

원호형 조파시스템 개발

○이창훈¹⁾, 김민균²⁾, 조홍연³⁾, 조용준⁴⁾

1. 서론

연안재해현상들은 다방향조파수조에 모형을 설치하여 실시되어야 하는데 기존의 다방향 조파 시스템은 1자형, 2자형, 3자형으로 배치되어 있어 파랑이 비스듬히 전파할 때, 조파기의 끝점에서부터 파향선 방향으로 파랑에너지의 불연속선이 생기고, 따라서 회절이 발생하게 되므로 원하는 파랑에너지가 존재하는 실용 가능한 영역이 제한된다. 또한, 조파기의 역할은 단지 실험대상물로 파랑에너지를 전파시키는 것인데, 기존의 조파시스템은 실험대상물에서 파가 반사되어 조파판으로 돌아오는 반사파의 방향을 정확히 알 수 없기 때문에 조파판에서 이를 효율적으로 흡수하지 못함으로써 재반사가 발생하고, 이러한 재반사의 효과가 실험대상물로 전파되어 원하지 않는 현상이 발생된다.

본 연구에서 제안된 조파시스템의 조파판은 원호형으로 배치되며, 각각의 조파판은 원호의 중심을 직각으로 바라보게 하여 가능한 한 실험대상물을 원호의 중심에 두게 하였다. 그렇게 하면 실험대상물에서부터 반사된 파가 조파판에 도달하였을 때, 거의 직각이 되므로 방향성을 염려할 필요 없이 반사파의 에너지를 효과적으로 흡수할 수 있기 때문이다. 조파판이 원호형으로 배치되기 때문에 격자생성기법을 도입하여 곡선경계를 계산하기에 적합한 곡선형 격자망을 구성하여 수치실험 하였다. 구성된 격자망을 바탕으로 파랑의 생성과 전파 및 반사가 되는 상황을 재현하는 수치모형의 지배방정식으로서 Copeland(1985)의 환경사방정식을 사용하였다.

2. 곡선형 격자망에서 파랑변형식의 적용

본 연구에서는 실제의 비직사각형 격자망에 일대일로 대응되는 가상의 직사각형 격자망을 구성하는 방법으로서 타원형 격자생성기법을 사용하였다. 즉, 실제 격자망의 좌표(x, y)를 독립변수로 하고 가상 격자망의 좌표(ξ, η)를 종속변수로 하는 타원형 편미분 방정식을 해석하는 방법을 이용하였다(Hoffmann과 Chiang, 1993). 타원형 편미분방정식으로서 Laplace 방정식을 사용하였고, 이 식을 풀기 위하여 Gauss-Seidel 법을 사용하였다.

임의의 공간상에 구성된 실제 격자망을 가상의 사각형 격자망으로 변환한 뒤, 각 격자점에서 파랑의 전파를 재현할 수 있는 Copeland(1985)의 환경사 방정식을 매시간 단계에서 시간 및 공간적으로 차분하였다. 에너지 감쇠계수 D_s 를 포함한 Copeland(1985)의 파랑변형식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{C}{C_g} \left(\frac{\partial \mathcal{P}}{\partial x} + \frac{\partial \mathcal{Q}}{\partial y} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathcal{P}}{\partial t} + CC_g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \omega D_s \mathcal{P} = 0, \quad \frac{\partial \mathcal{Q}}{\partial t} + CC_g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \omega D_s \mathcal{Q} = 0 \quad (2)$$

위 식에서 ζ 는 수면변위이고, \mathcal{P} 와 \mathcal{Q} 는 각각 x, y 축 방향의 체적속(volume flux)이고, h 는 평균 수심

- 1) 세종대학교 토목환경공학과 조교수
- 2) 서울시립대학교 토목공학과 박사과정
- 3) 한국해양연구원 연안항만공학연구본부 선임연구원
- 4) 서울시립대학교 토목공학과 부교수

을 나타내며, $C = \omega/k$ 와 $C_g = (\omega/k)(1 + 2kh/\sinh 2kh)/2$ 는 각각 파의 위상속도와 군속도를 나타내며, D_s 는 에너지감쇠계수를 나타낸다.

가상의 사각형 공간좌표(ξ, η)에서 식 (1), (2)는 다음과 같이 변환된 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{C}{C_g} \frac{1}{J} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\sqrt{g_{\xi\xi} g_{\eta\eta}}}{J} P - \frac{\sqrt{g_{\xi\eta} g_{\xi\eta}}}{J} Q \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\frac{\sqrt{g_{\xi\xi} g_{\xi\eta}}}{J} P + \frac{\sqrt{g_{\eta\eta} g_{\xi\xi}}}{J} Q \right) \right\} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{CC_g}{\sqrt{g_{\xi\xi}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + \omega D_s P = 0, \quad \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{CC_g}{\sqrt{g_{\eta\eta}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} + \omega D_s Q = 0 \quad (4)$$

위 식에서 P, Q 는 각각 ξ, η 축 방향의 체적속이고,

$$g_{\xi\xi} = \left(\frac{\partial x}{\partial \xi} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \xi} \right)^2, \quad g_{\xi\eta} = \frac{\partial x}{\partial \xi} \frac{\partial x}{\partial \eta} + \frac{\partial y}{\partial \xi} \frac{\partial y}{\partial \eta}, \quad g_{\eta\eta} = \left(\frac{\partial x}{\partial \eta} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \eta} \right)^2 \quad (5)$$

Jacobian J 는 다음과 같다.

$$J = \frac{\partial(x, y)}{\partial(\xi, \eta)} = \frac{\partial x}{\partial \xi} \frac{\partial y}{\partial \eta} - \frac{\partial y}{\partial \xi} \frac{\partial x}{\partial \eta} \quad (6)$$

3. 곡선수로를 전파하는 경우 해석해와 수치해의 비교

반원의 곡선 수로를 따라 파랑이 전파하는 현상을 모의한 수치해를 해석해와 비교하였다. Laplace 방정식은 수심이 일정한 경우 극좌표상에 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} + k^2 \phi = 0 \quad (7)$$

위 식에서 k 는 입사파의 파수를 나타내며 분산방정식으로부터 구한다. 곡선수로의 벽에 수직인 방향으로의 흐름은 없다(no-flow)라는 경계조건을 적용하면 ϕ 의 일반해를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi(r, \theta) &= \sum_{n=0}^N a_n [Y'_{\gamma_n}(kr_1) J_{\gamma_n}(kr) - J'_{\gamma_n}(kr_1) Y_{\gamma_n}(kr)] e^{i\gamma_n \theta} \\ &= \sum_{n=0}^N a_n F_n(r) e^{i\gamma_n \theta} \end{aligned} \quad (8)$$

위 식에서 $Y_{\gamma_n}(r)$ 과 $J_{\gamma_n}(r)$ 은 Bessel 함수를 나타내며, $Y'_{\gamma_n}(r)$ 과 $J'_{\gamma_n}(r)$ 은 Bessel 함수의 도함수를 나타내고, r_1, r_2 는 각각 내, 외측 벽의 반경이다. 함수 $F_n(r)$ 은 직교성을 만족하며, Sturm-Liouville의 이론으로부터 $r_1 \leq r \leq r_2$ 의 범위에서 $(1/r)$ 의 가중치를 지닌다. 계수 a_n 의 값은 $\theta=0$ 일 때, 수로를 통과하는 파의 진폭이 일정하다는 초기조건을 통하여 다음식과 같이 나타낼 수 있다(Kirby 등, 1994).

$$a_n = \frac{\int_{r_1}^{r_2} r^{-1} \phi(r, 0) F_n(r) dr}{\int_{r_1}^{r_2} r^{-1} F_n^2(r) dr} \quad (9)$$

식 (8)에 의한 해석해와 식 (3), (4)에 의한 수치해의 무차원 수면변위의 등고선과 무차원 파고의 등고선을 그림 1, 2에 비교하여 나타내었다. 내측 벽과 외측 벽의 반경이 각각 75m, 100m이고 수로의 폭이 25m이다. 수로 내의 수심은 4m이고, 조파되는 파의 주기는 4초로 두었다. 파장은 20.856m이고, $\gamma_1 = 14.2876$, $\gamma_2 = 22.8742$, $\gamma_3 = 27.6755$ 이며, 파수(k)는 $0.301m^{-1}$ 이다(Dalrymple과 Kirby, 1994). 그림 1, 2를 보면 해석해와 수치해 사이에 수면변위가 약간 차이가 나지만 위상은 거의 일치하는 모습을 관찰할 수 있다. 그리고, 두 경우 모두 파향선이 수로의 곡선부분에서 반사되어 방향이 바뀌면서 전파되는 모습을 볼 수 있으며 수로의 외측 벽에서 파고가 높아지는 현상을 관찰할 수 있다. 따라서, 본 연구에서 사용된 격자망과 지배방정식이 적절하였음을 알 수 있다.

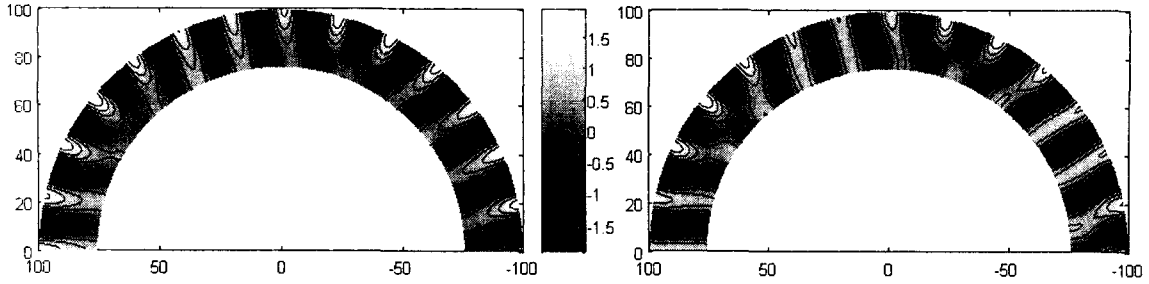


그림 1. 곡선수로에서의 해석해(좌)와 수치해(우)로 구한 무차원 수면변위의 등고선 비교

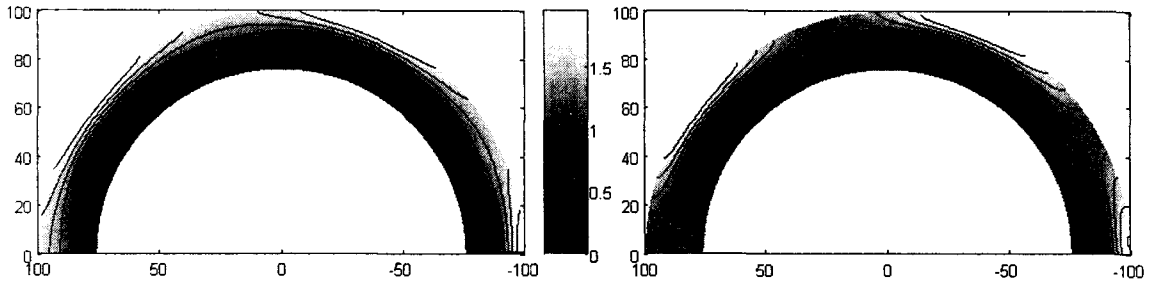


그림 2. 곡선수로에서 해석해(좌)와 수치해(우)로 구한 무차원 파고의 등고선 비교

4. 원호형 조파시스템의 수치 조파

파랑에너지가 생성되는 조파경계($j=J$)에서 파랑의 수면변위 $\zeta_{i,J}^n$ 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\zeta_{i,J}^n = [\zeta^I]_{i,J}^n + [\zeta^R]_{i,J}^n \quad (10)$$

위 식에서 $[\zeta^I]_{i,J}^n$, $[\zeta^R]_{i,J}^n$ 는 각각 입사파와 반사파의 수면변위를 의미한다. 조파경계에서 반사파를 정확히 예측하여 외해로 전파하게 해주면 계산영역의 내부로 재 반사가 일어나는 것을 막을 수 있다. 반사파 성분은 조파경계의 바로 앞 지점($j=J-1$)에서 예측할 수 있고, 조파경계의 바로 앞 지점에서 반사파는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$[\zeta^R]_{i,J-1}^n = \zeta_{i,J-1}^n - [\zeta^I]_{i,J-1}^n \quad (11)$$

이 반사파가 조파경계에 도달하는 시간을 $\tau \Delta t$ 라고 정의하면 다음과 같다.

$$\tau \Delta t = \frac{\sqrt{(x_{i,J} - x_{i,J-1})^2 + (y_{i,J} - y_{i,J-1})^2}}{C_{i,J-1/2}} \quad (12)$$

조파경계에서 반사파의 수면변위를 선형 보간하여 다음과 같이 예측할 수 있다.

$$[\zeta^R]_{i,J}^n = \{1 + \text{int}(\tau) - \tau\} [\zeta^R]_{i,J-1}^{n - \text{int}(\tau)} + \{\tau - \text{int}(\tau)\} [\zeta^R]_{i,J-1}^{n - \text{int}(\tau) - 1} \quad (13)$$

위 식에서 $\text{int}(\tau)$ 는 양의 실수 τ 를 정수화한다는 것을 의미한다.

조파판을 원호형으로 배치시켜 임의의 에너지와 방향을 갖는 파를 생성시키고, 이 파가 공간 영역으로 전파되어 실험대상물까지 도달하는 현상을 재현하였다. 그런 후, 실험대상물에서부터 반사되어 되돌아온 반사파가 조파판에 거의 직각으로 부딪히도록 유도하고, 직각으로 부딪친 반사파성분을 흡수하는 수치실험을 수행하였다.

그림 3은 격자생성기법으로 생성된 원호형 조파구조를 보여 준다. 구조물이 직각으로 그 길이가 $5L$ (L 은 파장임)이고, 구조물의 중심에서 조파판이 $5L$ 만큼 떨어져 반원형으로 배치되어 있다. 구조물의 중심에서 조파판을 잇는 선이 조파판과 거의 직각을 이루고, 조파판 지점과 조파판 바로 앞 지점을 잇는 선이 조파판과 직각이 되게 하였다. 구조물의 좌, 우에는 $2.5L$ 두께의 에너지 흡수층을 두었다.

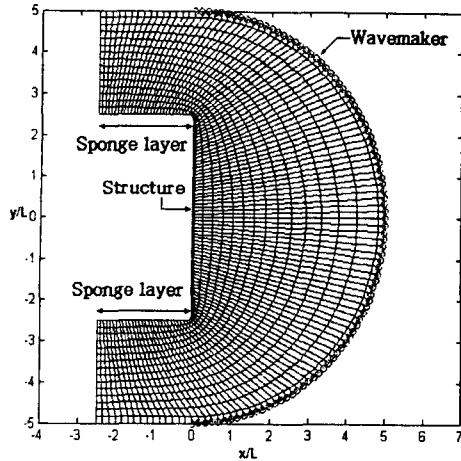


그림 3. 원호형 조파수조의 격자망

5. 원호형 다방향조파시스템의 수치해 분석

조파판이 원호형으로 배치된 조파시스템을 통하여 수치조파 시킨 결과, 파랑에너지가 구조물에 45° 왼쪽으로 전파된 경우에 조파 후 16주기와 26주기 경과한 시각에서 무차원 파고와 무차원 수면변위를 그림 4, 5에 각각 도시하였다. 시간이 서로 다름에도 불구하고 두 결과가 거의 일치함을 볼 수 있다. 이는 조파판에서 반사파를 제대로 흡수하였음을 보여준다. 따라서, 본 연구에서 수치실험 된 원호형 다방향 조파시스템이 기존의 一자형, 丄자형, ㄷ자형으로 배치되어 있는 다방향 조파시스템보다 반사파흡수에 있어 우월한 성능을 보일 수 있다고 사료되며, 실험대상물의 규모가 상대적으로 큰 경우에도 적용할 수 있다고 판단된다.

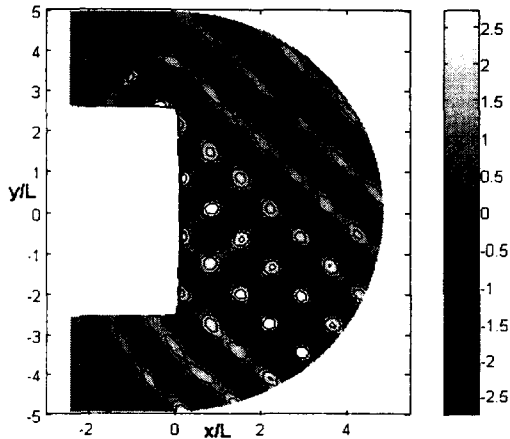


그림 4. 대상구조물에 45°로 전파하는 경우: 무차원 수면변위의 등고선(16주기)

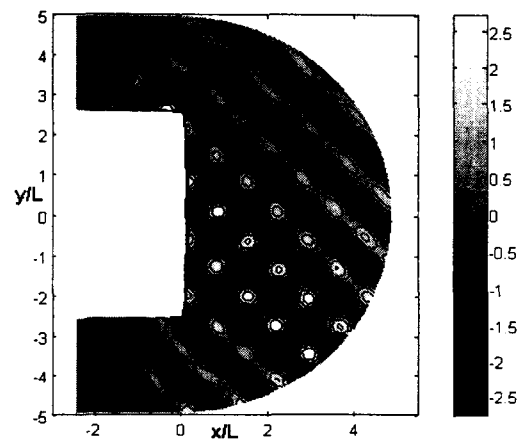


그림 5. 대상구조물에 45°로 전파하는 경우: 무차원 수면변위의 등고선(26주기)

참고문헌

- Copeland, G.J.M. (1985). "A practical alternative to the mild-slope wave equation." *Coastal Eng.*, Vol. 9, pp. 125-149.
- Dalrymple, R.A. and Kirby, J.T. (1994). "Waves in an annular entrance channel." *Coastal Eng.*, Vol. 24, pp. 128-141.
- Hoffmann, K.A., and Chiang, S.T. (1993). *Computational Fluid Dynamics for Engineers*. Vol. I, Engineering Education System, Kansas, Appendix E.
- Kirby, J.T., Dalrymple, R.A., and Kaku, H. (1994). "Parabolic approximations for water waves in conformal coordinate systems." *Coastal Eng.*, Vol. 23, pp. 185-213.