

미끄러짐 마찰 접촉하는 시스템에서의 열탄소성 불안정성 연구

안성호[†], 장용훈^{*}

Frictionally Excited Thermoelastoplastic instability in sliding contact system

Ahn Seong Ho, Jang Yong Hoon

Key Words: Thermoelastic instability(열탄성 불안정성), Thermoelastoplastic instability(열탄소성 불안정성), Hot Spot(핫스팟), Brake(브레이크)

Abstract

A transient finite element simulation is developed for the two-dimensional stationary elastoplastic layer between sliding layers, to investigate thermoelastoplastic instability(TEPI) due to frictional heating in the material. The analysis will show some differences between the case of thermoelastic instability and TEPI, especially according to the contact pressure above yield stress. A transient behavior of contact pressure is captured to explain the behavior of thermoplasticity of contact with different sliding velocity. The instability of contact pressure in the long range of braking time will be explored to understand the generation mechanism of hot spots.

1. 서 론

브레이크 혹은 변속기 클러치의 작동시 마찰열이 발생하고, 그 결과로 생기는 불균일한 온도분포는 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]이라하고, 이로 인해 미끄러짐 표면에서 핫스팟(Hot Spot)이 생긴다.

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

이러한 문제를 해결하기 위해 여러 연구가 수행되었다. Barber는 열탄성 불안정성(TEI)의 개념을 처음으로 도입하면서 현상의 물리적 설명을 제시하였다. Dinwiddie와 Lee^[3]는 고속 적외선 카메라를 이용하여 핫스팟의 시간에 따른 거동을 직접적으로 관찰하였다. 심각한 핫스팟 현상은 자동차 디스크 브레이크에서 저더(judder)라 불리는 저주파 진동을 일으킨다. Burton et al.^[4]은 두 개의 미끄러짐면 사이에 균일한 접촉압력을 가해 준 상태에서 작은 요동을 주었을 때 임계속도를 초과한 미끄러짐 속도에서 불안정하다는 것을 보였다. Lee와 Barber^[5]는 자동차 디스크 브레이크에서 유한한 디스크 치수를 고려하기 위해 유한

[†] 회원, 연세대학교 기계공학부

E-mail : ash105@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-5812 FAX : (02)312-2159

^{*} 회원, 연세대학교 기계공학부 부교수

층 모델을 고안하였고, 임계속도를 예측할 수 있는 모델을 제시하였다. Zagrodzki et al.^[6] 은 두 개의 미끄러짐층 사이에 고정된 층이 있고 마찰열이 발생하는 열탄성 접촉 문제의 2차원 유한요소 과도(transient) 시뮬레이션을 고안하였다. 그 모델은 선형범위에서 Lee와 Barber의 모델^[5]과 비교하여 검증되었고 비선형 범위에서 과도 열탄성 거동을 설명하였다.

하지만 기존의 열탄성 불안정성(TEI)은 기본적으로 재료를 탄성으로 가정한 것이므로 실제 거동을 예측하는 데에는 한계가 있다. 브레이크나 클러치 구동 시 발생하는 핫스팟은 디스크 표면에 열과 응력을 집중시키고 이는 결국 재료의 탄성영역을 넘어서 재료가 소성거동을 하게 된다. 따라서 재료의 소성거동을 고려함으로써 보다 실제 현상에 가까운 핫스팟 생성 메커니즘에 대한 연구를 수행할 수 있을 것으로 생각된다.

이 연구에서 기존의 열탄성 불안정성(TEI)연구가 지니던 한계를 극복하기 위해 재료의 소성거동을 추가로 고려하는 열탄소성 불안정성(Thermoelasto-plastic instability, TEPI)연구를 수행하였다. 열탄소성 불안정성(TEPI)연구를 수행함으로써 이전 열탄성 불안정성(TEI)만을 고려했을 때의 거동과의 차이점을 살펴보고, 불안정한 상태에서의 과도(transient) 열탄소성 거동을 살펴보았다.

2. 해석 모델

2.1 기하학 모델

열탄소성 불안정성 연구를 위해 Fig. 1과 같은 2차원 모델을 사용하였다. 두 개의 외부층 Ω_1 과 Ω_3 은 마찰재로 구성되어 있고 Ω_2 에 대하여 상대 미끄러짐 속도 V 로 수평으로 움직이며 탄성 재료로 가정하였다. 두 외부층 사이의 Ω_2 층은 steel로 구성되어 있으며 유효응력의 크기에 따라 탄소성 거동을 정의하였다.

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

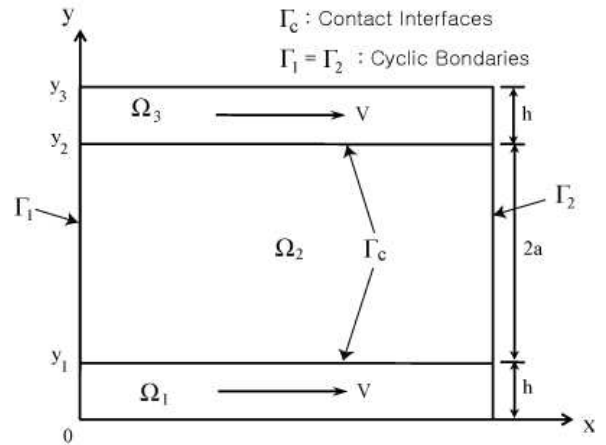


Fig. 1 The geometric model of sliding contact system

2.1 탄소성 모델

재료가 항복응력에 도달하기 전의 탄성영역에서는 기본적으로 훅의 법칙을 따른다. 주기적 대칭 조건을 위해 $x=0, x=L$ 인 양쪽 끝의 모서리에서의 경계조건은 다음과 같다.

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

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

재료의 소성 거동은 등방 경화(isotropic hardening)를 가정하였고, 다음과 같은 항복조건식을 사용하였다.^[7]

$$f = \sigma_e - r - \sigma_y = \left(\frac{3}{2} \sigma' : \sigma' \right)^{1/2} - r - \sigma_y \quad (3)$$

여기에서 σ_e 는 유효응력으로 Von Mises 응력을 사용하였고, σ_y 는 재료의 항복응력, σ' 은 deviatoric 응력 텐서, r 은 등방경화함수(Isotropic hardening function)를 나타내며 소성변형시 항복 표면(yield surface)의 팽창량을 의미하고 다음 식과 같이 구한다.

$$r = \int h de^p \quad (4)$$

여기에서 h 는 변형률 경화 상수, de^p 는 유효 소성변형률 증분을 나타낸다. 식(3)의 항복조건식에서 $f < 0$ 일 때는 소성변형이 일어나지 않고 탄성변형 상태에 있음을 의미하고 $f > 0$ 일 때 소성변형이 일어난다. 이 연구에서는 h 가 상수인 선형 등방경화(Linear isotropic hardening)를 가정하였다.

2.2 열해석 모델

기준 좌표계 O_{xy} 는 모든 층을 포함하는 전체 모델에 관해서 정의되었다. 기준 좌표계는 접촉 압력 요동의 거동에 근거하여 선택되었다. 기준 좌표계는 전도가 잘되는 재료에 설정하는 것이 효율적이라고 보고되었다.[6] Fig. 1에 나와있는 모델에서 기준좌표계는 고정된 층인 Ω_2 층에 설정하였다.

마찰재인 Ω_1 과 Ω_3 층에서의 열전도 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$K_i \left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial y^2} \right) = c_{p,i} \rho_i \left(\frac{\partial T_i}{\partial t} + \frac{\partial T_i}{\partial x} \right), \quad i = 1, 3 \quad (5)$$

여기에서 c_p 는 비열, ρ 는 밀도, K 는 열전도율이다. Ω_1 과 Ω_3 층은 고정된 층인 Ω_2 층에 대하여 미끄러지는 상대속도가 있기 때문에 대류에 관한 항이 포함되었다.

고정된 층인 Ω_2 층에서의 열전도 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$K_A \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} \right) = c_{p,2} \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t}, \quad \text{in } \Omega_2 \quad (6)$$

열전도 방정식에 관한 경계조건들은 층들 사이의 접촉과 주위 환경에 영향을 받는다. 층들 사이의 접촉($\Gamma_c(y = y_1, y_2)$)은 마찰 때문에 열을 발생시키는데 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$q_i = f V p_{c,i} \quad (7)$$

f 는 마찰계수, $p_{c,i}$ 는 1번 층과 2번 층 그리고 2번 층과 3번 층 사이의 접촉압력이다.

$y = y_i$ 에서의 계면 경계조건은 기계적 접촉의 상태에 의존한다. 접촉 표면의 경계조건은 두 가지 경우가 있다. 첫 번째 경우는 표면이 접촉해 있는 경우이고, 두 번째 경우는 접촉면 일부가 떨어져 접촉하지 않는 경우이다. 첫 번째 경우의 열 경계조건은 다음과 같다.

$$K_i \frac{\partial T_i}{\partial y} \Big|_{y=y_i} - K_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial y} \Big|_{y=y_i} = q_i, \quad i = 1, 2 \quad (8)$$

$$T_i \Big|_{y=y_i} = T_{i+1} \Big|_{y=y_i} = 0, \quad i = 1, 2 \quad (9)$$

두 번째로 접촉 표면이 분리되는 경우의 경계 조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial T_i}{\partial y} \Big|_{y=y_i} = \frac{\partial T_{i+1}}{\partial y} \Big|_{y=y_i} = 0, \quad i = 1, 2 \quad (10)$$

그리고 주기적 대칭 조건을 주기위해 $x = 0$, $x = L$ 인 양쪽 끝의 경계에서의 조건은 다음과 같다.

$$T_i \Big|_{x=0} = T_i \Big|_{x=L}, \quad i = 1, 2 \quad (11)$$

2.3 해석과정

해석시 열해석과 탄·소성 해석은 시간에 따라 순차적으로 해석한다. 이 방법은 가정된 온도 분포에 관한 탄·소성 해석으로부터 시작되고, 그 결과로 접촉면에서의 변위, 응력, 그리고 접촉 압력이 계산된다. 접촉압력은 열해석에서 접촉면에서의 열유속(heat flux)를 정의하는데 사용된다. 열해석은 과도(transient)과정이고 아주 짧은 시간동안 열해석을 하여 온도를 구하고 그 후에 온도장에 관한 탄·소성 해석이 수행된다.

열해석의 첫 단계에서 특정한 접촉압력 요동을 가정한다. 이 초기 조건은 접촉압력 분포의 일반적인 형태에 영향을 주고, 실제 형태는 해석이 진행되면서 점차적으로 형성된다.

모든 해석과정은 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 해석하였다.^[8]

3. 결과

이전의 TEI에서의 결과들과 비교하여 소성거동이 주어진 시스템에 미치는 영향을 살펴보았다. 대부분의 해석은 TEI에서의 임계속도 V_{cr} 이상의 속도에서 해석을 진행하였다. TEI의 경우에 임계속도 이상의 속도에서는 시스템이 불안정해져서 접촉압력 요동이 점점 증가하여 일부만 접촉하게 되는 접촉 분리 현상이 일어나게 된다. TEPI에서는 이 접촉분리 현상이 일어나기 이전에 소성거동이 시작되는지 아니면 접촉분리 현상 이후에 소성거동이 시작되는지에 따라 거동의 차이가 크게 나기 때문에 두 가지 경우를 분리하여 결과를 나타내었다.

3.1 접촉분리 이후에 소성거동이 시작되는 경우

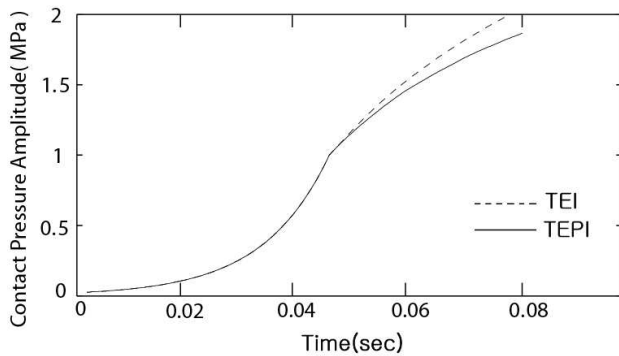


Fig. 2 The comparison between TEI and TEPI (The variation of contact pressure amplitude, $V=20\text{m/s}$)

접촉압력 요동의 파장이 21.258 mm 인 경우에 대하여 TEI에서의 임계속도의 5배인 속도에서 해석을 진행한 결과를 Fig. 2에 TEI결과와 비교하여 나타내었다. 소성거동을 시작하기 이전에는 재료가 탄성거동을 하므로 TEI와 TEPI가 같은 거동을 한다. 하지만 약 0.04초 이후에 접촉분리가 일어나고 그 직후에 소성거동이 시작되어 TEI와 TEPI에서의 접촉압력 요동에 차이가 생기는 것을 확인할 수 있다. 그리고 다음 Fig. 3에 시간에 대한 유효 소성변형률을 표시하였다. 소성거동 초기인 0.06초에 접촉면의 일부에서 소성변형이 생겨 시간이 지남에 따라 소성영역이 조금 더 확장되기는 하지만, 접촉분리 이후에 소성거동이 시작되는 경우에는 접촉하고 있는 부위 근처에서만 소성변형이 일어남을 확인할 수 있다. 이

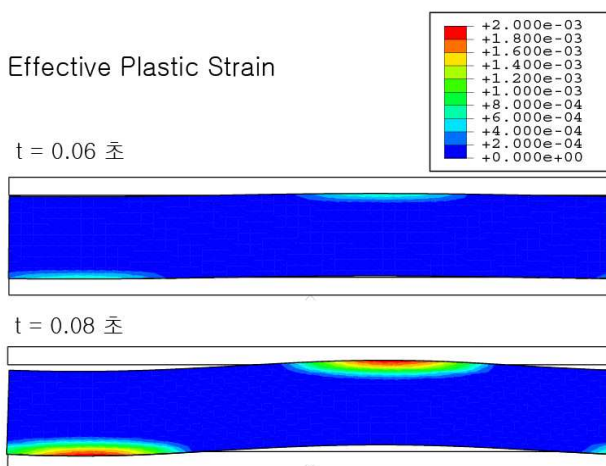


Fig. 3 The distribution of effective plastic strain ($V=20\text{m/s}$)

결과로부터 접촉분리 이후에 소성거동이 일어나는 경우에 접촉하는 일부에서만 소성변형이 생기기 부위에서 핫스팟이 생성 된다는 사실을 짐작할 수 있다.

3.2 접촉분리 이전에 소성거동이 시작되는 경우

접촉분리 이후에 소성거동이 시작되는 경우의 해석과 동일한 조건에서 해석을 수행하고, 초기에 가정하는 접촉압력의 크기만 조절하여 접촉분리 이전에 소성거동이 시작되도록 해석을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. TEPI 결과를 보면 소성거동이 시작될 때 접촉압력 요동의 진폭이 감소하다가 조금 후에 증가하기 시작하고, 다시 어느 시점부터 감소하다가 증가하고, 이렇게 증가와 감소를 반복하게 된다.

이 경우에 대해서 더 긴 시간동안 해석한 결과를 다음 Fig. 5에 표시하였다.

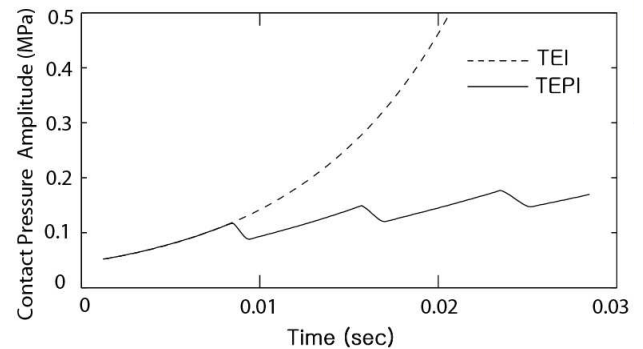


Fig. 4 The comparison between TEI and TEPI (The variation of contact pressure amplitude, $V=20\text{m/s}$)

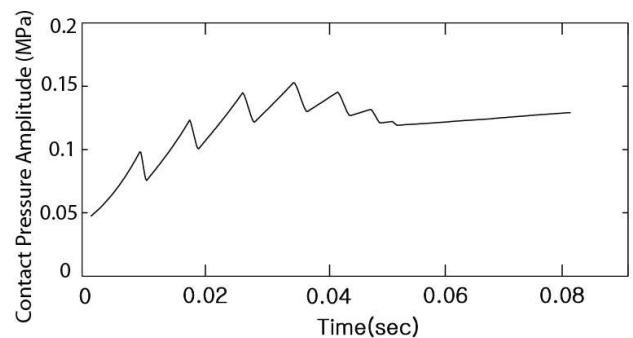


Fig. 5 The variation of contact pressure amplitude ($V=20\text{m/s}$)

Effective Plastic Strain

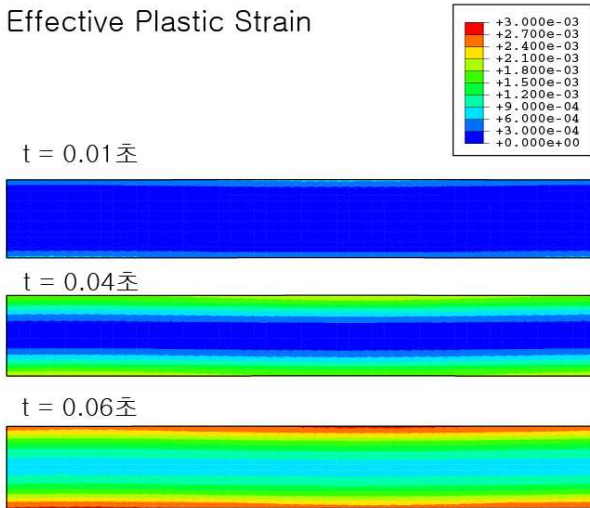


Fig. 6 The distribution of effective plastic strain(V=20m/s)

그림을 보면 소성거동이 시작되는 0.01초부터 약 0.05초 까지는 증가와 감소를 반복하는 현상을 볼 수 있고, 그 이후에는 다시 일정한 기울기로 변화하게 된다. 이 경우의 시간에 대한 유효 소성 변형률 분포를 Fig. 6에 나타내었다. 접촉분리 이전에 소성거동이 시작되는 경우에는 접촉면 전체에서 소성변형이 발생한다. 소성거동 초기인 0.01초에는 접촉면 전체에 걸쳐 소성변형이 시작되어 소성영역이 점점 커지다가 특정 시점 이후부터는 중간층 전체가 소성거동을 하게 된다. 0.01초에서 약 0.05초까지 소성 거동하는 영역과 탄성 거동하는 영역이 함께 존재 하게 되고, Fig. 5의 결과와 비교하면 이 시간대에 접촉압력 요동이 증가와 감소를 반복하게 된다. 즉, 탄성영역과 소성영역이 같이 존재할 때에 접촉압력 요동이 증가와 감소를 반복하는 현상을 보이고, 디스크 전체가 소성영역으로 바뀐 후부터 일정하게 변화하게 된다.

3.3 Transient 거동

접촉분리 이전에 소성거동이 시작되는 경우에 대해서 소성거동 이후에 접촉분리 현상을 확인하기 위해 긴 시간동안의 접촉압력 요동의 변화를 살펴보았다. TEI에서의 임계속도보다 큰 몇 개의 속도에서 해석을 수행한 결과를 다음 Fig. 7에 나타내었다. 미끄러짐 속도를 15m/s, 20m/s, 30m/s의 세 가지 속도에 대해서 해석을 수행하였는데,

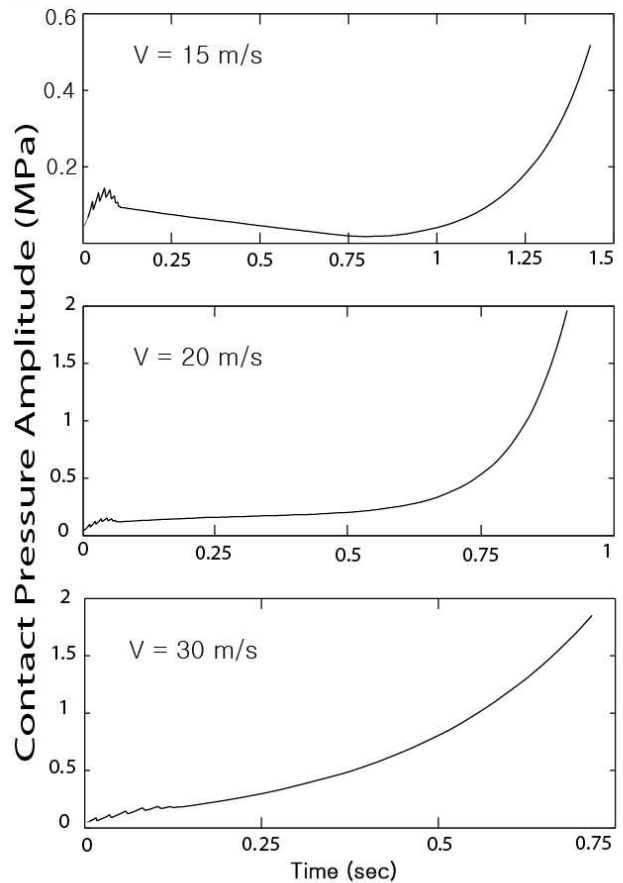


Fig. 7 The variation of contact pressure amplitude about different sliding speeds

이 속도들은 모두 TEI에서의 임계속도보다 큰 값이다. 결과를 보면 세 가지 경우 모두 0.1초 이전에 디스크 전체가 소성영역을 바뀌어 소성거동을 하게 된다. 속도가 30m/s인 경우에는 디스크 전체가 소성영역으로 바뀐 후부터 접촉압력 요동의 진폭이 꾸준히 증가하여 접촉분리 현상에 이르게 된다. 속도가 15m/s인 경우에는 디스크 전체가 소성영역으로 바뀐 이후에 접촉압력 요동의 진폭이 꾸준히 감소하다가 약 0.8초 이후부터 급격하게 증가하는 현상을 보인다. 20m/s의 경우는 디스크 전체가 소성영역으로 바뀐 이후 작은 기울기로 꾸준히 증가하다가 약 0.75초를 지나면서부터 큰 기울기를 가지고 증가하게 된다. 20m/s 속도인 경우에는 약 1초경에, 30 m/s인 경우에는 약 0.75초경에, 그리고 15m/s인 경우에는 표시된 결과에는 접촉 분리가 일어나지 않아서 1.5초 이후에 접촉 분리가 일어나게 된다. 결국 이 경우에는 해석을 수행한 모든 경우에 오랜 시간동안 해석을 진행할 경우 불안정한 상태가 되어 결국

엔 접촉분리가 일어나게 된다. 하지만 3.1절의 결과에서는 약 0.04초에 접촉 분리가 일어나게 되는데, 이 결과와 비교하면 접촉분리 이전에 소성 거동이 일어나는 경우가 접촉분리가 일어나는 데 까지 오랜 시간이 걸리고, 따라서 핫스팟이 생성 되기 까지도 훨씬 더 많은 시간이 걸린다는 것을 알 수 있다.

3.4 결과 검토

이 연구에서 2차원 기하학 모델에 주기적 대칭 조건을 주는 과정에서 x방향으로 구속 조건을 주는 효과를 받게 되어 접촉압력 방향인 y방향보다 x방향의 응력이 훨씬 더 큰 값을 보였다. 결과적으로 식 (3)의 항복조건식에서 유효응력의 크기로 소성거동을 판단하게 되는데, y방향보다 x방향의 응력이 소성거동을 판단하는 데에 더 크게 작용하였다.

TEI 도 그렇지만 TEPI 에서도 접촉압력 요동이 변화가 매우 중요한 문제이고, 따라서 접촉압력 방향인 y방향의 응력이 소성거동을 판단하는 데에 더 크게 작용하도록 하는 것이 더욱 정확한 해석이 되리라 생각한다.

이 연구 이후에 주기적 대칭 효과를 주되 x방향으로 구속되는 효과가 제거되도록 경계조건을 수정하여 열탄소성 불안정성 연구를 수행하고자 한다.

4. 결 론

TEI결과와 비교하여 소성거동이 미끄러짐 접촉 시스템에 미치는 영향을 살펴보고, 소성거동이 접촉분리 이전에 시작되는지 접촉분리 이후에 시작되는지를 구분하여 과도(transient) 거동을 살펴 보았다. 해석결과 접촉분리 이후에 소성거동이 시작되는 경우는 접촉압력 요동이 증가하는 기울기가 조금 줄어들기는 하지만 TEI의 거동과 유사한 거동을 보였다. 반면에 접촉분리 이전에 소성 거동이 시작되는 경우는 소성거동이 시작되면서 접촉압력 요동이 증가와 감소를 반복하는 현상을 보이고, 접촉분리가 일어나기 까지 훨씬 더 많은 시간이 필요하다는 것을 확인하였다.

참고문헌

- [1] J. R. Barber, 1969, "Thermoelastic instabilities in the sliding of conforming solids", *Proc. R. Soc. London, Ser. A.* 312, pp.381~394
- [2] A. E. Anderson, and R. A. Knapp, 1990, "Hot spotting in automotive friction systems", *Wear*, Vol. 135, pp.319~337.
- [3] K. Lee and R. B. Dinwiddie, 1998, "Conditions of frictional contact in disk brakes and their effects on brake judder", *SAE paper 980598*.
- [4] R. A. Burton, V. Nerlikar and S. R. Kilaparti, 1973, "Thermoelastic instability in a seal-like configuration", *Wear*, Vol.24, pp.177~188.
- [5] K. Lee and J. R. Barber, 1993, "Frictionally Excited Thermoelastic Instability in Automotive Disk Brakes", *Journal of Tribology*, Vol.115, pp.605~614.
- [6] P. Zagrodzki, K. B. Lam, E. Al Bahkali, J. R. Barber, 2001, "Nonlinear Transient Behavior of a Sliding System With Frictionally Excited Thermoelastic Instability" , *Journal of Tribology*, Vol.123, pp.669~708.
- [7] Fionn Dunne and Petrinic, 2004, "Introduction to Computational Plasticity", Oxford University
- [8] ABAQUS, Theory Manual, Version 6.5, HKS, 2005