

스트로보스코픽 전자 스페클 패턴 간섭법을 이용한 디스크 브레이크의 진동 모드의 정량적 가시화에 관한 연구

A Study on Quantitative Visualization of Vibration Mode Shape of Disk Brake by using Stroboscopic ESPI

강 영 준*, 박 성 태**, 신 성 국***, 최 영 선****
Young-June Kang, Sung-Tae Park, Sung-Kuk Sin, Young-Seon Choi

ABSTRACT

Brake squeal noise has been a problem since the early days of motoring. It is important to obtain vibration mode shape for reduction of brake noise. Stroboscopic Electronic Speckle Pattern Interferometry is a very powerful measuring method for study of vibrating objects in static state compared with conventional methods because this method can give both resonance frequency and quantitative visualization of vibration mode shape at the same time. In this paper, we performed qualitative visualization and quantitative analysis of vibration mode shape of disk brake by using stroboscopic ESPI and phase shifting method. The stroboscopic wavefronts are obtained by chopping continuous wave laser beam using acousto-optic modulator. Experiments were performed at the same constraint conditions as disk brake of the practical vehicle as far as possible. The experimental results of this paper show qualitative measurement of vibration mode shape and quantitative visualization of vibration amplitude of disk brake with 3D plotting.

주요기술용어 : Disk Brake(디스크 브레이크), Stroboscopic ESPI (스트로보스코픽 ESPI), Resonance Frequency(공진 주파수), Harmonic Vibration(조화진동), Quantitative Visualization(정량적 가시화), Vibration Mode Shape (진동모드형태), Phase Shifting Method(위상 이동법)

1. 서론

자동차의 브레이크에서 제동 시에 발생하는 노이즈는 탑승자는 물론이고 길가는 사람에게도 심한 불편감을 주는데, 이 노이즈의 원인들 중 하나

는 디스크 브레이크의 공진 시에 디스크의 진동 형태 등의 기하학적인 요인이 큰 비중을 차지하고 있다. 따라서 이러한 공진을 일으키는 브레이크의 고유진동수와 그 진동 형태에 대한 연구의 중요성이 날로 증가하고 있다. 진동을 측정하기 위해 지금까지는 주로 가속도계를 사용하여 직접 시험체에 점단위로 붙여서 여기서 획득된 정보를 통해 진동을 해석하는 방법이 사용되어왔고, 최근에는 레이저 도플러 진동측정기(Laser Dop

* 정회원, 전북대학교 기계공학부

** 전북대학교 대학원

*** 정회원, 현대자동차 상용제품개발연구소

**** 진주 벽성대학교 자동차과

-pler Vibrometer, LDV)를 이용하여 물체에 접촉하지 않고 측정하는 방식을 이용해 왔다. 그러나 이런 방법들은 점단위로 해석을 하기 때문에 측정시간이 상당히 많이 소요되고, 가속도계를 이용한 접촉식 방법의 경우 질량 효과 등이 발생하는 문제점 등이 있었다. 또한, 고유진동수를 먼저 찾고 나서 다시 그 진동형태를 알아내야 하는 부가적인 절차가 필요하고, 이러한 진동에 대한 측정값들은 진동을 전공하지 않은 사람들이 이해하기가 다소 어려운 점이 있었다. 따라서 본 논문은 디스크 브레이크의 진동 진폭 분포를 기존의 진동측정 방법에 비해 거의 실시간적으로 측정할 수 있고, 한번에 전면적인 측정이 가능하며, 고유진동수를 찾음과 동시에 그 진동형태를 3차원적으로 정량화 할 수 있는 장점을 가진 광학적인 비접촉, 비파괴 방법을 이용하였다.

본 논문에서 채택한 전자 스펙클 간섭법(Electronic Speckle Pattern Interferometry, ESPI)⁽¹⁾는 레이저의 간섭원리를 이용하여 변형이나 진동을 해석하는 새로운 방식으로, 물체의 변형이나 진동에 대한 정보를 담고 있는 간섭무늬의 기록 및 해석 장치로 CCD 카메라를 이용한 비디오 시스템과 화상 획득 장치 및 일반 퍼스널 컴퓨터를 이용한 화상 처리 프로그램을 이용하여 물체의 변형에 대한 정보를 실시간으로 기록, 처리할 수 있는 전자적 방법이다. 특히 ESPI는 구조물의 고유 진동수를 찾아내고 이를 가시화 하는데 유용하기 때문에 진동 측정^{(2),(3),(4)}에 강점을 가지고 있다. ESPI를 진동측정에 이용하면 물체의 고유진동수를 측정함과 동시에 그 진동형상이 모니터에 간섭무늬 형태로 가시화 됨으로써 물체의 진동 특성에 관한 정보를 쉽게 획득할 수 있다. 이렇게 실시간적으로 물체의 변형이나 진동의 형태를 관찰할 수 있기 때문에 현장에서 구조물의 진동 모드 형태(vibration mode shape)를 가시화하는데 유용한 방법으로 사용될 수 있다. 또한 레이저가 조사되는 부위 전체에 걸쳐 물체의 진동 형태를 한번에 관측할 수 있으며, 수백 nm의 레이저 파장을 계측단위로 사용함으로써 수

백 nm정도의 변형까지 측정할 수 있을 정도로 측정 정밀도 및 민감도가 우수하고, 검사대상에 영향을 주지 않는 비접촉식 방법이다. ESPI를 이용한 진동측정 방법 중 시간평균방법^{(5),(6)}은 간단한 광학적 구성으로 비교적 손쉽게 고유진동수와 간섭무늬 형태의 진동모드를 얻을 수 있는 장점이 있으나⁽⁷⁾, 시간 평균된 간섭무늬를 얻게 되기 때문에 진동하는 물체의 위상정보는 소실되어 버려서, 특정 진폭에서의 디스크 브레이크의 전체적인 진동분포를 정량적으로 측정할 수 없는 단점이 있다. 이렇게 시간평균법에서의 위상정보의 손실은 진동을 정량적으로 해석하는데 문제를 야기하기 때문에 본 연구에서는 기존의 시간 평균법의 장점을 모두 가지고 있을 뿐만 아니라 진동의 정량적 해석을 수행할 수 있는 스트로보스코픽 전자스펙클간섭법(Stroboscopic ESPI)^{(8),(9)}을 이용하여 디스크 브레이크의 진동모드를 실시간, 전면적으로 측정하고, 이를 정량적으로 가시화 하는 과정을 수행하였다.

2. 스트로보스코픽 ESPI

조화진동하는 물체의 진동 상태가 아래식과 같이 표현된다고 하면

$$u_0(x, y, z) = a_0(x, y) \cos[2\pi ft + \phi_0(x, y)] \quad (1)$$

여기에서, $a_0(x, y)$, $\phi_0(x, y)$ 는 각각 진폭과 위상의 분포이고 f 는 진동수이다. 시간평균법에서 측정된 간섭무늬는 아래 식처럼 나타나게 된다.

$$I(x, y) \propto \int_0^2 \left[\frac{2\pi}{\lambda} \vec{K} \cdot \vec{A}_0(x, y) \right] \quad (2)$$

여기에서는 $I(x, y)$ 재생상의 세기, J_0 는 제 1종 0차 베셀함수이며, \vec{K} , \vec{A}_0 는 각각 민감도 벡터와 물체의 진폭이다. 위 식에서 보듯이 시간 평균법에서는 기록 과정

중에 위상 $\phi_0(x, y)$ 정보는 상실되어 버리고, 재생상의 세기는 베셀함수의 제곱에 비례하기 때문에 진동의 정량적 해석이 불가능하게 되는 단점이 있다.

이에 비해서 스트로보스코픽법은 베셀함수형의 간섭무늬를 갖는 진동하는 물체의 진동 모드를 정량화 하기 위해 시간평균된 베셀함수형의 간섭무늬 형태를 정적 변형의 특성을 나타내는 Cosine형 간섭무늬 형태로 바꾸어서 진동모드의 정량화를 수행하는데 사용되는 방법이다. 즉, 이 방법은 진동하고 있는 시험체에서 임의의 진폭을 갖는 순간에서의 응답을 주기적으로 획득하기 위하여, 연속발전 레이저를 AO 변조기(AO modulator)나 EO 변조기(EO modulator) 등을 이용하여 물체의 진동주기 중 응답을 원하는 순간만 레이저가 광경로를 지나가게 하고, 나머지 부분들은 광경로를 지나지 못하게 차핑(chopping)시키는 방법이다. 이 차핑 주파수와 물체를 가진하는 주파수를 동기시켜주고, 정량화를 원하는 진폭값에 해당하는 위상차를 두 파 사이에 주어서 물체의 특정 진폭에서의 응답을 계속해서 추출해내게된다. 따라서 이렇게 하면, 마치 우리가 보기에 진동하고 있는 물체가 그 특정 진폭값에 해당하는 변형을 가지면서 정지하고 있는 듯한 스트로보효과를 이용하여 동적변형 측정실험을 정적변형 측정실험으로

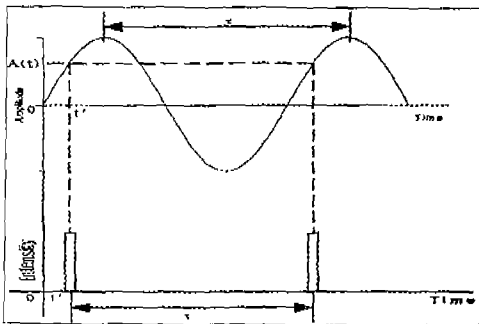


Fig. 1 Intensity modulation of laser beam by AO modulator

바꾸어 줄 수 있게 된다. Fig. 1은 이에 대한 그림이며, 스트로보스코픽 방법에 의해서 생성된 재생상의 세기는 식(3)과 같이 cosine의 제곱에 비례하는 형태를 가지고 있다.

$$I(x, y) = I_0(x, y) \cos^2 \left[\frac{2\pi}{\lambda} a_0(x, y)(\alpha + \beta) \right] \quad (3)$$

$I_0(x, y)$: 정지시의 간섭 영상의 세기

$a_0(x, y)$: 정지시의 진폭

α, β : 조사, 관측 방향과 운동벡터와의 사이각
이렇게 정적변형의 형태로 바뀐 간섭무늬에 대한 정량화는 정적변형의 정량화에 응용한 위상 이동 방법에 의해 수행되어진다.

3. 민감도 벡터에 의한 간섭무늬 해석

본 시스템에서 획득한 영상은 등고선 형태의 간섭무늬를 변형된 물체의 상위에 나타내는데, 이러한 변위의 방향은 간섭계의 광학적 구성에 의해 결정되는 민감도 벡터(sensitivity vector)에 의해 결정된다. 일반적인 간섭계에서 물체를 비추는 빔의 벡터 \vec{k}_1 과 물체에서 반사되어 관측자에게 오는 빔의 벡터 \vec{k}_2 에 대한 민감도 벡터 \vec{K} 는 아래 식과 같다.⁽¹⁰⁾

$$\vec{K} = \vec{k}_2 - \vec{k}_1 \quad (4)$$

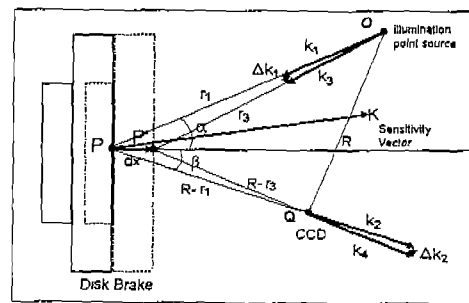


Fig. 2 Vector diagram showing sensitivity to displacement in out-of plane interferometry

Fig. 2의 벡터 구성도에서 간섭계의 구성에

따른 민감도 벡터와 변위 벡터를 구한다. 그림에서 평면의 어느 한 점이 변위 \vec{d}_x 만큼 이동했을 때의 빔의 강도 분포는 아래식으로 표현된다.

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Psi + \Delta\phi) \quad (5)$$

여기서 I_1 : 변형전의 빔의 강도, I_2 : 변형후의 빔의 강도, Ψ : 불규칙 위상, $\Delta\phi$: 변형전 후의 두 빔의 경로차에 의한 위상차이다.

여기서 변형전과 후에 발생하는 레이저의 경로의 차이에 의해서 화상모니터 상에 간섭무늬가 형성이 되어진다. 즉, 물체면의 각 점에 대해서 보면, 변형전과 변형후의 위상차이가 없으면 변형전과 후의 화상을 서로 빼주게 되면 아무것도 남지 않으나, 위상차이가 있다면 이 위상차에 해당하는 밝기의 세기인 그레이 레벨(grey level) 값이 물체면상의 점에 대한 강도값으로 화상모니터에 표시된다. 따라서 이러한 결과 값들이 전체적으로 보면 간섭무늬를 형성하고 이 간섭무늬를 통해서 변위값을 알아낼 수 있게 된다.

진동의 정량적 해석을 위해, 2 채널 신시사이저를 이용해서 같은 주파수의 디스크를 가진할 Sine 파와 AO 변조기로 입력되는 사각파를 만들어 준다. 이 두 주파수를 서로 동기 시켜 주고, 진동하고 있는 디스크 브레이크의 최대 진폭값을 추출하기 위해 약 85° 정도의 위상차를 두 파 사이에 주게 된다. 불체가 정지한 듯한 효과를 내는 스트로보효과를 얻기 위해 연속 레이저를 chopping 시켜주는 장치로는 EO 변조기(electro-optic modulator)와 AO 변조기(acousto-optic modulator)가 있는데 본 연구에서는 AO 변조기를 사용하였다. 여기서 AO 변조기에 들어가는 파의 형태는 Fig. 1에서 보여지는 것처럼 주기의 1/20의 순간만 출력을 내는 펄스파의 형태를 갖도록, Duty cycle을 5%로 변환시켜준다. 이렇게 하면 레이저빔이 진동하는 디스크 브레이크의 최대 진폭점에서만 레이저가 디스크에 조사되기 때문에 모니터 상에 나타나는 간섭무늬는 진동하지 않는 변형전의 스펙클 패턴에서 진동하고 있는

디스크에서 최대 진폭을 갖는 변형후의 상을 프로그램 상으로 전자적 빼기를 통해 정적변형과 같은 원리로 간섭무늬가 형성된다. 이때 PZT장치를 이용하여 간섭무늬의 간격 2π 에 대해서 90° 씩 4 frame의 위상이동을 수행하면, 화상처리 프로그램이 이 값들을 위상이동을 통해 위상값을 도출하는 식에 대입해서 위상값을 포함한 위상지도를 생성하고, 이를 3차원적으로 모니터 상에 출력해 준다. 위 그림에서 변형 전과 후의 광 경로를 계산한 후 이 차이를 구해보면 변위에 대한 식을 아래식 (6)과 같이 얻을 수 있다.

$$d = \frac{N\lambda}{1 + \cos\phi} \cong \frac{N\lambda}{2} \quad (6)$$

여기에서, $\phi \cong 0$ 이고, N은 간섭무늬 차수이고, λ 는 사용된 레이저의 파장이다. 식 (6)은 본 실험에서 측정하고자 하는 진폭 d에 대한 특성을 알려주는 식으로 식에서 알수 있듯이 진동진폭은 간섭무늬의 차수가 증가함에 따라 비례적으로 증가함을 알 수 있다. 따라서 측정된 간섭무늬의 개수가 많으면 많은 수록 진폭값이 더 크다는 것을 알 수 있다. 또한 측정된 실험결과에서 임의의 위치에서의 진폭은 그 지점에서의 간섭무늬의 차수를 통해서 대략적으로 계산해 볼 수도 있음을 알 수 있다.

4. 실험 장치 구성 및 방법

본 연구에서 사용된 스트로보스코픽 ESPI 시스템의 간섭계 부분과 화상처리 부분이 각각 Fig. 3과 Fig. 4에 나타나 있다.

구성된 면의 변위에 민감한 시스템은 진동 절연된 광학 테이블(isolation table) 위에서 구성하였으며, 광원으로는 파장이 514.5nm인 아르곤 레이저를 사용하였다. 광원에서 나온 레이저빔은 미러(mirror)에서 반사되어 광분할기(beam splitter)를 통하여 기준빔과 물체빔으로 나누어진다. 이때 기준빔과 물체빔 사이의 광량비(beam ratio)는 물체빔이 물체에 조사된 후 반사

되는 빛이기 때문에 빔의 상당량이 소실되므로 가변 광분할기를 사용하여 물체빔으로 훨씬 많은 빛이 갈 수 있도록 했다. 그리고 물체빔은 CCD 카메라 앞에 놓여 있는 광분할기에 의해 CCD 카메라에 입사되어 기준빔과 간섭을 일으키게 된다. CCD 카메라를 통해 스펙클 패턴의 강도 분포는 전기적인 신호로 바뀌어 Frame Grabber 내로 들어와서 디지털 정보로 저장되며 이렇게 저장된 변형선과 변형후의 이미지를 전자적 빼기를 수행해주면 그 결과가 모니터에 간섭무늬로 나타난다.

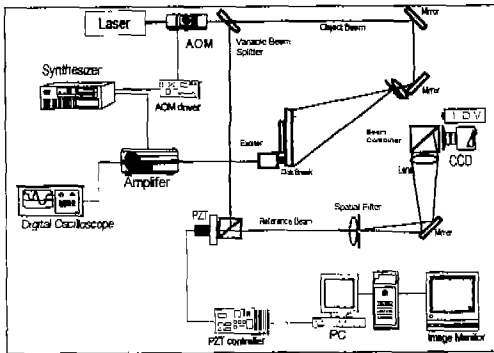


Fig. 3 A schematic of stroboscopic ESPI to measure vibration mode shape of the disk brake

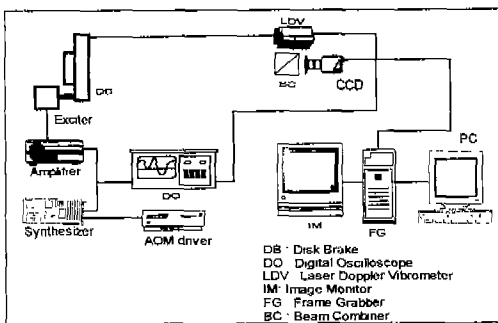


Fig. 4 A schematic of image acquisition system to measure vibration mode shape of the disk brake

본 시스템에 의해 측정되어진 디스크 브레이크는 실제 자동차에서 사용되고 있는 부품이며, 구속 조건은 실제 자동차에 부착되어 있는 디스크 브레이크와 가능한 한 같은 구속조건을 주기 위

해 지그를 제작하여 Fig. 5에 보이는 것처럼 앞의 4부분을 볼트로 구속을 시켰다. 가진은 합수 발생기에서 발생된 파를 증폭기를 이용하여 증폭한 후 이 증폭된 파를 소형 가진기에 입력하여 이 가진기로 디스크 브레이크의 뒷면을 가진하였고, 가진시 합수 발생기에서 나온 파는 디지털 오실로스코프를 이용하여 정확히 측정을 하였다. 본 연구의 신뢰성을 높이기 위해 사용된 LDV는 디스크 브레이크의 약 1.5 m 전방에 간섭계에 영향을 주지 않도록 설치하고, 디지털 오실로스코프와 연결시켜 간섭계를 통한 공진 주파수 측정시에 맞추어 측정하여 그때 그때의 실험결과를 비교·분석하였다.

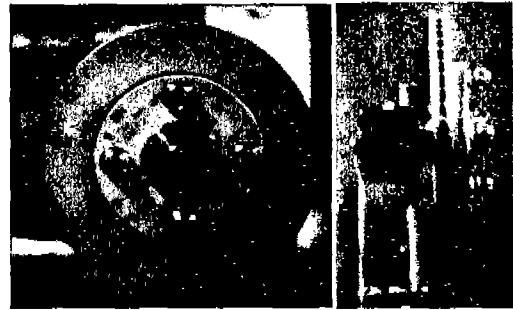


Fig. 5 Disk brake was constrained by bolting to measure vibration mode shape

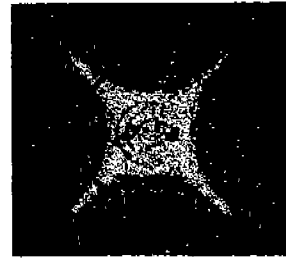
5. 실험 결과

Fig. 6에서 Fig. 6(a)는 화상모니터로 관측되는 스펙클 간섭무늬로 중앙의 X자형의 밝은 하안선이 진동을 하지 않는 노달선을 나타내고 있고, 그 사이에 4개의 반호 모양의 간섭무늬는 진동이 일어나고 있는 부분을 나타내고 있다. Fig. 6(b)는 4 프레임(frame) 위상 이동법을 이용하여 Fig. 6(a)의 간섭무늬를 최대 진폭이 되는 진폭 값에 대하여 작성한 위상지도이다. 그림에서 보면 간섭무늬가 점진적에서 점점 색깔이 열려져서 흰색으로 변화해 가는 형태를 띄고 있음을 알 수 있는데, 이는 위상이동법을 이용해서 구한 위상 값이 arctan값을 갖기 때문에 나타나는 현상이다. Fig. 6(c)는 Fig. 6(b)를 위상펼침 알고리즘

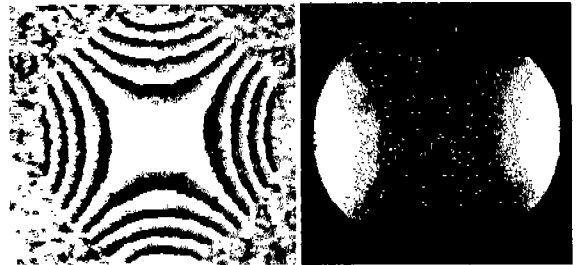
으로 이용하여 펼쳐서 위상값들이 서로 연결되도록 재구성한 것이고, Fig. 6(d)는 Fig. 6(c)의 위상값들을 3차원상으로 그려서 1400 Hz의 고유진동수를 가질 때의 디스크 브레이크의 진동형상을 나타내 준 것이다. Fig. 6(d)그림을 보면 Fig. 6(a)에서 설명했던 바와 같이 가운데 X자형 부분은 진동을 하지 않는 평평한 부분이고 왼쪽 상단과 오른쪽 하단이 위로 올라오는 형상을 띄고, 왼쪽 하단과 오른쪽 상단이 아래로 내려가는 형태로 진동을 하고 있음을 바로 알 수 있다. 따라서 이 그림을 보면 디스크 브레이크가 1400 Hz의 고유진동수에서 어떠한 형태로 진동을 하고 있는지를 쉽게 알아볼 수 있다. Fig 6(e)는 stroboscopic ESPI를 통해 찾아낸 고유 주파수와 공진상태에 있는 디스크 표면상의 한 점으로부터의 응답을 LDV로 측정된 주파수를 비교한 것으로 두 측정값이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7(a)와 (b)그림을 비교해보면 진동하지 않는 노달선 부분을 중심으로 그 사이에 있는 6개의 반호 모양의 부분들이 서로 번갈아 오르락 내리락 하면서 진동을 하고 있음을 바로 알 수 있다. Fig. 7(a)에서 보면 6개의 반호 모양의 간섭부위 중 왼쪽 하단의 것과 오른쪽 상단의 것이 다른 것과 비교해서 모양이 조금 다름을 알 수 있는데, 이는 아마도 디스크를 조인 볼트의 조임량이 서로 달라서 발생하는 현상으로 생각된다.

Fig. 6~ Fig. 9를 보면 진동수가 증가할수록 노달선이 증가되어 고유진동수가 나타남을 알 수 있다. 또한 노달선이 증가할수록(고주파수로 갈수록) 디스크에서 진동이 일어나는 부분이 점점 감소하여 디스크의 원 둘레 부분으로 이동해가는 형상을 보임을 알 수 있다. 참고로 본 실험에서는 8900 Hz에서 노달선이 6개인 모드까지 측정이 가능하였고, 그 이상의 주파수에는 진동 모드의 측정이 불가능하였다.

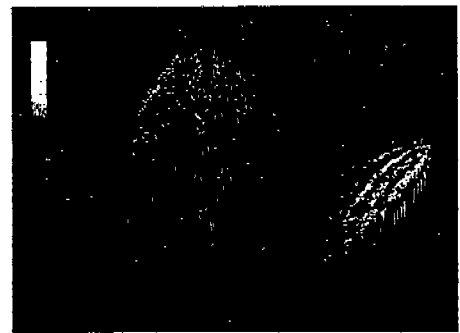


(a) Fringe pattern

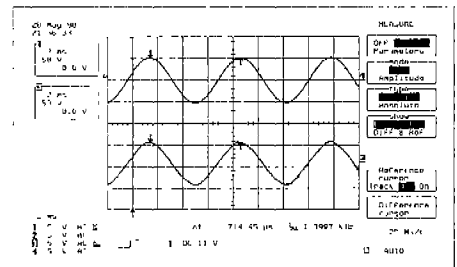


(b) Phase map

(c) Demodulation

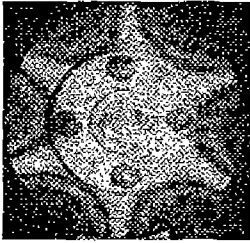


(d) 3D Plot

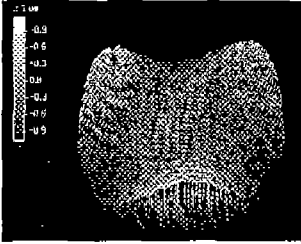


(e) Stroboscopic ESPI measurement result at 1400Hz : upper waveform, LDV measurement result at 1399Hz : lower waveform

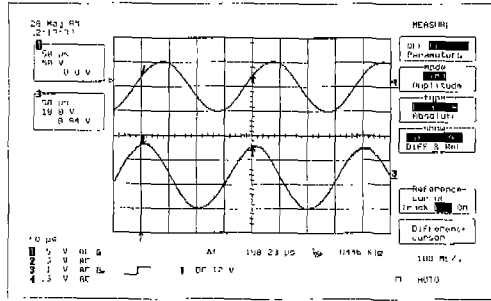
Fig. 6 Vibration mode shape of disk brake at 1400 Hz



(a) Fringe pattern

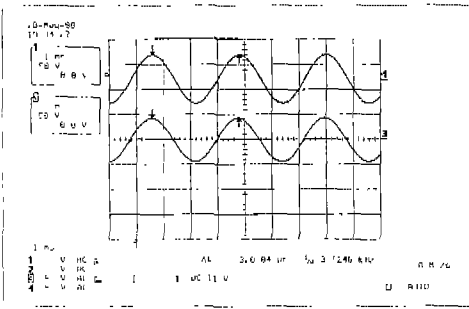


(b) 3D Plot



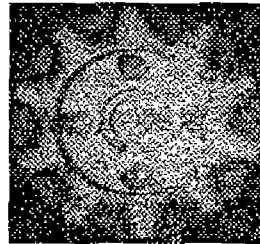
(c) Stroboscopic ESPI measurement result at 5031Hz : upper waveform, LDV measurement result at 5044Hz : lower waveform

Fig. 8 Vibration mode shape of disk brake at 5031 Hz

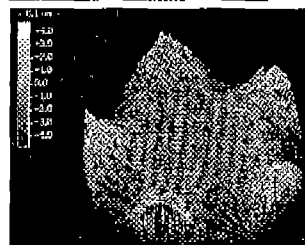


(c) Stroboscopic ESPI measurement result at 3124Hz : upper waveform, LDV measurement result at 3124Hz : lower waveform

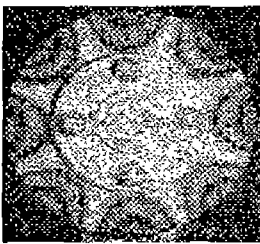
Fig. 7 Vibration mode shape of disk brake at 3124 Hz



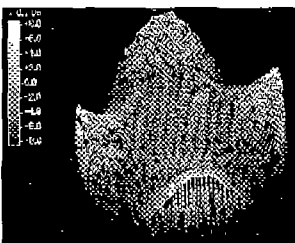
(a) Fringe pattern



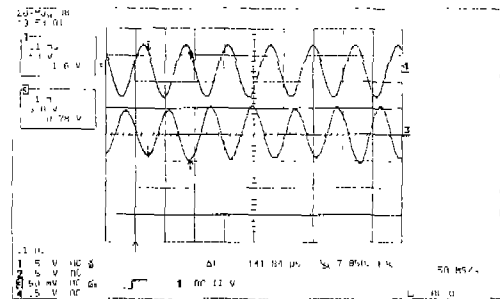
(b) 3D Plot



(a) Fringe pattern



(b) 3D Plot



(c) Stroboscopic ESPI measurement result at 7045Hz : upper waveform, LDV measurement result at 7050Hz : lower waveform

Fig. 9 Vibration mode shape of disk brake at 7045 Hz

6. 결 론

본 연구에서는 정적 진동 물체의 진동측정에 적합한 스트로보스코픽 ESPI 기법을 실제 자동차의 디스크 브레이크에 새로이 적용하여 디스크 브레이크의 고유진동수와 진동 모드 형태를 실시간적으로 계측하여 정성적으로 가시화하였고, 위상이동법을 이용하여 진동모드 형상을 정량적 측정을 통해 3차원 그림의 형태로 가시화 하여 기존의 진동측정방법의 최대 문제점으로 지적되어 온 시간소비성을 크게 개선할 수 있음을 확인하였다. 본 연구 방법은 시험체의 고유진동수를 찾음과 동시에 그 진동형상을 모니터로 확인할 수 있고, 이를 3차원적으로 나타낼 수 있기 때문에 시험체의 진동특성을 쉽게 파악하는데 큰 도움이 될 것으로 생각한다. 실제 자동차의 구속조건과 최대한 가까운 구속조건을 주기 위해 디스크 브레이크의 구속지그를 제작하여 실험을 수행하였으므로 측정 결과값이 좀 더 실제적이고 현장 적용성을 높을 것으로 생각되어진다. 본 연구에서 외국에서는 이미 상용화되어있는 레이저 계측 기술을 본 연구실에서 광학계 구성 및 화상처리 프로그램 자체 제작하여 선진국 수준의 연구 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 본 연구의 신뢰성을 높이기 위해 LDV를 이용한 진동 계측을 동시에 수행하여, 본 간섭계에 의해 측정된 디스크 브레이크의 공진 주파수와 비교·분석을 수행하여 두 방법에 의한 측정결과들이 잘 일치하고 있음을 보임으로써 본 연구의 결과들에 대한 타당성을 검증하였다.

후 기

본 연구는 전북대학교 자동차 신기술 연구소의 지원을 받아 수행하였으며 이에 감사 드립니다.
(과제 번호 : AR 9905)

참 고 문 헌

1. C. Joenathan, "Vibration Fringe by Phase Stepping on an Electronic Speckle Pattern Interferometer", *Applied Optics*, Vol. 30, No. 32, pp. 4658~4665, 1991.
2. Ole J. Lokberg, "ESPI - The ultimate holographic tool for vibration analysis?", *J. Accoust. Soc. Am*, Vol. 75, No. 6, 1984.
3. Ryszard J. Pryputniewicz, "Measurement of Vibration pattern using Electro-Optic Holography", *SPIE*, Vol. 1162, pp. 456~467, 1989.
4. K. A. Stetson, et al, "An Electro-Optic Holography system with real-time arithmetic processing", *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 8, No. 2, pp. 69-76, 1989.
5. Karl A. Stetson and William R. Brohinsky, "Fringe-shifting technique for numerical analysis of time-average hologram of vibrating objects", *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 5, No. 9, pp.104~111, 1988.
6. Ryszard J. Pryputniewicz, "Time average holography in vibration analysis", *Optical Engineering*, Vol. 24, No. 5, pp. 843~848, 1985.
7. 최장섭, 강영준, "전자 광학적 홀로그래픽 간섭법을 이용한 진동 물체의 모드 형태 계측법", *대한기계학회논문집*, 제 20권 제 2호, pp. 564~574, 1996.
8. P. Hariharan and B. F. Oreb, "Stroboscopic Holographic Interferometry : Application Of Digital Techniques" *Optics Communications*, Vol 59, No. 2, 1986.
9. Y. M. He & Y. S. Tan & C. H. Ku, "Stroboscopic Laser Speckle Interferometry Used for Measuring Dynamic Behaviour of Structures", *Optics in Engineering Measurement*, *SPIE* Vol. 599, pp. 166~172, 1985.
10. Charles M. Vest, "Holographic Interferometry", *John Wiley & Sons. Press*, pp. 36~77, 1979.