

곡선형 조파시스템 개발

Development of Curve-Shaped Wave Generation System

이창훈*, 김민균**, 조용준***, 구석근****

Changhoon Lee, Min Kyun Kim, Yong Jun Cho, Seok Kun Koo

요 지

본 연구에서는 기존의 一자형, ㄴ자형, ㄷ자형 조파시스템이 경사진 방향으로 가동될 때 발생하는 에너지 불연속성으로 인한 회절현상이나 구조물에서 반사된 파가 조파관에서 발생하는 재 반사 현상의 단점을 보완할 수 있도록 곡선형태의 조파관을 배치하여 수치실험을 행하였다. 조파관을 곡선형으로 배치시켜 실험 대상물에서부터 반사된 파가 가능한 조파관에 직각으로 부딪히도록 유도하였다. 편미분 격자생성기법을 도입하여 구성된 곡선형 격자망에서 Copeland(1985)의 완경사 방정식을 이용하여 수치해석 하였다. 우선, 1차원 실험영역에서 파를 생성하여 대상구조물에서 반사되어 돌아온 반사파 성분을 조파관에서 흡수하면서 입사파를 생성하는 현상을 재현하였다. 그 후, 실험영역을 2차원으로 확장시켜 조파관을 곡선형으로 배치하여 수치 실험 하여 진행파와 회절파의 중첩으로 고안된 해석해와 수치 해를 비교하였다. 그 결과, 기존의 조파시스템에 비하여 에너지 불연속선에서의 회절 현상도 발생하지 않고 반사파 성분을 효율적으로 흡수하는데 효과적임을 알아냈다.

핵심용어: 곡선형 조파시스템, 곡선 격자망, 완경사 방정식, 수치실험

1. 머리말

현재 평면수리실험에 사용되는 다방향 조파 시스템의 조파관은 一자형, ㄴ자형, ㄷ자형으로 배치되고 있다. 一자형 조파시스템에서 파랑이 비스듬히 전파하는 경우, 조파기의 끝점에서부터 파향선 방향으로 파랑에너지의 불연속선이 생기며, 이로 인하여 회절이 발생하게 되므로 원하는 파랑에너지가 존재하는 실용 가능한 영역이 제한된다. 또한, 기존의 모든 조파시스템은 실험대상물에서 파가 반사되어 조파관으로 돌아오는 반사파의 방향과 파고를 정확히 알 수 없기 때문에 조파관에서 이를 효율적으로 흡수하지 못함으로써 재 반사가 발생하고, 이러한 재 반사의 영향이 실험대상물로 전파되어 원하지 않는 현상이 발생한다. 최근에 기존의 조파시스템에서 발생하는 에너지 불연속선으로 인한 회절 현상과 조파관에서의 재 반사를 극복하는 방법으로 원호형 조파시스템이 개발되었다(이창훈 등, 2003). 개발된 조파시스템의 조파관은 반원 모양의 형태를 지니며, 각각의 조파관이 실험대상물의 중심방향을 향해 가능한 직각으로 배치되게 된다. 그리하여, 실험대상물로부터 반사된 파가 조파관에 도달하였을 때, 거의 수직으로 입사되어 들어오기 때문에 방향성을 염려할 필요 없이 반사파의 에너지를 효과적으로 흡수할 수 있게 하였다. 조파관에서 파랑

* 정회원 · 세종대학교 토목환경공학과 부교수 · E-mail: clee@sejong.ac.kr

** 정회원 · 서울시립대학교 토목공학과 박사과정 · E-mail: kimminkyun@sidae.uos.ac.kr

*** 정회원 · 서울시립대학교 토목공학과 부교수 · E-mail: young@uoscc.uos.ac.kr

**** 정회원 · (주)대림산업 기술연구소장 · E-mail: skkoo@dic.co.kr

이 생성되면 이 파랑이 실험대상물까지 전파되고, 전파된 파랑이 실험대상물에 반사되어 조파판으로 되돌아오면, 되돌아 온 반사파 성분의 에너지를 조파판에서 흡수하는 현상을 수치실험을 통하여 재현하였다.

본 연구에서는 두 가지 면에서 원호형 조파시스템을 개선하였다. 첫째, 평면수조에서 조파판에서의 파랑의 생성 및 전파, 구조물에서의 반사, 조파판에서의 반사파 흡수 현상을 해석적으로 모의하여 과거의 연구에서 재현한 평면 수조에서의 반사파 흡수 성능을 정량적으로 검사하였다. 두 번째로는 조파판의 배치 모양을 원호형 뿐만 아니라 다양한 형태의 곡선으로 확장하여 반사파 흡수 효율이 높으면서도 조파선의 길이가 짧은 경제적인 조파판의 배치형태를 찾아보았다.

2. 수치실험방법

2.1 곡선형 격자망

유한차분법은 통상적으로 사각형으로 이루어진 격자망에서 해석하는 것이 보통이다. 본 연구에서의 조파판은 직선이 아닌 곡선형으로 배치되므로, 배치된 조파판을 따라 파랑의 거동을 규명하기 위하여 곡선을 따라 해석 가능한 격자망이 요구된다. 따라서, 곡선을 따른 경계의 해석이 가능하고, 격자점을 연결하는 선의 모양도 곡선 형태를 갖게 되는 곡선형격자망을 구성할 수 있는 격자생성기법을 도입하였다. 실제의 곡선형 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. 타원형 편미분방정식으로서 Laplace 방정식을 사용하였고, 이 식을 풀기 위하여 Gauss-Seidel 법을 사용하였다. 그림 1에 반원의 조파판이 반원으로 배치되어 있고 반원의 가운데 지점에 $5L$ 길이의 직 벽이 있는 경우에 생성된 곡선형 격자망을 볼 수 있다.

2.2 파랑변형식 차분화

임의의 공간상에 구성된 실제 격자망을 가상의 사각형 격자망으로 변환한 뒤, 각 격자점에서 파랑의 생성과 전파 및 반사가 되는 상황을 재현할 수 있는 Copeland(1985)의 환경사 방정식을 매시간 단계에서 시간 및 공간적으로 차분하였다.

에너지 감쇠계수 D_s 를 포함한 Copeland의 파랑변형식은 다음과 같이 표현된다.

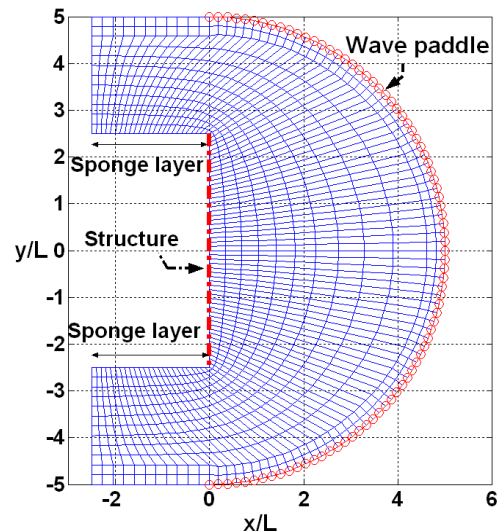


그림 1. 곡선형 격자망 구성도

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

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

위 식에서 ζ 는 수면변위이고, \mathcal{P} 와 \mathcal{Q} 는 각각 x 축과 y 축 방향의 체적속(volume flux)이고, h 는 평균수심을 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. D_s 를 두는 목적은 계산영역의 경계에서 가상의 스폰지층을 설정하여 스폰지층을 통과하는 파랑의 에너지를 흡수함으로써 경계면에서의 반사를 막기 위함이다.

실제의 공간좌표(x, y)에서의 변수인 $\zeta, \mathcal{P}, \mathcal{Q}$ 를 가상의 공간좌표(ξ, η)에서 각각 ζ, P, Q 로 정의한다면, 식 (1), (2)는 다음과 같이 변환된다.

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

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

위 식에서 Jacobian J 는 다음과 같이 표현할 수 있다

$$J = \frac{\partial(x, y)}{\partial(\xi, \eta)} = \frac{\partial x}{\partial \xi} \frac{\partial y}{\partial \eta} - \frac{\partial y}{\partial \xi} \frac{\partial x}{\partial \eta} \quad (5)$$

3. 조파시스템 수치실험

3.1 조파 및 반사파 흡수 이론

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

$$\zeta_{i,J}^n = [\zeta_L]_{i,J}^n + [\zeta_R]_{i,J}^n \quad (6)$$

위 식에서 $[\zeta_L]_{i,J}^n, [\zeta_R]_{i,J}^n$ 는 각각 입사파와 반사파의 수면변위를 의미한다. 즉, 조파경계에서의 파랑은 외해에서 계산영역의 내부로 전파하는 입사파 성분과 계산영역의 내부에서 구조물에 반사되어 조파경계로 되돌아오는 반사파 성분으로 구성되어 있다. 이 반사파를 정확히 예측하여 조파경계에서 외해로 전파하게 해 주면 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.

$$[\zeta_R]_{i,J-1}^n = \zeta_{i,J-1}^n - [\zeta_L]_{i,J-1}^n \quad (7)$$

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

$$\tau \Delta t = \frac{\sqrt{(x_{i,J} - x_{i,J-1})^2 + (y_{i,J} - y_{i,J-1})^2}}{C_{i,J-1/2}} \quad (8)$$

따라서, 조파경계에서 반사파의 수면변위를 다음과 같이 예측할 수 있다.

$$[\zeta_R]_{i,j}^n = \{1 + \text{int}(\tau) - \tau\} [\zeta_R]_{i,j-1}^{n - \text{int}(\tau)} + \{\tau - \text{int}(\tau)\} [\zeta_R]_{i,j-1}^{n - \text{int}(\tau) - 1} \quad (9)$$

위 식에서 $\text{int}(\tau)$ 는 양의 실수 τ 를 정수화한다는 것을 의미한다(이창훈 등, 2003).

3.2 해석 해

평면수조에서 조파관에서의 파랑의 생성 및 전파, 구조물에서의 반사, 조파관에서의 반사파 흡수 현상을 해석적으로 모의하여 반사파 흡수 성능을 정량적으로 검사하기 위하여 다음과 같은 해석적인 해를 고안하였다. 고안된 해석 해는 다음과 같은 두 가지 현상이 중첩된 것으로 판단된다. 첫 번째는 조파관에서 임의의 방향으로 평면 입사파가 전파하는 현상이다. 입사파의 파향선이 x 축과 이루는 각이 θ 라면 수면변위는 다음과 같이 표현된다.

$$\eta_I = a_I \cos(kx \cos\theta + ky \sin\theta + \epsilon) \quad (10)$$

위 식에서 a_I 는 입사파 수면변위의 진폭이고, k 는 파수이고, ϵ 는 위상차이다. 두 번째 현상은 대 상구조물 벽면에서 발생하는 반사파가 평면수조로 전파하는 현상이다. 이 현상은 벽면이 양의 방 파제 사이의 개구부가 되고, 이 개구부를 통하여 파랑이 평면 수조로 회절 되는 현상과 같다. Penney와 Price(1952)는 일정한 개구부를 갖는 양의방파제 사이를 진행하는 파랑의 회절 현상에 대한 해석 해를 유도하였다. 본 연구에서 Penney와 Price의 해석 해를 수치적으로 계산하였다.

그림 2는 y 축에 위치한 벽에 오른쪽에서부터 왼쪽으로 45° 의 각도로 전파하는(즉, $\theta = 270^\circ - 45^\circ$) 진행파의 무차원 수면변위를 보여준다. 그림 3은 y 축에 위치한 양의 방파제(개구부의 폭이 $5L$ 임)를 왼쪽에서부터 오른쪽으로 45° 의 각도로 전파하는(즉, $\theta = 270^\circ + 45^\circ$) 파랑의 회절 현상과 방파제 전면에서의 반사 현상을 보여준다.

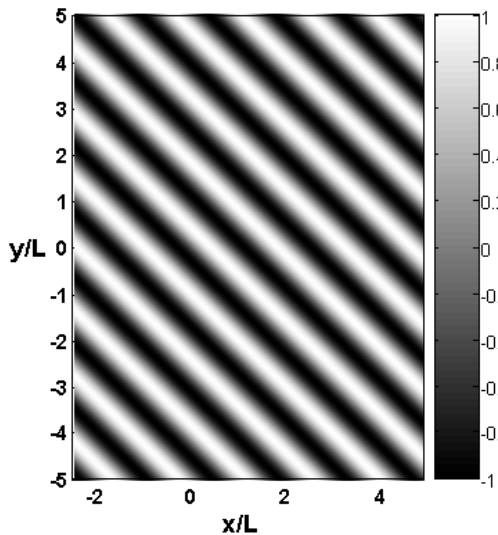


그림 2. 입사파의 수면변위 등고선

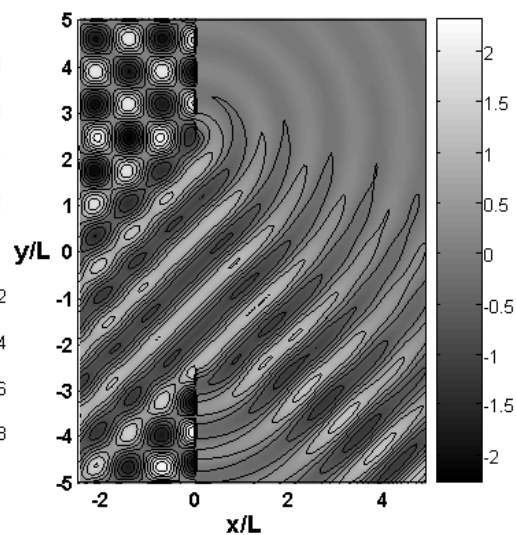


그림 3. 회절파의 수면변위 등고선

3.3 一자형, 반원형, 반타원형 조파판의 수치실험

조파판의 배치 모양을 원형뿐만 아니라 다양한 형태의 곡선으로 확장하여 반사파 흡수효율이 높으면서도 조파선의 길이가 짧은 조파판의 배치 형태를 찾아보았다. 조파판의 형태가 곡선인 경우에는 조파판의 길이가 길수록 실험대상 지점에서 조파판까지 떨어진 거리가 멀어지기 때문에 조파판에 도달한 반사파의 방향은 조파선과 거의 직각이 되어 반사파의 흡수효율이 높아진다. 하지만, 조파판의 길이가 길어질수록 수치실험 비용이 증가하는 비경제적인 문제점이 발생된다. 따라서, 조파판의 형태를 반원형뿐만이 아닌 단축과 장축의 길이의 비가 서로 다른 반타원형의 경우에도 수치실험을 수행하였다. 그리고, 현재 국내뿐만 아니라 여러 나라에서 사용하고 있는 一자형 조파기의 경우에도 수치실험을 수행하여 곡선형의 경우와 함께 비교하였다.

그림 4는 구조물의 벽면에 45° 로 전파하는 파가 벽면에서 반사되는 현상을 해석적으로 구한 수면변위의 등고선을 보여준다. 구조물의 벽을 $x=0$, $-2.5L \leq y \leq 2.5L$ 선에 두고 이를 벗어나는 선, 즉 $x=0$, $y < -2.5L$, $y > 2.5L$ 선에는 파가 그대로 통과하게 하였다. 이는 그림 2, 3에서 각각 진행파와 양의 방파제를 통과하는 회절파의 해석 해를 중첩해서 구한 결과이다.

그림 5는 조파판이 一자형으로 $x=5L$, $-5L \leq y \leq 5L$ 에 배치된 경우에 조파 시작 후 26주기가 경과한 시각에서의 수면변위를 보여준다. $y=-5L$ 과 $y=5L$ 의 경계에는 에너지 흡수층을 두었다. 그림에서 보다시피 $(x, y) = (5L, 5L)$ 지점에서 아래로 45° 선을 따라 에너지 불연속선이 생기고 파랑의 회절현상이 크게 나타났다. 그 결과 구조물의 벽면에 도달한 파의 에너지는 작고 위상도 왜곡되어 있다. 그림 6, 7은 조파판이 각각 반원형과 반타원형인 경우에 조파 시작 후 26주기가 경과한 시각에서의 수면변위를 보여준다. 그림 7의 경우 타원형의 장축과 단축의 길이 비를 5 : 4로 하였다. 두 경우 다 대체적으로 그림 4의 해석 해와 유사하게 나왔다. 반원형 조파판의 길이는 $5\pi L$ 이고, 타원형 조파판의 길이는 $4.53\pi L$ 로서 반타원형 조파판의 길이가 반원형 조파판에 비해 약 9% 더 짧아 더 경제적이라고 말할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서 기존의 다방향 一자형, ㄴ자형, ㄷ자형 등의 다방향 조파시스템에서 발생하는 에너지 불연속선에서의 회절과 반사파 흡수의 비효율성을 극복하는 곡선형 다방향 조파시스템을 제안하였다. 과거의 연구(이창훈 등, 2003)에서 개발된 원호형 조파시스템에서는 반사파 흡수 효율이 높으나 조파판의 길이가 길어 비경제적인 단점이 있었다. 一자형, 반원형, 반타원형의 조파시스템의 경우에 진행파와 회절파의 중첩으로 구한 해석 해를 수치 해와 비교하였다. 그 결과 반타원형 조파시스템에서 반사파 흡수 효율이 높으면서 반원형 조파시스템에 비해서 길이가 짧아 더 경제적인 것을 알 수 있었다. 수리모형실험의 조건 또는 중요도에 따라 실험자가 조파시스템의 정밀도나 경제성 중에서 어느 것을 더 중요하게 생각할 지 판단하여 조파판의 배치를 결정할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구(과제번호: R01200300010) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. 이창훈, 김민균, 조홍연, 조용준 (2003). 원호형 조파시스템 개발, 한국수자원학회 학술발표회, 공주대학교, pp. 497-500.
2. Copeland, G.J.M. (1985). A practical alternative to the mild-slope wave equation, Coastal Eng., 9, pp. 125-149.
3. Penney, W. G. and Price, A. T. (1952). The diffraction theory of sea waves and the shelter afforded by breakwaters, Philos. Tran. R. Soc. A, 244, pp. 236-253.

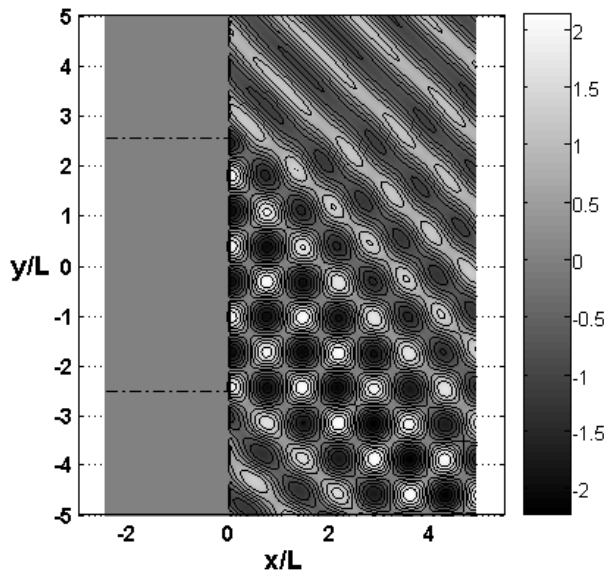


그림 4. 해석해의 수면변위 등고선

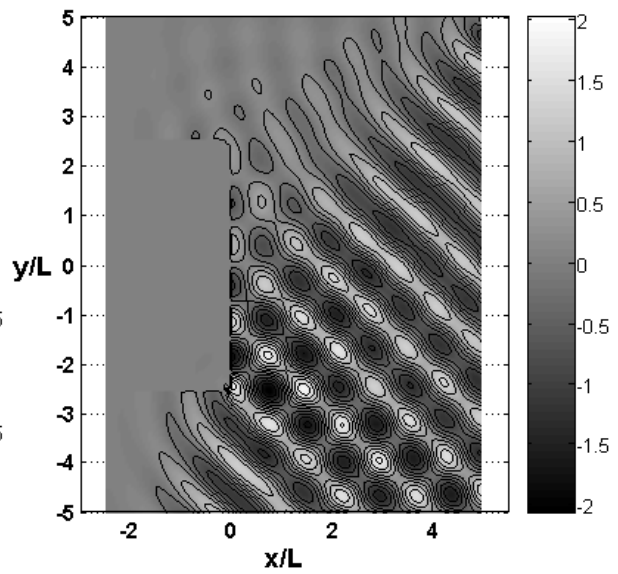


그림 5. T자형 조파시스템의 경우
조파 후 26주기 경과 시 수면변위 등고선

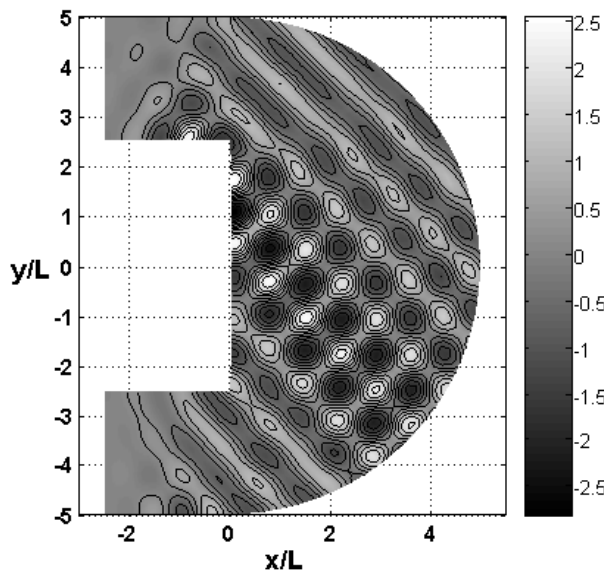


그림 6. 반원형 조파시스템의 경우
조파 후 26주기 경과 시 수면변위 등고선

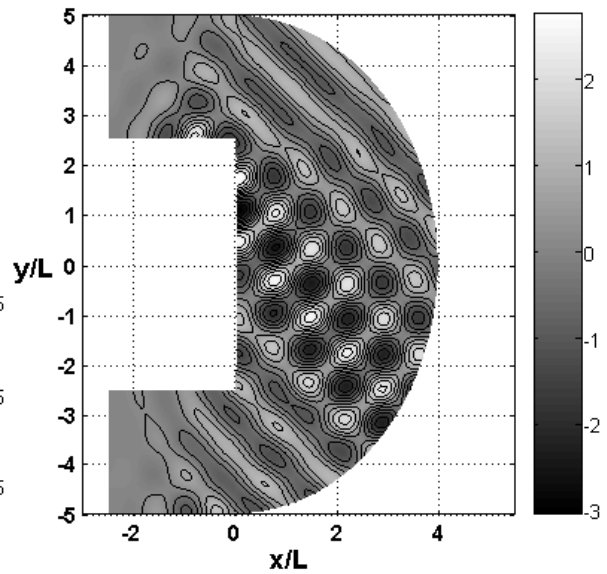


그림 7. 반타원형 조파시스템의 경우
조파 후 26주기 경과 시 수면변위 등고선