

타이어 공동의 공명에 의한 차량 실내음 전달경로 연구 Study on Interior Noise Transfer Path Analysis by Tire Cavity Resonance

이상주† · 강현석*

Sang-Ju Lee, Hyun-Seok Kang

Key Words : Cavity Resonance(캐비티 공진), Tire Cavity Noise(타이어 공명 소음), Cleat Impact(돌기), Vertical/Tangential Force(상하/전후 방향 진동량)

ABSTRACT

Vibration transmitted through rolling tire is a major source of road noise in vehicle interior noise on the range of low frequency.(0~500Hz) Among various road noises, tire cavity noise has very peak on 200~250Hz. And generally it is generated by cavity resonance of tire. In this paper, tire cut-sample is used to calculate the tire cavity frequency. Cavity resonance frequency of tire is measured through vertical/tangential forces at load cell of axle using drum cleat impact. This method is useful to find cavity peak because measured forces do not have complex peaks. And changing the test conditions (air inflation, loads), tire cavity resonance characteristics are identified. Finally, vehicle interior noise is measured as tire/vehicle are changing. As difference of tire vertical force is bigger, interior noise level is higher at cavity frequency. Also we can assume that vehicle sensitivity is important factor at tire cavity noise.

1. 서론

차량이 주행할 때 타이어와 노면의 접촉에 의하여 발생된 가진력은 차량의 현가장치를 통하여 차체로 전달되어 로드 노이즈를 발생시킨다. 일반적으로 로드 노이즈는 500Hz 미만의 영역에서 관심을 가지며 타이어와 차량간의 어떤 모드가 공진이 될 경우 문제가 발생할 수 있다. 이러한 로드 노이즈는 주파수 범위에 따라 booming, vehicle cavity noise, rumble noise 및 타이어 공명 소음 등으로 나누어 지기도 한다. 이 중 타이어 공명 소음은 타이어 내부의 공동에 의해 200~250Hz 영역에서 발생하는 날카로운 주파수의 소음을 일컫는다.

이러한 타이어 공명 소음은 1990 년 Sakata 에 의해 규명되었으며, Sakata 는 타이어 내부에 폴리우레탄폼을 채워넣어 내부 공간을 없앴으로써 공명현상을 제거하였다.[1] R.W. Scavuzzo 는 타이어 내부에 공기 대신에 헬륨가스를 주입하여 공명주파수 변경을 통한 차량 실내소음을 개선하였다.[2] 1995 년 Thompson 은 차량 spindle force 과의 영향을 분석하여 차량 구조 전달계 개선에 의한 소음 저감을 진행하였다.[3] 이후에는 FE 방법을 사용함에 따라 동적상태에서의 해석도 연구되었다. 2002 년 Yamauchi 등은 내부 공간 압력 변화에 따라 공명 현상을 2 개의 mode 로 구분하여 cavity 주파수를 분석하기도 하였다. 더불어 wheel 의 개선(close edge oval wheel)을 통해 타이어 공명 소음을

개선하기도 하였다.[4]

본 연구에서는 타이어 공명 주파수를 실제 타이어 단면을 이용하여 정확하게 찾아내는 방법을 알아보았다. 또한 드럼 돌기를 이용한 동적 상태에서 단순화된 진동 특성과 차량 실내 소음과의 비교를 통해 공명 현상을 분석할 수 있는 방법에 대해 알아보고, 그 특성을 분석하였다. 이를 통해 공명현상이 어떠한 전달경로에 발생하는가에 대해 고찰해 보았다.

2. 타이어 공동에 의한 공명 현상

2.1 타이어 공명 주파수

캐비티 공진(Cavity Resonance)이란 외부공간과 폐쇄된 공간 내에서 경계조건에 의해 특정한 음압 분포가 형성되는 것을 의미한다. Tire 의 경우, 림과 결합되어 타이어 내부공간이 도우넛 형태의 캐비티를 형성하게 되고, 외부에서 충격이 가해질 때 간섭현상에 의해 특정한 음압분포가 나타나게 된다. 즉, 타이어 내부에 형성되는 공동의 압력 변화에 따라 타이어가 가진되고 이때 발생하는 공명 주파수는 식(1)으로 구할 수 있다.

$$f = c/L \tag{1}$$

f: cavity resonance frequency[Hz]

c: speed of sound

L: Circumference of centroid

† 이상주; 한국타이어㈜ 중앙연구소
E-mail : Sangju@hanta.co.kr
Tel : (042) 865-0291, Fax : (042) 865-0304

* 한국타이어㈜ 중앙연구소

정적인 상태의 타이어 경우 정확한 L 값을 알기 위해서는 유효 반경을 알아야 되며, 이를 위해 실

제 타이어의 절단된 샘플의 스캔을 이용하여 정확하게 측정하는 방법을 사용하였다. 타이어 트레드부의 두께(t)와 휠과 타이어 비드부가 접촉하는 길이(b)를 측정, 타이어 Size 에 나타나는 트레드폭(A), 편평비(B), 휠 사이즈(C) 값을 이용하여 아래식(2)로 유효반경(R)을 계산할 수 있다.

$$R[\text{mm}] = \{(A \times B / 100) - t\} / 2 + (C \times 25.4) / 2 - b \quad (2)$$

계산된 R 값으로 타이어 중심의 원주길이 L 을 계산할 수 있다.

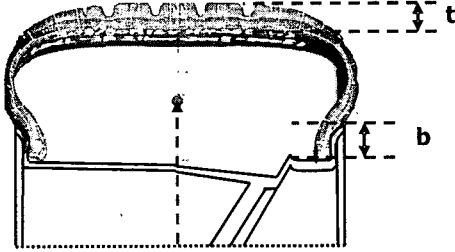


Fig.1 Tire cut-sample scan diagram

205/50R16 래디얼 타이어의 실제 측정값을 통한 계산 결과, 유효반경은 약 227.9mm 였으며, 공명 주파수는 약 237.6Hz 로 계산되었다.

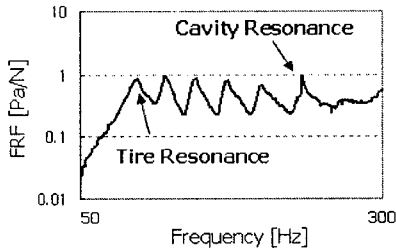


Fig.2 Frequency response function of tire (205/50R16)

이러한 공명 주파수를 확인하는 방법으로 포인트 이너턴스를 이용하는 방법으로 주파수 응답함수를 구하여 보았으며(Fig.2), 이 때 측정된 주파수는 236Hz 로 확인할 수 있었다. 측정 오차를 감안할 때 타이어 절단 샘플 스캔을 통한 방법은 정확성이 있음을 나타낸다.

2.2 공명 주파수 분리현상

실제로 타이어가 차량에 장착되어 하중이 가해질 경우, 타이어는 변형을 하게 된다. 이 경우 타이어 내부 공동의 형상도 변하게 되는데 이러한 비대칭성에 의해서 타이어 공명 주파수는 2 개로 분리되게 된다.[2,5,6]

Fig.3 에 하중에 의한 전후/상하 방향의 모드 형상을 나타내었다. 전후방향의 모드는 정적인 상태의 타이어의 공명 주파수보다 낮은 값을 가지게 되며, 상하방향의 모드는 높은 값을 가지게 된다.

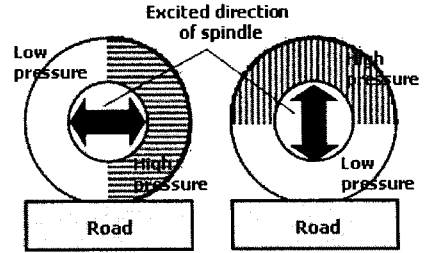


Fig.3 Cavity modes of loaded tire

이러한 분리된 2 개의 공명 주파수는 주행 속도가 증가함에 따라 낮은 주파수는 낮은 값으로, 높은 주파수는 높은 값으로 변한다고 알려져 있다.[4]

2.3 타이어 회전 시 공명 주파수 측정 방법

공명 주파수를 찾아내기 위하여 타이어 외부에 마이크로폰을 이용, 타이어를 임팩트로 가진시 발생하는 소음의 주파수 응답함수를 측정하는 방법을 사용할 경우 정적인 상태 또는 그냥 하중이 가해진 상태에서의 공명 주파수의 측정이 용이하다는 장점이 있다. 하지만 실제 주행 중인 차량에서의 공명 현상을 표현하기에는 한계가 있다. 또는 차실 내에 발생한 소음은 다양한 주파수 성분들을 가지고 있기 때문에 이러한 차실 내 소음의 주파수 성분들을 구별하여 정확한 공명 주파수를 찾아 내기는 쉽지가 않다.

이에 본 연구에서는 Fig.4 와 같이 돌기형상을 가진 드럼을 이용, 실제 주행 중인 차량에서 차량과 연결되는 타이어 중심 축에 발생하는 힘을 Load Cell 을 이용하여 측정하였다. 타이어 회전에 따라 돌기물을 지날 때 차축에 발생하는 전후/좌우의 힘을 측정을 통해 타이어 공명현상을 파악하였으며 이러한 차축에 발생하는 힘에 대한 분석을 실시하였다.

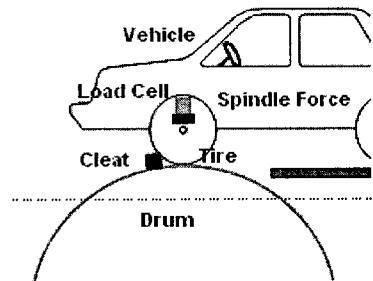


Fig.4 Schematic diagram of test

이러한 방법을 통해 하중이 가해진 실제 주행조건과 유사한 상태를 재현하였으며, 이 때 발생하

는 차축에서의 전후/상하 방향 힘의 진동량을 통해서 타이어 공명현상을 규명해 보고자 한다.

3. 드럼 돌기를 이용한 공명현상 특성

3.1 공명 소음 발생 전달 경로 연구

205/50R16 레디얼 타이어를 이용 20kph 에서 100kph 까지 속도를 증가시키며 측정된 상하/전후 방향의 힘 발생량이 Fig. 5 에 나타나 있다.

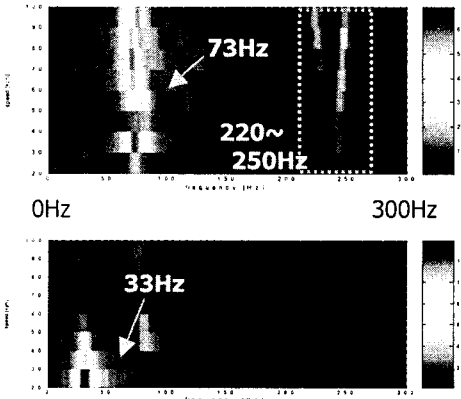


Fig.5 Vertical/Fore-aft spindle force of 205/50R16

타이어의 상하 방향 1 차 고유진동수인 73Hz 와 전후 방향 1 차 고유진동수인 33Hz 인 진동특성은 속도 변화에 상관없이 발생한다. 또한 220~260Hz 대역에서는 상하방향의 힘이 발생하며, 전후 방향의 힘은 상하 방향 대비 작음을 알 수 있다.

이러한 차축에서의 발생 진동량과 차실 내 소음과의 연관성을 알아보기 위해 거친 노면에서 동일 시험 조건으로 차량 실내 소음을 측정하였다.

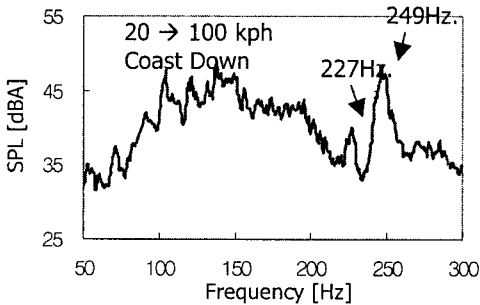


Fig.6 Vehicle interior noise on rough surface

Fig.6 에 나타난 타행속도 구간의 실내음의 평균 값을 살펴보면, 227Hz 와 249Hz 에서 날카로운 음이 존재함을 알 수 있다. 단, 그 피크 음압 레벨은

249Hz 가 더 크게 나타났다.

즉, 드럼 돌기 시험에서 측정된 상하방향 Force 의 공명 피크 주파수와 실제 주행 중에 차실 내에 발생한 공명 소음의 주파수는 유사하였으며 이는 차축에 발생한 상하 방향의 진동량이 차량 전달계를 통해 차실 내의 소음에 반영이 되었음을 나타낸다.

3.2 공명 주파수 확인

이러한 드럼 돌기를 이용하는 방법에 대한 확신을 얻기 위해, 일반적으로 타이어에 의한 공명 소음을 제거하기 위한 방법[3]인 타이어 내에 이물질들을 채워서 공명 소음이 제거되는 현상을 확인하였다. Fig.7 에는 드럼 돌기방법을 이용하여 측정된 일반 조건에서의 진동 발생량과 타이어 공명 내부에 이물질을 채운 경우에 대해 비교하였다. 타이어 내부에 이물질을 채운 경우, 공명 주파수 대역의 2 개의 피크가 상하/전후 방향 진동에서 모두 감소하였다.

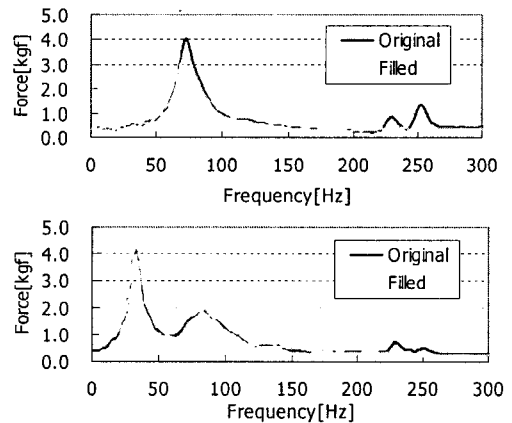


Fig.7 Comparison of cavity original/filled tire

3.3 하중 및 주행시 공명 주파수 특성

타이어 공명에 의한 피크 주파수는 차량 속도가 증가할 때 일정한 특징을 가지고 있으며, 이러한 현상이 드럼 돌기 시험을 통해 측정된 상하방향의 힘에서도 유사하게 나타난다. 205/50R16 레디얼 타이어로 타행 조건에서 측정된 220~260Hz 대역의 상하방향 힘의 피크 주파수의 값을 속도마다 나타내면 Fig.8 과 같다. 하중이 가해진 상태에서 측정된 공명 주파수는 두 개의 성분으로 분리되었음을 알 수 있으며, 각각의 주파수 값을 Low, High, Average 로 표시하였다.

드럼 돌기를 이용하여 측정된 상하방향의 진동

량의 공명 주파수 대역의 피크 값은 차량 속도가 증가함에 따라 높은 주파수는 높은 방향으로, 낮은 주파수는 낮은 방향으로 이동됨을 알 수 있다.

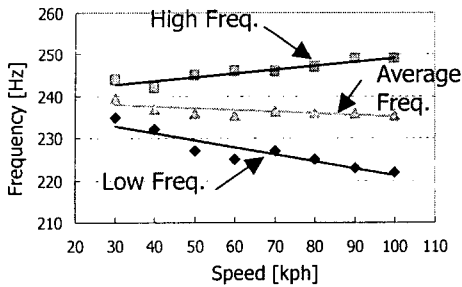


Fig.8 Variation of cavity peak frequency (205/50R16)

두 주파수의 평균값은 거의 변동이 없으며, 이 값은 정적인 상태에서 측정된 공명주파수 값인 237Hz 와 유사하였다. 아래 Table 1 에는 2 개로 분리된 주파수의 전속도에 대한 중간값을 나타내었으며, 60kph 정속 시험 평가에서 측정된 차실 내 소음(3.1 절)에서의 공명 피크 주파수와 거의 일치함을 알 수 있다.

Table 1. Averaged values of each frequency

	Low	High	Average
평균치	228Hz	247Hz	236Hz

이러한 결과를 통해, 드럼 돌기를 이용하여 공명 주파수 영역에 대한 분석을 하는 방법은 차실 내에 발생하는 공명 소음에 대한 분석과 유사함을 알 수 있다.

드럼 돌기를 이용한 공명 주파수 및 현상에 대한 분석은 실내음에 존재하는 다양한 피크로 인해 공명주파수를 판단하기 어려울 경우, 그 사용 효과가 더욱 클 것으로 판단된다.

3.4 사용 조건에 따른 공명 현상 분석

3.1 절에서 3.3 절까지 차량 실내음에서 발생하는 공명 현상과 드럼 돌기를 이용한 차축의 상하방향 진동 발생 현상으로 나타낼 수 있음을 알 수 있었다. 이에 드럼 돌기 방법을 이용하여 공기압 및 하중 사용 조건 변화에 따라 공명 주파수에서의 진동량이 어떻게 발생하는지 알아보려고 한다.

3.4.1 공기압 변에 따른 경향

Fig.9 에 타이어 공기압에 따른 상하방향 진동량의 발생 경향을 도시하였다. 공기압이 증가함에 따라 차축에 발생하는 진동량은 증가하며, 공명

주파수 대역(220~260Hz)의 진동량도 증가함을 알 수 있다.

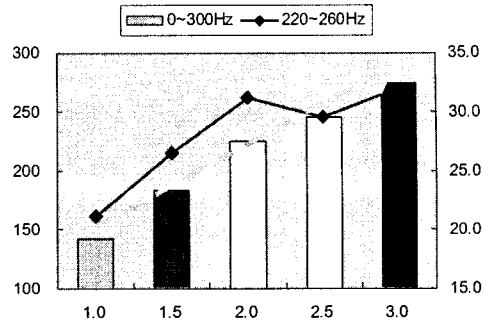


Fig.9 Summed vertical force by inflation increasing

3.4.2 하중 변경에 따른 경향

Fig. 10 은 하중의 변화에 따른 차축에서의 발생 진동량을 나타내었다. 가해지는 하중이 증가할수록 전체 주파수 대역에서 발생하는 진동량은 감소하다가 수렴하였으나, 공명 주파수 대역에서의 진동량 합은 하중 증가에 따라 증가하는 것으로 나타났다.

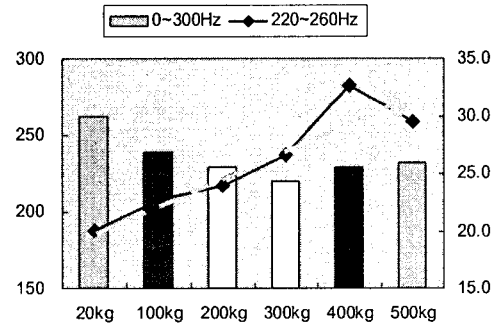


Fig.10 Summed vertical force by load increasing

공기압이나 하중이 증가할 경우, 공명 주파수 대역에서의 진동량은 증가하므로 공명 현상을 Control 하기 위해서는 적절한 사용조건이 필요함을 알 수 있다..

4. 타이어/차량 변경에 따른 실내음

지금까지 드럼 돌기를 이용하여 차축에 발생하는 상하방향의 진동성분에 의해 공명 현상에 대해 알아보았다. 4 장에서는 실제 차량내 실내음을 통해 타이어와 차량간의 영향에 대해 알아보려고 한다. 공명 주파수에서의 진동량 발생량이 차이가 있는

2 개의 타이어 및 서로 다른 2 개 차종에 대하여 무향실 내 거친 노면에서 차량 실내음(운전자석 오른쪽에 마이크로폰 위치)을 측정, 서로 비교하였다. 각 시험은 동일 조건에서 20kph 와 100kph 에서의 타행으로 실시하였으며, 주파수 분해능은 1Hz 를 이용하였다. 시험에 사용된 타이어 B 가 타이어 A 대비 공명주파수 대역에서의 상하방향 진동량 발생이 큰 샘플을 이용하였으며, 2 개 차종은 1500cc 동급의 다른 메이커 제품을 사용하였다. Fig. 11 에는 타이어/차량의 각각의 조합 조건에서 측정된 차내 실내음이 나타나 있다.

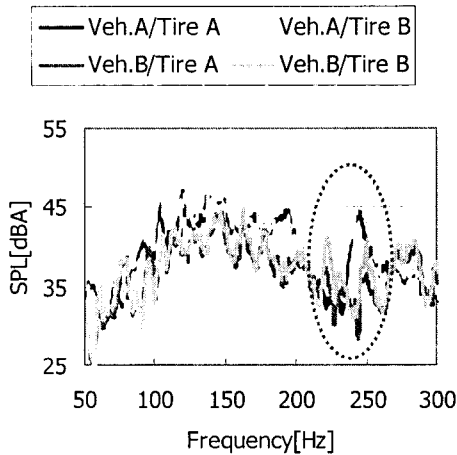


Fig.11 Comparison of two vehicle interior noise

동일 차량 내에서 타이어의 진동 특성이 차이가 있는 경우, 전체 주파수 대역에서의 소음 발생 경향은 유사하지만 공명 주파수 대역인 200~250Hz 에서는 그 차이가 약 4dB 가량 발생함을 알 수 있다. 차축 상하방향 힘이 크게 발생하는 타이어 B 의 경우, 실제 차실 내 소음도 공명 주파수 영역에서 크게 발생하였다.

이와 반대로 동일한 타이어를 사용한 경우에는 2 개 차량의 특성에 따라 차실 내에 발생하는 소음 레벨은 차이가 존재하였다. 전체적으로 차내 실내음이 작게 발생한 차량 B 는 공명 주파수 대역인 200~250Hz 대역에서도 약 6dB 가량 낮은 피크 레벨을 나타내었다. 이를 통해 차실 내 공명 소음은 타이어에 의한 영향도 있지만 차량에 의한 차이도 무시할 수 없음을 나타낸다.

차량 B 와 타이어 A 를 사용한 경우가 가장 양호한 차량 실내음 및 공명 소음을 나타내었다. 타이어와 차량의 적절한 조합을 통해 차실 내 소음 및 공명 소음은 최적화 및 감소될 수 있고 판단된다.

5. 결론

- 1) 타이어 단면을 이용하여 타이어 공명주파수를 찾아내는 방법을 적용해 보았으며, 이 방법을 통해 계산된 타이어 공명 주파수는 실제와 유사하였다.
- 2) 타이어의 공명에 의해 차실 내에 발생하는 소음과 차축에서 발생하는 상하방향의 진동량의 상관성에 대해 규명하였다. 이를 위해 드럼 돌기를 이용하여 하중이 가해진 동적 상태에서의 차축에 발생하는 진동량을 측정하였으며, 차량 실내음에서 공명 주파수와 일치함을 알 수 있었다. 또한 차량 속도에 따라 상하방향의 진동량의 공명 주파수의 분리현상을 파악할 수 있었다.
- 3) 타이어의 공기압이나 하중이 변함에 따라 공명 주파수 대역에서 발생하는 진동량은 변하였으며, 이는 적절한 사용조건이 필요함을 나타내었다.
- 4) 타이어/차량의 변화에 따른 차실 내 소음을 비교를 통해 타이어와 차량의 영향 정도를 알아 보았다. 주행 중 발생하는 차량 내 공명 소음은 타이어에 의한 상하방향의 가진력의 차이에 따라 다르게 발생하였으며, 그 크기가 작을수록 차실 내 공명소음 피크도 작게 발생하였다. 또한 이러한 가진력이 유사하게 차축에 가해지더라도 차량의 민감도에 따라 차실 내 소음 및 공명 소음의 크기가 다르게 발생하는 것도 확인하였으며, 타이어와 차량 간의 적절한 조합이 필요함을 알 수 있었다.

참고 문헌

- (1) Sakata, T., et al., 1990, "Effect of Tyre Cavity Resonance on Vehicle Road Noise", Tyre Science and Technology, Vol.18, pp 68-79
- (2) Scavuzzo, R. W., 1994, "Influence of wheel resonance on tire acoustic cavity noise", SAE, No. 940533.
- (3) Thompson, J., "Plane Wave Resonance in the air Cavity as a Vehicle Interior Noise Source", Tyre Science and Technology, Vol.23, pp 2-10
- (4) Hiroshi Yamauchi, Yasuji Akiyoshi, 2002, "Theoretical analysis of tire acoustic cavity noise and proposal of improvement technique", JSAE Review 23, 89-94.
- (5) Sakata, T., et al., 1998, "Influence of tire cavity acoustic noise to road noise", Proc. Spring Convention of JSAE, No. 881012.
- (6) 고강훈. 2000. "타이어 공동의 공명이 차량 실내 소음에 미치는 영향", 추계학술대회 논문집, 한국자동차공학회.