

선체주위의 3차원 경계층 해석

姜 信 榮

<서울대 工大 機械工學科 · 工博>

1. 서 언

선박이 항해시 받는 저항을 정확히 예측하여 주어진 조건에서 최소의 엔진마력이 소요되도록 선체를 설계하는 것이 저항연구의 궁극적인 목표가 된다. 실제 선박은 파도가 있는 해상에서 운항되기 때문에 파도의 존재에 의한 소위 부가 저항이 고려되어야 하겠으나 일반적으로 선박 저항의 연구는 파도가 없는 정수중에서 중점적으로 수행되고 있다. 선체는 정수중에서 움직이며 유체와 선체의 경계에서 유체 점성의 존재에 의하여 경계층과 반류(boundary layer and wake)를 형성하여 저항을 받게 되고, 이 뿐만 아니라 선체가 자유표면에 중력파를 형성하면서 에너지를 소비하기 때문에 또 다른 저항을 받게 된다. 다시 말하여 전자는 점성저항이라고 하고 후자는 조파저항이라고 한다. 한편 저항 R 은 배의 속도 U , 배의 기하학적 크기 L , 물의 동점성계수 ν , 중력가속도 g 에 의하여 결정되기 때문에 차원해석에 의하면 저항계수 $C_r \left(R / \frac{1}{2} \rho U^2 \right)$ 는 베일놀즈수, $Re (= UL/\nu)$ 와 프루우드수 $Fr (= U/\sqrt{gL})$ 의 함수가 된다. 물론 유체의 점성이 없다고 보아 포텐셜 유동의 범주에 속하는 선형 중력파 이론에 의한 조파저항의 개념과 자유표면이 고려되지 않는다고 본 점성저항을 독립적으로 해석함은 엄밀한 의미에서 보아 불가능하며, 실제로는 두가지 저항성분은 상호 작용을 하게 된다. 그러나 경우에 따라서는 점성저항

은 Re 수만의 함수이고 조파저항은 Fr 수만의 함수라는 가정을 쓰기도 한다(Froude 가정). 이에 따라 과거 백여년간 선박유체역학 분야에서는 주로 조파저항의 견지에서 저항을 최소화하는 선형개발에 주력하여 왔으며 수조(towing tank)에서의 선형시험시에 점성저항은 그저 이에 대응하는 평판의 마찰저항, 혹은 경험적으로 수정된 형상저항을 추가하여 사용하고 있다.

그러나 근래에 와서는 유조선, 컨테이너선, 벌크캐리어 등 선형이 비대하여지고 더구나 최근 유가의 상승에 의하여 저속선의 연구가 각광을 받고 있다. 상대적으로 속도가 빠른 군함이라든지 소형어선 등은 점성저항이 전체저항의 약 절반정도이나, 앞서 말한 대형선박의 경우는 거의 80%~90%가 점성저항이 된다. 더구나 일반적으로 선박은 선미에 부착된 프로펠러의 회전에 의하여 추진되기 때문에 선미의 점성유동 해석은 프로펠러의 설계, 특히 효율, 진동, 캐비테이션의 관점에서 중요한 정보를 제공하게 된다. 뿐만아니라 선체에 부착되는 각종 부가물의 설계에 중요한 영향을 주며 특히 모형선 실험으로부터 실선의 성능을 예측하는 과정에서 각종 축척의 영향을 고려하기 위해서는 선체주위의 정확한 점성유동의 해결이 없이는 어려운 상태이다. 이러한 문제점을 해결하고 선형개발의 단계에서 효율적인 연구를 하기 위해서는 선체주위의 3차원 난류 경계층 및 반류의 예측이 필수적인 방법이 된다.

Prandtl 및 Blasius 등에 의하여 출발한 경
大韓機械學會誌/Vol. 22, No. 5, 1982/371

계층 이론은 주로 기계, 항공 분야에서 발전되어 그동안 2차원 유동, 축대칭 유동, 경사진 무한 실린더 등 간단한 유동상태에서 많은 연구가 진행되었고, 최근 고속 대형 전자계산기에 힘입어 일반 3차원 난류 경계층 이론이 급속히 발전되었다. 그러나 일반적인 선체에 적용되어 연구된 것은 1970년대 이후라고 하겠다. 이렇게 뒤늦게 경계층 이론이 선형에 응용된 이유는 그동안 조파저항의 연구에 편중되어 왔으나 이론의 한계성으로부터 점성저항의 연구가 절실하게 되었기 때문이다. 또한 선체는 상당히 복잡한 일반 3차원 형상이고 자유표면 및 파도에 의한 포텐셜 유동해석이 아직도 어려운 실정이다. 이 문제는 바로 조파저항 연구분야인데 선박유체역학 중 이 분야가 가장 뒤져 있음을 고려할 때 그 어려움을 짐작할 수 있다. 더구나 점성유동도 완전히 3차원 난류유동이고 여러 가지 복잡한 문제가 모두 선체위에서 일어나고 있다. 이 분야에 대한 일반적인 요약은 Larsson(1974)⁴⁾, Landweber and Patel (1979)³⁾에 나타나 있다.

이와 같이 선체주위의 경계층 및 반류의 계산이 선형의 연구에 중요한 역할을 하고 있기에 최근 미국, 일본, 구라파 등지에서 많은 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 조선공학의 배경을 갖고 있는 연구자 외에도 많은 기계공학 및 항공공학 분야에서 일하고 있는 사람들이 이 문제를 다루고 있다. 따라서 본 강좌는 이러한 선박과 관련되어 있는 유체역학의 분야를 기계공학에 관계된 분들에게 소개 및 주시시키고자 전반적인 연구현황 및 주요한 결과를 다음에서 설명하고자 한다.

2. 선체주위의 경계층의 특성

선체는 임의의 기하적 형상을 주로 오프셋(offset)의 형태로 주어진다. 그러나 일반적으로 $Y=F(X,Z)$ 의 식으로 주어진다. 이때 자유표면의 유동해석이 어려울 뿐만 아니라 배의 속도가 느릴 경우 대부분 이중선형(double-ship model)에 대하여 이루어지고 있다. 즉 자유표면을 마찰이 없

는 고체벽으로 생각하는 것이다. 고속선의 경우나 선수 선미에서 이러한 가정은 실제와 많이 다르겠으나 이러한 가정하에 실마리를 풀고 있다.

경계층 방정식은 주로 선체표면에 고정된 x , z 좌표와 표면에 수직한 y 좌표를 도입하여 나타나며, 초기단계의 연구에서는 주로 1차 경계층 이론에서 유도된 결과를 쓰고 있다. 즉,

$$\frac{u}{h_1} \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{w}{h_3} \frac{\partial u}{\partial z} + (k_{13}u - k_{31}w)w + \frac{1}{h_1} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p}{\rho} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\tau_x}{\rho} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{u}{h_1} \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{w}{h_3} \frac{\partial w}{\partial z} + (k_{31}w - k_{13}u)u + \frac{1}{h_3} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{p}{\rho} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\tau_z}{\rho} \right) = 0 \quad (2)$$

또한 연속방정식은

$$\frac{1}{h_1 h_3} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (h_3 u) + h_1 h_3 \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} (h_1 w) \right\} = 0 \quad (3)$$

여기서 h_1, h_3 는 길이 계수이고 k_{13}, k_{31} 은 점선면에서 좌표계의 곡률이다. 식 (1)과 식 (2)에서 전단응력 τ_x, τ_z 는 점성에 의한 전단력과 레이놀즈 응력(Reynolds stress)의 합, 즉

$$\tau_x = \mu \frac{\partial u}{\partial y} - \overline{\rho u'v'}, \quad \tau_z = \mu \frac{\partial w}{\partial y} - \overline{\rho v'w'} \quad (4)$$

로 주어진다. 위의 식 (1)~식 (4)는 적당한 난류모델(turbulence model)과 함께 해석되어야 한다. Landweber 및 Patel(1979)에 의하여 지적되었듯이 초기의 연구는 적분법에 의하여 대부분 시도되었다. 적분법은 식 (1)과 식 (2)로부터 구해지는 모멘텀 적분방정식 이외에 추가로 필요한 보조방정식(auxiliary equation), 벽에서의 마찰저항 경험식, 또 가정되는 속도분포에 의하여 여러가지 방법으로 나누어지고 있는데 계산시간이 절약되나 일반적으로 구체적인 속도분포 등 세부 정보는 얻을 수 없다. 뿐만 아니라 선체주위의 복잡한 유동을 잘 해석하기 위해서는 많은

경험식이 필요하게 되어서 직접 미분방정식을 푸는 것에 비하여 그 장점을 잃어가고 있다.

관련 적당한 난류모형, 즉 와점성 모델(eddy-viscosity model), $k-\epsilon$ 모델 등 현재 공학에서 많이 쓰이는 모델을 도입하여 유한 차분법에 의한 해석이 많이 연구되고 있다. 물론 경우에 따라서 비직교좌표계를 도입하는 경우도 있으나 일반적으로 직교좌표계(선체표면에 고정된 직교좌표 또는 유선과 이에 직교하는 좌표계)를 많이 사용하고 있다. 이러한 연구결과는 과거 10년간 많이 발표되어 왔으며 또 좋은 결과를 주고 있다. 또 V 형선수, U 형선수 또는 구상선수(bulbous bow) 등 다양한 선수에서의 층류경계층 계산, 실제로 층류에서 난류경계층으로의 천이문제 등의 처리에 어려움이 따르고, 3차원 경계층 해석의 종속영역(zone of dependence) 및 영향영역(zone of influence)개념에 의한, 즉 주유동 방향에 직각방향의 유동(cross flow)의 부호가 상당히 변하고 있는 경우에 수치해석상의 불안정문제 등 어려움을 해결하기 위한 노력이 집중되고 있다.

이러한 선체주위의 경계층 해석의 현황을 파악하고 여러가지 방법을 비교한 후 문제점을 찾아보기 위하여 1980년 6월 Sweden의 SSPA(스웨덴 해사기술연구소)에서는 ITTC(국제 선형수조 협의회)의 주최로 워크샵들이 개최되었다. 여기서는 풍동에서 실험된 경계층 데이터가 있는 SSPA 컨테이너 선형 Model 720($C_B=0.675$, $L/B=7.06$, $B/T=2.4$)과 HSVA 탱커(tanker) 선형($C_F=0.85$, $L/B=6.6$, $B/T=2.7$)이 채택되었다. 이 선형에 대하여 주어진 경계조건과 초기조건을 사용하여 여러가지 프로그램에 의한 결과가 약 24명의 과학자에 의하여 발표되었다. 이 결과는 제16차 ITTC의 저항분과 보고서(1981)에 요약되어 있는데(표 1 참조) 여러가지 적분법과 미분법은 각기 다른 특성을 갖고 있으나 비교적 좋은 결과를 주고 있음이 밝혀졌다. 여기서 좋은 결과라고 함은 선체길이의 70~80%에 해당하는 부분에서의 결과를 의미하

며, 대부분의 방법이 앞서 설명한 1차 경계층 이론에 의한 결과임을 고려할 때 상당히 고무적인 결론이었다.

그러나 문제는 그 이후 하류부분, 즉 선미 경계층의 해석에 있다. 선미근처의 유동상태는 지극히 두터운 난류 경계층에 속하며 이 또한 선미파도와 직접적인 상호작용을 하기 때문이다. 워크샵의 결과는 선미에서 천차단별의 결과를 보여주고 있다. 이 부근의 유동해석은 선체의 점성저항 추정이나 프로펠러의 관점에서 보아 직접적인 영향을 주기 때문에 더욱 그 중요도가 크다고 하겠다. 이 부근에서는 자유표면의 영향을 무시한다 하더라도 곡률반경의 영향, 각 레이놀즈 응력의 영향, 부분적인 박리현상 및 반류의 형성 등을 신중히 고려하여야 하며, 따라서 경계층과 경계층 밖의 포텐셜 유동의 상호작용도 고려되어야 한다. 현재 선미경계층 해석의 연구가 많이 진행되고 있기 때문에 머지 않아 실제에 응용할 수 있는 좋은 프로그램이 출현하리라 기대된다.

3. 경계층의 계산에

앞에서 선체주위의 경계층 해석의 일반적인 문제점들을 간략하게 소개하였는데 필자의 계산결과와 예 소개하고자 한다. 보유하고 있는 프로그램은 원래 Chang and Patel (1975)²⁾에 의하여 개발된 것을 개선한 것으로 선체에 고정된 직교 좌표계를 채택하고 있다. 선형의 각 단면이 선체표면에 이루는 선을 x 좌표로, 이어 직교하는 좌표를 z 좌표로 택하고 있다.(그림 1) 또

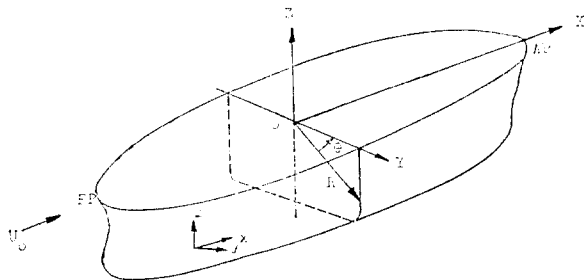


그림 1. 좌 표 계

표 1. ITTC-SSPA 워크샵에서 제시된 경계층 계산방법의 분류

방 법	파괴계	차 원	사 용 된 경 형 식	고 차 함 여 부	X Y Z 크 디 의 수	비 용 (US \$)
적근법 Himeno & Tanaka,	비직교	Fully 3-D	Mom of mom eq, Coles profiles and skin friction	No	150(169) - (-) 10(10)	
Krylov Institute	직 교	Small cross-flow	Entrainm eq, Coles-Mager profiles, Coles skin friction	No	31 (40) - (-) 13 (0) 23 (24)	
Larsson, SSPA	직 교	Fully 3-D	Entrainm eq, Similarity profiles, L-T skin friction	No	29 (32) - (-) 20(18) 6 (7)	
Ibri & Hatano, Hirosh. U.	직 교	Fully 3-D	Entrainm eq, Power law-Mager profiles, L-T skin friction	No	146(170) - (-) 19(19) 75 (65)	
Nagamatsu, MIII	비직교	Fully 3-D	Entrainm eq, Coles profiles and skin friction	Pressure variation, Interaction	150(169) - (-) 16(16)	
Okuno, U Osaka P	직 교	Small cross-flow	2 Aux eq, Power law-Improved Mager prof, L-T frict	No	320(390) - (-) 69(69) 19 (24)	
Smith, RAE	비직교	Fully 3-D	Entrainm eq, Power law-Mager profiles, New frict law	No	150(169) - (-) 16(16)	
Tanaka & Himeno,	직 교	Small cross-flow	Algebraic shape factor power law-Mager, L-T	No	32	10
Vollheim & Hauke,	직 교	Small cross-flow	Entrainm eq, Coles long profile	No		
v Kerczek & Langan DTNSRDC	비직교	Fully 3-D	Entrainm eq, Power law-Mager profiles, Thompson frict	No		
미분법 Cebeci, et al. Douglas	비직교	Fully 3-D	Eddy viscosity, O-eq	No	96 54 21	
Hoekstra & Raven, NSMB	직 교	Fully 3-D	Eddy viscosity (Case 1)	No	160(152) 40(40) 25(25) 465(600)	
Johansson, SSPA	직 교	Fully 3-D	1-equation turb model	No	110 43 25 450	
Krogstad, TU Norway	직 교	Small cross-flow	Eddy viscosity, O-eq	No	110(174) 92(92) 20(16) 120(125)	
McLean, Boeing	직 교	Fully 3-D	Eddy viscosity, O-eq	No	95 (93) 40(40) 19(19) 121(145)	
Muraoka & Hirose, IHI	비직교	Fully 3-D	2 equation turb model	No Press var, Curvature	35 (36) 12(12) 12(12) 300(300)	
Soajima et al, Mitsui	직 교	Fully 3-D	Eddy viscosity, O-eq	No Press var, Curvature	44 (44) 63(65) 19(21) 562(562)	

※ 괄호속의 수치는 HSVA 탱커모델의 경우임.

한 Cebeci and Smith (1968)¹⁾에 의하여 사용된 외점도 모델을 채택하고 있다. 주어진 초기조건(선수에서의 층류경계층 영역)과 포텐셜 유동을 경계조건으로 하여 계산이 수행되며 킨(keel)을 따라 대칭면 유동(plane of symmetry flow)이 계산됨과 동시에 3차원 경계층 계산의 경계조건이 되도록 하였다. 원래 프로그램은 Crank-Nicolson 형식의 수치해석을 택하고 있으나 S-형태의 측류를 계산할 수 있도록 소위 zig-zag 형식의 수치해석도 병행하게끔 수정되었다. 자세한 내용은 S.H. Kang (1981)⁶⁾에 설명되어 있다. (그림 2)

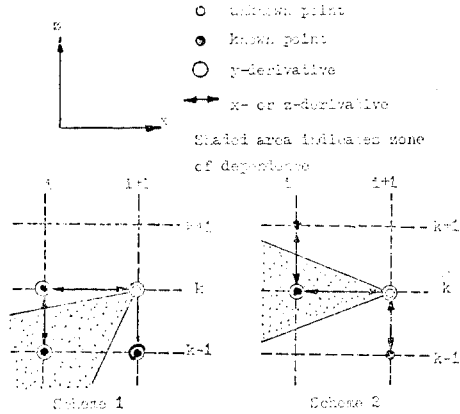


그림 2. 변분법의 모델

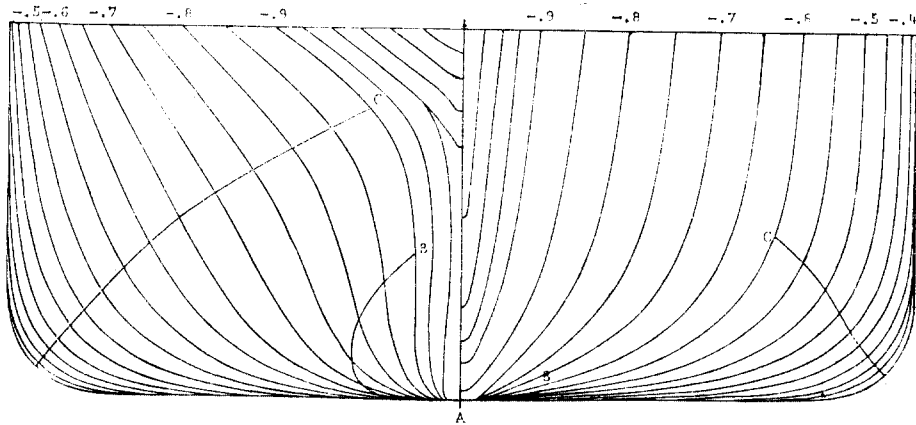


그림 3. 모델 720

위 프로그램에 의하여 앞서 언급한 ITTC-SSPA 워크샵에서 채택된 모형들에 대하여 계산된 결과와 문제점들이 Kang(1981)에 지적되어 있는데 여기서는 Model 720(그림 3)에 대한 결과를 중심으로 설명하고자 한다. Model 720은 Lars Larsson(1974)⁵⁾에 의하여 풍동에서 실험된 모형으로 $L=2.0m$, $B=0.283m$, $T=0.118m$, $C_b=0.675$ 이다 그림 3에 나타난 세개의 유선에서 실험치와 계산치가 비교되도록 하였다. 유선 A는 수직 대칭면으로 선미에 가까워질수록 경계층의 두께가 얇아진다. 이는 선미에서 유동 유선이 심하게 퍼지고 있기 때문이다. 유선 B는 심한 곡선을 만들며 이 때문에 큰 측류가 생긴다. 그러나 선미에서도 경계층은 많이 두터워

지지 않기 때문에 1차 3차원 난류 경계층 이론이 적용될 수 있는 유선이다. 마지막으로 유선 C는 주로 빌지선(bilge line)을 따르고 있으

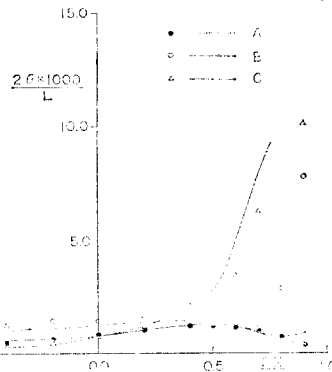


그림 4. 유선 A, B, C를 따른 모델넛 두께의 변화

나 선미에서는 경계층의 두께가 급격히 두터워지고 있다. 계산은 레이놀즈 수 5.0×10^6 에서 $2x/L = -0.6$ 에서 시작하였다.

유선 A, B, C를 따라서 계산된 모멘텀(momentum) 두께 θ , 근접유선도각(limiting cross flow angle) β_w , 형상계수 H, 및 마찰계수 c_f 가 그림 4에서 그림 7까지 나타나 있다. 실험치

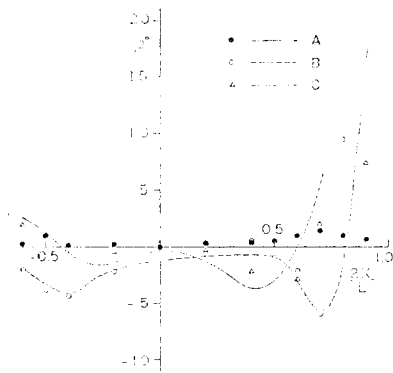


그림 5. 유선 A, B, C를 따른 유선각도의 변화

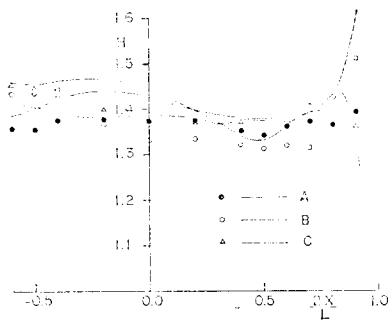


그림 6. 유선 A, B, C를 따른 형상계수의 변화

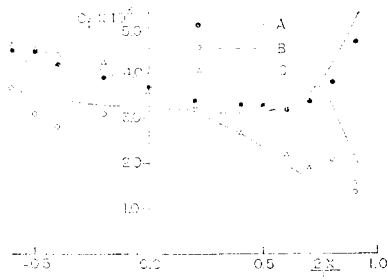


그림 7. 유선 A, B, C를 따른 마찰계수의 변화

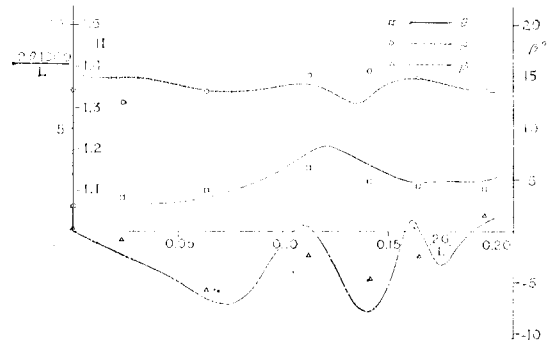


그림 8. $2x/L=0.5$ 에서 적분변수의 변화

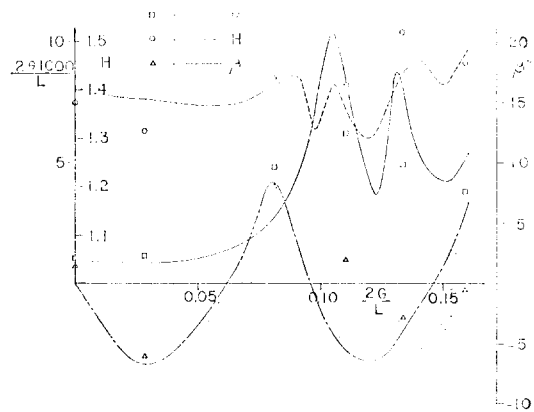


그림 9. $2x/L=0.7$ 에서 적분변수의 변화

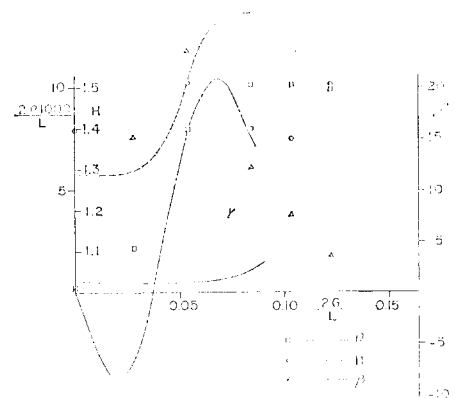


그림 10. $2x/L=0.9$ 에서 적분변수의 변화

와 비교하여 $2x/L=0.7$ 즉 전체의 약 85%까지 정성적으로 좋은 결과를 보여주고 있으나 그 이후에는 문제점을 보여주고 있다. $2x/L=0.5, 0.7, 0.9$ 에서 θ, H, β_w 의 변화가 그림 8에서 그림 10에 나타나 있다. 실제로 $2x/L=0.5$ 이후는 선미 경계층이라고 생각되는데 $2x/L=0.7$ 에서는 유선 c 와 자유표면 사이에서 계산결과가 불안정함을 알 수 있다. $2x/L=0.9$ 에서는 유선 A 를 제외하고는 결과를 얻을 수 없었다.

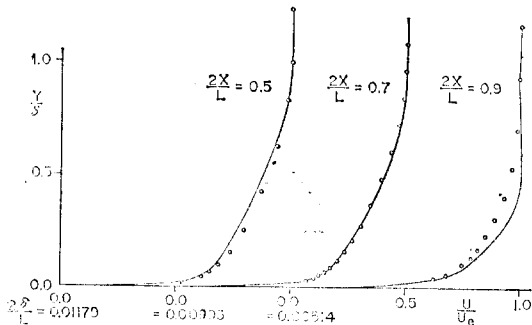


그림 11. 대칭면 A에서 속도분포

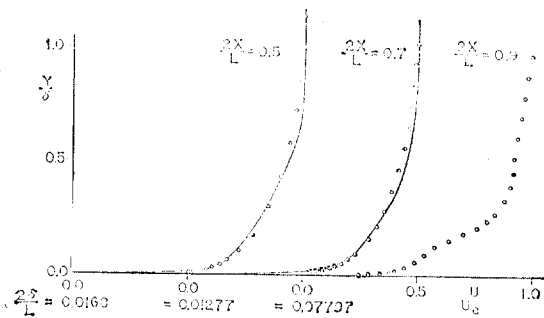


그림 12. 유선 B를 따른 속도분포

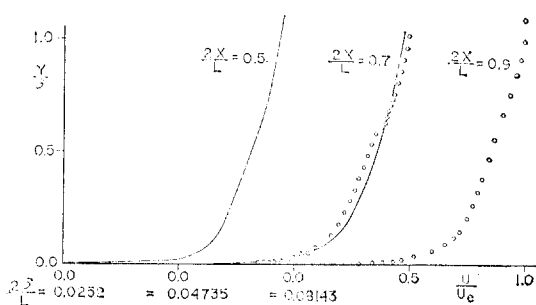


그림 13. 유선 C를 따른 속도분포

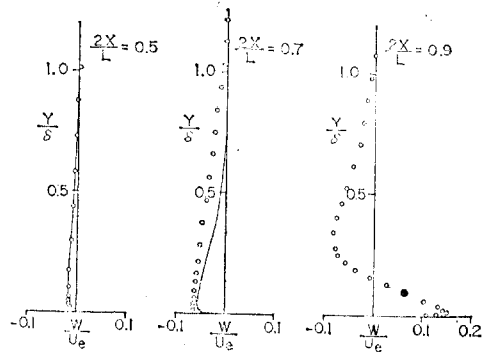


그림 14. 유선 B를 따른 속도분포

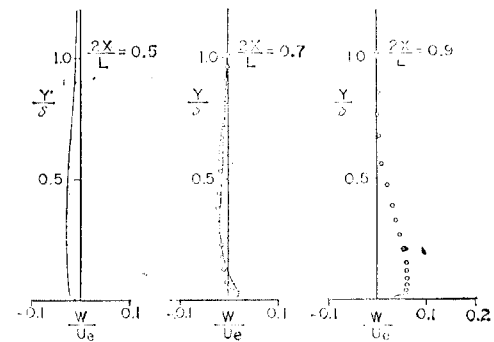


그림 15. 유선 C를 따른 속도분포

여기서는 본 계산에서 채택한 원주좌표계가 적당치 않은 듯 하다. 한편 각 유선을 따라서 $2x/L=0.5, 0.7, 0.9$ 에서의 계산된 속도분포가 그림 11에서 그림 15에 나타나 있는데 비교적 양호한 결과임을 알 수 있다. 그러나 마찬가지로 $2x/L=0.9$ 에서는 대칭면 이외에는 계산을 수행하지 못하였다. SSPA-ITTC에서 발표한 다른 계산도 $2x/L=0.9$ 에서는 대부분 계산을 수행치 못하거나 결과가 실험치와 상당히 차이가 있었다. 참고로 그림 16에는 $2x/L=0.9$ 에서 계산된 반류 등고선과 실험치를 나타내었는데 대부분 심한 차이를 보여주고 있다.

여기에서 우리는 현재 선체 주위의 경계층 해석의 현실을 파악할 수 있다. 현재 이에 관하여 실험적, 이론적으로 많은 연구가 집중되고 있다.

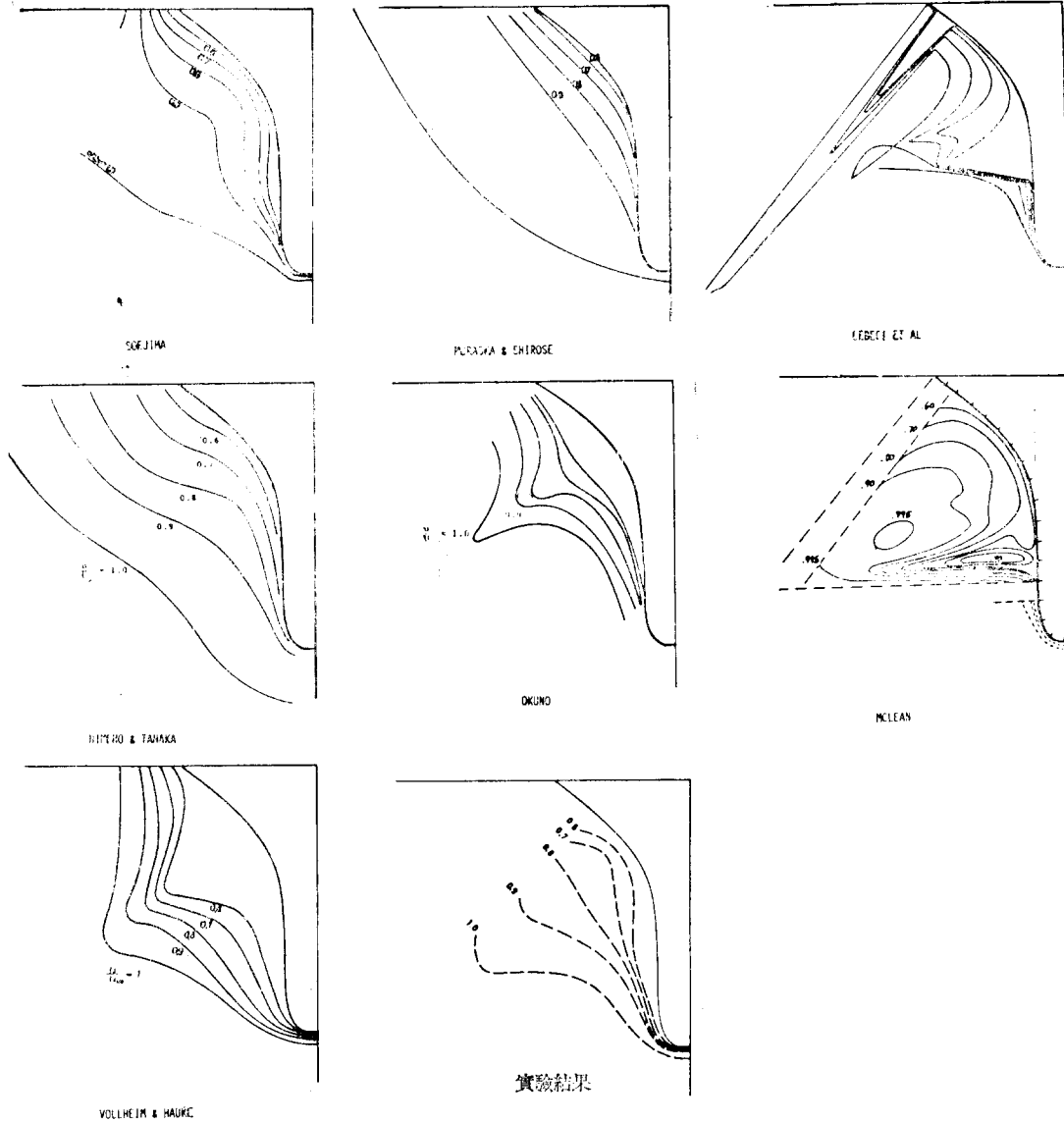


그림 16. SSPA-ITTC 위크샷(동반류곡선 $2x/L=0.9$)

4. 결 언

지금까지 선박저항의 일반적인 개요, 선체주위의 유동해석의 중요성, 해석의 어려움들을 소개하고, 선체주위의 3차원 난류 경계층 해석의 계산예와 ITTC-SSPA 위크샷의 결과로부터 이론의 현실을 알 수 있었다. 현재 미국, 일본, 구

라과 등지에서 이 분야에 대한 연구가 집중되고 있으며, 많은 항공 및 기계분야에서 일하고 있는 학자들이 참여하고 있다. 따라서 본 강좌를 통해서 국내의 연구자들이 관심을 가질 수 있는 계기가 되었으면 좋겠다.

앞서 언급한 바와 같이 자유표면의 존재를 고려하지 않는다 하더라도 선체주위의 경계층 문제는 3차원 난류 경계층 해석에서 흔히 나타나

는 제반문제(고차항의 영향, 레이놀즈 응력의 영향, 포텐셜 유동과의 상호작용, 박리현상의 규명, 반류의 계산 등)들을 대부분 포함하고 있는 어려운 상황에 있다. 이 분야에 관하여 국내에서도 많은 연구가 있기를 희망한다.

아울러 자유표면의 파도와 경계층과의 상호작용, 더 나아가서 선박 조파저항 이론의 평행적인 발전이 있어야 완전한 선체주위의 유동해석이 가능하리라 생각된다. 이 분야 역시 선박 유체역학 분야에서 제일 오래된 문제이자 어려운 문제이나 최근 많은 발전이 이루어지고 있기 때문에 머지 않아 좋은 이론이 개발되어 선형설계에 직접 응용될 수 있기를 기대한다.

참 고 문 헌

1. T. Cebeci & A. M. O. Smith, "A Finite-Difference Solution of the Incompressible Turbulent Boundary Layer Equation by an Eddy-Viscosity Concepts," AFOSR-IFP Stanford Conf., 1968.
2. K.C. Chang & V.C. Patel, "Calculations of Three Dimensional Boundary Layers on Ship Forms," IHR Rept. 178, The Univ. of Iowa, 1975.
3. L. Landweber & V.C. Patel, "Ship Boundary Layers," Annual Review of Fluid Mechanics, vol. 11, 1979.
4. L. Larsson, "Boundary Layers of Ships, Part II: A Literature Survey on Investigations of Ship and Model," SSPA Rept. No. 45, 1974.
5. L. Larsson, "Boundary Layers of Ships. Part III: An Experimental Investigation of the Turbulent Boundary Layer on a Ship Model," SSPA Rept. No.46, 1974.
6. S.H. Kang, "A Prediction Method for Three-Dimensional Boundary Layers on Ship Forms at Zero Froude Number" J. of SNAK, vol. 18, No.2, June, 1981.