

복합추진장치가 포함된 축대칭 물체 주위유동의 수치적 연구

안종우*, 문일성*, 표상우**, 서정천**

Numerical Study of the Flow Field Around an Axisymmetric Body with Integrated Propulsors

by

Jong-Woo Ahn*, Il-Sung Moon*, Sang-Woo Pyo** and Jung-Chun Suh**

요 약

복합 추진장치가 포함된 경우와 포함되지 않은 경우에 축대칭 물체 주위 유동특성을 조사하기 위한 수치적 연구가 수행되었다. 비압축성 RANS 방정식을 유한체적법으로 해석하는 수치적 방법이 표준 $k-\epsilon$ 난류모형을 이용하여 수행된다. 선체와 추진기의 상호작용은 패널법에 의하여 계산된 유기속도를 프로펠러 면에 분포하여 경계조건으로 처리하는 방법을 사용하였다. 수치적 결과로부터 얻어진 표면압력분포와 유속분포는 시험 결과와 비교된다. 본 연구에서 얻어진 수치계산 프로그램은 복합추진장치의 설계에 이용될 수 있다고 생각된다.

Abstract

Numerical study is carried out to investigate flow characteristics around an axisymmetric body with and without an integrated propulsor. The incompressible Reynolds-Averaged Navier-Stokes(RANS) equations are also solved using the finite volume method and the standard $k-\epsilon$ turbulence model for turbulence closure. In order to investigate the propulsor-hull interaction, the induced velocity calculated by surface panel methods is utilized for the boundary condition at the propeller plane. The calculated results are compared to the experimental results. It is considered that the present numerical code can be used for design of an integrated propulsor.

접수일자 : 1999년 3월 19일, 재접수일자 : 1999년 5월 14일

* 정회원, 한국해양연구소 선박해양공학분소

** 정회원, 서울대학교 조선해양공학과

1. 서 언

복합추진장치를 정확하게 설계하기 위해서는 선체 주위의 난류경계층, 박리 및 표면압력 등에 의하여 생성되는 선체저항 뿐 아니라 프로펠러의 성능해석에 직접적 영향을 미치는 선미반류 등이 정도 높게 해석되어야 한다. 최근 이와같은 추세에 따라 선체와 덕트는 RANS 방정식을 이용하여 해석하고 프로펠러는 양력면 이론이나 패널법과 같은 포텐셜 이론으로 해석하여 서로 연결하는 연구가 계속적으로 진행되고 있다[1]. 이와같은 연구를 원활히 수행하기 위해서는 실험·이론 양면의 연구가 동시에 수행되어야 하는 바, 실험적 연구는 캐비테이션 터널에서 수중운동체 특히 축대칭 물체를 대상으로 복합추진장치의 배열변화에 따른 유동특성에 대한 실험을 이미 수행한 바 있다[2].

본 연구에서는 복합추진장치가 취부된 상태에서 축대칭 물체 주위의 유동장에 대한 수치적 해석을 다루고 있다. 그러므로 선체와 프로펠러의 상호작용을 해석하기 위하여 프로펠러에 의한 작용을 고려하여야 한다. 프로펠러에 의한 유기속도는 패널법에 의하여 계산하였으며, 이를 RANS 방정식에서 경계조건으로 처리하는 방법으로 상호작용을 해석하였다.

본 연구를 수행하기 전에 프로펠러만 설치된 경우에 양력면 이론을 이용하여 유기속도를 구하여 유동장을 해석한 바 있다[2]. 그러나, 이때 덕트와 프로펠러가 함께 포함된 경우에 유기속도는 계산하지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 패널법을 이용하여 프로펠러 뿐만 아니라 덕트가 포함된 경우에도 유기속도를 계산할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 계산된 유기속도는 축대칭 난류·점성 프로그램에서 경계조건으로 처리되어 유동장 해석을 수행하는데 이용되었다. 본 연구에서 개발된 수치적 방법은 앞으로 복합추진장치의 설계에 사용될 수 있으리라 생각된다.

2. 수중운동체 주위 유동특성시험

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 수행한 바 있으며[2], 본 연구의 수치적 계산도 이와같은 4가지 경우에 대하여 수행된다.

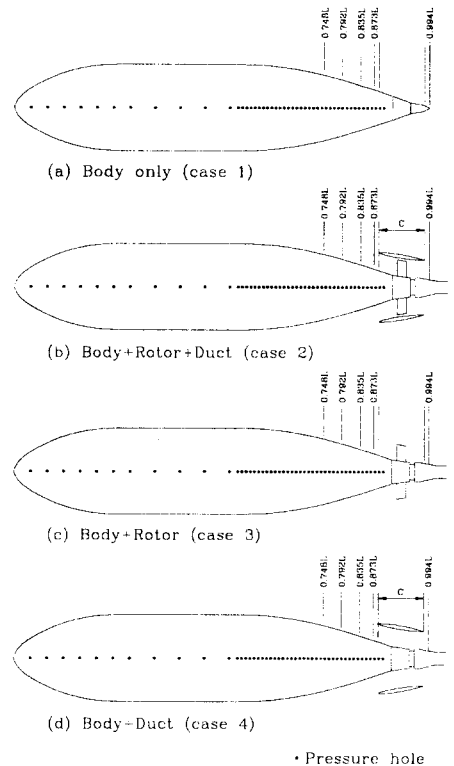


Fig.1 4 cases of experimental set-up

캐비테이션 터널에 설치된 수중운동체의 실험 및 수치계산을 위한 좌표계는 Fig.2에 나타난 것과 같이 선수를 원점으로 하였다. 캐비테이션 터널에서 표면압력분포 및 유속분포를 계측하기 위해서는 기준압력 (P_{ref})과 기준유속(U_{ref})이 필요하게 되는데, Fig.2에 나타난 것과 같이 벽면 근

처에 설치된 압력구멍 및 피토 관으로부터 측정된 값을 기준으로 하였다. 수치 계산에서의 기준 압력과 기준유속도 동일한 위치에서 계산된 값을 사용하였다.

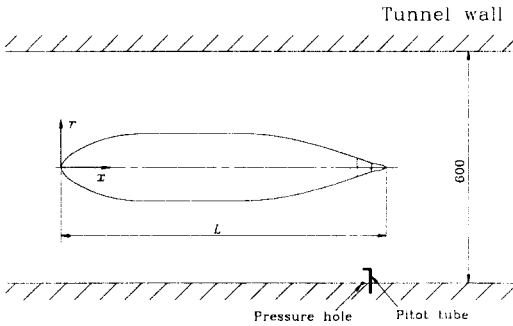


Fig.2 Coordinate system

3. 수중운동체 주위유동의 수치해법

3.1 지배방정식

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

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

여기서 p는 평균압력을 나타내며, U와 V는 각각 축방향(x)과 반경방향(r)의 평균속도를 나타낸다. ρ와 ν는 유체밀도와 동점성 계수이다. 난류유동을 계산하기 위하여 표준 k-ε 난류모형을 채택하였는데, 난류운동에너지 k와 난류에너지 소산을 ε에 따른 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} U \frac{\partial k}{\partial x} + V \frac{\partial k}{\partial r} &= \frac{\partial}{\partial x} [\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x}] \\ &+ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r \frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial r}] + P + C_{D\varepsilon} \\ U \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + V \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} &= \frac{\partial}{\partial x} [\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x}] \\ &+ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r}] \\ &+ \frac{\varepsilon^2}{k} (C_{\varepsilon 1} \frac{P}{\varepsilon} + C_{\varepsilon 2}) \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} P &= \nu_t [2((\frac{\partial U}{\partial x})^2 + (\frac{\partial V}{\partial r})^2 \\ &+ (\frac{V}{r})^2) + (\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial V}{\partial x})^2] \end{aligned}$$

현재의 표준 k-ε 난류모형에서 채택한 모형상수들은 다음과 같다 C_{ε1}=1.44, C_{ε2}=1.92, C_D=1.0, C_μ=0.09, σ_k=1.0, σ_ε=1.3.

3.2 수치방법과 경계조건

차분화된 방정식들은 비직교 좌표계 및 비교차 격자계(nonstaggered grid)에서 유한체적법에 의하여 수치적으로 해석되며, 비교차 격자계를 사용함으로써 발생하는 압력의 진동현상은 Rhie와 Chow[3]가 제시한 운동량보간법을 이용하여 해결하였다. 압력과 속도의 연결은 여러가지 문제에서 수렴성이 입증된 SIMPLEC 알고리즘을 이용한다. 대류항의 차분화는 2차의 정확도를 가지고 있는 HPLA (Hybrid Linear and Parabolic Approximation) 방법을 이용하였다. 최종적으로

언어진 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^{-5} 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 Neumann 조건을 사용한다. 벽면에 대하여는 점착(no-slip) 조건을 적용하며, 벽면으로부터 첫 번째 격자점에서의 값은 벽합수를 이용하여 결정하였다.

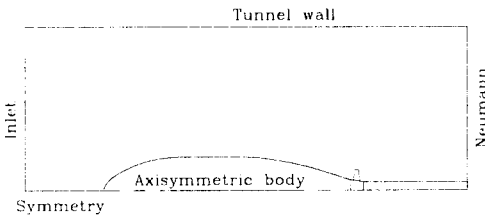


Fig.3 Boundary conditions

3.3 패널법에 의한 유기속도계산

프로펠러를 정확하게 해석하기 위해서는 비정상적 작용을 포함하는 난류 점성유동장을 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 사용할 수 있다[2]. 본 연구에서는 후자의 방식을 택하였다.

프로펠러에서 유기되는 반경방향의 속도 분포를 구하는 방법은 여러 가지가 있다. 본 연구에서는 최근에 프로펠러의 유기속도를 구하는데 적용되었던 포텐셜을 기저로 한 패널법(Potential Based Surface Panel Method)을 사용하였다[5]. 패

널법은 프로펠러의 표면에 지배방정식을 만족하는 법선 다이폴과 소오스를 분포시켜 포텐셜을 구하고, 포텐셜을 미분함으로써 속도와 압력을 구하는 유한차분법이다. 본 연구에서는 프로펠러의 경계치 문제를 해석하고 프로펠러 표면에서 구하여진 포텐셜 분포에 의하여 임의의 제어점에서의 축방향 평균 속도분포를 구하여 경계조건으로 처리하였다. Fig.4와 Fig.5에 프로펠러와 덕트-프로펠러의 패널형상을 도시하였다.

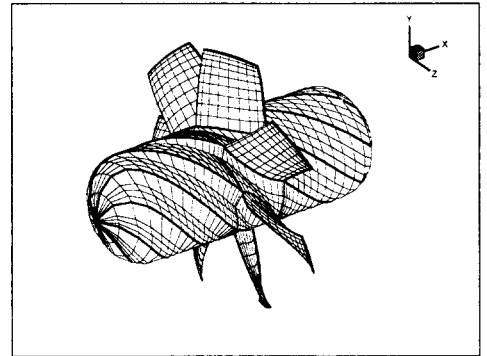


Fig.4 Panel representation of a propeller

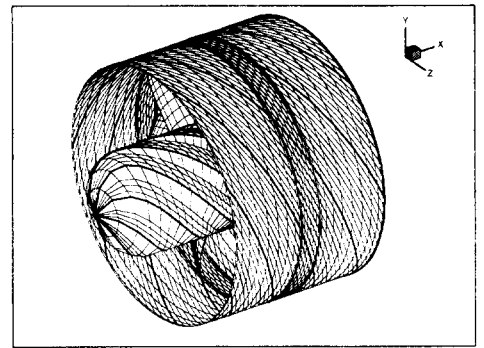


Fig.5 Panel representation of a ducted propeller

일반적으로 덕트-프로펠러에서 덕트와 프로펠러의 상호간섭을 고려할 경우 전통적으로 덕트-프로펠러는 프로펠러를 해석하여 유기속도분포를 구하고 다시 덕트를 해석하는 방법을 많이 사용하였으나, 본 연구에서는 덕트와 프로펠러를 동시에 해석함

으로써 덕트와 프로펠러의 상호간섭을 좀더 정확히 고려함과 동시에 계산시간의 향상을 도모하였다. Fig.6에 일반적인 프로펠러와 덕트-프로펠러의 유기속도를 비교 도시하였다.

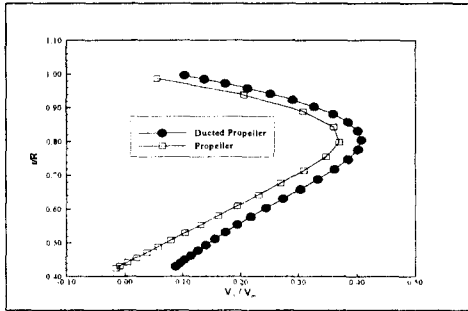


Fig.6 Induced velocity distributions

4. 결과 및 고찰

본 연구의 주요 목적은 수중운동체의 추진장치별 난류유동 특성을 연구하는 것이다. 그 목적을 위해 Fig.1에 나타난 4가지 경우에 대하여 수치계산을 수행하였다. 수중운동체 주위의 격자는 H-type을 선정하였으며, 덕트가 없는 경우에는 161×80의 격자점이 축방향(x)과 반경방향(r)으로 분포되었으며, 덕트가 있는 경우에는 덕트 표면 및 덕트 후류에서의 유동의 예측정도를 고려하여 251×100의 격자점을 분포하였다. 입구에서의 경계조건은 레이놀즈 수($ReL=7 \times 10^6$)를 기준으로 설정되었다. 덕트가 설치된 경우에 격자수를 증가시키고 덕트 앞날과 뒷날 부근에 격자계를 매끄럽게 조절한 결과 기존의 계산결과[2]보다 수렴도가 증가하였다(10-5).

Fig.7은 4가지 경우에 대한 수중운동체 표면압력분포의 실험결과 및 수치계산 결과의 비교를 보여준다. 4가지 경우 모두 선미부에서 실험 및 계산 결과가 잘 일치하는 것으로 보인다. 그러나 곡률변화가 심한 선수부($x/L=0.2$)와 선미부가 시작되는 영역($x/L=0.6$)에서 약간의 차이를 보여준다. 이는 표준 k-ε 난류모형이 선수부와 같이 곡률의 변화가 심한 영역에서 표면압력분포를

정확하게 예측하지 못하는 데에 기인한다. Cheng과 Farokhi(6)는 후향계단유동(Backward-Facing Step Flow)과 S자 및 180° 곡률을 갖는 덕트 등에서 곡률의 변화를 고려한 난류모형을 개발하여 기존에 표준 k-ε 난류모형의 문제점을 개선한 바 있다. 그러나 이들의 난류모형은 주로 2차원 유동에 적합한 것으로 축대칭 및 3차원 유동에서 적용되기 위해서는 더 많은 연구가 진행되어야 한다.

Fig.8은 4가지 경우에 대한 축방향 속도분포의 실험결과와 수치계산 결과의 비교를 보여준다. 모든 경우의 실험결과와 계산결과가 비교적 잘 일치한다. 축대칭 물체만이 설치된 case 1은 실험결과에서 경계층유동의 변화가 급격한 난류경계층의 특성을 보여준다. 경계층과 경계층을 벗어난 지역에 변화가 급격하여 수치계산과 실험 결과 사이에 약간의 차이를 보여준다. case 2는 패널법에 의하여 계산된 유기속도가 비교적 정확하게 예측된 것으로 보여진다. 덕트 바로 앞($x/L=0.873$) 위치에서 속도분포에 약간의 차이가 나타나지만 경향은 일치한다. 덕트 바로 뒤($x/L=0.994$) 위치에서는 최대속도 부분에서 거의 차이가 나타나지 않으나, 유기속도 영향이 끝나는 $r/R=0.96$ 이상에서 약간의 차이가 유발되고 있다. 그러나 프로펠러 유기속도의 영향이 끝나는 영역은 매우 잘 일치하고 있다. case 3도 역시 패널법에 의하여 계산된 유기속도가 비교적 정확하게 예측되었다고 보여진다. 덕트 바로 뒤($x/L=0.994$) 위치에서 최대속도 기준으로 약 1.5% 정도의 차이를 보여준다. 그러나 프로펠러 유기속도의 영향이 끝나는 $r/R=0.9$ 부근에서 차이가 나타난다. 이는 RANS 방정식을 이용한 수치계산 code에서 축방향 유기속도만을 프로펠러 면에 분포시키는 방법으로는 프로펠러 후류에서 발생하는 유관(slip-stream radius) 감소를 고려할 수 없기 때문에 나타나는 차이이다.

앞으로 프로펠러 유관감소까지도 고려할 수 있는 방법이 연구되어야 할 것으로 사료된다. Case 2는 프로펠러 유관보다는 덕트가 존재함에 따라 덕트에 의한 유관의 감소가 자연적으로 이루어졌

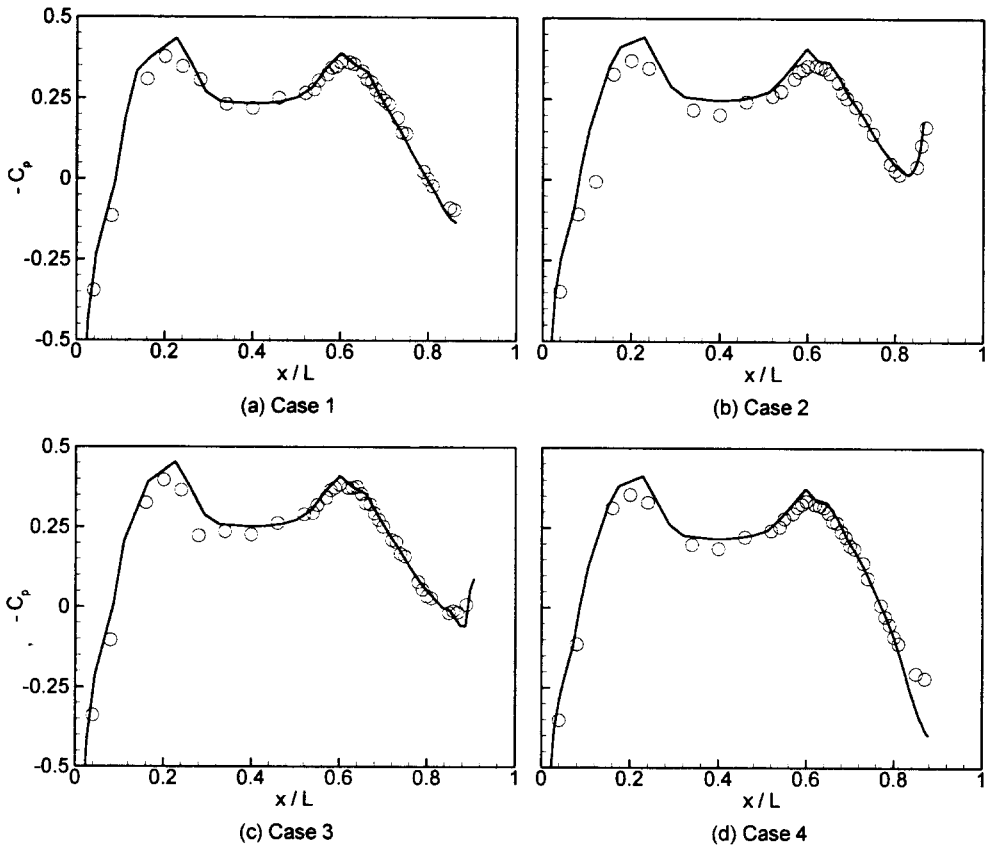


Fig.7 Surface pressure distribution

으며 이로 인해 case 3에 비해 실험과 계산이 일치되었음을 보여준다. Case 4는 덕트 바로 앞 ($x/L=0.873$)과 덕트 바로 뒤($x/L=0.994$)에서 차이가 유발되고 있는데, 일반적인 경향은 큰 차이가 없이 일치하고 있다. 이는 LDV를 이용한 유속측정에 공간분해능[7]과 수치계산에서 격자계세밀함 정도의 차이 때문에 문제가 있다고 보여진다. 본 연구에서 사용한 LDV 초점렌즈는 초점길이가 350mm이며, 두 개의 레이저 빛이 교차하는 측정점(초점)에서 길이는 Beam expander를 사용하지 않을 경우 약 3.0mm 이다. 본 연구에서는 Beam expander를 사용하지 않았지만, 앞으로 2.27배의 Beam expander를 사용할 경우

측정점에서의 길이는 약 1.3mm 정도로 감소되어 유속이 급격히 변화하는 영역에서 실험 정도를 향상시킬 수 있을 것이다.

Case 2와 case 3에서 특이한 점은 Fig.6에 나타난 유기속도 분포에서는 case 2의 유기속도 분포가 3.7% 정도 크게 계산되었는데, 덕트 바로 뒤($x/L=0.994$) 위치에서 case 3의 최대속도가 약 7.0% 정도 더 커진 것으로 나타났다. 실험 결과에서도 같은 현상이 나타났다. 이는 본 연구에서 사용된 덕트가 감속형이기 때문에 나타나는 현상으로 실험적·수치적으로 이와같은 현상을 잘 예측하고 있다.

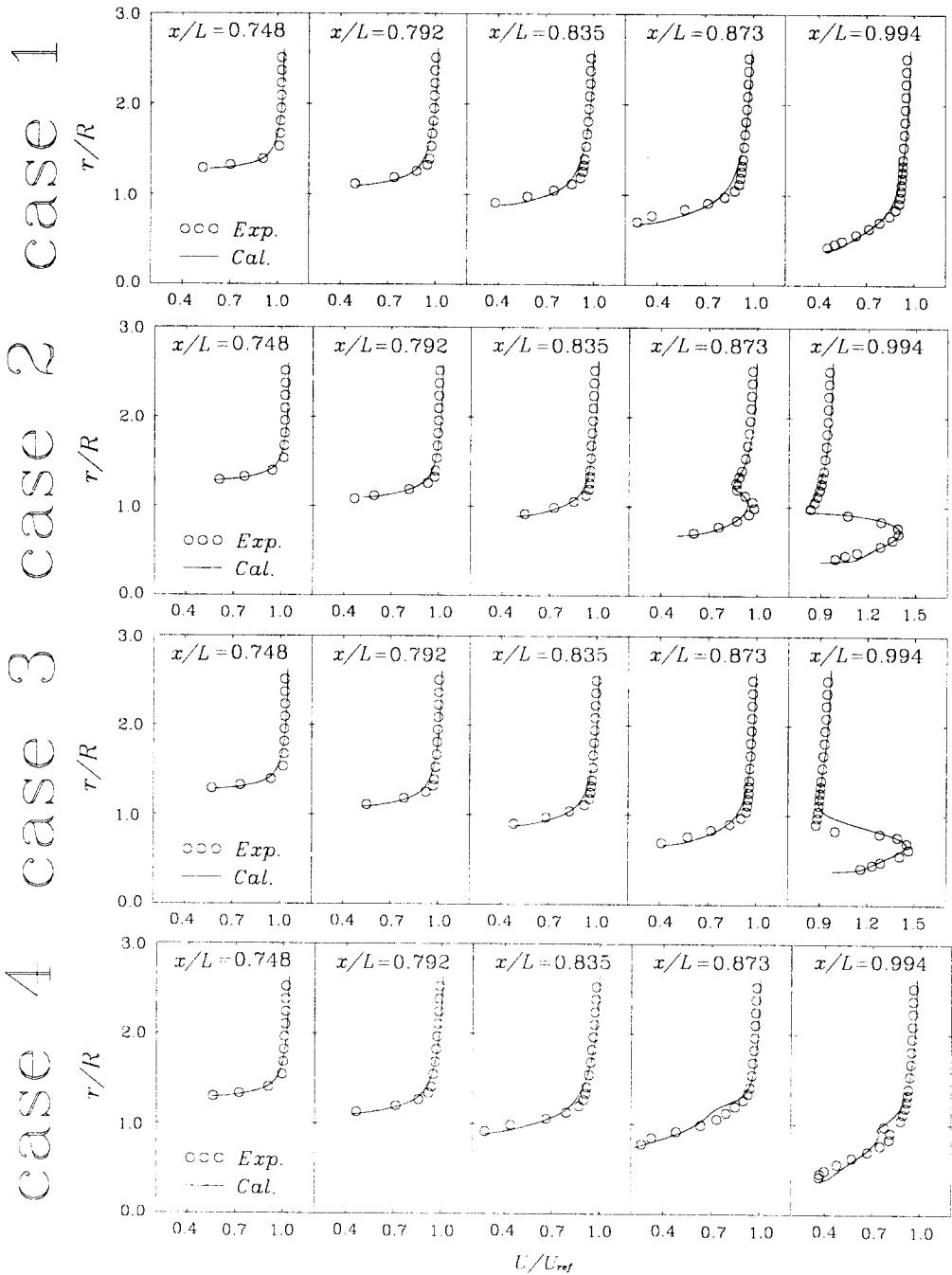


Fig.8 Velocity profiles

5. 결 언

본 연구를 통하여 복합추진장치에서의 유기속도를 패널법에 의하여 계산할 수 있는 방법이 개발되었다. 아직까지는 난류점성유동 계산시 프로펠러의 유관 수축반경을 고려하는 문제와 프로펠러에 유입되는 유효반류의 고려 등이 남아 있지만 타당한 결과를 얻을 수 있었으며 앞으로 개선이 가능하리라 보여진다.

본 연구에서는 축방향 유기속도 만을 고려하여 전유동장을 해석하였는데, 앞으로 반경방향과 원주방향의 유기속도도 고려하여 수치해석을 수행할 예정이다. 현재의 RANS방정식을 이용한 수치계산 방법은 난류점성 유동이 지배적인 선체 및 덕트 주위의 유동장을 정확하게 예측할 수 있어 앞으로 선체를 고려한 복합추진장치의 설계에도 이용될 수 있으리라 생각된다.

참 고 문 헌

[1] J.E. Kerwin and S.D. Black, " A Design Procedure for Marine Vehicles with Integrated Propulsors", PROPELLERS/SHAFTING '97 Symposium, Virginia Beach, 1997.

[2] 안종우, 송인행, 박태선, "축대칭 물체주위 유동의 실험적·수치적 해석", 대한조선학회논문집, 제 34권 제 3호, 1997.

[3] C.M.Rhie and W.L.Chow, "A Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Isolated Airfoil with Trailing-Edge Separation," AIAA,Vol. 21, 1983

[4] F. Stern, H. T. Kim, V. C. Patel, and H. C. Chen, "A Viscous-Flow Approach to the Computation of Propeller-Hull Interaction", J. of Ship Research, Vol. 32, No. 4,Dec. 1988.

[5] 김영기, 이진태, 이창섭, 서정천, "포텐셜을 기저로 한 패널법에 의한 프로펠러의 정상성능 해석", 대한조선학회논문집, 제 30권 제 1호, 1993.

[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] 안종우, 이진태, 김기섭, 이창용, "레이저 유속계를 이용한 2차원날개 단면 주위의 난류경계층 연구", 대한조선학회논문집, 제 28권 제 2호, 1991.