

트랜섬 선미를 가지는 선형의 포텐셜 유동해석

최희종* · 진호환**

*부산대학교 조선해양공학과 대학원, **부산대학교 조선해양공학과(기계기술연구소)

Potential Flow Analysis for a Hull with the Transom Stern

HEE-JONG CHOI* AND HO-HWAN CHUN**

*Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

**Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Research Institute of Mechanics and Technology, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

KEY WORDS: Panel method 패널법, Transom stern 트랜섬 선미, Athena hull 아테나 선형, High speed ship 고속선, Trim and sinkage 트림과 침하, Fixed and free state of a hull 선체의 고정 및 자유상태

ABSTRACT: This study focuses on the potential flow analysis for a hull with the transom stern. The method is based on a low order panel method. The Kelvin type free-surface boundary condition which is known to better fit experimental data for a high speed is applied. To treat a dry transom stern effect a special treatment for the free-surface boundary condition is adopted at the free-surface region after the transom stern. Trim and sinkage, which are important in high speed ships, are considered by an iterative method. Pressure and momentum approaches are used to calculate the wave resistance. Numerical calculations are performed for Athena hull and these results are compared with the experimental data and also other computational results.

1. 서 론

고속으로 항해하는 선박의 대부분은 트랜섬 선미를 채택하며, 트랜섬 선미를 가진 선박에 대한 선박주위의 유동해석과 트랜섬 선미의 처리기법은 선박유체역학자들의 관심거리이다.

Saunders(1957)는 트랜섬 선미를 가진 선박이 고속으로 항해할 때 트랜섬 선미에서 자유수면의 침하가 발생하며, 트랜섬 선미 끝단의 유체는 부드럽게 트랜섬 선미를 떨어져 나간다는 것을 보여주었다. 그 이후 많은 선박유체역학자들에 의해 트랜섬 선미를 가지는 선박주위의 파형과 조파저항에 대한 계산이 시도되어 왔다.

Chang(1979)과 Gadd(1976)는 트랜섬 선미를 가지는 선박주위의 유동해석에 있어서 선미 끝단에서의 형상을 선미 이후의 부분까지 연장하여 계산하였으며, Telste & Reed(1994)는 교란되지 않은 정수면에 대하여 Neumann-Kelvin 경계조건을 선체와 트랜섬이 만나는 곳에서의 선형화로 수정하여 계산된 파형을 발표하였다. Dawson(1979)은 그의 이중모형 근사이론에 트랜섬 선미 처리기법을 추가하여 계산결과를 발표하였다.

Cheng(1989)은 Dawson(1979)의 프로그램에 트랜섬 선미 끝단에서 압력이 대기압과 같아야 되고, 유체 흐름이 접선방향으로 되어야 한다는 물리적 트랜섬 경계조건을 추가하고 트랜섬 선미 이후의 자유수면영역에 대한 경계조건으로 이중모형이 아닌 Kelvin형을 사용하여 개선된 결과를 발표하였다.

Xia(1986)는 트랜섬 선미 끝단에서의 유동해석을 위하여 Cheng의 방법을 채택하고, 트랜섬 선미 이후의 부분을 포함한 전 자유수면 영역에서 이중모형 근사방법을 적용하여 선박주

위의 유동을 해석하고자 하였으며, Nakos & Sclavounos(1994)는 트랜섬 선미 끝단에서 선박의 흡수와 흡수의 길이방향의 구배는 트랜섬 선미 끝단 근처의 자유수면영역의 파고의 크기와 파고의 구배와 같다는 조건을 도입하여 트랜섬 선미 끝단에서의 유동을 해석하였다.

이중모형 유동해석은 저속선 이론으로서, 일반적으로 고속에서는 이중모형 유동해석보다는 Kelvin형 자유표면조건을 사용한 해가 실험결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 Cheng(1989)이 제시한 트랜섬 선미 끝단에서의 물리적 조건을 사용하고 트랜섬 이후 부분을 포함한 전 자유수면 영역에 Kelvin형 자유수면조건을 적용하였다. 선박의 자세변화(침하와 트림)를 고려하여 파형과 조파저항을 계산하고, 침하와 트림이 일정 허용오차 범위내에 올 때까지 반복계산을 수행하였다. 조파저항은 압력적분에 의한 방법과 운동량이론에 의한 방법을 사용하여 계산하였으며, 방사조건을 만족시키기 위하여 패널이동법(panel shift method)을 사용하였다.

위와 같은 방법을 사용하여 개발된 프로그램의 검증을 위하여 Athena선형에 적용하여 계산된 파형과 조파저항을 발표된 계산결과 및 실험결과와 비교하였다.

2. 문제의 정식화

선체가 U_∞ 의 일정속도로 x 축의 음의 방향으로 이동할 경우에 대한 선체주위의 유동장 해석에 대한 정식화는 다음과 같다. 여기서 좌표계는 Fig. 1과 같이 수직 상 방향을 z 축의 양으로 하는 자유수면상에 고정된 우수직교좌표계를 사용하며,

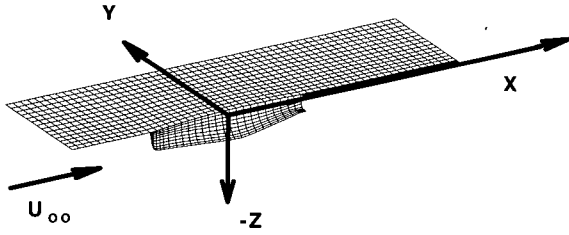


Fig. 1 Coordinates system

원점은 자유수면상의 선박의 중앙에 있다.

문제의 해석을 용이하게 하기 위해 자유수면에서의 표면장력을 무시하였고, 선체주위의 유체의 성질을 비점성, 비압축성이라 가정하고, 유동은 비회전성으로 가정하였다.

위와 같은 가정에 대하여 속도포텐셜(ϕ)을 도입하면 유동장에 대한 지배방정식은 아래의 라플라스(Laplace) 방정식이 된다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad \text{in the fluid domain} \quad (1)$$

전체속도포텐셜(ϕ)은 유입유동에 의한 속도포텐셜($U_\infty x$)과 교란속도포텐셜(φ)를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi = U_\infty x + \varphi \quad (2)$$

선체표면 및 선체주위의 다른 경계면들에서 만족되어야 할 경계조건은 다음과 같다.

물체표면경계조건 :

$$\nabla \phi \cdot \vec{n} = 0 \quad \text{on } S_B(\text{surface of hull}) \quad (3)$$

여기서,

$$\vec{n} : \text{단위법선벡터}(n_x, n_y, n_z)$$

를 나타낸다.

선형화된 Kelvin형 자유수면경계조건 :

$$\varphi_{xx} + K_o \varphi_z = 0 \quad (4)$$

여기서,

$$K_o (= g/U_\infty^2) : \text{파수(wave number)}$$

$$g : \text{중력가속도(gravitational acceleration)}$$

를 나타낸다.

무한원방에서의 경계조건 :

$$\nabla \varphi \rightarrow 0 \quad (5)$$

본 연구에서는 방사조건을 만족시키기 위하여 Jensen (1987) 등에 의해 제시된 바 있는 패널이동법(panel shift method)을 사용하였다.

3. 트랜섬 선미 조건식의 처리

보통의 크루즈 선미(cruise stern)를 가진 선박과는 달리 Athena선형과 같은 드라이 트랜섬 선미(dry transom stern)를 가지는 선박은 선미의 끝단 부분에서 유체가 선체로부터 떨어져 나가므로 트랜섬 선미 끝단에서 특별한 처리가 필요하다.

Cheng(1989)은 드라이 트랜섬 선미 끝단에서의 압력은 대기압과 같아야 되며 그 곳에서의 유체의 흐름이 선미 끝단 근처에서 선체의 길이방향에 대한 접선성분과 서로 접하여야 한다고 가정하고 이에 대한 정식화를 하였다.

정식화를 수행하기 위하여 트랜섬 선미 끝단에서의 곡선의 방정식은 트랜섬 선미 끝단의 x 좌표(x_T)를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$z_T = f(y) \quad \text{at } x = x_T \quad (6)$$

트랜섬 선미 끝단은 대기 중에 노출되어 있으므로 이곳에서의 압력은 대기압이며, 이것을 베르누이의 방정식에 적용하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{1}{2}[\phi_x^2 + \phi_y^2 + \phi_z^2] + gz_T = \frac{1}{2} U_\infty^2 \quad (7)$$

식 (7)의 양변을 $\frac{U_\infty^2}{2}$ 으로 나누고 다시 식을 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{\phi_x^2 + \phi_y^2 + \phi_z^2}{U_\infty^2} = 1 - \frac{2g}{U_\infty^2} z_T \quad (8)$$

트랜섬 선미 끝단에서 만족시켜주어야 할 또 하나의 경계조건으로 선미 끝단에서의 유체의 흐름이 선체길이 방향에 대한 접선방향과 서로 접하여야 한다는 것이 있는데, 이 조건을 부과하기 위해서 먼저 선미 끝단에서의 속도포텐셜을 알아야 한다. 그러나, 속도포텐셜 자체가 문제의 해로 구해지기 때문에 이에 대한 근사해로서 이중모형에 대한 유동해석을 하여 그에 대한 속도포텐셜을 구하고 그 값을 근사해로 두어 실제 유동해석을 위한 최초의 입력조건으로 사용한다. 그에 대한 정식화는 다음과 같다.

트랜섬에서 x , y , z 방향의 단위접선속도성분은 다음과 같다.

$$t_x = \frac{\phi_x}{\sqrt{\phi_x^2 + \phi_y^2 + \phi_z^2}}$$

$$t_y = \frac{\phi_y}{\sqrt{\phi_x^2 + \phi_y^2 + \phi_z^2}} \quad (9)$$

$$t_z = \frac{\phi_z}{\sqrt{\phi_x^2 + \phi_y^2 + \phi_z^2}}$$

위의 식에서 ϕ_x , ϕ_y , ϕ_z 는 미지수이므로, 이에 대한 근사해로서 이중모형해를 구하고 구하여진 ϕ_x , ϕ_y , ϕ_z 를 식 (9) 에 대입하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} T_x &= \frac{\phi_x}{\sqrt{\phi_x^2 + \phi_y^2 + \phi_z^2}} \\ T_y &= \frac{\phi_y}{\sqrt{\phi_x^2 + \phi_y^2 + \phi_z^2}} \\ T_z &= \frac{\phi_z}{\sqrt{\phi_x^2 + \phi_y^2 + \phi_z^2}} \end{aligned} \quad (10)$$

이러한 과정을 통해 최종적으로 트랜섬 선미 끝단의 속도벡터의 x, y, z 방향 성분에 대한 이중모형에 대한 근사값은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} u_T &= \sqrt{U_\infty^2 - 2gz_T} T_x \\ v_T &= \sqrt{U_\infty^2 - 2gz_T} T_y \\ w_T &= \sqrt{U_\infty^2 - 2gz_T} T_z \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)으로 표현된 트랜섬 선미 끝단에서의 유체입자의 속도는 자유수면 경계조건식을 이산화하는 과정에서 경계조건으로 사용된다. 본 연구에서는 트랜섬 선미 이후의 자유수면 영역에 대하여 Kelvin형 자유수면조건에서 나타나는 속도포텐셜의 2차 미분항을 구하기 위하여 2점 상류 차분을 사용하였다.

4. 조파저항의 계산

4.1 압력 적분에 의한 조파저항의 계산

압력 적분에 의한 조파저항의 계산 방법은 선체표면에 미치는 압력(p)을 선체표면에 걸쳐 적분하여 아래와 같이 구한다.

$$p = \frac{\rho}{2}(U_\infty^2 - \nabla\phi \cdot \nabla\phi) \quad (12)$$

$$F_x = - \int_{S_B} p n_x dS \quad (13)$$

$$C_W = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 S_B} \quad (14)$$

여기서,

S_B : 선체침수표면적

F_x : 선체에 미치는 힘의 x 성분

를 나타낸다.

4.2 운동량이론에 의한 조파저항의 계산

운동량이론에 의한 접근방법은 선체 및 선체주위의 유체영역(control volume)에 대하여 운동량보존법칙을 적용하여 x 방향으로 선체에 작용하는 힘인 조파저항을 구하는 것이다.

x 방향에 대한 운동량보존법칙은 다음 식과 같다.

$$\int \int_{S_c} \rho \phi_x (\nabla\phi) \cdot \vec{n} dS + \int \int_{S_c} (p + \rho gz) n_x dS = 0 \quad (15)$$

여기서 S_c 는 유동장을 둘러싸는 검사면(control surface)를 나타낸다.

질량보존법칙은 다음 식과 같다.

$$\int \int_{S_c} (\nabla\phi) \cdot \vec{n} dS = 0 \quad (16)$$

식 (16)에 ρU_∞ 를 곱한 후, 그 식을 다시 식 (15)에서 빼면 다음과 같이 된다.

$$\int \int_{S_c} \rho u (\nabla\phi) \cdot \vec{n} dS + \int \int_{S_c} (p + \rho gz) n_x dS = 0 \quad (17)$$

위의 식에서 u 는 x 방향의 교란속도를 나타낸다.

유동장을 둘러싸는 검사면은 폐곡면이므로 식 (15)의 두 번째 적분 속의 두 번째 항은 다음과 같이 사라진다.

$$\int \int_{S_c} \rho gz n_x dS = 0 \quad (18)$$

그 외에 조파저항에 영향을 미치지 않는 영역에 대한 적분을 소거한 후, 식 (17)을 다시 정리하면 다음과 같은 조파저항 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} F_x &= - \int \int_{S_B} p n_x dS = \rho \int \int_{S_F} u (\nabla\phi) \cdot \vec{n} dS \\ &= \rho \int \int_{S_F} u w dS \end{aligned} \quad (19)$$

윗 식에서 w 는 z 방향의 교란속도를 나타내며, S_F 는 자유수면영역을 나타낸다.

4.3 정적압력에 의한 조파저항의 계산

트랜섬 선미를 가지는 선박에 대한 조파저항을 계산할 경우 크루즈 선미를 가지는 선박의 조파저항을 계산하는 것과는 달리 선체에 작용하는 정압을 고려해 주어야 한다. 크루즈 선미를 가지는 선박의 조파저항계산에는 선체가 자유수면을 $z=0$ 에서 가로지르므로 정압성분의 합이 선박의 앞뒤에서 서로 상쇄되지만, 트랜섬 선미를 가지는 선박은 고속에서 유체입자가 $z=0$ 인 지점보다 낮은 지점인 트랜섬 끝단에서 선체와 이탈해 나가므로, 계산한 조파저항에 정압을 고려한 힘(R_s)을 더해 주어야 한다.

$$\begin{aligned} R_s &= - \int \int_{S_T} \rho gz_T dS \\ &= 2 \int_0^{B/2} \int_0^{z_T(y)} \rho gz_T dz dy \\ &= \rho g \int_0^{B/2} z_T^2 dy \end{aligned} \quad (20)$$

윗 식에서 B 는 트랜섬 선미의 y 방향의 폭을 나타낸다.

5. 트림(Trim)과 침하(Sinkage)의 계산

고속으로 운항하는 트랜섬 선미를 가지는 선박은 선체가 완전한 정상상태에 도달할 때까지 많은 트림과 침하를 경험하게 된다. 그러므로 선체가 완전한 정상상태까지 도달하는 과정을 예측하는 것은 중요하다. 이 값은 선체에 미치는 압력을 계산하면 구할 수 있다.

모우멘트계수(C_M)는 아래의 식으로 주어진다.

$$C_M = \frac{\sum_{i=1}^{NB} C_{pi} A_i [n_{zi}(x_{ci} - x_F) - n_{xi} z_{ci}]}{\sum_{i=1}^{NB} A_i} \quad (21)$$

여기서,

NB : 선체를 구성하는 패널수

C_{pi} : i -번째 패널의 압력계수

A_i : i -번째 패널의 면적

x_F : 부심(center of floatation)의 x 좌표

x_{ci}, z_{ci} : i -번째 패널 도심의 x, z 좌표

를 나타낸다.

트림각(θ)은 모우멘트계수를 사용하여 다음과 같이 구한다.

$$\theta = \frac{C_M \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 S_B L^3}{\rho g I_L L^4} = C_M F_n^2 \frac{S_B}{I_L} \quad (22)$$

여기서,

I_L : 수선면적의 x_F 에 대한 2차모우멘트

L : 선체의 수선간 길이

를 나타낸다.

z 방향에 대한 힘의 계수(C_z)은 각 패널의 z 방향의 힘을 구하고 그것을 선체 전체에 대하여 적분을 하여 구한다.

$$C_z = \frac{-\sum_{i=1}^{NB} C_{pi} n_{zi} A_i}{\sum_{i=1}^{NB} A_i} \quad (23)$$

부심에서의 침하(z_s)는 C_z 을 이용하여 구하면 다음과 같이 된다.

$$z_s = \frac{C_z \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 S_B}{\rho g A_w L} = C_z F_n^2 \frac{S_B}{A_w} \quad (24)$$

여기서,

A_w : 수선면적

를 나타낸다.

선체의 트림각과 침하가 구해지면 기준점(원점)과 선수 및 선미에서의 침하를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} z_{so} &= z_s + x_F \theta \\ z_{sb} &= z_{so} + \frac{L}{2} \theta \\ z_{ss} &= z_{so} - \frac{L}{2} \theta \end{aligned} \quad (25)$$

여기서,

z_{so} : 원점($x=0$)에서의 침하

z_{sb} : 선수에서의 침하

z_{ss} : 선미에서의 침하

를 나타낸다.

6. 수치 계산 결과

본 연구를 위하여 개발한 코드의 검증을 위하여 실험결과가 발표된 Athena선형에 적용하여 계산을 수행하고 그 결과를 실험결과와 비교하였다.

Fig. 2는 설계속도($F_n=0.48$)에서 계산한 파형을 보여주고 있으며 자유수면에서의 계산영역과 패널의 구성을 동시에 보여주고 있다. 패널법에서는 선체표면에서의 패널수, 자유수면에서의 계산영역 및 패널수에 따라서 계산값이 다소 다르게 나타나는 것이 일반적이며 수렴값을 얻기 위해서는 충분한 계산영역과 패널수를 사용해야 한다. 본 계산에서는 수렴정도를 확인한 후 Fig. 2에 보이는 바와 같이 자유수면에서는 $-1 < x/L < 1.5$, $0 < y/L < 0.75$ 의 영역에서 총 624개, 트랜섬 선미 이후의 부분에는 42개의 패널을 분포하고, 선체에는 234개를 분포하였다. Fig. 2로부터 트랜섬 선미를 가지는 선박의 일반적인 현상인 선미 뒤에서 큰 삼각파가 생성됨을 볼 수 있다.

Fig. 3은 $F_n=0.40$ 과 $F_n=0.48$ 에서의 파형을 비교한 것이다. $F_n=0.48$ 인 경우가 $F_n=0.40$ 인 경우에 비해 파장이 더 길고, 트랜섬 선미 끝단 이후의 삼각파는 선미에서 더 먼 곳에서 발생되는 것을 볼 수 있다.

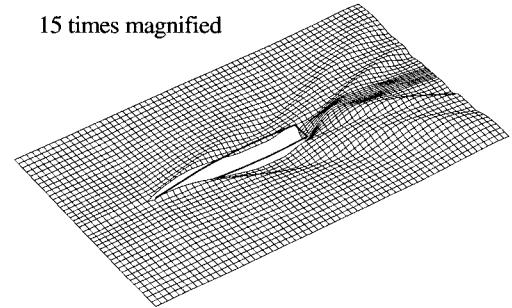


Fig. 2 Wave pattern ($F_n=0.48$)

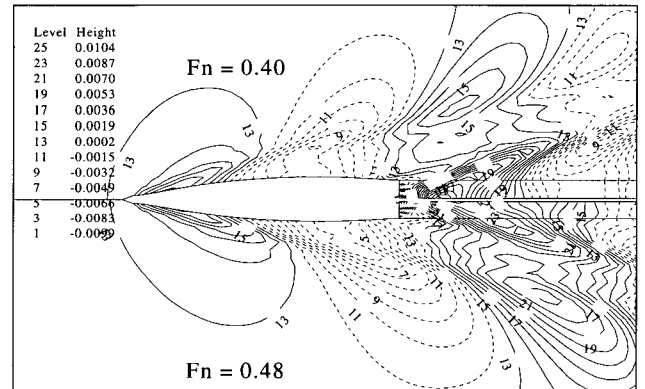


Fig. 3 Wave contours ($F_n=0.40$ and $F_n=0.48$)

Fig. 4는 고정상태(fixed condition)에서 압력적분과 운동량이론에 의한 조파저항을 파형 분석에 의한 ITTC의 실험값과 Dawson(1979), Xia(1986), Kim(1997)의 계산값과 비교하였다. 여기서, Dawson과 Xia는 이중모형가정으로 압력적분을 하여 계산을 수행한 반면, Kim는 이중모형에 운동량이론을 사용하여 조파저항을 계산하였다. 압력적분에 의한 조파저항은 운동량이론에 의해 구한 값보다 다소 큰 값을 주고 있다. 운동량이론에 의하여 계산된 조파저항의 경우, F_n 이 커지면서 실험값에 수렴하는 경향을 보인다. 이것은 고속으로 가면서 트랜섬 선미에서 유체가 선체를 부드럽게 떨어져 나가서 본 연구에서 도입한 트랜섬 선미모델과 동일한 양상을 보이기 때문으로 생각된다. F_n 가 낮은 경우에는 조파저항 값이 잘 맞지 않는 경향을 보이는데 이것은 F_n 가 낮으면 실제유동이 현재의 드라이 트랜섬 모델링에 위배되는 현상을 보이기 때문으로 생각된다. 즉, 트랜섬 끝단에서 정적압력 기여분이 다소 크게 기여하기 때문이다.

Fig. 5는 고정상태와 자유상태에 대한 선체의 자세변화와 선측파형을 설계속도에서 비교한 것이다. 자유상태로 가면서 선미트림이 발생하고, 그에 따라 선측파형이 고정상태의 선측파형과 비교하여 낮은 것을 볼 수 있다.

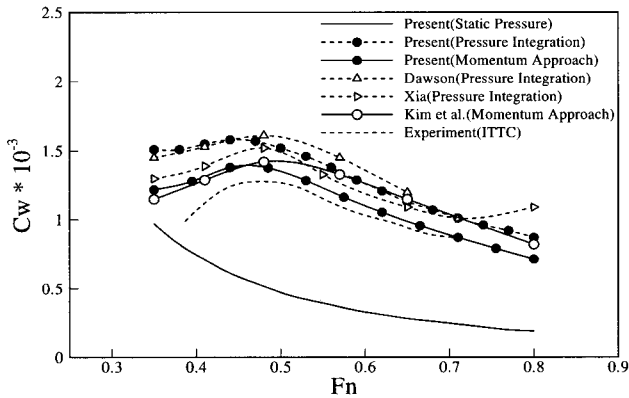


Fig. 4 Comparison of C_w (fixed condition)

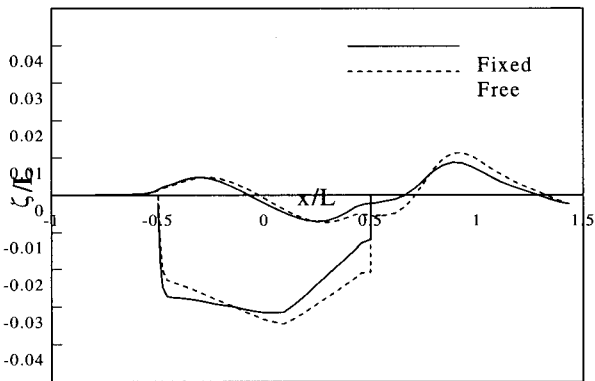


Fig. 5 Comparison of hull profiles and wave elevation along the hull side at the fixed and free condition ($F_n=0.48$)

Fig. 6은 설계속도에서 자유상태를 계산할 때 트림과 침하의 수렴과정을 보여준다. 본 계산에서는 트림과 침하가 10^{-5} 보다 작을 때 수렴했다고 보았다.

Fig. 7은 자유상태에서 선수와 선미에서의 침하를 F_n 에 대하여 나타내고, DTNSRDC의 실험값과 비교한 것이다. 고정상태에 대한 조파저항의 비교에서 지적하였던 것처럼 비교적 저속영역에 대하여 선미에서의 침하가 실험에 의하여 측정된 침하와 비교하여 다소 많은 차이를 보이는 것을 볼 수 있다. 그

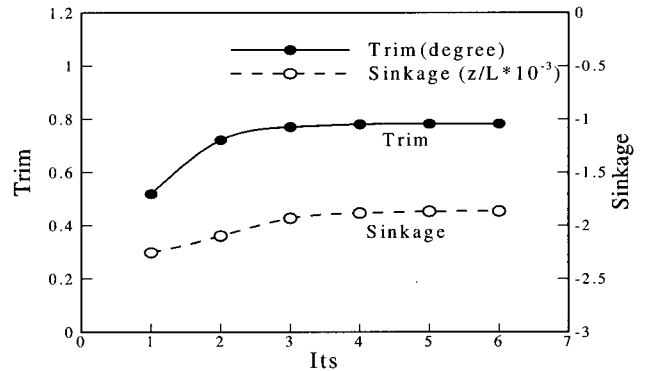


Fig. 6 Convergence history of trim and sinkage ($F_n=0.48$)

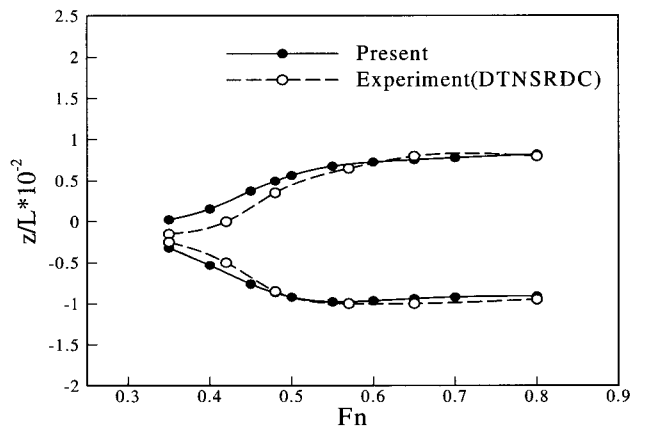


Fig. 7 Sinkage vs. F_n at bow and stern

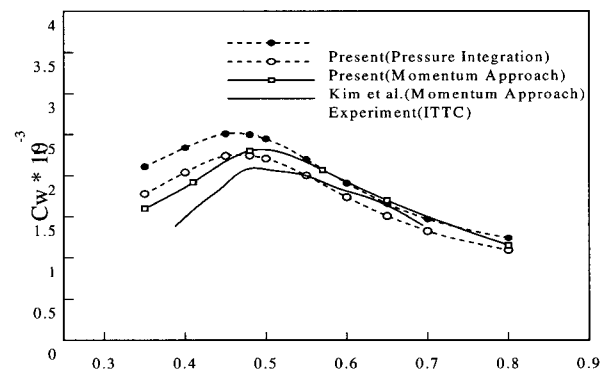


Fig. 8 Comparison of C_w (free condition)

러나, 설계속도 이상의 고속영역으로 가면서 실험값과 좋은 일치를 보이고 있다.

Fig. 8은 자유상태에서 압력적분법과 운동량이론법으로 계산한 조파저항을 실험값과 Kim *et al.*의 계산값과 비교한 것이다. 고정상태와 마찬가지로 압력적분에 의한 조파저항이 운동량이론에 의하여 구한 값보다 다소 큰 값을 주고 있음을 알 수 있다. 고속으로 가면서 두 값의 차이가 감소하여 실험값에 접근함을 알 수 있다.

7. 결 론

Kelvin형 자유수면조건을 사용하여 트랜섬 선미를 가지는 선형의 조파저항 해석기법에 대하여 논하고 압력적분과 운동량이론에 의해 구한 조파저항과 발표된 계산값 및 실험값과 비교하였다.

모형선의 침하와 트림변화의 예측은 실험값과 좋은 일치를 보여주고 있는 것으로 보아 트랜섬조건에 부과된 부담을 알 수 있었다. 압력적분에 의해 구한 조파저항이 운동량이론에 의해 구한 조파저항보다 다소 큰 값을 주고 있으나, Athena선형의 설계속도 이후에서는 두 값의 차이가 감소하여 실험값과 비교적 일치하는 경향을 볼 수 있었다.

참 고 문 헌

- Chang M. S.(1979). "Wave Resistance Predictions by using a Singularity Method", Proc. of the Workshop on Ship Wave-Resistance Computations, DTNSRDC, Bethesda. Md., 20084.
- Cheng B. H.(1989). "Computations of 3D Transom Stern Flows", Proc. Fifth International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, National Academy Press, Washington, DC, pp 581~592.
- Dawson C. W.(1979). "Calculations with the XYZ Free Surface Program for Five Ship Models", Proc. of the Workshop on Ship Wave Resistance Computations, DTNSRDC, Bethesda, Md. 20084.
- Gadd G. E.(1976). "A Method of Computing the Flow and Surface Wave Pattern Around Full Forms," Trans. RINA, London, UK, pp 207~220.
- Jensen, P. S.(1987). "On the Numerical Radiation Condition in the Steady-State Ship Wave Problem", Journal of Ship Research, Vol. 31, No.1, pp 14~22.
- Kim D. H, Van S. H. and Kim H. C.(1997). "On the treatment of a Transom Stern in Panel Method", Proc. of the Annual Autumn Meeting, SNAK, Seoul, 13-14, pp 189~194 (in Korean).
- Lee K. H. and Chun H. H.(1998). "A Study on the Numerical Radiation Condition in the Steady Wave Problem", Journal of Ocean Engineering, Vol. 12, No. 4, pp 97~110 (in Korean).
- Nakos D. E. and Scлавounos P. D.(1994). "Kelvin Wakes and Wave Resistance of Cruiser and Transom Stern Ships", Journal of Ship Research, Vol. 38, No. 1, pp 9~29.
- Ni S. Y.(1987). "Higher Order Panel Methods for Potential Flows with Linear and Non-linear Hydrodynamics", Chalmers University of Technology.
- Ni S. Y.(1987). "Higher Order Panel Methods for Potential Flows with Linear and Non-linear Hydrodynamics", Ph.D. Thesis, Chalmers University. Gotheburg, Sweden.
- Saunders H. E.(1957). "Hydrodynamics in Ship Design", SNAME, Vol. 1, pp 326~327.
- Telste J. G. and Reed A. M.(1994). "Calculation of Transom Stern Flows", Proc. Sixth International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, National Academy Press, Washington, DC, pp 79~92.
- Xia F.(1986). "Numerical Calculations of Ship Flows with Special Emphasis on the Free Surface Potential Flow", Ph.D. Thesis, Chalmers University, Gotheburg, Sweden.

2000년 11월 17일 원고 접수

2000년 12월 20일 수정본 채택