

차량용 브레이크 코너 모듈에서 마찰재의 온도와 압력에 따른 물성치 변화를 고려한 스켈 소음 해석 연구

A Study on Squeal Noise Simulation considering the Friction Material Property Changes according to Temperature and Pressure in an Automotive Brake Corner Module

조호준† · 김정태* · 채호중*

Hojoon Cho, Jeong-Tae Kim and Ho-Joong Chae

Key Words : Temperature Dependent Material Property (온도 의존적 물성치), Orthotropic material (직교이방성재료), Disc Material Variation (디스크 물성치 편차), Complex Eigenvalue Analysis (복소고유치해석), Warm Squeal Noise Simulation Model (고온 스켈 해석 모델)

ABSTRACT

This paper is a study on squeal noise simulation under the consideration of temperature and pressure dependent material properties of friction material. For this, data of pressure and temperature dependent material properties of lining is achieved by using lining data base and exponential curve fit. Complex eigenvalue analysis is performed for predicting squeal noise frequency and instability and chassis dynamo test is performed for achieving squeal noise frequency, sound pressure level, occurrence temperature & pressure. Initial multi models are composed for considering complex interface conditions such as pad ear-clip, piston-housing and guide pin-torque member. The simulation result of base models is compared with the test result. Squeal noise simulation under the consideration of temperature and pressure dependent material properties of friction material is performed and analyzed using multi models. And additional condition is disc material property variation. Entire simulation conditions are combined and analyzed. Finally, this paper proposes direction of the warm squeal noise model.

기 호 설 명

- C_{ii} : 구하고자 하는 마찰재의 물성치 (GPa)
- $(C_{ii})_0$: 초기 온도 혹은 압력에서 마찰재 물성치(GPa)
- A, R_0 : 측정 시험 데이터들을 exponential curve fit 으로 얻어낸 계수
- x : 구하고자 하는 물마찰재 물성치의 압력 혹은 온도

1. 서 론

일반적으로 마찰력을 이용하여 제동을 수행하는

장치에는 많은 소음 및 진동 현상이 나타난다. 이러한 제동 NVH 현상은 재현 상태, 주파수 대역 및 마찰 현상 등에 따라 구분된다. 그 중 주파수 대역으로 크게 나누면 열적 불균일 (Thermal Roughness)이나 DTV (Disk Thickness Variation)에 의해 발생하는 5~60Hz 대역의 저더 진동 (Judder vibration), Stick-slip 에 의해 100~1000Hz 대역에서 발생하는 브레이크 저주파 소음 현상 (Low Frequency Noise: Groan, Moan 등) 그리고 1kHz~20kHz 영역에서 발생하는 스켈 소음 (Squeal Noise) 현상으로 나눌 수 있다⁽¹⁾. 그 중 스켈 소음 문제는 운전자뿐만 아니라 주변 사람들에게도 높은 불안감과 불쾌감을 주는 현상이며 최근 들어 품질 보증에 대한 많은 지불을 하고 있는 실정이다. 이러한 스켈 소음을 줄이기 위해 수많은 노력과 자본이 투자되고 있으며 여전히 주요한 NVH 문제 중 하나로 대두되고 있다. 스켈 소음은

† 교신저자; 현대모비스 공학해석팀

E-mail : hjcho@mobis.co.kr

Tel : 031-8021-4512, Fax : 031-280-2843

* 현대모비스 공학해석팀

크게 고주파수 스켈(High Frequency Squeal, 5~15kHz)과 저주파수 스켈(Low Frequency Squeal, 1~5kHz)로 나뉘고 스켈 현상에 기인되는 원인에 따라서는 브라킷 기인(Bracket-induced, 2~6.5kHz), 패드 기인(Pad-induced, 4~11kHz) 그리고 로터 기인(rotor-induced, 7~16kHz) 스켈로 나뉜다⁽²⁾. 스켈 소음 개선을 위한 많은 연구가 진행되어 왔으며 그 중 시스템 모드의 동적 불안정성에 의해 기인되는 이론을 기반으로 한 복소고유치해석(Complex Eigenvalue Analysis)은 스켈에 대한 원인 분석과 성능을 파악하기 위한 방법으로 최근 가장 널리 사용되고 있다⁽³⁾⁻⁽⁷⁾. 그러나 복소고유치해석은 상대적으로 복잡하고 민감한 경계 조건들로 인해 해석 엔지니어의 접근 방법과 경험에 상당 부분을 의존하게 된다. 또한 제동 시스템은 그 특성상 급변하는 온도 조건 하에서 있기 때문에 해석적 구현을 위해서는 다각적인 검토가 필요하다.

본 연구는 마찰재의 온도와 압력에 따른 물성치 변화를 고려하여 시스템의 불안정 모드가 변화되는 양상을 분석하였다. 이방성 재질 (Anisotropic Material)로 된 마찰재의 물성치에 대해 압력과 온도에 따른 재료 측정이 용이하지 않기 때문에 기존의 압력 및 온도에 따른 마찰재 측정 결과들을 이용하여 exponential curve fit으로 변화율을 얻어내었다. 이를 이용하여 온도와 압력에 따른 물성치를 획득하고 해석에 적용하였다. 또한 디스크의 물성치 편차(Disc Material Variation)를 같이 고려하여 마찰재 물성치 변화와 디스크 물성치 변화에 따른 해석 결과의 차이를 비교하였고 스켈 시험 결과와 비교, 분석하였다. 최종적으로 고온 스켈 해석 모델(Warm Squeal Noise Simulation Model) 구성 방안을 제시하였다.

2. 복소 고유치 해석

2.1 온도-압력 의존적 마찰재 물성치

일반적으로 차량용 마찰재는 탄소 섬유를 포함한 다수의 혼합체로 구성되며 이러한 특징으로 인해 재료 물성에 대해 방향성이 존재하게 된다. 이방성 특징을 갖는 마찰재는 측정의 복잡성과 결과의 편차 및 형상 등을 고려하여 직교이방성재료(Orthotropic Material)로 간략화시켜 사용하고 있다. 직교이방성재료를 측정하기 위해서 주로 사용하고 있는 방법 중 하나로 초음파 측정(Ultrasonic Measurement) 방법이 있으며 본 논문에서 사용한

마찰재 물성치는 모두 이 방법으로 측정되었다. 직교 이방성 재료에 대한 응력-변형을 관계식은 식(1)과 같고 후크의 법칙(Hooke's Law)을 이용하여 각 방향별 탄성계수 (Young's Modulus) 및 포아송 비(Poisson's Ratio)로 계산하여 해석에 사용된다. Figure 1은 마찰재 물성치의 축방향을 나타낸다. 초음파 측정 방법으로 측정된 값은 식(1)의 계수로 계산되며 해석에서 사용하기 위해 변환을 수행하게 된다. 결과적으로 5개의 독립적인 물성치를 측정하면 해석에 적용할 수 있는 물성치를 확보할 수 있게 된다. 기본 모델에서 사용된 마찰재 물성은 Table 1과 같다.

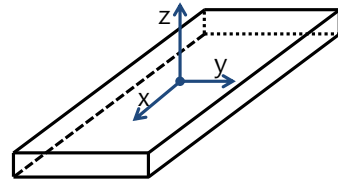


Figure 1 Coordinate Definition

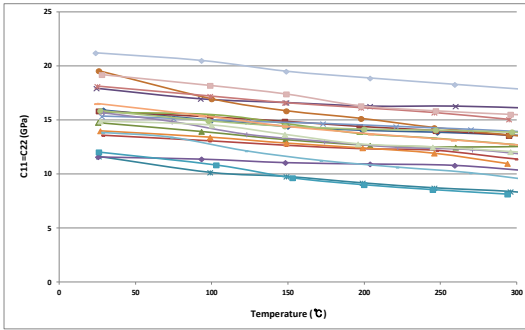
$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Table 1 Orthotropic Elastic Constants at Base Model

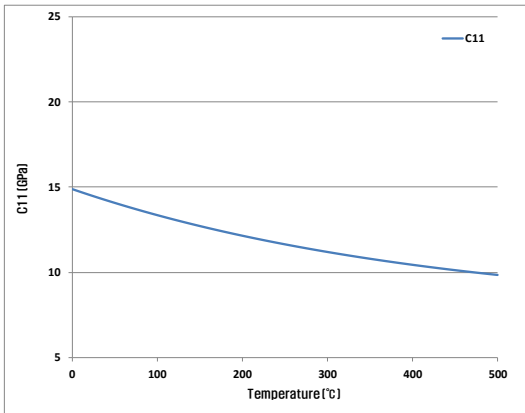
$E_1=E_2$ (GPa)	E_3 (GPa)	ν_{12} $=\nu_{21}$	ν_{13} $=\nu_{31}$	ν_{31} $=\nu_{32}$	G_{12} (GPa)	$G_{13}=G_{23}$ (GPa)
13.2	2.0	0.07	0.66	0.10	6.2	2.1

온도와 압력 의존적 물성치 (Temperature and Pressure Dependent Material Property) 측정은 측정 자체도 용이하지 않고 측정 에러도 상대적으로 많이 나타난다. 이를 보완하기 위해 본 연구에서는 기존의 확보된 데이터베이스를 이용하여 exponential curve fit을 수행하였으며 최종적으로 식(2)를 통해 온도와 압력에 따른 물성치 변화율을 얻어냈다.

$$C_{ii} = (C_{ii})_0 + A \cdot \exp(R_0 \cdot x) \quad (2)$$



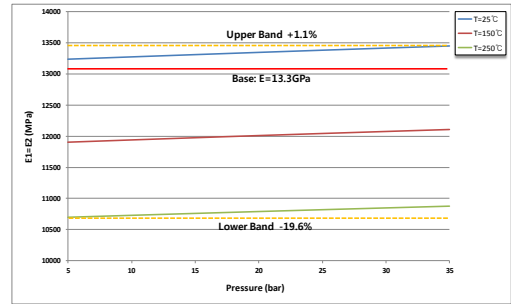
(a) C11 – Measurement Data



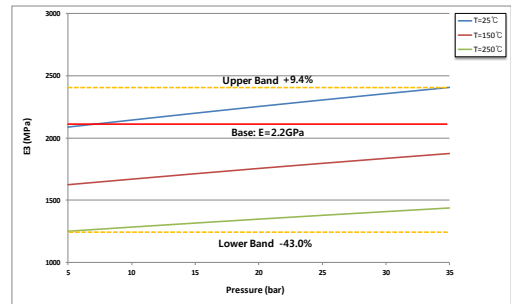
(b) C11 – Exponential Curve Fitting Data

Figure 2 Measurement Data and Exponential Curve Fitting Data of C11 according to Lining Temperature

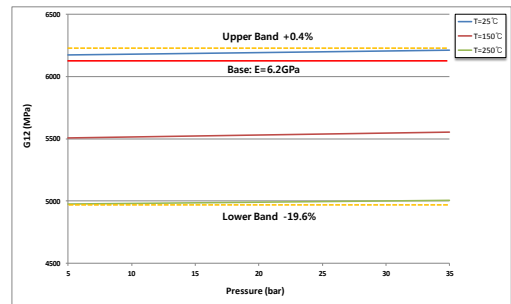
Figure 2 (a)는 C11에 대해 각 마찰재 별 온도에 따라 나타낸 그림이고 (b)는 exponential curve fit 한 결과를 나타낸다. 이러한 결과를 이용하여 필요한 직교 이방성 재료의 탄성 상수(Elastic Constant)를 온도 및 압력별로 확보하여 해석 물성치로 사용되었다. Figure 3은 본 연구에서 사용된 마찰재의 주요 탄성계수를 온도-압력에 따라 나타낸 그림이다. 결과에서 보는 바와 같이 기본 모델에서 사용된 물성치 대비 가장 큰 차이가 나는 조건은 하한에서 고온 저압 조건이며 상한에서는 저온 고압 조건에서 나타난다. 이는 물성 변화가 온도가 오름에 따라 낮아지고 압력이 높아짐에 따라 높아지는 특성 때문에 의해서 이다.



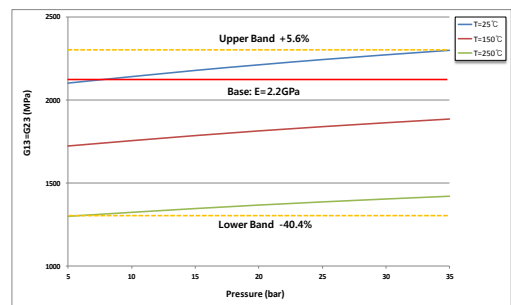
(a) Elastic Constant – E1



(b) Elastic Constant – E3



(c) Elastic Constant – G12



(d) Elastic Constant – G13

Figure 3 Exponential Curve Fitting Data of Elastic Constants according to Lining Temperature and Pressure

2.2 복소 고유치 해석

마찰재의 압력 및 온도 의존 물성치를 적용한 해석을 수행하기 위해서 초기 해석 모델을 구성하고 각 주요 인터페이스 조건을 고려하여 기본 모델(Base Model)을 구성해야 한다. 주요 인터페이스 조건으로는 백플레이트(Backplate)와 패드 클립(Pad Clip), 가이드 로드(Guide rod)와 토크 멤버(Torque Member) 그리고 피스톤(Piston)과 캘리퍼(Caliper)가 있으며 그 중 백플레이트와 패드 클립의 접촉 조건은 해석 결과에 가장 큰 영향을 준다. 백플레이트와 패드 클립 간 상대 거동의 중요성은 Fieldhouse⁽⁹⁾ et. al. 연구에서도 잘 보여주고 있다. 이러한 접촉 조건의 복잡성을 극복하기 위해서 다중 인터페이스 조건을 고려한 기본 모델을 수립하였으며 본 연구에서는 총 4가지 기본 모델로 구성하여 예측을 수행하였다.

해석 수행을 위해 2차 사면체 요소(2nd Order Tetrahedral Element)인 너클(Knuckle)을 제외한 모든 부품에 대해 육면체와 오면체 격자(Hexahedral and Pentahedral Element)를 이용하여 유한요소 모델링을 하였으며 해석 모델은 Fig. 3과 같다. 해석기(Solver)는 ABAQUS V6.11을 사용하였으며 각 부품의 결속 조건은 접촉 및 결합 조건을 부여하였다. 각 단품에 대해서는 진동 모드 시험(Vibration Modal Analysis) 결과와 상호 보정(Correlation)을 수행하였다. 브레이크 패드와 로터 간의 마찰계수는 0.7로 주었으며 회전 속도는 5rad/s, 압력 초기 조건은 1.5MPa로 부여하였다.

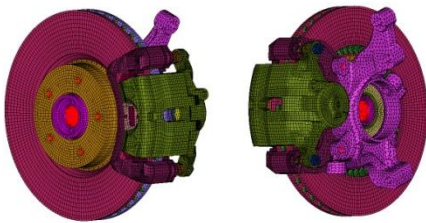


Figure 4 FE Model of 17inch front brake corner module

시스템 모드들은 마찰력에 의해서 주파수가 이동하게 되는데 스킵 소음 방사가 크게 일어나는 거동을 가지고 있는 인접한 두 시스템 모드가 서로 연성(Mode Coupling)되면 불안정 모드(Instability Mode)가 발생하면서 스킵을 유발시킨다. 이러한 현상을 해석적으로 구현하기 위해 복소고유치해석을 수행한다. 복소고유치해석 절차는 다음 같다.

- (1) 정적 해석 (가압) - 피스톤과 캘리퍼에 가압되어 정적 해석을 수행
- (2) 정적 해석 (회전) - 디스크를 회전시키는 효과를 부여하여 회전에 의한 마찰력을 발생시키는 정적 해석을 수행
- (3) Normal mode 해석 - 1kHz~10kHz까지 System Normal mode 해석을 수행
- (4) 복소고유치해석 - (3)번 결과를 이용하여 1kHz~10kHz까지 마찰력이 고려된 복소고유치 해석을 수행

구성된 초기 기본 모델을 이용하여 Table 2의 디스크의 물성치 변화량, 마찰재 압력, 온도 조건으로 총 192개의 해석을 수행하였다. 디스크 물성치 또한 온도에 의해서 변화하게 되나 본 연구에서는 해석에서 고려하고 있는 최대, 최소 가능 편차 ($\pm 5\%$) 수준으로만 고려하였다.

Table 2 Simulation Conditions

Disc Material Variation	Lining Temperature	Pressure
E $\pm 5\%$ (3 cases)	25°C 150°C 250°C	5 bar
		15 bar
		25 bar
		35 bar

3. 결과 분석

3.1 초기 해석 모델의 해석-시험 비교

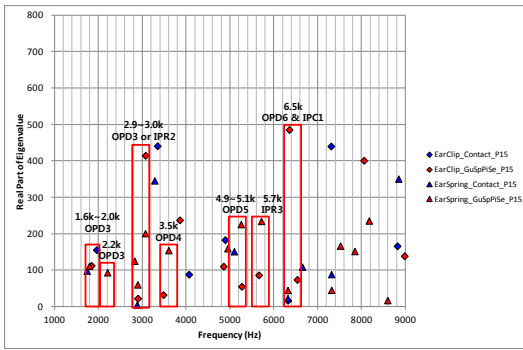
초기 모델을 결정하기 위해 다중 경계 조건을 고려한 해석을 수행하였으며 그 결과는 Figure 5와 같다. 불안정 모드를 선별하는 기준은 크게 세 가지로 분류될 수 있으며 내용은 다음과 같다.

- (1) 디스크의 OPD 모드 (Out-of-Plane Diametric Mode)가 주요하고 명확하게 발생
- (2) 디스크의 OPD 모드가 명확하게 발생하고 IPR 모드 (In-Plane Radial Mode)가 포함되어 발생
- (3) 디스크의 OPD 모드와 IPC 모드 (In-Plane Circumferential Mode)가 명확하게 발생

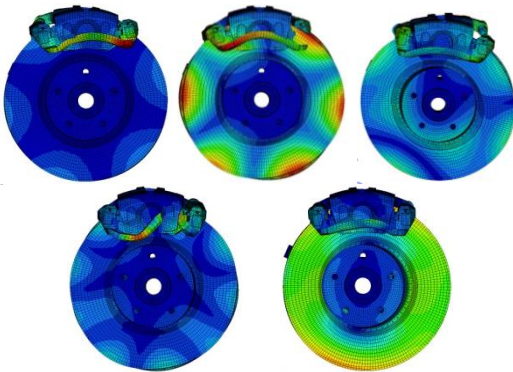
스컬 소음을 유발하는 불안정 모드를 판단하는 많은 기준들이 존재하며 이러한 판단 기준으로 획득한 불안정 주파수는 Table 3에 시험 결과와 함께 정리하였다.

Table 3 Squeal Noise Frequencies of Test and Prediction

No.	1	2	3	4	5	6
Test (Hz)	1.6k	2.5k	2.9~3.0k	5.2~5.7k		6.5~6.8k
Prediction (Hz)	1.6~2.0k (OPD3)	2.2k (OPD3)	2.9~3.0k (OPD3)	4.9~5.1k (OPD5)	5.7k (IPR3)	6.5k (IPC1-OPD6)



(a) Stability Chart

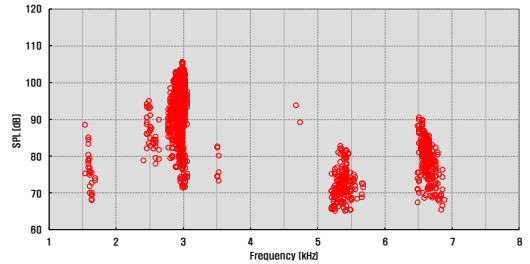


(b) Instability Mode Shapes – 1.6k OPD3, 2.2k OPD3, 3.0k OPD3, 5.0k OPD5 and 6.5k OPD6-IPC1

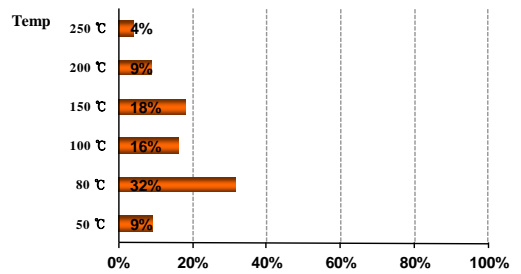
Figure 5 Squeal Noise Simulation Results

해석 결과와 시험 결과를 비교해 보면 시험에서 발생하고 있는 모든 스컬 주파수를 예측한 것으로 판단하였다. Figure 6 (b)와 (c)는 압력과 온도에 따른 스컬 발생 빈도이다. 현재 나타나고 있는 스컬 현상은 대부분의 온도와 압력 대역에서 나타나고

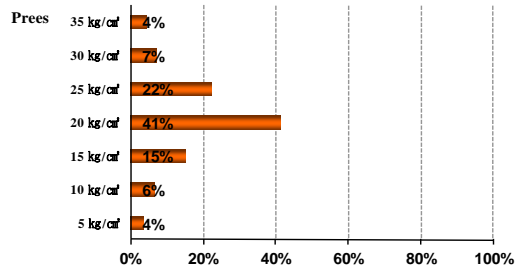
있으므로 선별된 제동 시스템에 대해 온도 및 압력 의존적 물성치를 이용한 해석 연구에 적절한 모델이라 판단된다.



(a) Sound Pressure Level vs. Frequency



(b) Squeal Occurrence vs. Temperature



(c) Squeal Occurrence vs. Pressure

Figure 6 Squeal Noise Test Results

3.2 온도-압력 의존적 마찰재 해석 결과 분석

다중 기본 모델을 바탕으로 온도-압력 의존적 마찰재 적용 모델의 해석을 수행하였고 그 결과는 Figure 7 과 같다. 총 192개의 해석을 수행하여 모든 결과를 확인해 본 결과, 기본 모델에서 예측한 주파수는 여전히 불안정이 주로 나타나고 있었으며 실수(Real)의 최대 값이 3.0kHz를 제외하고는 증가하였다. 그 외에 새롭게 나타난 불안정 모드는 (녹색 점선) 모드 선별 기준에 부합되지 않아 배제하였다.

and Temperature Dependent Material Properties

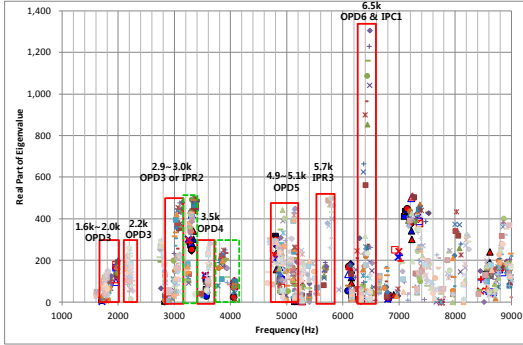
Figure 7 (b)~(d)는 전체 데이터 중 상대비교가 용이한 데이터를 선별하여 나타낸 것이다. 디스크 및 패드는 스켈 해석 시 가장 중요한 부분이다. 디스크의 물성치 변화는 해석 결과에 높은 영향을 미치기 때문에 해석 시 반드시 검토해야 하는 부분이다. 이번 해석에서 디스크 편차 수준의 변화량을 적용한 결과는 주요 모드 이외의 주파수가 나타나지 않았으며 6.5kHz 스켈의 경우는 디스크 변화에 민감하게 커지는 양상을 보이고 있다. 경우에 따라서는 해석상으로 구현이 힘든 불안정성이 디스크 편차 해석에 의해서 들어나기도 한다. 이는 실제 스켈이 고온(Warm) 구간에서 발생하기 때문일 수도 있고 디스크 물성치 보정의 문제 혹은 제품 편차 문제일 수 있다. 시험 결과를 토대로 보면 전체적인 온도 구간에서 스켈이 발생하고 있으며 해석도 일관된 양상을 보이고 있다.

마찰재 온도에 따른 불안정성 결과는 전체적인 불안정성 발생 양상이 크게 변화하고 있다. 이는 마찰재 온도에 따른 물성 변화가 대략 +9 ~ -40%로 높은 변화율을 보이고 있기 때문으로 판단된다. 또한 마찰재 물성 변화가 전체 시스템 변화에 많은 영향을 미치고 있다고 판단할 수 있으며 이는 마찰재의 적절한 선별이 스켈 소음 감소에 높은 영향을 줄 수 있다는 점을 시사하고 있다. 마찰재 압력에 따른 물성치 변화는 온도에 따른 변화 대비 비교적 작으나 시스템 자체의 가압력도 변화한 결과이기 때문에 주요 주파수에서는 변함없이 발생하나 실수 값의 크기에는 다소 영향을 미치고 있다. 그러나 결과적으로 마찰재 압력에 따른 불안정성 변화 영향 대비 온도에 따른 불안정성 변화 영향이 상대적으로 크게 나타났다.

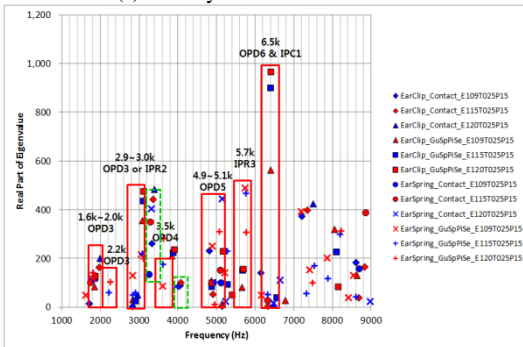
4. 결 론

본 연구는 마찰재의 온도와 압력에 따른 물성치 변화를 고려하여 시스템의 불안정 모드가 변화되는 양상을 분석하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

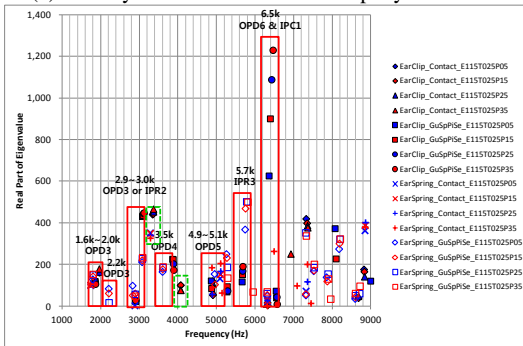
- (1) 마찰재는 압력과 온도에 따라 방향별 물성치가 변화한다. 본 연구에서 고려한 압력 및 온도 조건에 하의 마찰재 물성치 변화량은 +9 ~ -40%이다.
- (2) 스켈 소음 해석을 위해 복소고유치해석을 수행하였으며 주요 인터페이스 조건을 최대한



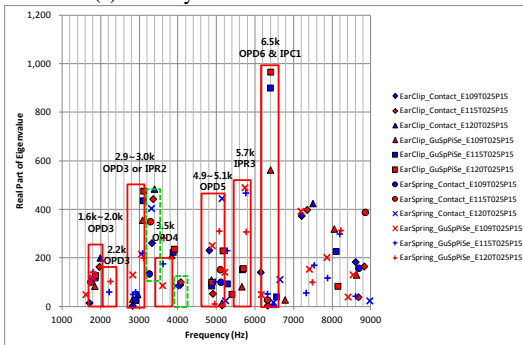
(a) Stability Chart – Total Results



(b) Stability Chart – Disc Material Property Variation



(c) Stability Chart – Pressure Variation



(d) Stability Chart – Pad

Figure 7 Squeal Simulation Results according to Pressure

고려할 수 있는 다중기본모델을 구성하였다. 6개의 불안정 모드를 스컬 선정 기준을 토대로 선정하였으며 시험 결과와 일관된 결과를 보이고 있다. 시험 결과에서 스컬 발생은 전체적인 압력 및 온도 조건에서 두루 스컬이 발생하였다.

- (3) 마찰재의 압력 및 온도, 그리고 디스크 편차를 고려한 스컬 해석을 수행하였다. 해석 결과, 마찰재의 온도에 따른 물성치 변화가 불안정성을 상대적으로 많이 변화시키고 있다. 이는 마찰재의 적절한 선별이 스컬 소음 감소에 높은 영향을 줄 수 있을 것으로 판단된다.
- (4) 디스크의 편차에 따른 불안정성 변화도 시스템을 많이 변화시킨다. 그러므로 고온 스컬 모델을 완성시키기 위해서는 디스크의 온도에 따른 물성치 변화를 포함하여 디스크-마찰재 온도 의존적 물성치를 고려하여 연구를 추가할 필요가 있다고 판단된다.

참 고 문 헌

(1) K. B. Dunlap, M. A. Ridhle and R. E. Longhouse, 1999, An Investigation Overview of Automotive Disc Brake Noise, SAE Paper 1999-01-0142.

(2) O. Dessouki, G. Drake, B. Lowe and W. Chang, 2003, Disk brake squeal : Diagnosis and Prevention, SAE Paper 2003-01-1618.

(3) M. T. Junior, S. N. Y. Gerges and J. A. Cordioli, 2004, Analysis of Brake Squeal Noise using FEM Part I: Determination of Contact Stiffness between Rotor and Pads, SAE Paper, 2004-01-3330.

(4) J. D. Fieldhouse, 1999, A Proposal to Predict the Noise Frequency of a Disk Brake Based on the Friction Pair Interface Geometry, SAE paper 1999-01-3403.

(5) D. Guan, X. Su and F. Zhang, 2006, Sensitivity Analysis of Brake Squeal Tendency to Substructures' Modal Parameters, J. Sound and Vibration, Vol. 291, pp.72-80.

(6) T. S. Shi, O. Dessouki, T. Warzecha, W. K. Chang and A. Jayasundera, 2001, Advances in Complex Eigenvalue Analysis for Brake Noise, SAE Paper, 2001-01-1603.

(7) A. Bajer, V. Belsky and S. Kung, 2004, The

Influence of Friction-Induced Damping and Nonlinear Effects on Brake Squeal Analysis, SAE Paper 2004-01-2794.

(8) J. D. Fieldhouse, D. Bryant and C. J. Talbot, 2011, The Influence of Pad Abutment on Brake Noise Generation, SAE Paper 2011-01-1577.