

CFD 해석을 이용한 덕트형 자율무인잠수정의 운동해석 및 설계 최적화에 관한 연구

정태환* · Karl Sammut* · Fangpo He* · 이승건**

*School of Computer Science, Engineering and Mathematics, Faculty of Science & Engineering, Flinders University

**부산대학교 공과대학 조선해양공학과

A Study on the Motion Analysis and Design Optimization of a Ducted Type AUV (Autonomous Underwater Vehicle) by Using CFD (Computational Fluid Dynamics) Analysis

Tae-Hwan Joung*, Karl Sammut*, Fangpo He* and Seung-Keon Lee**

*School of Computer Science, Engineering and Mathematics, Faculty of Science & Engineering, Flinders University, Australia

**Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Autonomous underwater vehicle 심해용 자율무인잠수정, Computational fluid dynamics 전산유체역학, Optimum design 최적설계, Drag force 항력, Drag coefficient 항력계수

ABSTRACT: Autonomous Underwater Vehicles (AUV's) provide an important means for collecting detailed scientific information from the ocean depths. The hull resistance of an AUV is an important factor in determining the power requirements and range of the vehicle. This paper describes a design method that uses Computational Fluid Dynamics (CFD) to determine the hull resistance of an AUV under development. The CFD results reveal the distribution of the hydrodynamic values (velocity, pressure, etc.) of an AUV with a ducted propeller. This paper also discusses the optimization of the AUV hull profile to reduce the total resistance. This paper demonstrates that shape optimization in a conceptual design is possible by using a commercial CFD package. Optimum design work to minimize the drag force of an AUV was carried out, for a given object function and constraints.

1. 서 론

심해용 무인잠수정은 해저 구조물 설치, 심해의 생물이나 생태계 조사, 해저지질학 연구, 해저 화산조사, 해저 열수광상 조사 등의 해양조사, 해저 모니터링, 해양 에너지개발, 해저 구난, 심해고고학 등을 연구하기 위한 구체적인 수단이다. 특히 모션으로부터의 케이블에 의존하지 않고 독자적인 운용이 가능한 자율무인잠수정(Autonomous underwater vehicle, AUV)은 수중통신기술 등의 첨단과학기술의 발달로 점차 그 비중이 높아지고 있다.

심해의 광활한 공간에서 다양한 목적으로 사용되는 AUV는 내부에 자체의 전원시스템과 함께 모션과의 통신을 위한 수중통신장비 등을 장착하여야 하므로, 효과적인 운용을 위해서 초기설계단계에서부터 효율적인 추진시스템을 가지기 위해 최소의 저항을 가지도록 설계되어야 한다. AUV선체의 유체저항을 추정하기 위해 기존에는 간단한 추정식이나 예인수조에서 실험을 수행하였으나 간단한 추정식의 경우, 복잡한 형상의 부가물

등을 고려할 수 없으며, 예인수조에서의 실험은 고가의 장비와 숙련된 기술자의 상당한 시간과 노력을 요한다. 따라서 특정한 AUV를 개발하기 위해 개념설계단계에서부터 쓰일 수 있는, 개발자에게 사용이 편리하고 효과적이면서도 강건하고 신뢰할 수 있는 새로운 저항추정법이 필요하다.

본 연구에서는 이러한 비용, 시간과 노력을 줄이기 위해 초기 개념설계단계에서 전산유체역학(Computation fluid dynamics; CFD)해석에 의해 제공되는 신뢰할 수 있는 AUV선체저항을 추정하는 방법과 최소의 저항값을 가지는 최적설계 방법을 살펴 보았다. 즉, (1) 신뢰할 수 있는 CFD해석을 위하여 기존의 경험식과 비교 및 해석결과의 분석과 함께, 안정적(Stable)이고 강건한(Robust) 해석을 위해 선체와 부가물(노즐부)에 대하여 경계층을 고려한 자동요소분할 방법, (2) 사용자가 원하는 설계변수에 대해 원하는 목적함수의 감시를 통해 수렴횟수를 조절하여 시간을 조절하는 방법과 (3) 최소의 저항값을 가지기 위한 설계변수(노즐각)의 최적의 설계값을 찾기 위한 최적설계방법을 살펴 보았다.

교신저자 정태환: 부산광역시 금정구 장전동, 051-510-2755, s_joung@cnu.ac.kr

본 논문은 2007년 10월 대전 한국해양연구원(MOERI)에서 개최된 한국해양공학회 추계학술대회에 발표된 논문의 주된 내용을 발췌하였음을 밝힙니다.

2. 초기 AUV 선형 설계 및 저항추정

2.1 선형설계

기본설계단계에서 AUV 선체는 선수콘, 중앙선체, 선미콘과 함께 덕트부로 나뉘어서 설계되었다. 기본선체는 주어진 순도비(Fineness ratio), 즉 길이와 최대직경의 비(l/d)에 대하여 최소의 저항계수를 가지는 선형인 Myring hull profile equations (Prestero, 2001)를 기초하여 설계하였다. 따라서 선수콘과 선미부의 곡선형상은 식 (1)과 (2)에 의해 결정된다.

추력을 향상시키기 위하여 노즐(Nozzle)은 프로펠러의 성능을 향상시킬 수 있다. 즉, 프로펠러가 회전할 때, 각 날개단면의 앞날과 뒷날의 압력차에 의해 추력을 발생시키게 되는데, 각 프로펠러의 끝에서는 높은 압력으로부터 낮은 압력으로 유체가 이동함으로 인해서 각 날개의 끝에서 손실이 발생하게 된다. 따라서 이는 선체를 전진방향으로의 추력을 감소시키는 결과를 가져오게 되는데, 프로펠러 날개 끝에 형성된 덕트부는 프로펠러 끝으로부터 유체흐름을 고정시킴으로서 손실을 줄인다 (Barringhaus and Olds, 2007). 본 연구에서 설계된 노즐의 단면은 Table 1에 나타낸 바와 같은 NACA profile(NACA 6721)에 기초하여, Kort 노즐에 비해 저항성능이 우수한 Rice 노즐 profile을 참고하여 설계되었다.

AUV 기본선체는 Myring equation에 의해, 노즐부는 NACA profile(NACA 6721)에 기초하여 설계된 선체의 형상을 Fig. 1에 나타내었다.

$$r(x) = \frac{1}{2}d \left[1 - \left(\frac{x-a}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

$$r(x) = \frac{1}{2}d - \left[\frac{3d}{2c^2} - \frac{\tan(\theta)}{c} \right] (x - (a+b))^2 + \left[\frac{d}{c^3} - \frac{\tan(\theta)}{c^2} \right] (x - (a+b))^3 \quad (2)$$

2.2 경험식에 의한 저항계수추정

수중에서 일직선상으로 운동하는 축대칭 AUV에 의해 야기

Table 1 Section of the Nozzle-NACA profile (NACA 6721)

Thickness	21	% of wing chord (Length of chord = 1)
Position	0.7	Position of max camber (0-1)
Camber	0.06	% of wing chord (Length of chord = 1)

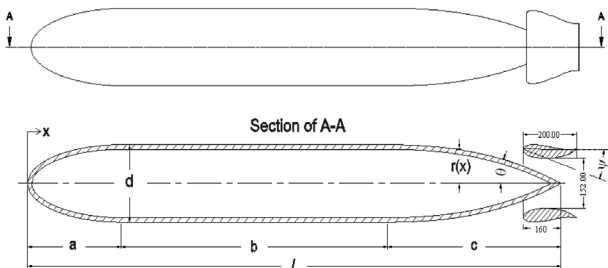


Fig. 1 An initial design of the AUV

되는 저항은 유체 점성의 직접적인 결과이다. 점성효과는 두 가지의 요소로 분리하여 고려될 수 있다. 즉, 이 두 가지 요소는 선체를 따라 흐르는 유체의 점성 전단력에 의해 야기되는 표면 마찰저항(The skin friction drag)과 선체의 선미부와 선수부의 압력분포의 차와 경계층의 전개에 의한 형상저항(The form drag)이다(Phillips et al., 2007).

점성에 의한 마찰저항계수(C_f)추정을 위하여, 일반적으로 사용되는 'ITTC 1957년 모형선-실선 상관 곡선식'을 사용하였다. 사용되는 곡선은 Reynolds 수의 함수로서 다음과 같이 표시될 수 있다(임상전, 1971).

$$C_{F_{1957}} = \frac{0.075}{\log(R_N - 2)^2} \quad (3)$$

그러나 이 식은 실선에 쓰이기 위한 점성저항계수를 사용하기 위해 형상계수($1+k$)가 곱해져야 한다. 형상계수의 크기는 선체의 형상의 함수인데, Hoerner는 선체의 길이(l)와 직경(d)의 함수로서 유선형 선체에 대하여 다음과 같이 추정하였다(Hoerner, 1965).

$$(1+k) = 1 + 1.5(d/l)^{3/2} + 7(d/l)^3 \quad (4)$$

2.3 추진저항 추정

AUV의 축방향 추진저항은 유체내부에서 일정한 속도로 움직이는 선체로 가정하고, 다음과 같은 식을 이용하여 추정한다(임상전, 1971).

$$R_f = \frac{1}{2} \rho C_f A_f |u|u = X_{|u|u} |u|u \quad (5)$$

여기서 C_f 는 식 (3)과 (4)로부터 얻어진 마찰저항계수, ρ 는 유체의 밀도, A_f 는 선체의 침수면적, 그리고 u 는 전진속도이다. 이와 같은 저항추정은 초기설계단계에서 유용한 정보를 제공할 수 있으나, 부가물 등이 부착된 복잡한 선형에 대해서는 형상계수($1+k$)의 고려만으로는 불가능하므로 저항추정이 불확실할 수 있다.

3. CFD 해석 방법

3.1 CFD 해석 지배방정식

AUV 주위의 유체압력(p)과 유동장을 계산하기 위한 CFD 해석을 위한 지배방정식은 비압축성의 가정하의 연속 방정식 (6)과 Navier-Stokes 방정식 (7)이다(서용권 등, 2005).

$$\frac{\partial v_j}{\partial x_j} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho v_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \rho v_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + F_i \quad (7)$$

여기서 x_j ($j=1, 2, \text{ and } 3$)는 직교 좌표계에서의 축을 나타내며, v_i 는 i 차 요소의 유체 속도, ρ 는 유체의 밀도, τ_{ij} 는 점성력 텐서(Tensor), 그리고 F_i 는 i 차 요소의 외력(중력, 프로펠러 추력,

토오크 등)이다.

3.2 CFD 해석을 위한 모델링

Myring Equation과 NACA profile을 기본으로 설계된 선형은 EXCEL 편집기에서 수식을 정의하고 데이터를 정리하였다. 정리된 데이터는 Script파일로 만들어져 ANSYS Workbench DesignModeler 11.0에서 불러들여 선형을 완성하였다.

완성된 AUV 3D모델은 상용유한요소 코드인 ANSYS CFX 11.0에서 요소격자분할작업(Meshing)을 수행하여 CFD해석을 수행하였다. 요소격자분할작업은 유체영역에서 복잡한 구조물의 형상을 Meshing 작업으로 요소와 절점으로 형상을 구현하는데 가장 적합하다고 알려진 Tetrahedral요소와 Pyramid요소를, 경계층을 구현하기 위해서는 이에 가장 적합한 요소인 Prism 요소를 사용하였다(Nishi et al., 2007; ANSYS-CFX 11.0 Manual, 2007). CFD해석을 위해 요소분할작업이 완성된 그림을 Fig. 2에 나타내었다.

시뮬레이션이 수행된 수조는 사각수조로서 수조의 영향이 CFD 해석결과에 영향을 미치지 않을 정도로 크게 형성되어야 하며, 이를 위하여 충분한 사전 해석이 필요하다. 수조의 전면부로부터의 유입속도는 AUV의 속도와 동일하게 부여였고, 반대면의 유출부는 상대압력이 없는 것으로 하고, 다른 면은 모두 자유표면조건(Free surface)을 부여하였다(Fig. 3). 해석을 위한 주요사항을 Table 2에 정리하였고, 전처리해석작업이 완료된 그림을 Fig. 3에 나타내었다.

난류모델은 ANSYS-CFX에서 k-epsilon($k-\epsilon$), Shear stress

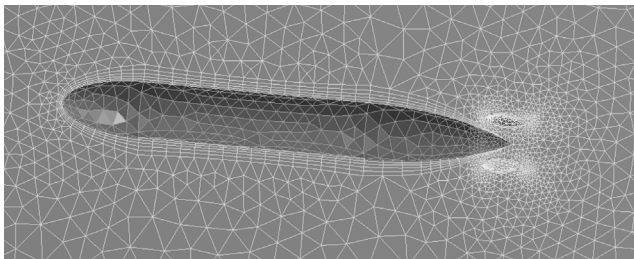


Fig. 2 Hybrid (Tetrahedral and layer) meshes generated adjacent to the main body and nozzle of the AUV

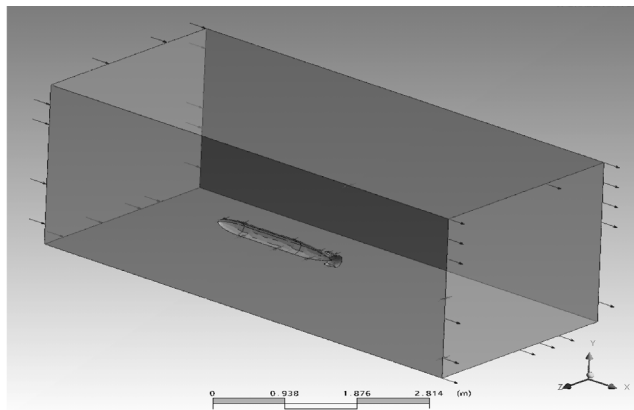


Fig. 3 Overview of the pre-processing for a CFD analysis

Table 2. Principal conditions of numerical computation

Water tank size	7,000 × 3,000 × 3,000 mm ³
Turbulence model	$k-\epsilon$ model, Shear stress transport (SST)
Reference pressure	3 atm (depth of 30 m)
Reynolds number	$8.73 \times 10^5 \sim 6.11 \times 10^6$
Maximum radius of the AUV	250 mm
Maximum length of the AUV	2,000 mm
Angle of attack of the nozzle	0°~20° (Design variable)
Total no. of elements (nodes)	132,308~158,611 (30,685~45,303)
No. of Tetrahedra	Maximum 153,878
No. of Prisms, Pyramids	Max. 1,313, Max. 3,420

Transport, BSL Reynolds stress, SSG Reynolds stress 등 여러 가지 모델을 제공하여주나, 본 연구에서는 $k-\epsilon$ model과 Shear stress transport(SST)의 두 가지 모델을 사용하였다. 여기서 $k-\epsilon$ model은 여러 범위의 유동에서 적응이 쉽고 강건한 공학적 시뮬레이션 모델이지만, 박리의 시작과 그 영역 내에서 모호한 결과를 나타내므로 더 나은 결과를 보일 수 있는 SST를 사용한 후 $k-\epsilon$ model로 결과를 검증하였다(Phillips et al., 2007). 또한 노즐부분은 최소의 저항을 가지도록 최적화 작업을 수행하기 위하여 각도(ψ)를 제한조건 내에서 설계변수로 설정하였다.

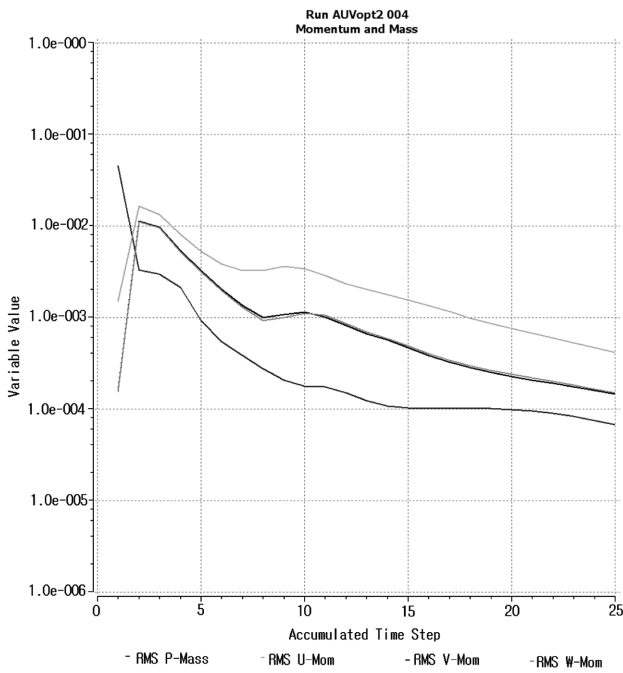
4. CFD 결과 및 해석

4.1 CFD 해석 및 결과

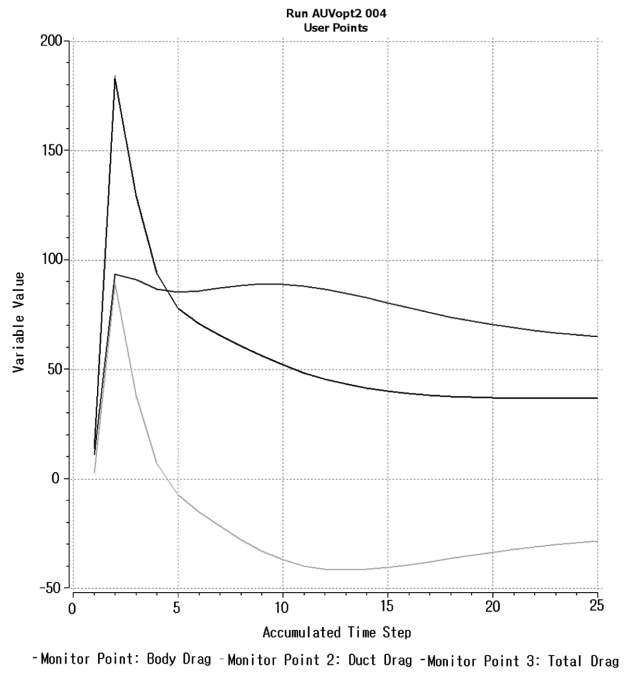
CFD 해석에 사용된 상용코드(ANSYS-CFX Ver.11)는 계산중에 사용자가 원하는 값(모멘텀, 압력, 힘 등 목적함수)을 감시할 수 있게 하여준다. 즉, Solver manager에서 기본적인 정보 및 사용자가 원하는 값의 Iteration에 따른 변화를 관찰함으로써 Iteration 횟수를 조절하여 불필요한 해석시간을 줄일 수 있다(ANSYS-CFX 11.0 Manual, 2007). 본 연구에서 수행된 CFD 해석 중 모니터링 되는 과정을 Fig. 4에 나타내었는데, AUV전진축(X-축)방향 저항값은 Iteration 횟수가 15회를 넘기면서 일정한 값으로 수렴함을 알 수 있다. 따라서 수렴을 위한 Iteration 횟수는 15회에서 20회 미만에서 결정할 수 있음을 알 수 있다.

CFD 해석결과는 Fig. 5에 나타난 바와 같이, 'TTC 1957곡선'과 잘 일치하고 있으며, 'TTC 1957곡선'에 형상계수를 고려한 값이 CFD 해석 결과와 보다 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 수행된 CFD 해석에 사용된 방법과 결과는 신뢰할 수 있음을 알 수 있다.

AUV주위의 압력은 선수부의 정체점(Stagnation point)를 제외하고는 균일한 압력분포를 가지나 노즐부분에서 최대 압력(최대 -1.822e-4Pa)이 발생함을 알 수 있다(Fig. 6). 또한 Fig. 8에 보는 바와 같이 AUV 길이방향에 대한 압력의 변화를 살펴보면, 노즐부에서 발생하는 대부분의 압력은 음압이므로서, AUV본체에 비하여 높은 값은 나타내는데, 이는 좁은 덕트 내부를 통



(a) Default (Momentum etc.)



(b) Defined by user (Drag)

Fig. 4 Monitoring during the CFD analysis process

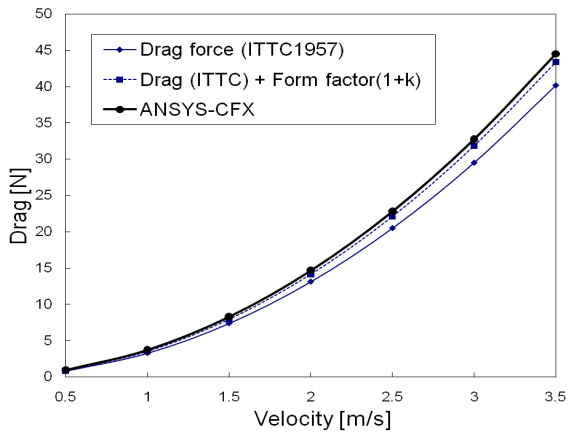


Fig. 5 Comparisons of drag predictions for the AUV

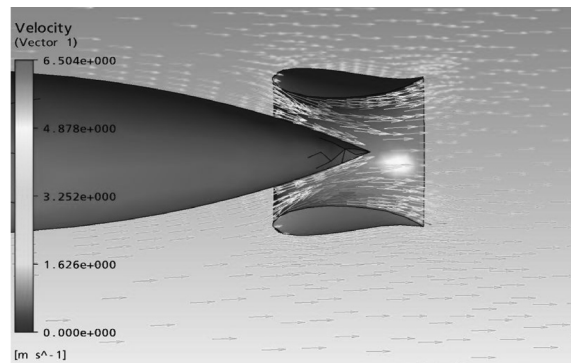


Fig. 7 Velocity contour around the AUV at 3 m/s

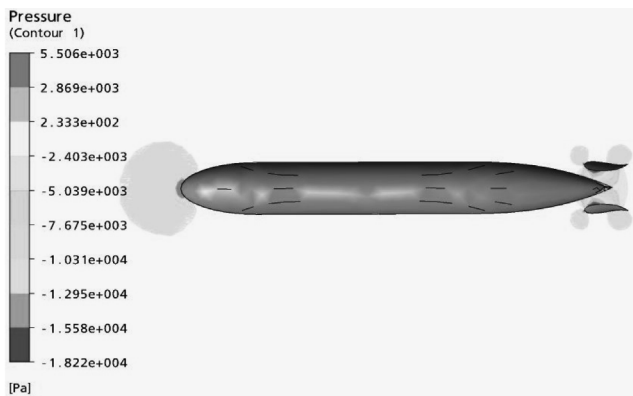


Fig. 6 Pressure contour around the AUV at 3 m/s

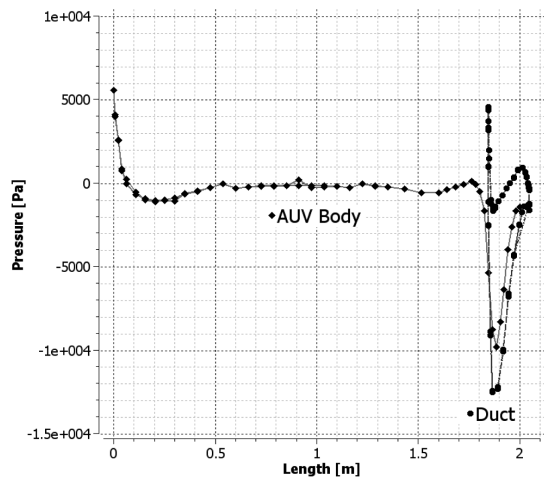


Fig. 8 Pressure distribution around the AUV at 3 m/s

과하는 유체의 속도가 증가함으로써 발생한다. 덕트 내부를 통과하는 최대유속은, 유입속도(AUV의 자항속도)가 3m/s일 경우, 최대 6.5m/s로서 속도분포는 Fig. 7에 보는 바와 같다.

4.2 최적설계

최소의 전진축(X-축)방향 저항을 가지는 최적의 노즐부 NACA profile의 단면 각도(θ)를 제한조건($0^\circ \sim 20^\circ$)내에서 찾기 위한 최적화 작업을 수행하였다.

최적의 설계변수값을 찾기 위하여 상용최적설계코드인 ANSYS-DesignXploer을 이용하였다. 목적함수의 최적값을 찾는 최적설계를 위하여, ANSYS-DesignXploer과 AUV 모델링이 수행된 3차원 CAD프로그램, 격자분할프로그램이 연계되도록 하였으며, 최적설계 방법은 실험계획법(Design of experiment; DOE)과 직접탐색법(What-if)에 의한 방법이 사용되었다. 제한조건 내에서 설계변수(θ)에 대한 해석을 전부 수행하는 직접탐색법에 비하여 실험계획법은 추출된 표본점에 대해서만 해석을 수행하므로 상당한 해석시간을 줄일 수 있다. 본 연구에서는 중심합성계획법(CCD; Central composite design)을 이용하여 실험계획을 수립(표본점 추출), 실험계획법에 의한 해석을 수행하여 최소목적함수(X-directional drag force)의 값을 가지는 최적의 설계변수(θ)를 찾고 직접탐색법으로 이를 검증하여 실험계획법의 타당성을 확인하였다.

최적설계를 위한 CFD해석결과, 즉 실험계획법과 직접탐색법에 의해 수행된 최적화 결과를 Fig. 9와 Fig. 10에 각각 나타내

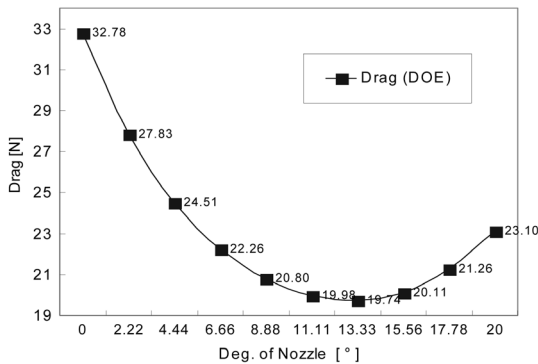


Fig. 9 X-directional drag force acting on the AUV (DOE)

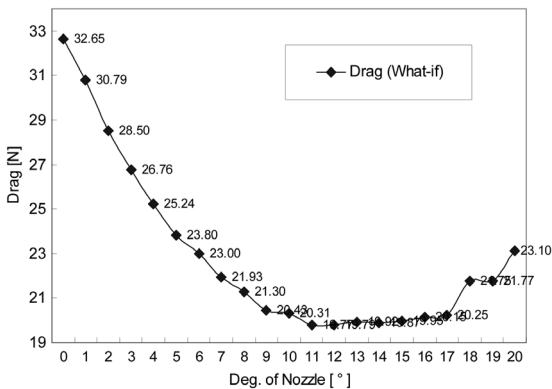
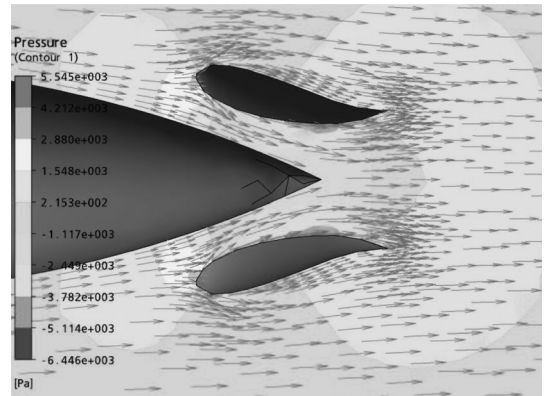
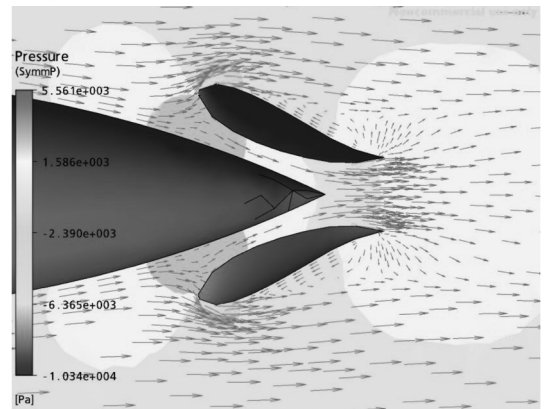


Fig. 10 X-directional drag force acting on the AUV (what-if)



(a) 11° of the nozzle



(b) 20° of the nozzle

Fig. 11 Pressure and velocity contour around the AUV at 3m/s

었다. 실험계획법에 의해 얻어진 최적설계 변수값(θ)은 13° 이며 이때 목적함수(저항값)의 값은 약 19.8N이다. 이를 검증하기 위해 사용된 직접탐색법의 결과는 최적설계 변수값 $11^\circ \sim 12^\circ$ 에서 목적함수의 값은 약 19.8N으로서 실험계획법에 의한 결과와 잘 일치하고 있음을 할 수 있다.

노즐부는 단면의 각도가 최적설계값($11^\circ \sim 13^\circ$)보다 커지면서 유체의 유입량도 줄어들 뿐 아니라, Fig. 11에 보이는 바와 같이 노즐부의 뒤쪽에서 유체의 와류현상이 발생하여 노즐의 효율을 떨어뜨리고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 상용프로그램(ANSYS-CFX Ver. 11.0)을 이용하여 설계된 AUV선형을 모델링하고, 요소격자작업 후, CFD 해석을 수행하였다. CFD 해석결과로서 AUV주위의 압력, 속도 분포 및 추진축방향 저항값이 얻어졌으며, 이에 대한 분석을 수행하였다. 수행된 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 초기개념설계단계에서 AUV선체저항을 추정할 수 있는 CFD해석방법은, 기존에 사용되는 경험식과 비교하여 타당성이 검증되었고, 부가물 등이 부착된 복잡한 형상에 대해서도 보다 정확하고 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있다.
- (2) 보다 빠른 수렴속도를 얻기 위해 사용자가 원하는 설계변수에 대한 원하

는 목적함수의 관찰을 통해 수렴횟수를 조절할 수 있음을 보였다. (3) 최소의 저항값을 가지기 위한 설계변수(노즐각)의 최적의 설계값을 찾기 위한 최적설계방법을 살펴보았다.

본 연구에서는 예인수조시험으로부터 얻기 어려운 선형주변의 속도 및 압력분포, 저항추정을 위한 축방향의 힘 등을 CFD 해석으로부터 얻고, 상용최적설계코드를 통하여 최적의 설계값을 구할 수 있었으나, 노즐 내부의 프로펠러 추력(Thrust, t), Wake(w) 등을 고려한 추진력이 고려되지 않았다. 따라서 향후 연구과제로는 프로펠러의 추진력과 토오크가 모두 고려된 CFD 모델을 구축하고, 예인수조시험으로부터 해석된 CFD 결과의 검증을 수행할 계획 하에 있다.

후 기

본 연구는 방위사업청/국방과학연구소에 의해 설치된 수중운동체특화센터(UVRC)의 연구비 지원(SM-23과제)과, 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다(KRF-2007-355-D00031).

참 고 문 헌

임상전 (1971). 기본조선학, 대한교과서주식회사, pp 462-472.

서용권, 강상모, 서이수 (2005). 전산유체역학, 동아대학교 출판부, pp 187-201.

ANSYS-CFX Ver. 11.0 Manual (2정007). ANSYS Inc.

Barringhaus, D. and Olds, R. (2007). How a Marine Nozzle Works, <http://www.propellerpages.com>.

Phillips, A., Furlong, M. and Turnock, S.R. (2007). "The Use of Computational Fluid Dynamics to Assess the Hull Resistance of Concept Autonomous Underwater Vehicles", OCEAN '07 IEEE Aberdeen.

Hoerner, S.F. (1965). Fluid-Dynamic Drag, Published by the Author.

Presterio, T. (2001). Verrification of a Six-Degree of Freedom Simulation Model for the REMUS Autonomous Underwater Vehicle, M. Sc. thesis at M. I. T., pp 14-19.

Nishi, Y., Kashiwagi, M., Koterayama, W., Nakamura, M., Samuel, S.Z.H., Yamamoto, I. and Hyakudome, T. (2007). "Resistance and Propulsion Performance of an Underwater Vehicle Estimated by a CFD Method and Experiment", ISOPE '07 Lisbon.

2008년 9월 22일 원고 접수

2009년 1월 20일 최종 수정본 채택