

PIV측측에 의한 고주파수 초음파 유동장 해석에 관한 연구

이상범* · 송민근* · 손승우* · 정광수* · 주은선**

A Study on the Flow Field Analysis with a High-frequency Ultrasonic by PIV Measurement

Sangbum Lee*, Mingeun Song*, Seungwoo Son*, Gwangsu Jeong*, Eunsun Ju**

Key Words: High Frequency Ultrasonic(고주파초음파), Particle Image Velocimetry(입자영상유속계) Flow Field Visualization(유동장 가시화), Coaxial Circular Pipe(동심원관)

Abstract

The purpose of this study is to compare the time mean velocity distribution, the time mean kinetic energy, and the time mean turbulence intensity between vertical and horizontal flow fields in a coaxial circular pipe by PIV measurement. Experiments are performed at a Reynolds number 2,000, measuring regions divided as the section regions A, B, C, D in flow fields. The angle of the high-frequency ultrasonic is selected in the direction of 45° to the flow axes and it is reflected several times. In results, it is clarified that the effect of gravity is given in the vertical flow field compared with the horizontal flow field and the ultrasonic affects the turbulence enhancement. And kinetic energy and turbulence intensity with ultrasonic are shown slightly bigger than those in flow field without it.

1. 서론

유체유동과 연소등의 열·유체 문제를 다루는데 있어서 기본적으로 요구되는 것은 유동장에 대한 유동정보이다. 유동장의 유동특성 및 형태를 파악하는 일은 유체기기의 설계과정에 필수적이다.

그러나 실제 유체의 유동 구조는 대단히 복잡한 난류유동이므로 이를 해석하기 위해서는 많은 어려움이 따른다. 이를 해결하기 위한 실험적 방법으로 유동가시화(Flow Visualization)에 의한 PIV(Particle Image Velocimetry)측정법을 들 수 있다. 이 방법은 전체 유동장에 대해서 화상처리

로 해석함으로써 유동장 전체에 걸쳐서 동 시각의 속도분포를 정량적으로 측정가능한 기술이다.

유체유동의 일반적인 이론은 임의의 기하학적 형상에 적용되기에는 너무나 어려우므로 간단한 형상이면서도 유동정보를 충분히 제공할 수 있는 형상들이 주로 다루어져 왔다. 그 중에서도 동심관내에서의 유동은 유체유동의 많은 정보를 제공하고 있으므로 이에 관한 연구가 다수 자행되어져 왔다. Dust¹⁾는 2중원관에서 핵의 거침에 대한 난류유동에 대해 연구하였고, Whitelaw²⁾등은 동심관 Jet의 선회류 유무에 대한 연구를 하였다. 김³⁾은 수평유동장에서 난류강도와 축방향 전단응력에 관한 연구를 했고, 서⁴⁾등 과 송⁵⁾등은 수직유동장에 관한 연구를, 구⁶⁾등은 수직유동장에서 초음파 가진에 의한 난류증진을, 이⁷⁾등은 초음파진동이 난류증진에 미치는 영향에 관해 연구하였다. 본 연구에 이용한 고주파 초음파는

* 경상대학교 대학원

** 경상대학교 수송기계공학부, 항공기 부품기술연구소, 생산기술연구소

직진성을 가지며 유체유동에 있어서는 방사압에 의해 난류를 증진^{5),6)}시키는 효과가 있다고 알려져 왔다. 초음파 진동에 의해 액체 속에서는 작은 캐비테이션이 발생하며, 이는 금속 용해물, 광학유리등에서 세척효과를 나타내기도 한다. 초음파를 가함으로 증진된 더욱 복잡한 난류유동장에 관한 조사는 PIV에 의해 접근가능케 된다.

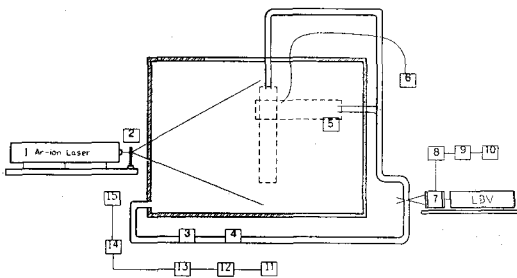
상기한 바와 같이 액체유동특성에 관해 많은 정보를 제공해 주는 동심원관 유동장 연구에 있어서 수직 또는 수평 각각에 관한 연구는 있으나 수직, 수평을 동시에 실험·비교한 연구는 미미하다.

본 연구에서는 액체유동의 특성에 대해 수평 및 수직 동심원관 유동장에 입자영상유속계(PIV)를 이용하여 Re수 2,000에서 고주파인 2MHz 초음파의 조사 유·무에 따라 나타나는 유동특성 즉, 속도분포, 운동에너지, 난류강도등의 유동현상을 조사·비교·검토해 봄으로써 이중원관 내에서 초음파 유동에 대한 정성적, 정량적 유동정보를 얻고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

Fig. 1은 본 실험을 위한 장치구성의 개략도를 나타내고 있다. 큰 수조는 1500(L)×250(W)×800(H)mm³의 크기로 투명성이 뛰어난 아크릴판으로 제작하였다.



1. Ar-ion Laser
2. Cylindrical Lens
3. Circulation Pump
4. Flow control valve
5. Ultrasonic
6. Ultrasonic generator
7. He-Ne Laser
8. Photo Multiplier
9. Signal 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 arrangement of the experimental system

내경 46mm, 두께 2mm인 투명 유리관속에 내경 d=23mm, 두께 t=1mm인 스테인레스강(STST)노즐을 부착하여 동심원관 유동장을 만들었다. 여기서 아크릴수조와 투명 유리관은 광학적 수차가 적고 가시화가 가능한 두께를 가진 것을 사용하였다. 순환펌프를 사용하여 원형관 내부의 유동을 구동시키고 유속을 측정하기 위해 TSI제품의 30mW 출력의 He-Ne 레이저를 사용하는 LDV를 장착하여 측정하였으며, speed valve로 유속을 제어하였다.

난류 발생장치로 고주파인 2MHz의 초음파를 사용하였고, 유동의 흐름과 45° 각도를 이루도록 조정하여 조사하였다. 초음파의 출력을 일정하게 조절하기 위해 초음파 발생기 회로를 사용하였으며, 초음파는 최대 출력상태에서 실험을 행하였다.

Table 1은 제반 실험조건을 나타내고 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 : 100 μ m)
Working Fluid	Citywater(10°C)
Sheet Light	Cylindrical Lens(t=2mm)
Flow Meter	LDV(Laser Doppler Velocimetry)
Flow Regulation	Pump(1HP), Valve(BrCl)
Host Computer	Intel Pentium III
Ultrasonic	2MHz
Image Recorder	Hi-8mm Camcorder
Identification	Two-frame Gray-Level Cross Correlation Algorithm
PIV Software	Cactus 2000'

2.2 PIV에 의한 영상처리 과정

유동을 가시화하기 위한 조명으로서 2W출력의 연속광 Ar-ion laser를 사용하였으며, 두께 1.5mm 내외의 빔이 fiber optic cable 및 cylindrical lens를 통해서 두께 2mm정도의 시트로 형성하여 유동장을 가시화 하였다. 가시화된 유동장을 측정하기 위한 산란입자로 비중이 1.02 이고 직경이 100 μ m 전후의 polyvinyl chloride 백색 구형입자를 사용하였다.

유동장내에 정전기로 인한 산란입자의 부착을 방지하며 비중의 증가를 최소화하기 위하여, 계면활성제를 미리 소량 희석 한 후 유동장이 완전

히 발달되었을 때 산란입자를 유동장에 투입하였다. 유동 가시화를 위한 고해상도 원시 영상을 얻기 위해서는 고속카메라로 촬영한 영상을 Hi-Fi 8mm 캠코드에 저장되게 하고, 여기에 보존된 원시영상을 처리하여 속도 벡터를 구하였다. 이때 아날로그 영상은 디지털로 바꾸어져 PIV 전용 컴퓨터에 그 영상이 전달되는데, 이러한 기능을 가진 영상 전용기로서 Data Translation사의 DT3155(640×480pixel, Grey 8bit)제품을 이용하였다. DT3155 Image Grabber는 8Bit 즉, 256 계조치의 분해능과 수평 640line과 수직 480line의 해상도를 가지고 있다. Fig. 2는 PIV system의 처리과정을 나타내었다.

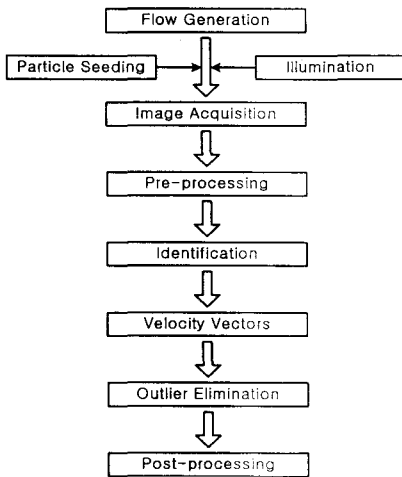


Fig. 2 Flow chart of PIV processing

여기에 이용된 공식들은 다음과 같다.

연속된 두 피일드간의 상호상관계수는 다음과 같다.

$$C_{fg} = \frac{\sum_{i=1}^N (f_i - \bar{f})(g_i - \bar{g})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (f_i - \bar{f})^2 \sum_{i=1}^N (g_i - \bar{g})^2}} \quad (1)$$

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

시간평균과 순시의 속도변동성분에 관한 식은 아래와 같다.

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u \, dt, \quad \bar{v} = \frac{1}{T} \int_0^T v \, dt \quad (2)$$

$$u' = u - \bar{u}, \quad v' = v - \bar{v} \quad (3)$$

(u' 및 v' 는 순시 속도변동성분, \bar{u} 및 \bar{v} 는 시간평균속도)

시간평균과 순시 운동에너지에 관한 식은 아래와 같다.

$$K.E. = \frac{u^2 + v^2}{2} \quad (4)$$

$$T.M.K.E. = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{u^2 + v^2}{2} \, dt \quad (5)$$

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

시간평균과 순시 난류강도에 관한 식은 아래와 같다.

$$T.I. = \frac{\sqrt{(u'^2 + v'^2)/2}}{\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}} \quad (6)$$

(T.I. = Turbulent Intensity)

$$T.M.T.I. = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{\sqrt{(u'^2 + v'^2)/2}}{\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}} \, dt \quad (7)$$

(T.M.T.I. = Time-Mean Turbulent Intensity)

난류운동에너지와 시간평균 난류운동에너지는 각기 아래와 같이 주어진다.

$$T.K.E. = \frac{u'^2 + v'^2}{2} \quad (8)$$

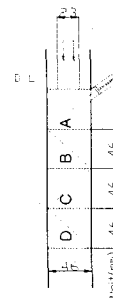
(T.K.E = Turbulent Kinetic Energy)

$$T.M.T.K.E. = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{u'^2 + v'^2}{2} \, dt \quad (9)$$

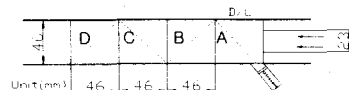
(T.M.T.K.E.=Time-Mean Turbulent Kinetic Energy)

2.3 실험방법

Fig. 3은 수평 및 수직 측정부로서 각 영역별 측정부 A, B, C, D 4구간으로 나누어 나타내었다.



(a) Vertical flow field with ultrasonic



(b) Horizontal flow field with ultrasonic

Fig. 3 Measuring regions in the flow fields of the vertical (a) and the horizontal (b)

측정영역은 원관의 출구에서 46mm떨어진 부분에서 시작하여 46(L)mm×46(H)mm의 영역을 형성하여 무차원화 시켰으며, 차례대로 측정영역 A, B, C, D로 정하였다. 실험시 10℃의 수도수(citywater)를 작동유체로 사용하였으며, Re수를 계산하기 위하여 LDV를 설치하여 원관의 대표속도를 측정하고, 노즐의 직경을 대표길이로 하였으며, 10℃ 수도수의 동점성계수를 적용하였다. System의 유량조절은 미세 유량까지 조절이 가능한 밸브를 사용하여 유량을 조절하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 초음파 비가진시 수직유동장

Fig. 4는 수직유동장에서 Re수 2,000에서 시간평균 속도분포를 나타내고 있으며, 측정영역이 A에서 D로 갈수록 전체적인 속도분포의 크기가 점점 작아짐을 볼 수 있다. A, B, C영역까지는 관내 유동특성 분포를 잘 보이고 있으나, D영역에서는 노즐에서 나오는 유동과 동반류의 유속이 많이 혼합되어지는 부분이고, 정수압을 가장 많이 받는 영역이므로 이로 인해 유동특성 분포를 잘 따르지 못함을 볼 수 있다.

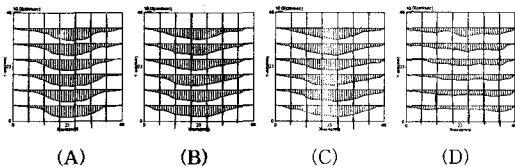


Fig. 4 Time mean velocity distribution in the vertical flow field without ultrasonic

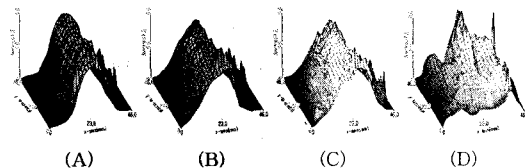


Fig. 5 Time mean kinetic energy distribution in the vertical flow field without ultrasonic

Fig. 5는 Re수 2,000에서 초음파가 가진되지 않았을 때의 영역 A, B, C, D에서 수직원관의 시간평균 운동에너지를 나타낸 것으로 D영역으로 갈수록 운동에너지를 많이 분산됨을 볼 수 있는데 그 이유는 Fig. 4에서 기술한 바와 같다.

3.2 초음파 비가진시 수평유동장

Fig. 6은 초음파가 가진되지 않았을 때의 수평원관에서의 시간평균 속도분포이다. 이 그림에서도 수직과 마찬가지로 A, B, C로 갈수록 관내 유동특성 분포를 잘 따르고 있으나, D영역에서는 유동특성분포가 A, B, C영역 부분에 비해서는 충실하지 못함을 볼 수가 있다. A영역에서 D영역으로 갈수록 속도 크기는 감소하고 전단 혼합류화하므로 속도분포가 난류형으로 됨을 볼 수 있다.

Fig. 4와 Fig. 6을 비교해 보면, 수직원관의 A영역보다 수평원관 A의 속도분포가 조금 더 큼을 볼 수가 있는데, 이는 측정위치에 따라서 작용하는 정수압의 분포정도가 수평은 일정한데 반해, 수직은 A, B, C, D로 갈수록 더 크게 작용하기 때문이고, 수직원관의 D부분에서 속도분포가 수평원관에 비해 더 많이 흐트러지는 이유는 수직원관 D영역이 수평원관 D영역에 비해 더 큰 정수압이 작용하기 때문인 것으로 사료된다. 두 수직·수평 노즐에서 각각 분출되는 유속영향이 출구에서 멀어질수록 상대적으로 작게 작용함을 볼 수 있다.

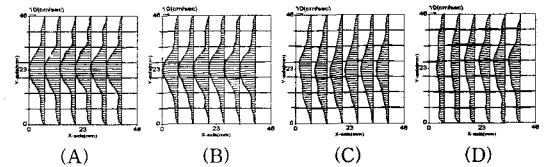


Fig. 6 Time mean velocity distribution in the horizontal flow field without ultrasonic

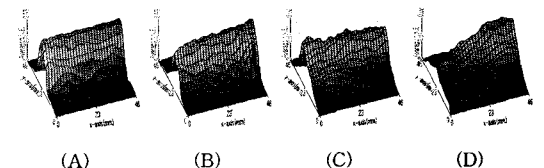


Fig. 7 Time mean kinetic energy distribution in the horizontal flow field without ultrasonic

Fig. 7은 운동에너지 분포가 D영역으로 갈수록 감소함을 보이고 D영역에서는 균일하게 분포하지 않음을 볼 수 있다.

Fig. 5와 Fig. 7의 운동에너지 분포의 비교에서 수직원관이 수평원관에 비해 특히 D영역에서 조금 더 많이 분산됨을 볼 수가 있는데, 이 또한 A, B, C부분으로 갈수록 즉, 노즐출구에서 멀어질수록 분출되는 유속영향이 수직, 수평원관내에서 다같이 감소하기는 하나 수직원관쪽이 수심이 깊어짐에 따른 정수압이 더 크게 작용하는 것으로 사료된다. 이는 수평유동은 중력의 영향을 고르게 받으나 수직유동은 수심이 깊을수록 정수압이 커짐을 잘 보여주고 있다.

3.3 초음파 가진시 수직유동장

Fig. 8은 수직원관에서 고주파 초음파가 가진되는 45° 방향으로 속도분포가 치우쳐 있음을 보여준다. A, B, C, D영역으로 갈수록 속도분포가 작아짐을 볼 수 있고, 이는 상기한 바와 같으며, 유동분포가 다소 균일해지는 분포를 보이고 있다.

Fig. 9는 고주파 초음파의 영향으로 운동에너지가 더 증가하였음을 보여주며, D영역에서는 정수압과 초음파 영향으로 운동에너지 분포가 많이 흐트러짐을 볼 수 있다.

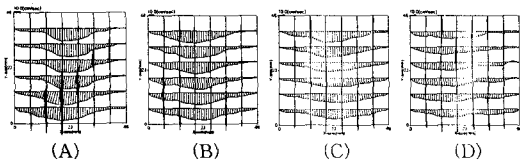


Fig. 8 Time mean velocity distribution in the vertical flow field with ultrasonic

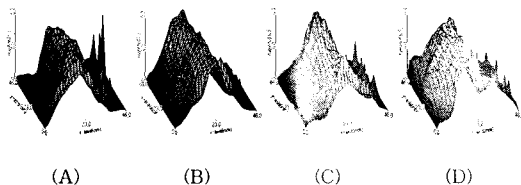


Fig. 9 Time mean kinetic energy distribution in the vertical flow field with ultrasonic

3.4 초음파 가진시 수평유동장

Fig. 10은 수평원관에서 상기한 바와 같이 고주파 초음파가 가해지는 45° 방향으로 속도분포 구배를 보여주고 있으며, A에서 D영역으로 갈수록 초음파의 영향이 더 약해지고 작아짐을 볼 수가 있다. 속도분포 구배가 난류형으로 발달되고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 8과 Fig. 10을 비교해 볼 때에 고주파 초음파 가진 방향으로 수평유동장의 속도분포가 수직유동장 보다 더 커지며, 이는 초음파가 수평유동장에서 더 강하게 작용함을 보이고, 수직유동에서 초음파는 정수압 영향을 받고 있음을 보이고 있다.

Fig. 11은 고주파 초음파의 영향으로 A영역에서 D영역으로 갈수록 운동에너지가 관벽을 제외한 영역에 다소간 낮아지면서 균등히 분포함을 보이고 있다.

Fig. 9와 Fig. 11을 비교할 때 수평원관에서 운동에너지 분포가 수직원관에 비해 다소 고르게 분포함을 알 수 있고, 수직에서는 정수압으로 인해 D영역에서 운동에너지가 약함을 보이고 있다.

Fig. 12(a)는 고주파 초음파가 가진되지 않았을 때의 수평·수직유동장에서 영역에 따른 난류강도를 비교한 것으로, 수직원관에서는 A에서 D영역으로 갈수록 난류강도가 감소하나 D영역에서 다소 증가하는데 그 이유는 정수압의 증가로 원관내 입자가 다소 상승하기 때문이고, 수평원관에

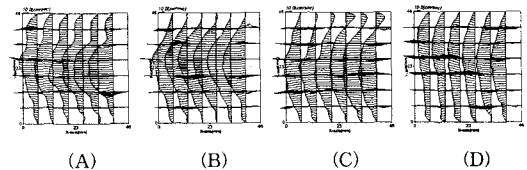


Fig. 10 Time mean velocity distribution in the horizontal flow field with ultrasonic

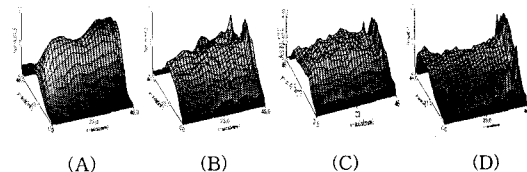


Fig. 11 Time mean kinetic energy distribution in the horizontal flow field with ultrasonic

서는 A에서 D영역으로 갈수록 난류강도가 증가함을 볼 수 있다. Fig. 12(b)는 초음파가 가진되었을 때의 수평·수직 각 유동장에서 영역에 따른 난류강도를 비교해 보이고 있다. 수직원관에서는 A영역에서 C영역까지는 난류강도가 감소하다가 D영역에서는 조금 증가함을 보였는데 이는 상기 (a)에서와 같은 이유로 사려되며, 수평원관에서는 A영역에서 C영역으로 갈수록 다소 증가하나 D영역에서 다소 감소함을 보이고 있다. 이는 D영역에서는 출구로부터 멀어져 유속이 다소 느려지고 입자의 부착현상 때문인 것으로 사려된다. 초음파가 가진되지 않았을 때 (a)에 비해서 가진되었을 때 (b)가 모든 영역에 걸쳐 상대적으로 난류강도가 증가했음을 볼 수 있다. 이는 초음파가 동심원관내 유동에 난류증진을 가져옴을 의미한다.

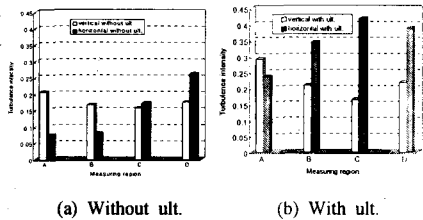


Fig. 12 Comparison of the time mean turbulence intensity according to measuring region

4. 결 론

Re수가 2,000일 때 이중원관의 수직·수평유동장에서 초음파 가진 유·무에 따른 시간평균속도 분포, 운동에너지, 난류강도 등을 PIV계측기법에 의해 실험·관찰·비교한 결과는 다음과 같다.

1. 초음파 가진 유·무에 관계없이 수직 유동장에서 시간평균 속도분포가 수평 유동장에 비해 다소 작게 나타났는데, 이는 중력에 의한 정수압 때문으로 사료된다. 또한 전반적으로 초음파가 가진되었을 때가 가진하지 않았을 때보다 속도 크기가 다소 크게 나타났다.
2. 초음파 가진 유·무에 관계없이 수직 유동장에서 시간평균 운동에너지가 수평 유동장에 비해 다소 작게 나타났는데, 이 또한 정수압 때문으로 사료된다. A에서 D영역으로 갈수록 운동에너지는 감소하는 경향이 있다.

수직에서는 정수압이, 수평에서는 많은 동반류의 혼합이 주된 영향인 것으로 사료된다. 고주파 초음파가 가진되었을 때는 가진하지 않았을 때보다 전반적으로 운동에너지가 다소 크게 나타났다.

3. 수직·수평 이중원관 유동의 비교에서 중력에 의한 유동특성이 수직유동장에서 뚜렷이 나타났으며, 전반적으로 초음파가 난류증진에 유효함을 보였다.

후 기

이 논문은 2001년 두뇌한국21사업에 의해 지원되었음.

참고문헌

- (1) Durst, F., 1968, "On Turbulent Flow through Annular Passages with Smooth and Rough Core", M. Sc. Thesis, Imperial College.
- (2) Whitelaw, J. H. and Ribeiro, M. M., 1980. "Coaxial jets with and without swirl", J. of Fluid Mech, Vol. 96, part 4, pp. 769~795.
- (3) 김성배, 1999, "PIV 기법을 이용한 이중 동심관 유동의 난류구조에 관한 연구" 부산대학교 대학원 공학석사학위 논문, pp. 1~77.
- (4) 서민식, 1998, "CFD 및 PIV에 의한 이중원관 제트의 유동특성에 관한 연구", 한국해양대학교대학원 공학석사학위논문, pp.1~158.
- (5) 송민근, 김한매, 구자훈 1999, "초음파 진동에 의한 원관 내부의 유동특성에 관한 연구" 대한기계학회 학술대회 논문집(B), pp. 159~164.
- (6) 구자훈, 박영호, 최우창 2000, "동심원관내에서 초음파가 가진된 유동특성의 PIV계측에 의한연구" 대한기계학회 2000년도 추계학술대회논문집(B), pp. 639~644.
- (7) 이승엽, 김태현, 최영돈, 1999, "미소기포 캐비테이션과 초음파 진동에 의한 난류증진에 관한 연구", 대한기계학회 1999년도 추계학술대회 논문집(B), pp. 651~657.