

수중익 경계층의 천이영역에 미치는 표면조도의 영향

문 철 진* · 김 시 영
부산수산대 대학원* · 부산 수산대학교
(1993년 9월 27일 접수)

Surface Roughness Effects on Boundary Layer Transition Region for Hydrofoil

Chul - Jin MOON* and Si - Young KIM

*Graduate School, National Fisheries University of Pusan.
National Fisheries University of Pusan
(Received September 27, 1993)

There has been studied a lot of two dimensional hydrofoil sections for the boundary layers. This paper suggests that the plaiable roughness effects on boundary layer transition region of suction side for NACA 4412 hydrofoil sections provided by auxieiry shape factor and lag-entrainment effects. These results show that the laminar sepration, transition and end of transition of the boundary layer due to pitting roughness effects, to the foil Reynold's number as well as to the angle of attack were delayed a little. And comparisons with valuable the other calculations and measurements show qualitative agreements.

서 론

선박용 프로펠라 단면이나 방향타의 단면형상, 그리고 각종 수차 및 펌프 등의 유체기계에 2차원 익형상이 많이 사용되고 있다. 이렇게 사용되는 익형의 종류는 그 사용 목적에 따라서 아주 다양한 형상으로 개발되어 있으며, 특히 선박용 프로펠라 단면에 사용되는 익형상은 그 성능의 증대를 위해서 변화하는 선미의 반류 등, 운전되는 유동의 조건하에서 날개 표면의 유동 특성에 대한 규명이 필수적이어서, 이에 관하여 국내외적으로 많은 연

구^{1)~4)}가 이루어져 왔다. 그리고, 익형상의 초기 설계, 기계가공 및 운항환경에 의하여 달라지는 표면 형상, 그리고 부분, 초월 캐비이션의 붕괴에 의한 표면 침식, 그리고 운항중 해수에 의한 부식으로 표면 거칠기가 증가한다. 따라서 이러한 여러가지 요인에 의하여 익형 표면의 경계층 특성이 변화하고, 그것에 상응하는 만큼의 익형상 효율도 변화하며 그것을 구체적으로 고려하여 추진효율을 구하는 것이 중요하다. 또, 익표면에 발생하는 경계층은 일반적으로 익형이 임의의 입사각을 가지는 점성 유동장 내에 위치하고, 반류의 영향도

이므로 익형의 정체점으로부터 익형상의 표면을 따라 발달하는 층류 경계층이 증가하는 압력 기울기에 이기지 못하고 층류박리 혹은 난류 천이를 일으켜서 불안정한 전단층 유동으로 되고, 이것이 캐비테이션을 일으키는 발생요인이 되거나, 이것으로 인하여 난류 경계층으로 천이하여 난류 박리하여 재부착하거나 그대로 박리된 상태에서 난류 운동장으로 되어 버리는 경우등, 여러 유동 형태로 변화한다. 익형상의 선단부근에 발달하는 층류박리, 난류천이, 천이박리포 및 난류 박리등에 미치는 익형상의 영향도 많이 알려져 있으며, 이에 관련한 연구로서 Eppler⁵⁾이 캐비테이션의 초기발생 조건이 되는 층류 박리의 지연을 위하여 부압의 급증가를 억제하여 최저 임계속도를 줄이고 익후연의 압력 회복부영역을 확장한 여러가지의 익형상을 개발하였으며, Mullen⁶⁾은 NACA 16-012와 NACA 4412 익형에 대하여 익형상과 점성의 영향을 규명하는 관점에서 발생하는 여러가지 형상의 캐비테이션을 보고하였다. 그리고 Yamaguchi⁷⁾은 익전연부에서 층류 박리포의 발생과 난류 박리를 최대로 지연시키고, 동시에 Eppler⁵⁾의 익설계 이론에 합당하며, 익형상의 표면의 영향을 무시하고, 캐비테이션 초기발생 조건을 억제하는 새로운 익형상을 개발하였다. 또 Baubeau⁸⁾은 초기의 익형상 표면에 거칠기 영향이 없는 경우의 NACA 16-102와 NACA 4412 익형에 대하여 경계층의 층류 박리, 난류천이 및 난류박리등을 레이놀즈수, 영각의 변화에 대하여 경계층의 거동을 조사하였다. 이러한 결과들을 볼 때 경계층의 거동이 익형상의 표면에 발생하는 캐비테이션, 또는 이것에 직접적인 원인이 되는 층류박리, 혹은 난류 천이에 미치는 요인이 아주 중요한 것임을 잘 설명하고 있다. 특히 양력 증가에 미치는 요인은 익형상 뿐이 아니고, 표면의 거칠기 영향이 경계층의 특성 변화에 미치는 요인의 분석 및 조사도 매우 중요하다고 생각된다.

그러므로 본연구에서는 익표면 경계층이 발달하여가는 과정에서 층류박리, 층류박리포 및 난류 천이에 미치는 표면 거칠기의 영향을 고찰하고자

하였다. 이 영향을 분석하기 위하여 먼저 Yamaguchi의 방법⁷⁾에 의하여 유선 형상으로부터 구해진 속도 분포를 이용하여 익형표면의 경계층 변화를 구하였다. 이를 구하기 위하여 표면 거칠기의 특성식을 Clauser의 거칠기 함수와 Cole의 Wall & Wake의식, 그리고 Head의 Entrainment 식에 부가 형상보조 계수식의 형태로 고려하여 계산하였다. 그리고 거칠기의 형상으로서는 여러가지가 있으나 운항중에 익형상의 표면에 생성되는 해수 침식에 의하여 변화하는 표면의 영향에 대한 실험식⁸⁾을 이용하였다. 그리고 계산 응용으로서 NACA 4412 비대칭 수중익 표면 주위 경계층 변화에 대하여 층류 박리, 난류천이 그리고 천이완료의 계산결과를 구하고 그 값들을 표면 거칠기의 영향 관점에서 검토하고, 또 거칠기 영향이 무시된 경우와 같은 조건의 보고된 계산 및 실험결과 자료들과도 비교검토하여 본 연구의 계산 방법으로서도 표면 거칠기의 영향을 규명할 수 있다는 것을 보이고자 하였다.

기본 계산

1. 포텐셜 및 경계조건

2차원 수중익 주위의 유속 계산은 Yamaguchi의 계산방법의 YAMSN 코드⁷⁾를 수중익형상의 계산에 적합 하도록 수정한 계산 코드⁴⁾를 사용하였다. 상세한 이론수식 및 계산방법은 문헌^{4), 7), 11)}에서 상세히 알수 있으며 2차원 NACA 4412 익형상에 대한 경계층 계산을 수행하기 위하여 Fig. 1과 같은 익형상의 둘레 유동을 생각하였다.

먼저 익표면을 분할한 각요소 선분 중점에 용출강도 m_j 및 보오텍스 강도 γ 를 분포시키면 임의의 선분요소상의 복소점 $z = x + iy$ 에서의 공액 복소속도, $\omega(z)$ 는 Fig. 2의 좌표를 생각하여 다음과 같이 쓸수 있다.

$$\omega(z) = Ue^{-i\alpha} + \frac{1}{2\pi} \sum_{j=1}^n m_j \frac{|s_j|}{s_j} \ln \frac{z-z_j}{z-z_{j+1}}$$

$$+ \frac{\gamma}{2\pi} \sum_{j=1}^n \frac{|s_j|}{s_j} \ln \frac{z-z_j}{z-z_{j+1}} \quad (1)$$

여기서, a, s_j, c_j 그리고 z_j 는 각각 받음각, 각 선분요소길이, 중점좌표및 각요소의 절점 좌표이다. 그리고, 경계조건으로서 다음의 Fig. 1에서 영역(1)에서는 접선류조건, 영역(2)에서는 압력 일정조건, 영역(3)에서는 좌단은 접선류조건 우단은 압력 일정조건, 그리고 익후연(4)에서 kutta의 조건을 만족하도록 하였으며 그식은 각각 다음과 같다.

$$I_m \{\omega(c_j) \times s_j\} = 0 \quad (2)$$

$$-R_e \{\omega(c_k) \times s_j / |s_j|\} = U_c \quad (3)$$

$$-R_e \{\omega(c_1) \times s_1 / |s_1|\} = R_e \{\omega(c_n) \times s_n / |s_n|\} \quad (4)$$

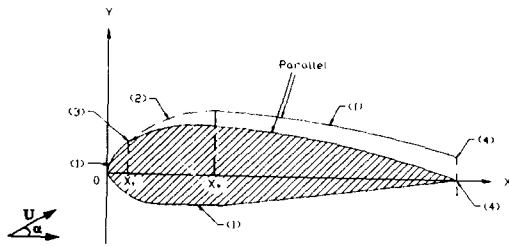


Fig. 1. Coordinate system.

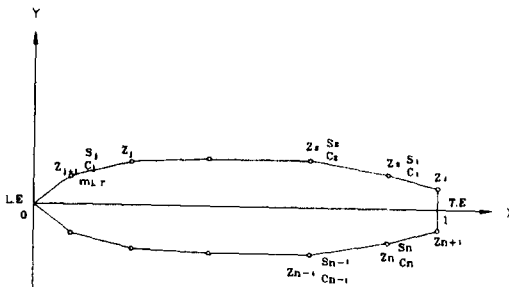


Fig. 2. Discretization of boundary

2. 유선 형상 계산

식(1)의 포텐셜 유동 계산으로부터 점성 영향에 의한 배제두께를 고려하기 위하여 최종의 유선 형상을 계산하였다. 초기의 유선형상은 배제두께를 0으로 하여 식(1)및 경계조건 (2)와 (3)을

만족토록하는 포텐셜 속도를 구하고, 이것으로부터 경계층의 초기 배제 두께를 구하여, 이값을 고려한 용출 m_j 및 보오텍스 γ 를 재계산하여 새로운 유선 형상을 계산한다. 이렇게 반복함으로써 유선간의 변화값이 10^{-3} 의 수렴값 범위내의 최종 유선을 구하고 그 값으로부터 경계층 계산을 위한 익형 표면의 유속을 계산한다.

3. 경계층 계산

층류경계층은 Thwaite's의 방법에 의하여 계산하였고, 난류경계층은 Karman의 적분방정식과 Head의 Entrainment 방정식을 이용하였다. 거칠기 영향을 경계층의 계산에 고려하기 위하여 Clauser의 거칠기 함수식을 마찰계수 C_f 와 Entrainment 식에 고려 하였다. 거칠기 형상은 해수 침식의 경우로서 균일 입자의 금강사(연마용 탄화규소 : carborundum)를 균일하게 도포시켜 행한 표면 거칠기의 실험 결과를 다음의 실험식¹²⁾을 이용하였고, 이때의 입자 평균거칠기 $38\mu\text{m}$ 로 하였다.

$$\frac{\Delta U}{u_o} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{hu_o}{\nu} \right) - 3.37 \quad (5)$$

여기서 $\kappa, h,$ 그리고 u_o 는 각각 von Karman 상수, 거칠기 평균높이, 그리고 점성 마찰속도이다. 층류 박리의 판정은 Thwaites의 방법을 이용하였으며, 난류 천이 판정은 천이판정에 관한 Oossanen의 임계 레이놀즈수 R_{eth} 식을 사용하였으며 그 식은 다음과 같다.

$$R_{eth} = 1.174(1 + 22400/R_s)R_s^{0.46} \quad (6)$$

여기서, R_s 와 R_{eth} 는 각각 익표면 임의의 점에서 레이놀즈수와 운동량 모멘트 두께에 의한 레이놀즈수이다. 그리고 천이완료 지점을 'Intermediate method⁸⁾에 의한 간헐도 계수(Intermittency Factor) γ 를 이용하였으며, 다음식과 같은 γ 의 값이 0.99 되는 위치로 하였다.

$$\gamma = 1 - \text{Exp} \left[-4.5 \left(\frac{\theta}{\theta_r} - 1 \right) \right] \quad (7)$$

여기서, θ 와 θ_w 는 각각 익형 표면의 임의의 점과 천이점에서의 운동량 모멘트 두께이다. 그리고, 난류 경계층의 박리는 $H=H_{sep}$ 되는 위치로 하였고, 그식¹⁴⁾은 다음과 같다.

$$H_{sep} = 1 + \frac{1}{1 - \frac{\delta^*}{\delta}} \quad (8)$$

4. Cole의 벽법칙과 형상 보조계수

거칠기가 분포된 표면에 생성되는 경계층은 Cole의 Wall & Wake 법칙에 Clauser의 거칠기 함수, $\Delta U/u_o$ 를 포함시키면 경계층내 점성 마찰속도¹⁵⁾는 다음과 같다.

$$\frac{U}{u_o} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{y u_o}{\nu} \right) + 5.0 + \frac{1}{\kappa} \cdot \pi [2 - \omega(\eta)] - \frac{\Delta U}{u_o} \quad (9)$$

여기서 $u_o = \sqrt{(t_o/\rho)}$: 벽면 마찰속도, $\pi =$ Cole's Wake 강도 변수, $\omega(\eta) = 2\eta^2 - (3-2\eta) - \pi^{-1}\eta^2(1-3\eta+2\eta)^{16)}$ 이다. 그리고 Clauser의 거칠기 함수식과 거친표면(r)과 매끄러운 표면(s)과의 관계는

$$\sqrt{\frac{2}{C_{fs}}} - \sqrt{\frac{2}{C_{fr}}} = \frac{\Delta U}{u_o} < \sqrt{\frac{2}{C_{fs}}} - \sqrt{\frac{2}{C_{fr}}} \quad (10)$$

이므로

$$\frac{1}{\omega_s} - \frac{1}{\omega_r} = \frac{\Delta U}{u_o} \quad (11)$$

이 되고, 식(11)은 다음과 같이 다시 쓸수 있다.

$$\omega_s - \omega_r = -\frac{\Delta U}{u_o} (\omega_s \cdot \omega_r) \quad (12)$$

그리고, 표면거칠기에 의한 형상계수의 증가량 (여기서 형상 보조 계수식 이라함)은 적분 경계층 방정식에 의하여 형상 계수를 구하고, 식(11)에 의하여 $\Delta H = H_s - H_r$ 의 값을 구하면 다음과 같다.

$$\Delta H_{12} = -\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta U}{u_o} \right) \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \sqrt{(C_{fs} - C_{fr})} \quad (13)$$

여기서, I_1 와 I_2 식은 배제두께 및 운동량 두께를 이용하여 구하면, $I_1 = 2.44(\pi + 0.983)$; $I_2 = 5.95(1.486\pi^2 + 3.176\pi + 2.009)(\pi + 0.983)^{-1}$ 가 됨을 알수 있다.

5. 거칠기에 의한 유입 효과

익표면 익형요소 길이당의 경계층내에 유체의 유입 증가량을 Entrainment(E)라고 하면 그양은 다음과 같이 쓸수 있다.

$$E = \frac{d}{ds} \int_0^{\delta} u dy = \frac{d}{ds} [U_e (\delta - \delta^*)] \quad (14)$$

여기서, 새로운 형상계수 $H_e = (\delta - \delta^*)/\delta_2$ 에 의하여 정리하면 식(14)는 다음과 같이 쓸수 있다.

$$E = \frac{d}{ds} (U_e H_e \delta_2) = 0.0306 U_e (H_e - 3)^{-0.653} \quad (15)$$

그리고, 식(15)의 H_e 는 식(13)의 형상보조계수를 Head의 식¹⁷⁾에 고려하면 다음과 같다.

$$H_e = 1.535(H_{12} + \Delta H_{12} - 0.7)^{-2.175} + 3.3 \quad (16)$$

계산결과 및 검토

이상의 계산식으로부터 경계층의 특성들을 익형상에 표면 거칠기 영향이 없는경우(smooth)와 있는경우(rough)를 계산하고 다른 연구의 계산결과⁸⁾ 및 실험 결과⁶⁾와 각각 비교하였다.

Fig. 3은 받음각 2° 이고, 레이놀즈수가 2×10^5 인 경우의 익형의 부압면의 전연으로부터 후연 방향으로 경계층의 배제두께(δ^*)를 각각 비교한 것이다. 본 비교에서는 Baubeau의 계산결과⁸⁾와 본계산의 smooth 및 rough인 경우를 비교하여 나타내었다. 대체로 거칠기 영향이 없는 경우는 비교에서 정성적으로 유사한 계산 결과를 보이거나 약간의 오차는 계산의 요소 분할수나 계산방법의 차이에서 생기는 것으로 생각된다. 그러나 거칠기 영향이 고려된 경우는 익전연의 부근에서는 거칠

기 영향이 무시된 경우와 정상적으로 같은 분포로 나타났으나, 천이 영역인 익현 길이 방향 0.4 이후, 0.75 사이에서는 거칠기 영향이 배제 두께를 크게 증가시키는 것으로 나타났다. 즉 천이 영역에서 거칠기 영향에 의하여 천이에 영향을 촉진시키고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 4에서는 받음각이 2° 이고 레이놀즈수가 2×10^5 인 경우에 익형의 부압면의 길이 방향에 따른 형상계수값(H_{12})을 보고된 계산⁸⁾의 결과 및 본 계산의 거칠기 영향이 없는 경우, 그리고 거칠기 영향이 있는 경우의 값들의 비교를 나타낸 것이다. 여기서 천이 영역 이외에서는 그 값이 거의 정량적으로 같은 분포로 나타났으나 천이 영역에서는 거칠기 영향이 없는 경우 보다도 약간 높게 나

타나 거칠기 영향에 의한 형상계수가 다소 증가하였음을 알 수 있었다.

Fig. 5는 받음각이 2° 이고 레이놀즈수가 2×10^5 인 경우의 익형 부압면의 길이 방향으로 에너지 소실두께(H_{32})를 비교한 것이다. 천이 영역을 제외한 다른 영역에서는 거의 같은 값을 나타내 보이나, 천이 영역에서 그 값이 약간 감소하여 나타나 매끄러운 경우 보다도 거칠기에 거칠기 분포에 의하여 약간 에너지 손실이 증가 하였음을 알 수 있으며, 이것은 천이 영역에서 거칠기의 분포가 유속의 감소에 영향을 주는 것으로 생각된다.

Fig. 6는 받음각이 4° 이고 레이놀즈수가 3.9×10^5 인 경우의 익형부압면의 길이 방향에 따른 운동량 두께(θ)를 다른 보고된 기존의 연구

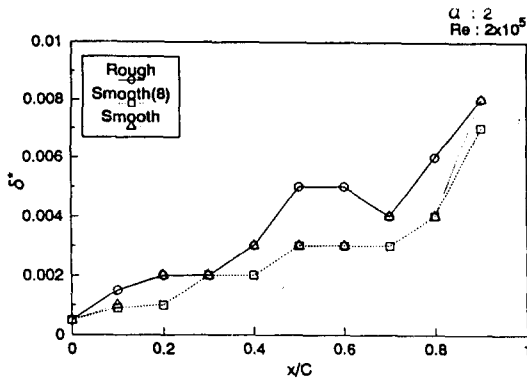


Fig. 3. Comparison of displacement thickness.

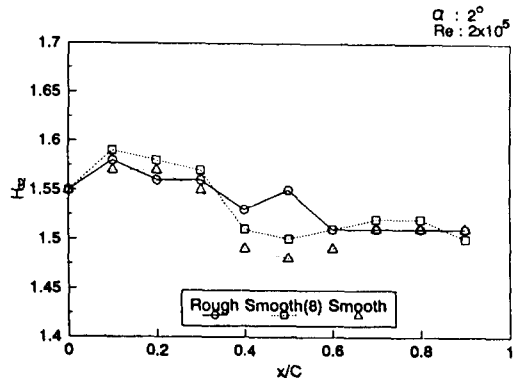


Fig. 5. Comparison of energy thickness.

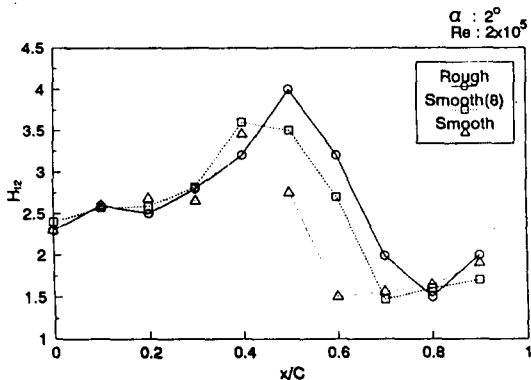


Fig. 4. Comparison of shape factors.

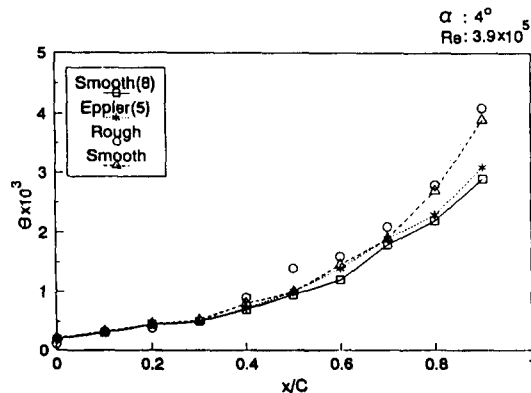


Fig. 6. Comparison of momentum thickness.

결과^{5), 8)} 및 본계산을 거칠기 영향이 없는 경우와, 거칠기 영향이 있는 경우를 각각 비교한 것이다. 다른 연구 결과와의 비교에서와 같이 거칠기 영향이 없는 경우는 거의 같은 값의 분포를 나타내 보이나 천이 영역부근에서 거칠기 영향이 있는 경우는 거칠기에 의한 운동량 손실이 매끄러운 경우 보다도 다소 증가하고 있음을 보이고, 난류 영역에서는 큰변화를 찾아 볼수 없었다. 이것은 거칠기 분포에 의하여 운동량 손실이 증가하고 있음을 알수 있다.

Fig. 7는 받음각이 2°인 경우, Smooth인 경우와 Rough인 경우에 레이놀즈수의 증가에 따른 층류 경계층의 난류천이(lar. trs.), 그리고 천이의 완료지점(trs. end)등을 다른 계산자료(8)과

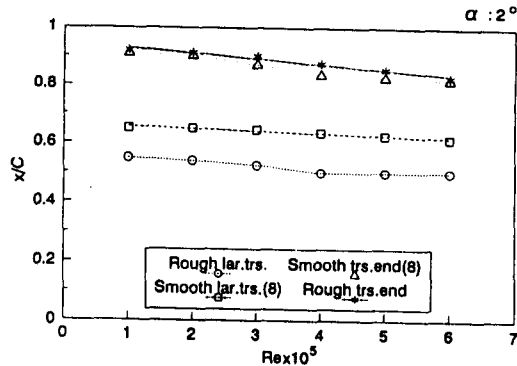


Fig. 7. Comparison of smooth and rough foils.

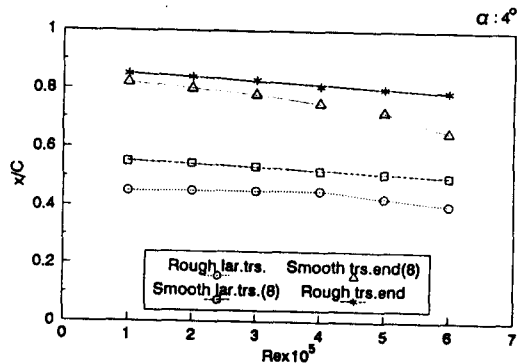


Fig. 8. Comparison of smooth and rough foils.

각각 비교하였다. 각각의 비교에서 거칠기 영향에 의하여 층류천이점은 거칠기 영향이 있는 경우가 천이점이 촉진 되었어서 전연쪽으로 이동하였고, 천이 완료점은 오히려 후연쪽으로 후퇴하여 천이 영역이 넓어 졌음을 알수 있다. 그리고 레이놀즈수 증가에 대한 영향은 층류박리및 천이완료점은 모두 조금씩 전연 쪽으로 이동 하였음을 알수 있어 거칠기 분포에 의하여 난류유동이 촉진되고 있음을 알수 있다. 또보다도 난류천이점에 미치는 영향이 더욱 크게 나타났다.

Fig. 8은 받음각이 4°인 경우에 레이놀즈수 변화에 대하여 다른 Smooth인 경우와 Rough한 경우에 층류박리, 난류천이 그리고 천이완료점들을 실험자료⁸⁾ 각각 비교한 것이다. 난류 천이점, 그리고 천이완료 모두 조금씩 Rough한 경우가 Smooth한 경우보다도 약간씩 전연으로 이동하였고, 레이놀즈수 증가에 따른 거칠기 영향은 레이놀즈수가 4×10^5 이상의 경우에 그영향이 더욱 증가하여 전연으로 이동이 더욱 촉진 되었음을 알수 있다.

Fig. 9는 받음각이 6°인 경우에 레이놀즈수의 증가에 대하여 익형의 길이 방향에 따른 난류천이 그리고 천이 완료지점들을 실험자료⁸⁾과 비교한 것이다. 거칠기 영향이 난류 천이에 미치는 영향은 크게 나타났으나 층류박리및 천이 완료점은 큰 이동이 없음을 알수 있었다. 그리고 레이놀즈수

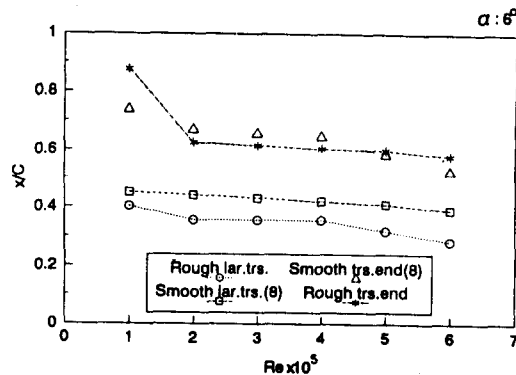


Fig. 9. Comparison of smooth and rough foils.

증가에 따른 거칠기 영향은 난류 천이 완료에는 크게 미치지 못하는 것으로 나타났다.

Fig. 10은 받음각이 10° 인 경우, 레이놀즈수의 증가에 따라 익형의 길이 방향에 대하여 난류천이 그리고 천이 완료점들을 이미 보고된 Rough인 경우의 실험자료⁸⁾와 비교를 나타낸 것이다. 난류 천이점은 레이놀즈수가 증가할수록 큰 변화는 없었으나, 천이완료점은 거칠기 영향에 의하여 익의 후연으로 약간 이동함을 알수 있었다.

Fig. 11은 받음각이 2° 인 경우에 레이놀즈수 변화에 따른 층류박리와 난류 천이점들을 본계산의 Rough한 경우와 보고된 실험자료⁶⁾와 각각의 비교를 나타낸 것이다. 이경우는 대체로 층류박리 및

난류천이완료점이 본계산의 Rough한 경우와 Smooth경우 모두 거의 같은 값을 나타내 보였다. 그리고 레이놀즈수 증가에 따른 큰 변화는 찾아볼수가 없었다. 이것은 거칠기 영향이 미소 각도에서는 영향이 거의 없음을 알수 있었다.

Fig. 12은 받음각이 6° 인 경우에 레이놀즈 수 변화에 따른 층류 박리와 난류 천이완료점들을 본계산의 Rough한 경우와 실험치⁶⁾를 비교한 것을 나타낸 것이다. 본 실험치와의 비교에서 층류 박리점은 익형의 후연방향으로 약간 이동하였으며 난류 천이점은 실험치와 큰 오차는 발견할 수가 없었다. 그러나 레이놀즈 수의 증가에 대하여는 천이 완료점이 익형의 전연으로 약간 이동하는 경향을 보였다. 이것은 거칠기 영향에 의하여 천이 완료점에 영향이 있음을 알수 있었다.

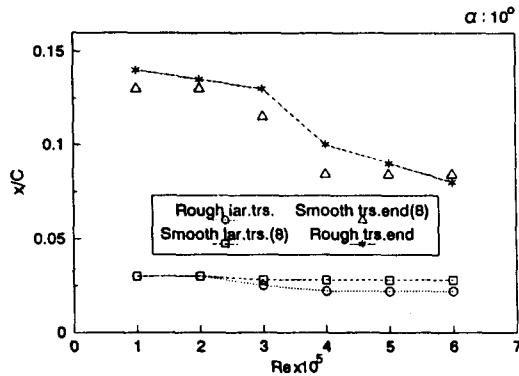


Fig. 10. Comparison of smooth and rough foils.

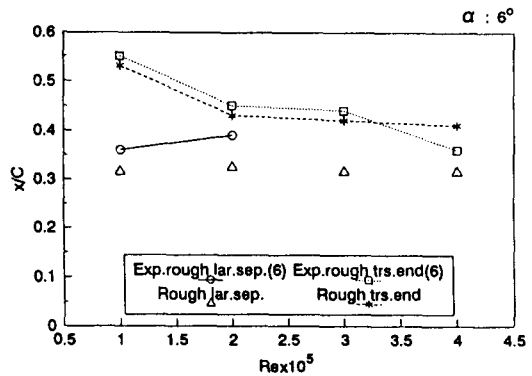


Fig. 12. Comparison of calculations and experiments.

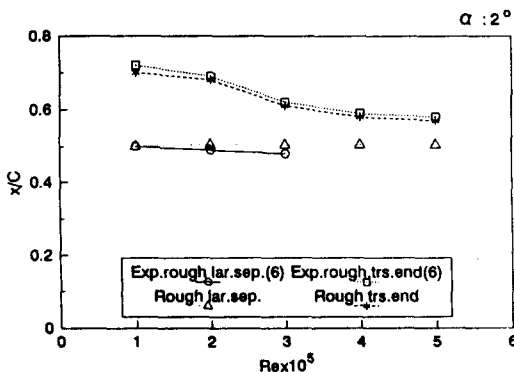


Fig. 11. Comparison of calculations and experiments.

결 론

침식등에 의하여 생성하는 익형의 표면 거칠기 영향이 익형에 발생하는 경계층의 특성변화에 미치는 영향을 규명하기 위하여 거칠기에 의한 형상 보조계수와 Entrainment 유입 효과를 고려하여 NACA 4412 익형 주위의 유동 특성을 계산하고, 이를 다른 결과와 비교 검토한 결과를 정리하면 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 경계층 천이의 특성인 난류천이의 위치는 대

체로 거칠기 영향에 의하여 다소 익전연으로 이동하였다.

2. 천이 영역에서 표면거칠기 영향에 의하여 배체두께가 다소 증가하였으므로 유속감소 효과가 있음을 알수 있었고, 동시에 운동량 두께 및 에너지 소실 두께도 약간 증가하였고, 형상 계수도 약간 증가하였다.

3. 천이 영역의 특성에 미치는 거칠기 영향은 영각이 6° 이상, 그리고 레이놀즈 수가 4×10^5 이상의 비교적 높은 영역에서 그 영향이 크게 나타났다.

4. 거칠기 영향은 형상보조 계수와 유입 효과를 고려함으로서 낮은 받음각과 저레이놀즈수의 영역에서 실험치에 잘 일치하나, 큰 영역의 범위 위에서는 다소 오차가 있음을 알수 있었다.

참고문헌

- 1) Abbott, I. H.,(1956) : Theory of Wing Section, Dover Publications Inc., New York.
- 2) Eppler, R.,(1960) : Ergebnisse gemeinsamer Anwendung von Grenzschrift- und Profiltheorie, Zeitschrift für Flugwissenschaften, Braunschweig, 80 - 110.
- 3) C.S., Lee,(1980) : Prediction of the Transient Cavitation on Marine Propeller by Numerical Lifting-Surface Theory, 13th Symposium on Naval Hydrodynamics, Tokyo, 1-3-1 ~ 1-3-22.
- 4) Kim, S.Y.,(1988) : A Study on the Hydrofoil Section Shapes in Consideration of Viscous Effects for Marine Propeller Blades, J. of the Korean Society of Marine Engineers, Vol.12, No.2, 110 - 120.
- 5) Eppler, R., and Somer, D.M.,(1980) : A Computer Program for the Design and Analysis of Low-speed Airfoils, NASA Technical Memorandum 80210, 8 - 30.
- 6) Van der Meulen,(1980) : Boundary Layer and Cavitation Studies of NACA 16-012 and NACA 4412 Hydrofoils, 13th Symposium on Naval Hydrodynamics, Tokyo, II-5-1 ~ II-5-23.
- 7) Yamaguchi, H. and Kato, H.,(1983) : Non-linear Theory Partially Cavitating Hydrofoils, J. of Society of Naval Architecture of Japan, Vol.152, 117 - 124.
- 8) R.Baubeau and R.Latorre(1986) : Numerical Study of the Boundary-Layer Transition for Two-Dimensional NACA 16-012 and 4412 Hydrofoil Sections, J. of ship Research, Vol.30, No.1, 43 ~ 50.
- 9) Kim, S.Y. and Lewkowicz, A.K.,(1990) : The surface Roughness Effects in Computation of the Turbulent Boundary Layer on ship-Hulls, Proceedings, 2nd KSME-JSME Fluid Engineering Conference, Seoul, 178 - 183.
- 10) Yamaguchi, H. and Kato, H.,(1983) : Development of a Foil Section with Improved Cavitation Performance, J. of Society of Naval Architecture of Japan, vol.154, 102 - 108.
- 11) Yamaguchi, H.,(1983) : Non-linear Theory and Development a Foil Section for Improved Cavitation Performance, PhD Thesis, Tokyo University, 5 - 17.
- 12) Krogstad, P.A.,(1989) : Modification of the van Driest Damping Function to include the Effects of Surface Roughness, AIAA Journal, Vol.29, No.6, 888 - 894.
- 13) Van Oossanen, P.,(1975) : Method for the Assessment of the Cavitation Performance of Marine Propellers, Int'l Shipbuilding Progress, Vol.22, 3 - 33.
- 14) Sandborn, V.A.,(1961) : Flow Models in Boundary Layer Stall Inception, ASME, J. of Basic Engineering, Vol.83, No.3.

- 15) Smit, A.J.,(1980) : Some Experiments on Artificially Roughened LUCY ASHTON Geosims. J. of Ship Research, Vol.24, 170-180.
- 16) Lewkowicz, A.K.,(1982) : An Improved Method Universal Wake Function for Turbulent Boundary Layer and Some of it's Consequences. Z. Flugwisse Weltraumforsch. 6 Heft 4, 261-266.
- 17) Head, M.R.,(1958) : Entrainment in the Turbulent boundary Layer. Aeron. Res. Coun., R. & M. 3152, 1-3.