

---

 論 文
 

---

大韓造船學會論文集  
 第29卷 第1號 1992年 3月  
 Transactions of the Society of  
 Naval Architects of Korea  
 Vol. 29, No. 1, March 1992

## 타 단독 특성의 이론적 해석

공인영\*, 강창구\*, 이창민\*

### Theoretical Analysis of Open Water Characteristics of a Rudder

by

I. Y. Gong\*, C. G. Kang\* and C. M. Lee\*

#### 요 약

Spade Type 타의 단독 특성을 추정하기 위하여 3차원 Panel Method를 사용하였다. 입사류는 균일하며 시간에 따라 변하지 않는다고 가정하였고, 타 표면에 소오스 및 다이폴을 분포하였다. 후류면은 타의 뒷날에서 물체로부터 떨어져 나간다고 가정하였으며, 후류면에는 다이폴을 분포하였다.

후류면은 물체의 뒷날과 무한 원방에서 적당한 조건을 부여함으로써 그 형상을 가정하였으며, 후류 형상의 차이가 최종 결과에 미치는 영향을 고찰하였다.

뒷날에서는 3차원 압력 Kutta 조건을 적용하였으며, 2차원 Kutta 조건을 적용한 결과와 비교하여 보았다.

Spade Type 타에 대한 계산을 수행하였으며, 실험 결과와 전반적으로 잘 일치함을 확인하였다. 본 연구에서 사용한 방법은 타의 초기 설계 단계에서 유용하게 사용할 수 있을 것이다.

#### Abstract

A potential based panel method is used to predict the open water characteristics of spade-type rudders. The inflow velocity is assumed to be constant in time and uniform in space. Source and dipole are distributed on the rudder surface. It is assumed that the wake surface is streaming from trailing edge and it is represented by dipole distribution.

---

발표 : 1991년도 대한조선학회 춘계연구발표회('91. 4. 13)  
 접수일자 : 1991년 5월 13일, 재접수일자 : 1991년 8월 12일  
 \* 정회원, 해사기술연구소

大韓造船學會論文集 第29卷 1號 1992年 3月

In this paper, wake geometry is assumed by imposing appropriate conditions at the trailing edge and far from the body. The effects of wake geometry are studied. The pressure Kutta condition is applied at the trailing edge, the effects of which are compared with those of two-dimensional Kutta condition. The results of calculations for a spade-type rudder are compared with published results. It is concluded that this approach shows fairly good agreement with experimental results and can be used in the initial design stage of a rudder.

## 1. 서 언

선박의 대형화 및 추진 효율의 향상을 위한 특수한 선형의 개발로 조종 성능이 불량한 선박이 출현하면서, 선박을 조종 및 제어할 수 있는 거의 유일한 수단으로서 타의 역할이 중요하여지고 있다.

조종 성능의 견지에서 불안정한 선박의 경우에도, 타의 면적을 증가시킴으로써 그 결점을 어느 정도 극복할 수 있다는 것은 잘 알려진 사실이다. 물론 근본적으로 불량한 조종 성능을 가진 선박은 타의 면적을 증가시키거나 타의 효율을 높이는 것만으로는 조종 성능의 개선에 한계가 있지만, 주어진 상황에서 최대의 효력을 발휘할 수 있는 타를 설계할 필요성은 아무리 강조하여도 지나치지 않을 것이다.

본 연구에서는 타의 설계를 위한 기초 연구로서 Spade Type의 타(전 가동 타)가 단독으로 균일류중에 놓여 있을 때의 타 단독 특성을 계산하고 이를 기존의 실험 결과와 비교하여 보았다.

이를 위하여 타의 표면 및 후류면에 특이점을 분포하였으며, 후류는 타의 뒷날로부터 떨어져 나간다고 가정하였다. 후류면의 형상은 엄격하게는 해의 일부로서 결정되어야 하지만, 계산의 효율을 위하여 타의 뒷날과 무한원방에서 적절한 조건을 부여함으로써 그 형상을 가정하였으며, 본 연구에서 취급한 단순한 형태의 물체의 경우에는 후류 형상의 차이가 최종 결과에 거의 영향을 미치지 않음을 확인하였다.

뒷날에서의 Kutta 조건으로서 2차원 조건(속도 일치)과 3차원 조건(압력 일치)을 각각 적용하여 보았으며, 이로 인한 계산 결과의 차이를 NACA

4 자리 단면을 가진 원형익에 대하여 검토하였다.

일반적인 전가동 타에 대한 계산을 수행하고 DTMB의 풍동 실험 결과와 계산 결과를 비교하였으며 두 결과가 비교적 잘 일치함을 확인하였다.

## 2. 문제의 정식화

### 2.1 좌표계 및 기본 가정

좌표계는 Fig. 1과 같다. 균일 입사류의 속도 벡터는  $\vec{U}_\infty$ 로 표시되며 시간에 따라 변하지 않고, xy-평면에 평행하다고 가정하였다. 영각(Angle of Attack)  $\alpha$ 는 +x축과  $-\vec{U}_\infty$ 가 이루는 각으로 정의되며, +x축으로부터 반시계 방향일때를 +로 정의하였다. 또한 물체 표면에 수직인 법선 벡터  $\vec{n}$ 은 물체의 내부를 향한다고 정의하였다.

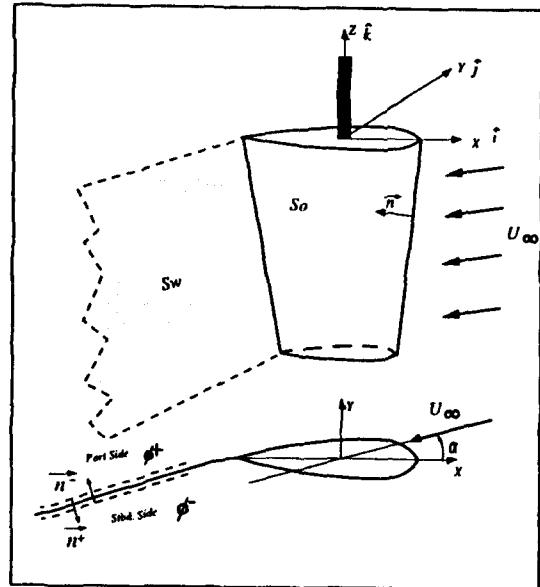


Fig. 1 Coordinate system

Fig. 1에서  $S_0$ 는 물체의 표면을,  $S_w$ 는 후류면을 나타낸다. 보오텍스는 뒷날에서만 유출된다고 가정하였고 유체는 비점성 및 비압축성, 유체 유동은 비회전성이라 가정하였다.

2.2 경계치 문제 및 적분 방정식의 유도

무한히 넓은 유체중에 위치한 타에 균일한 흐름이 입사될 경우, 일반적으로 물체로부터 박리된 흐름은 후류면을 이루는 데 이의 두께는 매우 얇다고 가정한다. 물체와 이러한 후류면을 제외한 유장에서는 속도 포텐셜  $\Phi$ 가 존재하며, 전체 속도 포텐셜  $\Phi$ 는 다음처럼 쓸 수 있다.

$$\Phi(x,y,z) = \phi_\infty(x,y,z) + \phi(x,y,z) \quad (1)$$

여기서  $\phi_\infty$ 는 균일 입사류의 속도 포텐셜이고,  $\phi$ 는 물체의 존재로 인한 유체의 교란 속도 포텐셜을 나타낸다.  $\phi_\infty$  및  $\phi$ 는 다음처럼 표현된다.

$$\phi_\infty = -U_\infty(x \cos \alpha + y \sin \alpha) \quad (2)$$

$$\vec{U}_\infty = \nabla \phi_\infty = (-U_\infty \cos \alpha, -U_\infty \sin \alpha) \quad (3)$$

교란 속도 포텐셜  $\phi$ 에 대한 경계치 문제는 다음처럼 쓸 수 있다.

$$\nabla^2 \phi(x, y, z) = 0 \quad \text{in fluid region} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = -\vec{n} \cdot \nabla \phi_\infty = -\vec{n} \cdot \vec{U}_\infty \quad \text{on } S_0 \quad (5)$$

$$|\nabla \phi| \rightarrow 0 \quad \text{at } \infty \quad (6)$$

$$|\nabla \phi|_{T,E} < \infty \quad \text{at Trailing Edge} \quad (7)$$

$$\Delta p|_{S_w} = p^+ - p^- = 0 \quad (8)$$

$$\Delta \left( \frac{\partial \phi}{\partial n} \right) |_{S_w} = \left( \frac{\partial \phi}{\partial n} \right)^+ - \left( \frac{\partial \phi}{\partial n} \right)^- = 0 \quad \text{on } S_w$$

여기서 후류면은 두께가 0인 것으로 가정하였으며, 식 (8)에서 뿔첨자 +와 -는 각각 후류면의 좌현 방향 및 우현 방향에서의 값임을 의미한다.

이제 다음과 같이 쏘오스에 대한 Green 함수를 정의하자.

$$G(P,Q) = \frac{1}{r(P,Q)} = \frac{1}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2}} \quad (9)$$

여기서  $P$ 는 실제 물리적인 좌표  $(x,y,z)$ 를 의미하고  $Q$ 는 쏘오스가 위치한 점의 좌표  $(\xi, \eta, \zeta)$ 를 나타낸다.

이제 유체 영역에서  $\phi$ 와  $G$ 에 Green 정리를 적용하고,  $P$ 점을 물체 표면으로 접근시키면 다음과 같이 물체 표면에서의 포텐셜  $\phi$ 에 대한 표현식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} -2\pi\phi(P) = & \iint_{S_0} [\phi(Q) \frac{\partial G(P,Q)}{\partial n_Q} - G(P,Q) \frac{\partial \phi(Q)}{\partial n_Q}] dS \\ & + \iint_{S_w} [\phi(Q) \frac{\partial G(P,Q)}{\partial n_Q} - G(P,Q) \frac{\partial \phi(Q)}{\partial n_Q}] dS, \end{aligned} \quad (10)$$

$P \in S_0$

여기서  $\iint_{S_0}$ 는 주치 적분(Principal Value Integral)을 의미한다. 한편, Fig. 1 및 식 (8)로부터  $S_w$ 에 대한 적분은 다음처럼 정리된다.

$$\begin{aligned} & \iint_{S_w} [\phi(Q) \frac{\partial G(P,Q)}{\partial n_Q} - G(P,Q) \frac{\partial \phi(Q)}{\partial n_Q}] dS \\ & = \iint_{S_w} \Delta \phi(Q) \frac{\partial G(P,Q)}{\partial n_Q} dS \end{aligned} \quad (11)$$

여기서

$$\Delta \phi(Q) = \phi|_{(port\ side)} - \phi|_{(stbd.\ side)}, \quad \frac{\partial}{\partial n_Q} |_{S_w} = \frac{\partial}{\partial n^+}$$

따라서 물체 표면에서의  $\phi$ 에 대한 적분 방정식은 다음처럼 정리된다.

$$\begin{aligned} 2\pi\phi(P) + \iint_{S_0} \phi(Q) \frac{\partial G(P,Q)}{\partial n_Q} dS \\ + \iint_{S_w} \Delta \phi(Q) \frac{\partial G(P,Q)}{\partial n_Q} dS \\ = U_\infty \iint_{S_0} G(P,Q) (n_x \cos \alpha + n_y \sin \alpha) dS \end{aligned} \quad (12)$$

여기서  $S_w$ 에서의 포텐셜 점프인  $\Delta \phi$ 는 Kutta

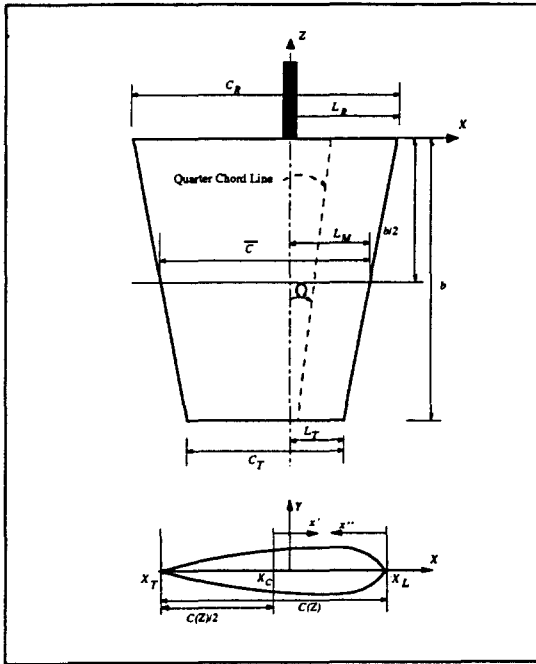


Fig. 2 Geometry of spade rudder

조건으로부터 결정될 수 있다.

2.3 타의 형상

전가동타(Spade Rudder)의 제원은 Fig. 2에 보여지고 있으며, 각 인자들은 다음처럼 정의된다.

- $b$  : Span (Rudder Height)
- $\lambda$  : Taper Ratio  $= C_T/C_R$
- $a$  : Aspect Ratio  $= b/\bar{c}$
- $\Omega$  : Sweepback Angle
- $r_b$  : Ballance Ratio  $= L_M/\bar{c}$
- $C_R$  : Root Chord
- $C_T$  : Tip Chord
- $\bar{c}$  : Geometric Mean Chord  $= (C_R + C_T)/2$
- $L_M = r_b \bar{c}$
- $L_R = L_M + 0.5b \tan\Omega + (C_R + C_T)/8$
- $L_T = 2L_M - L_R$

여기서  $b, \lambda, a, \Omega, r_b$ 는 타의 기하학적 특성을 결정하는 인자들이며,  $C_R, C_T, \bar{c}, L_M, L_R, L_T$ 는 위의

인자들로부터 결정될 수 있다.

앞날, 뒷날 및 코오드 중심선과 코오드 길이의 스패방향 분포는 다음처럼 쓸 수 있다.

$$x_L(z) = \frac{L_R - L_T}{b} z + L_R \quad (14)$$

$$x_T(z) = \frac{L_R - L_T - (C_R - C_T)}{b} z - (C_R - L_R) \quad (15)$$

$$x_C(z) = \frac{L_R - L_T - 0.5(C_R - C_T)}{b} z + L_R - \frac{C_R}{2} \quad (16)$$

$$c(z) = \frac{C_R - C_T}{b} z + C_R \quad (17)$$

타의 단면으로 많이 사용되는 NACA 4-자리 단면의 두께 및 캠버의 코오드 방향 분포는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$t(x'') = 10\tau c \left[ 0.2969 \sqrt{\frac{x''}{c}} - 0.1260 \frac{x''}{c} - 0.3537 \left(\frac{x''}{c}\right)^2 + 0.2843 \left(\frac{x''}{c}\right)^3 - 0.1015 \left(\frac{x''}{c}\right)^4 \right] \quad (18)$$

$$Y(x'') = \frac{\epsilon}{\rho^2} x''(2\rho - \frac{x''}{c}) \quad 0 \leq x'' \leq c\rho \quad (19)$$

$$= \frac{\epsilon(c - x'')}{(1 + \rho)^2} (1 + \frac{x''}{c} - 2\rho) \quad c\rho \leq x'' \leq c$$

2.4 후류 형태의 가정

후류 면의 형상은 엄밀하게는 식 (8)을 만족하도록 유선을 따라가는 형상을 취해야 하지만, 해가 결정되지 않은 상황에서 이를 결정한다는 것은 매우 어려운 문제이다. 따라서 대부분의 경우에는 후류 면의 형상을 가정하고 문제를 풀게 된다. Fig.1로부터 타의 각 단면에서의 후류의 형태를 다음처럼 가정할 수 있다.

$$y_w = ax + \frac{b}{x'} + c \quad (20)$$

이제 위의 식이 다음의 조건을 만족한다고 가정하면,

$$y_w = 0 \quad \text{at } x = x_T$$

$$y'_w = 0 \quad \text{at } x = x_T \quad (21)$$

$$y'_w \rightarrow \tan\alpha \quad \text{as } x \rightarrow -\infty$$

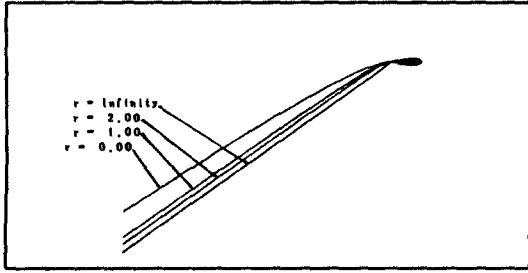


Fig. 3 Variation of wake geometry with parameter r for angle of attack=35.0°

이로부터 식(20)은 다음처럼 쓸 수 있다.

$$y_w = \tan \alpha \left( x + \frac{x_T^{r+1}}{rx} - \left(1 + \frac{1}{r}\right) x_T \right) \quad (22)$$

여기서  $x_T$ 는 각 단면에서의 뒷날의  $x$ 좌표이며, 인자  $r$ 은 식 (8)이 가장 잘 만족되도록 결정되어야 한다.  $r$  값에 따른 후류 형상의 변화가 Fig. 3에 보여지고 있으며, 이에 의한 계산 결과의 차이는 4.2 절 및 4.3 절에 기술되어 있다.

### 2.5 Kutta 조건의 적용

일반적으로 유체중에서 양력을 발생시키는 구조를 수학 모델화할 때 가장 중요한 부분중의 하나가 뒷날에서의 Kutta 조건을 수식화하는 방법이다. 뒷날에서의 일반적인 Kutta 조건은 뒷날에서의 유속이 유한하다는 식 (7)로 표현되는데, 이는 뒷날 (혹은 후류 면)에서 윗면과 아랫면 사이에 압력차가 없음을 의미한다. 즉, Bernoulli 방정식으로부터

$$\frac{1}{2} |\vec{V}_U|^2 = \frac{1}{2} |\vec{V}_L|^2 \quad (23)$$

여기서,  $\vec{V}_U$  및  $\vec{V}_L$ 은 각각 뒷날에 인접한 윗면 및 아랫면에서의 속도 벡터를 나타낸다. 달리 쓰면,

$$\frac{1}{2} (\vec{V}_U + \vec{V}_L) \cdot (\vec{V}_U - \vec{V}_L) = 0 \quad (24)$$

즉, 뒷날의 위, 아랫면에서의 평균 속도 벡터와 보오텍스 벡터  $\vec{\omega} = \vec{n} \times (\vec{V}_U - \vec{V}_L)$ 은 평행이 됨을 알 수 있다. 하지만, 식 (23) 및 (24)는 비선형식이므로 이 식을 만족하기 위해서는 반복 계산기법을 이

용한 해법이 필요하다.

한편, 2차원 문제의 경우에는 스펜 방향으로의 유체 속도 성분이 존재하지 않으므로 후류의 위, 아랫면에서의 포텐셜 차이는 다음처럼 표시된다 [1].

$$\Delta \phi|_{S_w} = \phi_{port}|_{T.E} - \phi_{stbd}|_{T.E} + \vec{U}_\infty \cdot \overline{P_{stbd} P_{port}} \quad (25)$$

식 (25)의 마지막 항은 뒷날에 인접한 표면요소의 계산점이 실제의 뒷날과 일치하지 않는 데에 기인한 보정항이다. 많은 경우에는 이 항을 무시하여도(Morino의 Kutta 조건) 계산 결과에 큰 차이는 없으나, 뒷날 각이 커지는 경우에는 이 항의 존재 여부가 계산 결과에 큰 영향을 미치게 된다 [2].

또한 3차원 문제에서, 압력 Kutta 조건을 반복 계산기법을 이용하여 만족시키고자 할 경우 그 초기값을 구할 때 식 (25)가 사용된다.

### 2.6 타에 작용하는 유체력

식 (12)의 적분 방정식으로부터 물체 표면에에서의 포텐셜  $\phi$ 를 구할 수 있으며, 다시 다음의 Bernoulli 방정식으로부터 물체 표면에 작용하는 동압  $p$ 에 대한 표현식을 구할 수 있다.

$$p + \frac{\rho}{2} |\nabla \phi|^2 = p_\infty + \frac{\rho}{2} U_\infty^2 \quad (26)$$

이로부터

$$\frac{p - p_\infty}{\rho} = -\vec{U}_\infty \cdot \nabla \phi - \frac{1}{2} |\nabla \phi|^2 \quad (27)$$

물체 표면에서는  $\nabla \phi$ 는

$$\nabla \phi = \nabla_s \phi + \vec{n} \frac{\partial \phi}{\partial n} \quad (28)$$

여기서  $\nabla_s \phi$ 는 물체 표면에 접하는 방향으로의 속도 성분을 나타낸다. Kerwin 등 [3]에 의하면  $\nabla_s \phi$ 는 다음처럼 표시될 수 있다.

$$\nabla_s \phi = \frac{\frac{\partial \phi}{\partial u} [e_u^+ - (e_u^+ \cdot e_v^+) e_v^+] + \frac{\partial \phi}{\partial v} [e_v^+ - (e_v^+ \cdot e_u^+) e_u^+]}{1 - (e_u^+ \cdot e_v^+)^2} \quad (29)$$

여기서  $e_u^+, e_v^+$ 는 물체 표면에서의 임의의 두 방

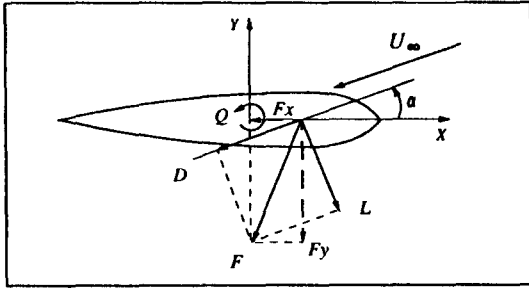


Fig. 4 Forces and moments notation

향을 나타내는 단위 벡터이고,  $\frac{\partial \phi}{\partial u}$ ,  $\frac{\partial \phi}{\partial v}$  는 각각 그 방향의 속도를 의미한다.

한편,  $\frac{\partial \phi}{\partial n}$  은 물체 표면 경계조건으로부터

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = U_\infty (n_x \cos \alpha + n_y \sin \alpha) \quad (30)$$

즉, 식 (29)에서  $e_x, e_y$  는 임의의 두 방향을 나타내므로, 물체 표면의 두 분할 방향(코오드 방향 및 스펠 방향)과 일치한다고 간주하면,  $\frac{\partial \phi}{\partial u}$  및  $\frac{\partial \phi}{\partial v}$  는 유한 차분법을 이용하여 수치적으로 구할 수 있으므로 식 (27)로부터 물체 표면에서의 압력 분포를 구할 수 있고, 이로부터 물체에 작용하는 힘 및 모멘트를 다음처럼 구할 수 있다.

$$\vec{F} = (F_x, F_y, F_z) = \iint_{S_0} p \vec{n} dS, \quad \vec{M} = \iint_{S_0} p(\vec{r} \times \vec{n}) dS \quad (31)$$

$$F_x = \iint_{S_0} p n_x dS \quad (32)$$

$$F_y = \iint_{S_0} p n_y dS \quad (33)$$

$$Q = \iint_{S_0} p(xn_y - yn_x) dS \quad (34)$$

$$B = \iint_{S_0} p(yn_z - zn_y) dS \quad (35)$$

여기서 Q 및 B는 각각 z 축과 x 축에 대한 토크와 굽힘 모멘트를 나타낸다. 한편 Fig. 4로부터

$$L = F_y \cos \alpha - F_x \sin \alpha \quad (36)$$

$$D = F_x \cos \alpha + F_y \sin \alpha \quad (37)$$

무차원 계수는 다음처럼 정의된다.

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A_R} \quad C_Q = \frac{Q}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A_R \bar{c}} \quad (38)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A_R} \quad C_B = \frac{B}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A_R s}$$

여기서  $A_R$ 은 타의 측면적,  $\bar{c}$  및  $s$ 는 각각 평균 코오드 길이와 스펠을 의미한다.

### 3. 수치 계산

#### 3.1 수치 계산 모델

물체 표면과 후류면을 여러 개의 표면 요소로 분할하고, 각 표면 요소에서의 포텐셜 및 법선 방향 속도가 일정하다고 가정하면 식 (12)의 적분 방정식은 다음처럼 쓸 수 있다.

$$2\pi\phi(P_i) + \sum_{j=L+1}^{N_B} \phi(Q_j) D_{ij} + \sum_{j=1}^{N_S} (\phi(Q_e) - \phi(Q_u)) W_{ij} \\ = U_\infty \sum_{j=1}^{N_B} A_j S_{ij} - \sum_{j=1}^{N_S} U_\infty \cdot (\vec{P}_u \vec{P}_e)_j W_{ij} \quad (39)$$

$i = 1, 2, \dots, N_B$

여기서

$$D_{ij} = \iint_{S_j} \frac{\partial}{\partial n_Q} G(P_i, Q_j) dS$$

$$S_{ij} = \iint_{S_j} G(P_i, Q_j) dS$$

$$W_{ij} = \sum_{k=(j-1)N_u+1}^{N_u} D_{ik} + \iint_{(\Delta S_w)_j} \frac{\partial}{\partial n_Q} G(P_i, Q_j) dS$$

$$u = N_c (N_T + j - 1) + 1$$

$$l = N_c (N_T + j)$$

$P_u, P_e$  :  $l, u$ -표면 요소의 Null Point 좌표

$$A_j = (n_x)_j \cos \alpha + (n_y)_j \sin \alpha$$

$N_B$  : 물체 표면 전체의 표면 분할 요소수

$N_c$  : 물체 표면 전체의 코오드 방향 분할 수

$M_R$  : 물체 표면 전체의 스펠 방향 분할 수  
( $= N_T + N_S + N_R$ )

- $N_T$  : Tip 단면의 분할 수
- $N_R$  : Root 단면의 분할 수
- $N_S$  : 측면의 스펀 방향 분할 수
- $N_W$  : 후류 면의 곡률부의 흐름 방향 분할 수
- $(\Delta S_w)_j$  : 후류 면의 평면 부분의  $j$  번째 띠

이 식은 수치 계산이 가능한 식이며,  $S_{ij}$  및  $D_{ij}$ 는 Newman의 방법 [4]에 의하여 계산하였고, 물체 표면 및 후류 면의 분할은 Hess & Smith의 방법 [5]을 따랐다.

$W_{ij}$ 의 표현식 중 첫 항은 곡면부에 의한 영향을, 그리고 두번째 항은 평면부에 의한 영향을 각각 나타낸다.

식 (39)는 결국 Matrix 방정식으로 표현되는데, 이 Matrix 방정식의 해를 구하기 위하여 Clarke[6]에 의하여 개발된 가속 반복 계산기법(Accelerated Iterative Matrix Solution Technique)을 사용하였다. 이 방법은 특히 Fredholm의 제2종 적분 방정식으로부터 유도되는, 대각선항이 지배적인 Matrix 방정식을 풀고자 할 때 효과적인 것으로 알려져 있으며, 다른 방법에 비하여 계산 시간이 빠르다는 장점을 가지고 있다.

한편, 풀고자 하는 Matrix 방정식의 차수가 상당히 커지면, 수치 계산상의 오류로 인하여 실제 해와 약간 다른 해가 계산된 가능성이 있으며, 따라서 해의 정도 향상을 위하여 다음과 같은 기법을 이용하였다[7]. 즉, 풀려고 하는 Matrix 방정식이 다음과 같은 형태일 경우,

$$[A] \{X\} = \{b\}$$

수치 계산상에 포함되는 오류로 인하여 실제 해인  $\{X\}$  대신에  $\{X + \delta X\}$ 가 얻어지게 된다. 이를 향상시키기 위하여,  $\{X + \delta X\}$ 를 위의 식에 대입하여  $\{\delta X\}$ 에 관한 식을 유도하면

$$[A] \{\delta X\} = [A] \{X + \delta X\} - \{b\} = \{d\}$$

가 되고, 이 식을 풀면  $\{\delta X\}$ 에 대한 표현식을 얻을 수 있으므로 실제 해는  $\{X + \delta X\} - \{\delta X\}$ 가 되고, 원하는 정도를 가진 해를 얻을 때 까지 이를 반복하여

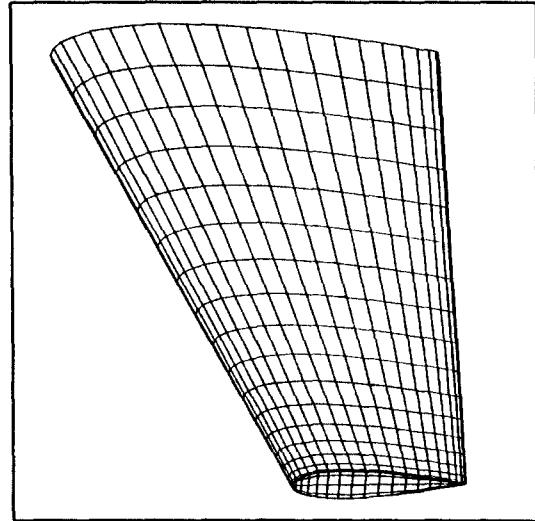


Fig. 5 Example of rudder surface discretization

정도가 향상된 해를 구할 수 있게 된다. 물론, 대개의 경우에는 이러한 정도 향상 기법이 불필요하지만, Matrix의 차수가 커지는 경우에는 해를 검토할 필요가 있으며, 일반적으로  $\{\delta X\}$ 에 대하여 한번 더 Matrix 방정식을 풀면, 원하는 오류 범위 내에서는 거의 완전한 해를 얻을 수 있다.

### 3.2 타의 표면의 분할

물체 표면의 분할은 Hess & Smith[5]의 방법에 따라 일반적으로 4각형 요소를 이용하여 행하였다. 스펀 방향 및 코오드 방향 모두 코사인 분할 방법을 사용하여 양쪽 Tip 부근 및 앞날과 뒷날 부근에서 세밀하게 분할되도록 하였다. Fig. 5는 이렇게 하여 분할된 타 표면의 한 예를 보여주고 있다.

(1) z방향 분할(타의 측면의 스펀 방향 분할)

$$z_i = -\frac{b}{2} \left(1 + \cos \frac{\pi}{N_s} (i-1)\right) \quad i=1, 2, \dots, N_s+1 \quad (40)$$

(2) y방향 분할(Root 및 Tip 단면에서의 두께 방향 분할)

$$y_j = \bar{Y}(x^*) \pm \frac{1}{2} t(x^*) \cos \frac{\pi}{2M} (j-1) \quad j=M+1, M+2, \dots, 2M+1 \quad (41)$$

여기서,  $\bar{Y}$  및  $t$ 는 식 (18) 및 (19)에 주어져 있으며, (+), (-)는 각각 단면의 아랫면 및 윗면을 나타낸다. 또한  $M$ 은 Root 단면의 경우  $N_R$ 을, Tip 단면의 경우  $N_T$ 를 각각 의미한다.

(3) x방향 분할(코오드 방향 분할)

$$x'_k = -\frac{c(z)}{2} \cos \frac{2\pi}{N_c}(k-1) \quad k=1,2, \dots, \frac{N_c}{2} + 1$$

$$x_k = x_c + x'_k$$

$$x''_k = x_L - x_k \tag{42}$$

식 (42)에서  $x$ ,  $x'$  및  $x''$ 의 관계는 Fig. 2에 도시되어 있다.

### 3.3 후류면의 분할 및 평면부에 대한 적분

타의 각 단면에서의 후류면의 형상은 식 (22)로 가정하였으므로, 타에서 충분히 떨어진 곳에서의 후류면은 곡률이 없는 평면을 이루게 된다. 여기서는 후류면을 Fig. 6과 같이 두 부분으로 나누어, 곡면 부분과 평면 부분에 대한 수치 계산을 달리 하였다. 즉, 곡률이 있는 부분은 물체 표면과 마찬가지로 후류면을 유한개의 표면 요소로 분할하여 계산하였으며, 평면부는 흐름 방향으로 무한히 긴 띠에 분포된 단위 세기의 법선 다이폴에 의한 유기 함수를 유도하여 사용하였다. Fig. 6에서  $s$ 축은 입사류의 방향을 나타내고 각 후류면 띠의 변과 평행하다.  $u$ 축은 후류면의 평면부에 수직한 법선 방향이며,  $t$ 축은,  $s$ ,  $u$ 축과 함께 직교 좌표계를 이룬다. 또한  $Q_1$ ,  $Q_2$ 점은 후류면의 평면부가 시작되는 선(OF선)에 위치한 두 점이라고 하면, 이 두 점의  $u$  방향 좌표는 0이 된다.

이제  $j$ 번째 후류면 띠의 평면부  $(\Delta S_w)_j$  ( $j=1,2,$

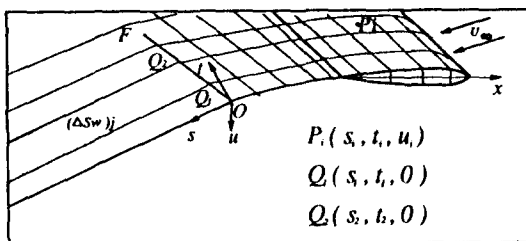


Fig. 6 Wake surface discretization

...,  $N_s$ )에 의한 유기 항에 대한 표현식은 다음처럼 유도된다[10].

$$\iint_{(\Delta S_w)_j} \frac{\partial}{\partial n_0} \frac{1}{r} dS \tag{43}$$

$$= \tan^{-1} \frac{t_2 - t_1}{u_i} - \tan^{-1} \frac{t_1 - t_i}{u_i}$$

$$+ \tan^{-1} \frac{m_{12} e_2 - h_2}{u_i r_2} - \tan^{-1} \frac{m_{12} e_1 - h_1}{u_i r_1}$$

여기서,

$$m_{12} = \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1}$$

$$e_k = u_i^2 + (t_i - t_k)^2$$

$$h_k = (s_i - s_k)(t_i - t_k)$$

$$r_k = \sqrt{(s_i - s_k)^2 + (t_i - t_k)^2 + u_i^2}, \quad k=1, 2$$

### 3.4 압력 Kutta 조건의 수치적 적용

식 (25)로 주어지는 2차원 Kutta 조건을 적용하여 문제를 풀면, 이로부터 얻어지는 압력 분포는 식 (23)으로 표현되는 뒷날에서의 압력 Kutta 조건을 일반적으로 만족시키지 못하게 되며, 이러한 경향은 물체의 끝 부근으로 갈수록 심화된다. 이러한 압력 Kutta 조건을 만족시키지 못할 경우 계산되는

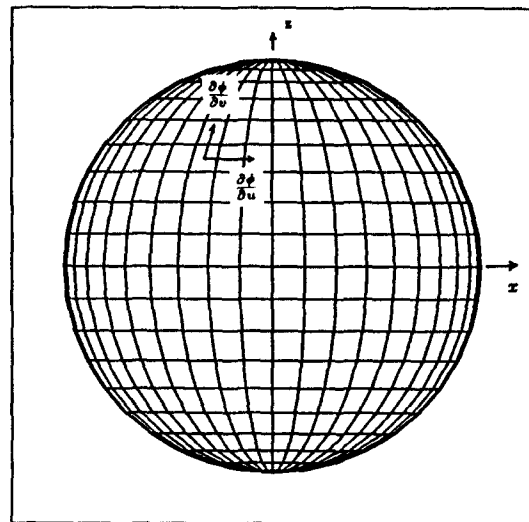


Fig. 7 Coordinate system of circular wing



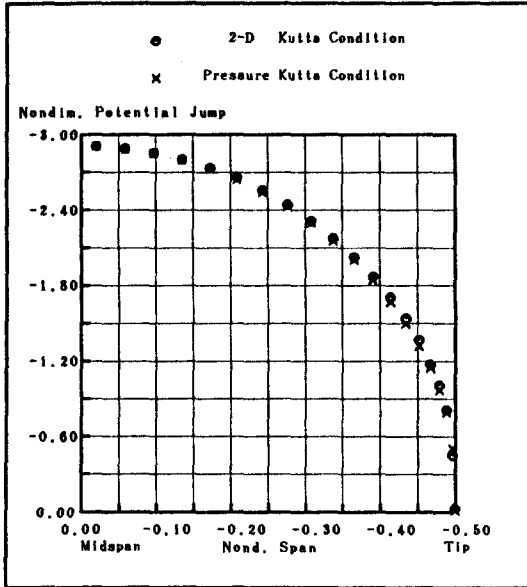


Fig. 8 Nondim potential jump distribution of the circular wing at wake region(NACA 0005,  $\alpha=5.73^\circ$ )

압력 분포에 오류가 포함되므로 양력이나 항력뿐 아니라 토크 값도 영향을 받을 수 있다.

식 (23)으로 주어지는 압력 Kutta 조건은 비선형 식이므로, 식 (25)의 경우처럼 이를 Matrix 방정식에 융합하여 한번에 풀기는 곤란하므로 여기서는 Kerwin 등 [3]의 반복 계산 알고리즘을 사용하였다[10].

압력 Kutta 조건을 만족하기 전과 후의 코오드 방향 압력 분포의 한 예가 Fig. 8-12에 보여지고 있다.

#### 4. 수치 계산 결과

수치 계산은 이론해 및 실험 결과가 알려져 있는 몇가지 경우에 대하여 수행하였으며, 이러한 계산 결과로부터 계산 프로그램의 유효성 및 한계성을 고찰하고자 하였다.

##### 4.1 NACA 단면을 가진 원형익에 대한 계산

Planform은 원형이고 단면은 NACA 단면을 가진

원형익에 영각을 가진 균일류가 입사될 경우의 계산을 수행하였으며, 그 계산 결과가 Figs. 8-Fig. 12에 보여지고 있다. 후류 인자  $r$ 은 1.0으로 놓고 계산한 결과들이며, 본 계산에서는 물체의 기하학적 대칭성을 이용하여, 물체의 반쪽 표면( $z < 0$ )에서만 문제를 풀었고, 물체의 분할 모습은 Fig. 7과 같다.

Fig. 8은 영각이  $5.73^\circ$ 일 경우의 후류면에서의 포텐셜 점프의 스펠 방향 분포를 보여주고 있

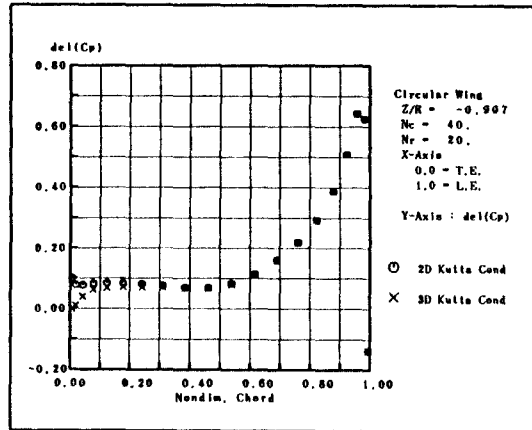


Fig. 9 Chordwise distribution of the pressure jump of the circular wing(NACA 0005,  $\alpha=5.73^\circ$ ,  $z/R=0.907$ )

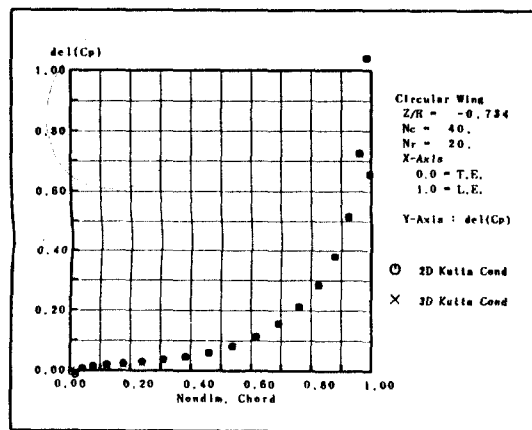


Fig. 10 Chordwise distribution of the pressure jump of the circular wing(NACA 0005,  $\alpha=5.73^\circ$ ,  $z/R=0.734$ )

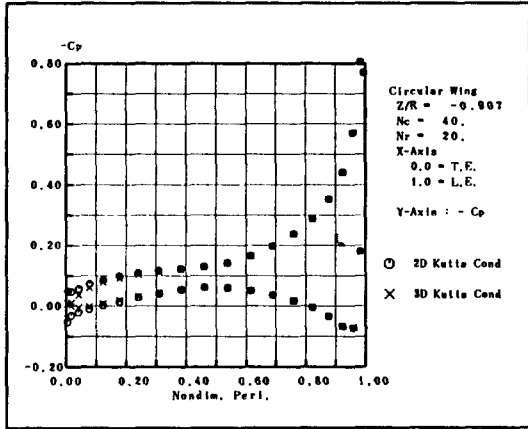


Fig. 11 Chordwise distribution of the pressure of the circular wing(NACA 0005,  $\alpha=5.73^\circ$ ,  $z/R=0.907$ )

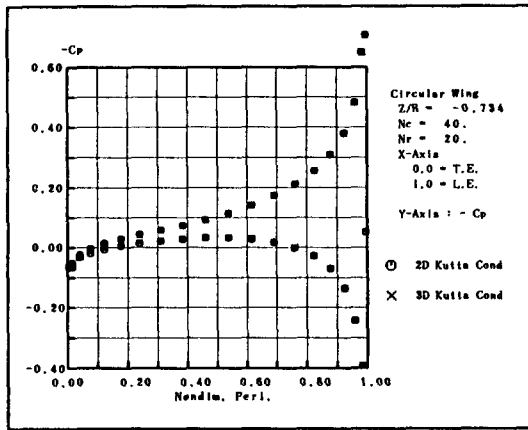


Fig. 12 Chordwise distribution of the pressure of the circular wing(NACA 0005,  $\alpha=5.73^\circ$ ,  $z/R=0.734$ )

는데, 압력 Kutta 조건의 적용 여부에 따른 차이는 끝 부근을 제외하고는 그리 크지 않은 것을 알 수 있다.

Figs. 9-12는 원형익의 끝 및 끝에서 어느 정도 떨어진 곳에서의 Chord 방향 압력 점프 및 압력의 분포를 보여주고 있다. 압력 Kutta 조건을 적용함에 따라 뒷날 부근에서의 압력 분포가 약간 변화하는 것을 볼 수 있으나 끝에서 멀어질수록 그 차이는 크지 않았으며, 양력, 항력 및 토크 계수의 값

에도 그리 큰 차이가 보이지 않았다.

Fig. 13은 영각이  $10^\circ$ 인 경우에 후류인자  $r$ 의 변화에 따른 양력, 항력 및 토크 계수의 변화를 보여주고 있는데,  $r$ 의 변화에 따른 이들 값의 차이는 10% 이내인 것으로 판단된다.

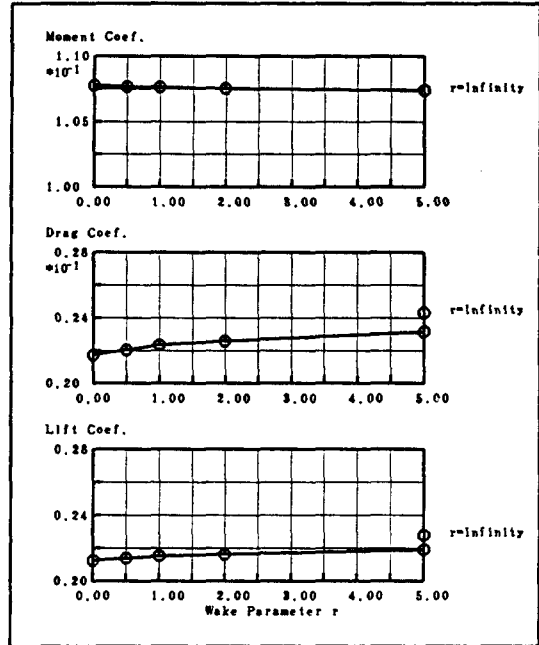


Fig. 13 Variation of hydrodynamic coeff. of circular wing with wake parameter (NACA 0005,  $\alpha=10^\circ$ )

#### 4.2 DTMB 경험식과의 관계

1958년 DTMB에서는 여러가지 단면 형상과 모양을 가진 전가동 제어판에 대한 광범위한 풍동 실험 결과를 발표한 바 있다[9]. 이 자료에 의하면 실험된 범위안에 있는 제어판들의 동유체력 계수들은 다음의 식으로 근사할 수 있다.

$$C_L = \left[ \frac{a_o a_c}{\cos \Omega \sqrt{\frac{a_c^2}{\cos^2 \Omega} + 4 + \frac{57.3 a_o}{\pi}}} \right] \alpha + \frac{C_{Dc}}{a_c} \left( \frac{\alpha}{57.3} \right)^2 \quad (44)$$

$$C_D = C_{D0} + \frac{C_L^2}{\pi a_c e} \quad (45)$$

$$C_M = \left[ \left( \frac{x}{c} \right)_{shp} - \left( \frac{\partial C_M}{\partial C_L} \right)_{C_L=0} \right] \left( \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \right)_{C_L=0} \alpha$$

$$-\frac{1}{2} \frac{C_{Dc}}{a_e} \left(\frac{\alpha}{57.31}\right)^2 \quad (46)$$

$$\left(\frac{\partial C_M}{\partial C_L}\right)_{C_L=0} = \frac{1}{2} \frac{2\pi}{57.31 a_e} \frac{\sqrt{a^2 + 4} + 2}{4(a_e + 2)}$$

- $a_e = 0.09869$
  - $a_e =$  Effective Aspect Ratio
  - $\Omega$  : Sweepback Angle of Quarter Chord Line
  - $C_{Dc}$  : Cross Flow Drag Coefficient (0.80 for squared Tip)
  - $\alpha$  : Angle of Attack(deg.)
  - $C_{do}$  : Minimum Section Drag Coefficient (0.065 for NACA 0015 Section)
  - $C_L$  : Lift Coefficient
  - $e$  : Oswald Efficiency Factor(0.90)
- 이들 제어판의 Root 단면은 풍동 벽면으로부터

Convergence Test of DTMB Rudder	
Rudder Section	NACA 0015
Geometric Aspect Ratio	1.50
Taper Ratio	0.45
Sweep Back Angle(deg.)	11.00
Legend:	
○	Nc X Mr = 20x11
△	Nc X Mr = 40x15
×	Nc X Mr = 40x20
—	DTMB 933 Empirical Formula

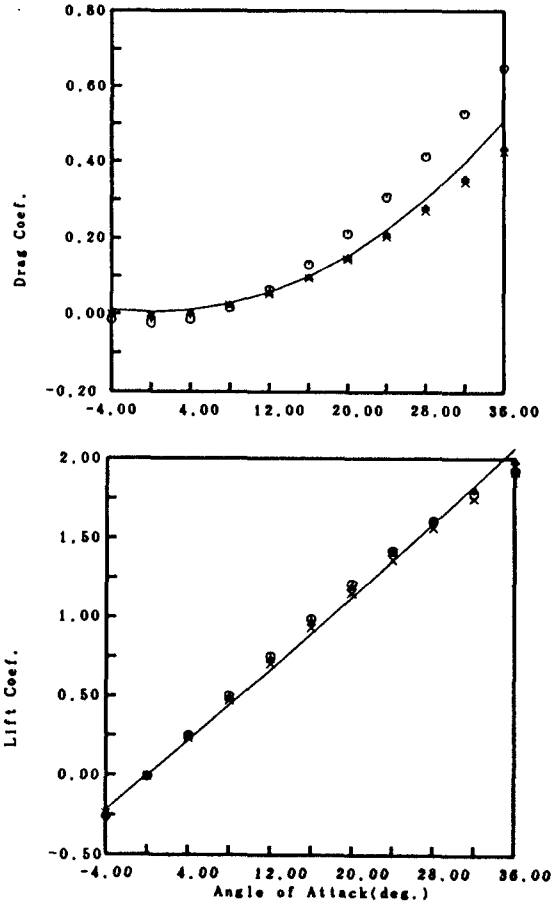
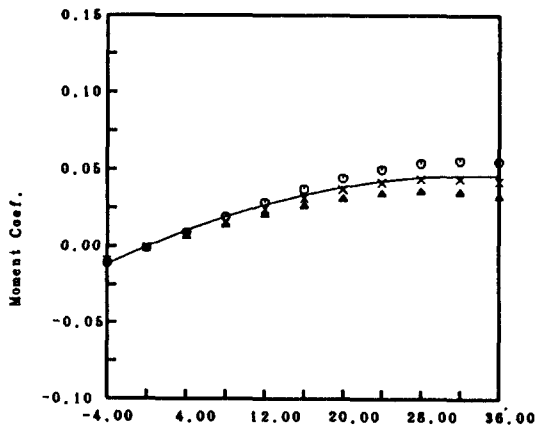


Fig. 14 Convergence test of DTMB rudder calculation(NACA 0015,  $a=1.5$ ,  $\lambda=0.45$ ,  $\Omega=11^\circ$ )

어느 정도 떨어진 곳에 위치한 면에 부착되어 있는 상태로 실험되었으며, 이러한 실험 결과를 본 연구의 계산 결과와 비교한 결과가 Figs. 14-17에 보여지고 있다.

Fig. 14는 표면 분할수에 따른 계산 결과의 수렴도를 조사한 것이다. 영각이  $10^\circ$  이내일 경우에는 분할수를 적게 하여도 실험 결과와 큰 차이가 없음을 알 수 있으나 영각이 커짐에 따라 차이가 나타남을 알 수 있다. 또한 양력 계수는 분할수에 상관없이 실험 결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있으나, 항력 계수 및 토크 계수의 경우에는 분할수에 따라 계산 결과에 큰 차이가 보임을 알 수

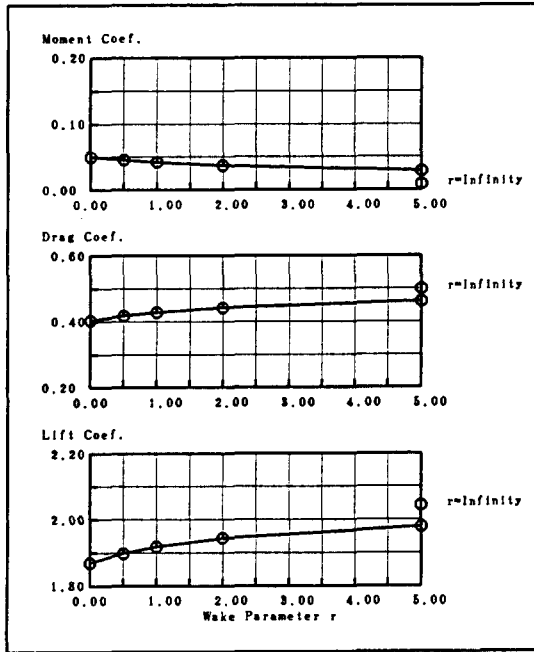


Fig. 15 Variation of hydrodynamic coefficients of DTMB rudder with wake parameter  $r$  (NACA 0015,  $a=1.5$ ,  $\lambda=0.45$ ,  $\Omega=11^\circ$ ,  $\alpha=36^\circ$ )

있다.

Fig. 15는 후류인자  $r$ 의 변화에 따른 계수들의 변화를 보여주고 있으며,  $r$ 이 커짐에 따라 토모크 계수는 약간 감소하지만, 양력 및 항력 계수는 약간 증가하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 16과 17은 각각 기하학적 가로-세로비가

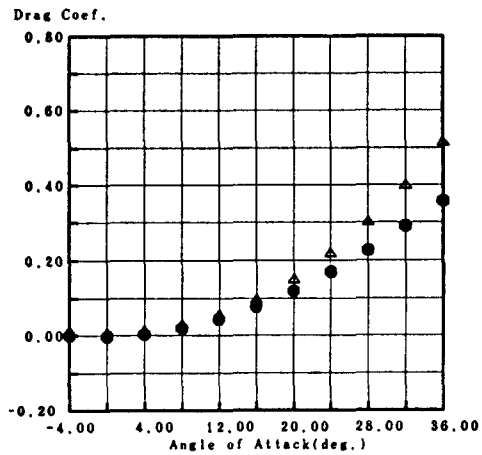
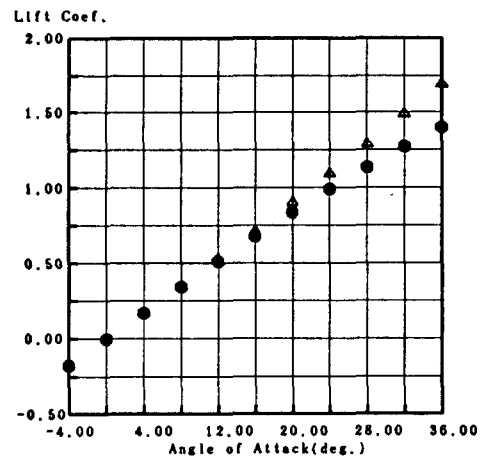
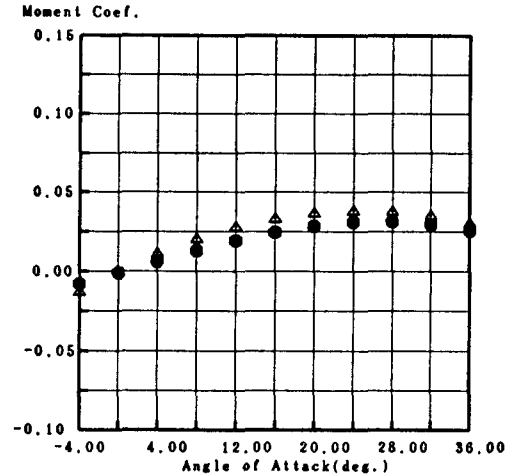
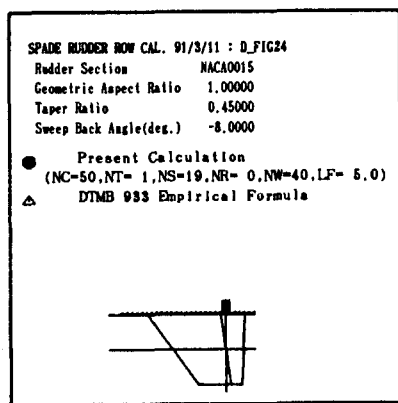


Fig. 16 Comparison of calculated results with those of DTMB empirical formula (NACA 0015,  $a=1.0$ ,  $\lambda=0.45$ ,  $\Omega=-8^\circ$ )

1.0, 1.5, 후퇴각은  $-8^\circ$  및  $0^\circ$ 일 때, 본 계산 결과와 실험식의 결과를 비교한 것이며, 역시 전반적으로 좋은 일치를 보여주고 있다.

계산경험에 의하면 양력 및 항력계수에 비하여 모멘트계수는 경험식과 잘 일치하지 않는데, 이는 현재의 코오드 방향 분할수(50)로는 앞날부근에서는 급격한 압력변화를 충분히 정확하게 표현하지 못하는데 그 원인이 있다고 생각된다. 또한 Ballance비가 25%인 관계로 압력의 중심점이 타 축부근에 있어서 상대적으로 작은 모멘트 값을 추정하여야 하는데도 그 어려움이 있는 것으로 생각된다.

한편, 본 방법으로 타의 성능을 계산함에 있어서 적용가능한 타의 기하학적 가로-세로비는 0.5이상인 것으로 생각되며, 이보다 작은 경우에는 뒷날뿐 아니라 물체의 끝쪽(Root 및 Tip 안면)에서 유출되는 후류면도 고려해 주어야 한다[11].

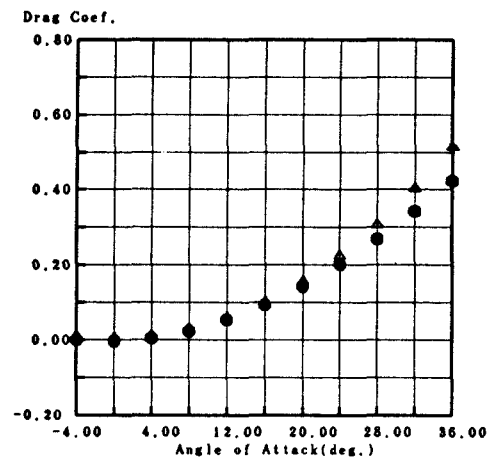
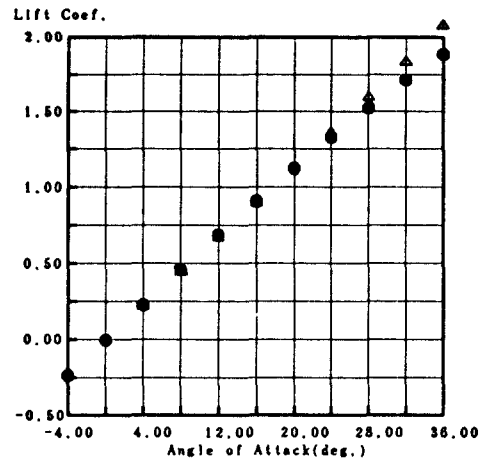
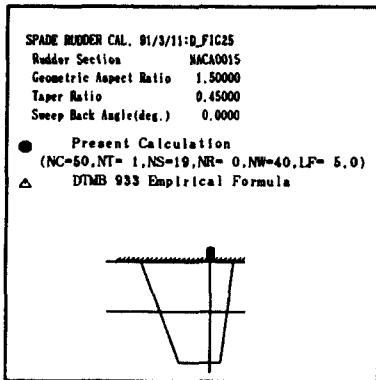
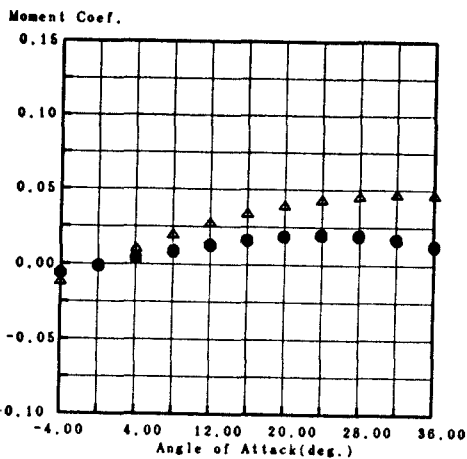


Fig. 17 Comparison of calculated results with those of DTMB empirical formula(NACA 0015,  $a=1.5$ ,  $\lambda=0.45$ ,  $\Omega=0^\circ$ )



### 5. 결 언

이상에서 단독타에 작용하는 동유체력에 관하여 간단히 살펴 보았다. 실제 선박에서 타에 작용하는 힘의 해석을 위하여는 많은 연구가 필요하다. 본 연구에서는 이를 위한 기초 연구로서 타가 단독으로 균일류중에 존재할 때 이 타에 작용하는 동유체력을 이론적인 방법으로 해석하여 보았다. 이상의 연구로부터 다음과 같은 결론을 유도할 수 있었다.

- (1) 본 연구에서 사용한 Panel Method에 의한

동유체력 추정 방법은 충분한 정도로서 실험 결과를 예측할 수 있으며, 특히 양력 계수의 경우 그 기울기를 상당히 정확하게 예측할 수 있다.

(2) 본 방법에 의하여는 영각이 커짐에 따라 나타나는 실속(Stall) 현상은 예측할 수 없으며 이의 예측을 위하여는 점성을 고려한 해석법이 요구된다.

(3) 후류 면의 형상은 물체에 작용하는 동유체력에 큰 영향을 미치지 않는다.

(4) 압력 Kutta 조건은 뒷날 및 물체의 끝 부분에서의 압력 분포에 영향을 미치지 않지만 그 크기는 그리 크지 않으며 통상적인 경우에는 2차원 조건을 적용하여도 충분한 정도로서 타에 작용하는 동유체력을 예측할 수 있다.

## 6. 후 기

본 논문은 과학 기술처의 1989년도 기본 연구 사업으로 한국 해사기술 연구소가 수행한 “타에 작용하는 유체력의 이론적 및 실험적 고찰”과제의 결과임을 밝혀 둔다.

## 참 고 문 헌

- [1] Lee, J. T., “A Surface Panel Method for the Analysis of Hydrofoils with Emphasis on Local Flows around the Leading and Trailing Edges”, *Proceedings of Seminar on Ship Hydrodynamics*, Seoul National University, May, 1988.
- [2] Lee, J. T., “A Potential Based Panel Method for the Analysis of Marine Propellers in Steady Flow”, MIT Ph. D. Thesis, July, 1987.
- [3] Kerwin, J. E. and et al., “A Surface Panel Method for the Hydrodynamic Analysis of Ducted Propellers”, *Trans. SNAME*, Vol. 95, 1987.
- [4] Newman, J. N., “Distribution of Sources and Normal Dipoles over a Quadrilateral Panel”, *J. of Eng. Math.*, Vol. 20, 1986.
- [5] Hess, J. L and Smith, A.M.O., “Calculation of Nonlifting Potential Flow about Arbitrary Three Dimensional Bodies”, *Douglas Aircraft Company Report No. ES40662*, 1962.
- [6] Clarke, R. W., “A New Iterative Matrix Solution Procedure for Three Dimensional Panel Methods”, *In 23rd Aerospace Science Meeting*, AIAA, Reno, Nevada, Jan. 1985.
- [7] Press, W. H. and et al., “Numerical Recipes”, *Cambridge University Press*, 1986.
- [8] Lamb, H., “Hydrodynamics”, *Cambridge University Press*, 6th Edition, 1932.
- [9] Whicker, L. F. and Fehlner, L. F., “Free stream Characteristics of a Family of Low Aspect Ratio, All-Movable Control Surfaces for Application to Ship Design”, *DTMB Report No. 933*, Dec. 1958.
- [10] 공인영, 김선영, “타에 작용하는 유체력의 이론적 및 실험적 고찰”, 해사 기술 연구소 연구 보고서 UDC629. 111, 1989. 12.
- [11] Price, W. G. and Tan, M., “A Preliminary Investigation into the Forces acting on Submerged Body Appendages”, Paper No. 13, *Proc. of ICSM*, 1987.