

선체 표면 거칠기가 경계층 변화에 미치는 영향

김옥석* · † 오우준 · 손창배** · 이경우***

*목포해양대학교 연구원, † 목포해양대학교 대학원, **한국해양대학교 해양공학과, *** 목포해양대학교 해양시스템공학부 교수

On the Variation of the Boundary Layer as Hull Surface Roughness

Ok-Sok Gim* · † Woo-Jun Oh · Chang-Bae Shon** · Gyoung-Woo Lee***

*Researcher, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

† Graduate School of Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

** Division of Ocean Engineering, Korea Maritime University, Busan, 606-791, Korea

*** Division of Ocean System Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

요 약 : 해양의 다양한 환경에 노출된 선체 표면의 거칠기를 일반화 하여 모델 실험을 PIV기법을 적용하여 회류수조에서 수행하였다. 모델의 유동방향 표면 거칠기의 폭에 기초하여 본 연구에 적용된 레이놀즈수 $Re=1.0 \times 10^3$ 에서 유동가시화, 시간평균 속도장 및 와도장을 상호 평가를 통하여 유동특성을 조사하였다. 와의 생성과 소멸 메커니즘을 통해 와류의 중심은 표면 거칠기 높이의 $0.5H$ 로 나타났다. 또한 거칠기 계수가 증가함에 따라 와의 크기와 비례하고, 와의 생성위치도 상부와 전방으로 이동하였다.

핵심용어 : 표면거칠기, 입자영상유속계, 유동가시화, 속도장, 와도

Abstract : The experimental study of the hull surface roughness on a developing turbulent boundary layer which exposed to a variety of operating environments were investigated by performing particle image velocimetry(PIV) in a circulating water channel. The Reynolds number based on the width of roughness was about $Re=1000$. The roughness elements used were periodically arranged two-dimensionally. The flow visualization, time-mean velocity fields and vorticity fields to measure the flow characteristics were obtained. The investigation shows that the vortex generation and its progress inside the walls. And the center of the vortex was located at the middle of the height of the surface roughness.

Key words : Surface roughness, PIV analysis, Flow visualization, Velocity field, Vorticity

1. 서 론

유체 중에 있는 선박 침수하부의 표면은 재질에 따라 고유의 표면 거칠기를 가지고 있으며 접합이나 절단과정 등 제작과정에서 발생하는 환경적 영향으로 처음 설계시 요구하는 매끄러운 선체표면에서 벗어나게 된다. 또한 항해하는 해역에 따라 변화하는 여러 가지 해양환경의 차이로 인한 해중 생물의 부착으로 선체표면의 상태는 시간이 지날수록 그 정도가 심해진다. 이러한 현상은 선박이 항해하는데 저항을 증가시키기 때문에 설계단계에서 어떻게 적용해야 하는지는 다양한 측면에서 접근이 시도되고 있다. 이러한 이유로 선체 표면 거칠기에 따른 유동변화에 관한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다(Krogstad et al, 1999; Tachie et al, 2007). 선박 표면의 거칠기는 건조과정에서 블라스팅, 외판 조립에 따른 용접부위의 거칠기 및 도장 공정을 거치면서 선체외판 고유의 표면 거칠기 정도가 정해진다. 또한, 운항하면서 해양생물의 부착과 도장부분의 탈락 등의 요인으로

표면 거칠기는 변화하게 된다.

선체의 부가물의 형상과 그 주위에서 발생하는 유동에 관한 연구는 지금까지 지속적으로 이루어지고 있으나, 선체 표면의 거칠기 변화에 따른 표면 주위의 유동에 관한 연구는 아직까지 미비한 실정이다. 이러한 표면 거칠기에 관한 유동연구는 표면근처에서 일어나는 유체역학적인 관점에서 접근이 가능하다. Krogstad et al(1999)은 일반 평판의 표면 거칠기의 영향이 거칠기의 기하학적 형상에 따라 유동과 경계층에 미치는 영향이 다름을 증명하였다. 또한 Tachie et al(2007)은 표면 거칠기에서 수반되는 유동구조 및 표면근처에서 형성되는 경계층에서의 유속변화를 해석하기 위해 가로보 형상의 모델을 선정하고 경계층에서의 난류응력과 난류강도를 실험조건에 따라 비교하였다.

박 등(1988)은 선체에 대한 항력을 평가하기 위해서 거칠기 함수를 결정하고, 이에 대한 이론적 방법과 직접 조사방법을 제시하였다. 제시된 방법에 대하여 선체 표면의 거칠기 정도에 따

† 교신저자 : 연희원, woojunoh@mmu.ac.kr 061)240-7142

* 연희원, domingo@mmu.ac.kr 016)614-3001

** 연희원, kaigan@hanmail.net 051)410-5293

*** 종신회원, kwlee@mmu.ac.kr 061)240-7307

라 속도 손실을 해석하였으며, 항력 평가에 대한 추가적 기술과 방법을 거론하였다. 선체 마찰저항을 감소하기 위한 연구는 이외에도 Kim 등(1991)은 실린더형 선체에서 난류경계층에 대한 표면 거칠기 효과에 대해 연구를 하였으며, 거칠기 변화에 따라 계산된 수치와 풍동 실험결과치를 비교 고찰하였다.

유 등(1997)은 벽마찰력과 벽근처영역에서의 유동방향 속도 점동간의 상관관계를 알아보고 벽마찰력과 직접적인 관계를 가지고 있는 벽근처 영역의 유동구조에 대한 정량적 해석을 수행하였다. 벽마찰력과 큰 상관관계를 가지고 있는 유동구조가 주 유동방향에 대하여 기울어져 있음을 보였다. 구 등(2004)은 리블렛 표면을 이용하여 유동제어 및 저항 감소에 대하여 수행하였다. 직접수치모사방법을 사용하여 해당 모델을 해석하였으며, 리블렛이 가져오는 유동구조에 따른 저항감소 요인을 설명하였다. 현 등(2005)은 사각단면을 갖는 거칠기 요소에 의한 유동변화를 알아보았다. 표면 거칠기 요소간의 거리변화에 따른 유동패턴에 중점을 두고 해석하였으며, 각각의 실험조건을 영역적으로 비교하였다.

Lee 등(2008)은 직접수치모사를 이용하여 표면 거칠기에 따른 경계층의 형성 과정을 설명하였고, 모델의 상사성이 성립하기 위해 필요조건을 제시하였다. 표면 거칠기가 미치는 영역을 이해하기 위해서는 주유동 방향으로 매우 큰 계산영역이 필요하다는 것을 증명하였다. 표면 거칠기에 따른 경계층 내 난류구조에서 거칠기의 영향이 벽면 근처의 난류구조에 미치는 영향을 고찰하였고, 거칠기의 영향이 존재하는 유동장의 범위를 난류구조의 관점에서 파악하였다.

또한, 선체표면 거칠기에 의한 점성유체의 난류경계층은 유체의 종류, 표면거칠기 및 선체 부가물 등에 의해 난류유동장이 생성된다. 균일한 유입유동에서 Y-방향의 속도구배는 전단변형율의 시간에 따른 변화율과 같아 전단이 일어나는 단면의 단위면적당 힘의 형태인 전단응력에 의해 3차원 선체의 거칠기에 대한 저항추정이 가능하다. 즉 1978년 ITTC 해석법에서 저항 성능 추정시 3차원 해석법(Hughes방법)을 적용하면 거칠기 계수는 단위 높이와 길이로 산출되므로 3차원 선체의 거칠기에 대한 적용이 가능하다(박 등, 1994)

본 연구에서는 선체표면에서 나타나는 거칠기 정도에 따라 경계층 및 유동구조의 변화를 알아보았다. PIV기법을 이용하여 2차원 표면 거칠기에 따른 경계층에서 와구조의 생성과 소멸과정을 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 레이저의 광원을 회류수조에 2차원으로 조사(照査)한 후 고속카메라를 이용해 모델 주위의 유동을 계속한 입자영상유속계의 시스템 구성도를 나타낸 것이다. 실험에 적용한 유체는 19°C 전후의 청수를 이용하였다. 모델 주위 유동의 원활한 추적을 위해 150 μ m 크기의 미소한 입자를 선별하여 사용하였다. 표 1은 본 연구에 적용된 실험 유속과 모델의 기하학적 형상을 거칠기 계수로 표현하여 나타낸 것이다. 선체 표면 거칠기 형상

은 매우 불규칙하여 대상선박의 크기 및 표면처리방법에 따라 여러 가지로 나뉘질 수 있다. 특히 해상에 노출된 시간은 그 표면형상을 더 다양하게 한다. 따라서 본 연구에서 실험한 모델은 선체표면의 불규칙한 표면조도의 형상을 일반화하여 요철(凹凸)형태로 적용하였다. 또한 모델의 불룩한 부분(W=10mm)에 기초한 레이놀즈수는 $Re=1.0 \times 10^3$ 으로 회류수조와 모델형상에 따라 성능평가에 적합한 균일한 유입유동을 적용하였다.

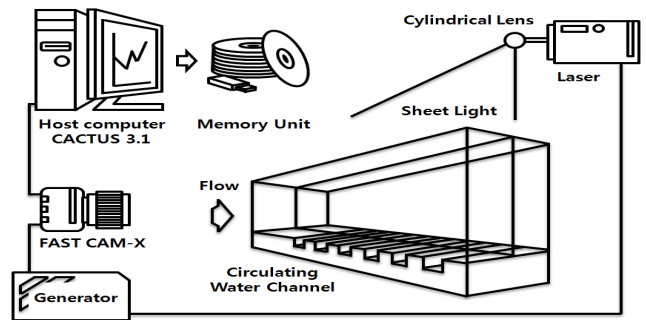


Fig. 1 Schematic arrangement of PIV system

Table 1 Experimental conditions

Re	L(mm)	W(mm)	H(mm)	Cr
1.0×10^3	40	10	10	0.33
			20	0.66
			30	1.00

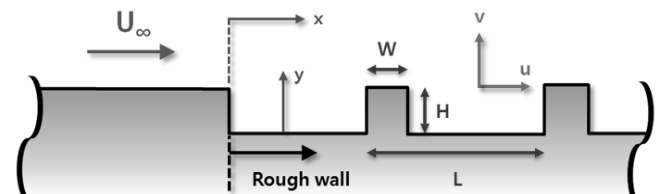


Fig. 2 Experimental model set-up

Fig. 2는 거칠기를 일반화하여 실험모델의 기하학적 형상을 나타낸 것이다. 연속적인 균일한 거칠기를 표현하기 위해서 요철의 반복횟수를 50회 이상 반복하도록 제작하였다. 또한 거칠기의 형상이 불균형한 동일입자추적을 위한 해석영역은 요철형상을 갖은 모델의 구간이 2회 반복되는 구간으로 선정하여 해석하였다. 그리고 거칠기의 가로방향을 W라 정의하고 세로방향을 H 그리고 간격을 L로 정의하였다. 순간 유동장의 해석을 위해서 12 프레임을 연속적으로 선정하였으며 표면 거칠기 형상 높이를 기준으로 상부를 해석하였다. 동일입자 추적을 위해 유입유속에 따른 입자의 이동을 고려하여 해석영역의 격자는 4500개로 하였으며 동일입자추적 범위는 12픽셀로 설정하였다. 시간 평균유동장의 해석을 위해 1,000 프레임을 순차적으로 선정하여 약 8초간의 입자의 이동을 평균화하였다.

$$C_r = H_n / H_{max} \quad (1)$$

실험모델은 형상사이의 높이(H) 변화에 따라 거칠기 계수(Cr ; Coefficient of roughness)를 식(1)을 이용하여 계산하였다. 충분한 예비실험과 선행연구를 바탕으로 돌출부 형상 3, 4개 이후에는 동일 패턴의 유동이 나타남을 고려하여 촬영 및 해석 영역은 거칠기 영역 X방향으로 32~41지점으로 하였다.(Lee et al, 2008)

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 레이놀즈수 $Re=1.0 \times 10^3$ 에서 표면 거칠기 간격(L)이 40인 경우의 유동가시화 결과를 나타낸 것이다. 선체 표면의 거칠기를 일반화한 형상인 요철(凹凸)의 전·후방에서 대규모 와가 생성되고 있으며 높이(H) 상부에서 경계층의 영역을 확인할 수 있다. Fig. 3(a)는 표면 거칠기 계수 $Cr=0.33$ 인 경우의 유동가시화 결과이다. 와의 생성 위치가 블록한 부분의 전방에서 작게 형성되고 있다. 또한 블록한 부분의 상부에서 일정한 경계층 영역과 분리되는 형상을 확인할 수 있다. Fig. 3(b)는 표면 거칠기 계수 $Cr=0.66$ 인 경우의 유동가시화 결과를 나타낸 것이다.

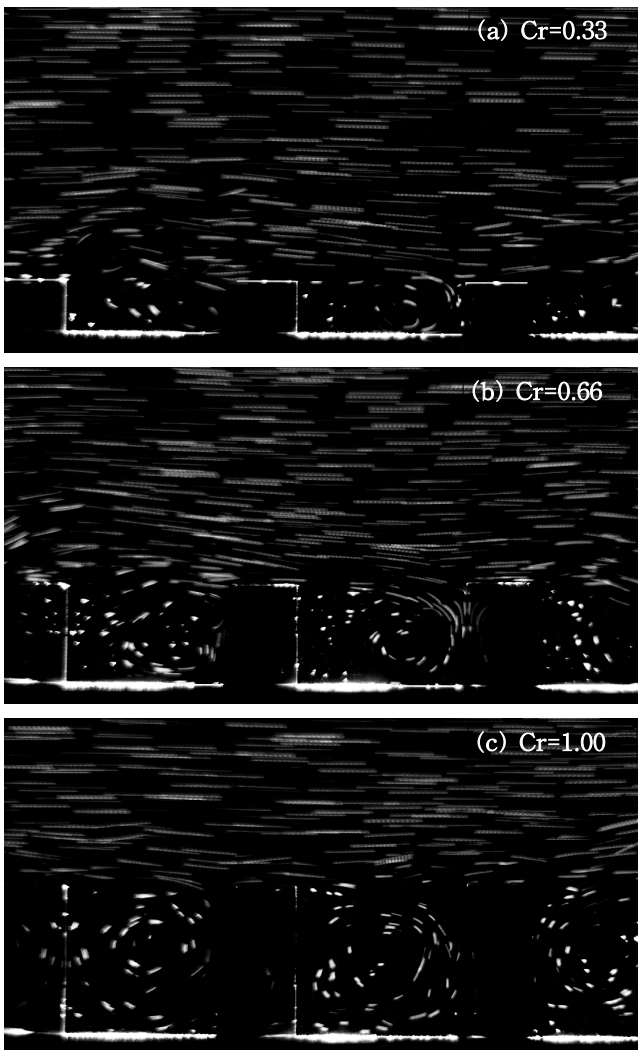


Fig. 3 Flow visualization

와의 규모가 $Cr=0.33$ 일 경우에 비하여 다소 커져 있으며 오목한 부분의 절반을 차지하고 있다. 또한 와의 생성에 따른 영향이 블록한 부분 뒷면까지 발달하여 유입유동과 혼합되어 경계층의 영역이 증가하여 나타났다. Fig. 3(c)는 표면 거칠기 계수 $Cr=1.00$ 인 경우의 유동가시화 결과를 나타낸 것이다. 가장 두드러진 변화는 와의 중심이 상부로 이동하였으며 크기로 오목한 부분의 전체를 차지하고 있다. 그러나 Fig. 3(b)에서와 같이 블록한 부분의 상부에서 나타났던 발달된 유동구조는 다소 감소하여 나타났다. 즉 유입유동과 와의 혼합되는 과정이 블록한 부분 상부에서 오목한 부분으로 이동하여 발달된 와의 형태를 보이고 있다. 전체적으로 거칠기 계수가 증가함에 따라 와의 크기는 증가하고 와의 중심이 상부로 이동하고 있다. 또한 생성위치도 전·후방의 블록한 부분 사이에서 나타나고 있다.

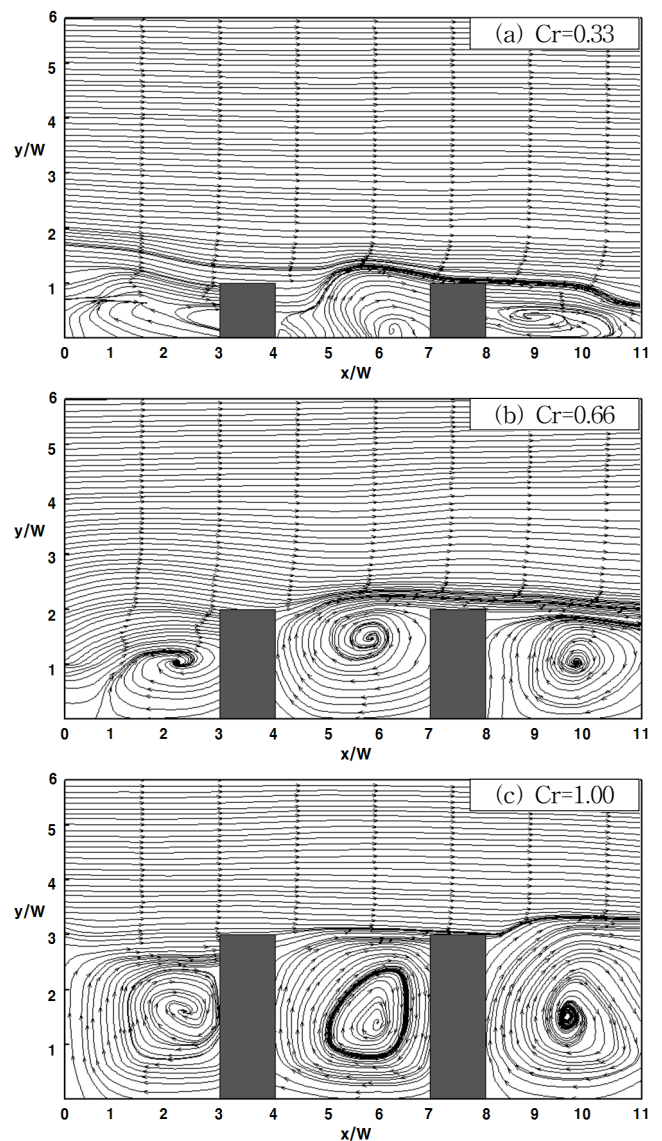


Fig. 4 Streamlines of instantaneous velocity

Fig. 4는 레이놀즈수 $Re=1.0 \times 10^3$ 에서 표면 거칠기(H)를 10mm, 20mm 및 30mm로 증가시키며 계측한 유선을 나타낸

것이다. 표면 거칠기의 간격(L)은 40mm로 고정하고 높이(H)를 변화시키며 순간유동의 변화를 해석하여 주기적인 유동의 흐름을 예측한 결과이다. Fig. 4(a)는 거칠기 계수 $Cr=0.33$ 에서 유선으로 요철주위에서 발생하는 와의 구조와 경계층 영역을 예측하였다. Fig 3의 결과와 유사하게 볼록한 부분의 전방 하부에서 와의 위치가 소규모로 발생하였으나 전반적으로 넓은 경계층 영역을 형성하고 있다. 와의 중심위치는 $y/W=1$ 이하에서 생성되고 있다. Fig. 4(b)는 거칠기 계수 $Cr=0.66$ 인 경우로 와의 규모가 Fig. 4(a)에 비해 상대적으로 크고 와의 중심위치가 $y/W=1\sim 1.5$ 지점으로 이동하고 가장 높은 지점에 있는 와와 가장 낮은 지점에 있는 와의 거리가 상대적으로 크게 나타났다. Fig. 4(c)는 거칠기 계수 $Cr=1.00$ 인 경우로 가장 거친 표면구조를 일반화한 경우이다. 와의 규모가 가장 크게 나타나지만 와의 생성지점은 Fig. 4(b)의 경우와 동일한 지점에서 생성되었다.

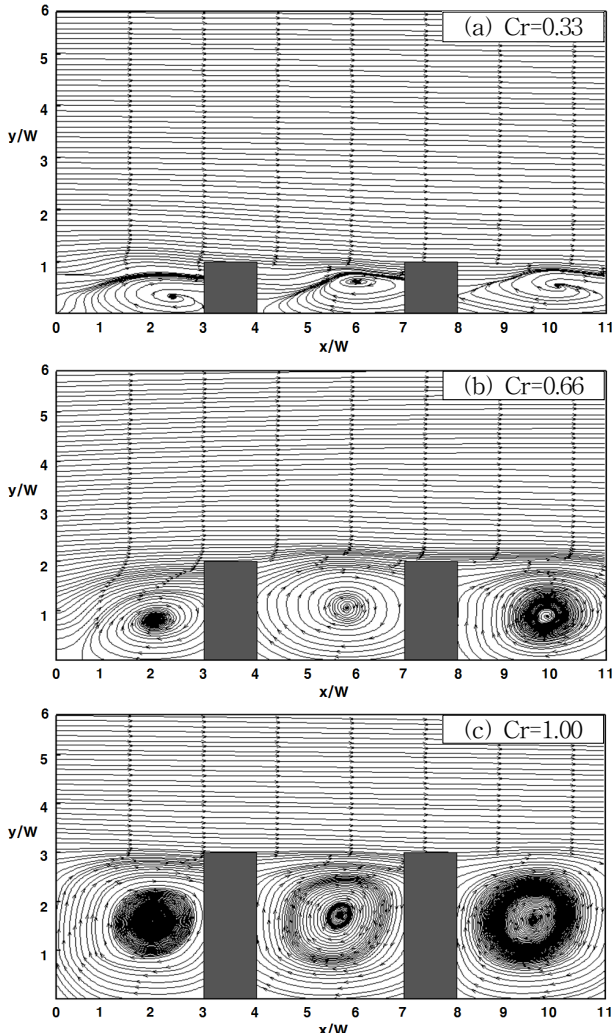


Fig. 5 Streamlines of time-mean velocity

Fig. 5는 Fig. 4의 순간 유동장을 시간평균한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 5(a)에서는 와의 생성지점은 유동가시화와 순간유동의 결과와 동일하지만 경계층의 영역은 다소 감소하는 경향을 보이고 있다. Fig. 5(b)의 경우에는 순간유동장에서 가장

활발한 유동구조를 보였으며 시간평균화된 결과에서도 와의 위치와 규모에서는 큰 차이를 보이지 않았다. Fig. 5(c)의 와의 구조는 상호 대칭적인 구조를 보이고 있다. 전반적으로 거칠기 계수가 증가함에 따라 와의 구조는 가로방향으로 넓은 분포형에서 정사각형의 안정된 구조 형태로 나타났다.

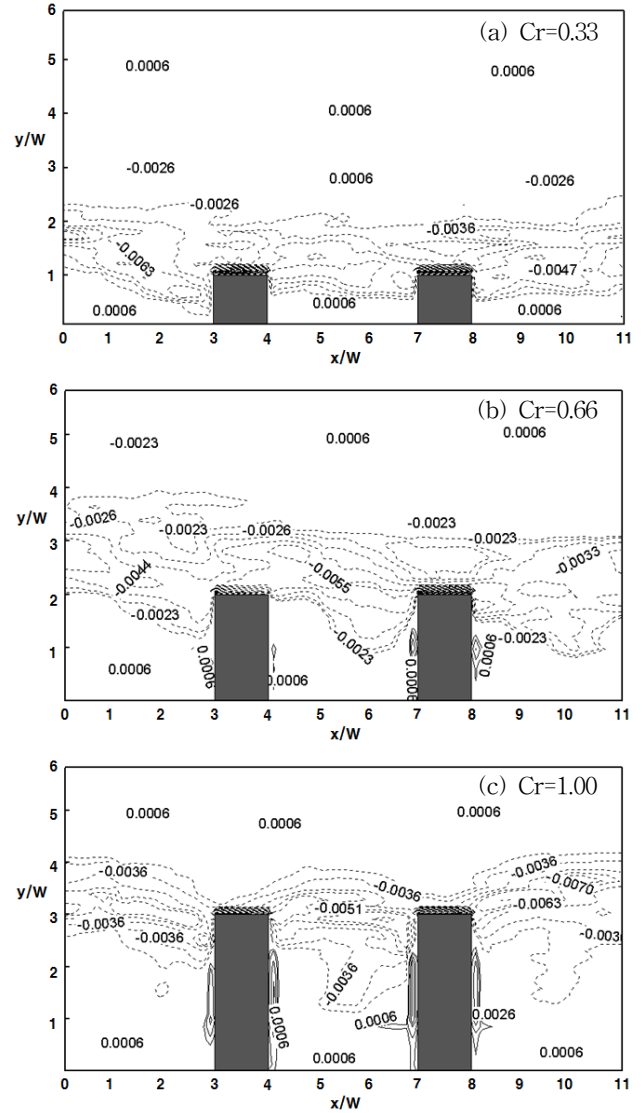


Fig. 6 Time-mean vorticity field

표면 위를 흐르는 유체에 대한 이해는 유체요소의 병진운동이나 회전으로 고체입자 운동과 결부시킬 수 있다. 여기서 운동학적 상태량인 와도 벡터(Vorticity vector)는 수학적으로 속도 벡터 \vec{V} 의 curl로 정의된다. xy 평면 상의 2차원 유동에서 z 방향 속도성분은 0이며, z 방향 직교좌표계 \vec{z} 를 포함한 와도는 다음과 같이 표현된다.

$$\omega = \text{curl}(\vec{V}) = \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \vec{k} \quad (2)$$

일반적으로 난류의 구조를 보면 대규모 와가 존재하고 그 내부에 소규모 와의 형태를 가지고 있다. 난류의 발생은 벽에 부딪혀 발생하는 난류와 유속차를 가진 두개 이상의 유동의 합에 의한 난류로 구분된다. Fig. 6에서는 거칠기 계수별로 유동가시화와 유선구조에서 추적한 와의 연직방향에 대한 각속도를 추적하였다. Fig. 6(a)에서는 거칠기 계수 $Cr=0.33$ 에 대한 와도분포를 나타낸 것이다. 경계층 영역이 낮아 상부에서의 와도는 적층구조를 가지고 있다. 그리고 요철(凹凸)의 형태 내부에서 낮은 와도성분이 발생하고 있다. $x/W=3, 4, 7$ 및 8지점에서 강한 와도성분이 나타났다. 또한 Fig. 6(b)의 경우 $Cr=0.66$ 으로 적층구조의 와도는 일부 무너졌으며 불룩한 부분 전·후방에 인접한 부분에서 세로방향으로 길고 강한 와도성분이 나타났다. Fig. 6(c)는 $Cr=1.00$ 로 불룩한 부분 전·후에서 강한 와도의 형상이 세로방향으로 가장 길게 형성되고 있다. 또한 두개의 불룩한 부분 사이에서도 강한 와도가 나타나고 있다. 즉 불룩한 부분의 전방에서 발생하는 강한 와도는 유입유동이 벽에 부딪혀 발생하는 벽난류의 발생이고 불룩한 부분 후방에서 발생하는 강한 와류는 유입유동이 유속차를 가진 불룩한 부분 사이에서 낮은 유동과 결합에 의한 난류영역을 형성하는 강한 와도성분이 형성되었다. 압력과 속도가 시간과 공간에 따라 빠르게 변화하는 수송계수가 크고 물체에 끼치는 저항 또한 크게 나타난다. 즉 난류는 유체의 가장자리에서 발생하고 유속이 빠르며 유체 점성이 작을때 발생하는 성질을 보이고 있다.

Fig. 7은 유입유동이 거칠기 형상을 지나 와의 형성과정에서 속도분포를 추출한 결과이다. 추출지점은 세로축 $H/2$ 지점에서 가로축으로 $x/W=4\sim 7$ 영역에서 50개의 값을 추출한 결과이다. 거칠기 계수 $Cr=0.33$ 에서는 전체적으로 높은 값을 나타내고 있다. 또한 벽면 근처에서 낮은 속도분포를 보이는 일반적인 경향과 대조적으로 높은 값을 나타내고 있다. 이에 반하여 거칠기 계수 $Cr=0.66$ 에서는 $x/W=4$ 지점에서는 낮은 속도분포를 보이다가 $x/W=7$ 지점에서 높게 나타난다. 즉 벽난류가 발생하는 지점에서는 빠른 수송계수에 의한 영향으로 판단된다. 거칠기 계수 $Cr=1.00$ 에서는 전반적으로 일정한 낮은 값이 계속되었다.

Fig. 8은 유입유동에 수직한 방향으로 유동의 변화를 알아보고자 $x/W=5.5$ 지점에서 세로축 방향으로 속도값을 추출한 결과이다. 전체적인 경향을 유속분포가 역으로 변화를 보이기 시작한 지점이 거칠기 계수와 비례의 관계를 가지고 있다. 거칠기 계수 $Cr=0.33$ 에서는 $y/W=0.5$ 지점에서 양의 값으로 변화하고 $Cr=0.66$ 에서는 $y/W=1$ 지점 그리고 $Cr=1.00$ 에서는 $y/W=1.5$ 지점에서 음의 속도구배가 양으로 변화하는 지점으로 계속되었다. 즉 $y/W=H/2$ 지점에서 유동의 변화를 보이고 있음을 알 수 있다. 그리고 $y/W=4$ 에서 거칠기 계수에 관계없이 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보이고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 선체 외판의 조도를 요철(凹凸)구조로 일반화하여 PIV기법을 적용하여 모델실험을 적용하여 거칠기의 높이의 변화에 따른 유동변화와 경계층 내에서의 유동구조를 고찰하였다. 순간속도분포, 시간평균 속도분포 및 와도분포를 통하여 2차원 경계층의 변화를 추적하여 와의 내부구조에 대해서 공간적 변화를 관측하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

거칠기 계수가 증가함에 따라 와의 크기와 비례하고, 와의 생성위치도 상부와 전방으로 이동한다. 와도는 벽난류의 발생지점과 유체의 운동이 큰 지점인 거칠기 형상 중 불룩한 부분의 전·후방에서 크게 나타났다. 거칠기 형상 내부에서 속도구배가 음에서 양으로 변화하는 지점은 거칠기 계수의 크기에 비례하여 상부로 이동하였으며 그 위치는 높이의 $1/2$ 지점으로 나타났다.

본 연구에서는 높이를 변수로 거칠기의 형상을 일반화하였으나 길이방향의 변화에 대한 추가연구가 필요하며 다양한 형상의 표면 거칠기에 대해 접근이 필요하다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임

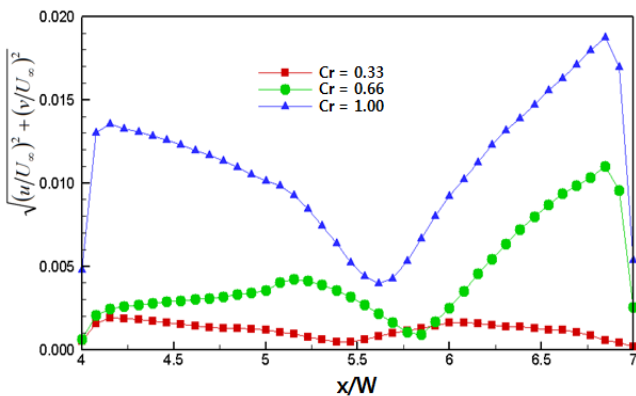


Fig. 7 Velocity distributions along $y/W=H/2$

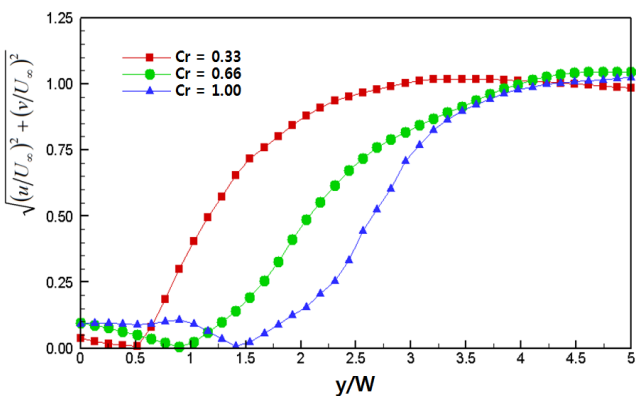


Fig. 8 Velocity distributions at $x/W=5.5$

참고문헌

- [1] 구본국, 윤현식, 전호환(2004), “리블렛 표면을 이용한 난류 유동해석 및 마찰저항감소”, 대한조선학회논문집 제41권 제4호, pp.59-67.
- [2] 박명규, 김동진, 이승호(1988), “선체조도에서의 저항증가의 평가에 관한 연구”, 한국항해항만학회지 제12권 제3호, pp.23-37.
- [3] 박용제, 김은찬, 이춘주, 임효관, 박호선(1994), “동력추정을 위한 모형선-실선 상관해석에 관한 연구”, 대한조선학회지 제31권 제1호, pp32-41.
- [4] 양준모, 유정열, 최해천(1997), “난류경계층에서 벽마찰력과 유동방향 속도성분과의 상관관계”, 대한기계학회지 제21권 제1호, pp.140-152.
- [5] 현범수, 서은정, 문재승, 김길원(2006), “사각단면을 갖는 환경 거칠기 요소의 거칠기 간격에 따른 유동변화”, 한국해양환경공학회지 제9권 제2호, pp.85-91.
- [6] Kim, S.Y., Lewkowicz, A.K.(1991), “The Surface Roughness Effects in Computation of the Turbulent Boundary Layer on Slender Ship-Hull”, KSME International Journal Vol.5 No.2, pp.65-70.
- [7] Krogstad, P.A., Antonia, R.A.(1999), “Surface roughness effects in turbulent boundary layers”, Experiments in Fluids, Vol.27 No.5, pp.450-460.
- [8] Lee, S.H., Kim, J.H. and Sung, H.J.(2008), “PIV measurements of turbulent boundary layer over a rod-roughened wall”, The International journal of heat and fluid flow, Vol.29 No.6, pp.1679-1687.
- [9] Tachie, M.F., Agelinchaab, M. and Shah, M.K.(2007), “Turbulent flow over transverse ribs in open channel with converging side walls”, The International journal of heat and fluid flow, Vol.28 No.4, pp.683-707.

원고접수일 : 2010년 3월 22일

심사완료일 : 2010년 7월 22일

원고채택일 : 2010년 7월 29일