

변형률 모드시험법 특성의 실험적 고찰 및 응용

주영삼* · 이형석** · 이건명***

Experimental Study on Characteristics of Strain Modal Testing and its Application

Young-Sam Ju* · Hyung-Seok Lee** · Gun-Myung Lee***

ABSTRACT

The types of responses which are generally measured in the modal testing are displacement, velocity or acceleration. In strain modal testing, however, strain responses subject to excitation forces are measured. In this paper, the characteristics of strain modal testing are investigated experimentally. Investigated are the effects of frequency range, excitation force level, and excitation signal on the quality of measured strain frequency response functions. It has been shown that a strain FRF at a point can be predicted from displacement FRFs and strain FRFs at other points.

I. 서론

기계시스템의 소음, 진동문제를 해결하기 위하여 수행하는 모드시험에서 일반적으로 측정하는 응답의 형태는 변위(속도, 가속도)이다^[1]. 그러나 기계시스템의 주된 관심의 대상이 변형률과 응력임에도 불구하고 변형률을 응답으로 하는 모드시험법은 별로 활용되지 않고 있으며 이 방법에 관한 연구 역시 부진한 편이다^[2-6].

본 연구에서는 가진력과 변형률응답 사이의 관계를 구하는 변형률 모드시험의 특성을 실험적으로 고찰하였다. 간단한 구조물인 외팔보를 충격해머와 가진기로 가진하며 스트레인게이지를 사용하여 변형률응답을 측정하고, 가진력과 변형률응답사

이의 주파수응답함수와 코히어런스(coherence) 함수를 측정하였다. 주파수범위, 가진력의 세기, 가진 신호 등을 변화시켜가며 이들의 영향을 관찰하였다.

구조물의 구조적인 문제 등으로 인해 변형률 주파수응답함수를 직접 측정하지 못하거나 측정하더라도 잡음의 영향 등으로 인하여 만족스러운 측정 결과를 얻을 수 없는 경우가 있다. 이러한 경우 변위 주파수응답함수와 다른 지점에서 측정한 변형률 주파수응답함수로부터 변형률 주파수응답함수를 예측할 수 있음을 보였다.

II. 이론적 배경

시스템의 가진점 k 와 응답점 j 사이의 변위 주파수응답함수(Displacement Frequency Response Function : DFRF) $H_{jk}(\omega)$ 와 변형률 주파수응답함수(Strain Frequency Response Function : SFRF)

* 스페이스 테크놀러지

** 경상대학교 대학원

*** 경상대학교 수송기계공학부, 항공기부품기술연구센터

$S_{jk}(\omega)$ 는 다음과 같다.

$$H_{jk}(\omega) = \sum_r \frac{r\phi_j \cdot r\phi_k}{\omega_r^2 - \omega^2 + i2\zeta_r \cdot \omega_r \cdot \omega} \quad (1)$$

$$S_{jk}(\omega) = \sum_r \frac{r\epsilon_j \cdot r\phi_k}{\omega_r^2 - \omega^2 + i2\zeta_r \cdot \omega_r \cdot \omega} \quad (2)$$

이 때, ω_r 과 ζ_r 은 모드 r 의 고유진동수와 감쇠비
 를, $r\phi_k$ 는 모드 r 의 변위 모드형(displacement
 mode shape)으로 k 점에서의 성분을, 그리고 $r\epsilon_j$
 는 모드 r 의 변형률 모드형(strain mode shape)으
 로 j 점에서의 성분을 각각 나타낸다. 위 식들을
 비교하여 보면 DFRF로부터 모드매개변수를 추정
 하는 모드해석 프로그램을 SFRF에 적용하여 모드
 매개변수를 추정할 수 있고, SFRF 행렬은 대칭이
 아님을 알 수 있다.

변형률 주파수응답함수의 예측을 위하여
 $H_{kk}(\omega)$, $S_{jk}(\omega)$, $H_{jl}(\omega)$ 를 측정하면 이들은 다음
 과 같이 표현된다.

$$H_{kk}(\omega) = \sum_r \frac{r\phi_k \cdot r\phi_k}{\omega_r^2 - \omega^2 + i2\zeta_r \cdot \omega_r \cdot \omega} \quad (3)$$

$$S_{jk}(\omega) = \sum_r \frac{r\epsilon_j \cdot r\phi_k}{\omega_r^2 - \omega^2 + i2\zeta_r \cdot \omega_r \cdot \omega} \quad (4)$$

$$H_{jl}(\omega) = \sum_r \frac{r\phi_l \cdot r\phi_l}{\omega_r^2 - \omega^2 + i2\zeta_r \cdot \omega_r \cdot \omega} \quad (5)$$

$H_{kk}(\omega)$ 를 모드해석하여 모드상수(modal constant)
 $rA_{kk}(= r\phi_k \cdot r\phi_k)$ 를 구하면 $r\phi_k$ 를 구할 수 있고,
 이를 이용하여 $S_{jk}(\omega)$ 의 모드상수 $rS_{jk}(=$
 $r\epsilon_j \cdot r\phi_k)$ 로부터 $r\epsilon_j$ 를 구할 수 있다. 같은 방
 법으로 $H_{jl}(\omega)$ 로부터 $r\phi_l$ 을 구하면 직접 측정하
 지 않은 $S_{jl}(\omega)$ 을 다음과 같이 예측할 수 있다.

$$S_{jl}(\omega) = \sum_r \frac{r\epsilon_j \cdot r\phi_l}{\omega_r^2 - \omega^2 + i2\zeta_r \cdot \omega_r \cdot \omega} \quad (6)$$

III. 변형률 모드시험의 특성

변형률 모드시험의 특성을 고찰하기 위하여 길
 이 270mm, 폭 35mm, 두께 1.5mm 인 스테인레스
 외팔보에 대하여 모드시험을 수행하였다. 가진방
 법으로 충격해머와 가진기를 사용하였고, 가진력의

세기, 주파수 범위, 그리고 가진기의 가진신호에
 따른 특성을 비교하였다.

1. 충격해머에 의한 가진

그림 1과 같이 외팔보를 충격해머로 가진하며
 변형률응답을 스트레인게이지에 연결된 동적 변형
 률 증폭기(Measurement Group, 2120A)의 출력전
 압으로 측정하였다. 가진신호와 응답신호로부터
 FFT 분석기(ONO SOKKI, CF-350)를 사용하여
 주파수응답함수와 코히어런스함수를 측정하였다.

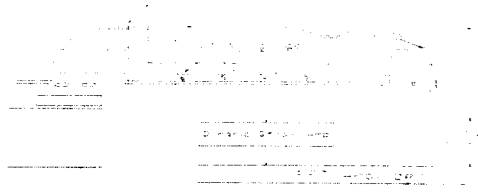


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup.

충격해머를 사용하여 가진력의 크기를 점점 증
 가시켜가며 측정된 변형률 주파수응답함수와 코히
 어런스함수를 그림 2-4에 나타내었다. 이 때 주파
 수범위는 1kHz이다. 각 그림의 결과는 응답신호의
 rms값이 각각 0.0127, 0.0351, 0.0518V인 경우이며,
 이 값들은 변형률 12.69 μ , 35.09 μ , 51.76 μ 에 해당
 한다. 이 결과를 주파수응답함수의 정확도를 나타
 내는 코히어런스의 관점에서 보면, 가진력의 크기
 가 커짐에 따라 주파수응답함수의 정확도가 향상되
 는 것을 알 수 있다. 따라서 정확한 변형률 주파수
 응답함수의 측정을 위해서는 어느 정도 큰 가진력
 이 필요하다. 또 코히어런스함수가 저주파수에서는
 1에 가까운 값을 가지나, 고주파수에서는 값이 매
 우 낮아짐을 알 수 있다.

비교의 목적으로 가속도계를 사용하여 변위 주
 파수응답함수를 측정하고, 그 결과를 그림 5에 나
 타내었다. 이 경우 코히어런스함수는 0Hz부근을
 제외하고는 거의 1의 값을 가지며, 주파수응답함수
 는 앞의 경우에 비하여 매끈하다. 그러나 0Hz부근
 에서 계의 특성과는 무관한 피크가 생기는 것을
 볼 수 있다. 이 피크로 인하여 제 1 모드의 정확한
 매개변수를 추정할 수 없다. 반면, 변형률 주파수
 응답함수에서는 이러한 피크가 발생하지 않는다.

변형률 모드시험 결과에 대한 실험 주파수범위의 영향을 고찰하기 위하여 주파수범위를 200Hz와 500Hz로 변화시켰다. 이 때 측정된 주파수응답함수와 코히어런스함수를 그림 6, 7에 나타내었다. 주파수범위가 200Hz일 때는 전 주파수대역에서 코히어런스함수가 거의 1의 값을 갖고, 주파수응답함수도 매끄럽다. 주파수범위가 500Hz일 때는 300Hz까지의 주파수대역에서는 앞의 경우와 같은 결과를 나타내고, 그 이상의 주파수대역에서는 코히어런스함수가 현저하게 낮아지고, 주파수응답함수도 매끄럽지 못하다. 이상의 결과로부터 변형률 모드시험에서 적합한 주파수범위는 대략 300Hz임을 알 수 있다.

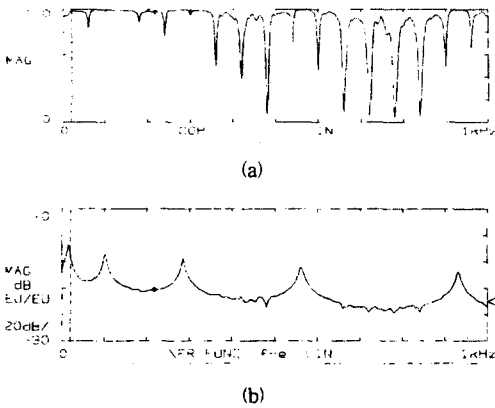


Fig. 2 S_{61} in case of weak impact force.
(a) coherence (b) FRF

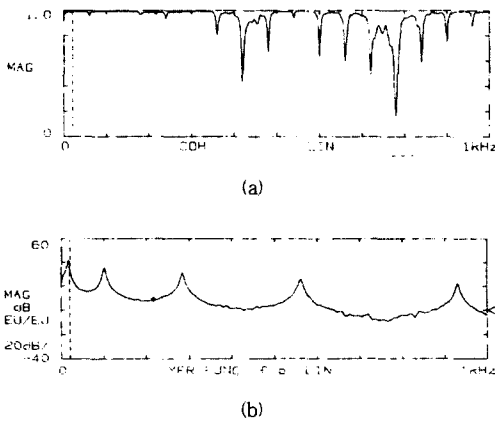


Fig. 3 S_{61} in case of medium impact force.
(a) coherence (b) FRF

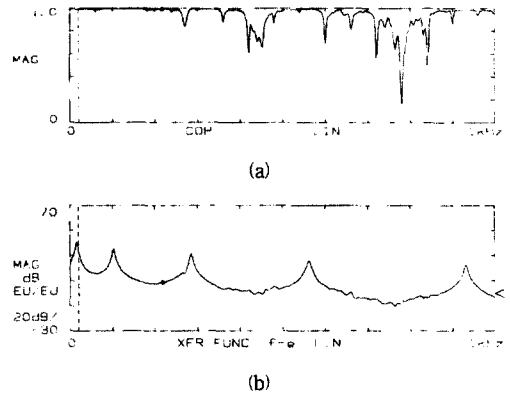


Fig. 4 S_{61} in case of strong impact force.
(a) coherence (b) FRF

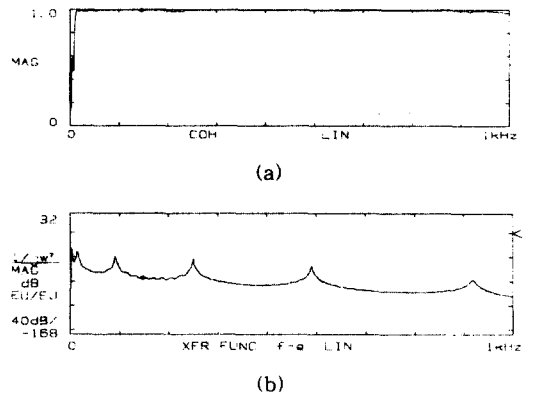


Fig. 5 DFRF measured with an accelerometer.
(a) coherence (b) FRF

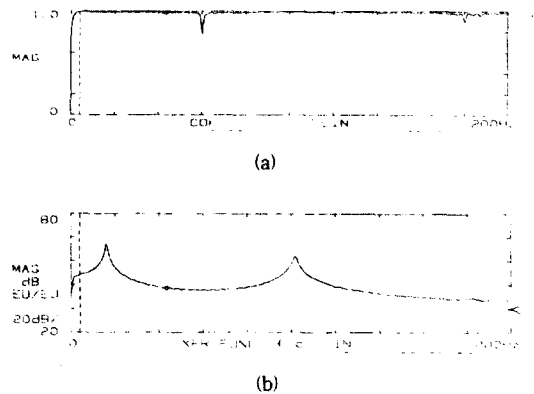
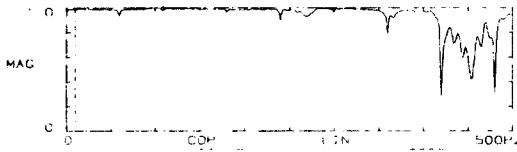
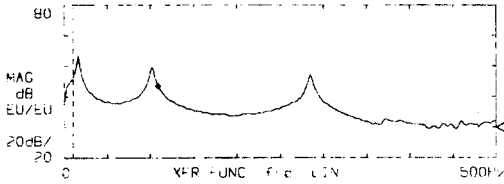


Fig. 6 S_{61} in 200Hz frequency range.
(a) coherence (b) FRF



(a)



(b)

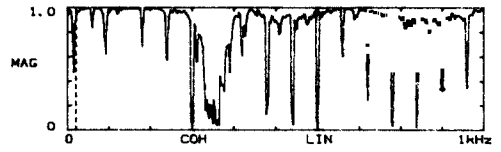
Fig. 7 S_{11} in 500Hz frequency range.

(a) coherence (b) FRF

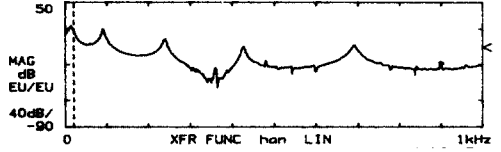
2. 가진기에 의한 가진

가진기의 가진신호에 따른 변형률 모드시험의 특성을 고찰하기 위하여 그림 1의 실험 장치도에서 충격해머 대신 가진기를 사용하여 모드시험을 수행하였다. 가진파형으로 불규칙파(random wave), 주기적 불규칙파(periodic random wave), 소인 정현파(swept sine wave) 등 세가지 파형을 사용하였고, 주파수범위는 1kHz, 평균 회수는 16회 이었다. 각각의 파형을 사용하여 측정된 변형률 주파수응답함수와 코히어런스함수를 그림 8-10에 나타내었다. 이 그림들을 비교하여 보면 불규칙파, 주기적 불규칙파, 소인 정현파의 순으로 측정된 주파수응답함수의 정확도가 높아지는 것을 알 수 있다. 대략 300Hz 이하의 저주파수 대역에서는 코히어런스함수 값이 1에 가깝고, 주파수응답함수가 매끈하나 그 이상의 주파수 대역에서는 코히어런스함수 값이 현저하게 낮아지는 현상 등은 충격해머를 사용하였을 때의 결과와 일치한다.

각각의 파형에 대하여 가진력의 크기를 점점 증가시켰을 때 측정된 주파수응답함수의 정확도는 개선되었다. 이 결과 역시 충격해머를 사용하였을 때의 경우와 일치한다. 간략하게 하기 위하여 이 결과를 나타내는 그림은 논문에 수록하지 않았다.



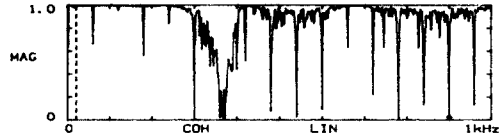
(a)



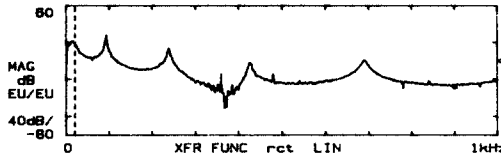
(b)

Fig. 8 SFRF measured with random wave.

(a) coherence (b) FRF



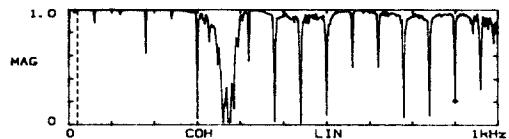
(a)



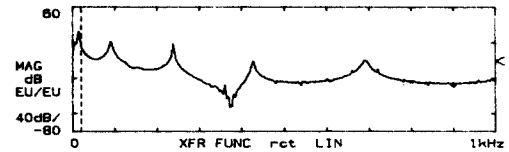
(b)

Fig. 9 SFRF measured with periodic random wave.

(a) coherence (b) FRF



(a)



(b)

Fig. 10 SFRF measured with swept sine wave.

(a) coherence (b) FRF

IV. 미측정 주파수응답함수의 예측

구조물의 구조적인 문제 등으로 인하여 변형률 주파수응답함수를 직접 측정하지 못하거나 측정하더라도 여러 가지 잡음의 영향으로 인하여 만족스러운 측정결과를 얻을 수 없는 경우에 두 개의 변위 주파수응답함수와 다른 지점에서 측정한 변형률 주파수응답함수를 이용하여 변형률 주파수응답함수를 예측하는 방법을 연구하였다. 이 연구를 위하여 앞에서 모드시험에 사용한 외팔보를 사용하였다.

변형률 주파수응답함수 S_{61} 을 예측하기 위하여 변위 주파수응답함수 H_{11} , H_{55} 와 변형률 주파수응답함수 S_{65} 를 측정하였다. 변위 주파수응답함수는 스트레인게이지 대신 가속도계를 외팔보에 부착하여 측정하였다. 앞의 이론적 배경에서 설명한 방법으로 H_{11} 과 H_{55} 로부터 변위 모드성분 $r\phi_1$ 과 $r\phi_5$ 를 구하고, S_{65} 로부터 변형률 모드성분 $r\epsilon_6$ 를 구하였다.

구하여진 모드성분들 $r\phi_1$, $r\phi_5$, $r\epsilon_6$ 로부터 변형률 주파수응답함수 S_{61} 의 모드상수 $r\epsilon_6 \cdot r\phi_1$ 의 값을 예측하고, 이 값을 실제로 측정한 S_{61} 를 모드해석하여 추정한 모드상수와 함께 표 1에 수록하였다. 이 표를 관찰하면 첫 번째 모드를 제외하고는 10% 내외의 오차를 가지고 각 모드의 모드상수를 예측하고 있음을 알 수 있다. 첫 번째 모드에서 큰 오차가 발생하는 이유는 그림 5에서 보듯이 변위 주파수응답함수가 0Hz부근에서 계의 특성과 무관한 피크를 가지고, 이 피크로 인하여 첫 번째 모드의 모드상수를 정확하게 구할 수 없었기 때문이라고 판단된다.

Table 1 Comparison of predicted and estimated modal constants

Mode	Predicted Modal Constants ($r\epsilon_6 \cdot r\phi_1$)	Estimated Modal Constants ($r\epsilon_6 \cdot r\phi_1$)	Errors (%)
1	-197634	-431900	54.2
2	1354657	1474000	8.1
3	-2996459	-2803000	6.9
4	3583601	3176000	12.8
5	-2749999	-2640000	4.2

예측된 모드상수와 S_{65} 로부터 구해지는 고유진동수, 감쇠비를 사용하여 합성한 변형률 주파수응답함수 S_{61} 을 실제로 측정한 주파수응답함수와 그림 11에서 비교하였다. 첫 번째 모드를 제외하고는 두 주파수응답함수가 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

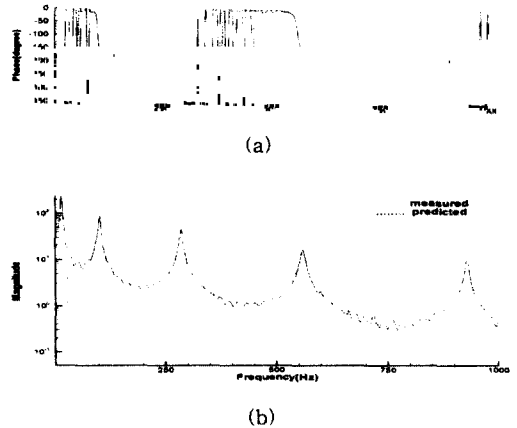


Fig. 11 Comparison of predicted and measured SFRFs.

(a) phase (b) magnitude

V. 결론

본 논문에서는 외팔보에 대한 실험을 통하여 변형률 모드시험의 특성을 고찰하였다. 충격해머를 사용하여 가진할 때 가진력의 크기가 커짐에 따라 측정된 변형률 주파수응답함수의 정확도가 향상되었다. 따라서 정확한 변형률 주파수응답함수의 측정을 위해서는 어느 정도 큰 가진력이 필요함을 알 수 있다. 저주파수 대역에서는 코히어런스함수가 1에 가까운 값을 갖고, 매끄러운 주파수응답함수가 얻어지나, 고주파수 대역에서는 코히어런스함수값이 현저하게 낮아지고, 주파수응답함수도 매끄럽지 않다. 변형률 모드시험에서 적합한 주파수범위는 대략 300Hz이다.

가진기로 가진할 경우 가진신호로 소인 정현파를 사용하였을 때 가장 정확한 주파수응답함수를 얻을 수 있었고, 주기적 불규칙파, 불규칙파의 순으로 측정된 주파수응답함수의 정확도가 떨어졌다. 그 외에는 충격해머를 사용하였을 경우와 동일한 결과를 얻었다.

본 논문에서는 두 지점의 변위 주파수응답함수와 한 지점에서 측정된 변형을 주파수응답함수를 이용하여 다른 한 지점의 변형을 주파수응답함수를 예측할 수 있음을 보였다. 이 방법을 이용하여 구조물의 구조적인 특성으로 변형을 주파수응답함수를 직접 측정하지 못하거나 측정하더라도 여러 가지 잡음의 영향으로 인하여 만족스러운 측정결과를 얻을 수 없는 경우에 변형을 주파수응답함수를 간접적으로 측정할 수 있다.

Reference

1. Ewins, D. J., 1984, "Modal testing : theory and practice," B & K Korea Ltd.
2. Li, D. B., Zhuge, H. C. and Wang, B., 1989, "The principles and techniques of experimental strain modal analysis," Proc. IMAC VII, 1285-1289.
3. Bernasconi, O. and Ewins, D. J., 1989, "Application of strain modal testing to real structures," Proc. IMAC VII, 1453-1464.
4. Yam, L. H., Leung, T. P., Li, D. B. and Xue, K. Z., 1996, "Theoretical and experimental study of modal strain analysis," Journal of Sound and Vibration 191(2), 251-260.
5. 서순우, 1996, "변위-변형률 변환행렬을 이용한 운전중 변형률 예측 및 응용," 한국과학기술원 석사학위논문.
6. 차주환, 하태희, 이건명, 1998, "변형률 모드시험 방법의 특성 및 응용," 한국소음진동공학회지 8(3), 420-427.