

폴리머 첨가제에 의한 항력감소 난류 채널 유동장의 직접수치모사

김 경 연*†

* 한밭대학교 기계공학과

DNS of Drag-Reduced Turbulent Channel Flow due to Polymer Additives

Kyoungyoun Kim * †

* Dept. of Mechanical Engineering, Hanbat Nat'l Univ.

(Received April 12, 2010 ; Revised June 18 2010 ; Accepted June 18, 2010)

Key Words : Drag Reduction(항력감소), Turbulent Channel Flow(난류채널유동), Polymer Additives(폴리머 첨가제), FENE-P Model(FENE-P 모델), DNS(직접수치모사), Spectral Method(스펙트럴기법)

초록: 폴리머 첨가제에 의한 항력감소 난류 채널 유동에 대한 직접수치모사를 스펙트럴 기법을 통해 수치적으로 해석하였다. 마찰속도 및 채널 높이의 절반으로 무차원화한 레이놀즈수는 395 이며, 폴리머 첨가제에 의해 발생하는 폴리머 응력은 FENE-P 모델을 통해 고려하였다. 폴리머 분자의 이완 시간 및 최대 연신 한계와 같은 FENE-P 모델 인자는 항력감소율에 큰 영향을 끼치는 것으로 나타났다. 항력감소율이 낮은 유동과 높은 유동에 대해 항력감소에 따른 난류 통계량의 변화를 조사하였다. 또한, 동일한 항력감소율을 갖는 유동에 대해, 서로 다른 FENE-P 모델 인자가 난류 통계량의 변화에 미치는 영향도 조사하였다. 최종적으로, Li 등(2006) 이 제시한 유변학 인자들과 항력감소율과의 상관관계식을 본 수치해석 결과를 통해 확인하였다.

Abstract: Direct numerical simulations (DNS) of turbulent channel flow for which the drag is reduced by using polymer additives have been performed by a pseudo-spectral method. The Reynolds number based on the friction velocity and half-channel height is 395, and the polymeric stresses due to the polymer additives are evaluated using the FENE-P (finitely extensible nonlinear elastic-Peterlin) model. The numerical results show that the drag reduction rate is significantly affected by the parameters used in the FENE-P model, such as the maximum extensibility and relaxation time of the polymer molecules. The turbulence data for both low- and high-drag reduction regimes are analyzed. In addition, the effects of FENE-P model parameters on the flow characteristics have been investigated for the same drag reduction rate due to the polymer additives. Finally, the present DNS results have been used to verify the correlation between rheological parameters and the extent of drag reduction, which was suggested by Li *et al.* (2006).

- 기호설명 -

- h : 채널 높이의 절반
- u_τ : 벽면마찰속도 ($\sqrt{\tau_w / \rho}$)
- ν_0 : 폴리머 용액의 무전단 동점도
- q_0 : 폴리머 분자의 최대 신장한계
- λ : 폴리머 분자의 이완시간
- μ_w : 벽면점성계수 ($\tau_w / (dU/dy|_w)$)
- U_m : 평균속도 ($\int U dy / 2h$)
- $We_{\tau,0}$: 와이센버그수 ($\lambda u_\tau^2 / \nu_0$)
- Re_τ : 레이놀즈수 ($u_\tau h / \nu_0$)

- Re_m : 레이놀즈 수 ($U_m 2h / \nu$)
- τ_p : 폴리머 응력
- τ_{vis} : 점성 응력

1. 서론

폴리머 첨가제의 의한 난류항력 감소현상은 최초로 Toms⁽¹⁾에 의해 발견되었다. 이는 긴 체인형태의 분자구조를 갖는 고분자 폴리머를 아주 낮은 농도로 용해시키면 액체 유동의 난류 항력이 60% 이상까지 줄어드는 현상이다. 이러한 현상을 이용하면, 유체수송시스템의 기계적인 변화 없이 난류 유동의 항력을 감소시킬 수 있으므로, 폴리머 첨가제를 이용한 항력감소 기법은 유체수송시스템의

† Corresponding Author, kkim@hanbat.ac.kr
© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

효율 증가에 획기적인 방법이다. 일례로 알래스카 송유관 시스템(Trans-Alaska pipeline system; TAPS)에서는 미량의 긴 체인 구조를 갖는 hydrocarbon 폴리머를 송유시스템에 주입하여 오일 수송 효율을 증가시키고 있다.⁽²⁾

기존의 실험을 통한 연구에서 폴리머 첨가제에 의한 난류 항력 감소현상의 특징은 아래와 같다고 보고되었다. 용액내의 폴리머 농도가 특정한 임계값 이상에서만 항력 감소 현상이 발생하며,⁽³⁾ 폴리머의 농도가 아무리 증가해도 어느 일정 수준의 이상의 항력감소는 얻어지지 않는, 즉, 최대 항력감소 한계가 존재한다.⁽⁴⁾ 또한, 항력감소율(DR)이 낮은 영역과 높은 영역에 따라 그 변화 양상이 확연히 다름이 보고되었다.⁽⁵⁾ 항력감소율이 낮은 유동장(DR<35%)에서는 벽면근처의 로그영역에서의 평균속도의 기울기(von Karmann constant)가 일반적인 뉴턴 유체 유동과 동일하게 관측된다. 난류강도의 분포는 항력이 증가할수록, 주 유동방향의 난류강도는 증가하는 반면, 나머지 방향의 난류강도는 감소한다. 반면 항력감소율이 높은 유동장(DR>40%)에서는 로그 영역에서의 평균속도의 기울기가 뉴턴 유체 유동에 비해 상당히 증가하고, 레이놀즈 전단응력이 매우 감소하게 된다. 폴리머 첨가제에 의한 난류 항력 감소에 대한 보다 자세한 최근 연구 동향은 White 등⁽⁶⁾에서 파악할 수 있다.

난류 항력은 벽면 난류 유동장에 존재하는 다양한 보텍스 구조들과 밀접한 관련이 있다고 밝혀졌다. 버퍼영역에 존재하는 주 유동방향의 보텍스 및 로그 영역에서 관찰되는 헤어핀 보텍스들에 의해 유도되는 스위프와 이젝션 모션에 의해 레이놀즈 전단응력이 발생하게 되며, 이는 항력의 증가로 이어진다.^(7,8) 따라서 폴리머 첨가제가 벽면 난류 유동의 보텍스 구조들을 어떻게 변화시키는지에 대한 연구는 폴리머 항력 감소 메커니즘을 규명함에 있어 반드시 필요한 연구 주제라 할 수 있으며 이에 대한 연구들이 현재까지 활발히 이루어지고 있다.⁽⁹⁾ White 등⁽¹⁰⁾은 PIV 기법을 통해 폴리머 항력 감소 유동장의 유동구조를 관측하여, 폴리머 항력 감소 유동장에서는 이러한 벽면 보텍스 구조들이 약화되며, 그 길이 척도가 증가한다고 보고하였다. 그러나 실험을 통해서만 폴리머 첨가제에 의한 효과를 직접적으로 구별해 내기가 어려운 문제점이 있다.

따라서 항력감소 유동장에 대한 직접수치모사(Direct numerical simulation; DNS)를 수행하고 그로

부터 확보한 3 차원 시공간 데이터를 해석하여 항력감소 유동장의 특성을 유동 구조적인 관점에서 파악하고자 하는 수치적인 연구가 진행되고 있다. 폴리머 첨가제의 효과를 반영하기 위해, Navier-Stokes 방정식에서 점성응력과 더불어 폴리머 분자로 인해 발생하는 폴리머 응력을 도입하여 해석한다. 폴리머 응력을 고려한 DNS 를 통해 항력감소 유동장의 특성을 성공적으로 예측한 여러 사례들이 보고되었으며,^(11~16) 이를 통해, 폴리머 응력이 난류 유동구조의 변화에 미치는 영향을 직접적으로 파악할 수 있다.

긴 체인 구조를 갖는 고분자 폴리머 분자는 유체 유동 내에서 비선형적인 거동을 보인다. 유동의 변형에 의해 폴리머 분자가 스트레칭을 하게 되고 이로 인해 유동 내부에 폴리머 응력을 발생시킨다. 또한, 뉴턴 유체와는 달리 유동이 갑자기 정지할 경우, 응력이 즉시 사라지지 않고 특정한 시간 동안 줄어들게 되는 이완 효과를 지니고 있다.⁽¹⁷⁾ 비뉴턴 유체 유동에 대해, 용액의 농도 및 분자의 특성에 따라 다양한 폴리머 응력 모델이 존재한다. 그 중 FENE-P 모델은 아주 낮은 농도의 긴 체인형태를 갖는 고분자 폴리머가 용해된 용액에 적합하고, FENE-P 모델을 도입한 DNS 는 폴리머 첨가에 의한 난류항력 감소 현상을 성공적으로 예측하였다.^(11~13) FENE-P 모델은 폴리머 분자를 두 개의 구슬이 용수철에 의해 연결된 덤벨 구조로 모델링하며 폴리머 분자의 이완시간 및 최대신장 한계와 같은 유변학적인 인자들을 반영한다.

최근 Li 등⁽¹⁸⁾은 이러한 FENE-P 모델의 유변학 인자들이 난류채널유동의 항력감소에 미치는 영향에 대해 보고하였다. 폴리머 분자의 이완 시간을 유동의 시간 척도로 무차원화한 와이센버그 수(We) 및 폴리머 분자가 늘어날 수 있는 최대신장 한계의 변화에 따라 항력감소율의 변화를 조사하여 FENE-P 모델인자가 항력감소율에 큰 영향을 미침을 보고하였다. 그러나 대부분의 조사가 낮은 레이놀즈 수의 영역($Re_\tau=125$)에서 이루어졌다. 또한, 각각의 조사 대상에 따라 계산영역의 크기 및 격자의 크기가 다르므로 FENE-P 모델 인자의 효과를 독립적으로 구분해내기에 무리가 있다.

본 연구에서는 FENE-P 모델 인자들이 폴리머 항력감소 유동장의 항력감소율에 대해 미치는 영향을 독립적으로 조사하고자 한다. $Re_\tau=395$ 의 난류 채널 유동장에 대하여 FENE-P 모델 인자인 We 수와 무차원화된 폴리머 분자의 최대신장한계 L 을 변화시켜 총 6 경우에 대한 직접수치모사를

수행하였다. FENE-P 모델 인자를 제외한 다른 수치적 인자들(계산영역, 격자수 등)은 동일하게 유지하여, FENE-P 모델 인자가 항력감소율의 변화에 미치는 영향을 독립적으로 조사하였다. 또한, 거의 동일한 항력감소율을 가지는 유동장에서 서로 다른 FENE-P 모델인자가 유동장에 미치는 영향을 파악하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 지배방정식

FENE-P 모델을 도입한 비정상, 비압축성 유체 유동에 대한 무차원 지배방정식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\beta}{\text{Re}_{\tau,o}} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \frac{1-\beta}{\text{Re}_{\tau,o}} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial c_{ij}}{\partial t} + u_k \frac{\partial c_{ij}}{\partial x_k} = c_{ik} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \frac{\partial u_i}{\partial x_k} c_{kj} - \tau_{ij} \quad (3)$$

$$\tau_{ij} = \frac{\text{Re}_{\tau,o}}{\text{We}_{\tau,o}} \left(\frac{L^2 - 3}{L^2 - c_{kk}} c_{ij} - \delta_{ij} \right) \quad (4)$$

여기서, u_i 는 속도, p 는 압력, τ_{ij} 는 폴리머 응력을 나타내며, 지배방정식은 벽면 마찰속도 u_τ 및 채널 높이의 절반 h 로 무차원화 되었다. 레이놀즈 수는 $\text{Re}_{\tau,o} = u_\tau h / \nu_o$ 로 정의되며 ν_o 는 폴리머 용액의 무전단 동점도(zero shear-rate kinematic viscosity)이다. 또한, β 는 용매의 점도와 용액의 무전단 점도의 비를 나타내며, 본 연구에서는 폴리머 용액의 농도가 낮은 경우를 다루고 있으므로 0.9의 값으로 사용하였다. 폴리머 응력 τ_{ij} 는 폴리머 분자의 평균 2 차 모멘트인 c_{ij} 의 구성방정식을 해석해서 계산하며, $\mu_{po}u_\tau/h$ 로 무차원 되었다. 여기서, μ_{po} 는 폴리머 용액의 무전단 점도(μ_o)와 용매의 점도(μ_s)의 차이이다.

FENE-P 모델에서는 폴리머 분자의 2 차 모멘트가 평형상태로부터 이탈한 정도에 의해 식 (4)와 같이 폴리머 응력이 발생한다고 모델링한다. 여기서, $\text{We}_{\tau,o}$ 는 폴리머 분자의 이완시간(λ)을 유동의 시간 척도, ν_o/u_τ^2 로 무차원화한 와이센버그 수 ($\text{We}_{\tau,o} = \lambda u_\tau^2/\nu_o$) 이며, L 은 폴리머 분자의 길이척

도로 무차원화한 폴리머분자의 최대 신장한계이다.

2.2 전산해석 기법

위의 지배방정식의 시간전진은 점성 항에 대해서는 내재적인 방법인 Crank-Nicolson 기법을 사용하였고, 나머지 항들은 Adams-Bashforth 방법을 사용하는 준 내재적(semi-implicit)기법을 적용하였다. 공간상으로는 주유동방향 및 횡방향으로는 푸리에 계수, 벽면 수직방향으로는 Chebyshev 계수를 사용하는 스펙트럴 기법을 사용하였다. 폴리머 분자의 구성 텐서 방정식의 수치적 안정성을 위해 수치 확산 항인 $D\partial^2 c_{ij}/\partial x_j^2$ 을 식 (3)에 추가하였다. 이에 대한 타당성은 기존의 연구를 통해 확인할 수 있으며,⁽¹⁹⁾ 본 연구에서는 기존의 연구들^(11,20)과 유사한 크기의 확산계수 $D = 0.02$ 를 사용하였다. 지배방정식의 경계조건은 벽면에서는 점착조건을 사용하였으며, 주 유동 및 횡 방향으로서는 주기적인 경계조건을 사용하였다. 전산해석에 관한 자세한 내용은 Li 등⁽¹⁸⁾의 논문을 참고한다.

본 연구에서는 $\text{Re}_{\tau,o} = 395$ 의 난류채널 유동에 대하여, FENE-P 모델 인자를 제외한 나머지 다른 수치적 인자들인 계산영역의 크기 및 격자의 크기는 동일하게 유지하였다. 폴리머 응력으로 인해 난류 항력이 감소할수록 유동 구조의 크기가 증가하므로⁽²¹⁾ 충분히 큰 계산 영역인 $(L_x, L_y, L_z) = (8\pi h, 2h, \pi h)$ 을 사용하였으며, 사용된 격자 수는 $(N_x, N_y, N_z) = (512, 129, 128)$ 이다. 벽단위로 환산하면 각각 $(L_x^+, L_z^+) = (9927, 1241)$ 과 $(\Delta x^+, \Delta z^+) = (19, 9.7)$ 이다.

2.3 FENE-P 모델 인자

밀도 ρ , 점도 μ_s 를 갖는 유체에 분자량 M_w (g/mol), 이완 시간 λ (s), 최대 신장 한계 q_o (m)를 갖는 폴리머 분자를 농도 C (wppm)로 희석한 용액을 높이 $2h$ 의 채널을 통해 수송할 때, 벽면 전단 응력이 $\tau_w (= \rho u_\tau^2)$ 로 관측되었다면, 이에 해당하는 FENE-P 모델 인자들은 아래의 식과 같이 정해질 수 있다.⁽¹⁷⁾

$$n = C \times 10^{-3} \rho \frac{N_A}{M_w} \quad (5)$$

$$\mu_o = \mu_s + nk_B T \lambda \quad (6)$$

$$\beta = 1 - \frac{nk_B T}{\rho u_\tau^2} \text{We}_{\tau,o} \quad (7)$$

$$L = q_o / \sqrt{k_B T / H} \quad (8)$$

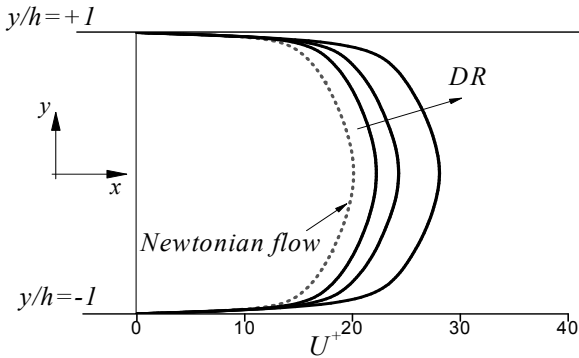


Fig. 1 Increase of flow rate in drag-reduced flows

여기서 n 은 단위부피당 폴리머 분자의 개수이며, H 는 FENE-P 모델의 선형 스프링 상수, k_B 는 볼츠만 상수, N_A 는 아보가드로 수이며, T 는 절대온도이다. 본 연구에서는 $We_{\tau,o} = 25, 50$ 과 $L = 30, 60, 120$ 의 경우에 대한 DNS 를 수행하여 FENE-P 인자들이 항력 감소 유동장에 미치는 영향을 조사하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 항력감소율

본 연구에서는 주 유동 방향의 압력 구배를 일정하게 유지하여 계산을 수행하였기 때문에($Re_{\tau,o} = 395$), 폴리머 응력에 의한 항력감소는 유량의 증가로 나타난다(Fig. 1). 그러나, 일반적으로 항력감소율 (DR) 은 동일한 물성치의 유체를 동일한 유량으로 수송할 때, 뉴턴 유체 유동에 대비한 마찰 항력의 감소 비율로 아래와 같이 정의된다.

$$DR = \frac{\tau_w^N - \tau_w}{\tau_w^N} \Big|_{Re_m, h, \mu_w, \rho} = 1 - \left(\frac{Re_\tau}{Re_\tau^N} \right)^2 \quad (9)$$

여기서 위첨자 N 은 뉴턴 유체 유동을 의미하며, Re_m 은 평균 레이놀즈 수($Re_m = \rho U_m 2h / \mu_w$)를 나타낸다. μ_w 는 벽면 점성계수($\mu_w = \tau_w / (dU/dy|_w)$)를 나타내며, 무전단 점도와 벽면에서의 평균 속도 구배를 통해 아래와 같이 표현된다.⁽²²⁾

$$\mu_w = \mu_o \left/ \frac{dU^+}{dy_o^+} \right|_w \quad (10)$$

여기서 y_o^+ 는 벽면마찰속도와 무전단 점도에 의해 무차원화된 길이 이다($y_o^+ = yu_\tau / \nu_o$). 항력감소 유동장의 유량에 상응하는 뉴턴 유체 유동의 Re_τ^N 는 Dean's correlation($c_f = 0.073 Re_m^{-1/4}$)으로부터 계산

Table 1 Drag reduction rate for different values of FENE-P model parameters at $Re_{\tau,o} = 395$

$We_{\tau,o}$	L	Re_m	DR(%)
25	30	16193.2	19%
	60	16563.8	25%
	120	16654.6	29%
50	30	17766.7	30%
	60	18762.2	42%
	120	19135.1	47%

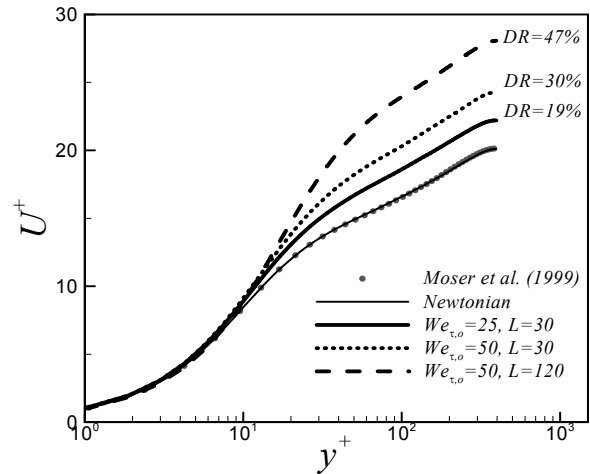


Fig. 2 Mean velocity profiles

한다.⁽²³⁾ 최종적으로 아래의 식 (11)을 통해 항력감소율을 계산하며, 각 FENE-P 인자들에 따른 항력감소율을 Table 1 에서 나타내었다.

$$DR = 1 - \left(\frac{dU^+}{dy_o^+} \right)^2 \left(\frac{Re_{\tau,o}}{0.095525 Re_m^{7/8}} \right)^2 \quad (11)$$

3.2 난류 통계량

Fig. 2 는 항력감소유동장의 주 유동 방향의 평균속도를 나타낸다. 항력감소의 영향을 비교하기 위해 뉴턴 유체 유동의 데이터($Re_\tau^N = 395$)도 함께 표시하였다. 항력감소 유동장의 평균속도를 살펴보면, 벽면 근처의 점성아층(viscous sublayer)에서 거의 선형적인 분포를 나타내며, log 영역에서는 평균속도가 뉴턴 유동장에 비해 증가함을 확인할 수 있다. 항력감소율이 낮은 유동장(DR=19, 30%)의 평균속도는 뉴턴 유체 유동장과 동일한 기울기를 가진다. 반면, 항력감소율이 높은 유동장(DR=47%)에서는 평균속도의 기울기가 뉴턴 유체

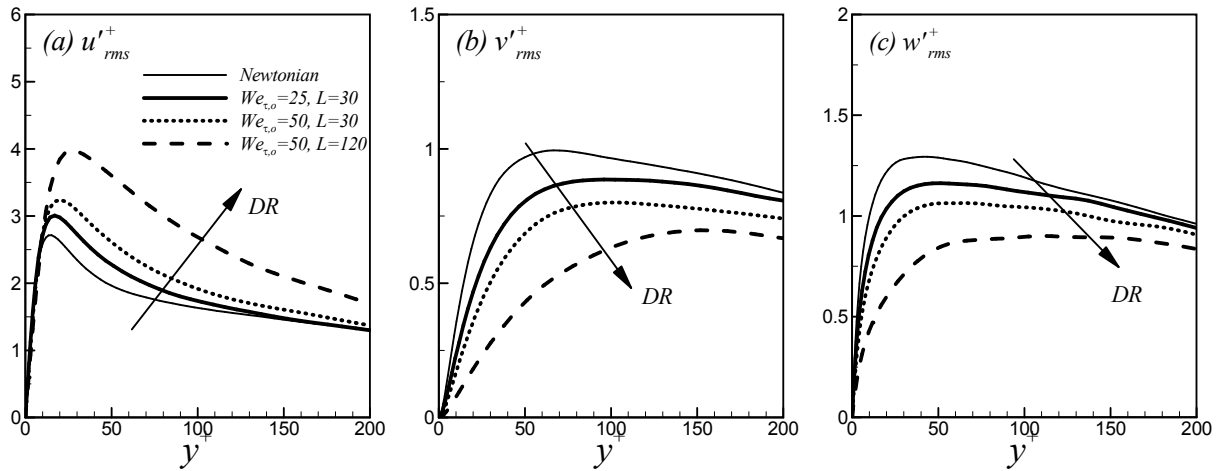


Fig. 3 Rms of velocity fluctuations normalized by the friction velocity

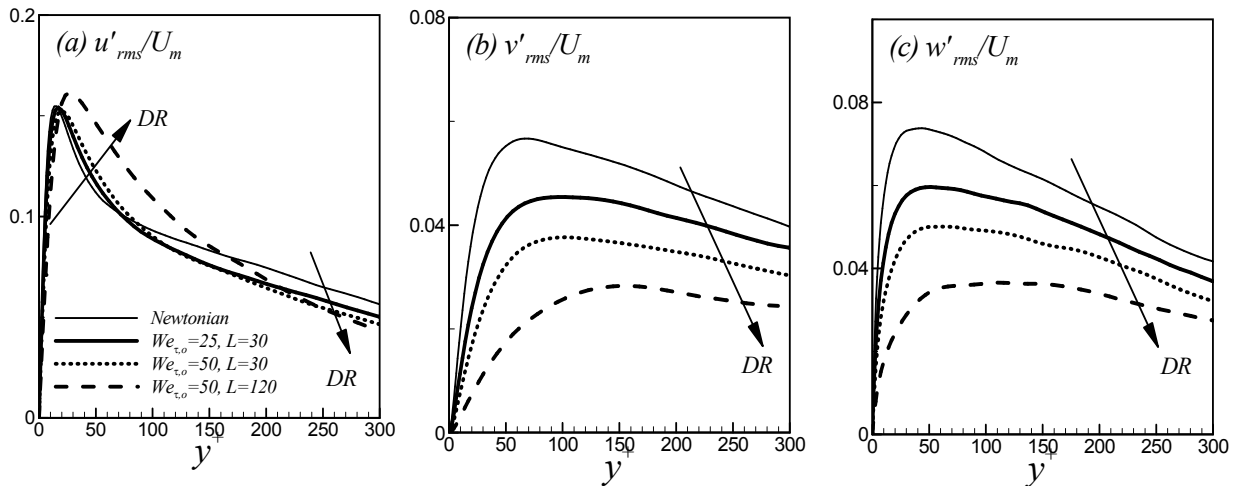


Fig. 4 Rms of velocity fluctuations normalized by the bulk mean velocity

유동에 비해 증가함을 확인할 수 있으며, 이러한 항력감소율에 따른 평균속도의 기울기의 변화는 Warholic 등⁽⁶⁾의 실험 결과에서도 발견된다.

항력감소 유동장에서 벽면마찰속도로 무차원화된 난류강도의 분포를 Fig. 3 에서 나타내었다. 주 유동 방향의 난류강도는 항력감소율이 증가함에 따라 증가한다. 항력감소율이 증가하면, u'^+_{rms} 의 최대값이 발생하는 위치가 벽면으로부터 멀어지며, u'^+_{rms} 가 큰 영역의 분포가 넓어진다. 벽면 수직 및 횡 방향의 난류강도는 항력감소율이 증가함에 따라 전 영역에 걸쳐 감소하며, 최대값의 위치는 벽면으로부터 멀어진다. 항력 감소 유동장에서 평균 유동에 대한 상대적인 난류강도의 변화를 조사하기 위해 평균속도로 무차원화한 난류강도를 Fig. 4 에서 나타내었다. 낮은 항력감소율을 보이는 유동장(DR=19, 30%)에서의 주 유동 방향의 난류강도

는 $y^+ < 70$ 의 벽면 근처에서 뉴턴 유체의 유동장과 거의 유사한 분포를 가진다. 즉, 벽면 마찰속도로 무차원된 난류강도는 항력 감소율에 따라 그 최대값이 증가하는 반면(Fig. 3a), 평균속도로 무차원된 난류강도의 최대값은 뉴턴 유체 유동과 거의 동일한 값을 지닌다. $y^+ > 70$ 영역에서는 뉴턴 유체 유동의 난류강도보다 감소함을 확인할 수 있다. 항력감소율이 높은 유동장(DR=47%)에서는 벽면 근처에서 발생하는 주 유동 방향의 난류강도의 최대값이 뉴턴 유체 유동보다 다소 증가하였고, $y^+ < 150$ 영역까지 뉴턴 유체 유동보다 큰 값을 가진다. 벽면 수직 및 횡 방향의 난류 강도는 전 영역에 걸쳐 뉴턴 유체 유동의 값보다 감소함을 확인하였다. 전체적으로, 평균 유동의 운동에너지에서 난류 운동에너지가 차지하는 비율은 항력이 감소할수록 줄어들음을 확인하였다.

완전 발달된 난류 채널 유동장의 전체 응력은 벽면으로부터의 거리에 따라 식 (12)와 같이 선형적으로 변화한다.

$$\underbrace{\overline{-u'v'}}_{\text{Reynolds shear stress}} + \underbrace{\frac{\beta}{\text{Re}_{\tau,o}} \frac{dU}{dy}}_{\text{Viscous stress}} + \underbrace{\frac{1-\beta}{\text{Re}_{\tau,o}} \tau_{xy}}_{\text{Polymer stress}} = 1-y \quad (12)$$

폴리머 용액의 난류 유동에서 전체 응력은 난류 효과에 의한 레이놀즈 응력, 폴리머 첨가로 인한 폴리머 응력과 평균 속도 구배에 의한 점성 응력으로 구성된다. 이러한 각각의 응력 성분의 분포를 $We_{\tau,o}=25$ 의 경우에 대해 다양한 L 값에 따라 Fig. 5 에서 나타내었다. Fig. 5 에서 보듯이 L 이 증가함에 따라 레이놀즈 전단 응력은 감소한다. 반면, L 의 증가에 따라 점성 응력 및 폴리머 응력은 증가하게 된다. Table 1 에서 보듯이 L 이 증가하면 항력감소율도 증가한다. 항력감소 유동장

서는 레이놀즈 응력과 폴리머 응력의 합이 기존의 뉴턴 유체 유동에서의 레이놀즈 응력 보다 작게 되면 전체 응력 중 점성응력이 차지하는 비율이 증가하게 되고, 평균 속도 구배의 증가로 인해 주 유동방향의 평균 속도가 증가한다. 결과적으로, 폴리머 응력과 레이놀즈 응력의 합의 감소는 유량의 증가로 나타나며 이는 항력의 감소를 의미한다.

Fig. 6 에서는 보텍스 구조와 밀접한 연관이 있는 와도 섭동량의 분포를 항력 감소율에 따라 나타내었다. 난류 마찰 항력에 큰 영향을 미치는 레이놀즈 응력은 벽면 난류 유동장에서 존재하는 다양한 보텍스 구조들과 밀접한 관련이 있음은 이미 기존의 연구를 통해 밝혀졌다.⁽⁷⁾ 한편, 최근 Kim 등⁽²⁴⁾은 폴리머 항력 감소 유동장에서 난류 운동에너지를 감소시키는 폴리머 응력의 효과 또한 벽면 근처의 보텍스 구조와 연관이 있음을 조건부 평균을 통해 확인하였다. 흥미롭게도 이러한 보텍스 구조들이 레이놀즈 전단응력의 발생과 관련이 깊은 주 유동 방향 보텍스 및 헤어핀 보텍스들과 유사한 형태로 파악되었다. 본 연구결과 또한 모든 성분의 와도 섭동량이 감소하였으며 특히, 주 유동방향의 와도 섭동량이 전 영역에 걸쳐 크게 감소하였다. 벽면 수직인 방향의 와도 섭동량의 감소는 $y^+ < 50$ 영역에서 두드러지게 나타났다. 횡 방향 와도 섭동량의 변화는 다른 성분에 비해 크게 관측되지 않았으나, 벽면 근처에서 감소함이 확인되었다. 와도 섭동량의 변화를 통해 항력감소 유동장에서 보텍스 구조가 약화됨을 확인할 수 있다.

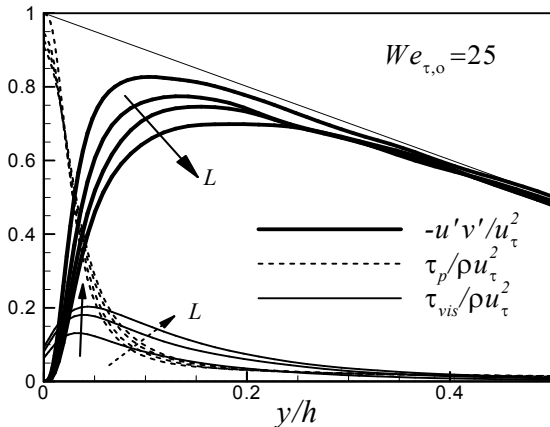


Fig. 5 Stress profiles at $We_{\tau,o}=25$ for $L=30,60,120$

3.3 FENE-P 모델 인자의 효과

FENE-P 모델인자가 난류 통계량에 미치는 효과를 독립적으로 파악하기 위해 FENE-P 모델

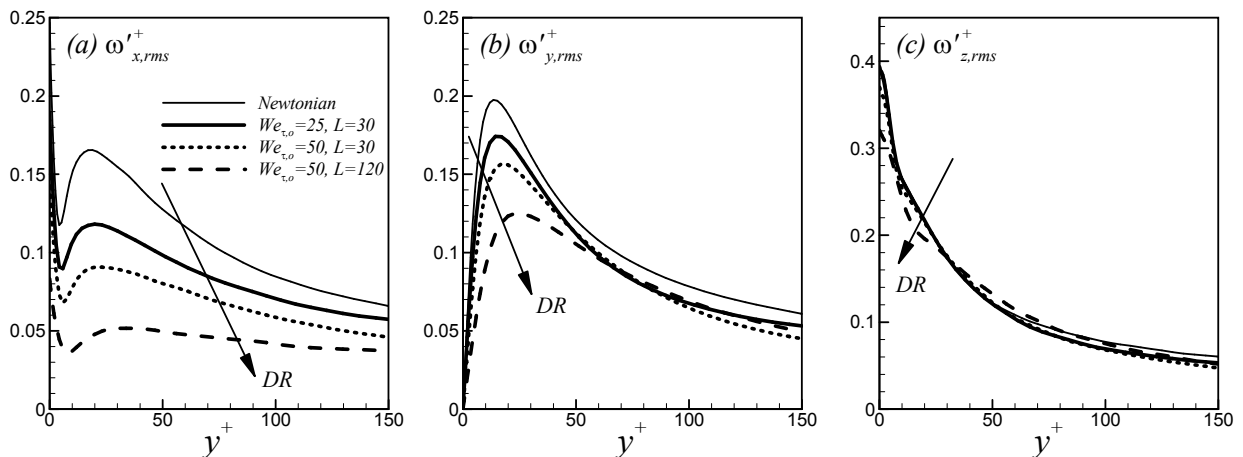


Fig. 6 Rms of vorticity fluctuations normalized by u_{τ}^2/ν_0

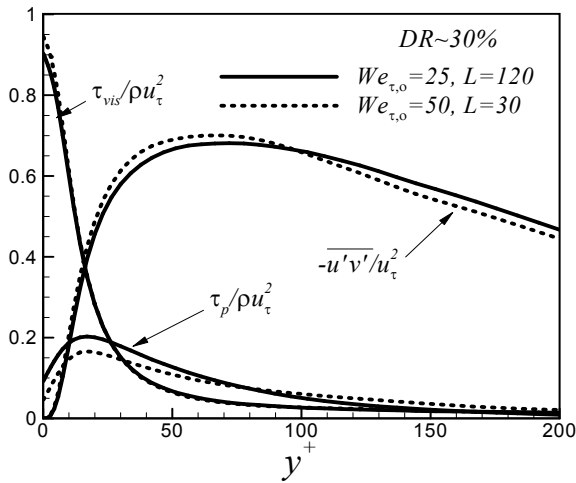


Fig. 7 Stress profiles for 30% DR flows

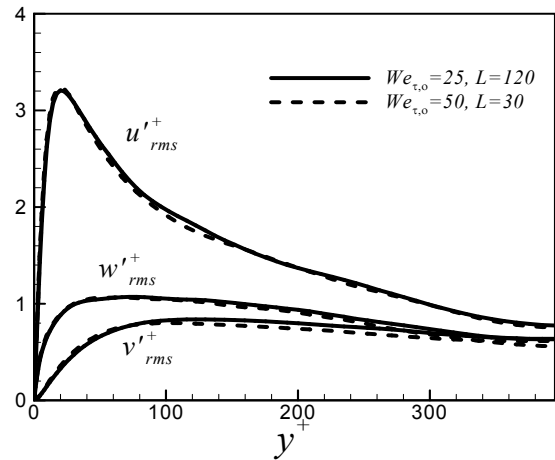


Fig. 8 Turbulent intensities for 30% DR flows

인자들은 서로 다르지만, 비슷한 항력감소율을 가지는 유동장의 통계량을 조사하였다. 본 연구에서는 $We_{\tau,o}=25, L=120$ 와 $We_{\tau,o}=50, L=30$ 의 두 가지 서로 다른 경우에 대해 거의 동일한 항력감소율 ($DR=30\%$) 을 얻을 수 있었다. 우선, 이 두 경우에 대한 응력 분포를 Fig. 7 에 나타내어 비교하였다. 평균 속도 분포와 직접적인 연관이 있는 점성응력의 분포는 $y^+ > 10$ 을 제외한 모든 영역에서 두 경우 거의 동일하게 나타났다. $y^+ < 10$ 에서의 점성응력의 차이는 두 경우의 폴리머 응력의 차이와 균형을 이룬다. We 수가 작더라도 L 이 큰 경우 ($We_{\tau,o}=25, L=120$), 벽면에서의 폴리머 응력이 더 크며, $y^+ < 100$ 범위까지 폴리머 응력이 더 크게 나타난다. 반면, 레이놀즈 응력은 더 작게 관측된다. 결과적으로 $10 < y^+ < 100$ 에서 두 응력의 차이가 균형을 이루어 점성 응력은 거의 동일하게 나타난다. $y^+ > 100$ 인 영역에서는 폴리머 응력과 레이놀즈 응력의 크기가 반대의 경향을 보이니, 그 차이는 벽면 근처에 비해 작다.

Fig. 8 에서는 $DR=30\%$ 의 항력감소율에 대해서로 다른 FENE-P 모델인자에 따른 난류 강도의 분포를 나타내었다. 항력감소율이 같을 경우 ($DR=30\%$), 모든 성분의 난류 강도는 서로 다른 We 수 및 L 에 대해 거의 동일한 분포를 가짐을 확인할 수 있다.

최근 Li 등⁽¹⁸⁾은 다양한 유동조건에 대한 폴리머 항력감소 채널유동에 대한 DNS 를 수행하여 항력감소율과 유변학 인자들 사이의 관계식을 제안하였다. $Re_{\tau}=125$ 의 유동장에 대한 심도 있는 파라미터 연구를 통해 항력감소율과 FENE-P 모델인자

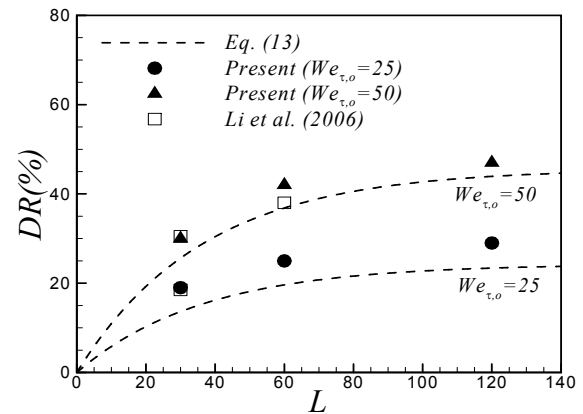


Fig. 9 Drag reduction rate

의 관계식을 유추하고 $Re_{\tau}=180, 395$ 에 대한 추가적인 계산을 수행하여 레이놀즈 수의 효과도 반영하였다(식 (13)).

$$DR = 80 \left[1 - \exp(-0.025(We_{\tau} - 6.25)(Re_{\tau}/125)^{-0.225}) \right] \times [1 - \exp(-0.0275L)] \quad (\%) \quad (13)$$

Li 등⁽¹⁸⁾은 $Re_{\tau}=395$ 에 대해서만 제한적인 경우에 대해서만 위의 관계식을 검증하였으므로, 본 연구에서는 $Re_{\tau}=395$ 의 유동장에 대한 위 관계식의 타당성을 보다 엄밀히 확인하고자 한다. Fig. 9 에서 FENE-P 모델 인자에 따른 항력감소율의 변화를 나타내었으며, 비교를 위해 Li 등 의 관계식도 함께 나타내었다. Li 등⁽¹⁸⁾이 제안한 식 (13)은 서로 다른 We 수에 대하여 폴리머 분자의 최대 신장 한계 L 의 변화에 따른 항력감소율의 변화 경향

을 잘 보여주고 있으나, 항력감소율을 다소 낮게 예측하고 있다. We 수가 낮은 경우 그 차이가 더 크게 나타났다. 따라서 식 (13)을 이용하여 높은 레이놀즈 수의 유동장에 대한 항력감소율을 예측할 경우, 예측 값이 다소 낮을 수 있음을 주의해야 하며, 보다 정확한 예측식을 개발하기 위해선 높은 레이놀즈 수 및 다양한 FENE-P 모델 인자를 고려한 추가적인 연구가 필요하다.

4. 결 론

$Re_\tau=395$ 의 난류 채널 유동장에 대하여 FENE-P 모델 인자 (We 수와 L)를 변화시켜 총 6 경우에 대한 직접수치모사를 수행하여, FENE-P 모델 인자들이 폴리머 항력감소 유동장에 대해 미치는 영향을 조사하였다. 우선, 항력감소율의 변화에 따른 평균속도, 난류강도, 응력, 와도 섭동량 분포의 변화를 조사하여 기존의 문헌결과와 일치함을 확인하였다. $DR=30\%$ 의 동일한 항력감소율을 보이는 유동장에 대해 서로 다른 FENE-P 모델 인자의 효과를 조사하였다. We 수가 작더라도 L 이 큰 경우가 반대의 경우에 비해, 벽면근처에서 ($y^+ < 100$) 폴리머 응력은 더 크고, 레이놀즈 응력은 더 작게 나타났다. 이러한 두 응력의 차이가 균형을 이루어 점성 응력은 두 경우 거의 동일하게 나타났으며, 난류강도의 분포 또한 거의 동일함을 확인하였다. 또한, 본 연구 결과를 바탕으로 Li 등⁽¹⁸⁾이 제안한 항력 감소 예측식을 검증하여 제안된 식은 FENE-P 모델 인자에 따른 항력감소율의 변화 경향을 잘 보여주고 있으나, 다소 낮게 예측함을 확인하였다.

후 기

이 논문은 한국과학기술정보연구원의 지원에 의해 연구되었음 (KSC-2009-S02-0013).

참고문헌

- (1) Toms, B.A., 1948, "Some Observations on the Flow of Linear Polymer Solutions Through Straight Tubes at Large Reynolds Numbers," in *Proc. 1st Int. Congr. Rheol.* North Holland, Amsterdam.
- (2) *Alyeska Pipeline Service Company*. [cited 2010 April 12]; Available from: <http://www.alyeska-pipe.com/>.
- (3) Virk, P.S., Merrill, E.W., Mickley, H.S., Smith, K.A. and Mollo-Christensen, E.L., 1967, "The Toms Phenomenon: Turbulent Pipe Flow of Dilute Polymer Solutions," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 30, pp. 305~328.
- (4) Virk, P.S., 1971, "An Elastic Sublayer Model for Drag Reduction by Dilute Solutions of Linear Macromolecules," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 45, pp. 417~440.
- (5) Warholic, M.D., Massah, H. and Hanratty, T.J., 1999, "Influence of Drag-Reducing Polymers on Turbulence: Effects of Reynolds Number, Concentration and Mixing," *Experiments in Fluids*, Vol. 27, No. 5, pp. 461~472.
- (6) White, C.M. and Mungal, M.G., 2008, "Mechanics and Prediction of Turbulent Drag Reduction with Polymer Additives," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 40, pp. 235~256.
- (7) Adrian, R.J., 2007, "Hairpin Vortex Organization in Wall Turbulence," *Physics of Fluids*, Vol. 19, pp. 041301.
- (8) Robinson, S.K., 1991, "Coherent Motions in the Turbulent Boundary Layer," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 23, No. 1, pp. 601~639.
- (9) Kim, K., Adrian, R.J., Balachandar, S. and Sureshkumar, R., 2008, "Dynamics of Hairpin Vortices and Polymer-Induced Turbulent Drag Reduction," *Physical Review Letters*, Vol. 100, No. 13, pp. 134504.
- (10) White, C.M., Somandepalli, V.S.R. and Mungal, M.G., 2004, "The Turbulence Structure of Drag-Reduced Boundary Layer Flow," *Experiments in Fluids*, Vol. 36, No. 1, pp. 62~69.
- (11) Sureshkumar, R., Beris, A.N. and Handler, R.A., 1997, "Direct Numerical Simulation of the Turbulent Channel Flow of a Polymer Solution," *Physics of Fluids*, Vol. 9, p. 743.
- (12) De Angelis, E., Casciola, C.M. and Piva, R., 2002, "DNS of Wall Turbulence: Dilute Polymers and Self-Sustaining Mechanisms," *Computers and Fluids*, Vol. 31, No. 4-7, pp. 495~507.
- (13) Housiadas, K.D. and Beris, A.N., 2003, "Polymer-Induced Drag Reduction: Effects of the Variations in Elasticity and Inertia in Turbulent Viscoelastic Channel Flow," *Physics of Fluids*, Vol. 15, pp. 2369~2384.
- (14) Min, T., Yoo, J.Y., Choi, H. and Joseph, D.D., 2003, "Drag Reduction by Polymer Additives in a Turbulent Channel Flow," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 486, pp. 213~238.
- (15) Ptasiński, P.K., Boersma, B.J., Nieuwstadt, F.T.M., Hulsen, M.A., Van den Brule, B. and Hunt, J.C.R., 2003, "Turbulent Channel Flow Near Maximum Drag Reduction: Simulations, Experiments and Mechanisms," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 490, pp. 251~291.
- (16) Dubief, Y., White, C.M., Terrapon, V.E., Shaqfeh, E.S.G., Moin, P. and Lele, S.K., 2004, "On the Coherent Drag-Reducing and Turbulence-Enhancing Behaviour of Polymers in Wall Flows," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 514, pp. 271~280.
- (17) Bird, R.B., Armstrong, R.C. and Hassager, O., 1987, *Dynamics of Polymeric Liquids, Vol. 2: Kinetic Theory*. 2nd ed. John Wiley & Sons, New York.

- (18) Li, C.F., Sureshkumar, R. and Khomami, B., 2006, "Influence of Rheological Parameters on Polymer Induced Turbulent Drag Reduction," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 140, No. 1-3, pp. 23~40.
- (19) Sureshkumar, R. and Beris, A.N., 1995, "Effect of Artificial Stress Diffusivity on the Stability of Numerical Calculations and the Flow Dynamics of Time-Dependent Viscoelastic Flows," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 60, No. 1, pp. 53~80.
- (20) Dimitropoulos, C.D., Sureshkumar, R. and Beris, A.N., 1998, "Direct Numerical Simulation of Viscoelastic Turbulent Channel Flow Exhibiting Drag Reduction: Effect of the Variation of Rheological Parameters," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 79, No. 2-3, pp. 433~468.
- (21) Warholic, M.D., Heist, D.K., Katcher, M. and Hanratty, T.J., 2001, "A Study with Particle-Image Velocimetry of the Influence of Drag-Reducing Polymers on the Structure of Turbulence," *Experiments in Fluids*, Vol. 31, No. 5, pp. 474~483.
- (22) Housiadas, K.D. and Beris, A.N., 2004, "Characteristic Scales and Drag Reduction Evaluation in Turbulent Channel Flow of Nonconstant Viscosity Viscoelastic Fluids," *Physics of Fluids*, Vol. 16, pp. 1581~1586.
- (23) Dean, R.B., 1978, "Reynolds Number Dependence of Skin Friction and Other Bulk Flow Variables in Two-Dimensional Rectangular Duct Flow," *Journal of Fluid Engineering*, Vol. 100, pp. 215~223.
- (24) Kim, K., Li, C.F., Sureshkumar, R., Balachandar, S. and Adrian, R.J., 2007, "Effects of Polymer Stresses on Eddy Structures in Drag-Reduced Turbulent Channel Flow," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 584, pp. 281~299.