

사각단면을 갖는 환경 거칠기 요소의 거칠기 간격에 따른 유동 변화 (제2보 : 난류, 마찰속도 및 적분변수)

현범수[†] · 서은정 · 문재승 · 김길원
한국해양대학교

Turbulent Flow over 2-D Rectangular-Shaped Roughness Elements with Various Spacings (Part 2 : Turbulence, Friction Velocity and Integral Parameters)

B.-S. Hyun[†], E.J. Suh, J.S. Moon and G.W. Kim
Korea Maritime University

요 약

본 연구는 자연지형에 존재하는 다양한 형태의 크고 작은 거칠기 요소들로 인하여 기본 유동장이 변화하는 양상을 밝히기 위한 연구로서 회류수조에서 PIV 기법을 사용하여 수행되었다. 먼저 제1보에서는 동일한 2차원 사각단면을 가지는 많은 양의 거칠기 요소를 평판위에 규칙적으로 배열한 후, 거칠기요소의 높이와 거칠기 사이의 간격이 다른 세 경우에 대하여 유속, 유선 및 와도분포를 계측하여 거칠기 유동의 특성을 살펴보았다. 본 2보에서는 난류유동특성을 비롯하여 벽법칙을 이용한 해석과 경계층 적분변수 도출을 통하여 거칠기 간격이 유동장 변화에 미치는 영향을 정량적으로 비교하고자 하였다. 실험결과 거칠기 간격이 거칠기 높이의 7배와 14배인 경우 3.5배에 비하여 거칠기로 인한 유동장의 변화가 큼을 재차 확인할 수 있었다.

Abstract – This study deals with the flow over a flat plate with repeated roughness elements of 2-dimensional rectangular shape, which can be applied into the study on the natural geographical roughness and the turbulent flow on roughened solid surface. Part 1 of the study showed that the ratio between the spacing and the height of roughness elements plays a crucial role in developing the flow pattern near wall surface. The present study complements the turbulence characteristics, the utilization of friction velocity as well as integral parameters. Results confirmed that k-type roughness ($s/H=7$ or 14) is certainly a more effective means than d-type roughness ($s/H=3.5$) in thickening the viscous region.

Keywords: Environmental Roughness(환경거칠기), 2-D(2차원), Rectangular Shape(사각단면), PIV(입자영상유속계), Roughness Spacing(거칠기간격), Turbulence(난류), Friction Velocity(마찰속도), Integral Parameters(적분변수)

1. 서 언

자연계 유동은 그 특성상 난류이며 실질적으로 거의 모든 유동이 표면 거칠기 요소를 내포하고 있다. 이러한 표면거칠기의 영향으로는 물체의 저항이나 운동특성의 변화를 비롯하여 해양이나 하천 환경의 변화, 대기유동 변화 등을 들 수 있다. Shafiqul Islam 등[2002]의 사각거칠기나 Kuzan 등[1989]의 파형거칠기 실험결과

에 따르면 거칠기요소의 간격변화에 따라 다양한 형태의 속도분포가 얻어짐을 알 수 있다. 실험적 연구가 주를 이루었던 과거와는 달리 최근엔 Ashrafian[2004]과 같이 DNS법을 이용한 수치해석도 의미있는 결과를 보여주는 수준에 이르고 있다. 본 논문은 제1보와 제2보로 나누어 소개되는데, 지난 1보(현범수 등 [2006])에서는 3가지의 거칠기 간격에 대하여 계측된 평균유속, 유선, 와도성분을 해석하여 유동의 전반적인 특성을 파악하였으며, 본 2보에서는 난류응력, 벽법칙을 이용한 마찰속도 및 경계층 적분 파라미터와 같은 물리량들을 분석하여 종합적으로 거칠기 간격변화에

[†]Corresponding author: bshyun@mail.hhu.ac.kr

따른 거칠기 유동의 특성을 조사하였다.

본 연구에서는 2차원 사각거칠기 요소의 높이와 간격 변화에 따른 난류유동장의 변화를 먼저 살펴본다. 표면거칠기를 고려할 수 있는 실용적인 방법으로는 현재까지 벽법칙(Law-of-the-Wall)이 거의 유일한데, 우리가 잘 아는 균일한 모래에 대한 거칠기 실험을 필두로 하여 불균일 거칠기, 균일한 사각거칠기(2차원 및 3차원), 파형거칠기, 와이어메쉬 거칠기 등에 의한 유동특성의 변화에 대한 연구 자료가 Krogstad & Antonia[1999], Ching[2003] 및 Akinlade 등[2004]에 소개되어 있다. 따라서 본 연구에서도 3종류의 거칠기 간격에 따른 영향을 벽법칙을 사용하여 간접적으로 정량화하는 시도를 하였다. 끝으로 거칠기 유동장의 경계층두께를 비롯하여 배제두께와 운동량두께와 같은 적분변수를 살펴봄으로써 매끄러운 물체표면에 대하여 잘 적용되어온 적분변수들이 상대적으로 큰 규모의 반복적인 거칠기가 존재할 때 어떠한 경향을 보이는지를 조사하여 기존 이론의 활용가능성을 점검하고자 하였다.

폴리염화비닐 (PVC)로 제작된 거칠기 모형은 Fig. 1과 같으며, 유동계측은 회류수조에서 PIV기법을 이용하여 실시하였다. 거칠기 요소의 폭과 높이가 $w/H=1$ 인 정사각형 거칠기 요소를 택하여 거칠기 사이의 간격 (s)과 높이 (H)의 비를 $s/H=3.5, 7, 14$ 로 바꾸어 가면서 그에 따른 유동변화를 조사하였다. 거칠기 요소의 높이는 $H=20\text{ mm}$ 와 40 mm 인 두 종류를 택하였다. 평균유속 U_0 는 0.24

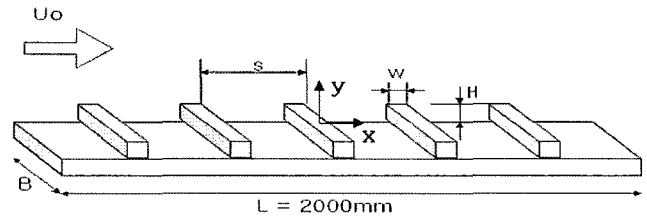


Fig. 1. Test model.

m/s 이며 거칠기의 높이로 무차원화된 레이놀즈수는 각각 $Re=4210$ 과 8420 이다. 실험은 관측부의 길이×폭×높이= $5\times 1.8\times 1.2\text{ m}$ 인 회류수조에서, 6 W Ar-Ion 레이저와 화이버 옵틱, 원통형 렌즈로 구성된 PIV 시스템을 사용하여 수행되었다. 실험과 관련된 설명은 현범수 등 [2006]에 좀 더 자세히 소개되어 있다.

2. 난류유동특성

2.1 거칠기 높이 $H=20\text{ mm}$ 인 경우

먼저 거칠기 높이가 20 mm 인 경우 거칠기요소의 간격에 따른 난류유동 특성이 Fig. 2-Fig. 4에 나타나 있다. 이 결과들은 총 600 장의 영상 이미지를 해석하여 얻어진 시간평균값 들이다.

Fig. 4에 주어진 전단응력분포도 역시 수직응력분포와 비슷한

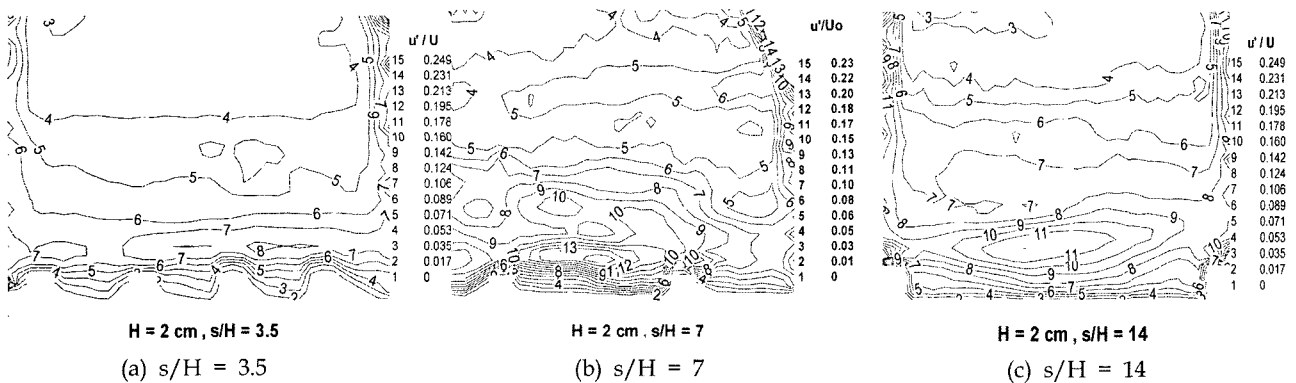


Fig. 2. Streamwise turbulent intensity $\sqrt{u'^2}/U_0$ at 3 different roughness spacings ($H=20\text{ mm}$).

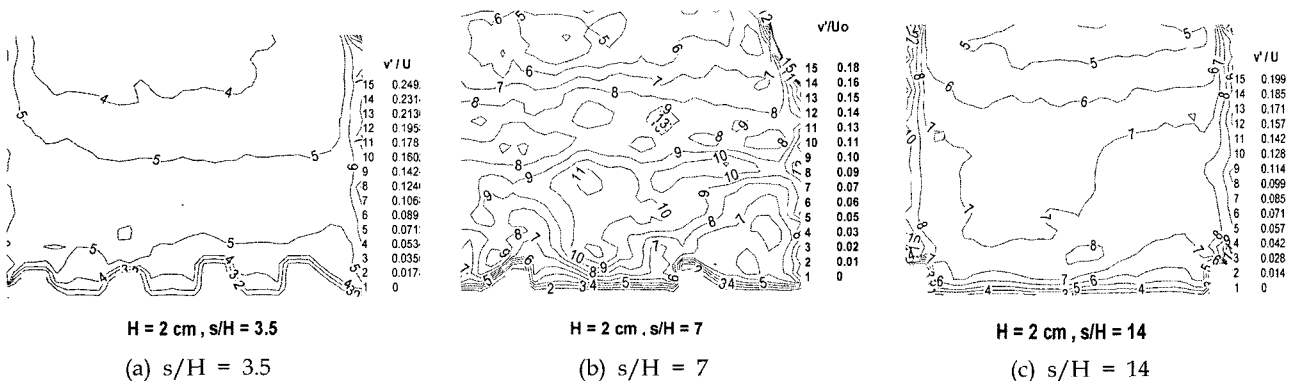


Fig. 3. Vertical turbulent intensity $\sqrt{v'^2}/U_0$ at 3 different roughness spacings ($H=20\text{ mm}$).

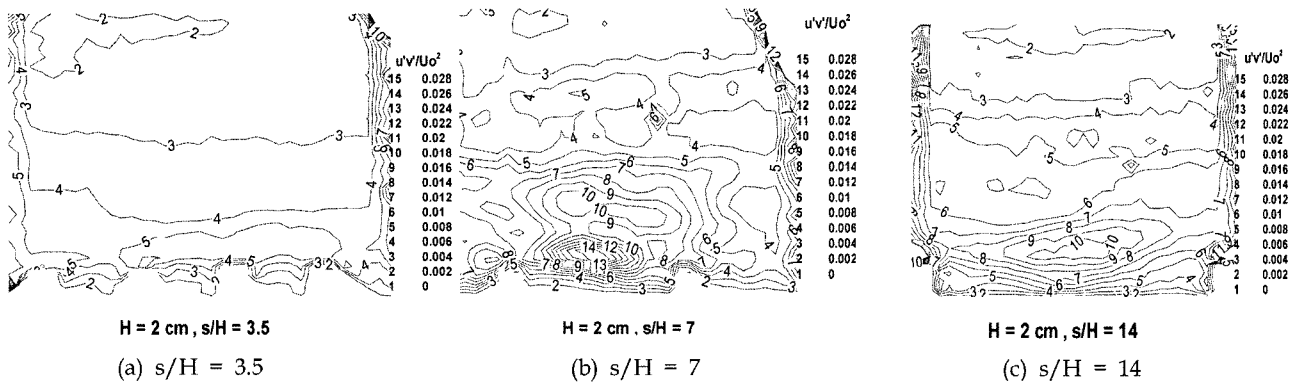


Fig. 4. Shear stress $\sqrt{u'v'}/U_0$ at 3 different roughness spacings ($H=20 \text{ mm}$).

양상을 보여주고 있으며 $s/H=3.5$ 가 현격히 작은 값을, $s/H=7$ 과 14 가 전단응력의 절대값이 크게 얻어졌다. 이 역시 d 타입 거칠기와 k 타입 거칠기의 차이를 보여주는 좋은 예이다. 앞서 언급한 바와 마찬가지로 거칠기 주위에서 Reynolds 응력의 변화가 큼을 알 수 있으며 특별히 거칠기 요소의 상부에서 Reynolds 응력의 최대치가 얻어지고 있다.

2.2 거칠기 높이 $H=40 \text{ mm}$ 인 경우

거칠기 높이가 2배 증가하면 Reynolds수가 2배 증가하게 되며, 대상물체의 크기 증가로 인하여 보다 정도높은 계측이 가능하다는

장점이 있지만 수조 계측부에 배치할 수 있는 거칠기의 절대 개수가 절반으로 감소하기 때문에 지난 1보 (현범수 등[2006])에 소개한 바와 같이 유동장의 주기성 확보 문제도 안고 있는 경우이다. 하지만 실험 정도의 간접적인 확인과 Reynolds수의 의존성을 다소나마 파악하고자 하는 목적으로 계측을 수행하였다. 실험결과 는 Fig. 5~Fig. 7과 같은데, 이중 $s/H=14$ 는 PIV 영상취득 범위의 제한으로 인하여 거칠기 전체 간격의 전반부만 해석되었다.

$H=20 \text{ mm}$ 에 비하여 영상 크기는 같으면서 거칠기만 커졌기 때문에 공간분해능이 향상되었으며 그로 인하여 거칠기 부근 유동 패턴이 좀 더 깨끗이 보이고 있다. 응력분포의 패턴, 최대 응력분

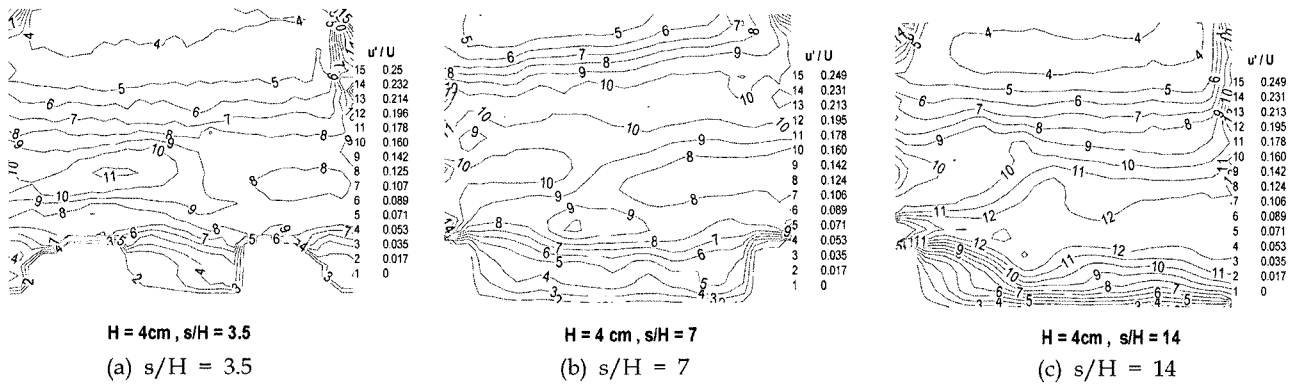


Fig. 5. Streamwise turbulent intensity $\sqrt{u'^2}/U_0$ at 3 different roughness spacings ($H=40 \text{ mm}$).

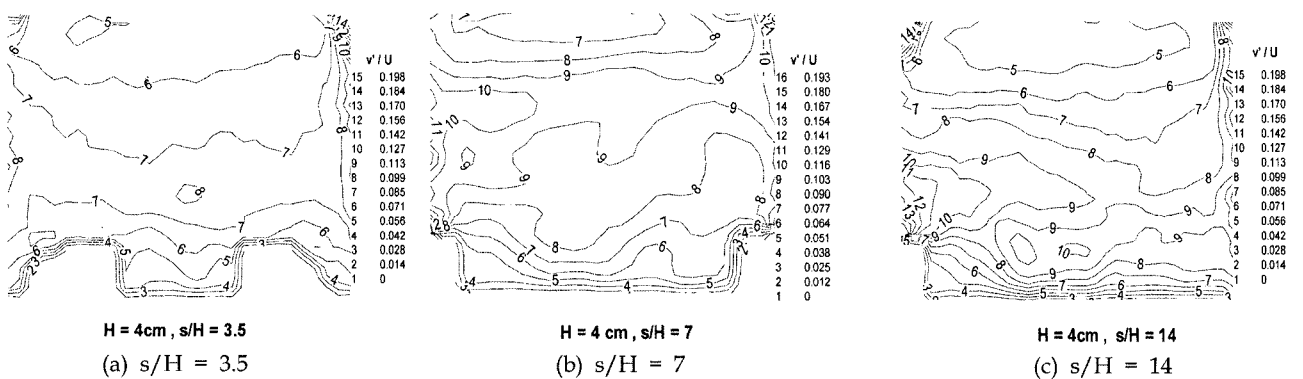


Fig. 6. Vertical turbulent intensity $\sqrt{v'^2}/U_0$ at 3 different roughness spacings ($H=40 \text{ mm}$).

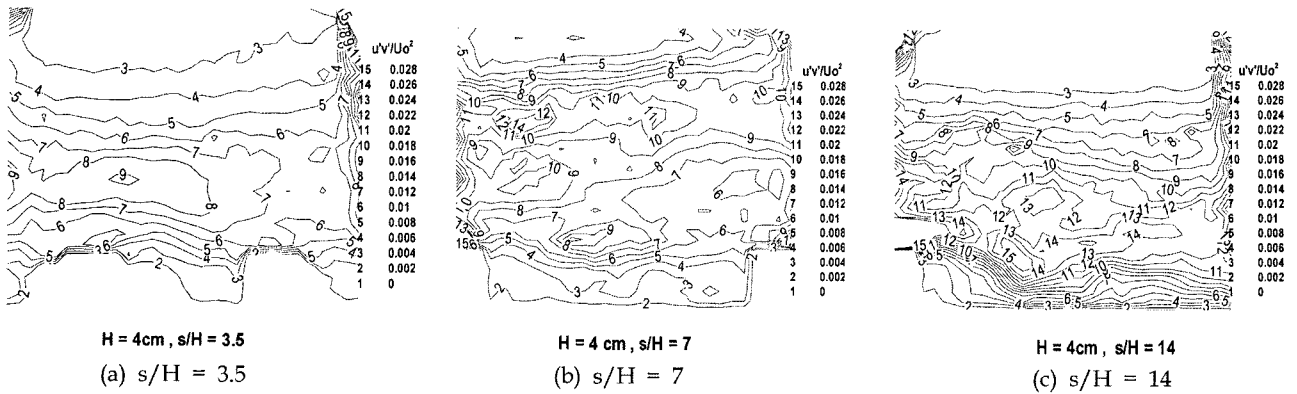


Fig. 7. Shear stress $\sqrt{u'v'}/U_0^2$ at 3 different roughness spacings ($H=40$ mm).

포점의 위치 등 전반적인 양상은 $H=20$ mm에서와 흡사하나 정량적으로는 차이가 눈에 띈다. 흐름방향 난류응력은 $s/H=14$ 가 다소간 크며 수직방향 난류응력은 $s/H=7$ 과 14 가 비슷한 크기로 얻어졌다. $s/H=3.5$ 는 두 경우 모두 다른 경우에 비하여 작게 예측되고 있으나 그 차이는 그리 크지 않다. 이는 $s/H=3.5$ 가 다른 경우에 비하여 현격하게 작은 난류강도를 보여준 $H=20$ mm일 때와는 다른 경향으로서, Reynolds 수의 영향, 자유흐름 난류강도의 영향 등 다양한 이유에 기인하므로 다음에 소개할 벽법칙이나 적분 파라미터 등과 함께 종합적으로 검토해야 할 사항으로 여겨진다. 전단응력도 $s/H=3.5, 7, 14$ 의 순으로 크게 얻어지는 것이 수직응력의 경우와 같은 경향을 보여주고 있다. 하지만 $s/H=7$ 인 경우 거칠기 부근에서는 난류강도가 크진 않지만 거칠기에서 멀리 떨어진 외부에서는 다른 경우보다 상대적으로 큰 난류값이 얻어지는 것은 거칠기요소들로 인하여 넓은 범위에서 에너지가 활발히 교환되었다는 측면에서 의미가 있다고 판단된다.

이상을 종합할 때 전반적으로 $s/H=3.5$ 는 d 타입 특성을, $s/H=7, 14$ 는 k 타입 특성을 보여준다고 볼 수 있으며 난류응력과 전단응력의 절대값이 큰 것이 거칠기요소와 외부유동 간의 활발한 상호작용과 연관이 있을 것으로 여겨지지만 이에 대한 결론은 다음 절 이후로 유보하고자 한다.

3. 벽법칙을 이용한 거칠기 부근 유동해석

난류유동장 내부, 특히 층류저층(Laminar Sublayer) 내의 벽 근방에서 유속을 정확히 예측하는 것이 어렵기 때문에 벽법칙을 이용하여 소위 ‘마찰속도’를 구하여 마찰계수는 물론 로그법칙(Logarithmic Law)을 만족하는 속도분포를 얻는 것이 널리 알려진 난류해석방법이다. 이를 위하여 보통 다음과 같은 실험적 근사식이 사용된다.

$$\frac{u}{u_\tau} = A \log_{10} \frac{y u_\tau}{\nu} + B - \Delta B \tag{1}$$

여기서 $A=5.75, B=5.5$ 를 사용하는 것이 보통이다. 이로부터 식

(1)을 만족하는 마찰속도 u_τ 와 거칠기로 인한 부가적인 영향 ΔB 는 로그법칙을 만족하는 영역내 두 점 y_1, y_2 에서의 유속 u_1, u_2 알 수 있다면 다음과 같이 구할 수 있게 된다.

$$u_\tau = \frac{(u_1 - u_2)}{A \log \left(\frac{y_1}{y_2} \right)} \tag{2}$$

$$\Delta B = 0.5 \left[A \log y_1 y_2 - \frac{u_1 + u_2}{u_\tau} \right] + A \log \frac{u_\tau}{U_0} + B \tag{3}$$

한편 충분히 거친 파이프에서의 유동도 다음과 같은 근사식을 사용하는 것이 일반적이다.

$$\frac{u}{u_\tau} = A \log_{10} \frac{y}{\epsilon} + C \tag{4}$$

이때 A 는 위에서와 마찬가지로 $A=5.75$ 이며, $C=8.5$ 로 놓고 식 (4)가 만족되도록 거칠기 입자의 등가 거칠기 ϵ 을 정하는 것이 보편적인 방법이다(Sabersky 등[1989]). 두 점 y_1, y_2 에서의 유속 u_1, u_2 을 안다면 거칠기 높이 ϵ 역시 다음과 같이 쉽게 얻을 수 있게 된다.

$$\log \epsilon = -\frac{1}{2A} \left(\frac{u_1 + u_2}{u_\tau} - A \log y_1 y_2 - 2C \right) \tag{5}$$

본 절에서는 예측된 유속분포를 식 (2), (3), (5)를 이용하여 정리한 결과의 일부를 소개한다.

Fig. 8은 $s/H=7$ 이고 $H=20$ mm인 경우 $x/H=0.32$ 위치에서 벽에 수직인 방향으로 속도분포를 세미로그(Semi-Log)로 그린 것이다. 여기에서 $u^+ = u/u_\tau, y^+ = y u_\tau/\nu$ 를 나타낸다.

이 그림은 마찰속도를 구할 때 벽으로부터 얼마정도 떨어진 위치의 속도값을 사용하는 것이 적합할지를 파악하기 위하여 수행한 것이다. 예를 들어 그림에서 1은 벽으로부터 가장 가까운 예측점을, 2는 벽으로부터 두 번째 위치에서의 예측점을 의미한다. 벽면가까이의 값은 이론적으로 적합할 수는 있겠지만, 벽면 근처에서 예측의 불확실성이 큰 PIV 기법상 벽면에서 어느 정도 떨어진

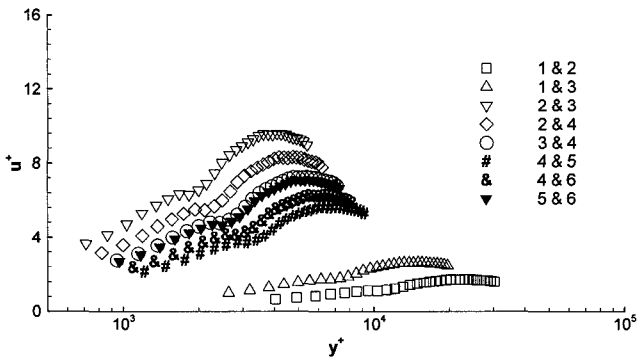


Fig. 8. Changes of velocity profile with respect to the distance from the wall of data points used ($s/H=7$, $H=20$ mm, $x/H=0.32$).

위치의 데이터를 사용하는 것이 오히려 바람직할 수 있기 때문이다. 특히 해상도가 640×480 인 CCD 카메라의 성능과 취득한 영상의 크기($325 \text{ mm} \times 245 \text{ mm}$), PIV 해석상의 상관영역($CDD=25$ 픽셀), 전체 계측점의 개수(35개) 정보를 종합할 때 1픽셀은 0.51 mm 이며, y방향으로 계측점 사이의 간격은 약 7 mm , PIV 해석시 요구되는 상관영역의 크기는 12.68 mm 정도가 된다. 한편 Fig. 8은 첫 번째 계측점(계측점 1)이 벽으로부터 고작 1.77 mm 밖에 떨어져 있지 않은 경우였다. 이로부터 첫 번째 계측점의 값은 신뢰성이 매우 떨어지는 값으로 판단되며 두 번째 계측점은 상관영역의 크

기로 볼 때 신뢰성 여부를 자신할 수 없는 값으로 판단되었다. 따라서 이후부터는 벽법칙을 적용할 때 벽으로부터 세 번째와 네 번째 위치의 속도를 사용하여 해석하기로 정하였다. 즉, 네 번째 이후의 속도값을 사용한 그래프들은 Fig. 8에서와 같이 적절한 범위 내에서 잘 수렴함을 확인할 수 있었다. 한편 여기에 결과를 수록하지는 않았지만 기준이 되는 벽면의 위치, 즉 $y=0$ 의 절대위치를 정하기 위하여 등가거칠기 요소의 타당한 크기를 기준으로 한 다양한 검증을 실시하여 거칠기의 꼭대기 위치를 $y=0$ 로 설정하였다. 이는 거칠기 요소 사이의 위치에서도 $y=0$ 의 위치가 실제 벽면이 아닌 $y=H$ 만큼의 높이를 기준으로 하여 해석되었음을 의미한다.

다음으로 Fig. 9는 $H=20 \text{ mm}$ 인 경우, 두 거칠기 요소와 그 사이의 유속분포가 7개의 x 위치에서 어떻게 변하는지를 3종류의 거칠기 간격에 대하여 비교한 것이다. 거칠기요소 사이의 간격이 넓어질수록 x위치에 따라 속도분포의 변화가 크게 일어나고 있다. 특히 $s/H=3.5$ 는 모든 위치에서 거의 동일한 속도분포를 보이는데 이는 거칠기 요소 사이에 재순환영역이 발생하여 그 속으로 외부 유동이 침입할 수 없었기 때문이다. 거칠기요소 사이의 거리가 긴 $s/H=14$ 는 속도분포의 변화가 가장 크기는 하지만 아직까지 유동의 주기성은 어느 정도 존재하며, 오히려 $s/H=7$ 이 상대적으로 열악한 주기성을 보여주었다. 전체적으로 볼 때 x방향 위치별 유동 특성의 차이 외에도 실험의 상대적 부정확성과 거칠기요소 개수의 부족으로 인한 주기성의 불만족 등 여러 오차의 원인이 존재

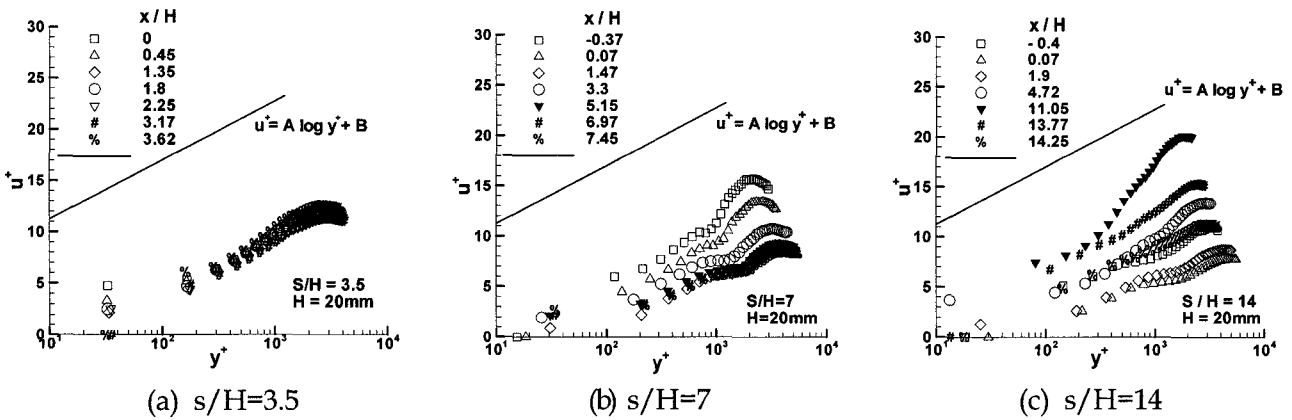


Fig. 9. Velocity profiles at various x locations for 3 different roughness spacings ($H=20$ mm).

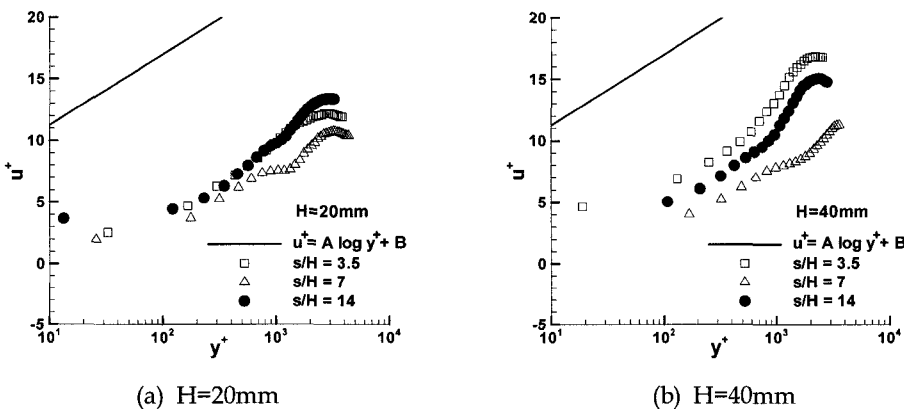


Fig. 10. Mean velocity shifts with 3 different roughness spacings ($x/H=3.5$).

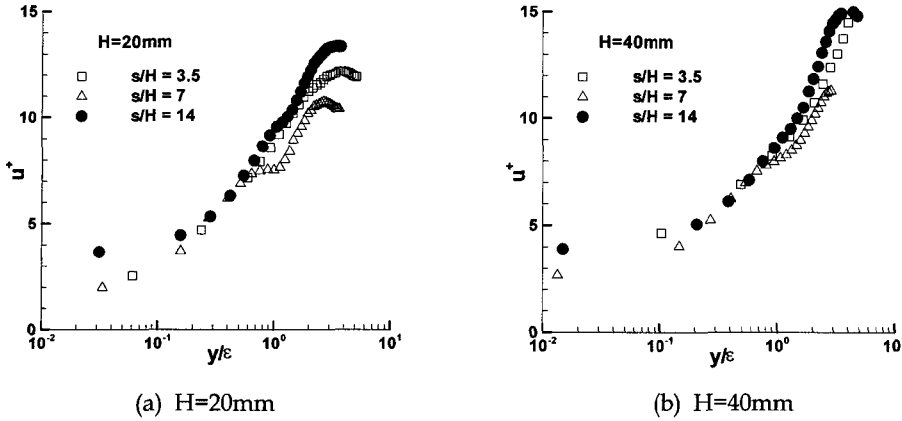


Fig. 11. Velocity profile versus y/ϵ with respect to s/H ($x/H= 3.5$).

한다고 판단되지만, 범용 PIV 장치로도 벽법칙에 적용할 만한 정도의 데이터를 취득할 수 있다는 것을 밝힌 것에 의미를 부여하고자 한다.

끝으로 Fig. 10과 Fig. 11에는 거칠기 간격의 변화에 따른 속도 분포의 차이가 나타나 있다. $H=20\text{ mm}$ 와 40 mm 공히 $s/H=7$ 에서 속도분포가 가장 밀로 치짐을 볼 수 있다. 이는 거칠기요소가 속도분포에 가장 큰 영향을 미쳤다는 것을 의미하는데, $s/H=7$ 이 가장 큰 영향을, $s/H=3.5$ 가 가장 적게 영향을 미쳤다고 해석할 수 있다. 이는 현범수 등[2006]과 앞 절에서 논의하였던 내용과 일맥상통하는 결과이나, 그 값의 차이가 그리 크지 않다는 것은 거칠기 간격변화에 따라 유동장에 미치는 영향이 그리 크지는 않다는 의미이기도 하다. 횡축을로 잡은 Fig. 11 역시 유사한 결과를 나타내고 있는데 특별히 $H=40\text{ mm}$ 인 경우에 따라 결과가 잘 정리됨을 볼 수 있었다.

4. 경계층 적분변수의 고찰

경계층 유동의 특성을 분석하는 고전적인 방법으로서 배제두께, 운동량두께, 형상계수(Shape Factor)와 같은 경계층의 적분변수 들을 살펴보는 것을 들 수 있다.

$$\delta^* = \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{u}{U_0}\right) dy \quad (6)$$

$$\theta = \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{u}{U_0}\right)^2 dy \quad (7)$$

$$H = \delta^*/\theta \quad (8)$$

먼저 Fig. 12는 거칠기간격이 바뀔에 따라 거칠기요소 사이에서 유속분포가 바뀌는 것의 예를 보여주고 있다. 층류유동과 유사하게 평이한 유속분포를 보이는 $s/H=3.5$ 와는 달리 $s/H=7$ 과 14 는 전형적인 난류경계층유동에서 보이는 소위 ‘Wake’의 패턴이 크게 나타나고 있는데 이 역시 거칠기로 인한 유속의 손실이라 볼 수 있다.

Table 1에는 경계층두께, 배제두께, 운동량두께를 거칠기 높이가 20 mm , 40 mm 인 경우와 거칠기가 설치되지 않은 평판의 경

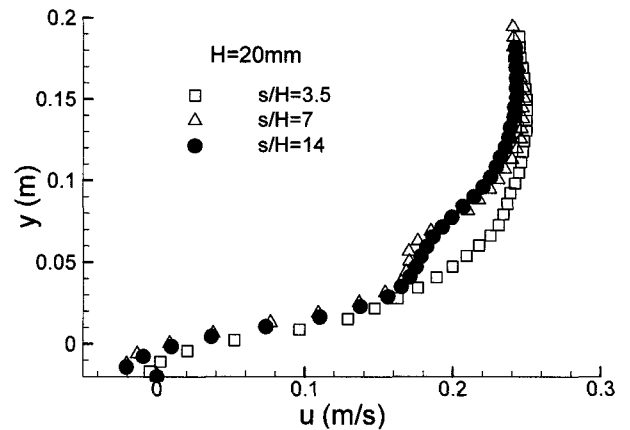


Fig. 12. Typical velocity profiles for 3 different roughness spacings ($H=20\text{ mm}$).

Table 1. Integral parameters

H	s/H	δ	δ^*	θ	δ^*/θ
20 mm	3.5	0.1450	0.0450	0.0150	3.043
	7	0.1475	0.0537	0.0180	2.940
	14	0.1681	0.0525	0.0219	2.353
40 mm	3.5	0.1818	0.0735	0.0200	3.669
	7	0.1977	0.0753	0.0236	3.170
	14	-	-	-	-
Smooth	-	0.1250	0.0120	0.0092	1.4*

*: Typical value for turbulent boundary layer of flat plate [7]

우를 함께 나타내었다. 적분변수들이 거칠기의 영향으로 인하여 거칠기가 없을 때에 비해 크게 두꺼워 지며, 거칠기사이의 간격 s/H 가 넓어질수록 적분변수 값이 약간 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 거칠기 크기가 증가할수록 당연히 더 큰 적분변수 값을 보여주고 있는데, $s/H=14$ 이고 $H=40\text{ mm}$ 인 경우는 유동의 주기성 결여로 인하여 결과의 신뢰성이 크게 떨어졌기 때문에 제외시켰다. 특이할 것은 $s/H=7$ 이 경계층두께는 그리 증가하지 않는 반면 배제두께는 비교적 많이 증가한 사실이다. 종합하여 볼 때 배제두께와 운동량두께의 증가가 클수록 거칠기의 영향이 커진다고 본다

면 $s/H=14$ 가 가장 거칠기의 영향이 크다고 볼 수 있겠다. δ^+/θ 는 s/H 의 증가에 따라 감소하고 있다. 전체적으로 오히려 층류유동에 가까운 비례관계를 보이고 있는데, 거칠기의 크기가 상대적으로 큰 본 연구와 같은 경우에 과연 적분변수들의 특성이 기존의 이론과 어느 정도 관련지을 수 있을지는 좀 더 연구해야 할 과제로 여겨진다.

3. 결 언

이상으로 간략하게 2차원 사각단면을 갖는 거칠기 요소에 의한 유동의 변화를 PIV 기법으로 조사한 후 난류유동특성, 벽법칙의 응용 및 적분변수의 고찰을 통하여 다각도로 살펴보았다. 지난 제 1보(현범수 등[2006])와 현재의 결과로부터 거칠기가 외부유동장에 미치는 영향이 거칠기 표면 부근에 집중됨을 볼 수 있었으며, 거칠기 사이 간격으로 인한 난류강도나 전단응력 등의 변화도 밝힐 수 있었다. 먼저 난류유동특성을 볼 때 k 타입 거칠기가 d 타입보다 현격히 큰 난류강도를 보여주었으며, s/H 가 증가할수록 거칠기로 인한 난류강이 증가하는 경향을 보였다. 벽법칙을 이용한 해석을 통하여는 $s/H=7$ 인 경우가 마찰속도, 즉 마찰계수가 상대적으로 가장 크게 얻어졌지만, 적분변수 관점에서는 $s/H=14$ 가 약간 큰 영향을 보여주는 것으로 밝혀졌다. 따라서 종합적으로 $s/H=7$ 과 $s/H=14$ 이 $s/H=3.5$ 보다 거칠기의 영향이 크다는 데는 이견이 있을 수 없지만, 어느 상태가 가장 큰 영향을 주는지는 단정하기 어려웠다. 향후 실험시 입구조건의 불안정성, 유속의 불균일성 및 PIV 측정정도 문제를 개선한다면 보다 정확한 측정이 가능할 것이며 이를 위하여 고해상/고속 CCD카메라의 사용을 검토할 것이다.

2차원 사각단면에 대한 본 연구결과는 일반적인 자연계의 거칠기에 의한 유동과는 다르겠지만 적절한 가정을 통하여 자연환경에 등장하는 다양한 형태의 환경거칠기 요소들의 영향을 밝히는데 도움을 줄 수 있다고 판단하며, 특히 해안사구와 같은 해양환경유체 문제를 해석하는데 유용한 도구가 될 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

본 연구는 2003년부터 2개년동안 한국과학재단에서 지원하고 학술진흥재단으로 이관된 '지역대학우수과학자지원사업'으로 수행

된 연구결과임을 밝히며, 지원에 감사드린다(과제번호: R05-2003-000-10948-0).

참고문헌

- [1] 현범수, 서은정, 김무룡, 최기철, 2006, "사각단면을 갖는 환경 거칠기 요소의 거칠기 간격에 따른 유동 변화(제1보: 평균유동장)", 한국해양공학회 논문집 제9권 제2호.
- [2] Akinlade, O. G., Bergstrom, D. J., Tachie, M. F. and Castillo, L., 2004, "Outer Flow Scaling of Smooth and Rough Wall Turbulent Boundary Layers", *Experiments in Fluids*, Vol. 37, pp. 604-612.
- [3] Ashrafiyan, A., Andersson, H.I. and Manhart, M., 2004, "DNS of Turbulent Flow in a Rod-Roughened Channel", *Int'l J. of Heat and Fluid Flow*, Vol. 25, pp. 373-383.
- [4] Cui, J., Patel, V. C. and Lin, C. L., 2000, "Large-eddy Simulation of Turbulent Flow in a Channel with Rib Roughness", IIHR Technical Report No. 413, University of Iowa, Iowa City, Iowa.
- [5] Krogstad, P.-A. and Antonia, R. A., 1999, "Surface Roughness Effects in Turbulent Boundary Layers", *Experiments in Fluids*, Vol. 27, pp. 450-460.
- [6] Kuzan, J. D. and Hanratty, T. J., 1989, "Turbulent Flow with Incipient Separation over Solid Waves", *Experiments in Fluids*, Vol. 7, pp. 88-98.
- [7] Sabersky, R. H., Acosta, A. J. and Hauptmann, E. G., 1989, *Fluid Flow: A First Course in Fluid Mechanics*, 3rd ed., Macmillan.
- [8] Shafiqul Islam, M., Haga, K., Kaminaga, M., Hino, R. and Monde, M., 2002, "Experimental Analysis of Turbulent Flow Structure in a Fully Developed Rib-Roughened Rectangular Channel with PIV", *Exp. in Fluids* 33, pp. 296-306.

2006년 2월 8일 원고접수

2006년 5월 1일 수정본 채택