

마찰 곡선에 의한 불안정 브레이크 패드 모드 해석 Unstable Brake Pad Mode Due to Friction-velocity Slope

남 재 현* · 강 재 영†
Jaehyun Nam and Jaeyoung Kang

(Received August 24, 2012 ; Revised October 18, 2012 ; Accepted October 22, 2012)

Key Words : Brake Squeal(브레이크 소음), Friction Curve(마찰 곡선), Negative Damping(음의 댐핑)

ABSTRACT

The brake squeal propensity due to the friction-velocity curve is numerically investigated. The finite element models for the disc and pad are correlated with the modal test. In the friction-engaged system modeling, the friction function is linearized at the equilibrium. The damping term induced by friction-velocity slope is incorporated into the equations of motion. In the complex eigenvalue analysis, it is found that the pad shear mode is very sensitive to the friction curve. The results shows that the squeal propensity of the pad shear mode can be controlled by the design parameters such as pressure and stiffness.

1. 서 론

브레이크 제동 소음은 디스크와 패드 사이의 마찰에 의한 소음이며, 그 소음은 주파수 영역에 따라 저더, 그로운, 스킨로 나뉜다. 이중 가청 주파수 영역에서 가장 민감한 것이 바로 스킨 소음이다. 스킨 소음에 관한 연구는 다양한 방법으로 시행 되고 있다^(1,2). 브레이크 다이내모 시스템을 구축하여 직접 소음을 측정하거나 실차 시험에 의한 실험적인 방법과 Kang⁽³⁾에 의해 소개 되었듯이 이론적인 완전 해를 구하는 이론적 검증법, Nack⁽⁴⁾에 의한 FEM 복소수 고유치 해석 등 여러 방법으로 나뉜다. 브레이크 스킨은 다양한 소음 인자들로 인하여 복합적인 메커니즘을 갖기 때문에 하나의 검증법 만으로 근본적인 해결책을 제시 하기는 다소 미흡한 면이 있다.

따라서 제시된 검증법들의 복합적인 형태의 접근이 소음 인자를 연구하는 효율적인 방법이다.

최근 브레이크 스킨에 관한 연구를 보면, 신뢰성과 다양한 소음 인자들을 연구하기 위해 한 가지 검증법에 의한 결론이 아닌 다양하고 복합적인 형태의 접근으로 연구되고 있다. Kang⁽⁵⁾은 정교한 접촉모델 기반의 브레이크 모델을 사용하여 모달 해석 및 FEM을 통한 유한요소-수학적 모델을 제시하였고, Lee⁽⁶⁾ 등은 기여도 분석법을 통하여 FEM으로 스킨 소음을 예측하였다. 이와 같이 복합적인 연구를 통해 보다 신뢰성 높은 연구가 진행되고 있다.

Bajer^(7,8)은 마찰계수의 변화에 따른 FEM해석과 modal damping효과로 실수부(real part)를 안정화시킬 수 있음을 해석적으로 연구 하였다. Kang⁽⁹⁾은 이론적인 영향도 분석으로 음의 기울기는 브레이크 스킨 소음의 주요 메커니즘인 모드 연성과 더불어 중

† Corresponding Author ; Member, Division of Automotive & Mechanical Engineering, Kongju National University
E-mail : jkang@kongju.ac.kr
Tel : +82-41-521-9263

* Division of Automotive & Mechanical Engineering, Kongju National University

A part of this paper was presented at the KSAE 2012 Annual Conference

† Recommended by Editor Don Chool Lee

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

요한 인자임을 제시하였고, 브레이크 다이내모미터 실험⁽¹⁰⁾을 이용하여 저온에서 압력에 상관없이 음의 기울기를 가질 수 있음을 보였다. 또한 Ouyang 등⁽¹¹⁾은 마찰특성에 따라 변하는 진동모드의 불안정성을 연구하여 마찰 곡선의 기울기가 스컬 모드에 미치는 영향도를 분석하여 연관성을 제시하였다.

기존의 FEM 해석의 경우 일반적으로 모드연성에 관한 브레이크 스컬 메커니즘에 대해 연구되고 있다. 그러나 브레이크 스컬은 보다 다양한 복합적인 형태의 메커니즘을 가지고 있으며, 그 중 음의 기울기는 선행 연구된 문헌들⁽⁹⁻¹¹⁾에서 볼 수 있듯이 매우 중요한 인자 중 하나이다. 따라서 이 연구에서는 음의 기울기를 고려한 FEM복소수 고유치 해석을 통하여 기존의 단순한 FEM해석 보다 복합적인 형태의 해석과 음의 기울기가 존재 할 경우 나타나는 특정한 모드에 대해 연구하고자 한다.

2. 본 론

2.1 FEM 해석 모델

ANSYS의 QR damped 방법을 이용하여 복소수 고유치 해석을 수행하였다. 우선 원통좌표축 기준으로 각각 (r, θ, z) 방향의 변위벡터는 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$\mathbf{u} = [\phi_r] \mathbf{q} \tag{1}$$

$$\mathbf{v} = [\phi_\theta] \mathbf{q} \tag{2}$$

$$\mathbf{w} = [\phi_z] \mathbf{q} \tag{3}$$

여기서 $[\phi_r]$, $[\phi_\theta]$, $[\phi_z]$ 는 각각 (r, θ, z) 방향의 정규화된 모드형상 행렬로써(모드의 수 x 접촉 노드의 수) 사이즈를 갖는다. \mathbf{q} 는 modal coordinate 벡터이다. 모드 연성에 의한 마찰 접촉 브레이크 모델은 참고문헌⁽³⁾과 같이 비대칭 행렬 상태의 modal equation을 얻을 수 있다.

$$\ddot{\mathbf{q}} + ([\omega^2] + [K_{asym}]) \mathbf{q} = 0 \tag{4}$$

여기서 $[\omega^2]$ 는 단품 고유주파수 행렬이고, $[K_{asym}]$ 는 접촉에 의한 비대칭 강성행렬이다. 단, 위 식은 마찰계수가 상수이며, 저속이라는 가정하에 자이로스코픽(gyroscopic) 효과가 무시될 때 유효하다⁽⁵⁾.

만일 마찰계수를 미끄럼 속도에 따라 변하는 함수라고 하면 다음과 같이 평형상태에 대해 선형화할 수 있다. 이때 마찰곡선 기울기가 선형요소로 존재한다.

$$\mu = \mu_{eq} + \left(\frac{\partial \mu}{\partial v} \right)_{eq} \dot{v} + O(2) \tag{5}$$

여기서 첨자 eq 는 평형점을 의미하고 v 는 θ 방향의 변위이며, $O(2)$ 는 고차항으로 무시한다. 따라서, 마찰계수 기울기 항은 패드에 작용하는 정압(p_o)과 결합하여 다음과 같이 속도 항 $\dot{\mathbf{q}}$ 에 대응하는 선형 행렬을 만들어 낸다.

$$[S] = p_o \left(\frac{\partial \mu}{\partial v} \right)_{eq} [\phi_\theta] [\phi_\theta]^T \tag{6}$$

즉, 마찰계수의 속도에 대한 기울기 함수는 시스템 감쇠 특성에 중요한 역할을 한다. 따라서, 운동방정식에 식을 추가하면 다음과 같다.

$$\ddot{\mathbf{q}} + [S] \dot{\mathbf{q}} + ([\omega^2] + [K_{asym}]) \mathbf{q} = 0 \tag{7}$$

상기 운동방정식에 대한 고유치 해석을 수행하면 마찰곡선에 대한 스컬 영향도를 해석할 수 있다. 즉, 실수부(real part)가 양수인 스컬 모드를 찾아서 마찰곡선과의 연관성을 연구하고자 한다.

브레이크 스컬 해석을 수행하기 전에 3D CAD를 이용하여 형상을 모델링 한 후, 유한요소법에 따라

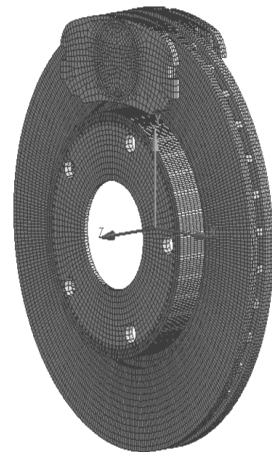


Fig. 1 Brake squeal FEM model

유한요소 모델을 제시하여야 한다. 모델링은 CATIA, Solid Works를 이용하여 역설계 하였고, 유한요소 모델은 Fig. 1과 같이 hyper mesh를 이용하여 구성하였다. 요소 타입은 Solid185를 사용하였고, 79956개의 요소와 103437의 노드로 해석을 수행하였다. 마찰재와 백플레이트 및 디스크는 접촉조건과 경계조건을 생성하여 연결하였다.

FEM복소수 고유치 해석에서 디스크의 완벽한 회전을 구현하기는 어려움이 있다. 따라서 디스크는 pseudo-rotation⁽¹²⁾상태이며, 패드는 백플레이트의 댐핑심이 없다는 가정하에서 실린더가 압력을 가하고 있는 것과 동일하게 적용하였다. 해석을 수행한 디스크

Table 1 Material table

	Material	Elastic modulus [E][GPa]	Density [ρ][kg/m ³]	Poisson's ratio[v]
Disc	Grey cast iron	120.2	6900	0.28
Back plate	Steel	200	7850	0.3
Friction	Organic	X: 2.95	1590	0.25
		Y: 2.95		
		Z: 0.35		

Table 2 Modal test of disc










Mode shape	FEM[Hz]	Hammering test[Hz]	Error[%]
	1152.0	1152	0
	2544.9	2560	0.6
	4030.3	4160	3.1
	5591.6	5760	2.9
	7208.2	7488	3.7
	8872.5	9280	4.4

Table 3 Modal test of pad

Mode shape	FEM[Hz]	Hammering test[Hz]	Error[%]
	2104	2112	0.38
	3072	3136	2.04
	5571	5568	0.54

브레이크 및 패드의 물성은 Table 1과 같고, damping은 고려하지 않고 해석 하였다.

2.2 단품 모델 충격 망치시험

전체 모델에 대한 브레이크 스컬 해석에 앞서 단품 모델에 대한 해석을 수행하였다. 단품 모델은 free-free 상태로 모달 해석을 수행하였으며, 충격망치 시험(hammering test)을 통하여 해석 모델과 상호관계(correlation)를 확인 하였다. 해석 모델의 정확성을 높이기 위하여 충격망치시험의 결과를 기준으로 FEM의 보정작업을 수행하였다.

디스크의 경우 회주철(grey cast iron)의 탄성계수(E) 범위는 62.1~162 GPa이다. 실험은 3축 가속도계(B&K4525-B)를 이용하였고, 브레이크 스컬의 주요 모드인 out-of-plane 모드를 기준으로 하여 보정작업을 실시하였다. 보정인자는 질량을 측정하여 밀도(ρ)를 기준으로 탄성계수(E) 120.2 GPa로 하여 Table 2와 같이 5% 이내의 오차 범위 안에서 해석을 수행하였다.

패드의 경우 마찰재와 백플레이트로 나뉜다. 이 논문에서 백플레이트는 댐핑심을 제거한 스틸(steel)로 가정하여 해석 하였으며, 마찰재의 경우는 복합소재로 직교 이방성의 물성을 가지고 있다. 직교 이방성에 따른 진동 연구는 Ayorinde 및 Lai에 의해 연구 된 사례가 있다^(13,14). 따라서 ANSYS를 통하여 직교 이방성의 물성(탄성계수)을 Table 1과 같이 적용하고, 밀도를 기준으로 각 방향의 탄성계수 및 전단 탄성계수를 보정 인자로 하여 3%이내의 오차 범위 안에서 해석을 수행하였다.

2.3 마찰계수가 상수일 때, 복소수 고유치 해석

음의 기울기를 통한 복소수 고유치 해석을 수행하기 전에 마찰계수가 상수 일 때 해석을 통하여 불안정 모드를 확인 하여 보았다. 마찰계수(μ)는 각각 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5로 일정하다고 가정한다. 60개의 모드를 추출하였고 0 Hz~12611 Hz까지 해석하였다. 복소수 고유치 해석 결과는 Fig. 2와 같다.

마찰계수가 상수 일 경우 불안정한 모드는 Fig. 2와 같이 한 주파수 대역에서 음과 양의 실수부(real part)가 쌍으로 존재하고 있는 것을 확인 할 수 있으며, 마찰계수가 증가하면 낮은 마찰계수에서 발생하지 않던 불안정성이 발생하게 된다.

‘B’(30,31) 구간에서의 각 마찰계수 별 실수부를 나타내 보면, Fig. 3과 같이 마찰계수가 0, 0.1일 때는 불안정성이 나타나지 않지만 마찰계수가 증가함에

따라 실수부도 증가하는 것을 확인 할 수 있다.

주파수(imaginary part)는 실수부와는 반대로 마찰계수의 증가에 따라 낮은 마찰계수에서는 분리되어 있던 모드가 마찰계수가 증가할수록 하나의 모드로 합쳐진다. 따라서 모드 연성에 의한 스킵 임을 확인 할 수 있으며, 모드 형상은 Fig. 4에서 보는 바와 같다.

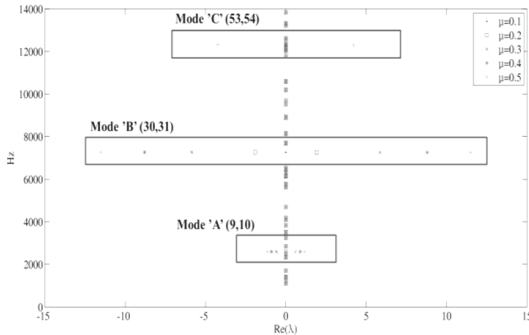


Fig. 2 Complex eigenvalue analysis(μ=constant)

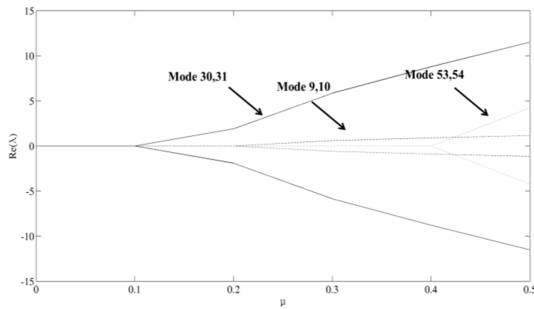


Fig. 3 Real part variation with respect to coefficient of friction(‘A=9,10), (B=30,31), (C=53,54)’ mode)

2.4 마찰계수가 음의 기울기를 가질 때, 복소수 고유치 해석

음의 기울기의 변화가 브레이크 FEM 해석에서 어떠한 영향을 미치는지 살펴보기 위하여 음의 기울기가 존재할 경우 FEM 해석을 수행하였다. Fig. 5에서 보듯이 회전속도($\Omega=10$ rad/s)에 상응하는 마찰계수는 0.3으로 고정되면서, 기울기만 0.1, 0.15, 0.2로 변화도록 설정하여 해석하였다. 만약 회전속도를 변화하면 불안정성의 영향도는 음의 기울기 및 회전속도가 되므로 기울기만을 변화 시켜 60개의 모드를 추출 하였고, 복소수 고유치 해석의 결과는 Fig. 6과 같다.

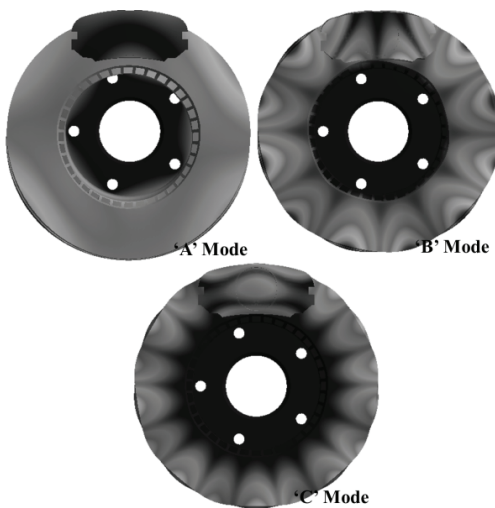


Fig. 4 Unstable modes due to mode coupling

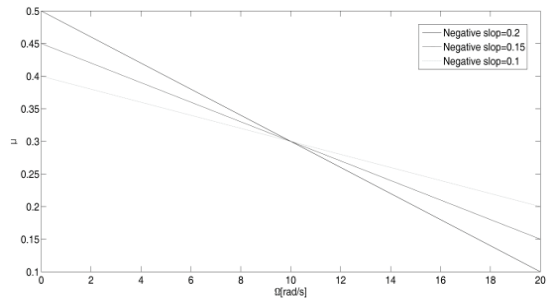


Fig. 5 Fiction-velocity curve

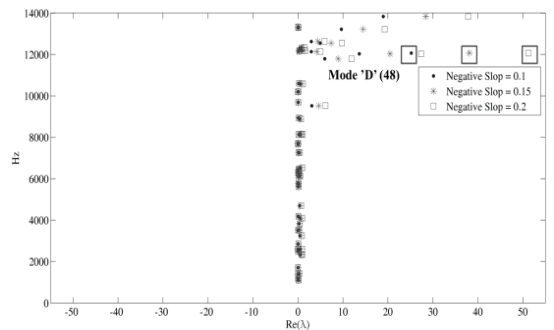
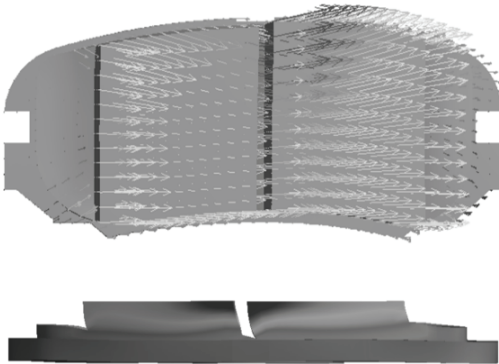


Fig. 6 Complex eigenvalue analysis(negative slop)



(a) System mode shape



(b) Pad mode shape

Fig. 7 Unstable pad shear mode

마찰계수가 음의 기울기를 가질 때, 각 주파수 별 실수부는 다양한 실수로 존재한다. 음의 기울기가 존재하면 Fig. 6의 ‘D’와 같이 특정한 모드에서 불안정성이 발생한다. 특히 ‘D’ 모드는 음의 기울기가 증가 할수록 불안정성이 매우 증가하는 것을 확인 하였다. ‘D’ 모드 형상을 확인 해 본 결과 Fig. 7과 같이 브레이크 패드의 회전 방향의 전단모드 임을 확인하였다. 음의 기울기에 매우 민감한 패드 전단 모드를 다음과 같은 설계 변수 해석을 통하여 좀 더 살펴보고자 한다.

2.5 패드 불안정 모드에 대한 설계 변수 해석(압력, 탄성계수 X,Y방향)

브레이크 패드 전단모드에 대해서 패드에 가해지는 압력의 변화가 불안정성에 어떠한 영향을 미치는 지 살펴보았다.

Fig. 8은 음의 기울기(0.2)를 가지고 있는 브레이크 시스템의 압력변화에 따른 복소수 해석의 결과로

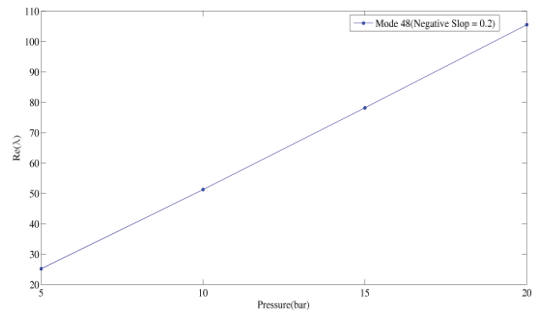


Fig. 8 Real part variation with respect to pressure(‘D’ mode)

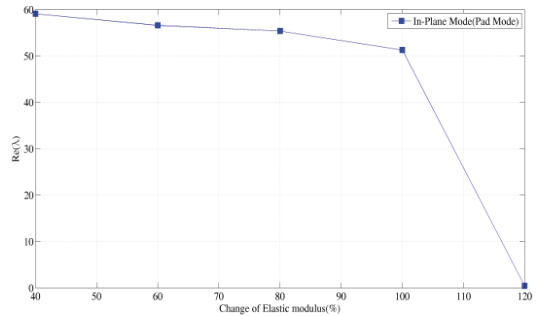


Fig. 9 Real part variation with respect to X,Y elastic modulus(‘D’ mode)

5 bar에서는 실수부가 26이지만 압력이 증가함에 따라 20 bar에서는 105의 실수부가 나타났다. 일반적으로 음의 기울기에 의한 시스템의 음의 댐핑 (negative damping)은 압력에 비례한다. 이 스켈 모델에서도 음의 댐핑은 압력에 비례하며 압력의 증가는 불안정성을 증폭시키는 인자임을 확인 하였다.

패드 전단모드가 회전에 민감한 모드이기 때문에 횡 방향(X,Y)의 직교 이방성 탄성계수를 보정하여 해당 모드의 스켈 영향도를 파악하고자 하였다. 이를 위해서 횡 방향(X,Y) 탄성계수를 기존 탄성계수의 40 %에서 20 %씩 증가시켜 120 %까지 해석 결과를 추출 하였다. Fig. 9의 결과를 보면 패드 전단 모드는 탄성계수가 100 %일 때, 51였던 실수부가 120 %일 때는 0에 가깝게 감소하였으며, 반대로 40 %일 때는 59로 증가하였다. 즉, 횡 방향(X,Y)의 탄성계수의 증가는 상대적으로 패드의 회전 방향 변형을 어렵게 만들어 48모드의 불안정성을 낮출 수 있음을 확인하였다.

3. 결 론

이 연구에서는 기존의 모드연성을 메커니즘으로 고려한 FEM해석과 함께 음의 기울기 또한 브레이크 스켈 메커니즘의 주요한 인자로 고려하여 FEM해석을 수행하였다. 음의 기울기가 존재할 경우 특정 불안정 모드를 확인하고, parameter study를 통해 불안정성에 민감한 요인을 연구하였다. 음의 기울기는 스켈 소음 해석에서 매우 민감한 인자이고, 꼭 고려해야 할 대상이다. 결론은 다음과 같다.

(1) 마찰계수가 상수 일 경우, 복소수 고유치 해석의 결과 모드 연성에 의한 스켈 소음이 발생하였으며, 마찰계수가 증가하면 불안정성도 증가하였다.

(2) 음의 기울기가 존재할 경우 마찰계수가 상수 일 때 존재하는 모드연성 외 특정한 모드인 패드 전단모드에서 불안정성이 증폭되었다.

(3) 음의 기울기가 증가할수록 패드 전단모드의 불안정성은 증가한다.

(4) 패드 전단모드의 불안정성은 압력과 비례하여 압력이 증가할수록 불안정성이 증가한다.

(5) 패드 전단모드의 횡 방향(X,Y) 탄성계수의 증가는 불안정성을 낮추는 역할을 할 수 있다.

후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2011-0025765).

참 고 문 헌

(1) Ghazaly, N., Mohammed, S. and Abd-El-Tawwab, A., 2012, Understanding Mode-coupling Mechanism of Brake Squeal Using Finite Element Analysis, *International Journal of Engineering Research and Application*, Vol. 2, No. 1, pp. 241~250.

(2) Kwon, S., Kim, M., Lee, B., Lee, D., Bae, C. and Kim, C., 2007, The DOE Based Robust Design to Reduce the Brake Squeal Noise, *Transactions of KSAE*, Vol. 15, No. 2, pp. 126~134.

(3) Kang, J., Krousgrill, C. M. and Sadeghi, F., 2008,

Dynamic Instability of a Thin Circular Plate with Friction Interface and Its Application to Disc Brake Squeal, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 316, No. 1-5, pp. 164~179.

(4) Nack, W., 2000, Brake Squeal Analysis by Finite Elements, *International Journal of Vehicle Design*, Vol. 23, No. 3-4, pp. 263~275.

(5) Kang, J., 2009, Squeal Analysis of Gyroscopic Disc Brake System based on Finite Element Method, *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 51, No. 4, pp. 284~294.

(6) Lee, J., Lim, H., Kim, H. and Beak, J., 2009, The Prediction of Brake Corner Module Squeal Noise Using Participation Factor Analysis, *Transaction of the Korean Society of Mechanical Engineers-A*, Vol. 33, No. 10, pp. 1074~1080.

(7) Bajer, A., Belskyl, V. and Zeng, L., 2003, Combining a Nonlinear Static Analysis and Complex Eigenvalue Extraction in Brake Squeal Simulation, 2003-01-3349, SAE, Warrendale, PA.

(8) Bajer, A., Belskyl, V. and Kung, S., 2004, The Influence of Friction-induced Damping and Nonlinear Effects on Brake Squeal Analysis, 2004-01-2794, SAE, Warrendale, PA.

(9) Kang, J., 2012, Effect of Friction Curve on Brake Squeal Propensity, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 22, No. 2, pp. 163~169.

(10) Kang, J., 2007, Brake Dynamometer Model Predicting Brake Torque Variation due to Disc Thickness Variation, *Journal of Automobile Engineering*, Vol. 221, No. 1, pp. 49~55.

(11) Ouyang, H. and Mottershead, J. E., 2001, A Bounded Region of Disc-brake Vibration Instability, *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 123, pp. 543~545.

(12) Kang, J., 2012, Finite Element Modeling for the Investigation of In-plane Modes and Damping Shims in Disc Brake Squeal, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 331, No. 9, pp. 2190~2202.

(13) Ayorinde, E. and Gibson, R., 1993, Elastic Constants of Orthotropic Composite Materials Using Plate Resonance Frequencies, *Classical Lamination Theory and an Optimized Three-mode Rayleigh*

Formulation, Composite Engineering, Vol. 3, No. 5, pp. 395~407.

(14) Lai, T. and Lau, T., 1993, Determination of Elastic Constants of a Generally Orthotropic Plate by Modal Analysis, The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis, Vol. 8, No. 1, pp. 15~33.



Jaehyun Nam received the B.S degree in the Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University in 2012. He is currently a graduate student of Kongju National University and one of the members in Dynamic Stability Lab. His research interest

is the simulation and experiment of disc brake squeal.



Jaeyoung Kang is an Assistant Professor in the Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University. He received his Ph.D degree in Mechanical Engineering from Purdue University in 2008. His research interests include friction noise, structural vibration and nonlinear dynamics.