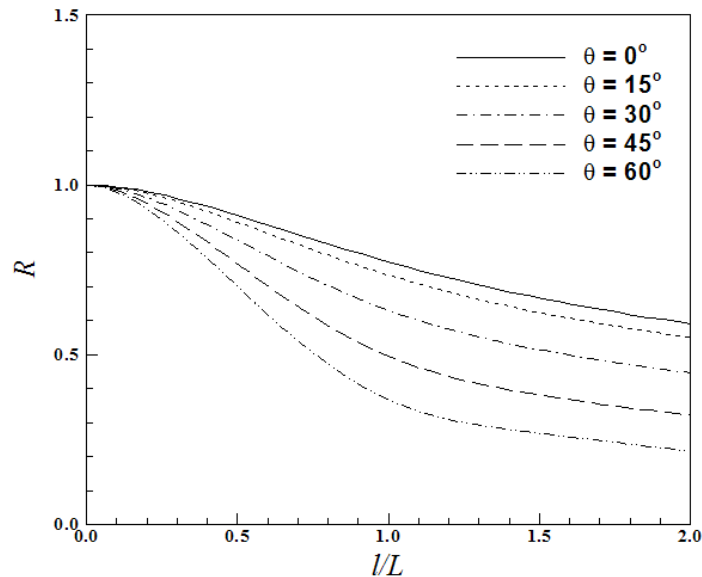
② 구조물의 위치별 위상차에 의한 파력 감소

구조물의 길이가 긴 경우 구조물의 위치에 따라 파랑의 위상이 달라서 위치별로 다른 크기의 파력이 작용한다. 따라서 장대구조물에 작용하는 파력은 경사각이 클수록 수직 입사에 비해 파력이 작아진다. 본 연구팀(정재상 등, 2010)은 장대구조물에 작용하는 파력의 감소파력비를 그림 5에 나타내었다.

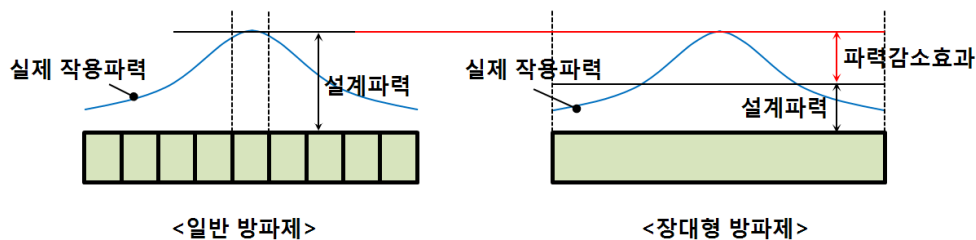
최근 국내에 설치되는 방파제는 국내 토목기술의 발달과 더불어 25m 이상의 대수심 영역에서 케이슨 공법을 주로 적용하고 있다. 케이슨 공법의 경우 한 함체의 길이를 10~25m로 제작하고 있는데, 한 함체의 길이가 입사 파랑의 유의파장(수심 20m에서 약 200~400m) 대비 매우 짧기 때문에 파랑의 위상 차이는 고려하지 않고 있다. 방파제를 장대구조물로 시공할

경우 파랑의 위상 차이와 다방향 불규칙파랑의 파봉 길이 감소에 의한 파력감소효과를 고려할 수 있다(그림 6 참조). 일반방파제에 비해 장대형 방파제는 규칙파 및 불규칙파가 내습할 때 작용하는 파력이 크게 감소함을 볼 수 있다.

장대구조물에 대해서 유럽과 일본의 많은 학자들에 의해 수리모형실험과 이론적, 수치적으로 그 연구가 진행되어 왔다. 하지만 그들의 연구에서는 방파제 주변에서 발생하는 파랑의 회절효과는 고려하지 않았다. 본 연구팀(정재상 등, 2011; Lee et al., 2013)은 장대방파제에 작용하는 파력에 회절 성분 효과를 무시할 수 없음을 밝혔다. 따라서, **장대구조물에 작용하는 파력감소효과에 역시 회절 효과를 고려하여 그 이론적 연구와 실험을 통한 검증이 수행되어야 할 것이다.**



<그림 5> 장대구조물에 작용하는 파력의 감소파력비



<그림 6> 일반방파제 및 장대형 방파제에 작용하는 파력 특성

(3) 경제 · 산업적 측면에서의 기술개발 중요성

최근 건설관련 산업은 최악의 불황에 직면하고 있다. 국내 건설수주는 2007년 이후 하락국면에 있으며, 이와 같은 위기를 타개하기 위해 국내 건설기업들은 해외 건설시장 공략에 주력해 왔다. 하지만 대부분의 국내 건설기업들은 기술력보다는 가격경쟁력을 앞세워 해외 진출을 추진하였으며, 그 결과 GS건설, 삼성엔지니어링 등의 기업들이 해외 진출에 따른 막대한 손실을 기록하였다.

이와 같이 국내 기업들의 해외진출 실패는 우리나라 고유의 우수한 원천기술 개발을 등한시 하고, 과거 70년대와 같이 가격적인 경쟁력만 앞세웠기 때문이라고 판단된다. 따라서, 본

연구와 같이 우리나라에서 최초로 개발되는 원천기술 확보를 활성화하고, 이를 통해 기술경쟁력을 향상시켜 간다면 국내 건설업의 활성화에도 큰 도움이 될 것이다.

본 연구에서 제안하는 “회절을 고려한 파력식”과 “장대구조물”을 적용하여 설계 및 시공할 경우 물리적으로 명확한 근거를 가지고 구조물의 단면을 축소하여 설계할 수 있으며, 이를 통해 가격적인 경쟁력을 확보할 수 있다. 즉, 기술력의 향상이 가격경쟁력으로 이어지는 일례로 볼 수 있으며, 이를 활용할 경우 해외시장에서도 충분한 기술적 우위를 확보할 수 있을 것이다.

(4) 정부지원의 필요성

본 연구에서 제안하는 기술은 해안구조물에 작용하는 파력을 더욱 정확히 예측할 수 있는 파력식을 개발하는 것이며, 제안된 식이 장대구조물에도 적용될 수 있도록 지침을 만드는 것이다. 이와 같은 연구는 매우 원천적인 기술을 개발하는 연구로 볼 수 있으며, 이를 하나의 기관이나 기업이 독점하는 것은 국가적으로도 큰 도움이 되지 않을 것이다. 즉, 정부지원을 통해 국가에서 원천기술을 개발하고, 이를 공개하여 우리나라의 모든 건설관련 기업들이 활용할 수 있도록 한다면, 국가 경쟁력 확보 차원에서도 큰 도움이 될 것이다.

3. 연구개발 범위

가. 연구개발 단계

〈표 1〉 본 과제의 연구개발 단계

구분		표기	단계별 설명	
기초연구 단계	TRL 1	☐	TRL 1	이론적 연구단계
	TRL 2	☐	TRL 2	기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	☐	TRL 3	실험적 증명 단계
	TRL 4	☒	TRL 4	실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	☐	TRL 5	유사환경 시험 단계
	TRL 6	☐	TRL 6	유사환경 기술시험 단계
실용화 단계	TRL 7	☐	TRL 7	실제환경 시작품 데모 단계
	TRL 8	☐	TRL 8	시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	☐	TRL 9	현장적용/사업화 단계

본 연구 목표의 TRL 단계는 실험실에서 구성시스템의 성능평가 및 신뢰성 시험 단계인 4 단계이다. 본 주제에 대한 국내외의 연구수준은 기초적인 과학 원리 관찰 및 파악단계(순수 이론단계)인 TRL 1 수준이다. 반면 본 연구팀은 해석해와 수치해를 통한 연구가 상당히 진행된 상태로 연구를 통해 기능과 특성을 정립하는 단계인 TRL 3 수준의 기술을 보유하고 있다. 본 연구에서는 테스트 결과를 분석하여 새로운 해안구조물 설계법을 제안하는 TRL 4 수

준의 성과를 제시할 계획이다. 본 연구와 완료 된 이후에는 현장 실증실험, 시험시공 등의 추가 연구를 통해 최종적인 실제 환경 사용적합성을 증명하는 TRL 9 단계 달성이 가능할 것으로 판단된다.

나. 타산업 연계 및 국제협력 가능성

(1) 타산업 연계

본 연구는 해안구조물관련 건설업에 적용된다. 즉, 본 연구에서 중력식 방파제와 부유식 방파제 등에 적용되는 파력식을 제안한다. 제안되는 파력식은 **해중 터널이나 해저 파이프 라인과 같은 구조물에도 적용이 가능하다**. 해저 수도 관로, 해저 케이블 등의 구조물은 해상풍력발전, 파력발전, 조류발전 등 **해양에너지 관련 사업**에 적용되는 구조물이다. 해양 풍력발전의 경우 부유식 구조물 기초 안정성 평가에도 적용될 것이다. **수산업의 전초기지인 어항**의 방파제 및 부유식 방파제의 안정성 확보에도 본 연구에서 개발한 기술이 적용될 것이다. **농지 확보를 위한 방조제** 건설에도 본 연구 결과를 적용할 수 있다. 방조제 및 배수갑문에 작용하는 파력 예측에도 적용이 가능하다. 특히 농업기반시설 관련 국가 주요업무를 담당하고 있는 한국농어촌공사 농어촌연구원이 공동연구기관으로 참여하고 있어 관련 산업과의 연계 가능성이 매우 높다고 판단된다.

〈표 2〉 타 산업과의 연계 가능성

산업명	연계 활용 기술	비 고
에너지 산업	- 해저케이블에 작용하는 파력 예측 - 해상풍력발전 등 부유식 구조물 기초 안정성 검토	
수산업	- 어항(漁港)에 설치되는 방파제 설계 및 시공 - 해상 양식장 보호를 위한 부유식 방파제 설계 및 시공	
농 업	- 농지 확보를 위한 방조제 설계 및 시공	

(2) 국제협력 가능성

본 연구의 공동연구기관은 한국농어촌공사 농어촌연구원으로 최근 해외 사업을 활발히 진행하고 있다. 특히 새만금방조제와 같은 높은 기술력을 요하는 해양구조물 건설에 관심을 갖고 있다. 이에 매년 1,000명 이상의 방문객들이 농어촌연구원의 새만금종합수리시험연구동을 방문하여 견학하고 있다. 또한, 농어촌연구원은 해외 26개 기관과 MOU를 체결하여 기술교류를 수행하고 있어, 본 연구와 관련된 국제적인 협력이 활발히 이루어 질 것이다.

〈표 3〉 본 연구 관련 MOU체결 기관(농어촌연구원)

국 가	협약기관명	주요연구분야	체결일	협력현황
1.일 본	1.비와호 연구소	수환경, 해양환경, 환경공학	1998.05.20	-
	2.수도총합연구소	관개·배수 기술, 농촌개발	2008.10.29	정보교환
2.중 국	3.양자강 과학연구원	삼협댐개발연구, 이동상 수리모형시험	1995.01.14	책자수령
	4.농업공정설계연구원	농업토목, 건축, 축산오폐수처리, 에너지 개발	1995.06.07	-
	5.남경수리과학연구원	수리실험분야	2004.05.14	-
3.네델란드	6.텔프트 수리연구소	해안수리, 항만, 하천, 수리모형, 수치해석 연구	1994.12.07	교환연구원 (2008년 1인)
	7.네덜란드 물 관리청	수리, 환경, 토지 이용, 농업경제	2006.04.26	정보교환
4.인 도	8.수자원개발관리센터	관개배수, 농업환경, 해안수리, 원격탐사연구	1996.04.02	-
5.영 국	9.윌링포드연구소	해안수리, 항만, 하천, 수리모형, 수치해석 연구	1997.07.28	-
	10.런던사우스뱅크대학 (www.lsbu.ac.uk)	환경시스템 공학	2011.09.06	공동연구 교환연구원 (2013년 1인)
6.태 국	11.왕립관개청(RID)	관개배수(수자원관리처 공동)	2007.09.13	방문·견학

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 관련 분야의 국내외 연구동향 및 학술적 성과

가. 국가 연구개발사업 유사연구 실적

(1) 연구개발과제의 중복방지를 위한 조사 및 검토결과

유사과제의 검토결과 총 4개의 과제가 조사되었다. 그 중 교육부의 “수치조파수조 구현을 통한 파랑구조연성 기반 해양구조물의 파력, 운동 및 유동매커니즘 연구”의 경우 부유식 구조물에 한하여 그 파력 및 유동 매커니즘에 대해 연구하였다. 해양수산부의 “유공 케이슨 및 상부구조물 작용 파압 산정 연구”의 경우는 방파제 및 안벽에 주로 적용되는 유공케이슨 내부의 파압에 대해 주로 검토하였다. 즉 전술한 연구는 주로 특수 형태 구조물의 국부적인 파압에 대한 연구이다. 해양수산부의 “기후변화대응 항만설계기준 개선방안연구(1단계)”는 주로 월파, 피복재의 안정성, 2격실 이상 유공케이슨에 작용하는 파력 등에 대한 연구로써 항만설계기준의 관련 항목을 개선하는 연구이다. 마지막으로 해양수산부의 “설계외력 증대에 따른 항만설계기준 개선 기획연구”는 최근 기상이변에 따른 이상 고파랑에 대응하기 위해 항만설계기준을 개선하기 위한 연구이다.

〈표 4〉 본 연구와 유사한 과제

(단위 : 억원)

부처명	사업명	과제명	예산	비고
교육부	일반연구자지원	수치조파수조 구현을 통한 파랑구조연성 기반 해양구조물의 파력, 운동 및 유동매커니즘 연구	0.34억원	
해양수산부	첨단항만건설기술개발	유공케이슨 및 상부구조물 작용파압 산정 연구	2.86억원	
해양수산부	첨단항만건설기술개발	기후변화대응 항만설계기준 개선방안연구(1단계)	10억원	
해양수산부	첨단항만건설기술개발	설계외력 증대에 따른 항만설계기준 개선 기획연구	0.5억원	

(2) 연구개발과제의 차별화 방안

기 수행되었거나 수행 중인 유사연구과제들은 특수한 조건에 대한 세부 연구들이며, 본 과제와 같이 포괄적이고 원천적인 연구는 아니다. “수치조파수조 구현을 통한 파랑구조연성 기반 해양구조물의 파력, 운동 및 유동매커니즘 연구”의 경우에는 부유체와 같은 연성 해양

구조물에 대한 연구이며, “유공케이슨 및 상부구조물 작용파압 산정 연구”는 유공케이슨 안벽이나 방파제에 대한 연구이다.

반면 본 과제의 연구는 모든 종류의 해양구조물에 적용이 가능한 보다 원천적인 연구이다. 회절효과를 고려하여 해양구조물에 작용하는 파력을 산정하는 연구로, 본 과제의 성과물은 해상부유체, 해저 파이프라인, 중력식 방파제 등에 모두 적용 가능하다. 특히, 본 연구에서는 해석적인 정확해를 유도하여 제시하며, 평면수리모형실험 및 수치해석 연구와 병행하여 그 정확성을 검증할 계획이다. 또한, 본 연구의 결과물을 실무자들이 활용할 수 있도록 안내서를 작성하여, 연구 결과가 현장에 즉시 적용이 가능하도록 할 계획이다. 또한, 전문성을 보유한 2개의 기관이 공동연구를 수행함으로써 각 기관의 장점을 최대한 활용하여 최대의 연구 성과를 도출할 수 있도록 할 계획이다.

나. 관련분야의 국내외 연구동향 및 학술적 흐름 분석

(1) 해안구조물에 작용하는 파력에 대한 기존 연구사례

방파제와 같은 해안구조물에 작용하는 파력은 국내·외의 수많은 연구가들에 의해 연구되었다. 특히 직립형 방파제는 1800년대 후반부터 유럽 및 일본에서 활발히 건설되었다. Stevenson(1886)에 의해 최초로 방파제에 작용하는 파력이 측정되었으며, Gaillard(1905)는 1890년부터 1902년까지 계속된 자료를 바탕으로 파력식을 개발하였다. 일본에서는 Hiroi(1919)에 의해 1919년 파력식이 제안되었으며, Minikin (1950)에 의해 쇄파를 고려한 파력식이 제안되었다. 이후 일본의 Ito et al.(1966)이 수리모형실험 결과를 바탕으로 더 정확한 파력식을 제안하였으며, 일본의 Goda(1973)에 의해 불규칙파 개념을 포함하는 파력식이 제안되었다. 이후에는 주로 쇄파력 및 충격쇄파력에 대한 다양한 연구가 수행되었다(Goda, 1994; Cuomo et al., 2011; Kisacik et al., 2014).

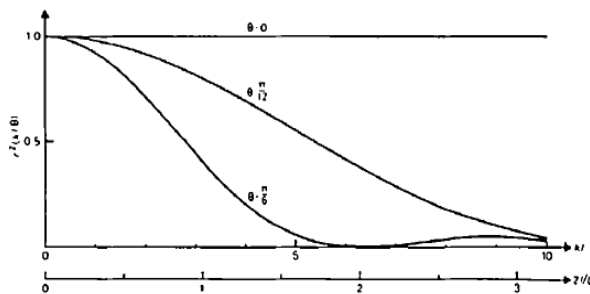
Tanimoto et al.(1976)은 Goda(1973)의 파압식에 경사 입사각에 따른 파력 감소효과를 포함하는 식을 제안하였으며, 현재 일본 및 국내 항만설계기준에 반영되어 있다. Tanimoto et al.(1976)은 완전 반사 조건에서 방파제를 설계할 때 방파제에 작용하는 파압이나 파력은 입사파랑 진폭의 2배를 적용하고, 경사각(β)이 15도 이상인 경우 $(1 + \cos\beta)$ 배를 적용하였다. 하지만 이에 대한 명확한 근거가 없어 근사적으로 위의 식을 이용하여 방파제 설계에 적용하고 있다. 이후 본 연구팀(정재상 등, 2013; 나유리 등, 2014; 정재상 등, 2014)은 파랑의 경사각에 따른 파력 감소효과는 반사파의 회절에 의한 에너지 이동에 의한 것임을 주장하였다. 따라서 향후 연구과제를 통해 이에 대한 검증이 수행되어야 할 것이며, 정재상 등의 주장이 확인될 경우 국내 건설기술의 발전과 국내 항만관련 기술경쟁력 제고에 큰 도움이 될 것이다.

(2) 장대구조물에 작용하는 파력감소효과에 대한 기존 연구사례

장대구조물에 작용하는 파력감소효과에 대한 연구는 Tratteberg(1968)에 의해 최초로 수행되었다. 이후 Battjes(1982)가 비쇄파 조건에서 규칙파 및 다방향 불규칙파에 대한 해석해를 제시하였다. 하지만 Battjes는 다양한 주기를 갖는 불규칙파에 대한 연구는 수행하지 않았으며, 쇄파 조건은 고려하지 않았다. 이후 Takahashi and Shimosako(1990)가 수리모형실험을 통해 장대구조물의 파력감소효과를 연구하였다. 그들은 쇄파 및 비쇄파 조건에서 일방향 및 다방향 불규칙파에 대한 파력감소효과를 실험을 통해 확인하였으나, 이에 대한 이론적 근거는

규칙파에 대한 해석해를 이용하였다. Frigaard et al.(1998)은 다방향 불규칙파랑을 대상으로 쇄파 조건에서 수리모형실험을 통해 연구하였으며, 일방향 파랑에 비해 다방향 파랑의 파력이 더욱 감소됨을 확인하였다. Martinelli et al.(2007)은 통계적인 분석 방법을 통해 다방향 불규칙파랑의 쇄파 및 비쇄파 조건에서 장대구조물에 작용하는 파력에 대한 해석해를 제시하였다. 정재상 등(2010)은 Battjes(1982)의 연구에 더하여 다양한 주기에 대해 다방향 불규칙파에 대한 해석해를 제시하였으며, 파랑의 방향 비대칭효과가 장대구조물의 파력감소효과에 미치는 영향을 추가로 분석하였다.

그런데, 기존의 연구들은 모두 장대구조물 배후로 침입하는 회절파의 효과는 고려하지 않았다. 특히 기존의 실험적 연구들은 방파제 배후로 진행되는 파랑의 회절을 임의로 막은 채 수리모형실험을 진행하였다. 하지만 실제 해역에서는 방파제 배후에서는 회절이 발생한다. 따라서, 장대구조물에 작용하는 파력을 계산하기 위해서는 회절 효과가 포함되어야 할 것이다.



(a) 1982년 유럽의 연구진이 제안한 규칙파의 감소파력비(Battjes, 1982)



(b) 2007년 이탈리아 연구진이 수행한 수리모형실험 전경(Martinelli et al., 2007)

<그림 7> 기존 연구자들의 주요 연구 현황

2. 국내외 관련 기술 특허 동향

본 연구와 직접적으로 관련된 국내외의 특허는 없다. 다만 본 연구의 주요 과제 중 하나인 장대구조물의 경우, 구조물의 장대화 방안에 대해 국내 특허 1건 존재한다. 하지만 본 특허의 경우 해안구조물을 **장대화하는 방법 제안에 국한된 특허**이므로 향후 실용화 및 사업화에 따른 분쟁은 예상되지 않는다. 본 연구는 회절을 고려하여 일반구조물 및 장대구조물에 작용하는 파력을 예측하는 식을 제안하는 것으로 본 연구의 결과를 상기 특허에 적용이 가능하여 두 연구가 시너지 효과를 발휘할 수 있을 것이다. 국내 관련 특허에 대한 세부사항은 표 5와 같다.

3. 국내외 시장분석 및 연구동향

가. 국내외 항만업계의 시장분석 및 산업동향

건설산업의 국내 수주액은 2011년 941억달러 수준으로 2007년까지 증가추세에 있었으나 이후 약간의 하락세에 있는 추세이다. 반면 해외건설 수주액은 2002년 이후 지속적으로 증가

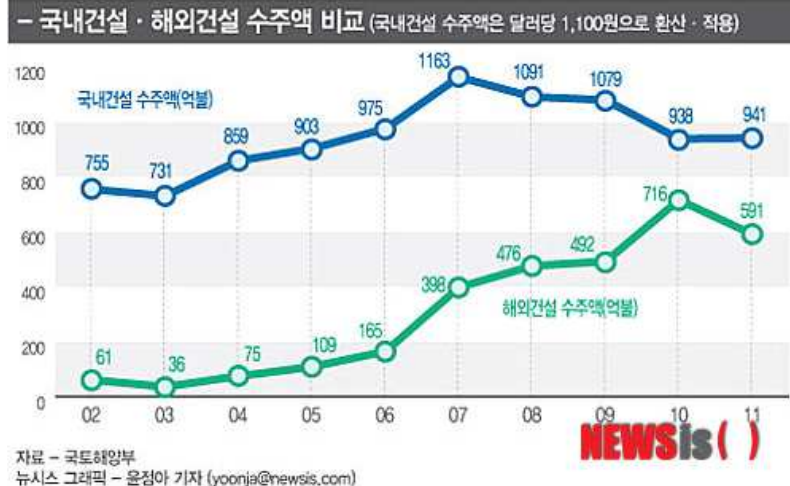
하여 2011년 591억달러에 이르는 것으로 분석되었다. 국내외 건설산업 수주액은 그림 8을 참고할 수 있다.

그림 9(a)는 항만분야 해외 건설 수주액 변화를 나타낸 그림이다. 항만분야의 해외사업 수주액은 2002년 33백만달러(360억원) 규모에서 2012년 10.9억달러(1.2조원) 규모로 급격히 증가하였다. 2003년에서 2012년까지 항만분야 해외사업 평균 수주액은 9.4억달러(1.03조원) 규모로 평가되며, 2012년 이후에도 지속적인 성장이 예상된다. 항만분야의 국내산업은 그림 9(b)와 같은 해운·항만분야의 정부예산규모를 통해 간접적으로 확인할 수 있다. 해운·항만분야의 정부예산은 2007년 3.8조원 규모에서 2014년 2.6조원 규모로 매년 지속적인 감소추세에 있다. 하지만 향후에도 연평균 2.5조원 규모가 유지될 것으로 파악된다.

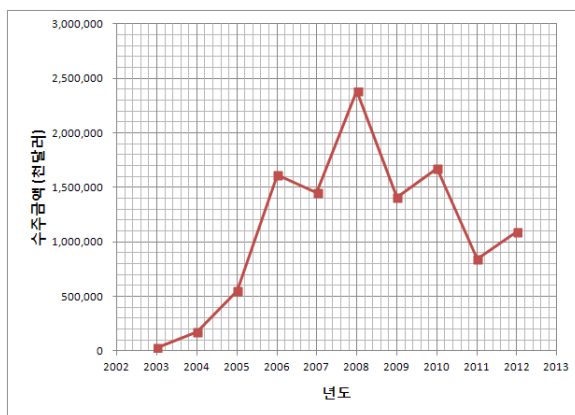
이상의 현황을 통해 항만 건설시장 규모는 국내 1조원(해운·항만분야 정부예산의 30%), 해외 1조원 규모로 파악되며 해외시장규모는 지속적으로 증가하고, 국내시장규모는 감소가 예상되어 국내외 시장규모는 2조원 규모를 당분간 유지할 것으로 검토된다. 해외시장규모의 경우 지속적인 증가가 예상되는데 국내 기업의 성공적인 해외진출을 위해서는 **세계적으로 경쟁력 있는 우리나라 고유의 기술개발이 절실한 실정이다.**

〈표 5〉 국내 관련 특허 세부사항

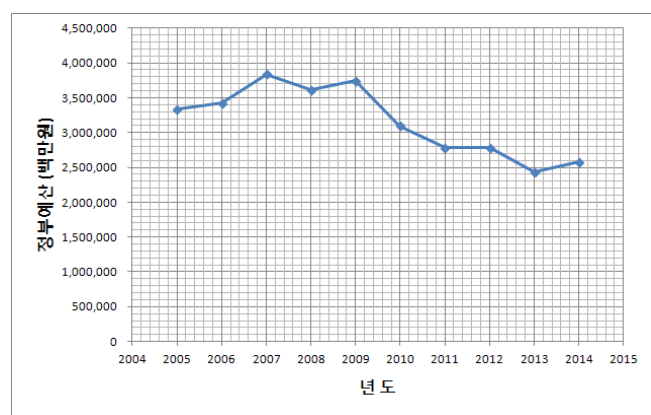
구 분	주요내용	비 고
등록번호/일자	1010130230000 / 2011.01.28	
출원인	현대산업개발 주식회사	
발명인	김범형, 김종석, 이정욱, 정재상	
초 록	본 발명은 방파제를 구성하는 각각의 단위 케이슨이 기하학적 맞물림에 의한 인터록킹(interlocking)에 의해 일체 거동하도록 하여 케이슨의 장대화를 통한 파력의 평활화 효과에 의해 각 단위 케이슨에 작용하는 파력을 감소시킴으로써 경제적 설계가 가능하면서도 이상 파랑 등의 내습 시에 케이슨 방파제의 안정성을 높일 수 있도록 하는데 그 목적이 있다. 이를 위해 본 발명은, 단위 케이슨 들을 일렬로 거치하여 구성되는 케이슨 방파제에 있어서, 단위 케이슨이 인터록킹되어 케이슨 방파제에 작용하는 단위 폭당 파력이 감소될 수 있도록 한 것을 특징으로 하는 케이슨 방파제 및 그 시공방법을 제공한다.	
키워드	인터록킹, 장대화, 케이슨, 방파제	



〈그림 8〉 국내외 건설수주액



(a)

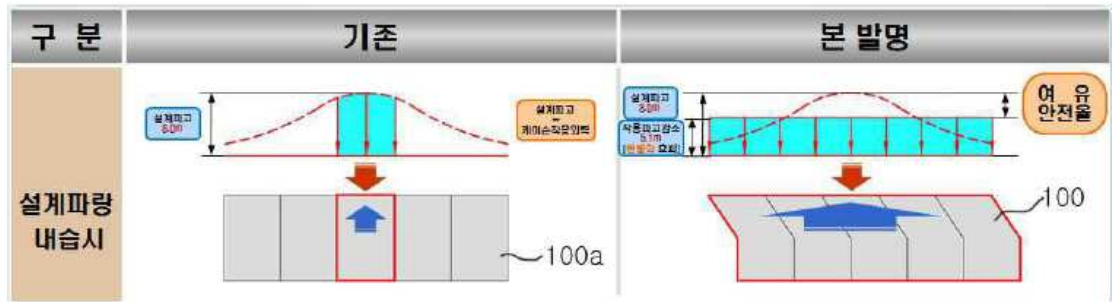


(b)

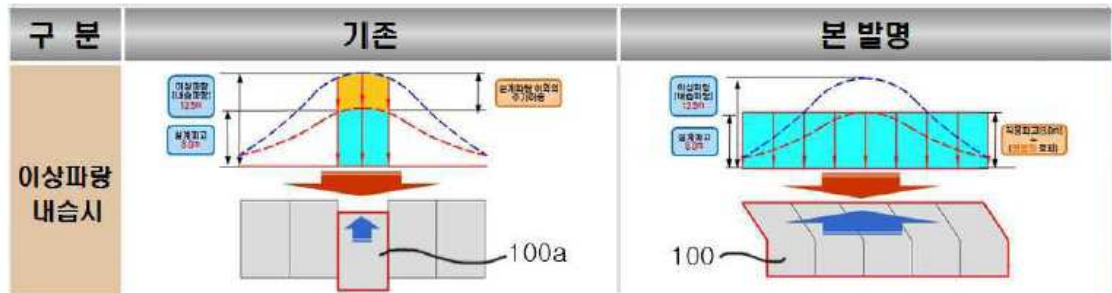
〈그림 9〉 (a) 해외 건설(항만부문) 수주금액 (국토교통통계누리, stat.mltm.go.kr), (b) 해운·항만분야 정부 예산 현황 (기획재정부, 디지털예산회계시스템)

나. 국내 항만업계의 연구동향

국내 항만 업계에서는 2008년 이후 현대산업개발을 중심으로 인터록킹을 통한 해양구조물의 장대화 방안에 대하여 연구하였다(현대산업개발, 2008; 김범형 등, 2010). 인터록킹 방파제의 기본적인 개념도는 그림 10과 같다. 인터록킹 방파제는 일반 직립식 방파제와는 달리 평면에서 보았을 때 구조물 측면에 요철을 두어 각 구조체가 일체로 거동하게 함으로써 장대화를 구현한 구조물이다. 설계기준을 넘어선 이상파랑이 내습할 경우 일반 방파제는 활동 파괴가 발생한다. 하지만 장대화를 구현한 인터록킹 방파제는 전체구조물에 평균적인 파력이 작용하여 활동파괴가 발생하지 않게 된다. 실제로 현대산업개발에서는 위와 같은 인터록킹 방파제를 적용할 경우 방파제의 폭을 최대 70%까지 줄일 수 있는 것으로 검토하였다. 이는 동해안에서 1000m 길이의 방파제 평균 공사비용이 약 2000억원 가량인데, 이와 같은 방파제 시공비용을 30%인 600억원 가량 절감할 수 있는 수치이다. 인터록킹 방파제에 대한 연구는 김범형 등(2011a, 2011b), 박우선 등(2011)에 의해 수행된 바 있다.



(a) 설계파랑 내습시



(b) 이상파랑 내습시

<그림 10> 인터록킹 방파제에 작용하는 파력 개념도

4. 종합결론

국내 건설수요가 급감하여 건설업의 경영여건이 악화되었으며, 가격경쟁력만을 앞세운 해외 건설사업 진출로 손실이 급증하는 위험이 있다. 또한 본 연구와 관련된 정부의 투자 미흡과 본 연구결과의 적용사례가 없어서 관련분야 기술자들의 신뢰도 확보가 곤란한 약점이 있다. 본 연구는 **세계 최초의 원천연구**라는 강점을 갖고 있다. 또한, TRL 3단계 수준까지 자체 연구를 통해 기 수행하였으며, 과거 관련 연구를 수행하였던 연구인력과 관련 특허의 발명자가 본 연구에 참가하고 있다. 여기에 더하여 최근 동남아 지역의 방조제 등 농업관련 ODA사업과 해양에너지 관련 사업 수요가 급증하고 있다. 따라서, 연구관련 정부투자를 확대하고, 향후 추가 연구를 통해 시험시공까지 완료하면, 우수한 국내 기술력이 이용하여 **동남아시아 지역의 해외사업 진출 등을 통해 국내 건설산업의 활성화**에도 기여할 수 있을 것이다.

마지막으로 가장 중요한 국민의 생명과 재산을 보호할 수 있는 보다 안전한 해안구조물 설계 및 시공에 본 연구 결과가 큰 도움이 될 수 있을 것이다.

<표 6> 본 과제의 강점, 약점, 기회, 위협

강점 (Strength)	약점 (Weak)
- 본 연구는 세계 최초의 원천 연구 - TRL 3단계까지 연구 기 수행 - 유사연구 참여자 및 특허 발명자가 본 연구에 참가	- 본 연구관련 정부 투자 미흡 - 기술의 불확실성에 따른 관련 기술자들의 신뢰도 확보 곤란 - 본 연구 결과를 적용한 건설사례가 없음
기회 (Opportunity)	위협 (Threat)
- 동남아 지역의 농업 및 수자원 관련 ODA사업 급증 - 해양에너지 관련 사업 등 본 연구 적용 가능 사업 활성화	- 국내 건설 수요 급감, 국내 건설경기 악화 - 해외 건설사업 진출에 따른 기업체 손실 증가 - 기상 이변에 따른 태풍의 대형화 및 해안구조물 피해 증가

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

1. 반무한방파제에 작용하는 지점별 파력 분포

가. 서론

일반적으로 파랑이 방파제(breakwater)에 경사지게 입사할 경우 방파제에 작용하는 파력은 수직 입사하는 경우에 비해 작다고 알려져 있다. Tanimoto et al.(1976)는 일련의 수리모형실험을 통해 파랑이 방파제에 경사지게 입사할수록 파력이 더욱 감소한다는 사실을 밝혔으며, 이를 통해 기존의 Goda(1973)가 제시한 파력식에 $0.5(1 + \cos \beta)$ 항을 추가함으로써 식을 수정하였다. Franco et al.(1996)과 Midrigal(1998)은 수리모형실험을 통해 파랑의 경사 입사각이 클수록 작용 파력이 감소한다는 사실을 확인하였다.

방파제 설계에서 대부분의 경우 방파제 전면에 작용하는 파력만을 고려한다. 하지만 방파제 주변에 회절이 발생할 경우 방파제 전면 및 후면에도 회절 성분에 의한 파력이 작용한다. 따라서, 방파제에 작용하는 파력은 중복파에 의한 일정한 크기의 파력이 아니라 방파제 수평 방향의 위치에 따라 다른 회절이 고려된 파력이 존재한다. Hur et al.(2006)은 3차원 수치해석을 통해 회절에 의해 방파제 후면에도 파력이 작용하며, 방파제 전면의 파고가 비교적 작은 경우 입사파 및 회절파에 의한 총 파력은 회절파의 위상에 따라 전면 파고가 큰 경우보다 더 클 수 있다는 점을 확인하였다. 하지만 Hur et al.(2006)은 반무한 방파제의 임의의 지점에 작용하는 파력만을 분석하였고 방파제에 수직으로 입사하는 경우만 검토하였다. 일반적으로 방파제 전면에 회절파의 파봉이 위치하면 후면에 파곡이 위치하여 방파제에 작용하는 총 파력은 전면에 작용하는 파력보다 더 커지게 된다. 따라서, 반무한 방파제의 두부 가까이 회절이 크게 발생하는 곳에는 회절에 의한 방파제 후면에서 작용하는 파력도 함께 고려해야 한다.

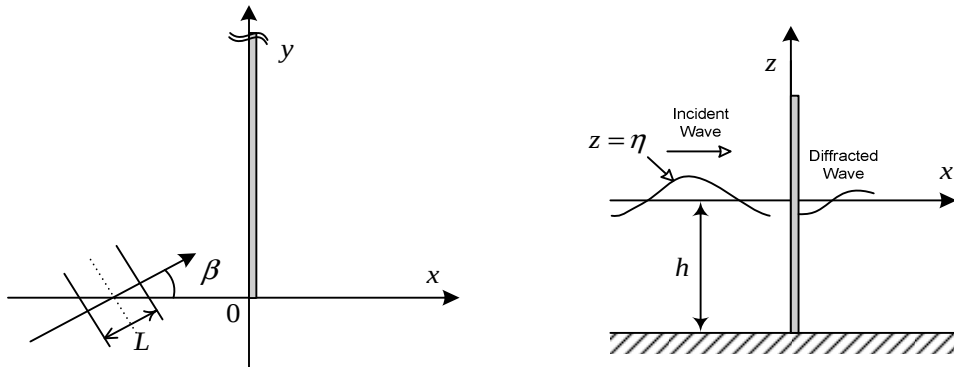
본 연구에서 비쇄파 조건에서 반무한 직립 방파제에 작용하는 파력분포 특성을 규명하였고, 파랑의 회절을 고려하여 경사 입사각이 증가함에 따라 파력이 감소하는 현상을 밝혔다. Jung et al.(2011)은 장대구조물에 작용하는 파력 검토를 위해 방파제 후면의 회절을 고려하였고, Jung et al.(2015)은 방파제 후면 뿐만 아니라 전면의 회절까지 고려하여 반무한방파제 형식의 장대구조물에 작용하는 파력을 검토하였다. 본 연구에서 Jung et al.(2015)의 연구와 같이 방파제 후면 뿐만 아니라 전면에서의 회절도 포함하였다. Jung et al.(2015)의 연구는 장대구조물에 작용하는 평균 파력에 대한 연구인 반면 본 연구는 장대구조물이 아닌 일반 구조물에 작용하는 지점별 파력에 대한 연구이다. 따라서 본 연구의 결과는 비쇄파 조건에서 방파제 구조물의 길이가 충분히 길지 않은 일반 방파제에 적용될 수 있다. 파력분포 계산을 위해 선형파 이론과 Penney and Price(1952)가 제시한 회절의 해석해를 이용하였다.

본 연구에서 입사파랑으로 규칙파(monochromatic wave)와 다방향 불규칙파(multi-directional random waves)를 적용하였다. 다방향 불규칙파의 상대파력의 정의를 위해 제곱 평균의 제곱근비(ratio of root mean square)의 개념과 파력 스펙트럼비를 이용하였다. 3.1.나에서 회절을 고려한 규칙파의 파력에 대해 기술하고, 3.1.다에서 불규칙파의 파력특성에 대해 기술하였다. 그리고 마지막 3.1.라에서 결론을 기술하였다.

나. 회절을 고려한 반무한방파제에 작용하는 규칙파의 파력

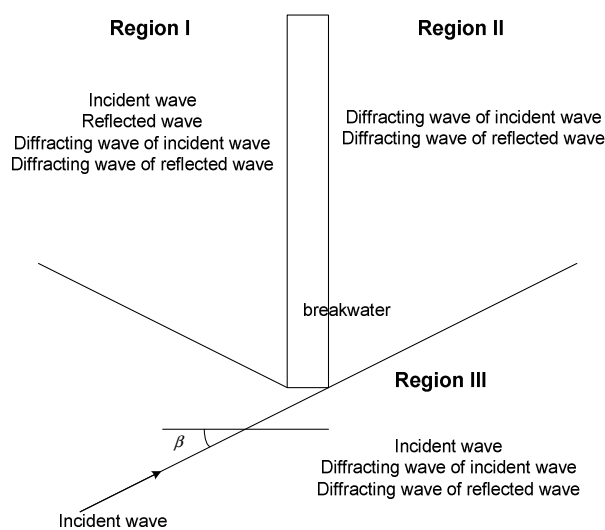
(1) 해석해의 유도

회절을 고려한 파력분포 해석을 위해 선형파 이론과 Penney and Price(1952)의 회절에 대한 해석해를 이용하여 파력식을 유도하였다. 수치해석을 위한 변수 및 구조물에 대한 설명은 그림 11을 참고할 수 있다. 그림 11에서 L 은 파장(wave number), β 는 구조물 전면에 수직인 선과 입사 파향선과의 교각을 뜻하며, h 는 수심(water depth), η 는 자유수면변위(free surface elevation)를 나타낸다.



<그림 11> Definition sketch for the analysis of wave forces on vertical breakwater.

본 연구에서는 입사파, 반사파, 입사파의 회절성분, 반사파의 회절성분을 모두 반영하여 직립방파제에 작용하는 파력의 해석해를 제시한다. 방파제의 전면(Region I)에는 입사파, 반사파, 입사파의 회절성분 및 반사파의 회절성분이 존재하며, 방파제의 후면(Region II)에는 입사파 및 반사파의 회절성분이 존재한다. 방파제 주위에서 각 영역별파랑성분은 그림 12와 같다.



<그림 12> Wave components in each area around the breakwater.

선형파 이론에서 방파제 전면의 입사파 및 반사파 속도포텐셜(velocity potential)은 다음 식들과 같다.

$$\phi_i = \frac{i g a_i(x,y)}{\omega} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} e^{i(\omega t - kx \cos \beta - ky \sin \beta)} \quad (1)$$

$$\phi_r = \frac{i g a_r(x,y)}{\omega} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} e^{i(\omega t + kx \cos \beta - ky \sin \beta)} \quad (2)$$

$$a_r(x,y) = K_r a_i(x,y) \quad (3)$$

여기서, ϕ_i 는 입사파의 속도포텐셜, ϕ_r 은 반사파의 속도포텐셜을 나타낸다. $a_i(x,y)$ 와 $a_r(x,y)$ 는 각각 입사파 및 반사파의 진폭(wave amplitude)을 뜻하며 ω 는 각진동수(angular frequency), g 는 중력가속도(gravitational acceleration) 그리고, K_r 은 반사계수를 뜻한다. 방파제 전면에서 입사파 및 반사파의 회절성분에 대한 속도포텐셜은 다음 식 (4)와 같으며, 방파제 후면에서 입사파 및 반사파의 회절성분에 대한 속도포텐셜은 아래 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_{d,f} = \frac{i g}{\omega} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} [-b_{i,f}(y)e^{i(\omega t - ky \sin \beta)} - b_{r,f}(y)e^{i(\omega t - ky \sin \beta)}] \quad (4)$$

$$\phi_{d,l} = \frac{i g}{\omega} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} [b_{i,l}(y)e^{i(\omega t - ky \sin \beta)} + b_{r,l}(y)e^{i(\omega t - ky \sin \beta)}] \quad (5)$$

여기서, $b_{i,f}(y)$ 와 $b_{r,f}(y)$ 는 입사파의 진폭으로 무차원화 된 회절파의 진폭으로 각각 입사파와 반사파의 회절 성분이고, 각각 입사파와 반사파의 회절성분이고, $b_{i,l}(y)$ 와 $b_{r,l}(y)$ 는 방파제 후면에서 입사파의 진폭으로 무차원화 된 회절파의 진폭으로 각각 입사파와 반사파의 회절 성분이다. 이 회절성분들의 위상정보는 Penney and Price(1952)의 복소수로 표현된 해석해 내부에 포함되어 있다. 각 회절성분들은 Penney and Price의 해석해를 이용하여 계산할 수 있으며, 다음 식과 같이 표현된다.

$$b_{i,f}(y) = f(-\psi_f), \quad b_{r,f}(y) = K_r f(-\psi_f') \quad (6)$$

$$b_{i,l}(y) = f(\psi_l), \quad b_{r,l}(y) = K_r f(\psi_l') \quad (7)$$

여기서,

$$f(\psi) = \frac{1}{2}(1+i) \int_{-\infty}^{\psi} e^{\frac{1}{2}i\pi u^2} du \quad (8)$$

$$\psi_f = \psi_f' = 2\sqrt{\frac{ky}{\pi}} \sin\left(\frac{1}{2}\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right)\right) \quad (9)$$

$$\psi_l = \psi_l' = 2\sqrt{\frac{ky}{\pi}} \sin\left(\frac{1}{2}\left(\beta + \frac{3\pi}{2}\right)\right) \quad (10)$$

식 (9)와 식 (10)에서 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\psi_f = -\psi_l, \quad f(-\psi_f) = f(-\psi_f') = f(\psi_l) = f(\psi_l') \quad (11)$$

식 (11)을 통해서 방파제 전면 및 후면에서 입사파 및 반사파의 회절성분은 모두 동일한 값을 가짐을 알 수 있으며, 이를 통해서 방파제 후면에서 회절에 의해 생성된 에너지와 방파제 전면에서 회절에 의해 감소한 에너지가 동일함을 확인할 수 있다. 방파제 전면에서의 총 속도포텐셜은 입사파, 반사파 및 회절성분의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\phi_f = \phi_i + \phi_r + \phi_{d,f} \quad (12)$$

$$= \frac{i g}{\omega} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} a_i \left[\{(1+K_r) - (b_{i,f} + b_{r,f})\} e^{-iky \sin \beta} \right] e^{i\omega t}$$

방파제 전면 및 후면에서의 정수압 성분을 제외한 파압은 아래 식들과 같다.

$$P_f = -\rho \frac{\partial \phi_f}{\partial t} = \rho g \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} a_i \left[\{(1+K_r) - (b_{i,f} + b_{r,f})\} e^{-iky \sin \beta} \right] e^{i\omega t} \quad (13)$$

$$P_l = -\rho \frac{\partial \phi_{d,l}}{\partial t} = \rho g \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} a_i \left[(b_{i,l} + b_{r,l}) e^{-iky \sin \beta} \right] e^{i\omega t} \quad (14)$$

방파제 단위폭 당 작용하는 파력은 파압을 수심 방향으로 적분함으로써 구할 수 있다. 파력의 방향은 방파제 전면에서 후면으로 작용하는 파력을 +로 가정하였다. 방파제 전면 및 후면에서의 단위폭 당 파력은 다음과 같다.

$$P_f = \rho g h \frac{\tanh kh}{kh} a_i \left[\{(1+K_r) - (b_{i,f} + b_{r,f})\} e^{-iky \sin \beta} \right] e^{i\omega t} \quad (15)$$

$$P_l = -\rho g h \frac{\tanh kh}{kh} a_i \left[(b_{i,l} + b_{r,l}) e^{-iky \sin \beta} \right] e^{i\omega t} \quad (16)$$

방파제에 단위폭 당 작용하는 총파력은 방파제 전면 및 후면에서 작용하는 파력의 합으로 표현할 수 있으며, 이는 아래 식과 같다.

$$P_t = P_f + P_l \quad (17)$$

$$= \rho g h \frac{\tanh kh}{kh} a_i \left[\{(1+K_r) - (b_{i,f} + b_{r,f}) - (b_{i,l} + b_{r,l})\} e^{-iky \sin \beta} \right] e^{i\omega t}$$

회절을 무시하고, 방파제 전·후면에 동시에 작용하는 정수압 성분을 제외한 지점별 파력은 식 (17)에서 회절성분을 제거함으로써 구할 수 있으며 이는 식 (18)과 같다.

$$P_0 = \rho g h \frac{\tanh ky}{kh} (1+K_r) a_i e^{-iky \sin \beta} e^{i\omega t} \quad (18)$$

회절을 고려한 경우 방파제 지점별 단위폭당 총파력과 회절을 무시한 경우의 총파력의비(즉, 상대 총 파력, relative total force)는 다음 식과 같다.

$$\left| \frac{P_t}{P_0} \right| = \left| \frac{(1+K_r) - (b_{i,f} + b_{r,f} + b_{i,l} + b_{r,l})}{(1+K_r)} \right| \quad (19)$$

회절을 고려한 경우 방파제 전면의 파력과 회절을 무시한 경우의 총 파력의 비(즉, 상대 전면 파력, relative front-side force)와 회절을 고려한 경우 방파제 후면에서의 파력과 회절을 무시한 경우의 파력의 비(즉, 상대 후면 파력, relative lee-side force)를 각각 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\left| \frac{P_f}{P_0} \right| = \left| \frac{(1+K_r) - (b_{i,f} + b_{r,f})}{(1+K_r)} \right| \quad (20)$$

$$\left| \frac{P_l}{P_0} \right| = \left| \frac{(b_{i,l} + b_{r,l})}{(1+K_r)a_i} \right| \quad (21)$$

본 연구에서 유도한 회절을 고려한 파력과 회절을 무시한 경우의 파력비는 $e^{i\omega t}$ 항 및 $e^{-iky \sin \beta}$ 항이 약분되어 없어지므로 일정한 값을 갖는다. 따라서 본 연구에서 제안한 파력비는 $e^{i\omega t}$ 항 및 $e^{-iky \sin \beta}$ 항이 1인 경우에도 성립하므로 최대 파력비로 볼 수 있다.

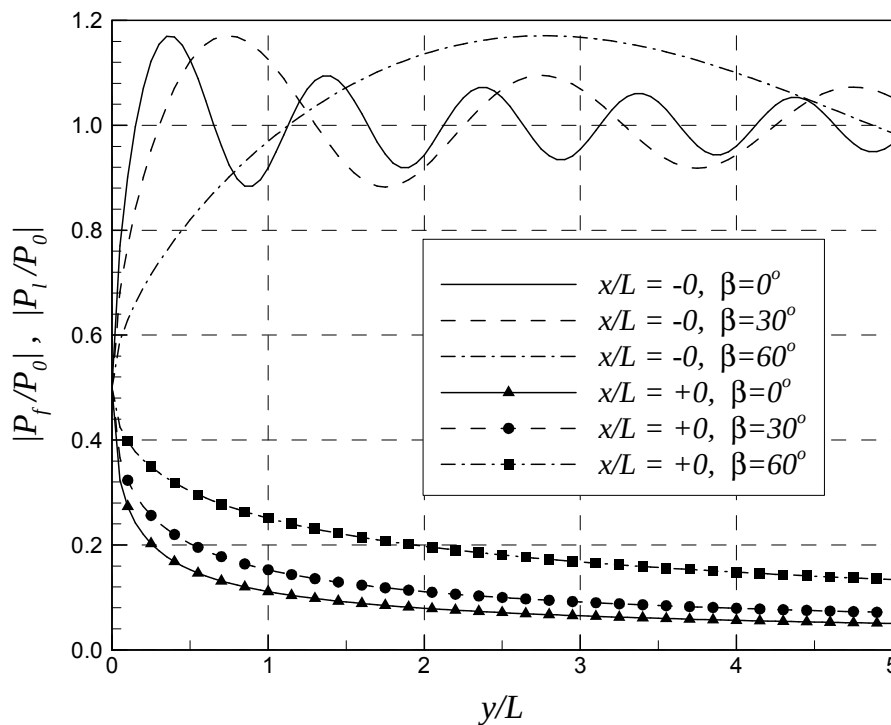
(2) 반무한방파제에 작용하는 파력분포 특성

직립방파제 전면에서의 파력 및 파고는 입사파 및 반사파 성분의 합으로 결정된다. 완전반사 조건에서 방파제 전면에서의 파고는 입사파고의 2배이다. 하지만 이는 회절을 무시하였을 경우에만 타당하며, 회절이 고려될 경우에는 이와는 다른 값들을 갖게 된다.

파랑의 입사각이 15° 이상인 경우 방파제 전면에 작용하는 파력은 완전반사 조건에서 입사각이 0 도인 경우 작용파력에 $0.5(1 + \cos \beta)$ 를 곱한 값을 적용한다(Tanimoto et al., 1976; Burcharth and Liu, 1999; Goda, 2000). Tanimoto et al.(1976)은 일련의 수리모형실험 결과로부터 방파제 전면에 작용하는 파력으로 파랑이 경사지게 입사하는 경우 수직 입사 파력에 $0.5(1 + \cos \beta)$ 항을 곱한 값을 제안하였다. 이후 실제 방파제 설계(해양수산부, 2005)에서 파랑의 경사 입사각 β 가 15° 이상인 경우 방파제 전면에 작용하는 파력으로 수직입사 파력에 $0.5(1 + \cos \beta')$ 를 곱한 값을 사용하고 있다(Goda, 2000). 여기서 $\beta' (= \beta - 15^\circ)$ 는 경사 입사각 β 에 15° 만큼 보정한 입사각이다. 본 절에서는 해석해를 이용하고 회절을 고려하여 경사 입사각에 따른 반무한방파제에서의 총 파력을 제시하고 Tanimoto et al.에 의한 보정값 $0.5(1 + \cos \beta')$ 와 비교하였다. 본 연구에서 직립방파제의 반사계수(K_r)는 완전반사 조건인 1.0으로 가정하였다.

반무한방파제에 작용하는 파력분포는 그림 13에 도시하였다. 이 그림에서 $x/L=+0$ 은 방파제 후면을 나타내며, $y/L=-0$ 은 방파제 전면을 나타낸다. 방파제 두부($y/L=0$)에서 방파제 전면 및 후면에 작용하는 상대파력은 사실상 반사가 발생하지 않기 때문에 0.5이다. 방파제 두부에서 멀어질수록 방파제 전면의 상대파력은 진동하면서 1.0으로 수렴한다. 방파제 두부에서 멀어질수록 방파제 전면의 상대파력은 위 아래로 진동하면서 1로 수렴하였다. 반면 방

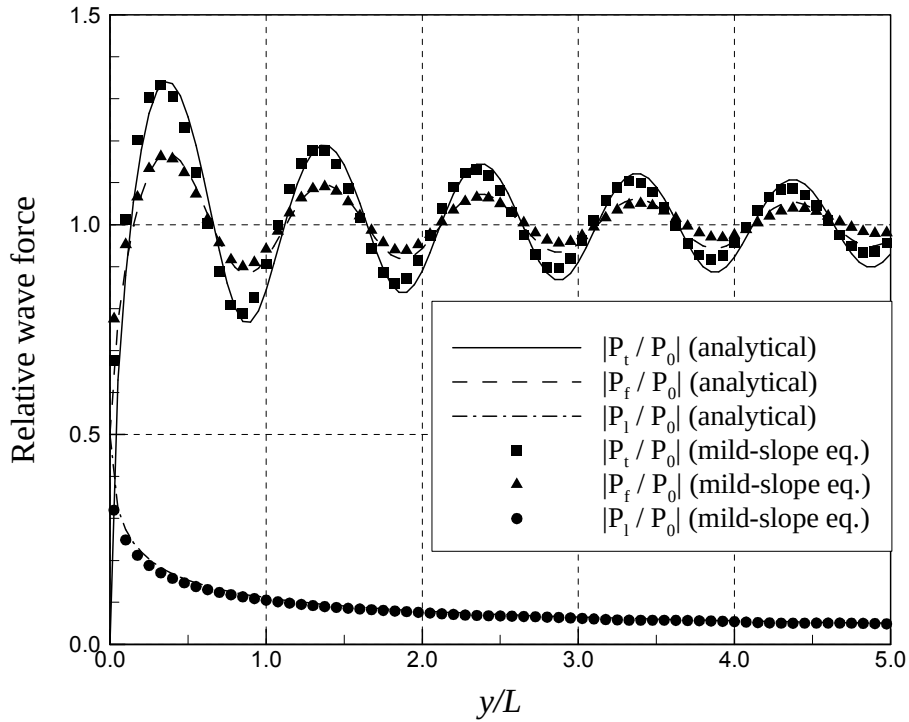
파제 후면에 작용하는 상대파력은 방파제 두부에서 멀어질수록 감소하였다. 파랑의 경사 입사각이 증가할수록 방파제 후면에 작용하는 회절파의 파력은 더 크게 증가하였다. 방파제 전면에서 중복파의 위상과 회절파의 위상이 일치하는 지점에서는 입사파, 반사파, 회절파의 파봉이 중첩되어 큰 파력이 발생할 것이다. 중복파의 위상과 회절파의 위상이 180° 만큼 차이가 나는 지점에서는 중복파의 파봉과 회절파의 파곡이 중첩되어 작은 파력이 발생할 것이다. 따라서 방파제 전면에서 파력의 진동 양상이 발생하게 되는 것이다. 방파제 전면에서의 회절뿐만 아니라 후면에서의 회절까지 고려하면 파력의 진동 양상이 더 크게 발생할 것이다. 이는 전면의 회절 성분과 후면의 회절 성분이 180° 만큼 위상차가 나기 때문이다. 즉, 전면의 회절 성분이 파봉일 때 후면의 회절 성분은 항상 파곡이 되어 전 후 양면의 회절 성분에 의한 파력차가 더 크게 증폭되는 것이다. 방파제 전면에서의 회절파와 방파제 후면에서의 회절파가 180° 위상차가 난다는 사실을 Penney and Price(1952)와 Lee et al.(2005)의 연구에서 확인할 수 있겠다.



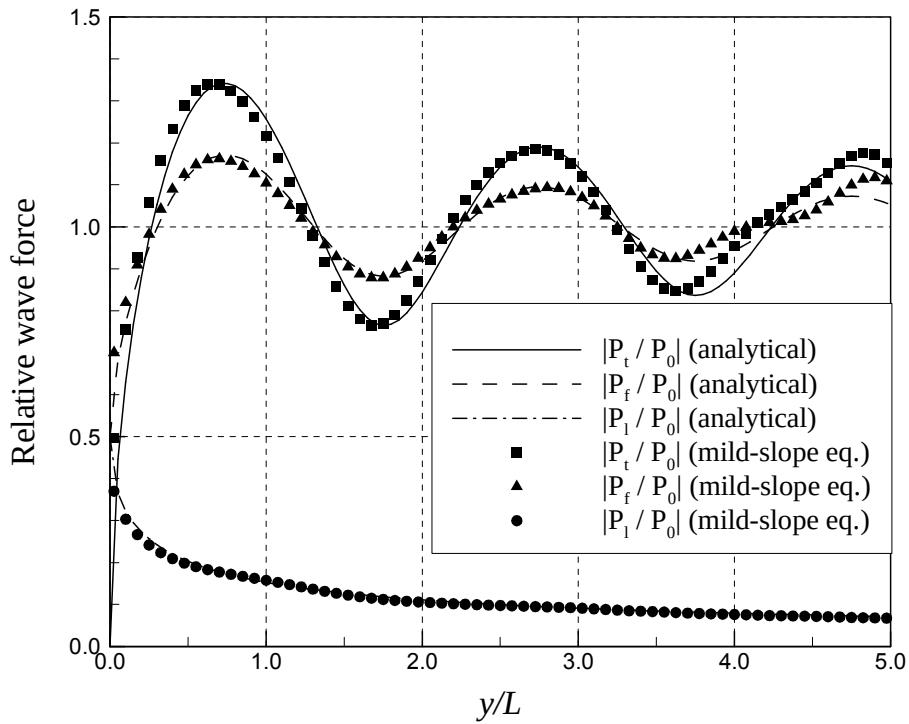
〈그림 13〉 Distribution of relative wave force on a semi-infinite breakwater.

그림 14~16은 경사 입사각이 0도, 30도 및 60도인 경우 반무한방파제에 작용하는 총파력과 전면 및 후면에 작용하는 파력을 도시한 그림이다. 해석해의 정확성 검증을 위해 Radder and Digemans(1985)가 제시한 쌍곡선형 완경사방정식(mild-slope equation)을 이용한 수치해석 결과와 비교하였다. 경사 입사파를 조파하기 위해 직선조파기법을 쓰면 90° 각도의 두 조파선이 만나는 지점에서 파랑에너지가 과다하게 또는 과소하게 생성되어 에너지 불연속에 의한 회절이 발생한다. 이러한 문제를 최소화하기 위해 본 수치모델에서는 Lee and Yoon(2007)이 제안한 곡선조파기법을 적용하였다. 비교 결과 해석해와 완경사방정식을 통한 수치해는 최대 오차 5% 범위 내에서 거의 일치함을 볼 수 있으며, 본 연구에서 제시한 해석해가 타당함을 확인할 수 있다. 방파제의 두부에서 방파제에 작용하는 총 파력은 방파제의 폭이 0인 조건이기 때문에 전면에 작용하는 입사파의 파력과 배후에서 작용하는 회절파의 파력이 상쇄되어 0이 된다. 방파제에 작용하는 총 파력은 전면에 작용하는 파력에 비해 진동하는 진폭이 더욱 컸다. 이는 전면의 회절 성분과 후면의 회절 성분이 180° 만큼 위상차가 나서 총 파

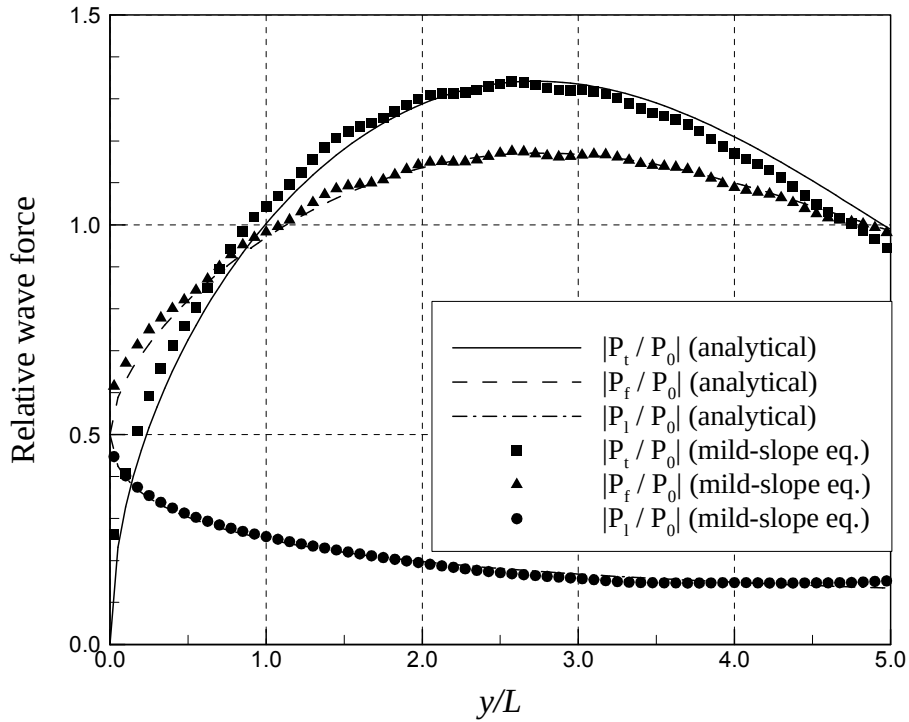
력에 고려된 전면에서의 회절 성분에 후면에서의 회절 성분을 빼 값의 크기가 전면의 파력에 고려된 전면에서의 회절 성분의 크기보다 더 크기 때문이다. 파랑의 경사 입사각이 증가할수록 방파제 전면에 작용하는 파력 진동패턴의 파장이 더 크게 증가하였다.



<그림 14> Distribution of relative wave force on a semi-infinite breakwater ($\beta = 0^\circ$).

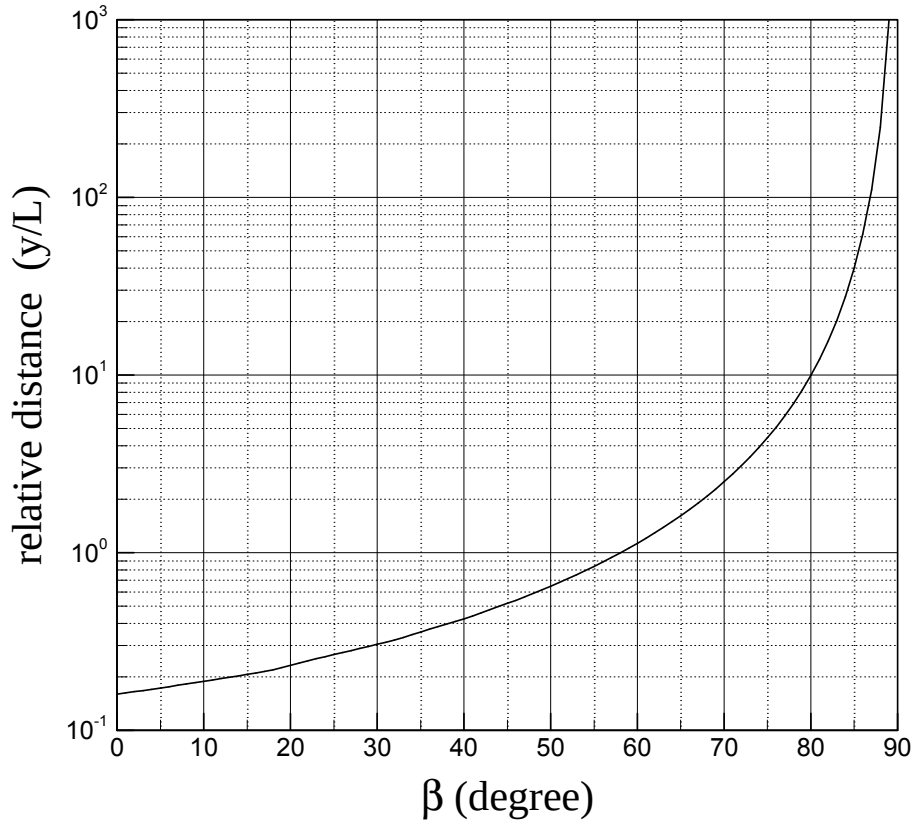


<그림 15> Distribution of relative wave force on a semi-infinite breakwater ($\beta = 30^\circ$).



〈그림 16〉 Distribution of relative wave force on a semi-infinite breakwater ($\beta=60^\circ$).

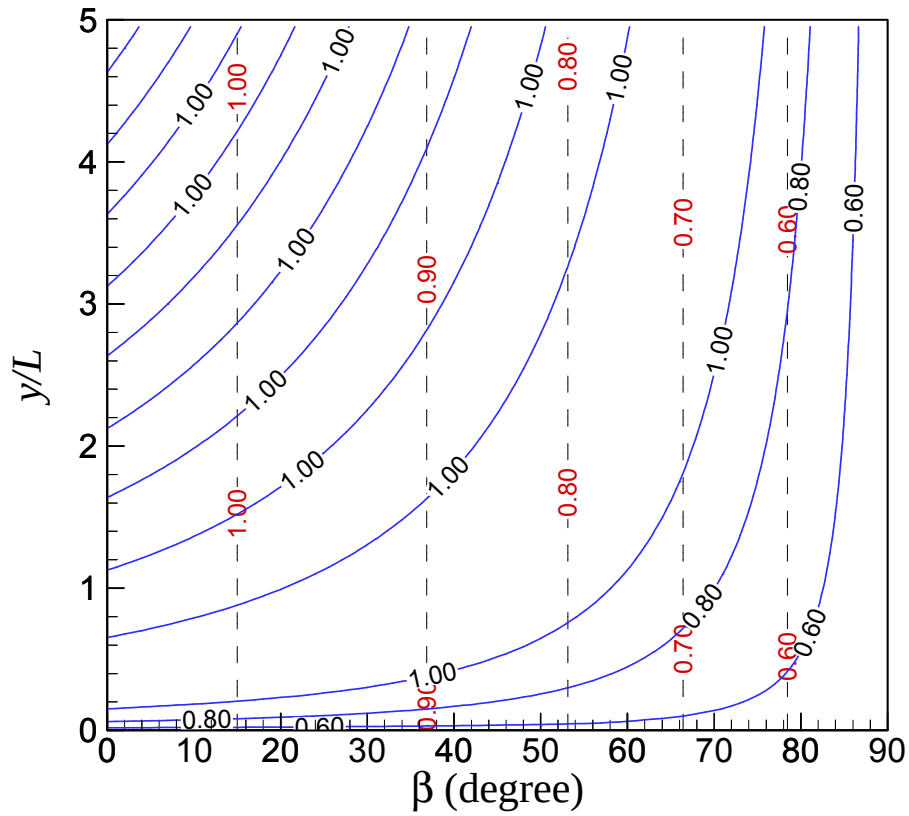
일반적으로 방파제 전면에서 작용하는 상대파력의 경우 y/L 이 0일 때(방파제의 두부) 0.5에서 출발하여 y/L 이 증가함에 따라 상대파력도 역시 증가하여 1.0에 도달하게 된다. 그림 17은 방파제 전면에서 작용하는 파력의 상대파력이 최초로 1.0에 도달하는 방파제 두부로부터의 거리를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 파랑의 경사 입사각이 증가할수록 상대파력 1.0에 도달하는 상대거리가 기하급수적으로 증가함을 볼 수 있다. 경사 입사각이 60° 이상인 경우에는 y/L 이 1.0 이상인 지점에서 상대파력 1.0에 도달하였다. 또한 경사 입사각이 80° 이상인 경우에는 y/L 이 10.0 이상에서 상대파력 1.0에 도달한다. 이를 통해 입사각이 큰 경우에는 회절에 의해 방파제 전면에서의 상대파력 분포가 대부분 1.0 이하임을 알 수 있으며, 경사 입사각이 클수록 방파제에 작용하는 파력이 감소하는 특성에 대해 회절 관점에서 설명이 가능하다는 점 또한 알 수 있다.



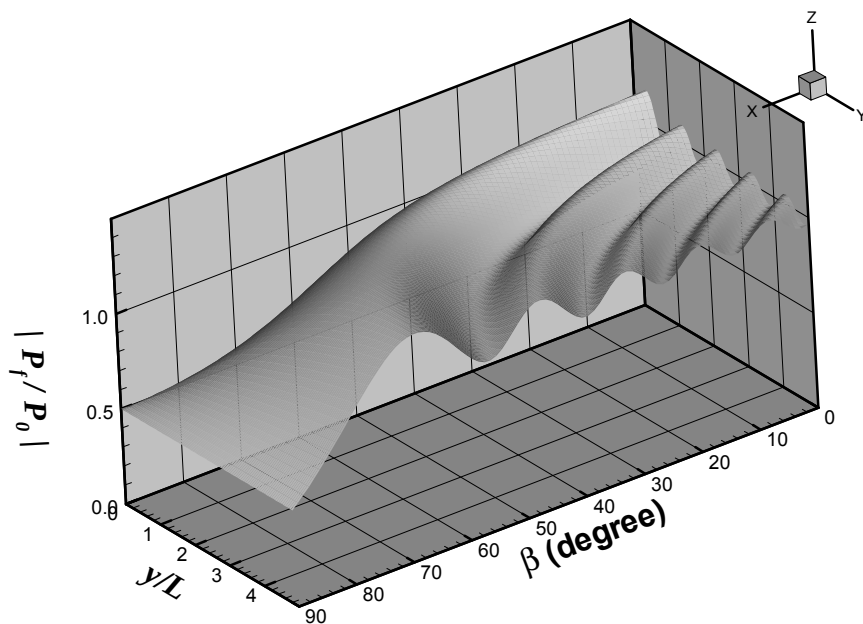
〈그림 17〉 First relative distance where $\left| \frac{P_f}{P_0} \right| = 1.0$ according to incident wave angle.

파랑의 경사 입사각(β)과 방파제 두부로부터의 거리(y/L)에 따른 반무한방파제 전면에서 작용하는 상대파력분포를 그림 18, 19에 나타내었다. 특히 그림 18에는 Tanimoto et al.(1976)이 제안한 $0.5(1 + \cos \beta)$ 항을 함께 나타내어 회절에 의한 파력분포와 비교하였다. Tanimoto et al.이 제안한 $0.5(1 + \cos \beta)$ 항은 파랑의 경사 입사각(β)을 15도 보정해 주는데, 그림 18에서는 15도 만큼 경사 입사각이 보정된 값을 도시하였다. 방파제 두부로부터의 거리(y/L)가 0인 경우에는 방파제 전면에서 작용하는 상대파력은 0.5이며, 경사 입사각이 90° 인 경우, 즉 방파제에 평행하게 파랑이 입사하는 경우 역시 방파제 전면에서 작용하는 상대파력은 0.5이다. 그림 18, 19를 통해 파랑의 경사 입사각이 증가하고 y/L 이 감소할수록 전면에서 작용하는 상대파력 역시 감소함을 알 수 있다. 그리고 이와 같은 파력의 분포는 y/L 이 0과 1.0 사이인 범위에서 Tanimoto et al.이 제안한 $0.5(1 + \cos \beta)$ 항과도 유사함을 알 수 있다.

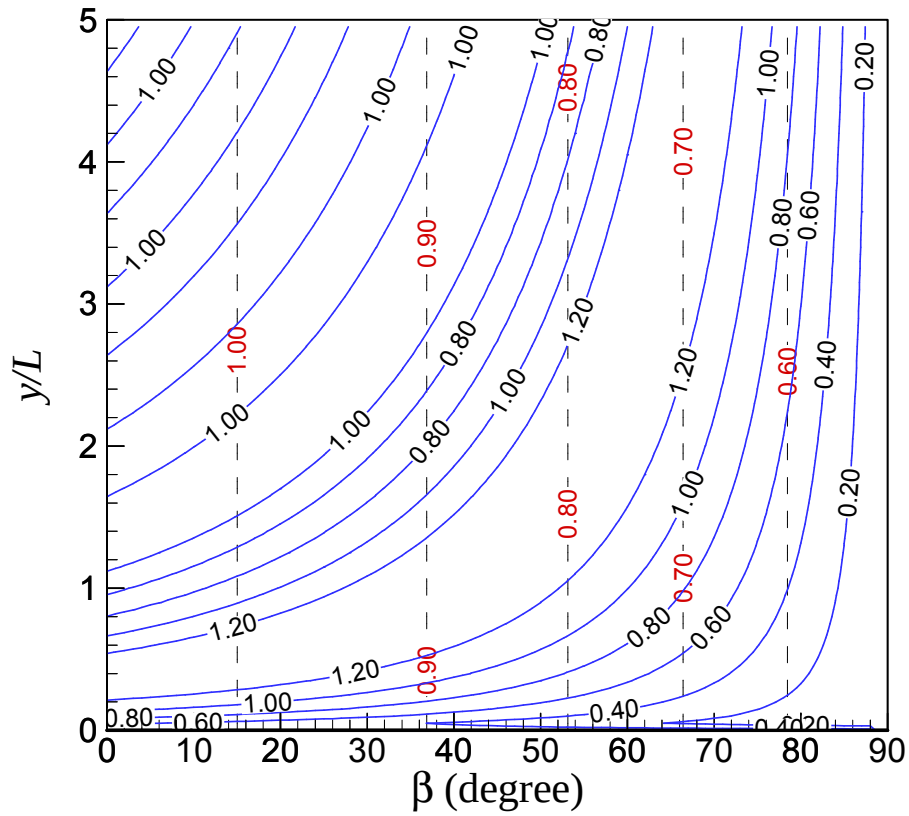
파랑의 경사 입사각(β)과 방파제 두부로부터의 거리(y/L)에 따른 반무한방파제에 작용하는 총 파력 분포를 그림 20, 21에 도시하였다. 과거 대부분의 연구에서는 방파제 전면에서 작용하는 파력만을 고려하였는데, 회절이 발생할 경우 방파제 배후에도 파랑이 전파하게 되며 이에 따른 파력 역시 작용한다. 또한 방파제 전면에서도 회절이 발생하며 전면에서 작용하는 파력에 영향을 미치게 된다. 특히 전면에서는 파봉이 위치하고, 배후에서는 회절파의 파곡이 위치할 경우에는 방파제에 작용하는 상대파력은 더욱 증가하게 된다. 따라서, 회절이 발생할 경우에는 설계파로 방파제 전면 및 후면에 작용하는 파력을 모두 고려한 총 파력을 적용하는 것이 더욱 타당할 것이다. 총 파력은 방파제 두부로부터의 거리(y/L)가 0이거나 경사 입사각이 90° 일 때 0이 된다.



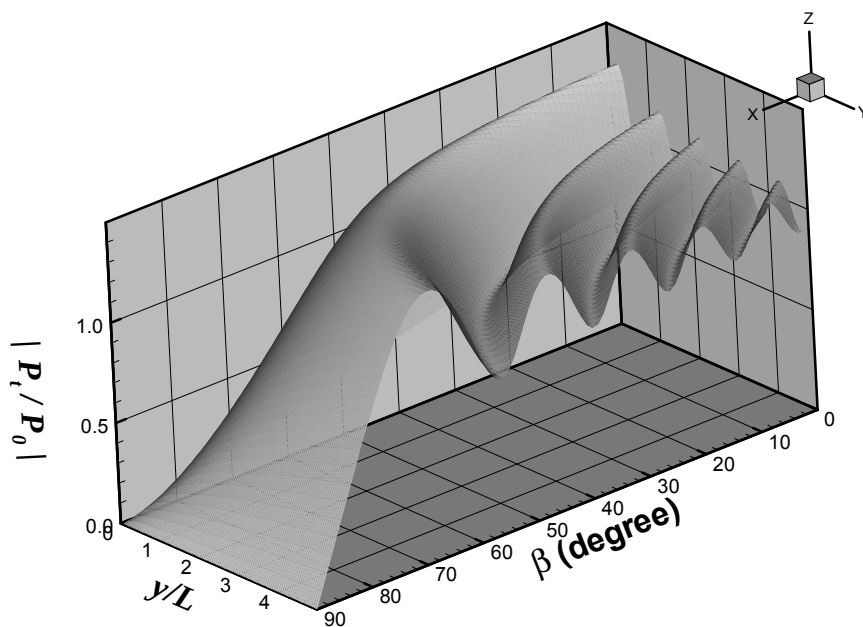
〈그림 18〉 Comparison of the relative wave force distribution in front of a breakwater when considering diffraction (solid line) and from Goda's formula $0.5(1 + \cos \beta')$ (dashed line).



〈그림 19〉 Relative wave force distribution in front of a breakwater for varying relative distance and obliquely incident wave angle.



〈그림 20〉 Comparison of the total relative wave force distribution on a breakwater when considering diffraction (solid line) and from Goda's formula $0.5(1 + \cos \beta')$ (dashed line).



〈그림 21〉 Total relative wave force distribution on a breakwater for varying relative distance and obliquely incident wave angle.

다. 회절을 고려한 반무한방파제에 작용하는 불규칙파의 파력

(1) 불규칙파의 상대파력비 정의

회절을 고려하여 반무한방파제에 작용하는 불규칙파의 파력은 3.1.나.(1)에서 제시한 규칙파의 상대파력비를 이용하여 계산할 수 있다. 즉, 불규칙파를 구성하는 에너지스펙트럼을 각각의 규칙파로 분해하여 3.1.나.(1)에서 제시한 상대파력비를 계산하고 이를 재합성하는 방법을 사용하였다. 규칙파의 경우 진폭만으로 상대 파력을 결정할 수 있다. 왜냐하면 주파수 성분이 하나여서 위상 값이 규칙적으로 변하기 때문이다. 하지만 불규칙파의 경우 서로 다른 주파수 성분의 제곱은 위상 값이 서로 다르기 때문에 진폭만으로 상대 파력을 결정할 수 없다. 따라서, 불규칙파의 경우 각 성분의 제곱의 평균을 취한 후 제곱근을 취하여 상대 파력을 결정할 필요가 있다. 다방향 불규칙파의 파력 계산을 위해서 주기는 0.05Hz에서 0.41Hz까지 $\Delta f = 0.02$ 를 적용하였으며, 방향은 -180° 에서 $+180^\circ$ 까지 $\Delta\beta = 1^\circ$ 를 적용하여 총 6,498개의 규칙파로 분해하여 계산한 후 재합성하였다. 방파제의 각 위치에 작용하는 다방향 불규칙파 각 성분파의 파력은 식 (17)을 이용하여 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$P_t(f, \beta) = \rho g h \frac{\tanh kh}{kh} a_i(f, \beta) \left[\{ (1 + K_r) - (b_{i,f} + b_{r,f}) - (b_{i,l} + b_{r,l}) \} e^{-iky \sin \beta} e^{i\nu} \right] e^{i\omega t} \quad (22)$$

여기서, f 는 주파수를 나타내며, ν 는 0에서 2π 까지 변하는 난수(random number)로 불규칙파 각 성분의 위상을 나타낸다. 회절을 고려하지 않은 경우 방파제 단면에 작용하는 파력은 식 (18)을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_0(f, \beta) = \rho g h \frac{\tanh kh}{kh} (1 + K_r) a_i(f, \beta) e^{-iky \sin \beta} e^{i\nu} e^{i\omega t} \quad (23)$$

방파제에 작용하는 다방향 불규칙파의 상대파력은 회절을 고려한 경우 방파제에 작용하는 각 성분 파력의 제곱 평균의 제곱근(root mean square)과 회절을 무시한 경우 파력의 평균 제곱근의 비로 정의할 수 있다. 이는 식 (22)와 식 (23)을 이용하여 나타낼 수 있다. 다방향 불규칙파의 상대파력은 각 성분파의 위상정보를 고려하여야 하므로 아래 식과 같이 실수부만 취하여야 한다.

$$P_r = Re \left(\sqrt{\frac{\sum_f \sum_\beta [Re(P_t(f, \beta))]^2}{\sum_f \sum_\beta [Re(P_0(f, \beta))]^2}} \right) \quad (24)$$

위의 식 (24)를 다시 정리하면 다음 식과 같다.

$$P_r = Re \left(\sqrt{\frac{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \int_{\beta_{\min}}^{\beta_{\max}} \left[Re \left(\delta(f, \beta) \sqrt{S(f, \beta)} \left(\frac{\tanh kh}{kh} \right) e^{-iky \sin \beta} e^{i\nu} e^{i\omega t} \right) \right]^2 d\beta df}{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \int_{\beta_{\min}}^{\beta_{\max}} \left[Re \left(\sqrt{S(f, \beta)} \left(\frac{\tanh kh}{kh} \right) e^{-iky \sin \beta} e^{i\nu} e^{i\omega t} \right) \right]^2 d\beta df}} \right) \quad (25)$$

여기서, $S(f, \beta)$ 는 다방향 불규칙파 스펙트럼을 뜻하며, $\delta(f, \beta)$ 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\delta(f, \beta) = \frac{(1 + K_r) - (b_{i,f} + b_{r,f}) - (b_{i,l} + b_{r,l})}{(1 + K_r)} \quad (26)$$

다방향 불규칙파 스펙트럼 구성을 위해서 주파수 스펙트럼은 Hasselmann et al.(1973)이 제안한 JONSWAP 스펙트럼을 적용하였으며, 방향스펙트럼은 Lee et al.(2010)이 제시한 비대칭 스펙트럼을 적용하였다.

(2) 불규칙파의 상대파력 해석

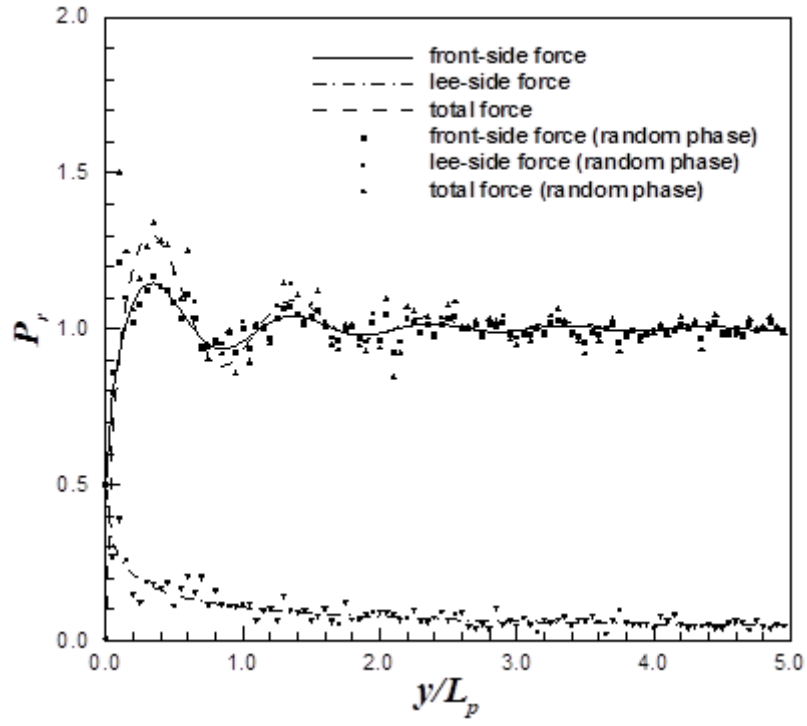
반무한방파제 형식의 직립구조물에 작용하는 불규칙파의 상대파력을 검토하였다. 검토를 위해 수심은 10m를 적용하였으며, 입사하는 유의파고는 1.0m를 적용하였다. 불규칙파 상대파력의 정의는 식 (25)와 같은데, 식 (25)에는 각 성분파의 임의의 위상(random phase)이 포함되어 있어 실무에서 적용하기에는 어려움이 있다. 따라서, 아래 식 (27)과 같은 파력 스펙트럼을 이용한 상대파력과 제곱 평균 제곱근 비를 이용한 상대파력을 비교 검토하였다.

$$P_r = Re \left(\sqrt{\frac{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \int_{\beta_{\min}}^{\beta_{\max}} |\delta(f, \beta)|^2 S(f, \beta) \left(\frac{\tanh kh}{kh} \right)^2 d\beta df}{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \int_{\beta_{\min}}^{\beta_{\max}} S(f, \beta) \left(\frac{\tanh kh}{kh} \right)^2 d\beta df}} \right) \quad (27)$$

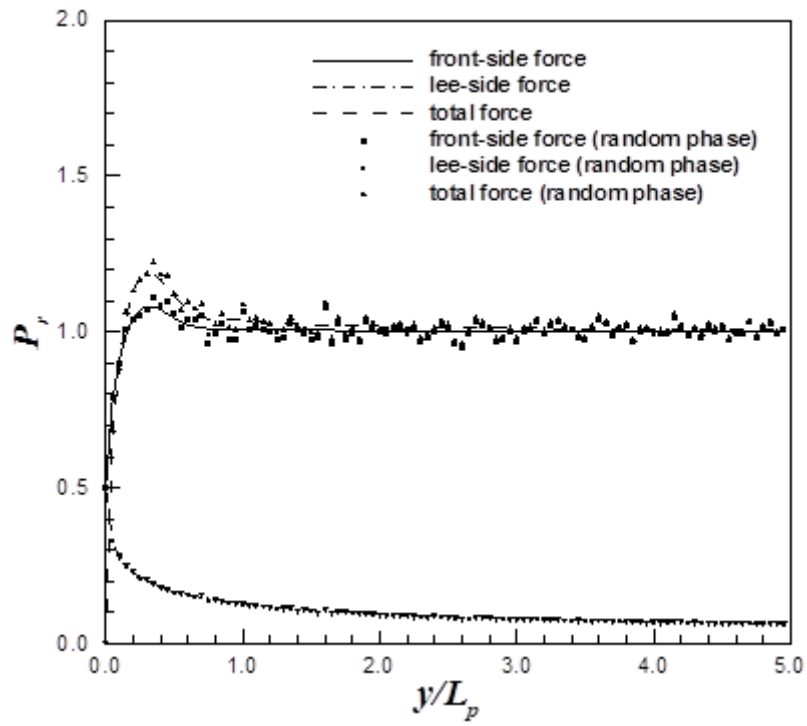
불규칙파 각 성분파의 임의의 위상을 고려한 경우(제곱 평균 제곱근 비를 이용한 상대파력)와 고려하지 않은 경우(파력 스펙트럼을 이용한 상대파력)는 그림 22~24에 도시하였다. 각 그림에서 (a)는 일방향 불규칙파를 나타내며, (b)는 다방향 불규칙파를 뜻한다. 실선은 파력 스펙트럼을 이용한 상대파력으로 전후면에 작용하는 총파력, 파선은 전면의 파력, 그리고 점쇄선은 후면의 파력을 나타낸다. 그리고, 심별로 표현된 그림은 불규칙파 각 성분파의 임의의 위상을 고려한 제곱 평균 제곱근 비를 이용한 경우이다. 다방향 불규칙파 해석을 위해 첨두신장계수(peak enhancement factor)는 3.0을 적용하였으며, 방향분포 계수(directional spreading parameter)는 10을 적용하였다.

해석 결과 각 성분파의 제곱 평균 제곱근 비를 이용한 상대파력과 파력 스펙트럼을 이용한 상대파력은 거의 일치하는 결과를 나타내었다. 일방향 불규칙파랑의 경우 임의의 위상을 고려한 제곱 평균 제곱근 비의 경우 좀더 불규칙한 파력 특성을 보였는데, 이는 일방향 불규칙파의 경우 다방향 불규칙파에 비해 구성하는 파랑 성분의 숫자가 적어서 각 성분파의 위상이 미치는 영향이 좀더 크기 때문인 것으로 판단된다. 반면 다방향 불규칙파의 경우 매우 많은 규칙파 성분이 존재하여 각 성분의 임의의 위상이 서로 상쇄되어 파력 스펙트럼을 이용한 상대파력과 거의 일치하였다. 따라서, 회절을 고려하여 반무한방파제 각 지점에 작용하는 불규칙파의 상대파력은 식 (29)를 적용하여도 최대 오차 10% 이내로 충분히 정확한 결과를 나타낼 수 있다.

일방향 불규칙파의 경우 주파향각(β_p)이 증가할수록 방파제에 작용하는 총 파력의 최대치는 방파제 두부로부터 먼 곳에서 나타났다. 그리고 규칙파와 같이 전반적으로 주파향각(β_p)이 증가할수록 상대파력은 감소하는 경향을 보였다.

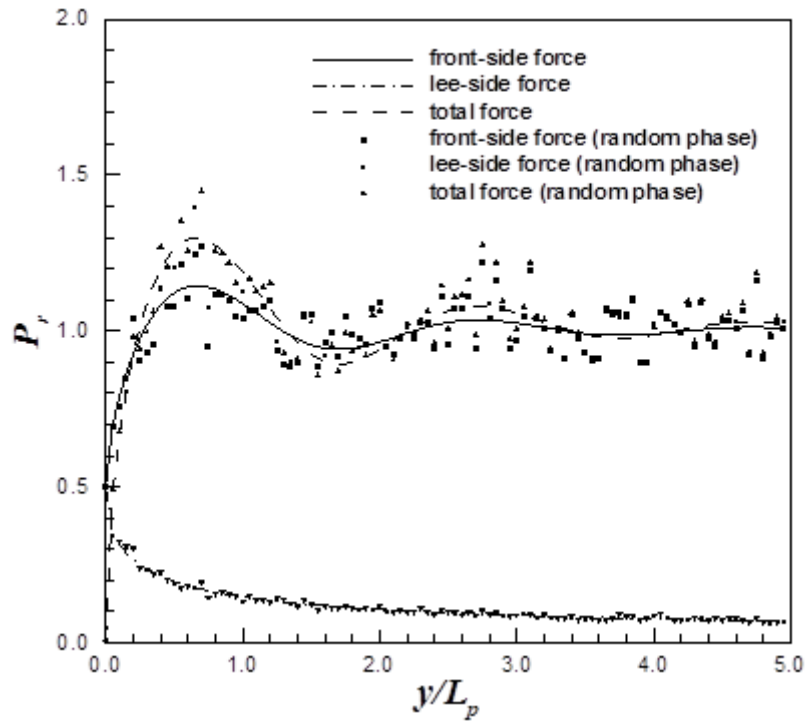


(a) uni-directional random waves ($\gamma = 3$)

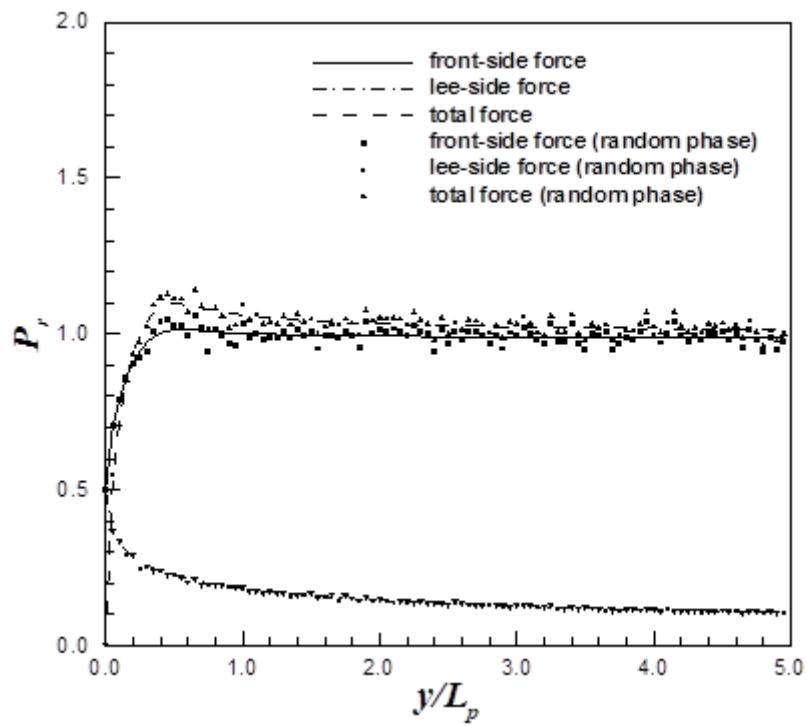


(b) multi-directional random waves ($s_{\max} = 10$, $\gamma = 3$)

<그림 22> Relative wave force for random waves on semi-infinite breakwater ($\beta_p = 0^\circ$)

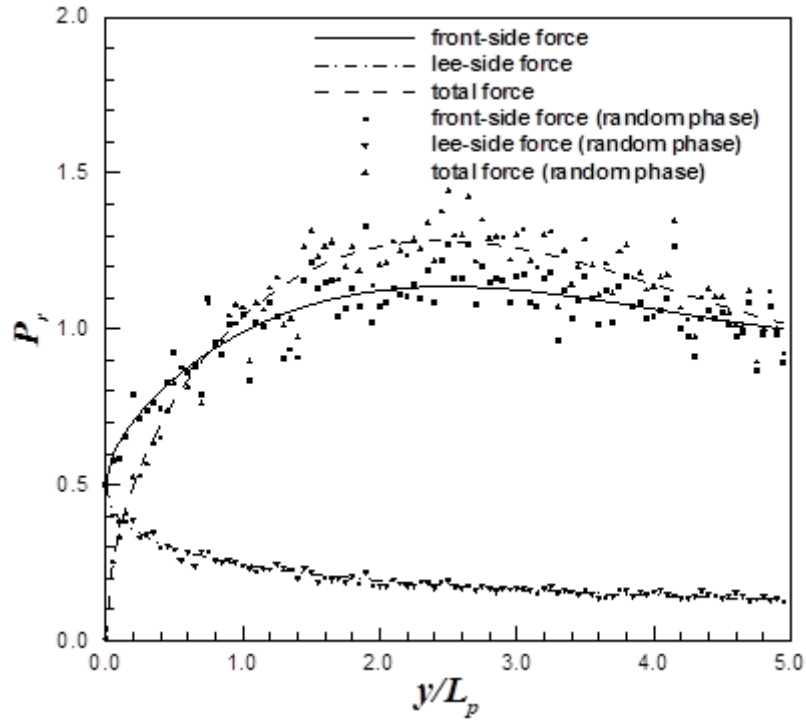


(a) uni-directional random waves ($\gamma=3$)

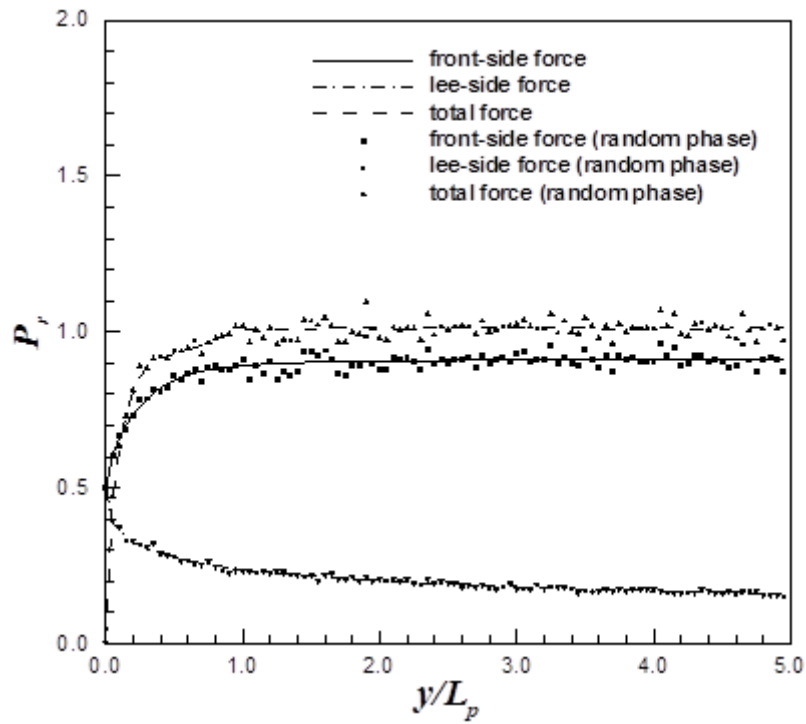


(b) multi-directional random waves ($s_{\max}=10$, $\gamma=3$)

<그림 23> Relative wave force for random waves on semi-infinite breakwater ($\beta_p = 30^\circ$)



(a) uni-directional random waves ($\gamma=3$)

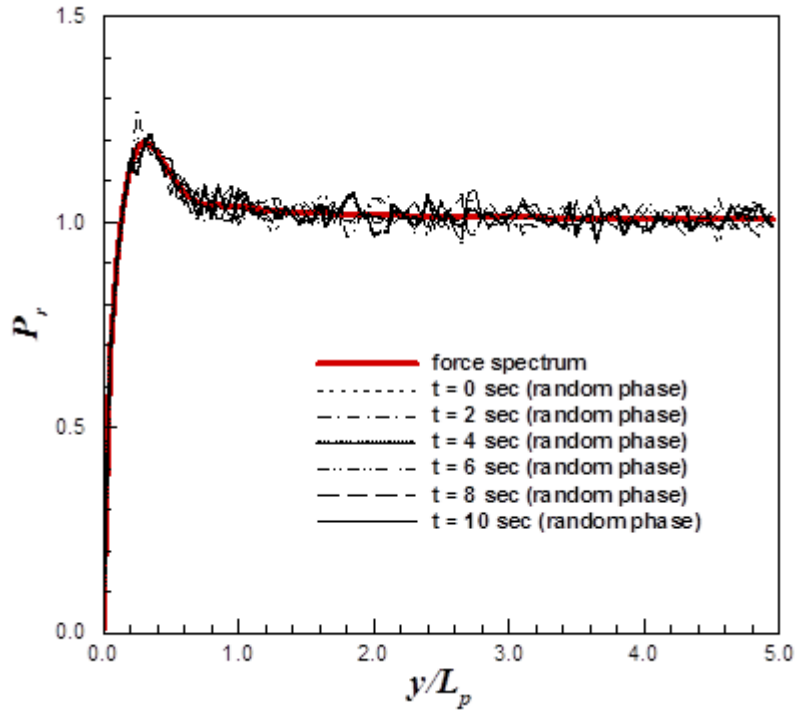


(b) multi-directional random waves ($s_{\max}=10$, $\gamma=3$)

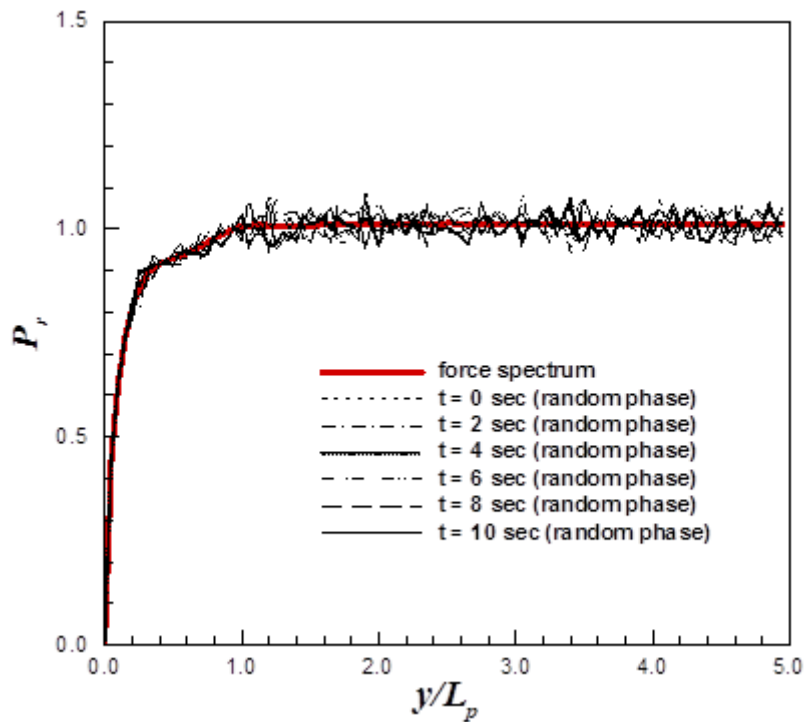
<그림 24> Relative wave force for random waves on semi-infinite breakwater ($\beta_p=60^\circ$)

시간의 경과에 따라 달라지는 불규칙파의 상대 파력에 대해 그림 25에서 검토하였다. 입사 파랑의 주 파향이 0° 와 60° 인 경우의 상대 파력을 각각 그림 25(a), 그림 25(b)에 도시하였다. 경과한 시각이 2초 간격으로 0초에서 10초까지의 상대 파력을 검토하였는데, 제공 평균 제공근 비를 이용한 상대파력은 그림 25에서 보는 바와 같이 파력 스펙트럼을 이용한 상대 파력을 중심으로 위 아래로 진동하는 형태로 분포하였다. 이는 제공 평균 제공근 비를 이용

할 경우 시간에 따라 바뀌는 회절과 성분의 위상 정보가 포함되어 있기 때문이다. 그림 25를 통해 볼 때, 파력 스펙트럼을 이용한 상대파력은 제곱 평균 제곱근 비를 이용한 상대파력의 평균값을 나타내므로 충분히 파력 검토에 활용할 수 있다. 좀 더 보수적인 파력 검토를 위해서는 제곱 평균 제곱근 비를 이용하는 것도 충분히 고려할 필요가 있을 것이다.

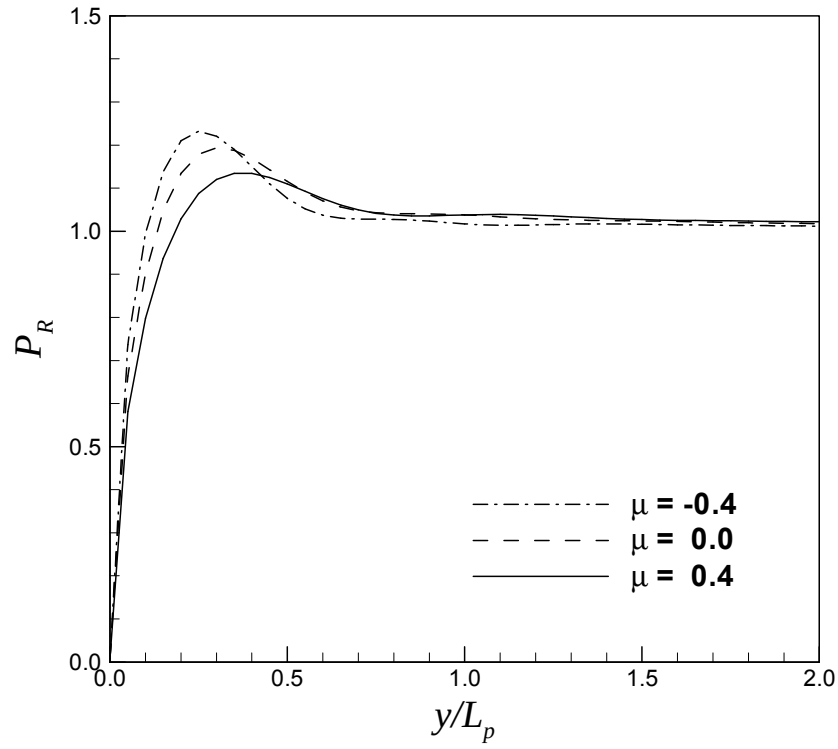


(a) $\beta_p = 0^\circ$

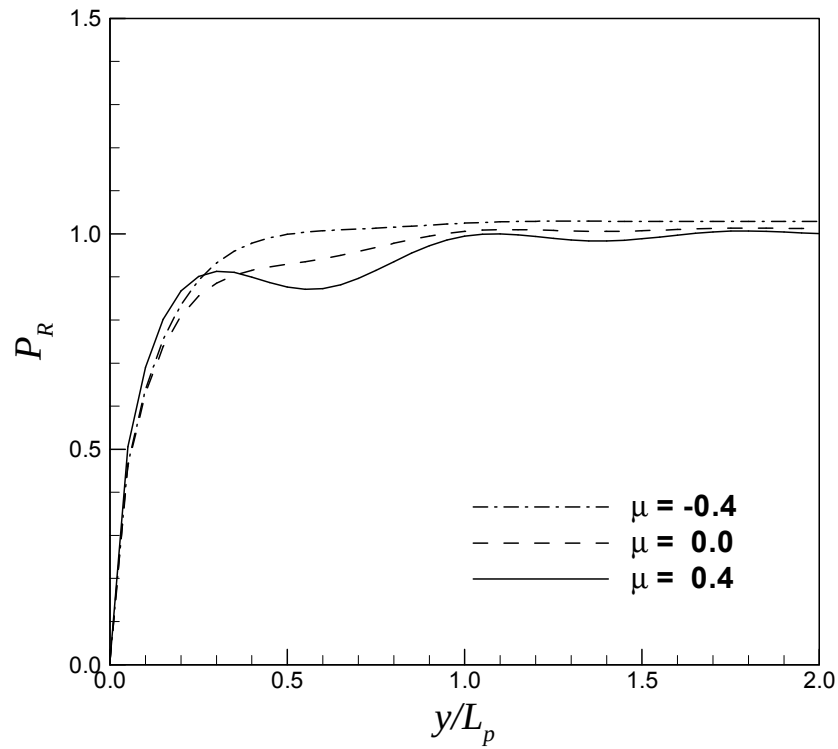


(b) $\beta_p = 60^\circ$

<그림 25> Relative wave force for random waves progressing time ($s_{\max} = 10$, $\gamma = 3.3$, $\beta_p = 0^\circ$)



(a) $\beta_p = 0^\circ$



(b) $\beta_p = 60^\circ$

<그림 26> Relative wave force for random waves as directional asymmetry ($s_{\max} = 10$, $\gamma = 3.3$)

다방향 불규칙파의 방향 비대칭의 영향에 대해서도 검토하였다. 주파향의 입사각이 양수일 때 비대칭계수(μ)가 음수이면 방파제에 수직인 파향 성분이 넓게 분포하고, 비대칭계수가 양수이면 방파제에 수직인 파향 성분은 좁게 분포한다. 주파향의 입사각이 0도인 경우는 그림 25(a), 입사각이 60도인 경우는 그림 26(b)에 도시하였다. 주파향이 0도인 경우 비대칭계수가

음수이면 입사각이 음수인 성분의 에너지가 크다. 따라서 그림 26(a)와 같이 비대칭계수가 -0.4인 경우 상대파력이 가장 크게 계산되었다. 주파향이 60도인 경우 비대칭계수가 음수($\mu = -0.4$)이면 입사각이 60도보다 작은 성분이 넓게 분포하여 상대파력의 크기가 커진다. 반면 비대칭계수가 양수($\mu = +0.4$)인 경우에는 방파제에 수직인 성분이 좁게 분포하여 상대적으로 파력의 크기가 작아지게 된다.

마. 소 결

본 연구에서는 기존 연구에서는 고려하지 않은 회절을 고려하여 반무한방파제 형식의 직립방파제에 작용하는 파력분포에 대한 해석해를 유도하였으며, 2차원 수치해석 모델과 비교를 통해 검토하였다. 반무한방파제 지점별 파력의 해석해는 Penney and Price(1952)에 의해 제시된 해석해를 적용하였다. 방파제 전면 및 후면의 회절성분을 모두 고려하였으며, 입사파랑은 규칙파와 불규칙파를 대상으로 하였다. 기존 연구에서는 완전반사 조건에서 반무한방파제 전면의 상대파력은 1.0 으로 가정하였으나, 회절을 고려한 경우에는 반무한방파제 전면의 위치에 따라 서로 다른 상대파력이 나타남을 확인하였다.

규칙파에 대한 검토 결과 방파제 전면에 작용하는 상대파력은 파랑의 경사 입사각이 증가하고 방파제 두부로부터의 거리(y/L)가 가까울수록 감소하였다. 방파제 두부로부터의 거리(y/L)가 0이거나 입사각이 90° 인 경우에는 방파제 전면의 상대파력은 0.5로 계산되었다. 전체적인 파력 분포 경향은 방파제 두부로부터의 거리(y/L)가 약 0~1.0 사이인 경우 Tanimoto et al.(1976)이 Goda의 파력식에 포함한 $0.5(1 + \cos \beta)$ 항과도 유사하였다. 방파제에 작용하는 총 파력도 파랑의 경사 입사각이 증가하고 방파제 두부로부터의 거리(y/L)가 가까울수록 감소하였다. 방파제 두부로부터의 거리(y/L)가 0이거나 입사각이 90° 인 경우 방파제에 작용하는 총 파력은 0으로 계산되었다.

다방향 불규칙파의 상대파력을 회절의 영향을 고려하지 않은 파력과 회절을 고려한 파력의 평균 제곱근비와 파력 스펙트럼을 이용하여 정의하였다. 제곱 평균 제곱근 비와 파력 스펙트럼을 이용한 결과를 비교하였으며, 두 결과는 거의 일치하였다. 불규칙파 역시 주파향각이 증가할수록 상대파력은 전반적으로 감소하였다.

본 연구에서 수행한 다양한 검토 결과 반무한방파제의 경우 회절을 고려하면 방파제에 작용하는 파력이 방파제 위치에 따라 큰 변화를 보였다. 따라서, 향후 반무한 방파제와 같이 회절의 영향이 큰 구조물을 설계할 때에는 회절의 영향을 고려하는 것이 바람직할 것이다. 하지만 보다 정밀한 설계 적용을 위해서는 수리모형실험, 현장관측 등 다양한 추가 검토가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 쇄파 조건에서 규칙파에 의한 직립구조물에 작용하는 파력에 대해 검토하였다. 일반적으로 방파제에 작용하는 파력은 쇄파 조건에서 충격력 등의 작용으로 인해 더욱 커지게 된다. 하지만 쇄파 조건에서 충격력 등을 검토하기 위해서는 강비선형 모델이나 수리모형실험을 통한 검토가 필요하다. 따라서, 향후에는 3차원 수리모형실험과 Hur et al.(2006)과 같은 Navier-Stokes 방정식을 지배방정식으로 하는 3차원 수치해석 모델 등을 이용하여 쇄파 조건에서 작용하는 파력에 대한 연구가 추가로 수행되어야 할 것이다.

2. 반무한방파제 형식의 장대구조물에 작용하는 파력

가. 서론

최근 기후변화 등에 의해 우리나라에 영향을 미치는 태풍은 해마다 늘어나고 있으며, 이들 태풍에 의한 고파랑으로 해안지역에서 방파제 붕괴나 월파에 의한 침수피해 등이 발생하고 있다. 일본의 경우 방파제의 피해 유형으로 활동(sliding)이 가장 많으며, 약 66%를 차지하는 것으로 보고되었다(Takayama and Higashira, 2002). 우리나라에서도 최근 동해안 및 남해안에 서 고파랑에 의한 방파제 활동피해사례가 보고되었다. 일반적으로 이와 같은 직립방파제의 활동 피해는 주로 예상치 못한 고파랑 내습에 의해 발생한다. 고파랑 내습시에는 파랑의 비선형 효과와 충격 파압의 효과가 크게 작용하며, 방파제 주변에서 회절, 굴절 등의 파랑 변형이 발생하여 이를 정확히 예측하기는 매우 어렵다.

과거 Traetteberg(1968)는 장대구조물의 경우 구조물의 길이에 따른 평균 파력이 감소한다는 사실을 최초로 발견하였다. 국내에서는 Kim et al.(2010)이 인터록킹을 이용한 케이슨 방파제 공법을 제안하여 방파제를 장대화할 수 있는 방안을 최초로 제안하였다. 유럽과 일본에서는 장대구조물에 작용하는 파력에 대한 다양한 연구들이 수행되었지만 그들은 물리적으로 길게 제작하는 방식만을 고려하였다. 일본에서는 1992년 고치 항에 100m 길이의 장대방파제를 세계 최초로 시공하였다(Allsop et al., 1996; Takahashi, 2002). 하지만 물리적으로 구조물을 길게 제작하는데 한계가 있기 때문에, 세계적으로 장대구조물에 대한 심도 깊은 연구와 시공은 2000년대 이후 거의 이루어지지 않았다. 하지만 인터록킹을 이용한 Kim et al.(2010)의 새로운 장대화 방법이 제안됨에 따라 최근 국내에서 장대구조물에 대한 연구가 보다 활발히 수행되고 있다(Jung et al., 2010; Park et al., 2011a, Park et al., 2011b).

일반적으로 옹벽이나 안벽과 같은 구조물들은 주로 토압을 받게 된다. 반면 방파제나 대형 부유식 구조물과 같은 해안구조물들은 주로 파력을 받게 된다. 토압과 파력의 가장 큰 차이점은 시간에 따라 작용력이 변화하는지 여부이다. 실제로 토압은 지진과 같은 특별한 경우를 제외하고는 시간이 지남에 따라 거의 변하지 않는다. 반면 파력은 시간에 따라 계속 변화한다. 따라서, 해안구조물의 설계를 위해 파력을 산정할 때에는 시간에 따른 변화를 고려하여 통계적인 접근법이나 경험식을 이용하여 최대 파력을 산정한다.

시간에 따라 변화하는 파력특성을 고려하여 Traetteberg(1968)는 비스듬히 입사하는 파랑의 위상차이에 의해 장대구조물에 작용하는 평균파력이 감소한다는 사실을 최초로 밝혔다. 또한 그는 다방향 불규칙파랑이 입사할 경우 파봉선이 짧아지면서 장대구조물에 작용하는 평균파력이 감소한다는 사실 역시 제시하였다. 이후 Battjes(1982)는 비쇄파 조건에서 장대구조물에 작용하는 규칙파 및 다방향 불규칙파의 감소파력비(reduced force ratio)에 대한 해석해를 최초로 제시하였다. 하지만 Bajjtes는 다양한 주기가 공존하는 불규칙파랑에 대해서는 고려하지 않았다. Takahashi and Shimosako(1990)는 일련의 수리모형실험을 통해 장대구조물에 작용하는 파력에 대해 연구하였다. Friggard et al.(1998)은 수리모형실험을 통해 장대구조물에 작용하는 파력에 대해 연구하였다. 그들은 다방향 불규칙파의 파력이 일방향 불규칙파의 파력보다 작다는 사실을 발견하였다. Allsop and Calabrese(1998)는 직립 및 혼성 방파제에 작용하는 다방향 불규칙파의 파력에 대해 3차원 수리모형실험을 통해 연구하였다. 그들은 파랑의 충격력도 고려하였다. Burcharth and Liu(1999)는 장대구조물에 작용하는 파력에 대해 이론적으로 연구하였다. 그들은 다방향 불규칙파의 파력이 일방향 불규칙파의 파력보다 작다는 사실을 발견하였다.

Allsop and Calabrese(1998)는 직립 및 혼성 방파제에 작용하는 다방향 불규칙파의 파력에

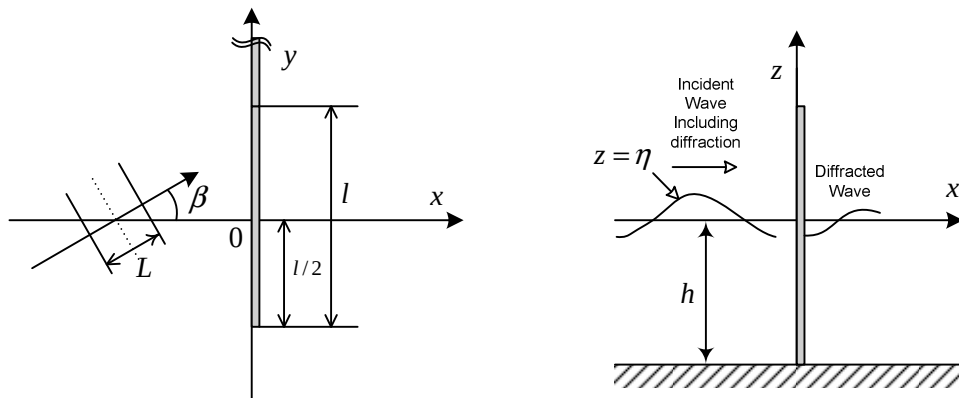
대해 3차원 수리모형실험을 통해 연구하였다. 그들은 파랑의 충격력도 고려하였다. Burcharth and Liu(1999)는 장대구조물에 작용하는 파력에 대해 이론적으로 연구하였다. 그들은 Battjes(1982)의 연구에 다양한 주기가 공존하는 불규칙파랑도 추가하여 연구하였다. 이후 Martinelli et al.(2007)은 3차원 수리모형실험과 자기상관(auto-correlation)을 이용한 이론적 방법을 통해 장대구조물에 작용하는 파력에 대해 연구하였다. 그들은 다방향 불규칙파를 대상으로 쇄파 및 비쇄파 조건에서 연구를 수행하였다.

Martinelli et al.은 3차원 수리모형실험을 수행할 때 방파제 배후로 회절이 발생하지 않도록 하기 위해 다양한 노력을 기울였다. 하지만 이는 역설적으로 방파제에서 발생하는 회절이 장대구조물에 작용하는 파력에 영향을 미침을 보여준다. 이에 Jung et al.(2011)은 회절을 고려한 장대구조물에 작용하는 파력에 대해 연구하였으나, 그들은 방파제 배후에서 발생하는 회절만을 고려하였다. 하지만 실제 해역에서는 방파제 전면에서도 회절에 의한 영향이 존재한다. 따라서 본 연구에서는 방파제 전면의 회절까지 추가하여 연구를 수행하였다. 입사파랑은 규칙파, 일방향 불규칙파, 다방향 불규칙파를 대상으로 한다. 장대구조물에 작용하는 파력의 해석에는 선형파 이론과 Penney and Price(1952)가 제시한 회절의 해석해를 이용하여 유도하였다. 일반적으로 파고가 비교적 큰 고파랑이 내습할 경우에는 비선형 효과와 충격파압의 효과의 영향이 회절효과보다 더욱 클 것이다. 따라서, 본 연구에서는 파고가 비교적 작은 경우에 대해 회절효과를 고려하여 연구하였으며, 이 경우 비선형성이 약하기 때문에 선형파 이론을 채택하였다.

회절을 고려한 규칙파의 감소파력비는 3.2.나에서 해석적으로 유도되며, 3.2.다에서는 규칙파 및 불규칙파를 대상으로 한 수치해석 결과를 제시한다. 그리고 3.2.라에서는 연구결과를 기술한다.

나. 감소파력비의 해석해 유도

회절을 고려한 파력분포 해석을 위해 선형파 이론과 Penney and Price(1952)의 해석해를 이용하여 파력식을 유도하였다. 수치해석을 위한 변수 및 구조물에 대한 설명은 그림 26을 참고할 수 있다. 본 그림에서 L 은 파장, l 은 장대구조물의 길이, β 는 구조물 법선에 수직인 선과 입사 파향선과의 교각을 뜻하며, h 는 평균수심, η 는 자유수면변위를 나타낸다. 본 연구에서 고려한 장대 방파제는 물리적으로 길게 제작되거나 방파제 길이방향으로 구속이 확실한 경우를 대상으로 하며, 장대 방파제의 상대길이(l)는 길이방향으로 구속된 구간의 길이를 의미한다.



<그림 27> Definition sketch for the analysis of the wave forces on a long structure (semi-infinite breakwater).

본 연구에서는 입사파, 반사파, 입사파의 회절성분, 반사파의 회절성분을 모두 반영하여 직립방파제에 작용하는 파력의 해석해를 제시한다. 선형파 이론에서 방파제 전면에서 입사파 및 반사파의 속도포텐셜은 다음 식들과 같다.

$$\phi_i = \frac{i g a_i(x, y)}{\omega} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} e^{i(\omega t - kx \cos \beta - ky \sin \beta)} \quad (30)$$

$$\phi_r = \frac{i g a_r(x, y)}{\omega} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} e^{i(\omega t + kx \cos \beta - ky \sin \beta)} \quad (31)$$

$$a_r(x, y) = K_r a_i(x, y) \quad (32)$$

여기서, ϕ_i 는 입사파의 속도포텐셜, ϕ_r 은 반사파의 속도포텐셜을 나타낸다. $a_i(x, y)$ 와 $a_r(x, y)$ 는 각각 입사파 및 반사파의 진폭을 뜻하며 ω 는 각진동수, g 는 중력가속도, K_r 은 반사계수를 뜻한다. 방파제 전면에서 입사파 및 반사파의 회절성분에 대한 속도포텐셜은 다음 식 (33)과 같으며, 방파제 후면에서 입사파 및 반사파의 회절성분에 대한 속도포텐셜은 아래 식 (34)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_{d,f} = \frac{i g}{\omega} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} [-b_{i,f}(y)e^{i(\omega t - ky \sin \beta)} - b_{r,f}(y)e^{i(\omega t - ky \sin \beta)}] \quad (33)$$

$$\phi_{d,l} = \frac{i g}{\omega} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} [b_{i,l}(y)e^{i(\omega t - ky \sin \beta)} + b_{r,l}(y)e^{i(\omega t - ky \sin \beta)}] \quad (34)$$

여기서, $b_{i,f}(y)$ 와 $b_{r,f}(y)$ 는 각각 방파제 전면에서 입사파 및 반사파의 회절성분의 진폭이며, $b_{i,l}(y)$ 와 $b_{r,l}(y)$ 는 각각 방파제 후면에서 입사파 및 반사파의 회절성분의 진폭이다. 과거 Jung et al. (2011)은 그들의 연구에서 방파제 후면의 회절 성분인 $b_{i,l}(y)$ 와 $b_{r,l}(y)$ 만을 반영하였다. 각 회절성분들은 Penney and Price의 해석해를 이용하여 계산할 수 있으며, 다음 식과 같이 표현된다.

$$b_{i,f}(y) = a_i f(-\psi_f), \quad b_{r,f}(y) = K_r a_i f(-\psi_f') \quad (35)$$

$$b_{i,l}(y) = a_i f(\psi_l), \quad b_{r,l}(y) = K_r a_i f(\psi_l') \quad (36)$$

여기서,

$$f(\psi) = \frac{1}{2}(1+i)^\psi \int_{-\infty}^{\frac{1}{2}i\pi u^2} e^{\frac{1}{2}i\pi u^2} du \quad (37)$$

$$\psi_f = \psi_f' = 2\sqrt{\frac{k(y+l/2)}{\pi}} \sin\left(\frac{1}{2}\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right)\right) \quad (38)$$

$$\psi_l = \psi'_l = 2\sqrt{\frac{k(y+l/2)}{\pi}} \sin\left(\frac{1}{2}\left(\beta + \frac{3\pi}{2}\right)\right) \quad (39)$$

방파제 전면에서의 총 속도포텐셜은 입사파, 반사파 및 회절성분의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi_f &= \phi_i + \phi_r + \phi_{d,f} \\ &= \frac{i g}{\omega} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \left[\{(1+K_r)a_i - (b_{i,f} + b_{r,f})\} e^{-iky \sin \beta} \right] e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (40)$$

방파제 전면 및 후면에서의 파압은 아래 식들과 같다.

$$P_f = -\rho g z - \rho \frac{\partial \phi_f}{\partial t} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} &= -\rho g z + \rho g \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \left[\{(1+K_r)a_i - (b_{i,f} + b_{r,f})\} e^{-iky \sin \beta} \right] e^{i\omega t} \\ P_f &= -\rho g z - \rho \frac{\partial \phi_{d,l}}{\partial t} \\ &= -\rho g z + \rho g \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \left[(b_{i,l} + b_{r,l}) e^{-iky \sin \beta} \right] e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (42)$$

방파제 단위 폭당 작용하는 파력은 파압을 수심방향으로 적분함으로써 구할 수 있다. 방파제 전면 및 후면에서의 단위 폭당 파력은 다음과 같다.

$$P_f = \frac{1}{2} \rho g h^2 + \rho g h \frac{\tanh kh}{kh} \left[\{(1+K_r)a_i - (b_{i,f} + b_{r,f})\} e^{-iky \sin \beta} \right] e^{i\omega t} \quad (43)$$

$$P_l = \frac{1}{2} \rho g h^2 + \rho g h \frac{\tanh kh}{kh} \left[(b_{i,l} + b_{r,l}) e^{-iky \sin \beta} \right] e^{i\omega t} \quad (44)$$

방파제에 단위 폭당 작용하는 총파력은 방파제 전면 및 후면에서 작용하는 파력의 합으로 표현할 수 있으며, 이는 아래 식과 같다.

$$\begin{aligned} P_t &= P_f = -P_l \\ &= \rho g h \frac{\tanh kh}{kh} \left[\{(1+K_r)a_i - (b_{i,f} + b_{r,f}) - (b_{i,l} + b_{r,l})\} e^{-iky \sin \beta} \right] e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (45)$$

장대구조물의 전체 길이에 작용하는 총파력은 위 식을 방파제 길이 방향으로 적분함으로써 구할 수 있으며, 이는 다음 식과 같다.

$$F = \int_{-l/2}^{l/2} P_1 dy = \rho g h l (1+K_r) a_i \frac{\tanh kh}{kh} R e^{i\omega \pi} \quad (46)$$

여기서,

$$R = A + B + C \quad (47)$$

$$A = \frac{1}{l} \int_{-l/2}^{l/2} e^{-iky \sin \beta} dy = \frac{\sin(kl/2 \sin \beta)}{kl/2 \sin \beta} \quad (48)$$

$$B = -\frac{1}{l(1+K_r)a_i} \int_{-l/2}^{l-2} (b_{i,f} + b_{r,f}) e^{-iky \sin \beta} dy \quad (49)$$

$$C = -\frac{1}{l(1+K_r)a_i} \int_{-l/2}^{l/2} (b_{i,l} + b_{r,l}) e^{-iky \sin \beta} dy \quad (50)$$

위 식에서, A 는 방파제 전면에서 작용하는 입사파 및 반사파 성분의 파력이며, B 는 방파제 전면에서의 회절파 파력이다. 그리고 C 는 방파제 후면에서의 회절파 파력을 뜻한다. 따라서, A 는 Battjes(1982)가 제안한 회절을 고려하지 않은 경우의 감소파력비와 동일하다. 위에서 R 은 입사파, 반사파, 방파제 전후면의 회절파 파력을 모두 고려한 규칙파의 감소파력비(reduced force ratio)로 정의할 수 있다. 회절파의 파력 성분인 B 와 C 의 적분식은 사다리꼴 방법이나 4차 Runge-Kutta 방법 등을 이용하여 수치적으로 계산할 수 있다. 장대구조물의 상대길이(l/L)가 0으로 접근할 때 A 는 1이 되고, B 와 C 는 -0.5가 된다. 따라서, 구조물의 길이가 0일 때 반무한방파제 형식의 장대구조물의 감소파력비는 0이 된다.

다. 감소파력비의 해석해와 수치해 비교

(1) 환경사방정식에 의한 수치해석 기법

본 연구에서 개발한 감소파력비의 해석해를 검증하기 위하여 파랑의 회절이 고려된 파랑식인 환경사방정식을 사용하여 수치해석을 수행하여 감소파력비의 해석해와 수치해를 비교하였다. 본 연구에서 사용한 환경사방정식은 Radder and Dingemans(1985)가 개발한 쌍곡선형 환경사방정식이다. 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\nabla \cdot \left(\frac{C_p C_g}{g} \nabla \tilde{\phi} \right) + \frac{\omega^2 - k^2 C_p C_g}{g} \tilde{\phi} \quad (51)$$

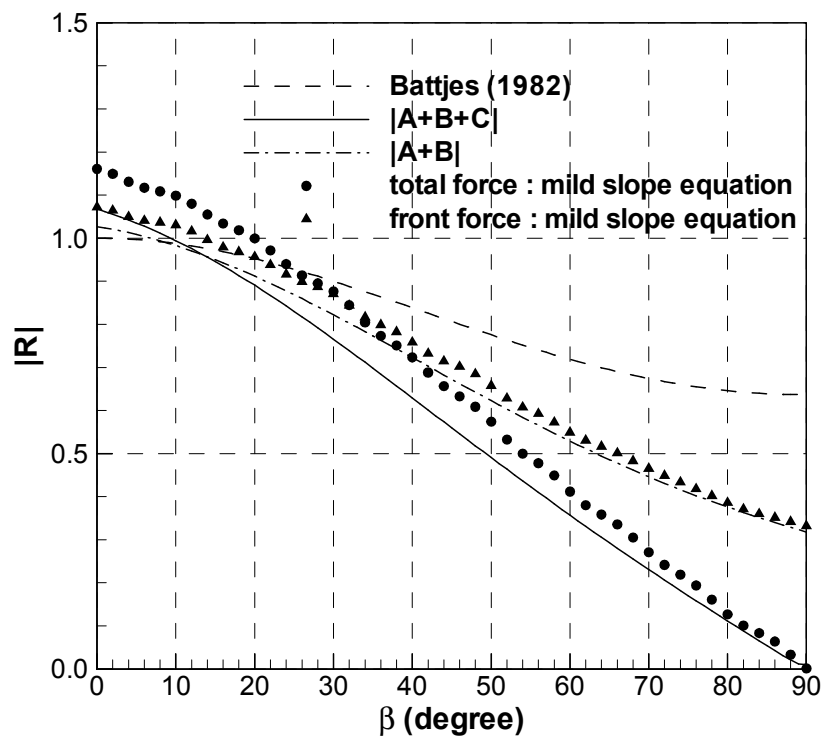
$$\frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial t} = -g \eta \quad (52)$$

위 식에서 η 는 자유수면변위이고, $\tilde{\phi}$ 는 평균해수면에서의 속도포텐셜이고, C_p 와 C_g 는 각각 위상속도와 군속도이고, $\nabla (= (\partial/\partial x, \partial/\partial y))$ 는 수평미분연산자이다. 식 (51), (52)의 시간미분항을 차분할 때 4차의 Adams-Bashforth predictor and corrector 기법을 사용하였다. 또한 공간미분항을 차분할 때 2차의 중앙차분법을 사용하였다. 구조물에서의 반사파를 흡수하기 위하여 계산영역의 사방 경계에서 스폰지층을 두었고, 구조물의 상류경계에 곡선조파기법을 사용하였다. 수치해석기법과 곡선조파기법에 대한 자세한 설명이 Lee and Yoon(2007)에 있다.

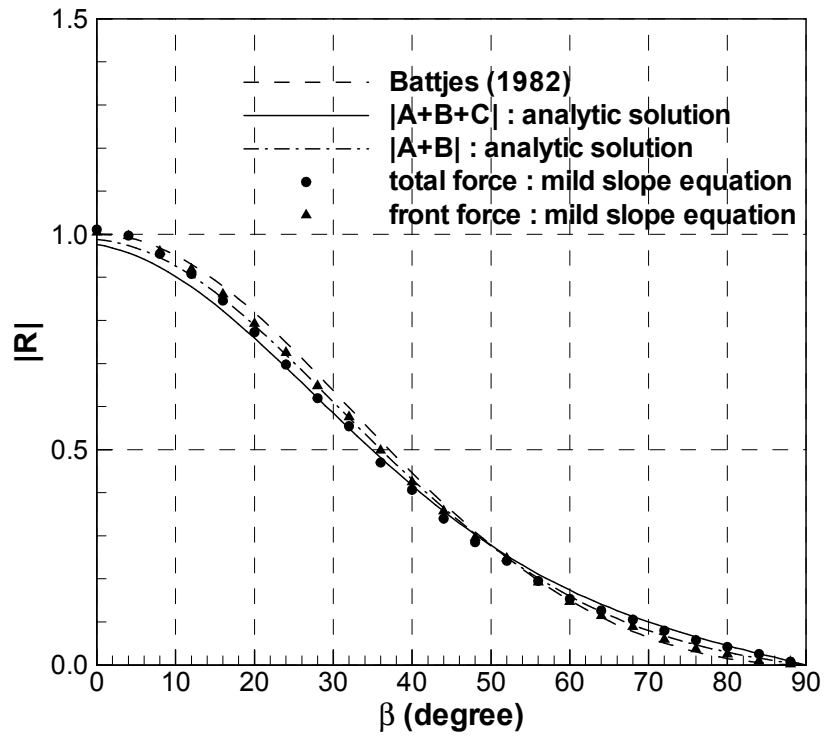
(2) 규칙파의 감소파력비

먼저 장대구조물의 상대길이에 따른 규칙파의 감소파력비를 계산하였다. 아래 그림에서 실선은 방파제 전, 후면의 회절을 모두 고려한 경우이며, 일점쇄선은 전면에서의 회절만을 고려한 경우이다. 그리고, 파선은 회절을 무시한 경우를 뜻한다. 해석해에 의한 결과들은 환경사방정식에 의한 수치해석 결과와 비교하였다. 그림 28에서 실선은 회절을 고려한 방파제에 작용하는 총파력을 나타내며, 일점쇄선은 방파제 전면의 중복파 및 회절파의 파력을 나타낸다. 그리고, 파선은 회절을 무시한 경우로 Battjes(1982)가 제시한 해석해와 동일하다. 해석해에 의한 결과들은 환경사방정식에 의한 수치해석 결과와 대부분 최대 오차 10% 범위 내에서 매우 일치하는 경향을 보였다. 방파제의 길이가 $0.5L$ 인 경우에는 방파제의 길이가 짧고 환경사방정식의 격자 구성 한계에 따라 폭 0인 방파제의 구현이 불가능하여 해석해의 결과가 수치해에 비해 약 10% 작게 계산되었다.

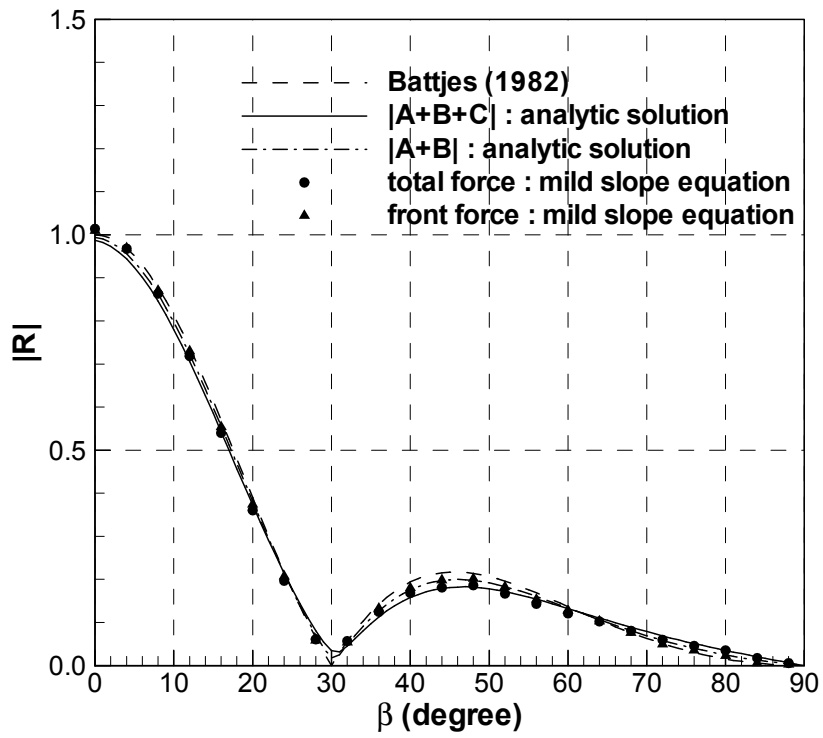
장대구조물의 상대길이가 1.0보다 클 때 회절을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우는 거의 차이 나지 않았다. 하지만 장대구조물의 상대길이가 0.5인 경우에는 회절 고려 유무에 따라 비교적 큰 파력의 차이를 보였다. 따라서 방파제의 상대길이가 1.0 이하인 경우에는 회절의 영향을 반드시 고려하여야 할 것이다.



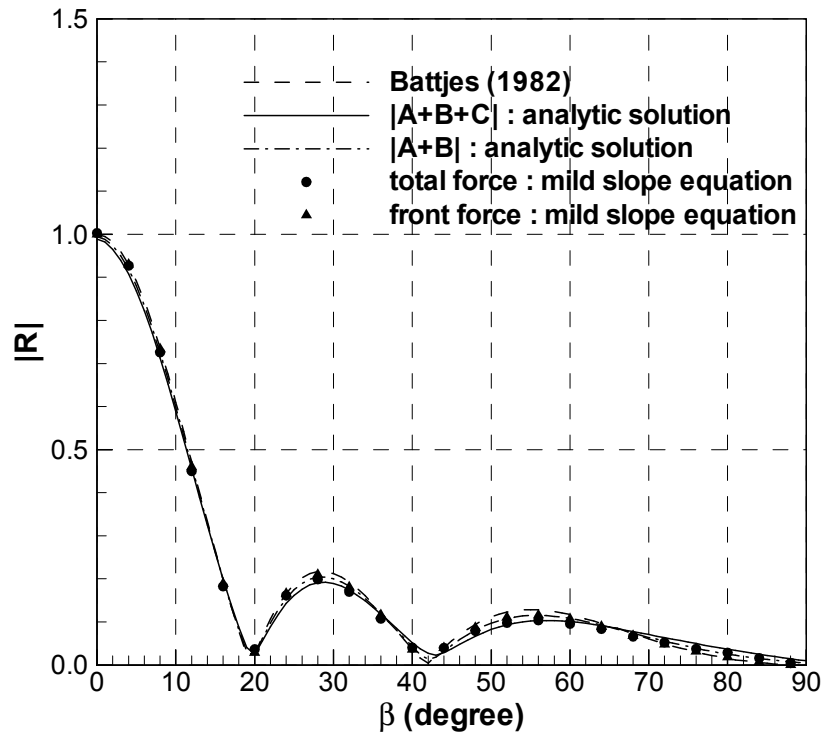
(a) $l/L = 0.5$



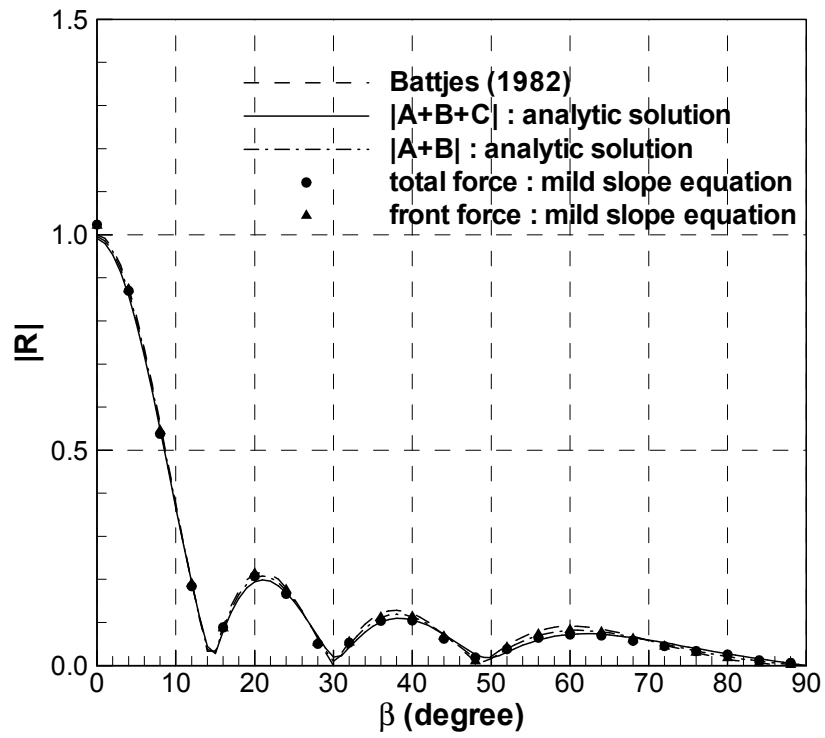
(b) $l/L = 1.0$



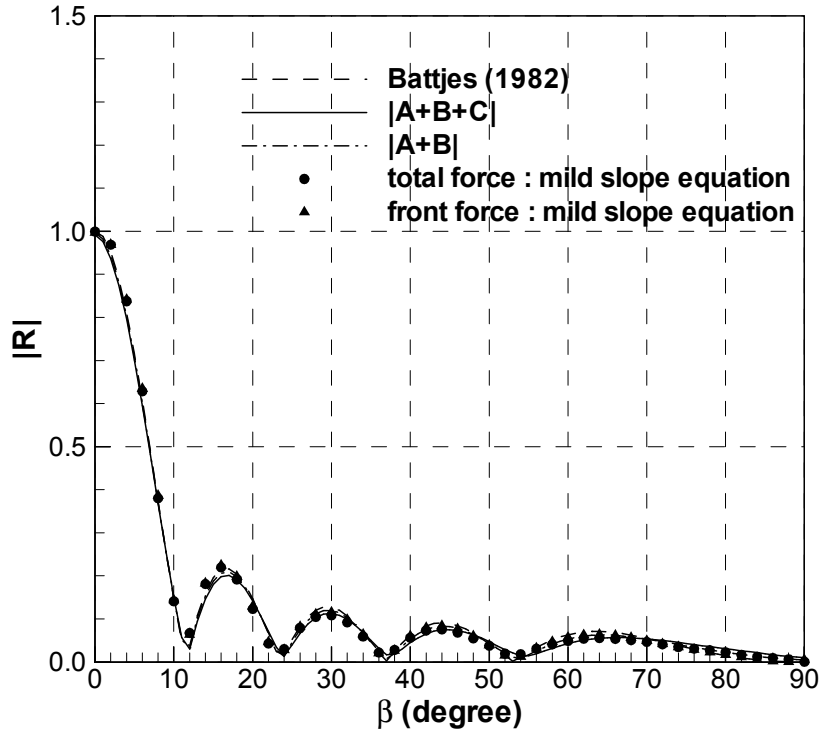
(c) $l/L = 2.0$



(d) $l/L = 3.0$



(e) $l/L = 4.0$



(f) $l/L = 5.0$

<그림 28> Reduced force ratios of monochromatic waves as functions of incident wave angle β .

위의 그림을 보면 특정 입사각에서 감소파력비가 0이 됨을 알 수 있다. 이는 해당 입사각에서 장대구조물의 길이가 방파제 전면의 자유수면 파장의 정수배이기 때문이며, 해당 조건에서는 파봉에 의한 정(+)의 파력과 파곡에 의한 부(-)의 파력이 서로 정확히 상쇄되어 감소파력비는 0이 된다. 이와 같이 감소파력비가 0이 되는 조건은 아래 식과 같다.

$$\beta = \cos^{-1} \left(n \times \frac{L}{l} \right), \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (53)$$

(3) 불규칙파의 감소파력비

본 절에서는 회절을 고려한 불규칙파의 감소파력비를 계산하였다. 일방향 및 다방향 불규칙파의 감소파력비는 각각 다음 식과 같이 정의한다.

$$R_u = \sqrt{\frac{\int_0^\infty R^2(f, \beta) S(f) (\tanh kh / kh)^2 df}{\int_0^\infty S(f) (\tanh kh / kh)^2 df}} \quad (54)$$

$$R_m = \sqrt{\frac{\int_0^\infty \int_{-\pi}^\pi R^2(f, \beta) S(f, \beta) (\tanh kh / kh)^2 d\beta df}{\int_0^\infty \int_{-\pi}^\pi S(f, \beta) (\tanh kh / kh)^2 d\beta df}} \quad (55)$$

여기서, $R(f, \beta)$ 는 불규칙파의 각 주기 및 방향에 해당하는 규칙파의 감소파력비이며, 이는 식 (46)을 이용할 수 있다. 식 (54), (55)에서 정의한 감소파력비는 구조물의 길이를 고려하지 않는 파력과 구조물의 길이 효과에 의해 감소된 파력의 비로 정의된다. 따라서, 본 연구에서 제시한 감소파력비는 과거 다양한 연구자들에 의해 제안된 구조물의 길이를 고려하지 않은 파력식에 의해 산출된 결과에 곱하여 적용할 수 있다. 위 식에서, $S(f)$ 는 주파수 스펙트럼이며, $S(f, \beta)$ 는 다방향 스펙트럼을 나타낸다. 다방향 스펙트럼은 방향 분포함수 $G(f, \beta)$ 를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S(f, \beta) = S(f)G(f, \beta) \quad (56)$$

파랑의 주파수 스펙트럼으로는 다음과 같이 표현된 JONSWAP(Joint North Sea Wave Project) 스펙트럼을 적용하였다(Hasselmann et al., 1973; Goda, 2000).

$$S(f) = \varepsilon_J H_{1/3}^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp[-1.25(T_p f)^{-4}] \gamma^{\exp[-(T_p f - 1)^2 / 2\sigma^2]} \quad (57)$$

$$\varepsilon_J \cong \frac{0.0624}{0.23 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}} [1.094 - 0.019151 \ln \gamma] \quad (58)$$

$$T_p \cong T_{1/3} [1 - 1.032(\gamma + 0.2)^{-0.559}] \quad (59)$$

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_a = 0.07 : f \leq f_p \\ \sigma_b = 0.09 : f \geq f_p \end{cases} \quad (60)$$

여기서, γ 는 첨두증진계수(peak enhancement factor), $H_{1/3}$ 은 유의파고, T_p 는 첨두주파수에서의 주기를 나타낸다. Lee et al.(2010)에 의해 제시된 비대칭 방향분포함수는 다음과 같다.

$$G(f, \beta) = G_0 \cos^{2s} \left(\frac{\beta - \beta_p}{2} \xi \right) \quad (61)$$

$$G_0 = \left[\int_{\beta_{\min}}^{\beta_{\max}} \cos^{2s} \left(\frac{\beta - \beta_p}{2} \xi \right) d\beta \right]^{-1} \quad (62)$$

$$s = \begin{cases} s_{\max} f^{-5}, & f \leq f_p \\ s_{\max} f^{-2.5}, & f \geq f_p \end{cases} \quad (63)$$

$$\xi = \begin{cases} \exp(-\mu), & \beta \geq \beta_p \\ \exp(+\mu), & \beta \leq \beta_p \end{cases} \quad (64)$$

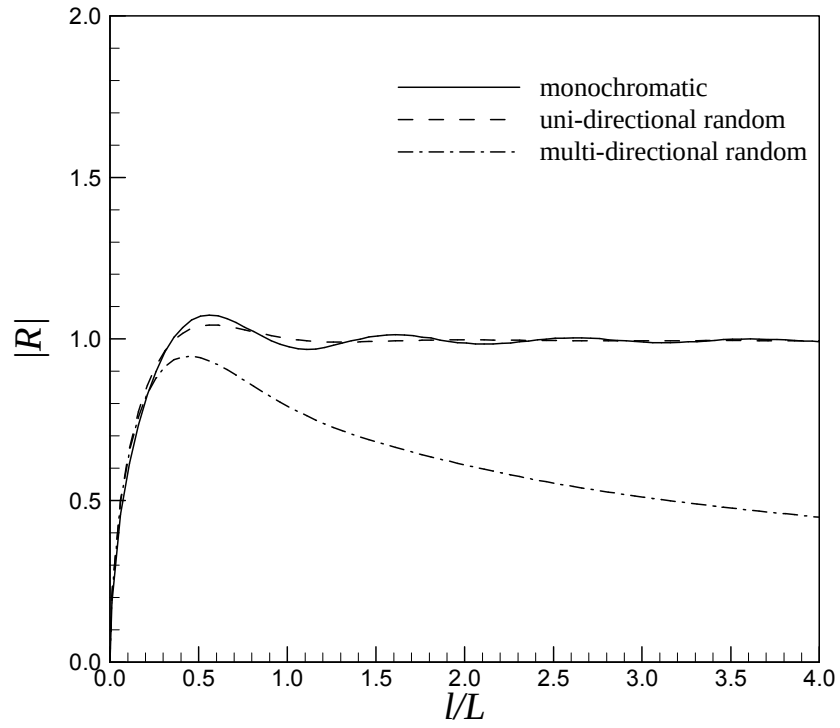
여기서, μ 는 비대칭계수, $s_{\max}$ 는 최대분포계수를 나타낸다. 다방향 불규칙파의 감소파력비 계산을 위해 $\Delta f = 0.005$, $\Delta \beta = 1.0^\circ$ 를 적용하여 45개 주기성분 및 181개의 방향성분으로 나누어 계산하였다. 수치해석 조건으로 $H_{1/3}$ 은 1m, $T_{1/3}$ 은 10초이다. 수심은 10m이며, $s_{\max}$ 는

10, γ 는 1.0을 적용하였다.

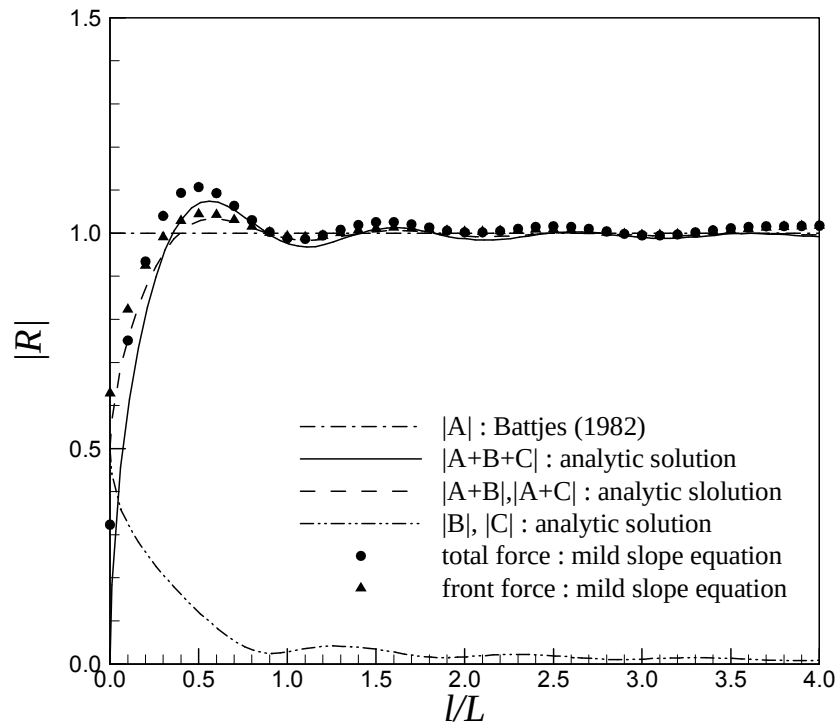
장대구조물에서 규칙파, 일방향 및 다방향 불규칙파의 감소파력비는 아래 그림 29~31에 나타내었다. 그림 29는 입사각(β)이 0° 인 조건이며, 그림 30은 30° , 그림 31은 60° 인 조건이다. 그림 29(a)는 회절효과를 모두 고려한 경우 장대구조물의 길이에 따른 감소파력비를 나타낸다. 본 그림에서 구조물의 상대길이가 0인 경우 감소파력비 역시 0이 됨을 알 수 있다. 규칙파 및 일방향 불규칙파의 감소파력비는 입사각이 0° 인 경우 구조물 전면에서 위상차이가 존재하지 않으므로 구조물의 상대길이가 증가할수록 1.0에 수렴한다. 규칙파 및 일방향 불규칙파의 경우 파랑의 파봉장이 무한한 장봉파(long crested waves)이기 때문에 구조물의 상대길이에 관계 없이 파력 감소효과는 발생하지 않는다. 반면, 다방향 불규칙파의 감소파력비는 주파향의 입사각이 0° 임에도 불구하고 비스듬히 입사하는 파랑성분이 다수 존재하기 때문에 파봉장의 길이가 비교적 짧은 단봉파(short crested waves)를 형성하며, 이에 따라 구조물의 상대길이가 증가할수록 감소파력비는 감소한다. 그림 29(b), (c)는 회절 효과에 따른 규칙파 및 일방향 불규칙파의 감소파력비를 나타낸다. 구조물 전면에서의 회절만을 고려할 경우 구조물의 상대길이가 0인 경우 감소파력비는 0.5가 된다. 그림 29(b), (c)에서 $|B|$ 와 $|C|$ 는 같은 값을 가진다. 이는 구조물 배후로 이동한 회절파의 에너지와 구조물 전면에서 감소한 회절파의 에너지가 같기 때문이다. 따라서 $|A+B|$ 와 $|A+C|$ 역시 같은 값을 가진다. 즉, 구조물 전면에서 중복파 및 회절을 고려한 파력은 구조물 전면에서 중복파와 후면에서의 회절을 고려한 파력과 같다. 그림 29를 통해서 구조물의 상대길이가 1.0 이하인 경우에는 회절의 효과가 비교적 큼을 다시 한번 확인할 수 있다.

그림 30은 입사각 30° 인 경우의 결과이다. 그림 30(a)에서 다방향 불규칙파의 감소파력비가 규칙파 및 일방향 불규칙파에 비해 크게 계산됨을 볼 수 있다. 특히 규칙파의 경우 장대구조물의 상대길이가 2.0인 경우에는 감소파력비가 거의 0이 된다. 그림 30(b)는 회절 고려 유무에 따른 규칙파의 감소파력비를 나타낸다. 본 그림을 통해 방파제 전면 및 후면의 회절성분을 모두 고려한 경우 감소파력비가 가장 작게 산정됨을 볼 수 있다. 그림 31은 입사각이 60° 인 경우의 결과이며, 전반적으로 입사각 30° 인 경우와 유사한 경향을 보였다. 해석해의 결과 중 규칙파의 감소파력비는 환경사방정식의 결과와 비교하였는데, 거의 유사한 결과를 보였다. 즉, 본 연구에서 제시한 해석해가 이론적으로 타당함을 알 수 있다.

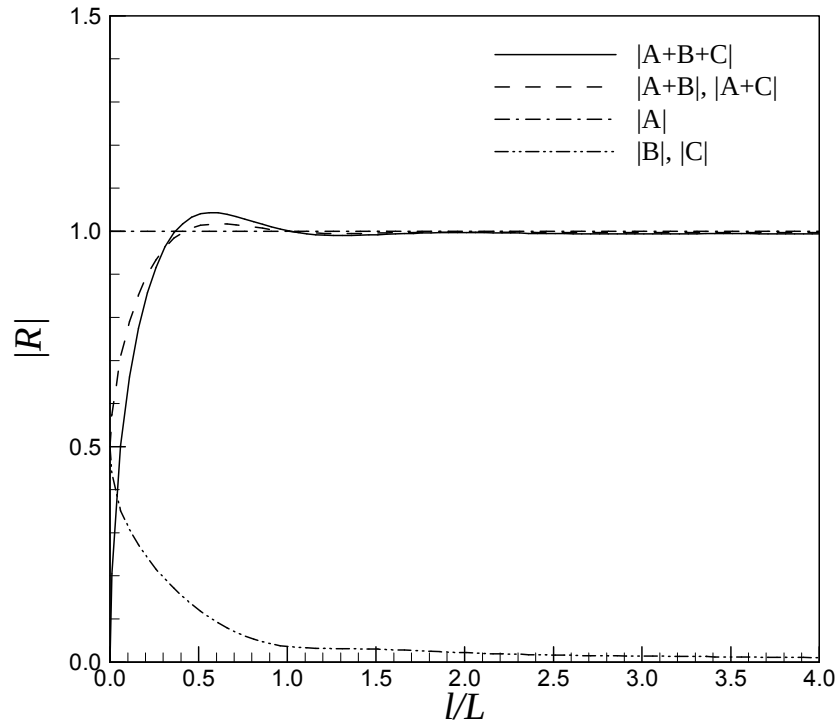
이상의 분석을 통해 장대구조물의 상대길이가 1.0 이하인 경우에는 회절의 영향을 반드시 고려하여야 하며, 장대구조물의 상대길이가 최소 0.5 이상이 되어야 감소파력비가 감소하기 시작하여 구조물의 장대화 효과를 이용할 수 있음을 알 수 있다. 입사파랑이 다방향 불규칙파랑이고 주파향의 입사각이 0° 도이며, 구조물의 상대길이가 2인 경우 감소파력비는 0.794로 계산되었다. 따라서 반무한방파제의 경우 다방향 불규칙파 조건에서는 파력 감소효과가 10% 이상임을 알 수 있다.



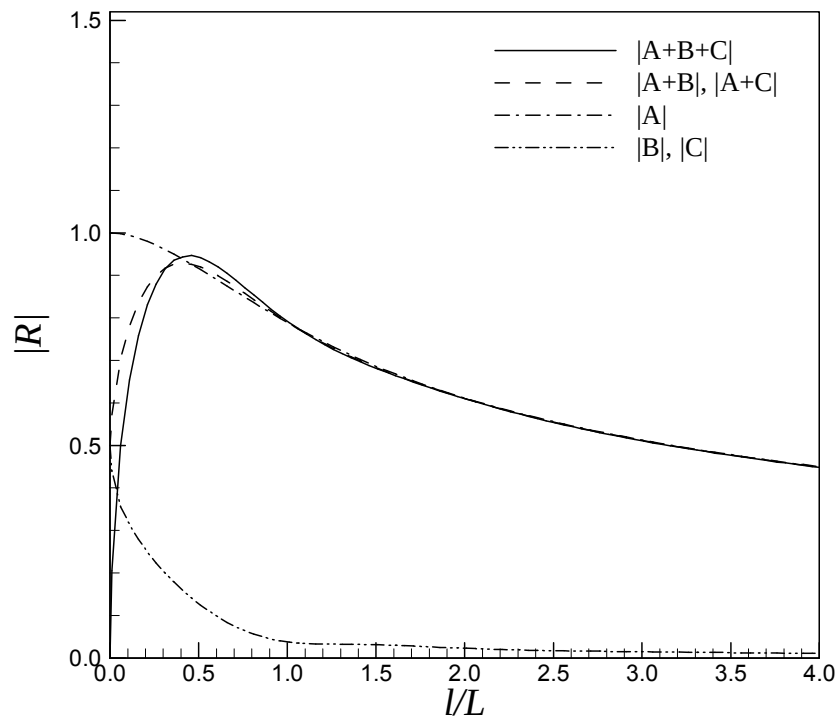
(a) Reduced force ratios for different wave types



(b) Comparison of reduced force ratios of monochromatic waves

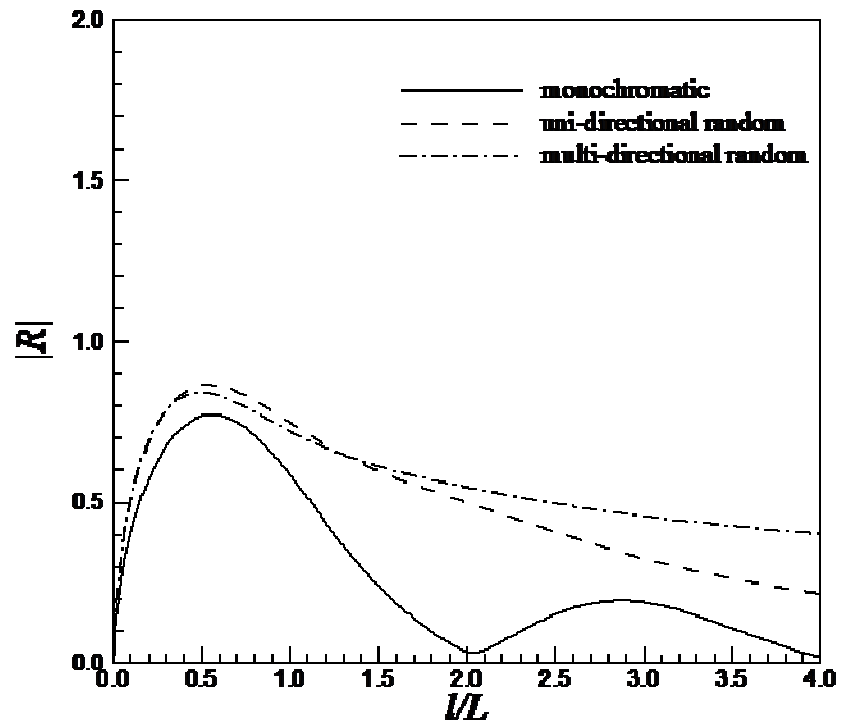


(c) Comparison of reduced force ratios of uni-directional random waves

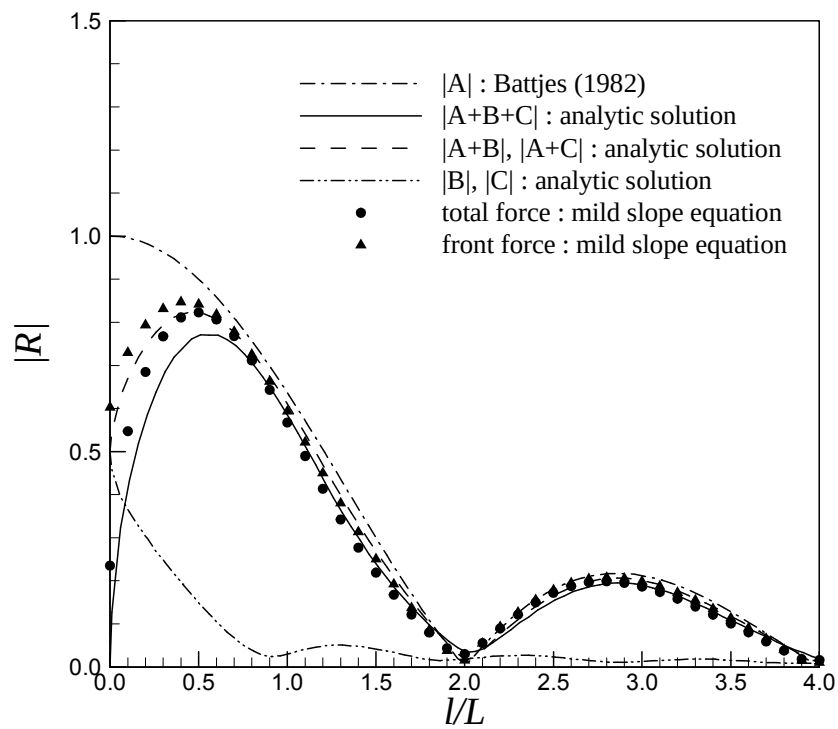


(d) Comparison of reduced force ratios of multi-directional random waves

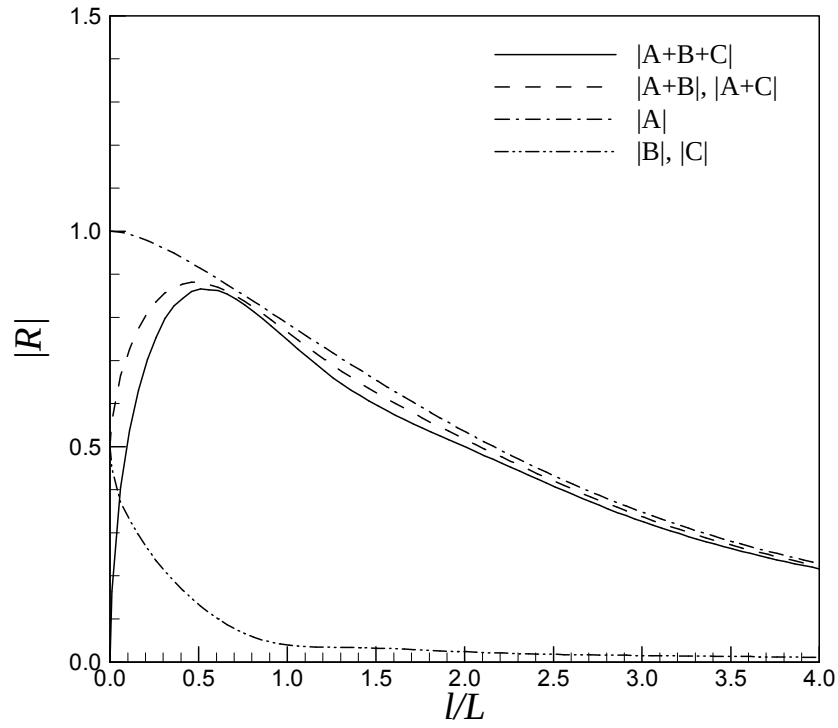
<그림 29> Reduced force ratios of with consideration of diffraction effects ($\gamma=1.0$, $s_{\max}=10$, $\beta_p=0^\circ$).



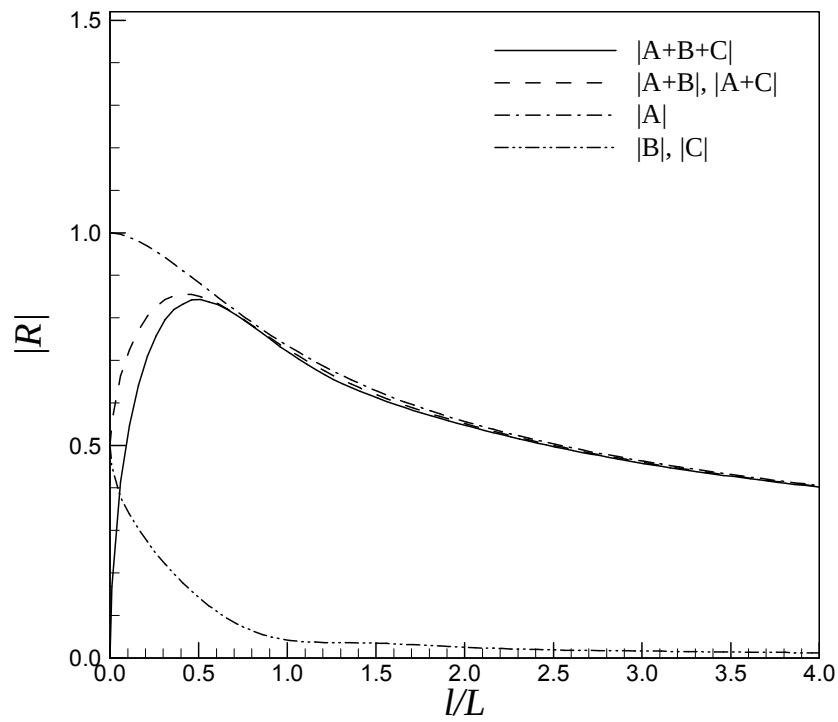
(a) Reduced force ratios for different wave types



(b) Comparison of reduced force ratios of monochromatic waves

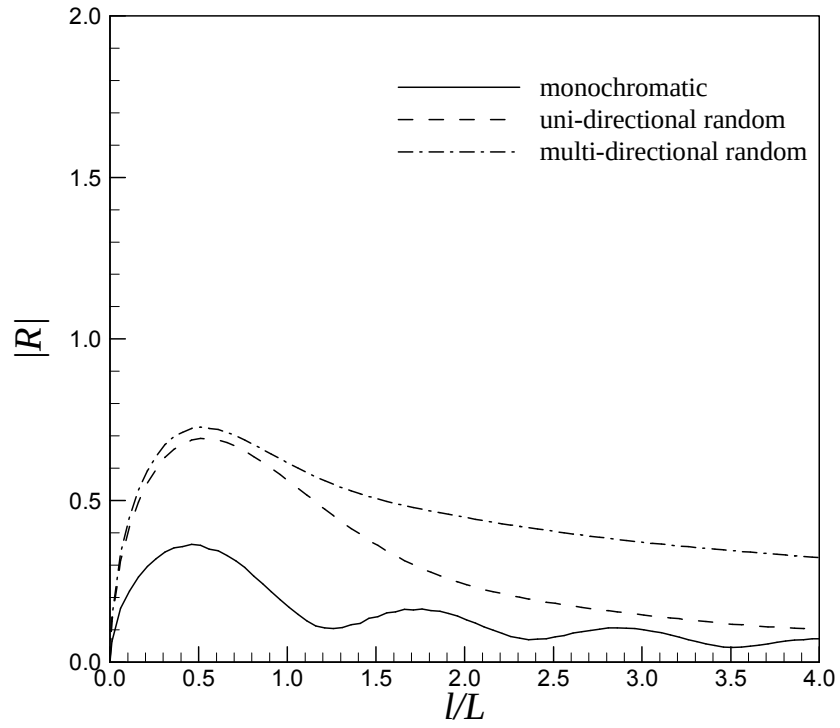


(c) Comparison of reduced force ratios of uni-directional random waves

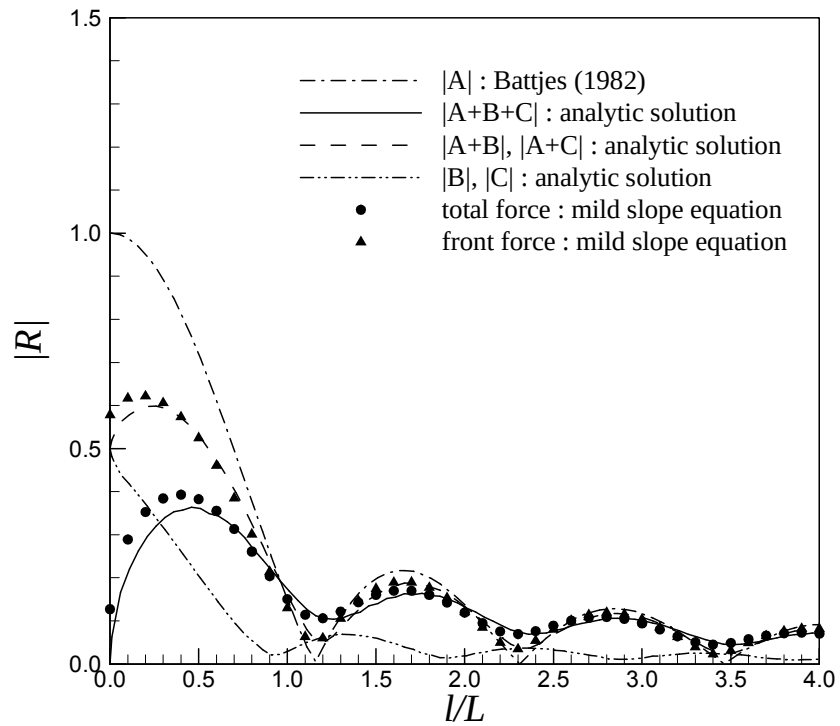


(d) Comparison of reduced force ratios of multi-directional random waves

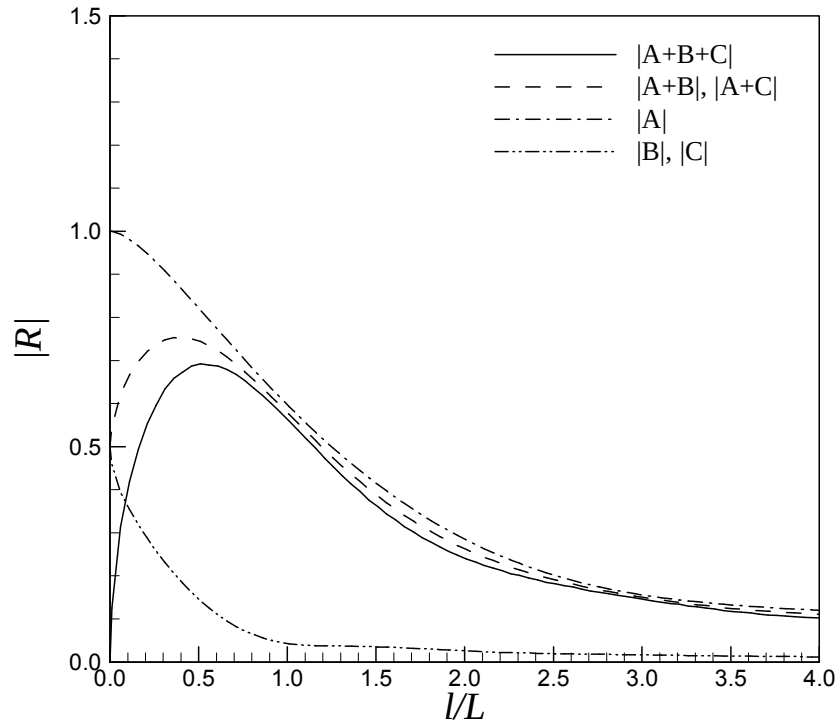
<그림 30> Reduced force ratios of with consideration of diffraction effects ($\gamma=1.0$, $s_{\max}=10$, $\beta_p=30^\circ$).



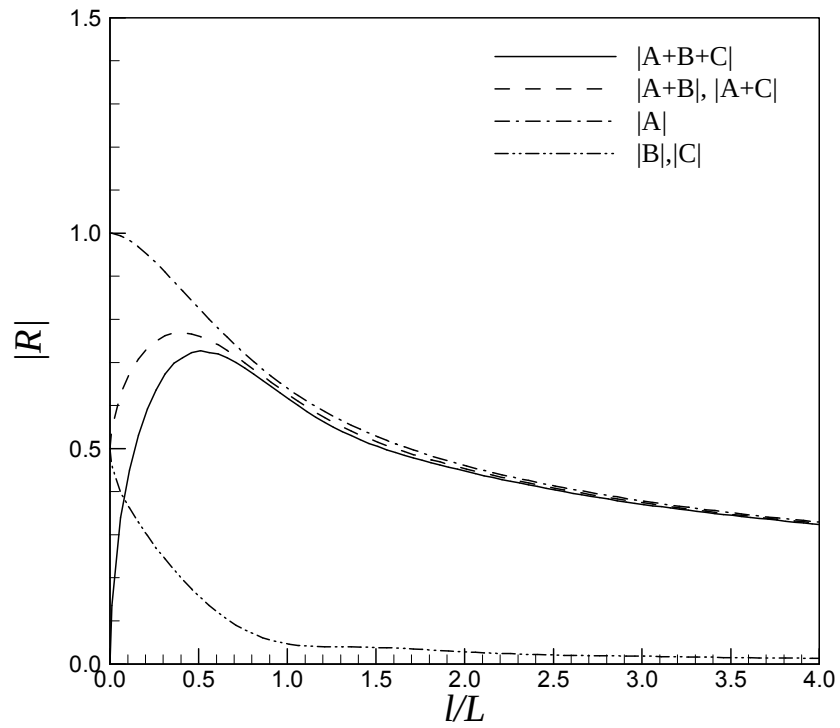
(a) Reduced force ratios for different wave types



(b) Comparison of reduced force ratios of monochromatic waves



(c) Comparison of reduced force ratios of uni-directional random waves

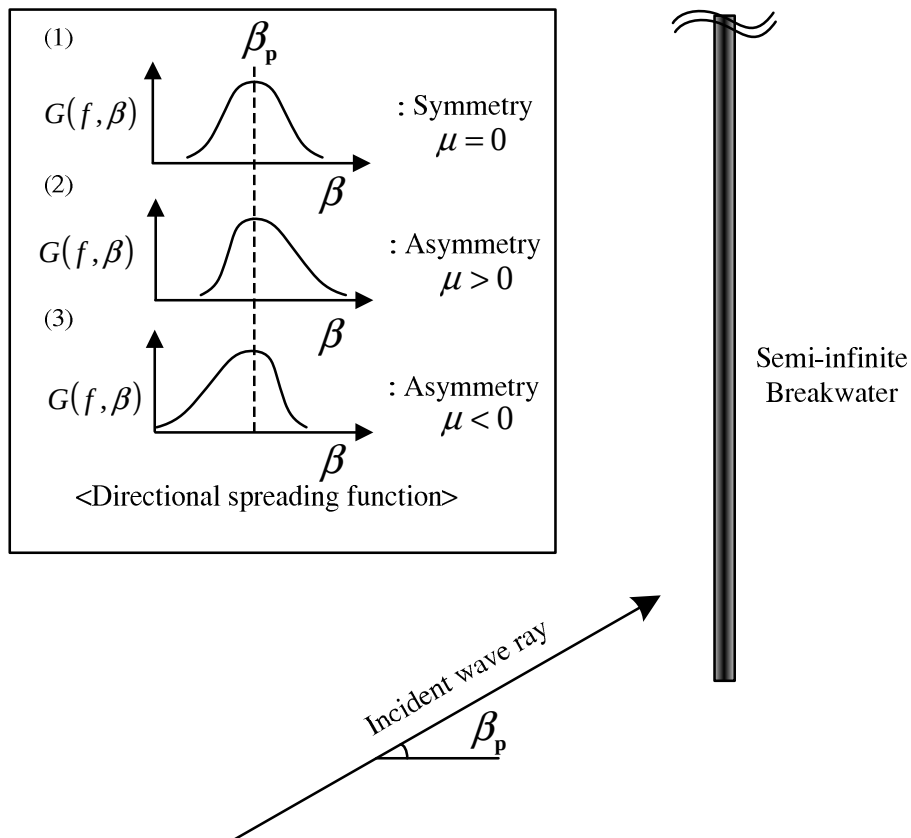


(d) Comparison of reduced force ratios of multi-directional random waves

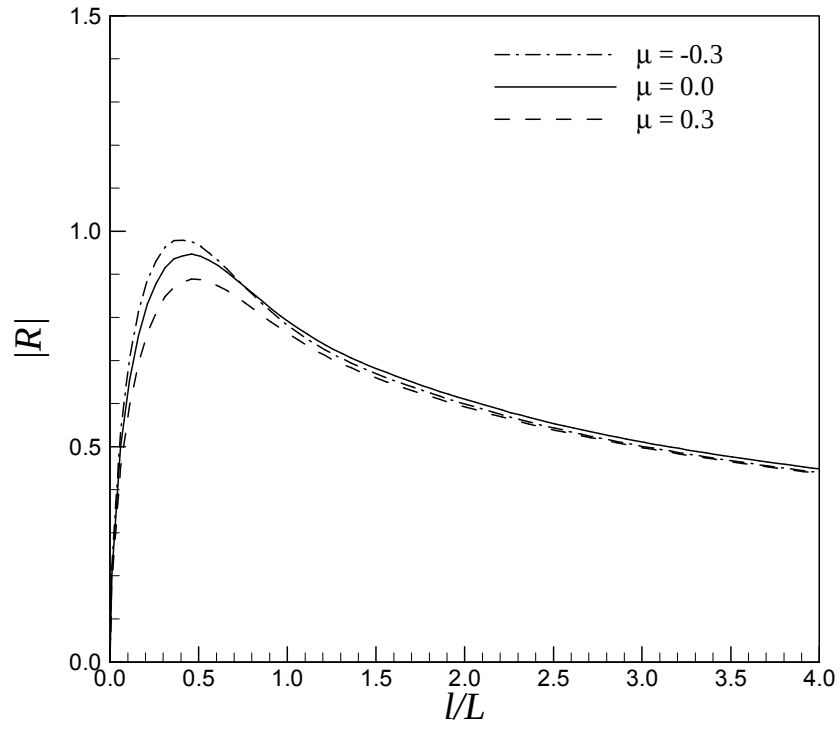
<그림 31> Reduced force ratios of with consideration of diffraction effects ($\gamma=1.0$, $s_{\max}=10$, $\beta_p=60^\circ$).

(4) 다방향 불규칙파의 방향 비대칭 효과

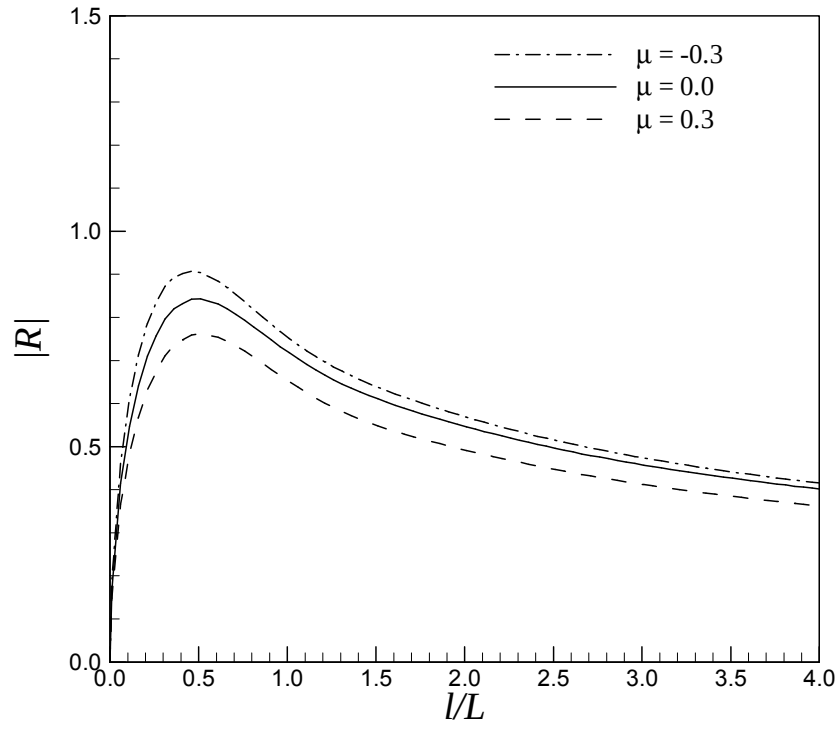
본 연구에서는 다방향 불규칙파의 비대칭 효과에 대해서도 추가로 검토하였다. 다방향 불규칙파의 방향 비대칭성은 Lee et al.(2010)이 제안한 비대칭 방향분포함수를 적용하여 재현하였다. 비대칭계수에 따른 방향스펙트럼의 에너지 분포는 그림 32를 참고할 수 있으며, 파랑의 방향 비대칭에 따른 감소파력비는 아래 그림 31에 나타내었다. 각 해석결과를 보면 비대칭계수(μ)가 -0.3인 경우 감소파력비가 가장 크게 계산되었다. 과거 Jung et al.(2010)에 의해 수행된 회절을 고려하지 않은 경우에는 주파향의 입사각이 0° 일 때 비대칭계수의 변화에 따른 감소파력비의 변화가 거의 없었다. 하지만 회절을 고려한 본 연구에서는 주파향의 입사각이 0° 일 때 비대칭계수가 음수인 경우 감소파력비가 크게 계산되었다. 이는 비대칭계수가 음수인 경우 - 방향의 입사파랑 성분이 우세하며, 따라서 회절의 영향을 적게 받으므로 감소파력비가 크게 계산되었다. 반면 입사각이 30° 및 60° 일 때에는 비대칭계수가 음수인 경우 주파향을 중심으로 입사각이 0° 에 가까운 파랑 성분이 우세하기 때문에 감소파력비가 크게 계산된다.



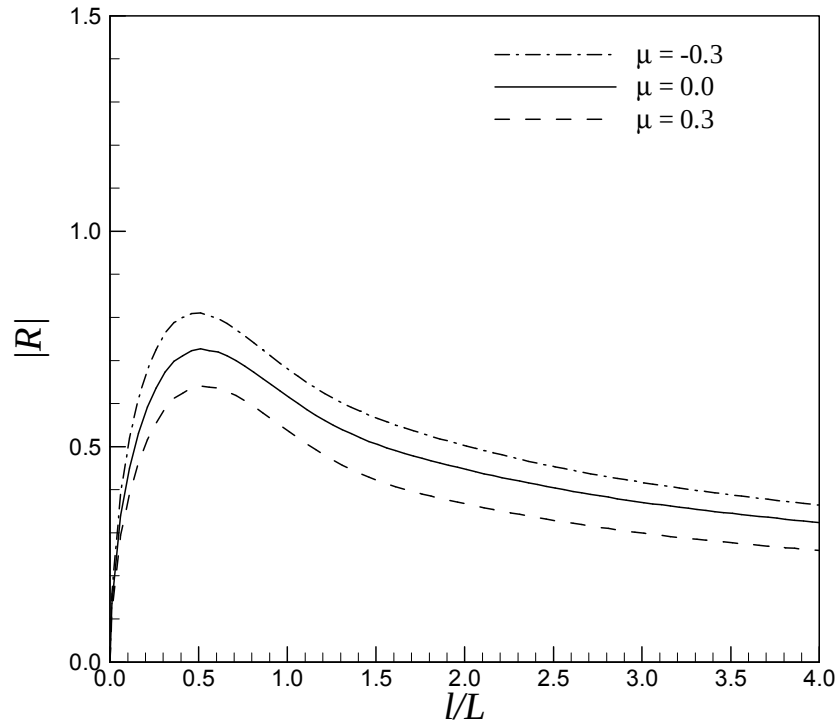
<그림 32> Wave-energy distributions as the asymmetry parameter.



(a) $\beta_p = 0^\circ$



(b) $\beta_p = 30^\circ$



(c) $\beta_p = 60^\circ$

<그림 33> Reduced force ratios of multi-directional random waves for various asymmetry parameters μ ($\gamma = 1.0$, $s_{\max} = 10$).

라. 소 결

본 연구에서는 회절을 고려한 반무한방파제 형식의 직립식 장대구조물에 작용하는 파력에 대해 해석해를 이용하여 검토하였다. 파력의 해석해는 선형파 이론과 Penney and Price(1952)의 해석해를 적용하였다. 입사파랑은 규칙파, 일방향 불규칙파 및 다방향 불규칙파를 대상으로 하였으며, 파랑 조건은 비쇄파 조건이다. 본 연구에서 제시한 장대구조물 파력의 해석해는 규칙파 조건에서 환경사방정식의 결과와 비교하였으며, 매우 일치하는 결과를 보였다.

규칙파 및 일방향 불규칙파의 감소파력비는 입사각이 0° 인 경우 구조물 전면에서 위상차이가 존재하지 않으므로 구조물의 상대길이가 증가할수록 1.0에 수렴한다. 반면, 다방향 불규칙파의 감소파력비는 비스듬히 입사하는 파랑성분이 다수 존재하기 때문에 구조물의 상대길이가 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 구조물 전면에서의 회절만을 고려할 경우 구조물의 상대길이가 0인 경우 감소파력비는 0.5가 되며, 구조물 전,후면의 회절을 모두 고려한 경우 구조물의 상대길이가 0인 경우 감소파력비는 0이 된다. 파랑의 방향 비대칭성에 따른 감소파력비는 비대칭계수가 음수일 때 가장 크게 계산되었다.

본 연구를 통해 장대구조물의 상대길이가 1.0 이하인 경우에는 회절의 영향을 고려하여야 하며, 장대구조물의 상대길이가 최소 0.5 이상이 되어야 구조물의 장대화 효과를 이용할 수 있음을 알 수 있다. 하지만 장대구조물의 상대길이가 어느 정도이어야 파력의 감소효과가 충분하며, 적정한지에 대해서는 파력 감소효과에 의한 장대구조물의 공사비 절감효과와 결부한 경제성 분석을 통해 추가로 연구하여야 할 것으로 판단된다.

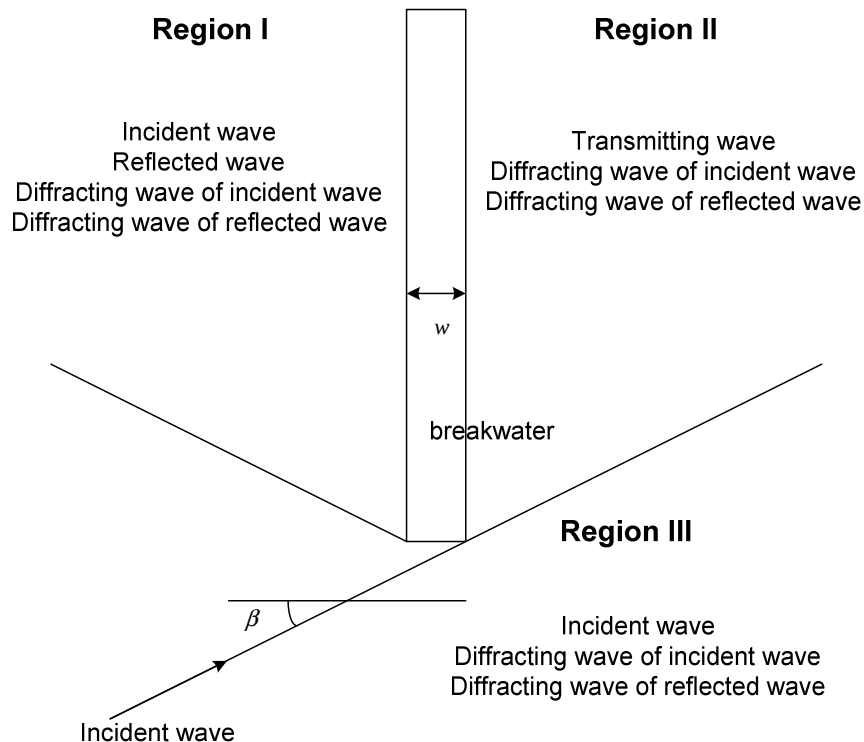
3. 투과성 방파제에 작용하는 파력 분포

가. 서론

투과성방파제에 있어서 반사율, 통과율 및 에너지 감소율의 결정은 방파제 설계에 있어서 매우 중요한 인자이다. 일반적으로 케이슨식이나 블록식과 같은 직립구조물이 아닌 사석경사제 형식의 방파제는 모두 유공이 있는 투과성방파제로 볼 수 있다. 투과성방파제에 작용하는 파력을 산정하기 위해서는 방파제 전면 및 후면의 파고에 기초한 반사 및 통과 계수를 먼저 산정해야 한다. Yu(1995)는 투과성방파제의 회절에 대한 연구를 수행하였다. 그는 그의 해에 투과성 효과 재현을 위해 Sollit and Cross(1972)에 의해 제안된 convection-neglected Euler 방정식을 적용하였다. 하지만 Yu는 방파제에 수직 입사하는 경우에 대한 해만 제시하였다. McIver(1999)는 다양한 입사각을 갖는 파랑이 투과성방파제에 내습하는 경우에 대해 Yu의 연구를 확장하여 그 해를 제시하였다. 따라서, 본 연구에서는 투과성방파제에 작용하는 파력 해석을 위해 McIver의 접근 방식을 채택하였다.

나. 투과성방파제를 위한 해석해 유도

본 절에서도 투과성방파제 형식은 반무한방파제를 채택하였다. 방파제 주변의 각 영역별 파랑 성분 분포는 그림 34와 같다. 방파제 전면(region I)에서는 입사파, 반사파, 그리고 입사파 및 반사파의 회절성분이 존재한다. 방파제 후면(region II)에는 통과파 및 회절파 성분이 존재한다. 그리고 영역 III에는 입사파 및 반사파 성분만 존재한다. 그림 34에서 w 는 방파제의 폭을 뜻한다.



<그림 34> Wave components in each area around the porous breakwater

영역 I 에서 입사파 및 반사파의 속도포텐셜은 불투과성방파제의 경우와 동일하다. 영역 II 에서 통과파의 속도포텐셜은 다음과 같다.

$$\phi_t = \frac{iga_t(x,y)}{\omega} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} e^{i(\omega t - kx \cos \beta - ky \sin \beta)} \quad (65)$$

$$a_t(x,y) = K_t a_i(x,y) \quad (66)$$

여기서, $a_t(x,y)$ 는 통과파의 진폭을 뜻하며, K_t 는 통과율을 나타낸다. 영역 I 에서 방파제 전면의 입사파 및 반사파의 회절성분의 속도포텐셜과 영역 II 에서 방파제 후면의 회절성분은 각각 다음과 같다.

$$\phi_{d,f} = \frac{ig}{\omega} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} [-b_{i,f}(y) - b_{r,f}(y)] e^{i(\omega t - ky \sin \beta)} \quad (67)$$

$$\phi_{d,l} = \frac{ig}{\omega} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} [b_{i,f}(y) + b_{r,f}(y)] e^{i(\omega t - kw \cos \beta - ky \sin \beta)} \quad (68)$$

본 연구에서는 Yu(1995)의 연구와 McIver(1999)의 연구에 더하여 회절성분의 통과파도 포함하였다. 방파제 후면에서 전면으로 전파하는 회절파의 통과파의 속도포텐셜은 다음과 같다.

$$\phi_{d,l,t} = \frac{ig}{\omega} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} K_t [b_{i,l}(y) + b_{r,l}(y)] e^{i(\omega t - ky \sin \beta)} \quad (69)$$

방파제 후면에서 전면으로 회절파의 에너지가 이동함에 따른 방파제 후면에서 감소된 파랑 에너지의 속도포텐셜은 다음과 같다.

$$\phi_{d,l,r} = \frac{ig}{\omega} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} K_t [-b_{i,l}(y) - b_{r,l}(y)] e^{i(\omega t - kw \cos \beta - ky \sin \beta)} \quad (70)$$

방파제 전면 및 후면의 총 속도포텐셜은 각각 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi_f &= \phi_i + \phi_r + \phi_{d,f} + \phi_{d,l,t} \\ &= \frac{ig}{\omega} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \left[\left\{ (1+K_r)a_i - (b_{i,f} + b_{r,f}) \right\} e^{-iky \sin \beta} \right] e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (71)$$

$$\begin{aligned} \phi_l &= \phi_i + \phi_{d,l} + \phi_{d,l,r} \\ &= \frac{ig}{\omega} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \left[\left\{ K_t a_i + (b_{i,l} + b_{r,l}) \right\} e^{-i(kw \cos \beta + ky \sin \beta)} \right] e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (72)$$

각 회절성분은 다음과 같은 관계식을 갖는다. $f(\psi)$, ψ_f , ψ_l 은 전 절에서 설명한 바와 같다.

$$b_{i,f}(y) = (1 - K_t)a_i f(-\psi_f), \quad b_{r,f}(y) = K_r a_i f(-\psi_f') \quad (73)$$

$$b_{i,l}(y) = (1 - K_t)a_i f(\psi_l), \quad b_{r,l}(y) = K_r a_i f(\psi_l') \quad (74)$$

방파제 전면 및 후면에 작용하는 파압은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} p_f &= -\rho g z - \rho \frac{\partial \phi_f}{\partial t} \\ &= -\rho g z + \rho g \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \left[\left\{ (1 + K_r)a_i - (b_{i,f} + b_{r,f}) \right\} e^{-iky \sin \beta} \right] e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (75)$$

$$\begin{aligned} p_l &= -\rho g z - \rho \frac{\partial \phi_l}{\partial t} \\ &= -\rho g z + \rho g \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \left[\left\{ K_t a_i + (b_{i,l} + b_{r,l}) \right\} e^{-i(kw \cos \beta + ky \sin \beta)} \right] e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (76)$$

방파제 단위 길이당 작용하는 파력은 방파제에 작용하는 파압을 z 방향으로 적분하여 구할 수 있다. 방파제 전면 및 후면에 작용하는 단위 길이당 파력은 각각 다음 식과 같다.

$$P_f = \frac{1}{2} \rho g h^2 + \rho g h \frac{\tanh kh}{kh} \left[\left\{ (1 + K_r)a_i - (b_{i,f} + b_{r,f}) \right\} e^{-iky \sin \beta} \right] e^{i\omega t} \quad (77)$$

$$P_l = \frac{1}{2} \rho g h^2 + \rho g h \frac{\tanh kh}{kh} \left[\left\{ K_t a_i + (b_{i,l} + b_{r,l}) \right\} e^{-i(kw \cos \beta + ky \sin \beta)} \right] e^{i\omega t} \quad (78)$$

방파제 단위 길이당 작용하는 총 파력은 방파제 전면 및 후면의 파력을 더하여 계산할 수 있으며, 이는 아래 식과 같다.

$$P_t = P_f - P_l = \rho g h \frac{\tanh kh}{kh} \left[\left\{ (1 + K_r)a_i - (b_{i,f} + b_{r,f}) \right\} e^{-iky \sin \beta} - \left\{ K_t a_i + (b_{i,l} + b_{r,l}) \right\} e^{-i(kw \cos \beta + ky \sin \beta)} \right] e^{i\omega t} \quad (79)$$

불투과성 방파제에 작용하는 회절을 무시한 정수압을 제외한 파력은 다음과 같다.

$$P_{0,i} = \rho g h \frac{\tanh kh}{kh} 2a_i e^{-iky \sin \beta} e^{i\omega t} \quad (80)$$

반면, 투수성방파제에 작용하는 회절을 무시한 정수압을 제외한 파력은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$P_{o,p} = \rho gh \frac{\tanh kh}{kh} (1 + K_r) a_i e^{-iky \sin \beta} e^{i\omega t} \quad (81)$$

식 (81)에서 $P_{0,p}$ 는 반사율은 고려하고, 통과율은 무시한 파력이다. 투수성방파제에서 회절을 무시한 파력과 회절을 고려한 파력의 비는 다음식과 같이 정의된다.

$$\frac{P_t}{P_{0,p}} = \left| \frac{\left[\left\{ (1 + K_r) a_i - (b_{i,f} + b_{r,f}) + K_t (b_{i,l} + b_{r,l}) \right\} e^{-iky \sin \beta} - \left\{ K_t a_i + (b_{i,l} + b_{r,l}) - K_t (b_{i,l} + b_{r,l}) \right\} e^{-i(kw \cos \beta + ky \sin \beta)} \right]}{(1 + K_r) a_i e^{-iky \sin \beta}} \right| \quad (82)$$

불투과성방파제에서 회절과 유공율을 무시한 파력과 투수성방파제에서 회절을 고려한 파력의 비는 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{P_t}{P_{0,i}} = \left| \frac{\left[\left\{ (1 + K_r) a_i - (b_{i,f} + b_{r,f}) + K_t (b_{i,l} + b_{r,l}) \right\} e^{-iky \sin \beta} - \left\{ K_t a_i + (b_{i,l} + b_{r,l}) - K_t (b_{i,l} + b_{r,l}) \right\} e^{-i(kw \cos \beta + ky \sin \beta)} \right]}{2 a_i e^{-iky \sin \beta}} \right| \quad (83)$$

투수성방파제에서 회절을 무시한 파력과 회절을 고려한 전면 파력의 비와 불투과성방파제에서 회절과 유공율을 무시한 파력과 투수성방파제에서 회절을 고려한 전면 파력의 비는 다음과 같이 간략히 다시 쓸 수 있다.

$$\frac{P_f}{P_{0,p}} = \left| \frac{\left[\left\{ (1 + K_r) a_i - (b_{i,f} + b_{r,f}) + K_t (b_{i,l} + b_{r,l}) \right\} e^{-iky \sin \beta} \right]}{(1 + K_r) a_i e^{-iky \sin \beta}} \right| \quad (84)$$

$$\frac{P_f}{P_{0,i}} = \left| \frac{\left[\left\{ (1 + K_r) a_i - (b_{i,f} + b_{r,f}) + K_t (b_{i,l} + b_{r,l}) \right\} e^{-iky \sin \beta} \right]}{2 a_i e^{-iky \sin \beta}} \right| \quad (85)$$

그리고, 투수성방파제에서 회절을 무시한 파력과 회절을 고려한 후면 파력의 비와 불투과성방파제에서 회절과 유공율을 무시한 파력과 투수성방파제에서 회절을 고려한 후면 파력의 비는 다음과 같다.

$$\frac{P_l}{P_{0,p}} = \left| \frac{\left[\left\{ K_t a_i + (b_{i,l} + b_{r,l}) - K_t (b_{i,l} + b_{r,l}) \right\} e^{-i(kw \cos \beta + ky \sin \beta)} \right]}{(1 + K_r) a_i e^{-iky \sin \beta}} \right| \quad (86)$$

$$\frac{P_l}{P_{0,p}} = \left| \frac{\left[\left\{ K_t a_i + (b_{i,l} + b_{r,l}) - K_t (b_{i,l} + b_{r,l}) \right\} e^{-i(kw \cos \beta + ky \sin \beta)} \right]}{(1 + K_r) a_i e^{-iky \sin \beta}} \right| \quad (87)$$

다. 해석해의 검증

앞 절에서 유도한 해석해를 검증하기 위해 Boussinesq 방정식의 해와 비교하였다. Lee et al.(2014)이 제안한 투수성 구조물을 고려한 확장형 Boussinesq 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot [(h + \eta)\bar{\mathbf{u}}] = 0 \quad (88)$$

$$\begin{aligned} & \left(\tau \frac{\partial}{\partial t} + \alpha \right) \bar{\mathbf{u}} + g \nabla \eta + \bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla \bar{\mathbf{u}} + \frac{1}{6} \left(\tau \frac{\partial}{\partial t} + \alpha \right) h^2 \nabla (\nabla \cdot \bar{\mathbf{u}}) \\ & - \left(\frac{1}{2} + \delta \right) \left(\tau \frac{\partial}{\partial t} + \alpha \right) h \nabla [\nabla \cdot (h \bar{\mathbf{u}})] - \delta g h \nabla [\nabla \cdot (h \nabla \eta)] = 0 \end{aligned} \quad (89)$$

여기서, η 는 자유수면변위, h 는 평균 수심, g 는 중력가속도, $\bar{u}$ 수심 평균 유속을 뜻한다. $\delta(=1/18)$ 은 보정계수, 그리고 α 와 τ 는 각각 항력 및 관성력 계수를 나타내며, 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$\alpha = \alpha_l \left(\frac{1-\lambda}{\lambda} \right)^2 \frac{\nu}{m^2} + \alpha_t \frac{1-\lambda}{\lambda} \frac{1}{m} |\mathbf{U}| \quad (90)$$

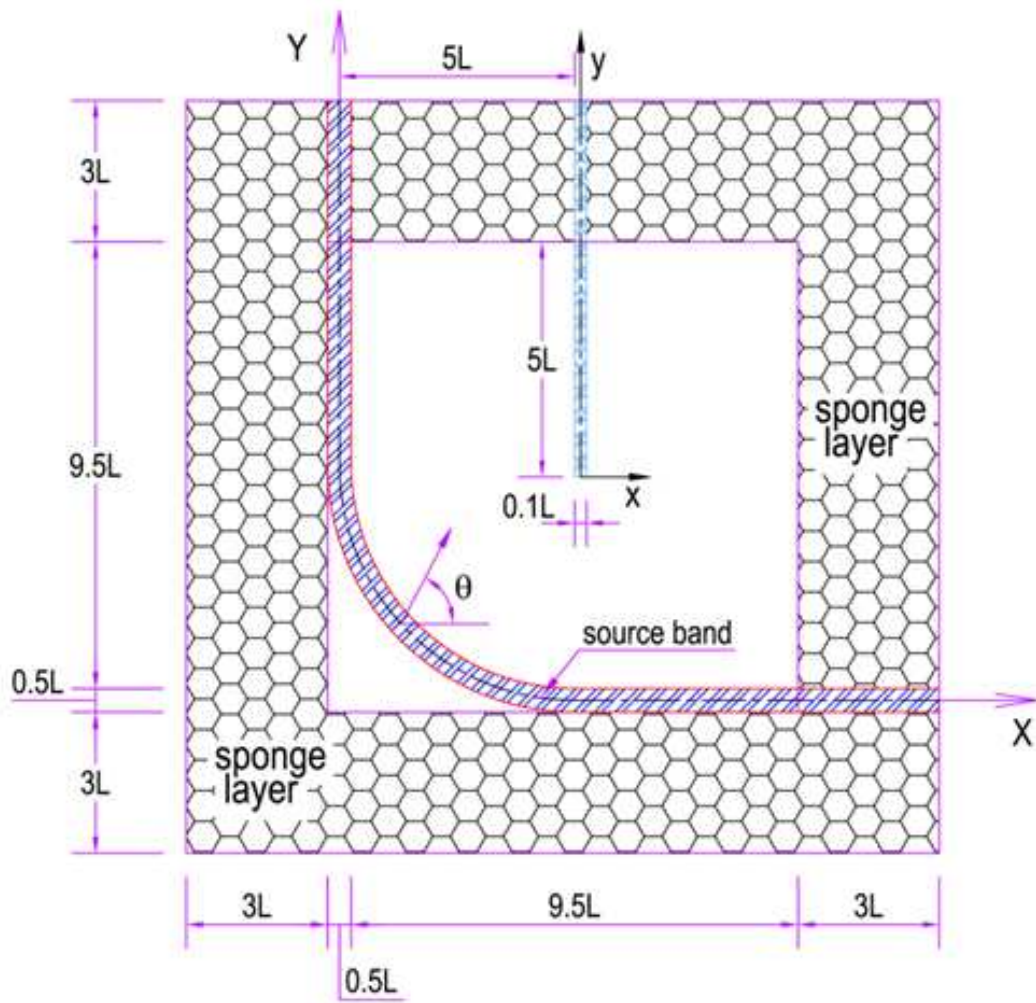
$$\tau = 1 + (1-\lambda)(1+\kappa) \quad (91)$$

여기서, λ 는 유공율, κ 는 부가 질량계수, α_l 과 α_t 는 각각 층류 및 난류 저항을 뜻하며, ν 는 물의 동점성, m 은 유공재료의 크기를 나타낸다.

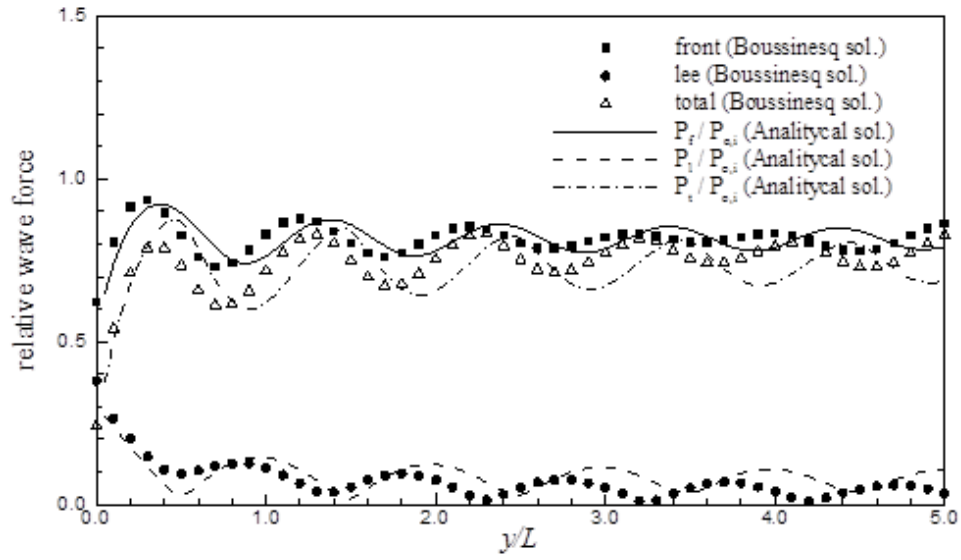
수치해석을 위한 2차원 영역은 다음 그림과 같다. 투수성방파제 재현을 위해서 유공율(λ)은 0.35, 0.5, 0.75를 적용하였으며, $\alpha_l = 1100$, $\alpha_t = 0.81$, $m = 1.43 \text{ cm}$ 를 각각 적용하였다. 그리고, 방파제의 폭(w)는 0.1L을 적용하였다. 천수영역($kh = 0.05\pi$)에서 반무한 투수성방파제를 대상으로 수치해석을 수행하였다. 선형파의 내부 조파를 위해서 Vu et al.(2013)이 제시한 원천함수를 이용하였다. 파랑의 입사각은 0도, 30도, 45도, 60도인 경우에 대해 해석하였다.

방파제 전면과 후면에서 방파제에 작용하는 파력을 측정하였다. 방파제에 작용하는 총파력은 방파제 전면과 후면에서의 파고 차이로부터 결정된다. Boussinesq 모델에서 해석된 평균 통과 및 반사율은 해석해에 직접 적용되었다. 해석해에 의한 결과는 Boussinesq 모델에 의한 결과와 매우 유사한 결과를 보였다. 방파제 전면과 후면에서 파력은 수치모델에서 잘 예측하였지만, 방파제 전면에서 해석해와 Boussinesq 모델의 결과는 약간의 위상 차이가 존재하였다. Boussinesq 모델과 비교 결과 최대 오차 10% 이내에서 정확히 일치함을 확인하였다. 그리고, 투수성방파제의 경우 일반 불투수성방파제에 비해 90% 이하의 파력이 대체로 작용하였다.

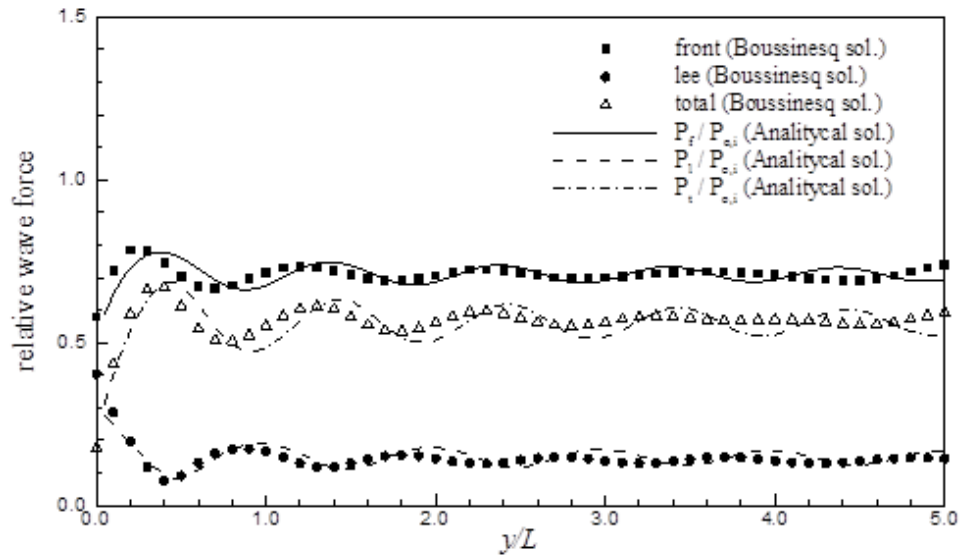
해석 결과 방파제의 유공율이 증가할수록 방파제 전면과 후면의 무차원화된 파력은 감소하는 경향을 보였다. 반면 투수성방파제에 작용하는 파력은 유공율이 감소할수록 증가하였다. 파랑의 입사각이 증가할 경우 방파제의 전면과 후면에 작용하는 파력의 진동하는 파장은 증가하는 것으로 보인다.



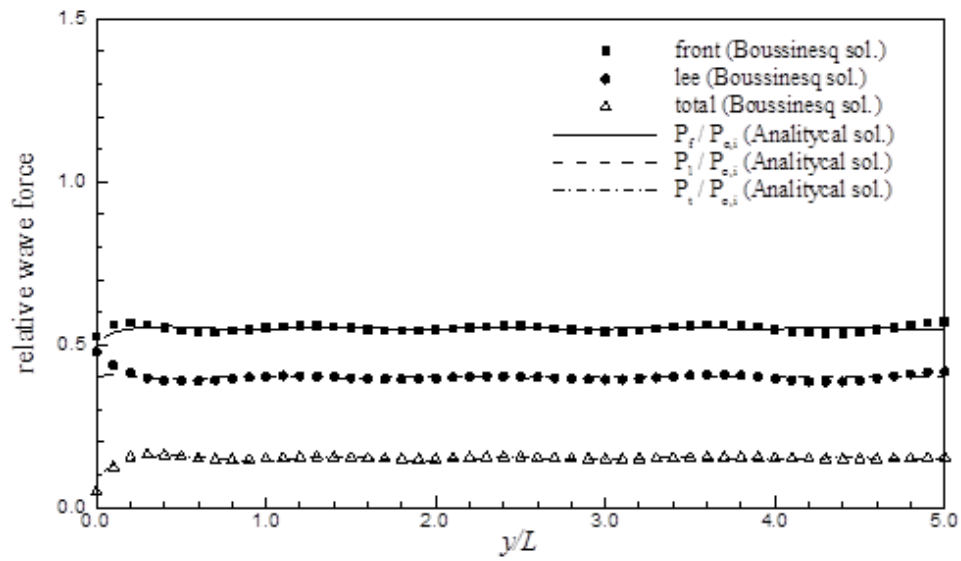
<그림 35> Computational domain for Boussinesq model



(a) $\lambda = 0.35$

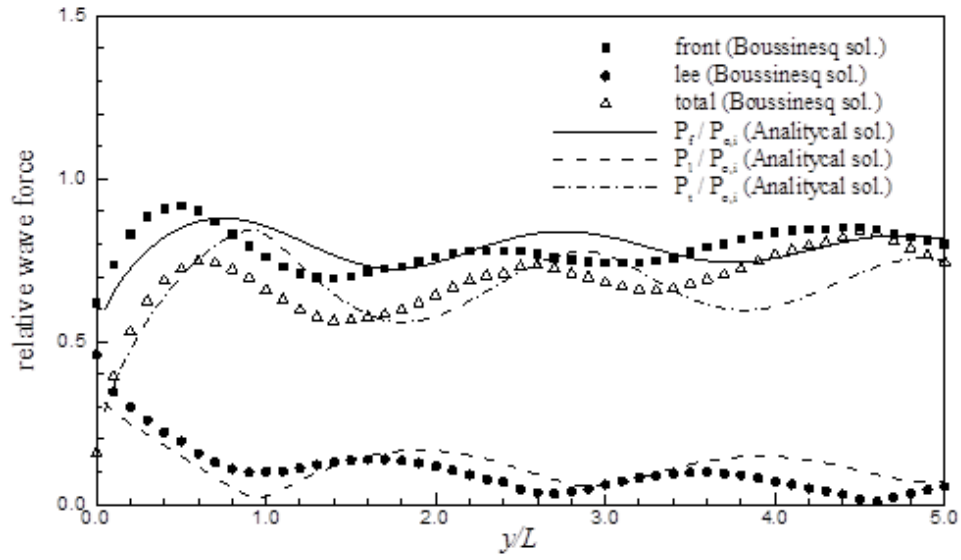


(b) $\lambda = 0.50$

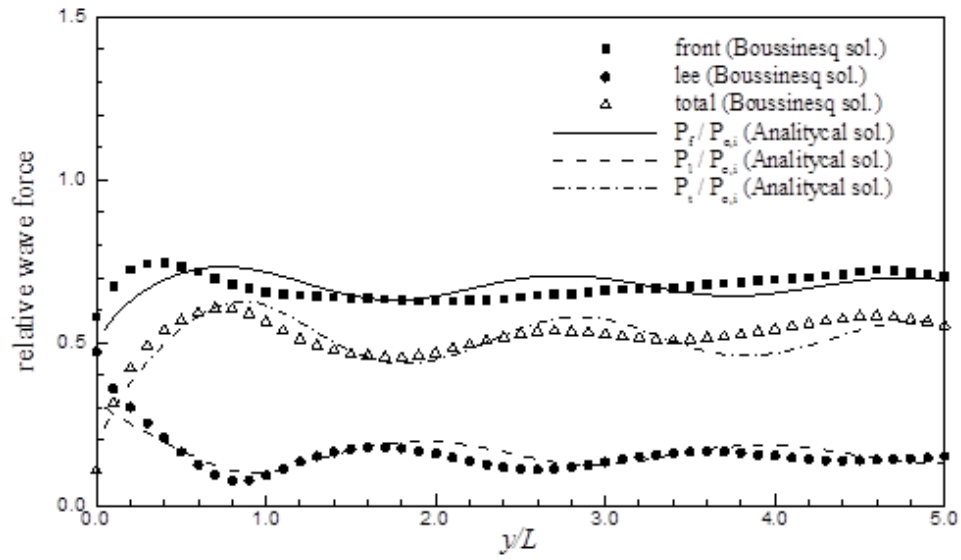


(c) $\lambda = 0.75$

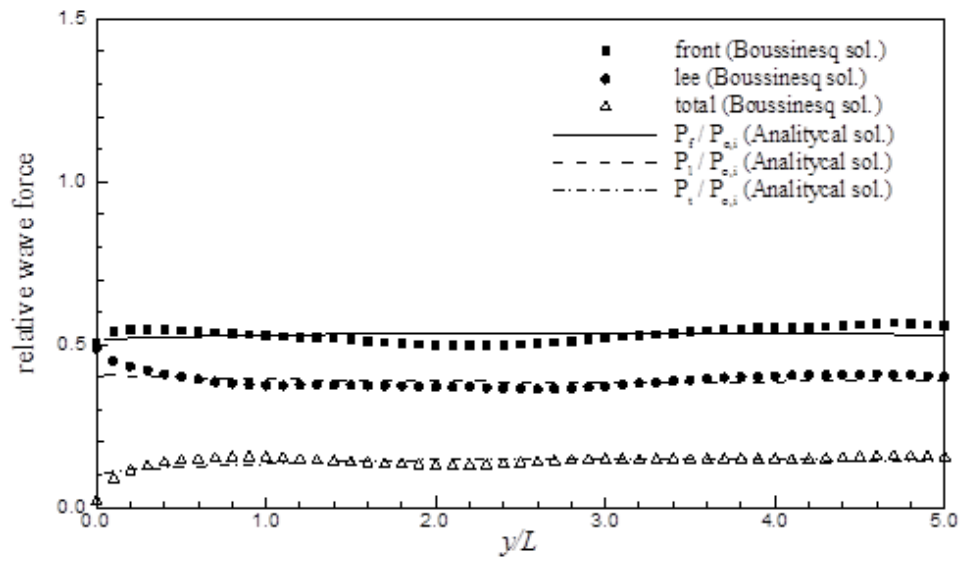
<그림 36> Normalized wave forces on a semi-infinite porous breakwater($\beta = 0^\circ$)



(a) $\lambda = 0.35$

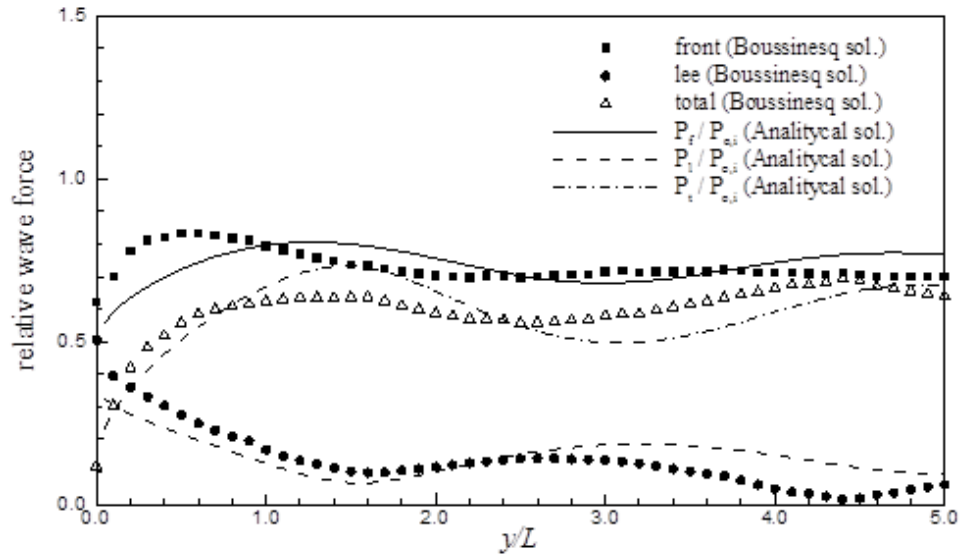


(b) $\lambda = 0.50$

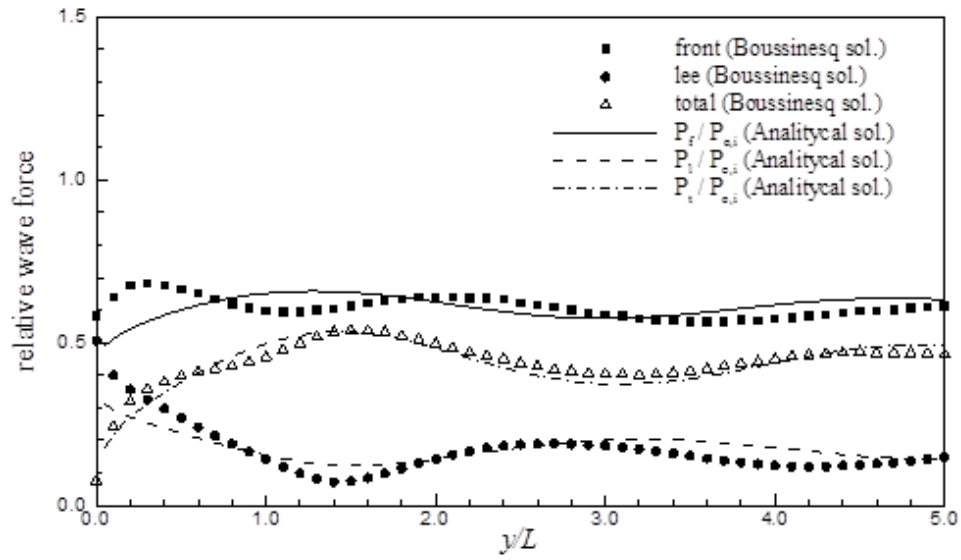


(c) $\lambda = 0.75$

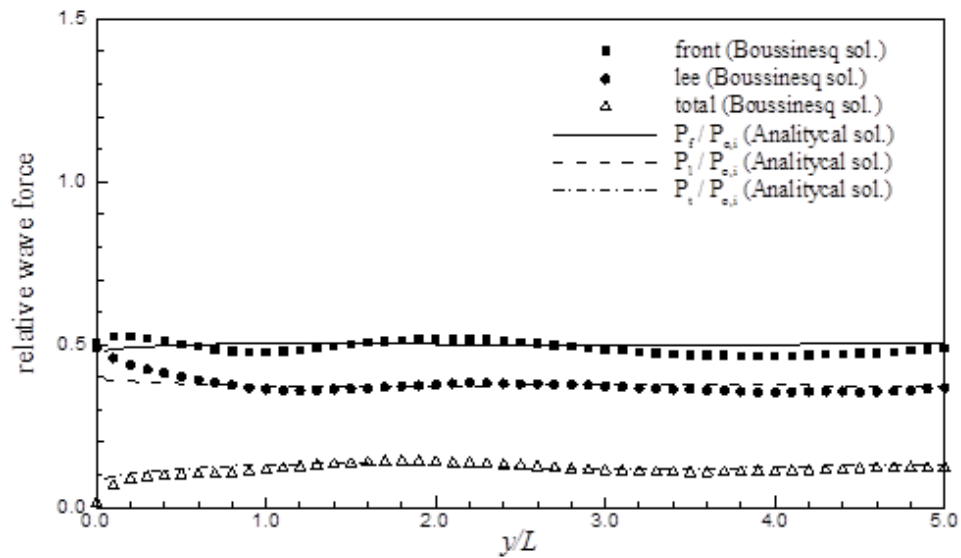
<그림 37> Normalized wave forces on a semi-infinite porous breakwater($\beta = 30^\circ$)



(a) $\lambda = 0.35$

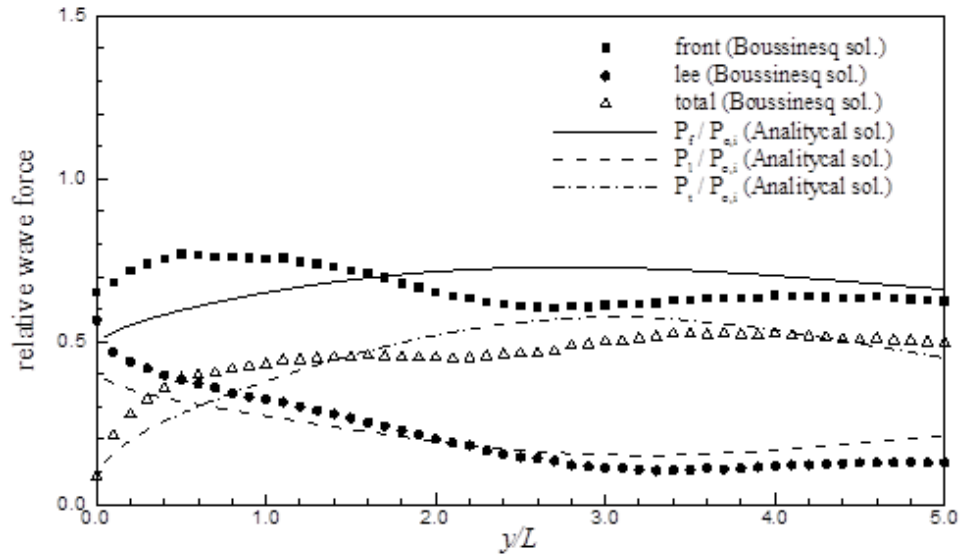


(b) $\lambda = 0.50$

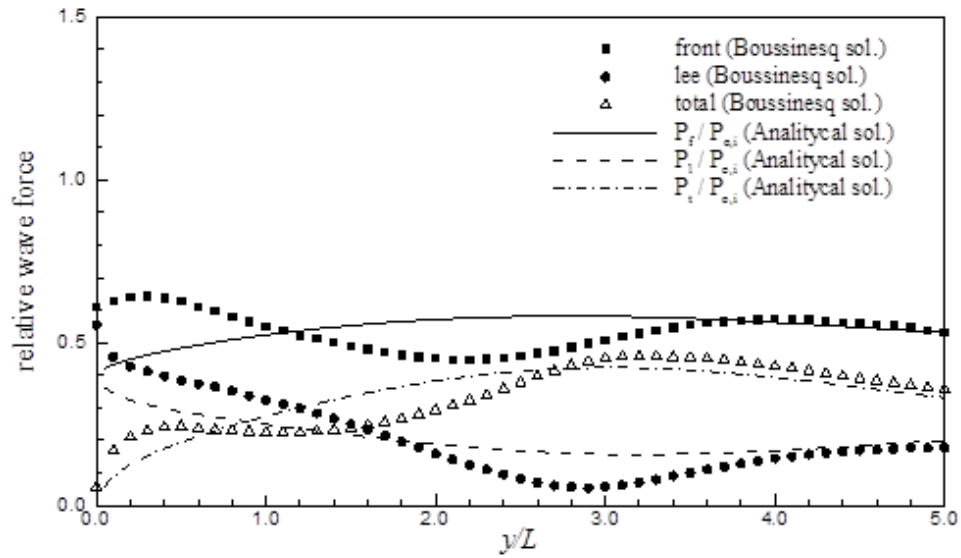


(c) $\lambda = 0.75$

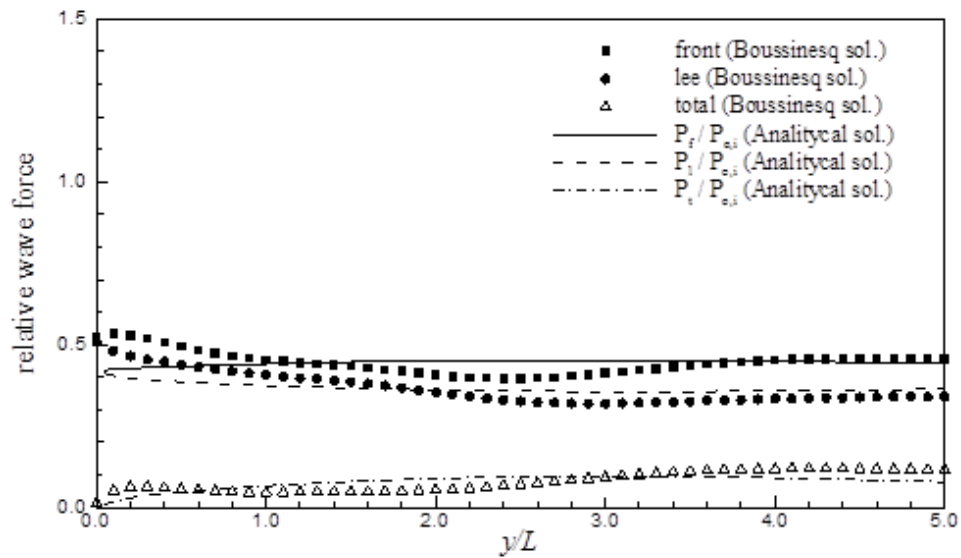
<그림 38> Normalized wave forces on a semi-infinite porous breakwater($\beta = 45^\circ$)



(a) $\lambda = 0.35$



(b) $\lambda = 0.50$



(c) $\lambda = 0.75$

<그림 39> Normalized wave forces on a semi-infinite porous breakwater($\beta = 60^\circ$)

라. 통과 및 반사계수의 결정

McIver(1999)가 비스듬히 입사하는 파랑에 대한 통과 및 반사계수를 Yu(1995)의 방법을 보완하여 제안하였다. McIver가 제시한 통과 및 반사계수는 다음과 같다.

$$K_t = \frac{2\zeta}{2\zeta - ik \cos \beta}, \quad K_r = 1 - K_t = \frac{-ik \cos \beta}{2\zeta - ik \cos \beta} \quad (92)$$

여기서,

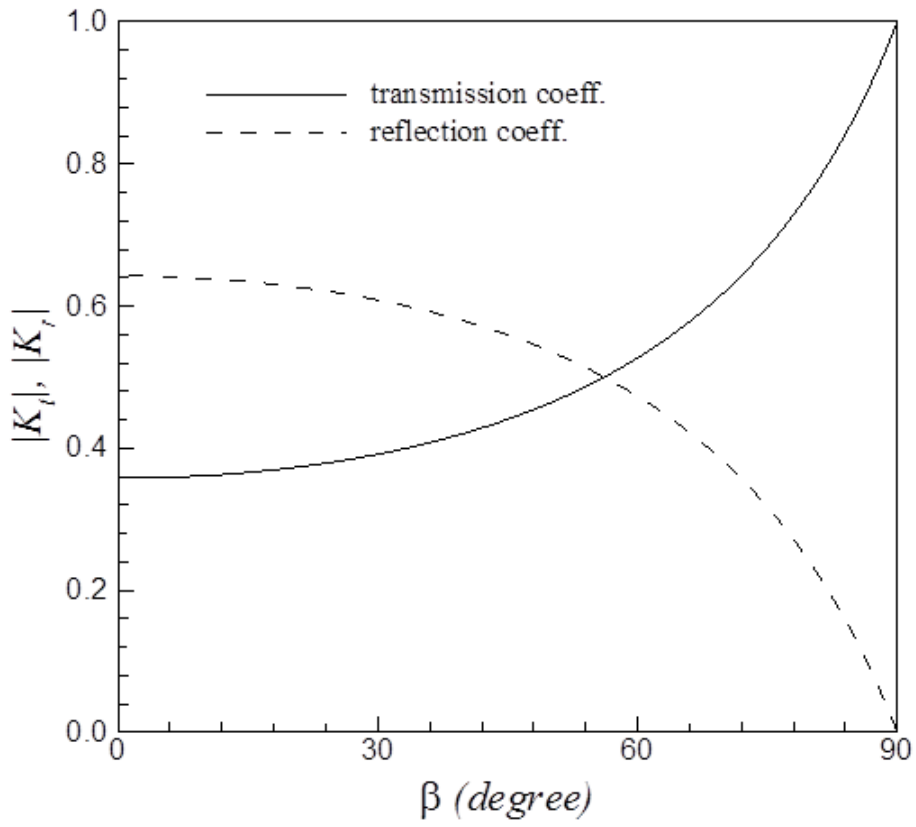
$$\zeta = \frac{-i\lambda}{w(f_c - iC_m)} \quad (93)$$

여기서, λ 는 투수성방파제의 유공율, f_c 는 무차원화된 마찰 계수, C_m 은 무차원화된 관성력 계수를 뜻한다. 식 (92)에서 통과 및 반사계수는 Yu and Togashi(1996)의 결과와 거의 일치하며, 입사각이 0도인 경우 Yu(1995)의 결과와 동일하다. McIver의 해는 본 연구에서 유공방파제의 통과 및 반사계수를 결정하는 데 적용되었다.

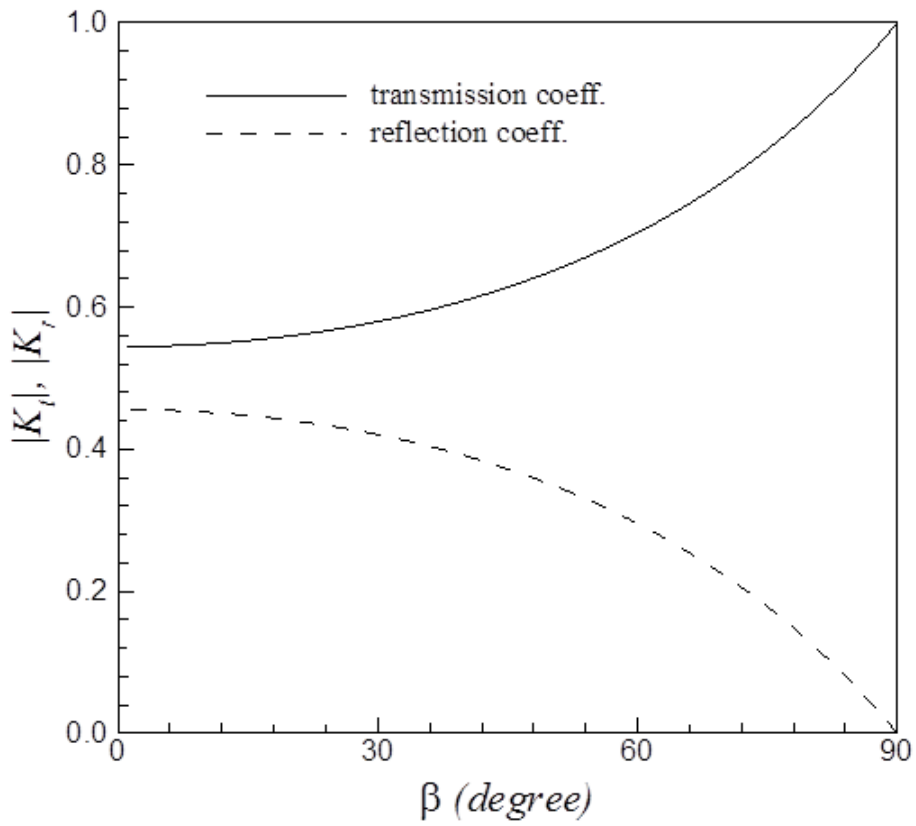
입사각에 따른 통과 및 반사계수는 그림 40 및 41에 각각 도시하였다. 두 그림에서, 방파제의 상대 폭(w/L)은 0.1이다. 입사각이 증가할수록 통과율은 증가하고 반사율은 감소하는 것으로 검토되었다. 투수성방파제의 유공율이 증가할 경우에도 통과율은 증가하고 반사율은 감소하였다. 입사파랑이 수직으로 입사할 때($\beta = 90^\circ$), 통과 및 반사계수는 각각 1.0 및 0이 되었다.

파랑의 입사각과 무차원화된 마찰계수(f_c)의 변화에 따른 통과계수 및 반사계수는 그림 42에 표현하였다. 그리고, 파랑의 입사각과 관성력계수(C_m)에 따른 통과 및 반사계수는 그림 43에 나타내었다. 무차원화된 마찰계수와 관성력계수가 감소할수록 통과율은 증가하고 반사율은 감소하는 것으로 나타났다.

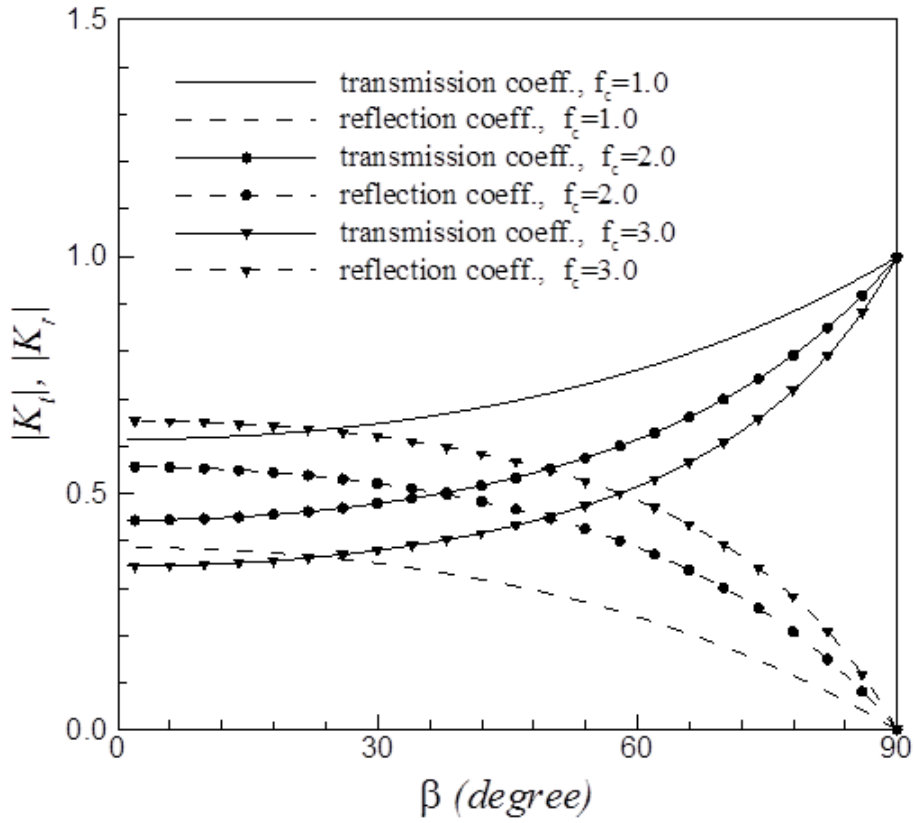
방파제의 전면과 후면에서 파랑의 상대파력을 식 (92) 및 (93)에서 제안된 통과 및 반사계수의 관계식을 이용하여 계산하였다. 투수성방파제에 작용하는 파력은 식 (82) - (87)을 이용하였다. 파랑의 입사각도(β), 방파제의 유공율(λ), 무차원화된 마찰계수(f_c), 그리고 무차원화된 관성력계수(C_m)에 따른 방파제 전면과 후면에 작용하는 상대파력과 총파력을 그림 44 - 47에 도시하였다. 그림 44 - 47에서 파력은 회절을 무시한 불투과성 방파제에 작용하는 파력으로 무차원화한 결과(각 그림에서 (a)와 (b))와 회절을 무시한 투과성 방파제에 작용하는 파력으로 무차원화한 결과(각 그림에서 (c)와 (d))로 나타내었다. 방파제의 유공율이 증가하거나 마찰계수 및 관성력계수가 감소할 경우 방파제 전면에 작용하는 파력은 감소하고 방파제 후면에 작용하는 파력은 증가하는 경향을 보였다. 또한 투수성방파제에 작용하는 총파력은 방파제의 유공율이 감소하거나 마찰계수 및 관성력계수가 증가할 때 증가하는 것으로 나타났다.



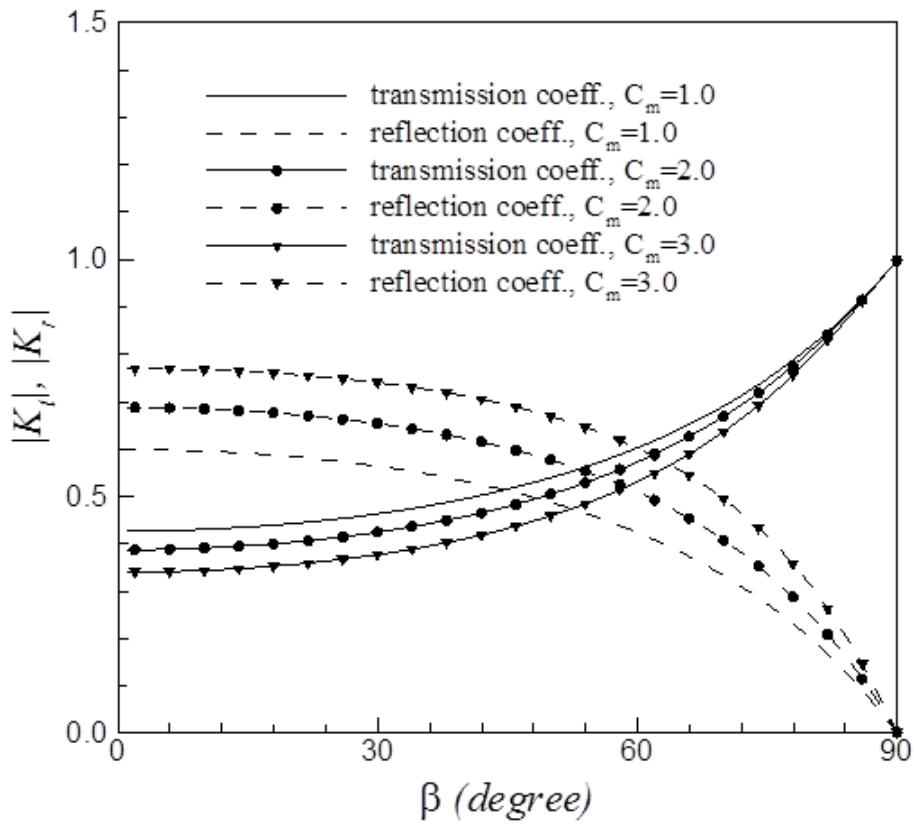
〈그림 40〉 Transmission and reflection coefficients as functions of incident wave angle β
 $(\lambda = 0.35, f_c = 2.0, C_m = 0.0, w/L = 0.1)$



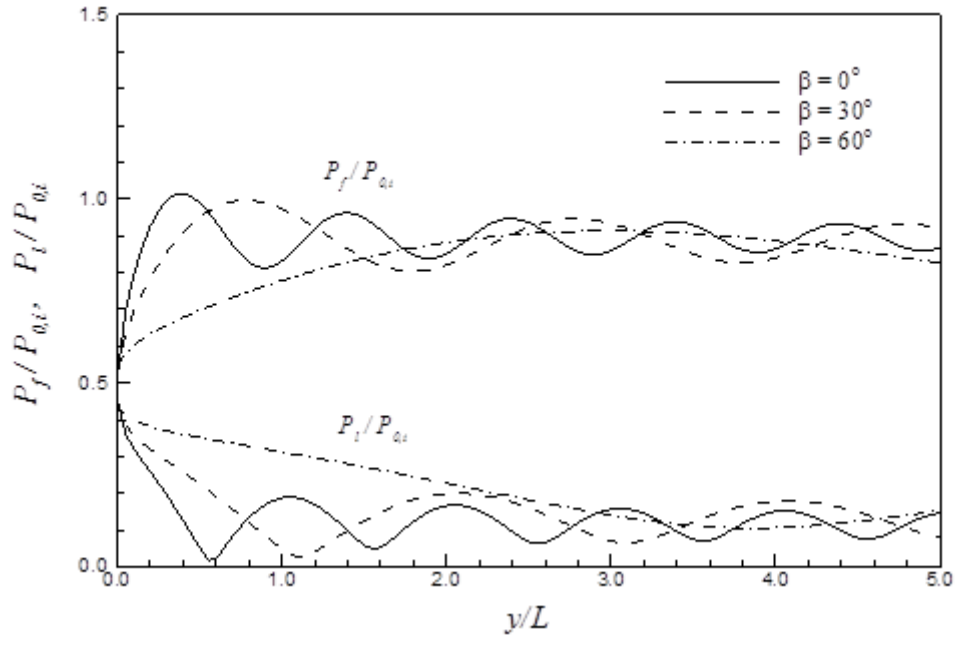
〈그림 41〉 Transmission and reflection coefficients as functions of incident wave angle β
 $(\lambda = 0.75, f_c = 2.0, C_m = 0.0, w/L = 0.1)$



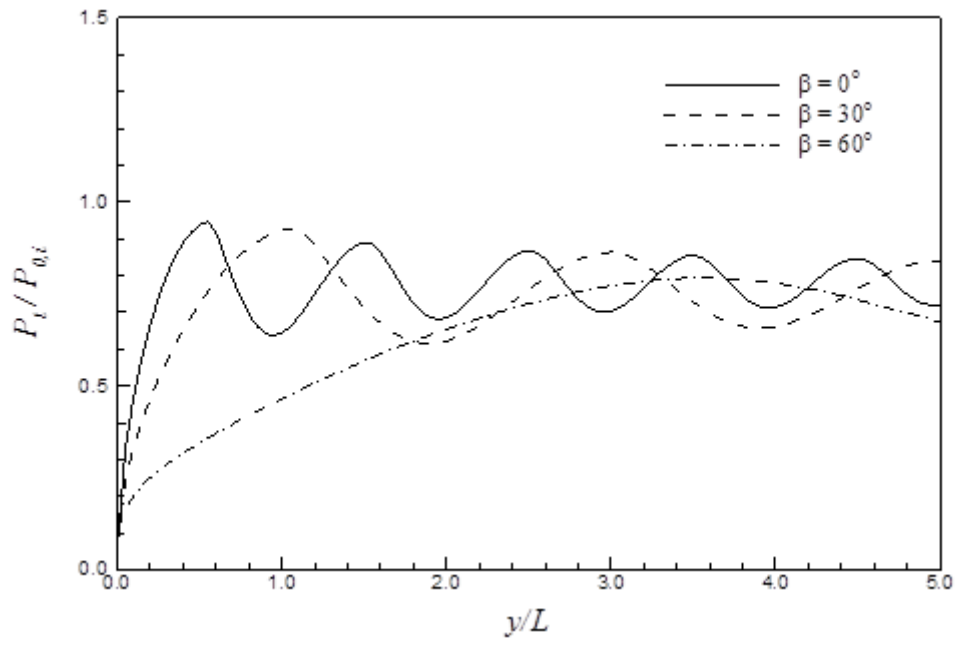
〈그림 42〉 Transmission and reflection coefficients as functions of incident wave angle β for various dimensionless friction coefficients f_c ($\lambda=0.5$, $C_m=0.0$, $w/L=0.1$)



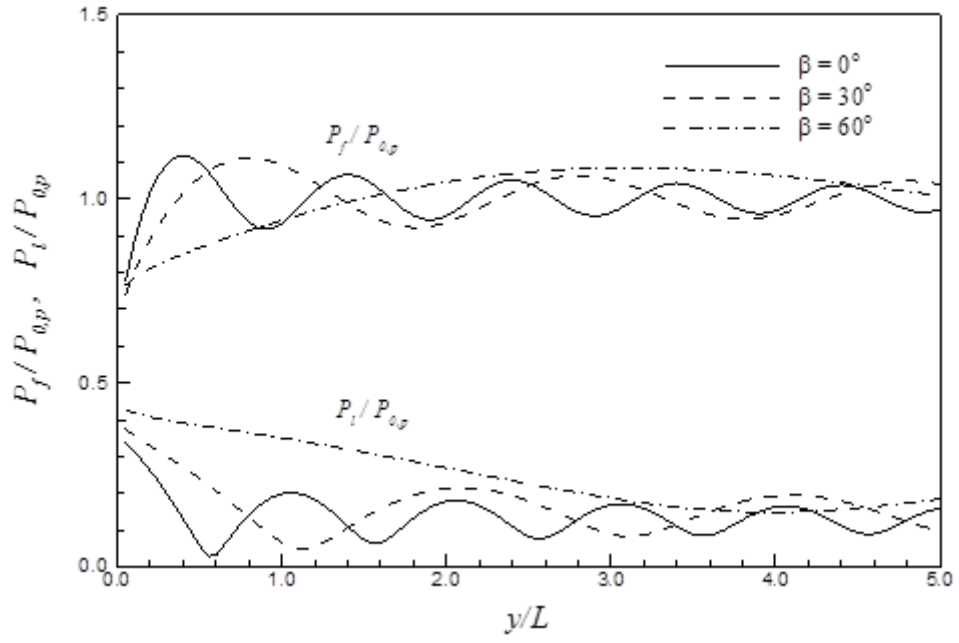
〈그림 43〉 Transmission and reflection coefficients as functions of incident wave angle β for various dimensionless inertia coefficients C_m ($\lambda=0.5$, $f_c=2.0$, $w/L=0.1$)



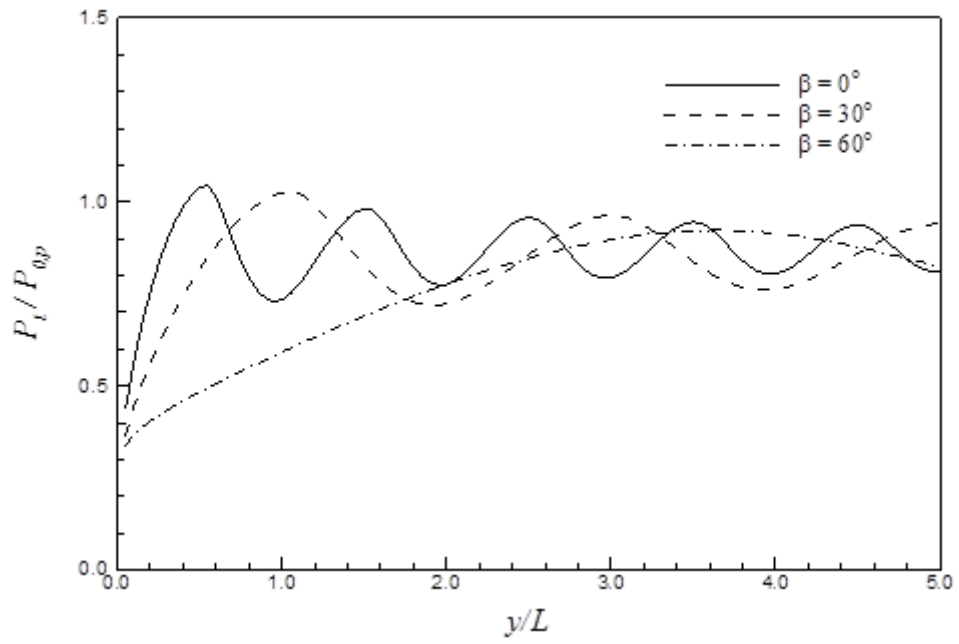
(a) $P_f/P_{0,i}$, $P_t/P_{0,i}$



(b) $P_t/P_{0,i}$

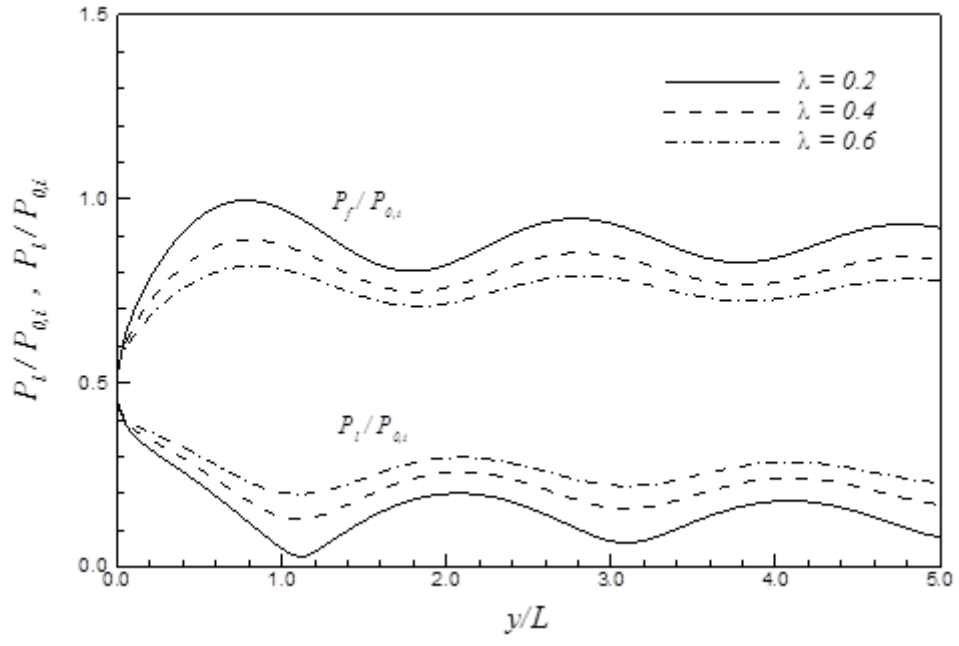


(c) $P_f/P_{0,p}$, $P_t/P_{0,p}$

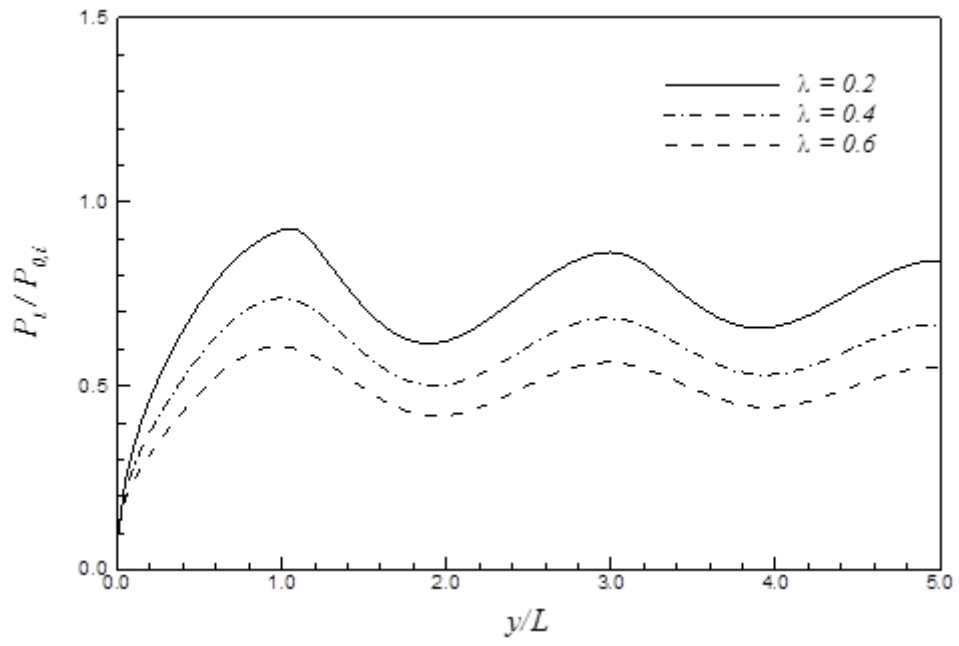


(d) $P_t/P_{0,p}$

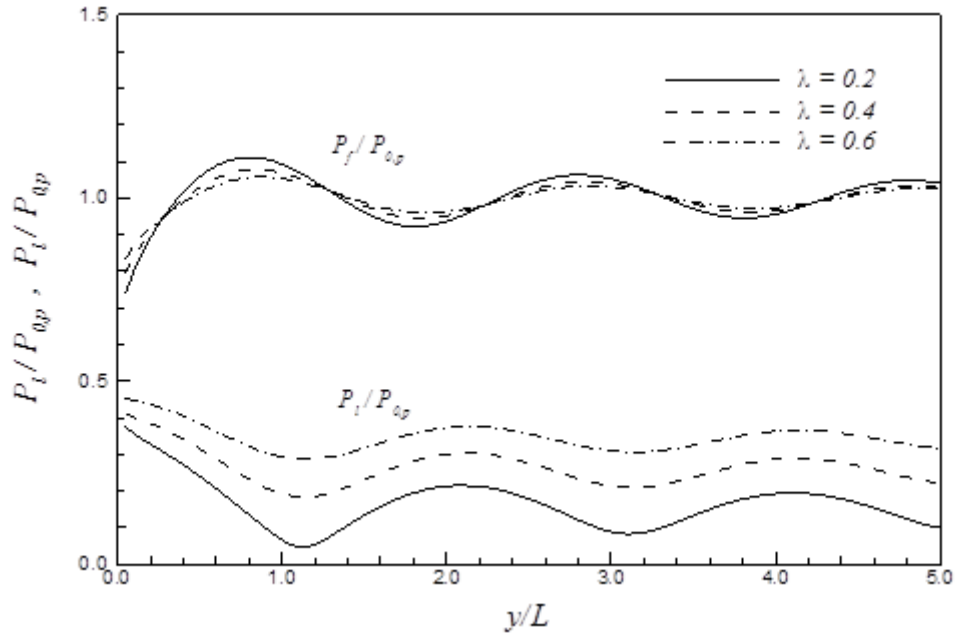
<그림 44> Normalized wave force distributions as function of incident wave angle ($\lambda=0.2$, $f_c=2.0$, $C_m=1.0$, $w/L=0.1$)



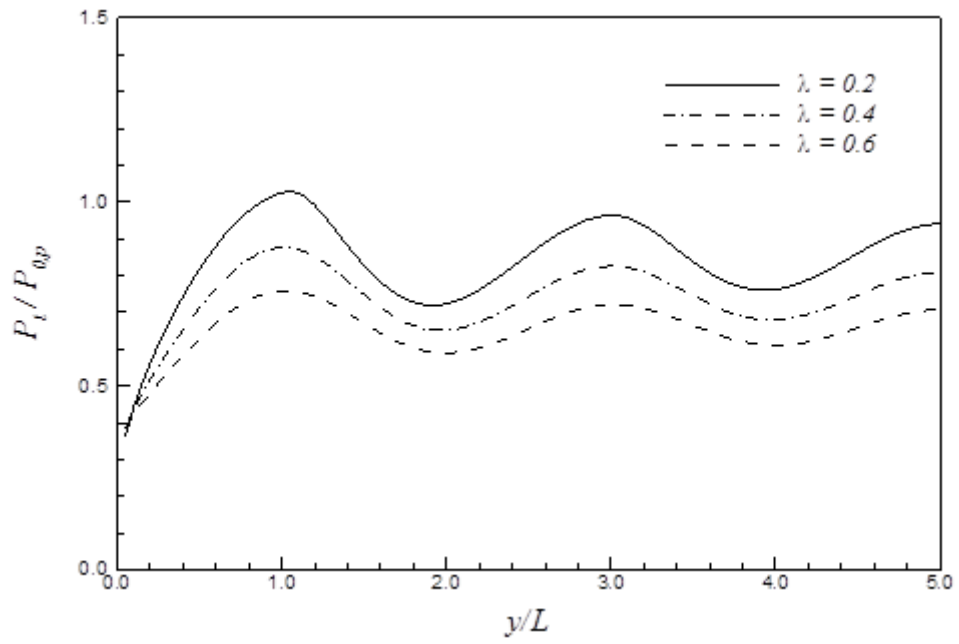
(a) $P_f/P_{0,i}$, $P_t/P_{0,i}$



(b) $P_t/P_{0,i}$

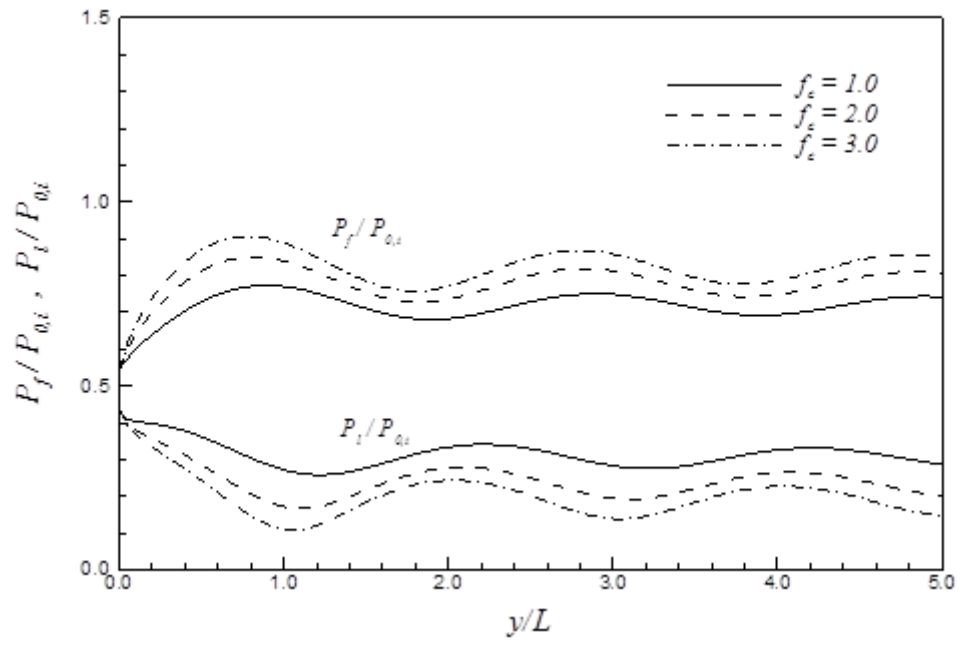


(c) $P_f/P_{0,p}$, $P_t/P_{0,p}$

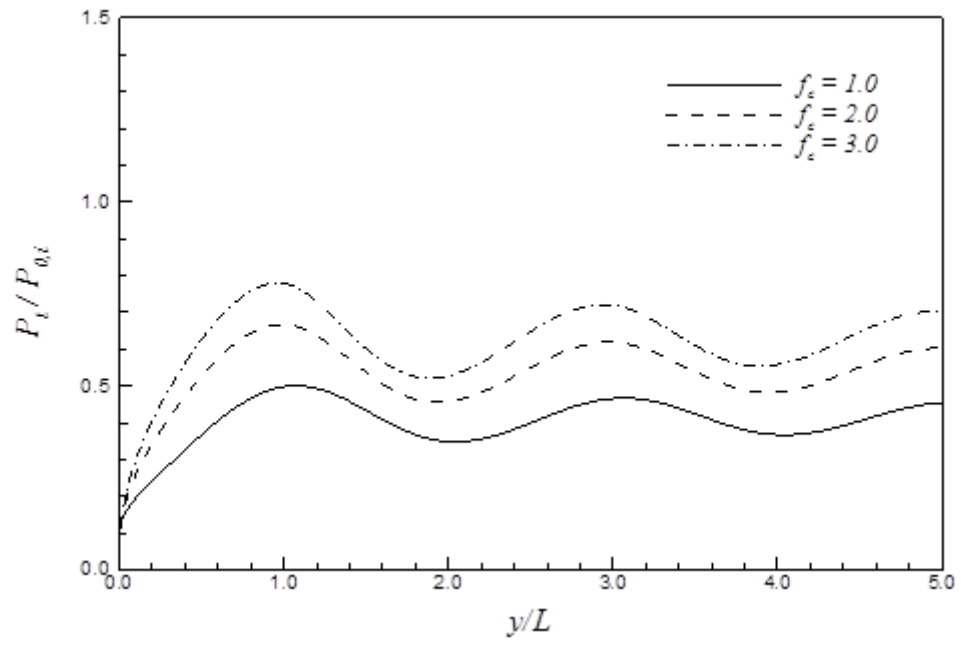


(d) $P_t/P_{0,p}$

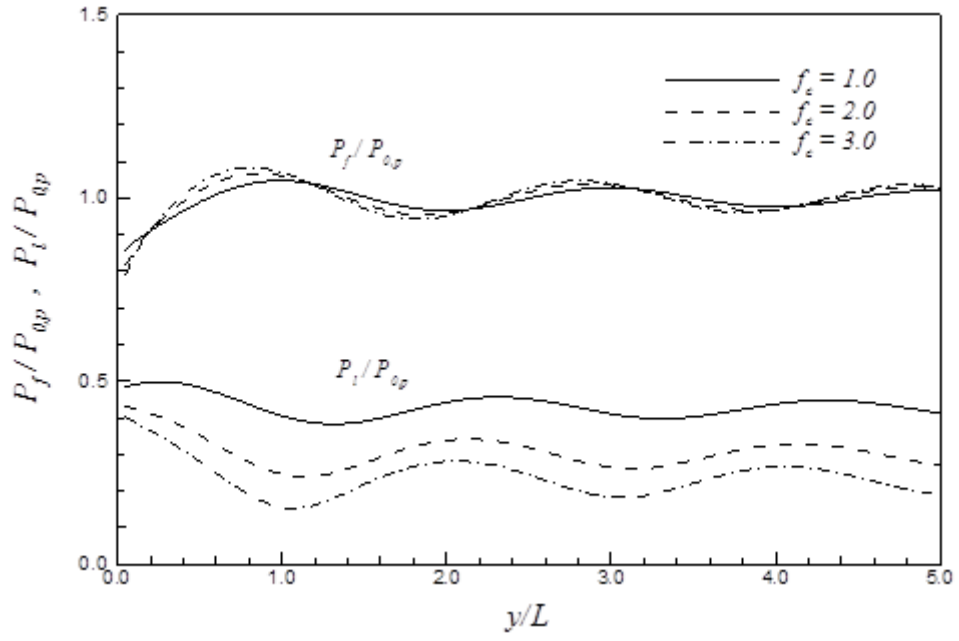
〈그림 45〉 Normalized wave force distributions as function of porosity ($\beta = 30^\circ$, $f_c = 2.0$, $C_m = 1.0$, $w/L = 0.1$)



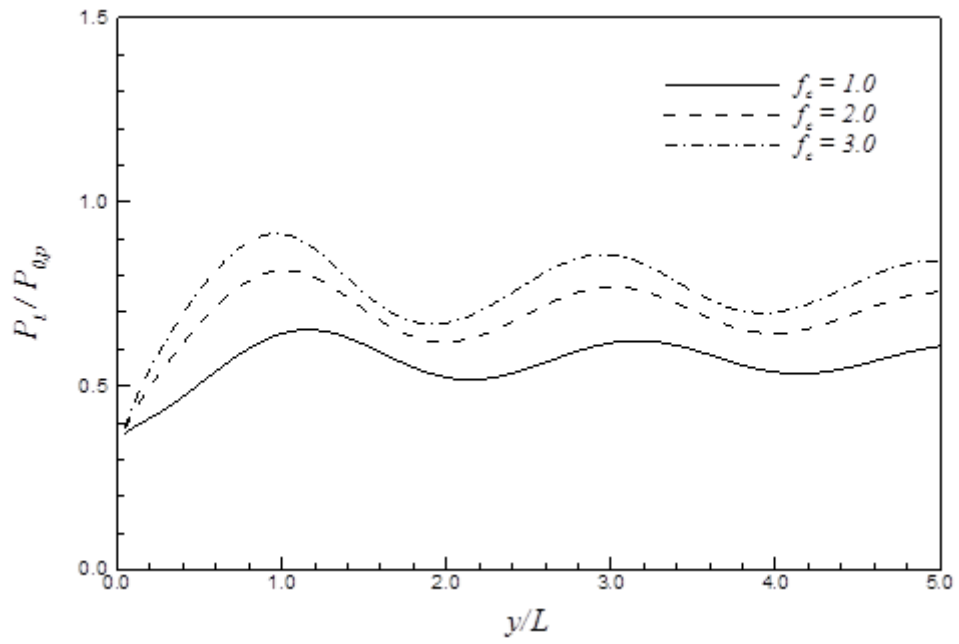
(a) $P_f/P_{0,i}$, $P_t/P_{0,i}$



(b) $P_t/P_{0,i}$

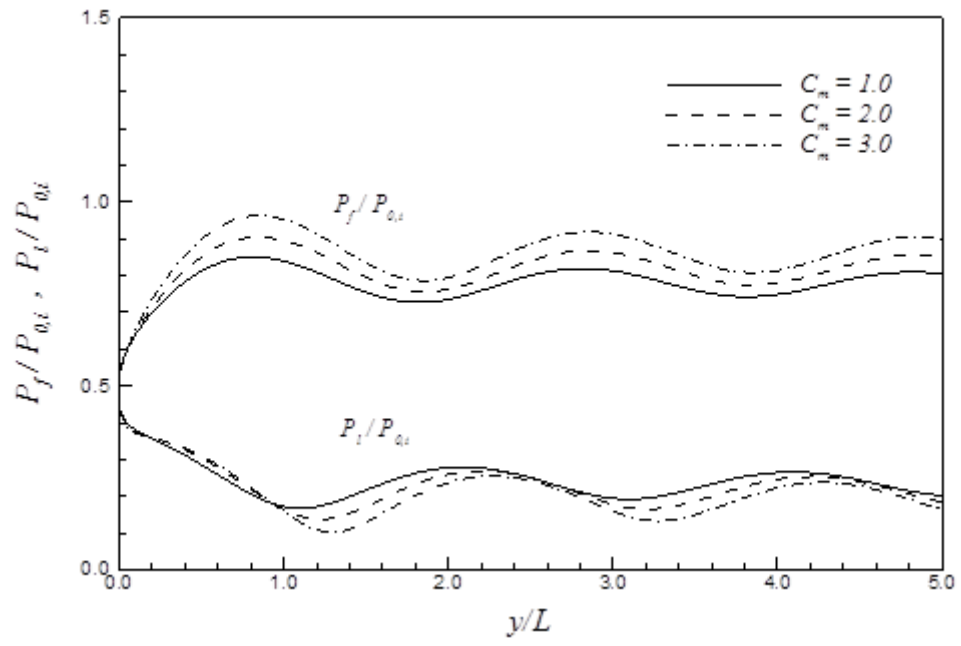


(c) $P_f/P_{0,p}$, $P_t/P_{0,p}$

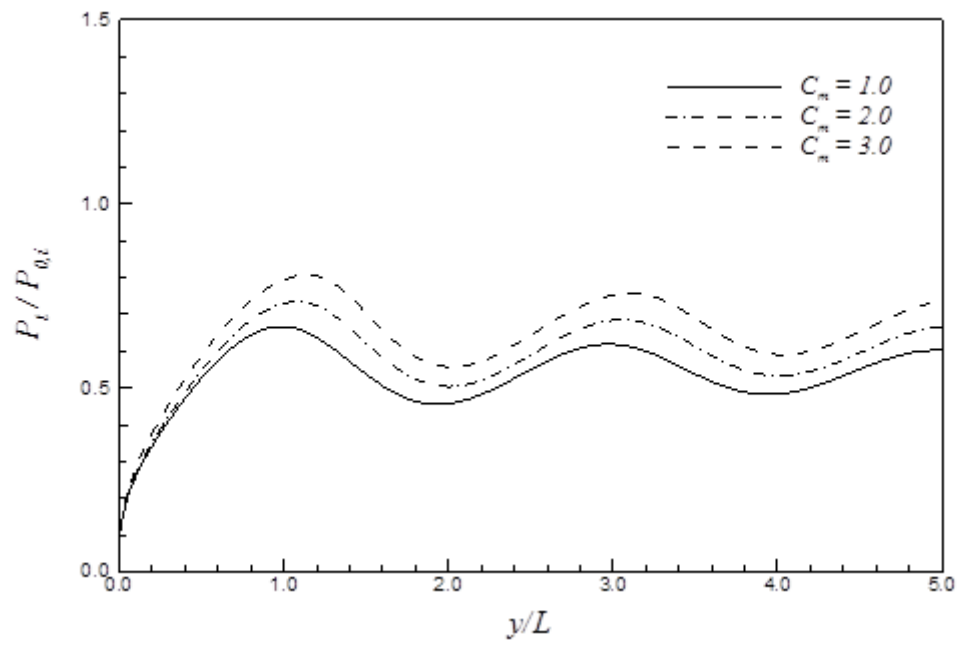


(d) $P_t/P_{0,p}$

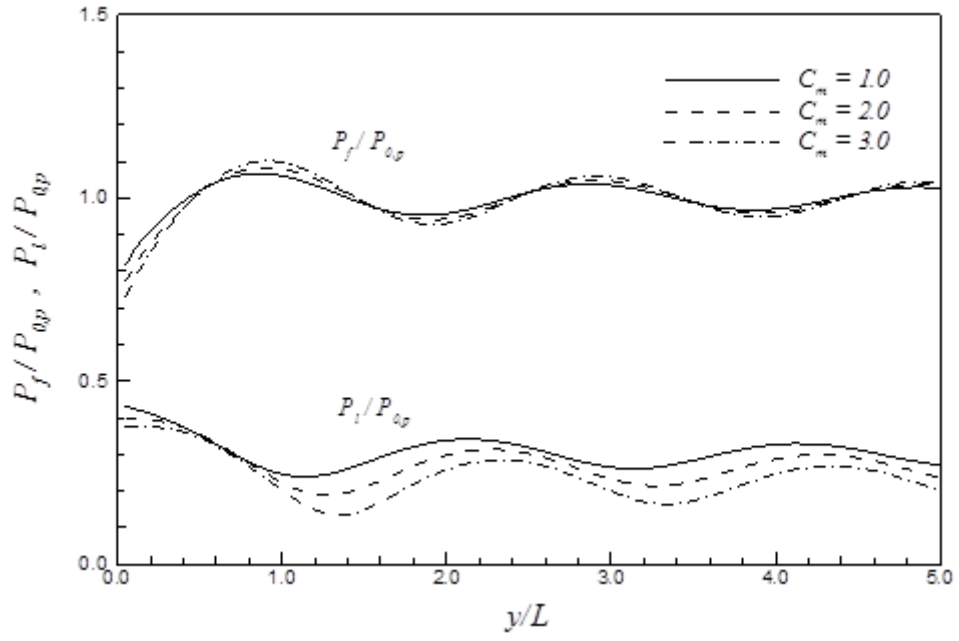
<그림 46> Normalized wave force distributions as function of dimensionless friction coefficient ($\beta = 30^\circ$, $\lambda = 0.5$, $C_m = 1.0$, $w/L = 0.1$)



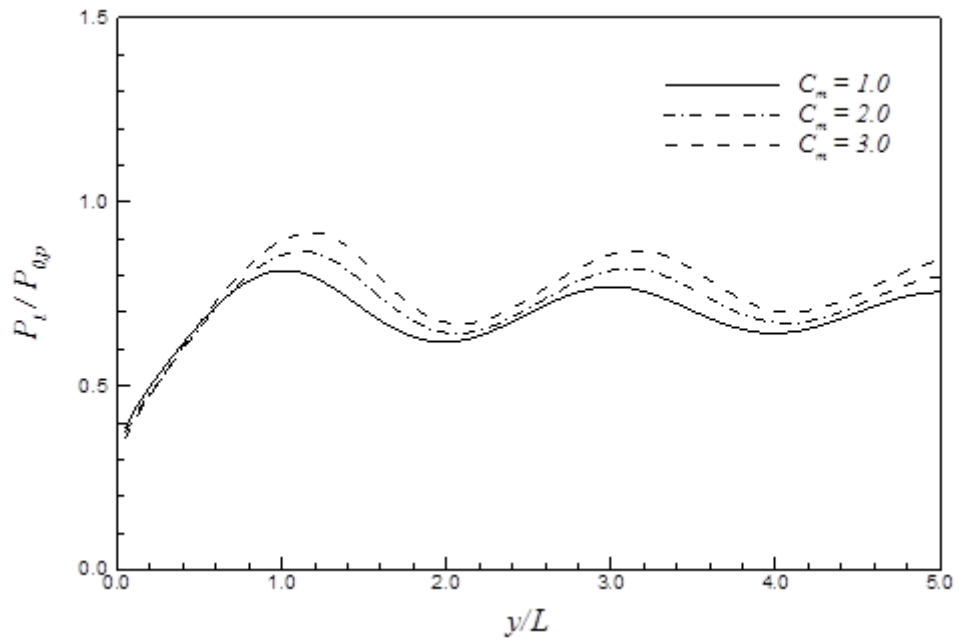
(a) $P_f/P_{0,i}$, $P_t/P_{0,i}$



(b) $P_t/P_{0,i}$



(c) $P_f/P_{0,p}$, $P_t/P_{0,p}$



(d) $P_t/P_{0,p}$

<그림 47> Normalized wave force distributions as function of dimensionless inertia coefficient ($\beta = 30^\circ$, $\lambda = 0.5$, $f_c = 2.0$, $w/L = 0.1$)

4. 이안제에 작용하는 지점별 파력 분포

가. 지배방정식의 유도

입사파 및 반사파의 속도포텐셜은 다음과 같다.

$$\phi_i = \frac{iga_i}{\omega} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} e^{i(\omega t - kx \cos \beta - ky \sin \beta)} \quad (94)$$

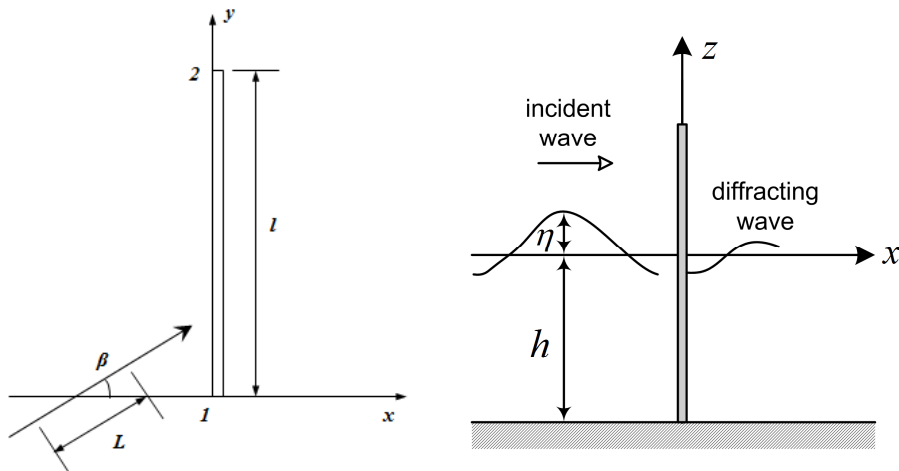
$$\phi_r = \frac{iga_r}{\omega} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} e^{i(\omega t - kx \cos \beta - ky \sin \beta)} \quad (95)$$

여기서, $a_r = K_r a_i$ 이다. 방파제 전면 및 후면에서 회절파의 속도포텐셜은 각각 다음식과 같다.

$$\phi_{d,f} = \frac{ig}{\omega} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} a_i \left[\begin{aligned} &-(b_{i,f1} + b_{r,f1})e^{i(\omega t - ky \sin \beta)} \\ &-(b_{i,f2} + b_{r,f2})e^{i(\omega t + ky \sin \beta - 2kl \sin \beta)} \end{aligned} \right] \quad (96)$$

$$\phi_{d,l} = \frac{ig}{\omega} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} a_i \left[\begin{aligned} &(b_{i,l1} + b_{r,l1})e^{i(\omega t - ky \sin \beta)} \\ &+(b_{i,l2} + b_{r,l2})e^{i(\omega t + ky \sin \beta - 2kl \sin \beta)} \end{aligned} \right] \quad (97)$$

여기서, $b_{i,f1}$, $b_{r,f1}$ 은 각각 방파제 전면에서 입사파 및 반사파가 1번 지점에서 회절된 성분이며, $b_{i,f2}$, $b_{r,f2}$ 는 각각 방파제 전면에서 입사파 및 반사파가 2번 지점에서 회절된 성분이다. $b_{i,l1}$, $b_{r,l1}$ 은 각각 방파제 후면에서 입사파 및 반사파가 1번 지점에서 회절된 성분이며, $b_{i,l2}$, $b_{r,l2}$ 는 각각 방파제 후면에서 입사파 및 반사파가 2번 지점에서 회절된 성분이다. 각 변수 및 지점은 아래 그림 48을 참고할 수 있다. 또한 각 회절 성분들은 Penney and Price(1952)의 해석해를 이용하여 계산할 수 있다.



<그림 48> Definition sketch of waves obliquely incident on a detached breakwater

방파제 전면에 작용하는 속도포텐셜은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\phi_f &= \phi_i + \phi_r + \phi_{d,f} \\ &= \frac{i g}{\omega} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} a_i \left[\left\{ (1+K_r) - (b_{i,f1} + b_{r,f1}) \right\} e^{-iky \sin \beta} \right] e^{i\omega t} \\ &\quad \left[- (b_{i,f2} + b_{r,f2}) e^{ik(y-2l) \sin \beta} \right]\end{aligned}\quad (98)$$

방파제 전면 및 후면에 작용하는 정수압을 제외한 파압은 다음과 같다.

$$P_f = -\rho \frac{\partial \phi_f}{\partial t} = \rho g \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} a_i \left[\left\{ (1+K_r) - (b_{i,f1} + b_{r,f1}) \right\} e^{-iky \sin \beta} \right] e^{i\omega t} \quad (99)$$

$$\left[- (b_{i,f2} + b_{r,f2}) e^{ik(y-2l) \sin \beta} \right]$$

$$P_l = -\rho \frac{\partial \phi_{d,l}}{\partial t} = \rho g \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} a_i \left[(b_{i,l1} + b_{r,l1}) e^{-iky \sin \beta} \right] e^{i\omega t} \quad (100)$$

$$\left[+ (b_{i,l2} + b_{r,l2}) e^{ik(y-2l) \sin \beta} \right]$$

방파제 단위 폭당 작용하는 파력은 파압을 수심방향으로 적분함으로써 구할 수 있다. 파력의 방향은 방파제 전면에서 후면으로 작용하는 파력을 +로 가정하였다. 방파제 전면 및 후면에서의 단위 폭당 파력은 다음과 같다.

$$P_f = \rho g h \frac{\tanh kh}{kh} a_i \left[\left\{ (1+K_r) - (b_{i,f} + b_{r,f}) \right\} e^{-iky \sin \beta} \right] e^{i\omega t} \quad (101)$$

$$\left[- (b_{i,f2} + b_{r,f2}) e^{ik(y-2l) \sin \beta} \right]$$

$$P_l = -\rho g h \frac{\tanh kh}{kh} a_i \left[(b_{i,l1} + b_{r,l1}) e^{-iky \sin \beta} \right] e^{i\omega t} \quad (102)$$

$$\left[+ (b_{i,l2} + b_{r,l2}) e^{-ik(y-2l) \sin \beta} \right]$$

방파제에 단위 폭당 작용하는 총파력은 방파제 전면 및 후면에서 작용하는 파력의 합으로 표현할 수 있으며, 이는 아래 식과 같다.

$$\begin{aligned}P_t &= P_f + P_l \\ &= \rho g h \frac{\tanh kh}{kh} a_i \left[\left\{ (1+K_r) - (b_{i,f} + b_{r,f}) - (b_{i,l} + b_{r,l}) \right\} e^{-iky \sin \beta} \right] e^{i\omega t} \\ &\quad \left[- \left\{ (b_{i,f2} + b_{r,f2}) + (b_{i,l2} + b_{r,l2}) \right\} e^{ik(y-2l) \sin \beta} \right]\end{aligned}\quad (103)$$

회절을 무시하고, 방파제 전후면에 동시에 작용하는 정수압 성분을 제외한 지점별 파력은 식 (103)에서 회절성분을 제거함으로써 구할 수 있으며 이는 식 (104)와 같다.

$$P_0 = \rho g h \frac{\tanh ky}{kh} (1 + K_r) a_i e^{-iky \sin \beta} e^{i\omega t} \quad (104)$$

회절을 고려한 경우 방파제 지점별 단위폭당 총파력과 회절을 무시한 경우의 총파력의비(즉, 상대 총 파력, relative total force)는 다음 식과 같다.

$$\left| \frac{P_t}{P_0} \right| = \left| \frac{(1 + K_r) - (b_{i,f1} + b_{r,f1} + b_{i,l1} + b_{r,l1}) - (b_{i,f2} + b_{r,f2} + b_{i,l2} + b_{r,l2}) e^{i2k(y-l) \sin \beta}}{(1 + K_r)} \right| \quad (105)$$

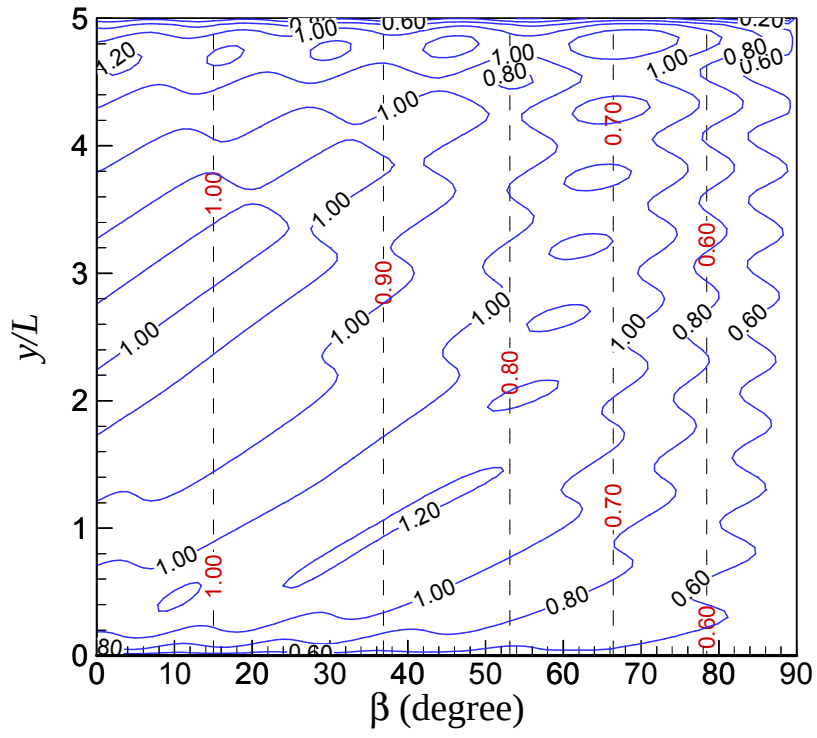
회절을 고려한 경우 방파제 전면의 파력과 회절을 무시한 경우의 파력의 비(즉, 상대 전면 파력, relative front-side force)와 회절을 고려한 경우 방파제 후면에서의 파력과 회절을 무시한 경우의 파력의 비(즉, 상대 후면 파력, relative lee-side force)를 각각 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\left| \frac{P_f}{P_0} \right| = \left| \frac{(1 + K_r) - (b_{i,f1} + b_{r,f1}) - (b_{i,f2} + b_{r,f2}) e^{i2k(y-l) \sin \beta}}{(1 + K_r)} \right| \quad (106)$$

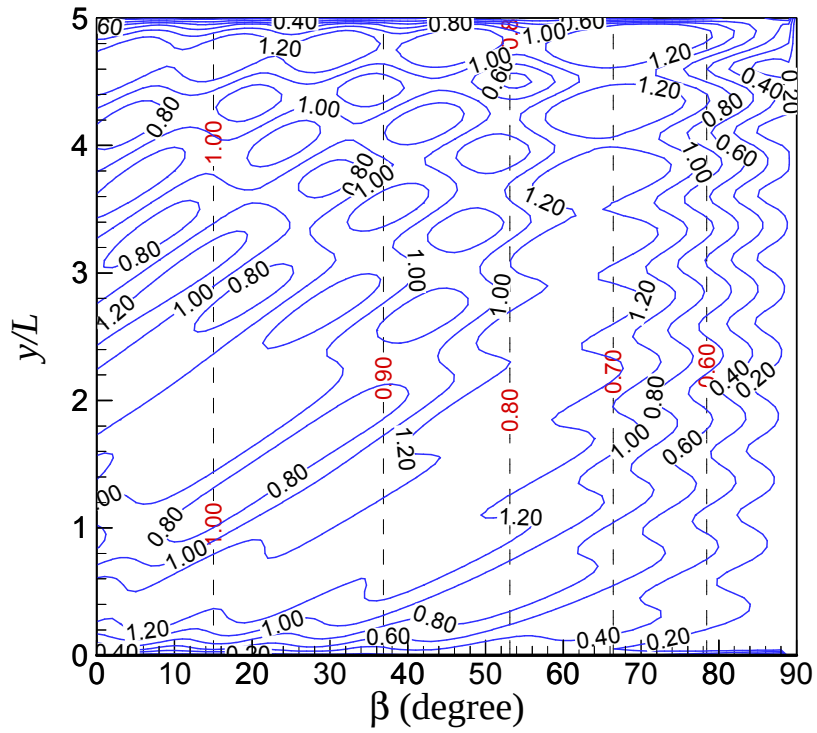
$$\left| \frac{P_l}{P_0} \right| = \left| \frac{(b_{i,l1} + b_{r,l1}) + (b_{i,l2} + b_{r,l2}) e^{i2k(y-l) \sin \beta}}{(1 + K_r) a_i} \right| \quad (107)$$

나. 수치해석 결과

그림 49는 방파제 위치 및 파랑의 입사각에 따른 이안제에 작용하는 상대파력에 대한 해석 결과이다. 그림 49(a)는 이안제에 작용하는 전면 파력에 대한 해석 결과이며, 그림 49(b)는 방파제 전후면의 파력차를 모두 고려한 해석 결과이다. 이안제 역시 배후의 회절을 고려하지 않으면 입사각이 90도일 때 상대파력은 0.5이며, 회절을 고려할 경우에는 입사각 90도인 경우 상대파력은 0이다. 본 연구에서 제시하는 해석해는 회절파가 다시 회절하는 경우에 대해서는 고려하지 않았다. 이안제의 경우 방파제의 상대길이가 매우 짧거나 입사각이 클 때 ($\beta > 80^\circ$)에는 오차가 발생한다. 그림 49를 이용할 경우 파랑의 입사각 및 위치에 따른 이안제에 작용하는 지점별 파력에 대해 손쉽게 구할 수 있다.



(a) $|P_f/P_0|$



(b) $|P_t/P_0|$

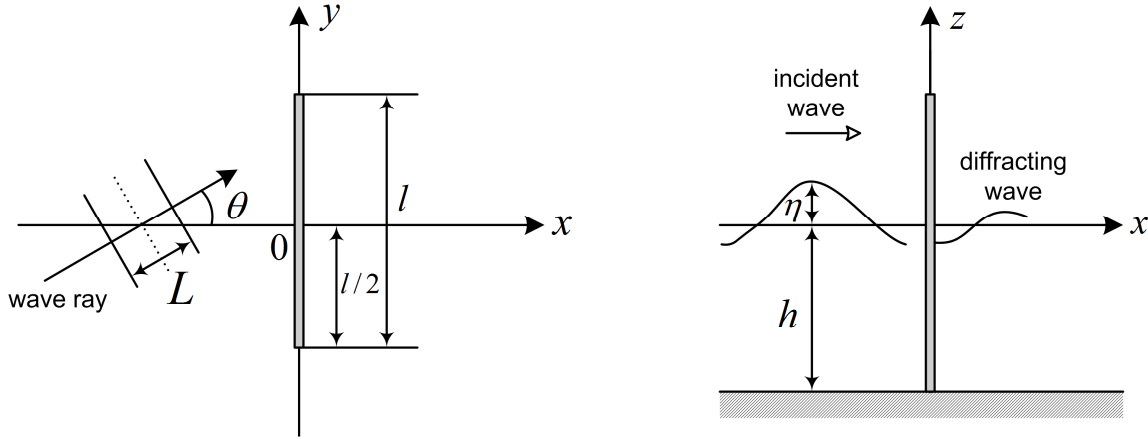
<그림 49> Variation of wave forces on detached breakwater with incident wave angle (β) and x -position

(solid line : present solution, dashed line : Goda's formula)

5. 이안제 형식의 장대구조물에 작용하는 파력

가. 지배방정식의 유도

지배방정식 유도 및 수치해석을 위한 변수 및 구조물에 대한 설명은 아래 그림 50을 참고할 수 있다.



<그림 50> Definition sketch of waves obliquely incident on a detached breakwater

이안제 형식의 장대구조물에 작용하는 총파력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \rho g h l (1 + K_r) a_i \frac{\tanh kh}{kh} R e^{i\omega t} \quad (108)$$

$$R = A + B + C + D + E \quad (109)$$

여기서,

$$A = \frac{\sin(kl/2 \sin \beta)}{kl/2 \sin \beta} \quad (110)$$

$$B = -\frac{1}{l(1 + K_r) a_i} \int_{-l/2}^{l/2} (b_{i,f1} + b_{r,f1}) e^{-iky \sin \beta} dy \quad (111)$$

$$C = -\frac{1}{l(1 + K_r) a_i} \int_{-l/2}^{l/2} (b_{i,l1} + b_{r,l1}) e^{-iky \sin \beta} dy \quad (112)$$

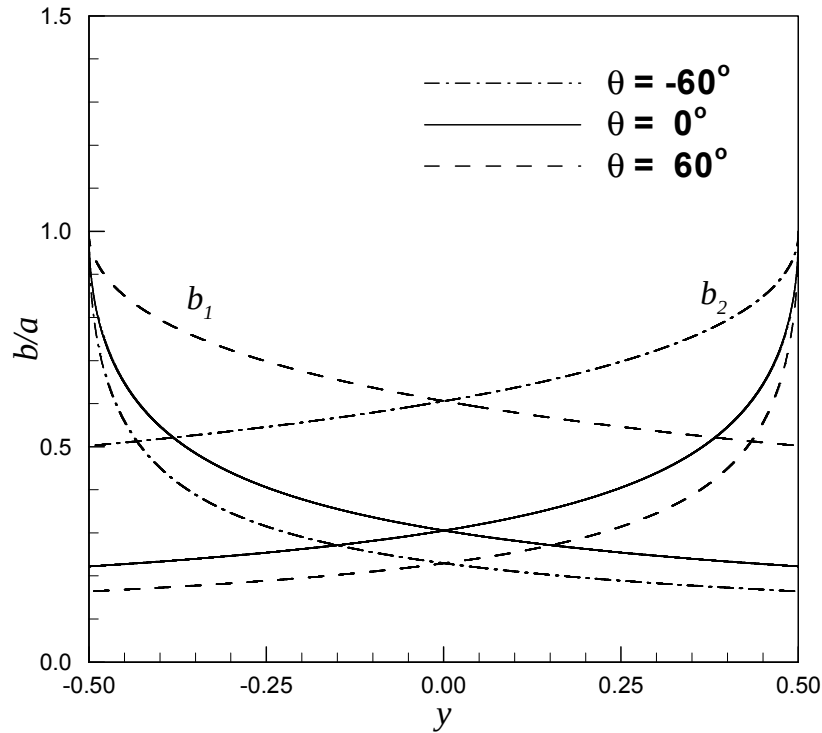
$$D = -\frac{1}{l(1 + K_r) a_i} \int_{-l/2}^{l/2} (b_{i,f2} + b_{r,f2}) e^{iky \sin \beta} dy \quad (113)$$

$$E = -\frac{1}{l(1 + K_r) a_i} \int_{-l/2}^{l/2} (b_{i,l2} + b_{r,l2}) e^{iky \sin \beta} dy \quad (114)$$

비록 이안제 형식의 장대구조물이지만 일방향 불규칙파 및 다방향 불규칙파의 감소파력비의 정의는 식 (54) 및 (55)와 동일하다.

나. 수치해석 결과

이안제 형식의 장대구조물 배후에서 회절파의 진폭은 아래 그림 51과 같다. 파랑의 입사각이 증가할수록 1번 지점에서 회절된 파의 진폭은 증가하며, 2번 지점에서 회절된 파의 진폭은 감소한다. 이안제는 중앙을 기준으로 대칭이기 때문에 입사각이 -60° 인 경우 1번 지점의 회절파 진폭과 입사각이 60° 인 경우 2번 지점에서 회절된 파의 진폭은 크기는 같고 $y=0$ 을 기준으로 y 방향으로 대칭인 형태를 갖는다.

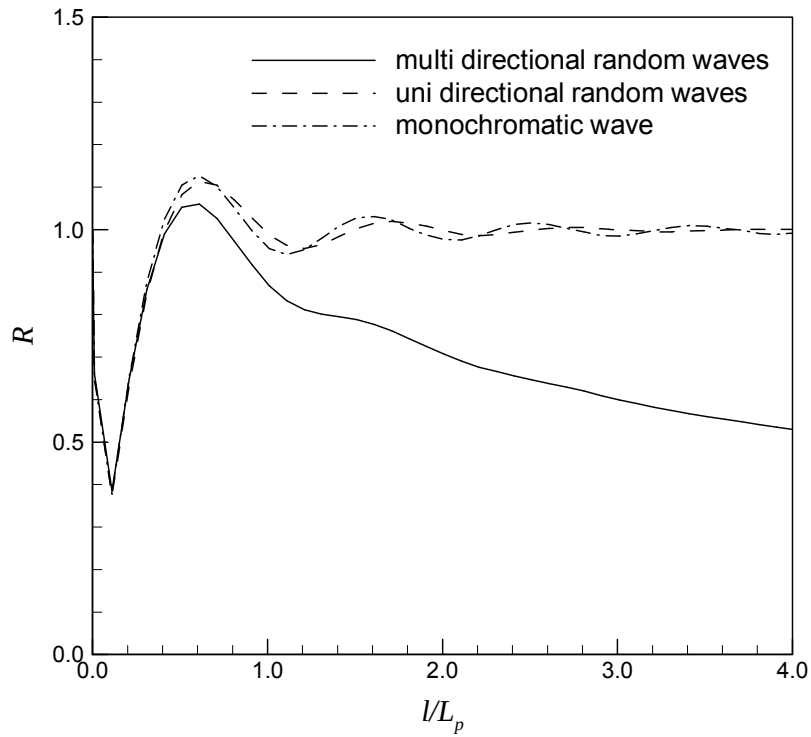


<그림 51> Normalized amplitude of diffracting waves at the back of a detached breakwater ($l = L$)

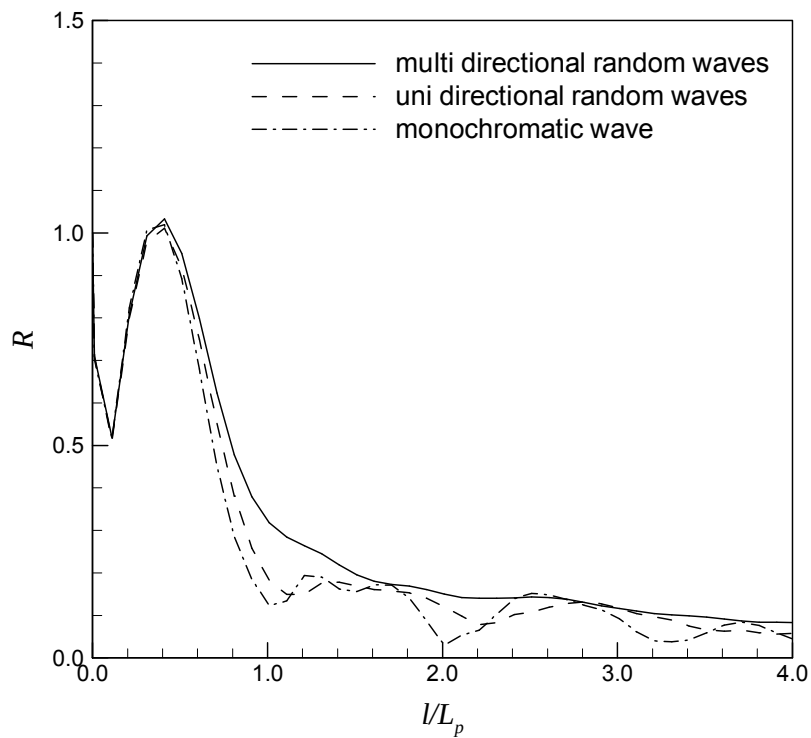
그림 52는 주파향의 입사각이 0도 및 60도일 때 이안제 형식의 장대구조물에 작용하는 감소파력비를 나타낸다. 그림 52에서 실선은 다방향 불규칙파, 파선은 일방향 불규칙파, 일점쇄선은 규칙파의 감소파력비를 뜻한다. 이안제 형식의 장대구조물의 길이가 0일 때 감소파력비는 1이 된다. 장대구조물의 길이가 0이 될 때에는 입사파 성분(1.0) 외에 전면 1번 두부의 회절성분(0.5), 전면 2번 두부의 회절성분(0.5), 후면 1번 두부의 회절성분(0.5), 후면 2번 두부의 회절성분(0.5)이 모두 합성되어 1.0의 파력이 발생한다. 하지만 실제로는 방파제 길이가 0인 경우에는 작용 파력 역시 0이 되어야 한다. 본 해석해는 회절된 파가 다시 재회절되는 경우에 대해 해석할 수 없기 때문에 이와 같은 오류를 포함하는 것으로 판단된다. 그림 52를 통해서 볼 때, 방파제의 상대길이 0.1 이상에서만 본 해석해의 결과가 타당한 것으로 보인다.

그림 53은 파랑의 입사각이 30도인 경우 이안제에 작용하는 감소파력비를 나타낸 그림이다. 본 그림에서 실선은 전후면의 회절을 모두 고려한 감소파력비이며, 파선은 입사파 성분의 감소파력비, 일점쇄선은 1번 두부에서 회절된 성분의 감소파력비, 이점쇄선은 2번 두부에서 회절된 성분의 감소파력비를 나타낸다. 그리고 그림 53에서 (a)는 규칙파, (b)는 일방향 불규칙파, (c)는 다방향 불규칙파의 감소파력비이다. 입사각이 30도이므로 1번 두부에서 회절성분이 2번 두부에서 발생한 회절성분의 감소파력비보다 크게 생성됨을 알 수 있다.

이안제의 경우 입사파랑이 다방향 불규칙파랑이고 주파향의 입사각이 0도이며, 구조물의 상대길이가 2인 경우 감소파력비는 0.712로 계산되었다. 따라서 이안제의 경우에도 장대구조물을 적용할 경우 다방향 불규칙파 조건에서 파력 감소효과가 10% 이상임을 알 수 있다.

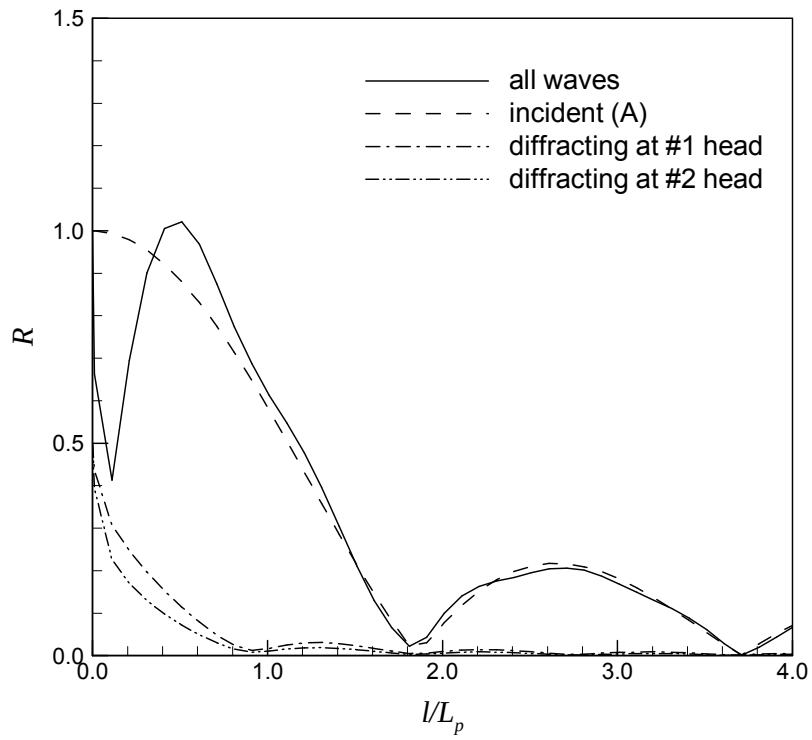


(a) $\beta_p = 0^\circ$

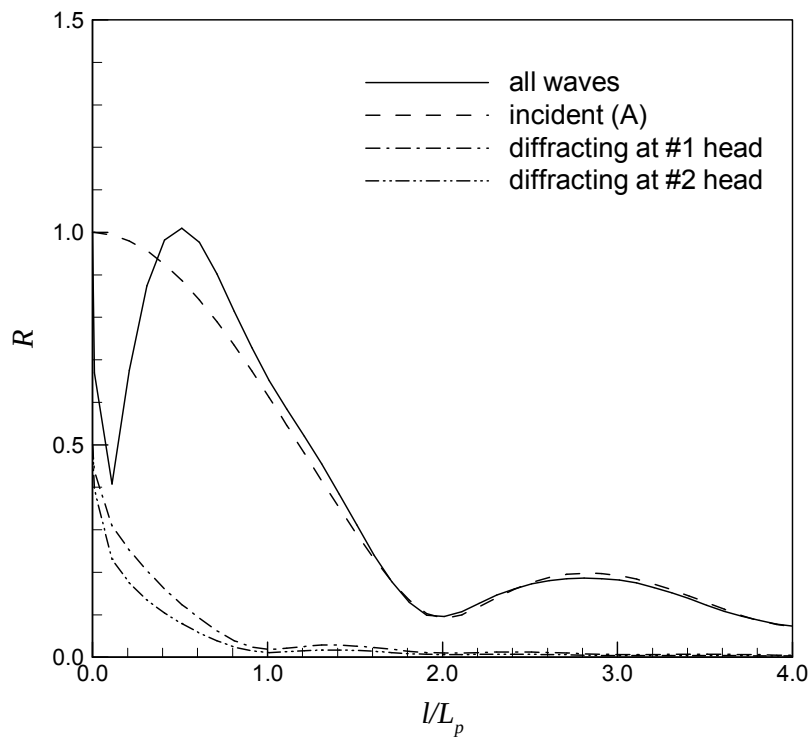


(b) $\beta_p = 60^\circ$

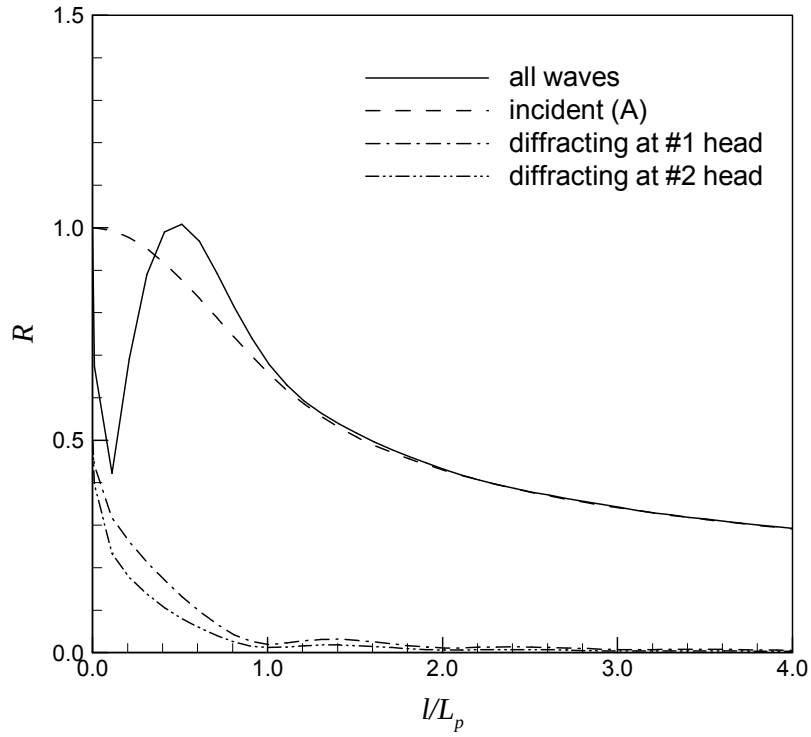
<그림 52> Reduced force ratios with different wave conditions ($\gamma=3.3$, $s_{\max}=10$)



(a) monochromatic wave



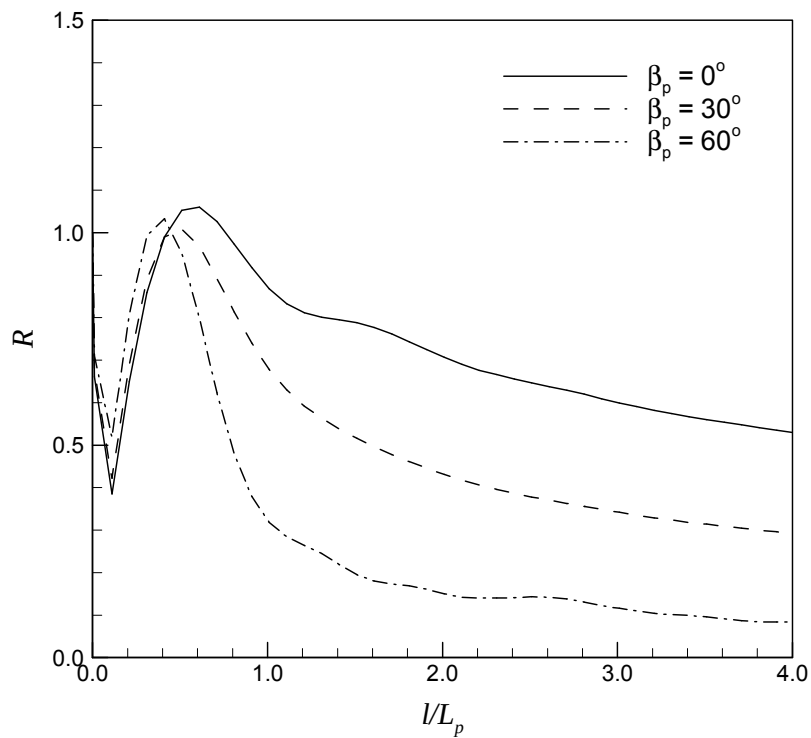
(b) uni-directional random waves



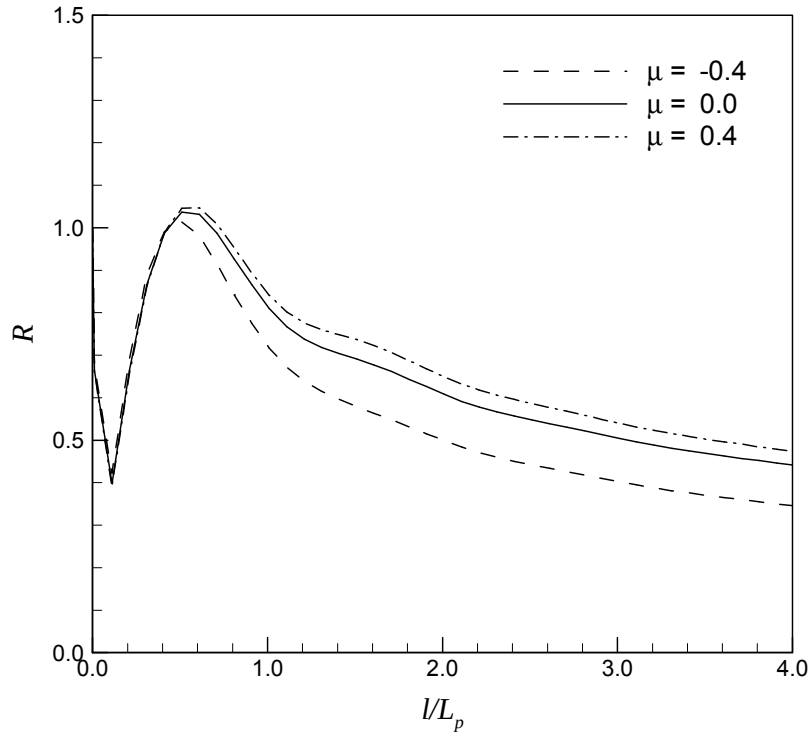
(c) multi-directional random waves

<그림 53> Reduced force ratios with different wave conditions ($\beta_p = 30^\circ$, $\gamma = 3.3$, $s_{\max} = 10$)

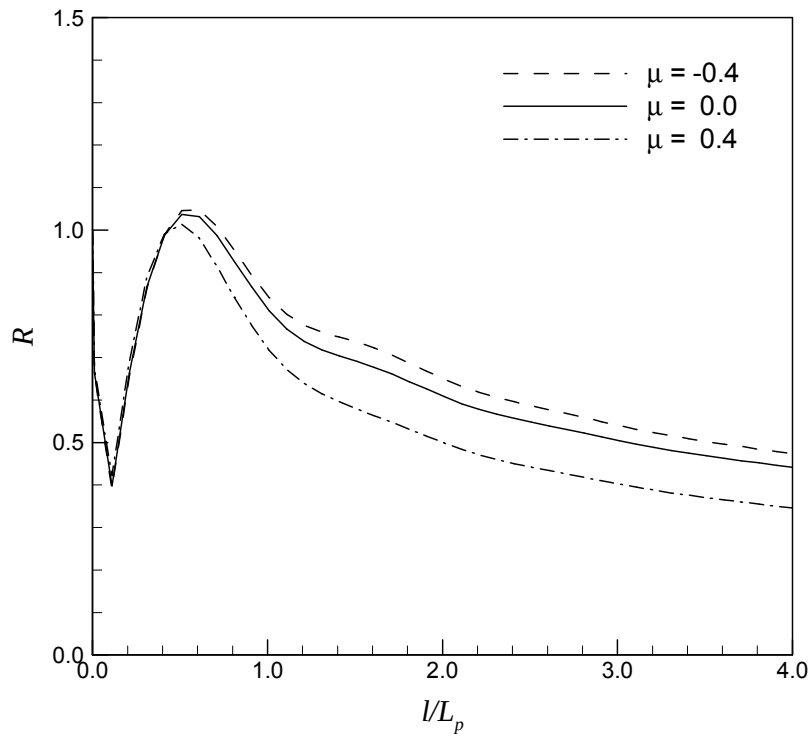
그림 54는 입사각도에 따른 이안제 형식의 장대구조물에 작용하는 다방향 불규칙파의 감소파력비를 나타낸 그림이다. 반무한방파제 형식과 마찬가지로 파랑의 입사각이 클수록 감소파력비는 더욱 감소함을 알 수 있다.



<그림 54> Reduced force ratios with different angle of wave incidence ($\gamma = 3.3$, $s_{\max} = 10$)



(a) $\beta_p = 30^\circ$



(b) $\beta_p = -30^\circ$

<그림 55> Reduced force ratios with different directional asymmetries ($\gamma=3.3$, $s_{\max}=10$)

그림 55는 다방향 불규칙파의 방향 비대칭성에 따른 감소파력비를 나타낸 그림이다. 그림에서 실선은 대칭인 경우, 파선은 비대칭계수(μ)가 0.4인 경우이며, 일점쇄선은 비대칭계수가 -0.4인 경우이다. 그림에서 (a)와 (b)는 주파향의 입사각도가 각각 30도 및 -30도인 경우인데 이안제의 경우 $y=0$ 을 기준으로 대칭이기 때문에 그림 55 (a)와 (b)는 일점쇄선과 이점쇄선의 위치만 바뀐 채 동일하게 표현된다.

6. 3차원 수치해석

가. 수치해석 모형 소개

FLOW-3D는 Navier-Stokes 방정식을 유한차분법 (finite difference method)과 유한체적법 (finite volume method)을 사용하여 근사화하며, x, y, z 방향의 유속을 모두 고려하여 유체 흐름을 해석할 수 있는 범용 프로그램이다. 또한, 미국 Los Alamos National Laboratory의 Hirt 등에 의해 개발된 MAC (Marker And Cell)방법과 SOLA (For Solution Algorithm) - VOF (Volume Of Fluid)방식을 기초로 하고 FLOW Science Inc.dp 의해 발전되어왔다.

기본적으로 비정상 상태의 유동을 해석하며, 연속방정식, 3차원 운동량 보존 방정식 (Navier-Stokes eq.) 및 에너지 방정식을 사용하여 해석하고 있다. 또한, 난류 흐름을 해석하기 위해 혼합 길이 모형 (mixing length model), 난류 에너지 모형 (tubulence energy model), $k-\varepsilon$ 모형, RNG (ReNormalized Group) 모형, LES 모형 등 5가지 모형을 적용할 수 있으며, 자유수면 해석을 위하여 VOF (Volume Of Fluid) 방정식을 사용하고 있다.

나. 지배 방정식

FLOW-3D 모형에서 사용하는 압축성 유체에 대한 3차원 연속방정식은 다음과 같다 (Flow Science Inc. 2009).

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u A_x \rho) + R \frac{\partial}{\partial y}(v A_y \rho) + \frac{\partial}{\partial z}(w A_z \rho) + \zeta \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (115)$$

위의 식에 사용된 V_F 는 체적비 (volume fraction), ρ 는 밀도 (density), R_{DIF} 는 난류 확산항, R_{SOR} 은 질량 생성/소멸 (mass source/sink)항, u, v, w 는 각 방향별 x, y, z 순간 속도성분 (instantaneous velocity), A_x, A_y, A_z 는 각 방향별 면적비 (area fraction), R 과 ζ 는 원통형 좌표계 (cylindrical coordinate)를 사용할 경우 사용하는 상수이다. 난류 확산항은 FLOW-3D에서의 GUI (Graphical User Interface) 환경에서 각 옵션의 조정에 따라 그 값이 제공되어 진다. 본 연구에서는 직교좌표계 (cartesian coordinate)에서의 비압축성 유체를 가정하므로 연속 방정식은 다음 식 (116)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} + (u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(u A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(w A_z) = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad (116)$$

FLOW-3D에서 직교좌표계를 사용하는 경우의 운동량방정식은 다음과 같다 (Flow Science Inc., 2009).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + u A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} u \quad (117)$$

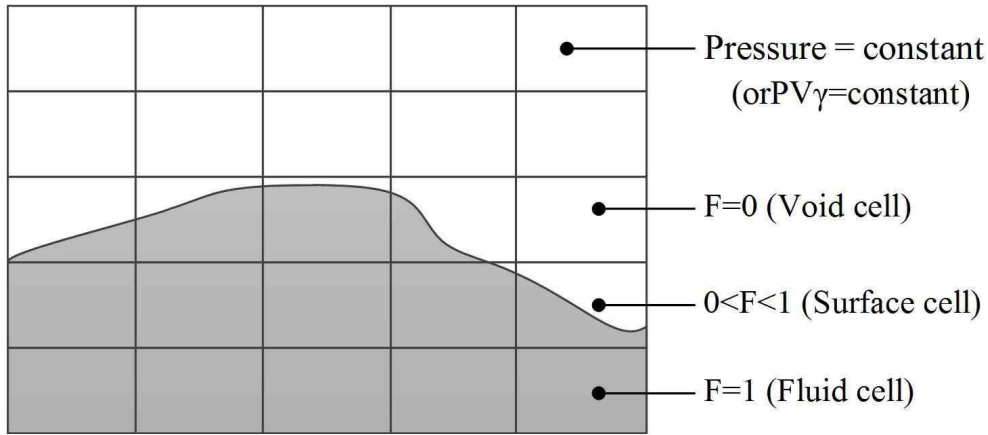
$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} v \quad (118)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} + G_z + f_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} w \quad (119)$$

위의 식에 사용된 G 와 f 는 각 방향별 중력과 점성력을 나타내는 항이다. R_{SOR} (Accelerations Caused by Mass Injection at Zero Velocity)은 기체와 접하고 있는 액체 표면의 VOF의 함수 $G(x, y, z, t)$ 와 $f(x, y, z, t)$ 를 통해 얻을 수 있다.

다. 수치 기법

흐르는 유체의 복잡한 자유 표면 운동 기술은 고정 오일러 (eulerian)기법을 사용하는 VOF 방법을 통해 간단히 이루어질 수 있다. FLOW-3D는 정확한 압력 및 운동학적 경계 조건을 상이 경계면 (sharp interface)에서 적용하고 있으며, 또 유한차분식 경계면을 보다 정확하게 표현하기 위해 특별 수치차분법을 사용함으로써 두 유체 (유체와 공기일 경우는 보통 자유 표면으로 가정함) 사이의 운동을 기술할 수 있는 수치해석 방법이다.



<그림 56> VOF (Volume of Fluid)

위 그림 56은 VOF 기법의 개념도를 그림으로 표현하였다. 그림 56에서 F 는 단위 체적 내에 포함되어 있는 기체와 액체가 차지하는 체적비를 나타내며, 자유표면을 포함하고 있는 비압축성 유체의 경우, F 는 유체가 점유하고 있는 체적비율을 의미한다. 그러므로 $F=1$ 이면 계산 격자내부에 유체가 채워져 있다는 것이고, $F=0$ 이면 유체가 없는 빈 공간을 의미한다. 빈 공간은 진공상태로 공간에 균일한 압력이 작용되고 유체가 없는 공간을 말한다. 실제 현상에서는 이 공간에 기체가 채워져 있지만 이들 기체의 밀도가 액체에 비해 무시될 수 있을 정도로 작으므로 전체 계산 영역에 걸쳐 액체 경계면 위로는 일정한 압력이 작용하고 있는 빈 공간이라고 가정하게 된다.

다음 식 (120)과 (121)은 VOF 기법의 지배 방정식이다(Flow Science Inc., 2009).

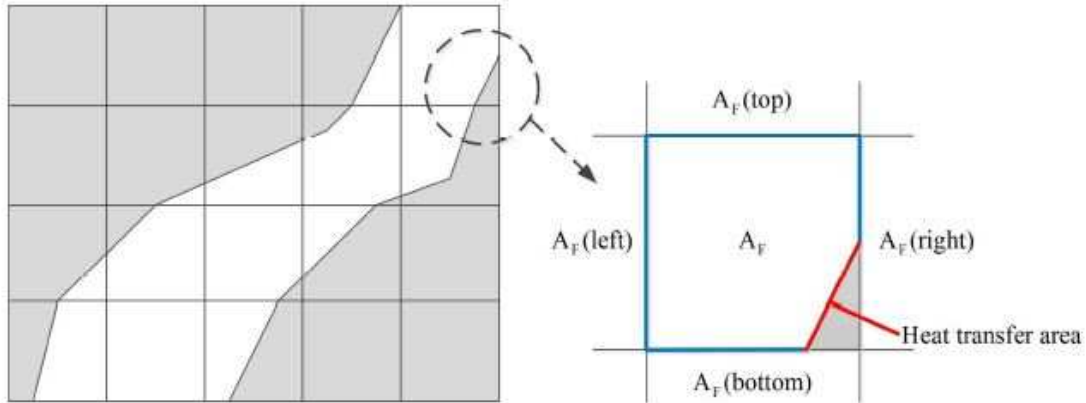
$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial x} (F A_x u) + \frac{\partial}{\partial y} (F A_y v) + \frac{\partial}{\partial z} (F A_z w) \right] = F_{DIF} + F_{SOR} \quad (120)$$

$$F_{DIF} = \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(u_F A_x \frac{\partial F}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(u_F A_y \frac{\partial F}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(u_F A_z \frac{\partial F}{\partial z} \right) \right\} \quad (121)$$

여기서, $v_F = C_F \mu / \rho$ 로 확산계수 (diffusion coefficient)를 말한다. 이때, 상수 C_F 는 turbulent

schmidt 수의 역수이다. 위 확산항은 서로 다른 유체간에 난류 혼합 (turbulent mixing)이 발생하는 경우에만 의미를 갖으며 F_{SOR} 은 연속 방정식과 운동량방정식의 R_{SOR} 에 해당하며 유체의 질량생성으로 인해 변화되는 해당 유체의 시간에 따른 체적 변화율을 의미한다.

FAVOR은 유한차분법을 사용 시 직사각형 격자 내부에 들어있는 구조물과 유체의 형상을 표현하는 방법으로 각각의 격자에서 각 면들의 전체 또는 일부가 유체가 출입할 수 없는 물체에 의해 막혀 있다고 정의하는 것이다. 그림 57은 FAVOR 기법의 개념을 그림으로 표현하였다.



<그림 57> FAVOR (Fractional Area/Volume Representation)

직사각형 격자에서 유체가 차지하는 부피 및 통과하는 면적이 정의되며 이 격자 안에서의 질량, 에너지, 운동량들이 통과 면적에 대한 유입량을 고려한 방정식들의 유한체적적분을 통해 구조물 주위의 유동에 대한 영향을 기술하게 된다. 즉, 유한차분법 사용 시 가장 큰 문제인 하나인 계단형 격자에 의한 문제점을 해결하고 신속하고 정확한 곡면을 표현하므로 격자의 양과 격자의 구성 방법에서 여타 다른 격자 구성법보다 편리하고 간단하면서 정확도가 높은 수치모의를 수행할 수 있다.

Yakhot와 Orszag (1986)에 의해 기존의 표준 $k-\varepsilon$ 난류모형을 보다 발전시킨 RNG $k-\varepsilon$ 난류모형은 표준 $k-\varepsilon$ 난류모형의 계수들을 통계적인 기법을 통해 조정한 것으로 작은 크기의 난류 운동을 가지는 유체의 움직임을 제거하고 제거된 유체가 큰 크기의 유체 움직임과 점성에 미치는 영향을 계수 조정과 수정된 점성력을 사용하여 난류 성분에 대한 평균적인 공식을 제공한다. 특별히 약한 난류의 강도가 적용되는 흐름이나, 강한 전단 흐름을 발생시키는 조건하에서 RNG $k-\varepsilon$ 난류모형은 표준 $k-\varepsilon$ 난류모형 보다 더 보다 정확한 해석이 가능하다. RNG $k-\varepsilon$ 난류모형은 표준 $k-\varepsilon$ 난류모형과 유사하며 방정식은 다음과 같다(Flow Science Inc., 2009).

RNG $k-\varepsilon$ 난류모형은 난류정점계수 (v_T)를 계산하기 위해 다음의 경험 관계식을 사용한다.

$$v_T = C_\mu k^2 / \varepsilon \quad (122)$$

여기서, $C_\mu = 0.085$ 를 사용하고 난류 운동 에너지인 k 는 표준 $k-\varepsilon$ 난류모형의 이송 방정식을 사용하여 산정하고, 난류 소산률 ε 을 계산하기 위해서 식 (2-22)와 같은 이송 방정식을 사용한다.

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v A_y \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + w A_z \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right\} C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (P + C_{3\varepsilon} G) + Diff - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (123)$$

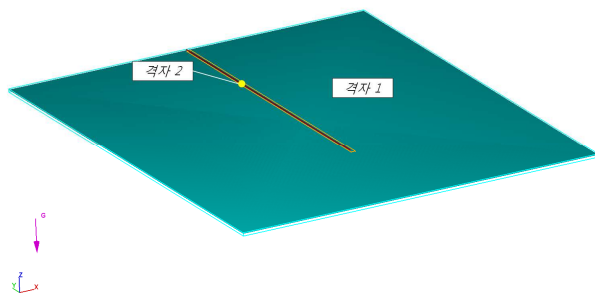
각 계수는 $C_{1\varepsilon}=42$, $C_{3\varepsilon}=0.72$ 로 FLOW-3D에서 기본으로 제공하는 값을 사용했으며, P 는 전단 생성항, G 는 부력 생성항, $Diff$ 는 확산항이다. 표준 $k-\varepsilon$ 난류모형의 C_μ 는 0.085로써 크게 차이가 없다. 하지만 RNG $k-\varepsilon$ 난류모형은 표준 $k-\varepsilon$ 난류모형에서 사용하는 $C_{2\varepsilon}$ 대신 $C_{2\varepsilon}^*$ 을 사용한다. RNG $k-\varepsilon$ 난류모형에서 사용하는 $C_{2\varepsilon}^*$ 값은 다음 식 (124)를 통해 결정된다.

$$C_{2\varepsilon}^* = \frac{C_\mu \lambda^3 (1 - \lambda/\lambda_0)}{1 + \beta \lambda^3} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (124)$$

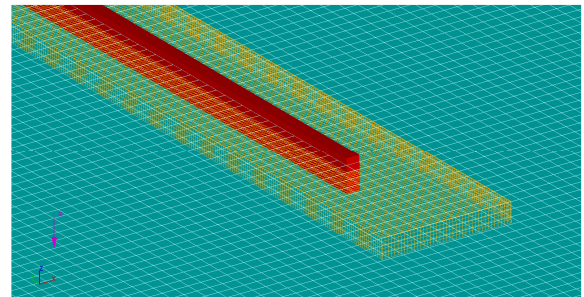
여기서, $\beta=0.012$, $\lambda_0=4.38$ 의 값을 가지며 λ 는 난류의 변형정도를 나타낸다. 또한, FLOW-3D의 퇴적세굴 모델은 기본적으로 drifting, advection, bed-load transport, entrainment 4가지 기본적인 매커니즘으로 구성되어 있다.

라. 수치해석 수행

수치해석 수행을 위해 해석영역의 격자망을 구성하였다. 수치해석은 반무한방파제 및 이안제를 대상으로 하였다. 전체 격자는 x 방향 2m 간격 800개, y 방향 2m 간격 1,000개, z 방향 0.5m 간격 28개로 총 22,400,000개의 격자를 구성하였다. 방파제 주변에서는 좀 더 세밀한 모의를 위해 x 방향 0.5m 간격 40개, y 방향 0.5m 간격 2,800개, z 방향 0.5m 간격 24개로 총 2,688,000개의 격자를 구성하여 수치모의를 수행하였다. 수치해석 모델 격자구성은 아래 그림을 참고할 수 있다.



(a) 전체 격자 구성

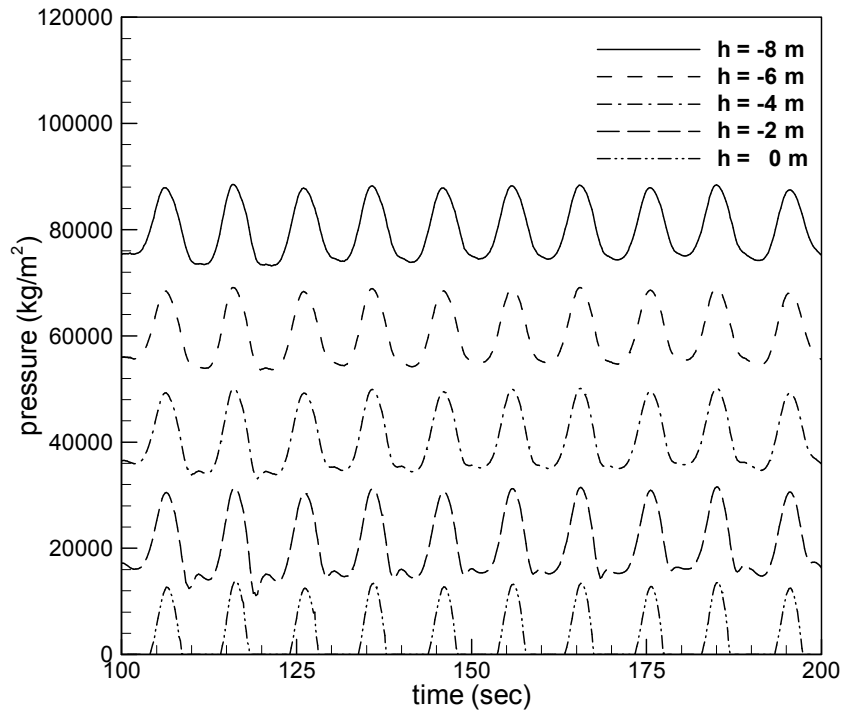


(b) 방파제 주변부 격자 구성

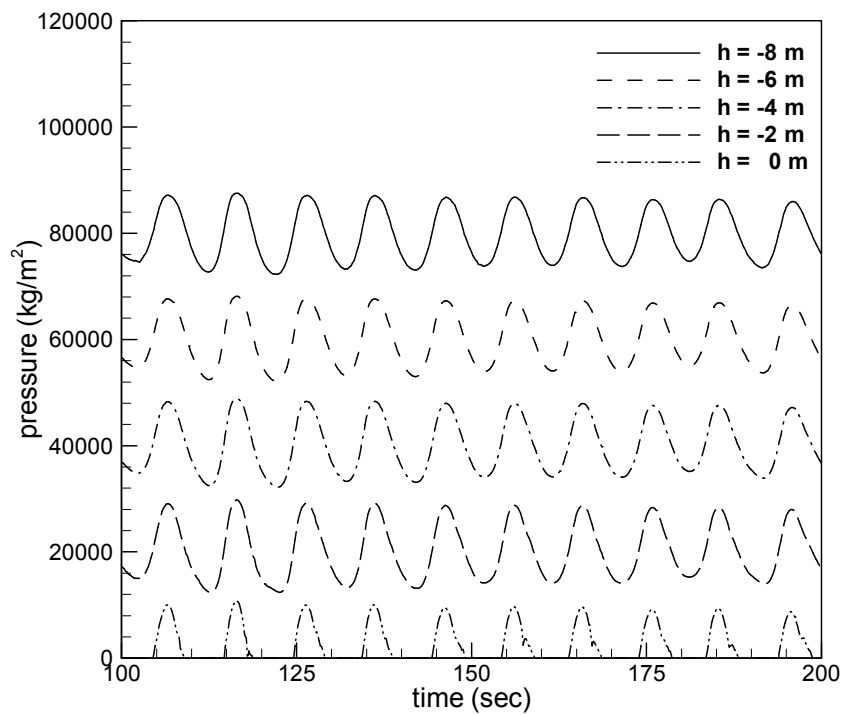
<그림 58> 방파제 주변부 격자구성

수치해석 수행을 위해 난류 모형으로는 RNG(Renormalized Group) 모델을 적용하였으며, 초기 평균 수심은 10.0m를 적용하였다. 입사파랑은 파고 2.0m, 주기 10초인 규칙파를 활용하였다. 방파제 전면에서의 파압은 방파제 전, 후면을 모두 측정하였다. 방파제 바닥부터 2m 간격으로 수심까지 5개 지점에 대한 데이터를 취득하였고, 방파제 길이 방향으로 방파제 두부에서 3m 간격으로 300m 지점까지 100개 지점에 대한 데이터를 취득하여 총 1000 지점의 데이터를 분석하여 방파제에 작용하는 파력을 계산하였다. 방파제에 작용하는 지점별 파력은 방파제 한 단면에서 수심방향으로 계측된 5개 지점의 파압 시계열을 수심방향으로 적분하여 계산하였다.

수치해석 결과는 Penney & Price(1952)의 해석해와 비교 결과 방파제 전면에서 파고재현 정밀도 평균오차 3.9%, 배후 회절재현 정확도 평균오차 5.5%를 만족하였다. 수치해석 결과는 아래 그림들을 참고할 수 있다.

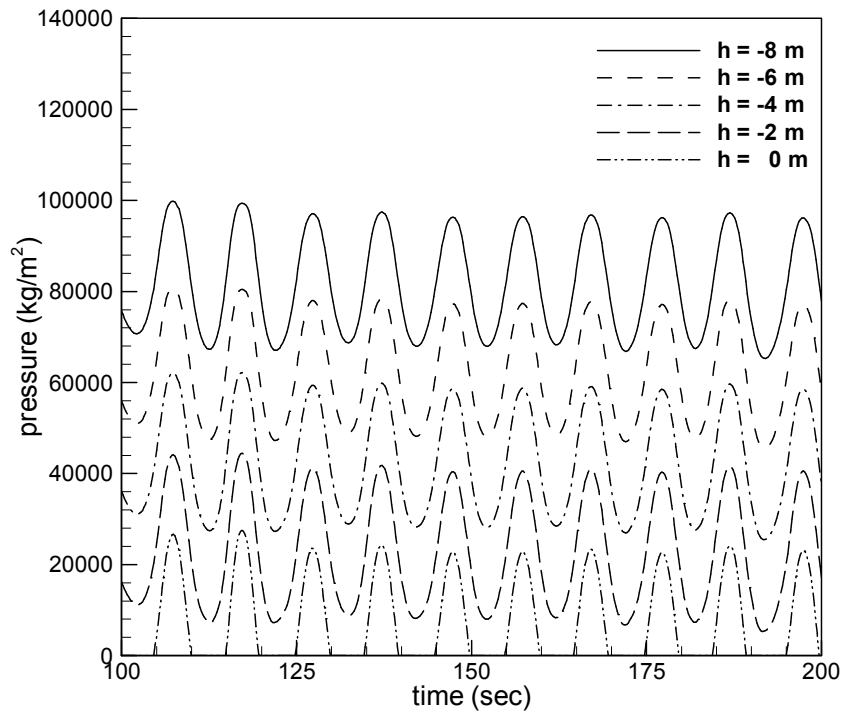


(a) 전면

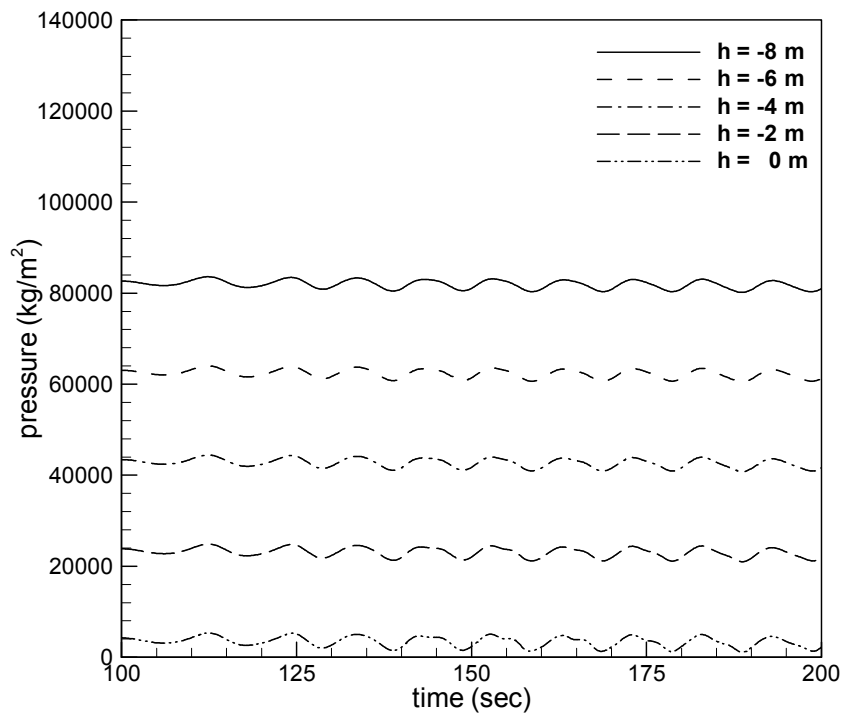


(b) 후면

<그림 59> 방파제 전·후면에서 지점별 파력 시계열($y = 0\text{m}$)

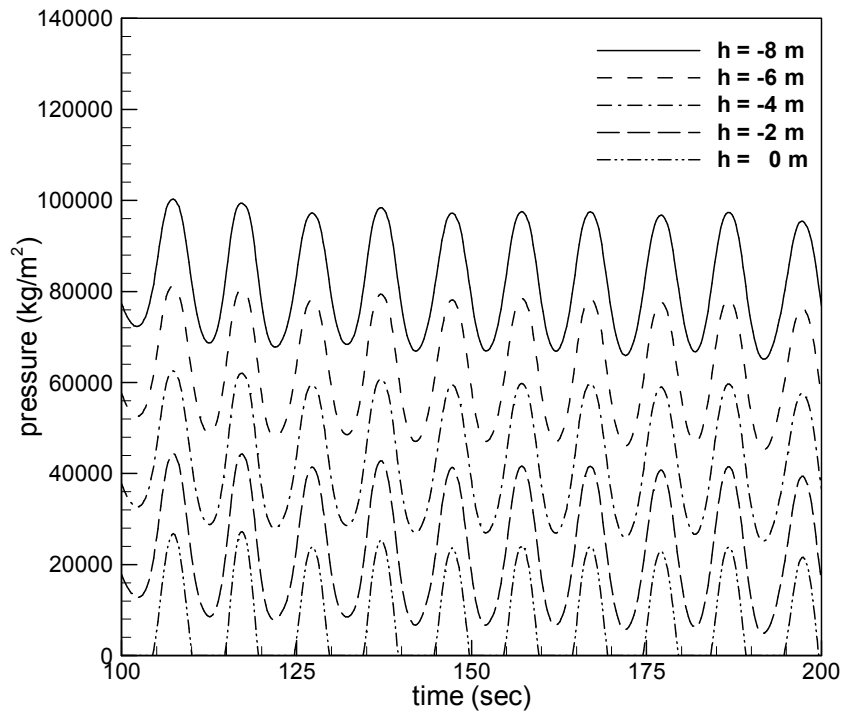


(a) 전면

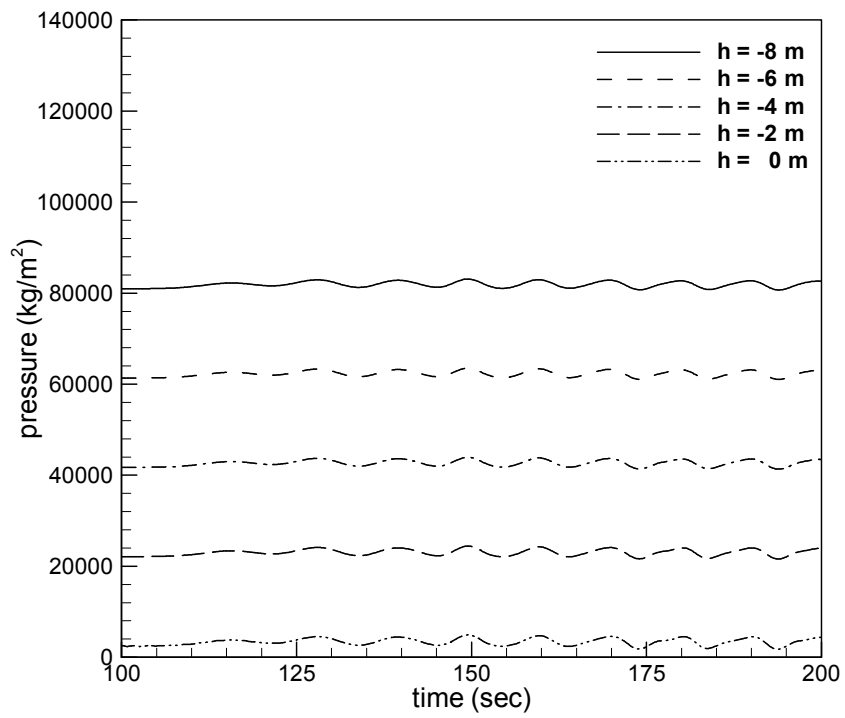


(b) 후면

<그림 60> 방파제 전·후면에서 지점별 파력 시계열($y = 150$ m)

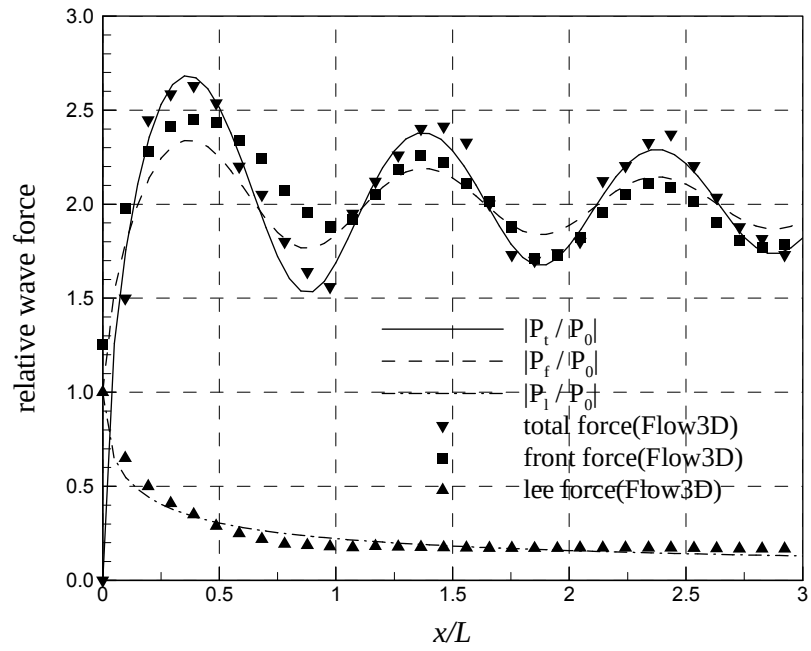


(a) 전면

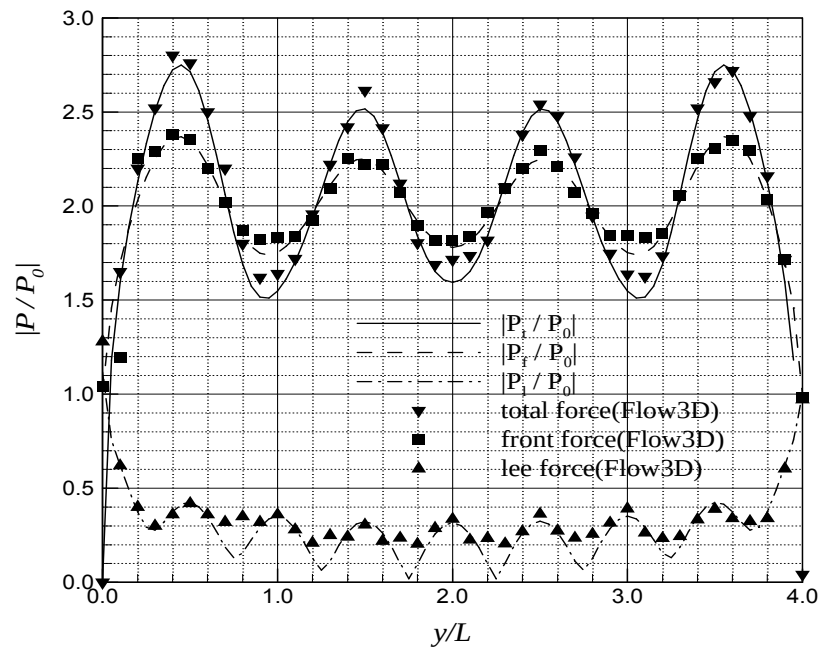


(b) 후면

<그림 61> 방파제 전·후면에서 지점별 파력 시계열($y = 300\text{m}$)



<그림 62> 입사각이 0도인 경우 반무한방파제에 작용하는 파력



<그림 63> 입사각이 0도인 경우 이안제에 작용하는 파력

마. Flow-3D 파력 분석 프로그램 Fortran 소스코드

```
program flow3D_analysis

character*10 cn, outfile1, outfile2, outfile3, outfile4, outfile5
character*10 outfile6, outfile7, outfile8, outfile9, outfile10

open(20,file='out.dat')

pi=3.141592
depth=10.
at=10.
omega=2.*pi/at
g=9.807
call WAVENUM(depth,omega,g,wvnum)

do i=1,100

open(11,file='temp.txt')
write(11,*) i
close(11)
open(11,file='temp.txt')
read(11,*) cn
close(11)

if (i .lt. 10) then
outfile1=cn(1:1)//'_1f.txt'
outfile2=cn(1:1)//'_2f.txt'
outfile3=cn(1:1)//'_3f.txt'
outfile4=cn(1:1)//'_4f.txt'
outfile5=cn(1:1)//'_5f.txt'
outfile6=cn(1:1)//'_1l.txt'
outfile7=cn(1:1)//'_2l.txt'
outfile8=cn(1:1)//'_3l.txt'
outfile9=cn(1:1)//'_4l.txt'
outfile10=cn(1:1)//'_5l.txt'
elseif (i .lt. 100) then
outfile1=cn(1:2)//'_1f.txt'
outfile2=cn(1:2)//'_2f.txt'
outfile3=cn(1:2)//'_3f.txt'
outfile4=cn(1:2)//'_4f.txt'
outfile5=cn(1:2)//'_5f.txt'
```

```

outfile6=cn(1:2)//'_1l.txt'
outfile7=cn(1:2)//'_2l.txt'
outfile8=cn(1:2)//'_3l.txt'
outfile9=cn(1:2)//'_4l.txt'
outfile10=cn(1:2)//'_5l.txt'
elseif (i .lt. 1000) then
outfile1=cn(1:3)//'_1f.txt'
outfile2=cn(1:3)//'_2f.txt'
outfile3=cn(1:3)//'_3f.txt'
outfile4=cn(1:3)//'_4f.txt'
outfile5=cn(1:3)//'_5f.txt'
outfile6=cn(1:3)//'_1l.txt'
outfile7=cn(1:3)//'_2l.txt'
outfile8=cn(1:3)//'_3l.txt'
outfile9=cn(1:3)//'_4l.txt'
outfile10=cn(1:3)//'_5l.txt'
endif
open(7,file=outfile1)
open(8,file=outfile2)
open(9,file=outfile3)
open(10,file=outfile4)
open(11,file=outfile5)
open(12,file=outfile6)
open(13,file=outfile7)
open(14,file=outfile8)
open(15,file=outfile9)
open(16,file=outfile10)

do j=1,11
  read(7,*)
  read(8,*)
  read(9,*)
  read(10,*)
  read(11,*)
  read(12,*)
  read(13,*)
  read(14,*)
  read(15,*)
  read(16,*)
enddo

daf2=0.
ddaf2=0.

```

dddaf2=0.

do while(.not. eof(7))

read(7,*) atime, apress1, aeta

read(8,*) atime, apress2, aeta

read(9,*) atime, apress3, aeta

read(10,*) atime, apress4, aeta

read(11,*) atime, apress5, aeta

read(12,*) atime, apress6, aeta2

read(13,*) atime, apress7, aeta2

read(14,*) atime, apress8, aeta2

read(15,*) atime, apress9, aeta2

read(16,*) atime, apress10, aeta2

if (atime .ge. 150. .and. atime .le. 200.) then

```
!      af=(apress1+(apress1+g*1000.*2.))+(apress1+apress2)
! +      +(apress2+apress3)+(apress3+apress4)+(apress4+apress5)
! +      -(apress6+(apress6+g*1000.*2.))-(apress6+apress7)
! +      -(apress7+apress8)-(apress8+apress9)-(apress9+apress10)
      aaf=(apress6+(apress6+g*1000.*2.))+(apress6+apress7)
+      +(apress7+apress8)+(apress8+apress9)+(apress9+apress10)
      aaaf=(apress1+(apress1+g*1000.*2.))+(apress1+apress2)
+      +(apress2+apress3)+(apress3+apress4)+(apress4+apress5)
```

af=aaaf-aaf

daf=af

ddaf=aaf-g*1000.*depth**2./2.

dddaf=aaaf-g*1000.*depth**2./2.

if (abs(daf) .gt. abs(daf2)) then

daf2=daf

else

daf2=daf2

endif

if (abs(ddaf) .gt. abs(ddaf2)) then

ddaf2=ddaf

else

ddaf2=ddaf2

endif

```

        if (abs(dddaf) .gt. abs(dddaf2)) then
            dddaf2=dddaf
        else
            dddaf2=dddaf2
        endif

write(*,*) daf2, ddaf2, dddaf2
pause

        endif
    enddo

af2=g*1000.*depth*tanh(wvnum*depth)/(wvnum*depth)*2.

ax=(i-1)*3.
write(*,1000) ax*wvnum/(2.*pi), daf2*2., af2, daf2/af2*2.,
+          ddaf2/af2*2., dddaf2/af2*2.
write(20,1000) ax*wvnum/(2.*pi), daf2*2., af2, daf2/af2*2.,
+          ddaf2/af2*2., dddaf2/af2*2.
1000 format(f8.3,2x,f9.2,2x,f9.2,2x,f5.2,2x,f6.3,2x,f6.3)
enddo

close(20)

stop
end

!=====
!==[Newton-Raphson method to compute wavenumber ]=====
      SUBROUTINE WAVENUM(depth,omega,g,wvnum)
!=====
      tol=1.e-5
!      xo=omega**2/(g*SQRT(TANH(omega**2*depth/g)))
      xo=omega**2/(g*TANH(SQRT(omega**2*depth/g)))

      DO 3 n=1,20
          fn=g*xo*TANH(xo*depth)-omega**2
          fnp=g*(TANH(xo*depth)+xo*depth/COSH(xo*depth)**2)
          x1=xo-fn/fnp
!          WRITE(*,*) 'n =',n,'xo =',xo
          IF (ABS(x1-xo)/xo < tol) THEN
              GO TO 2

```

```

        END IF
        x0=x1
3      CONTINUE
        WRITE(*,4) depth
4      FORMAT('The solution of wavemumber does not converge !/'
             +      ' at depth = ',f7.3)
2      wvnum=x0
        RETURN

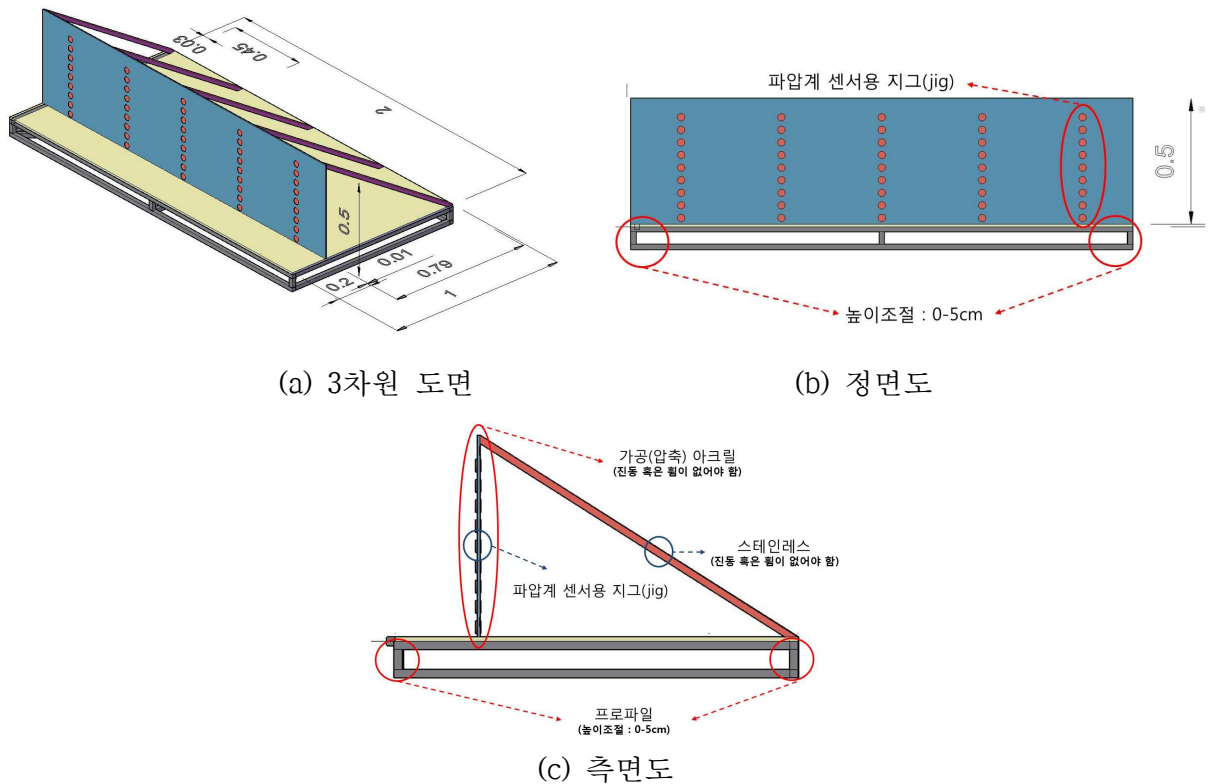
END SUBROUTINE

```

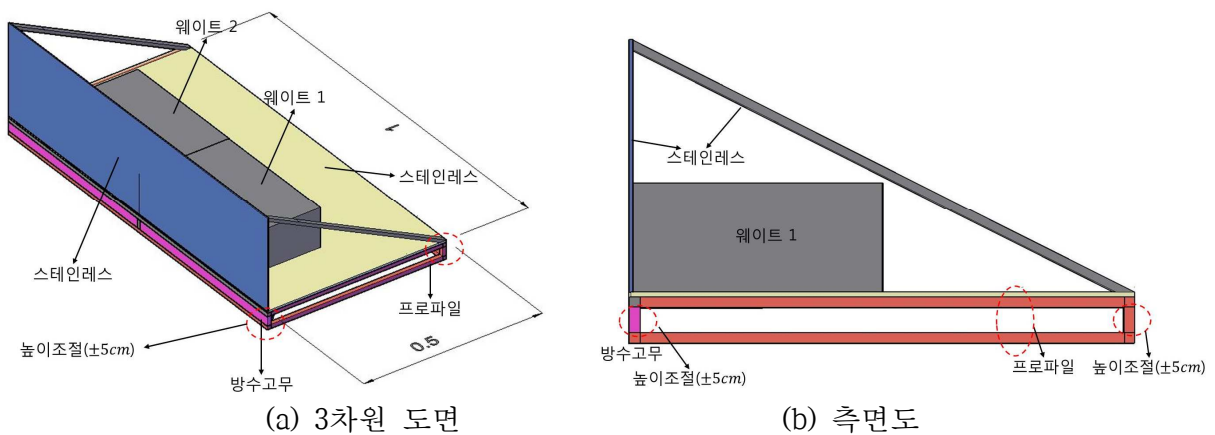
7. 3차원 수리모형실험

가. 수리모형 제작

방파제에 작용하는 파력식 검증을 위해 3차원 수리모형실험을 수행하였다. 3차원 수리모형 실험 결과의 신뢰성 향상을 위해서는 올바른 모형 설계 및 설치가 매우 중요하다. 따라서 모형 제작오차는 1mm 이내를 만족하도록 하였다. 수리모형 설계를 위해 영국 HR Wallingford 및 네덜란드 Deltares에 방문하여 자문을 구하였다. 수리모형실험을 위한 모형 제작도 및 Wave Guide 제작도는 다음 그림과 같다.



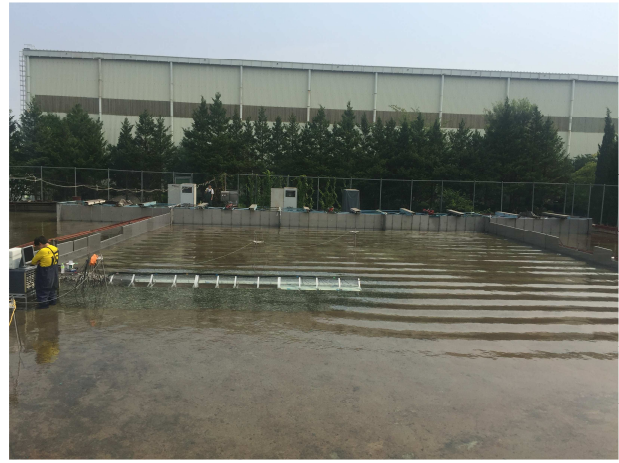
<그림 64> 3차원 수리모형실험을 위한 모형 설계도



<그림 65> 수리모형실험 수행을 위한 Wave guide 제작 도면



(a) 모형 설치 전경



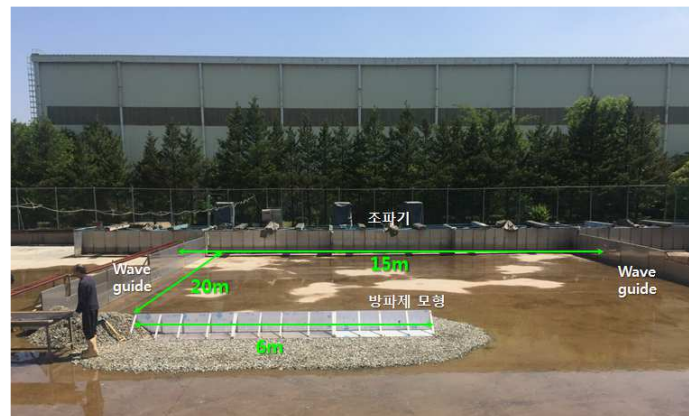
(b) 수리모형실험 수행 전경

<그림 66> 3차원 수리모형실험 수행 전경

나 수리모형실험 수행

(1) 모형 배치

수리모형실험은 한국농어촌공사 농어촌연구원에서 보유하고 있는 3차원 파랑시험장에서 수행하였다. 본 실험에 사용된 수조는 총 50m(L) × 50m(B) × 0.700m(H)의 철근 콘크리트 야외수조이며, 수리모형실험 시 적용된 수조 내 실험영역은 28m(L) × 20m(B) × 0.700m(H)에 해당한다. 또한, 기상의 영향을 최소화하기 위하여 방풍벽을 설치하였다. 야외수조의 특성상 비 또는 바람이 실험에 영향을 미칠 수 있으므로 기상조건이 양호할 경우에만 실험을 실시하는 등 최적의 조건에서 실험과랑을 재현토록 하였다. 입사파랑 재현을 위해 유압식 피스톤 타입 조파기를 활용하였다. 수리모형실험 수행을 위한 모형배치는 다음 그림과 같다.



<그림 67> 수리모형실험을 위한 모형 배치

(2) 실험 장비

본 실험에 사용된 조파기는 일방향 불규칙파랑 조파기(Uni-Directional Random Wave Generator)로서 실험과랑의 입사방향에 따라 이동 설치가 가능하다. 고립파 조파를 위한 피스톤의 스트로크(stroke)는 총 0.600m에 해당하며, 조파장치의 주요제원은 다음과 같다.



(a) 조파피스톤



(b) 조파기

<그림 68> 3차원 유압식 조파피스톤 및 조파기

<표 7> 조파기 주요제원

구 분	내용	비고
조파형태	일방향 불규칙파랑 발생	
조파관길이	16.5m(5.5m × 3기)	
재현파고	최대 0.3m	
주기	0.7 ~ 4.0sec	
형식	피스톤식(유압식)	
구동방식	22kw × 2 moter	

수리모형실험 수행시 파압 계측을 위해 파압계측 시스템을 신규 제작하였다. 파압계는 WT-P020 센서를 사용하였다. 본 파압계의 측정범위는 0~0.2kg/cm² 이며, 초당 최대 500개의 압력 Data를 취득할 수 있다. 파압계 지름은 20mm이다. 파압계는 전용 앰프와 연결되며, 앰프에서 샘플링된 Data는 컴퓨터로 전송된다. 본 연구에서 사용된 파압계측시스템은 36채널로 아래 그림을 참고할 수 있다.



(a) 파압계측시스템



(b) 파압계

〈그림 69〉 36채널 파압계측시스템 및 파압계

실험대상과 설정 및 파고계측 시 사용된 파고계는 용량식 디지털 파고계를 사용하였다(그림 2 참조). 본 실험의 파고 제어/계측시스템은 여러개의 파고계를 하나의 케이블로 직렬 연결하므로 위치이동 및 관리가 용이하며, 출력 Data는 디지털 형식이므로 별도의 A/D 보드 없이 컴퓨터로 직접처리가 가능하다. 파고계의 측정범위 등의 특징은 아래와 같다.



〈그림 70〉 파고계 및 거치대

〈표 8〉 파고계 주요제원

구 분	주요제원
측정범위	0.300m ~ 1.000m
Sampling time	0.025sec ~ 1.000sec
채널설정	Dip switch에 의한 3단계 필터 기능

윈도우(window) 환경에서 조파시작 및 정지가 가능하고 조파 설정 모드에서 규칙파 및 불규칙파를 생성하고 목적 스펙트럼과 계측 스펙트럼 분석결과를 그래프 또는 텍스트(text) 파일로 저장 관리할 수 있다. 계측기의 교정, 계측, 분석 및 저장이 가능하며, 목적 스펙트럼을 손쉽게 정확하게 생성할 수 있는 스펙트럼 교정 프로그램을 포함하고 있어 신속하고 정확한 파랑재현이 가능하다. 조파제어장치 및 Data 처리장치의 주요제원은 다음과 같다(표 9 참조).



〈그림 71〉 조파 제어장치 및 Data 처리장치

〈표 9〉 조파제어장치 주요제원

구분	내용	비고
조파신호제작 프로그램	주기, 파고, 스펙트럼 형식 등을 입력하고 연산하여 조파 파일생성	
파고계교정 프로그램	각 채널 계측기기의 출력특성을 자동 보정하고 그 보정계수를 파일로 저장	
계측 및 분석 프로그램	보정계수에 의해 수집된 실시간 Data를 수집하고 분석	
목적스펙트럼 보정 프로그램	분석된 계측스펙트럼을 목적스펙트럼과 비교분석하여 동일한 스펙트럼으로 수렴	
입, 반사파 분리분석 프로그램	2점법에 의한 분석으로 계측기 번호 및 상호간 거리, 수심을 입력하면 분석가능한 주파수 범위를 표시	

(3) 수리모형실험 수행안

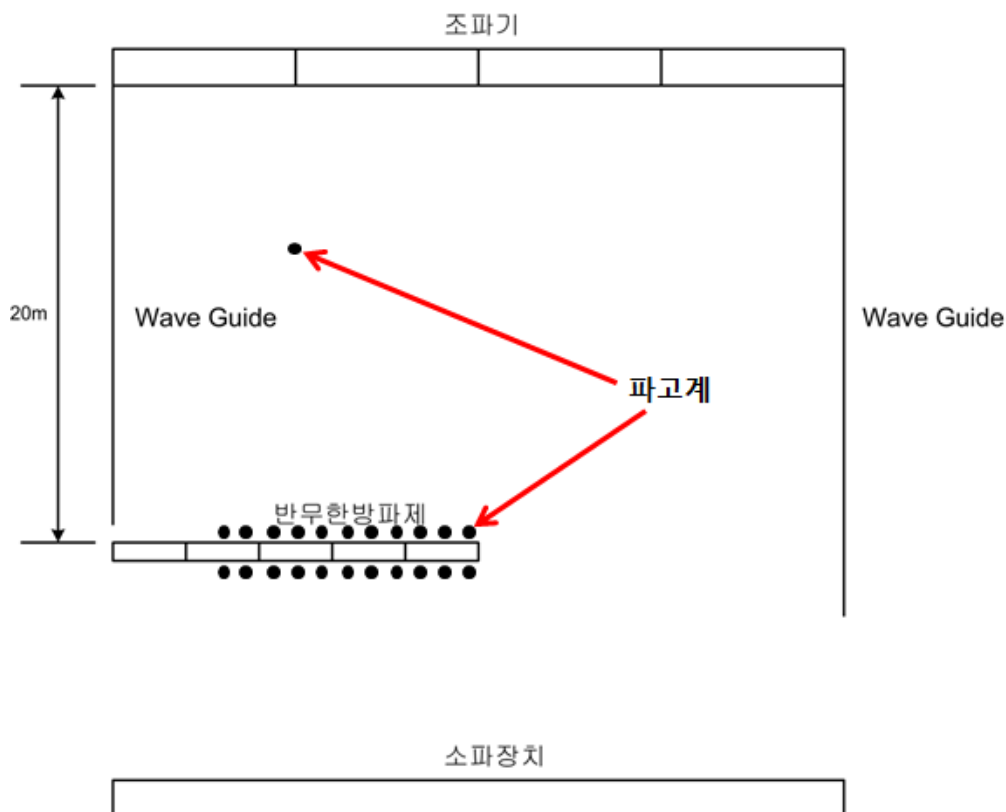
수리모형실험 수행을 위해 입사파랑은 규칙파로 설정하였다. 일방향 불규칙파의 경우 구조물에서 반사된 파와 조파판에서 재반사된 파의 제어가 불가능하여 실험 대상에서 제외하였다. 수리모형실험을 위해 수심은 30cm로 설정하였으며, 실험파의 제원은 아래 표와 같다.

〈표 10〉 수리모형실험을 위한 실험파 제원

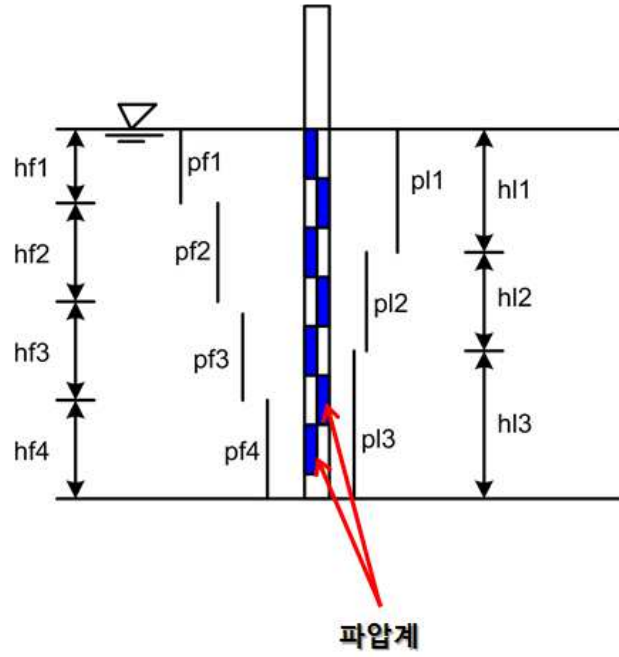
주기	실험파 제원(파고)		비 고
	Target	재현	
0.8초	3.0cm	2.95cm	
	4.0cm	3.92cm	
1.0초	3.0cm	3.05cm	
	4.0cm	3.94cm	
2.0초	3.0cm	2.93cm	
	4.0cm	4.02cm	

(4) 수리모형실험 결과

수리모형실험은 반무한방파제 및 이안제를 대상으로 수행하였다. 방파제에 작용하는 파력은 방파제 전·후면에 파압계를 설치하여 계측하였다. 파압은 방파제 전·후면에 각각 93개 지점에 대해 계측 및 분석하였으며, 파고는 방파제 전·후면에 각각 11개 지점에서 Data를 취득하였다(반무한방파제 66 지점, 이안제 66 지점). 모형의 평면배치계획은 아래 그림과 같다. 방파제에 작용하는 파력은 파압 분석결과로부터 도출하였다. 계측된 파압에 대해 아래 그림 73, 일반 구조물의 경우 식 (125)를 적용하였고, 장대구조물의 경우 식 (126)을 이용하여 분석하였다.



〈그림 72〉 모형배치계획



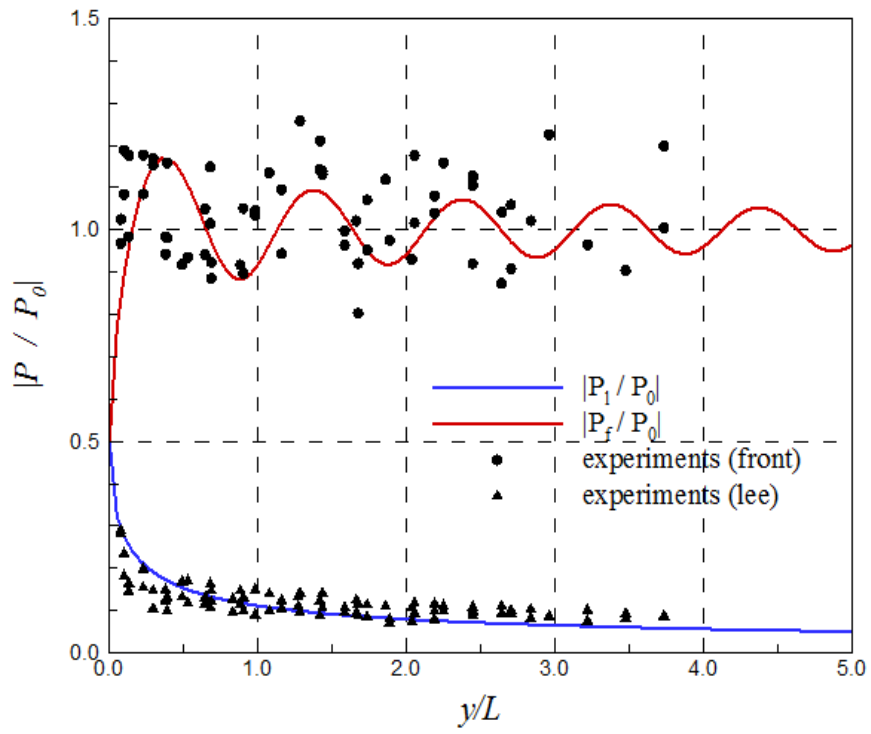
<그림 73> 파압계 배치 및 파력분석 개념도

$$F(t) = \sum_{n=1}^{n_{\max}} hf_n pf_n(t) - \sum_{n=1}^{n_{\max}} hl_n pl_n(t) \quad (125)$$

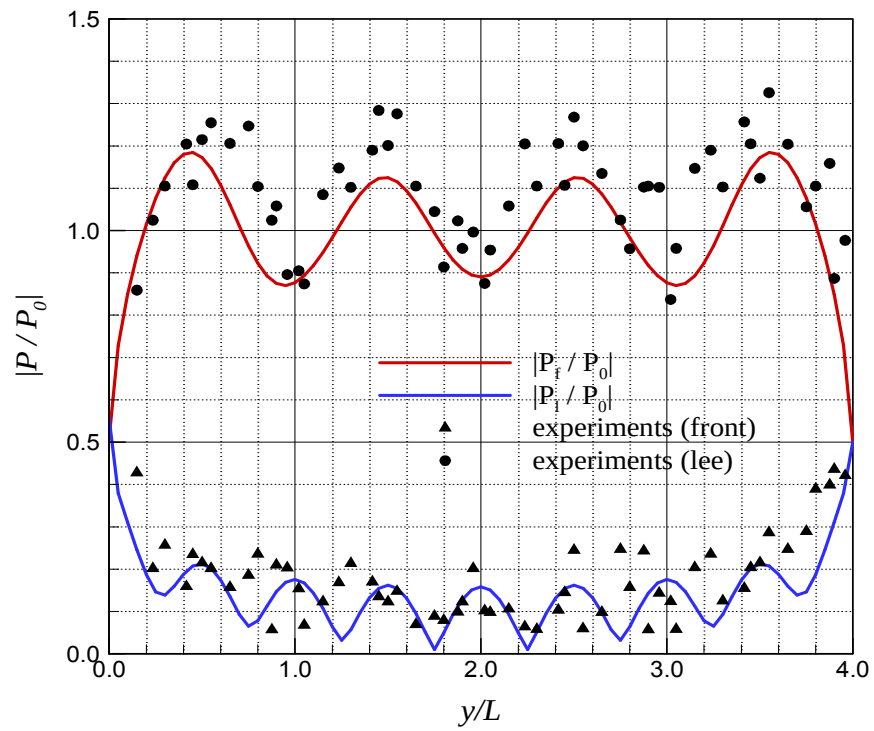
$$F(t) = \frac{1}{\sum_{m=1}^{m_{\max}} l_m} \left\{ \sum_{m=1}^{m_{\max}} \left(\sum_{n=1}^{n_{\max}} hf_n \times pf_n(t) \right) \times l_m - \sum_{m=1}^{m_{\max}} \left(\sum_{n=1}^{n_{\max}} hl_n \times pl_n(t) \right) \times l_m \right\} \quad (126)$$

$$R_{\text{exp}} = F_{\text{max}}(t) / \left(2\rho g a_i \frac{\tanh kh}{k} \right) \quad (127)$$

입사각도는 수직 입사하는 경우에 대해 검토하였다. 수리모형실험 결과는 아래 그림 74와 같다. 아래 그림에서 (a)는 반무한방파제에 대한 결과이며, (b)는 이안제에 대한 결과이다. 수리모형실험을 통한 검토 결과 해석해와 평균 오차 10% 이내로 상당히 유사한 결과를 보였다. 실제로 3차원 수리모형실험의 경우 조파판에서의 재반사, wave guide에서의 반사, wave guide를 지나는 파랑의 회절 발생 등 의도치 않은 다양한 물리적인 현상이 발생하기 때문에 수치해석과 같이 정확한 상황의 재현이 매우 어렵다. 본 연구에서도 의도치 않은 물리적 현상 발생을 최대한 차단하여 실험을 수행하였으나 앞서 설명한 바와 같은 다양한 노이즈들에 의해 매우 정확한 결과를 도출하지는 못하였다. 하지만 회절 현상에 의한 방파제 전면에서의 파력 진동 경향은 충분히 정확한 결과를 도출하였다. 실험 결과 중 일부 해석해와 차이를 보이는 경우가 있는데, 이는 다양한 노이즈 뿐만 아니라 해석해의 경우 파랑의 비선형성을 재현하지 못하지만 수리모형실험의 경우 비선형성이 모두 포함되기 때문인 것으로 판단된다. 하지만 전반적인 수리모형실험 결과 본 연구에서 제안하는 파력식이 상당히 타당함을 알 수 있다.



(a) 반무한방파제



(b) 이안제

<그림 74> 수리모형실험 결과와 해석해의 결과 비교

8. 본 파력식 적용에 따른 공사비 절감효과

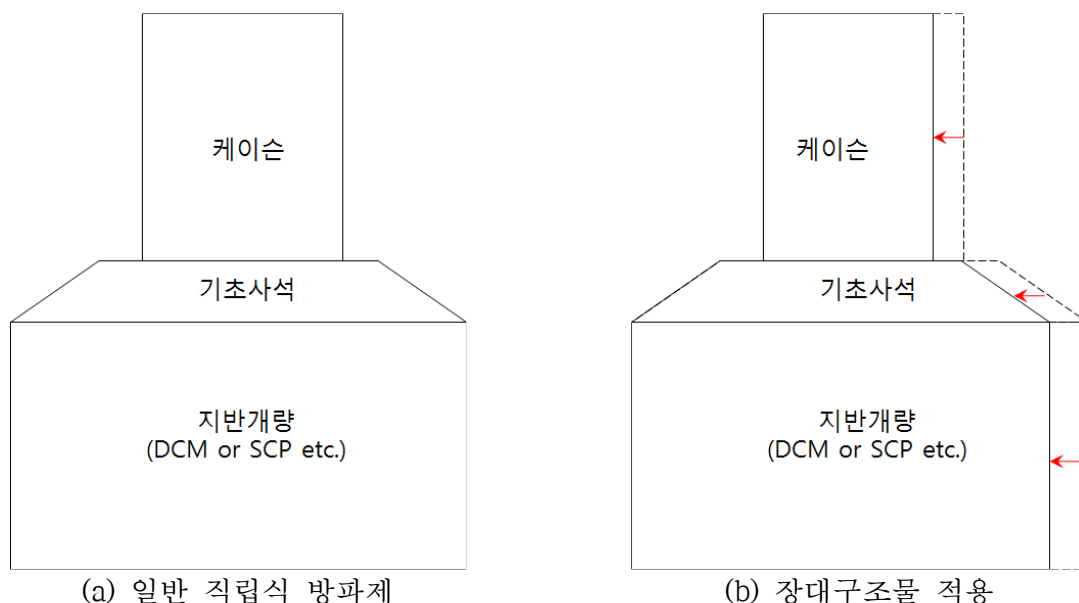
가. 일반 구조물

본 연구에서는 반무한방파제 및 이안제 형식의 일반구조물에 대해 회절을 고려한 파력식을 제안하였다. 일반적으로 회절을 고려할 경우 방파제에 작용하는 총파력은 최대 약 1.4배 까지 증가하는 것을 그림 14 ~ 16을 통해 알 수 있다. 즉, 과거 회절을 고려하지 않고 방파제를 설계할 경우 특정 구간에서는 회절에 의해 방파제의 피해가 발생할 수 있음이 예상된다. 따라서, 본 연구에서 제안하는 회절을 고려한 파력식을 적용할 경우 이상 고파랑 발생에 따른 피해가 예상 되는 방파제의 안정성 확보에 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

나. 장대 구조물

본 연구에서는 회절을 고려하여 장대구조물에 작용하는 파력에 대해 최초로 연구하였으며 그 결과를 제시하였다. 실제로 파랑이 비스듬히 입사할 경우 장대구조물에 작용하는 파력은 거의 0에 가깝게 감소하는 경우도 존재한다. 또한 다방향 불규칙파의 경우 방파제에 수직 입사하는 경우에도 파력감소효과가 존재함을 그림 28을 통해서 알 수 있다.

방파제의 장대화 방안에 대해서는 인터록킹을 이용하거나 물리적으로 구조물을 길게 만드는 등 다양한 방법들이 제시되었다(Takahashi, 2002; Kim et al., 2010). 장대방파제의 경우 인터록킹을 이용할 경우 방파제 전체 길이에 장대화효과를 발현할 수 있다고 하지만 본 연구에서는 보수적으로 보아 방파제의 상대길이(l/L)를 2.0 으로 가정하였으며, 다방향불규칙파의 최대 분포계수(s_{max})도 천해역에서 너울(swell)에 해당하는 값인 75를 적용하였다. 이 경우 방파제에 작용하는 총파력의 감소파력비는 0.796이다. 따라서, 방파제에 작용하는 파력을 80%로 가정할 수 있다. 파력이 80%로 감소하게 되면 방파제의 중량을 최대 20% 줄일 수 있다.



<그림 75> 일반 직립식 방파제와 장대구조물 적용시 방파제 단면 차이

직립식 방파제는 파랑과 같은 외력에 대해 중량으로 저항하는 구조물이다. 즉, 장대구조물을 적용할 경우 직립식 방파제의 중량을 감소시킬 수 있어 경제성 확보가 가능하다. 직립 방

파제의 천단고는 파랑의 율파를 저감시켜 항내 정온도를 확보해야 하기 때문에 장대구조물을 적용한다고 해서 낮출 수는 없다. 하지만 방파제의 폭은 충분히 감소가 가능하다. 기존의 직립식 방파제와 장대구조물을 적용한 경우의 차이는 위 그림 75와 같다. 즉, 케이슨 구체공의 폭을 줄일 수 있기 때문에 기초사석과 하부의 지반개량공도 감소가 가능하다.

과거 실제 시공된 방파제 설계자료를 분석해 보면 장대구조물을 적용했을 경우 공사비 절감 여부를 판단할 수 있다. 본 연구에서는 울산신항 남방파제 2-1공구의 공사비를 이용하여 실제로 장대구조물이 시공될 경우의 공사비 절감액을 산정하였다. 실제 직립식 방파제의 공사비 구성은 아래 표와 같다. 공사비 분석을 위해 실제 방파제 건설 내역에서 케이슨 구체의 중량을 80% 수준으로 조정하였으며, 이에 기초하여 기초사석공, 지반개량공 등의 수량을 조정하였다. 하지만 보수적인 검토를 위해 케이슨의 함수나 케이슨 제작을 위한 플로팅 도크의 사용기간, 케이슨 제작장 등은 기존의 수량을 그대로 반영하였다. 검토 결과 울산신항 남방파제 2-1공구의 총 공사비는 원 공사비의 87.99% 수준으로 공사비 12.01% 가량의 절감이 가능한 것으로 판단된다.

〈표 11〉 울산신항 남방파제 2-1공구 공사비

공 종	원 공사비(원)	장대구조물 적용(원)	원공사비 대비
지반개량	42,489,719,587	34,014,235,308	88.05%
구체공	85,404,371,359	75,246,500,453	88.11%
부대공	9,905,885,104	9,905,885,104	100.00%
전기공	1,532,857,182	1,532,857,182	100.00%
간접비	39,521,403,132	36,682,354,537	92.82%
총원가	178,854,236,364	157,381,832,584	87.99%

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

본 연구의 최종목표는 “회절을 고려한 해양구조물에 작용하는 파력식 개발”이다. 해양구조물에 작용하는 파력식은 규칙파와 다방향 불규칙파에 대해 각각 유도하고, 일반구조물과 장대구조물에 대한 식을 구분하여 제시한다. 또한, 파랑의 경사각, 방향집중도, 방향 비대칭성, 통과율 및 반사율 등 다양한 변수들 대한 결과를 제시한다. 구체적인 최종목표는 아래와 같다.

- 해양구조물에 작용하는 규칙파 및 다방향 불규칙파의 파력식 개발
 - 일반 구조물에 작용하는 파력식
 - 장대구조물에 작용하는 파력식
- 수치해석 및 수리모형실험을 통한 이론식의 검증

가. 1차년도 연구목표

(1) 1차년도 정량적 성과지표 달성도

연차별 성과목표	성과지표	측정방법	목표치	가중치	달성치
- 해양구조물에 작용하는 파력식 개발 I:반무한 방파제 - 수치해석 및 수리모형실험을 통한 이론식의 검증 I:반무한 방파제	국내외 지적재산권 확보 건수	소프트웨어(S/W)등록건수	1건	10%	2차년도에 등록
	국내외 학술지 논문 게재 건수	논문게재 건수	1건	30%	1건 (SCI)
	국내외 학술회의 발표 논문건수	학술회의 발표건수	2건	60%	5건
총 계				100%	100%

(2) 1차년도 연구목표 및 달성도

구분	연구목표	주요연구내용	달성도(%)
주 관 - 세종대	■ 해양구조물에 작용하는 파력식 개발 I - 반무한 방파제에 작용하는 파력식 개발	- 규칙파에 대한 해양구조물에 작용하는 파력식 개발(반무한방파제) - 다방향 불규칙파에 대한 해양구조물에 작용하는 파력식 개발(반무한방파제) - 구조물의 폭의 영향을 고려한 파력식 개발(반무한방파제) - 구조물의 반사율 및 통과율을 고려한 파력식 개발(반무한방파제) - 환경사방정식을 이용한 수치해석 수행(반무한방파제) - Boussinesq 방정식을 이용한 수치해석 수행(반무한방파제)	100
공 동 - 농어촌 연구원	■ 수치해석 및 수리모형실험을 통한 이론식의 검증 - 반무한 방파제에 대한 수치해석 수행 - 반무한방파제 수리모형 실험 수행	- FLOW-3D를 이용한 수치해석 수행(반무한방파제) - 수리모형실험을 위한 모형 설계 - 반무한방파제 수리모형실험 수행	100

나. 2차년도(최종년도) 연구목표

(1) 2차년도 정량적 성과지표 달성도

연차별 성과목표	성과지표	측정방법	목표치	가중치	달성치
- 해양구조물에 작용하는 파력식 개발 II:이안제	국내외 지적재산권 확보 건수	소프트웨어(S/W)등록건수	2건 (1차년도 미달성분 1건 포함)	10%	3건
- 수치해석 및 수리모형실험을 통한 이론식의 검증 II:이안제	국내외 학술지 논문 게재 건수	논문게재 건수	1건	30%	3건 (1건 게재확정)
	국내외 학술회의 발표 논문건수	학술회의 발표건수	3건	60%	6건
총 계				100%	100%

(2) 2차년도 연구목표 및 달성도

구분	연구목표	주요연구내용	달성도(%)
주 관 - 세종대	■ 해양구조물에 작용하는 파력식 개발 II - 이안제에 작용하는 파력식 개발	- 규칙파에 대한 해안구조물에 작용하는 파력식 개발(이안제) - 다방향 불규칙파에 대한 해양구조물에 작용하는 파력식 개발(이안제) - 구조물 폭의 영향을 고려한 파력식 개발(이안제) - 구조물의 반사율 및 통과율을 고려한 파력식 개발(이안제) - 환경사방정식을 이용한 수치해석 수행(이안제) - Boussinesq 방정식을 이용한 수치해석 수행(이안제)	100
공 동 - 농어촌 연구원	■ 수치해석 및 수리모형실험을 통한 이론식의 검증 II - 이안제에 대한 수치해석 수행 - 이안제 수리모형실험 수행	- FLOW-3D를 이용한 수치해석 수행(이안제) - 이안제 수리모형실험 수행	100

2. 관련 분야 기여도

- 국내 원천기술확보로 기술 경쟁력이 향상되어 국내 건설업의 활성화에 도움이 될 것임.
- 본 연구의 파력식을 활용하면 기존의 항만설계기준으로 설계하는 해안구조물의 공사비를 절감할 수 있음.
- 국내 건설회사의 기술경쟁력 확보와 해외 해양구조물 관련 사업 수주에 도움이 됨.
- 정부의 해안 및 해양구조물 건설예산 절감에 큰 역할을 할 것임.

제5장. 연구개발성과의 활용계획

본 과제의 최종 성과물은 “회절이 고려된 해양구조물에 작용하는 파력식”이며, 이는 해석적인 방법을 활용하여 유도 및 제시한다. 유도된 파력식은 평면수리모형실험 및 2차원, 3차원 수치해석 연구 결과와 비교하여 그 정확성을 검증한다. 제시되는 파력식은 현업에 종사하는 기술자 및 대학교수 등을 대상으로 공청회를 거쳐 제시할 계획이며, 이 식은 실무자들이 중력식 방파제, 부유식 방파제, 해중터널 및 해저케이블 등 해양구조물 설계를 위한 외력조건인 파력 산정에 적용이 가능하다. 또한 각종 설계기준에 포함되도록 하여 해안구조물 설계에 활용되도록 적극 유도한다. 그리고 본 과제의 결과물은 항만관련 건설업과 관련된 건설회사, 설계회사 등지에서 구조물 설계에 활용할 수 있다. 특히 세계적으로 규명되지 않은 경사입사각에 따른 파력 감소효과를 명확히 규명함으로써 국내 해양구조물 관련 원천기술 확보에도 큰 도움이 될 것이다. 일반구조물에 대한 파력식은 좀 더 정확한 파력 산정에 큰 도움이 될 수 있다. 장대구조물의 경우 일반구조물에 비해 작용하는 평균파력이 10% 이상 감소하므로 본 연구의 결과를 잘 활용하면 해외 해안구조물 건설사업을 수주함에 있어서 큰 가격 경쟁력을 가질 수 있을 것이다. 따라서, 최근 침체를 겪고 있는 국내 건설업의 경기 부양에도 작은 도움이 될 것으로 판단된다. 또한, 본 연구 성과에 의한 장대구조물 적용이 활성화 될 경우 정부의 해안 및 해양구조물 건설예산을 10% 이상 절감 하는데 큰 역할을 할 것이다.

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

해당사항 없음

제7장. 연구개발성과의 보안등급

일반

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호
해당사항 없음								

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

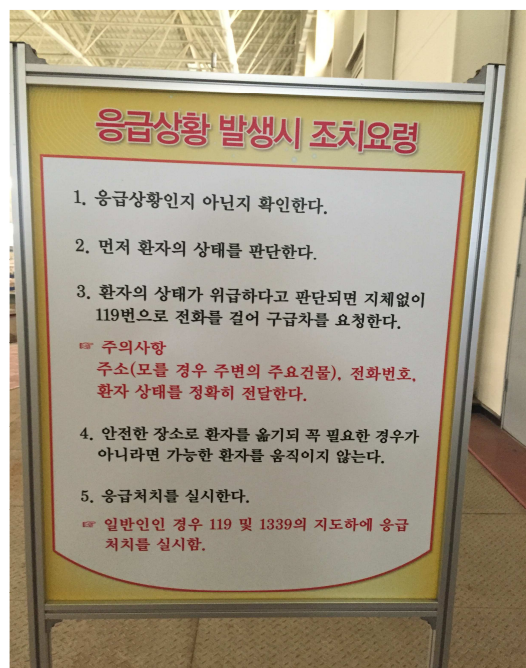
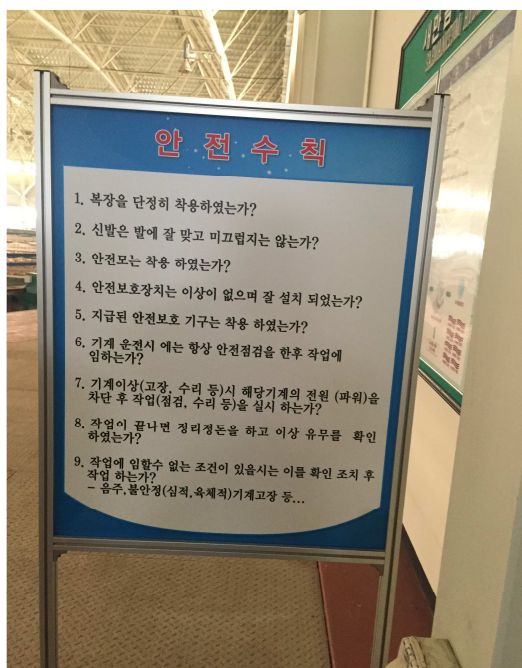
1. 실험실 안전수칙의 명문화 및 정기적 교육 실시

가. 주관연구기관: 세종대학교 산학협력단



[실험실 응급상황 발생시 비상기구함 사용요령]

나. 공동연구기관: 한국농어촌공사 농어촌연구원



[실험실 안전수칙 및 응급상황 발생시 조치요령]



[실험인력의 안전수칙 교육]

2. 안전관리 교육주기

가. 주관연구기관: 세종대학교

- 연구실 안전관리 교육: 연구실안전관리센터에서 1학기에 최소 1번 시행

나. 공동연구기관: 한국농어촌공사 농어촌연구원

- 실험실 안전수칙 교육: 매일
- 응급상황 발생시 조치요령: 주 1회

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	Internal generation of damped waves in linear shallow water equations	세종대 학교	저자	Cosatal Engineerin g	2.841	2015.10.	단독 사사	SCI
2	논문	회절을 고려한 반무한방파제 형식의 장대구조물에 작용하는 파력 예측	세종대 학교, 농어촌 연구원	저자	한국해안·해양공학회 논문집		2015.12.	단독 사사	
3	논문	회절을 고려한 반무한방파제 형식의 직립구조물에 작용하는 지점별 파력 분포	세종대 학교, 농어촌 연구원	저자	한국해안·해양공학회 논문집		2016.08.	단독 사사	게재확정
4	S/W	Porus Water Boussinesq-1D& 2D Wave Model	세종대 학교	저작권자	국내		2016.05.03	단독	C-2016-0108 17 (등록번호)
5	S/W	회절을 고려한 파력산정 프로그램	농어촌 연구원	저작권자	국내		2016.07.11	단독	C-2016-0171 13 (등록번호)

제11장. 기타 사항

없음

제12장. 참고 문헌

- 김범형, 김홍진, 김종석, 김동철, 최진휴 (2011a). 케이슨 연속구조에 의한 내파 성능 향상 기술에 관한 연구, 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, 1907-1910.
- 김범형, 김종석, 박상용, 김지환 (2011b). 3D 인터록킹 방파제 설계사례, 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, 1903-1906.
- 나유리, 부반니, 정재상, 이창훈 (2014). 경사임사 시 파력감소효과 검토: 환경사방정식과 Boussinesq 방정식, 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, 1378-1381.
- 정재상, 이창훈, 박우선 (2013). 입사파향에 따른 방파제 전면의 파고 및 파압의 변화, 한국해양공학학회 학술발표논문집, 78-81.
- 정재상, 이창훈, 박우선, 조용식 (2014). 경사임사 시 파력감소효과 검토: Goda 파력식 개선, 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, 1391-1394.
- 정재상, 이창훈, 조용식 (2011). 회절을 고려한 장대구조물의 파력해석, 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, 1899-1902.
- Allsop, N.W.H. and Calabrese, M. (1998). Impact loadings on vertical walls in directional seas, Proc. 26th Int. Conf. Coastal Eng., Copenhagen, Denmark, 2056-2068.
- Allsop, N.W.H., Vicinanza, D. and McKenna, J.E. (1996). Wave forces on vertical composite breakwaters, Report SR 443, HR Wallingford.
- Battjes, J.A. (1982). Effects of short-crestedness on wave loads on long structures. Applied Ocean Res., 4(3), 165-172.
- Burcharth, H.F. and Liu, Z. (1999). Force reduction of short crested non-breaking waves on caissons, MASTIII PROVERBS, Probabilistic Design Tools for Vertical Breakwaters, MAS3-CT95-0041, II a, Chapter 4.3, 1-26.
- Cuomo, G., Allsop, W. and Takahashi, S. (2010). Scaling wave impact pressures on vertical walls, Coastal Engineering, 57(6), 604-609.
- Flow Science (2009). FLOW-3D User Manual.
- Franco, C., van der Meer J.W., and Franco, L. (1996). Multidirectional wave loads on vertical breakwaters. Coastal Engineering (1996). ASCE, 2008-2021.
- Frigaard, P., Burcharth, H.F. and Kofoed, J.P. (1998). Wave impacts on caisson breakwaters situated in multidirectionally breaking seas, Proc. 26th Int. Conf. Coastal Eng., Copenhagen, Denmark, 1959-1970.
- Gaillard, B. (1905). Wave action in engineering structure, Engineering News, 23, Feb.
- Goda, Y. (1973). New wave pressure formulae for composite breakwater, Proc. 14th Int. Conf. Coastal Eng., Copenhagen, 1702-1720.
- Goda, Y. (1994). Dynamic response of upright breakwaters to impulsive breaking wave forces, Coastal Eng., 22(1-2), 135-158.
- Goda, Y. (2000). Random Seas and Design of Maritime Structures, World Scientific.
- Hasselmann, K. et al. (1973). Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), Deutsches Hydrographisches Zeitschrift, 8(12). 1-95. (in German).
- Hiroi, I. (1919). On a method of estimating the force of waves, Memoirs of Eng. Faculty, Imperial Univ. Tokyo, X(1), 19.

- Hur, D.-S., Yeom, G.-S., and Bae, K.-S. (2006). The phase difference effects on 3-D structure of wave pressure acting on a composite breakwater, *J. KSCE*, 26(5B), 563-572. (in Korean).
- Hyundai Development Company (2009). Designe report of north breakwater 2-1 stage at Pohang Yongilman port.
- Ito, Y., Fujishima, M., and Kitatani, T. (1966). On the stability of breakwaters, *Rept. Port and Harbour Res. Inst.* 5(14), 53-61.
- Jung, J.-S., Kim, B.-H., Kim, H.-J. and Cho, Y.-S. (2010). Calculation of the peak-delay force reduction parameter of multi-directional random waves acting on a long caisson breakwater, *J. Korean Society of Water Resources Association*, 43(10), 843-850 (in Korean).
- Jung, J.-S., Lee, C. and Cho, Y.-S. (2011). Effects of directional asymmetry of random wave loads on long structures, *The 6th Int. Conf. on Asian and Pacific Coasts*, Hong Kong, 1695-1702.
- Jung, J.-S., Lee, C., and Cho, Y.-S. (2015). Prediction of wave force on a long structure of semi-infinite breakwater type considering diffraction, *J. Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 27(6), 424-433. (in Korean)
- Kim, B.-H., Park, W.-S., Lee, J.-W. and Jung, J.-S. (2010). Making long caisson breakwater using interlocking system, *the Magazine of the Korean Society of Civil Engineers*, 58(12), 65-72 (in Korean).
- Kisacik, D., Troch, P., van Bogaert, P. and Caspeele, R. (2014). Investigation of uplift impact forces on a vertical wall with an overhanging horizontal cantilever slab, *Coastal Engineering*, 90, 14-22.
- Lee, C., Jung J.-S. and Haller, M.C. (2010). Asymmetry in directional spreading function of random waves due to refraction, *ASCE J. Waterway, Port, Coast. Ocean Eng.*, 136(1), 1-9.
- Lee, C., Kim, M.K. and Cho Y.J. (2005). Wave diffraction and multi-reflection around breakwaters, *J. Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 17(4), 232-242 (in Korean).
- Lee, C. and Yoon, S.B. (2007). Internal generation of waves on an arc in a rectangular grid system, *Coastal Eng.*, 54, 357-368.
- Lee, C., Jung J.-S. and Haller, M.C. (2010). Asymmetry in directional spreading function of random waves due to refraction, *ASCE J. Waterway, Port, Coast. Ocean Eng.*, 136(1), 1-9.
- Lee, C., Jung, J.-S., Park, W.-S., and Cho, Y.-S. (2013). Random wave loads on a long detached breakwater considering diffraction, *Proc. 7th Int. Conf. Asian and Pacific Coasts (APAC2013)*, 671-676.
- Lee, C., Vu, V.N., and Jung, T.-H. (2014). Extended Boussinesq equations for waves in porous media: derivation of governing equations and generation of waves internally. *Proc. of 34th Int. Conf. on Coastal Engineering ICCE2014*, Seoul, Korea, 1-15.
- Madrigal, B.G. (1998). Wave obliquity and multidirectionality effect on composite vertical breakwater. Case of Study: Las Palmas, Gran Canaria.

- Martinelli, L., Lamberti, A. and Fgiraard, P. (2007). Effect of short-crestedness and obliquity on non-breaking and breaking wave forces applied to vertical casson breakwaters, *Coastal Eng. J., JSCE*, 49(2), 173-203.
- McIver, P. (1999). Water-wave diffraction by thin porous breakwater, *ASCE J. Waterway, Port, Coast. Ocean Eng.*, 125(2), 66-70.
- Minikin, R.R. (1950). *Winds, Waves and Maritime Structures*, Griffin, London, 38-39.
- Ministry of Oceans and Fisheries, *Coastal and Fishery Port Design Manual* (2015) (in Korean).
- Park, S.-H., Park, W.-S. and Kim, H.S. (2011a). Evaluation of structural behavior for interlocking breakwater, 2011 Joint Conference of KAOSTS, 1915-1918 (in Korean).
- Park, W.-S., Park S.-H. and Jang S.-C. (2011b). Dynamic analysis model of interlocking breakwater systems for wave loadings, 2011 Joint Conference of KAOSTS, 2247-2249 (in Korean).
- Penney, W.G. and Price, A.T. (1952). The diffraction theory of sea waves by breakwaters and the shelter afforded by breakwaters, *Philos. Trans. R. Soc. London*, A(244), 236-253.
- Radder, A.C. and Dingemans, M.W. (1985). Canonical equations for almost periodic, weakly nonlinear gravity waves, *Wave Motion*, 7, 473-485.
- Sollitt, C.K. and Cross, R.H. (1972). Wave transmission through permeable breakwater, *Proc. 13th Coastal Engineering Conference*, Vancouver, B.C. ASCE, New York, 1827-1846.
- Stevenson, T. (1886). *The design and construction of harbours* (3rd Ed.), Adam & Charles Blacks.
- Takahashi, S. (2002). Design of vertical breakwaters. *Port and Airport Res. Inst.*
- Takahashi, S. and Shimisako, K. (1990). Reduction of wave force on a long caisson of vertical breakwater and its stability. Report No. 685, *The Port and Harbour Res. Inst.* (in Japanese).
- Takayama, T. and Higashira, K. (2002). Statistical analysis on damage characteristics of breakwaters, *J. Ocean Development*. 18, 263-268. (in Japanese).
- Tanimoto, K., Moto, K., Ishizuka, S., and Goda, Y. (1976). An investigation on design wave force formulae of compsite-type breakwater, *Proc. 23rd Japanese Conf. Coastal Eng.* 11-16. (in Japanese).
- Traetteberg, A. (1968). The effects of wave crests on wave forces. *Proc. of the Int. Conf. on Coastal Eng.*, 11, 934-939.
- Vu, V.N., Lee, C., and Jung, T.-H. (2013). Development of internal generation of waves in Boussinesq equations for waves in a porous layer. *Proc. 39th KSCE. Kangwonland Convention Hotel*, 1-5.
- Yakhot, V. and Orszang, S.A. (1986). Renormalization group analysis of turbulence. I : Basic Theory. *J. of Scientific Computing*, 1(1), 1-51.
- Yu, X. (1995). Diffraction of water waves by porous breakwater. *ASCE J. Waterway, Port, Coast. Ocean Eng.*, 121(6), 275-282.