

초음파가 가진 유체유동의 PIV측측에 의한 연구

주은선* · 이영호** · 나우정*** · 정진도****

A Study on the Fluid Flow with Ultrasonic Forcing by PIV Measurement

E-S Ju*, Y-H Lee**, W-J La***, J-D Jung****

Key words : Fluid Flow(유체유동), Ultrasonic Forcing(초음파가진), PIV(입자영 상유속계), Turbulence (난류), Enhancement(증진)

Abstract

A study on the fluid flow with ultrasonic forcing is carried out to obtain data for the turbulence enhancement. A large water tank is made of the transparent acrylic plates and a horizontal flow field is given by setting two acrylic tubes to face mutually on a horizontal line. A 2-dimensional PIV system which is composed of a continuous-output 4W Argon-ion laser, a high-speed video camera, a PC based by an image grabber and a high resolution monitor is used to investigate characteristics of the complex turbulence flow field. And a 2MHz ultrasonic transducer is used for ultrasonic vibration forcing. Some experiments are carried out at Reynolds numbers of 2,000 and 4,000 and at 7 angles of ultrasonic incidence. In results, the flow velocity vector distribution, kinetic energy and turbulence intensity in both cases of with and without ultrasonic forcing are examined, compared and discussed by using PIV measurement. It is clarified that the ultrasonic forcing into flow field is valid to obtain the turbulence enhancement.

1. 서 론

유체기계의 최적설계를 얻기 위해서는 작동유체유동의 특성에 관한 해석이 불가피하다. 실제 유체유동의 대부분이 난류유동이다. 난류유동은 매우 복잡한 흐름으로서 유동장의 특징을 해석하는

데 일률적인 공식을 적용하는 것은 어렵다.

그래서 난류유동 문제에 대한 해는 각 경우에 따라서 적당한 난류 model을 개발하고 적용시킨으로서 그 해에 접근 가능하다. 공업적 응용에서 난류유동은 파이프유동에서의 압력손실율, 수직 작용에 의한 파도유동 등을 가져온다.

* 주은선 : 경상대학교 수송기계공학과, 항공기 부품기술 연구센터, 생산기술연구소 (원고접수일 : 2001년6월)

** 이영호 : 한국해양대학교 기계공학과, 유동정보연구원

*** 나우정 : 경상대학교 농업공학과, 농업생명과학연구원

**** 정진도 : 호서대학교 환경공학과, 환경기술연구소

그래서 파이프의 수명을 단축시키고, 동력에서 에너지 손실을 초래한다³⁾. 다른 한편으로 난류는 연소기에서 효율의 증가를, 교반기에서 물질 전달을, 열교환기에서 열전달을 가져온다⁴⁾.

난류증진은 열전달과 냉각수 혼합을 증진시키므로 신 원자로 설계를 위해 대단히 중요한 기술로 인식되고 있다⁵⁾. 또한 난류증진은 가정과 공업적 응용 양면에서 세척기계의 세척효율을 증가시키기 위해 핵심기술로 연구되고 있다. 교반에 의한 난류증진은 자연대류에 의한 열전달을 방해한다⁶⁾. 자기수력 난류는 핵융합로 개발을 위해 응용되고 있다⁷⁾. 음향가진에 의한 난류증진방법도 연구되어지고 있다. 초음파진동은 액체 속으로 잘 전파되며, 방사압과 캐비테이션을 유발하므로 난류증진을 기대케 한다⁸⁾. 본 연구에서는 저 레이놀즈수 유동에서 난류증진을 증가시키기 위해 초음파진동법을 사용하며, 초음파 가진에 의한 유체유동의 특성을 얻기 위한 실험들이 수행되어진다. 초음파 진동에 의한 난류유동의 증진효율을 극대화하기 위해서는 이들 유동장에 대한 해석이 필수적이다. 그러나 이 유동은 상기에서 언급한 바와 같이 너무 복잡하므로 일률적인 공식이나 CFD를 사용하여 이들의 유동특성 해석에 접근한다는 것은 매우 어렵다.

최근 PIV가 computer와 더불어 digital영상처리의 획기적 진전으로 많은 발전을 하고 있다⁹⁾.

이 PIV 측정법은 동시속도 vector를 효율적으로 측정할 수 있고, 비정상 유동의 동시다점에 대한 자료를 얻을 수 있을 뿐 아니라, 2차원 유동장의 전 구성을 파악할 수 있기 때문에 초음파 가진으로 증진된 복잡한 난류유동장이 가시화 될 수 있고, 정성적·정량적 해석의 접근을 기대하게 한다¹⁰⁾.

본 논문에서는 초음파 가진에 의한 난류의 증진에 관한 실험을 하기위해 큰 아르셀 수속에서 일정한 속도로 수평으로 유동하는 수평유동장이 만들어진다. 그리고 그들의 속도 vector, 운동에너지, 난류강도 등이 Re수 2,000과 4,000에서 PIV를 사용하여 측정되고, 초음파 가진에 의한 유체유동의 난류증진을 위한 특성들에 대한 자료들이 얻어진다.

2. 이 론

난류는 임의성, 확산성, 회전도 요동 및 소산성을 가진 유체유동의 속성이다. 난류에너지 수지식은 매우 복잡하며 다음과 같이 나타내어진다¹⁾.

$$U_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{1}{2} u_i u_i \right) = - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{1}{\rho} \overline{u_j P} + \frac{1}{2} \overline{u_i u_j} - 2 \overline{v u_i s_j} \right) - u_i u_j \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_j} + \frac{\partial U_i}{\partial x_i} \right) \right] - 2 \overline{v s_j s_j} \quad (1)$$

여기서 난류생성량은 다음과 같다.

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

초음파 진동에너지의 강도가 동일한 매질 중에서 더 크게 될 때 초음파는 더 빨리 전파된다. A가 파의 진폭이고, f가 진동수일 때 에너지 합성은 다음과 같이 주어진다¹¹⁾.

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

단위체적당에너지 ϵ 는 다음과 같다.

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

단위면적당 초음파 에너지량 I는 다음과 같이 주어진다.

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

여기서 c는 음파의 전파 속도이다.

고주파 초음파는 방사압을 가지며, 그의 체적력 의 요동 f_j 는 난류요동과 상호작용하여 난류가 생성될 수 있으며, 그 생성율은 다음과 같이 주어진다.

$$F_j = \overline{f_j u_j} + \overline{f_j^2 u_j} \quad (6)$$

초음파 가진에 의한 복잡한 유동의 난류증진에 대한 해석을 하기 위해 PIV측정법이 사용되며, 그 관계식은 다음과 같다¹²⁾.

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

여기서 $C(s,t)$ 는 연속된 두 frame간의 상호상관 계수이다.

순간속도요동성분 u' 와 v' 는 다음과 같이 정의된다.

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

시간평균난류운동에너지는 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{E}_{kt} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{u'^2 + v'^2}{2} dt \quad (9)$$

시간평균난류강도는 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{I}_t = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} \frac{(u'^2 + v'^2)^{1/2}}{(\bar{u}^2 + \bar{v}^2)^{1/2}} dt \quad (10)$$

난류강도의 평균선 높이의 평균은 다음과 같이 주어진다.

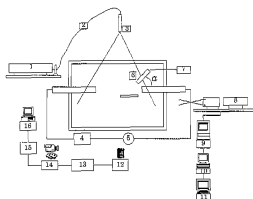
$$\bar{I}_{tc} = \frac{\sum_{i=1}^n I_{tc,i}}{n} \quad (11)$$

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

Fig. 1은 초음파가 가진되었을때 저 레이놀즈수와 초음파가진 각도에 따른 유동장을 가시화하여 측정하기 위한 시험장치의 개략도이다. 이는 유동장 system, 초음파 system, 및 PIV측정 system으로 구성되어진다.

직경과 두께가 각각 50mm와 5mm를 가진 두 원통 투명 아크릴 튜브가 한쪽은 분무, 다른 쪽은 흡수 역할을 하도록 간격 200mm를 두고 상호 마주보게 설치되어진다.



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

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

실験 수조는 1500(L)×800(W)×250(H)mm 크기로 투명 아크릴판으로 만들어진다. 작동유체를 유동시키기 위해 한일사의 모델 No. PB-40E-1-D인 펌프가 사용된다. 회전계를 통하여 순환하는 유속은 LDV system을 사용해 정확히 측정되어지고, 제어속도 valve에 의해 제어되어진다.

Table 1은 전체 실험조건들을 보이고 있다.

Table 1 Experimental conditions

Item	Specification
Image Grabber	DT3155(640×480 pixel, B&W)
Light Source	4W Ar-Ion Laser
Particle Seed	PVC (Polyvinyl Chloride : 100µm)
Working Fluid	City water (25°C)
Sheet Light	Cylindrical Lens (width : 2mm)
Dimension of Test Tank	1500(L)×800(W)×250(H)mm
Ultrasonic Transducer	2MHz
Host Computer	Intel P-III 650MHz Dual Processor (Windows2000)
Calculation Time	1 sec / 120 frame
Image Recorder	Hi-8mm Camcorder
Identification	Two-frame Grey-level Cross Correlation Algorithm
PIV Software	CACTUS 2000

3. 2 실험방법

작동 유체로서 25℃의 수도수가 사용되어진다. 초음파 변환기는 반사와 굴절과 같은 빛의 성질에 가까운 특성을 이용하기 위해 2MHz 고주파수의 초음파로 선택되어진다.

유동장 특성을 점검하는데 Re수가 2,000과 4,000인 두 경우에서 실험이 행해진다. 이때 특성 길이는 노즐 내경(50mm)으로 정하고, 초음파 가진에 의한 경미의 난류증진의 결과를 얻기 위해서는 관류에서 층류의 임계치 모델로서 Re수가 2000일때를 택하고, 한정된 초음파 동력이 증가된 유동력에 의해 파묻히는 현상 규명을 위해서는 난류로 천이 하는 과정에서의 모델로서 Re수 4000을 택한다. 각도크기의 증가에 따른 난류증진의 유동특성을 조사하기 위해 각도가 30, 45, 60, 90, 120, 135, 150°인 7가지 초음파 입사각이 선택되어진다. 유동을 가시화 하기 위해 사용된 산란자 들은 비중이 1.02, 평균직경이 100μm인 Polyvinyl chloride구형색입자이며, 정전기를 방지하기 위해 계면 활성제를 혼합하여 무입되어진다. 4W 동력의 연속 beam을 갖는 Ar-Ion 레이저 (Spectra-Physics Laser Co.)가 광원으로 이용되어진다. 두께 1.0mm를 가진 2차원 평면조사광이 섬유광케이블과 실린드리카탈렌즈를 통해 유동장으로 조사되어진다.

CCD카메라에 의해 촬영된 영상은 Hi-Fi 8mm 캠코더에 기록되어지고, 기록된 원시영상들은 Data Translation Co.의 DT3155영상입력장치 (640×480pixel, Grey 8bit)를 사용하여 PC로 옮겨진다.

주computer에서 영상처리를 하기 위해 CACT US2000이 사용되어진다⁹⁾. 영상처리의 전처리에서 윤곽선을 탐색하기 위해 Sobel연산자가 사용되어진다. 2 프레임 제초치의 상호상관법이 동일입자처리 알고리즘으로서 사용되어진다.

여기서 탐색반경(SAR)은 8pixel이고 상관영역(CAS)은 45pixel×45pixel이다. 그리고 sub-pixel 보간은 후처리에서 계산적자수 45pixel×45pixel에 대해 60pixel×60pixel을 가진 격자점이 재배치 될 때 최소사승법을 사용하여 수행되어진다. 단

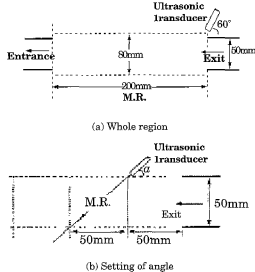


Fig. 2 Definition of measuring region

위완산은 계단영역에 따라 계산되어지며, 원시영상에서 360pixel은 50mm의 측정거리에 해당한다.

Fig. 2는 각 실험에 따른 측정영역을 보이고있다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig 3.은 초음파가 가진되었을 때 Re수에 따른 시간평균속도분포를 보이고 있다. 이는 430장 이상의 원시 영상으로부터 시간 평균한 것이다.

초음파 힘이 수평유동장을 교란함을 보이고 있다. 초음파영역은 큰 Re수에서 더 많이 퍼지고 있다. 이는 속도의 증가가 일정한 강도를 가진 초음파 힘의 집중을 흐트림을 의미한다.

Fig. 4는 초음파가 가진되었을 때 Re수에 따른

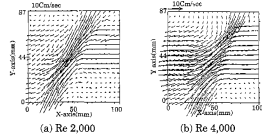


Fig. 3 Time mean velocity with ultrasonic vibration forcing

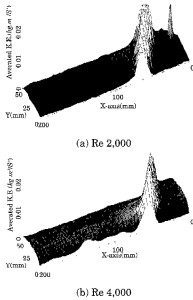


Fig. 4 Time mean kinetic energy with ultrasonic vibration forcing

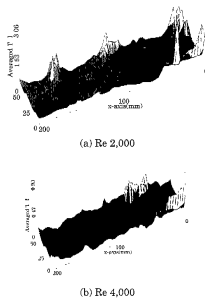


Fig. 6 Time mean turbulence intensity with ultrasonic vibration forcing

시간평균 운동에너지를 보이고 있다. Re 수 4,000에서의 운동에너지는 Re 수 2,000에서 보다도 유동방향으로 조금 더 크지면서 확실히 나타나고 있다. 이는 Re 수의 증가는 운동에너지의 증가임을 의미한다. (a) 그림의 뒷부분의 돌출부는 체트류와 등반류간에서 들뜬적으로 일어날 수 있는 소규모 와(渦)에 의한 것으로 사료된다.

Fig. 5는 초음파가 가진 또는 비가진일 때 운동에너지가 가장 일정한 부분이 되는 중간부에서 운동에너지가 Re 수에 따라 비교되어지는 그래프이다.

초음파 가진영역에서 운동에너지의 갑작스런 솟음이 초음파 비가진영역에 비교해서 크게 나타나고 있다. 또한 Re 수가 4,000일때가 Re 수 2,000

일때에 비해서 운동에너지의 증가가 더 뚜렷함을 보이고 있다. 이는 Re 수 증가가 운동에너지 증가를 가져온다는 원리에 부합된다.

Fig. 6은 초음파가 가진되었을 때 Re 수에 따른 시간평균 난류강도를 보이고 있다.

초음파에 의한 난류증진의 정미 증가가 Re 수 4,000에 비해서 Re 수 2,000에서 더 크게 나타나는 데 이는 일정한 초음파 힘이 Re 수 2,000 유동에 비해 Re 수 4,000 유동에서의 더 미세한 힘에 파동됨을 의미한다.

Fig. 7은 난류강도가 일정하게 되는 중심부에서 난류강도가 전거리영역에 걸쳐서 Re 수에 따라 비교되는 그래프이다.

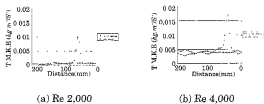


Fig. 5 Comparison of the time mean kinetic energy between with and without ultrasonic

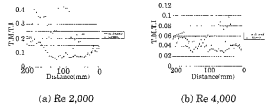
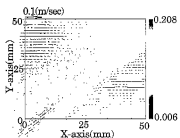
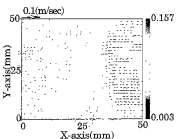


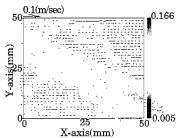
Fig. 7 Comparison of the time mean turbulence intensity between with and without ultrasonic



(a) 45°



(b) 90°

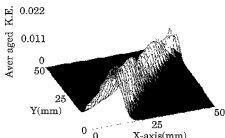


(c) 150°

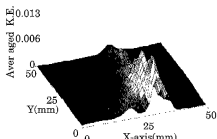
Fig. 8 Time mean velocity vector at Re 2,000 according to angles

Re수 2,000에서 초음파 가진에 의한 난류증진의 증가는 초음파 비가진시와 비교해서 전 거리 영역에 걸쳐 현저하게 나타나고 있다. Re수 4,000에서도 초음파 가진 영역에서의 난류강도가 초음파 비가진시에 비교해서 크게 나타나고 있으나, 뒤 영역으로부터 멀어짐에 따라 현저히 감소되어지고 있고, 초음파가 가진 안된 양상에 비스함을 보인다. 이는 Re수 증가에 따른 유동력의 증가는 상기한 바와 같이 일정한 초음파강도를 압도했음을 의미한다.

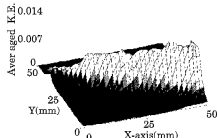
따라서 난류증진을 최대화하기 위해서는 초음파강도가 Re수의 증가에 따라서 강하게 되어져야 할을 알 수 있다.



(a) 45°



(b) 90°



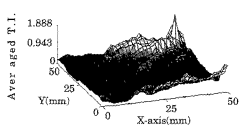
(c) 150°

Fig. 9 Time mean kinetic energy at Re 2,000 according to angles

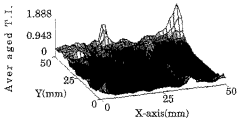
Fig. 8은 Re수 2,000에서 각도에 따른 시간평균 속도 vector를 보이고 있다. 이는 유체 유동을 교란하기 위한 성질이 유체유동의 방향에 대해 초음파의 가진 각도가 증가함에 따라 더 강하게 됨을 나타내고 있다.

Fig. 9는 Re수 2,000에서 각도에 따른 시간평균 운동에너지의 3차원적인 분포모양을 보이고 있다. 운동에너지가 초음파 통과영역을 따라서 초음파 입사각이 클수록 크게 나타나고 있다.

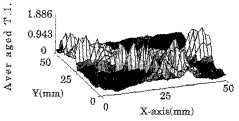
Fig. 10은 각도에 따른 시간평균 난류강도를 3차원적인 입체모양으로 보이고 있다. 난류강도는 난류입사각의 증가에 따라 증가함을 보이고 있다.



(a) 45°

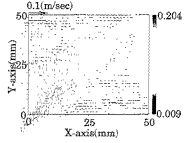


(b) 90°

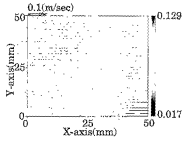


(c) 150°

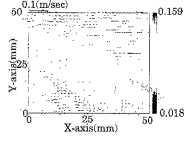
Fig. 10 Time mean turbulent intensity at Re 2,000 according to angles



(a) 45°

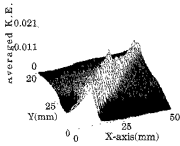


(b) 90°

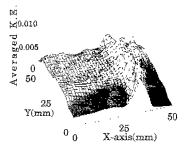


(c) 150°

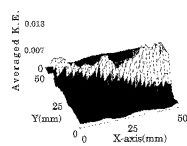
Fig. 11 Time mean velocity vector at Re 4,000 according to angles



(a) 45°



(b) 90°



(c) 150°

Fig. 12 Time mean kinetic energy at Re 4,000 according to angles

상·하 양 영역의 가장자리에 나타나는 큰 난류 강도는 수평유동과 추위흐름의 간섭에 의해 형성 되는 것으로 사료된다.

Fig. 11은 Re수 4,000에서 각도에 따른 시간평균속도 vector분포를 보이고 있다.

수평장의 속도 vector분포의 영향장은 Re수 2,000에 비교해서 폭은 더 넓게 나타났다. 이는 상기한바와 같이 Re수의 증가에 따른 속도의 증가로 흐름과 간섭영역이 퍼진 것으로 사료된다.

Fig. 12는 Re수 4,000에서 초음파 입사각에 따른 시간평균운동에너지를 3차원적으로 보이고 있다.

Re수 2,000에 비교해서 더 복잡한 등고선의 운동에너지를 보이고 있다. 이는 난류에너지의 평장이 Re수 증가에 따른 유동속도의 증가에 의한 것으로 해석된다. 수평유동장에서 운동에너지의 변화량은 Re수 2,000에서와 같은 양상을 보이나 영향받는 폭은 3가지 각 전반에 걸쳐 더 넓게 보이고 있다.

이는 Re수 증가가 운동에너지를 증가시키고, 운동에너지를 증가는 유동속도의 증가를 가져와 상기한 바와같이 초음파 간섭영역을 더 퍼지게 함을 의미한다.

Fig. 13은 Re수 2,000과 4,000에서 각도에 따른 시간평균운동에너지를 비교를 보이고 있다.

운동에너지를 감소는 초음파 입사각의 증가에 따라 나타나고, Re수 4,000에서의 운동에너지를

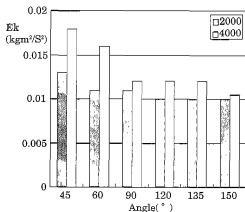


Fig. 13 Time mean kinetic energy distribution at Re 2,000 and 4,000 according to angles

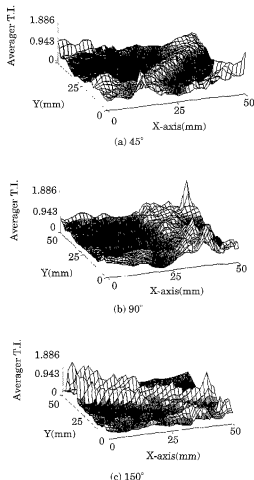


Fig.14 Time mean turbulence intensity at Re 4,000 according to angles

Re수 2,000에서보다 각 전반에 걸쳐 크게 나타나고 있다. 이는 Re수의 증가는 상기한 바와 같이 운동에너지를 증가를 가져옴을 의미한다.

Fig. 14는 Re수 4,000에서 각도에 따른 시간평균 난류강도를 3차원적인 입체모양으로 보이고 있다. 초음파 입사영역에서 난류강도는 현저히 나타나고 그것의 분포와 크기는 초음파 입사각의 증가에 따라서 각각 더 복잡하게 되고 더 크지고 있다. 난류강도는 Fig. 10의 Re수 2,000에서 보다는 각도 전반에 걸쳐 좀 더 크게 나타나고 있다. 이것은 Re수 증가에 따른 유동속도의 증가에 의한 난류생성과 초음파간의 상승작용으로 해석된다.

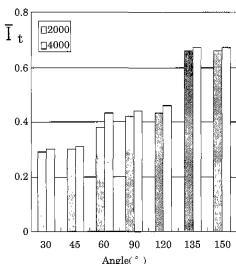


Fig. 15 Time mean turbulent intensity distribution at Re 2,000 and 4,000 according to angles

Fig. 15는 Re수 2,000과 4,000사이에서 난류강도에 대한 비교 그래프이다. 난류강도는 입사각의 증가에 따라 크게 나타나고 있다. 이는 초음파 입사각의 증가는 난류생성의 증가를 가져온다. Re수 4,000에서 난류강도는 Re수 2,000에서보다 각도 전반에 걸쳐 조금 크게 나타나고 있다.

이는 상기에서 언급한 바와같이 초음파 동력과 수평유동장 자체에 의해생기는 난류생성에 의한 난류중간간의 상승작용으로 사료된다.

5. 결 론

초음파가 가진 수평유동장에서 Re수와 입사각에 따른 유동특성을 PIV측정으로 비교·검토한 결과는 다음과 같다.

1. 시간평균속도 분포에서 초음파의 간섭이 뚜렷하며, Re수가 클 때 그 영역이 피경을 볼 수 있다. 이는 초음파가 수평유동장의 유동 특성에 영향을 끼침을 나타낸다.
2. 시간평균 운동에너지는 초음파가진 영역을 따라 크게 나타나며, 그 뒤 흐름에서 Re수가 클 때

줄며 우세하게 발전하고 있다. 이는 일정한 초음파의 가진 동력과 Re수 증가에 따른 유동자체의 운동에너지 증가와의 상승작용으로 사료된다.

3. 초음파가진에 의한 난류강도의 정미 증가는 Re수가 작을 때가 클때보다도 유동의 전거리 영역에서 뚜렷이 나타나고 있다. 이는 일정한 초음파 가진력이 Re수가 작을때 우세하게 나타날 수 있고, Re수가 커질수록 파를림을 의미한다.
4. 초음파 입사각의 변화에 따른 운동에너지는 입사각 전반에 걸쳐서 입사각이 커질수록 감소되고, 난류강도는 조금씩 증가됨을 볼 수 있다. 입사각이 예각일 때 Re수 증가에 따른 운동에너지의 정미증가는 뚜렷했다.
5. 난류중진을 위한 초음파 영향의 극대화를 위해서는 Re수 증가에 따른 초음파 동력의 증가와 입사각에 대한 배려가 요구된다.
6. 초음파에 의한 복잡한 난류중진 유동장 해석에 PIV기법의 도입은 이 분야 연구에 큰 가능성을 보여 주었다.

후 기

이 논문은 2001년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

- [1] Tennekes, H. and Lumley, J. L., "A first course in turbulence", MIT Publishing Company, Inc., pp. 1~4, 1994.
- [2] 박길준, 고영하, "4각 덕트내에서 난류벽층유동의 난류특성에 관한 연구",공기조화·냉동공학논문집 제2권, 제3호, pp. 188~197, 1990.
- [3] 이동원, 김광용, "원관내 난류 선회류의 수치해석", 공기조화·냉동공학 논문집, 제7권, 제3호, pp. 396~405, 1995.
- [4] 이승엽, 김태현, 최일돈, "미소기포캐비테이션 과 초음파 진동에 의한 난류중진에 관한 연구",대한기계학회 1999년도 추계학술대회 논문집B, pp. 651~657, 1999.

- [5] Mantagomery, D., "Magneto-hydrodynamic Turbulence Lecture Notes on Turbulence", edited by J.R. Herring and J.G. McWilliam S, World Scientific, 1987.
- [6] Adrian, R.,J., "Limiting Resolution of Particle Image Velocimetry for Turbulent Flow", Proc. Advances in Turbulence Reseach, POSTEC, Pohang, Korea, 1~19, 1995.
- [7] 이영호, 최장운, "PIV 분류 및 원리" 대한기계학회지, 제36권, 제12호, pp. 1146~1162, 1996.
- [8] CACTUS 2,000 Manual, I.I.T.
- [9] 김경천, "환경 및 산업에서의 난류유동 이해와응용", 대한기계학회지, 제 34권, 9호, pp.666~677, 1994.
- [10] 서장식, 조석, 송철화, 정문기, 최영돈, "PIV를 이용한 피동형 안전주입탱크내의 유체기구 내부유동측정", 대한기계학회 1998년도 춘계학술대회 논문집 B, pp.399~404, 1998.

저자 소개



주은석(朱恩錫)

1938년 6월 8일생. 1963년 서울대 분리학과 졸업. 1980년 부산대 대학원 기계공학 졸업(석사). 1984년 동 대학원 기계공학 졸업(박사). 현재 경상대 공대 수송기계공학부 교수. 당 학회 정회원.



이영호(李英浩)

1957년 2월생. 1980년 한국해양대학교 기체공학과 졸업. 1982년 한국해양대학교 대학원 석사과정 수료. 1989년 동경대학 기계공학 박사과정 수료. 1980~현재 한국해양대학교 조교, 전강, 조교수, 부교수(기계공학부). 당학회 편집위원('97, '98년도).



남우정(南又鎭)

1947년 12월 12일생. 1970년 서울대 농공학과 졸업. 1986년 Ghent대 대학원 농공학과 졸업(농박). 현재 경상대 농대 농업시스템공학부 교수.



질진도(池鎭處)

1960년 9월 23일생. 1983년 충남대 기계공학과 졸업. 1985년 동 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학). 1996년 (日)Kanazawa Uni. 환경공학과 대학원 졸업(공학). 현재 호서대 공대 안전전공학부 교수.