

실험계획법을 이용한 전륜 디스크 브레이크 시스템의 로터형상 스퀴소음 저감 최적화

The Optimum Design of Rotor Shape in Front Disk Brake System for Squeal Noise Reduction using the DOE

이현영* · 조용구* · 아미누딘 빈 아부* · 이정윤*** · 오재응****

Hyunyoung Lee, Yonggoo Joe, Aminudin bin Abu, Jung-Youn Lee and Jae-Eung Oh

Key Words : 디스크 브레이크(Disk brake), Squeal Noise(스퀴소음), FEM(유한요소법), 실험계획법(DOE),
Complex Eigenvalue(복소고유치), Self-excited Vibration(자려진동), Mode Coupling(모드연성),

ABSTRACT

This paper deals with friction-induced vibration of disc brake system under constant friction coefficient. A linear, finite element model to represent the floating caliper disc brake system is proposed. The complex eigenvalues are used to investigate the dynamic stability and in order to verify simulations which are based on the FEM model, The comparison of experimental and analytical results shows a good agreement and the analysis indicates that mode coupling due to friction force and geometric instability is responsible for disc brake squeal. And the Front brake system reduced the squeal noise using design of experiment method(DOE). This helped to validate the FEM model and establish confidence in the simulation results. Also they may be useful during real disk brake model.

1. 서론

브레이크는 자동차의 안전과 성능에서 가장 중요한 요소로서 자동차가 발전함에 따라 제동력과 신뢰성에 많은 초점을 맞추어 왔다. 하지만 승용차의 소음 및 진동문제에 대한 일반인들의 인지도가 점점 증가하고 있어 자동차의 쾌적성, 정숙성에 대한 중요성이 점점 높아지고 있다. 특히 차량 제동시 브레이크에서 발생하는 소음은 제동 시 디스크와 패드의 접촉면 사이의 마찰로 인하여 자려진동이 발생하는데 이러한 진동으로 인하여 약 1kHz 에서 20kHz 의 높은 주파수 범위 내에서 발생하는 소음을 스퀴소음(Squeal Noise)이라고 한다.

R.T.SPurr⁽¹⁾는 마찰계수 μ 와 v 가 독립적일 때도 적용되며, μ 를 일정하게 놓았을지라도 디스크와 캘리퍼 사이에 위치한 패드의 기하학적인 형태에 따라서 진동이 유발될 수 있음을 발견한 "sprag-slip"이론을 내놓았다. M.R. North⁽²⁾은 브레이크 로터와 마찰패드 사이의

뒤따르는 힘(follower force)으로 결합되어 있다는 이론을 내놓았다. 이것은 각각의 접촉요소 (contact element)로 브레이크 패드와 로터 사이의 접촉을 모델링 함으로써 얻어진다. 이때부터 유한요소법이 사용됨으로써 Lagrange 방정식을 이용한 수학적 모델링이 가능해 졌다.

본 연구에서는 현재의 작동상태일 때의 기하학적 불안정성에 기인한 디스크 브레이크 스퀴의 해석을 유한요소법을 통해 확인하고, 실험과 타당성을 입증한 수학적 방법⁽⁴⁾의 결과를 비교 검토하고 실험계획법(DOE)을 이용하여 로터의 형상을 변경 시킴으로써 스퀴가 저감될 수 있는 로터의 형상모델을 제안하고자 한다.

2. 수학적 모델링

2.1 마찰 시 연성 브레이크 시스템 대한 운동 방정식

브레이크 시스템의 각 부분의 연결조건과 디스크 패드 사이의 접촉결합관계에 따라 결합하면 다음과 같은 커플링 모델을 얻을 수 있다.

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\} \quad (1)$$

식 (1)에서 $\{F\}$ 는 각 캘리퍼, 패드, 캐리어의

* 한양대학교 자동차공학부

*** 경기대학교 기계시스템공학부

**** 한양대학교 기계공학부

E-mail : jeoh@hanyang.ac.kr

Tel : (02) 2220-0452, Fax : (02) 2299-3153

연결조건에 의한 힘과, 디스크-패드의 마찰조건에 의한 힘이다. 디스크-패드의 마찰조건에 의한 힘을 제외한 나머지는 경계면의 노드들이 스프링으로 연결되어 있다면 평형방정식으로 표현 할 수 있다. 디스크-패드 부분은 마찰경계부의 각 노드들을 스프링으로 연결하고 그 스프링의 강성은 패드-로터간의 접촉강성계수로 놓는다. 여기서 마찰력 μ 를 상수로 간주하면 디스크와 패드는 디스크에 접선방향의 마찰력이므로 접촉부분에 대한 선형방정식이 된다. 위의 관계로 의해 힘 벡터를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\{F\} = [K_T]\{x\} \quad (2)$$

여기서 $[K_T]$ 는 각 요소간의 접촉강성행렬 (contact stiffness matrix)로 볼 수 있다. 이 행렬 $[K_T]$ 은 마찰조건으로 인해 비 대칭이다.

식(1)과 식(2)를 이용하여

$$[M]\{\ddot{x}\} + ([K] + [K_T])\{x\} = 0 \quad (3)$$

로 나타낼 수 있다. $[K_T]$ 가 비대칭 이므로 $([K] + [K_T])$ 역시 비대칭이다. 강성행렬의 비대칭일 경우 이 행렬의 고유치 또한 비대칭이므로 이 고유치들은 어느 부분에서는 복소값을 가질 수 있고 이때 불안정성이 나타난다.

마찰이 포함된 연성된 요소의 브레이크 시스템에 대한 운동 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} M_r & 0 & 0 \\ 0 & M_p & 0 \\ 0 & 0 & M_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_r \\ \ddot{x}_p \\ \ddot{x}_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{rr} & K_{rpN} + \mu K_{rpT} & K_{ro} \\ K_{rpN}^T + \mu K_{rpT} & K_{pp} & K_{po} \\ K_{ro}^T & K_{po}^T & K_{oo} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r \\ x_p \\ x_o \end{bmatrix} = 0 \quad (4)$$

여기서 첨자 r, p 그리고 o 는 로터, 패드, 그리고 그 밖의 브레이크 시스템 구성요소이다. 그리고 여기서 M_r, M_p , 그리고 M_o 는 로터, 패드, 그리고 그 외의 구성요소 대한 대칭 질량행렬이다. K_r, K_p , 그리고 K_o 는 로터, 패드, 그리고 그 외의 구성요소 대한 대칭 강성행렬이다. K_{rpN} 은 패드와 로터의 접촉면의 수직변위 구속력 강성행렬이다. 이것은 전형적으로 로터와 패드내부의 재료 강성보다 매우 크다. K_{rpT} 는 패드-로터 접촉면의 접선의 마찰력 강성행렬이다. 이것은 잠재적인 K_{rpN} 이다. μ 는 패드-로터 접촉면의 마찰계수이다. 이것은 미끄럼 속도에 의해 가정된다. 마찰계수는 대부분 이 인자에 의존한다. 식(4)는

감쇠가 없다고 가정한 식이다. 마찰조건에 의한 강성항이 0 이면 브레이크 시스템의 모드는 각각의 브레이크 구성요소의 자유조건 모드이다. 만약 마찰이 모델에 $\mu > 0$ 과 시스템의 모드가 추가된다면 불안정하게 되며 시스템의 안정성은 마찰계수에 의한 것이다. 스킵 현상은 브레이크 패드의 마모, 온도, 그리고 습도 같은 인자의 변화에 의한 것으로 말 할 수 있지만, 여기서는 μ 에 의한 기하학적 브레이크 시스템 안정성과 그로 인한 브레이크 스킵을 판별하는 것으로 한정 지었다.

3. 시뮬레이션

해석은 FEM 을 활용 하였으며 Lanczos 법이 고유치 추출을 위하여 사용되었다. 요소타입은 structural 타입의 육면체 요소를 사용하였다. Table 1.은 요소의 개수를 나타낸 것이다. Table2. 는 각 단품의 FRF 실험 결과와 FRF 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 가진점과 가속도계의 위치의 지정은 실험과 시뮬레이션 모두 동일한 조건에서 실시하였다. 각 구성품의 시뮬레이션 결과와 실험결과와의 기본 주파수 (Fundamental frequency)를 비교해본 결과 거의 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

3.1 모델 요소와 구속조건의 연결

시스템 모델은 브레이크 디스크의 볼트구멍과 와 캐리어 안의 볼트구멍으로 고정된다. 이것은 동적 자유도와 비구속된 정적 자유도가 브레이크 스킵에 조합되는 것을 제거하기 위한 것이다. 구성품간의 구속은 접촉에 해당하는 요소를 통하여 구현하였다. 패드와 캘리퍼의 접촉은 해당 접촉강성에 해당되는 스프링 요소를 통해 완성하였다.

Table 1. Elements number of the component model

Component	Elements
Caliper	3940
Carrier	1922
Pads	Lining Back plate
	1252 748
Piston	1069
Guide rod(pin)	1069
Rotor	13220
Total	23220

Table 2 Fundamental frequency of simulation & experiment

component	experiments	simulation
Caliper	2288 Hz	2280 Hz
Carrier	701.9 Hz	701.8 Hz
Pad component	2004 Hz	2010.4 Hz
Rotor	1096 Hz	1060 Hz

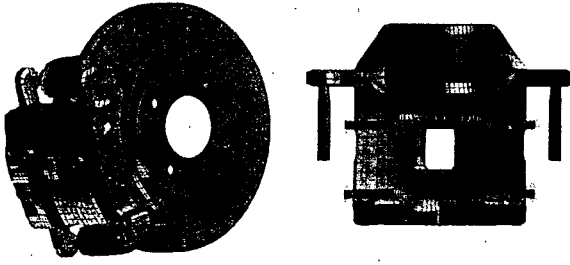


Fig. 1 Complete brake squeal full model & Caliper system

다른 한쪽 패드 또한 스프링 요소를 통해 캘리퍼 내에 있는 피스톤과 연결하였다. 캐리어와 패드의 구속하는 것 또한 영역과 방향에 적합하도록 하였다. 이것은 패드-캘리퍼의 접촉은 접촉면과 수직방향으로 제한됨을 의미한다. 캘리퍼는 차체에 있는 상태의 캘리퍼를 고려하기 위하여 미끄러짐을 구현할 수 있는 핀(pin) 구성품을 통해 캐리어와 접촉되어있다.

3.2 패드-로터 접촉조건

로터와 패드가 서로 접촉하는 부분의 노드 개수를 같게 하고, 패드와 로터의 표면 노드들 사이에 접촉속성을 부여하기 위하여 일렬로 정렬하였다. 패드와 로터의 접촉은 패드에서 브레이크 디스크를 일반적으로 사용되는 수직 스프링 요소로써 붙이는 것이 필요하다. 이 모든 요소들은 로터와 패드가 접촉되는 부분에서, 복소고유치 해석에 대한 마찰조건에 해당되는 요소를 부여할 수 있도록 하였다.

Table 3 Contact stiffness of component

Component	Contact stiffness(N/m)
Caliper - Carrier	Rigid, slide (Y-direction free)
Pad - Piston	2.08×10^5
Pad - carrier	7.56×10^{-2} (Y-direction free)
Pad-caliper finger	6.76×10^4
Rotor pads	1.5×10^{10}

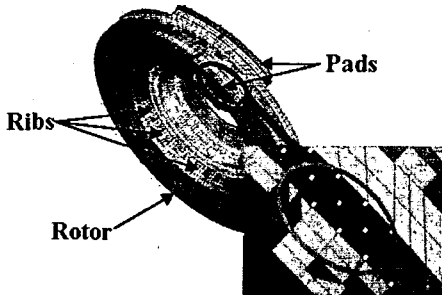


Fig. 2 Constraint of the rotor & pads section

4. 복소고유치 해석결과의 비교고찰

4.1 복소고유치 해석 결과

복소 모드 해석은 안정, 불안정 모드를 결정에 따르는 s-평면에서 허수축에 떨어져 극점(pole)을 생성한다. Fig. 5 는 FEM 복소 고유치 해석한 결과이다. 에서 13551Hz 를 제외한 4774, 9243, 14413Hz 는 로터의 면외방향에 대한 불안정 주파수 특성이다. 이 결과는 면외방향만을 고려한 수학적 해석법⁽⁴⁾의 복소고유치 결과와 일치하며 로터 다이내모 실험을 통한 스킬주파수와 일치한다. Table 4 는 각 방법의 불안정한 진동수를 비교하여 정리한 것이다.

Table 4 Comparison of experiment, theory and FEM

Experiment-al squeal frequencies (Hz)	Theoretical squeal frequencies (Hz)	FEM squeal frequencies (Hz)
4750	4699	4774
9550	10166	9243
-	12098	12551
14250	14415	14113

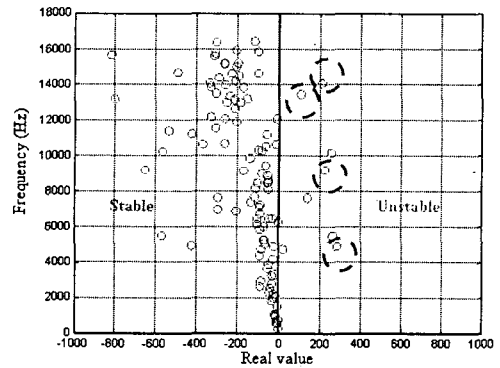


Fig. 5 complex eigenvalues of the Disk brake system at $\mu = 0.4$

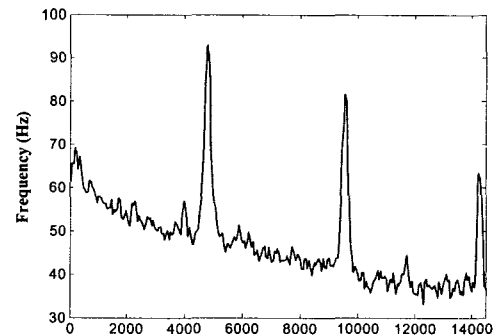


Fig. 6 Dynamometer test results (SPL) on front brake

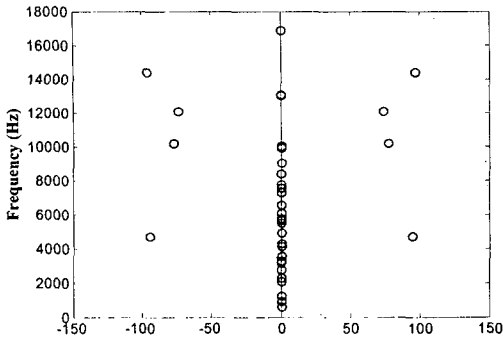


Fig. 7 A plot of the complex eigenvalues of the theoretical model at $\mu = 0.4$

FEM 시뮬레이션 결과는 수치해석과 실험에서 얻어진 불안정한 진동수의 결과를 비교하여 볼 때 13551Hz를 제외하곤 Table 4에서 보듯이 상당히 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

일반적으로 시뮬레이션 결과는 실험적인 결과보다 더 많은 불안정한 주파수가 나타난다. 패드와 디스크가 접촉할 때 디스크의 두 모드는 진동수가 증가하면서 서로 다른 진동수로 분리되고 마찰력과 같은 비보존력에 의해 각 모드들이 서로 연성되어 복소모드로 나타날 때 그 모드는 디스크 브레이크 시스템의 불안정한 거동을 일으키는 에너지의 전달이 야기될 수 있다. 이러한 모드 연성은 패드-로터의 접촉조건에서 각 단품의 고유진동수와 관계가 있으며 특히 Fig. 8에서 보는 바와 같이 Fig. 8(c)의 패드의 모드를 제외하곤 대부분 디스크의 진동수와 밀접한 관계가 있다.

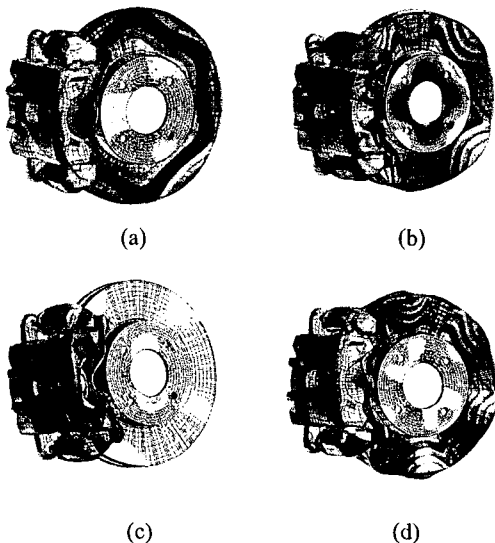


Fig. 8 Unstable out-of-plane mode shape at (a)4.74kHz, (b)9.24kHz, (c)12.55kHz, (d)14.11kHz

4.2 실험계획법 (Design of Experiment)

실험계획법은 효율적인 실험과 그 결과의 분석을 위해 사용하여 왔다. 최근에는 적은 수의 실험으로 여러가지 영향인자의 기여도를 평가하여 그 제품의 최적조건을 찾아냄으로써 비용절감과 개발주기를 단축할 수 있는 장점이 있어 차량의 소음 진동 저감에도 많이 이용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 브레이크 스킬노이즈에 큰 영향을 미치는 인자들을 택하여 실험계획법의 제어인자로 설정하고 복소고유치 해석을 통해 이를 최적화하여 스킬저감 형상을 제시 하였다. 브레이크 로터의 경우 디스크의 변형이 작을수록 스킬 억제성능에 유리한것으로 나타났다. 그러므로 브레이크 로터의 형상변경에 대한 인자를 선정하기 위하여 FRF 시뮬레이션을 이용하였고, 진동변위의 증감에 따른 스킬의 성능향상유무를 파악하였다. 그 결과 리브의 배열각도, 캡(cap)부의 두께는 작을수록 브레이크 스킬 억제에 유리하고, 디스크의 두께와 리브의 두께가 클 수록, 디스크와 캡(cap)부 사이의 홈이 깊을수록 스킬억제에 유리한 것으로 나타났다. 그러나 이 결과 자체만으로는 디스크의 형상을 임의로 결정할 수 있기에는 명확하지 못하기 때문에 직교배열표를 이용하여 설계변수에 대한 최적 형상을 결정 하였다.

Table 5에서 보는 바와 같이 로터의 파라미터 해석을 수행하였던 결과에 따라 그 중 제일 영향이 크게 작용한 4 가지 인자를 선정 하였다. 실험계획법은 열의 수와 동일한 대표적인 L_0 의 일부 실시법으로 실시하였다. 복소고유치의 해석의 경우, 재료의 물성치를 변화시키기에 따라 수행한 시뮬레이션 결과는 불안정 요소라 할 수 있는 전 주파수대에 모든 양의 실수부가 동일한 방향으로 변화하는 반면에, 형상변경을 통한 특성치는 양의 실수부의 증감이 주파수대에 따라 각각 다르게 나타나기 때문에 복소 고유치 전체를 기준으로 고려하는 데에는 문제가 있다.

따라서 실험과 수학적 방법으로 얻어낸 스킬발생 주파수를 관심 주파수로 선정하고 각각 Table 5 control factors for experimental design and their level

Level	A (Disk thickness)	B (Rib angle)	C (Groove depth)	D (Rib thickness)
-1	7 mm	0°	0 mm	4 mm
0	8 mm	8°	1.5 mm	6 mm
1	9 mm	16°	3 mm	8 mm

해당 주파수별로 실험계획법을 실시하였고, 주 효과(main effect)를 비교하여 가장 지배적인 인자와 수준을 선정하였다. 또한 시뮬레이션을 수행하여 구한 특성함수에 대한 분산분석(Analysis of Variance)을 각 모드마다 수행하였다. 주 효과 분석 그래프에서는 인자가 브레이크의 불안정성을 유발시키지 않을수록 적은 값을 나타낸다. Table 6의 대표적인 결과인 9000kHz의 불안정한 주파수를 토대로 디스크 스킵을 일으키지 않는 최적인자의 조합은 $[-1\ 1\ 0\ -1]$ = 디스크 두께 : 7mm, 리브 배열각도 : 16°, 홈 깊이 : 1.5mm, 리브두께 : 4mm로 산출되었다.

결과에서 디스크 두께가 얇을수록, 리브의 배열각도가 클수록 스킵발생 억제성능이 개선되었고, 리브 두께는 작을수록 개선되었으며, 홈 깊이의 증가는 스킵억제 설계변수에 대하여 영향을 미치지 못하였다. 로터의 FRF 시뮬레이션 결과에서 리브 배열 각도에 경우 각도가 클수록 진동변위는 커졌지만 복소고유치 해석에서의 스킵 억제성능에 대해서는 유리하게 나타났으므로 이는 반드시 브레이크 로터의 진동 변위가 적을수록 브레이크 스킵억제 성능에 유리하다는 이론에 상반되는 결과이다.

4.3 최적화 확인 시뮬레이션

실험계획법 결과에서 얻은 최적값에 대하여 브레이크 시스템의 검증해석을 수행 하였다. 최적모델에서의 불안정한 실수부의 저감성능은 각 실험계획법에 의한 실험횟수의 결과와 비교하여 볼 때 가장 좋은 스킵 억제 성능을 나타내었다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 9, 1.2, 1.4kHz 영역의 불안정성은 사라졌으며 0.9, 4, 1.1kHz에서 불안정성이 발견 되었으나 최적화 전의 복소 고유치 해석의 해당 실수값 보다 현저히 줄어든 것을 확인할 수가 있었다. 따라서 로터 다이내모 실험을 통해 확인된 스킵 주파수 4, 9, 1.2, 1.4kHz의 불안정한 진동수를 FEM과 직교배열표 최적화 기법을 이용하여 저감시킬 수 있었다.

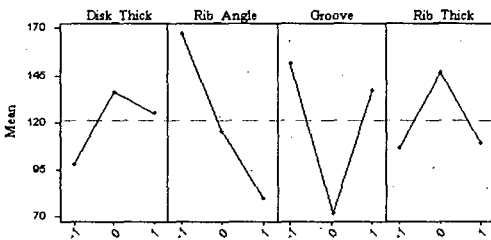


Fig. 9 Main effects plot for means of 9000Hz

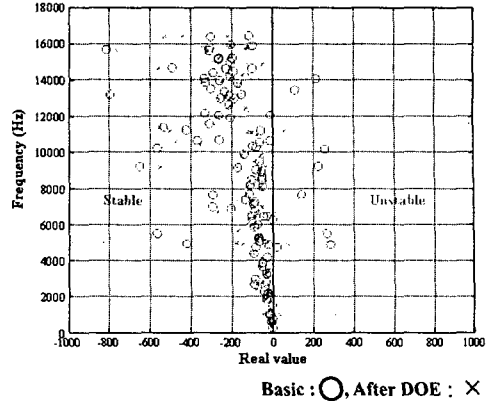


Fig. 10 complex eigenvalues of the Disk brake using Design optimization

5. 결론

디스크 브레이크 스킵 소음을 해석하기 위해 유한요소 Full 모델을 구성하였고 복소고유치 해석이 수행되었다. 브레이크 다이나모미터를 이용한 실차실험과 수치해석 결과를 비교검토 하였다. 또한 직교배열표를 이용하여 로터의 스킵 저감 성능을 향상시킬 수 있는 최적형상을 제시하였으며, 이에 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 유한요소 모델을 통한 복소고유치 해석결과는 실험과 수치해석에 나타난 스킵발생 진동수를 포함하고 있었으며 스킵발생영역의 모드형상을 확인한 결과 디스크 로터의 면외변위의 영향이 매우 큰 것으로 나타났다.
- 2) 최적화를 수행한 결과 로터의 진동 변형이 적으면 적을수록 스킵의 발생을 반드시 억제하는 것이 아닌 것으로 판명되었다. 원인은 디스크 브레이크 로터가 패드와 구성품과 결합되어 상호간 모드 연성작용이 발생하는 것과 관련이 있다고 판단된다.

참고문헌

- (1) H.R. Mills, "Brake Squeal", Institution of Automobile Engineers, Technical Report 9000B, 1938
- (2) R.T. Spurr, A of brake squeal, Proceedings of the Automobile Division Mechanical Engineers 1961-1962 pp. 33-52
- (3) M.R. North, "Disc brake squeal" Braking of Road Vehicles Publications limited, London, England, 1976, pp.169-176
- (4) 오재웅, 신기홍, 조용구 등 "마찰기인 접촉 강성을 가지는 2-자유도계 면외 방향 진동 시스템의 비선형 안정성 해석" 한국소음진동공학회 논문집 pp. 259-265
- (5) 오재웅, 차병규, 조용구 "분포매개변수를 이용한 디스크 브레이크의 마찰기인 불안정성 해석" 한국소음진동공학회논문집 pp. 702-708