

조파판 수중운동의 근사해석과 조파기 설계에 응용

권중오¹·김효철²·류재문^{1,†}·오정근³

충남대학교 선박해양공학과¹

서울대학교 조선해양공학과·서울대학교 공학연구원²

군산대학교 조선해양공학과³

Simplified Analytic Solution of Submerged Wave Board Motion and Its Application on the Design of Wave Generator

Jongoh Kwon¹·Hyochul Kim²·Jae-Moon Lew^{1,†}·Jungkeun Oh³

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National University¹

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University·Institute of Engineering Research²

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Kunsan National University³

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.

A segment of the wave board has been expressed as a submerged line segment in the two dimensional wave flume. The lower end of the line segment could be extended to the bottom of the wave flume and the other opposite upper end of the board could be extended to the free surface. It is assumed that the motion of the wave board could be defined by the sinusoidal motion in horizontal direction on either end of the wave board. When the amplitude of sinusoidal motion of the wave board on lower and upper end are equal, the wave board motion could express the horizontally oscillating submerged segment of piston type wave generator. The submerged segment of flap type wave generator also could be expressed by taking the motion amplitude differently for the either end of the board. The pivot point of the segment motion could play a role of hinge point of the flap type wave generator. Simplified analytic solution of oscillating submerged wave board segment in water of finite depth has been derived through the first order perturbation method at two dimensional domain. The case study of the analytic solution has been carried out and it is found out that the solution could be utilized for the design of wave generator with arbitrary shape by linear superposition.

Keywords : Wave board(조파판), Submerged oscillating segment(수중 동요 요소), Analytic solution(이론해), Wave board motion(조파판 운동), Wave generator design(조파기 설계)

1. 서론

선박연구와 관련하여 실험실에서 파도를 발생시키는 문제는 오래전부터 다루어져 왔다. 초기의 조파기는 이론 해석 결과에 근거하기 보다는 물에 규칙적인 교란을 주고, 교란에 의하여 발생하는 파도를 계측하여 교란과 파도의 상관관계를 찾아내어 조파기 운전에 사용하도록 하는 경험적 방법으로 설계하였다. 따라서 초기에는 파도의 유체 입자 운동에 되도록 가까운 교란을 줄 수 있는 기계장치를 설계하는 것을 우선적으로 생각하였고, 감속기와 연동되는 왕복동 기구를 설계하는 것이 조파기 설계의 주요 내용이 되었다.

단순한 조파판의 운동은 많은 유체역학 연구자가 관심을 두게 되면서 이론적 근사해를 구하게 되었고 이를 근거로 조파기를 설계하게 되었다. 현재 약 20여종의 조파기가 사용되고 있으며 그 중 약 40%정도는 순수한 실험적 방법에 의한 경험적 설계로 제작되고 있다.

우리나라에서는 1963년 서울대학교 공과대학에 중력식 예인수조를 건설되며 선박 모형 시험용 조파장치가 최초로 소개되었다. 당시의 조파장치는 감속기로 구동되는 순수한 기계식 조파장치로 규칙 파만을 발생시킬 수 있었다. 수조 바닥에 힌지가 붙여진 조파판이 크랭크 레버 방식으로 왕복 운동을 일으키면서 제한된 범위에서 파장과 파고를 변화시킬 수 있었다. 1970년대에 들어서며 선형시험수조가 늘어나며 발전된 서보모터 제어기술을

활용하여 불규칙 파의 발생이 가능한 조파기를 활용하게 되었다.

현재 보편적으로 사용되고 있는 조파기로는 플랩형 조파기, 피스톤형 조파기 그리고 플러저형 조파기 등이 있다. 이들 조파기를 설계할 때는 섭동이론에 근거한 1차 근사해법을 사용하는 것이 보편적이다 (Khalilabadi & Bidokhti, 2012). 다만, 플러저형 조파기인 경우에는 반복 계산법이 함께 사용되고 있으며 최근에는 수치 해석법이 발전되어 있어서 복잡한 형식의 조파기에 대하여서도 이론적 설계가 가능하게 되었다. 그리고 수중에서 수평방향으로 동요운동을 하는 수직 판 요소에 의한 조파문제가 다루어진 바 있다 (Kwon, et al., 2017).

조파기 설계에 사용하는 이론해석은 근본적으로 선형이론에 근거하고 있으므로 원칙적으로 선형 중첩이 가능하다. 그 동안 여러 연구자들이 특수 경우에 대한 이론해를 구하였는데, 그 결과는 수중에 잠겨서 왕복운동을 하고 있는 특수한 경우의 조파판 요소에 대한 근사해석 결과로 실험과 잘 일치하는 것이 확인되었다 (Liao & Roddier, 1998; Khalilabadi & Bidokhti, 2012).

이로부터 수중에서 운동하는 조파판 요소에 대한 일반해를 구한다면 그 결과를 활용하여 선형중첩 기법을 적용함으로써 다양한 형태의 조파기 설계에 사용할 수 있을 것으로 기대된다. 본 논문에서는 2차원 수조의 수중에 잠겨있는 조파판이 왕복운동을 하는 문제에 대한 일차 근사 해를 구하였고, 얻어진 일반해를 활용하여 다양한 형태의 조파기 설계에 활용할 수 있음을 보였다. 이를 통해 조파기 설계에 적용할 수 있는 이론적 근사해를 소개하고 그 활용도를 소개하는 것을 목적으로 하였다.

2. 조파판 요소의 수중운동의 이론해석

2.1 조파판의 자유수면 지배 방정식

깊이가 h 인 이차원 조파수조가 있다고 생각하고 조파판 요소가 Fig. 1에 보인 바와 같이 물에 잠겨 있을 때를 생각해 보자.

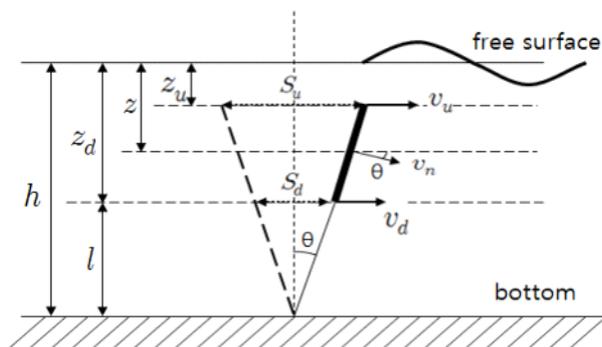


Fig. 1 Horizontally oscillating submerged wave board

유체 영역에서 속도 포텐셜은 식 (1)로 표현되는 라플라스 방정식을 만족하여야 한다.

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

속도포텐셜은 조파수조 바닥에서 식 (2)를 만족하여야 한다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, \text{ at } z = -h \quad (2)$$

또한, 자유수면, $z = \eta$ 에서는 식 (3), (4)를 만족해야한다.

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

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

위의 식 (3)과 식 (4)에서 자유수면의 높이가 작다고 가정하여 자유표면 경계조건을 선형화 시키면 식 (5)가 얻어진다 (Krogstad & Arntsen, 2000).

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, \text{ on } z = 0 \quad (5)$$

2.2 수중에서 수평방향으로 동요하는 조파판의 경계조건

수중에서 조파판이 수평방향으로 왕복 조화운동을 하는 경우를 생각하자. 조파판의 상단은 수면으로부터 z_u 만큼 잠겨 있고, 조파판 상단과 하단의 스트로크를 각각 S_u , S_d 라 하고 상단 및 하단의 동요 주파수를 각각 σ_u , σ_d 라 할 때 수평방향 속도는 식 (6)으로 표시할 수 있다고 하자.

$$v_u = \frac{d \left[\frac{S_u}{2} \sin(\sigma_u t + \alpha) \right]}{dt} = \frac{S_u}{2} \sigma_u \cos(\sigma_u t + \alpha) \quad (6)$$

그리고 조파판의 하단은 수면으로부터 z_d 만큼 잠겨 있으며 수평방향 속도 성분은 식 (7)로 표시 할 수 있다고 하자.

$$v_d = \frac{d \left[\frac{S_d}{2} \sin(\sigma_d t + \beta) \right]}{dt} = \frac{S_d}{2} \sigma_d \cos(\sigma_d t + \beta) \quad (7)$$

만일 조파판의 상단과 하단의 스트로크는 다르지만 주기는 같고 위상차가 없을 때를 생각하면, 즉 $S_u \neq S_d$, $\sigma = \sigma_u = \sigma_d$, 그리고 $\alpha = \beta = 0$ 인 관계가 성립한다. 이때 조파판의 시간에 따른 경사각 θ 는 식 (8)의 관계를 가진다.

$$\tan \theta = \frac{1}{2} \frac{S_u - S_d}{z_u - z_d} \sigma \cos \sigma t \quad (8)$$

따라서 수중에 깊이 z 만큼 잠긴 위치에서 조파판의 경사각이 작아 v_n 이 수평방향 속도와 같다고 가정하면 v_n 은 근사적으로 식 (9)와 같이 표현 할 수 있다.

$$v_n = \frac{1}{2} \left(S_u \frac{z - z_d}{z_u - z_d} + S_d \frac{z_u - z}{z_u - z_d} \right) \sigma \cos \sigma t \quad (9)$$

따라서 Fig. 1 과 같이 수중에 잠긴 조파판이 수평방향으로 동요를 일으키면 그로 인한 경계조건은 식 (10)으로 표현된다.

$-z_u > z > -z_d$ 일 때

$$v_n = \frac{1}{2} \left(S_u \frac{z - z_d}{z_u - z_d} + S_d \frac{z_u - z}{z_u - z_d} \right) \sigma \cos \sigma t \quad (10)$$

2.3 조파판 운동에 대한 일차 근사해

위의 경계조건을 만족하는 조파판의 수중운동에 대한 속도 포텐셜은 이미 오래전에 소개된 바 있는 해법에 따라 구할 수 있다. 일차 근사 해에는 조파판으로부터 떨어지면 바로 소멸되는 항이 포함되지만 이를 무시하고 해양파를 나타내는 진행파의 성분을 구할 수 있다 (Hughes, 1993).

해를 구하면 조파판의 운동으로 얻어지는 진행파는 식 (11)로 표시 할 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} \eta(x, t) &= \frac{A\sigma}{g} \cosh kh \cos(kx - \sigma t) \\ &= \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) \end{aligned} \quad (11)$$

여기서,

$$H = \frac{2A\sigma}{g} \cosh kh \quad (12)$$

유한수심에서 파는 식 (13)의 분산관계식을 만족하여야 한다.

$$\sigma^2 = gk \tanh kh \quad (13)$$

Fig. 1에 보인 바와 같이 수면 아래에 잠겨있는 조파판에 의해 발생하는 파의 파고는 식 (12)와 식 (13)의 관계식을 사용하고 복잡한 연산 과정을 거쳐서 정리하면 식 (14)로 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} H &= \frac{4 \sinh kh}{(\sinh 2kh + 2kh)} \times \\ &\left(-S_u \sinh k(z_u - h) + S_d \sinh k(z_d - h) \right. \\ &\left. + (S_u - S_d) \frac{\cosh k(z_d - h) - \cosh k(z_u - h)}{k(z_d - z_u)} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

식 (14)로 얻어진 해는 Fig. 1에 보인 바와 같이 조파판이 깊이 z_u 로부터 z_d 까지 잠겨 있으며 상단과 하단이 서로 다른 스트로크로 운동하고 있는 일반적인 경우에 대한 해이다.

이 조파판을 구동하여 얻어지는 발생파의 파고-스트로크 비는 상단의 스트로크, S_u , 를 사용하여 식 (15)로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{H}{S_u} &= \frac{4 \sinh kh}{(\sinh 2kh + 2kh)} \times \\ &\left(-\sinh k(z_u - h) + \frac{S_d}{S_u} \sinh k(z_d - h) \right. \\ &\left. + (1 - \frac{S_d}{S_u}) \frac{\cosh k(z_d - h) - \cosh k(z_u - h)}{k(z_d - z_u)} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

조파판의 한쪽 면에만 물이 있을 때 조파판에 작용하는 압력의 일차 근사해는 다음과 같다.

$$p_0(z, t) = \rho A \sigma \cosh [k(h + z)] \cos \sigma t \quad (16)$$

이 때 조파판의 단위 폭당 작용하는 힘은 식 (16)의 압력을 적분하여 힘을 계산할 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned} F_{T_0} &= \int_{-z_d}^{-z_u} p_0(z, t) dz \\ &= \int_{-z_d}^{-z_u} [\rho \sigma A \cosh [k(h + z)]] \cos \sigma t dz \end{aligned} \quad (17)$$

여기서 조파판의 양쪽 면에 모두 물이 접촉해 있을 때는 식 (16)의 압력을 조파판 양쪽면 모두에 적용하여 (17)식의 적분을 수행하면 에 2를 곱해준 결과로 나타나게 된다.

식 (12)를 사용하여 A 의 관계식을 구한 후 식 (17)에 적용하면 조파판의 한쪽 면에만 물이 있을 때 2차원 조파판에 작용하는 힘은 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} A &= \frac{gH}{2\sigma \cosh kh} \\ &= \frac{g}{\sigma} \times \frac{2 \tanh kh}{(\sinh 2kh + 2kh)} \times \\ &\left(-S_u \sinh k(z_u - h) + S_d \sinh k(z_d - h) \right. \\ &\left. + (S_u - S_d) \frac{\cosh k(z_d - h) - \cosh k(z_u - h)}{k(z_d - z_u)} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

$$F_{T_0} = \frac{A\rho\sigma}{k} (\sinh k(z_d - h) - \sinh k(z_u - h)) \cos \sigma t \quad (19)$$

조파판의 한쪽 면에만 물이 있을 때 조파판에 작용하는 동력은 다음 식으로 계산 가능하다.

$$\begin{aligned} Power(t) &= \int_{-z_d}^{-z_u} p_0(z, t) v_n(z, t) dz \\ &= \int_{-z_d}^{-z_u} \frac{\rho A \sigma^2}{2} \cosh k(h + z) \\ &\left(S_u \frac{z_d - z}{z_d - z_u} + S_d \frac{z - z_u}{z_d - z_u} \right) \cos^2 \sigma t dz \end{aligned} \quad (20)$$

파도 한 주기에 대한 식 (20)의 평균 동력 계산식은 다음과 같다.

$$P_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} Power(t) dt \quad (21)$$

식 (21)에 식 (20)을 대입하여 정리하면 다음 식을 얻는다.

식 (22)의 최종식 첫 항은 상하 스트로크가 같은 피스톤식 조파기에서 0이 되므로 이 항은 플랩 조파기의 영향을 나타내는 항이 되고 마지막 항은 피스톤 조파기에 의한 항이 되는 것을 알 수 있다.

$$P_0 = \frac{1}{2} \int_{-z_d}^{-z_u} \frac{\rho A \sigma^2}{2} \cosh k(h+z) \left(S_u \frac{z_d-z}{z_d-z_u} + S_d \frac{z-z_u}{z_d-z_u} \right) dz$$

$$= \frac{\rho A \sigma^2}{4} \times \left((S_u - S_d) \left[\frac{z_u \sinh k(z_u - h)}{k} - \frac{z_d \sinh k(z_d - h)}{k} + \frac{\cosh k(z_d - h)}{k^2} - \frac{\cosh k(z_u - h)}{k^2} \right] + (S_u z_d - S_d z_u) \left(\frac{\sinh k(z_d - h)}{k} - \frac{\sinh k(z_u - h)}{k} \right) \right) \quad (22)$$

3. 조파판 운동에 대한 이론해의 검토

앞에서 식 (11)로 구하여진 이론 해는 Fig. 1에 주어진 것과 같이 수중에 잠겨있는 2차원 조파판이 수평방향으로 동요하는 경우에 대한 일차 근사해이다. 조파판이 수면 밖으로 노출되어 있는 경우에도 이론해석에서는 자유수면 이하의 부분만을 생각하게 된다. 따라서 생각하는 문제에서는 조파판의 상단은 자유수면에 일치하는 경우까지 확장이 가능하고 조파판의 하단은 생각하는 유체영역에서 최대수심까지 확장이 가능하다. 이론해를 구한 조건은 조파판의 상단과 하단의 동요 스트로크가 다르고 동요주기는 동일한 상태이며 위상차가 없는 경우가 된다. 선형시험수조와 같은 시설은 비교적 수심이 깊기 때문에 사용하고 있는 조파기는 수면으로부터 일정한 깊이까지 조파판이 존재하는 경우에 대하여 취급하고 있다. 따라서 일반적으로 조파기 설계에 활용할 수 있는 문제를 검토하여 보기로 한다.

3.1 수면 근처에서 운동하는 조파판에 대한 이론 해

Fig. 2에 보인 바와 같이 조파판의 상단은 수면에 이르고 하단은 수조의 일정한 깊이 z_d 까지 잠긴 경우를 생각하자. 이때 발생하는 파고는 식 (14)에 $z_u = 0, z_d = h - l$ 을 대입하여 정리하면 다음 관계식을 얻을 수 있다.

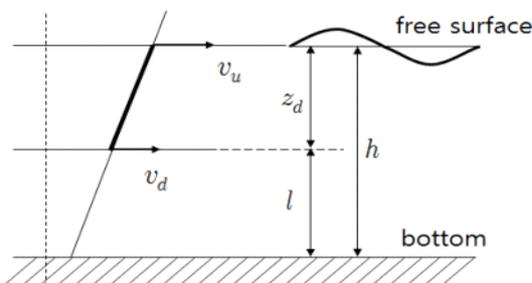


Fig. 2 Partly submerged wave board

$$H = \frac{4 \sinh kh}{(\sinh 2kh + 2kh)} \left((S_u \sinh kh - S_d \sinh kl) + (S_u - S_d) \left(\frac{\cosh kl - \cosh kh}{k(h-l)} \right) \right) \quad (23)$$

조파판의 수면위치와 조파판 하단이 서로 다른 스트로크로 운동할 때 얻어지는 파고와 수면 상의 스트로크 사이에는 식 (24)의 관계가 있다.

$$\frac{H}{S_u} = \frac{4 \sinh kh}{(\sinh 2kh + 2kh)} \times \left(\sinh kh - \frac{S_d}{S_u} \sinh kl + \left(1 - \frac{S_d}{S_u} \right) \frac{\cosh kl - \cosh kh}{k(h-l)} \right) \quad (24)$$

3.2 하단 플랩형 조파판의 운동에 대한 이론 해

Fig. 3에 보인 바와 같이 자유수면에 놓인 힌지로부터 아래로 매달린 조파판의 하단이 왕복운동을 일으키는 조파판 문제를 생각하면, 앞절에서 주어진 조파판 상단의 스트로크가 0인 경우에 해당한다. 즉, $z_u = 0, z_d = h - l, S_u = 0$ 의 관계가 있으므로 파고는 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$H = - \frac{4 \sinh kh}{(\sinh 2kh + 2kh)} \times S_d \left(\sinh kl + \frac{\cosh kl - \cosh kh}{k(h-l)} \right) \quad (25)$$

그리고 이 조파판이 발생시키는 파고와 하단 스트로크 사이에는 식 (25)의 관계가 주어진다.

$$\frac{H}{S_d} = - \frac{4 \sinh kh}{(\sinh 2kh + 2kh)} \times \left(\sinh kl + \frac{\cosh kl - \cosh kh}{k(h-l)} \right) \quad (26)$$

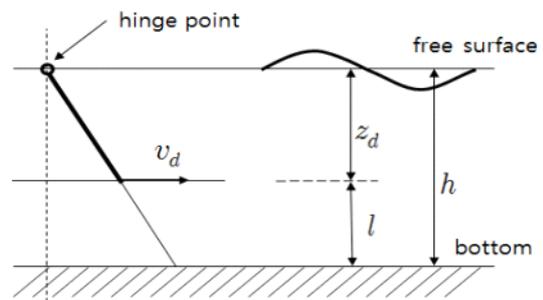


Fig. 3 Submerged wave board hinged at free surface

3.3 상단 플랩형 조파판의 운동에 대한 이론 해

다음에는 Fig. 4에 보인 바와 같이 조파판의 하단이 힌지가 되어 하단의 스트로크가 0인 경우, 즉 $z_u = 0, z_d = h - l, S_d = 0$ 이고 조파판이 수면 상에서 스트로크 S_u 로 왕복 운동을 하는 조파판의 문제는 다음 관계식이 얻어진다.

$$H = \frac{4 \sinh kh}{(\sinh 2kh + 2kh)} \times S_u \left(\sinh kh + \frac{\cosh kl - \cosh kh}{k(h-l)} \right) \quad (27)$$

식 (27)을 사용하면 발생파고와 스트로크 사이에 식 (28)이 성립된다.

$$\frac{H}{S_u} = \frac{4 \sinh kh}{(\sinh 2kh + 2kh)} \times \left(\sinh kh + \frac{\cosh kl - \cosh kh}{k(h-l)} \right) \quad (28)$$

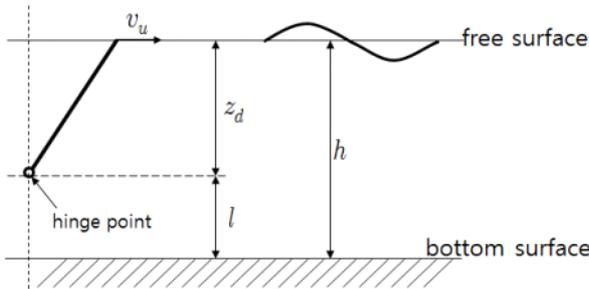


Fig. 4 Partly submerged lower end hinged wave board

이 문제는 Fig. 4와 같이 수심이 깊은 수조에서 흔히 사용되는 플랩형 조파기의 문제에 해당하고, 이결과는 Hyun (1976)의 결과와 일치한다.

그리고 Fig. 5에 보인 바와 같이 조파판의 하단이 수조 바닥과 일치하는 플랩형 조파기로 확장하면 $S_d = 0$, $z_d = h$, $l = 0$ 가 되어 다음의 관계를 구할 수 있다.

$$H = \frac{4 \sinh kh}{(\sinh 2kh + 2kh)} \times S_u \left(\sinh kh + \frac{1 - \cosh kh}{kh} \right) \quad (29)$$

이때 발생파의 파고와 스트로크 사이에는 식 (30)의 관계가 얻어지고 이는 Takezawa (1980), Dean and Dalrymple (1991), Liao and Roddier (1998) 등 에 소개된 해석해와 일치 한다.

$$\frac{H}{S_u} = \frac{4 \sinh kh}{(\sinh 2kh + 2kh)} \times \left(\sinh kh + \frac{1 - \cosh kh}{kh} \right) \quad (30)$$

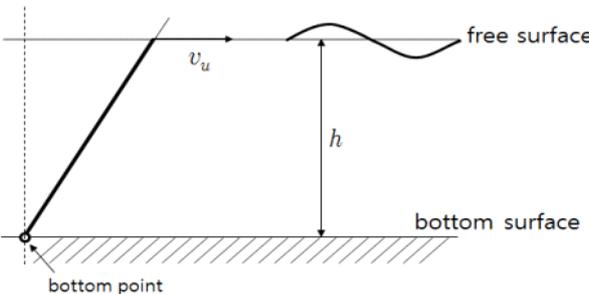


Fig. 5 Fully submerged bottom hinged wave board

3.4 피스톤형 조파판의 운동에 대한 이론해

Fig. 6에 보인 바와 같이 물에 잠겨있는 조파판의 상단 부분의 스트로크와 하단의 스트로크가 같은 상태로 동조 운전이 이루어진다고 생각하자. 조파판이 $0 > z > l-h$ 의 구간에 존재하는 피스톤형 조파기의 운동을 일으키는 경우로 $S_u = S_d = S$ 의 관계가 성립한다. 따라서 식 (14) ~ (15)는 다음 식으로 나타낼 수 있게 된다 (Dean & Dalrymple, 1991).

$$H = \frac{4 \sinh kh}{(\sinh 2kh + 2kh)} \times S_u (\sinh kh + \sinh kl) \quad (31)$$

$$\frac{H}{S_u} = \frac{4 \sinh kh}{(\sinh 2kh + 2kh)} \times (\sinh kh + \sinh kl) \quad (32)$$

이 해의 특수한 경우로 Fig. 6의 우측 그림에 해당하는 $l = 0$ 인 경우를 생각하면 이는 조파수조 깊이 전체에 걸쳐 조파판이 피스톤 운동을 일으키는 경우로 생각할 수 있어 식 (33)으로 표시되고, 이는 Hughes (1993)에 주어진 결과와 같은 것을 확인 할 수 있다. 그리고 파고와 스트로크 사이에는 식 (34)의 관계가 성립한다.

$$H = \frac{4 S_u \sinh^2 kh}{(\sinh 2kh + 2kh)} \quad (33)$$

$$\frac{H}{S} = \frac{4 \sinh^2 kh}{(\sinh 2kh + 2kh)} \quad (34)$$

이들의 경우를 조파판의 운동을 그림으로 나타내면 Fig. 6과 같다. 즉 Fig. 6의 좌측은 식 (31) 과 식 (32)로 표시된 것으로 수직인 조파판의 상하부분이 같은 속도로 왕복 운동을 하는 것을 나타낸다. 이에 대하여 우측 부분은 수심 전체에 걸쳐서 조파판이 식 (33)과 식 (34)에 따라서 왕복운동을 일으키는 것을 나타내고 있다.

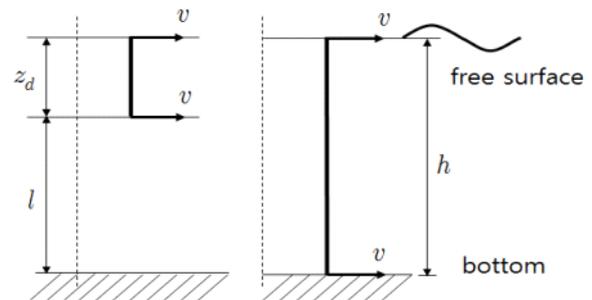


Fig. 6 Partial and whole depth piston type wave board

4. 조파기 설계에서 이론해의 응용

이론 해의 특수한 경우들을 별도의 방법에 의하여 구하여진 경우들과 비교하여 동일한 결과가 얻어지는 것을 확인하였다. 얻어진 이론 해는 선형 근사해로 원칙적으로 선형 중첩이 가능

하다. 따라서 조파기의 기본 유형이 되는 경우로 조파판 요소가 수평왕복하는 피스톤운동을 일으키는 경우와 플랩 운동을 일으키는 경우에 대하여 수치 계산을 수행하였다. 동시에 이론해의 선형 중첩으로도 동일한 결과가 얻어질 수 있음을 보이기 위하여 조파판을 두 개의 요소로 분할하고 두 개의 조파판의 운동으로 얻어지는 결과를 중첩함으로써도 동일한 결과를 얻을 수 있음을 보이고자 한다.

수치계산은 수심이 1.5m인 수조의 수조 깊이 전체에 걸쳐서 설치된 i)피스톤형, ii)플랩형 조파판 운동에 대하여 계산을 수행하였다. 그리고 조파판이 0.95m 깊이까지 잠겨있는 iii)상단 플랩형 조파판에 대해 수치계산을 수행하였다. 조파판의 스트로크는 모두 동일한 0.4m에 대해 계산을 수행하였고, 상부 플랩형은 수면 하 0.95m에 힌지가 설치된 것으로 가정하였다.

본 논문에서는 얻어진 이론해가 임의의 깊이에 잠겨진 2차원 판 요소의 동일한 주기로 규칙적인 왕복 운동을 하고 있으나 상단과 하단이 수평방향의 진폭은 서로 다른 경우에 대한 일반해이다. 따라서 이들 해는 하나의 조파판을 하나의 2차원 판 요소로 보아 계산이 가능하다. 하지만 판 요소가 두 개의 요소로 분할되어 있는 경우를 생각하고 각각의 판 요소에 대하여 별도로 계산하고 각각의 결과로부터 그들을 중첩하였을 때 동일한 결과가 얻어지는 것을 보이고자 하였다.

수치계산은 앞에서 언급한 i)피스톤형, ii) 플랩형 그리고 수면 근처에 설치된 iii) 상부 플랩형 조파판에 대하여 수행하였으며 이들 각각은 다시 상부와 하부로 등 분할한 후 각각에 대하여 별도 계산을 수행하였다. 이들 경우는 Fig. 7과 같이 나타낼 수 있으며 이들 계산에서는 Table 1 에 보인 것과 같이 수치계산에 변수를 설정하였다.

각각의 조파판에 대하여 주어진 파고와 스트로크의 비 H/S 를 계산하였으며 파고는 Hughes (1993)에 의해 제안된 쇄파 기준인 $0.142 \times \lambda$ 또는 $0.78 \times h$ 보다 작은 경우에만 유효한 파가 발생되는 것으로 판단하였다.

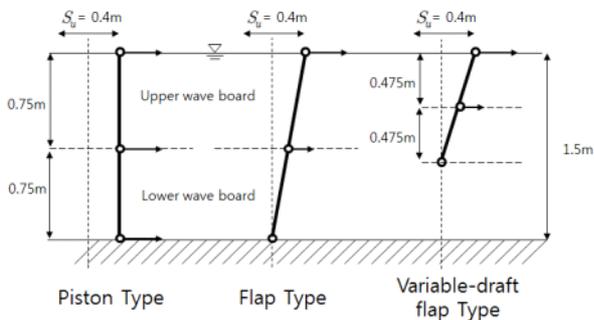


Fig. 7 Examples of wave maker for numerical computation

Fig. 8은 피스톤형 조파판의 파고-스트로크 비와 파 주기의 관계를 나타내었다. 피스톤형 조파판을 상부조파판과 하부 조파판으로 나누었으므로 각각의 조파판에 의해 얻어지는 H/S_u 의 특성을 확인할 수 있다. 그림으로부터 상부 조파판의 영향이 두드러지게 나타나며, 특히 파 주기가 짧을 때에는 상부 조파판이

조파현상을 지배하는 것을 알 수 있다. 그리고 당연한 결과이지만 상부조파판과 하부 조파판의 영향을 합쳐주면 하나의 조파판으로 이루어진 경우와 동일한 결과로 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Table 1 Input data for numerical computations

	Z_u	Z_d	S_u	S_d
Piston type	0.0	0.75	0.4	0.4
	0.75	1.5	0.4	0.4
Flap type	0.0	0.75	0.4	0.2
	0.75	1.5	0.2	0.0
Variable-draft flap type	0.0	0.475	0.4	0.2
	0.475	0.95	0.2	0.0

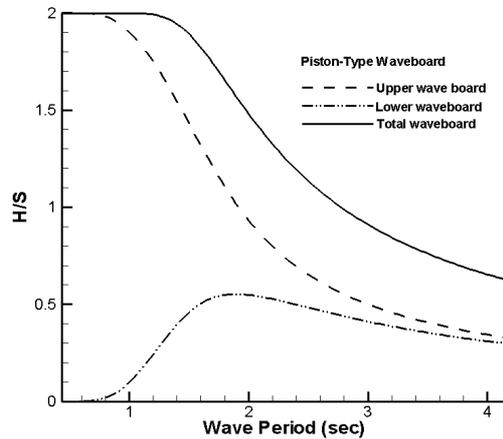


Fig. 8 Wave height-to-stroke ratio for piston-type wavemaker (2 segments)

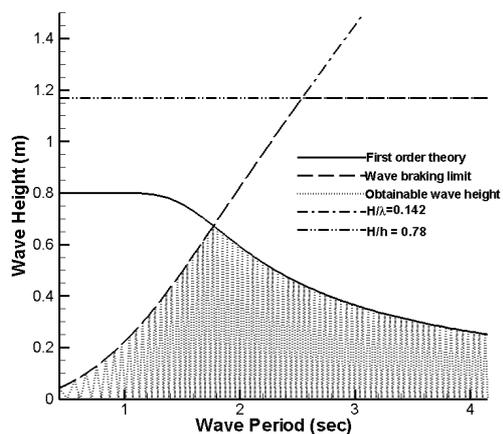


Fig. 9 Maximum wave height obtainable by piston-type wavemaker

Fig. 9에는 쇄파 현상을 피하며 발생 가능한 파고를 표기하였는데 쇄파현상 발생 조건을 함께 도시하였다. 짧은 파 주기에서는 선형 파 이론에 따라 발생하는 파고는 쇄파 현상을 피해야 하는 조건으로 인해 발생파고가 일부 제한되는 것을 알 수 있다.

다른 한편으로 쇄파 현상은 수심의 영향을 받게 되는데 파 주기가 길어지면서 선형이론에 의한 파고는 작아지고 있어서 예제로 계산한 수심조건에서는 쇄파 현상이 문제되지 않는 것을 알 수 있고, 이는 Liao and Roddier (1998)와 일치하는 결과이다.

Fig. 10은 수조수심 전체에 걸쳐 설치된 플랩형 조파판에서 얻어지는 파고-스트로크 비와 파 주기의 관계를 나타낸 것이다. 피스톤형 조파판인 경우와 마찬가지로 조파판을 상부 조파판과 하부 조파판으로 나누어주고 각각의 조파판으로 인하여 발생하는 파의 성분을 알아보고자 하였다. 상부 플랩의 운동조건을 살펴보면 하부 플랩에 비하여 운동량이 크다는 것을 알 수 있다. 파도 중에서의 유체 입자의 궤도 운동속도 조건을 함께 고려하면 상부 플랩의 영향이 더욱 두드러지는 것은 당연하다고 보인다.

Fig. 11은 플랩형 조파판에 의하여 쇄파 현상을 피하며 발생시킬 수 있는 발생 가능 파고와 파 주기의 관계를 나타낸 것이다. 플랩형 조파판도 피스톤 조파판과 마찬가지로 파주기가 작은 경우에는 쇄파현상의 발생으로 파고의 제한을 받게 되는 것을 알 수 있다. 파주기가 커지면 쇄파 현상은 수심의 영향을 받게 되고 파고가 제한되지만 계산된 예에서는 수심의 영향보다는 선형이론에

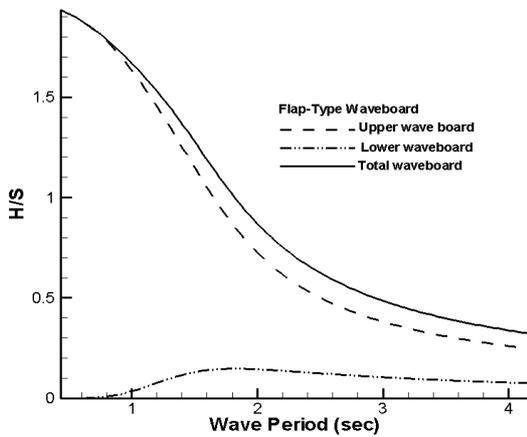


Fig. 10 Wave height-to-stroke ratio for flap-type wavemaker (2 segments)

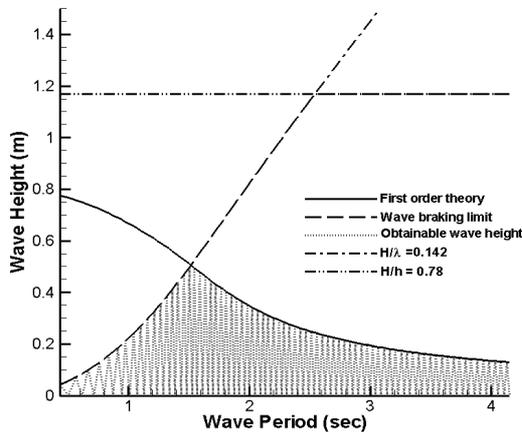


Fig. 11 Maximum wave height obtainable by flap-type wavemaker

의하여 파고가 지배되는 것으로 나타났다. 한편으로 피스톤형과 플랩형 조파판의 발생파를 조사해보면 피스톤형의 파고가 보다 높은 것으로 나타나 있다. 그러나, 두 조파판이 최대 스트로크가 동일하다는 제한 조건상에서의 문제점으로 정당하게 비교하기 위하여서는 동일 파고를 발생시키는데 필요한 동력을 기준으로 비교하는 것이 필요하다고 생각된다.

Fig. 12와 Fig. 13은 한지점의 위치가 수면으로부터 일정한 깊이까지만 잠겨진 플랩형 조파판에 대해서 파고-스트로크 비와 파 주기의 관계를 나타낸 것이다. 이는 앞에서 보인 수심전체에 걸쳐서 설치된 피스톤형 조파판이나 플랩형 조파판인 경우와 동일한 모양을 보이고 있다. 또 상부 플랩과 하부 플랩으로 나누어 각각의 해석 결과를 중첩시킨 결과가 당연히 전체의 결과와 동일하게 된다는 기본적인 특성도 동일하게 입증되고 있음을 알 수 있다.

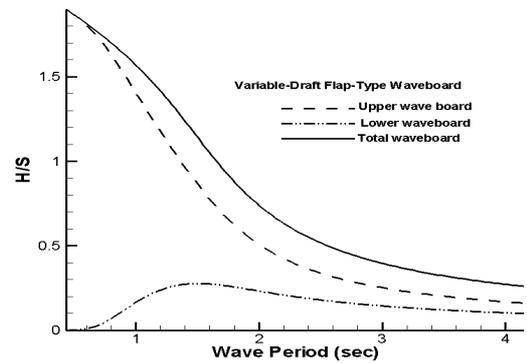


Fig. 12 Wave height-to-stroke ratio for partial-draft flap-type wavemaker(2 segments)

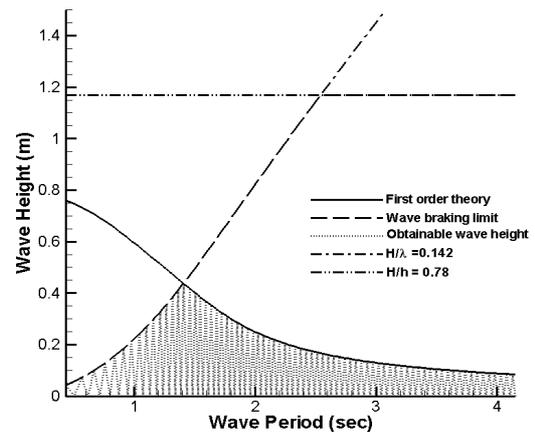


Fig. 13 Maximum capability of a variable-draft flap-type wavemaker

Fig. 14는 앞에서 언급한 i) 피스톤형, ii) 플랩형 그리고 수면 근처에 설치된 iii) 상부 플랩형 조파판에 대하여 Table 1에 주어진 계산 조건에서 얻어진 파고-스트로크 비와 파 주기 관계를 하나의 그래프로 표현한 것이다. 이 결과만을 보면, 동일한 스트로크로 운전하는 경우 피스톤형 조파판이 파고 발생 측면에서 가장 유리한 것으로 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 15에서는 앞에서 주어진 세 가지 조파판을 구동하는데 소요되는 동력을 식 (22)를 사용하여 계산하고 $\rho gh_u S_u^2 / T$ 로 무차원화 하여 나타낸 것이다. 모든 조파판에서 주기가 증가함에 따라 소요동력이 증가하다가 특정 주파수대에서 최대값을 가지게 되고, 이어서 소요동력이 줄어드는 것을 확인 할 수 있다. 피스톤형 조파판인 경우를 살펴보면 동일한 스트로크인 경우를 기준으로 하였을 때 파고를 얻는 데는 유리하였지만, 소요 동력을 기준으로하면 플랩형 조파판인 경우에 비하여 매우 큰 동력을 소모하여야 하는 것으로 나타나고 있다. 따라서 조파장치를 설계함에 있어서는 발생파의 파고를 우선 고려할 것인지 또는 소요 동력을 함께 고려할 것인지를 미리 판단하는 것이 필요하다고 생각된다.

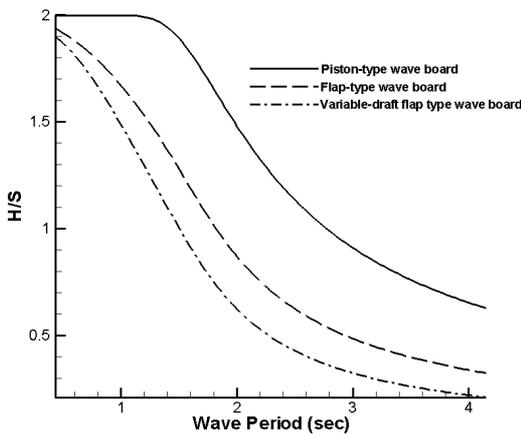


Fig. 14 Comparisons of wave height-to-stroke ratio for various type of wave board

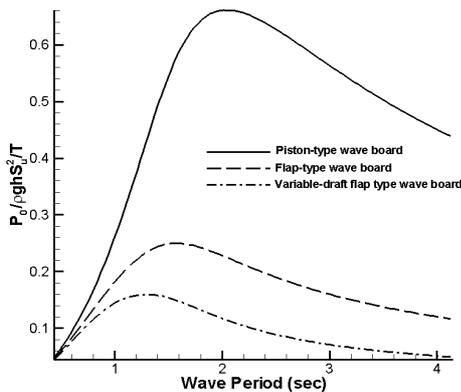


Fig. 15 Dimensionless mean wave power for various type of wave board

5. 결 언

임의의 깊이에 잠겨있는 2차원 평판 요소가 수평방향으로 주기적인 왕복운동을 하는 경우의 유동을 라플라스 방정식으로 정식화하고 섭동해석법을 적용하여 1차 근사해를 구하였다. 얻어진

이론해는 수중에 잠겨있는 평판요소의 주기적 운동에 관한 선형 해에 해당한다. 판 요소의 상단과 하단의 위치를 임의로 지정할 수 있을 뿐 아니라 상단과 하단의 운동을 지정하기에 따라서 다양한 판의 운동을 모사할 수 있다. 따라서 본 연구에서 도출된 해를 이용하면 입력 자료만을 바꾸어 줌으로써 본문에서 예시한 것과 같이 피스톤형이나 플랩형 조파판 전체 또는 일부분이 수중에 잠겨 있거나 수면을 관통하는 모든 경우를 모사할 수 있을 뿐 아니라 힌지점의 위치의 영향에 대하여도 적용이 가능한 일반 해로써 공학적 가치가 매우 높다. 본질적으로 선형해는 중첩이 가능하다는 특징을 가지고 있으므로 수치 계산을 통하여 이론해석이 불가능하다고 생각되는 다양한 운동을 일으키는 조파장치의 해석에도 중첩하여 손쉽게 수치적 근사해를 구할 수 있을 것으로 기대된다.

앞으로 다양한 형상의 조파기의 설계와 해석에 연구 결과를 적용해보고, 이를 수치 해석과 실험을 통해 비교 검증해 볼 예정이다.

후 기

본 연구는 2015년도 충남대학교 학술연구비로 수행되었음을 밝힙니다. 또한 본 논문을 발표함에 있어서 공과대학 명예교수의 연구 성과 정량화와 학문수준 제고를 위한 사업으로 지원해주신 서울대학교 공학 연구원에 감사드립니다.

References

Dean, R. G. & Dalrymple, R. A., 1991. *Water wave mechanics for engineers and scientists. Advanced Series on Ocean Engineering - Volume 2*, World Scientific; USA.

Hughes, S. A., 1993. *Physical model and laboratory Techniques in Coastal Engineering. Advanced Series on Ocean Engineering - Volume 7*, World Scientific; USA.

Hyun, J. M., 1976. Theory for hinged wavemakers of finite draft in water of constant depth. *Journal of Hydraulics*, 10(1), pp 2-7.

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.

Krogstad, H.E. & Arntsen, O.A., 2000. *LINEAR wave theory part a regular waves, lecture note*. Norwegian University of Science And Technology: Trondheim, Norway

Kwon, J.O. Kim, H. Lew, J.M. & Ch, J.K., 2017. Analytic solution of oscillating submerged vertical board segment by perturbation method and its characteristics. The Society of Naval Architects of Korea, *Korea Towing Tank Conference Spring Meeting*, Inha University, May 11, 2017.

Liao, S.W. & Roddier, D., 1998. Simulation of breaking waves-theory and experiments. Society of Naval Architects and

Marine Engineers, *Student Paper Presented at the SNAME Northern California Section meeting*, University of California at Berkeley, April 8, 1998.

Takezawa, S., 1980. Waves of the wave basin for the offshore structure experiments(in Japanese). *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 613, pp.376-387.

