

---

 論 文
 

---

大韓造船學會誌  
 第21卷 第3號 1984年 9月  
 Journal of the Society of  
 Naval Architects of Korea  
 Vol. 21, No. 3, September 1984

## 垂直運動이 最小인 浮標의 不規則波중 繫留狀態에 대한 動力學的 解析

崔恒洵\* · 金曉哲\* · 成宇濟\*\*

### Theoretical Study on the Dynamic Response of a Moored Buoy with Minimum Vertical Wave-exciting Force in Irregular Waves

by

H.S. Choi\* · Hyochul Kim\* · Woojae Seong\*\*

#### Abstract

A body form, which experiences minimum vertical wave-exciting forces in the vicinity of a prescribed wave frequency in water of finite depth, is obtained by an approximate method. Its configuration has the symmetry with respect to the vertical axis, expressed in terms of exponential functions.

By distributing three-dimensional pulsating sources and dipoles on the immersed surface of the body, a velocity potential is determined and subsequently hydrodynamic forces including the 2nd-order time-mean drift force are calculated.

The dynamic behavior of the body moored in irregular waves is investigated numerically by using central difference method. Hereby irregular wave trains are simulated with examining its repeatability by comparing the resulting spectrum with the original one.

Numerical results indicate that the body form obtained from the present analysis possesses in general a favorable hydrodynamic characteristics in comparison with a spherical buoy and that the maximum excursion of the body can be significantly reduced by setting pre-tension of an appropriate amount in the mooring cable.

#### 1. 서 론

부유식 해상석유저장탱크나 CALM 또는 SALM 등의 방식을 이용한 해상하역장치 그리고 항로나 해역을 표시하는 부표의 사용이 증가함에 따라 이러한 종류의 부유식 구조물의 적정설계가 해양공학의 중요한 과제의 하나로 대두되었다. 이들은 항해하는 선박과는 달리 일정한 해역에서 작업기능을 발휘하여야 하므로 위

치확보성능(station-keeping quality)이 중요한 설계인자가 된다. 수평운동은 계류장치에 의하여 어느 정도 억제할 수 있으나, 수직운동을 구속할 수 있는 장비의 설치에 어려운 실정이다. 따라서 이러한 부유식 구조물의 적정설계란 수직운동이 최소가 되는 형상을 찾아내고 수평운동을 최대한 억제할 수 있는 경제적인 계류계를 설계하는 일이다.

무한수심에서 수직운동이 최소가 되는 물체형상에 대한 해석은 Bessho[1]†가 수행하였고, Kyojuka[2]는

接受日字: 1984年 8月 3日, 再接受日字: 1984年 9月 3日

\* 正會員, 서울大學校 工科大學 造船工學科

\*\* 學生會員, 서울大學校 大學院

Bessho의 이론에 따라 물체의 형상을 구하여 이를 실험적으로 증명하였다. 그러나 실제응용의 관점에서 보면 부표가 설치되는 해역은 유한수심이며, 또한 규칙파가 아닌 불규칙파가 입사한다. 이러한 해상환경에서 최적의 부표에 대한 동역학적 거동을 수치적으로 고찰하는 것이 본 논문의 목적이다.

본 논문에서는 Kyozuka의 방법을 유한수심의 경우로 확대하여 규정된 파수에서 수직운동이 최소가 되는 물체의 형상을 얻었다. 얻어진 물체의 표면에 특이점을 분포하고 수직축대칭 물체에 적용할 수 있는 Black [3]의 방법에 따라 유동을 표시하는 속도포텐시얼을 구하였으며, 이로부터 선형동유체력을 계산하였다[4].

한편 표류력은 2차항에서 나타나는 비선형 동유체력으로 계류된 부유체의 수평운동에 많은 영향을 미친다. Havelock[5]은 1차 운동응답간의 상호작용에 의한 위상차로부터 얻어진다고 설명하였고, Maruo[6]와 Newman[7]은 운동량이론을 적용하여 일반적인 표현식을 유도하였으며, Choi와 Oh[8]은 Newman의 표현식을 이용하여 유한수심에 놓인 축대칭물체에 작용하는 시간평균 표류력을 계산하였다. 불규칙파중에서는 성분파의 한주기동안에 걸친 평균치가 일정한 표류력 성분과 시간에 따라 서서히 변화하는 성분이 함께 나타나는데, 계류된 부유체는 시간에 따라 서서히 변화하는 표류력에 의하여 매우 큰 수평운동을 한다고 알려져 있다. Hsu와 Blenkarn[9]은 불규칙파가 입사할 때 파의 시간 기록을 일련의 규칙파로 나누어 각 규칙파에 의하여 발생하는 시간 평균 표류력을 시간에 따라 연결한 결과를 시간에 따라 서서히 변화하는 표류력으로 해석하였다. Remery와 Hermans[10]은 반사계수(reflection coefficient)를 이용하여 표류력의 스펙트럼을 구하였으며, Pinkster[11]와 Newman[12]은 좀더 엄밀한 계산법을 제안하고 있으나 실제적용에는 많은 어려움이 있다. 따라서 여기서는 Choi와 Oh의 방법에 따라 규칙파에 의한 시간평균 표류력을 계산하였으며, 불규칙파에 대하여는 Hsu와 Blenkarn의 방법을 택하였다.

계류된 부유체의 동적거동에 대한 해석은 계류계와 부유체를 하나의 동역학적 모델로 택하여 시간적분법을 이용하여 수행하여야 하나, 이는 엄청난 계산시간이 소요된다. 따라서 공학적 응용을 감안하여 각 시각에서 계류계를 정역학적으로 처리하고, 그 결과를 부유체에 대한 경계조건으로 대입하는 간편한 방법을 택

하였다[13]. 본 논문에서는 선인장력(pre-tension)이 계류된 부유체의 최대변위와 계류계의 인장력에 미치는 영향을 고찰하려는 목적으로 계산을 수행하였다.

### 2. 문제의 수식화

수심( $d$ )이 일정한 해역에 불규칙파가 입사할 때, 특정 파진동수( $\omega_0$ )에서 수직운동이 최소인 부표의 형상을 찾아내고, 수평운동을 일정한 크기로 제한하는 경제적인 계류계를 설계하는 문제를 생각한다. 이를 기술하기 위하여 Fig. 1에 도시한 바와 같이 우수적교좌표계( $x, y, z$ )와 원통좌표계( $r, \theta, z$ )를 도입한다. 유체는 비점성, 비압축성유체이고, 유체입자의 운동은 비회전성이라 가정한다. 유동은 속도포텐시얼을 도입하여 표시할 수 있으며, 용출점(source)의 속도포텐시얼을 나타내는 Green함수는 다음의 방정식과 경계조건들을 만족하여야 한다.

(i) 연속방정식

$$\nabla^2 G = \delta(x-x', y-y', z-z') \quad z \leq 0 \tag{1}$$

여기서  $\delta$ 은 Dirac의 델타함수를, 그리고  $(x', y', z')$ 는 특이점의 좌표를 의미한다.

(ii) 선형화된 자유표면 경계조건

$$\frac{\partial^2 G}{\partial t^2} + g \frac{\partial G}{\partial z} = 0 \quad \text{on } z=0 \tag{2}$$

$g$ 는 중력가속도를 표시한다.

(iii) 해저면 경계조건

$$\frac{\partial G}{\partial z} = 0 \quad \text{on } z=-d \tag{3}$$

(iv) 방사조건(radiation condition)

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \sqrt{R} \left( \frac{\partial G}{\partial R} + i\nu G \right) = 0 \tag{4}$$

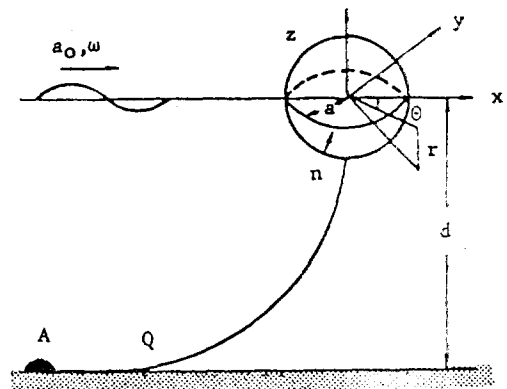


Fig. 1 Coordinate System and Definitions

† [ ] 안의 숫자는 본문 말미에 수록한 참고문헌의 번호임.

여기서  $\omega$ 는 파의 원진동수,  $R$ 은 수평거리 ( $=\sqrt{(x-x')^2+(y-y')^2}$ ) 그리고  $\nu$ 는 기준파수 ( $=\omega^2/g$ )를 나타낸다.

천이상태가 지나면 부유체 및 유체입자는 시간에 따라 조화운동을 하므로 Green함수는 시간항을 분리하여 표시할 수 있으며

$$G=Re\{\varphi e^{i\omega t}\} \quad (5)$$

상기한 방정식과 경계조건을 만족하는 함수  $\varphi$ 는 다음과 같다[14].

$$\varphi = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \lim_{\mu \rightarrow 0} \int_0^\infty \frac{2(k+\nu)e^{-kd} \cosh k(z'+d)}{k \sinh kd - \nu \cosh kd} \frac{\cosh k(z+d)}{+i\mu} J_0(kR) dk$$

$$r_1^2 = R^2 + (z-z')^2$$

$$r_2^2 = R^2 + (z+2d+z')^2 \quad (6)$$

$J_0$ =제 1 종 Bessel 함수

한편 세장체이론에 의하면 수직동요를 야기시키는 파랑강제력( $F_z$ )은 Kochin 함수에 선형적으로 비례한다.

$$F_z \propto H(k, \theta) \quad (7)$$

여기서  $k$ 는 파수,  $\theta$ 는 파의 입사각을 뜻하며, Kochin 함수는 다음과 같이 표시된다.

$$H(k, \theta) = \iint_S \cosh k(z'+d) \exp ik(x'\cos\theta + y'\sin\theta) \left( \frac{\partial\varphi}{\partial n} - \frac{\partial\varphi'}{\partial n} \right) dS \quad (8)$$

윗식에서 적분은 특이점이 분포된 물체의 침수표면 ( $S$ )에 걸쳐 수행되며, 물체내부의 가상적인 유동을 표시하는 속도 포텐셜  $\varphi'$ 을 도입함으로써 특이점은 소오스만 필요하고, 그 크기를 뜻하는  $(\partial\varphi/\partial n - \partial\varphi'/\partial n)$ 항은 수직운동에 대한 물체표면 경계조건을 만족하여야 한다.

소오스의 세기를  $\sigma(x', y', z')$ 로 표기하고, 수직축대칭 물체에 대한 세장체근사법을 적용하여  $x$ 축상  $[0, T]$ 에 특이점을 분포포시킴 Kochin 함수는 다음과 같이 간략히 쓰여진다( $T$ =총수).

$$H(k) = \int_T^0 \cosh k(z'+d) \sigma(0, 0, z') dz' \quad (9)$$

이제 Kochin 함수가 어느 특정파수에서 0이 되도록 소오스의 세기를 적절히 구하면, 식 (7)에 따라 그 파수에서 수직방향으로 작용하는 파랑강제력이 0이 되어 부유체의 수직운동은 나타나지 않을 것이며, 또한 이 특정파수 부근에서는 자연히 수직운동의 크기가 작아지게 된다.

### 3. 최적 형상

무한수심의 경우에는 세장체근사이론을 사용하지 않더라도 특정파수에서 수직운동이 없는 물체의 형상을 구할 수 있다. 즉, Kyozuka는 무한수심에 대한 Green 함수에 연산자  $(\nu_1 - \partial/\partial z')$   $(\nu_2 - \partial/\partial z')$ 을 가해주어 다음과 같은 속도포텐셜을 얻었다.

$$\varphi_\infty = 2\nu(\nu_1 - \nu)(\nu_2 - \nu) \lim_{\mu \rightarrow 0} \int_0^\infty \frac{e^{k(z+z')}}{k - \nu + i\mu} J_0(kR) dk + \nu_1 \nu_2 \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_3} \right) + \frac{2\nu^2}{r_3} - (\nu_1 + \nu_2) \left( \frac{z-z'}{r_1^3} + \frac{2\nu}{r_3} \right) - \left( \frac{1}{r_1^3} + \frac{1}{r_3^3} \right) + \frac{3(z-z')^2}{r_1^5} + \frac{3(z+z')^2}{r_3^5} \quad (10)$$

$$r_3^2 = R^2 + (z+z')^2$$

윗식에서 볼 수 있듯이 파수  $\nu$ 가 특정파수  $\nu_1$  및  $\nu_2$ 와 같아지면 파도를 표시하는 적분이 0이 되어 파랑하중이 0이 되는 속도포텐셜이 된다.

그러나 유한수심에서는 Green 함수 식 (6)의 표현식이 복잡하여 무한수심의 경우와는 달리 식 (10)과 같은 정확한 포텐셜을 얻을 수 없다. 따라서 전장에서 논의한 바와 같이 세장체근사이론을 이용하여 근사해를 구할 수 밖에 없다. 무한수심에서 사용하였던 연산자를 조금 수정하여 소오스의 세기를 다음과 같이 정의한다.

$$\sigma(z) = \left( \nu_1 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \left( \nu_2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) m(z) \quad (11)$$

여기서 함수  $m(z)$ 는 특이점의 세기를 나타내는 임의의 함수이다. 이제 식 (11)을 식 (9)에 대입하면 Kochin 함수는 다음과 같이 된다.

$$H = (\nu_1 - k^2)(\nu_2 - k^2) \int_T^0 \cosh k(z+d) m(z) dz + k \sinh k(z+d) \left( \nu - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) m(z) \Big|_T^0 - \cosh k(z+d) \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) m(z) \Big|_T^0 \quad (12)$$

$$\nu = \nu_1 + \nu_2 - k^2$$

만약  $\left( \nu - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) m(z) \Big|_T^0 = 0$ 을 만족하는 함수  $m(z)$ 를 구할 수 있으면 특정파수  $k = \sqrt{\nu_1}$ 과  $k = \sqrt{\nu_2}$ 에서 Kochin 함수의 값은 0이 되어 수직방향으로 작용하는 파력이 0이 될 것이다. 이 조건을 만족하는 함수  $m(z)$ 는 특성치가  $\sqrt{\nu}$ 인 지수함수로 쉽게 구할 수 있고, 또한 세장체이론의 결과인  $\sigma(0, 0, z) = 2dx/dz$ 를 이용하면 최적 형상의 표현식을 얻게 된다.

$$x = \frac{B}{2} \frac{\exp(-\sqrt{\nu z}) - \exp(\sqrt{\nu T})}{1 - \exp(\sqrt{\nu T})} \quad (13)$$

여기서  $B$ 는 수선면의 폭을 의미한다.

4. 등유체력, 표류력 및 파스펙트럼

선형이론에 따라 속도포텐시얼은 입사파포텐시얼, 회절파포텐시얼(diffraction potential) 그리고 방사파포텐시얼의 합으로 표시된다. 입사파포텐시얼은 선형중력파이론에서 잘 알려져 있으며, 회절파포텐시얼과 방사파포텐시얼은 물체표면에 소오스와 다브렛을 분포하여 경계치문제로 구한다. 수치해법의 algorithm은 선박유체역학에서 잘 정리되어 있으며, 특히 축대칭 물체에 대하여는 Black의 방법을 이용하여 쉽게 구할 수 있다 즉, 해석과정에서 자주 나타나는 면적적분은 위도와 경도에 따른 독립적 적분으로 구성되어 있으므로 경도에 따른 적분을 수행하면 면적적분은 위도에 따른 선적분으로 치환된다. 선적분은 많은 수의 구간으로 나누어 각 구간의 중간점에서 구한 외적분값에 구간의 길이를 곱하는 형태로 간략화시킬 수 있다[3, 4].

속도포텐시얼이 결정되면 Bernoulli 방정식을 이용하여 동압이 얻어지고, 이를 물체표면에 걸쳐 적분하면 등유체력을 구할 수 있다. 여기서 선형항만을 택하면 선형 파랑강제력과 부가질량 및 등유체감쇠력이 된다. 반면에 비선형항중에서 2차항을 취하여 성분파의 한주기동안에 걸친 평균을 구하면 시간평균 표류력을 얻게 된다. 불균칙파 중에서는 Hsu와 Blenkarn의 방법에 따라 불규칙파의 시간기록을 정수단을 upcrossing하는 간격으로 나누고, 각각을 하나의 규칙파라 가정하여 각 규칙파가 진폭과 주기에 따른 일정한 크기의 표류력을 부유체에 발생시키며 이들을 시간축에 따라 연결시키면 표류력은 시간에 따라 서서히 변하게 된다.

상기한 방법을 사용하기 위하여는 불규칙파에 대한 자료가 제공되어야 한다. 여기서는 특정해상상태의 특성을 표시하는 스펙트럼을 이용하여 시간영역에서 시뮬레이션한 자료를 사용한다. Borgman[15]에 의하면 재현성(repeatibility)을 증진시키기 위하여 다음과 같은 파형 $\eta(t)$ 에 관한 방정식의 사용이 권장된다.

$$\begin{aligned} \eta(t) &= \sqrt{2} \sum_{n=1}^N a_n \cos(k_n x - 2\pi f_n t + \theta_n) \\ a_n &= \sqrt{S(f_n) - S(f_{n-1})} \\ f_n &= (f_n + f_{n-1})/2 \\ S(f) &= 2 \int_0^f S(f') df' \end{aligned} \quad (14)$$

$\theta_n = [0, 2\pi]$ 구간에서 균일분포의 확율을 갖는 위상각

파진동수  $f$ 는 이론상 0에서 무한대까지이나 실제로는  $f$ 가 어느 일정한 값 이상이 되면 스펙트럼의 값이 0에 가까우므로, 이 일정한 값까지만 취한다. 잊식에 표시되어 있는 바와 같이 파진동수를  $N$ 개로 분할할 때  $a_n$ 이 일정한 값이 되도록 하여야 한다. 임의의 스펙트럼  $S(f)$ 가 주어지면 수치적으로  $a_n$ 이 일정하도록 파진동수를 분할할 수 있으며, 특히 Pierson-Moskowitz 스펙트럼과 같은 경우에는  $S(f)$ 가 해석적으로 표현되므로 쉽게 파진동수를 나눌 수 있다.

5. 계류상태에서의 부유체운동

본 논문에서는 문제를 가능한 단순화시켜 계류계가 부유체의 운동응답에 미치는 영향, 특히 계류계에 가해진 선인장력(pre-tension)의 영향을 고찰하였다. 즉 부유체에는 파력만이 외력으로 작용하고, 계류삭은 catenary cable로 자중만을 고려한다. 또한 부유체와 계류삭은 입사파의 진행면내에서만 운동한다고 가정하고(coplanar), 수직방향과 수평방향으로의 직선운동을 고려하되 연성효과는 무시하면 운동방정식은 다음과 같다[17].

$$\begin{aligned} (m + \Delta m_x(t)) \ddot{x} + b_x(t) \dot{x} &= F_x(t) + F_{d_r}(t) \\ &\quad - T_H^L(t) + T_H^R(t) \\ (m + \Delta m_z(t)) \ddot{z} + b_z(t) \dot{z} + c(t) z &= F_z(t) \\ &\quad - T_V^L(t) - T_V^R(t) \end{aligned} \quad (15)$$

- 여기서  $m$  = 부유체의 질량
- $\Delta m(t)$  = 부유체의 부가질량
- $b(t)$  = 부유체의 등유체감쇠계수
- $c(t)$  = 부유체의 정복원력계수
- $F(t)$  = 파랑하중
- $F_{d_r}(t)$  = 표류력
- $T_H(t)$  = 계류인장력의 수평방향성분
- $T_V(t)$  = 계류인장력의 수직방향성분

잊식에서 아래 첨자  $x, z$ 는 각 방향으로의 성분을 그리고 잊 첨자  $L, R$ 은 부유체의 왼쪽(weather side)과 오른쪽(lee side)을 표시한다. 부유체의 부가질량, 등유체감쇠계수, 파랑하중과 표류력은 전장에서 기술한 바와 같이 불규칙파의 시간기록을 규칙파성분으로 분할하여 각 규칙파에 대한 값을 계산하였다. 한편 계류삭은 몇개의 절점으로 이산화시켜 동적거동을 계산할 수 있으나, 이 방법은 많은 계산시간을 요할뿐아니

다 근사 계산결과와 별다른 차이를 주지 않는다. 따라서 여기서는 각 시각에서는 동적해석대신 static catenary 방정식을 풀어 부유체에 작용하는 인장력을 산정하고, 이를 다시 식(15)에 대입하여 다음 시각에서의 부유체운동을 계산하는 간략한 방법을 택하였다.

왜냐하면 이 방법은 계류삭을 lumped mass로 처리하여 시간적분을 수행하는 좀 더 정확한 방법에 비하여 7~10% 가량의 오차를 유발시키나 계산시간이 훨씬 줄어들기(대략 1/100) 때문이다[13].

여러가지 시간적분법이 제안되어 있으나 여기서는 시간증가량  $\Delta t$  동안 가속도는 선형적으로 변화하고 또한  $\Delta t$  동안 동역학적 계수들이 변화하지 않는다 가정하여 central difference 방법을 사용하였다[16]. 초기조건은 시뮬레이션된 파가 시작하는 시각( $t=0$ )에서 물입자의 변위와 속도를 택하였으며 계산결과와 수렴도는 양호하였다.

### 6. 수치계산 및 토론

수치계산은 3가지 형상의 부표에 대하여 수행하였다 즉, 무한수심에 대한 Kyozuka의 결과인 식(10)에서  $\nu T = \nu_1 T = \nu_2 T = 1.5$  그리고 특이점의 위치를  $z'/T = -0.355$ 에 놓고 유선을 추적하여 얻은 형상(Kyozuka로 표시)과 유한수심에 대한 근사결과인 식(13)에서  $\sqrt{\nu} T = \sqrt{\nu_1} T = \sqrt{\nu_2} T = 1.5$  (Slender 1.5로 표시) 및  $\sqrt{\nu} T = 1.0$  (Slender 1.0으로 표시)인 경우에 대한 형상을 택하였다. 이들의 형상을 Fig. 2에 도시하였다.

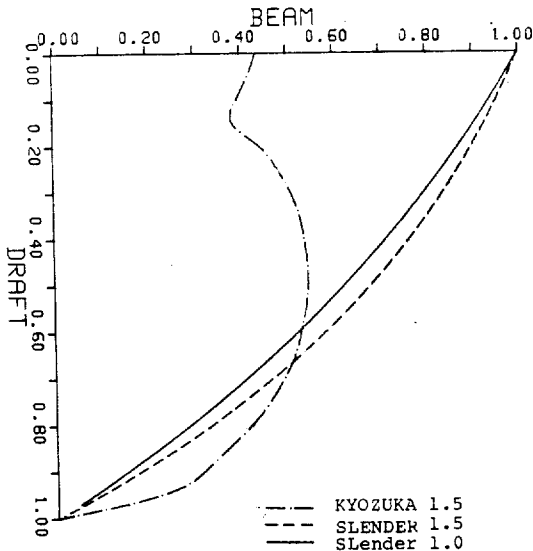


Fig. 2 Body Forms obtained by Kyozuka and Slender Body Approximation

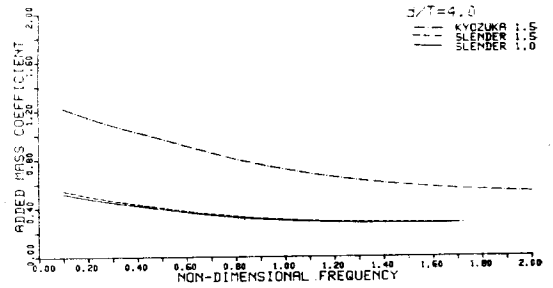


Fig. 3 Added Mass Coefficient for Heave Motion

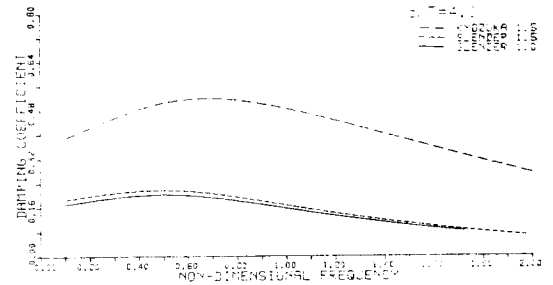


Fig. 4 Hydrodynamic Damping Coefficient for Heave Motion

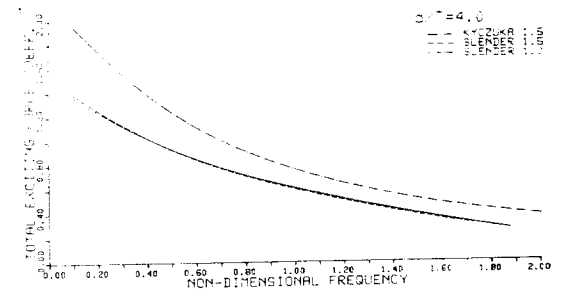


Fig. 5 Total Wave Exciting Force Coefficient for Heave Motion

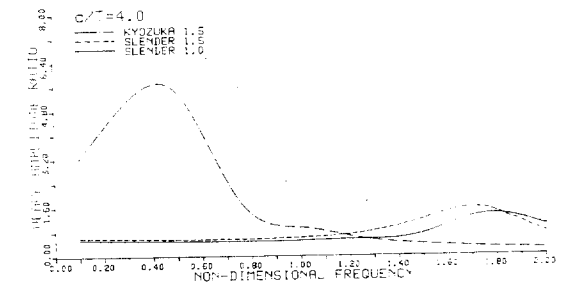


Fig. 6 Heave Amplitude Ratio

여기서 모든 길이는 홀수  $T$ 로 무차원화시켰으며, Kyo-zuka의 경우 수신면에서의 반폭은 0.437이며, Slender형상의 경우에서는 반폭을 홀수와 같이 택하였다.

동유체력을 구하기 위하여 물체는 대칭축을 수신면에서 홀수까지 12구간 등간격이 되게 분할하여, 그 표면에 소오스와 다브렛을 분포하였으며, 무차원 수심  $d/T=4.0$  그리고 무차원 파진동수  $\omega^2 T/g=0.1, 0.2, 0.5, 0.75, 1.0, 1.2, 1.5, 1.75, 2.0$ 에 대하여 계산하였다. Fig. 3에는 수직운동에 대한 부가질량계수를, Fig. 4에는 동감쇠계수를 보이고 있다. 여기서 부가질량은 배수량( $\rho V$ )으로, 동감쇠계수는 ( $\rho \omega V$ )으로 무차원화시켰다. 파진동수의 전 구간에서 Kyo-zuka형상의 부가질량이 Slender형상보다 크며, Slender 1.0과 1.5간의 차이는 매우 적음을 알 수 있다. 이러한 경향은 동감쇠계수의 경우에도 그대로 나타나고 있다. Fig. 5에는 수직방향으로 작용하는 파랑강제력을  $\rho g a_0^2 r^{2/3}$  ( $a_0$ =파 진폭)으로 무차원화시킨 하중계수로 보이고 있다. Haskind관계식에서 예측할 수 있듯이 Kyo-zuka형상에 작용하는 파랑하중이 전진동수 구간에서 Slender형상보다 큼을 확인할 수 있다. Fig. 6에는 수직운동의 진폭을 파진폭으로 나눈 수직운동진폭비를 도시하였다. 저진동수 영역에서 Kyo-zuka형상의 수직운동이 크게 나타나거나 어떤 특정 파진동수부근에서는 수직운동응답이 매우 작다. 한편 Slender형상은 저진동수영역에서는 수직운동응답이 작으나, 어떤 특정 무차원 진동수에서의 운동응답이 커진다. 이는 무차원진동수 1.8근처에서 공진이 발생하기 때문이다. 수평방향에 대한 동유체력과 운동응답도 같은 algorithm으로 계산할 수 있다. 계산결과를 지면관계로 이에 게재하지 않았으나 대체로 수직방향에 대한 결과와 유사한 경향을 보이고 있다.

규칙파중에서의 시간평균표류력을 무차원화시킨 표류력계수( $F_d / \rho g a_0^3 r^{1/3}$ )로 Fig. 7에 도시하였다. 수직운

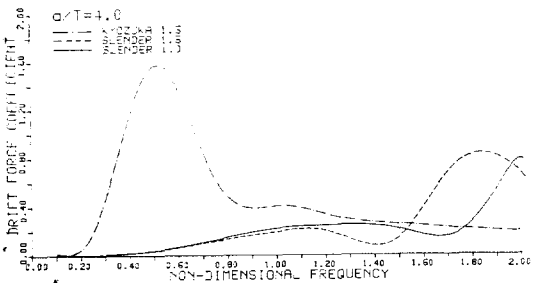


Fig. 7 Wave Drift Force Coefficient for Freely-floating Bodies

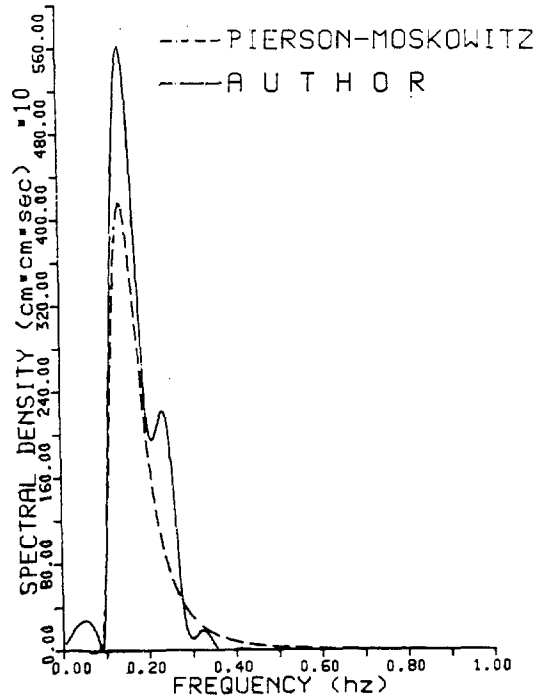


Fig. 8 Comparison of sea spectra  $d/T=4.0$

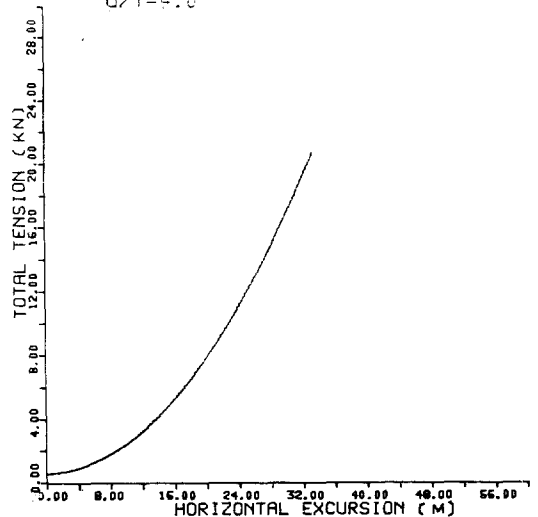


Fig. 9 Mooring line tension VS. displacement

동이 공진되는 진동수에서 표류력은 매우 크게 나타나며, Slender 1.5형상은 지정된 무차원 진동수 1.5부근에서 매우 작은 표류력을 받게 된다. 비교적 긴 파장의 파가 입사하는 해역에서 Kyo-zuka형상은 큰 표류력을 받게 되어 계류의 관점에서 불리하다. 불규칙파중에서의 표류력을 계산하기 위하여 Pierson-Moskowitz 스펙

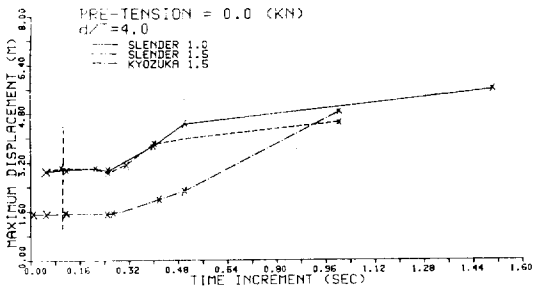


Fig. 10 Influence of Time Increment on the Accuracy of Numerical Solutions

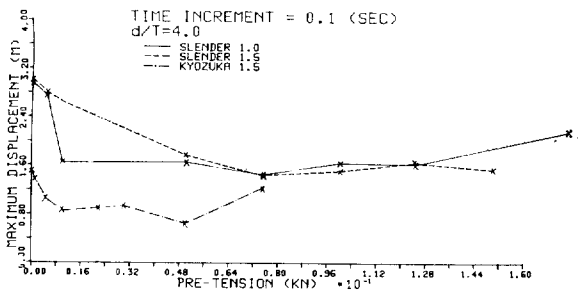


Fig. 11 Influence of Pre-tension on Buoy's Maximum Offset

트럼을 입력시켜 Borgman의 방법에 따라 시뮬레이션을 수행하였다. 선택한 풍속은 19knots 분할갯수는  $N=100$ 이었으며 500초동안을 시뮬레이션하였다. 이 결과의 정밀도를 확인하기 위하여 이를 데이터로 택하여 스펙트럼을 구하였다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 대체로 비슷한 경향을 보이고 있으나, 최대치가 원래 주어진 스펙트럼의 값보다 크게 나왔으며 몇개의 극대점을 갖고 있다. 여기서는 Hanning의 window 함수를 사용하였는데, 이 window 함수의 side lobes에 기인하는 차이로 해석된다.

계류계는 파괴하중이 62KN이며, 수중에서의 무게가 0.145KN/m인 와이어 로우프에 대한 계산을 수행하였다. 정역학적 해석에 의한 이 계류계의 특성이 Fig. 9에 나타나 있다. 선형구간이 비교적 큰 변위에까지 나타나고 있음을 알 수 있다. 전술한 바와 같이 각 시각에서 계류계의 성질은 정적해석으로 구하고, 이를 부유체에 대한 경계조건으로 대입하여 동역학적 해석을 수행하였다. 시간간격에 의한 정밀도를 확인하기 위하여 여러가지 시간간격으로 계산하였을 때 얻어지는 최대변위를 Fig. 10에 제시하였다. 이 그림에 뚜렷이 나타나 있듯이 시간간격은  $t=0.3$ 초 이하가 되어

야 수치결과가 수렴함을 알 수 있다. 한편 선인장력(pre-tension)이 변위에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 선인장력을 바꾸어가며 계류계의 변위와 인장력을 계산하였다. Fig. 11에서 알 수 있듯이 선인장력을 증가시키면 일반적으로 최대변위는 줄어들고 있으나 어떤 적정치 이상의 선인장력을 가하면 최대변위는 오히려 증가하게 되는 경역학적 해석에서는 볼 수 없는 결과를 얻게된다.

### 7. 결 론

이상의 연구에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(i) 무한수심에서 정확한 해법으로 구한 최적형상(Kyozuka)의 수직운동성능은 유한수심의 경우 저진동수 영역에서 매우 크게 나타난다.

(ii) 유한수심에서는 무한수심에서와는 달리 엄밀한 해를 구할 수 없으며, 단지 세장체이론을 이용하여 근사해를 구할 수 있다. 이 근사해는 지정파수에서 수직방향 파랑강제력을 적게 받으나 운동응답의 크기가 0이 되지는 않는다. 대체로 보아 반구나 무한 수심에서 최적인 형상(Kyozuka)보다 수직운동성능이 우수하다. 또한 공작이 상대적으로 용이하다.

(iii) 계류계의 설계시 적절한 선인장력을 가함으로써 최대변위를 줄일 수 있다. 부유체의 동적거동이 크게 일어날 때 최적의 선인장력은 정적해법으로는 구할 수 없으며 동적해법을 사용하여야만 최적치를 얻을 수 있다.

유한수심에서의 최적형상을 구하는 해법개발에 대한 연구가 지속되어야 할 것이다. 저자들은 현재 이와 관련하여 실험적 연구를 수행하고 있음을 부언한다. 끝으로 이 논문은 1983년도 문교부 학술연구조성비에 의하여 연구되었음을 밝히며, 이 자리를 빌어 문교부에 심심한 감사를 드린다.

### 참 고 문 헌

- [1] M. Bessho: On the wave-free distribution in the oscillation problem of the ship, Zosen Kiokai, 1965, pp.117-127.
- [2] Y. Kyozuka and K. Yoshida: On wave-free floating body forms in heaving oscillation, App. Ocean Research, 1981, Vol. 3, No. 4.
- [3] J.L. Black: Wave forces on vertical axisymmetric bodies, J.F.M., Vol. 67, Part 2, 1975, pp.

- 369-376.
- [4] 최항순 · 김성균 : 유한수심의 해상에서 규칙파에 놓인 구의 운동특성, 대한조선학회지, 제19권 제1호, 1982, pp. 23-32.
- [5] T.H. Havelock: Drifting forces on a ship among waves, Philosophical Magazine, Vol. 33, 1942, pp. 467-475.
- [6] H. Maruo: The drift of a body floating on waves, J.S.R., 1960, pp. 1-10.
- [7] J.N. Newman: The drift force and moment on a ship in waves, J.S.R., Vol. 11, No. 1, 1967, pp. 51-65.
- [8] 최항순 · 오태명 : 유한수심의 해상에서 규칙파에 놓인 구에 작용하는 표류력, 대한조선학회지, 제20권 제4호, 1983.
- [9] F.A. Hsu and K.A. Blenkarn: Analysis of peak mooring forces caused by slow vessel drift oscillations in random sea, OTC 1159, 1970, pp. 135-150.
- [10] G.F. Remery and A.J. Hermans: The slow drift oscillations of a moored object in random seas, OTC 1500, 1971, pp. 829-838.
- [11] J.A. Pinkster: Low frequency phenomena associated with vessels moored at sea, Soc. of Petroleum Engineers of AIME, SPE 4737, 1974.
- [12] J.N. Newman: 2nd order slowly-varying forces on vessels in irregular wave, Inter. Symp. of the Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves, London, England, Apr., 1974.
- [13] F. Cordelle: Simulation of the dynamic behavior of mooring buoys in waves, Proc. 2nd Intern. Symp. Ocean Eng. & Ship Handling, Gothenburg, Sweden, 1983.
- [14] J.V. Wehausen and E.V. Laitone: Surface Waves, Encyclopedia of Physics, Vol. 9, Berlin, 1960.
- [15] L.E. Borgman: Ocean wave simulation for engineering design, Journal of Waterways and Harbors Division, Proc. of A.S.C.E., Nov., 1969.
- [16] R.W. Clough and J. Penzien: Dynamics of Structures, McGraw-Hill, 1975.
- [17] M. Triantafyllou and C. Chryssostomidis: Environment Description, Force Prediction and Statistics for Design Applications in Offshore Engineering, MIT, 1980.