

경사기능재료에서의 열탄성 불안정성

장 용 훈* · 안 성 호 · 이 승 욱

연세대학교 기계공학과

Thermoelastic Instability in Functionally Graded Materials

Yong Hoon Jang* · Seong Ho Ahn · Seung Wook Lee

School of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

(Received 2 February 2006 / Accepted 2 April 2006)

Abstract : A transient finite element simulation is developed for the two-dimensional thermoelastic contact problem of a stationary functionally graded material between sliding layers, with frictional heat generation. Thermoelastic instability in functionally graded materials is investigated. The critical speed of functionally graded material coating disk is larger than that of the conventional steel disk. The effect of the nonhomogeneity parameter in functionally graded material is also investigated. The results show that functionally gradient materials restrain the growth of perturbation and delay the contact separation.

Key words : Thermoelastic instability(열탄성 불안정성), Functionally graded materials(경사기능재료), Hot spots(핫스팟), Brakes and clutches(브레이크와 클러치)

Nomenclature

a : half layer thickness of core material
 h : thickness of friction material
 t : thickness of FGM material
 V : sliding speed
 L : wavelength
 C : circumference of the disk
 m : wavenumber
 P : material property of FGM layer
 α : nonhomogeneity parameter of FGM
 c_p : specific heat
 ρ : density
 K : thermal conductivity
 f : coefficient of friction
 p : contact pressure at the interface

\bar{h} : convection heat transfer coefficient
 e : characteristic element length
 k : thermal diffusivity
 u : displacement
 Cu : Courant number
 t : time

Subscripts

A : core material
 F : FGM material
 s, c : steel, ceramic material
 cr : critical value

1. 서론

브레이크 혹은 변속기 클러치의 작동시 마찰열이 발생하고, 그 결과로 생기는 불균일한 온도분포는

*Corresponding author, E-mail: jyh@yonsei.ac.kr

접촉압력에 영향을 주는 열탄성 변형을 일으킨다. 만약 접촉압력 요동을 증가시킬 만큼 미끄러짐 속도가 충분히 크다면 시스템이 불안정하게 되고 국부적으로 열이 발생하고 압력을 받는다. 이러한 현상을 열탄성 불안정성(TEI)¹⁾이라 하고, 이로 인해 미끄러짐 표면에서 핫스팟(Hot Spots)이 생긴다.

열탄성 불안정성(TEI)이 마찰이 일어나는 클러치나 브레이크에서 이른바 핫스팟(Hot Spots), 핫저더(Hot Judder)라 불리는 현상의 원인이 된다.²⁾ 이렇게 핫스팟(Hot Spots)이 생기는 부분에서 국부적으로 높은 응력을 받고 이것이 재료의 기능저하를 일으키고 결과적으로 파단의 원인이 된다.

이러한 문제를 해결하기 위해 몇 가지 연구가 수행되었다. Barber는 열탄성 불안정성(TEI)의 개념을 처음으로 도입하면서 현상의 물리적 설명을 제시하였다. Anderson과 Knapp²⁾는 자동차의 브레이크에서 핫스팟(Hot Spots)에 의해 일어나는 재료의 영구적 기능저하를 관찰하였다. Dinwiddie와 Lee³⁾는 고속 적외선 카메라를 이용하여 핫스팟(Hot Spots)의 시간에 따른 거동을 직접적으로 관찰하였다. 심각한 핫스팟(Hot Spotting)현상은 자동차 디스크 브레이크에서 저더(judder)라 불리는 저주파 진동을 일으킨다. Burton et al.⁴⁾은 두 개의 미끄러짐면 사이에 균일한 접촉압력을 가해준 상태에서 작은 요동을 주었을 때 임계속도를 초과한 미끄러짐 속도에서 불안정하다는 것을 보였다. Lee와 Barber⁵⁾는 자동차 디스크 브레이크에서 유한한 디스크 치수를 고려하기 위해 유한 층 모델을 고안하였고, 임계속도를 예측할 수 있는 층 모델을 제시하였다. Zagrodzki et al.⁶⁾는 두 개의 미끄러짐층 사이에 고정된 층이 있고 마찰열이 발생하는 열탄성 접촉 문제의 2차원 유한 요소 과도(transient) 시뮬레이션을 고안하였다. 그 모델은 작동의 선형범위에서 Lee와 Barber의 모델⁵⁾과 비교하여 검증되었고 비선형 범위에서 과도(transient) 열탄성 거동을 설명하였다. 또한 최지훈 등⁷⁾과 하태원 등⁸⁾도 브레이크에서의 열탄성 불안정성에 대해 연구하였다.

이전의 연구를 통해 전통적인 스틸 디스크가 TEI 현상을 일으키는 원인이라는 것을 잘 알 수 있다. 최근에 브레이크나 클러치 시스템에서 TEI현상을 줄

여주는 새로운 재료가 제안되었다.⁹⁾ 장래성 있는 재료중의 하나는 둘 혹은 그 이상의 비균질 재료간의 완만한 단계의 물성치를 갖는 경사기능재료(FGM)¹⁰⁾이다. FGM은 세라믹의 열과 부식에 대한 내구성과 금속재료의 기계적 강도를 동시에 가지는 이점으로 작동 온도와 열효율을 증가시키고 코팅면의 결합 강도를 증가시킨다.^{11), 12)} 따라서, 구조를 FGM으로 바꾸는 최소한의 변화로 브레이크와 클러치 시스템에서 최대의 효과를 볼 수 있다.

이 논문에서, 우리는 브레이크와 클러치 시스템에서 FGM의 실현가능성을 연구할 것이다. 우리는 FGM을 사용한 브레이크와 클러치 시스템에 적합한 수치적 모델을 설계하여 시뮬레이션 하였고, FGM에서의 TEI현상을 살펴보고, TEI현상에서 FGM의 효과를 검토하였다.

2. 기하학 모델

Fig. 1에서 볼 수 있는 2차원 모델은 미끄러짐 접촉 시스템의 기하학 모델을 나타낸다. 시스템의 각 층은 탄성이고 열전도가 일어난다. 두 개의 외부층 Ω_1 과 Ω_3 는 Ω_2 에 대하여 상대 미끄러짐 속도 V 로 수평으로 움직인다. Ω_1 과 Ω_3 는 마찰재로 구성되어있고 Ω_2 에서 Ω_A 는 steel, Ω_F 는 FGM 코팅층으로 구성되어있다. Ω_1 층과 Ω_3 층의 두께는 h 이고, 중간재료의 두께 Ω_A 가 $2a$ 이고 FGM층의 두께 Ω_F 가 t 일 때 Ω_2 층의 총 두께($\Omega_2 = \Omega_A + 2\Omega_F$)는 $2a + 2t$ 가 된다. 이 모델은 $y = h + a + t$ 축을 기준으로 기하학적 대

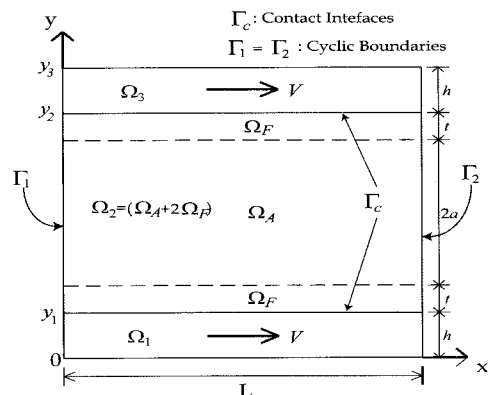


Fig. 1 미끄러짐 접촉 시스템의 기하학 모델

칭이다.

열탄성 문제는 미끄러지는 방향인 x방향으로 파장 $L = C/m$ (C 는 디스크 원주의 길이이고, m 은 파의 개수이다.)을 가지고 주기적 대칭이라고 가정한다.

3. 재료의 물성치

이 모델의 주 재료는 마찰재, 중간부분의 스틸, 코팅층의 FGM으로 구성되어있다. 물성치들은 Table 1에 나타나있다.

Table 1 FGM과 마찰재의 물성치

	마찰재	스틸	세라믹
탄성계수, E (GPa)	0.3	200	151
열팽창계수, α (μ/K)	1.4	1.2	1.0
열전도율, K (W/mK)	0.09	42	2.2
Poisson's Ratio, ν	0.12	0.3	0.3
열확산도, k ($\mu m^2/s$)	4.167	11.91	0.623

마찰재와 중간재는 전체 부피에서 단일 물성치를 가지지만 FGM 코팅층은 높이에 따라 다른 물성치를 가진다. 코팅은 두께 변화에 따라 두 재료가 연속적으로, 즉 물성치 변화가 단계적으로 완만하게 된다고 가정하여 만들어진다. 그 결과로 재료 물성치 분포의 불연속성이 제거되고, 복합재료영역 전체에 걸쳐 유한한 응력값을 갖는다.

FGM 층에서의 재료물성치 분포는 많은 연구에서 논의 되었다. 그중에 간단하고 유망한 한 가지 방법은 FGM 재료를 상수로 된 여러 층으로 나누는 것이다.¹⁰⁾ 각각의 층에서 재료의 물성치는 높이에 따른 함수이고 다음식과 같이 주어진다.

$$P = P_s + (P_s - P_c) \left(\frac{h+2a+t-y}{t} \right)^\alpha, \quad (1)$$

$$h+2a+t < y < h+2a+2t$$

P 는 높이에 따른 물성치이고, P_s 는 스틸의 물성치, P_c 는 세라믹의 물성치, α 는 FGM에서의 비균질 물성치의 기울기(비균질물성기울기)를 나타낸다. P 는 탄성계수, 열팽창계수, 열전도율, 열확산도를 정하는데 사용할 수 있다. 아래쪽 FGM층에서의 물

성치는 $h < y < h+t$ 인 높이 y 에서 구하고, 위쪽 FGM 층의 물성치는 $y = h+a+t$ 인 층에 대한 대칭 조건을 이용하여 구한다. 물성치 분포에 관한 식 (1) 으로부터 중간 스틸층과 FGM층 사이 면에서는 스틸의 물성치를 가지고 높이가 증가함에 따라 세라믹의 비중이 증가하다가 FGM층의 끝에서는 세라믹의 물성치를 갖는다는 것을 알 수 있다. FGM층의 물성치 분포는 α 에 의해 결정되는데, $\alpha = 1$ 일 때는 선형적인 물성치 분포를 보이고, 선형 FGM 이라 한다. $\alpha > 1$ 일 때는 세라믹이 주된 FGM(세라믹FGM), $0 < \alpha < 1$ 일 때는 스틸이 주된 FGM(스틸FGM)이라 한다. Fig. 2는 FGM층에서 α 에 따른 탄성계수의 변화를 보여준다. 수치적 모델에서 FGM층은 10개의 층으로 나뉘지고, 각 층의 물성치는 식 (1)에 의해 주어진다.

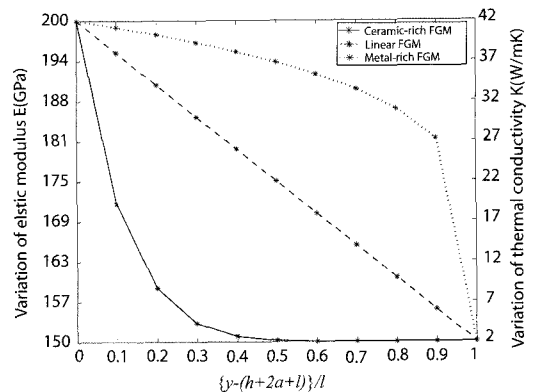


Fig. 2 FGM 코팅층에서의 탄성계수분포

4. 열탄성 해석

열탄성 문제는 열과 기계적 문제를 동시에 포함한다. 이것은 열해석과 탄성해석을 분리한 알고리즘의 개발이 필요하다. 또한 열전달 방정식은 각층들 사이에 미끄러지는 상대속도가 있기 때문에 대류에 관한 항이 있어야 한다. 이어지는 단원에서 모델의 열과 탄성해석에 관한 자세한 내용이 논의 될 것이다.

4.1 열해석

기준 좌표계 Oxy 는 모든 층을 포함하는 전체 모델에 관해서 정의 되었다. 기준좌표계는 접촉압력

요동의 거동에 근거하여 선택되었다. 기준좌표계는 전도가 잘되는 재료에 고정되는 것이 효율적이라고 보고되었다.⁶⁾ Fig. 1에 나와 있는 모델에서 기준좌표계는 고정된 층인 2번 층에 고정되어 있다.

마찰제인 Ω_1 과 Ω_3 층에서의 열전도 방정식은 전도-대류의 항으로 표현된다.

$$K_i \left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial y^2} \right) = c_{p,i} \rho_i \left(\frac{\partial T_i}{\partial t} + \frac{\partial T_i}{\partial x} \right), \quad i = 1, 3 \quad (2)$$

c_p 는 비열, ρ 는 밀도, K 는 열전도율이다.

2번층에 대해서는, 층이 Ω_A 층과 FGM 코팅층인 Ω_F 층으로 나누어져 있고, 각층의 열전도 방정식은 다음과 같다.

$$K_A \left(\frac{\partial^2 T_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_A}{\partial y^2} \right) = c_{p,A} \rho_A \frac{\partial T_A}{\partial t}, \quad \text{in } \Omega_A \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_F(y) \frac{\partial T_F}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_F(y) \frac{\partial T_F}{\partial y} \right) = c_{p,F}(y) \rho_F \frac{\partial T_F}{\partial t}, \quad \text{in } \Omega_F \quad (4.3)$$

Ω_F 층 재료의 물성치는 높이 y 에 따라 변하지만, Ω_A 층 재료의 물성치는 일정하다. FGM층의 밀도는 일정하다고 가정한다.

열전도 방정식에 관한 경계조건들은 층들 사이의 접촉과 주위 환경에 영향을 받는다. 층들 사이의 접촉 $\Gamma_c(y = y_i, i = 1, 2)$ 은 마찰 때문에 열을 발생시키는데 다음 식으로 표현된다.

$$q_i = f V p_{c,i} \quad (4.4)$$

f 는 마찰계수, $p_{c,i}$ 는 1번층과 2번층 그리고 2번층과 3번층 사이의 접촉압력이다.

$y = y_i$ 에서의 계면 경계조건은 기계적 접촉의 상태에 의존한다. 접촉 표면의 경계조건은 두가지 경우가 있다. 첫 번째 경우는 표면이 접촉해 있을 경우이고, 두 가지 열 경계조건이 있다.

열발생 조건:

$$K_i \frac{\partial T_i}{\partial y} \Big|_{y=y_i} - K_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial y} \Big|_{y=y_i} = q_i, \quad i = 1, 2 \quad (4.5)$$

온도 연속성 조건:

$$T_i \Big|_{y=y_i} = T_{i+1} \Big|_{y=y_i} = 0, \quad i = 1, 2 \quad (4.6)$$

두 번째 경우는 접촉 표면이 분리 되었을 경우이고, 이때의 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial T_i}{\partial y} \Big|_{y=y_i} = \frac{\partial T_{i+1}}{\partial y} \Big|_{y=y_i} = 0, \quad i = 1, 2 \quad (4.7)$$

$x = 0, x = L$ 인 경계에서의 주기적 대칭조건 ($T_1 = T_2$):

$$T_i \Big|_{x=0} = T_i \Big|_{x=L}, \quad i = 1, 2 \quad (4.8)$$

그리고 몸체의 윗면과 아랫면에서의 경계조건:

$$q_i = \bar{h} (T_i - T_\infty) \quad (4.9)$$

\bar{h} 는 대류 열전달 계수, T_∞ 는 주위의 온도이다.

열전도 방정식 (2)와 (4.3)은 대류항을 나타낸다. 이 항들은 표준 Galerkin 유한요소 알고리즘이 사용될 때 중요한 문제를 드러낸다. 특히, 메쉬 크기가 특정 임계치를 초과할 경우, 예를 들어 Peclet 수 ($P_e = V_e/k$)가 2보다 클 때(e 는 한 요소의 길이, k 는 열확산도), 표준 Galerkin 알고리즘은 대류항의 적합한 이산화(discretization)를 제공하지 못하고 해가 수치적으로 수렴하지 못한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Petrov-Galerkin 알고리즘이 소개 되었다.⁶⁾ 이 새로운 알고리즘은 중심차분법을 후방차분법으로 대체하는 upwinding 해석방법을 사용한다. 이 연구에서, 해석을 수행하기 위해 상용 유한요소 프로그램인 Abaqus/HKS 을 사용하였다.¹⁴⁾

4.2 탄성해석

접촉 조건을 만족 한다면 접촉면에 대한 수직변위 u_y 의 연속성이 적용되는 표준 탄성접촉공식이 사용된다.

탄성해석을 위한 x, y 방향의 기계적 경계조건은 다음과 같이 요약할 수 있다.

주기적 대칭 조건이 적용되는 $x = 0, x = L$ 모서리:

$$(u_x)_i \Big|_{x=0} = (u_x)_i \Big|_{x=L}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (4.10)$$

$$(u_y)_i \Big|_{x=0} = (u_y)_i \Big|_{x=L}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (4.11)$$

$y = 0, y = y_3$ 인 모서리에서의 경계조건:

$$(u_y)_1|_{y=0} = \gamma \tag{4.12}$$

$$(u_y)_3|_{y=y_3} = 0 \tag{4.13}$$

$(u_y)_i$ 는 i 번째 층의 변위성분, γ 는 상수이다. 덧붙여 y 방향으로 주어지는 하중 F_y 는 일정하다. 탄성접촉 문제도 Abaqus/HKS를 사용하여 유한요소법으로 풀었다.

4.3 해석과정

해석시 열과 탄성접촉 문제는 시간에 따라 순차적으로 해석한다. 이 방법은 가정된 온도 분포에 관한 탄성해석으로부터 시작되고, 그 결과로 마찰면에서의 변위, 응력, 그리고 접촉압력이 계산된다. 접촉압력은 열해석에서 접촉면에서의 열유속(heat flux)을 정의하는데 사용된다. 열해석 과정은 비정상(unsteady) 과정이다. 우선 아주 짧은 시간동안 열해석을 하여 온도를 구하고 그 후에 온도장에 관한 탄성해석이 수행된다.

시뮬레이션의 열해석에서 첫 단계에 특정한 접촉압력 요동을 준다. 이 초기조건은 접촉압력 분포의 일반적인 형태에 영향을 주고, 실제 형태는 시뮬레이션을 하는 동안 점차적으로 형성된다.

5. 유한요소 모델의 조건

과도(transient) 열탄성 해석을 수행하는 수치적 모델은 메쉬나 시간스텝에 관해서 신중하게 선택된다.

유한요소 메쉬는 마찰재료의 표면층에서 급격한 온도 변화가 잘 나타나도록 설계되어야 한다. 열전도가 잘 일어나는 재료에서는 마찰재료에 비해 y -방향으로 훨씬 작은 온도 기울기가 예상된다. 그러므로 열전도가 잘 일어나는 스틸층에서는 훨씬 큰 요소 크기 e^y 가 사용된다. 미끄러지는 방향인 x -방향으로는 각각의 층에서 메쉬가 균일하다. Zagrodzki et al.⁶⁾에 의해 표면층에서 요소의 종횡비(aspect ratio)는 $e_x/e_y \gg 1$ 이고, 최소 파장의 길이를 50개의 요소로 나누는 것이 권장되었다. 대류 문제를 풀기 위해서는 시간 스텝이 Courant number가 $Cu = V\Delta t/e_x$ 일 때, $Cu \leq 1$ 의 조건을 만족해야한다.

6. 결과 및 검토

6.1 선형 FGM층을 사용했을 때의 결과

우선 Lee와 Barber의 이론적 모델⁵⁾과 비교검증하기 위해서 $\alpha = 1$ 인 선형 FGM층을 사용하였다. FGM층에서 세라믹 물성치 변화에 따른 과장수 ma 에 대한 무차원 임계속도 $V_{cr}^* = V_{cr} a/k_c$ 의 거동을 Fig. 3에 표시하였다($m = 2\pi/L$, k_c 는 스틸층의 열확산도). 검증작업에서 모델은 식 (1)의 P_c 에 따라 세라믹부터 스틸까지 물성치를 단계적으로 변화시켰다. 선형 FGM층에서 세라믹의 탄성계수는 150 GPa, 175 GPa, 190 GPa를 사용하였고, 스틸의 탄성계수는 200 GPa를 사용하였다. FGM층에서 세라믹과 스틸의 중간단계의 물성치들은 세라믹과 스틸의 비율에 따라 변화시켰다. 마찰계수 $f = 0.2$ 를 사용했을 때의 임계속도에 관한 Lee와 Barber의 해도 Fig. 3에 표시되었다. 결과를 보면 세라믹 물성치가 스틸과 가까워질수록 Lee와 Barber의 해에 가까워진다는 것을 알 수 있다.

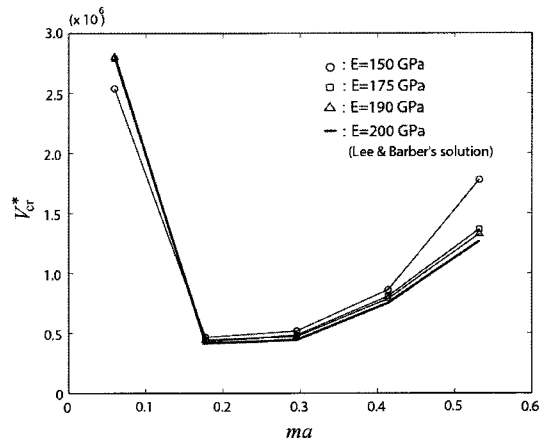


Fig. 3 세라믹 물성치 변화에 따른 과장수 ma 에 대한 무차원 임계속도 V_{cr}^* 의 거동

6.2 임계속도에 대한 비균질물성기울기의 효과

식 (1)에 따라 FGM층의 비균질 물성치에 따른 과장수에 대한 무차원 임계속도의 거동이 Fig. 4에 나타나있다. 이 그림에서 비균질물성기울기 α 가 1보다 큰, 즉 세라믹의 비중이 큰 FGM 코팅층이 주로

사용되었다. 균질재료로된 중간층에 관한 Lee와 Barber의 해가 그림에서 FGM의 해와 비교하기 위한 기준으로 표시 되었다. FGM코팅층을 사용했을 때의 임계속도가 균질재료의 경우보다 대부분 크게 나타났다. 비균질물성기율기 α 가 커질수록 임계속도가 증가하다가 $\alpha = 6$ 일 때 최대값을 보이고 그 이상에서는 감소하게 된다. 이러한 경향은 비균질물성기율기에 대한 임계속도의 거동을 나타낸 Fig. 5에서 더욱 명확히 알 수 있다. FGM코팅층을 사용했을 때의 임계속도가 더욱 크다는 사실로부터 FGM코팅이 접촉압력 요동의 증가를 막을 수 있는 좋은 대안이 된다는 것을 알 수 있다.

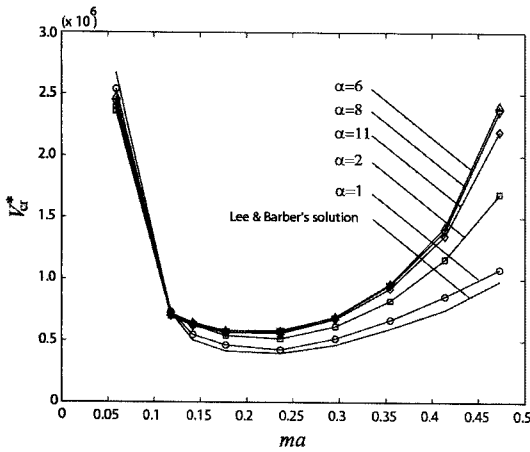


Fig. 4 비균질물성기율기 α 에 따른 파장 ma 에 대한 무차원 임계속도 V_{cr}^* 의 거동

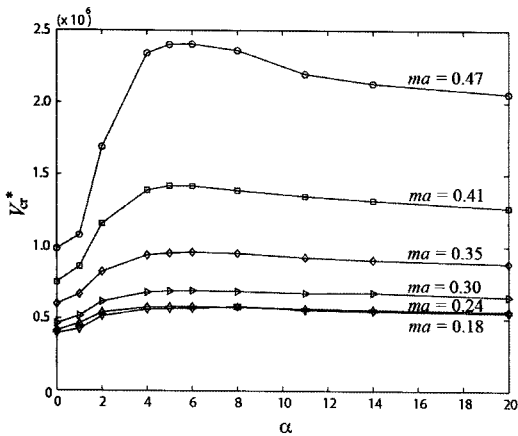
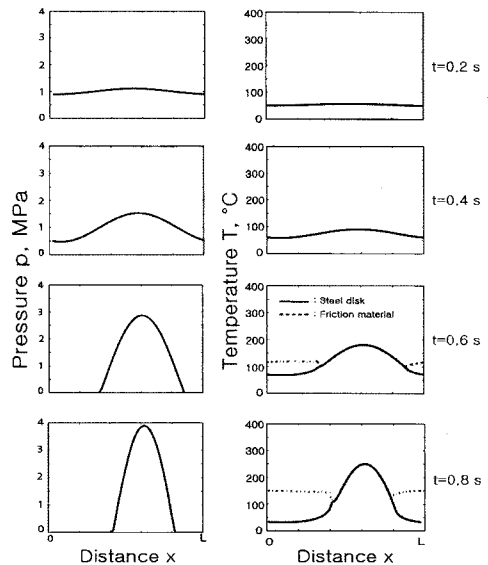


Fig. 5 파장 ma 에 따른 비균질물성기율기 α 에 대한 무차원 임계속도 V_{cr}^* 의 거동

6.3 접촉압력과 온도의 시간에 따른 변화

모든 시뮬레이션들은 FGM 디스크와 종전의 스틸 디스크의 성능을 비교하기 위하여 수행되었다.

종전의 스틸 디스크와 마찰재 사이에서의 시간에 따른 접촉압력과 온도분포를 Fig. 6에 나타내었고, FGM 코팅 디스크와 마찰재 사이에서의 시간에 따른 접촉압력과 온도 분포를 Fig. 7에 나타내었다. 종전의 스틸 디스크에서는 초기의 작은 접촉압력 분포가 급격하게 증가하여 $t = 0.6s$ 인 시간에 마찰면의 일부분만 접촉하게 되고 일부는 분리되는 접촉분리(contact separation)가 일어난다. 접촉분리가 일어나는 지점에서 온도는 불연속적으로 분포하게 되고, 마찰재 표면에서의 온도가 스틸디스크 표면의 온도보다 높게 나타난다. 국부적으로 온도가 급격히 증가하게 되는데, 이것이 접촉분리를 일으키는 원인이다. 반면에 FGM 디스크에서는 접촉분리가 일어나지 않고, 마찰면의 평균 온도는 더 높게 나타나지만 온도 구배가 증가하지 않는다. 따라서 FGM이 접촉면에서 국부적인 온도 차이를 줄여주고 전체의 평균온도를 올려주는 역할을 한다고 결론지을 수 있다. 국부적인 온도차이가 TEI현상을 유발하는 중요한 원인이기 때문에 FGM 코팅 디스크가 임계속도를 증가시켜줄 것이다.



NonFGM, $V = 5 \times V_{cr}$ (20 m/s), $L = 21.258 \times 10^{-3}$ (ma=0.2956)

Fig. 6 스틸중간재와 마찰재 사이 접촉면에서의 시간에 따른 압력과 온도 변화

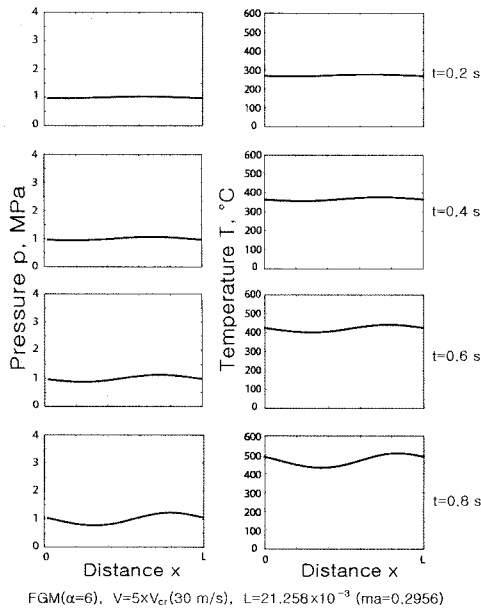


Fig. 7 FGM코팅층과 마찰재 사이 접촉면에서의 시간에 따른 압력과 온도 변화

6.4 FGM층에서의 응력변화

FGM 코팅 디스크와 스틸 디스크에서의 시간에 따른 열탄성 응력을 Fig. 8과 Fig. 9에 비교하여 나타내었다. 스틸 디스크에서의 응력 변화는 국부적으로 온도가 증가하는 것처럼 국부적으로 응력이 증가한다. 결과적으로 접촉분리가 일어날 때 핫스팟이 생기는 지점을 따라 응력이 국부적으로 커진다. FGM 코팅 디스크에서는 응력변화의 폭이 아주 작은데 이것은 FGM 코팅 시스템을 사용함으로써 오랜 시간동안 사용할 수 있는 확실한 강도를 얻을 수 있다는 것을 보여준다.

7. 결론

과도(transient) 시뮬레이션은 FGM 코팅 디스크에서의 TEI현상을 조사하기 위해 수행되었다. 모델은 선형 FGM 코팅 디스크를 사용함으로써 Lee와 Barber의 이론해와 비교하여 검증되었다. 최대 임계속도는 비균질물성기울기(nonhomogeneity)의 변화에 따라 얻어지고, FGM 코팅 디스크에서의 임계속도가 스틸디스크에서 보다 크게 나타난다. 마찰면에서의 접촉압력과 온도 분포의 시간에 따른 변화를 보면 FGM 코팅이 접촉분리를 지연시키고 접촉

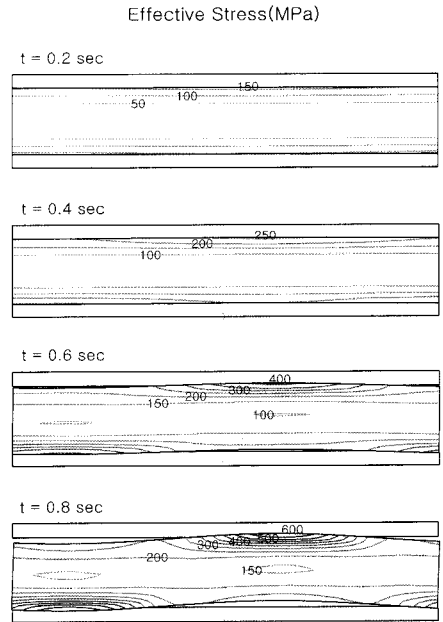


Fig. 8 스틸중간재와 마찰재 사이 접촉면에서의 시간에 따른 Von Mises Stress 변화

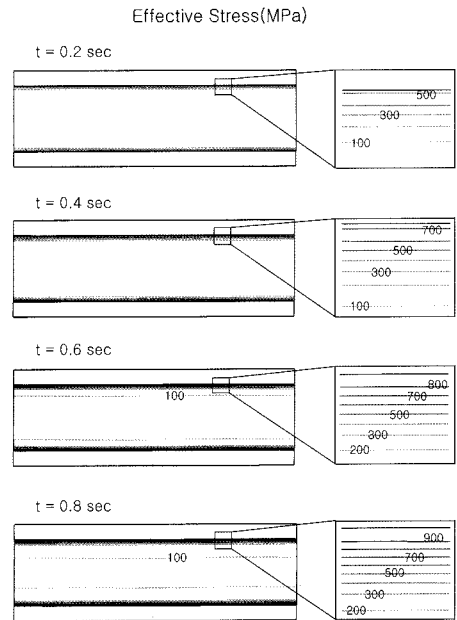


Fig. 9 FGM코팅층과 마찰재 사이 접촉면에서의 시간에 따른 압력과 Von Mises Stress 변화

압력 요동의 증가를 막아준다는 사실로부터 FGM 코팅 디스크에서 임계속도가 크다는 것을 명확히 알 수 있다.

References

- 1) J. R. Barber, "Thermoelastic Instabilities in the Sliding of Conforming Solids," Proc. R. Soc. London, Ser. A. 312, pp.381-394, 1969.
- 2) A. E. Anderson and R. A. Knapp, "Hot Spotting in Automotive Friction Systems," Wear, Vol.135, pp.319-337, 1990.
- 3) K. Lee and R. B. Dinwiddie, "Conditions of Frictional Contact in Disk Brakes and Their Effects on Brake Judder," SAE 980598, 1998.
- 4) R. A. Burton, V. Nerlikar and S. R. Kilaparti, "Thermoelastic Instability in a Seal-like Configuration," Wear, Vol.24, pp.177-188, 1973.
- 5) K. Lee and J. R. Barber, "Frictionally Excited Thermoelastic Instability in Automotive Disk Brakes," Journal of Tribology, Vol.115, pp.605-614, 1993.
- 6) P. Zagrodzki, K. B. Lam, E. Al Bahkali and J. R. Barber, "Nonlinear Transient Behavior of a Sliding System With Frictionally Excited Thermoelastic Instability," Journal of Tribology, Vol.123, pp.669-708, 2001.
- 7) J.-H. Choi, D.-H. Kim and I. Lee, "Study on Thermoelastic Instability of Automotive Disc Brakes," Journal of KSNVE, Vol.II, pp.315-322, 2001.
- 8) T.-W. Ha, Y.-G. Joe, H.-S. Kim, J.-Y. Lee and J.-E. Oh, "Thermoelastic Instability of the Layer Sliding between Two Rigid Non-conducting Half-planes," Transactions of KSAE, Vol.12, No.1, pp.114-121, 2004.
- 9) F. A. Lyod and W. O. Silverthorne II, "The Effect of Modulus and Thermal Diffusivity on Sintered Metal Performance," SAE 2001-01-1438, 2002.
- 10) G. R. Liu and X. Han, "An Inverse Procedure for Determination of Material Property of FGM," Center for Advanced Computations in Engineering Science C/o Department of Mechanical Engineering National University of Singapore.
- 11) Y. D. Lee and F. Erdogan, "Residual/Thermal Stresses in FGM and Laminated Thermal Barrier Coatings," International of Fracture, Vol.69, pp.145-165, 1995.
- 12) T. Fujimoto and N. Noda, "Influence of the Compositional Profile of Functionally Graded Material on the Crack Path under Thermal Shock," J. Am. Ceram. Soc., Vol.84, pp.1480-1486, 2001.
- 13) S. Sarraute, O. T. Sorensen and B. F. Sorensen, "Microstructure Dependent Thermophysical Properties of Ni-Zn Ferrite-BaTiO₃ Functionally Graded Ceramics," Journal of Materials Science, Vol.34, pp.99-104, 1999.
- 14) ABAQUS, Theory Manual, Version 6.5, HKS, 2005.