Proc. of 4th KSV Conference
PNU, Busan, Korea, Dec. 2, 2005

선박 모형의 하중 (loading)조건 및 Reynolds 수의 변화에 따른 선미 반류의 PIV 속도장 측정

이정엽* • 백부근** • 이상준†

PIV Measurements of Hull Wake behind a Container Ship Model with Varying Loading Condition and Reynolds number

Jung-Yeop Lee, Bu-Geun Paik and Sang-Joon Lee

Abstract

Flow characteristics of hull wake behind a container ship model were investigated experimentally with varying loading condition and Reynolds number. Large-scale bilge vortices of nearly the same strength are formed in the near-wake region. They are symmetric and counter-rotating with respect to the wake centerline for all loading conditions tested. With going downstream for both design and ballast loading conditions, the strength of the bilge vortices decreases and the wake region expands due to diffusion and viscous dissipation. Under the design loading condition, the bilge vortices start to appear at St=0.363 transverse plane above the propeller-boss. For the ballast loading condition, however, the bilge vortices start to appear at St=0.591 below the propeller-boss. They move upward as the hull wake goes downstream and Reynolds number increases. These wake characteristics, under the ballast loading condition, may weaken the propulsion and cavitation performances of the propeller, which are usually optimized for the design loading condition.

Key Words : Hull wake (선미 반류), Loading condition (하중조건), Bilge Vortex (빌지 보오텍스)

1. 서 론

프로펠러를 포함한 선미 주위 유동에 대한 이해는 선체에 미치는 저항 성분의 결정, 조타 및 부가장치와 추진기의 효율적 설계 그리고 선미 부분으로 유입되는 반류 (wake)를 해석하는 데에 있어서 매우 중요하다. 그런데 선미 부분에 설치된 대부분의 장치들은 설계 하중 (design loading) 상태에서 최적설계가 되어 있으므로 하중조건 (loading condition)이 바뀔 경우 선박 주위 유동이 변화하게 되어 프로펠러의 성능변화에 많은 영향을 미치게 된다. 최근 들어 많이 건조되고 있는 LNG 또는 LPG선의 경우, 선미 선형이 비교적 비대한 반면 고속으로 운항해야 하므로 높은 추진력을 요구한다. 그러나 이러한 선박은 적재화물을 적재하지 않는 발라스트 (ballast) 조건에서 운항될 경우 설계 하중에 기초한 선형과 프로펠러 설계의 특성상 심각한 캐비테이션 (cavitation) 문제를 피할 수 없는 실정이다. 본 연구에서는 화학운반선과 비슷한 운항속도를 갖는 컨테이너선 모형에 대하여 적재하중 변화에 따른 선미 반류를 측정하고 그 영향을 알아보고자 한다.

지금까지 선미 주위의 유동측정은 대부분 설계 하중 (배가 수평으로 유지된 상태, even keel)상태에서만 행하여 졌으며, 발라스트 하중 (배의 선미 방향으로 기울어진 상태, trimmed by the stern) 상태에서의 유동측정은 극히 드문 실정이다. 실제 선박은 설계 하중뿐 아니라, 발라스트 하중

† 포항공과대학교 기계공학과
E-mail : sjlee@postech.ac.kr
* 포항공과대학교 기계공학과 대학원
** 한국해양연구원 해양시스템안전연구소

Table 1. Principal dimensions of the ship model

Parameters	Dimension
L_{pp}	1.422 m
B (breadth)	0.199 m
D (depth)	0.117 m
T (mean draft)	0.0667 m
C_B (block coefficient)	0.65

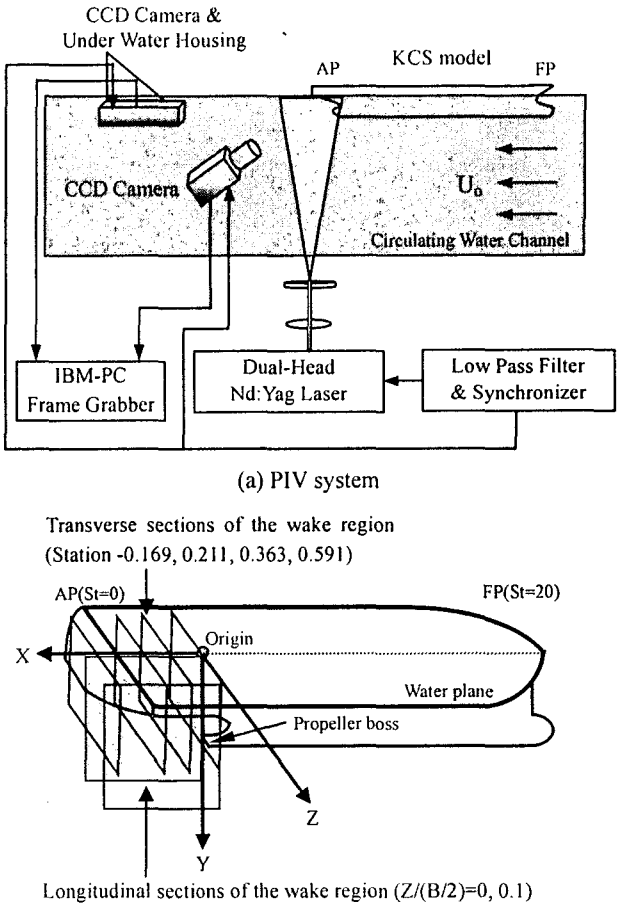
상태에서도 운행을 하기 때문에 각각의 하중조건에서의 선미 반류를 정확하게 예측하고, 평가하기 위해서는 모든 하중조건을 고려하여야 한다. 이에 따라 하중조건에 따른 선미 반류 유동의 변화 및 유동장이 어떻게 형성되는지를 정확히 계측하고, 분석하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다.

선박 주위 유동은 많은 연구자들에 의해서 연구되어져 왔는데, 실험적 연구의 대부분은 열선유속계, 피토관, LDV 등을 통한 점측정 방식을 이용한 유동측정[1-3] 이었다. 그러나 PIV 속도장 측정기술의 발전과 함께 유동을 교란시키지 않고 넓은 영역의 유동장을 짧은 시간에 측정할 수 있게 되었다. 최근 Lee 등[4]은 PIV 속도장 측정기법을 이용해 프로펠러가 부착되지 않은 선미 반류의 유동특성을 연구하였으며, Paik 등[5]은 자유표면이 있는 경우, 선박 모형에 부착되어 회전하는 프로펠러 주위 유동을 PIV 속도장 측정기법으로 조사하였다.

본 연구에서는 선박의 후미에 위치한 부가장치들 특히, 프로펠러의 성능에 크게 영향을 미치는 하중조건을 변화시키면서 2-D PIV 속도장 측정기법을 이용하여 선미 반류 유동을 측정하고, 반류 유동의 변화 및 프로펠러 날개로 유입되는 유입류의 변화를 비교분석 하였다.

2 실험 장치 및 실험 방법

본 실험은 시험부의 크기가 $1.0^{W}\times1.0^{H}\times4.5^{L}$ m^3인 회류수조에서 수행하였다. 속도장 측정을 위해서 사용된 선박 모형은 1/161.74로 축소 제작된 KRISO 3600TEU 컨테이너선 (이후 KCS로 표시함) 이며, Table 1에 자세한 제원이 나와 있다. 선박 모형에서 선수 (FP, fore perpendicular)와 선미(AP, after, perpendicular)를 기준으로 총 20개의 station (St) 으로 나누었고, 횡단면 (transverse plane) 측정은 St=0.591, 0.363, 0.211, -0.169에서 이루어졌다. 자유 흐름속도 (U_0)는 0.4, 0.6, 0.8 m/s이며, 수선간 길이 (L_{pp})에 기초한 레이놀즈 수는 $Re=5.08\times10^5$, 7.60×10^5, 1.01×10^6이다.



(a) PIV system

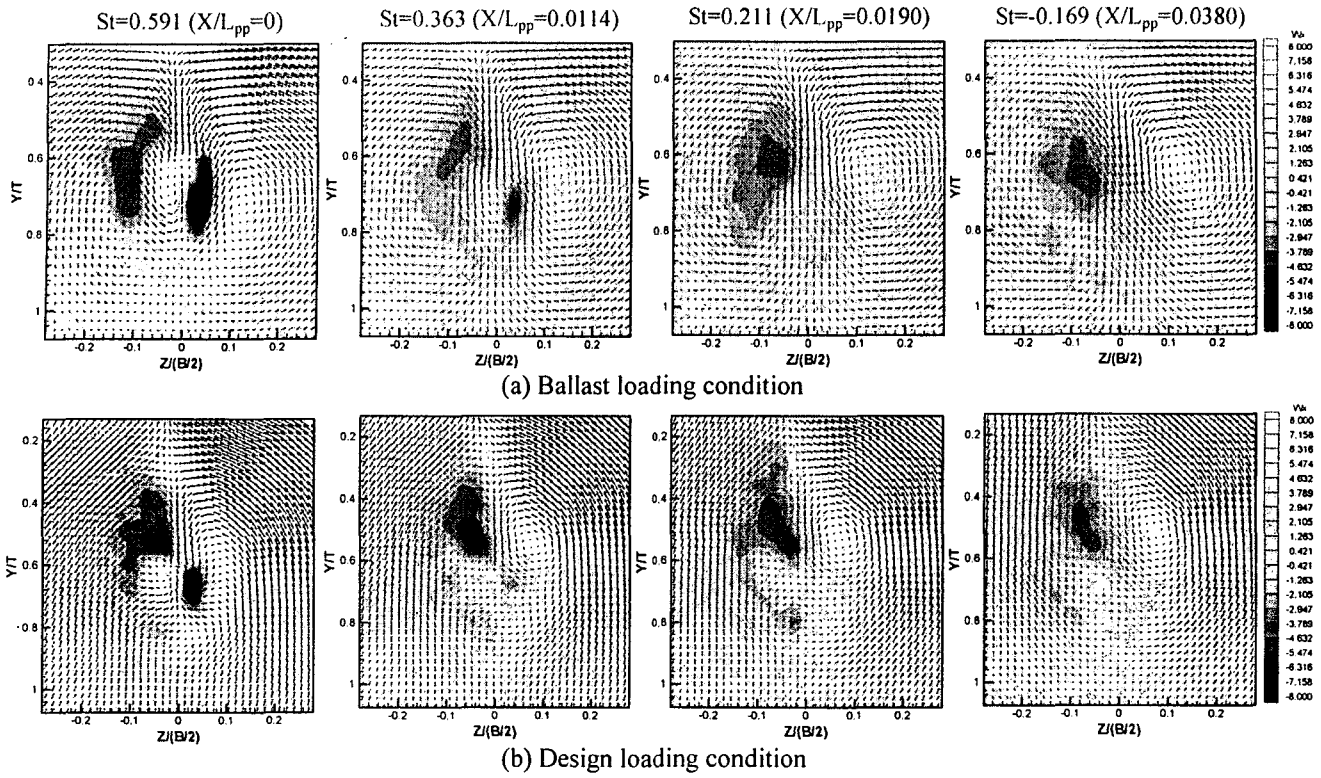
(b) Measurement sections and coordinate system

Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up and coordinate system

선미 반류의 속도장 측정을 위한 2-D PIV 시스템은 Nd:YAG 펄스 레이져, CCD 카메라, 영상획득장치, 제어 및 계산용 컴퓨터 등으로 이루어져 있으며, 레이저와 CCD 카메라는 동기장치를 통하여 동기시킴으로써 깨끗한 입자영상을 획득할 수 있었다. 본 실험에서 사용된 산란입자는 silver coated hollow grass 입자이며, 평균직경은 10 μm이다. 두께 2 mm 정도의 레이저 평면광을 선미에 조사하고 해상도가 1024×1024 pixels인 CCD 카메라를 이용하여 7×7 cm^2 크기의 측정단면에서 한번에 2 프레임씩 쌍 (pair)으로 유동영상을 취득하였다.

Fig. 1에 PIV 속도장 측정장치, 측정단면 및 좌표계가 나타나 있다. 속도장 측정은 5개의 횡단면, 2개의 종단면 (longitudinal plane, Z/(B/2)=0, 0.1) 총 7개의 단면에서 이루어 졌으며, 각각의 경우에 500개의 순간 입자 영상을 획득하여 속도장을 검출하였으며, 평균 속도와 와도 (vorticity)장뿐 아니라 난류량 계측도 이루어 졌다.

3. 결과 및 토의



(a) Ballast loading condition

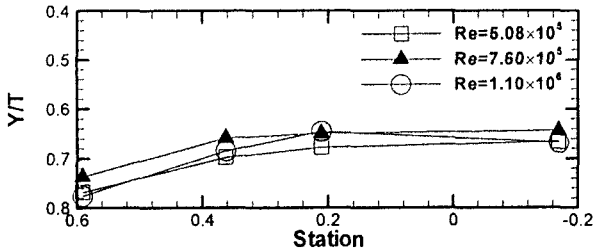
(b) Design loading condition

Fig. 2 Mean velocity and vorticity fields of two loading conditions at transverse planes, looking toward the upstream direction, in the near-wake region along X-axis for Re=7.60×10^5

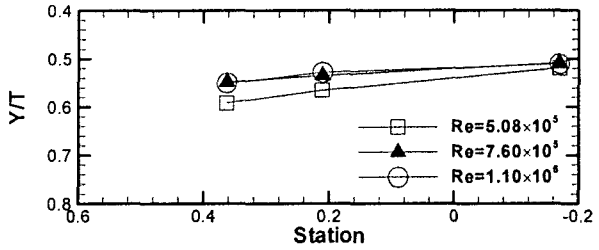
Fig. 2는 선미에서 하류 방향으로 나아가면서 측정된 선미 반류 횡단면의 속도장과 와도장을 보여주고 있다. 프로펠러 보스의 위치는 X/L$_{pp}$=0 (St=0.591), Y/T=0.603, Z/(B/2)=0에 해당한다. 선박 모형의 표면을 따라서 발달해오는 유동은 하중조건이나 레이놀즈 수에 상관없이 선미 빌지 부분의 급격한 형상변화로 인해 빌지 보오텍스 (bilge vortex)가 생성, 발달하게 된다. 이러한 빌지 보오텍스는 프로펠러 유입류의 특성을 결정하는 직접적인 영향을 주게 된다. Fig. 2에서 서로 반대방향으로 회전하고 대칭적인 형상을 가지는 빌지 보오텍스를 뚜렷이 관찰할 수 있으며, 최대 와도값은 빌지 보오텍스 중심부 근처에서 나타났다. 유동이 하류로 나아감에 따라 난류 확산 (turbulent diffusion)과 점성 소산 (viscous dissipation)의 영향으로 빌지 보오텍스의 크기는 점차 증가하고 와도값은 점차 감소하는 것을 알 수 있다. 하지만, Fig. 2를 자세히 살펴보면 발라스트 하중에서는 프로펠러 보스가 위치한 St=0.591에서 대칭적인 형상을 가지는 빌지 보오텍스가 관찰되지만, 설계 하중의 경우에는 St=0.363에서 빌지 보오텍스가 관찰되기 시작한다. 이는 설계 하중의 경우 발라스트 하중보다 프로펠러 보스에서의 유동박리가 늦게 발생하여 나타나는 결과라고 생각되어진다.

하중조건에 따른 선미 반류 유동구조의 차이는 Fig. 3에서 보이는 바와 같이 빌지 보오텍스의 궤적변화 (빌지 보오텍스 중심부의 위치)를 통해 명확히 구분할 수 있다. 빌지 보오텍스의 궤적은 각각의 횡단면 평균 속도장에서 유선 (streamline)을 계산하여 구하였다. 모든 하중조건에서 레이놀즈 수가 증가함에 따라 자유표면 방향으로 빌지 보오텍스가 이동함에 따라 궤적이 확장되는 경향을 보이며, 하류로 나아감에 따라서도 역시 궤적이 확장된다. 하지만 하중조건에 따른 궤적의 위치는 큰 차이를 보여준다. 설계 하중의 경우 빌지 보오텍스는 프로펠러 보스 (Y/T=0.603) 위쪽에서 성장 발달하지만 발라스트 하중의 경우에는 이와는 반대로 빌지 보오텍스가 프로펠러 보스 아래에 존재한다. 이와 같은 차이는 상대적으로 깊은 수심을 갖는 설계 하중과, 얕은 수심을 갖는 발라스트 하중의 수심에 따른 자유표면의 영향이 서로 다르게 나타나기 때문이라고 생각되어진다. 또한 발라스트 하중의 경우 배가 선미 방향으로 기울어진 상태로 물속에 얕게 잠겨있는 흘수 조건도 위와 같은 빌지 보오텍스 궤적의 변화에 영향을 준다고 판단되어진다.

이러한 빌지 보오텍스 궤적의 차이는 프로펠러로 유입되는 유입류에 직접적인 영향을 미쳐 Fig. 4에 보이는 바와 같이 선미 반류 축방향 속도성분의 분포에 큰 차이를 발생시키게 된다.



(a) Ballast loading condition



(b) Design loading condition

Fig. 3 Comparison of the starboard side longitudinal vortex center trajectories along Y-axis

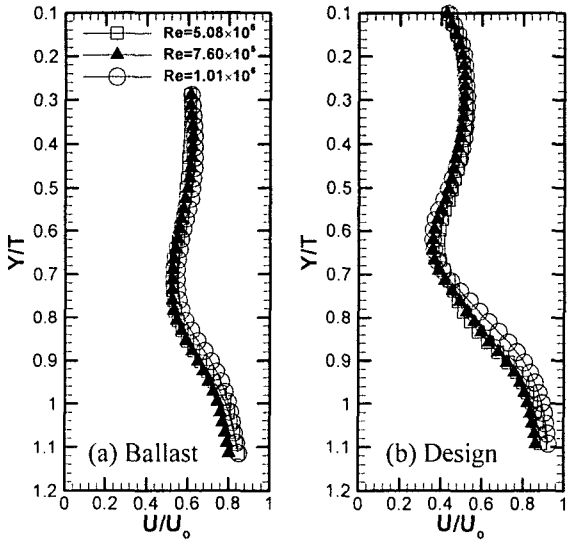


Fig. 4 Axial velocity profiles at propeller plane (station 0.363) and Z/(B/2)=0.1

속도 분포를 살펴보면 설계 하중의 경우 최대 속도감쇄가 Y/T=0.62에서 나타나지만, 발라스트 하중의 경우 Y/T=0.71에서 나타난다. 최대 속도감쇄가 나타나는 위치에서의 축방향 속도 역시 발라스트 하중에서 34%이상 크게 나타난다. 이와 같은 하중조건에 따른 유입류의 변화는 설계 하중 상태에서 최적설계가 되어있는 대부분의 장치들의 성능을 변화시키는 요인이 되며, 특히 유입류에 따라 성능에 큰 영향을 받는 프로펠러가 발라스트 하중에서 작동될 때 심각한 공동현상을 초래할 수 있고, 추진효율이 저하되는 주요 원인이 된다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 두 가지 하중조건에 대해서 컨테이너 선박 모형 반류 유동의 속도장을 PIV 기법을 이용하여 측정하고, 유동특성을 분석하였다. 모든 하중조건에서 선체의 좌우 빌지를 따라서 발달한 서로 반대 방향으로 회전하는 전형적인 빌지 보오텍스가 관찰되었다. 그러나 하중조건에 따라 빌지 보오텍스의 궤적은 서로 다르게 나타났다. 설계 하중에서는 빌지 보오텍스가 프로펠러 보스 위쪽에서 발생하며, 발라스트 하중에서는 프로펠러 보스 아래에서 발생하였다. 이러한 유동특성의 차이는 하중조건에 따라 선박의 잠김 깊이 변화에 의한 것으로 보여지며, 프로펠러 성능에 영향을 줄 수 있다. 특히, 발라스트 하중에서 심각한 공동현상이나 프로펠러 추진효율 저하를 초래할 수도 있으므로 하중조건에 따른 선미 반류 정보는 프로펠러 설계를 위해 매우 중요하다고 판단되어진다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업의 지원에 의하여 이루어 졌으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1) Lee S. J., Kim H. R., Kim W. J., and Van S. H., 2003, "Wind Tunnel Tests on Flow Characteristics of KRISO 3600TEU Container Ship and 300 KVLCC Ship Double Models," Journal of Ship Research, Vol. 47(1), pp. 24–38.

2) Kim W. J., Van S. H., and Kim D. H., 2001 "Measurement of Flows around Modern Commercial Ship Models," Experiments in Fluids, Vol. 31, pp. 567–578.

3) Kakugawa A., Takeshi H., and Makino M., 1991 "Flow Field Measurements around Marine Propellers at Towing Tank Using Fiber Optics LDV," In: Proc. 4th Int. Conf. Laser Anemometry, Advances and Applications, ASME, 5–9 August 1991, Cleveland, OH, 2, pp. 807–817.

4) Lee S. J., Koh M. S., and Lee C. M., 2003, "PIV Velocity Field Measurements of Flow around a KRISO 3600TEU Container Ship Model," Journal of Marine Science and Technology, Vol. 8, pp. 76-87.

5) Paik B. G., Lee C. M., and Lee S. J., 2004, "PIV Analysis of Flow around a Container Ship Model with a Rotating Propeller," Experiments in Fluids, Vol. 36, pp. 833-846.