

브레이크 스켈 해석에서 접촉압력분포의 영향에 관한 연구

The study on the influence of contact pressure distribution on brake squeal analysis

이호건†·손민혁*·서영욱*·부광석**·김홍섭**

Hogun Lee, Minhyuk Son, Younguk Seo, Kwangseok Boo, Heungseob Kim

Key Words : Squeal Noise(스켈 소음), Disc Brake(디스크 브레이크), Static Contact Pressure(정적 접촉 압력), Complex Eigenvalue analysis(복소 고유치 해석)

ABSTRACT

Recently in the automotive brake industry brake squeal noise has become one of the top automotive quality warranty issues. The contact pressure is used to predict friction coupling in the brake squeal analysis. The formulation of friction coupling has performed by nonlinear static analysis prior to the complex eigenvalue analysis. This paper proposes a validation methodology of squeal analysis using modal testing and contact analysis and examines the effect of predicted contact pressure that leads to the discrepancy between unstable complex mode and squeal frequency. This studies compose a three step validation process : examining the modal characteristics of component and assembly loaded contact pressure using modal testing and FEM analysis and verifying the contact pressure distribution using nonlinear static analysis and experiment. Finally, the unstable modes from complex eigenvalue analysis and realistic squeal frequency from the noise dynamometer are investigated.

1. 서 론

브레이크 소음은 주파수에 따라 저더(Judder), 그론(Groan), 스켈(Squeal) 소음 등으로 구분한다. 스켈 소음은 1kHz~16kHz의 주파수 범위를 가지고 있는 소음으로써 제동 성능에는 영향을 주지 않지만, 사용자의 불쾌감을 유발시키는 요인이다. 일반적으로 스켈 현상은 제동 말기의 저속상태에서 회전체와 마찰재사이의 마찰력이 진동계에 유입되어 발생하는 동적 불안정 현상(일종의 자려진동)으로 인식되고 있다. 하지만 마찰재의 재질 및 차량의 속도, 브레이크의 온도, 브레이크의 속도, 브레이크 부품의 동특성 등의 여러 가지 인자들의 영향이 계에 복합적으로 주는 요인 때문에 아직 까지 스켈에 대한 동역학 모델식이 완전

하게 규명되지 않은 실정이다. 스켈에 대한 연구는 동마찰계수(coefficient of dynamic friction)보다 큰 정마찰계수(coefficient of static friction)에 의해서 발생하는 스틱슬립(stick-slip)현상으로부터 시작되었다. 스틱슬립에 대한 연구는 1950년대에 종료 되고, 그 후 마찰계수의 음의 속도 구배(negative friction-velocity slope)를 1자유도 모델에 적용하여 해석하였고⁽¹⁾, 마찰재의 전단(shear)효과를 고려하여 해석하는 방법⁽²⁾⁽³⁾ 등이 고려되었지만 시간이나 비용적인 측면에서 단점들이 제기 되어 본 논문에서는 유한요소모델(finite element model)을 이용하여 복소고유치(complex eigenvalue)를 해석하는 방법을 사용하였다. 보통 브레이크 시스템에서 동적인 접촉압력은 실험적 방법을 통해서 구하기는 상당히 어렵다. 하지만 그것을 예측하기 위해서 유한요소법을 사용하여 수치적 해석을 통해 구한 값을 실제 값과 비교 가능 하다. 브레이크 시스템에서 접촉압력에 대한 연구는 많은 사람들에 의해 수행되었다. 복소 고유치해석 또는 동적인 transient한 해석 방법을 사용해서 스켈 소음을 예측하는 방법은 브레이크 연구자에게 필수적인 매개변수이다.⁽⁴⁾⁽⁵⁾ 아직도 실험적 방법을 통한 동적접촉압력분포를 수치화하기에는 불가능한 부분이 많지

† 교신저자; 인제대학교 기계공학과
E-mail : guns1367@naver.com
Tel: (055) 321-2801

* 인제대학교 수송기계부품 기술혁신센터(TIC)

** 인제대학교 기계자동차공학부

만 면압지를 통해 측정하는 방법⁽⁶⁾이 있다. 이 논문에서는 정적인 접촉압력분포에 대한 값과 동적인 접촉압력에 대한 분포의 값을 구하여 복소 고유치 해석을 하는 방법에 대하여 설명 하였다. 그것을 바탕으로 디스크 브레이크 시스템 유한요소모델에 대하여 복소 고유치 해석을 수행하고 노이즈 다이내모미터 실험을 통하여 수치해석을 이용한 스켈의 예측이 정확함을 확인하였다.

2. 스켈 해석을 위한 유한요소모델

본 연구에서는 브레이크 스켈 해석을 위해 이용되어지는 복소 고유치 해석의 정확성 향상을 위해 각 단계별로 검증 방법 및 이에 따른 결과를 분석하고자 하였다. Fig.1 은 본 연구의 전체 연구의 과정을 나타내고 있다. 첫 번째로 단품과 어셈블리 상태에서 모드 해석을 통해 해석의 정확성을 검증하고, 둘째로 디스크와 패드사이의 마찰력에 직접적으로 영향을 주는 접촉해석을 정적, 그리고 동적 상태에서 해석하여 기존 참고 논문에서의 실험결과와 검증하였다. 마지막으로 접촉상태에서 표면조도(Topography)를 적용한 전후의 복소 고유치 해석 결과를 노이즈 다이내모 테스트에서 구한 스켈 주파수와 비교 분석을 통해 해석의 정확성을 높일 수 있는 방법을 고찰하였다.

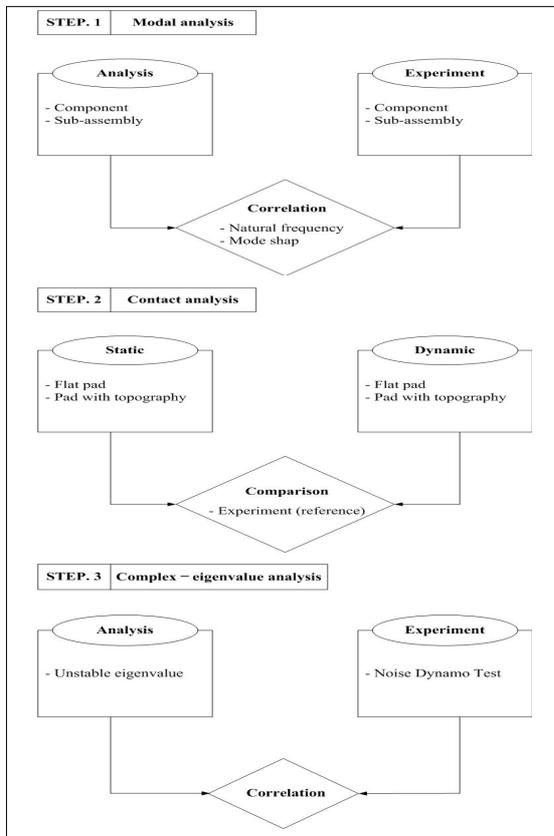


Fig.1 Research procedures for squeal analysis

2.1 유한요소모델과 경계조건

전체 브레이크 구성품은 Fig.1와 같이 디스크, 패드, 하우징등으로 구성된다. 유한요소모델은 실제 브레이크 모델과 동일하게 구속조건, 연결 방법등을 고려하여 구성하였다. 각 단품을 연결하는 방법은 크게 2가지로 나눌 수 있다. 강제요소연결과 스프링요소연결이 있는데 Fig.2에서 강제요소연결은 패드와 백 플레이트, 피스톤-하우징등 동일한 움직임을 가지는 요소를 자유도에 의한 구속으로 정의했고, 백 플레이트의 병진운동은 피스톤의 움직임에 의해 발생되므로 두 접촉면에 절점을 생성하여 구속하고 스프링요소를 사용하여 연결하였다.

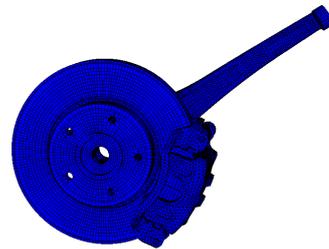
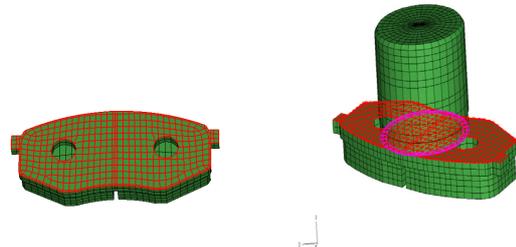


Fig.2 Brake system model for squeal analysis



(a)Rigid Body Element (b)Spring Element

Fig.3 Boundary condition

2.2 모드해석

브레이크 구성품의 유한요소모델에 ABAQUS를 이용하여 각 구성품의 모달해석을 수행하였다. 유한요소모델은 실제의 모델의 동특성을 예측하여 가장 최적의 모델을 구성하여 스켈 소음 관련 주파수 대역에 맞추어 1kHz 이상의 모드에 대해서 모달 해석을 수행하였다. 유한요소모델의 신뢰성을 검증하기 위해서는 실험적 데이터와 해석결과를 비교하고 오차율을 따져서 검토해야 한다. 실험적 모달해석은 LMS 모달전용 프로그램과 B&K진동장비를 이용하여 각 구성품의 고유진동수를 추출하였다.

2.3 모드 해석 결과 비교

LMS 모드해석전용 프로그램과 B&K진동장비를 이용하여 구한 각 구성품의 고유진동수와 해석적 방법을 통해 구한 두 데이터를 비교하여 유한요소모델의 실제 모델과의 신뢰성을 검증한다. 두 데이터의 비교를 위해서 아래와 같은 식으로 두 데이터의 오차범위를 구해 유한요소모델을 검증하였다. Table 1에서 실험적 데이터와 FEM의 오차율은 1% 내외로 유한요소모델의 신뢰성이 검증 된다는 것을 알 수 있다. 이 데이터를 바탕으로 신뢰성이 있는 유한요소모델로 본 연구를 수행할 수 있었다.

Table 1 Result of modal analysis

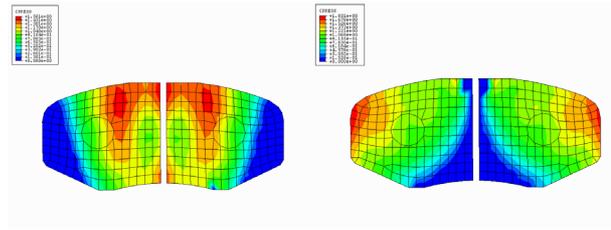
Mode	실험적 데이터(Hz)	FEM (Hz)	Error(%)
1	1128	1114.2	1.21
2	6356	6321.1	0.55
3	8052.4	8105.7	-0.66
4	10868	10887	0.17
5	12400	12497	0.78

3. 접촉 해석(Contact analysis)

브레이크 스킵 해석에서 접촉 표면의 적절한 모델링을 ABAQUS/Standard에서 제공하는 정적해석을 이용하여 압력에 의해 브레이크 디스크와 패드사이의 압력 분포를 이용하였다. 본 연구에서는 제동과정에서 발생하는 예측하는 기법은 매우 중요하다. 실제 브레이크 시스템이 적용되는 동적상태와 실제상황과 같이 패드 표면의 Topography를 가지는 경우를 고려하였다.

3.1 정적 접촉 해석(Static contact analysis)

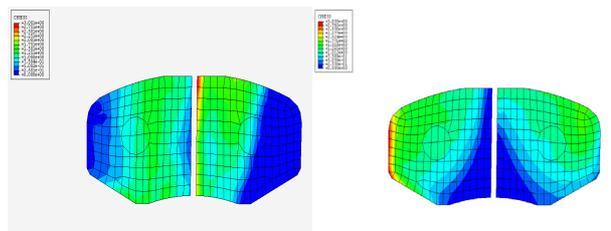
모달 해석의 신뢰성으로 이루어진 모델을 바탕으로 ABAQUS에서 너클 부위의 구속 조건을 부여 후 디스크를 고정 시키고 피스톤과 백 플레이트의 접촉 부위와 하우징과 백 플레이트의 접촉 부위에 각각 2MPa의 크기로 접촉 압력을 부여하였다. Fig.4는 FEM을 통한 정적접촉압력으로 (a)는 피스톤압력을 받는 Piston Pad, (b)는 하우징의 핑거부위의 압력을 받는 Finger Pad의 정적 압력 분포를 나타낸다. 해석에서 피스톤 패드는 중앙 상단부에서, 핑거패드는 리딩에지와 테이징에지에서 가장 큰 압력을 가지고 있다.



(a) Piston Pad (b)Finger Pad
Fig.4 Static contact pressure analysis

3.2 동적 해석(Dynamic Analysis)

동적해석은 정적해석과 달리 속도라는 매개변수가 추가로 주어져야 한다. 정적상태에서의 실험과 동일 한 조건에서 브레이크 다이내모미터 장비를 이용하여 디스크를 정적상태 처럼 고정 시키지 않고 원주방향으로 속도(70Km/h)를 부여했다. 해석적 방법은 FEM을 통하여 속도에 대한 값과 디스크와 패드 사이의 마찰에 대한 변화 값이 스켈 노이즈에 어떠한 영향을 주는지에 대해 연구했다. Fig.5와 같이 각속도와 디스크와 패드사이의 마찰의 영향으로 정적 상태의 압력분포와 달리 압력분포 값들이 leading Point 점을 중심으로 높게 형성되었다. 피스톤압력을 받는 Piston Pad의 경우 Piston과 Pad의 접촉면 중심에서 Leading Point로 형성되는 것을 볼 수 있고 하우징의 핑거부위의 압력을 받는 Finger Pad의 경우 Finger의 영향으로 인해 좌우 끝단에서 높은 압력 분포가 형성되었다.

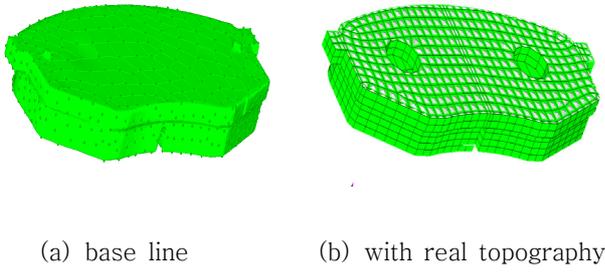


(a) Piston Pad (b)Finger Pad
Fig.5 Dynamic contact pressure

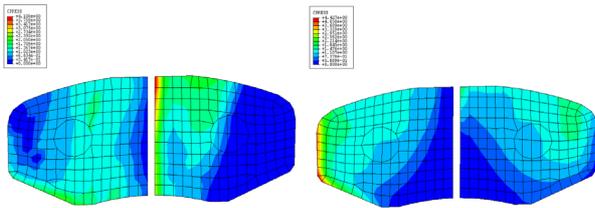
3.3 Topography를 적용한 접촉 해석

유한요소모델의 특성상 실제 패드의 topography가 적용되지 않고 패드의 면이 평탄하고 부드럽게 설계된 경우가 많다. 본 연구에서는 패드의 topography를 3D Scan을 이용하여 패드의 조도를 분석 한 후 모델에 적용하여 평탄하고 부드럽게 설계된 경우에서의 스켈 주파수를 비교해 보았다. Fig.6 (a),(b)는 topography를 적용한 전후의 패드 모델의 변화를 나타내고, 이를 적용하여 접촉해석을 수행한 결과는

Fig. 7 과 같다.



(a) base line (b) with real topography
Fig.6 Brake Pad surface model



(a) Piston Pad (b) Finger Pad
Fig.7 Contact pressure distribution with real topography

4. 복소 고유치 해석 및 결과 고찰

실험으로 검증된 유한요소모델을 각 단품의 접촉강성 및 경계조건을 부여하여 스컬 노이즈 해석을 위한 전체모델의 유한요소모델을 생성하였다. 유한요소모델의 복소 고유치 해석결과 값을 검증하기 위하여 노이즈다이노미터 장비를 이용하여 Fig.8과 같이 스컬 노이즈 주파수를 비교하였다.



Fig.8 Experiment setup

노이즈다이노미터 실험 장비를 이용하여 각 주파수에 대한 제동소음(dB) 값을 Fig 9와 같이 나타내었다. 스컬 소음은 주목하는 5~11kHz 범위 내에서만 측정하였다.

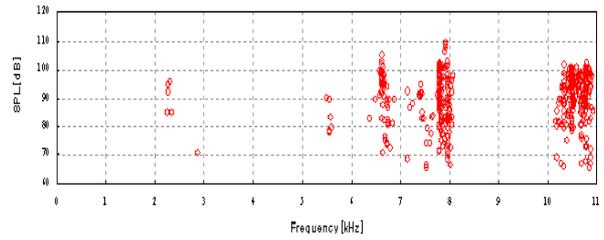
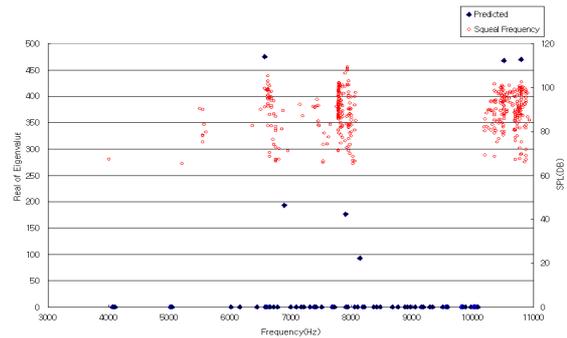


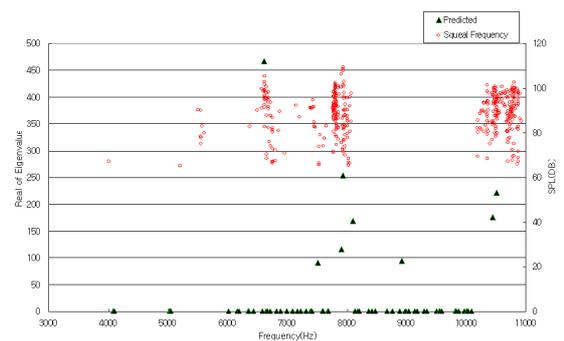
Fig.8 노이즈 다이노미터 테스트 데이터

고유진동수와 고유 모드를 계산 하는 경우는 마찰이 포함되지 않은 질량 및 강성행렬이 대칭으로 이루어져 있다. 이 경우에는 복소 고유치 해석을 할 수 없다. 하지만 질량 및 강성 행렬이 마찰계의 마찰의 영향을 받게 되면 마찰에 의한 영향을 고려하여 비대칭 행렬로 문제를 해결해야 한다.⁽⁸⁾⁽⁹⁾ 디스크와 패드사이의 두 물체의 접촉 하는 부분의 마찰력에 대한 영향을 고려하여 이미 완성된 모델에 복소 고유치 해석을 수행하여 실험에서 구한 스컬 노이즈 발생 주파수 대역과 ABAQUS를 이용한 해석 결과 값을 비교하였다.

Fig.10(a)와 같이 이상적인 편평한 패드를 적용한 경우와 Fig.10(b)와 같이 실제의 topography를 적용하여 복소 주파수 해석을 수행하여 구한 고유치의 실수부와 실험에서 구한 스컬 소음 주파수와의 상관관계를 나타내었다.



(a) Ideal Pad



(b) Realistic Pad(with topography)

Fig.10 Real part of eigenvalue and squeal frequency

5. 결 론

본 논문에서는 정적상태에서의 압력분포, 동적상태에서의 다양한 압력분포가 스켈 노이즈 해석에 어떠한 영향을 미치는지 연구했다. 일반적으로 기존의 유한요소모델은 접촉면은 부드럽고 편평하게 설계하여 왔지만 실제 모델은 각 모델의 특성에 따라 약간의 조도차이가 발생하게 된다. 본 연구에서는 스켈 노이즈에 영향을 미치는 패드의 조도를 측정하여 실제모델과 같은 모델링을 했을 때와 스켈 주파수와 이상적인 패드 모델과 실제 패드 모델을 적용한 경우의 해석과 노이즈다이내믹미터 시험을 통해서 비교 분석하였다. 그 결과 저주파수 대역에서는 크게 차이가 나타나지 않았지만, 고주파수 영역에서는 조도차이를 적용한 패드가 더 우수하게 나타남을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) Sinclair,D., Frictional Vibrations. Journal of Applied Mechanics,vol.22. ,June 1955
- (2) Basford,P.R. and Twiss,S.B., Properties of Friction Materials I-Experiments on Variables Affecting Noise. Transactions of the ASME, vol.99, Feb.1958
- (3) Basford,P.R. and Twiss,S.B., Properties of Friction Materials II-Experiments on Variables Affecting Noise. Transactions of the ASME, vol.99, Feb.1958
- (4) Liles,G.D.1989. Analysis of Disc Brake Squeal Using Finite Element Method. SAE Technical Paper 891150.
- (5) Mahajan,S.K., Y.K.Hu, and K.Zhang.1999. Vehicle Disc Brake Squeal Simulations and Experiences. SAE Technical Paper 1999-01-1738.
- (6) Samie,F., and D.C.Sheridan.1990. Contact Analysis for a Passenger Cars Disc Brakes. SAE Technical Paper 900005.
- (7) Abd Rahim Abu Baker, A New Prediction Method Methodology Dynamic Contact Pressure Distribution In a Disc Brake. Jurnal Teknologi, 45(A) Dis.2006:1-11
- (8) 유성우,1999, “브레이크계의 스켈 소음에 관한 연구”, 서울대학교 공학박사학위논문
- (9) 권성진, 김찬중, “저소음 브레이크 설계를 위한 스켈 노이즈 해석기법 연구”, 한국소음진동공학회 2006년 춘계 학술대회논문집