
 論 文

大韓造船學會論文集
 第 34 卷 第 3 號 1997 年 8 月
 Journal of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 34, No. 3, August 1997

축대칭 물체 주위유동의 실험적·수치적 연구

안종우*, 송인행*, 박태선**

Experimental and Numerical Studies of the Flowfield around an Axisymmetric Body

by

Jong-Woo Ahn* , In-Haeng Song* and Tae-Sun Park**

요 약

복합추진장치가 포함된 경우와 포함되지 않은 경우의 축대칭 물체 주위 유동특성을 조사하기 위한 실험적·수치적 연구가 수행되었다. 축대칭 물체주위 유동특성 파악을 위해 선박해양공학연구센터의 캐비테이션 터널에서 표면압력분포와 LDV 장치를 이용한 주위유속분포 계측 시험이 우선적으로 이루어졌으며, 비압축성 RANS 방정식을 유한체적법으로 해석하는 수치적 방법이 표준 $k-\epsilon$ 난류모형을 이용하여 수행되었다. 선체와 프로펠러 상호작용은 양력면이론에 의하여 계산된 유기속도를 프로펠러 면에 분포하여 경계조건으로 처리하는 방법을 택하였다. 추진장치의 여러 가지 배열변화에 따른 실험적 결과를 기반으로 타당한 수치적 방법이 개발될 수 있다고 생각된다.

Abstract

Experimental and numerical studies are carried out to investigate flow characteristics around an axisymmetric body with and without a compound propulsor. The effects of a compound propulsor are investigated as measuring the surface pressure distribution and the velocity profiles using LDV system in the cavitation tunnel of KRISO. The incompressible Reynolds-Averaged Navier-Stokes(RANS) equations are also solved using the finite volume method. The standard $k-\epsilon$ turbulence model is adopted for turbulence closure. In order to calculate propeller-hull interaction, the induced velocity calculated by lifting surface theory is considered as the boundary condition at the propeller plane. The experimental data obtained in this study can provide a useful database for development and validation of CFD code.

발 표 : 1996년도 대한조선학회 추계연구발표회 ('96. 11. 8)

접수일자 : 1996년 12월 23일, 재접수일자 : 1997년 5월 12일

* 정회원, 선박해양공학연구센터 추진기기술그룹

** 항공우주연구소 우주추진기관그룹

1. 서 언

최근 해양방위 기술개발과 관련하여 추진장치를 갖는 수중운동체에 관한 연구가 계속적으로 요구되고 있다. 수중운동체의 원활한 설계를 위해서는 선체 주위의 난류경계층, 박리 및 표면압력 등에 의하여 생성되는 선체저항 뿐 아니라 프로펠러의 성능해석에 직접적 영향을 미치는 선미반류 등이 정도 높게 해석되어야 한다. 또한 선체와 추진기와의 상호작용으로 알려진 추력감소계수, 유효반류 분포 등도 축대칭 물체에 대해서는 실험·이론 양면의 연구가 활발한 편이다. 이러한 실험적 연구의 일환으로 선박해양공학연구센터의 캐비테이션 터널에서는 수중운동체 특히 축대칭 물체를 대상으로 복합추진장치의 배열변화에 따른 체계적인 유동특성에 대한 실험을 수행한 바 있다[1].

본 연구에서는 복합추진장치가 취부된 상태에서 축대칭 물체 주위의 유동장에 대한 이론적 해석을 다루고 있다. 선체와 프로펠러의 상호작용을 해석하기 위하여 프로펠러에 의한 작용을 고려하여야 한다. 프로펠러에 의한 유기속도는 양력면 이론에 의하여 계산하였으며, 이 증가된 속도성분은 RANS 방정식에서 경계조건으로 처리함으로써 선체-프로펠러 상호작용을 해석하는 방법을 택하였다. 본 연구의 대상물은 유속 방향으로 축대칭 모양을 갖는 선체와, 덕트와 로터로 된 복합추진장치를 갖는 고속 추진체이다. 그러나 선체 후류 프로펠러 평면에서 계측된 공칭속도(Nominal velocity)는 추진기의 작용에 의해 유효반류(Effective velocity)로 변환되기 때문에 추진기에 의해 유기된 속도는 원칙적으로 반복작업에 의해 구해져야 한다.

한편 최근 발표된 수중운동체의 복합추진기에 관한 실험은 주로 추진기에 작용하는 추력, 토오크 및 효율, 그리고 캐비테이션 초생의 관점에서 수행되어 왔으며 추진장치의 성능을 개선하는 목적으로 실험자료가 축적된 면이 많았다. 그러나 본 연구는 축대칭 물체와 복합추진기의 상호작용을 포함하는 전 유동장에 대한 실험적·이론적 접근을 다루고 있기 때문에 보다 광범위한 수중 운

동체 및 추진기 설계에 대한 자료를 제공해 주고 있다. 이와 같은 연구는 군사적 목적하에 주로 국내보다는 외국에서 수행되고 있으나, 연구 결과의 발표가 전혀 이루어지지 않고 있는 분야에 속한다. 본 연구에서 제시된 해석기법은 선박해양공학연구센터의 캐비테이션 터널에서 축대칭 물체 표면 및 프로펠러 면 주위에서의 유속분포를 LDV를 이용하여 계측한 결과[1]와 비교하여 검증하였다.

2. 수중운동체 주위 유동특성시험

본 연구에서는 추진장치가 포함되지 않은 경우와 추진장치가 포함된 경우에 대한 수치해석을 수행하였다. 추진장치가 포함되지 않은 경우는 축대칭 점성유동장을 위한 RANS 방정식을 유한체적법에 의하여 해석하였다. 추진 장치가 포함된 경우의 선체와 프로펠러의 상호작용은 프로펠러 유기속도를 고려하여 경계조건으로 처리하는 방법을 사용하였음은 전술한 바와 같다.

캐비테이션 터널에서 수중운동체 주위의 유동특성을 조사하기 위하여 Fig.1에 나타난 것과 같이 수중운동체만 있는 경우(Case 1), 수중운동체에 프로펠러 및 덕트가 모두 설치되어 있는 경우(Case 2), 수중운동체에 프로펠러만 설치되어 있는 경우(Case 3), 그리고 수중운동체에 덕트만 설치되어 있는 경우(Case 4)로 4 가지 실험장치를 구성하여 물체 표면압력분포 및 LDV를 이용한 유속계측을 수행하였다. 표면압력분포는 Fig.1에서 보여지는 압력구멍 위치에서 스캐니 벨브를 이용하여 계측하는 기존의 당소에서 개발된 방법으로 수행하였다[2]. 유속계측을 위해 사용된 LDV는 2 color 3 beam 후방 산란형으로 6W 아르곤 이온 레이저를 사용하여 2방향 유속을 동시에 계측할 수 있는 시스템 이지만[3], 본 연구에서는 축방향의 경계층 유동을 계측하는 것에 주안점을 두었기 때문에, 유속계측점의 공간분해능(Spatial Resolution)을 높이기 위하여 축방향의 유속만을 계측할 수 있도록 LDV를 구성하였다.

캐비테이션 터널에 설치된 수중운동체의 실험 및 수치계산을 위한 좌표계는 Fig.2에 나타난 것

과 같이 선수를 원점으로 하였다. 캐비테이션터널에서 표면압력분포 및 유속분포를 계측하기 위해서는 기준압력(Pref)과 기준유속(Uref)이 필요하게 되는데, Fig.2에 나타난 것과 같이 벽면 근처에 설치된 압력구멍 및 피토티 관으로부터 계측된 압력 및 속도를 기준으로 하였다.

수중운동체를 시험하기 위해서는 우선적으로 레이놀즈 수의 영향을 살펴보아야 한다. 이를 위하여 Fig.1에 나타난 각 경우에 대하여 수중운동체의 길이를 기준으로 한 레이놀즈 수(ReL)를 3×10^6 , 5×10^6 및 7×10^6 으로 변화시키면서 물체 표면압력분포 및 LDV를 이용한 유속분포 계측을 수행하였는데, 모든 경우에서 레이놀즈 수가 5×10^6 이상이면 레이놀즈 수 변화에 따른 압력분포 및 유속분포 특성이 거의 변화하지 않는 것으로 나타났다[1].

3. 수중운동체 주위유동의 수치해법

3.1 지배방정식

본 연구에서는 수중운동체가 축대칭임을 감안하여 축대칭 원통좌표계를 기본좌표계로 택하였다. 비압축성, 정상유동을 위한 연속방정식 및 Reynolds-Averaged Navier Stokes 지배방정식은 다음과 같이 쓰여진다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rW) &= 0 \\ U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial r} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} [2\nu_t \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{2}{3} k] \\ &+ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r\nu_t (\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial V}{\partial x})] + \nu \nabla^2 U \\ U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial r} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} [\nu_t (\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial V}{\partial x})] \\ &+ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [2\nu_t r \frac{\partial V}{\partial r} - \frac{2}{3} rk] \\ &+ \nu \nabla^2 V - (\nu + \nu_t) \frac{V}{r^2} + \frac{2}{3} \frac{k}{r} \end{aligned}$$

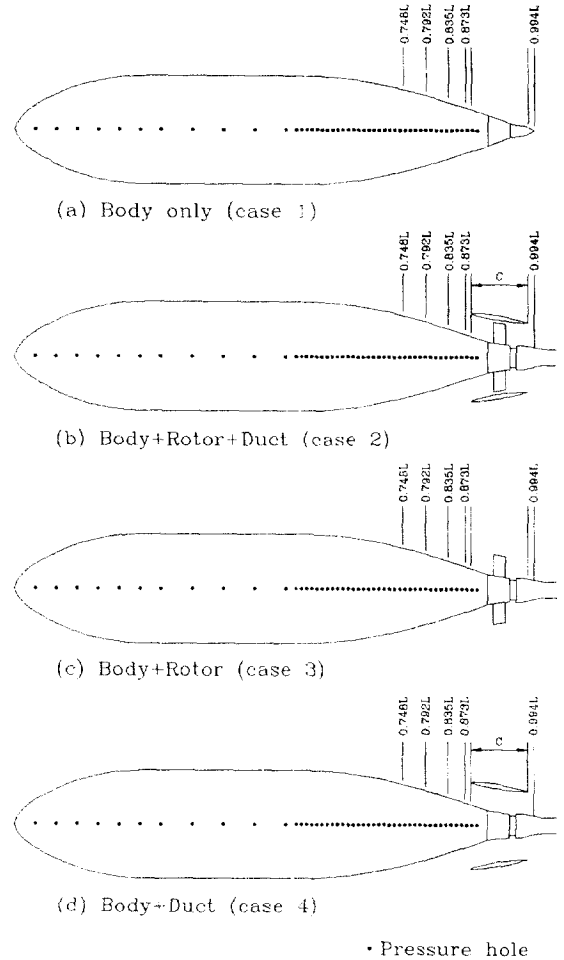


Fig.1 4 Cases of experimental set-up

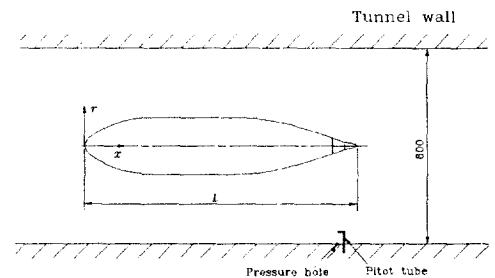


Fig.2 Coordinate system

여기서 p는 평균압력을 나타내며, U와 V는 각 축방향(x)과 반경방향(r)의 평균속도를 나타낸

다. ρ 와 ν 는 유체밀도와 동점성 계수이다. 난류 유동을 계산하기 위하여 표준 $k-\epsilon$ 난류모형을 채택하였는데, 난류운동에너지 k 와 난류에너지 소산을 ϵ 에 따른 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$U \frac{\partial k}{\partial x} + V \frac{\partial k}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial r} \right] + P + C_D \epsilon$$

$$U \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + V \frac{\partial \epsilon}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial r} \right] + \frac{\epsilon^2}{k} (C_{\epsilon 1} \frac{P}{\epsilon} + C_{\epsilon 2})$$

여기서 P 는 난류에너지 생성을 나타내는데 수직변형 항과 전단변형 항으로 다음과 같이 표현된다.

$$P = \nu_t \left[2 \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{v}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 \right]$$

표준 $k-\epsilon$ 난류모형에서 와점성계수는 k 와 ϵ 의 함수로서 다음과 같이 표현된다.

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

현재의 표준 $k-\epsilon$ 난류모형에서 채택한 모형상수들은 다음과 같다; $C_{\epsilon 1}=1.44$, $C_{\epsilon 2}=1.92$, $C_D=1.0$, $C_\mu=0.09$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\epsilon=1.3$.

3.2 수치방법 및 경계조건

차분화된 방정식들은 비직교 좌표계 및 비교차 격자계(nonstaggered grid)에서 유한체적법에 의하여 수치적으로 해석되며, 비교차 격자계를 사용함으로써 발생하는 압력의 진동현상은 Rhie와 Chow가 제시한 운동량보간법을 이용하여 해결하였다. 압력과 속도의 연결은 여러가지 문제에서 수렴성이 입증된 SIMPLEC 알고리즘을 이용한다. 대류

항의 차분화는 2차의 정확도를 가지고 있는 HPLA(Hybrid Linear and Parabolic Approximation) 방법을 이용하였다. 최종적으로 얻어진 이산화된 선형 대수방정식은 5대각 행렬에 대한 해법인 SIP(Strongly Implicit Procedure)에 의해 풀리게 된다. 수렴도는 모든 격자점의 잔류량의 합을 입구면의 유량으로 나눈 값이 10^{-3} 정도부터 각각의 물리량의 변화가 없어 10^{-4} 보다 작아질 때로 결정하였다.

수중운동체의 수치해석을 수행하기 위한 경계면 설정은 Fig.3에서와 같으며, 계산영역의 입구는 선수로부터 2L로 선택하고 출구는 유동이 충분히 발달되게 하기 위하여 8L로 결정하였다. 지배방정식 및 난류유동방정식의 해를 구하기 위한 경계조건은 다음과 같이 설정되었다. 입구면의 조건은 실험 조건으로부터 주어지며, 출구면에서는 Neumann조건을 사용한다. 벽면에 대하여는 점착(no-slip)조건을 적용하며, 벽면으로부터 첫 번째 격자점에서의 값은 벽합수를 이용하여 결정하였다.

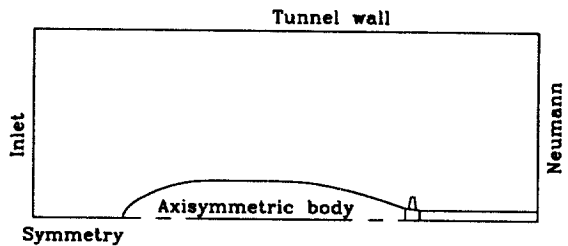


Fig.3 Schematic diagram

축대칭 주위의 유동은 중심축에 대하여 대칭이기 때문에 축대칭 물체 전·후에서는 다음 경계조건이 만족되어야 한다. 즉, 중심축에 수직방향으로 물리량의 구배 및 운동량 교환(Momentum flux)이 없어야 한다. 선체 주위의 유동에 프로펠러의 작용을 포함시키기 위해서는 원칙적으로 회전하는 프로펠러의 비정상적 작용을 포함하는 난류 점성 유동장을 해석하여야 한다. 그러나 프로펠러의 매 회전각도에 따른 수중운동체의 비정상적인 유동해석은 많은 계산시간 등의 문제를 수반하기 때문에 비정상적인 프로펠러의 작용을 평균적인 물체력

(Body-force)으로 대체시키거나[4], 프로펠러에 의한 유기속도를 평균적으로 구하여 경계조건으로 처리하는 방법을 사용하고 있다. 본 연구에서는 후자의 방식을 택하였다. 프로펠러의 작용은 프로펠러의 대표면인 얇은 판을 지나면서 유체가 갑자기 가속되는 것으로 단순화시킨다(Actuator disk theory). 그러나 이러한 모델에서는 반경방향의 속도분포를 알 수 없는 단점이 있기 때문에 본 연구에서는 양력면 이론(Lifting Surface Theory)을 적용하여 프로펠러에 의한 유기속도를 구하였다. 이 이론에서는 프로펠러 경계치 문제를 풀어서 보오텍스 분포를 알게 되면 프로펠러 후류에서의 유기속도는 Biot-Savart 법칙을 사용하여 구할 수 있다[5]. 프로펠러에 의한 유기속도는 프로펠러의 후류 반경에 따라서 유기속도가 달라지기 때문에 최종 반류 지역(Ultimate wake zone)에서의 값을 사용하였으며, 그 분포는 Fig.4에 나타나 있다.

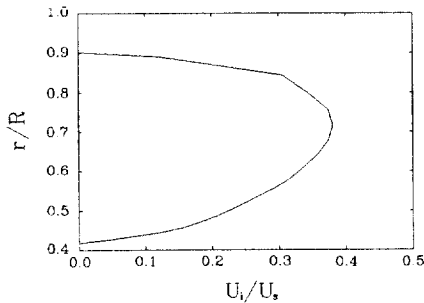


Fig.4 Distribution of induced velocity

4 결과 및 고찰

본 연구의 주요 목적은 수중운동체의 추진장치별 난류유동 특성을 연구하는 것이다. 그 목적을 위해 Fig.1에 나타난 4가지 경우에 대하여 실험 및 수치계산을 수행하였다. 수중운동체 주위의 격자는 H-type을 선정하였으며, 덕트가 없는 경우에는 161×80의 격자점이 축방향(x)과 반경방향(r)으로 분포되었으며, 덕트가 있는 경우에는 Fig.5에 나타난 것과 같이 덕트 표면을 고려하여 201×100의 격자점을 분포하였다. 수치계산을 위해 선정된 수중운동체의 길이를 기준으로 하는 레이놀즈 수는 7×10^6 이며, 입구에서의 경계조건은 레이놀즈 수를 기준으로 설정되었다.

Fig.6는 3가지 경우에 대한 수중운동체 표면 압력분포의 실험결과 및 수치계산 결과의 비교를 보여준다. 3가지 경우 모두 선수부($x/L=0.2$)에서 약간의 차이를 보여준다. 이는 현재의 표준 $k-\epsilon$ 난류모형이 선수부와 같이 곡률의 변화가 심한 영역에서 표면압력분포를 정확하게 예측하지 못하는 데에 기인한다. Cheng 과 Farokhi[6]는 후향계단 유동(Backward-Facing Step Flow)과 S자 및 180° 곡률을 갖는 덕트 등에서 곡률의 변화를 고려한 난류모형을 개발하여 기존에 표준 $k-\epsilon$ 난류모형의 문제점을 개선한 바 있다. 이들은 주로 2차원 유동에 적합한 난류모형을 개발하였다. 이들의 난류모형이 축대칭 및 3차원 유동에서 적용되기 위해서는 더 많은 연구가 진행되어야 한다.

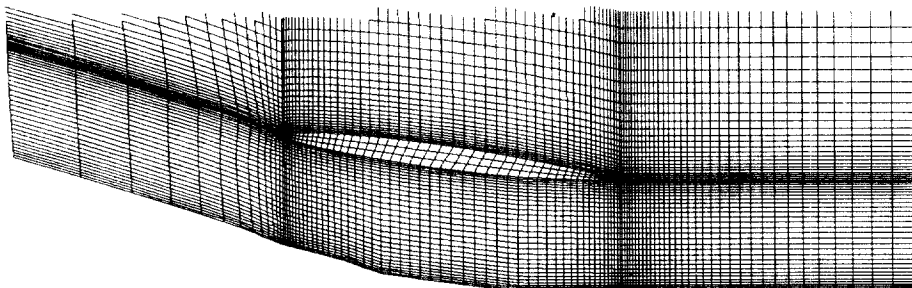


Fig.5 Grid system around duct (case 4)

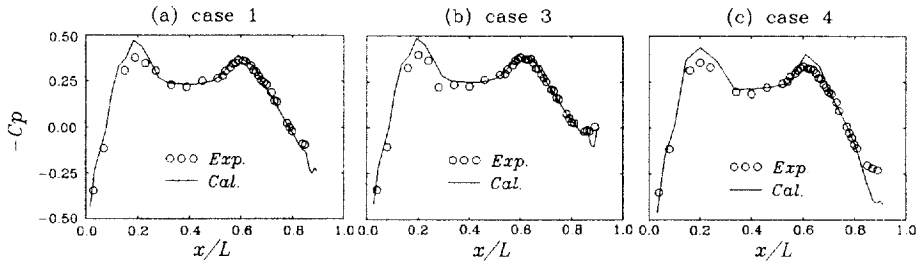


Fig.6 Surface pressure distribution

현재의 연구에서 선수부의 문제점은 축대칭 유동에서 곡률을 고려한 난류모형의 개발을 통하여 해결할 수 있을 것으로 보인다. 수중운동체만 있는 경우(case 1)와 수중운동체에 프로펠러만 설치된 경우(case 3)는 실험결과와 계산결과가 잘 일치하지만, 수중운동체에 덕트만 설치된 경우는 $x/L=0.6$ 근처와 $x/L=0.9$ 근처에서 두 결과 사이에 차이를 보여주고 있다. 수중운동체의 덕트는 보통 선미에 있는 제어판에 고정된다. 그러나 제어판이 있는 경우 선미유동이 축대칭이 될 수 없으므로 축대칭 유동을 최대 재현하기 위하여 덕트 고정장치는 덕트 뒷날 부근에 설치된다. 이때 덕트 고정장치는 고속으로 흐르는 주위유동(약 10%)과 고속으로 회전하는 프로펠러(약 30rps)에서 진동이 발생하지 않도록 설계되어야 한다. 고속으로 회전하는 프로펠러의 경우 덕트와 프로펠러와의 간극은 보통 0.3~0.5mm인데, 이와같은 간극을 유지하면서 진동이 없도록 덕트를 고정시키기 위하여 덕트 후류 쪽에 덕트 고정장치가 강력하게 설치된다. 덕트 고정장치는 축대칭 유동장을 수치적으로 해석할 때 고려될 수 없으므로 실험과의 차이를 유발할 가능성이 높다. case 4에서 실험과 수치해석 사이에 나타난 표면압력분포의 차이는 다른 문제에 의하여 나타날 수도 있으나 현재로서는 덕트고정장치가 가장 큰 이유라고 생각된다. 수치적으로 덕트 고정장치까지 고려하여 계산하는 것은 3차원 유동계산시 가능하며, 축대칭 해석 방법으로는 매우 어려운 점이 있다.

Fig.7에서 Fig.9까지는 3가지 경우에 대한 반경 방향 속도분포를 Fig.1에 표시된 위치에서 실험결과와 수치계산 결과의 비교를 보여준다. 표면압력

분포와 같이 case 1 과 case 3은 비교적 실험결과와 일치하는 것으로 나타났다. 다만 경계층 근처 유속분포의 곡률에서 약간의 차이가 유발되는데 이는 벽면에서의 와점성계수의 감소효과를 고려한 레이놀즈수 난류모형이나 벽면에서의 비선형효과를 고려하는 난류모형을 사용하면 개선이 가능할 수도 있다. 그러나, 레이놀즈 수 7×10^6 에서 이와같은 난류모형을 사용하는 것은 격자계생성, 수렴도 및 계산시간에서 많은 문제를 야기시킬 가능성이 있으므로, 벽면에서 첫번째 격자점을 가장 넓게 설정할 수 있는 표준 $k-\epsilon$ 난류모형이 현재 단계에서 가장 적합하리라 생각된다. Case 4는 덕트 바로앞($x/L=0.873$)과 덕트 바로 뒤($x/L=0.994$)에서 차이가 유발되고 있는데, 이는 앞서 설명한 바와 같이 덕트고정 방법에서 문제도 있겠지만 LDV를 이용한 유속측정에 공간분해능 (spatial resolution)과 수치계산에서 격자계 세밀함 정도의 차이도 문제가 있을 수 있다고 보여진다. 본 연구에서 사용한 LDV 장치에 공간분해능은 0.5mm 정도였으며, 덕트근처에 수치계산을 위한 격자계는 0.1mm 정도여서 급격하게 변화하는 유동을 실험적으로 추적하기 어려운 점이 있다.

또 다른 이유로는 난류모형의 문제로서 현재의 계산에서 채용한 표준 $k-\epsilon$ 난류모형은 전유동장을 난류로 가정함으로써 야기되는 비난류 영역에 Entrainment 효과가 나타나지 않아 덕트 뒤쪽 속도가 실제보다 더 낮게 계산될 가능성이 있다[7]. 유속변화가 큰 지역은 항상 실험적, 수치적인 면에서 상당한 주의를 기울여야 할 것으로 생각된다.

Fig.10는 여러 가지 실험장치 설치에 따른 표면압력분포의 실험적·수치적 결과의 비교를 보여

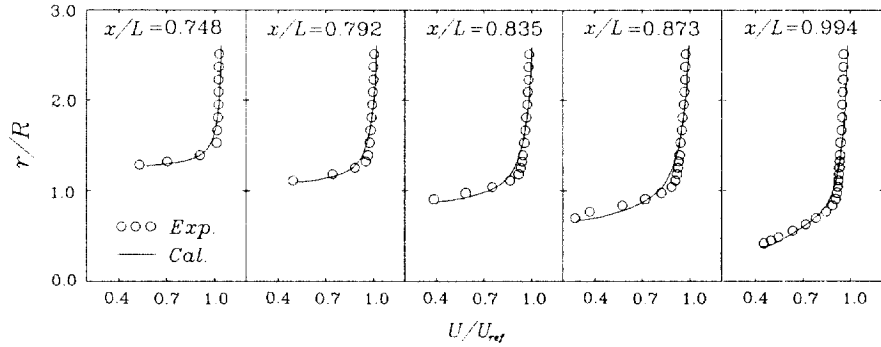


Fig.7 Velocity profiles (case 1)

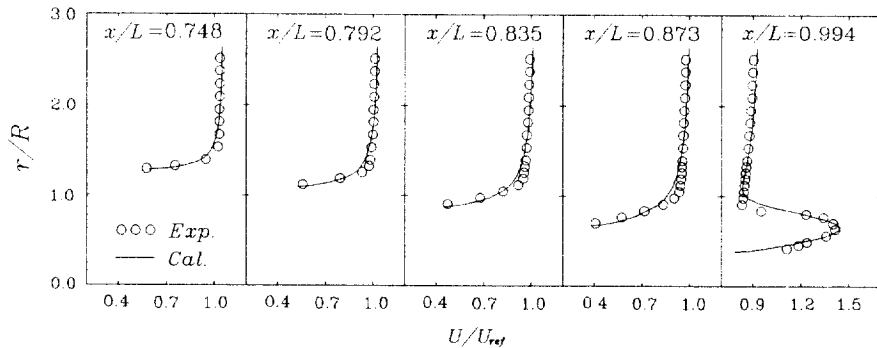


Fig.8 Velocity profiles (case 3)

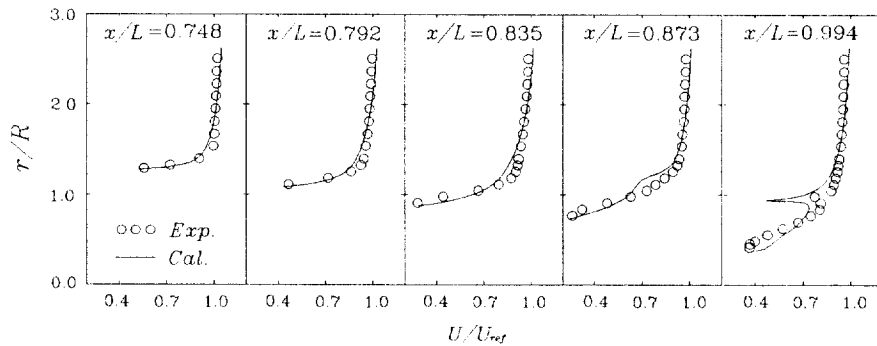


Fig.9 Velocity profiles (case 4)

준다. Fig.10-(a)의 실험결과를 살펴보면 선미에서의 유동특성이 잘 나타나고 있는데 덕트와 프로펠러가 복합된 case 2가 선미에서 가속이 많이 되어 표면압력이 가장 낮아지고 있음을 보여주고 있으며, case 4는 덕트에 의해 주위 속도가 감소됨에 따라 case 1에 비하여 압력이 더 높아지는 것을

관찰할 수 있다. case 3는 case 1과 case 2 중간에 위치하고 있다. Fig.10-(b)의 수치계산에서도 이와같은 현상이 그대로 나타나고 있다. 다만 case 4가 case 1과 case 3에 비하여 $x/L=0.2$ 부근에서 차이가 나타나고 있다. 이는 격자계 분포 때문에 나타난 문제이다. Case 4는 Fig.5에 나타난 것과

같이 덕트 서쪽과 동쪽에 벽면이 형성됨으로서 격자가 밀집되었고, 이로 인해 $x/L=0.2$ 부근에 격자가 case 1과 case 3에 비하여 넓게 분포되었다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 격자수를 증가시키는 것은 계산시간 및 기억용량에 문제가 있을 수 있으므로 새로운 격자계 생성(Multi-Block Grid) 및 수치해석법의 개발을 통하여 근본적으로 해결될 수 있을 것이다.

본 연구에서 덕트 및 프로펠러가 설치된 경우의 계산이 수행되지 않아 수치적인 경향을 모든 경우에 대하여 비교할 수 없었다. 이는 덕트가 설치되어 있는 경우에는 기존에 양력면 이론을 가지고 프로펠러에 의해 유기된 속도를 구하기가 어려운 점이 있어 패널법(Panel Method)등과 같은 다른 방법으로 유기속도를 계산하여야 한다. 그러나, 아직까지 덕트와 프로펠러가 결합된 경우에 유기속도를 계산할 수 있는 방법이 개발되지 않아 추후에 case 2에 대한 난류 점성유동장 해석을 수행할 예정이다. Fig.11과 Fig.12는 덕트 바로 앞($x/L=0.873$)과 덕트 바로 뒤($x/L=0.994$)에서 여러 가지 실험장치 설치에 따른 반경 방향 유속분포의 실험적·수치적 결과의 비교를 보여준다. Fig.11-(a)와 Fig.11-(b)의 실험 및 계산결과를 살펴보면 축대칭 물체에 덕트만 설치되어 있는 경우(case 4)가 유속이 가장 늦은 것으로 나타나 선미의 표면압력분포와 같은 현상이 나타나는데, 이는 덕트로 인한 유속의 Blockage 효과 때문인 것으로 생각된다. case 2는 덕트 안에서 많은 양의 가속이 이루어진 영역과 덕트 앞날(Leading edge)를 중심으로 Blockage 효과로 인한 감속이 이루어진 두 영역을 잘 보여주고 있다. 덕트는 프로펠러와 조합될 때만이 추진기로서의 기능을 발휘할 수 있지만 덕트 자체로는 추진효과가 없다는 것을 case 2와 case 4의 실험결과로부터 잘 알 수 있다. Fig.12-(a)의 case 2와 case 3의 유속분포는 Fig.11-(a)에서의 경향과 비교해 볼 때 변화가 있는 것을 알 수 있다. 덕트 상류쪽에서는 덕트와 프로펠러의 복합추진장치(case 2)의 유속이 프로펠러만의 추진장치(case 3)에 비해 가속이 더 이루어진 것으로 나타났으나, 하류쪽에서는 오히려

case 3의 유속이 더 가속된 것을 볼 수 있다. 이는 본 연구에서 사용된 덕트가 감속형 덕트이기 때문에 나타난 현상이라 생각된다. Fig.11과 Fig.12에 나타난 수치계산 결과는 앞서 언급한 바와 같이 실험장치의 공간분해능 및 난류모형의 성능에 따른 정도에 차이는 있을지라도 실험에서 나타난 경향이 잘 나타나고 있다. 이런 점으로 미루어 보아 실험과 수치계산의 상호간에 타당함을 알 수 있어 앞으로 덕트와 프로펠러가 동시에 설치된 경우(case 2)에 수치계산 시에도 현재의 실험결과를 충분히 활용할 수 있으리라 생각된다.

5. 결 언

본 연구를 통하여 수중운동체의 여러 가지 경우에 대하여 표면압력분포 및 유속분포를 예측하였고, 실제적인 경향과 잘 일치하는 일관성 있는 실험자료를 확보할 수 있었다. 또한 이를 기반으로 한 수중운동체 주위 난류 점성유동을 계산한 결과 양과 경향에서 타당한 결과를 얻을 수 있었다. 본 연구에서 가장 중요한 결론은 프로펠러가 설치된 경우에 수치계산시 양력면에 의해 계산된 유기속도만을 가지고 유동장을 해석할 수 있다는 점이다. 이와같은 방법을 사용하므로써 프로펠러를 경계조건으로 대체하여 간단하게 유동장을 처리할 수 있었다. 덕트와 프로펠러가 설치된 경우에는 본 연구에서 수치계산을 수행하지 못하였는데, 이는 양력면이론에 의하여 유기속도를 구할 수 없었다는 점이 주요 원인으로 나타난다. 앞으로 패널법 등을 이용하여 덕트와 프로펠러를 동시에 해석하여 유기속도를 계산할 수 있는 연구가 수행되면, 현재의 수치계산방법을 다시 활용할 예정이다. 현재의 실험결과 및 수치 계산결과를 잘 이용하면 수중운동체와 추진기 상호작용을 해석할 수 있어, 실험적으로가 아닌 수치적으로 수중운동체를 개발할 수 있다고 기대된다.

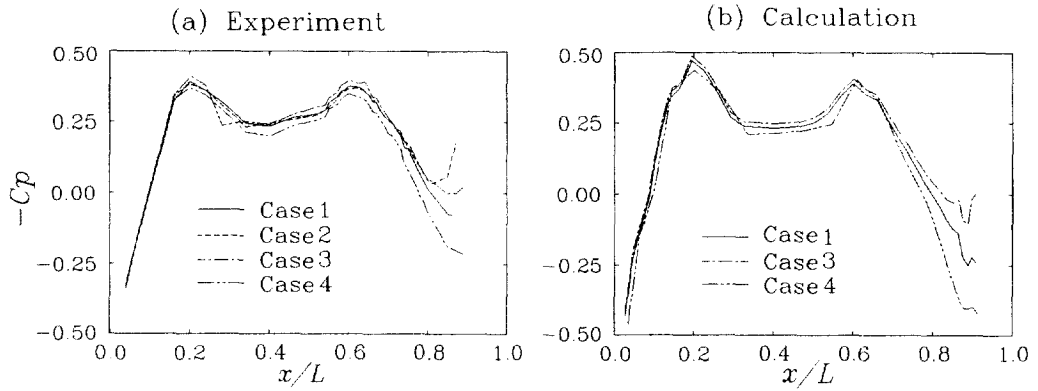


Fig.10 Comparison of surface pressure distribution

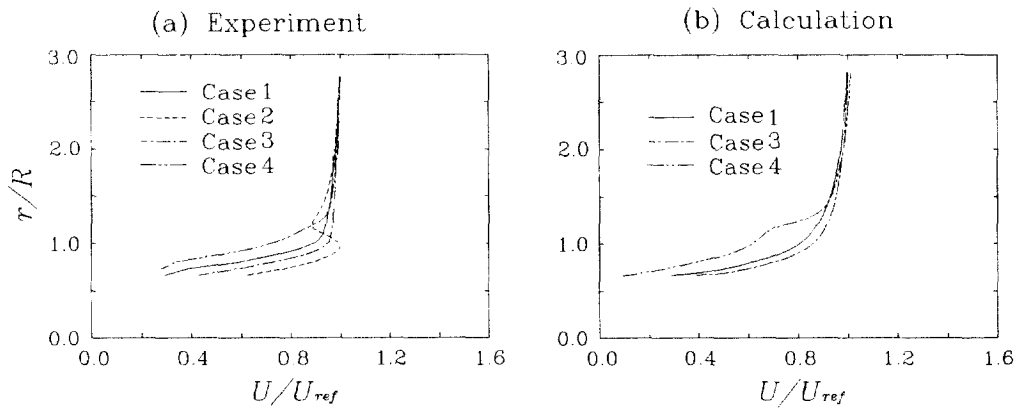


Fig.11 Comparison of velocity profiles ($x/L=0.873$)

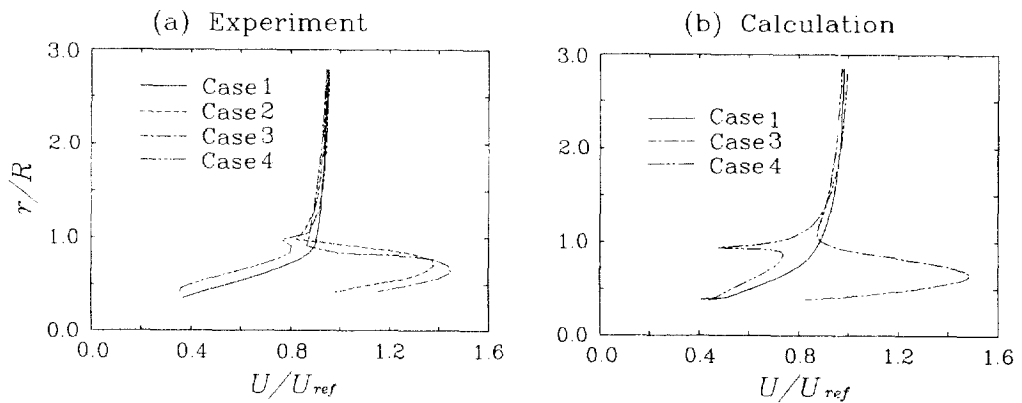


Fig.12 Comparison of velocity profiles ($x/L=0.994$)

참고 문헌

- [1] 안종우, 김기섭, 김경열, “축대칭 물체주위 유동의 실험적 해석”, 선박해양기술, 제 20호, 1995.
- [2] 안종우, 김기섭, 이진태, “NACA0012 단면 주위의 속도, 압력, 힘 및 모멘트 계측”, 선박해양공학연구, 제 2호, 1989.
- [3] 안종우, 이진태, 김기섭, 이창용, “레이저 유속계를 이용한 2차원날개 단면 주위의 난류경계층 연구”, 대한조선학회 논문집, 제 28권 제 2호, 1991.
- [4] F. Stern, H. T. Kim, V. C. Patel, and H. C. Chen, “A Viscous-Flow Approach to the Computation of Propeller-Hull Interaction”, *Journal of Ship Research*, Vol. 32, No. 4, Dec. 1988, pp. 246-262.
- [5] J. E. Kerwin and C. S. Lee, “Prediction of Steady and Unsteady Marine Propeller Performance by Numerical Lifting-Surface Theory”, *Trans. SNAME*, Vol. 86, 1978.
- [6] G. C. Cheng and S. Farokhi, “On Turbulent Flows Dominated by Curvature Effects”, *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, Vol. 114, March 1992.
- [7] J. W. Ahn and H. J. Sung, “Prediction of Two-dimensional Momentumless Wake by $k-\varepsilon-\gamma$ Model”, *AIAA Journal*, Vol. 33, No. 4, April 1995, pp. 611-617.