

동심원관내에서 초음파가진에 의한 제트유동의 난류증진에 관한 연구

A Study on the Turbulence Enhancement of Jet Flow by the Ultrasonic Forcing in a Coaxial Circular Pipe

주은선 · 이영호 · 송민근 · 이상범 · 손승우

E. S. Ju, Y. H. Lee, M. G. Song, S. B. Lee and S. W. Son

Key Words : Turbulence Enhancement(난류증진), Jet Flow(제트유동), Ultrasonic Forcing(초음파가진), Coaxial Circular Pipe(동심원관), PIV(입자영상유속계)

Abstract : A study to obtain the enhancement of turbulence at low Reynolds number is carried out by adding ultrasonic force into the jet flow field of a coaxial circular pipe which can afford the sufficient data of flow characteristics with the shear flow and turbulence flow in spite of its simple shape. A coaxial circular flow field is made vertically in a large and transparent acryl tank.

The time mean velocity vector, distribution, kinetic energy and turbulence intensity formed in the complex flow field of turbulence enhancement are investigated, observed and discussed at Reynolds number of 2,000, 3,000 and 5,000 by using PIV measurement. In results, the validity of ultrasonic to obtain the enhancement of turbulence is certified.

1. 서 론

유체유동에서 실제 유동의 대부분은 난류유동이다. 난류는 매우 복잡한 유동으로 그의 해석은 정확한 해에 접근하기 어렵다¹⁾. 난류 유동의 취급에는 두 가지 경우에서 연구되어져 왔다²⁾. 하나는 후류에 의한 항력과 마찰에 의한 에너지 손실 등을 감소시키기 위한 난류제어이고, 다른 하나는 기체 혼합에 의한 열효율 향상과 물질과 열전달 촉진을 위한 난류의 증진이다. 고 Re수에서 난류는 자연대류의 방해요소로 작용한다³⁾. 그러나 저 Re수에서 난류 증진은 세척효율의 향상과 화학 약품의 혼합에서 바람직하다. 유동장에 가진되는 초음파는 캐비테이션과 방사압의 성질에 의해 작은 와를 형성할 수 있으므로 저 Re수에서 난류 증진을 기대할 수 있다³⁾.

초음파는 액체매질의 내부에서 직진하고 반사하므로 여러번의 반사에 의한 난류증진을 더욱 피할

수 있다. 동심원관에서 제트유동은 그 형상이 단순함에도 불구하고 난류의 특성을 충분히 제공할 수 있다. 이는 전단 혼합과 와의 생성 등으로 유체역학의 여러 현상을 동반하여 그의 공학적 응용이 우수한 유동장으로서 충분히 연구되어져 왔으며, 연소 실이나 에젝트 펌프와 같은 실용적인 유동장에서 자주 발견되고 있다⁴⁾. 그럼에도 불구하고 이의 충분한 연구는 매우 제한되어 있고 결과의 대부분은 시간 평균 내용에서 머물고 있다. 현재에 이르기까지 여러 측정 방법들이 정량적으로 유동특성을 파악하기 위해 발전되었고, 수치해석은 충분히 발전된 난류의 유동 모델을 개발하기 위해 계속연구 되어져 왔으나 속도와 압력 분포는 정량적으로 임의의 순간 유동장에 대해 표현되어지지 않았다.

최근에 디지털 영상처리기법의 획기적 진전과 PC의 처리속도 증가에 따른 향상된 PIV를 사용함으로써 동심원관의 제트유동장내에서 임의의 순간 속도 vector는 실시간에서 동시 다점으로 측정되고, 따라서 많은 정보가 측정되어질 수 있다.^{5),6)} 그러므로 상기 난류증진에 대한 복잡한 유동해석의 가능성을 기대하게 한다.

본 연구에서는 투명 아크릴 판으로 제작되어진

접수일 : 2001년 6월 일
주은선 : 경상대학교 수송기계공학과, 항공기부품 기술연구센터, 생산기술 연구소
이영호 : 한국해양대학교 기계공학과, 유동정보 연구실
송민근, 이상범, 손승우 : 경상대학교 대학원

큰 수조 속에 동심원관의 제트유동장을 수직으로 만들고, 2MHz 초음파가진에 의한 난류증진의 특성을 획득하기 위해 몇 가지 실험이 수행되었다.

그들의 속도 vector 분포, 운동에너지 및 난류강도가 PIV에 의해 측정되고, 노즐 입구에 가까운 영역과 먼 영역간에 비교 검토된다. 초음파 영향에 관해서는 Re수가 2,000, 3,000 및 5,000 일 때 노즐 입구에서 가까운 영역을 위주로 검토하였다.

2. 이 론

난류는 임의성, 확산성, 회전도 요동성, 소산성등을 가진 유체유동의 속성으로서, 그 에너지 수지식은 3차원적으로 다음과 같이 복잡하다¹⁾.

$$U_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{1}{2} \overline{u_i u_i} \right) = - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{1}{\rho} \overline{u_j p} + \frac{1}{2} \overline{u_i u_i u_j} - 2\nu \overline{u_i s_{ij}} \right) - \overline{u_i u_j} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] - 2\nu \overline{s_{ij} s_{ij}} \quad (1)$$

여기서 난류생성항은

$$- \frac{1}{2} \overline{u_i u_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

이다.

초음파 진동에너지는 동일매질에서는 그 강도가 클수록 멀리 전파할 수 있다. 파의 진폭을 A, 진동수를 f 라 하면 합성에너지 E는³⁾

$$E = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m (A\omega)^2 = 2 \pi^2 m A^2 f^2 \quad (3)$$

으로 주어지며, 따라서 단위체적당에너지 ε는 다음과 같다.

$$\varepsilon = 2 \pi^2 A^2 f^2 \rho \quad (4)$$

여기서 음파의 전파속도를 c라 하면 단위시간당, 단위면적당 초음파 에너지량 I는 다음과 같이 주어진다.

$$I = 2 \pi^2 A^2 f^2 \rho c \quad (5)$$

고주파수 초음파는 방사압을 가지며, 그의 체적력

의 요동 f_i 는 난류요동과 상호작용하여 난류가 생성될수 있으며 그 생성율은 다음과 같이 주어진다.

$$F_{ij} = \overline{f_i u_j} + \overline{f_j u_i} \quad (6)$$

고주파수 초음파에 의한 난류증진의 정량적 해석을 위해 PIV를 사용했으며 여기에 사용된 수식들은 다음과 같다.^{6,7)}

$$C(s,t) = \frac{\sum_x \sum_y [f(x,y) - \bar{f}(x,y)] [w(x-s, y-t) - \bar{w}]}{\left(\sum_x \sum_y [f(x,y) - \bar{f}(x,y)]^2 \sum_x \sum_y [w(x-s, y-t) - \bar{w}]^2 \right)^{1/2}} \quad (7)$$

위에서 $C(s,t)$ 는 연속된 두 frame간의 상호상관계수이다.

순시의 속도요동성분 u' 과 v' 은⁷⁾

$$u' = u - \bar{u}, \quad v' = v - \bar{v} \quad (8)$$

로 정의되고, 시간평균 난류운동에너지는 순시난류운동에너지를 시간적분하여 시간평균한 것으로

$$\overline{E_{tt}} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{u'^2 + v'^2}{2} dt \quad (9)$$

로 정의된다. 시간평균난류강도는 순시난류강도를 시간적분하여 시간평균한 것으로

$$\overline{I_t} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{\left[\frac{1}{2} (u'^2 + v'^2) \right]^{1/2}}{(u'^2 + v'^2)^{1/2}} dt \quad (10)$$

로 정의된다. 난류강도의 등고선 높이의 평균은

$$\overline{I_{tc}} = \frac{\sum_{i=1}^n I_{tci}}{n} \quad (11)$$

로 주어진다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

Fig. 1은 실험 장치의 개략도 이다. 이는 유동시스템, 초음파시스템, PIV 시스템, LDV 시스템 등으로 구성되어 있다. 동심원관의 내부 노즐관의 직경

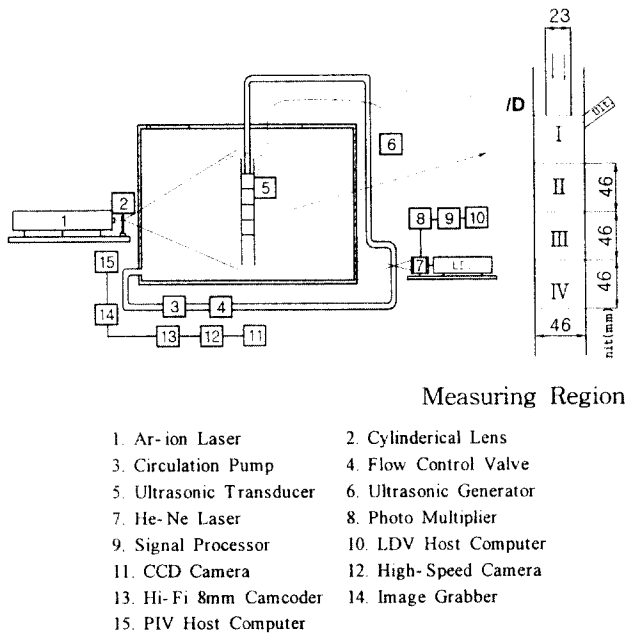


Fig. 1 Schematic arrangement of the experimental system

은 23mm, 외부관은 직경이 46mm인 아크릴 투명원관을 수직되게 설치하였다. 측정영역의 상세도는 오른쪽에 도식하였다. 노즐 출구로부터 동심원관 직경 길이로 4구역을 설정하였다.

실험에 사용된 수조는 1,500(L)×800(W)×250(H) mm 크기로 투명 아크릴판으로 제작하였다. 한일사의 PB-40-E-1-D 펌프를 사용하였으며, 유속조절은 LDV 시스템으로 측정하여 유량조절 valve에 의해 제어된다.

Table 1은 본 연구의 제반 실험조건을 나타낸다.

Table 1 Experimental conditions

Item	Specification
Image Grabber	DT3155(640×480pixel, B&W)
Light Source	4W Ar-Ion Laser
Particle Seed	Polyvinyl Chloride : 100 μ m
Working Fluid	City water (10 $^{\circ}$ C)
Sheet Light	Cylindrical Lens (width:2mm)
Dimension of Test Tank	1500(L)×800(W)×250(H)mm
Ultrasonic Generator	2MHz
Host Computer	Intel P-III 650MHz Dual Processor(Windows 2000)
Calculation Time	2min/120frame
Image Recorder	Hi-8mm Camcoder
Identification	Two-frame Grey-level Cross Correlation Algorithm
PIV Software	CACTUS' 2000

3.2 실험방법

실험 영역은 노즐 출구에서 길이 무차원수 $x/D=1$ 까지 I 영역, 2까지 II영역, 3까지 III영역, 4까지 IV영역으로 정하고, 제트 노즐에서 가까운 영역을 I 영역, 먼 영역을 IV 영역으로 정하였다. 여기서 D 는 이중원관의 직경이고 x 는 노즐 출구에서 유동방향으로의 거리이다. 초음파 비가진시 동심원관 유동 특성을 관찰하기 위해서는 영역 I 과 영역 IV를 위주로 비교 검토하고, 초음파 가진시 Re수 2,000, 3,000, 4,000에 따른 초음파 영향 특성에 관해서는 영역 I 을 위주로 관찰·검토한다. 작동 유체는 10 $^{\circ}$ C의 수도수 이다. 반사와 굴절 등 빛의 성질에 가까운 특성을 얻기 위해 고주파수인 2MHz 초음파가 사용되어 진다. 광원은 4W 출력의 연속광인 Ar-Ion 레이저(Spectra-Physics Laser Co.)를 사용하였다. 2mm 두께를 가진 2 차원의 평면 레이저 조사광이 광섬유 케이블과 원통 렌즈를 통해 유동장으로 조사되어졌다. 유동을 가시화하기 위해 사용된 산란입자들은 비중이 1.02, 평균 직경이 100 μ m인 Polyvinyl Chloride 구형 백색 입자들이며, 정전기를 방지하기 위해 계면 활성제를 혼합하여 투입되어졌다. 고속도카메라에 의해 촬영된 영상들은 Hi-Fi 8 mm 캠코드에 기록되고, 기록된 원시 영상들은 Data Translation사의 DT -3155를 사용하여 PC에 저장되어졌다.

Host PC에서 영상처리를 위해 CACTUS' 2,000을 사용하였다. 영상처리에서 전 처리에 윤곽선을 찾기 위해 Sobel 연산자가 사용되었고 역치는 20으로 하였다. 두 프레임 계조치 상호상관법은 동일입자의 추적 알고리즘으로 사용되었다. 여기서 탐색반경은 8 pixel 이고 상관 영역은 45 pixel 이다.

Sub-pixel 보간은 후처리에서 산출 격자수 40×40에 대해 60×60로 격자점 재배치시 최소자승법으로 수행하였다. 단위 환산은 영역에 따라 계산되어졌다. 원시영상에서 305 pixel 은 46mm의 측정 거리에 해당되었다.

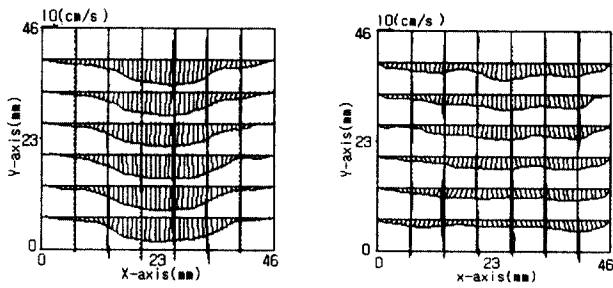
4. 실험 결과 및 고찰

Fig. 2는 동심원관내의 제트유동에서 초음파가 가진되지 않았을 때 Re수 2,000에서 영역에 따른 속도 분포를 보이고 있다. (a)는 상기한 바와 같이 노즐 출구에서 가장 가까운 I 영역, 즉 노즐출구에서 무차원 길이 $x/D=1$ 까지의 영역에서의 속도 분포이고 (b)는 무차원 길이 3에서 4인 영역 IV에서의 속도 분포를 보이고 있다.

노즐에서 가장 가까운 영역인 (a) 영역 I에서의 속도 분포는 층류의 속도 분포의 특징인 포물선형을 나타냄에 반해서 노즐에서 먼 영역인 (b) 영역 IV에서의 속도 분포는 난류의 속도 분포형을 나타내고 있다.

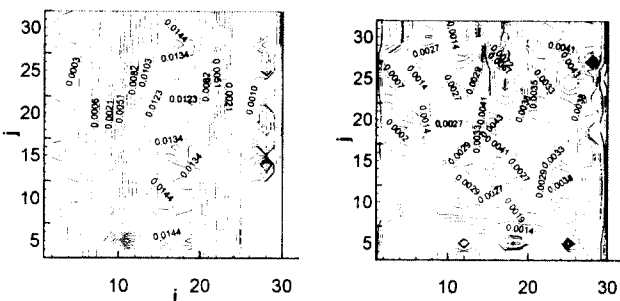
이는 분무 노즐 입구에서 멀어질수록 층류가 난류로 변화되고 있음을 보인다. 따라서 이는 제트류의 유속이 노즐 입구에서 멀어질수록 감소되면서 전단류에 의한 동반류 등과의 혼합류가 발달한 것으로 사료되며, 동심원관 내부유동 이론에 잘 부합되고 있다.

Fig. 3은 초음파비가진시 영역 I 과 IV의 운동에너지의 등고선 분포를 비교하고 있다. (a) 영역 I에서는 층류의 흐름을 보이고 중심부의 운동에너지는 양 가장자리 동반류에 비해 뚜렷하게 나타나고 있다. (b) 영역 IV에서는 양 가장자리 동반류에 의한 혼합류가 우세함을 보이고 있고, 운동에너지 크기 분포는 I 영역에 비해 평준화되면서 작아짐을 볼 수 있다.



(a) region I (b) region IV

Fig. 2 Comparison of the time mean velocity distribution between regions I and IV without ultrasonic

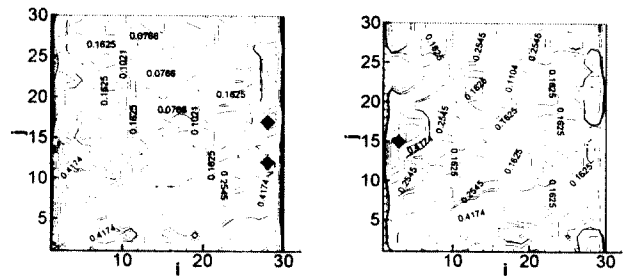


(a) region I (b) region IV

Fig. 3 Comparison of the time mean kinetic energy distributions between regions I and IV without ultrasonic

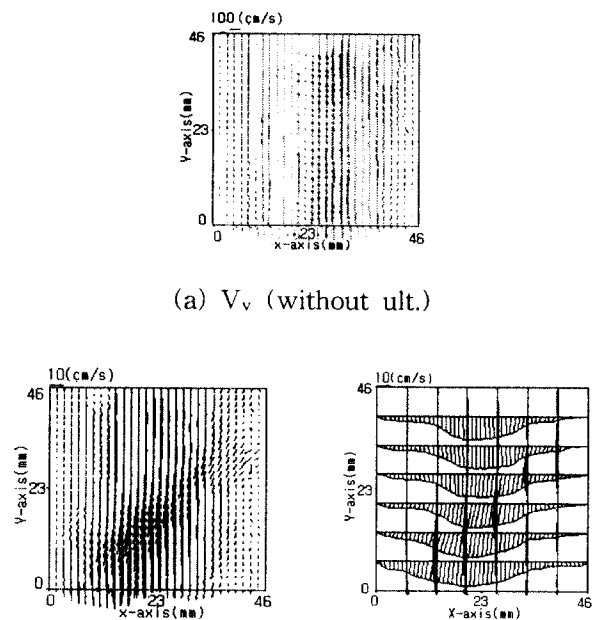
Fig. 4는 초음파 비가진시 영역 I 과 IV간의 시간 평균 난류강도를 비교하고 있다. (a) 영역 I에 비해서 (b) 영역 IV의 난류분포가 우세하고 난류강도 또한 크게 나타나고 있다. 이는 상기한 바와 같이 전단류에 의한 동반류와 제트류와의 혼합류가 발달한 것으로 사료되어진다.

Fig. 5는 Re수 2,000일 때 I 영역에서 시간 평균 속도 vector와 속도 분포를 보이고 있다. (a)는 비가진시의 속도 vector를 보이고 있으며, 수직방향으로의 층류를 유지하고 있다. (b)는 가장멀리까지 반사가 가능한 45° 각도로 초음파 가진시의 속도 벡터를 보이고 있다. 비 가진시인 (a)에 비해 45° 방



(a) region I (b) region IV

Fig. 4 Comparison of the time mean turbulence intensity between regions I and IV without ultrasonic



(a) V_v (without ult.)

(b) V_v (with ult.)

(c) D_v

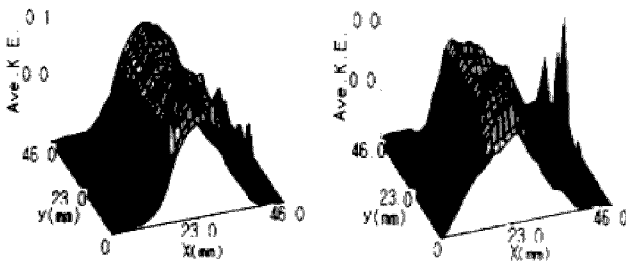
Fig. 5 Velocity vector (V_v) and velocity distribution (D_v) with ultrasonic at Re 2,000 in the region I

향으로의 간섭현상을 뚜렷이 보이고 있다. (c)는(b)의 속도 분포를 보이며 초음파 간섭 방향으로 속도 분포가 영향을 받고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 6 은 Re수 2,000일 때 시간 평균 운동에너지 를 보이고 있다. (a)는 비가진시이고 (b)는 가진시로서 초음파 가진시의 운동에너지가 비가진시에 비해 좀더 넓은 분포로 퍼져있다. 이는 초음파 가진시의 운동 에너지가 비가진시보다 우세함을 의미한다.

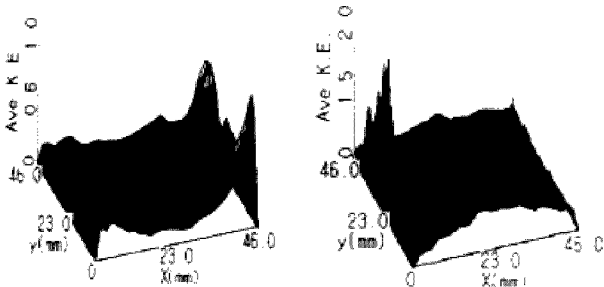
Fig. 7은 Re수 2,000일 때 초음파 가진 유무에 따른 난류강도(I_t)를 비교하고 있다. 초음파 비가진시 (a)에 비해 초음파 가진시 (b)의 난류강도가 약간 솟음을 볼 수 있다. 이는 초음파 가진시의 난류강도가 비가진시보다 우세함을 나타낸다.

Fig. 8은 Re수 3,000일 때 초음파 가진 유무에 따른 속도 분포를 보이고 있다. 초음파 가진시 (b)의 속도 profile이 비가진시 (a)에 비해 우세한 난류형을 보이고 있다. 이는 초음파 가진이 난류증진에 유효함을 나타낸다.



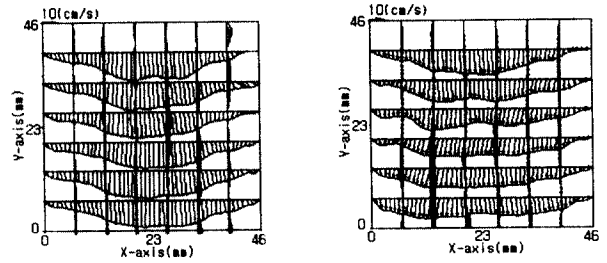
(a) E_k without ult. (b) E_k with ult.

Fig. 6 Comparison of the time mean kinetic energy(E_k) between with and without ultrasonic at Re 2,000 in the region I



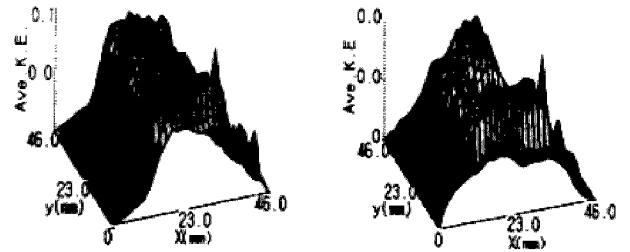
(a) I_t without ult. (b) I_t with ult.

Fig. 7 Comparison of the time mean turbulence intensity between without and with ultrasonic at Re 2,000 in the region I



(a) D_v without ult. (b) D_v with ult.

Fig. 8 Comparison of the velocity distribution (D_v) between with and without ultrasonic at Re 3,000 in the region I



(a) E_k without ult. (b) E_k with ult.

Fig. 9 Comparison of the time mean kinetic energy(E_k) between with and without ultrasonic at Re 3,000

Fig. 9는 Re수 3,000일 때 초음파 가진 유무에 따른 시간 평균 운동 에너지 (E_k)를 비교하고 있다.

초음파 가진시 (b)의 운동에너지 분포 곡선의 볼록 등 면이 초음파 비가진시 (a)에 비해 폭이 넓게 나타나고 있다. 이는 초음파에너지가 유동 운동에너지에 간섭했음을 보여준다.

Fig. 10은 Re수 3,000일 때 초음파 가진 유무에 따른 시간 평균 난류 강도의 등고선도를 비교하고 있다. 초음파가 가진시 (b)의 난류강도가 초음파 비가진시 (a)에 비해 다소 우세함을 볼 수 있다. 이는 초음파가 Re수 3,000에서도 난류 증진에 유효함을 의미한다.

Fig. 11은 초음파 가진 유무시 Re수에 따른 시간 평균 운동에너지 크기를 비교하고 있다. Re수 2,000, 3,000, 5,000에서 Re수가 커질수록 운동에너지는 전반적으로 커지고 있다. Re수 2,000에서는 초음파 가진시의 운동 에너지가 비가진시 보다 조금 크게 나타나고 있다. 이는 초음파의 진동에너지가 유동에 가해져 운동 에너지가 증가한 것으로 사료된다. Re수 3,000, 5,000에서는 초음파가 운동

에너지 증가에는 기여하지 못함을 보이고 있다. 이는 일정한 초음파 에너지가 Re수 증가에 따른 유동 에너지 증가에 압도당한 것으로 해석되며, 따라서 Re수가 커짐에 따라 초음파 동력도 커져야 함을 알 수 있다.

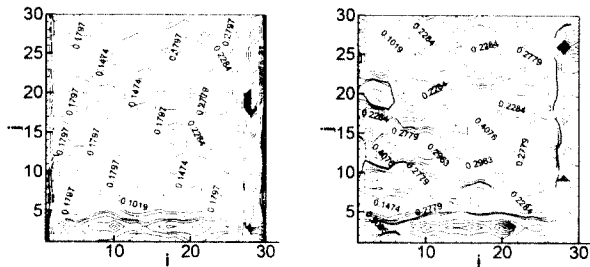


Fig. 10 Comparison of the time mean turbulence intensity contour height between with and without ultrasonic at Re 3,000 in the region I

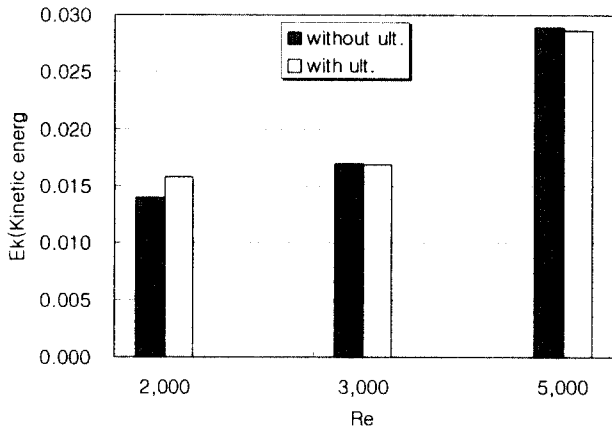


Fig. 11 Comparison of the kinetic energy contour height according to Re No. between with and without ultrasonic

Fig. 12는 초음파 가진 유무간에 Re수에 따른 난류강도의 평균등고선 높이를 비교하고 있다. 초음파 가진 유무에 관계없이 Re 수가 커질수록 난류강도가 커짐은 유동원리에 부합된다.

초음파 가진시는 비가진시보다 난류강도가 증가했음을 보이고 있는데, Re수 2,000에서는 그 차이가 가장 크게, Re수 5,000에서는 작게 나타나고 있다. 이는 일정한 크기의 초음파 동력이 Re수 증가에 따른 유동력 증가에 압도당함을 의미한다.

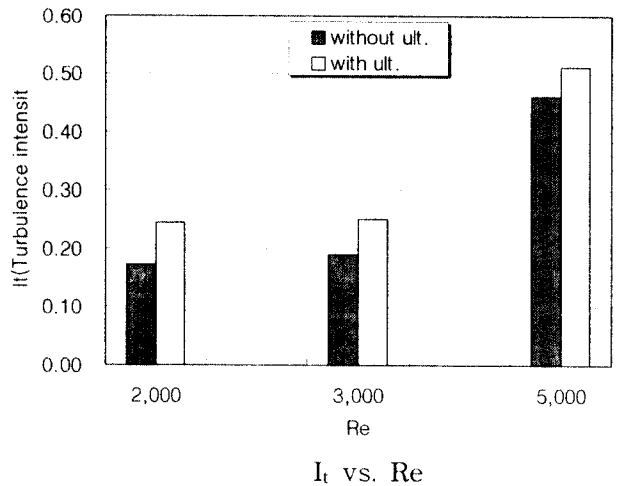


Fig. 12 Comparison of the mean contour height of turbulence intensity according to Re No. between with and without ultrasonic

5. 결 론

Re수 2,000, 3,000 및 5,000일 때 난류증진을 위한 초음파 가진 실험에서, PIV측정에 의한 동심원관 내의 유동특성을 비교·검토한 결과는 다음과 같다.

1. 초음파 비가진시 분무노즐 입구에 가까운 영역에서는 운동에너지가 우세하면서 난류강도가 미미한 층류의 특성을 보이고, 먼 영역에서는 전단류에 의한 동반류의 혼합으로 운동에너지가 흩어지면서 난류강도가 우세해지는 혼합류에 의한 난류 특성을 보이고 있다. 이는 2중 동심원관 제트유동 이론을 잘 보여주고 있다.
2. 운동에너지는 Re수가 커질수록 초음파 가진 유무 다같이 증가함을 보임은 유동원리에 부합되며, 초음파 가진에 의한 운동 에너지 증가는 Re수가 작은 경우에 뚜렷이 나타나고 있다. 이는 초음파 동력이 유동 방향으로의 속도 증가에 유효했음을 의미하며, Re수가 클 때는 일정한 초음파 동력이 증가한 유동력에 압도당함을 보인다.
3. 난류강도에 있어서는 Re수 증가에 따라 초음파 가진 유무 다 같이 난류강도가 증가함은 Re수 증가에 따른 유동원리에 부합되며, Re수가 작을 때 초음파 가진에 의한 난류증가가 뚜렷했다.
4. 2중 동심원관 제트 유동장내의 저 Re수에서의 난류증진에 초음파 가진법이 유효하며, 그 증진 효율 극대화를 위해서는 Re수 증가에 부합되는

초음파 동력의 증가가 요구된다.

후 기

이 논문은 2001년도 두뇌한국21 사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

1. H. Tennekes, and J. L. Lumley, "A first course in turbulence", MIT Publishing Company, Inc., pp. 1~4, 1994
2. 김경천, "환경 및 산업에서의 난류유동 이해와 응용", 대한기계학회지, 제34권, 9호, pp. 666~677, 1994
3. 이승엽, 김태현, 최영돈, "미소기포캐비테이션과 초음파 진동에 의한 난류증진에 관한 연구", 대한기계학회 1999년도 추계학술대회 논문집B, pp. 651~657, 1999
4. 서민식, "CFD 및 PIV에 의한 이중원관 제트의 유동특성에 관한 연구", 한국해양대학교 대학원 공학석사 학위논문, pp. 1~159, 1998
5. R. J. Adrian, "Limiting Resolution of Particle Image Velocimetry for Turbulent Flow", Proc. Advances in Turbulence Reseach, POSTEC, Pohang, Korea, pp. 1~19, 1995
6. 이영호, 최장운, "PIV 분류 및 원리" 대한기계학회지, 제36권, 제12호, pp. 1146~1162, 1996
7. CACTUS' 2,000 Manual, I.I.T.
8. 박길문, 고영하, "4각 덕트내에서 난류맥동유동의 난류특성에 관한 연구", 공기조화·냉동공학논문집 제2권, 제3호, pp. 188~197, 1990
9. 서정식, 조석, 송철화, 정문기, 최영돈, "PIV를 이용한 피동형 안전주입탱크내의 유체기구 내부 유동측정", 대한기계학회 1998년도 춘계학술대회 논문집 B, pp. 399~404, 1998
10. 이동원, 김광용, "원관내 난류 선회류의 수치해석", 공기조화·냉동공학 논문집, 제7권, 제3호, pp. 396~405, 1995