

# 전자 스페클 간섭계에 의한 스피커 진동 해석

강영준\*, 채희창\*

## Vibration Analysis of Loudspeaker by Using Electronic Speckle Pattern Interferometry

Young-June Kang and Hee-Chang Chae

### Abstract

Nowadays, Electronic Speckle Pattern Interferometry is a well-established measuring technique with a wide range of industrial applications, particularly in the fields of deformation measurement and vibration analysis. Comparing with holographic interferometry, it has some attractive features, which are rapid recording and reconstruction, satisfiable automation etc. The Time-Average ESPI is used to provide vibration mode shape of an object whose vibration amplitude is given as a fringe pattern. Its merit is rapid and simple measurement for vibrating object. However, it is not possible to determine the direction of motions of a point on the object at any given time, because it does not give any information about the phase of vibration. But, Stroboscopic ESPI can measure the amplitude and phase of vibrating surface. In this paper, loudspeakers were tested by these two methods. As a result, we can assume that these techniques will be applied directly in the loudspeaker industry.

Keywords : Electronic Speckle Pattern Interferometry(전자적 스페클 무늬 간섭법), Holographic Interferometry (홀로그래픽 간섭법), Time-Average Method(시간 평균법), Stroboscopic Electronic Speckle Pattern Interferometry(스트로보스코픽 전자적 스페클 무늬 간섭법)

### 1. 서 론

회전이나 왕복 운동을 하는 물체는 불균형한 힘들과 기계 부품들 사이에서 발생하는 마찰, 제작사의 여유부 분 등에 의한 동역학적 영향으로 진동이 발생한다. 때때

로 무시할 만한 작은 진동이 구조물의 공진 주파수에서 증폭되어 큰 진동의 주요 근원이 될 수 있다. 특히 기계 에 동력을 공급하기 위해 모터를 사용한 때부터 진동 감 소 및 방진의 문제는 가장 큰 관심사가 되어왔다. 이에따 라 진동의 정확한 측정 및 분석의 필요성이 증대되었다.

\* 전북대학교 기계공학부

기존의 진동 특성 연구로는 해석적 방법인 유한 요소법이 있다. 이 경우, 경계 조건과 재료의 물성치에 대하여 정확히 알고 있어야만 올바른 결과를 얻을 수 있다.<sup>(1)</sup> 또 실험적 방법으로 진동을 전기적 신호로 변환시키는 압전형 가속도계나 LDV(Laser Doppler Vibrometer)를 사용하여 진동을 측정, 분석하였다. 그런데 가속도계는 접촉식이고 점단위 측정 방법이라는 단점이 있고, LDV는 접촉식이라는 것은 탈피했지만 역시 점단위 방법이므로 단지 피실험체의 몇 개의 점들만을 대상으로 실험을 하므로 한정적인 데이터만을 얻는데 그쳐 전체의 동적인 거동을 예상하는 데에는 한계가 있다.<sup>(2)</sup>

이러한 방법들과는 별도로 1960년대부터 홀로그래픽 간섭법(Holographic Interferometry)이 개발되어 시편 전체에 걸쳐서 변형 특성을 가시적인 방법으로 검사할 수 있었다. 그러나 이 방법은 측정 정밀도가 뛰어나고 비접촉식이라는 장점이 있는 반면, 복잡한 기록과 재생 과정으로 인하여 시간 소비적이기때문에 실시간 처리가 요구되는 산업 현장의 적용에는 한계가 있었다. 이러한 HI의 단점을 극복하고자 홀로그래픽 간섭법과 TV시스템을 접목시키는 연구가 활발해졌다.<sup>(3-4)</sup> 1970년대 초에는 TV 홀로그래픽 간섭법 또는 전자 스펙클 간섭법(Electronic Speckle Pattern Interferometry)이라 불리는 새로운 방법이 고안되었다. 이 방법은 기록과 재생 과정을 비디오 기술과 전자적 처리에 의해 수행하므로써 공기의 유동, 주변의 진동 등 환경에 민감하고 실시간 처리가 곤란한 HI의 단점을 극복할 수 있었다. 실제로 물체의 동적 특성을 파악하는데 중요한 것은 진동 모드 형태(Vibration Mode Shape)의 정보이며, 이 얻어진 정보를 설계에 이용할 수 있다. 본 연구에서는 스피커의 설계에 이용하기 위한 데이터를 얻기 위해서 시간 평균 ESPI를 이용하여 진동 모드를 얻었고 추가적으로 스트로보스코픽 ESPI에 의해 진폭을 정량화 해서 3차원 그래프로 나타내었다.

## 2. ESPI를 이용한 진동 계측 방법

ESPI를 이용한 진동 계측 방법으로는 시간 평균 ESPI 방법(Time-Average ESPI Method), 스트로보

스코픽 ESPI 방법(Stroboscopic ESPI Method), 이중 펄스 ESPI 방법(dual-pulsed ESPI Method) 등이 주로 사용되는데 본 연구에서는 시간 평균법과 스트로보스코픽 방법으로 스피커의 진동을 계측하였다.

### 2.1 시간 평균 ESPI 방법

시간 평균법은 물체의 규칙적인 진동 주기보다 긴 시간 동안 노출시켜 각각의 위치에서 시간에 따른 변위의 평균치를 밝기 정보로 모니터상에 나타내는 방법이다. 조화 진동 물체의 경우 다음과 같은 식으로 나타내진다.

$$u_o(x, y, t) = a_o \cos[2\pi ft + \phi_o(x, y)] \quad (1)$$

여기서,  $a_o$ : 진폭,  $\phi_o(x, y)$ : 위상,  $f$ : 주파수,  
 $u_o(x, y, t)$ : 조화 운동의 벡터 표현

위와 같이 진동하는 물체에 대한 그 재생상의 강도는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$I(x, y) \propto J_0^2\left[\frac{2\pi}{\lambda} \vec{K} \cdot A_0\right] \quad (2)$$

여기서,  $J_0$ : 1종 0차 베셀 함수,  $\vec{K}$ : 민감도 벡터,  
 $A_0$ : 물체의 진폭

식 (2)에서와 같이 시간 평균법에 의한 강도식에서 물체의 변위에 대한 밝기는 제 1종 0차 베셀함수의 제곱에 비례 관계가 있다.  $J_0^2$  함수는 Fig. 1처럼 첫번째 최대값이 그 이후의 최대값보다 상대적으로 매우 크며, 가시도(Visibility)가 진동 진폭의 증가와 더불어 감소하는 특성이 있다. 즉 물체 면에서 전혀 움직이지 않은 노달점(Nodal Point)들은 첫 번째 최대값을 가지므로써 다른 부분보다 구별되어 밝게 나타나므로 물체의 진동 모드만으로도 진동 형태를 정성적으로 알 수가 있다. 또 실험을 하는 중에 모니터 상에서 공진을 실시간적으로 분리할 수도 있다. 그러나 위상 정보가 평균에 의해 사라지므로 물체상의 각 위치로부터 진동의 방향은 정해지지 못한다. 그러므로 진폭의 정량화를 위해서는 이 베셀함수를 해석해야만 하는 곤란한 점이 있다.<sup>(5-6)</sup> 물체가 정현적으로 진동 변형되고 있을 때 CCD 카메라에서 빛의 강도 분포는 아래 식으로 나타내진다.

$$I(x, y) = I_0(x, y) + I_R(x, y) 2A_0(x, y)A_R(x, y) \cos[\Delta\phi(x, y)]M[\Omega(x, y)] \quad (3)$$

여기서,  $I_0(x, y)$  와  $A_0(x, y)$ : 물체빔의 강도와

진폭

$I_R(x, y)$  와  $A_R(x, y)$  : 기준빔의 강도와 진폭  
 $\Delta\phi(x, y)$  : 불규칙 위상,  $I(x, y)$  : 모니터 화소의 밝기  
 위의 식에서 M은 물체의 변형으로 인한 기준빔과 물체빔 사이의 간섭을 변조(Modulation)시키는 특성함수(Characteristic Function)로써 정적인 변형의 경우에는 코사인 함수가, 진동과 같은 동적인 변형에는 베셀함수가 된다. 또한  $\Omega$ 는 간섭무늬 궤적함수(Fringe Locus Function)로써, 간섭무늬의 차수(Order)를 n이라 하면  $\Omega(x, y) = 2\pi \cdot n(x, y)$ 으로 표현된다.

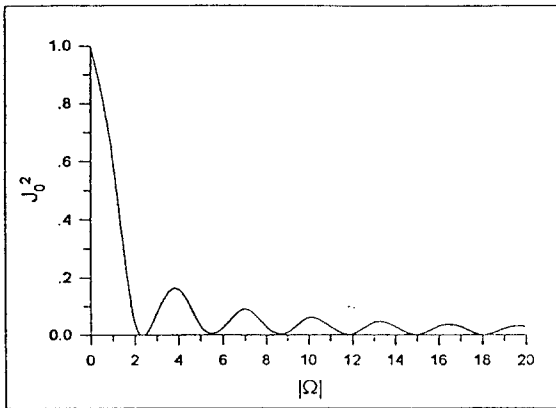


Fig. 1 Square of the zero order Bessel function of the 1st kind

### 2.2 스트로보스코픽 ESPI 방법

스트로보스코픽 ESPI 방법은 연속 발진 레이저에 A-O 변조기(Acousto-Optic Modulator)나 E-O 변조기(Electro-Optic Modulator) 또는 Mechanical Chopper 등을 광 분할기 앞에 설치하여 스트로보 효과를 얻어 Fig. 2와 같이 물체의 진동에 대한 응답을 특수한 점에서 추출하는 방법이다. 즉, 짧은 노출로 인하여 물체가 정지된 듯한 효과를 만들어 물체의 진폭을 측정하는 원리이다. 여기에서의 간섭 무늬는 균일한 사인형의 강도 분포를 갖는다. 그러므로 조화 진동의 진폭과 위상 정보를 얻을 수 있으므로 정량적인 해석에 용이하다. 그러나 레이저 출력의 일부분을 사용하므로 상대적으로 고출력 레이저를 사용해야 하며 좋은 간섭 무늬를 얻기 위해 변조 시기를 진동 주기의 최대점으로 잡아야

한다.<sup>(7)</sup>

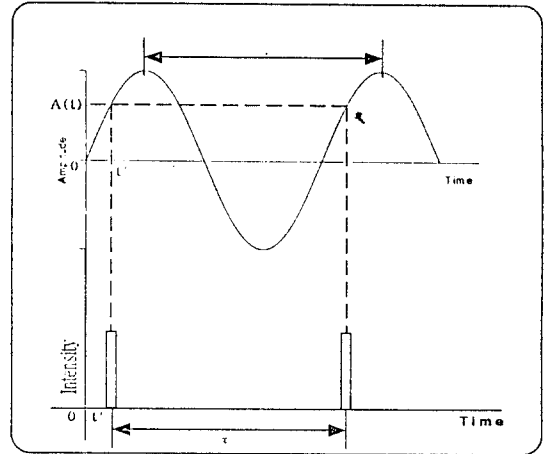


Fig. 2 Intensity modulation of laser beam

## 3. 실험 장치 및 실험 방법

### 3.1. 광학계의 구성

본 연구에서 사용된 광학계는 Fig. 3, 4와 같이 시간 평균과 스트로보스코픽 ESPI법을 위한 형태로 구성되었다. 레이저 광은 514.5 nm 파장의  $Ar^+$  레이저를 사용하였다. Fig. 3에서 레이저 빔은 BS1에 의해 참조빔과 물체빔으로 나뉘어 진다. 참조빔의 진행방향에는 위상 이동법을 수행하기 위하여 PZT(Piezoelectric Transducer)를 부착시켜 참조빔에  $90^\circ$  씩의 위상이동을 주도록 하였다. 또한 함수 발생기에서 정현파를 만들어 스피커를 가진하였다. 물체빔은 M3를 통해 반사된 후 물체를 조사하고 여기서 산란된 빛이 BS2를 통하여 CCD 카메라로 들어오게 된다. 여기서 물체빔은 참조빔과 만나 간섭을 일으키게 되어 물체의 변형에 따른 정보가 빛의 강도 분포의 형태로 기록된다. 4번의 위상이동으로 기록된 각각의 상은 화상처리 장치를 통하여 매모리에 기억되고 모니터에는 간섭 무늬 형태가 나타난다.

Fig. 4의 스트로보스코픽 ESPI 시스템 구성도는 전체적으로 시간평균법과 유사하다. 다른 점은 광분할기를 거치기 전에 변조기를 위치시킨 것이다. 이 변조기 내에는 수정이 들어있는데 이 것이 전압의 인가에 따라서 굴절률이 바뀌게 된다. 그러므로 Fig. 2에서 처럼 조화 진동 주기 내의 임의의 부분에만 레이저 빔이 진행하게

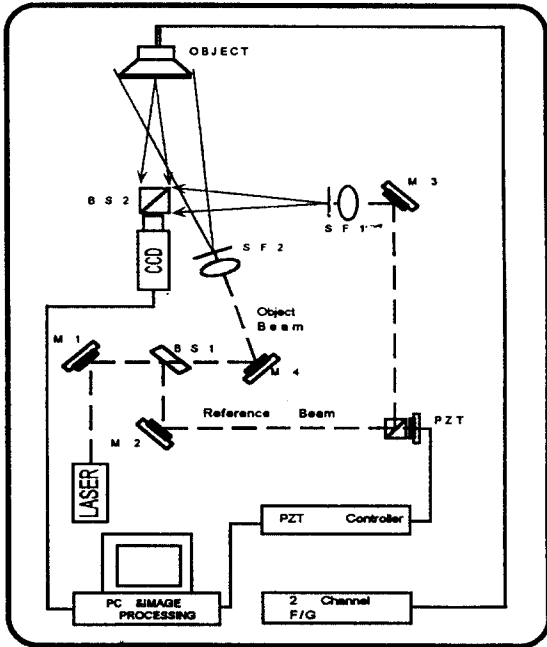


Fig. 3 Time-average system configuration

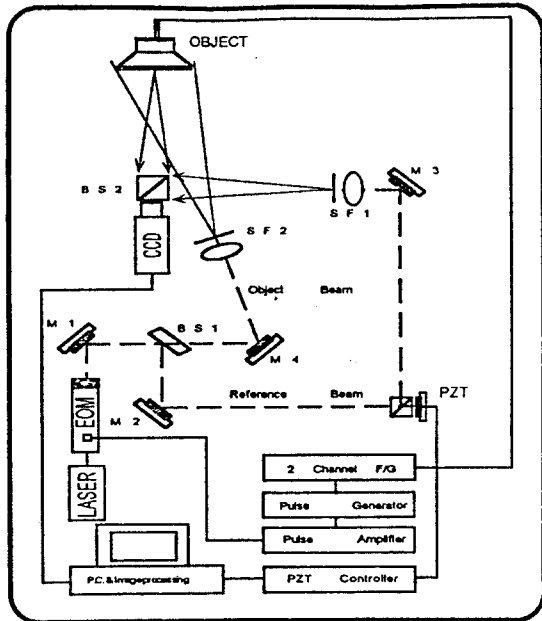


Fig. 4. Stroboscopic system configuration

할 수 있어서 연속 발진 레이저로써 펄스의 효과를 얻을 수 있다. 그리고 이 시스템에서 사용된 PZT는 물체의 변형에 따른 간섭 위상값을 알아내기 위한 변위의 정량화에 사용되었다.

### 3.2. 노이즈의 제거

시간 평균법을 사용하면 스펙클 간섭계에서 필연적으로 나타나는 스펙클 노이즈와 전기적 노이즈 등 광학계의 구성 성분들로부터 나타나는 노이즈가 제거된다. 노이즈의 처리는 프레임 평균법을 사용했는데, 이 때의 프레임 평균 횟수는 이전의 연구 결과로부터 30 프레임 이상으로 하면 충분한 결과가 나와서 30회 이상으로 하였다. ESPI의 경우 물체의 변형으로 인한 위상 변화로부터 간섭 무늬가 형성되고 나면 그 이후부터 스펙클은 간섭 무늬의 가시도(Visibility)를 저하시키는 노이즈로 작용한다. 따라서 보다 깨끗한 간섭 무늬를 얻기 위해서는 불규칙 위상과 배경 노이즈를 제거하여야 한다. 그래서 다음과 같은 4-frame 위상 이동법(Phase Stepping)을 이용하였다. 식 (3)에서 기준빔에 90° 씩 4번의 위상 이동을 실시하면 다음과 같은 4개의 식으로 표현되는 상을 만들 수 있다.

$$I_1 = I_O + I_R + 2A_O A_R \cos(\Delta\phi) M(\Omega) \quad (4)$$

$$I_2 = I_O + I_R + 2A_O A_R \sin(\Delta\phi) M(\Omega) \quad (5)$$

$$I_3 = I_O + I_R - 2A_O A_R \cos(\Delta\phi) M(\Omega) \quad (6)$$

$$I_4 = I_O + I_R - 2A_O A_R \sin(\Delta\phi) M(\Omega) \quad (7)$$

위의 식들에서 아래의 식이 유도된다.

$$(I_1 - I_3)^2 + (I_2 - I_4)^2 = 16I_O I_R M^2(\Omega) \quad (8)$$

식 (8)에서 알 수 있듯이 위상 이동법을 이용하면  $\Delta\phi$  로 표시되는 불규칙 위상항이 제거된다. 그러므로 보다 가시도가 좋은 간섭무늬를 얻을 수 있다.

## 4. 실험 결과 및 고찰

현재까지 우리나라 스피커 음질의 검사는 주로 숙련된 사람의 청각에 의존했으며, 이 검사법은 매우 시간 소비적이고, 또 개인의 편차때문에 객관적이라고 할 수 없었다. 또한 스피커 자체의 진동 측정은 하지 못하고 스피커에 임의의 정현파를 인가하여 이 때 생기는 음압의

변화를 마이크로폰으로 얻어서 이 것을 전기적인 신호로 바꾸어 낸 데이터만으로 스피커의 진동 특성을 파악하는 정도였다. 그러나 위의 시간 평균과 스트로보스코픽 시스템들을 이용하면 스피커 자체의 구조적인 진동 특성과 진폭의 정량적인 값을 알아낼 수가 있다.

일반적으로 좋은 스피커라 함은 진동 형태가 캡을 중심으로 같은 거리에 있는 점들이 방사형의 고른 진동을 보여야 하는데 이 점을 염두에 두고 실험을 하였다.

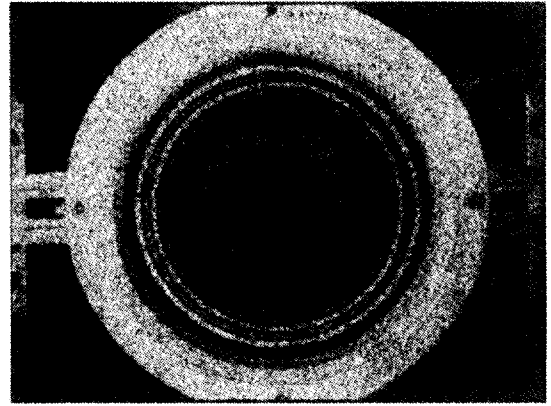
시료는 진동판의 재질에 따라 총 세 종류의 다섯 가지의 스피커를 대상으로 실험을 하였다. 진동판의 재질로 구분하여 종이 진동판 스피커의 경우 직경이 4inch와 5inch의 것을 사용했는데 전자를 이후부터 A형이라 하고 후자를 B형이라 하겠다. 또 폴리프로필렌 진동판 스피커는 직경이 5inch의 것으로 C형으로, 직경이 6inch인 유리 섬유 진동판을 가진 스피커를 D형이라 하겠다. 그리고 위의 네 개의 시편이 모두 원형인데 스피커의 형태에 따른 진동을 알아보기 위해 11×5cm의 크기를 가진 사각형의 종이 진동판 스피커를 대상으로도 실험을 하였다.

#### 4.1 방진에 따른 진동 형태

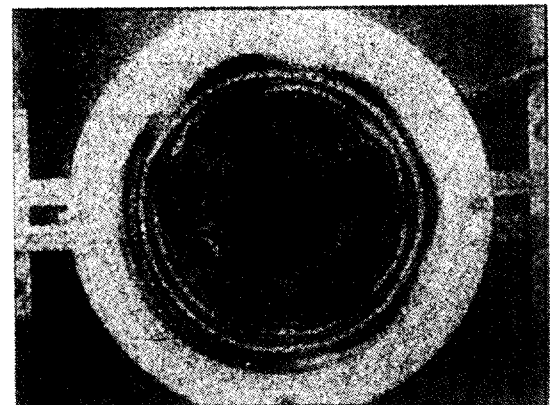
먼저 현재 많이 쓰이고 있는 가속도계로 스피커의 진동을 측정한다면 압전 소자 자체가 방진의 역할을 함으로서 오차를 내재할 수 밖에 없을 거라는 가정하에 인위적으로 시편에 방진 고무를 부착후 진동 모드를 시간 평균 방법에 의해 얻었다. Fig. 5(a)는 폴리프로필렌 진동판을 가진 스피커의 진동 모드 형태이고 (b)는 진동판에 방진 고무(1cm×1cm, W=0.32g)를 좌하단에 부착했을 때이다. 이로부터 방진 고무가 진동에 영향을 미쳐서 무늬 형태가 변화하는 것을 알 수 있다. 종이나 직물 편조의 진동판을 가진 스피커의 경우에도 진동 모드의 형태가 변하는 것을 관찰할 수 있었다.

#### 4.2 스피커 진동판 재질에 따른 진동 형태

스피커의 음질에 영향을 주는 변수로는 진동판(Corn), 캡(Cap), 모서리(Edge)의 형태와 재질, 프레임(Frame)의 지지도 등이 있다. 이 중에 진동판의 재질은 강성, 질량, 내부 손실 등에 관계되어 가장 영향이 크다. Fig. 6의 (a),(b),(c)는 A,C,D형의 진동 형태를 시간 평균법으로 보인 것이다. 이 방법으로는 앞에서 언급했듯이 위상항이 평균되어 운동의 방향을 정해줄 수 없다.



(a) Speaker with polypropylene vibration plate

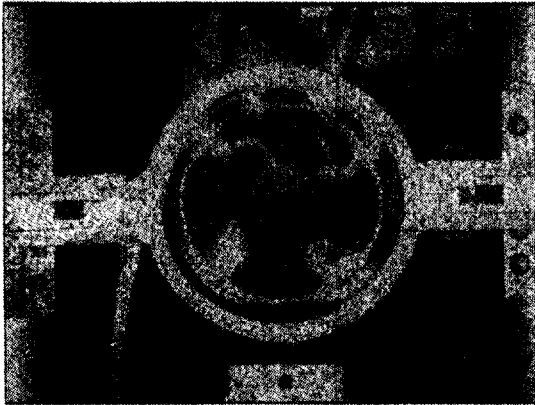


(b) Speaker attached anti-vibration rubber

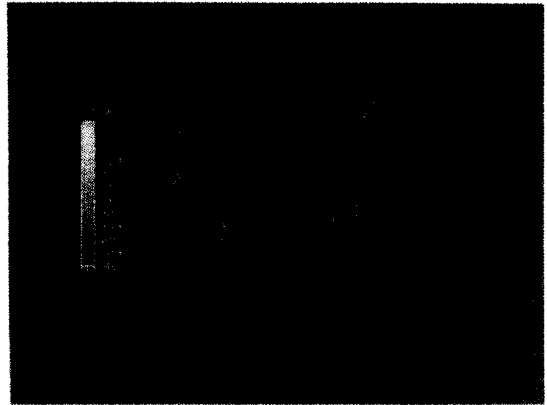
Fig. 5 Time-average fringe pattern at 2100 Hz, 2 V

#### 4.3 3차원 Wire Frame 진폭 분포

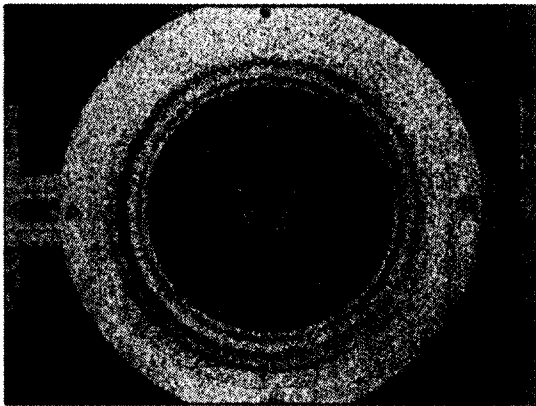
Fig. 7의 (a),(b),(c)는 Fig. 6의 (a),(b),(c)와 동일한 시료에 대하여 쉽게 운동의 방향을 정해줄 수 있는 스트로보스코픽 방법으로 측정하여 진폭값을 보인 것이다. 이러한 진동판 재질에 차이가 나는 스피커들의 진동을 측정할 결과 종이 스피커보다는 폴리프로필렌이나 직물 편조 스피커가 보다 대칭적이고 균형적인 모드 형태를 보였는데, 일반적으로 후자가 전자보다 더 좋은 스피커로 알려져있는 것과 일치한다.



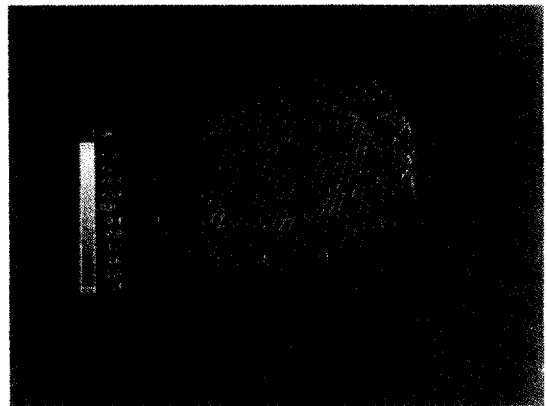
(a) A type speaker at frequency 2200 Hz, 1 V



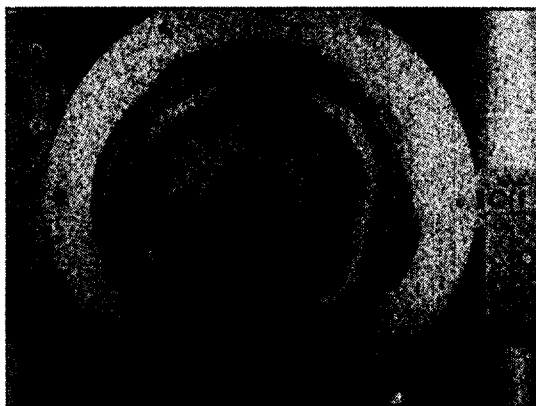
(a) A type speaker at frequency 2200 Hz, 1 V



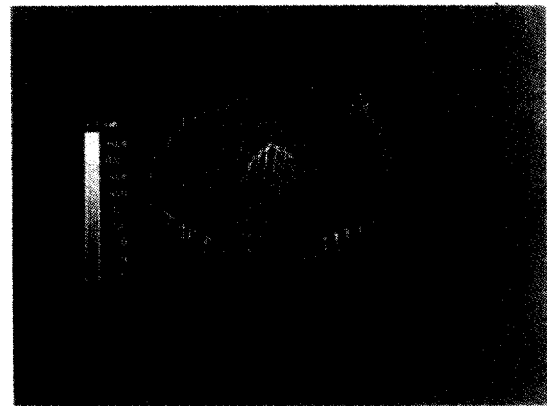
(b) C type speaker at frequency 2700 Hz, 2 V



(b) C type speaker at frequency 2700 Hz, 2 V



(c) D type speaker at frequency 1900 Hz, 1 V  
Fig. 6 The fringe pattern of time-average method



(c) D type speaker at frequency 1900 Hz, 1 V  
Fig. 7 3-D plot of amplitude by stroboscopic method

#### 4.4 주파수의 증가에 따른 측정

각 스피커들을 진폭을 일정하게 1 V로 고정시킨후 주파수를 증가시키면서 진동 형태를 관찰한 결과 C형 스피커는 계속해서 원형의 간섭 무늬를 보였고 30 KHz가 넘으면서는 캡 부분에 복잡한 무늬가 나타났다. D형 스피커에서는 원형 간섭 무늬는 아니었지만 그래도 무늬가 방사형이고 대칭적으로 관측됐다. 주파수가 낮을 때는 캡을 중심으로 가까운 곳에서 간섭 무늬가 많았다. 그러나 A나 B형의 경우, 저주파수에서도 간섭 무늬가 복잡하고 무질서하게 나타났다. 이 실험에서도 C형이나 D형의 스피커가 종이 스피커보다는 여러 주파수에 걸쳐서 보다 균일한 진동 모드를 보였다.

#### 4.5 직사각형 스피커의 진동 형태

다음으로 원형이 아닌 직사각형 스피커로 실험을 해보았다. Fig. 8은 타원형 종이 진동판 스피커의 진동 형태이다. Fig. 9는 이 때의 3 차원 진폭 분포이다. 주파수에서는 대칭적인 모습을 보였으나 2 KHz를 넘으면서 대칭이 깨지면서 복잡해졌다. 이 직사각형 스피커와 A, B형은 진동판에 직접 붙인 코일때문에 간섭 무늬가 비대칭적으로 나타나는 것을 관측할 수 있었다. 이를 해결하면 더 이상적인 진동 패턴을 얻을 수 있을 것으로 보인다.

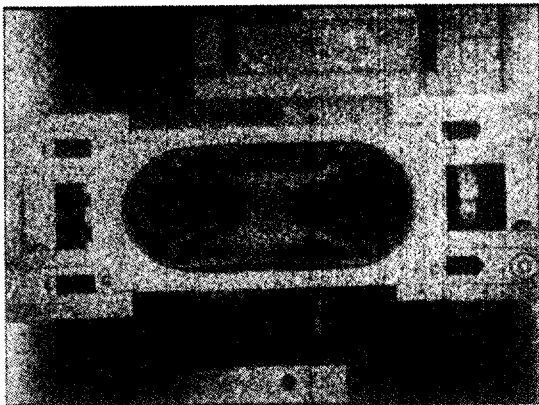


Fig. 8 Time-average fringe pattern of oval paper speaker ( $F = 1000 \text{ Hz}$ ,  $0.5 \text{ V}$ )

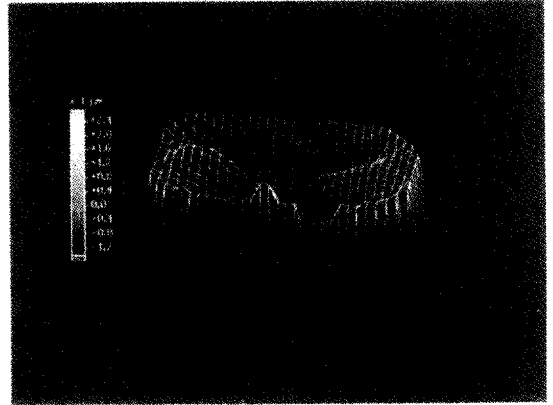


Fig. 9 3-D plot of quad speaker amplitude by stroboscopic method ( $F = 1000 \text{ Hz}$ ,  $0.5 \text{ V}$ )

## 5. 결 론

본 연구에서는 시간 평균 ESPI 장치를 구성하여 조화 진동하는 스피커의 진동 형태를 실시간적으로 모니터링할 수 있었으며, 스트로보스코픽 ESPI 방법으로는 진폭을 정량화 할 수 있었다. 실험 결과들은 스피커의 설계 단계 뿐만아니라 나아가서는 검사 단계에서도 이러한 시스템들을 이용할 수 있다는 가능성을 보인다. 또, 진동판, 예지부, 캡 등의 재질 위치, 모양과 같은 여러 변수들을 여러 조건하에서 실험을 하여 얻은 자료를 데이터베이스화 할 수 있다면 다음 스피커 설계 시에는 보다 빠른 작업이 이루어지리라 생각된다. 그래서 선진국과 기술력의 차이를 낚아지 좁히고 있는 국내 스피커 산업에 도움을 줄 수 있음을 의심치 않는다. 부가적으로 진동을 가시화하는 측정법이기에때문에 진동 전문가가 아니더라도 어느 정도 쉽게 이러한 방법들을 이용할 수 있을 것으로 보인다.

## 참고문헌

1. Robert D. Cook, David S. Malkus and Michael E. Pleshe, "Concepts and Applications of Finite Element Analysis", John Wiley & Sons, pp. 367~ 417, 1987.
2. Stroud, R. C., Excitation, "Measurement and

- Analysis Method for Model Testing", Sound and Vibration, Aug. 1987.
3. A. Macovski, S. D. Ramsey and L. F. Schaefer, "Time-lapse interferometry and contouring using television system", Applied Optics, Vol. 10, pp. 2722, 1971.
  4. J. N. Butters and J. A. Leendertz, "Speckle pattern and holographic techniques in engineering metrology", Optics and Laser Technology, Vol. 3, No. 27, 1971.
  5. K. A. Stetson and W. R. Brohinsky, "Fringe-shifting technique for numerical analysis of time-average holograms of vibrating objects", J. Opt. Soc. Am., Vol. 5, No. 9, 1988.
  6. Karl A. Stetson, "Phase-step interferometry of irregular shapes by using an edge-following algorithm", Applied Optics, Vol. 31, No. 25, 1992.
  7. Xizhou Wang, Yushan Tan, "Vibration Modal Using Stroboscopic Digital Speckle Pattern Interferometry(DSPI)", Speckle Techniques, Birefringence Methods, and Applications to Solid Mechanics, SPIE Vol. 1554A, 1991.