

경사식구조물 오목부 구간의 파랑증폭 실험

김영택¹, 안창현¹, 이종인^{2*}

¹한국건설기술연구원 하천해안연구실, ²전남대학교 해양토목공학과

Hydraulic experiments on wave amplification at concave corner for rubble mound structures

Young-Taek Kim¹, Chang-Hyun Ahn¹ and Jong-In Lee^{2*}

¹River and Coastal Research Division, Korea Institute of Construction Technology

²Department of Marine and Civil Engineering, Chonnam National University

요약 평면 수리실험을 통해 경사식구조물의 오목부 구간에 대한 파고 증폭을 검토하였다. 실험에 적용된 경사식 구조물 단면은 1:1.5의 경사면에 테트라포드가 2층 피복되어 있는 형상이다. 실험파는 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼을 적용한 불규칙파를 적용하였으며, 오목부의 중심각도는 120°, 140°와 160°를 적용하였다. 실험결과에 따르면 오목부 구간에서의 입사파고에 대한 파고증폭비는 본 실험에서 적용한 실험조건 내에서 최대 1.5배로 계측되었으며, 상대파고비의 분포형태는 오목부의 중심에서 최대가 되고, 오목부를 중심으로 거리가 멀어질수록 감소했다 다시 증가하는 형태인 W자 형태를 나타내었다.

Abstract Amplification of wave height at concave corner was investigated by three dimensional hydraulic tests. A typical rubble mound structure was tested with two-layer Tetrapod and the slope of 1:1.5. The irregular waves with Bretschneider-Mitsuyasu spectrum were applied to the tests. The center angles of concave corner were 120 degree, 140 degree and 160 degree. According to the test results, the maximum wave height amplification ratio at concave corner was about 1.5 times of incident wave height among the all test conditions, and the W-shaped wave height distribution was shown.

Key Words : amplification of wave height, concave corner, hydraulic tests, rubble mound structure

1. 서론

1.1 개요

항만구조물에 있어 외곽시설의 평면배치는 항만 운영과 같은 기능적인 설계요소와 중심과 같은 지형적 원인 등에 따라 결정되는 것이 일반적이다. 외곽시설의 평면배치시 변곡(오목부, 볼록부) 구간이 발생할 수 있으며, 특히 오목부 구간(concave section)에서는 파랑의 증폭으로 인해 피복재의 안정성 확보 문제, 월파가 증가되는 문제점 등이 유발될 수 있어, 피복재의 중량을 늘리거나 마루 높이를 상향하는 대책을 적용하고 있다.

에너지 감쇠가 없다고 가정할 때 직립벽에 파랑이 입

사하게 되면 반사파가 형성되어 직립벽 전면에서 입사파의 2배에 해당하는 증폭파가 발생한다. 이러한 원리로 인해 오목부가 설치된 유한한 구조물에 파랑이 입사하게 되면 오목부 중심 구간에서 반사파와 입사파가 중복되어 삼각부에서는 파고가 현저하게 증대된다(USACE, 2006). USACE(2006)에서는 오목부(concave)와 볼록부(convex)의 중요성에 대하여 검토를 하였으나, 직립식구조물에 대해서만 파고증폭을 계산하는 방법을 제시하였을 뿐 경사식구조물에 대해서는 언급되어 있지 않다. USACE(2006)에서는 수치해석 및 수리실험을 통한 검토를 권하고 있는 실정이다. 일부 연구(Girolamo, 1996; Losada et al., 2008; Bellotti et al., 2012 등)에서 직립벽 형태의 오목부

본 논문은 한국해양과학기술진흥원 지원과제 “기후변화대응 항만설계기준 개선방안연구(1단계)”의 성과입니다.

*Corresponding Author : Jong-In Lee(Chonnam National Univ.)

Tel: +82-61-659-7321 email: jilee@chonnam.ac.kr

Received March 29, 2013

Revised (1st May 9, 2013, 2nd June 3, 2013)

Accepted June 7, 2013

에 대한 수치 및 수리실험을 수행하였으나 이는 부진동 해석을 위한 연구로 본 연구에서 검토하는 내용과는 차이가 있는 것으로 판단된다.

상대적으로 볼록부 구간보다는 오목부 구간에서 파랑이 집중될 것으로 예상되기 때문에 증폭정도를 예측할 수 있는 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 경사식구조물의 오목부 전면에서의 파고 증폭 및 공간적인 분포를 확인하고, 오목부 중심각의 변화에 따른 파고 증폭영향을 검토하기 위해 수리실험을 수행하였다.

1.2 기존 연구

USACE(2006)에서는 변곡점을 갖는 구조물의 배치 형상을 Fig. 1과 같이 도시하였으며, Goda(1985)는 직립식 구조물을 대상으로 오목부 중심에서의 파고증폭을 산정할 수 있는 식을 다음과 같이 제시하였다.

$$H_c = \frac{2\pi}{\beta} H_i \tag{1}$$

여기서 H_c 는 오목부 중심에서의 파고, H_i 는 입사파고, β 는 오목부의 각도(radian)이다. 예를 들어 $\beta = \pi$ 인 경우의 구조물은 직선이며, $H_c/H_i=2$ 가 되어, 입사파가 2배로 증폭됨을 알 수 있다. 그러나 β 가 작아지게 되면 H_c 는 무한히 증가하는 결과로 나타나게 된다.

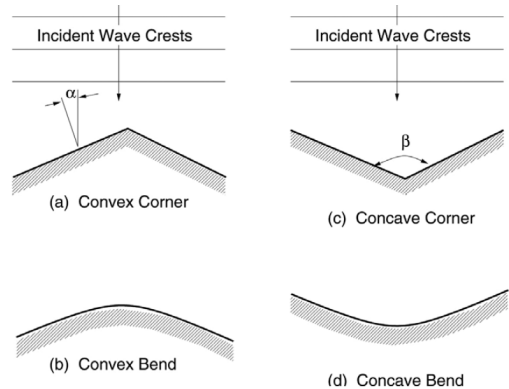
이홍식 등(2008)은 수치해석을 통해 오목부 구간이 존재하는 방파제의 전면과 오목부 부근에서의 파랑증폭을 다방향불규칙파를 적용하여 해석하였다.

2. 본론

2.1 실험기기 및 모형

수리실험은 한국건설기술연구원의 다방향조파 평면수조에서 수행되었다. 실험에 사용된 조파기는 사형(snake-type) 다방향 불규칙 조파기로서 규칙파, 일방향 및 다방향 불규칙파의 재현이 가능하다. 조파기 각 구동부에 연결된 조파판 하나의 폭은 0.5m이고 높이는 1.1m로서 총 60개의 구동부로 구성되어 있어 전체폭은 30m이며, 조파기는 전기서보피스톤식이다. 경사식구조물 오목부 구간에서의 파랑증폭에 대한 수리실험을 수행하기 위하여 조파수조 내에 좌우대칭으로 한변의 구조물 연장이 8m인 전체 16m 연장의 경사식구조물을 설치하였다. 모형의 단면형상은 1:1.5경사로 테트라포드(Tetrapod,

TTP)가 2층 피복된 경사식구조물 단면으로서 상치콘크리트와 TTP의 마루높이는 0.5m이다. 그리고 실험에 적용된 오목부 구간의 중심각(α)은 $120^\circ \sim 160^\circ$ 로서 $\Delta\alpha=20^\circ$ 로 수리실험을 수행하였다. 즉, 오목부 구간의 배치에 따른 실험안은 3개이다([Fig. 2] 참조).



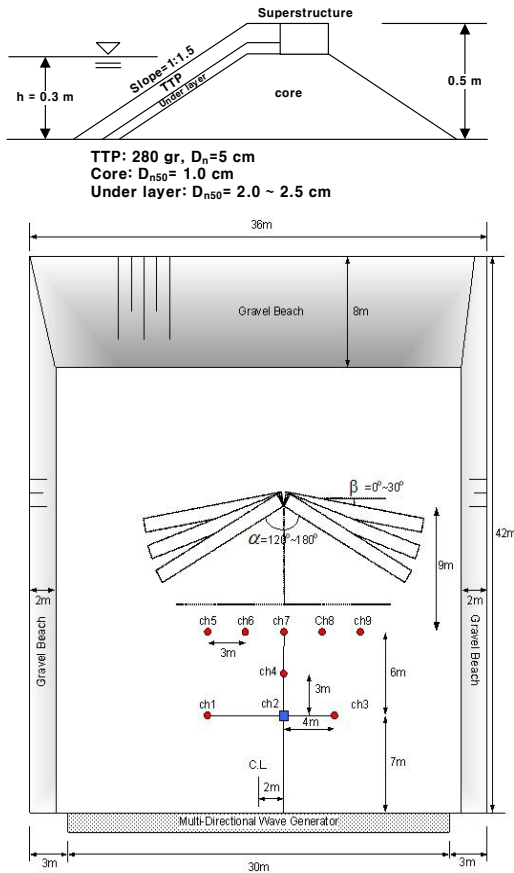
[Fig. 1] Schematic sketch of concave and convex corner(USACE, 2006)

2.2 실험조건

경사식구조물 토우(toe)에서의 수심(h_s) 0.3m이며, 여유고(R_c , 정수면으로부터 상치콘크리트 상단까지의 높이)를 $R_c=0.2m$ 로 설정하여 처오름에 의한 월파가 최소화되도록 하였다. 이는 월파로 인해 발생할 수 있는 파고저감을 최소화하기 위함이다. 실험에 적용된 목표파의 주기 및 파고는 [Table 1]과 같으며, Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼을 적용한 일방향 불규칙파를 실험파로 사용하였다. 목표파는 [Fig. 2]에 도시된 ch2 지점에서 구조물이 설치되지 않은 조건, 즉 통과파 관점으로 설정하였다.

[Table 1] Target wave conditions at ch2 in Fig. 2.

significant wave period	wave length for T_s	relative water depth	significant wave height
T_s (sec)	λ_s	kh	H_s (cm)
1.06	1.5	1.23	4 6 8 10
1.32	2.0	0.94	
1.59	2.5	0.75	
1.86	3.0	0.63	
2.14	3.5	0.54	
2.42	4.0	0.47	



[Fig. 2] Schematic sketch for cross-section of model and layout of model at wave basin

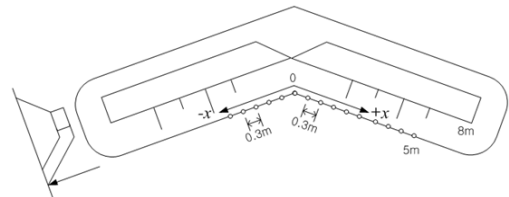
2.3 파고계측

경사식구조물의 오목부 구간에 대한 파랑증폭을 검토하기 위해 [Fig. 2]에 도시된 모형의 토우 끝단에 용량식 파고계를 설치하여 반사파와 입사파가 중첩된 증폭파랑(local wave)의 유의파고(H_s)를 계측하였다. 그리고 입사파고(H_{s0})에 대한 계측된 증폭파고의 비인 상대파고(H_s/H_{s0})를 분석하여 파고증폭을 검토하였다.

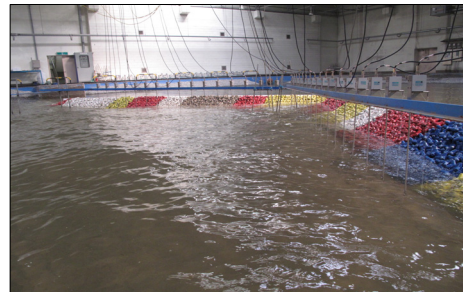
상대파고 산정을 위한 입사파고의 설정을 위해 본 연구에서는 다음과 같은 3가지 방법을 고려하였다. 첫째는 [Fig. 2]의 ch2에서 설정된 목표파고를 입사파고로 설정하는 방법, 두 번째는 모형설치 후 ch1, ch2, ch3 위치에서 입반사 분리를 통해 입사파고를 설정하는 방법, 세 번째는 ch2에서 설정된 목표파랑이 구조물이 설치될 위치인 토우에서 계측된 파고를 입사파고로 설정하는 방법이다. 본 연구에서는 세 번째 방법을 적용하여 입사파고를 설정한 후, 상대파고를 산정하였다. 첫 번째 방법은 목표파랑이 구조물 위치로 전파되면서 수조바닥의 영향 등으

로 인해 변형이 생길 수 있기 때문이며, 두 번째 방법은 구조물 설치시 구조물의 배치로 인해 반사파가 방향성 갖게 됨으로서 위치별(ch1, ch2 및 ch3)로 서로 다른 크기의 입사파고가 산정되어 대표 입사파고로 설정하기 어렵기 때문이다.

입사파고(H_{s0})와 증폭파고(local wave)의 계측은 [Fig. 3]에 도시된 바와 같이 경사식구조물 토우에서 0.3m 간격으로 수행하였으며, 오목부 구간의 중심점을 기준으로 좌우측에 각각 5m 구간을 대상으로 하였다. 수리실험시 모형은 한쪽 변이 8m인 전체 16m를 설치하였으나, 구조물 끝단에서 발생하는 end effect 영향 구간을 피하고, 입사하는 파랑을 유도하기 위하여 구조물 끝단으로부터 3m 구간을 제외한 나머지 5m 구간, 즉 전체 10m를 대상으로 파고를 계측하였다. [Fig. 4]는 $\alpha=160^\circ$ 조건에 대한 파고계 배치 및 실험장면 사진이다.



[Fig. 3] Layout of model



[Fig. 4] Photo for measurement of wave at toe of model structures

2.4 실험결과

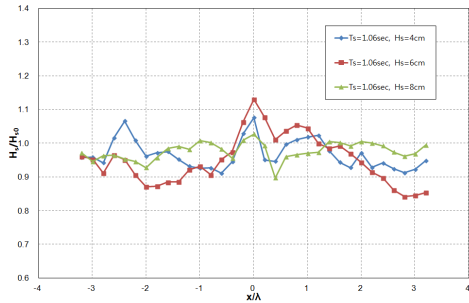
2.4.1 결과 분석 방법

구조물 토우 위치에서 계측된 파고를 이용하여 상대파고(H_s/H_{s0})를 분석하였으며, 결과분석시 x 축에 해당하는 거리는 해당 입사파의 유의주기에 대한 유의파장(λ)으로 무차원화된 거리(x/λ)로 도시하였다.

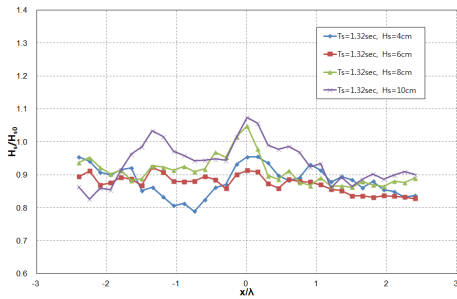
2.4.2 파랑증폭 실험결과

[Fig. 5]는 $\alpha=160^\circ$ 인 실험조건에 대한 상대파고를 도

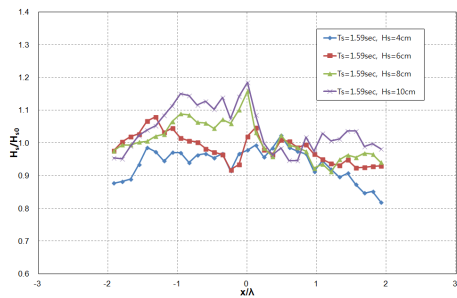
시한 것으로서 상대파고의 분포는 $x/\lambda=0$ 인 오목부 구간의 중심을 기준으로 대칭형상을 보인다.



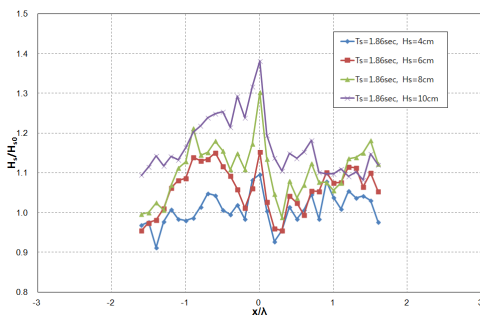
(a) $T_s=1.06$ s ($kh=1.23$)6



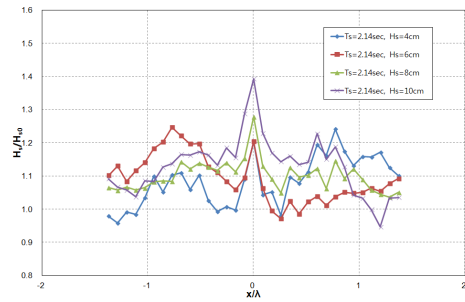
(b) $T_s=1.34$ s ($kh=0.94$)



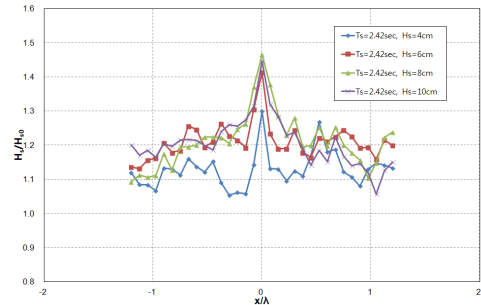
(c) $T_s=1.59$ s ($kh=0.75$)



(d) $T_s=1.86$ s ($kh=0.63$)



(e) $T_s=2.14$ s ($kh=0.54$)

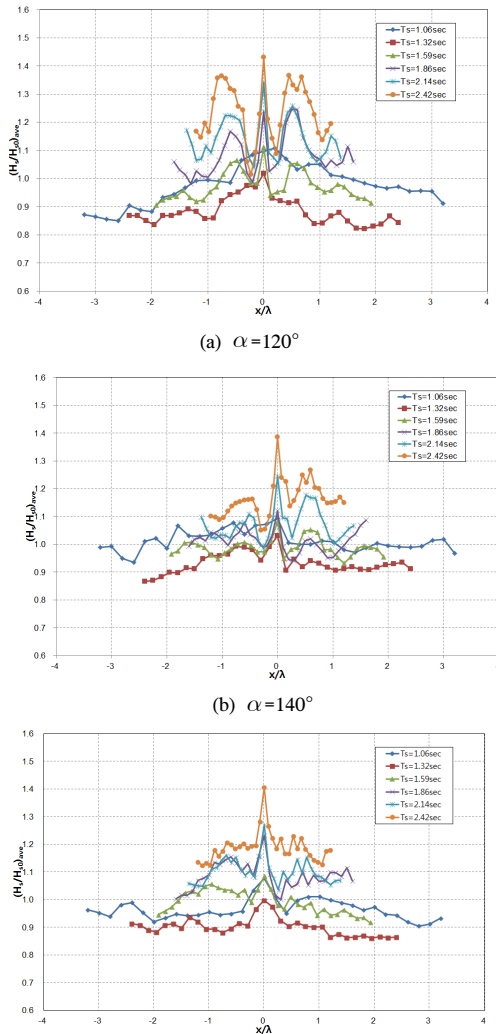


[Fig. 5] Normalized wave height(H_s/H_{s0}) for $\alpha=160^\circ$

[Fig. 5]를 살펴 보면 전체적으로 유의파의 주기가 길어질수록 상대파고(H_s/H_{s0})가 증가하는 경향을 보인다. 동일 주기 조건에서 파고가 증가하는 경우, 즉 파형경사가 증가하는 경우에 상대파고가 일정하게 증가하는 경향을 보이지는 않는다. 이는 입사파고(H_{s0})가 증가할 때 오목부에서의 파고(H_s)도 같이 증가하기 때문이다. 전반적으로 오목부($x/\lambda=0$)를 제외한 양쪽 측면에서는 $H_s/H_{s0} \approx 1.0$ 을 기준으로 진동하는 경향을 나타낸다. 그리고 상대파고 분포는 대부분 W자 형태를 나타내고 있다. 즉 $x/\lambda=0$ 에서 최대 파고비가 나타나고 좌우측으로 갈수록 값이 작아지다 다시 증가하는 경향을 보인다. 그러나 [Fig. 5](c)와 같이 오목부 구간 대칭 형태와 다른 분포형태의 결과를 나타내기도 한다. 이것은 구조물에 의한 반사효과와 한정된 수조 내에서의 재반사로 반파사가 증폭되기 때문으로 판단된다. $\alpha=160^\circ$ 인 조건에서 오목부에서의 최대 상대파고 증폭은 $H_s/H_{s0} \approx 1.5$ 로 나타났다.

[Fig. 6]은 오목부 각도가 $\alpha=120^\circ \sim 160^\circ$ 일 때 오목부의 중심각에 따른 평균 상대파고 분포를 나타낸 것이다. [Fig. 5]에서 나타난 바와 같이 입사파고의 증가에 따른 상대파고의 변화가 일정한 나타내지 않았기 때문에 주기에 따른 대표 분포를 제시하기 위하여 주기별로 여러 파고조건에 대한 상대파고를 산술평균하여 각각의 거리별 평균 상대파고 분포로 도시한 것이 [Fig. 6]이다. [Fig. 6]

에서 산술 평균된 평균 상대파고($(H_s/H_{s0})_{ave}$)의 거리별 분포 형태는 W자 또는 사람인(人) 분포와 유사한 좌우 대칭 분포를 보인다. 오목부의 중심각이 상대적으로 작은 $\alpha=120^\circ$ 인 경우, 오목부 중심부에서의 반사가 증가함에 따라 보다 뚜렷한 W자 형태의 분포를 나타내며, 중심각이 증가함에 따라 W형 분포에서 사람인(人)형 분포로 변함을 알 수 있다. 그러나 최대 평균 상대파고의 차이는 크지 않고 유사한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 오목부 각도의 감소에 따른 반사파의 증대로 오목부 전면에서 큰 중복파랑이 발생하지만, 불규칙파군 중 고파고성분이 쇠파됨으로 인해 파고의 증폭이 제한되기 때문이다.



[Fig. 6] Average normalized wave height for each significant wave periods

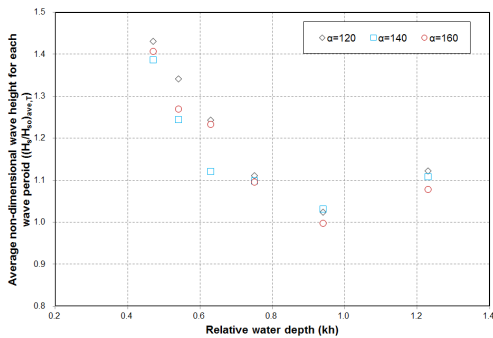
[Table 2]는 본 연구에서 적용한 모든 실험 조건에 대한 오목부($x/\lambda=0$) 구간의 상대파고 결과를 정리한 것이다. 오목부의 중심각이 작아질수록 H_s/H_{s0} 는 전반적으로 증가하는 경향을 보인다. 이러한 경향은 Goda(1985)의 결과에서도 동일하게 나타났으나, 본 실험에 적용된 경사 식구조물 단면에서는 $\alpha=120^\circ$ 조건에서 H_s/H_{s0} 가 최대 약 1.5로 예측되었다. 동일 조건에서 직립식구조물의 경우에는 식(1)로부터 $H_c=3H_i$, 즉 입사파고의 3배임을 의미하는 것으로서 경사식구조물의 경우에는 반사가 상대적으로 작기 때문에 낮은 증폭비를 보이는 것이다.

[Table 2] Normalized wave height at concave corner

T_s (s)	significant wave length (λ_s , m)	measured wave height at ch2 (H_s , m)	wave steepness ($=H_s/\lambda_s$)	normalized wave height (H_s/H_{s0})		
				$\alpha=120^\circ$	$\alpha=140^\circ$	$\alpha=160^\circ$
1.06	1.5	0.041	0.027	1.21	1.14	1.08
	1.5	0.062	0.041	1.10	1.14	1.13
	1.5	0.083	0.055	1.06	1.04	1.03
1.32	2.0	0.041	0.021	1.00	1.05	0.96
	2.0	0.061	0.031	0.96	0.99	0.91
	2.0	0.083	0.042	1.06	1.04	1.05
1.59	2.0	0.109	0.055	1.07	1.04	1.07
	2.5	0.040	0.016	0.97	1.10	0.99
	2.5	0.061	0.024	0.99	0.97	1.05
1.86	2.5	0.083	0.033	1.20	1.11	1.16
	2.5	0.110	0.044	1.29	1.21	1.19
	3.0	0.040	0.013	1.09	0.91	1.10
2.14	3.0	0.059	0.020	1.09	1.03	1.15
	3.0	0.087	0.029	1.38	1.22	1.30
	3.0	0.112	0.037	1.41	1.33	1.38
2.42	3.5	0.044	0.013	1.22	1.09	1.20
	3.5	0.065	0.019	1.29	1.16	1.20
	3.5	0.096	0.027	1.38	1.30	1.28
2.42	3.5	0.135	0.039	1.47	1.44	1.39
	4.0	0.044	0.011	1.43	1.35	1.30
	4.0	0.073	0.018	1.54	1.36	1.41
	4.0	0.118	0.028	1.41	1.38	1.47
	4.0	0.153	0.038	1.35	1.45	1.45

[Table 3]과 [Fig. 7]은 본 연구에서 수행한 모든 실험 조건에 대한 주기평균 상대파고 결과이며, [Table 2]와 [Fig. 6]의 결과에서 각각의 주기별로 모든 H_s/H_{s0} 를 산

술평균한 결과($(H_s/H_{s,0})_{ave,T}$)에 대하여 정리한 것이다. 입사파의 주기는 무차원 값인 상대수심으로 표현하였다. 전술한 바와 같이 주기가 증가함에 따라 즉, 상대수심이 감소함에 따라 $H_s/H_{s,0}$ 는 증가하는 유사한 결과를 보인다. 오목부 중심각의 크기에 따른 $(H_s/H_{s,0})_{ave,T}$ 의 차이는 크지 않으나 전반적으로 입사각이 작을 때 $(H_s/H_{s,0})_{ave,T}$ 는 증가하는 경향을 보였으며, 최대 $(H_s/H_{s,0})_{ave,T}$ 는 약 1.4로 분석되었다.



[Fig. 7] Average normalized wave height for each wave period

[Table 3] Results for average normalized wave height for each wave periods $(H_s/H_{s,0})_{ave,T}$ at concave corner

Relative water depth (kh)	T_s (s)	Average normalized wave height for each wave periods $(H_s/H_{s,0})_{ave,T}$		
		$\alpha=1.06^\circ$	$\alpha=140^\circ$	$\alpha=160^\circ$
1.23	1.06	1.12	1.11	1.08
0.94	1.32	1.02	1.03	1.00
0.75	1.59	1.11	1.10	1.10
0.63	1.86	1.24	1.12	1.23
0.54	2.14	1.34	1.25	1.27
0.47	2.42	1.43	1.39	1.41

3. 결론

수리실험을 통하여 경사식구조물 오목부 구간에서의 파고 증폭을 검토하였다. 경사식구조물은 1:1.5의 경사로 TTP가 2층 피복된 단면이다. 오목부 중심 각도 및 상대수심에 따른 파고 증폭을 분석한 결과, 중심각도가 작아지면 $H_s/H_{s,0}$ 가 점차 증가하는 경향을 보였으나 그 차이는 크지 않았다. 본 실험조건 내에서 $H_s/H_{s,0}$ 는 최대 1.5로 분석되었다. 이러한 경향은 직립식구조물에 대한 결과

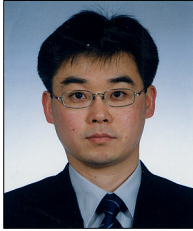
인 Goda(1985)의 연구결과와 유사하다. Goda(1985)의 연구결과인 직립식구조물의 경우에는 중심각 $\alpha=120^\circ$ 에서 입사파고의 3배까지 증폭되며, 이는 본 연구에서 적용한 경사식구조물인 조건의 결과에 비해 2배로 크게 나타나는 것이다. 경사식구조물 오목부 구간의 파고분포는 오목부 중심각이 작을 때는 W자 형태를 보이거나, 중심각이 커짐에 따라 사자 형태의 분포경향을 보였다. 본 연구에서 제시된 오목부에서의 파랑 증폭에 대한 정량적인 실험 결과는 오목부에 거치되는 피복재의 안정중량 산정 및 구조물의 마루높이 산정시 참고자료로 활용될 수 있을 것이다.

References

- [1] US Army Corps of Engineers(USACE) (2006). *Coastal Engineering Manual (CEM)*.
- [2] Girolamo, P.D. (1996). "An experiment on harbour resonance induced by incident regular waves and irregular short waves", *Coastal Engineering*, Vol.27, pp.47-66. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0378-3839\(95\)00039-9](http://dx.doi.org/10.1016/0378-3839(95)00039-9)
- [3] Losada, I.J., Gonzalez-Ondina, J.M., Diaz- Hernandez, G. and Gonzalez, E.M. (2008). "Numerical modeling of nonlinear resonance of semi-enclosed water bodies: Description and experimental validation", *Coastal Engineering*, Vol.55, pp.21-34. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2007.06.002>
- [4] Bellotti, G., Briganti, R., Beltrami, G.M. and Franco, L. (2012). "Modal analysis of semi-enclosed basins". *Coastal Engineering*, Vol. 64, pp.16-25. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.02.002>
- [5] Goda, Y. (1985). *Random seas and design of maritime structures*. World Scientific Publishing.
- [6] Lee, H.S. and Kim, S.D. (2008). "A Study on the Wave-height Distribution of Multidirectional Random Waves at the Concave Corner by Refracted Breakwater Systems", *Korean Society of Coastal and Ocean Engineerings*, Vol.20, No 5, pp. 429~438.

김 영 택(Young-Taek Kim)

[정회원]



- 2001년 2월 : 한양대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2010년 8월 : 한양대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2001년 1월 ~ 현재 : 한국건설 기술연구원 연구위원

<관심분야>
해안공학, 항만공학

안 창 현(Chang-Hyun Ahn)

[정회원]



- 2011년 2월 : 강원대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 한국건설 기술연구원 석사후연구원

<관심분야>
해안공학, 항만공학

이 종 인(Jong-In Lee)

[정회원]



- 1990년 2월 : 한양대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 1999년 2월 : 한양대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 1999년 1월 ~ 2010년 2월 : 한국건설기술연구원 책임연구원
- 2010년 3월 ~ 현재 : 전남대학교 공학대학 해양토목공학과 부교수

<관심분야>
해안공학, 항만공학