

수직 평판 요소의 수중동요 근사해와 설계 적용

오정근¹·김주열¹·김효철²·권종오³·류재문^{3†}
군산대학교 조선해양공학과¹
서울대학교 조선해양공학과·서울대학교 공학연구원²
충남대학교 선박해양공학과³

Approximate Solution of Vertical Wave Board Oscillating in Submerged Condition and Its Design Application

Jungkeun Oh¹·Ju-Yeol Kim¹·Hyochul Kim²·Jongho Kwon³·Jae-Moon Lew^{3†}
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Kunsan National University¹
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University · Institute of Engineering Research²
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam 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.

The segment of the piston type wave board has been expressed as a submerged vertical line segment in the two dimensional wave flume. Either end of vertical line segment representing wave board could be located in fluid domain from free surface to the bottom of the flume. Naturally the segment could be extended from the bottom to the free surface of the flume. It is assumed that the piston motion of the wave board could be defined by the sinusoidal oscillation in horizontal direction. Simplified analytic solution of the submerged segment of wave board has been derived through the first order perturbation method in water of finite depth. The analytic solution has been utilized in expressing the wave generated by the piston type wave board installed on the upper or lower half of the flume. The wave form derived by the analytic solution have been compared with the wave profile obtained through the CFD calculation for the either of the above cases. It is appeared that the wave length and the wave height are coincided each other between analytic solution and CFD calculation. However the wave form obtained by CFD calculations are more closer to real wave form than those from analytic calculation. It is appeared that the linear solutions could be not only superposed by segment but also integrated by finite elements without limitation. Finally it is proven that the wave generated by the oscillation of flap type wave board could be derived by integrating the wave generated by the sinusoidal motion of the finite segment of the piston type wave board.

Keywords : Submerged segment(수중 요소), wave board motion(조파판 운동), approximate solution(근사해), linear superposition(선형 중첩), wave generator design(조파기 설계)

1. 서론

파랑 중에서 운항하는 선박의 파랑 중 운동성능의 중요성을 인식하면서 선박의 파랑 중 운동응답을 실험적으로 확인하기 위하여 실제해역의 파도를 재현하는 문제가 제기되었다(Tanizawa et al., 2011). 초기에는 이론해석에 근거하여 파도를 발생시키기 보다는 물에 규칙적인 교란을 주어 파도를 발생시키려 하였다. 즉, 교란으로 발생된 파도를 계측하여 교란과 파도의 상관관계를 찾

아내어 조파기를 운전하는 경험적 방법이 사용되었다.

파도의 유체 입자 운동에 가까운 교란을 기계장치로 줄 수 있다면 파도를 발생시킬 수 있을 것으로 생각하여 감속기와 연동되는 왕복운동 기구를 고안하는 것이 주된 관심사였다. 하지만, 파도 중에서 유체입자의 속도분포에 대한 정보가 있더라도 파도와 교란사이의 관계를 설명하는 명확한 근거가 없어 경험을 가진 기술자가 직관에 의하여 기구를 설계하여 왔다.

수중에서 왕복 운동을 일으키는 평판 요소가 유체를 교란시켜 수면파를 발생시킬 수 있다면 위와 같은 조파문제를 해결하는 출

발점이 될 것이다. 따라서 임의의 깊이에 잠겨있는 2차원 평판 요소가 수평방향으로 조화왕복 운동할 때의 이론 해를 구하는 것이 중요하다. 이를 위하여 임의의 깊이에 잠긴 2차원 평판 요소가 수평방향으로 조화왕복 운동하는 경우의 유동을 라플라스 방정식으로 정식화하고 섭동해석법으로 풀어 기존의 조파판 문제를 대표할 수 있는 일반해를 제시한 바 있다 (Kwon et al., 2017).

이론해는 선형중첩이 가능하므로 다양한 문제를 해결하는 기본해가 될 것이다. 평판요소를 조파왕복 운동하는 조파기구의 구성요소라고 하면 이론 해를 선형 중첩하여 전체 조파기구 운동의 해를 구할 수 있다. 수중에서 피스톤운동을 일으키는 수직판 요소의 해는 일반적인 조파기 문제를 해석하는 기본 요소가 된다. 기본요소는 조파판을 구성하는 미소 요소라 생각하고 중첩하여 다양한 조파판 문제해석에 효율적으로 사용할 수 있음을 보이기 위하여 전산유체역학문제로 처리하여 비교하였다.

2. 수직판 요소의 수중운동

2.1 수직판 요소의 수중 운동을 지배하는 방정식

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

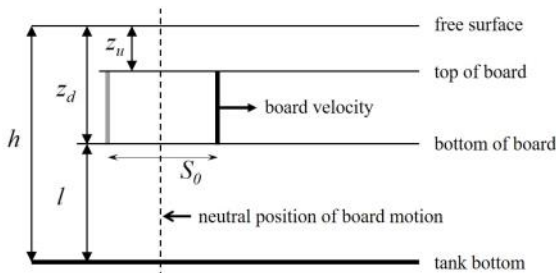


Fig. 1 Horizontally oscillating vertical wave board element

유체 중에 수직판 요소가 수평방향으로 조화왕복운동 할 때 속도 퍼텐셜은 라플라스 방정식, 식 (1)을 만족하여야 한다.

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

속도 퍼텐셜은 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.

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

2.2 수평방향으로 동요하는 수직판 요소의 경계조건

수중에 수직하게 놓인 판이 수평방향으로 왕복 조화운동을 하는 경우를 생각하자. 조파판의 진폭을 $S_0/2$, 수평방향 속도는 식 (6)으로 표시할 수 있다.

$$v_n = \frac{d \left[\frac{S_0}{2} \sin(\sigma t + \alpha) \right]}{dt} = \frac{S_0}{2} \sigma \cos(\sigma t + \alpha) \quad (6)$$

만일 $\alpha = 0$ 인 관계가 성립한다면 수중에 부분적으로 설치된 수직판 요소가 수평방향으로 동요할 때 조파판에서의 수평방향 속도 성분은 다음 식들로 표현된다.

$$0 > z > -z_u \text{ 일 때 } v_n = 0 \quad (7)$$

$$-z_u > z > -z_d \text{ 일 때 } v_n = \frac{S_0}{2} \sigma \cos \sigma t \quad (8)$$

$$-z_d > z > -h \text{ 일 때 } v_n = 0 \quad (9)$$

2.3 조파판 운동에 대한 일차 근사해

위의 경계조건을 만족하면서 위상차를 무시할 수 있다고 하면 Fig. 1에 보인 조파판이 수중에서 주파수 σ 로 동요할 때의 속도 퍼텐셜은 식 (10)과 같이 구할 수 있다 (Hughes, 1993).

$$\phi(x, z, t) = A \cosh[k(h+z)] \sin(kx - \sigma t) + \cos(\sigma t) \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-k_3 x} \cos[k_3(z+h)] \quad (10)$$

여기서 유한수심에서의 주파수(σ), 파수(k, k_3) 및 A 와 C_n 은 다음 식을 만족하여야 한다.

$$\sigma^2 = gk \tanh kh = -gk_3 \tan(k_3 h) \quad (11)$$

$$A = \frac{2\sigma S_0}{k} \frac{[\sinh k(h-z_u) - \sinh k(h-z_d)]}{(\sinh 2kh + 2kh)} \quad (12)$$

$$C_n = -\frac{2\sigma S_0}{k_{3_n} [\sin(2k_{3_n} h) + 2k_{3_n} h]} \times [\sin k_{3_n} (h - z_u) - \sin k_{3_n} (h - z_d)] \quad (13)$$

선형 조파이론으로부터 발생 파의 진폭과, 조파판에 의한 유속은 각각 다음 식으로 계산 된다.

$$\eta(x, t) = \frac{A\sigma}{g} \cosh(kh) \cos(kx - \sigma t) + \sin(\sigma t) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sigma C_n}{g} e^{-k_{3_n} x} \cos(k_{3_n} h) \quad (14)$$

$$u(x, z, t) = \frac{\partial \phi}{\partial x} = Ak \cosh[k(h+z)] \cos(kx - \sigma t) - \cos(\sigma t) \sum_{n=1}^{\infty} C_n k_{3_n} e^{-k_{3_n} x} \cos[k_{3_n} (z+h)] \quad (15)$$

$$v(x, z, t) = \frac{\partial \phi}{\partial x} = Ak \sinh[k(h+z)] \sin(kx - \sigma t) - \cos(\sigma t) \sum_{n=1}^{\infty} C_n k_{3_n} e^{-k_{3_n} x} \sin[k_{3_n} (z+h)] \quad (16)$$

식 (14)의 첫 항은 진행파(progressive wave)를 나타내는 항이고 두 번째 항은 정지파(standing wave)를 나타내는 항이다. 이중 정지파 진폭은 매우 작을 뿐 아니라 가장 영향이 큰 파에 대해서도 조파판으로부터 2h 떨어진 위치에서 96%, 3h 떨어진 곳에서는 99% 수준으로 급격히 감소하므로(Dean and Dalrymple, 1984) 조파문제에서는 무시할 수 있다. 여기서 진폭은 지수함수, $e^{-k_{3_n} x}$, 의 영향으로 급격히 감소하므로 식 (15)와 식 (16)의 유체입자 속도성분도 정지파의 영향은 무시하고 계산한다.

식 (14)에서 정지파를 무시하면 파고는 식 (17)로 계산 된다.

$$H = \frac{2A\sigma}{g} \cosh kh \quad (17)$$

Fig. 1에 보인 수면 아래에 잠겨있는 조파판에 의해 발생하는 파의 파고는 식 (8), 식 (11) 및 식 (17)의 관계식을 사용하여 정리하면 다음 식으로 정리할 수 있다.

$$H = \frac{4S_0 \sinh kh}{(\sinh 2kh + 2kh)} (\sinh k(z_d - h) - \sinh k(z_u - h)) \quad (18)$$

식 (18)로 얻어진 해는 Fig. 1에 보인 수직한 조파판이 깊이 z_u 로부터 z_d 까지 잠겨서 일정한 스트로크로 조화왕복운동을 하는 피스톤식 조파기의 발생 파고이다. 따라서 발생파와 파고-스트로크 비는 식 (19)로 표시 할 수 있으며 이 피스톤 식 조파판 요소의 파고와 스트로크 사이의 전달함수가 된다.

$$\frac{H}{S_0} = \frac{4 \sinh kh}{(\sinh 2kh + 2kh)} (\sinh k(z_d - h) - \sinh k(z_u - h)) \quad (19)$$

2.4 근사해를 이용한 피스톤식 조파기의 해

앞에서 식 (18)로 주어진 파고는 Fig. 1에 보인 바와 같이 수중에 수직하게 잠긴 2차원 판 요소가 수평방향 조화왕복운동에 대한 일차 근사해이다. 조파판이 수면 밖으로 노출되어 있을 때에는 이론해석에서 자유수면 이하의 부분만을 생각하면 된다. 따라서 생각하는 문제에서는 조파판 상단은 자유 수면에 일치할 수 있고 조파판 하단은 생각하는 유체영역의 수조바닥과 같아질 수 있다. 참고로, 수심이 깊은 선형시험수조에서는 수면으로부터 일정한 깊이까지 조파판을 설치하고 있다.

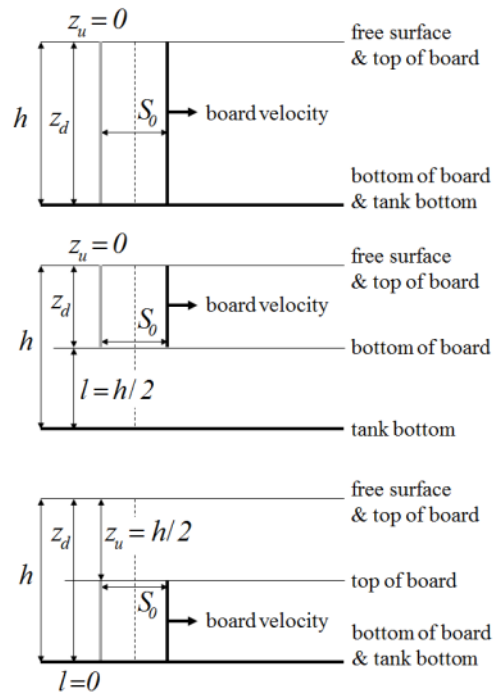


Fig. 2 (a) Whole depth piston type wave board(top), (b) Piston type wave board with freeboard of h/2 (middle), (c) Submerged lower half of Piston type wave board(bottom)

a) 조파판이 수심 전체에 걸쳐있는 경우

수직한 판이 수면으로부터 수조의 바닥까지 설치되어 있으면 $z_u = 0$ 이고 $z_d = h$ 가 되어 Fig. 2(a)와 같이 표시할 수 있다. 그리고 식 (18)과 식 (19)는 식 (20)과 식 (21)로 간단하게 바뀐다.

$$H = \frac{4S_0 \sinh^2 kh}{(\sinh 2kh + 2kh)} \quad (20)$$

$$\frac{H}{S_0} = \frac{4 \sinh^2 kh}{(\sinh 2kh + 2kh)} \quad (21)$$

b) 조파판이 수면에서부터 h/2까지만 있는 경우

Fig. 2(b)와 같이 조파판이 수면에서부터 수심 중간인 h/2까지만 설치되어 있으면 $z_u = 0$ 이고 $z_d = h - l = h/2$ 이므로, 식 (18)과 식 (19)는 각각 식(22)와 식 (23)으로 나타낼 수 있다.

$$H = \frac{4S_0 \sinh kh}{(\sinh 2kh + 2kh)} (\sinh kh - \sinh(kh/2)) \quad (22)$$

$$\frac{H}{S_0} = \frac{4 \sinh kh}{(\sinh 2kh + 2kh)} (\sinh kh - \sinh(kh/2)) \quad (23)$$

c) 조파판이 h/2에서부터 바닥까지 있는 경우

Fig. 2(c)와 조파판이 수심 중간인 h/2에서부터 바닥까지만 설치되어 있으면 $z_u = h/2$ 이고 $z_d = h$ 이므로, 식 (18)과 식 (19)는 각각 식(24)와 식 (25)으로 나타낼 수 있다.

$$H = \frac{4S_0 \sinh kh}{(\sinh 2kh + 2kh)} \cdot \sinh(kh/2) \quad (24)$$

$$\frac{H}{S_0} = \frac{4 \sinh kh}{(\sinh 2kh + 2kh)} \cdot \sinh(kh/2) \quad (25)$$

2.3절과 같이 수심 0.25m, 주기 2초, 스트로크 0.115m 인 경우 파형을 계산하면 Fig. 3과 같다. 즉, 조파판이 수심전체에 걸쳐 설치하였을 때 파는 진폭이 약 30mm이며 이는 피스톤 조파기에 대한 Hughes (1993)의 계산과 동일하다, 조파판이 수면으로부터 수심의 1/2까지만 설치하였을 때 발생파의 진폭은 약 15.5mm이고 수심의 1/2로부터 수조 바닥까지 조파판이 설치하였을 때는 약 14.5mm의 진폭이 형성된다. 이러한 사실은 수중조파판 요소를 선형 중첩하여 다양한 형태의 조파판 문제에 활용할 수 있음을 뜻한다.

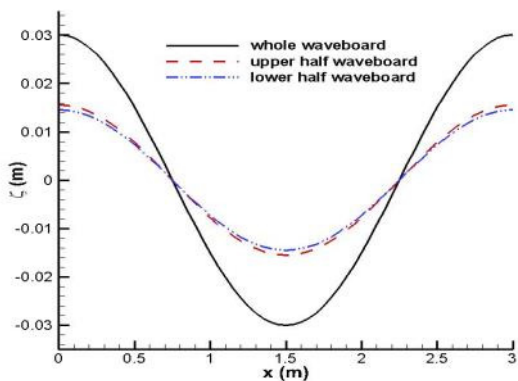


Fig. 3 Wave profiles according to waveboards

3 수직조파판 이론해와 CFD 계산의 비교

3.1 수평동요 판 요소의 CFD 계산방법

수평방향으로 동요하는 조파판 요소 선형근사해와 동일한 조건으로 전산유체역학해석을 수행하였다. CFD 계산에 사용된 코드는 상용코드인 STAR-CCM+이며, 비정상상태 비압축성 점성유동으로 가정하여 계산하였다.

지배방정식으로 식 (26)과 식 (27)에 보인 연속방정식과 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes)방정식을 사용하였다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (26)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j} \right) + \rho g_i \quad (27)$$

여기서, x_i 는 직교좌표계, $u_i = \bar{u}_i + u'_i$ 는 속도성분(\bar{u}_i 는 평균 속도, u'_i 는 변동속도)이며, p 는 압력, ρ 는 밀도, μ 는 점성계수, \bar{g}_i 는 중력가속도이다. 또한, 식(27)의 Reynolds Stress $-\overline{\rho u_i u_j}$ 는 난류 종결을 위해 k-ε model을 사용하였다.

압력-속도 결합방법으로는 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation)을 선택하였으며 시간에 대한 이산화는 2차 음해법을 사용하였다. 또한 대류 항과 확산 항은 2차 상류차분법(upwind differencing scheme)을 사용하였다. 이러한 조건들은 Maguire(2011)의 유사연구를 참고하여 결정하였다.

계산을 위하여 모델링한 수치 수조는 Fig. 3과 같이 깊이를 0.5m로 결정하고 길이는 비정상상태의 해석을 수행하기에 충분하도록 15m로 결정하였다. Fig. 4의 A 부분은 조파판이 놓인 위치 주변을 표시한 것으로, 이어서 설명하는 좌표계를 비롯하여 조파판의 크기, 위치 등을 표현할 때 보이는 부분이다.

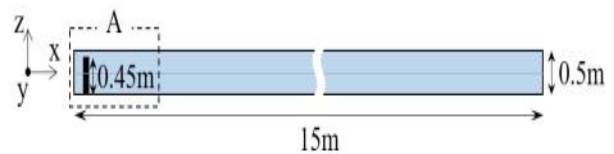


Fig. 4 Computational domain

Fig. 5는 좌표계를 나타낸 것으로 Fig. 5의 A부분만을 표시하였다. 앞에서 소개한 이론해와 동일한 조건으로 계산을 수행하기 위하여 본 연구에서의 수심은 0.25m로 고정하였다. 또한, 본 계산의 주요 목적은 생성되는 수면파이기 때문에 좌표계의 원점은 수조의 왼쪽 끝과 자유수면(free-surface)이 만나는 곳으로 설정하였으며, 오른쪽 방향이 양(+)의 x축, 중력의 반대방향이 양(+)의 z축으로 설정하였다.

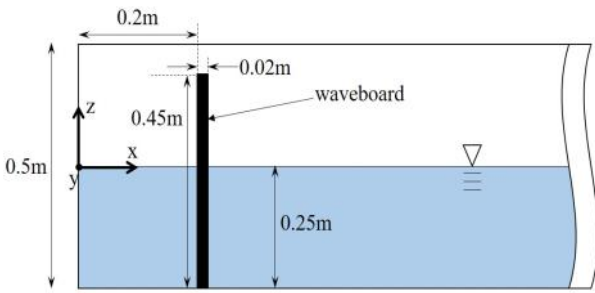


Fig. 5 Coordinate system

3.2 격자계 및 계산 조건

발생되는 파도의 형상을 정확히 나타내기 위하여 정규격자인 트리머 격자(trimmed mesh)를 사용하여 자유수면 근처의 격자를 조밀하게 구성하였다. 계산에 사용할 격자수를 파악하기 위하여 자유수면 근처의 격자만을 변경하여 전체 격자수가 약10만개, 약 30만개, 약85만개인 경우에 대하여 조파기로부터 약 1파장 떨어진 $x=3m$ 에서 파의 움직임을 시간에 따라 확인해 보았으며 Fig. 6에 나타내었다.

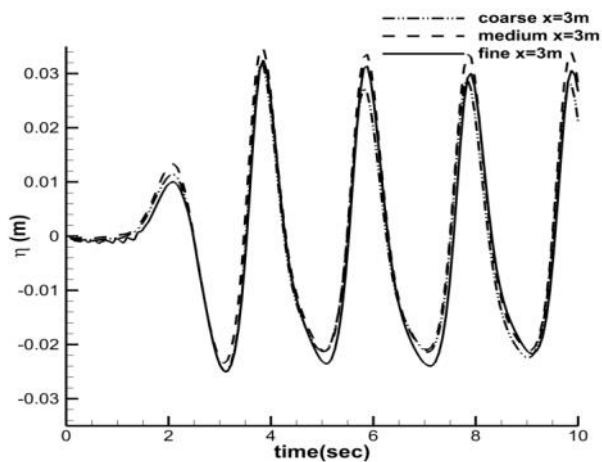


Fig. 6. Wave elevations at $x=3m$ varying mesh size

Fig. 6을 살펴보면 파정과 파저를 이론과 가장 유사하게 모사하면서 시간에 따른 변화가 가장 적은 격자는 가장 조밀한 85만개 격자를 갖는 경우라는 것을 확인할 수 있으며 따라서 본 연구에서는 조밀한 격자계를 이용하여 계산을 수행하였다.

한편, 조파판의 움직임을 모사하기 위하여 overset grid 방법을 적용하였다. 자유수면에 대한 표현의 방법은 Volume Of Fluid (VOF) 방법을 선택해 공기와 물의 경계면을 표현하였다.

경계조건은, Fig. 7과 같이 수치수조의 상부만 pressure outlet으로 설정하였고 나머지 모든 면들은 wall로 설정하였으며 반사파의 영향을 줄이기 위하여 조파기 반대쪽 끝의 3m 구간을 감쇠영역으로 설정하였다.

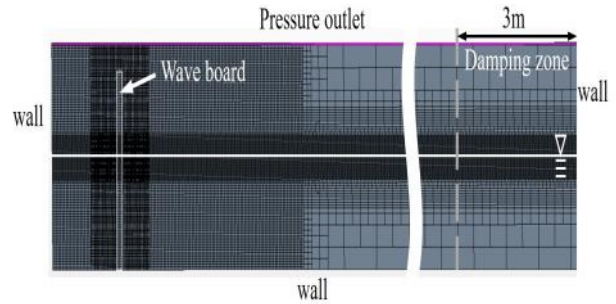


Fig. 7 Grid system for numerical simulation

한편, 수치계산시 시간간격을 결정하기 위해 85만개의 격자에 대하여 시간간격을 다양하게 바꿔가며 계산을 수행하였으며, 그 중에서 대표적인 세 가지의 시간간격에 대해 $x=3m$ 에서의 파의 높이에 대한 계산결과를 Fig. 8에 나타내었다. 계산결과 이론해와 유사한 파정과 파저를 나타내고 시간에 따른 파고의 변화가 가장 작은 결과를 보이는 시간간격은 0.07초로 나타났고, 본 연구에서는 시간간격을 0.07초로 사용하였으며 이 경우 Courant-Friedrichs-Lewy (이하, CFL) 값이 약 80이었다.

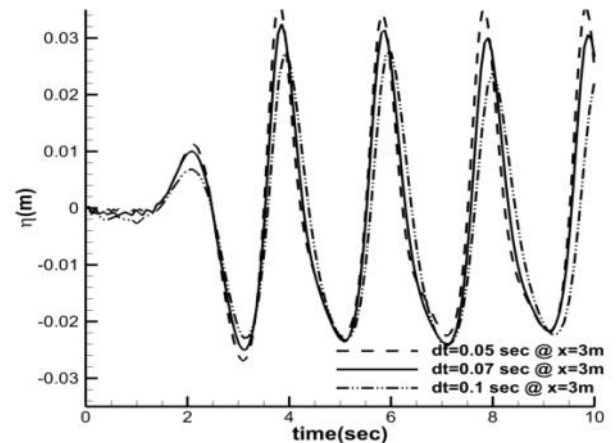


Fig. 8 Wave elevations at $x=3m$ varying d_t

CFL은 식(28)로 계산할 수 있는데 V_x 는 x방향 속도, V_y 는 y방향 속도이며, d_t 는 시간 간격이다. dx 와 dy 는 각각 x방향 격자 크기와 y방향 격자 크기를 의미하며 격자의 크기는 동일하게 적용하였다. 또한 각 경우에 대한 총 계산 시간은 10초로 하였으며 iteration은 10번으로 하였다.

$$CFL = \frac{V_x * d_t}{dx} + \frac{V_y * d_t}{dy} \quad (28)$$

2장에서 소개한 근사해의 선형중첩결과를 CFD를 사용하여 설정할 때와 비교하기 위하여 Fig. 2에서 소개한 선형 근사 해를 이용한 조파판의 크기와 위치가 다른 3가지의 피스톤 식 조파기를 Fig. 9와 같이 모델링하였다. 즉, 조파판이 수조바닥으로부터 자

유수면 위까지 있는 경우, 수면으로부터 수심의 1/2까지 조파판이 잠겨있는 경우, 그리고 수조 바닥으로부터 수심의 1/2까지만 조파판이 있는 경우에 대한 계산을 수행하였다. 파 생성 조건도 근사해 계산의 경우와 동일하게 수심은 0.25m이고, 조파판이 주기 2초, 스트로크 0.115m로 운동할 때를 대상으로 하였다.

Fig. 9(a)는 조파판의 높이를 수조 바닥으로부터 자유수면 위 0.2m 까지 연장하여 파가 조파판을 넘어가지 않도록 하였다. Fig. 9(b)는 조파판이 수심의 중간에서부터 자유수면 위로 연장한 경우이며 수조 중간부터 바닥까지는 wall로 설정하였다. Fig. 9(c)는 조파판이 수심의 중간부터 바닥까지 설치된 경우이며 수중 중간부터 위 쪽으로는 wall로 설정하였다. 즉, (a)는 (b)와 (c)가 합쳐진 경우이다.

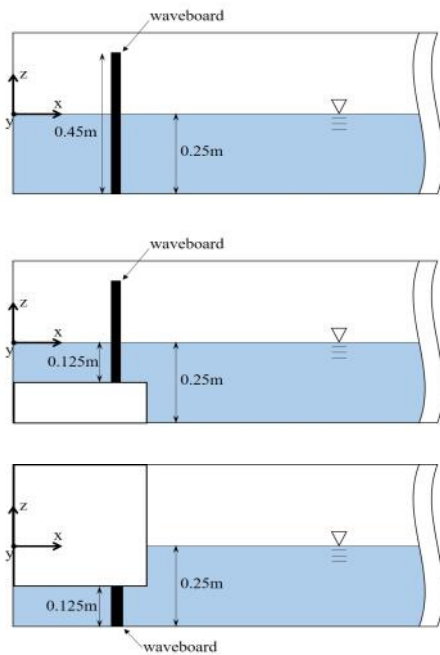


Fig. 9 (a) Whole depth piston type wave board (top) (-0.25m~0.2m), (b) Piston type wave board with freeboard of $h/2$ (middle) (-0.125m~0.2m), (c) Submerged lower half of piston type wave board (bottom) (-0.25m ~ -0.125m)

3.3 수치 해석 결과 및 고찰

수치해석 결과를 선형근사해의 결과와 비교하기 위하여 임의의 순간에 나타나는 파의 형상을 선형근사해와 함께 Figs. 10~12에 표현하였다. 각각의 파 형상은 계산 시작 후 약 7초, x 는 약 2m~5m 정도에 위치한 경우이며 이론해와 비교하기 위하여 처음 위치를 모두 0으로 표시하였다.

조파판이 수면으로부터 수심전체에 걸쳐 있는 Fig. 9(a)일 때 파장은 약 3.01m 이며 파정까지의 높이는 선형근사해의 진폭과 거의 동일한 30.3mm로 나타났다. 그러나 파정까지의 깊이는 22.0mm로서 선형 근사 해에 비하여 약 8mm의 차이가 있다. 파형은 파정까지의 형상과 파저까지의 형상이 기준선에 대하여 비

대칭으로 생성되고 있음을 Fig. 10에서 확인할 수 있다. 특히 생성된 파의 파저에서의 비선형성은 Anbarsooz et al. (2013)의 연구결과와 경향이 유사하다.

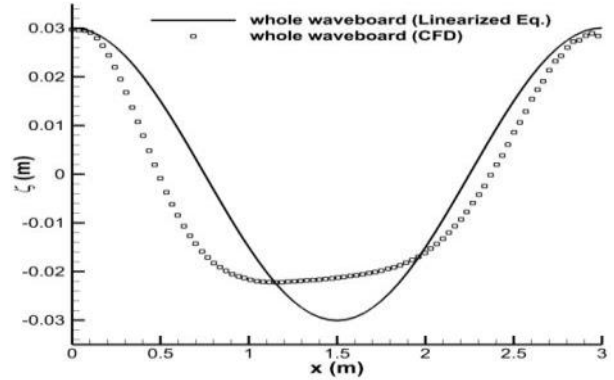


Fig. 10 Wave elevation generated by whole depth wave-board

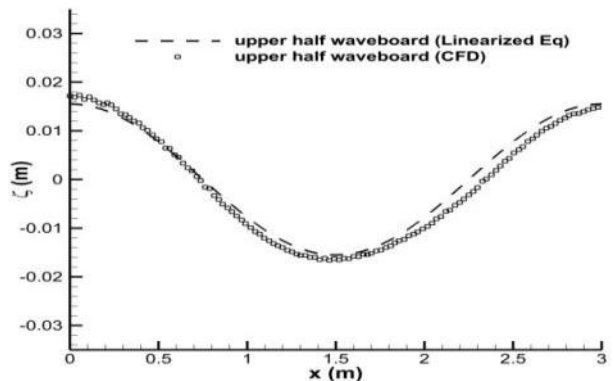


Fig. 11 Wave elevation generated by upper half of wave-board

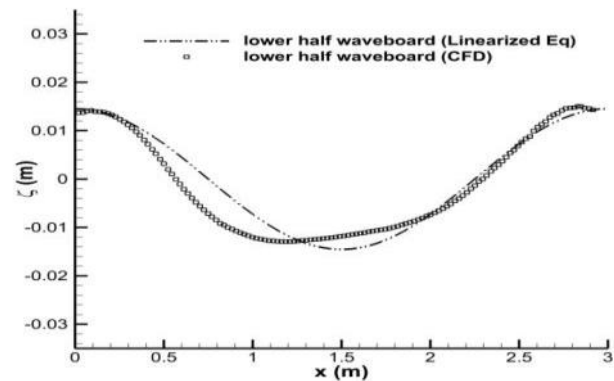


Fig. 12 Wave elevation generated by lower half of wave-board

이러한 결과는 Fig. 9(b)과 Fig. 9(c)에서도 같은 경향이 나타나고 있다. 위쪽에 설치된 조파판이나 아래쪽에 설치된 조파판이 만들어내는 파의 파장은 각각 3.0m, 2.998m로 선형 근사해의 결과와 일치하며 Fig. 9(b)일 때 파정은 약 15.03mm, Fig. 9(c)일 때는 약 14.90mm의 높이를 보이며 이는 근사해의 결과인

15.5mm, 14.5mm와 유사한 결과를 보이고 있다. 그러나 파저의 깊이는 Fig. 9(b) 일 때 약 12.50mm, Fig. 9(c) 일 때 약 11.60mm으로 계산되었다. 이러한 경향은 Fig. 9(a)일 때와 유사하게 비대칭 파가 형성되는 것을 알 수 있으며 Fig. 11와 Fig. 12에서 확인할 수 있다. 이와 같은 결과로부터 바닥에 위치한 조파판이 생성파의 비선형성에 큰 영향을 줄 수 있다는 점을 알 수 있으며 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

전반적으로 파의 파정까지 높이는 선형근사 해와 수치해석 결과가 동일하지만 수치해석일 때는 비대칭 파가 형성되고, 파의 파저까지의 깊이가 선형근사해보다 더 낮게 나타나서 수치해석 결과에 대한 실험검증이 필요하였다. 따라서 피스톤식 조파기를 이용한 실험연구를 수행한 Webster and Kim (1991)의 결과를 참고하였으며 그 결과는 Fig. 13에 보였다.

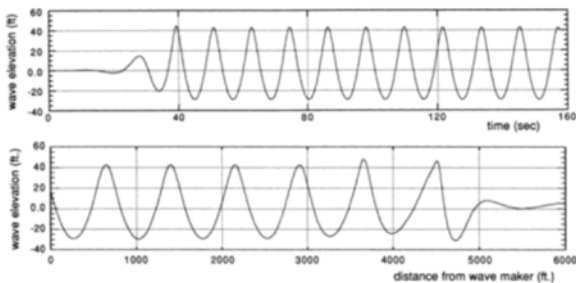


Fig. 13 Wave elevation according to time(upper) and distance(lower) (source: Webster and Kim 1991)

Fig. 13의 상단의 그래프는 시간에 따른 파의 생성에 대해 나타내고 있으며 하단의 그래프는 조파판과 거리에 따른 파의 형상을 나타내고 있다. 시간에 따른 파의 생성과 조파판과의 거리에 따라 파의 형상이 수면에 대하여 비대칭으로 나타나며 또한 파의 안정화 후에도 마루와 골의 크기는 동일하지 않게 나오는 것을 알 수 있다. Webster and Kim (1991)의 실험은 수치계산 조건과 일치하지 않으나 파형이 기준선에 대하여 비대칭이고 파정과 파저의 크기가 다르다는 점은 수치해석 결과와 같은 성질을 가진다고 볼 수 있다.

이상과 같이 수치해석 결과와 선형근사식의 결과가 유사한 성질을 가지고 있어서 선형근사식을 이용하면 두 개 이상의 판 요소로부터 생성되는 파를 예측하여 설계할 수 있음을 확인하였다. 앞으로 동일한 조건에서 실험검증을 수행하여 조파기 설계에 실제 현상을 반영하는 방안을 마련할 예정이다.

4 수직한 판 요소운동의 선형중첩

4.1 수평방향으로 동요하는 판 요소의 선형중첩

앞서 보인 식 (20)~(21)은 선형 해석으로 얻어진 식 (19)의 특수한 경우에 해당하며 Dean and Dalrymple (1984)과 Hughes (1993)에 의하여 얻어진 결과와 일치한다. 이번에는 Fig. 3(a)에 보인 조파판을 10개의 수중에 잠긴 판 요소로 10개의 분할하고

각각의 판 요소에 의해 발생된 파를 계산하고 이들을 하나로 중첩하여 Fig. 14에 도시하였다.

Fig. 14로부터 판 요소의 잠긴 깊이가 깊어질수록 조파 현상에 미치는 영향은 작아지는 것을 확인할 수 있다. 자유수면에 위치한 판 요소를 1번으로 하고, 바닥에 있는 판요소를 10번으로 표시하였다. 이들 10개의 판 요소가 발생시키는 파고를 모두 중첩하면 검은색 점으로 표시되고 하나의 조파판으로 계산한 결과와 일치한다. 이는 선형해석으로 얻어지는 선형 해의 선형 중첩의 결과로서 당연한 결과라 생각된다.

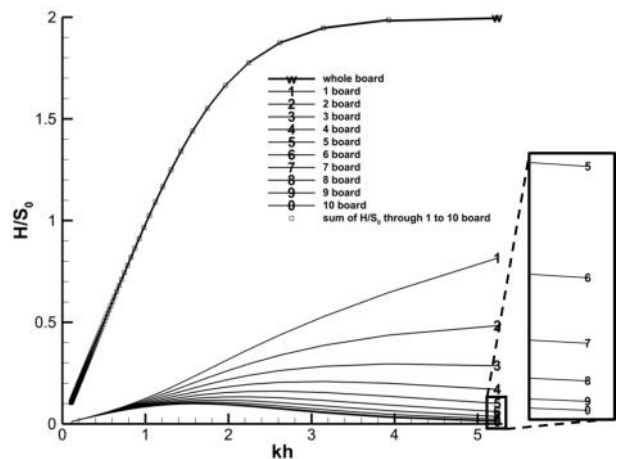


Fig. 14 Contribution of submerged segment of wave-board on height of generated wave

이를 한걸음 더 나가서 Fig. 15에 예시한 바와 같이 판 요소를 나누어주고 스트로크를 함께 생각하면 수심에 따라 스트로크가 변동하는 조파기 설계에도 활용할 수 있을 것으로 기대 된다. 특히 수조 바닥에 힌지점이 있는 플랩형 조파판의 깊이 z에서의 스트로크는 수면위 치에서의 스트로크 S_0 를 사용하면 식(29)로 나타낼 수 있다.

$$S(z,t) = S_0(t) \left(1 + \frac{z}{h}\right) \quad (29)$$

$t=0$ 일 때 수심이 z 인 위치에 길이가 dz 인 미소한 조파판 요소가 있다면 조파판 상단의 깊이는 $z_u = z - \frac{dz}{2}$ 가 되고 하단의 깊이는 $z_d = z + \frac{dz}{2}$ 로 표시할 수 있다. 따라서 이들 관계를 사용하면 식 (18)의 관계를 식 (30)과 같이 바꾸어 쓸 수 있다.

$$dH = \frac{4S_0(1+z/h) \sinh kh}{(\sinh 2kh + 2kh)} \times (\sinh k(-z - \frac{dz}{2} - h) - \sinh k(-z + \frac{dz}{2} - h)) \quad (30)$$

쌍곡선함수는 x 가 작으면 $\sinh(x) \approx x$ 의 관계를 가지므로 식 (30)을 정리하면 식 (31)와 같이 표현할 수 있다.

$$dH = \frac{4S_0(1+z/h) \sinh kh}{(\sinh 2kh + 2kh)} (2 \cosh(k(z+h)) \cdot \sinh(\frac{dz}{2}k)) \approx \frac{4S_0(1+z/h) \sinh kh}{(\sinh 2kh + 2kh)} \cdot 2 \cosh(k(z+h)) \cdot \frac{dz}{2}k = \frac{4kS_0(1+z/h) \sinh kh}{(\sinh 2kh + 2kh)} \cdot \cosh(k(z+h)) \cdot dz \quad (31)$$

따라서, 식 (31)을 수면으로부터 $z = -h$ 까지 적분을 수행하고 스트로크 S_0 로 무차원화 하면 식 (32)가 얻어지고 이는 플랩형 조파기에 대한 Hughes(1993)의 해와 일치한다.

$$\frac{H}{S_0} = \frac{4 \sinh kh}{(\sinh 2kh + 2kh)} \left(\sinh kh + \frac{(1 - \cosh kh)}{kh} \right) \quad (32)$$

식 (31)에서 $z = l - h$ 까지 적분을 수행하면 식 (32)의 최종 항 분모가 $k(h - l)$ 이 되어 Hyun(1976)의 결과가 된다.

이를 준용하여 조파판의 운동이 Fig. 13의 오른쪽 그림과 같이 표시되는 복잡한 운동을 일으키는 조파기에서도 임의 위치에서의 스트로크 표현식과 적분기법을 적용하면 조파판의 설계에서 충분히 활용도가 높은 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

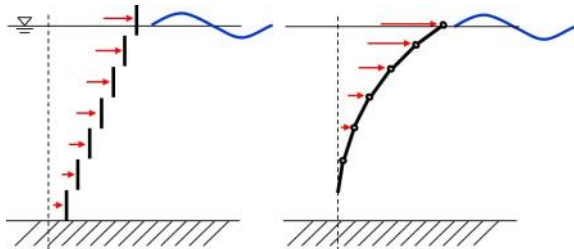


Fig. 15 Schematic diagrams of multi-board wavemakers

6. 결 언

임의의 깊이에 수직하게 잠겨있는 2차원 평판 요소가 수평방향으로 조화왕복운동을 하는 경우에 대하여 선형 근사 해를 구하였다.

근사해의 특수경우가 기존의 연구결과와 일치하는 것을 확인하였다. 근사 해를 사용하여 수조의 상반부에 설치되는 조파판과 수조의 바닥에 접하며 하반부에 설치되는 조파판 각각에 대하여 해를 구하였고, 이들 두해를 선형중첩하면 수심 전체에 걸쳐 설치되는 조파판 문제의 해가 되는 것을 확인하였다.

동일한 문제를 CFD 계산으로 수행하고 선형해의 중첩으로 얻어지는 결과와 비교하였다. 선형근사해로 계산되는 파장과 파고는 CFD 계산 결과와 일치하는 것이 확인되었다. 파형계산에서는 CFD 계산이 기준수면으로부터 파저까지의 거리가 파저까지의 거리보다 크게 나타나고 있어서 실제 계측되는 파형에 가까운 것으로 확인되었다. 따라서 조파기 상세설계시 CFD를 활용하면 보다 정확한 설계가 가능하다고 판단한다.

선형근사해석으로 얻어진 임의의 수심에 잠겨 있는 미소한 조파판 요소에 대한 일반해를 기본해로 하여 스트로크가 수심에 따라서 변화하는 복잡한 운동을 하는 조파기 문제에 적용하여 해석적 또는 수치적 적분을 수행함으로써 근사 해를 구할 수 있음을 확인하였다.

앞으로 적분기법을 사용하여 새로운 형식의 조파기를 설계하고 제작하여 실험검증을 계획하고 있음을 밝힙니다.

후 기

이 연구에서는 2017년도 군산대학교 교수장기국외연구경비의 지원으로 전산 수치유체역학 계산을 수행하였으며 선형 근사해석은 서울대학교 공학연구원의 공과대학 명예교수의 연구 성과 정량화와 학문수준 제고를 위한 사업으로 지원되었음을 밝힙니다.

References

- Anbarsooz, M., Passandideh-Fard, M. and Moghiman, P.M., 2013. Fully nonlinear viscous wave generation in numerical wave tanks. *Ocean Engineering*, Vol 59, pp. 73-85.
- Dean, R.G. & Dalrymple, R.A., 1984. *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Hughes, S.A., 1993, *Physical Model and Laboratory Techniques in Coastal Engineering*, USA.
- Hyun, J.M., 1976, Theory for hinged wavemakers of finite draft in water of constant depth. *Journal of Hydrodynamics*, 10(1), pp 2-7.
- Kwon, J.O., Kim, H., Lew, J.M. & Oh, J.K., 2017. 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.
- Maguire, A.E., 2011. Hydrodynamics, control and numerical modelling of absorbing wavemakers, Ph. D. Dissertation, The University of Edinburgh.
- Tanizawa, K., Ueno, M., Taguchi, H., Fujiwara, T., Miyazaki, H., Sawada, H., & Tsukada, Y., 2011, The actual sea model basin(in Japanese). *Report of National Maritime Research Institute*, 10(4), pp. 343-382.
- Webster, W. & Kim, D.Y., 1991. The dispersion of large-amplitude gravity waves in deep water. *Eighteenth Symposium on Naval Hydrodynamics*, National Academy of sciences, Washington DC, pp. 397-416.



오정근



김주열



김효철



권종오



류재문