

부유 플랩형 고조방파제의 파랑 반사 및 전달 - 수리실험 Wave Reflection and Transmission from Buoyant Flap Typed Storm Surge Barriers - Hydraulic Experiments

정신탉* · 김정대* · 고동휘* · 김동현** · 박우선***

Shin Taek Jeong*, Jeong Dae Kim*, Dong Hui Ko*, Dong Hyawn Kim** and Woo Sun Park***

요 지 : 부유 플랩형 고조방파제의 파랑 반사 및 전달 특성을 평가하기 위하여 수리실험을 실시하였다. 수리실험에 사용된 부유 플랩형 고조방파제는 해저 지중에 설치된 기초구조와 이에 힌지로 연결된 부유 구조체로 구성된다. 36종의 규칙파와 4종의 불규칙파 조건에 대하여 파랑의 반사, 전달, 회전각 등을 분석하였다. 파랑 반사 및 전달 성능을 제고하기 위한 방안의 하나로 일정 크기의 판을 부유 구조체에 부착하는 방안에 대하여 검토하였다. 수리실험 결과, 항내측에 판을 부착하는 경우는 효과가 미미하고, 외해측에 판을 부착하면 반사파와 전달파를 동시에 저감시킬 수 있는 것으로 평가되었다.

핵심용어 : 고조방파제, 부유식, 플랩형, 파랑의 반사 및 전달

Abstract : To evaluate wave reflection and transmission from buoyant flap-typed storm surge barriers, hydraulic experiments were performed by using regular and irregular wave conditions. Buoyant flap-typed storm surge barriers consist of buoyant main body connected with foundation structure in the seabed by hinge. The characteristics of wave reflection, transmission and dynamic response of the structure were investigated for 36 regular and 4 irregular wave conditions. It was also evaluated the usage of plain plate attached on the buoyant main body as one of alternatives to control wave reflection and transmission. From the hydraulic experiments, it was found that the case of plain plate attached on the offshore side is very effective to improve the wave transmission as well as reflection. But, the effect of the case on the harbor side might be negligible.

Key words : storm surge barrier, floating, flap, wave reflection and transmission

1. 서 론

최근 지구 온난화 영향에 의한 해수면 상승, 빈번한 대형 태풍 발생, 태풍과 동반한 고조현상, 그리고 이들에 의한 연안재해가 중요한 화두로 대두하고 있다. 해수면 상승에 대비하기 위하여 설계하면 재산정 연구(Mitchell et al., 2006), 빈번한 대형 태풍 발생에 의해 높아지는 외해 파고를 적절히 고려하기 위하여 설계파 재추정 작업(한국해양연구원, 2005), 그리고 고조 발생에 의한 연안역 보호를 위

한 일련의 연구가 진행중에 있다(건설교통부, 2007; Ballinger et al., 2002).

일본 항만공학기술연구소에서는 고조, 쓰나미 등의 발생에 대응하기 위하여 민간 4개업체와 공동으로 ‘直立浮上式防波堤’ 개발을 추진하고 있다(삼성건설, 2006). 이 구조물은 상부강관과 하부강관으로 구성되는 벽체구조물로서 만입구 혹은 방파제 사이에 설치된다. 평상시에는 해저에 설치한 하부강관중에 상부강관을 격납시켜두고, 고조 또는 쓰나미 발생시 상부강관을 부상시켜 외해와 내해를 차단하게

*원광대학교 토목환경공학과(School of Civil, Environmental and Urban Engineering, Wonkwang University, 344-2, Shinyong-dong, Iksan, 570-749, Korea. sijeong@wonkwang.ac.kr)

**군산대학교 해양시스템공학과(Department of Ocean System Engineering, Kunsan National University, Jeonbuk, 573-701, Korea. eastlite@kunsan.ac.kr)

***한국해양연구원 연안개발연구본부 항만·연안공간연구사업단(Corresponding author: Woo Sun Park, Coastal Engineering Research Department, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan, Kyunggi 425-600, Korea, wspark@kordi.re.kr)

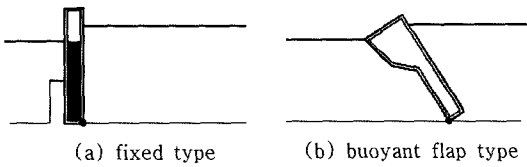


Fig. 1. Storm surge barrier developed.

된다. 우리나라의 국토해양부에서도 고조로부터 연안역을 효율적으로 보호하기 위한 독자적인 연구를 추진하고 있다. 현재 개발되고 있는 고조방파제는 Fig. 1과 같은 두가지 형태로서, 평상시에는 해저면에 가라 앉혀 두었다가 고조가 발생하면 공기압을 이용하여 부상시켜, 만 또는 항을 외해로부터 폐쇄할 수 있도록 고안되었다. 본 연구에서는 움직이면서 능동적으로 고조에 대응할 수 있는 부유 플랩형을 대상으로 하였다.

소규모 부유 플랩형 고조방파제의 모형에 대하여 2차원 수로에서 규칙 및 불규칙파를 이용하여 동적특성과 수리특성을 평가하였으며, 파랑 전달 및 반사 성능을 제고하기 위한 방안의 하나로 일정 크기의 판을 부유 구조체에 부착하는 방안에 대하여 검토하였다.

2. 수리모형실험

2.1 실험수로 및 조파기

수리모형실험은 한국해양연구원의 2차원 수로에서 수행되었다(Fig. 2참조). 수로의 길이는 53.15 m, 높이 1.25 m, 폭은 1.0 m이며, 수조의 상류쪽 13 m와 하류쪽 7 m 구간

은 양측벽이 철재로 되어 있으며, 나머지 중앙부분 33.15 m의 양측벽은 강화유리로 되어 있어 거의 모든 실험구간에서 관찰이 가능하다. 조파기는 유압펌프에 의해 작동하는 피스톤형으로 최대 이격거리가 ± 50 cm이며, 조파기의 후면과 수조의 하류 쪽 끝에는 경사식 소파장치가 설치되어 있다. 이 수조는 파랑과 흐름을 동시에 발생시킬 수 있는 복합수조로서, 수조 저면에 흐름상자(Current box)들이 설치되었고 이 흐름상자들은 수조의 하부에서 내경 30 cm의 회류파이프를 통하여 서로 연결되어 있다.

2.2 계측기기

고조방파제의 수리 및 동적 응답특성 평가에 사용된 계측기기는 다음과 같다.

과고계 : 반사파, 후면 전달파 특성 분석을 위하여 길이 80 cm의 용량식 과고계 8 개를 사용하였다.

Multi-channel Oscilloscope : 과고계의 아날로그 출력값을 모니터링함으로써 기기의 정상 작동 유무를 확인함에 사용하였다.

Camcorder : 고조방파제의 동적응답 분석, 실험과정의 모니터링을 위해 사용하였다

2.3 모형 제작 및 설치

수리실험에 사용된 모형은 총 3가지로, 1안은 표준안으로 부유 본체만으로 구성된 경우(Fig. 3), 2안은 부유 본체 외해 측에 판이 부착된 경우(Fig. 4)이며, 3안은 내해 측에 부착된 경우(Fig. 5)이다. 그림에서 좌측이 항내측이며 우측이 외해측이다.

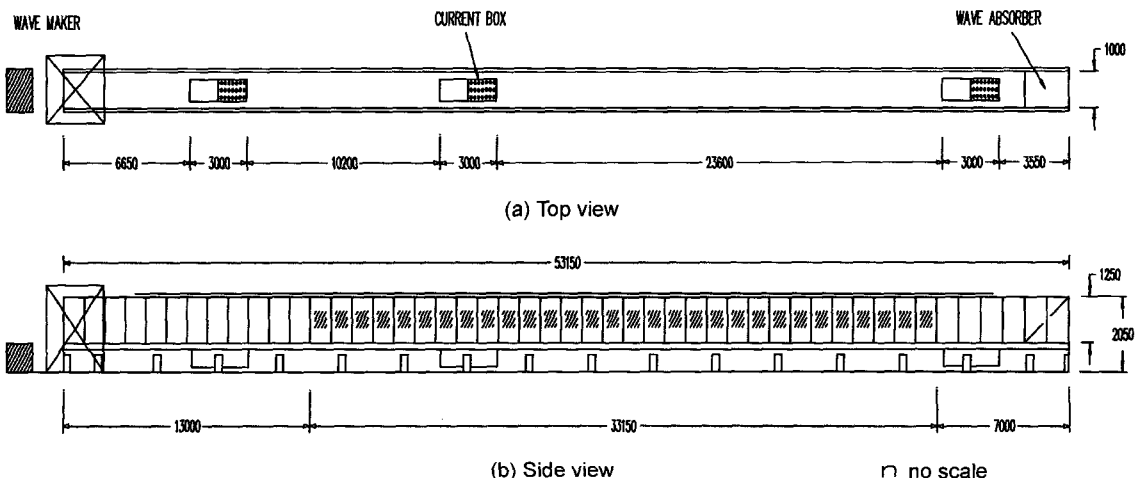


Fig. 2. Schematic diagram of the wave-current flume.

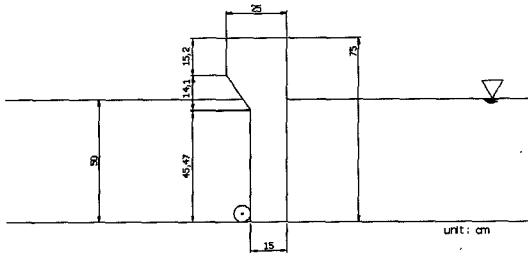


Fig. 3. Buoyant flap-typed storm surge barrier(Case 1).

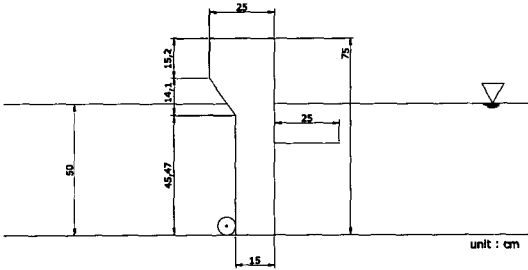


Fig. 4. Buoyant flap-typed storm surge barrier(Case 2).

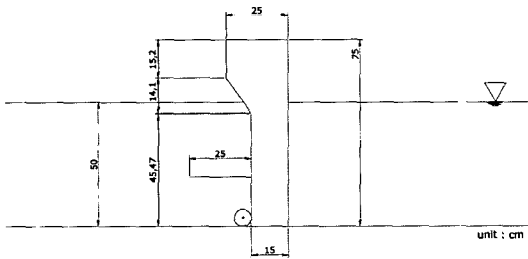


Fig. 5. Buoyant flap-typed storm surge barrier(Case 3).

실험을 위한 구조모형은 3 mm 철판을 이용하여 제작하였으며, 본체 저면에는 베어링으로 구성된 힌지가 부착된

두께 5 mm 철판을 설치하여 수조 콘크리트 바닥에 고정하였고, 모형의 폭은 58 cm이다.

2.4 수로의 구성 및 계측기기의 설치

수리실험을 효율적으로 수행하기 위하여 Fig. 6에 도시된 바와 같이 실험수로를 폭 40 cm의 협수로와 폭 60 cm의 광수로로 분할하고, 광수로에 고조방파제 모형을 설치하였다. Fig. 6에서 W1는 파고계를 의미하며 이들은 다음의 용도로 사용되었다.

- W1~W3: 협수로에서 실험 중 입사파 확인용
- W4~W6: 광수로에서 입사파와 반사파의 분리용
- W7, W8: 방파제 배후측 전달파 계측용

2.5 실험조건 및 계측

실험에 사용된 36종류의 규칙파 제원과 4종류의 불규칙파 제원을 Table 1과 Table 2에 정리하여 나타내었다. 불규칙파의 입사파랑은 식 (1)에 보인 Goda(1988)에 의해 수정된 Bretschneider - Mitsuyasu 스펙트럼을 기초하여 작성하였다.

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

여기서 $S(f)$ 는 파랑에너지 밀도, f 는 주파수를 나타내며, $H_{1/3}$ 및 $T_{1/3}$ 은 각각 유의파고 및 유의파 주기를 나타낸다.

2.6 자료 분석방법

고조방파제의 반사계수 및 전달계수는 박우선 등(1992)이 개발한 3점법을 사용하여 산정하였다. W4~W6의 계측 자료를 사용하여 입·반사파 분리를 하여 반사계수를 계산

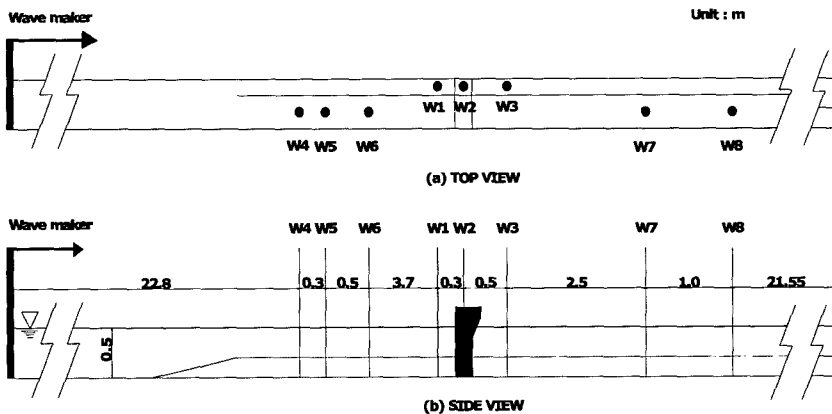


Fig. 6. Views of the wave-current flume showing arrangement of model and wave gauges.

Table 1. Summary of experimental regular wave conditions

T(s)	H(cm)		
	1	2	5
0.8	○	○	○
1.0	○	○	○
1.2	○	○	○
1.4	○	○	○
1.6	○	○	○
1.8	○	○	○
2.0	○	○	○
2.2	○	○	○
2.4	○	○	○
2.6	○	○	○
2.8	○	○	○
3.0	○	○	○

Table 2. Summary of experimental irregular wave conditions

$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)			
	1.0	1.4	1.8	2.2
2	○	○	○	○

하고, W7, W8로부터 측정된 전달파고를 이용하여 전달계수를 산정하였다.

고조파파제의 동적응답은 Camcorder로 촬영한 이미지를 영상처리하여 구하였다(김태림, 2004). 본 연구에서는 회전각을 산정하기 위하여 동일 크기의 표식자 두개를 사용하였다(Fig. 7). 영상처리의 첫 단계는 컬러영상을 흑백영상으로 변환하는 일이다. 화소값은 컬러의 경우 흑색이 0, 백색이 1의 값을 갖는다. Fig. 8은 Fig. 7의 영상을 역치(值, threshold) 0.3을 사용하여 흑백으로 변환한 것이다. 화소의 값이 0.3보다 크면 백색으로, 작으면 흑색으로 변환한다. 다음으로 표식자 주위의 영상을 추출하기 위하여 윈도우(window)를 적용한 영상에 대하여 표식자의 중심위치를 결정하는 것이다. 이를 위해 표식자 주위의 화소값을 누적시



Fig. 7. Image of object(720 × 405 pixel).

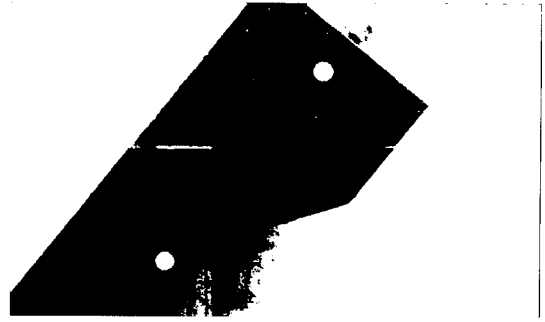


Fig. 8. Black and white image after image processing.

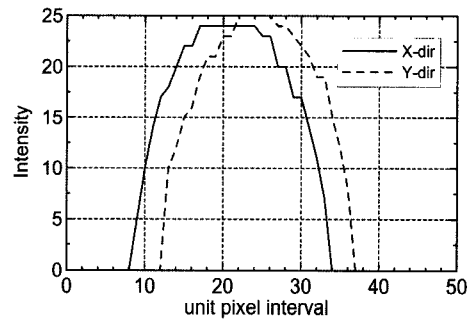


Fig. 9. Variation of pixel intensity.

키면 각축에 대하여 Fig. 9와 같은 결과를 얻게 된다. 이 때 x축과 y축 상의 중심점을 구하기 위하여 최대점(maximum point)을 구하거나 면적 중심점(centroid)를 이용할 수 있는데 본 연구에서는 잡음(noise)의 영향을 최소화할 수 있도록 식 (2)와 같은 면적 중심점식을 이용하였다. 식 (2)에서 C_x 는 x축의 면적중심 위치이며 $A(x)$ 는 x위치에서의 면적 즉 화소의 누적값이다. y축에 대해서도 동일한 방법을 적용하여 면적 중심의 y축 좌표를 구할 수 있다.

$$C_x = \frac{\int xA(x)dx}{\int A(x)dx} \tag{2}$$

마지막으로 동체의 두 표식자가 이루는 각을 구하는 것은 두개의 표식자 위치 즉 (C_{x1}, C_{y1}) 과 (C_{x2}, C_{y2}) 가 확정된 후 이들을 이용하여 다음의 식 (3)으로 간단히 구할 수 있다.

$$\theta = \tan^{-1} \left| \frac{C_{y2} - C_{y1}}{C_{x2} - C_{x1}} \right| \tag{3}$$

매 촬영 시간 간격(sampling time)마다 얻게 되는 동체의 영상에 위와 같은 방법을 적용하면 연속적인 표식자의 회전각을 구할 수 있다. Fig. 10은 동적 회전각 추출 사례

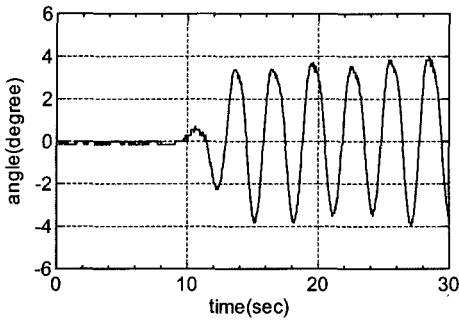


Fig. 10. Example of image processing profile.

를 보여주고 있다. 여기서, (+)는 정적 평형위치에서 반시계방향, (-)는 시계방향을 의미한다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 정적 평형위치

정적 평형위치는 구조물의 자중과 방파제 내외측 정수압에 의한 회전모멘트가 서로 평형을 이루는 조건에 의해서 결정된다. 3가지 형상의 모형에 대한 결과를 Table 3에 제시하였다.

Table 3. Static equilibrium position of flap-type floating Breakwater

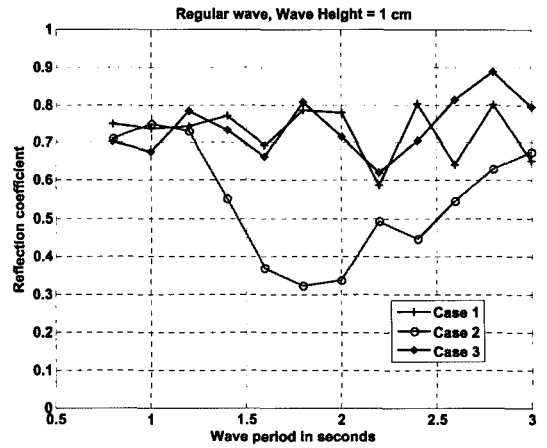
경우	수심(m)	회전각(도)	비고
Case 1	0.5	40.0	연직선에서 시계
Case 2	0.5	37.5	방향으로 관측한
Case 3	0.5	41.5	회전각

3.2 반사 및 전달 특성

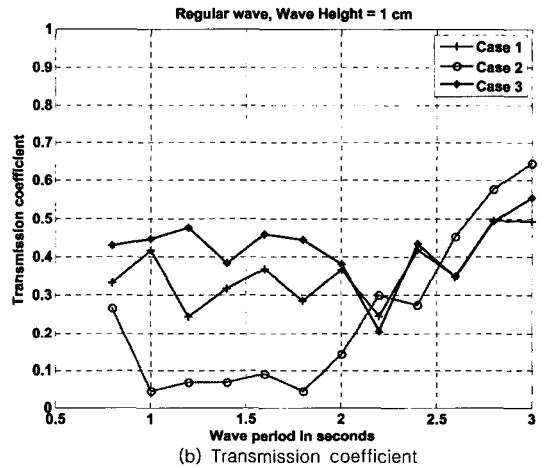
3.2.1 규칙파

규칙파의 반사 및 전달 특성을 분석할 때에는 자료 분석 시간을 결정하는 것이 매우 중요하다. 자료 분석 시간을 어떻게 결정하는 지에 따라서 결과가 크게 달라지기도 한다. 본 연구에서는 조파된 파가 방파제의 전면에서 반사된 후 조파판에서 재반사될 때까지의 시간에 해당되는 자료만을 이용하여 반사계수를 계산하였다. 이 경우 조파판에서 처음 조파된 파는 군파의 속도로 전파되므로 군파의 전파 속도를 계산하여 반사파 및 재반사파의 도달 시간을 계산하여 사용하였다.

Fig. 11~Fig. 13에 분석된 규칙파에 대한 반사계수와 전달계수를 나타내었다. 입사 파고 변화와 방파제 구조형식 변화(Case 1, 2, 3)에 대한 결과를 살펴보면, 입사파고가 증



(a) Reflection coefficient

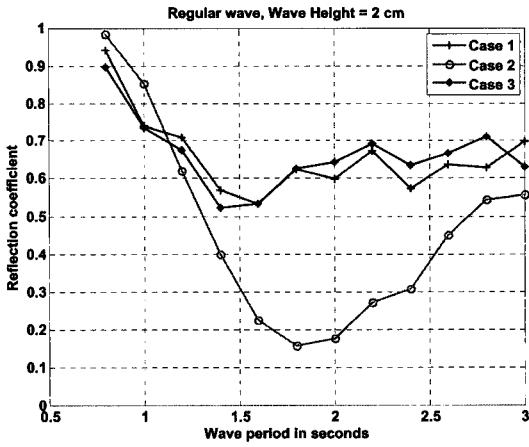


(b) Transmission coefficient

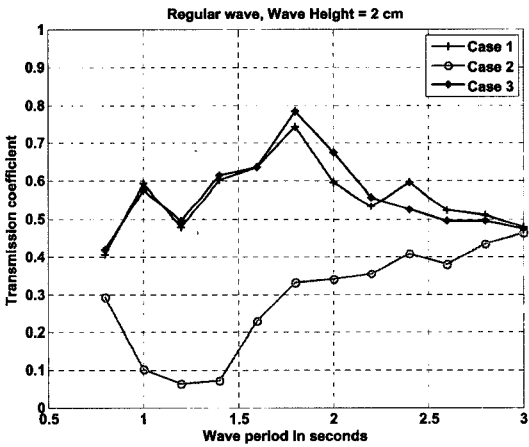
Fig. 11. Wave reflection and transmission coefficients for 3 kinds of buoyant flap-typed storm barriers(Regular wave, Wave height = 1 cm).

가할수록 반사계수는 감소하고 전달계수는 증가하는 경향을 보임을 알 수 있으며, 외해측에 판을 부착한 Case 2의 경우 Case 1과 3에 비하여 상당히 다른 경향을 보임을 알 수 있다. 선형 거동을 하는 경우 파고에 따라 반사 및 전달 특성이 동일하게 유지되어야 함을 고려해 볼 때, 본 플랩형 방파제는 비선형성이 비교적 강한 구조형식으로 판단할 수 있다. 본 방파 시스템의 비선형성으로는 부력에 의한 회전강성의 변화, 비교적 큰 회전각 등을 생각할 수 있다. 그러나 본 경우의 경우는 앞에 언급한 비선형성의 영향도 어느 정도 있겠지만 배어링으로 구성된 힌지 부분에서의 마찰력에 의한 저항력이 더 큰 영향을 준 것으로 판단된다.

외해측에 판을 부착한 Case 2의 특성이 두 경우와 많이



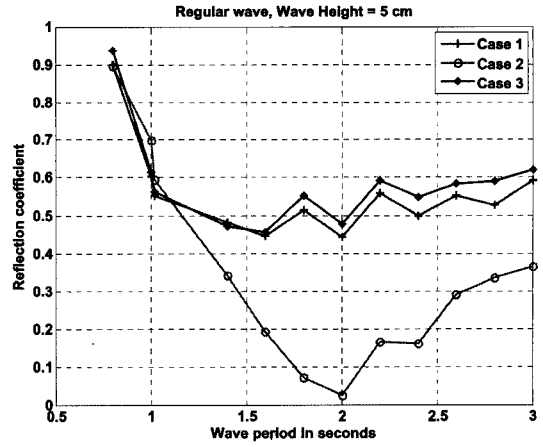
(a) Reflection coefficient



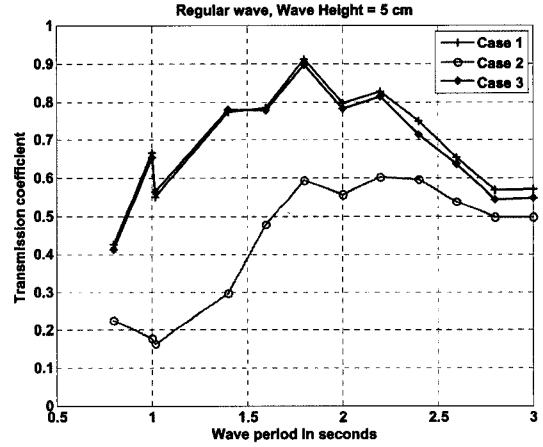
(b) Transmission coefficient

Fig. 12. Wave reflection and transmission coefficients for 3 kinds of buoyant flap-typed storm barriers(Regular wave, Wave height = 2 cm).

다른 것은 내해 측에 판을 부착한 Case 3의 경우와 Case 1의 경우와 크게 다르지 않은 경향을 보임으로 판단해 볼 때, 단순히 판의 부착에 의한 부가질량 등의 변화에 기인된 것은 아니고, 다른 영향에 의한 것으로 볼 수 있다. 일반적으로 부유식 방파제의 경우 반사계수가 증대되면 전달계수가 감소하고, 전달계수가 증대되면 반사계수가 감소하는 특징을 갖게 되는데, Case 2의 경우는 반사계수와 전달계수가 동시에 감소하는 현상을 보이고 있다. 이러한 현상이 가능하려면 많은 에너지 소모가 있어야 설명이 가능하다. 이에 기초하여 원인을 추측해 보면, 외해측에 부착된 판의 끝단에서 발생하는 흐름분리에 의한 에너지 손실에 의해 발생된 것으로 볼 수 있다. 특히, 판의 끝단과 정수면 사이 간격이 좁아 흐름단면의 급축소 확대에 의한 에너지 소모가 더욱 확대되었을 것으로 추정된다. 향후, 수치해석 등



(a) Reflection coefficient



(b) Transmission coefficient

Fig. 13. Wave reflection and transmission coefficients for 3 kinds of buoyant flap-typed storm barriers(Regular wave, Wave height = 5 cm).

을 통한 보다 정확한 원인 규명이 요구된다.

3.2.2 불규칙파

Fig. 14에 불규칙파에 대한 반사 및 전달 계수를 비교하여 나타내었다. 전체적으로 규칙파와 같은 경향을 보임을 알 수 있다. Case 1과 Case 3은 거의 같은 거동으로 보이나, Case 2는 두 경우에 비하여 반사계수와 전달계수가 동시에 감소하게 되는 경향을 보임을 알 수 있다. 이는 규칙파의 경우와 같이 외해 측에 설치된 판의 끝에서 발생하는 에너지 소모로 설명할 수 있는 것으로 보고 있다.

3.3 회전 응답 변위 특성

파고 5 cm 급 규칙파 조건에 대한 동적 응답을 Fig. 15에 도시하였다. Case 1과 Case 3은 주기가 길어질수록 응

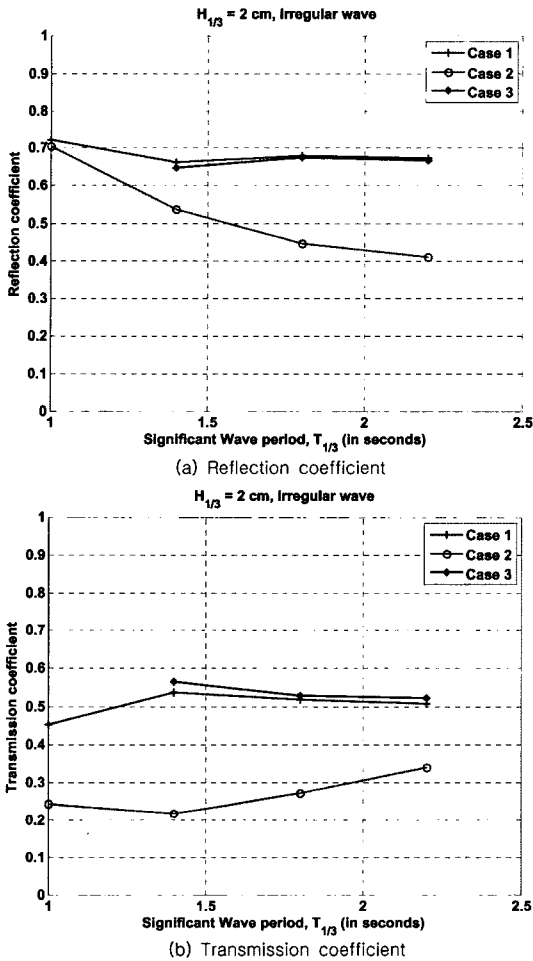


Fig. 14. Wave reflection and transmission coefficients for 3 kinds of buoyant flap-typed storm barriers (Irregular wave).

답이 증가하다가 1.6초 이상이 되면 감소하는 경향을 보임을 알 수 있으며, Case 2의 경우는 Case 1과 3의 경우에 비하여 작은 응답을 보이면서 증가하는 경향을 나타냄을 알 수 있다. Case 1과 3의 경우, 1.6초 이상의 조건에서 응답이 감소하는 경향은 Fig. 13의 전달계수에서도 같이 나타나는 것으로 보면 어떤 원인에 의하여 발생된 것으로 판단되는데 아직 명확한 원인을 찾아내지 못하고 있다. 향후 수치모델 등을 이용하여 원인을 규명해야 할 것으로 판단된다. Case 2의 경우, 작은 응답을 보임은 전달계수가 작다는 것을 의미하는 것으로 Fig. 13에 보인 전달 특성변화와 같은 경향이라고 할 수 있다. 응답이 작으면 반사계수가 커야 하는데 Case 2의 경우는 상대적으로 응답이 작음에도 불구하고, 반사계수가 작다는 것은 에너지 소모가 많다는

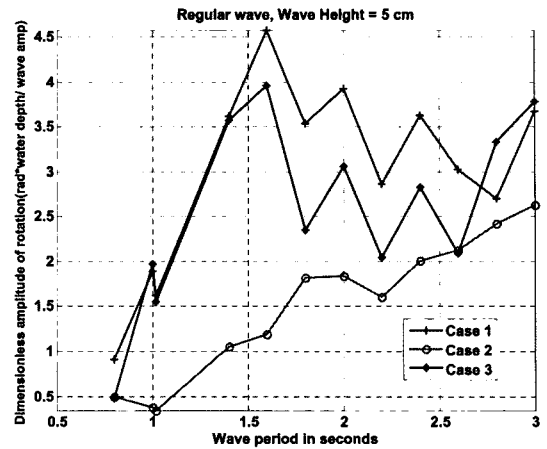


Fig. 15. Dimensionless amplitude of the rotational angle for 3 kinds of buoyant flap-typed storm barriers (Regular wave).

것을 의미하는 것이다. 이러한 경향은 앞에서 보인 반사 및 전달 특성에서 나타난 현상과도 일치하는 것으로, 수치 모델을 이용한 보다 면밀한 원인을 규명하면 보다 우수한 성능을 보이는 새로운 안의 도출도 가능할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 수리실험을 통하여 해저 지중에 설치된 기초구조와 이에 힌지로 연결된 부유 구조체로 구성된 부유 플랩형 고조방과제의 파랑 반사 및 전달 특성과 응답 특성을 평가하였다. 파랑 반사 및 전달 성능을 제고하기 위한 방안의 하나로 일정 크기의 판을 부유 구조체에 부착하는 방안에 대하여 검토하였다.

도출된 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 입사파의 주기가 길어질수록 부유 구조체 회전응답이 증가하고, 이에 의해 항내 전달계수가 증가된다.
- 부체 본체에 부착된 판에 의한 부가질량 증대에 의한 고조방과제 파랑 반사 및 차단 성능개선 효과는 미미하다.
- 외해측에 판을 부착하는 방안이 파랑의 반사 및 차단 성능 양면에서 모두 우수한 것으로 평가되었으며, 이는 판의 끝단에서 발생하는 흐름 분리에 의한 에너지 소모에 기인한 것으로 판단되었다.

향후, 수치 모델을 이용하여 대규모 에너지 소모 원인에 대한 규명과 실제로 고조현상이 발생되면 항내외측의 수위 차이가 발생하여 다른 거동을 보일 수 있을 것으로 판단되

는 바, 이에 대한 추가적인 수치 및 수리실험 연구가 수행 되면 보다 우수한 성능을 보이는 새로운 안의 도출도 가능 할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 지역특성화연구개발사업(C105 E1020001-06E020200210)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 건설교통부 (2007). 차세대 해안공간 확보기술 연구 2년차도 보고서.
- 김태림 (2004). 디지털영상을 이용한 파고계 개발 및 검증. 한국해양·해양공학회지, 16(3), 171-177.
- 박우선, 오영민, 전인식 (1992). 최소자승법에 의한 입·반사 파의 분리기법. 한국해양·해양공학회지, 4(3), 139-145.
- 삼성건설 (2006). 항만건설기술, 124.
- 한국해양연구원 (2005). 전해역 심해설계파 추정 보고서 II.
- Ballinger, R., J. Taussik and J. Potts. (2002). Managing coastal risk: making the shared coastal responsibility work - Coastal planning and shoreline management: a review of legislation and guidance. The Local Government Association's Special Interest Group on Coastal Issues, UK.
- Goda, Y. (1988). Statistical variability of sea state parameters as a function of a wave spectrum, Coastal Engineering in Japan, 31(1), 39-52.
- Mitchell, J.F.B., Lowe, J., Wood, R.A., and Vellinga, M. (2006). Extreme events due to human-induced climate change. Phil. Trans. R. Soc. A, 364, 2117-2133.

Received April 15, 2008

Accepted April 22, 2008