대한기계학회 2000년도 추계학술대회논문집 B pp. 633~638 KSME 00F219

PIV계측을 이용한 난류유동의 증진을 위한 초음파 적용

박영호*·최우창*·구자훈*·송민근*·주은선**

Ultrasonic Applications for the Enhancement of Turbulence Flow by using the PIV Measurement

Y. H. Park*, W. C. Choi*, J. H. Koo*, M. G. Song* and E. S. Ju**

Key Words : Ultrasonic Application(초음파적용), PIV(Partical Image Velocimetry), LDV(Laser Doppler Velocimetry), Turbulence Flow(난류유동), PIV Measuremenet(PIV계측)

Abstract

Ultrasonic applications for the enhancement of turbulence flow by using the PIV measurement were carried out according to the angle of the ultrasonic oscillator, materials of the reflector and each section when ultrasonic is reflected several times. Angles of the ultrasonic oscillator such as 30° , 45° , 60° , 90° , 120° , 135° and 150° were selected, and turbulent intensities were compared at Reynolds No. 2,000 and 4,000. Materials of the reflector such as wood, acryl, iron and glass were selected, and time mean velocity vector and turbulent intensity were compared at Reynolds No. 4,000. The zone which was observed was selected from first section to fourth section when ultrasonic was reflected several times. Every data such as time mean velocity vector and time mean turbulent intensity which was obtained by PIV measurement was examined, compared and discussed at Reynolds No. 2,000 and 4,000 to know the degree of turbulence enhancement in each case.

1. 서 론

유체에서 발생하는 대부분의 실제 유동은 난류유동으로 이는 관로유동에서는 압력손실을 크게 하고, 수격 및 유격작용에 의하여 과도유동을 발생시켜 관로의 수명을 단축시키는 단점이 있는 반면에 연소기에서 열효율의 증가, 교반기 및 반응탑 등에서 물질전달의 증가와 열교환기 등에서 열전달을 증가시킨다.[1] 또 선회[2,3]는 난류강도를 증가시켜 열 및 물질전달의 효과를 증진시키므로 가스터어빈의 연소기, 열교환기 및 각종 산업용 버너등의 공업분야에 폭넓게 응용되고 있다. 기존의 원자로에서는 혼합깃의 부착으로 발생하는 난류에 의한 열전달 및 열혼합을 증진시키는 방법을 사용하고 있으나 이는 자연대류에 의한 열전달에 장해요소로 작용한다.[4] 체적력의 요동으로 난류생성이 증가하는 자기수력난류는 핵 융합로 개발을 위해 응용되고 있고 음향가진에 의해 와류증진을 꾀한 연구[5]도 있다. 또 초음파의 가진에 의하여 발생하는 캐비테이션(Cavitation)과 큰 진동 가속도 등을 이용하여 유체의 흐름을 크게 교란시킬 수 있다. 수백 kHz 이상의 초음파는 직진성이 아주 강하며 그 때문에 통로에 반사경이나 프리즘, 렌즈를 놓고 반사, 굴절, 집속, 발산시킬 수 있다. 이런 초음파의 직진성을 이용해서 여러번 반사시키는 방안을 강구한다면 난류증진 효율을 한층 더 강화시킬 수도 있다. 또한 이러한 초음파의 진동에 의한 난류증진효과를 극대화하기 위해서는 이들 유동장에 대한 해석이 필수

* 정회원 경상대학교 기계공학과 대학원
** 정회원 경상대학교 수송기계공학부, 항공기 부품기술 연구센터

적이다. 이를 위해 비정상의 순시 다점계측이 가능하고 NS방정식에서 5종류의 기본 물리량을 동시에 측정 가능하면서[6] 2차원 유동장의 전체구조를 파악할 수 있는 PIV 측정기법이 요구된다. PIV란 동일 비중의 미소입자들이 들어있는 유동장을 2차원 가시화 광원으로 조사하고 조사된 영역을 CCD카메라를 이용하여 영상화 한 후 화상처리과정을 거침으로써 유동장의 전체에 걸쳐서 한꺼번에 속도분포를 얻어내는 측정기법이다.[7] Durst[8]는 이중원관내의 난류유동장을 실험적으로 연구하였고, 주[9] 등은 액체금속로 핵연료봉의 초음파 산란을 해석하였으며, Whitelaw[10]등은 동축의 관으로부터 대기상태로 분류와 선회류가 방출되는 선회분류(swirling jet)에 대한 연구를 하였다.

본 연구에서는 수평유동장을 만들고 상기한 초음파의 직진성을 이용한 난류증진 효율 극대화 system 제작을 위해 7가지의 초음파 가진각도(30°, 45°, 60°, 90°, 120°, 135°, 150°)와 4가지의 반사체(나무, 아크릴, 유리, 강철)재질에 따른 난류유동의 속도vector distribution, kinetic energy, turbulent intensity 등을 PIV 측정기법에 의해 실험·관찰·검토하여 그 기본 설계자료를 정립하고자 했다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig.1은 오픈 채널에서 2MHz의 초음파가 가진되었을 때 초음파의 가진 각도, 반사체의 재질 그리고 초음파를 여러번 반사시킬때의 유동장을 가시화하기 위한 실험장치이다.

수평유동장을 만들기 위해 내경 50mm, 두께 5mm인 투명 아크릴원관을 200mm 간격을 띄우고 마주보게 설치하여 한쪽에서는 Jet류가 나오고 맞은 편에서는 그 흐름을 흡수하도록 하였다. 초음파가 가진될때의 유동을 측정하기 위하여 작동유체로 25℃의 수도수를 사용하였으며 실험부의 수조는 1500(L)×800(W)×250(H)㎜ 크기의 아크릴로 제작되었다. 유체의 이송을 위해 펌프(HANIL사 PB-40E-1-D)를 사용하였고 루프를 순환하는 유체의 유속은 LDV 장비를 이용하여 정확히 계측하였으며 제어밸브를 통하여 Re수 2,000과 4,000에 맞추어 일정하게 유지하였다.

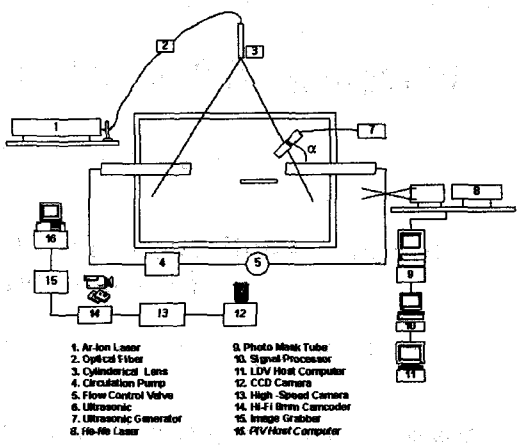


Fig.1 Schematic diagram of the test loop with ultrasonic.

2.2 PIV에 의한 영상처리

입자영상유속계(PIV)에 의한 유동가시화의 기본 원리는 유동장에 투입된 입자의 운동을 추적하여 입자들의 순시적인 위치를 미소시간 간격을 두고 영상입력하여 경계탐색과 영상의 분화 작업을 수행한 후에 각각의 입자의 변위를 계산하여 전체 유동장내의 속도벡터를 구하는 것이다.

연속된 두 피일드간의 상호상관계수는 다음과 같다.

$$C_{fg}=\frac{\sum_{i=1}^{n^2}(f_i-\overline{f_i})(g_i-\overline{g_i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n^2}(f_i-\overline{f_i})^2\sum_{i=1}^{n^2}(g_i-\overline{g_i})^2}} \quad (1)$$

여기서 f_i, g_i 는 상관영역내의 각 pixel의 계조치를 의미하며 '−' 는 평균을 뜻한다.

순시의 속도변동성분에 관한 식은 다음과 같다.

$$u'=u-\overline{u}\ ,\quad v'=v-\overline{v} \quad (2)$$

그리고 시간평균 난류운동에너지는 다음과 같다.

$$T.M.T.K.E.=\frac{1}{T}\int_0^T\frac{u'^2+v'^2}{2}\,dt \quad (3)$$

(T.M.T.K.E. = Time-Mean Turbulent Kinetic Energy)

유동가시화를 위해 사용된 산란입자는 비중이 1.02, 직경이 약 100미크론 전후의 Polyvinyl Chloride 백색 구형입자로 정전기를 방지하기 위하여 계면활성제를 소량 혼입하여 투입하였다.

그리고 조명장치로서는 4W출력의 연속광 Ar-Ion Laser(Spectra-Physics Lasers사)를 이용하였

으며, 두께 1.5mm 내외의 2차원 평면조명이 fiber optic cable 및 cylindrical lens를 통해서 유동장에 직접 조사되었다.

CCD 카메라로 촬영된 영상을 Hi-Fi 8㎜ 캠코더에 기록하고, Data Translation사의 DT3155영상입력장치(640×480pixel, Grey 8bit)를 이용하여 기록된 원시영상을 PC에 입력하였다. 영상처리작업은 호스트 컴퓨터인 PC에서 CACTUS2000 소프트웨어를 이용하였다.

2.3 실험방법

2MHz의 진동자를 사용하여 Re수 2,000과 4,000일 때의 초음파의 각도(30° , 45° , 60° , 90° , 120° , 135° , 150°)에 따른 난류증진효과를 비교하였으며, 반사체의 재질에 따른 난류증진효과를 측정하기 위해서는 Re수 4,000으로 일정하게 유지하여 측정하였다. 유체의 흐름 방향은 오른쪽에서 왼쪽으로 하였고 초음파는 유체의 유동방향과 45° 의 각을 이루며 위쪽에서 반사체의 중앙면을 향하게 가진시켰다. 측정영역은 반사체에서 초음파의 반사가 이루어지는 부분을 중심으로 하여 60㎜×60㎜를 선택하였다. 그리고 후면에서 발생하는 난류정도를 알아보기 위하여 초음파의 가진을 받는 반사체의 바로 뒷부분(60㎜×60㎜)에서의 시간평균난류강도를 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

수평유동장에서 난류증진을 위한 초음파 가진효과를 측정하기 위해 작동유체를 물로 정하고, 유동의 교란을 극대화할 수 있는 방법으로서 초음파의 특징중 직진성과 반사성을 이용하여 초음파의 가진 각도(30° , 45° , 60° , 90° , 120° , 135° , 150°)와 반사체의 재질(나무, 아크릴, 강철, 유리)에 따른 난류유동의 속도vector distribution, kinetic energy, turbulent intensity 등을 PIV계측기법에 의하여 실험 · 관찰 · 검토한 결과는 다음과 같다.

4.1 초음파의 각도에 따른 비교

Fig.2는 Re수 2,000일때 유체에 가하는 초음파의 가진 각도에 따라 각각의 시간평균난류강도를 3차원그래프로 비교하여 나타낸 것이다. 그래프(a)는 초음파를 가하지 않았을 때의 시간평균난류

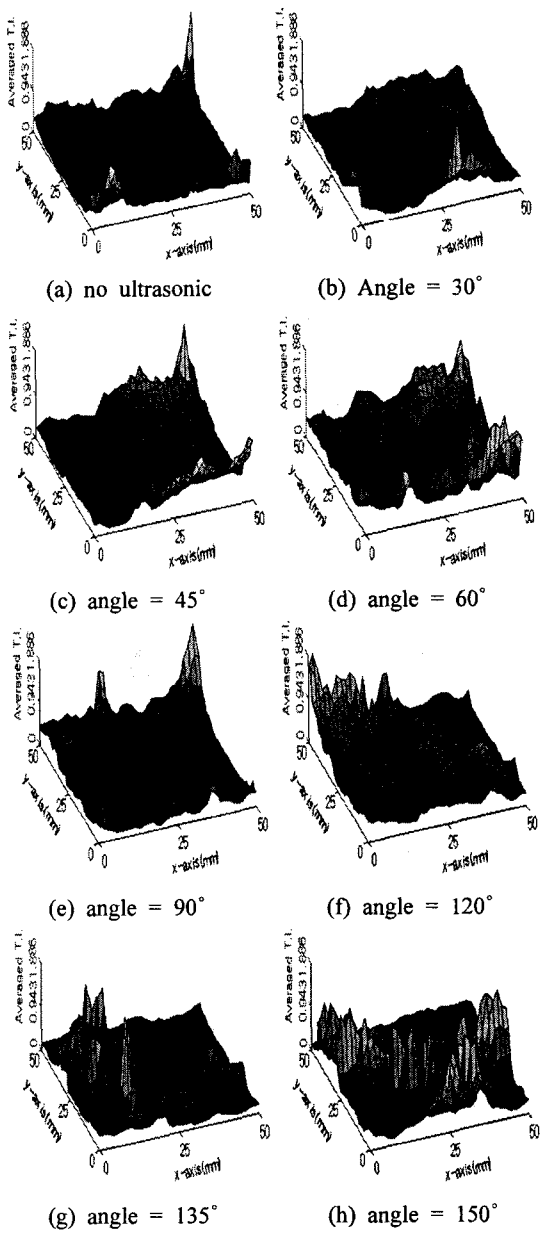
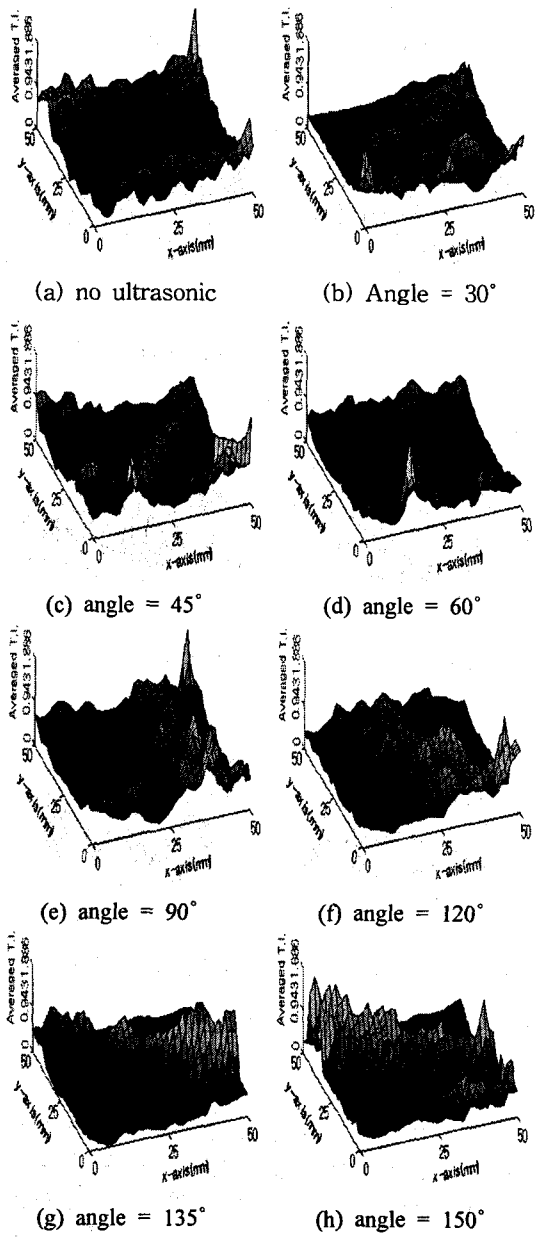


Fig.2 Time mean turbulent intensity at Re = 2,000 according to angle.

강도를 나타낸 것인데, Re수 2,000일때의 유동이 층류의 경향이 강함을 잘 나타내고 있다. (b)~(g)의 모든 그래프들이 초음파를 가진하지 않았을 때(a)에 비하여 상당히 높은 시간평균난류강도를 가지고 있다. 전체적으로 볼 때 유체의 흐름에 대하여 순방향으로 초음파를 가진할 때의 시간평

균난류강도((b)~(d))보다 역방향으로 초음파를 가진할 때의 시간평균난류강도((f)~(g))가 크게 나타나고 초음파의 가진 각이 증가할수록 시간평균난류강도가 증가하는 경향을 띄고 있다. 이는 초음파의 가진 각이 증가할수록 유체의 흐름에 반대방향으로 초음파 에너지를 받으므로 해서 유체의 교란정도가 커진 것으로 사료된다.



(a) no ultrasonic (b) Angle = 30°

(c) angle = 45° (d) angle = 60°

(e) angle = 90° (f) angle = 120°

(g) angle = 135° (h) angle = 150°

Fig.3 Time mean turbulent intensity at Re = 4,000 according to angle.

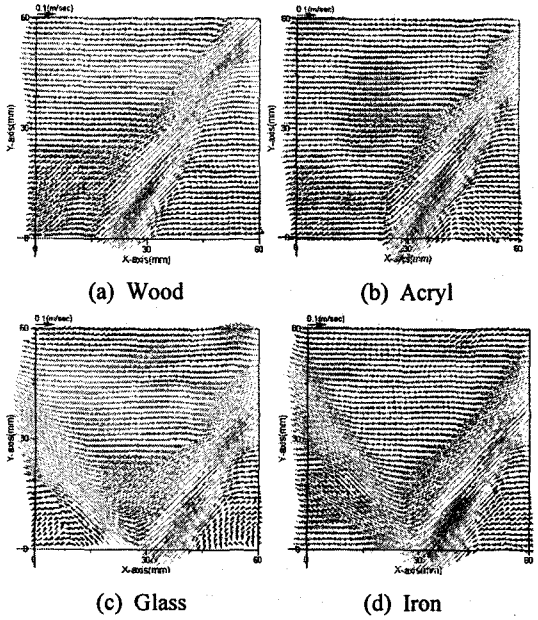
Fig.3은 Re수 4,000일때 유체에 가하는 초음파의 가진 각도에 따라 각각의 시간평균난류강도를 3차원그래프로 비교하여 나타낸 것이다. 그래프 (a)는 초음파를 가하지 않았을 때의 시간평균난류강도를 나타낸 것인데, Re수 4,000일때의 흐름이 난류의 경향이 강함을 잘 나타내고 있다.

Re수 4,000일때도 Re수 2,000때와 비슷하게 역방향으로 초음파를 가진시킬때의 시간평균난류강도가 강하며 초음파의 가진 각이 증가할수록 시간평균난류강도가 증가하는 경향을 띄었다. 그리고 가진 각이 90° 이하일때보다 90° 이상일 때 시간평균난류강도가 눈에 띄는 증가를 보였다.

Fig.2와 Fig.3을 비교해볼 때 Re수 4,000일때의 시간평균난류강도가 더 크게 나타났는데 이는 Re수 4,000일때의 난류유동과 초음파의 가진에 의해 발생한 난류의 상승작용으로 더 큰 값을 나타낸 것으로 사료된다. 그리고 몇몇의 그래프에서 y축의 상단면과 하단면에 아주 큰 값을 나타내는 곳이 있는데 이는 경계면에서 발생한 동반류에 의한 난류강도이다.

3.2 반사체의 재질에 따른 비교

Fig.4는 Re수 4,000일때 반사체의 재질에 따른 시간평균속도벡터를 비교하여 나타낸 것이다.



(a) Wood (b) Acryl

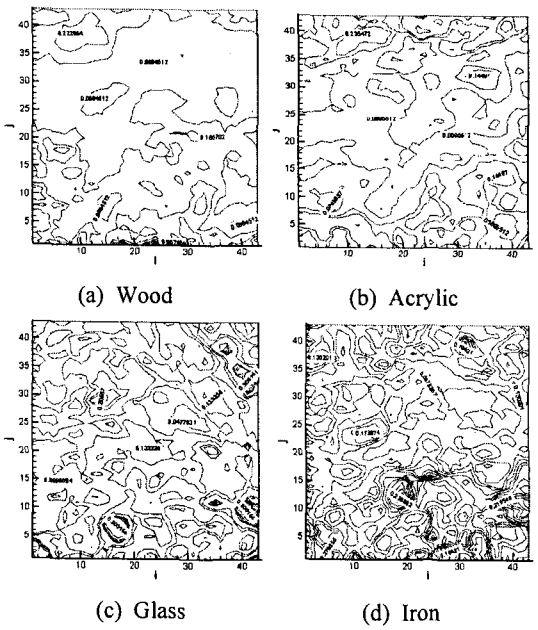
(c) Glass (d) Iron

Fig.4 Time mean velocity vector at Re=4,000 according to a material of reflector.

재질별로 볼 때 시간평균속도벡터의 크기가 강철이 가장 크게 나타났고 다음으로 유리, 아크릴 그리고 나무순으로 나타났다. 이는 초음파의 반사가 강철에서 가장 많이 일어났음을 말해준다.

나무의 경우에는 반사가 거의 나타나지 않았는데 이는 나무의 연한 재질이 초음파 에너지를 모두 흡수한 것으로 사료된다.

이로써 초음파 반사의 정도는 반사체 재질의 강도에 따른 것으로 사료되며, 강도가 강한 재질일수록 초음파의 반사 또한 좋은 것으로 사료된다.



(a) Wood (b) Acrylic

(c) Glass (d) Iron

Fig.5 Time mean turbulent intensity at Re=4,000 according to a material of reflector.

Fig.5는 Re수 4,000일 때 반사체의 재질에 따른 시간평균난류강도를 비교하여 나타낸 것이다. 측정영역은 초음파의 가진을 받는 반사체의 바로 뒷부분으로 정하였다.

재질별로 볼 때 나무, 아크릴, 유리 그리고 강철 순으로 측정영역에서의 시간평균난류강도가 커지는 경향을 보였다. 재질의 강도가 강한 강철의 뒷영역에서 시간평균난류강도가 가장 크게 나타났으며, 재질의 강도가 가장 약한 나무의 뒷영역에서 시간평균난류강도가 가장 작게 나타났는데 이는 강철에서 초음파의 반사가 가장 큰 것과 나무에서 초음파의 반사가 가장 작은 것과 관계가 있는 것으로 사료된다. 결과적으로 볼 때 초음파의 반사가 크면 클수록 시간평균난류강도가 비례하여 증가함을 잘 알 수 있다.

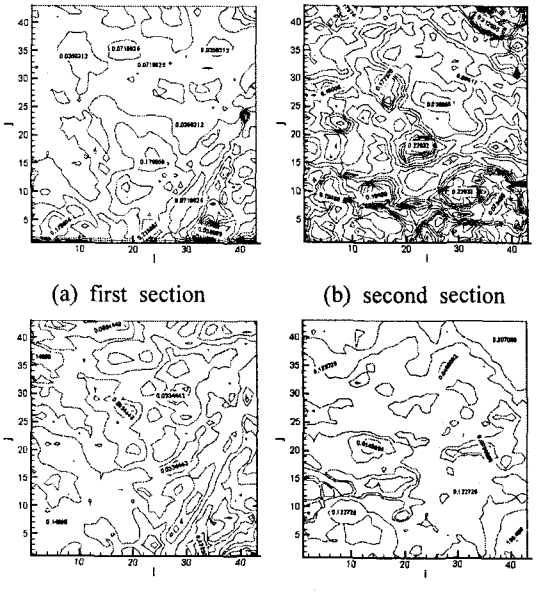
Fig.4와 Fig.5에서 볼 때 후면에서의 시간평균난류강도는 앞부분의 초음파 가진 영역의 반사체에서 얼마나 많이 초음파를 반사시키느냐에 따라 후면에서 시간평균난류강도의 크기가 결정되는 것을 알 수 있다.

3.3 초음파를 두 번 이상 반사시킬 때의 변화

Fig.6은 Re수 4,000일 때, 초음파의 반사성을 이용하여 두 번 이상 반사시킬 때의 단계별 시간평균난류강도를 비교하여 나타낸 것이다.

(a)에서 (d)의 그림을 비교해볼 때 두번째 영역에서의 시간평균난류강도가 가장 크게 나타났으며 세번째, 네번째 영역으로 갈수록 다시 줄어드는 경향을 보였다. 이것은 본 실험에서 초음파의 힘이 두 번째 영역까지는 반사를 이용하여 잘 전달되었지만 그 다음 영역부터는 초음파가 매질을 통과하는 동안 초음파의 힘이 매질에 의해 흡수·소산되어 약해졌음을 잘 보이고 있다.

첫 번째 영역에서보다 두 번째 영역에서의 시간평균난류강도가 더 크게 나타났는데 이는 첫



(a) first section (b) second section

(c) third section (d) fourth section

Fig.6 Time mean turbulent intensity at Re = 4,000 when ultrasonic is reflected several times.

번째 영역에서 발생한 난류와 두 번째 영역에서 초음파에 의해 발생한 난류가 합쳐져서 이 영역에서의 난류강도가 가장 크게 나타난 것으로 사료된다. 그러나 세번째 영역, 네번째 영역으로 갈수록 반사에 의해 도달하는 초음파의 힘이 약해져서 다시 시간평균난류강도가 약해진 것으로 사료된다.

요약하면 초음파의 가진에 의해서 난류가 많이 발생하였고, 초음파를 더 넓은 영역으로 반사시키므로 해서 초음파의 힘을 여러 영역으로 확산시킬 수 있을 뿐만 아니라 반사된 초음파에 의해서 여러 영역에서 난류 발생이 증가되었다. 그러나 본 실험에서는 초음파 힘의 한계에 의해서 4번 이상의 반사는 곤란한 것으로 측정되었으며 앞으로 계속 연구할 사항으로 사료된다.

4. 결 론

수평유동장에서 난류증진을 위한 초음파 가진 효과를 측정하기 위해 작동유체를 물로 하여, 초음파의 가진 각도(30° , 45° , 60° , 90° , 120° , *135°* , *150°*)와 초음파를 반사시킬때의 반사체의 재질(나무, 아크릴, 강철, 유리) 및 초음파를 여러번 반사시켰을 때의 난류발생정도를 PIV계측법을 통하여 가시화하여 비교·검토한 결과는 다음과 같다.

1. 유체에 가진되는 초음파의 각도가 증가할수록 시간평균난류강도가 Re수 2,000, 4,000일 때 모두 증가하였으며 초음파의 가진에 의한 난류발생 증진이 뚜렷하게 나타났다.

2. Re수 4,000일때의 시간평균난류강도가 Re수 2,000일때의 시간평균난류강도에 비하여 상대적으로 큰 값을 나타내었는데 이는 Re수 4,000일때의 난류유동과 초음파의 가진에 의해 발생한 난류의 상승효과에 기인한 것으로 사료된다.

3. 반사체의 재질별로 비교해 볼 때 시간평균난류강도는 강철, 유리, 아크릴, 나무순으로 강하였다. 이는 경계면에서의 반사파, 투과파의 강도는 양 매질의 밀도와 음속의 곱의 값으로 결정되는데 단단한 매질일수록 반사파의 강도가 높아져 반사파로 인한 난류 발생이 증가하였음을 잘 보여준다.

4. 초음파를 여러번 반사 시킴으로해서 후면의 시간평균난류강도를 증진시켰으며 이를 이용하여 초음파의 힘을 더 넓은 영역으로 확대할 수 있을 뿐만 아니라 유동에의 교란을 넓은 영역에 걸쳐 가능하게 하였다.

참고문헌

[1] 박길문, 고영하, "4각 덕트내에서 난류맥동 유동의 난류특성에 관한 연구", 공기조화·냉동공학 논문집 제2권 제3호 (1990), pp.188－197.

[2] 이동원, 김광웅, "원관내 난류 선회류의 수치해석", 공기조화·냉동공학 논문집 제7권 제3호 (1995), pp.396－405.

[3] Jones, W.P. and Pascau. A., "Computation of confined swirling flows with a second moment closure", ASME Trans., J. of Fluids Eng., (1989), pp.248－255.

[4] 이승엽, 김태현, 최영돈, "미소기포캐비테이션과 초음파 진동에 의한 난류증진에 관한 연구", 대한기계학회 1999년도 추계학술대회 논문집B (1999), pp.651－657.

[5] 조성권, "음향가진을 이용한 원형제트에서의 보텍스 병합", 서울대학교 대학원 공학박사 학위논문 (1998), pp.1－111.

[6] 이영호, 최장운, "PIV 분류 및 원리",대한기계학회지, 제36권 제12호 (1996), PP.1146－1162.

[7] 도덕희, "3차원PIV를 이용한 유동장의 3차원 계측", 대한기계학회99년도 유체공학부문 춘계학술대회 강연집, pp.41－49.

[8] Durst, F., "On Turbulent Flow through Annular passages with smooth and rough core", M. Sc. Thesis, Imperial College, (1968).

[9] 주영상, 이윤산, 유봉, "액체금속로 핵연료봉의 초음파 산란 해석" 한국음향학회 98년도 학술발표대회논문집 제17권 제2(s)호 (1998), pp.247－250.

[10] Whitelaw, J.H. and Ribeiro, M.M., "Coaxial jets with and without swirl", j of Fluid Mech, Vol.96, part 4 (1980), pp.769－795.