철재형 이안제 설계기법 연구 I. 설계 및 파압추정 단계

Design Methodology on the Steel-type Breakwater I. Design Procedure and Wave Pressure Estimation

권혁민* · 한유식** · 권오균*** · 고경래****

Kweon, Hyuck-Min · Han, Yu-Shik · Kwon, Oh Kyun · Ko, Kyoung-Lae

Abstract

The present study proposes a new estimation relationship for the transmission rate of the steel breakwater which is expected to make up for the weakness points in existing hard solution for shore protection. The steel breakwater consists of the wave dissipator of the dual horizontal plates, the supporting columns and their foundations, and thus its respective designs should also be conducted one by one. Furthermore, the breakwater has to ensure both functions of shore protection and structure stabilization. The study produced experimental data for the stability and safety investigation of the steel breakwater. The forces acting on the steel breakwater were classified into two categories, one is vertical up and down loads for the pile resistance and the other was maximum difference of the vertical load acting on horizontally different position for the torsion. The study applied the stability force produced by the summation of maximum pressure at each point and the safety force acting on each point simultaneously. The regular wave corresponding to the significant wave was utilized for measuring wave pressure and force. The study showed the method for the proper position of submerged upper plate by considering occurrence frequency of tide level. The design process finally determined by trial and error is proposed in the present study.

Key words : Shore protection, Detached steel breakwater, Wave pressure, Colume design, Pile design

요 지

해안선 보호대책을 위하여 기존의 강성공법의 단점을 보완한 철재형 이안제의 소파형식인 수평형 이열 조합판의 투과율 산정식이 제안됐다. 철재형 이안제는 소파제, 이를 지지하는 기둥 및 하부기초로 구성되어 있는 구조물이므로 각 요소 구조물에 대한 설계가 가능해야 한다. 그리고 철재형 이안제는 해안선 보호라는 기능성과 구조물로서의 안정성을 동시에 만족하여야 한다. 본 연구에서는 실패역을 대상으로 철재형 이안제의 축조를 위한 설계기법의 단계를 제안하고자 한다. 본 연구는 구조물의 안정성(stability)과 안전성(safety)을 검토하기 위하여 유공판에 작용하는 파압추정을 수행했다. 기초말뚝의 안정성 검토를 위해 파압계에 의한 지점별 최대하중을 총 파력으로 산출하는 방법을 적용했다. 이때, 연직 파력 산정을 위하여 유의파에 상응하는 규칙파를 사용했다. 적정 몰수심 조정을 위하여 조위발생밀도함수를 적용하여 최적 수심을 산정하는 방법을 보였다. 본 연구는 시행착오를 통하여 검토된 최종단계의 수순을 설계단계로써 제안하고자 한다.

핵심용어 : 해안선보호, 철재형 이안제, 파압, 기둥설계, 파일설계

1. 서 론

해안선 침식문제는 국내외적으로 중요한 사회적 문제로 대두되었을 뿐만 아니라 대책을 위한 각국의 요소기술이 서로 차이가 있을 수 있으므로 우리나라도 이에 대한 대비가 시급히 요구된다.

권혁민 등(2004)은 플로리다 일대의 해안선 보호 기술 및 정책에 대하여 보고한 바 있으며 이를 통하여 전략적 해안선

보호를 위한 여러 가지 요소기술을 소개했다. 그리고 조사결과로 여러가지 요소기술 중 양변에 의한 공법과 샌드바이패싱 기술이 연성공법으로써 강성공법보다 우선하여 수행되고 있음을 조사의 결과로써 보고한 바 있다. 그러나 모든 해안선 보호방법을 연성공법만으로 처리할 수 없으며 현지의 지형 및 파랑장 조건에 대하여 어떤 방법이 우선시 되느냐가 공법선정에서 중요하다.

권혁민 등(2008)은 기존의 중력식 이안제의 단점을 보완할

*정회원 · 경주대학교 철도건설환경공학과 부교수 (E-mail: hmkweon@kju.ac.kr)

**학생회원 · 경주대학교 토목공학과 박사과정

***계명대학교 토목공학과 교수

****경주대학교 조형예술학부 조교수

Fig. 1. Artist's rendering of the steel-type breakwater

수 있는 대안으로써 철재형 이안제를 제안한 바 있다. 실험적 연구를 통하여 소파제에 해당하는 다양한 수평형 이열 조합판의 투과율을 산정하였으며, 그 결과로 설계자들이 소파판의 폭을 결정할 수 있는 관계식을 제안했다. 소파판의 폭은 파장에 대하여 정리하였으며 해안선 보호, 정온역 확보, 레저 공간 확보 등의 목적에 따라 투과정도를 설정하여 결정되

로, 기존의 중력식 방파제보다 탁월하게 설계상 유연성을 가지고 있다고 할 수 있다. Fig. 1은 철재형 이안제의 축조 이미지를 보여준다. 철재형 이안제는 이 그림에 보인 바와 같이 소파판, 이를 지지하는 기둥 등의 상부구조와 바닥의 하부기초로 구성되어 있으므로 이들을 위한 별도의 설계기법 확립을 위한 수준이 필요하다.

본 연구 1에서는 파압추정 및 기초설계 단계를 중심으로 전체 설계단계를 제안한다. 하부기초 설계 단계는 권오균 등 (2011)이 논의한다.

2. 설계단계의 제안

철재형 이안제는 새로운 형식의 구조물이므로 합리적인 설계수준이 요구된다. 본 연구는 시행착오를 통하여 검토된 수준을 설계단계로써 제안하고자 한다. 설계단계는 점차적 세분화를 통하여 이루어 질 수 있다.

세분화는 기본적으로 ① 수리적 성능검토를 중심으로 ② 상부 구조설계와 ③ 하부 기초설계의 단계 및 수준으로 분류하였으며, 각각의 독립적 영역끼리 연결경로를 가지고 있다.

Fig. 2. Flow chart of the design steps for the steel-type breakwater

수리적 성능검토(단계①)로부터 상부구조와 하부구조 설계 단계(단계②와 단계③)에 필요한 외력조건을 생산하게 된다. Fig. 2는 철재형 이안제 설계단계의 세분화를 보인 것이다. 최적 배치안을 결정하기 위하여 계절별 최빈파를 대상으로 모래이동 여부를 검토한다.

단계 ①에서 파압 분포에 대한 검토는 2단계로 구분되어 있으며 구조물에 작용하는 시간별 최대파압 분포와 구조물에 작용하는 지점별 최대 하중으로 구분한다. 본 연구 I에서는 부재의 안정성과 구조물 전체의 안정성을 검토하기 위하여 시간최대 및 지점 최대 하중에 대한 정보를 동시에 생산한다. 외력은 ①과정에서 직접생산하는 경우가 파압산정 과정이며 연직외력 1과 연직외력 2가 해당된다. 하지만, 수평외력 1은 ①과정에서 설계파를 산정하면 ②과정에서 독립적으로 정보를 생산한다. 수평외력 2는 ②과정에서 생산하여 ③과정으로 전달한다.

3. 실험역 대상 설계 예

설계의 세분화 단계 및 경로를 보인 Fig. 2의 병렬 및 직렬을 혼합한 순서도의 타당성을 확인하기 위하여 실험역에 대하여 철재형 이안제를 설계하고자 한다. 설계단계 세분화는 수리적 성능 검토를 중심으로 기능성과 안정성의 관점에서 세분화한 것이다. 세분화에서 상부 구조물 설계 ②와 하부 기초 설계 ③은 안정성 확보를 위한 수순이며 수리적 성능 검토 ①단계로부터 수평 및 수직 하중에 대한 정보를 제공받는다.

3.1 소파형식에 의한 투과율 산정 실험

철재형 이안제의 소파형식으로 채택된 이열 수평형 조합판은 다른 형식으로 변경이 가능하다. 본 과정의 설계단계상 중요한 목표는 적절한 소파판의 폭을 결정하기 위함이다. 본 연구에서는 이열 수평형 조합판의 조건을 일부 변경하여 투과율 저하를 위한 실험과정을 보이고자 한다.

권혁민 등(2008)은 이열 수평형 조합판을 이용하여 상부에는 유공판, 하부에는 무공판인 경우에 대하여 불규칙파 실험을 수행했다. 본 연구 I에서는 소파판에 작용하는 외력을 저감시키기 위하여 권혁민 등의 성과에서 하부를 유공판으로 대체하여 실험을 수행했다. Fig. 3은 본 연구에서 수행될 상

Fig. 3. Dimension of horizontal dual plate

Table 1 Dimension of horizontal dual plate for the estimation of transmission rate

Dimension	Section	
	Section 1	Section 2
Width, w	0.60 m	0.90 m
Length, B	0.99 m	0.99 m
Interval, t_1	0.08 m	0.11 m
Interval, t_2	0.03 m	0.03 m
Porosity rate, P	7%	7%

부 유공판과 하부 유공판으로 조합된 수평형 이열 유공판의 모습을 나타낸 그림이며, 실험에 적용된 이열 유공판의 제원은 Table 1에 상세히 나타나 있다. 투과율 산정 실험을 위한 수평형 이열 유공판은 Fig. 3에 보인 바와 같이 권혁민 등(2008)이 실험한 조합판과 치수는 동일하지만, 하부판에 유공율이 존재한다는 점에서 차이가 있다.

Table 1에 보는 바와 같이 하판의 유공율은 상판과 동일하게 7%이며, 즉 면적이 7% 감소된 경우이다. 투과율 산정 실험은 권혁민 등(2008)과 동일한 조파시스템에서 같은 수준의 입사파 조건으로 실시하였으며 실험방법과 해석기법도 일치한다. Table 2는 실험조건과 결과를 정리한 것이며, 모든 경우에서의 파조건은 비쇄파대에 해당한다. Table 2에 보인 바와 같이 반사율 K_R 은 투과율 K_T 에 비하여 변화가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서 수행된 실험결과는 권혁민 등(2008)의 투과율과 반사율 결과와 비교하고자 한다. Fig. 4는 폭-파장비에 대한 투과율 K_T 과 반사율 K_R 에 대하여 본 연구결과와 권혁민 등(2008)이 제안한 각각의 직선식을 비교한 것이다. 유의파

Table 2 Wave conditions and results of analysis

Section	Case	Period $T_{1/3}$, sec	Wave height $H_{(1/3)}$, cm	Width-Wave length ratio $w/L_{(1/3)}$	Reflection rate K_R	Transmission rate K_T	Rate of energy loss K_{loss}
Section 1	case 1	1.491	11.947	0.202	0.397	0.525	0.567
	case 2	1.667	10.894	0.174	0.379	0.615	0.479
	case 3	1.849	13.709	0.152	0.360	0.656	0.441
	case 4	2.020	13.736	0.136	0.327	0.696	0.408
Section 2	case 1	1.487	11.134	0.305	0.448	0.357	0.672
	case 2	1.657	11.101	0.263	0.429	0.427	0.634
	case 3	1.868	10.766	0.225	0.430	0.495	0.571
	case 4	2.042	11.037	0.201	0.387	0.578	0.516

Fig. 4. Comparisons of Kweon et al.'s(2008) and present results on the dual plate of transmission and reflection rates

파장의 입사파조건 $L_{(1/3)}$ 에 대한 폭 w 의 비로 표시했다. 이 그림에서 속이 채워진 것과 비워있는 점들은 각각 투과율과 반사율을 나타내며, 각각의 실험결과에 대하여 회귀분석한 결과가 직선식 및 점선식으로 표시되어 있다. 이 그림에 보인 바와 같이 투과율 K_T 는 폭-파장비 $w/L_{(1/3)}=0.1$ 부근에서 본 연구와 권혁민 등(2008)의 연구 결과가 약 10%의 차이를 보이고 있다. 그러나 반사율 K_R 은 폭-파장비 0.1~0.35에서 두 결과의 차이가 미미한 것을 알 수 있다.

상부 유공판과 하부 유공판의 이열 수평형 조합판에 대한 실험 결과로부터 폭-파장비와 투과율 K_T 및 반사율 K_R 에 대한 관계식을 다음의 식(1) 및 식(2)와 같이 각각 얻을 수 있다.

$$K_T = -2.03w/L_{(1/3)} + 0.96 \quad (1)$$

$$K_R = 0.68w/L_{(1/3)} + 0.25 \quad (2)$$

투과율 K_T 의 식 (1)은 폭-파장비 $w/L_{(1/3)}=0$ 에 대하여 0.96을 보임으로써 K_T 절편 상에서 4%의 오차가 발생한다. 반사율 K_R 은 $w/L_{(1/3)}$ 가 증가함에 따라 커지는 경향을 보인다. 식 (1)과 식 (2)는 비쇄파대를 대상으로 실험한 결과이다.

본 연구에서 투과율에 대한 실험결과는 폭-파장비가 약 0.27보다 작은 경우에서 권혁민 등(2008)의 연구결과 보다 최대 약 10%작게 나타나고 있다. 이와 같이 하부판의 면적 7% 감소와 더불어 투과율도 약간 감소되고 있음을 실험적으로 확인하였으며, 이 결과를 설계과정에 반영하기로 한다.

실험역은 경상북도 울진군 오산항 인근 초산리 일대로 정했다. 대상지는 항공사진 분석을 통하여 후퇴 해안임을 확인했다. 본 연구 I에서는 3차원 다방향 쇄파 모델인 권혁민 (1988)의 수치해석 프로그램을 사용하여 천해 설계파를 산정했다. 천해 설계파고는 6.216 m이고 심해 설계파고 7.58 m에 대하여 약 82%에 해당하는 비쇄파조건이다. 주기는 12.21 sec이며(이동영 등, 2005) 주파향은 E 방향이다.

3.2 파압분포 검토

유공판에 작용하는 파압검토는 파일의 안정성과 판의 안정성을 파악하기 위한 기초자료의 생산을 위하여 수행됐다. 파

Table 3. Experimental condition for wave pressure measurement (scale: 1/30)

Dimension	Conditions of real ocean	Conditions of experiment
Width, w	12 m	0.4 m
Water depth, h	9 m	0.3 m
Period, T	12 sec	2.2 sec
Shallow water wave height, $H_{(1/3)}$	6.2 m	0.207 m

압분포 검토는 Fig. 2에 보인 바와 같이 연직 외력 1과 연직 외력 2를 생산하기 위한 단계이다. 파압은 철재형 이안제 구조물의 기둥과 수평형 이열 유공판에 작용하게 되지만 연구 I에서는 주로 수평판에 작용하는 파압분포를 검토하고자 한다.

본 연구 I에서는 파압분포 검토를 위하여 수리모형실험을 수행했다. 파압측정을 위한 수리모형실험의 축척은 실험수조의 조건을 고려하여 1/30로 정했다. Table 3은 실험역 조건에 대한 실험 조건을 보인 것이다. 본 실험은 불규칙파를 사용하지 않고 설계파고에 상응하는 규칙파로 파압을 산정하고자 한다. 본 규칙파가 불규칙파랑 내에 한파로서 위상차를 가지고 각각 내습했다고 가정한다. 이때, 파고 · 수심비 $H_{(1/3)}/h$ 가 약 0.7이며 조파가 가능하다고 판단된다. 실험역 조건과 실험 조건은 동일하게 환산심해 파형경사 $H'_0/L_0 = 0.025$ 가 되며 풍파영역에 해당됨을 확인했다.

파압측정은 Fig. 2에 보인 바와 같이 수리적 성능검토에서 상부 구조물 설계와 하부 기초 설계에 정보를 제공하기 위한 단계이며 수순에 해당한다. 파압을 측정하는 목적은 구조물의 안정성과 안전성을 확보하기 위한 정보를 제공하기 위함이다. 계측을 위하여 파압계와 로드셀을 동시에 측정하였으며 파압계 자료를 중심으로 로드셀의 자료는 검증자료로 활용하였다. 파압계의 자료는 분석을 통하여 지점별 최대파압으로부터 설계하중을 산정하였으며 시간별 최대하중은 각지점에 최대하중이 작용할 시 다른 지점에 작용하는 동시파압자료를 나열하였다. 아래의 각 절에서 상세히 설명하고자 한다.

3.3.1 파압측정을 위한 모형거치 및 실험방법

파압측정을 위해 모형 유공판의 형상은 Fig. 5와 같다. Fig. 5 (a)의 평면도에서 보는 바와 같이 3등분한 유공판은 2 cm 씩 이격하여 가운데 판을 수조의 양끝단 지점으로부터 자유롭게 했다. 수조 양끝단의 지점에 판이 연결되면 힘이 구속되므로 판에 작용하는 순수한 힘을 알 수 없다. 가운데 유공판에 작용하는 하중을 로드셀(용량 1.96 kN)을 이용하여 측정하였으며, Fig. 5의 정면도에 보이는 바와 같이 상판과 하판은 서로 연결되어 있지 않으며 각각 독립적으로 파압을 측정했다. Fig. 5의 정면도에 보인 바와 같이 상판의 물수심은 수심 0.3 m에 대하여 5%에 해당하는 0.015 m로 했다. 파압에 관한 자료를 얻기 위하여 파압계 5개를 이용하여 상판상부(Case 1), 상판하부(Case 2), 하판상부(Case 3), 하판하부(Case 4)에서의 파압을 각각 독립적으로 측정했다.

Fig. 6은 파압계가 설치된 위치를 보여주고 있다. 이 그림

(b) Experimental set up for wave pressure measurement(front view)

Case 1. Up pressure gauge at upper plate

Case 2. Down pressure gauge at upper plate

Case 3. Up pressure gauge at down plate

Case 4. Down pressure gauge at down plate

에 보는 바와 같이 파압계는 로드셀 연결봉을 피하여 약간 한쪽으로 치우쳐져 가운데판 수조벽 방향 끝단에서 0.118 m 가 되도록 폭 방향으로 5개를 설치했다. 유공판의 양끝에서 1 cm 안으로 P_1 번과 P_5 번 파압계 그리고 나머지 P_2 , P_3 , P_4 번 파압계는 9.5 cm 등간격으로 배치했다.

파고계 #1과 후부 파고계 #2는 반사파를 허용하지 않는 범위 내에서 실험을 수행하고자 했다.

본 실험은 상술한 바와 같이 가용한 파압계 5개를 활용하여 상판과 하판의 상하면을 독립적으로 파압을 계측하였으며 파압계설치 지점의 자료에 대하여 위상차 보정을 하여야 한다. 또한 타당한 실험임을 확인하기 위하여 투과율에 대하여 기존의 성과와 비교했다.

213

Fig. 7. Transmission rate according to relative depth, kh

본 실험에 의한 K_T 값의 타당성 확인을 위하여 파형의 시계열을 분석하고자 한다. Fig. 8은 파의 시계열과 파고결정을 위한 방법을 보인 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 투과율 산정을 위하여 시계열 중 가장 먼저 내습한 입사파와 가장 먼저 발생한 투과파를 대상으로 했다. 규칙파 실험에서의 투과율 K 는 입사파고가 목표파인 20.7 cm에 가장 유사한 20.2 cm의 경우를 대상으로 계산하였으며, 파압분포 검토에서도 해당파를 적용했다. 본 파는 실험역의 유의파에 해당하는 규칙파의 파고이나 실험상 한계파임을 알 수 있다. 즉, 파압 자료의 생산을 위하여 주어진 수심에 대하여 거의 최대파고 H_{max} 를 대상으로 하고 있음을 알 수 있다. 본 규칙파실험에

의한 투과율은 58%로써 불규칙파 실험식과 김성중의 수치계산결과보다 17%정도 작게 나타난다. 이는 Fig. 9에 보인 바와 같이 반사를 허용하지 않은 조건과 입사파형의 강비선형성에 기인한다고 추측된다. 즉 유공판 통과 후 투과파의 파형은 입사파에 비하여 선형적임을 알 수 있다. 따라서 입사파고가 크게 되며 투과파고는 상대적으로 작아져 K_T 가 작게 추산되고 있다. 특히, 투과파의 주기가 비선형성의 영향으로 약간 길어지고 경향을 보이고 있으며 향후 이러한 현상에 대한 면밀한 검토가 요구된다.

본 실험은 Fig. 6에 보인 바와 같이 5개의 파압계를 상판 상부에 부착시킨 후, 파압계로부터 동일한 입사파에 대하여 동일한 크기와 형태의 파형을 얻을 수 있는지 확인하기 위하여 5번 반복실험을 수행했다. 시간파압의 파형을 파압최대치의 시간대를 일치시켜 위상차를 보정한 것이다. 5회의 매 실험마다 실험자가 임의의 측정시간 시작점을 결정하므로 위상차가 발생한다. 이러한 위상차를 1회측의 최대 파압시간대에 2~5회의 최대 파압시간대를 인위적으로 일치시켰다. 본 실험에서는 상판상부, 상판하부, 하판상부, 하판하부를 유사한 파형이 발생하는지 확인한 후 위상차를 조정하여 모든 분석을 수행했다. 위상차를 보정한 후 매시간대 별 5회의 평균값을 계산했다. 다음 단계로써 상부와 하부에 작용하는 파압의 위상을 조정해야 한다.

Fig. 9는 상부판과 하부판의 상하부 파압의 위상을 일치시

(a) Experiment of transmission rate by regular wave

(b) Determination of wave height for estimation of transmission rate

Fig. 8. Experiment of transmission rate by regular wave

(a) Wave pressure at P_1 acting on the upper plate

(b) Wave pressure at P_1 acting on the down plate

Fig. 9. Wave pressure acting on the perforated plate

Table 4. Maximum pressure distribution acting on the plate

 $P[N/m^2]$

Plate	Working point of maximum	Vertical down lift wave pressure					Vertical up lift wave pressure				
		P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
Upper Plate	P_{1max}	289.1	-78.4	-139.2	42.1	-12.7	-216.6	-288.1	-372.4	403.8	524.3
	P_{2max}	-56.8	160.7	-173.5	174.4	121.5	8.8	-476.3	-493.9	102.9	310.7
	P_{3max}	108.8	156.8	163.7	165.6	230.3	-44.1	-472.4	-499.8	153.9	347.9
	P_{4max}	-69.6	-76.4	-258.7	465.5	420.4	-97.0	75.5	-172.5	-58.8	115.6
	P_{5max}	-139.2	-324.4	-392.0	377.3	527.2	248.9	-6.9	-73.5	74.5	-17.6
Down Plate	P_{1max}	174.4	2.9	-1.0	2.9	1.0	-118.6	-237.2	-215.6	-81.3	-332.2
	P_{2max}	83.3	235.2	84.3	181.3	-3.9	104.9	-306.7	-149.9	58.8	-187.2
	P_{3max}	-4.9	124.5	116.6	266.6	-99.0	-72.5	-214.6	-222.5	-99.0	-372.4
	P_{4max}	-37.2	-41.2	100.0	329.3	-86.2	-7.8	-163.7	-217.6	-118.6	-407.7
	P_{5max}	-4.9	-42.1	-16.7	126.4	105.8	-7.8	-163.7	-217.6	-118.6	-407.7

키는 과정이다. 위상차를 일치시키기 위하여 상판의 상부와 하부, 하판의 상부와 하부의 부호를 각각 동일하게 가정한 후 최대치를 일치시켰다. 일치된 위상을 가지고 하판에 작용하는 파압을 원래의 “-” 부호로 한 후 더하여 최종적으로 P_1 지점에 작용하는 파압을 산정했다. 다른 지점 $P_2 \sim P_5$ 도 P_1 과 동일하게 작용파압을 산정했다.

3.3.3 시간별 최대 파압분포

부재의 안전성을 해석하기 위하여 순간에 작용하는 파압분포를 파악하고자 한다. 본 연구에서는 각 지점에서 최대파압이 발생하는 시간대에 다른 파압계에 작용하는 파압을 나열하여 어떠한 경우가 가장 부재의 안전성에 영향을 미칠 것 인지를 파악하기 위한 기초자료를 제공하고자 한다. 단, 부재력을 파악하기 위하여 상판과 하판을 별도로 연직상향파압과 연직하향파압을 각각 따로 정리했다. 연직상향파압은 하중으로 연직하향파압은 양력으로 구조물에 각각 작용한다. Table 4는 각각의 파압 측정점에서 최대치가 발생한 시간대의 다른 파압계에 측정된 파압을 나열한 것이다. Table 4에서 보는 상판 P_{1max} 에서 $P_1 \sim P_5$ 는 P_1 점에 최대파압이 발생한 동일한 시간대에 작용한 파압을 의미한다. 이때, Fig. 8에 보인 바와 같이 최대파압이 작용하는 동일시간대에 상판의 상부와 하부에 동시에 작용하면서 이를 각 지점별로 합한 압력이 판에 작용하는 참값이다. 하지만, 외력에 대한 부재력의 안전율을 확보하기 위하여 독립적으로 작용하는 외력으로 취급한다.

연직 하향파압과 연직 상향파압의 지점에 작용하는 압력차는 부재의 비틀림 등에 영향을 줄 수 있다. 이때, 상판의 연직 하향파압 P_{4max} 경우에 $527.2 - (-392.0) = 919.2 \text{ N/m}^2$ 으로 최대차, 연직 상향파압 $-372.4 - 524.3 = -896.7 \text{ N/m}^2$ 으로 최대차, 하판의 P_{4max} 경우에 연직 하향파압 $329.3 - (-41.2) = 370.4 \text{ N/m}^2$ 으로 최대차, 상향파압 P_{2max} 경우에 $-306.7 - 104.9 = -411.6 \text{ N/m}^2$ 으로 최대차가 각각 보인다. Fig. 2에 보인 바와 같이 Table 4의 정보는 상부 구조물 설계를 위해 외력 2의 시간별 최대 파압조건으로써 제공된다.

3.3.4 지점별 최대 하중 분포

수평파력을 추산하기 위하여 습田(2008)는 최대파 H_{max} 그리고 주기는 유의파 주기 $T_{1/3}$ 을 사용했다. 하지만, 본 연구

에서 대상으로 하는 구조물의 소파판에 작용하는 하중은 상하방향으로 동시에 작용한다. 이는 근본적으로 수평면에 작용하면서 한쪽 방향에서만 작용하는 습田의 수평 파력식과 다르다. 본 실험은 $H_{1/3}$ 을 대상으로 했으나 Fig. 7의 실험파형에서 보인 바와 같이 실제로 거의 쇄파한계에 도달하여 H_{max} 에 근접하고 있다는 것을 알 수 있다. 향후 유의파에 의한 파력산정 방법에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

본 자료해석은 지점별 최대하중이 작용할 때 반대방향에서 작용하는 하중은 없는 것으로 가정한다. 즉, 지점별 최대 연직 하향파압이 작용할 때 상향파압은 0이며 이와 반대로 상향파압이 작용할 때 하향파압은 0로 가정한다. 단, 유공판을 일체형으로 간주하고 상판, 하판에 작용하는 지점별 최대 연직하향파압 및 최대 연직상향파압을 각각 합산하여 Table 5에 보이는 바와 같이 유공판에 작용하는 지점별 최대압력을 산정했다. 이 표에서 보는 바와 같이 각 지점별 최대하중 중에서 P_4 에서 연직 하향파압 794.1 N/m^2 , P_2 에서 연직 상향파압 -782.6 N/m^2 로 가장 크게 나타나고 있다. 이는 연직 하향파압은 내습파 진행방향으로 보면 비교적 판의 뒤쪽에 나타나며 연직 상향파압은 앞쪽에 크게 작용함을 알 수 있다.

지점별 최대 파압자료로부터 길이당 작용하는 파력을 산정하기 위하여 위치에 따른 파압크기를 Fig. 10과 같이 직선으로 연결했다. 위치지점은 Fig. 6에 보인 바와 같이 조합판 앞쪽에서부터 길이로 표시했다. Fig. 10에서 (a)의 지점별 최대 연직 하향파압 분포로부터 수평축과 직선 연결선내 면적을 구하면 197.284 N/m , 이고 동일하게 (b)는 199.695 N/m 이 된다. 이들을 각각 길이방향 0.32 m 로 곱하게 되면 유공

Table 5. Maximum pressure at each position acting on the plate

Working point	Maximum vertical down lift wave pressure per unit area $P(N/m^2)$	Maximum vertical up lift wave pressure per unit area $P(N/m^2)$
P_1	462.78	-335.53
P_2	396.41	-782.63
P_3	280.55	-721.87
P_4	794.12	-177.22
P_5	633.04	-425.07

Fig. 10. Maximum pressure distribution at each position

Table 6. Maximum force acting on the horizontal dual plate

	Load	Maximum vertical down lift force	Maximum vertical up lift force
Experiment section	Total acting load per length	197.284 N/m	199.695 N/m
	Total load $W(40\text{ cm}) \times L(32\text{ cm})$	63.122 N	-63.896 N
Real ocean section	Total acting load per length	177.56 kN/m	179.72 kN/m
	Total load $W(12\text{ m}) \times L(9\text{ m})$	1598.01 kN	-1617.50 kN

판에 작용하는 최대 연직 하향력 63.122 N, 최대 연직 상향력 -63.896 N을 얻는다. Table 6은 실험단면과 실제역 단면에 작용하는 최대하중을 보인다.

실험단면인 유공판에 작용하는 최대 하중에 대하여 상부 구조물 설계 및 하부 기초설계에 적용되는 연직 외력을 산정하기 위해 Froude 상사법칙을 적용하면 Table 6에서 보는 바와 같이 최대연직 상향력 1598.01 kN, 최대 연직상향력은 -1617.50 kN이 작용하게 된다. 이 표에서 보는 바와 같이 실험역 단면에 작용하는 최대 파력은 연직 하향력과 상향력이 거의 유사함을 알 수 있다.

3.3.5 로드셀에 의한 파력 측정

파력에 의한 이열형 수평판에 작용하는 하중을 측정하여 상부구조물 설계와 하부기초 설계에 반영하기위하여 파압계를 이용하여 파력을 측정했다. 파압계측에 의한 파력을 이용하여 산정한 최대하중을 비교·분석하기 위하여 파압계측과 동시에 로드셀을 이용하여 파압과 하중을 동시에 측정하였으며 상판 상부 5회, 상판 하부 5회 하판 상부 5회, 하판 하부 5회를 측정하였으며, Fig. 6에 보인 바와 같이 수평형 이열 유공판 거치 도면에서 상판과 하판을 동시에 측정 하였으므로 총 상판 20회, 하판 20회의 연직파력이 수평형 이열 유공판에 작용하는 하중을 측정했다. 측정된 결과는 Fig. 11과 같다. 이 그림 (a)와 (b)는 각각 20회의 측정결과 중에서 연직상향력 최대와 연직하향력 최대 하중이 작용하는 경우의 자료를 선택하여 보인 것이다. 본 실험에서 사용된 로드셀은 초당 1개의 자료를 취득하므로 20회의 반복실험을 통하여 초당 20개의 자료를 획득하도록 공리하여 수행했다. 이 그림으로부터 파력에 의한 이열형 유공판의 상판과 하판에 작용하

(a) Measurement of load cell(force) at upper plate

(b) Measurement of load cell(force) at down plate

Fig. 11. Measurement of load cell

는 연직 하향력 및 연직 상향력의 최대값을 각각 산정했다. 파압측정을 위한 실험에서의 파압계측을 이용한 측정값과 로드셀을 이용한 측정값을 비교하기 위하여 수평형 이열 유

Table 7. Maximum load acting on horizontal dual plate

	Dimension (m)	Maximum vertical down lift force	Maximum vertical up lift force
Experiment section	0.3×0.4	63.406 N	-51.185 N
Real section	9×12	1712.06 kN	-1382.006 kN

공판에 작용하는 최대하중을 산정했다. 산정방법은 유공판을 일체형으로 간주하고 상판과 하판에 작용하는 파력에 의한 최대 하중을 합산한 결과 수평형 이열 유공판에 작용되는 하중을 Table 7과 같이 산정했다. 파력에 의한 이열형 수평판에 작용하는 로드셀에 의한 측정 최대 하중 값은 실험단면에서 산정된 유공판에 작용하는 최대 하중에 Froude 상사법칙을 적용하면, 이 표에서 보는 바와 같이 최대연직하향력은 1712.1 kN이고 최대 연직상향력은 -1382.0 kN이 된다.

3.3.6 파력측정의 비교

파력에 의한 이열형 수평판에 작용하는 최대하중을 파압계에 의한 측정 값과 로드셀에 의한 측정 값을 비교한 결과 Table 8에서 보는 바와 같이 최대 연직 하향력에서는 로드셀에 의한 값이 114.052 kN 크게 측정되었으며 최대 연직 상향력의 경우는 파압계에 의한 값이 235.494 kN 더 크게 측정됐다. 실험 단면에서의 최대 연직 하향력은 파압계에 의한 계측 값과 로드셀에 의한 계측값은 비슷한 값을 보였으며, 최대 연직 상향력은 파압계에 의한 계측값이 로드셀에 의한 계측값 보다 12.711 N이 더 크게 나오는 것을 알 수 있다. 이는 규칙파에 의한 파압계 실험에서 상판 및 하판에 작용하는 최대 연직 하향력 및 상향력은 비슷한 값을 나타낸 반면, 규칙파에 의한 로드셀 실험에서 상판 및 하판 최대 연직 하향력은 비슷한 값을 보였으며, 최대 연직 하향력 측정시 상판 보다 하판이 약 14.7 N정도 낮게 측정되는 것을 알 수 있다.

본 연구에서 제안하는 철재형 이안제의 기초부는 말뚝으로 형성되어 있으며 이의 안정성을 확보하기 위하여 지점별 최대하중으로 추정한 파압계 산출 값 중 최대 연직 상향력 -1617.5 kN을 설계에 반영하기로 한다.

4. 물수심 조정을 위한 조위발생빈도분포 해석

김성중(2006)은 상판의 물수심 d 가 수심 d_s 에 대하여 $0.05d_s \sim 0.1d_s$ 의 범위 내에서 투과율이 전 주파수영역에 걸쳐

서 유사하다는 것을 보였다. 식 (1)에 보인 투과율 산정식은 $0.05d_s$ 의 조건에서 얻어진 실험식이므로 조위변화로 인하여 가변수심이 발생하는 실험역에 대하여 $0.05d_s \sim 0.1d_s$ 조건이 최대 대한 만족되도록 물수심을 조정할 필요가 있다.

조위발생빈도분포의 분석에 사용된 쌍봉형 확률밀도함수는 권혁민 등(2006)이 사용한 2개의 정규분포함수의 합의 형태로 표시된 식 (3)과 같은 꼴로 표현했다. 사용된 정규분포의 함수는 각 경우에 대하여 면적비가 같지 않아도 된다. 수위 변동량 의 채현성을 높이기 위하여 각각의 정규분포가 미치는 영향 정도도 변수화하여 추정했다.

$$P(\eta) = a_D \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\eta - \mu_D}{\sigma_D}\right)^2\right] + a_U \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\eta - \mu_U}{\sigma_U}\right)^2\right] \quad (3)$$

여기서, $a_D = \frac{a_1}{\sigma_D \sqrt{2\pi}}$, $a_U = \frac{a_2}{\sigma_U \sqrt{2\pi}}$ 는 각각 저수위, 고수위 분포함수의 영향을 나타내 주는 모형 변수이며 μ_D , μ_U , σ_D , σ_U 는 각각 저수위, 고수위 분포함수의 평균과 표준편차를 나타낸다. 단, 모형 변수는 $a_1 + a_2 = 1$ 의 관계를 만족시키며 η 는 조위자료 η_o 로부터 평균값 $\bar{\eta}_o$ 를 각각 뺀 조위값의 시계열이다.

철재형 이안제 수심 9 m 지역의 철재형 이안제 물수심은 45 cm이며, 해양수산부 (2005)를 참조하여 철재형 이안제 실험 후보지역 주변의 후포지역의 평균조위(MSL) 13.5 cm을 적용하였다. 조위 발생확률밀도함수에 의한 물수심 결정 방법은 상기한 바와 같이 d 는 $0.05d_s \sim 0.1d_s$ 에서 투과율이 전 주파수영역에 걸쳐서 유사하므로 조위발생확률밀도함수 내에서 식 (4)와 같은 관계식을 설정한다.

$$\int_{\eta_{\min}}^{\eta_{\max}} P(\eta) = A(\max) \quad (4)$$

식 (4)는 $\eta_{\max} - \eta_{\min} = 5d_s$ 를 만족하며 분포 내에서 최대면적 $A(\max)$ 가 되도록 $\eta_{\max}$, $\eta_{\min}$ 을 구한다.

수심 $h_s = 9$ m에 대하여 $\eta_{\min} = -\infty$ 부터 $\eta_{\max} = \infty$ 까지 $P(\eta)$ 의 면적을 구할 수 있다. 순차적으로 $\eta_{\min}$ 을 증가시켜 면적이 증가하다가 감소하는 $\eta_{\min}$ 에 대하여 최대면적으로 판단했다. 조위발생확률밀도함수 내에서 식 (5)를 만족하는 $\eta_{\min} = -23$ cm, $\eta_{\max} = 22$ cm이며, 96.5%의 최대면적값을 나타내었다. 조위발생빈도 분포는 η 는 조위자료 η_o 로부터 평균값 $\bar{\eta}_o$ 를 각각 뺀 조위값의 시계열이므로 평균조위(MSL)를 고려하여야 한다. 평균조위를 고려한 $\eta_{\min}$, $\eta_{\max}$ 는 $\eta_{\min} = -0.23 + 0.135 = -0.095$ m, $\eta_{\max} = 0.22 + 0.135 = 0.355$ m가 되며, 철재형 이안제의 물수

Table 8. Comparison of wave pressure gauge and load cell's results of maximum load acting on horizontal dual plate

	Experiment according to measurement of wave pressure		Experiment according to load cell	
	Size of experiment setup	Real size	Size of experimental setup	Real size
Dimension(m×m)	0.3 × 0.4	9 × 12	0.3 × 0.4	9 × 12
Maximum vertical down lift force	63.122 N	1598.008 kN	63.41 N	1712.060 kN
Maximum vertical up lift force	-63.896 N	-1617.500 kN	-51.185 N	-1382.006 kN

심은 조위발생확률밀도함수 내에서의 최대면적 $A(\max)$ 가 96.5%일때 $\eta_{\min} = -0.095$ m를 기준으로 식 (5)에 보이는 바와 같다.

$$h_{\min} + d = 0.05d_s \quad (5)$$

여기서, 최저 물수심 $d_s = 45$ cm이며, 실패역 물수심 d 를 관계식 (5)에 의해 계산하면 0.545 m 되며, 이는 Approx. LLW로부터 수심이 된다.

5. 결론 및 요약

본 연구에서는 철재형 이안제의 설계기법 단계를 제안하고, 본 구조물이 시험 시공될 현장에 대한 실시설계의 사례를 논의했다. 본 구조물이 설치될 예정인 경상북도 울진군 오산항 인근 해역에 대한 구조물의 수리모형실험을 실시하여 구조물의 안정성(stability)과 안전성(safety)을 파악하기 위한 파압분포 및 작용하중을 생산했다. 본 연구는 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 새로운 형식인 철재형 이안제의 설계과정을 위해 본 연구에서 제안한 바와 같이 수리적 성능검토, 상부 구조물 설계, 하부 기초 설계로 분리하여 진행하면서 상호 관련 자료를 주고받는 직·병렬 혼합형 방법을 제안했다.
2. 구조물의 안정성을 검토하기 위하여 유공판에 작용하는 하중을 검토하였으며 연직상향력은 실패역 파랑이 확률과정(stochastic process)임을 염두에 두고 유의파에 상응하는 규칙파가 작용하는 지점별 최대파압을 대상으로 하중을 산정했다. 이때 파 진행방향으로 판에 작용하는 최대파압은 지점별로 서로 다른 강도로 나타난다.
3. 부재의 안전성 파악을 위하여 시간별 최대하중이 작용하는 경우를 대상으로 하향력과 상향력의 최대차가 발생하는 자료를 생산했다.
4. 철재형 이안제의 소파장치에 해당하는 수평형 이열 유공판의 최적 물수심 결정을 위하여 조위발생밀도함수를 적용하여 성능지속시간을 향상시킬 수 있는 방법을 제안했다. 단, 물수심이 수심의 5%-10%사이에서 투과율이 유사하다는 결과에 근거하고 있다.

5. 수평형 이열 유공판 조합에 있어서 기존의 성과보다 투과율이 약간 작은 유공상판-유공하판의 투과율 산정식을 제시했다.
6. 철재형 이안제의 설계과정 중 수리적 성능 검토 과정은 소파판 폭, 유공율, 물수심 등 제원을 공급할 수 있으며 구조 및 지반 검토과정을 위해 외력정보를 제공할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 지역특성화연구개발사업의 연구비지원(05지역특성 B04-01)에 의해 수행되었음을 밝히며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 권혁민 (1998) 방향 스펙트럼 파랑에 대한 3차원 쇄파변형 모델. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제18권, 제II-6호, pp. 591-599.
- 권혁민, 박현석, 안경모, 천세현 (2006) 신뢰성 해석에 의한 우리나라 해역별 기대월파확률 특성비교, **대한토목학회지**, 제26권, 제1B호, p. 400.
- 권혁민, 김영학, 기성태 (2008) 수평형 이열 조합판의 투과율 산정을 위한 실험적 연구, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제4B호, pp. 421-428.
- 권오균, 오세봉, 권혁민 (2011) 철재형 이안제 설계기법 연구 II. 하부기초 설계 단계, **한국방재학회논문집**, 한국방재학회, 제11권, 제3호, pp. 219-228
- 김성중 (2006) **3중 유공판 방파제의 성능 평가**, 공학석사 학위논문, 서울산업대학교.
- 이동영, 전기천 등 (2005) **심해설계파 추정 보고서II**, 연구보고서, 한국해양연구원 pp. H-8
- 해양수산부 (2005) **항만 및 여항 설계기준**, 표(6-5) 한국 연안의 조석의 비조화상수, p. 168
- 合田良實 (2008) **耐波工學**. 鹿島出版社, p. 104.

◎ 논문접수일 : 11년 03월 23일
 ◎ 심사의뢰일 : 11년 04월 07일
 ◎ 심사완료일 : 11년 05월 02일