

동유체력 계산을 이용한 수중운동체의 횡동요 계수 변화 예측

김 태 우,¹ 강 태 진,¹ 박 원 규,^{*1} 정 철 민²

¹부산대학교 기계공학부

²국방과학연구소 제3기술연구본부

ESTIMATION OF ROLL COEFFICIENT OF UNDERWATER VEHICLE USING A CALCULATION OF HYDRODYNAMIC FORCES

T.W. Kim,¹ T.J. Kang,¹ W.G. Park^{*1} and C.M. Jung²

¹School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.

²The 3rd Research and Development Institute, Agency for Defense Development

For Underwater vehicles, Unwanted roll excursions are inevitable as they are caused by induced propeller torque, disturbances, and banking motion during turns. To estimate the manoeuvring performance of underwater vehicle, it is necessary to obtain the roll coefficient of body. This paper was covered estimation of roll coefficient of underwater vehicle using STAR-CCM+, commercial CFD(Computational Fluid Dynamics) code. The RANS equations for incompressible fluid flows was solved numerically by using a finite volume method. An MRF(Moving Reference Frame) Method was Also adopted for rotations of body. For the validation, the flow around a DARPA SUBOFF bare hull model was simulated and good agreement with experiments was obtained. And Pure roll coefficients were calculated and compared with the experimental data which were presented by Seoul National University. Finally, an underwater vehicle model with propeller was simulated and analyzed for estimation of roll coefficient variation caused by induced propeller torque.

Key Words : 동유체력(Hydrodynamic Forces), 횡동요 계수(Roll Coefficient), DARPA SUBOFF, 전산유체역학(CFD), MRF(Moving Reference Frame)

1. 서 론

수중운동체의 설계에 있어서 주행 및 조종안정성을 확보하는 것은 매우 중요하다. 특히 조종특성 및 주행 안전성을 결정하는 타 설계에 있어 횡동요 계수에 대한 연구는 필수적이다. 일반적으로 수중운동체의 횡동요 계수에 대한 해석은 원추형 운동실험에 의한 모형실험에 의존하고 있으나, 원추형 운동실험에서는 시험조건상 추진기 회전효과를 고려할 수 없어 정확한 횡동요 계수 도출에 제약을 받으므로 추진기 회전효과를 고려한 전산해석이 요구된다.

수중운동체 주위의 유동특성 및 조종특성에 관한 연구는 다양하게 수행되어졌으며, Liu and Huang[1]은 수중운동체 주

위의 유동을 실험을 통해 연구하였으며, Donaldson et al.[2]은 수중운동체 주위의 유동을 포텐셜 코드와 RANS 코드를 사용하여 연구하였다. Gross et al.[3]은 다양한 난류모델을 수중운동체 형상에 적용하여 계산하였고 받음각에 따른 결과 차이를 나타내었다. 횡동요 특성에 관한 연구는 주로 함정이나 어선의 경우에 연구되어져 왔는데, 특히 소형어선의 경우 해난 사고 대부분이 횡동요에 의한 전복사고이다. 이에 대해서 Tanaka et al.[4], Bass and Haddara[5]이 소형어선의 전복방지를 위해서 횡동요 연구를 수행하였다. Peter et al.[6]은 실험을 통해서 수중운동체의 동역학적 모델링에 대한 연구를 수행하였으며, 제어판의 횡동요 모멘트에 대한 연구와 함께 모멘트의 비선형 조종 계수에 대한 변수를 제공하였다. Arafat et al.[7]은 AUV(Autonomous Underwater Vehicle)에 대한 동역학 모델 개발과 관련된 연구를 수행한바 있다.

국내에서는 Na et al.[8]이 수중운동체의 항적 특성을 살펴 보기 위하여 SUBOFF 모형에 대한 수치 시뮬레이션을 수행하였으며, Kim[9]은 전산유체해석을 통해 기저부를 갖는 축대칭

Received: June 1, 2015, Revised: June 18, 2015,

Accepted: June 18, 2015.

* Corresponding author, E-mail: wgpark@pusan.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2015.20.2.081>

© KSCFE 2015

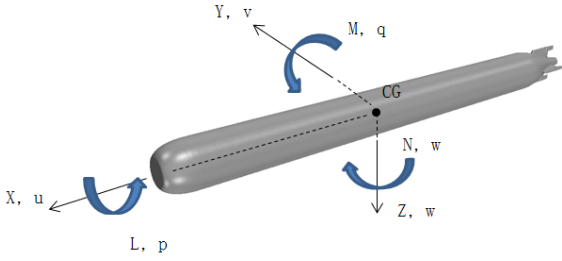


Fig. 1 Coordinate system of body-fixed reference frame

수중운동체의 저항을 예측하고자 난류 모델에 따른 성능 차이를 분석하였다. 수중운동체의 수치해석을 활용한 연구는 동체에 작용하는 저항특성 및 추진기 단독연구가 주를 이루고 있으며 동유체력계수에 관한 모델링은 현재까지 실험에 의존하고 있는 추세이다.

본 연구에서는 수중운동체의 동유체력계수 도출을 위한 방법으로 수치해석을 사용하였으며, 시험조건상 측정하기 힘든 추진기 회전효과를 반영한 횡동요 계수를 도출하였다. 기존의 DARPA SUBOFF bare hull 모델에 대해 수력학적 계수의 검증 수행하였으며, 서울대학교 해양기술 연구센터에서 실험한 저항실험과 횡동요 계수를 비교 분석함으로써 계산의 타당성을 검증하였다.

2. 운동방정식 및 수치해석방법

2.1 운동방정식

수중운동체의 동적 거동을 파악하고 자세 제어에 대한 성능을 확인하기 위해서는 수학적 동역학 모델이 필요하다. 수중운동체에 대한 비선형 6자유도 운동 방정식을 유도하기 위해 좌표계를 Fig. 1과 같이 설정하였다. 일반적으로 수중운동체의 운동을 묘사하기 위해서는 지구고정좌표계와 물체고정좌표계를 사용하며 물체고정좌표계에서는 운동체의 진행방향을 x 축, 우현방향을 y 축, 수심방향을 z 축의 양의 방향으로 설정한다.

Fig. 1에서 u, v, w 와 p, q, r 은 x, y, z 축에 대한 수중운동체의 병진운동 속도와 회전운동 각속도를 나타낸다. 수중운동체의 질량분포가 xz 평면에 대하여 대칭이라고 가정할 때, 무게중심의 y 방향 좌표값은 0이 되며 질량관성 모멘트의 I_{xy}, I_{yz} 도 0이 된다. 따라서 횡동요에 관한 6자유도 운동방정식은 식 (1)과 같다.

$$I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr - (r + pq)I_{zz} - mz_G(\dot{v} - wp + ur) = K_H + K_\delta + K_P \quad (1)$$

여기서 z_G 는 z 축에 대한 수중운동체의 질량중심 위치를 나타내며 K 는 수중운동체에 작용하는 외력 성분을 의미한다. 하점차 H, δ, P 는 각각 선체, 제어판, 추진기에 의한 성분을 의미하며 본 연구에서는 수중운동체가 횡동요 운동만을 한다고 가정하였을 때, 유체에 의한 K 를 구하는 것이다. 모형의 각속도 및 수중운동체의 횡동요 모멘트는 식 (2) 및 (3)과 같이 무차원화 하였다.

$$P' = \frac{\omega L}{U} \quad (2)$$

$$K' = \frac{M_x}{1/2\rho A L U^2} \quad (3)$$

식 (2)에서 ω 는 모형의 각속도, L 은 모형의 길이, U 는 유입속도를 나타내며, 식 (3)에서 M_x 는 모형의 x 축에 대한 모멘트, A 는 모형의 투영면적을 나타낸다.

2.2 수치해석방법

본 연구에서는 전산상용프로그램인 STAR-CCM+ V.9.02를 사용하여 수치해석을 수행하였다. 비정상상태 비압축성 난류 유동을 지배하는 방정식들로 아래의 3차원 연속방정식과 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes) 방정식을 고려하였으며 식 (4)와 (5)에 각각 기술하였다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_i} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (5)$$

여기서 μ, p 와 $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ 는 각각 유체의 점성계수, 압력, 레이놀즈 스트레스를 의미한다. 유동해석자는 Segregated 방식을 사용하였으며 대류항(Convection Term)과 확산항(Diffusion Term)은 2차 상류차분법과 2차 중심차분법을 각각 적용하여 이산화 하였다. 난류모델은 $k-\omega$ SST를 적용하여 계산을 수행하였다.

3. 수치해석결과

3.1 DARPA SUBOFF bare hull

점성유동해석 코드의 검증을 위해 기존의 DARPA

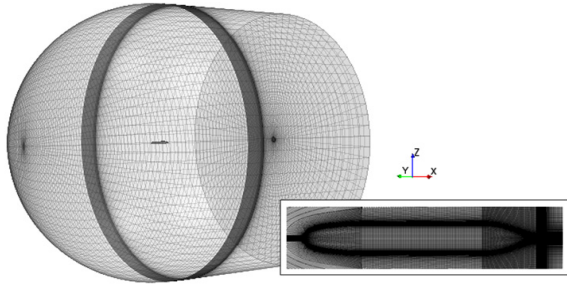


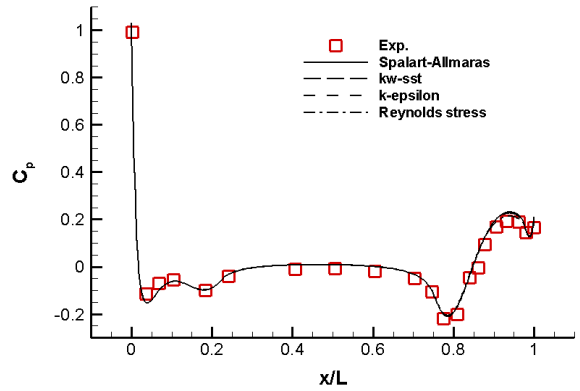
Fig. 2 Computational domain of DARPA SUBOFF bare hull

SUBOFF bare hull 모델에 대해 수력학적 계수를 검증하였다. DARPA SUBOFF bare hull 모델은 제어판이나 핀, 추진기 등 각종 부가물을 장착하지 않은 모델로 형상에 대한 세부적인 정보는 Groves et al.[10]에 의해 기술되었으며 간단한 형상에 대한 정보를 Table 1에 나타내었다. Liu and Huang[1]은 DARPA SUBOFF 모델에 대해 실험적으로 연구하였으며 본 연구에서는 실험에 적용된 레이놀즈 수 1.4×10^7 를 사용하여 계산을 수행하였다. 해석에 사용한 계산영역은 전방의 경우 동체길이의 3배, 후방은 8배, 반경방향은 4배로 구성하였으며 총 3.84×10^6 개의 육면체 격자계로 구성하였다. 후방에 생성되는 와류를 자세히 관찰하기 위하여 동체전방보다 후방에 격자를 조밀하게 생성하였으며 벽면의 경계층을 엄밀하게 나타내기 위해 y^+ 값을 1.0 미만으로 설정하였다. 첫 번째 격자의 크기는 1.0×10^{-5} m 이고 수직방향으로 1.1배씩 증가하도록 설정하여 30개의 Layer를 적용하였으며 생성격자를 Fig. 2에 나타내었다. 경계조건은 입구에서는 속도성분을 고정시켰으며 출구에서는 압력 값을 고정시켰다. 난류모델의 선정을 위해 4가지의 난류모델에 대해 수치테스트를 실시하였으며 Spalart-Allmaras 모델, k- ω SST 모델, k- ϵ 모델 그리고 Reynolds Stress 모델에 대해 해석결과를 비교하였다. Fig. 3는 동체 표면에 작용하는 압력계수와 표면마찰계수를 나타낸 그림으로 압력계수와 표면마찰계수는 각각 식 (6)과 (7)로 정의된다.

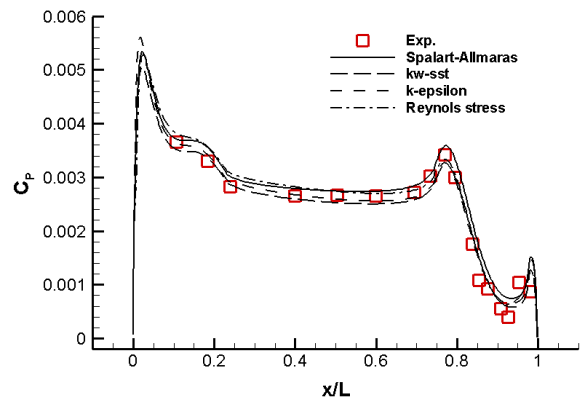
$$C_P = \frac{(p - p_\infty)}{\left(\frac{1}{2} \rho V_0^2\right)} \tag{6}$$

Table 1 Main specification of DARPA SUBOFF bare hull

Description	Magnitude	Unit
Length overall	4.356	m
Length between perpendiculars	4.261	m
Maximum hull Diameter	0.508	m



(a) Pressure coefficient



(b) Skinfriction coefficient

Fig. 3 Comparison between the numerical results and the experimental data of the SUBOFF bare hull model

$$C_f = \frac{|\vec{\tau}|}{\left(\frac{1}{2} \rho V_0^2\right)} \tag{7}$$

압력계수의 경우 모델에 따른 결과 차이가 크지 않으며 $x/L = 0.92$ 지점에서 Reynolds stress 모델의 정확성이 높으며, 표면마찰계수의 경우 전 구간에서 경향은 비슷하지만 약간의 결과 차이가 있다. 동체 후반부에서 Spalart-Allmaras 모델의 결과차이가 존재하며 실험결과와 비교하여 계산의 효율 및 정확성을 고려하여 경계층 영역 난류해석에 적합한 k- ω SST 모델을 해석모델로 선정하였다.

3.2 순수 횡동요 검증

수중운동체의 동유체력계수의 도출을 위해서 원추형 모형 시험(Coning Motion Test)이 개발되었고 서울대학교 해양시스템 예인수조에서 모형시험이 수행되었다[11]. 횡동요 계수 계

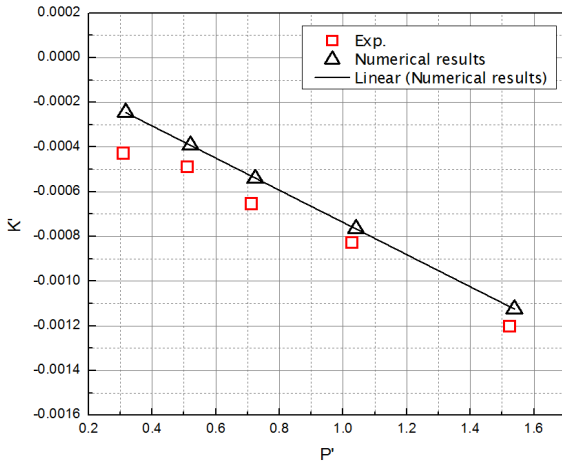


Fig. 4 Comparison between the numerical results and the experimental data of the roll moment coefficient along to rotation of body

산의 타당성을 검증하기 위하여 횡동요각과 원추각을 모두 0°로 설정하고 모형의 회전 속도를 변경하며 테스트한 순수 횡동요 실험에 대하여 수치해석을 수행하였다. 테스트에 사용된 모형의 제원은 Table 2와 같다. 계산영역은 회전영역과 고정영역으로 나누어 격자를 생성하였으며 동체의 회전영역에 대해서 MRF(Moving Reference Frame) 기법을 사용하였다. 비회전 영역과의 경계면은 Interface 경계조건을 사용하여 보간을 시켜 데이터의 호환을 이루어지게 하였다. 계산에 사용된 경계조건을 입구에서는 유입속도 5 m/s로 고정하였으며 출구에서는 대기압으로 고정하였다. 레이놀즈수는 6.3×10^6 이며 난류 모델은 k- ω SST 모델을 사용하였다. Table 3에 나타낸 바와 같이 동체의 회전수에 따라 총 5 Case에 대해 해석을 수행하였으며 동체 표면에 작용하는 압력과 표면 마찰력을 계산하여 동체에 작용하는 모멘트를 구하였으며 유체력에 의한 동체의 횡동요 계수를 구하였다. Fig. 4는 동체의 회전수에 대한 횡동요 계수 실험 결과와 수치 해석 결과를 비교하여 나타낸 그림이다. 모형의 횡동요 각속도가 증가할수록 횡동요 모멘트는 음의 방향으로 선형적으로 커지는 타당한 결과를 가진다. 실험에서는 동체의 낮은 각속도 범위에서 비선형효과가 나타나는 반면 수치해석에서는 경향이 나타나지 않는다. 실험의 경우 낮은 각속도 범위에서 축방향 속도성분이 회전방향 속도성분보다 강하게 지배되고 수중에서 오차범위가 상

Table 2 Main Specification of Test Geometry

Description	Magnitude	Unit
Length	1.08	m
Diameter	0.089	m

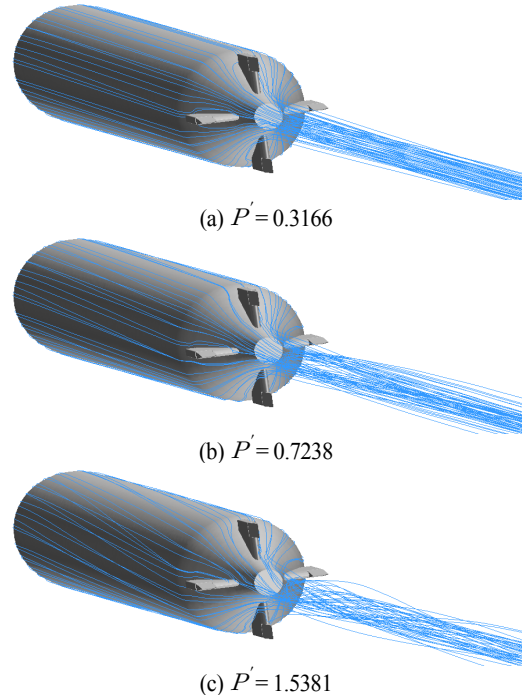


Fig. 5 Streamline pattern along to rotation of body

대적으로 크게 작용하며 이에 따른 비선형효과를 가지는 것으로 판단되며, 수치해석의 경우 정상상태에 도달한 후 시간 평균값을 사용하여 횡동요 계수를 계산하므로 선형적인 결과를 가지는 것으로 판단된다. 횡동요 계수의 크기 차이는 존재하지만 운동방정식을 구성하는데 중요한 역할을 하는 기울기는 거의 일치하는 것을 확인 할 수 있다. Fig. 5는 동체의 회전속도에 따른 동체 주위의 유선을 나타낸 그림으로 회전속도가 클수록 유선의 회전 정도가 커지는 것을 확인 할 수 있으며, Fig. 6는 동체의 회전속도에 따른 동체 주위의 와도를 축방향의 $x/L = 0.92, 0.95, 1, 1.1, 1.25, 1.4$ 지점에서 나타낸 그림으로 회전속도가 클수록 제어판 주위에서 생성된 와도의 크기가 크며 운동체 후류까지 발달됨을 볼 수 있다.

3.3 추진기 포함 횡동요 계수 계산

추진기를 포함하였을 때 횡동요 계수의 변화를 분석하기

Table 3 Rotational Speed of Body

Case	P'	ω (rad/s)
1	0.3166	1.466
2	0.5202	2.4085
3	0.7238	3.351
4	1.0405	4.817
5	1.5381	7.121

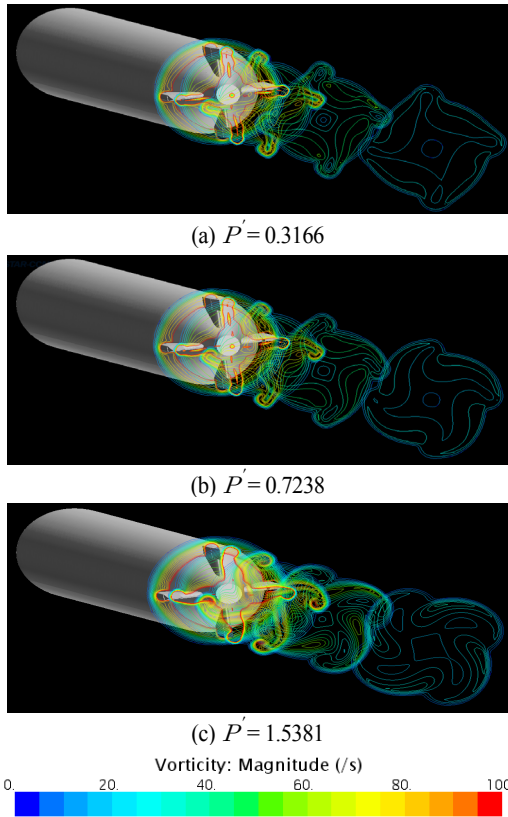


Fig. 6 Contours of vorticity magnitude at several axial location

위해 본 연구에서는 상반반전프로펠러의 펌프제트 추진기를 사용하여 분석하였다. 펌프 제트는 많은 날개를 가지고 회전하는 로터, 회전하지 않는 스테이터 및 로터를 둘러싸는 덕트로 구성되어 있으며 상반반전프로펠러를 사용하여 횡동요 감소 효과를 계산하고자 한다. 해석조건인 전진비는 2.14이며 식 (8)로 정의된다.

$$J = \frac{V_\infty}{nD} \tag{8}$$

여기서 n 은 프로펠러 회전수(rps)를 의미하며, D 는 프로펠러 블레이드의 직경이다. 추진기의 추력계수 및 토크계수는 식 (9) 및 (10)으로 정의되며 Table 4는 해석에 사용한 추진기의

Table 4 Main parameter of rotor

Description	Magnitude	
Thrust Coefficient, K_T	Front rotor	0.3259
	Rear rotor	0.3967
Torque Coefficient, $10K_Q$	Front rotor	0.0616
	Reat rotor	-0.0670

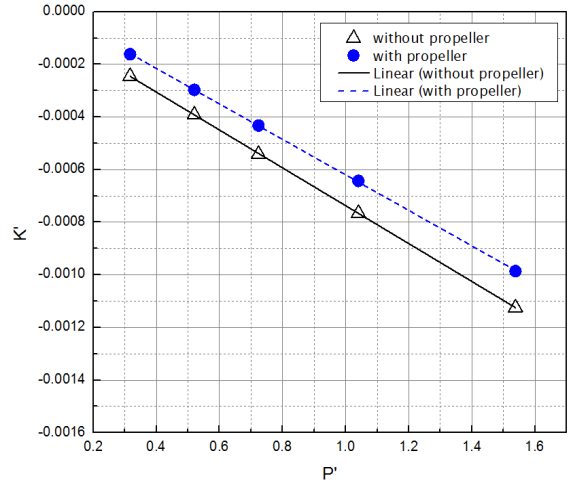


Fig. 7 Comparison of the numerical results between without propeller and with propeller of the roll moment coefficient along to rotation of body

추력계수 및 토크계수의 계산결과를 나타내었다.

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \tag{9}$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \tag{10}$$

여기서 T 는 추력, Q 는 토크를 나타낸다. 순수 횡동요 실험과 동일한 레이놀즈수 6.3×10^6 의 조건에 대해서 모형의 회전속도 및 동체에 걸리는 횡동요 모멘트를 무차원화하여 계산을 수행하였다. Fig 7은 추진기가 포함되지 않은 모형의 횡동요 계수와 추진기가 포함된 횡동요 계수의 수치해석 결과를 비교하여 나타내었다. 추진기를 포함하고 있을 때 횡동요 계수는 동체만을 계산한 횡동요 계수와 비교하여 상대적으로 작은 값을 가진다. 동체의 회전속도를 고정하여 회전시켰을 때 정상상태에서 상반반전프로펠러의 회전효과는 동체 회전의 반대방향으로 작용하는 것을 알 수 있다. Fig. 8은 추진 장치의 설치 유무에 따른 동체의 회전수 $P' = 1.5381$ 일 때 $x/L = 0.84, 0.88, 0.92, 0.95$ 지점에서의 축방향 및 접선방향 속도를 동체 반경 위치에서 나타낸 그래프로 추진기에 의해 축방향의 속도는 가속되며 접선방향의 속도성분은 작아지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 9은 동체 후류에서 와도를 축방향의 $x/L = 0.92, 0.95, 1, 1.1, 1.25, 1.4$ 에서 나타낸 그림으로 동체의 회전에 따른 제어판 주위에서 생성되는 와도의 크기차이를 보여주고 있다. 동체의 회전에 의해 제어판 주위에서 생성된 와도는 후류로 가면서 소멸되며 회전속도가 빠를수록 회

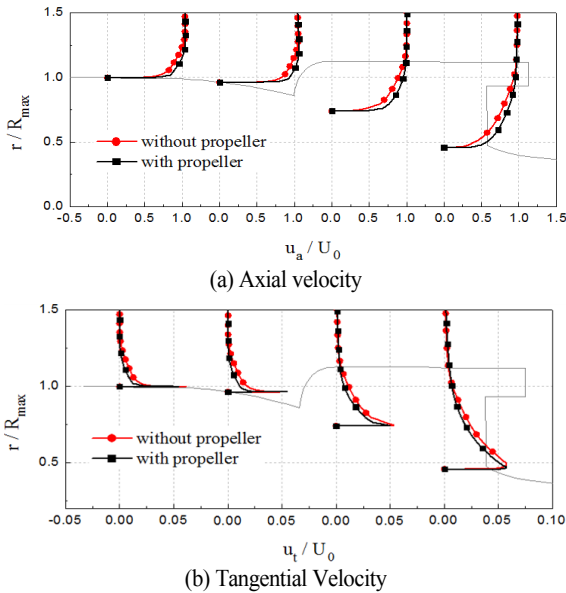


Fig. 8 Profiles of the axial velocity and the tangential velocity at $x/L = 0.84, 0.88, 0.92$ and 0.95

어짐의 차이를 확인 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 3차원 비압축성 점성유동 코드 RANS 모델을 사용하여 DARPA SUBOFF bare hull 모델에 대하여 코드 검증을 수행하였으며 수중운동체의 횡동요 특성에 관한 연구를 수행하였다. 순수 횡동요 실험과 비교 검증을 통해 수중운동체의 횡동요 특성에 대해 연구하였으며 시험조건상 고려할 수 없는 추진기 회전효과를 고려한 수치해석 연구를 수행하여 횡동요 계수를 예측하였다. 계산결과로부터 상반반전프로펠러의 사용으로 인한 횡동요 감쇠효과를 기대할 수 있으며 정량적인 횡동요 계수를 제공하였다.

본 연구의 결과에 추진기의 성능과 제어판의 형상 및 운용에 따른 동유체력 계수 연구를 보완하면 수중운동체의 성능향상을 위한 정량적인 자료로 활용할 수 있을 것이라 기대된다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소가 지원하는 “횡동요 계수 및 제어판 공동해석 연구”에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

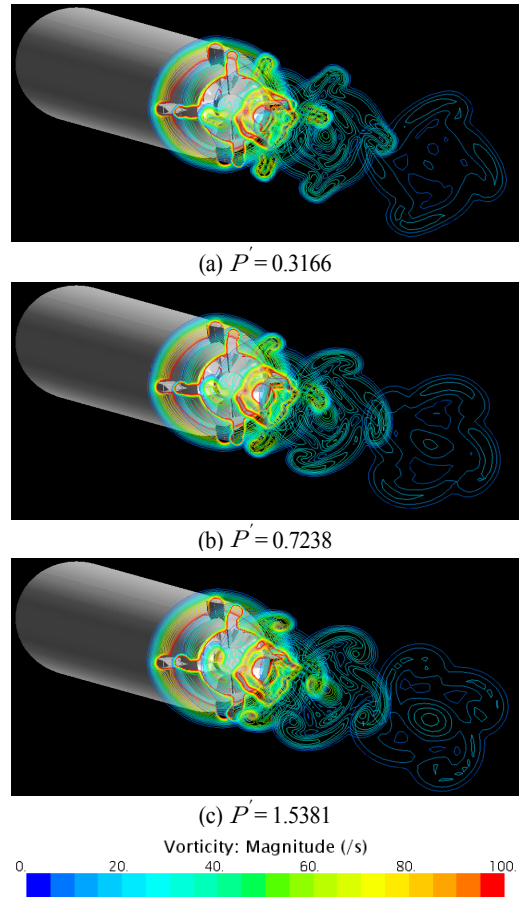


Fig. 9 Contour of vorticity magnitude at several axial location

References

- [1] 1992, Liu, H.-L. and Huang, T.T., "Summary of DARPA Suboff Experimental Program Data," *Naval Surface Warfare Center Carderock Division(NSECCD)*.
- [2] 1990, Donaldson, C., Everstine, G.C., Fyfe, D., Goldstein, D. and Stern, F., "Requirement Analysis for the DARPA Submarine," *Hydrodynamics/Hydroacoustic Technology Center*.
- [3] 2011, Gross, A., Kremheller, A. and Fasel, H.F., "Simulation of Flow over Suboff Bare Hull Model," *AIAA Paper 2011-290*.
- [4] 1984, Tanaka, N., Ikeda, Y. and Okada, H., "Study on Roll Characteristics of Small Fishing Vessel. Part II An Approximate Method of Solution for Nonlinear Lateral Equations," *Journal of the Kansai Society of Naval Architects*, No.189, pp.43-51.

- [5] 1987, Bass, D.W. and Haddara, M.R., "On the modeling of the nonlinear damping moment for the rolling motion of a ship," *Proceedings of the International Association of Scientific Technology(LASTED) Symposium: Identification*.
- [6] 2003, Peter, R., Fontan, J. and Corke, P., "Submarine Dynamic Modeling," *Queensland University of Technology*.
- [7] 2006, Arafat, H.N., Stilwell, D.J. and Neu, W.L., "Development of Dynamic Model of a Small High-Speed Autonomous Underwater Vehicle," *OCEANS 2006*, Boston, M/A.
- [8] 2010, Na, Y.I., Bang, D.B. and Park, J.C., "Numerical Simulation of Turbulent Wake Behind SUBOFF Model," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol.47, No.4, pp.517-524.
- [9] 2010, Kim, M.J., "Numerical Investigation for Drag Prediction of an Axisymmetric Underwater Vehicle with Bluff Afterbody," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol.13, No.3, pp.372-377.
- [10] 1989, Groves, N.C., Huang, T.T. and Chang, M.S., "Geometric Characteristics of DARPA SUBOFF Models(DTRC MODEL NOS. 5470 and 5471)," *David Taylor Research Center*.
- [11] 2001, Kang, J.N., Yoon, H.K., Sung, Y.J. and Rhee, K.P., "An Experimental Study of the Appendage Effect on the Hydrodynamic Coefficients of a Submerged Body," *Proceedings of the Annual Spring Meeting*, pp.173-177.