

익형에 발생하는 부분 캐비테이션 후연영역 유동장 특성 연구

문 철 진* · 김 시 영*

A Study on the Characteristics of End Region Flow Field for Partially Cavitating Hydrofoil

C. J. Mun, S. Y. Kim

Abstract

Most of the recent for the flow field hydrofoil in partially cavitating condition are the ones which are linearized, and the problem of cavity end region for hydrofoil is not verified. This paper deals with a study on characteristics of end region flow field for partially cavitating hydrofoil by using a characteristics of shear turbulence flow and nonlinear cavity flow theory.

The results obtained as follows:

- 1) Shear layer thickness is decreased gradually going to the end section of hydrofoil. When attack angle is large, it is appeared largely at the region of partial cavitation after its collapsing.
- 2) The fluctuation velocity of a second-degree relative direction have minimum value at the front of hydrofoil or at the end of hydrofoil. The difference for the validity of attack angle is appeared largely at the surrounding of x_c point.
- 3) The fluctuation velocity of transverse direction decrease from the maximum thickness of cavitation to the end of hydrofoil, but it undergoes largely the effect of pressure recovery. The difference is larger at the region of partial cavitation after its collapsing than at the of hydrofoil.
- 4) The distribution of Reynolds stress have maximum values at the region of partial cavitation after its collapsing and the end of foil, and the larger attack angle, the lager the distribution of value.

* 正會員, 釜山水產大學

기 호 설 명

- C : 익현의 길이
- C_f : 마찰계수
- C_j : 익형의 요소 중점을 나타내는 복소수 좌표
- i : 단위허수
- Im : 허수부분
- m_j : 소오스의 강도
- P : 기포주위의 압력
- P_∞ : 무한원방의 압력
- R_r : 실수부분
- R : 레이놀즈수($U_\infty C/\nu$)
- S : 익표면을 따르는 길이
- S_j : 익형요소의 복소수
- U : 익표면의 유속도
- U_∞ : 균일유속도
- v_n : 법선방향 유속도
- W : 하중계수
- α : 영각
- δ : 경계층두께
- δ^* : 배제두께
- r : 와강도
- ν : 동점성 계수
- σ : 캐비테이션수
- ρ : 유체밀도

1. 서 론

2차원 익형에 발생하는 부분 캐비테이션 주위의 유동장 해석에 대하여 발표된 연구는 대부분 선형이론¹⁻³⁾에 의한 것으로 「캐비테이션이 익전연으로 부터 발생한다」는 가정을 하지 않으면 익전연부에서 압력이 음의무한대로 크게 되고 캐비테이션이 전연에서 발생하지 않는 경우는 캐비테이션 두께는 실험치의 두배 이상으로 되는 불합리가 있다고 보고 되어 있다.⁴⁾

그리고 비선형이론에 의한 것으로 山崎·高橋⁵⁾ 西山·伊藤⁶⁾의 방법이 있지만 이들 모두 캐비테이션 두께를 0으로 하는 경계조건을 주어야 하기 때문에 두께가 존재할 때는 모순이 생기게

된다. 그리고 山口·加藤⁷⁾의 연구는 익과 캐비테이션 두께를 보다 엄밀히 고려하기 위해 캐비테이션 전연 위치를 적당히 가정하여 익과 캐비테이션 표면의 특이점을 분포시켜, 과도 흐름모델⁸⁾에 의한 자유유선현상을 반복계산으로 구하여 익표면의 경계층 계산을 한다. 한편 층류박리점 혹은 난류 천이점이 캐비테이션 전연에 일치하지 않는 경우는 그것을 새로운 캐비테이션 전연위치로써 계산을 반복하였다. 압력일정부보다 후류측에서는 기포의 붕괴방정식⁹⁾을 풀어서 전체의 캐비테이션 형상을 구하였다. 그러나 이들의 연구는 부분캐비테이션 특성에 절대적 영향을 미치는 캐비테이션 후연의 특성을 고려해 넣지 않고 있다. 캐비테이션 후연의 유동특성은 캐비테이션의 성장붕괴에 의하여 흐름내부의 유동은 전단류가 된다. 이러한 캐비테이션의 후류 유동모델을 해석함으로써 부분캐비테이션의 해석이 더욱 명확히 될 것으로 생각 된다. 따라서 본 논문에서는 山口·加藤의 연구를 토대로 하여 부분 캐비테이션 후류의 유동모델을 이용하여 그 영역의 전단층 두께, 종방향 교란속도, 횡방향 교란속도 및 레이놀즈 응력을 구하여 그 특성을 검토하고자 한다

2. 이론해석

2.1. 계산과정

좌표와 익모형을 설정하여 익과 캐비티의 표면을 미소한 선분으로 분할하고 그 위에 적당한 용출분포와 경계조건에 맞도록 분포시켜 과도흐름모델에 의한 캐비티 형상을 반복계산에 의해 구하였고, 캐비티 전연은 층류 박리점 혹은 난류천이점에 일치하도록 하고, 캐비티 후연에서는 기포의 붕괴방정식으로 전체의 캐비티 형상을 구하였으며, 붕괴영역 후연에서는 난류의 특성식들을 사용하여 그 특성을 조사하였다.

2.2. 좌표와 익모형

2차원 정상류를 가정하고 Fig.1과 같이 익의 수미선에 x 축, 익전연에서 수직하게 y 축을 잡고 익전후연의 x 좌표를 각각 0.1로 한다. 그림중의

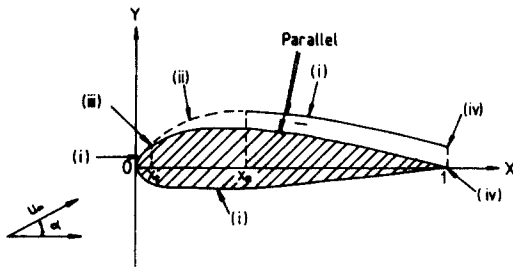


Fig. 1. Coordinate System and Cavitation Model.

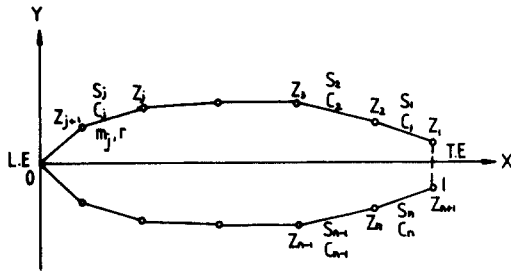


Fig. 2. Discretization of Boundary.

숫자는 경계조건을 나타내고 균일류 U_∞ 는 영각 α 로서 유입한다. 익표면의 경계를 Fig. 2와 같이 익후연상면→익전면→익후연하면의 순으로 n 개 선분으로 분할하고, 각점의 좌표를 (x_k, y_k) 라 하면,

$$Z_k = x_k + iy_k \quad (k=1, 2, \dots, n+1) \quad (1)$$

$$S_j = Z_{j+1} - Z_j \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

$$C_j = \frac{1}{2}(Z_{j+1} + Z_j) \quad (3)$$

이 된다.

그리고 각선분상의 중점에 불균일강도의 용출 분포 m_j , 각선분 전체에 균일강도의 와분포 r 를 분포시키면 임의점 Z 에 있어서 복소공역속도 $W(z)^{10}$ 는 다음과 같다.

$$W(z) = U_\infty e^{-i\alpha} + \frac{1}{2\pi} \sum_{j=1}^n m_j \frac{|S_j|}{S_j} l_n \frac{Z - Z_j}{Z - Z_{j+1}} + \frac{r}{2\pi i} \sum_{j=1}^n \frac{|S_j|}{S_j} l_n \frac{Z - Z_j}{Z - Z_{j+1}} \quad (4)$$

2.3. 경계조건

경계조건으로서는 아래의 것을 고려하여 山口

의 방법⁷⁾에 의해 각선분의 중점 C_j 에서 경계조건식을 만족하도록 한다.

i) 접선류 조건

Fig. 1의 실선부에는 흐름의 방향과 선분의 방향이 일치하도록 한다.

즉,

$$I_m\{W(c_j) \cdot S_j\} = 0 \quad (5)$$

이 성립한다.

ii) 압력일정 조건

Fig. 1의 점선부의 영역에서는 유속의 크기가 어떤 일정치 U_c 가 된다고 본다.

$$Re\{W(c_j) \cdot S_j / |S_j|\} = U_c \quad (6)$$

iii) 캐비테이션 전연 조건

캐비티는 익면의 접선방향으로 매끄럽게 발생한다고 보고 (5)식과 (6)식을 동시에 만족시키도록 한다.

iv) Kutta조건

익후연부에서 이틀 돌러싸는 익형의 상하면의 유속은 같다고 본다.

즉,

$$Re\{W(c_1) \cdot S_1 / |S_1|\} = Re\{W(c_n) \cdot S_n / |S_n|\} \quad (7)$$

이 된다.

이상 (5)~(7)식을 (4)식에 대입해서 각각 선분분할에서 만족시키도록 하고 $(n+1)$ 개의 미지수 m_j, r 에 관한 $(n+1)$ 개의 연립 1차방정식을 구하여 이를 풀어서 m_j, r 를 결정한다. 캐비테이션 수 σ 는 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$\sigma = \frac{P_\infty - P_v}{(1/2) \rho U_\infty^2} = \left(\frac{U}{U_\infty}\right)^2 - 1 \quad (8)$$

2.4. 자유유선 형상

(1) 초기단계

먼저 캐비테이션 두께를 0으로 하여 익표면을 선분분할 하고 경계조건을 만족하도록 m_j, r 의 크기를 (4)식에 의해 각선분의 중점에 있어서

x, y 방향의 유속 u_j, v_j 를 구하고 그값으로 부터 기울기를 계산한다, 다음에 각선분의 x 좌표는 그대로 두고 그 기울기가 v_j/u_j 가 되도록 새로운 구한다. 이것을 초기단계의 자유유선 형상으로 한다.

(2) 제 r 단계 ($r=1, 2, 3, \dots$)

제 $(r-1)$ 단계에서 얻어진 자유유선 형상은 2.2의 경계조건 하에서 u_j, v_j 을 구하고 (1)과 같은 순서로서 새로운 자유유선형상을 구한다. 이 경우 다음단계에는 이 자유유선 형상을 그대로 대입하지 않고 $(r-1)$ 단계에서 얻어진 것을 다음 식에 의하여 새로운 형상을 유선을 구한다. 즉,

$$y_{fr}(x) = W_y' y_{fr}(x) + (1-W)y_{fr-1}(x) \quad (9)$$

여기서, 수렴의 판정은 유속일정부 전체세분의 법선방향유속 v_n 이 다음 식이 만족되도록 한다.

$$v_n < \delta_1 u_\infty \quad (10)$$

2.5. 캐비테이션 전연위치

이상의 방법으로 자유유선 형상이 구해지

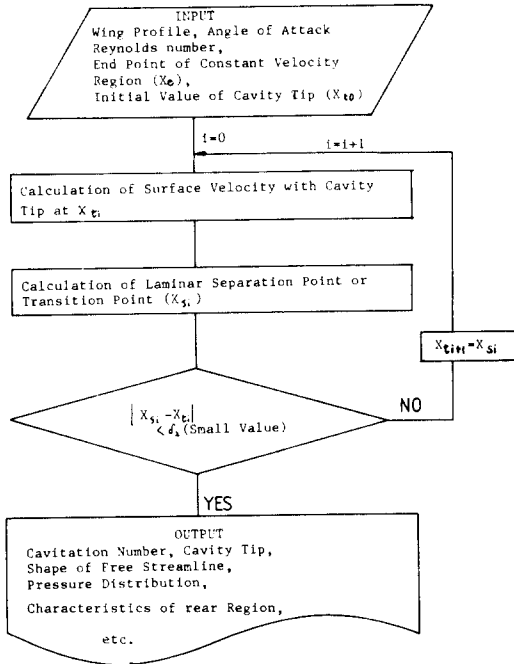


Fig. 3. Flow Chart of Iterative Calculation for Cavitating Hydrofoil.

만, 이것만으로 x_c 에 대해서 x_c 를 구할 수가 없고 그 값에 따라서 해가 변하게 된다. 그리고 캐비테이션 전연은 층류박리점 혹은 난류 전이점에 일치하는 것으로 알려져 있으므로¹¹⁻¹⁵, Fig. 3과 같은 반복 계산에 의해 캐비테이션 전연의 위치를 층류박리점 혹은 난류 전이점에 일치되도록 한다.

2.6. 캐비테이션 후연위치

캐비테이션 후연부에서는 캐비테이션 이미세한 기포로 분열되어 붕괴되고 있는 것으로 생각되어 지므로 $x \geq x_c$ 영역에서는 구형기포의 성장 붕괴에 관한 Reyleigh⁹의 방정식

$$R' \frac{d^2 R'}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR'}{dt} \right)^2 = \frac{P_b - P}{\rho} \quad (11)$$

을 수치적 계산에 의하여 $R'=0$ 으로 되는 경우를 캐비테이션 후연으로 한다. 이 경우 기포 속도와 기포주위의 압력은 자유유선 선상의 값을 이용한다. 즉 x 에 있어서 자유유선상의 속도를 u' , 압력 계수를 C_p , 기포벽의 압력을 P_b (증기압)과 같다고 하여 (11)식을 무차원화시키면

$$2u^2 R \frac{d^2 R}{ds^2} + 2u \frac{du}{ds} R \frac{dR}{ds} + 3u^2 \left(\frac{dR}{ds} \right)^2 = -\rho - C_p \quad (12)$$

가 되고 이를 Runge-Kutta의 방법¹⁶에 의해 dR/ds 를 구한다. 여기서 S 는 $x=x_c$ 에서 표면거리를 C 로서 무차원화한 것이다. 그리고 $x_c \leq x \leq l_{max}$ 영역에서는 기포의 포락 선을 작도하여 그것을 Fig. 4와 같이 캐비테이션 형상으로 하고 그 후연위치를 $x=l_{max}$ 으로 한다.

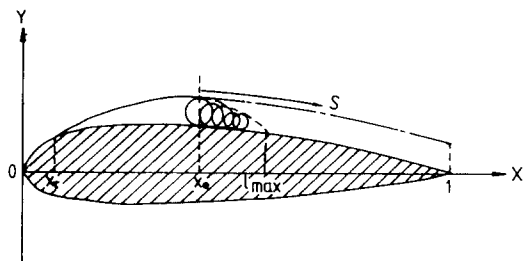


Fig. 4. Modeling of Cavity Collapsing Region.

2.7. 익단면 형상좌표

익단면 형상좌표는 다음식과 같이 Camber 및 익두께의 최대위치에서 전후영역으로 나누어 표시한다.¹⁷⁾

(1) Camber 곡선

$$\text{전연부 } Y_{cf} = A_1x + A_2x^2 \quad (13)$$

$$\text{후연부 } Y_{ca} = B_0 + B_1x + B_2x^2 + B_3x^3 \quad (14)$$

(2) 익두께 곡선

$$\text{전연부 } Y_{th} = C_0\sqrt{x} + C_1x + C_2x^2 \quad (15)$$

$$\text{후연부 } Y_{ta} = D_0 + D_1x + D_2x^2 + D_3x^3 \quad (16)$$

위의 식을 최소사승법을 사용하여 초기익형에 대해서 구한다. 그리고 익후연부를 3차식으로 한 것은 압력회복을 얻기위해 필요한 곡선을 주기 위한 것이고 익두께 곡선전연부에 2승근을 넣어서 곡율을 고려해 주었다.

익두께 분포는 전연으로 부터 1.25% 이후에서 부압의 피크를 주어 부분캐비테이션 발생을 유도하였다. 이러한 이유는 이 부분의 곡율이 층류경계층의 박리 및 난류천이와 가장 관계가 있다고 생각되기 때문이다.

2.8. 캐비테이션 후연특성 계산¹⁸⁾

앞절까지 계산된 익형의 부분캐비테이션의 결과에 대하여 다음의 난류의 특성식들을 사용하여 각각의 특성을 구한다.

(1) 난류전단층 두께

전단층 두께로서는 (17)식과 같이 경계층의 배제 두께에 해당하는 량을 구하는 식을 사용하여 계산한다.

$$\delta^* = \frac{1}{U} \int_0^{\delta} (U - \bar{u}) dy = \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{\bar{u}}{U}\right) dy \quad (17)$$

여기서 U 는 경계층 외연의 속도이고 \bar{u} 는 평균 속도이다.

(2) 종방향 교란속도

종방향의 교란속도 분포는 (18)식에 의하여 구하였다.

$$\sqrt{\bar{u}^2} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \{U(x_i, y_i) - \bar{u}(y_i)\}^2} \quad (18)$$

여기서 M 은 분할 층수이다.

(3) 횡방향 교란속도 분포는 (19)식에 의해 구해진다.

$$\sqrt{\bar{v}^2} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M a(x_i, y_i)^2} \quad (19)$$

(4) 레이놀즈 응력

레이놀즈 응력은 (20)식으로 부터 구할 수 있다.

$$\bar{u}\bar{v} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \{U(x_j, y_j) - \bar{u}(y_j)\}v(x_j, y_j) \quad (20)$$

3. 계산결과 및 고찰

Fig. 5에 나타낸 바와 같이 초기익형으로서 NACA 4412익형을 사용하여 계산된 전반부가 타원이고 상하비대칭인 익형을 사용하여 2.3 및 2.4의 반복계산을 행하였다. 익 및 캐비테이션면의 분할방법으로서는 각선분의 정점 Z_k 의 x 좌표인 x_k 가 익 및 캐비테이션의 전후연 부근에 집중하도록 다음식과 같이 하였다.

i) $0 \leq x \leq x_t$

$$x_{k1} = \frac{x_t}{2} \left\{1 - \cos \frac{\pi(k_1 - 1)}{M_1}\right\} \quad (19)$$

여기서 $k_1 = 1, 2, \dots, M_1$ $M_1 \geq 7$

ii) $x_t \leq x \leq x_e$

$$x_{k2} = x_t + \frac{x_e - x_t}{2} \left\{1 - \cos \frac{\pi(k_2 - 1)}{M_2}\right\} \quad (20)$$

여기서 $k_2 = 1, 2, \dots, M_2$ $M_2 \geq 7$

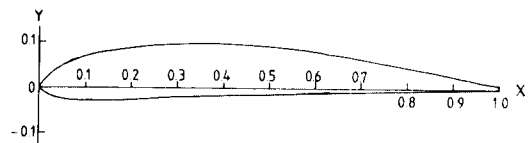


Fig. 5. The Shape of Wing Profile.

iii) $x_e \leq x \leq 1$

$$x_{k3} = x_e + \frac{1-x_e}{2} \left\{ 1 - \cos \frac{\pi k_3}{M_3} \right\} \quad (21)$$

여기서 $k_3 = 0, 1, 2, \dots, M_3, M_3 \geq 7$

그리고 선분의 총수 n 는 (22)식과 같이 나타내며

$$n = 2(M_1 + M_2 + M_3) - 1 \quad (22)$$

$n \approx 60$ 이 되도록 M_1, M_2, M_3 , 을 취했다.

또 2.3의 반복계산에서 수렴성은 W 값을 0.5, 1.0의 2가지 값으로서 조사했으나 값 0.5쪽이 수렴이 빨리 $W=0.5$ 로서 계산을 행하였다. 여기서 (10)식의 δ_1 을 1×10^{-3} 으로 수렴 판정하였다. 그리고 캐비테이션 전연위치의 계산은 Fig. 3과 같이 반복계산에 의하여 수행하였다. 총류박리점은 계산은 Thwaites의 방법¹⁴⁾, 난류전이점의 계산은 Oossanen의 방법¹⁵⁾에 의하여 행하였으며 이때의 레이놀즈수는

$$R_{e,c} = U_\infty c / \nu = 4.0 \times 10^6 \quad (23)$$

이며, Fig. 3의 수렴판정치 δ_2 는 0.666×10^{-3} 으로 하였다.

여기서 δ_2 를 작은 값으로 취하면 x_i 의 수렴치 폭은 작아지지만 앞의 계산에서 값이 충분한 정도가 얻어졌다고 생각한다.

Fig. 6은 영각의 변화 및 코오드 길이에 따른 용출분포 m_j 의 경향을 나타낸 것이다. 익전연으로 부터 다소 증가하는 경향을 보이다가 익후연 쪽으로 갈수록 감소한다. 이것은 익후연부에서 압력회복이 커짐을 알 수 있다. 그리고 영각의 측면에서 $\alpha = 5.2^\circ, 6.2^\circ, 7.2^\circ$ 3가지의 경우에 대해서 캐비테이션 붕괴영역에서 부터 익현장에

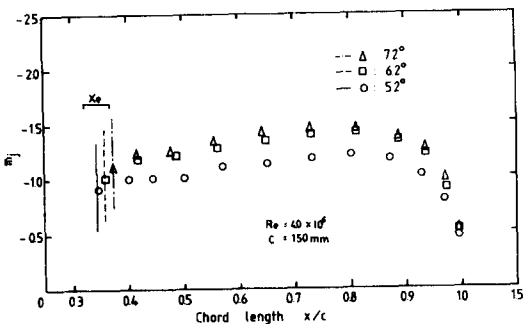


Fig. 6. Distribution of Source for Attack Angle.

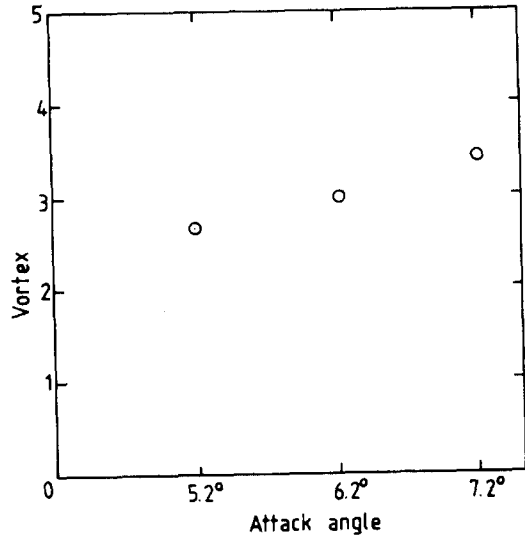


Fig. 7. Distribution of Vortex for Attack Angle.

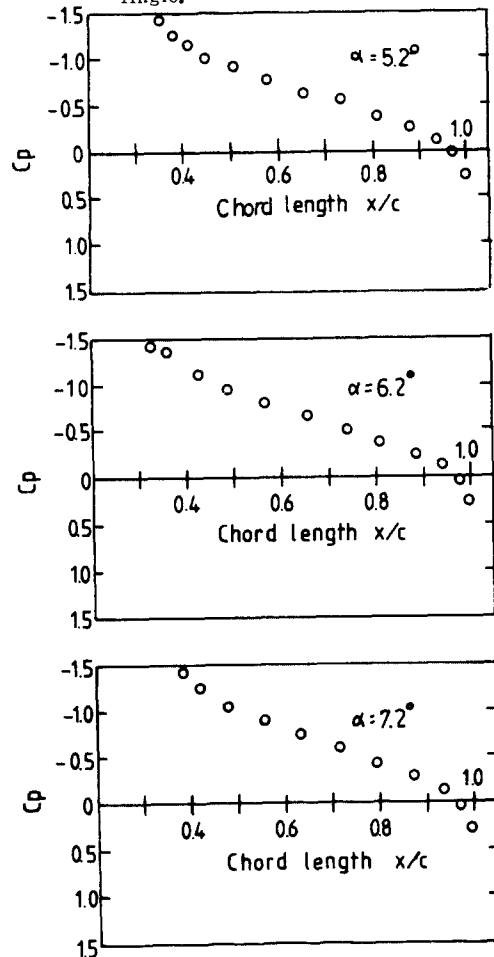


Fig. 8. Pressure Distribution for Attack Angle.

따라서 분포경향을 보면 증가함에 따라 그 값이 크게 나타났으며 영각이 7.2° 값이 가장 큰 값을 보이고 있다.

Fig. 7은 3가지 영각의 변화에 대한 와 r 의 값을 도시한 것이다. 영각이 클수록 r 의 값도 큰 값을 보이고 있으며 이는 후류영역의 증가에 의한 와류의 증가를 의미한다.

Fig. 8은 익현장에 따른 압력분포 $-C_p$ 의 변화를 영각에 대하여 나타낸 그림이다. 3가지 영각의 경우 모두 비슷하게 나타내고 익후연부에서는 압력이 회복됨을 보인다. 이것은 익좌표의 (14), (16) 식에서 압력회복을 얻기 위해서 마지막 항에 3차식을 준 결과와도 잘 일치하고 있다.

Fig. 9는 영각의 변화 ($\alpha=5.2^\circ, 6.2^\circ, 7.2^\circ$)에 대한 전단층두께 δ^* 의 값을 표시하고 있는데 캐비테이션 붕괴 영역에서부터 익후연으로 갈수록 그 값이 감소하고 있고, 영각이 증가할수록

층류박리점 또는 난류천이점이 앞으로 당기므로 난류 영역이 증가하여 전단층 두께가 더욱 두꺼워진다. 갈수록 속도의 감소 및 압력의 증가가 생겨 전단층의 두께에 대한 영향이 크다.

Fig. 10은 수치 계산에서 결과로부터 익현장에 대한 종방향 교란속도 분포를 나타내었다. 교란속도분포는 캐비테이션 붕괴영역보다 익후연쪽에서 더욱 높게 나타났으며 거의 평균속도에 가까운 지점인 $0.73x/c$ 근방에서는 가장 큰 값을 보이고 있다.

Fig. 11은 익현장에 대한 횡방향의 교란속도 분포를 나타내었다. 캐비테이션 붕괴 영역에서부터 익후연으로 갈수록 $\alpha=5.2^\circ, 6.2^\circ, 7.2^\circ$ 3가지 모두 전단층 두께에 상사적으로 비례하여 감소함을 나타내고 있다. 이것은 난류영역에서 익후연으로 갈수록 속도가 감소하는 것에 크게 영향을 받음을 알 수 있다.

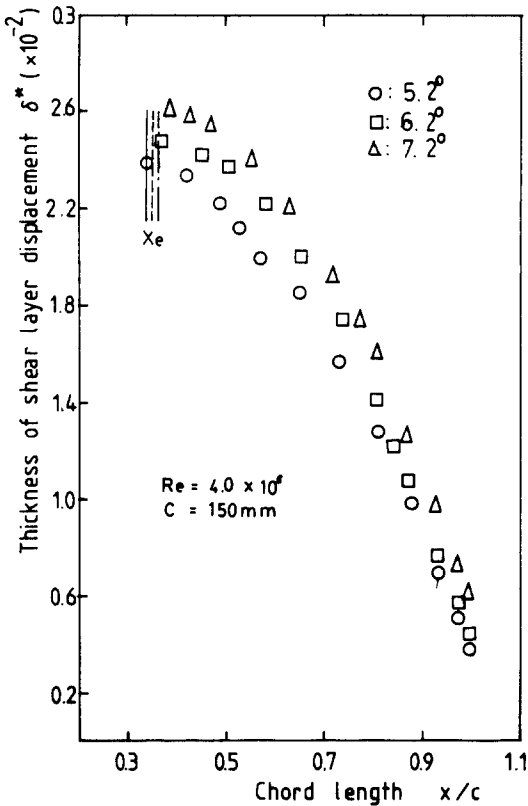


Fig. 9. Thickness of Shear Layer for Turbulence.

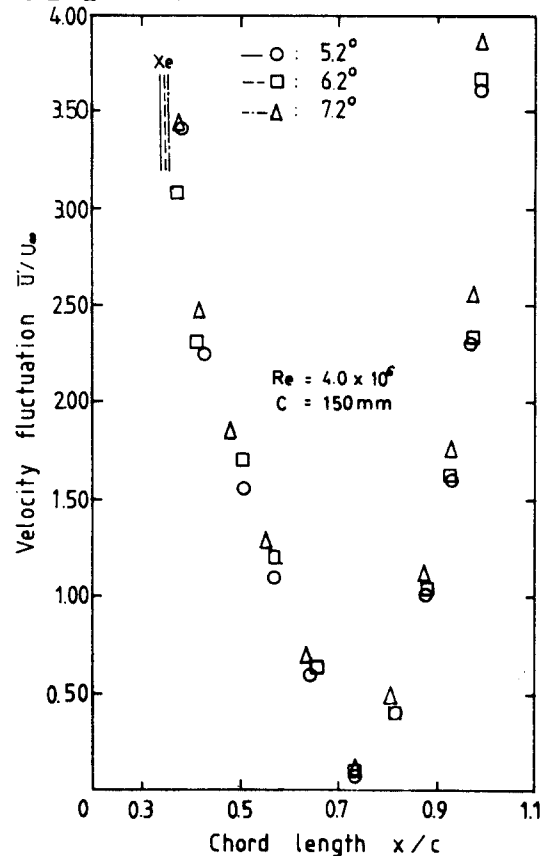


Fig. 10. Distribution of Length Turbulence Velocity $\frac{u'}{U_\infty}$.

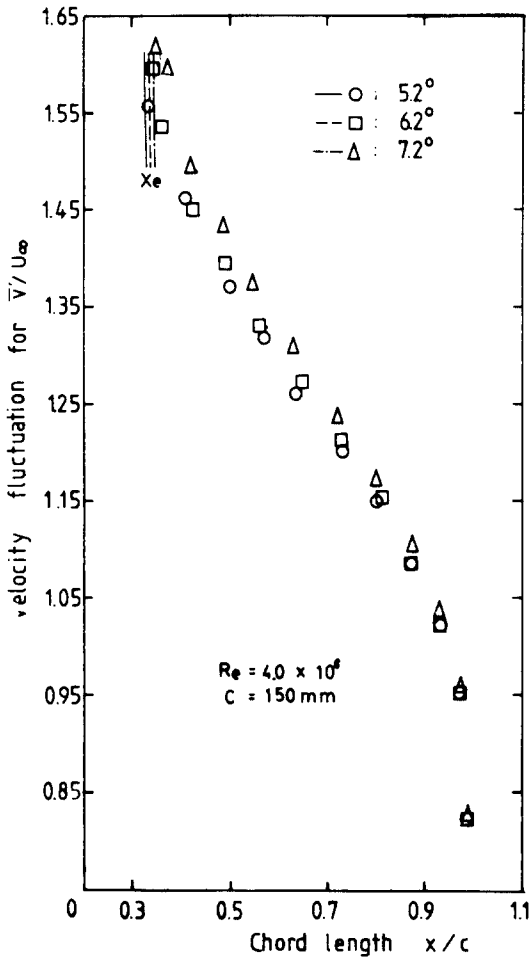


Fig. 11. Distribution of Transverse Turbulence Velocity \bar{v}/U_∞ .

Fig. 12는 레이놀즈 응력을 익현장에 대하여 나타낸 그림으로 캐비테이션 붕괴 직후 영역과 익후연에서 최대값을 보이고 영각의 변화에 대하여는 영각이 클수록 그 값의 분포가 크게 나타났다.

4. 결 론

이상으로 부터 캐비테이션 후류부($x \geq X_c$) 영역의 전단층 두께, 종방향 교란속도, 횡방향 교란속도 및 레이놀즈 응력을 계산한 결과 그 특성은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 전단층 두께는 익 후연부로 갈수록 차차 감소하는 경향을 보이고 입사 영각이 클

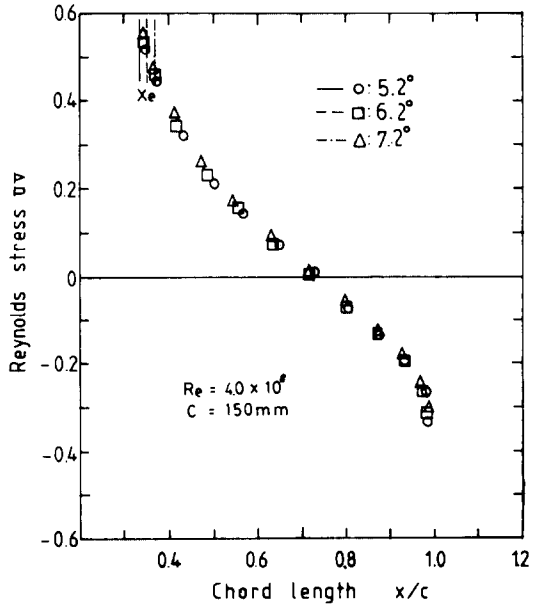


Fig. 12. Distribution of Reynolds Stress.

수록 두꺼우며 그 차이는 부분 캐비테이션 붕괴 직후 영역에서 크게 나타났다.

- (2) 종방향 교란속도는 l_{max} 점 직후 부근 및 익 후연 끝에서 매우 큰 값을 보이며 입사각이 증가할수록 x_c 점 부근에서 그 값의 차이가 가장 크게 나타났다.
- (3) 횡방향의 교란속도는 캐비테이션 후연으로부터 익 끝쪽으로 갈수록 감소하는 경향을 보이며 익 후연에서 압력의 회복에 따른 영향이고 각도의 증가에 대하여 익 후연 보다도 캐비테이션 붕괴 직후의 영역에서 큰 차이가 있었다.
- (4) 레이놀즈 응력의 절대치는 캐비테이션 붕괴 직후 영역과 익후연에서 최대값을 보이고 영각에 따른 변화는 큰 차이가 없었다.

참 고 문 헌

- 1) Geurst, J.A: Linearized theory for partially cavitated hydrofoils, Int Shipbuilding progress, Vol. 6, No. 60(1959), pp. 369~384.
- 2) 花岡達郎: 任意翼型のキャピテーション流場の線型理論(その3・部分空洞の解法) 日本造船學會論文集, Vol. 119(1966).

- 3) 西山哲郎, 伊藤惇: 特異點法による部分空とう
翼の流れ場の基礎式とその解法(第1報, 二次元
單獨翼) 日本機械學會論文集(第2部), Vol. 43,
No. 370(1977).
- 4) SR174研究資料 No. 320(1977).
- 5) 山崎正二郎, 高橋通郎: 特異點分布法を用いた
二次元厚翼の部分洞の解法, 日本造船學會論
文集, Vol. 146(1979).
- 6) 西山哲郎, 伊藤: 特異點法による部分空とう
翼の流れ場の基礎式とその解法(第5報, 反りお
よび厚みの大きい單獨翼) 日本機械學會論文集
(B編) Vol. 47, No. 424(1981).
- 7) 山口一, 加藤洋治: 翼型に發生する部分キャ
ビテーションの非線形理論, 日本造船學會論文集
Vol. 152(1983).
- 8) Wu, T. Y: A wake model for free-stream-
line flow theory (Part.1 Fully and partially
developed wake and cavity flows and cavity
flows paston oblique flat plate, J. Fluid
Mech, Vol. 13 (1961).
- 9) 加藤洋治: キャビテーション, 槇書店, 1979,
pp. 24~25.
- 10) Hess, J.L. and Smith, A.M.O: Calculation
of potential flow about arbitrary bodies,
Progress in Aeronautical Sciences, Vol. 8
(1966).
- 11) 山口一, 加藤洋治: 翼型前縁形状のスーパーキ
ャビテーション特性に對する影響, 日本造船學
會論文集, Vol. 149(1981).
- 12) Arakeri, V.H, and Acosta, A.J: Viscous
effects in the inception of cavitation on
axisymmetric bodies, J. Fluid Engineering,
Trans. of ASME. Vol. 95(1973).
- 13) Casey, M. V: The inception of attached
cavitation from laminar Separation bubbles
on hydrofoils, Conference on Cavitation,
Edinburgh (1974) pp. 9~16.
- 14) Meulen, J. H. J. vander: Boundary layer and
cavitation studies of NACA 16-012 and NACA
4412 hydrofoils, 13 th Sym. on Naval Hyd-
rodynamics, H-5, 1980.
- 15) Oossanen, P. van: Method for the assessment
of Cavitation performance of maropellers, Int.
Shipbuilding progress, Vol. 22. No. 254(1979),
pp. 3~33.
- 16) 坂野光弘: FORTRANによる數値計算法入門,
pp. 159~165.
- 17) 田岡治賢, 加藤洋治, 山口一: プロペラキャ
ビテーション發生範圍の推定法, 日本造船學
會論文集, Vol. 150(1981).
- 18) 徳永宏, 安井良次: 渦糸モデルによる非定常二
次元せん断亂流の數値解析, 日本機械學會論
文集, Vol. 50(1981).