

사각단면을 갖는 환경 거칠기 요소의 거칠기 간격에 따른 유동 변화 (제1보: 평균유동장)

현범수[†] · 서은정 · 김무룡 · 최기철
한국해양대학교

Turbulent Flow over 2-D Rectangular-Shaped Roughness Elements with Various Spacings (Part 1 : Time Averaged Flow)

B.-S. Hyun[†], E.J. Suh, M.R. Kim and K.C. Choi
Korea Maritime University

요 약

본 연구는 자연지형에 존재하는 다양한 형태의 크고 작은 거칠기 요소들로 인하여 기본 유동장이 변화하는 양상을 밝히기 위한 기초연구로서, 본 제1보와 이어지는 제2보로 나누어 소개될 것이다. 실험은 동일한 2차원 사각단면을 갖는 많은 양의 거칠기 요소를 평판위에 규칙적으로 배열한 후 거칠기 주위 유동장을 계속하였다. 회류수조에서 PIV 기법을 사용하여 2종류의 거칠기요소 높이와 3종류의 거칠기 사이 간격을 택하여 총 6경우에 대하여 거칠기 유동의 특성을 비교하였다. 실험결과 거칠기 간격이 거칠기 높이의 7배와 14배인 경우가 3.5배에 비하여 거칠기로 인한 유동장의 교란이 더 활발하고, 그에 따라 유동장에 미치는 영향도 큼을 확인할 수 있었다.

Abstract – The present 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. Experiment was performed using PIV technique in the circulating water channel. Results showed that the flow over roughness elements was characterized by the high shear flow emanating from top of roughness element and the recirculating region formed at the trough of two roughness elements. In general, the ratio between the spacing and the height of roughness elements plays a crucial role in developing the flow pattern near wall surface.

Keywords: Environmental Roughness Elements(환경 거칠기요소), 2-D(2차원), Rectangular Shape(사각단면), PIV(입자영상유속계), Roughness Spacing(거칠기간격), Turbulent Flow(난류유동)

1. 서 언

자연계 유동은 그 특성상 난류이며 수력학적으로 매끈한 유동이라 할 수 있는 일부 낮은 레이놀즈수 유동을 제외하고는 실질적으로는 거의 모든 유동이 표면 거칠기 요소를 내포하고 있다. 선박이나 항공기, 터보기계 등 여러 공학적인 물체표면 유동을 비롯하여 하천이나 해저 바닥의 형상변화나 대기권 내부의 지형변화 등도 그 표면의 거칠기에 의하여 필연적으로 영향을 받게 된다. 이러한 표면거칠기의 영향으로는 물체의 저항이나 운동특성의 변화를 비롯하여 해저 지형변화나 대기중의 습기와 가스의 이동,

하천바닥에서 모래이동 양상의 변화 등을 들 수 있다. 특별히 조선헤양공학의 관점에서 보면 해양파 현상을 규명하기 위한 연구나 선박을 비롯한 물체 표면의 미세한 거칠기 변화에 따른 유동장의 변화까지 고려할 수 있을 것이다(Belcher & Hunt[1998], Yoon & Patel[1996], Cui 등[2000]).

표면거칠기를 고려할 수 있는 실용적인 방법으로는 현재까지 벽법칙(Law-of-the-Wall)이 거의 유일하다 할 수 있다. 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 유체역학 교재나 20세기 전반부 연구자들의 논문에 소개되어 있다. 특별히 Perry 등[1969]은 2차원 사각단면 거칠기요소에 의한 유동장

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

을 k 타입과 d 타입으로 분류하였는데 이중 k 타입은 거칠기 높이에 비하여 거칠기 사이의 간격이 넓은 경우이며, d 타입은 그 간격이 상대적으로 좁은 경우인데 보통 거칠기 간격이 높이의 4배 이하인 경우로 알려져 있다. 이밖에도 파이프나 평판에 부과된 표면거칠기의 영향에 대한 고전적인 실험결과를 검증하고 발전시키기 위한 많은 시도들이 있었는데, 대표적인 연구로는 Buckles 등[1984], Hudson 등[1996]과 다수의 사각거칠기 연구결과들이 있다(Shafiqul 등[2002], Sutardi 등[2003]). 주로 실험적인 방법으로 단순한 몇 가지의 대표적인 거칠기 형상들에 대하여 표면거칠기의 크기와 형태가 유동장에 미치는 영향에 대한 결과를 제공하였다. 그러나 대부분 실험자료는 정성적인 유동의 가시화나 시간평균 혹은 공간평균 된 물리량들에 한정되어 있기 때문에 거칠기 요소가 실제 유동에 미치는 영향에 대한 물리적인 이해는 아직도 매우 부족한 실정이다. 실험기법 상으로도 열선유속계나 LDV와 같은 통상의 일점 계측으로는 Large eddy 들의 전개와 변화 등 다양한 실시간 현상이해가 불충분할 수밖에 없다.

본 연구에서는 기본적인 표면 거칠기의 형태로서 2차원 사각단면을 가지는 연속하는 거칠기 요소를 택하여 그 크기와 사이 간격에 따른 유동변화를 회류수조에서 PIV기법을 사용하여 조사하였다. 본 논문은 제1보와 제2보로 나누어 소개되는데, 먼저 제1보에는 3가지의 거칠기 간격에 대하여 계측된 평균유속, 유선, 와도 성분을 해석하여 유동의 전반적인 특성을 파악하고자 하였으며, 제2보에서는 난류응력, 벽법칙을 이용한 마찰속도 및 경계층 적분 파라미터들과 같은 물리량까지 분석하여 종합적으로 거칠기 간격 변화에 따른 거칠기 유동의 특성을 조사하였다.

2. 실험모형, 실험장치 구성 및 PIV 실험기법

Fig. 1에 소개되는 실험모형은 폴리염화비닐(PVC)로 제작되어 거칠기 사이의 간격을 조절할 수 있도록 하였으며 각 실험 조건에 맞게 최대 22개에서 최소 7개의 거칠기가 포함될 수 있도록 하였다. 계측 구간은 각 경우에 따라 조금씩 차이가 있으나 전체 길이로 보아 후방으로 75%되는 지점에서 수행하였다. 거칠기요소의 폭과 높이가 같은 $w/H=1$ 인 정사각형 거칠기 요소를 택하여 거칠기 사이의 간격을 바꾸어 가면서 그에 따른 유동변화를 조사하였다. 레이놀즈수의 영향과 PIV 계측정도의 영향 등을 보기 위하여 거칠기 요소는 높이가 다른 두 종류($H=20$ mm, 40 mm)를 채택하였다.

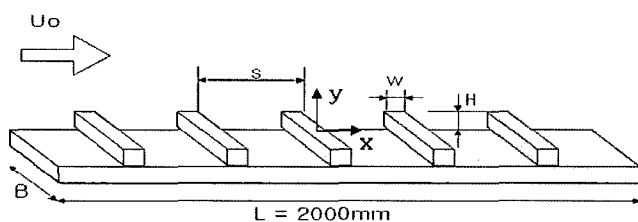


Fig. 1. Test model.

평균유속 U_0 는 0.24 m/s로 일정하게 유지하였는데 이 값은 거칠기로부터 충분히 떨어진 곳에서의 자유흐름속도이다. 평균유속과 거칠기의 높이로 무차원화 된 레이놀즈수는 각각 $H=20$ mm일때 4210, $H=40$ mm일때 8420이다. 실험은 사각거칠기 사이의 간격(s)과 높이에 따른 영향을 살펴보기 위하여 간격과 높이비(s/H)를 3.5, 7, 14인 세 경우를 택하였다. 사용한 회류수조는 관측부의 크기가 $L \times W \times H = 5 \times 1.8 \times 1.2$ m이며, PIV 실험에는 6 W Ar-Ion 레이저가 사용되었다. 레이저 광선은 회이버 옵틱을 거친 후 원통형 렌즈에서 2차원 단면광이 생성되어 회류수조내 자유수면 바로 밑에서 거칠기가 부착된 판을 향하여 수직 하방으로 조사되었다. 산란입자는 중성부력을 가지면서 입자직경이 $50(\pm 10)\mu\text{m}$ 인 비닐 클로라이드 폴리머를 사용하였다. 영상은 흑백 SONY CCD카메라로 취득되어 해상도 640×480 픽셀인 DT3155 이미지그래버를 통해 PC에 저장되었다. 초당 30 프레임씩 촬영된 이미지는 충분히 수렴된 유속이나 난류성분 등의 시간평균치를 얻기 위하여 각 경우마다 최대 2500장씩을 취득하여 프로세싱 하였다. 촬영된 영상의 크기는 금번 실험에서 관찰한 다양한 와류들의 크기에 적합하도록 가로 \times 세로 $=325 \times 245$ mm로 하였다. 이렇게 취득된 영상은 PIV 해석 소프트웨어인 THINKERS를 통해 2차원 계조치 상호상관법(Cross-correlation Method)으로 해석되었다(도덕희 등[1999]).

본 실험에 앞서 PIV 해석에 있어서 가장 민감한 요인인 상호상관영역(CDD)과 탐사직경(SLR)을 최적화하기 위한 기초실험을 수행하였다. CDD는 그 값이 작을수록 공간분해능이 증가하므로 유리하고 SLR은 커질수록 탐사영역이 넓어지므로 특별한 난류 이벤트 등을 찾아내는데 유리하다. 이는 전체 화면의 크기가 325×245 mm인 이번 영상에서 1 픽셀은 약 0.507 mm 해당하므로 SLR은 25픽셀 정도가 되면 거의 모든 크기의 와류를 잡아낼 수 있었고 CDD는 평균유속분포에는 거의 영향이 없으나 난류강도에 미치는 영향을 고려하여 최소 25픽셀 정도가 되어야 함을 알 수 있었다. 향후 모든 해석에 이 값이 사용되었다.

반복하는 거칠기요소에 의한 유동장의 반복성을 점검하기 위하여 계측단면에서 유동의 주기성을 조사하였다. Fig. 2는 $s/H=7$ ($H=20$ mm)인 경우 계측영역내 전후 거칠기 요소 위와 거칠기가 설치되지 않은 평판의 등가위치에서 거칠기 요소 유무에 따른 평균 유동장과 난류응력을 조사한 것이다. 그림에서 #1은 입구쪽 거칠기 단면이며 #2는 출구쪽 단면을 나타낸다. 평균유동장은 전후 거칠기 요소 간에 거의 일치 하는데 비해 난류응력은 그 값이 비교적 일치하기는 하나 국부적으로 약 5%까지 오차가 생김을 볼 수 있다. 이와 같이 유동장의 완전발달 여부를 종합 평가한 결과 $s/H=3.5, 7$ 인 경우 문제가 없다고 판단되었으나 거칠기 사이의 간격이 큰 $s/H=14$ 에서는 주기성이 확보되었기엔 다소 무리가 따를 수 있다고 여겨졌다. 따라서 이 경우엔 완전발달이라는 개념보다는 유동의 Self-similarity의 관점에서 결과를 이해하려 노력하였다. 또한 거칠기 요소에 의한 평균유동장의 유속 감소는 물론이고 거칠기 요소가 포함되지 않았을 때도 평판 부근에서 유속의 결손이 보이고 있다. 따라서 순수한 거칠기에 의한 영향은 이 두 유속분포

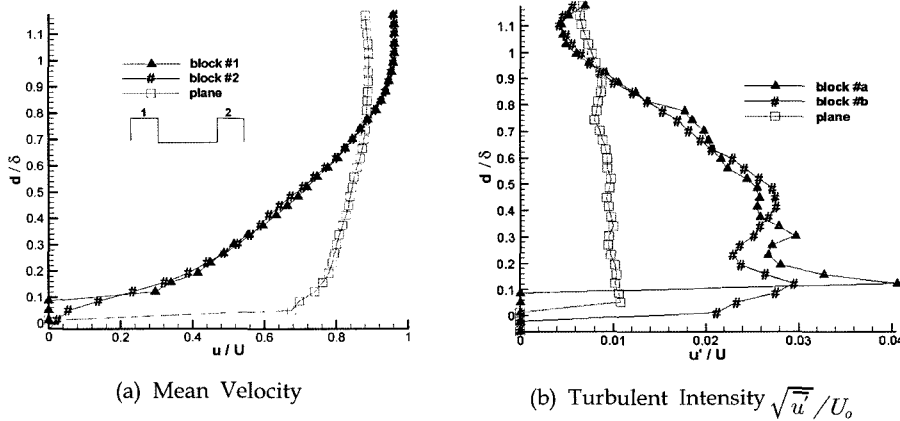


Fig. 2. Flow field at test section with and without roughness elements.

의 차이로서 나타나고 있다고 말할 수 있다. 난류응력 또한 거칠기 요소가 있을 때 그 값이 훨씬 커지는 것을 알 수 있다. 그림에 표시된 #a와 #b는 거칠기 요소의 높이 차이에 의한 값인데 #a는 사각단면의 가장 높은 위치에서의 값이고 #b는 가장 낮은 곳에서의 값이다. 이 경우 경계층두께는 $\delta = 130 \text{ mm}$ 정도로서 거칠기 요소에 의하여 경계층이 상당히 두꺼워 졌음을 잘 볼 수 있다.

3. 결과 해석 및 고찰

앞서 언급한 바와 같이 사각단면의 크기와 그 간격의 영향을 연구하기 위하여 총 6가지 경우에 대하여 실험이 수행되었는데 이를 $H=20 \text{ mm}$ 와 $H=40 \text{ mm}$ 로 나누어 고찰하고자 한다. 두 종류의 거칠기 높이를 사용한 것은 레이놀즈 스케일링(Reynolds Scaling)의 영향을 보기 위함이었다.

3.1 거칠기 높이가 $H=20 \text{ mm}$ 인 경우의 평균유동장

Fig. 3은 세 종류의 거칠기 간격별로($s/H=3.5, 7, 14$) 각각 600장의 영상 이미지를 해석하여 얻어진 시간평균 유속분포로서, 사각단면 거칠기 요소의 높이와 거칠기 요소간 간격이 전체 유동에 어떠한 영향을 미치는지를 잘 보여주고 있다. 먼저 거칠기 간격이

좁은 $s/H=3.5$ 는 거칠기 요소들 사이에 재순환영역이 고립되어 형성되므로 그 상부유동과의 상호작용은 매우 작을 것으로 보이는데, 이는 Perry 등 [4]이 분류한 d 타입의 전형적 특성이다. 하지만 그림의 좌측에 보이는 속도벡터의 형상을 볼 때 경계층의 두께는 제법 두꺼워져 있음을 볼 수 있다. $s/H=7$ 은 통상 k 타입 거칠기의 양상이 기대되지만 d 타입 거칠기 특성도 나타날 수 있는 흥미로운 경우이다. 그림에서 보면 거칠기 요소 사이에 거칠기 간격의 약 2/3 정도에 해당하는 비교적 큰 재순환영역이 형성되며 그 후방으로는 상부유동이 거칠기 사이로 침투하여, 예측한 바와 같이 제법 활발한 에너지 교환이 이루어지는 k 타입의 거칠기로 분류할 수 있었다. 즉 $s/H=3.5$ 보다 거칠기의 turbulent bursting 현상 및 mixing 특성이 오히려 더 강할 것으로 판단되었다. 끝으로 $s/H=14$ 는 거칠기 요소들 간의 거리가 충분히 길어 전방의 거칠기와 후방에 위치한 거칠기 사이에 상호작용은 다소 감소할 것으로 예상하였다.

Fig. 4는 거칠기 주위 유동장의 유선분포를 보여준다. 위에 나타난 속도분포와 마찬가지로 $s/H=3.5$ 인 경우에는 거칠기 요소 사이에 폐쇄된 재순환영역에 외부유동이 침투하지 못하는 소위 캐비티 유동(cavity flow)의 양상을 잘 보여주고 있다. 이는 거칠기 요소가 뺄뺄하게 배치됨으로 인하여 전체유동장을 교란하는 영향

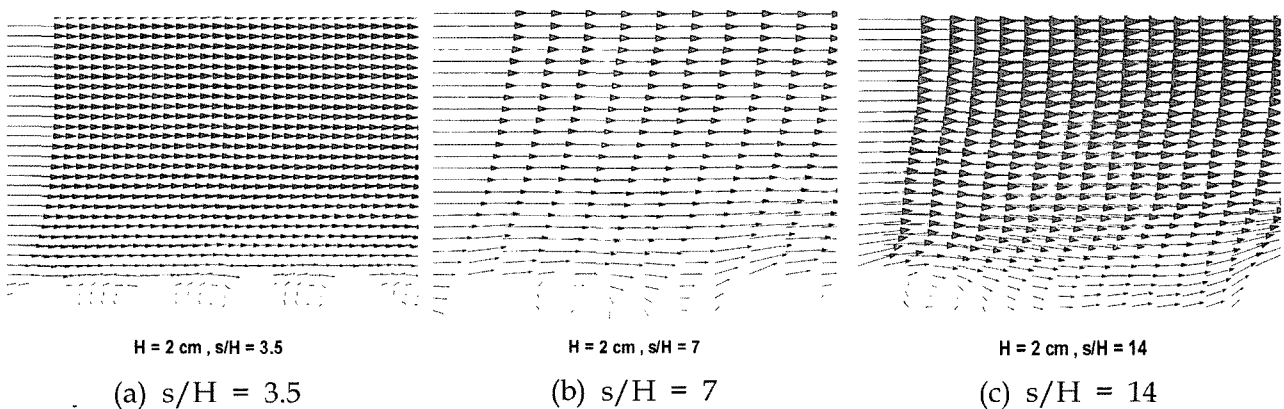


Fig. 3. Mean velocity field at $H=20 \text{ mm}$.

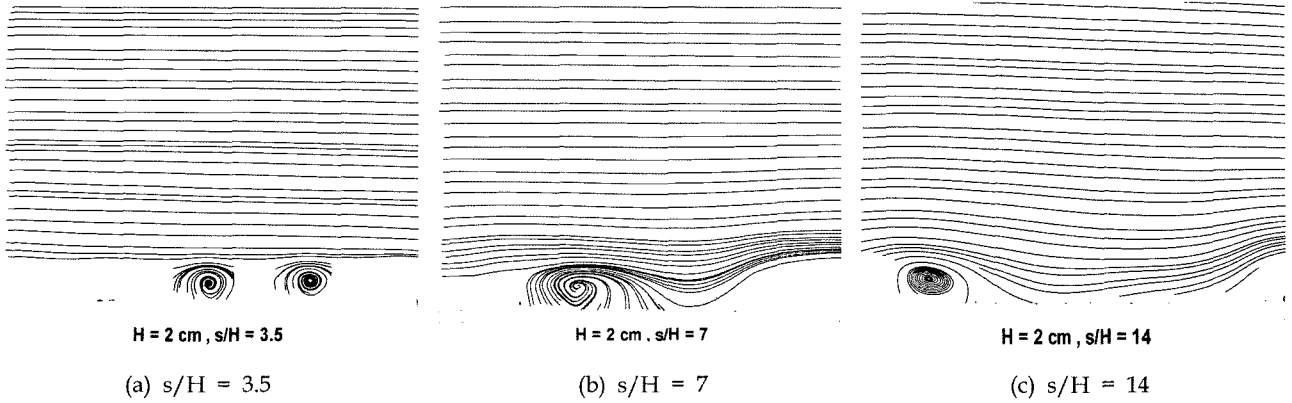


Fig. 4. Mean streamlines at $H=20 \text{ mm}$.

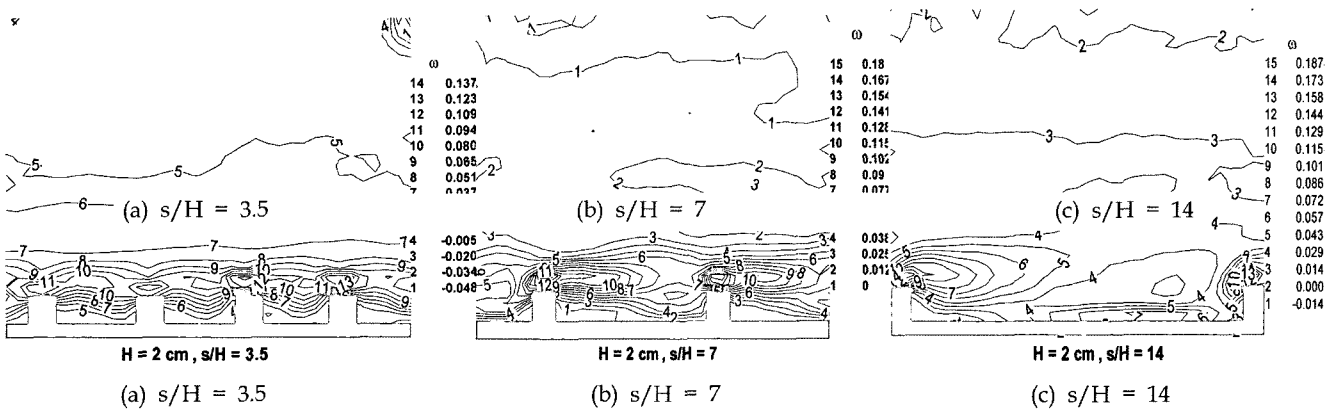


Fig. 5. Vorticity distribution at $H=20 \text{ mm}$.

이 오히려 작아지는 경우에 해당하며, 거칠기 내부의 유동이 그 밖의 유동에 미치는 영향이 작을 것으로 확인되었다. 반면에 $s/H=7$ 이 되면 거칠기요소 외부의 흐름이 거칠기요소 사이로 들어오는 현상이 보이며, $s/H=14$ 는 마치 backward-facing flow에서와 유사하게 거칠기요소의 후방에 재순환영역이 국한되는 것을 볼 수 있었다. 전체적으로 볼때 거칠기요소 사이의 간격에 따라 유동패턴이 확연히 달라지는 현상을 정성적으로 확인할 수 있었으나 본 실험

에서 사용한 PIV 시스템의 공간분해능의 한계로 인하여 정량적인 비교를 하기에는 다소 어려움이 있었다.

거칠기 유동의 난류특성에 대하여는 본 논문의 제2부에 다루겠지만, 평균유동과의 기본적인 연관성을 보기위하여 $s/H=7$ 인 경우에 국한하여 잠시 소개하고자 한다. Fig. 6은 각각 흐름방향 난류강도, 수직방향 난류강도 및 전단응력 분포를 보여준다. 먼저 흐름방향 난류강도를 보면 거칠기 표면을 따라 주흐름 방향인 우측

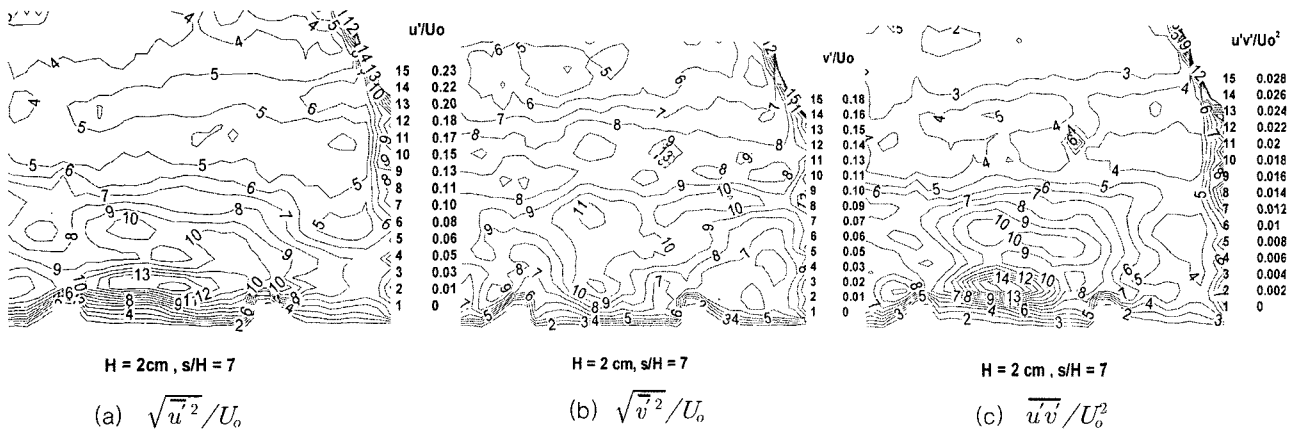


Fig. 6. Turbulent intensities and shear stress distributions at $s/H=7$ ($H=2 \text{ cm}$).

방향(x방향)으로 거의 평행하게 높은 난류강도 값이 얻어진다. 최대값은 수직상방으로 거칠기요소 높이의 1~2배 정도의 위치에 나타나고 있다. 수직방향 난류강도도 거의 유사한 경향을 보이나 그 최대값이 흐름방향의 최대값에 비해 약 15%정도 낮으며 최대값의 위치 또한 흐름방향에 비해 상부로 치우친 것을 볼 수 있다. 거칠기요소와 평판에 인접한 영역에서 난류강도의 절대값은 작으나 그 변화는 매우 크며, 그 경향은 흐름방향으로 거의 평행하게 영향권을 형성하고 있다는 것을 알 수 있다. 전단응력분포도 비슷한 양상이며, 특별히 거칠기 요소의 상부에서 난류응력의 최대치가 얻어지고 있다. 전체적으로 와도분포와 흡사한 양상인 점으로 볼 때 전단응력과 속도구배의 관계로 구해지는 마찰법칙(*gradient law* 라고도 함)이 비교적 잘 성립하고 있다고 볼 수 있었다.

3.2 거칠기 높이가 H=40 mm 인 경우의 평균유동장

본 실험은 거칠기요소의 크기에 따른 축척효과(scale effect)와 레이놀즈수의 영향(H=40 mm 일 경우 Reynolds수가 8420으로 H=20 mm에 비해 2배가 됨)도 볼 수 있지만, 취득한 영상의 질을 향상시킴으로 PIV 공간분해능의 한계를 어느 정도 완화시키기 위한 목적도 있다. Fig. 7~Fig. 9는 거칠기요소의 높이가 H=40 mm 인 경우의 유동장이 소개되어 있다. 단 s/H=14는 거칠기요소 사이의 간격이 560 mm로서 본 실험에서 택한 영상의 크기에 비하

여 거의 두 배 가까이 유동장이 컸기 때문에 부득이 전반부 유동 영역 만을 소개한다. Fig. 7의 속도분포는 H=20 mm인 경우와 유사한 패턴을 보여준다. 즉, s/H=3.5는 전형적인 d 타입 거칠기 유동 형태를, s/H=14는 거칠기 사이의 상호작용이 거의 눈에 띄지 않는 양상이며 s/H=7 만이 거칠기 후방에서 벽근처 유동과 상부 유동 사이에 다소간의 상호작용이 있음을 짐작케 한다. 특기사항으로는 s/H=14에서 거칠기 상부 속도분포가 다른 그림에서와 다른 패턴의 경계층유동을 보이는데 이는 지적인 바와 같이 너무 적은 개수의 거칠기 요소만을 설치함으로 인한 반복성의 결여에 기인하는 것으로 판단된다.

유선분포를 보여주는 Fig. 8로부터 기대한대로 H=20 mm일 때 보다 s/H=3.5에서의 캐비티 유동이나 s/H=14에서의 재순환영역(recirculating area), 재부착점(reattachment point)등이 확실히 드러나 보인다. 거칠기요소 사이 간격의 영향도 좀 더 명확한데, s/H=7인 경우 s/H=3.5나 s/H=14의 중간 형태 패턴임이 보여지고 있다. s/H=7은 후방에 있는 거칠기 요소 전방의 압력 패턴이 재순환영역의 크기를 결정하는 것으로 보이며, 재순환영역의 절대 크기가 s/H=14에서는 오히려 조금 줄어들었다. 본 실험만 가지고 거칠기 요소가 유동장에 미치는 영향이 가장 큰 임계간격을 결정하기는 어렵지만 대략 s/H=7~14 사이일 것으로 여겨지며 그중에서도 s/H=7에 가까운 영역이 아닐까 추측해본다.

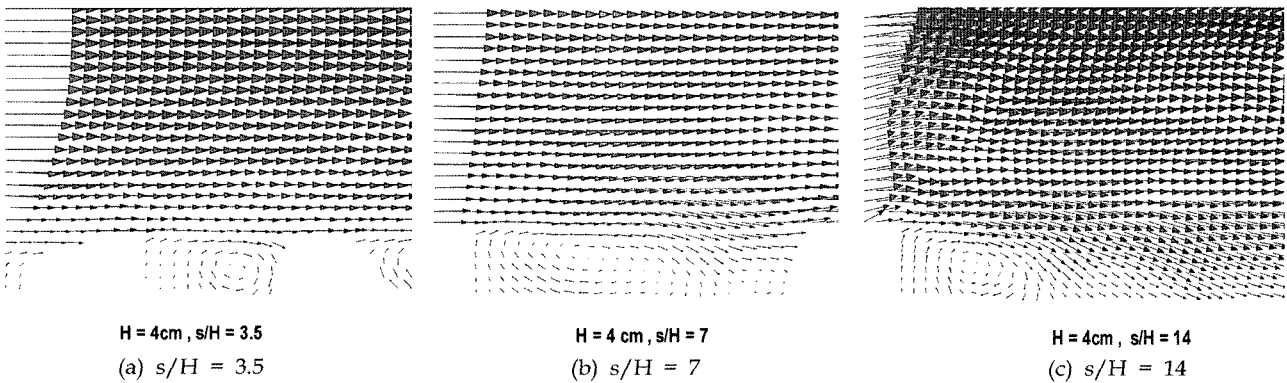


Fig. 7. Mean velocity field at H=4 cm.

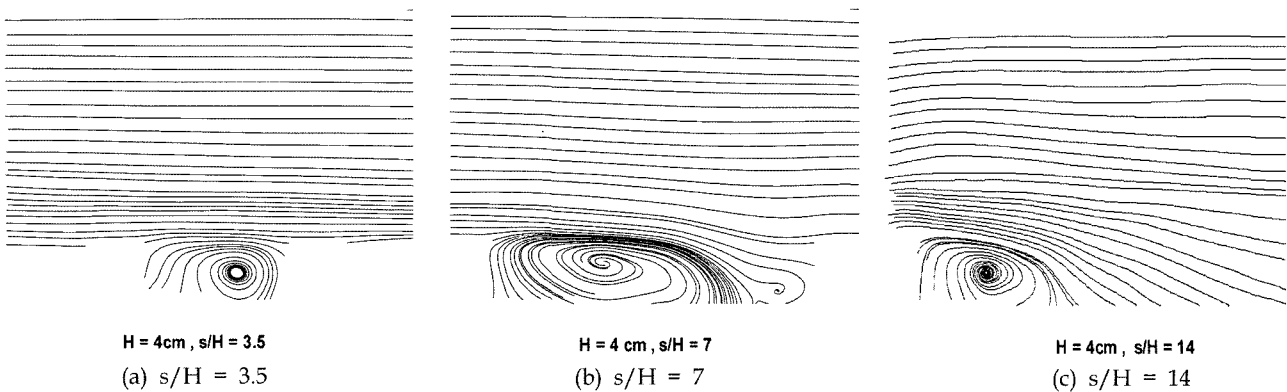


Fig. 8. Mean streamlines at H=4 cm.

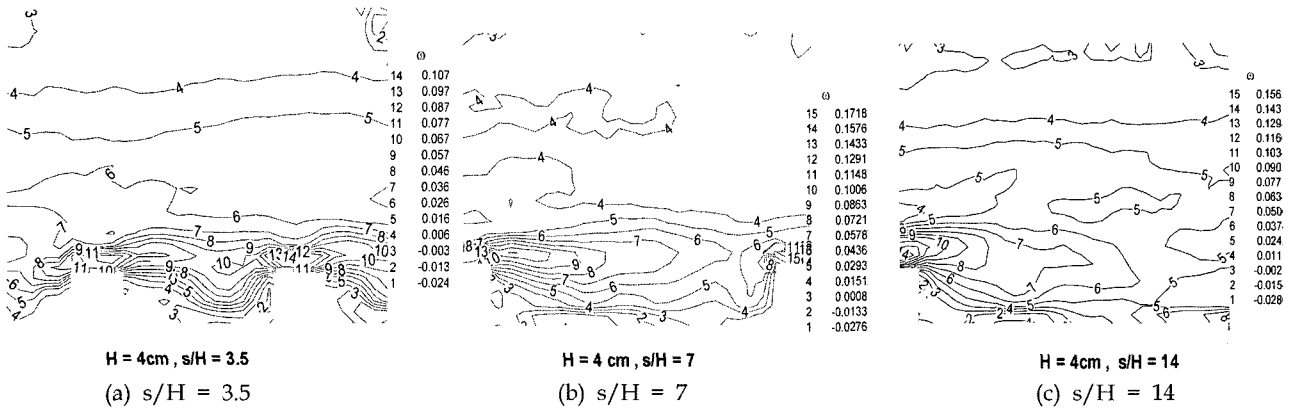


Fig. 9. Vorticity distribution at H=4 cm.

4. 결 언

2차원 사각 단면을 갖는 거칠기 요소에 의한 유동 변화를 개괄적으로 살펴보았다. 2차원 단면에 의한 유동변화는 물론 자연계 거칠기에 의한 유동과는 사뭇 다르겠지만, 본 실험으로 거칠기의 영향이 거칠기 표면 근처에서 국한되어 나타남을 알 수 있었고 거칠기 사이 간격으로 인한 평균유동장과 난류특성이 크게 변화함을 알 수 있었다. 특별히 s/H=7과 14인 경우가 s/H=3.5보다 거칠기로 인한 유동장의 교란효과 즉 거칠기의 영향이 크며, 그중에서도 s/H=7이 임계간격에 가까울 것으로 예상되었다. 이에 대한 정성적인 난류유동 특성분석과 아울러 벽법칙이나 경계층 적분변수(경계층두께, 배제두께, 운동량두께)를 활용한 정량적인 비교연구는 본 연구의 제2보에 자세히 소개할 것이다.

후 기

본 연구는 2003년부터 2개년동안 한국과학재단에서 지원하고 학술진흥재단으로 이관된 '지역대학우수과학자지원사업'으로 수행된 연구결과임을 밝히며, 지원에 감사드린다(과제번호 : R05-2003-000-10948-0).

참고문헌

[1] 도덕희, 현범수, 최성환, 홍성대, 1999, "이중유벽 사이에 가두어진 기름층의 거동해석", 한국해양환경공학회지, 제3권 제1호, pp. 25-34.

[2] Belcher, S. E. and Hunt, J. C. R., 1998, Turbulent Flow over Hills and waves, Annual Rev. Fluid Mech. 30, pp. 507-538.

[3] Buckles, J. Hanratty, T. J and Adrian, R. J., 1984, "Turbulent Flow over Large-Amplitude Wavy Surface", J. Fluid Meth., Vol. 140, pp. 27-44.

[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] Hudson, I. D., Dykhno, L. and Hanratty, T. J., 1996, "Turbulent Production in Flow Over a Wavy Wall", Experiments in Fluids 20, pp. 257-265.

[6] Perry, A. E., Schofield, W. H. and Joubert, P. N., 1969, "Rough Wall Turbulent Boundary Layers", J. Fluid Mech., Vol. 37, No. 2, pp. 383-413.

[7] 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.

[8] Sutardi, C. Y. Ching, 2003, "Effect of Different Sized Transvers Square Grooves on a Turbulent Boundary Layer", Exp. in Fluids 34, pp. 261-274.

[9] Yoon, J. Y. and Patel, V. C., 1996, "Numerical Model of Turbulent Flow over Sand Dune", J. Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 122, No. 1, pp. 10-18.

2006년 1월 16일 원고접수
 2006년 5월 1일 수정본 채택