

차량진동 및 Rotor 내구특성을 고려한 Brake System 의 최적설계

김봉수 * · 김희열 ** · 김강욱 ** · 손영균 *** · 이동근 **** · 박관흠 *

Optimal Design of Brake System considering Vehicle Vibration and Durability of Rotor

B. S. Kim, H. Y. Kim, K. W. Kim, Y. K. Son, D. G. Lee, K. H. Park

Key Words : BTV(Brake Torque Variation), SRO(Side-face Runout), DTV(Disk Thickness Variation), BCM(브레이크 코너모듈), CBS(Conventional Brake System), Brake Rotor(브레이크 로터), Disk Brake(디스크 브레이크), Cold Judder(콜드저더), Hot Judder(핫저더), Thermal Load(열하중)

Abstract

Brake-induced vibrations of a vehicle such as brake judder are determined by the excitation of brake torque variations and by their transfer to the driver's contact points via suspension, body and steering system. The formation of brake torque variation is mainly determined by static and dynamic disk thickness variations. The vibration transfer from the excitation by brake torque variation to the perception by the driver depends on the kinematic and dynamic behaviour of the components in the transfer path. Optimization of the judder performance can be achieved either by minimizing the excitation or by reduction of the judder sensitivity of the vehicle. In this paper, the optimization process of a front rotor is suggested to reduce brake judder considering the cooling performance of the rotor, the judder sensitivity of the vehicle and durability of the rotor.

1. 서 론

자동차 엔진의 고출력화 및 고속화에 따라 BCM (Brake Corner Module) 성능의 중요성이 증가하고 있으며, 자동차 Maker 는 우수한 성능의 CBS (Conventional Brake System) 및 ABS 등의 적용으로 운전자의 안전을 도모하고 있다.

기본적인 BCM 의 성능향상을 위한 많은 연구들이 단품 또는 모듈 Supplier 에 의하여 이루어 지고

있으며, 완성차 Maker 들은 이러한 BCM 이 차량에 탑재되었을 때의 문제점을 차량의 종합적인 측면에서 집중적으로 연구하게 된다. 기본적인 제동 성능 검토와 더불어 이루어지는 가장 일반적인 검토항목은 차량진동, 소음 및 내구등이다. BCM 에 의한 차량진동은 차량의 동특성과 밀접한 관계가 있으며, Groan 이나 Squeal 과 같은 소음은 문제 주파수 영역에 따라 차량동특성의 관련도가 다르게 된다. BCM 내구성능은 BCM 자체의 특성과 차량특성의 연관관계속에서 결정된다.

BCM 에 의한 대표적인 차량진동현상중의 하나는 Judder 이다. Judder 는 제동중에 스티어링 휠의 떨림이나, 차체진동 또는 Pedal Pulsation 등으로 나타나는데, 프런트 브레이크 시스템이나 리어 브레이크 시스템에서 발생하며, 원인에 따라 Hot Judder 와 Cold Judder 로 나누어지고 각각의 원인은 다음과 같다.

* 회원, 현대자동차 선행개발센터
 ** 현대자동차 남양연구소
 *** 현대자동차 울산연구소
 **** 현대자동차 상용연구소

• Cold Judder

- Dimension 불량
- 초기 제품의 가공불량
- 주행에 의한 이상 마모
- 소재 불균일
- 이물질 유입에 의한 이상 마모

• Hot Judder

- 로터와 패드의 마찰에 의한 열 발생
- 로터 크기, 마찰재, Vent 구조, 재질등 방열성능
- 차량 중량, 운행패턴등의 요소 영향.

Cold Judder 는 초기 제품상태나 소재등의 영향을 받으며, 마찰재와 로터간의 Material Transfer 등이 원인이 된다. Hot Judder 의 주원인은 로터와 패드의 마찰열에 기인한 로터의 Dynamic DTV (Disk Thickness Variation) 이다. 제동마찰열에 의해 Disk 마찰면에 발생하는 Heat Spot 또한 마찰력의 변화를 유발하여 Judder 의 원인이 된다. 이와 같이 여러 가지 원인에 의하여 발생하는 Judder 를 억제하기 위한 다양한 시도들이 이루어 지고있는데, 이러한 시도 중 한가지는 로터의 형상을 코닝이 가능한 작게 발생하도록 최적화하는 것이다¹⁾. 로터의 형상최적화는 로터의 내구특성을 동시에 고려하여 이루어져야 하며, 로터의 형상최적화가 차량의 진동특성에 어떻게 기여하는지를 동시에 고려하여야 한다.

본 논문에서는 대부분의 전륜 브레이크 시스템의 로터로 적용되고 있는 디스크의 최적화 프로세스를 차량의 시스템 특성 및 디스크 내구특성을 동시에 고려하여 다루었다.

2. 브레이크 시스템의 최적설계

2.1 Judder 현상분석

차량진동특성은 브레이크 시스템의 설계시 우선적으로 검토되어야 한다. 제동시 브레이크 시스템으로부터 유발되는 BTV 는 휠을 가진시키고, 이 진동은 타이로드, 스티어링 기어박스, 스티어링 킬럼을 거쳐 스티어링 휠로 전달되거나 스트럿트등의 기타 전달경로를 통하여 차체를 가진시키기도 하며 때로는 Pedal Pulsation 으로 나타나기도 한다. 동일한 DTV 나 BTV 에서도 차량의 전달특성에 따라 최종 응답점에서의 응답크기는 Fig.1 과 Fig.2 에서와 같이 서로 다르게 나타나므로 브레이크 시스템의 설계시 차량의 시스템특성이 고려되어야 한다. 그러므로 전달계의 특성에 따라 디스크에

대한 설계기준이 다르게 설정되는 것이 바람직하며, 디스크의 SRO (Side-face Runout), 초기 Static DTV, 마찰열과 관계가 있는 디스크의 Dynamic DTV 및 열용량등이 설계기준 설정시 대표적인 검토항목이 된다.

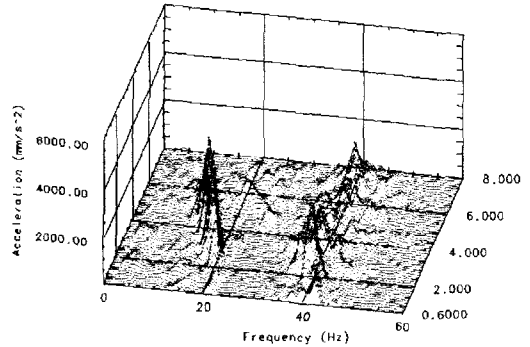


Fig. 1 Acceleration waterfall at steering wheel for A car

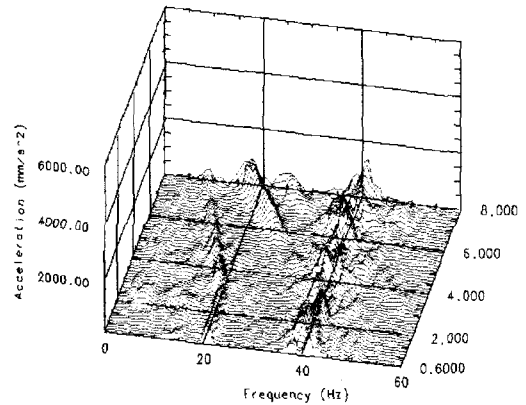


Fig. 2 Acceleration waterfall at steering wheel for B car

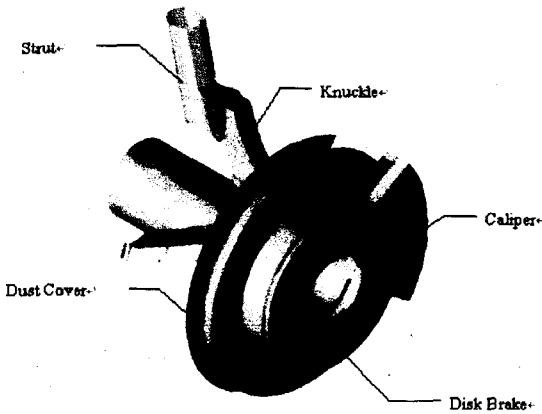
2.2 디스크 최적화 프로세스

1940 년대 말에 차량의 제동장치에 처음 도입된 디스크 브레이크는 1970 년 이래 현재 대부분의 차량의 전륜 브레이크 시스템 및 일부 차량의 후륜 브레이크 시스템에 장착되고 있다. 차량의 CG Point 가 항상 도로 표면 상부에 존재하기 때문에 제동시에 관성력으로 인하여 Front Axle 에 하중이 많이 작용하고 Rear Axle 은 Lifting 되는 현상 (Weight Transfer)이 발생한다 (Weight Transfer : 리어 타이어의 하중이 프런트 타이어로 Transfer 함을 의미). 일반적으로 급제동시에 전륜 브레이크 시스템이 Total Brake Force 의 2/3 정도 또는 그 이상을 부담한다. 이 때문에 전륜 브레이크 시스템이 많은 Heat Energy 를 흡수하여야 하므로 전륜 브레이크 시스템의 열용량을 후륜 브레이크 시스템에

비하여 크게 설계하여야 하며, 다음과 같은 장점으로 인하여 대부분의 전륜 브레이크 시스템의 로터에 Fig.3 과 같은 디스크 브레이크가 사용되고 있다. 디스크 브레이크 시스템의 장점은 다음과 같이 요약되어진다.

디스크 브레이크 시스템의 장점

- Brake Fade 가 적음
- Cooling 이 좋음
- Water 에 민감하지 않음
- 유지비가 적음
- Surface Area 가 큼



a) Brake system for a passenger car



b) Brake system for a commercial vehicle

Fig. 3 Front brake system

브레이크에서 가장 온도가 높은 부분은 마찰재와 접촉하는 금속표면이다. 드럼 브레이크의 경우가 접촉면이 드럼의 내부에 위치하는 반면에 디스크 브레이크의 경우 디스크의 외부에 위치한다.

드럼 브레이크는 드럼 전체의 온도가 상승한 뒤에 드럼을 에워싸고 있는 공기에 의하여 Cooling 이 발생한다. 디스크 브레이크의 경우는 디스크의 마찰면에 접촉하는 공기에 의하여 곧바로 Cooling 이 발생한다.

드럼 브레이크는 한면의 접촉면을 갖는 반면에, 디스크 브레이크는 양면의 접촉면을 갖는다. 디스크 브레이크의 Swept Area 가 같은 직경 및 하중을 갖는 드럼 브레이크에 비하여 크며, 이는 Cooling 이 유리함을 의미한다.

디스크의 최적화 프로세스는 디스크를 포함한 브레이크 시스템에 의하여 발생하는 차량진동, 소음 및 디스크 내구특성을 고려하여 이루어진다. 브레이크 시스템의 최적설계 단계 중 디스크의 Cooling 및 열변형과 관련한 CAE 적용 프로세스는 Fig. 4 와 같다.

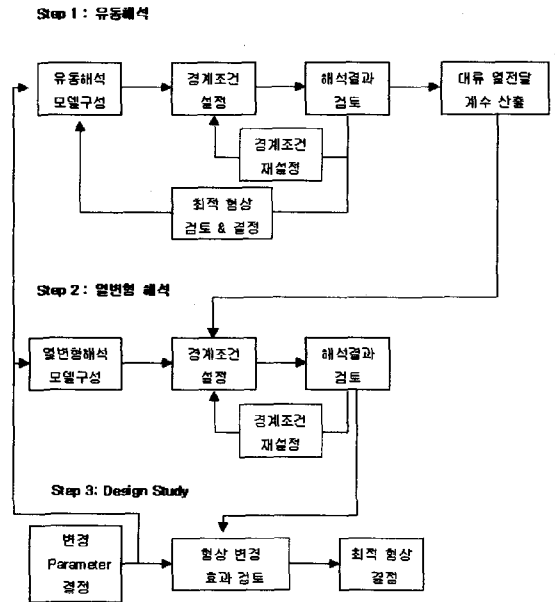


Fig. 4 Thermal deformation analysis flow of brake disk

열응력 해석을 위한 전단계로 실시하는 유동해석의 목적은 마찰열로 인한 디스크 표면에서의 냉각작용으로 나타나는 열전달의 대부분이 대류에 의한 열전달로 가정되기 때문에 디스크 주위 공기의 유동으로 인한 냉각정도를 수치화 하는 것이다. 실험을 통해 디스크 표면에서의 온도, 유속 등을 측정하여 열전달 정도를 구하는 것이 바람직한 방법이지만, 실험적인 방법으로 Film Coefficient 를 얻는 것이 간단하지 않고, 개발초기단계에서는 시험대상이 없으므로 유동해석을 이용하여 Film Coefficient 를 구하고, 이를 통해서 제동시 발생하는 디스크 표면의 변형, 응력분포, 온도분포 등

을 파악하는 과정이 일반적으로 이용된다.

제동시 마찰열은 디스크의 형상, 재질, 차량의 무게, 감속도율 등의 영향을 받으며, 또한 공기의 유동은 차속 뿐 아니라 휠의 회전수, 차체, 캘리퍼, 타이어, 너클 등의 주위 부품의 형상에 영향을 받는다. 따라서 디스크 주위의 모든 부품이 포함된 모델로 유동해석을 실시하여야 하는 필요성이 생긴다. Fig.5 는 유동해석에 사용되는 전체 Mesh 를 나타낸다.

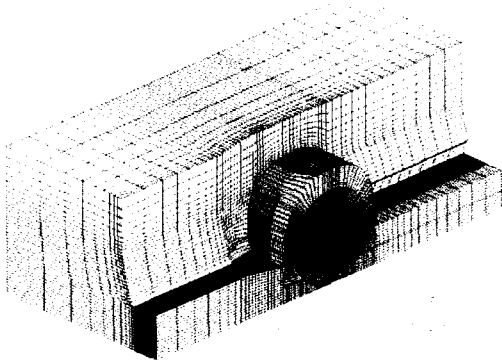


Fig. 5 The overall computational mesh

유동해석 조건 및 경계조건은 차량상용주행구간(0 ~ 200 KPH) 주행시와 동일한 조건을 부여하였으며, 타이어, 휠 및 브레이크 디스크등 회전 요소에 대해서는 실제로 동일한 회전 효과를 줄 수 있는 경계 조건을 고려 하였다.

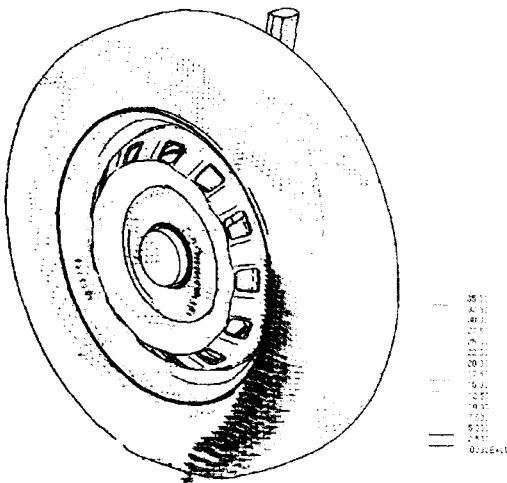


Fig. 6 Velocity vectors for 100 KPH case

Fig. 6 은 100 KPH 로 주행시 타이어 주위의

유동장을 나타내는데, 스틸 휠 주위의 흐름은 그림에서 보는 바와 같이 차량의 진행에 의한 주행풍의 속도성분과 휠 및 타이어의 회전 속도성분에 의해 매우 복잡한 양상을 보인다.

차량 진행 방향쪽의 Hole 에서 주행풍에 의해 디스크쪽으로 흐름이 강하게 유입됨을 볼 수 있으며, 그 외의 Hole 에서는 스틸 휠 내부의 공기가 일부 빠져 나감을 볼 수 있다. 브레이크 디스크의 냉각에 소요되는 주 흐름은 앞쪽에 위치한 Hole 로 유입됨을 알 수 있다. 디스크 아우터 쪽 주위 공기 흐름은 휠 및 휠 커버의 형상에 의해 크게 영향을 받으며 디스크 인너 쪽 주위 공기 흐름은 더스트 커버나 타이어등에 의해 크게 영향을 받을 수 있다. 주행시 및 제동시 각 차량속도에 따라 유동장이 변화하며 이에 따라 디스크에 작용하는 Film Coefficient 를 구하기 위해서 각 차량속도에 따라 변화하는 유속등을 입력 데이터로 사용하여야 한다. Fig.7 은 프런트 디스크에 작용하는 Film Coefficient 를 나타내는데, 차속의 변화에 따라 연속적으로 변화한다. 차속 및 유속의 방향, 난류/층류/전이영역등을 고려하여 Film Coefficient 를 구하는 프로그램을 개발하여 본 해석에 적용하였다.

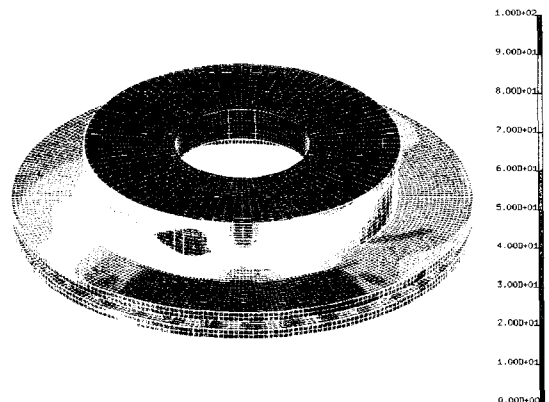


Fig. 7 Film coefficient for front disk

이와 같은 과정을 통하여 결정된 Film Coefficient 는 차량속도에 따른 디스크의 Cooling 을 묘사하기 위한 Thermal Boundary Condition 으로 적용된다. 주행중인 자동차가 가지는 운동에너지는 Eq. (1) ⁽¹⁾⁽²⁾로 표현되는데, 이 운동에너지 중 10% 이하가 타이어, 휠, 브레이크, 엔진 및 드라이브 라인등의 회전부품에 저장된다.

$$E_b = \frac{M}{2}(v_1^2 - v_2^2) + \frac{I}{2}(\omega_1^2 - \omega_2^2) \quad (1)$$

여기서, M 은 자동차의 질량이며 v_1 은 제동초기 속도, v_2 는 제동말기 속도, I 는 회전체의 질량

관성모멘트, ω_1 은 제동초기 각속도, ω_2 은 제동말기 각속도이다.

이와 같은 운동에너지는 제동중 열, 소음, 포텐셜에너지등으로 변환되는데, 디스크와 패드의 마찰에 의하여 발생하는 열량중 디스크로 유입되는 열량은 디스크의 히팅을 위한 Thermal Boundary Condition 으로 적용하며, 해석하고자 하는 디스크는 전체 4 개의 휠 중 1 개의 전륜 디스크이므로 전·후륜 브레이크 분담률과 디스크와 패드의 에너지흡수율을 고려한 한쪽 브레이크에 해당하는 가중치를 상수로 적용하면 자동차가 초기속도 v_1 으로부터 정지할때까지 감가속도가 일정할 경우 디스크와 패드 상호접촉면의 단위면적당 작용하는 열량은 다음과 같은 식으로 표현된다 (1)(2)

$$q_o = \frac{1}{A_o} C_1 C_2 k M a (v_1 - at) \quad (2)$$

여기서, C_1 은 전·후륜 브레이크 분담률이고, C_2 는 한쪽 브레이크만의 비율이며, k 는 Eq. (1)에서 Eq. (2)로 유도하는 과정에서 차량질량 및 회전체의 질량관성모멘트등으로 표현되는 값이다. 이와 같은 Thermal Boundary Condition 과 함께 디스크의 회전에 의한 원심력을 Mechanical Boundary Condition 으로 적용하여 열변형해석을 진행하게 된다.

디스크의 열변형해석 결과는 디스크의 축방향 변형량과 내구측면에서의 열응력분포등을 종합하여 검토하게 된다.

3. 디스크 해석 및 결과분석

3.1 Parameter 선정

디스크의 설계 Parameter 로서 다음과 같은 항목이 검토되었다(Fig.8).

- (1) Disc Size
- (2) Under Cut
- (3) Inboard, Outboard, Vane 두께비
- (4) Heat Mass
- (5) Wall Inner Cut
- (6) Wall Outer Cut
- (7) Hub Mass

디스크의 열용량과 관계가 있는 Outer Diameter 및 Inner Diameter 는 차량진동특성중 주행/제동패턴(주행속도, 제동횟수, 제동감속도등)에 따른 진

동특성변화에 의하여 결정된다. Fig. 9 는 1 회제동과 3 회제동시의 스티어링 휠에서의 응답을 나타내는데, 제동이 증가함에 따라 스티어링 휠의 진동레벨이 급격하게 증가함을 알 수 있으며, 이러한 경우는 디스크의 열용량을 확보하여야 한다.

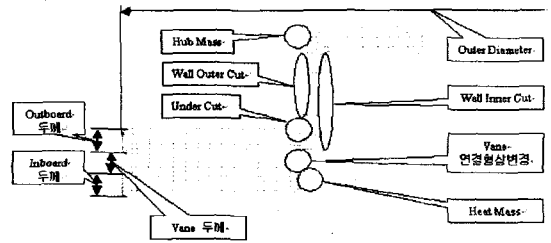


Fig. 8 Design parameters for a front disk

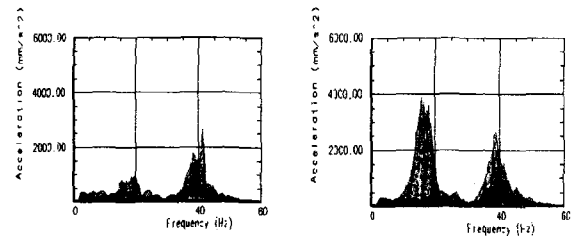


Fig. 9 Acceleration levels at 1st and 3rd braking

3.2 디스크의 최적설계 적용

디스크의 설계시 제일 기본적으로 검토되는 사항은 재질이다. 디스크 재질의 선택에 있어서 기본적으로 제동성능과 더불어 마찰재의 공격성에 대한 저항특성과 열응력에 의한 열피로나 크립등과 같은 내구특성이 검토되어진다. Fig. 10 은 재질 특성중 열전도계수가 특히 서로 다른 두재질로 제조된 디스크에서 나타나는 응력의 크기를 비교한 것이다.

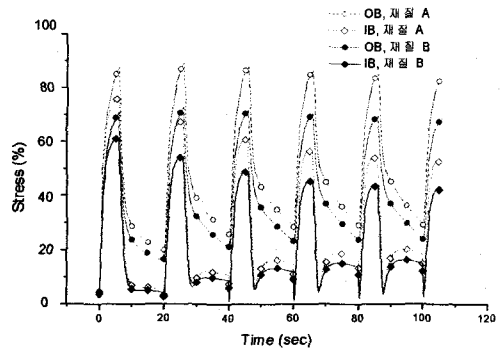
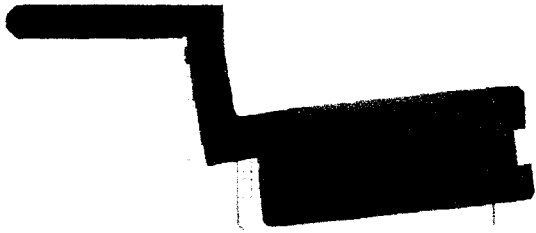


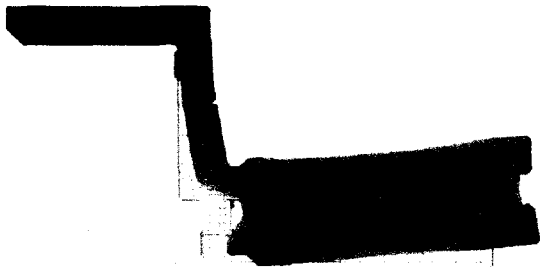
Fig. 10 Relative stress levels at braking

그림에서 알 수 있듯이 Inboard 와 Outboard 모 두 재질 B 의 경우가 재질 A 에 비하여 응력이 낮 게 나타남을 알 수 있는데, 최종적으로 내구수명 은 각 재질에 대한 Damage 특성 Data 를 이용하여 계산되어진다.

재질이 선정된 다음단계로 3.1 절에서 언급된 Parameter 들에 대하여 디스크 브레이크의 최적설 계를 위한 해석이 진행된다. Fig.11 은 초기모델과 개선모델 I, 개선모델 II 의 열변형 형상을 나타낸 다.



a) Original model



b) Modified model I



c) Modified model II

Fig. 11 Thermal deformation of original- and modified models

제동시 Modified Model II 의 축방향 변형이 가장 적게 발생하여 열변형거동이 세 모델 중 제일 양

호하며, Modified Model I 이 Original Model 에 비 하여 양호한 거동을 보인다. 이러한 디스크의 형 상최적화는 적용된 제동모드에 따라 다른 결과를 얻을 수 있으므로 목표시장의 도로조건이나 운전 자의 운전성향등이 고려된 제동모드를 기준으로 최적화프로세스가 진행되어야 한다.

4. 결 론

제동시 우수한 승차감을 유지하기 위하여 차량 의 주행속도, 축하중, 시스템 진동특성, 디스크로 의 유속확보 및 디스크 자체의 냉각성능등 여러가 지 Factor 들을 고려한 브레이크 시스템 설계 프로 세스를 제시하였다. 차량에 따른 브레이크 시스템 의 설계 Target 이 다르게 설정되어야 하며, 이에 따라 디스크의 Dimension 및 형상설계가 이루어 졌다. 형상설계를 위한 해석시 적용하는 경계조건 은 차량특성의 반영과 함께 제동모드를 결정하는 운전자의 운전특성 및 도로조건등을 고려하여 이 루어져야 한다.

참고문헌

- (1) S.K. Lee, B.Y. Sung, S.K. Ha, 2000, "Optimal Design of Ventilated Disc Brake Rotor", KSME, Vol.24, No. 3
- (2) Rudolf Limpert, 1992, *Brake Design and Safety*, SAE, Warrendale, pp.89-90