

## 동심원관내에서 초음파가 가진된 유동특성의 PIV계측에 의한 연구

구자훈\*, 박영호\*, 최우창\*, 송민근\*, 주은선\*\*

### A Study on Flow Characteristics with Ultrasonic Forcing in a Coaxial Circular Pipe by PIV Measurement

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

**Key Words:** Ultrasonic(초음파), PIV(Particle Image Velocimetry), Velocity Profile(속도윤곽선), Visualization(가시화), Turbulent Kinetic Energy(난류운동에너지), Coaxial Circular Pipe(동심원관)

#### Abstract

An experiment on the enhancement of turbulent flow with ultrasonic forcing was carried out by using PIV measurement in a coaxial circular pipe which could offer characteristics of the turbulence flow plentifully through its jet. A large transparent acryl tank and a coaxial circular pipe nozzle were made for the above research. city water of 25°C was selected as an experimental liquid and the front flow field of the coaxial circular pipe was divided vertically as 3 measuring regions to observe characteristics of flow phenomena. characteristics of fluid flow such as velocity vector distribution, kinetic energy, turbulent intensity and etc. were visualized, observed, examined and considered at 5 kinds of Re No. such as  $Re=1 \times 10^3$ ,  $2 \times 10^3$ ,  $3 \times 10^3$ ,  $5 \times 10^3$ ,  $1 \times 10^4$ . In result it was proved that ultrasonic vibration affected the enhancement of turbulent flow.

#### 1. 서론

유체기계의 최적 설계를 위해서는 작동유체의 유동특성에 대한 해석이 필수적이다. 실제 유동의 대부분은 난류로서 그 유동은 대단히 복잡하여 일률적인 공식적용은 어렵고 그 경우에 적합한 난류모델을 개발하여 적용하므로 난류유동해석에 접근하고 있다.<sup>1)</sup> 이중원관 Jet 유동은 그

형상이 단순하면서도 난류유동 특성을 풍부히 제공할 수 있다. 이 유동장은 전단혼합 및 와류 방출등 다양한 유체 역학적 현상을 동반하며, 연소실이나 에젝터 펌프와 같은 실용적인 유동장에서 자주 발견되는 공학적으로 응용도가 뛰어난 유동장으로서 많은 연구가 있다.<sup>2),3)</sup> 그럼에도 본격적인 연구는 매우 제한적이며 대부분의 결과가 시간평균적인 내용에 머물고 있는 실정이다. 현재까지 유동특성을 정량적으로 파악하기 위하여 다양한 계측기법<sup>4),5),6)</sup>이 제시되어 왔고 충분히 발달한 난류유동장의 난류 모델개발에 수치해석적 연구<sup>7)</sup>가 지속되어 왔지만 임의의 순간의 유동장에 대한 속도 및 압력 분포는 정량적으로 제시되지 못하였다. 최근에 들어 디지털 영상처리

\* 정회원 경상대학교 대학원

\*\* 정회원 경상대학교 수송기계공학과,  
항공기 부품기술 연구센터

기법의 팔목할 만한 발달로 PIV기법<sup>8)</sup>에 의해 이중원관 제트 유동장의 임의의 순간 속도 벡터를 실시간적으로 동시다점 계측하고 다양한 정보를 제시하고 있다.<sup>9)</sup>

난류이용에 있어서는 난류제어에 대한 기술학적과 더불어 난류증진 기법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 예로서 난류증진은 냉각제의 열전달 및 열혼합을 증진시킴으로 신형원자로 설계에 중요한 기술로 인식되고 있다.<sup>10)</sup> 또한 가정용 세탁기나 공업용세척에서 난류증진은 세척 효율을 향상시키는 주된 기술로 연구되고 있다. 난류증진법의 하나인 교반법은 자연대류에 의한 열전달에 장해 요소로 작용한다.

체적력의 요동으로 난류생성이 증가하는 자기수력난류법은 핵융합 개발에 이용되고 있다.

초음파는 직진성<sup>11)</sup>으로 액체에 가해지면 음압에 의해 유체유동에 영향을 주어 난류유동을 증진시킬 수 있다. 초음파진동은 액체에 잘 전달되면서 쉽게 소멸되지 않으며 진동압과 캐비테이션 유발에 의한 유체의 교란 효과는 크다.

본 연구에서는 상기한 바와 같이 비교적 그 형상이 단순하면서도 공학적 난류 유동장으로 뛰어난 동심 2중원관 Jet 유동에 초음파 진동을 가함으로 난류증진을 위한 유동특성을 PIV 계측기법으로 고찰하고자 한다. 여기에는 서<sup>9)</sup>에 의한 수직유동실험과 송<sup>12)</sup>에 의한 초음파 가진 수직 유동실험을 토대로 하고, 본 연구에서는 수직유동에 2MHz TDK에 의한 초음파 가진에 따른 난류증진 유동현상을  $Re=1 \times 10^3$ ,  $2 \times 10^3$ ,  $3 \times 10^3$ ,  $5 \times 10^3$ ,  $1 \times 10^4$ 영역에서 속도 vector 분포, 운동에너지, 난류강도 등을 실험·관찰·검토하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 실험에서 동심이중원관의 유동을 측정하기 위하여 1500(L)×250(W)×800(H) mm의 투명성이 뛰어난 아크릴로 유동장을 형성하고 그 속에 내경 46mm, 두께 2mm인 투명 유리관과 노즐은 내경  $d=18\text{mm}$ ,  $t=1\text{in}$  스테인레스강(STST)을 사용하여 동심이중원관 유동장을 만들었다. 여기서 속도를 측정하기 위하여 TSI제품의 30mW출력의 He-Ne Laser를 사용하는 LDV system을 사용하

였고, 초음파 발진을 위하여 2MHz TDK진동자를 이용하였다.

Fig.1 은 본 실험장치의 개략도이다. 유체의 유속을 측정하는 LDV System과 영상을 획득하기 위한 PIV System으로 구분될 수 있다.

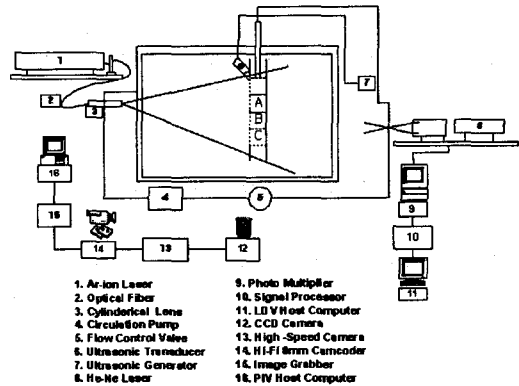


Fig.1 schematic diagram of the test loop with ultrasonic

### 2.2 실험방법

실험시 작동유체로 25°C의 수도수(citywater)를 사용하였으며, 유속은 펌프를 사용하여 제어하였으며, 유동은 가시화하기 위한 조명으로 4W출력의 연속광 Ar-ion Laser를 이용하였으며, 두께 1.5mm 내외의 빔이 fiber optic cable 및 cylindrical lens를 통해서 2mm정도의 시트로 형성하여 유동장을 가시화하였다.

Fig.2 는 측정부의 측정영역을 표시하였다.

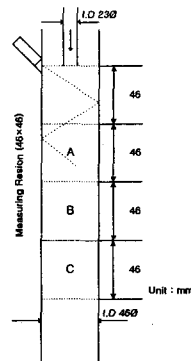


Fig.2 Definition of measuring region

가시화된 유동장을 측정하기 위한 산란입자로 비중이 1.02이고 직경이 100 $\mu\text{m}$  전후의 polyvinyl

chloride 백색 구형입자를 선별한 다음 정전기 방지를 위해 계면활성제를 소량 혼입하여 사용하였다.

Fig.3은 계측영역 A에서의 Re수가  $1 \times 10^3$  일때의 원시 순간 영상이다.

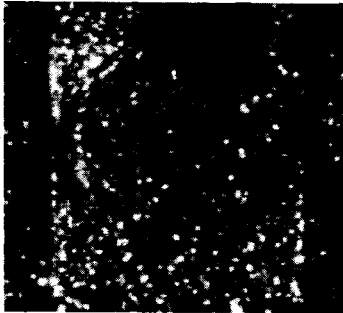


Fig.3 Instantaneous image. ( $Re = 1 \times 10^3$ )

### 2.3 영상처리

고속카메라로 촬영한 영상은 Hi-Fi 8mm 캠코드에 기록되고 여기에 보존된 원시영상을 처리하여 속도 벡터를 구한다. 이때 아날로그 영상을 digital로 바꾸어 PIV 전용 host computer에 영상을 전달하게 되는데 이러한 기능을 가진 이미지 전용 Grabber 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.4는 PIV System의 처리과정을 나타내었다.

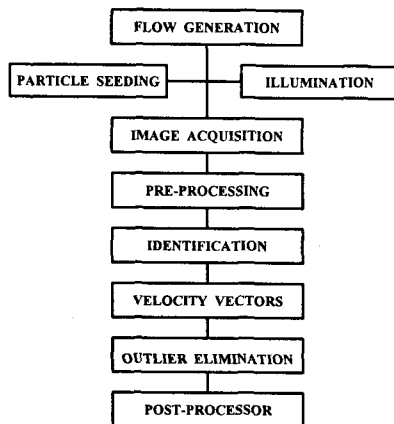


Fig.4 Flow Chart of PIV Processing

일반적으로 난류는 난류운동력  $(\overline{u_k u_i})$ 과 전단구배  $(\partial U_i / \partial x_k)$ 의 상호작용으로 생성되며 난류 생성률은

$$P_{ij} = - \left( \overline{u_k u_i} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} + \overline{u_k u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \right) \quad (1)$$

로 나타내어진다.

그러나 체적력의 요동( Body Force Fluctuation,  $f_i$ )과 난류운동이 상호 작용하여 난류가 생성될 수 있으며, 그 생성률은

$$F_{ij} = \overline{f_i u_j} + \overline{f_j u_i} \quad (2)$$

로 표현된다.

연속된 두 피일드간의 상호상관계수는 다음과 같다.

$$C_{fg} = \frac{\sum_{i=1}^n (f_i - \overline{f_i})(g_i - \overline{g_i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (f_i - \overline{f_i})^2 \sum_{i=1}^n (g_i - \overline{g_i})^2}} \quad (3)$$

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

시간평균속도와 순시의 속도변동성분에 관한 식은 각각 다음과 같다.

$$\overline{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u dt, \quad \overline{v} = \frac{1}{T} \int_0^T v dt \quad (4)$$

$$u' = u - \overline{u}, \quad v' = v - \overline{v} \quad (5)$$

난류운동에너지와 시간평균 난류운동에너지는 각각 다음과 같다.

$$T.K.E. = \frac{u'^2 + v'^2}{2} \quad (6)$$

( T.K.E. = Turbulent Kinetic Energy )

$$T.M.T.K.E. = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{u'^2 + v'^2}{2} dt \quad (7)$$

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

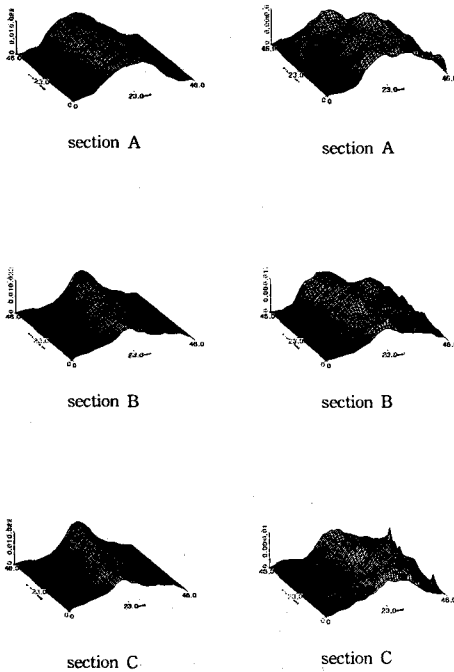
### 3. 실험결과 및 고찰

초음파 가진에 따른 난류증진 유동현상을 Re 수  $1 \times 10^3, 2 \times 10^3, 3 \times 10^3, 5 \times 10^3, 1 \times 10^4$ 영역에서 실험하여 얻은 속도vector 분포, 운동에너지, 난류강도등을 아래 그림들에 의해 살펴본다.

에서 차츰 낮아지고 전체적으로 운동에너지곡선이 완만해지는 경향을 보이고 있다.

(b)는 초음파를 가진 경우로 section A에서 원관의 중심부에서 운동에너지는 초음파를 가진 하지 않았을 경우와 비교할 때 상대적으로 상당히 낮아졌으며 원관을 중심으로 운동에너지 곡선이 서로 대칭을 이루지 않는다. 이는 초음파의 간섭영향에 의한 것이다. 초음파가 반사되는 벽면에서 시간평균운동에너지가 높게 나타나는 데 이는 초음파의 힘에 의한 것으로 사료된다.

초음파에 의한 간섭영향으로 시간평균운동에너지는 원관 내의 전체에 존재하나 불규칙적이다.



(a) no ultrasonic forcing (b) ultrasonic forcing

Fig.7 Time mean kinetic energy at Re = 5,000

Fig.8은 초음파가 가진 경우의 Re수 1,000, 10,000일 때의 section A, B, C에서 시간평균난류강도를 나타낸 것이다.

(a)는 Re수 1,000일 때 초음파가 가진 경우의 시간평균난류강도로 section A의 중심부에서 원관내 자체의 유동교란에 의한 난류강도보다는

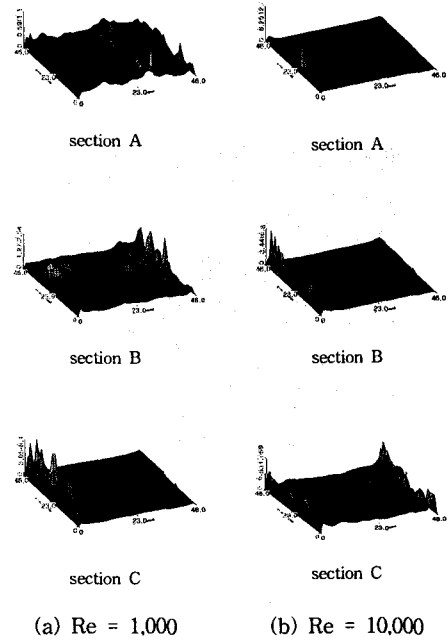


Fig.8 Time mean turbulent intensity (ultrasonic forcing)

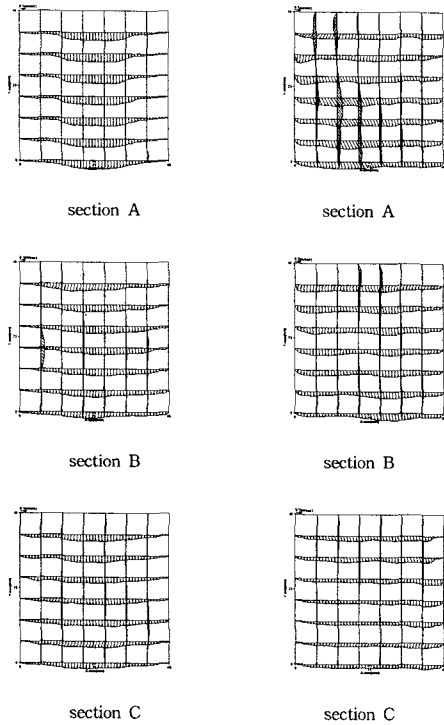
초음파의 간섭영향에 의한 난류강도가 더 많이 나타났다. section B, C로 갈수록 초음파에 의한 간섭이 약해지고 초음파의 반사부분에서 난류강도가 높게 나타나고 있으며 차츰 초음파에 의한 영향보다 자체 교란에 의한 영향이 많이 나타났다.

(b)는 Re수 10,000때의 초음파가 가진 경우로 section A와 section B에서는 초음파에 의한 간섭영역이 거의 나타나지 않는다. 유체유속이 커짐에 따라 초음파에 의한 간섭영역은 나타나지 않으며 이는 유체의 유속에 의해 원관내의 벽면에서 교란이 작용하기 때문인 것으로 사료된다.

section C에서 시간평균난류강도 분포가 section A, B보다 많이 나타나는 것은 유체유속에 의한 자체의 교란 때문이다. 이 경우도 원관 중심부에서는 시간평균난류강도가 크게 나타나지 않고 원관의 벽면주위에서 나타난다.

초음파가 가진 경우와 가진되지 않은 경우의 원관내의 유동특성은 초음파를 가진하지 않았을 때보다 가진하였을 경우 초음파의 간섭영향이 크

Fig.5는 Re수 3,000일 때 초음파가 가진된 경우와 가진되지 않은 경우의 시간평균속도 분포도이다.



(a) no ultrasonic forcing (b) ultrasonic forcing

Fig.5 Time mean velocity profile at Re = 3,000

(a)는 초음파가 가진되지 않은 경우로 유체의 유속방향으로 속도분포가 균일하게 분포되며 속도분포가 포물선모양을 그리고 있다. 그리고 원관의 축을 중심으로 속도분포가 서로 대칭되고 있다. section A에서는 노즐속에서 나오는 유속이 상대적으로 동반류의 유속보다 크므로 중심부에서 유속의 분포가 집중되었다. section A에 비해 section C로 갈수록 원관 내의 속도분포가 난류의 특성을 나타내는 납작한 곡선모양을 하고 있다. 이것은 노즐에서 나오는 유체의 유속과 동반류의 혼합에 의한 유체유속의 평균화이다.

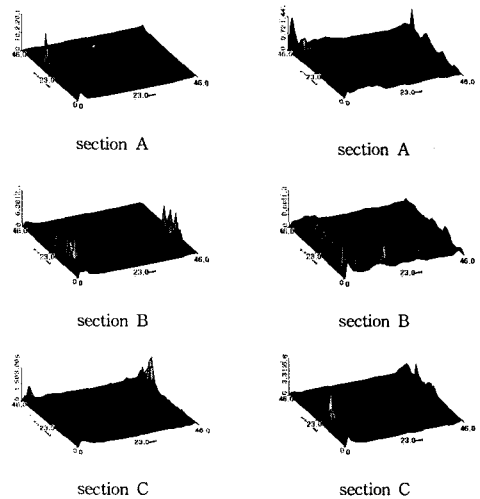
(b)는 초음파가 가진된 경우로 초음파의 간섭영향에 의해 유체유속의 방향에 영향을 주어 속도분포가 불균일하게 분포함을 알 수 있다. section A에서 section C로 갈수록 초음파의 간섭영향이 줄어들어 속도분포가 차츰 균일해짐을

알 수 있다.

Fig.6은 Re수 2,000일 때 초음파를 가진한 경우와 가진하지 않았을 때 Section A, B에서 나타난 시간 평균속도벡터이다.

(a)는 초음파를 가진하지 않은 경우로 Section A에서 Section C로 갈수록 난류의 영향에 의해 난류강도의 분포가 많이 나타남을 알 수 있고 이는 이중원관 벽면에서 유체의 점성에 의해 난류강도가 나타나는 현상이다.

(b)는 초음파가 가진된 경우로 벽면에서 반사되는 초음파의 힘에 의해 난류강도가 커지고 원관 중심부에서도 초음파가 유체유속의 영향에 미쳐 난류강도가 커짐을 알 수 있다. 그러나 section B와 section C를 비교하였을 때 section C에서 시간평균난류강도 분포가 상대적으로 작게 나타나고 있다. 이는 초음파에 의한 간섭영향이 줄었음을 의미한다.



(a) no ultrasonic forcing (b) ultrasonic forcing

Fig.6 Time mean turbulent intensity at Re = 2,000

Fig.7은 Re수 5,000일 때의 초음파가 가진된 경우와 가진되지 않은 경우의 시간평균운동에너지이다.

(a)는 초음파가 가진되지 않은 경우로 원관의 중심부에서 시간평균운동에너지가 높고 원관의 축을 중심으로 서로 대칭을 이루다가 section C로 갈수록 시간평균운동에너지는 원관의 중심부

## 참고문헌

다. 간섭영향이 큰 section에서는 시간평균속도 벡터, 시간평균운동에너지, 시간평균난류강도의 차이가 많이 나타남을 보였다. 이는 초음파의 간섭을 많이 받으므로 원래의 유체유동특성을 변화시키기 때문이다. 그리고 초음파가 반사되는 벽면에서 유체유동의 특성에 많은 영향을 주었다.

이것은 벽면에서는 유체의 유속은 작아지고 상대적으로 초음파에 의한 영향은 크기 때문이다. Re수가 커지고 section이 멀어질수록 초음파에 의한 영향은 줄어들고 원관내의 유체유동의 특성만을 나타내었다.

Fig.8에서 볼 수 있듯이 Re=10,000 일 때는 초음파에 의한 간섭영향이 거의 나타나지 않았다. 이는 유동력에 초음파력이 묻혀진 것으로 사료된다.

## 4. 결론

수직유동장에서 2MHz TDK의 초음파를 가진 하여 동심이중원관 내의 유동장을 PIV로 가시화 하였을 때 나타나는 유동의 특성을 정리한 결과는 다음과 같다.

1. 초음파가 가진된 경우 수직 동심이중원관내의 유동특성으로서 Re수가 커짐에 따라 속도벡터, 운동에너지, 난류강도등이 증가한 것은 기본이론에 잘 부합됨을 보이고 있다.
2. 초음파가 가진되었을 때 초음파에 의한 간섭영역이 뚜렷이 나타났으며, 이러한 간섭영역은 Re수가 증가함에 따라서 초음파에 의한 간섭영역이 줄어들음을 알 수 있다. 이는 초음파의 힘이 일정한데 비해 유동력이 우세해짐으로 초음파의 영향이 둔화된 것으로 사료된다.
3. 초음파에 의한 간섭영역은 초음파가 벽면에서 반사되는 부분의 유동장에 많은 영향을 주었다.
4. 초음파는 벽면에서 반사되는 부분도 있었지만 초음파는 벽면을 따라 힘이 전달되기도 하였다.
5. 동심이중원관의 양벽면의 영향으로 난류강도가 크게 나타났으며 이것은 경계면에서의 와류의 영향으로 사료된다.

- [1] H. Tennekes, J.L. Lumley, "A first course in turbulence", MIT Publishing Company, INC., 1994.
- [2] 김경천, 안수환, 이병규 "외벽에 거칠기가 있는 이중 동심관 유동의 난류구조", 대한기계학회논문집 제18권 제9호, 1994, pp.2443-2453.
- [3] 이찬희, 이상환 "Karhunen-Loève 변환을 이용한 Forcing 제트의 동적 특성 해석", 대한기계학회논문집(B) 제20권 제6호, 1997, pp.758-772.
- [4] E.Razinsky and J.A.Brighton, "Confined Jet Mixing for Non-separating Condition", ASME J, Basic Eng. Sep., 1971, pp.333-349.
- [5] T.S Wung, G.Y Deng, "Investigation of 3-D Flow Field In a Cubic Chamber Using a Stereo Color-coded Particle Tracking Velocimetry", Proc. of 1st Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing, Honolulu, February 23-26, 1997, pp.586-591.
- [6] Au, H. and Ko, N. W. M., Trans. of Canadian Society. of Mech Engineering, Vol. 7, 1983, pp.51-57.
- [7] N. Namiki, O. Kitamura and M. Yamamoto, "Numerical Prediction of Performance of Annular-Type Jet Pump", Trans. JSME Vol. 63 NO.607, 1997, pp.204-210.
- [8] 최장운, 이영호, "PIV에서의 계조치 상호상관법 개발", 대한기계학회 춘계학술대회, 논문집(II), 1996, pp.396-400.
- [9] 서민식, "CFD 및 PIV에 의한 이중원관 제트의 流動特性에 관한 研究", 해양대학교 대학원 석사학위 논문, 1998, pp.1-159.
- [10] 이승엽, 김태현, 최영돈, "미소기포 캐비테이션과 초음파 진동에 의한 난류증진에 관한 연구", 대한기계학회 1999년도 추계학술대회 논문집 B, 1999, pp.651-657.
- [11] 藤森聰雄, "やさしい超音波の應用", 東京大學生産技術研究所, 産保出版, 1980.
- [12] 송민근, "超音波가 加振된 圓形제트의 流動解析을 爲한 디지털 映像處理技法의 適用에 關한 연구", 경상대학교 대학원 석사학위 논문, 2000, pp.1-79.