



다기능 조파기의 조파 운동과 발생 파형

김효철^{1,2}·오정근^{3,†}·류재문^{4,7}·이신형^{1,5}·김재현⁶

서울대학교 조선해양공학과¹

서울대학교 공학연구원²

군산대학교 조선해양공학과^{3,†}

충남대학교 선박해양공학과⁴

서울대학교 해양시스템공학연구소⁵

한국해양대학교 조선해양시스템공학부⁶

선박해양시스템기술협동조합⁷

Wave and Wave Board Motion of Hybrid Wave Maker

Hyochul Kim^{1,2}·Jungkeun Oh^{3,†}·Jae-Moon Lew^{4,7}·Shin Hyung Rhee^{1,5}·Jae Heon kim⁶

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University¹

Institute of Engineering Research, Seoul National University²

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Kunsan National University³

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National University⁴

Research Institute of Marine System Engineering, Seoul National University⁵

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Korea Maritime & Ocean University⁶

The Cooperative for Ship and Ocean Technology⁷

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Piston type wave makers or flap type wave makers are usually adopted as a wave maker which disturbing the fluid domain with sinusoidal motion. Recently hybrid wave maker which could be operated as not only piston type and/or flap type but also swing type wave maker have been devised by utilizing the link mechanism. The wave board of hybrid wave maker has been devised to be independently controlled by the horizontal actuators on upper and lower end of the wave board. The wave board could operate as a flap type wave board when the lower hinge is in a stationary condition and the upper hinge is operated with sinusoidal motion. On the contrary, the swing type wave board could be obtained by the lower hinge is activated and the upper hinge is in a stationary condition. When both end of the wave board is activated in a synchronized condition, the wave board motion become piston motion. In addition the hybrid wave maker could enhance the piston motion with flap motion or swing motion by selecting control parameters. Various wave board motion of hybrid wave maker and relevant wave form have measured on the wave board and departed location. It is appeared that the novel hybrid wave maker could be utilized for the improvement of wave qualities in experiments.

Keywords : Hybrid wave maker(다기능 조파기), Wave board motion(조파판 운동), Theoretical wave(이론 파형), Measured wave(계측 파형)

1. 서 론

선박 및 해양구조물의 실제 해역에서의 성능을 실험실에서 정수 중 모형실험으로 조사하고 파도가 있는 실제 해역에서의

성능은 여유를 주어 판단하는 간접적 추정 방법을 사용했다. 근래에 Energy Efficiency Design Index : EEDI의 발효로 선박 설계에서 좀 더 정밀하게 실제 해역에서의 성능을 실험적으로 추정하는 방법이 필요하게 되었다. 정밀한 실험적 추정을 하려면 제한된 실험실 환경에서 해상 상태를 나타낼 수 있어야 한다.

파랑 중에서도 정속 운항이 중요한 선박의 저항 추진 성능을 대상으로 할 때는 정수 중에서의 저항을 조사하고 해상 여유를 고려하는 방식으로 실제 해역에서의 저항의 증가를 추정하였다. 선박모형의 정수 중 실험으로 실선 저항을 추정하는 Froude 방법은 파랑 중 운항 선박의 저항성능 추정에는 충분하지 못하다. EEDI의 발효는 실제 해상 상태에서 파랑으로 인한 저항의 증가를 좀 더 정밀하게 직접 확인하는 것을 요구하고 있다.

해양구조물은 연안에 고정되는 구조물일 때는 구조물에 미치는 파랑 하중에 관심의 대상이 되었으나 심해에 계류되는 부유 구조물일 때는 파도 중에서 운동 응답이 더욱 중요하게 되었다. 해상 유전이 점차 깊은 해역으로 옮겨감에 따라 해양구조물이 받는 파도의 형태는 수심의 영향을 받는 연안 파형으로부터 수심의 영향을 무시할 수 있는 해양파형으로 바뀌었다.

결국, 실험실에서 선박이나 해양구조물을 실험하려면 수심의 영향을 받지 않은 파도로 실제 해역의 해상 상태를 나타낼 수 있어야 한다 (Tanizawa et al., 2011). 저항성능에 주요 관심으로 두는 선형시험수조에서는 정면 파를 중요하게 다루지만, 내항성과 조종성에 주요 관심을 두는 수조에서는 불규칙한 실제 해역의 해상 상태를 나타내는 것이 중요하게 되었다.

지금까지 선형시험 수조에서는 수면에 규칙적인 교란이 일어나도록 유체영역에 규칙적인 교란을 일으키는 방법이 사용되고 있다. 초기에는 기계장치를 조화 왕복 운동하도록 하여 물을 교란하고 발생한 파도를 측정된 후 교란과 파도 사이의 상관관계를 조사하여 원하는 파도 발생에 사용하였다 (Takezawa, 1980). 최근에도 조파기에 관한 연구는 활발히 진행되며 다양한 형식의 조파기의 조파 성능에 대한 조사가 보고되고 있다 (Ahn et al., 2013; Kwon et al., 2019). 유체를 조화 왕복운동으로 교란하면 정현파가 얻어진다고 가정하는 이론해석법이 1800년대 초반에 소개되었으며, 이 해석법을 활용하여 쇄파발생을 위한 조파기를 설계하는 방법을 도입하였다 (Liao & Roddier, 1998).

즉 유체영역에서는 속도 퍼텐셜이 성립하므로 수조 벽면에서는 면에 수직 방향 흐름이 없으며 자유 수면에서는 선형 경계조건이 성립하여야 한다. 이러한 조건에서는 유체영역에 교란을 조파판의 조화 왕복운동으로 표시하고 라플라스 방정식의 이론해를 구하고 이를 사용하여 조파기를 설계하고 있다 (Khalilabadi & Bidokhti, 2012). 따라서 조파판 하단이 힌지이고 상단이 조화운동 하는 플랩 조파기와 조파판 전체가 일정한 스트로크로 조화운동 하는 피스톤 조파기가 널리 보급되었다.

조파기를 사용하기 시작한 후 100년 이상 지났으나 조파판 운동으로 파도의 유체입자 운동을 엄밀하게 나타내지 못함으로 엄밀한 정현파를 발생시키지 못하고 있다. 또한, 수조의 벽과 바닥으로부터의 영향이 포함된 파도가 발생하므로 이론 해의 결과와는 다른 파도가 발생한다. 따라서 실험실에서는 폭이나 깊이에 영향을 피하며 최대한 정현파에 가까운 규칙 파를 얻을 수 있는 조건에서 파도를 발생시키고 있다.

Stokes는 이론 파형과 실제 파형의 차이를 고차성분 파도로 설명하고자 하였으며 고차 항을 포함한 해를 구하여 실제 파형을 좀 더 가깝게 설명하였다. 하지만 하나의 조파판을 기계적으

로 구동하여 조화운동을 일으켜 고차 항까지 만족하는 교란을 일으키는 장치는 아직 개발되어 있지 않다. 다기능 조파기의 상단 또는 하단을 구동하여 이론 파형을 발생하며 반대쪽 단에서는 고차성분 파형을 발생하도록 운전하면 우수한 합성 파형을 생성할 수 있을 것이 기대된다.

새로이 개발된 다기능 조파기는 플랩 조파기나 피스톤 조파기로 운전할 수 있을 뿐만 아니라 조파판 상단의 스트로크를 '0'으로 놓고 하단의 스트로크를 지정하면 그네 운동을 하는 그네 조파기로 운전할 수 있다. 그리고 상단과 하단의 스트로크를 자유롭게 선정할 수 있고 주기와 위상차를 자유롭게 설정할 수 있다.

이번의 연구에서는 새로이 개발된 다기능 조파기를 다양한 조건으로 운전하여 발생하는 파도를 실험적으로 조사하고자 하였다. 실험은 (1) 플랩 운전일 때, (2) 그네 운전일 때, (3) 피스톤 운전일 때, (4) 플랩 운동이 강화된 피스톤 운동일 때, (5) 그네 운동이 강화된 피스톤 운동일 때를 실험 대상으로 하였다. 이들 실험에서는 조파판이 밀어내는 유량이 같아지도록 하여 조파판 운동에 따른 파형의 변화도 함께 알아보하고자 하였다.

2. 수중 조파판 운동의 수식 표현

수중 조파판의 운동은 Kwon et al. (2017), Oh et al. (2018) 그리고 Kim et al. (2019)에서 표현한 수식을 본 연구에 활용하였다. 이 수식들을 정리하여 소개하면 다음과 같다. 수중 조파판 운동의 수식을 2차원 유체영역의 조파 문제로 생각하면 조파판의 운동을 Fig. 1에 보인 것 같이 굵은 선으로 표시된 조파판이 수평 이동하는 운동으로 나타낼 수 있다.

이때 2차원 직교 좌표계에서 라플라스 방정식은 속도 퍼텐셜로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

식 (1)에서 속도 퍼텐셜은 $\Phi = \Phi(x, z, t)$ 로 나타내는 값이다. 바닥의 경계조건과 자유수면의 운동학적 및 동역학적 경계조건은 각각 식 (2), 식 (3) 그리고 식 (4)와 같다.

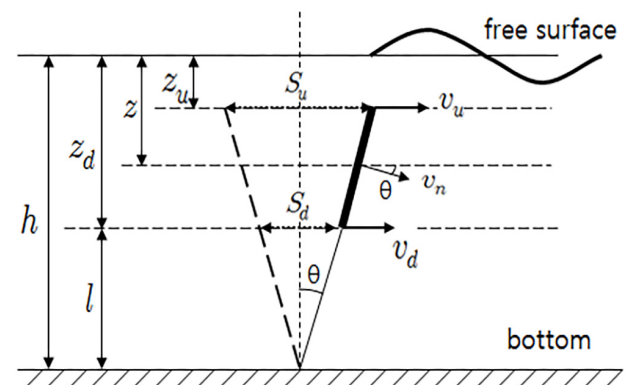


Fig. 1 Coordinate system of two dimensional water domain (Kwon et al., 2017)

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial z} \right|_{z=-h} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right] + g\eta = 0 \quad (4)$$

위의 식들에서 t 는 시간이고 g 는 중력가속도이다.

조파판이 평평한 강체라고 생각하면 조파판의 경계조건을 수식으로 나타낼 수 있다. 조파판이 수직선과 이루는 각도가 θ 이고 조파판 표면에 수직 방향 유체 입자 속도를 v_n 이라 하면 입자 속도는 조파판의 속도와 같으므로 경계조건은 식(5)과 같아진다.

$$v_n = v \cos \theta \quad (5)$$

여기서 조파판의 변위가 미소하여 선형조건을 만족한다고 가정하면 $\theta \rightarrow 0$ 로 놓을 수 있다. 따라서 조파판 표면의 경계조건은 식(6)으로 바꾸어 쓸 수 있다.

$$v_n = v \cos \theta \rightarrow v \quad (6)$$

Fig. 1과 같이 수중에 잠겨 있는 다기능 조파판 요소의 상단은 수면으로부터 z_u 만큼 잠기고, 하단은 z_d 만큼 잠겨 있다. 조파판 양단의 동요 주파수를 σ_u, σ_d 위상차를 α_u, α_d 라 정의하고, 스트로크를 각각 S_u, S_d 속도 성분을 v_u 와 v_d 로 표시하자. 주어진 문제에서 상단은 식 (7)과 같이 수평 방향으로 조화 왕복운동 하며 하단은 식 (8)과 같이 수평 방향으로 조화 왕복운동 한다고 하자.

$$v_u = \frac{S_u}{2} \sigma_u \cos(\sigma_u t + \alpha_u) \quad (7)$$

$$v_d = \frac{S_d}{2} \sigma_d \cos(\sigma_d t + \alpha_d) \quad (8)$$

생각하는 다기능 조파기의 깊이 z 에 잠긴 점에서의 수평 속도 v 는 Fig. 2에 보인 바와 같이 하단을 힌지로 조파판 상단이 식 (7)에 따라 동요하는 플랩 운동속도 성분과 상단을 힌지로

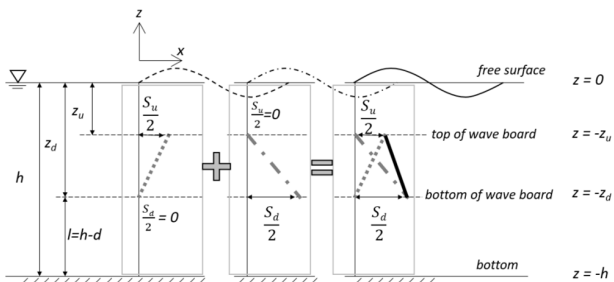


Fig. 2 Wave generated by submerged wave board oscillation

하단이 식 (8)에 따라서 동요하는 그네 운동속도 성분의 합으로 나타낼 수 있어서 식 (9), 식 (10), 식 (11)의 관계가 성립한다.

$$v_{uz} = \frac{S_u}{2} \frac{z+z_d}{z_u-z_d} \sigma_u \cos(\sigma_u t + \alpha_u) \quad (9)$$

$$v_{dz} = -\frac{S_d}{2} \frac{z+z_u}{z_u-z_d} \sigma_d \cos(\sigma_d t + \alpha_d) \quad (10)$$

$$v = v_{uz} + v_{dz} = \frac{S_u}{2} \frac{z+z_d}{z_u-z_d} \sigma_u \cos(\sigma_u t + \alpha_u) - \frac{S_d}{2} \frac{z+z_u}{z_u-z_d} \sigma_d \cos(\sigma_d t + \alpha_d) \quad (11)$$

수중에 잠겨서 상단과 하단이 독립적으로 수평 방향 조화 왕복운동 하는 다기능 조파판의 임의의 점에서의 속도를 식 (11)으로 나타낼 수 있으므로 다기능 조파판이 수중에서 동요하는 문제에서는 식 (12), 식 (13), 식 (14)으로 경계조건을 설정할 수 있다.

$$v = 0, \quad 0 \geq z \geq -z_u \quad (12)$$

$$v = v_{uz} + v_{dz} = \frac{S_u}{2} \frac{z+z_d}{z_u-z_d} \sigma_u \cos(\sigma_u t + \alpha_u) - \frac{S_d}{2} \frac{z+z_u}{z_u-z_d} \sigma_d \cos(\sigma_d t + \alpha_d) \quad (13)$$

$$v = 0, \quad -z_d \geq z \geq -h \quad (14)$$

3. 다기능 수중 조파판 운동의 일반 해

다기능 조파기는 라플라스 방정식 식 (1)을 만족하고 경계조건 식 (2), 식 (3), 식 (4)과 조파판에서의 경계조건 식 (12), 식 (13), 식 (14)을 만족해야 한다. 결국, 유체영역에서의 속도 퍼텐셜 ϕ 는 식 (13)의 첫 번째 항으로 표시되는 경계조건을 만족하는 속도 퍼텐셜 ϕ_u 와 두 번째 항으로 표시되는 경계조건을 만족하는 해 ϕ_d 의 합으로 식 (15)과 같이 나타낼 수 있다. 이때 당연히 식 (16)과 식 (17)이 성립하여야 한다.

$$\phi = \phi_u + \phi_d \quad (15)$$

$$\frac{\partial \phi_u}{\partial x} = v_{uz} = \frac{S_u}{2} \frac{z+z_d}{z_u-z_d} \sigma_u \cos(\sigma_u t + \alpha_u) \quad (16)$$

$$\frac{\partial \phi_d}{\partial x} = v_{dz} = -\frac{S_d}{2} \frac{z+z_u}{z_u-z_d} \sigma_d \cos(\sigma_d t + \alpha_d) \quad (17)$$

따라서 속도 퍼텐셜 ϕ_u 와 식 (17)을 만족하는 속도 퍼텐셜 ϕ_d 를 구하는 문제가 된다. 속도 퍼텐셜 ϕ_u, ϕ_d 를 구하는 해법은 Hughes (1993), Dean & Dalrymple (2007) 등의 방법을 이용하여 Kim et al. (2019)가 식 (18)로 표현된 해를 도출하였다.

$$\begin{aligned} \phi(x, z, t) = & A_u \cosh[k_u(h+z)] \sin(k_u x - \sigma_u t - \alpha_u) \\ & + \cos(\sigma_u t) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{S_{u_n}}{2(z_d - z_u)} e^{-k_{u_n} x} \cos[k_{u_n}(z+h)] \\ & + A_d \cosh[k_d(h+z)] \sin(k_d x - \sigma_d t - \alpha_d) \\ & + \cos(\sigma_d t) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{S_{d_n}}{2(z_d - z_u)} e^{-k_{d_n} x} \cos[k_{d_n}(z+h)] \end{aligned} \quad (18)$$

식 (18)에서 제1항과 제2항은 조파판 상단이 동요하는 플랩 운동에 따르는 속도 퍼텐셜 Φ_u , 제3항과 제4항은 조파판 하단이 동요하는 그네 운동에 따르는 속도 퍼텐셜 Φ_d 를 나타낸다. 그런데 식 (18)의 제1항과 제3항을 살펴보면 t 와 거리 x 에 따라서도 변동하는 파형을 나타내는 항이고, 제2항과 제4항은 급수에 포함된 항들은 t 에 따라 상하 방향으로만 동요하고 조파판으로부터 떨어진 거리 x 에 따라 급속히 줄어드는 값으로 조파판 근처에서만 영향을 주므로 무시할 수 있다 (Kwon et al., 2017; Oh et al., 2018).

A_u 와 A_d 는 조파판의 스트로크와 조파판의 길이 비로 정해지며 식 (19)과 식 (20)과 같다.

$$A_u = \frac{2\sigma_u S_u}{(z_d - z_u)(\sinh 2k_u h + 2k_u h)} \times \left(+ \frac{1}{k_u} (z_d - z_u) \sinh k_u (h - z_u) - \frac{1}{k_u^2} [\cosh k_u (h - z_u) - \cosh k_u (h - z_d)] \right) \quad (19)$$

$$A_d = \frac{2\sigma_d S_d}{(z_d - z_u)(\sinh 2k_d h + 2k_d h)} \times \left(- \frac{1}{k_d} (z_d - z_u) \sinh k_d (h - z_d) + \frac{1}{k_d^2} [\cosh k_d (h - z_u) - \cosh k_d (h - z_d)] \right) \quad (20)$$

다기능 조파판에서 발생한 파형은 파고가 H_u 인 플랩 운동으로 발생한 파형과 파고가 H_d 인 그네 운동으로 발생한 파형을 선형중첩하여 구할 수 있다. 파형은 파수, 진동수, 위상차를 사용하여 식 (21)과 같이 일반적인 형태로 표시할 수 있다.

$$\eta(x, t) = \frac{H_u}{2} \cos(k_u x - \sigma_u t - \alpha_u) + \frac{H_d}{2} \cos(k_d x - \sigma_d t - \alpha_d) \quad (21)$$

다른 한편으로 속도 퍼텐셜의 이론 해로부터 자유표면 $z = 0$ 에서 파고에 대한 일차 근사해를 구하면 식 (22)을 얻을 수 있다.

$$\eta(x, t) = \frac{A_u \sigma_u}{g} \cosh(k_u h) \cos(k_u x - \sigma_u t - \alpha_u) + \frac{A_d \sigma_d}{g} \cosh(k_d h) \cos(k_d x - \sigma_d t - \alpha_d) \quad (22)$$

식 (21)과 식 (22)으로 나타낸 파형이 같아야 하므로 유한수심에서의 분산관계식 (23)을 사용하면 파고와 스트로크 사이에

는 식 (24)과 식 (25)의 관계가 성립한다.

$$\sigma^2 = gk \tanh kh \quad (23)$$

$$H_u = \frac{4S_u \sinh k_u h}{(z_d - z_u)(\sinh 2k_u h + 2k_u h)} \times \left(+ (z_d - z_u) \sinh k_u (h - z_u) - \frac{1}{k_u} [\cosh k_u (h - z_u) - \cosh k_u (h - z_d)] \right) \quad (24)$$

$$H_d = \frac{4S_d \sinh k_d h}{(z_d - z_u)(\sinh 2k_d h + 2k_d h)} \times \left(- (z_d - z_u) \sinh k_d (h - z_d) + \frac{1}{k_d} [\cosh k_d (h - z_u) - \cosh k_d (h - z_d)] \right) \quad (25)$$

식 (24)과 식 (25)을 식 (21)에 대입하면 조파판에서 발생하는 파형은 식 (26)으로 표시한 것과 같이 플랩 운동으로 발생한 파형과 그네 운동으로 발생한 파형의 합으로 구성된다.

$$\begin{aligned} \eta(x, t) = & \frac{2S_u \sinh k_u h}{\sinh 2k_u h + 2k_u h} \times \cos(k_u x - \sigma_u t - \alpha_u) \\ & \times \left(+ \sinh k_u (h - z_u) - \frac{\cosh k_u (h - z_u) - \cosh k_u (h - z_d)}{k_u (z_d - z_u)} \right) \\ & + \frac{2S_d \sinh k_d h}{\sinh 2k_d h + 2k_d h} \times \cos(k_d x - \sigma_d t - \alpha_d) \\ & \times \left(- \sinh k_d (h - z_d) + \frac{\cosh k_d (h - z_u) - \cosh k_d (h - z_d)}{k_d (z_d - z_u)} \right) \end{aligned} \quad (26)$$

4. 조파기의 구동 기구 설계

이차원 수조에 수직 조파판이 수면으로부터 깊이 h_e 까지 잠겨서 상단과 하단이 Fig. 3과 같이 독립적으로 동요한다고 생각하자.

점선으로 표시된 길이가 l_0 인 수평 구동링크 AB와 길이가 h_e 인 수직 조파판 BC는 B점에서 힌지로 연결되어 있다. A점은 조파판이 운동을 일으키면 식 (7)에 표시되는 속도로 수평 이동하며, 힌지 C는 식 (8)으로 표시되는 속도로 수평 이동한다. A점과 C점은 시간에 따라 이동하며 A점이 최대 수평 방향 이동하여 a점에 이르렀을 때 $\overline{Aa} = S_u / 2$ 이 되고 C점이 최대 수평 방향으로 이동하여 c점에 이르렀을 때 $\overline{Cc} = S_d / 2$ 이 된다.

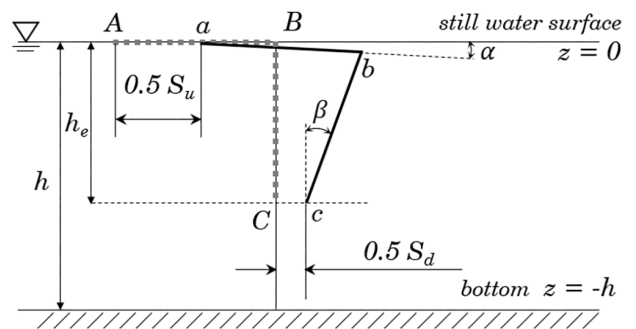


Fig. 3 Schematic of oscillating mechanism of wave board

A점과 C점이 식 (7)과 식 (8)에 표시된 속도로 이동하면 힌지 B는 연속 이동하여 b점에 이르게 된다. 이때 수평선과 $\overline{ab}$ 가 이루는 각을 α 라하고, $\overline{bc}$ 와 수직선이 이루는 각도를 β 라 하면 이동과정에서의 β 값을 알 수 있다. 최대 변위가 일어났을 때는 식 (27)과 식 (28)의 관계가 성립한다.

$$h_e = l_b \sin \alpha + h_c \cos \beta \quad (27)$$

$$l_b - 0.5S_u + 0.5S_d = l_b \cos \alpha - h_e \sin \beta \quad (28)$$

두 식으로부터 $\cos \beta$ 를 구하면 각 β 를 알 수 있다. 조파기 설계과정에서 수평 링크 l_b 의 길이와 조파판의 유효 길이 h_e 를 결정하면 연속운동이 가능한 β 값을 구할 수 있다. 연속운동이 가능한 β 값은 2개가 얻어지지만 그중 조파판 구동에 적합한 하나의 값을 사용하여 조파기를 설계하면 Fig. 4와 같다.

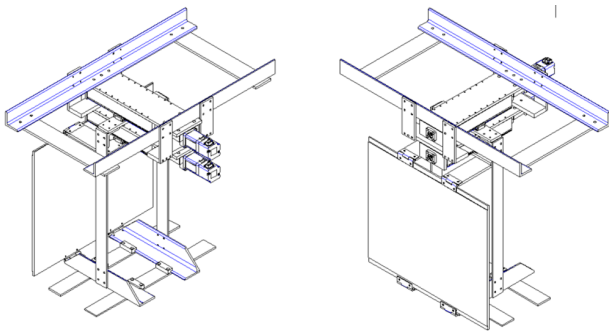


Fig. 4 Perspective view of novel hybrid wave maker

상단 스트로크가 $S_u = 0.5l_b = 0.5h_e$, $S_d = 0$ 일 때를 예로 들면 링크 BC의 경사각 β 는 14.42° 가 되므로 경계조건을 유도하며 미소 변위라고 가정한 근사조건을 97 % 정도 충족한다. 스트로크 $S_u = 0.6h_e$ 로 증가시키면 근사조건을 95 % 정도 충족한다. 상단 힌지로 하단이 스트로크 $S_d = 0.5h_e$ 로 왕복 운동하였을 때에도 근사조건을 97 % 정도 충족한다. 따라서 조파기는 링크 길이 l_b 와 조파판 길이 h_e 를 고려하여 조파판 경사가 14° 보다 작아지도록 조파판 길이의 50 %보다 작게 스트로크를 결정하면 좋다.

5. 조파 실험 환경과 파고 계측

서울대학교 실험실에 Fig. 5와 같은 알루미늄 프로파일과 투명 아크릴로 제작한 2차원 수조에 다기능 조파기를 설치하였다. 2차원 수조의 안쪽 치수는 길이가 3000 mm이고 폭이 300 mm이며 조파기의 조파판 하단과 수조 바닥 사이에는 10 mm의 간격을 두었다.

실험조건에 따라서 깊이 h 까지 물이 채워진 수조에 조파기의 조파판이 유효 깊이 h_e 까지 잠기도록 조파기를 설치하면 $z_u = 0$, $z_d = h_e$, $h - z_d = l$ 의 관계가 성립한다. 따라서 식 (26)은 식 (29)과 같이 바꾸어 쓸 수 있다.

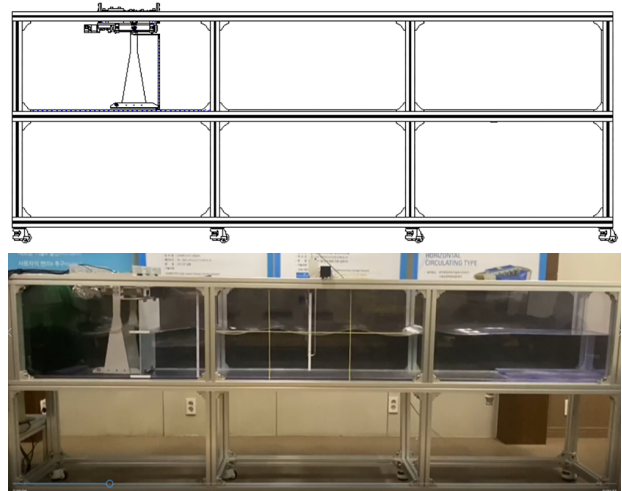


Fig. 5 Hybrid wave maker installed in 2 dimensional wave flume

$$\begin{aligned} \eta(x, t) = & \frac{2S_u \sinh k_u h}{\sinh 2k_u h + 2k_u h} \times \cos(k_u x - \sigma_u t - \alpha_u) \\ & \times \left(+ \sinh k_u h - \frac{\cosh k_u h - \cosh k_u l}{k_u z_d} \right) \\ & + \frac{2S_d \sinh k_d h}{\sinh 2k_d h + 2k_d h} \times \cos(k_d x - \sigma_d t - \alpha_d) \\ & \times \left(- \sinh k_d l + \frac{\cosh k_d h - \cosh k_d l}{k_d z_d} \right) \end{aligned} \quad (29)$$

5.1 조파기의 제어와 파고 계측 시스템의 구축

조파판의 교란 운동으로 파도가 발생하여 수조 내로 전파된다. 조파판 위치에서 파도를 측정하면 조파판 교란으로 인한 비선형 성분과 전파되지 않고 단순히 상하 동요하는 파도 성분이 포함된다. 즉 이론해를 구하며 무시하였던 식 (18)의 두 번째 항과 네 번째 항이 포함되며 자유 수면과 조파판 표면에서의 경계조건을 선형화하며 사용한 변위가 작다는 가정에 따른 오차가 포함된다.

파도를 발생시키기 위한 조파판의 운동 제어 신호는 이상적 미소 변위 상태를 기준으로 구한 이론해석으로 얻어지는 파고에 근거하고 있다. 조파판에서 발생한 파도는 조파판으로부터 떨어질수록 비선형 성분과 단순 상하동요 성분은 소멸하므로 파도의 영향을 조사하는 실험은 조파판으로부터 일정한 거리를 두고 수행한다. 조파판 표면과 조파판으로부터 떨어진 위치에서의 파도를 동시에 계측하기로 Fig. 6와 같이 계측 시스템을 구성하였다.

조파기는 운전조건을 제어반에 입력하면 조파판은 그네 운동과 플랩 운동을 일으킨다. 조파판 표면에는 Procomm에서 공급하는 주문형 저항식 파고계를 접착하여 파고를 직접 계측할 수 있도록 하였으며 계측 위치에는 수조 중심선에 거치하여 파고를 계측할 수 있도록 하였다. 노트북 컴퓨터에서는 파고계에서 얻어진 파고 정보 또는 연산 정보를 제어기에 신호를 보내어 조파기를 제어할 수 있도록 하였다. 그리고 실험 중 영상을 수면의 변동상황을 고속으로 기록할 수 있으며 수조 관측 창에 눈금자를 붙여서 영상자료로부터 파형을 측정하는 예를 Fig. 7에 나타내었다.

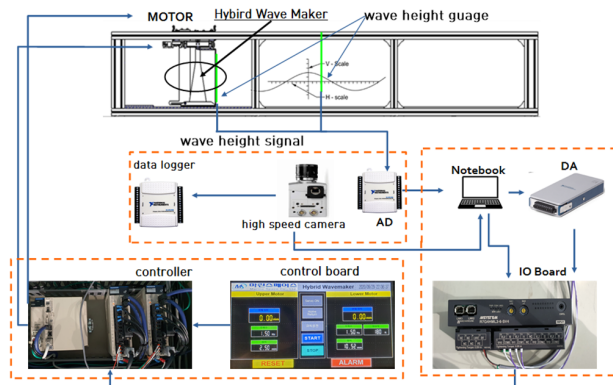


Fig. 6 Measuring arrangement of hybrid wave maker system



Fig. 7 Example of wave form closeup

5.1.1 저항식 파고계의 교정시험

첫 번째 저항식 파고계를 조파판 표면에 설치하여 조파판 표면에서의 파고를 계측하고 두 번째 파고계는 파도 중 실험하고자 하는 위치에 설치한 후 파도를 계측하여 기대하였던 파도가 전파되어 오는 파도의 파고를 측정하여 확인하기로 하였다. 우선 두 개의 파고계 출력이 같아야 하므로 두 개의 파고계를 각각 교정 실험하고 민감도를 조사한 후 같은 출력이 얻어지도록 증폭 비를 조절하여 Fig. 8과 같은 파고계 교정시험 선도를 얻었다.

조파판에 붙인 파고계의 교정시험 선도의 기울기가 0.03 mV/mm인 데 대하여 수조의 중앙 근처에 설치한 파고계의 교정 시험 선도의 기울기는 0.0322 mV/mm이므로 조파판에 붙인 파고계의 민감도가 수조 중앙 설치 파고계의 민감도의 93 % 정도로 나타났다. 그런데 조파판이 경사하면 경사각 β 에 따라 파고계의 수중길이가 $\sec\beta$ 배로 늘어나므로 민감도가 상당부분 회복될 것이다.

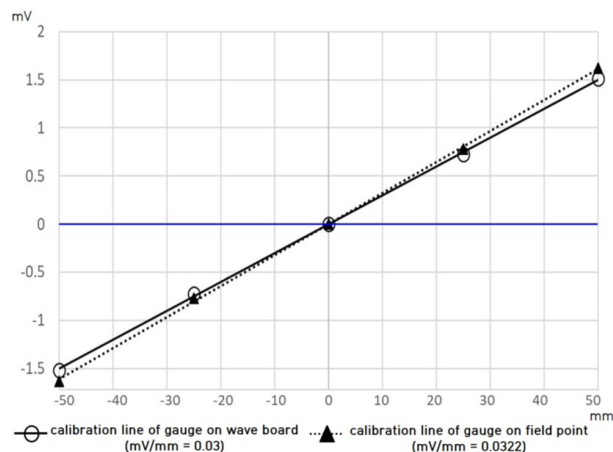


Fig. 8 Calibration results of wave probe

5.1.2 저항식 파고계의 간섭현상

교정시험이 끝난 저항식 파고계를 조파판에 설치한 파고계와 가까운 위치로부터 거리를 늘려가며 0점 출력을 조사하여 Fig. 9와 같은 결과를 얻었다. 이는 두 개의 파고계가 전기적인 간섭 현상을 일으키는데 기인하는 것으로서 파고계를 근접사용할 때는 간섭현상으로 인한 교정시험 선도의 원점이동에 주의가 필요하다. 실험의 목적이 다기능 조파기의 성능을 확인하는 데 있으므로 두 개의 파고계 사이의 간섭현상을 무시할 수 있도록 파고계 사이의 거리를 1000 mm 이상 떨어진 위치에 설치하고 실험을 추진하였다.

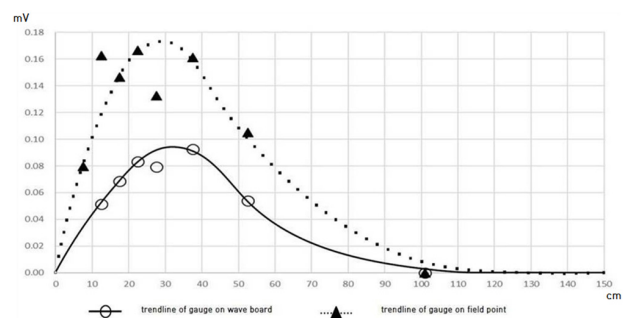


Fig. 9 Characteristics of interaction between two wave probes

5.2 다기능 조파기의 운동조건과 조파판 운동의 관계

다기능 조파기의 사용자가 조파판의 상단과 하단의 스트로크를 선정하기에 따라서 다양한 조파 운동을 일으키는 특징이 있다. 예컨대 조파판 하단 스트로크를 지정하고 수면상의 스트로크를 0으로 설정하면 조파판은 그네 운동을 하며, 수면상의 스트로크를 지정하고 하단의 스트로크를 0으로 설정하면 조파판은 플랩 운동을 한다. 상단 스트로크와 하단의 스트로크를 달리 선정하면 그네 운동과 플랩 운동이 동시에 일어나며 특수한 경우로 상단과 하단의 주파수와 스트로크가 같아지면 피스톤 운동을 한다.

5.2.1 다기능 조파판의 파도 발생 조건과 파형의 계측

다기능 조파기는 자유롭게 운전조건을 설정할 수 있으나 시험수조에 설치된 조파기는 $l_b = 130$ mm로 설계되었으며 물을 채웠을 때 $h_e = 235$ mm이 되는 조건에서 조파판의 수면상 스트로크와 조파판 하단의 스트로크를 Table 1에 주어진 바와 같이 설정하고 실험을 계획하였다.

Table 1에 주어진 조건에서 스트로크와 위상차가 없는 상태에서 1.5 Hz로 파도를 발생시키고 파고를 계측하였다. 조파판에 붙여진 파고계로 계측한 파고를 H_B 라 하고 조파판으로부터 충분히 떨어져서 계측한 파고를 H_F 라 하면 Fig. 10에 예시한 바와 같은 파형 기록이 얻어진다.

Table 1 Operational parameters of hybrid wave maker

wave board motion	stroke on free surface S_u	stroke on bottom of board S_d
swing 1	0	20
swing 2	0	10
flap 1	20	0
flap 2	10	0
piston 1	20	20
piston 2	10	10
piston 3	5	5
swing enhanced piston	5	15
flap enhanced piston	15	5

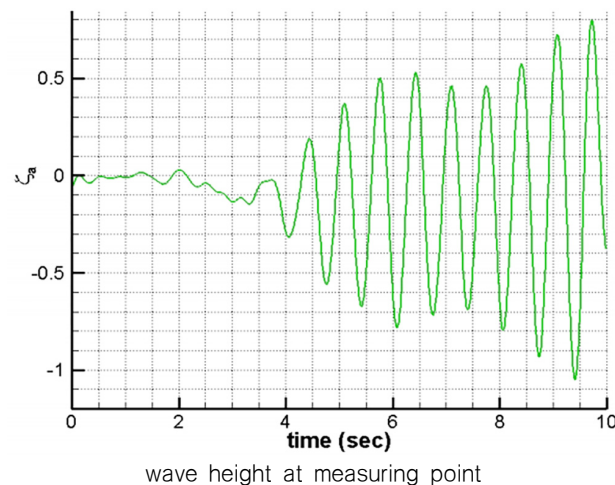
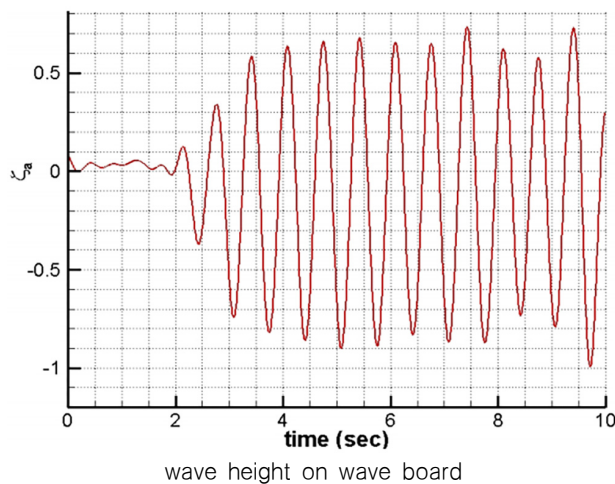


Fig. 10 Example of wave height induced by swing motion
frequency:1.5Hz, wave board stroke : $S_u = 0$, $S_d = 20$ mm

5.2.2 조파판 위치 교란 파형과 계측 위치 생성 파형의 비교

조파판 위치에서의 기록을 보면 조파판이 작동하여 4번째 파형이 얻어질 때로부터 정상적인 파도가 얻어진다고 보았다. 그리고 계측 위치에서 얻어진 파형을 보면 4번째 파형에서 정상

적인 파형이 얻어지나 수조의 길이가 짧고, 소파기를 설치하지 않은 상태에서 실험하였으므로 반사파의 영향이 나타나 파형 변화가 일어나고 있다. 조파판에 붙인 파고계의 파고 H_B 그리고 계측 위치의 파고 H_F 를 측정하고 4번째 파형의 파고 기록과 영상 기록을 판독하여 Table 2에 이론 파고 H_T 와 비교하였다.

Table 2 Comparison of wave height measured and theory

wave board motion	wave height					
	H_T	H_B	H_B/H_T	H_F	H_F/H_T	H_B/H_F
swing 1	12.75	14.95	1.172	12.85	1.003	1.169
swing 2	6.38	8.25	1.291	6.08	0.954	1.356
flap 1	23.19	23.37	1.008	20.38	0.879	1.129
flap 2	11.59	13.0	1.121	10.0	0.863	1.300
piston 1	35.94	34.0	0.946	31.0	0.863	1.097
piston 2	17.97	19.33	1.076	16.33	0.909	1.184
piston 3	8.99	11.0	1.224	9.0	1.002	1.222
swing enhanced piston	15.37	16.8	1.093	14.2	0.924	1.183
flap enhanced piston	20.58	21.0	1.020	17.67	0.858	1.189
mean			1.108		0.917	1.207

Table 2의 결과를 비교하면 조파판에서 계측되는 파고는 이론계산에서 생각하였던 파고 보다 11 % 정도 큰 것을 알 수 있다. 이에 대하여 측정 위치에서는 이론값보다 파고가 94 % 정도로 줄어든 것을 알 수 있다. 이는 조파판 위치에서는 이론계산에서 무시하였던 조파판의 교란 운동으로 전파되지 않고 상하 운동만을 일으키는 정재파가 계측되고 국부적인 비선형 성분이 포함되는데 기인하는 것으로 판단된다. 또 측정한 위치에서는 이론 파고의 92 %가 측정되었는데 실험장치에서는 수조의 바닥과 벽의 영향으로 2~4 % 정도의 점성 감쇄 영향이 포함되며 이는 실험조건에 따라 근사적으로 추정할 수 있다 (Hughes 1993, eq(4.67),(4.68)). 시험수조에서는 조파판에서 계측된 파고가 실험 위치에서 계측한 파고의 1.2배 정도인 것이 확인되었다. 따라서 조파기를 제어하며 이와 같은 시설 특성을 사용하면 보다 정밀한 파도 생성에 도움이 될 것이다.

5.2.3 조파 운동의 합성과 생성 파형의 비교

다기능 조파기 문제를 이론 해석하며 설정한 경계조건 식 (13)과 식 (26)을 살펴보면 조파판의 운동으로 인한 파형은 그네 운동으로 형성되는 파형과 플랩 운동으로 형성되는 파형의 합으로 표시하고 있다. 조파판 운동을 그네 운동과 플랩 운동의 합으로 나타내거나 피스톤 운동과 그네 운동 또는 플랩 합으로 나타낼 수 있으므로 실험계측 결과를 합성하여 Table 3과 같이 비교하였다.

Table 3의 결과를 보면 다기능 조파기가 발생하는 파형을 성분 파형으로 나누고 각각의 파형에 대하여 별도로 계측한 파형을 합성하여 보면 두 실험을 합성한 파형이 단일 실험에서 얻어진 결과보다 5 % 정도 크고 이론 파고의 93 % 정도로 나타났다.

Table 3 Compatibility of component wave superposition

wave board motion	wave height				
	H_T	H_F	H_C	H_C/H_F	H_C/H_T
piston 1	35.94	31.0	33.23	1.072	0.925
piston 2	17.97	16.33	16.08	0.985	0.895
swing enhanced piston	15.37	14.2	15.08	1.062	0.981
flap enhanced piston	20.58	17.67	19.0	1.075	0.923
mean				1.048	0.931

5.2.4 조파 운동의 유체 교란 양이 같을 때 발생한 파고 비교

조파판은 주기적인 왕복운동을 하며 물을 밀어내고 다시 끌어들이는 역할을 한다. 조파판이 최대 진폭으로 운동하였을 때 밀어낸 물의 양이 같아지는 조건을 Table 2에서 추출하여 파고의 순서에 따라서 다시 정리하면 Table 4가 얻어진다.

Table 4의 결과를 살펴보면 조파판이 밀어내는 유량이 같은 상태에서 플랩 운동이 클수록 조파판에서 측정되는 파고가 이론값에 가까워지는데, 조파판으로부터 떨어진 계측 위치에서는 그네 운동이 커질수록 측정되는 파고가 이론값에 가까워지는 것을 알 수 있다.

Table 4 Wave height under constant displacement volume

wave board motion	wave height					
	H_T	H_B	H_B/H_T	H_F	H_F/H_T	H_B/H_F
flap 1	23.19	23.37	1.008	20.38	0.879	1.129
flap enhanced piston	20.58	21.0	1.020	17.67	0.858	1.189
piston 2	17.97	19.33	1.076	16.33	0.909	1.184
swing enhanced piston	15.37	16.8	1.093	14.2	0.924	1.183
swing 1	12.75	14.95	1.172	12.85	1.003	1.169

5.2.5 조파판의 최대 스트로크가 같을 때 발생한 파고 비교

Table 2의 결과를 바탕으로 최대 스트로크가 20 mm인 상태에서 발생하는 파고의 크기에 따라 표기하면 Table 5의 결과를 얻어진다.

Table 5 Wave height under maximum stroke of wave board

wave board motion	wave height					
	H_T	H_B	H_B/H_T	H_F	H_F/H_T	H_B/H_F
piston 1	35.94	34.0	0.946	31.0	0.863	1.097
flap enhanced piston	29.56	32.33	1.094	26.33	0.891	1.238
swing enhanced piston	24.35	27.58	1.133	22.41	0.920	1.147
flap 1	23.19	23.37	1.008	20.38	0.879	1.129
swing 1	12.75	14.95	1.172	12.85	1.003	1.169

위의 결과를 살펴보면 스트로크가 같을 때는 조파판이 밀어내는 물의 양이 많을수록 파고가 크게 나타나며 밀어내는 물의 양이 같을 때는 수면에 가까운 쪽의 스트로크가 조파판 하단의 스트로크보다 클수록 파고가 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

6. 결 언

선박 및 해양구조물의 설계는 오래도록 정수 중에서의 성능을 기준으로 이루어졌으나 근래에 이르러 실제 해상에서의 성능을 설계에 반영하게 되었다. 실험실에서 실제 해역의 상태를 모형 축척으로 모사하려면 정교한 조파기가 필요하게 되었다. 그리고 2차원 규칙 파 중에서 문제로부터 발전하여 2차원 불규칙 파랑 중에서의 문제로 다루도록 발전하였다. 또한, 실제 해상 상태는 불규칙 수면으로 구성되어 있으므로 삼차원 불규칙 파를 생성할 수 있어야 하므로 정교한 조파 장치가 필요하게 되었다.

현재 실험시설에서는 플랩 조파기와 피스톤 조파기가 보편적으로 사용되고 있으나 이들 조파기는 유체를 조파판의 운동으로 교란을 일으키고 있어서 입자의 교란 속도 분포가 파도 운동에 따르는 속도 분포와는 차이가 있다. 교란 속도의 차이가 파형에 미치는 영향은 조파판 근처의 2~3파장 정도에 국한되지만 유효한 수면도 줄어든다. 이러한 불리 점을 극복하기 위하여 조파판 상단과 하단의 교란 속도를 자유롭게 조절할 수 있는 다기능 조파기를 새로이 개발하였다.

새로이 개발된 다기능 조파기를 소형 수조에 설치하고 운전 조건을 바꾸어가며 성능을 실시하였다. 운전조건을 달리하여 플랩 조파기, 그네 조파기, 피스톤 조파기, 플랩 운동이 강화된 피스톤 조파기, 그리고 그네 운동이 강화된 피스톤 조파기로 운전하였을 때의 다섯 가지 운전조건을 대상으로 선정하고 실험하였다. 계측에는 수심이 250 mm인 상태에서 주기를 1.5 Hz로 설정하고 파도를 발생하였다. 파도의 계측은 경계조건 설정 위치인 조파판 표면에 저항식 파고계를 부착하여 계측하였으며 조파판으로부터 파고계 사이의 간섭현상을 피할 수 있도록 일정 거리 떨어진 실험 위치에서 저항식 파고계로 수행하였다. 파고 계측은 조파기가 구동하여 정상 스트로크에 도달하는 4번째와 5번째 사이에서 판독되는 파고로 결정하였다.

다기능 조파판에서 발생한 파고 계측 결과로부터 다음과 같은 특징을 확인하였으며 이러한 특징들은 파고 계측 정보를 활용하여 다기능 조파기를 제어할 때 주요 정보가 되리라 확신한다.

조파판 위치에서 파도를 계측하면 이론계산에서 무시하였던 진행하지 않고 상하 동요하는 성분과 비선형 국부 파의 영향으로 이론 파고보다 11 % 높게 파고가 계측된다.

조파판으로부터 떨어진 계측 위치에서는 수조 벽으로부터 나타나는 점성의 영향으로 파고의 감쇄가 나타나 이론 파고보다 8 % 정도 낮게 파고가 계측된다. 따라서 수조의 점성 감쇄 영향을 확인하여야 한다.

다기능 조파기가 발생하는 파도를 그네 운동으로 인한 파도

와 플랩 운동으로 인한 파도로 분리하여 생각하거나 피스톤 운동으로 인한 파도와 그네 또는 플랩 운동으로 인한 파도의 합성으로 나타내면 이론 파고보다 7 % 정도 작은 값이 된다.

조파판이 밀어내는 유량이 같을 때는 플랩 운동 성분이 클수록 조파판에서 계측한 파고가 이론 파고와 가까워지고 조파판으로부터 떨어진 계측 위치에서는 그네 운동 성분이 클수록 계측한 파고가 이론 파고에 가까워지는 것을 알 수 있다.

조파판의 최대 스트로크가 같을 때는 조파판이 밀어내는 물의 양이 많을수록 파고가 크게 나타나며 밀어내는 물의 양이 같을 때는 그네 운동의 스트로크가 플랩 운동의 스트로크보다 클수록 파고가 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

후 기

본 연구는 서울대학교 공학연구원이 지원하는 공과대학 명예교수의 학문 수준 제고를 위한 사업의 지원과 2017년도 한국연구재단 이공분야기초연구사업(NRF-2017R1D1A1B0 3036478), 그리고 과학기술인협동조합지원센터의 과학기술인협동조합 사업화 지원 사업으로 수행하였습니다. 본 연구를 지원해주신 (주)CIIZ, 서울대학교 공학연구원, 한국해양대학교, 군산대학교 공과대학, 과학기술인협동조합지원센터에 감사드립니다.

References

- Ahn, J.Y., Choi, J.K. & Kim, H.T., 2013. Investigation of characteristics of waves generated in two-dimensional wave channel. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 27(4), pp.68–75.
- Dean, R.G. & Dalrymple, R.A., 2007. *Water wave mechanics for engineers and scientists*, World Scientific (Advanced series on Ocean Engineering), New Jersey.
- Hughes, S.A., 1993. *Physical model and laboratory techniques in coastal engineering*, USA World Scientific (Advanced series on Ocean Engineering), New Jersey.
- Khalilabadi, M.R. & Bidokhti, A.A., 2012. Design and construction of an optimum wave flume. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 5(3), pp.99–103.
- Kim, H., Oh, J.K., Kwon, J.O. & Lew, J.M., 2019. Linear analysis of water surface waves generated by submerged wave board whose upper and lower ends oscillate horizontally freely. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 56(5), pp.418–426.
- Kwon, D.S., Kim, S.J. & Koo, W.C., 2019. A parametric study of the wave-generation performance of a piston-type wave maker. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 33(6), pp.504–509.
- Kwon, J.O., Kim, H., Lew, J.M. & Oh, J.K., 2017. Analytic solution of oscillating submerged vertical board segment by perturbation method and its characteristics. *KTTC Spring Meeting*, Inha University.
- Liao, S.W. & Roddier, D., 1998. Simulation of breaking waves-theory and experiments, SNAME Northern California Section meeting, April 8, pp.1–22.
- Oh, J.K. et al. 2018, Approximate solution of vertical Wave Board Oscillating in Submerged Condition and Its Design Application. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 55(6), pp.527–534.
- Takezawa, S., 1980, Waves of the wave basin for the offshore structure experiments, *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 613, pp.376–387.
- Tanizawa, K. et al. 2011. The actual sea model basin(in Japanese), *Papers of National Maritime Research Institute*, 10(4) pp.343–382.



김 효 철



오 정 근



류 재 문



이 신 형



김 재 현