

부소파제의 부체 개발을 위한 기초적 실험 연구

정동호[†] · 김현주 · 김진하 · 문덕수
한국해양연구원 해양시스템안전연구소

A Preliminary Experiment Study for Development of Floater of Floating Breakwater

D. H. Jung[†], H. J. Kim, J. H. Kim and D. S. Moon

Maritime & Ocean Engineering Research Institute(MOERI)/Korea Ocean Research & Development Institute(KORDI),
171 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

요 약

해양의 활용범위를 확대시키기 위해서 방파제는 필수적인 요소이며, 특히 친환경적인 부소파제의 활용은 증대될 것으로 기대된다. 본 연구에서는 친환경 소재인 폴리에틸렌 파이프와 시트를 활용하여 새로운 개념의 부소파제용 부체를 개발하며, 이에 대한 소파 성능평가를 위하여 기초적 실험연구를 수행한다. 입사되는 파랑은 연결된 파이프와 시트를 통과하면서 일부는 반사되고 일부는 투과되는데, 투과되는 파랑은 파이프를 지나면서 와류유기가 발생하여 파랑 에너지가 소멸된다. 따라서 입사파랑 에너지를 감소시킬 수 있다. 개발된 부체의 성능평가를 위하여 규칙파 및 불규칙파에 대한 수리모형 실험을 수행한다. 입사파랑 주기가 6초 이하 조건에서는 소파 성능이 양호하였으나, 장 주기의 입사파랑에 대해서는 부체 전체가 해수면과 같이 거동하면서 소파성능을 거의 나타내지 못하였다. 향후 소파성능 개선을 위한 추가적인 연구가 요구되어진다.

Abstract – A newly designed floating breakwater made of Polyethylene with considering the introduction of new material for being harmony with environment and stability of the floater is developed for a marine ranching. In this study, the new concept in which incident wave dissipates its energy due to the vortex shedding by passing through the pipes and sheets is selected for wave breaking mechanism. Model experiment in order to test its capability is performed for the regular and irregular waves in ocean engineering basin. Good capability to break the incident wave within the 6 seconds of period and 1 m of height is shown. Breaking efficiency for long period wave is not so good in regular and irregular wave. The results of this study will contribute to the design and construction of the floating breakwater.

Keywords: Floating breakwater(부소파제), Experimental Study(실험적 연구), P.E Pipe(폴리에틸렌 파이프), Breaking efficiency(소파성능), Vortex shedding(와류유기)

1. 서 론

소파제는 해역 보호를 위하여 파랑에너지를 소산시키는 구조물을 의미하는 것으로서, 일반적으로 방파제로 알려져 있다. 소파제는 크게 고정식 소파제(중력식 소파제)와 부유식 소파제(이하 부소파제)로 나누어진다. 고정식 소파제는 소파용 구조물이 해저면에 직접적으로 고정되어 있는 경우이며, 부소파제는 방파제 기능을 수행하는 구조물이 해수면 위에 떠 있는 경우를 의미한다.

Fig. 1에서는 부소파제의 전체적인 모양 및 구성을 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 부소파제는 소파기능을 담당하는 부체와 부체를 일정위치에 유지시키는 계류시스템으로 구성된다. 계류시스템은 다시 계류라인과 앵커로 구성된다.

부소파제는 다양한 분야에서 활용될 수 있는데, 양식장 보호, 어항 및 항만 보호, 그리고 해양공공간 파랑제어 등에 많이 이용되고 있다.

소파제의 시설 비용은 소파제의 설치 수심이 점점 깊어짐에 따라서 증가하게 되었는데, Fig. 2에 그 근거를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 소파제의 설치 수심이 약 10 m 이상

[†]Corresponding author: dhjung@moeri.re.kr

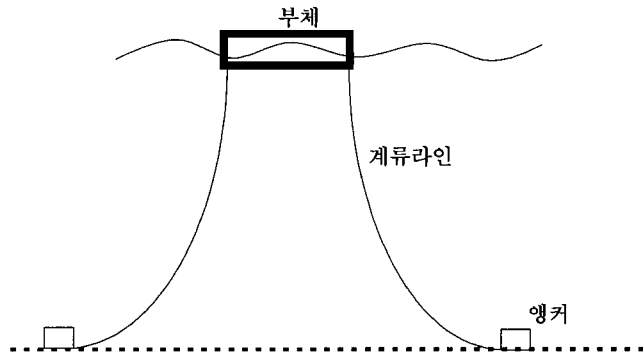


Fig. 1. Schematic configuration of floating breakwater.

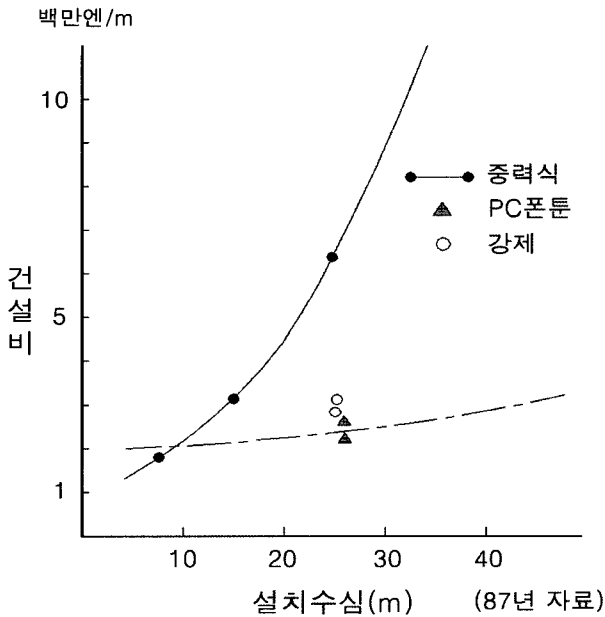


Fig. 2. Comparison of construction cost between a fixed breaker and float breaker with water depth (ECOR 일본위원회[1980]).

이 되면 고정식 소파제의 설치비용은 급격히 증가하는 반면에, 부소파제는 수심이 깊어지더라도 건설비용이 완만하게 증가하는 것을 알 수 있다 (ECOR 일본위원회[1980]).

부소파제는 수심에 따른 경제 비용면에서 본 장점 외에도 다음과 같은 다양한 장점을 가지고 있다.

- 1) 대수심 및 연약지반에 적용가능하다.
- 2) 해수교환형으로 친환경적이다.
- 3) 지진에 대한 피해가 적으며, 고정식 소파제에 비하여 시공이 간단하다.
- 4) 이동이 가능하다는 것이다.
- 5) 소파제 외의 다양한 용도로 이용할 수 있다.

이상과 같이 부소파제는 다양한 장점을 가지고 있음에도 불구하고 현재까지 우리나라에서 시공된 사례는 없다. 단지 경남 마산시 원전항에 부소파제 건설을 위한 설계를 하고 있는 중에 있다 (포스코건설[2003]), ((주)해강[1996]). 원전항의 수심은 14 m 정도 이

Table 1. Configuration and properties of commercial float breaker in Japan (ECOR 일본위원회 [1980])

형식	개요도	소파원리	기본형식	사용재질
A		반사	삼중 Barrier	강재
B		쇄파	경사판	강재
C		반사	폰툰 Hybrid (강제+PC)	
D		공명	동요제어	강재
E		공명	공기제어	강재

지만, 해저지반이 약 20 m 정도가 연약한 해성점토층으로 이루어져 있다. 따라서 고정식 방파제를 설치한다면 약 40 m 높이의 대형 방파제 설치가 불가피 하기 때문에 부소파제를 계획하고 있다. 이 부소파제의 부체는 강재로 이루어져 있으며, 입사하는 면에 특정 형상의 강재를 설치해서 입사파랑을 소파시키고자 설계되어졌다.

한국에서는 부소파제의 개발 사례가 없는 반면에 일본에서는 다양한 목적과 형상의 부소파제가 개발 및 설치되어져 왔다. 일본에서는 주로 민간회사를 중심으로 개발되어 왔으며, 어항뿐만 아니라 해역파랑조건이 보다 악조건인 해역에도 설치 가능한 새로운 형식의 부방파제 연구 및 개발에 많은 투자를 하고 있다. 현재 일본에는 전국 21개 지자체, 100여개소 이상에 설치하고 있다. 1990년대부터는 일본 전국어항협회에서 부소파제 모델 5종을 발표하여 표준화하여 왔다 (ECOR 일본위원회[1980]). Table 1에서는 일본에서 표준화하여 사용하고 있는 5가지 모델과 그 특징을 보여주는데, 소파원리, 사용재질, 그리고 기본형식에 따라서 5가지 형태로 나누어졌다. 이러한 부소파제는 방파제 역할 외에 낚시터 등 관광목적으로도 활용되고 있다. 또한 부소파제를 개발하여 일본 각 지역에 보급해 온 부소파제 제작사들은 '일본부소파제협회'를 조직하여, 다목적 용도로 적용될 수 있고 한층 성능이 개선된 부소파제를 제작하고 있다.

본 연구에서는 부소파제 개발을 위한 새로운 개념의 부체를 개발하였으며, 소파 성능특성을 파악하기 위하여 수리모형 실험을 수행하였다. 부체는 폴리에틸렌(PE) 파이프를 연결하고 시트(sheet)를 경사지게 설치하여 제작하였으며, 입사하는 파랑이 시트를 통과하면서 쇄파되고 파이프를 통과하면서 와류유기(vortex shedding)가 발생하여 파랑에너지가 감소되는 개념을 적용하고자 하였다.

2. 본 론

본 절에서는 개발된 신형 부체에 대해서 소개하며, 성능 특성을 파악하기 위한 실험에 대해서 다룬다.

2.1 신형 부체 재질 및 형상

부체의 형상은 앞에서 언급한 바와 같이 소파 원리에 따라서 반사형, 경사형, 공기제어형 등 다양한 종류가 있는데, 본 연구에서는 새로운 개념의 투과파의 에너지 감소 개념과 경사형 소파제를 응용하여 입사파랑의 에너지를 소산시킬 수 있는 형상을 개발하였다. 부체는 폴리에틸렌 파이프를 적층되도록 연결하여 구조체를 형성하였는데, 입사되는 파랑이 일부는 구조체에 의하여 반사되며 일부는 투과되면서 와류유기에 의해서 에너지가 소실되도록 제작하였다. Fig. 3은 새롭게 고안되는 부소파제의 전체적인 형상을 보여준다. 부소파제는 외경 60 mm 파이프를 연결시켜서 제작하였으며, 파이프가 연결된 내부 공간에는 시트를 입사되는 파랑에 대하여 경사지게 설치하여 입사되는 파랑을 차단할 수 있도록 설계하였다. 내부 공간에 설치되는 시트는 각각 교차되도록 제작하여 소파성능을 높이고자 하였다. 부체는 폭 1 m, 높이 0.72 m, 길이 4.5 m 제원으로 하였으며, 상부 3단은 흡수 조절을 위하여 캡을 부착하여 흡수는 0.55 m가 되도록 하였다.

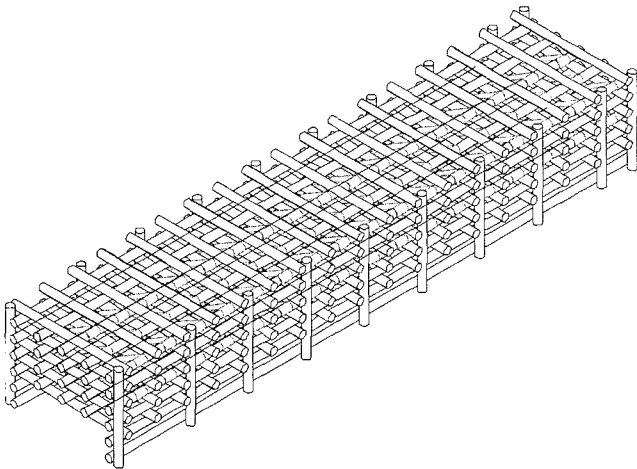


Fig. 3. Schematic view of new designed floating breakwater in 3-D.

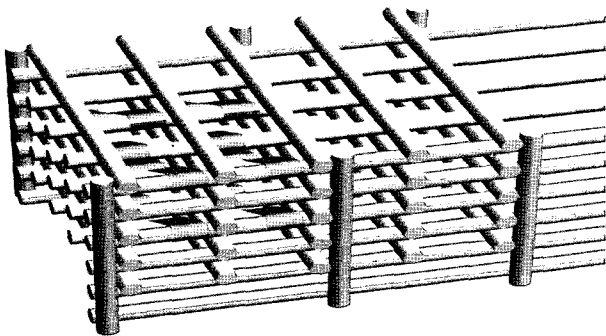


Fig. 4. Magnified configuration of new designed model.

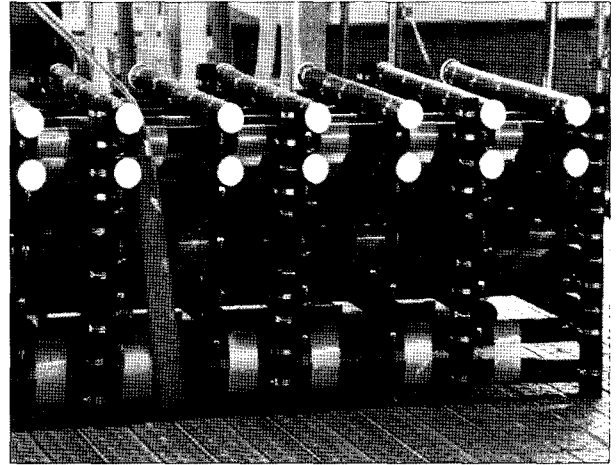


Fig. 5. Model of new designed floating breakwater.

Fig. 4에서는 시트의 연결 상태를 보다 자세히 확인할 수 있도록 신형 모델의 확대된 모양을 보여주고 있다.

수리실험을 위하여 1/10의 축척으로 모형을 제작하였다. 따라서, 실험의 부체는 전체 길이가 45 m, 폭이 10 m, 전체 높이가 7.2 m가 된다. 파이프는 외경 60 cm 재원을 사용하게 되며, 시트는 폭 80 cm 재원을 사용하게 된다.

모형 제작에서 PE 파이프가 연결되는 지점에는 스텐스스를 이용하여 포인트 용접을 하여 충분한 접합강도를 가질 수 있도록 하였다. Fig. 5에서는 실험을 위하여 제작된 부소파제를 보여주고 있다.

2.2 수리모형실험 조건

본 실험은 한국해양연구원 해양시스템안전연구소에서 보유하고 있는 3차원 해양공학수조에서 수행되어졌다.

실험은 개발된 모형을 구속장치에 의해서 일정 위치에 계류시킨 후, 몇 가지 파랑 조건에서 개발된 부체의 성능을 평가하였다. 파랑 조건은 크게 2가지로 나누어지는데, 부체의 기본 운동특성을 파악하기 위한 규칙파와 실제 소파성능을 평가하기 위한 불규칙파로 구성된다. 규칙파는 일정주기와 파고로 구성된 파랑을 여러 가지 경우로 구성하였으며, 불규칙파는 2가지의 운용조건에 대하여 수행되었다. Table 2에서는 규칙파와 불규칙파 구동조건을 보여주고 있다. 규칙파에서는 3.14초의 단주기에서부터 약 15.7초의 장주기까지 다양한 주기에 대한 실험을 수행하여 개발된 부소파제의 소파특성을 얻고자 하였다. 불규칙파에서는 2가지 경우를 실험하였는데, 유의주기 5.4초 유의파고 1 m인 경우와 유의주기 8.64초와 유의파고 2 m인 경우에 대해서 수행하였다.

모형실험의 구성은 Fig. 6에서 보여진다. 총 7개의 파고계가 설치되었는데, 1번 파고계는(No. 1) 입사파를 따로 측정하기 위하여 모델에서 약 5 m 떨어진 지점에 설치하였다. 또한 입사파와 반사파의 성분을 분해하기 위해서 부소파제 전면에서 3개의 파고계(No. 2~No. 4)를 설치하였으며, 투과파 성분을 측정하기 위하여 부소파제 후면에 3개의 파고계(No. 5~No. 7)를 설치하였다. 부체의 계

Table 2. wave condition

No	Wave Height[m] [proto/model]	Wave Period[sec] [proto/model]	Wave length[m] L[proto/model]
1	2 / 0.2	15.71 / 4.97	385.08 / 38.51
2	2 / 0.2	10.47 / 3.31	171.2 / 17.12
3	1 / 0.1	7.86 / 2.49	96.3 / 9.63
4	2 / 0.2	7.86 / 2.49	96.3 / 9.63
5	3 / 0.3	7.86 / 2.49	96.3 / 9.63
6	2 / 0.2	6.28 / 1.99	61.6 / 6.16
7	2 / 0.2	5.24 / 1.66	42.8 / 4.28
8	2 / 0.2	4.49 / 1.42	31.45 / 3.145
9	2 / 0.2	3.93 / 1.24	24.09 / 2.409
10	2 / 0.2	3.49 / 1.10	19.01 / 1.901
11	2 / 0.2	3.14 / 0.993	15.39 / 1.539

No	Wave Height[m] [proto/model]	Wave Period[sec] [proto/model]	Wave length[m] L[proto/model]
SP1	1/0.1	5.4/1.706(0.586 Hz)	TP=1.08Ts (by Goda)
SP2	2/0.2	8.64/2.732(0.366 Hz)	

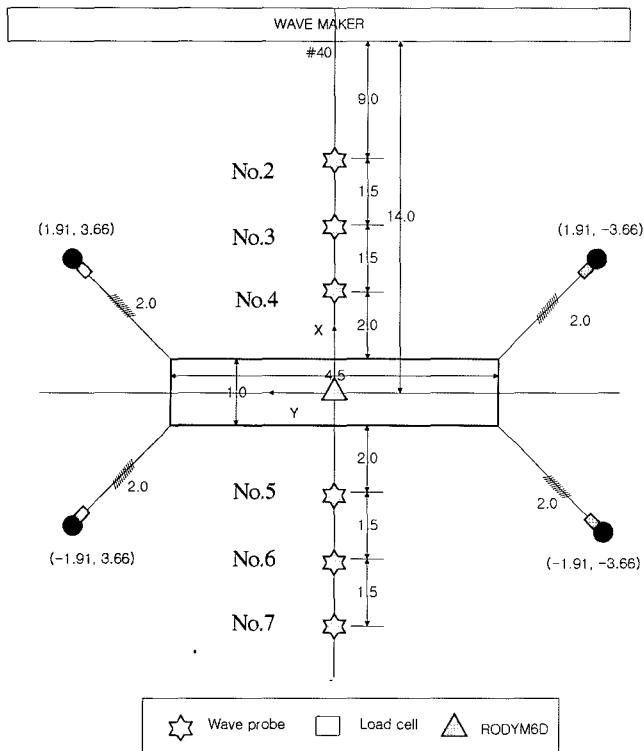
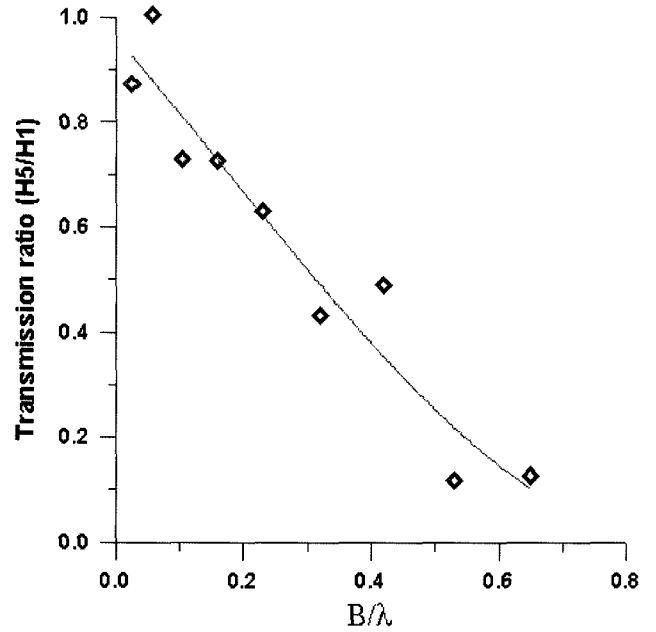


Fig. 6. Experiment scheme.

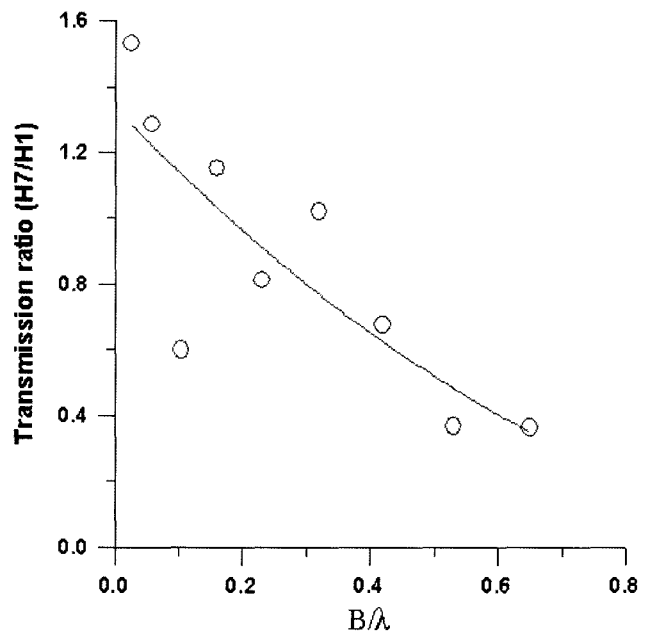
류는 해수면 상에서 수평으로 강제 수축시켰으며, 계류선 중간에 스프링을 설치하고 끝단에 20 kgf 용량의 하중측정장치(load cell)를 설치하여 파랑 하중을 측정하고자 하였다. 또한 부체의 거동을 측정하기 위하여 부체 가운데 부분에 운동센서를 설치하였다.

2.3 실험 결과

규칙파와 불규칙파로 나누어서 실험을 수행하였는데, 규칙파에 대한 실험에서는 개발된 부소파제의 성능특성을 파악하고자 하였



(a) No. 5 wave sensor



(b) No. 7 wave sensor

Fig. 7. Breaking efficiency of floating breakwater with wave length.

으며, 불규칙파에 대한 실험에서는 실제 파랑 현상과 유사하게 재현하는 실험을 수행하였다.

먼저 Fig. 7에서는 규칙파 중의 실험결과를 정리한 것을 보여주고 있다. 횡축은 파장(λ)에 대한 소파제 폭(B) 비율을 무차원 변수로 나타내었으며, 종축은 1번 파고계 측정값인 입사파($H1$)에 대한 투과파($H5, H7$)의 평균파고를 무차원화하여 나타내었다. 소파제 주변에는 입사파(incident wave), 반사파(reflection wave), 그리고 방사파(radiation wave) 등이 혼재되어서 나타나게 되는데, 투

파울에 대한 표현은 입사파 성분만을 측정할 수 있는 별개로 설치된 1번 파고계(No. 1) 값에 대한 투과된 지점에서 측정된 성분의 비율로 표현하였다.

그림을 통하여 단파장에서는 비교적 소파성능이 양호하다는 것을 알 수 있다. 입사파의 약 70%가 투과되는 조건을 본다면, 실제 파랑주기는 약 8초 정도가 된다. 즉, 8초 이내의 파랑 주기에 대해서는 입사파랑 에너지의 약 30%를 소파시킬 수 있다는 것을 알 수 있다. 또한 주기 약 5초 이내의 파랑에 대해서는 입사파의 50%를 소파시킬 수 있다는 것을 알 수 있다. 두 지점(No. 5, No. 7)에서 측정된 투과율을 살펴본다면 5번 파고계에 관측된 결과가 7번 파고계에 관측된 결과보다 소파율이 높은 것으로 관측되었다. 이것은 5번 파고계는 소파제에서 약 2.0 m 떨어진 지점에 설치된 반면에 7번 파고계는 약 5.0 m 떨어져서 설치되었기 때문에, 이로 인하여 7번 파고계 절점에는 회절파의 영향에 의하여 입사파랑의 효과가 간접적으로 미치기 때문인 것으로 사료된다. 즉, 소파제를 투과한 파랑과 회절된 파랑성분이 서로 중첩되어서 입사파 에너지보다 높게 나타나는 것이다. 이 문제는 여러 개의 소파제를 직렬로 설치하여 회절파랑 효과를 차단한다면 해결될 문제이라고 판단된다. 7번 파고계에서 측정된 자료를 살펴보면 7.86초 파랑 조건에서 소파효율이 높게 나타나는데, 이 현상 또한 회절파와 투과파의 중첩효과에 의해서 나타나는 것으로 사료된다.

Fig. 8에서는 부소파제의 소파효율을 증대시키기 위해서 설치한 경사 시트(sheet)가 없는 경우에 대한 실험결과를 보여주고 있다(5번 파고계). Fig. 7(a) 결과와 서로 비교해 보면 경사 시트가 있는 경우에 소파효율이 전반적으로 높게 나타나며, 특히 단주기 파랑에 대해서는 경사 시트의 효과가 더욱 크게 나타나는 것을 확

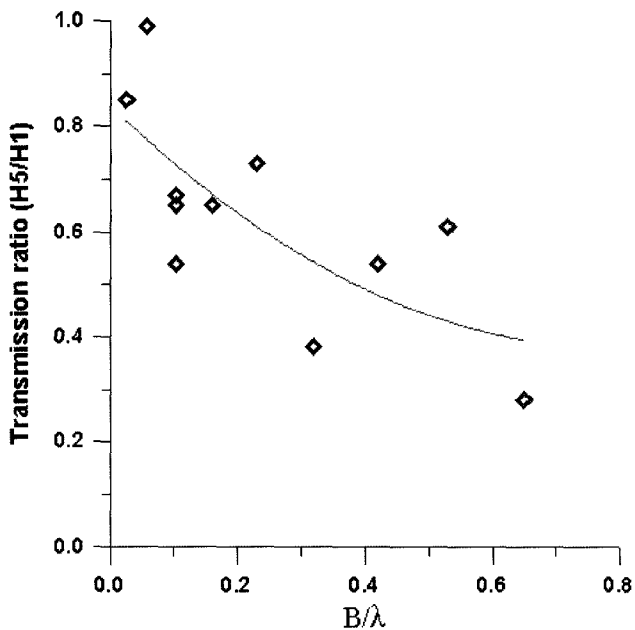
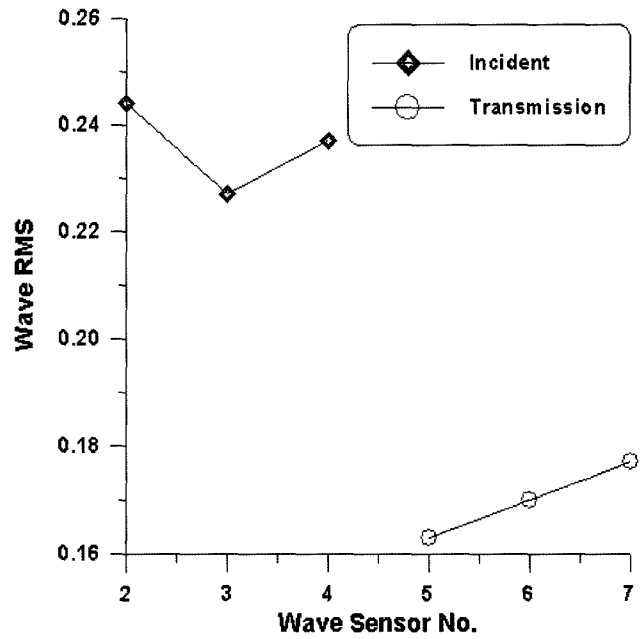
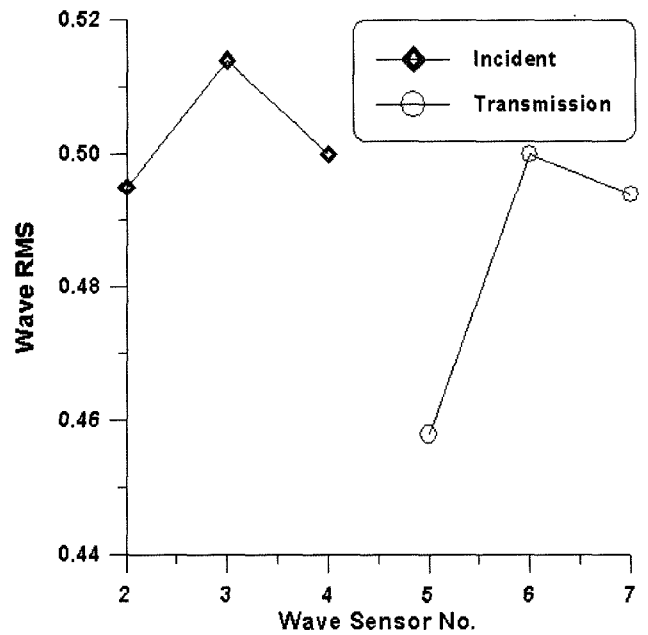


Fig. 8. Breaking efficiency of floating breakwater without sheet at No. 5 wave sensor.



(a) $T_s : 5.4s, H_s : 1m$

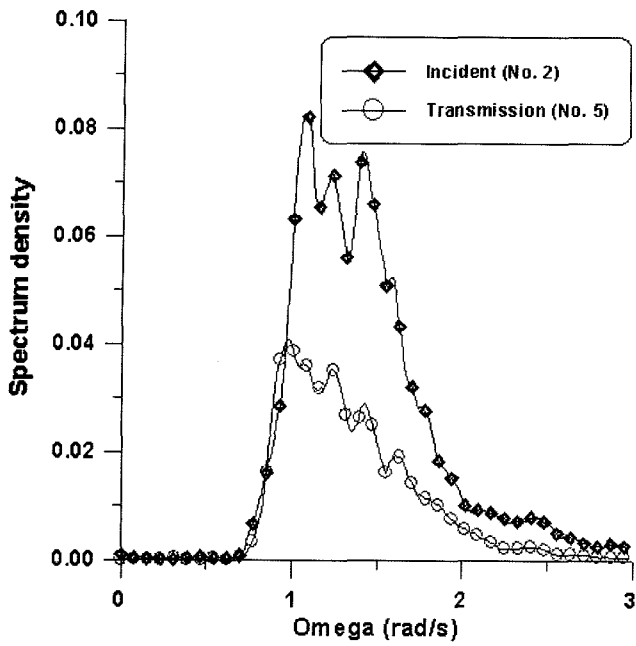


(b) $T_s : 8.64s, H_s : 2m$

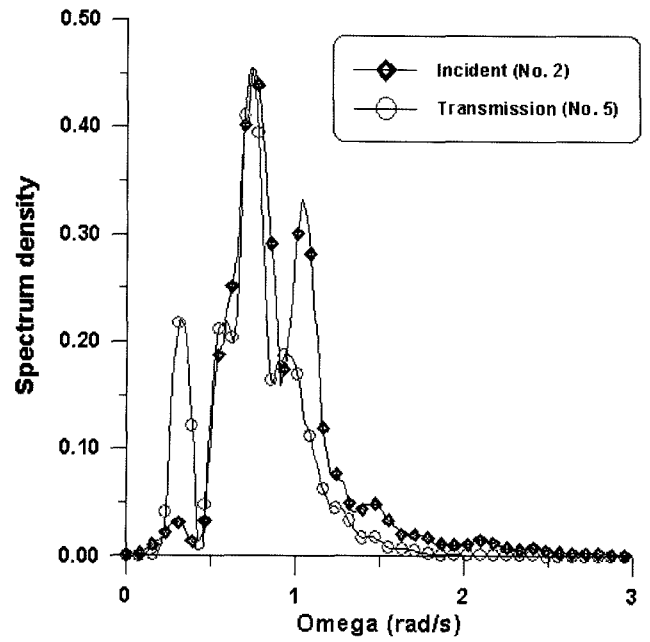
Fig. 9. Wave RMS in irregular wave.

인할 수 있다. 이 결과를 통하여 경사 시트는 부소파제의 소파 성능 증대에 큰 기여를 한다는 것을 알 수 있다.

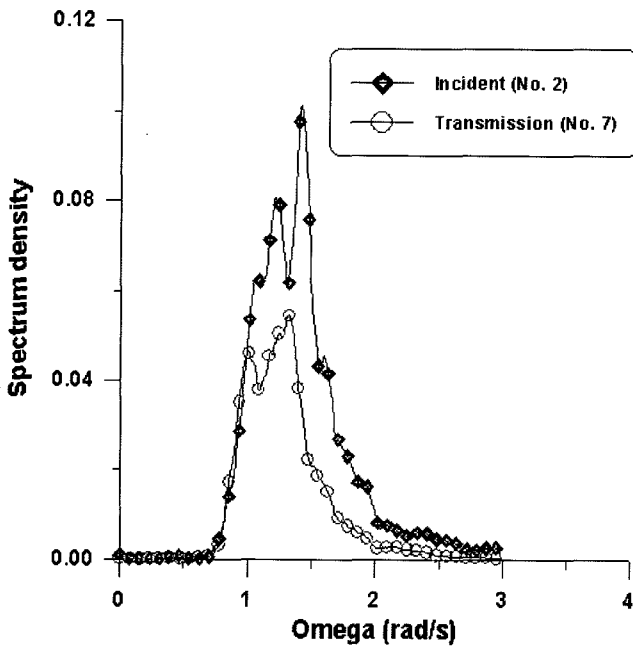
다음은 불규칙파랑 실험결과를 살펴보도록 한다. Fig. 9는 각 파고계에 관측된 파랑 자료를 RMS(root mean square) 값으로 나타낸 값이다. 여기서 횡축은 파고계 번호를 나타내는 것으로 incident 자료는 입사파를 측정하는 파고계(No. 2, No. 3, No. 4)이며, transmission은 투과파를 측정하는 파고계(No. 5, No. 6, No. 7) 자료를 의미한다. 그림을 보면 알 수 있듯이 유의주기 5.4초 파랑에



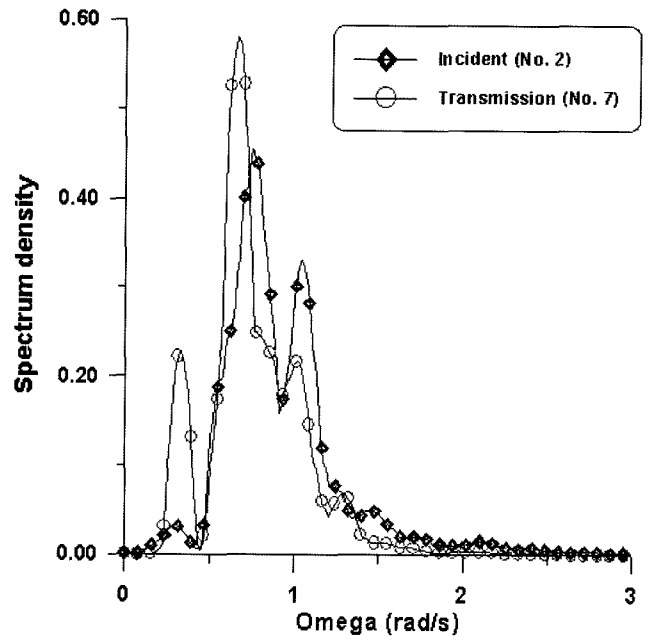
(a) No. 5 wave sensor



(a) No. 5 wave sensor



(b) No. 7 wave sensor



(b) No. 7 wave sensor

Fig. 10. Spectrum density for incident and transmittant waves in irregular wave ($T_s=5.4$ s, $H_s=1$ m).

Fig. 11. Spectrum density for incident and transmittant waves in irregular wave ($T_s=8.64$ s, $H_s=2$ m).

대해서는 소파성능이 양호한 것을 알 수 있으나, 유의주기가 8.64 초이고 유의파고가 2 m인 경우에서는 소파성능이 그다지 좋지 못하다는 것을 알 수 있다. 이 결과는 다음에 나오는 스펙트럼 결과에서도 볼 수 있다.

Fig. 10은 유의주기(T_s) 5.4초, 유의파고(H_s) 1 m 파랑에 대한 실험결과를 스펙트럼으로 나타낸 것으로, 소파효율이 대부분 주파수 영역에 걸쳐서 양호하게 나타난다는 사실을 확인할 수 있으며,

특히 약 주기 6초 이하의 입사 파랑에 대해서 소파효율이 높게 나타난다는 것을 알 수 있다. 반면에 Fig. 11에서는 유의주기 8.64초, 유의파고 2 m 파랑에 대한 소파성능을 보여주고 있는데, 소파성능이 양호하지 못하다는 사실을 확인할 수 있다.

일반적인 부소파제의 소파성능에서도 알 수 있듯이 장주기 입사파랑 성분에 대해서는 소파성분이 떨어진다는 사실을 확인하였

다. 향후 장주기 파랑에 대한 소파성능 향상을 위하여 부체의 형상 및 단면 변화에 대한 연구가 요구되어 진다.

3. 결 론

환경친화적인 소재인 폴리에틸렌 파이프와 시트를 사용하여 새로운 소파 개념의 부소파제를 개발하였다. 개발된 부소파제의 소파 성능평가를 위하여 수리실험을 수행하였으며, 실험의 주된 관심은 입사파의 에너지 감소에 있었다. 규칙파에 의한 실험 부체의 기본 소파특성을 파악하였으며, 실제 현상과 유사하게 나타나는 불규칙파 중의 부체 소파 성능을 파악하였다. 규칙파 실험에서는 파랑주기 8초 이내의 파랑조건에서는 약 입사파의 약 30%를 소파할 수 있으며, 5초 이내의 파랑주기에 대해서는 약 50%까지 소파할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 그러나, 파랑주기가 10초 이상인 경우에는 입사파를 거의 감소시킬 수 없다는 것을 알 수 있었는데, 이것은 지금까지 알려진 일반적인 부소파제의 문제점을 보여주고 있다. 이 문제에 대해서는 향후 보다 깊은 연구가 요구되어 진다. 불규칙파 역시 유의주기 5.4초 유의파고 1 m에 대해서는 소파성능이 양호하였으나, 유의주기 8.64초 유의파고 2 m에 대해서는 입사파에 대한 소파성능이 떨어진다는 것을 알 수 있었다. 개발된 부소파제는 수산, 양식 시설물 보호 및 작업을 위한 정

온 유지를 위하여 충분히 적용될 수 있을 것으로 기대된다. 향후, 부체의 성능 개선을 위하여, 부체폭, 홀수, 파이프 직경, 계수선 길이, 그리고, 계류방법 등에 대한 최적조건 해석이 이루어져야 한다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 지원으로 수행된 ‘해양심층수 다목적 이용 개발’의 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 포스코건설, 2003, “부소파의 파랑제어 해석법과 기술개발사례 및 설치현황조사”.
- [2] (주)해강 부설해강기술개발연구소, 1996, “부소파제의 설계를 위한 수치모형개발연구”.
- [3] ECOR일본위원회, 1980, “부소파제개발에 관한 케이스 스테디의 현황”.

2006년 3월 21일 원고접수

2006년 6월 12일 수정본 채택