

OWC 플랜트 주위 파랑변형

김 용 직* · 김 동 준* · 윤 길 수** · 류 청 로** · 홍 석 원***
(97년 1월 29일 접수)

Wave Deformation due to Oscillating Water Column Plant

Yong-Jig Kim* · Dong-Joon Kim* · Gil-Su Yoon** · Cheong-Ro Ryu** · Seok-Won Hong***

Key words : Wave deformation(파랑변형), Oscillating water column plant(진동수주 플랜트), Improved Green integral equation(개량된 그린 적분방정식), Three dimensional wave deformation analysis(3차원 파랑변형해석)

Abstract

Wave deformation due to Oscillating water column (OWC) plant was studied. To solve this problem, three dimensional numerical method based on Improved Green integral equation was applied. Moored condition was considered as well as fixed condition and freely floating condition. From the calculation results, main characteristics of wave deformation due to OWC plant were discussed. Also, some calculations for the floating barge were performed to confirm the validity of numerical solution of the method.

1. 서 언

파랑중에 계류되어 있는 구조물은 입사되는 해양 파로부터 기진력을 받아 운동하게 되고, 이때 구조물의 운동에 의해 발생하는 방사파(radiation wave)와 구조물에 의해 산란되는 산란파(diffraction wave)가 입사파(incident wave)에 중첩되어 구조물 주위에는 다양한 파랑변형(wave deformation)이 발생하게 된다. 이러한 파랑변형은 주위 파랑환경에 중요한 영향을 미칠 수 있고, 특히 주위에 파랑관측장치를 설치할 경우 이 파랑변형의 영향을 고려할 필요가 있다.

부유식 구조물에 의한 파랑변형은 지금까지 주로 부방파제의 소파효과를 해석하기 위해 다루어져 왔고, 해석법도 2차원 해석법이 주로 쓰여 왔다고 할 수 있다^{1),2)}. 본 연구에서는 임의 형상을 갖는 3차원 부유체에 의한 파랑변형을 다루기 위해 Green 적분방정식에 기초한 3차원 수치해법을 사용하였고, 적용 예로서 직경 13m인 진동수주(OWC ; oscillating water column) 플랜트에 의한 파랑변형을 고찰하였다. 이 OWC 플랜트는 본래 파랑발전을 위한 시설이며 파랑발전에는 챔버내 공기유동과 내부 수면과의 상호작용이 중요하나, 본 연구에서는 플랜트 외부의 파랑변형에 중

* 부경대학교 공과대학 선박공학과
** 부경대학교 해양과학대학 해양공학부
*** 한국기계연구원 선박해양공학연구센터

점을 두었으며 문제의 복잡성을 피하기 위해 챔버 내 공기유동의 영향은 고려하지 않았다.

수치계산의 타당성을 검증하기 위해 비교적 많은 자료가 있는 바이저형 부유체에 대한 계산을 수행하였다. OWC 플랜트에 대한 계산에서 계류계의 구속력에 따른 변화를 보기 위해 일차 추정된 다점 taut 계류계에 의한 계류상태외에 고정상태와 자유 부양상태에 대한 계산도 함께 수행하였다. 계산결과들로부터 플랜트에 의한 파반사 및 소파효과, 파진폭의 분포, 파랑변형 효과가 미치는 범위등 플랜트에 의한 파랑변형의 주요 특성등을 고찰하였다.

2. 해석방법

2.1 문제의 정식화

유체는 비점성, 비압축성 유체이고, 비회전유동을 한다고 가정하여 속도포텐셜로 그 유동을 나타낸다. 물체는 강체운동을 한다고 가정하며, 좌표계는 직각좌표계 (x, y, z) 로 취하여 z 축을 중력의 반대방향으로 두고 x, y 축은 정수면상에 둔다. 문제를 선형화하기 위하여 입사파의 진폭 및 물체의 운동진폭은 작다고 가정한다.

이러한 가정하에 속도포텐셜 ϕ 를 다음과 같이 나타내며,

$$\phi = \text{Re}\{\phi(x, y, z)\exp(-i\omega t)\} \quad (1)$$

여기서, ω 는 조파운동의 원주파수이고, ϕ 는 복소포텐셜이다. 이 후의 수식에서 모든 시간함수는 식 (1)의 형태를 따른다. ϕ 를 다음과 같이 나타내며,

$$\phi = \phi_I + \phi_O + \phi_R \quad (2)$$

여기서, ϕ_I 는 입사파의 포텐셜, ϕ_O 는 산란파의 포텐셜, ϕ_R 는 방사파의 포텐셜을 뜻한다.

ϕ_I 는 Airy의 파이론을 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\phi_I = -\frac{gA}{2\omega} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \exp[ik(x\cos\gamma + y\sin\gamma)] \quad (3)$$

여기에서, g 는 중력 가속도, ω 는 입사파의 원주파수, A 는 입사파의 진폭, γ 는 입사파의 진행방향과 x 축과 이루는 각, k 는 분산관계를 만족하는 파

수이며, h 는 수심을 나타낸다.

ϕ_R 은 물체의 운동 6가지 성분에 대응하는 요소포텐셜 ($\phi_i, i=1, 2, \dots, 6$)로 다음과 같이 표시된다.

$$\phi_R = -i\omega \sum_{i=1}^6 \xi_i \phi_i \quad (4)$$

여기에서, ξ_i 는 물체의 복소 운동진폭을 나타내며, $i=1, 2, \dots, 6$ 은 각각 전후동요(surge), 좌우동요(sway), 상하동요(heave), 횡동요(roll), 종동요(pitch), 선수동요(yaw)를 나타낸다.

산란포텐셜 ϕ_O 까지를 포함하는 7개의 요소 속도포텐셜 $\phi_i (i=0, 1, \dots, 6)$ 에 대한 경계치 문제는 다음과 같은 지배방정식과 경계조건들로 형성된다.

$$\nabla^2 \phi_i = 0 \quad \text{in the fluid region} \quad (5)$$

$$\phi_{iz} - \frac{\omega^2}{g} \phi_i = 0 \quad \text{at } z=0 \quad (6)$$

$$\phi_{iz} = 0 \quad \text{at } z=-h \quad (7)$$

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial n} = \begin{cases} n_i & i=1, 2, \dots, 6 \\ -\frac{\partial \phi_I}{\partial n} & i=0 \end{cases}$$

$$\text{on the body surface} \quad (8)$$

Radiation condition(방사조건)

여기에서, n_1, n_2, n_3 는 유체영역 밖으로 향하는 단위 법선벡터의 각 축방향 성분 n_x, n_y, n_z 이며, n_4, n_5, n_6 은 각각 $y n_z - z n_y, z n_x - x n_z, x n_y - y n_x$ 이다.

2.2 경계치 문제의 수치해법 개요(Green 적분방정식 해법)

요소 포텐셜 ϕ_i 를 구하기 위한 해법은 여러 가지가 있으나, 여기에서는 물체표면에 Green 함수로 표현되는 소오스와 다브렛을 분포시키고 물체표면 경계조건을 만족시켜 그 분포세기를 구하는 Green 적분방정식 해법을 이용하였다. 사용된 Green 함수는 Wehausen and Laitone³⁾에 의해 주어진 주치적분(principal value integral)식과 급수

전개식이다.

Green 적분방정식을 이용한 해법에는 Green 함수의 계산과 물체표면에 대한 면적분등이 필수적이나 이의 수치계산이 까다로와 여러 가지 어려움이 따른다. 여기에서는 관측점과 용출점 사이의 수평거리와 파수의 곱이 0.1보다 작은 경우에는 주치적분식을 사용하였고, 주치적분의 계산에는 Endo에 의해 제안된 Gauss-Laguerre Quadrature를 이용한 방법⁴⁾을 사용하였다. 파수와 수평거리의 곱이 0.1보다 큰 경우는 주치적분식을 급수형태로 바꾸어 계산하는 것이 보다 효율적이므로 급수전개식³⁾을 사용하였다.

Green 정리로부터 다음의 관계식을 얻을 수 있다⁵⁾.

$$\int \int_S \left[\frac{\partial \phi(M)}{\partial n} G(P, M) - \phi(M) \frac{\partial G(P, M)}{\partial n} \right] dS$$

$$= \begin{cases} 4\pi\phi(P) & P \ni D \\ 2\pi\phi(P) & P \ni S \\ 0 & P \notin D \cup S \end{cases} \quad (9)$$

$$(10)$$

$$(11)$$

여기에서, $P(x, y, z)$ 는 관측점을 $M(a, b, c)$ 는 용출점을 각각 의미한다. D 는 유체영역을, S 는 물체 표면을 나타낸다. 물체표면에 분포되는 특이점 분포를 결정하기 위해서는 통상 식(10)을 이용한다.

수면에 떠 있는 물체의 경우 적분방정식(10)의 유일해를 찾을 수 없는 파수가 존재하며, 이러한 파수를 특이파수(irregular frequency)라 한다. 이의 제거에 대한 연구 역시 많이 이루어져 오고 있으나, 여기에서는 Hong⁶⁾의 방법을 따랐다. Hong의 방법에 따라 위의 식(10)과 식(11)를 결합하면 아래와 같다.

$$2\pi\phi(P) + \int \int_{S \cup WA} \phi(M) \frac{\partial G(P, M)}{\partial n} dS$$

$$= \int \int_S \frac{\partial \phi(M)}{\partial n} G(P, M) dS,$$

$$P \ni S \cup WA, \quad (12)$$

여기에서 WA 는 물체 내부의 가상 수선면을 의미한다. $P \ni WA$ & $M \ni WA$ 일 경우 Green함수는

$$G(P, M) = \frac{1}{r} + \frac{1}{r^*} \quad (13)$$

를 사용한다. 이 방법은 WA 상에 다브렛만을 분포시키고 그때의 법선속도가 0이 되도록 하는데, 이 방법을 개량된 Green 적분방정식 해법이라고 한다.

적분방정식(12)는 표면을 요소 분할하여 각 면적 요소 δS 에서 ϕ 및 $\frac{\partial \phi}{\partial n}$ 이 일정하다고 가정하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$2\pi\phi_i + \sum_{j=0}^{NT} \phi_j \int \int_{\delta S_j} \frac{\partial G_{ij}}{\partial n_j} dS_j = \sum_{j=1}^N \frac{\partial \phi_j}{\partial n_j} \int \int_{\delta S_j} G_{ij} dS_j, \quad i = 1, 2, \dots, NT \quad (14)$$

여기에서, i 와 j 는 요소번호를 나타내며, N 은 물체표면에서의 면 요소 수이고, NT 는 내부 수선면에서의 면 요소 수 NF 를 포함한 총 요소 수, $N+NF$ 이다. 식(14)로 얻어진 대수 방정식을 풀면 각 면적 요소에서의 포텐셜 값(다브렛의 세기)을 구할 수 있다. 이 다브렛의 분포와 이미 알고 있는 소오스의 세기 분포($\frac{\partial \phi}{\partial n}$)를 이용하여 유체 영역에서의 포텐셜 값이 계산된다.

Green 함수의 면적요소에 대한 적분 계산에서 $1/r$ 항에 대한 것은 Newman⁷⁾의 방법을 사용하였으며, $1/r$ 항을 제외한 부분에 대해서는 Gaussian 적분공식을 사용하였다. 이 Gaussian 적분은 면적 요소의 4점에서 계산한 값을 이용하여 적분을 근사시키는 방법으로 계산되었다⁸⁾.

2.3 운동응답 및 파형의 계산

속도 포텐셜이 얻어지면 Bernoulli 방정식에 의해 압력을 계산할 수 있고, 이 압력을 물체표면에서 적분함으로써 파 기진력과 부가질량 계수, 감쇠력 계수를 계산할 수 있다. 복소수 형태의 파 기진력은 다음과 같고,

$$F_i = i\omega\rho \int \int_S (\phi_0 + \phi_i) n_i dS \quad i = 1, 2, \dots, 6. \quad (15)$$

부가질량 계수 A_{ij} 와 감쇠력 계수 B_{ij} 는 다음과 같이 계산된다.

$$A_{ij} = \rho \int \int_S \text{Re}\{\phi_i n_j\} dS, \quad i = 1, 2, \dots, 6, \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad (16)$$

$$B_{ij} = \rho \omega \int \int \text{Im}\{\phi, n_j\} dS, \quad (17)$$

$i=1, 2, \dots, 6, \quad j=1, 2, \dots, 6$

물체의 복소 운동진폭을 구하기 위해 아래와 같은 주파수 영역에서의 물체 운동방정식을 풀어야 한다.

$$\sum_{j=1}^6 [-\omega^2(M_{ij} + A_{ij}) - i\omega(B_{ij} + B_{ij}^*) + (K_{ij} + K_{ij}^m)] \xi_j = F_i, \quad i=1, 2, \dots, 6 \quad (18)$$

여기서 M_{ij} , K_{ij} 는 물체의 질량행렬과 복원력 행렬을 의미하며⁹⁾, B_{ij}^* 는 유체점성에 기인하는 등가선형 감쇠계수(equivalent linear damping coefficient)이고, K_{ij}^m 은 계류계에 의한 복원력계수이다. 식(18)을 풀어 복소 운동진폭 ξ_i 를 얻고, 이를 이용하여 식(4)로부터 ϕ_R 이 계산된다.

또한, 얻어진 속도 포텐셜로부터 동역학적 자유 표면 경계조건을 이용하여 수면변위의 복소진폭 $\zeta(x, y)$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\zeta(x, y) = i \frac{\omega}{g} \phi(x, y, 0) = i \frac{\omega}{g} (\phi_I + \phi_O + \phi_R) \quad \text{on } z=0 \quad (19)$$

실제 수면변위 $\eta(x, y, t)$ 는 복소진폭 $\zeta(x, y)$ 로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\eta(x, y, t) = \text{Re}\{\zeta(x, y) \exp(-i\omega t)\} \quad (20)$$

3. 계산결과 및 고찰

3.1 바아지형 부유체에 대한 계산

바아지형 부유체는 Pinkster & Oortmerssen¹⁰⁾, Pinkster¹¹⁾, 홍외¹²⁾ 등 많은 연구자들에 의해 다루어져 온 대표적인 부유체라고 할 수 있다. 여기에서는 이에 대한 계산을 수행하여 수치계산의 타당성을 검증하고자 한다.

Fig.1에는 계산에 사용된 바아지의 표면요소 분할이 보여지고 있다. 수선면 이하의 물체표면을 188개의 요소로 분할하였으며, Table 1에는 이 바아지의 주요 요목이 보여지고 있다.

Table 1 Principal Particulars of Barge

Particulars	Value
Length (L)	150 m
Breadth (B)	50 m
Draft	10 m
Displaced Volume	73750 m ³
KG	10 m
GM	16.23 m
Gyradius of Pitch	39 m
Gyradius of Yaw	39 m
Gyradius of Roll	20 m

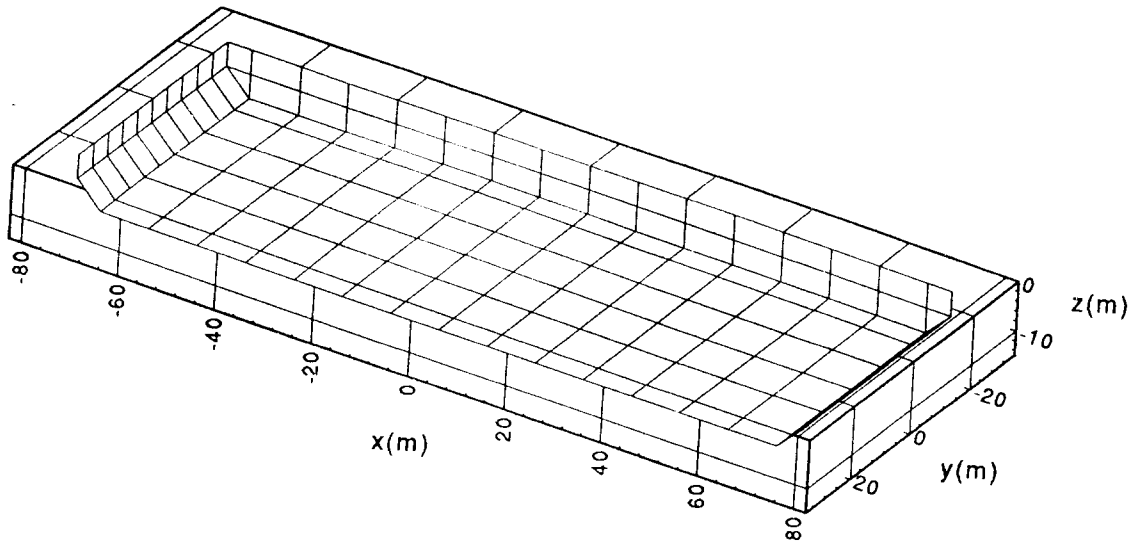


Fig.1 Facet representation of barge (N=188)

Fig.2에는 수심 50m해역에서의 선수 규칙파 ($\gamma = 180^\circ$)에 대한 시간평균 표류력의 한 성분이 보여지고 있다. Pinkster¹¹⁾의 결과와 비교하여 본 계산 결과가 매우 잘 일치함을 볼 수 있다. Fig.2의 표류력 성분은 상대파고의 제곱에 비례하는 항으로 다음과 같이 구해진다.

$$(F_i)_S^I = \frac{\rho g}{4} \int_{WL} \zeta_r \zeta_r^* n_i dl, \quad i=1,2,\dots,6 \quad (21)$$

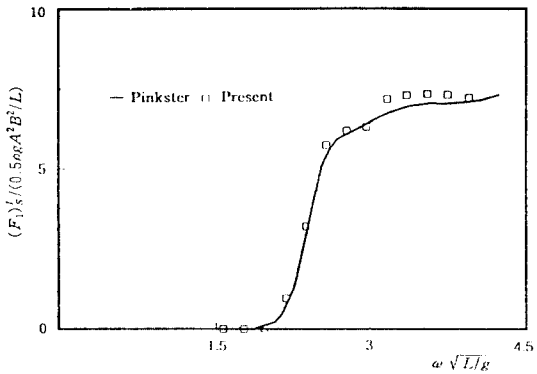


Fig.2 Comparison of the time-mean drift force due to relative free-surface elevation of barge in head sea condition

여기에서, ζ_r 은 파면과 물체와의 상대변위 (relative displacement) 복소진폭이며, ζ_r^* 는 이의 공액 복소수를 나타낸다. \int_{WL} 은 수선(water line)에서의 선적분을 나타낸다. 이 표류력 성분이 제대로 계산되기 위해서는 물체의 운동응답은 물론 파면변위의 계산이 정확해야 하는데, Fig.2에서 Pinkster의 결과와 잘 일치하므로 본 프로그램의 파변형 계산과 운동응답 계산이 타당함을 확인할 수 있다.

Fig.3에는 시간 $t=0$ (또는 $t=T$ 또는 $t=2T \dots$, T 는 파의 주기)일 때 자유롭게 운동하는 바이지 주위 파형상의 한 예가 보여지고 있다. 입사파의 원 주파수 $\omega=0.75$ rad/sec이며, 입사파가 y 축 방향으로 진행하는 횡파의 경우($\gamma=90^\circ$)이다. Fig.4에는 1/4 주기 후인 $t=T/4$ (또는 $5T/4$ 또는 $9T/4 \dots$)에서의 파 형상이 보여지고 있다. 구조물에 의한 파변형 효과를 보다 용이하게 파악하기 위해서는 각 위치에서의 파진폭 (η_a)을 산출하는 것이 필요하며, 이후의 파변형은 이들 파진폭의 분포로 나타내기로 한다. Fig.5에는 Fig.3, Fig.4와 같은 경우에 대한 바이지 주위 파진폭(입사파 진폭A로 무차원화 됨) 분포의 계산 예가 등고선형으로 보여지고 있다.

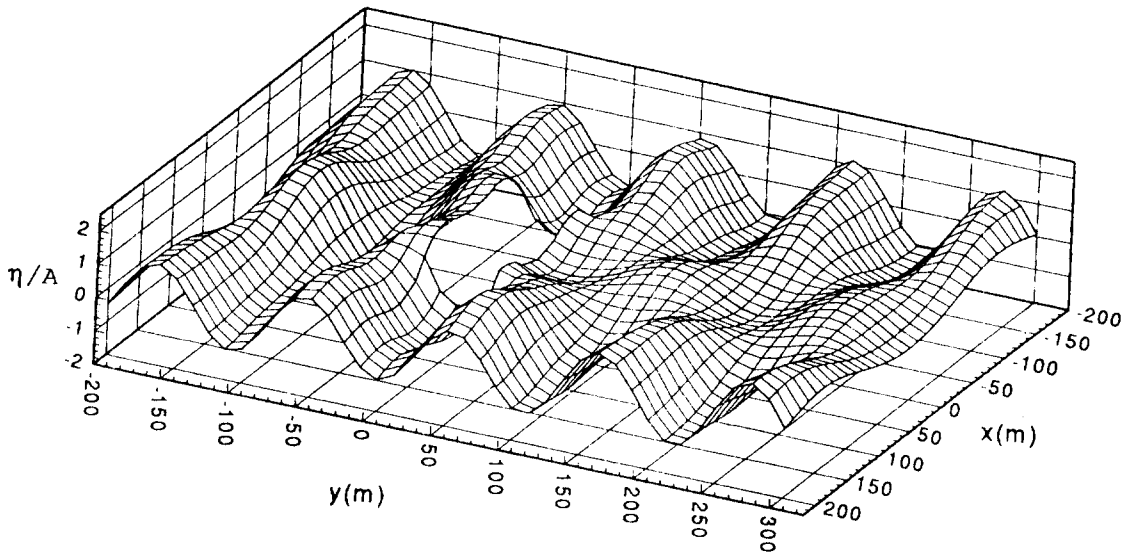


Fig.3 Wave profile at $t=0$ around the freely floating barge in beam sea ($\omega = 0.75$ rad/sec, $|\xi_2| = 0.421 \cdot A$, $|\xi_3| = 0.486 \cdot A$, $|\xi_4| = 1.175 \cdot \omega^2 A/g$)

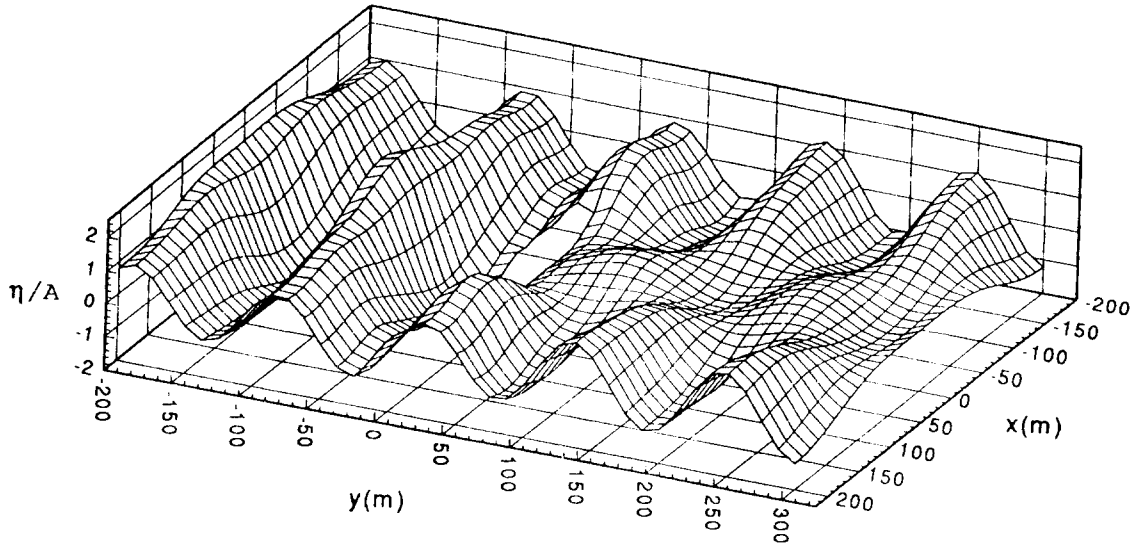


Fig.4 Wave profile at $t=T/4$ around the freely floating barge in beam sea(the same as in Fig.3)

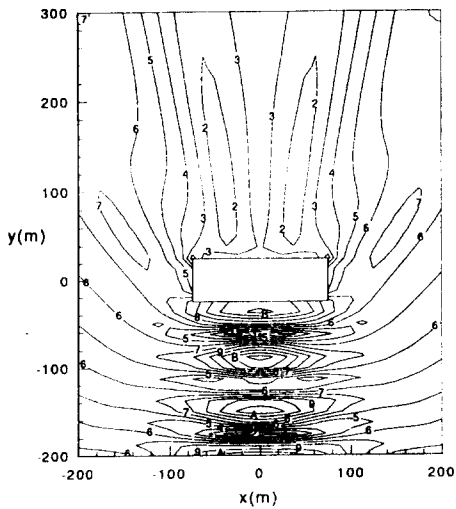


Fig.5 Contour plot of wave amplitudes around the freely floating barge in beam sea (the same as in Fig.3)

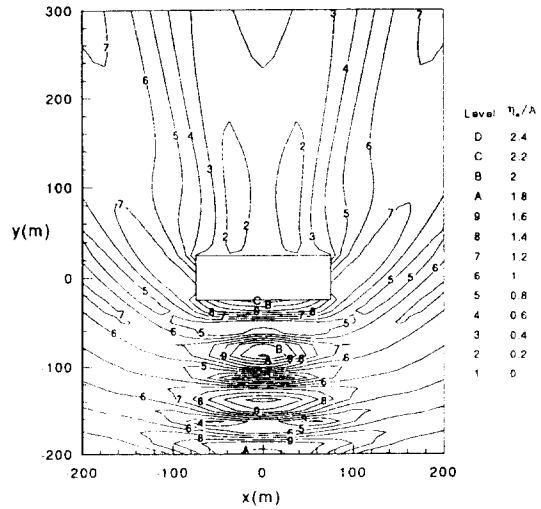


Fig.6 Contour plot of wave amplitudes around the fixed barge in beam sea ($\omega = 0.75 \text{ rad/sec}$)

Fig.6에는 바야지가 고정된 경우에 대한 계산 결과 (입사파 조건은 동일)가 보여지고 있다. Fig.5와 비교하여 두 경우의 차이가 크지 않은 것은 우연히 이 경우에 운동응답($|\xi_2| = 0.421 * A$, $|\xi_3| = 0.486 * A$,

$|\xi_5| = 0.175 * \omega^2 A / g$)이 크지 않은데 따른 결과로 생각된다. 전체적으로 파의 입사쪽(weather side)에 정지파(standing wave)의 특성을 갖는 높은 파고의 영역이 형성되고, 후방 반대쪽에 바야지의 소

파효과에 의한 낮은 파고 영역이 형성됨을 볼 수 있다. 특히, 파 입사쪽에서 최대 진폭이 입사파 진폭의 약 2배가 되는 정지파가 형성됨은 쉽게 예상할 수 있는 자연스런 결과로서, 계산의 타당성을 보여주는 한 예이다.

3.2 OWC 플랜트에 대한 계산

3.2.1 계산모델

내경 10m 외경 13m 인 원통형 OWC 플랜트에 대한 계산이 수행되었다. Fig.7 에는 대상 부유체의 수면아래 면요소 분할이 보여지고 있다(288개의 면요소로 분할). Table 2에는 계산에 사용된 주요 요목이 보여지고 있으며, 수심은 22m 로 주었다.

Table 2 Principal particulars of OWC plant

Particulars	Value
Outer diameter of chamber	13 m
Inner diameter of chamber	10 m
Draft	7.5 m
Displaced volume	406.44 m ³
KG	4.55 m
Gradius of pitch & roll	4.2 m

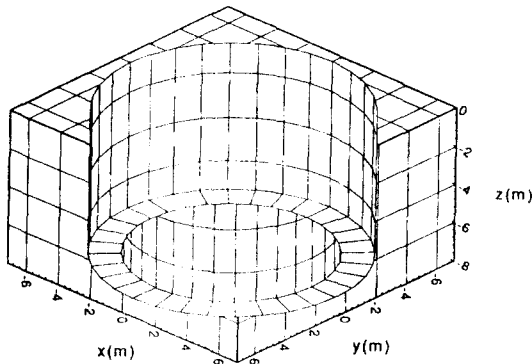


Fig.7 Facet representation of OWC plant (N=288)

계류상태에 대한 계산에서 계류계에 의한 복원력계수들은 다음과 같이 가정하였다.

$$K_{11}^m = 1471.5 \text{ KN/m} \tag{22}$$

$$K_{33}^m = K_{33} * 0.23 \tag{23}$$

$$K_{55}^m = (K_{11}^m + K_{33}^m) * (6.5m)^2 \tag{24}$$

$$K_{15}^m = K_{51}^m = -K_{11}^m * (6.5m) \tag{25}$$

이러한 복원력 계수들은 얇은 수심을 감안하여 수평방향으로 강한 구속력을 갖는 다점 taut 계류계가 설치될 때를 상정한 것이며, 식(24)과 식(25)은 계류삭이 정수면으로부터 6.5m 아래 외벽에 설치된다는 가정하에 추정된 것이다. 챔버 형상이 축대칭이므로 입사파의 방향에 따른 차이는 없고, 계산에서는 편의상 x축의 양의 방향으로 ($\gamma=0^\circ$) 입사파가 진행하는 것으로 하였다. 따라서, 운동응답은 전후동요, 상하동요, 종동요로만 나타난다.

또한, 원통형이므로 회전운동(종동요등)에 의한 조파감쇠력이 작아 점성감쇠력을 고려하지 않을 경우 종동요등에서 과도한 공진현상이 나타날 수 있다. 이를 방지하기 위해 다음과 같이 점성에 의한 등가선형감쇠계수를 추정·고려하였다.

$$B_{11}^* = 50900 (\text{Kg/m}) * \omega | \xi_1 | \tag{26}$$

$$B_{33}^* = 943 (\text{Kg/m}) * \omega | \xi_3 | \tag{27}$$

$$B_{55}^* = 2680000 (\text{Kg} \cdot \text{m}^2) * \omega | \xi_5 | \tag{28}$$

등가점성감쇠계수 B^* 는 운동진폭에 비례하므로 이에 의한 감쇠력들은 운동진폭의 2승에 비례하는 비선형 감쇠력이 된다. 따라서 이를 고려한 식(18)의 운동 방정식은 반복법에 의해 해가 계산된다(이 계산시 입사파의 진폭 A는 편의상 1m로 가정).

3.2.2 운동응답

Fig.8과 Fig.9에는 OWC 플랜트의 전후동요와 종동요의 결과가 각각 보여지고 있다. 이 두 운동은 서로 연성(couple)되어, 상호 영향을 준다. 계류상태뿐만아니라 자유부양상태에 대한 결과도 함께 보여지고 있고, 참고로 점성감쇠력을 무시했을 때의 결과도 함께 보여지고 있다.

자유부양상태의 결과에서 파주기 $T = 8.5\text{sec}$ 부근에서 공진(resonance)현상을 볼 수 있는데, 이 주기가 자유부양시 종동요의 고유주기(natural period)에 해당한다. 점성감쇠력을 고려함으로써 공진시 종동요 극대값이 크게 감소함을 볼 수 있고, 전후동요에서도 이의 영향을 볼 수 있다. 자유부양시의 또 하나의 운동 극대점은 $T = 3.0\text{sec}$ 에서 나타나는데 이는 챔버 내부파의 두번째 고유주

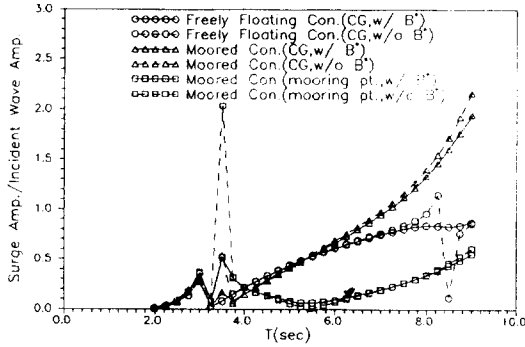


Fig.8 Surge responses of OWC plant

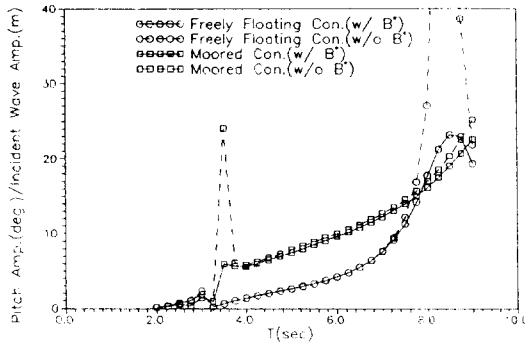


Fig.9 Pitch responses of OWC plant

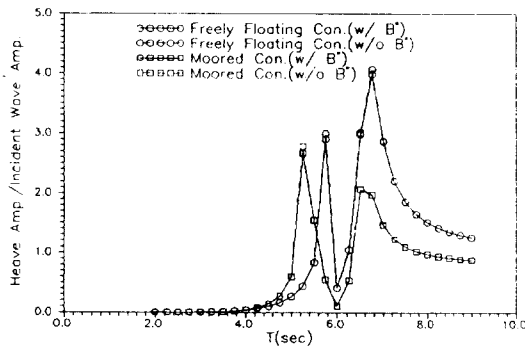


Fig.10 Heave responses of OWC plant

기에 해당한다. 이 내부파의 두번째 고유운동은 슬로싱(sloshing) 형태의 운동이며, 전후동요와 종동요에 영향을 주고 있다. 챔버 내부파가 상하 운동

하는 첫번째 고유주기는 약 $T = 6.75\text{sec}$ 이며 (Fig.10 참조), 이 첫번째 고유운동은 본 계산에서는 수평방향 운동들에 영향을 주지 않는다.

계류상태의 계산결과에서 종동요 고유주기의 이동으로 종동요 공진점이 $T = 3.5\text{sec}$ 에서 나타남을 볼 수 있다. 계류상태의 전후동요 고유주기도 대략 이 주기에 가깝다. $T = 3.0\text{sec}$ 에서의 극대값은 자유부양상태에서도 보여진 내부파의 두번째 고유운동에 의한 것이다. 내부파의 고유운동은 챔버형상에 의해 결정되므로 계류상태에서 복원력이 변하더라도 파의 고유주기는 변하지 않는다. 계류상태의 전후동요는 무게중심점(CG)과 계류점(정수면으로부터 6.5m 아래점)에서의 결과가 함께 보여지고 있다. 고주파수인 $T = 3.5\text{sec}$ 부근에서는 무게중심점의 진폭이 계류점에서의 진폭보다 더 작고, 저주파수(즉, 주기 T 가 큰)영역에서는 더 커지는 것을 볼 수 있다. 이는 고주파수에서는 동적효과가 커서 종동요의 회전중심이 무게중심에 가깝고, 저주파수에서는 반대로 회전중심이 계류점 근처로 이동하기 때문이라고 할 수 있다. 이러한 영향으로 저주파수 영역에서 무게중심점의 전후동요는 계류상태에서가 계류되지 않은 자유부양상태에서보다 더 크게 나타나고 있다. 그러나, 실제 계류점에서의 전후동요는 계류상태가 자유부양상태보다 더 작음을 볼 수 있다.

Fig.10에는 상하동요의 계산결과가 보여지고 있는데, 두 개의 운동극대점이 나타나고 있다. 약 $T = 6.75\text{sec}$ 에서의 극대점은 챔버 내부파의 첫번째 고유운동(상하방향 진동)에 기인한다. 자유부양상태와 계류상태에서 이 극대점 주기의 이동은 별로 없고, 극대점의 크기는 계류상태일 때가 더 작음을 볼 수 있다. 플랜트 자체의 상하동요 고유주기에 의한 공진현상은 자유부양시 약 $T = 5.75\text{sec}$ 에서, 계류시 약 $T = 5.25\text{sec}$ 에서 나타남을 볼 수 있다. 식(27)에 의한 점성감쇠력을 고려했을 때와 고려하지 않았을 때의 차이는 별로 나타나지 않고 있다. 식(27)의 상하동요 점성감쇠는 마찰항력만을 고려하여 추정된 것인데, 계류삭의 부착방법에 따라서는 계류삭 또는 부수장치에 의한 형상항력이 크게 작용할 수 있으므로 이를 고려할 필요가 있다. 현재로서는 이에 대한 구체적인 자료가 없어 고려할 수 없었다.

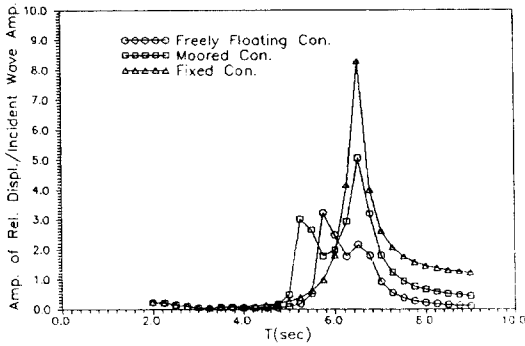


Fig.11 Relative vertical displacement of free-surface at the center of OWC plant

현 형태의 파력발전기에 있어 발전량에 가장 중요한 영향을 미치는 것은 챔버와 내부수면과의 상하방향 상대운동이다. Fig.11에는 챔버내 중앙점에서의 수면과 챔버 본체와의 상하방향 상대운동이 보여지고 있다. 이 계산결과는 내부 파형 계산결과와 상하동요 계산결과로부터 도출된 것이다. 계류상태외에 자유부양상태와 고정상태에서의 결과도 함께 보여지고 있다. $T = 6.5\text{sec}$ 에서 내부수면의 첫번째 고유운동에 의한 현저한 극대점이 나타남을 볼 수 있으며, 상대적으로 작은 주기에서 상하동요 고유운동에 의한 극대점이 나타남을 볼 수 있다. 본 계산에서는 내부 공기유동에 의한 감쇠효과를 고려하지 않았다. 본 플랜트의 계류상태 상대운동은 대략 주기 $5\sim 7\text{sec}$ 범위에서 크게 나타나고 있는데, 이는 본 플랜트의 설치예정 해역에서 0.5m 이상 되는 파랑의 탁월주기가 $5\sim 7\text{sec}$ 임¹¹³⁾을 감안하면 이를 잘 반영하여 설계되었음을 알 수 있다.

3.2.3 파랑변형

구조물에 의한 파랑변형은 입사파의 주기에 의해 그 특성이 크게 달라진다. 설치 예정 해역의 파랑 탁월주기가 $5\sim 7\text{sec}$ 범위에 있으므로, 본 계산에서는 파주기 $T=5\text{sec}$ 와 $T=7\text{sec}$ 인 두 경우에 대해 고찰하였다. 구조물의 구속상태도 파랑변형에 상당한 영향을 미치므로 일차 추정된 계류상태와 자유부양상태, 고정상태의 3가지 경우들을 앞의 두

개의 파주기에서 각각 고찰하였다.

Fig.12에는 $T=5\text{sec}$ 일 때 고정상태에서의 파고분포가 보여지고 있다. 물체가 원통형이므로 anti-node line(파고 증가위치)과 node line(파고 감소위치)이 입사파 진행방향으로 열린 포물선 형태를 이루고 있다. 파 반사에 의해 물체전방(파 입사쪽) 근접영역에서 최대 약 60%정도의 진폭증가를 볼 수 있고, 후방의 좌우 각각 약 25° 범위에서 파고가 감소하는 소파효과를 볼 수 있다. 이 경우 파고가 최소인 영역은 물체 직후방이 아니라 좌우로 다소 이동된 방향에서 나타남도 볼 수 있다.

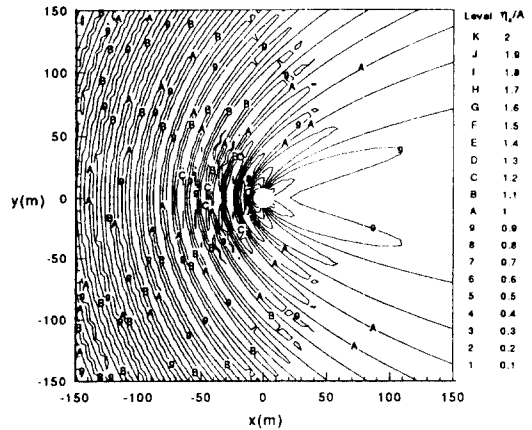


Fig.12 Contour plot of wave amplitudes around the fixed OWC plant ($T = 5.0 \text{ sec}$)

Fig.13, Fig.14에는 $T=5\text{sec}$ 일 때 자유부양상태와 계류상태에서의 파고분포가 보여지고 있다. 고정상태에서는 물체에 의한 파랑변형 효과가 물체전방 좌우에 걸쳐 고르게 나타나는데 비해, 물체가 움직이는 이 두 경우에서는 물체전방의 파랑변형 효과는 상대적으로 감소하고 물체 좌우방향에서의 변형효과가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 아울러, 물체후방에서도 소파효과가 직후방 좌우 약 17° 내에서 비교적 고르게 나타남도 볼 수 있다. 이는 물체운동에 의한 방사파가 더해져 복잡적으로 나타난 현상이라고 할 수 있다.

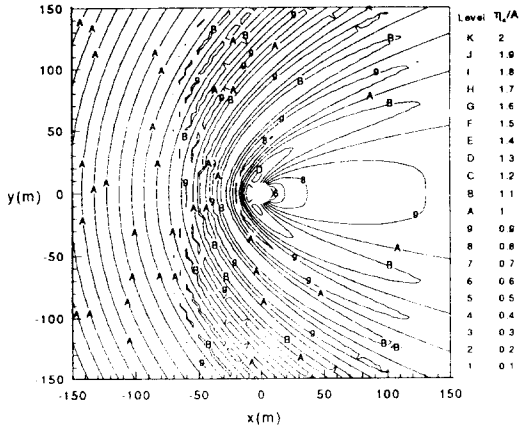


Fig.13 Contour plot of wave amplitudes around the freely floating OWC plant ($T = 5.0 \text{ sec}$)

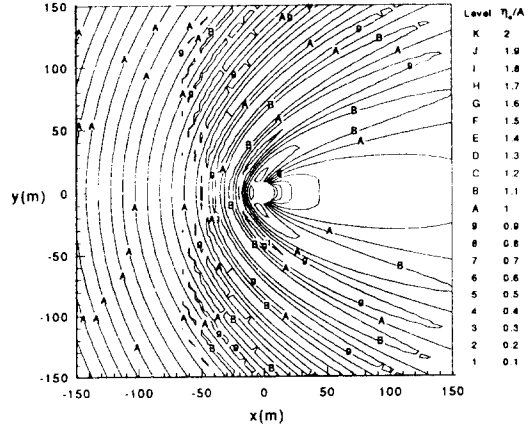


Fig.14 Contour plot of wave amplitudes around the moored OWC plant ($T = 5.0 \text{ sec}$)

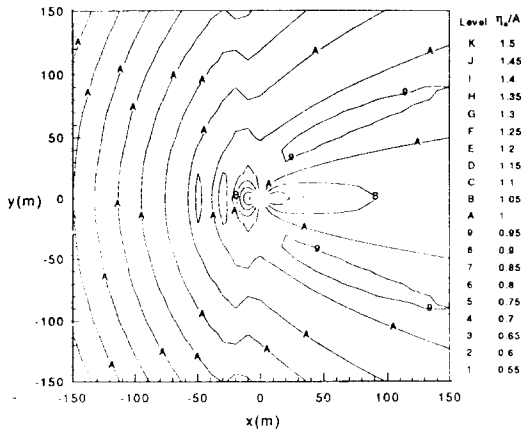


Fig.15 Contour plot of wave amplitudes around the fixed OWC plant ($T = 7.0 \text{ sec}$)

Fig.15에는 $T=7\text{sec}$ 이고, 고정상태에서의 파고분포가 보여지고 있다. $T=5\text{sec}$ 의 결과와 비교하여 파변형 효과가 현저히 감소하고 있는데, 이는 파장이 길어짐에 따라 물체에 의한 파산란 효과가 감소하기 때문이다. 이 경우 물체 직후방에서는 파고가 오히려 증가하며, 소파작용이 나타나는 곳은 직후방에서 좌우로 약 $25^\circ \sim 35^\circ$ 벗어난 방향이다.

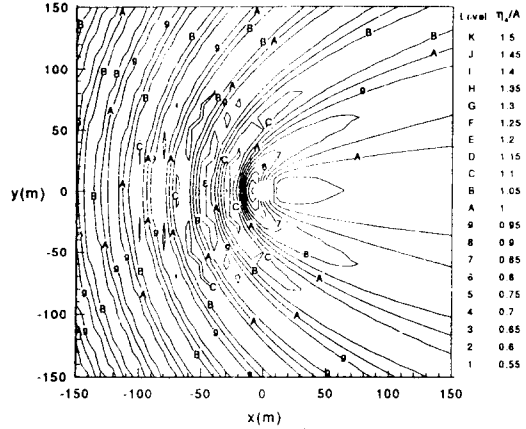


Fig.16 Contour plot of wave amplitudes around the freely floating OWC plant ($T = 7.0 \text{ sec}$)

Fig.16, Fig.17에는 $T=7\text{sec}$ 일 때 자유부양상태와 계류상태에서의 파고분포가 보여지고 있는데, 물체운동에 의한 방사파가 더해져 고정상태보다는 파변형이 크게 나타나고 있다. 물체 직후방에서의 파고증가현상도 고정상태보다는 악화되며, 직후방 좌우에서의 소파작용은 고정상태보다 현저하게 나타난다.

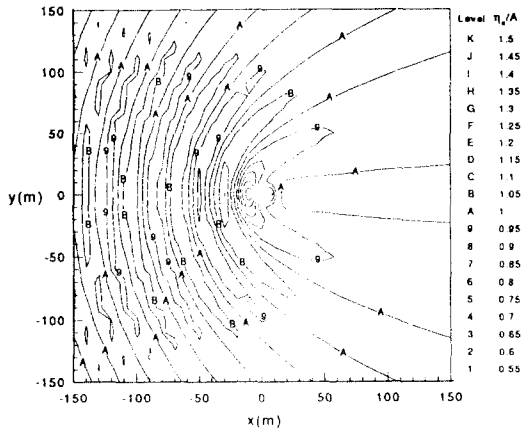


Fig.17 Contour plot of wave amplitudes around the moored OWC plant ($T=7.0$ sec)

물체에 의한 파랑변형 효과를 면밀하게 검토하기 위해서는 물체를 중심으로 한 각 반경방향에서 파고분포가 어떻게 변화하는지를 넓은 영역에서 고찰할 필요가 있다. Fig.18에는 $T=5$ sec이고 물체가 고정되어 있을 때 각 방향에서의 파고변화가 500m거리(플랜트 외경의 약 38.5배)까지 보여지고 있다. 각 반경방향은 45° 의 등간격으로 나누어져 있고, $\theta=0^\circ$ 가 정면방향(파 입사방향)이며, $\theta=180^\circ$ 가 직후방(파 진행방향)이다. 물체둘레에서 최대 약 60%의 파고증가와 최대 약 40%의 파고감소를 볼 수 있다. 대략 $\theta=0^\circ \sim 90^\circ$ 범위의 방향에서 물체의 파랑변형 효과가 크고 고르게 나타나고 있고, $\theta > 90^\circ$ 범위에서 그 효과가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 거리에 따른 변형효과와 감소는 물체부근에서는 국소파(local wave) 감소에 따라 다소 급격한 감소가 나타나지만, 그 밖의 범위에서는 대체로 거리의 제곱근에 역비례해서 변형효과가 감소한다고 할 수 있다. 이 경우 파랑변형 효과는 플랜트 중심으로부터 250m 떨어졌을 때 영향이 가장 큰 방향을 기준으로 약 11%이며, 500m에서 약 7.5%이다.

Fig.19 Fig.20에는 $T=5$ sec이고 자유부양상태와 계류상태에서의 파고분포가 각각 보여지고 있다. 이들에서는 물체전방보다 좌우 측면과 후방에서 파랑변형이 두드러진다. 거리에 따른 변형효과와

변화도 이 두 경우가 거의 비슷한데, 250m 거리에서 약 9% 정도이며 500m 거리에서 약 6.5% 정도이다. 또한, 이들에서 물체 직후방($\theta=180^\circ$)에 상당한 거리까지 소파효과가 나타남도 볼 수 있다.

Fig.21과 Fig.22, Fig.23에는 $T=7$ sec일 때 고정상태, 자유부양상태, 계류상태에서의 반경방향 파고분포들이 각각 보여지고 있다. 파장이 긴 이 주기에서는 $T=5$ sec일 때보다 물체에 의한 파랑변형 효과가 상대적으로 작게 나타나고 있으며, 특히 물

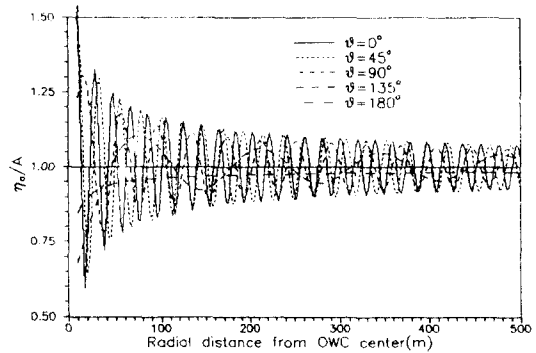


Fig.18 Distribution of wave amplitudes along the radial lines for the fixed OWC plant ($T=5.0$ sec, θ : measured from the incident direction of wave)

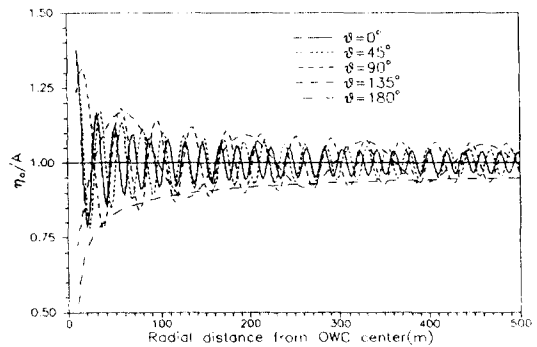


Fig.19 Distribution of wave amplitudes along the radial lines for the freely floating OWC plant ($T=5.0$ sec, θ : measured from the incident direction of wave)

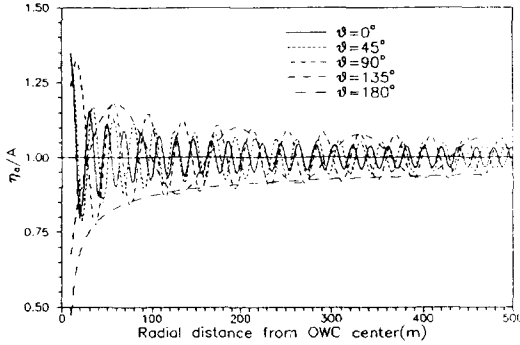


Fig.20 Distribution of wave amplitudes along the radial lines for the moored OWC plant ($T = 5.0\text{sec}$, θ : measured from the incident direction of wave)

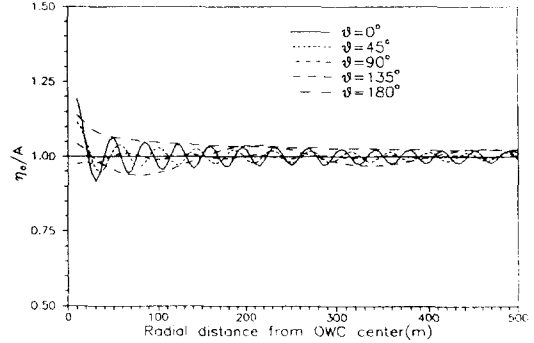


Fig.21 Distribution of wave amplitudes along the radial lines for the fixed OWC plant ($T = 7.0\text{sec}$, θ : measured from the incident direction of wave)

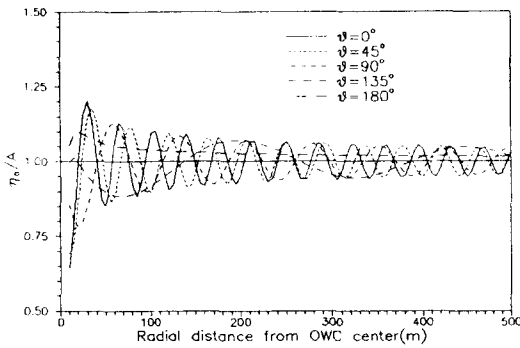


Fig.22 Distribution of wave amplitudes along the radial lines for the freely floating OWC plant ($T = 7.0\text{sec}$, θ : measured from the incident direction of wave)

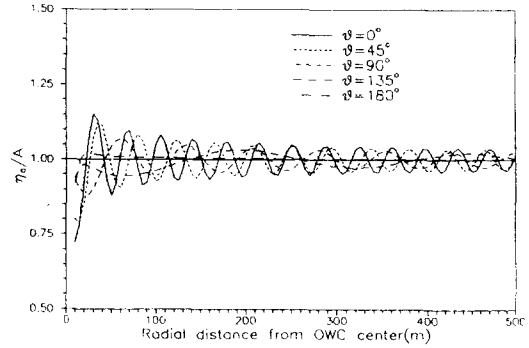


Fig.23 Distribution of wave amplitudes along the radial lines for the moored OWC plant ($T = 7.0\text{sec}$, θ : measured from the incident direction of wave)

체운동에 의한 방사파가 없는 고정상태에서 작다. 250m 거리에서 최대 변형효과는 고정상태에서 약 3.1%, 자유부양상태에서 약 6.8%, 계류상태에서 5.1%이며, 500m 거리에서는 고정상태 약 2.2%, 자유부양상태 약 4.8%, 계류상태 약 3.8% 정도이다. 이 경우들에서 물체둘레의 파랑변형은 고정상태와 자유부양상태에서 약 20%의 최대 파고증가가 나타나고, 자유부양상태에서 약 40%의 최대 파고감소가 나타난다. 또한, 이 경우들에서 물체 직후방에서는

파고가 증가하며, 이 현상은 고정상태와 자유부양상태에서 현저하고 계류상태에서는 미미하다.

4. 결 론

본 연구에서는 Green 적분방정식을 이용한 3차원 수치해법으로 직경 13m인 OWC 플랫폼 주위의 파랑변형 특성이 고찰되었다. 주기 5sec와 주기 7sec의 규칙파에 대한 파랑변형 계산이 수행되었

고, 계류계의 구속력에 따른 변화를 파악하기 위해 일차 추정된 다점 taut 계류계에 의한 계류상태에 고정상태와 자유부양상태에 대한 계산도 함께 수행되었다. 얻어진 주요 결과들은 다음과 같다.

- (1) 원통형 플랜트가 단독으로 설치되므로 파반사효과 및 소파효과가 바이지형 부유체등에 비해 일반적으로 작다.
- (2) 플랜트 형상이 원통형이므로 입사파에 산란파와 방사파가 중첩되어 나타나는 anti-node line(파고 증가위치)과 node line(파고 감소위치)은 대략 물체를 중심으로 뒤쪽(lee side)으로 열린 포물선 형태를 이룬다.
- (3) 물체에 의한 파랑변형 효과는 입사파 파장(주기)이 짧은 경우가 파장(주기)이 긴 경우보다 현저하며, 영향이 미치는 범위도 넓다.
- (4) 입사파 파장이 짧은 경우(주기 $T=5\text{sec}$)에는 대략 물체후방 좌우로 각각 약 $17^\circ \sim 25^\circ$ 범위까지 소파효과가 나타난다. 이 소파효과에 의한 파고 감소량은 물체둘레에서 최대 50~60% 정도이다.
- (5) 입사파 파장이 긴 경우(주기 $T=7\text{sec}$)에는 물체 직후방에서 파고가 오히려 증가할 수 있으며, 파고가 감소하는 소파영역은 직후방에서 좌우로 다소 벗겨 나타난다.
- (6) 물체에 의한 파랑변형 효과는 국소파가 영향을 미치는 물체 근방을 제외하고는 대략 물체로부터 떨어진 거리의 제곱근에 역비례하여 감소한다.
- (7) 입사파 파장이 짧은 경우(주기 $T=5\text{sec}$) 물체에 의한 파랑변형 효과는 거리 500m에서 계류계의 구속정도에 따라 6.5~7.5% 정도까지 영향이 나타날 수 있다. 이는 5%를 기준으로 할 때, 반경 0.8~1.1km(플랜트 직경의 약 62~85배 거리)까지 영향이 미친다는 것을 의미한다.
- (8) 입사파 파장이 긴 경우(주기 $T=7\text{sec}$) 물체에 의한 파랑변형 효과는 거리 500m에서 계류정도에 따라 2.2~4.8% 정도까지 나타난다.

실제 해상상태는 서로 다른 방향으로 진행되는 많은 파들이 중첩되어 있고, 해상구조물에 의한 파랑변형 효과도 이들 각 파들에 의한 효과가 중첩되

어 나타난다. 따라서, 실제해상에서의 파랑변형 효과를 좀더 종합적으로 파악하기 위해서는 향후 본 연구를 다방향 불규칙파(multi-directional irregular sea)에 대해 확장할 필요가 있다고 생각한다.

참 고 문 헌

- 1) Hales, L.Z., "Floating breakwaters, State-of-the-Art literature review", U.S. Army, Corps of Engineers, CERC, Technical Report No.81-1, p.279, 1981
- 2) 정 원 무, 편 중 근, "천해역에 기인장 계류된 2차원 부방파제 운동 해석", 한국해양해양공학회지, 제3권, 제3호, pp.137-151, 1991
- 3) Wehausen, J.V. & Laitone, E.V., "Surface Waves", Encyclopedia of Physics, Vol.9, Springer-Verlag, Berlin, 1960
- 4) Endo, H., "Shallow-water effect on the motions of three dimensional bodies in waves", J. of Ship Research, Vol.31, No.1 pp.34-40, 1987
- 5) Newman, J.N., "Marine Hydrodynamics", MIT Press, Cambridge, Massachusetts and London, England, 1977
- 6) Hong, D.C., "On the improved Green integral equation applied to the water wave radiation-diffraction problem", 대한조선학회지, 제24권, 제1호, 1987
- 7) Newman, J.N., "Distribution of sources and normal dipoles over a quadrilateral panel", J. Engineering Mathematics, Vol.20, 1986
- 8) 공 인 영, "3차원 물체에 작용하는 동유체력의 시간영역 해석", 서울대학교 박사학위 논문, 1987
- 9) Faltinsen, O.M & Michelsen, F.C., "Motions of large structures in waves at zero Froude number", Proc. Intern. Symp. Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves, pp. 99-144, 1974
- 10) Pinkster, J.A. & Van Oortmerssen, G., "Computation of the first and second order wave forces on oscillating bodies in regular

- waves”, Proc. 2nd Conf. Numer. Ship Hydrodyn., Berkeley, USA, 1976
- 11) Pinkster, J.A., “Mean and low frequency wave drifting forces on floating structures”, Ocean Engineering, Vol.6, pp.593-615, 1979
- 12) 홍 사 영, 이 판 목, 홍 도 천, “반잠수식 시추선에 작용하는 장주기 표류력에 관한 연구”, 해양공학연구회 제22차 Workshop 논문집, pp. 5-25, 1988
- 13) 류 청 로 외, “해역파랑에너지 연중치 조사·평가”, 한국기계연구원 선박해양공학연구센터 위탁연구보고서, 1994