

중층계류식 인공해저시스템의 파랑중 운동특성에 관한 실험적 연구

윤상준⁽¹⁾, 양찬규⁽²⁾, 김현주⁽³⁾, 김헌태⁽⁴⁾

An Experimental Investigation on the Hydrodynamic Characteristics of Submerged Artificial Seabed System in Regular Waves

by

Sang-Joon Yoon⁽¹⁾, Chan-Kyu Yang⁽²⁾, Hyeon-Ju Kim⁽³⁾ and Heon-Tae Kim⁽⁴⁾

요 약

본 연구는 입체적 어장 개발을 위해 수산자원 증대의 토대가 되는 해조장의 확대와 생태계의 고밀도·고효율화를 위한 기초적 연구로 수평판형 중층계류식 인공해저시스템의 파랑응답특성에 관한 실험적 연구를 수행하였다. 실험은 2차원 수조에서 다른 두 가지 모형의 수평판을 세 가지 다른 수심에 각각 고정 혹은 계류시켜 실시하였다. 실험에서 모형 고정시의 작용유체력 특성과 모형 계류시의 파랑응답 및 계류력 특성을 살펴보았으며, 또 각 조건에서 모형의 파랑제어특성을 검토하였다.

Abstract

This paper deals with the experimental investigation on the hydrodynamic behavior of the submerged artificial seabed system in regular waves. This system can function as a basis of seaweed forest which will cultivate coastal fishing ground and enhance coastal productivity. The experiment was conducted with the submerged rectangular plates of different length and depth in 2-D wave flume of KRISO/KORDI. The wave exciting forces, mooring line tension and 2-D motion response are measured and analyzed to figure out the design strategy.

Keywords: Artificial Seabed, Submerged Plate, Marine Ranch, Wave Force, Mooring Force, Motion Response

(1) 한국해양연구원 (KRISO/KORDI) joon2ya@kriso.re.kr

(2) 한국해양연구원 (KRISO/KORDI) ckyang@kriso.re.kr

(3) 한국해양연구원 (KRISO/KORDI) hjkim@kriso.re.kr

(4) 부경대학교 해양공학과(PKNU, Ocean Eng.) htkim@pknu.ac.kr

1. 서 론

종래 바다목장화를 위한 해양공간의 이용개념은 해저면에 착저식 인공어초를 설치하거나 중층 또는 표층에 부유식 인공어초를 설치하는 평면(단층)적 개발 및 이용이었다(류청로 등[1994]). 그러나 해양공간에는 표층, 중층 및 저층에 다양한 생물자원이 서식하고 있고, 각 생물자원은 서로 유기적인 영향을 미치고 있으며, 동일 생물일 지라도 성장과정에서 서식지를 바꾸어가는 생태적 특성을 가지기도 한다. 이에 따라 인공어장조성기술은 평면적인 착저식 인공어초의 개발·제작에서 해류제어 구조물 및 표·중층식 부유구조물과 연계한 입체적 개발로 발전되어 가고 있는 추세이다(김현주 등[1998], 김현주 등[1999]).

한편 세계 주요 생태계의 1차생산량이 해양의 경우 해안으로부터 3해리까지는 $10\sim 25\times 10^3$ Kcal/m²/yr, 3~12해리까지는 $0.5\sim 3.0\times 10^3$ Kcal/m²/yr, 심해층은 1.0×10^3 Kcal/m²/yr 이하로 알려져 있고, 또 평균 건조중량이 외양은 125 g/m²/yr인데 비해 2,000 g/m²/yr인 열대우림과 거의 같은 해조장(1,800 g/m²/yr)의 생산성을 인지한다면(Odum, E. P.[1971]), 햇빛이 도달하는 중층 및 저층에 풍부한 영양염류와 착생기질이 있는 경우에는 해조류에 의한 1차 생산량이 보다 향상될 것임은 분명하다. 따라서 중수심역에 (1) 산란·보호·육성기능, (2) 산소공급을 통한 저질 및 수질 개선, (3) 영양염의 분산소모에 의한 적조저감, (4) 천연사료 공급기능 등으로 알려진 해조장의 효과를 확대할 수 있는 환경을 인공적으로 조성하는 것은 1차생산량을 크게 증대시키는 효과적인 방안이 될 수 있다(한국해양연구소[2000]).

이에 본 연구는 입체적 어장 개발을 위해 수산자원 증대의 토대가 되는 해조장의 확대와 생태계의 고밀도·고효율화를 위한 기초적 연구로 수평판형 중층계류식 인공해저시스템의 파랑응답특성에 관한 실험적 연구를 수행하였다. 실험에서 모형 고정시의 작용유체력 특성과 모형 계류시의 파랑응답 및 계류력 특성을 살펴보았으며, 또 각 조건에서 모형의 파랑제어특성을 검토하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험대상 및 조건

중층계류식 인공해저시스템의 2차원 수리모형실험을 위해 1/40 스케일의 모형을 제작하였으며, 목재 및 알루미늄판을 이용하여 비중을 조절하였다. 수중평판(인공해저) 모형의 형상, 설치수심, 파의 제원 및 기타 실험에 필요한 사항은 실험역의 파랑상태 및 광달수심(투명도)를 고려하여 Table 1과 같이 설정하였다.

2.2 실험 및 해석방법

2차원 수조를 이용한 중층계류식 인공해저시스템의 성능평가 실험을 위해 축소된 시작품 모형 및 계류센서를 2차원 수조 내에 설치하였다(Fig. 1). 고정 수평판 모형에 작용하는 파력은 모형 중심에 사각봉을 고정하여 윗쪽에 설치된 2축 로드셀(loadcell)에 부착하여 측정하였다(Fig. 1-a). 한편, 계류된 모형의 운동은 모형에 검은색 원형 표시를 하고 캠코더로 녹화하여 화상처리 함으로써, 모형의 전후동요(surge), 상하동요(heave) 그리고 중동요(pitch) 운동을 측정하였고, 계류력은 모형의 앞뒤에 장력계를 두어 계류삭에 걸리는 장력을 측정하였으며, 모형스케일에서의 초기장력(pre-tension)을 모사하기 위해서 장력계 바로 밑에 스프링을 두어 측정하였다(Fig. 1-b). 프로펠러형 유속계로 유속을 측정하였으며, 파고는 용량식 파고계(KENEK co.)를 설치하여 반사파 및 투과파를 측정하였다.

Table 1 Experiment conditions

Model	specific gravity	0.8
	L×B×t (m)	10.0 and 5.0×23.2×0.92 [0.25, 0.125×0.58×0.023]
	submerged depth, d (m)	2.5[0.063], 5.0[0.125], 7.5[0.19]
	setting type	fixed, 2-point mooring
Water depth, h (m)		20[0.5]
Wave	height, H (m)	1.2[0.030], 1.8[0.045] 2.2[0.055], 3.5[0.088]
	period, T (sec)	4[0.63], 6[0.95] 8[1.26], 10[1.58]

※ The inside of [] represents model scale.

중층계류식 인공해저시스템의 파랑중 운동특성에 관한 실험적 연구

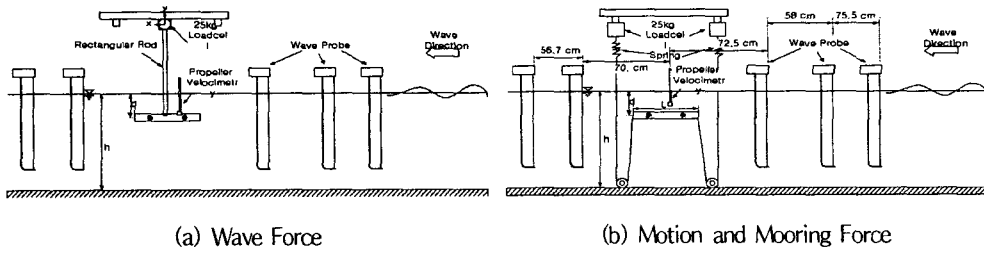
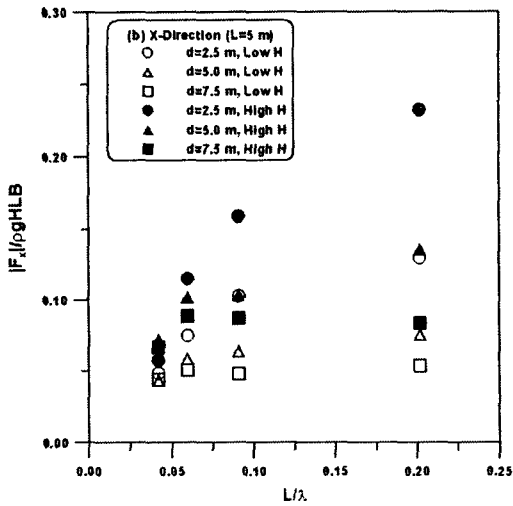
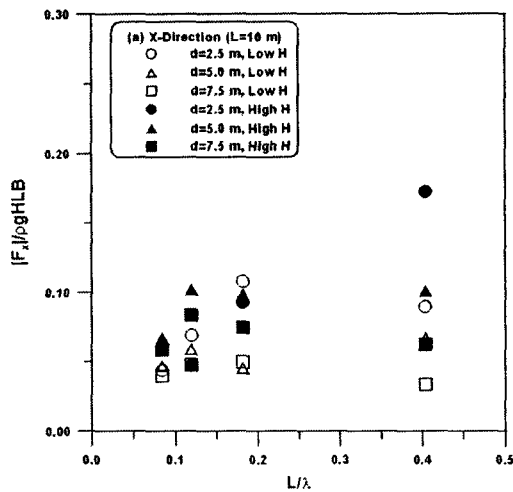


Fig. 1 Experimental Setups

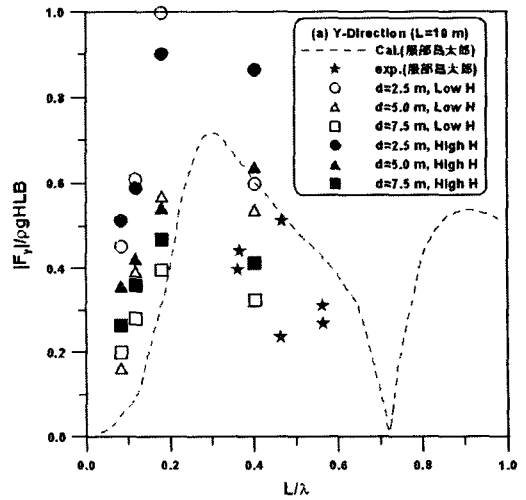


(a) L = 10 m

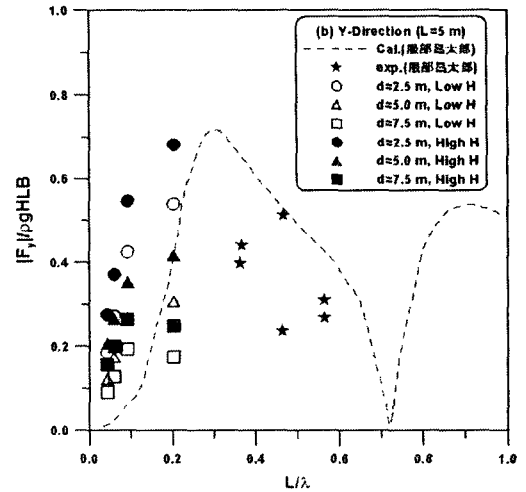


(b) L = 5 m

Fig. 2 x-Component of Wave Exciting Force



(a) L = 10 m



(b) L = 5 m

Fig. 3 y-Component of Wave Exciting Force

3. 작용 유체력 특성

로드셀에 고정된 구조물의 설치수심을 변화시키면서, 다양한 주기의 규칙파 및 각 주기별로 두 가지 파형 경사(낮은 파고와 높은 파고)를 적용하여 파력 및 수평판 상부의 유속을 측정하였다. 실험에서 설치수심 $d=2.5$ m 일 때, 주기 8~10 초인 장파가 구조물 상부에서 쇄파되는 현상을 관찰할 수 있었다. 전반적으로 구조물 길이가 짧은 경우가 긴 경우보다 쇄파가 약하게 일어났으며 구조물이 수면으로부터 5 m 이상 깊어지면 쇄파현상이 거의 관찰되지 않았다.

파력성분의 시계열 자료를 zero up-crossing 방법을 이용하여 해석함으로써 수평 및 수직 파력의 진폭을 얻을 수 있고, 이를 무차원화한 결과가 각각 Fig. 2와 Fig. 3이다. 여기서 λ 는 파장, H 는 파고를 나타낸다.

또, y-방향 파강제력은 服部昌太郎 등[1977]의 수평판 실험에서 $d/h=0.25$ (본 실험의 경우 $d=5.0$ m에 해당)인 계산값 및 실험값과 비교하여 보았다. 동일 파랑조건에서 수면에 가까울수록, 판의 길이가 길수록 파강제력은 크게 나타나고 수평판 길이대 파장의 비가 약 0.2~0.3 부근에서 최대가 되는 것으로 판단된다. 실험으로부터 동일 파랑환경에서 $L=5$ m일 때가 $L=10$ m인 것에 비해, 파강제력은 약 30% 정도 작은 것을 볼 수 있다. 한편 이러한 파강제력에 관해서는 많은 연구가 있어왔으나, 주로 상자형(송무식 등[1998]) 혹은 수평판형의 부유식 방파제로서 파랑제어에 관한 것으로, 본 연구의 경우처럼 상대적으로 작은 두께(t)와 길이(L)를 가진 형상과 방파제가 아닌 인공해저시스템이라는 기능을 고려할 때 직접적인 비교는 한계가 있다. 그러나 0.4 이하의 작은 L/λ 값을 가지는 영역에서의 y-방향 파강제력 특성을 검토할 수 있었다는데 의의가 있는 것으로 사료된다.

파고 및 파력 성분의 시계열 자료를 이용하여 항력 계수 및 관성력계수를 구할 수 있고(김현주[1995]), 이렇게 구한 수평방향 항력계수 및 관성력계수를 수평판 길이를 KC수에 대해 나타낸 것이 Fig. 4 및 Fig. 5에 각각 도시하였다. 이때 KC수는 아래와 같다.

$$KC = \frac{U_m T}{D} \quad (1)$$

여기서, U_m =최대수립자속도, T =파의 주기, D =수평판의 형상특성상 지배적 인자인 수평판 길이(L)이

다.

그림으로부터 관성계수보다는 항력계수가 더 크게 나왔고, 항력계수는 평균적으로 6 이하, 관성계수는 0.2 이하의 값을 알 수 있다. 또 두 계수는 $KC < 1.5$ 인 영역에서 KC수가 증가할수록 감소하는 특성을 보이나 $KC > 1.5$ 인 영역에서는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 이것은 파 진행 방향에 횡으로 놓여있는 수평실린더의 경우 KC의 증가에 따라 항력계수는 증가하다가 감소하는 경향을 보이는 일반적 경향(Clauss, G. et al[1988])과 대치되는 것처럼 보이나 이는 다루어지는 KC수 영역의 차이에 의한 것으로 직접적인 비교는 할 수 없다.

Fig. 6은 수평판 상부의 무차원화한 유속 진폭을 도시한 것이다. 고정 수평판 상부 표면에서의 유속은 대체로 평판의 길이와 상관없이, 파장이 유속특성을 결정짓는 변수인 것으로 보이며, 파장이 짧은 영역에서는 설치수심에 따라 유속차이가 큰 것으로 나타났다. 특히, 평판의 설치깊이 d 가 2.5 m일 때는 동일한 파장 및 평판의 설치 깊이가 조건이라도 평판 길이에 따라서도 큰 폭의 유속차를 보이며, 특히 판의 길이(L)가 10 m인 경우는 예외적으로 L/λ 에 따라 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보였다.

4. 파랑응답 및 계류력

계류된 수평판의 파랑중 운동성 및 계류력을 살펴보았다. 실험에 사용된 스프링의 스프링 상수는 91.16 kgf/m이었다. 파고는 Table 1의 높은 파고만 택하였고, 수평판의 설치깊이 d 는 2.5 m와 5 m 두 가지만

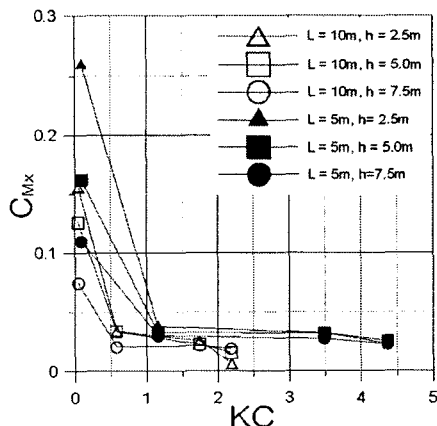


Fig. 4 Drag Coefficient of X-Direction

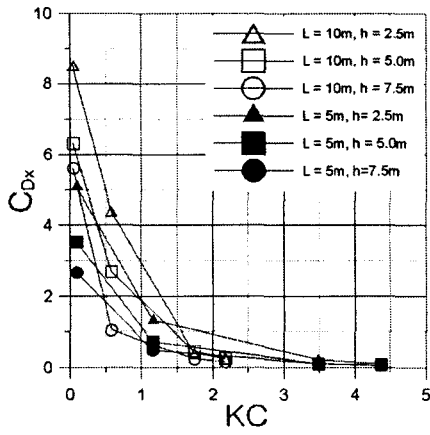


Fig. 5 Inertia Coefficient of X-Direction

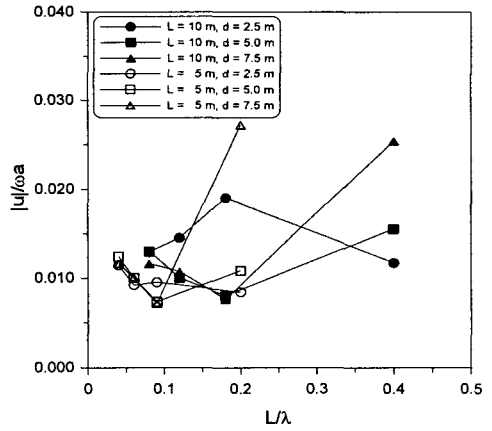
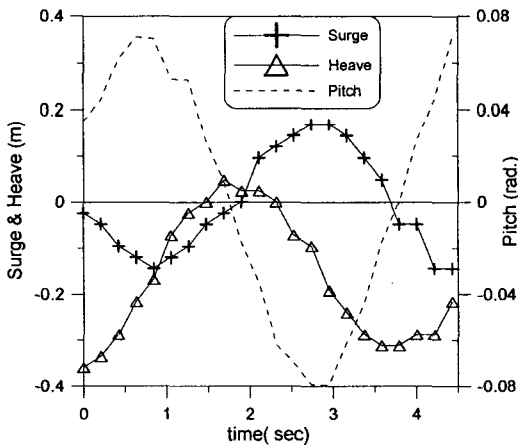
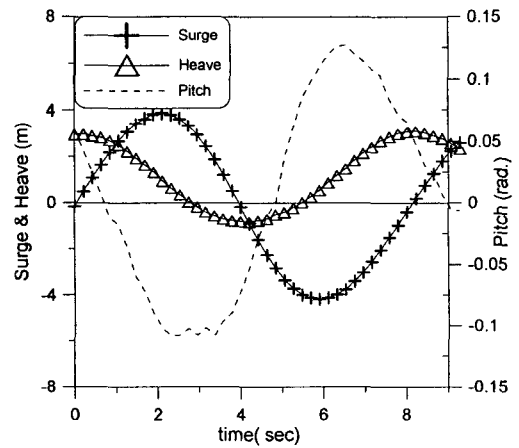


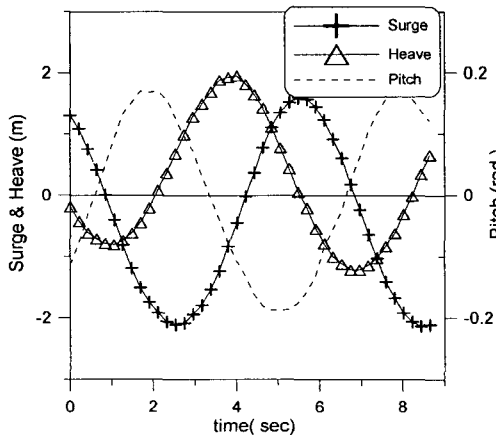
Fig. 6 Velocity over the Fixed Plate



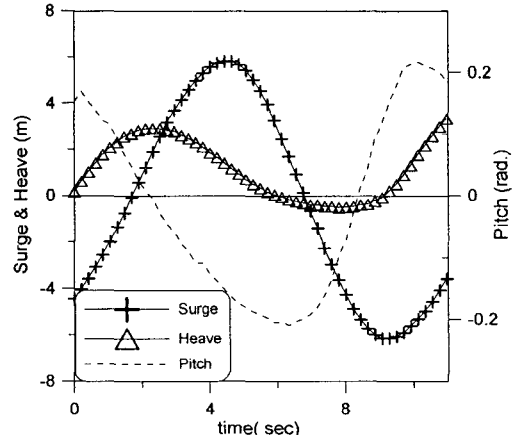
(a) T=4 sec



(c) T=8 sec



(b) T=6 sec



(d) T=10 sec

Fig. 7 Time History of Three Degree of Freedom Motion (L=10 m)

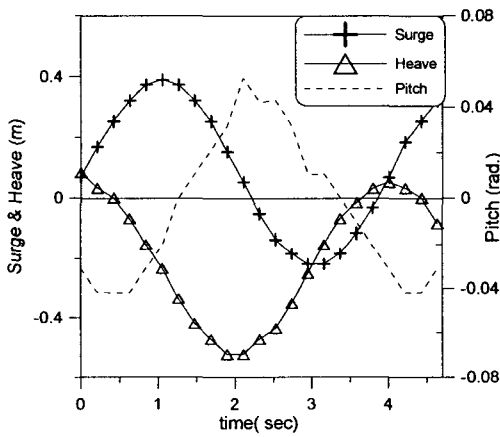
택하여 깊이의 영향을 살펴보았다. 계류된 수평판의 파도중 운동은 전반적으로 수평판이 수면에서 가까울수록 운동이 현저히 커지는 것을 관찰할 수 있었고, 구조물 길이(L)가 큰 쪽의 운동이 더 컸다. 이것은 수평판이 수면에 가까울수록, 또 수평판 크기가 클수록 파강제력을 더 많이 받는 것과 연관지을 수 있다. 또한 주목할 만한 특징은 수평판의 상하 회전운동(pitch 운동)은 평판과 그 윗쪽의 수표면과 같은 기울기를 갖고 움직인다는 것이다. 즉, 수중의 판위의 파형에서 임의점의 수면 기울기와 평판기울기는 같은 값을 가지고 운동을 하였다.

Fig. 7과 Fig. 8은 $d=2.5$ m일 때 3자유도 운동에 대한 시간이력을 보여준다. 병진운동인 전후동요(surge)와 상하동요(heave)는 $T=4$ sec일 때를 제외하고는 다

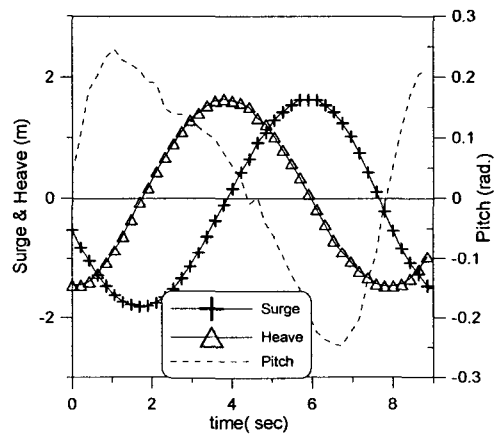
소 차이는 있으나 매우 깨끗한 정현파형을 보인다. 그러나 종동요(pitch)는 계류삭의 장력과 부력간의 간섭에 의해 복잡한 운동을 하고 있음을 알 수 있다.

운동의 시계열을 통해 무차원한 운동 진폭을 Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11과 같이 얻을 수 있다. 주파수가 증가할수록 진폭은 감소하고, 긴 평판이 짧은 평판에 비해 병진운동이 더 크다는 것을 알 수 있다. 그러나 회전운동은 주파수에 따라서 짧은 평판의 진폭이 더 큰 경우도 관찰되었다.

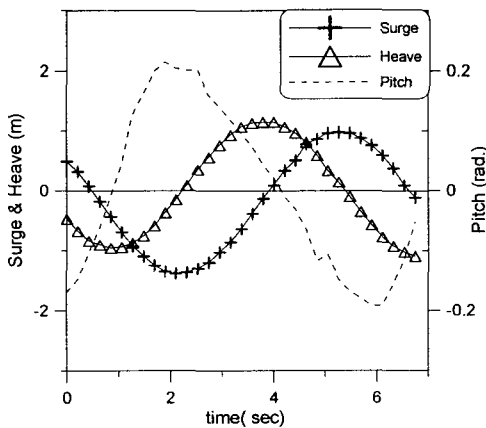
수평판 앞과 뒤의 계류삭에 걸리는 장력을 장력계로 계측하여 얻어진 장력의 진폭을 무차원화하여 Fig. 12에 도시하였다. 여기서 F1은 파를 받는 쪽, F2는 파가 빠져나가는 쪽의 장력이다. 이때 F1과 F2는 수평판의 길이에 상관없이 수평판이 수면에 가까울 때



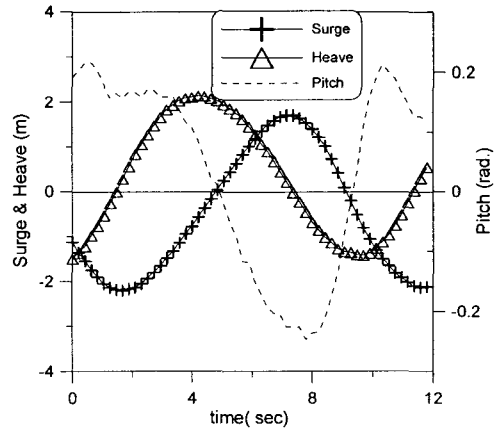
(a) $T=4$ sec



(c) $T=8$ sec



(b) $T=6$ sec



(d) $T=10$ sec

Fig. 8 Time History of Three Degree of Freedom Motion ($L=5.0$ m)

할인된 가격으로 시장이 형성되어져 있는 것이 현실이다. 특히 트럭을 이용한 도로운송의 운송비용 할인 경쟁은 매우 심하다. 본 연구에서는 할인된 운송비용이 아닌 운송회사에서 공식적으로 공시하고 있는 운송비용을 이용하였다.

4.2 운송경로의 희생량 계산 및 최적 운송 경로 선택

희생량 모델을 이용하여 각 운송경로의 희생량을 계산하고 그 계산결과에 기초한 최적 운송경로의 선택 결과에 대하여 고찰한다.

1) 희생량 모델에 의한 최적 운송경로 선택

Table 3의 결과와 (2)식의 희생량 모델을 이용하여 수출입 컨테이너화물의 시간가치에 따른 각 운송경로의 희생량을 계산한 결과를 Fig. 5에 나타낸다. 수출입 컨테이너화물의 시간가치는 원/TEU·시간의 단위로 결정하였으며 그 범위는 200,000원/TEU·시간까지로 하였다.

운송경로별 희생량 계산 결과를 살펴보면 철도운송과 도로운송의 교차 시간가치인 51,905원을 기준으로 51,905원보다 낮은 시간가치의 화물은 희생량이 가장 낮은 철도운송이 최적 운송경로이며 51,905원보다 높은 시간가치의 화물은 희생량이 가장 낮은 도로운송이 최적 운송경로인 것을 알 수 있다. 또한 연안운송의 경우는 철도운송과의 교차 시간가치가 -2,098원으로 화물의 모든 시간가치에 대하여 다른 운송경로 보다 높은 희

생량을 가져 최적 운송경로로는 선택되지 않아 운송경로로서 경쟁력을 가지지 못하는 것을 알 수 있다. 그리고 연안운송과 도로운송의 교차 시간가치는 4,444원으로 화물의 거의 모든 시간가치에서 도로운송이 연안운송에 대하여 유리한 것을 알 수 있다.

각 운송경로의 운송 분담율을 계산하기 위해서는 정확한 화물의 시간가치 분포가 필요하나, Fig. 5의 결과가 부산항을 이용하는 수출입 컨테이너화물의 운송수단별 분담율(2001년 기준, 트럭운송 86.9%, 철도운송 10.7%, 선박운송 2.3%) 경향을 비교적 잘 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

2) 연안운송의 운송비용 및 운송시간 삭감에 따른 최적 운송경로 선택

선박을 이용한 연안운송을 활성화하여 수출입화물의 운송 분담율을 증대시키기 위해서는 연안운송의 운송시간과 운송비용을 삭감시키는 것이 필요하다. 연안운송의 운송시간과 운송비용을 현재의 수준에서 50%까지 각각 삭감시켰을 때의 연안운송과 다른 운송경로간의 교차 시간가치를 조사한 결과를 Table 4와 Table 5, Fig.6과 Fig.7에 각각 나타낸다.

Table 4의 결과에서 알 수 있듯이 연안운송의 운송비용을 감소시킴에 따라 연안운송과 다른 운송경로와의 교차 시간가치가 증대하여 연안운송의 경쟁력이 향상되는 것을 확인할 수 있다. 연안운송의 운송비용이 50% 감소함에 따라 연안운

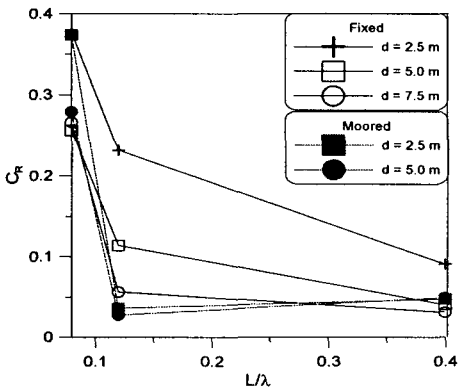
Table 4 Variation of cross time value by reduction of coastal transport cost

Unit: won/TEU·hour

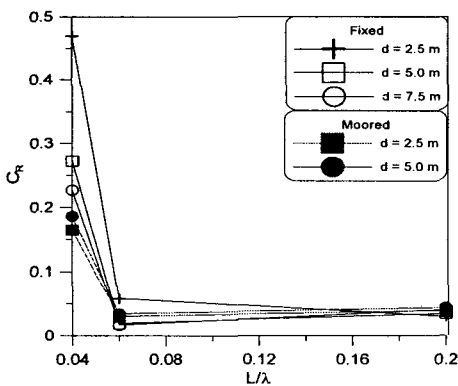
	Transport cost 0% reduction	Transport cost 10% reduction	Transport cost 20% reduction	Transport cost 30% reduction	Transport cost 40% reduction	Transport cost 50% reduction
Cross time value between coastal and railway	-2,098	-921	257	1,434	2,611	3,789
Cross time value between railway and road	51,905	51,905	51,905	51,905	51,905	51,905
Cross time value between road and coastal	4,444	5,479	6,513	7,548	8,583	9,618

[1991]), 입사파의 반사계수를 살펴보았다(Fig. 13). 앞서 살펴본 결과와 같이 수면에 가까이 있을수록 반사계수는 커지며, 또한 파 주파수가 큰 경우 상대적으로 큰 반사율을 가진다. 이는 장파에 비해 단파가 수심 근처에 있는 구조물의 영향을 많이 받기 때문이다.

또, 대체로 고정되어 있을 때가 계류되어 있을 때보다 수평판의 반사율이 높는데, 이것은 계류시의 수평판이 파도의 위상과 같은 위상으로 움직여 그만큼 파도의 반사를 줄여주기 때문이다. 대체로 반사계수는 0.03에서 0.4 사이가 됨을 알 수 있다.



(a) L = 10m



(b) L = 5m

Fig. 13 Reflection Coefficients

6. 결 론

중층계류식 인공해저시스템 개발을 위한 수중평판의 2차원 수리모형실험을 수행하여 다음과 같은 결론을

얻었다.

- 고정 수평판이 수면 가까이 설치된 경우, 장파의 쇄파를 관찰할 수 있었고, 이때의 에너지 소산 및 이로 인해 생겨난 흐름(wave induced current)이 파랑장의 유동특성을 변화시킨다.
- 고정 수평판의 파 강제력계수는 수면과의 거리가 가까울수록, 평판의 길이가 길 때가 짧은 쪽에 비해 파도의 기울기에 민감하게 변하며, 동일 파랑조건에서 파강제력은 L=5 m일 때가 L=10 m인 것에 비해 약 30% 작다.
- 고정 수평판의 항력계수는 평균적으로 6 이하, 판성계수는 0.2 이하의 값을 보이며, 두 계수는 $KC < 1.5$ 인 영역에서 KC 수가 증가할수록 감소하는 특성을 보인다.
- 고정 수평판 상부 표면에서의 유속은 대체로 파장에 따라 다른 특성을 나타내며, 특히 설치 깊이가 2.5 m인 경우는 평판의 설치수심 및 평판의 길이도 중요한 변수로 작용한다.
- 계류 수평판의 병진운동은 거의 완벽한 정현파형의 운동을 하는 반면, 회전운동은 구조물 길이에 따라 계류계와 보다 민감하게 상호작용하여 불규칙성을 내포하고 있다.
- 장력은 구조물이 수면에 가까울수록 커지고, L/λ 가 0.15보다 작은 영역까지는 장력의 진폭이 작아지다가 L/λ 이 0.15보다 큰 영역에서는 다시 커지는 경향을 나타낸다.
- 반사율은 수면에 가까이 설치된 수평판이 더 높고, 계류된 것보다는 고정되어 있는 쪽이 더 높다. 반사계수는 0.03에서 0.4 사이의 값을 갖는다.

후 기

본 연구는 해양수산부 “통영해역의 바다목장 연구개발 (2001)” 사업의 일부로서 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 김현주, 1995, “연안 생태계제어 구조물의 안정성과 기능 극대화를 위한 기초적 연구”, 145p.
- 김현주 · 조일형 · 양찬규, 1998, “다목적 수산증식시설 개발을 위한 기초연구”, 어항 '98 가을호, 44~51.

- [3] 김현주 · 양찬규 · 홍기용, 1999, “인공어초 주위의 유동특성에 관한 실험 및 해석”, 1999년도 춘계 수산관련학회 공동학술발표회 요지집, 60~61.
- [4] 류청로 등, 1994, “해양목장화를 위한 적정어초 및 설계기술 개발”, 수산청, RCOID931-1213-06-1.
- [5] 송무석 · 김도영 · 이현엽 · 조일형, 1998, “규칙 파중 수면 근처에 고정된 상자형 방파제의 특성에 관한 연구”, 대한조선학회논문집, 35(2), 38~50.
- [6] 한국해양연구소, 2000, “통영해역의 바다목장화 개발 연구용역 사업 보고서(1단계 최종보고서)”, 해양수산부.
- [7] Chakrabarti, S. K., 1987, “Hydrodynamics of Offshore Structure”, Computational Mechanics Publications, 440p.
- [8] Clauss, G., E. Lehmann and C. Østergaard, 1988, “Meerestechnische Konstruktionen”, Springer-Verlag.
- [9] Odum, E. P., 1971, “Fundamentals of ecology 3rd ed.”, Sounders.
- [10] Isaacson, M., 1991, “Measurement of Regular Wave Reflection”, J. Wtrwy, Harbor and Coastal Engrg, Div. ASCE, Vol. 117, 553~569.
- [11] 服部昌太郎, 松本文信, 1977, “水平板式透過性防波堤の水理特性”, 第24回海岸工学講演會論文集, 266~270.