

# PIV(Particle Imaging Velocimetry)에 의한 음향류의 실시간 가시화 계측

도덕희\*, 최성환\*\*, 홍성대\*\*, 김동혁\* 최석주\*\*\*

\*한국해양대, 기계·냉동·자동차공학부, \*\*한국해양대, 대학원, \*\*\*삼성건설기술연구원

## Real time measurement of an acoustic stream by a visualization technique, PIV

D.H. Doh\*, S.H. Choi\*\*, S.D. Hong\*\*, D.H. Kim\*, S.J. Choi\*\*\*

\*Korea Maritime Univ., School of Mechanical Systems Engineering, \*\*KMU, Graduate School,

\*\*\*Samsung Inst. of Technology, Engineering & Construction Group

**Key Words:** Real Time Sound Field Visualization(실시간 음장가시화), PIV(Particle Imaging Velocimetry)(입자영상유속계), 2-D Muffler System(2차원소음기시스템), Acoustic Streaming(음향류)

### Abstract

A new real time sound field visualization technique is introduced in this study using PIV(Particle Imaging Velocimetry) technique. Small particles of which density is small enough to follow up the air flow are used for sound visualization. When the driving frequency is in the vicinity of the resonance frequency of the simplified 2-dimensional muffler system, an acoustic streaming is shown and of which velocity distribution is obtained through PIV technique. It is experimentally proved that the present technique is able to visualize and quantify the sound field's energy flow.

### 1. 서론

음은 파동현상이며 그 전파의 기구는 대단히 복잡하다. 그래서 이러한 음파를 어떠한 방법을 이용해서라도 가시화 하려고 오래 전부터 여러 가지 궁리가 있어왔다. 음장의 가시화방법으로는 schlieren법, shadowgraph법, 음향홀로그래피법<sup>(1)</sup>, 음향인터시티법<sup>(2)</sup> 등의 방법들이 있다. 이들 방법들은 정성적이거나 혹은 마이크로폰 등의 사

용으로 인하여 음장 자체에 영향을 끼치며 복잡한 신호처리의 과정을 거친 후 측정데이터에 대하여 재구성함으로써 가시화 하는 방법들이었다.

한편 유체의 유동장 속에 추적입자를 주입한 후 그 입자들의 거동을 화상처리를 통하여 정량적으로 파악하는 방법인 PIV(Particle Imaging Velocimetry)<sup>(3)</sup>는 유동장의 비정상계측과 유동장 전체를 동일 시각에 계측할 수 있다는 점으로부터 유동의 구조를 정량적으로 이해하는데 유효한 방법으로 쓰여지고 있다. 또한 이 방법은 비접촉식므로 유동장에 대하여 영향을 미치지 않는 장점을 가지고 있기 때문에 얻어낸 데이터에 대한 신뢰성도 확보할 수 있다는 특징을 가지고 있어서 최근의 유체계측분야에 많이 응용되고 있다<sup>(4)</sup>.

본 연구에서는 이와 같이 비접촉식 계측방법이면서 장 전체에 걸쳐서 입자속도를 계측할 수 있는 PIV(입자영상유속계)계측법을 음장의 가시화에 도입하는 것을 연구의 목표로 하고 있다. 본 연구에서는 2차원 소음기모델에 스피커로 가진하여 생성된 음향류를 PIV계측함으로써 기존의 방법들이 계측할 수 없었던 음향류의 흐름등을 정량적으로 재현하였다.

### 2. PIV(Particle Imaging Velocimetry)계측법

유동장의 국소속도는 어느 한 점을 통과하는 추적입자가 미소시간간격동안 이동한 미소 직선 거리 및 방향을 알면 쉽게 구해진다. 즉, 주어진 측정시간( $\Delta t$ )동안 움직인 유동입자(particle)들의 변위정보를 CCD(charge coupled device)카메라와 같은 화상입력장치를 이용하여 2차원 화상 데이터로 저장한 후 디지털 화상처리기법을 이용하여 입자변위(S)를 계측하는 것이다. 이때 사용되는 추적입자의 비중은 유체의 비중과 동일한 것을 사용하여야 한다. 변위를 계산하는 방법으로는 입자중심을 추적하는 방법과 입사 군들의 패턴을 추적하는 방법인 상호상관법들이 있다<sup>(3)</sup>.

본 연구에서는 계조치상호상관법<sup>(5)</sup>을 사용하여 입자군들의 패턴을 추적함으로써 속도벡터를 구하였다.

### 3. PIV구성 및 2차원 소음기 모델실험

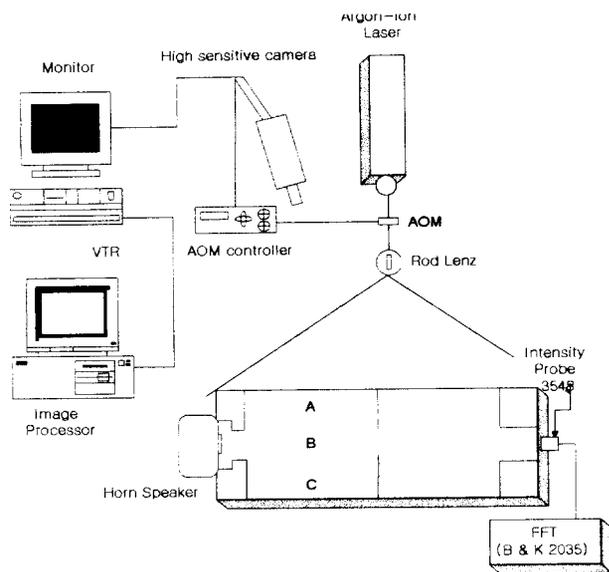


Fig. 1 Experimental apparatus for sound visualization.

Fig. 1은 본 연구에서 구축한 2차원 소음기내부 음장계측용 PIV시스템의 배치도를 나타낸다. 2차원 소음기 음장의 형상 및 크기로서 가로가 17cm, 세로가 20cm, 높이가 1.5cm인 2차원 캐비티를 좌우대칭으로 하여 이 캐비티 사이에는 연결통로의 길이가 1.5cm이며 폭이 3.8cm인 목부를 형성시켰다. 좌측 캐비티의 입구에는 호른식 스피커(25W)를 새는 부위가 없도록 연결시키고 우측 캐비티의 출구벽 측에는 음의 반사의 영향을 줄

이기 위하여 석민을 설치하였다. 또한 출구로부터 빠져 나오는 음의 주파수스펙트럼을 분석하기 위하여 마이크로폰을 출구부에 설치하여 그 신호를 FFT(B & K 2035)로 전송하였다.

스피커의 출력주파수와 소음기의 음향임피던스에 따라 생성된 음장내의 음향류의 가시화를 위한 추적입자로서는 공기의 비중에 가까운 마이크로풍선(micro-balloon)(0.02g/cc 이하)을 사용하였다. 가시화 광원으로서는 아르곤이온레이저(Omnichrome, 500mW)를 사용하였으며 이 레이저로부터 나오는 선 광원은 막대렌즈(rod lens)를 통과하여 2차원 단면의 확산광원으로 된다. 화상을 얻기 위한 입력장치로서 고감도카메라(Hamamatsu, Super Eye)를 사용하였다. 또한 레이저의 광원을 간헐적으로 조사하기 위하여 음향광학조절장치인 AOM(Acousto-Optic Modulator)을 사용하였으며 이는 고감도카메라가 적분 식이기 때문에 순간적인 유동장의 패턴을 기록하기 위하여 사용되며 짧은 시간에 광원을 스위칭하는 역할을 한다. 카메라로부터 받아들인 화상정보는 VTR(Sony, SLV-RS1)로 기록되어지고 기록된 화상정보는 한 장씩(1/30sec) 호스트컴퓨터(IBM, Pentium 200MHz)에 연결된 이미지보오드(Ditect, DT64)로 불러들여져 전송의 추적알고리즘에 따라 입자속도의 벡터가 구해지게 된다. 본 연구에서는 다음과 같이 하여 음향류의 속도장을 구하였다.

먼저 0에서 6.4KHz사이의 백색잡음을 스피커를 통하여 소음기입구부에서 발생시킨다. 출구측의 마이크로폰으로부터 받아들여진 신호를 FFT를 이용하여 주파수 스펙트럼분석을 하였다. 얻어진 결과로부터 음향파위레벨의 감소량이 많은 주파수 중에서 1984Hz를, 감소량이 적은 주파수중에서 2200Hz, 3112Hz, 4152Hz를 선택하여 이들 주파수를 스피커에 단일 주파수로서 FFT장치를 통하여 입력시켜서 생성된 음향유동장을 구축된 PIV계측시스템으로 계측하였다. 이때 단일 주파수로 2차원 소음기에 입력시키기 전에 추적입자를 스피커 측에 설치된 구멍을 통하여 투입한 후 밀봉하였다.

그 다음 앞 절에서 정한 각 주파수로 스피커를 가진하여 발생하는 소음기의 음장을 2차원 레이저광원으로 소음기의 측면으로부터 주사해서 가시화한다. 소음기의 수직방향에서는 전송의 카메라를 이용하여 가시화 된 화상을 얻는다. 가시화 된 화상을 VTR에 기록한다. 기록된 화상을 이

미지보오드로 불러들여 화상 처리하여 전술의 상호상관법에 의하여 두 장의 이미지에 대하여 패턴추적을 행함으로써 속도벡터를 얻게된다. 이렇게 하여 얻어진 약 120장의 이미지는 시간 평균화되어 평균속도를 얻어낼 수 있다. 또한 얻어진 속도벡터는 계조치상호상관법에서 조절되어야 하는 계수인 상관영역의 크기나 탐색영역의 크기의 잘못된 설정에 따라서 에러벡터를 측정할 수도 있다. 따라서 본 연구에서는 유동의 연속성을 고려한 에러벡터처리법<sup>6)</sup>을 도입하여 오류벡터를 최대한 줄였다.

#### 4. 계측결과 및 고찰

Fig. 2와 Fig. 3은 스피커로부터 가까운 위치에 있는 캐비티 유동장에 음향파위레벨의 감소가 많은 경우인 1984Hz의 주파수로 스피커를 진동시켰을 때 소음기내부에 발생하는 음향류를 앞 절에서 설명한 미소추적입자로 가시화 한 것으로서 Fig. 2는 스피커 입구 측의 사각형 캐비티 내부에서 발생한 음향류에 대해서, Fig. 3은 출구 측의 사각형 캐비티 내부에서 발생한 음향류에 대해서 PIV계측한 결과를 나타낸다. 그림에서 (a)는 미소추적입자로 가시화 한 순간적인 화상과 이들 순간적인 화상들에 대하여 본 연구에서 구축한 PIV기법으로 계측한 120개의 순시 속도벡터들에 대한 평균속도벡터를 겹쳐서 나타낸 것이다. (b)는 평균속도벡터들에 대한 속도프로파일을 나타낸다. 그림의 상부에 표시된 화살표의 길이는 대표길이에 대한 속도크기를 나타낸다.

Fig. 4는 전술의 스피커의 가진 주파수가 각각 2200Hz, 3112Hz, 4152Hz일 때의 화상을 나타낸다. 이들 주파수에서는 미소 가시화입자들의 움직임을 찾아 볼 수가 없으므로 음향류가 거의 발생하지 않았음을 알 수 있다. 즉 유동이 정체되어 있었다.

이들의 결과들로부터 알 수 있는 사실은 음향파위레벨의 감소가 많은 주파수에서는 2차원 소음기내부에서 음향류가 발생하고 있음을 알 수 있으며 이는 감소된 양만큼의 에너지가 흐르고 있음을 알 수 있다. 이들 에너지의 흐름을 단위면적당으로 직분을 하게 되면 본 연구에서 구축한 PIV기법으로 어느 한 주파수에서의 손실된 에너지량을 계산할 수 있음을 의미한다. 또한 음향류가 발생하지 않은 주파수에서는 에너지의 흐

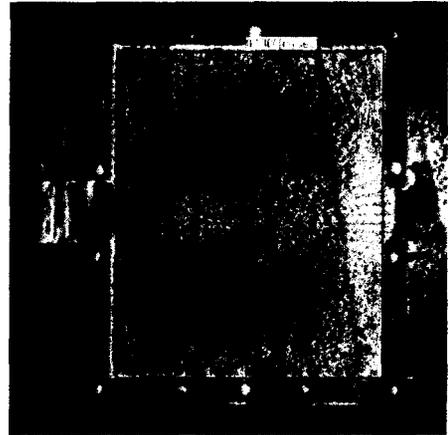


Fig. 2(a) Image of the acoustic stream and the velocity vectors of the left cavity.

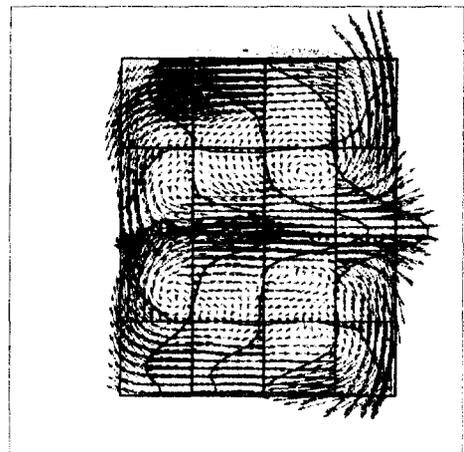


Fig. 2(b) Velocity vector profiles of the acoustic stream of the left cavity.

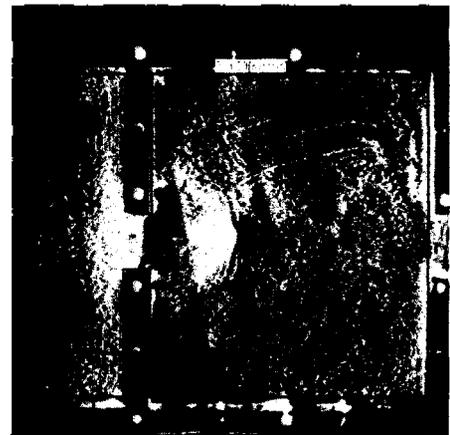


Fig. 3(a) Image of the acoustic stream and the velocity vectors of the right cavity.

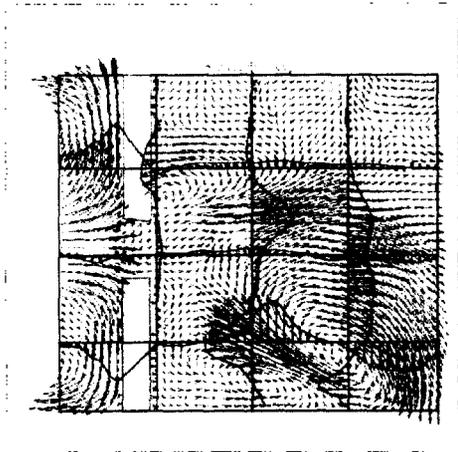


Fig. 3(b) Velocity vector profiles of the acoustic stream of the right cavity.

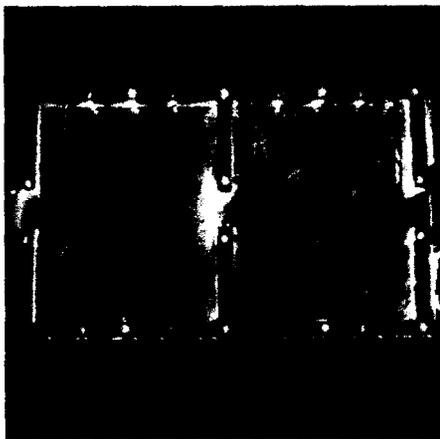


Fig. 4 Visualized image of the acoustic stream at the frequencies of 2200Hz, 3112Hz, 4152Hz.

를 찾아 볼 수가 없으며 이는 소음기에 들어온 에너지의 대부분이 출구 쪽으로 빠져나갔음을 추론 할 수 있다. 또한 Fig. 2(b)의 속도를 정량적으로 측정해 본 결과 Fig. 1에서 A부의 평균속도가 1.8cm/sec이었으며 B부의 평균속도가 3.6cm/sec이었으며 C부의 평균속도가 1.75cm/sec였다. 이는 A부로 흘러가는 에너지와 C부로 흘러가는 에너지의 합이 B부의 에너지로 볼 수 있으며 이는 캐비티 내에서 히스테리시스 에너지손실과 같은 음향류가 존재하고 있음을 의미한다. 한편 D부위로도 0.17cm/sec의 속도가 있음을 고야와측 캐비티 내부의 손실에너지가 일부는 유출 캐비티로 빠져나가고 있다고 말할 수 있다.

## 5. 결론

2차원 소음기 모형의 PIV에 의한 음상가시화 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

음상의 정량적인 가시화를 위한 PIV(Particle Imaging Velocimetry)계측 시스템을 구축하였다.

본 연구에서 구축한 PIV계측시스템은 소음기 음장에서 발생하는 음향류의 비정상 현상들에 대한 정량적인 해석이 가능하였으며 이는 음상의 가시화기법을 통한 음향과위레벨의 손실 또는 투과의 정량적인 해석이 가능함을 시사하므로 본 연구에서 구축한 PIV계측시스템을 소음기 및 관련된 기기의 설계단계에서 적용한다면 설계자로 하여금 눈으로 확인 가능하게 함으로써 용이한 설계가 가능하게 할 것으로 사료된다.

계측장비는 <http://hanara.kmaritime.ac.kr/~doh/>로 들어가서 Laboratory의 Research에서 동화상으로 볼 수 있다.

## 후기

본 연구를 수행하는 과정에서 도움을 주신 한국해양대학교 기계·냉동·자동차공학부 김의강 교수, 변용수 대학원생, LG전자 리빙시스템연구소의 안병하 박사께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Hayashi T., 1991, "Sound field visualization by using acoustic holography method", 騒音と振動, 騒音制御, 騒音制御工學會, Vol.15, No.4, pp.4-7.
2. Yano H., Hidaka Y., Tachibana H., 1991, "Visualization of sound fields by the sound intensity technique", 騒音と振動, 騒音制御, 騒音制御工學會, Vol.15, No.4, pp.8-12.
3. Adrian R. J., 1991, "Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics", Ann. Rev. Fluid Mech., Vol.23, pp.261-304.
4. Buchhave, P., 1992, "Particle image velocimetry-status and trends," Exp. Thermal and Fluid Sci., Vol.5, pp.586-604.
5. 本村, 高森, 井上, 1986, "相關を利用した流れの画像計測", 流の可視化, Vol.6, No.22, pp.105-108.
6. 北條, 高島, 1995, "PIVにおける異常ベクトルの検出", 可視化特報, Vol.15, Suppl. No.2, pp.177-180.