프로펠러 회전류에서 작동하는 방향타의 받음각 특성 연구

정재환¹·백동근¹·윤현식^{2,†}·김기섭³·백부근³

부산대학교 조선해양공학과¹

부산대학교 조선해양플랜트글로벌핵심연구센터²

한국해양과학기술원 선박해양플랜트연구소 해양운송연구부³

Study on the Angle-of-Attack Characteristics of the Rudder in Rotating Propeller Flow

Jae Hwan Jung¹·Dong Geun Baek¹·Hyun Sik Yoon^{2,†}·Ki-Sup Kim³·Bu-Geun Paik³

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University¹

Global Core Research Center for Ships and Offshore Plants, Pusan National University²

Marine Transportation Research Division, KIOST/ MOERI³

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

This study aims at numerically investigating the angle of attack characteristics of the rudder behind a rotating propeller. The rotating propeller of 5 blades and the full spade rudder are placed in the numerical water tunnel with a uniform flow condition to consider propeller-rudder interaction. The turbulence closure model is employed to simulate the three-dimensional unsteady incompressible viscous turbulent flow around the propeller and the rudder. The present numerical method are well verified by comparing with the experimental results. In order to identify the dependence of the angle of attack of the rudder on the rudder angle, a wide range of rudder angles is considered. The present study carried out the quantitative and qualitative analysis of the angle of attack in terms of the pressure distribution, streamlines and the evaluation of the flow incidence, resulting in that the angle of attack increases as we move from the root and the tip to the center of the rudder, regardless of the rudder angle. The distribution of the angle-of-attack along the span is strongly affected by rotating propeller flow and rudder angle. Consequently, the distribution of the angle-of-attack of the oncoming flow against the rudder leading edge plays a role in determination of rudder performance.

Keywords : Rudder(방향타), Angle of attack(AOA, 받음각), Propeller-rudder interaction(프로펠러와 타 상호작용)

1. 서 론

국제해사기구가 이산화탄소 총량 규제 제도인 '선박제조연비 지수(EEDI, Energy Efficiency Design Index)' 채택을 의무화 하면서 친환경 선박(green ship)에 대한 요구는 경제적 문제와 직결된 사항으로 부상하였다. 이에 따라 고효율, 고성능의 선박 개발이 필수사항으로 되었으며, 추진기와 방향타 또한 예외가 될 수는 없다. 과거, 선박의 조종성능을 좌우하는 방향타 관련 연구는 추진력을 발생시키는 프로펠러 개발연구에 비해 제한적으로 진행되어왔으나, EEDI 시행과 더불어 선박의 조종성능 상실로 인해 발생한 초대형 유조선의 사고로 환경문제가 대두되면서 조종성능 향상을 위한 방향타 성능개발 연구가 활발히 진행되어 오고 있다.

방향타 개발을 위한 연구로는 Min and Chung (2000)은 최적 방향타 설계를 위해 단면형상, 단면 최대두께의 위치 그리고 투영형상에 따른 성능 특성을 실험을 통해 확인하였으며, Boo, et

al. (2003)은 혼(semi-spade rudder)타 단면에 대하여 CFD 상용 프로그램인 FLUENT를 이용하여 2차원 점성유동해석을 수행하였다. 또 Seo, et al. (2010)과 Seo and Lee (2013)는 물체 표면에 접선방향으로 분사된 제트 유동이 물체표면에 밀착되어 흐르는 현상인 관다효과를 혼 타와 전가동타(full-spade rudder)에 각각 적용하여 수치계산 및 모형실험을 수행하였으며 그 결과, 양력 성능 개선에 큰 효과가 있는 것을 확인하였다.

앞서 언급한 연구들은 방향타 단독상태에 유동특성에 대한 연구들이다. 그러나 프로펠러 하류에 위치하는 방향타의 특성상, 방향타는 프로펠러 하류의 복잡한 회전류에 놓여 작동하게 되므로 방향타의 양, 항력 및 캐비테이션 특성을 연구하기 위해서는 프로펠러-타 상호작용 유동 특성의 이해와 이를 바탕으로 성능개발 연구를 수행하는 것이 필수적이다. 프로펠러-방향타 관한 실험 연구로, Molland and Turnock (1991)는 풍동 실험을 수행하였으며, Krachet (1992)는 예인 및 공동 수조에서 양력과 항력을 측정하여 프로펠러-타의 상호작용에 관한 연구를 수행하였다. 수

치해석연구로, Kim, et al. (2009)은 판넬법(panel method)을 이용, 프로펠러 상하 입사류가 다른 것에 착안하여 개발된 비대칭타의 최적 단면을 유전자 알고리즘을 통해 개발하였으며, Choi, et al. (2010)은 전가동타와 비대칭타의 유동특성과 속도성능을 수치적 방법으로 비교하고 실험으로 검증하였다. Kim and Lee (2011)는 선체-프로펠러-혼타의 연계 수치해석을 통해 관다 효과를 혼 타에 적용하여 양력 성능 개선이 있음을 확인하였다.

언급된 방향타 단독상태와 프로펠러-방향타 상호작용 연구들은 대부분 성능평가에 있어서 양력 및 항력 값과 방향타 표면의 압력 분포 그리고 방향타 주위 유선 등에 초점을 맞추었다. 본 연구에서는 방향타 설계 및 캐비테이션 제어에 활용하기 위하여 프로펠러-방향타 상호작용을 고려한 방향타 유입유동 받음각에 대하여 살펴본다. Paik, et al. (2011)는 중형 캐비테이션터널에서 설치된 프로펠러와 방향타의 주위 유동을 PIV를 이용하여 가시화 하였으며 이를 프로펠러의 변경별 위치에 대응하는 방향타의 각 섹션 위치에서의 유입류의 받음각을 산정하였다. 이러한 받음각 산정은 방향타의 길이(span) 방향에 따른 단면설계와 캐비테이션 발생 위치와 원인 파악에 유용한 자료가 될 것으로 소개하고 있다. 하지만 이와 관련한 연구는 저자들이 찾아본바, 거의 없는 것으로 판단되며 업계의 경우 기술보안을 위해 제한적으로만 공개하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 방향타의 성능을 결정짓는 중요 인자중 하나인 방향타 유입류의 받음각 특성을 연구하기 위해 프로펠러 회전류 속에 놓인 전가동타에 대하여 타각 변화에 따른 유입류의 받음각 특성 연구를 수행하였다.

2. 대상모형 및 해석조건

프로펠러 하류유동이 타각 변화 시 타와 타 주위에 미치는 영향을 연구하기 위해 본 연구에 사용된 대상 프로펠러와 방향타는 한국해양과학기술원(KIOST)에서 제공한 KP884과 R1이다. 프로펠러의 직경은 250mm, 날개 수는 5개, 그리고 설계 전진비는 0.62이다. 방향타는 전가동 타이며 상부, 중간부, 하부의 단면은 각각 NACA0020, NACA0019, NACA0018을 사용하였다. 프로펠러와 방향타 연계해석을 수행하기 위해서 한국해양과학기술원의 중형캐비테이션과 동일한 크기를 가지는 수치회류수조터널 내에 프로펠러와 방향타를 위치하였으며 설치 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 그리고 본 연구에서 고려된 해석 조건은 Table 1에 보는 바와 같다.

Fig. 1 Propeller and rudder arranged in the test section

Table 1 Test conditions

Advance ratio	0.62
Inlet velocity [m/s]	4.831
Speed of revolution [rps]	31
Propeller diameter [m]	0.250

3. 수치해석방법

3.1 지배방정식 및 수치해석방법

본 연구에서는 프로펠러와 러더 주위 유동을 수치해석 하기 위하여 유한 체적법에 근거한 범용 프로그램인 STAR-CCM+를 사용하였다. 본 연구에서 고려되어진 지배방정식은 3차원 비정상 비압축성으로써 연속(continuity) 방정식은 식(1)과 같으며, 난류유동을 해석하기 위하여 Navier-Stokes 방정식을 레이놀즈 평균한 방정식인 Reynolds averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식은 식(2)와 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i}(-\rho \overline{u_i' u_j'}) \\ & + \frac{\partial}{\partial t} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \left(\frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, ρ 는 유체의 밀도, t 는 시간, u_i 는 유속, p 는 압력, μ 는 유체 점성계수이다. 식 (2)의 $\overline{u_i' u_j'}$ 는 레이놀즈 응력(Reynolds Stress)항으로 본 연구에서는 $k-\omega$ SST 모델을 사용하여 해석하였다. 대류항(convection term)과 확산항에는 2차 상류 차분법과 2차 중심차분법을 각각 적용하였다.

프로펠러 회전류를 모사하기 위한 방법으로는 프로펠러를 직접 회전시키는 Sliding Mesh Method(SMM)를 적용하였다.

3.2 해석영역 및 경계조건

KP884-R1 연계 해석에서 고려된 격자수는 약 350만개이며 복잡한 형상을 가지는 프로펠러 주위 격자생성 방법으로 분할격자기법을 이용하였다. 프로펠러와 방향타의 표면에 위치하는 격자점의 첫 번째 위치는 $y^+ = 30$ 에 해당하는 위치를 고려하였으며 수치해석에 사용된 계산영역 및 경계조건은 Fig. 2와 같다. Fig. 2에 도시한 바와 같이 유체가 들어오는 입구영역에서 유체가 빠져나가는 출구영역까지의 거리는 $-2.4D \leq x \leq 8.0D$ 이며, 사각 회류수조 터널 형상을 고려하였다.

Fig. 2 Computational domain and boundary condition

3.3 수치해석방법 검증

3.3.1 KP505 단독 시험

본 연구에서 고려된 수치해석 기법을 검증하기 위해 공개 모델인 KP505에 대해 프로펠러 수치 단독시험을 수행하였으며 수치계산을 통해 얻어진 전진비에 따른 추력, 토크 그리고 단독 효율은 SRI(Ship Research Institute) 400m Towing tank에서 수행된 실험결과 (Fujisawa, et al., 2000)와 비교하여 Fig. 3에 도시하였다. 실험결과와 비교하여 전진비 1.0을 제외한 모든 구간에 추력계수와 토크계수는 각각 3~5%와 5~6%의 차이를 보인다. 전반적으로 실험결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 3 Comparison of thrust coefficient, torque coefficient and open water efficiency between experiment in SRI 400m towing tank and CFD(present) for KP505

3.3.2 KP884-R1 연계 시험

KP884-R1 연계 해석결과의 검증을 위해서 KIOST의 중형캐비

테이션터널에서 수행된 KP884-R1의 실험결과와 비교하여 Fig. 4에 도시하였다. 항력 및 양력 값에 대하여 본 연구의 수치결과 값들과 실험값들을 비교한 결과, 본 수치결과는 방향타 회전각 변화에 따른 방향타에 작용하는 타력을 전반적으로 잘 재현하는 것을 Fig. 4에서 확인할 수 있다.

(a)

(b)

Fig. 4 Comparison of (a) drag and (b) lift between experiment in medium-size cavitation tunnel and CFD(Present) for KP884-R1

4. 회전각, 입사각 및 받음각 정의

방향타 유입류의 받음각을 산정하기 위해서 방향타 회전각 그리고 유동의 입사각의 부호를 아래와 같이 정의하였으며 방향타의 회전각과 유동의 입사각의 상대 받음각을 정의하였다.

4.1 방향타 회전각 정의

방향타의 회전각(θ)을 Fig. 5에 정의하였다. θ 의 부호는 방향

타의 뒷날(trailing edge)이 좌현으로 회전하면 양으로 지정하고, 우현으로 회전하면 음으로 지정한다.

Fig. 5 Definition of sign convention for rudder angle (θ)

4.2 유동의 입사각 정의

방향타로 유입되는 유동의 입사각(α_f)는 아래의 식 (3)과 같이 정의되어지고, 이의 부호는 Fig. 6과 같이 지정되어진다. 즉, α_f 는 유동이 우현에서 좌현으로 유입되면 양의 부호를 가지고, 좌현에서 우현으로 유입되면 음의 값을 가진다.

$$\alpha_f = \tan^{-1} \frac{z - \text{velocity}}{x - \text{velocity}} \quad (3)$$

Fig. 6 Definition of inflow angle (α_f)

4.3 방향타 받음각 정의

식 (3)에서 정의되어진 유동의 입사각(α_f)과 Fig. 5에서 정의한 방향타의 회전각(θ)의 상호관계를 고려하여 실제 방향타의 받음각(angle of attack, α)을 산정할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 방향타의 받음각을 식 (4)과 같이 정의한다.

$$\alpha = \alpha_f - \theta \quad (4)$$

5. 해석결과

5.1 타각 변화에 따른 방향타 압력분포

방향타 회전각 변화에 따른 좌현과 우현의 방향타 표면에서의 C_p 분포를 Fig. 7과 8에 각각 정리하였다. 여기서, C_p 는 $(P - P_\infty) / (0.5 \rho V^2)$ 로 정의되며 P_∞ 는 유동 유입구의 평균 압력으로 하였다.

방향타 상부면에서는 시계방향(선미에서 선수를 바라볼 때)의 프로펠러 회전유동에 기인하여 회전각이 $\theta = 0^\circ$ 일 때, 좌현 쪽 방향타 면은 압력면(pressure side)으로, 우현 쪽 방향타 면은 흡입면(suction side)이 된다. 방향타가 양의 방향으로 회전할수록, 즉 양의 회전각이 증가될수록 ($\theta = 0^\circ \rightarrow \theta = 9^\circ$), 방향타 상부면에서 유입류의 받음각의 증가로 인해 압력면(상부면 좌현)의 압력은 상승하게 되고 흡입면(상부면 우현)의 압력은 감소하게 된다. 이와 반대로 방향타가 음의 방향으로 회전할 경우 ($\theta = 0^\circ \rightarrow \theta = -9^\circ$), 받음각의 감소로 인해 압력면의 압력은 감소하게 되고 흡입면의 압력은 증가하는 것을 Fig. 7과 8의 비교를 통해 관찰할 수 있다.

Fig. 7 C_p distributions of the rudder on the port side

Fig. 8 C_p distributions of the rudder on the starboard side

방향타 하부면에서는 상부면과 반대로 프로펠러 유기 회전유동에 기인하여 즉, 우현에서 좌현으로 유입되는 유동으로 인해 방향타 하부면의 좌현 쪽 방향타면이 흡입면으로, 우현 쪽 방향타면이 압력면으로 각각 형성되어진다. 방향타의 회전각이 양의 방향으로 회전할수록 ($\theta = 0^\circ \rightarrow \theta = 9^\circ$) 받음각 감소로 인해 압력면의 압력은 감소하게 되고 흡입면의 압력은 증가하게 된다. 방향타가 음의 방향으로 회전할 경우 ($\theta = 0^\circ \rightarrow \theta = -9^\circ$), 받음각의 증가로 인해 압력면의 압력은 증가하게 되고 흡입면의 압력은 감소하게 되는 것을 Fig. 7과 8의 상세한 관찰을 통해 확인할 수 있다. 특히, 회전방향에 관계없이 방향타의 앞날(leading edge) 부근에서 회전각에 따른 압력변화가 가장 크게 일어난다.

결론적으로, 이러한 본 연구의 결과들은 선행연구들에서 규명되어져 있는 방향타 회전각에 따른 방향타 표면에서의 압력변화를 잘 재현함을 확인할 수 있다.

5.2 타각 변화에 따른 방향타 단면별 C_p 분포 및 유선

앞 장에서는 방향타 전체 표면에 작용하는 C_p 분포를 살펴보았다면, 본 장에서는 프로펠러 반경 위치에 해당하는 방향타 단면별 (x - z 평면) C_p 및 유선 분포를 고찰하고자 한다. 지면수를 고려하여 대표적으로 $\theta = 0^\circ, 6^\circ, -6^\circ$ 에 대해서만 방향타 단면별 C_p 및 유선 분포를 살펴본다. x - z 측정 단면 위치 및 좌표계에 대한 정의는 Fig. 9에 나타내었다.

Fig. 9 x-z measurements and coordinate system

5.2.1 타 회전각 $\theta = 0^\circ$

Fig. 10은 회전각이 $\theta = 0^\circ$ 일 때, 방향타 단면별 C_p 와 유선 분포를 보여준다. 방향타 상부면에 해당하는 방향타 단면 (1.0R~0.3R)들의 경우, 단면 위치에 관계없이, 시계방향의 프로펠러 회전유동으로 인해 방향타로의 유입 유동은 좌현에서 우현으로 진행되는 음의 방향 입사류 (Fig. 5 참조)를 가진다. 이로 인해 좌현과 우현 쪽 방향타면이 각각 압력면과 흡입면으로 정의된다. 유동의 입사각(α_f)은 방향타의 상부(root) 부근(1.0R)에서 방향타 중심 근처(0.3R)로 이동할수록 점점 증가하여, 단면 위치별로 영향을 미친다. 결과적으로, 방향타 상부면과 비교하여 방향

타 중심부근의 단면들에서 압력면과 흡입면의 C_p 분포의 차이가 상대적으로 증가함을 관찰 할 수 있다.

방향타 하부면에 해당하는 방향타 단면들(-0.3R~-1.0R)을 관찰해 보면, 우현에서 좌현으로 유입되는 유동, 즉 양의 방향 입사류로 인해 우현과 좌현의 하부 방향타면은 압력면과 흡입면으로 각각 정의될 수 있으며, 방향타의 날개 끝(tip)에서 중심 부근으로 갈수록 유동의 입사각이 증가하여 압력면과 흡입면의 C_p 분포의 차이가 관찰되는 것을 Fig. 10을 통해 관찰 할 수 있다.

Fig. 10 Distributions of C_p & streamlines in x - z plane at $\theta = 0^\circ$

5.2.2 타 회전각 $\theta = 6^\circ$

양의 회전각이 증가될수록 ($\theta = 0^\circ \rightarrow \theta = 6^\circ$), 방향타 상부면에서의 음의 받음각은 증가하게 되며, 이로 인해 압력면(상부면 좌현)의 압력은 상승하게 되고 흡입면(상부면 우현)의 압력은 감소하게 된다. 따라서 양의 방향으로 회전각이 증가하게 됨에 따라, 방향타 상부면에서는 단면의 위치에 관계없이 압력면과 흡입면의 C_p 분포의 차이가 더 커짐을 Fig. 10과 11의 비교를 통해 관찰 할 수 있다. 방향타 하부면의 경우, 양의 회전각이 증가될수록 ($\theta = 0^\circ \rightarrow \theta = 6^\circ$), 양의 받음각이 감소하게 되어 단면 위치에 관계없이 압력면(하부면 우현)과 흡입면(하부면 좌

현)의 C_p 차이는 감소하게 되고, 특히 방향타의 날개 끝으로 갈수록 압력면과 흡입면의 압력차이가 작아지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 11 Distributions of C_p & streamlines in x - z plane at $\theta = 6^\circ$

5.2.3 타 회전각 $\theta = -6^\circ$

음의 회전각이 증가될수록 ($\theta = 0^\circ \rightarrow \theta = -6^\circ$), 방향타 상부면에서의 받음각은 감소하게 되어 압력면(상부면 좌현)과 흡입면(상부면 우현)의 C_p 차이는 단면에 관계없이 감소하게 되는 것을 Fig. 10과 12의 비교를 통해 관찰할 수 있다. 방향타 하부면의 경우, 음의 회전각이 증가될수록 ($\theta = 0^\circ \rightarrow \theta = -6^\circ$) 받음각은 증가하게 되며, 이로 인해 압력면(하부면 우현)의 압력은 상승하게 되고 흡입면(하부면 좌현)의 압력은 감소하게 된다. 결과적으로, 방향타 하부면에서는 음의 방향으로 회전각이 증가하게 됨에 따라, 압력면과 흡입면의 C_p 분포의 차이가 더욱 더 커지는 것을 Fig. 10과 12의 비교를 통해 확인할 수 있다. 방향타 날개 끝 부근에 해당하는 단면(-1.0R)의 C_p 분포를 관찰해보면 방향타 날개 끝 보오텍스(tip vortex)로 인해 방향타 하류에 국부적으로 낮은 음압이 존재하는 것을 알 수 있다.

5.3 방향타 회전각 변화에 따른 y/D 의 위치별 방향타 받음각 분포

방향타 회전각(θ) 변화에 따른 y/D 의 위치별 방향타 받음각(α) 분포를 Fig. 13에 나타내었다. 이 때 얻어진 α 는 식 (4)로 정의된다. y/D 에 따른 α 의 변화를 살펴보면, 타각에 관계없이 전반적으로 $y/D=0.5(1.0R)$ 에서 $y/D=0.15(0.3R)$ 로 갈수록 음의 α 는 증가하며, $y/D=-0.5(-1.0R)$ 에서 $y/D=-0.15(-0.3R)$ 로 갈수록 양의 α 는 증가한다.

Fig. 12 Distributions of C_p & streamlines in x - z plane at $\theta = -6^\circ$

즉, 방향타 중심 근처로 갈수록 받음각이 증가하는 경향이 나타남을 Fig. 13을 통해 확인할 수 있다. 이는 이미 Fig. 10, 11와 12을 통해 관찰되었던 바 있으며 방향타의 타입과 형상은 다르지만 Paik, et al. (2011)의 실험결과에서도 동일한 경향이 나타나는 것을 확인하였다. 방향타 길이 방향으로 방향타 중심 부근에 다가갈수록 받음각이 증가하는 현상은 프로펠러의 기하학적 형상으로 인한 것인지 허브에서 발생하는 허브 보오텍스에 의한 영향인지 판단이 어려우며 이에 관한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 13 Distributions of AOA(α) according to θ

즉, θ 가 양의 방향으로 증가할 때 방향타 상부면의 받음각 증가로 방향타 하부면보다 상부면에서 더 큰 양력이 작용할 것을 추정할 수 있으며, 반대로 θ 가 음의 방향으로 증가할 때 방향타 하부면의 받음각 증가로 방향타 상부면보다 하부면에서 더 큰 양력이 발생할 것을 예상할 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 방향타의 성능을 결정짓는 중요 인자중 하나인 방향타 유입류의 받음각 특성을 연구하기 위해 프로펠러 하류유동에서 작동하는 전가동타의 타각 별 받음각 특성 연구를 수행하였다. 이로부터 다음의 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 방향타 회전각 변화에 따른 방향타 표면의 압력 분포는 프로펠러 회전류의 특성에 의존함을 확인할 수 있었으며, 선행연구들에서 규명되어져 있는 방향타 회전각에 따른 방향타 표면에서의 압력 특성과 잘 일치함을 확인할 수 있었다.
- (2) 타각 변화에 따른 방향타 단면 별 압력계수 및 유선 분포를 관찰하였다. 타각이 양의 방향으로 증가 시 방향타의 하부면보다 상부면에서 받음각 증가로 인해 방향타 상부면에서의 압력면과 흡입면의 압력 차이가 크게 나는 것을 확인할 수 있고 타각이 음의 방향으로 증가하면 방향타 하부면에서의 방향타 단면 압력차이가 상부면보다 크게 나는 것을 관찰하였다. 또, 타각 변화에 관계없이 타의 중심 부근으로 갈수록 유동의 입사각이 증가하여 압력면과 흡입면의 압력 차이가 뚜렷이 관찰되는 것을 확인할 수 있었다.
- (3) 타각 변화에 따른 방향타 단면 위치별 방향타 받음각(α) 분포를 산정하였다. 그 결과 타각에 관계없이 방향타 중심 근처로 갈수록 받음각이 증가하는 것을 관찰하였으며, $\theta = 0^\circ$ 일 때의 α 를 기준으로, 타각이 양의 방향으로 증가할 때 방향타의 단면 위치별 α 는 전반적으로 음의 방향으로 증가하

고 타각이 음의 방향으로 증가할 때 α 는 양의 방향으로 증가하는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부 산업원천과제인 “친환경 추진기 캐비테이션 제어기술 개발 (10033689, 저전동고효율 추진기 및 방향타 개발 기술)”의 일환이며 지원에 감사드립니다. 또한, 이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0030013).

References

- Boo, K. Han, J. Song, I. & Shin, S., 2003. Viscous Flow Analysis for the Rudder Section Using FLUENT Code. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 40(4), pp.30-36.
- Choi, J.E. Kim, J.H. Lee, H.G. & Park, D.W., 2010. Hydrodynamic Characteristics and Speed Performance of a Full Spade and a Twisted Rudder. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(2), pp.163-177.
- Fujisawa, J. Ukon, Y. Kume, K. & Takeshi, H., 2000. Local Velocity Field Measurements around the KCS Model in the SRI 400m Towing Tank. *Ship Performance Division Report No. 00-003-02*, The Ship Research Institute of Japan: Mitaka.
- Kim, D.D. & Lee, Y.G., 2011. A Study on the Interaction between Hull-Propeller and a High-Lifting Horn-type Rudder. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(4), pp.346-356.
- Kim, I.H. Kim, M.C. Lee, J.H. Chun, J.H. & Jung, U.H., 2009. Study on Design of a Twisted Full-Spade Rudder for a Large Container Ship by the Genetic Algorithm. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 46(5), pp.479-487.
- Kracht, A. M., 1992. Ship-propeller-rudder interaction. *Proceedings 2nd International Symposium on Propeller and Cavitation*, Hangzhou, China, Sep 1992. pp.145-153
- Min, K.S. & Chung, K.N., 2000. Experimental Study for the Optimum Rudder Design. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 37(2), pp.88-99.
- Molland, A.F. & Turnock, S.R., 1991. *Wind Tunnel Investigation of the Influence of Propeller Loading on Ship Rudder Performance*. Ship Science Report No. 46, London.: The Royal Institution of Naval Architects.

- Paik, B.G. Kim, K.S. Kim, K.Y. Kim, G.D. & Park, Y. H., 2011. PIV Measurements of Rudder Inflow Induced by Propeller Revolution in Hull Wake. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(2), pp.128-133.
- Seo, D.W. Oh, J. & Lee, S.H., 2010. A Study for Improvement of Lift Performance of a Horn-type Rudder with the Coanda Effect. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(4), pp.543-552.
- Seo, D.W. & Lee, S.H., 2013. A Study to Improve the Lift Performance of a Full Spade Rudder with the Coanda Effect. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(1), pp.25-32.

정재환

백동근

윤현식

김기섭

백부근