

〈논 문〉

자동차용 디스크 브레이크의 열탄성 불안정성에 관한 연구

Study on Thermoelastic Instability of Automotive Disc Brakes

최지훈* · 김도형* · 이인**

Ji-Hoon Choi, Do-Hyung Kim and In Lee

(2000년 12월 21일 접수 ; 2001년 3월 12일 심사완료)

Key Words : Disc Brakes(디스크 브레이크), Hot Spot(열점), Judder(저더), Thermoelastic Instability, (열탄성 불안정성)

ABSTRACT

This paper is focused on the frictionally induced thermoelastic instability (TEI) in automotive disk brakes. This instability leads to the formation of localized high temperature contact regions known as hot spots. This article investigates the thermoelastic instability in automotive disk brake systems consisting of a finite thickness layer (disk) and two half-planes (pads) using a perturbation method. The antisymmetric mode involves hot spots located alternately on two sides of the disk. As a result the circumferentially periodic hot spots produce rotor surface distortion and induce low frequency vibration. Also the effects of system parameters on the critical speed for TEI are investigated.

1. 서 론

자동차 브레이크 시스템은 전 세계적으로 오랜 기간 연구 개발되어 기본적인 제동 성능은 현 기술수준으로도 충분히 확보되고 있으나, 제동 시 브레이크 디스크와 패드사이의 마찰에 의한 저더(judder)라는 이상 진동 및 소음 현상이 여러 차종에서 발생하여 이에 대한 운전자의 불만이 제기되고 있는 실정이다. 이와 같은 이상 현상인 저더는 일반적으로 크게 cold 저더와 hot 저더로 분류될 수 있으며, 전자의 경우 단품 제조과정의 품질관리와 자동차 조립 라인에서의 공정관리를 철저히 함으로써 충분히 방지될 수 있는 반면에 후자의 경우는 단품 조립시에 발생가능성을 파악하기 어렵고, 고속 주행 중 hot 저더에 의한 제동 저하는 인명과 직결된 문제이므로 근본적인 원인에 대한 심도 있는 해석 및 실험적 연구가 반드시 필요하다. 특히, 이 진동/소음 문제들은 과거에 철도나 항공기 등에서 주로 관찰 되어 왔으나, 현재 자동차에서도 심각한 문제점으로 부각되기 시작하였다.

앞에서 언급한 hot 저더 현상의 원인은 고속 주행 중 제동 시 디스크와 패드의 마찰에 의한 열탄성 불안정성(thermoelastic instability; TEI)^(1,2)으로 인해 발생하는 현상으로 밝혀져 있다. 이 현상을 간략하게 설명하면 다음과 같다. 고속 주행 시 제동으로 인한 브레이크와 패드 사이의 마찰열은 디스크의 열변형을 수반하고 이로 인한 디스크와 패드 사이의 접촉 압력 분포를 불안정하게 만들게 된다. 이에 따라 디스크와 패드 사이의 마찰력의 변화가 생기게 되어 온도의 섭동 현상을 발생시키고 이것은 디스크와 패드 사이의 열변형에 의한 국부적인 접촉을 만들며, 이 국부적인 접촉은 열점(hot spots)으로 성장하게 되고, 최종적으로 이 열점으로 인한 디스크 표면이 변형되어 브레이크 시스템에 심각한 진동/소음 문제를 유발시키게 되는 것이다.^(3,4) 즉, 두 물체의 미끄럼 속도에 의한 열적, 기계적 특성, 기하학적 형상 및 마찰 계수 등이 복잡하게 관련되어 있는 현상이다.

서로 접촉한 두 물체가 상대 속도를 가지고 미끄러질 때 마찰열로 인해 발생하는 열탄성 불안정성 문제를 해결하고자 하는 시도는 1960년대 후반부터 시작되었다. 열탄성 불안정성 현상을 파악하기 위하여 해석에 사용된 모델은 반무한 고체에 일정한 속도로 미끄러지는 반무한 평판 모델이었으며, 접촉면에서의 온도를 후리에 급수(fourier series)

* 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공

** 정희원, 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공
E-mail : inhee@asdl.kaist.ac.kr

Tel : (042) 869-3717, Fax : (042) 869-3710

로 표현하여 TEI를 해석하였다.⁽⁵⁾ 이후, 이 모델을 균일한 압력으로 압착하는 두 개의 반무한 고체(패드) 사이에 유한한 두께를 갖는 무한 평판(디스크)이 일정한 속력으로 미끄러지는 이상적인 모델로 개선하여 열탄성 해석을 수행하였다.⁽⁶⁾ 이와 같이 열탄성 문제는 열 해석(thermal analysis)과 열 변형(thermal deformation) 및 접촉(contact) 문제들을 서로 연계하여 풀어야 하는 어려움 때문에 대부분 비교적 단순한 모델을 통한 해석적 접근이 수행되고 있다. 최근에는 컴퓨터의 계산 속도의 급속한 발전으로 인하여 유한요소법을 적용한 열탄성 해석을 수행하고 있지만 아직 미흡한 점이 많은 실정이다.^(7,8) 또한, 최근에 와서 국내의 경우 주로 자동차 업체에서의 이 문제의 심각성을 인식하고 연구를 진행하고 있지만 아직까지 시행 착오적으로 해결해 나가고 있다.

본 연구에서는 자동차용 브레이크 시스템의 Hot 저터 현상을 파악하기 위한 기초연구로 참고문헌 (6)의 모델을 기초로 하여 브레이크 시스템의 열탄성 불안정성을 유발하는 임계속도를 계산하였다. 또한, 마찰 패드의 물성치에 따른 파라미터 해석을 수행하여 열탄성 불안정성에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 이론 전개

• 수학적 모델

본 연구에서 고려한 자동차용 브레이크 시스템을 Fig. 1과 같이 균일한 압력으로 압착하는 두 개의 반 무한 평면(패드)과 그 사이에서 일정한 속력 V 로 움직이는 두께가 $2a$ 인 무한 평판 층(디스크)으로 모델링 하였다. 그림에서 첨자 1은 패드를, 첨자 2는 디스크를 나타낸다.

먼저 방향 온도 교란의 절대속도를 c , 각 물체 $i(i=1,2)$ 에 대한 교란의 상대속도를 c_i 라 하면 $c=c_1=V+c_2$ 이므로 다음과 같은 식을 얻는다.

$$V = c_1 - c_2 \tag{1}$$

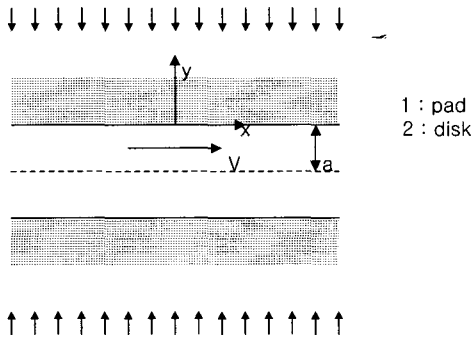


Fig. 1 A layer between two half-planes, pressed by a uniform pressure (1 : pad, 2 : disk)

또한, 접촉면에서의 압력 교란을 식 (2)처럼 나타낼 수 있고, 마찰로 인한 열속(heat flux)은 식 (3)과 같다.

$$p(x, y) = p_1 \exp(bt) \cos(mx) \tag{2}$$

$$q_{net} = q_{y1} - q_{y2} = fVp_1 \exp(bt) \cos(mx) \tag{3}$$

여기서, f 는 마찰 계수, q_{yi} 는 각 물체 i 의 계면에서의 y 방향 열속을 나타낸다. 그리고, 디스크와 패드에 부착된 국부 좌표계 (x_i, y_i) 와 교란장 내의 좌표계 (x, y) 사이의 관계는 다음과 같다.

$$x = x_1 - c_1 t = x_2 - c_2 t \tag{4}$$

$$y = y_1 = y_2 = a \tag{5}$$

본 연구에서는 디스크 브레이크의 열탄성 불안정성을 해석하기 위하여 디스크에서 발생하는 온도의 섭동 모드를 디스크의 중앙 면에 대해 대칭과 반대칭 형상 모드로 구별하여 각 모드에 대하여 해석하고자 한다. 이와 같은 해석을 수행하기 위해서는 디스크와 패드의 온도장을 구하여야 한다.

• 디스크와 패드의 온도 해석

패드와 디스크는 각각 다음과 같은 열전도 방정식을 만족해야 한다.

$$\frac{\partial^2 T_i}{\partial x_i^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial y_i^2} = \frac{1}{k_i} \frac{\partial T_i}{\partial t} \tag{6}$$

$$k_i = \frac{K_i}{\rho_i c_{pi}}$$

여기서, K_i, ρ_i, c_{pi} 는 각각 열 전도율, 밀도, 재질의 비열을 나타낸다. 온도 교란을 식 (7)처럼 가정하고 식 (6)에 대입하고 정리하면, 다음과 같다.

$$T_i = \text{Re}\{f_i(y_i) \exp(bt + jm(x_i - c_i t))\} \tag{7}$$

$$T_i = \text{Re}\{(F_i \exp(-\lambda_i y_i) + G_i \exp(\lambda_i y_i)) \exp(bt + jm(x_i - c_i t))\} \tag{8}$$

$$\lambda_i = \xi_j \eta_i = \sqrt{\left(m^2 + \frac{b}{k_i}\right) - j \frac{mc_i}{k_i}}$$

여기서, F_i, G_i 는 임의의 복소 상수들을 나타낸다. 패드 부분에서의 온도 교란은 계면에서부터 멀어질수록 사라지므로 ($T_i \rightarrow 0$ as $y_i \rightarrow \infty$) $G_i = 0$ 이고, 결과적으로 패드 부분의 온도 교란식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_i = \text{Re}\{F - 1 \exp(bt - \lambda_1 y_1 + jm(x_1 - c_1 t))\} \tag{9}$$

2.1 온도 분포가 대칭인 경우

먼저 온도의 섭동 모드가 대칭인 형상을 갖는 경우를 고

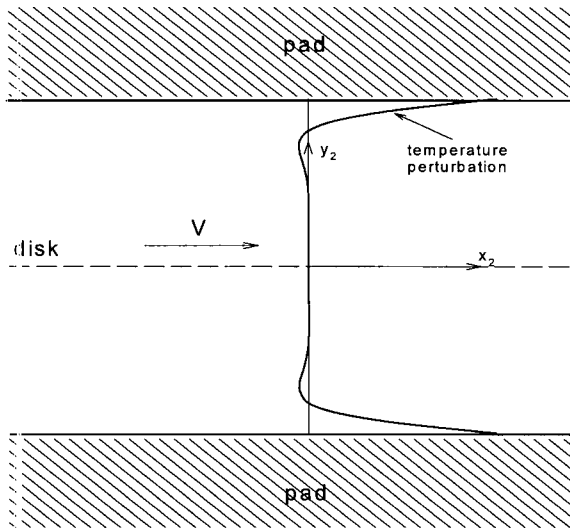


Fig. 2 Symmetric temperature perturbation of a disk

려해보면, 디스크 중심에서의 열속이 0인 조건과 디스크와 패드의 계면에서의 온도 분포가 연속이라는 조건으로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$T_1 = \text{Re} \{ T_0 \exp(bt - \lambda_1 y + jmx) \} \quad (10)$$

$$T_2 = \text{Re} \left\{ T_0 \frac{\cosh(\lambda_2(y+a))}{\cosh(\lambda_2 a)} \exp(bt + jmx) \right\} \quad (11)$$

여기서, T_0 는 미지의 상수이다. Fig. 2는 식 (11)으로부터 얻어진 대칭 모드에 대한 디스크의 온도 분포를 나타내 것이다. 또한, 디스크와 패드사이의 계면에서의 열속은 다음과 같다.

$$q_{y1} = -K_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (12)$$

식 (10)과 식 (11)을 이용하여 식 (3), (12)에 대입하고 정리하면, 다음식을 얻을 수 있다.

$$\{K_1 \lambda_1 + K_2 \lambda_2 \tanh(\lambda_2 a)\} T_0 = fVp_1 \quad (13)$$

(1) 열탄성 응력과 변위(thermoelastic stress and displacement)

열탄성 문제를 풀기 위해서는 섭동 온도에 의한 응력과 변위를 구해야 한다. 먼저 응력과 변위에 대한 경계 조건을 살펴보면 다음과 같다.

$$\sigma_{xx1}, \sigma_{xy1}, \sigma_{yx1} \rightarrow 0 \text{ as } y \rightarrow \infty \quad (14)$$

또한, 대칭인 조건으로부터,

$$u_{y2} = 0 \text{ at } y = -a \text{ (} u_{y2} \text{는 디스크(첨자 2)의 } y\text{-방향 변위)} \quad (15)$$

$$\sigma_{x2} = 0 \text{ at } y = -a \quad (16)$$

계면 $y=0$ 에서,

$$u_{y1} = u_{y2} \quad (17)$$

$$\sigma_{yy1} = \sigma_{yy2} = -p(x, t) \quad (18)$$

$$\sigma_{xy1} = \sigma_{xy2} = -fp(x, t) \quad (19)$$

식 (10), (11)의 섭동 온도 분포 하에 열탄성 응력과 변위에 대한 특수해(particular solution)는 다음의 지배 방정식을 만족시키는 열탄성 포텐셜(thermoelastic potential) Ψ_i 을 이용하여 얻을 수 있다.⁽⁹⁾

$$\nabla^2 \Psi_i = \beta_i T_i \quad (20)$$

$$\beta_i = \frac{2\mu_i \alpha_i (1 + \nu_i)}{1 - \nu_i}$$

여기서, 열탄성 변위 벡터 \mathbf{u}_i 는 다음의 식에서 얻을 수 있고,

$$2\mu \mathbf{u}_i = \nabla \Psi_i \quad (21)$$

α_i, μ_i, ν_i 는 각각 열팽창 계수, 전단 계수, 포아송 비(Poisson's ratio)를 나타낸다.

또한, 식 (10), (11)을 이용하여 식 (20)을 만족하는 열탄성 포텐셜을 구하면 다음과 같다.

$$\Psi_1 = \text{Re} \left\{ \frac{\beta_1 T_0}{\lambda_1^2 - m^2} \exp(bt - \lambda_1 y + jmx) + A_1 \exp(-my + jmx) \right\} \quad (22)$$

$$\Psi_2 = \text{Re} \left\{ \frac{\beta_2 T_0}{\lambda_2^2 - m^2} \frac{\cosh(\lambda_2(y+a))}{\cosh(\lambda_2 a)} \exp(bt + jmx) + A_2 \cosh(m(y+a)) \exp(jmx) \right\} \quad (23)$$

열탄성 포텐셜과 열탄성 응력, 수직 변위와의 관계는 다음과 같다.

$$u_{yi} = \frac{1}{2\mu_i} \frac{\partial \Psi_i}{\partial y}, \quad \sigma_{yyi} = -\frac{\partial^2 \Psi_i}{\partial x^2}, \quad \sigma_{xyi} = \frac{\partial^2 \Psi_i}{\partial x \partial y} \quad (24)$$

경계 조건을 만족시키는 일반해(general solution)를 얻기 위해서는 동차해(homogeneous solution)를 구하여 앞에서 구한 특수해와 중첩시켜야 한다. 본 연구에서는 Green과 Zerna⁽¹⁰⁾의 동차해 D 를 이용하였고, 이를 이용하여 앞에서 구한 특수해와 중첩시키면 다음과 같은 일반해를 얻을 수 있다.

$$u_{y1} = \frac{1}{2\mu_1} \frac{\partial \Psi_1}{\partial y} + \frac{1}{2\mu_1} \left\{ y \frac{\partial \omega_1}{\partial y} - (3 - 4\nu_1) \omega_1 \right\} \quad (25)$$

$$\sigma_{yy1} = -\frac{\partial^2 \psi_1}{\partial x^2} + y \frac{\partial^2 \omega_1}{\partial y^2} - 2(1-\nu_1) \frac{\partial \omega_1}{\partial y} \quad (26)$$

$$\sigma_{xy1} = \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial x \partial y} + y \frac{\partial^2 \omega_1}{\partial x \partial y} - (1-2\nu_1) \frac{\partial \omega_1}{\partial x} \quad (27)$$

$$u_{y2} = \frac{1}{2\mu_2} \frac{\partial \psi_2}{\partial y} + \frac{1}{2\mu_2} \left\{ (y+a) \frac{\partial \omega_2}{\partial y} - (3-4\nu_2)\omega_2 \right\} \quad (28)$$

$$\sigma_{yy2} = -\frac{\partial^2 \psi_2}{\partial x^2} + (y+a) \frac{\partial^2 \omega_2}{\partial y^2} - 2(1-\nu_2) \frac{\partial \omega_2}{\partial y} \quad (29)$$

$$\sigma_{xy2} = \frac{\partial^2 \psi_2}{\partial x \partial y} + (y+a) \frac{\partial^2 \omega_2}{\partial x \partial y} - (1-2\nu_2) \frac{\partial \omega_2}{\partial x} \quad (30)$$

여기서, 포텐셜 ω_i 는 $\nabla^2 \omega_i = 0$ 을 만족시켜야 하는 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\omega_1 = \text{Re} \{ B_1 \exp(-my + jmx) \} \quad (31)$$

$$\omega_2 = \text{Re} \{ B_2 \sinh(m(y+a)) \exp(jmx) \} \quad (32)$$

앞에서 구한 응력과 변위에 관한 식으로부터 계면조건인 식 (17)~(19)을 이용하면, 다음과 같은 열탄성 복소 특성 방정식(thermoelastic complex characteristic equation)을 얻는다.

$$\begin{aligned} & \left\{ \frac{K_1}{K_2} \lambda_1 + \lambda_2 \tanh(\lambda_2 a) \right\} \left(1 - jf \frac{H_1}{H_2} \right) \\ &= \frac{fH_1 V m}{k_2} \left[\frac{1}{\lambda_1 + m} \frac{\alpha_1(1+\nu_1)}{\alpha_2(1+\nu_2)} \{ A \sec h^2 A + \tanh A \} \right. \\ & \quad \left. + \frac{\tanh A}{\lambda_2^2 - m^2} \{ \lambda_2 \tanh(\lambda_2 a) - m \tanh A \} \right] \\ H_1(A) &= \frac{2\mu_1 \mu_2 k_2 \alpha_2 (1+\nu_2)}{\{ \mu_2 (1-\nu_1) (A \sec h^2 A + \tanh A) + \mu_1 (1-\nu_2) \tanh^2 A \} K_2} \\ H_2(A) &= [4\mu_1 \mu_2 k_2 \alpha_2 (1+\nu_2)] / \{ \mu_2 (1-2\nu_1) (A \sec h^2 A \\ & \quad + \tanh A) - \mu_1 (1-2\nu_2) \tanh A + \mu_1 A \sec h^2 A \} K_2 \end{aligned} \quad (33)$$

여기서, $A = ma$ 이다.

또한, 복잡한 식을 단순화시키기 위해 다음과 같은 무차원 변수들을 도입한다.

$$K^* = \frac{K_1}{K_2}; \quad k^* = \frac{k_1}{k_2}; \quad \alpha^* = \frac{\alpha_1(1+\nu_1)}{\alpha_2(1+\nu_2)} \quad (34)$$

$$\lambda_i^* = \frac{\lambda_i}{m}; \quad c_i^* = \frac{c_i}{k_2 m}; \quad b^* = \frac{b}{k_2 m^2} \quad (35)$$

$$V^* = \frac{V}{k_2 m} = c_1^* - c_2^* \quad (36)$$

무차원 변수들을 사용하여 무차원화 된 복소 특성방정식을 표현하면 식 (37)과 같다.

$$\begin{aligned} & \{ K^* \lambda_1^* + \lambda_2^* \tanh(\lambda_2^* A) \} \left(1 - jf \frac{H_1}{H_2} \right) \\ &= fH_1 V^* \left[\frac{\alpha^*}{\lambda_1^* + 1} (A \sec h^2 A + \tanh A) \right. \\ & \quad \left. + \frac{\tanh A}{\lambda_2^{*2} - 1} \{ \lambda_2^* \tanh(\lambda_2^* A) - \tanh A \} \right] \end{aligned} \quad (37)$$

(2) 안정성 경계(stability boundary)

브레이크 시스템의 열탄성 불안정성을 유발하는 임계속도 즉, 안정성 경계(stability boundary)를 계산하기 위하여, 앞 식의 λ_i 에서 지수 성장률 b 를 0으로 놓는다. $b=0$ 일 때, 무차원 변수 λ_i^* 는 다음과 같이 간략화 된다.

$$\lambda_i^* = \xi_i^* + j\eta_i^* \quad (38)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \xi_i^* &= \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{c_i^*}{k^*} \right)^2} \right] \right\}^{1/2}, \quad \eta_i^* = - \left\{ \frac{1}{2} \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{c_i^*}{k^*} \right)^2} \right] \right\}^{1/2} \\ \xi_2^* &= \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \sqrt{1 + (c_2^*)^2} \right] \right\}^{1/2}, \quad \eta_2^* = \left\{ \frac{1}{2} \left[-1 + \sqrt{1 + (c_2^*)^2} \right] \right\}^{1/2} \end{aligned}$$

식 (38)을 식 (37)에 대입하여 실수부와 허수부를 서로 분리하면, 두 개의 비선형 방정식을 얻을 수 있다. 이 두 방정식에서 c_1^*, c_2^* 를 구하여 안정성 경계에 해당하는 임계속도 값을 결정하게 된다.

2.2 온도 분포가 반대칭인 경우

반대칭 모드에 대한 열탄성 문제는 대칭 모드인 경우와 마찬가지로 방법으로 풀 수 있다. 디스크 중심에서의 섭동 온도가 0이라는 조건을 이용하여 페드와 디스크에서의 섭동 온도 분포를 구하고(Fig. 3 참조), 식 (15), (16) 대신에 반대칭 조건인 식 (39), (40)을 이용하여 반대칭 형상에 대한 복소 특성방정식을 얻을 수 있다.

$$u_{x2} = 0 \quad \text{at } y = -a \quad (39)$$

$$\sigma_{yy2} = 0 \quad \text{at } y = -a \quad (40)$$

식 (41)은 반대칭 모드에 대한 무차원화 된 복소 특성방정식을 나타낸 것이다.

$$\{ K^* \lambda_1^* + \lambda_2^* \coth(\lambda_2^* A) \} \left(1 - jf \frac{H_1}{H_2} \right)$$

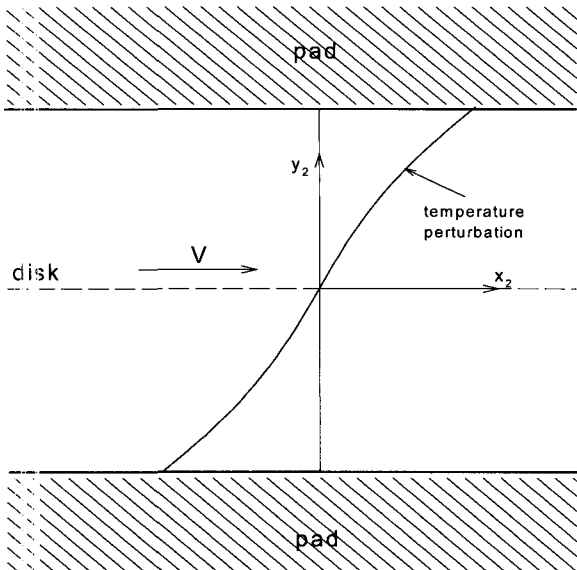


Fig. 3 Antisymmetric temperature perturbation of a disk

$$= fH_1V^* \left[\frac{\alpha^*}{\lambda_1^* + 1} (-A \csc h^2 A + \coth A) + \frac{\coth A}{\lambda_2^{*2} - 1} \{ \lambda_2^* \coth(\lambda_2^* A) - \coth A \} \right] \quad (41)$$

여기서,

$$H_1(A) = [2\mu_1\mu_2k_2a_2(1+v_2)] / \{ \mu_2(1-v_1)(-A \csc h^2 A + \coth A) + \mu_1(1-v_2)\coth h^2 A \} K_2$$

$$H_2(A) = [4\mu_1\mu_2k_2a_2(1+v_2)] / \{ \mu_2(1-2v_1)(A \sec h^2 A + \coth A) - \mu_1(1-2v_2)\coth A - \mu_1A \csc h^2 A \} K_2$$

디칭인 경우와 마찬가지로 방법으로 식 (38)을 식 (41)에 대입하고, 실수부와 허수부로 나누면 두 개의 비선형 방정식을 얻을 수 있고, 이 식들을 계산하여 임계속도 값을 결정하게 된다.

3. 해석 결과 및 검토

본 연구에서는 자동차 브레이크 시스템을 디스크와 패드로 모델링하여 열탄성 불안정성이 발생하는 임계속도를 계산하였다. 계산에 사용된 패드와 디스크의 물성치는 Table 1과 같다. 디스크의 재질로는 회주철(gray cast iron)을, 패드는 석면(asbestos)(Table 1에서 패드 C) 계통과 semi-metallic 재질(Table 1에서 패드 D)을 사용하였다. 일반적으로 자동차 브레이크용 디스크의 재질로는 회주철을 가장 많이 사용하고 있으며, 패드의 재질로는 과거에는

Table 1 Material properties

No.	Material	E (Gpa)	ν	α	K	k
1	Pad C	0.53	0.25	30	0.5	0.269
1	Pad D	1.00	0.25	10	5.0	3.57
2	Cast iron	125	0.25	12	54	12.98

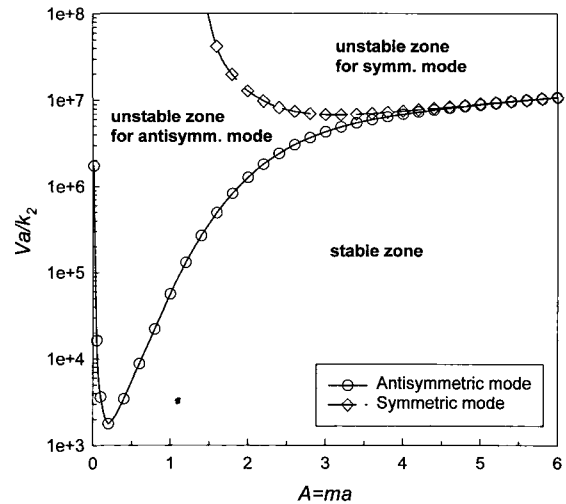


Fig. 4 Critical speed of the symmetric and antisymmetric modes for pad C

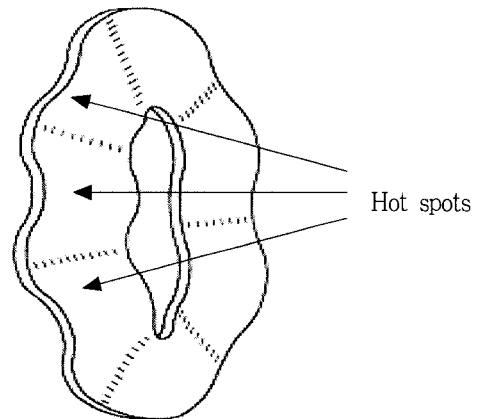


Fig. 5 Circumferentially buckled configuration for the disk

우수한 라이닝 재료로 석면 재질을 사용하였으나, 최근 환경문제로 인하여 석면 재질은 사용이 금지되어 있어 semi-metallic, low steel 등의 재질로 대체되고 있는 실정이다. 또한, 계산에 사용된 마찰 계수 f 값은 0.4를 사용하였다.

Fig. 4는 패드 C에 대해서 무차원 형상 변수의 변화에

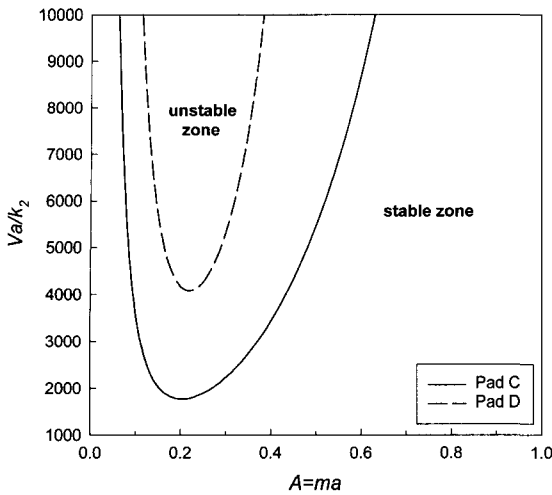


Fig. 6 Critical speed of the antisymmetric mode near the minimum point

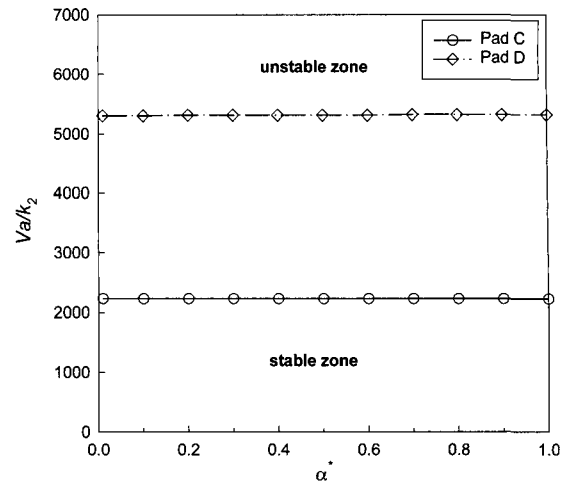


Fig. 8 Effect of the thermal expansion ratio, α^* , on the critical speed ($A=0.3$).

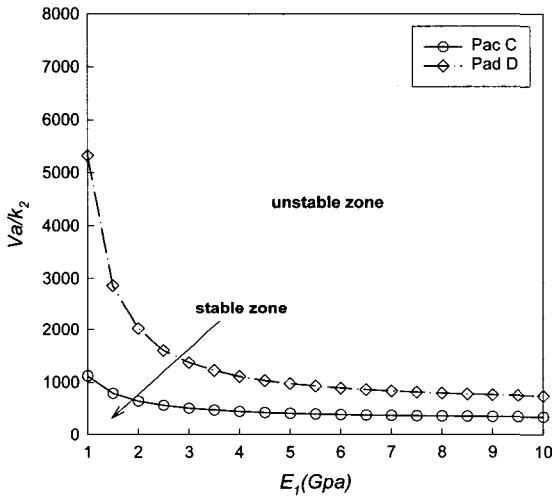


Fig. 7 Effect of elastic modulus, E , on the critical speed ($A=0.3$).

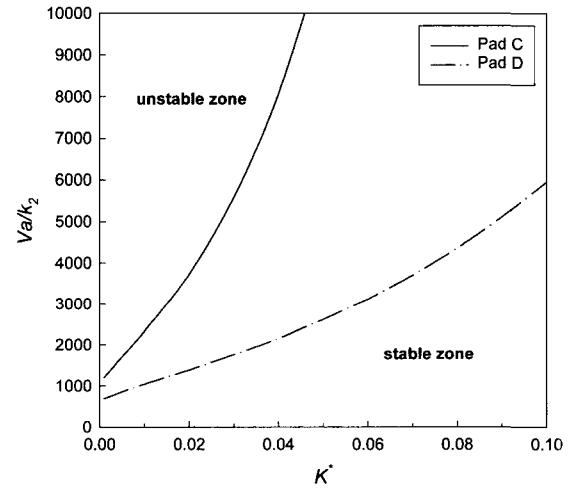


Fig. 9 Effect of the thermal conductivity ratio, K^* , on the critical speed ($A=0.3$).

따른 무차원화된 임계속도 ($V^* A = Va/k_2$) 값을 나타낸 것이다. 해석 결과를 보면 모든 무차원 형상 변수에 대하여 대칭 모드보다 반대칭 모드의 임계속도 값이 더 작게 나옴을 알 수 있다. 즉, 반대칭 모드 형상에서 먼저 불안정해지고, 디스크가 변형됨을 짐작할 수 있다. 또한, 이러한 결과는 브레이크 실험에서도 일반적으로 나타나는 현상으로 알려져 있다.⁽¹¹⁾ Fig. 5는 이와 같은 반대칭 모드에 대한 열탄성 불안정성으로 인한 열점(hot spots)의 위치와 디스크의 원주 방향으로 변형(좌굴)된 모양을 나타낸 것이다. 즉, 이와 같은 디스크의 변형은 제동 시 차량의 진동 및 소음의 중요한 원인이 될 것이다. Fig. 6은 두 패드 재질에 대하여 반대칭 모드에 대한 임계속도 값을 확대하여 그린 그림

으로 이 경우 semi-metallic재질이 석면 재질보다 높은 임계속도 값을 가짐을 알 수 있다. 전형적인 자동차용 디스크 브레이크를 고려해보면, 주어진 디스크 두께 ($2a$)에 대하여 무차원 형상 변수 A 는 파동 수(wave number) $m(=2\pi/l)$ 에 따라 변한다(일반적으로 자동차용 디스크 브레이크의 무차원 형상 변수는 0.3~0.4 정도임). l 은 파장(wave length)으로 디스크 표면에서 발생하는 열점 사이의 거리이고, 패드 길이와 관련되어 있다. 즉, 패드 길이를 변화시키면, 열탄성 불안정성이 발생하는 임계속도 값을 변화시킬 수 있다는 것이다. 패드 길이를 짧게 하면 할수록 디스크 표면의 섭동 주기가 짧아지면서 고차화 되어 열탄성 불안정성이 발생하는 임계속도 값을 증가시킬 수 있다.⁽⁴⁾

다음은 마찰재의 물성치 변화에 따른 임계속도 값의 변화를 살펴보고자 한다. Fig. 7은 마찰재의 탄성 계수를 변화시켜가면서 임계속도 값을 나타낸 그림이다. 두 마찰재 모두 탄성 계수 값이 작아질수록 임계속도가 증가함을 알 수 있다. 이는 탄성 계수가 작아질수록 열변형을 일으킨 디스크와 패드의 면압 분포를 균일하게 발생시켜 열섬 형상을 저감 시키기 때문이다. Fig. 8은 무차원화 된 열팽창 계수를 변화시켜가면서 임계속도 값을 나타낸 것이다. 이 경우 다른 변수는 고정시키고 마찰재의 열팽창 계수만 변화시킨 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 두 경우 모두 열팽창 계수 변화에 따라 임계속도 값의 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 이러한 이유는 열탄성 불안정성 해석 시 패드의 교란 속도(c_1)가 디스크의 교란 속도(c_2)보다 커서 섭동 온도에 의한 열의 침투(thermal penetration)가 상대적으로 작게 되기 때문이다. 이러한 이유로 패드 부분의 섭동 온도에 대한 열적 변형이 작아 임계속도에 미치는 영향이 거의 없는 것이다. 그러나 실제적으로 마찰에 의한 패드 부분의 온도 상승에 대한 열변형을 고려할 시 열팽창 계수가 임계속도에 미치는 영향은 충분히 있을 것으로 생각된다. Fig. 9는 마찰 패드의 열 전도율 증가에 따른 임계속도 값을 나타낸 것이다. 패드의 열 전도율이 좋을수록 임계속도가 증가함을 알 수 있다. 마찰재의 열 전도율이 높을 경우 고온부의 디스크의 온도를 보다 빨리 냉각시키는 것으로 생각할 수 있으므로, 디스크의 온도 상승을 억제하는 효과를 얻을 수 있다. 그러므로 열 전도율이 좋은 마찰재를 사용하는 것이 열탄성 불안정성으로 인한 저더 현상을 저감 시키는데 중요한 역할을 할 것으로 판단된다. Fig. 10은 디스크와 패드의 마찰 계수에 대한 임계특성을 나타낸 그림으로, 마찰 계수가 커짐에 따라 임계속도 값이

감소함을 알 수 있다. 마찰 계수가 커질수록 마찰로 인한 디스크와 패드에서 발생하는 열이 증가하기 때문에 열탄성 불안정성을 유발하는 임계속도 값이 감소하는 것으로 보인다. 실제 자동차 브레이크 시스템의 마찰 계수는 제동력과 관련되어 있으므로(대략 0.3~0.4정도임), 이 범위 안에서 마찰 계수를 변화시키면 임계특성을 개선 시킬 수 있을 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 고속 주행 중 제동 시 브레이크 시스템에서 발생하는 hot 저더 현상의 중요한 원인인 열탄성 불안정성 해석을 수행하였다. 브레이크 시스템을 디스크와 패드로 2차원 모델링하여 마찰로 인한 열탄성 불안정성이 발생하는 임계속도에 대한 해석을 수행하였다. 온도의 섭동 모우드를 대칭과 반대칭 모드로 구별하여 해석하였고, 반대칭 모드가 대칭인 경우보다 더 작은 속도에서 즉, 먼저 불안정해짐을 알 수 있었다. 또한, 이 사실로 디스크의 변형도 반대칭 형상으로 변형한다는 것을 알 수 있었다. 마찰 패드의 물성치에 따른 해석도 수행하여 탄성 계수가 작을수록, 열 전도율이 높은수록, 마찰 계수가 작을수록 열탄성 불안정성을 유발하는 임계속도가 증가함을 알 수 있었다. 위의 해석으로 디스크 브레이크 설계 시 특정 변수에 따른 임계속도의 경향을 쉽게 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 과학기술부 중점국가연구개발사업의 지원에 의해 수행되었으며 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Barber, J. R., 1967, "The Influence of Thermal Expansion on the Friction and Wear Process," *Wear*, Vol. 10, pp. 155~159.
- (2) Barber, J. R., 1969, "Thermoelastic Instabilities in the Sliding of Conforming Solids," *Proc. Roy. Soc. Series A312*, pp. 381~394.
- (3) Kreitlow, W., Schrodter, F., and Matthai, H., 1985, "Vibration and Hum of Disc Brakes under Load," SAE 850079.
- (4) Anderson, A. E., and Knapp, R. A., 1989, "Hot Spotting in Automotive Friction Systems," *Intl. Conf.*

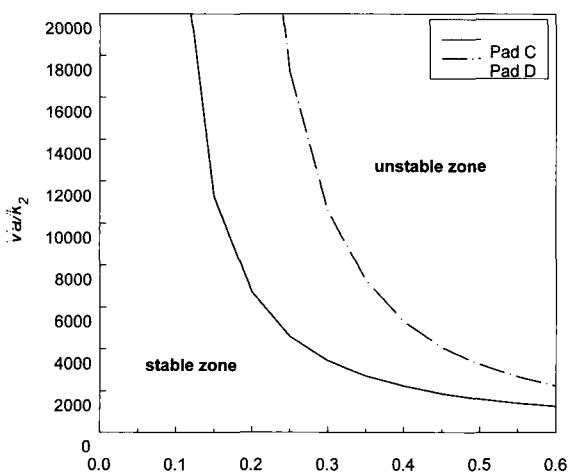


Fig. 10 Effect of the friction coefficient, f , on the critical speed ($A=0.3$).

On Wear of Materials, Vol. 2, pp. 673~680.

(5) Dow, T. A., and Burton, R. A., 1972, "Thermoelastic Instability of Sliding Contact in the Absence of Wear," *Wear*, Vol. 19, pp. 315~328.

(6) Lee, K., and Barber, J. R., 1993, "Frictionally Excited Thermoelastic Instability in Automotive Disk Brakes," *Journal of Tribology, Transactions of ASME*, Vol. 115, pp. 607~614.

(7) Du, Shuqin, Zagrodzki, P., Barber, J. R. and Hulbert, G. M., 1997, "Finite Element Analysis of Frictionally Excited Thermoelastic Instability," *Journal of Thermal Stresses*, Vol. 20, No. 2, pp. 185~201.

(8) 여태인, 1998, "미끄럼 마찰시 열탄성 접촉의 불안정성에 대한 유한요소해석," *대한기계학회 논문집(A)*, 제 22 권, 제 7 호, pp. 1185~1192.

(9) Timoshenko, S. P., and Goodier, J. N., 1982, "Theory of Elasticity", McGraw-Hill.

(10) Green, A. E., and Zerna, W., 1954, "Theoretical Elasticity", Clarendon Press, Oxford.

(11) 久保田 외, 1997, "고속브레이크저감기술의開發," *일본 자동차기술회 학술연구회*, 제 5 호, pp. 1~5.

(12) Hartsock, D. L., Hecht, R. L., and Fash, J. W., 1999, "Parametric Analyses of Thermoelastic Instability in Disc Brakes," *Int. J. of Vehicle Design*, Vol. 21, pp. 510~526.

(13) Barber, J. R., 1999, "Thermoelasticity and Contact," *Journal of Thermal Stresses*, Vol. 22, pp. 513~525.