

PIV기법을 이용한 트랜섬 선미 후류 점성유동장 계측

이경우* · †김옥석

*목포해양대학교 해양시스템공학부, †목포해양대학교 연구원

PIV Measurement of Viscous Flow Field in the Wake of Transom Stern

Gyoung-Woo Lee* · †Ok-Sok Gim

†,* Division of Ocean System Engineering, Mokpo National Maritime Uni., Mokpo, 530-729, Korea

요 약 : 트랜섬 선미 형상변화에 따른 후류 유동특성을 알아보기 위해 $Re=3.5 \times 10^3$ 및 $Re=7.0 \times 10^3$ 에서 수면하부 유동을 계측하였다. 선미 형상변화에 따른 유동장 계측을 위해 2-프레임 그레이 레벨 상호상관 PIV기법을 이용하여 분석하였다. 선미형상은 실선조사 결과를 바탕으로 선저와 이루는 각을 각각 45° (모델 A), 90° (모델 B) 및 135° (모델 C)를 실험에 적용하였다. 모델의 선미 침수면의 깊이는 자유 수면으로부터 40mm를 기초하였다. 레이놀즈수가 증가함에 따라, 와의 규모가 증가하고 하류로 길게 형성되는 경향을 나타냈다.

핵심용어 : 트랜섬 선미, 입자영상유속계, 점성유동, 와도, 순간유동장

Abstract : An experiment was carried out to figure out the instantaneous flow characteristics in the wake of the transom stern's 2-dimensional section by 2-frame grey level cross correlation PIV method at $Re= 3.5 \times 10^3$, $Re= 7.0 \times 10^3$. The stern angles of models were learning at 45° (Model "A"), 90° (Model "B") and 135° (Model "C") respectively based on the survey results of real ships. The depth of wetted surface is 40mm from free surface. As Reynolds number increases, vortices increase in volume and move their way to the downstream. Flow separation appeared at the end of model's bottom.

Key words : Transom stern, PIV(Particle Image Velocimetry), Viscous flow, Vorticity field, Instantaneous flow field

1. 서 론

선박의 저항을 감소시키기 위한 노력으로는 침수면적을 줄이는 방법, 선체표면에 탄성피막을 입히는 방법, 미소 기포주입법 또한 각종 부가물을 이용하는 방법 등이 적용되고 있으며 다양한 연구가 진행되고 있다.(장 등, 2003; 장·김, 1999)

저항감소를 위해 이러한 방법들만큼이나 중요한 선미형상에 대한 연구는 상당히 미흡한 실정이다. 특히, 선미형상은 화물선의 화물적재 공간 및 작업선의 작업공간 확보를 위해 넓은 면적을 확보할 필요가 있다. 이러한 측면에서 트랜섬(Transom) 선미가 다양한 선종에 적용되고 있으며 역학적 측면이나 선체 건조 측면에서 유리한 면을 가지고 있다.(김 등, 2005) 역학적으로 트랜섬 선미 끝단에서 유체가 선미에서 부드럽게 이탈하여 후류(Wake)의 긴 선열을 끄는 것을 피해야 한다. 트랜섬 선미 끝단의 갑작스런 곡률변화는 선체를 따라 이동하는 유체가 선미에서 유동박리(Flow separation)되어 후류 유동이 복잡하고 불안정한 난류의 형태로 발전하게 된다.(최 등, 2005)

화물 적재 공간확보 등을 목적으로 넓은 면적의 트랜섬 선미를 적용하고 있는데 이는 높고 불안정한 선미파에 의한 부가저항을 증가시켜 선박의 전저항을 증가시키는 요인으로 작

용하고 있다. 넓은 갑판 면적의 확보와 선미파에 의한 저항 증가에 대한 방안으로 스텐플랩(Stern Flap), 웨지(Wedge), 덕테일(Ducktail) 등 선미부가물 부착에 의한 저항을 줄이려는 노력이 이루어지고 있다. 스텐플랩이나 웨지에 의한 저항감소 효과는 트림변화에 기인한 것으로 알려져 있다. 따라서 스텐플랩은 흘수의 변화가 없는 고속선에서 효과가 크고 플랩의 길이와 각도에 따라 저항에 미치는 영향이 다르다고 보고되고 있다. 이와 더불어 덕테일의 적용에 의하여 선미파로 인한 부가저항을 최대한 감소시키는 것으로 일본조선소의 모형시험에서는 약 2-5%의 저항감소 효과를 보고하고 있다.(Yamano, et al., 2001; 김 등, 2003; 임 등, 2007)

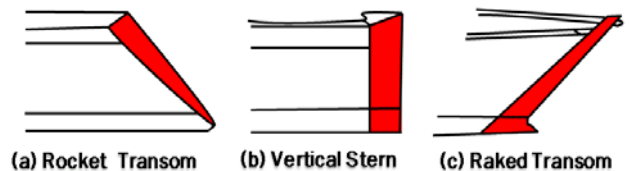


Fig. 1 Schematic Illustration of the realistic Transom stern model. (a)Rocket Transom, (b)Vertical Stern Transom, (c)Raked Transom

† 교신저자: 연희원, domingo@mmu.ac.kr 010)2614-3001
* 중신회원, kwlee@mmu.ac.kr 010)9339-3589

이러한 트랜섬 선미는 선미파 형상에 중요한 영향을 미치기 때문에 조파저항에 영향을 끼치며, 또한 선미수면의 높이에 따라 배의 전진방향으로 작용하는 트랜섬 끝 단면에서 압력 기여분이 달라지므로 선박의 저항성능에 선미차의 형상과 높이가 매우 중요한 인자로 작용한다.(Yamano, et al., 2003)

선미파 저항은 다음과 같이 크게 세 가지 요소로 분류가 가능하다. 첫째, 선미 후류으로 격렬한 난류와 함께 선수 방향으로 파도가 부서지는 형상(Forward-oriented wave breaking, FOWB)에 의해서 생기는 저항이 있다. FOWB에 의한 수면층 높이와 저항의 크기는 상호 비례적인 관계를 가지고 있으며, 저속에서 저항을 결정하는 중요한 요소가 된다. 이는 모멘텀 손실을 유발하고 선박의 저항을 크게하여 실선에서 저항과 추력에 영향을 미친다.

둘째로, 선미방향으로 흘러가는 선미파(Remaining following waves, RFW)에 의해서 생기는 저항을 들 수 있다. RFW에 의한 경계면은 선미 끝에서 유체가 가속될 때 FOWB가 없는 자유흐름처럼 선미 뒤로 흐른다. RFW에 의한 경계면 높이는 저항의 크기와 비례하며 고속에서의 저항을 결정하는 중요한 요소이다. 마지막으로 선미 끝 단면에서의 수압감소로 인해 생기는 저항이다.(이 등, 2006)

트랜섬을 가지는 선박이 고속 항해할 때 트랜섬 선미 끝단에서 유체는 트랜섬 선미를 부드럽게 떨어져 나가야 한다. 선미의 갑작스러운 곡률변화로 유동박리가 발생하며 트랜섬 후방의 자유수면에서 생기는 선미파가 매우 복잡하며 불안정한 형태를 보인다.(최 등, 2001; 이 등, 2001)

트랜섬 선미를 적용한 실적선의 자료를 조사한 결과 대표적인 선형을 일반화하여 이를 분류하면 Fig. 1과 같이 3종류로 대별될 수 있다.

본 연구에서는 PIV기법을 적용하여 트랜섬 선미의 형상변화에 따른 후류의 점성유동 특성을 파악하였다. 이를 위해 순간유동장을 계측하고 유선구조, 와의 분포 형태, 유입유동에 수직·수평 성분 및 와도장의 평가를 각각 수행하였다

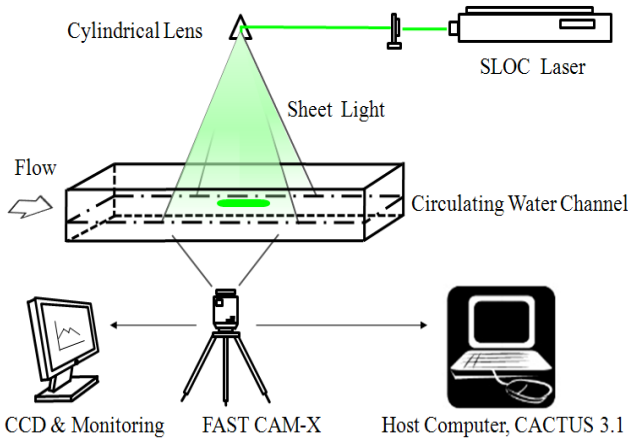


Fig. 2 Schematic arrangement of Circulating Water Channel and PIV system

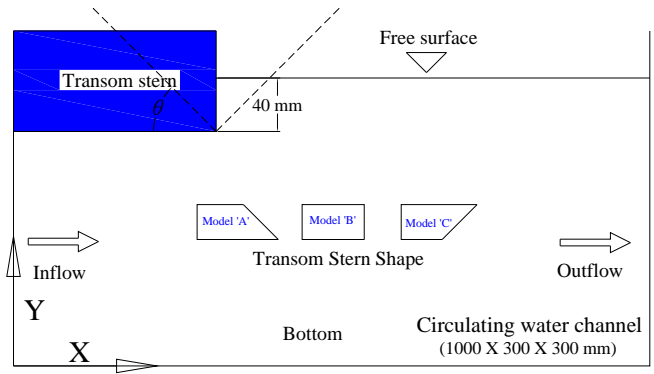


Fig. 3 Coordinate system and model setup

2. 실험장치 및 조건

Fig. 2는 트랜섬 선미 후류 유동정보 계측을 위한 PIV시스템의 개략적인 구성도이다. 유동가시화를 위해 광원은 직진성과 반사성이 우수한 500mW의 광다이오드를 사용하였다. 이를 집적화한 2차원 광원을 계측영역에 조사하여 $1.0^L \times 0.3^B \times 0.3^D m^3$ 의 회류수조영역에서 실험을 수행하였다. Table 1과 같이 모델실험시 회류수조 내 유체의 온도는 19°C 전후의 청수를 사용하였다. 벽면효과와 자유수면에 의한 영향을 최소화하고자 트랜섬 선미의 모델을 일반화하여 회류수조의 전체 폭과 일치하도록 회류수조 상부 자유수면에 접하도록 배치하였다. 트랜섬 선미 후류 유동관측을 위해 사용된 PVC입자는 비중이 1.02로 광원에 의한 반사성이 우수한 입자를 선정하여 일정한 크기를 선별하여 실험에 사용하였다.

트랜섬 선미 후류유동 계측을 위해 적용한 모델은 Fig. 3과 같으며 유입유속(U_∞), 트랜섬 선미의 각도를 45°, 90° 및 135°를 각각 모델 A, B, C로 그림과 같이 구분하였다. 트랜섬 선미 단면의 길이는 회류수조의 상부에서 길이와 폭이 각각 300mm로 유입유동에 난류가 유입되지 않도록 설계·제작하였다. 트랜섬 선미 형상변화에 따른 후류 유동특성평가를 위한 계측영역은 선미 침수 면적의 7배 후반부까지 유동정보를 계측하였다. 모델의 침수깊이($D=40mm$)에 기초한 레이놀즈수는 $Re=3.5 \times 10^3$ $Re=7.0 \times 10^3$ 로 회류수조와 모델형상에 따라 성능평가에 적합한 균일한 유입유동을 적용하였다.

Table 1 Experimental conditions

Item	Specification
Light source	SLOC Lasers(GL532H-500mW)
Sheet light	Cylindrical lens(Width=2mm)
Working fluid	Fresh water (19±1°C)
Time resolution	125 FPS
Particle	PVC($\rho : 1.02, \phi : 150\mu m$)
Algorithm	2-frame grey-level cross correlation CACTUS v.3.1

Table 2 Measurement uncertainties of u-component measured by PIV system(units : m/s)

Source	Average	R.M.S.	Min.	Max.
	0.11042	0.00540	0.10338	0.11851
Δu	0.25393	0.00274	0.25027	0.26133
	0.40153	0.00288	0.39878	0.40907

전체 실험에서 나타날 수 있는 계측오차는 많이 존재한다. 본 실험에 적용한 광원의 레이저는 파장이 매우 짧아서 계측에서 나타날 수 있는 불확실성은 무시할 수 있는 정도로 미소하다. 동일입자추적에 의해 얻어진 유입유동과 동일한 방향의 속도 변동성분은 Table 2와 같다. 회류구조의 불확실성 계측을 위해 유입유속의 평가는 3단계로 조절하여 0.1m/s, 0.25m/s 및 0.4m/s와 같다. 시간평균 유동장 계측을 위해 총 1,000프레임을 평균한 결과 전체 동일입자추적과정에서 발생한 에러율은 평균 4%이하로 나타났다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 $Re=3.5 \times 10^3$ 에서 모델 후류의 유선구조를 도시한 것이다. 모델 A형은 선수방향으로 45도 기울어진 형태로 Fig. 1(a)와 동일한 형상이다. 모델의 하부 $y=80\text{mm}$ 를 따라 흐르던 유입유동이 $x=120\text{mm}$ 지점에서 상부에서 발생하는 와의 영향으로 흐름에 변화를 보이고 있다. 유동장의 후방 약 $y=320\text{mm}$ 지점부터 난류경계층 영역이 자유수면으로 빠르게 이동하면서 좁은 경계층 영역이 형성되고 있다. 즉, 유체의 평균 흐름이 난류를 발생함으로 에너지를 손실하는 난류소산(Turbulence dissipation)이 이루어지고 있다. 또한, 크기 면에서 다소 작은 규모의 와의 형태를 보이고 있으나 생성 장소는 일정한 간격을 두고 형성되는 특성을 보이고 있다.

모델 B형은 Fig. 1(b)와 동일한 형태이다. 모델 하부에서는 벽면을 따라 흐르던 유입유동이 $X=120\text{mm}$ 지점에서 난류층과 혼합되어 복잡한 유동현상을 보이고 있다. 모델 A형에서는 $x=160\text{mm}$ 지점에서 소규모 와가 생성되고 $x=230\text{mm}$ 지점에서 대규모 와가 생성되었다. 그러나 모델 B형에서는 소규모 와가 $x=120\text{mm}$ 와 $x=180$ 지점에서 생성되고 대규모 와는 $x=260\text{mm}$ 지점에서 생성되고 있다. 와의 생성 규모는 모델 A형에 비해 증가하고 있으며, 대규모 와의 생성지점이 후류로 이동하고 있다.

모델 C형은 모델 하부와 이루는 각이 135도로 Fig. 1(c)와 동일한 형상이다. 유입유동이 $x=120\text{mm}$ 지점에서 박리되어 난류층과 혼합되는 $x=160\text{mm}$ 지점에서 대규모 와가 근접 후류에서 나타났다. 또한 $x=240\text{mm}$ 지점과 $x=290\text{mm}$ 지점에서 소규모 와가 생성되고 있다. 즉, 와의 생성지점은 선미와 근접한 후방에서 대규모의 와가 생성되고 후방으로 이동할수록 와의 규모가 감소하였다. 난류경계층의 영역은 유동장 끝지점에 까지 큰 감소를 보이지 않고 형성되는 특징을 보이고 있다.

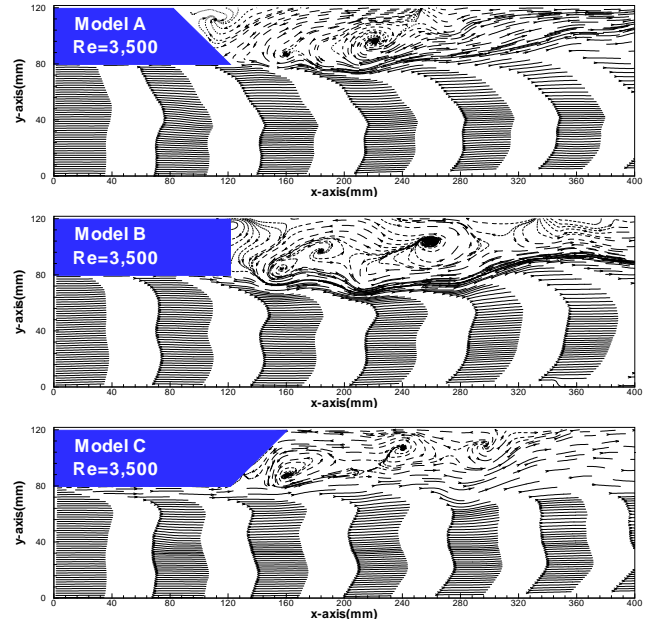


Fig. 4 Streamlines at $Re=3.5 \times 10^3$

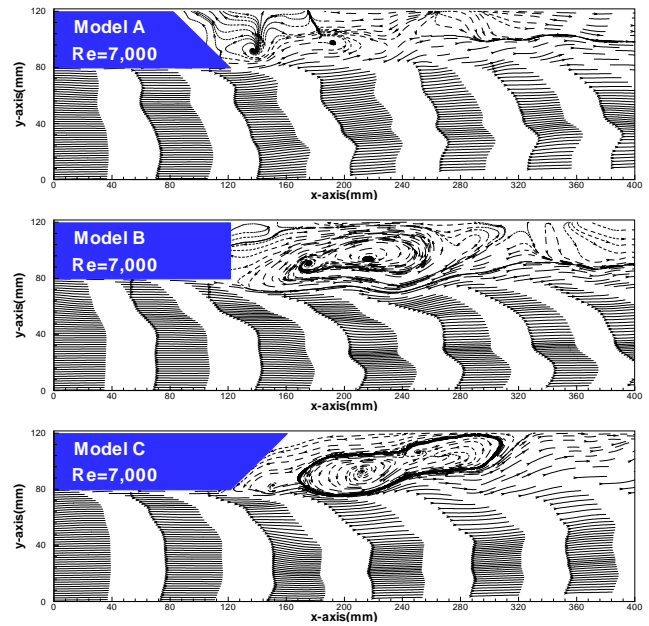


Fig. 5 Streamlines at $Re=7.0 \times 10^3$

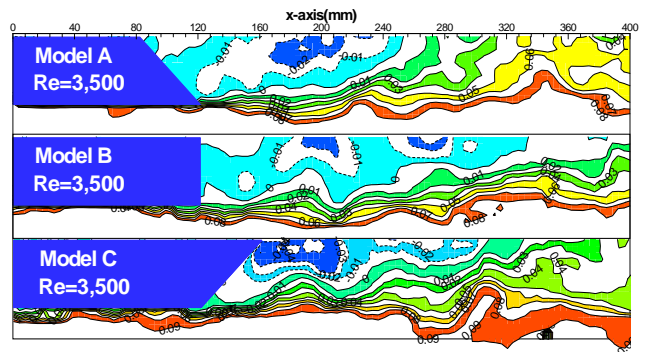


Fig. 6 U-component at $Re=3.5 \times 10^3$

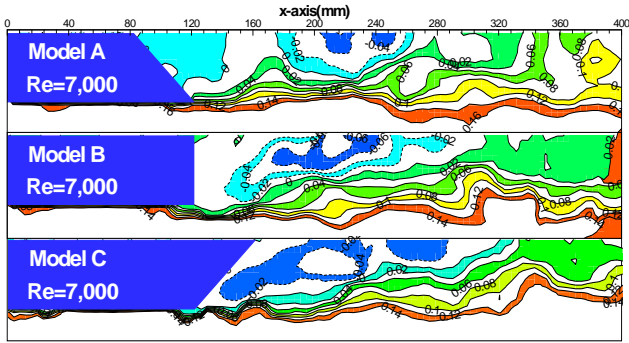


Fig. 7 U-component at $Re=7.0 \times 10^3$

Fig. 5는 $Re=7.0 \times 10^3$ 에서 모델 후류의 유선구조를 도시한 것이다. 전체적으로 Fig. 4에 비하여 와의 생성지점이 모델의 근접 후류로 접근하였다. 모델 A형에서 와의 생성지점은 $x=140\text{mm}$ 와 $x=200\text{mm}$ 지점에서 소규모의 와가 생성되고 있으며 후류의 형태는 난류경계층은 유동장 후방까지 일정한 폭이 유지되고 있다. 모델 B형에서 와의 생성지점은 $x=170\text{mm}$ 와 $x=220\text{mm}$ 로 대규모 와 속에 소규모 와를 포함하고 있다. 모델 C형에서도 비슷한 유형의 유동구조를 보이고 있으며 와의 중심이 후방으로 이동하여 $x=200\text{mm}$ 와 $x=270\text{mm}$ 지점에서 생성되고 있다. 난류경계층의 폭은 Fig. 4와 유사하다. 전체적으로 Fig. 5에서는 와의 생성지점이 모델의 근접한 후방으로 이동하였고, 유동방향으로 길게 분포하는 특징을 나타냈다.

Fig. 6과 Fig. 7은 유동의 세부구조를 분석하기 위해 유입유동에 평행한 방향인 U성분을 분리하여 도시한 것이다. 점선으로 나타낸 것은 음(-)의 값을 의미하고 실선으로 나타낸 것은 양(+)의 값으로 모델은 근접 후류에서 낮은 성분이 집중적으로 나타났다. Fig. 6은 $Re=3.5 \times 10^3$ 에서 동일한 속도의 윤곽선을 도시한 것이다. 모델 A형에서 음의 속도분포는 $x=120\text{mm}$ 와 $x=240\text{mm}$ 지점 내에서 넓게 분포하고 있다. 모델 B형에서는 $x=300\text{mm}$ 지점까지 산발적으로 음의 값이 분포하였다. 또한 모델 C형에서는 근접 후방에서 $x=300\text{mm}$ 까지 자유수면에 가까운 지점에 음의 속도분포가 분포하였다.

Fig. 7은 $Re=7.0 \times 10^3$ 으로 유입유동을 배로 증가시켰을 때 수평방향의 속도분포를 나타낸 것이다. 모델 A형에서는 $x=220\text{mm}$ 지점 부근에서 소규모의 음의 값이 나타났다. 모델 B형에서는 음의 값이 근접 후류에서 $x=290\text{mm}$ 지점까지 넓은 분포를 나타냈다. 모델 C형에서는 모델 근접 후방에서 시작하여 모델 B형의 경우와 비슷한 영역에까지 음의 성분이 나타났다.

Fig. 8과 Fig. 9는 유입유동과 수직인 방향의 V성분을 $Re=3.5 \times 10^3$ 과 $Re=7.0 \times 10^3$ 에서 도시한 것이다. 양(+)과 음(-)의 성분을 각각 실선과 점선으로 구분하여 도시하였다. 전체적으로 모델의 후방에서 음의 성분이 강하게 나타났다. Fig. 8은 $Re=3.5 \times 10^3$ 에서 유입유동과 수직인 성분에 대한 속도분포를 도시한 것이다. 모델 A형에서는 $x=120\text{mm}$ 에서 $x=200\text{mm}$ 에서 수직방향으로 낮은 값이 나타났다. 모델 B형에서는 상하로 진

동하는 형태로 양(+)과 음(-)의 성분이 상호교차하며 나타났다. $x=280\text{mm}$ 에서 $x=320\text{mm}$ 지점에서 강한 양의 성분이 나타나고 있다. 모델 C형에서는 다소 상이한 형태로 근접 후방에서 소규모의 음의 성분이 나타났다. 모델 B형과 동일지점에서 다소 강한 양의 성분이 나타났으며 그 전방에서 미소하나마 음의 성분을 보이고 있다.

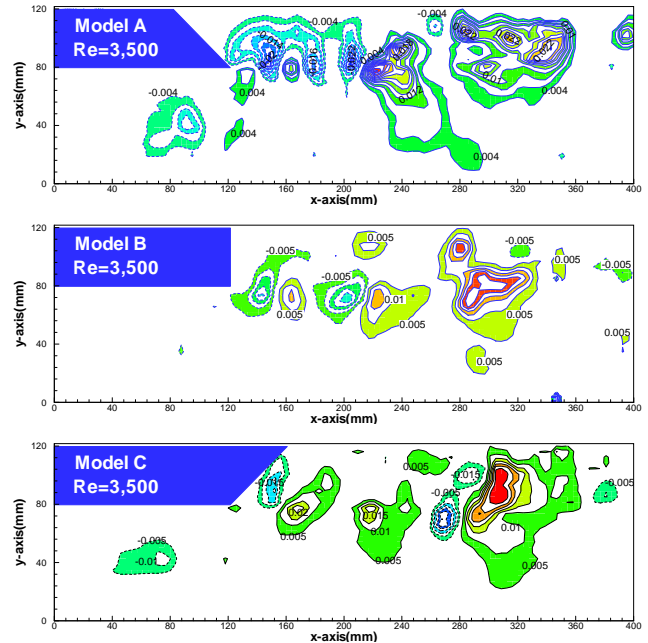


Fig. 8 V-component at $Re=3.5 \times 10^3$

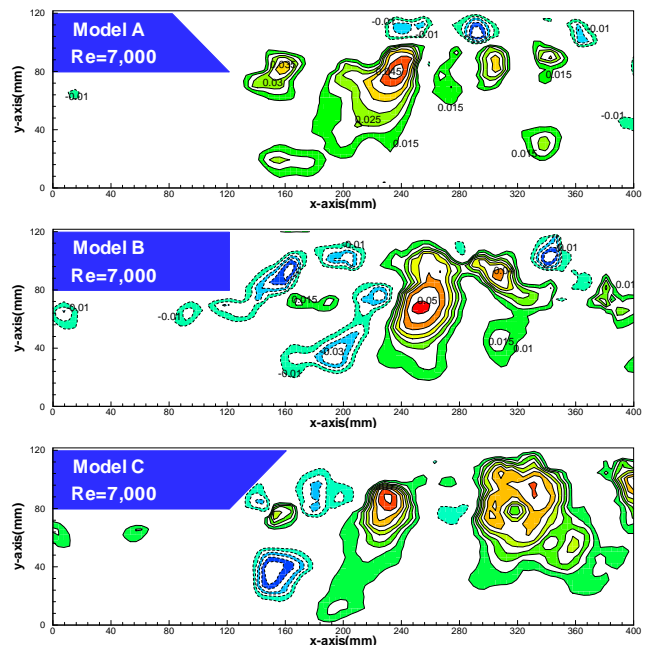


Fig. 9 V-component at $Re=7.0 \times 10^3$

Fig. 9는 $Re=7.0 \times 10^3$ 에서 유입유동과 수직인 성분에 대한 속도분포를 도시한 것이다. 모델 A형에서는 자유수면에 접한

부근에서 소규모의 음의 성분이 간헐적인 분포를 보이고, x=240mm 지점에서 강한 양의 성분이 나타났다. 모델 B형에서는 강한 양의 성분은 x=250mm 지점을 중심으로 전방에서는 음의 성분이 후방에서는 양의 성분이 나타났다. 모델 C형에서는 근접 후류에서 수직하게 음의 성분이 나타났다. x=220mm과 x=330mm 지점에서 강한 양의 성분이 나타났다.

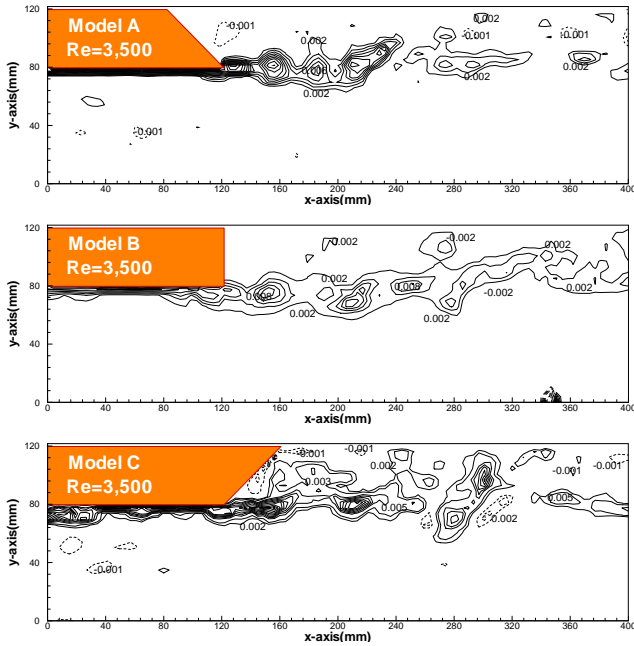


Fig. 10 Vorticity at $Re=3.5 \times 10^3$

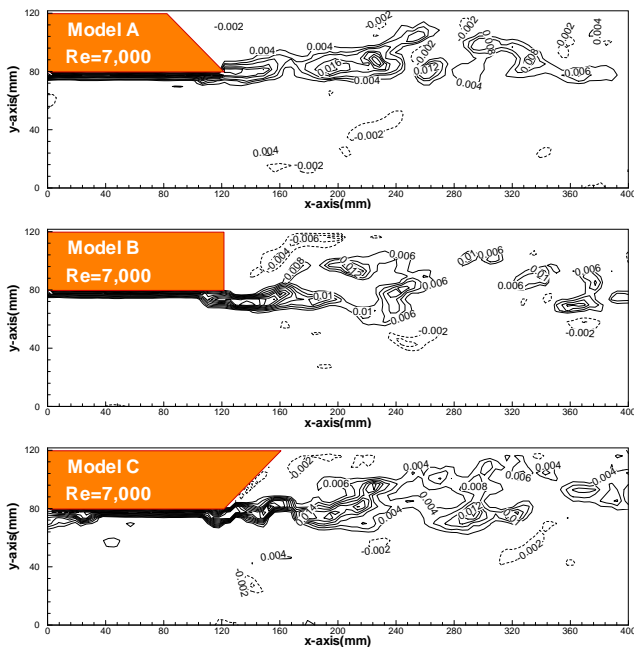


Fig. 11 Vorticity at $Re=7.0 \times 10^3$

Fig. 10~11은 $Re=3.5 \times 10^3$ 와 $Re=7.0 \times 10^3$ 에서 와도분포를 나타낸 것이다. 와도는 유체의 회전을 나타내는 척도로 각속도

의 2배로 알려져 있다. 양(+)의 값은 반시계방향의 회전을 의미하며 음(-)의 값은 시계방향의 회전을 의미한다. 전체적인 와도의 형상은 운동학적 상태량인 와도 벡터(Vorticity vector)는 수학적으로 속도 벡터 \vec{V} 의 curl로 정의된다. xy평면 상의 2차원 유동에서 z방향 속도성분은 0이며, z방향 직교 좌표계 \vec{k} 를 포함한 와도는 다음과 같이 표현된다.

$$\omega = \text{curl}(\vec{V}) = \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \vec{k} \quad (1)$$

난류의 생성원은 유동방향에 위치한 장애물에 부딪혀 발생하는 난류와 유속차를 가진 두개 이상의 유동의 혼합에 의한 것이다. 이러한 난류의 내부에는 소규모 와를 포함한 대규모 와가 존재한다. Fig. 10은 $Re=3.5 \times 10^3$ 에서 와도장이다. 모델 C형의 제외하고는 모델 후류에서 전체적으로 양의 값을 보이고 있다. 그러나 유속을 배로 증가시킨 Fig. 11에서는 $Re=7.0 \times 10^3$ 로 와도장이 전체적으로 시계방향과 반시계방향으로 회전하는 유체의 특성이 나타났다.

4. 결론

트랜섭 선미의 형상변화에 따른 후류의 점성유동장을 $Re=3.5 \times 10^3$ 와 $Re=7.0 \times 10^3$ 에서 PIV기법을 적용 후류 유동의 이해를 높이고자 하였다. 트랜섭 선미 후류 유동구조의 기초 연구로 순간유동장과 수직·수평성분 및 와도장에 대한 해석을 통하여 다음과 같은 결론은 얻을 수 있었다.

모델 A형에서는 소규모의 와가 근접후류에서 생성되고, 이후 하류에서 와의 생성이 억제되었다. 모델 B형의 후류특성은 와의 규모가 크고 후류에서 긴 와열을 형성하였다. 유입유동과 수직한 성분의 분석에서 상하로 진동하는 형태로 양(+)과 음(-)의 성분이 상호교차하며 나타났다. 모델 C형에서는 유입유동에 평행한 성분은 근접후류에서 음(-)의 값이 나타났다. 전체적으로 유입유속이 증가할수록 와의 형태는 규모가 커지고 하류로 길게 형성되며 다수의 소규모 와를 포함하고 있다. 와의 생성지점도 하류로 이동하였다.

본 연구에서는 프로펠러 후류에서 발생하는 난류유동을 유입유동과 자유수면에 대한 역학적상사성에 대해서는 실험상 제약으로 고려되지 못하였다. 향후 선미형상에 따라 부가물의 적용에 대한 단계적 응용 및 연구를 수행할 계획이다.

후기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신 인력양성사업으로 수행된 연구결과임

참고 문헌

[1] 김우전, 박일룡(2008), “트랜섭 선미 후방의 점성 유동장

- Topology 관찰”, 대한조선학회논문집 제42권 제4호, pp 322-329.
- [2] 김정중, 안성목, 최순호, 장학수(2003), “트랜섬 부가물의 저항성능에 대한 수치 및 실험적 연구”, 대한조선학회학술대회집, pp. 181-187.
- [3] 이만복, 김경천(2001), “PIV기법을 이용한 정사각 실린더의 근접후류에 관한 연구(I : 평균유동장)”, 대한기계학회논문집 제25권 제10호, pp 1408-1416.
- [4] 이영길, 김규석, 강대선, 정광열(2006), “트랜섬 선미를 가지는 선박의 선미선형 설계에 관한 기초적 연구”, 한국해양공학회지 제20권 제3호, pp. 88-95
- [5] 임채성, 박동우(2007), “컨테이너 운반선의 선미부가물에 의한 속도성능 향상에 대한 연구”, 대한조선학회 특별논문집, pp. 32-42.
- [6] 장진호, 김세은, 최순호(2003), “공기 주입법에 의한 모형선의 저항 감소 연구”, 대한조선학회학술대회집 제30권, pp 234-239.
- [7] 장효진, 김효철(1999), “선저에 부착된 공기공동에 의한 선박의 저항감소에 관한 연구”, 대한조선학회논문집 제36권 제2호, pp 1-8.
- [8] 최희중, 이 경우, 신성철, 윤순동, 양준모(2005), “트랜섬 선미를 가지는 선형의 비선형 포텐셜 유동해석”, 한국항해항만학회 제29권 제1호, pp. 41-46
- [9] Yamano, T., Kusunoki, Y., Kuratani, F., Ogawa, T., Ikebuchi, T and Funeno I.(2003), “Effect of Transom Stern Bottom Profile From on Stern Wave Resistance -An Experimental Study-”, J. Kansai Soc. N.A., Japan, No 239, pp 1-10.

원고접수일 : 2011년 07월 15일
 심사완료일 : 2011년 10월 17일
 원고채택일 : 2011년 11월 29일