2차원 조파수조에서의 파 생성 특성 조사

안재열* · 최정규* · 김형태*

*충남대학교 선박해양공학과

Investigation of Characteristics of Waves Generated in Two-Dimensional Wave Channel

Jae-Youl Ahn*, Jung-Kyu Choi* and Hyoung-Tae Kim*

*Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea

KEY WORDS: Wave channel 조파수조, Flap type wave maker 플랩형 조파기, Wave characteristic 파 특성

ABSTRACT: This paper investigates the characteristics of waves generated by a flap-type wave maker in a two-dimensional wave channel. Measurements are carried out for various water depths, wave heights, periods, and lengths capacitance-type wave height gages. The experimental results are shown to satisfy the dispersion relation of the linear wave theory. For waves with a small height and long period, the wave profiles agree well with those of the linear wave theory. However, as the wave height and period become higher and shorter, respectively, it is shown that the wave profiles measured in the present experiments are different from the linear wave profiles, and the measured wave heights are smaller than the target wave heights, which may be due to the non-linearity of the waves. As the wave progresses toward the channel end, the wave height gradually decreases. This reduction in the wave height along the wave channel is explained by the wave energy dissipation due to the friction of the side walls of the channel. The performance of the wave absorber in the channel is found to be acceptable from the results of the wave reflection tests.

1. 서 론

최근 들어 해양플랜트, 해양에너지 등 해양에 대한 관심이 고조되면서 조파수조(Wave channel) 실험에 대한 필요성이 높아지고 있으며, 국내에서도 선박, 해양플랜트, 파력발전 등 관련된 실험 연구가 많이 수행되고 있다(Shin et al., 2008; Lee et al., 2013; Hyun et al., 1991; Koo et al., 2012; Kim et al., 2012). 파와 관련된 실험은 대부분 2차원 단순파 또는 다양한 단순파를 중첩하여 생성한 3차원 불규칙파를 대상으로 하고 있다. 2차원의 조파수조는 소규모로 운영이 용이하고 비교적 정확한 파를 생성할 수 있기 때문에 파 특성에 관한 기본 연구나 파와 물체 간의 상호작용에 대한 실험 연구에 있어서 중요한 역할을 하고 있다. 하지만 일반적으로 2차원 조파수조의 길이나 폭에 제한이 있기 때문에 생성된 파의 특성에 대해 사전에 면밀히 검토해야 한다.

한편, 조파수조에서 파의 생성은 조파기(Wave maker)를 통해 이루어지는데, 조파기는 피스톤(Piston), 플랩(Flap), 플런저(Plunger), 실린더(Cylinder) 형 등이 있으며, 이 중에서도 플랩형의 조파기는 구조가 간단하고, 원하는 파 생성을 위한 제어가 쉽기 때문에 2차원 및 3차원 조파수조에서 많이 활용되고 있다. 피스

톤형이나 플랩형 조파기에 대해서는 선형이론에 기초한 선형 조파기 이론(Dean and Darlymple, 1991)이나 2차의 비선형 이론(Schäffer, 1996) 등이 있으며, 플런저형(Rytönen and Granholm, 1989)에 대한 연구도 수행된 바 있다. 이러한 이론에 기초하여 조파수조에서 파를 생성하고 있으나, 조파기의 종류나 조파수조의 제원 그리고 소파장치의 성능 등에 따라 실제로 생성된 파의 특성이 다양하게 나타나므로 목적하는 파를 생성하여 실험을 수행하기 위해서는 조파수조에서의 파 생성 특성에 대한 조사가 필요하다.

본 논문에서는 2차원 조파수조에서 플랩형 조파기를 대상으로 선형 조파기 이론을 적용하여 파를 생성하고, 파고 및 파장을 예측하여 생성된 파의 특성을 조사하였다. 또한 2차원 수조에서의 파 전파 특성과 소파장치의 성능을 파악하여 향후 2차원 조파수조에서 수행할 실험에 필요한 파 생성 정보를 얻고자 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 2차원 조파 수조

본 연구에 사용한 충남대학교 선박해양공학과 조파수조는

Received 11 March 2013, revised 9 July 2012, accepted 12 August 2013

Corresponding author Hyoung-Tae Kim: +82-42-821-6629, h-tkim@cnu.ac.kr

© 2013, The Korean Society of Ocean Engineers

(a) Wave channel

(b) Hinge type wave maker

(c) Wave absorber

Fig. 1 Wave channel (Chungnam national university, $L \times B \times D : 12\text{m} \times 0.4\text{m} \times 0.345\text{m}$)

Fig. 2 Sketch of flap type wave maker

길이 12m, 폭 0.4m, 높이 0.345m인 소규모의 2차원 조파수조이다. 파 생성은 힌지에 연결된 플랩으로 하며, 직경 약 1mm의 플라스틱 와이어 다발을 조파기로부터 11.5m 위치에 설치하여 소파한다(Fig. 1). 수조의 폭과 조파기의 폭이 일치하도록 하여 2차원 조파가 가능하며, 수조 바닥은 스테인레스 스틸(Stainless steel)로 되어 있다. 조파기 상부와 교류모터에 부착된 원형 판을 연결하여 조화함수 형태로 조파기를 작동시킨다.

플랩형 조파기는 플랩이 밀어낸 물의 양과 파고와의 관계로부터 조파기의 스트로크(Stroke)에 따라 원하는 파고를 생성할 수 있으며, Fig. 2에는 실험에 사용된 플랩형 조파기의 개략적인 모습을 나타내었다. 플랩형 조파기를 구현하기 위해 조파기 아래와 바닥을 힌지로 연결하였으며, 힌지를 수조 바닥과 일치시키는 것은 구조적으로 복잡해지기 때문에 수조바닥과 0.02m 떨어져 고정 되도록 하였고, 힌지 아래쪽으로 유동이 없도록 벽을 설치하였다.

대상 파도 생성을 위한 플랩형 조파기의 운동은 Dean and Dalrymple (1984)과 Hughes (1993)의해 다음 식 (1)과 같이 조파기의 스트로크와 파고의 관계로부터 구현될 수 있다.

$$\frac{H}{S} = \frac{4 \sinh kh}{\sinh 2kh + 2kh} \left\{ \sinh kh + \frac{1 - \cosh kh}{k(h+l)} \right\} \quad (1)$$

여기서 H 는 파고, S 는 조파기의 스트로크, k 는 파수(Wave number), h 는 평균 수심, l 은 힌지에서 수조 바닥까지의 높이이다. $l \leq 0$ 인 경우는 플랩형 조파기를 나타내고, $l \rightarrow \infty$ 인 경우는 피스톤형 조파기를 나타낸다.

2.2 계측 장비

본 실험에서는 파고 계측을 위해서 크롬 와이어를 이용한 용량

식 파고계(Capacitance type wave gauge)를 사용하였다 (Fig. 3). 용량식 파고계는 크롬 와이어와 신호증폭을 위한 앰프로 구성되며, 선형성이 우수하고, 저렴하며, 설치 및 운용이 비교적 용이한 장점이 있다. 계측 신호는 데이터 수집장치(DAS, Data acquisition system)를 통해 PC로 전송되고, DAS는 HBM사의 MGCPlus를 사용하였다.

파고계의 교정을 위해서 정지되어 있는 물에서 파고계의 높이를 변화해 가며 신호를 계측하였다. 실험에서는 파장의 계측 및 반사파 영향 등을 살펴보기 위해 두 개의 파고계 사용하였으며, 두 개의 파고계에 대해 교정을 수행하였다. 샘플링 데이터는 100Hz이며, 30초간의 계측 신호를 평균하였다. 조파수조에서의 실험은 파고계를 어느 정도 물속에 잠기게 하기 때문에 수면이 위치하는 부근에서는 1mm 단위로 정밀하게 계측하였으며, 교정 결과를 Fig.

Fig. 3 Wave height gages(left) and DAS(right)

Fig. 4 Calibration results of wave height gages

Table 1 Wave characteristics for wave channel tests

Wave height(H , m)	0.005	0.01	0.015	0.02	0.025
Wave period(T , sec)	0.483	0.653	0.812	0.972	1.141
Wave length(L , m)	0.364	0.647	0.929	1.209	1.484
Water depth(h , m)	0.22	0.25	0.28	0.22	0.25
Relative depth(kh)	3.797	4.368	4.891	2.137	2.490

Wave maker type : Hinged flap type

Wave height gage : Capacitance type, 2 point measurement

4에 나타내었다. 교정 데이터로부터 수면 높이에 따른 전압의 기울기가 선형적이며, 비선형성(Non-linearity)이 $\pm 0.1\%$ 이내, 이력성(Hysteresis)이 $\pm 0.1\%$ 이내로서 파고 계측에 적합함을 확인하였다.

2.3 실험 방법

본 실험은 수심 0.22, 0.25, 0.28m의 세 개의 조건을 대상으로 하였으며, 파고(H)는 0.01~0.03m까지 5개, 파주기(T)는 0.483~1.141초이고, 식 (2)의 분산관계(Dispersion relation)에 의한 파장(L)은 0.35~1.326m이다. 이러한 파 특성은 우리나라 연근해(서남해안)의 평균 파고(0.3~2.0m)와 평균 파주기(3~8초)를 대상으로 축척비 1/40을 적용하여 기하학적 상사 및 Froude 상사를 통해 도출한 것 중에서 선택하였다. 대상 파의 주요 제원을 Table 1에 나타내었다.

$$w^2 = gk \tanh kh \quad (2)$$

한편 파고의 계측은 1개의 파고계로부터 파가 충분히 발달한 다음 5개의 파의 평균으로부터 얻었으며, 샘플링 데이터는 100Hz이다. 파장은 2개의 파고계를 이용하여 파고계 사이의 거리($\Delta l = 1\text{m}$)와 파가 첫 번째에서 두 번째 파고계를 지나는 시간을 계측하여 도출하였으며, 파고 및 파장 계측 위치는 Fig. 5와 같다.

대상 파도는 대부분 유한 수심의 영역으로 판정할 수 있으나 kh 가 π 보다 큰 무한 수심의 경우도 일부 포함되어 있다. 파주기가 짧고 파고가 큰 경우에는 비선형성이 나타날 수 있으므로, 고차의 파형을 가지는 파도는 2차 이상의 조파기 이론(Schäffer, 1996)을 사용하여 조파기 운동을 구현해야하지만, 본 연구에서는 선형이론에 의한 파 생성 특성을 조사하는 것이 주된 목적이므로 고차의 비선형효과가 될 수 있는 파주기 및 파고 범위는 대상에서 제외하였다.

Fig. 5 Measuring setup in the wave channel

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 분산 관계에 대한 조사 및 고찰

생성파의 분산 관계를 확인하기 위해 조파기로부터 2m 떨어진 위치(Fig. 5, P1)에서 파고 및 파장을 계측하고, 계측결과와 선형 이론을 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 여기서 C_0 , C_G , L_0 , H_0 는 각각 무한수심에서의 파 위상속도 (Celerity), 군속도

Fig. 6 Variation of wave parameters(C_G/C_0 , L/L_0 , H/H_0)

(Group velocity), 파장, 파고이며, 계측된 파고, 주기를 다음의 (3), (4), (5) 식으로부터 각 무차원수를 얻었다. H/H_0 는 에너지 보존으로부터 유도된 것이다 (McCormick, 2007; Dean and Dalrymple, 1991).

$$\frac{C_G}{C_0} = \frac{1}{2} \tanh kh \left\{ 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right\}, \quad C_0 = \frac{gT}{2\pi} \quad (3)$$

$$\frac{L}{L_0} = \tanh kh, \quad L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (4)$$

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{C_G}{C_0}} = \sqrt{\frac{1}{\tanh kh (1 + 2kh/\sinh 2kh)}} \quad (5)$$

Fig. 6에서 보는 바와 같이 비교한 모든 변수에 대해 선형 이론과 잘 일치하고 있음을 볼 수 있으며, 무차원 변수들이 선형 이론의 분산 관계에 기반하고 있기 때문에 선형 조파기 이론으로 생성한 파의 계측 결과가 파의 주기, 파장, 수심에 따른 분산 관계를 잘 만족하고 있음을 확인하였다.

3.2 조파기 이론에 의한 파고

입력 파고 및 파주기에 따른 플랩형 조파기의 파 생성 특성을 확인하기 위해 식 (1)로부터 파고에 대해 스트로크를 도출하고, 조파기를 작동하여 조파기로부터 2m 위치에서의 파고를 계측하였다. 조파기에 의해 생성된 파도의 파고 및 파장을 파고와 스트로크의 비(H/s)와 수심과 파장의 비(kh)의 관계로 Fig. 7에 나타내었다. 여기서 H , k 는 계측된 파고와 파수($2\pi/L$)이며, 이론의 경우 대상 파고와 파장을 사용하였다. kh 가 2.5보다 작은 유한 수심의 경우에는 대부분 이론에 의한 식 (1)과 잘 일치하고 있는 반면, 무한 수심으로 볼 수 있는 kh 가 3.14 이상에서는 다소

Fig. 7 Wave height to stroke ratios according to relative depths(kh)

Fig. 8 Validity of several theories for the waves(Le Mehaute, 1969)

차이를 보이고 있는데, 이는 조파기 이론이 선형이론에 기반하고 있기 때문에 파주기가 짧은 경우에 비선형성이 나타나면서 발생한 차이로 보인다. Fig. 8에는 생성 파의 예측 결과를 여러 가지 이론의 판정 기준 (Le Mehaute, 1969)과 비교하였는데, 파주기가 짧고, 파고가 높은 파는 Stokes 3차 파(Stokes'3rd order wave)에 가까우며 일부는 Stokes 3차로 볼 수 있다. 다른 대상파의 경우 모두 Stokes 2차 파로 나타나고 있으며, 분산 관계의 경우 2차

파에서는 다른 보정이 없기 때문에(Dean and Dalrymple, 1991) Fig. 6의 분산관계는 선형이론과 잘 일치한 것으로 보인다.

Fig. 9에는 예측된 결과 중 대표적인 파고와 파주기에 대해 시간에 따른 파형을 나타내었다. 파주기가 1.141초인 경우에는 파형이 선형파와 거의 일치하고 있으며, 주기가 0.812초인 경우는 파고는 이론과 거의 유사하지만 파정(crest) 부근에서 약간의 비선형성이 나타나고 있음을 볼 수 있다. 파주기가 짧은 경우 이론에 비해서 파형이 다소 차이를 보이고 있으며 특히 파정보다 파저에서의 차이가 더 큰 것으로 나타나고 있는데, 이는 파주기가 짧을 때 다른 경우보다 비선형성이 크게 나타나기 때문인 것으로 보인다.

이러한 파고 특성을 확인하기 위해 파주기 및 입력파고에 따른 파고의 차이($(H_0 - H)/H_0 \times 100$)를 Fig. 10에 나타내었다. 파주기가 길어질수록 차이는 작아지는 것을 볼 수 있으며, 수심에 따라서는 유사한 경향을 보이나 0.25m에서 차이가 가장 적은 것을 볼 수 있다. 짧은 주기에서는 상당한 차이가 나타났으며, 앞서 살펴본 바와 같이 비선형성이 나타나는 주기 0.812초부터는 차이가 점점 증가하는 경향을 보이고 있다. 각 주기에서 파고에 따른 평균은 주기가 짧은 경우 약 17.5%, 주기가 긴 경우 약 4.5%의 차이가 나타나고 있다.

Fig. 9 Comparison of wave profile between measured data and theories

Fig. 10 Difference(%) between measured and input wave heights

3.3 수조 길이방향으로의 파 전파

조파수조에서 파를 생성할 때, 파의 수조 길이방향 전파 특성은 매우 중요한 요소이다. 특히 본 연구의 2차원 조파수조는 폭이 좁아서 수조 벽면 등의 영향으로 에너지 전파가 길이방향으로 달라질 수 있다. 에너지의 경우 파고의 제곱에 비례하기 때문에 수조 길이방향으로 파고 변화에 대한 특성을 파악해야 하며, 본 조파수조에서 생성한 파가 길이방향으로 어떻게 전파되는지를 살펴보았다. 수심 0.22m에 대해 파고 0.01m, 0.015m, 0.025m와 Table 1과 동일한 5개 주기를 가지는 파를 대상으로 조파기로부터 2~8m 까지 1m 간격으로 파고를 계속하였으며 (Fig. 5, P1~P7), Table 2에 이를 정리하였다.

계측된 파고의 거리에 따른 변화를 Fig. 11에 나타내었으며, 여기서 계측된 파고(H)는 목적 파고(H_0)로 무차원한 것이다. 파

Table 2 Wave characteristics for wave propagation tests

Wave height (H , m)	0.01, 0.015, 0.025
Wave period (T , sec)	0.483, 0.653, 0.812, 0.972, 1.141
Wave length (L , m)	0.364, 0.647, 0.929, 1.209, 1.484
Wave gage position from wave maker (x , m)	2(P1), 3(P2), 4(P3), 5(P4), 6(P5), 7(P6), 8(P7)

Water depth : 0.22m

Fig. 11 Wave height reduction as far away from wave maker according to wave height at 0.22m water depth

고가 높고, 파주기가 긴 경우 길이 방향으로 변화가 작게 나타나고 있으며, 파고가 작은 경우는 모든 주기에 대해 길이 방향으로 낮아지는 경향을 보이고 있다. 특히 모든 파고에서 파주기가 짧아지면 예외 없이 길이 방향으로 파고가 낮아지는 경향을 보이고 있으며, 파고가 작을수록 변화율이 큰 것을 볼 수 있다.

파가 전파되면서 파고가 낮아지는 것은 수조의 벽면이나 유체 간의 마찰에 의해 에너지 손실이 발생하면서 파고의 감소로 나타난 것으로 볼 수 있으며, 특히 파주기에 따라서 그 영향이 크게 나타난다(Darlymple, 1992). 수로에서 진행되는 파의 파고 감소에 대해 Hunt (1952)는 수로 벽면에 의한 층류마찰에 의한 감소로, Battjes(1965)는 난류마찰 감소로 설명한 바 있으며, 파고 감소를 층류와 난류가 혼합되어 있는 경우에 대해 다음 식 (6)과 같이 나타내었다.

$$\ln\left(1 + \frac{2\alpha}{\beta H}\right) = \ln\left(1 + \frac{2\alpha}{\beta H_0}\right) + \alpha x \quad (6)$$

여기서 x 는 기준위치로부터 거리이며, α , β 는 파주기 및 벽면 마찰에 의해 결정되는 계수로서 다음 식 (7)과 같다.

$$\alpha = \frac{k}{b} \sqrt{\frac{\nu T}{\pi}} \frac{2kb + \sinh 2kh}{2kh + \sinh 2kh}, \quad \beta = \frac{2w^2}{3\pi bgn} \left(\frac{1}{3} + \sinh^{-2} kh\right) C_f \quad (7)$$

식 (7)에서 b 는 수조의 반폭(m), ν 는 유체의 동점성계수(m^2/s), w 는 파의 원진동수(rad/s), g 는 중력가속도(m/s^2), n 은 군속도와 파속도의 비(C_g/C_p), C_f 는 마찰계수이다. 본 조파 수조는 조류(Current) 등 특히 큰 유속에 의한 영향은 없고, 유체입자 운동에 의한 수조 벽면과의 마찰만 있으므로 속도가 작은 유체입자 운동에 의한 벽면에서의 경계층은 모든 구간에 대해 층류로 볼 수 있으며, 층류 마찰에 의한 감소만 고려하면 파고 감소는 식 (8)과 같다.

$$\ln \frac{2}{H} = \ln \frac{2}{H_0} + \alpha x \Rightarrow \frac{H}{H_0} = \frac{1}{e^{\alpha x}} \quad (8)$$

Fig. 12 Wave height reduction as far away from wave maker according to wave period at 0.22m water depth

Fig. 12에는 대상 파주기별로 식 (8)과 비교하여 나타내었다. 파주기가 증가하면서 길이방향 감쇠가 점점 작아지는 것을 볼 수 있는데, 이는 이론과 실험 모두 동일한 경향을 보이고 있다. 같은 주기에서 파고 감소 따른 길이방향 변화도 모든 경우가 유사하게 나타나고 있으며, 이론과도 잘 부합하고 있다. 이를 통해 조파수조에서의 길이방향 파 감쇠는 파고의 영향보다는 주기의 영향이 더 지배적인 것을 알 수 있으며, 이는 식 (7)에서도 나타나고 있듯이 감쇠 영향 계수 α 가 $\sqrt{T}$ 에 비례함을 통해서도 확인할 수 있다. 계수 α 는 파수와 수조의 반폭의 비(k/b)에 비례하고 있는데, 폭이 크거나 파장이 길수록 수조 벽면에 의한 영향은 감소하게 될 것이며, 이는 본 조파수조에서 파주기의 증가 즉, 파장의 증가에 따라 선형이론의 특성과 가까운 파가 생성되고, 길이방향으로 파가 잘 유지됨을 통해서도 확인할 수 있다.

또한 앞서 입력 파고가 크고, 파주기가 짧을 때 나타나는 현저한 파고 감소도 비선형성의 증가보다는 벽면 효과에 의한 감쇠가 영향을 미쳤을 것으로 사료된다. 한편, 수조 뒤쪽으로 갈수록 파주기 0.483초를 제외하면 어느 정도 파의 고란을 받는 것을 볼 수 있는데, 이는 수조 끝에서의 반사파 영향으로 보이며, 이를 살펴보기 위해 파의 반사계수를 도출하였다.

3.4 반사파의 영향

수조의 끝단이나 소파기에 의한 반사파의 영향은 다음 식 (9)와 같은 반사계수(K_r)를 도출하여 검토할 수 있다.

$$K_r = \frac{\alpha_R}{\alpha_I} \quad (9)$$

여기서 α_I 는 유입 파의 진폭, α_R 은 반사파의 진폭이며, 유입파 및 반사파의 파형을 다음 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다. Goda and

Suzuki(1979)의 제안과 같이 2점에서 측정한 파형(η_1, η_2)을 식 (11)과 같이 표현하면, 식 (12)로부터 반사파의 진폭을 도출할 수 있다.

$$\begin{aligned} \eta_I &= \alpha_I \cos(kx - \omega t + \epsilon_I) \\ \eta_R &= \alpha_R \cos(kx + \omega t + \epsilon_R) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \eta_1 &= (\eta_I + \eta_R)_{x=x_1} = A_1 \cos \omega t + B_1 \sin \omega t \\ \eta_2 &= (\eta_I + \eta_R)_{x=x_2} = A_2 \cos \omega t + B_2 \sin \omega t \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \alpha_I &= \frac{1}{2|\sin k\Delta l|} \sqrt{(A_2 - A_1 \cos k\Delta l - B_1 \sin k\Delta l)^2 + (B_2 + A_1 \sin k\Delta l - B_1 \cos k\Delta l)^2} \\ \alpha_R &= \frac{1}{2|\sin k\Delta l|} \sqrt{(A_2 - A_1 \cos k\Delta l + B_1 \sin k\Delta l)^2 + (B_2 - A_1 \sin k\Delta l - B_1 \cos k\Delta l)^2} \end{aligned} \quad (12)$$

본 실험에서는 Fig. 13과 같이 기준점(x_1)과 Δl 거리에 있는 점(x_2) 위치에 파고계를 설치하였으며, Δl 은 0.58m이다. 측정은 수심 0.25m인 상태에서 조파기로부터 2, 5, 8m위치(Fig. 5, P1, P4, P7)에서 수행되었고, 파고 0.01, 0.02, 0.03m, 파주기 0.812, 1.141초이다. 실험 조건을 Table 3에 나타내었다. 여기서 유의해야 할 사항은 Δl 의 결정인데, 파고계 간격과 파장 사이의 비($\Delta l/L$)가 $n/2$ ($n=0, 1, 2, \dots$)가 되면 식 (12)에서 우변의 분모가 0이 되면서 발산하게 되므로 입력 파장을 고려하여 파고계 사이의 간격을 결정해야 한다(Goda and Suzuki, 1979). 본 실험에서는 Δl 을 0.58m로 유지하여 파주기 세 개에 대해 분산 관계에 의한 파장으로 부터 각각 $\Delta l/L$ 가 0.607, 0.373이다. 한편 식 (11) 우변의 계수들은 푸리에 분석(Fourier analysis)을 통해 얻을 수 있으며, 본 실험에서는 반사파의 영향을 확인할 수 있도록 샘플링 주파수

Fig. 13 Experimental setup for wave reflection effects

Table 3 Wave characteristics for wave reflection tests

Wave height(H , m)	0.01, 0.02, 0.03
Wave period(T , sec)	0.812, 1.141
Wave length(L , m)	0.929, 1.484
$\Delta l/L$	0.607, 0.373
Wave gage position from wave maker (x , m)	2(P1), 5(P4), 8(P7)

Water depth : 0.25m

Distance between gages(Δl) : 0.58m

100Hz로 108초 동안 계측을 하여 분석을 수행하였다.

식 (9)의 반사계수를 계측하여 전 측정 시간동안의 파주기 및 파고에 따른 변화의 평균을 거리에 따라 Fig. 14에 나타내었다. 파주기가 긴 경우 반사계수가 크고, 파고에 따라서는 큰 변화가 없는 것을 볼 수 있으며, 거리에 따라서는 조파기에서 멀어질수록 반사파의 영향이 큰 것으로 나타나고 있다. 따라서 반사파의 영향은 파주기가 길어질수록 즉 위상속도가 클수록 그리고 수조의 끝에 가까워질수록 반사파의 영향이 큰 것을 알 수 있다. 한편 시간에 따른 반사계수의 변화를 살펴보기 위해 측정 시간의 구간별로 반사계수의 평균을 Fig. 15에 나타내었다.

Fig. 14 Wave channel reflection coefficients according to wave period and height

Fig. 15 Wave channel reflection coefficients according to distance from wave maker

Fig. 16 Arrangement of wave absorber

여기서는 파도가 발달하는 시간을 10초로 정하고, 측정시간의 10초부터 50초까지 10초 간격으로 해석한 것이다. 계측 위치 5m 이내의 위치에서 계측 시간 20초 이내에는 반사파의 영향이 크지 않은 것을 볼 수 있으며, 시간이 지날수록 반사파 영향이 증가하는 것을 볼 수 있다. 주기가 긴 파는 시간이 지날수록 주기가 짧은 파보다 반사파의 영향이 크며, 수조 끝으로 갈수록 반사파의 증가율이 더 큰 것으로 나타났다.

본 조파수조의 소파기는 Fig. 16과 같이 배치하였는데, 수조 끝에서는 파 반사계수가 0.2 이하로 나타난 것으로 볼 때, 소파기의 파 흡수율이 80%이상인 것으로 분석할 수 있다. 또 앞서 파고에 따른 반사파 영향이 크지 않은 것으로 나타난 Fig. 14의 결과로부터 파고가 큰 경우 파 흡수율은 더욱 뛰어날 것으로 추정된다.

4. 결 론

본 논문에서는 2차원 조파수조에서 파고, 파주기, 수조의 길이 방향 위치별로 파고를 계측하고 플랩형 조파기에 의해 생성된 파 특성에 대해 조사하였다. 생성된 파는 대부분 유한 수심의 Stokes 2차 파에 속하며, 계측파의 분산 관계는 선형이론과 잘 일치하였다. 일부 무한수심의 Stokes 3차 파의 경우, 계측파의 분산 관계는 선형이론과 일치하고 있지만 계측파형은 다소 차이를 보이며, 특히 파고의 감소가 분명하게 드러나고 있다. 파주기가 짧고 입력 파고가 클수록 계측 파고는 작게 나타나고 있는데, 이는 파주기가 짧고 파고가 클 때 비선형성이 증가하는 것과 2차원 조파수조의 벽면 마찰로 인한 길이방향 파 감쇠에 의한 것이 복합적으로 나타난 것으로 보인다. 실제로 조파수조의 길이방향으로 파고 및 파주기에 따라 계측한 결과로부터도 벽면 층류마찰에 의한 파고 감쇠를 확인할 수 있었다. 반사파 영향은 파주기가 길어지거나 수조의 끝에 가까워질수록 증가하며, 파고에 따른 차이는 작게 나타났다. 또한 시간이 지날수록 반사파의 영향은 증가하지만 그 크기가 크지 않음을 볼 때, 소파기의 파 흡수 성능이 우수함을 알 수 있었다.

향후 본 조파수조를 해양플랜트 및 파력발전 등의 다양한 실험 연구에 사용할 수 있을 것으로 기대되며, 비선형파 등에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2011-0016077).

References

- Battjes, J.A., 1965. Wave Attenuation in a Channel with Roughened Sides. Proceedings Coastal Engineering Specialty Conference, ASCE, Santa Barbara, 425-460.
- Dalrymple, R.A., 1992. Water Wave Propagation in a Jettied Channel. Proceedings of 23rd International Conference, Coastal Engineering, 3040-3053.
- Dean, R.G., Dalrymple, R.A., 1991. Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists. Advanced Series on Ocean Engineering-Volume 2, World Scientific, USA.
- Goda, Y. and Suzuki, Y., 1979. Estimation of Incident and Reflected Waves. Proceedings of 15th Coastal Engineering Conference, ASCE, 1, 828-845.
- Hughes, S.A., 1993. Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering. World Scientific, Singapore.
- Hunt, J.N., 1952. Viscous Damping of Waves over an Inclined Bed in a Channel of Finite Width. La Houille Blanche, 836-842.
- Hyun, B.S., Lee, P.M., Gong, D.S., 1991. An Experimental Study on Performance of the Fixed-type OWC Chamber for Wave-Energy Conversion. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 28(2), 318-328.
- Kim, S.J., Kwon, J.S., Kim, J.D., Koo, W.C., Shin, S.W., Kim, K.H., 2012. Experimental Study of Hydrodynamic Performance of Backward Bent Duct Buoy (BBDB) Floating Wave Energy Converter. Journal of Ocean Engineering and Technology, 26(6), 53-58.
- Koo, W.C., Kwon, J.S., Kim, J.D., Kim, S.J., Kim, M.W., Choi, M.K., 2012. Experimental Study of Shape Parameter of Land-based OWC Wave Energy Converter. Journal of Ocean Engineering and Technology, 26(3), 33-38.
- Le Mehaute, B., 1969. An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves. Water Wave Theories, 2, U.S. Department of Commerce, ESSSA, Washington.
- Lee, S.J., Kang, D.H., Jo, H.J., and Shin, D.R., 2013. Study on Behavior of Slender Bodies in Waves. Journal of Ocean Engineering and Technology, 27(3), 29-35.
- McCormick, M.E., 2007. Ocean Wave Energy Conversion. Dover Publication, USA, New York.
- Rytönen, J., Granholm, G., 1989. Experimental Investigation of Plunger type Wave Maker. Rakenteiden mekaniikka, 22(3), 25-46.
- Schäffer, H. A., 1996. Second-order Wavemaker Theory for Irregular Waves. Ocean Engineering, Elsevier Science, 23(1), 47-88.
- Shin, H.K., Kim, M.S., Noh, C.M., Yang, S.H., Cho, J.W., Kim, J.W., Kim, S.R., Yang, Y.C., and Kim, B.M., 2008. Model Test and Numerical Simulation of the Behaviour of Dock-Gate in Waves. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 45(6), 611-619.