

Rolling Tire 모드해석을 위한 회전주기성분제거에 대한 연구

The Study of harmonic peaks removal for modal analysis of Rolling tire

최정현*·이상주*·박주배*

Choi jeong-hyun, Lee sang-ju and Park ju-bae

Key Words : Rolling Tire, Modal Analysis, Harmonic Peaks Removal, Synchronized Time Domain Averaging Technique

ABSTRACT

Just as the vibration modes of a beam are dependent on its end constraints or boundary conditions. Vibration modes of a tire are dependent on its patch and spindle constraints. This dependence is key to understanding the dynamic properties of a tire and is apparent in various analytical and experimental investigations in the literature. One of the main task in a modal analysis is the measurement of the Frequency Response Function (FRFs). Because all the subsequent analysis is based on these FRFs, their quality is critically important in obtaining accurate modal parameter estimates. In rotating systems, FRFs are frequently contaminated by harmonic peaks related to such factors as imbalance, misalignment. This harmonic peaks appear in the FRFs as sharp spikes, which can be erroneously treated in modal curve-fitting procedures as structural modes. The harmonic peaks removal method is demonstrated by application to modal analysis on rotating tires. The results show substantial improvement in FRF quality.

기호설명

- $F(\omega)_j$: 가진력 주파수 함수
- $F(\omega)^{ran}_j$: 순수한 랜덤 가진력 주파수 함수
- $F(\omega)^{rot}_j$: 회전 주기성분 가진력 주파수 함수
- $X(\omega)_i$: 가속도 응답 주파수 함수
- $X(\omega)^{ran}_i$: 순수한 가속도 응답 주파수 함수
- $X(\omega)^{rot}_i$: 회전 주기성분 응답 주파수 함수

1. 서론

타이어의 진동모드가 승차감에 중요한 영향을 미친다는 사실은 주지의 사실이다. 주행상태에서의 타이어는 회전을 하게되며 회전하는 시스템의 전달함수는 불균일성, 정렬불량등의 인자와 관련된 주기성분에 의하여 왜곡된다^[2-3].

주기성분의 Peaks 는 전달함수에서 날카로운 Spike 형태로 나타나며 타이어의 회전속도와 기하학적 형상에 의존한다. 일반적으로 모드해석은 주파수 전달함수를 기초로하여 모든 하위영역의 분석이 이루어지기 때문에 측정 시스템의 정확한 전달함수를 구하는 것이 매우 중요하다. 특히 회전하는 타이어의 경우 이러한 주기성분이 제거되어야만 모드해석으로부터 동적 변화를 정확하게 파악할 수 있다. 따라서 기존의 분석

방법인 시간영역 평균법을 이용하여 모드해석을 수행하였으며 그 결과에 근거하여 동기화 주파수 영역법을 소개하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 주기성분 제거

본 연구는 회전하는 타이어의 동특성을 추출하기 위한 방법의 일환으로 먼저 전달함수에 포함된 주기성분만을 분리 제거하는 방법에 대하여 논의하기로 한다. 주기성분 제거 방법은 1) 동기화 주파수 영역 평균법 2) 비동기화 시간영역 평균법 3) 동기화 시간영역 평균법등이 있다. 본 논문에서는 시간과형에서 주기성분만을 제거하기 위하여 Trigger 를 사용한 동기화 시간영역 평균법^[1]을 사용하였다. 각각의 시간과형은 시스템에 가진력으로 주어지는 순수한 random 신호와 회전성분의 합으로 식 (1)과 같이 표현할 수 있다^[1,4].

$$\begin{aligned} X(t)_i &= X(t)_i^{ran} + X(t)_i^{rot} \\ F(t)_j &= F(t)_j^{ran} + F(t)_j^{rot} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, i=측정 점 j=가진 점

가진기에 의하여 발생하는 순수한 Random 신호는 식 (1)로부터 식 (2)와 같이 정의할 수 있다. 식 (2)와 같이 측정된 시간 신호에서 회전성분을

$$\begin{aligned} X(t)_i^{ran} &= X(t)_i - X(t)_i^{rot} \\ F(t)_j^{ran} &= F(t)_j - F(t)_j^{rot} \end{aligned} \quad (2)$$

* 한국타이어 중앙연구소 NVH
E-mail : cjh@hankooktire.com
Tel : (042) 865-0295, Fax : (042) 865-0304

* 한국타이어 중앙연구소 NVH
* 한국타이어 중앙연구소 NVH

제거하기 위하여 동기화 시간영역 평균법을 적용한다.

3. 실험방법

3.1 실험장치

회전에 따른 타이어의 동특성 변화를 측정하기 위하여 그림 1 과 같이 스피들 상부의 회전하는 휠에 실험용 타이어를 취부하였다. 경계조건에 의한 영향을 최소화하기 위하여 스피들의 양 끝단에 Bungee Cord 를 통하여 하중을 부가하도록 하였으며 두 개의 독립적인 입력신호를 갖는 가진기에 의하여 X 방향과 Z 방향에 대하여 랜덤한 신호로 가진하였다. 실험에 사용된 타이어와 실험 조건은 표 1 과 같다.

표 1 타이어 및 실험 조건

타 이 어	표 준 하 중	표 준 공 기 압	속 도
P235/65R17	450kgf	2.1kgf/cm ²	0,20,40,60,80(Kph)

표에 제시된 표준공기압과 표준공기압의 $\pm 10\%$, 표준하중 및 표준하중의 -50% 에 대하여 실험을 수행하였다. 측정은 4 점의 축 방향과 3 점의 수직방향에 대하여 가속도 응답을 측정하였다. 각각의 실험속도에서 시간신호를 취득하여 주기성분을 제거하였으며 주기성분이 제거된 시간신호로부터 FRF 를 구성한 후 모드해석을 수행하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 주기성분 제거 전 전달함수

(1) 정지상태에서의 전달함수

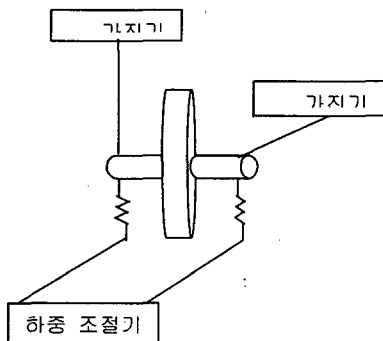


Figure 1 Tire/Spindle Modal Test Rig

타이어가 하중을 받으며 정지하고 있는 상태에서 타이어 공기압은 회전상태에 따른 내부 공기의 온도에 따라 달라지므로 일정한 공기압을 유지할 수 있도록 15 분 정도의 충분한 초기 가동 후 측정을 수행하였다. 그림 2 는 정지 상태의 타이어/스핀들의 전달함수를 나타내고 있다.

(2) 회전에 따른 전달함수

그림 3 은 20Kph 로 회전할 때의 전달함수를 나타내고 있는 것으로 정지상태의 전달함수에 대하여 회전에 따른 주기성분이 포함되어 나타남을 알 수 있다. 그림 4 는 60Kph 로 회전할 때의 전달함수를 나타내는 것으로 20Kph 로 회전할 때의 전달함수에 비하여 조밀한 형태의 회전 주기성분이 포함되어 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 회전 주기성분의 기본 주파수가 회전속도에 비례하며 타이어의 반경에 반비례하기 때문이다.

4.2 주기성분 제거 후 전달함수

(1) 회전속도 및 가진 방향에 따른 전달함수

그림 5 는 측정된 시간 신호에 대하여 주기성분 제거 알고리즘을 적용한 신호로부터 구한 전달함

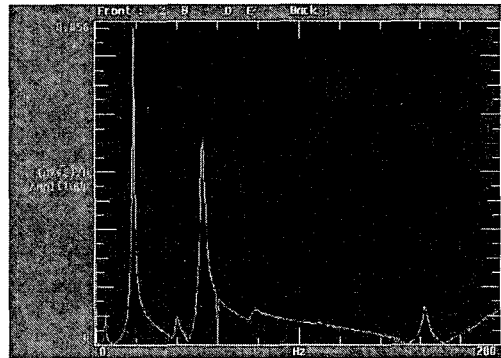


Figure 2 FRF of Static State

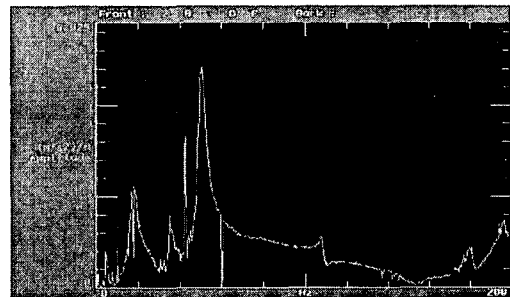


Figure 3 FRF of Rolling State (20Kph)

수를 나타내고 있다. 제거 전 전달함수에 비하여 매우 양호한 정도의 FRF를 보여주고 있다. 이와 같은 방법으로 주기성분이 제거된 FRF로부터 P235/65R17 타이어에 대하여 회전속도에 따른 모드해석을 수행하였으며 속도변화와 공기압 및 하중에 따른 영향을 평가하였다.

(2) 모드해석

그림 6.1은 회전성분 제거전의 전달함수에 대하여 모드해석을 수행한 것으로 주기성분에 의한 Peaky한 신호의 영향으로 곡선 접합의 수행이 용이하지 않으며 따라서 고유진동수와 댐핑에 대한 정확한 정보를 구할 수 없음을 알 수 있다. 그림 6.2는 회전성분이 제거된 후의 전달함수에 대하여 모드해석을 수행한 것으로 고유특성을 나타내는 인자의 선정이 매우 양호함을 알 수 있다.

4.3 동특성 평가

(1) 속도 변화에 따른 고유진동수 평가

본 연구의 근본적인 목적이 타이어의 회전에 따른 차량의 동특성 변화의 정도를 예측하고 상관성을 알아보기 위한 것이므로 표 1에 제시된 각 실험 속도에 대하여 주기성분이 제거된 전달함수로부터 모드해석을 수행하여 정지상태의 동특성과 비교하였다.

그림 7.1로부터 전반적으로 2~6Hz 사이의 주파수 변화량이 발생하나 특정 주파수에서 큰 변화량이 발생함을 알 수 있다. 정지상태와 비교하여 회전상태에서는 모든 차수의 고유진동수가 감소하는 경향을 보이고 있으며 저차 모드에 비하여 고차 모드에서 그 변화의 폭이 증가함을 알 수 있다. 회전속도에 비례하여 고유진동수가 증가하나 60Kph 근방에서 고유진동수의 변화폭이 현저히 감소하며 거의 일정한 기울기의 감소폭을 가지므로 60Kph를 기준으로 기타의 실험조건에 대하여 고유진동수 변화를 비교 평가하였다.

(1) 공기압 변화에 따른 고유진동수 평가

그림 7.2는 60Kph로 회전하는 상태에서 표준공기압에 대하여 ±10%의 공기압 편차로 실험하였을 때의 결과를 도시한 것이다. 수행된 실험에서 공기압이 증가함에 따라 주파수 변화가 증가함을 알 수 있다.

(1) 하중 변화에 따른 고유진동수 평가

하중 증가에 의한 고유진동수 평가는 하중 변화에 따른 타이어와 노면의 접촉면적 즉, Footprint의 면적변화에 따른 고유진동수를 관찰하기 위한 것이다. 그림 7.3은 하중이 증가함에 따라 고유진동수가 하중에 비례하여 증가함을 보이고 있다.

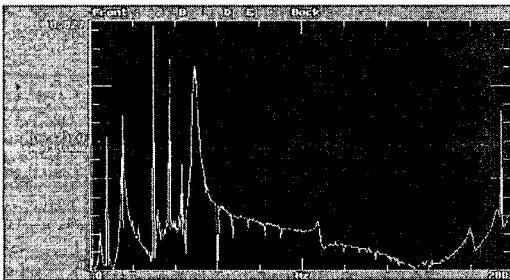


Figure 4 FRF before harmonic peaks removal

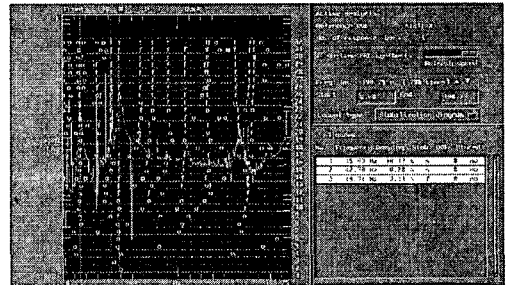


Figure 6.1 Modal analysis of FRF with Harmonic Peaks

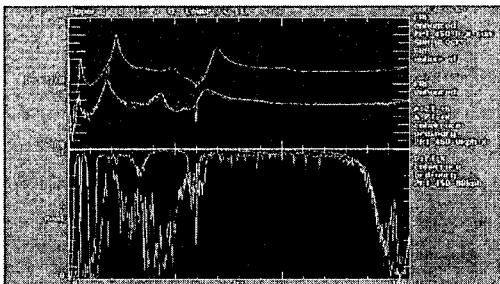


Figure 5 FRF after harmonic peaks removal

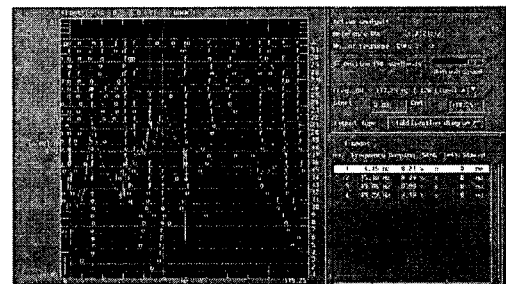


Figure 6.2 Modal analysis of Harmonic removal FRF

4.4 동기화 주파수 영역 평균법 적용 가능성 검토

동기화 시간영역 평균법은 일찍이 Goodyear 에서 적용한바 있으며 본 논문에서는 먼저 동기화 시간영역 평균법으로부터 회전성분이 제거된 주파수 전달함수로부터 모드해석을 수행하여 동특성을 추출하였다. 그러나 이러한 방법은 회전성분이 제거된 전달함수로부터 모드해석을 수행하기 위하여 여러 가지 부수적인 작업들과 시간이 소요된다. 따라서 이러한 문제점을 개선하기 위하여 일정 속도 이상에서 고유진동수의 변화가 미소하다는 실험결과로부터 타행 실험에 의한 주파수 영역에서 평균을 취함으로써 타행에 의하여 발생하는 주기성분을 제거하는 방법을 제시하고자 한다. 그림 8 은 타행실험으로부터 취득한 시간신호를 주파수

영역 평균법으로 주기성분을 제거한 전달함수를 나타내는 것으로 일부 주파수 영역에서 곡선이 매끄럽지 못하지만 주기성분은 제거됨을 알 수 있다

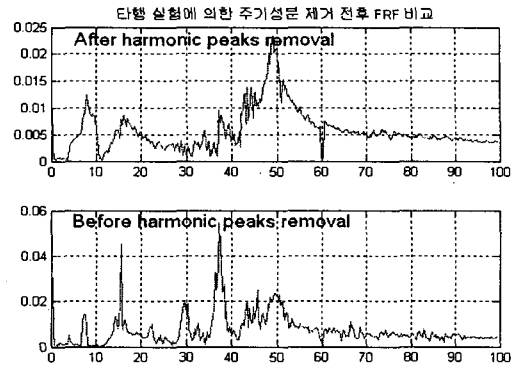


Figure 8 Harmonic peaks removal FRF for the run-down frequency averaging method

속도 영향

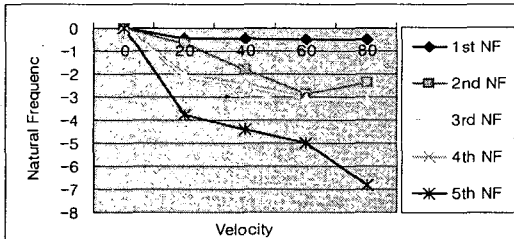


Figure 7.1 The effect of velocity

공기압 영향

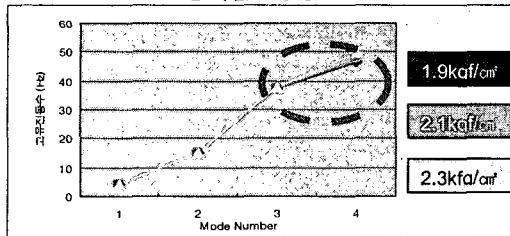


Figure 7.2 The effect of inflation

하중 영향

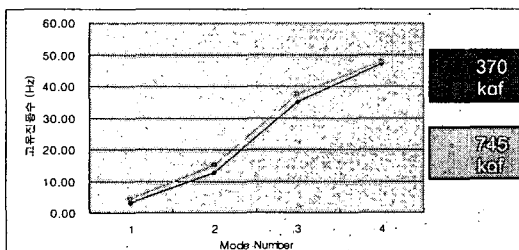


Figure 7.3 The effect of load

결론

회전하는 타이어나로부터 측정된 전달함수에서 회전성분을 제거하기 위한 실험과 해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 회전속도가 증가할수록 고유진동수는 감소하는 경향을 보이며, 고차모드 일수록 변화의 폭이 증가하였다.
- 2) 실험에 사용된 타이어나는 60Kph 이상의 회전 상태에서 5 차 모드를 제외한 저차 모드 의 고유진동수는 거의 변화가 없었다.
- 3) 공기압이나 하중의 증가에 비례하여 고유진동수의 변화는 증가하는 경향을 보였다.
- 4) 일정 속도 이상에서 고유진동수의 변화량이 작다는 결과로부터 타행실험에 의하여 회전 주기성분을 제거하는 타행 주파수 평균법을 제안하였다.

참고 문헌

- (1) Leonard T. Char 다, "Removal of Harmonic Peaks from Frequency Response Function of Rotating Systems", pp 999-1004
- (2) Steve Goldman, Vibration Spectrum Analysis, New York, Industrial Press, Inc., 1999, pp 70-71.
- (3) Victor Wowk, Machinery Vibration, Boston, McGraw Hill, 1991
- (4). Bendat, J.S. and Piersol, A.G., "Random Data: Analysis and Measurement Procedures", 2nd Ed., John Wiley & sons, NY,1986