

---

 論 文
 

---

大韓造船學會論文集  
 第 31 卷 第 4 號 1994年 11月  
 Transactions of the Society of  
 Naval Architecture of Korea  
 Vol. 31, No. 4, November 1994

### 3차원 파넬방법에 의한 파중 선박의 조종성능 해석

안성필\*, 이기표\*\*

#### Analysis of Manoeuvrability of a Ship in Waves by 3-Dimensional Panel Method

by

S. P. Ann\* and K. P. Rhee\*\*

#### 요 약

본 논문에서는 파중에서 조종운동을 하는 선박에 작용하는 유체력에 대한 수학적 모델을 확립하고, 이에대한 수치해석을 수행하였다. 파중에서 운항하는 선박은 입사파의 주파수에 의존하는 고주파수 운동과 선박의 조종운동에 따른 저주파수 운동을 하게되므로, two time scale expansion 방법을 적용하여 속도포텐셜에 대한 선형경계치 문제를 정립하였으며, 선박의 조종운동에 미치는 파의 영향은 2차차수 저주파수 표류력만을 조종운동방정식에 포함시켜 고려하였다. 속도포텐셜에 대한 적분방정식의 해는 3차원 파넬방법을 사용하여 구하였으며, 선박에 작용하는 힘은 직접적분법을 사용하여 계산하였다.

#### Abstract

A mathematical model for the hydrodynamic forces acting on the ship manoeuvring in waves is formulated and a numerical method for the problem is developed. The motion of a ship, which manoeuvres in waves, may be thought to have two components; one is a high frequency component due to encounter waves, and the other is a low frequency component due to manoeuvring motion. So the method of two time scale expansion is used to divide linear boundary value problem.

For the effects of waves on the manoeuvring motion of a ship, only the second order drift forces are considered. The integral equation for the velocity potential is solved by

---

접수일자 : 1994년 5월 25일, 재접수일자 : 1994년 11월 1일

\* 정희원, 한라중공업(주) 선박해양연구소

\*\* 정희원, 서울대학교 조선해양공학과

3 dimensional panel method and hydrodynamic forces are calculated by direct integral method.

## 1. 서 론

최근의 빈번한 해난사고로 인하여 국제해사기구(International Maritime Organization)에서는 선박의 조종성에 대한 규정을 강화할 예정이므로, 선박의 조종성이 많은 우리나라로서는 실선 시운전시 바람, 조류 및 파도등의 외적요인이 선박의 조종성능에 미치는 영향을 분석하여 실선시운전결과를 수정할 필요가 있다. 이러한 외력들중 바람과 조류에 의한 영향은 현재 많은 연구가 이루어져 거의 정확한 추정이 가능한 상태이다. 그러나 조종운동중인 선박에 작용하는 파의 힘은 선박을 동요시키면서 파의 진행방향으로 표류시키므로 정확한 추정이 매우 어렵다. 본 논문에서는 선박의 조종성능에 미치는 파의 영향에 대하여 검토하였다.

선박에 미치는 파의 영향은 주로 선박의 내항성능과 계류된 부유체의 운동예측의 분야에서 많은 연구가 이루어져왔다. 내항성능에서 주요관심은 파중 선박의 운동과 부가저항으로, 선박의 운동은 선형이론으로 해석하고 부가저항은 비선형 표류력으로 생각하여 추정하는 방법이 사용되어져왔다.

선박의 운동을 엄밀하게 추정하는 방법으로 주로 3차원 특이점분포법이 사용되고 있다. 이 방법을 사용하여 처음으로 유체력을 계산한 사람은 Chang[2]으로, Chang은 자유표면 경계조건에서 전진속도의 영향이 동유체력의 계산에 미치는 영향을 무시할 수 없다고 하였다. 그후 Inglis와 Price[13]는 자유표면 경계조건과 선체표면 경계조건에서의 전진속도의 영향을 타원회전체에 대한 계산을 통하여 조사하였으며, Huijmans[12]는 선박의 전진속도를 지속적으로 가정한 후 경계치문제와 Green함수를 속도에 대해 전개하여 유체력을 구하였다. 이상은 모두 주파수영역에서 유체력을 구하였으며, Liapis와 Beck[19], 공인영[8]등은 시간영역에서 파도 Green함수를 사용하여 파중 선박에 작용하는 유체력을 구하였다.

비선형 표류력은 주로 계류된 부유체에 작용하는 저진동 표류력의 분야에서 많은 연구가 이루어져왔다. Havelock[9,10]이 고정된 부유체에 작용하는 시간평균 표류력에 대해 고찰한 이후, Maruo[20], Newman[21]등이 각각 표류력과 표류모우먼트에 대한 수학적 모델을 유도하였으며, Triantafyllou[29]

는 two time scale expansion의 방법을 사용하여 유체력과 부유체의 운동을 고주파수성분과 저주파수성분으로 분리하여 해석하였으며, Pinkster[25]는 부유체의 표면에 작용하는 압력을 직접 적분하여 유체력을 구하였는데, 이 방법은 표류력을 성분별로 분리하여 물리적 해석을 할 수 있다는 장점이 있다.

조종성능에 영향을 미치는 파의 효과는 크게 선박의 조종운동에 의하여 발생하는 파에대한 문제와 입사파에 의한 파강제력 문제로 나눌 수 있다. 이들중 선박의 조종운동에 의하여 발생하는 파에 의한 영향은 Fujino[6]가 조종운동방정식에 기억효과를 포함시킴으로서 고려할 수 있다는 것을 보였다. 그후 Jiang[16], Takaki[27,28], 이기표[26], 이승건[17]등이 기억효과가 조종성능에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였는데, 선박의 속도가 매우 저속일 경우를 제외하고는 거의 영향이 없는 것으로 밝혀졌다. 파중 선박의 조종운동에 관한 연구는 Eda와 Shiba[4]에 의해 처음 시작되었는데, 그들은 규칙파중에서 선회시험에 대한 모형시험을 수행하여 선회계획이 정수중에서의 것과 많은 차이가 있다는 것을 관찰하였다. 그후 Inoue와 Murahashi[15], Hirano[11]등은 규칙파중에서의 모형시험을 수행하여 선박의 궤적변화가 표류력때문이라고 결론지었다. Nonaka[22]는 파중에서 조종운동을 하는 선박에 대한 유체역학적 문제를 Triantafyllou의 방법을 사용하여 이론적으로 정립하고, 중첩이론에 의한 파중 조종성능 예측의 타당성을 확인하였다. 그러나 Nonaka는 선박의 형상을 세장형으로 가정하여, 선박의 전진운동에 의한 유체장의 교란이 작다는 가정하에 문제를 간략화한 후 이론식만을 제시하였고 실제적인 계산결과는 얻지 못했다.

본 논문에서는 선박의 형상에 대한 가정을 하지 않은 상태에서, 일반적인 선박의 파중 조종성능을 예측할 수 있는 수학적 모델을 정립하였고, 주파수영역에서 3차원 특이점분포법을 사용하여 선박에 작용하는 유체력을 계산하여 실험값과 비교하였다. 또, 정수중 선박의 조종운동에 의한 유체장의 교란이 파중을 운항하는 선박의 동유체력에 미치는 영향에 대하여 조사하였으며, 이것을 토대로 파중 조종운동을 하는 선박에 작용하는 2차차수 저주파수 표류력을 계산하여 파중에서의 선박의 조종시운전을 컴퓨터 모사하

였다.

**2. 조종운동방정식**

파중 선박의 조종성능을 해석하기 위한 수학적 모델로, 본 논문에서는 일본의 MMG (Manoeuvring Modelling Group)에서 제안한 조종운동방정식을 사용하였다. 바람과 조류의 영향이 없을 경우, 조종운동방정식은 무게중심을 원점으로 한 우수좌표계에서 다음과 같은 형태로 표현된다.

전후동요  

$$m (\dot{u} - rv) = X_{hull} + X_{prop} + X_{rud} + X_{wave} \quad (1)$$

좌우동요  

$$m (\dot{v} + ru) = Y_{hull} + Y_{rud} + Y_{wave} \quad (2)$$

선수동요  

$$I_{33} \dot{r} = N_{hull} + N_{rud} + N_{wave} \quad (3)$$

여기서  $m$ 과  $I_{33}$ 은 선박의 배수량과  $z$ 축에 대한 질량관성모우먼트를 나타내고,  $u, v, r$ 은 선박의  $x$ 축방향속도,  $y$ 축방향속도, 선수동요 각속도를 각각 나타낸다. 또한 하첨자로 표시된 hull, prop, rud, wave는 각각 선체, 추진기, 타, 파에 의한 성분을 나타낸다. MMG 모델은 선박의 운동에 영향을 주는 여러가지 인자들의 상호 간섭효과를 고려하도록 되어있지만, 본 논문에서는 파가 선체에만 영향을 미치고, 추진기와 타에 대해서는 간섭효과가 거의 없다고 가정하고 수학적 모형을 정립하기로 한다. 따라서 파에 의한 힘과 모우먼트는 정수중에서의 조종운동방정식에 외력으로서만 첨가하는 형태로 된다. 그러므로 식 (1), (2), (3) 에서 선체, 추진기, 타에 의한 힘과 모우먼트는 정수중에서의 경험식이나 실험값을 사용하였다.

**3. 파에 의한 힘과 모우먼트**

파중을 운항하는 선박은 입사파의 주파수에 의존하는 고주파수 성분과 선박의 조종운동과 표류력에 의한 저주파수 성분의 힘과 모우먼트를 받게된다. 이와같이 두 종류의 주파수 성분이 공존하는 문제를 해석하기 위하여, 본 논문에서는 two time scale expansion의 방법을 적용하기로 한다.

**3.1 좌표계**

본 논문에서는 파중 선박의 조종운동을 해석하기 위하여 다음과 같이 세가지 좌표계를 사용하기로 한다.

가)  $\vec{x}_0$  좌표계 ;  
 공간고정좌표계로서 원점은 평균자유수면에 위치하고, 평균자유수면에서 연직상방향을 양의  $z_0$  방향으로 하는 우수좌표계이다.

나)  $\vec{x}$  좌표계 ;  
 선박의 저주파수 조종운동에 따라 이동하는 좌표계이다. 본 논문에서는 저주파수 조종운동을 평균자유수면에 평행한 전후동요, 좌우동요, 선수동요운동만으로 제한하기로 한다. 따라서 이 좌표계는 원점이 평균자유수면에 위치하고, 선수방향을 양의  $x$ 방향으로 하고, 좌현방향을 양의  $y$ 방향으로 하는 우수좌표계이다. 이 좌표계와  $\vec{x}_0$  좌표계사이의 관계는 다음과 같다.

$\vec{x}_A$  ;  $\vec{x}_0$  좌표계와  $\vec{x}$  좌표계의 원점사이의 벡터  
 $\theta$  ;  $\vec{x}_0$  좌표계에 대한  $\vec{x}$  좌표계의 회전각

다)  $\vec{x}'$  좌표계 ;  
 선체에 고정된 좌표계로서  $\vec{x}$  좌표계와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$\vec{\xi}$  ;  $\vec{x}$  좌표계와  $\vec{x}'$  좌표계의 원점사이의 벡터  
 $\vec{a}$  ;  $\vec{x}$  좌표계에 대한  $\vec{x}'$  좌표계의 회전각  
 ( 횡동요, 종동요, 선수동요순 )

좌표계의 변환에는 다음과 같은 식을 사용한다.

$$\vec{x} = E (\vec{x}_0 - \vec{x}_A), \quad \vec{x}_0 = E^T \vec{x} + \vec{x}_A$$

$$\vec{x}' = D (\vec{x} - \vec{\xi}), \quad \vec{x} = D^T \vec{x}' + \vec{\xi} \quad (4)$$

여기서 E와 D는 변환행렬로 다음과 같다.

$$E = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$D = \begin{bmatrix} C_2 C_3 & C_1 S_3 + S_1 S_2 C_3 & S_1 S_3 - C_1 S_2 C_3 \\ -C_2 S_3 & C_1 C_3 - S_1 S_2 S_3 & S_1 C_3 + C_1 S_2 S_3 \\ S_2 & -S_1 C_2 & C_1 C_2 \end{bmatrix}$$

여기서,  $C_i = \cos \alpha_i$ ,  $S_i = \sin \alpha_i$ 를 각각 나타낸다.  $\vec{x}$ 좌표계의 원점은  $\vec{x}_0$ 좌표계에서 속도  $\vec{U}_0$ , 각속도  $\vec{\tau}_0$ 로 이동한다고 표시한다. 이 속도와 각속도를  $\vec{x}$ 좌표계에서  $\vec{U}_S$ 와  $\vec{\tau}$ 로 표기하고, 수평방향의 운동만을 고려하므로 다음과 같이 나타낸다.

$$\vec{U}_S = (u, v, 0) \quad \vec{\tau} = (0, 0, r) \quad (6)$$

### 3.2 경계치 문제

섭동법을 적용하기 위하여 작은 값을 나타내는 변수  $\epsilon (\ll 1)$ 을 도입하고, 이 변수를 파기울기에 대응하는 값으로 생각한다. 또 선박의 운동은 입사파의 주파수에 대응하는 고주파수 성분과 조종운동과 표류력에 의한 저주파수 성분으로 이루어져 있고, 이들은 각각 시간  $t$ 와  $t_1 (= \epsilon t)$ 에 의존한다고 가정한다. 따라서 식 (6)의  $u, v, r$ 은 시간  $t_1$ 의 함수이고, 이들의 크기는  $u$ 의 경우에는  $O(1)$ 로,  $v$ 와  $r$ 은  $O(\epsilon)$ 으로 생각하여 식 (6)을 다음과 같이 표현하기로 한다.

$$\begin{aligned} \vec{U}_S(t_1) &= \vec{u}_0(t_1) + \epsilon \vec{u}_1(t_1) \quad \vec{\tau}(t_1) = \epsilon \vec{\tau}_1(t_1) \\ \vec{u}_0 &= (u, 0, 0), \quad \vec{u}_1 = (u_1, v_1, 0) \\ \vec{\tau}_1 &= (0, 0, r_1) \end{aligned}$$

유체는 비점성, 비압축성으로, 유동은 비회전성으로 가정하여 속도포텐셜을 도입하고, 이 속도포텐셜을  $\vec{x}_0$ 좌표계에서는  $\phi_0$ ,  $\vec{x}$ 좌표계에서는  $\phi$ 로 표시하고,  $\phi$ 는 다음과 같이  $\epsilon$ 에 대한 급수로 나타낼 수 있다고 가정한다.

$$\begin{aligned} \phi(\vec{x}, t, t_1) &\sim \phi_0(\vec{x}, t, t_1) + \epsilon \phi_1(\vec{x}, t, t_1) \\ &+ \epsilon^2 \phi_2(\vec{x}, t, t_1) + O(\epsilon^3) \end{aligned} \quad (7)$$

파에 의한 선박의 운동은 파고에 비례하므로,  $O(1)$ 의 속도포텐셜은 파와는 무관하다. 따라서  $\phi_0$ 는 시간  $t_1$ 에만 관계한다. 이 속도포텐셜에 의해 선박은 침하와 종경사를 하게되는데, 3-1 절의 좌표계는 이 침하와 종경사가 포함된 상태의 선박에 대한 좌표계이다. 또  $\phi_1$ 은 정수중 선박의 조종운동에 의

한 성분과 파에 관계하는 성분으로 분리할 수 있다고 가정하여  $\phi_0$ 와  $\phi_1$ 을 다음과 같이 표현한다.

$$\begin{aligned} \phi_0(\vec{x}, t_1) &= \phi_0^m(\vec{x}, t_1) \\ \phi_1(\vec{x}, t, t_1) &= \phi_1^m(\vec{x}, t_1) + \phi_1^w(\vec{x}, t, t_1) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 상첨자  $m$ 은 정수중 선박의 조종운동에 대한 성분을 나타내고,  $w$ 는 파에 관계하는 성분을 나타낸다. 정수중 선박의 조종운동에 의한 유체력과 모우먼트는 2장의 선체에 의한 힘과 모우먼트에 포함되어 있으므로,  $\phi_0^m$ 과  $\phi_1^m$ 에 의한 유체력을 계산할 필요는 없다. 그러나,  $\phi_1^w$ 의 경계조건과 파에 의해 선박에 작용하는 동유체력에  $\phi_0^m$ 의 영향이 포함되어 있으므로, 이들에 대한 경계치문제도  $\phi_1^w$ 와 함께 정립하기로 한다. 파에 의한 2차차수 속도포텐셜은 무한수심의 경우 선박의 저주파수 운동에 거의 영향을 미치지 않으므로 본 논문에서는 무시하기로 한다.(Faltinsen et. al. [5])

선박의 운동의 경우도 속도포텐셜과 마찬가지로, 정수중 조종운동에 의한 성분과 파에 의한 운동성분으로 분리하고, 파에 의한 성분의 경우 1차차수까지만을 고려하기로 한다.

$$\begin{aligned} \xi(t, t_1) &\sim \epsilon \xi_1(t, t_1) + O(\epsilon^2) \\ \vec{a}(t, t_1) &\sim \epsilon \vec{a}_1(t, t_1) + O(\epsilon^2) \\ \xi_1(t, t_1) &= \xi_1^m(t_1) + \xi_1^w(t, t_1) \\ \vec{a}_1(t, t_1) &= \vec{a}_1^m(t_1) + \vec{a}_1^w(t, t_1) \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)에서 운동벡터의 성분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \xi_1^m(t_1) &= (0, 0, \xi_3^m) \\ \xi_1^w(t, t_1) &= (\xi_1^w, \xi_2^w, \xi_3^w) \\ \vec{a}_1^m(t_1) &= (a_1^m, a_2^m, 0) \\ \vec{a}_1^w(t, t_1) &= (a_1^w, a_2^w, a_3^w) \end{aligned} \quad (10)$$

속도포텐셜은 지배방정식으로 Laplace방정식을 만족하므로, 유체 경계면에 대한 경계조건이 주어지면 해를 구할 수 있다. 경계조건은 선체표면 경계조건, 자유표면 경계조건, 해저면 경계조건 및 무한원방 경계조건으로 나눌 수 있다. 이들중 선체표면 경계조건과 자유표면 경계조건은 비선형 경계조건이므로 경계치 문제의 해를 구하는 것이 대단히 어렵

다. 따라서 이들에 대하여 섭동법을 적용하여, 선형 경계조건을 도출하여 사용하였다.

3.2.1. 선체표면 경계조건

선체의 침수표면은 3-1 절에 수록한 세 좌표계에 서 각각 다음과 같이 정의한다.

$$S_0(x_0, y_0, z_0, t) = S(x, y, z, t) = S'(x', y', z') \quad (11)$$

여기서는 1차차수의 속도포텐셜에 대한 경계조건 을 기술하므로, 이 침수표면들은  $\phi_0^m$ 에 의한 자유표 면 상승이 포함되어 있다. 선박의 조종운동방정식은  $\vec{x}$ 좌표계에서 정의하므로, 경계조건을 선체표면 S에 대해 정의하는 것이 편리하다. 그러나 선체표면 S는 시간에 따라 변화하므로 이에 대한 경계치 문제의 해를 구하는 것이 대단히 어렵다. 그러므로 다음과 같이 새로운 선체표면을  $\vec{x}$ 좌표계에서 정의한다.

$$S_m(x, y, z) = S'(x, y, z) = 0 \quad (12)$$

이와같이 정의된 선체표면  $S_m$ 은 수평면상의 저주 파수 운동에 따라 이동하는 일종의 평균위치를 나타 낸다. 그러나 1차차수의침하, 종경사, 횡경사등의 저 주파수 운동은 고려하지 않았으므로 정확한 의미에 서의 평균위치를 나타내지는 않는다.  $S_m$ 과 S의 차 이는 선박의 운동  $\vec{z}$ 와  $\vec{a}$ 에 비례하므로  $O(\epsilon)$ 의 크 기를 갖게된다.  $\vec{x}_0$  좌표계에서의 선체표면 경계 조건은 다음과 같다.

$$\vec{n}_0 \cdot \nabla \phi = \vec{n}_0 \cdot \vec{U}_0 \quad \text{on } S_0 \quad (13)$$

여기서  $\vec{n}_0$ 는 선체표면  $S_0$ 에서의 법선벡터를 나 타내고,  $\vec{U}_0$ 는 선체표면에서의 속도를 나타낸다.  $\vec{U}_0$ 는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{U}_0 &= \frac{d\vec{x}_A}{dt} + \frac{dE^T}{dt} \vec{x} + E^T \frac{d\vec{x}}{dt} \\ &= \vec{U}_{S_0} + \vec{r}_0 \times (\vec{x}_0 - \vec{x}_A) + E^T \frac{d\vec{x}}{dt} \end{aligned} \quad (14)$$

식 (13), (14)를  $\vec{x}$ 좌표계의 식으로 변환하면 다음 과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \vec{n} \cdot \nabla \phi &= \vec{n} \cdot \vec{U} \quad \text{on } S \\ \vec{U} &= \vec{U}_S + \vec{r} \times \vec{x} + \frac{d\vec{x}}{dt} \end{aligned} \quad (15)$$

$S_m$ 에 대한 경계조건을 구하기 위하여  $\vec{n}, \nabla \phi, \vec{U}$ 를  $\vec{x}$ 좌표계의 것으로 변환시키면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \vec{n} &\sim \vec{n} + \epsilon \vec{a}_1 \times \vec{n} + \epsilon^2 H \vec{n} + O(\epsilon^3) \\ \vec{U} &\sim \vec{U}_S + \epsilon \left( \frac{d\vec{Q}}{dt} + \vec{r}_1 \times \vec{x} \right) \\ &\quad + \epsilon^2 \left( \frac{dH}{dt} \vec{x} + \vec{r}_1 \times \vec{Q} \right) + O(\epsilon^3) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \nabla \phi &\sim \nabla \phi + \epsilon (\vec{Q} \cdot \nabla) \nabla \phi \\ &\quad + \epsilon^2 \left\{ \frac{1}{2} (\vec{Q} \cdot \nabla)^2 + (H \vec{x} \cdot \nabla) \right\} \nabla \phi + O(\epsilon^3) \end{aligned}$$

여기서  $\vec{Q}$ 와  $H \vec{x}$ 는  $\vec{x}$ 좌표계와  $\vec{x}$ 좌표계의 관계를 나타내는 벡터로 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \vec{Q} &= \xi_1 + \vec{a}_1 \times \vec{x} \\ \epsilon^2 H &= \begin{bmatrix} -\frac{a_2^2 + a_3^2}{2} & 0 & 0 \\ a_1 a_2 & -\frac{a_1^2 + a_3^2}{2} & 0 \\ a_1 a_3 & a_2 a_3 & -\frac{a_1^2 + a_2^2}{2} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (17)$$

식 (16)을 식 (15)에 대입하고,  $\vec{x}$ 와  $\vec{n}$ 를 평균 위치에서의 값을 나타내는  $\vec{x}$ 와  $\vec{n}$ 으로 하면  $S_m$ 에 서의 경계조건을 구할 수 있다. 이 경계조건을 1차차 수까지만 취하고, 정수중 조종운동에 의한 성분과 파 에 의한 성분으로 분리하면, 각각의 속도포텐셜에 대 한 선체표면 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{정수중 조종운동에 의한 성분} \\ \vec{n} \cdot \nabla \phi_0^m &= u n_x \end{aligned} \quad (18)$$

$$\vec{n} \cdot \nabla \phi_1^m = \vec{B} \cdot \vec{n} + \{ \nabla \times (\vec{Q}_m \times \vec{W}) \} \cdot \vec{n} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \text{파에 의한 성분} \\ \vec{n} \cdot \nabla \phi_1^w &= \left[ \frac{d\vec{Q}_w}{dt} + \nabla \times (\vec{Q}_w \times \vec{W}) \right] \cdot \vec{n} \\ &= \frac{d\vec{Q}_w}{dt} \cdot \vec{n} - \xi_1^w \cdot \{ (\vec{n} \cdot \nabla) \vec{W} \} \\ &\quad - \vec{a}_1^w \cdot \{ (\vec{n} \cdot \nabla) (\vec{x} \times \vec{W}) \} \end{aligned} \quad (20)$$

여기서

$$\begin{aligned} \bar{B} &= \bar{u}_1 + \bar{r}_1 \times \bar{x} \quad , \quad \bar{\omega} = \bar{\omega}_m + \bar{\omega}_w \\ \bar{\omega}_m &= \bar{\xi}_1''' + \bar{a}_1''' \times \bar{x} \quad \bar{\omega}_w = \bar{\xi}_1'' + \bar{a}_1'' \times \bar{x} \\ \bar{W} &= \bar{\nabla}(\phi_0'' - ux) \end{aligned}$$

를 나타낸다. 식 (19), (20)에는 선박의 전진운동에 의한 유체장의 교란  $\bar{\nabla}\phi_0''$ 이 포함되어 있다. 만약  $\bar{\nabla}\phi_0''$ 이 선박의 전진속도  $u$ 에 비하여 매우 작다고 가정하면  $\bar{W} \sim -u i$ 로 되어  $\phi_1''$ 에 대한 선체표면 경계조건은 다음과 같이 정수중 조종운동에 의한 유체의 교란과는 무관한 형태로 된다.

$$\bar{n} \cdot \bar{\nabla}\phi_1'' = \frac{d\bar{\omega}_w}{dt} \cdot \bar{n} + u(a_2'' n_x - a_3'' n_y) \quad (21)$$

### 3.2.2 자유표면 경계조건

자유표면에서의 압력이 대기압과 같다고 하면, Bernoulli 방정식을 이용하여  $\bar{x}$ 좌표계에서 다음과 같이 자유표면 경계조건을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} gz + \frac{\partial\phi}{\partial t} - (\bar{U}_s + \bar{r} \times \bar{x}) \cdot \bar{\nabla}\phi + \frac{1}{2} \bar{\nabla}\phi \cdot \bar{\nabla}\phi = 0 \\ \text{on } z = \zeta \quad (22) \end{aligned}$$

자유표면 상승은 식 (22)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \zeta &\sim \zeta_0 + \varepsilon \zeta_1 + O(\varepsilon^2) \\ &\sim \zeta_0 + \varepsilon(\zeta_1'' + \zeta_1''') + O(\varepsilon^2) \quad (23) \end{aligned}$$

여기서

$$\begin{aligned} \zeta_0 &= -\frac{1}{2g}(W^2 - u^2) \\ \zeta_1''' &= -\left(\frac{\partial\phi_0''}{\partial t_1} + \bar{W} \cdot \bar{\nabla}\phi_1'' - \bar{B} \cdot \bar{\nabla}\phi_0''\right) \\ &\quad / \left(g + \bar{W} \cdot \frac{\partial\bar{W}}{\partial z}\right) \\ \zeta_1'' &= -\left(\frac{\partial\phi_1''}{\partial t} + \bar{W} \cdot \bar{\nabla}\phi_1''\right) / \left(g + \bar{W} \cdot \frac{\partial\bar{W}}{\partial z}\right) \\ &\quad \text{on } z = \zeta_0 \\ W^2 &= \bar{W} \cdot \bar{W} \end{aligned}$$

를 나타낸다. 식 (22)의 자유표면 경계조건에는 자유표면 상승이 포함되어 있다. 따라서 속도포텐셜에 대한 자유표면 경계조건을 구하기 위하여 식 (22)에 전미분을 취하면 다음과 같이 자유표면 경계조건을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} g\frac{\partial\phi}{\partial z} + \left\{\frac{\partial}{\partial t} + (\bar{\nabla}\phi - \bar{U}_s - \bar{r} \times \bar{x}) \cdot \bar{\nabla}\right\} \\ \times \left\{\frac{\partial\phi}{\partial t} - (\bar{U}_s + \bar{r} \times \bar{x}) \cdot \bar{\nabla}\phi + \frac{1}{2} \bar{\nabla}\phi \cdot \bar{\nabla}\phi\right\} = 0 \\ \text{on } z = \zeta \quad (24) \end{aligned}$$

식 (24)에 식 (7)을 대입하고,  $z = \zeta$ 주위로 Taylor급수 전개한 후, 차수별로 정리하면 다음과 같이 각각의 속도포텐셜에 대한 자유표면 경계조건을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{정수중 조종운동에 의한 성분} \\ g\frac{\partial\phi_0''}{\partial z} + \frac{1}{2} \bar{W} \cdot \bar{\nabla}W^2 = 0 \quad \text{on } z = \zeta_0 \quad (25) \\ -\left(\frac{\partial\phi_0''}{\partial t_1} + \bar{W} \cdot \bar{\nabla}\phi_1'' - \bar{B} \cdot \bar{\nabla}\phi_0''\right) \\ \times \left(\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial z}(\bar{W} \cdot \bar{\nabla}W^2) + g\frac{\partial^2\phi_0''}{\partial z^2}\right) / \left(g + \bar{W} \cdot \frac{\partial\bar{W}}{\partial z}\right) \\ + g\frac{\partial\phi_1''}{\partial z} + \bar{W} \cdot \bar{\nabla}\left(\frac{\partial\phi_0''}{\partial t_1} + \bar{W} \cdot \bar{\nabla}\phi_1'' - \bar{B} \cdot \bar{\nabla}\phi_0''\right) \\ - \frac{1}{2}(\bar{B} - \bar{\nabla}\phi_1'') \cdot \bar{\nabla}W^2 = 0 \quad \text{on } z = \zeta_0 \quad (26) \end{aligned}$$

파에 의한 성분

$$\begin{aligned} -\left(\frac{\partial\phi_1''}{\partial t} + \bar{W} \cdot \bar{\nabla}\phi_1''\right) / \left(\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial z}(\bar{W} \cdot \bar{\nabla}W^2) + g\frac{\partial^2\phi_0''}{\partial z^2}\right) \\ / \left(g + \bar{W} \cdot \frac{\partial\bar{W}}{\partial z}\right) + g\frac{\partial\phi_1''}{\partial z} + \frac{\partial^2\phi_1''}{\partial z^2} + 2\bar{W} \cdot \bar{\nabla}\frac{\partial\phi_1''}{\partial t} \\ + \bar{W} \cdot \bar{\nabla}(\bar{W} \cdot \bar{\nabla}\phi_1'') + \frac{1}{2} \bar{\nabla}\phi_1'' \cdot \bar{\nabla}W^2 = 0 \\ \text{on } z = \zeta_0 \quad (27) \end{aligned}$$

식 (25)의  $\phi_0''$ 에 대한 자유표면 경계조건은 비선형 경계조건이다. 또한 식 (26), (27)의 자유표면 경계조건에는  $\phi_0''$ 이 포함되어 있는데, 이러한 자유표면 경계조건을 만족하는 해를 구하는 것은 일반적인 선박의 경우 거의 불가능하다. 선체표면 경계조건에서와 마찬가지로  $\bar{\nabla}\phi_0''$ 이  $u$ 보다 매우 작다고 가정하면 자유표면 경계조건은 다음과 같은 형태로 된다.

정수중 조중운동에 의한 성분

$$u^2 \frac{\partial^2 \phi_0^m}{\partial x^2} + g \frac{\partial \phi_0^m}{\partial z} = 0 \quad \text{on } z=0 \quad (28)$$

파에 의한 성분

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} - u \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 \phi_1^m + g \frac{\partial \phi_1^m}{\partial z} = 0 \quad \text{on } z=0 \quad (29)$$

### 3.3 선체에 작용하는 유체력

선체에 작용하는 유체력은 유체압력을 선체표면에 대하여 적분해서 구한다. Bernoulli 방정식을 사용하면 유체압력은  $\vec{x}$ 좌표계에서 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{p}{\rho} = -gz - \left\{ \frac{\partial}{\partial t} - (\vec{U}_s + \vec{r} \times \vec{\omega}) \cdot \nabla \right\} \phi - \frac{1}{2} \nabla \phi \cdot \nabla \phi \quad (30)$$

식 (30)을 선체표면  $S$ 에 대하여 적분하면 유체력을 구할 수 있다. 그러나 선체표면  $S$ 는 선박의 운동  $\vec{\xi}$ 와  $\vec{\omega}$ 에 의해 시간에 따라 변화하므로 3-2-1 질에서 정의한 선체표면  $S_m$ 에 대해 적분하는 것이 편리하다. 식 (30)의 압력을  $S_m$ 에 대한 표현으로 변환하고 적분해서 선박에 작용하는 힘과 모우먼트를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \vec{F}_0 &= \rho g V k - \frac{\rho}{2} \int_{S_m} (W^2 - u^2) \vec{n} ds \\ \vec{F}_1 &= -\rho \int_{S_m} \left\{ \left( \frac{\partial}{\partial t} + \vec{W} \cdot \nabla \right) \phi_1^m + \vec{W} \cdot \nabla \phi_1^m \right\} \vec{n} ds \\ &\quad - \rho g A_w (\xi_3 - x_F a_2) k \\ &\quad - \rho \int_{S_m} \left\{ \frac{\partial \phi_0^m}{\partial t_1} + \frac{1}{2} (\vec{\Omega} \cdot \nabla) W^2 - \vec{B} \cdot \nabla \phi_0^m \right\} \vec{n} ds \\ &\quad - \frac{\rho}{2} \int_{S_m} (W^2 - u^2) (\vec{a}_1 \times \vec{n}) ds \\ \vec{F}_2 &= -\rho \int_{S_m} (\vec{\Omega} \cdot \nabla) \left\{ \vec{W} \cdot \nabla \phi_1^m + \left( \frac{\partial}{\partial t} + \vec{W} \cdot \nabla \right) \phi_1^m \right\} \vec{n} ds \\ &\quad - \rho \int_{S_m} \left\{ \frac{\partial \phi_1^m}{\partial t_1} - \vec{B} \cdot \nabla \phi_1 + \frac{1}{2} \nabla \phi_1 \cdot \nabla \phi_1 \right\} \vec{n} ds \\ &\quad - \rho \int_{S_m} \left\{ \vec{W} \cdot \nabla \phi_1^m + \left( \frac{\partial}{\partial t} + \vec{W} \cdot \nabla \right) \phi_1^m \right\} (\vec{a}_1 \times \vec{n}) ds \\ &\quad + \frac{\rho g}{2} \oint_{C_m} \{ \xi_1^2 - 2\xi_1(\xi_3 + a_1 y - a_2 x) \} \vec{n} dl \\ &\quad - \rho g A_w x_F a_1 a_3 k \\ &\quad - \rho \int_{S_m} \left[ (\vec{\Omega} \cdot \nabla) \frac{\partial \phi_0^m}{\partial t_1} + \frac{1}{4} (\vec{\Omega} \cdot \nabla)^2 W^2 \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} (\vec{H} \vec{x} \cdot \nabla) W^2 - \vec{B} \cdot ((\vec{\Omega} \cdot \nabla) \vec{W}) \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\quad - (\vec{r}_1 \times \vec{\Omega}) \cdot \nabla \phi_0^m \} \vec{n} ds \\ &\quad - \rho \int_{S_m} \left\{ \frac{\partial \phi_0^m}{\partial t_1} + \frac{1}{2} (\vec{\Omega} \cdot \nabla) W^2 - \vec{B} \cdot \nabla \phi_0^m \right\} (\vec{a}_1 \times \vec{n}) ds \\ &\quad - \frac{\rho}{2} \int_{S_m} (W^2 - u^2) (\vec{H} \vec{n}) ds \\ &\quad - \frac{\rho}{4} \oint_{C_m} \frac{\partial W^2}{\partial z} (\xi_1 - \xi_3 - y a_1 + x a_2)^2 \vec{n} dl \\ &\quad - \rho \oint_{C_m} \left\{ \frac{\partial \phi_0^m}{\partial t_1} + \frac{1}{2} (\vec{\Omega} \cdot \nabla) W^2 - \vec{B} \cdot \nabla \phi_0^m \right\} (\xi_1 - \xi_3 - y a_1 + x a_2) \vec{n} dl \quad (31) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \vec{N}_0 &= -\rho g V x_B j - \frac{\rho}{2} \int_{S_m} (W^2 - u^2) (\vec{x} \times \vec{n}) ds \\ \vec{N}_1 &= -\rho \int_{S_m} \left\{ \left( \frac{\partial}{\partial t} + \vec{W} \cdot \nabla \right) \phi_1^m + \vec{W} \cdot \nabla \phi_1^m \right\} (\vec{x} \times \vec{n}) ds \\ &\quad - \rho g (a_1 (L_{22} + V z_B) - a_3 V x_B - \xi_2 V) i \\ &\quad - \rho g (a_2 (L_{11} + V z_B) - \xi_3 A_w x_F + \xi_1 V) j \\ &\quad - \rho \int_{S_m} \left\{ \frac{\partial \phi_0^m}{\partial t_1} + \frac{1}{2} (\vec{\Omega} \cdot \nabla) W^2 - \vec{B} \cdot \nabla \phi_0^m \right\} (\vec{x} \times \vec{n}) ds \\ &\quad - \frac{\rho}{2} \int_{S_m} (W^2 - u^2) \{ \vec{a}_1 \times (\vec{x} \times \vec{n}) + \vec{\xi}_1 \times \vec{n} \} ds \\ \vec{N}_2 &= -\rho \int_{S_m} (\vec{\Omega} \cdot \nabla) \left\{ \vec{W} \cdot \nabla \phi_1^m + \left( \frac{\partial}{\partial t} + \vec{W} \cdot \nabla \right) \phi_1^m \right\} (\vec{x} \times \vec{n}) ds \\ &\quad - \rho \int_{S_m} \left\{ \frac{\partial \phi_1^m}{\partial t_1} - \vec{B} \cdot \nabla \phi_1 + \frac{1}{2} \nabla \phi_1 \cdot \nabla \phi_1 \right\} (\vec{x} \times \vec{n}) ds \\ &\quad - \rho \int_{S_m} \left\{ \vec{W} \cdot \nabla \phi_1^m + \left( \frac{\partial}{\partial t} + \vec{W} \cdot \nabla \right) \phi_1^m \right\} \\ &\quad \quad \quad \{ \vec{a}_1 \times (\vec{x} \times \vec{n}) + \vec{\xi}_1 \times \vec{n} \} ds \\ &\quad + \frac{\rho g}{2} \oint_{C_m} \{ \xi_1^2 - 2\xi_1(\xi_3 + a_1 y - a_2 x) \} (\vec{x} \times \vec{n}) dl \\ &\quad - \rho g (a_2 a_3 (L_{22} - L_{11}) + \xi_2 A_w (\xi_3 - x_F a_2) \\ &\quad \quad \quad + A_w x_F \xi_3 a_3 - V x_B a_1 a_2) j \\ &\quad - \rho g (a_1 a_3 (L_{22} - L_{11}) - \frac{1}{2} (a_2^2 + a_3^2) V x_B - \xi_1 A_w (\xi_3 - x_F a_2)) i \\ &\quad - \rho \int_{S_m} \left[ (\vec{\Omega} \cdot \nabla) \frac{\partial \phi_0^m}{\partial t_1} + \frac{1}{4} (\vec{\Omega} \cdot \nabla)^2 W^2 \right. \\ &\quad \quad \quad \left. + \frac{1}{2} (\vec{H} \vec{x} \cdot \nabla) W^2 - \vec{B} \cdot ((\vec{\Omega} \cdot \nabla) \vec{W}) \right. \\ &\quad \quad \quad \left. - (\vec{r}_1 \times \vec{\Omega}) \cdot \nabla \phi_0^m \right] (\vec{x} \times \vec{n}) ds \\ &\quad - \rho \int_{S_m} \left\{ \frac{\partial \phi_0^m}{\partial t_1} + \frac{1}{2} (\vec{\Omega} \cdot \nabla) W^2 - \vec{B} \cdot \nabla \phi_0^m \right\} \\ &\quad \quad \quad \{ \vec{a}_1 \times (\vec{x} \times \vec{n}) + \vec{\xi}_1 \times \vec{n} \} ds \\ &\quad - \frac{\rho}{2} \int_{S_m} (W^2 - u^2) \{ \vec{\Omega} \times (\vec{a}_1 \times \vec{n}) + (\vec{H} \vec{x}) \times \vec{n} + \vec{x} \times (\vec{H} \vec{n}) \} ds \\ &\quad - \frac{\rho}{4} \oint_{C_m} \frac{\partial W^2}{\partial z} (\xi_1 - \xi_3 - y a_1 + x a_2)^2 (\vec{x} \times \vec{n}) dl \\ &\quad - \rho \oint_{C_m} \left\{ \frac{\partial \phi_0^m}{\partial t_1} + \frac{1}{2} (\vec{\Omega} \cdot \nabla) W^2 - \vec{B} \cdot \nabla \phi_0^m \right\} \\ &\quad \quad \quad (\xi_1 - \xi_3 - y a_1 + x a_2) (\vec{x} \times \vec{n}) dl \quad (32) \end{aligned}$$

여기서  $\vec{F}$ 와  $\vec{N}$ 의 하첨자들은 차수를 나타내고, (i, j, k)는 단위벡터이며, 사용된 유체정역학적 특성 값들은 다음과 같은 값을 나타낸다.

- $V$  ; 배수용적
- $A_w$  ; 수선면적
- $x_F$  ; 부면심의 길이방향 좌표 ( $x_B, 0, y_B$ ); 부심의 좌표
- $L_{11}$  ; 수선면의 길이방향 2차 모우먼트
- $L_{22}$  ; 수선면의 폭방향 2차 모우먼트

### 3.4 관성력과 관성모우먼트

파중에서 조종운동을 하는 선박에 작용하는 관성력과 중력은  $\vec{x}_0$ 좌표계에서 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\vec{G}_0 = m \frac{d^2 \vec{x}_{0G}}{dt^2} + mgk \quad (33)$$

여기서  $m$ 은 선박의 배수량을 나타내고  $\vec{x}_{0G}$ 는 무게중심의 좌표를 나타낸다. 식 (33)은  $\vec{x}$ 좌표계에서 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{G} = m \left( \frac{d\vec{U}_s}{dt} + \frac{d\vec{r}}{dt} \times \vec{x}_c + \vec{r} \times \frac{d\vec{x}_c}{dt} + \frac{d^2 \vec{x}_c}{dt^2} \right) + m \vec{r} \times \left( \vec{U}_s + \vec{r} \times \vec{x}_c + \frac{d\vec{x}_c}{dt} \right) + mgk \quad (34)$$

$\vec{x}_G$ 를  $\vec{\xi} = \vec{a}$  (주위로 Taylor 급수전개하고 식 (34)에 대입한 후, 저주파수 수평방향운동 성분만 2차차수까지 취하고 나머지는 선형항만 취하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \vec{G}_a &= mgk \\ &+ m \left( \left( \frac{du}{dt_1} - rv - r^2 x_G \right) i + \left( \frac{dv}{dt_1} + \frac{dr}{dt_1} x_G + ru \right) j \right) \\ &+ LFP \left[ -m x_G \frac{d^2}{dt^2} \left( \frac{1}{2} (a_2^{w^2} + a_3^{w^2}) i - a_1^w a_2^w j \right) \right] \\ \vec{G}_s &= m \left( \frac{d^2 \vec{\xi}_1^w}{dt^2} + \frac{d^2 \vec{a}_1^w}{dt^2} \times \vec{x}_c \right) \end{aligned} \quad (35)$$

여기서 하첨자 a는 저주파수 성분을 나타내고, 하첨자 h는 고주파수 성분을 나타내며 LFP는 저주파수 성분만을 취하는 것을 의미한다.

$\vec{x}_0$ 좌표계에서 선박의 무게중심에 대한 관성모우먼트는 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{M}_0 = \frac{d}{dt} \vec{K}_{0G} \quad (36)$$

여기서

$$\vec{K}_{0G} = \iiint_V \mu \left\{ (\vec{x}_0 - \vec{x}_{0G}) \times \frac{d}{dt} (\vec{x}_0 - \vec{x}_{0G}) \right\} dv \quad (37)$$

를 나타내고  $\mu$ 는 선박의 질량밀도를 나타낸다. 식 (36), (37)을  $\vec{x}$ 좌표계에 대한 식으로 변환하면 다음과 같이 된다.

$$\vec{M} = \frac{d}{dt} \vec{K}_C \quad (38)$$

$$\vec{K}_C = \iiint_V \mu \left[ (\vec{x} - \vec{x}_C) \times \left\{ \vec{r} \times (\vec{x} - \vec{x}_C) + \frac{d}{dt} (\vec{x} - \vec{x}_C) \right\} \right] dv \quad (39)$$

식 (39)의  $\vec{x}$ 와  $\vec{x}_C$ 는 시간에 따라서 변화한다. 따라서  $\vec{K}_C$ 를  $\vec{x}$ 좌표계에서 정의하는 것이 편리하다.  $\vec{x}$ 좌표계에서  $\vec{K}_C$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{K}_C = I \vec{Q} \quad (40)$$

여기서

$$\begin{aligned} I_{ij} &= \iiint_V \mu \left\{ (\vec{x} - \vec{x}_C) \cdot (\vec{x} - \vec{x}_C) \delta_{ij} - (x_i - x_{Ci})(x_j - x_{Cj}) \right\} dv \\ \vec{Q} &= D \vec{r} + \vec{w} \\ \vec{w} &\sim \begin{Bmatrix} \dot{a}_1 + \dot{a}_2 a_3 \\ \dot{a}_2 - \dot{a}_1 a_3 \\ \dot{a}_3 + \dot{a}_1 a_2 \end{Bmatrix} + O(\epsilon^3) \end{aligned} \quad (41)$$

이다. 식 (40)에  $D^T$ 를 곱해서  $\vec{K}_C$ 를 구한 후 식 (38)에 대입하면 다음과 같이 관성모우먼트를 구할 수 있다.

$$\vec{M} = D^T \left( I \frac{d\vec{Q}}{dt} + \vec{Q} \times I \vec{Q} \right) \quad (42)$$

관성력과 마찬가지로 저주파수 수평방향 성분만 2차차수까지 취하고, 나머지는 선형항만 취하여 정리



하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \vec{M}_a &= I_{33} \frac{\partial \vec{r}}{\partial t_1} \mathbf{k} \\ &+ \text{LFP} \left[ \frac{d}{dt} \{ I_{22} a_1'' a_2'' + (I_{33} - I_{11}) a_1'' a_2'' \} \right. \\ &\left. + I_{13} (a_2'' a_3'' + a_2'' a_3'') \right] \mathbf{k} \\ \vec{M}_s &= I \frac{d^2 \vec{a}_1''}{dt^2} \end{aligned} \quad (43)$$

여기서  $I_{12}, I_{21}, I_{23}, I_{32}$  등은 선박의 질량분포가  $x-z$  평면에 대하여 대칭이라고 가정하여 무시하였다. 식 (43)의 관성모우먼트는 무게중심을 중심으로 해서 구하였으므로, 3-3 절에서 구한 동유체력도 무게중심에 대한 식으로 변환시켜야 한다.

**4. 계산결과 및 고찰**

본 논문의 유용성을 검증하기 위하여 Series 60 (CB=0.6, 0.7)에 대하여 유체력을 계산한 후, 실험결과 및 다른 수치해들과 비교하였다. 또한 Wigley 포물선형에 대한 파중 운동응답을 계산하여 스트립이론에 의한 결과와 비교를 수행하였다. 마지막으로 선박의 조종운동에 미치는 파의 효과를 조사하기 위하여 Series 60 (CB=0.7)에 대해 규칙파중에서 선회시험과 Zig-Zag시험을 컴퓨터 모사하였다.

**4.1 선형 동유체력과 파중 운동응답**

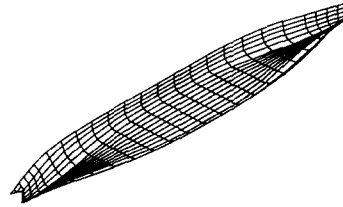
선형 동유체력은 선박의 운동에 의해 유기되는 힘과, 파강제력으로 나누어 생각하기로 한다. 이러한 동유체력들을 구하기 위해서는 1차차수의 속도포텐셜에 대한 경계치문제를 풀어야 한다. 본 논문에서는 Green 함수를 이용한 적분방정식을 3차원 파넬방법을 사용하여 수치적으로 풀어서 속도포텐셜을 구하였다. Green 함수는 Wu 와 Taylor [30] 가 제안한 지수함수로 표현한 형태의 식을 사용하였다.

$k$  방향의 선박의 운동에 의해 유기되는  $j$  방향의 힘은 일반적으로 부가질량과 감쇠계수를 사용하여 다음과 같이 표현한다.

$$\text{HD}_{jk} = -\omega_{en}^2 A_{jk} + i\omega_{en} B_{jk} \quad (44)$$

여기서  $A_{jk}$ 는 부가질량을 나타내고  $B_{jk}$ 는 감쇠계수를 나타낸다. 계산은 Series 60 (CB = 0.7,

$L_{pp}=121.92\text{m}$ )에 대하여 수행하였으며, Fig. 1 에는 수치계산에 사용된 386개의 사각형 파넬로 표현된 선체표면을 보였다.



**Fig. 1 Panel representation of Series 60 (CB=0.7)**

Fig. 2 ~ Fig. 9 에는  $F_n=0.2$ 로 전진하는 선박의 무차원화된 부가질량과 감쇠계수를 수록하였다. 무차원화에는 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$\begin{aligned} A_{jj} &= \frac{A_{jj}}{m}, \quad B_{jj} = \frac{B_{jj}}{m\sqrt{g/L}} \quad \text{for } j = 1, 2, 3 \\ A_{jj} &= \frac{A_{jj}}{mL^2}, \quad B_{jj} = \frac{B_{jj}}{mL^2\sqrt{g/L}} \quad \text{for } j = 4, 5, 6 \\ \omega &= \omega\sqrt{\frac{L}{g}} \end{aligned}$$

동유체력을 구하는데 있어서  $\phi_0^m$ 의 영향과 압력적분방법에 따른 변화를 조사하기 위하여, 선체표면 경계조건과 압력적분방법을 변화시키면서 4가지 방법으로 계산을 수행하였다. 사용한 압력적분방법은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{HD}_{jk} &= \rho \int \int_{S_a} \{ (i\omega_e + \bar{W} \cdot \nabla) \phi_k \} n_j ds \quad (45) \\ \text{HD}_{jk} &= \rho \int \int_{S_a} (i\omega_e n_j - m_j) \phi_k ds \\ &\quad - \rho \oint_{C_a} \phi_k \frac{\partial \phi_0^m}{\partial z} n_j dl \quad (46) \end{aligned}$$

여기서

$$\begin{aligned} (n_1, n_2, n_3) &= \vec{n} \\ (n_4, n_5, n_6) &= (\vec{x} - \vec{x}_G) \times \vec{n} \\ (m_1, m_2, m_3) &= -(\vec{n} \cdot \nabla) \bar{W} \\ (m_4, m_5, m_6) &= -(\vec{n} \cdot \nabla) \{ (\vec{x} - \vec{x}_G) \times \bar{W} \} \end{aligned}$$

을 나타낸다. Table 1 에는 이들 각각의 방법에서 사용한 식들을 수록하였다.

**Table 1 Calculation method**

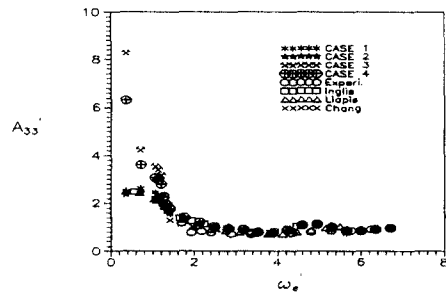
	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4
Pressure Integration	eq.(45)	eq.(46)	eq.(45)	eq.(46)
Body Boundary	eq.(21)	eq.(21)	eq.(20)	eq.(20)
Free Surface	eq.(29)	eq.(29)	eq.(29)	eq.(29)

식 (46)을 사용하여 압력을 적분할 경우, 자유표면과 선체표면의 교선에 대한 선적분을 무시하고 유체력을 구하였다. 또한 CASE 3와 CASE 4는 선체표면 경계조건에서  $\phi_0^m$ 을  $O(1)$ 로 하였으므로 선체표면  $S_m$ 은  $\phi_0^m$ 에 의한 자유표면 상승  $\zeta_0$ 를 포함하여야 한다. 그러나 이러한 선체표면에 대한 적분을 수행하기가 대단히 어려우므로, 여기서는  $\zeta_0$ 에 의한  $S_m$ 의 변화를 무시하고 적분을 수행하였다. 또  $\phi_0^m$ 은 식 (25)의 비선형 자유표면 경계조건을 만족해야 하지만, 여기서는  $\nabla\phi_0^m$ 가  $u$ 에 비하여 작다고 생각하고 식 (28)의 선형 자유표면 경계조건을 만족한다고 가정하여 Kelvin Green 함수를 사용한 적분방정식으로 부터  $\phi_0^m$ 을 구하였다.

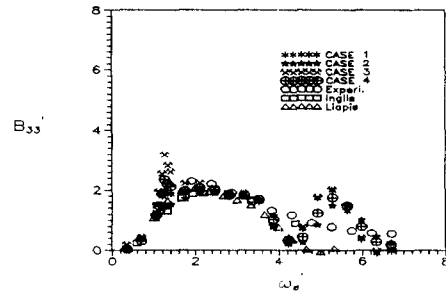
Fig. 2 ~ Fig. 5 에는 선박의 상하동요와 종동요에 의한 부가질량과 감쇠계수를 수록하였다. 그림에서 실험값들은 Gerritsma와 Beukelman[7]이 강제동요장치를 사용하여 측정한 값들이다. 그림에는 기존의 발표된 수치계산값들을 함께 수록하였다. 그림에서 보면  $A_{33}$ 과  $A_{55}$ 의 경우 저주파수 영역에서 계산방법에 따라 심한 차이를 보이고 있는데, 이것은 저주파수 영역에서 전진속도의 영향이 상대적으로 크기 때문이다.  $B_{33}$ 의 경우에는  $\tau (= u\omega_e/g) = 1/4$ 처와  $\omega \approx 5$  근처에서 좋지 못한 결과를 주고 있다. 그러나 이러한 영역을 제외하고는 전반적으로 실험값과 일치하는 경향을 보이고 있다.  $B_{55}$ 의 경우에는 모든 수치계산값들이 실험값과 차이를 보이고 있고, 본 논문의 계산의 경우에는  $\tau = 1/4$ 처와  $\omega \approx 5$  부근에서 특히 심하게 분산된 결과를 주고 있다. Chang은  $B_{55}$ 에 대한 계산값이 실험값과 차이를 갖는 것은  $\phi_0^m$ 이 종동요 감쇠계수의 계산에 큰 영향을 주기 때문이라고 결론 지었지만, 본 논문의 계산에 있어서 CASE 1 과 CASE 3 가 차이를 보이지 않는 점에 비추어

Chang의 결론은 옳지 못하다고 생각되며, 이러한 차이는 평면파넬을 사용할 경우 수치계산의 정도가 좋지 못한 때문으로 추정된다.

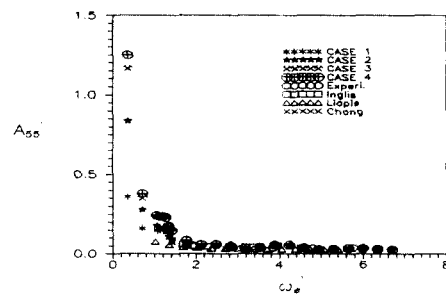
Fig. 6 ~ Fig. 9 에는 좌우동요와 선수동요에 의한 부가질량과 감쇠계수를 보였다. 여기서 실험값들은 van Leeuwen[18]이 PMM장비를 사용하여 측정 한 값들이다. 실험은 타를 부착하지 않은 상태와 타를 부착한 상태에 대하여 수행되었는데, 타를 부착하지 않은 상태의 실험이 저주파수 영역에서만 수행되었으므로 두 상태에 대한 실험값을 모두 수록하였다.



**Fig. 2 A<sub>33</sub> of Series 60 C<sub>B</sub>=0.7**



**Fig. 3 B<sub>33</sub> of Series 60 C<sub>B</sub>=0.7**



**Fig. 4 A<sub>55</sub> of Series 60 C<sub>B</sub>=0.7**

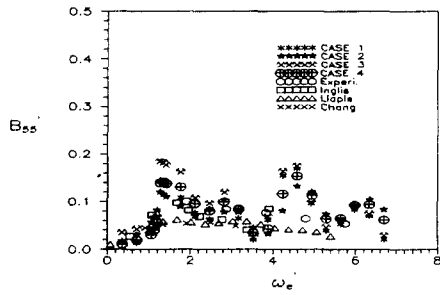


Fig. 5 B<sub>55</sub> of Series 60 C<sub>B</sub>=0.7

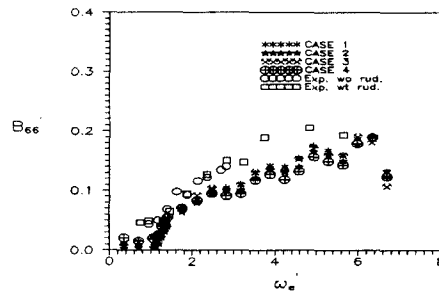


Fig. 9 B<sub>66</sub> of Series 60 C<sub>B</sub>=0.7

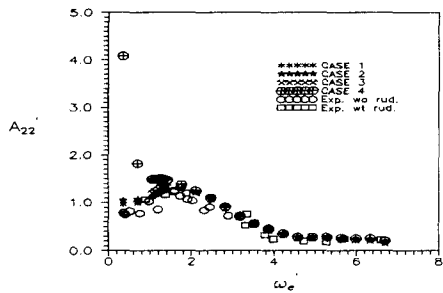


Fig. 6 A<sub>22</sub> of Series 60 C<sub>B</sub>=0.7

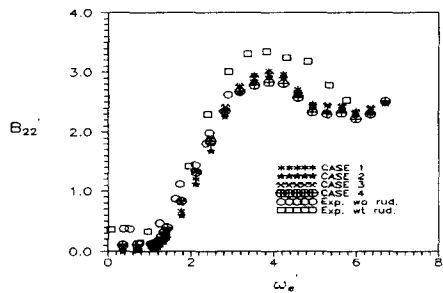


Fig. 7 B<sub>22</sub> of Series 60 C<sub>B</sub>=0.7

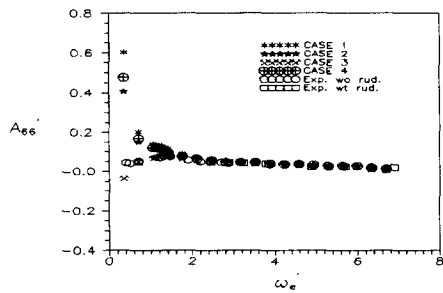


Fig. 8 A<sub>66</sub> of Series 60 C<sub>B</sub>=0.7

전반적으로 저주파수 영역을 제외하고는 네가지 계산방법이 좋은 일치를 보여주고 있다. 따라서 일반적인 선박의 경우, 동유체력 계수를 추정하기 위해서는 계산이 편리한 CASE 1의 방법을 사용하는 것이 적절하다고 생각된다

파강제력은 Series 60 (C<sub>B</sub> = 0.6)선형에 대해 계산하여 실험값과 비교하였다. Fig. 10에는 수치계산에 사용한 366개의 패널로 표현된 선체표면을 보였고, Fig. 11 ~ Fig. 14에는 계산결과를 수록하였다. 무차원화에는 힘의 경우에는  $\rho g A_w$ 를 사용하였고, 모우먼트는  $\rho g A_w L$ 을 사용하였다. 그림에서 실험값들은 Chey[3]가 규칙파중에서구속모형시험 장비를 사용하여 측정된 값들이고, Pawlowsky[24]등이 Strip 이론을 사용하여 계산한 값들을 함께 수록하였다.

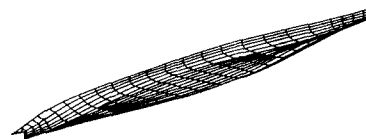


Fig. 10 Panel representation of Series 60 ( C<sub>B</sub>=0.6 )

파 강제력의 계산도 앞서와 마찬가지로 네가지 방법을 사용하여 수행하였다. 압력적분의 방법은 앞서와 마찬가지로 하였고, CASE 1, 2의 경우에는  $\phi_0^m$ 을 무시하고 유체력을 구하였으며, CASE 3, 4는  $\phi_0^m$ 를 포함하여 계산을 수행하였다. 그림에서

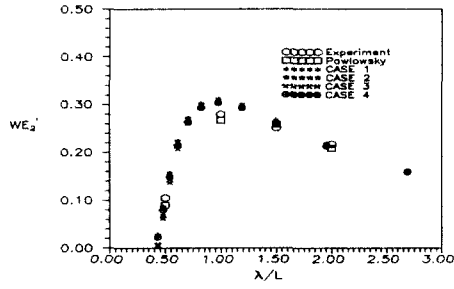


Fig. 11 WE<sub>2</sub> of Series 60 C<sub>B</sub>=0.6 ,  
Heading Ang. = 120 deg

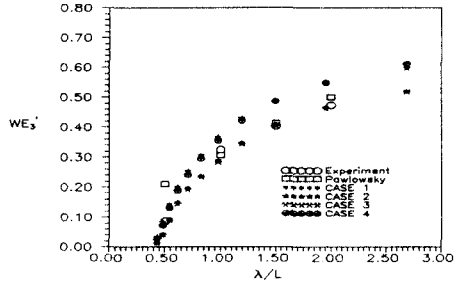


Fig. 12 WE<sub>3</sub> of Series 60 C<sub>B</sub>=0.6 ,  
Heading Ang. = 120 deg

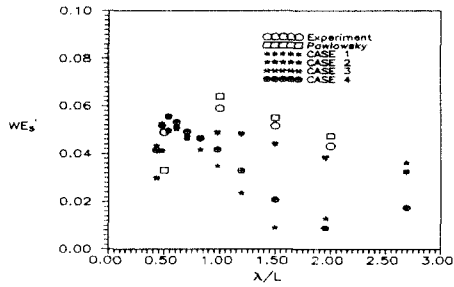


Fig. 13 WE<sub>5</sub> of Series 60 C<sub>B</sub>=0.6 ,  
Heading Ang. = 120 deg

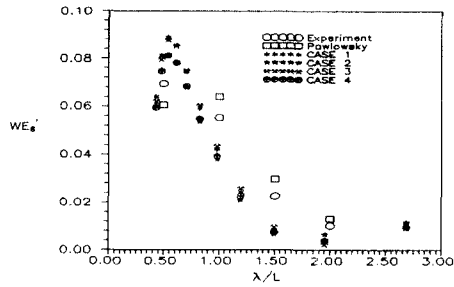


Fig. 14 WE<sub>6</sub> of Series 60 C<sub>B</sub>=0.6 ,  
Heading Ang. = 120 deg

보면 CASE 1, 3 은 비교적 실험값과 일치하지만, CASE 2, 4 는 실험값과 차이를 보이고 있다. 이것은 CASE 2, 4 의 경우 선적분을 무시하고 계산을 수행한 때문이라고 생각된다. 따라서 파강제력을 추정하는데 있어서 CASE 1 의 방법을 사용하는 것이 일반적인 선박의 경우에는 적절하다.

파중 선박의 운동응답은 스트립 이론의 가정에 적합한 Wigley 포물선형에 대한 계산을 수행하여 서울대학교에서 개발한 Strip이론을 이용한 선박의 운동성능예측 프로그램인 SNUSMP 에 의한 계산결과와 비교하였다. Wigley 포물선형을 400개의 파넬을 사용하여 표현한 선체표면을 Fig. 15 에 보였다. 운동응답의 계산에 있어서 선형동유체력은 CASE 1 의 방법을 사용하여 추정하였다. Fig. 16 ~ Fig. 21 에는 단위 규칙파중에서 선박의 RAO를 보였다. 그림에서 보면 공진점 부근을 제외하고는 전반적으로 두 방법의 결과가 일치한다는 것을 알 수 있다.

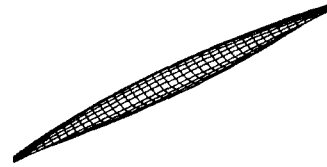


Fig. 15 Panel representation of  
Wigley Parabolic Hull

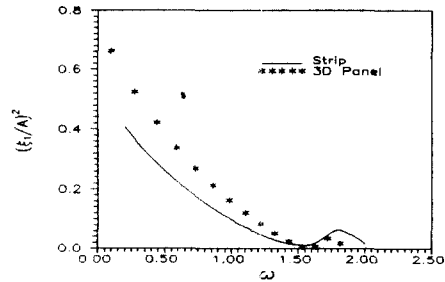
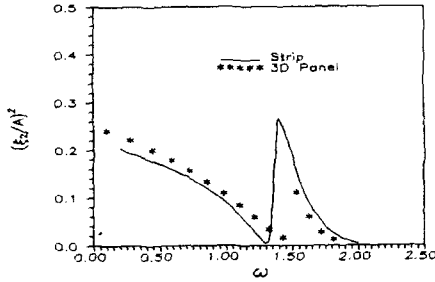
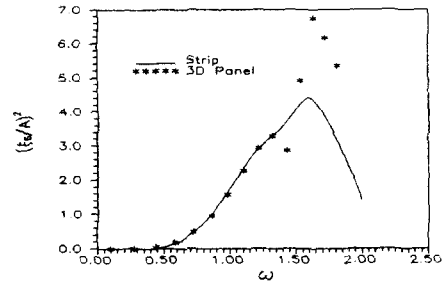


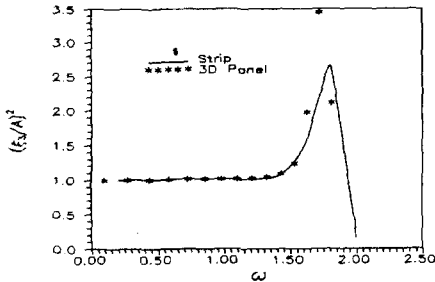
Fig. 16 Surge RAO of Wigley hull  
Heading = 150 deg Fn=0.266



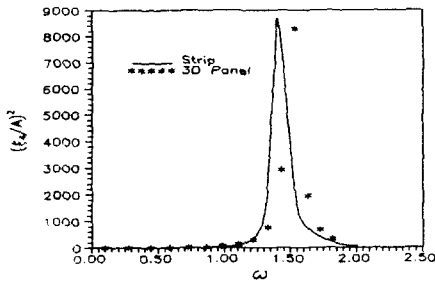
**Fig. 17 Sway RAO of Wigley hull**  
Heading = 150 deg Fn=0.266



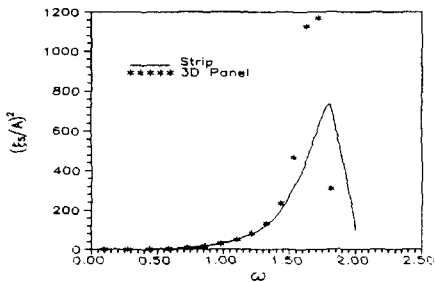
**Fig. 21 Yaw RAO of Wigley hull**  
Heading = 150 deg Fn=0.266



**Fig. 18 Heave RAO of Wigley hull**  
Heading = 150 deg Fn=0.266



**Fig. 19 Roll RAO of Wigley hull**  
Heading = 150 deg Fn=0.266



**Fig. 20 Pitch RAO of Wigley hull**  
Heading = 150 deg Fn=0.266

4.2 규칙파중 선박의 조종시험모사

선형 속도포텐셜과 파중 선박의 운동응답이 주어지면 조종운동중인 선박에 작용하는 파에 의한 힘과 모우먼트를 추정할 수 있다. 본 논문에서는 준 정상상태의 가정하에 규칙파중에서의 Series 60 (CB = 0.7)의 선회시험과 Zig-Zag 시험에 대한 컴퓨터 모사를 수행하였다.

4.1 절의 선박의 동유체력에 대한 계산결과를 보면 저주파수 영역을 제외하고는 선박의 진진운동에 의한 유체의 교란이 유체력계산에 거의 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있다. 따라서 여기서는 파중 조종운동중인 선박에 작용하는 표류력과 표류 모우먼트를 추정하는데 있어서  $\phi_0^m$ 을 무시하였다. 실제적으로 선박의 조종운동에 큰 영향을 미치는 것은 파장이 매우 짧은 파지만, 이 경우 선박의 운동이 거의 없고 대부분의 파가 선체표면에서 반사되므로, 종래의 방법으로 선체표면에서의 입사파의 전반사를 가정하여 운동량의 변화로부터 표류력을 추정하면 된다. 따라서 본 논문에서는 비교적 파장이 긴 규칙파에 대해서만 모사를 수행하였다.

표류력은 식 (31), (32)의 유체력과 (35), (43)의 관성력에서 고주파수 운동과 속도포텐셜의 곱으로 표현된 항에서 나타난 주파수차이에 의존하는 항들을 앞에서 구한 고주파수 속도포텐셜과 선박의 운동응답을 이용하여 구하였다. (안성필 [2]) Fig. 22에는 Series 60 (CB = 0.6) 횡파중을 Fn=0.194로 항주할 경우 선박에 작용하는 횡방향 표류력을 구하여 Chey[3]의 실험결과와 함께 수록하는데 비교적 실험값과 일치하고 있는 것을 알 수 있었다.

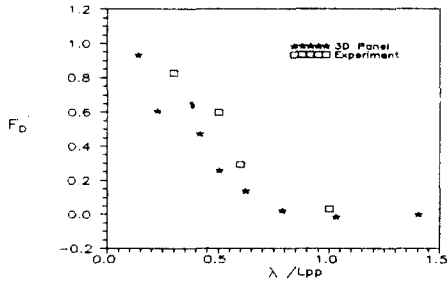


Fig. 22 Side Drift Force of Series 60, CB=0.6

Series 60 (CB = 0.7) 의 파중 조종성능을 모사 하는데 있어서, 선박의 전진속도는  $F_n = 0.2$ 로 하였고, 입사파의 파장은  $\lambda/L = 2, 3.33$ 으로, 진폭은 1, 2, 3 m로 하였으며 입사각은  $-45^\circ$  와  $-135^\circ$  로 하였다.

Fig. 23 ~ Fig. 26 에는 규칙파중에서의 선회시험을 모사한 결과를 보였는데, 파장이 짧은 파가 선회궤적에 좀 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었으며, 파의 입사각이 초기 상태에서  $-45^\circ$  일 경우가 선박의 선회궤적에 큰 영향을 미치는 것을 관찰할 수 있었다.

Fig. 27 ~ Fig. 30 에는 규칙파중에서의 Zig-Zag 시험을 모사한 결과를 보였다. 선회시험과 마찬가지로 입사파의 초기 입사각이  $-45^\circ$  일 경우가  $-135^\circ$  의 경우보다 조종성능에 큰 영향을 미치고 있다.

이상과 같은 조종시험의 모사는 선박의 횡동요가 비교적 심한 구간에서 이루어졌는데, Inoue[15] 등이 예측하였던 것과는 달리 파에 의한 선회궤적의 변화가 그리 크지 않은 결과를 얻었다. 따라서 Hirano[11] 등이 밝혔듯이 파에 의한 선회궤적의 변화는 단파장파의 경우에는 매우 크지만, 본 계산에서와 같은 장파장파에서는 거의 영향이 없다는 것을 알 수 있었다.

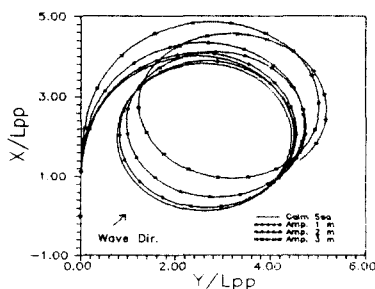


Fig. 23 Turning circle test ( $\lambda/L=2$ )

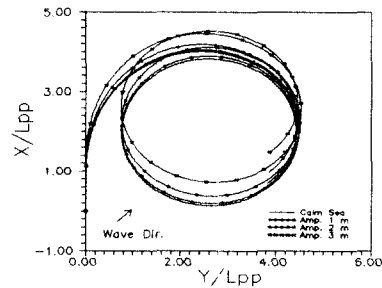


Fig. 24 Turning circle test ( $\lambda/L=3.33$ )

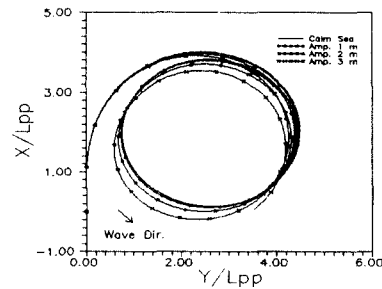


Fig. 25 Turning circle test ( $\lambda/L=2$ )

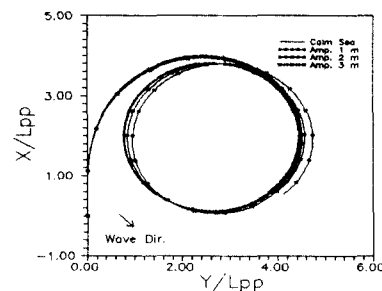


Fig. 26 Turning circle test ( $\lambda/L=3.33$ )

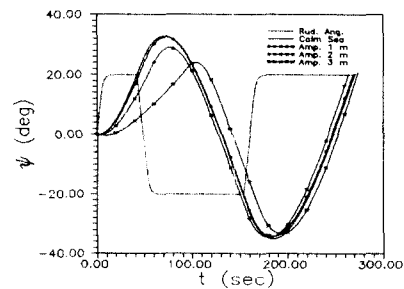


Fig. 27 Zig-Zag test( $\lambda/L=2, \chi=45^\circ$ )

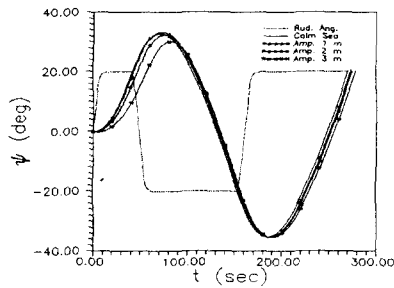


Fig. 28 Zig-Zag test (  $\lambda/L=3.33, \chi=-45^\circ$  )

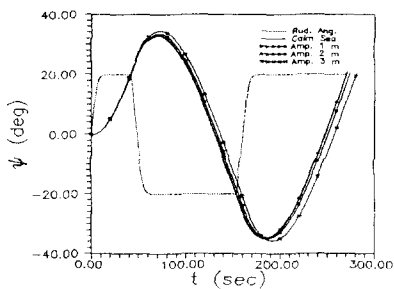


Fig. 29 Zig-Zag test (  $\lambda/L=2, \chi=-135^\circ$  )

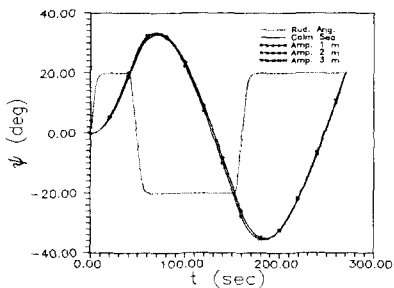


Fig. 30 Zig-Zag test (  $\lambda/L=3.33, \chi=-135^\circ$  )

### 5. 결 론

본 논문에서는 파중 선박의 조종성능을 추정하기 위한 수학적 모델을 확립하고, 이에 대한 수치해법을 개발하였다. 종래의 수학적 모델에서는 선박의 형상을 세장형으로 생각해서 정수중 선박의 조종운동에 의한 유체의 교란이 작다고 가정하여 문제를 간략화 하였으나( Nonaka[22] ), 본 논문에서는 이러한 가정을 하지않고 일반적인 선박에 대해 적용할 수 있

는 수학적 모델을 확립하였다.

속도포텐셜은 Green함수를 이용하여 적분방정식을 세운 후에 3차원 파넬방법을 사용하여 수치적으로 구하였다. 선박에 작용하는 선형 동유체력을 계산하여 실험값과 비교를 수행하였고, 정수중 선박의 전진운동에 의한 유체의 교란이 파에 의한 선형 동유체력에 미치는 영향에 대하여도 조사하였다.

선형 속도포텐셜과 파중 선박의 운동응답을 계산한 후, 파중 선박에 작용하는 표류력을 계산해서 규칙파중 Series 60(CB = 0.7)의 조종시험에 대한 컴퓨터 모사를 수행하였다. 이때 선박에 미치는 파의 영향을 선체만으로 한정하여, 타와 프로펠러에는 영향을 주지 않는다고 가정하였다. 규칙파의 파장은 비교적 선박의 운동응답이 큰 영역의 것을 택하였는데, Inoue[14]등의 결론과는 달리 선박의 선회궤적에 거의 영향이 없었다. 따라서 Hirano[10]등이 밝혔듯이 선박의 운동이 거의 없는 단파장파가 선박의 조종성능에 큰 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었다.

앞으로 비정상 주파수의 제거를 할 수 있는 프로그램의 개발과,  $\tau = 1/4$  근처에서 유체력을 예측할 수 있는 방법의 확립이 필요하다고 생각되며, 계산의 정도를 향상시키기 위해서는 고차차수 파넬방법, 곡면파넬방법등 보다 엄밀한 수치해석법에 대한 연구가 수행되어야 한다고 생각된다. 이와 더불어 Green함수의 계산시간을 감소시키기 위한 연구도 3차원 파넬방법을 실용적으로 사용하기 위해서는 절실히 필요하다고 생각된다. 또한, 본 논문의 경우 조종운동중인 선박에 미치는 파의 영향을 선체에 작용하는 표류력만으로 한정하였는데, 정확한 추정을 위해서는 조종운동 방정식에 기억효과를 포함시키고, 타와 프로펠러에 미치는 파에 의한 영향을 고려하는 것에 대한 연구도 장차 수행되어야 한다고 생각된다.

### 참 고 문 헌

- [1] 안성필, "3차원 파넬방법을 이용한 파중 선박의 조종성능 해석", 서울대학교 공학박사 학위논문, 1993.
- [2] Chang, M. S., "Computation of Three Dimensional Ship Motions with Forward Speed", Proc. 2nd Int. Conf. Num. Ship Hydrodynamics, 1977.
- [3] Chey, Y., "Experimental Determination of Wave-Excited Forces and Moments Acting on a Ship Model Running in

- Oblique Regular Waves", Rep. No. 920, Davidson Laboratory, 1964.
- [4] Eda, H. and Shiba, H., "On the Turning Experiments by the Free Running Models", Monthly Reports of Transportation Technical Research Institute, 1962.
- [5] Faltinsen, O. M. and Loken, A. E., "Slow Drift Oscillations of a Ship in Irregular Waves", Appl. Ocean Res., Vol.1, No.1, 1979
- [6] Fujino, M., "The Effect of Frequency Dependence of the Stability Derivatives of Manoeuvring Motion", International Shipbuilding Progress, Vol.22, 1975.
- [7] Gerritsma, J. and Beukelman, W., "The Distribution of the Hydrodynamic Forces on a Heaving and Pitching Ship Model in Still Water", Proc. of the 5th Symp. on Naval Hydrodynamics, 1964.
- [8] 공인영, "3차원 물체에 작용하는 동유체력의 시간영역 해석", 서울대학교 공학박사 학위논문, 1987.
- [9] Havelock, T. H., "The Pressure of Water Waves upon a Fixed Obstacle", Proc. Royal Soc. London, 1940.
- [10] Havelock, T. H., "The Drifting Force on a Ship among Waves", Philosophical Magazine, 1942.
- [11] Hirano, M., Takashina, J., Takaishi, Y. and Saruta, T., "Ship Turning Trajectory in Regular Waves", Trans. of the West-Japan Soc. of Naval Architects, 1980.
- [12] Huijmans, R. H. M., "A Fast Algorithm for Computation of 3-D Ship Motions at Moderate Forward Speed", Proc. 4th Int. Conf. Num. Ship Hydrodynamics, 1985.
- [13] Inglis, R. B. & Price, W.G., "The Influence of Speed Dependent Boundary Conditions in Three Dimension Ship Motion Problem", International Shipbuilding Progress, 1981.
- [14] Inglis, R. B. & Price, W.G., "A Three-Dimensional Ship Motion Theory - Comparison between Theoretical Prediction and Experimental Data of the Hydrodynamic Coefficients with Forward Speed", Trans. of Royal Institution of Naval Architects, 1982.
- [15] Inoue, S. and Murahashi, T., "A Calculation of Turning Motion in Regular Waves", Trans. of the West-Japan Soc. of Naval Architects, 1965.
- [16] Jiang, T., Shellin, T. E. and Sharma, S. D., "Manoeuvring Simulation of a Tanker, Moored in a Steady Current Including Hydrodynamic Memory Effect and Stability Analysis", Int. Conf. on Ship Manoeuvrability, London, 1987.
- [17] 이승건, 조효제, "파랑중 조종운동 계산에 관한 고찰", 제 25 차 KTTTC 내항성 및 조종 성분과 Workshop 논문집, 1993.
- [18] van Leeuwen, G., "The Lateral Damping and Added Mass of a Horizontally Oscillating Shipmodel", International Shipbuilding Progress, 1965.
- [19] Liapis, S. & Beck, R. F., "Seakeeping Computations using Time Domain Analysis", Proc. 4th Int. Conf. Num. Ship Hydrodynamics, 1985.
- [20] Maruo, H., "The Drift of a Body Floating on Waves", Jour. Ship Research, 1960.
- [21] Newman, J. N., "The Drift Force and Moment on Ships in Waves", Jour. Ship Research, 1967.
- [22] Nonaka, K., "Manoeuvring Motion of a Ship in Waves", Proc. MARSIM & ICSM 90, 1990.
- [23] Ogilvie, T. F. and Tuck, E. O., "A Rational Strip Theory for Ship Motions, Part 1", Rep. No. 013, Dep. Nav. Archit. Mar. Eng., Univ. of Michigan, Ann Arbor, 1969.
- [24] Pawlowski, J. S., Bass, D. W. and Grochowalski, S., "A Time Domain Simulation of Ship Motions in Waves", Proc. 17th Symp. on Naval Hydrodynamics, 1988.
- [25] Pinkster, J. A., "Low Frequency Second Order Wave Forces on Vessels Moored at



- Sea", Proc. 11th Symp. on Naval Hydrodynamics, 1976.
- [26] Rhee, K. P., Kim, C. K. and Lee, C. M., "The Manoeuvring Motion of the Marad Type Ship in Waves", Proc. MARSIM & ICSM 90, 1990.
- [27] Takaki, M. and Saito, K., "On the Description of Non-Harmonic Wave Problem in Frequency Domain (1st Rep.)", Jour. of the Kansai Soc. of Naval Architects, 1981.
- [28] Takaki, M. and Saito, K., "On the Description of Non-Harmonic Wave Problem in Frequency Domain (5th Rep.)", Jour. of the Kansai Soc. of Naval Architects, 1983.
- [29] Triantafyllou, M. S., "A Consistent Hydrodynamic Theory for Moored and Positioned Vessels", Jour. Ship Research, 1982.
- [30] Wu, G.X. and Eatock Taylor, R., "A Green Function Form for Ship Motions at Forward Speed", International Shipbuilding Progress, 1987.