

시간에 대해 감속하는 난류 파이프 유동에 관한 연구

정원관* · 이재화†

Turbulence in temporally decelerating pipe flows

Wongwan Jeong and Jae Hwa Lee

Abstract. Direct numerical simulations (DNSs) of turbulent pipe flows with temporal deceleration were performed to examine response of the turbulent flows to the deceleration. The simulations were started with a fully-developed turbulent pipe flow at the Reynolds number, $Re_D = 24380$, based on the pipe radius and the laminar centerline velocity, and three different constant temporal decelerations were applied to the initial flow with varying $dU/dt = -0.001274$, -0.00625 and -0.025 . It was shown that the mean flows were greatly affected by temporal decelerations with downward shift of log law, and turbulent intensities were increased in particular in the outer layer, compared to steady flows at a similar Reynolds number. The analysis of Reynolds shear stress showed that second- and fourth-quadrant Reynolds shear stresses were increased with the decelerations, and the increase of the turbulence was attributed to enhancement of outer turbulent vortical structures by the temporal decelerations.

Keywords : Direct Numerical Simulation(직접수치모사), Turbulent Pipe Flows(파이프 난류 유동), Temporal Deceleration(시간적 감속)

1. 서 론

비정상 난류 유동은 유압기기, 열교환기 등의 공학적 응용 가치가 높을 뿐만 아니라, 난류 유동에 대한 이해도를 증가하는데 있어 큰 의의가 있다.

큰 중요성을 가진 만큼 많은 실험적, 수치적 연구가 많이 진행되어 왔는데, 주기적으로 맥동하는 난류 파이프 유동(Mizushima 등⁽¹⁾, Ramaprian and Tu⁽²⁾, Shemer 등⁽³⁾), 그리고 난류 채널 유동(Tardu 등⁽⁴⁾, Scotti and Piomelli⁽⁵⁾⁽⁶⁾)의 경우 진동수와 평균 유량의 변화에 대한 난류특성 변화에 대한 연구가 이루어져 왔다. 비주기적 비정상 난류 유동에 대한 Kataoka 등⁽⁷⁾의 연구는 레이놀즈 수가 증가함에 따라 유동이 층류에서 난류로 전이되는 상태가 짧아짐이 보여주었으며, Maruyama 등⁽⁸⁾은 실험을

통해 난류의 지연과 벽면 근처에서 새로 생성된 난류가 파이프의 중심으로 전파되는 것을 확인했다. He & Jackson⁽⁹⁾은 Laser Doppler Velocimetry를 이용하여 파이프에서 난류 유동이 가속, 감속하는 연구를 진행하였으며, 난류의 생성과 난류 에너지 재분배, 그리고 반경방향의 난류 에너지 전파에서 지연이 발생하고, 난류에너지의 전파는 초기 유동 조건에 의해 결정된다고 보고하였다. Greenblatt & Moss⁽¹⁰⁾는 충분히 큰 압력구배를 가지는 파이프 난류 유동에서, 난류 통계량 분석을 통해 유동을 크게 4가지의 상태로 구분하였으며, 이전 연구에서는 확인되지 않았던 wake의 재생성을 보여주었다.

Jung & Chung⁽¹¹⁾은 시간에 대해 가속하는 파이프 난류 유동에 대해 Large-Eddy-Simulation(LES)를 수행하여, He & Jackson의 결과와 일관되게 난류에너지의 전파에서

† 책임저자의 소속 및 연락처

Mechanical and Nuclear Engineering, UNIST, UNIST-gil 50, Ulsan, 689-798
E-mail : jhlee06@unist.ac.kr

* 저자 1의 소속

Mechanical and Nuclear Engineering, UNIST, UNIST-gil 50, Ulsan, 689-798

delay effect가 나타남을 확인하였고, 시간에 대해 가속하는 경우와 공간에 대해 가속하는 경우 난류통계량에서 유사한 특징이 나타나는 것을 확인하였다.

앞서 언급되었던 비정상 난류 유동의 경우, 대부분의 연구가 시간에 대해 가속하는 난류 유동에 국한되어 진행되었으며, 감속하는 유동은 대부분 난류 경계층에서 역압력 구배(Adverse Pressure Gradient)를 통해 확인되었다. 난류 경계층에서 역압력 구배가 발생하는 경우에 대해 몇 가지의 중요한 특징이 알려져 있는데, 이는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 큰 역압력 구배가 발생할 때, 평균 속도 분포에서 큰 wake 영역이 나타나고, 벽면 근처에서 난류 운동 에너지가 감소한다. Nagano 등⁽¹²⁾은 벽면 근처에서의 난류 운동 에너지 감소는 난류 운동 에너지의 생성이 감소하기 때문이라고 제안하였다.

2) 역압력 구배가 발생할 경우, 일반적으로 알려진 평균 속도 분포의 logarithmic law가 아랫방향으로 감소한 상태에서 나타난다.

본 연구에서는 시간적으로 감속하는 파이프 난류 유동에 대해 직접수치모사(direct numerical simulation)를 수행하여 시간 감속에 따른 난류 통계량의 변화를 정상상태의 난류유동과 비교, 분석하였다. 시간 감속은 세 가지 서로 다른 $dU/dt = -0.001274, -0.00625, -0.025$ 을 사용하였으며, 초기 조건은 완전 발달된 난류파이프 유동을 별도의 계산을 통해서 부과하였고, 층류 중심속도와 파이프의 반지름으로 무차원화된 레이놀즈 수(Re_D)는 24,380이다. 직접수치모사를 통해 얻은 난류유동장을 통해, 평균 속도 분포, 난류섭동량, 그리고 난류전단응력의 변화를 조사하였으며, 그 결과를 역압력 구배가 존재하는 난류경계층 유동, 그리고 정상상태의 난류유동과 비교 분석하여 시간에 대해 감속하는 난류유동의 특성을 확인하였다. 난류전단응력의 보다 자세한 분석을 위해 quadrant 분석을 진행하여 시간 감속을 변화에 대한 Q1~Q4 events의 변화를 조사하였고, 스윙 강도의 가시화를 통해 난류와 구조의 변화를 살펴보았다.

2. 수치적 방법

본 연구에서 사용된 무차원화 된 3차원의 비정상 비압축성 Navier-Stokes 방정식과 연속 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \nabla^2 u_i \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

여기서 x_i 는 원통 좌표를 나타내고, u_i 는 각각의 속도 성분들을 나타낸다. 모든 변수들은 층류중심속도 (U_0)와 파이프의 반지름 (R)으로 무차원화 되었으며 Re 는 레이놀즈 수를 나타낸다. 지배방정식은 Kim 등⁽¹³⁾에 의해 제시된 부분 단계법(fractional step method)을 사용하여 속도와 압력 항으로 분리하였다. 지배방정식의 모든 항은 시간과 공간에 대해 각각 2차의 중심차분법과 Crank-Nicolson 방법을 이용하여 완전 내재적 방법으로 차분하였다. 이를 통해 얻어진 행렬식은 계수행렬의 근사적인 분해(LU decomposition)를 통해서 속도와 압력으로 분리하였으며 대류항의 내재적 처리로 인해 결합된 속도 성분들 또한 근사적인 분해를 통해 각각 분리하였다. 본 연구에서는 시간에 대한 감속을 구현하기 위하여 시간에 따라 레이놀즈 수를 일정한 비율로 감소시켰다. $dU/dt = -0.025$ 에 대해서는 층류 중심속도와 파이프의 반지름으로 무차원화 된 감속 구간($T = \frac{tU_0}{R}$)을 0.01으로 설정하였으며, $dU/dt = -0.00625, -0.001274$ 에 대해서는 감속 구간을 0.008로 설정하였다. 또한, 감속이 끝날 때의 최종 레이놀즈 수는 12,000이다.

본 연구에서 사용된 계산 영역은 주 유동 방향, 벽 수직 방향 그리고 횡 방향으로 각각 $(L_x, L_y, L_z) = (5R, R, 2\pi)$ 이며, 격자수는 (427, 279, 769)이다. 주 유동 방향과 횡 방향으로 균일 격자계(uniform grid)를 사용하였고, 벽면의 수직 방향으로는 쌍곡선탄젠트함수(hyperbolic tangent function)를 이용한 비 균일 격자계(non-uniform grid)를 사용하였다. 벽면에서는 점착조건(no-slip condition)을 적용하였고, 주 유동 방향과 횡 방향으로는 주기적 경계조건(periodic boundary condition)을 사용하였다. 모든 inner scaled 통계량은 국소의 벽면마찰속도(local wall-friction velocity(u_τ)), 그리고 파이프의 반지름(R)으로 무차원화 되었고, outer scaled 통계량은 층류 중심속도 (U_0)와 파이프 반지름(R)으로 무차원화 되었다.

3. 연구 결과

3.1 난류 통계량

Fig. 1는 시간에 대해 감속할 때 dU/dt 에 따른 평균속도 분포의 변화를 정상 상태의 난류 유동과 함께 나타낸다. 모

든 dU/dt 에 대해서 정상 상태의 난류 유동에 비해 큰 wake 영역이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 dU/dt 에 상관없이 viscous sublayer($y^+ < 5$)에서 linear law ($U^+ = y^+$)가 만족하는 것을 알 수 있다. 뿐만 아니라 dU/dt 가 증가함에 따라 평균 속도가 logarithmic law에 대해 아래로 옮겨가는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 Lee & Sung⁽¹⁴⁾이 역압력 구배가 존재하는 난류 경계층에서 확인한 결과와 일치한다. 하지만, dU/dt 가 -0.025 일 때, logarithmic law에 대해 위로 옮겨가는 것을 알 수 있는데, 이는 큰 감속으로 인해 u_r 가 매우 작아짐으로써 나타나는 결과이다.

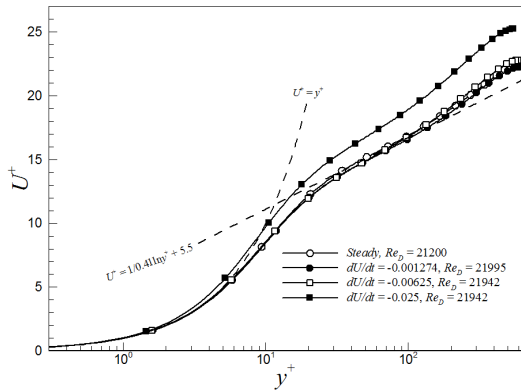


Fig. 1. Inner scaled mean velocity profiles with increasing dU/dt at a similar Reynolds number.

Fig. 2는 dU/dt 의 변화에 따른 난류섭동량 (Root-mean-square of velocity fluctuations)의 변화를 inner scale로 나타낸다. 역압력 구배를 받는 난류 경계층 유동과 마찬가지로 dU/dt 가 증가함에 따라 주 유동 방향, 벽면의 수직 방향, 그리고 횡 방향에 대한 난류섭동량이 모두 증가함을 알 수 있다. 또한, 역압력 구배가 발생하는 난류 경계층과 유사하게 inner region에서 난류섭동량이 dU/dt 의 변화에 따라 일치하지 않는 경향이 나타났다. 하지만, 역압력 구배가 존재하는 난류 경계층에서 크게 발생하는 바깥영역의 에너지 peak에 비해, 시간에 대해 감속하는 파이프 난류유동의 경우 바깥영역의 에너지 peak이 상대적으로 작게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 시간에 대해 감속할 때, 바깥영역의 큰 스케일의 구조가 역압력 구배의 난류경계층에 비해 적게 발생하기 때문에 나타나는 결과이다.

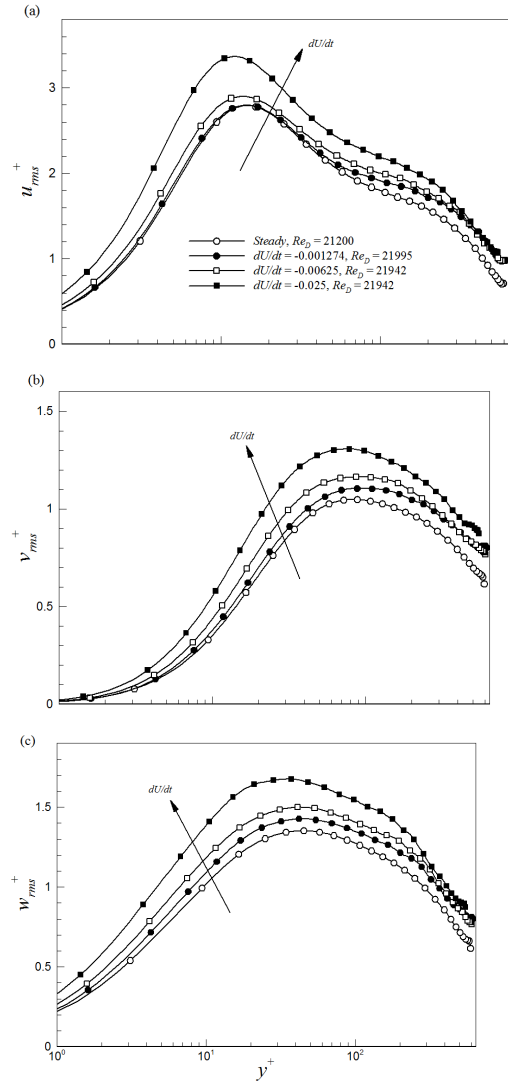


Fig. 2. Inner scaled root-mean-square velocity fluctuations with increasing dU/dt at a similar Reynolds number.

Fig. 3은 dU/dt 에 따른 난류전단응력(Reynolds shear stress)의 분포를 inner scale로 나타낸 그림이다. 벽 수직 방향과 횡 방향의 난류섭동량 변화와 일관되게, 난류전단응력 역시 dU/dt 가 증가함에 따라 증가하는 것을 확인할 수 있다. 특히, 바깥 영역에서 난류전단응력이 크게 증가하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 난류구조의 활발한 생성으로 난류에너지가 크게 증가한 결과로 해석된다.

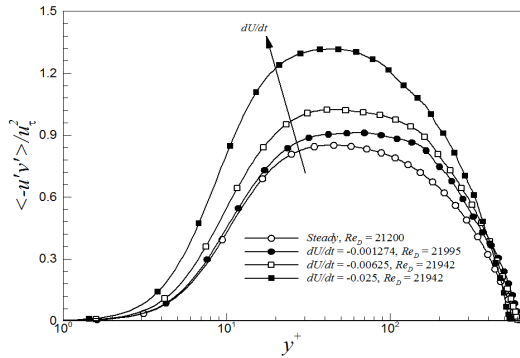


Fig. 3. Inner-scaled Reynolds shear stress profiles for $dU/dt = 0$ (steady), -0.001274 , -0.00625 , and -0.025 at a similar Reynolds number.

3.2 Quadrant 분석

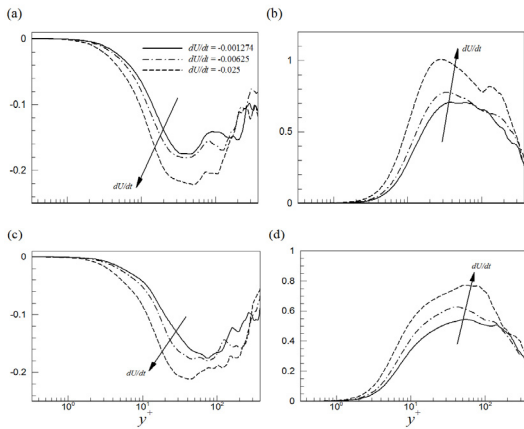


Fig. 4. Quadrant analysis for Reynolds shear stress during deceleration with varying of dU/dt at a similar Reynolds number. (a) Q1 event, (b) Q2 event, (c) Q3 event and (d) Q4 event.

난류전단응력에 영향을 미치는 난류구조의 성분을 확인하기 위하여 Quadrant 분석을 수행하여 난류에너지의 생성과 소멸에 대해 조사하였다. Quadrant 분석은 난류전단응력을 u' 와 v' 의 부호에 따라 4개의 영역으로 나누어 진행된다. Q1 event($u' > 0, v' > 0$)는 빠른 속도의 유체에 의한 바깥방향 운동을 나타낸다. Q2 event($u' < 0, v' > 0$)는 느린 속도의 유체에 의한 바깥방향 운동이며, 이는 ejection events를 나타낸다. Q3 event($u' < 0, v' < 0$)는 느린 속도의 유체에 의한 안쪽방향 운동이다. Q4 event($u' > 0, v' < 0$)는 고속 유체의 유입이며, 이는 sweep events를 나타낸다. 따

라서 Q1 event와 Q3 event는 음의 난류전단응력을 만들어내고, Q2 event와 Q4 event는 양의 난류전단응력을 만들어낸다.

Fig. 4는 dU/dt 의 증가에 대한 난류전단응력에 기여하는 Q1~Q4 events의 변화를 나타낸다. dU/dt 의 변화에 따라 Q1 event와 Q3 event의 변화는 거의 없는 반면에, Q2 event와 Q4 event가 크게 증가하는 것을 확인할 수 있고, 이는 난류전단응력의 변화가 Q2 event와 Q4 event의 변화에 많은 영향을 받는다는 것을 의미하며, 시간에 대해 감속할 때 정상 상태의 난류 유동에 비해 더 큰 난류전단응력이 발생하는 것을 의미한다.

3.3 스윙 강도

시간에 대해 유동이 감속함에 따라 난류외구조의 변화를 살펴보기 위해 스윙 강도(λ_{ci})의 등위면을 가시화하였다. λ_{ci} 는 속도 기울기 텐서의 복소 켈레에 대한 고유값의 허수 부분을 나타낸다. 사용된 $\lambda_{ci}R/U_{cl}$ 의 contour level은 2.1이다. Fig. 5는 dU/dt 가 -0.001274 , 그리고 -0.025 일 때 전체 도메인에 대한 스윙 강도를 나타낸 그림이다. Fig. 5를 통하여 역압력 구배가 존재하는 난류 경계층 유동의 연구결과와 일관되게, dU/dt 가 증가함에 따라 난류 외구조가 활발하게 발생하는 것을 확인할 수 있고, 이것은 앞서 언급한 난류섭동량 및 난류전단응력의 증가와 일관되는 결과이다. 또한, 난류 경계층의 바깥 영역에서 큰 스케일의 구조가 생성되는 것은 난류전단응력 생성과 관련이 있다는 이전 연구 결과(Robinson⁽¹⁵⁾, 1991)와 일치한다.

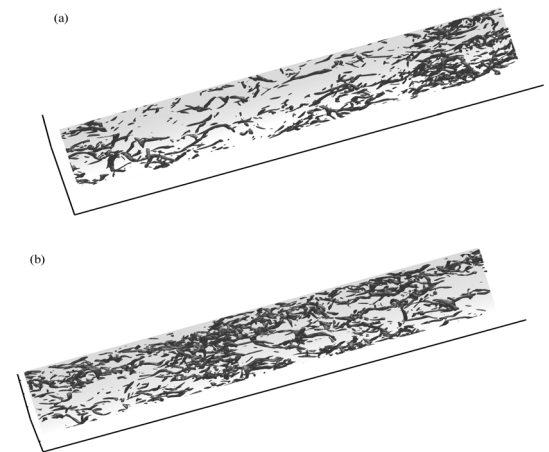


Fig. 5. Vortical structures for (a) $dU/dt = -0.001274$ and (b) $dU/dt = -0.025$ at a similar Reynolds number.

4. 결론

파이프에서 시간에 대해 감속하는 난류 유동의 난류 통계량의 변화를 조사하기 위하여 직접수치모사를 수행하였다. 시간감속율(dU/dt) 변화에 따른 평균속도분포, 난류섭동량 및 난류전단응력의 조사를 통하여, 시간에 대해 감속하는 난류유동의 경우, 역압력 구배가 존재하는 난류경계층유동과 유사하게 dU/dt 가 증가함에 따라 평균속도분포가 정상상태의 logarithmic law보다 아래로 내려가고, 난류섭동량과 난류전단응력이 증가하는 것을 확인하였다. 하지만, 주 유동 방향 속도의 난류섭동량에서 나타나는 바깥 영역의 에너지 peak은 시간에 대해 감속하는 경우, 크게 나타나지 않는데 이것은 바깥 영역에서 활발해지는 큰 스케일의 난류구조가 충분히 생기지 않기 때문에 나타나는 결과이다. 감속에 따른 난류전단응력의 증가는 Q2와 Q4 events의 증가에서 기인하는 것을 확인하였고, 이러한 현상은 dU/dt 에 따른 스윙 강도의 가시화를 통해 난류 와구조의 활발한 생성에서 비롯되는 것을 확인하였다.

REFERENCE

- 1) Mizushima, T., Maruyama, T., Shiozaki, Y., 1973, "Pulsating turbulent flow in a tube," J. Chemical Engineering Japan., vol.6, pp.487-494.
- 2) Ramaprian, B.R., Tu, S.W., 1983, "Fully developed periodic turbulent pipe flow. Part 2: The detailed structure of the flow.," J. Fluid Mech., vol.137, pp.59-81.
- 3) Shemer, L., Wygnanski, I., Kit, E., 1985. "Pulsating flow in a tube," J. Fluid Mech., vol.153, pp.313-337.
- 4) Tardu, S.F., Binder, G., Blackwelder, R.F., 1994. "Turbulent channel flow with large amplitude," J. Fluid Mech., vol.267, pp.109-151.
- 5) Scotti, A., Piomelli, U., 2001. "Numerical simulation of pulsating turbulent channel flow," Phys. Fluids., vol.13, pp.1367-1384.
- 6) Scotti, A., Piomelli, U., 2002. "Turbulence models in pulsating flows," AIAA Journal., vol.40, pp.537-543.
- 7) Kataoka, K., Kawabata, T., Miki, K., 1975. "The start-up response of pipe flow to a step change in flow rate," J. Chemical Engineering Japan., vol.8 (4), pp.266-271.
- 8) Maruyama, T., Kuribayashi, T., Mizushima, T., 1976. "The structure of the turbulence in transient flows," J. Chemical Engineering Japan., vol.9, pp.431-439.
- 9) He, S., Jackson, J.D., 2000. "A study of turbulence under conditions of transient flow in a pipe," J. Fluid Mech., vol.408, pp.1-38.
- 10) Greenblatt, D., Moss, E.A., 2004. "Rapid temporal acceleration of a turbulent pipe flow," J. Fluid Mech., vol.514, pp.65-75.
- 11) Jung S.Y., Chung Y.M., 2012. "Large-Eddy simulation of accelerated turbulent flow in a circular pipe," Int. J. Heat and Fluid Flow., vol.33, pp.1-8.
- 12) Nagano, Y., Tagawa, M., Tsuji, T., 1993. "Effects of adverse pressure gradients on mean flows and turbulence statistics in a boundary layer," In: Durst, F., Friedrich, R., Launder, B.E., Schmidt, F.W., Schumann, U., Whitelaw, J.H. (Eds.), Turbulent Shear Flows, vol.8, Springer, Berlin, pp.7-21.
- 13) Kim, K., Baek, S.-J., Sung, H.J., 2002. "An implicit velocity decoupling procedure for the incompressible Navier-Stokes equations," Int. J. for Numerical Methods in Fluids., vol.38 (2), pp.125-138.
- 14) Lee J.H., Sung H.J., 2008. "Effects of an adverse pressure gradient on a turbulent boundary layer," Int. J. Heat and Fluid Flow., vol.29, pp.568-578.
- 15) Robinson, S.K., 1991. "Coherent motions in the turbulent boundary layer," Ann. Rev. Fluid Mech., vol.23, pp.601-639.