

축대칭체 주위 고 레이놀즈수 유동에 대한 수치해석

최정규*, 김형태†*

충남대학교 선박해양공학과*

Numerical Analysis of High-Reynolds-Number Flow around Axisymmetric Body

Jung Kyu Choi* and Hyoung Tae Kim†*

Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National University*

Abstract

In this paper, numerical analysis based on the RANS equation and the Realizable $k-\epsilon$ turbulence model is carried out for flows around an axisymmetric body at three Reynolds numbers (1.22×10^7 , 1.0×10^8 , 1.5×10^8) and the numerical results are compared with experiments data. Computed velocity distributions agree well with experiments as the Reynolds number increases. Pressure distributions agree well with the results of the potential flow except the tail region but differ from experiments for the parallel middle body as well as tail region. Pressure gradients show a good agreement with those of potential flow and experiment except the tail region. Friction coefficients show that the numerical results generally are lower than the experimental results estimated from the measured velocity. The difference of friction coefficients between the calculation and the experiment increases with growing of a boundary layer.

*Keywords: High reynolds number(고 레이놀즈수), Axisymmetric body(축대칭체), Realizable $k-\epsilon$ turbulence model(Realizable $k-\epsilon$ 난류모형), Boundary layer(경계층)

1. 서론

최근 CFD를 통한 선박 주위의 유동 해석 결과가 모형시험 결과와 잘 일치하는 경향을 보여줌에 따라, 국내 조선소에서는 저항 및 자항성능은 물론 조종성능 그리고 부가물이 부착된 선박 주위유

동 해석 등 그 활용도를 높여가고 있다. 하지만 이 연구결과들은 대부분 모형선 레이놀즈수 유동에 대한 것이며, 실선의 고 레이놀즈수 유동에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다. 특히, 프로펠러 유입 유동에 대해서는 모형선에 대한 실험을 통해 유동정보를 통계적, 경험적으로 추정하고 있으며 실선 프로펠러 유입 유동의 정확성에 대한 정보가

접수일: 2008년 9월 29일, 승인일: 2008년 12월 3일

† 교신저자: h-tkim@cnu.ac.kr, 042-821-6629

거의 없는 상황이다. 따라서 실선 유동에 대한 수치해석이 필요하며, 수치해석 기법과 컴퓨터의 발전은 이를 가능하도록 하고 있다.

국외에서는 실선 스케일의 레이놀즈수에 가까운 유동에 대해 비교적 간단한 형상인 축대칭체를 대상으로 실험이 수행(Coder 1983)되었고, 실선에 대한 고 레이놀즈수 수치해석(Ju and Patel 1991, Patel 1998)이 수행된바 있다. 한편, 국내에서는 모형선 스케일의 레이놀즈수에 대해 축대칭체를 대상으로 실험 및 수치해석(Ahn et al. 1997)이 수행된바 있으며, 축대칭체 주위의 점성유동에 대해 수치해석(Lew 1991)이 이루어진바 있다. 그러나 이는 레이놀즈수가 10^7 이하로서 실선 수준의 고 레이놀즈수에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 논문에서는 형상이 간단하며 고 레이놀즈수 (1.5×10^8) 유동에 대한 실험자료(Coder 1983)가 알려져 있는 Series 58 body(Landweber and Gertler 1950)를 대상으로 하였고, 풍동의 blockage(2.3%)가 크지 않음을 고려하여 무한유체 중으로 가정하고 수치해석을 수행하였다. 수치해석 결과와 실험 자료의 비교를 통하여 고 레이놀즈수 유동에 대한 수치해의 정확도와 수치해석 방법의 유용성을 조사하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 대상물체 및 좌표계

본 논문에서의 대상물체는 중앙 평행부와 뾰족한 꼬리(tail) 형상을 갖는 최대 직경이 0.559m, 전장 6.283m인 축 대칭체이며, 그 기하학적 형상을 Fig. 1에 간단히 도시하였다.

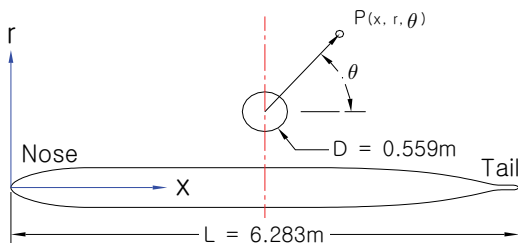


Fig. 1 Principal dimensions and cylindrical coordinate system

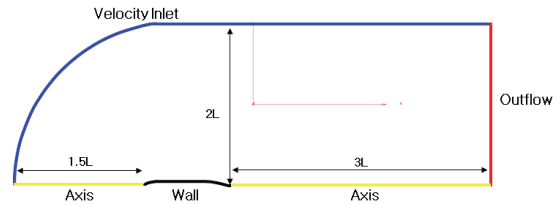


Fig. 2 Domain for flow calculation

기본 좌표계는 축대칭 물체 주위의 유동해석에 편리한 원통좌표계(cylindrical coordinate system)를 사용하였다. 코(nose)를 원점으로 주 유동방향을 x축, 반경방향을 r축, x축을 중심으로 반시계방향 회전을 θ 로 하였다. 계산영역의 유입경계는 Fig. 2에 보인바와 같이 nose로부터 1.5L, 유출경계는 tail로부터 3L, 외부경계는 중심축으로부터 2L 떨어져 있다.

2.2 지배방정식

정상, 비압축성 축대칭 유동에 관한 방정식은 원통좌표계에서 다음 식으로 표시된다.

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rV) = 0 \quad (1)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x}(p + \overline{uv}) + \frac{\partial}{\partial r}(\overline{uv}) + \frac{\overline{uv}}{r} - \frac{1}{Re} \nabla^2 U = 0 \quad (2)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x}(\overline{uv}) + \frac{\partial}{\partial r}(p + \overline{vv}) + \frac{1}{r}(\overline{vv} - \overline{ww}) - \frac{1}{Re}(\nabla^2 V - \frac{V}{r^2}) = 0 \quad (3)$$

$$\text{여기서 } \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r},$$

(U, V)는 x, r 방향 평균속도성분, (u, v, w)는 x, r, θ 방향의 난류속도성분, $Re = U_0 L / \nu$, U_0 는 유입속도, L 은 물체 길이이며 위의 식은 U_0, L 및 ρ (밀도)로 무차원화 된 식이다.

2.3 수치격자

유동 계산을 위한 수치격자는 상용 코드인

Gridgen을 사용하여 2차원 정렬격자계로 생성하였으며, 축대칭 경계조건을 사용하였다. Fig. 3에 보인 것처럼 Tail부근에서 양질의 격자생성이 어려워 대상물체 표면 근처의 블록과 그 외의 블록으로 나누어 격자를 생성하였다. 한편 벽으로부터 첫 격자점의 y^+ 는 벽함수를 사용함에 따라 벽 로그 법칙(logarithmic law of the wall)을 만족하는 y^+ 범위 안에 있어야 하고, 레이놀즈수에 따라 로그 법칙을 만족하는 y^+ 범위가 증가하므로 평판에서 로그 법칙을 만족하는 y^+ 범위를 고려하여(Choi and Kim 2008) 본 연구에서는 모든 레이놀즈수에 대해 로그 법칙을 만족하는 y^+ 값인 50을 사용하였다.

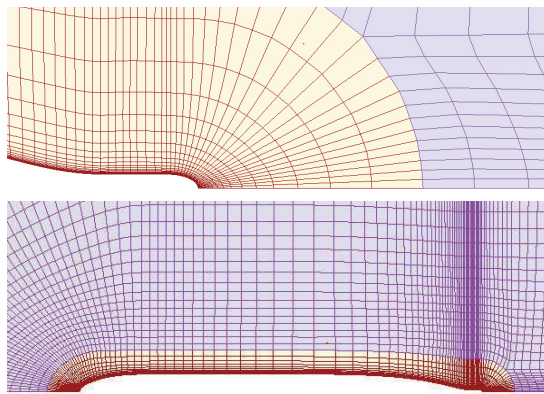


Fig. 3 Structured grid around axisymmetric body

2.4 계산조건

수치 계산은 실험과 동일하게 레이놀즈수가 1.22×10^7 , 1.0×10^8 , 1.5×10^8 인 경우에 대하여 수행하였으며, 상용코드인 FLUENT를 사용하였다. 난류모형은 Realizable $k-\epsilon$ 모형을 사용하였고, 벽함수(standard wall function)를 사용하였다. 지배방정식의 확산항은 2차 중심차분과 대류항은 QUICK방법을 사용하여 이산화 하였고, 속도-압력 연성은 SIMPLEC 방법을 사용하였다.

3. 수치해석 결과

3.1 격자수 영향 조사

축대칭체의 경우 축 방향으로 반경이 달라지고 곡률변화가 심한 부분이 있으므로 수치계산에 사

Table 1 Grid dependency test for resistance

순번	격자수	$C_p \times 10^3$	$C_f \times 10^3$	$C_T \times 10^3$
1	8523	0.05069	1.92364	1.97433
2	10563	0.03969	1.92427	1.96396
3	31643	0.05063	1.93007	1.98070
4	49093	0.07174	1.93434	2.00608
5	69593	0.07129	1.93453	2.00582

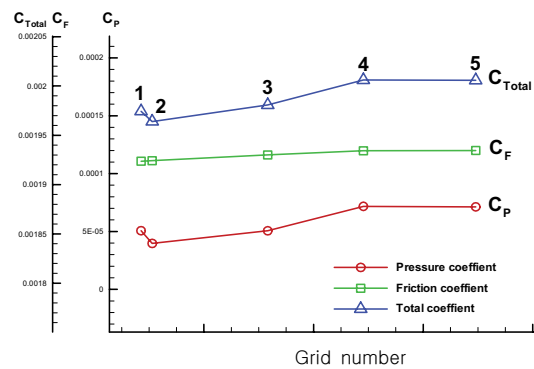


Fig. 4 Convergence of resistance with grid numbers

용된 격자의 분해능에 대한 고려가 필요하며 이에 따라 수치계산의 첫 단계로 격자수에 따른 수치해의 영향을 조사하였다. 격자수는 8523개를 기준으로 $\sqrt{2}$ 배씩 x 방향, r 방향으로 같은 비율로 증가시켜 가면서 계산을 수행하였다. Table 1에 격자수와 수치계산에서 구해진 총저항 및 마찰저항과 압력저항을 보이고 있으며, Fig. 4에 그래프로 나타내었다. 격자수가 많아질수록 값이 증가하나, 4번 격자이후로는 거의 일정한 값으로 나타나므로 이후 모든 수치계산은 격자생성 및 계산시간 등을 고려하여 4번 격자분포를 사용하였다.

3.2 실험결과와의 비교

수치해의 정확도를 알아보기 위해 축 대칭체의 풍동실험 결과를 가지고 물체 표면에서의 압력을 비교하였으며, 경계층 내의 속도분포를 Fig. 5에 보인바와 같이 $X/L = 0.158, 0.357, 0.595$ 위치에서 비교하였다. 또한 실험의 속도분포 자료를 바탕으로 클라우저 도시(Clauser Plot)를 활용하여 마찰계수를 추정하고 계산결과와 비교해 보았다.

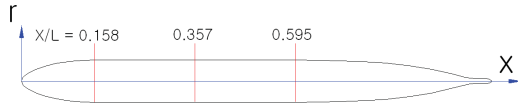


Fig. 5 Positions on the axisymmetric body for comparing velocity profiles

압력분포

레이놀즈수가 1.0×10^8 인 경우에 본 연구에서 계산된 압력분포와 압력구배를 실험 및 포텐셜 계산결과(Coder 1983)와 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 다른 레이놀즈수 유동의 경우에 압력분포는 거의 차이가 없기 때문에 1.0×10^8 의 경우에 대해서만 도시하였다.

표면 압력은 예상 밖으로 실험과 다소 큰 차이를 나타내고 있다. Nose부분에서는 차이가 작으나 실험값이 약간 높고, 중앙평행부에서는 실험값이 다소 낮으며 $X/L = 0.2$ 부근을 지나면서 그 차이가 점점 커지고 있다. 그러나 압력구배는 대부분의 영역에서 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있으며, 압력분포는 포텐셜 결과와는 Tail 부근을 제외하곤 잘 일치하고 있으나, 중앙평행부와 Tail ($X/L > 0.97$)부근에서 실험과 압력분포의 차이를 보이는데, 이는 풍동의 blockage가 충분히 작은 것을 고려할 때, 풍동실험시 축대칭체에 부착된

지지 스트럿(strut)의 영향 또는 기타 알 수 없는 원인으로 인해 유동의 축대칭성이 깨져 실험의 압력분포에 영향을 미쳤을 가능성도 배제할 수는 없다.

속도프로파일

레이놀즈수 1.22×10^7 , 1.0×10^8 , 1.5×10^8 에 대해 $X/L = 0.159$, 0.357 , 0.595 의 위치에서 속도 프로파일의 계산결과와 측정값을 비교하여 Fig. 7에 나타내었다.

얇은 경계층 구간($X/L = 0.159$)에서 계산결과와 실험과 최대 약 5%의 차이를 보이며, 모든 위치에서 레이놀즈수가 커질수록 실험값과 더욱 잘 일치하는 경향을 보여주고 있다. 그러나 벽 가까이에서는 실험의 속도가 계산의 속도보다 다소 작게 나타나고 있으며 이러한 속도차이의 영향은 앞서 살펴본 압력분포에 그대로 반영되어 나타난 것을 알 수 있다.

마찰계수(C_f)

Fig. 8은 레이놀즈수가 1.0×10^8 인 유동에 대한 유속 측정결과를 각 위치에서의 클라우저 도식(Clauser plot)로 나타낸 것이며, 세로축은 Q/U_0 이고 가로축은 $U_0 y/\nu$ 이다. 여기서 Q 는 실험으로부터 측정된 축방향 속도이며, U_0 는 유입속도, y 는 벽으로부터의 좌표, ν 는 동점성계수이다.

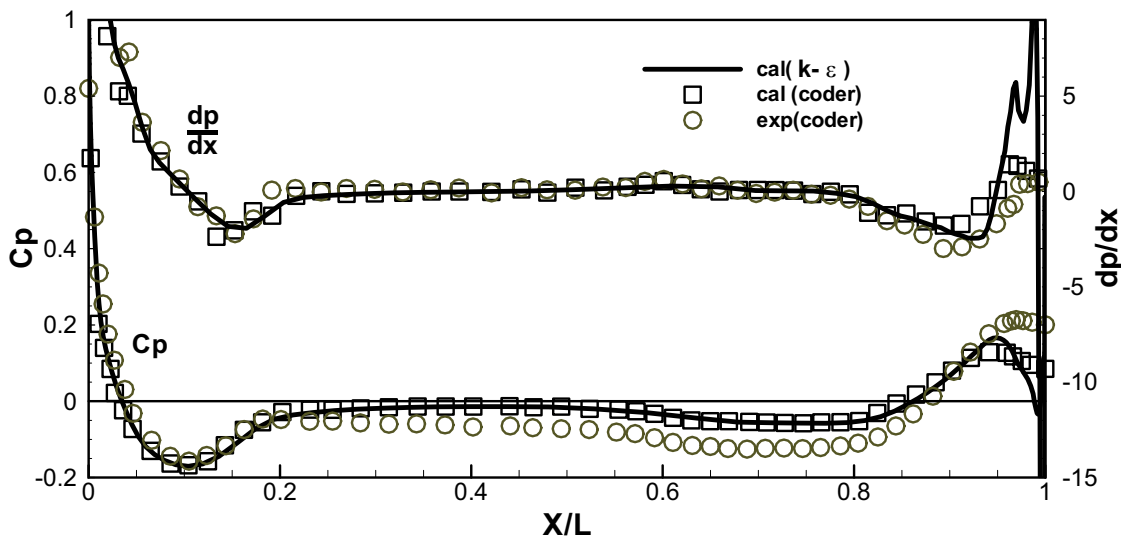


Fig. 6 Calculated and measured surface pressure over the axisymmetric body($Re=1.0 \times 10^8$)

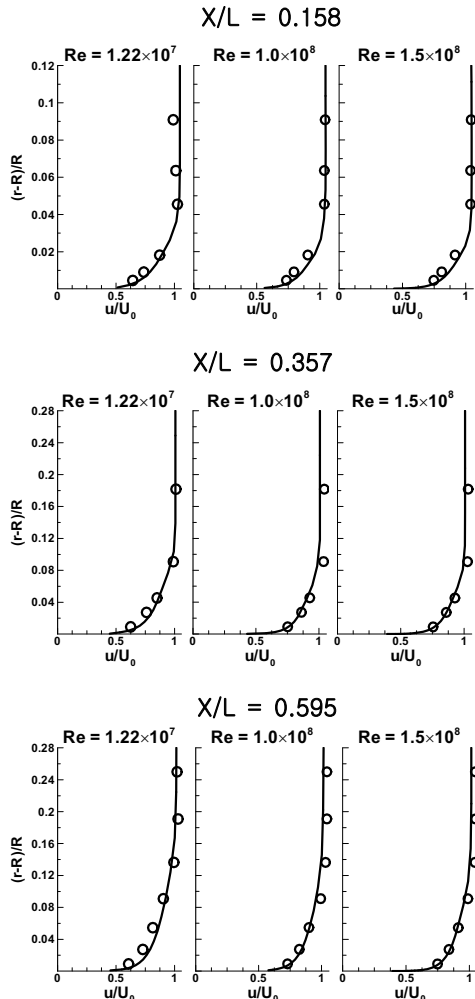


Fig. 7 Velocity profiles on the axisymmetric body

클라우저 도시는 그림에 표시한 직선 및 식 (6)과 같이 마찰속도(U_τ)를 변수로 하여 로그법칙을 나타낸 것과 실험의 속도분포를 위에 설명한 방법으로 함께 도시하여 비교함으로써 기울기가 일치하는 마찰속도를 찾는 것이다. 이 도시는 유입속도로 무차원화 된 것이므로 $u^+ - y^+$ 좌표가 아님을 유의해야한다. 본 연구에서 사용된 로그법칙은 식 (4)와 같으며, 실험으로부터 얻어진 값인 $\kappa = 0.418$, $B = 5.45$ (Patel 1998)를 사용하였다.

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + B \quad (4)$$

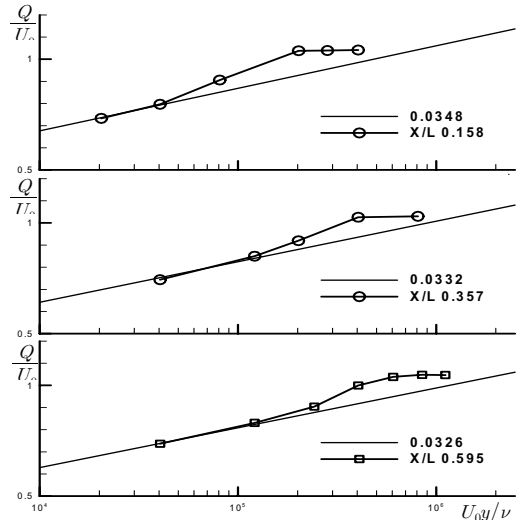


Fig. 8 Clauser plot of measured velocity profiles on the axisymmetric body($Re=1.0 \times 10^8$)

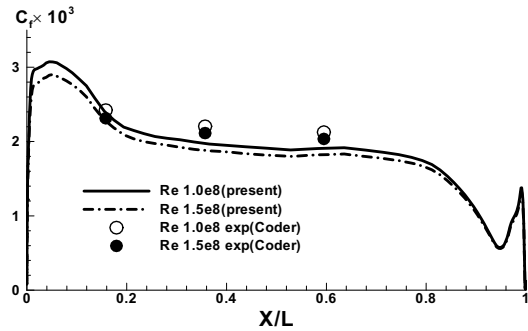


Fig. 9 Friction coefficients with experimental data

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau}, \quad y^+ = \frac{u_\tau y}{\nu}, \quad U_\tau = \frac{u_\tau}{U_0} \quad (5)$$

$$\frac{Q}{U_0} = U_\tau \left\{ \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{U_0 y}{\nu} U_\tau \right) + B \right\} \quad (6)$$

실험의 표면 마찰계수(C_f)를 각 위치의 속도프로파일로부터 클라우저 도시를 활용하여 추정하였으며, 이를 계산결과와 함께 Fig. 9에 나타내었다. 계산이 수행된 다른 레이놀즈수(1.22×10^7 , 1.5×10^8)에 대해서도 클라우저 도시를 수행하였으나 레이놀즈수가 1.22×10^7 의 경우에는 속도 측정점이 로그영역을 벗어나서 마찰속도 추정이 어려우므로 계산과의 비교에서는 제외하였다. 표면

마찰계수는 두 레이놀즈수 모두 대체적으로 계산 값이 작게 나타나고 있다. 각 비교 위치에서 경계층이 두꺼워질수록 마찰계수가 작아지는 경향을 보이고 있고, 계산과 실험의 차이는 점차로 증가하여 두 레이놀즈수 모두 세 위치에서 각각 2.5%, 9.4%, 12%의 차이를 보였다.

4. 결론

실선 주위의 고 레이놀즈수 유동 계산에 앞서 비교적 높은 레이놀즈수의 실험 자료가 알려져 있는 축대칭체를 대상으로 세 가지 레이놀즈수 (1.22×10^7 , 1.0×10^8 , 1.5×10^8) 유동에 대해 RANS 방정식과 Realizable $k-\epsilon$ 난류모형을 이용하여 수치해석을 수행하고 실험 자료와 비교하였다.

속도 프로파일은 축대칭체의 세 위치에서 레이놀즈수가 커질수록 실험과 잘 일치하는 경향을 보여주었고, 길이 방향의 표면 압력분포는 꼬리부분을 제외하고는 포텐셜 해석의 결과와 잘 일치하나 실험과는 차이가 나타났다. 압력구배는 본 계산과 포텐셜 해석, 실험의 결과가 꼬리를 제외한 대부분의 영역에서 잘 일치함을 확인하였다. 실험의 속도 프로파일로부터 추정된 마찰계수를 해석결과와 비교한 결과, 모든 위치에서 계산값이 더 작게 나타났으며, 경계층이 두꺼워질수록 값의 차이가 커지는 것을 확인하였다.

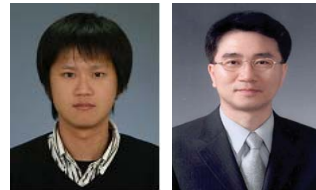
본 연구의 계산결과와 실험결과의 차이가 나타난 원인을 크게 두 가지로 생각할 수 있다. 하나는 경계층 내의 log-law가 성립하는 완전난류 (fully turbulent) 영역 내의 속도 계측점이 부족한 것과 풍동실험시 축대칭체의 지지 스트럿(strut) 영향 등 실험 자료의 부정확성을 생각할 수 있다. 또 다른 원인으로는 수치해석에 사용된 난류모형과 벽함수의 적용으로 인해 발생한 오차가 원인일 수 있다. 벽함수를 사용하는 경우, 벽으로부터 첫 격자점의 y^+ 값은 수치해에 영향을 미치므로 고 레이놀즈 유동의 수치해석을 위해서는 이에 대한 보다 체계적인 연구가 필요할 것으로 생각된다. 이와 함께 고 레이놀즈수 유동에 대한 수치해석 결과를 비교, 검증할 수 있는 정확한 실험 자료도 확보해야만 할 것이다.

후 기

본 논문은 충남대학교 2007년도 교원연구력강화사업과제로 연구되었으며, 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Ahn, J.W., Song I.H. and Park, T.S., 1997, "Experimental and Numerical Studies of the Flowfield around an Axisymmetric Body," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 34, No. 3, pp. 9-18.
- Coder, D.W., 1983, "Reynolds Number Scaling of Velocities in Axisymmetric Turbulent Boundary Layers," 14th Symposium Naval Hydrodynamics, pp. 1071-1086.
- Choi, J.K. and Kim, H.T., 2008, "Numerical Analysis of High-Reynolds-number Flat Plate Boundary Layers," Proceedings of the Annual Autumn Meeting, SNAK, pp. 774-779.
- Ju, S. and Patel, V.C. 1991, "Stern Flows at Full-Scale Reynolds Numbers," Journal of Ship Research, Vol. 35, No. 2, pp. 101-112.
- Landweber, L. and Gertler, M. 1950, "Mathematical Formulation of Bodies of Revolution," David Taylor Model Basin Report, p. 719.
- Lew, J.M., 1991, "A Computation of Viscous Flows on an Axisymmetric Body," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 28, No. 1, pp. 19-26.
- Patel, V.C. 1998, "Flow at High Reynolds Number and over Rough Surfaces-Achilles Heel of CFD," Journal of Fluids Engineering, Vol. 120, No. 3., pp. 1-26.



< 최 정 규 > < 김 형 태 >