

KRISO 3600TEU 컨테이너 모형선 주위 유동의 난류구조에 관한 실험적 연구

김학록*, 이상준**

Experimental Study on Turbulent Structure of Flow around KRISO 3600TEU Container Double-deck Model

by

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

요 약

KRISO 3600TEU 컨테이너 이중모형선 주위 유동의 평균속도와 난류성분들을 풍동실험을 통해 실험적으로 연구하였다. 선미와 후류의 여러 단면에서의 속도분포를 x형의 열선 프로우브로 측정하여 평균속도와 레이놀즈 응력, 그리고 난류 운동에너지 등을 구하였다. 선미영역과 후류영역에서의 유동은 매우 복잡한 3차원 유동특성을 보여주고 있다. 측정 결과로부터 주유동 방향의 와 구조의 형성과 이러한 와 유동이 후류의 유동에 미치는 영향을 알 수 있었으며, 하류로 나아감에 따라 전단층 영역이 점차 확장되어짐을 확인하였다. 이와 같은 선체주위 유동의 난류 성분들의 측정은 향후 수치계산 및 정확한 난류모델의 개발에 비교자료로 사용되어질 것이다.

Abstract

The flow characteristics around the KRISO 3600TEU container ship model have been experimentally investigated in a subsonic wind tunnel. The mean velocity and turbulence characteristics in the stern and wake regions were measured using an x-type hot-wire probe. The flow characteristics in the stern and near wake regions revealed a complicated three-dimensional flow pattern. The measured results showed clearly the formation of longitudinal vortices and their effect on the flow pattern in the wake region. The shear layer developed along the ship model expands slowly to the downward direction. The turbulence statistics measured can be used as comparative data of numerical simulations and provide insights into development of accurate turbulence models for the ship design.

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

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

* 포항공과대학교 첨단유체공학연구소 연구원

** 정회원, 포항공과대학교 기계공학과

1. 서론

선형의 변화가 선체 주위의 유체역학적 특성에 미치는 영향은 매우 크며, 또한 프로펠러를 포함한 선미 주위의 유동은 매우 복잡한 3차원 유동특성을 나타내므로 이에 관한 정확한 예측은 매우 힘들다. 또한, 실선의 설계를 위한 기본 예측자료로서 오래 전부터 단순화된 모형선 모델을 이용하여 선체 주위의 유동을 측정해 오고 있으나, 실선과 모형선 실험 사이의 레이놀즈 수의 큰 차이로 인해 실선 주위의 유동을 정확하게 예측하기에는 어려움이 따른다.

지금까지 여러 가지 기하학적 형상의 선형에 대한 실험 및 수치 해석적 연구들이 수행되어져 왔다. 실험적인 연구로는 SSPA 화물선[4], HSVA 탱커[2], 시리즈 60 hull[7]과 같은 형상의 선박 모델에 관한 유속측정이 이루어졌다. 그러나 대부분의 기존 연구들은 선미와 후류의 유동을 묘사하는데 경계층 좌표계를 사용하였고, 선미의 좁은 영역에 한정된 측정을 하였다. 그리고 예인수조 실험을 통해 선체주위 유동의 평균속도와 표면압력 분포를 주로 해석하였다. 반면에 후류영역의 3차원 유동에 대한 난류량 측정은 거의 이루어지지 않았다[5].

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. 본 연구에서도 폐쇄형 아음속 풍동 내에 실제 컨테이너 선박과 유사한 이중모형선 형태의 선박모델을 설치하여 선형 주위의 유동특성을 조사하였다.

선체주위 유동에 관한 몇 가지 유동특성을 살펴보면[6], 선수부의 경계층 유동은 수선으로부터 용골 방향으로 움직이며, 이러한 유동은 선미에서 선형이 급격하게 변함에 따라 와 구조 형성에 영향을 주게 된다. 또한 선미를 지나 후류로 나아감에 따라 점성과 비점성 유동의 상호작용이 일어나며, 결과적으로 점성소산(viscous dissipation)

이 일어나게 된다.

본 연구에서는 국내에서 건조되고 있는 실제 선박에 가까운 KRISO 3600TEU 컨테이너 이중모형선을 풍동 시험부에 설치하고, 선미와 후류영역에서의 평균속도와 난류 통계치들을 측정함으로써 선박 주위 유동에 대한 보다 자세한 이해와 함께 향후 수치해석이나 난류모델 검증에 필요한 비교자료로 활용하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

본 연구는 시험부 크기가 $1.8W \times 1.5H \times 4.3L$ 인 포항공대 대형 아음속 풍동에서 수행되었다. 풍동의 최대속도는 $70m/s$ 이며 난류강도는 약 0.15% 이다. 실험하는 동안 풍동 시험부 내부 온도를 일정하게 유지하기 위하여 80냉동톤 용량의 열교환기가 풍동 내부에 설치되어 있다.

실험에 사용된 모델은 KRISO에서 제작된 3600TEU급 컨테이너선이며, 선형의 주요제원을 표 1에 나타내었다. 컨테이너선 모델은 풍동실험에서 자유표면 효과를 모사하기 위하여 수선면을 기준으로 대칭인 이중모형선 형태로 제작되었다. 모형선 단면은 선수(F.P.)와 선미(A.P.)를 기준으로 20개의 station으로 나누어 선수부를 station 20.0, 선미부를 station 0.0으로 정하였으며, 프로펠러 단면은 station 0.35에 위치하게 된다. 이중모형선의 선수부분에는 유동의 난류축진을 위하여 직경 $1.4mm$ 의 강철 stud를 $10mm$ 간격으로 station 19.0과 station 20.3 위치에 높이가 $2mm$ 되게 설치하였다. Fig. 1과 Fig. 2은 선체의 폭과 깊이를 선형의 길이(L_{pp})로 무차원화한 이중모형선의 횡단면 분포와 선형의 3차원 입체도를 나타낸 것이다. 실험시 자유흐름속도는 $U_0 = 25m/s$ 로 고정하였으며, 모형선의 길이에 기준한 레이놀즈 수는 $Re = 3.3 \times 10^6$ 이었다.

2.2 열선유속계

선체주위 유동의 속도를 항온형 열선유속계(hot-wire anemometer)를 사용하여 측정하였

Table 1 Principal dimensions of prototype and model

Parameter	Full scale ship	Wind tunnel model
Scale ratio λ	115.0	
Length L_{pp} (m)	230.0	2.0
Breadth B (m)	32.2	0.28
Depth D (m)	23.0	0.2
Draft T (m)	10.8	0.0939
Block Co. C_B	0.65	
Reynolds No. Re	-	3.3×10^6

다. Fig. 3은 유속측정에 사용된 열선유속계의 개략도를 나타낸 것이다. 속도측정에 사용된 열선은 직경이 $5\mu m$ 이고 텅스텐에 백금을 코팅 처리한 x형 프로우브(Dantec 55P61)를 이용하였다. 이 열선프로우브는 TSI IFA 100 항온형 열선유속계에 연결되어 있고 여기서 나온 아날로그 신호는 A/D 변환기(DT2838)를 거쳐 디지털 신호로 변환된다. 열선유속계를 이용한 속도측정에 있어서 풍동 내부의 온도변화는 측정결과에 큰 영향을 미치게 되므로 실험 도중에 온도를 일정하게 유지시켜야 한다. 본 실험에서는 풍동 시험부 내부의 공기온도를 $\pm 0.1^\circ C$ 이내로 일정하게 유지하였다.

x형 열선 프로우브를 사용하여 속도의 방향성을 알아내기 위하여 effective yaw 보정법[1]을 사용하였다. 열선은 그 자신이 방향성을 느끼지 못하므로 열선의 출력크기를 이용하여 속도의 크기와 방향을 유추하여야 한다.

선미와 후류영역의 많은 측정점에서 속도 데이터를 얻어야 하므로 열선 프로우브는 컴퓨터로 제어되는 이송장치에 의해 이송되었다. 이송장치의 backlash에 따른 최대오차는 약 $0.5mm$ 정도이다. 각각의 station에서 속도 측정구간은 유동의 대칭성을 확인하기 위하여 대칭면인 $Y=0$ 또는 $Z=0$ 주변영역을 포함하여 선체의 우현쪽에서 주유동 속도성분(U)이 자유흐름속도(U_0)와 같은 크기를 갖는 구간까지 측정하였다.

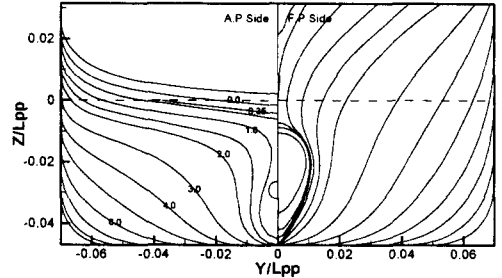


Fig. 1 Hull form of the KRISO 3600TEU container ship

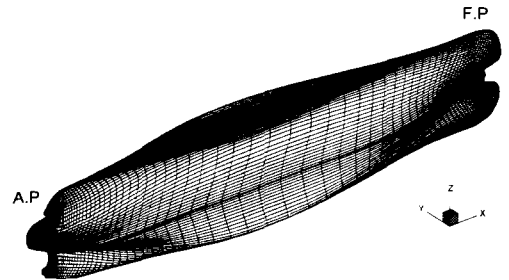


Fig. 2 3-D view of the container double-deck model

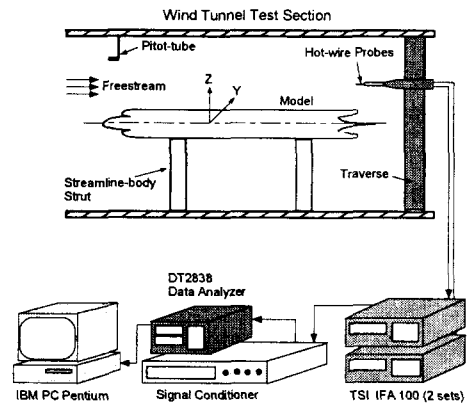


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus for velocity measurement

2.3 불확실성 해석

본 연구에서 사용된 측정장치와 측정방법에 기인한 실험데이터의 불확실성(uncertainty)을 20:1 odds 방법을 이용하여 오차해석을 행하였다[3]. 풍동 실험을 통하여 바로 측정되어지는 값

들(평균속도, 레이놀즈 응력)과 측정된 값들로부터 간접적으로 계산되어지는 값(난류 운동에너지)에 대하여 측정 오차를 평가하였다. 오차평가는 주로 선체 유동의 대칭성이 존재하는 수직면 ($Y=0$)과 수선면($Z=0$)을 중심으로 선미부와 후류영역에 걸쳐서 수행되었다. 각각의 측정 물리량에 관한 오차범위는 다음과 같다.

Mean velocity U	:	$\pm 0.5 \%$
Mean velocity V	:	$\pm 0.7 \%$
Mean velocity W	:	$\pm 1.0 \%$
Reynolds normal stress u'^2	:	$\pm 7.8 \%$
Reynolds normal stress v'^2	:	$\pm 12.1 \%$
Reynolds shear stress $\overline{u'v'}$:	$\pm 8.5 \%$
kinetic energy k	:	$\pm 12.8 \%$

x형 열선 프로우브를 이용하여 두 방향의 속도 성분을 측정하였으므로 2차 모멘트 값들의 오차가 다소 크게 나타나고 있다. 그러나 일반적인 난류 전단유동에서 이들 오차는 보통 20%를 상회하는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구를 통해 구한

실험결과가 상당히 정확하고 신뢰성있는 결과임을 알 수 있다.

3. 결과 및 토의

3.1 평균속도

본 연구에서는 일반적인 경계층 좌표, 즉 국부적으로 선체표면에 수직한 방향으로 설정한 좌표계를 사용하지 않고 선체에 고정된 직각 좌표계 (X, Y, Z)를 따라 유속을 측정하였다. 좌표계 X, Y, Z 에 따른 평균속도 성분들을 각각 U, V, W 로 표시하고, 속도성분들의 양의 방향을 각각 선수에서 선미로, 선체의 중앙부에서 우현으로, 그리고 용골로부터 수선면 방향으로 정하였으며, U 는 등고선으로, V, W 는 벡터형태로 나타내었다. 측정된 평균속도 성분들은 모두 자유흐름속도 U_0 로 무차원화 하였으며, Y 축과 Z 축 방향 길이는 모델의 수선장 길이 L_{pp} 로 무차원화하여 표시하였다. 그리고, 모형선 하부에 있는 유선형 지지대에 의한 유동의 교란을 고려하여 유속측정은 상부 대칭면에서 수행되었으며, 측정결과는 자유표면이

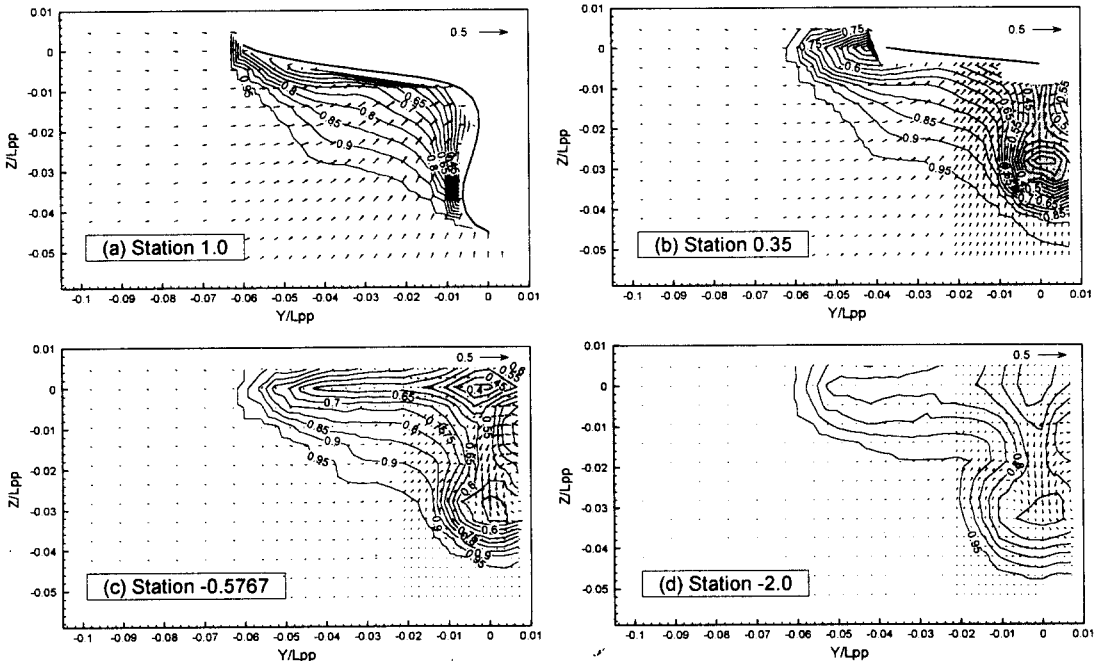


Fig. 4 Mean velocity contours of axial velocity(U/U_0) and cross-flow velocity(V/U_0 & W/U_0)

위쪽에 위치하도록 나타내었다.

Fig. 4는 열선유속계를 사용하여 측정된 선미와 후류영역에서의 평균속도 결과를 나타낸 것이다. 결과에서 보듯이 선체주위나 후류영역에서 주유동 방향으로 어떠한 역방향 속도성분도 나타나지 않고 있다. 선형의 곡률 변화가 심하고 복잡한 기하학적 형상을 갖는 station 1.0에서의 결과(Fig. 4a)를 보면, $Y/L_{pp} \cong -0.01$ 위치에서 시계방향으로 회전하는 와 구조의 생성이 감지되고 있다. 이와 같은 종방향(longitudinal) 와류는 선형의 단면적이 급격하게 바뀔 때 따라 유동이 선체 표면을 매끄럽게 따라가지 못하고 박리되어 형성된다고 추측할 수 있다. 프로펠러가 위치하게 되는 단면인 station 0.35에서의 평균속도 결과(Fig. 4b)를 보면 종방향(longitudinal) 와류의 존재를 뚜렷이 확인할 수 있다. 또한 수선면에 가까운 선체의 끝단 부근에서 크기는 작지만 2차 와류의 생성도 나타나고 있다. 이와 같은 2차 와류는 익형의 끝단에서 발생하는 wing tip vortex와 매우 유사하다고 할 수 있다. 선형이 더 이상 존재하지 않는 후류 영역(Fig. 4c, Fig. 4d)에서는, 후류의 중심축($Y=0$)에서 주유동 방향 속도 성분(U)의 감쇠가 선미부에 비해 다소 크게 나타나고 있다. 중심축 부근에 존재하는 종방향 와류는 선미로부터 완전히 떨어져 나와 후류영역으로 나아갈수록 팽창되고 있다. 선형의 폭 방향 끝단에서 유동박리된 2차 와류는 점차 약해지며, 횡유동의 크기도 작아진다.

3.2 레이놀즈 응력

Fig. 5와 Fig. 6은 선미와 후류영역에서 구한 레이놀즈 법선응력 u'^2 과 v'^2 의 분포를 U_o^2 으로 무차원화하여 나타낸 것이다. 주유동 방향 속도성분의 법선응력(난류강도) u'^2 의 경우, 대체로 유동이 하류로 진행됨에 따라 난류 전단층의 폭은 더욱 팽창하지만, 난류값의 크기는 점성소산에 의해서 점차 감소함을 알 수 있다. 선체의 중심축($Y=0$) 부근에서의 난류강도 분포에서 국부적으로 큰 값을 가지게 되는 영역이 존재하는데, 이것은 종방향 와류의 영향에 기인한 것으로 보인다.

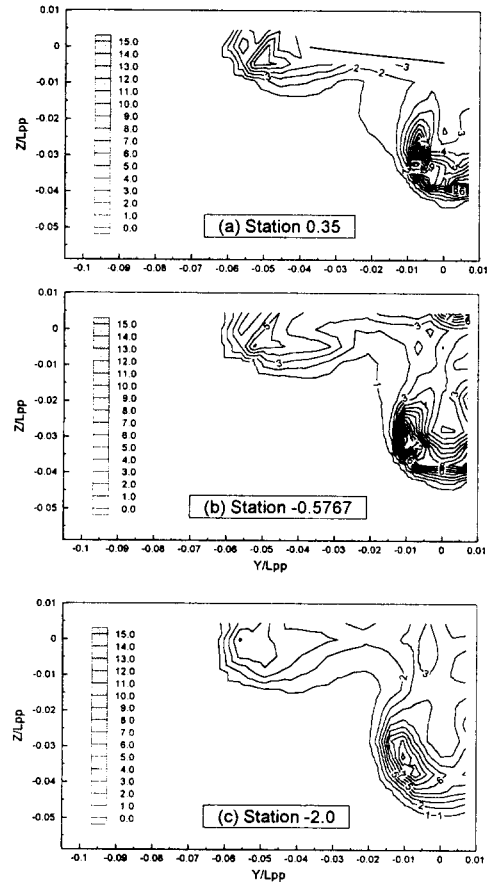


Fig. 5 Contour plots of Reynolds normal stress $u'^2/U_o^2 (\times 10^3)$

또한, 수선면이 위치하는 선체의 측면에서 유동박리된 2차 와류의 영향으로 국부적으로 큰 난류값을 가지고 있다. 수직방향 속도성분의 난류강도 v'^2 의 분포는 u'^2 에 비해 크기가 훨씬 적게 나타났다. 하류로 나아감에 따라 전단층의 폭은 다소 확산을 하고 있지만, 주유동 방향 난류강도 분포를 나타낸 u'^2 의 결과와는 달리, 2차 와류의 영향이 거의 나타나지 않고 있다. 이것은 선체 폭 방향으로의 난류섭동이 적기 때문으로 보인다. 지면관계상 본 논문에는 나타내지 않았지만 법선응력 w'^2 결과를 u'^2 , v'^2 와 함께 비교하여 보면, 근접후류 영역에서는 u'^2 값이 상대적으로 큰 값을 가지는 비등방성 구조를 가지나 하류로 나아감에 따라 점차 등방성 구조를 회복하고 있다.

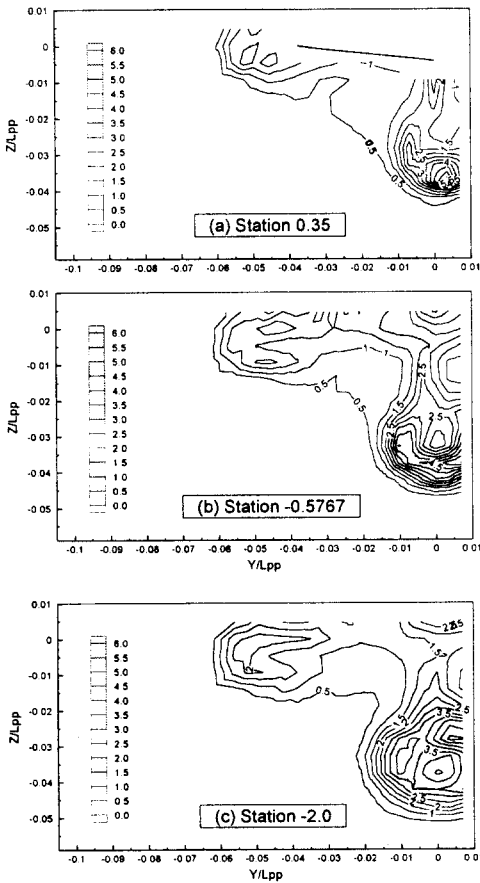


Fig. 6 Contour plots of Reynolds normal stress $v^2/U_0^2 (\times 10^3)$

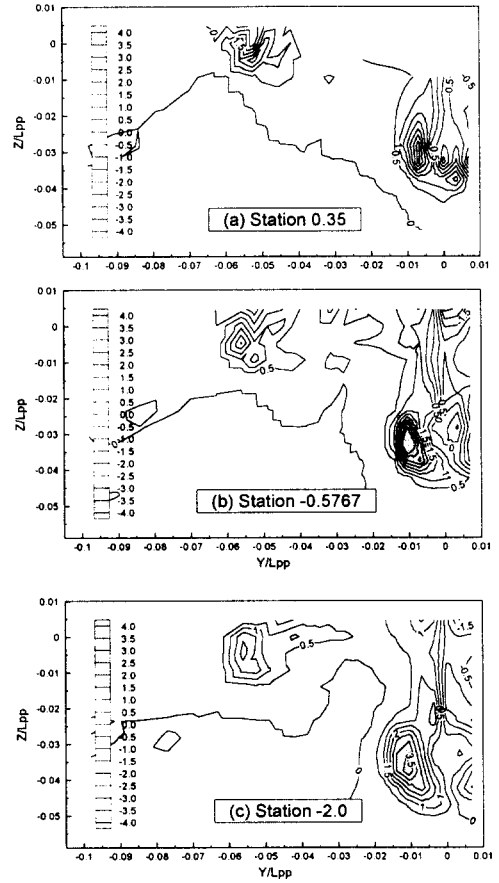


Fig. 7 Contour plots of Reynolds shear stress $u'v'/U_0^2 (\times 10^3)$

Fig. 7은 레이놀즈 전단응력 $\overline{u'v'}$ 의 분포를 나타낸 것이다. 선미에서 후류영역으로 나아감에 따라 전단응력의 절대값이 감소하는 일반적인 선체후류의 유동특성을 보여주고 있다. 그리고 종방향 와가 존재하는 영역에서는 국부 최대값을 가지며, 2차 와류가 존재하는 선체 측면의 끝단 위치에서도 다소 큰 $\overline{u'v'}$ 값을 가진다.

3.3 난류 운동에너지

측정된 각각의 레이놀즈 법선응력 성분들로부터 난류 운동에너지(turbulent kinetic energy)를 구하였다. Fig. 8은 선체의 후류영역에서 구한 난류 운동에너지 분포를 보여주고 있다. 난류 운동에너지는 선미로 향하면서 점차 증가하다가

station -0.5767 부근에서 국부 최대값을 가진 후, 하류로 나아감에 따라 전단층에서 발생하는 점성소산에 의해서 다시 감소하는 특징을 보여주고 있다. 그러나, 어느 정도 이상의 난류 운동에너지 값을 갖는 전단층 영역은 하류방향으로 나아갈수록 점점 확대되고 있다. 앞서서도 설명하였듯이, 종방향 와류와 2차 와류가 발생하는 영역에서의 난류 운동에너지는 국부적으로 큰 값을 가지는 것으로 나타났다. 전반적으로 난류 운동에너지의 분포는 레이놀즈 법선응력 u'^2 와 비슷한 분포를 보여주고 있는데, 이것으로부터 컨테이너선 선체 주위 유동의 난류 운동에너지를 결정하는 데 있어서 주유동 방향 속도성분의 응력이 가장 지배적임을 알 수 있다.

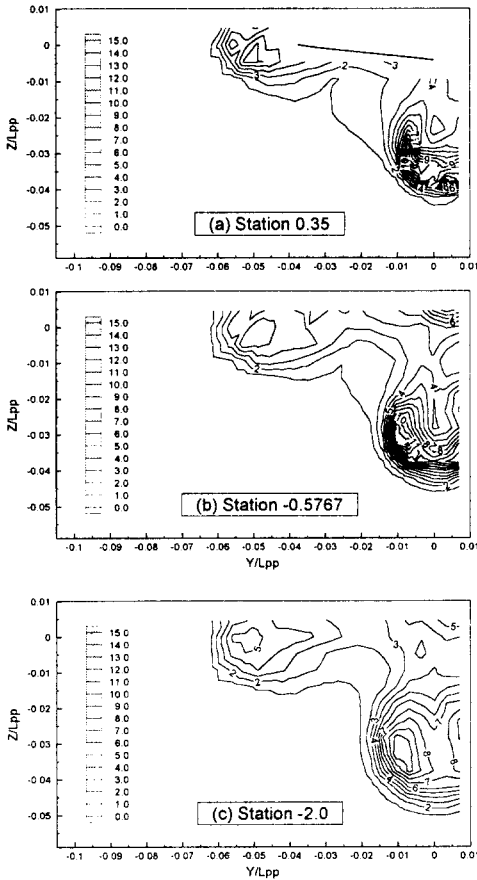


Fig. 8 Contour plots of turbulent kinetic energy
 $k = \rho/2 (u'^2 + v'^2 + w'^2)/U_0^2 (\times 10^3)$

4. 결론

본 연구에서는 KRISO 3600TEU 컨테이너 선형의 이중모형선을 이용하여 선체주위 유동의 평균속도와 난류특성을 풍동실험을 통하여 해석하였다. 평균속도의 결과로부터 선미와 후류영역에서 생성된 종방향 와 유동이 지배적인 역할을 할 수 있었다. 또한 크기가 상대적으로 작은 2차 와류를 수선면에 가까운 선체 끝단 부근에서 확인할 수 있었다. 난류성분들의 측정을 통하여 하류로 나아가면서 전단층 영역이 더욱 확장됨을 확인하였고, 근접후류 영역에서의 난류성분들의 비등방성은 하류로 나아감에 따라 점차 등방성을

회복하였다. 본 연구결과들은 선형 설계를 위한 수치해석 결과와의 비교나 난류모델 검증에 필요한 기초자료로 활용되어질 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원 선박해양공학연구센터(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 (International Towing Tank Conference), vol. 1, pp. 47-95, Kobe, Japan, 1987
- [3] Klein, S. J. and McClintock, F. A., "Describing Uncertainties in Single Sample Experiments", Mechanical Engineering, Vol. 117, pp. 3-8, 1953
- [4] 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
- [5] Patel, V. C. and Sarda, O. P., "Mean-flow and Turbulence measurement in the Boundary Layer and Wake of a Ship Double Model", Experiments in Fluids, vol. 8, pp. 319-335, 1990
- [6] Sarda, O. P., "Turbulent Flow Past Ship Hulls-An Experiment and Computational Study", Ph.D. Thesis, Mech. Eng., University of Iowa, 1986
- [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, IHR Report, 1988