

직사각형 형상의 표면조도 변화에 의한 난류변동분 해석

오대균* · 오우준***† · 김도정**** · 이경우**

*, ** 목포해양대학교 해양시스템공학부, *** 목포해양대학교 대학원, **** 한국조선해양기자재연구원

Analysis of Turbulent Velocity Fluctuations of Rectangular Shape of the Surface Roughness Change

Dae-Kyun Oh* · Woo-Jun Oh***† · Do-Jung Kim**** · Gyoung-Woo Lee**

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

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

**** Korea Marine Equipment Research Institute, Yeongam, 526-897, Korea

요 약 : 표면조도에 의해 발생하는 난류유동은 공학적, 물리적 분야에서 매우 중요하게 다루어지고 있다. 표면조도는 선박에서도 설계, 용접, 도장 등 각각의 단계에서 다양한 측면으로 고려되어야 할 중요한 요소이다. 본 연구는 표면조도 형상을 일반화하여 PIV기법을 적용하여 수조실험을 수행하였다. 표면조도 조건은 거칠기 형상의 간격에 대해 변화를 주었으며, 실험유속은 $Re = 1.1 \times 10^4$, $Re = 2.0 \times 10^4$, $Re = 2.9 \times 10^4$ 에서 시간평균에 대한 난류강도를 알아보았다. 거칠기 계수 증가에 따라 표면 거칠기 형상 근처에서 발생한 난류성분에 의해 난류강도는 강하게 나타났다. 자유흐름 영역으로 갈수록 유동 방향의 변동이 전혀 없는 흐름이 나타났다. 실험유속 조건 변화에 대한 난류강도의 편차는 크게 영향을 받지 않았다.

핵심용어 : 표면조도, 난류강도, 난류경계층, 입자영상유속계, 상호상관기법

Abstract : In physical engineering, the turbulent flow on the surface roughness is very important. With the welding, design and paint, the hull surface roughness at each stage in the various aspects are important factors to be considered. In this study, the hull surface roughness geometry that was generalized to the PIV was applied to the tank test. The roughness of the surface changed the distance of the interval. Experimental velocity is $Re = 1.1 \times 10^4$, $Re = 2.0 \times 10^4$ and $Re = 2.9 \times 10^4$. The turbulent intensity at the time-average were examined. The roughness coefficient occurred with increasing turbulence intensities was stronger. The turbulence intensity away from the roughness in the shape was zero. The variation of turbulence intensity at the experimental flow conditions change was not affected.

Key Words : Surface roughness, Turbulence intensity, Turbulent boundary layer, Particle image velocimetry, Cross correlation

1. 서론

표면조도는 선박의 건조과정에서 블라스팅, 외판 조립에 따른 용접부위의 거칠기 및 도장 공정을 거치면서 선체외판 고유의 표면 거칠기 정도가 결정된다. 그리고 해수에 노출된 선체의 표면은 재질 및 노출환경에 따라 거칠기 변화를 가져오게 된다. 이처럼 선체 건조과정에 따른 기존의 재질 및 형상조건에서도 변화가 발생하지만 환경적 요인에 의해 점차 거친 선체표면형상이 된다. 선체에는 항해하는 해역에 따라 다양한 해중 생물 등이 부착하게 되며, 선체 표면조도 상태는 시간이 지날수록 정도가 심해진다. 이외에도 도장부분의 탈락, 방식 등의 요인으로 표면조도는 변화하게 된다. 거칠기 증가는 선박이 항해하는데

저항을 증가시키기 때문에 설계단계에서부터 다양하게 접근이 시도되고 있다. 따라서 선체 표면조도에 따른 유동변화에 관한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다(Krogstad and Antonia, 1999; Tachie et al., 2007).

표면조도에 대한 연구는 거칠기와 유동 조건에 기초한 실험적 접근이 대부분이다. 윤(1998)은 매끈한 면과 거친 면에서의 속도분포와 난류 성분 등을 해석하여 거칠기에 따라 평균 속도의 변화보다는 난류 성분의 거동이 크게 증가했음을 보였다. 국(2000)은 거칠기 형상변화 조건에서 수조실험을 수행하였다. 형상은 3차원 저면조도 형태로 바닥 거칠기 형태에 인위적 요소를 추가하여 조석잔차류를 고려한 방향성 저항특성을 해석하였다. 유속 및 모델조건에 변화를 주어 해수교환에 따른 최적 저면조도 형상을 선정하였다. 김 등(2005)은 풍동실험을 통한 트리핑 구조물에서 조도 변화에 따른 난류 경계층 발달과 특성을

* 대표저자 : 중신회원, dkoh@mmu.ac.kr, 061-240-7318

† 교신저자 : 정희원, woojunoh@mmu.ac.kr, 061-240-7124

해석하였다. 표면조도의 영향으로 표면조도가 커질수록 경계층 등이 증가하며, 속도섭동성분의 영향은 매끈한 면에 비해 조도 불연속 이후 급격히 커지며 이는 재순환 유동으로 인해 강한 혼합을 이유로 들었다. 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 따라 속도 손실을 해석하였으며, 항력 평가에 대한 추가적 기술과 방법을 거론하였다.

현 등(2006)은 거칠기 요소에 대한 기본 유동장 변화를 알아보기 위해 회류수조와 PIV기법을 활용하여 거칠기 요소 높이와 간격에 따른 유동 특성에 대해 연구하였다. 하나의 유속조건으로 고정하였으며, 거칠기 요소변화에 따른 유속 및 와도분포, 난류강도, 전단응력 등을 소개하였다. 흐름방향 난류강도는 거칠기 표면을 따라 주 흐름 방향으로 평행하게 높고 거칠기 요소와 평판에 인접한 영역에서 절대값은 작으나 그 변화는 매우 크며, 거칠기의 영향이 거칠기 표면 근처에서 국한되어 나타남을 보였다.

안과 정(1994)은 표면조도에서 발생하는 난류에 대해 실험적으로 접근하였으며, 이중동심관내에 표면조도 형상을 나타내어 속도분포, 전단응력, 난류강도 및 난류 운동에너지 그리고 와확산 등을 설명하였다. 이 등(2010)은 3차원 표면조도의 영향을 갖는 난류경계층을 직접수치모사하여 유동 방향에 따라 공간 발달하는 3차원 조도 위의 난류특성을 2차원 막대형 표면조도 결과와 비교하였다. 조도저층 뿐만 아니라 바깥영역에서도 표면조도의 영향이 존재하며, 이는 표면조도의 주기와 사각형상면에 의한 막음현상으로 설명하였다.

2차원 거칠기 요소에 의한 유동장에 대한 연구는 k-type과 d-type으로 분류되며 k-type은 거칠기 높이에 비하여 거칠기 사이의 간격이 넓으며, d-type은 상대적으로 간격이 좁다. 이러한 거칠기 요소에 대해 Jimenez(2004)는 거칠기 요소변화에 따른 벽 난류 흐름에 대해 정량화를 시도하였다.

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

본 연구에서는 선체표면에서 나타나는 거칠기 정도에 따라 표면조도 형상 부근부터 자유흐름 영역까지의 난류강도 성분에 대해 알아보았다. 고려되는 실험적 접근으로는 거칠기 높이에 비하여 거칠기 사이의 간격이 넓은 k-type의 간격변화 조건이며, 선체표면의 주위의 유속성분을 고려하여 실험 유속조건이다. PIV기법을 이용하여 유속조건과 표면거칠기 간격변화에 따

라 표면거칠기에 의한 난류성분의 영향과 유동 경계층에서의 난류 변동성분에 대해 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

수조실험에 적용한 유체는 19 °C 전후의 청수를 이용하였다. Fig. 1은 레이저의 광원을 회류수조에 2차원으로 조사(照査)한 후 고속카메라를 이용해 모델 주위의 유동을 계측한 입자영상 유속계의 시스템을 나타낸 것이다. 모델 주위 유동의 원활한 추적을 위해 150 μm 크기의 미소한 입자를 사용하였다. Table. 1은 본 연구에 적용된 실험 유속과 모델의 기하학적 형상을 거칠기 계수로 표현하였다. 실험유속은 선체 주위의 유속을 고려하였으며, 표면 거칠기의 최대 간격 60mm를 대표 길이로 하여, $Re = 1.1 \times 10^4$, $Re = 2.0 \times 10^4$, $Re = 2.9 \times 10^4$ 로 하였다. 모델은 선체표면의 불규칙한 표면조도의 형상을 일반화하여 요철(凹凸)형태로 적용하였다.

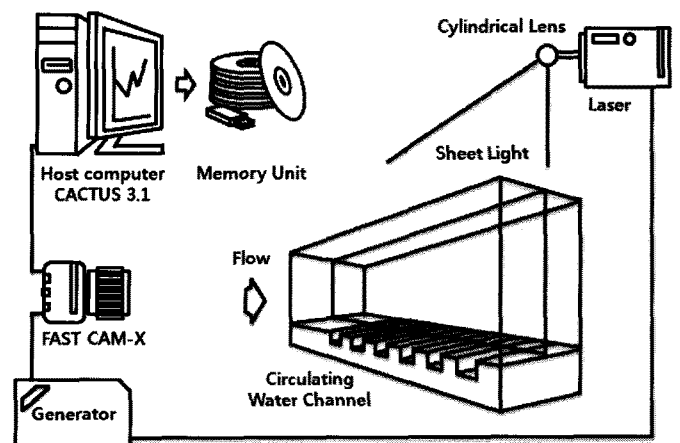


Fig. 1. Schematic arrangement of PIV system.

Table 1. Experimental conditions

H (mm)	w (mm)	Re	λ (mm)	Cr
10	10	1.1×10^4	20	0.33
		2.0×10^4	40	0.66
		2.9×10^4	60	1.00

Fig. 2는 거칠기를 일반화하여 실험모델의 기하학적 형상을 나타낸 것이다. 균일하고 연속적인 거칠기를 표현하기 위해서 요철의 반복횟수를 50회 이상 반복하도록 제작하였다. 또한 거칠기의 형상이 불균형한 동일입자추적을 위한 해석영역은 요철 형상을 갖은 모델의 구간이 2회 반복되는 구간으로 선정하여 해석하였다. 그리고 거칠기의 가로방향을 w라 정의하고 세로방향을 H 그리고 간격을 λ로 정의하였다.

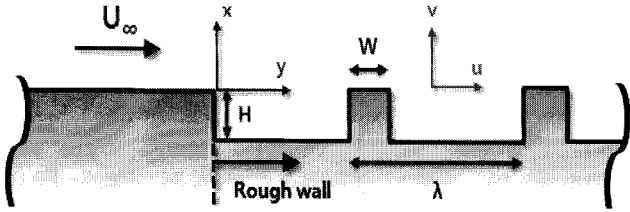


Fig. 2. Experimental model set-up.

동일입자의 추적을 감안하여 해석영역의 격자는 90×50 로 하였으며, 격자를 고려한 동일입자추적 반경은 12 pixel로 설정하였다. 시간 평균유동장의 해석을 위해 1,000 Frame(실험시간 ≈ 8.0 sec)을 순차적으로 선정하여 입자의 이동을 시간 평균하였다.

$$C_r = \lambda_n / \lambda_{max} \quad (1)$$

여기서 λ_{max} 는 60 mm이며, 실험모델은 형상사이의 간격(λ) 변화에 따라 거칠기 계수(C_r ; Coefficient of roughness)를 식(1)을 이용하였다. 실험환경과 최초 유동 유입지점과 거칠기 형상 간 거리 등을 고려하여 거칠기 간격변화(λ) 조건을 적용하였다. 충분한 예비실험과 선행연구를 바탕으로 돌출부 형상 3, 4개 이후에는 동일 패턴의 유동이 나타남을 고려하여 촬영 및 해석 영역은 거칠기 영역 X방향으로 320~540 mm지점으로 하였다(이 등, 2010). 상용프로그램인 "CACTUS 3.1"을 이용하여 촬영된 영상에 대해 해석하였으며, 해석영역은 표면 조도 형상 높이를 기준으로 상부를 해석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 난류강도

유체흐름에서 각각의 성분 중에 난류는 매끄러운 층을 이루며 질서정연한 유체 운동에서는 '낮다' 할 수 있으며, 속도 변동이 심하며 매우 불규칙한 유체 운동에서는 '높다' 말할 수 있다. 하지만, 복잡한 흐름을 보이고 있는 유체에서는 그 정도를 나누어 낮고 높음을 정의하기가 어렵다(Fig. 3). 따라서 유체가 가지고 있는 에너지는 난류강도(T.I; Turbulence Intensity) 방법으로 추정 가능하다.

난류강도는 난류의 정도이며, 난류특성을 %로 나타낸다. 유체의 속도 또는 방향의 변동이 전혀 없는 흐름의 경우 난류강도가 0%이다.

$$I \equiv \frac{u'}{U} \quad (2)$$

여기서 u' 은 지정된 시간동안 특정 위치에서의 난류 속도 성분 에 따른 표준편차이며, U 는 같은 시간동안 동일한 지점에서의 평균유속(Reynolds 평균)을 나타낸다.

만약 난류 에너지를 k_t 라 하면, u' 는 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

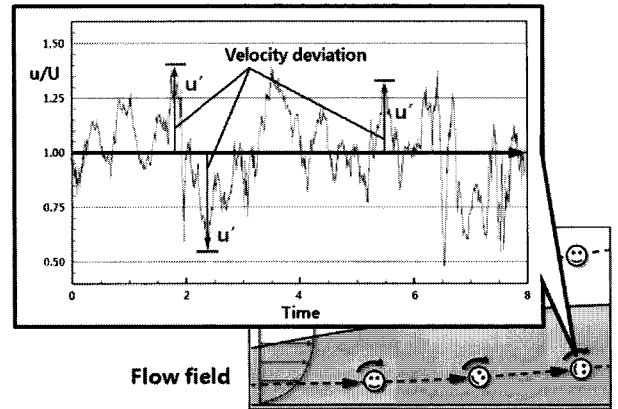
$$u' \equiv \sqrt{\frac{1}{3}(u_x'^2 + u_y'^2 + u_z'^2)} = \sqrt{\frac{2}{3}k_t} \quad (3)$$

U 는 U_x , U_y 그리고 U_z 의 세 개의 평균속도 구성요소로부터 계산된다.

$$U \equiv \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2} \quad (4)$$

난류강도의 계산은 식(5)와 같으며, 해석격자 지점에서의 계산은 수조단면 조사에 따른 2차원 해석으로 고려하였다.

$$T.I. = \frac{\sqrt{(u'^2 + v'^2 + w'^2)/3}}{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}} \quad (5)$$



$$Re = 2.0 \times 10^4 \text{ of } \lambda = 2w \text{ (X/w=10.5, Y/w=0.88)}$$

Fig. 3. Velocity deviation at the flow field.

실험영역의 난류변동분(Turbulent velocity fluctuations)을 해석하여 평균유속에 대한 유속편차와 난류의 정도를 알아보았다.

3.2 표면조도 변화에 의한 난류강도

Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6은 각각의 표면조도 및 유속조건 변화에 따른 표면 상부에서의 난류강도 분포이다. 표면조도 형상을 벗어나는 자유흐름 상태에서는 0에 가까운 난류강도를 확인할 수 있다. 표면조도 형상에서 충분히 떨어진 거리에서는 난류강도가 현저히 낮아진다. Fig. 4는 표면조도 간격이 2w이며, Fig. 5는 표면조도 간격 4w일 때의 그래프이다. 유속증가에 따른 표면조도 골부분에서 높은 영역의 난류강도를 확인할 수 있었으며, 유속증가에 따라 상대적으로 높은 난류강도를 확인할 수 있다. Fig. 6은 그래프는 표면조도 간격 6w일 때의 그래프이다.

표면조도 골 부분(凹)의 높은 난류강도 영역이 보이며, 거칠기 간격이 2w, 4w 보다 자유흐름 영역까지 감소되는 차이를

보이고 있다.

Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6은 실험조건 변화에 따라 난류강도를 비교하기에는 난해한 부분이 있다. 따라서 X/w 지점의 0에서 부터 22지점을 균등하게 19개로 나누어 각각의 지점에 대하여 Y/w 가 0인 지점부터 4까지 난류강도 성분을 추출하였다. 표면 조도 간격변화 및 실험유속 조건 변화에 따라 표면근처에서의 난류변동에 대한 편차와 난류강도에 대하여 해석하였다.

Fig. 7은 동일 유속조건에서 표면조도의 거칠기 계수변화에 따른 난류강도의 편차를 나타내고 있다. Fig. 7 (a)는 Y/w 가 0.7 아래 지점에서 난류강도의 최대 편차범위는 ± 0.12 이다. Y/w 가 0.7 보다 큰 지점에서 난류강도의 편차는 거의 없다. Fig. 7 (b)에서는 상대적으로 적은 범위인 ± 0.7 의 편차를 보이고 있으나, Y/w 가 2.7 지점까지 약 ± 0.2 의 편차를 유지하고 있다. Fig. 7 (c)는 ± 0.7 의 최대편차를 가지며 Y/w 가 3.8인 지점까지 Fig. 7 (a)나 (b)보다 상대적으로 매우 큰 편차를 보이고 있다. Cr 이 0.33일 때는 Y/w 가 0.5 지점까지 편차를 보이며 Cr 이 0.66이면 Y/w 가 1.5 지점이며, Cr 이 1.0일 때는 Y/w 가 3.0 지점까지 두드러진 편차를 보인다. 표면조도 형상에 기인한 점차 넓은 범위의 난류성분 경계층을 확인할 수 있다.

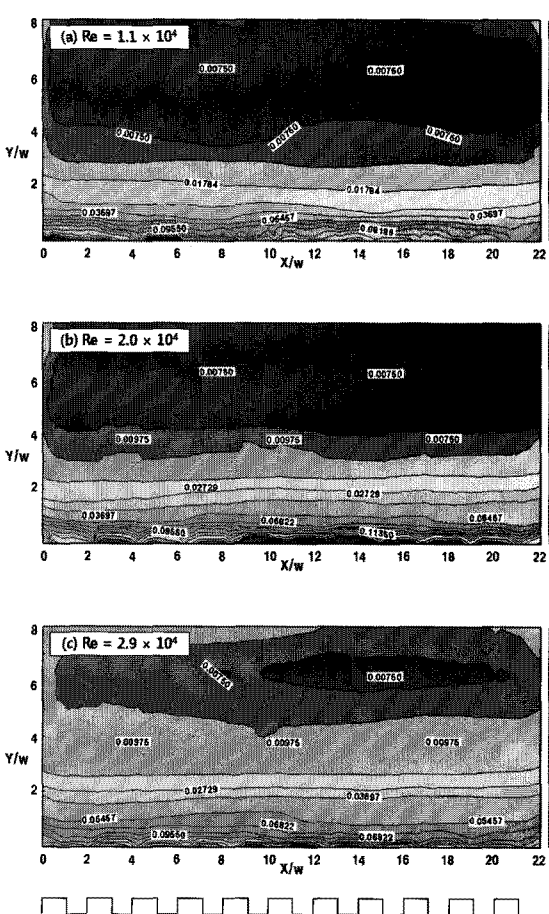


Fig. 4. T.I. field of mean velocity($\lambda=2w$).

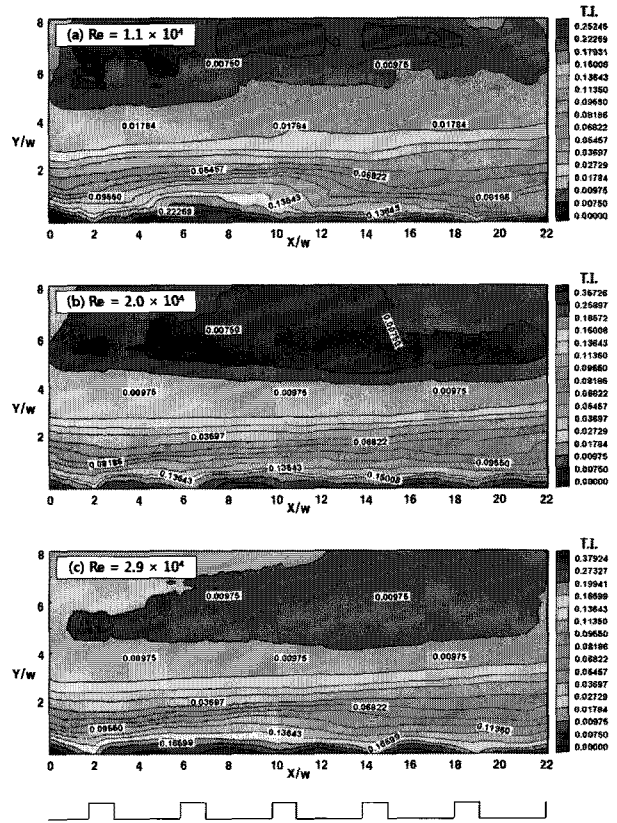


Fig. 5. T.I. field of mean velocity($\lambda=4w$).

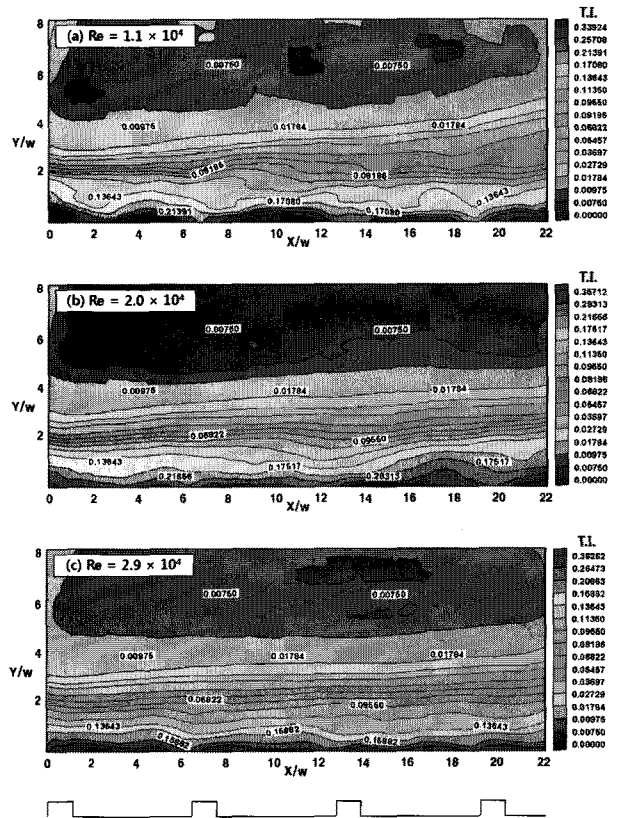


Fig. 6. T.I. field of mean velocity($\lambda=6w$).

Fig. 7에서 난류강도의 편차에 대한 각각의 실험조건에서의 평균값을 Fig. 8에서는 실험유속 변화에 따라 Fig. 9에서는 표면조도 간격(λ) 변화에 따라 표면근처에서 비교한 그래프이다.

Fig. 8은 (a)에서 (c)까지 같은 표면조도 형상조건일 때 실험유속 변화에 따른 표면근처의 난류강도이다. 각각의 수치 값이 미비하게 차이는 있으나 동일한 곡선 형태임을 볼 때, 실험유속 변화에 따른 표면근처에서 난류강도에는 크게 영향을 보이지 않음을 알 수 있다.

Fig. 9에서는 동일 실험유속 조건에서 표면조도 간격이 점차 커짐에 따라 난류강도가 큰 차이를 보이고 있다. Fig. 9(a)부터 (c)는 표면조도 간격 $\lambda=4w$ 와 $\lambda=6w$ 일 때 Y/w 가 2.5지점까지 일정한 난류강도 차이를 보이고 있다. 반면, $\lambda=2w$ 는 Y/w 가 0.3부터 1.5에서 가장 큰 차이를 보이고 있다.

실험영역에 대해 추출하여 평균된 난류변동분은 유속변화에 따른 k-type의 거칠기 요소에 따라 거의 차이를 보이지 않지만, Cr 이 커질수록 큰 차이를 보인다. 크게 변화되는 난류강도 지점에서는 약 28% - 78% 비율로 난류변동분이 증가하였다.

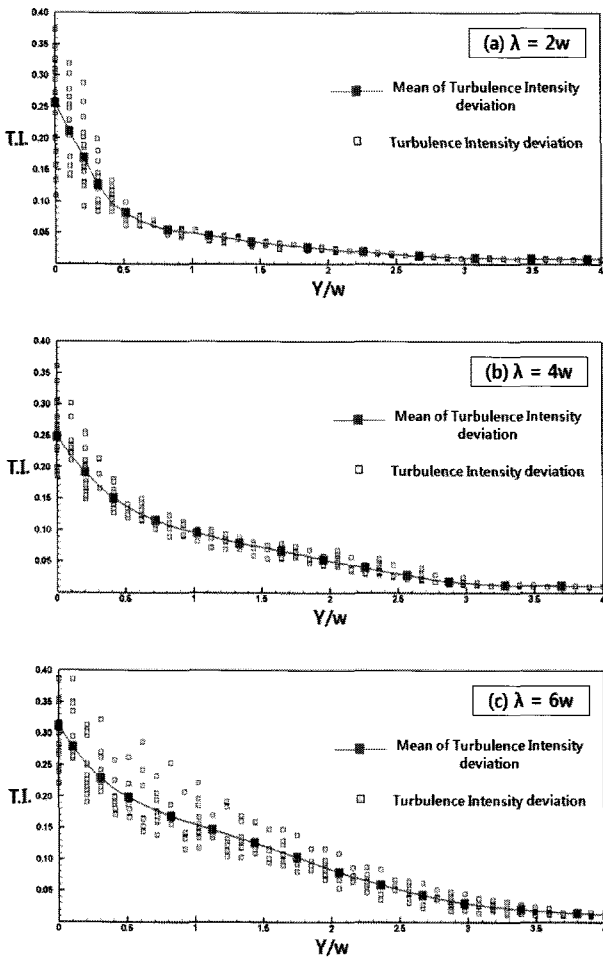


Fig. 7. T.I. deviation distribution.

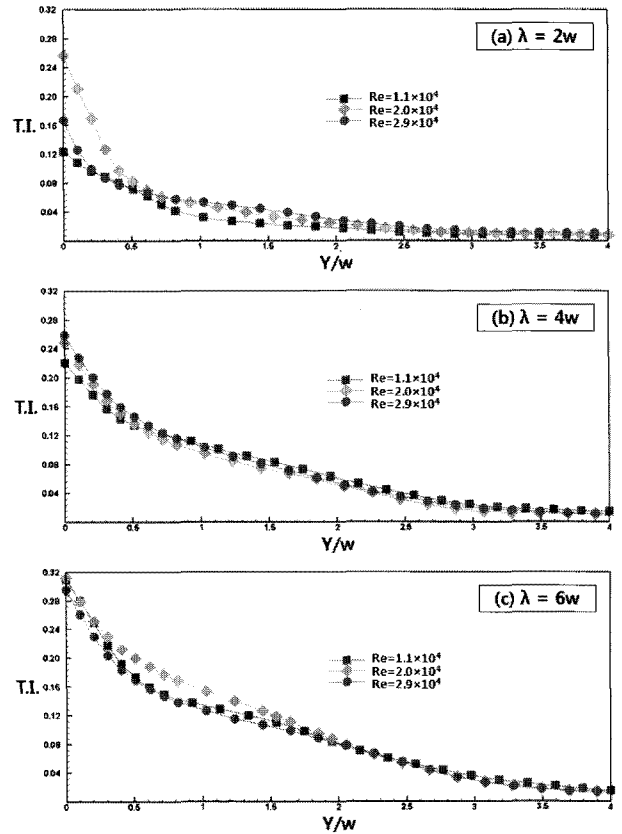


Fig. 8. T.I. distributions as functions of Re numbers.

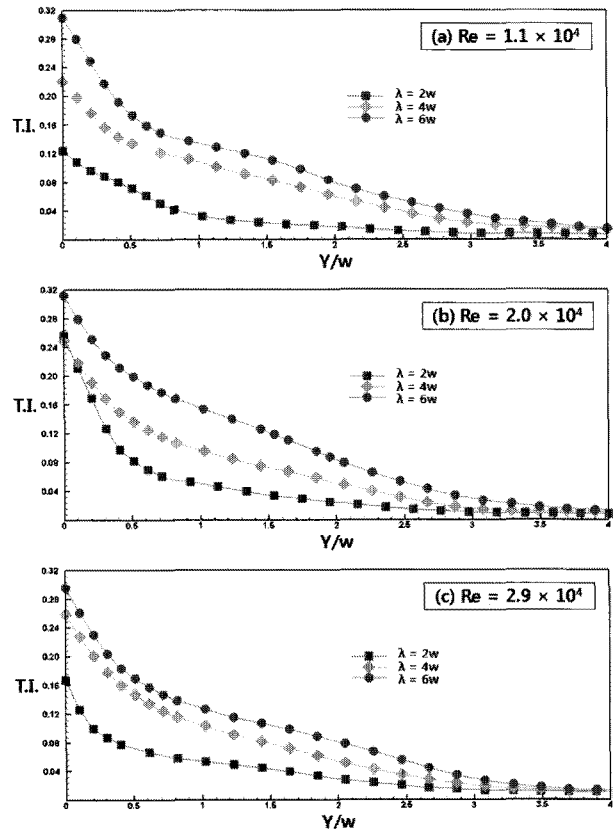


Fig. 9. T.I. distributions of the λ change.

4. 결 론

선체 표면조도 형상을 요철(凹凸)구조로 일반화하여 PIV기법을 적용하여 모델실험을 적용하여 거칠기의 간격변화에 따른 경계층 내에서의 난류강도에 대해 고찰하였다. 시간평균 난류강도와 실험영역 평균에 대한 난류변동분을 다음과 같은 결론으로 나타내었다.

거칠기 계수(Cr)가 증가함에 따라 난류강도는 표면조도 형상 부근에서 큰 편차를 가지고, 난류강도 편차는 거칠기 계수의 증가에 따라 거칠기 형상을 벗어나 균등하게 확장됨을 보였다. 높은 편차의 난류강도는 자유흐름에서 표면근처로 갈수록 점차 발달된다. 이는 표면 근처에서 발생한 큰 편차의 난류성분에 기인되는 것이다. 실험유속 변화에 따른 난류강도의 변화분포는 크지 않았다. 그러나 k-type 형태의 거칠기 형상에 대한 난류변동분은 표면근처에서 두드러지게 나타났다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임을 밝히며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] 국승기(2000), 방향성 저항특성을 가진 3차원 저면조도의 최적형상에 관한 연구, 한국항만학회지, 제14권, 제4호, pp. 441-450.

[2] 김동건, 김문경, 윤순현(2005), 영압력 구배 난류 경계층에서 표면조도가 미치는 영향, 한국마린엔지니어링학회지, 제29권, 제4호, pp. 453-460.

[3] 박명규, 김동진, 이승호(1988), 선체조도에서의 저항증가의 평가에 관한 연구, 한국항해학회지, 제12권, 제3호, pp. 23-37.

[4] 안수환, 정양범(1994), 양벽면에 거칠기가 있는 이중동심관내의 난류유동에 관한 연구, 한국마린엔지니어링학회지, 제18권, 제3호, pp. 267-275.

[5] 윤준용(1998), 표면 거칠기가 난류 유동장에 미치는 효과에 대한 실험적 연구, 공학기술논문집, 제7권, 제1호, pp. 129-135.

[6] 이재화, 성형진(2010), 3차원 입방형 표면조도가 난류경계층에 미치는 영향, 대한기계학회지, B권, 제34권, 10호, pp. 917-823.

[7] 현범수, 서은정, 김부룡, 최기철(2006), 사각단면을 갖는 환경 거칠기 요소의 거칠기 간격에 따른 유동 변화, 한국해양환경공학회지, 제9권, 2호, pp. 79-84.

[8] Jimenez, J.(2004), Turbulent flows over rough walls, Annual review of fluid mechanics, Vol. 36 No. 6, pp. 173-196.

[9] Krogstad, P. A., R. A. Antonia(1999), Surface roughness effects in turbulent boundary layers, Experiments in Fluids, Vol. 27, No. 5, pp. 450-460.

[10] Tachie, M. F., M. Agelinchaab, M. K. Shah(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 : 2011년 04월 28일

원고수정일 : 2011년 05월 27일

게재확정일 : 2011년 06월 23일