

해안공학분야에서 2차원 수리모형실험을 위한 실험과 설정방법: 불규칙과 대상

Method of the Laboratory Wave Generation for Two Dimensional Hydraulic Model Experiment in the Coastal Engineering Fields: Case of Random Waves

이종인* · 배일로** · 김영택***

Jong-In Lee*, Il Rho Bae** and Young-Taek Kim***

요 지 : 해안분야 실험은 복잡하며, 여러 요소들을 고려해야 한다. 성공적인 수행에는 경험이 중요한 요소가 되기도 하며, 조파기 및 계측기의 성능향상 등으로 지속적으로 발달되어 왔다. 수리실험은 구조물의 안정성 및 해안수리학적 특성 검토 분야에서 수치실험에 비해 직관적인 관찰이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 모형축척, 실험시설 및 장비와 실험 수행자의 판단 등에 의해 서로 다른 결과가 도출될 수도 있다. 본 연구에서는 수리실험에 있어 가장 기본이면서 중요한 실험과(불규칙과) 설정을 위한 지침을 제안하기 위해 2차원 실험을 수행하였다. 실험을 통하여 주파수 스펙트럼을 활용한 불규칙과의 설정방법 및 입사파고의 범위 $[(H_S)_M/(H_S)_T = 1 \sim 1.05]$ 에 대하여 제시하였다. 제안된 실험과 설정 지침은 실험결과의 신뢰도 향상에 기여할 수 있기를 기대한다.

핵심용어 : 실험과 설정, 2차원 수리실험, 불규칙과, 해안공학분야, 지침

Abstract : The experiments in coastal engineering are very complex and a lot of components should be concerned. The experience has an important role in the successful execution. Hydraulic model experiments have been improved with the development of the wave generator and the advanced measuring apparatus. The hydraulic experiments have the advantage, that is, the stability of coastal structures and the hydraulic characteristics could be observed more intuitively rather than the numerical modelings. However, different experimental results can be drawn depending on the model scale, facilities, apparatus, and experimenters. In this study, two-dimensional hydraulic experiments were performed to suggest the guide of the test wave(random wave) generation, which is the most basic and important factor for the model test. The techniques for generating the random waves with frequency energy spectrum and the range for the incident wave height $[(H_S)_M/(H_S)_T = 1 \sim 1.05]$ were suggested. The proposed guide for the test wave generation will contribute to enhancing the reliability of the experimental results in coastal engineering.

Keywords : test wave generation, two-dimensional hydraulic experiment, random wave, coastal engineering fields, guide

1. 서 론

항만 및 해안구조물을 설계/시공함에 있어 구조물의 기능충족을 위해서는 요구되는 성능과 안정성 등을 확보하여야 한다. 설계된 구조물이 요구성능과 안정성 등을 확보하는가에 대한 검토는 수리모형실험이 일반적으로 활용되고 있다. 컴퓨터의 발달과 해석기법의 발전으로 인해 수치모형실험을 통한 검토도 수행되고 있지만, 구조물의 해안수리특성(반사계수, 월파량 등)과 안정성 검토는 여전히 수리모형실험에 의존하

고 있는 실정이다. 수리모형실험은 조파장치의 발달, 정도 높은 계측기 개발 및 수리모형실험 기법의 확립 등을 바탕으로 꾸준히 개선되고 있다. 수리모형실험은 다양한 장점이 있음에도 불구하고, 수치모형실험에 비해 예산이 다소 많이 소요됨으로 인해 중요 항만구조물을 대상으로 수행되고 있는 실정이다.

항만 및 해안구조물의 형상이 다양하고 복잡해짐에 따라 수리모형실험의 중요성은 높아지고 있으나 수리모형실험의 절차에 대한 표준이나 지침이 부재함으로 인해 실험 수행자의

*전남대학교 공과대학 토목공학과 교수(Professor, Department of Civil Engineering, Chonnam National University)

***전남대학교 해안항만실험센터 학술연구교수 (Research Professor, Experimental Center for Coastal and Harbour Engineering, Chonnam National University)

***한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 연구위원(Corresponding author: Young-Taek Kim, Research Fellow, Department of Hydro Science and Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283 Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Korea, Tel: +82-31-910-0654, ytkim@kict.re.kr)

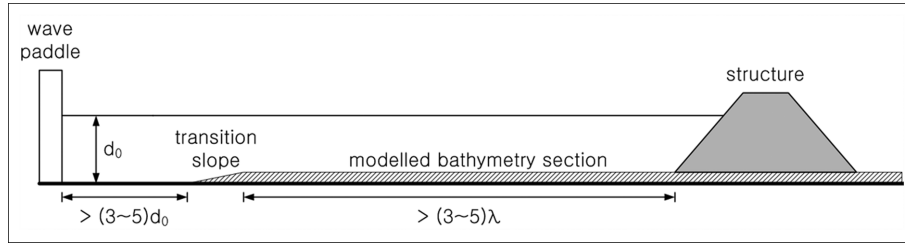


Fig. 1. Bathymetry layout for the experiment (Hydralab III, 2011).

경험에 따라 상이한 결과가 도출될 수 있으며, 이는 수리모형실험의 신뢰도 저하를 야기시킬 수 있다. 해안 및 항만분야의 수리모형실험 절차를 세세히 규정하고 있는 사례는 없으며, 일반적인 절차에 대한 해외 참고자료는 일부 제시되어 있다(Hughes, 1993; Hydralab III, 2011). 국내에서는 이러한 참고자료도 부재한 상황이며, 각 기관별로 수행되는 실험결과와의 일관성을 위해서는 최소한의 표준절차 및 지침이 요구되는 실정이다.

Hydralab III(2011)는 조파수로의 구성 및 파고계 배치 등에 대한 기본적인 내용을 제시하고 있다(Fig. 1 참조). 조파판(wave paddle) 전면에는 수심(d_0)의 3~5배 이상(또는 3~5 m 이상)의 일정수심이 요구되며, 이는 조파기로부터 생성된 evanescent mode의 파랑이 소멸되는데 요구되는 거리이다. 그리고 해저지형을 재현하기 전의 경사면(transition slope)은 1/10 이하이어야 하고, 구조물 전면의 해저지형은 파장(λ)의 3~5배 이상을 재현하도록 제시하고 있다. 그리고 Klopman and van der Meer(1999)는 반사계수 측정을 위한 파고계 배치는 구조물 전면에서 0.4 파장 이상 떨어진 위치에 설치하도록 하고 있으며, Goda(2010)는 1.5 파장 이상 이격된 위치에 설치할 것을 제안하고 있다. Hydralab III(2011)에는 이와 같이 기본적인 개념만 제시하고 있고, 수리모형실험시 실험결과에 큰 영향을 미치는 실험과 설정, 해안수리특성 측정 등에 대해서는 기술되어 있지 않다.

본 연구에서는 2차원 수리모형실험을 수행함에 있어 가장 기본이면서 중요한 항목인 불규칙파 설정에 대해 논하고자 한다. 이는 수리모형실험시 실험과 설정은 실험결과를 좌우하기 때문이다. 실험과 설정방법의 표준화 제안을 위해 대상 구조물 설치위치에서의 쇄파 여부에 따른 설정 방법, 수로벽면 영향을 고려한 파봉선 방향의 계측기 설치위치, 실험과 설정

을 위한 조파 및 분석시간에 따른 영향을 검토하였다.

2. 실험시설 및 실험조건

2.1 실험시설

본 실험은 전남대학교 해안항만실험센터 2차원 수로에서 수행되었으며, 사용된 단면수로의 제원은 폭 1 m, 길이 50 m, 높이 1.3 m이며, 전기서보피스톤식 조파기가 설치되어 있고, 규칙파 및 불규칙파를 조파할 수 있다. 또한 조파판 전면부에 부착된 파고계를 이용하여 독취한 자료를 바탕으로 반사파 흡수식 제어가 가능하고 수로 양쪽 끝부분에 소파시설이 설치되어 있다. 설치된 조파기의 성능은 최대파고 0.7 m, 재현가능 주기 0.5~8 sec이다. Fig. 2는 단면수로의 개념도이다. 본 실험에서 자유수면계측에 활용된 파고계는 용량식 파고계로서 독취율은 100 Hz이다.

2.2 실험조건

본 실험에 적용된 실험과 및 실험수심은 Table 1에 제시되어 있다. 구조물 설치위치에서의 수심(d)은 0.3 m, 실험파의 목표 유의주기(significant wave period, $(T_s)_T$)는 $(T_s)_T = 1.3, 1.8, 2.3, 2.8$ sec, 목표 유의파고(significant wave height, $(H_s)_T$)는 $(H_s)_T = 0.05, 0.11, 0.13$ m를 적용하였다. 그리고 실험과는 Bretschneider-Mitsuyasu 주파수 스펙트럼을 이용하여 설정하였다.

본 연구는 해안항만분야의 2차원 수리모형실험을 수행함에 있어 실험과 설정방법의 표준화 제안을 목적으로 하며, 먼저 대상 구조물 설치위치에서의 쇄파여부에 따른 설정방법을 검토하기 위해 Fig. 3과 같이 조파판 전면과 동일한 수심(d_0) 위치(① 지점)와 대상 구조물이 설치되는 수심(d) 위치(② 지

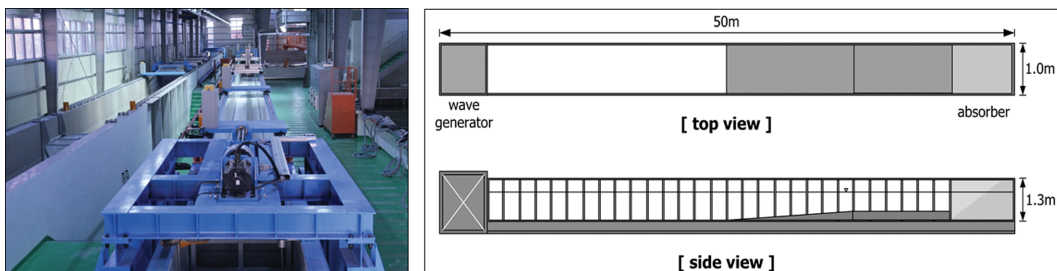
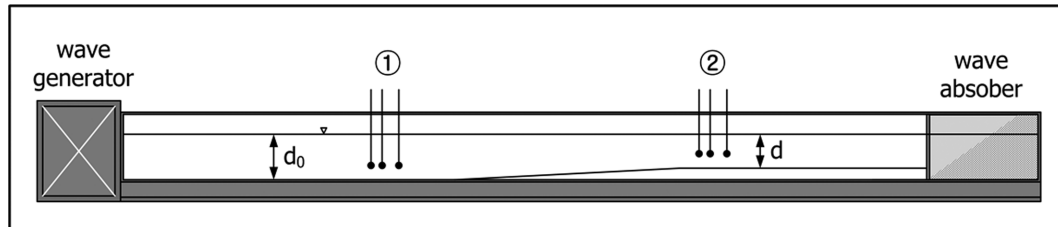
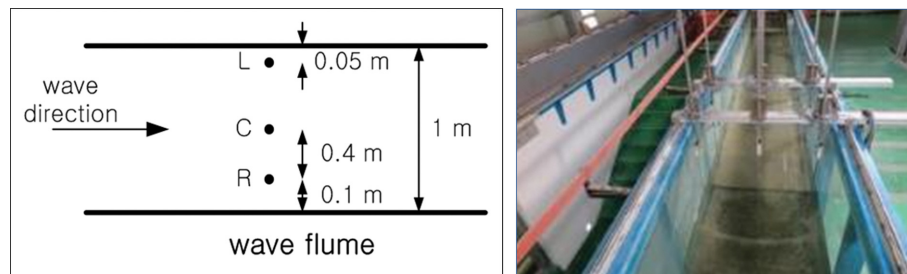


Fig. 2. Experimental facilities.

Table 1. Target wave conditions and water depth

Water depth of shallow point (d , m)	Target significant wave period ($(T_s)_T$, sec)	Target significant wave height ($(H_s)_T$, m)	Remarks
0.3	1.3	0.05	Bretschneider-Mitsuyasu frequency spectrum
	1.8	0.11	
	2.3	0.13	
	2.8	0.13	

**Fig. 3.** Schematic sketch of bottom layout and wave gage locations.**Fig. 4.** Wave gage locations of lateral direction in the wave flume.

점에 파고계를 설치하였다. ① 지점과 ② 지점 사이의 경사면은 1:50이다.

그리고 대상 구조물 설치위치(Fig. 3의 ② 지점)에서 수로의 횡방향(파봉선 방향) 위치에 따른 차이를 검토하기 위해 Fig. 4와 같이 파고계를 배치하였다. Fig. 4에서 C 지점은 수로의 중앙부(수로벽면으로부터 0.5 m 이격된 위치), R 지점은 수로벽면으로부터 0.1 m, L 지점은 수로벽면으로부터 0.05 m 이격된 위치이다. 이는 실험과 설정시 수로벽면의 영향을 검토하기 위한 파고계 배치조건이다.

3. 실험과 조파 및 분석방법

실험과 설정시 쇄파여부 및 수로 횡방향 위치에 따른 검토는 목표 유의주기별로 약 200파 동안의 자유수면자료를 이용하였다. 여기서, 200파는 조파시작 후 30 sec가 경과한 이후로부터 계속된 자료를 의미하며, 자유수면은 50 Hz로 독취하였다.

Fig. 3의 ①과 ② 위치에서 자유수면을 계측하였으며, ① 위치는 본 실험에서 설정한 모든 파랑조건에 대해 쇄파가 발생하지 않는 위치이며, ② 위치는 유의파고가 큰 조건에서는 쇄파가 발생하는 수심 위치이다. ①과 ② 위치에서 독취된 자유수면자료를 이용하여 Goda and Suzuki(1976)가 제시한 입

반사분리법(separation of incident and reflected waves)을 이용하여 유의파고(H_s) 및 유의주기(T_s)를 분석하였고, 또한 영점상향교차법(zero-up crossing method)을 이용하여 유의파고($H_{1/3}$)와 최대파고(H_{max}) 등을 분석하였다.

본 실험에서 설정한 목표파랑 중 쇄파가 발생하지 않는 조건은 실험대상 구조물이 설치되는 Fig. 3의 ② 위치에서 목표 파랑의 스펙트럼을 재현하여 실험파를 설정하였다. 그리고 쇄파조건인 경우에는 ① 위치에서 목표 파랑의 스펙트럼을 재현하고 ② 위치에서 독취된 자유수면자료를 이용하여 파랑특성을 분석하였다. 이는 대상 구조물 설치위치에서 쇄파가 발생되면 스펙트럼을 재현하는 것이 타당하지 않기 때문에 쇄파조건에서의 실험과 설정방법을 검토하기 위함이다.

실험과 설정을 위한 자유수면 계측 및 분석시간(t_w)이 실험과 설정에 미치는 영향을 검토하기 위해 $(T_s)_T = 1.3$ sec 조건에 대해서는 분석시간을 유의파주기 기준으로 $t_w = 158, 315, 630(T_s)_T$ 를 적용하였고, $(T_s)_T = 2.3$ sec 조건에 대해서는 분석시간을 유의파주기 기준으로 $t_w = 178, 356, 712(T_s)_T$ 를 적용하였다. 즉, 각각의 분석시간 조건에서 유의파고와 최대파고를 분석하여 요구되는 최소 조파시간 및 분석시간을 검토하였다.

Fig. 5는 본 실험에서 수행한 실험 중 일부 장면을 나타낸 것이다.

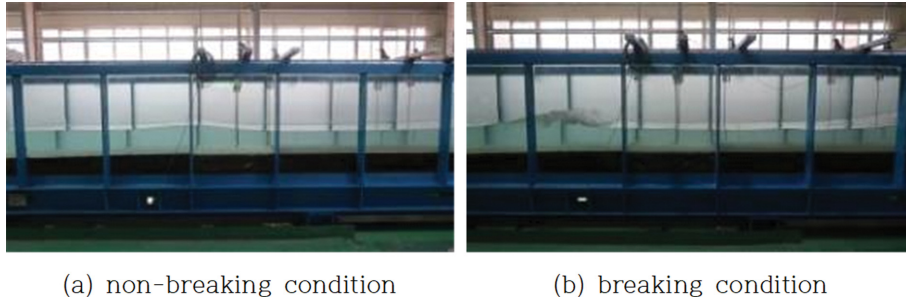


Fig. 5. Selected images of experiment.

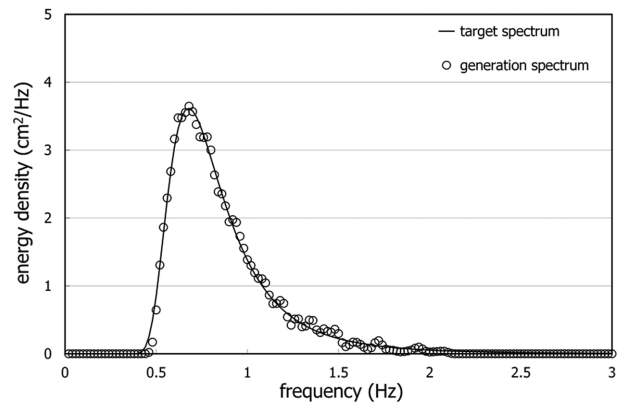
4. 결과분석

4.1 쇄파여부에 따른 실험과 설정

실험대상 구조물 설치위치에서의 쇄파여부에 따른 실험과 설정에 대해 검토하고자 한다.

먼저 구조물 설치위치에서의 수심이 깊어 쇄파가 발생하지 않는 경우에 대한 실험과 설정에 대해 논하고자 한다. Fig. 6은 Table 1에 제시된 비쇄파조건에서의 실험과중 하나의 조건에 대한 스펙트럼을 도시한 것이다. Fig. 6에서 볼 수 있는 바와 같이 비쇄파조건에서는 조파장치의 조파신호를 반복 수정함으로써 목표 스펙트럼(target spectrum)과 부합되는 실험과 스펙트럼(generation spectrum)을 어렵지 않게 재현할 수 있다.

비쇄파조건에서 Fig. 3에 도시된 실험과 설정위치(①과 ② 위치)에서 실험과 설정 후 그 결과를 정리한 것이 Table 2와 Table 3이다. Table 2는 Fig. 3의 ① 위치(경사면 시작 전)에서 실험과의 목표 스펙트럼을 재현한 후, 위치별 실험과의 유의파고비 $[(H_S)_M/(H_S)_T]$ 및 최대파고비 $[(H_{max})_M/(H_{1/3})_M]$ 를 정리한 것이다. 여기서 아래첨자 M 은 계측된 자료로부터 분석된 결과이고, 아래첨자 T 는 목표 파랑제원을 의미한다. $(H_{max})_M$ 은 설정된 실험과로부터 분석된 최대파고이다. Table 2에 정

Fig. 6. Example of wave generation spectrum for non-breaking condition $[(T_S)_T = 1.3 \text{ sec} \ \& \ (H_S)_T = 5 \text{ cm}]$.

리된 바와 같이 ① 위치에서 실험과 조건별로 $(H_S)_M = (1 \sim 1.04)(H_S)_T$, ② 위치에서는 $(H_S)_M = (1.01 \sim 1.12)(H_S)_T$ 로 분석되었다. 즉, ① 위치에서 목표 파랑을 재현한 경우, ① 위치 이후의 경사면으로 인한 천수현상으로 인해 ② 위치에서는 목표 유의파고보다 다소 큰 파랑이 설정되는 것으로 분석되었다. 이러한 증폭은 실험수로에 설치되는 경사면의 제원에 따라 달라질 수 있다. 그리고 ① 위치에서 $(H_{max})_M/(H_{1/3})_M = 1.67 \sim 1.88$ 로 분석되었으며, 일반적으로 알려져 있는 $H_{max} =$

Table 2. Results of wave generation for non-breaking condition (target location ①)

Target location	$(T_S)_T$ (sec)	$(H_S)_T$ (cm)	$(H_S)_M/(H_S)_T$		$(H_{max})_M/(H_{1/3})_M$
			Location ①	Location ②	Location ③
① in Fig. 3	1.3	5	1.00	1.01	1.67
	1.8	5	1.04	1.05	1.69
	2.3	5	1.04	1.11	1.78
	2.8	5	1.04	1.12	1.88
	average		1.03	1.07	1.76

Table 3. Results of wave generation for non-breaking condition (target location ②)

Target location	$(T_S)_T$ (sec)	$(H_S)_T$ (cm)	$(H_S)_M/(H_S)_T$		$(H_{max})_M/(H_{1/3})_M$
			Location ①	Location ②	Location ③
② in Fig. 3	1.3	5	1.05	1.05	1.63
	1.8	5	1.03	1.04	1.75
	2.3	5	0.99	1.06	1.72
	2.8	5	0.99	1.07	1.81
	average		1.02	1.05	1.73

$(1.6\sim 2)H_{1/3}$ 에 부합됨을 알 수 있다. Table 3은 Fig. 3의 ② 위치(실험대상 위치)에서 실험파의 목표 스펙트럼을 재현한 후, 위치별 실험파의 유의파고비 $[(H_S)_M/(H_S)_T]$ 및 최대파고비 $[(H_{max})_M/(H_{1/3})_M]$ 를 정리한 것이다. Table 3에 정리된 바와 같이 ② 위치에서 실험파 조건별로 $(H_S)_M = (1.04\sim 1.07)(H_S)_T$ 로 설정되었고, ① 위치에서는 $(H_S)_M = (0.99\sim 1.05)(H_S)_T$ 로 분석되었다. 그리고 ② 위치에서 $(H_{max})_M/(H_{1/3})_M = 1.63\sim 1.81$ 로 분석되었으며, 이 또한 $H_{max} = (1.6\sim 2)H_{1/3}$ 에 부합됨을 알 수 있다. 따라서 실험수로에 해저경사가 설치되고 해저경사 후면에 구조물을 설치하여 실험을 수행하는 경우, 비쇄파조건에서는 실험대상 위치(Fig. 3의 ② 위치)에서 실험파를 설정하는 것이 타당함을 알 수 있다. 실험파 설정과 관련하여 일본의 경우에는 실험대상 위치에서 목표 유의파고의 수% 이내로 설정하는 것을 권고하고 있고, 200파 조파시 유의파고의 표준편차가 4%이고, 3회 반복시 1회는 4% 이상 발생할 수 있음을 제시하고 있다(JPHA, 2018).

항만 및 해안구조물은 일반적으로 쇄파대내에 건설되기 때문에 쇄파조건에서의 실험파 설정이 상대적으로 더 중요하다고 할 수 있다. 쇄파조건의 경우에 수심대비 파고의 비인 상대파고가 큰 경우에는 쇄파로 인해 실험대상 위치에서 실험파의 스펙트럼 재현이 불가하며, 상대파고가 상대적으로 작은 부분쇄파조건에서는 스펙트럼 설정이 가능하지만 이러한 경우에는 과도한 실험파가 설정될 가능성도 있다. 따라서 항만 및 해안구조물의 안정성 및 해안수리특성 평가를 위해서는 쇄파조건에서의 실험파 설정이 실험결과에 미치는 영향이 상대적으로 더 크다고 할 수 있다.

Fig. 7은 Table 1에 제시된 쇄파조건에서의 실험파중 하나의 조건에 대한 스펙트럼을 도시한 것이다. Fig. 7은 Fig. 3의 ① 위치(비쇄파조건 위치)에서 실험파의 목표 스펙트럼을

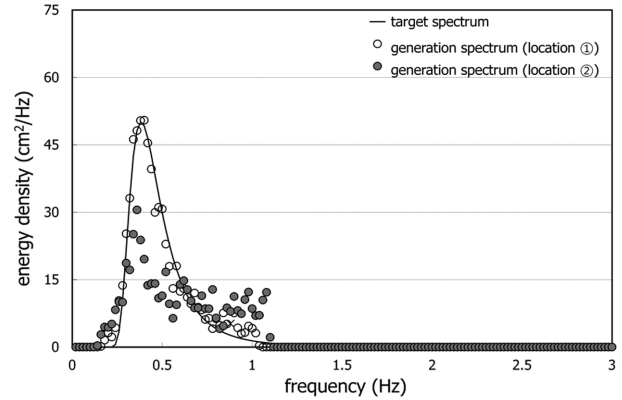


Fig. 7. Example of wave generation spectrum for breaking condition $[(T_S)_T = 2.3 \text{ sec} \ \& \ (H_S)_T = 13 \text{ cm}]$.

재현하고, 독취된 자료의 분석을 통해 ② 위치에서의 스펙트럼을 비교 도시한 것으로서 쇄파로 인해 ② 위치에서는 목표 스펙트럼에 비해 스펙트럼이 작게 나타남을 알 수 있다. 즉, 실험파 설정시 적용되는 주파수 스펙트럼은 쇄파가 고려되지 않은 스펙트럼이기 때문에 쇄파조건에서의 실험파 설정방법이 중요함을 알 수 있다. 따라서 실험대상 위치에서의 수심이 낮아 쇄파가 발생하는 경우에는 수심이 깊은 지점(쇄파가 발생하지 않은 지점, Fig. 3의 ① 위치)에서 입력파의 스펙트럼을 재현하고, 실험대상 위치(Fig. 3의 ② 위치)에서의 목표 유의파고에 부합되는 유의파고가 설정되도록 조파신호 생성을 위한 입력파의 파고조건을 변경하여 반복수행하는 것을 검토하였다.

Table 4와 Table 5는 Fig. 3의 ① 위치(비쇄파 위치)에서 입력파의 스펙트럼을 재현하고, 입력파에 따른 실험대상 위치(② 위치)에서의 유의파고를 비교 정리한 것이고, $(H_S)_T$ 는 조파신호 생성을 위한 입력파의 유의파고이다. 쇄파조건에서

Table 4. Results of wave generation for breaking condition $[(T_S)_T = 1.3 \text{ sec} \ \& \ (H_S)_T = 11 \text{ cm}]$

Target location	$(T_S)_T$ (sec)	$(H_S)_T$ (cm)	$(H_S)_I$ (cm)	$(H_S)_M/(H_S)_I$	$(H_S)_M/(H_S)_T$	
				Location ①	Location ①	Location ②
②	1.3	11	8	1.03	0.73	0.73
			9	1.02	0.82	0.81
			10	1.01	0.89	0.87
			11	1.00	0.97	0.91
			12	1.02	1.05	0.96
			13	1.00	1.15	1.01

Table 5. Results of wave generation for breaking condition $[(T_S)_T = 2.3 \text{ sec} \ \& \ (H_S)_T = 13 \text{ cm}]$

Target location	$(T_S)_T$ (sec)	$(H_S)_T$ (cm)	$(H_S)_I$ (cm)	$(H_S)_M/(H_S)_I$	$(H_S)_M/(H_S)_T$	
				Location ①	Location ①	Location ②
②	2.3	13	10	1.04	0.83	0.80
			11	1.04	0.91	0.86
			12	1.05	1.00	0.91
			13	1.04	1.07	0.96
			14	1.03	1.15	1.00
			15	1.02	1.22	1.01

Table 6. Results of wave generation according to measurement location (target location ②)

$(T_S)_T$ (sec)	$(H_S)_T$ (cm)	$(H_S)_M/(H_S)_T$			$(H_{max})_L, R/(H_{max})_C$		
		point L	point C	point R	L/C	C/C	R/C
1.3	5	1.01	1.00	1.02	1.02	1.00	1.03
1.8	5	1.03	1.04	1.06	0.99	1.00	1.02
2.3	5	1.03	1.04	1.06	0.99	1.00	1.02
2.8	5	1.05	1.04	1.06	1.00	1.00	1.02
average		1.03	1.03	1.06	1.00	1.00	1.02

의 실험과 설정절차를 정리하면 다음과 같다.

1) 목표 유의파고 $[(H_S)_T]$ 를 기준으로 입력파고 $[(H_S)_I]$ 를 입력하여 조파신호를 생성한 후, 비쇄파지점에서 입력파에 해당하는 스펙트럼 및 파랑특성이 재현되도록 반복한다.

2) 비쇄파지점에서 입력파 스펙트럼이 재현되었으면, 실험대상 위치에서 목표 유의파고 $[(H_S)_T]$ 등이 재현되었는지 검토한다.

3) 실험대상 위치에서의 목표 유의파고 $[(H_S)_T]$ 등이 재현되지 않았을 경우에는 입력파의 유의파고 $[(H_S)_I]$ 를 변경하여 조파신호를 생성하고, 1)의 절차를 진행한다. 이때 입력파의 유의주기는 변경시키지 않는다.

4) 실험대상 위치에서의 목표 유의파고 $[(H_S)_T]$ 등이 재현될 때까지 1)~3)의 절차를 반복한다.

전술한 쇄파조건의 실험과 설정절차에 따른 실험과 설정결과를 정리한 Table 4와 Table 5이다. 입력파의 파랑조건 $[(T_S)_T$ & $(H_S)_I]$ 를 이용하여 조파신호를 생성한 후, 비쇄파 위치에서 입력파의 목표 스펙트럼에 부합하고 $(H_S)_M/(H_S)_I \approx 1$ 이 될 때까지 조파신호를 수정 및 반복하여 입력파를 설정하였다. 입력파가 설정된 경우에 실험대상 위치(② 위치)에서 분석된 유의파고와 목표 유의파고의 비가 $(H_S)_M/(H_S)_T \approx 1$ 이 되는지 검토하였다. 그리고 실험대상 위치에서 $(H_S)_M/(H_S)_T \approx 1$ 이 되지 않는 경우에는 입력파의 유의파고 $[(H_S)_I]$ 를 수정하여 동일한 절차를 반복하였다. Table 4는 목표 유의파고와 유의주기가 $(T_S)_T = 1.3 \text{ sec}$ & $(H_S)_T = 11 \text{ cm}$ 인 조건에 대해 입력파의 유의파고를 $(H_S)_I = 8 \sim 13 \text{ cm}$ 까지 변경하면서 수행한 결과로서 $(H_S)_I = 13 \text{ cm}$ 인 경우에 $(H_S)_M/(H_S)_T \approx 1$ 이 됨을 확인할 수 있다. 즉, 쇄파로 인해 목표 유의파고보다 더 큰 입력파를 적용하여 실험파를 생성하여야지만 실험대상 위치에서 목표 유의파고가 재현됨을 확인할 수 있다. Table 5는 $(T_S)_T = 2.3 \text{ sec}$ & $(H_S)_T = 13 \text{ cm}$ 인 조건에 대한 결과이다. 전체적인 경향은 Table 4와 유사하며, $(H_S)_I = 14 \text{ cm}$ 와 $(H_S)_I = 15 \text{ cm}$ 조건의 경우에 실험대상 위치에서의 $(H_S)_M/(H_S)_T \approx 1$ 로 나타

났다. 이는 입력파고를 상대적으로 크게 입력하여 설정하더라도 쇄파로 인해 유의파고는 더 이상 크게 증가하지 않음을 의미한다.

4.2 실험과 설정위치 영향

실험과 설정시 계측기 위치에 의한 영향을 분석하였다. Fig. 4에 도시된 바와 같이 수로의 횡방향(파봉선 방향)으로 3개 지점을 설정한 후, 동시간에 계측한 자료를 이용하여 각 지점별 유의파고를 분석하였다. Fig. 4에서 C 지점은 실험수로의 중앙이고, L 지점과 R 지점은 수로벽면으로부터 각각 0.05 m와 0.1 m 이격된 위치이다.

Table 6은 횡방향 계측기 설치위치에 대한 실험결과를 정리한 것이다. 실험과 설정후 설정된 실험파의 유의파고와 목표 유의파고 비의 평균을 살펴보면, 중앙부(C)와 좌측부(L)의 경우에 $(H_S)_M/(H_S)_T = 1.03$, 우측부(R)는 $(H_S)_M/(H_S)_T = 1.06$ 으로 큰 차이를 보이지 않는다. L 지점과 R 지점의 최대파고를 C 지점의 최대파고로 나눈 비의 평균값을 살펴보면, L/C = 1, R/C = 1.02로서 최대파고비 또한 위치에 따른 차이는 크지 않음을 알 수 있다. 따라서 실험수로 횡방향으로의 계측기 위치는 실험과 설정결과에 큰 차이가 없지만 수로 중앙부에 계측기를 설치하여 실험파를 설정하는 것을 제안한다.

4.3 실험과 설정시간의 영향

실험과 설정시 조파시간 즉, 실험과 설정을 위한 분석시간(자유수면 계측시간)도 실험결과에 크게 영향을 미치며, 수리 모형실험을 수행하는 소요시간에도 큰 영향을 미치게 된다.

Table 7은 $(T_S)_T = 1.3 \text{ sec}$ & $(H_S)_T = 5 \text{ cm}$ 조건에 대해 실험과 설정을 위한 분석시간(t_W)을 유의주기 기준으로 $t_W = 158(T_S)_T$, $315(T_S)_T$ 및 $630(T_S)_T$ 를 적용한 결과를 정리한 것이다. $t_W = 158(T_S)_T$ 인 경우에 $(H_S)_M/(H_S)_T = 1.02$ 로서 목표 유의파고는 재현 가능하지만, $(H_{max})_M/(H_{1/3})_M = 1.43$ 으로서 최대파고는 재현되지 않음을 알 수 있고, $t_W = 315(T_S)_T$ 이상인 조건

Table 7. Results of wave analysis according to generation time $[(T_S)_T = 1.3 \text{ sec} \text{ \& } (H_S)_T = 5 \text{ cm}]$

$(T_S)_T$ (sec)	$(H_S)_T$ (cm)	Analysis time (t_W)	$(H_S)_M/(H_S)_T$	$(H_{max})_M/(H_{1/3})_M$
1.3	5	158	1.02	1.43
		315	1.00	1.78
		630	1.01	1.78

Table 8. Results of wave analysis according to generation time $[(T_S)_T = 2.3 \text{ sec} \ \& \ (H_S)_T = 5 \text{ cm}]$

$(T_S)_T$ (sec)	$(H_S)_T$ (cm)	Analysis time (t_W)	$(H_S)_M/(H_S)_T$	$(H_{max})_M/(H_{1/3})_M$
2.3	5	178	1.01	1.78
		356	1.01	1.76
		712	1.02	1.82

에서 목표 유의파고뿐만 아니라 최대파고, 즉 $(H_{max})_M/(H_{1/3})_M = 1.6 \sim 2$ 범위가 재현됨을 알 수 있다. Table 8은 $(T_S)_T = 2.3 \text{ sec}$ & $(H_S)_T = 5 \text{ cm}$ 조건에 대해 실험과 설정을 위한 분석시간 (t_W)을 $t_W = 178(T_S)_T$, $356(T_S)_T$ 및 $712(T_S)_T$ 를 적용한 결과를 정리한 것이다. $t_W = 178(T_S)_T$ 조건에서도 목표 유의파고 및 최대파고가 재현됨을 확인할 수 있다. 두 조건의 결과로부터 실험과 설정시 최소 분석시간은 $t_W \geq 200(T_S)_T$ 이 필요함을 알 수 있다. 이러한 결과를 종합하여 실험과 설정을 위한 조파시간(t_G)은 $t_G \geq 3t_0 + t_W$ 는 필요할 것으로 판단된다. 여기서 t_0 는 조파기로부터 조파된 파랑이 실험대상 위치에 도달하는 시간이며, $3t_0$ 는 조파된 파랑의 안정화 시간 및 재반사파가 실험과 설정위치에 도달하는 전반부 시간으로서 실험과 설정을 위한 분석에서는 제외되는 시간이다.

해안 및 항만분야 수리모형실험에서 해안수리특성(반사계수, 월파량, 전달계수 등) 검토를 위한 실험인 경우에는 실험과 설정시 분석시간을 $t_W \geq 200(T_S)_T$ 를 표준으로 하고, 실험체의 안정성 및 파압/파력 검토 등을 위한 실험에서는 $t_W \geq 400(T_S)_T$ 를 표준으로 하는 것을 제안하고자 한다. 안정성 등의 검토시에는 불규칙파군중 최대파고로 1/250 파고를 사용하는 것이 일반적이기 때문이다. 이는 400파를 발생시켰을 때 최대파고의 기대값이 1/250 파고에 일치한다는 기존 연구결과에 따른 것이며, 최소 유의주기 기준 200파 이상의 파군을 적용하도록 권고하고 있다(JPHA, 2018). 본 논문에서 제안하는 설정시 분석시간은 구조물 안정성 평가 등을 위한 조파시간이 아닌 실험과 설정을 위한 최소한의 조파시간이며, 실험시에는 각 측정항목에 부합되는 조파시간을 적용하여야 한다.

그리고 주파수 스펙트럼 및 파고 등을 분석하기 위한 자유수면 독취 시간간격(Δt)은 실험대상 파랑의 최소 유의주기(T_S)의 1/20 이하로 할 것을 제안한다. 즉, 파고계의 독취율(f_s)은 $f_s \geq \left(\frac{1}{\Delta t} = \frac{1}{T_S/20}\right)$ 이 되도록 한다. 이와 관련하여 일본 항만설계기준(JPHA, 2018)에는 20 Hz 이상, Hughes(1993)에는 20~30 Hz를 제안하고 있지만, 실험파의 주기가 1 sec 미만인 경우에는 더 높은 독취율(20 Hz 이상)이 요구된다.

5. 결 론

해안 및 항만분야에서 수리모형실험의 중요성에도 불구하고, 실험을 위한 표준화된 절차가 부재한 실정이다. 또한 수리모형실험은 담당자의 경험에 의존되는 항목이 많기 때문에 최소한의 실험절차 표준화 및 지침은 필요하다고 판단된다.

본 연구에서는 수리모형실험시 우선적으로 수행하여야 하는 실험과 설정절차 및 표준화에 대해 2차원 수리모형실험 결과를 이용하여 최소한의 절차를 제안하고자 한다. 수리모형실험시 실험과는 실험결과에 큰 영향을 미치지 때문에 매우 중요한 항목이다.

본 연구를 통해 도출된 주요 내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 쇄파유무에 따른 실험과 설정

- 비쇄파조건의 경우, 실험체 등이 설치되는 실험대상 위치에서 실험파를 설정한다. 그리고 설정 유의파고는 목표 유의파고의 100~105% 범위 $[(H_S)_M/(H_S)_T = 1 \sim 1.05]$ 가 되도록 한다. 또한 설정된 실험파의 최대파고는 목표 유의파고의 1.6~2배 범위 $[(H_{max})_M/(H_{1/3})_M = 1.6 \sim 2]$ 가 되도록 한다.
- 쇄파조건의 경우, 상대적으로 수심이 깊은 위치(쇄파가 발생하지 않는 위치)에서 실험파의 스펙트럼을 재현하고 실험대상 위치에서 $(H_S)_M/(H_S)_T = 1 \sim 1.05$ 가 되도록 한다. 만약 실험대상 위치에서 $(H_S)_M/(H_S)_T < 1$ 인 경우에는 조파신호 생성을 위한 입사파고를 증가시켜 스펙트럼을 재현하고 실험대상 위치에서 분석된 유의파고가 $(H_S)_M/(H_S)_T = 1 \sim 1.05$ 가 되도록 한다. 단, 이 경우에 목표 유의주기는 변경하지 않는다.

(2) 계측기 위치

- 실험과 설정시 실험수로내 횡방향(파봉성방향, 수로의 폭 방향) 위치에 따른 유의미한 차이는 나타나지 않았다.
- 실험과 설정시 계측기는 수로의 중앙부에 설치한다.

(3) 실험과 설정시간

- 실험과 설정을 위한 조파시간(t_G)은 $t_G \geq 3t_0 + t_W$ 이 되도록 한다. 여기서 t_0 는 조파기로부터 조파된 파랑이 실험대상 위치에 도달하는 시간이다. 그리고 해안수리특성을 검토하기 위한 실험인 경우에는 $t_W \geq 200(T_S)_T$, 실험체의 안정성 및 파압/파력 검토를 위한 실험은 $t_W \geq 400(T_S)_T$ 로 한다.
- 실험과 설정시 자유수면 독취율(f_s)은 $f_s \geq \frac{1}{(T_S)_T/20}$

이 만족 되도록 한다. 여기서 T_S 는 적용하는 실험과 중 최소 유의주기를 의미한다.

본 논문에서는 수리모형실험 수행시 가장 먼저 수행하여야 하고, 실험결과에 미치는 영향이 큰 실험과 설정지침 및 절차에 대해 검토하였다. 현재 항만 및 해안구조물의 해안수리특성 계측 및 분석방법, 파압/파력 계측 및 분석방법, 구조물

안정성 평가방법 등에 대한 절차수립을 위한 연구가 진행중이며, 추후 단계적으로 제시할 예정이다.

감사의 글

본 논문은 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(18-CTAP-B139288-02) 및 해양수산부 및 해양수산과학기술진흥원의 연구비 지원(과제번호: 20180323)으로 수행된 연구이며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Goda, Y. and Suzuki, Y. (1976). Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments. Proceedings of the 15th Coastal Engineering Conference, ASCE, 1, 825-845.
- Goda, Y. (2010). Random seas and design of maritime structures. World Scientific (ISBN 978-981-4282-39-0).
- Hughes, S.A. (1993). Physical models and laboratory techniques in coastal engineering. World Scientific (ISBN 981-02-1540-1).
- Hydralab III. (2011). Users guide to physical modelling and experimentation. CRC Press (ISBN 978-0-415-60912-8).
- Japan Ports and Harbors Association (JPHA) (2018). Design standard of harbor and fishery ports.
- Klopman, G. and van der Meer, J.W. (1999). Random wave measurements in front of reflective structures. J. of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering, 125(1), 39-45.

Received 8 December, 2021

1st Revised 21 December, 2021

2nd Revised 24 December, 2021

Accepted 24 December, 2021