

계면활성제를 첨가한 마찰감소 채널흐름의 유동특성

Flow Characteristics of Drag Reducing Channel Flows Induced by Surfactant

박 성 룡*, 윤 형 기*
S. R. Park, H. K. Yoon

Key words : Drag Reduction(마찰저항 감소), Channel flows(채널흐름), Surfactant(계면활성제), Turbulence(난류), LDV(레이저 도플러 유속계)

Abstract

A 2D-LDV system was employed to investigate the flow field characteristics in fully developed drag reducing turbulent channel flows. The additive used in this study was Habon-G which showed splendid drag reduction effect and minimum mechanical degradation trend in the closed flow circulation loop. In order to have better understanding of the drag reduction mechanism, the instantaneous velocities were carefully measured under various experimental conditions and the flow characteristics including time-averaged velocity, turbulent intensity and Reynolds shear stresses were carefully assessed. The time-averaged velocity profiles of surfactant flows showed more parabolic shape(typically shown in a laminar flow) together with significant suppression of turbulent production, yielding the shear induced micelle structure orienting in the flow direction due to its isotropic characteristics. Especially it was observed that the maximum intensity for drag reducing flows was shifted away from the wall and that the streamwise and normal turbulent intensities were strongly altered. This phenomenon strongly suggests that the viscous sublayer becomes thicker with addition of surfactant. Turbulent momentum transport was drastically suppressed across the whole drag reducing channel flow.

기 호 설 명

C_f : 마찰저항 계수

$$(C_f = \tau_w / \frac{1}{2} \rho U_b^2 \approx \frac{h}{2} \frac{dP}{dx} / \frac{1}{2} \rho U_b^2)$$

b : 채널 넓이

dP : 유동 방향의 압력공사이의 압력 강하

dx : 유동 방향의 압력공사이의 거리

H : 채널 높이

l : 채널 입구에서 시험부까지 거리

R_m : Reynolds 수 ($R_m = \frac{U_b \cdot H}{\nu}$)

U_b : 시간평균 혼합속도

u'_i : 난류 강도

* 한국에너지기술연구소, 지역냉난방연구팀

\overline{uv} : 레이놀즈 전단응력

그리스 문자

ρ : 작동 유체의 밀도

τ_w : 벽에서의 전단력

ν : 작동유체의 동점성계수

1. 서 론

미소량의 고분자물질을 난류유동에 첨가시 일어나는 마찰저항의 감소효과는 Toms⁽¹⁾에 의하여 발견된 이래 에너지 절약 대체물로서의 활용을 위한 많은 기초 및 응용 연구가 수행되었다. 현재 마찰감소 첨가물로 널리 이용되는 물질은 분자량이 수백만 이상 되는 고분자물질과 계면활성제가 있다. 고분자 물질은 낮은 농도에서 마찰저항감소 효과가 매우 우수하나, 열 및 기계적 에너지에 의하여 성능저하가 쉽게 일어나는 단점 때문에 폐회로에서 사용하기가 곤란하다. 한편 1949년에 Mysels⁽²⁾가 처음으로 계면활성제를 이용한 마찰감소연구를 발표한 이래 많은 관심을 끌지는 못했지만, 고분자 물질과 비교해서 장기간 사용 가능한 면이 부각되면서 최근에 계면활성제를 이용한 마찰감소현상에 대한 연구(특히 지역난방에 적용을 목적으로)가 매우 활발하다. 계면활성제는 화학적성분에 있어서 물과 친화력이 있는 머리구조와 물과 불화한 꼬리를 갖는 구조 때문에 물에 쉽게 용해되며, 어떤 농도 이상에서는 분자 부분구조가 서로 결합하므로써 교질(micelle)이라고 불리는 물질을 형성하여 열역학적인 면에서 평형상태를 이루고, 가역적이기 때문에 마찰감소 효과가 크고, 열 및 기계적 저하에 강하며, 강한 전단력이 발생하는 장소에서 분해된 계면활성제의 구조는 재결합하여 마찰감소효과를 회복하는 것으로 보고되었다.

마찰저항의 감소현상은 미소량의 첨가제가 유동장에 첨가되었을 때 얻어지는 유동방향의 압력강하 현상을 통하여 확인할 수 있는데 핵심과제는 이 현상을 어떻게 적절하게 설명하며 또한 주어진 유동장을 어떻게 제어하여 벽에서 발생하는 전단응력이

감소되는가 하는 마찰감소 메커니즘을 해석하는 것이다. 이를 위하여 지금까지 다양한 첨가물에 대하여 유변학적 특성 또는 난류의 유동특성에 대한 연구가 진행되었다. Bewersdorff 등⁽³⁾은 계면활성제의 교질(micelle)의 방향이 유동방향과 일치하는 것과 축방향으로의 난류의 강도가 다소 증가한 반면, 벽에 수직방향으로는 강도가 소멸되어 두 방향 속도성분의 분리현상을 관찰하였다. Beiersdorfer 등⁽⁴⁾이 LDA(Laser Doppler Anemometer)를 이용하여 계면활성제를 첨가한 난류의 경우 매우적은 부분만이 중심부(core)로 존재하고, 저층(sublayer)에서는 특성이 변화하지 않으며 완충층(buffer layer)에서 난류와 교질(micelle)의 상호작용으로 마찰감소현상이 일어남을 관찰하였다. Walsh⁽⁵⁾는 첨가제와 점성저층(viscous sublayer)에서 생기는 작은 스케일의 와류(vortex)가 서로 간섭하여 에너지 균형상태를 변화시킬 것임을 제안하였다. 즉 첨가제에 의하여 약해진 난류성분은 주위 용매와의 점성소멸에너지(viscous dissipation energy)에 의하여 소멸되고 작은 스케일의 와류(vortex)의 성장이 억제되면, 난류의 구조를 바꾸어 마찰감소가 나타나는 것으로 설명하였다. De Gennes⁽⁶⁾은 점도가 아닌 탄성에 주안점을 두어, 첨가제의 탄성에너지가 난류의 운동에너지와 같은 경우에는 cascade가 끊김을 가정하였다. 이외에도 마찰감소의 메커니즘에 대한 수많은 이론이 제시되었지만 궁극적으로 다루어야 할 과제는 난류와 SIS(Shear Induced Structure)의 상호관계를 어떻게 잘 설명하는 가에 달려있다. 본 연구는 계면활성제(Habon-G)를 첨가한 마찰감소흐름의 난류상태를 규명하기 위하여 2차원 LDV(Laser Doppler Velocimetry) 시스템을 사용하여 마찰감소 채널흐름에서의 유동특성을 측정하였다.

2. 실험 장치 및 방법

마찰감소 계면활성제를 첨가한 흐름의 유동 특성을 측정하기 위하여 사용한 채널흐름 실험장치의 개략도는 Fig.1에 제시하였다. 실험장치는 투명 아크릴을 사용하여 제작한 직육면체 채널, 25kW 용량의 원심펌프, 2기의 유체 저장조, 2차원 LDV

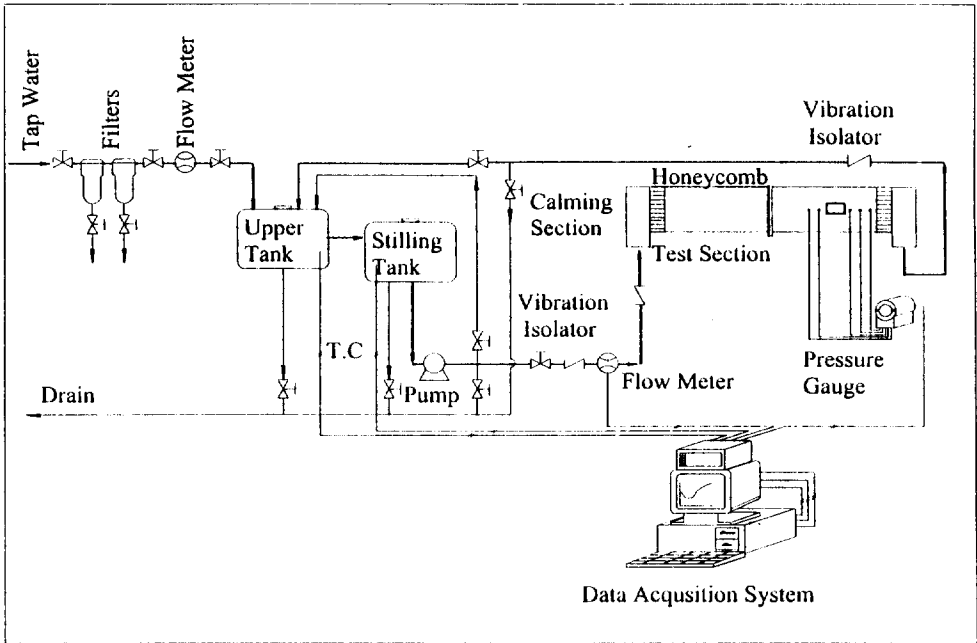


Fig.1 Schematic diagram of experimental setup and instrumentations

시스템, 유량계, 차압계, 자료측정 및 분석장치 (workstation) 등으로 구성되었다. 유체 저장조는 2기(체적이 각각 500kg)를 직렬로 연결하여 회수되는 유체에 의한 펌프에서의 불안정성을 최소화하였다. 원심펌프(180m³/hr)에 의하여 구동된 작동 유체는 시험부 전면에 설치한 직육면체의 고요부와 원통형의 honeycomb에 의하여 큰 eddy가 정돈된 후에 시험부로 유입되도록 설계하였다. 실험부는 높이 20mm와 폭 250mm의 직육면체의 채널로 전체길이는 3000mm이며, 실험치는 첨가물 농도가 250ppm인 용액을 사용시에 완전발달류가 형성될 것으로 예상되는 채널 높이의 100배의 지점에서 측정하였다. 본 연구에서는 직경이 40mm인 와류 유량계(최대 측정유량 : 48m³/h)를 사용하여 유량을 측정하였으며 첨가물농도가 저농도로 첨가물이 유량계에 미치는 영향은 미소할 것으로 판단되어 보정하지 않았다. 마찰계수는 1mm의 압력공과 차압계(최대 측정차압 : 500mmH₂O)를 사용하여 유동방향의 차압을 측정하여 산정하였다. 본 실험에 사용된 LDV 시스템(TSI사 제작의 5W 용량 Argon-Ion 레이저)은 2광 3색으로써 3차원유동

의 측정이 가능하나 채널흐름이 2차원 흐름으로 가정할 수 있기 때문에 녹색(514.5mm)과 청색(48mm)를 이용하여 2차원 유동을 측정하였다. 본 실험에서 사용된 광학측정장치(optic-probe)위 초점거리는 350mm의 렌즈, 빔간거리 (beam spacing)는 50mm로 하였고, 빛을 채널중심부에 발사하여(폭 250mm의 중심, 즉 125mm) 후방산란에 의하여 수집된 빛을 fiber로 광증폭기로 보내어 전기신호로 전환한 후에 TSI IFA-750processor에서 분석하는 시스템으로 구성되었다. 추적입자로는 입자의 비중이 1.0kg/l이며, 평균직경이 4 μ m인 부유물질(TSI사 제공)을 사용하였다. 레이저광학측정장치(laser-optic-probe)는 0.01mm의 정확도를 갖는 이송장치를 사용하여 매우 정확하게 이동되도록 하였다. 본 실험에서 마찰감소 첨가물로 사용한 계면활성제는 독일 Hoechst사가 지역난방설비의 이용을 목적으로 개발한 Habon-G로서 분자구조는 Fig.2에 제시하였다. Habon-G는 이온교환과성으로 전해질을 제거한 CTAB(Cetyl Timethyl Ammonium Bromide)과 Salicylate를 1 : 1로 혼합하여 제조된 물질인데 Habon-G는 이미 독일,

네델란드 등에서 지역난방시스템의 열수송 마찰감소 첨가물로 사용되어 실용성이 입증되었다. 용매는 일반 수도물을 정수하여 사용하였다. 실험조건은 첨가물 농도(100, 250ppm), Reynolds 수(25, 500, 35,500), 유체온도는 20℃이며, 측정항목은 평균유속분포, 난류강도, Reynolds 전단응력이었다. 용액의 점도는 온도와 전단율(shear rate)에 의하여 변화하나, 사용된 용액의 농도가 낮아서, 점도계(Physica rheometer)에 의하여 측정된 값이 물과 비슷하므로, Reynolds 수는 물의 점도를 사용하여 계산되었다. 정화된 물을 사용한 실험장치 및 측정기기의 실험오차는 마찰계수로 표시하여 기존의 자료와 비교하면 2.5%로 분석되었다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 마찰감소 흐름 특성

LDV를 이용한 유동특성을 측정하기 전에 실험의 신뢰성에 대한 검증과 계면활성제를 채널흐름에 첨가시에 나타나는 일반적인 마찰감소특성을 분석하기 위한 실험을 수행하였다. Fig.3에 제시된 바와 같이 물을 작동유체로 하여 실험한 결과는 기존의 실험방정식과 잘 일치하고 있어 실험장치 및 방법의 신뢰성이 증명되었다. 작동유체의 온도는 20℃, 농도는 30, 50, 100, 150, 250ppm, 계면활성제는 Habon-G 사용하여 측정한 마찰감소효과에 관한 실험결과는 마찰계수(C_f)를 Reynolds 수(R_m)의 함수로 Fig.3에 제시하였다. Reynolds 수는 용매의 물성치와 평균유속을 기준하여 계산하였다. 그림에서 보는 바와 같이 일정농도(본 실험에서는 30ppm)에서는 뚜렷한 마찰감소효과가 없었으나, 첨가물 농도의 증가와 함께 점차로 마찰감소효과는 증가하며, 어느 농도 이상에서는 마찰감소효과가 더이상 증가하지 않음을 관찰할 수가 있다. 이것은 용액속에 첨가된 계면활성제의 농도에 따라 교질(micelle)의 형성되며 임계교질농도(critical mi-

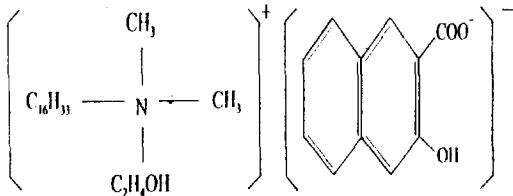


Fig.2 Molecular structure of Habon-G

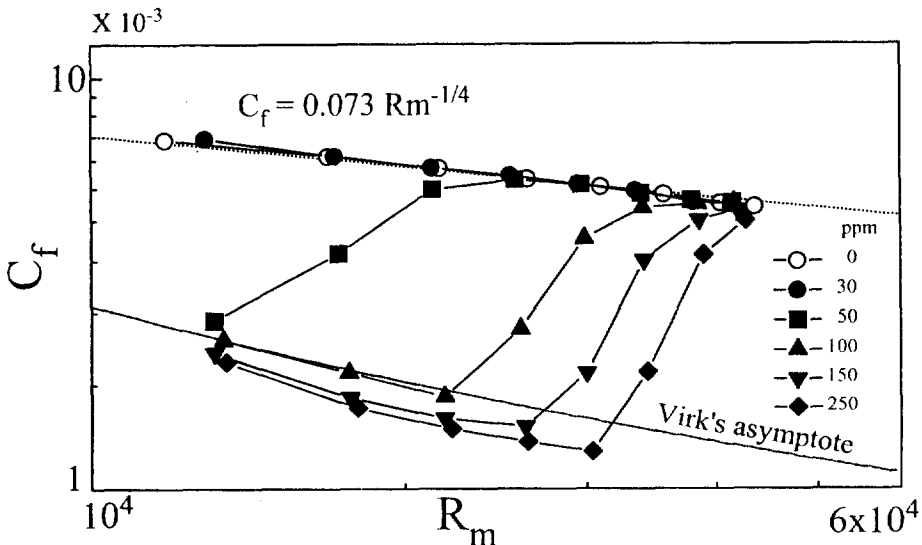


Fig.3 Drag reduction characteristics of Habon-G in channel flows

celle concentration) 이상에서는 생성된 교질(micelle)이 포화 상태에 이르기 때문에 사료된다. 또한 동일 그림에서 농도의 증가에 비례하여 임계 전단율(즉 Reynolds 수)의 증가하는 현상을 관찰하였다.

한편 동일 그림에서 농도가 낮은 경우에는 마찰감소효과가 Reynolds 수가 증가하면서 급격히 감소하고 있는 것을 관찰할 수 있는데, 이것은 막대형의 교질(micelle)의 방향이 서로 일치하는 등방성(isotropic)에서, 이방성(anisotropic)의 흐름으로 변화하는 율이 증가함을 나타낸다. 따라서 첨가물 종류, 농도를 포함한 마찰감소유체의 유변학적 변화에 따른 교질(micelle)의 형성과 분해가 난류특성과 상호 연관된 메카니즘을 규명하는 것이 마찰감소흐름의 유동장을 제어하는데 필요한 선행단계이다.

3.2 마찰감소 채널흐름의 유동특성

마찰감소특성을 어떻게 적절하게 설명하며 또한 주어진 유동장을 어떻게 제어하며 벽 경계층에서 발생하는 전단응력을 효율적으로 감소시키기 위한 메카니즘은 아직도 분명하게 규명되고 있지 못하는데 이것은 난류에 대한 이해의 부족과 특히 첨가물이 마찰감소흐름에 미치는 영향에 대한 특성분석이 미진한 것에 기인한다. 본 연구에서는 2차원 LDV 시스템을 사용하여 마찰감소 계면활성제의 첨가에 따른 유동장 특성변화를 분석하였다. 지역난방시스

템의 관 유동도 기본 메카니즘은 채널흐름과 유사할 것이라는 가정과 관 유동측정시 실험의 어려움으로 인하여 채널 유동에서 측정하였다.

평균속도 분포

동일 Reynolds 수에서 농도의 변화에 따른 물과 계면활성제 용액의 유동방향으로의 평균속도분포가 Fig.4에 제시되었다(점선은 층류의 평균속도분포를 표시한다). 계면활성제 용액의 점도를 산정하는 방법에 따라서 벽으로부터의 무차원 거리(y^+)가 상이하기 때문에 본 연구에서는 채널평균속도(U_b), 채널의 높이(H)를 사용하여 실험치를 무차원화 하였다. Fig.3에서 제시한 Reynolds 수 25, 500에서 100ppm, 250ppm 용액에 마찰감소 특성곡선을 살펴보면 마찰감소율이 Virk⁽¹⁾에 의하여 제시된 최대 마찰저항감소치에 도달하여 이미 임계 교질농도에 도달한 것으로 사료된다. Fig.4에서 보는바와 같이 마찰감소유체의 평균속도분포는 계면활성제의 농도가 증가하면 점성의 증가로 벽근처에서는 속도가 감소하지만, 중앙부에서는 점탄성효과로 속도가 증가함을 분명히 관측할 수 있다. 이는 마찰감소를 야기시키는 막대형의 교질(micelle)이 유동방향과 일치하는 방향으로 정렬해 있는 상태를 유추할 수가 있고, 정렬상태는 또한 용액의 농도에 영향을 받는 것으로 판단된다. 또한 Fig.3과 Fig.4를 함께 고찰하면, 임계교질농도 이상에서 농도가 증가한 경우 마찰감소효과는 비슷하나, 흐름 중앙부에서는 평균속도분포가 더욱 층류화하고 벽면측

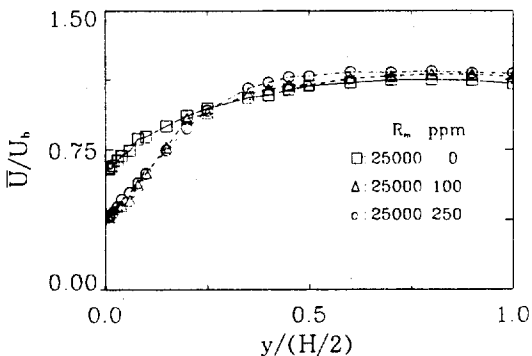


Fig.4 Effects of surfactant concentration on time-averaged velocity

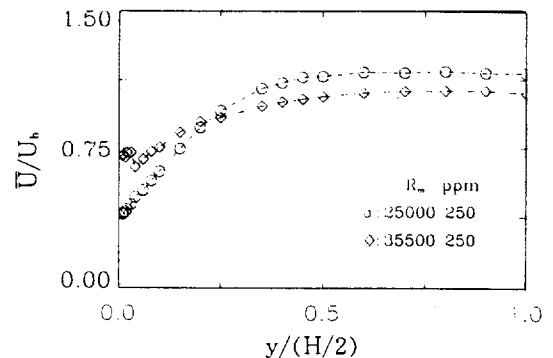


Fig.5 Effects of Reynolds number on time-averaged velocity in surfactant flows

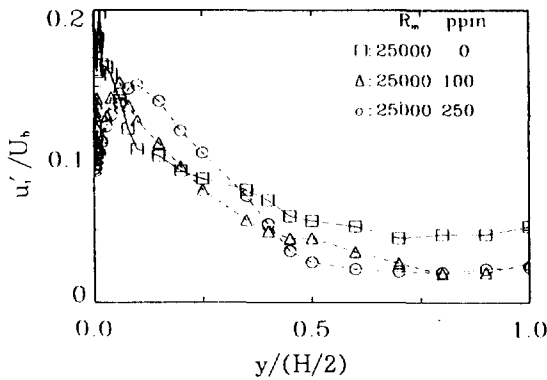


Fig.6 Effects of surfactant concentration on streamwise turbulence intensity

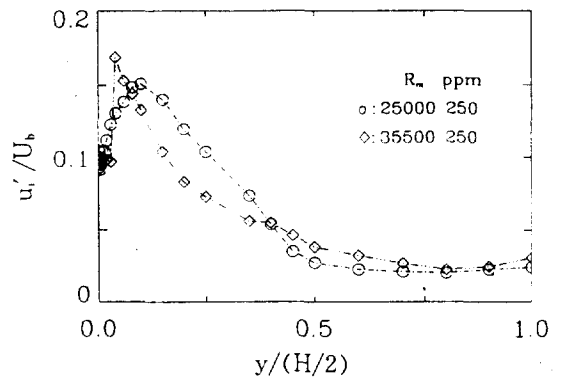


Fig.7 Effects of Reynolds number on streamwise turbulence intensity in surfactant flows

에서는 유사한 속도분포가 관측되어 마찰감소는 벽 근처에서의 유동과 더욱 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

Fig.3의 마찰특성곡선에서 보는바와 같이 농도가 250ppm 용액은 Reynolds 수가 25,500에서는 최대 마찰감소효과를 나타내지만, Reynolds 수가 35,500으로 증가하면 마찰감소효과를 급격히 감소하는 조건이다. Fig.5는 동일 농도(250ppm)에서의 Reynolds 수 변화에 따른 평균유속변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는바와 같이 마찰감소효과와 함께 계면활성제 용액의 평균유속분포는 물의 유속분포와 유사하게 접근한 것이 측정되었다.

난류강도 분포

유체의 평균속도분포만을 이용하여 마찰감소현상에 대해 설명하는 것은 불충분하다. 따라서 난류와 첨가제의 관계를 정확히 이해하기 위하여는 난류강도에 대한 이해가 필수적이다. Fig.6에서 보는 것과 같이 물의 경우 벽면 가까운 곳에서는 매우 급격히 최대 난류강도에 도달한 후 완만한 곡선으로 감소하는 경향을 관찰할 수가 있으며, 중심부에서는 마찰감소유체와 비교할 때 매우 큰 난류강도 분포를 보이고 있다. 한편 마찰감소유체의 최대 난류강도는 물의 경우와 비교하여 벽에서 바깥쪽에 위치하고 있고 감소의 경향도 급하다. 일반적으로 농도 및 속도의 증가와 함께 난류강도는 감소하는 경향을 나타낸다고 할 수가 있으나 본 실험에서는

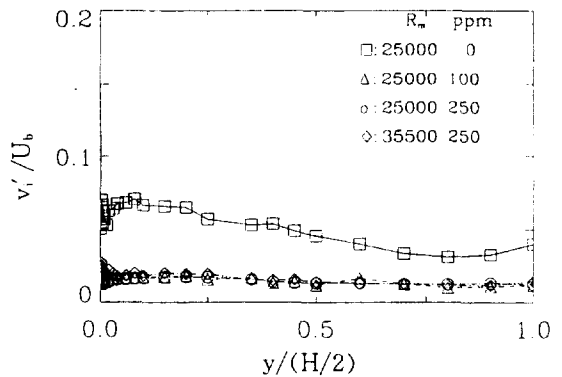


Fig.8 Profiles of normal turbulence intensity in surfactant flows

동일 속도(Reynolds 수)에서 저농도(100ppm)의 경우 난류강도는 비록 벽근처에서 절대 크기는 비슷할 지라도 최대 난류강도가 벽면에 더 가까이 분포하고 있음으로 난류의 생성이 고농도(250ppm)과 비교하여 활발할 것으로 추정되나 실제 전달된 에너지양이 측정되지 못해서 이 부분은 추후 연구가 필요한 것으로 사료된다. 또한 첨가물의 농도의 비례하여 중심부에서의 난류강도가 크게 감소되는 것을 관찰할 수 있다.

Fig.7은 동일 농도(250ppm)에서 Reynolds 수 변화에 따른 유동방향 난류강도의 변화를 제시하였다. 그림에서 보는바와 같이 마찰감소효과가 클수

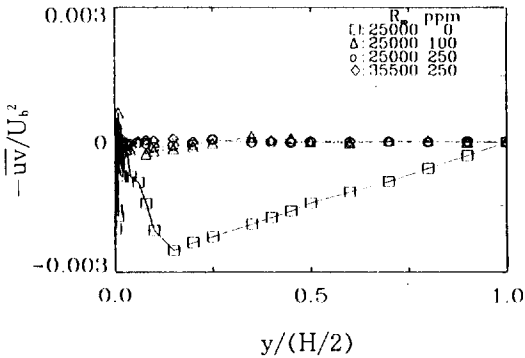


Fig.9 Profiles of Reynolds shear stress in surfactant flows

록 난류강도는 벽근처에서 크게 감소됨을 관찰할 수가 있고, 특히 최대 난류강도는 벽에서 더욱 멀리 떨어져 발생됨이 뚜렷하게 관찰되었다. 이 결과는 Chara 등⁽⁶⁾이 발표한 결과와 잘 일치한다. 한편 채널중심부에서는 물을 사용한 경우와 비교하여 난류강도가 매우 줄어든 경향을 보이고 있다. 마찰감소율과 평균속도, 난류강도를 함께 고려할 경우 마찰감소율은 난류강도의 증감뿐만 아니라 점성층의 두께와 벽으로부터 전달된 에너지가 중심부에서 어떤 과정을 거쳐서 확산, 소멸되는가 하는 것이 매우 중요한 요인인 것으로 판단된다.

축방향의 난류강도는 Fig.8에서 보는바와 같이 첨가제 농도 및 Reynolds 수의 변화에 관계없이 매우 억제된 것을 알 수 있는데 이것은 첨가용액의 교질(micelle)이 유동방향과 일치하는 방향으로 정렬되어 있어서 축방향의 난류 생성을 억제하는 역할을 하기 때문인 것으로 사료된다. 축방향 성분은 난류생성의 메카니즘(mechanism)에 중요한 성분인 Reynolds 전단응력에 직접적인 역할을 하는 성분이어서 Reynolds 전단응력의 생성이 없이도 난류가 생성될 수 있는가 하는 문제를 제기하여 계속적인 연구가 필요하다.

Reynolds 전단응력 분포

난류생성의 중요한 성분인 Reynolds 전단응력분포가 농도 및 속도의 변화에 대하여 Fig.9에 제시되었다. 물의 경우와 비교하여 마찰감소유체의 Reynolds 전단응력은 채널전체, 특히 벽근처에서 크게 압축되었다. 특히 주목할 사항은 흐름방향의

난류강도의 변화와 축방향성분의 난류강도의 억제로 인한 Reynolds 전단응력의 감소는 벽으로부터 중심부로의 운동량의 변화에 큰 영향을 나타낼 수 있다. 따라서 마찰감소효과를 적절하게 설명하기 위하여는 난류성분과 계면활성제의 교질(micelle)사이의 에너지교환방법이 연구되어야 할 것이다.

4. 결 론

미소량의 고분자물질을 난류에 첨가하여 일어나는 마찰저항의 감소효과는 Toms에 의하여 발견된 이래, 첨가제의 에너지 절약 대체물로서의 응용을 위한 수많은 실험화 연구가 수행되었다. 그러나 마찰저항의 감소특성을 어떻게 적절하게 설명하며 또한 주어진 유동장을 어떻게 제어하여 벽 경계 층에서 발생하는 전단응력을 효율적으로 감소할 것인가에 대한 난류에서의 마찰감소 메카니즘은 아직도 분명하게 규명되고 있지 못한데 이것은 난류에 대한 정확한 이해의 부족과 특히 첨가물이 마찰감소 흐름에 미치는 영향에 대한 특성분석이 미진한 것에 기인한다. 본 연구에서는 2차원 LDV 시스템을 사용하여 마찰감소 계면활성제(Habon-G)의 첨가에 따른 채널흐름에서의 유동장 특성변화를 분석하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 마찰감소 계면활성제의 농도가 증가함에 따라 동일 Reynolds 수에서 마찰감소효과는 증가하나 마찰감소율이 Virk에 의하여 제시된 최대 마찰감소치에 도달하면 더이상 증가하지 않는데, 이것은 용액에 흡수된 첨가제의 농도가 임계교질농도에 도달하여 포화 상태에 이른 것으로 사료된다.

2) 계면활성제 용액의 마찰감소효과는 Reynolds 수가 임계값이상으로 증가하면 급격히 감소하고 있는 것을 관찰할 수 있는데, 이것은 막대형의 교질(micelle)이 난류내에서 방향성을 잃기 때문에 기인한 것으로 판단된다. 즉 유체의 유동방향과 교질(micelle)의 방향이 서로 일치하는 등방성(isotropic)에서 이방성(anisotropic)의 흐름으로 변하는 용이 증가함을 나타낸다.

3) 마찰감소흐름의 평균속도분포는 계면활성제의 농도가 증가하면 점성의 증가로 벽근처에서는

속도가 감소하지만, 중앙부에서는 점탄성효과로 속도가 증가함을 분명히 관측할 수 있다. 이는 마찰 감소를 야기시키는 막대형의 교질(micelle)이 유동 방향과 일치하는 방향으로 정렬해 있는 상태를 유추할 수가 있고, 정렬상태는 또한 용액의 농도에 영향을 받는 것으로 사료된다.

4) 유동방향의 난류강도는 마찰감소효과가 클수록 벽근처에서 크게 감소됨을 관찰할 수가 있고, 특히 최대 난류강도는 벽에서 더욱 멀리 떨어져 발생됨이 분명하게 측정되었다. 한편 채널중심부에서는 물을 사용한 경우와 비교하여 난류강도가 매우 줄어드는 경향을 보이고 있다. 마찰감소율과 평균속도, 난류강도를 함께 고려할 경우 마찰감소율은 난류강도의 증감뿐만 아니라 점성층의 두께와 벽으로부터 전달된 에너지가 중심부에서 어떤 과정을 거쳐서 확산, 소멸되는가 하는 것이 매우 중요한 요인인 것으로 판단된다.

5) 축방향의 난류강도는 첨가제 농도 및 Reynolds 수의 변화에 관계없이 매우 억제된 것을 알 수 있는데 이것은 첨가용액의 교질(micelle)이 유동방향과 일치하는 방향으로 정렬되어 있어서 축방향의 난류 생산을 억제하는 역할을 하기 때문인 것으로 사료된다.

6) 물의 경우와 비교하여 마찰감소유체의 Reynolds 전단응력은 채널전체, 특히 벽근처에서 크게 압축되었다. 따라서 마찰감소효과는 축방향성분의 난류강도의 영향을 인한 Reynolds 전단응력의 감소에 기인한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Toms, B. A., 1948, "Some observations on the flow of linear polymer solutions through strait tubes at large Reynolds numbers", North Holland, Amsterdam, Proc. 1st Intern. Congr. on Rheology 2, pp. 135~141.
2. Mysels, K. J., 1949, "Flow of Thickened Fluids", U. S. Patent 2, 492, 173.
3. Bewersdorff, H. W., *et al.*, 1986, "The conformation of drag reducing micelles from small-angle-neutron-scattering experiments", Rheologica Acta, 25, pp. 642~646.
4. Beiersdorfer, H. *et al.*, 1994, "Flows with surfactant at maximum drag reduction", Proc. IUTAM Symp.
5. Walsh, M., 1967, "On the Turbulent Flow of Dilute Polymer Solutions", Ph. D. dissertation, California Institute of Technology.
6. De Gennes, P. G., 1990, "General aspects of polymer chains" in Introduction to Polymer Dynamics, Cambridge Univ. Press.
7. Virk, P. S., 1975, "Drag reduction fundamentals", AIChE, J., 21, pp. 625~656.
8. Chara, Z., *et al.*, 1993, "Turbulence measurements of drag reducing surfactant systems", J. Exp. Fluids, 16, pp. 36~41.