韓國港灣學會誌 第8卷 第2號 pp. 67~78, 1994.

論 文

파랑과 흐름의 혼합하에서 파랑집적구조물의 영향

이 중 우* · 곽 파이 충

Effect of Wave Focusing Structures in Combined Waves and a Current

*J. W. Lee, K. F. Cheung***

Key Words : 흐름(current), 회절(diffraction), 파랑에너지(wave energy), 파랑에너지집적(wave energy focusing), 잠제(submerged breakwater), 방사조건(radiation condition), 체표면 경계조건(body surface boundary condition)

Abstract

A time-domain numerical model is developed to examine the performance of a wave energy focusing structure in combined waves and a current. With the current assumed to be slow and the structure fully submerged, the wave-current interaction problem is reduced to a wave scattering problem in a uniform current. The diffraction of incident waves around a narrow berm is considered. The shape of the berm is defined by a parabola, imitating that of an optical reflector. The energy focus is achieved by reflecting the incident waves through a pre-determined focal point. Through the numerical simulations, the numerical model is shown to be effective in modeling the wave-current interaction problem, and the current speed and direction are shown to affect significantly the location, amplitude and sharpness of the focus.

1. 서 론

과거 미국, 일본 및 영국, 노르웨이를 포함한 유럽의 제반국가에서는 지리적인 특성으로 인해 기술적 경제적인 관점에서 해수파의 에너지에 대한 잠재력에 대해 관심을 가지게 되었고 해양으로부터 에너지를 추출하기 위한 연구에 대규모의 투자를 행하여 오늘에 와서는 실험용 시설이나 소규모로 현실화가 되어 이용되고 있다.

일반적으로 해양으로부터 에너지의 개발은 그 비용이 높기 때문에 이에 대한 투자가 지속적으로 이루어 지지 않는다는 어려움이 있지만 최근의 연구결과나 공학의 발달 추세로 보아 짧은 장래에 이를 극복할 수 있는 수준에 이를 것으로 예측하고 있다 (McCormick, 1981). 특히 폭풍속에서 쉽게 인지하듯이 해양에는 어마어마하게 큰

* 한국해양대학교 이공대학 항만운송공학과 교수.
** 미국 하와이 주립대학교 해양과학기술대학 교수.

파괴력을 가진 에너지원이 존재하고 있고 이를 우리의 환경에 이용할 수 있도록 감쇄시킬 수 있다는 점을 잊지 않아야 할 것이다. 이와 같이 인류에게 강한 파괴력을 가진 자연에너지를 감쇄시켜 에너지원으로 포획하기 위해서는 무엇보다도 고도의 설계감각과 수력학적 공학적인 문제를 완전히 이해하고자 하는 노력없이는 이루어질 수 없다는 점을 인식하여야 할 것이다.

여기서 계획하고 있는 파랑에너지 집적구조물은 사전설계한 집적점 (focal point)에 입사파고를 증폭시키도록 계획한 것으로 집적된 파랑에너지는 기계적인 발전기로 동력을 전환할 수 있게 된다. 이러한 파랑에너지의 집적장치나 이의 효과에 대해서는 각기 다른 입사파의 조건하에서 여러 연구가 이루어져 왔는데 이중에서 Helstad (1980)가 자유해면하에서 박판형 수평구조물 (submerged horizontal thin plate)을 제안하였다. 이를 Kudo 등 (1987), Imai 등 (1988)과 Murashige 및 Kinoshita (1992)가 박판이지만 형태와 규격이 다른 여러가지 구조물을 사용하여 Helstad의 개념적인 설계를 수치모델 및 수리실험으로 더욱 검토하였다. 그러나 이들의 실험에서는 구조물의 후반가장자리를 따라서 쇄파를 발생시켜 목적한 구조물의 효과를 저감시키게 됨을 발견하였다.

한편, Mehlum & Stamnes (1980)과 McCormick 등 (1980)은 제각기 해저면에 렌즈형의 수직구조물을 사용하여 집파효과를 검토하였으며 Ertekin & Monopolis (1985)는 포물형 계단 (parabolic step)을 해저면에 계획하여 여러가지 실험을 통해 파랑에너지 집적에 관한 연구를 수행하였으며 후에는 Yang & Ertekin (1990)이 이를 수치실험을 통해 다루었다. 또한, 국 및 이 (1992)는 잠제 (submerged breakwater)의 형태로 완만한 경사를 가진 구조물을 해저에 구축하여 입사파를 굴절시켜 파랑의 에너지를 집적시키는 시도를 하였으며, 이 와 크록(1994)은 급경사에서 유사비선형파랑방정식을 도입하여 그의 모델을 확장하고 광학이론에 근거한 해저구조물을 설계하여 파랑에너지의 집적효과 및 이의 응용에 대한 연구를 수행하였다.

여기서는 상기와는 다른 형태의 파랑집적구조물을 계획하여 이를 균일류 (uniform flow)와 같은 흐름 (current)이 파랑과 공존할 때 이의 효과를 다루기로 하였다. 선택한 구조물은 폭이 입사파장에 비해 좁은 해저의 수직구조물로 집적점에 따라 평면형상이 변하는 포물형구조로 하여 광학에서 반사경 (optical reflector)처럼 반사에 의해 파랑에너지를 집적하도록 설계한 것이다. 구조물의 크기는 Mehlum & Stamnes (1980), McCormick 등 (1980) 및 국 과 이 (1992)의 구조보다 규모가 훨씬 작으며 집적점도 구조물의 전방에 위치하는 것으로 하였다. 일반적인 해저의 경사구조물은 상당한 재료와 공사비를 요하나 이와 같은 수직구조물은 그 높이가 수심의 1/2 이하로, 폭은 입사파장의 1/10이하로 계획하여 이러한 문제점을 해결할 수 있다고 본다.

특히 Isaacson & Cheung (1993) 및 Cheung 등 (1995)에 의하면 흐름이 존재할 때 산란파의 장과 진폭이 현저하게 변화하는 것으로 밝히고 있어서 파랑과 흐름이 공존하는 해역에 이와 같은 파랑집적구조물의 집적효과를 예측하는 것은 특히 연안에서의 구조물의 설계와 운영하는데 중요한 의미가 있음을 알 수 있다.

파랑과 흐름이 상호작용하는 문제를 다루기 위한 방법으로 장 (flow field)을 흐름과 같이 일정한 성분과 파랑과 같이 변동하는 성분으로 분리하는 것이다. 흐름의 속도를 느리다고 가정하고 일정한 흐름에 대한 자유해면경계조건을 고정벽면조건으로 하면서 진행파에 대해서는 일차의 자유해면조건으로 하여 수정된 흐름장을 포함하도록 확장할 수가 있다. 이와 같은 접근에 근거하여 Isaacson & Cheung (1993) 과 Cheung 등 (1995)은 각각 2차원 및 3차원문제에 대한 시간영역에서의 해를 제시하였다. 이들은 Zhao & Faltinsen (1988) 및 Nossen 등 (1991)의 주파수영역에서의 해와 비교하여 매우 양호한 결과를 얻었다. Cheung 등 (1995)의 수치모델은 해면에 노출한 3차원구조물 부근에서 균일류가 존재할 때 규칙파랑의 회절효과를 조사하고 있다.

한편, 구조물이 완전히 해면하에 있는 경우에는

파랑과 흐름의 상호작용에 관한 문제를 더욱 단순화하여 균일류하의 파랑의 산란문제로 다룰 수 있다. 본 연구에서는 수치모델을 흐름이 있는 곳에서 해저에 설계된 파랑집적구조물에 적용하기 위해서 확장한 것으로 파랑과 흐름이 같은 방향, 반대방향 및 경사진 각도로 입사될 때의 영향을 검토하기로 한다. 본 연구에서는 흐름의 속도와 방향에 따라 집적점의 위치, 진폭 및 파형의 상호관계를 조사하는데 목적을 두기로 하였다.

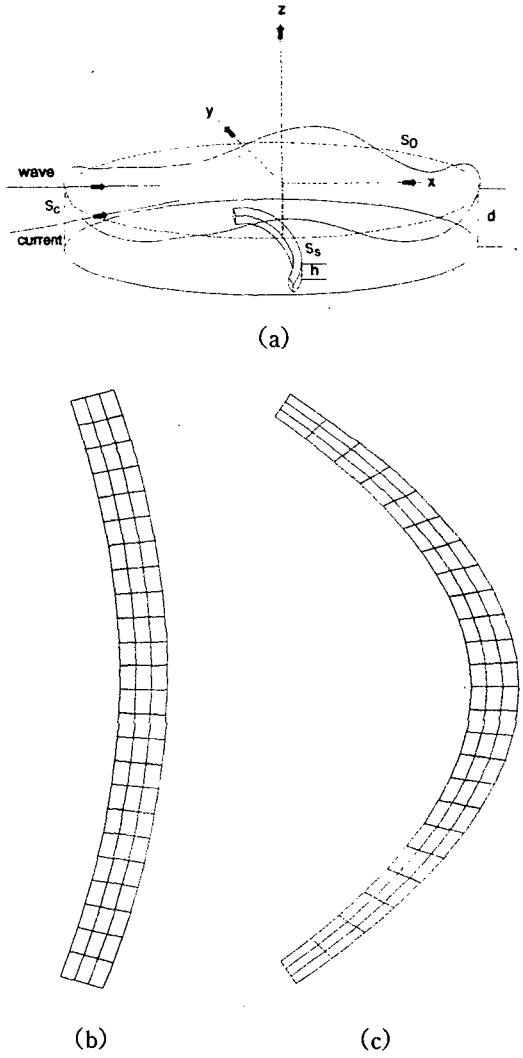


Fig.1 Definition sketch and plan form of adopted structures

2. 이론적 배경

2.1 문제의 기술

Fig. 1에서 경계치문제를 수평좌표계 (x, y)와 정수면으로 부터 상방향으로 수직좌표계 (z)를 취해 서로 직교하도록 하여 정의하고 해저구조물은 그림에서와 같이 계산영역의 중앙에 일정한 높이 h로 계획하고 수심은 d로 한다. 입사파는 x−z평면에서 2차원적으로 x축의 양의방향으로 진행하는 것으로 하며 흐름은 x축의 양의 방향에 대해 임의의 각 α로 주어지는 것으로 하였다. 유체는 비압축성으로 점성이 없으며 비회전류인 것으로 하여 흐름장을 Laplace 방정식을 만족하는 속도포텐셜 φ로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\nabla^2\phi = 0 \quad \cdots\cdots (1)$$

선형해를 구하기 때문에 속도포텐셜을 유속과 파고에 비례하는 각각의 성분의 합으로 나타낼 수 있다.(*Nossen, et al.*, 1991)

$$\phi = U(x\cos\alpha + y\sin\alpha) + \phi_b + \phi_w + \phi_s \quad \cdots\cdots (2)$$

여기서 U 는 유속으로 우측 1항은 균일류에 해당한다. ϕ_b는 구조물때문에 균일류가 일정하게 변형되는 성분을 나타내고 ϕ_w와 ϕ_s는 각각 입사파와 산란파의 성분을 나타낸다. 이때 유속은 작은 것으로 가정하면 흐름과 관계된 자유해면의 일정한 성분은 무시할 수 있는 것으로 된다. 따라서 자유해면의 변화는 단순히 입사파와 산란파 성분의 합으로 식 (3)과 같이 정리된다.

$$\eta = \eta_w + \eta_s \quad \cdots\cdots (3)$$

균일류에 실린 규칙입사파의 경우는 선형파이론으로 부터 입사파의 속도포텐셜과 자유해면을 다음 식 (4), (5)와 같이 정의할 수 있다.

$$\phi_w = \frac{\pi H}{kT}\frac{\cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)}\sin(kx-\omega_c t) \quad \cdots\cdots (4)$$

$$\eta_w = \frac{H}{2}\cos(kx-\omega_c t) \quad \cdots\cdots (5)$$

여기서 H는 파고, T는 균일류에 대한 파의 주기, k는 파수, $\omega_c = \omega + kU\cos\alpha$ 로 어느 고정점에 대한 상대적인 입사파의 각주파수를 나타내며 이때 $\omega = \frac{2\pi}{T}$ 는 균일류에 대한 상대 각주파수를 나타낸다.

2.2 지배방정식

해저면 및 구조물의 표면 S_s에서의 산란 속도포텐셜에 대한 경계조건식은 각각

$$\frac{\partial\phi_s}{\partial z} = 0 \qquad at \quad z=-d \quad \cdots\cdots (6)$$

$$\frac{\partial\phi_s}{\partial n} = -\frac{\partial\phi_w}{\partial n} \quad on \quad S_s \quad \cdots\cdots (7)$$

여기서 흐름이 존재하면 운동학적 (kinematic) 및 동적 (dynamic) 자유해면 경계조건식은 각각 다음과 같이 수정된다.

$$\frac{\partial\phi_s}{\partial z} - \frac{\partial\eta_s}{\partial t} - U\left[\frac{\partial\eta_s}{\partial x}\cos\alpha + \frac{\partial\eta_s}{\partial y}\sin\alpha\right] = \left[\frac{\partial\eta_w}{\partial x}+\frac{\partial\eta_s}{\partial x}\right]\frac{\partial\phi_b}{\partial x} + \left[\frac{\partial\eta_w}{\partial y}+\frac{\partial\eta_s}{\partial y}\right]\frac{\partial\phi_b}{\partial y} - (\eta_w+\eta_s)\frac{\partial^2\phi_S}{\partial z^2} \quad on \quad S_o \quad \cdots\cdots (8)$$

$$\frac{\partial\phi_s}{\partial t} + g\eta_s + U\left[\frac{\partial\phi_s}{\partial x}\cos\alpha + \frac{\partial\phi_s}{\partial y}\sin\alpha\right] = -\left[\frac{\partial\phi_w}{\partial x}+\frac{\partial\phi_s}{\partial x}\right]\frac{\partial\phi_b}{\partial x} - \left[\frac{\partial\phi_w}{\partial y}+\frac{\partial\phi_s}{\partial y}\right]\frac{\partial\phi_b}{\partial y}$$

$$on \quad S_o \quad \cdots\cdots (9)$$

이때 S_o는 정수해면을 나타낸다. 식 (8) 및 (9)의 우측항은 구조물 주위에서 국지적흐름장에 의한 입사파와 산란파의 변형을 나타내며, 만약 구조물이 완전히 해면아래에 놓인 경우에는 이의 단면크기가 수심에 비해 작을 때에는 해면의 유속에 대한 구조물의 영향은 무시할 정도가 된다. 따라서 식 (8) 및 (9)의 우측항은 다른 항에 비해 한차원 작은 값으로 수치모델에서는 이를 제외시키기로 한다. 결과적으로 ϕ_b에 대한 해는 필요하지 않게 된다.

흐름의 존재로 인해 산란파의 파속은 산란파 및 흐름의 방향에 따라 달라지며 방사조건 (radiation condition ; Orlanski, 1976)을 조정면 (control surface) S_c 에서의 공간의존 파속을 나타낼 수 있도록 다음 식 (10)과 같이 확장시키기로 한다.

$$\frac{\partial\phi_s}{\partial t} + c\frac{\partial\phi_s}{\partial n} = 0 \quad \cdots\cdots (10)$$

여기서 c는 구조물에서부터 충분히 떨어진 거리에 위치한 조정면에서의 외부로 향하는 파속을 시간의 함수로 나타낸 것이다 (Isaacson & Cheung, 1992).

2.3 수치해석

산란파에 대한 속도포텐셜로 나타난 경계치문제는 Green함수 G를 도입하여 적분방정식의 적용으로 풀 수 있다. 즉,

$$\phi_s(\mathbf{x}) = \frac{1}{2\pi}\int_s \left[G(\mathbf{x},\xi)\frac{\partial\phi_s}{\partial n} - \phi_s(\mathbf{x})\frac{\partial G}{\partial n}(\mathbf{x},\xi)\right] dS \quad \cdots\cdots (11)$$

이 때 ξ는 적분을 수행하게 되는 표면 S에서 한점 (ξ, Ψ, ζ)를 나타내며 n은 점 ξ에서 측정한다. 표면 S는 구조물의 표면, 정수해면, 해저면, 그리고 무한 유체의 영역을 제한한 조정면으로 구성한다.

해저면이 수평인 경우에는 S에서 해저면을 제외시키고 해저면에 대해 식 (12)와 같이 대칭을 나타내는 Green 함수를 도입하는 것이 효과적이다.

$$G(x,\xi) = \frac{1}{|\xi-x|} + \frac{1}{|\xi'-x|} \quad \cdots\cdots (12)$$

이 식에서 용출점 (source point) $\xi' = [\xi, \Psi, -(\zeta+2d)]$는 해저면에 대해 대칭인 ξ의 영상이다. 만약 흐름장도 역시 x 축에 대해 대칭이면 이중

대칭을 나타내는 Green 함수를 사용할 수 있다 (Isaacson & Cheung, 1992).

Isaacson & Cheung (1992, 1993)이 기술한 수치해석법을 상기의 정식화에도 바로 적용할 수 있으며 여기에서는 단지 이의 개요만을 기술하기로 한다. 경계치문제에 대한 해는 수치적으로 유한하게 요소로 분할하여 구하는데, 여기서 표면 S_c, S_s 및 S_o는 평면 4각형으로 분할 하였다. 속도포텐셜 ϕ_s와 $-\frac{\partial\phi_s}{\partial n}$은 각 요소내에서는 일정하고 요소의 중심에 적용하는 것으로 하였다. 그 후 적분방정식을 연립방정식계로 정리하면 이 방정식이 기하학적인 형상 및 분할된 요소만의 함수로 나타나기 때문에 계의 방정식에 대한 해는 한 번만 요구되며 수치모델을 여러가지 입사파와 흐름의 상태에 대해 적용할 수 있게 된다.

방정식계에 대한 입력vector는 체표면경계조건 (body surface boundary condition)으로 알려진 산란파의 속도포텐셜의 직교방향 도함수와 상응한 경계조건을 시간변환과정을 통해 구할 수 있는 조정면 및 정수해면의 속도포텐셜로 구성된다. 시간 t=0인 초기조건으로는 계산영역에서 균일류에 변형이 없는 규칙파군을 싣는 것으로 하고 산란파의 속도포텐셜은 일률적으로 0으로 두어 구조물이 흐름장에 전혀 영향을 미치지 않는 것으로 한다. 변환함수를 사용해서 처음의 1주기동안 점진적으로 체표면경계조건을 부여하면 대개 처음의 2주기 이 후부터 구조물 주위에서의 정상상태의 해가 발달하게 된다.

3. 결과 및 토론

수치모델을 통해 계획한 파랑에너지 집적구조물의 효과를 검토하기 위해서 흐름과 파랑이 공존하는 해역에서 해저면에 폭이 좁은 포물형 단 (berm)을 설계하고 이로 인한 회절 및 반사로 인한 집적상태를 조사하였다. 이 구조물의 중앙선은 Fig.1(a)에서와 같이 x와 y축의 중심에 식 (13) 의 포물형의 정점이 위치하도록 하였다.

$$y^2 = -4\alpha x \quad \cdots\cdots (13)$$

이 때 α는 이 정점과 촛점 즉 집적점간의 거리를 나타낸다. Fig.1의 (b), (c)는 각각 구조물의 평면곡률을 달리한 형상의 변화와 구조물 표면을 평면사각형으로 분할한 모양을 나타내는데 (b)는 178개의 요소, (c)는 180개의 요소로 구성하였다. 입사파장 L에 대해 구조물의 폭 및 길이는 각각 $0.25L$ 및 $2L$로 하고 구조물의 높이는 수심의 반 (h/d=0.5)으로 하였다. 계산범위는 $4.5L\times3L$로 하였으나 결과는 구조물 주위의 $3L\times3L$ 영역만으로 제한하여 나타내었다. 여러가지 실험조건 중에서 Fig.1(b)에 대해서는 적용한 수심을 kd=0.5, 거리 a를 $1.25L$로 하여 Case 1, Fig.1(c)에 대해서는 각각 kd=1.0, $a=0.32L$로 하여 Case 2로 두고 이들의 결과만을 분석하기로 한다.

먼저 Case 1의 경우를 살펴보면 유속이 0인 때 계산영역에서 파랑의 진폭을 3차원 및 2차원으로 나타면 Fig.2와 같다. 진폭은 입사파의 진폭에 대

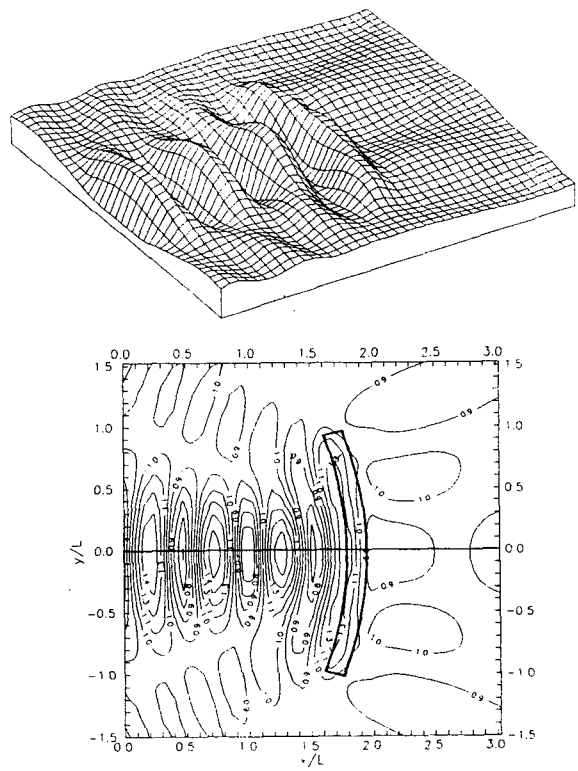
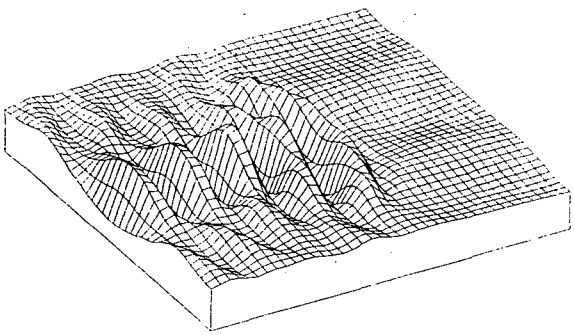


Fig. 2 Perspective view and contour plots of the computed wave amplitude for $U/\sqrt{gd}=0$.

해 표준화하였으며 집적점에서 표준화된 진폭은 증폭비를 나타낸다. 2차원 증폭비 도형에서는 에너지 집적구조물의 평면 외곽선을 짙은 선으로 표시하였다. 구조물은 광학기기의 반사경의 역할을 하도록 하여 반사된 파가 계획한 집적점에 수렴하도록 하여 일련의 극점을 가진 부분적인 정상파의 형태를 가진 계를 구성하도록 하였다. 구조물 배후의 파랑장은 그렇게 심한 변화는 없으며 인접 해역에서도 파랑의 영향도 극히 작았다. 이 경우의 증폭비는 1.53 정도였다. 파랑에너지는 파고의 제곱에 비례하므로 이경우 에너지의 수준이 234% 정도로 상승한 것을 의미한다. 같은 파랑, 흐름 및 수심 등 외적조건하에서 이 수준을 올리기 위해서는 보다 긴 구조물을 도입하면 가능할 것으로 사료된다.



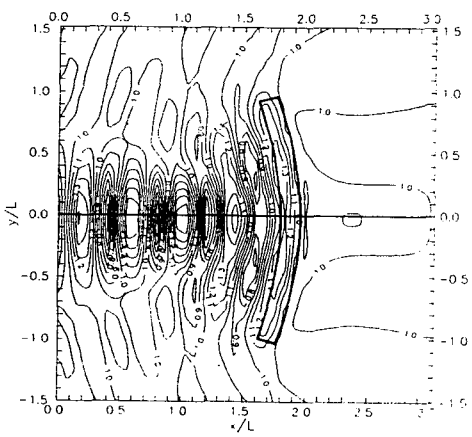
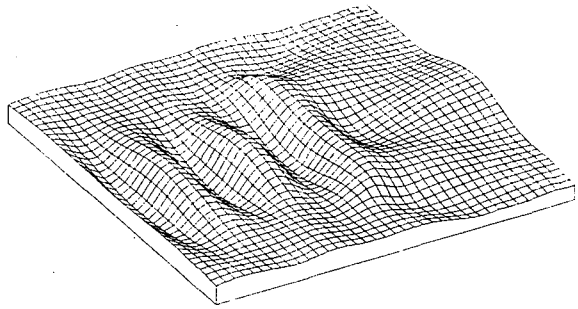


Fig.3 Perspective view and contour plots of the computed wave amplitude for $U/\sqrt{gd}=0.2$ and $\alpha=0°$.



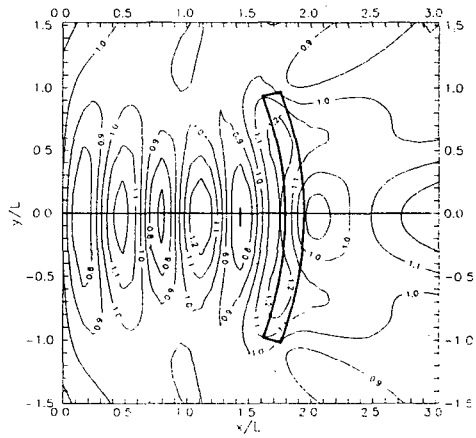
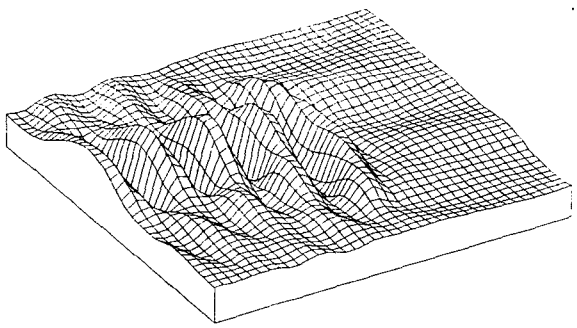


Fig.4 Perspective view and contour plots of the computed wave amplitude for $U/\sqrt{gd}=0.2$ and $\alpha=180°$.

파랑과 흐름의 방향이 동일하게 작용하는 경우에는 두 사이각이 $\alpha=0°$, 반대방향으로 작용하는 경우에는 $\alpha=180°$ 로 각각 Fig.3과 Fig.4에서 나타낸 바와 같다. 이 두가지 경우 유속은 똑같이 $\frac{U}{\sqrt{gd}}=0.2$이다. $\alpha=0°$ 인 경우 구조물로부터 반사된 파는 흐름을 거슬러 진행하게 되어 진폭이 증폭되는데 비해 파장은 짧아진다. Fig.3 에서와 같이 구조물 주위에서의 부분정상파계는 흐름으로 인해 현저히 수정된다. 집적점은 구조물쪽으로 이동되며 집적점에서의 파형은 예민해지고 진폭도 증가하게 된다. $\alpha=180°$인 경우에는 반사파가 흐름과 동일방향으로 진행하게 되어 파장은 길어지고 그 반면에 진폭은 작아진다. Fig.4에서와 같이 집적점은 구조물에서 멀어지게 되고 집

적점에서의 파형은 둔하며 진폭도 감쇄하게 된다.

Fig.5와 Fig.6은 각각 $\alpha=45°$, $\alpha=90°$ 인 경우로 Froude No.가 공히 0.2일 때이다. $\alpha=45°$ 인 경우에는 x방향의 유속성분이 반사파에 대해 진폭을 증가시키고 파장은 감쇄시키는 반면 y방향의 유속성분은 반사파의 방향을 변화시키게 된다. 따라서 집적점은 흐름의 방향으로 이동되면서 진폭이 약간 상승하는 것이 기록되었다. 파랑과 흐름이 직교하는 경우, 즉 $\alpha=90°$ $\alpha=90°$ 일 때에는 x 방향으로 진폭 및 위상의 단면형상은 그렇게 큰 영향은 없으나 Fig.6 에서와 같이 파형이 전반적으로 흐름의 방향으로 이동된 것을 알았다.



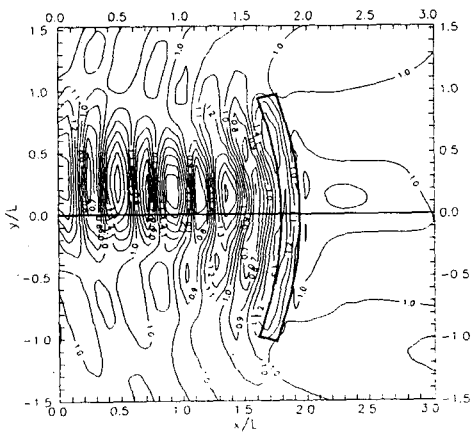
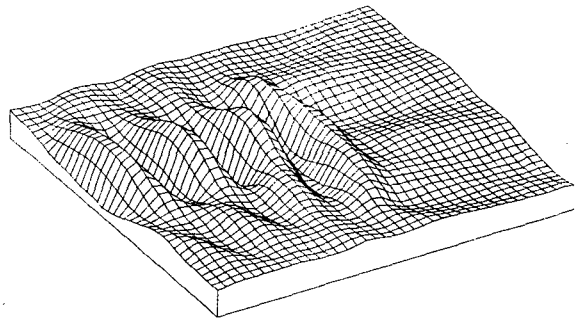


Fig.5 Perspective view and contour plots of the computed wave amplitude for $U/\sqrt{gd}=0.2$ and $\alpha=45°$.



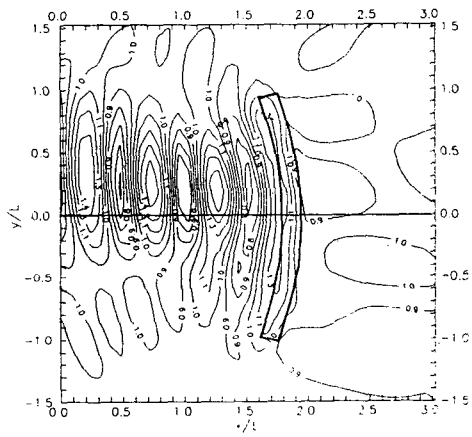


Fig.6 Perspective view and contour plots of the computed wave amplitude for $U/\sqrt{gd}=0.2$ and $\alpha=90°$.

특히 가장 관심이 있는 부분은 '집적점에서 흐름으로 인해 증폭비가 어떻게 변화할 것인가?로 Fig.7과 같이 증폭비를 Froude No. 와 유향의 함수로 나타내어 보았다. $\alpha=0°$ 의 경우 증폭비는 Froude No. 가 작을 때에 높은 반사파가 형성되므로 증폭비가 높아지고 Froude No. 가 커지면 반사파고의 증가분이 입사파와 반사파간의 위상차로 인해 상쇄되므로 점차 안정된다. 이와 유사하게 $\alpha=45°$ 인 경우에도 Froude No. 가 높아지면 증폭비가 안정되는 것으로 나타났다. $\alpha=90°$ 에 대해서는 파형이 y 방향으로 이동되기만 하며 파의 진폭에는 그다지 영향을 미치지 않았다. 증폭비는 고려한 Froude No. 범위내에서 비교적 일정한 것으로 나타났다. Froude No.의 범위는 연

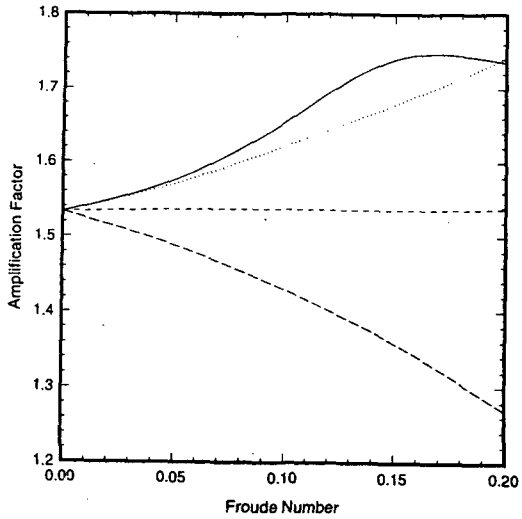


Fig.7 Amplification factor as a function of the Froude number and current direction.____, α=0° ; ·····, α=45° ; -----, α=90° ; – –, α=180° .

안해역에서 보편적인 조류의 크기 (1~4kts)를 고려한 것으로 현실성을 배려하였다. 한편, 파랑과 흐름이 반대방향인 경우에는 낮고 긴 반사파로 인해 Froude No. 가 증가함에 따라 증폭비는 감쇄하였다.

흐름이 존재하는 경우에 에너지 집적점의 위치는 파력발생장치의 위치설정에 중요하므로 Fig.8a 및 Fig.8b에서 각각 x, y 방향으로 집적점의 이동을 Froude No. 와 유향의 함수로 조사하여 보았다. 먼저 x방향의 이동은 반사파의 파장 및 진폭에 변화로 인한 것이며 y방향의 이동은 그방향으로 유속성분이 직접 영향을 미치는 때문이다. 따라서 α = 0° , α = 180° 인 경우에는 y방향의 이동이 없었으나 α = 45° , α = 90° 인 경우에는 Froude No.가 커짐에 따라 y방향의 이동량도 증가하여 Froude No.가 아주 커지면 1파장의 상당한 부분에 해당할 만큼 벌어지게 될 것이다.

Case 2의 경우 집적점이 구조물의 정점부근에 위치하도록 설계하였으므로 전반적으로 집파효과가 낮게 나타났다. 이는 Fig.7 및 Fig.8(b)에서와

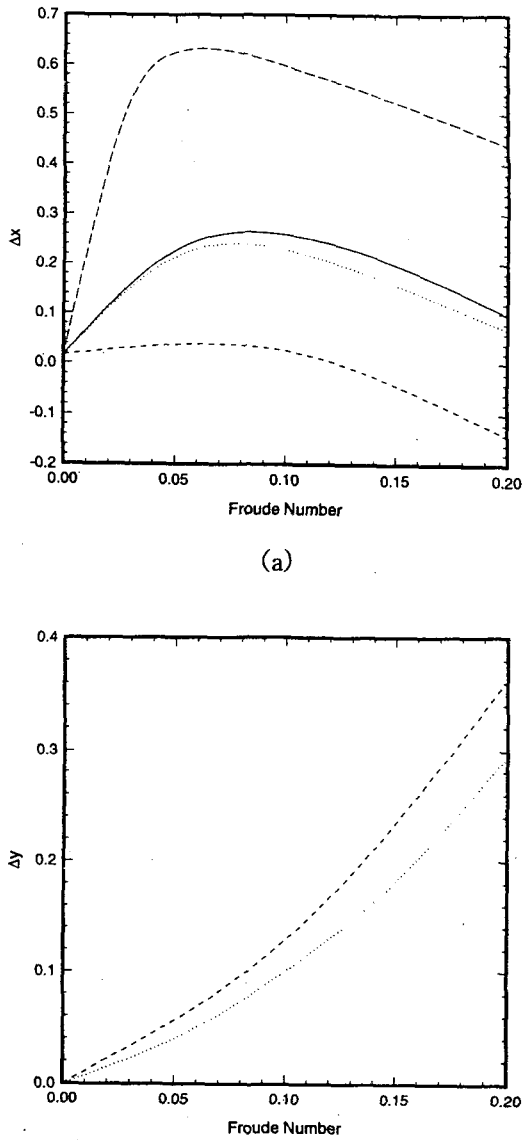


Fig.8 Displacement of focal point as a function of the Froude number and current direction. (a) x direction. (b) y direction. ____, α=0° ; ·····, α=45° ; -----, α=90° ; – –, α=180° .

같이 증폭이 충분히 이루어지지 않은 Froude No. $(U/\sqrt{gd})=0.05$에서의 결과이기 때문이며, 또한

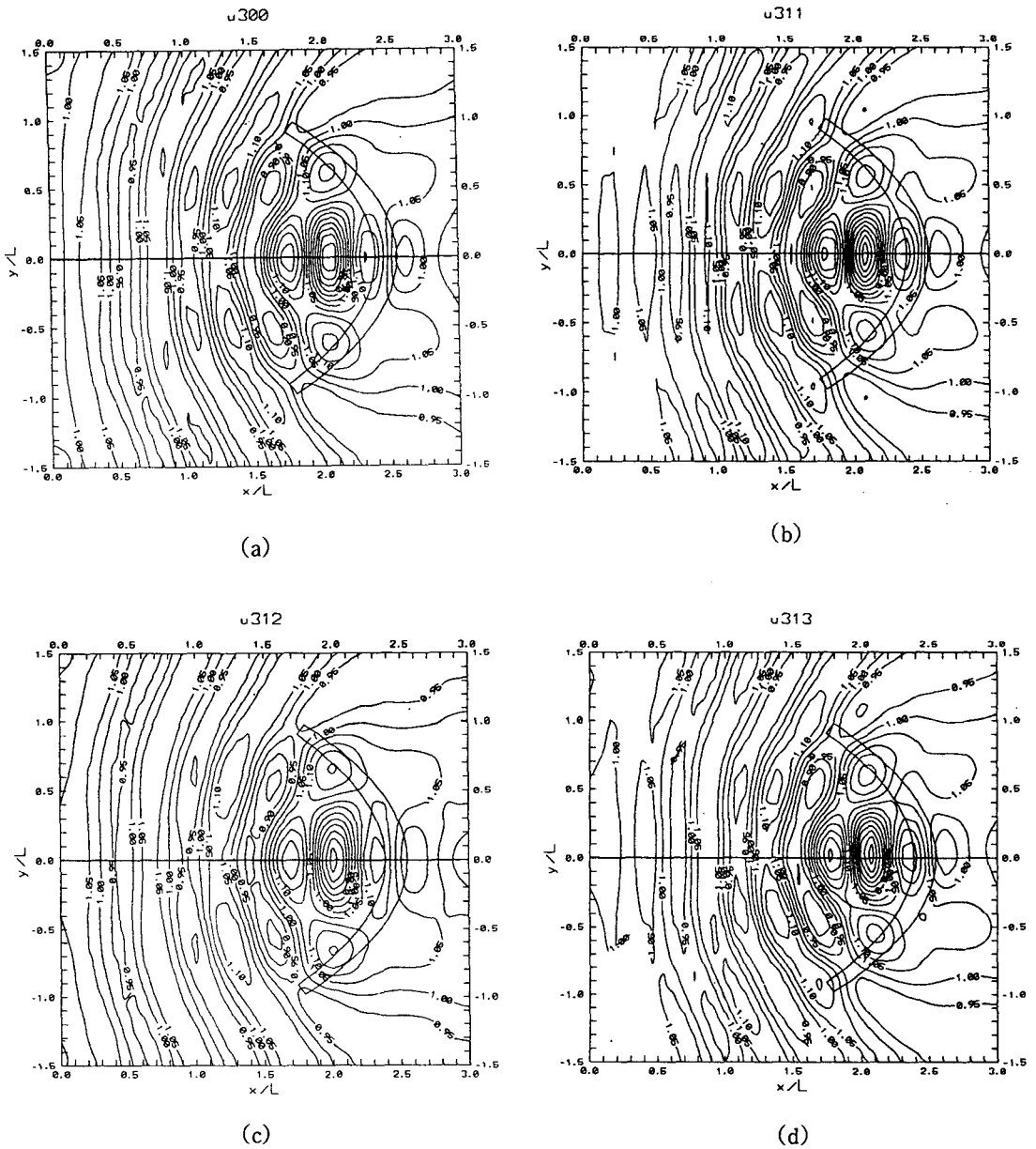


Fig.9 Contour plots of the computed wave amplitude for $U/\sqrt{gd}=0.0$ (a), $U/\sqrt{gd}=0.05$, $\alpha=0°$ (b), $U/\sqrt{gd}=0.05$, $\alpha=180°$ (c), and $U/\sqrt{gd}=0.05$, $\alpha=45°$ (d)

집적점의 위치가 구조물에 인접해 있어서 집적된 에너지가 구조물 상단으로 통과되어버리는 것으로 사료된다. Case 1은 Case 2의 정점부근에 해당하는 구조물을 확대하여 설계한 것으로 볼 수 있다. 구조물이 점하는 공간적인 배치특성 때문에 파형이 구조물 전면에서 굴곡이 더욱 심한 경우

를 제외하면 Froude No.와 관련한 증폭비, 집적 No.와 관련한 증폭비, 집적점의 이동 등은 전반적으로 Case 1과 동일한 양상을 보인다. 또한, 같은 Froude No.의 조건에서는 파랑과 흐름이 동일 방향에서는 진폭은 증폭되나 파장은 짧아지며 집적점은 구조물쪽으로 이동되고, 반대방향에서는 이의 반대현상을 관찰할 수 있었다.

4. 결 론

파랑과 흐름이 공존하는 해역에서 파랑집적 구조물의 효과를 조사하기 위하여 수치모델을 개발하였다. 본 연구에서 고려한 구조물의 규모는 전통적인 파랑집적구조물에 비해 작고 파랑에너지도 입사파를 회절 및 반사시켜 집적하려는 시도를 해 보았다. 이를 위해 해저면에 폭이 좁은 직립구조물을 설계하고 평면형상은 계획된 에너지 집적점을 가지도록 광학이론에서 출발한 포물형 구조로 하였다. 또한 수치시뮬레이션을 통하여 제안한 구조물이 효과적으로 입사파의 에너지를 집적시키고 있음을 나타내어 보였다. 자유해면의 진폭, 증폭비 및 집적점의 이동을 Froude No. 와 유향의 함수로 나타내었다.

특히 시뮬레이션에 의하면 에너지 밀도가 집적점에서 증가할 뿐만 아니라 구조물 전면의 여러 지점에서도 증가하는 것이 발견되었다. 결과적으로 유속과 유향에 따라서는 진폭과 집적점의 위치가 현저하게 변화하는 등 흐름이 파랑에너지 집적구조물의 성과에 상당한 영향을 미치고 있음을 알게 되었다. 따라서 이와 같은 형태의 에너지 집적장치를 설계하거나 운영할 때에는 흐름의 영향을 반드시 고려하여야 할 것으로 본다.

감사의 글

본 연구는 교육부 한국학술진흥재단의 1993년도 국비해외파견연구(공동연구)지원에 의한 University of Hawaii의 해양공학과에서 연구한 결과의 일부이며, 지원하여 주신 동 재단에 감사드립니다. 아울러 실험을 위해 동대학의 J. K. K. Look Lab 시설을 이용하도록 허락하여 주신 H. J. Krock 박사께도 사의를 표합니다.

참고문헌

국승기, 이중우 (1992), 해저구조물 설치에 따른 파랑에너지 집적에 관한 연구, 한국항만학회지 제 6권 1호.

이중우, 한스 크록 (1994), 파랑에너지 집적 및 연안해역 제어를 위한 해저구조물의 설계, 한국항만학회지, 제 8권 2호.

Cheung, K.F., Lee, J.W. and Isaacson, M. (1995), "Wave diffraction around a three-dimensional body in a current." Proceedings of the Fourteenth International Conference on Offshore Mechanics and Archtic Engineering, Copenhagen, Denmark, to appear.

Ertekin, R.C. and Monopolis, G.M. (1985), "Investigation of wave focusing over a parabolic step." Hydrodynamics of Ocean Wave-Energy Utilization, edited by D.V. Evans and A.F. de O. Falcao, pp. 433－346.

Helstad, J. (1980), "Power production based on focused ocean swell." Norwegian Maritime Research, Vol. 4, pp. 34－42.

Imai, K., Akiyama, Y. and Kudo, K. (1988), "Wave focusing due to a submerged cresecent plate." Coastal Engineering in Japan, Vol. 31, No. 2, pp. 231－243.

Isaacson, M. and Cheung, K.F. (1992), "Time-domain second-order wave diffraction in three dimensions." Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 118, No. 5, pp. 496－516.

Isaacson, M. and Cheung, K.F. (1993), "Time-domain solution for wave-current interac-

tions with a two-dimensional body." Applied Ocean Research, Vol. 15, No. 1, pp. 39 −52.

Kudo, K., Tsuzuku, T., Imai, K. and Akiyama, Y. (1987), "A wave focusing phenomenon by a submerged plate." Journal of the Society of Naval Architecture of Japan, Vol. 106, pp. 35−43.

McCormick, M. (1981), "Ocean wave energy conversion." John Wiley & Sons, New York.

McCormick, M., Kastner, R. and Glover, L.. (1980), "Water wave focusing by submerged lens-shaped structures." U.S. Naval Academy, Report EW-14-80.

Mehlum, E. and Stamnes, J. (1980), "On the focusing of ocean swells and its significanc—e in power production." Proceedings of the First Symposium of Wave Energy Utilization, Gothenburg, Sweden, pp. 29−35.

Murashige, S. and Kinoshita, T. (1992), "An ideal ocean wave focusing lens and its shape." Applied Ocean Research, Vol. 14, No.4, pp. 275−290.

Nossen, J., Grue, J. and Palm, E. (1991), "Wave forces on three-dimensional floating bodies with small forward speed." Journal of Fluid Mechanics, Vol. 227, pp. 135−160.

Orlanski, I. (1976), "A simple boundary condition for unbounded hypdrbolic flows." Journal of Computational Physics, Vol. 21, pp. 251 −269.

Yang, C. and Ertekin, R.C. (1990), "Numerical simulation of wave-energy focusing." Proceedings of Oceans 91, Vol. 1, pp. 539−546.

Zhao, R. and Faltinsen, O.M. (1988), "Interaction between waves and current on a two-dimensional body in the free surface." Applied Ocean Research, Vol. 10, No. 2, pp. 87−99.