

## 디스크 런아웃에 기인한 브레이크의 저더 진동

## Brake Judder due to Disc Run-out

신범식\*·최연선†

Bum-Sik Shin and Yeon-Sun Choi

Key Words : Judder(저더), Run-out(런아웃), Disc Brake(디스크 브레이크)

## ABSTRACT

Brake judder of an automotive vehicle is defined as an abnormal vibration of low frequency during braking. Under the assumption that judder occurs due to disc run-out and is a resonance phenomenon with a specific parts of the automobile, computational simulations using SAMCEF software were performed in this paper. The results show that the stabilizer of the car is a possible part which makes the judder vibration due to resonance. And initial braking velocity, the magnitude of run-out, and the friction coefficient between disk and pad are the influential factors to the brake judder.

## 1. 서 론

자동차의 브레이크 장치는 차량의 제동 시 필수적인 요소이다. 오늘날 자동차의 고급화와 수요자의 요구로 승용차 부분에서는 디스크 타입의 브레이크의 장착이 일반화 되고 있다. 이러한 대중화로 디스크 브레이크의 진동 및 소음이 차량에 대한 소비자의 제품 만족도를 결정하는 중요 요소 중 하나가 되었다.

디스크 브레이크에서 발생하는 진동 및 소음에는 스킨(squeal) 소음, 저더(Judder) 진동, 그로안(Groan) 소음, 몬(Moan) 소음 등 여러 가지 종류가 있다. 이중 저더 진동은 제동장치에서 기인하는 1-100 Hz 주파수를 갖는 이상 진동 현상으로 제동장치 작동 시 디스크의 런아웃(Run-out)과 두께 변화로 인하여 디스크의 마찰면에 작용하는 패드의 압력 변화가 일어나며, 이로 인하여 제동 토크가 불균일하게 되어 차량에서 발생하는 이상 떨림 현상이다.

저더에 관련된 연구로 황인진(1)은 맥퍼슨 타입의 샤시코너 모듈을 대상으로 하는 연구에서 현가장치의 전후, 좌우 모드

가 저더의 주요 원인이라고 했고, 부쉬의 전후, 좌우 강성을 보강하면 해결할 수 있다고 했다. 조호준(2)은 디스크에 열섬이 발생할 때 저더가 발생하고, 열섬은 특정 모드에서 발생한다고 하였다. 열섬에 의한 디스크의 변형으로 인한 1/2f의 분수조화 성분이 발생한다고 했다. 신동철(3)은 잦은 제동에 의한 마찰열이 디스크의 열변형으로 인한 코닝(coning)현상을 일으켜 제동 시 저더를 일으킨다고 했다. 윤승원(4)은 열변형으로 인한 런아웃 및 DTV로 인하여 마찰면에서 점착-미끄러짐 현상(Stick-slip)이나 강체의 순간적인 접촉에 의한 햄머링(hammering) 효과로 저더가 발생한다고 하였다. 이때 발생 주파수는 디스크 원주 1회전에 2번 진동이 발생한다고 하였다. 조형욱(5)은 저더의 발생 원인을 자동차의 클러치 표면의 DTV가 불안정성을 일으켜 저더를 발생시킨다고 하였다. 이상과 같이 저더에 대한 원인은 연구자에 따라 각기 다른 견해를 보이고 있다.

본 논문에서는 브레이크 저더가 디스크 런아웃에 기인한다는 가정하에 상용해석 프로그램인 SAMCEF(6)를 이용하여 저더 진동 현상을 수치적으로 재현하고, 저더가 차량의 특정 요소 부품과의 공진을 유발 가능성 및 초기 제동속도, 런아웃 크기, 마찰계수 등 브레이크 설계변수와의 영향을 검토하였다.

† 책임저자, 성균관대학교 기계공학부  
E-mail : yschoi@yurim.skku.ac.kr  
Tel: (031)290-7440, Fax : (031)290-5849

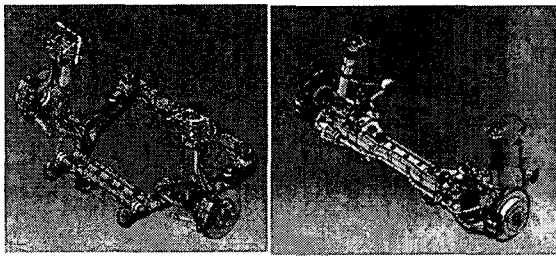
\* 정회원, 성균관대학교 기계공학부 대학원

## 2. 전산 시뮬레이션

## 2.1 유한 요소 모델 생성

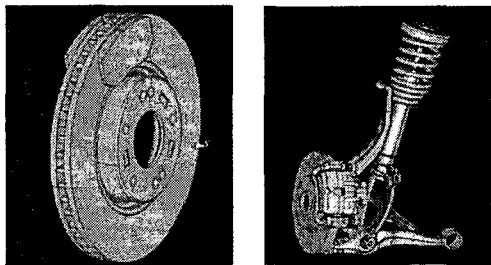
저더 해석 모델 생성을 위하여 Fig. 2.1과 같은 대상 차

량의 1/2 차량 3차원 CATIA 파일로부터 Fig. 2.2의 SAMCEF 해석 모델을 만들었다. Fig. 2.2의 (a)는 1/4차량 모델, (b)는 디스크-패드 접촉 모델, (c), (d)는 1/2 차량 모델로서 각각 전방 차량 모듈과 후방 차량 모듈을 나타낸다. 본 연구에서는 모드해석 시 1/2차량 모듈 및 1/4차량 모듈을 유연체(flexible body) 모델링하여 모드해석을 통한 고유주파수 성분을 분석하고, 디스크-패드 모델에서 발생하는 주파수를 비교 분석하여 저더 발생 여부를 판단하였다. 또한 작동상황 시뮬레이션에서는 해석 시간 및 효율을 고려하여 디스크와 패드를 제외한 구성 요소는 강체(rigid body)로 모델링하여 해석을 수행하였다. 현가장치의 모델링을 위해 SAMCEF에 Fig. 2.3와 같이 반영하였고, 마찰 특성은 Fig. 2.4와 같이 반영하였다. 본 해석에서 사용된 메쉬(mesh)는 사면체(tetrahedron)이고, 전체 메쉬의 형성 방법은 Delaunay-Voronoi 형태를 사용하였다. 메쉬 크기는 각 부품에 따라 평균 5 mm 간극의 크기로 하였다.

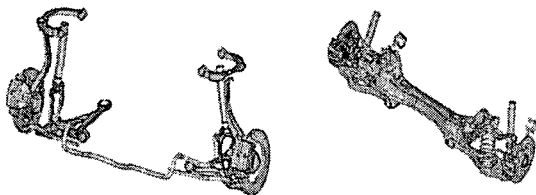


(a) Front (b) Rear

Fig. 2.1 CATIA 1/2 car model

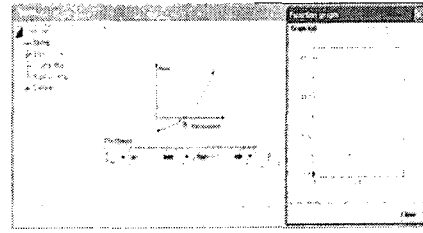


(a) Disc-pad model (b) Quarter car model

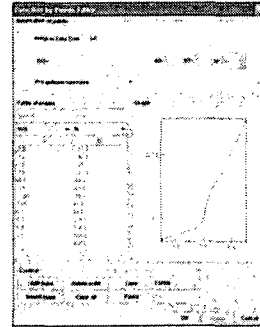


(c) 1/2 model(rear) (d) 1/2 model(rear)

Fig. 2.2 SAMCEF model



(a) Spring



(b) Damper

Fig. 2.3 SAMCEF window(Damping and stiffness coefficient)

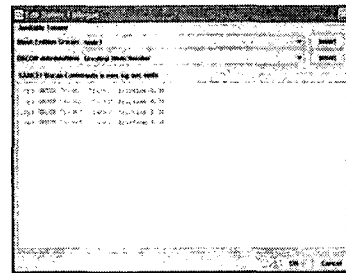


Fig. 2.4 SAMCEF window(friction coefficient)

## 2.2 모드 해석

### (1) 부품 모드 해석

전후방 스테빌라이저바(stabilizer bar)의 모드해석을 수행하였다. 스테빌라이저바는 좌우 현가장치의 뒤틀림 현상을 막아주어 주행 안정성을 높여주는 장치이다. 전방 스테빌라이저바의 모드해석 결과 Fig. 2.5의 모드 형상을 확인할 수 있으며 고유진동수는 Table 2.1에 표시한 바와 같이 1차 주파수가 68 Hz, 2차 주파수가 146 Hz로 저더 진동의 주파수 영역과 조금 차이를 보이거나 제동 시 발생하는 진동의 전달 경로로서 관심 부품에 해당한다.

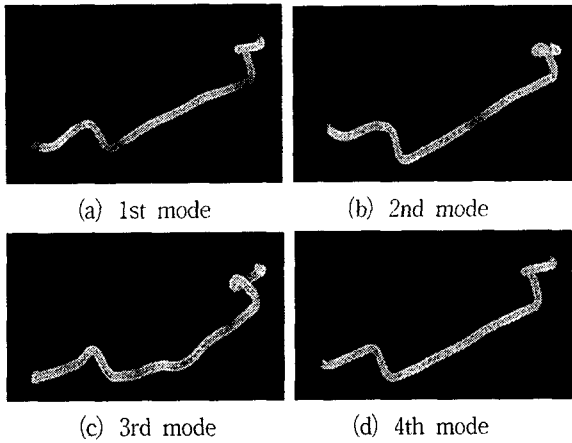


Fig. 2.5 Mode shapes of the front stabilizer bar

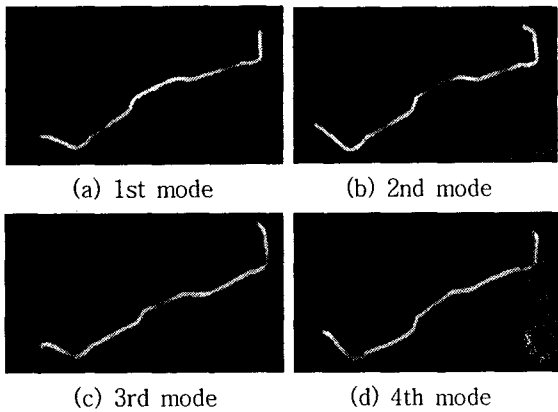


Fig. 2.6 Mode shapes of the rear stabilizer bar

Table 2.1 Natural frequencies of the model

(Hz)

	Front stabilizer bar	Rear stabilizer bar
1st mode	68	37
2nd mode	146	42
3rd mode	150	88
4th mode	103	93

후방 스테빌라이저바의 모드해석 결과 Fig. 2.6의 모드 형상을 확인할 수 있으며 고유진동수는 Table 2.1에서 보듯이 1차 주파수가 37 Hz, 2차 주파수가 42 Hz로 저더 진동의 주파수 영역과 유사 영역을 갖고 있음을 확인할 수 있다. 전방 스테빌라이저바와 마찬가지로 제동 시 진동의 전파 경로가 됨으로 관심 부품에 해당한다.

(2) 모델 모드 해석

차량 모델의 모드 형상과 고유진동수를 파악하기 위하여 차량 모델에 대한 모드해석을 수행하였다. 차량 모드해석에는 전방 모델의 1/4, 1/2 모델을 사용하였다. 해석 결과 Fig. 2.7, Fig. 2.8과 같은 모드 형상을 확인할 수 있었다. 또한 각각의 고유진동수는 Table 2.2와 같다. 해석 결과 관심 영역인 100 Hz 미만의 고유진동수가 존재하였고, 1/2 차량 모델의 1차 모드, 2차 모드, 3차 모드, 1/4 차량의 1차 모드의 고유진동수가 50 Hz 미만을 갖고 있다는 것을 확인할 수 있었다. 1/2차량 모델의 경우 스테빌라이저바의 영향에 의한 모드 형상을 확인할 수 있었다. 고유진동수가 스테빌라이저바와 차이를 보이는 것은 타 부품과의 결합에 의한 모드 발생에 그 원인이 있다.

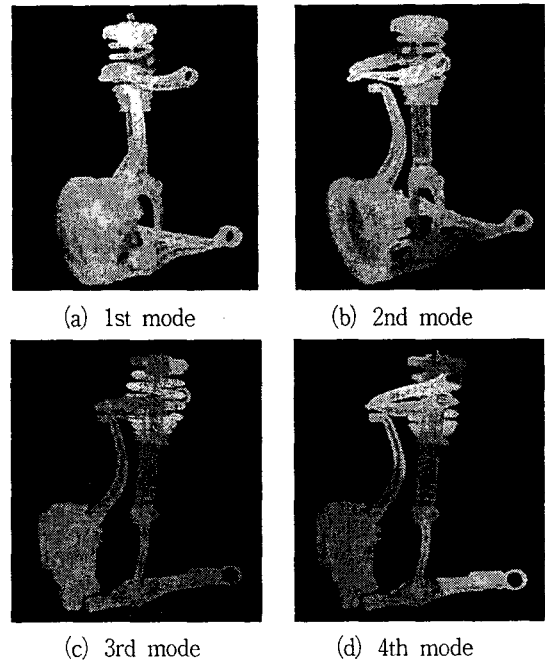
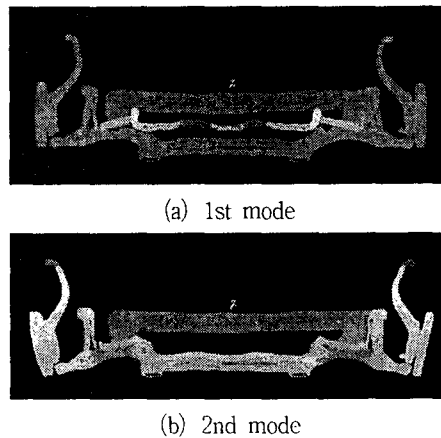
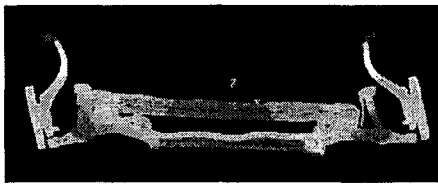
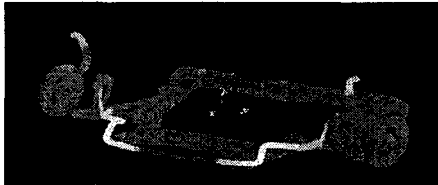


Fig. 2.7 Mode shapes of the 1/4 car model





(c) 3rd mode



(d) 4th mode

Fig. 2.8 Mode shapes of the 1/2 car model (front)

Table 2.2 Natural frequencies of the model

	Natural frequency of 1/4 car	Natural frequency of 1/2 car
1st mode	28	18
2nd mode	61	37
3rd mode	92	46
4th mode	103	55

(Hz)

### 2.3 작동 영역 해석

차량 모델의 특성을 파악하기 위하여 1/2 차량모델의 작동 영역 해석을 수행하였다. 해석 조건은 Fig. 2.9와 같이 디스크의 속도를 변화시킨 후 패드와 마찰시켜 변위 응답을 받았다. 디스크와 패드의 마찰계수는 0.38로 설정하였다. 해석 결과 Fig. 2.10(a)와 같이 시간 영역에서는 발생 진동의 경향을 확인할 수 있으며, Fig. 2.10(b)에서 확인할 수 있듯이 주파수 영역에서 약 33 Hz의 응답 결과를 얻을 수 있었다. 해석 결과 제동 시 저더 진동의 가능성을 확인할 수 있었다.

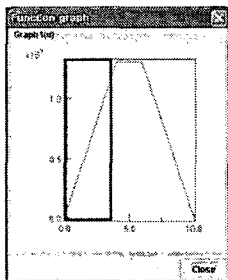
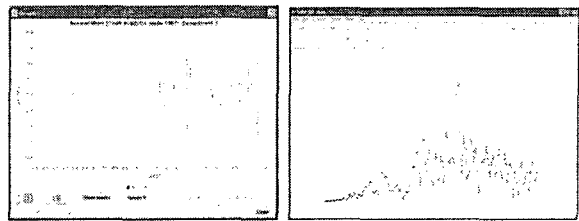


Fig. 2.9 Time response of the disc



(a) Time response

(b) Frequency response

Fig. 2.10 Responses of the 1/2 model

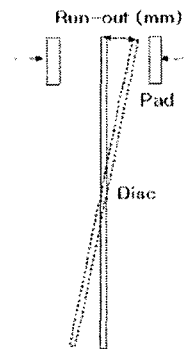
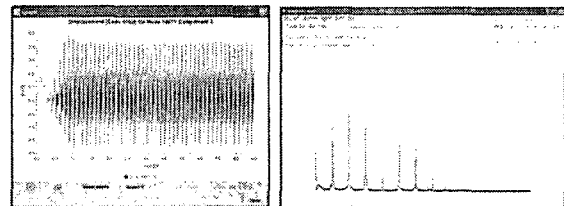
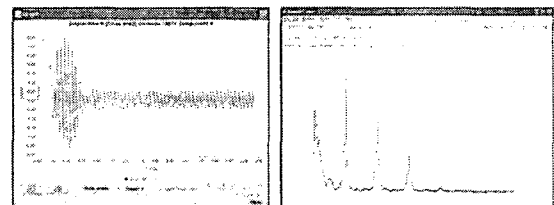


Fig. 2.11 Disc run-out

1/2 차량 모델의 런아웃에 의한 발생주파수를 파악하기 위하여 디스크에 런아웃을 주어 해석을 수행하였다. 런아웃은 Fig. 2.1과 같이 디스크에 경사각을 주어 발생시켰으며 크기는 디스크의 가장자리의 최대 변위량을 기준으로 하였다. 런아웃의 크기는 0.01 mm를 주어 해석을 수행하였다. 디스크 런아웃 모델은 디스크의 속도를 500 RPM, 1000 RPM으로 하여 해석하였다. 해석 결과는 Fig. 2.12와 같다.



(a) 500 RPM



(b) 1000 RPM

Fig. 2.12 Run-out responses of the 1/2 model

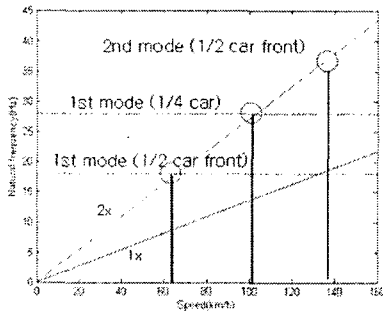


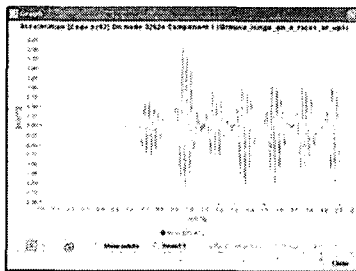
Fig. 2.13 Comparison of natural frequencies and run-out responses

결과에서 확인할 수 있듯이 디스크의 런아웃에 의한 제동 응답을 확인할 수 있었으며 차량에 가진되는 주파수는 회전 주파수와 회전주파수의 배수 성분으로 이루어져 있음을 확인할 수 있다. 결과를 바탕으로 모드해석 결과와 비교하면 Fig. 2.13와 같으며 Fig. 2.12에서 확인하는 발생 주파수가 1/2 모델의 2차 주파수와 가진 주파수의 2배수 성분과의 공진에서 발생함을 알 수 있다. 회전주파수의 2배수 성분은 런아웃에서 기인한다.[4]

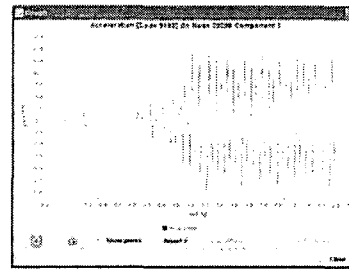
### 3. 요인별 영향 해석

#### 3.1 초기 제동 속도

요인별 영향도 해석을 하기 위하여 Fig. 2.2(a)와 같이 디스크-패드 모델을 생성하였다. 모델은 런아웃, 마찰계수의 영향도 관점에서 패드가 접촉하는 부분만을 모델링 하였으며 모델에서 변경 가능한 경계조건은 런아웃의 크기, 초기 제동 속도, 마찰계수이다. 초기 제동 속도 영향도를 분석하기 위하여 모델의 해석 조건은 디스크의 런아웃을 고정된 상태에서 초기 제동속도인 디스크의 속도만을 변경시켜 디스크 표면의 가속도 응답을 획득하였다. 해석 결과 Fig. 3.1과 같이 응답의 주기는 속도가 빨라짐에 따라 커지고, 응답의 크기 또한 속도가 커짐에 따라 커짐을 확인할 수 있다. 초기 제동속도가 빠름에 따라 같은 런아웃에서 가진 크기가 결정됨을 알 수 있다.



(a) 300 RPM

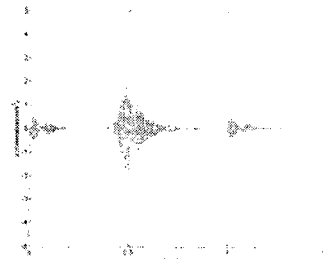


(b) 1000 RPM

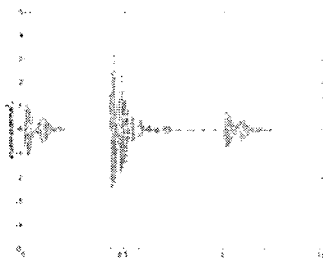
Fig. 3.1 Time response of disc

#### 3.2 Run-out 크기

런아웃 크기에 대한 영향도를 해석하기 위하여 디스크와 패드 모델에 대하여 해석을 수행하였다. 해석 조건은 Table 3.1과 같이 런아웃 디스크와 패드의 마찰계수 및 디스크의 초기 제동속도를 고정하고 디스크의 런아웃의 크기만 변경하여 해석하였다. 해석 결과 Fig. 3.2에서 확인할 수 있듯이 런아웃 크기가 커짐에 따라 응답의 크기가 커짐을 확인할 수 있다.



(a) Run-out : 0.02 mm



(b) Run-out : 0.3 mm

Fig. 3.2 Responses of the disc-pad model

Table 3.1 Analysis conditions of disc-pad model

Variable	condition
Friction coefficient	0.38
Run-out	0.02 mm - 0.3 mm
Disc speed	1000 RPM

### 3.2 마찰계수

마찰계수의 영향도를 해석하기 위하여 디스크-패드 모델을 해석하였다. 해석 조건은 마찰계수를 0.2, 0.4로 변화시켜 디스크의 표면에서 응답을 받았으며, 이때 초기 제동속도는 300 RPM으로 설정하였으며, 런아웃의 크기는 0.001 mm로 고정하였다. 해석 결과 Fig. 3.3에서 확인할 수 있듯이 마찰계수가 증가함에 따라 응답의 크기가 증가함을 알 수 있다.

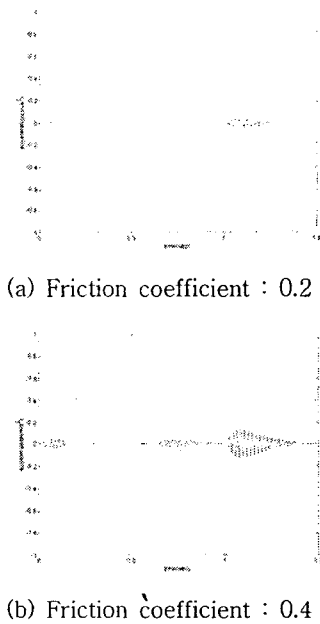


Fig. 3.3 Responses of the disc-pad model

### 4. 결론

본 논문에서는 전산해석을 통하여 브레이크의 저더 진동 현상을 해석하였다. 해석 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 모드해석 결과 100 Hz 미만의 고유진동수에 영향을 미치는 부품인 스테빌라이저바이다.
- 2) 디스크의 런아웃은 디스크 브레이크 제동 시 회전주파수와 회전주파수의 배수 성분의 가진을 유발하며, 모드해석 결과와 비교 시, 초기 제동속도에 따라 모듈과 공진을 일으킨다.
- 3) 디스크의 런아웃의 크기가 커질수록, 마찰계수의 크기가 커질수록, 초기 제동속도가 높음에 따라 진동의 크기가 커진다.

전산해석을 통하여 브레이크의 저더 진동에 대한 해석 연구를 수행한 결과 브레이크 저더 진동에 대한 주요 지배 요인을 찾을 수 있었고 그 요인별 응답과 영향을 파악할 수 있었다.

### 후 기

본 연구는 2005 산자부 지역산업기술개발사업의 지원을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- (1) 황인진, 박경진, "브레이크 저더 개선을 위한 시스템 모드분석 및 민감도해석," Transactions of KSAE, Vol.13, No. 6, pp.142-153, 2005.
- (2) 조호준, 김명구, 맹주원, 조종두, "디스크 브레이크에서 저더 현상을 발생시키는 원인 해석," 한국자동차공학회, 추계학술대회 논문집, pp. 1056-1061, 2005.
- (3) 신동철, 김택조, 지태수, 김광윤, "BRAKE JUDDER 개선을 위한 BRAKE DISC 최적 설계 기법 연구," 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집, pp. 905-912, 2000.
- (4) 윤승원, 한만철, "브레이크 디스크의 런아웃과 두께 변화에 의한 이상 떨림 현상에 관한 연구," 한국자동차공학회 논문집, 제7권, 제2호, pp. 378-386, 1999.
- (5) 조형욱, 김동림, 한관수, 조종두, "자동차용 클러치에서 저더 현상에 대한 실험 및 수치적 연구," 한국자동차공학회 구조강도, 리사이클, 생산기술, 재료, SAFETY부문 학술강연 논문집, pp. 40-46, 2000.
- (6) Samcef field. SAMTECH. 2002.
- (7) Kazuhiro Doi, Takahiro Mibe, Hiromichi Matsui, Tadashi Tamasho, Hiroyuki Nakanishi. "Brake judder reduction technology brake design technique including friction material formulation," JSAE Review 21, 497-502. 2000.