

# 초음파 기반 브레이크 패드 마찰재의 동탄성 측정 및 분석에 관한 연구

## A Study on the Measurement and Analysis of the Dynamic Stiffness of a Brake Pad Based on Ultrasonic Waves

권성진† · 김효성\* · 김태호\* · 배철용\* · 김찬중\* · 이봉현\*

Seong-Jin Kwon, Hyo-Sung Kim, Tae-Ho Kim, Chul-Yong Bae, Chan-Jung Kim, and Bong-Hyun Lee

### 1. 서 론

자동차의 제동 시 발생하는 문제는 소음, 떨림, 제동불량, 편제동 등으로 분류할 수 있다. 이 중에서 제동 시 발생하는 소음 현상은 운전자 및 승객에게 심적인 불쾌감을 주게 되며, 제동에 대한 불안감을 유발하여 제품에 대한 품질신뢰성을 떨어뜨리는 지대한 인자로 작용한다. 디스크 브레이크 시스템의 소음 현상은 주파수 대역에 따라 다양하게 구분되지만, 주요 발생 소음은 제동 후반부에 고주파 영역에서 발생하는 스켈 노이즈(squeal noise)이며, 이는 디스크(disc)와 패드(pad) 사이의 가변적인 수직항력 및 마찰력에 기인한 브레이크 시스템의 동적 불안정성(dynamic instability)을 야기하여 발생한다고 알려져 있다.

스켈 노이즈에 관련한 연구는 다양한 분야에서 활발하게 진행되고 있으며, 스켈 노이즈를 해석하기 위한 수학적 이론부터 유한요소 해석, 과도 응답 해석 및 스켈 노이즈 저감을 위한 DFSS(Design for Six Sigma), 강건 설계(robust design) 등의 다양한 접근방법을 제시하였다. 하지만 패드 마찰재(friction material)의 정확한 물성 측정과 스켈 노이즈와의 상관관계를 예측 및 평가하는 연구는 미진한 실정이다.

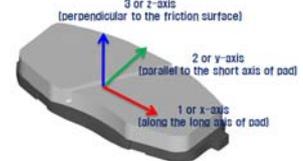
따라서 본 연구에서는 브레이크 패드의 상층재로 디스크와의 접촉마찰을 일으켜 제동력을 발생시키는 수집가지 복합물로 이루어진 복합재인 패드 마찰재의 정확한 탄성 물성(elastic properties)을 초음파(ultrasonic wave)로 측정 및 분석하고자 한다. 이를 통하여 이방성 재질(anisotropic material)과 점탄성(visco-elasticity)의 성질을 가지는 패드 마찰재의 정확한 탄성 물성을 확보하여, 브레이크 패드 마찰재 설계단계에서 스켈 노이즈와의 상관관계를 규명하고자 하였다.



(a) test machine (ETEK-3000)



(b) ultrasonic sensor



(c) coordinate definition

Fig. 1 Ultrasonic velocity measurement machine

### 2. 탄성 물성 측정 이론

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 자동차부품연구원 이 보유하고 있는 IMS(Industrial Measurement System, Inc.)의 ETEK-3000 장비를 활용하여 브레이크 패드 마찰재의 3축 방향별 초음파 투과속도 및 탄성 물성을 측정하였다. 시험방법은 SAE(Society of Automotive Engineers) J2725 규격을 사용하였다.

브레이크 패드 마찰재의 좌표계 설정은 Fig. 1(c)와 같으며, 마찰재와 같이 횡방향 등방성(transverse isotropy) 재질에서의 후크의 법칙은 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(c_{11} - c_{12}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (1)$$

† 교신저자: 자동차부품연구원 ICE/EV구동융합연구센터

E-mail : sjkwon@katech.re.kr

Tel : (041) 559-3337, Fax : (041) 559-3340

\* 자동차부품연구원 ICE/EV구동융합연구센터

여기서  $\sigma$ 는 수직 응력,  $\tau$ 는 전단 응력,  $\epsilon$ 는 수직 변형율,  $\gamma$ 는 전단 변형율,  $c$ 는 탄성 상수(elastic constants)를 나타낸다.  $c$ 는 패드 마찰재를 투과하는 초음파의 속도와 밀도를 바탕으로 구할 수 있으며, 식(2)를 통하여 패드 마찰재의 공학적 탄성 계수(Young's modulus,  $E$ ), 전단 계수(shear modulus,  $G$ ), 프와송 비(Poisson's ratio,  $\nu$ )를 확장하여 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & -\frac{\nu_{zx}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_{zy}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xz}}{E_x} & -\frac{\nu_{yz}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xz}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (2)$$

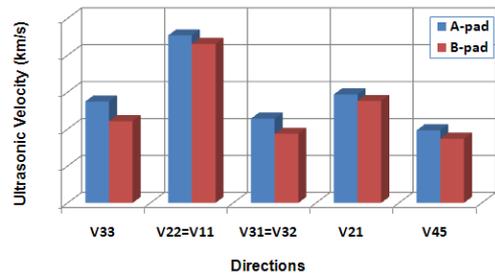
### 3. 탄성 물성 측정 및 분석

본 연구에서는 Table 1과 같이 A 패드 마찰재와 B 패드 마찰재를 임의로 선정하여 탄성 물성 측정시험을 수행하였다. 우선, 상온(17°C)에서 패드 마찰재의 방향별 초음파 투과속도, 탄성 상수, 공학적 탄성 계수는 Fig. 2와 같다.

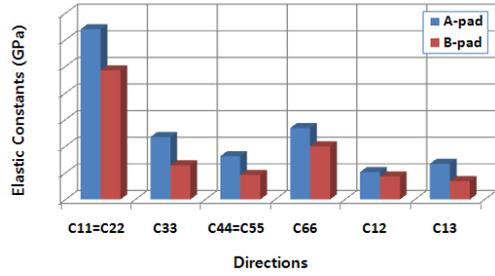
시험 결과에서와 같이 패드 마찰재의 횡방향(x, y방향) 초음파 투과속도, 탄성 상수, 공학적 탄성계수가 다른 방향에 대비하여 가장 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 B 패드 마찰재에 대비하여 A 패드 마찰재의 강성 및 밀도가 높게 분석되며, 특히 수직방향 탄성 상수와 공학적 탄성 계수는 A 패드 마찰재가 B 패드 마찰재 대비 각각 1.83배, 1.67배의 값을 가진다. 이를 다시 온도조건에 따라 분석해 보면 Fig. 3과 같으며, 온도가 상승할수록 탄성 상수는 감소함을 알 수 있다.

Table 1 Specifications of test samples

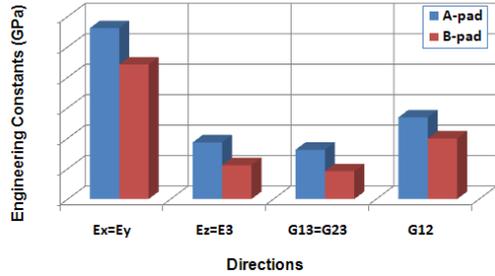
		friction materials	
		A-pad	B-pad
test sample size	X(mm)	20.05	20.16
	Y(mm)	14.79	14.86
	Z(mm)	7.94	7.48
density (g/cc)		2.48	2.09
test sample picture			



(a) ultrasonic velocity results



(b) elastic constants results



(c) engineering constants results

Fig. 2 Ambient temperature results of brake pads

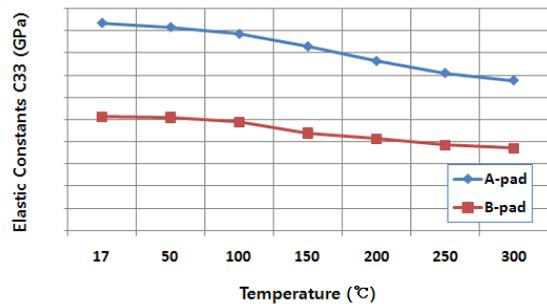


Fig. 3 Elevated temperature results of brake pads

### 4. 결론

본 연구에서는 디스크 브레이크 시스템의 패드 마찰재에 대한 탄성 물성을 정확히 측정하기 위하여 초음파 투과속도를 측정하여, 패드 마찰재의 탄성 상수, 공학적 탄성 계수를 분석할 수 있었다. 이러한 결과는 추후 패드 마찰재와 같은 횡방향 등방성 재질에 대한 탄성 물성 정량화를 통하여 브레이크 시스템의 스켈 노이즈 신뢰성 향상을 위한 기반 기술로 활용할 수 있다.