

## 동심원관 유동장에서 난류증진을 위한 초음파 영향에 관한 연구

송민근\*, 구자훈\*, 이상범\*, 손승우\*, 주은선\*\*

### A Study on the Ultrasonic Effect for Turbulence Enhancement in the Flow Field of a Coaxial Circular Pipe

Mingyun Song\*, Jahoon Koo\*, Sangbum Lee\*, Seungwoo son\*, Eunsun Ju\*\*

Key Words: Ultrasonic Effect(초음파의 영향), Turbulence Enhancement(난류증진), Flow Field(유동장), Coaxial Circular Pipe(이중원관), PIV(입자영상유속계)

#### Abstract

A study on the ultrasonic effect for turbulence enhancement is carried out in the horizontal flow field of a coaxial circular pipe. A large transparent acryl tank is made to perform several experiments for the above research. The front flow field from jet exit is divided as 4 measuring regions to observe characteristics of the above flow field according to those with and without ultrasonic. An ultrasonic transducer with 2MHz high frequency is used to give them the ultrasonic forcing. Characteristics such as the velocity distribution, the kinetic energy and the turbulence intensity are visualized, observed, examined and considered at Re No. 2000. In results, it is clarified that the ultrasonic increases the turbulence enhancement. And the optimum and harmonious intensity suited to the power of flow is needed to maximize the turbulence enhancement.

#### 1. 서론

연소기에서 열 효율의 증가, 교환기에서 혼합의 증대, 열교환기에서 열전달의 촉진을 위해서는 난류의 증진을 필요로 한다<sup>1)</sup>. 이들 대부분은 고 레이놀즈수 유동에서 얻어진다. 이는 자연대류에 의한 열전달에 장애요소로 작용한다<sup>2)</sup>. 화학반응률 및 세정효율 향상 등에는 저 레이놀즈수 유동영역에서의 난류증진이 요구된다. 초음파는 액체중에서 방사압 및 캐비테이션에 의해 작은 와를 생성할 수 있으므로 저 레이놀즈수 유동에서 난류증진이 기대된다<sup>3)</sup>. 특히 초음파는 고주파일수록 지향성이 강하며 빛의 성질에

유사성을 가지므로 반사, 굴절 및 집속 등을 반복시켜서 한층 더 높은 난류증진의 효율향상을 기대할 수 있다. 이중원관 제트유동은 그 구성이 단순하면서도 난류유동 특성을 풍부히 제공해 준다. 이 유동장은 전단혼합 및 와류방출 등 다양한 유체역학적 현상을 동반하며, 연소실이나 이젝트 펌프와 같은 실제 유동장에서 자주 발견되는 공학적으로 응용도가 뛰어난 유동장으로서 많은 연구가 있다.<sup>4)</sup> Durst<sup>5)</sup>는 이중원관내의 난류유동장을 실험적으로 연구하였고, 김<sup>6)</sup> 등은 동심관 유동의 난류구조를 거친 외벽의 영향에 대해 조사하였다. 어<sup>2)</sup> 등은 미소 캐비테이션으로 초음파 진동에 의한 난류증진에 관한 연구를 하였고, Montgomery<sup>7)</sup>는 핵융합개발에 응용되는 초음파 작용과 유사한 자기수력난류에 대해 실험하였다.

초음파에 의한 난류증진의 극대화를 위해서는

\* 경상대학교 대학원

\*\* 경상대학교 수송기계공학부, 항공기부품기술연구센터, 생산기술연구소

이들 유동장에 대한 해석이 필수적이다. 난류는 복잡한 유동으로서 정확한 해를 얻기는 어려우며 더구나 난류증진에 의한 유동은 더욱 복잡하므로 종래의 유속계나 CFD등으로 정확한 해에 접근하기는 더욱 어렵다. 최근 PIV는 컴퓨터에 의한 영상처리 기법과 저장용량의 획기적인 발전으로 상기의 난제를 해결하는데 기대를 준다. 이는 동일 비중의 미소 산란입자들이 들어있는 유동장을 레이저광에 의해 2차원으로 가시화하여 CCD카메라에 의한 영상수집 및 처리과정을 수행하여 유동장 전체에 대한 비정상 동시다점 속도분포에 대한 자료를 제공하므로 복잡한 난류증진 유동에 대한 정성적, 정량적 유동해석을 가능하게 한다<sup>8)</sup>.

Adrian<sup>9)</sup>은 난류유동에 대한 입자영상 유속계의 해상도에 관한 연구를 선행했고 서<sup>4)</sup>등은 이중 원관 제트 유동특성을 PIV에 의해 조사하였다.

본 연구에서는 투명아크릴로 만든 수조 내에 수평 이중동심원관 유동장을 만들고 2MHz의 고주파수 초음파를 가함으로 PIV측정에 의한 유동의 속도분포, 운동에너지, 난류강도 등을 Re수 2000에서 실험, 비교, 검토하므로 초음파의 난류증진에 대한 유동특성의 영향에 관한 자료를 얻고자 한다.

## 2. 이론

난류는 임의성으로서 그 에너지 식은 3차원적으로 대단히 복잡하며, 그 생성항은

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

으로 주어진다.

초음파 진동에너지는 동일 매질에서는 그 강도가 클수록 멀리 전파된다. 파의 진폭을 A, 진동수를 f라 하면 합성에너지 E는

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

으로 주어지며, 따라서 단위체적당에너지  $\epsilon$ 는 다음과 같다<sup>5)</sup>.

$$\epsilon = 2 \pi^2 A^2 f^2 \rho \quad (3)$$

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

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

고주파 초음파는 방사압을 가지며, 그의 체적력의 요동  $f_i$ 는 난류유동과 상호작용하여 난류가 생성될수 있으며 그 생성율은 다음과 같이 주어진다.

$$F_{ij} = \overline{f_i u_j} + \overline{f_j u_i} \quad (5)$$

고주파 초음파에 의한 난류증진의 정량적 해석을 위해 PIV 측정법을 사용했으며 여기에 사용된 수식들은 다음과 같다<sup>8)</sup>.

$$C(s, t) = \frac{\sum_x \sum_y [f(x, y) - \bar{f}(x, y)] [u(x-s, y-t) - \bar{u}]}{(\sum_x \sum_y [f(x, y) - \bar{f}(x, y)]^2 \sum_x \sum_y [u(x-s, y-t) - \bar{u}]^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (6)$$

위에서 C(s, t)는 연속된 두 frame간의 상호상관계수이다.

순시의 속도요동성분  $u'$  와  $v'$  는<sup>8)</sup>

$$u' = u - \bar{u}, \quad v' = v - \bar{v} \quad (7)$$

로 정의되고, 시간평균 난류운동에너지는 순시 난류운동에너지를 시간적분하여 시간평균한 것으로

$$\bar{E}_{kt} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{u'^2 + v'^2}{2} dt \quad (8)$$

로 정의된다. 시간평균 난류강도는 순시 난류강도를 시간적분하여 시간평균한 것으로

$$\bar{I}_t = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{[\frac{1}{2}(u'^2 + v'^2)]^{\frac{1}{2}}}{(u'^2 + v'^2)^{\frac{1}{2}}} dt \quad (9)$$

로 정의된다. 난류강도의 등고선 평균은

$$\bar{I}_{tc} = \frac{\sum_{i=1}^n I_{tci}}{n} \quad (10)$$

로 주어진다.

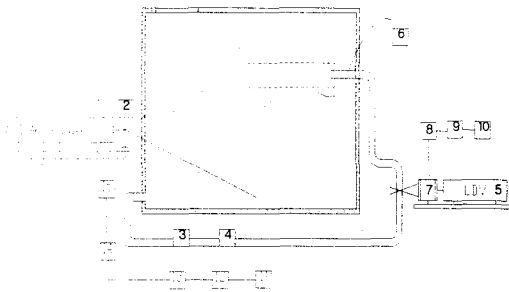
## 3. 실험장치 및 방법

### 3.1 실험장치

본 실험에서 동심이중원관의 유동을 측정하기 위하여 1500(L)×250(W)×800(H)mm의 투명성이 뛰어난 아크릴로 유동장을 형성하고 그 속에 내

경 46mm, 두께 2mm인 투명 유리관과 내경 d=18mm, t=1인 스테인레스강(STST)노즐을 사용하여 동심이중원관 유동장을 만들었다. 여기서 속도를 측정하기 위하여 30mW출력의 He-Ne Laser를 사용하는 TSI社 LDV system을 사용하였고, 초음파 발진을 위하여 2MHz 압전세라믹스 초음파 진동자를 이용하였다.

Fig.1 은 본 실험장치에의 개략도이다. 이는 유체의 유속을 측정하는 LDV system과 영상을 획득하기 위한 PIV system 및 레이저광 시트로 구성된다.



- |                         |                         |
|-------------------------|-------------------------|
| 1. Ar-ion Laser         | 2. Cylindrical Lens     |
| 3. Circulation Pump     | 4. Flow Control Valve   |
| 5. He-Ne Laser          | 6. Ultrasonic Generator |
| 7. Beam Splitter        | 8. Photo Multiplier     |
| 9. Singnal Processor    | 10. LDV Host Computer   |
| 11. CCD Camera          | 12. High-Speed Camera   |
| 13. Hi-Fi 8mm Camcorder | 14. Image Grabber       |
| 15. PIV Host Computer   |                         |

Fig. 1 Schematic diagram of the test loop

### 3.2 PIV에 의한 영상처리

유동가시화를 위해 사용된 산란입자는 비중이 1.02, 직경이 약 100미크론 전후의 polyvinyl chloride 백색 구형입자로서 정전기를 방지하기 위하여 계면활성제를 소량 혼합하여 투입하였다.

그리고 광원으로서 4W출력의 연속광 Ar-ion 레이저(Spectra-Physics Laser社)를 이용하였으며, 두께 1.5mm 내외의 2차원 평면조명이 fiber optic cable 및 cylindrical lens를 통해서 유동장에 직접 조사되었다.

CCD 카메라로 촬영된 영상을 Hi-Fi 8mm 캠코더에 기록하고, Data Translation社의 DT3155(640

×480pixel, Grey 8bit)를 이용하여 원시영상을 A/D 변환을 하였다. 영상처리작업은 PIV 호스트 컴퓨터에서 CACTUS' 2000 이용하였다.

영상처리중 전처리과정에서 윤곽선 검출을 위한 연산자로서 소벨연산자(Sobel Operator)를 사용하였으며, 이 때의 역치값은 20으로 하였다. 2 프레임 계조치상호상관법을 동일입자 처리 알고리즘으로 하였으며, 이 때의 탐색반경(SAR)은 8pixel이고 상관영역(CAS)은 45pixel×45pixel이다. 그리고 후처리 과정에서 계산격자수 45pixel×45pixel에 대하여 60pixel×60pixel로 격자점 재배치시 최소자승법을 이용하여 서브픽셀보간을 행하였다. 단위환산은 계측영역별로 실시하였고 이때 원시영상에서 360pixel이 측정거리 50mm에 해당한다.

### 3.3 실험방법

Fig. 2는 수평측정부의 영역을 나타내고 있다. 측정영역은 원관의 출구에서 시작하여 46(L)mm×46(H)mm의 영역을 차례대로 계측영역 I, II, III, IV내 영역으로 정하였다. 실험시 작동유체로 10℃의 수도수(citywater)를 사용하였으며, Re수를 계산하기 위하여 LDV를 설치하여 원관 Jet의 대표속도를 측정하고, 대표길이는 Jet의 직경을 기준으로 하였으며, 10℃ 수도수의 동점성 계수를 구하여 Re수의 변화에 따른 대표속도를 구하였고, system의 유량조절은 정밀한 유량조절 밸브를 사용하여 Re수에 따라 유량을 조절하였다.

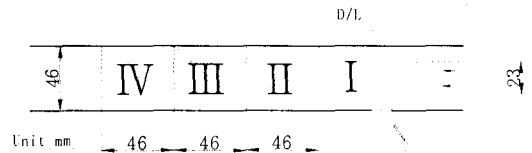


Fig. 2 Definition of measuring region

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 초음파 비가진시 유동장

Fig. 3은 초음파 비가진시 Re수 2000일 때 영역에 따른 유동의 속도 분포를 보이고 있다. 영

역 I(a)에서는 원형관 중심축을 기준으로 포물선형에 가까운 속도분포를 보이고 있다. 이는 출구에 가까운 Jet로서 주위의 동반류와 혼합되지 않는 상태를 보이고 있다. 영역 IV(b)에서는 속도 분포가 작아지고 상하로 퍼진 분포를 보이고 있으며 이는 (a)에 비해 주위의 동반류와의 전단 혼합류로서 유동이 점차 난류로 발달되고 있음을 보이고 있다.

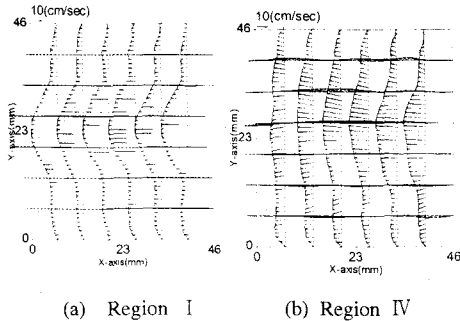


Fig. 3 Comparison of velocity distribution between the regions I and IV at Re No. 2000 without ultrasonic

Fig. 4는 상기영역에 따른 운동에너지를 3차원적 그래프로 비교하고 있다. 영역 I(a)에서는 전반적으로 균일한 운동에너지 분포를 보이고 있으나 영역 IV(b)에서는 운동에너지가 그 영역 내부에서 불균일함을 보이고 있다. 이는 분출구에서 멀어질수록 동반류에 의한 전단 혼합류의 발달과 분출류의 속도 감소 등으로 인한 것으로 해석된다.

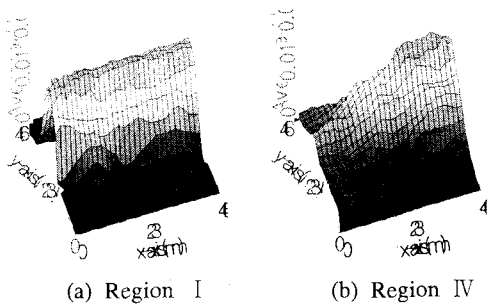


Fig. 4 Comparison of kinetic energy distribution between the regions I and IV at Re No. 2000 without ultrasonic

Fig. 5는 상기 영역에 따른 난류 강도를 등고선으로 비교하고 있다. 영역 I(a)에서의 난류 강도에 비해서 영역IV(b)에서의 난류 강도의 값들이 전반적으로 높게 나타나고 있다. 이는 노즐 출구에서 멀어질수록 전단 혼합에 의한 난류 발달이 왕성해 짐을 의미한다.

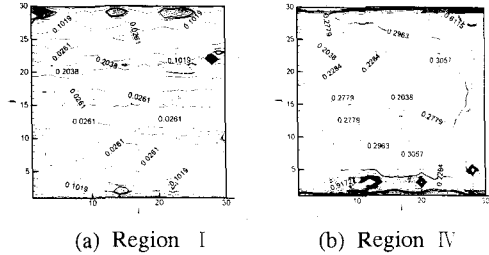


Fig. 5 Comparison of turbulence intensity distribution between the regions I and IV at Re No. 2000 without ultrasonic

#### 4.2 초음파 가진시 유동장

Fig. 6은 초음파 가진시 Re 수가 2000 일 때 영역에 따른 유동의 속도 분포를 보이고 있다. 영역 I(a)에서는 속도 분포가 중앙부는 노즐 분출류에 의한 포물선형 속도 분포를 보이고 양 가장자리로는 동반류의 속도 분포가 낮게 나타나 중앙부의 제트류와 양 가장자리의 속도 분포가 뚜렷이 구별되게 나타났다. 비가진시 Fig. 3의 (a)에 비해 초음파의 영향을 받았음을 볼 수 있다. 영역IV(b)에서 속도 분포는 전반적으로 분출류와 동반류의 뚜렷한 구별이 사라진 전단혼합류에 의한 난류형 속도 분포를 보이고 있다. 초음파 가진시의 속도 분포는 비가진시 속도 분포에 비해 전 영역에 걸쳐 초음파 음압의 영향으로 속도가 크게 나타나고 있다.

Fig. 7은 영역에 따른 운동에너지를 3차원적 그래프로 비교하고 있다. 영역 I(a)에서는 영역 중앙부가 포물선형으로 솟아 있으나 비가진시의 Fig. 4의 (a)에 비해 난조를 보이고 있다. 이는 초음파의 영향으로 사료된다. 영역 IV(b)에서는 운동에너지가 영역 I(a)에 비해 낮아지면서 넓혀진 모양을 보이는데 이 또한 분출구에서 유동이 멀어질수록 속도는 감소되고 대신 난류가 크게 왕성해짐으로 해석된다. 비가진시에 비해서

도 흐트러짐이 뚜렷이 나타나는데 이는 역시 초음파영향으로 사료된다.

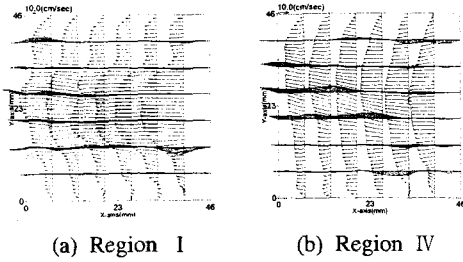


Fig. 6 Comparison of velocity distribution between the regions I and IV at Re No. 2000 with ultrasonic

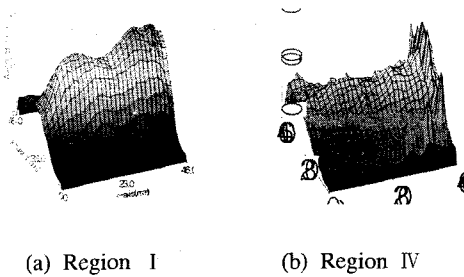


Fig. 7 Comparison of kinetic energy distributions between the regions I and IV at Re No. 2000 with ultrasonic

Fig. 8은 초음파와 가진시 영역에 따른 난류 강도를 등고선으로 비교하고 있다. 영역 I(a)에서의 난류 강도에 비해서 영역 IV(b)에서의 난류 강도의 등고선이 전반적으로 높게 나타나고 있다. 이는 분출구에서 멀어질수록 전단혼합류에 의한 난류 강도가 왕성해짐을 의미하며 이는 비가진시와 같다. 또한 같은 영역에서 초음파와 비가진시에 비해 가진시의 난류강도 등고선이 전반적으로 크게 나타남을 볼 수 있는데 이는 초음파의 영향으로 사료된다.

Fig. 9는 운동에너지가 일정한 부분이 되는 중앙부에서 운동에너지가 전거리 영역에 걸쳐서 거리에 따라 비교되는 그래프이다. 영역 I(a)에서는 초음파와 가진시의 운동에너지가 비가진시의 운동에너지보다 전 영역에 걸쳐 높게 나타나고

있다. 영역 IV(b)에서는 초음파와 가진시의 운동에너지가 비가진시보다 약간 약하거나 같게 나타났다. 이는 제트노즐 출구에서 멀어질수록 초음파와 운동에너지가 소실됨을 말해준다.

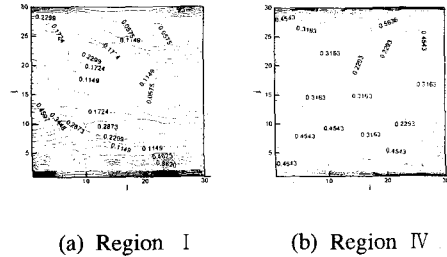


Fig. 8 Comparison of the time mean turbulence intensity distributions between the regions I and IV at Re No. 2000 with ultrasonic

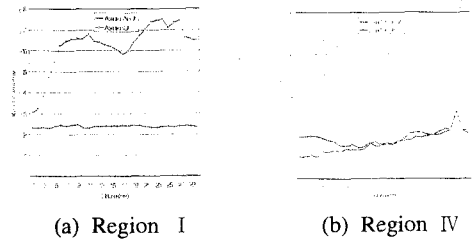


Fig. 9 Comparison of the kinetic energy at the central part which the turbulence intensity becomes a constant according to distance of x axis between without and with ultrasonic

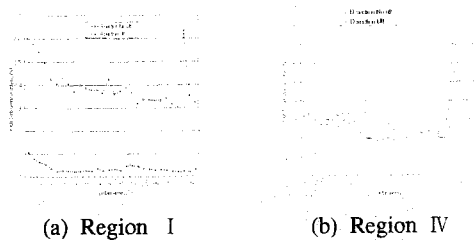


Fig. 10 Comparison of the turbulence intensity at the central part which the turbulence intensity becomes a constant according to distance along x axis between with and without ultrasonic

Fig. 10은 난류강도가 일정부분이 되는 중앙부에서 난류강도가 전 거리영역에 걸쳐 거리에 따라 비교되는 그래프이다.

영역 I (a)에서는 초음파 가진시의 난류강도가 비가진시 보다 높게 나타나고 있다. 이는 초음파에 의한 난류강도가 커졌음을 나타낸다. 영역 IV(b)에서는 초음파 가진시의 난류강도가 비가진시보다 조금 크게 나타나 있다. 이는 (a)에 비해서 영역이 Jet에서 멀어질수록 난류강도가 많이 소산되었음을 의미한다

## 5. 결 론

이중원관 수평유동장에서 저 Re수 2,000일 때 초음파의 가진 유무와 측정영역에 따른 속도분포, 운동에너지, 난류강도등을 PIV로 측정 비교한 결과는 다음과 같다.

1. 이중원관 유동장은 분출구에서 거리가 멀어질수록 속도분포가 층류형에서 전단혼합류에 의한 난류형으로 발전했으며, 초음파에 의한 영향이 뚜렷이 나타났다.
2. 운동에너지는 출구에 가까운 영역에서, 난류강도는 먼 영역에서 우세하게 나타났다.
3. 출구에 가까운 영역에서 먼 영역에 이르기 까지 초음파가 가진된 경우의 난류강도는 가진되지 않은 경우보다 우세하게 나타났다. 이는 초음파가 이중원관 유동에 난류증진을 가져옴을 의미한다.

## 후 기

이 논문은 2001년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

## 참고문헌

- (1) 박길문, 고영하, 1990, "4각 덕트내에서 난류 맥동유동의 난류특성에 관한 연구", 공기조화·냉동공학 논문집, 제2권, 제3호, pp. 188~197.
- (2) 이승엽, 김태현, 최영돈, 1999, "미소기포개비태이션과 초음파 진동에 의한 난류증진에 관한 연구", 대한기계학회 1999년도 추계학술대회 논문집B, pp. 651~657.
- (3) Tennekes, H. and Lumley, J. L., 1994, "A First Course in Turbulence", MIT Publishing Company, Inc., pp. 1~4.
- (4) 서민식, 1998, "CFD 및 PIV에 의한 이중원관 제트의 유동특성에 관한 연구", 한국해양대학교 대학원 공학석사학위논문, pp.1~158.
- (5) Durst, F., 1968, "On Turbulent Flow through Annular Passages with Smooth and Rough Core", M. Sc. Thesis, Imperial College.
- (6) 김경천, 안수환, 이병규, 1994, "외벽에 거칠기가 있는 이중 동심원관 유동의 난류구조", 대한기계학회 논문집 제18권 제9호, pp.2443~2453.
- (7) Montgomery, D., 1987, "Magneto-hydro Dynamic Turbulence", lecture notes on turbulence, edited by J. C. McWilliams, World Science.
- (8) 이영호, 최장운, 1996, "PIV분류 및 원리", 대한기계학회지, 제36권, 제12호, pp. 1146~1162.
- (9) Adrian, R.J, 1995, "Limiting Resolution of Particle Image Velocimetry for Turbulence Flow", Proc. Advances in Turbulence Research, POSETC, Pohng, Korea, pp. 1~19.