

## 유동 방향 변화에 따른 잠수함 주위의 3차원 점성유동 해석과 공기역학적 계수의 변화

장진호\* · 박원규\*\*

### Viscous Flow Analysis of a Submarine with Variation of Angle of Attack and Yaw Angle

Jin-Ho Jang\*, Warn-Gyu Park\*\*

**KeyWords** : submarine model(잠수함 모델), aerodynamic forces(공력), 3-D unsteady incompressible flow(3차원 비정상상태 비압축성 유동), multi-block grid(다중격자)

#### Abstract

In this paper, the submarine model, called DARPA SUBOFF model, has been numerically analyzed to investigate the aerodynamic forces variation in terms of angle of attacks and yaw angles. The SUBOFF model is consisted of the three parts : axisymmetric body, fairwater, and four symmetric stern appendages. Three dimensional unsteady incompressible Navier-Stokes equation was used on curvilinear multi-block grid system. To validate the present code, the SUBOFF bare hull and an ellipsoid at angle of attacks of 10° and 30° were simulated and a good agreement with experiments was obtained. After the code validation, the flows over SUBOFF model were simulated at three different angle of attacks and yaw angles. The variation of aerodynamic forces in terms of angle of attack and yaw angle were calculated. Also, to understand the flow features around a submarine with variation of yaw and attack angle, the pressure contours and streamlines were plotted.

#### 1. 서론

은밀한 공격 수단인 잠수함은 냉전 체제가 무너지면서 건조 척수는 감소된 것이 사실이나, 앞으로 현재보다 더 중요한 임무를 접할 것이라는 예측 하에 21세기의 세계 잠수함에 대해 새로운 기술들이 활발히 개발되고 있는 실정이다. 특히, 이 기술들 중 잠수함의 추진 시스템에 대한 기술들이 많이 개발되고 있는데, 이는 잠수함 주위의 유동 특성에 직접적으로 관여되고 있다. 따라서 이러한 새로운 기술들을 개발하기 위해서는 잠수함 주위의 유동 특성에 대해 정확한 이해가 필요하며 최근 전산기 성능의 급속한 발달로 인하여 수치적인 방법에 의한 유체역학연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 David Taylor Research Center에서 제시한 DARPA SUBOFF 잠수함 모델(Ref 1.) 주위의 3차원 유동장을 추진 시스템에 영향을 줄 수 있는 받음각과 편향각의 변화에 따라 수치적으로 해석해 봄으로써, 공기역학적 계수를 구해보고 압력이나 속도 분포를 예측하고 점성유동의 기본적인 특성을 이해하는 데에 목적이 있다. 유동해석에 사용된 지배방정식은 3차원 비정상, 비압축성 N-S 방정식이며 유한차분법으로 이산화 하여 해석하였다. 이 연구 결과는 잠수함의 추진 시스템의 설계와 잠수함의 형상 설계 등 여러 가지 연구에 많은 도움이 될 것으로 기대된다.

#### 2. 지배방정식 및 수치해석방법

3차원 비정상상태 비압축성 점성유동의 지배방정식은 N-S 방정식으로서, 이를 무차원화한 후 일반화된 곡선좌표계로 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 시간행진(Iterative Time marching) 방법[Ref 2, 3]을 사용하였다. 우선, 운동량 방정식만을 생각해 보면 이 방정식은 포물선형 편미분방정식이므로 아래와 같이 시간행진 방법을 이용하고, Newton 반복법을 적용하면,

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

여기서 윗첨자 n+1, n 은 시간 간격을 k+1은 반복계산을 의미한다.  $\bar{E}$ ,  $\bar{F}$ ,  $\bar{G}$ ,  $\bar{E}_v$ ,  $\bar{F}_v$ ,  $\bar{G}_v$  를 n+1 시간단계와 k 반복 단계에 대해 국부적으로 선형화시키면 다음과 같다.

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

\* 부산대학교 대학원 기계공학과, human-jjh@hanmail.net

\*\* 부산대학교 기계공학부, wgpark@pusan.ac.kr

여기서  $\omega$ 는 완화계수(relaxation factor)이고  $\bar{A}$ ,  $\bar{B}$ ,  $\bar{C}$ 는 Jacobian 행렬로 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\bar{A} &= \frac{\partial}{\partial q} (\bar{E} - E_v); \bar{B} = \frac{\partial}{\partial q} (\bar{F} - F_v); \\ \bar{C} &= \frac{\partial}{\partial q} (\bar{G} - G_v)\end{aligned}\quad (4)$$

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

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

다음으로 연속 방정식은 비압축성 유동해석의 효율적인 수행하기 위해 MAC(Marker-and-Cell) 방법[4]의 개념을 이용하면,

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

여기서  $\beta$ 는 완화계수(relaxation factor)를 의미하며 난류 유동장 해석을 위한 Baldwin-Lomax 난류모델[5]이 사용되었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 코드 검증

본 연구에서 3차원 잠수함 주위 유동해석에 앞서 개발된 코드의 검증에 위해 3차원 타원체와 잠수함의 Bare Hull 주위의 유동해석을 수행하였다. 격자계는 Fig1과 같은 H-O의 격자계로서 사용된 격자수는 각각 58650(86×23×30)개, 259065(101×57×45)개이다. 먼저 타원체의 유동해석은 실험과의 비교를 위해 Re수가 각각  $7.2 \times 10^6$ ,  $7.7 \times 10^6$  인 경우에 대해 각각 받음각이  $10^\circ$ ,  $30^\circ$  인 경우에 대해 계산이 수행되어졌다. Fig.2에는  $Re=7.7 \times 10^6$ ,  $\alpha=30^\circ$ 에 대해 표면유선에 대해 실험[6]과의 비교를 나타내었는데 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 그리고 Fig.3에는  $Re=7.2 \times 10^6$ 와  $\alpha=10^\circ$ 에 대해 표면 Cp값을 실험값[7]과 비교하였다. 다음으로 SUBOFF bare hull의 유동해석은  $Re=1.0 \times 10^6$ ,  $\alpha=0^\circ$ 에 대해 수행하여 Fig.4에 Cp값을 실험값[1]과 다른 전산해석결과[1]와 비교하였다.

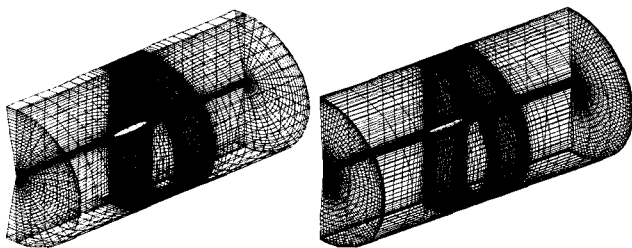


Fig.1 Grid system of an ellipsoid and SUBOFF bare hull



Fig.2 Limiting streamline on the ellipsoid body

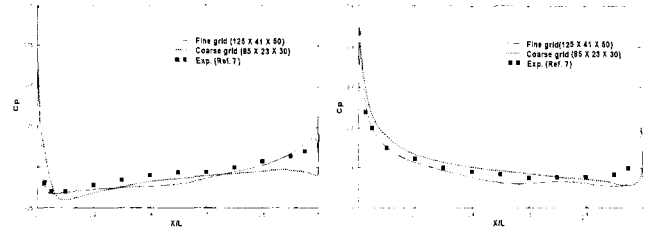


Fig.3 Pressure comparison of ellipsoid

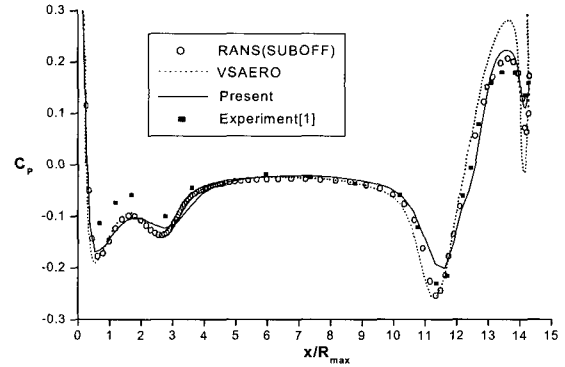


Fig.4 Pressure comparison of SUBOFF bare hull

#### 3.2 SUBOFF model 주위의 유동해석

##### 3.2.1 격자계 구성

잠수함의 형상은 Fig.5와 같은 DARPA SUBOFF 모델[1]이며 격자계는 Fig.6과 같이 9개의 계산영역으로 나눈 다중 블록의 격자계를 사용하였다. Block#1~4는 각각  $154 \times 28 \times 56$ 이고, Fairwater 부분인 Block#5는  $8 \times 55 \times 32$ , Stern부분의 Block#6~9는 각각  $11 \times 37 \times 45$ 으로 구성되어 있다.

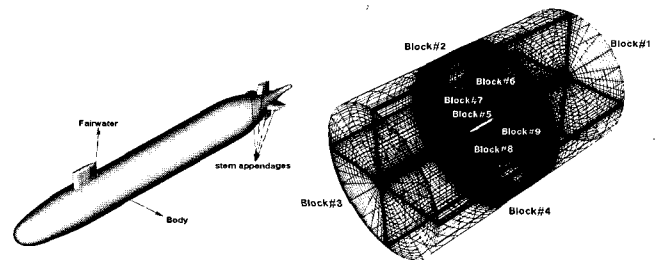


Fig.5 Configuration

Fig.6 Grid system

##### 3.2.3 결과 및 고찰

본 연구에서는, Re수가  $1 \times 10^6$ 인 경우로, 이 때 Re수는 SUBOFF 모델의 길이 방향의 길이를 기준으로 하였으며, 받음각( $\alpha$ )이  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ 인 경우와 편향각( $\theta$ )  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ 에 대해 계산을 수행하였다. Fig.7~13은 각각의 받음각과 편향각에 대한 압력분포(a)와 전체(b), Fairwater(c), Stern(d) 주위의 유선을 나타내고 있다.

결과에서 볼 수 있듯이 잠수함의 Fairwater의 급격한 물체구배지역과 Stern를 제외하고는 대체적으로 유동의 방향이 흘러짐 없이 물체 주위를 따라 흐르고 있고, Fairwater와 Stern의 상단에서 유동바리가 나타나고 측면의 후미 부분에서는 급격한 구배로 인해 강한 와류현상을 볼 수 있는데, 이는 받음각과 편향각이

커질수록 더 강해짐을 볼 수 있다. 주위의 압력분포를 보면 대체적으로 Body, Fairwater, Stern의 전두부 주위에서 높은 압력 구배를 나타내고 있고 와류가 발생하는 지역인 Fairwater, Stern의 측면에서는 낮은 압력 분포를 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 유선을 표시한 그림들을 보면 알 수 있듯이 받음각과 편향각이 커짐에 따라 vortex core line(유선이 진하게 표시된 부분)이 더 두꺼워 지고, separation line이 더 길게 발생하고 와류가 더 강해짐을 볼 수 있다. 그리고 받음각이 커짐에 따라 Fairwater 후류부분에 생기는 vortex core의 위치가 하단에서 상단으로 이동되고 있는 것을 볼 수 있다. 또한 이들 결과의 공통점은, Fairwater 에서 발생하는 와류는 Stern에서 발생하는 와류보다 훨씬 약하다는 것을 알 수 있는데, 이것은 Fairwater와 Stern의 형상을 비교 해보았을 때 Aspect ratio의 차이에 의한 것으로 사료된다.

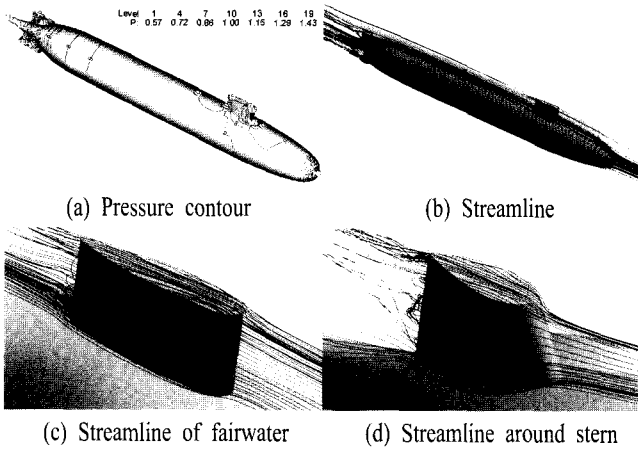


Fig.7 Pressure contour and streamline at  $\alpha=0^\circ, \theta=0^\circ$

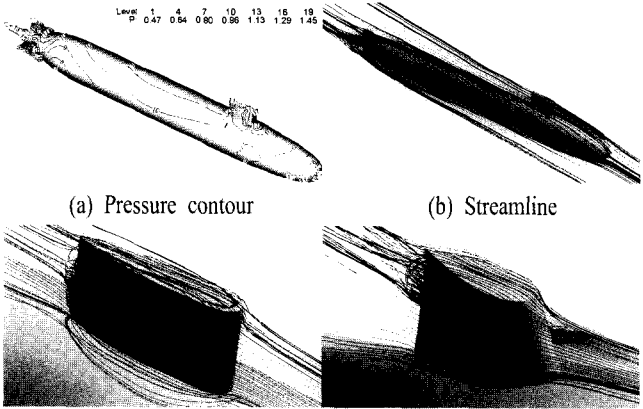


Fig.8 Pressure contour and streamline at  $\alpha=10^\circ, \theta=0^\circ$

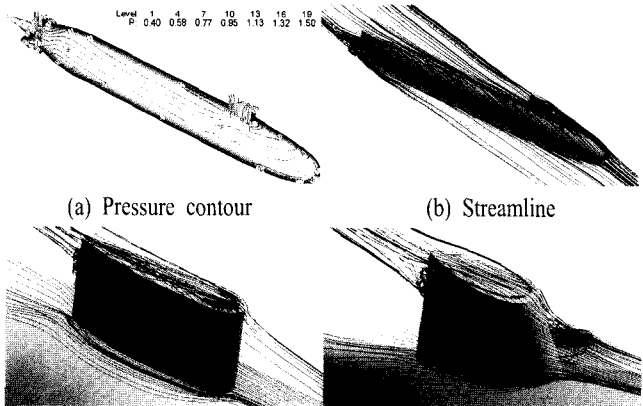


Fig.9 Pressure contour and streamline at  $\alpha=20^\circ, \theta=0^\circ$

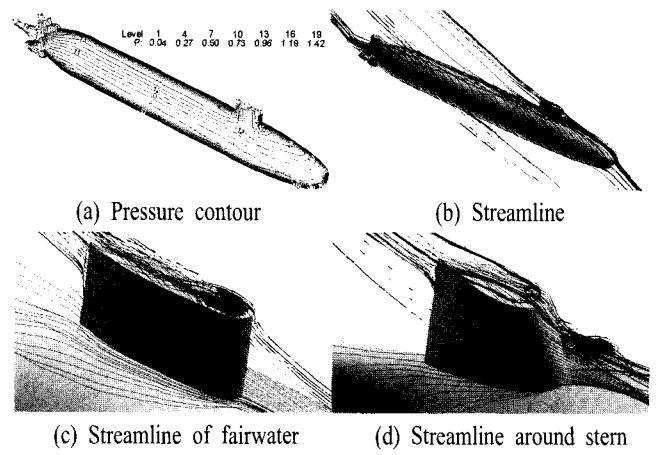


Fig.10 Pressure contour and streamline at  $\alpha=30^\circ$

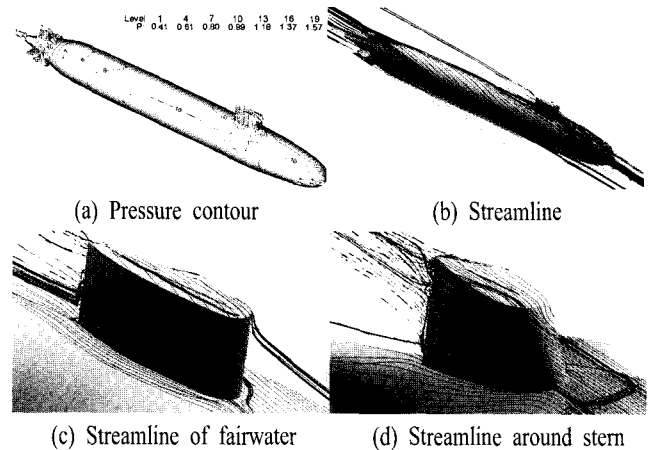


Fig.11 Pressure contour and streamline at  $\theta=10^\circ$

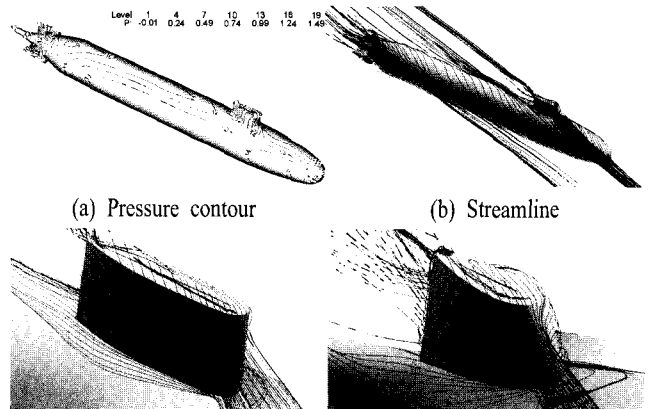


Fig.12 Pressure contour and streamline at  $\theta=20^\circ$

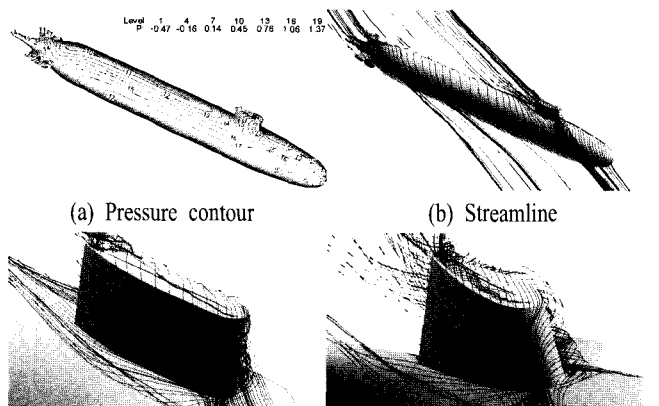
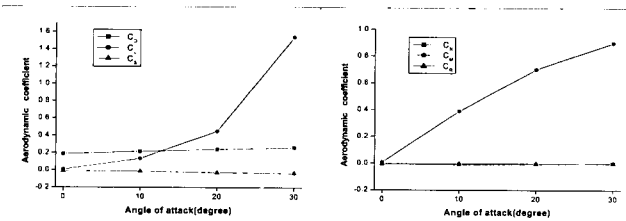
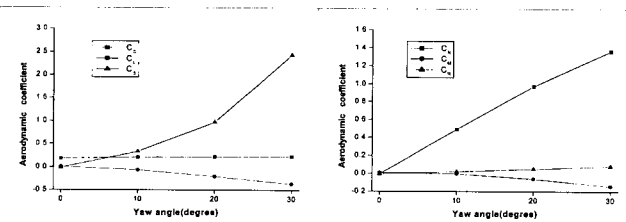


Fig.13 Pressure contour and streamline at  $\theta=30^\circ$

Fig.14, Fig.15는 각각 받음각과 편향각의 변화에 따른 공기역학적 계수들을 나타내고 있다. 여기서 기준면적은 잠수함을 정방향으로 보았을 때의 면적이고 기준길이는 잠수함의 전체길이의 1/2로 선정하였다. Fig.14에서 알 수 있듯이 받음각의 변화에 따라 항력( $C_D$ )과 추력( $C_S$ )에는 크게 영향을 미치지 않지만 양력( $C_L$ )은 받음각이 커질수록 점점 더 큰 값을 가지고, 이에 따라 yawing moment( $C_N$ )와 rolling moment( $C_R$ ) 또한 변화가 많지 않고 pitching moment( $C_M$ )가 역시 증가 하고 있는 것을 알 수 있다. 한편 Fig.15에서는 편향각의 증가에 따라,  $C_D$ 는 거의 변화가 없고  $C_S$ 가 증가하고  $C_L$ 은 감소한다는 것을 알 수 있다. 모멘트를 살펴보면  $C_R$ 은 거의 변화가 없고  $C_N$ 은 증가하고  $C_M$ 은 감소하고 있는 것을 알 수 있다. Fig.16, Fig.17은 각각의 받음각과 편향각에 따라 각각 네 군데의 line을 따른 표면압력계수를 비교한 것이다. 이 그림들은 Fig.7~13을 이해하는 데에 도움을 줄 것이다.



(a) Aerodynamic forces (b) Aerodynamic moments  
Fig.14 Aerodynamic coefficients as a function of angle of attack



(a) Aerodynamic forces (b) Aerodynamic moments  
Fig.15 Aerodynamic coefficients as a function of yaw angle

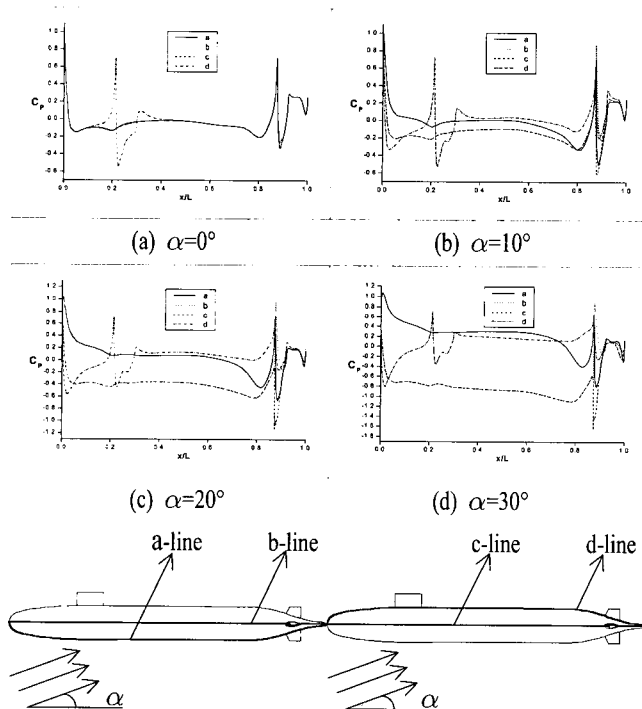


Fig.16 Surface pressure distribution with variation of angle of attack

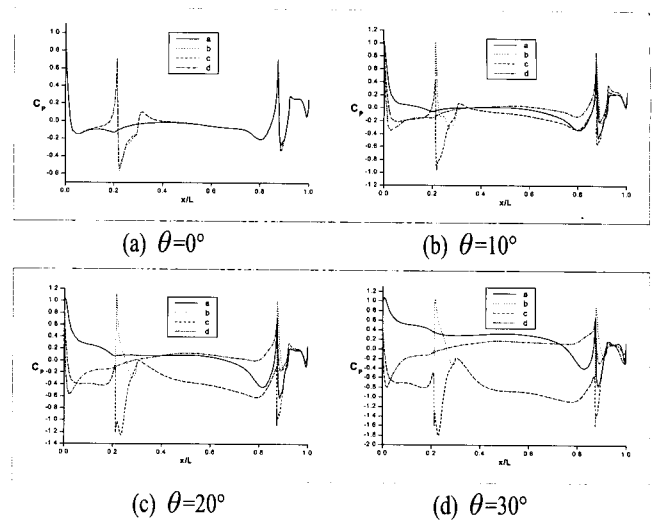


Fig.17 Surface pressure distribution with variation of yaw angle

#### 4. 결론

본 연구에서는 수치해석 결과를 타원체와 bare hull의 실험 결과와 비교함으로써 3차원 점성유동을 해석할 수 있는 타당한 코드를 개발하였다. 더불어, 잠수함 주위의 받음각과 편향각 변화에 따른 유동 정보를 얻었다. 그 결과 영향력이 가장 큰 계수는  $C_L$ 과  $C_S$ ,  $C_M$ 와  $C_N$ 이다. 이 유동 정보는 유동박리, 와류변화에 대한 정보를 포함하고 있는 것으로, duct와 추진시스템을 첨가시켜 연구하고 더 나아가 cavitation을 연구하는 데에 중요한 정보가 될 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

- [1] David Taylor Research Center, 1989, "Geometric Characteristics Of DARPA SUBOFF Models", DTRC/SHD-1298-01.
- [2] 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
- [3] 정영래, 2002, "로터-스테이터 상호작용이 포함된 수중추진기의 Tip 간극변화에 따른 유동특성에 관한 연구," 부산대학교 박사학위논문.
- [4] Viccelli, 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.
- [5] Baldwin, B. S. and Lomax, H., 1978, "Thin Layer Approximation and Algebraic Model for Separated Turbulent Flows," AIAA Paper 78-0257,
- [6] Veer N. Vatsa, 1991, "Viscous Flow Solutions For Slender Bodies Of Revolution At Incidence" Computers and Fluids, Vol.20, No.3, pp.313-320,
- [7] Patel.V.C. and back,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.