
 論 文

大韓造船學會論文集
 第 33 卷 第 1 號 1996年 2月
 Transactions of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 33, No. 1, February 1996

계류된 부유체의 규칙파중 표류감쇠에 대한 연구

박인규*, 최항순**

A Study on the Wave Drift Damping of Moored Floating Structures in Regular Waves

by

In K. Park* and Hang S. Choi**

요 약

해저 원유개발이 점차 심해역으로 옮겨감에 따라 부유식 생산시스템이 자켓과 해저파이프라인으로 구성된 종래의 시스템을 대체하고 있다. 계류부유체의 해상에서의 거동은 계류계로 인한 저주파수 파강제력과의 공진에 의해 커질 수 있다. 대진폭 전후동요를 정확하게 추정하기 위해 감쇠계수를 알아야 하며, 감쇠력중에서 표류감쇠가 주요 성분으로 알려져 있다.

본 논문에서는 부유구조물의 전진속도가 작다는 가정아래 표류감쇠를 구하는 근사적인 방법을 채택하였다. Green함수와 속도 포텐셜을 Brard수 r 에 관해 점근전개하여 1차항까지 취한 다음 동유체력 및 1차항 파강제력은 전진속도가 없는 경우와 같은 방법으로 구한다. 평균표류력의 전진속도에 대한 변화율로 표류감쇠를 구하였다.

계산방법의 유용성을 검증하기 위하여 선수파에서의 Series 60($C_b=0.7$)선형과 Esso-Osaka유조선에 대한 표류력을 계산하여 다른 계산결과와 비교하였다. 선수사파에서의 효과를 고찰하기 위하여 작은 편류각에 대한 계산을 하여 표류감쇠를 추정하였다. 계산결과와 비교하기 위하여 실험을 하였으며 이들은 비교적 잘 일치하였다.

발 표 : 1995년도 대한조선학회 추계연구발표회('95. 11. 9)

접수일자 : 1995년 10월 30일 , 재접수일자 : 1996년 1월 2일

* 정회원, 현대중공업(주) 선박해양연구소

** 정회원, 서울대학교 조선해양공학과

Abstract

In this paper, the wave drift damping is studied. An approximate method is adopted to calculate the wave drift damping for the sake of practical applications. By assuming the ship's forward speed to be low, the Green function and the velocity potential are expanded asymptotically with respect to the Brard number(τ) and terms up to the first order of τ are retained. Mean wave drift forces are computed straightforwardly. The wave drift damping is estimated as the change rate of the mean wave drift force with respect to the ship's speed. In order to validate the present method, Series 60($C_b=0.7$) ship is exemplified for forward speeds of $F_n=0, 0.02$ and 0.04 . To predict the wave drift damping experimentally, three geosym models of the Esso-Osaka tanker are used. Also the effect of drift angle on the wave drift damping is also considered. Comparisons between numerical and experimental results show reasonable agreements.

1. 서 론

종래의 해저석유의 개발은 주로 고정식 해양구조물인 자켓(Jacket)을 이용한 생산 플랫폼과 해저 파이프라인을 이용한 수송으로 이루어져 왔다. 그러나 최근에는 연근해역의 채굴가능한 유전은 대부분 고갈됨에 따라 점차 심해역으로 옮겨가게 되었다. 수심이 깊어짐에 따라 고정식 생산 플랫폼과 해저 파이프라인을 기본으로 하는 종래의 생산 방식은 기술적인 면이나 경제적인 면에서 한계에 이르러, 그 대신 부유식 구조물을 이용한 해저석유 생산시스템이 각광을 받게 되었다.

이러한 계류부유체가 해상에서 보이는 동적거동은 전체 시스템의 운영에 절대적인 영향을 미친다. 계류된 부유체의 동적거동은 파 주파수 운동과 저주파수 운동으로 나눌 수 있다. 파 주파수 운동은 입사파와 같은 주파수로 운동하게 되며, 저주파수 운동은 2개 파성분의 주파수 차 ($\omega_i - \omega_j$)를 특성 주파수로 갖는 운동을 뜻한다. 저주파수 운동이 중요한 이유는 표류력의 크기는 작지만 계류계로 인한 부유체의 수평방향 고유주파수와 공진하여 운동을 크게하고, 이로 인해 매우 큰 하중을 계류계에 유발할 수 있기 때문이다[1, 2].

이와 관련된 연구로는 Wichers & van Sluijs[3]

가 처음으로 감쇠실험을 하고, 이로부터 파랑중에서는 정수중보다 감쇠력이 커짐을 증명하였는데, 이를 표류감쇠력이라고 불렀다. Huijsmans & Hermans[4, 5]는 작은 전진속도를 고려한 Green 함수를 사용하여 유한한 전진속도에서 선박운동을 계산하는 효율적인 방법을 발표하였다.

Faltinsen et al.[6]는 실험 및 이론으로 불규칙 파중 계류된 선박의 표류감쇠를 연구하였다. Wichers[7]는 작은 전진속도를 고려한 Green 함수를 사용하여 유조선 및 LNG선에 대한 표류감쇠력을 계산하였고, 또한 MARIN의 $40m \times 40m$ 의 사각수조에서 3.8 m 모형으로 20만 DWT 유조선의 표류감쇠를 추정하는 실험을 하였다. Hearn & Tong[8, 9]은 유조선, 바지, 반잠수식 시추선동의 표류감쇠를 추정하는 실험을 수행하여 계산결과와 비교하였다. 한편 Nossen et al.[10] 및 Grue[11]는 작은 전진속도를 고려한 Green 함수와 정상(steady)포텐셜을 포함한 이론을 전개하여 반구(hemisphere), 수직원주 및 Series 60선형에 대한 평균표류력의 계산예를 보였다. Newman[12]은 저주파수 물체 진동을 산란장에 중첩시키는 다척도 전개법을 써서 표류감쇠계수를 이론적으로 유도하였다. Clark et al.[13]은 원주에 대하여 평균표류력만으로 표류감쇠를 추정할 수 있는 간단한 공식을 발견하였지만, 이를 확대적용하기 위해서는 공식의 수학적인 유도가 당면과제라 하였다.

Huijsmans & Siervogel[14]는 작은 전진속도에서 유효한 Green 함수를 구하고, 정상포텐셜을 자유 표면에서 적분하여 포함시키는 방법으로 표류력을 구하였다.

2. 표류감쇠의 정의

규칙파중 전후동요방향 저주파수 운동방정식의 최종형태는 다음과 같이 표현된다[7].

$$(M + a_{11}(\mu_1)) \ddot{x}_1^{(2)} = -B_{11}(\mu_1) \dot{x}_1^{(2)} - B_{112}(\mu_1) \dot{x}_1^{(2)} | \dot{x}_1^{(2)} + X_1^{(2)}(\mathbf{x}^{(1)}, 0, 0) + \frac{\partial X_1^{(2)}(\mathbf{x}^{(1)}, 0, 0)}{\partial \dot{x}_1^{(2)}} \dot{x}_1^{(2)} - c_{11}x_1^{(2)} \tag{1}$$

이 식의 우변에서 첫 두개의 항은 점성성분을 속도에 대하여 Taylor 급수전개하여 속도의 제곱항까지 취한 것이고, 그 다음 두개 항은 2차항 표류력을 Taylor 급수전개하여 속도의 1차항까지 취한 형태이다. 따라서 우변의 첫째 항은 속도에 선형적으로 비례하는 점성감쇠를, 둘째 항은 속도의 제곱에 비례하는 점성감쇠를 나타내며, 셋째 항은 평균표류력을 그리고 넷째 항은 평균표류력의 느린 전진속도에 비례하는 항이 된다. 이와 같이 속도에 비례하는 항은 일반적인 운동방정식에서 감쇠항에 해당하므로, 넷째항의 계수인 $\frac{\partial X_1^{(2)}}{\partial \dot{x}_1^{(2)}}$ 를 표류감쇠계수 $-B_1$ 이라고 정의한다. 이 항은 파가 없으면 0 이지만, 파가 있을때는 그 값이 0 이 아니다. 다섯번째 항은 감쇠시험을 위하여 설치한 스프링의 복원력항을 의미하며, 식의 좌변은 관성력을 뜻한다.

(1)식에 있는 3가지 감쇠항들을 분리하여 추정하기 위하여 다음과 같이 단계적인 모형시험을 수행한다. 즉 (1)식을 정수중 감쇠 시험에 적용하면 파랑에 의한 성분이 모두 사라지므로

$$(M + a_{11}(\mu_1)) \ddot{x}_1^{(2)} = -B_{11}(\mu_1) \dot{x}_1^{(2)} - B_{112}(\mu_1) \dot{x}_1^{(2)} | \dot{x}_1^{(2)} - c_{11}x_1^{(2)} \tag{2}$$

와 같이 되며, 저속에서는 $B_{112}(\mu_1) \approx 0$ 이라 가정할 수 있으므로

$$(M + a_{11}(\mu_1)) \ddot{x}_1^{(2)} + B_{11}(\mu_1) \dot{x}_1^{(2)} + c_{11}x_1^{(2)} = 0 \tag{3}$$

로 근사시킬 수 있다. 따라서 (3)식은 흔히 보는 진동방정식이므로 정수중 감쇠시험을 하여 점성감쇠계수 B_{11} 을 구할 수 있다.

한편 (1)식을 규칙파중 감쇠시험에 적용하면 다음과 같이 된다.

$$(M + a_{11}(\mu_1)) \ddot{x}_1^{(2)} = -(B_{11} + B_1) \dot{x}_1^{(2)} + X_1^{(2)}(\mathbf{x}^{(1)}, 0, 0) - c_{11}x_1^{(2)} \tag{4}$$

여기서 속도의 제곱에 비례하는 점성감쇠는 무시하였으며, B_1 은 표류감쇠계수이다.

예인시험에 적용하기 위하여 전체 표류력을 다음과 같이 근사적으로 표현한다.

$$X_1^{(2)}(\mathbf{x}^{(1)}, \dot{x}_1^{(2)}, \omega) = X_1^{(2)}(\mathbf{x}^{(1)}, 0, \omega) - B_1(\omega) \dot{x}_1^{(2)} \tag{5}$$

이러한 가정은 Wichers[3, 7]가 규칙파중 전진속도 0 부근에서 행한 예인실험을 통하여 그 유효성이 입증되었다. 실험에 의하면 작은 전진속도에서 표류력은 전진속도에 선형적으로 비례하며, 입사파고의 제곱에 비례한다. 그러면 주파수 ω 인 규칙파중 낮은 선박속도 U 의 함수로서의 표류력의 2차 전달함수는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{X_1^{(2)}(U, \omega)}{\zeta_a^2} = \frac{X_1^{(2)}(0, \omega)}{\zeta_a^2} - \frac{B_1(\omega)U}{\zeta_a^2} \tag{6}$$

따라서 규칙파중에서 예인속도 0 및 $U(\ll 1)$ 로 각각 예인시험을 수행하여 예인저항을 측정한 후, 윗식으로 부터 B_1 을 구할 수 있다. 여기서 ζ_a 는 입사파의 진폭이다.

3. 문제의 기술

3.1 경계치문제의 정식화

경계치문제로 정식화하기 위하여 Fig. 1과 같이 물체의 속도 U 에 따라 일정속도로 전진하는 좌표계를 도입한다. 비점성, 비압축성, 균일 유체이고, 유동은 비회전성이라고 가정하면, 포텐셜 이론을 적용할 수 있다. 유체유동은 Laplace 방정식을 만족하는 속도 포텐셜 ϕ 로 기술할 수 있으며, 다음과 같은 성분으로 나눌 수 있다.

$$\phi(\vec{x}, t, U) = -Ux + \phi_S(\vec{x}, U) + \phi_U(\vec{x}, t, U) \quad (7)$$

여기서 $-Ux$ 는 주위의 균일조류이고, ϕ_S 는 균일조류가 물체에 의해 교란된 정상(steady)포텐셜, ϕ_U 는 비정상(unsteady) 시간조화 포텐셜로 아래와 같이 나타낸다.

$$\phi_U(\vec{x}, t, U) = e^{-i\omega t} (\phi_0(\vec{x}) + \phi_1(\vec{x}; U) + \sum_{j=1}^6 \xi_j \phi_j(\vec{x}; U)) \quad (8)$$

여기서 ϕ_1 는 산란포텐셜을, ξ_j 는 j 번째 모드 의 물체 운동의 진폭을 나타내며, ϕ_j 는 운동의 단위 진폭에 대하여 대응되는 방사포텐셜이다. ϕ_0 는 입사파포텐셜을 나타내며, 입사각도가 β 인 파에서는 다음과 같이 주어진다.

$$\phi_0 = \frac{g\zeta_0}{\omega_0} e^{Kz - iK(x \cos \beta + y \sin \beta)} \quad (9)$$

여기서 g 는 중력가속도를, ω_0 는 입사파의 원주파수를, 그리고 ω 는 만남주파수를 각각 나타낸다. 또한 K 는 입사파의 파수를 나타낸다.

만남주파수 ω 는 입사파 주파수 ω_0 및 전진속도 U 와 다음의 관계가 있다.

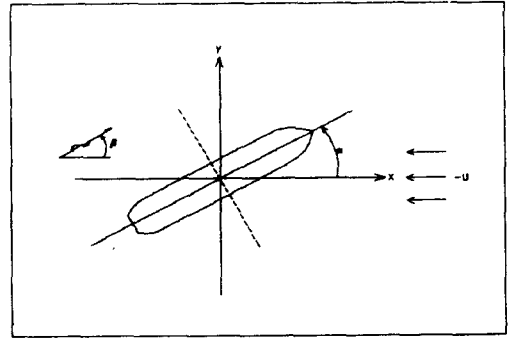


Fig. 1 Coordinate system

$$\omega = \omega_0 - UK \cos \beta \quad (10)$$

$\beta=0$ 와 π 는 각각 선미파와 선수파에 대응된다.

자유표면 경계조건은 자유표면에서의 압력은 대기압과 같다는 동력학적 조건과 자유표면의 속도는 물입자의 속도와 같다는 운동학적 조건을 $z = \zeta$ 에서 적용하므로써 표시된다.

$$\begin{aligned} g\zeta + \phi_1 + \frac{1}{2} \nabla \phi \cdot \nabla \phi &= \text{const} \\ \phi_x - \phi_x \zeta_x - \phi_y \zeta_y - \phi_t \zeta_t &= 0 \end{aligned} \quad \text{at } z = \zeta(x, y, t) \quad (11)$$

정상류와 비정상류의 유동이 균일류에 비하여 작다고 가정하여 자유표면 경계조건을 선형화하면, 방사 포텐셜 ϕ_j ($j=1, \dots, 6$) 과 산란 포텐셜 ϕ_7 은 다음과 같이 비교적 간단한 형태의 비정상 자유표면 경계조건을 만족한다[15].

$$(-i\omega - U \frac{\partial}{\partial x})^2 \phi_j + g \frac{\partial \phi_j}{\partial z} = 0, \quad \text{at } z=0, \quad j=1, \dots, 7, \quad (12)$$

포텐셜 $\phi_j, j=1, \dots, 7$ 의 물체 경계조건은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} = \begin{cases} n_j - \frac{U}{i\omega} m_j, & j=1, \dots, 6 \\ -\frac{\partial \phi_0}{\partial n}, & j=7 \end{cases} \text{ on SB} \quad (13)$$

여기서, $(n_1, n_2, n_3) = \vec{n}$, $(n_4, n_5, n_6) = \vec{x} \times \vec{n}$,

$$(m_4, m_5, m_6) = -\vec{n} \cdot \nabla(\vec{x} \times \nabla(\frac{\phi_0}{U} - x)) \quad (14)$$

$$(m_1, m_2, m_3) = -\vec{n} \cdot \nabla(\nabla(\frac{\phi_0}{U} - x)).$$

윗식에 나타나 있는 바와 같이 정상류와 비정상류의 속도 포텐셜이 연성되지 않지만, 방사 및 산란포텐셜의 물체 경계조건에 정상류포텐셜에 의한 유동이 영향을 미치고 있다. 그러나 본 논문에서와 같이 물체가 얇거나, 가늘고 길거나, 전진속도가 느리면 정상포텐셜은 매우 작아서 무시할 수 있다. 따라서 m_j 항은

$$m_j = 0, \quad j=1, 2, 3, 4, \quad m_5 = n_3, \quad m_6 = -n_2 \quad (15)$$

로 근사시킬 수 있다. 방사포텐셜과 산란포텐셜은 해저면에서 경계조건을 만족시키며, 물체로부터 멀리 떨어진 곳에서는 밖으로 퍼져나가는 파를 표시할 수 있어야 한다.

3.2 적분방정식

속도포텐셜을 구하기 위하여 속도포텐셜과 Green 함수를 Green의 제2등식에 대입시켰다. 즉, 자유표면경계조건과 해저면조건 그리고 방사조건을 만족하는 Green 함수 G와 방사 및 산란포텐셜에 대하여 Green 정리를 적용하였다.

S_B 를 물체의 침수표면이라고 하면 방사문제와 산란문제는 각각 다음과 같다. 이 때 자유표면에 대한 적분은 전진속도가 작다는 가정에 의해 무시된다.

$$\int \int_{S_A} (\phi_j \frac{\partial G}{\partial n} - G(n_j - \frac{U}{i\omega} m_j)) dS = -2\pi \phi_j(\vec{x}), \quad j=1, \dots, 6 \quad (16)$$

$$\int \int_{S_B} (\phi_7 \frac{\partial G}{\partial n} + G \frac{\partial \phi_0}{\partial n}) dS = -2\pi \phi_7(\vec{x}), \quad (17)$$

Green 함수의 수치계산을 간소화하기 위해 Brard 수 ($\tau = U\omega/g$)가 작다는 가정하에, 미지 속도포텐셜 ϕ_j 와 G를 물체 부근에서 다음과 같이 점근전개 하였다.

$$\phi_j = \phi_j^0 + \tau \phi_j^1 + O(\tau^2), \quad j=1, \dots, 7 \quad (18)$$

$$G = G^0 + \tau G^1 + O(\tau^2) \quad (19)$$

이들 전개를 (16) 및 (17)식에 대입하고 τ 의 같은 차수끼리 모으면, ϕ_j^0 와 ϕ_j^1 에 관한 다음과 같은 두개의 방정식을 얻는다.

$$2\pi \phi_j^0 + \int \int_{S_B} \phi_j^0 \frac{\partial G^0}{\partial n} dS = \begin{cases} \int \int_{S_B} G^0 n_j dS, & j=1, \dots, 6 \\ -\int \int_{S_B} G^0 \frac{\partial \phi_0}{\partial n} dS, & j=7 \end{cases} \quad (20)$$

$$2\pi \phi_j^1 + \int \int_{S_B} \phi_j^1 \frac{\partial G^0}{\partial n} dS = -\int \int_{S_B} \phi_j^0 \frac{\partial G^1}{\partial n} dS + \begin{cases} \int \int_{S_B} (G^1 n_j - G^0 \frac{m_j}{i\nu}) dS, & j=1, \dots, 6 \\ 0, & j=7 \end{cases} \quad (21)$$

여기서 $\nu = \omega^2/g$ 이다. 위의 두 방정식들은 좌면에 동일한 연산자를 가지며 미지수는 침수 물체 표면에만 요구되므로 효율적인 전산프로그램을 작성할 수 있다. 본 논문에서는 침수물체표면에 특이점을 분포시킬 뿐만 아니라, 동시에 수선면(waterplane)에도 다이폴을 분포시킴으로써 특이파수의 발생을 억제시키는 개량된 Green 적분방정식법[16]을 사용하였다.

G^0 와 G^1 의 표현은 G의 정확한 적분형태와 함께 다음의 3.3절에 제시하였다. 적분방정식의 해들은 Green 함수의 특이점에서 해석적으로 적분하는 종래의 파넬법에 의하여 구하였다.

3.3 Green 함수

Green 함수로는 자유표면조건(12)를 만족하고 작은 전진속도하에서 동요하는 다음의 소-스포트엔 설을 채택한다.

$$G(\vec{x}, \vec{\xi}; U) = \frac{1}{r} - \frac{1}{r'} + \phi(\vec{x}, \vec{\xi}; U) \quad (22)$$

여기서

$$\vec{x} = (x, y, z), \quad \vec{\xi} = (\xi, \eta, \zeta), \quad r = |\vec{x} - \vec{\xi}|, \\ r' = |\vec{x} - (\xi, \eta, -\zeta)| \text{ 이다.}$$

$\tau \ll 1$ 이고 Froude 수 $Fn = U/\sqrt{gL} \ll 1$ 이라고 가정하면, Green 함수 G 의 진동부분인 ϕ 를 다음과 같이 접근전개할 수 있다.

$$\phi(\vec{x}, \vec{\xi}; U) = \phi^{(0)}(\vec{x}, \vec{\xi}) + \tau \phi^{(1)}(\vec{x}, \vec{\xi}) + O(\tau^2) \quad (23)$$

여기서

$$\phi^{(0)}(\vec{x}, \vec{\xi}) = 2 P.V. \int_0^\infty \frac{k e^{k(x+\tau)} J_0(kR)}{k-\nu} dk \quad (24)$$

$$\phi^{(1)}(\vec{x}, \vec{\xi}) = 4i \cos \theta P.V. \int_0^\infty \frac{k^2 e^{k(x+\tau)} J_1(kR)}{(k-\nu)^2} dk \quad (25)$$

이며, $R = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}$, $\theta = \arctan(\frac{y-\eta}{x-\xi})$ 이고 J_0, J_1 은 각각 0차 및 1차의 제1종 Bessel 함수이다.

접근전개과정에서 $\phi^{(1)}$ 은 R이 커지면 불균일성(non-uniformity)이 나타나게 되며[5], 이로 인해 $\phi^{(1)}$ 의 계산값에 대한 오차가 커지게 된다. 이 경우에는 $\nu R > 1$ 인 영역에서 유효한 Green 함수를 구하여 사용한다. 이 과정은 (22)식에서 경로 적분(contour integral)을 사용하여 유수(residue)를 구한 후 정류위상법(method of stationary phase)을 적용하면 다음과 같이 외부영역(far field)에서 유효한 Green 함수 G_{far} 구해진다[11, 14, 17].

$$G_{far}(\vec{x}, \vec{\xi}; U) = R^{-\frac{1}{2}} h(\vec{\xi}, \theta) e^{k_1(\theta)(x - iR\sqrt{1-4r^2 \sin^2 \theta})} + O\left(\frac{1}{R}\right) \quad (26)$$

여기에서

$$h(\vec{\xi}, \theta) = \sqrt{\frac{8\pi}{\nu}} k_1(\theta) e^{k_1(\theta)[\zeta + iR - \cos \theta - 2r \sin^2 \theta] + iR[-\sin \theta + 2r \cos \theta \sin \theta] + i\pi/4} \quad (27)$$

이며, 밖으로 퍼져나가는 파의 파수 (wave number)는,

$$k_1(\theta) = \nu(1 + 2r \cos \theta) + O(r^2) \quad (28)$$

이 된다.

위에서 유도된 Green 함수를 수치계산하기 위해서는 0차 및 1차의 Green 함수 표현식을 수치계산이 쉽고 정확하도록 그 형태를 바꾸어야 한다. 0차의 경우는 전진속도가 없는 Green 함수와 같은 형태이므로 관측점과 특이점사이의 수평거리 R과 파수 ν 의 곱($= \nu R$)의 크기에 따라 효율적인 Green 함수를 선택할 수 있다. 여기서는 이 νR 값이 0.1보다 크면 급수형태의 식을 사용하였고, 0.1보다 작은 경우에는 적분형태의 식을 사용하였다 [18, 19]. 전진속도의 영향을 나타내는 1차항 Green 함수는 피적분함수가 double pole을 갖고 있어서 적분에 주의하여야 한다[20].

3.4 파랑하중

선체표면을 여러개의 작은 평면 사각형 파넬로 분할하고 파넬내에는 포텐셜의 크기가 일정하다고 가정하면, 적분방정식 (20), (21)는 파넬수 만큼의 미지수를 갖는 대수방정식으로 바뀐다. 이 대수방정식을 풀면 속도 포텐셜 $\phi_j(x, U)$ 을 구하고, 베르누이 방정식(Bernoulli's eq.)으로 부터 유체 압력을 구할 수 있다.

$$P = -\rho gz - \rho \phi_j - \frac{1}{2} \rho |\nabla \phi_j|^2 + P_o + C(t) \quad (29)$$

여기서

- P_o = 대기압력
- z = 평균 자유표면 아래로 수직거리
- ϕ_j = 속도 포텐셜
- $C(t)$ = 좌표계에 무관한 상수
- ρ = 유체의 질량 밀도

선형 동유체력을 영향계수 f_{kj} 로 표시한다

$$F_{k\alpha}^{(1)} = \text{Re}(-i\omega \sum_{j=1}^6 \xi_j e^{-i\omega t} f_{kj}), \quad k, j=1, 2, \dots, 6 \quad (30)$$

여기서

$$f_{kj} = i\omega a_{kj} - b_{kj} = \rho \iint_{S_k} (-i\omega \phi_j + \nabla(\phi_j - Ux) \cdot \nabla \phi_j) n_k dS \quad (31)$$

Tuck의 정리를 이용하면[10] 복소 영향계수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$f_{kj} = \rho \iint_{S_k} (-i\omega n_j - Um_k) \phi_j dS. \quad (32)$$

전진속도가 0일 경우에는 모든 j에 대하여 속도와 관련된 항이 $m_j = 0$ 이 되며, 연성된 동유체력 계수 a_{kj} 및 b_{kj} 는 항상 다음의 대칭관계식을 만족한다.

$$a_{kj} = a_{jk}, \quad b_{kj} = b_{jk} \quad \text{for } U=0$$

이 연성계수들간의 대칭성은 Timman-Newman 관계식으로 알려져 있으며, Green의 제2 등식으로 증명할 수 있다. 전진속도가 있는 문제에서는 선박이 길이 및 횡방향 평면에 대칭이면 Timman & Newman[21]은 역류(reverse flow) 조건을 써서 $b_{kj} + b_{jk} = 0$ 임을 보였다. 여기서 b_{kj} 는 모든 연성된 계수들이며, 예외로 $b_{15} + b_{51}$ 및 $b_{24} + b_{42}$ 는 $b_{kj} - b_{jk} = 0$ 이 된다.

비슷한 방법으로 1차항 파 강제력은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F_{\alpha\alpha}^{(1)} = -\rho \iint_{S_\alpha} (\frac{\partial}{\partial t} - U \frac{\partial}{\partial x})(\phi_0 + \phi_1) n_\alpha dS = \text{Re}(\xi_\alpha e^{-i\omega t} X_k^{(1)}) \quad (33)$$

여기서,

$$\begin{aligned} X_k^{(1)} &= \int \int_{S_k} (\phi_0 + \phi_1) (-i\omega n_k - Um_k) dS \\ &= -i\omega \int \int_{S_k} \phi_0 n_k dS - \rho \int \int_{S_k} \phi_1 (i\omega n_k + Um_k) dS \end{aligned} \quad (34)$$

(34)식은 (9) 및 (10)식을 이용하여 구할 수 있다.

2차항 파 강제력인 평균 표류력 계산은 Pinkster[22]의 직접 압력 적분법을 따라 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} F^{(2)} &= - \int_{\text{wet}} \frac{1}{2} \rho g \xi_i^{(1)2} n d t + a^{(1)} \times (M \cdot \dot{X}_i^{(1)}) \\ &+ \int_{S_0} \frac{1}{2} \rho |\nabla \phi^{(1)}|^2 n dS \\ &+ \int_{S_0} \rho (x^{(1)} \cdot \nabla \phi_i^{(1)}) n dS - \rho U \int_{S_0} (x^{(1)} \cdot \nabla \phi_i^{(1)}) n dS \end{aligned} \quad (35)$$

위의 표현은 Pinkster[22]의 결과와 유사하나 전진속도의 영향이 고려되어 있다. 여기서의 ϕ 는 (8)식으로 정의된 선형 전체포텐셜이다. 2차항 포텐셜은 평균표류력에 기여하지 않으므로 (35)식의 표현에는 포함되지 않는다.

4. 수치계산

전산 프로그램을 검증하기 위한 계산예로서 Series 60(Cb=0.7) 선박에 대하여 평균표류력을 계산하였고, Esso-Osaka 유조선에 대하여 평균표류력 및 표류감쇠를 계산하였다. 이들 선박의 주요요목을 Table 1에 표시하였다.

Table 1 Main particulars of Series 60 Ship and Esso-Osaka Tanker

	Series 60	Esso-Osaka
Lpp (m)	121.9	325.0
B (m)	17.4	53.0
T (m)	7.0	21.8
∇ (m ³)	10357	311900
Aw (m ²)	1666	15600
GM _T (m)	1.20	10.4
GM _L (m)	138.4	363.
KG (m)	7.2	11.3
LCG (m) fwd	0.6	10.3
I _{xx} (m ⁵)	0.3505 × 10 ⁶	0.8035 × 10 ⁸
I _{yy} , I _{zz} (m ⁵)	0.9851 × 10 ⁷	0.2059 × 10 ¹⁰

4.1 Series 60 (Cb=0.7) 선형

길이 121.92m인 Series 60(Cb=0.7) 선박의 선체 표면을 요소분할하였다. 선체표면은 20개의 수선면 요소를 포함하여 346개의 요소로 분할하였으며, 무차원주파수 6까지 30개의 주파수에 대하여 계산하였다. 이때 선박의 무차원 전진속도는 각각 $Fn=0.0, 0.02$ 및 0.04 로 하여 다른 계산결과 및 실험결과와 비교하였다.

Fig. 2는 전진속도가 없을때의 평균표류력을 보여주고 있다. 여기서 종축은 무차원 표류력 $-F/(\rho g \zeta_o^2 B)$, 이며 가로축은 무차원 파주파수 $\omega \sqrt{L/g}$ 로 표시되어 있다. Grue의 계산결과와는 극치까지는 잘 일치하나 고주파수에서 이보다 약간 크게 나타나고 있다. 이 차이는 선박의 무게중심의 위치, 관성반경등 입력 데이터의 차이에 기인한 것으로 생각된다. 한편 Chan[23]의 계산결과와는 극치에서 상당히 큰 차이를 보이고 있다. 이는 1차항 운동에 큰 차이가 없는 것으로 보아 평균표류력 계산방법의 차이에 기인한 것으로 생각된다.

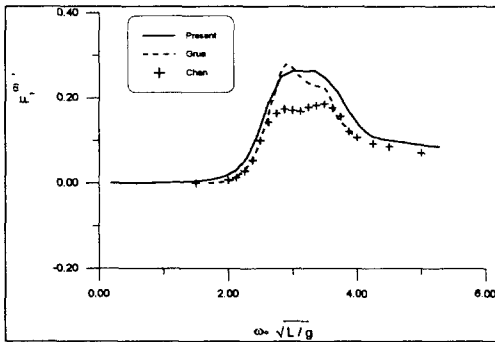


Fig. 2 Mean wave drift force coefficient of Series 60 ship at $Fn=0.0$

전진속도가 있을때의 영향을 알아보기 위하여 Series 60 선박에 대하여 $Fn=0.02$ 및 0.04 의 경우를 택하였다. Fig. 3에 평균표류력의 계산결과를 Grue의 계산치와 비교하였다. 이 경우는 최대치의 값은 대략 일치하나, 본 계산결과는 높은 주파수

영역에서 크게 나타났다. 이는 정상(steady)포텐셜을 무시함에 따라 m_j 항을 근사식으로 사용한 탓으로 여겨진다.

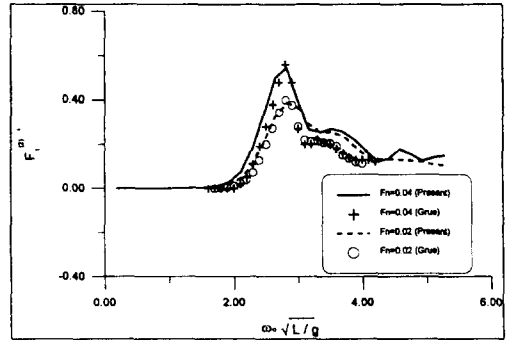


Fig. 3 Mean wave drift force coefficient of Series 60 ship at $Fn=0.02$ & 0.04

파입사각의 영향을 알아보기 위하여 파입사각 140도인 선수사파에 대한 평균표류력을 계산하여 Fig. 4에 도시하였다. 여기서도 Grue의 계산치를 함께 보였다. 두 결과는 대체로 일치하나, 전진속도가 있는 경우에 본 계산결과와 극치는 약간 크게 추정하고 있다. 전진속도가 있으면 Doppler 효과에 의해 극치가 낮은 주파수로 이동되고 있음을 보이고 있다. Fig. 5에는 파입사각이 140도인 경우의 Y-방향 평균표류력을 제시하였다. Grue의 계산은 Y-방향 평균표류력이 전진속도에 의해 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. Fig. 6은 Z-방향 표류모멘트를 보여 주고 있다. Z-모우멘트는 전진속도에 크게 영향을 받으며 Grue의 결과와 대체로 비슷한 경향을 보이고 있으나, 고주파수 부근에서 차이를 보이고 있다. 이러한 차이는 Doppler 효과에 의해 극치의 주파수가 낮은 값으로 이동됨으로 인한 것이다. 그밖의 원인은 선박의 무게중심의 위치와 같은 입력데이터의 차이로 생각된다. 계산시간은 워크스테이션(Sun Axil-320)으로 주파수당 10분(동유체력 2분, 파강제력 5분, 표류력 3분) 정도 걸리므로, 실제적인 목적으로 유용하게 사용할 수 있음을 알 수 있다. 참고로 전진동요 Green 함수를 사용하면 420분 정도 걸렸다[24].

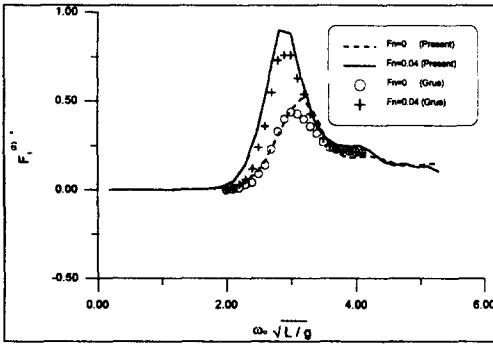


Fig. 4 Mean wave drift X-force coefficient of Series 60 ship at $F_n=0.04$, $\beta = 140^\circ$

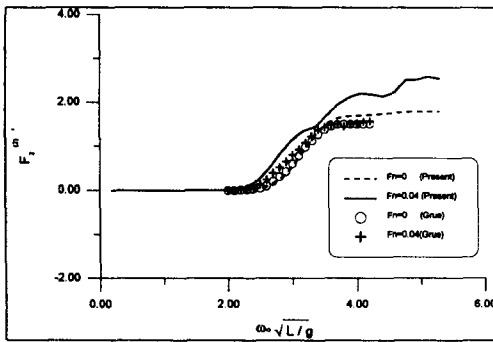


Fig. 5 Mean wave drift Y-force coefficient of Series 60 ship at $F_n=0.04$, $\beta = 140^\circ$

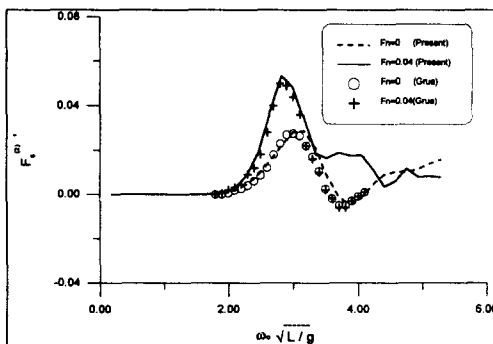


Fig. 6 Mean wave drift Z-moment coefficient of Series 60 ship at $F_n=0.04$, $\beta = 140^\circ$

4.2 Esso-Osaka 유조선

Esso-Osaka 유조선에 대한 수치계산을 수행하였다. 선박은 수선면에 8개의 패널을 포함하여 482개의 평면 사각파넬로 근사되었다. Fig. 7은 전진속도 $F_n=0.0018$ ($=0.1$ m/sec)일 경우의 선형 상하동요 및 종동요에 대한 계산 결과를 보여주고 있다. 여기서 상하동요와 종동요의 무차원 고유주파수가 2.9 및 3.5 임을 알 수 있다. 무차원 전진속도 $F_n=\pm 0.0018$ 에 대한 평균표류력이 Fig. 8에 보여주고 있다. 이때 가로축은 무차원주파수 $\omega_0 \sqrt{L/g}$ 이고, 세로축은 무차원표류력으로서 $F^{(2)}/\rho g L^2 B$ 이다. 그림에서 상하동요와 종동요의 고유주기에서 표류력이 크게 증폭되고 있음을 볼 수 있는데, 이것으로 보아 표류력은 공진된 수직 운동에 크게 영향받음을 알 수 있다.

선박의 편류각(drift angle)이 있을때의 영향을 알아보기 위하여 편류각 $\alpha=10$ 도 일 경우의 X, Y 방향 평균표류력과 Z 방향 선수동요(yaw)모우멘트를 계산하였다. 이때의 파입사각은 $\beta=180$ 도로 하였다. Fig. 9에 X 및 Y방향 평균표류력을 전진속도 $F_n=0$ 및 0.0018에 대하여 도시하였다. 편류각 $\alpha=10$ 도 에서의 X-방향 평균표류력은 무차원주파수 2.5 부근에서 크게 증폭됨을 볼 수 있다. 이는 횡동요의 고유주파수와 일치하며, 횡동요의 공진영향으로 인해 큰 표류력이 발생함을 의미한다. 그 이외의 주파수에서는 편류각이 없을때와 유사하다. Y-방향 평균표류력은 무차원 주파수 2.3에서 첫번째 극치를 가지며, 무차원 주파수 2.5에서 거의 0에 가까운 골을 보인다. 이는 횡동요와 관련된 것으로 보이며, 무차원 주파수 3.5부근에서의 변곡현상은 종동요와 관련된 것으로 생각된다. Y-방향 평균표류력은 파의 산란에 의한 것으로 입사파주파수가 커져도 줄어들지 않는다. 전진속도가 있으면 주파수 2.5까지는 평균표류력이 더 작아지다가 주파수가 2.5보다 더 크면 표류력이 커진다. Fig. 10에 편류각 $\alpha=10$ 도 일 때의 Z 방향 선수동요모우멘트를 전진속도 $F_n=0$ 및 0.0018에 대하여 각각 계산하고 그 결과를 표시

하였다. 선수동요 모우먼트는 횡동요 운동과 강한 연성을 보이며, 무차원 주파수 2.5부근에서 극치를 보이고 있다.

전진속도 0 부근에서 표류력의 속도에 대한 기울기가 표류감쇠라는 정의에 따라 속도 $F_n=0$ 및 $F_n=\pm 0.0018$ 에 대한 표류력 계산결과로부터 구한 표류감쇠 계수가 선수 규칙파의 경우 Fig. 11에 도시되어 있다. 횡측은 무차원 표류감쇠계수인 $B_1/\rho g \zeta_B U$ 로 표시되어 있다. 표류감쇠 역시 수직 운동의 공진에 크게 영향을 받고 있으며, 음(-)의 값을 보이는 곳도 나타난다. 즉, 상하동요의 고유 주파수인 무차원주파수 2.9 부근에서 첫번째 극치를 보이며, 중동요의 고유주파수인 3.5 에서 두번째 극치를 보인다. 두 극치사이에 아주 깊은 골이 생기며 음(-)의 값을 보인다. 이러한 현상은 공진 주파수 부근에서 운동의 위상이 180도 바뀌면서 에너지발산이 극소화된 때문으로 보인다[25, 26, 27]. 주파수가 더 커지면 표류감쇠는 양의 어떤 작은 값으로 수렴함을 관찰할 수 있다[6].

편류각을 가진 경우의 표류감쇠도 편류각이 없는 경우에 대한 정의를 그대로 따른다. 즉, 편류각을 가지고 작은 전진속도로 움직일때의 평균표류력과 편류각을 가지고 전진속도가 없을때의 평균표류력의 차이를 작은 전진속도로 나눈 값이 된다. 편류각이 10도 및 30도 일때 계산하고 그 결과를 Fig. 12에 표시하였다. 이 경우 모형시험 결과와 함께 표시하였는데, 모형시험에 대해서는 다음 장에서 자세히 언급한다. 표류감쇠는 편류각이 있으면 없을때 보다 훨씬 더 커질 것으로 예상되는데, 계산결과는 이러한 예상과 대체로 일치하고 있다. 편류각이 있으면 선박은 더 이상 유선형이 아니므로 선체주위의 흐름이 완전히 난류가 되며 와류(eddy), 박리(separation)등 복잡한 유동이 발생되어 에너지 손실이 커진다. 따라서 포텐셜 이론으로는 이를 추정할 수 없음은 자명하다. 한편 포텐셜이론에 근거한 계산에서도 선박의 좌우대칭관계를 이용할 수 없다. 그러므로 임의의 3차원물체로 모델링을 다시 해야한다. 이 경우 파넬수가 2배로 늘어남에 따라 계산시간이 더 걸리게 된다. 또한 선체의 관성반경 및 수선면의 면적 모우먼트등을

정의된 좌표계에 따라 다시 계산하여야 한다. 편류각이 있는 경우에도 표류감쇠는 수직 운동에 크게 영향을 받는다. 이 경우 횡동요 고유주파수에서 큰 봉우리가 생기는 것을 계산결과로 부터 알 수 있다.

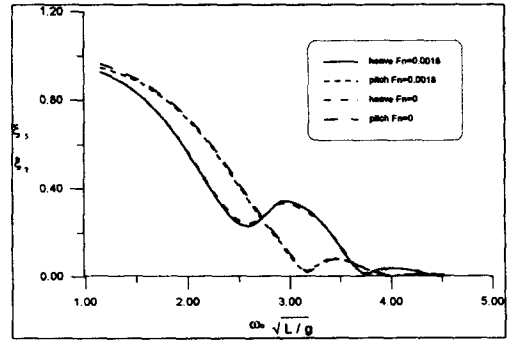


Fig. 7 Heave and pitch responses of Esso-Osaka tanker

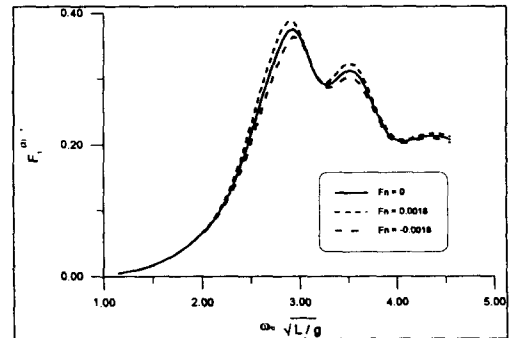


Fig. 8 Mean wave drift force coefficient of Esso-Osaka tanker

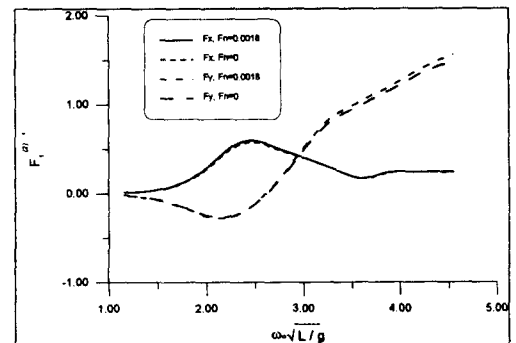


Fig. 9 Mean wave drift X- & Y-force of 10° drift angle

5. 모형실험

5.1 실험의 개요

모형시험은 Esso-Osaka 유조선의 각기 다른 축척 (1/50, 1/80 및 1/100)을 가진 모형선을 가지고 서울대학교(SNU) 수조와 현대 선박해양연구소(HMRI)에서 수행되었다. 유조선의 주요 요목이 Table 1에 수록되어 있다.

모형선은 선수선미에 부착된 수평방향 선형 스프링으로 계류되어 저주파수 전후동요 감쇠시험을 할 수 있도록 장치하였다. 스프링은 모형선의 1차항 운동에 영향을 주지 않고, 동시에 저진동수 운동에 선형적으로 작용하도록 주의하여 부착하였다. 모형선의 길이방향 중량 분포는 피칭 테이블로 측정하여 원하는 값에 맞추도록 하였다. 또한 횡방향 중량분포는 트리밍 탱크에서 횡동요 감쇠 시험을 수행하여 원하는 값이 되도록 맞추었다. 하나의 스프링은 실선에서 그 탄성계수가 15 tonf/m가 되도록 하였고, 양쪽 스프링을 합하면 계류사의 탄성계수는 30 tonf/m이다. 이때 계측된 전후동요 운동의 고유주기는 약 0.03 rad/sec였다. 감쇠시험시 전후동요 운동은 비디오 카메라로 녹화하여 덤으로서 계측결과를 추후 확인할 수 있도록 하였다. 1개의 servo-needle type(현대) 또는 용량식(서울대) 파고계를 모형선 및 수조 측벽과 적당히 떨어진 곳에 설치하므로써 반사파의 영향을 받지 않는 파고계측이 되도록 하였다. 실험할때의 입사파의 주파수는 $\omega=0.3\sim0.7$ rad/sec 범위에서 0.1 rad/sec 간격으로 선정하였고, $\omega=0.45\sim0.55$ rad/sec 구간에서는 계측치의 분산이 심하였으므로 좀더 촘촘하게 간격을 선정하였다. 입사파의 파고는 실선으로 환산하여 처음에는 5m 로 정하였으나, 시험이 진행되는 동안 수직운동의 고유주기에서 공진현상을 일으켜 갑판상에 물이 올라오는 경우가 생기므로 주파수에 따라 적절히 줄여서 사용하였다. 감쇠시험할때 세심한 주의를 기울였으나 작은 양을 계측하게 되어 계측치에 오차가 포함될 가능성이 있을 것에 대비하여

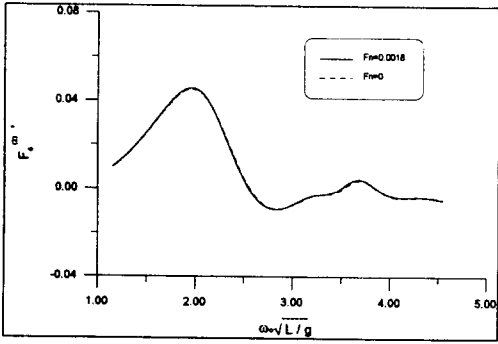


Fig. 10 Mean wave drift Z-moment of 10° drift angle

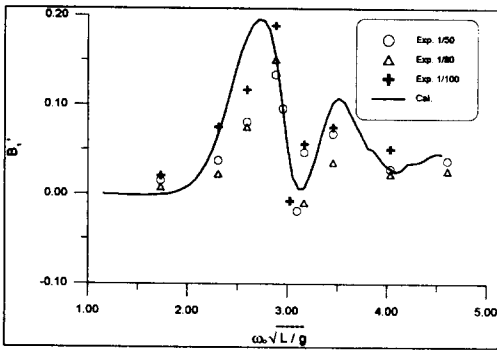


Fig. 11 Wave drift damping of Esso-Osaka tanker

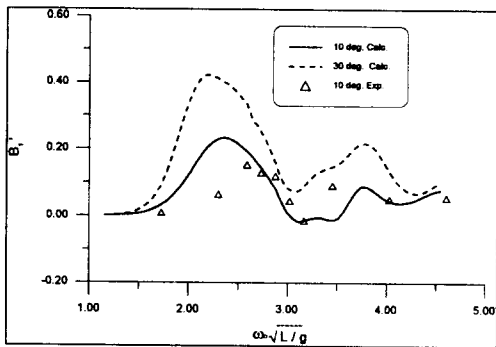


Fig. 12 Wave drift damping of 10 & 30° drift angle

같은 경우의 실험을 결과에 확신이 있을 때까지 여러번 반복 수행하였다. 전후동요의 파크치들을 계속하여 로그를 취한 후 감쇠계수를 구할 수 있다.

한편 선박이 작은 전진속도로 전진하며 편류각(drift angle)을 갖는 경우에는 감쇠시험의 장치로는 표류감쇠를 계속하는데 어려움이 있다. 다른 방법인 예인시험을 통하여 선박에 작용하는 선체 저항을 계속하여 표류감쇠를 구하는 방법을 시도하였다. 선수 선미에 횡방향으로 엇갈리게 트리밍 가이드 부착용 버팀목을 붙여서 편류각을 0도, 5도 및 10도까지 줄 수 있도록 하였다. 정수중 뿐만 아니라 파랑중에서도 편류각을 가지고 전진하며 운동하므로, 모형선의 1차항 운동을 방해하지 않도록 트림 가이드의 힌지부의 수직위치를 주의하여 선택하여야 한다. 기본적으로 파장에 비해 작은 파고를 가진 파만이 사용된다고 가정한다. 저항계측은 500 Newton 용량의 로드셀로 계속하였다. 이와 같은 장치로는 편류각 10도까지가 한계이며, 더 큰 편류각에 대한 계측에는 좀 더 특별한 장치가 있어야 할 것으로 생각된다. 그 이유는 편류각에 의해 6자유도 운동을 하게되는데, 이들 운동을 허용하며 전후동요 방향으로 잡아주는 트리밍 가이드가 튼튼해야 할 뿐 아니라 그 힌지부의 위치가 중요해 지기 때문이다. 예인 전차의 속도는 ± 0.25 m/sec 로 하였다.

5.2 실험 결과의 검토

편류각이 없을때 계측된 표류 감쇠계수가 Fig 11에 표시되어있다. 여기서 더하기(+) 표시는 1/100 축척을 가지고 서울대학교 예인수조에서 2차례에 걸쳐서 시험한 결과를 종합한 것이다. 삼각형 표시기호는 선박해양공학연구센터(KRISO)에서 빌려 준 1/80 모형으로 계측한 결과를 표시한 것이다. 작은 원으로 표시된 기호는 현대선박해양연구소의 1/50 모형으로 3차례에 걸쳐서 시험한 결과를 종합한 것이다. 모형선의 길이는 6.5m 이고 배수량 2.5 ton 이다.

$\omega=0.5$ 및 0.6 rad/sec(무차원 주파수 2.9와 3.5에 해당)에서 뚜렷한 극치를 관찰할 수 있으며, 본 계산결과도 동일한 경향을 보이고 있다. 그 중간에 아주 깊은 골이 음(-)의 값을 나타내고 있다. 이처럼 표류감쇠가 음(-)의 값을 보이는 이유는 앞장에서도 논의한 바와 같이 공진점부근의 위상변화에 기인된 것이며 복잡한 형상을 가진 구조물에 흔히 나타난다[11]. 또한 선박에서도 상하동요와 종동요의 공진위치에 따라 간혹 나타난다[28]. 비록 실험 결과가 모델마다 조금씩 다르긴하지만 척도 효과의 징후가 뚜렷하게 보이지 않는다. 또한 $\omega=0.55$ rad/sec(무차원주파수 약 3.2에 해당)에서의 최소치를 찾기 위해서는 앞에서 언급한 바와 같이 충분히 많은 회수의 시험이 필요하였다.

편류각을 가진 경우의 표류감쇠가 Fig. 12에 보이고 있다. 작은 편류각이 있을때의 표류감쇠는 없을때의 표류감쇠와 비슷한 경향을 보이며 약간 더 큰 값을 갖지만, 횡동요와의 강한 연성의 영향으로 횡동요 고유주파수에서 큰 봉우리를 보이고 있다. 그러나 모형시험에서는 이러한 현상이 상당히 둔화되어 나타났다. 그 이유는 모형시험장치의 설치시 1차항 운동이 방해받지 않아야 하는데, 예인할 때 선수동요를 억제시키는 기계장치의 구성상 완전한 자유를 보장하기 어렵기 때문이다. 또한 횡동요 운동은 점성감쇠를 고려하지 않은 포텐셜이론에서 추정된 값보다 훨씬 작은 운동만 발생되기 때문이다. 작은 편류각도하에서의 현상은 횡동요와 큰 연관이 있으며, 이러한 경향은 실제문제에 흔히 봉착하는 매우 현실적인 문제이며 앞으로 더욱 연구해야 할 과제로 여겨진다.

6. 결 론

앞에서 논의한 결과를 토대로 다음의 결론을 얻을 수 있다.

1) 부유체의 표류감쇠를 구하기 위하여 전진속도가 작다는 가정하에 점근전개된 Green 함수를 이용한 실용적인 수치계산 프로그램을 작성하여

다른 계산치 및 실험치와 비교하여 그 유효성을 입증하였다.

2) 표류감쇠는 보통 양(+)의 값을 가지며 그 크기는 부유체의 수직운동에 크게 좌우된다. 즉 계산 및 실험에 의하여 상하동요와 종동요의 고유주파수에서 극치를 갖고 그 사이에 최소값이 나타남을 확인하였다. 또한 최소값은 음이 될 수 있음을 확인하였다.

3) 모형에 대한 감쇠실험(decay test)과 예인실험으로 표류감쇠를 추정할 수 있었으며, 모형선의 크기에 따른 척도효과는 무시할수 있을만큼 작은 것으로 판단되었다.

4) 실제상황에서 흔히 발생하는 편류각을 가진 경우의 표류감쇠에 대한 계산 및 모형시험을 수행한 바, 횡동요의 영향이 크게 나타남을 알 수 있었다. 그러나 이에 대한 결론을 얻기위하여는 앞으로 좀더 체계적인 연구가 요구된다.

후 기

본 논문작성에 필요한 수조시험용 모델을 빌려주신 선박해양공학연구센터의 양승일 소장님께 감사드리며, 본 논문이 완성될 수 있도록 지도와 격려를 아끼지 않으신 서울대학교의 김효철 교수님, 배광준 교수님, 이기표 교수님 그리고 홍익대학교의 송무석 교수님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Triantafyllou, M. S., A consistent hydrodynamics theory for moored and dynamically positioned vessels, *Journal of Ship Research*, Vol.26, No. 2, pp.97-105, 1982.
- [2] 최 항순, 비선형 파랑하중과 구조물의 운동응답, 해양공학 연구회 제 21차 Workshop 논문집, 1988.
- [3] Wichers, J. E. W. & M. G. van Sluijs, The influence of waves on the low-frequency hydrodynamic coefficients of moored vessels, OTC 3625, 1979.
- [4] Huijsmans, R. H. M. & A. J. Hermans, A fast algorithm for computation of 3-D ship motions at moderate forward speed, *Proceedings of 4th conference on Numerical Ship Hydrodynamics*, 24-31, 1985.
- [5] Huijsmans, R. H. M. & A. J. Hermans, The effect of the steady perturbation potential on the motion of a ship sailing in random seas, *Fifth international conference on Numerical Ship Hydrodynamic*, 1989.
- [6] Faltinsen, O. M., L. H. Dahle & B. Sortland, Slow drift damping and response of a moored ship in irregular waves, *Proceedings of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vol. 1, 1986.
- [7] Wichers, J. E. W., A simulation model for a single point moored tanker, MARIN Publication No. 797, 1988.
- [8] Hearn G. E. & K. C. Tong, Evaluation of low-frequency wave damping, OTC 5176, 1986.
- [9] Hearn, G. E. & K. C., Tong, A comparative study of experimentally measured and theoretically predicted wave drift damping coefficients, OTC 6136, 1989.
- [10] Nossen, J., J. Grue & E. Palm, wave forces on three-dimensional floating bodies with small forward speed, *Journ. of Fluid Mechanics*, Vol. 227, 1991.
- [11] Grue, J., Drift Force and drift moment on ships advancing with small speed in oblique waves, *Ship Technology Research*, Vol. 39, 1992.
- [12] Newman, J. N., Wave Drift Damping of Floating Bodies, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol 249, pp 241 ~ 259, 1993.
- [13] Clark, P. J., S. Malenica & B. Molin, An heuristic approach to wave drift damping, *Applied Ocean Research* 15,, 1993
- [14] Huijsmans, R. & L. Siervogel, Wave-drift forces on ships in cross-flow conditions, *Conference on Naval-Hydrodynamics*, 20th ONR, Santa-Barbara, 1994.
- [15] Newman, N. J., The theory of ship motions, *Advances in Applied Mechanics* Vol. 18,

Academic Press Inc., 1978.

- [16] Hong, D. C., On the improved Green integral equation applied to the water-wave radiation-diffraction problem, Journal of the Society of Naval Architecture of Korea, Vol. 24, No. 1, 1987.
- [17] Haskind, M. D., The hydrodynamic theory of ships oscillating in rolling and pitching, Prikl. Mat. Mekh. 10, 33-66, 1946.
- [18] 김 동준, 해상에 계류된 부유체의 표류운동해석, 서울대학교, 조선해양공학과, 박사학위논문, 1989.
- [19] 최 윤락, 불규칙파중에 계류된 부유체에 작용하는 저진동표류력, 서울대학교, 조선해양공학과, 석사학위논문, 1990.
- [20] 최 진근, 이 기표, 전진속도를 고려한 3차원 물체의 동유체력 해석, 대한 조선학회지, 제25권, 제3호, 1988.
- [21] Timman, R. & J. N. Newman, The coupled damping coefficients of a symmetric ship, Journal of Ship Research, Vol. 5, 1962.
- [22] Pinkster, J. A., Low frequency second order wave exciting forces on floating structures, MARIN Publication No.600, Wageningen, 1980.
- [23] Chan, H. S., A Three dimensional technique for predicting first- and second-order hydrodynamic forces on a marine vehicle advancing in waves, Ph. D. Thesis, University of Glasgow, 1990.
- [24] 이 호영, 개인적인 계산 및 토론, Hyundai Maritime Research Institute, 1995
- [25] Park, I. K. & H. S. Choi, On the prediction of wave drift damping of a tanker, Proceedings of BOSS '94, 1994.
- [26] 박 인규, 해상에 계류된 부유체의 표류감쇠에 대한 연구, 박사학위논문, 서울대학교 조선해양공학과, 1995.
- [27] Park, I. K. & H. S. Choi, A study on the wave drift damping of moored ships, Proceedings of PRADS '95, 1995.
- [28] Maruo, H., The drift of a body floating on waves, Journal of Ship Research, Dec., 1960.