

원통형 수중운동체 두부 형상 역설계

An Inverse Design for Nose Shape of a Cylindrical-Shaped Submerged Body

정철민*

Jung, Chul-Min

ABSTRACT

In this paper, an efficient inverse design method for nose shape of submerged body based on the MGM(Modified Garabedian-McFadden) design method has been developed. The MGM design method is a residual-correction technique, in which the residuals are differences between the desired and the computed pressure distributions. 3-D incompressible Navier-Stokes equation was adopted for obtaining the surface pressure distribution and combined with the MGM design method to perform the inverse design of nose shape of submerged body. The design method was verified by applying to several airfoil shapes. Improved design shapes could be obtained when the method was applied to nose shapes of submerged body.

주요기술용어(주제어) : Inverse Design(역설계), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학), Cavitation(캐비테이션), Navier-Stokes Equation(Navier-Stokes 방정식), Submerged body(수중운동체)

1. 서론

원통형 수중운동체 형상 설계방법은 전통적으로 경험과 모형시험에 기초한 시행착오법을 사용하고 있는데 이러한 방법으로 최적화된 형상을 얻기까지는 많은 시간과 비용이 소비된다. 최근 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)의 발달로 유동장에 대한 상세한 정보를 정도 높게 추정하는 것이 가능해지면서 형상설계에 최적화기법의 도입이 가능해졌다.

두부 끝단에 일정 크기의 원판형상을 갖는 절두형

수중운동체의 두부 형상설계의 주요한 인자는 캐비테이션, 난류 전이, 층류 박리 등이다. 이 중에서 캐비테이션은 기포의 형성과 붕괴에 의하여 매우 심한 소음이 발생되고 구조물의 손상을 유발할 수 있으므로 반드시 피해야 한다. 따라서, 본 연구에서는 절두형 수중운동체의 두부에서 캐비테이션을 줄이는 압력분포를 목표압력분포로 설정하여 수중운동체 두부 형상을 역설계한다.

Lighthill^[1]에 의해 개척되어진 역설계 기법은 설계자가 설정한 이상적인 유동특성, 즉 벽면에서의 압력 또는 속도분포를 정해놓고 이를 만족하도록 물체의 형상을 설계하는 방법으로 항공기 익형 등의 설계에 널리 응용되고 있다. 임의로 주어진 압력분포나 속도분포가 닫힌물체형태(closed body shape)를 가져오지 못하는 닫힘문제(closure problem)나

† 2004년 5월 19일 접수~2004년 7월 9일 심사완료

* 국방과학연구소(Agency for Defense Development)

주저자 이메일 : imuya@hanmail.net

제약조건(constraint)부과의 어려움 등의 단점이 있으나, 주어진 설계점에서 설계형상에 대한 압력분포 등의 유동정보가 바람직하게 설정된다면 효율적인 설계방법이다.

Garabedian과 McFadden은 표면압력분포의 변화로 형상을 생성해 내는 잔여-보정 개념을 기초하여 Garabedian-McFadden (GM)방법^[2]을 제시하였고, 3차원 압축성 유동과 완전포텐셜(full potential)유동에 적용하였다. Malone^[3]등은 GM방법의 몇몇 한계를 제거하여 Modified Garabedian-McFadden(MGM)방법을 제시하였고, Santos^[4]등은 이를 발전시켰다. MGM 방법은 대표적인 역설계 방법으로 유동의 지배방정식 외에 물체 표면의 공간좌표를 지배하는 편미분방정식을 실제 물리영역에서 계산하여 새로운 기하학적 형상을 찾아내는 방법으로, 국내에서는 김형진, 이재우 등^[5,6]에 의해 익형에 대한 역설계 방법이 연구되었다.

본 연구에서 수중운동체 형상설계를 위하여 Navier-Stokes 방정식을 유동의 지배방정식으로 사용하고, 계산된 압력분포와 목적 압력분포의 차이를 형상의 수정에 연결하기 위한 보조방정식으로 Malone 등이 제시한 MGM 방법을 사용한다.

2. 수치해석 및 역설계 기법

가. 유동해석 방법

유동해석을 위한 지배방정식으로 3차원 비정상 상태의 비압축성 점성 유동의 Navier-Stokes 방정식으로써, 이를 무차원화한 후 일반화좌표계(τ, ξ, η, ζ)로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \hat{q}}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial \xi}(E - E_v) + \frac{\partial}{\partial \eta}(F - F_v) + \frac{\partial}{\partial \zeta}(G - G_v) = 0 \quad (1)$$

여기서,

$$\hat{q} = \frac{1}{J} \begin{pmatrix} 0 \\ u \\ v \\ w \end{pmatrix} \quad (2)$$

를 의미하고, J 는 좌표변화의 Jacobian 이고, 유동벡터 E, F, G 는 곡선좌표계의 대류항, 그리고 E_v, F_v, G_v 는 점성항을 나타낸다. 우선 운동량 방정식에 대해 반복시간전진법(iterative time marching method)^[7,8]과 뉴턴의 반복법을 사용하여 $n+1$ 의 시간과 k 의 반복횟수에 대해 부분적으로 선형화시키면 다음과 같다.

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

여기서, ω 는 완화계수이며 $\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}$ 는 유량 (flux)항의 Jacobian 행렬로서 다음과 같이 정의된다.

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

$$\bar{q} = \begin{pmatrix} 0 \\ u \\ v \\ w \end{pmatrix}$$

그리고 $\bar{R}^{n+1,k}$ 은 잔류벡터로서 다음과 같다.

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

다음으로 연속방정식은 매 시간 변화하는 속도장과

이에 대한 압력 변화에 대한 연결이 필요한데, 본 연구에서는 Marker-And-Cell(MAC) 개념^[9]을 이용하였다.

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

여기서, β 는 완화계수를 나타낸다.

본 연구에서의 유한차분화는 대류항에 대해서는 QUICK(Quadratic Upstream Interpolation for Convection Kinematics) 방법^[10]을 이용하였으며, 점성항 및 연속방정식은 중앙차분을 이용하였다. 그리고 알고리즘의 안정화를 위해 4차의 인공감쇠항(artificial damping term)을 연속방정식에 첨가하였다.

나. MGM 설계 방법

목표하는 압력분포를 따라가는 형상을 설계하기 위해 유동해석에 의해 계산된 압력분포와 설계자에 의해 주어진 목표 압력분포의 차이를 물체 형상의 변화량과 연결해 주는 보조방정식으로 MGM(Modified Garabedian-McFadden) 방법을 사용한다. 이 방법은 고전적인 파형벽 문제(wavy wall problem)^[11]에서 유도된 보조 편미분방정식을 이용한다.

선형화된 포텐셜 유동에서 물체표면의 압력계수는 다음과 같이 주어진다.

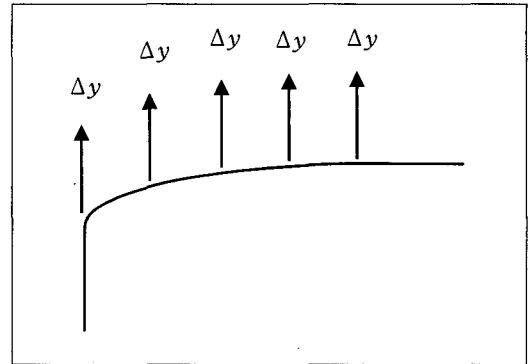
$$\text{초음속유동} : C_p = \frac{2}{\sqrt{M_\infty^2 - 1}} \frac{dy}{dx} \quad (7)$$

$$\text{아음속유동} : C_p = \frac{2}{\pi\sqrt{1 - M_\infty^2}} \frac{d^2y}{dx^2} \quad (8)$$

여기서, 일정한 마하수(M_∞)에 대해 국부 압력계수 C_p 는 국부 기울기 dy/dx 와 국부 곡률 d^2y/dx^2 와 관련이 있음을 알 수 있다.

이 관계는 다음과 같은 미분방정식 형태로 주어질 수 있다.

$$F_0\Delta y + F_1\Delta y_x + F_2\Delta y_{xx} = R \quad (9)$$



[그림 1] MGM 역설계 방법에 의한 표면형상 변화

여기서, R 은 유동해석에 의해 계산된 압력계수 C_{pc} 와 목적인 압력계수 C_{pt} 의 차인 잔여값으로 다음과 같이 정의된다.

$$R = C_{pc} - C_{pt} \quad (10)$$

F_0, F_1, F_2 는 잔여값 R 의 크기에 좌우되는 수렴 안정성을 돕기 위한 양의 정수 값이다.

Δy 는 잔여값을 최소화하기 위해 필요한 수중운동체 표면점의 수직방향 변위이다.

이러한 형상의 변화방향을 그림 1에 나타내었다. MGM 방법은 수직방향 변위만 가지기 때문에 수중운동체 길이 증가를 배제할 수 있고, 두부를 매끄럽게 만든다.

식 (9)를 국부 기울기 Δy_x 에 대하여 풍상차분법을 적용하고, 국부 곡률 Δy_{xx} 에 대하여 중앙차분법을 적용하여 차분화한 후 정리하면 다음과 같이 된다.

$$A_i\Delta y_{i+1} + B_i\Delta y_i + C_i\Delta y_{i-1} = R_i \quad (11)$$

여기서

$$A_i = \frac{2F_2}{(x_{i+1} - x_i)(x_{i+1} - x_{i-1})}$$

$$B_i = F_0 + \frac{F_1}{(x_i - x_{i-1})}$$

$$-\frac{2F_2}{(x_{i+1} - x_i)(x_i - x_{i-1})} \quad (12)$$

$$C_i = -\frac{F_1}{(x_i - x_{i-1})} + \frac{2F_2}{(x_i - x_{i-1})(x_{i+1} - x_{i-1})}$$

$$R_i = C_{pci} - C_{pti}$$

수중운동체 표면 위에 N개의 설계점이 있다면 N개의 차분식이 나오게 되고, 수치해석방법으로 각 표면점의 수직방향 변화량 Δy_i 를 구할 수 있다. 특히, 이 식의 계수항은 삼각대각행렬(tridiagonal matrices)을 이루므로 band system^[12]해법으로 Δy_i 를 쉽게 구할 수 있다. 형상변화의 시작점과 끝점은 변화량이 없는 것으로 하여 $\Delta y = 0$ 으로 고정한다.

N개의 형상 표면점의 수직방향 변화량 Δy_i 를 구한 후, 이 값을 식 (13)과 같이 이전의 형상에 더하여 새로 설계된 수중운동체 형상을 얻을 수 있다.

$$y_i^{new} = y_i^{old} + \Delta y_i \quad (13)$$

결정된 새로운 수중운동체 형상(y_i^{new})으로부터 새로운 격자를 생성하고 다시 Navier-Stokes 방정식 계산에 의한 유동해석으로 표면 압력계수 값을 얻는다.

얻어진 표면압력계수 값과 최초 설정된 목표압력계수 값의 차인 잔여량을 계산하여 잔여량이 수렴범위 안에 들면 형상설계를 마치고 수렴범위 안에 들지 않는다면 다시 역설계 방법으로 수중운동체 표면형상의 수직방향 변위 값을 구한다. 위 과정을 계속 반복하여 목표하는 압력분포로 수렴하는 형상을 설계한다.

그림 2는 MGM 방법의 흐름도를 보여준다.

3. 결과 및 고찰

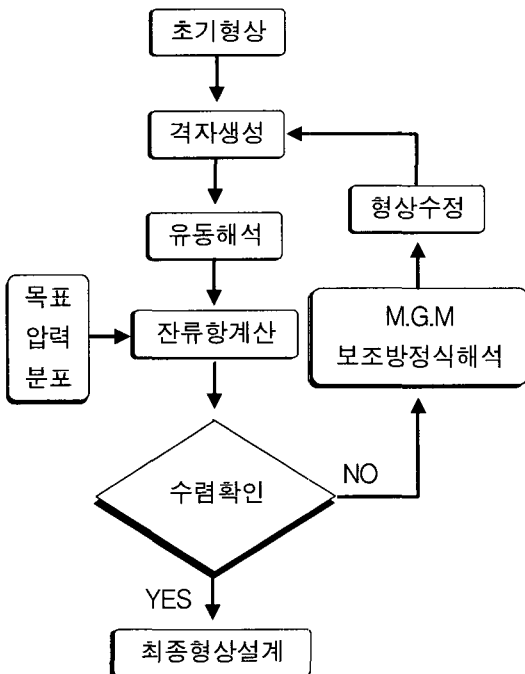
가. 익형의 역설계

수중운동체 두부 역설계를 수행하기 전에 개발된 역설계 프로그램을 검증하기 위하여 익형에 대해 역설계를 수행하였다.

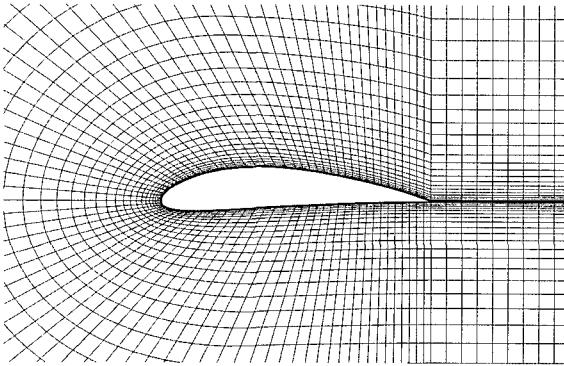
유동해석을 위해 151×45개의 격자로 그림 3과 같이 격자계를 구성하였고, 표면에 80개의 격자점을 분포시켰다. 유동의 지배방정식으로 2차원 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 사용하였고, NACA0015의 압력분포를 목표압력분포로 설정하고 초기형상 NACA0008에서 역설계 과정을 거쳐 최종 형상에 도달하는 경우(Case I)와, NACA4412의 압력분포를 목표압력분포로 설정하고 초기 NACA3412의 형상에서 역설계 과정을 거쳐 최종형상에 도달하는 경우(Case II)에 대해 역설계를 수행하였다.

Case I에서 최초 NACA0008 형상에서 설정한 목표압력을 따라가기 위해 MGM 방법으로 익형의 상면과 하면을 변화시켰으며, 목표압력과 비교하여 수렴범위 안에 드는 형상을 최종적으로 설계할 수 있었다. 설계된 형상은 목표로 설정한 NACA0016 형상과 거의 일치하였다.

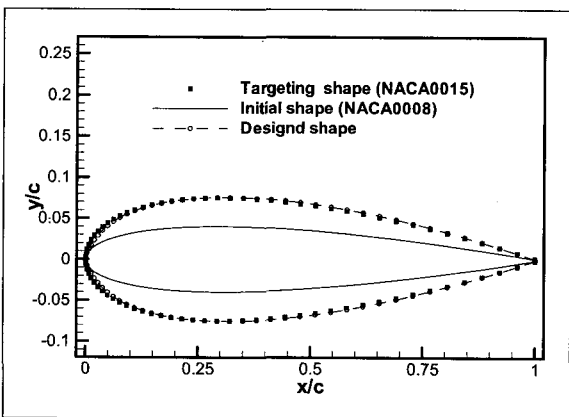
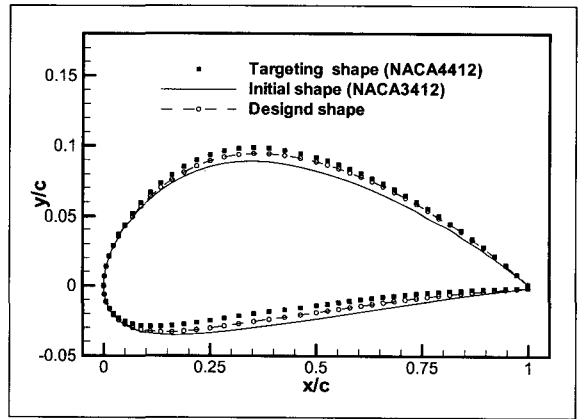
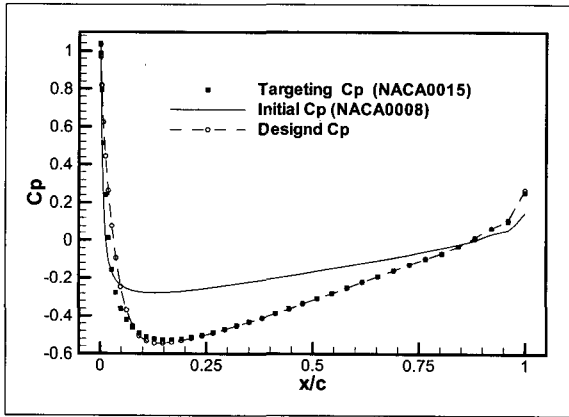
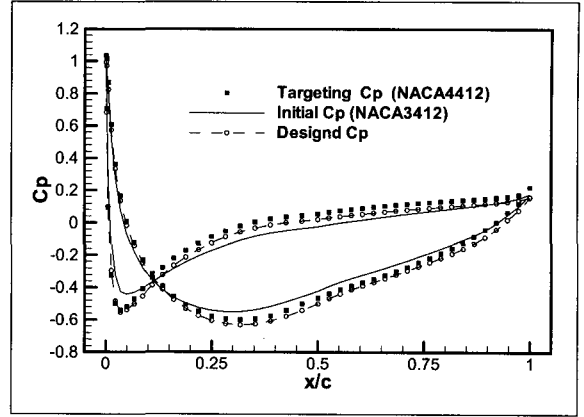
Case II에서는 최초 NACA3412에서 익형의 상면



[그림 2] 역설계 알고리즘



[그림 3] 익형의 격자계



[그림 4] 압력계수분포와 설계 형상(Case I)

[그림 5] 압력계수분포와 설계 형상(Case II)

력분포를 구현하는 형상을 설계할 수 있음을 알 수 있다.

나. 수중운동체 두부 역설계

수중운동체 유동해석을 위한 격자계는 100×11×50 개의 격자점으로 구성하였으며, 물체표면에는 그림 5 에서와 같이 100×11개의 격자점을 분포하였다.

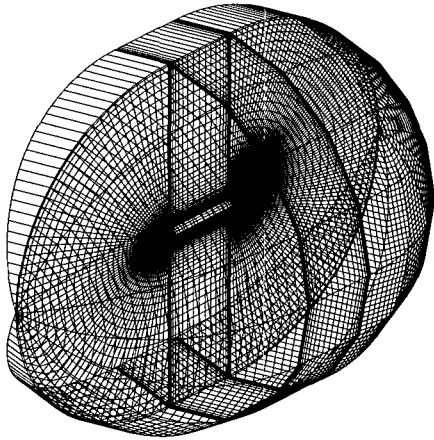
역설계 과정 중 자동격자 생성은 변경된 표면형 상정보와 무한방원(far field)을 경계로 하여 2-boundary technic으로 2차원 내부격자를 생성한 후 회전시켜 3차원 격자를 얻었다. 유동해석을 위한 지배방정식으로는 3차원 비압축성 Navier-Stokes 방정 식을 사용하였다.^[8]

수중운동체 두부의 곡면 부분만을 역설계에 의해 형상을 변화시켜 최소압력계수가 최대가 되도록 유체

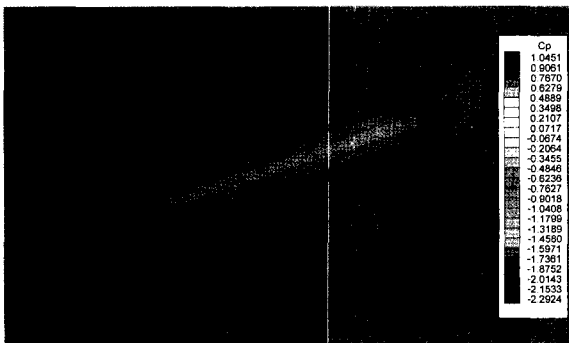
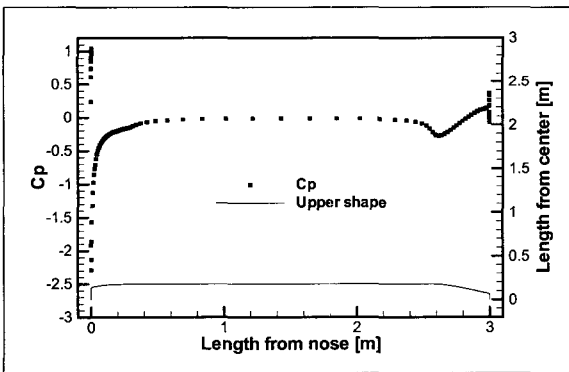
과 하면을 변화시키면서 설정한 목표압력분포와 NACA4412 형상에 근접하는 최종형상을 설계하였다. 이상에서 개발된 역설계 프로그램은 설정한 목표압

역학적 성능을 향상시켰고, 상대적으로 형상변화에 따른 항력변화가 심한 후미부의 형상은 고정 하여 전체적인 항력 변화는 가능한 최소화 하였다.

두부가 뭉툭한 임의의 수중운동체 형상의 유동해석



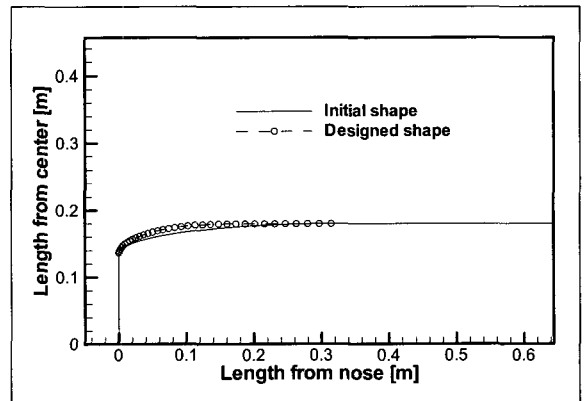
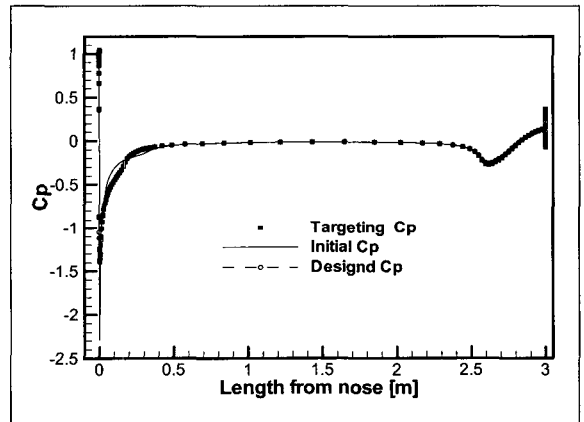
[그림 6] 수중운동체 유동해석을 위한 격자계



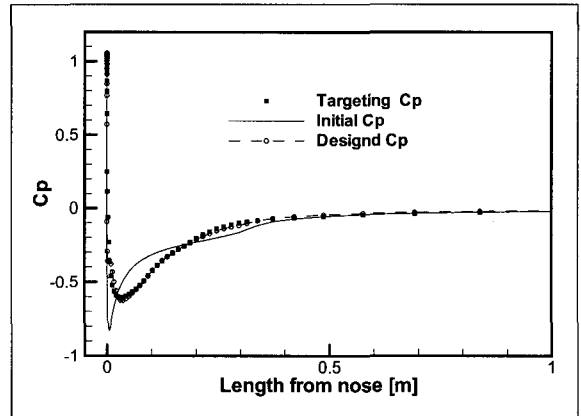
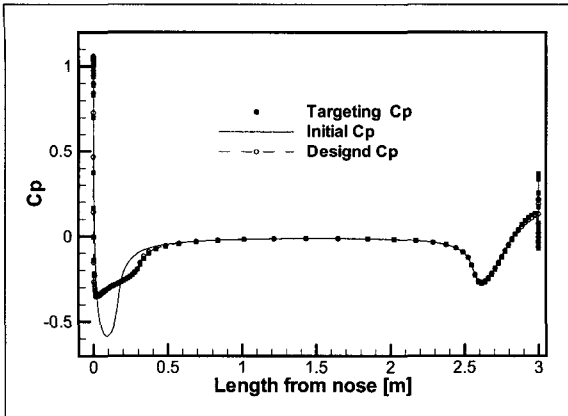
[그림 7] 수중운동체 형상과 압력계수 분포

결과는 그림 6과 같다. 그림 6에서 보이는 바와 같이 수중운동체의 압력계수는 몸체부분에서는 거의 0에 가깝고 후미부에서 조금 작아지며, 두부에서 최소값을 가진다. 두부에 위치한 임의형상의 최소 압력계수는 -2.29로 수중운동체가 수면가까이에 도달하면 물의 포화증기압보다 낮아져 수중운동체 두부에 캐비테이션이 발생할 수 있다. 캐비테이션을 피하기 위해서는 수중운동체를 깊은 수심에서 운용하여 두부의 압력이 물의 포화증기압보다 높아야 하고, 이 경우 수중운동체 운용이 제한될 수밖에 없다. 따라서, 낮은 수심에서 수중운동체를 운용할 수 있도록 캐비테이션을 피하기 위해서는 주어진 제약조건 하에서 최적의 형상을 설계하여 두부의 최소압력을 높여야 한다.

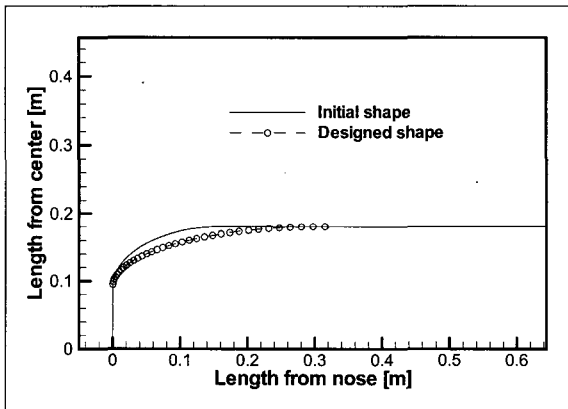
Case III은 수중운동체 절두부 지름이 전체 지름의



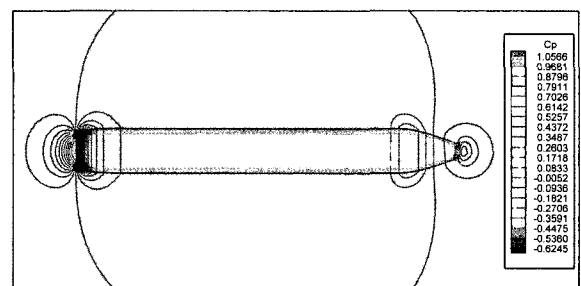
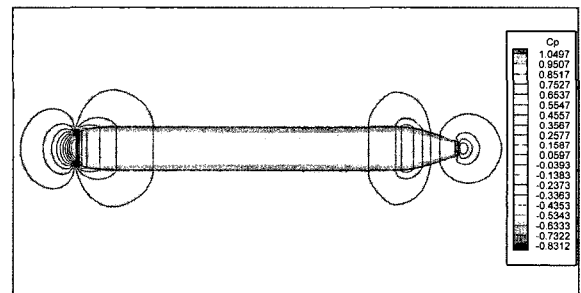
[그림 8] 절두부 지름이 전체지름의 75% 인 경우역 설계한 압력계수분포와 형상(Case III)



[그림 10] 절두부 지름이 전체지름의 62% 인 경우역 설계한 압력계수분포(Case V)



[그림 9] 절두부 지름이 전체지름의 50% 인 경우역 설계한 압력계수분포와 형상(Case IV)



[그림 11] 절두부 지름이 전체지름의 62% 인 경우 형상변화(위 설계전, 아래 설계후)(Case V)

75%로 가정하여 역설계한 경우이다. 수중운동체 전체 길이를 3m, 두부 길이를 0.315m, 전체 지름을 0.36m, 절두부 지름이 전체 지름의 75%인 0.27m로 고정하고 수중운동체 전체 형상 중 두부 곡면형상만을 역설계 기법으로 형상을 변화시켜 설계하였다. 최초 형상의 최소압력계수(-2.29)를 증가시키는 압력분포를 목표압력분포로 설정하여 MGM 방법에 의해 역설계를 수행하였다. 설계된 형상의 최소압력계수는 -1.36으로, 약 40%의 압력계수가 개선되었다.

Case IV와 Case V는 각각 수중운동체 두부끝단의 지름을 전체지름의 50%인 0.18m와 62%인 0.2232m로 하고 나머지 조건은 Case III과 동일한 조건에서 수중운동체의 두부 곡면만을 MGM 기법으로 역설계하였다.

설계 후 Case VI에서 압력계수의 최소값은 최초 -0.59에서 -0.35로 약 0.24가 증가하였고, Case V에서 압력계수의 최소값은 최초 -0.83에서 -0.62로 약 0.21이 증가하여 압력계수가 개선되었다. 설계형상은 Case VI에서는 초기의 뾰족한 두부형상에서 설계 후에 가늘어졌고, Case V에서는 초기의 가는 형상에서 뾰족해졌다. 이는 다양한 초기 형상에 대해 원하는

목표압력 분포를 만족하는 두부형상을 설계할 수 있음을 보여준다.

4. 결론

본 연구에서는 수중운동체의 두부에서 발생하는 캐비테이션을 줄여 수중운동체의 운용성능을 향상시키기 위해 Navier-Stokes 코드를 이용한 유동해석과 역설계 알고리즘인 MGM 방법을 결합하는 수중운동체 두부 역설계 기법을 개발하였다. 먼저 다양한 익형에 대해 역설계를 수행하여 설계기법과 프로그램을 검증하였으며, 이를 바탕으로 수중운동체 두부의 역설계를 수행하였다.

수중운동체 두부의 최소압력을 높이는 방향으로 목표압력 분포를 설정하여 역설계를 수행한 결과 얇은 수심에서도 캐비테이션이 발생할 가능성이 줄어들어 수중운동체의 운용 성능을 향상시킬 수 있는 형상을 설계 할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] Lighthill, M. J., "A New Method of Two Dimensional Aerodynamic Design", ARC Rand M2112, 1945.
- [2] Garabedian, P. and McFadden, G., "Design of Supercritical Swept Wings", AIAA Journal, Vol. 20, No. 3, 1982, pp.289~291.
- [3] Malone, J. B., Vadyak, J., and Sankar, L. N., "Inverse Aerodynamic Design Method for Aircraft Component", J. of Aircraft, Vol. 24, No. 1, 1987, pp.8~9.
- [4] Santos, L. C., and Sankar, L. N., "A Hybrid Inverse Optimization Method for the Aerodynamic Design of Lifting Surfaces", AIAA Paper 94-1895-CP, 1994.
- [5] 김형진, 노오현, "역설계법을 이용한 천음속 익형설계", 한국항공우주학회 춘계학술발표회 논문집, 1995, pp.343~347.
- [6] 이재우, 이기영, 변영환, "Inverse 기법을 이용한 아음속/천음속 익형 설계", 한국전산유체공학회 춘계학술대회 논문집, 1998, pp.61~66.
- [7] Park, W. G. and Sankar, L. N., "A Technique for the Prediction of Unsteady Incompressible Viscous Flows", AIAA Paper 93-3006, 1993.
- [8] 박원규, "멀티그리드 방법을 이용한 프로펠러 주위의 비압축성 층류유동 계산", 대한조선학회논문집, 제32권, 제4호, 1994, pp.41~50.
- [9] Vieceili, J. A., "A Method for Including Arbitrary External Boundaries in the MAC Incompressible Fluid Computing Technique", Journal of Computational Physics, Vol. 86, 1990, pp.147~167.
- [10] Leonard, B. P., "A Stable and Accurate Convective Modeling Procedure Based on Quadratic Upstream Interpolation", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 19, 1979, pp.59~98.
- [11] Liepmann, H. W. and Roshko, A. Element of Gas Dynamics, John Wiley and Sons, N.Y. 1957.
- [12] Yakowitz, S. and Sidarovszky, F., An Introduction to Numerical Computations, Macmillan Publishing Company, N.Y. 1990.