철재형 이안제의 설계외력 산정기법 검증을 위한 실험

Verification of the Design Force Estimation Method
for the Steel-type Breakwater in the Real Sea

권혁민* · 권오균** · 한유식*** · 윤강훈****

Kweon, Hyuck Min · Kwon, Oh Kyun · Han, Yu Sik · Yoon, Kang Hun

Abstract

The steel-type breakwater has the merits of structural simplicity and passing the long period wave for beach accretion. So, it has been expected to be a key tool for the strategic beach protection technology. The design methodology of the steel-type breakwater was published by Kweon et al.(2011), Kwon et al.(2011), Lee et al.(2011). For the analysis of the resistant friction load acting on the pile, Kweon et al. proposed the estimation method of the design up lift force acting on the dual horizontal plate. With a train of regular wave corresponding to the significant one, they integrated the distribution of the biggest pressure at each point. For the verification of the estimation method of the load on the pile, the study is carried out the experiment in a real sea state. Moreover, the construction procedure, the displacement, joint checking and removal possibility of the steel-type breakwater are discussed. The constructed breakwater has the horizontal wave energy dissipator of 9 m×12 m(length×width) and pile diameter of 711 mm, thickness of 12 mm, length of 23.2 m. The construction took about 8 hours for 1 cell composed of 9 piles and 1 horizontal dual plate. There is a little vertical and horizontal displacement of pile attacked by the maximum wave height of 5.83 m. The removal of 1 cell took about 2 days. This study shows the merits of the easier design, faster construction and simpler removal of the steel-type breakwater. The structure could be estimated as a stable one because it has the horizontal dissipator on which acting a little compression and a little uplift force due to the perforated holes. Moreover, the easier removal could make it possible to manage the coastal line as depending on the conditions of erosion or accretion sand volume.

Key words : steel-type breakwater, beach accretion, strategic beach protection, real sea, horizontal wave energy dissipator

요 지

철재형 이안제는 구조형식이 단조롭고 설계가 용이하며 퇴적과랑을 통과시키는 등 장점이 많아 기존의 중력식 방파제의 대안으로서 기대된다. 철재형 이안제의 설계외력은 권혁민 등(2011), 권오균 등(2011), 이정렬 등(2011)이 보고한 바 있다. 권혁민 등(2011)은 철재형 이안제의 설계외력을 산정함에 있어서 유의파고에 해당하는 규칙파를 사용하고 말뚝의 심도설계를 위한 연직상향력은 수평판의 지점별 최대압력분포로부터 산정할 것을 제안하였다. 본 연구는 제안된 외력산정기법의 실험적 검증을 위하여 수행되었다. 또한 본 연구에서는 설계상 가능한 구조물에 대하여 실험을 통하여 축조 과정 기술 확보, 파괴 여부 판정, 철거 가능성을 검증하고자 한다. 철재형 이안제에 사용된 소파판은 9 m×12 m(길이×폭)의 크기이고, 강관말뚝은 직경 711 mm, 두께 12 mm, 길이 23.2 m이다. 실험 결과, 본 구조물의 축조는 기존의 장비로 약 8시간 만에 1셀의 시공이 가능하고, 유의파고 5.83 m의 외력에 대하여 말뚝의 수평 및 수직 상호변위는 매우 작게 발생하였으며, 철거는 양호한 기후조건에서 2일이 소요되었다. 본 실험을 통하여 권혁민 등(2011)의 철재형 이안제에 작용하는 외력산정기법이 유용하며 말뚝의 인발력에 대한 마찰 안전율이 약 2.0에 상당하다는 것을 알았다. 또한 철재형 이안제는 설계, 시공, 철거가 간단하며, 소파판의 착탈식 운영방식으로 해안의 사정에 따라 모래포집량 조절이 가능할 수 있다는 기대를 높게 되었다.

핵심용어 : 철재형 이안제, 실험, 수평 및 수직 상호 변위, 착탈식 운영, 모래포집량

1. 서 론

국내외적으로 해안선 침식은 갈수록 광범위한 지역에 발생

하고 있다. 우리나라는 최근 들어 해안선 구조물 또는 평균 해수면 상승 등의 요인으로 인한 해안선 침식 지역이 점점 많아지고 있는 추세이다. 하지만, 현재 해안선 침식방지를 위

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

**정회원 · 계명대학교 토목공학과 교수

***정회원 · 경성대학교 토목공학과 박사과정

****정회원 · 한국방재학회 부회장

한 전략과 기술의 부재로 인하여 효과적 대응이 어려운 상황이다. 우리나라에서는 해안침식 방지공법으로 중력식 이안제를 가장 많이 채택하여 왔다. 또한 잠제, 돌제 형식도 최근 들어 시공된 바 있다. 기존의 중력식 이안제는 횡단표사(cross sedimentation)의 이동을 방해하는 형식이므로 장주기파에 의한 해안방향 표사이동이 자유롭지 못한 단점이 있다. 잠제는 광폭으로 축조하거나 수심이 깊은 경우는 적용이 곤란하며, 쇄파를 유도하므로 연안류 또는 이안류 등 기대하지 않는 흐름이 발생하는 등의 단점이 있다. 돌제는 기존의 방파제와 같이 연안표사를 방해하므로 도류제 목적으로 사용하지 않는 한 사용이 제한적이라고 할 수 있다. 이와 같이 기존의 모든 구조물은 이동 및 철거가 현실적으로 불가능하여, 복잡하고 어려운 해안선 방어를 위한 전략기술로 충분하다고 할 수 없다.

이에 비하여 철재형 이안제는 해수유통 원활, 퇴적파랑 통과, 축조비용 절감, 축조기간 단축, 소파판의 착탈 가능, 이동 가능, 해수면 상승에 따른 즉각 대응 가능, 수평파력이 거의 작용하지 않는 점 등 기능적·구조적 장점이 많아 전략적 해안선 보호 및 파 제어의 최신기술로 주목받고 있다. 권혁민 등(2008)은 철재형 이안제의 소파판으로 적용할 수평판의 파랑에너지 감쇠능력을 알아보기 위하여 수리모형실험을 수행하였다. 권혁민 등(2011), 권오균 등(2011), 이정열 등(2011)은 외력산정기법, 하부구조검토방법, 배치방법 등 철재형 이안제의 설계기법에 대하여 보고한 바 있다. 철재형 이안제는 해안선 보호 목적 뿐 만 아니라 파 제어 목적으로도 사용이 가능하다. Kweon et al. (2011)은 해운대의 이안류 크기가 2열로 배치된 철재형 이안제에 의해 저감될 수 있다는 가능성을 수치모델로 보인 바 있다.

권혁민 등(2011)은 철재형 이안제의 수평형 이열 조합판에 작용하는 상향력을 유의파에 상당하는 규칙파로 수리모형실험을 수행하여 산정할 것을 제안하였다. 이때, 폭방향 지점별 최대파압분포를 적분한 외력을 이용하도록 하였다. 본 방법은 파랑의 확률과정(stochastic process)을 모사하면서 불규칙파를 사용할 경우 발생할 가능성이 높은 충격파(shocking wave)에 의한 순간최대파압발생을 피하기 위함이다. 즉, 충격파는 구조물의 안전성(safety)에 영향을 주나 본 외력산정은 안정성(stability)을 검토하기 위하여 산정하는 것이다. 철재형 이안제의 수평형 소파판에 작용하는 상향력은 인발력으로 파일에 작용하며 이에 대하여 지반 마찰력으로 지지되는 파일의 저항크기는 직경과 심도로 결정된다.

본 연구는 권혁민 등(2011)이 제안한 외력산정방법에 의해 설계 및 시공된 철재형 이안제의 시험 중 내습한 설계파 상당의 파력에 의해 발생한 변위를 계측하여 이를 논의하고자 한다. 또한 본 실험역 시험을 통하여 철재형 이안제의 축조 및 철거 과정 등을 확보하고자 한다.

2. 철재형 이안제의 소파판 제작 및 운반

철재형 이안제의 설계과정 및 설계도면은 기존의 연구(권혁민 등, 2011; 권오균 등, 2011; 이정열 등, 2011)에서 보인

사진 1. 펀칭작업이 완료된 수평판의 적재 모습

사진 2. 수평판과 가로보 및 세로보가 용접된 상황

사진 3. 말뚝을 관통시킬 소켓 용접 모습

바 있으며, 실험역 축조를 위한 단면설계는 권오균 등(2011)에서 나타내었다. 수평판은 크기가 9m×12m×20mm(길이×폭×두께)인 강판으로 제작되었고, 수평판의 가공은 부산 다대포에 소재하는 미포조선에서 수행되었다. 사진 1은 수평판의 유공설치를 위하여 펀칭작업 후 적재되어 있는 모습을 보인 것이다. 사진 2와 3은 상부 설치 수평판 1개와 가로보(빔)와 세로보를 용접한 상태와 말뚝을 관통시킬 소켓을 용접하고 있는 모습을 보여준다. 실제 현장에 구조물로 설치될 때에는 사진 2의 반대방향이 된다.

강관말뚝은 길이 24m로 용접 연결하여 수평형 소파판과 같이 바지에 적재하여 올린 현장까지 이동하였다. 현장이동은 운반 바지선(43.22m×18.4m×2.5m, 29.62m×15m×2.20m) 2대를 중심으로 예인선 1대를 이용하였다. 바지선 2대 중 큰 것은 자체 이동이 가능하다. 또한 바지선에는 크레인이 부착되어 있으며, 크레인①은 용량 125 ton, 붐길이 27m, 627톤양이고, 크레인②는 용량 80 ton, 붐길이 36.58m, 625톤양이다. V/H 진동해머와 발전기 250kw 1대는 육상으로 운반하여 울진군 오산항에서 바지선에 적재하였다.

3. 철재형 이안제의 현장 축조

철재형 이안제의 설계단면은 1) 당해 연도에 설계파급의

(a) 철재형 이안제의 개요도

(b) 유공판과 기둥 연결부

(c) 종방향 및 횡방향 보강재

(d) 상하부 소파판

그림 1. 실해역 시공단면의 설계도

파가 내습할 가능성 희박, 2) 인근 소형선박 통행시 인식표 식물이 없을 시 사고 위험 등의 이유로 그림 1과 같이 관입 심도를 권오균 등(2011)에서 보인 파일의 심도를 작게 하고 상부에 일부 노출되도록 시공하였다. 그림 1은 실해역 시공 단면의 설계도를 보인 것이다. 그림 1(b)에 보이는 바와 같이 수평판과 일체로 된 소켓 부분의 높이는 설계수위(H.W.L.)에 일치하도록 하였다. 설계수위상에 노출되도록 한 것은 연결부의 시공공정을 명확하게 보이기 위함이며 시공 후 수평판과 말뚝의 연결부를 목측으로도 관찰이 가능하도록 하기 위함이다. 하지만, 실공사에 적용할 경우는 소켓부분도 설계수위보다 아래에 위치하는 것이 좋을 것이다. 수평판과 파일의 연결방법은 3.2절에 자세히 보이고자 한다.

3.1 수평형 소파판과 말뚝의 시공 순서

철재형 이안제의 현장 축조는 수평형 소파판의 4곳을 케이 블로 연결하여 크레인으로 매달아 입수전 수평상태를 유지하고, 다른 크레인이 말뚝을 수면위로 들어 올려 기준으로 정한 소켓을 통하여 관입하였고, 순차적으로 나머지 말뚝들을 관입하는 순서로 수행하였다. 말뚝관입 작업을 하면서 동시에 정해진 각각의 위치에서 관측을 통하여 수평판의 방향과 몰수심 측정을 하면서 작업을 진행하였다. 그림 2는 철재형 이

철재형 이안제의 설계외력 산정기법 검증을 위한 실해역 시험

그림 2. 철재형 이안제의 축조를 위한 말뚝(P1~P9)과 및 고리걸개(C1~C4) 위치도

안제의 축조 위치, 수평판에서의 말뚝위치, 수평판을 고정하기 위한 고리 위치를 표시한 개략도이다. 이 그림에서 CP. 6은 육상측량을 통하여 미리 정해둔 위치이다.

최초로 시공되는 기준 말뚝의 위치는 외해 쪽의 길이방향 중심에 해당하는 P8로 정했다. P8지점은 수평 소파판의 정방향 설치를 위한 좌우방향의 선회작업이 가장 쉬운 지점이다. 사진 4는 크레인①이 수평 소파판을 수면으로부터 가까운 공중에 들고 있고, 크레인②가 기준위치에 파일을 관입하고 있

(a) 수평 소파판의 인양

(b) 기준 말뚝(P8)의 관입

사진 4. 2대의 크레인을 이용하여 수평형 소파판 설치와 기준파일 (P8)을 관입하는 모습

(a)

(b)

사진 5. 육상기준점으로부터 수평판의 몰수심과 설치방향 결정을 위한 측량 모습

는 모습을 보여준다. 해상작업은 육상에서 관측자와 함께 진행하며 사진 5는 육상 기준점에서 몰수심과 수평판의 방향을 결정하기 위한 측량작업 모습을 보인 것이다.

철재형 이안제의 축조과정에서 상판의 몰수심과 방향을 결정하기 위하여 고정점인 육상 기준점으로부터 해상을 바라보며 측량을 실시하였다. 이를 위하여 사전에 현지답사를 통하여 각 말뚝의 상대위치를 좌표로 파악한 후, 사진 5에 보인 바와 같이 인근항의 DL값을 이용하여 EL값과의 관계를 설정하였다. 설치하고자 하는 위치에서 가까운 육상에서 광파기 (SET530RK)로 측량을 수행하면서 설계상의 상판의 몰수심과 설치방향의 정위치를 확인하였다. 몰수심 추정 방법에 대해서는 권혁민 등(2011)에 자세히 언급하였다.

강관말뚝 시공축조를 위한 말뚝번호는 그림 2에 나타나 있으며, 작업순서는 P8→P7→P9→P1→P2→P3→P4→P5→P6이다. 수평형 소파판의 가거치를 위하여 크레인①로 외해측 중앙에 위치한 강관말뚝(P8)을 최초 기준으로 시공하였다. 소파판과 기준 강관말뚝(P8)을 몰수심 관측 후, 산소용접으로 구멍을 뚫어 핀을 체결하였고, 외해측 2개의 강관말뚝(P7, P9)도 같은 방법으로 시공하였다. 3개 지점(P7, P8, P9)의 강관말뚝이 핀으로 체결이 완료되면, 강관말뚝 이동시 크레인②의 움직임을 자유롭게 하기 위하여 사진 4에서 보는 바와 같이 소파판을 들고 있는 크레인② 와이어로프(C3,C4)를 분리하여

내해측 3개 지점(P1, P2, P3)에 강관말뚝을 관입한다. 내해측 강관말뚝(P1, P2, P3)의 시공이 완료된 후 몰수심을 관측하였다. 크레인① 와이어로프(C1,C2지점)를 사용하여 정확한 DL위치에 소파판이 설치되도록 수직방향으로 조정한다. 정확한 DL의 정위치에 유도되면, 소파판 캡의 핀설치 구멍을 통해 강관말뚝에 구멍을 뚫어 핀을 체결한다. 소파판과 강관말뚝(P7, P8, P9, P1, P2, P3) 부분이 핀으로 고정되면, 소파판은 상하이동 및 좌우 움직임이 불가능하게 된다. 따라서 크레인① 와이어로프(C1, C2지점)를 분리하고, 정위치 지점인 P4, P5, P6 지점에 강관말뚝을 관입한 다음, 핀으로 수평판과 체결한다.

3.2 말뚝과 수평형 소파판의 연결구조

상술한 바와 같이 말뚝과 수평형 소파판은 핀으로 연결되며, 연결구조의 개념적 도면은 그림 3과 같다. 연결을 위한 기본 구성은 수평판과 일체형으로 제작된 소켓 11,12,13과 말뚝 그리고 핀 51, 52가 있다. 소켓의 외부에는 덧댐을 한 60이 있으며, 구멍은 육상제작시 미리 설치된 것이다. 덧댐을 한 이유는 핀 51 또는 52가 말뚝의 구멍과 접할 때 하부방향으로 선적 하중을 분배시키기 위하여 핀이 설치되는 방향의 접합선 길이를 길게 하기 위함이다. 최종적으로 판과 덧댐 구멍사이에 링 51a와 51b를 끼워 넣는다. 현장에서 설치하는 구멍은 A2와 O2이며 산소용접기로 가능하다. 소켓의 구멍 A1과 O1은 육상에서 미리 설치된 것이다. 말뚝 51과 52에는 stopper 역할을 하는 51a와 52a가 있다. 핀 51의 직경은 100 mm이며 길이는 1,000 mm이다. 연결구조 아래는 31과 31b와 같이 I형강으로 가로보가 설치되어 있다.

연결핀은 2인이 1조가 되어 인력으로 소켓의 구멍과 현장에서 말뚝에 설치한 구멍을 관통하여 설치한다. 이때 작업의 편리성을 위하여 핀의 전면부에 철사를 부착시켜 먼저 구멍을 통과하도록 한 후 반대쪽에서 당기면서 핀의 몸통이 통과되도록 한다. 사진 6은 수평형 소파판과 말뚝을 핀으로 연결하는 모습을 보여준다.

철재형 이안제 시공에 사용된 장비는 크레인①, 크레인②,

그림 3. 평형 소파판과 말뚝의 연결 방법

사진 6. 수평형 소파판과 말뚝을 연결핀으로 체결하는 작업

사진 7. 시공이 완료된 철재형 이안제 모습

예인선 1대, 통선 1대, 발전기(용량 250 kw) 1대, 운반바지선 2대이고, 관리 2명, 잠수부 4명, 비계 2명, 크레인 운전수 2명 등 총 10명이 시공에 참여하였다. 해상위치 지점으로 이동이 되면 육상에서 정확한 정위치를 측량하여, 설치구조물이 설치될 위치에 사진 4에서 보는 바와 같이 소파판을 크레인 ①로 가져치하고, 크레인②를 이용하여 항타기 설치 후 1본의 강관말뚝(P8지점)을 시추조사 결과를 바탕으로 모래층까지 관입하였다.

실해역에 설치되는 현장실험의 시공위치는 항로의 일부에 해당하므로 야간에 선박 운항 시 철재형 이안제 구조물로 인한 충돌 등의 안전사고가 우려되므로 해상경계시설을 설치하였다. 시공이 완료된 철재형 이안제의 모습이 사진 7에서 보여 준다. 본 구조물의 시공 당시(2009년 4월 10일) 소요시간은 1일(본 구조물의 경우 약 8시간 이내에 설치됨)이다.

4. 외력에 대한 변위 관측

실해역 검증을 위한 철재형 이안제의 시공은 표 1에 나타

난 바와 같이 2009년 4월 9일~10일에 걸쳐 수행되었다. 파랑계측 기간 중인 4월 26일 비교적 큰 파를 경험했으며, 이 기간 외에 5월 29일 큰 파가 내습하였다. 본 연구에서는 구조물의 변위를 관측하기 위하여 큰 파를 경험한 이후인 5월 1일과 6월 4일에 각각 1, 2차 측량을 실시하였고, 이후 6월 16일에 한 번 더 실시하였다.

철재형 이안제의 변위를 관측하기 위한 시트지 부착은 철재형 이안제 현장시공이 완료된 다음, 울진 인근해역의 해상상태를 확인하고 작업시 안전을 고려하여 해상의 날씨 상태가 좋은 2009년 4월 29일 시트지를 강관말뚝에 부착하였다. 구조물 기초의 변위관측은 준비단계를 거쳐 큰 파랑 내습 전후를 중심으로 실시되었다.

4.1 변위관측을 위한 준비

철재형 이안제 설치 구역의 배후지역에 대한 해안선 측량이 용이하도록 시통 및 보준이 양호한 위치를 설정한 다음, 광파기(SET530RK)를 사용하여 오산항 남방파제의 CP.1에서 초산지역 무릉교 위의 CP.8까지 내각을 왕복으로 트래버스 측량을 실시하였다. 망원경을 정·반위로 하여 평균값을 취하여 시준축 오차, 망원경 편심오차, 수평축 오차를 제거하였다. 또한 기준점에 대한 정확한 높이를 측정하기 위하여 철재형 이안제의 시공위치와 가장 근접한 위치에 있는 국가 수준점(BM 12-36-00)을 사용하여 울진군 초산리 지역(CP.1~CP.8)까지 왕복 수준측량을 실시하였으며, 시준축 오차를 소거하기 위하여 시준거리를 약 40 m정도로 유지하였고, 영점오차를 소거하기 위하여 표척 2개를 1조로 하고 출발점에 세운 표척을 반드시 도착점에 세웠다. 각 관측 데이터의 오차 발생 여부를 판단한 후, 허용오차의 범위에서 벗어날 경우 재측량하여 각 관측 데이터를 이용하여 정확한 기준점의 좌표를 산정하였다. 본 구조물의 현장실험 지역인 울진군 초산리 지역의 기본수준점 점표와 측지 수준점의 관계를 얻기 위하여 후포항의 기본수준점 성과표를 이용하여 DL은 후포항의 약최저저조면을 기준으로 하여 EL값과 DL값의 상관관계를 정립하여 측지 수준점에서 기본수준점을 보정하였다. 산정된 기준점 좌표를 기존의 지형도에 오산항을 기준으로 중첩시켜 기준점에 대한 상대좌표(X,Y,Z)를 최종 산정하였다.

관측용 시트지는 사진 8에서 보는 바와 같이 10 cm×10 cm의 크기이며, 광파기를 사용하여 거리 측정시 프리즘이 필요 없으며 약 500 m 정도의 거리를 측정할 수 있다.

표 1. 강관말뚝 변위계측 일정

날짜 \ 항목	4월					5월						6월				비고
	10	15	20	25	30	5	10	15	20	25	30	5	10	15	20	
철재형 이안제 시공																4월9일~4월10일
파랑계측																4월17일~5월21일
강관말뚝 변위계측																5월1일, 6월4일, 6월16일

(a)

(b)

사진 8. 관측용 시트지 및 강관파일에 부착된 상태

그림 4. 관측용 시트지 부착위치

파력에 의한 강관파일의 변위를 측정하기 위하여 사진 8에서 보는 바와 같이 강관말뚝에 관측용 시트지를 육상 기준점에서 시준이 가능한 곳(소파관 중심의 강관은 제외)에 부착하였다. 관측용 시트지 부착은 사포를 사용하여 강관말뚝의 녹을 제거한 후, 강관말뚝에 부착하였다. 강관말뚝의 변위 관측은 육상 기준점에 기계를 세운 후, 인근 기준점을 시준한 후 강관말뚝에 부착된 시트지를 광각기로 수평각 및 연직각을 정반위 관측하여 수평각, 연직각, 수평거리를 보정한 후, 관측용 시트지가 부착된 중심 지점의 N, E, Z의 거리를 주기적으로 관측을 실시하였으며, 측정시 수평각 및 연직각 관측 오차는 $\pm 4''$ 이며, 수평거리 측정오차는 ± 3 mm이다. 철재형 이안제 강관말뚝의 변위는 다음의 그림 4와 같이 총 8개소에 시트지를 부착하여 측정하였으며, S1 부분의 시트지는 5월 1일 첫 번째 관측이후 손실되었다.

4.2 파랑 관측

철재형 이안제의 항외측(W-1)에서 2009년 4월 17일~5월 21일까지 약 35일간 계측된 파랑자료를 분석하여 파랑의 최대파고(H_{max}), 유의파고($H_{1/3}$) 및 유의파주기($T_{1/3}$)를 그림 5에 나타내었다. 파랑계측 자료(W-1)를 살펴보면, 계측기간 동안 유의파고는 3.5 m이하로 나타났으며, 전체적인 파고주기 분포는 약 4~11초 정도로 나타났다. 대부분의 주기는 4~7초 사이에 집중하며, 최대 유의파고($H_{1/3}$)는 10~11초 주기대역에서 3.51 m로 나타났다.

본 계측지점의 인근에는 기상청이 운영하는 동해와 포항 부이가 있다. 그림 6은 인근 2개의 부이 관측 자료로부터 $H_{1/3}$ 를 분석하여 비교한 것이다. 2009년 4월 26일 12시를 전후하여 동해, 울진, 포항지역의 파고가 동시에 상승하고 있었으며 그 크기는 포항이 약 5 m이상을 기록했으며 울진과 동해는 3 m급 파고가 내습한 것을 알 수 있다.

그림 7에 보이는 바와 같이 2009년 5월 29일 09시 포항의 설계파고가 5.8 m가 내습하였다. 한편, 동시간대에 동해는 2.3 m가 내습하였다. 울진군 원남면 오산리 오산 출장소의 탐문조사결과 5월 29에는 풍랑주의보가 발효되어 오산항의 출항이 통제(울진군 오산항 해양경찰대)되었으며, 5월 30일에 풍랑주의보가 해제되었다. 또한 기상청 바람자료에 의하면 동시간대에 울진군 일대는 북북서의 7.4 m/sec, 동해는 북북서 4.8 m/sec, 포항은 북풍이 3.9 m/sec의 강도로 각각 기록되었다(<http://www.kma.go.kr/weather/observation>). 따라서 울진군 일대의 파랑에 의한 파랑이 포항일대 부이에 계측되었으며 울진군 일대의 파랑이 최소한 포항의 파랑보다 크게 발생했을 것으로 판단된다.

표 1의 강관말뚝 변위계측 기간 동안 기상관측 Buoy 자료의 최대파고를 비교한 결과, 그림 7에서 보인 바와 같이 동해 Buoy는 5월 21일에 최대파고 3.4 m, 포항 Buoy는 5월 29일에 5.8 m가 관측되었다. 철재형 이안제의 강관말뚝 변위 계측기간 동안 철재형 이안제에 내습한 파랑계측 자료가 미흡하여 철재형 이안제에 내습한 파랑 추산은 어려우나, 탐문 조사와 기상관측 Buoy 자료를 통하여 계측기간 동안에 철재형 이안제에 설계파에 상응하는 파랑이 내습한 것으로 판단된다. 포항 부이는 포항 월포 동쪽 35 km 해역(Buoy 설치 수심 32.0 m)에 설치되어 있으며, 그림 6에 보인 바와 같이 5월 29일 최대파고는 5.8 m, 주기는 3.2 sec가 관측이 되었으며, 천수변형에 의한 철재형 이안제 설치 구간에 유의파고 5.83 m의 파랑이 내습한 것으로 판단된다. 따라서 최대파고는 유의파의 1000파 기준으로 최빈치에 해당하는 1.86배에 상당하는 10.84 m 이나 이는 쇄파고를 넘으므로 고파파의 이론에서 $0.78 \times 9 \text{ m} = 7.02 \text{ m}$ 의 파가 내습한 것으로 판단된다. 이는 당일 포항보다 울진군의 바람강도가 훨씬 큰 것으로부터 최

그림 5. 파랑계측 자료의 시계열(입사파)

그림 6. 강관말뚝 변위계측 기간 동안의 기상관측 Buoy 자료 비교

소한 크기로 판단된다. 권혁민 등(2011)은 철재형 이안제의 상판에 작용하는 상방향 연직하중을 추정하기 위하여 유의파 크기에 해당하는 규칙파로 모형실험에 의한 지점별 최대압력을 계측하여 이를 힘으로 환산하는 방법을 제안한 바 있다.

이때, 적용된 유의파고는 실험에서 6.2 m에 해당한다. 따라서 실험 중 내습한 유의파고 5.83 m는 권혁민 등(2011)의 설계상 유의파고 6.2 m에 약 94%에 상당한다.

구조물의 안정성 여부를 판단하기 위하여 강관말뚝의 변위

그림 7. 2009년 5월 29일 설계파에 상응하는 파 내습 기록(인근 부이)

(a) N방향의 변위

(b) E방향의 변위

(c) Z방향의 변위

그림 8. 강관말뚝의 변위량

를 2009년 6월 4일과 6월 16일에 철재형 이안제에 부착되어 있는 시트지를 이용하여 5월 1일에 관측한 방법과 동일한 방법으로 관측을 실시하였으며, 자세한 내용은 다음의 4.3절에서 설명하였다.

4.3 관측 결과 및 분석

트래버스 측량에 의해 산정된 상대 좌표를 기준으로 하여 여 사진 8에 보인 바와 같이 관측용 시트지를 측량한 결과가 그림 8에서 보여 준다. 이 그림에서 보는 바와 같이 중

양에 위치한 말뚝을 제외한 나머지 8개의 말뚝에 대하여 수평 및 수직 위치의 변화를 측정하였다. 철재형 이안제 강관 말뚝의 변위를 측정된 결과를 이용하여 그림 8에서 보는 바와 같이 방향별로 변위량을 나타내었다. 변위량 측정은 2009년 05월 01일을 기준으로 하여 상대변위로 측정하였다. 설계파에 가까운 파의 내습에 대하여 최대 수평변위는 S3번의 위치에서 북쪽 방향으로 13 mm 발생하였고, 최대 수직변위는 S7번의 위치에서 상향으로 (+)14 mm 발생하였다. 강관 말뚝의 수평변위는 설계파에 상응하는 파가 내습시 남서(SW) 방향으로 움직임을 보였으며, 이후(6월16일) 관측시 북동(NE) 방향으로 강관말뚝이 움직임을 나타낸 것으로 추정된다. 도로교설계기준 해설(2008), 기초구조물설계기준 해설(2009) 등 국내 설계기준에 의하면 말뚝기초의 수직변위는 말뚝직경의 1%이내 또는 직경 1,500 mm 이하의 경우에 15 mm로 규정하고 있으므로 본 연구에서의 철재형 이안제 구조물에서 발생된 변위는 설계기준을 만족한다고 볼 수 있다.

그림 9에서 보는 바와 같이 평면적으로 각 강관말뚝의 변위가 시간적으로 서로 다른 방향으로 발생하고 있다는 것을 알 수 있다. 본 연구를 통하여 변위방향이 직전의 큰 파와 관계하는지 여부에 대해서는 밝힐 수 없으나 어떠한 시각에 대체적인 우세 방향이 존재한다는 것은 알 수 있다.

실해역 실험에서 설계파에 약 94%에 상당하는 파의 내습에 대하여 권오균 등(2011)에서 언급된 말뚝 근입깊이의 약 64%에 해당하는 길이($9.05 \text{ m}/14.2 \text{ m}=0.64\%$)가 실제 지반 속에 관입되어 있음에도 불구하고 수직변위는 최대 14 mm에 그쳤다. 말뚝의 인발력 저항력은 근입깊이에 비례하므로 철재형 이안제의 경우 인발외력에 대한 말뚝의 안전율은 근사적으로 권오균 등(2011)의 원설계에서 제시된 3.0의 0.64배인 약 2.0에 해당한다고 볼 수 있다.

실해역 실험에서 설계파에 약 94%에 상당하는 파의 내습에 대하여 파일심도가 권 오균 등(2011)이 보인 파일의 심도가 $9.05 \text{ m}/14.2 \text{ m}=0.64\%$ 임에도 불구하고 최대 상향변위 14 mm에 그쳤다. 파일의 인발력은 심도에 비례하므로 철재형 이안제 설계에 있어서 인발외력에 대한 파일의 마찰 안전율은 권 오균 등(2011)의 원설계에서 3.0에 대하여 0.64배인 약 2.0에 해당한다.

그림 9. 강관말뚝의 변위벡터

5. 철거과정 및 분석

실해역 현장실험을 위해 2009년 4월에 시공된 철재형 이안제는 현장실험 종료로 인해 2009년 10월 30일~11월 25일(해상 기상 조건에 따라 약 3일 소요)에 해체되었다. 해체 운영 장비로는 크레인(용량 150 ton) 1대, 예인선 1대, 운반바지선 1대, 카고(11 ton) 1대, v/h 함마(5 ton) 1대, 프리저마(20 kw) 1대, 발전기 2대와 관리 2명, 잠수부 4명, 비계 2명, 크레인 운전수 1명 등 총 9명이 해체에 참여하였다.

철재형 이안제의 해체순서는 그림 2에 보인 바와 같이 P5→P6→P7→P2→P4→P9→P3→P1→P8→소파판 순으로 해체한다. 일정한 순서없이 해체하였을 때 강관말뚝 9본, 고정핀 18ea, 소파판의 휨 변형이나 작업시 지반으로 슬립되는 과정을 방지하기 위해 순서를 정하였으며, 강관말뚝과 소파판을 연결하고 있는 고정핀을 제거하기 위하여 사진 9(a)에서 보는 바와 같이 산소용접기를 이용하거나, 사진 9(b)에서 보이는 바와 같이 함마를 이용해 인력으로 고정핀을 제거한다.

연결 고정핀이 제거된 강관말뚝을 지반으로부터 해체하기 위하여 크레인에 설치된 v/h 함마를 이용하여 사진 10, 11에서 보는 바와 같이 진동을 가하여 지반에 고정된 강관말뚝을 크레인으로 끌어올리는 방식으로 강관말뚝을 해체하였다. 첫 번째 작업은 2009년 10월30일에 P5→P6→P7→P2→P4지점의 순서로 강관말뚝 5본과 연결된 10ea를 해체하였고, 두 번째 해체작업은 2009년 11월 5일에 시행되었으며 첫 번째 작업당시 고정핀(P9)을 해체하였으므로 P9지점 강관말뚝만 해체하였다. P1, P3, P8지점의 6ea 고정핀은 산소용접과 인력(함마)을 통해 제거하였다. 고정핀 제거 당시 소파판의 수평 및 수직 움직임을 고려하여 소파판에 크레인 와이어로프를 이용하여 소파판을 들어 올린 상태로 핀을 제거하였다. 핀 제거 후 수평 및 수직 움직임은 나타나지 않았으며, 와이어로프를 크레인으로부터 해체하여 P3지점 강관말뚝을 해체하였다. 소파판이 가라앉기 전에 그림 2의 C1, C2, C3, C4지점을 잠

(a) 산소용접기를 이용하는 방법

(b) 함마를 이용하는 방법

사진 9. 소파판과 강관말뚝 연결핀 제거 모습

사진 10. v/h 해머 Vibrate 끌어 올리기

사진 11. 강관말뚝 끌어 올리기

사진 12. 소파판 부표 표시

사진 13. 소파판 해체 완료

수부가 저면으로 내려가 연결할 수 있도록 사진 12에서 보는 바와 같이 부표를 띄워 표시하였다. P1지점 강관말뚝을 해체 함으로써 두 번째 작업은 종료되었다. 세 번째 작업은 P8지점의 강관말뚝을 해체한 후에, 잠수부가 저면으로 내려가 소 파판에 Shackle을 걸어 크레인으로 인양하는 작업을 통해 종 료되었다. 소파판이 해체 완료된 모습이 그림 13에서 보여 준다.

총 해체는 장비 현장도착부터 소파판 육상운반까지 약 12 시간으로 비교적 용이하게 철거가 가능함을 보였다.

수평형 2열 조합판이 상향력을 받았는지 여부에 대하여 해 체한 파일의 연결구의 모양을 관찰하였다. 사진 14는 연결구 상부와 하부가 거의 대칭적으로 둥근 모양을 하고 있다. 이 는 최초 용접기로 작업한 조악한 구모양이 하부의 경우는 주 로 핀의 하중에 의해 둥근모양이 형성되었으며 상부는 상향 력에 의한 핀의 이동에 의한 타격으로 모양이 다듬어져 형성 된 것이다. 상부의 모양이 둥근모양으로 형성된 것은 소파판 에 상향력이 작용한 증거이다. 대부분의 접합구가 상하좌우 둥근모양을 하고 있으나 일부는 좌우 조악한 상태로 있거나

(a) 상부하부가 핀모양 처럼 둥근 모양

(b) 상부가 약간 조악한 경우

사진 14. 연결용 구멍의 상부가 연결 핀모양을 닮은 둥근 모양이거나 아닌 경우

사진 14(b)와 같이 상부가 약간 조악한 상태로 있는 경우도 있었다.

6. 결 론

해안침식방지 또는 저감을 위한 공법은 강성공법과 연성공 법으로 대별할 수 있다. 강성공법은 이안제, 잠제, 돌제 등 기존의 중력식 구조물들로 파랑장에 강한 영향을 주거나 인 위적 흐름 발생, 퇴적파랑 저감 등 자연해빈 유지에 역기능 이 많다. 이에 비하여 철재형 이안제는 말뚝으로 지지되는 수평판이 소파역활을 하므로 수평파력에 대하여 안정한 구조 물이라고 할 수 있을 뿐 아니라, 소파판 밑으로 파와 모래이 동이 자유로우므로 해수유통, 퇴적모래 이동 등에 유리하다.

본 연구에서는 상기한 바와 같이 장점이 많고, 기존 중력 식 구조물의 단점을 보완한 철재형 이안제의 실효역 현장시 공 실험을 수행하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 1) 설계외력 중 연직하중은 유의파에 상당하는 규칙파로 실험실에서 계측·산정하여 안정성을 확보할 수 있음을 알 았다. 왜냐하면 설계파에 94%이상에 상당하는 파의 내 습에 대하여 파일심도가 원설계(권 오균 등, 2011) 대비 실효역 심도가 $9.05\text{ m}/14.2\text{ m}=0.64$ 임에도 불구하고 최대 상향변위 14 mm 에 그쳤다. 따라서 철재형 이안제 설계 에 있어서 인발외력에 대한 파일의 마찰 안전율을 $3.0 \times 0.64 \approx 2.0$ 으로 제안하고자 한다.
- 2) 설계외력 중 수평하중은 유의파에 상당하는 규칙파로 검

토하여 안정성을 확보할 수 있음을 알았다. 왜냐하면 거의 설계파에 상당하는 파의 내습에도 불구하고 수평변위는 최대 약 13 mm에 그쳤다. 단, 금번실험은 1 Cell만을 대상으로 하였으므로 파의 회절을 허용하였으나 여러 Cell을 설치할 경우는 수평파력이 증가할 것으로 예상된다. 이에 대하여 확인이 필요하다.

- 3) 수평형 2열 유공판을 조합하여 소파를 하고자 하는 파일 지지형 해상구조물의 설계에 있어서 수평판에 작용하는 상향 파력에 의한 파일의 인발한계보다 파일에 작용하는 수평하중에 의한 변위가 지배인자일 가능성이 있다. 왜냐하면 파일 심도가 원설계 대비 64%정도에 대하여 설계파고는 94%급 이상이 내습하여 상향 변위가 최대 14 mm정도 미미한 발생에 그쳤다. 이에 비하여 수평 최대변위는 13 mm 발생하였다.

따라서 철재형 이안제는 해안보전을 위한 전략적 핵심 요소기술로 추천이 가능하고, 해안의 모래랑에 따라 착탈식으로 운영하여 표사계 전체의 모래랑을 년단위, 계절단위로 운영할 수 있는 세계최초의 신개념 기술로 기대된다.

향후 파일에 작용하는 모멘트로부터 수평변위를 허용할 수 있는 수평판과 파일의 연결형식 개선이 필요하며 실험역에 여러 셀(cell)을 설치하여 해안지형 변화를 모니터링하고, 이를 바탕으로 국내외적으로 해안보호를 위한 전략기술의 확립이 요구된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 지역특성화연구개발사업의 연구비 지원(05지역특성 B04-01, 2005~2010)에 의해 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 권혁민, 김영학, 기성태 (2008) 水平型 二列 組合板의 透過率 算定을 위한 實驗的 研究, **대한토목학회논문집**, 제28권 제4B호, pp. 421-428.
- 권혁민, 한유식, 김대현, 송규식 (2010) 철재형 이안제 축조 및 철거, **한국해양과학기술협의회 공동학술대회 발표논문집**, pp. 1-4.
- 권혁민, 한유식, 권오균, 고경래 (2011) 철재형 이안제 설계기법 연구 I. 설계 및 파압추정 단계, **한국방재학회논문집**, 제11권, 제3호, pp. 209-218.
- 권오균, 오세봉, 권혁민 (2011) 철재형 이안제 설계기법 연구 II. 하부기초 설계 단계, **한국방재학회논문집**, 제11권, 제3호, pp. 219-228.
- 대한토목학회·교량설계핵심기술연구단 (2008) **도로교설계기준 해설**, 기문당.
- 이정열, 이주용, 권혁민 (2011) 철재형 이안제 설계기법 연구 III, **한국방재학회논문집**, 제11권, 제4호, pp. 301-308.
- 한국지반공학회 (2009) **구조물기초설계기준 해설**, 구미서관.
- Kweon, H.M., Kim, I.H. and Lee, J.L. (2011) Rip Current Control behind Steel-type Multiple Breakwaters, *Journal of Coastal Research*, pp. 1779-1783.

- ◎ 논문접수일 : 12년 01월 03일
 ◎ 심사의뢰일 : 12년 01월 04일
 ◎ 심사완료일 : 12년 01월 18일