

신형식 다기능 조파기 설계

김효철¹·오정근^{2,†}

서울대학교 조선해양공학과·서울대학교 공학연구원¹

군산대학교 조선해양공학과²

On the Design of Novel Hybrid Wave Generator

Hyochoel Kim¹·Jungkeun Oh^{2,†}

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University·Institute of Engineering Research, Seoul National University¹

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Kunsan National University²

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.

The novel wave generating system of a wave flume has been devised by utilizing the analytic solution of wave board motion in idealized two dimensional space. The arbitrary oscillation motion of submerged wave board segment has been defined by sinusoidal motion of upper and lower end of the wave board. The analytic solution of the wave board motion has been represented by the solution of board motion due to flap motion and swing motion. Arbitrary oscillation of the board could be specified by determining amplitude, frequency, and the phase lag. A novel hybrid wave generator could be operated not only in piston motion but also in flap or swing motion by selection of control parameter. The wave generator has unique motion enhancing ability by appending flap motion or swing motion to piston motion in wave generation. In addition the hybrid wave generator has advantages in generating high quality wave spectrum of irregular wave in simulating real sea condition.

Keywords : hybrid wave generator(다기능 조파기), submerged wave board(수중 조파판), non-dimensional domain(무차원 공간), analytic solution(일반해)

1. 서론

근래에 이르러 환경 보전을 위한 선박의 배출가스 규제 강화로 실제 해역에서 선박의 성능이 중요하게 되었다. 해상 상태에서의 성능을 실험실에서 수행하기 위하여 많은 연구시설에서 실제 해상 상태를 나타내려 노력하고 있다 (Tanizawa et al., 2011). 수조 시험 모형의 치수가 정하여지면 관심을 두어야 하는 파도가 함께 정해진다. 수조의 치수는 발생하는 파도 형상에 영향을 줄 뿐 아니라 계측 결과에도 영향을 주게 된다. 따라서 올바른 실험 결과를 얻으려면 수조의 치수와 모형의 치수 그리고 해상 상태를 함께 고려하여야 한다.

선박이나 해양구조물 실험에서 파도는 모형선과 기하학적으로 상사 관계가 성립되어야 한다. 2차원 규칙 파를 발생시켜 많은 실험이 이루어지며 규칙 파를 중첩하여 해상 상태의 불규칙 파를 생성하고 실험을 수행한다. 모형시험에 적합한 불규칙 해상 상태를 실험실에서 나타내기 위하여 수조 주위에 다수의 조파기를 배치하고 연동 운전으로 파도를 발생시키고 중첩하고 있다.

현재 실험실에서 사용되고 있는 플랩 조파기, 피스톤 조파기, 플러저 조파기 등은 일차 선형이론으로 설계하고 있다. 조파기 설계에서는 이론해석에서 사용한 조파판 운동을 기구적으로 구현하도록 하고 있다. 현재 사용하고 있는 조파기는 조파판 구동으로 얻어지는 교란 속도분포가 정현파의 유체 입자 속도 분포를 엄밀하게 나타내지 못하므로 얻어지는 파형은 정현파와 다르게 될 것이다. 2차원 조파 수조에서 파도를 발생시키면 발생시키려던 정현파와 다른 파도가 발생하며, 전산 유체역학으로 계산한 파형도 이론 해석한 파형과도 차이가 나타난다 (Oh et al., 2018).

조파판의 상단과 하단이 독립적으로 구동하는 새로운 형식의 조파기를 고안하였다. 이 조파기는 운전조건을 선정하기에 따라서 플랩 조파기, 그네 조파기, 피스톤 조파기 등으로 사용할 수 있다. 또 운전조건을 선정하여 피스톤 운동에 플랩 운동을 중첩하거나 그네 운동을 중첩하여 조파 성능을 증강할 수 있을 뿐 아니라 다양한 기능을 가지는 조파기로 사용할 수 있다.

2. 수중 조파판 운동의 이론해석

2.1 모형시험에 필요한 파도의 조건

선박이 운항할 때 발생하는 파도는 저항의 원인이 되고 수면에 발생한 파도는 선체 운동의 원인이 된다. 모형선과 실선 주위의 유동과 파랑이 서로 기하학적으로 상사하여야만 실제 해상에서 발생하는 현상을 수조에서 모형시험으로 확인할 수 있다. 또 모형이나 파도는 수조의 벽과 바닥의 영향을 받지 않아야 한다. 그런데 파장이 수심의 2배보다 커질수록 수심 영향이 파도에 크게 나타나므로 수심의 2배보다 짧은 파장의 파도를 사용하게 된다. 파도 중에서 실험할 때는 모형의 운동 응답으로 인하여 나타나는 성능변화에 관심을 두게 된다. 따라서 모형의 치수는 확인하려는 현상을 효과적으로 측정할 수 있도록 결정하여야 한다.

예컨대 175m급 컨테이너선에 관한 연구 결과 (Kim & Kim, 2011; Liu et al., 2011)를 보면 파장과 모형길이가 $0.5l_m \leq \lambda_w \leq 2.0l_m$ 일 때 저항 증가가 두드러지고 파장이 $0.4l_m \leq \lambda_w \leq 4.4l_m$ 인 영역에서 선체 운동은 큰 값을 가지며 영역을 벗어나면 줄어들어 무시할 수 있는 것으로 나타나 있다 (KSN AJ, 1976).

따라서 이를 종합하면 실험시설에서는 저항 성능시험을 목적으로 하면 파장이 수심의 2배보다 짧아야 하고 상대적으로 작은 모형을 사용하는 운동 성능시험을 목적으로 하면 파장은 수심의 22.5~25%보다 커야 한다. 이와는 별도로 수조에서 발생한 파도는 전파되고 반사되어 영향을 주므로 수조의 길이나 폭이 최대 파장을 결정하는 인자로 작용하기도 한다.

2.2 무차원 공간에서 다기능 조파판의 수중운동

선형시험 수조에서는 제한 수로 영향과 수심 영향을 피할 수 있도록 모형의 치수를 결정하고 있다. 모형선과 실선 사이에는 길이를 기준으로 기하학적으로 상사하여야 하며 발생 파도는 수조 깊이 영향을 피하며 역학적 상사 관계가 성립해야 한다. 수조에서 조파 문제를 Table 1과 같이 수조 깊이와 중력가속도를 사용하여 무차원 공간의 문제로 표시하고 해를 구하면 실제 수조에서의 문제를 좀 더 합리적으로 평가할 수 있다 (Madsen, 1970; Takezawa, 1980).

2차원 유체영역에 잠겨진 조파판의 동요를 Fig. 1에 표시한 바와 같이 상단과 하단의 독립적인 동요의 합으로 나타낼 수 있다.

만일 조파판이 하단을 힌지로 상단이 플랩 운동을 할 때는 조파판은 하단 스트로크가 $S_d^* = 0$ 이 되고 상단 스트로크는 S_u^* 인 플랩 운동을 한다. 또 조파판을 상단-힌지 하단-그네 운동을 하도록 구성하면 조파판은 상단 스트로크는 $S_u^* = 0$ 이 되고 하단 스트로크는 S_d^* 인 그네 운동을 한다.

Table 1 Properties in non-dimensional space

properties	non-dimensional space
length	$L^* = L \cdot (1/h)$
time	$T^* = \sqrt{(g/h)} \cdot T$
frequency	$F^* = \sqrt{(h/g)} \cdot F$
velocity	$V^* = \sqrt{(1/hg)} \cdot V$
acceleration	$\dot{V}^* = (1/g) \cdot \dot{V}$
angle	$\theta^* = \theta$
angular velocity	$\dot{\theta}^* = \sqrt{(h/g)} \cdot \dot{\theta}$
wave number	$k^* = h \cdot k$

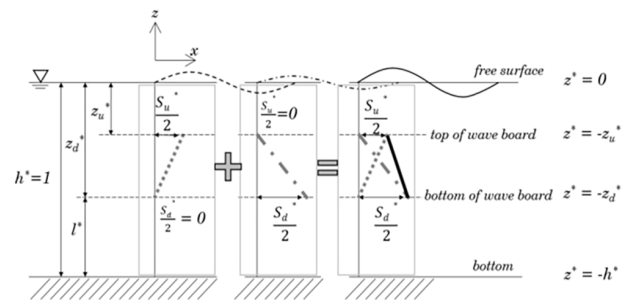


Fig. 1 Wave generated by submerged wave board oscillation

특수한 경우로 상단과 하단의 왕복운동의 주기와 위상차가 같아서 $\sigma_u^* = \sigma_d^*$, $\alpha_u^* = \alpha_d^*$ 인 상태로 운전할 때를 생각해 보자. 조파판 상단과 하단의 스트로크가 $S_u^* = S_d^*$ 일 때는 피스톤 운동을 하고 $S_u^* \geq S_d^*$ 이면 조파판은 스트로크 S_d^* 인 피스톤 운동에 스트로크가 $S_u^* - S_d^*$ 인 플랩 운동이 증강된 운동을 한다. 그리고 $S_u^* \leq S_d^*$ 일 때는 조파판은 스트로크가 S_u^* 인 피스톤 운동에 스트로크가 $S_d^* - S_u^*$ 인 그네 운동이 증강된 운동을 한다.

다기능 조파기는 위의 특징에 더하여 상단과 하단을 동요시키며 위상차와 주기를 자유롭게 바꾸어 줄 수 있다. 즉 조파판의 상단이나 하단의 스트로크를 다르게 선정할 수 있을 뿐 아니라 주기를 다르게, $\sigma_u^* \neq \sigma_d^*$, 또는 위상차를 서로 다르게, $\alpha_u^* \neq \alpha_d^*$, 선택할 수 있어서 다양한 운전을 할 수 있다.

2.3 무차원 공간에서 다기능 조파판의 경계조건

다기능 조파기의 조파판이 2차원 유체영역에 잠겨서 미소 동요하는 문제를 무차원 공간에서의 문제로 정식화하기로 하자. 유체영역에서 속도 퍼텐셜은 라플라스 방정식을 만족하여야 한다. 수조 바닥에서는 수직 방향으로 속도 성분이 없다는 경계조건과 자유 수면에서는 선형 경계조건을 사용할 수 있다고 가정한다.

Fig. 1에 예시한 조파판의 수중운동을 하단이 힌지이고 상단이 수평 방향으로 조화 왕복운동을 하는 플랩 운동과 상단이 힌지이고 하단이 수평 방향으로 조화 왕복운동을 하는 그네 운동

의 합으로 이루어진다고 생각하자. 무차원 영역에서 조파판 상단은 수면으로부터 z_u^* 만큼 잠겨있고, 하단은 z_d^* 만큼 잠겨있다. 상단과 하단의 스트로크를 각각 S_u^* , S_d^* 라고 하고 동요 주파수를 각각 σ_u^* , σ_d^* 라 하면 동요 위상차를 α_u^* , α_d^* 로 정의할 때 상단과 하단의 속도 성분 v_u^* 와 v_d^* 는 식 (1)과 식 (2)으로 표시할 수 있다.

$$v_u^* = \frac{S_u^*}{2} \sigma_u^* \cos(\sigma_u^* t^* + \alpha_u^*) \quad (1)$$

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

조파판 표면상의 점 z^* 에서 플랩 운동에 따르는 수평 방향 속도는 식 (1)으로부터 구할 수 있고, 그네 운동에 따르는 수평 방향 속도는 식 (2)으로부터 구할 수 있다. 따라서 $\alpha_u^* = \alpha_d^* = 0$ 이라면 조파판 위의 속도분포는 식 (3-1), (3-2), (3-3)으로 나타낼 수 있으며 이는 다기능 조파판 운동에 따르는 경계조건이 된다.

$$v^* = 0, \quad 0 \geq z^* > -z_u^* \quad (3-1)$$

$$v^* = \frac{S_u^*}{2} \frac{z^* + z_d^*}{z_d^* - z_u^*} \sigma_u^* \cos(\sigma_u^* t^* + \alpha_u^*), \quad z_u^* \geq z^* > z_d^* \quad (3-2)$$

$$- \frac{S_d^*}{2} \frac{z^* + z_u^*}{z_d^* - z_u^*} \sigma_d^* \cos(\sigma_d^* t^* + \alpha_d^*)$$

$$v^* = 0, \quad -z_d^* > z^* \geq -1 \quad (3-3)$$

2.4 조파판 운동으로 인한 발생 파의 일차 근사해

위의 경계조건을 만족하는 조파판의 수중운동에 대한 속도 퍼텐셜을 식 (4)과 같이 나타내기로 하자.

$$\phi = \phi_u + \phi_d \quad (4)$$

여기서 ϕ_u 는 플랩 운동으로 인한 속도 퍼텐셜로서 식 (3-2)의 첫 번째 항을 만족한다. ϕ_d 는 그네 운동으로 인한 속도 퍼텐셜로서 식 (3-2)의 두 번째 항을 만족한다. 식 (4)에 포함된 각각의 속도 퍼텐셜은 이론해석으로 구할 수 있다. 각각의 근사해에는 전파되지 않고 일정 위치에서 동요하는 정지 파 성분이 들어 있으나 이들 성분은 조파판으로부터 멀어질수록 바로 소멸하므로 조파판에서 발생하는 진행파 성분이 유효한 해가 된다 (Kwon et al., 2017a; 2017b). 그리고 수평 방향 속도는 조파판에서의 경계조건 식 (3-2)을 만족하고 유한수심에서 무차원 분산관계식 식 (5)를 만족해야 한다.

$$\sigma^{*2} = k^* \tanh k^* \quad (5)$$

식 (3-2)의 첫째 항과 두 번째 항 각각에 대하여 유체영역에서 식 (5)을 만족시킬 수 있는 이론 해를 구할 수 있다. 첫 번째 항은 조파판의 플랩 운동에 따른 경계조건을 나타내는 항이고 두 번째 항은 조파판의 그네 운동에 따른 경계조건을 나타내는 항이다. 조파판의 플랩 운동과 그네 운동에 따르는 스트로크와 파고 사이의 전달함수 각각을 Kim et al. (2019)가 사용한 계산 방법을 적용하여 구하면 식 (6)과 식 (7)이 얻어지며 이들 두 식은 식에 포함된 첨자 u와 d를 서로 바꾸어 쓰면 서로 부호만 바뀌고 다시 같아지는 켈레 관계가 있다.

$$\frac{H_u^*}{S_u^*} = \frac{4 \sinh k_u^*}{\sinh 2k_u^* + 2k_u^*} \times \left(\frac{\sinh k_u^* (1 - z_u^*)}{\cosh k_u^* (1 - z_u^*) - \cosh k_u^* (1 - z_d^*)} - \frac{1}{k_u^* (z_d^* - z_u^*)} \right) \quad (6)$$

$$\frac{H_d^*}{S_d^*} = \frac{4 \sinh k_d^*}{\sinh 2k_d^* + 2k_d^*} \times \left(\frac{-\sinh k_d^* (1 - z_d^*)}{\cosh k_d^* (1 - z_u^*) - \cosh k_d^* (1 - z_d^*)} + \frac{1}{k_d^* (z_d^* - z_u^*)} \right) \quad (7)$$

2.5 조파판의 이중동요 운동으로 발생하는 파고의 특성

다기능 조파기에서 발생하는 파고 H^* 를 조파판의 상단 동요에 따른 파고 H_u^* 와 하단동요에 따른 파고 H_d^* 를 써서 식 (8)으로 표시하고 파고와 스트로크 사이의 전달함수는 식 (9)으로 표시하면 합성된 전체파도의 스트로크는 식 (10)과 같이 전달함수를 사용하여 하나의 등가 스트로크로 나타낼 수 있다.

$$H^* = H_u^* + H_d^* \quad (8)$$

$$H^*/S^* = H_u^*/S_u^* + H_d^*/S_d^* \quad (9)$$

$$S^* = S_u^* S_d^* (H_u^* + H_d^*) / (H_u^* S_d^* + H_d^* S_u^*) \quad (10)$$

플랩 운동일 때의 전달함수 식 (6)과 그네 운동일 때의 전달함수는 식 (7)이 된다. 따라서 신형식 다기능 조파기의 전달함수는 식 (9)과 식 (10)의 관계로부터 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있으며 이들 각각의 곡선들은 별도의 연구 결과와 일치한다. (Dean & Dalrymple, 2007; Kwon et al., 2017b).

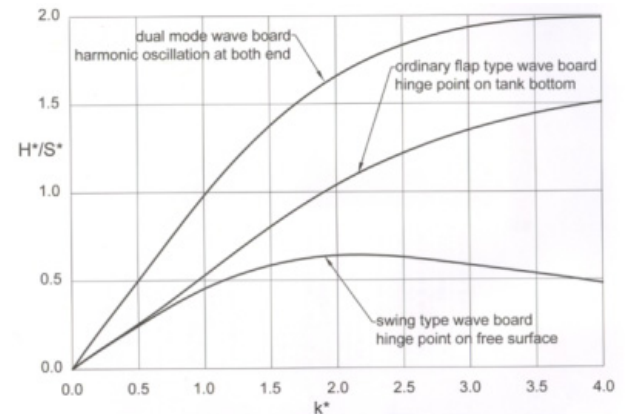


Fig. 2 Wave height-stroke transfer function

플랩 운동에 따른 파고 H_u^* 와 그네 운동에 따른 파고 H_d^* 를 사용하여 다기능 조파기가 발생하는 파형을 식 (11)으로 나타낼 수 있다. 플랩 운동에서 전달함수인 파고-스트로크 비 H_u^*/S_u^* 는 식 (6)으로 표시된다. 파수 k_u^* 에 따라 원 주파수 σ_u^* 가 결정되므로 위상차 α_u^* 를 지정하면 플랩 운동에 따른 파고 성분을 구할 수 있다. 또 그네 운동에서 전달함수인 파고-스트로크 비 H_d^*/S_d^* 는 식 (7)으로 표시할 수 있어서 파수 k_d^* 에 따라 원 주파수 σ_d^* 가 결정되고 위상차 α_d^* 를 지정하면 그네 운동으로 발생하는 파고 성분을 구할 수 있다. 따라서 다기능 조파기가 발생하는 파형은 식 (11)과 같이 두 성분의 합이 된다.

$$\eta^*(x^*, t^*) = \frac{H_u^*}{2} \cos(k_u^* x^* - \sigma_u^* t^* - \alpha_u) \quad (11)$$

$$+ \frac{H_d^*}{2} \cos(k_d^* x^* - \sigma_d^* t^* - \alpha_d)$$

3. 조파판 운동기구의 구성과 적합성 검토

Fig. 3과 같이 수면으로부터 깊이 h_e^* 까지 잠긴 조파판의 상단과 하단이 독립적으로 동요하는 문제를 생각하자.

점선으로 표시된 것과 같이 길이가 l_b^* 인 수평 구동링크 AB와 길이가 h_e^* 인 수직 조파판 BC는 B 점에서 힌지로 연결되어 있다. A 점이 시간 t 동안 이동하여 a 점에 이르렀다면 s_u^* 는 식 (1)로 표시된 속도 v_u^* 를 시간에 대하여 적분하여 구할 수 있으며 최대이동 거리는 $s_{u\max}^* = 0.6S_u^*$ 의 관계가 있다. 힌지 C는 시간 t 동안 이동하여 c 점에 이르렀다면 s_d^* 는 식 (2)로 표시된 속도 v_d^* 를 시간에 대하여 적분하여 구할 수 있으며 $s_{d\max}^* = 0.6S_d^*$ 의 관계가 있다.

임의의 시간 t 에서는 수평으로 놓여 있던 부재 \overline{AB} 는 이동하여 \overline{ab} 위치에 이르고 수직으로 놓여 있던 부재 \overline{BC} 는 이동하여 \overline{bc} 위치에 이르게 된다. \overline{AB} 와 \overline{ab} 가 이루는 각도를 α 라 하고, 수평선에 대하여 α 과 α 가 이루는 각을 라하고, \overline{BC} 와 \overline{bc} 가 이루는 각도를 β 라 정의하면 식 (12)과 식 (13)의 관계가 성립한다.

$$h_e^* = l_b^* \sin \alpha + h_e^* \cos \beta \quad (12)$$

$$l_b^* - s_u^* + s_d^* = l_b^* \cos \alpha - h_e^* \sin \beta \quad (13)$$

조파기 설계자가 조파판 상단의 스트로크 S_u^* 와 하단의 스트로크 S_d^* 를 결정하였을 때, 식 (12)과 식 (13)으로부터 $\cos \beta$ 를 구할 수 있다. 조파기 설계과정에서 설계자가 선택한 수평 링크 \overline{AB} 의 길이 l_b^* 와 조파판의 수중에 잠긴 부분 \overline{BC} 의 길이 h_e^* 를

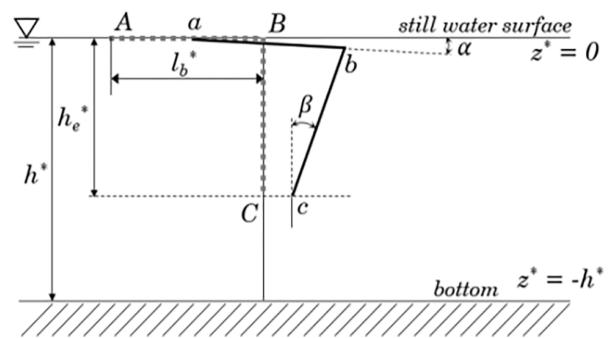


Fig. 3 Schematic of oscillating mechanism of wave board

결정하였을 때 2개의 해가 얻어지며 이 중에서 기구적으로 연속속운전이 합리적으로 이루어지는 범위에서 조파기를 설계하여야 한다.

상단 스트로크가 $S_u^* = 0.5l_b^* = 0.5h_e^*$, $S_d^* = 0$ 인 플랩 운동일 때는 링크 BC의 경사각 β 를 구하면 $\beta = 14.42^\circ$ 이므로 경계조건식 (3-2)을 유도하며 사용한 근사조건을 97% 정도 충족한다. 스트로크 $S_u^* = 0.6h_e^*$ 로 증가하면 근사조건을 95% 정도 충족한다. 하단이 스트로크 $S_d^* = 0.5h_e^*$ 로 왕복 운동하였을 때에도 경사각 β 를 구하여 면 근사조건을 97% 정도 충족하며 스트로크가 $S_d^* = 0.6h_e^*$ 일 때는 근사조건을 95%를 충족하는 것을 알 수 있다.

따라서 다기능 조파기의 스트로크는 링크 길이 l_b^* 과 조파판 길이 h_e^* 를 고려하여 작동할 때 조파판의 최대 경사각이 14° 전후가 되도록 하는 것이 좋다. 조파판 경사각 18° 를 넘으면 이론 해석에서 사용한 근사조건을 95% 이상 충족할 수 없다. 다만 식 (1)과 식 (2)의 주파수와 위상차에 따라서 조파판 경사각 β 가 변동되므로 설계자는 이를 검토하여 최대 스트로크를 결정하는 것이 바람직하다.

4 조파기 설계영역과 운전특성 결정

4.1 조파기 설계에 고려해야 하는 발생 파의 파장

특수한 경우가 아니라면 선박 및 해양구조물은 깊이의 영향을 받지 않은 파도를 만나므로 실험시설에서는 파장이 수심의 2배보다 작은 파도를 사용한다. 선박은 파도를 받으며 이동할 때 파도에 따라 운동을 일으키며 파도와 상호작용으로 선체에 작용하는 저항이 변화한다. 따라서 수조실험에서 사용하는 모형의 치수는 수조에서 발생시킬 수 있는 파도의 특성을 고려하여 정하여야 한다.

모형의 치수는 근본적으로 제한 수로의 영향을 피할 수 있도록 선정하여야 한다. 선박의 파랑 중 저항 증가는 파장이 선박 길이의 50% 이하이거나 2배 이상이면 무시할 수 있다. 수조에서 깊이의 영향을 받지 않은 파도의 최대파장은 수심의 2배이므로 파도 중에서 추진 성능을 살펴려면 모형의 최대길이는 수심보다 작아야 한다. 파도 중에서 내항성 실험에 사용하는 모형은 저항 추진시험용 모형의 1/2 정도인 것을 사용한다.

모형의 파도 중 운동 응답은 파장과 모형의 길이 비에 따르므로 내항성 시험에서도 파장은 모형 길이의 50% 이상이어야 한다. 즉 모형의 길이가 수심과 같으면 저항에 미치는 파도의 영향을 실험할 수 있다. 모형의 길이가 수심의 50% 이하인 내항성 모형에서는 파장이 수심의 25%보다 커야 한다. 따라서 수조실험에서는 파장이 $0.2 \leq \lambda^* \leq 2.0$ 인 파도를 주로 사용한다.

4.2 무차원 공간에서 다기능 조파기의 설계영역

시험수조에서 사용하는 파도의 파장 범위가 정해지면 파장에 따르는 파의 전파속도, 주기, 주파수, 파수 등의 범위도 정해진다. 또 실험에서 파도는 붕괴가 일어나지 않아야 신뢰할 수 있으므로 파도는 $H^* \leq 0.78$ 와 $H^*/\lambda^* \leq 0.142$ 의 관계를 만족해야 한다. 따라서 시험수조에서는 통상적으로 조파기는 Table 2에 표기된 범위의 파도를 사용하므로 이 범위가 설계영역이 된다.

Table 2 Non-dimensional design domain of wave maker

wave steepness limit	$H^*/\lambda^* \leq 0.142$
wave breaking limit	$H^* \leq 0.78$
wave length	$0.2 \leq \lambda^* \leq 2.0$
phase velocity	$0.1784 \leq v^* \leq 0.5631$
wave period	$1.1210 \leq T^* \leq 3.5515$
angular frequency of wave	$1.7691 \leq \sigma^* \leq 5.6050$
wave frequency	$0.2816 \leq f^* \leq 0.8921$
wave number	$\pi \leq k^* \leq 10\pi$

다만 미 해군에서는 선체 구조 강도를 다룰 때 파고를 식 (14)과 같이 제한하고 있다 (Smith, 2007). 이 조건에서 길이 25m인 소형선은 $H^*/\lambda^* = 0.122$ 이고 50m이면 $H^*/\lambda^* = 0.086$ 이 되지만 선박의 길이가 100m로 증가하면 파고는 $H^*/\lambda^* = 0.061$ 로 줄어든다. 따라서 구조 강도를 시험할 때는 이를 고려해야 한다.

$$H = 0.61 \sqrt{L_{BP}} \tag{14}$$

4.3 설계영역에서 다기능 조파기의 조파 성능

조파기가 주로 사용되는 영역 $\pi \leq k^* \leq 10\pi$ 을 중심으로 식 (6)과 식 (7)을 사용하여 식 (9)을 계산하면 다기능 조파기의 조파 성능은 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다.

실제로 파도를 발생시킬 수 있는 영역은 파도가 수심의 영향으로 붕괴하거나 파 경사의 영향으로 붕괴하지 않는 영역이어야 한다. 따라서 조파기로 파도 발생이 가능한 영역 내에서 파수 k^* , k_u^* , k_d^* 를 지정하고 원하는 파고의 파도를 발생시킬 수 있다. 즉, 자정한 파수에서 전달함수 H^*/S^* , H_u^*/S_u^* , H_d^*/S_d^* 를 확인하면 원하는 무차원 파고를 발생시키는 스트로크 S^* , S_u^* , S_d^* 를 결정할 수 있다.

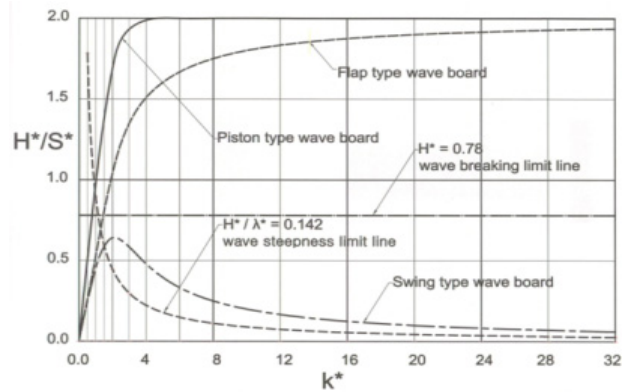


Fig. 4 Performance curve of hybrid wave generator system

4.4 설계영역에서의 파도의 성질과 운전조건의 결정

Table 2에 주어진 설계영역에서 파도의 물성을 파수에 따라서 조사하면 Fig. 5와 같은 상관관계를 얻을 수 있다. 따라서 조파판 상단이 동요하여 발생하는 파도의 무차원 파수 k_u^* 에서 물성값들을 읽으면 발생하는 파도의 무차원 파장 λ_u^* , 무차원 주기 T_u^* , 무차원 원 주파수 σ_u^* , 무차원 전파속도 v_u^* 를 읽어 낼 수 있다.

역으로 임의의 물성값을 우선 결정하였을 때는 물성값을 나타내는 수평선과 물성 곡선의 교점에서 무차원 파수 k_u^* 를 읽을 수 있다. 따라서 해당하는 무차원 파수에서 나머지 물성도 모두 도식적으로 결정할 수 있다. 당연히 다기능 조파판 하단에서도 같은 관계를 사용하여 k_d^* , λ_d^* , T_d^* , σ_d^* , v_d^* 등을 결정할 수 있다. 따라서 사용자는 발생시키려는 파도의 파형을 식 (11)의 변수들을 앞에서 설명한 물성 사이의 상관관계로부터 구하고 위상차 α_u^* 와 α_d^* 를 정하면 식 (11)으로 파형을 계산할 수 있다.

변수들 사이의 상관관계를 모두 간단한 식으로 표현할 수 없으나 $\pi \leq k^* \leq 10\pi$ 에서 $\tanh k^* = \tanh(2\pi/\lambda^*) \approx 1$ 의 관계가 있고 분산관계를 $\sigma^{*2} = k^* \tanh k^* = k^* \tanh(2\pi/\lambda^*) \approx k^*$ 로 나타낼 수 있어서 파도의 파수, 주파수, 원 주파수, 주기, 파장, 파 전파속도 등의 사이에는 Table 3의 관계를 사용할 수 있다.

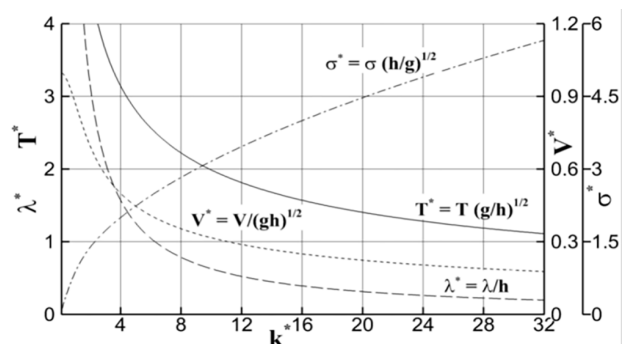


Fig. 5 Wave properties at design domain of wave maker
long dash line : wave length, solid line : wave period
short dash line : phase velocity, chain line : frequency

Table 3 Interrelation between wave properties in design domain

	k^*	f	σ^*	T^*	λ^*	c^*
k^*	k^*	$\sqrt{k^*}/2\pi$	$\sqrt{k^*}$	$2\pi/\sqrt{k^*}$	$2\pi/k^*$	$\sqrt{1/k^*}$
f	$(2\pi f)^2$	f	$2\pi f$	$1/f$	$1/2\pi f^2$	$1/2\pi f$
σ^*	σ^{*2}	$\sigma^*/2\pi$	σ^*	$2\pi/\sigma^*$	$2\pi/\sigma^{*2}$	$1/\sigma^*$
T^*	$(2\pi/T^*)^2$	$1/T^*$	$2\pi/T^*$	T^*	$T^{*2}/2\pi$	$T^*/2\pi$
λ^*	$2\pi/\lambda^*$	$\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{2\pi}{\lambda^*}}$	$\sqrt{\frac{2\pi}{\lambda^*}}$	$2\pi/\sqrt{\frac{2\pi}{\lambda^*}}$	λ^*	$\sqrt{\frac{\lambda^*}{2\pi}}$
c^*	$(1/c^*)^2$	$1/2\pi c^*$	$1/c^*$	$2\pi c^*$	$2\pi c^{*2}$	c^*

5 조파기 사용조건과 운전조건 설정

5.1 조파기의 파 발생을 위한 스트로크의 결정

Fig. 3과 같은 조파기의 조파판 상단 z_u^* 와 하단 z_d^* 위치의 수평 방향 스트로크를 결정하면 조파기를 운전할 수 있다. 원하는 파고를 발생시키는 상단 스트로크 S_u^* 와 하단 스트로크 S_d^* 를 식 (6)과 식 (7)으로부터 계산할 수 있다. 파도를 발생시키는 목적에 따라서 파고와 파수의 관계뿐 아니라 주파수, 원 주파수, 주기, 파장, 파 전파속도 등과의 관계가 더욱 중요하게 생각될 수 있다. 따라서 사용자는 Table 3의 관계를 사용하여 적합한 파도를 발생시킬 수 있는 스트로크를 결정할 수 있다.

5.2 조파기의 규칙 파 발생을 위한 서보모터제어

다기능 조파기로 파도를 발생시켜 얻어지는 파형은 식 (11)으로 표시된다. 따라서 파도 발생에 앞서서 운전자는 Fig. 2를 참조하여 플랩 운동으로 발생하는 파도 성분과 그네 운동으로 발생하는 파도 성분을 합성하여 얻어지는 최종 파도의 특성을 결정하여야 한다. 파도의 특성에 따라 파고 구성비를 결정하면 조파판 상단과 하단의 스트로크를 결정할 수 있다.

조파기를 제어할 때는 서보모터의 회전운동을 리드 스크루에서 직선운동으로 변환하고 특정 스트로크로 조파판의 상단 또는 하단을 왕복운동 시키게 된다. 따라서 조파기 사용자는 Table 3에 표시된 어떤 변수로도 스트로크를 나타낼 수 있고 해당하는 변수에 따라서 파도를 발생시킬 수 있어야 한다.

5.3 파도 발생에 사용하는 조파기 성능곡선과 전달함수

조파기로 파도를 발생시킬 때 흔히 파고와 파주기를 지정하고 파도를 발생시킨다. 그러나 사용자가 관심을 두는 파도의 물성에 따라서 파도를 발생시키는 것이 필요할 때도 있다. 따라서 식 (6)과 식 (7)으로 표시되는 전달함수를 Table 3의 관계를 사용

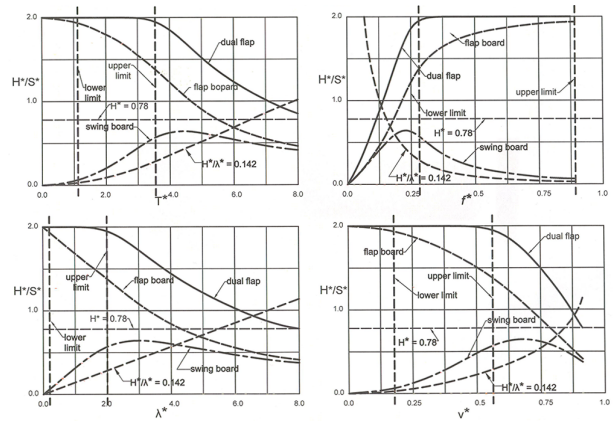


Fig. 6 Wave performance curves and control parameters

하여 변수 변환하여 원하는 물성의 함수형으로 나타낼 수 있다. 수심 전체에 설치된 신형식 다기능 조파기를 예로 들면 수심 (h^*)과 조파판의 길이(h_c^*)가 같아지며 발생하는 파고와 물성 사이의 관계를 Fig. 6과 같이 나타낼 수 있다.

위의 첫 번째 선도는 전달함수와 파주기 사이의 관계를 나타내는 곡선으로 파도 발생에 가장 흔하게 사용된다. 두 번째 선도는 전달함수와 주파수 사이의 관계를 나타내는 곡선으로 만남 주파수에 관심을 두게 되는 파랑 중 저항시험에서 사용하는 선도이다. 세 번째 선도는 파장의 영향에 관심을 두게 되는 시험에서 사용하면 편리한 선도이다. 그리고 네 번째 선도는 선박의 속도와 파도의 전파속도가 관심의 대상이 되는 추파 중 선박의 성능을 실험할 때 사용될 것으로 판단된다.

앞에서 보인 선도들은 서로 다른 모양을 보이나 Fig. 4에 보인 선도를 Table 3에 표시된 관계로 표기를 바꾸어 정리한 사실상 같은 선도로서 이들 선도를 사용하면 사용자는 편리하게 파도 발생에 필요한 전달함수 값을 구할 수 있다.

5.4 파고-주기 기준 조파기 성능곡선과 스트로크 선정

조파판이 수심 전체에 설치된 신형식 다기능 조파기를 예로 들면 발생하는 파고와 물성 사이에는 Fig. 6의 관계가 있다. 조파기로 파도를 발생시킬 때 흔히 파고와 파주기를 지정하고 파도를 발생시킨다. 따라서 사용자는 Fig. 6의 첫 번째 선도인 전달함수와 주기 T^* 의 관계를 나타낸 Fig. 7을 사용하게 된다.

제일 위쪽의 곡선은 다기능 조파기의 상단과 하단이 연동하여 운동할 때를 나타낸다. 두 번째 곡선은 플랩 운동할 때이고 세 번째 곡선은 그네 운동할 때를 나타낸다. 그리고 수심과 파경사에 따라 파의 붕괴가 일어나는 한계선을 함께 표시하였다. 실제로 실험은 한계선보다 아래쪽 붕괴가 일어나지 않는 영역에서 수행한다.

선박 및 해양구조물의 수조시험에서는 Table 2에 보인 것과 같이 주기가 $1.1210 \leq T^* \leq 3.5515$ 의 범위의 파도를 사용한다. 따라서 실험은 $T^* = 1.1210$ 와 $T^* = 3.5515$ 에서 그린 수직 점선 사이의 파도를 사용한다. 그리고 특수한 경우를 제외하면

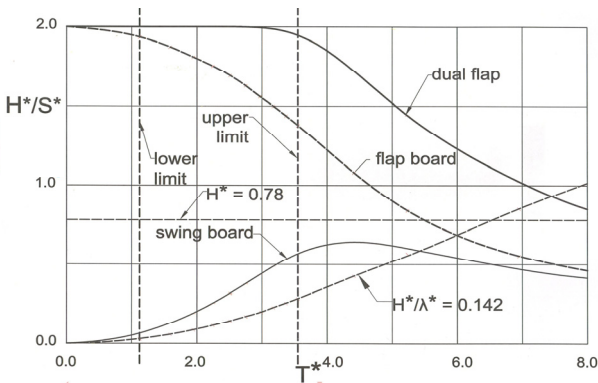


Fig. 7 Performance curve of hybrid wave generator system in wave height and period

대부분 실험은 파도의 붕괴가 일어나지 않을 때 이루어지므로 실험에 사용하는 파도는 $H^*/\lambda^* \leq 0.142$ 를 만족하여야 한다. 따라서 실제로 실험에서 사용하는 파도는 매우 좁은 영역의 파도이다.

5.5 다기능 조파기의 스트로크의 제한 조건

조파판의 스트로크를 조파판 흘수의 0.5배로 설정하면 97%의 정밀도를 가지고 0.6배로 설정하면 정밀도가 95%로 떨어지는 것을 3장에서 확인하였다.

조파기 운전자는 위의 조건에서 조파기 사용조건을 선정하여야 하므로 앞에서 설명한 방법에 따라서 얻어진 스트로크가 적정 범위에 있는지를 확인하는 것이 필요하다. 현재 사용하고 있는 대부분의 조파기는 스트로크를 임의로 설정하고 주기를 지정하여 운전한 후 파고를 측정하여 스트로크를 찾아 사용하고 있다.

5.5.1 다기능 조파기의 피스톤 운전과 스트로크 선정

Fig. 7에서 실제로 실험은 주기가 점선으로 표기된 상한선과 하한선 사이에 있으며 파도가 붕괴하지 않는 영역에서 수행된다. 실험에서 사용하는 영역을 확대하여 표기하고 다기능 조파기를 피스톤 조파기로 사용할 때를 Fig. 8로 나타내었으며 이 또한 수심(h^*)과 조파판의 길이(h_c^*)가 같은 경우이다.

Fig. 8에 사용자가 발생하려는 파도의 주기와 파고를 지정하면 그 점을 지나는 스트로크 선도의 값은 해당하는 주기와 파고를 가지는 파도를 생성하는데 필요한 스트로크가 된다. 설계 영역의 상한 $T^* = 3.5515$ 에서 파도 발생조건 $H^*/\lambda^* \leq 0.142$ 를 적용하면 식 (6)과 식 (7)을 더하여 얻어지는 피스톤 운전의 식으로부터 스트로크 $S_u^* = 0.1446$ 일 때 파고 $H^* = 0.284$ 인 파도를 얻을 수 있다. 하지만 실험시설과 조파기에 따라 파도 붕괴 현상이 일찍 일어나 $H^*/\lambda^* \leq 0.1$ 에서 붕괴가 일어나기도 한다 (Takezawa, 1980).

예로 들고 있는 신형식 다기능 조파기는 조파판이 수심 전체에 걸쳐 있다. 따라서 피스톤 조파기로 운전할 때는 $T^* \leq 3$ 에서 파고는

$H^* = 2S^*$ 이 되고 $T^* = 3.5515$ 에서는 $H^* = 1.947S^*$ 가 된다. 따라서 조파기 사용영역 $1.1210 \leq T^* \leq 3.5515$ 에 대하여 $H^* \approx 2S^*$ 라 취급하면 정밀도는 97% 이상이 되는 것을 알 수 있다.

5.5.2 다기능 조파기의 플랩 운전과 스트로크 선정

다기능 조파기를 플랩 조파기로 운전할 때 사용하는 영역을 확대하여 Fig. 8에 나타내었다.

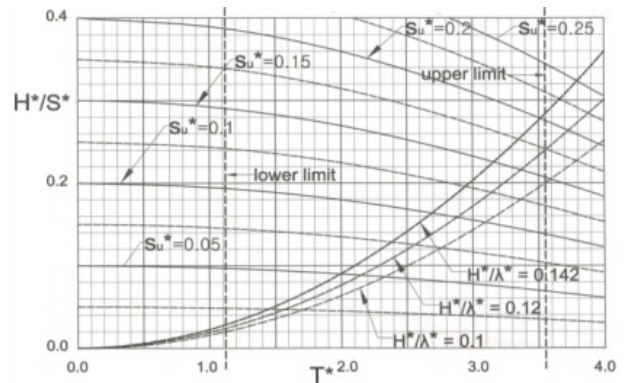


Fig. 8 Performance of hybrid wave generator system with wave board in flap motion

앞에서 설명한 바와 같이 사용자가 주기 $T^* = 1.12$ 에서는 파도의 붕괴 조건을 사용하면 파고 $H^* = 0.0284$ 인 파도를 $S_u^* = 0.0147$ 인 조건에서 생성할 수 있고 $T^* = 3.5515$ 에서는 $S_u^* = 0.206$ 로 설정하고 운전하면 파고 $H^* = 0.284$ 인 파도를 생성할 수 있다. 이 구간에서는 피스톤 운전일 때와 다르게 발생 파도의 주기가 길어질수록 파고를 결정하는 스트로크는 주기가 길어져야 하는 것을 확인할 수 있다.

5.5.3 다기능 조파기의 그네 운전과 스트로크 선정

Fig. 9는 다기능 조파기를 그네 조파기로 운전하는 경우이다.

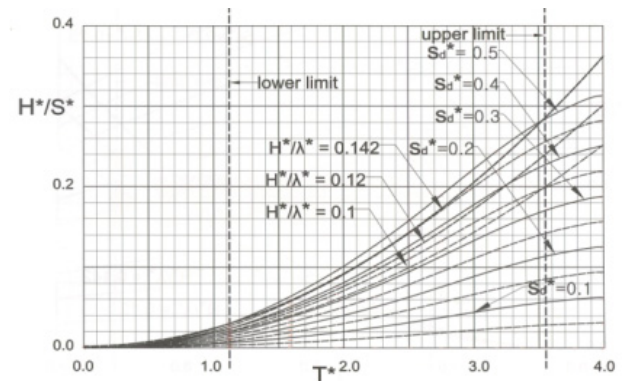


Fig. 9 Performance of hybrid wave generator system with wave board in swing motion

발생하려는 파도의 주기가 $1.12 \leq T^* \leq 2.6$ 일 때 스트로크를 $S_d^* = 0.446$ 로 설정하면 발생하는 파고를 나타내는 곡선은 파 경사에 의한 붕괴 조건 $H^*/\lambda^* \leq 0.142$ 에서 파고 곡선과 경향이 서로 같아지는 것이 확인된다. 발생하는 파의 주기가 $T^* \geq 2.6$ 일 때는 주기가 길어질수록 스트로크를 키워주어야 한다. $T^* = 3.5515$ 에서는 파의 붕괴 조건 $H^*/\lambda^* \leq 0.142$ 에서 스트로크 $S_d^* = 0.5$ 일 때 파고가 $H^* = 0.284$ 인 파도를 발생시킬 수 있다. 그런데 조파판 경사의 제한 조건을 나타내는 곡선과 파고 곡선이 서로 같은 경향을 가진다는 특징을 생각하면 그네 운전으로는 파 경사를 유지하며 파도를 발생시킬 때 사용하면 유리하다.

5.6 파고 지정 변수에 따른 성능곡선과 스트로크 선정

수조실험에서 사용하는 파도의 파고를 다른 변수로 표시하면 Fig. 6에서 보인 바와 같이 서로 다른 형태로 표시된다. 5.4절에서는 가장 흔히 사용하는 파고와 주기를 기준으로 조파기를 운전할 때 스트로크를 결정하는 방법을 Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9 등을 사용하여 설명하였다. 실험목적에 따라서 파고를 주파수나 전파속도 또는 파장에 따라서 발생시키는 것이 필요하다.

예컨대 파수를 주파수로 변환하고 계산 결과를 주파수를 기준으로 표시하면 Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9의 점들이 모두 변수 변환되어 전혀 다른 형태의 선도가 얻어진다. 따라서 주파수 영역에서 파고를 발생시키는 스트로크 선정 도표를 주파수 기준으로 작성할 수 있다. 관심을 두는 변수가 전파속도나 파장으로 바뀌더라도 Table 3에 주어진 관계를 사용하여 변수 변환을 하면 해당하는 변수를 기준으로 하는 스트로크 선정 도표를 작성할 수 있다.

따라서 다기능 조파기의 설계자는 사용자가 요구하는 사용조건을 가장 효과적으로 만족시킬 수 있는 운전조건을 선정하고 스트로크 선정 도표를 작성하여 공급하는 것이 바람직하다. 또 이들 도표는 조파기를 운전할 때 GUI 화면으로 사용하면 사용자의 편의를 극대화할 수 있을 것이다.

6. 다기능 조파기의 특수한 운전 기능

6.1 플랩 운동 또는 그네 운동을 보강한 피스톤 조파기

조파판의 수중운동을 Fig. 1에 표기한 바와 같이 플랩 운동과 그네 운동의 합으로 나타내었다. 특수한 경우로서 플랩 운동과 그네 운동의 주기가 같을 때를 생각해보자. 플랩 운동의 스트로크 S_d 가 그네 운동의 스트로크 S_g 좀 더 크면 조파판의 운동은 스트로크가 S_g 인 피스톤 운동에 스트로크가 $S_d - S_g$ 인 플랩 운동을 중첩하여 피스톤 운동을 플랩 운동으로 강화한 운동을 한다. 역으로 플랩 운동의 스트로크 S_d 가 그네 운동의 스트로크

S_g 보다 작으면 조파판의 운동은 스트로크가 S_d 인 피스톤 운동에 스트로크가 $S_g - S_d$ 인 그네 운동을 중첩하여 피스톤 운동을 그네 운동으로 강화한 운동을 한다.

이와 같은 운전을 하기 위하여 조파기 운전자는 피스톤 운전으로 얻고자 하는 파고를 발생시킬 수 있는 스트로크를 Fig. 8에서 결정하고 플랩 운동으로 추가로 얻으려는 파고를 발생시킬 수 있는 플랩 운동 스트로크 또는 그네 운동 스트로크를 결정하면 된다. 이와 같은 운전을 수행하면 제한된 스트로크 범위 안에서 좀 더 큰 파고의 파도를 발생시킬 수 있다 (Choi, 2020).

6.2 특수 파형 발생을 위한 플랩 운동과 그네 운동의 중첩

조파기가 발생하는 파형은 식 (11)으로 표시하였으므로 플랩 운동과 그네 운동은 완전히 독립적이다. 플랩 운동으로 1차 선형 파를 발생시키고 그네 운동으로 2차 선형 파를 발생시키면 2차 Stokes 파형을 발생시킬 수 있을 것이다. 또 시험수조에서 예기치 않은 Stokes 파가 발생할 때는 발생 파에 포함된 2차 성분을 조사하고 이를 상쇄시킬 수 있는 파도를 발생시켜 중첩함으로써 파형을 개선할 수 있을 것이다. Kim et al. (2019)는 식 (11)에 해당하는 이론식을 이용하여 서로 다른 파장의 파를 발생시키는 플랩 운동과 그네 운동의 합성파를 계산하여 Fig. 10과 같은 결과를 나타낸 바 있으며 향후 실험을 통하여 검증할 예정이다.

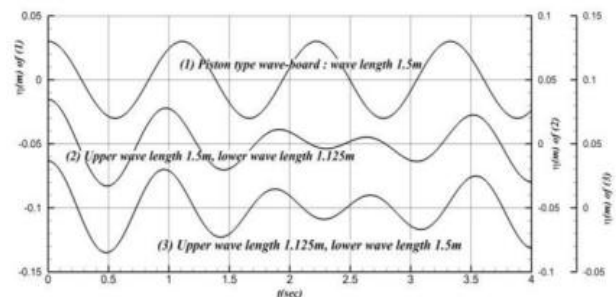


Fig. 10 Wave elevations of the hybrid wave generator: (1) piston type, (2)&(3) flap type + swing type (from Kim et al.(2019))

불규칙 파도를 발생시키는 경우에는 장파장 영역의 파도는 플랩 운동을 주로 사용하고 단파장 영역의 파도 발생에서는 그네 운동을 주로 사용하면 통상의 조파기로는 기대할 수 없는 우수한 스펙트럼 특성을 확보할 수 있다.

7. 결 언

수심이 일정한 2차원 공간의 임의의 깊이에 2차원 평판이 잠겨서 운동하는 문제를 깊이와 중력가속도로 무차원화 하였다. 조

파판의 하단을 힌지로 상단은 수평 방향으로 조화 왕복운동 할 때와 상단이 힌지이고 하단은 수평 방향으로 조화 왕복운동 할 때로 나누어 무차원 공간에서 라플라스 방정식으로 정식화하고 1차 섭동법으로 해석하여 근사해를 구하였다.

- 얻어진 일반 해는 시험시설에서 사용하는 모든 형식의 조파기를 나타낼 수 있는 무차원 공간에서의 일반 해이다.
- 조선해양공학 실험에 적합한 설계영역을 설정하고 설계하여야 우수한 성능의 조파기를 얻을 수 있다.
- 사용자가 피스톤 조파기나 플랩 조파기 그리고 그네 조파기로 자유롭게 사용할 수 있는 새로운 다기능 조파기를 제안하였다.
- 파도의 파수, 주기, 주파수, 파장 전파속도를 지정하고 원하는 파고를 발생시키는 스트로크를 선정하는 방법을 제시하였다.
- 사용자가 GUI에서 편리하게 운전 지령할 수 있는 운전조건을 선정하는 방법을 제안하였다.
- 조파기의 조파판 상단과 하단의 주기와 위상차를 조절하여 특수 파형을 합성할 수 있다.
- 신형식 조파기는 조파판 상단과 하단을 동시 제어하여 스펙트럼 특성이 우수한 불규칙 파를 발생할 수 있다.

후 기

본 연구는 서울대학교 공학연구원이 지원하는 공과대학 명예교수의 연구 성과 정량화와 학문 수준 제고를 위한 사업과 2017년도 한국연구재단 이공분야기초연구사업(NRF-2017R1D1A1B0 3036478)의 지원으로 이루어졌습니다. 신형식 다기능 조파기를 제작하여 서울대학교에서 실험확인 예정입니다. 본 연구를 지원해주신 서울대학교 공학연구원, 군산대학교 공과대학의 지원에 감사드립니다.

References

Choi, W.H. et al., 2020, Experimental evaluation of wave generated by the board motion of novel hybrid wave maker. *Proceedings of the annual spring meeting, the Society of Naval Architects of Korea*, Busan, Bexco, 22-23 July 2020, pp.254-263.

Dean, R.G. & Dalrymple, R.A., 2007, *Water wave mechanics for engineers and scientists*. World Scientific (Advanced series on Ocean Engineering), New Jersey.

Kim, K.H. & Kim, Y.H., 2011, Numerical study on added resistance of ships by using a time-domain Rankine panel method, *Ocean Engineering*, 38, pp.1357-1367.

Kim, H., Oh, J., Kwon, J. & 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, J.O., Kim, H., Lew, J.M. & Oh, J.K., 2017a, Analytic solution of oscillating submerged vertical board segment by perturbation method and its characteristics, *KTTC Spring Meeting*, Inha University.

Kwon, J.O., Kim, H., Lew, J.M. & Oh, J.K., 2017b, Simplified analytic solution of submerged wave board motion and its application on the design of wave generator. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 54(6), pp.461-469.

Liu, S., Papanikolaou, A. & Zaraphonitis, G., 2011, Prediction of added resistance of ships in waves. *Ocean Engineering*, Vol. 38, pp.641-650.

Madsen, O.S., 1970, Waves generated by a piston-type wavemaker. *Proceedings of the 12th Coastal Engineering Conference*, American Society of Civil Engineers, Vol 1, pp.589-607.

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.

The Kansai Society of Naval Architects of Japan(KSNAJ), 1976, *Handbook of Ship Design(in Japanese)*, Kaibundo Press, Tokyo, Japan.

