

大韓造船學會論文集
 第 36 卷 第 3 號 1999 年 8 月
 Journal of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 36, No. 3, August 1999

KRISO 300K VLCC 이중모형선의 유동특성에 대한 풍동실험 연구

김학록*, 이상준**

Wind Tunnel Study on Flow Characteristics around KRISO 300K VLCC Double-body Model

by

Hak-Rok Kim*, Sang-Joon Lee**

요 약

KRISO 300K VLCC 이중모형선 주위의 유동특성을 풍동실험을 통해 연구하였다. 선체 선미 주위유동과 후류유동의 평균속도 성분, 난류강도, 레이놀즈 전단응력 및 난류 운동에너지 분포를 열선풍속계를 이용하여 측정하였다. 실험은 선미와 후류의 횡단면에서 수행하였으며, 선체 표면에서의 유동 패턴을 정성적으로 조사하기 위하여 유막법을 이용한 유동가시화도 수행하였다. 선미와 근접 후류영역은 매우 복잡한 3차원의 유동특성을 가지고 있으며, 특히 종방향 외류영역에서 고리 모양의 후류 구조를 볼 수 있었다. 그리고 중앙평행부에서의 얇은 경계층은 선미 영역을 지나며 점차 두꺼워지고 복잡한 3차원 난류 후류로 발전하였다.

Abstract

The flow characteristics around KRISO 300K VLCC double-body model have been experimentally investigated in a closed-type subsonic wind tunnel. The local mean velocity and turbulence statistics including turbulent intensity, Reynolds shear stress and turbulent kinetic energy were measured using a x-type hot-wire probe. The measurements were carried out at several transverse stations of the stern and near wake regions. The surface flow was visualized using an oil-film technique to see the flow pattern qualitatively. The flow in the stern and near wake region revealed complicated three-dimensional flow characteristics. The VLCC model shows a hook-shaped wake structure behind the propeller boss in the main longitudinal vortex region. The thin boundary layer at midship was increased gradually in thickness over the stern and evolved into a full three-dimensional turbulent wake.

발 표 : 1999년도 대한조선학회 춘계연구발표회('99. 4. 23.)

접수일자 : 1999년 4월 12일, 재접수일자 : 1999년 5월 20일

* 포항공과대학교 첨단유체공학연구원 연구원

** 정회원, 포항공과대학교 기계공학과

1. 서론

선체 주위의 유동은 매우 복잡한 3차원 난류유동의 특성을 가지고 있으며, 선박의 형상에 따라 매우 다른 유동형태를 가진다. 특히 선미와 후류 영역의 유동은 프로펠러, 타와 같은 부가장치의 영향으로 인해 매우 복잡하게 나타나므로 선형 설계를 위해서는 이에 관한 정확한 유동정보를 필요로 한다. 이러한 선체 주위의 유동에 대한 실험결과는 선형의 설계나 전산유체역학(CFD)의 예측에 필요한 검증자료로 활용된다. 특히 최근의 컴퓨터 및 관련 소프트웨어 산업의 급속한 발전으로 향후 수치 해석적 연구의 유용성을 기대할 수 있게 되었지만, 아직 이러한 수치해석 결과를 비교, 검증할 수 있는 정확한 실험데이터가 거의 없는 실정이다.

지금까지 Wigley 선형[6], SSPA 720 liner[5], 시리즈 60[7] 또는 HSVA tanker[2][4] 등과 같은 여러 가지 형상의 선형에 대한 실험 결과들이 발표되었지만 이들 선형은 모두 현재 사용되고 있는 실제적인 선박형상과는 거리가 멀고, 난류강도 분포와 같은 난류 통계치 결과가 거의 없어 실선의 유동계산결과를 검증하는 데는 적합하지 못한 면이 있다. 따라서, 실제적인 선박에 대한 수치해석 결과의 신뢰성을 확보하기 위해서는 믿을 수 있고 정확한 실험데이터의 확보가 필수적이라 하겠다.

선박은 자유표면을 경계로 하여 물과 공기의 저항을 동시에 받으면서 항해하므로, 풍동을 이용하여 선박모형의 유동 및 저항특성을 해석할 경우에는 자유표면을 교란없는 평면으로 가정하여 이중모형선의 형태로 제작된 모델을 사용하게 된다 [3]. 본 연구에서도 폐쇄형 아음속 풍동 내에 VLCC 선형의 이중모형선을 설치하여 실제 선박과 유사한 상사조건에서 모델 주위의 유동특성을 실험적으로 조사하였다.

본 연구를 통해 얻어진 실험 결과들은 지금까지 해석에 어려움이 많았던 선미 주위 유동 및 근접 후류, 특히 프로펠러 보스 주위의 와류 구조 (vortical structure) 해석 등과 같은 분야에 응

용될 수 있을 것이다. 또한, 이 결과를 조파수조 결과와 비교함으로써 수파와 선체의 상호작용 효과도 분석할 수 있을 것이다. 그리고, 선박 주위 유동에 대한 정확한 실험결과를 축적하여 데이터 베이스를 구축하고, 향후 수치해석에 필요한 검증 자료를 제공함으로써 선박 관련 국제 기술경쟁력 향상에 크게 기여할 수 있을 것이다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 실험 장치

본 연구는 시험부가 $1.8W \times 1.5H \times 4.3L$ 인 포항공대 대형 아음속 풍동에서 수행되었다. 풍동의 최대속도는 $70m/s$ 이며 난류강도는 약 0.15% 이다. 실험에 사용된 선박모델은 KRISO 에서 설계된 KRISO 300K VLCC 선형으로 주요척도를 표 1에 나타내었다.

Table 1 Principal dimensions of prototype and model

Parameter	Full scale ship	Wind tunnel model
Scale ratio λ	116.0	
Length L_{pp} (m)	320.0	2.7586
Breadth B (m)	58.0	0.5
Depth D (m)	30.0	0.2586
Draft T (m)	20.8	0.1793
Block Co. C_B	0.8098	
Reynolds No. Re	-	4.6×10^6

열선유속계(hot-wire anemometer)를 이용한 유속 측정에서 자유흐름속도(free stream velocity)를 $25m/s$ 으로 고정하였으며, 모형선의 길이(L_{pp})를 기준으로 한 레이놀즈 수는 $Re = 4.6 \times 10^6$ 이다. 그리고, 선체의 폭과 깊이를 선형의 길이로 무차원화한 모델의 횡단면과 선형의 3차원 개략도를 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다. 모델은 축척비 1/116으로 아파치 나무를 가공하

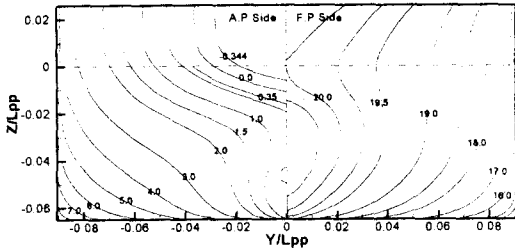


Fig. 1 Hull form of the KRISO 300K VLCC ship

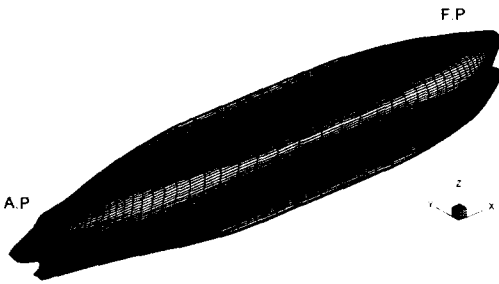


Fig. 2 3-D view of the VLCC double-body model used in this study

여 제작하였으며 선체표면을 페인트로 고르게 칠하였다. 모델의 단면적(frontal area)과 시험부의 횡단면 크기 비로 정의되는 막힘비(blockage ratio, B_r)는 약 6.6%로 이에 따른 속도보정은 따로 하지 않았다.

모형선은 수선(water line)면을 기준으로 상하 대칭인 이중모형선(double-deck) 형태인데, 이는 풍동실험에서 경상(mirror image)을 이용한 자유표면의 효과를 모사하기 위한 것이다. 실험 중 고속의 자유흐름속도에 의한 모델의 진동을 억제하기 위하여 풍동 시험부 바닥면에 지주대로 고정하였는데, 이 때 지주용 스트라트는 선체에 미치는 영향을 최소화하도록 유선형으로 제작하였다.

2.2 열선유속계

열선유속계를 이용한 속도 측정에 있어서 풍동 내부의 온도변화는 측정결과에 크게 영향을 미치므로 실험 도중에 풍동 시험부 내부의 공기온도를 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 이내로 일정하게 유지하였다.

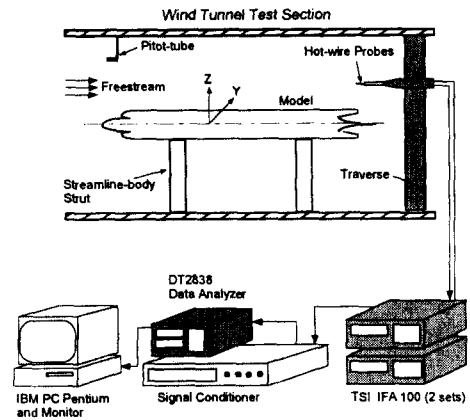


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus for flow measurement

열선(hot-wire)은 그 자신이 방향성을 느끼지 못하므로 x형 열선 프로우브와 effective yaw 보정법을 사용하여 속도의 크기와 방향을 구하였다 [1].

Fig.3에 열선유속계를 이용한 속도 측정장치의 개략도를 나타내었다. 선체주위의 유동측정에 사용된 센서는 x형 열선 프로우브(Dantec 55P61)로 정온형 열선유속계에 연결되어 있다. 열선 프로우브로부터 나온 아날로그 전압신호는 800Hz의 저 대역필터를 사용하여 노이즈를 제거한 후, 초당 4000개의 비율로 DT2838 A/D 변환기로 샘플링하여 20,000개의 디지털 데이터를 획득하여 통계 처리하였다. 열선 프로우브는 컴퓨터로 제어되는 이송장치에 의해 이송되었다.

2.3 유동가시화

선체표면에서의 정성적인 유동특성을 파악하기 위하여 유막법(oil-film method)을 사용하여 표면유동을 가시화하였다. 검정색의 무광택 락커로 균일하게 도포된 선체의 표면을 깨끗하게 닦아내고, 이산화티타늄(TiO_2) 분말과 아마유, 그리고 소량의 에레인산을 적당히 섞어 선체표면에 고르게 바른 후, 풍동을 가동한 상태에서 선체표면에서의 유막의 거동을 관찰하였다. 선체의 표면에 바른 유막은 유동에 의한 전단응력을 받아 방향성



(a) F.P region



(b) A.P region

Fig. 4 Flow pattern on the ship surface

을 띄게 되므로 표면에서의 유동특성을 나타내게 된다.

3. 결과 및 토의

3.1 유동가시화

유막법을 이용한 선체 표면에서의 유동가시화 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 선수부에서는 전체적으로 선체의 수선면에서 용골 방향으로 유동이 향하고 있으며, 선체의 모서리 부분을 휘감아 돌던 유동은 중앙평행부로 나아가며 점차 수선면과 평행하게 흐르게 된다. 선미영역에서는 횡단면의 변화와 프로펠러 보스가 위치하는 부분에서의 기하학적인 형상에 기인하여 매우 복잡한 표면유동 형태를 가진다. 프로펠러 보스를 중심으로 상하의 유동이 서로 만나게 되어 두꺼운 유막층을 형성한 부분을 볼 수 있는데, 이러한 유동의 수렴과정을 거치면서 유동이 선체의 표면에서 떨어져 박리가 일어나게 되고, 주유동방향의 종방향(longitudinal) 와류가 형성된다고 추측할 수 있다.

3.2 평균속도

선체에 고정된 직각 좌표계 (X, Y, Z)를 따라 선미와 후류 영역의 횡단면에서 측정된 평균속도

결과를 Fig. 5에 나타내었다. X, Y, Z 방향의 평균속도 성분들을 각각 U, V, W 로 표시하고, 속도성분들의 양의 방향을 각각 선수에서 선미로, 선체의 중앙부에서 우현쪽으로, 그리고 용골(keel)로부터 수선면 방향으로 정의하였다. 모든 평균속도값들은 자유흐름속도 U_0 와 모델의 수선장 길이 L_{pp} 로 무차원화하여 나타내었다. X 방향의 속도성분(U)은 명암(gray level) 등고선도로 표현하였으며, 횡유동(cross-flow)의 속도성분 V, W 는 그 크기와 방향을 벡터로 표현하여 나타내었다.

선체단면 station 1.0(Fig. 5(a))의 오목한 지역으로 횡유동이 수렴되며 프로펠러 보스 주위에 주유동 방향 속도성분의 등고선이 집중되는 형상을 보여주고 있는데, 이것으로부터 종방향 와류가 형성되기 시작함을 알 수 있다. 프로펠러 평면인 station 0.35에서 횡유동의 속도분포를 보면 프로펠러 보스 위치에서 큰 규모의 와류가 뚜렷이 형성되고 있으며 주유동 방향의 속도성분 U 도 프로펠러 보스 근방의 와류 중심에서 주위보다 작아져 고리 모양의 속도 분포를 보여주고 있다. 이와 같은 와류 유동은 선체의 단면적이 선미 끝부분에서 급격하게 감소함에 따라 프로펠러 보스와 수선면 사이 공간으로 유동이 수렴하면서 프로펠러 보스 쪽으로 하강하는 유동과 용골이 위치하는 지역으로부터 상승하는 유동이 프로펠러 보스 높이에서 만나게 되면서 형성된 종방향 와류가 선체의 표면에서 떨어져 나가면서 형성되는 것으로 보인다. Fig. 5(c)와 (d)는 후류영역 station -0.4525, -2.0에서 측정된 평균속도 결과를 나타낸 것이다. 큰 규모의 종방향 와류에 비해서는 약하지만 수선부근에서 2차 와류(secondary vortex)의 생성도 관찰할 수 있었다. 이와 같은 2차 와류는 선형의 단면적이 급격하게 감소함에 따라 선체 표면으로부터 분리되어 생성되는 것으로 보인다. 선체에서 보다 먼 station -2.0에서는 앞의 측정 단면에 비해 와의 크기와 세기가 점차 약해지고 있으며, 주유동 방향 속도성분 U 의 감쇠(deficit)도 많이 회복되고 있다.

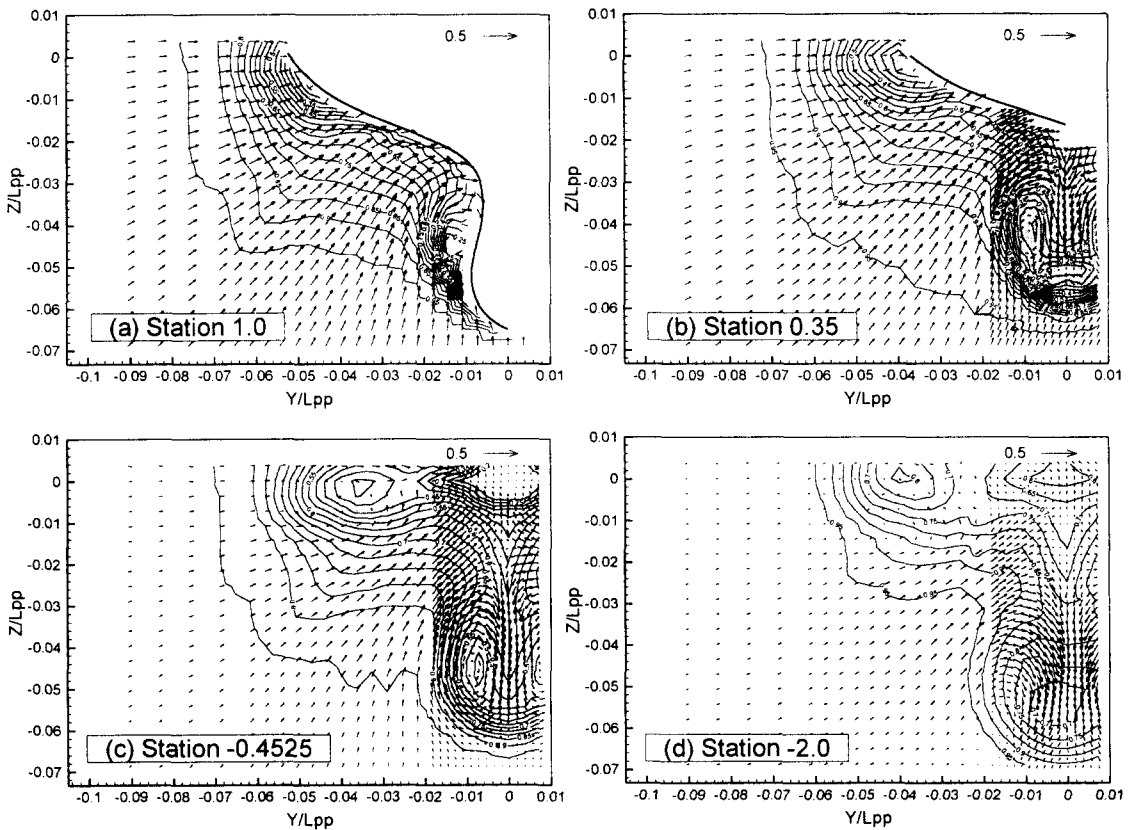


Fig. 5 Contour plots of axial velocity(U/U_0) and cross-flow velocity(V/U_0 and W/U_0)

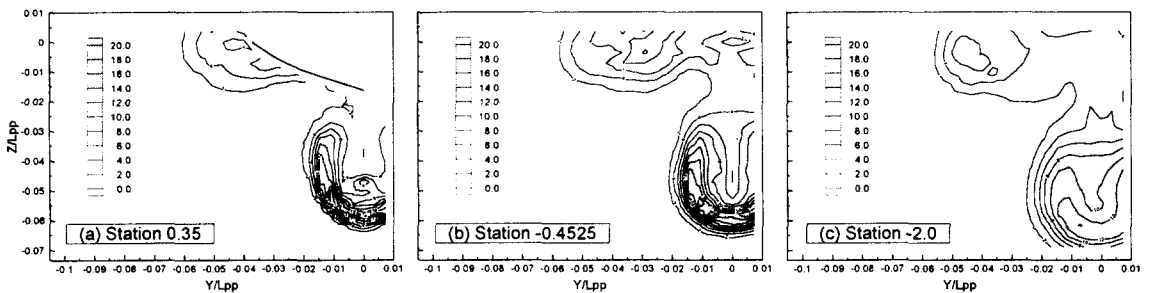


Fig. 6 Contour plots of Reynolds normal stress $u^2/U_0^2 (\times 10^3)$

3.3 레이놀즈 응력

Fig. 6 ~ 8은 선미와 후류영역에서 구한 레이놀즈 수직응력(난류강도) u'^2 , v'^2 그리고 w'^2 의 분포를 나타낸 것이다. 레이놀즈 응력 성분들의 상대적인 크기는 와류 유동의 생성과 감쇠, 그리

고 압력 기울기에 대한 정보를 제공하며, 난류 유동의 비등방성(anisotropy)을 나타내기도 있다. 난류강도의 결과들을 비교하여 보면, 평균속도의 결과에서 종방향 와류가 존재하는 곳에서 큰

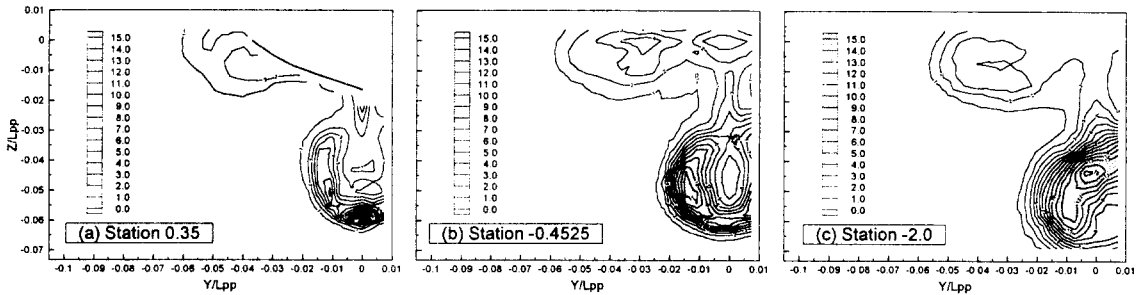


Fig. 7 Contour plots of Reynolds normal stress $v^2/U_0^2 (\times 10^3)$

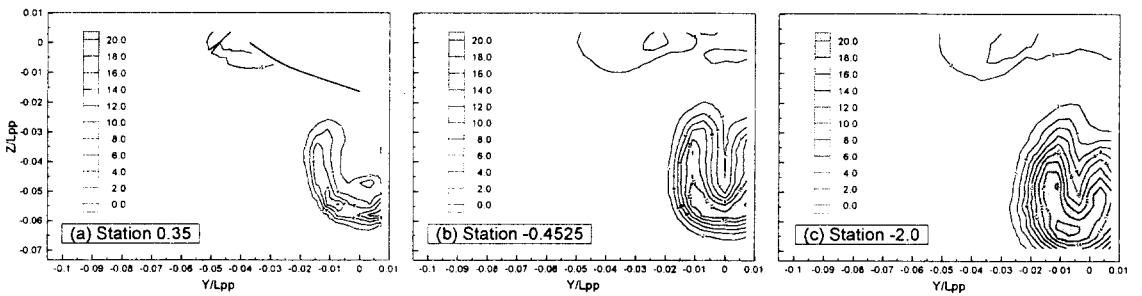


Fig. 8 Contour plots of Reynolds normal stress $w^2/U_0^2 (\times 10^3)$

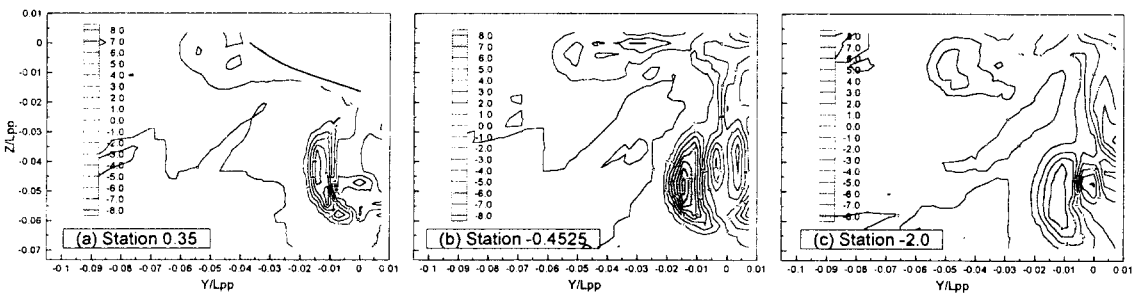


Fig. 9 Contour plots of Reynolds shear stress $u'v'/U_0^2 (\times 10^3)$

값을 가지며, 대체로 주유동 방향의 난류강도 u'^2 가 측면방향(Y) 난류강도 v'^2 에 비해 다소 큰 값을 가지며, 수직방향(Z) 난류강도는 상대적으로 매우 낮은 값을 보여주고 있다. 또한 평균속도 분포에서 나타났던 고리 모양의 유동구조는 난류값 분포에서도 잘 나타나고 있으며, 수선면 가까이 2차 와류는 주위에 비해 비교적 큰 값을 가지고 있다. 하류로 나아감에 따라 응력 성분들의 크기는 점차 감소하고 있지만, 일정 크기 이상의 난류 값을 갖는 전단층 영역은 계속 확대되고 있음을 볼 수 있다. 특히 station -0.4525에 비해 station -2.0 위치에서는 종방향 와류의 중심위

치가 크게 하강하고 있다. 선미부분과 근접 후류 영역에서는 응력값들이 큰 차이를 보이나, 하류로 나아감에 따라 점차 등방성 구조를 회복하게 되며, 응력값들의 크기도 감소하게 된다.

전단응력 $\overline{u'v'}$ 의 분포를 나타낸 Fig. 9을 보면 station -0.4525에서 넓은 영역에서 큰 값을 갖고, 하류로 나아감에 따라 크기가 감소하는 유동특성을 보여주고 있다. 프로펠러 보스 위치와 수선면의 대칭축 가까운 영역에서 상대적으로 큰 값을 가진다. 이는 주유동 방향의 주 와류와 2차 와류의 형성에 기인한다.

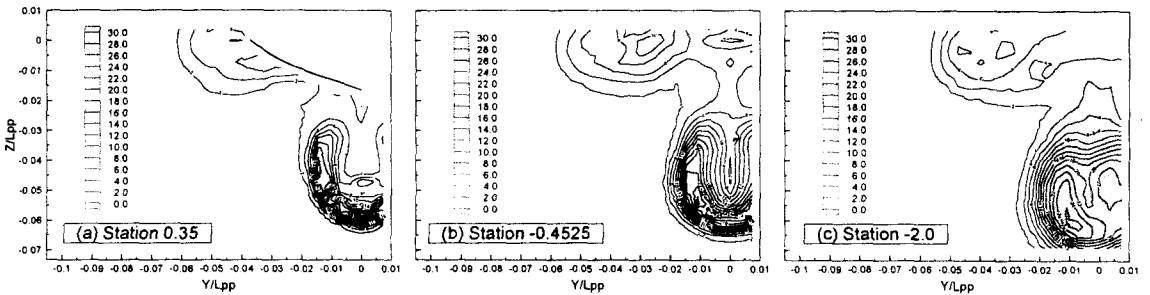


Fig. 10 Contour plots of turbulent kinetic energy $k = \rho/2 (u'^2 + v'^2 + w'^2)/U_0^2 (\times 10^3)$

3.4 난류 운동에너지

각 단면에서 구한 난류 운동에너지의 분포를 Fig. 10에 나타내었다. 대체로 난류 운동에너지는 수직응력성분 u'^2 과 비슷한 분포형태를 보여주고 있는데, 이것은 다른 응력 성분보다 주유동 방향 변동속도성분 u' 이 상대적으로 큰 값을 가지기 때문이다. 선미로부터 더 이상 선체가 존재하지 않는 단면을 지나 후류영역으로 이동함에 따라 선체의 중심축 부근에서 난류 운동에너지의 값은 증가하고 있는데, 이것은 프로펠러 보스 후방에서 보스의 양 측면을 따라 발달한 와동이 확장함에 따라 중심축 부근의 속도 감쇠가 회복되고 있기 때문으로 보인다.

4. 결론

KRISO 300K VLCC 이중모형선 주위유동의 평균속도 성분과 난류 특성을 풍동실험을 통하여 연구하였다. 선미영역에서 형성되기 시작한 중방향 와류는 프로펠러 보스 후방에 고리 모양의 분포를 가지게 하며, 후류 영역의 수선부근에서 2차 와류의 생성도 확인하였다. 레이놀즈 응력과 난류 운동에너지는 중방향 와류의 영향으로 프로펠러 단면의 하류에서 매우 큰 값을 가지고 있다. 본 연구에서 구한 실험결과는 VLCC 선박설계에 필요한 데이터베이스를 구축하고 향후 난류모델 개발에 필요한 비교자료로 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원 선박해양공학연구원(KRISO)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이

과정에서 많은 도움을 주신 반 석호 박사님과 김우전 박사님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Bruun, H. H., "Hot-Wire Anemometry", Oxford University Press, 1995
- [2] ITTC, "Report of the Resistance and Flow Committee", Proc. 18th ITTC, Vol. 1, pp. 47-95, Kobe, Japan, 1987
- [3] Joubert, P. N. and Matheson, N., "Wind Tunnel Test of Two Lucy Ashton Reflex Geosims", Journal of Ship Research, Vol. 14, pp. 241-276, 1970
- [4] Knaack, T., Kux, J. and Wiegardt, K., "On the Structure of the Flow Field on Ship Hulls", Proc. Osaka Int. Colloq. Ship Viscous Flow, pp. 192-208, Osaka, Japan, 1985
- [5] Larsson, L., "Boundary Layers of Ships, Part III : An Experimental Investigation of the Turbulent Boundary Layer on a Ship Model", SSPA, Gothenburg, Sweden, Report No. 46, 1974
- [6] Patel, V. C. and Sarda, O. P., "Mean-flow and Turbulence measurements in the Boundary Layer and Wake of a Ship Double Model", Experiments in Fluids, Vol. 8, pp. 319-335, 1990
- [7] Toda, Y., et al., "Measurements in the Stern and Wake flow of a Series 60 Ship With and Without a Propeller", Iowa Institute of Hydraulic Research, University of Iowa, IIHR Report No. 326, 1988