

소파안벽의 수리학적 성능에 관한 실험적 연구 An Experimental Study on the Hydraulic Performance of Wave Dissipating Quay Walls

김인철* · 이태환**

In Chul Kim* and Tae Hwan Lee**

요 旨 : 최근에 항내 정온도를 향상시키고 월파량을 저감시키기 위하여 구조물 내에 공극을 두어 파의 에너지를 감쇠 시키는 방법이 널리 행해지고 있다. 본 연구에서는 소파구조물 중에서 슬릿케이슨, 이글루블록 및 중공블록을 선택하여 이들의 수리학적 성능을 비교·검토하기 위하여 수리모형실험을 수행하였다. 평상파 조건에서 소파효과는 슬릿케이슨이 가장 양호한 결과를 보여주며, 설계파 조건에서 월파량의 저감효과는 슬릿케이슨과 이글루블록은 비슷하나 중공블록은 다소 저감효과가 떨어지는 경향을 보여주고 있다.

핵심용어 : 슬릿케이슨, 이글루블록, 중공블록, 소파, 월파량

Abstract □ Recently, wave dissipating structures with porosity are widely used to improve harbor tranquility and to reduce the wave overtopping rate. In this study, hydraulic model tests were performed to examine hydraulic efficiency of slit caissons, igloo blocks, and hollow blocks. The model tests showed that slit caissons were the most effective in dissipating wave energy under moderate wave conditions. Slit caissons and igloo blocks showed no significant difference in reducing wave overtopping rate. Hollow blocks are less effective in reducing wave overtopping rate than slit caissons and igloo blocks under higher wave energy conditions.

Keywords : slit caissons, igloo blocks, hollow blocks, wave dissipating, wave overtopping rate

1. 서 론

항만에 있어서 가장 중요한 기능은, 화객을 신속하고 안전하게 수송하는 것과 선박의 정박지 및 하역작업 등에 안정성과 편의를 제공해 주는 데 있다. 이러한 항만의 기능이 원활히 수행되기 위해서는 우선 항만이 정온한 수역을 확보해야 하는 것이 필수적인 조건이다. 항내의 정온도를 향상시키기 위해서는 항구쪽에 비하여 항내의 수면적을 넓게 함으로써 파의 에너지를 확산시키고, 항구로부터 진입된 파를 효과적으로 소파시킬 수 있도록 소파 해빈이나 저반사 구조물을 설치할 필요가 있다.

항내의 정온도를 항내 파고만으로 평가하는 방법으로서, 항만의 기술기준에서는 계선 안벽전면의 파고가 0.3 m~0.7 m 이하로 되는 날이 연간 95% 이상일 것을

정온도의 목표로 하고 있다. 그러나 파고가 동일하여도 예를 들어 주기 3 sec의 풍파와 주기 10 sec의 나불(swell) 파는 선박에 미치는 영향이 다르게 나타나므로 하역한 계정온도의 관점에서 보면 파고 뿐만 아니라 주기도 함께 고려되어야 한다.

항내의 안벽 구조물로서 전면이 불투수성인 직립벽은 반사파를 크게 발생시키고 부진동을 수반하는 항내 교란의 원인이 되어 소형선의 정박 및 하역작업에 어려움을 가져오게 한다. 따라서 이러한 현상을 미연에 방지하기 위하여 우선 반사율이 큰 직립식 안벽을 저반사 구조물로 하여 항내 파고를 저감시킬 필요가 있다 (대우건설, 1999).

따라서 본 연구에서는 항내 안벽 구조물로서 항내 정온을 향상시키고 월파량을 저감시키는 방안으로 구조물

*동서대학교 건설공학부 조교수 (Division of Architecture and Civil Engineering, Dongseo University, 617-716, Pusan, Korea)

** (주)대우건설 토목사업 본부 이사 (Civil Project Division, Daewoo Corporation, Namdaemunno 5-ga 84-11, Jung-gu, Seoul, Korea)

내에 유수부 및 공극을 두어 파의 에너지를 감소시키는 슬릿케이스, 이글루블록 및 중공블록 단면을 선택하여, 다양한 주기를 가진 평상파와 월파가 발생하는 설계파를 대상으로 하여 각 구조물의 수리학적 성능을 수리실험을 통하여 비교·검토하고자 한다.

2. 단면 수리모형 실험

2.1 실험시설

본 실험이 수행된 조파수로에는 Fig. 1에 도시한 것과 같이 길이 2 m, 폭 0.8 m, 높이 1 m의 2차원 조파기의 후면과 수로 끝단부에 직립식 소파장치가 설치되어 있다. 불규칙파를 실험파로 하는 수리모형 실험시 모형구조물과 조파판 양측에서 다중반사가 일어나 수로내에 에너지 누적현상이 생길 수 있으므로 수로내에 격벽을 설치하여 2개의 수로를 만들어 한편에서는 실험파랑을 재현시키고 다른 한편은 수로끝단에 있는 소파장치에서 파의 에너지 일부를 소모시키는 수로로 사용하였다.

조파기는 전기식 피스톤형 서보방식으로 조파판의 최대 이동거리가 ±50 cm이고, 최대발생 유의파고는 30 cm이며 그리고 발생 유의주기는 0.1~0.3 sec이다. 특히 조파판에는 실험대상 구조물로부터 반사되어 조파판에 도달하는 반사파를 감지하여 제어장치에서 조파판의 움직임을 제어시킬 수 있도록 조파판 전면에 파고계가 부착되어 있다.

2.2 실험모형

모형실험의 축척은 수조의 크기, 구조물의 실제크기, 실험파의 제원 및 조파기의 성능 등을 고려하여 결정

되어져야 하므로 여기서는 실험 축척을 1/40로 선정하였다.

모형구조물의 전면 해저경사는 1/200로 하고, 그 이후는 조파판 부근에서 쇄파되는 현상을 방지하기 위하여 1/10의 급경사로 연결하고 조파판까지는 일정수심으로 하였다. 모형의 경사 바닥면은 하부에 모래로 축재를 한 후, 그 위에 벽돌을 깔아 바닥경사를 유지시키면서 표면은 몰타르로 마감 처리하였다.

구조물의 모형 제작에 있어서 이글루블록은 실리콘으로 거푸집을 제작해 재질의 강도가 강하고 빨리 굳는 특수 합성수지에 석분, 철가루를 혼합하여 중량 조절하였으며 슬릿케이스 및 중공블록은 아크릴로 제작하고 케이스 내부는 축척에 따른 사석을 사용하였다. 그리고 제작 모형의 크기 및 무게는 목표치의 2%이내에 들도록 하였다.

2.3 실험조건

2차원 단면 실험대상은 항내 안벽단면으로서 Figs. 2a, 2b 및 2c와 같은 슬릿케이스, 이글루블록 및 중공블록이며 제측 분석할 항목은 반사계수, 월파랑 그리고 에이프런 위의 유속과 수위이다.

조위는 부산광역시 감천항의 조위중에 실험목적에 따라 평상파에 대한 소파블록의 반사계수실험은 평균해면 (MSL) 그리고 설계파에 대한 월파랑 실험은 약최고만 조위 (APP. HHW)를 기준으로 하였다. 그리고 실험에 사용된 파랑제원은 평상에 대한 항내 정온의 한계파고 0.7 m에 대하여 주기 3~20 sec 및 항내 설계파 조건인 2.5 m, 2.8 m에 대하여 주기는 15 sec이다.

2.4 불규칙파의 조파

우선 목표로 하는 파랑 스펙트럼을 조파기의 특성함수에 따라 조파판의 구동스펙트럼으로 변환시킨 다음 변환된 스펙트럼을 불규칙한 위상을 가진 성분파로 분해한 후 D/A converter를 거치게 되면 아나로그 조파신호가 얻어진다. 이와 같이 조파된 파랑을 모형 구조물 설치위치에서 입·반사파를 분리한 후 측정된 입사파의 스펙트럼이 목표스펙트럼과 일치하지 않으면 응답함수에 의해 조파판 구동 스펙트럼을 수정하여 실험파 스펙트럼이 목표 스펙트럼에 근접할 때까지 반복한다. 여기서 입·반사파 분리에는 상호 적정한 간격을 두고 설치된 2개의 파고계로부터 관측된 파고기록을 이용하는 Goda와 Suzuki(1976)가 제안한 방법을 사용하였다. 입

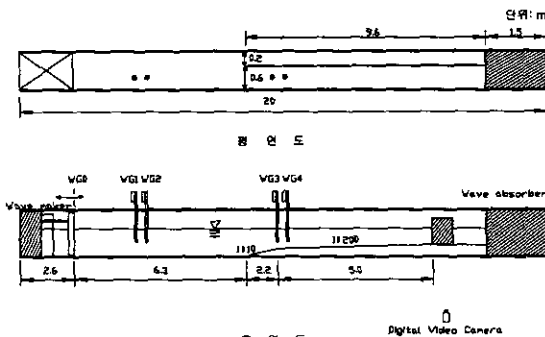
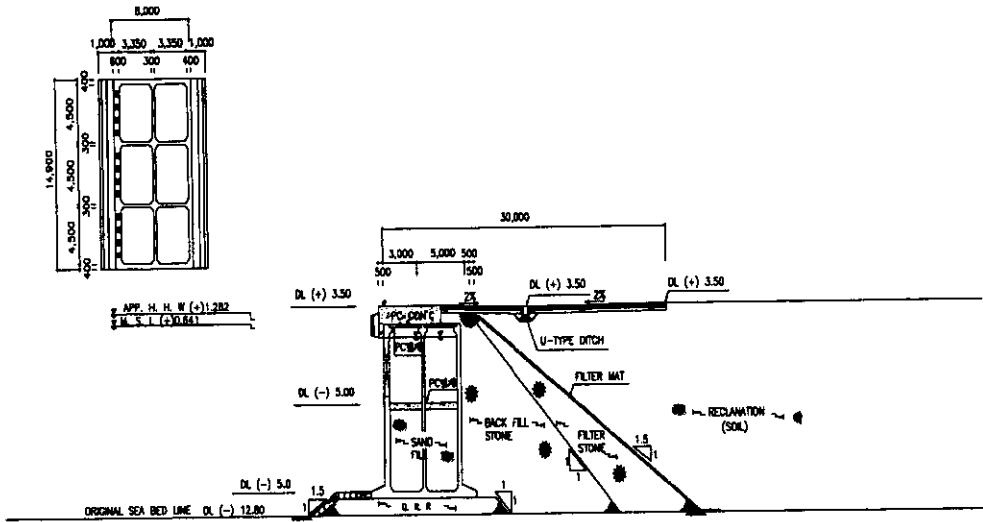
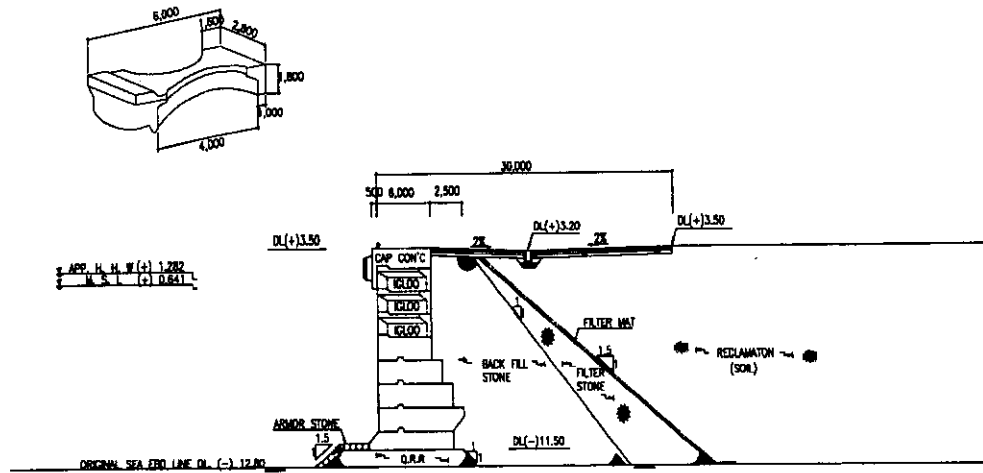


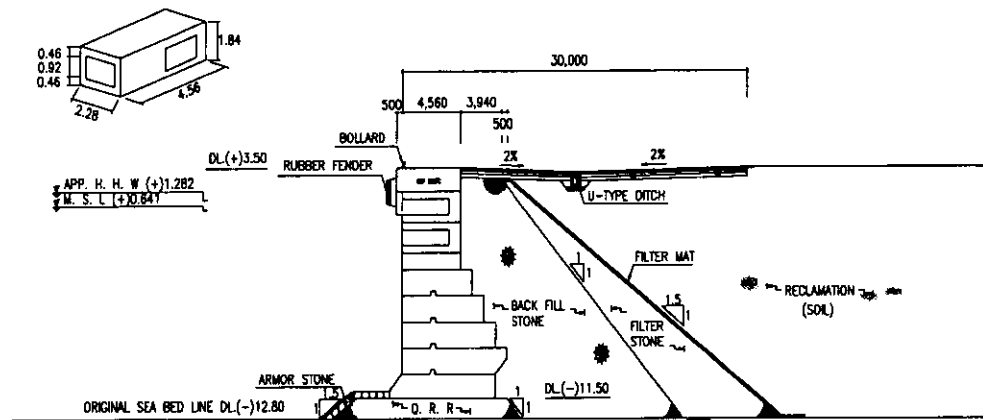
Fig. 1. Installation plan of model structure and measuring system.



(a) Slit cassion



(b) Igloo block



(c) Hollow block

Fig. 2. Model structures.

Table 1. Characteristics of experimental waves at the position of model structures

단면	SWL	목표 파랑제원		실험파 파랑제원		비고	
		파고 (m)	주기 (sec)	파고 (m)	주기 (sec)		
슬릿케이스	APP.	2.8	15	2.85	14.93	설계파	
	HHW			2.54	14.42		
				3	0.68		3.15
				4	0.72		4.22
				5	0.69		4.93
및 소파블록	MSL	0.7	10	0.71	10	평상파	
				12.5	0.72		12.27
				15	0.71		14.42
				17.5	0.72		16.89
				20	0.78		19.29

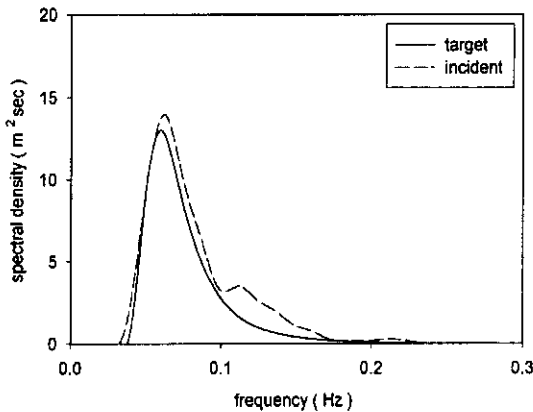


Fig. 3. Comparison of target spectrum with incident spectrum (H=2.8 m, T=15.0 sec, APP, HHW).

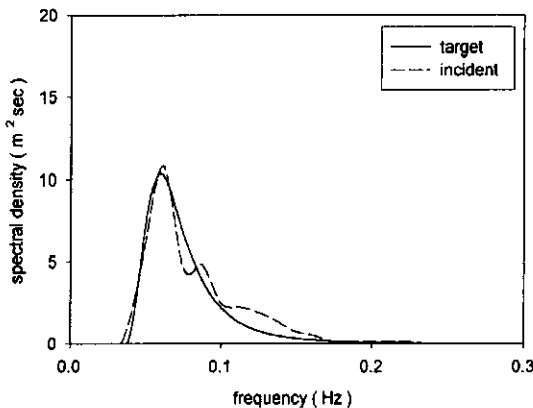


Fig. 4. Comparison of target spectrum with incident spectrum (H=2.5 m, T=15.0 sec, APP, HHW).

사파랑으로는 다음과 같이 Goda(1985)에 의해 수정된 Bretschneider-Misuyasu 스펙트럼을 사용하였다(해양수산부, 1997).

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

식 (1)을 목표스펙트럼으로 하여 모형 구조물의 설치 예정위치에 Fig. 1과 같이 두 개의 파고계 WG3와 WG4를 설치하여 통과파 스펙트럼과 목표스펙트럼이 일치하도록 재현시키고 이들과 병행하여 조파관 부근의 일정 수심상에 설치한 두 개의 파고계 WG1과 WG2는 통과파 및 모형구조물 설치시의 입사파 조건을 확인하기 위한 지시계로 사용하였다. APP, HHW, 및 MSL 조건에서 작성된 입사파랑에 대한 특성은 Table 1에 나타내었고, 스펙트럼은 Figs. 3 및 4에 도시하였다.

모형상 위에 모형 구조물이 설치된 후에는 구조물에서 반사되어 조파관으로 돌아오는 파는 반사파 흡수필터에 의하여 보정되어 조파되므로, 모형 설치전의 입사파가 모형설치 후에도 그대로 구조물 위치에 도달할 것이므로 파고계 WG1과 WG2로부터 입사파를 분리한 후, 앞서 통과파 실험시 입사파의 지시계(WG1, WG2)로부터 재측된 입사파 조건과 비교, 확인하면서 실험을 수행하였다(권·이, 1999).

2.5 실험항목의 계측방법

2.5.1 반사계수

입사파는 모형 구조물로 부터 반사하게 되므로 모형 구조물로 부터 유의과장 이상 떨어진 지점에 그림 1과 같이 적절한 간격을 두고 설치된 2개의 파고계를 설치하여 이들의 계측 결과인 파형기록에 의해서 FFT법을 사용해서 성분파의 진폭을 구하고, 이러한 성분파로부터 입·반사파의 진폭을 구한 후, 이들의 페리도그램을 평활화함으로써 입·반사파의 스펙트럼을 추정할 수 있다. 그리고 스펙트럼의 분리 추정치는 발산하지 않는 식 (2)와 같은 주파수 범위에서만 유효하다(藤本, 1985).

$$\begin{aligned} \text{상한치 } (f_{\max}) : \Delta l/L_{\min} &\approx 0.45 \\ \text{하한치 } (f_{\min}) : \Delta l/L_{\max} &\approx 0.05 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, f_{\max} , L_{\max} = 유효 주파수 범위의 상한치 및 그에 대응하는 과장
 f_{\min} , L_{\min} = 유효 주파수 범위의 하한치 및 그에 대응하는 과장

$\Delta t =$ 파고계 간격

$$E_I = \int_{f_{min}}^{f_{max}} S_I(f) df$$

$$E_R = \int_{f_{min}}^{f_{max}} S_R(f) df \quad (3)$$

여기서, E_I 및 E_R 은 입사파 및 반사파의 에너지이고 $S_I(f)$ 및 $S_R(f)$ 는 입사파 및 반사파의 스펙트럼 밀도함수이다.

식 (3)을 이용하면 반사계수는 식 (4)로 구할 수 있다.

$$K_R = \sqrt{E_R/E_I} \quad (4)$$

2.5.2 월파량

월파량은 안벽 및 호안 설계시 가장 중요한 실험인자 중의 하나이다. 월파량에 대한 실험(홍·전, 1999; 藤本 등, 1982)은 불규칙파의 파군을 대상으로 200~300파를 연속적으로 작용시켜 파량이 월류하는 모형 구조물 상부와 하류측 저수통 사이에 설치된 도수로를 통하여 저수통에 도달하는 물의 총량을 펌핑하여 회수된 물의 총 무게를 측정 후 단위시간당 단위길이당의 무게로 환산하였다(해양수산부, 1997).

2.5.3 에이프런 위의 유속 및 수위

모형 구조물을 월파한 수위는 에이프런 위에서 일정한 유속을 갖고 일정 시간동안 지속되는 흐름이 아니고 순식간에 지나가는 흐름이기 때문에 유속계로 유속을 측정하기에는 불가능하므로 본 실험에서는 수위의 흐름이 측정위치에 도달하기 전후의 장면을 디지털 캠코더로 촬영한 다음, 그 동영상 화면을 정지화면으로 1초에 30개 캡처하여 유속을 구하였다. 그리고 수위는 실험 중에 육안 및 디지털 캠코더로 촬영한 동영상 화면을 분석하여 측정하였다.

Photo 1은 월파한 수위가 측정위치를 기준으로 6/30초 도달 전·후 장면이다.

3. 실험결과 및 분석

항내 안벽 구조물로서 항내 정온을 향상시키고, 월파량을 저감시키기 위한 방안으로 투수성 구조물인 슬릿 케이슨, 이글루블록 및 중공블록 단면이 검토되었다. 단면의 실험항목은 반사계수, 월파량 그리고 에이프런 위의 유속 및 수위이다.

항내 정온에 영향을 미치는 안벽 구조물의 반사특성

은 평상시 항만 가동율과 밀접한 관계가 있으므로 MSL의 조위에서 다양한 주기(3 sec~20 sec)를 가진 평상파를 대상으로 하여 각 안벽단면별 반사계수의 특성을 검토하였으며, 아울러 월파가 생기는 설계파 조건에서도 반

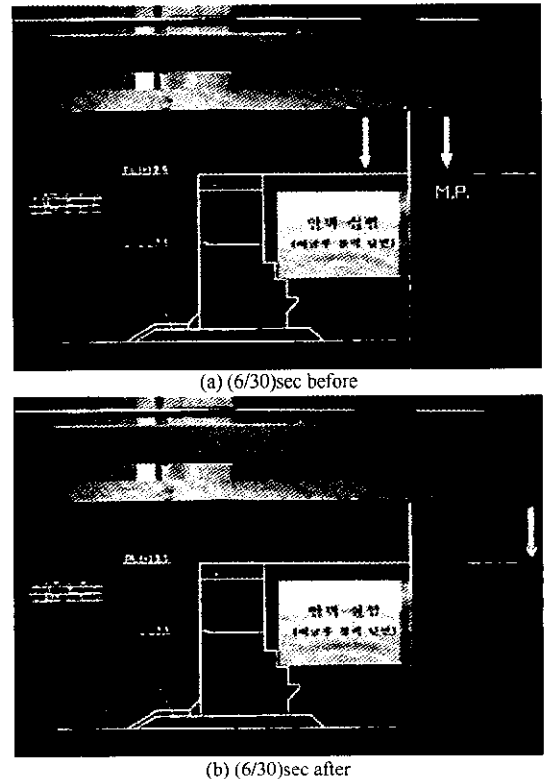


Photo 1. Snapshots for flow of water mass near the measuring position.

Table 2. Reflection coefficients of slit caissons, igloo blocks and hollow blocks

설계파	파고 (m)	주기 (sec)	반사계수		
			슬릿케이슨	이글루블록	중공블록
설계파	2.8	15	0.73	0.76	0.79
		2.5	0.75	0.77	0.79
	3	0.40	0.51	0.53	
	4	0.36	0.39	0.46	
	5	0.26	0.31	0.40	
평상파	0.7	7.5	0.29	0.42	0.50
		10	0.54	0.61	0.69
		12.5	0.62	0.69	0.72
		15	0.66	0.74	0.76
		17.5	0.76	0.80	0.83
		20	0.84	0.86	0.86

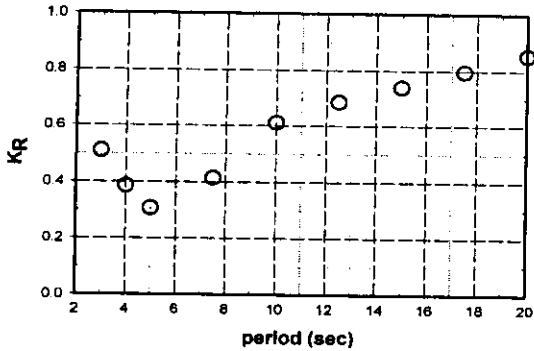


Fig. 5. Reflection coefficients of slit caissons.

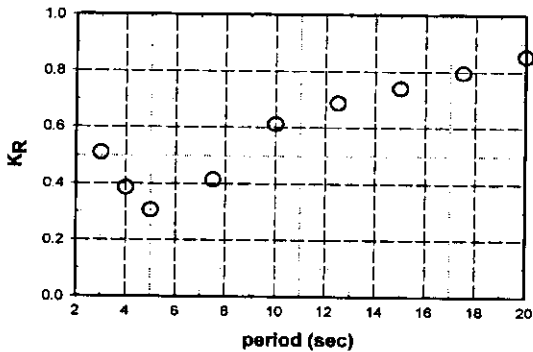


Fig. 6. Reflection coefficients of igloo blocks.

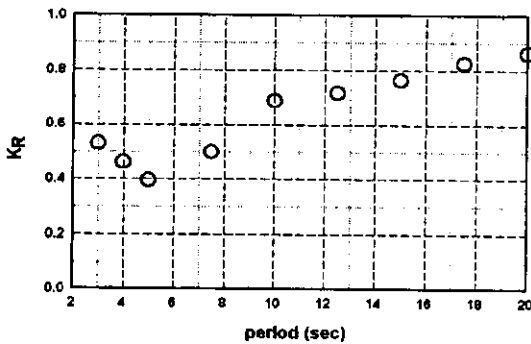


Fig. 7. Reflection coefficients of hollow blocks.

사계수를 구하여 비교하였다.

슬릿케이슨, 이글루블록 및 중공블록에 대한 반사계수의 계측결과를 Table 2에 나타내었고, 평상파 조건에서 구한 각 단면별 반사계수의 특성을 Figs. 5, 6 및 7에 도시하였다.

계측결과를 비교하여 살펴보면 평상파 조건에서 각 단면별로 공통적으로 주기 5 sec에서 반사계수가 가장 낮게 나타났고, 이를 기준으로 저주기 및 고주기 쪽으로

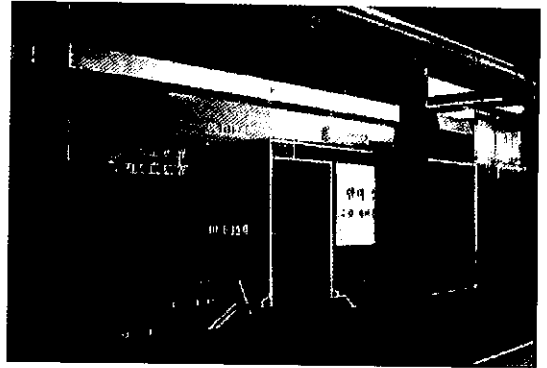


Photo 2. Scene of reflection coefficient measurement of slit caissons.

Table 3. Wave overtopping rates of slit caissons, igloo blocks, and hollow blocks

단면	파랑 조건		월파랑 최대 유속 (m/sec)	최대 수위 (m)	비고
	파고 (m)	주기 (sec)			
슬릿 케이슨	2.8	15	0.044	4.97	0.46 · 유속 및 수위는 안벽법선에서 후방으로 30 m 지점의 측정치
이글루 블록	2.5	15	0.025	4.07	0.32 · 수위의 기준 높이는 DL(+3.5)
중공 블록	2.8	15	0.061	5.42	0.60 · 조위는 APP.HHW
	2.5	15	0.033	4.38	0.44

갈수록 반사계수가 증가하는 경향을 보여주었다. 전반적으로 각 안벽 단면에 대한 저반사효과는 슬릿케이슨, 이글루블록, 중공블록 순으로 나타났으며, 월파가 생기는 설계파 조건에서도 같은 결과를 나타내었다. 주기 15 sec의 평상파와 설계파 조건에서 계측된 각 소파 단면의 반사계수를 보면 월파가 발생하는 설계파 조건에서 크게 나타났다. 이는 안벽 구조물에서 월파의 유무와 관계없이 입사파고 크면 반사계수가 크게 나타날 수 있음을 보여주는 현상이다.

Photo 2는 실험대상 단면 중에서 슬릿케이슨의 반사계수를 계측하는 실험장면이다.

월파량은 불규칙파의 파군을 대상으로 200파~300파를 연속적으로 작용시켜 월파량 측정장치를 이용하여 계측하였으며 각 단면별로 3회에 걸쳐 계측하여 평균값을 Table 3에 나타내었다.

계측결과를 살펴보면, 평균 월파량은 각 단면별로 0.02 m³/sec/m~0.06 m³/sec/m범위내에 존재하고, 월파 저감효과는 슬릿케이슨과 이글루블록은 비슷하고 중공블록

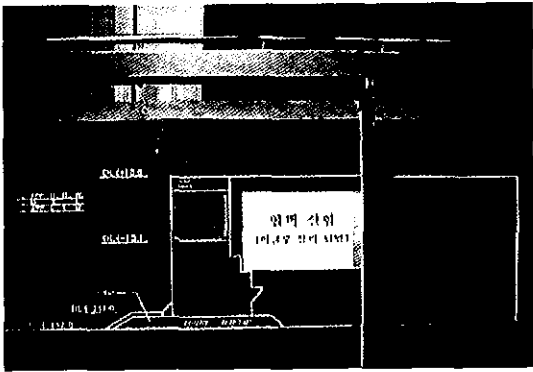


Photo 3. Scene of the measurements of wave overtopping rate and waver elevation of igloo blocks.

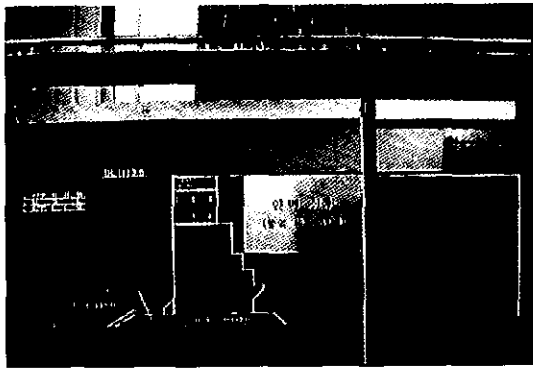


Photo 4. Scene of the measurements of wave overtopping rate and waver elevation of hollow blocks.

이 다소 떨어지게 나타났다. 이러한 결과를 각 단면별 반사계수의 특성과 비교하여 보면 전반적으로 반사계수가 크면 월파량이 많으나 이글루 블록의 경우는 약간 상이한 결과를 보여주고 있다. 그리고 안벽 법선으로 부터 30 m 위치 (Fig. 2)에서 측정된 최대유속은 4.01 m/sec~5.42 m/sec이고, 최고수위는 0.28 m~0.60 m로 측정 되었으며 월파량이 가장 많은 중공 블록단면에서 유속 및 수위가 가장 크게 나타났다.

Photoes 3 및 4는 실험대상 단면 중에서 이글루블록 및 중공블록의 월파량을 계측하는 월파량을 계측하는 실험장면이다.

4. 결 론

항내 정온을 향상시키고, 월파량을 저감시킬 수 있는 투수성 구조물로서 슬릿케이슨, 이글루블록 및 중공블록

단면에 대하여 2차원 단면 수리모형 실험을 통하여 수리학적 성능을 비교·검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

평상과 조건에서 슬릿케이슨, 이글루블록 및 중공블록 단면의 반사계수의 특성을 검토한 결과, 각 단면에서 공통적으로 주기 5 sec에서 반사계수가 가장 낮게 나타났고, 이를 기준으로 저주기 및 고주기 쪽으로 갈수록 반사계수가 증가함을 알 수 있고, 전체적인 반사계수의 저감효과는 슬릿케이슨, 이글루블록, 중공블록 순으로 나타났다. 설계과 조건에서도 같은 실험 결과를 보여주고 있다.

월파 저감효과는 슬릿케이슨과 이글루블록은 비슷하고 중공블록이 다소 떨어지게 나타났다. 전반적으로 볼 때 안벽 실험단면의 월파 저감효과에 대한 정도의 차이는 각 단면의 반사계수의 특성과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있으나 이글루 블록의 경우 약간 상이한 결과를 보여주고 있다.

안벽 법선으로 부터 30 m 위치에서 측정된 최대유속 및 최고수위는 각 단면별로 구한 평균 월파량의 결과와 같은 양상을 보여주고 있다.

감사의 글

본 연구는 2000년도에 대우건설의 연구비의 지원하에 수행된 ‘감천항 공영수산물 도매시장 건설공사 2차원 수리모형실험 보고서’ 연구결과의 일부이며 연구비의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 권혁민, 이달수, 1999. 신형 중간 피복블록의 개발, 대한토목학회 논문집, 19(II-3): 183-194.
- 홍근희, 전인식, 1999. 신 소파블록 Octopus의 성능평가 수리실험, 대한토목학회 논문집, 19(II 3): 359-374.
- 대우건설, 1999. 해군 99-5951-2시설 공사입찰 설계를 위한 수리모형실험 보고서.
- 대우건설, 2000. 감천항 공영 수산물 도매시장 건설공사 2차원 수리모형실험 보고서.
- 해양수산부, 1997. 울산 신항만 방파제 기본설계 보고서.
- 해양수산부, 1997. 부산 신항 방파제 실시설계 용역 단면 2차원 수리모형실험 보고서.
- Goda, Y. and Suzuki, Y. 1976. "Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments", Proc. 15th

conf., Coastal Engg., Honolulu, pp. 828-845.
Goda, Y. 1985. Random seas and design of maritime structure,
Univ. of Tokyo Press.
本稔美, 阿部宣行, 長谷川寛, 1982. 消波ブロックの水理特性

に関する實驗的研究, 電力中央研究所報告, Rep. (382001).
本稔美, 1985. 不規則波による消波ブロックの安定性に関する
實驗的研究, 電力中央研究所報告, Rep. (385008).