

유전자 알고리즘을 이용한 컨테이너선을 위한 침식예방용 최적방향타 단면 설계

김문찬^{†*}, 이언식^{**}, 변태영^{***}

부산대학교 조선해양공학과*
삼성중공업 해양설계 1팀**
한진중공업 기본설계팀***

Study on Optimization of Anti-erosion Rudder Section of Large Container Ship by Genetic Algorithm

Moon-Chan Kim^{†*}, Un-sik Lee^{**} and Tae-young Byun^{***}

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering , Pusan National University*
Samsung Heavy Industry Offshore Design 1 Team**
Hanjin Heavy Industry Construction Co. LTD Basic Design Team***

Abstract

This paper describes the optimization of the rudder section by the genetic algorithm based on VLM(Vortex Lattice Method) and panel method. The developed propeller-rudder analysis program has been validated by comparing with experimental data. The research extends to optimize the anti-erosion rudder section of the large container ship. The object function is the amount of pressure at leading edge of rudder which is closely related with erosion phenomena. The optimized rudder has been compared with conventional rudder with NACA 0021 section by analyzing with the developed program. The finally optimized section has low and mild pressure distribution in comparison with the NACA rudder. The experiments is expected to be carried out for the validation of the present optimization and more parametric study of section geometry is also expected to be conducted in the near future.

※Keywords: Rudder section optimization(방향타 단면최적화), Genetic algorithm(유전자 알고리즘), Rudder cavitation(방향타 캐비테이션), Combined analysis method of vortex lattice and panel(양력면과 양력판의 복합 해석 방법)

접수일: 2008년 5월 6일, 승인일: 2008년 7월 29일

†교신저자 : kmcprop@pusan.ac.kr, 051-510-2401

1. 서론

선박의 대형화 및 고속화 추세에 따라 프로펠러나 타에 과도한 부하가 발생하게 되고 이에 따른 캐비테이션이 발생되어 효율 저하 및 진동 등의 문제를 일으키고 있다. 이러한 캐비테이션의 피해 중에 가장 심각한 것이 침식이라 할 수 있다. 이러한 침식 현상은 캐비테이션이 불안정하게 발생하고 소멸되면서 굉장히 짧은 시간 동안 큰 압력으로 표면을 충격함으로써 발생되어진다. 이러한 복잡하고도 순간적인 현상으로 인하여 침식에 대한 정확한 예측은 이론적으로나 실험적으로 수행하기 매우 까다로운 현상이다. 최근 컨테이너선이 초대형화 됨에 따라 대형 조선소에서 타의 침식 사례보고가 잇따르고 있으며 이에 대한 해결책으로 타의 표면에 침식에 강한 보강재들을 부착하고 있으나 근본적으로 해결되지 못해 계속 타를 교체해 주어야 하거나 손상된 상태로 운항하는 경우가 많다. 타 침식은 타 자체의 캐비테이션에 의한 앞날 부근의 침식, 타의 뿌리 부분과 회전부 사이의 간극에서 발생하는 갭 침식, 타의 바닥 부분에서 발생하는 침식 그리고 프로펠러의 날개 끝과 허브에서 발생하는 보오텍스에 의한 침식 등이 있다. 특히 프로펠러에 의해 기인되는 침식은 프로펠러 설계와 그리고 프로펠러 타의 간섭 효과까지 고려해 주어야 침식이 없는 설계를 수행할 수 있다. 전형적인 타 침식의 예를 Fig. 1에서 보이고 있다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 통상 갭 부근에서 발생하는 갭 캐비테이션에 의한 침식과 타 아랫부분의 앞날부근에서 발생하는 침식이 빈번하게 발생되는데 최근에는 일체형 타를 사용하는 예가 많아지는 추세이므로 주로 앞날 부근에서 발생하는 침식이 더 문제라 할 수 있다.

캐비테이션의 형태는 캐비테이션 터널에서 시각적으로 분석하고 사진을 통해 연구하여 왔다. 그러나 이러한 작업을 통하여 매우 복잡한 캐비테이션 패턴을 분석하여 캐비테이션 침식의 위험에 대한 결과를 내기란 상당히 어렵다. 캐비테이션 패턴에서 주목되어야 할 특징들로는 캐비티의 크기, 지속성, 위치 그리고 캐비테이션 형태가 있다. 캐비테이션이 침식의 위험에 관해 더 직접적인 정보를 줄 수 있는 방법 중에 페인트 기법이 있으나 타의 경

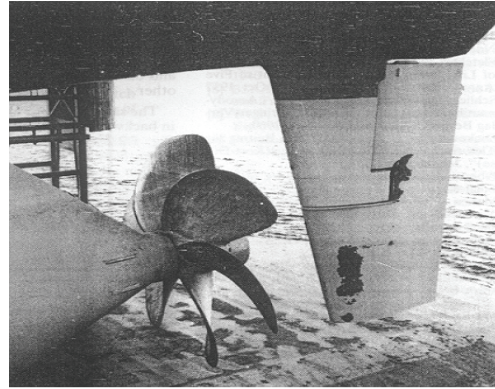


Fig. 1 Typical profile of the rudder erosion

우나 프로펠러의 경우에 있어서도 아직까지 정도 높은 추정이 쉽지 않은 상태이다. 본 연구에서는 침식이 캐비테이션의 양과 비교적 밀접한 관계를 보이고 있어 이를 목적 함수로 사용하여 타 단면을 개발하도록 하였다.

프로펠러 뒤에서 작동하는 타의 주위 유동의 정확한 분석은 매우 어렵고 프로펠러와 타의 상관관계는 매우 중요하다. 프로펠러 타의 상호관계를 분석하기 위해 많은 노력들이 있었다. Molland(1981)는 선체 없이 프로펠러 뒤에서 작동하는 타를 풍동 실험을 통하여 성능을 평가하였다. Han et al.(1999)은 또한 프로펠러와 타의 상호관계를 분석하기 위한 수치적 방법을 개발하였고 계산된 결과를 실험과 비교하였다.

본 논문에서는 수치적 해석 프로그램을 이용하여 타의 표면에 발생하는 캐비테이션을 계산하였고 이를 바탕으로 타의 형상을 최적화하였다. 본 프로그램은 타 주위의 유동을 해석하기 위해 양력판 이론(surface panel method, Lee 1987)을 사용하였고 프로펠러 주위의 유동을 풀기 위해 양력면 이론(Vortex Lattice Method, Greely and Kerwin 1982)을 사용했다. 그리고 타와 프로펠러 주위의 3차원 유동은 그것들 사이에 상호관계를 고려하여 동시에 계산된다. 이 프로그램은 대형 캐비테이션 터널에서 수행된 실험과 비교함으로써 수치적 기술 검증이 이루어졌다. 최적화 기법은 유전자 알고리즘이 사용되었으며 이는 다윈의 진화론을 모방하여

세대를 구성하고 이에 대해 선택, 교배, 돌연변이를 시켜 세대가 지날수록 설계변수를 진화시키는 방법이다.

본 연구에서는 먼저 3500TEU 컨테이너선에 대한 방향 타 단면에 대한 연구를 수행하고 향후 이를 토대로 초대형 컨테이너선으로 확장할 예정이며 실험과의 비교 부분은 실험 자료를 구할 수 있는 7000TEU 컨테이너선의 타에 대하여 이론 계산을 수행하여 비교하였다.

2. 프로펠러-타 해석

2.1 해석 방법

기존에 프로펠러와 타의 상호관계를 해석할 때에는 주로 프로펠러와 타를 서로 반복하여 계산을 수행하여 왔다. 하지만 본 논문에서는 기존의 방법과 달리 프로펠러는 양력면 이론(Vortex Lattice Method)으로 그리고 타는 양력판 이론을 사용하여 한번에 해석하는 방법으로 프로그램을 개발하였다. 이 해석법은 기존의 방법보다 해석시간을 상당히 줄일 수 있음과 동시에 상당히 높은 정도를 가질 수 있는 이점이 있다. 본 연구에 사용된 격자계를 Fig. 2에 보였다.

지배방정식, 가정, 경계조건 등은 본 논문의 핵심 주제가 아니므로 앞서 언급한 참고문헌(Lee 1987, Greely and Kerwin 1982)으로 대신하고 최

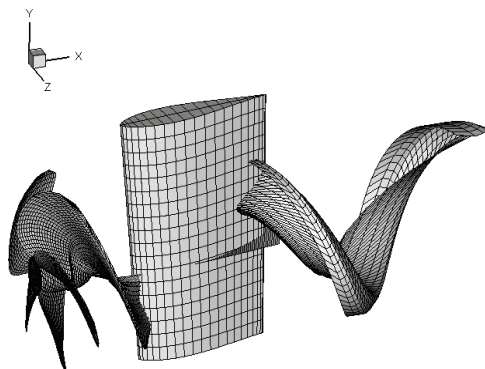


Fig. 2 Grid system of propeller and rudder system

적화를 위해 사용될 압력 계수 등에 대하여 다음과 같이 정의하여 사용하였다.

먼저 타에서의 압력계수 C_p 는 다음과 같다.

$$P_\infty + \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 = P + \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (1)$$

$$C_p = 1 - \left(\frac{u}{U_\infty} \right)^2 \quad (2)$$

또한 캐비테이션 수는 다음과 같이 정의 하였다.

$$\sigma_n = \frac{P_\infty - P_v + \rho gh}{\frac{1}{2} \rho n^2 D^2} \quad (3)$$

여기서 n 은 프로펠러 회전수를 그리고 P_v 는 물이 끓는 임계압력을 나타내며 h 는 기준 타 단면에서의 수두를 의미한다.

위의 (2)와 (3) 식에서 $-C_p$ 가 σ_n 보다 클 경우 캐비테이션이 발생한다고 가정하였으며 따라서 캐비테이션 발생 조건은 아래와 같다.

$$\sigma_n + C_p < 0 \quad (4)$$

2.2 해석 프로그램 검증

2.2.1 수렴 성 확인

개발된 코드의 수치적인 수렴 성을 확인하기 위해 해석에 사용된 선박은 3500TEU급의 컨테이너선이며 기본 재원은 Table 1과 같다.

본 연구에서는 프로펠러-타 해석 프로그램의 수렴의 정도를 검토하기 위하여 타의 가로 판넬 수를 바꿔가며 해석해보았다. 단면은 NACA

Table 1 Principal particulars of ship for the validation of numerical convergence

Length (L_{PP})	225.50 m
Breadth (B)	32.20 m
Draught (D)	19.2 m
Cubic coefficient (C_B)	0.62668
Design speed	23.5 knots

0021(Maximum thickness position : 30% of chord)을 사용하였고 선박의 통상적인 운항 상태(직진 시)보다 약간 큰 타각인 우현 타각(starboard turn) 6°의 상태(일반적으로 침식이 많이 발생되어지는 각도로 알려져 있음)에 대해 20개, 40개, 60개의 판넬로 나누어 각각의 결과를 Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5에 나타내었다.

계산 결과 전체적으로 큰 차이는 없으나 20개의 판넬로 나누었을 때와 40개로 나누었을 때의 차이보다 40개로 나누었을 때와 60개로 나누었을 때의 차이가 크지 않으므로 40개 이상으로 잘게 나누는 것은 큰 의미가 없다고 여겨져 이 후 계산은 40개의 판넬로 수행하였다.

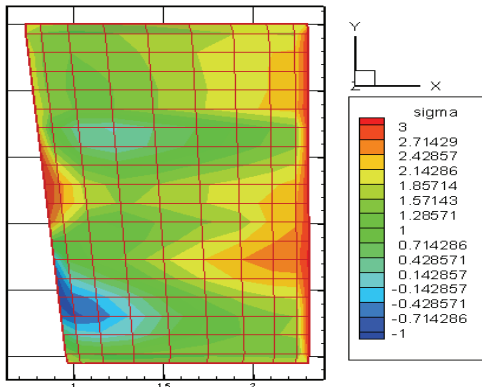


Fig. 3 Pressure distribution with 20 panels

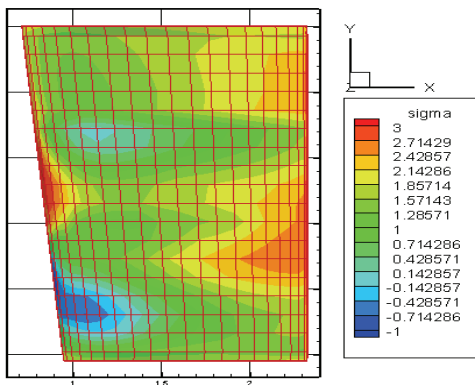


Fig. 4 Pressure distribution with 40 panels

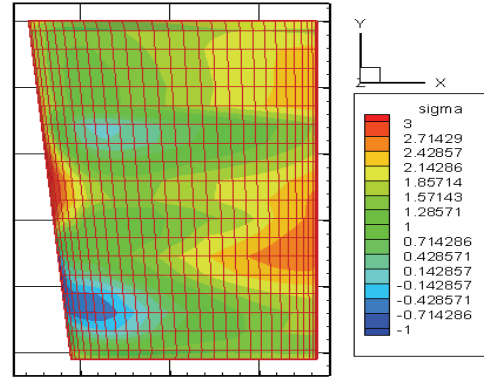


Fig. 5 Pressure distribution with 60 panels

2.2.2 실험과의 비교

실험과의 비교 검증을 위해 사용된 선박은 7,000TEU 컨테이너 선박에 대한 모형선이다. Table 2에서 대상 모형선의 재원을 보여주고 있다.

이론해석과의 비교를 위한 시험 조건은 Table 3에 보인 바와 같으며 여러 가지 조건 중에 우현으로 6° 돌린 상태에서의 시험 결과와 이론해석 결과를 본 연구에서 Figs. 7~8에 보였다. 그림에서 알 수 있듯이 거의 비슷한 위치에서 캐비테이션이 발생되고 그 양도 비슷함을 알 수 있다. 마지막으로 프로펠러 단독 상태에서의 실험값과 이론해석

Table 2 Principal dimensions of model ship

Length (L_{PP})	8.28 m
Draught at FP	0.375 m
Draught at AP	0.375 m
Propeller Dia.	0.25 m
Scale Ratio	36
Water Density	$999 kg/m^3$

Table 3 Condition of the cavitation test

Advanced ratio (J_A)	0.675
Propeller speed of revolution (rps)	30.8
Thrust coefficient (K_T)	0.20
Air content (%)	45.3
water temp (celsius)	27.6
Cavitation no. at 0.7R ($\sigma_{n0.7R}$)	1.44

결과를 Fig. 9에서 비교하였으며 거의 전 전진비에
서 상당히 좋은 일치성을 보이고 있다.

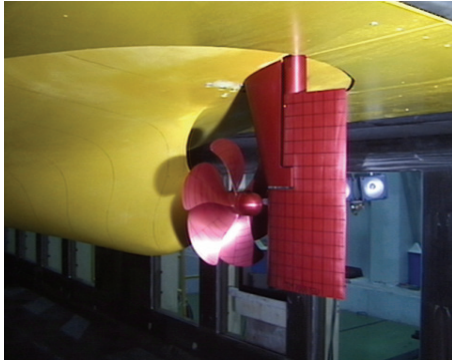


Fig. 6 Profile of set-up for cavitation test

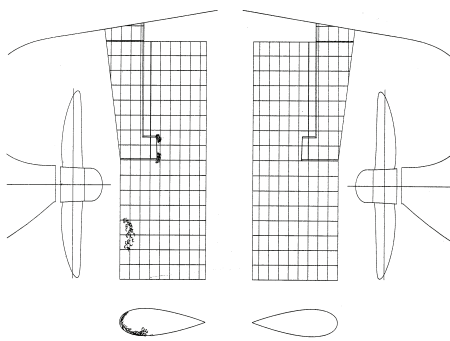


Fig. 7 Results of Cavitation Test (starboard
turn : 6°)

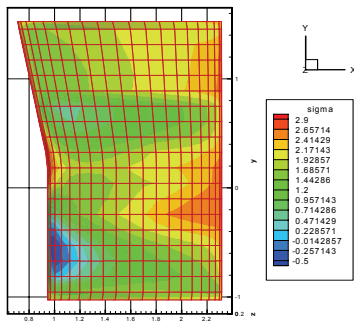


Fig. 8 Results of computation by the
developed propeller-rudder analysis system
(starboard turn 6°)

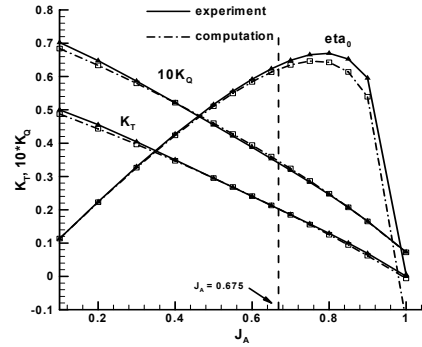


Fig. 9 Comparison of experiment and
computation in propeller open water
condition

3. 유전자 알고리즘을 이용한 최적화

3.1 유전자 알고리즘

유전자 알고리즘은 현재 가장 활발하게 사용되
어지고 있는 최적화 기법 중의 하나로 다윈의 자연
진화의 법칙을 컴퓨터의 논리로 모방하여 일반 최
적화 문제나 탐색문제의 해를 구하는 알고리즘이
다.

유전자 알고리즘은 기존의 탐색 방법과는 달리
집단(population)이라고 불리는 임의의 초기해 집
단으로부터 출발한다. 또한 집단을 구성하는 각 개
체는 게놈(genome) 혹은 염색체(chromosome)라
고 부르며, 유전자 알고리즘에서 문제의 해를 표현
하는 역할을 한다. 게놈은 이진 비트 스트링으로
표현되며(예: 10001101), 세대(generation)라고 부
르는 연속적인 반복 과정을 통해 진화한다. 이러한
탐색 과정이 오래 걸리는 약점을 보완하기 위해
Lee and Lee(1997)와 Lee et al.(1994)은 직접탐
색법과의 결합을 통하여 계산 시간을 단축시켰다.

집단이 현 세대에서 다음 세대로 넘어가기 위해
서는 일반적으로 선택(selection), 교배, 돌연변이
의 연산을 순차적으로 거쳐야 한다. 이들은 유전자
알고리즘의 기본적인 연산으로서 알고리즘의 메커
니즘을 규정하고 효율성에 영향을 미친다.

본 연구에서는 토너먼트 전략을 통해 개체를 선
택하고 균일 교배(Uniform crossover)와 점프 돌연

변이(Jump mutation)를 발생시켰다. 이를 프로펠러-타 해석 프로그램과 결합하여 캐비테이션 발생량을 목적 함수로 방향 타 단면의 최적화를 시도하였다.

3.2 정식화 및 계산 결과

침식 예방용 최적 방향 타 개발을 위한 계산에 사용된 선박과 프로펠러는 3.1절에 나온 바와 같은 3500TEU급 컨테이너선을 대상으로 하였으며 방향타의 최적화를 위해 기본 비교 대상과 기준을 NACA 0021 단면을 사용하였다. NACA 0021 단면은 최대두께가 코드 길이의 21%이며 최대 두께의 위치가 0.3 x/c 지점에 있는 단면이다. 본 연구에서는 최대두께를 21%로 고정한 뒤 이의 위치를 바꿔 가장 성능이 좋은 것을 선택하였다. 최대두께의 위치는 Modified Four-digit 시리즈에서 최대한으로 허용하는 0.2~0.5 x/c 범위를 제한 조건으로 하였고, 허용 오차를 10⁻⁶ 으로 하였다. 앞날(Leading edge) 반경은 최대두께위치에 의존하여 매끄럽게 변경되게 하였다. 사용된 수식을 식(5)~(6)에서 보였으며 NACA 0021 단면과 최대 두께의 양 끝 경계에서의 단면 형상을 Fig. 10에 표시하였다.

$$y_t = a_0\sqrt{x} + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \quad (5)$$

: Ahead of max. thickness

$$y_t = d_0 + d_1(1-x) + d_2(1-x)^2 + d_3(1-x)^3 \quad (6)$$

: behind of max. thickness

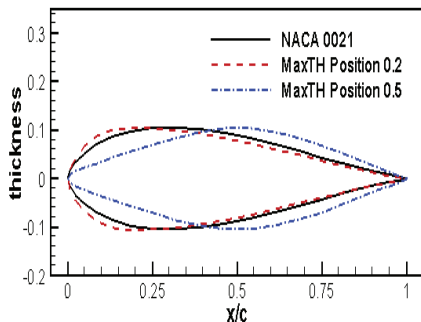


Fig. 10 Initial test section and limiting profiles for the optimization

본 연구에서는 삼차 식을 이용하고 최대두께의 위치 변화만을 고려하여 최적화를 시도해 보았으나 추후 본 연구를 기초로 보다 다양한 형상 변화에 의한 최적화 연구를 할 수 있으리라 생각된다.

Fig. 11에서 원으로 표시한 부분이 타 전체 영역에서 가장 압력이 낮은 부분을 나타낸다. 이 영역에서의 $\sigma_n + C_p$ 을 따로 그래프로 그려 보면 Fig. 12와 같다.

그림에서 CP+sigma(σ_n)의 값이 0이하인 영역을 최소로 하는 것을 목적함수로 하였으며, 최대두께 위치가 0.5 x/c인 단면의 경우와 같이 급격한 압력의 기울기를 가지는 경우는 면적이 작음에도 불구하고

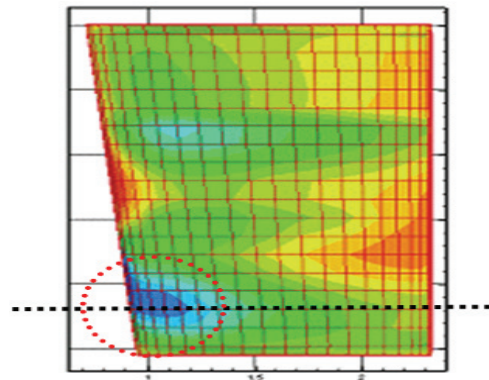


Fig. 11 Selected section of lowest pressure area for the optimization

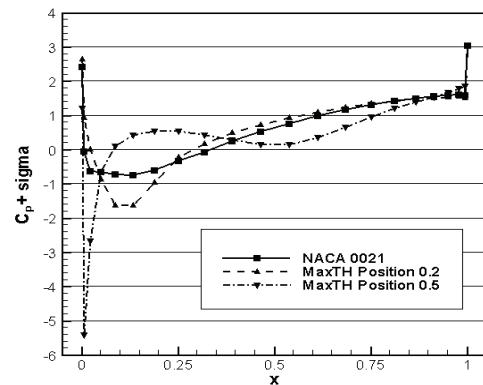


Fig. 12 Profile of $C_p + \sigma(\sigma_n)$ curve (Object function)

하고 성능이 좋지 않을 것으로 예상되므로 결과에서 제외시켰다.

각 세대의 개체 수는 10개씩이며 45세대까지 진화를 진행시켰고 그 결과 30번째 세대부터 45번째 세대까지 최대 적합도를 가지는 최대두께의 위치는 NACA보다 뒷날 쪽에 있으며 최종 도출된 최적 단면의 모습을 NACA와 비교하여 Fig. 13에 보였다.

최적화된 타의 단면 형상의 압력 분포를 Fig. 14에 보였으며 그림에서 알 수 있듯이 최적 단면의 경우가 최대 두께의 위치가 뒤쪽으로 이동함에 따라 캐비테이션이 발생하는 부위의 압력이 NACA 단면에 비해 상대적으로 높아져 캐비테이션 발생이 줄어들음을 알 수 있다. 이러한 현상을 좀 더 확실히 비교해 보기위해 Fig. 15에서 CP+ sigma 커브를 NACA 0021 단면과 최적 도출 단면에 대하여 비교하여 나타내었다. 단면형상은 변화된 양을 잘 보이기 위해 세로방향의 스케일을 두 배로 하였다. 그림에서 알 수 있듯이 앞날부근에서 오히려 약간 압력이 저하되는 부분이 있으나 통상 침식이 많이 발생하는 앞날부터 코드의 10~20% 부근에서 압력의 저하가 작고 그 기울기 또한 작아 캐비테이션 양 뿐 아니라 침식에 있어서 확실히 개선된 모습을 보여 줄 것으로 생각된다.

계산에 사용된 컴퓨터는 CPU 3.0 GHz, 2.0GB Ram의 사양을 가졌으며 최적 결과를 도출하기까지의 총 계산 시간은 약 48시간이었다.

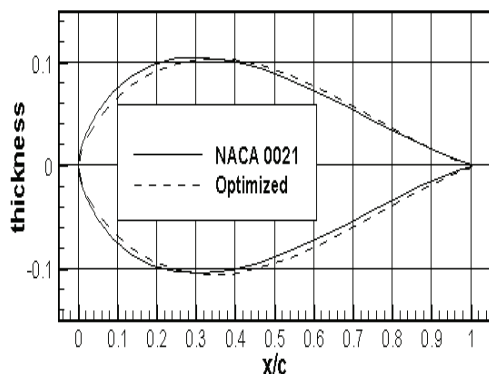


Fig. 13 Final optimized section by the developed optimization analysis system

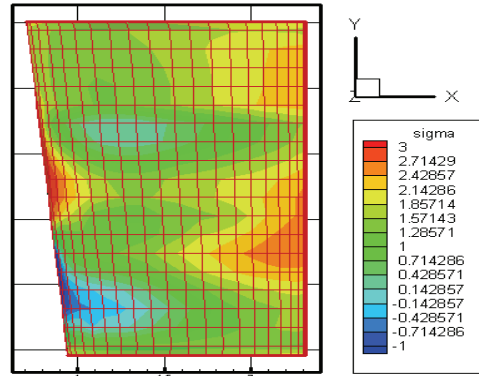


Fig. 14 Pressure distribution of the optimized section

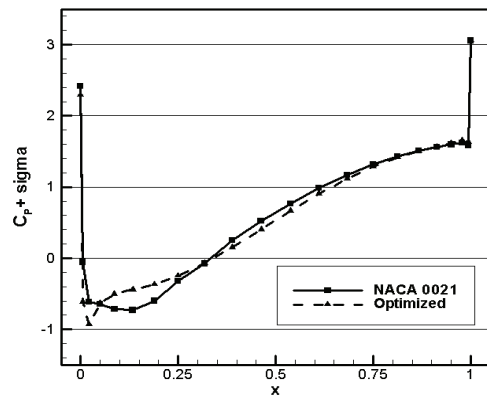


Fig. 15 Comparison of $C_p + \sigma$ curve between the original NACA section and the finally optimized section

4. 결론

유전자 알고리즘을 이용하여 침식을 예방 할 수 있는 최적 타 설계에 대한 연구를 수행하였으며 본 연구에서 도출된 결론은 다음과 같다.

- 포텐셜 이론에 의한 타-프로펠러 해석 프로그램을 개발하였으며 실험과의 비교 및 수렴성 확인 등을 통하여 정도를 검증하였다.
- 타-프로펠러 해석 프로그램을 토대로 유전자 알고리즘을 이용한 최적 단면 도출 알고리즘을 개발하였다.

- 최적 단면의 설계변수로 최대두께 위치와 날개 앞날 반경을 선택하였으며 앞날에서의 압력분포를 목적함수로 최적 단면을 도출하였다.
- 본 연구에서는 기하학적으로 중요하게 생각되는 최대두께 위치와 앞날 반경을 설계변수로 연결해서 최적화하였으나 보다 최적화된 단면을 찾기 위해서 향후 설계 변수에 대한 체계적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.
- 이론해석에 의해 도출된 최적타 단면에 대하여 추후 캐비테이션 터널에서의 침식 실험을 통하여 최적화에 대한 보다 정도 높은 검증이 가능할 것으로 생각된다.

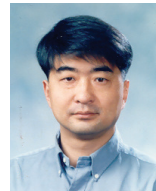
후 기

본 논문은 부산대학교 자유과제학술연구비(2년)에 의해 연구되었음.

참 고 문 헌

- Greely, D.S. and Kerwin, J.E., 1982, "Numerical Methods for Propeller Design and Analysis in Steady Flow," SNAME Transaction, Vol. 90, pp. 415-453.
- Han, J.M., Kong, D.S. Kim, Y.G. and Lew, J.M., 1999, "Analysis of Propeller-rudder Interaction with Rudder Angle," Proceedings, Annual Autumn Meeting of Society of Naval Architects of Korea, pp. 206-209.

- Lee, D.K., Jeong, S.J. and Kim, S.Y., 1994, "A Study on the Efficient Optimization Method by Coupling Genetic Algorithm and Direct Search Method," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 31, No. 3, pp. 12-18.
- Lee, J.T., 1987, A Potential Based Panel Method for the Aalysis of Mrine Popellers in Seady Flow, Ph.D Thesis, MIT, p. 150.
- Lee, K.H. and Lee, K.Y., 1997, "Hybrid Optimization Algorithm based on the Interface of a Sequential Linear Approximation Method and Genetic Algorithm," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 34, No. 3, pp. 93-101.
- Molland, A.F., 1981, The Free-stream Characteristics of Ship Skeg-rudders, Ph. Thesis, Department of Ship Science, University of Southampton.



< 김 문 찬 >



< 이 언 식 >



< 변 태 영 >