

복합판형 부소파제의 현지적용에 관한 연구

오윤석* · 최낙훈* · 천재영* · 김도삼**

*한국해양대학교 대학원 토목환경공학과

**한국해양대학교 건설환경공학부

A Study on Field Application of Floating Breakwater with Compound Plate Type

YOON-SEOCK OH*, NACK-HOON CHOI*, JAE-YEONG CHEN*, DO-SAM KIM**

*Department of Civil and Environmental Engineering, Graduate school, Korea Maritime University, Busan, Korea

**Division of Construction and Environmental Engineering, Korea Maritime University, Busan, Korea

KEY WORDS: Floating Breakwater with Compound Plate Type(FBCPT) 복합판형 부소파제, hydraulic model test 수리모형실험

ABSTRACT: Recently the target area for the installation of structures have been changed from shallow water into deep one by reservation and use of the wider coastal region, and development of deep water. Additionally, great emphasis in the improved human life quality has been placed on the necessities for the preservation of the agreeable natural and coastal environments and development waterfront, recreation, and resort in the sea. However, the existing gravity-type breakwater did not appropriately cope with the recent changes of circumstances, but required the enormous construction cost for coping with them. Until now, floating breakwater, which was adequate for the environment and construction cost, has been actively studied in the other countries including Japan. This floating breakwater has been already constructed in many places and satisfactory in poor subsoil and deep water in Japan. Also it showed the same function as a gravity-type breakwater. But floating breakwater was not control long period waves by reason of constructive characteristic. The aim of this study is to discuss field application of Floating Breakwater with Compound Plate Type(FBCPT) in coastal region by using numerical analyses and hydraulic model test.

1. 서 론

최근 보다 넓은 해역공간의 확보와 이용 및 심해역의 개발로 인하여 구조물 설치대상의 해역이 점점 심해역으로 향하고 있고 경제발전에서 따른 인간생활의 질적향상으로 바다에서의 레크레이션과 리조트, 해역의 쾌적한 자연환경보존과 해양환경의 개선 및 워터프론트의 개발에 대한 필요성이 강조되고 있다. 하지만 기존의 중력식 구조물로서는 이러한 상황변화에 대처할 수 없을 뿐만 아니라 목적을 달성하기 위해서는 막대한 건설비가 소요된다는 단점이 있다. 따라서 일본을 위시한 많은 외국에서는 이러한 중력식구조물의 기능을 가질 뿐만 아니라, 연약지반상 및 심해역에서도 그 기능을 충분히 발휘할 수 있으며, 환경적인 측면과 경제적인 측면에서 효과적인 부소파제에 대한 연구가 많이 수행되어 왔으며, 그의 시공 예를 많이 볼 수 있다. 하지만 부소파제의 구조특성상 장주기파랑의 제어에는 한계가 있어 이러한 부소파제의 단점을 보완하기 위하여 새로운 형식인 복합판형 부소파제가 연구·개발되었다.

본 연구에서는 통영시 바다목장의 전면해역에 건설되고 있는 복합판형 부소파제(Floating Breakwater with Compound Plate Type ;

이하 FBCPT)를 대상으로 2차원 수리모형실험, 2차원 및 3차원 특이점분포법(Source Distribution Method ; SDM)에 의한 수치해석과 SWAN모형에 의한 정온도해석으로부터 복합판형 부소파제의 현지 적용성에 대해 검토한다.

2. 2차원 수리모형실험

2.1 조파수조와 모형부소파제

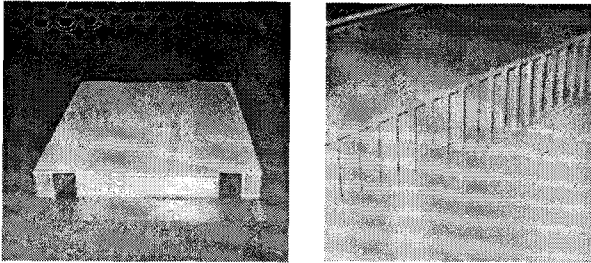
수리모형실험은 국립수산과학원내에 설치되어 있는 단면2차원조파수조를 사용하여 실시되었다. 조파수조는 길이 30m, 폭 1.0m, 높이 1.2m의 크기를 가지며, 수조의 한쪽 끝에 servomotor에 의해 구동되는 플랜저형의 불규칙 및 규칙파조파기가 설치되어 있고, 수조의 중앙부분에 모형 부소파제를 두고, 수조의 다른 끝단에 파의 재반사를 막기 위하여 소파공이 설치되어 있다. 수리실험은 통영시 바다목장 전면해역에서의 수심인 20~40m정도의 현지조건을 대상으로 하였으며, 이때 부소파제의 pontoon(부력체)의 폭은 대략 10~15m정도로 상정하였다. 이에 따라 실험에 적용된 모형부소파제는 현지조건인 1/50에 상당하는 크기로 주문·제작하였으며, 염화비닐판의 조합으로 구성하였다. 제작된 모형부소파제는 Photo. 1에 나타내는 바와 같고, 실험에 적용된 모형의 치수, 이에 따른 중량, 관성모멘트 및 중심의 위치 등은 Fig. 1에 주어져 있다.

계류라인은 시판되는 체인(단위길이당 수중단위중량 : 2.1gf/

김도삼 : 부산광역시 영도구 동삼1동 한국해양대학교

051-410-4463 kimds@hanara.kmaritime.ac.kr

cm)을 사용하였으며 부소파제를 수조의 중앙부분에 설치하고, 부소파제의 전후에 각각 2개의 계류라인, 총 4개의 계류라인으로 부소파제를 해저에 고정된 4개의 앵커블록에 open catenary방식으로 계류하였다.



Poto. 1 FBCPT

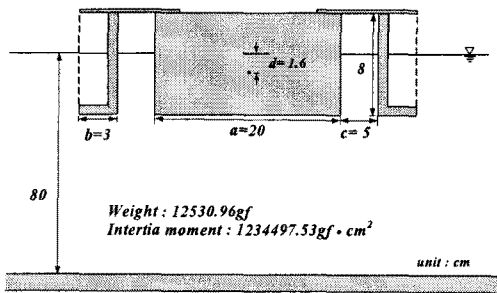


Fig. 1 Model of FBCPT

2.2 계측항목과 장비

실험에서 계측항목은 파랑변형율(반사율과 전달율), 계류라인에 작용하는 장력, 부체의 운동(sway, heave, roll), 표류거리 및 부체의 고유주기이다. 수위변동은 6대의 용량식파고계(Kenek-CHT-450)를 증폭기(Kenek-CH-403)와 AD변환기(NI-BNC-2090)를 통하여 해석용컴퓨터에 연결하여 데이터를 얻었다. 부체 전면에 설치된 3개의 용량식 파고계로부터 얻어진 데이터에 3점법에 의한 입·반사파분리법을 적용하여 입사파고와 반사율을 산정하였으며, 동일하게 후면에 설치된 3개의 용량식파고계로부터 얻은 전달파고로 전달율을 산정하였다. 부체 운동은 중심의 좌표가 시간의 경과에 따라 추적되면서 중심의 sway, heave, roll 및 표류거리가 동시에 측정되는 고속화상처리시스템(Keyence-CV-2100)으로 산정하여 얻어진 데이터를 해석용컴퓨터에 입력하여 각 운동변위를 산출하였다. 계류라인에 작용하는 장력을 측정하기 위하여 파력이 크게 작용하는 폰톤 전면에서 폰톤과 좌우 계류라인의 연결지점 2개소에 각각 1개(총 2개)의 장력계(용량 50kgf)를 부착하고, 이를 동적변위계(Unipulse-A14015)와 AD변환기(NI-BNC-2090) 및 해석용컴퓨터를 통하여 측정치를 얻었다. 부소파제의 고유주기는 계류하지 않은 자유운동의 상태에서 가속도계(Kyowa-ASW-2AZ10)로 측정되었으며, 이를 동적변위계(Unipulse-A14015)와 AD변환기(NI-BNC-2090) 및 해석용컴퓨터로 입력하여 heave와 roll의 감쇠고유운동의 시간 변화 데이터를 산출하여 고유주기를 측정

하였다.

2.3 실험파랑 및 실험케이스

실험에 사용한 수조의 수심은 통영시 바다목장 전만해역에서의 수심을 40m 정도를 상정하고, 1/50로 축척하여 80cm로 설정하였다. 입사파랑은 모두 규칙파이며, 적용시킨 입사파의 주기는 모형으로 0.5~2.0sec, 현지의 주기로 환산하면 3.54~14.14sec 정도에 상당한다. 입사주기 0.9~2.0sec에 대해서는 2개의 입사파고를 작용시켰고, 나머지 입사주기에 대해서는 1개의 파고를 입사시켰다.

또한 부체의 안정성을 평가하기 위하여 50년빈도 설계파와 태풍 매미의 파랑조건에 대해서도 실험을 수행하였다. Table 1은 통영시 바다목장 인근해역에서의 설계파랑조건을 나타낸다.

Table 1 Design wave conditions

구분	T(sec)	H(m)	h(m)
정상파랑(소파대상파)	4.05	1.35	20~40
이상파랑(50년빈도 파랑)	13.3	3.5	
태풍매미시의 파랑	12.2	5.7	

2.4 해석결과 및 고찰

본 연구에서 적용하는 수치해석법은 Green함수에 기초한 특이점분포법이며, 구조물에 의한 마찰과 와류 등에 의한 파랑에너지의 감쇠를 도입하고 있다(中村 등, 1997). 실제의 해석에서는 에너지감쇠율 f_c 의 값을 조정하여 수치해석을 실시하고 그 결과를 실험치와 비교하여 가장 합당한 값을 얻게 되며, 본 연구에서는 $f_c=0.12$ 의 값을 산출할 수 있었다.

2.4.1 파랑제어

Fig. 2는 복합관형 부소파제의 파랑제어특성을 나타낸 결과이다. 주기의 변화에 따른 파랑제어특성의 변화를 살펴보면 반사율의 경우 극소치를 나타내는 $T=4.3$ sec 근방을 제외하면 주기가 증가함에 따라 반사율은 작아지는 경향을 나타낸다. 전달율의 경우 설계파랑조건 중에 정상파랑조건에 상당하는 $T=5.0$ sec 근처까지의 단주기측에서는 $C_t=0.2$ 전후의 값을 나타내며 이상파랑조건에 대해서는 $C_t=0.85$ 전후의 값을 나타낸다. 따라서 소파대상으로 하는 정상파랑에 대해서 복합관형 부소파제의 탁월한 파랑제어기능을 확인할 수 있다.

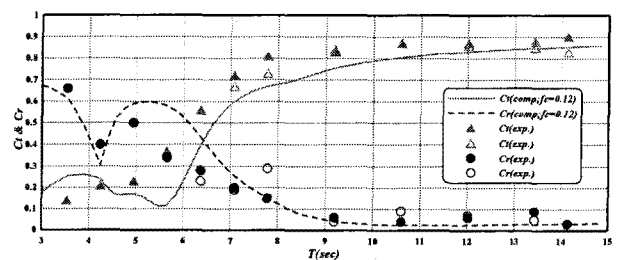


Fig. 2 Reflection and transmission coefficient

2.4.2 에너지감쇠

Fig. 3은 파랑에너지의 감쇠율을 나타낸 결과이다. 그림으로

부터 $T=4.2\text{sec}$ 근방에서의 파랑에너지감쇠는 약 80% 정도로 극대치를 나타내며, 이후에는 주기가 증가할수록 파랑에너지감쇠는 줄어드는 경향을 보인다. 이러한 주기의 변화에 따른 수치해석결과와 수리모형실험결과의 변화과정이 잘 일치하며, 두 값의 대응성이 매우 좋다는 것을 알 수 있다.

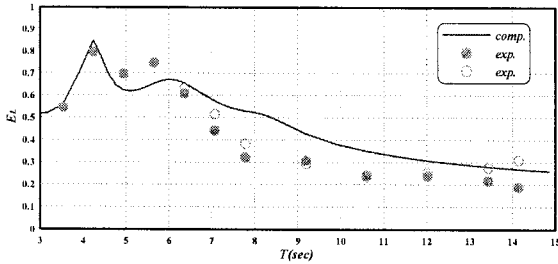


Fig. 3 Energy loss

2.4.3 부소파제의 운동

Fig. 4는 부소파제의 운동 중 중심의 회전운동(roll운동)을 $(B/2)/(H/2)$ (B 는 pontoon의 폭, H 는 입사파고)로 무차원하여 나타낸 결과로 sway 및 heave를 포함한 보다 자세한 내용은 윤희면(2005)을 참고하기 바란다.

결과를 살펴보면 $T=6.4\text{sec}$ 까지는 주기가 증가함에 따라 roll도 증가하는 경향을 나타내지만 $T>6.4\text{sec}$ 의 영역에서 수치해석결과는 극대치를 나타내지만 실험치는 거의 일정한 값을 나타낸다.

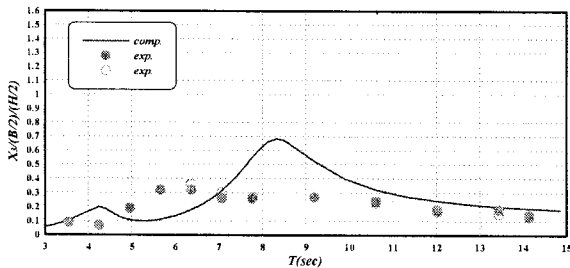


Fig. 4 Roll motion

2.4.4 계류라인의 장력

Fig. 5는 부소파제 전면에서 계류라인의 무차원장력을 나타낸 결과이다. 그림에서 T_L 은 장력, W 는 부체중량을 나타낸다.

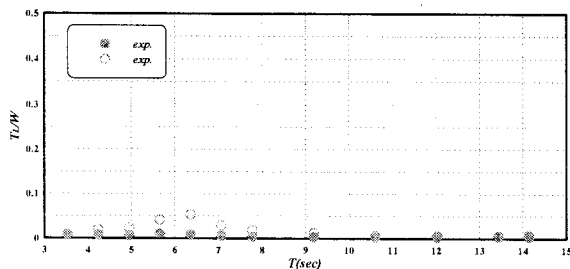


Fig. 5 Tension of mooring line

그림으로부터 계류라인에 작용하는 장력은 주기의 변화에 따라 큰 변화는 나타나지 않지만, 동일한 주기에 대해 입사파

고가 클수록 보다 큰 값으로 주어지는 것을 알 수 있다. 그리고 최대무차원장력은 $T=6.4\text{sec}$ 근방에서 약 0.06 정도의 값으로 나타난다. 이는 부소파제의 공기 중 중량의 대략 6%에 상당한다.

2.4.5 태풍 매미시의 파랑조건에 의한 물리량 검토

태풍 내습시 부소파제의 구조적인 안정성은 매우 중요한 사항이며, 본 연구에서는 2003년 남해안에 큰 피해를 준 태풍 매미 내습시의 파랑조건을 대상으로 부소파제의 안정성을 검토하였다. Table 2는 태풍 매미 내습시의 파랑조건 및 각 파랑조건에 대한 파랑변형을 및 계류라인의 무차원장력치를 나타낸 표이다. 검토된 파랑조건 중 가장 엄격한 파랑조건인 $T=16.97\text{sec}$, $H=8.25\text{m}$ 의 경우에도 무차원장력치가 0.03으로 주어지고, 이는 부소파제의 공기 중 중량의 약 3%에 상당하는 값이다. 여기서, 장력은 계류라인 1개에 작용하는 힘이며, 부소파제의 연장 98cm(현지환산치로 49m)에 대해 4개의 계류라인이 저항하기 때문에 충분히 안정하다고 판단된다.

Table 2 Incident wave condition and experimental result

T(sec)	H(m)	Cr	Ct	TL/W
12.73	4.55	0.04	0.86	0.01
	5.71	0.08	0.84	0.01
	6.75	0.10	0.85	0.02
15.56	6.56	0.13	0.82	0.03
	7.51	0.12	0.81	0.05
16.97	7.36	0.04	0.92	0.02
	8.25	0.04	0.92	0.03

3. 3차원수치해석

부소파제의 기능성에 관한 파랑제어능력의 평가는 2차원해석과 평면파랑변형의 해석에서 평가될 수 있지만, 부소파제의 안정성에 관련된 배치문제는 多基로 건설되는 부소파제의 운동으로 평가되어야 한다. 본 연구에서는 복합판형 부소파제와 같이 복잡한 형상의 부소파제에도 적용이 가능한 3차원특이점분포법을 적용하여 부소파제의 운동변위에 대해 수치해석을 수행하였으며, 이의 결과를 부소파제 평면배치시의 개구폭의 산정에 적용하였다.

3.1 수치해석 모델

Fig. 6은 3차원수치해석에 적용한 복합판형부소파제의 모델을 나타내며, 부소파제의 높이는 4m, 길이는 65m, pontoon의 폭은 10m, pontoon과 연직판 사이의 유수실폭은 각각 2.5m이며, 수평판의 폭은 1.5m의 크기를 갖는다. 부소파제의 설치수심 40m에 대하여 주기를 3.0~17.0sec까지 변화시켰으며, 입사파향각은 30°로 가정하였다. 부소파제의 基數는 1기이며, 비계류상태인 자유운동 조건하에서 수치계산을 수행하였다. 이는 계류부체의 경우보다 다소 큰 운동을 나타내어 실제의 적용에서는 안전한 값을 나타내기 때문이다.

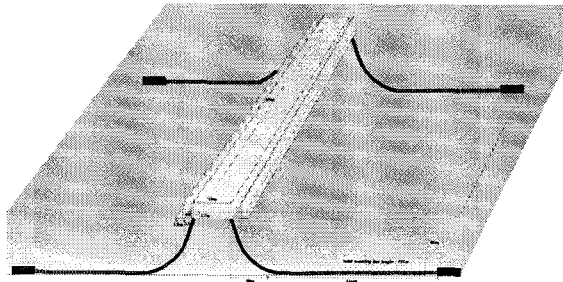
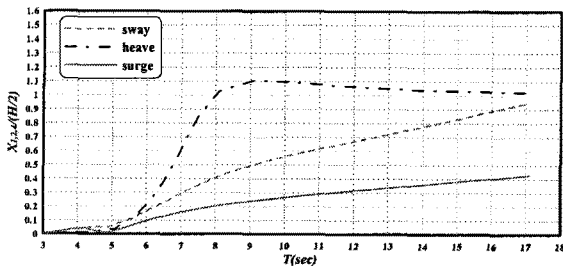


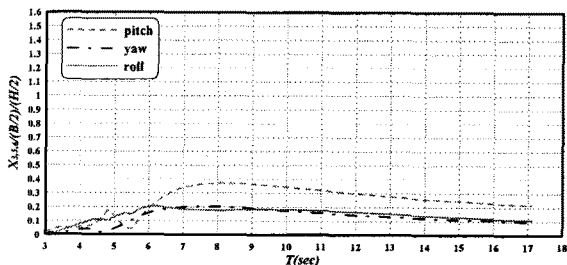
Fig. 6 Numerical model for three-dimensional SDM

3.2 수치해석 결과

복합판형 부소파제의 6-모드 운동에 대한 수치실험의 결과를 Fig. 7과 Fig. 8에 나타낸다. 평면배치시 개구부의 폭 결정에 중요한 영향을 미치는 surge와 yaw의 결과를 바탕으로 多基의 부소파제 개구부의 폭을 산정하면 다음과 같다. 즉 최대 surge 운동의 폭에 대해서 불규칙파랑을 고려하여 그에 각각 2배를 취하면 $2 \times 1.0 \times 2 = 4.0\text{m}$ 로 주어지고, yaw운동에 대해서는 가능한 최대의 수평변위값을 취하면 0.5m로 주어지므로 그의 2배를 취하면 $2 \times 0.5 = 1.0\text{m}$ 로 주어진다. 따라서 이론적으로 개구부의 폭은 0.5m로 계산되지만, 유사한 설치사례를 참조하고, 더불어 선박의 항행 등을 고려하여 좀더 여유폭을 주는 것이 바람직하다고 판단된다.



(a) X1=sway, X2=heave, X3=surge



(b) X3=pitch, X4=yaw, X5=roll

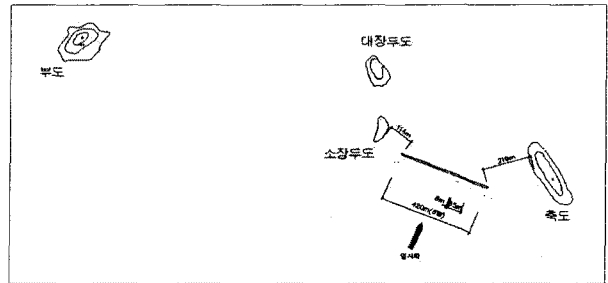
Fig. 7 Motions of FBCPT

4. 복합판형 부소파제에 의한 정온도해석

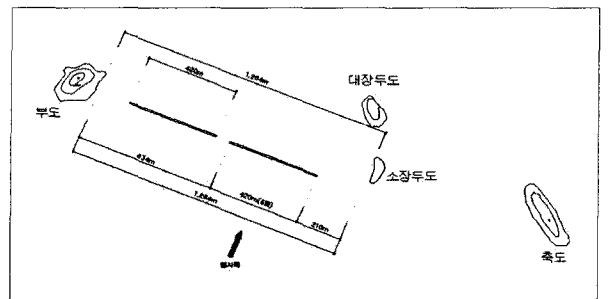
복합판형 부소파제의 평면배치에 의한 정온도를 해석하기 위하여 정도의 측면에서 세계적으로 인정되고 있고, 천수, 굴절, 반사, 투과, 쇄파뿐만 아니라 최근에 회절의 영향까지도 고려될 수 있도록 확장된 SWAN(Simulation Waves Nearshore) Cycle III version 40.41을 적용한다.

4.1 평면배치안

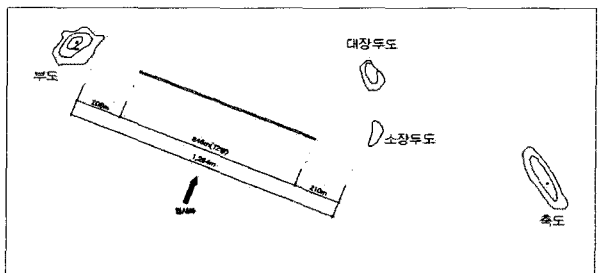
제시되는 평면배치안은 Fig. 8(a)의 CASE-1에서 Fig. 8(d)의 CASE-4까지 4개의 안이다. 부소파제 사이의 간격 및 길이는 모든 CASE에서 동일하며, 평상파랑의 조건하에서 수치해석을 실시하였다.



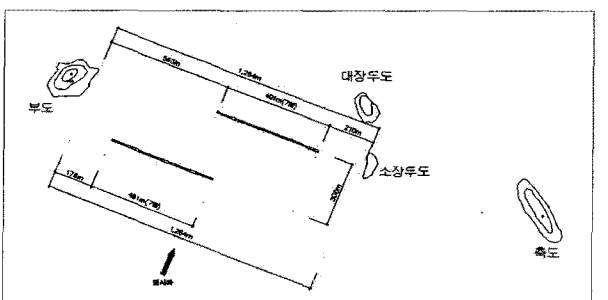
(a) CASE-1



(b) CASE-2



(c) CASE-3



(d) CASE-4

Fig. 8 Disposition of FBCPT

4.2 수치해석결과

Fig. 9(a)는 CASE-1의 파고분포를 나타낸 것이다. 결과를 살

해보면 부소파제의 배후역에서 원래 1.5m 전후의 파고가 1.0m 이하로 감소되고, 전반적으로 0.5m 정도의 파고감소를 나타내지만, 어항의 정온도 기준을 초과하는 파고분포를 나타낸다. 다음의 Fig. 9(b)의 CASE-2의 경우는 부소파제 배후역에서 원래 1.5m 전후의 파고가 0.8m 이하로 감소되며, 전반적으로 0.7~0.2m 정도의 파고감소를 나타낸다. 여기서 정온도를 살펴보면 어항의 정온도 기준을 초과하는 배후역도 있지만, 전반적으로는 0.5m 이하의 파고분포를 나타내는 해역이 넓게 분포되어 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 9(c)의 CASE-3의 경우는 전술한 CASE-2의 경우와 유사한 파고분포가 나타나지만, 정온한 해역이 CASE-2의 경우보다 넓게 나타나는 것을 알 수 있다. 다음의 Fig. 9(d)의 CASE-4는 전술한 CASE-2와 CASE-3의 경우와 유사한 파고분포가 나타나지만, 부소파제군의 사이에서 파고가 다소 커지는 결과를 나타낸다.

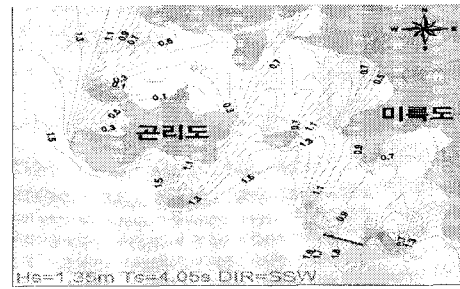
5. 맺음말

본 연구에서는 통영시 바다목장에 건설되는 복합판형 부소파제에 대하여 1/50모형에 대한 2차원 수리모형실험, 2차원 및 3차원 특이점분포법에 의한 수치해석과 SWAN모형에 의한 정온도 해석으로부터 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

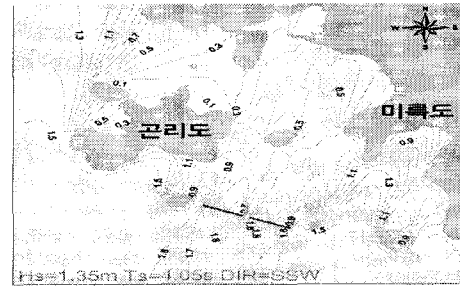
1. 복합판형 부소파제는 통영시 바다목장 해역의 파랑조건에 탁월한 파랑제어능력을 보이며, 그 이상의 긴 주기를 가진 해역에도 적용될 수 있다.
2. 부소파제군에서 입사파향각을 30°인 것으로 가정하여 surge 및 yaw운동에 관한 수치해석결과로부터 개구부폭을 산정한 결과 개구부폭을 5.0m 이상을 취하면 부소파제끼리의 충돌을 방지할 수 있지만, 유사한 설치사례 등을 참고하고, 선박의 항행 및 여유폭을 고려하여 6.0m 이상을 적용하는 것을 권장한다.
3. 계류라인의 장력값은 본 연구에서 적용한 최대의 파고 및 주기($H=8.25m$, $T=16.97sec$)에 대해 부소파제의 공기 중의 중량 3%에 상당하는 값을 나타낸다. 이의 값은 설계파랑보다 다소 큰 파랑에 대한 장력값이지만 안전측을 고려하여 이의 값보다 큰 값을 적용하여 설계하는 것을 권장한다.
4. 부소파제의 평면배치안으로 CASE-3의 경우가 정온도 측면에서 제일 유리한 안으로 판단되지만, 사정에 따라서는 모든 CASE를 고려할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

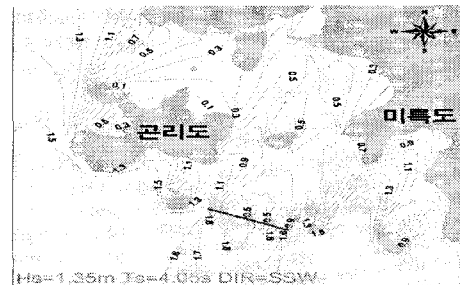
김도삼, 기성태, 허동수, 박경수 (2005). "복합판형 부소파제에 의한 파랑제어기능과 동적거동에 관한 연구", 2005 대한토목학회 정기학술대회, pp 796-799.



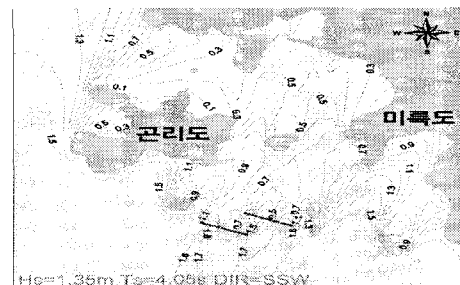
(a) Case-1



(b) Case-2



(c) Case-3



(d) Case-4

Fig. 9 Wave height distribution

윤희면 (2005). "복합판형 부소파제에 의한 파랑제어 및 동적거동해석", 박사학위논문, 한국해양대학교.

Nakamura and Ide (1997). "A Study on Application of Motion Theory of Floating Body in Damping Wave", Proc. of Coastal Engineering, JSCE, Vol 44, No 2, pp 856-860.