선체-프로펠러와 고양력 혼타의 상호작용에 관한 연구

김두동¹·이영길^{2,†}

인하대학교 대학원 조선해양공학과¹

인하대학교 기계공학부 조선해양공학전공²

A Study on the Interaction between Hull-Propeller and a High-Lifting Horn-type Rudder

Doo-Dong Kim¹·Young-Gill Lee^{2,†}

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Graduate School, Inha University¹

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University²

Abstract

Rudder is to be located in extremely complicated flows generated and disturbed behind a hull and a propeller in operation. In order to estimate the rudder efficiency, it is quite important to investigate the disturbed flows due to the interaction under the hull-propeller and rudder condition. The purpose of the present research is to investigate the interaction between the hull-propeller and a high-lifting horn-type rudder through both numerical computations and experiments. A horn-type rudder implementing the Coanda effect of USB (Upper Surface Blowing) type is selected for its high efficiency of lifting force, and a 1/85 scaled model of 47K PC(Product Carrier) is manufactured for the purpose of the model test. The forces acting on the rudder during the experiment are measured using a three-component force gauge. Both cases are investigated in the hull-propeller-rudder condition and rudder open-water condition, which confirms that the flows generated under the former condition is considerably different from that of the latter condition.

Keywords : Interaction(상호간섭), Coanda effect(관다효과), Horn-type rudder(혼-타), Model test(모형시험), CFD(전산 유체 역학)

1. 서론

전 세계적으로 환경에 대한 관심이 증대되면서 VLCC(Very Large Crude oil Carrier), 살물선(bulk carrier)과 같은 저속 비대선의 조종성능에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 국제해사기구(IMO)에서는 초대형 유조선의 사고에 의한 해양오염을 방지하기 위하여 선박의 조종성능이 일정한 수준 이상 될 것을 요구하고 있어, 고양력을 발생시킬 수 있는 타 개발의 필요성이 고조되고 있다.

선박용 제어판이 고양력을 얻기 위한 방법으로는 타 면적을 증가시키는 방법이 있지만, 이는 공간적인 설치상의 한계가 있다(Boo, et al., 2004). 따라서 고양력 타를 개발하기 위하여 새로운 방법에 대한 연구가 필요하게 된다. 제어판에 고양력을 발생시킬 수 있는 방법 중 하나는 관다효과를 응용하는 방법이 있으며, 이는 순환제어(circulation control)방식과 USB(Upper Surface Blowing)방식을 이용한 경계층 제어로 양력을 증가시킬 수 있다. 특히 USB를 이용한 경계층 제어란 물체 표면의 접선방향으로 분출된

고속의 유동이 물체표면을 따라 진행하면서 그 주위에 형성된 낮은 압력 분포가 유선을 물체표면에 더욱 밀착시켜 박리되지 않고 표면을 따라 잘 흘러가게 함으로써 양력을 증가시키는 현상을 뜻한다(Seo, et al., 2008).

관다효과는 항공분야에서 많은 연구가 이루어진 바 있으며, 최근에는 선박분야에서의 연구가 활발하다. Ahn and Kim (1999, 2003)은 관다효과를 선박의 타 장치에 적용한 실험적 연구를 수행하여, 관다효과를 응용한 플랩 타를 설계하고, 물 제트 분사량과 플랩각의 조합에 따라서 최대 160% 까지 양력이 증가됨을 확인하였다. 수치적 연구로는 2차원 순환 제어에 따른 날개 주위의 점성 유동을 해석하여 선박해양분야에 적용하기 위한 기초적 연구를 수행한 바 있다(Park & Lee, 2000). 최근에는 효율적인 관다 타 형상을 선정하기 위하여 제트 노즐의 변화에 따른 관다효과를 수치계산으로 해석한 연구가 수행되었으며(Seo, et al., 2008), 표면 근처에서의 경계층 유동 특성 및 앞날 정체점의 위치변화 등을 조사하고, 수치계산과 타 단독 모형시험을 이용한 고양력 타의 실선 적용 가능성을 검토한 연구가 수행되어졌다(Seo, et al., 2010).

선박의 타는 선체와 프로펠러로 인하여 교란된 유동장 내에 위치하고 있기 때문에 타의 성능을 평가하기 위해서는 선체-프로펠러-타의 상호작용을 고려한 연구가 필요하다. 이와 관련된 연구로, Boo, et al. (2004)은 체적력 분포법을 사용하여 선체-추진기-타를 고려한 수치유동해석 결과와 모형시험 결과를 비교함으로써 수치해석방법의 가능성을 보여준 바 있으며, Paik, et al. (2008)은 프로펠러 및 선미반류에 의해 영향을 받는 혼타의 실험적 연구를 수행하여, 프로펠러 후류에 위치한 타에서 캐비테이션이 감소됨을 증명한 바 있다. Carlton, et al. (2009)은 선체와 프로펠러의 후류가 고려된 타의 형상 변화에 따른 양·항력성능을 수치적으로 파악함으로써 타 형상 결정을 위한 기초 자료를 마련하였다. Choi (2004)는 선체-프로펠러와 고양력 타 장치의 저속 비대칭 모형에 적용하여 저속 영역에서 관다에 의한 양력증가를 실험을 통하여 확인한 바 있다. 한편, 선주의 선회도 등 여러 가지 요인에 의해 혼타를 선정해야 하는 경우가 많음에 착안하여, 본 연구에서는 선체와 프로펠러로 인하여 교란된 유동장 내에 위치한 관다 혼타에 대한 연구가 필요하게 되었다.

본 연구에서는 고양력 혼타의 성능연구에 있어서 선체-프로펠러와의 상호작용에 관한 연구를 수행하였다. 타의 고양력 발생을 위해서는 USB방식에 의한 관다효과를 응용하였다. 그리고 관다효과가 적용된 타의 성능을 모형시험을 통하여 평가하기 위해 축척비 1/85의 47K급 PC선에 대한 모형선을 제작하였으며, 타 단독, 선체와 타, 선체-프로펠러와 타의 실험 및 부분적인 수치계산을 수행하였다.

2. 실험 및 계산방법

2.1 대상 모형

고양력을 발생시킬 수 있는 타 장치를 채용하여 배의 조종성능 향상에 효과적으로 활용할 수 있는지를 알아보기 위하여 실적선 자료를 보유하고 있는 47K PC 모형과 타를 1:85의 축척으로 제작하였다. 프로펠러는 제작의 어려움으로 인하여, 실제 47K PC에 사용되는 프로펠러와 직경, 날개수가 동일한 프로펠러의 모형을 구입하여 실험에 사용하였다. 모형의 주요요목은 Table 1과 같다.

2.2 실험조건

본 연구의 목적은 선박의 저속 운항 시 높은 조종성능을 확보하기 위하여 타 장치의 양력성능을 향상시켰을 경우, 선체-프로펠러와 타의 상호작용을 파악하는데 있다. 저속 운항 상태의 한 예로 항구를 드나들 때의 저속상태를 가정하고, 모형시험 시에는 인하대학교 선형시험수조의 예인전차가 신뢰성을 가질 수 있는 속도범위를 고려하였다. 특히, 상호작용효과의 정량적 비교를 위하여, 선체-프로펠러-타의 실험과 타 단독실험에서, 타로 유입되는 평균유속을 동일하게 하였다. 선체와 프로펠러가 있는 경우의

후류평균속도는 수치계산을 이용하여 산출되었으며, 산출시 X방향 위치는 타의 앞날이며, 그 종방향 위치에서의 yz평면에서 폭은 프로펠러의 직경이고, 깊이는 타의 span에 해당하는 면적에서 X방향 속도성분을 평균하여 산출하였다. 고양력을 발생할 수 있는 타는 Seo, et al. (2010)의 연구를 참고하여 제작하였다. 타 단독 시험 시 물수깊이는 Molland and Turnock (2007)의 실험을 참고하여 타 높이의 1배로 하였으며, Fig. 1과 같다.

Table 1 Principal dimensions of the hull, propeller and rudder of the 47K PC

Hull	
Scale ratio	1/85
L_{WL} (m)	2.093
Breadth (m)	0.379
Depth (m)	0.225
draft (m)	0.129
WSA (m^2)	1.112
DISV (m^3)	0.079
C_B	0.790
Propeller	
No. of blade	4
Diameter (m)	0.07
Rudder	
Section	NACA-0020
Mean chord (m)	0.066
Span (m)	0.097

Fig. 1 Jet blowing system for the model test

2.3 계산조건

본 연구에서 실험으로 파악하기 힘든 물리적 현상에 대하여는 수치계산을 이용하였으며, 그 결과를 실험결과와 함께 유동 및 성능해석에서 참고하였다. 조건은 선형시험수조에서 수행된 실험과 동일하며, 상용 프로그램인 Fluent 6.3.26을 사용하였다. 난류모델에는 Realizable $k-\epsilon$, 대류항계산에는 QUICK scheme, 속도-압력 연성계산에는 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다. 또한 완화계수 값으로 압력에 대해서는 0.3, 운동량에 대해서는 0.7, 난류에 대해서는 0.5를 적용하였다.

3. 검증 실험

Table 2는 인하대학교 선형시험수조와 회류수조의 검증실험 조건이다.

Table 2 Conditions for the verification tests

	IUCWC	IUTT
Scale	1:21.4	1:85
Section	NACA-0020	
Mean Chord (m)	0.261	0.066
Span (m)	0.387	0.097
R_n	1.4×10^5	3.3×10^4

*IUCWC : Inha University Circulation Water Channel,
IUTT : Inha University Towing Tank

본 연구에서 사용된 타 모형의 평균 코드길이는 0.066m, 스패 길이는 0.097m로 모형의 크기가 매우 작다. 따라서 본 실험의 신뢰도를 높이기 위하여, 인하대학교 회류수조에서 조금 큰 모형에 대하여 수행된 바 있는 타 단독실험의 결과(Seo, et al., 2010)와 검증실험을 수행하였다.

Fig. 2 Comparison of the lift coefficients from experimental results in IUCWC and IUTT

Fig. 2는 검증 실험의 결과를 보여주고 있다. 두 실험에서 양력이 증가하는 경향은 정성적으로 유사하지만 회류수조의 결과 값 보다 선형시험수조의 값이 좀 작은 것으로 확인되었다. 이와 같은 차이는 회류수조의 실험은 타의 윗 단면이 수조 내측윗면에 수직으로 붙어있기 때문에 타의 윗면에서 3차원 효과가 상대적으로 작으며, 또한 두 실험의 레이놀즈수 차이에 의한 영향에 기인한 것으로 판단된다. 두 실험 모두 25도 부근에서 실속이 발생하였다.

4. 제트 모멘텀 계수 결정

관다효과를 얻기 위하여, 타 표면의 접선방향으로 물 제트를 분사할 때 물 제트의 양은 제트 모멘텀 계수(C_j)를 기준으로 결정하였다. 이때, 제트 모멘텀 계수는 식 (1)과 같이 정의된다. 여기서 $\dot{m}$ 은 물 제트 분사 슬릿에서 단위시간당 빠져 나오는 질량유량(Kg/s), V_{jet} 는 출구를 통해 빠져나가는 유동의 평균유속이며, ρ 와 V_∞ 는 타로 유입되는 유체의 밀도와 속도를 각각 나타낸다.

$$C_j = \frac{\dot{m} V_{jet}}{\frac{1}{2} \rho S V_\infty^2} \quad (1)$$

V_∞ 에 대하여, 본 연구에서는 실험조건(타 단독, 선체-타, 선체-프로펠러-타)에 따라 타로 유입되는 유속을 달리하여 적용하였으며, 이는 수치계산을 이용하여 산출하였다. 선체-타의 경우, 선체 반류속도의 산출시 X방향의 위치는 타의 앞날위치이며, YZ평면에서 타각 35도(실험 시 타의 최대각도)일 때 타의 종방향 투영 폭과 타의 스패길이 내에서의 속도를 평균하여 산출하였다. 선체만 있는 경우의 평균유속은 0.299m/s이며 선속 0.5m/s보다 약 40% 감소하였다. 또한 선체와 프로펠러가 있는 경우의 후류속도 산출시 X축 방향 위치는 타의 앞날위치이며, YZ평면에서 폭은 프로펠러 직경, 길이는 타의 스패길이에 해당하는 면적을 평균하여 산출하였다. 선체와 프로펠러가 있는 경우의 평균유속은 0.55m/s이며 선속 0.5m/s보다 10% 증가하였다.

Fig. 3 Comparison of the increase rates in various jet momentum coefficients and experiment conditions

한편, 가장 효율적인 제트 모멘텀 계수를 도출하기 위하여 실험을 수행하였다. 타 장치의 예인속도와 물 제트 분사장치의 조건 등을 고려하여 C_j 는 0, 0.035, 0.07, 0.1, 0.15인 5 가지의 경우와 타각10도와 20도에서 관다효과에 의한 타의 양력 증가율을 확인 하였다. 그 결과 Fig. 3에 보이는 바와 같이 양력 성능이 향상되는 것을 확인 할 수 있다. 타 단독의 경우에는 $C_j = 0.1$, 타각 10도와 20도에서의 양력성능은 각각 43%와 21% 증가되는 것을 확인 할 수 있으며, 선체 반류의 영향을 받은 타의 경우의 양력성능은 각각 20%와 10% 증가되는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 선체와 프로펠러로 인한 교란된 유동장 내에 타가 위치한 경우의 양력성능은 각각 21%와 14% 증가되는 것을 확인 할 수 있었다. 3가지의 모든 실험조건에서 $C_j = 0.1$ 부근까지는 C_j 에 따른 양력성능의 증가율이 상대적으로 크게 나타났으나, $C_j > 0.1$ 인 영역에서는 양력 증가율이 상대적으로 작게 확인되었다. 따라서 제트 분출 시 사용되는 펌프의 용량과 양력증가율을 고려하였을 때, $C_j = 0.1$ 이 가장 효율적인 것으로 판단된다.

5. 실험 및 계산결과와 고찰

선체-프로펠러와 관다효과를 응용한 타의 상호작용을 파악하기 위하여 실험 및 수치계산을 수행하였다. 관다효과로 인한 양력증가의 정량적 비교는, 타 단독상태와 선체-프로펠러-타 상태에서, 타로 유입되는 유입류의 평균 유속을 동일하게 하였다.

5.1 타 단독

관다효과가 응용된 타의 자체만의 성능을 확인하기 위하여 타 단독실험을 수행하였다. 예인속도는 선체-프로펠러의 평균 후류속도인 0.55m/s, 제트 모멘텀 계수는 $C_j = 0.1$ 이며, 흡입구의 유무를 고려한 실험을 함께 수행하였다. Fig. 4의 항력계수는 0도 근처에서 최소값을 나타냈으며, 타각이 커질수록 증가폭도 증가하였다. 또한 물 제트를 분사하였을 때는 항력이 감소하는 경향을 보이며, 받음각이 커지면서 그 경향은 감소하고 있다. 물 제트 분사 시 항력이 감소하는 원인으로는 분사된 물 제트에 의하여 타에 추력효과를 주게 되어 항력이 감소한 것으로 해석된다.

Table 3은 관다효과 적용 전 양력계수를 기준으로 물 제트를 분사만 할 경우와 물 제트의 분사와 흡입을 동시에 할 경우의 양력증가율과 항력감소율을 나타내었다. 물 제트의 분사와 흡입이 동시에 이루어지는 경우에는 분사만 할 때보다 항력감소율이 더 작게 확인 되었다. 그 원인으로는 타의 앞날에 위치한 물 제트 흡입구에서 빠른 속도로 유체를 흡입할 때, 엘보(elbow) 형태를 가지고 있는 흡입관내부가 유체의 유동방향을 바꾸는 과정에서 흡입관내에 항력이 발생될 것이라 예상되며, 수치계산을 이용하여 그 값을 추정하였다.

Fig. 4 Comparison of the lift and drag coefficients in the w/ and w/o jet conditions of experiment (Rudder open water)

Table 3 Increase rate of the lift and drag at various rudder angles by using water jet or water jet with suction in experiment (Rudder open water)

Rudder angle (deg.)	Lift force(%)		Drag force(%)	
	water jet	water jet +suction	water jet	water jet +suction
5	52.4	51.2	-48.6	-30.6
10	41.8	42.2	-31.3	-18.8
15	33.7	34.4	-24.9	-17.2
20	24.5	25.8	-10.4	-4.6
25	15.8	14.3	-4.7	-2.3
30	12.7	12.5	-3.9	-0.6
35	11.9	12.3	-1.1	-0.5

Fig. 5 CFD solution : Pressure distribution in the water suction pipe

엘보 형태의 흡입관에 발생하는 항력을 정확히 추정하기 위하여 Fig. 5와 같은 실험장치의 전체형상을 구현해야 하지만 형상구현의 어려움으로 인하여 엘보 형태의 흡입관만을 고려하여 수치계산하였다. 그 결과 엘보 흡입관의 항력계수($C_{D(elbow)}$)는 0.011로, 타각 10도에서 전체 항력계수의 약 16%, 타각 20도에서는 전체 항력계수의 약 6%에 해당하는 것으로 확인되었다. 따라서 실제 판다 타 설계 시 흡입관 경로에 의한 추가적인 항력이 발생하지 않도록 주의해야 할 것으로 판단된다.

Fig. 4에서 판다효과로 인한 양력계수는 전 영역에서 증가하는 경향을 보였으며, 타각 10도에서 42% 증가, 20도에서 24%의 증가를 확인하였다. Table 3에서 흡입과 분출을 동시에 하는 경우와 분출만 하는 경우의 양력증가율의 차이는 약 3% 미만으로 물제트 흡입으로 인한 양력성능의 변화는 크지 않음을 알 수 있다. 또한 Table 3에서 타각이 커짐에 따라 양력 증가율이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 타 흡입면의 접선방향으로 분사되는 물제트가 타각이 커질수록 타의 표면을 따라 흐르지 못하면서 양력증가율과 타의 각도가 반비례하는 것으로 판단된다. 타각 25도 부근에서는 판다효과와 상관없이 실속이 발생되었으며, 타각 35도 부근에서는 양력이 다시 증가하는 경향이 나타났다. 이러한 재 양력 발생에 대한 원인을 파악하고자 수치계산을 이용하였다. 계산 영역은 코드(C)를 기준으로 $-3 \leq x/C \leq 5$, $-4 \leq y/C \leq 4$, 깊이는 타의 스펀(S)을 기준으로 $-4 \leq z/S \leq 1$ 로 연장하였으며, 계산에 사용된 총 격자수는 약 130만개, Y^+ 는 200이하로 하였고, 계산에 사용된 격자계는 Fig. 6과 같다.

Fig. 6 Three-dimensional grid system for the numerical computation of rudder open-water condition

Fig. 7은 수치계산과 선형시험수조에서의 실험결과다. 수치계산에서도 타각 25도 부근에서 실속이 발생하였고, 35도 부근부터 양력이 증가하는 경향이 확인되었다. 두 결과 값의 오차는 7%이하로 확인되었다. 양력 재 발생의 원인을 파악하고자 Fig. 8과 같이 타의 윗부분(horn part)과 아랫부분(spade part)으로 영역을 분리하였고, 각 영역의 2차원 단면(Section A, B)을 선정하여 타 단면 주위의 유동특성을 파악하였다.

Fig. 9(Section A)의 모든 타각(25, 30, 35, 40도)에서 흡입면의 박리점이 유사한 반면, 타각이 커질수록 압력면의 압력은 조금씩 증가하는 경향을 확인 할 수 있다. 또한 Fig. 10(Section B)에서는 25도에서 발생하지 않던 실속이 30도부터 발생하기 시작한다. 이러한 경향을 Fig. 11과 같이 타의 윗부분과 아랫부분으로 나누어서 양력의 변화를 확인하였다.

Fig. 7 Comparison of the lift coefficients from experimental and numerical results with various rudder angles

Fig. 8 Vertical positions of Section A, B

Fig. 9 CFD solution: Pressure distributions and stream lines on Section A in uniform flow at various rudder angles

Fig. 10 CFD solution: Pressure distributions and stream lines on Section B in uniform flow at various rudder angles

Fig. 11 CFD solution: Lift coefficients of horn part, spade part and whole rudder

그 결과 타의 윗부분은 타각이 커짐에 따라서 양력이 조금씩 증가하는 경향을 보인다. 하지만 타의 아랫부분은 30도부터 실속이 발생되는 것이 확인되었고, 이로 인하여 양력 값이 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 40도부터는 큰 타각으로 인하여 아랫부분에서도 양력이 증가하는 경향을 보인다. 따라서 본 연구에 사용된 타의 재 양력 발생 원인은 타 아랫부분의 양력 감소폭보다 타 윗부분의 양력증가 폭이 더 커질 때 발생된다고 판단되며, 본 실험에서는 30도 이상의 타각에서 재 양력이 발생하는 것으로 확인되었다. 사실 방형타는 형상, 가로세로비, 테이퍼 등 타의 다양한 특성들에 따라 타 주위의 유동현상이 다르다. 따라서 타의 재 양력 발생 원인이 위와 같은 현상에 기인한다는 판단은 본 연구에서 사용된 타의 특성에 의한 것으로 판단된다.

5.2 선체-타

선박의 타 장치가 선체의 교란된 유동장 내에 위치하게 될 경우 타의 성능 파악을 위하여 실험을 수행하였다. Fig. 12는 타각 0도부터 35도까지 양력계수가 증가하였으며, 25도 부근에서 기울기의 작은 변화가 확인되었다. 또한 타 단독실험에서는 타각 25도에서 실속현상이 발생하였지만 선체와 타의 실험에서는 실속현상이 발생하지 않은 것으로 판단된다.

Table 4에서 관다효과 적용으로 인한 양력계수는 타각 10도에서 약 20% 증가, 20도에서 약 10%의 증가를 확인하였으며, 선체로 인하여 타로 유입되는 속도가 낮아졌기 때문에 계측되는 양·항력 값 또한 작은 것으로 판단된다. 선체로 인하여 타로 유입되는 속도가 감소하였음에도 실속이 발생되지 않는 이유는 선체의 영향으로 타 주위의 유동장이 교란되었으며, 타 단독 상태보다 낮은 레이놀즈수 임에도 교란된 유동으로 인하여 난류유동의 영향이 크기 때문인 것으로 해석되어진다. 또한 25도 부근에서 기울기의 작은 변화가 확인되었지만 계측되는 값이 작기 때문에 실속현상이 발생했다고 판단하기는 어려울 것으로 보인다. Table 4에서 양항력 계수의 경향은 타 단독상태와 유사하다고 판단된다.

Fig. 12 Comparison of the lift and drag coefficients in the w/ and w/o jet conditions of experiment (Hull-Rudder)

Table 4 Increase rate of the lift and drag at various rudder angles by using water jet or water jet with suction in experiment (Hull-Rudder)

Rudder angle (deg.)	Lift force(%)		Drag force(%)	
	water jet	water jet +suction	water jet	water jet +suction
5	24.5	22.9	-81.9	-58.9
10	19.8	18.0	-41.3	-29.8
15	13.7	11.7	-20.5	-15.3
20	9.5	8.1	-19.3	-10.3
25	4.6	5.8	-7.3	-6.8
30	2.1	3.5	-3.0	-2.3
35	10.1	12.2	0.8	1.7

5.3 선체-프로펠러-타

선박의 타는 선체와 프로펠러의 후류로 인하여 교란된 유동장 내에 위치하게 된다. 따라서 선체-프로펠러-타의 상호작용을 고려한 실험을 수행하였다.

Fig. 13 Comparison of the lift and drag coefficients in the w/o and w/ jet conditions of experiment (Hull-Propeller-Rudder)

Table 5 Increase rate of the lift and drag at various rudder angles by using water jet or water jet with suction in experiment (Hull-Propeller-Rudder)

Rudder angle (deg.)	Lift force(%)		Drag force(%)	
	water jet	water jet +suction	water jet	water jet +suction
5	43.3	41.0	-102.3	-46.9
10	20.9	21.1	-66.6	-13.5
15	17.3	17.8	-28.0	-12.4
20	15.2	15.1	-17.9	-0.9
25	14.6	14.4	-7.1	-7.2
30	13.5	13.8	1.9	6.1
35	10.6	9.8	2.0	6.4

Fig. 13의 양력계수는 타각 0도부터 25도까지 선형적으로 증가하였고, 25도 부근에서 기울기의 변화가 확인되었다. 또한 항력계수 역시 25도 부근에서 기울기의 변화를 확인하였다. 타 단독의 경우와 양력 값을 비교해 보면, 타 단독 상태는 25도 부근에서 실속이 발생하였고, 선체-프로펠러-타는 실속이 발생하지 않은 것과 같이 보인다. 타 단독의 경우 25도 부근에서는 실속이 발생하였고, 타각 35도 부근에서 재 양력 증가가 일어나는 것을 확인한 바 있다. 하지만 선체와 프로펠러 후류에

타가 위치해 있는 경우, 프로펠러의 영향으로 인하여 타의 받음각이 커지게 되며, 양력 값 또한 더 크게 예측된다. 따라서 타 윗부분의 양력 증가량 역시 타 단독상태보다 커지게 되고, 타 아랫부분에서 실속이 발생하여도 그 양력 감소량보다 윗부분의 양력 증가량이 상대적으로 크기 때문에 전체적인 양력계수 값을 확인하면 실속이 발생하지 않은 것과 같이 보이는 것으로 판단된다.

Table 5의 타각 30도에서 관다효과를 적용한 타가 적용하지 않은 타 보다 항력이 더 증가하였다. 그 원인은 타각이 커짐에 따라서 분사된 물 제트가 타판을 따라 흐르지 못하게 되면서 관다효과를 적용하지 않은 타의 항력 값에 비하여 비슷하거나 더 큰 것으로 판단된다. 항력 값이 더 크게 나타나는 이유는 분사와 흡입을 동시에 할 경우 흡입관 내부의 부가적인 항력발생에 기인한 것으로 판단된다.

5.4 상호작용에 관한 고찰

5.4.1 관다효과 적용 전

Fig. 14는 타 단독($C_j = 0.0$)과 선체-프로펠러-타($C_j = 0.0$)의 양력계수이다. 타 단독의 경우, 양력계수는 타각이 커질수록 기울기가 감소하는 경향을 보이며, 타각 25도 부근에서 실속이 발생하였다. 하지만 선체-프로펠러-타의 경우는 양력계수가 선형적으로 증가하다, 타각 25도 부근에서 기울기의 변화가 확인되었다. Table 6은 선체와 프로펠러의 후류에 의한 타의 양력증가율이며, 타각이 커질수록 선체와 프로펠러의 영향으로 인하여 양력증가율이 커지는 것을 알 수 있다.

Fig. 14 Comparison of the lift coefficients between the rudder open-water and hull-propeller-rudder conditions in experiment ($C_j = 0.0$)

Table 6 Increase of lift at various rudder angles by the interaction of hull-propeller and rudder in experiment ($C_j = 0.0$)

Rudder angle (deg.)	Increase rate of lift (%)
5	1.4
10	7.1
15	20.6
20	30.2
25	39.2
30	54.3
35	58.8

5.4.2 관다효과의 응용

Fig. 15는 타 단독 상태와 선체-프로펠러-타 상태에서 관다효과 적용 유무에 따른 양력계수이다. 타에 관다효과를 응용한 실험의 경우, 타 단독은 타각이 커질수록 Fig. 15와 같이 기울기가 감소하는 경향을 보이며, 타각 25도 부근에서 실속이 발생하였다. 선체-프로펠러-타의 경우는 양력계수가 선형적으로 증가하며, 타각 25도 부근에서 기울기의 변화를 확인했다.

Fig. 15 Comparison of the lift coefficients in the experimental rudder open-water and hull-propeller-rudder conditions by implementing the Coanda effect

Table 7은 관다효과의 응용으로 인한 양력증가율을 보여주고 있다. 타 단독은 10도와 20도에서 각각 42%, 24%, 선체-프로펠러-타는 각각 21%, 15%의 양력증가를 보인다. 특히 타각 10도는 타 단독의 양력증가율이 선체-프로펠러-타의 경우보다 약 2배나 크다.

이러한 차이의 원인을 파악하기 위하여 Fig. 16과 같이 혼의 중심 위치를 타의 대표단면(Section C)으로 선정하여 2차원 수치계산을 수행하였다. 유입류가 균일한 조건에서 관다효과 적용 유무에 의한 유동변화를 수치시뮬레이션 하였으며, 유입류가 프로펠러 속도분포를 따르는 조건도 관다효과의 적용유무에 따른 유동변화를 시뮬레이션 하였다. 타각은 10도이며, 프로펠러의 속도분포를 따르는 유입조건은 Park and Lee (2010)와 같은 방법으로 생성하였다.

Table 7 Increase rate of lift at various rudder angles in the experimental rudder open-water and hull-propeller-rudder conditions by implementing the Coanda effect ($C_j = 0.1$)

Rudder angle (deg.)	ROW ($C_j = 0.1$)	H + P + R ($C_j = 0.1$)
5	52%	47%
10	42%	21%
15	34%	17%
20	24%	15%
25	16%	15%
30	13%	14%
35	12%	11%

Fig. 16 Vertical position of Section C

수치계산결과 균일한 유동장내에 위치한 타에 물 제트를 분사하면, 물 제트 분사 전(Fig. 17(a))에 발생하였던 유동박리가 물 제트 분사(Fig. 17(b))로 인하여 억제 된다. 또한 분사 전 앞날의 중심근처에 위치하고 있던 정체점이 분사 후 압력면 쪽으로 이동하게 되면서 양력증가에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 이는 관다효과가 순환을 증가시킴으로써 유입류에 영향을 주는 것으로 생각된다. 따라서 균일한 유동장 내에 위치한 타에 관다효과를 응용한 경우에는 경계층 제어와 순환증가로 인하여 218%의 양력증가율을 확인하였다.

Fig. 18은 유입 경계조건에 프로펠러 후류의 속도장을 적용한 결과다. Fig. 18(a)에 보이는 것과 같이 관다효과의 응용 전에도 프로펠러의 후류로 인하여 유동박리가 발생하지 않았다. 따라서 유동박리 제어에 의한 양력증가는 발생하지 않았다. Fig. 18(a), (b)의 정체점 위치를 비교하면 물 제트 분사 전후의 정체점 위치가 유사한 것을 확인할 수 있다. 이로 미루어 관다효과 중 하나인 순환증가 효과가 타 단독에 비하여 선체-프로펠러-타 조건에서

작게 나타나는 것으로 판단된다. 하지만 흡입면에 고속으로 분사된 물 제트에 의하여 흡입면의 경계층 내부 속도가 증가됨으로써 압력면과의 압력차가 증가하였다. 이로 인하여 최대 약 60%의 양력이 증가하였으며, 선형시험수조에서 수행된 실험 결과에서도 이와 유사한 경향을 확인하였다. 판다효과를 적용하지 않은 타 단독의 경우 타각이 커질수록 양력계수의 기울기가 감소하는 경향을 보였다 (Fig. 14). 2차원 계산 결과로 이를 추정해 보면, 혼 부분의 흡입면에는 Fig. 17과 같이 10도 이하의 타각에서부터 유동박리가 발생되기 때문에 타각이 증가할수록 양력계수의 기울기가 감소하는 것으로 판단된다. 선체-프로펠러-타의 실험에서는 양력계수가 선형적으로 증가하는 것을 확인하였다. 2차원 계산결과로서 이를 추정해 보면, 타의 흡입면에는

Fig. 17 CFD solution: Characteristics of the flow field on Section C in the uniform flow (Rudder angle=10°, $R_n = 3.6 \times 10^4$)

Fig. 18과 같이 10도에서도 유동박리가 발생하지 않았으며, 그 이상의 타각에서도 유동박리가 발생하지 않았기 때문에 양력이 선형적으로 증가한 것으로 판단된다. 유동박리가 발생하지 않는 이유는 프로펠러의 회전으로 인하여 타로 유입되는 유동이 난류특성에 더 가깝기 때문이다. 본 실험에서 두 조건(타 단독, 선체-프로펠러-타)의 유입속도는 같지만, 양력계수는 선체-프로펠러-타의 경우가 큰 것을 확인하였다. 이는 선체-프로펠러-타의 경우 프로펠러의 회전으로 인하여 타의 받음각이 커지고, 흡입면에 박리가 발생하지 않기 때문이다. 또한, 타의 상면(top plate)과 선미의 간격이 좁기 때문에 타의 상면에서 발생하는 날개끝 와에 의한 양력손실이 줄어들기 때문으로 판단된다.

Fig. 18 CFD solution: Characteristics of the flow field on Section C in the behind of hull and propeller (Rudder angle=10°, $R_n = 3.6 \times 10^4$)

Fig. 19 Comparison of the increase of lift coefficients due to the hull, propeller and rudder interaction between the conditions of w/ and w/o the Coanda effect

Fig. 20 Comparison of the increase rate of lift coefficients due to the Coanda effect between the rudder open-water and hull-propeller-rudder conditions

Fig. 19에 타 단독과 비교하여, 선체와 프로펠러 후류에 위치한 타의 양력증가율을 나타냈다. 관다효과 적용 전, 타각 10° 에서는 상호작용으로 인하여 약 8.5%의 양력증가를 보였으며, 타각이 커질수록, 그 증가율이 커지는 것을 확인할 수 있다. 하지만 관다효과를 적용한 경우, 타각 25° 부근까지는 타 단독에 비교하여 선체-프로펠러-타의 양력계수 증가율이 더 작은 것으로 확인되었다. 이는 타 단독인 경우, 25° 이하에서는 경계층 제어에 따른 박리현상의 억제를 통해서 상대적으로 높은 양력증가율을 보이는 것으로 생각된다. Fig. 20은 각각의 조건(타 단독, 선체-프로펠러-타)에서 관다효과로 인한 양력증가율이다. 두 상태 모두 타각이 증가할수록 양력증가율이 감소하는 경향을 보이며,

타각 25° 이상에서는 그 값이 유사하다. 타 단독인 경우, 25° 이하에서는 경계층 제어를 통한 박리의 억제로 상대적으로 높은 양력증가율이 확인되었고, 선체-프로펠러-타의 경우는 단순히 압력면과 흡입면의 압력차에 의한 양력증가로 상대적으로 낮은 양력증가율을 보였다. 또한 25° 이상은, 두 경우 모두 흡입면과 압력면의 단순한 압력차의 증가로 인한 양력증가만 발생하는 것으로 판단된다.

5.5 레이놀즈수의 영향

2차원 수치계산에서 균일한 유동 내에 타가 위치한 경우(타각 10° , $R_n = 3.3 \times 10^4$) 유동의 박리가 확인되었다. $R_n = 3.3 \times 10^4$ 이상에서의 유동박리 특성을 확인하기 위하여 $R_n = 3.9 \times 10^5$, 1.3×10^6 에 대하여 2차원 수치계산을 수행하였다. 그 결과 Fig. 21과 같이 레이놀즈수가 커질수록 박리점이 뒷날 근처로 이동하는 것을 확인하였다. 실선에서는 큰 레이놀즈수와 선체-프로펠러 후류의 영향으로 흡입면에 유동박리가 발생하지 않을 것으로 예상된다. 따라서 실선에서는 유동박리 제어에 의한 양력증가 효과가 나타나지 않을 것으로 판단된다. 그러나 관다 제트로 인하여 흡입면의 압력은 감소하기 때문에 이로 인한 양력증가는 효과가 있을 것으로 판단된다.

Fig. 21 Comparison of separation points on suction side at various Reynolds numbers
(Upper: $R_n = 3.9 \times 10^5$, lower: $R_n = 1.3 \times 10^6$)

6. 결론

본 연구에서는 고양력 훈타의 성능연구에 있어서 선체-프로펠러와의 상호작용에 관한 연구를 수행하였으며, 타의 고양력 발생을 위해서는 USB방식에 의한 관다효과를 응용하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 관다효과를 적용하지 않은 경우 타 단독 상태에서는 타각이 커질수록 양력계수의 증가폭이 감소하는 반면, 선체-프로펠러-타의 경우 상호작용에 의한 영향으로 양력계수의 증가폭이 감소하지 않았다.
- 2) USB방식으로 관다효과를 적용한 경우 타 단독에서는 유동박리제어와 순환제어를 통하여 양력이 크게 증가하였으나, 선체-프로펠러-타의 경우 이러한 효과가 나타나지 않고 흡입면의 압력감소로 인한 양력증가만이 나타났다.
- 3) 타각 25도 이상에서 관다효과에 의한 양력증가율은 타 단독 상태와 선체-프로펠러-타 상태에서 큰 차이가 없지만 25도 이하의 타 각에서는 관다효과에 의한 양력증가율이 타 단독 상태와 선체-프로펠러-타 상태에서 큰 차이가 있으며, 특히, 타각 10도에서는 타 단독 상태가 2배 정도 크게 나타난다.
- 4) 실선에서는 큰 레이놀즈수와 선체-프로펠러의 영향으로 관다효과에 의한 타판의 박리점 제어를 통한 양력 증가는 발생하지 않을 것으로 예상되며, 흡입면의 압력감소에 의한 양력증가만이 예상된다.

타 단독 성능으로 선체-프로펠러 뒤에 위치한 타의 성능을 예측하기 어려울 것으로 판단된다. 따라서 관다효과를 응용한 고양력 타를 비롯하여 일반적인 타의 성능을 파악하기 위해서는 선체-프로펠러와 타의 상호작용을 고려한 연구가 반드시 수행되어야 할 것이다.

후 기

이 논문은 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. ROA-2007-000-10028-0).

참 고 문 헌

- Ahn, H.S., 2003. *An Experimental Study of the Coanda Effect on Flapped Control Surface*. Ph.D. Thesis, Dept. of Naval Architecture and Ocean Eng., College of Eng., Seoul National Univ., Seoul, Korea.
- Ahn, H.S. & Kim, H.C., 1999. An Application of Coanda Effect to a Flapped Rudder, *J. of Ship and Ocean Technology*, 3(4), pp.23-24.
- Boo, K.T. Hong, C.B. & Lee, K.J., 2004. Simulation of viscous flow around the ship appended with the propeller and the rudder, *Proceedings, Annual Autumn Meeting of SNAK*, pp.527-531.

- Boo, K.T. Ji, Y.H. Kim, Y.S. & Shin, S.C., 2004. A Numerical Study of Hydrodynamic Forces Acting on Rudders, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 41(2), pp.61-69.
- Carlton, J. Radosavljevic, D. & Whitworth, S., 2009. Rudder-Propeller-Hull Interaction: The Results of Some Recent Research, In-Service Problems and Their Solutions, *International Symposium on Marine Propulsors*.
- Choi, B.J., 2004. *An Experimental Evaluation of the Coanda Jet Applied High-Lifting Rudder System*, MS. Thesis, Dept. of Naval Architecture and Ocean Eng., College of Eng., Seoul National Univ., Seoul, Korea.
- Molland, A.F. & Turnock, S.R., 2007. *Marine Rudder and Control Surfaces*, Great Britain.
- Paik, B.G. et al., 2008. Cavitation Observation and Visualization of the Gap Flows on a Rudder Influenced by Propeller Slipstream and Hull Wakes, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(3), pp.238-246.
- Park, J.J. & Lee, S.H., 2000. A Numerical Study on a Circulation Control Foil using Coanda Effect, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 37(2), pp.70-76.
- Park, K.R. & Lee, Y.G., 2010. A Study on the Rudder Shapes for the Suppression of Cavitation around a Horn-type Rudder, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(4), pp.553-564.
- Seo, D.W. Kim, J.H. Kim, H.C. & Lee, S.H., 2008. Influence of Jet Nozzle Arrangement on the Performance of a Coanda Foil, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(4), pp.568-578.
- Seo, D.W. Oh, J.K. & 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.

김 두 동

이 영 길