

유동 방향 변화에 따른 잠수함 주위의 유동 특성과 유체동역학적 계수의 변화

장진호^{†*}, 박원규^{*}

부산대학교 기계공학과^{*}

The Variation of Flow Field and Hydrodynamic Coefficients of Submarine
by Changes of Angle of Attack and Yaw Angle

Jin-Ho Jang^{†*} and Warn-Gyu Park^{*}

School of Mechanical Engineering, Pusan National University^{*}

Abstract

The three-dimensional RANS equations were applied to analyze the flow field of a submarine. To validate the code, the DARPA SUBOFF bare hull and an ellipsoid at angles of attack of 10° and 30° were simulated and good agreement with experiments was obtained. After the code validation, the flows over the full configuration of DARPA SUBOFF model having a fairwater and four stern appendages were simulated at four angles of attack(0°, 10°, 20°, 30°) and three yaw angles(10°, 20°, 30°). Specifically, the pressure contours and streamlines of fairwater and stern appendage were compared as the angle of attack and yaw angle changed. The variations of hydrodynamic forces were also calculated.

※Keywords: Submarine(잠수함), Steady state(정상상태), RANS equation(RANS 방정식), Angle of attack(받음각), Yaw angle(편향각), Hydrodynamic coefficient(유체동역학적 계수)

1. 서론

은밀한 공격 수단인 잠수함은 냉전 체제가 무너지면서 건조 척수는 감소되었으나, 앞으로 현재보다 더 중요한 임무를 수행할 것으로 여겨져 21세기의 신형 고성능 저소음 잠수함에 대한 기술들이계속적으로 활발히 개발되고 있다. 특히 잠수함의 성능 및 소음은 선체 주위 유동 특성에 많은 영향을 받으므로 고성능 및 저소음의 잠수함을 개발하기 위해서는 주위 유동 특성에 대해 정확한 이해가 필요하다. 이에 대한 선행 연구로는 다음과 같다. Boger et al.(1977)은 수중 운동체 주위의 유동을 물리학을 바탕으로 해석할 수 있는 수치적 모사 방법을 제시하였으며

Donaldson et al.(1990)은 잠수함(SUBOFF 모델) 주위의 유동을 포텐셜 코드와 RANS 코드를 사용하여 연구하였다. 그리고 Sung et al.(2002)은 동적 거동을 가지는 잠수함(ONR Body-1 모델) 주위 유동을 RANS 코드를 이용하여 Fu et al.(2002)의 PIV 계측을 통한 실험적 연구와 비교 연구하였다. 또한 Groves et al.(1989)은 잠수함(SUBOFF 모델) 주위의 유동을 실험을 통해 연구하였으며, Huang et al.(1992)은 다양한 부가물을 부착한 축대칭 동체에 대해 실험적으로 연구하였다. 수치 해석 방법으로 Multi-block, Multi-grid system에 대한 비압축성 난류 유동 해석 기법 연구가 Sheng et al.(1995)과 Bull(1997)에 의해 선행되었다. 국내 연구 사례로는, Kim et al.(2003)이 WAVIS 코드를 이용하여 잠수함의 유체력 산정에 대해 연구를 한 적이 있다. 본 연

접수일: 2004년 2월 4일, 승인일: 2006년 7월 4일

†교신지자: human-jjh@hanmail.net, 055-269-3484

구의 목적은 받음각과 편향각 변화에 대한 잠수함의 동역학적 계수 변화를 전산 유체 역학을 이용하여 추론하고 유동 변화 양상을 파악하고자 하는데 있다. 본 연구의 목적이 거시적인 관점에서 Kim et al.(2003)의 연구 내용과 상당히 일치하나 Kim et al.의 연구에서는 유한체적법(FVM)을 기초로 하여 개발된 KRISO의 WAVIS 코드를 사용하고 있는데 반해, 본 연구에서는 본 연구실에서 자체 개발하여 보유하고 있는 유한차분법(FDM)을 기초로 하는 RANS 코드를 이용하고 있다.

2. 지배방정식 및 수치해석방법

3차원 비압축성 점성유동의 지배방정식은 N-S방정식으로서, 이를 무차원화한 후 일반화된 곡선 좌표계로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial \xi} (\bar{E} - \bar{E}_v) + \frac{\partial}{\partial \eta} (\bar{F} - \bar{F}_v) + \frac{\partial}{\partial \zeta} (\bar{G} - \bar{G}_v) = 0 \quad (1)$$

여기서, \bar{q} 는 유동벡터, \bar{E} , \bar{F} , \bar{G} 는 대류항이며, \bar{E}_v , \bar{F}_v , \bar{G}_v 는 점성항을 의미한다. 식(1)의 해를 구하기 위해 반복 시간 행진(Iterative Time marching) 방법(Park and Sankar 1993, Park et al. 1998)을 사용하였는데 간단히 서술하면, 우선, 운동량 방정식을 시간행진 방법을 이용하고, 뉴턴 반복법을 적용하면,

$$\frac{1}{\Delta \tau} (\bar{q}^{n+1, k+1} - \bar{q}^n) + \delta_\xi \bar{E}^{n+1, k+1} + \delta_\eta \bar{F}^{n+1, k+1} + \delta_\zeta \bar{G}^{n+1, k+1} = \delta_\xi \bar{E}_v^{n+1, k+1} + \delta_\eta \bar{F}_v^{n+1, k+1} + \delta_\zeta \bar{G}_v^{n+1, k+1} \quad (2)$$

여기서 위 첨자 n+1, n 은 시간 간격을 k+1은 반복 계산을 의미한다. \bar{E} , \bar{F} , \bar{G} , \bar{E}_v , \bar{F}_v , \bar{G}_v 를 n+1 시간단계와 k 반복단계에 대해 국부적으로 선형화시키면 다음과 같다.

$$\left(\frac{1}{\Delta \tau} + \frac{\partial}{\partial \xi} \bar{A} + \frac{\partial}{\partial \eta} \bar{B} + \frac{\partial}{\partial \zeta} \bar{C} \right) \Delta \bar{q} = \omega \bar{R}^{n+1, k} \quad (3)$$

여기서 ω 는 완화계수이고 \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} 는 Jacobian 행렬로 다음과 같다.

$$\bar{A} = \frac{\partial}{\partial q} (\bar{E} - \bar{E}_v); \bar{B} = \frac{\partial}{\partial q} (\bar{F} - \bar{F}_v); \bar{C} = \frac{\partial}{\partial q} (\bar{G} - \bar{G}_v) \quad (4)$$

그리고 여기서 $\bar{R}^{n+1, k}$ 는 잔류벡터라 불리는 항으로 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{R}^{n+1, k} = - \frac{1}{\Delta \tau} (\bar{q}^{n+1, k} - \bar{q}^n) - (\delta_\xi \bar{E}^{n+1, k} + \delta_\eta \bar{F}^{n+1, k} + \delta_\zeta \bar{G}^{n+1, k}) + (\delta_\xi \bar{E}_v^{n+1, k} + \delta_\eta \bar{F}_v^{n+1, k} + \delta_\zeta \bar{G}_v^{n+1, k}) \quad (5)$$

다음으로 연속 방정식은 비압축성 유동해석의 효율적인 수행하기 위해 MAC(Marker-and-Cell) 방법 (Viecelli 1969)의 개념을 이용하였다.

$$p^{n+1, k+1} - p^{n+1, k} = \Delta p = -\beta (\nabla \cdot V) \quad (6)$$

여기서 β 는 완화계수를 의미하며 난류 유동장 해석을 위해 저 레이놀즈 $k-\epsilon$ 모델(Chien 1982)을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 코드 검증

본 연구에서 3차원 잠수함 주위 유동해석에 앞서 개발된 코드의 검증을 위해 3차원 타원체와 잠수함의 부가물이 없는 bare hull 주위의 유동해석을 수행하였다. 먼저 타원체의 계산영역에 해당하는 격자계는 Fig. 1과 같은 H-O형의 격자계로서 사용된 격자수는 86×23×30개이며 유동해석은 Re수가 7.2×10⁶와 7.7×10⁶에서 받음각(α)이 10°와 30°인 경우에 대해 계산을 수행하였다. 수치해석에 사용된 좌표계는 일반화된 곡선 좌표계를 사용하였으며 초기 조건으로 자유 유동 조건을 사용하였고 원거리 유입 경계 조건과 유출 경계 조건 역시 자유 유동 조건을 부여하였다. 타원체 표면에서는 정착조건과 표면의 법선 압력 구배가 영(zero)이라는 조건을 이용하였다.

Fig. 2는 Re=7.7×10⁶, $\alpha=30^\circ$ 에서 표면 유선을 실험(Veer 1991)과 비교한 것으로써 비교적 서로 잘 일치함을 알 수 있다. 그리고 Fig. 3에는 Re=7.2×10⁶와 $\alpha=10^\circ$ 에서 표면압력분포를 실험값(Patel

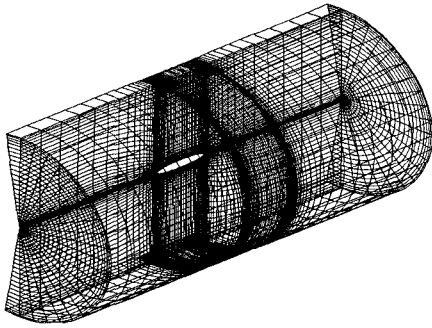


Fig. 1 Grid of an ellipsoid

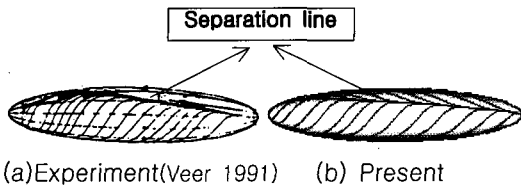


Fig. 2 Limiting streamlines on the ellipsoid

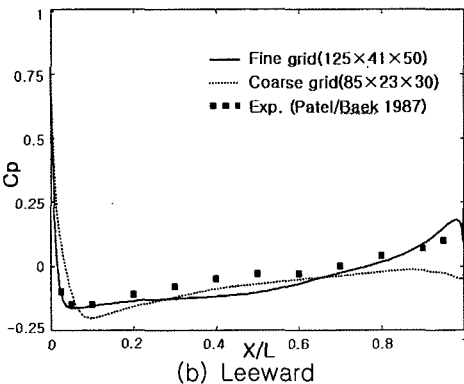
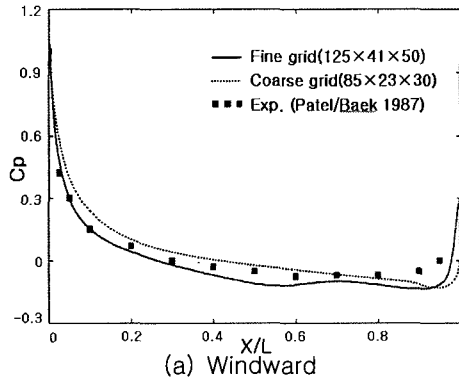


Fig. 3 Pressure comparison of the ellipsoid

and Baek 1987)과 비교하였으며 이것 역시 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

다음으로 Fig. 4의 SUBOFF bare hull에 대해 $Re=1.0 \times 10^6$, $\alpha=0^\circ$ 일 때 유동해석을 수행하여 Fig. 5에서 표면압력분포 값을 실험값(Groves et al. 1989)과 다른 전산해석결과(Donaldson et al. 1990)와 비교하여 나타내었다.

그림에서 보듯이 실험, 타 계산 결과와 본 연구에 의한 계산 결과들이 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있으나, 선두부에서 계산 결과들은 서로 잘 일치하나 모든 계산결과가 실험과 다소 차이를 보이는 것은 유입난류강도가 실험과 일치하지 않거나 실험에서는 선두부의 일정 위치에 돌출기를 이용하여 난류생성기를 부착하고 있기 때문으로 여겨진다. Fig. 5의 가로축 변수 R_{max} 는 bare hull의 선체 최대 반경을 나타낸다.

3.2 SUBOFF 모델 주위의 유동해석

DARPA SUBOFF 모델(Groves et al. 1989)의 형상은 Fig. 6(a)와 같으며 격자계는 Fig. 6(b)와 같이 9개의 계산영역으로 나눈 다중 블록의 격자계를 사용하였다. 블록 #1~4는 각각 $154 \times 28 \times 560$ 이고, fairwater부분인 블록 #5는 $8 \times 55 \times 32$, stern appendage부분의 블록 #6 ~ 9는 각각 $11 \times 37 \times 45$ 로 구성되어 있다.

유동해석은 Re 수가 1×10^6 인 경우로서, 받음각(α)가 $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ 인 경우와 편향각(θ)가 $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ 에 대해 계산을 수행하였다. 보통의 경우 잠수함 유동계산은 $Re = 10^7$ 범위 정도가 되어야 하나 본 연구에서는 Fig. 5의 계산과 동일한 $Re = 10^6$ 에 대해서 계산되어졌으므로 매우 저속 운항일 때에 해당된다. Fig. 7은 받음각과 편향각이 0° 일 때 fairwater 주위에서 말굽와류(Horseshoe vortex)가 선명히 잘 나타나 있음을 보여주고 있으며 Fig. 8~14는 각각의 받음각과 편향각에 대한 압력분포 (그림(a))와 전체유선 (그림(b)), fairwater 주위 유선 (그림(c)), stern appendage 주위 유선 (그림(d))를 나타내고 있다. 이들 그림에서 볼 수 있듯이, fairwater의 급격한 형상구배지역과 stern appendage를 제외하고는 대체로 유동의 방향이 흩어짐 없이 물체 주위를 따라 흐르고 있고, fairwater

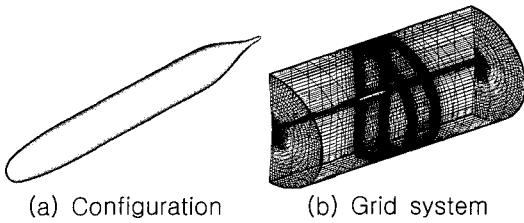


Fig. 4 SUBOFF bare hull

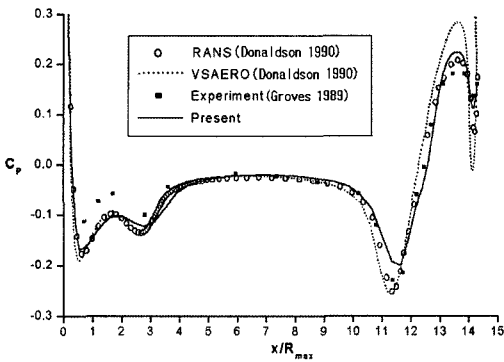
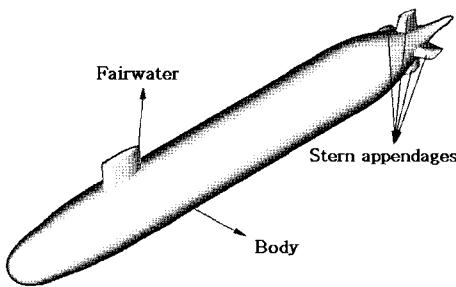
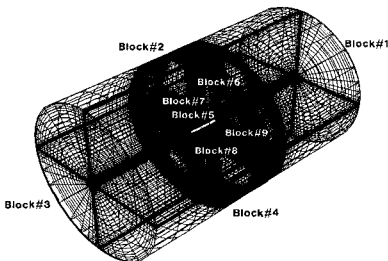


Fig. 5 Pressure comparison of SUBOFF bare hull



(a) Configuration of DARPA SUBOFF model



(b) Grid system

Fig. 6 DARPA SUBOFF model

와 stern appendage의 상단에서 유동박리가 나타나고 측면의 후미 부분에서는 급격한 형상구배로 인해 강한 와류현상을 볼 수 있는데, 이는 받음각과 편향각이 커질수록 더 강해짐을 알 수 있다. 잠수함 주위의 압력분포를 보면 대체적으로 동체, fairwater, stern appendage의 전두부 주위에서 높은 압력 구배를 나타내고 있고 와류가 발생하는 지역인 fairwater, stern appendage의 측면에서는 낮은 압력 분포를 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 유선을 표시한 그림들을 보면 받음각과 편향각이 커짐에 따라 와류 중심(선이 진하게 표시된 부분)이 더 두터워지고, 박리선이 더 길게 발생하고 와류가 더 강해짐을 볼 수 있다. 그리고 받음각이 커짐에 따라 fairwater 후류부분에 생기는 와류 중심의 위치가 하단에서 상단으로 이동되고 있는 것을 볼 수 있다. 또한 공통적으로 fairwater에서 발생하는 와류는 stern appendage에서 발생하는 와류보다 약하다는 것을 알 수 있는데, 이것은 fairwater와 stern appendage의 형상을 비교 해 볼 때 종횡비(aspect ratio)의 차이에 의한 것이다.

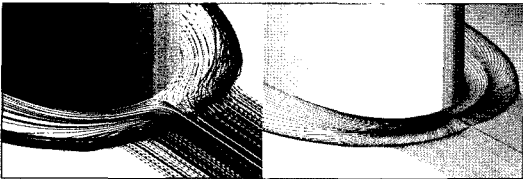
Fig. 15와 Fig. 16은 각각 받음각과 편향각의 변화에 따른 유체동역학적 계수들의 변화를 나타내고 있다. 이 때 유체동역학적 무차원 계수의 기준면적은 잠수함의 정면면적(Frontal area)이고 기준길이는 잠수함의 전체길이의 1/2로 하였다. 예를 들어, 항력계수(C_D)와 Yawing 모멘트 계수(C_N)은 다음과 같이 정의된다.

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2 S} ; C_N = \frac{N}{\frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2 S l} \quad (7)$$

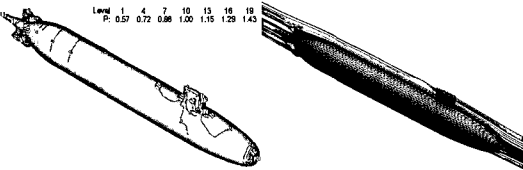
여기서 D는 항력을 의미하며 N은 Yawing 모멘트, S는 정면 면적, l은 기준 길이를 의미한다.

Fig. 15(a)에서 보듯이 받음각이 증가할수록 양력 계수(C_L)이 급격히 증가함을 알 수 있고 항력계수(C_D) 역시 서서히 증가함을 알 수 있다. 그러나 받음각 변화가 측력에 미치는 영향은 없으므로 측력계수(C_S)는 변화가 없다. Fig. 15(b)는 모멘트 계수 변화를 보여주고 있는데, 받음각이 증가할수록 Pitching 모멘트 계수(C_M)는 점차 증가하나 나머지 Yawing 모멘트 계수(C_N), Rolling 모멘트 계수(C_R)는 변화가 없다. Fig. 16은 편향각 증가에 따른 유체동역학적

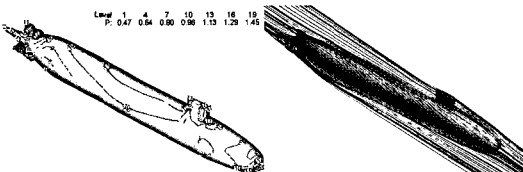
계수의 변화를 그린 것으로, 편향각이 증가하면 항력 계수와 측력계수가 점점 증가함을 알 수 있고 Fig. 15(a)의 변화가 없었던 측력계수 역시 fairwater와 stern appendage의 영향에 의해 편향각이 증가할수록 증가하고 있음을 알 수 있다. Fig. 16(b)는 모멘



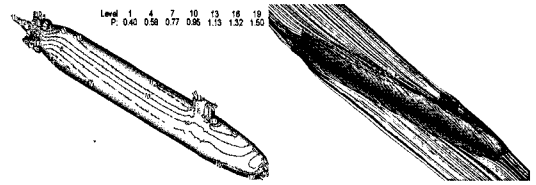
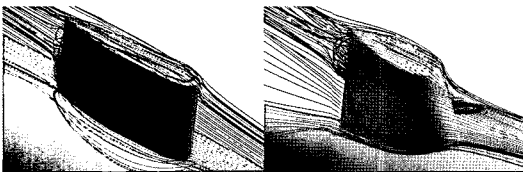
(a) Limiting streamlines (b) 3D streamlines
Fig. 7 Horseshoe vortex around the fairwater



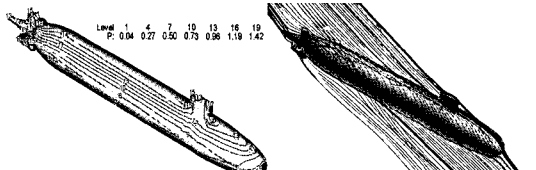
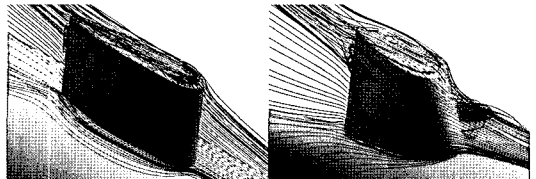
(a) Pressure contours (b) Streamlines
 (c) Fairwater (d) Stern appendage
Fig. 8 Flow features $\alpha=0^\circ, \theta=0^\circ$



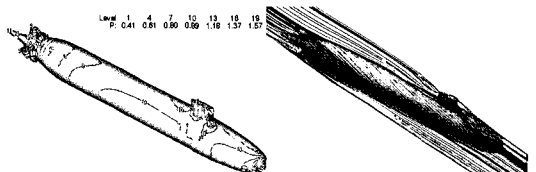
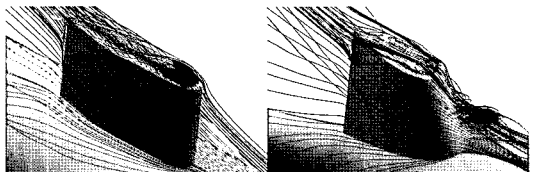
(a) Pressure contours (b) Streamlines
 (c) Fairwater (d) Stern appendage
Fig. 9 Flow features $\alpha=10^\circ, \theta=0^\circ$



(a) Pressure contours (b) Streamlines
 (c) Fairwater (d) Stern appendage
Fig. 10 Flow features $\alpha=20^\circ, \theta=0^\circ$



(a) Pressure contours (b) Streamlines
 (c) Fairwater (d) Stern appendage
Fig. 11 Flow features $\alpha=30^\circ, \theta=0^\circ$



(a) Pressure contours (b) Streamlines
 (c) Fairwater (d) Stern appendage
Fig. 12 Flow features $\alpha=0^\circ, \theta=10^\circ$



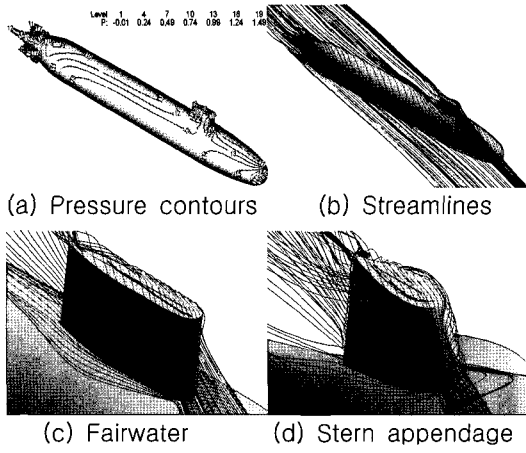


Fig. 13 Flow features $\alpha=0^\circ, \theta=20^\circ$

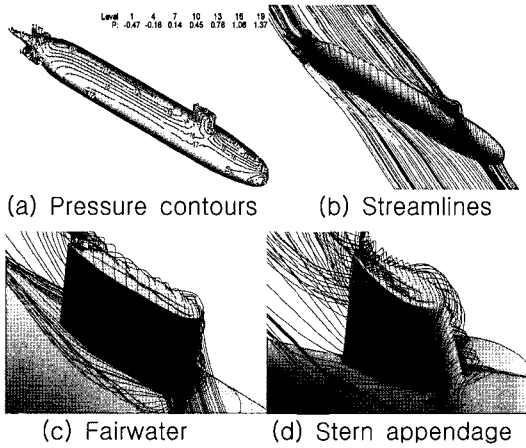


Fig. 14 Flow features $\alpha=0^\circ, \theta=30^\circ$

트 계수 변화를 나타내는 것으로 편향각이 증가할수록 전체적으로 모든 계수가 증가하고 있으며 Yawing 모멘트 계수의 증가폭이 가장 크다.

4. 결론

잠수함 주위 3차원 비압축성 점성유동을 해석할 수 있는 코드를 개발하였으며 코드 검증을 위해 타원체와 잠수함 DARPA SUBOFF bare hull 형상의 실험 데이터와 비교하여 코드의 타당성을 이끌어 내었다. 그리고 본 코드가 fairwater 주위의 말굽와류 (horseshoe vortex)를 정확히 묘사해 낼 수 있는 등 잠수함 주위 유동장을 정확히 해석하고 있음을 보였고 받음각과 편향각이 0° 에서 30° 까지 10° 간격으로 변할 때 SUBOFF 잠수함 모델 주위의 유동 변화를

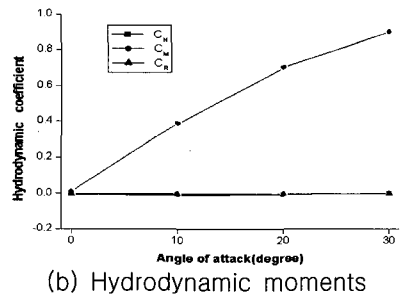
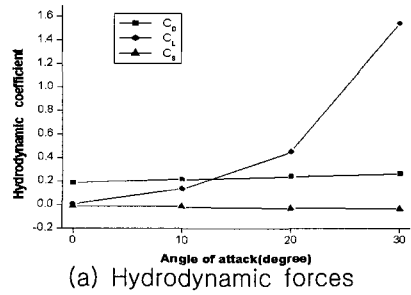


Fig. 15 Variation of hydrodynamic coefficients in terms of angle of attack

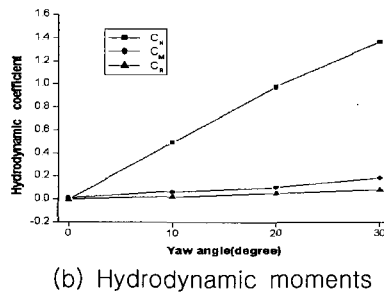
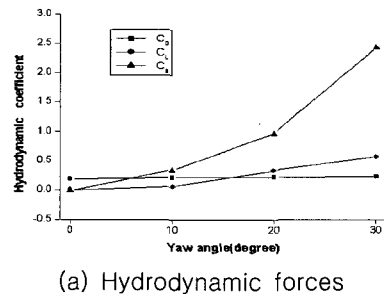


Fig. 16 Variation of hydrodynamic coefficients in terms of yaw angle

유선과 등압력 분포도를 이용하여 파악할 수 있었으

며 이에 따르는 유체동역학적 계수의 각 방향 힘 성분인 C_L , C_D , C_S 와 모멘트 성분인 C_M , C_N , C_R 의 변화를 계산하였다.

후 기

이 연구는 한국과학재단의 첨단조선공학연구센터의 지원으로 수행되었다.

참 고 문 헌

- Boger. D.A., Davoudzadeh. F., Dreyer. J.J., McDonald. H., Schott. C.G., Zierke. W.C., Arabshahi. A., Briley. W.R., Busby. J.A., Chen. J.P., Jiang. M., Jonnalagadda. R., McGinley. J., Pankajakshan. R., Sheng. C., Stokes. M.L., Taylor. L.K., and Whitfield. D.L., 1977, A Physics-Based Means of Computing the Flow Around a Maneuvering Underwater Vehicle, Technical Report No. TR 97-002.
- Bull, P., 1997, "The Validation of CFD Predictions of Nominal Wake for the SUBOFF Fully Appended Geometry," The 21th Symposium on Naval Hydrodynamics, Trondheim, pp. 1061-1076.
- Donaldson. C., Everstine. G.C., Fyfe. D., Goldstein. D. and Stern. F. of Jason Associates Corporation, 1990, "Requirements Analysis for the DARPA Submarine," Hydrodynamics/Hydroacoustic Technology Center.
- Fu, Thomas. C., Paisan. A. and David E.H., 2002, PIV Measurements of a Turning Submarine Model(ONR BODY 1) Part 1: Experimental Setup, NSWCCD-50- TR-2002/019, Hydromechanics Directorate, Research and Development Report.
- Groves. N.C., Huang. T.T. and Chang. M. S., 1989, Geometric Characteristics of DARPA SUBOFF Models(DTRC MODEL NOS. 5470 and 5471), DTRC/SHD-1298-01, Ship Hydromechanics Department, David Taylor Research Center.
- Huang. T.T., Liu. H.L., Groves. N.C., Forlini. T.J., Blanton. J.N., and Gowing. S., 1992, "Measurement of Flows Over an Axisymmetric Body with Various Appendages," 19th Symposium on Naval Hydrodynamics, Seoul, Korea.
- Kim. J., Park. I.R., Van. S.H. and Kim. W. J., 2003, "Calculation of Turbulent Flows around a Submarine for the Prediction of Hydrodynamic Performance," Journal of Ship & Ocean Technology, Vol. 7, No. 4, pp. 16-31.
- Park. W.G., Jung, Y.R., and Ha, S.D., 1998, "Numerical Viscous Flow Analysis around a High Speed Train with Crosswind Effects," AIAA Journal, Vol. 36, No. 3, pp. 477-479.
- Park. W.G., and Sankar. L.N., 1993, "A Technique for the Prediction of Unsteady Incompressible Viscous Flows," AIAA Paper 93-3006.
- Patel. V.C. and Baek. J.H., 1987, "Boundary Layers in Planes of Symmetry, Part II : Calculations for Laminar and Turbulent Flows," AIAA Journal, Vol. 25, No. 6, pp. 812-818.
- Sheng, C., Taylor, L.K. and Whitfield, D.L., 1995, "Multiblock Multigrid Solution of Three-Dimensional Incompressible Turbulent Flow About Appended Submarine Configuration," AIAA Paper 95-0203.
- Sung. C.H., Jiang. M.Y., Rhee. B., Percival. S., Atsavaprane. P. and Koh. I.Y., 2002, "Validation of the Flow around a Turning Submarine," The 24th Symposium on Naval Hydrodynamics, Fukuoka, Japan, pp. 167-178.
- Veer N. Vatsa, 1991, "Viscous Flow Solutions For Slender Bodies of Revolution At Incidence," Computers and Fluids, Vol. 20, No. 3, pp. 313-320.
- Viacelli. J.A., 1969, "A Method for including Arbitrary External Boundaries in the MAC Incompressible Fluid Computing Technique," Journal of Computational Physics, Vol. 4, pp. 543-551.