

PIV를 이용한 KRISO 3600TEU 컨테이너선모형선의 반류 측정 및 해석

이상준*, 고민석**, 이정묵***

PIV Measurements of Wake behind a KRISO 3600TEU Container Ship Model

Sang-Joon Lee*, Min-Seok Koh** and Choung-Mook Lee***

요 약

KRISO 3600 TEU 컨테이너 모형선의 반류 유동을 PIV 기법을 이용하여 측정하였다. 본 실험은 시험부의 크기가 $1.0^W \times 1.0^H \times 4.5^L$ (m)인 회류수조에서 수행되었는데, 선박 반류의 종단면과 횡단면에서 속도장을 측정함으로써 반류의 유동특성을 해석하였다. 실험시 횡단면 측정은 반류영역인 Station $-0.5767, -1, -3$ 의 3단면에서 수행하였고, 종단면의 경우 배의 중심 평면에서 우현방향으로 $Z/(B/2)=0, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6$ 의 5단면에서 속도장을 측정하였다. 자유흐름속도는 $U_0=0.6$ m/s로 고정하였는데, 수선간 길이 $L_{pp}=1.5$ m에 기초한 레이놀즈수는 약 $Re=9 \times 10^5$ 이다. 각각의 측정 단면에서 순간속도장 400장을 구하고, 이들을 앙상블(ensemble) 평균하여 평균속도장, 난류운동 에너지 및 와도의 공간분포를 구하였다. 반류영역에는 서로 반대방향으로 회전하는 한 쌍의 longitudinal 보오텍스가 존재하며 수선 근처에 반대방향으로 회전하는 2차 와류가 발생하였다. 하류로 나아감에 따라 longitudinal 보오텍스와 2차 와류는 난류확산과 점성소산에 의하여 강도가 약화되지만 반류영역은 점차 확장된다.

*Keywords: Wake(반류), PIV(입자영상유속계), Longitudinal vortex(longitudinal 보오텍스)

Abstract

The flow characteristics around KRISO 3600TEU container ship model have been experimentally investigated in a circulating water channel. The instantaneous velocity vectors were measured using 2-frame PIV measurement system. The mean velocity fields and turbulent statistics including turbulent kinetic energy and vorticity were obtained by ensemble-averaging 400 instantaneous velocity fields. The free stream velocity was fixed at 0.6m/s and the corresponding Reynolds number was 9×10^5 . The test sections were divided into two regions ; three transverse sections of the wake region (Station $-0.5767, -1, -3$) and five longitudinal sections of the wake ($Z/(B/2)=0, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6$). In the wake region, large-scale longitudinal vortices of nearly same strength are symmetric with respect to the wake centerline and a relatively weak secondary vortex is formed near the waterline. With going downstream, the strength of longitudinal vortex is decreased and the wake region expands.

접수일자: 2001년 12월 21일, 승인일자: 2002년 8월 5일

* 학생회원, 포항공과대학교 기계공학과 석사과정(E-mail:74msqueen@hanmail.net)

** 정회원, 포항공과대학교 기계공학과 정교수(E-mail:sjlee@postech.ac.kr)

*** 정회원, 포항공과대학교 기계공학과 정교수(E-mail:cmlee@postech.ac.kr)

1. 서언

선형의 변화는 선체주위의 유동의 유체역학적 특성에 미치는 영향이 매우 크다. 일반적으로 선체 주위의 유동은 매우 복잡한 3차원 난류유동이며, 선형에 따라 매우 다른 유동의 양상을 갖는다. 지금까지 여러 가지 기하학적 형상의 선형에 대한 실험적 연구들이 수행되어져 왔다. 실험적 연구들로는 SSPA 화물선(Larsson 1974), HSVA 탱커(ITTC 1987), 시리즈 60 hull(Toda 1988)과 같은 형상의 선박 모델에 관한 연구가 이루어졌다. 그러나 대부분의 기초 연구들은 추진기에 유입되는 유동형상을 규명하는데 목적을 두었기 때문에 선미에서의 유동에 관심이 집중되었다. Sarda(1986)는 선체주위의 유동의 난류특성에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 선수부의 경계층 유동은 수선으로부터 용골방향으로 움직이며, 이러한 유동은 선미에서 선형이 급격하게 변함에 따라 와 구조 형성에 영향을 주게 된다. 또한 선미를 지나 반류로 나아감에 따라 점성과 비점성 유동의 상호작용이 일어나며, 결과적으로 점성소산이 일어나게 된다. 선박 주위의 유동구조를 실험적으로 해석한 기초 연구들은 열선유속계(김학록 1999), 5공 pitot 튜브(반석호 2000, 김우전 2000), 그리고 LDV(최정은 1999)와 같은 점측정(point measurement) 계측장비를 사용하였다. 그러나, 최근 들어 속도장 측정기법인 PIV기법이 개발되면서, 선박주위 유동구조의 해석에 PIV기법이 사용되기 시작하였다. Dong 등(1995)은 메인수조에 PIV기법을 이용하여 선수부분의 유동을 측정하였다. 그들은 선수부의 유동구조와 파형구조는 Froude수와 선수부분의 배열에 영향을 받는다고 하였다. 국내의 경우 백승조/이상준(1997)은 자체 개발한 two-frame PTV(Particle Tracking Velocimetry)기법을 이용하여 원유운반선 모델 반류의 유동구조를 해석하였다. 그들은 평균속도장과 레이놀즈 전단 응력분포를 구하였고, 반류영역에서 발생하는 와유동이 자유표면과 서로 간섭함을 설명하였다.

본 연구에서는 KRISO 3600TEU 컨테이너선(이후 KCS로 표시함) 모형을 측정 대상 선형으로 선

정하고 2-frame PIV(Particle Image Velocimetry) 속도장 측정기법을 이용하여 선미반류의 평균속도와 난류통계치의 공간분포를 측정하고 유동특성을 해석하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 KCS 모형

본 연구에서 사용된 KCS 모형선은 실제 선형과 길이비가 약 153:1의 크기로 축소되어 제작되었다. 모형의 크기는 수선간 길이(L_{pp}) 1.5m, 폭(B) 0.21m, 깊이(D) 0.15m, 흘수(T) 0.07m, 그리고 방형비척계수(C_B)=0.65이다. Table 1에 본 실험에 사용된 선박모델의 주요척도를 실제선박과 함께 나타내었다. 일반적으로 실험 모델의 단면적과 시험부 단면적의 비로 정의되는 막힘비(blockage ratio)가 10% 이상이 되면 막힘효과를 보정하여야 한다(Rae/Pope 1984). 그러나, 본 연구의 경우, 막힘비가 1.47%로 유속에 미치는 막힘비의 영향을 무시할 수 있으므로 별도의 보정은 수행하지 않았다.

선체의 폭과 깊이를 선형의 수선간 길이(L_{pp})로 무차원화한 선형의 횡단면을 Fig.1에 나타내었다. 선박모델에서 선수(FP, fore perpendicular)와 선미(AP, after perpendicular)를 기준으로 총 20개의 Station으로 나누었고, 선수부를 Station 20.0, 선미부를 0.0, 그리고 프로펠러 평면은 Station 0.35에 위치시켰다.

Table 1. Principal dimensions of prototype and model of KRISO 3600TEU container model

Parameters	Full Scale Ship (m)	CWC Model (m)
$L(L_{pp})$	230.0	1.5
B	32.2	0.21
D	23.0	0.15
T	10.8	0.07
C_B	0.65	
Re	-	9×10^5

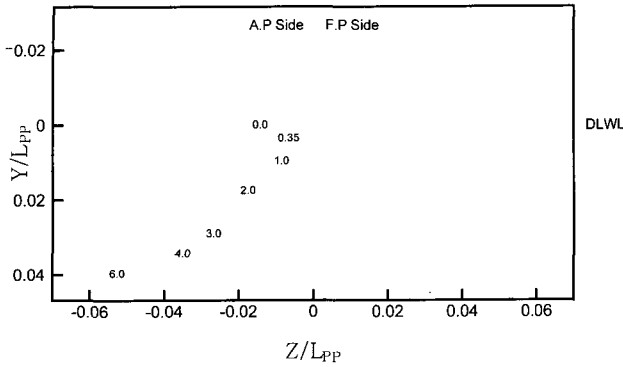


Fig. 1. Body plan of KRISO 3600TEU container ship

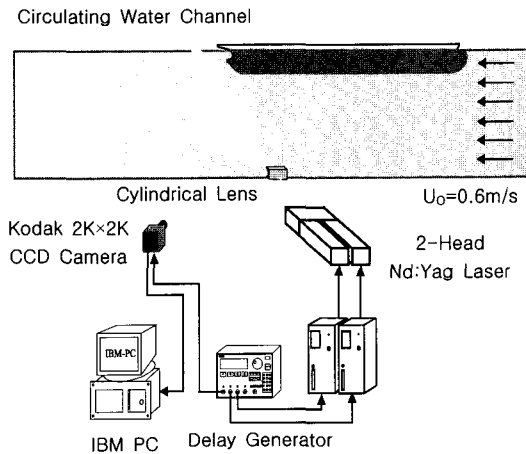


Fig. 2. Schematic diagram of PIV measurement system

2.2 입자영상유속계

Two-frame PIV방식은 두 개의 입자영상을 취득하고 이들로부터 순간속도장을 구하게 된다. 이 때 첫 번째 입자영상과 두 번째 입자영상패턴을 상호상관(cross-correlation) 알고리즘을 적용하여 각각의 조사구간(interrogation window)에서의 변위를 구하고, 이들을 시간간격(Δt)로 나누어 줌으로써 속도장 결과를 얻게된다.

Fig.2는 본 연구에 사용되어진 속도장 측정시스템을 나타낸 것으로 Nd:Yag 레이저, Kodak 2Kx2K CCD 카메라, 프레임 그래버, 동기장치,

PC 등으로 구성되어 있다. 펄스형 Nd:Yag 레이저는 노출시간이 7ns이고, 강도가 25mJ 이상인 two-head 방식으로 펄스의 최대 반복 주기는 20Hz이다. 실험시 동기 장치는 Nd:Yag 레이저와 Kodak CCD 카메라를 동기시킴으로써 프레임 노출시간 중 원하는 순간에 레이저 평면광을 유동장에 조사한다. 그리고 본 연구에 사용되어진 입자는 평균직경이 10 μm 인 은구슬 (silver coated hollow glass)을 사용하였고, 레이저 평면광의 두께는 3mm로 조절하였다.

2.3 측정단면과 PIV 속도장 계측 조건

Fig.3은 본 연구에 사용한 좌표계와 측정 단면을 나타낸 것이다. 실험시 longitudinal 보오택스의 대칭성과 상호작용을 조사하기 위해 Station -0.5767, -1, -3의 3개의 단면에서 속도장을 측정하였다. 이 때 측정영역(field of view)의 크기는 150mmx150mm이고, 2개의 레이저 펄스 사이의 시간간격(Δt)은 2ms로 하였다. 폭방향으로 $Z/(B/2) = 0, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6$ 의 5개 반류영역 종단면에서의 속도장을 측정하였다. 이 때, 유동의 발달과정을 관찰하기 위해서 120mmx120mm크기의 측정단면 2개를 길이방향으로 겹쳐 사용하였으며, 시간간격(Δt)는 800 μs 로 하였다. 모든 측정단면들에서 측정된 입자영상으로부터 속도장을 구하기 위해 미소조사 구간의 크기를 48x48pixels²으로 하고 50% 중첩하였다. 속도장 측정기법에 관한 자세한 내용은 참고문헌(이상준 2001)에 잘 묘사되어 있다. 각각의 측정단면에서 순간속도장 400장을 구하고, 이들을 앙상블(ensemble) 평균하여 평균속도장 및 와도의 공간분포를 구하였다.

난류통계치들의 공간분포를 구하기 위해서 순간속도장으로부터 평균속도장 결과를 빼 순간속도의 섭동성분을 구하고 이들을 앙상블 평균하였다. 또한, in-plane 속도성분(u,

v) 정보만을 가지고 있으므로 등방성 (isotropic) 가정을 적용하여 난류운동에너지 k 를 다음과 같이 계산하였다.

$$\bar{w}^2 = \frac{1}{2}(\bar{u}^2 + \bar{v}^2)$$

$$k = \frac{1}{2}\rho(\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2) \approx \frac{3}{4}\rho(\bar{u}^2 + \bar{v}^2)$$

따라서, 비등방성(non-isotropic) 난류구조를 가지는 근접반류 구간 일부에서는 실제 값과 다른 차이를 가질 것으로 예상된다.

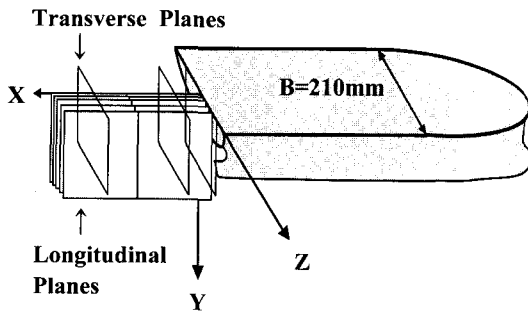


Fig. 3. Velocity field measurement sections and coordinate system

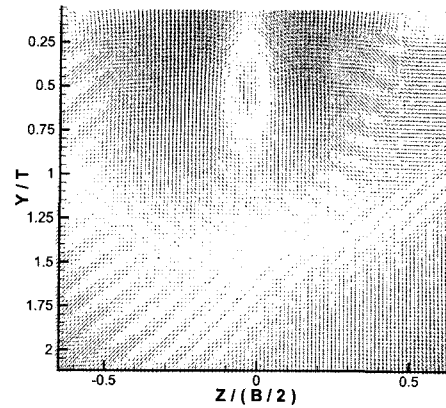
3. 결과 및 고찰

3.1 반류의 횡단면 유동특성

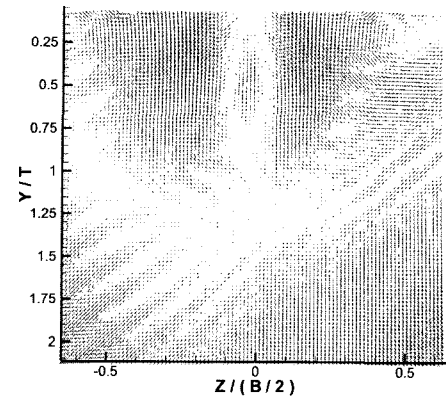
3.1.1 평균속도장

Fig.4은 선체 근접 반류영역인 세 개의 횡단면 (Station -0.5767, -1, -3)에서 측정한 평균속도장 결과를 나타낸 것이다. 선형단면이 완전히 사라지는 Station -0.5767 단면에서는 수선과 중심선이 교차하는 $Y/T=0$ 과 $Z/(B/2)=0$ 부근에서 유동이 수렴하면서 반류중심선($Z=0$)을 기준으로 서로 반대방향으로 회전하는 longitudinal 보오텍스가 정확히 쌍을 이루며 존재하고 있다. 수선 근처에서는 longitudinal 보오텍스와 반대방향으로 회전하는 2차 와류가 형성되어 있다.

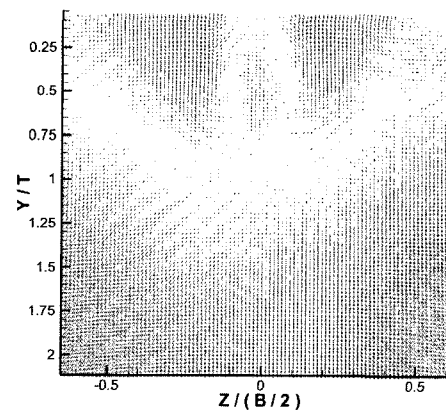
선체의 A.P(Station 0)에서 보다 멀리 떨어진



(a) Station -0.5767



(b) Station -1



(c) Station -3

Fig. 4. Mean velocity fields in the wake region

Station -1과 Station -3에서 평균속도장 결과를 Fig. 4(b),(c)에 나타내었다. Station -0.5767에 비해 cross flow의 크기가 약해지고, 와류의 크기도 하류로 나아갈수록 점차 약해지는 것을 볼 수 있으며, 그 중심위치도 반류중심선으로부터 조금씩 멀어지는 것을 알 수 있다. 수선높이에 위치한 2차 와류도 그 폭이 점차 넓어지면서 Station -3에 이르러서는 중심으로부터 이탈정도가 눈에 띄게 커졌다. 이러한 유동구조는 선미반류에서 나타나는 전형적인 유동특성이라고 할 수 있다.

3.1.2 와도

Fig.5은 근접반류영역에서 측정된 와류구조를 좀더 정량적으로 비교하기 위하여 와도 contours로 표시하였다. 흰색과 검은색은 각각 반시계방향과 시계방향으로 회전하는 와류의 방향성을 나타낸다. Fig.5(a)의 와도분포 결과에서, 반류중심선($Z=0$)을 기준으로 한 쌍의 서로 반대방향으로 회전하는 큰 척도의 longitudinal 보오텍스가 거의 같은 크기의 강도를 가지고 $0.2 < Y/T < 0.8$ 에 걸쳐서 분포하고 있으며, 수선부근의 $Z/(B/2) = -0.6$ 과 0.6 위치에 2차 와류의 존재하고 있다.

하류로 나아감에 따라 Fig. 5(b),(c)에서 나타낸 것처럼 Station -1.0과 Station -3에서 longitudinal 보오텍스와 2차 와류의 강도는 서서히 감소하고, 분포영역 또한 넓어지고 있다. 특히 Station -3에서는 2개의 longitudinal 보오텍스 사이의 중심거리도 멀어지는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 반류영역 내부로 비점성 유동의 유입에 따른 난류확산에 기인한 것으로 생각되어진다.

3.2 반류의 종단면 유동특성

3.2.1 순간속도장

Fig.6은 4개의 종단면 ($Z/(B/2) = 0, 0.1, 0.2, 0.4$)에 대한 순간속도장 결과를 나타낸 것이다. 반류영역 내부의 와류구조를 보다 명확히 나타내기 위해서 순간속도장 결과에서 U,V속도성분의 평균값을 빼고, X축과 Y축은 수선간거리(L_{pp})와 흘수의 크기(T)로 각각 무차원화 하였다.

선박모형의 기하학적 대칭평면인 $Z=0$ 에서는 선

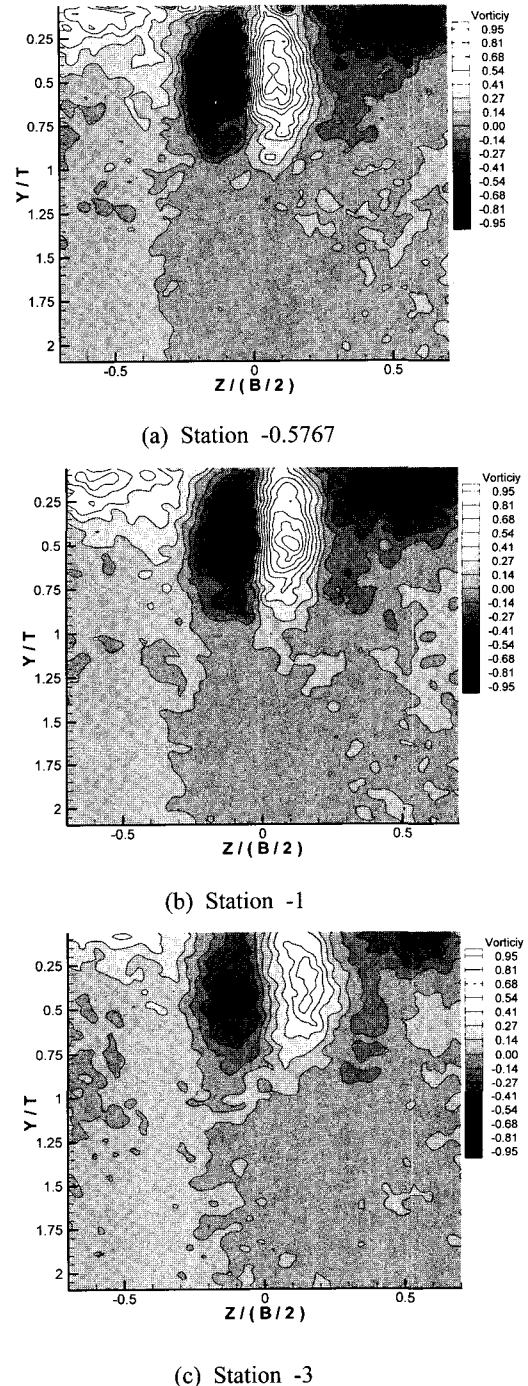


Fig. 5. Vorticity contours in the wake region

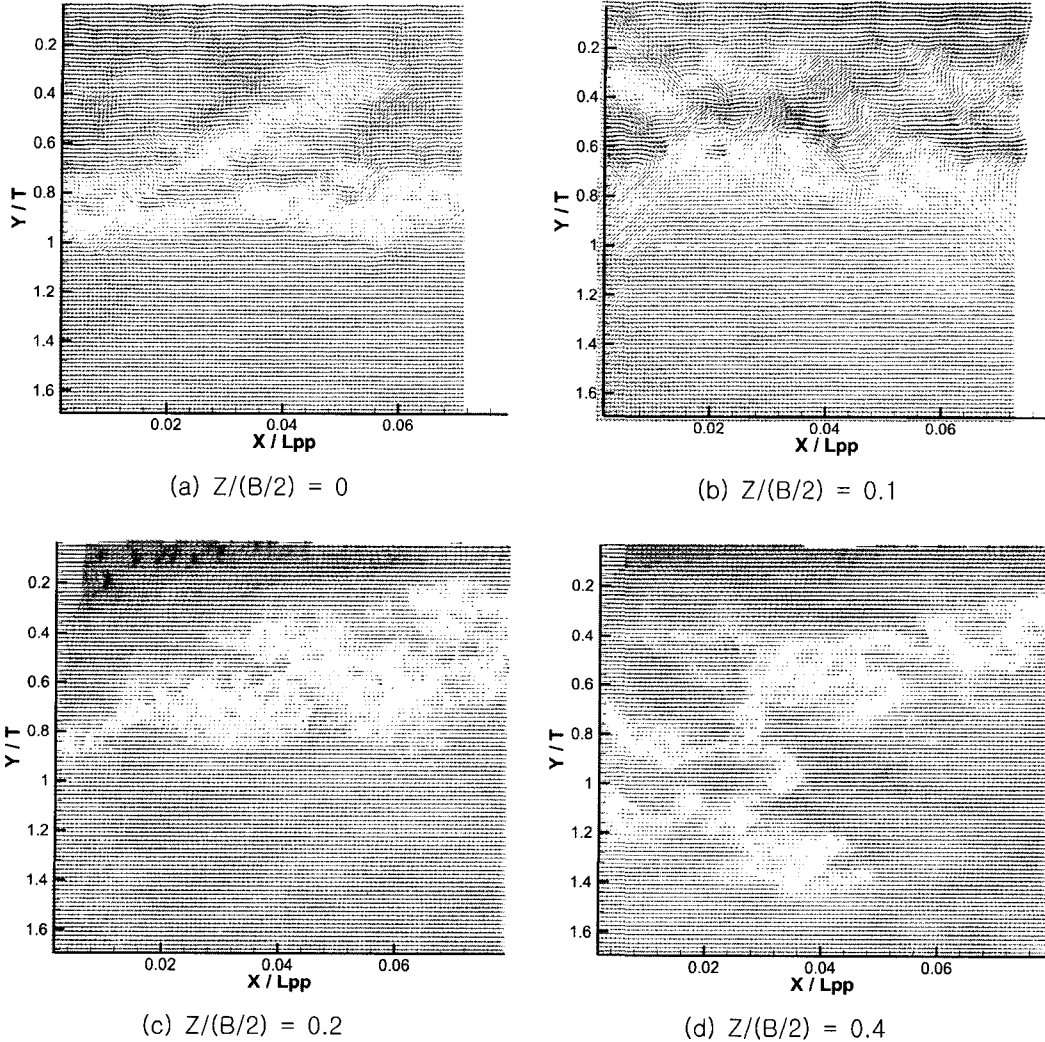


Fig. 6. Instantaneous velocity fields subtracting mean velocity in the longitudinal planes

저부근에서 박리되는 전단유동이 지배적임을 볼 수 있다. 이러한 전단유동은 하류로 나아감에 따라 비점성유동이 반류영역 내부로 유입됨에 기인하여 전단층이 확산되고 있다.

Z/(B/2)=0.1단면에서는 0.2<Y/T<0.8에 걸쳐 유동이 깊이 방향으로 요동을 치고 있는 것을 볼 수 있다. 횡단면 측정결과(Fig.5(a))에서 볼 수 있는 것처럼 longitudinal 보조택스의 중심이 이 단면에 위치하여 축방향 속도(U)와 수직방향 속도(V)의 변동성분이 크게 나타나기 때문이다.

반류중심에서 보다 멀리 떨어진 바깥영역 (Z/(B/2)=0.2, 0.4) 에서는 Fig.6(c),(d)에서 볼 수 있는 것처럼 longitudinal 보조택스의 영향이 크기 않기 때문에 활발한 난류생성은 일어나지 않으며, 와류동의 발달도 확인하기 어려웠다.

3.2.2 주유동방향 평균속도

Fig.7은 종단면에서 측정한 주유동방향 평균속도장 결과로부터 5개의 하류위치에서 추출한 속도 분포를 나타낸 것이다. 반류영역은 점성영역

($0 < Y/T < 1$)과 비점성영역($Y/T < 1$)으로 구분되는데, 중앙종단면($Z/(B/2)=0$)과 $Z/(B/2)=0.1$ 단면에서의 주유동방향 속도분포가 다른 종단면($Z/(B/2)=0.2, 0.4, 0.6$)에서의 결과와 크게 다르다. $X/L_{pp}=0.01$ 하류위치에서 $Z/(B/2)=0$ 인 경우, 자유표면에서 용골방향으로 내려옴에 따라 주유동방향 평균속도가 점차 증가하다가 감소하는 경향을 띠면서 프로펠러 보스(propeller boss)가 존재하는 위치인 $Y/T=0.63$ 부근에서 최소값을 갖는다. 그리고, 그 위치를 지나면서 차츰 자유흐름속도값으로 회복되고 있다. 프로펠러 보스위치에서 주유동방향 속도성분은 자유흐름속도의 약 50%정도의 값을 가진다. 프로펠러 보스위치에서의 이러한 주유동방향 속도성분의 이러한 큰 결손은 프로펠러 보스에서 박리되는 두개의 longitudinal 보오텍스가 중앙종단면에서 서로 혼합되고 간섭하여 out-of-plane 속도성분이 상대적으로 크게 발생하기 때문으로 추측된다.

$Y/T=0.63$ 높이를 기준으로 하부영역에서는 상부영역보다 큰 속도구배가 존재하는데, 이러한 현상은 큰 모멘트를 가진 자유흐름의 운동량이 점성유동영역으로 전달되기 때문이다. 반류 중심축($Z=0$)에서 주유동방향 평균속도는 하류로 나아감에 따라 전반적으로 속도결손을 회복하고 있다. 특히, $X/L_{pp}=0.13$ 위치의 $Y/T=0.63$ 높이에서는 자유흐름속도의 약 75%까지 회복하고 있으며, 자유표면유속은 50%까지 회복됨을 확인할 수 있다.

종단면 $Z/(B/2)=0.1$ 의 $X/L_{pp}=0.01$ 에서 주유동방향의 평균속도는 중앙종단면($Z=0$)의 속도분포와 유사한 경향을 가지나, 전반적으로 보다 큰 속도값을 가진다. 프로펠러 보스위치인 $Y/T=0.63$ 에서 가장 큰 속도결손을 보이는데, 이 위치는 longitudinal 보오텍스의 강도가 가장 큰 값을 가지는 곳으로 축방향 속도성분보다는 수직방향 속도성분이 크게 작용하기 때문이다. 하류로 나아감에 $Z/(B/2)=0.1$ 단면에서의 주유동방향 속도성분은 자유흐름 유속으로 점차적으로 회복되어간다. $Z/(B/2)=0.1$ 보다 바깥에 위치한 $Z/(B/2)=0.2, 0.4, 0.6$ 의 종단면에서는 거의 유사한 속도값을 갖는다. 그리고 자유표면에서 용골방향으로 내려감에 따라 주유동방향 속도값은 점차적으로 증가

하여 자유흐름속도값으로 수렴한다.

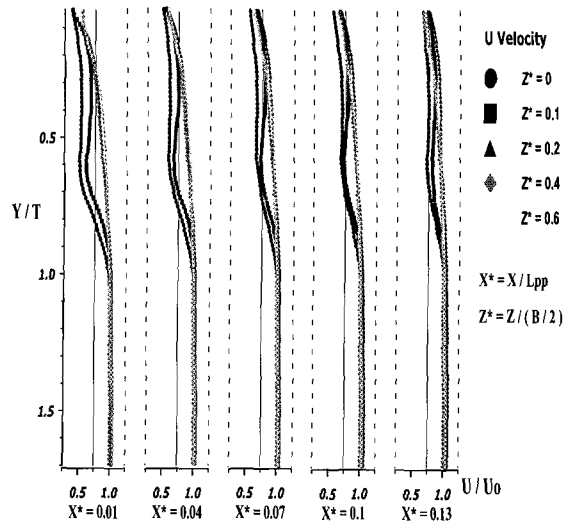


Fig. 7. Mean velocity profiles in the wake region

3.2.3 난류운동에너지

Fig.8은 4개의 반류종단면에서 구한 난류운동에너지분포를 contour로 표시한 것이다. 중앙 종단면 ($Z=0$)에서는 난류운동에너지가 깊이방향으로 $0.6 < Y/T < 1.0$ 구간에 걸쳐 국소적으로 큰 값을 가지고 있다. 중앙 종단면에서는 선저에서 박리되는 전단층이 지배적이기 때문에 비점성유동이 전단층 내부로 유입되면서 주변영역보다 상대적으로 강한 난류운동에너지가 발생하고 있다. 이러한 난류운동에너지는 하류로 나아감에 따라 상부로 확산되고 있다. 반류 중앙에 가까운 $Z/(B/2)=0.1$ 종단면에서는 난류운동에너지가 반류영역에 걸쳐 $0.35 < Y/T < 0.9$ 에 집중적으로 분포되어 있고, 난류확산이 중앙 종단면에 비해서 뚜렷하게 나타나지 않았다. 프로펠러 보스가 존재하는 $Y/T=0.63$ 부근에는 국소적으로 난류운동에너지가 큰 값을 가지는데, 이것은 longitudinal 보오텍스에 기인하여 난류생성이 활발하게 일어나고 있음을 나타낸다. 이 보다 바깥에 위치한 종단면($Z/(B/2)=0.2, 0.4$)에서는 상대적으로 매우 낮은 난류운동에너지분포를 보여주고 있다.

Fig.9은 $Z/(B/2)=0, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6$ 의 5개 종단면에서 하류방향으로 나아감에 따른 난류운동

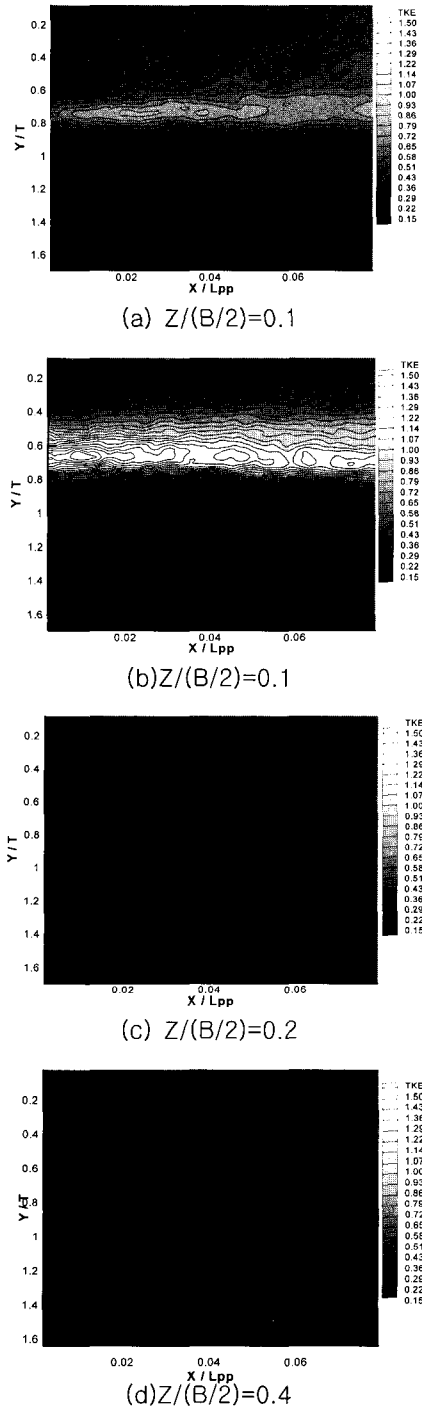


Fig. 8. Turbulent kinetic energy distributions in the longitudinal planes

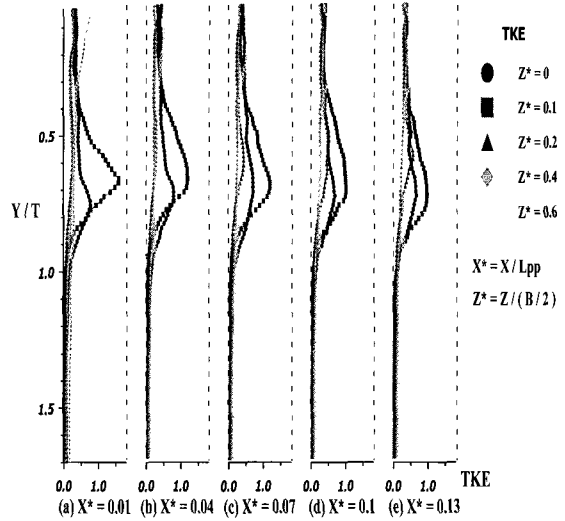


Fig. 9. Turbulent kinetic energy profiles in the wake region

에너지 분포를 나타낸 것이다. 중앙종단면인 $Z=0$ 에서 난류운동에너지는 $Y/T=0.75$ 부근에서 최대값을 가지며 하류로 나아감에 따라 점차 감소하며, 그 분포영역은 점차 확산되고 있다. longitudinal 보오텍스의 중심이 위치한 $Z/(B/2)=0.1$ 종단면에서는 주변영역에 비해 큰 난류운동에너지값을 가지고 있다. 특히 $X^*=0.01$ 에서는 longitudinal 보오텍스의 중심위치를 기준으로 대칭분포를 보여주고 있다. 이러한 난류운동에너지 분포는 하류로 나아감에 따라 전반적으로 그 크기가 감소하고, longitudinal 보오텍스 중심의 하부 영역에서 상부영역보다 난류운동에너지 감소량이 더 크게 발생하고 있다. 이러한 난류특성은 선저에서 박리되는 전단유동과 longitudinal 보오텍스의 상호작용에 의해서 점성소산이 활발히 일어나기 때문으로 생각되어진다. 보다 바깥에 위치한 $Z/(B/2)=0.2, 0.4, 0.6$ 종단면에서는 뚜렷한 난류운동에너지 특징이 나타나지 않았다.

4. 결론

본 연구에서는 2-frame PIV 기법을 이용하여 KCS 모형선의 반류영역에서 반류의 난류운동특성

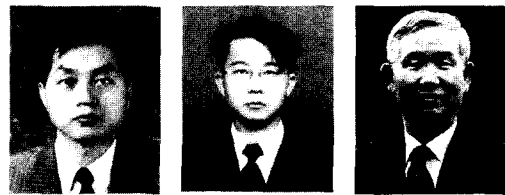
을 실험적으로 해석하였다. $Z/(B/2)=0.1$ 단면의 프로펠러 보스위치에서 longitudinal 보오텍스에 기인한 강한 난류생성에 기인하여 국부적으로 강한 난류운동에너지값을 가진다. 횡단면에서의 측정결과를 보면 Station -0.5767 단면에서 가장 큰 강도의 longitudinal 보오텍스가 형성되고, 수선부근에서 2차 와류가 존재하고 있다. 그리고 이러한 longitudinal 보오텍스와 2차 와류는 난류확산과 점성소산에 의하여 하류로 나아감에 따라 강도는 약화되지만, 유동패턴은 그대로 유지하고 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실(NRL) 사업 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 그리고 KCS 주위 유동에 대한 PIV 계측 자료는 <http://www.postech.ac.kr/me/efml/data>에 올려져 있습니다.

참 고 문 헌

- 김우전, 반석호, 김도현, 이춘주 2000 "선미선형을 변화시킨 두 척의 KRISO 300K VLCC 모형주위의 유동과 저항추진 특성에 대한 실험적 연구," 대한조선학회지, 제37권 제3호, pp.11-20.
- 김학록, 이상준 1999 "KRISO 3600TEU 컨테이너 모형선 주위 유동의 난류구조에 관한 실험적 연구," 대한조선학회지, 제36권 제3호, pp.8-14.
- 반석호, 김우전, 김도현 2000 "KRISO 3600TEU 컨테이너선 모형 주위의 국부유동 계측에 관한 연구," 대한조선학회지, 제37권 제3호, pp.1-10.
- 백승조, 이상준 1997 "Oil tanker 모델 후류 속도장 측정" 대한조선학회 '97추계학술대회 논문집, pp.317-320.
- 이상준 2001 "PIV/PTV Velocity Field Measurement Technique", POSTECH.
- 최정은, 서흥원, 민계식 1999 "에인수조에서 Fiber Optics LDV를 이용한 프로펠러면에서의 유속측정" 대한조선학회지, 제36권 제3호, pp.22-28.
- ITTC 1987 "Report of the Resistance and Flow Committee", Proc. 18th ITTC (International Towing Tank Conference), Vol. 1, pp.47-95, Kobe, Japan.
- Larsson, L. 1974 "Boundary Layers of Ships, Part III : An Experimental Investigation of the Turbulent Boundary Layer on a Ship Model", SSPA, Gothenburg, Sweden, Report No. 46.
- Rae, W. H. and Pope, A. 1984 "Low-speed Wind Tunnel Testing", 2nd Ed., New York, Wiley.
- Dong, R. R., Katz, J. and Huang, T. T., 1995 "PIV Measurement of Flow Structure around a Ship Model", ASME, Vol 229, pp.425-433.
- Sarda, O. P. "Turbulent Flow Past Ship Hulls-An Experiment and Computational Study", Ph.D Thesis, Mech. Eng., Univ. of Iowa.
- Toda, Y., Stern, F., Tanaka, I. and Patel, V. C. 1988 "Measurements in the Stern and Wake flow of a Series 60 Ship With and Without a Propeller", IIHR, Univ of Iowa, IIHR Report No.326.



< 이 상 준 > < 고 민 석 > < 이 정 록 >