

2차원 익렬 익형의 최적역설계

조장근*, 박원규**

Optimum Inverse Design of 2-D Cascade Airfoil

Jang-keun Cho* and Warn-Gyu Park**

요 약

2차원 익렬 익형의 표면에 목적하는 압력계수 분포를 설정하고 그 압력계수의 분포에 해당하는 형상을 설계하기 위해 임의의 초기형상으로부터 목적 형상에 근접해가도록 최적화 기법을 도입하여 역설계를 수행하였다. 목적함수인 표면압력계수를 구하기 위해 비직교 일반좌표계상의 2차원 비압축성 나비에-스톡스 방정식을 사용하였으며 목적함수의 감소를 위해서는 최속강하법과 공액경사도 방법을 사용하였다. 해의 탐색방향을 위해 1차 정확도의 유한 차분화를 행하였고, 해의 탐색거리를 위해 황금분할탐색을 사용하였다. 본 연구의 결과, 목적한 형상으로의 수렴성이 뛰어난 것을 확인할 수 있었다.

※Keywords: Navier-Stokes equations(나비에-스톡스 방정식), Inverse design(역설계), Cascade(익렬), Steepest descent method(최속강하법), Conjugate gradient method(공액경사도 방법), Golden section search(황금분할탐색)

Abstract

The present paper describes the optimum inverse design of 2-D linear cascade airfoil. The pressure coefficient of an airfoil surface is taken as the objective function, and non-orthogonal incompressible Navier-Stokes equation is applied to calculate the pressure coefficient. Both of steepest descent and conjugate gradient method have been used to make the objective function go to zero. The 1st order finite differential method is applied to the searching direction and the golden section method is used to compute the searching distance. As a result of the present work, a good convergence to the target airfoil has been obtained.

접수일자: 2001년 11월 20일, 승인일자: 2002년 9월 1일

* 주저자, 학생회원, 부산대학교 기계공학과 (E-mail: jkcho0405@hanmail.net)

** 정회원, 부산대학교 기계공학과 (E-mail: wgpark@pusan.ac.kr)

1. 서언

유체유동과 관련하여 설계자들은 주로 자신의 경험적 지식을 토대로, 또는 실험을 통해 축적된 데이터를 토대로 설계를 수행하여 왔다. 그러나 이러한 전통적인 방법은 연구개발의 기간이나 비용 면에서 그렇게 효율적이지 못하여서 최근에는 전산유체역학과 최적화 이론을 결합한 자동화된 설계 기법이 다양한 분야에서 응용되고 있다. 자동화된 설계 기법으로는 역설계(Inverse design) 기법과 수치 최적설계(Optimum design) 기법이 있으며, 역설계 기법은 MGM (Modified Garabedian-Mcfadden) 방법(Garabedian/Mcfadden 1980)이 대표적으로 많이 사용되고 있는데 물체표면을 따라 원하는 압력이나 속도와 같은 유동변수 값의 분포를 설정하고 물체형상을 역으로 찾아내는 설계방법을 말하는데, 설계속도가 매우 빠르다는 장점을 가지고 있으나 임의로 주어진 압력분포나 속도분포가 달한 물체형태(Closed body shape)를 가져오지 못하는 닫힘 문제(Closure problem)나 제약조건(Constraint)의 부과가 어려운 점 등의 단점을 가지고 있다.

Santos/Sankar(1994), Malone 등(1985), 정철민 등(1999)의 연구가 이 범주에 속한다. 최적화 기법은 기존의 MGM 방법에 의한 역설계 기법이 가지고 있는 단점을 대부분 해결할 수 있는 방법으로 여겨지나 유동해석을 여러번 반복 계산하여야 하므로 계산시간이 상당히 많이 요구되며, 최적화 과정에서 전체적인 최적화(Global optimum design)가 되지 못하고, 국부적 최적화(Local optimum design)가 될 수 있다는 단점을 갖고 있으나 다양한 형상에 대한 적용이 가능하다는 장점과 최근의 최적화 알고리즘의 발달에 힘입어 강력한 설계도구로 등장하고 있다. Burgreen/Baysal (1994), Baysal/Eleshaky (1991)이나 Lee/Eyi (1991), Eyi 등(1994)의 압축성 유동의 항공기 익형 최적설계에 대한 연구가 이 범주에 속하며 수중 프로펠러(이창섭 1991, 문일성 등 1996) 설계에서 패널코드와 최적설계기법의 적용은 Mishima/Kinnas(1996, 1997), 그리고 Griffin/Kinnas(1998) 등이 연구하였다. 그러나 최근에는

역설계 기법이나 최적화 기법에서 모두 공통적으로 유동변수의 계산을 위해 Euler방정식 코드(정철민 등 1999, Burgreen/Baysal 1994)에서 Navier-Stokes 방정식 코드(Santos/Sankar 1994, 정철민 등 1994, Eyi 등 1994)의 사용으로의 전환이 활발히 이루어지고 있는 실정이다. Navier-Stokes 방정식 코드의 사용은 실제 유동의 모든 현상을 기술하는 것이 가능하므로, 수치최적화 방법의 장점이 되는 목적함수와 제약조건의 자유로운 설정이 가능하게 되며, 진정한 의미의 최적화 설계를 위해서는 궁극적으로 Navier-Stokes 방정식 코드의 사용이 꼭 필요하다고 할 것이다. 현재 역설계나 최적 설계의 경우 대부분 익형과 같은 독립적으로 한 개만 놓여있는 2차원 익형 설계에 국한되어 있는데 익렬의 경우 각 익형들이 서로 근접되어 있어 이들 상호간의 유동작용이 상당하므로 이들 익렬간의 상호 작용을 무시한 채 독립적인 익형 설계 방법대로 역설계나 최적설계를 수행한다면 바람직하지 못한 결과를 초래할 것이다. 이들 익렬설계는 최근의 고성능 저소음 프로펠러 개발에 응용이 되고 있는데 이들 고성능 프로펠러들은 유체력에 의한 프로펠러 피치각 변동까지 고려하여 성능 향상을 추구하고 tip vortex 캐비테이션에 의한 소음 발생을 줄이기 위해 프로펠러 블레이드 개수를 늘임에 따라 각 블레이드 간의 거리가 서로 매우 근접하게 됨으로써 이들 영향을 고려한 설계가 마땅히 고려되어야 할 것이다. 본 연구에서는 이들의 영향을 프로펠러 설계에 궁극적으로 포함시키기 위한 1단계 연구로서 익형이 서로 근접되어 있는 2차원 익렬 익형에 대한 최적 역설계를 수행하여 보았다. 본 연구에서는 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 설계최적화 코드를 개발하고 상호근접작용을 고려한 2차원 익렬의 역설계에 적용하여 그 신뢰성을 분석하는데 있다.

2. 유동 해석 및 최적 역설계

2.1. 유동 해석의 수치적 기법

유동해석을 위한 지배방정식으로 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 사용하며 iterative time marching 방법(Park/Sankar 1993, Park 등 1998)을

이용하여 수치해를 구하였다.

2.2. 최적화 기법

2.2.1. 설계 변수

형상설계의 설계 변수(Design variable)는 물체의 형상을 나타내고 변화시킬 수 있는 변수로서 Baysal(1991), Lee등(1991)은 익형에 대하여 다양한 형상함수를 설정하여 그 형상함수의 계수들을 설계변수로 설정하였다. 그런데 NACA 4-digit 계열의 익형은 익형의 최대두께(t), 최대 캠버값(m)과 최대캠버를 갖는 코드방향의 길이(p)에 의해 나타낼 수 있으므로(Abbott 1959) 본 연구에서는 Fig.1과 같이 이들 t, m, p를 설계변수로 설정하였다.

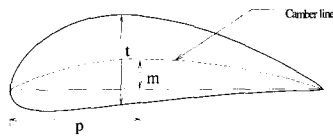


Fig. 1 Design variables of NACA 4-digit series airfoil

2.2.2. 목적함수

목적함수(Objective function)는 유동해석 코드에 의해 계산될 수 있는 공력성능이나 설계형태를 결정지을 수 있는 값으로 최대화 또는 최소화 시켜야 할 값을 의미한다. 또한 일반적으로 목적함수는 사용되는 유동해석 코드의 성능에 따라 제한되기도 한다. 본 연구에서는 다음과 같이 목적하는 압력분포와 현재 형상의 압력분포의 차를 목적함수로 설정하였다.

$$\text{Minimize : } f(\vec{x}) = \sum (C_{pt} - C_{pc})^2 \quad (1)$$

여기서, \vec{x} 는 설계변수이고 C_{pt} 는 목표가 되는 형상의 압력계수이고, C_{pc} 는 현재 형상에 대해 계산되어진 압력계수이다.

2.2.3. 탐색방향 및 이동거리의 결정

목적함수는 최소화해야 할 값이므로, 다음과 같은 필요조건(Necessary condition)이 만족될 것이다.

$$\nabla f(\vec{x}^*) = 0 \quad (2)$$

여기서, \vec{x}^* 는 수렴해이다. 수렴해의 탐색을 위해 다음과 같은 반복계산법을 이용한다.

$$\vec{x}^q = \vec{x}^{q-1} + \alpha_q \vec{S}^q \quad (3)$$

여기서, α_q 는 현재 반복계산 탐색방향에서 황금분할법(Golden section search method, Arora 1989)에 의해 구해지는 값이며 이 방법에 대한 흐름도는 Fig. 2와 같다. \vec{S}^q 는 탐색방향을 의미하는데 최속강하법(Speedest descent method) (Cauchy 1847) 이나 공액경사도 방법(Conjugate gradient method)(Fletcher/Reeves 1963)을 이용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$\vec{S}^q = -\vec{S}^0 + \beta_q \vec{S}^{q-1} \quad (4)$$

여기서, $\vec{S}^0 = -\nabla f(\vec{x}^0)$ 이고, 스칼라 값인 β_q 는 공액경사도 방법일 경우 다음과 같이 정의된다.

$$\beta_q = \frac{|\nabla f(\vec{x}^q)|^2}{|\nabla f(\vec{x}^q)[\nabla f(\vec{x}^q) + \nabla f(\vec{x}^{q-1})]|} \quad (5)$$

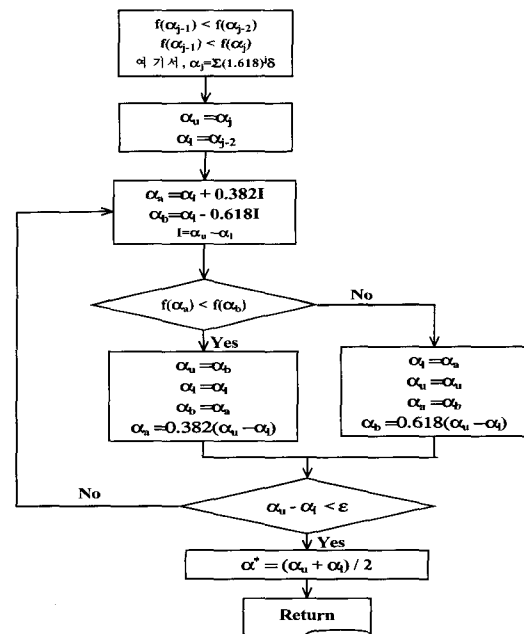


Fig. 2 Flow-chart of Golden section search

만약, $\beta_q = 0$ 으로 설정하면, 위의 방법은 최속강하법이 된다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 최적설계를 위한 설계과정을 Fig. 3에 나타내었다. 도시된 설계 방법에 따라 2차원 익월에 대한 최적역설계를 수행하였다. 유동의 계산은 Fig. 4와 같이 2개의 블록으로 이루어진 H-type의 격자계(200×80)를 이용하였고 익형의 표면에는 80개의 격자점을 두었다. 설계에 앞서 정확한 유동계산이 이루어지는지 검증하기 위해 NACA 4412 익형에 대해 받음각이 0°이고 $Re=6.0 \times 10^6$ 일 때 유동계산을 수행하였는데, Fig. 5에서 볼 수 있듯이 실험에 의한 결과와 비교적 잘 일치하고 있는 것을 볼 수 있다. 그리고 Fig. 6은 등압선을 그린 것인데 블록경계에서 등압선이 진동없이 연속적이므로 다중격자기법 역시 잘 적용되고 있음을 알 수 있다.

다음으로 최적역설계를 수행하여 보기 위해 상하대칭 익월 익형과 캠버를 가지는 상하비대칭 익월 익형의 경우에 대해 각각 적용하였다. 각각의 경우에 대하여 탐색방향은 최속강하법 및 공액경사도 방법을 모두 사용하여 비교하여 보았다. 상하대칭 익월 익형의 경우 NACA 0010을 초기형상으로 하고 NACA 0012를 목적형상으로 하여 역설계를 수행하였다. 최적 역설계 결과는 Fig. 7에 나타나 있는데 Fig. 7(a)에서 보면 NACA 0010 익형에서 출발한 현상이 최적 역설계 후에 목적하는 익형이 NACA 0012 익형에 잘 근접하였음을 볼 수 있다. Fig. 7(b) 초기 가정한 C_p 분포에서 최적 역설계 후에 목적하는 C_p 분포로 다가갔음을 볼 수 있고 Fig. 7(c)에서는 식(1)로 정의된 목적함수가 반복 설계 횟수가 증가함에 따라 영으로 근접되어 감을 보여준다.

다음으로 캠버를 가지는 상하비대칭 익월 익형의 경우에 대해서는 NACA 4412를 초기형상으로 하고 NACA 5420을 목적형상으로 하여 설계를 수행하여 보았다. Fig. 7에서와 마찬가지로 Fig. 8(a)에서도 최종 설계 형상이 목적형상과 비교적 정확하게 일치하고 있음을 볼 수 있으며 Fig. 8(b)와 Fig. 8(c)

는 최적 역설계 전후의 C_p 분포의 변화와 설계 횟수에 따른 목적함수의 변화를 보여주고 있다. 그리고

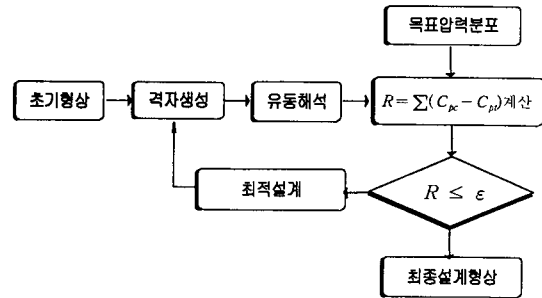


Fig. 3 Flow-chart of optimum inverse design algorithm

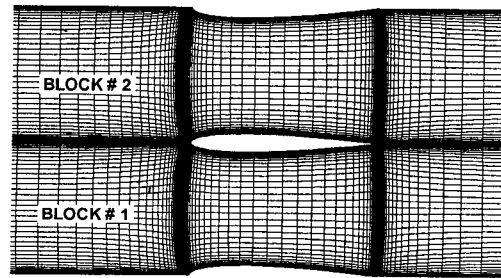


Fig. 4 Grid system of 2D cascade (200×80)

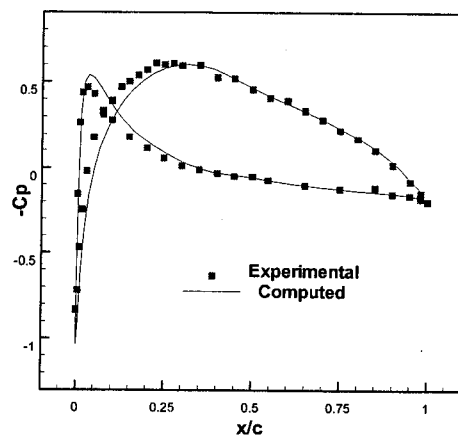


Fig. 5 Analysis validation with NACA 4412 airfoil

Fig. 8(c)에서는 공액경사도 방법과 최속하강법의 수렴성을 비교하여 보여주고 있는데 최속하강법이 현재의 설계단계에서 기울기가 가장 급한 방향으로 해를 감소시켜 나가는 반면, 공액경사도 방법은 이전 구배벡터와 현재의 구배벡터를 적절히 조합한 방법으로서 공액경사도 방법이 최속하강법에 비해 나은 수렴성을 보이는 것을 알 수 있다.

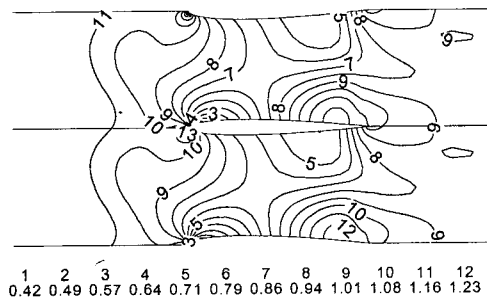
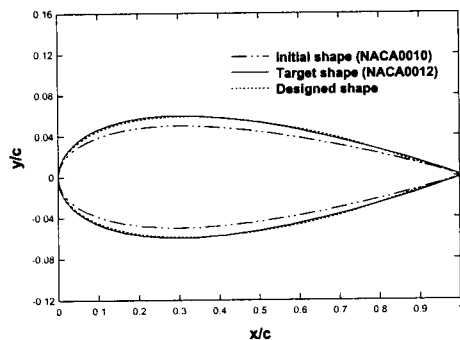
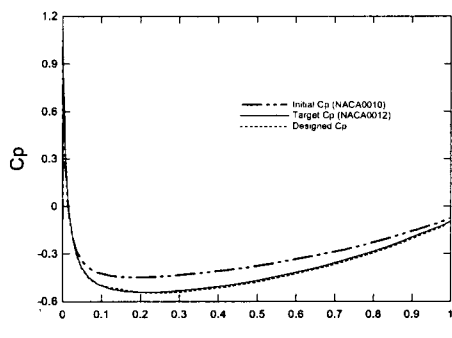


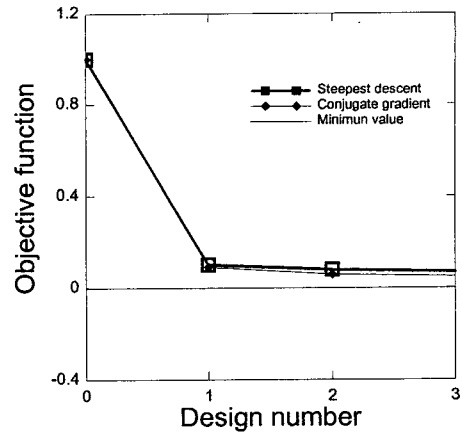
Fig. 6 Pressure contour NACA 4412 airfoil



(a) Change of the airfoil shapes

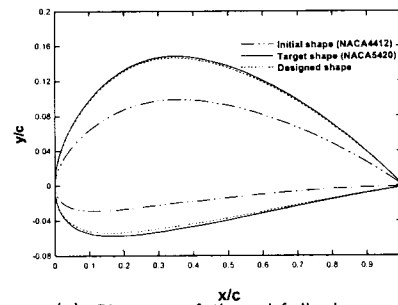


(b) Change of initial and final pressure coefficient

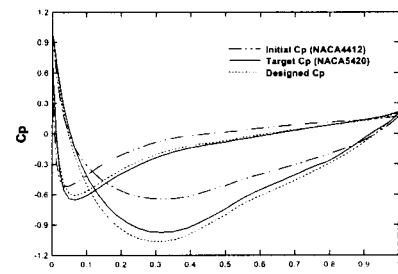


(c) History of objective function

Fig. 7 Design results : from NACA 0010 to NACA 0012

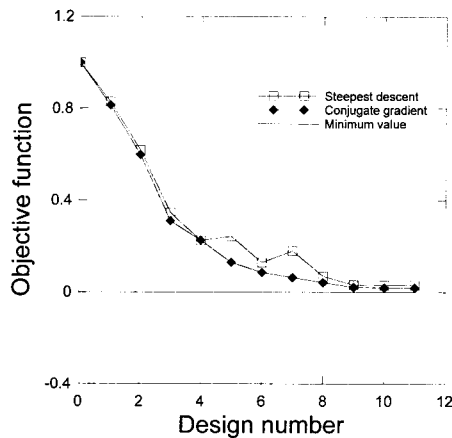


(a) Change of the airfoil shapes



(b) Change of initial and final pressure coefficient

Fig. 8 Design results : from NACA 4412 to NACA 5420



(c) History of objective function

Fig. 8 Continue

4. 결론

본 연구에서는 Navier-Stokes 코드를 이용한 유동해석과 최적설계 알고리즘을 결합하여 익렬의 상호근접작용을 고려한 2차원 익렬 형상의 최적역설계를 수행하였다. 개발된 코드를 NACA 4-digit 계열에 대하여 적용한 결과, 임의의 초기 가정 형상으로부터 출발하여 목적인 형상으로 매우 잘 수렴해 감을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에 의해 개발된 코드를 이용해 다른 형상의 익렬 및 다익(多翼)형 프로펠러의 2차원 형상설계에도 적용이 가능할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 정철민, 조장근, 박원규, "Modified Garabedian-MacFadden 방법을 이용한 프로펠러의 역설계 기법", 대한조선학회, 1999 춘계학술대회 논문집, 1999
- 이창섭, "선박 프로펠러 기술의 국내외 연구 동향", 대한조선학회지, Vol. 28, No. 4, (1991), pp.10-25, 69 ref
- 문일성, 김영기, 이창섭, "포텐셜을 기저로 한 패널법에 의한 프로펠러의 비정상유동해석", 대한조선학회논문집, Vol. 33, No. 1, (1996), pp.9-18
- 김중섭, 박원규, "최적설계방법을 이용한 익형의 최적역설계", 한국전산유체공학회 추계학술대회 논문집, (1997), pp126-130
- 조장근, 안재성, 박원규, "병렬 연산을 이용한 축류 블레이드의 역설계", 유체기계 연구개발 발표회 논문집, (1999), pp200-207
- Abbott, I. H., "Theory of Wing Sections," Dover Publication, (1959), pp.111-123
- Arora, J. S., "Introduction To Optimum Design," McGraw-Hill, (1989)
- Baysal, O. and Eleshaky, M. E., "Aerodynamic Sensitivity Analysis Methods for the Compressible Euler Equations," Journal of Fluids Engineering, Vol. 113, (1991), pp. 681-688
- Burgreen, G. W. and Baysal, O., "Aerodynamic Shape Optimization Using Preconditioned Conjugate Gradient Methods," AIAA Journal, Vol. 32, No. 11, (1994), pp. 2154-2152
- Cauchy, A., "Method Generale Pour La Resolution des Systemes d'Equations Simultanees," Compt. Rend. Acad. Sci., Vol. 25, (1847), pp.536-538
- Eyi, S., Hager, J. O. and Lee, K. D., "Airfoil Design Optimization Using the Navier-Stokes Equations," Journal of Optimization Theory and Applications, Vol. 83, No. 3 (1994), pp 447-461
- Fletcher, R. and Reeves, R. M. "A Rapidly Converged Descent Method for Minimization," The Computer and Fluids Journal, Vol.6, (1963), pp 163-180
- Garabedian, P. and Mcfadden, G., "Design of Supercritical Swept Wings," AERO Report 80-3, (1980)
- Jong-Seop, Kim and Warn-Gyu, Park. "Optimized Inverse Design Method For Pump Impeller," Journal of Mechanical Research Communication, Vol.27, No.4, pp.465-473, 2000
- Lee, K. D. and Eyi, S., "Transonic Airfoil

- Design By Constrained Optimization," AIAA Paper 91-3287-CP, (1991)
- Malone, J. B., Vadyak, J. and Sankar. L. N., "A Technique for the Inverse Aerodynamic Design of Nacelles and Wing Configurations," AIAA Paper 85-4096, (1985)
 - Park, W. G. and Sankar, L. N., "A Technique for the Prediction of Unsteady Incompressible Viscous Flows," AIAA Paper 93-3006, 1993
 - Park, W. G., Jung, Y.R., and Ha, S. D., "Numerical Viscous Flow Analysis around a High Speed Train with Crosswind Effects," AIAA Journal, Vol.36, No.3, pp.477-479, 1998
 - Paul E. Griffin and Spyros A. Kinnas, "A Design Method for High-Speed Propulsor Blades", Transactions of the ASME, Vol. 120, pp556-562, 1998
 - Santos, L. C. and Sankar, L. N. , " A Hybrid Optimization Method for the Aerodynamic Design of Lifting Surfaces," AIAA Paper 94-1895-CP, (1994)
 - Shigenori Mishima and Spyros A. Kinnas, "A Numerical Optimization Technique Applied to the Design of Two-Dimension Cavitating Hydrofoil Sections", Journal of Ship Research, Vol. 40, No. 1, pp.28-38, 1996
 - Shigenori Mishima and Spyros A. Kinnas, "A Numerical Optimization Technique to the Design of Cavitating Propellers in Nonuniform Flow", Journal of Ship Research, Vol. 41, No. 2, pp.93-107, 1997



< 조 장 근 >



< 박 원 규 >