

선체반류 중에서 작동하는 프로펠러에 의한 방향타 유입유동 PIV 계측

백부근^{1,†} · 김기섭¹ · 김경열¹ · 김건도¹ · 박영하¹
한국해양연구원 해양시스템안전연구소¹

PIV Measurements of Rudder Inflow Induced by Propeller Revolution in Hull Wake

Bu-Geun Paik^{1,†} · Ki-Sup Kim¹ · Kyung-Youl Kim¹ · Gun-Do Kim¹ · Young-Ha Park¹
Maritime & Ocean Engineering Research Institute, KORDI¹

Abstract

In the present study, the flow fields in between the propeller and the semi-spade rudder are investigated by using PIV technique to find out the influences of both simulated hull wake and propeller wake on the incident flow to the rudder. The velocity fields are measured at the propeller rotation angle of 180° and the rudder deflection angles of 0° . Flow fields measured at each rudder deflection angle are analyzed in terms of angle-of-attack against the rudder leading edge. The hull wake increases the angle-of-attack more than that in the uniform inflow condition, forming the angle-of-attack of about 20° at $0.7R$ (R =propeller radius) position. The distribution of the angle-of-attack is strongly affected by the stagnation point around the leading edge and camber effect of the rudder. These effects provide asymmetric distribution of angle-of-attack with respect to the leading edge of the rudder.

Keywords : Rudder(방향타), Angle of attack (받음각), Propeller (프로펠러), Hull wake(선체 반류), PIV(particle image velocimetry:입자영상속도계)

1. 서론

선박의 조종성능을 좌우하는 방향타는 추진력을 발생시키는 프로펠러에 비해 상대적으로 제한적인 관심을 받아 왔다. 회전하는 프로펠러의 하류에 위치하는 방향타는 3차원적으로 불균일도가 매우 높은 프로펠러 후류의 반류 유동장(wake field)에서 작동하게 된다. 그런데 최근 들어 선박의 대형화 및 고속화로 인하여 프로펠러와 방향타에 가해지는 유체력 부하가 크게 증가함에 따라 프로펠러 후류 특성의 영향을 직접적으로 받는 방향타는 양력 및 항력 발생을 유발하는 성능 특성과 함께 캐비테이션 발생 관점에서 많은 관심을 불러일으키고 있다.

회전하는 프로펠러의 하류에 설치되는 방향타 상하면에 유입되는 유동의 방향과 받음각의 부호는 Fig. 1과 같이 서로 반대이기 때문에 타의 단면 위치별로 양(+) 또는 음(-)의 타력(양력)을 발생하여 많은 양의 양력을 상쇄시킨다. 따라서 필요한 양력 확보를 위해서는 과도한 타 각도 설정이 필요하게 된다. 그런데 이러한 타 각도의 증가는 타 표면에 캐비테이션 발생량을 증가시켜 타 표면 침식을 유발하는 원인이 된다. 그리고 프로펠러 허브(hub)에 발생하는 보오텍스 캐비테

이션은 타 표면에서 붕괴하면서 침식을 유발한다. 비록 많은 연구기관과 조선소 등에서 혼-타(horn rudder; semi-spade rudder)나 전가동타(full-spade rudder)에서 나타나는 양력 손실과 캐비테이션 발생량 저감을 위하여 많은 관심과 노력을 하고 있으나 실효성에 한계가 있는 실정이다. 특히 많은 선주들이 선박에 대한 전통적인 관습 등으로 인하여 고정부(horn)와 가동부(movable part)로 구성된 혼-타의 사용을 선호하고 있지만, 혼-타 상하면에서 발생하는 양력의 상쇄 및 이로 인한 양력의 손실에 대한 문제를 극복하는 데에는 한계가 있으며, 수직 및 수평 방향의 간극(gap clearance)에서 침식을 수반하는 심각한 간극 캐비테이션(gap cavitation)의 문제 또한 심각하게 대두되고 있는 실정이다. 이러한 간극 캐비테이션을 극복하고자 전가동타에 대한 선호도가 점차 높아지고 있으나, 전술한 바와 같은 양력 손실을 극복하기 위하여 증가되는 타각으로 인해 타 표면에 나타나는 캐비테이션을 저감시키는 데에는 한계가 있고, 혼타와 전가동타는 공히 요구되는 타력 확보를 위하여 타각 증가를 수반하므로 선박의 선회성능 등 조종(양력)성능 향상에 매우 제한적이다.

방향타로 유입되는 유동은 프로펠러와 선미 반류에 의해 영향을 받으므로 방향타와 프로펠러/선미 반류 사이에 나타

나는 상호작용에 대해서 살펴볼 필요가 있다. Molland와 Turnock(1992)은 풍동에서 프로펠러와 타 사이의 상호작용에 대한 연구를 실험적으로 수행하였고 예인 및 공동 수조에서 Kracht(1992)가 양력과 항력을 측정하여 프로펠러와 타의 상호작용을 연구하기도 하였다. Stierman(1989)은 예인수조에서 일련의 모형시험을 수행하여 타가 낮은 전진비에서 양의 추력을 발생시킬 수 있음을 보였다. 이상의 실험들은 타에서 만들어지는 양력이나 추력에 초점을 맞추어 선박의 조종성이나 안정성에 대한 연구가 주를 이루었다. Shen et al.(1997)은 미해군의 LCC(Large Cavitation Channel)에서 비틀린(twisted) 타에 대하여 연구를 수행하여 타의 캐비테이션을 감소시킬 수 있음을 보였다. Paik et al.(2006)은 대부분의 상선에 적용되고 있는 혼-타(semi-spade rudder)의 간극 부분을 1/10 척도로 제작하고 균일 유동 조건에서 캐비테이션 실험을 수행하여 캐비테이션 수의 변화에 따른 간극 유동 및 간극 캐비테이션에 대한 연구를 수행하였다. 이 결과를 이용하여 간극 캐비테이션을 감소시킬 수 있는 간극 입구 형상 설계에 대한 기초 자료를 마련하였다. 그러나 선미 반류 및 프로펠러가 혼-타 전방에 놓이게 될 경우 타에 입사각을 가지고 유동이 유입되어 흡입면과 압력면에 대칭적인 캐비테이션이 나타나지 않고 간극 유동의 특성이 바뀌게 되므로 간극 입구 형상에 대한 세심한 검토가 필요하다.

혼-타는 전가동타와 달리 고정부와 가동부로 나뉘기 때문에 필연적으로 고정부와 가동부 사이에 간극이 발생하게 되며 가동부의 움직임에 따라 유입 유동은 혼-타의 표면에 압력면과 흡입면을 형성시킨다(Paik et al., 2008). 또한 혼-타는 앞서 언급한 바와 같이 타의 전방에 선체와 프로펠러가 놓이기 때문에 복잡하고 불안정한 유입 유동을 경험하게 되고 프로펠러 회전 성분에도 의해 타의 상부와 하부로 유입되는 유동의 입사각이 달라진다.

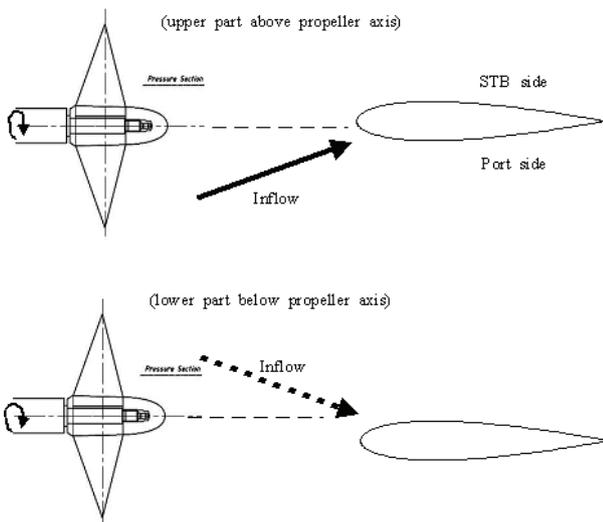


Fig. 1 Variation of rudder incident flow caused by propeller wake (top view)

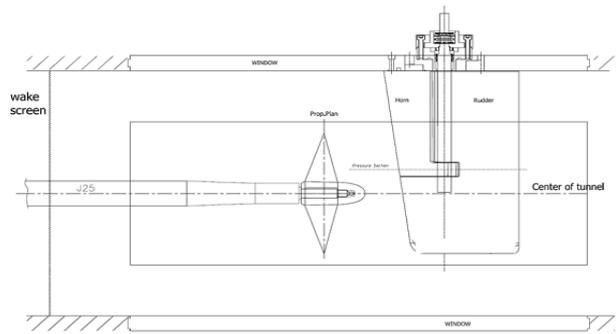


Fig. 2 Rudder, propeller and wake screen arranged in the test section

본 연구에서는 혼-타에 영향을 주는 유입 유동의 특성을 자세히 조사하기 위하여 크게 두 가지 모형 배열을 고려하였다. 첫 번째는 균일 유동 안에 존재하는 프로펠러와 혼-타이며 두 번째는 선미 반류 안에 존재하는 프로펠러와 혼-타이다. 방향타에서 발생하는 양력과 캐비테이션에 가장 큰 영향을 미치는 것이 방향타로 유입되는 유입류의 받음각이므로 이 받음각을 정확히 계속하기 위하여 두 가지 모형 배열에 대해서 방향타 유입류를 PIV(particle image velocimetry: 입자영상속도계)로써 가시화하였고 분석하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

혼-타에 유입되는 유입류의 특성을 살펴보기 위한 실험은 한국해양연구원 해양시스템안전연구소의 중형캐비테이션터널에서 수행되었는데 그 제원은 $2.6^A \times 0.6^B \times 0.6^D$ m³이다. Fig. 2는 시험이 수행된 중형캐비테이션터널의 시험부를 나타낸다. 중형캐비테이션터널의 최대 유속은 12m/s이고 수조 내부 압력은 0.1기압(Kgf/cm²)에서 2.0기압까지 변화가 가능하다. 본 연구에서는 방향타에서 나타나는 척도 효과(scaling effect)를 가능한 줄이기 위하여 중형캐비테이션터널에서 수용 가능한 최대 척도 1/28.5로써 프로펠러와 혼-타 모형을 제작하였다.

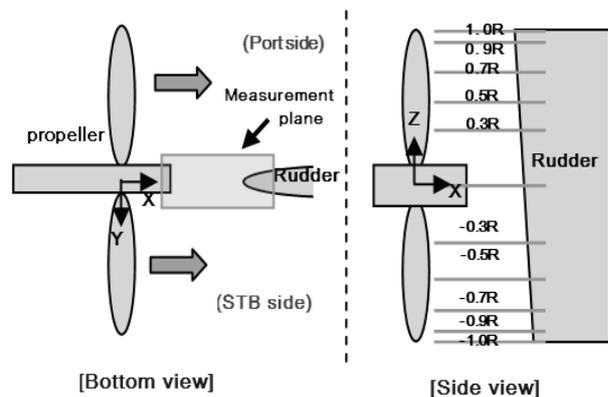


Fig. 3 Measurement planes and coordinate system for PIV visualization

프로펠러의 직경은 294.7mm이고 날개 수는 6개이다. 프로펠러의 설계 전진비는 0.75이고 평균 피치(pitch)비는 1.0320이다. 실험에 사용된 시험부 유속은 6.7m/s, 프로펠러 회전수는 22rpm (초당 회전수)이었다. 혼-타는 고정부와 가동부로 이루어져 있으며 가동부의 회전각(deflection angle) θ 에 따른 타 유입류의 받음각을 측정하기 위하여 최대 10°까지 회전할 수 있도록 제작되었다. 타의 고정부와 가동부는 모두 NACA64-421 단면을 사용하였다. 또한 선미 반류를 모사하기 위하여 반류 스크린(wake screen)을 제작하여 프로펠러 전방에 위치시켰다.

타 유입류의 받음각을 측정하기 위하여 정량적인 가시화 기법인 PIV(particle image velocimetry)를 사용하였다. 속도장(velocity fields) 측정을 위한 2차원 PIV 시스템은 Nd:Yag 레이저(펄스 당 200mJ), 두 대의 CCD 카메라, 카메라 이송장치, 영상처리 장치, 제어 및 계산용 컴퓨터 등으로 이루어져 있다. 사용한 CCD 카메라의 해상도는 1024 x 1024 pixels이다. 레이저 평면광을 중형캐비테이션터널 옆에서 조사하고 아래쪽에 카메라를 배치하여 12.5 x 6.5 cm²크기의 측정단면에서 속도장을 측정하였다. 산란입자로써 TiO₂(titaniumdioxide)를 사용하였고 PIV 알고리즘을 이용하여 계산된 속도장의 유효 공간 해상도는 0.97mm이었다. Fig. 3에는 본 연구에서 사용된 좌표계와 측정면이 나타나 있는데 프로펠러의 회전축을 원점이라고 할 때 X축은 하류방향, Y축은 우현

(starboard)방향을 나타내며 Z 축은 터널 시험부 연직 상방을 향하는 방향이다. 각 축은 프로펠러 직경으로 무차원화 하였다. Z 축을 따라 ±1.0R (R은 프로펠러 반경), ±0.9R, ±0.7R, ±0.5R, ±0.3R, 0R 위치에서 X-Y 측정단면을 형성하여 계측하였다. Y축의 원점은 프로펠러 축의 중심에 설정되었으며 특정 프로펠러 날개가 연직 상방을 가리킬 때를 프로펠러 위상각(ϕ) 0°라고 정의하였는데 본 연구에서는 180° 위상각이 되었을 경우에만 프로펠러 후류를 측정하였다. 또한 타각은 0°를 선택하여 측정하였다.

3. 실험 결과 및 토의

혼-타의 가동부 코드선(chord line)이 혼-타의 중심선(centerline)과 나란한 경우를 타각 0°라고 정의하며 가동부의 뒷날(trailing edge)이 수조중심선에서 좌현(port) 방향으로 멀어질 때를 양(+)의 타각이라고 정의하였다. Fig. 4와 Fig. 5는 측정면이 Z = ±0.7R일 경우 축방향 속도분포와 흐름선(streamline)들을 보인다. 프로펠러만 있을 경우, 프로펠러-방향타가 함께 있을 경우, 선미 반류-프로펠러-방향타가 함께 있을 경우에 대해서 유속 및 흐름선 변화를 잘 볼 수 있다.

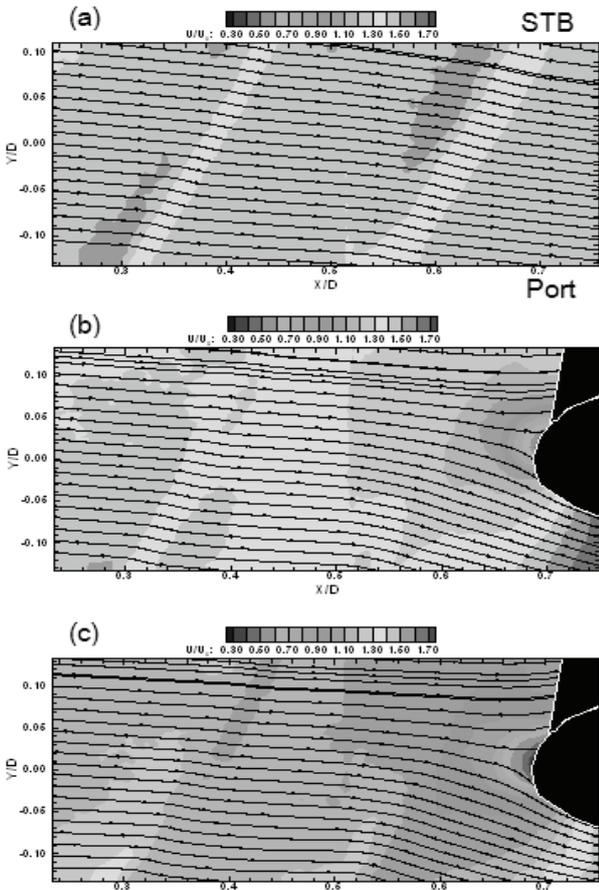


Fig. 4 Axial velocity contours and streamlines at the plane of Z = -0.7R: (a)propeller, (b)propeller+rudder, (c)hull wake+propeller+rudder

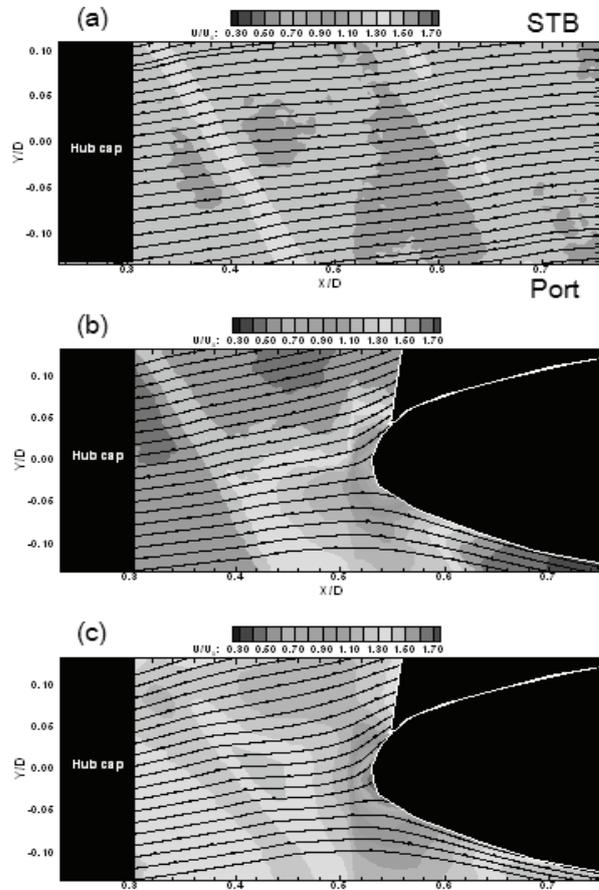


Fig. 5 Axial velocity contours and streamlines at the plane of Z = +0.7R: (a)propeller, (b)propeller+rudder, (c)hull wake+propeller+rudder

해당 그림들에서 $Y/D > 0$ 인 방향은 선박의 우현(starboard), $Y/D < 0$ 인 방향을 선박의 좌현(port)이라고 말할 수 있다. 프로펠러만 존재할 경우에는 전체 유동장의 평균 속도보다 낮은 속도를 갖는 사선 형태의 영역이 나타난다. 이 영역은 프로펠러의 날개끝 보오텍스에 기인한 것이며 회전 성분이 강하기 때문에 축방향 속도가 낮아지게 된다. 프로펠러의 하류 위치에 방향타를 설치하게 되면 프로펠러의 날개끝 보오텍스의 영향이 작아지고 유동장이 복잡해지는 것을 볼 수 있다. 아울러서 흐름선도 방향타의 고정부 앞날개(leading edge)에 가까워짐에 따라 방향타의 양 옆으로 나뉘는 모습을 볼 수 있다. 레이저 평면광은 방향타의 좌현에서 우현 방향으로 조사(illumination) 하였기 때문에 방향타의 우현쪽에 그림자가 형성되었으며 그림자 안에서 속도계측이 불가능하였다. 프로펠러 전방에 선미 반류, 후방에 방향타가 존재하면 유동장이 더욱 복잡해지고 프로펠러 날개끝 보오텍스의 영향도 크게 감소된다. 흐름선의 모습은 프로펠러-방향타의 경우와 유사하다.

Fig. 6은 프로펠러 후류의 방향타에 대한 받음각 정의를 나타낸 것이다. 즉, 흐름선이 타의 좌현 방향으로 나아가면 양의 받음각, 타의 우현 방향으로 나아가면 음의 받음각을 의미한다. Fig. 7은 방향타의 존재 유무에 따른 프로펠러 후류의 변화를 보여준다. 프로펠러만 있을 경우(Fig. 7(a)) 받음각 정보는 방향타의 앞날이 위치하는 영역에서 취득하였다. 프로펠러만 있을 경우 $Y/D = 0$ 을 기준으로 대칭 또는 평행한 받음각 분포를 보이고 있다. 받음각 분포에서 간혹 발생하는 변동은 날개끝 보오텍스나 후연(trailing) 와도(vorticity)에 기인한 것이다. 이러한 받음각 분포는 방향타가 프로펠러 하류에 위치함에 따라 확연히 달라지는 것을 볼 수 있다. 즉 Fig. 7(b)에서 보는 바와 같이 방향타의 앞날이 위치하는 $Y/D = 0$ 주위로 받음각이 크게 증가하는 경향이 나타난다. 방향타의 앞날 영역에서 강한 정체점이 발생하고 타의 캠버(camber) 효과가 나타나 타 유입류는 타의 앞날 전방에서 받음각이 크게 증가하게 된다. 이렇게 증가한 받음각은 $Y/D = 0$ 에서 멀어질수록 점차 받음각이 감소하게 된다. 프로펠러 후류의 회전 성분으로 말미암아 프로펠러 축 하부영역은 타의 우현에서 좌현 방향으로 향하는 양의 받음각이 형성되고 프로펠러 축 상부영역은 타의 좌현에서 우현으로 향하는 음의 받음각이 형성된다. 이 때 프로펠러 축의 하부영역에서는 타의 우현 앞날에 정체점이 발생하면서 $Y/D > 0$ 인 영역에서 받음각의 크기가 더 크게 나타나는 현상이 발생한다. 반대로 프로펠러 축의 상부영역에서는 타의 좌현 앞날에 정체점이 발생하고 $Y/D < 0$ 인 영역에서 받음각의 크기가 더 크게 나타나게 된다. 재미있는 것은 $Z = \pm 0.3 R$ 면에서 가장 큰 받음각이 나타나고 프로펠러 축으로부터 멀어짐에 따라 받음각이 점차 감소하고 있다는 것이다. 프로펠러의 설계상의 특성 때문인지 프로펠러 허브(hub)에서 발생하는 허브 보오텍스에 의한 영향 때문인지는 아직 알 수 없으며 후속 연구가 필요하다고 사료된다.

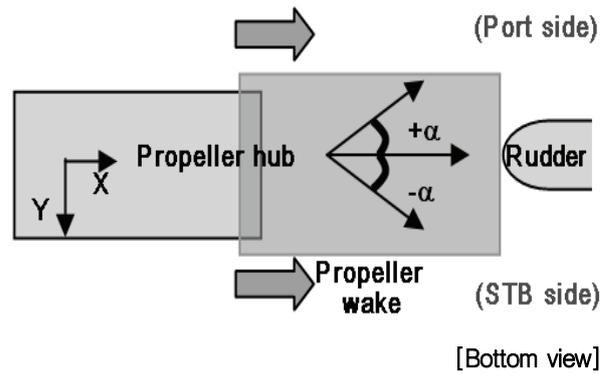


Fig. 6 Definition of angle-of-attack ahead of the leading edge of rudder

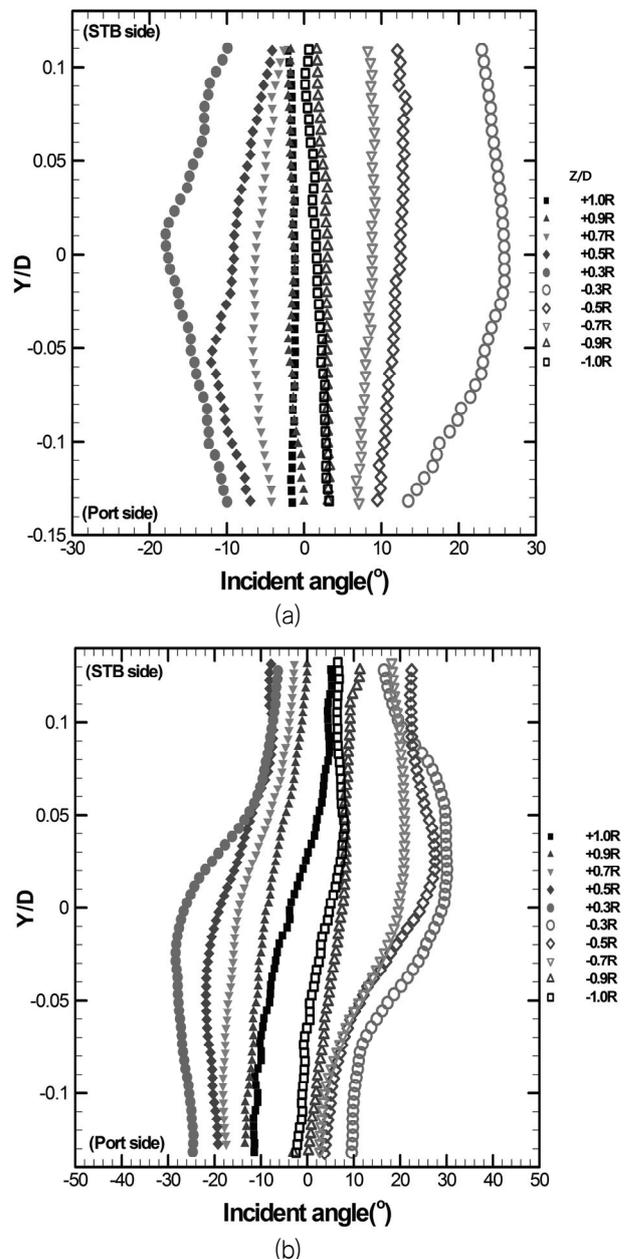
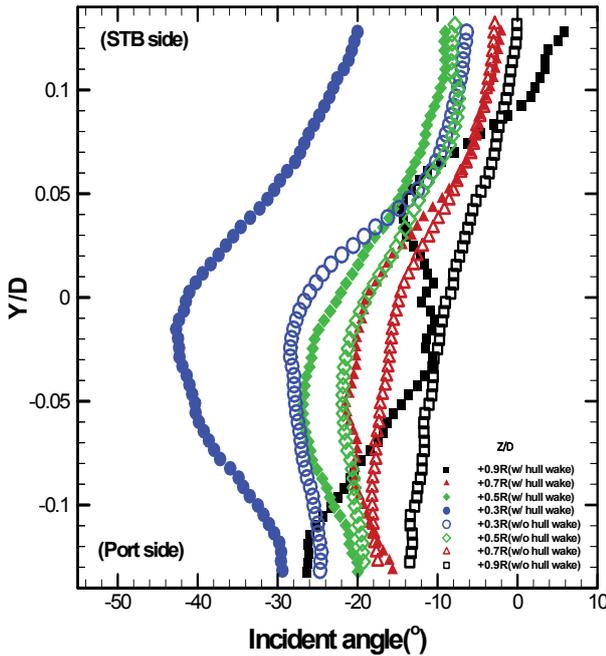
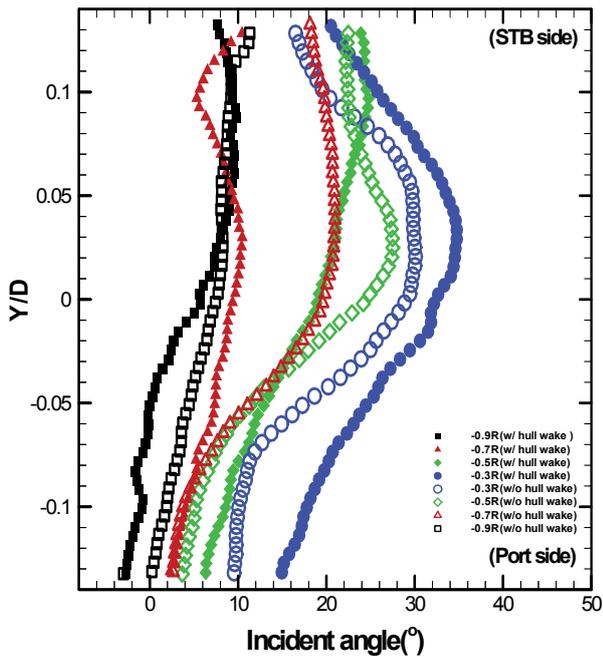


Fig. 7 Distribution of angle-of-attack at $\theta = 0^\circ$ (w/o hull wake) : (a) propeller only, (b) propeller + rudder



(a)



(b)

Fig. 8 Comparison of angle-of-attack at $\theta = 0^\circ$ (w/ propeller + rudder): (a) upper plane above hub, (b) lower plane below hub

Fig. 8은 선미 반류의 유무에 따른 프로펠러 후류의 방향타에 대한 입사각을 각 Z 측정면에서 계측한 것이다. 각 그림에서 안이 채워진 심볼(symbol)은 선미 반류가 있는 경우이고 안이 비워진 심볼은 선미 반류가 없는 경우이다. 대체적으로 선미 반류가 있을 경우 방향타로의 받음각이 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 증가 추세는 축 상부 영역의 0.3R ~ 0.7R 범위에서 뚜렷이 나타났다. 프로펠러 날개에 걸리는 부하가 가장 크게 나타나는

0.7R에서는 받음각이 -20° 내외가 되었다. 축의 하부 영역에서는 0.3R을 제외하고는 선미 반류가 없을 경우가 방향타로의 받음각이 다소 크게 나타나고 있으며 0.7R에서는 10° 내외의 비교적 작은 받음각 분포를 보인다. 프로펠러 후류의 방향타에 대한 받음각이 $Y/D = 0$ 근처에서 가장 크게 나타나는 경향이 있으므로 $Y/D = 0$ 위치에서 Z 방향을 따라 방향타의 받음각 자료를 Fig. 9와 같이 추출하였다. 프로펠러 후류 영역($-0.25 < Z/D < 0.25$) 안에서 최대 받음각은 상부 영역에서 -40° , 하부영역에서 약 30° 정도이다.

프로펠러 축으로부터 반지름 거리가 0.5 R ~ 0.7 R일 경우 상부 영역에서는 선미 반류가 존재할 경우 $4\sim 5^\circ$ 정도 받음각이 더 크게 나타나고 하부영역에서는 선미 반류가 없을 경우 $5\sim 10^\circ$ 정도 받음각이 더 크게 나타나는 경향을 보인다. 상부와 하부 영역에서 서로 다른 받음각이 나타나고 있으며 그 크기도 기존에 알려진 $7 \sim 10^\circ$ 가 아니라 20° 이상의 큰 받음각이 나타났다. 기존의 방향타 단면들은 Z 방향(스팬(span) 방향)으로 똑같이 적층해 나가는 방식을 따라 왔으나 이에 대한 심각한 고려가 필요함을 잘 알 수 있다. 비록 비틀림(twisted) 방향타일지라도 받음각의 크기가 대폭 증가함에 따른 적응 방식 변화를 고려해 볼 수 있을 것이다.

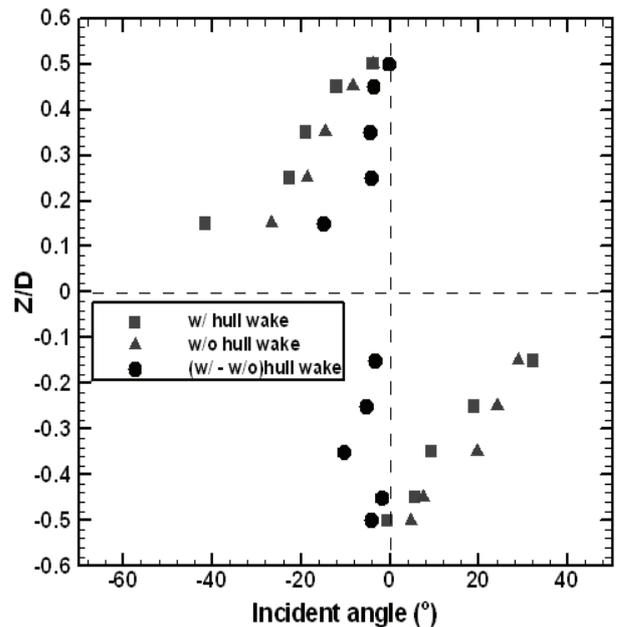


Fig. 9 Distribution of angle-of-attack at $Y/D = 0$ along Z axis

4. 결론

본 연구에서는 선미 반류 및 프로펠러 후류가 방향타의 유입류에 대한 받음각을 어떻게 변화시키는지 알아보기 위하여 PIV 기법을 이용하여 프로펠러와 방향타 사이의 유동장을 정량적으로 가시화하고 분석하였다.

타각이 0° 이고 프로펠러 및 선미 반류가 존재할 경우 프로펠러 후류 영역(-0.25 < Z/D < 0.25) 안에서 최대 받음각은 상부 영역에서 -40°, 하부영역에서 약 30° 정도이다. 상부 영역에서는 선미 반류가 있을 경우 4~5° 정도 받음각이 더 크게 나타나고 하부영역에서는 선미 반류가 없을 경우 5~10° 정도 받음각이 더 작게 나타나는 경향을 보인다.

기존의 방향타 단면들은 스펠(span) 방향으로 비틀림 없이 똑같은 입사각을 갖는 방식을 지켜 왔으나 이러한 설계 및 제작 방법에 대해 고민할 필요가 있다고 사료된다. 또한 프로펠러 후류의 후연 와도나 날개끝 보오텍스, 타의 앞날에서 발생하는 정체점 등으로 인하여 방향타로 유입되는 받음각의 변화가 커지므로 이에 대한 고려가 필요하다.

후 기

본 연구는 “저진동 고효율 추진기 및 방향타 기술 개발 (PNS132C)” 과제의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Kracht, A. M., 1992. Ship-propeller-Rudder Interaction. *Proceedings, 2nd International Symposium on Propeller and Cavitation*, Hangzhou, China.
- Molland, A. F. & Turnock, S. R., 1992. Wind Tunnel Investigation of the Influence of Propeller Loading on Ship Rudder Performance. *The Royal Institution of Naval Architects*, London.

- Paik, B.G. et al., 2006. Experimental Investigation on the Gap Cavitation of Semi-spade Rudder. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 43(4), pp.422-430.
- 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.
- Shen, Y.T. Jiang, C.W. & Remmers, K.D., 1997. A Twisted Rudder for Reduced Cavitation. *Journal of Ship Research*, 41(41), pp.260-272.
- Stierman, E.J., 1989. The Influence of the Rudder on the Propulsive Performance of Ships-Part 1. *International Shipbuilding Progress*, 36, pp.407.



백부근



김기섭



김경열



김건도



박영하