Wave Propagation 을 이용한 타이어 굽힘파 분석

The analysis of tire's flexural characteristic using wave propagation

황성욱† ·한진혁*·노국희**·조춘택***

S. W. Hwang, J. H. Han, G. H. Rho and C. T. Cho

Key Words : Flexural Wave(굽힘파), Group Velocity(군파 속도) ,Wavelet transform(웨이블렛 변환).

ABSTRACT

. Tire noise is a major noise source at high speeds. One of the noise source is controlled by pattern and structure. Pattern noise is effected by the shape of tread. And the bending stiffness of tire is influenced to the resonance of tire's belt. But in high frequency region, FEA is not appropriated with application. So this paper discusses about wave propagation of tire. There has been much effort to verify the flexural wave velocity with structure design specification.

1. 서 론

차량 소음에 있어 타이어 소음은 차지하는 비중은 날로 커지고 있으며, 특히 고주파 대역의 타이어 기인 소음은 고속 주행 성능에 많은 영향을 미치고 있다. 이는 타이어 트레드 상의 패턴 형상에 주로 기인하지만 구조적인 영향도 배제할 수 없다. 그리고 이러한 노면에 의해 가진된 타이어 구조 진동은 타이어와 노면 사이의 형상에 의한 Horn 효과로 소음이 증폭이 되게 된다. 그러므로 중고주파 대역에 대한 분석이 더욱 더 절실히 요구된다.

기존의 FEA 기법을 이용한 모달 해석 기법은 주로 400Hz 미만의 저주파대역의 진동에 적용되어 왔으며, 중고주파 대역은 모달 밀도가 크고, 특히 타이어에 있어서 고무의 Damping 특성으로 인해 적용이 힘들다.

이에 중고주파 대역 해석 기법으로 SEA 및 Wave 기법 등이 있다. 통계적 기법인 SEA (Statistical Energy Analysis)은 각 부계를 에너지 항으로 표현되며, 부계간의 에너지 흐름을 통계적 기법으로 접근하지만 구조 진동분야에서 고주파 대역에 적용되며, 근래에 들어 주로 타이어에 대한 적용으로 Wave 기법의 연구가 활발히 진행되고 있다.[1)]

본 논문에서는 타이어 구조 설계 인자에 따른 Wave 전파 현상을 시변주파수 기법인 Wavelet Transform 으로 실험적으로 분석하여 굽힘파 군속도의 특성을 이해하고, 전파 속도를 비교 분석하고자 한다.

일반적으로 굽힘파(Flexural)는 재질의 밀도, 두께, Young's Modulus 등에 의해서 속도가 결정되며 주파수에 비례하여 증가하는 분산 특성(Dispersion Relation)을 가진다. 그러므로 이를 이용하여 재질의 강성을 분석하기 위해서 군속도를 측정하는 방안도 소개되기도 하였다.[2)]

† 교신저자; 넥센타이어
E-mail : ukhwang@nexentire.co.kr
Tel : (055) 370-5309, Fax : (055) 373-2313

* 넥센타이어

** 넥센타이어

*** 넥센타이어

2. 타이어 굽힘파 분석

2.1 평판의 파동 방정식

먼저 타이어 파동 특성을 이해하기에 앞서 평판의 여러 파동을 소개하고 본 논문에서 주요하게 분석하고자 하는 굽힘파(Flexural Wave)의 분산 특성(Dispersion Relation)을 이해하고자 한다.

평판의 Wave 는 크게 아래의 2 종류의 파동이 존재한다 [2)]. 아래의 2 종류의 파동 중에 첫 번째는 대칭 모드인 S 파가 있으며 주로 의사 종파라 부르기도 한다. 이 외에도 타이어에서는 전단파(Shear waves)와 rotational 파동이 존재하며 이러한 파동은 2kHz 이상의 고주파 대역으로 그 크기가 작고 소음이 미치는 영향은 미비한 것으로 알려져 있다.[2)] 또 하나의 다른 파동은 A 파이며 이 중 제일 낮은 차수의 0 차 모드를 A0 파라고 부른다. 타이어에서 A0 파는 주로 500~2kHz 대역에 속하며 소음에 큰 영향을 미친다. [3)]

Fig. 1 (a) A0 Wave

Fig. 1 (b) S0 Wave

S 파와 전단파, rotational 파동은 주파수에 따라 속도의 변함이 없는 비분산 특성이 있지만, 굽힘파인 Flexural 파동은 주파수가 증가함에 따라 위상 속도가 커지는 분산 특성을 가지고 있다 [3)]

2.2 굽힘파 전파 특성

앞서 상기한 바와 같이 굽힘파인 Flexural 파동은 주파수가 증가함에 따라 위상 속도가 커지는 분산 특성을 가지고 있다고 하였다. 이러한 현상은 파장이 짧은 고주파일수록 굽히는데 더 많은 탄성에너지가 필요하게 되며 이러한 에너지가 운동에너지와 탄성에너지를 전환되면서 더 큰 속도로 전파하는 이론으로 설명될 수 있다 [4)]. 그리고 2 개 이상의 위상파가 군을 이루어 전파되는 경우 에너지의 지연이 생기게 된다. 이와 같은 충격파의 에너지 전달에 대한 분석 기법으로 시변 주파수 기법이 요구된다. 굽힘파의 전파 속도는 주파수의 제곱근에 비례하여 증가하고 있으며 위상파와 군파의 수식은 아래와 같이 표현된다.

$$EI = \frac{Eh^2}{12(1-\mu^2)\rho}, \quad V_{phase} = EI^{1/4}(2\pi f)^{0.5} \qquad (1)$$

$$V_{phase} = \frac{\omega}{k}, \quad V_{group} = \frac{\partial \omega}{\partial k} \qquad (2)$$

2.3 웨이블렛 분석(Wavelet Transform)

위와 같은 비정상 신호를 해석하기 위해서 시변주파수 기법이 요구된다. 이 중 웨이블렛 변환은 일반적인 충격파 신호가 가지고 있는 특성을 잘 표현하기 위해 사용되는 방법으로 창문의 사이즈를 조정하여 고주파에서는 시간 분해능을, 저주파에서는 주파수 분해능을 증가시킨다. 일반적으로 이러한 시변주파수 기법은 비정상 신호를 분석하기 위해 사용되며 기계류의 결함을 분석하기 위해 적용된다. 수학적인 표현은 다음의 식(3)과 같다.

$$CWT(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)\psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right)dt = \int s(t)e^{-\left(\frac{t-b}{a}\right)^2/\sigma^2} e^{j2\pi\frac{f_0}{a}(t-b)}dt \qquad (3)$$

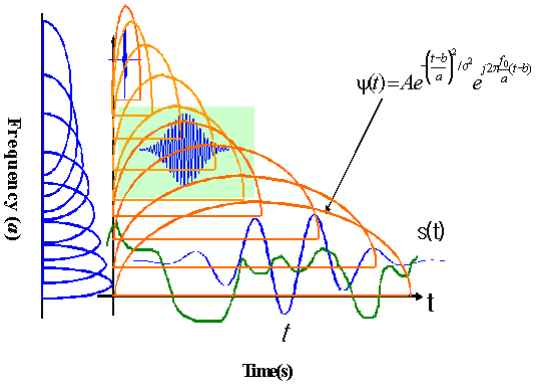


Fig. 2 The algorithm of Wavelet Transform

여기서 함수 ψ 는 Mother wavelet 이라고 부르며 Scaling Factor a 와 b 에 의해 조정된다. 이 인자를 조정함으로서 저주파수에서는 주파수 해상도를 고주파수에서는 시간 해상도를 증가시켜 굽힘파와 같이 저주파로 갈수록 시간 지연이 느린 충격파를 분석하기에 적합하다.

3. 실 험

3.1 군속도 측정

본 연구에서는 타이어 트레드 상에 두 개의 센서를 설치하여 센서간 거리를 알 때 센서 사이의 주파수 대역별 지연 시간을 이용하여 군속도를 측정하고자 한다.

(1) 트레드 방향의 군속도 분석

먼저 아래 그림 3 과 같이 트레드 원주 방향으로 10cm 간격으로 두 개의 가속도계를 부착한다. 첫번째 센서 근방에서 임팩트 해머로 가진하여 파동의 전파 현상을 분석할 수 있다.

아래 그림 3 과 같이 각 센서에서 측정된 임팩트 신호를 Wavelet 기법으로 분석하면 그림 4 와 같다.

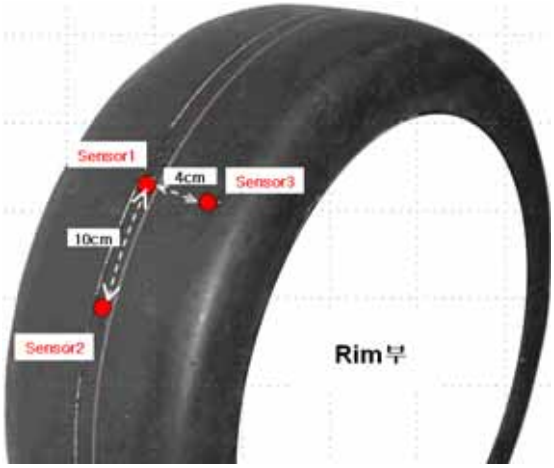


Fig. 3 The test setup

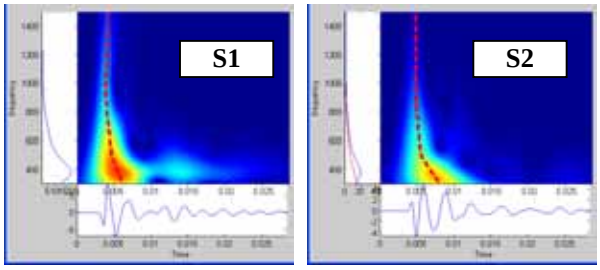


Fig. 4 The Wavelet Transformation
(a) for Sensor1, (b)for Sensor2

이러한 두개의 충격 신호로부터 에너지의 최대 값을 읽어 각 주파수별 도달 시간을 그림 5 와 같이 산출한다. 이렇게 산출된 도달시간과 센서거리를 이용하여 군파의 속도를 주파수 대역으로 분석할 수 있다.

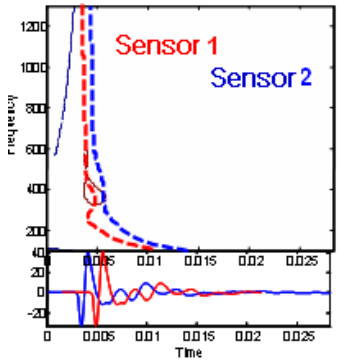


Fig.5 The arrived Time of S1& S2

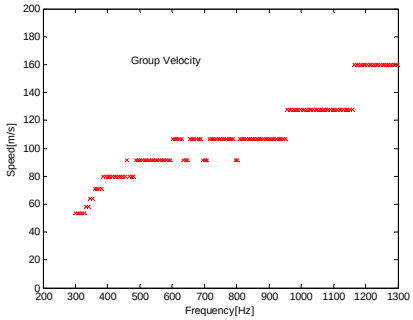


Fig.6 The Group Velocity of flexural wave

굽힘파(Flexural Wave)는 그림 6 과 같이 고주파로 갈수록 속도가 커지는 분산 특성을 가지고 있으며, 이러한 군속도 특성를 이용하여 설계 사양 별 군속도를 비교하고자 한다

3.2 타이어 설계 별 군속도 비교

시험 대상의 타이어는 그림 7 과 같다. 타이어 구조 인자는 크게 Steel Belt 와 Wrap 이라는 보강재로 구성될 수 있다. Steel Belt 는 타이어와 노면의 접지 형상을 잘 유지하도록 하며, Wrap 은 설계 사양에 따라 Full/Edge Type 으로 나뉘어지는 보강재이다. Steel Belt 는 각도 β/α 2 가지로 하였으며, 시험 Version 은 아래와 같이 3 가지이다.

본 연구에서는 고주파 대역의 구조 인자에 의해서 가진되는 구조 진동 영향도를 파악하기 위하므로, 패턴 형상은 가지지 않는 Non Pattern 타입으로 설정하였다. 그리고 일반적으로 타이어의 강성 보완을 위하여 적용 되어진 Wrap Type 에서, Edge 타입보다 Full Wrap 의 경우, 트레드의 강성이 훨씬 커지게 된다

	Wrap Type	Belt Angle
A	Edge	α
B	Full	α
C	Full	β

$\alpha > \beta$, $\beta < 24^o$

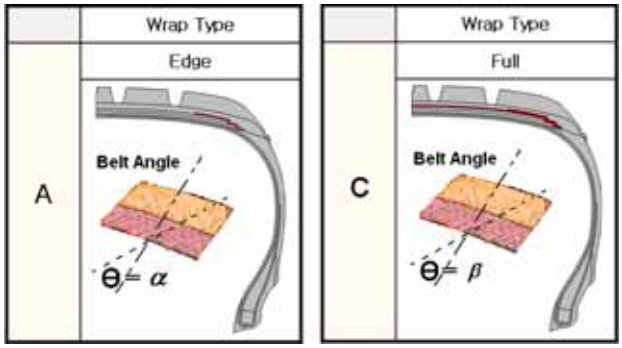


Fig.7 The Test tires

시험 측정 방법은 그림 3 과 같이 먼저, 원주 방향으로 10cm 간격으로 가속도계 1,2 를, 측(Lateral) 방향으로 가속도계 1,3 번을 부착하여 타이어 원주 방향과 Lateral 방향의 Wave 군속도를 측정하고자 한다.

원주 방향으로는 그림 9 와 같이 벨트 각도가 β 인 경우, α 보다 원주 방향의 군속도가 빠르게 진행됨을 알 수 있다. 이는 벨트 각도 β 의 경우는 원주 방향으로 높은 강성을 가지고 있기 때문이다. 약 180m/s 로 주행하고 있으며, 고주파로 갈수록 속도가 빨라지는 Dispersion 특성을 가지고 있다. 그리고 Edge Wrap 은 가지는 타이어는 Full Wrap 보다 군속도가 느리게 전파되는데 마찬가지로 Full Wrap 인 경우 트레드의 전체 강성이 높아지므로, 벨트 각도의 영향보다 상당히 큼을 확인할 수 있다.

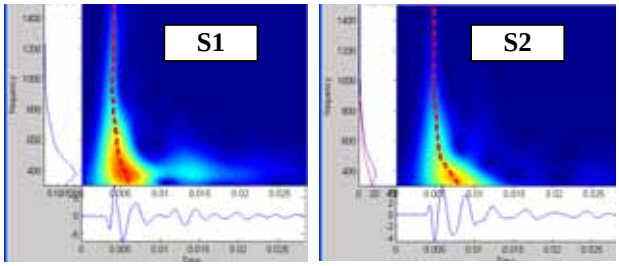
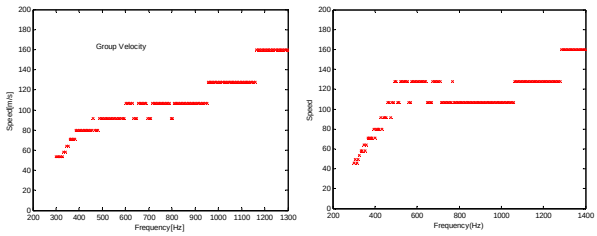
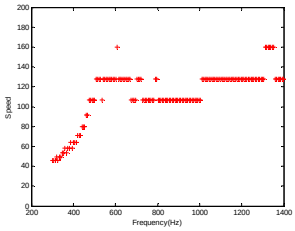


Fig.8 The Circumferential Group Delay for B ver



(a) (b)



(c)

Fig.9 The Group velocity of circumferential direction
(a) for A ver; (b) for B ver; (c) for C ver.

측(Lateral) 방향은 그림 11 와 같이 최고 120m/s 전파되는데, 대체적으로 원주 방향 보다 군속도가 느리게 전파되는 이유는 이는 벨트 각도가 주로 45 도 이하이므로 원주 방향으로 향하여 강성이 측방향보다 원주방향으로 크기 때문인 것으로 분석된다. 그리고 벨트 각도의 영향도는 원주 방향과는 달리 α 인 경우 β 보다 빨리 전파되며, 역시 보강재의 경우 Full Wrap 의 사양이 Edge Wrap 보다 상당히 빨리 전파되므로 보강재가 강성에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 그림 11 (a)에서 600Hz 대역에서 속도가 급격히 올라가는 현상은 Edge Wrap 에 의한 반사파 영향으로 해석된다. 이와 같이 가속도계 두 개 만으로 군파 속도를 계산하여 타이어 강성을 분석할 수 있다. [2)]

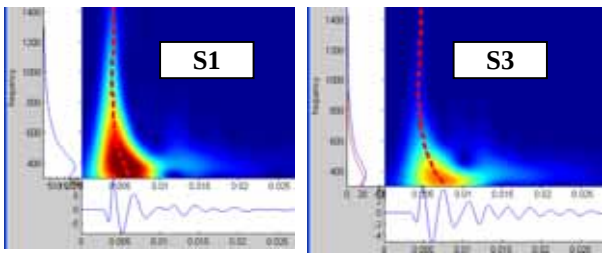
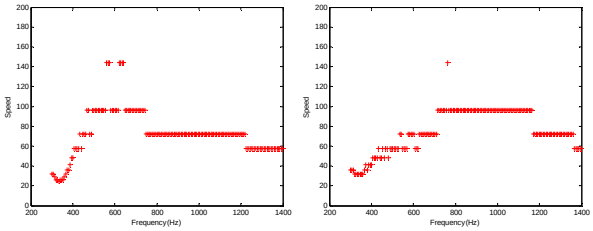
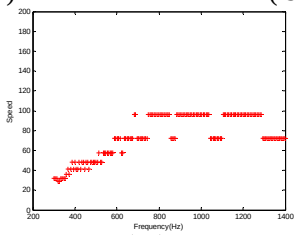


Fig.10 The Lateral Group Delay for B ver



(a) (b)



(c)

Fig.11 The Group velocity of lateral direction
(a) for A ver; (b) for B ver; (c) for C ver.

4. 결 론

본 연구의 굽힘파 군속도 분석을 트레드 상에 두 개의 가속도계를 이용하여 타이어 강성을 분석할 수 있게 되었다. 트레드 상의 원주방향으로는 고주파 대역에서 180m/s 로, 측 방향으로는 120m/s 로 전파되는데 이는 벨트 각도에 영향을 받을 것으로 추측된다. 그리고 굽힘파의 속도를 타이어 제조 사양별로 분석한 결과, 트레드의 SteelBelt 각도보다 보강재의 Wrap Type 이 구조적인 강성에 큰 영향을 미침을 알 수가 있다.

참고문헌

(1) 유지우 등, 2006, "중주파수 해석을 위한 웨이브 모형 연구;두개의 보와 판 연성계 ", 한국소음진동공학회 2006 년 추계학술대회논문집.

(2) 최영철,박진호 등, 2006 , “가속도계를 이용한 배관 감육 감시 방법 ,한국소음진동공회 2006 년 추계학술대회 논문집.

(3) R.J.Pinnington, 2002, 253(5), A Wave Model for A Pneumatic Tyre Belt, JS&V pp941-959.

(4) 김용범 등, 1997, "위그너-빌 분포함수 분석기법을 이용한 보에서의 충격신호 발생위치 추정방법", 대한기계학회 1997 년도 춘계학술대회논문집 A, pp378-384.