

시간평균 ESPI를 이용한 디스크 브레이크의 진동 모드 측정에 관한 연구

강 영 준*, 김 동 우*

A Study on Vibration Mode Shape Measurement of Disk Brake
by Using Time-Averaged ESPI

Young-June Kang*, Dong-Woo Kim*

Abstract

Electronic Speckle Pattern Interferometry(ESPI) is a powerful tool to measure the vibration mode shape and resonance frequency for modal analysis. As for ESPI, this method is very suited for full-field measurement of objects in industrial areas because the interferograms are recorded with a video camera and evaluated in real-time with a computer. In this study, We performed experiments at the same constraint conditions as disk brake of the practical vehicle as far as possible and obtained the resonance frequencies and vibration mode shapes by using time-averaged ESPI at once. Finally, to assure the experimental results by time-averaged ESPI, we also compared those with results obtained by Laser Doppler Vibrometer and obtained good agreement.

KeyWords : Non-destructive Testing(비파괴 검사), Time-averaged ESPI (시간평균법), Resonance Frequency(공진주파수), Distribution of a Vibration Amplitude(진동 진폭 분포), LDV(레이저 도플러 진동 계측기)

1. 서론

자동차 브레이크에서 제동 시에 발생하는 소음(noise)은 탑승자는 물론이고 길가는 사람에게도 심한 불편감을 주는 데, 이 소음의 원인들 중 하나는 디스크브레이크의 공진에 의한 기하학적인 요인이 큰 비중을 차지하고 있다. 따라서 이러한 공진을 일으키는 브레이크의 공진주파수와 그 진동 형태에 대한 연구는 중요하다. 하지만 현재 주로 사용되고 있는 진동측정 방법들은 접촉식이거나, 점단위 측정방법이기 때문에 측정시간이 상당히 많이 소요되고, 또 복잡한 형상의 물체의 경우 측정이 매우 힘든 단점이

있다. 따라서 본 논문은 브레이크 디스크의 진동 진폭 분포에 대하여 연구함에 있어서 실시간인 진동측정이 가능하고, 레이저가 조사되는 전 영역에 대해 한번에 측정이 가능한 장점을 가진 레이저의 간섭성을 이용한 광학적 방법을 채택하였다.

전자 스페클 패턴 간섭법(Electronic Speckle Pattern Interferometry, ESPI)⁽¹⁾은 기록 매체로 CCD 카메라를 이용한 비디오 시스템을 이용하고, 물체의 변형정보를 담고 있는 간섭무늬의 기록과 재생에 화상획득장치와 퍼스널 컴퓨터를 이용한 화상처리장치를 사용함으로써 실시간 기록 및 재생처리가 가능하고 재사용이 가능한 특징이 있어, 이

* 전북대학교 기계공학부

러한 특성으로 인해 홀로그래피⁽²⁾로는 불가능한 실시간 계측이 가능하고, 특히 진동 측정^{(3),(4),(5)}에 강점을 가지고 있다. 또한, ESPI는 구조물의 공진주파수를 찾아내고 이를 가시화 하는데 유용한 측정방법으로, 진동 계측을 함에 있어 아래와 같은 여러 가지 특징을 가지고 있다. 먼저 물체의 공진주파수를 찾게됨과 동시에 그 진동형상이 모니터에 간섭무늬 형태로 가시화 함으로써 물체의 진동 특성에 관한 정보를 쉽게 습득할 수 있다. 물체의 변형을 실시간적으로 관찰할 수 있기 때문에 현장에서 구조물의 진동 모드 형태(vibration mode shape)를 가시화 하는데 유용한 방법으로 사용될 수 있다. 또한 레이저가 조사되는 부위 전 면적에 걸쳐 물체의 진동 형태를 한번에 관측할 수 있으며, 수백 nm의 레이저 파장을 계측단위로 사용함으로 측정 정밀도 및 민감도가 우수하고, 검사대상에 영향을 주지 않는 비접촉식 방법이다. 더구나 시간 평균법^{(6),(7)}에 의한 계측 방법은 간섭무늬가 조화진동과 밀접한 베셀함수형 간섭무늬를 만들어 내므로 직접적으로 물체의 모드 형태를 관찰할 수 있는 이점이 있다.⁽⁸⁾

따라서 본 연구에서는 시간 평균 ESPI를 이용하여 자동차 디스크 브레이크의 진동 주파수에 따른 진동 모드 형태를 실시간, 전면적으로 계측하였다.^{(9),(10)} 본 연구의 디스크 브레이크는 뒷면과 옆면에서 각각 가진하여 그 측정 결과를 비교하였고, 본 연구 방법으로 측정한 공진주파수와 LDV(Laser Doppler Vibrometer)를 사용하여 측정한 결과를 오실로스코프를 이용해 비교·검토하였다.

2. 시간 평균법 (Time-averaged method)

전자 스펙클 패턴 간섭법의 진동 측정 방법에는 시간 평균법, 스트로보스코프 방법, 이중 펄스 방법이 있으나 가장 일반적이고 간단한 기술은 물체가 진동하는 동안 기록하는 시간 평균법이다. 규칙적으로 진동하는 물체의 진동 범위와 절점 등고선(nodal contour)을 얻기 위해 물체의 진동주기와 비교하여 보다 긴 노출 시간으로 영상을 제작하면 물체 각각의 시간에 따른 변위의 평균치가 밝기 정보로 영상이 CCD에 기록된다. 즉 물체의 공진주파수가 CCD의 프레임 비(frame rate)인 30Hz 이상이 되면 위의 조건이 만족되기 때문에 간단하게 진동 분포나 진동 모드를 계측할 수 있다.

물체의 진동 상태가 아래와 같다고 보자.

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

여기에서, $a_o(x, y)$, $\phi_o(x, y)$ 는 각각 진폭과 위상의 분포이고 f 는 진동수이다. 위 식 (1)과 같이 진동하는 물체에 대한 영상의 재생상의 세기를 $I(x, y)$ 라 하면, $I(x, y)$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

여기에서 J_o 는 제 1종 0차 베셀함수이며, \vec{K} , \vec{A}_o 는 각각 민감도 벡터와 물체의 진폭이다. 여기서, 노출 동안의 진동 주기의 수는 매우 크거나 정수라고 가정한다. 시간 평균법에서는 기록 과정 중에 위상 $\phi_o(x, y)$ 정보는 상실되며, 세기 정보만이 진동 물체의 상을 지나는 간섭무늬 패턴으로부터 쉽게 해석할 수 있다.

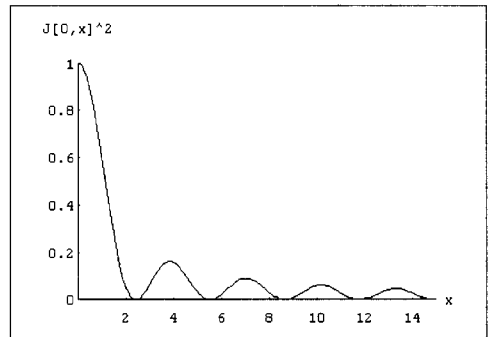


Fig. 1 Square of the zero order Bessel function of the 1st kind

식 (2)와 같이 시간 평균법에 의해 획득한 정보에서 물체의 변위에 대한 밝기의 관계는 제 1종 0차 베셀함수의 제곱에 비례한다. J_o^2 함수는 첫 번째 최대 값이 그 이후의 최대 값보다 상대적으로 매우 크며 그 값이 순차적으로 감소하는 특성을 가지고 있음을 Fig.1에서 알 수 있다. 따라서 시간평균법에 의해 측정된 결과의 간섭무늬를 보면 간섭무늬의 차수에 따른 밝기 분포가 일정하지 않음을 알 수 있다. 즉 물체면에서 전혀 움직이지 않은 절점(nodal point)들은 첫 번째 최대값을 가지므로 다른 부분보다 구별되어 밝게 나타난다. 그러므로 절점들을 중심으로 변위

가 증가함에 따라 밝기가 점점 어두워져 가는 양상을 보이게 되므로 물체의 진동 변형인 모드 형태를 직접적으로 관찰할 수 있다.

이 시간 평균법은 진동 세기의 정확한 측정이 가능하며, 진동 모드를 금방 눈으로 알아볼 수 있는 장점이 있다. 그러나 이 방법은 매우 작은 진폭을 갖는 진동 상태는 측정할 수 없으며, 물체 다른 부분의 상대적인 진동 위상 (vibration phase)을 측정할 수 없다. 또한, 간섭무늬의 가시도가 진동 진폭의 증가에 따라 감소하게 되며, 간섭무늬는 진동 위상이 아닌 단지 진폭만을 나타낸다는 단점이 있다. 비록 시간평균법이 이러한 단점들을 가지고 있지만, 고유진동수와 그 진동형태를 연구용으로 간단하고 적합한 방법이다.

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 k_1 과 물체에서 반사되어 관측자에게 오는 빔의 벡터 k_2 에 대한 민감도 벡터 K 는 아래 식과 같다.⁽²⁾

$$\vec{K} = \vec{k}_2 - \vec{k}_1 \quad (3)$$

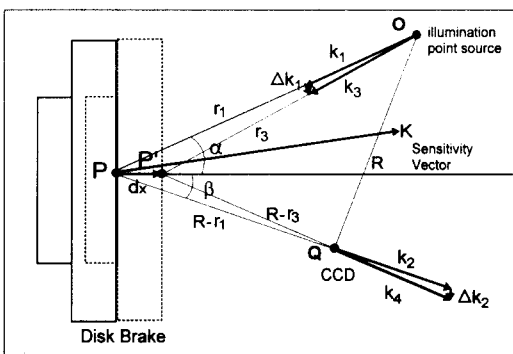


Fig. 2 Vector diagram showing sensitivity to displacement in out-of plane interferometry

간섭계의 구성에 따른 민감도 벡터와 변위 벡터를 구하

기 위해서 Fig.2의 벡터 구성도를 보자. 그림에서 평면의 어느 한 점이 변위 \vec{d} 만큼 이동했을 때의 빔의 강도분포는 아래 식으로 표현된다.

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Psi + \Delta\phi) \quad (4)$$

위 식에서 Ψ 는 불규칙 위상을, $\Delta\phi$ 는 두 빔에 의한 위상 변위를 나타내므로 그에 따른 식을 전개해 나가려면, 변위 \vec{d} 만큼 이동하기 전과 후 두 빔의 위상을 각각 벡터형으로 구해야 한다. 따라서 변형전과 후의 두 빔의 위상 ϕ_1 과 ϕ_2 는 Fig. 2의 벡터를 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\phi_1 = \vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1 + \vec{k}_2 \cdot (\vec{R} - \vec{r}_1) + \Psi \quad (5)$$

$$\phi_2 = \vec{k}_3 \cdot \vec{r}_3 + \vec{k}_1 \cdot (\vec{R} - \vec{r}_3) + \Psi \quad (6)$$

여기에서, $|\vec{k}_1| = |\vec{k}_2| = |\vec{k}_3| = |\vec{k}_4| = \frac{2\pi}{\lambda}$

$$\vec{k}_3 = \vec{k}_1 + \Delta\vec{k}_1, \quad \vec{k}_4 = \vec{k}_2 + \Delta\vec{k}_2$$

간섭무늬로서 나타내게 되는 전체 위상 변화는 변형전과 후의 두 빔의 위상 ϕ_1 과 ϕ_2 차로서 표현할 수 있으므로, 두 빔의 위상 차에 의한 변위는 아래식 (7)과 같이 된다.

$$\delta = \phi_1 - \phi_2 \quad (7)$$

위의 (7)식에 (5), (6)식을 대입하여 정리하면, 다시 아래의 식으로 전개된다.

$$\begin{aligned} \delta &= (\vec{k}_2 - \vec{k}_1) \cdot (\vec{r}_3 - \vec{r}_1) \\ &\quad - \Delta\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_3 - \Delta\vec{k}_2 \cdot (\vec{R} - \vec{r}_3) \quad (8) \\ &= r(\vec{k}_2 - \vec{k}_1) \cdot (\vec{r}_3 - \vec{r}_1) \end{aligned}$$

식 (8)에서 $\Delta\vec{k}_1$ 과 \vec{r}_3 , $\Delta\vec{k}_2$ 과 $(\vec{R} - \vec{r}_3)$ 는 서로 수직한 방향에 놓여 있으므로 그 값이 0이 된다. 결국 식 (8)은 식 (9)로 표현된다.

$$\begin{aligned} \delta &= (\vec{k}_2 - \vec{k}_1) \cdot \vec{d} = \vec{K} \cdot \vec{d} \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} d(\cos\beta + \cos\alpha) \quad (9) \\ &\cong \frac{2\pi}{\lambda} d(1 + \cos\alpha) \quad (\because \beta \cong 0) \end{aligned}$$

그리고 위상 변화에 의한 변위는 간격이 2π 인 간섭무늬의 개수로서 표현되므로

$$\begin{aligned} \delta &= 2\pi N \quad (10) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} d(1 + \cos\alpha) \quad (N=1, 2, 3, \dots) \end{aligned}$$

식 (10)을 변위 d 에 대하여 정리하면, 최종적인 변위식은 아래 식과 같다.

$$d = \frac{N\lambda}{1 + \cos\psi} \cong \frac{N\lambda}{2} \quad (\because \psi \cong 0) \quad (11)$$

여기에서, N은 간섭무늬 차수이고, λ는 사용된 레이저의 파장이다. 위 식에서, 간섭무늬의 차수가 증가함에 따라 변위가 비례적으로 증가함을 알 수 있다. 그러므로 이 간섭무늬는 위상차를 통해 구하고자 하는 방향의 변위를 내포하고 있다.

4. 실험 장치 구성 및 방법

Fig.3, Fig.4는 본 연구에서 사용된 ESPI 시스템의 간섭계 부분과 화상처리 부분을 나타낸 것이다.

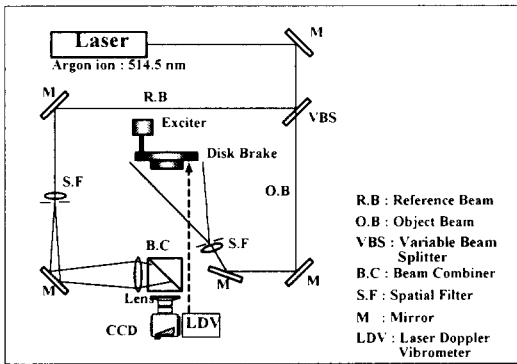


Fig. 3 A schematic of Electronic Speckle Pattern Interferometry to measure vibration mode shape of the disk brake

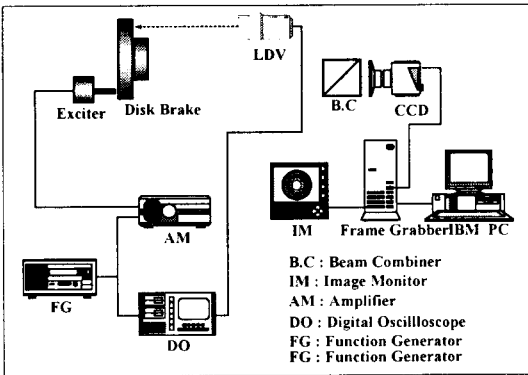


Fig. 4 A schematic of image acquisition system to measure vibration mode shape of the disk brake

구성된 면외변위에 민감한 ESPI 시스템은 진동 절연된 광학 테이블(isolation table) 위에서 구성하였으며, 광원으로는 파장이 514.5 nm인 아르곤 레이저를 사용하였다. 광원을 벗어난 레이저빔은 미러(mirror)에서 반사되어 광분할기(beam splitter)를 통하여 기준빔과 물체빔으로 나누어진다. 기준빔과 물체빔 사이의 광량비(beam ratio)는 기준빔의 CCD 광소자에 대한 직접 입사와 물체빔의 물체산란에 의한 간접 입사에 의해 그 특성상 상당량이 물체빔으로 사용되어야 하므로 가변 광분할기와 필터를 사용하여 광량이 물체빔으로 많이 가도록 하였다. 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 화상획득장치(Frame Grabber) 내로 들어와서 디지털 정보로 저장되며 이렇게 저장된 변형전과 변형후의 이미지를 전자적 빼기를 수행해주면 그 결과가 모니터에 간섭무늬가 나타난다.

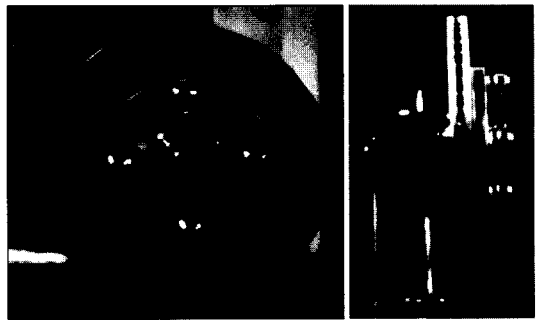


Fig. 5 Disk brake was constrained to measure vibration mode shape

본 시스템에 의해 측정되어진 디스크 브레이크의 구속 조건은 실제 자동차에 부착되어 있는 디스크 브레이크와 가능한 한 같은 구속조건을 주기 위해 지그를 제작하여 Fig.5에 보이는 것처럼 앞의 4부분을 볼트로 구속을 시켰다. Fig.6에서 보여진 것처럼 가진은 함수 발생기에서 발생된 파를 가진기와 증폭기를 이용하여 디스크 브레이크의 뒷면과 옆면을 각각 가진하였고, 가진 시 함수 발생기에서 나온 파는 디지털 오실로스코프를 이용하여 정확히 측정을 하였다. 본 연구의 신뢰성을 증명하기 위해 사용된 LDV

(Laser Doppler Vibrometer)는 디스크 브레이크의 약 1.5 m 전방에 간섭계에 영향을 주지 않도록 설치하고, 디지털 오실로스코프와 연결시켜 간섭계를 통한 공진 주파수 측정시 동시에 작동시켜 그때 그때의 실험결과를 비교·분석하였다.

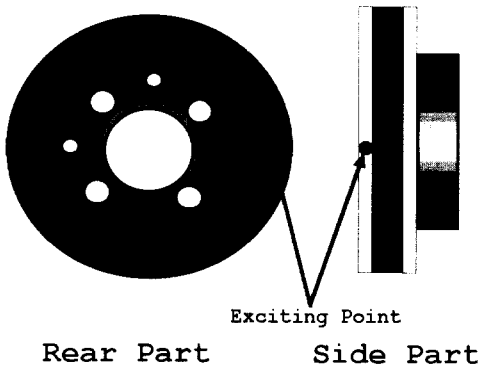
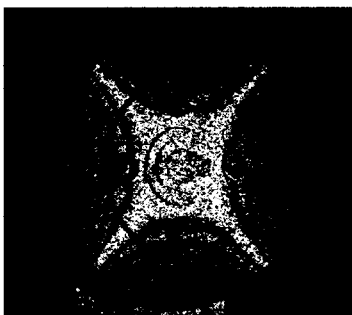


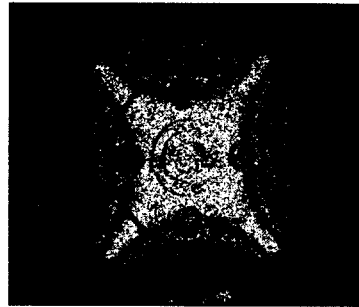
Fig. 6 Excited parts of the Disk Brake

5. 실험 결과

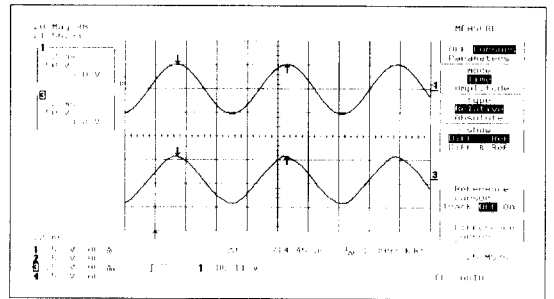
시간 평균 ESPI에 의해 측정된 디스크 브레이크의 각 공진 주파수에서의 진동 진폭 분포 및 LDV와 시간 평균 ESPI에 의해 측정된 공진 주파수의 비교를 통한 검증 결과가 Fig.7부터 Fig.10까지에 잘 나와 있다. 실험결과를 통해서 본 연구 방법을 이용하면 공진 주파수의 측정과 동시에 그 주파수에서의 진동모드형태를 간섭무늬의 형태로 획득할 수 있음을 확인할 수 있었고, 점단위 측정이 아닌 디스크 브레이크 전체에 대한 진동모드형태를 거의 실시간적으로 측정할 수 있었다.



(a) 1400Hz
(가진부위: 뒷면)



(b) 1395Hz
(가진부위: 옆면)



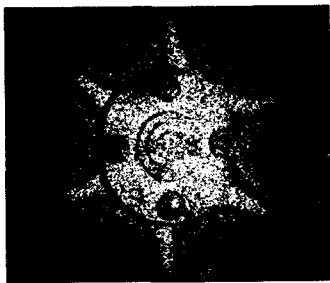
(c) ESPI측정값:1400Hz(위쪽 파형)
LDV측정값:1399Hz(아래쪽 파형)

Fig. 7 Fringe pattern & resonance frequency of the disk break

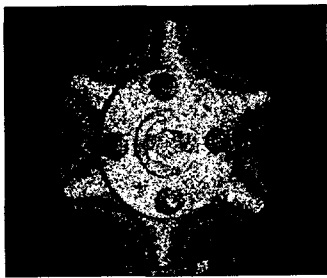
Fig.7은 절선(nodal line)이 두 개인 진동모드를 나타낸다. 여기서 Fig.7(a)는 디스크의 뒷면을 가진 하였을 때의 진동모드이고, 이때의 고유진동수는 1400Hz 이었다. Fig.7(b)는 디스크의 옆면에서 가진 하였을 때의 진동모드로써, 1395Hz의 공진주파수를 갖는다. (a)와(b)를 비교해보면 가진 부위와 무관하게 진동모드형태가 같음을 알 수 있고, 고유진동수도 일치함을 알 수 있다. 여기서 두 진동수사이에 5Hz의 차이가 나는 것은 측정자가 오실로스코프의 피크(peak)와 피크를 찍어서 진동수를 읽어들이는 데 있어서 발생하는 오차로 무시할 수 있다. 진동모드의 진동 형태는 가운데 십자형태의 하얀 부분이 진동하지 않는 절선을 나타내고, 절선 사이에 4개 부분의 반호모양의 간섭무늬들은 진동하고 있는 부분으로 한쪽이 앞쪽으로 나오는 상태이면 그 양 옆에 있는 간섭무늬들은 뒤쪽으로 들어가는 형태로 진동이 이루어지고 있는 양상으로 공진이 일어남을 알 수 있다.

Fig.7(c)는 ESPI에 의해서 진동형상의 간섭무늬가 생

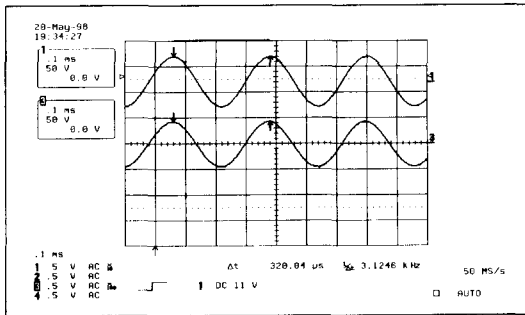
성될 때의 가진주파수(그 진동모드의 공진주파수)와 LDV를 이용해서 진동하는 물체에서 직접 측정된 진동수를 디지털 오실로스코프 상에서 서로 비교한 것이다. (c)그림에서 윗 부분에 있는 파형이 ESPI를 통해 알아낸 고유진동수의 파형이고, 밑 부분에 있는 파형이 LDV를 이용해서 측정된 파형에 해당한다. 그림에서 볼 수 있듯이 두 파형이 잘 일치함을 알 수 있고, 주파수도 일치함을 알 수 있다.



(a) 3124Hz
(가진부위: 뒷면)



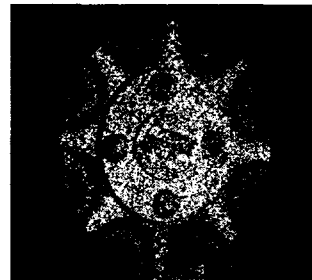
(b) 3123Hz
(가진부위: 옆면)



(c) ESPI측정값:3124Hz(위쪽 파형)
LDV측정값:3124Hz(아래쪽 파형)

Fig. 8 Fringe pattern & resonance frequency of the disk break

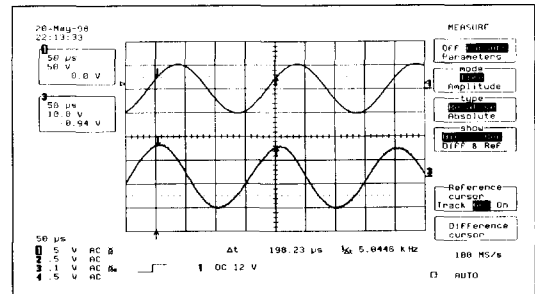
Fig.8은 Fig.7에서 절선이 하나 더 추가된 절선이 3개 일 때의 공진주파수와 간섭무늬 패턴을 보여주고 있는 실험 결과이다. 여기서도 가운데 하얗게 진동하지 않는 부분이 있고, 그 하얀 부분들 사이에 들어오고 나오는 진동형태가 반 호의 간섭무늬 형태를 띄고 있다. (a)와(b)그림을 보면 가진 위치가 달라도 같은 공진주파수에서의 진동모드 형태가 일치함을 확인할 수 있다. (c)그림을 통해서 LDV의 측정값과도 잘 일치함을 알 수 있다.



(a) 5031Hz
(가진부위: 뒷면)



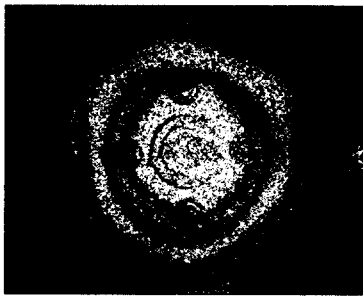
(b) 5022Hz
(가진부위: 옆면)



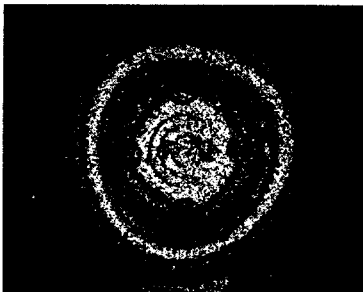
(c) ESPI측정값:5031Hz(위쪽 파형)
LDV측정값:5044Hz(아래쪽 파형)

Fig. 9 Fringe pattern & resonance frequency of the disk break

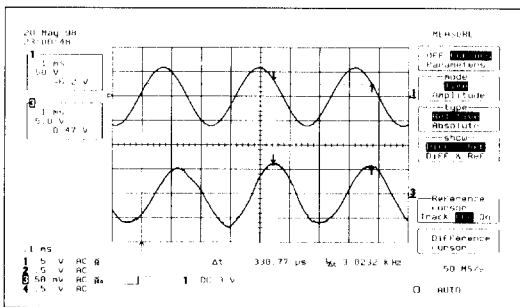
Fig 9는 절선이 4개일 때의 공진주파수와 간섭무늬 패턴을 보여주고 있는 실험 결과로써 가진 부위별 진동모드와 그때의 공진주파수가 잘 일치하고 있으며, LDV와의 측정값과의 비교결과도 잘 일치함을 확인하였다. 여기서 주파수가 증가하면 절선이 계속 증가하면서 진동모드가 계속되어지며, 본 실험에서는 절선이 6개인 경우까지 측정이 가능하였다.(8970Hz)



(a) 3033Hz
(가진부위:뒷면)



(b) 3027Hz
(가진부위:옆면)



(c) ESPI측정값:3033Hz(위쪽 파형)
LDV측정값:3027Hz(아래쪽 파형)

Fig.10은 원형의 절선을 갖는 디스크 브레이크의 진동 형태로써, 그림에서 진동하지 않는 하얀 원형의 절선이 가운데 하나있고, 중간에 하얀 원형 띠의 형태를 가진 절선이 있다. 그 두 절선은 진동하지 않고, 그 사이의 부분들이 앞, 뒤로 진동하는 형상으로 디스크가 진동하고 있음을 알 수 있다. 이 모드에서의 공진주파수와 진동모드형상 또한 잘 일치하고 있음을 바로 확인할 수 있다. 이러한 진동 모드 형상은 원형의 물체의 전형적인 진동형태 중 하나이다.

6. 결론

본 연구에서는 ESPI 기법 중 가장 일반적인 시간 평균법을 이용하여 실제 자동차의 디스크 브레이크의 진동 모드 형태를 실시간 적으로 계측하여 가시화 시켰다. 본 연구에서 구속 지그를 제작하여 실제 자동차에서의 구속조건과 같은 구속을 주고 디스크 브레이크의 공진주파수와 진동 모드 형태를 계측하였으므로 측정 결과 값이 좀더 실제적이고 현장 적용성이 높을 것이라고 생각된다. 가진 부위를 디스크 브레이크의 뒷면과 옆면으로 나누어 측정결과를 비교함으로써 물체의 공진주파수는 가진 부위와 무관하다는 공진주파수의 이론을 실험적으로 확인할 수 있었다. 또한, 본 연구의 신뢰성을 검증하기 위해 LDV를 이용한 진동 계측을 동시에 수행하여, 본 간섭계에 의해 측정된 디스크 브레이크의 공진 주파수와와의 비교, 분석을 수행하였다. 그리하여 두 방법에 의한 측정결과들이 잘 일치하고 있음을 보임으로써 본 연구의 결과들에 대한 타당성을 검증하였다.

시간 평균 ESPI를 이용한 진동측정 방법은 측정시간이 거의 실시간에 가깝기 때문에 기존 방법에 비해서 진동측정과 그 해석에 소요되는 시간을 상당히 단축시킬 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구를 보다 확장하여 차후에는 소음 발생시의 주파수에 대한 실험과 유한요소법에 의한 이론적 해석을 수행할 예정이다. 또한 본 연구를 위해 구성한 ESPI 시스템이 진동 해석에 매우 유용한 응용 기술임이 확인되었기 때문에, 이 시스템을 이용하면 디스크 브레이크뿐만 아니라 차체 진동 모드 해석, 엔진 및 커넥팅 로드 등의 변형 측정 및 해석, 타이어의 결합 검사 등 여러 분야에서 활용 가능하다.

Fig. 10 Fringe pattern & resonance frequency of the disk break

후 기

본 논문은 1997년도 교육부 학술연구조성비(기계공학 ME97-E-27)에 의하여 연구되었음.

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. Charles M. Vest, "Holographic Interferometry", John Wiley & Sons. Press, pp. 36~77, 1979.
3. Ole J. Lokberg, "ESPI - The ultimate holographic tool for vibration analysis?", J. Accoust. Soc. Am, Vol. 75, No. 6, 1984.
4. Ryszard J. Pryputniewicz, "Measurement of Vibration pattern using Electro-Optic Holography", SPIE, Vol. 1162, pp. 456~467, 1989.
5. 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.
6. 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.
7. Ryszard J. Pryputniewicz, " Time average holography in vibration analysis", Optical Engineering, Vol. 24, No. 5, pp. 843~848, 1985.
8. 최장섭, 강영준, "전자 광학적 홀로그래픽 간섭법을 이용한 진동 물체의 모드 형태 측정법", 대한기계학회논문집, 제 20권 제 2호, pp. 564~574, 1996.
9. K. A. Stetson and P. A. Taylor, "The use of normal mode theory on holographic vibration analysis with application to an asymmetrical circular disk", Journal of Physis E: Scientific Instruments, Vol. 4, pp. 1009-1015, 1971.
10. J. D. Fieldhouse and T. P. Newcomb, "Double pulsed holography used to investigate noisy brakes", Optics and Lasers in Engineering, Vol. 25, pp. 455~494, 1996.