

대형 컨테이너선용 Twist 일체형 타 개발

김인환*, 김문찬[†]*, 이진희*, 천장호*, 정운화**

부산대학교 조선해양공학과*
국방기술품질원**

Study on Design of a Twisted Full-Spade Rudder for a Large Container Ship by the Genetic Algorithm

In-Hwan Kim*, Moon-Chan Kim[†]*, Jin-Hee Lee*, Jang-Ho Chun* and Un-Hwa Jung**

Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University*
Defence Agency for Technology and Quality**

Abstract

This paper describes the design of a full-spade twisted rudder section by using 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 developed code has been used for the design of a twisted full-spade rudder especially for finding out optimum section. The optimization has been firstly carried out by the genetic algorithm. The more detail variation of a rudder section has been also conducted by changing section profile in more detail to confirm the most optimum section profile. The developed new twisted rudder has been compared with existing twisted rudder by cavitation testing in the cavitation tunnel at MOERI. It is concluded that the developed twisted rudder has a lower cavity in comparison with existing twisted rudder. The verification of efficiency gain is expected to be carried out through self-propulsion tests 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)

1. 서론

해지고 있다. 특히 컨테이너선의 경우 초대형화에 따라 프로펠러와 타에 미치는 유체력이 지속적으로 증가하고 있으며 이에 따라 방향타에서 유체의 불안정성 증가에 의한 심각한 침식 문제 등을 야기하고 있다. 선체 위의 반류 속에서 프로펠러의 높은 추력과 날개 끝의 빠른 속도로 인해 캐비테이션이 발생하고 이 캐비테이션은 소음, 진동, 프로펠러 침식을 유발하여 설계자들에게 큰 어려움을 주고 있다. 프로펠러 후류에서 발생된 대표적인 침식에 의한 방향타의 손상의 예를 Fig. 1에 보였다.



Fig. 1 Typical profile of the rudder erosion

그동안 거의 모든 선종에 사용되고 있던 Semi spade rudder는 중·소형선에서 조차 간혹 갭 부분과 Port side에서의 캐비테이션의 문제로 인한 침식이 발생되어 추진효율의 저하 및 조종성능의 감소의 문제를 야기하고 있다. 특히, 대형 컨테이너선에서는 더욱 문제가 심각한 실정이다. 여러 가지 방법으로 갭 부분의 침식을 해결하려는 시도가 있었으나 근본적으로 해결이 어려워 최근 일체형(Full spade) 타를 사용하려는 추세이다. 이에 따라 최근에는 방향타의 혼 부분과 타 부분의 간극문제를 없애고 하나의 형태로 만든 Full spade rudder에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 본 논문에서도 Full spade rudder 중에 보다 효과적인 상하 비대칭형인 Twist형 Full spade rudder 개발을 최종 목표로 하였다. Fig. 2에 보인바와 같이 Twist형 타는 프로펠러 상하 입사류가 다른

것에 착안하여 개발되었다. 입사각이 작아져 특히 아랫부분에서 캐비테이션 성능이 우수해지는 것 뿐 아니라 입사류에 의한 양력을 이용하여 추력을 발생시켜 일반 타 대비효율이 2~3% 정도 우수한 것으로 알려져 있다.

프로펠러 뒤에서 작동하는 타 주위 유동의 정확한 분석은 매우 어렵다. 이를 위해 프로펠러와 타의 상호관계를 분석하는 것은 매우 중요하다. 프로펠러와 타의 상호관계를 분석하기 위해 많은 노력들이 있었다. Molland(1981)은 선체 없이 프로펠러 뒤에서 작동하는 타를 풍동실험을 통하여 성능을 평가 하였다. 이후 Tamashima et al.(1993)은 프로펠러의 성능을 계산하기 위해 단순화된 프로펠러 이론을 사용하였고, 타의 유동력 계산은 Panel Method을 이용했다. Han et al.(1999)은 또한 프로펠러와 타의 상호관계를 분석하기 위한 수치적 방법을 개발하였고 계산된 결과를 실험과 비교하였다.

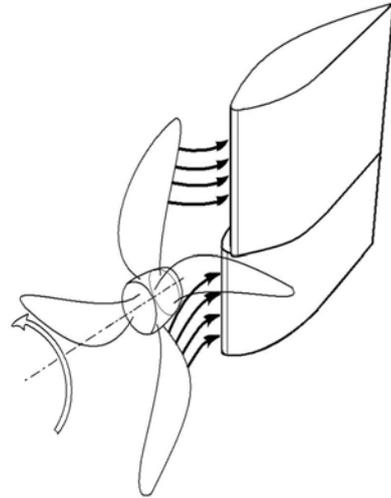


Fig. 2 Concept of the twisted rudder

본 논문에서는 수치적 해석 프로그램을 이용하여 타의 표면에서의 압력분포계산을 하였고, 이를 통하여 캐비테이션을 판단하였다. 이 결과를 바탕으로 타 단면의 형상을 최적화하였다. 본 프로그램은 타 주위의 유동을 해석하기 위해 Lee(1987)의 Surface panel method를 사용하였고 프로펠러 주위의 유동을 풀기 위해 Greely and

Kerwin(1982)의 VLM(Vortex Lattice Method)를 사용했다. 그리고 타와 프로펠러 주위의 3차원 유동은 그것들 사이의 상호관계를 고려하여 동시에 계산된다. 최적화 기법은 Kim et al.(2008)의 유전자 알고리즘이 사용되었으며 이는 다윈의 진화론을 모방하여 세대를 구성하고 이에 대해 선택, 교배, 돌연변이를 시켜 세대가 지날수록 설계변수를 진화시키는 방법이다. 현재 ES(Evolution Strategies) 방법과 함께 가장 각광받는 최적화 기법이다. 유전자 알고리즘을 이용하여 최적화된 단면 형상을 결정하였으며 스펀-코드의 비는 Twist형 타의 특성에 맞게 스펀보다 코드를 길게 하였으며, 최종적으로 설계된 Twist형 타는 캐비테이션 시험에 의해 검증 하였다.

2. 프로펠러-타 해석

2.1 해석방법

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. 3에 보였다.

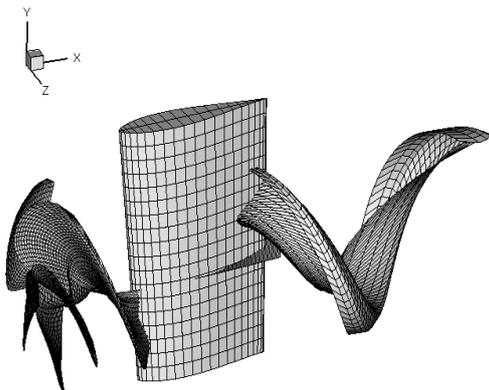


Fig. 3 Grid system of propeller and rudder system

지배방정식, 가정, 경계조건 등은 본 논문의 핵심 주제가 아니므로 앞서 언급한 참고문헌(Lee 1987, Greely and Kerwin 1982)으로 대신하고 최적화를 위해 사용될 압력 계수 등에 대하여 다음과 같이 정의하여 사용하였다.

먼저 타에서의 압력계수 C_p 는 다음과 같다.

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

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

위의 (2)식에서 캐비테이션 수와의 관계를 고려하여 실제 계산에서는 U_∞ 를 nD 로 치환하여 계산 하였다.

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

해석 프로그램을 검증하기 위해 실험값과 비교 하였다. 실험과의 비교 검증을 위해 사용된 선박은 7,000TEU 컨테이너 선박에 대한 모형선이다. Table 1에서 대상 모형선의 제원을 보여주고 있다.

이론해석과의 비교를 위한 시험 조건은 Table 2에 보인 바와 같으며 여러 가지 조건 중에 우현으로 6 도 돌린 상태에서의 시험 결과와 이론해석 결과의 비교를 Figs. 5~6에 보였다. 그림에서 알 수 있듯이 거의 비슷한 위치에서 캐비테이션이 발생되고 있음을 알 수 있다. 실제 시험 시 캐비테

이선 수에 따라 캐비테이션이 발생하는 양에는 차이가 있으나, 발생 위치는 거의 유사하다. 마지막으로 프로펠러 단독 상태에서의 실험값과 이론해석 결과를 Fig. 7에서 비교하였으며 거의 전 전진비에서 상당히 좋은 일치를 보이고 있으며 설계점에서도 3%이내의 오차를 보여 성능 비교에 문제가 없으리라 생각된다.

Table 1 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
Density	999 kg/m ³

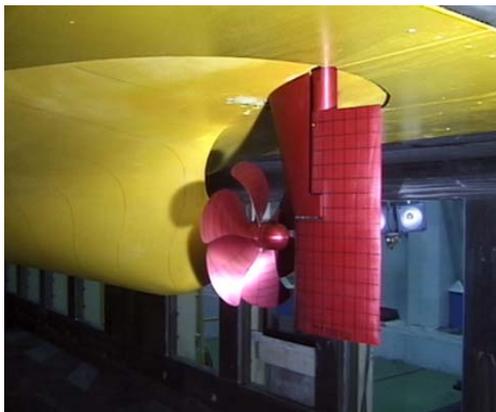


Fig. 4 Profile of set-up for cavitation test

Table 2 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

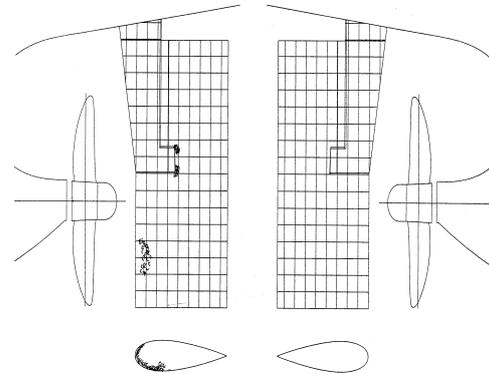


Fig. 5 Results of cavitation test (starboard turn: 6°)

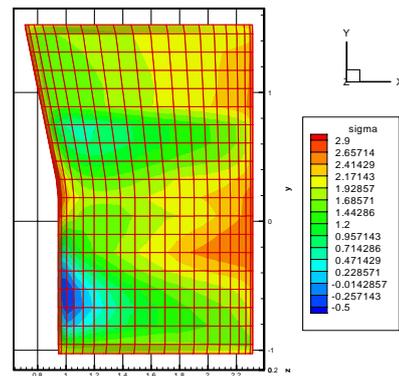


Fig. 6 Results of computation by the developed propeller-rudde analysis system (starboard turn : 6°)

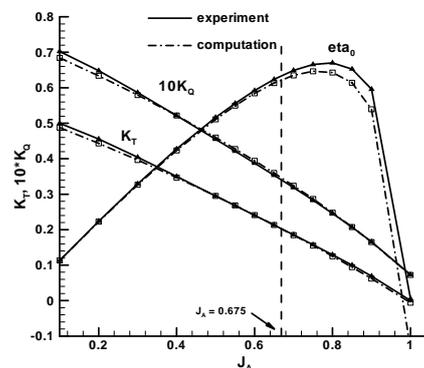


Fig. 7 Comparison of experiment and computation in propeller open water condition

3. Twisted 러더 단면의 개발

3.1 유전자 알고리즘

유전자 알고리즘은 현재 가장 활발하게 사용되고 있는 최적화 기법 중의 하나로 다윈의 자연 진화의 법칙을 컴퓨터의 논리로 구현하여 일반 최적화 문제나 탐색문제의 해를 구하는 알고리즘이다.

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

집단이 현 세대에서 다음 세대로 넘어가기 위해서는 일반적으로 선택(selection), 교배, 돌연변이의 연산을 순차적으로 거쳐야 한다. 이들은 유전자 알고리즘의 기본적인 연산으로서 알고리즘의 메커니즘을 규정하고 효율성에 영향을 미친다.

본 연구에서는 토너먼트 전략을 통해 개체를 선택하고 균일 교배 (Uniform crossover)와 점프 돌연변이 (Jump mutation)를 발생시켰다. 이를 프로펠러-타 해석 프로그램과의 결합하여 타 아랫부분에 캐비테이션이 가장 많이 생기는 단면에서의 캐비테이션 발생량을 목적 함수로 방향 타 단면의 최적화를 시도하였다.

3.2 정식화 및 계산 결과

Twist 형 타에 있어서 가장 중요한 변수 중에 하나가 Twist 각의 결정이다. 이 각은 타의 효율 및 캐비테이션 성능에 큰 영향을 미친다. 본 연구에서 해석해 본 결과 Twist 형 타의 Twist 각도가 정면을 기준으로 7~8도 정도에서 가장 작은 캐비테이션이 발생할 수 있으나 이 경우 효율 및 저항 관점에서 불리할 수 있어 기존 트위스트형 타와 비슷한 약 5도 정도로 결정하였다. Fig. 8에서 알

수 있는 바와 같이 이 각이 추력방향으로 양력이 발생하는 각도가 되며 (더 커질수록 캐비테이션은 다소 줄어들 수 있으나 효율의 감소가 예상됨) 저항적인 측면에서도 유리할 수 있다. 본 연구에서는 이 각도를 기준으로 최대 두께의 최적 위치를 찾아서 조종효율 및 캐비테이션이 우수한 타를 개발 하고자 하였다.

대형 컨테이너선용 트위스트 타 개발을 위한 계산에 사용된 선박과 프로펠러는 12000TEU급을 대상으로 하였으며 방향타의 최적화를 위해 초기 단면으로 NACA 0019단면을 사용하였다. Table 3에는 대상 선박의 제원을 보였으며, NACA 0019 단면은 최대두께가 코드 길이의 19%이며 최대 두께의 위치가 0.3 x/c 지점에 있는 단면이다.

Table 3 Principal dimensions of target ship (1200TEU container)

Engine power	98307.6 PS
Speed of revolution	104 RPM
Design speed	25.6 knots
Propeller Dia.	9.3 M

본 연구에서는 최대두께를 19%로 고정된 뒤 $C_p + \sigma_n$ 값이 음이 되는 영역의 면적을 목적함수로 하여 이 면적이 최소가 되도록 최대두께의 위치를 결정하도록 하였다. 그리고 최대두께의 위치 변화 시 Leading edge의 반경도 함께 변화하도록 하여 비현실적인 단면의 형성을 방지 하였다. 최대두께의 위치는 Modified Four-digit 시리즈에서 최대한으로 허용하는 0.2 ~ 0.5 x/c 범위를 제한 조건으로 하였고 허용 오차를 10^{-6} 로 하였다.

$$y_t = a_0 \sqrt{x} + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 \quad (5)$$

: 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. 8에는 새로이 개발된 Twisted 타의 단면을 기존 타의 단면과 비교한 모습을 나타내었다. 기

존의 타에 비하여 최대 두께의 위치가 뒤에 위치하고 Leading edge의 반경이 커진 모습이다. 본 연구에서는 삼차 식을 이용하고 flow의 입사각을 고정한 후 최대두께의 위치 변화만을 고려하여 최적화를 시도해 보았으나 추후 본 연구를 기초로 보다 다양한 형상 변화에 의한 최적화 연구를 할 수 있으리라 생각된다.

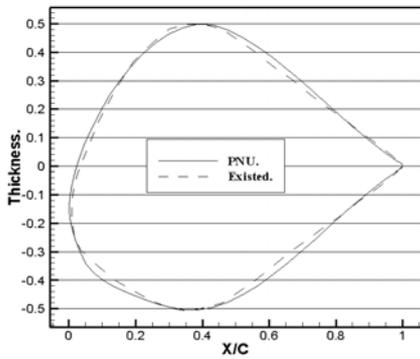


Fig. 8 Comparison with PNU twist rudder section and existing twist rudder section

타를 돌리지 않았을 때의 압력 분포이다. Fig. 10~11은 개발된 타를 port 방향으로 12도 돌렸을 때의 압력 분포이다. 낮은 압력의 영역이 Leading edge 부분에 발생하였지만 그 영역이 매우 작음을 확인 할 수 있었다.

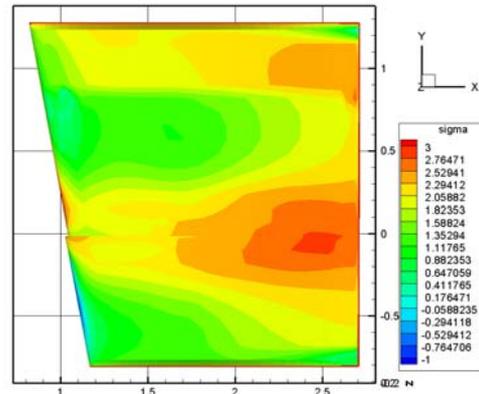


Fig. 10 Pressure distribution at 12 degree on port side of PNU rudder

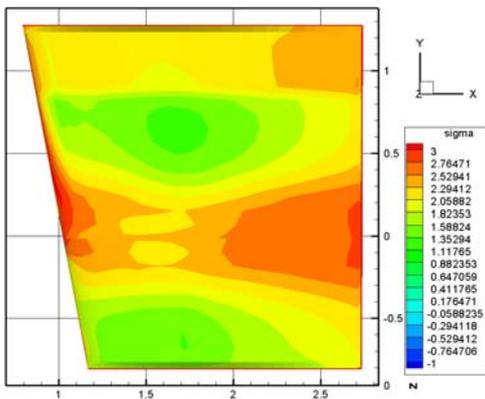


Fig. 9 Pressure distribution at 0 degree on port side of PNU rudder

Fig. 9~11에는 개발된 타의 압력 분포를 보여주고 있다. 캐비테이션이 낮은 압력과 비례한다고 생각 할 수 있으므로 이를 전체적으로 높이도록 설계하는 것이 유리 할 것이다. Fig. 9는 개발된

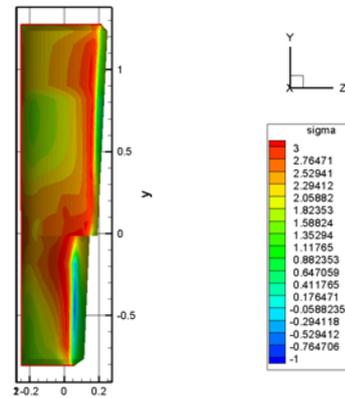


Fig. 11 Pressure distribution at 12 degree on front side of PNU rudder

압력분포를 통해 개발된 타가 기존 타에 비하여 어느 정도의 효과를 보이는지 비교해 보기 위하여 $\sigma_n + C_p$ 그래프를 그려 보았다.

압력이 가장 낮게 계산되는 위치에서, Fig. 12는 타를 0도 돌렸을 때의 $\sigma_n + C_p$ 그래프이고,

Fig. 13은 타를 Port 방향으로 12도 돌렸을 때의 $\sigma_n + C_p$ 그래프이다.

개발된 타의 $\sigma_n + C_p$ 값이 기존의 타보다 그 변화가 완만하고 그 최소값 또한 작아 캐비테이션에서 유리한 성능 나타낼 것이라는 것을 알 수 있다.

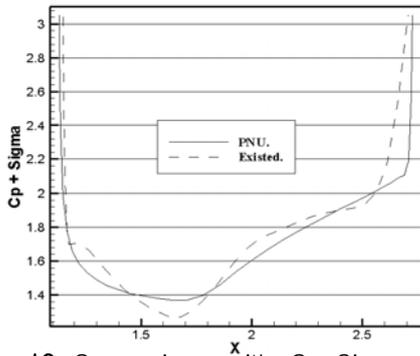


Fig. 12 Comparison with Cp+Sigma curves at 0degree between PNU and existing rudder

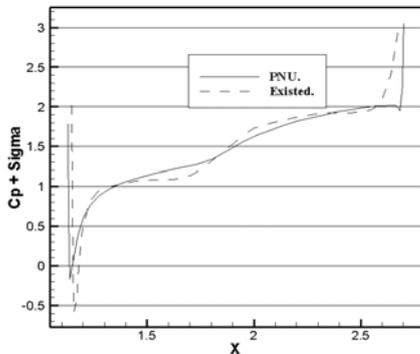


Fig. 13 Comparison with Cp+Sigma curves at 12degree between PNU and existing rudder

3.3 Cavitation test에 의한 시험결과 비교

Table 4 에 Cavitation test의 실험 조건을 보았다. 위 실험은 선박의 MCR의 조건과 동일하다.

Fig. 14는 캐비테이션 터널에서 실험하는 장면 모습이다. 실험조건을 선박의 최대출력으로 가정하고 실험을 하였기 때문에 실제 확인된 캐비테이션이 실제 운항에서는 보다 작게 발생하리라 예상된다. Fig. 15은 기존의 타를 Port 방향으로 6도

돌렸을 때 캐비테이션의 발생 모습을 찍은 것이고 Fig. 16은 개발된 타를 6도 돌렸을 때 캐비테이션 발생 모습을 찍은 것이다. 개발된 타에서는 캐비테이션이 발생 하지 않음을 확인 할 수 있었으며 최종 확인 결과 개발된 타에서의 캐비테이션의 초생이 1도 정도 지연 되었다.

Table 4 Condition of the cavitation test

Propeller speed of revolution (rpm)	109.2
Thrust coefficient (K_T)	0.1698
Pressure of vapor (Pa)	1651
Cavitation no. at 0.7R ($\sigma_{n0.7R}$)	1.051



Fig. 14 Experimental set-up for cavitation test



Fig. 15 Cavitation test at 6degree on existing rudder

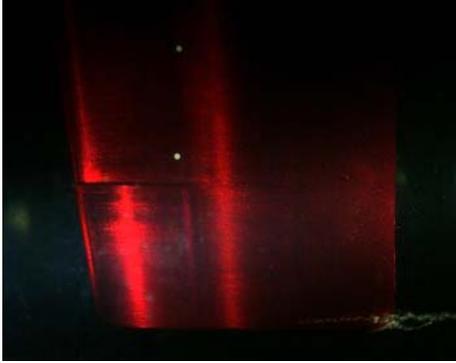


Fig. 16 Cavitation test at 6degree on PNU rudder



Fig. 17 Sole cavity at 6degree on existing rudder



Fig. 18 Sole cavity at 6degree on PNU rudder

Fig. 17~18은 Sole 부분에서의 Cavity를 관찰한 모습이다. 개발된 타의 Sole cavity가 기존 타보다 그 크기 및 양이 적음을 확인 할 수 있다.

효율을 확인하기 위해서는 자항시험을 수행하여야 하나 자항 시험은 아직 수행하지 못했으며 추후 이를 수행하여 보완 할 계획이다.

4. 결론

유전자 알고리즘을 이용하여 대형 컨테이너선용 Twisted 타 개발에 대한 연구를 수행하였으며 본 연구에서 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 포텐셜 이론에 의한 타-프로펠러 해석 프로

그램을 개발하였으며 실험과 비교를 통하여 정도를 검증하였다.

- 2) 타-프로펠러 해석 프로그램을 토대로 유전자 알고리즘을 이용한 최적 단면 도출 알고리즘을 이용하여 새로운 Twist 형 타 단면을 개발 하였다.
- 3) 개발된 단면은 기존의 것 보다 압력 변화가 급하지 않고 계산된 압력의 값이 더 작아 캐비테이션에서 유리할 것이라 생각 된다.
- 4) 실제 캐비테이션 시험에서도 개발된 타의 캐비티 성능이 inception, 발생범위 및 안정성 측면에서 기존 Twist형 타보다 더 우수하였다. 새로이 개발된 타에 대하여 자항시험을 통해 효율을 검증할 예정이다.

후 기

본 논문의 내용은 해덕선기(주)의 대형 컨테이너선 용 고성능 타 개발 연구 과제로 수행된 것으로, 위 기관의 후원에 감사드립니다.

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 SNAK, pp. 206-209.
- Kim, M.C., Lee, U.S. and Byun, T.Y., 2008, "Study on Optimizatiom of Anti-erosion Rudder Section of Large Container Ship by Genetic Algorithm," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 45, No. 4, pp. 403-410.
- 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 Analysis of Marine Propellers in Steady Flow, Ph.D Thesis, MIT.
- Lee, K.H. and Lee, K.Y., 1997, “Hybrid Optimization Algorithm Based on the Interface of a Sequential Linear Approximation Method and a Genetic Algorithm,” Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 34, No. 3, pp. 93-101.
- Molland, A.F., 1981, The Free-stram Characteristics of Ship Skeg-rudders, Ph.D Thesis, Department of Ship Science, University of Southampton.
- Tamashima, M., Matsui, S., Yang, J., Mori, K. and Yamazaki, R., 1993, "The Method for Predicting the Performance of Propeller-rudder System with Rudder Angles and Its Application to the Rudder Design," Transaction of the West-Japan Society of Naval Architects 86, 53-76 (in Japanese).



< 김 인 환 > < 김 문 찬 > < 이 진 희 >



< 천 장 호 > < 정 운 화 >