

단일 주파수 가진을 이용한 원형 제트의 난류 억제

박정영*, 최해천**

Suppression of Turbulence in a Circular Jet Using a Single Frequency Excitation

Jeongyoung Park* and Haecheon Choi**

Key Words : Turbulence suppression (난류 억제), Circular jet (원형 제트), Large eddy simulation (큰에디모사), Single frequency excitation (단일 주파수 가진), Strouhal number (스트로울 수)

Abstract

Large eddy simulation of a circular jet at the Reynolds number of 10000 is performed to investigate turbulence suppression effect with single frequency excitation at the non-dimensional frequency of 0.017. Instantaneous flow fields show that, with excitation, naturally occurring energetic vortices are suppressed through earlier saturation and breakdown of the shear layer vortices into fine grained turbulence. Due to the excitation, the Reynolds stresses are larger for the excited case near the jet and turbulence suppression begins afterward. The Reynolds normal stresses show largest suppression in the shear layer near the jet and in the centerline further downstream, while the Reynolds shear stress shows largest suppression in the shear layer at all the downstream locations.

1. 서론

원형 제트는 자유 전단 유동의 대표적인 유동으로 혼합, 가열/냉각, 프린팅, 추진 등이 필요한 곳에 널리 쓰이고 있을 뿐만 아니라 단순한 기하학적 형상으로 말미암아 난류 자유 전단 유동 연구의 주요한 주제로 수많은 연구가 진행되어 왔다. 특히 제트 출구에서 주기적인 가진을 함으로써 하류에서 제트 전단층의 변화를 얻어내려는 많은 연구들이 진행되어 왔으며 이러한 가진의 영향으로 난류, 혼합, 소음을 증가[1] 또는 감소[2, 4] 시키는 연구가 진행되어 왔다.

Zaman & Hussain[2]은 이전의 연구들에서 관찰된 적이 있는 난류 감소가 각기 상이한 주파수($St_D = fD/U_j$)에서 발생하는 것을 관찰하고 난류 감소와 관련된 주파수의 경우 제트 지름이 아닌 제트 출구에서의 운동량 두께로 무차원화한 주파수($St_\theta = f\theta/U_j$)가 적절한 인자임을 확인하였다. 여기서 f 는 가진 주파수, D 는 제트 지름, θ 는 제트 출구에서의 운동량 두께, U_j 는 제트 출구 속도이다. 음향 가진과 리본을 이용한 가진을 다양한 전단 유동에 적용한 그들의 실험에서 $0.01 < St_\theta < 0.02$ 에서 난류가 감소하였으며 최대 난류 감소는 $St_\theta = 0.017$ 에서 발생하는 것으로 관찰하였다. 이 주파수는 안정성이론에서 밝혀진 최대 성장율을 가지는 주파수와 일치하는 것으로 나타났다 [3].

제트에서의 난류 감소는 음향 가진이나 리본 가진처럼 전단층에 에너지를 능동적으로 가해주는 경우 뿐 만 아니라 링을 제트 출구 주위에 수동적으로 설치함으로써 얻어질 수도 있다. Tong & Warhaft[4]와 Rajagopalan & Antonia[5]는 각각 원형 제트와 사각 단면 제트의 출구 전단층에 얇은 링과 실린더를 설치하여 난류가 감소함을 관찰하였다.

본 연구에서는 큰 에디 모사를 이용하여 $St_\theta = 0.017$ 로 가진한 경우에 원형제트에서 발생하는 난류 감소에 대해서 연구하고자 한다.

2. 수치해석방법

본 연구는 실린더 좌표계에서 동적 모델을 사용하는 큰 에디 모사 지배 방정식을 차분하여 수치 해석하였다. 시간에 대한 차분 방법은 Akselvoll & Moin[6]과 같이 전체 영역을 두 개의 영역으로 나누어 각각의 영역에 대하여 한 방향에 대해서만 내재적인 2차 정확도의 Crank-Nicolson 방법을 적용하였으며, 다른 방향에 대해서는 외재적인 3차 정확도의 RK-3 방법을 적용하였다. 내재적인 방법을 적용하는 방향은 중심에서 가까운 지역은 원주 방향으로, 중심에서 먼 지역은 반경 방향으로 하였다. 또한, 공간에 대한 차분 방법은 2차 정확도의 중심 차분법을 이용하였다.

Fig. 1은 본 연구에 사용된 계산영역을 좌표축과 함께 나타

* 서울대학교 정밀기계설계공동연구소 난류제어연구단, parkjy@euler.snu.ac.kr

** 서울대학교 기계항공공학부, choi@socrates.snu.ac.kr

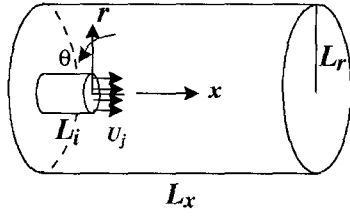


Figure 1. Schematic diagram of the computational domain.

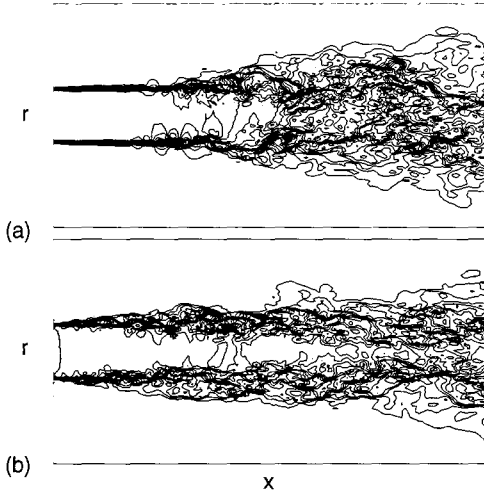


Figure 2. Instantaneous streamwise velocity: (a) undisturbed flow; (b) disturbed flow. Contours are from 0.05 to 1.2. Negative contours are dashed and the plot domain is $0 < x/D < 8$ and $-2 < r/D < 2$.

넌 그림이다. 계산 영역의 크기는 $L_i=3.6D$, $L_x=26D$, $L_r=7D$ 이다. 제트 출구 이전의 계산 영역은 제트 출구 근처에서 주위 유체가 유입되는 것을 실제 현상과 비슷하도록 하기 위하여 필요한 영역이다. 격자의 개수는 유선방향(x), 반경방향(r), 원주방향(θ)으로 각각 288, 96, 96개를 사용하였으며 제트 출구의 속도를 나타내는데 30개의 반경방향 격자를 사용하였다. 반경방향의 격자는 제트 출구 근처에 존재하는 전단층의 급격한 구배를 계산하기 위하여 hyperbolic tangent 함수를 두 개 사용하여 전단층에 격자를 조밀하게 분포시켰다.

유동장의 출구와, 제트 파이프를 제외한 입구에서는 Neumann 조건($\partial u_i / \partial x = 0$)을 사용하였으며, 측면 경계($r=L_r$)에서는 $\partial u_r / \partial r = 0$ 와 $\omega_\theta = \omega_x = 0$ 을 사용하였다. 이러한 경계조건은 측면 경계와 입구 경계를 통해서 주위 유체가 유입되는 것을 가능하게 하였다. 계산 영역 안으로 들어온 제트 파이프 외벽에서는 점착 조건을 사용하였으며 제트 출구에서는 일반적으로 실험에서 관찰되는 속도 분포처럼 벽에서 Blasius 분포를 가지는 top-hat 형태의 속도 분포를 주었다. 이 때 $D/\theta=120$ 이며 Blasius 속도 분포의 경계층 내에는 9개의 격자를 분포시켰다.

레이놀즈 수는 제트 속도와 제트 출구 지름으로 무차원화하였을 때 $Re=U_j D/\nu=10000$ 이며, 모든 계산은 시간 간격을

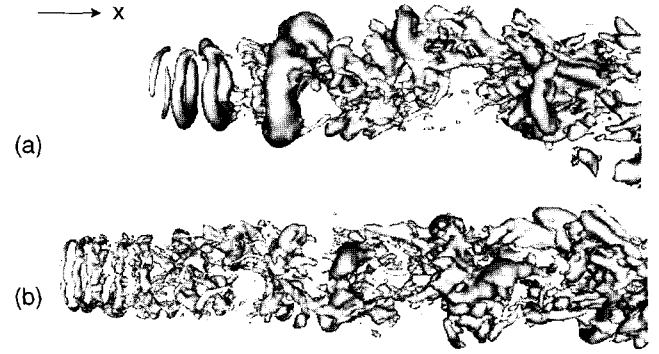


Figure 3. Instantaneous vortical structures up to $x/D=8$ (iso-surfaces of $p=-0.03$): (a) undisturbed flow; (b) disturbed flow.

$\Delta t=0.02D/U_j$ 로 하였고, 이 때 CFL 수는 1.0 안팎의 값을 보였다.

가진은 \sin 함수의 형태로 유선 방향 성분에만 더해 주었으며 가진 주파수는 $St_\theta=f\theta/U_j=0.017$, 가진의 크기(A)는 제트 속도의 5%로 하였다. 가진하지 않을 경우의 제트 출구 속도를 $U_0(r)$ 이라고 할 때 가진하는 경우의 제트 출구 속도 분포 $U(r)$ 은 다음과 같다.

$$U(r) = U_0(r)[1 + A \sin(2\pi f t)] \quad (1)$$

3. 결과

Fig. 2는 순간 유동장의 유선 방향 속도를 나타낸 것으로 가진으로 인한 전단층의 변화가 확연하게 나타나고 있다. 가진하지 않은 자유 전단층의 경우 Kelvin-Helmholtz 불안정성이 점차 커지면서 포화상태에 이르면 보텍스 링으로 형성(roll-up)되며 이러한 보텍스 링의 형성은 고유한 주파수($St_\theta=0.012$)를 가지게 된다. 보텍스 링은 하류 방향으로 진행해 가면서 병합 과정을 거치면서 그 크기가 점점 커지게 되고 병합을 통한 보텍스의 성장은 천이를 거치면서 작은 크기의 구조를 가지는 난류로 붕괴를 겪게 된다[7]. Fig. 2에서 가진하지 않은 경우는 매우 얇은 전단층이 제트 출구로부터 형성되어 있으며 $x/D=1.5$ 에서부터 전단층에 굴곡이 관찰되고 있고 이러한 굴곡은 보텍스의 형성(roll-up)과 일치한다(Fig. 3). 보텍스의 병합으로 인해 전단층은 더욱 두꺼워지고 포텐셜 코어가 끝나는 지점($x/D=4$)에서부터 난류로의 붕괴를 관찰할 수 있다. 반면에 가진을 한 경우는 제트 출구에서부터 $St_\theta=0.017$ 의 주파수로 보텍스 링이 형성되어(Fig. 3) 전단층이 더욱 두꺼워지지만, 형성된 보텍스가 가진하지 않은 경우의 보텍스 만큼 성장하지 못하고 포화상태에 이르러 난류로 천이를 하게 된다. 따라서 그림에 나타나는 것처럼 $x/D=4$ 이후에는 가진하지 않은 경우의 유동장이 더 복잡한 형태를 띠게 된다.

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 중심선에서의 유선방향 평균 속도(U_c)와 난류 강도를 나타낸 것이다. 평균 속도의 경우 $x/D > 10$ 이후의 상사 상태에 이른 속도 분포를 상류 방향으로 외삽해서 구할 수 있는 가상 원점(virtual origin)의 위치가 가진한 경우 약 $2D$ 정도 하류 방향으로 옮겨진 것을 알 수 있다. 난

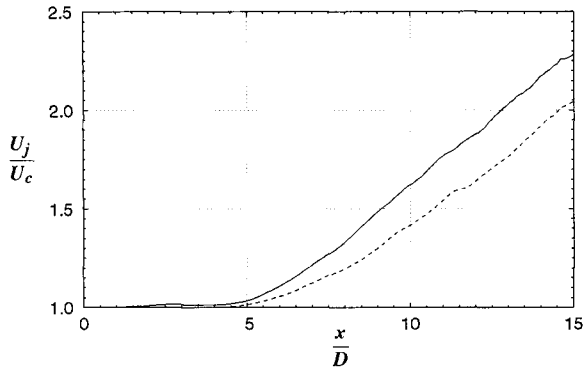


Figure 4. Mean streamwise velocity along the centerline for the undisturbed flow (solid) and disturbed flow (dashed).

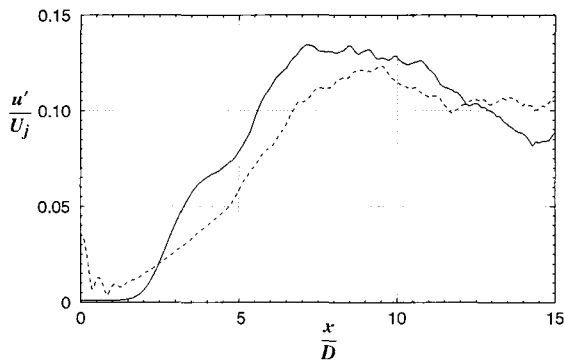


Figure 5. Rms streamwise velocity fluctuations along the centerline for the undisturbed flow (solid) and the disturbed flow (dashed).

류 강도의 경우 출구 근처에서는 가진의 영향으로 가진한 경우의 값이 크게 나타나지만 $x/D=2.5$ 이후부터는 가진하지 않은 경우의 난류 강도가 더 크게 나타나고 있다. 최대값을 나타내는 위치도 $x/D=7$ 에서 9.5로 하류로 옮겨졌으며 최대값은 가진의 영향으로 8% 정도 감소하였다. Zaman & Hussain[2]의 경우는 9%의 감소를 나타내 본 연구와 비슷한 값을 보인 반면에 링을 이용한 Tong & Warhaft[4]의 경우는 30%의 난류 감소를 얻었다. $x/D=12$ 부터는 다시 난류 강도의 역전 현상이 관찰되는데 이러한 현상은 기존의 실험에서도 관찰된 바 있으며, 중심선에서의 속도로 부차원화하여 상대적인 값 (u'/U_c)을 비교할 경우 이러한 역전 현상은 나타나지 않는다[4].

Fig. 6과 Fig. 7은 $x/D=2$ 와 $x/D=7$ 에서의 유선 방향 평균 속도와 난류 강도를 반경방향으로 나타낸 것이다. $x/D=2$ 에서는 전단층의 두께가 가진한 경우가 더 큰데 비해서 $x/D=7$ 에서는 그 반대로 나타나고 있다. 난류 강도의 경우 중심선에서의 변화가 전체 반경 방향의 변화와 일치하지만 $x/D=2$ 에서는 전단층에서의 난류 증가량이 가장 큰 반면, $x/D=7$ 에서는 중심선의 난류 감소량이 가장 큰 것으로 나타났다. 중심선에서의 난류 감소가 최대로 나타나는 것은 Tong & Warhaft[4]의 결과와 일치하는 것이다.

Fig. 8은 가진으로 인한 유선방향, 반경방향 난류 강도와 레이놀즈 전단 응력의 변화를 나타낸 것이다. 가진하지 않은 경우

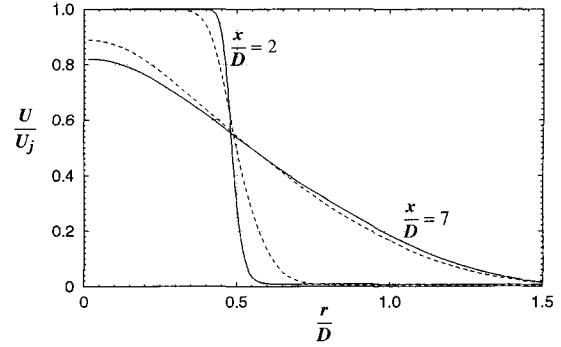


Figure 6. Mean streamwise velocity profiles for the undisturbed flow (solid) and the disturbed flow (dashed) at $x/D=2$ and $x/D=7$.

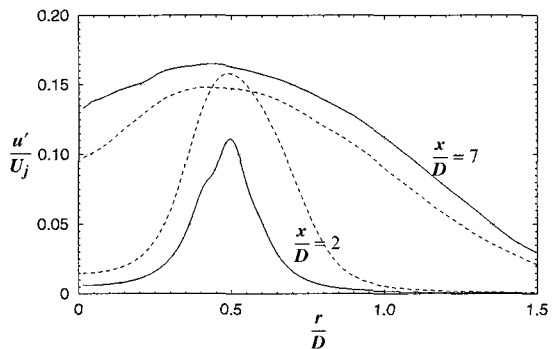


Figure 7. Rms streamwise velocity profiles for the undisturbed flow (solid) and the disturbed flow (dashed) at $x/D=2$ and $x/D=7$.

의 값에서 가진한 경우의 값을 빼서 나타낸 것으로 양의 값으로 나타난 부분이 난류가 감소한 영역이 된다. 모든 난류량에 있어서 $x/D \approx 2$ 까지는 가진한 경우의 값들이 전체 반경방향을 통해서 더 큰 값을 가지며 그 이후에서는 차츰 전단층부터 시작하여 전체 반경방향으로 가진하지 않은 경우의 값들이 더 큰 값을 가지는 것을 관찰할 수 있다. 유선 방향, 반경방향 난류 강도의 경우, 가진으로 인한 변화는 전단층을 따라서 가장 크게 나타나다가 하류로 진행해 가면서 $x/D=6$ 정도부터는 중심선에서 가장 크게 나타나고 있다. 반면, 레이놀즈 전단 응력의 경우에는 그림에서 나타난 $x/D=8$ 까지의 영역을 포함하는 전체 계산 영역에서 전단층에서 가장 변화가 큰 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 큰에디모사를 이용하여 $St_\theta=0.017$ 로 가진한 경우 원형 제트에서 발생하는 난류 억제에 대하여 연구하였다. 가진의 영향으로 제트 출구 근처에서 더 빨리 전단층이 포화되어 보텍스 링이 형성되고, 더 빨리 난류로의 천이가 일어나게 되어 더 큰 보텍스 링으로의 성장이 억제되기 때문에 $x/D=2.5$ 이후에서는 가진하지 않은 경우에 비해서 난류가 감소함을 관찰하였다. 또한 가상 원점이 하류로 이동하는 것과 전단층 두께의 변화를 살펴보았다. 유선 방향, 반경방향 난류 강도의 경우 출구

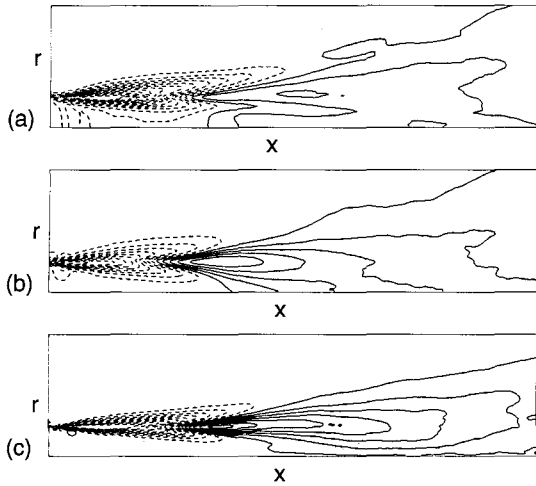


Figure 8. Changes in the Reynolds stresses due to excitation: (a) contours of $u'_{un}-u'_{dis}$ from -0.17 to 0.03; (b) contours of $v'_{un}-v'_{dis}$ from -0.13 to 0.07; (c) contours of $u'v'_{un}-u'v'_{dis}$ from -0.01 to 0.007. Here, 'un' and 'dis' denote the undisturbed and disturbed flows, respectively. Negative contours are dashed and the plot domain is $0 < x/D < 8$ and $0 < r/D < 2$.

근처에서는 전단층을 따라서 가장 많이 변화하지만 하류로 진행해 가면서 중심선에서의 난류 감소량이 가장 커지는 것을 관찰하였다. 반면에 레이놀즈 전단응력은 전단층에서 항상 변화가 큰 것으로 나타났다.

후기

본 연구는 과학기술부 창의적연구진흥사업 지원 하에 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] S. C. Crow and F. H. Champagne, Orderly structure in jet turbulence, *J. Fluid Mech.*, 48 (1971), 547.
- [2] K. B. M. Q. Zaman and A. K. M. F. Hussain, Turbulence suppression in free shear flow by controlled excitation, *J. Fluid Mech.*, 103 (1981), 133
- [3] A. Michalke, On spatially growing disturbances in an inviscid shear layer, *J. Fluid Mech.*, 23 (1965), 521
- [4] C. Tong and Z. Warhaft, Turbulence suppression in a jet by means of a fine ring, *Phys. Fluids*, 6 (1994), 328.
- [5] S. Rajagopalan and R. A. Antonia, Turbulence reduction in the mixing layer of a plane jet using small cylinders, *Exp. Fluids*, 25 (1998), 96.
- [6] K. Akselvoll and P. Moin, Large eddy simulation of turbulent confined coannular jets and turbulent flow over a backward facing step. Report No. *TF-63* (1995), Thermoscience Division, Department of Mechanical Engineering, Stanford University, Stanford, CA.
- [7] C.-M. Ho and P. Huerre, Perturbed free shear layers, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 16 (1984), 365.