

EEDI 개선을 위한 상반 회전 프로펠러 단독성능 분석용 수치해석과 모형시험에 대한 연구

김문찬¹ · 송무석^{2,†} · 강현지¹ · 김동언³

¹부산대학교 조선해양공학과

²홍익대학교 조선해양공학과

³STX조선해양

A Numerical and Experimental Procedure for the Open Water Characteristics of Contra-Rotating Propellers for EEDI Improvement

Moon Chan Kim¹, Mu Seok Song^{2,†}, Hyeon Ji Kang¹ and Dong Eon Kim³

¹Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

²Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Hongik University, Sejong 339-701, Korea

³STX Offshore & Shipbuilding, Changwon 642-845, Korea

요 약

IMO가 도입한 Energy Efficiency Design Index (EEDI)의 강제로 최근 관심이 증가되고 있는 상반회전 프로펠러(Contra-Rotating Propeller, CRP)의 단독 상태에서의 성능평가를 위한 보오텍스격자법(Vortex Lattice Method) 기반의 포텐셜 수치해법과 모형시험법을 확립하고 이를 특정 CRP에 적용하여 유용성을 검증하였다. 대상 CRP는 EEDI 개선을 목적으로 설계된 것으로 그 성능을 본 연구의 수치 및 실험 해석을 바탕으로 분석하였다. CRP의 설계점을 포함한 주 작동 영역에 대해 계산과 실험이 좋은 일치성을 보임을 확인하였고, 본 연구를 통하여 제안된 기법은 향후 CRP 설계 및 성능 해석에 유용하게 사용될 수 있으리라 생각된다.

Abstract – Recently, contra-rotating propellers (CRP) having higher efficiency draw much attention since the EEDI regulation of IMO has been enforced. In this paper a numerical method based on the vortex lattice potential theory with a wake model and an experimental procedure with a newly built measuring device, specifically focusing on CRPs, are introduced. And they are applied to a series of CRP known to be designed for the purpose of improving EEDI. The numerical and experimental results showed good agreement explaining the characteristics of the CRP properly. The proposed method is believed to be effectively used for various CRP related studies.

Keywords: Energy Efficiency Design Index, EEDI(에너지 효율설계지수), Contra-Rotating Propeller, CRP(상반 회전프로펠러), Vortex Lattice Method(보오텍스격자법), CRP Open Water Test(CRP단독시험), Wake Model(반류모델)

1. 서 론

대기 중 온실가스(GHGs, greenhouse gases) 농도의 증가에 따른 것으로 이해되는 기후변화의 문제가 전 지구적인 관심의 중심에 놓인 가운데, 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)는 교토의정서(Kyoto Protocol)의 온실가스 감축과 관련하여 국제

적인 산업의 영역에서 법적인 효력을 갖는 최초의 규정으로 에너지효율설계지수(EEDI, Energy Efficiency Design Index)의 도입을 결정하였다(IMO[2011]). 이는 2013년부터 신조되는 선박에 대하여, 건조, 항해 및 관리에 대하여 에너지 효율에 대한 지표들을 제시하여 단계적으로 적용하도록 하고 있는데, 건조 시 적용하는 에너지효율지수인 EEDI (Energy Efficiency Design Index for new ships)는 1톤의 화물을 1해상마일 거리를 운송하는 데 발생하는 이산화탄소(CO₂) 배출량을 나타내며, 2013년 1월 10% 저감을 시작

[†]Corresponding author: msong@hongik.ac.kr

Table 1. The cost price component by means of transport

■ 현황-운송수단별 원가구성 요소(N사, 2007년 기준)

| 구분 | 유류비 | 노무비 | 경비 | 기타 |
|------|-----|-----|-----|-----|
| 도로운송 | 27% | 36% | 23% | 14% |
| 해상운송 | 41% | 22% | 16% | 21% |
| 철도운송 | 7% | 10% | 58% | 23% |

※자료: 전국경제연합회/2009.5

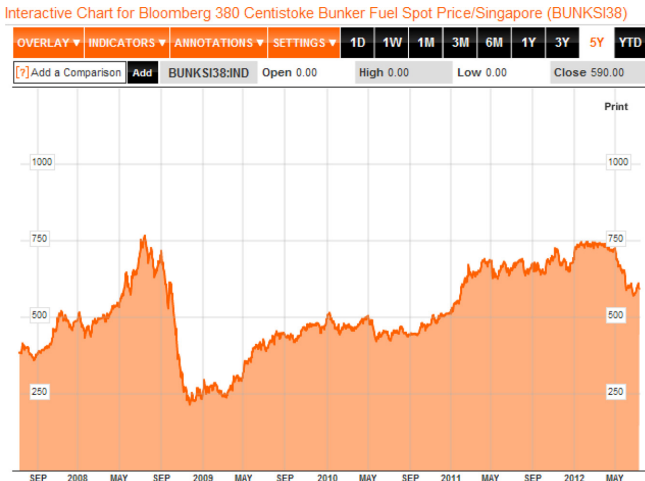


Fig. 1. 380 Centistoke Bunker Fuel Spot Price/Singapore [자료출처: Bloomberg].

으로 단계적으로 2025년까지 30%를 저감하여야 한다(Jung[2011]). EEDI는 방법을 규정하지 않고 최종적인 결과로 나타나는 CO2 배출량의 저감을 요구하는 체제로, 해양 운송체의 추진과 저항에 관련된 다양한 영역에서 다양한 형식의 효율 증대를 요구한다. 또한 선박 운항 원가에서 유류비가 차지하는 비중이 40%에 달하고(Table 1) 선박의 주 연료인 bunker의 가격이 톤당 약 650달러인 상황에서(Fig. 1) 특히 선박의 저항성능과 추진장치의 효율 개선은 많은 연구의 관심이 되고 있다.

상반회전프로펠러(Contra Rotating Propeller, CRP)는 고효율 추진 장치를 대표하는 프로펠러로서 서로 반대 방향으로 회전하는 두 개의 프로펠러를 동심 축 상에 전후 방향으로 설치하여 추력을 발생시키는 복합 추진 장치이다. 프로펠러의 회전은 하류로 밀치는 유동에 상당한 양의 회전 에너지를 남기며 이에 따라 약 8%의 효율 손실이 발생한다고 알려져 있는데, CRP는 서로 반대 방향으로 회전하는 두 후류의 중첩으로 회전 에너지 유실을 최소화함으로써 전체적인 추진효율을 증대시키는 장점을 가지며, 선박의 직진 성능을 개선하고 단위 프로펠러에 작용하는 하중을 줄임으로써 축 기진력 및 소음, 진동 등의 감소 효과도 얻는 것으로 알려져 있다(SNAK[2009]). Fig. 2는 CRP의 일반적인 성능 개선을 설명하는 간단한 그림으로, 단 추진 프로펠러에 비해 낮은 속도에서는 약 16%정도, 높은 속도에서는 약 9%정도 추진효율이 개선되는 것으로 이해된다.

한편, 프로펠러의 설계 및 개발을 위하여 양력면 이론을 기반으

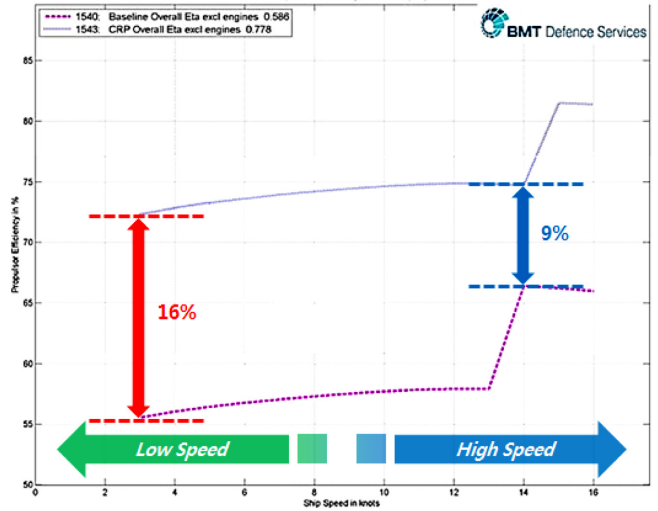


Fig. 2. Propeller Efficiency : Conventional Propeller - Contra-Rotating Propeller [자료출처: MAST Europe 2009].

로 하는 성능해석 기법이 주로 사용되어 왔다. Kerwin[1973]에 의해 정도 높은 해석 및 설계로의 적용 가능성이 확인된 이래로, Kerwin & Lee[1978]에서는 보오텍스격자(vortex lattice)를 프로펠러 캠버면에 직접 분포하여 해석하는 기법을 제안하였고, 그 후 프로펠러 후류의 모델링을 개선한 프로그램인 Greely & Kerwin[1982]에 의해 개발되어 현재, 양력면 이론에 의한 해석에 대부분 적용되어지고 있다. 한편, CRP에 대하여는 Cha[1992] 및 Paik, Suh & Chun[2000]에서 포텐셜 기저로 그 성능을 해석하기 위한 연구가 수행된 바 있으나, 실험값과의 비교 검증은 체계적으로 이루어진 바가 없다.

본 연구는 향후 적용이 증대될 것으로 기대되는 CRP의 설계와 해석에 이용될 수 있는 포텐셜 기반 해석 프로그램과 프로펠러 성능 분석을 위한 실험 기법의 개발과, 이를 EEDI 개선을 위해 제안된 CRP에 대해 적용하여 그 유용성을 살펴본 것이다. 벌크선에 사용할 CRP의 단독상태 성능을 본 연구의 방법에 따라 수행하고 이론과 실험을 비교하였으며, 제안된 CRP의 동일한 하중 상태에서의 효율을 비교하였다.

2. 상반 회전 프로펠러 해석

CRP는 두 프로펠러 사이의 상호작용이 크므로 전후의 두 프로펠러를 동시에 푸는 것이 필요하다. 또한 단 추진 프로펠러와 비교하였을 때, 허브의 크기가 상대적으로 크기 때문에 허브에 의한 효과를 보다 엄밀하게 고려하여야 한다. 본 연구에서는 허브를 경계요소(panel)로 처리하고 프로펠러의 날개 주위의 유동은 Greely & Kerwin[1982]의 양력면 이론을 적용하여 적절한 난류모델과 함께 해석하는 것으로 하였고, 각각의 프로펠러의 반경 및 코오드를 따른 하중 계산이 가능하게 하여 CRP의 종합적 성능과 전후방 날개의 특성을 구분하여 확인 할 수 있도록 하였다.

2.1 경계치 문제의 정식화

문제의 해석을 위하여 프로펠러 주위 유체의 비점성, 비압축성
과 유동의 비회전성을 가정하면, 질량 보존의 법칙으로부터 교란속
도포텐셜, ϕ 에 대한 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \tag{1}$$

지배방정식 (1)을 만족하기 위한 각 경계면에서 조건은 다음과
같다.

1) 무한 원방에서 경계조건:

$$\nabla \phi \rightarrow 0 \tag{2}$$

2) 날개 및 허브 표면에서의 운동학적 경계조건:

$$\hat{n} \cdot \vec{U}_\infty + \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \tag{3}$$

여기서, \hat{n} 은 물체 표면에서의 단위 법선 벡터이며, 유체장을 향할
때를 양으로 정의한다. \vec{U}_∞ 는 프로펠러로 유입되는 속도이다.

3) 날개 후연에서의 Kutta 조건:

$$|(\nabla \phi)_{T, \text{edge}}| < \infty \tag{4}$$

4) 후연 반류면에서 경계조건:

$$\Delta \frac{\partial \phi}{\partial n} = (\hat{n} \cdot \nabla \phi)^+ - (\hat{n} \cdot \nabla \phi)^- = 0 \tag{5}$$

$$\Delta p = p^+ - p^- = 0 \tag{6}$$

여기서, p 는 반류면에서의 압력을 나타내고, +와 -는 각각 반류면
의 상·하면을 나타낸다.

2.2 적분 방정식

Green정리로부터, 유체영역에서 지배방정식을 만족하는 섭동 포
텐셜은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \phi(\vec{x}) = & \int_{S_{b,H}} \{-\phi(\vec{\xi})\} \frac{\partial}{\partial n_\xi} G(\vec{x}, \vec{\xi}) dS \\ & + \int_{S_{b,H}} \frac{\partial \phi(\vec{\xi})}{\partial n} G(\vec{x}, \vec{\xi}) dS \\ & + \int_{S_w} (-\Delta \phi_w) \frac{\partial}{\partial n_\xi} G(\vec{x}, \vec{\xi}) dS \end{aligned} \tag{7}$$

여기서, $G(\vec{x}, \vec{\xi}) dS$ 는 Green 함수이다.

식 (7)은 Morino & Kuo[1974]에 의해 제안된 포텐셜을 기저로
하는 방정식으로써, Lee[1987]와 Hoshino[1989]에서 성공적으로
적용 된 바 있다. 이를 보오텍스격자법에 적합한 적분방정식으로
치환하기 위해 보오텍스와 다이폴 분포 사이의 관계식을 이용하여
정리하고 앞서 언급한 CRP 특성인 허브 효과를 적용하면 다음과
같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial n_p} = & \int_{S_b} \hat{n} \cdot \vec{\gamma} \times \nabla_p G dS + \int_{S_b} \sigma \frac{\partial G}{\partial n_p} dS \\ & + \int_{S_w} (\Delta \phi_w) \frac{\partial}{\partial n_p} \left(\frac{\partial G}{\partial n_w} \right) dS \\ & + \left(\frac{\partial \phi}{\partial n_p} \right)_H \end{aligned} \tag{8}$$

여기서 γ 는 날개 캠버면에서 와도의 강도를 나타내며, 마지막 항은
허브의 특이점에서 유기되는 속도이다.

2.3 형상의 정의

CRP는 전방과 후방의 프로펠러가 서로 반대방향으로 회전함으로,
각 프로펠러의 회전 방향을 고려하여 형상을 정의하여야 한다. 본
연구에서는 CRP 날개에 대하여 Paik, Suh & Chun[2000]의 정의를
따랐고, 허브 단면의 형상은 타원형으로 정의하였다.

날개 후연반류면의 기하학적 형상은 날개위에 유기되는 보오텍
스의 정확도에 큰 영향을 미친다. Kerwin & Lee[1978]는 관찰에
의한 slipstream과 축 방향 피치변화를 고려한, 실제에 근접한 roll-
up 반류모델을 제시하였고 본 연구에서는 실제 후연반류의 영향을
보다 정확하게 고려한 Greeley & Kerwin[1982]의 반류모형을 채
택하였다.

2.4 해석 모델

본 해석에는 Jang *et al.*[2012]에서 벌크선용으로 설계 되어진 1
차 및 2차 CRP를 사용하여 해석을 수행하였다. 해석에 사용되어
진 프로펠러의 제원은 Table 2에 명시하였으며, 격자계는 Fig. 3에
도시하였다. CRP는 진동관점에서 전방 프로펠러와 후방 프로펠러의
날개 수는 달라야 하며, 후류가 수축되기 때문에 후방 프로펠러의
직경이 전방 프로펠러보다 작은 것이 일반적이다.

Table 2. Principal particulars of model Propellers

| Designation | 1 st CRP | | 2 nd CRP | |
|--------------|---------------------|---------|---------------------|---------|
| | (PP018) | (PP019) | (PP021) | (PP022) |
| Diameter (m) | 0.200 | 0.175 | 0.200 | 0.175 |
| P/D mean | 0.893 | 0.780 | 0.990 | 0.920 |
| Ae/Ao | 0.400 | 0.437 | 0.450 | 0.350 |
| No. of Blade | 3 | 4 | 4 | 3 |

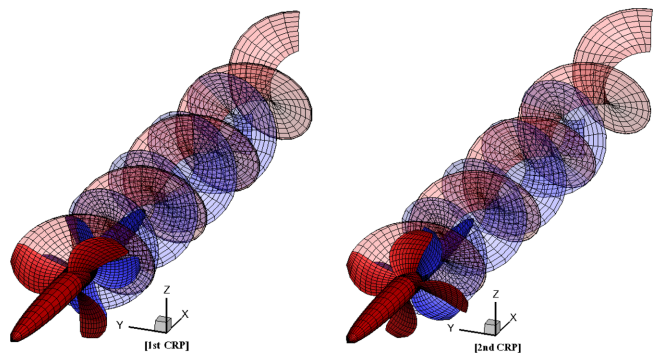


Fig. 3. Schematic view of grid system for CRP.

3. 모형시험

3.1 모형프로펠러

앞서 설명한 CRP 두 세트를 모형시험용으로 제작하였으며, 그 형상은 Figs. 4와 5에 사진으로 보였다.

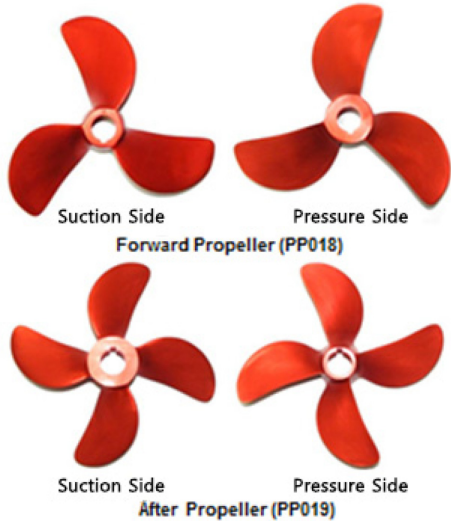


Fig. 4. Photographs of 1st contra-rotating propeller.

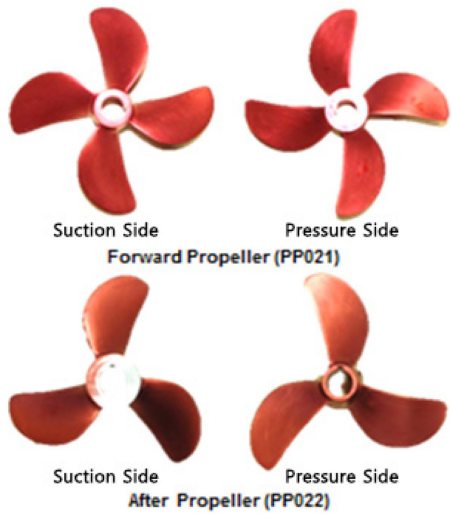


Fig. 5. Photographs of 2nd contra-rotating propeller.

3.2 모형시험시설

추진기단독성능 시험은 부산대학교 예인수조에서 이루어 졌으며, 새로 제작한 CR Dynamometer를 사용하여 그 성능을 계측하였다.

3.2.1 예인수조 및 예인전차

예인수조는 길이가 100 m, 폭이 8 m, 깊이는 3.5 m이며, 전차의 최대속도는 5 m/s이다.

3.2.2 POW 동력계

CRP의 성능을 측정하기 위해서는 두 개의 프로펠러에 대하여 회전방향 및 회전속도를 제어할 수 있어야하며, 각 프로펠러의 성능을 간접 없이 획득할 수 있어야한다. 본 연구에서는 일반프로펠러용 동력계가 아닌 CR 동력계를 새로 제작하여 모형시험을 수행하였다. CR 동력계의 주요 제원은 Table 3에 명시하였고 조합된 형

Table 3. Principal particulars of contra-rotating propeller dynamometer

| Contra-Rotating Propeller Dynamometer | |
|---------------------------------------|---|
| Rated Capacity | IN/OUT SIDE THRUSTER 100 N IN/OUT SIDE TORQUE 5 N-m IN/OUT SIDE 1,500 rpm |

[CONTRA-ROTATING PROPELLER DYNAMOMETER]

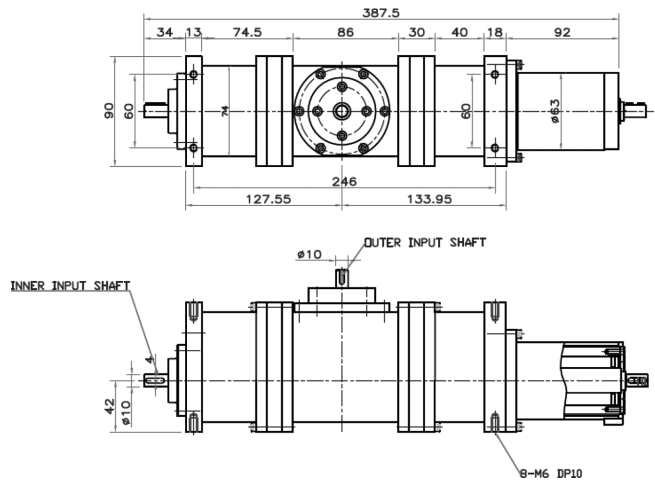


Fig. 7. Drawings of CR Dynamometer.

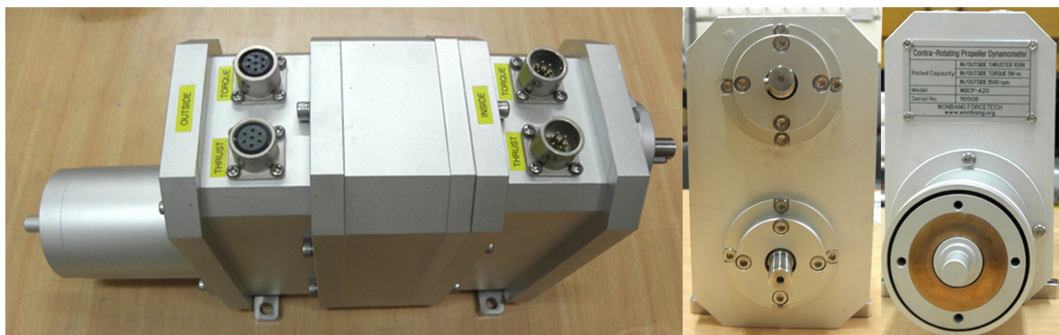


Fig. 6. Photographs of CR Dynamometer.

Table 4. Definition of non-dimensional coefficients

| Designation | Symbol | Definition |
|-----------------------|----------|--|
| Thrust Coefficient | K_T | $K_{T,Total} = \frac{T_f + T_a}{\rho \times n_a^2 \times D_f^4}$ |
| Torque Coefficient | K_Q | $K_{Q,Total} = \frac{Q_f \times n_f + Q_a \times n_a}{\rho \times n_a^3 \times D_f^5}$ |
| Advance Rratio | J_A | $J_A = \frac{V_A}{n_a \times D_f}$ |
| Open-water Efficiency | η_o | $\eta_{o,Total} = \frac{J_A + K_{T,Total}}{2 \times \pi \times K_Q}$ |

상은 Fig. 6에 사진으로, 주요 치수는 Fig. 7에 도면으로 보였다.

3.3 성능계수 무차원 정의

CRP는 전방과 후방 프로펠러의 회전수와 성능을 동시에 고려하여야 하며, 그 무차원 정의는 Min, Chang, Seo[2009]에 따라 Table 4에 명시하였다.

여기서 $T(N)$ 는 추력, $Q(N\cdot m)$ 는 토크, $D(m)$ 는 프로펠러의 직경, $n(s^{-1})$ 은 프로펠러의 회전 수, $V_A(m/s)$ 는 예인전차의 속도를 나타낸다. 아래첨자 f는 전방 프로펠러를 나타내고, a는 후방 프로펠러를 나타낸다.

4. 계산 및 모형시험 결과 비교

본 연구에서는 개발한 프로그램을 이용한 이론 해석과 모형시험을 통하여 도출된 결과를 비교 검증하였다. 모든 모형시험 자료는 ITTC 78 방법(15th ITTC Performance Committee[1978])을 이용하여 실선으로 확장된 결과이다. 전진비의 범위는 설계점($J=0.45$)을 포함하도록 정하였으며, 모형시험 결과와 비교하기 위해 모형시험을 수행하였을 때의 전진비와 동일한 값으로 수치해석을 수행하였다.

4.1 두 CRP의 단독특성

첫 번째 CRP에 대한 결과를 Table 5와 Fig. 8에 보였다. 수치해석 결과가 모형시험 결과보다 전체적으로 추력은 약간 크게, 토오크는 전진비가 0.4이상에서는 약간 작게 나타나고 있고, 특히 전진

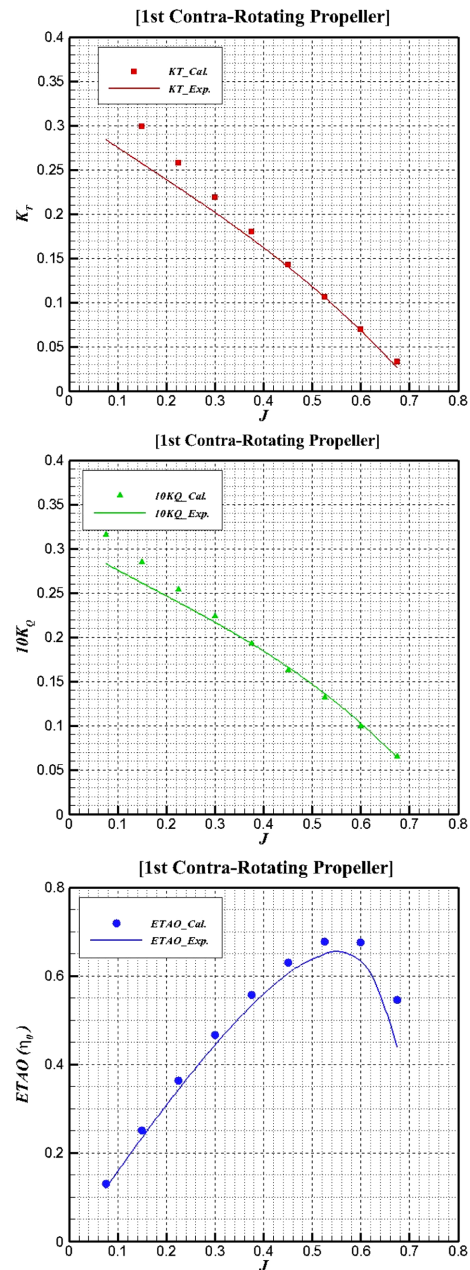


Fig. 8. Comparison of numerical analysis and model test for 1st CRP.

Table 5. Comparison of numerical analysis and model test for 1st CRP

| J | KT | 10KQ | ETAO | KT | 10KQ | ETAO | KT | 10KQ | ETAO |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| | (Cal.) | (Cal.) | (Cal.) | (Exp.) | (Exp.) | (Exp.) | (Diff.) | (Diff.) | (Diff.) |
| 0.075 | 0.3429 | 0.3156 | 0.1297 | 0.284 | 0.283 | 0.1198 | -17% | -10% | -8% |
| 0.15 | 0.2993 | 0.2845 | 0.2512 | 0.2568 | 0.261 | 0.2349 | -14% | -8% | -6% |
| 0.225 | 0.2576 | 0.2536 | 0.3638 | 0.2295 | 0.2392 | 0.3436 | -11% | -6% | -6% |
| 0.3 | 0.2189 | 0.2239 | 0.4667 | 0.2015 | 0.2167 | 0.444 | -8% | -3% | -5% |
| 0.375 | 0.1797 | 0.1927 | 0.5565 | 0.172 | 0.1926 | 0.533 | -4% | 0% | -4% |
| 0.45 | 0.1428 | 0.1623 | 0.6304 | 0.1403 | 0.1661 | 0.6052 | -2% | 2% | -4% |
| 0.525 | 0.1065 | 0.1314 | 0.6778 | 0.1059 | 0.1363 | 0.649 | -1% | 4% | -4% |
| 0.6 | 0.0701 | 0.0990 | 0.6761 | 0.068 | 0.1025 | 0.6335 | -3% | 4% | -6% |
| 0.675 | 0.0330 | 0.0650 | 0.5453 | 0.026 | 0.0637 | 0.4377 | -21% | -2% | -20% |

Table 6. Comparison of numerical analysis and model test for 2nd CRP

| J | KT | 10KQ | ETAO | KT | 10KQ | ETAO | KT | 10KQ | ETAO |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| | (Cal.) | (Cal.) | (Cal.) | (Exp.) | (Exp.) | (Exp.) | (Diff.) | (Diff.) | (Diff.) |
| 0.075 | 0.4035 | 0.4066 | 0.1185 | 0.3505 | 0.3857 | 0.1084 | -13% | -5% | -8% |
| 0.15 | 0.3592 | 0.3695 | 0.2321 | 0.3178 | 0.356 | 0.2131 | -12% | -4% | -8% |
| 0.225 | 0.3162 | 0.3345 | 0.3385 | 0.2853 | 0.326 | 0.3133 | -10% | -3% | -7% |
| 0.3 | 0.2744 | 0.2992 | 0.4378 | 0.2524 | 0.2954 | 0.408 | -8% | -1% | -7% |
| 0.375 | 0.2338 | 0.2638 | 0.5291 | 0.2189 | 0.2638 | 0.4954 | -6% | 0% | -6% |
| 0.45 | 0.1941 | 0.2279 | 0.6100 | 0.1844 | 0.2306 | 0.5727 | -5% | 1% | -6% |
| 0.525 | 0.1549 | 0.1913 | 0.6764 | 0.1484 | 0.1954 | 0.6345 | -4% | 2% | -6% |
| 0.6 | 0.1159 | 0.1537 | 0.7199 | 0.1106 | 0.1578 | 0.6692 | -5% | 3% | -7% |
| 0.675 | 0.0766 | 0.1146 | 0.7180 | 0.0705 | 0.1173 | 0.6461 | -8% | 2% | -10% |

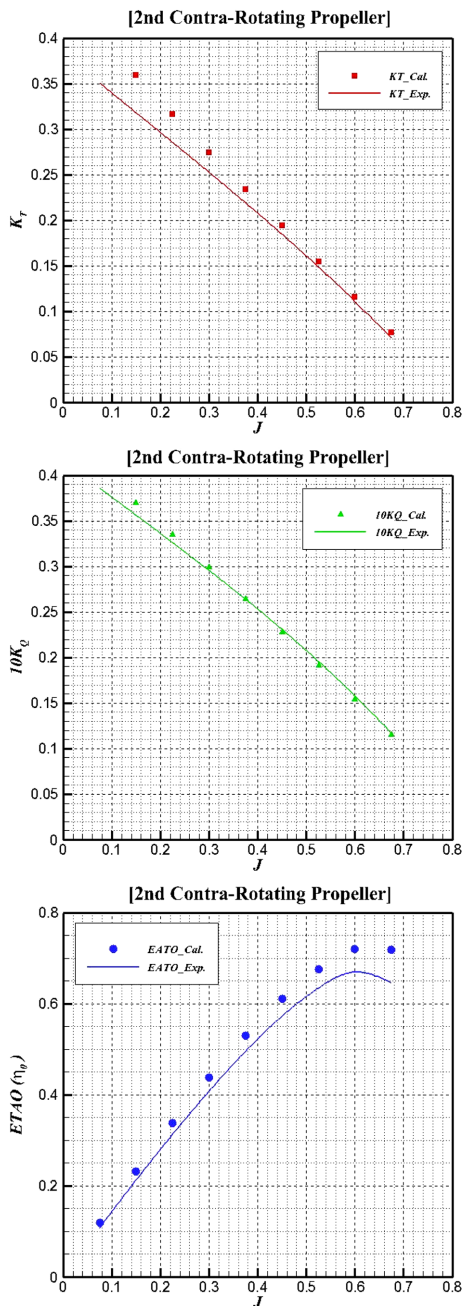


Fig. 9. Comparison of numerical analysis and model test for 2nd CRP.

비가 0.3이하 낮은 영역에서 오차가 다소 큼을 볼 수 있다. 오차는 다음과 같이 정의 한다.

$$Diff. = \frac{(Exp. - Cal.)}{Cal.} \times 100 \tag{9}$$

낮은 전진비에서는 날개의 받음각이 커지는 관계로 단 추진 프로펠러에서도 포텐셜 해석이 실험결과와 차이를 보이기도 하지만, 본 연구에서 적용되어진 반류모델이 단 추진 프로펠러에 적용되는 반류모델이기 때문에 발생하는 차이로도 생각되어지며, 개선이 필요한 부분이다. 결과적으로 효율은 전 영역에서 다소 크게 계산 값이 주고 있음을 확인 할 수 있고, 설계점(J=0.45)을 포함하는 대부분의 영역에서는 모형시험과 잘 일치함을 알 수 있다.

Table 6과 Fig. 9에 두 번째 CRP에 대한 계산과 실험 결과를 보였는데, 첫 번째 CRP와 유사한 경향을 보이고 있다. 설계점(0.45)을 기준으로 효율을 비교해 보았을 때는 1차 CRP가 2차 CRP보다 좀 더 높게 나타났으나 보다 명확한 성능 비교가 필요하다.

4.2 수치해석에 의한 효율 비교

전 절에서 상세히 비교된 두 CRP의 성능 특성을 명확히 구별 하자면 동일한 하중 조건 하에서 검토하는 것이 필요하다. 동일한 K_T/J^2 에서, 즉 0.7156인 점에서의 추력, 토오크 및 효율을 Table 7 과 Fig. 10에 보였는데, 두 번째 CRP에서 3.43%의 효율 개선이 이루어졌음을 확인 할 수 있다. 두 CRP의 오차는 다음과 같이 정의 한다.

$$Difference. = \frac{(2ndCRP - 1st CRP)}{1st CRP} \times 100 \tag{10}$$

Table 7. Comparison of propulsion efficiency using numerical analysis

| $K_T/J^2=0.7156$ | 1st CRP | 2nd CRP | Difference (%) |
|------------------|---------|---------|----------------|
| J | 0.4486 | 0.4959 | 10.54% |
| KT | 0.1435 | 0.1701 | 18.54% |
| 10KQ | 0.1628 | 0.2055 | 26.23% |
| ETAO | 0.6291 | 0.6507 | 3.43% |

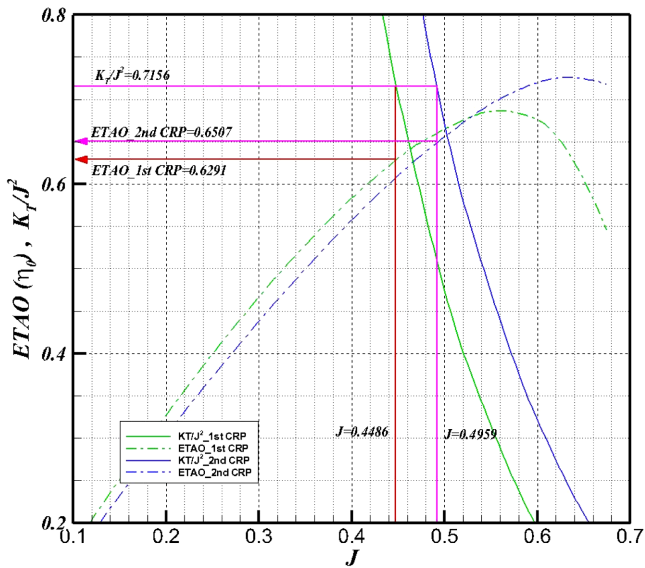


Fig. 10. Comparison of propulsion efficiency at the same.

5. 결 론

EEDI 개선을 목적으로 최근 관심이 고조되고 있는 상반회전 프로펠러의 분석을 위한 수치해법과 실험법을 정립하고 벌크선에 대해 제안된 두 세트의 CRP에 적용하여 그 유용성을 확인하였다. 수치해법은 포텐셜 기반의 보오텍스격자법을 바탕으로 한 것으로 낮은 전진비를 제외한 설계점을 포함하는 영역에서는 대체로 실험 결과와 일치하는 것을 확인 하였다. 효율 개선을 목표로 제안된 것으로 알려진 두 CRP간의 동일한 하중 조건에서의 비교를 통해 2차 CRP가 약 3.43% 효율 증가를 보이는 것으로 파악되었다. 다양한 CRP 연구에 본 기법을 적용하여 반류모델 등의 개선을 포함하는 발전이 필요하다고 판단된다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

[1] Cha, D.-R., 1992, "A Study on the Performance Prediction of Contra-Rotating Propellers", M.S. Thesis, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National Uni-

versity, Dajeon, Korea
 [2] Greeley, D.S. and Kerwin, J.E., 1982, "Numerical methods for propeller design and analysis in steady flow", Trans. SNAME, Vol. 90.
 [3] Hoshino, T., 1989, "Hydrodynamic analysis of propellers in steady flow using a surface panel method", J. of Soc. of Naval Arch. of Japan, Vol. 165, 55-70.
 [4] IMO, 2011. Mandatory energy efficiency measures for international shipping adopted at IMO environment meeting. [online] Available at: <http://www.imo.org/MediaCentre/PressBriefings/Pages/42-mepc-ghg.aspx> [Accessed 10 July 2013].
 [5] ITTC, 1978, "Report of the Performance Committee", Proceedings of 15th ITTC, Hague.
 [6] Jang, J.-Y., Kim, M.-C., Lee, W.-J., Mun, W.-J., Kim, D.-U., Kim, D.-J., 2012, "Study on the Self Propulsion Performance for the Contra-Rotating Propeller", Proceedings of the Annual Autumn Meeting, SNAK, Changwon, 15-16 November, 704-708.
 [7] Jung, R.-T., 2011, "Recent International Development on the Technical and Operational Measures of IMO's CO2 Emission Control From Ships", J. of KOSMEE, Vol. 14, No. 1, 65-71.
 [8] Kerwin, J.E., 1973, "Computer Techniques for Propeller Blade Section Design", International Shipbuilding Progress, Rotterdam, The Netherlands, Vol. 20, No. 227, 227-251.
 [9] Kerwin, J.E. and Lee, C.-S., 1978, "Prediction of steady and unsteady marine propeller performance by numerical lifting surface theory", Trans. SNAME, Vol. 86, 218-258.
 [10] Lee, J.-T., 1987, "A potential-based panel method for the analysis of marine propellers in steady flow", Ph.D. Thesis, Department of Ocean Engineering, M.I.T., Cambridge, Mass.
 [11] Min, K.-S., Chang, B.-J. and Seo, H.-W., 2009, "Study on the Contra-Rotating Propeller system design and full-scale performance prediction method", Inter J. of NAOE, Vol. 1, No. 1, 29-38.
 [12] Morino, L. and Kuo, C.-C., 1974, "Subsonic potential aerodynamic for complex configurations: a general theory", AIAA Journal, Vol. 12, No. 2, 191-197.
 [13] Paik, K.-J., Suh, S.-B. and Chun, H.-H., 2000, "Analysis of Contra-Rotating Propellers in Steady Flow by a Vortex Lattice Method", KSOE, Vol. 14, No. 2, 36-43.
 [14] SNAK, 2009, "Resistance and Propulsion of Ships", Jisungsa, 347-348.

2013년 10월 14일 원고접수
 2013년 10월 18일 심사수정일자
 2013년 10월 19일 게재확정일자