

## 구와 거친표면의 미끄럼 접촉 온도해석 및 실험에 관한 연구

한태훈 · 이상돈\* · 김태완\*\* · 조용주\*\*\*

부산대학교 대학원 정밀기계공학과  
\* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과  
\*\* 부산대학교 기계기술연구소  
\*\*\* 부산대학교 기계공학부

### A Study for 3D Temperature Analysis between sphere and rough surface with Measured Temperatures

T-H Han, S-D Lee\*, T-W Kim\*\*, Y-J Cho\*\*\*

Graduate School, Pusan National University

\* Graduate School, Pusan National University

\*\* Pusan National University Research Institute of Mechanical Technology

\*\*\* School of Mechanical Engineering, Pusan National University

#### Abstract

The surface temperature at the interface of bodies in a sliding contact is one of the most important factors influencing the behavior of machine components. So the calculation of the surface temperature at a sliding contact interface has long been an interesting and important subject for tribologist. In this study to verify estimation of temperature rising, calculated temperatures were compared with measured temperatures. It is possible to calculate bulk and flash temperature.

**Key Words:** Flash temperature, Heat partition factor, Semi-infinite solid analysis, Rough surface

#### 기 호 설 명

$f(x, y, t)$  : heat partition factor

$q(x', y', t')$  : heat flux

$l_{x,y}$  : half contact length

$t$  : time

$T_{1,2}$  : surface temperature

$\Delta T_{1,2}$  : temperature rise

$T_{1b,2b}$  : bulk temperature of bodies

$V_{1,2}$  : velocities of surface

$V_s$  : sliding speed

$x, y$  : coordinates on contact surface

$x', y', t'$  : dummy variables of  $x, y, t$  respectively

$\bar{T}, \bar{x}, \bar{y}, \bar{t}, \bar{q}, \bar{p}$  : non-dimensional variables of  $T, x, y, t, q, p$

$\rho$  : density of solid

$\Omega_c$  : contact area

$\alpha$  : thermal diffusivity of solids

$\mu$  : friction coefficient

## 1. 서론

베어링, 기어, 캠 등과 같이 미끄럼 접촉을 하는 기계요소들은 높은 하중, 속도에서 작동하기 때문에 접촉표면에서는 높은 마찰열이 발생하며 특히 접촉부에서 과도하게 발생한 마찰열은 윤활막의 파손, 재료의 성질변화, 표면 용융 등으로 스커핑을 일으키기 때문에 두 접촉면의 상승온도를 예측하는 것은 기계 시스템의 설계에 아주 중요하다.

접촉표면의 상승온도를 예측함에 있어서 관심이 되는 것은 접촉면 전반에 걸친 평균온도(Mean or Bulk Temperature)와 실접촉면에서 순간적으로 발생하는 섬광온도(flash temperature)인데 이 중 평균온도는 여러 가지 방법으로 측정이 가능하나 섬광온도는 그 발생구역이 두 물체가 접촉해 있는 영역이고, 발생시간 또한 매우 짧기 때문에 실제적으로 섬광온도를 측정한다는 것은 매우 어렵다고 할 수 있다.

따라서 이러한 섬광온도는 이론적인 해석을 이용한 시뮬레이션을 통해 구할 수 있다.

Blok은 단일 사각 열원을 가지는 접촉면의 온도분포를 마찰열은 미끄럼 마찰로부터 발생하고 열분할 계수(Heat partition factor)는 두 접촉면의 최대온도가 같다는 가정 하에서 구하였다. Jaeger는 반무한체 표면 위를 일정속도로 움직이는 다양한 형태의 열원에 대한 연구를 통해 돌기를 고려한 실접촉 열원에 대한 접촉표면온도 공식의 기초를 확립하였다.

Tian과 Kenndy는 모든 범위의 Peclet Number에 대하여 움직이는 열원에 기인한 반무한체의 접촉표면온도 해석을 수행하였다. Qui와 Cheng은 혼합윤활 상태에서 3차원 거친 표면의 상승온도를 구하였다.

## 2. 온도해석이론

### 2.1 반무한체 온도해석

Fig. 1은 두 움직이는 물체의 접촉 모델을 나타낸 것이다. 접촉면의 경계에서 열 손실이 없다고 가정할 때 접촉면적 위의 점  $(x', y', 0, t')$ 의 입력 열량  $q dx' dy' dt'$ 에 기인한 유한시간  $t$ 동안의 한 점  $(x, y)$ 에서의 상승온도는 Carslaw와 Jaeger에 의해 유도된 다음 식에 의하여 계산된다.

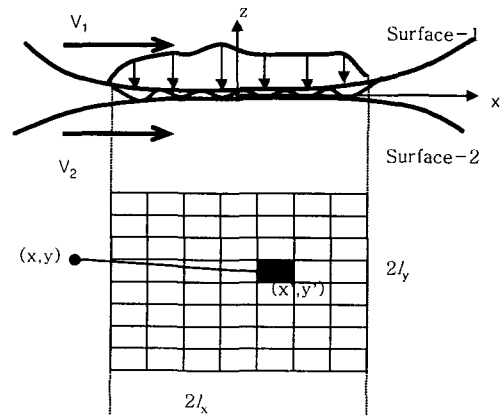


Fig 1. Model of surface contact

$$dT = \frac{q(x', y', 0, t') dx' dy' dt'}{4\rho c [\pi\alpha(t-t')]^{3/2}} \times \exp\left[-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2}{4\alpha(t-t')}\right] \quad (1)$$

식(1)을 무차원화 하면

$$d\bar{T} = \frac{\bar{q}(\bar{x}', \bar{y}', 0, \bar{t}') d\bar{x}' d\bar{y}' d\bar{t}'}{(t-t')^{3/2}} \times \exp\left[-\frac{(\bar{x}-\bar{x}')^2 + (\bar{y}-\bar{y}')^2}{(t-t')}\right] \quad (2)$$

발생된 열은 열 분할 계수  $f(\bar{x}', \bar{y}', \bar{t}')$ 에 의해 두 접촉표면으로 전도된다.

따라서 표면 1의 온도상승은 식(3)

$$d\bar{T}_1 = [1 - f(\bar{x}', \bar{y}', \bar{t}')] \frac{\bar{q}(\bar{x}', \bar{y}', 0, \bar{t}') d\bar{x}' d\bar{y}' d\bar{t}'}{(t - t')^{3/2}}$$

$$\times \exp \left[ - \frac{[(\bar{x} - \bar{x}') - \bar{V}_1(\bar{t} - \bar{t}')]^2 + (\bar{y} - \bar{y}')^2}{(t - t')} \right] \quad (3)$$

표면 2의 온도상승은 식(4)

$$d\bar{T}_2 = f(\bar{x}', \bar{y}', \bar{t}') \frac{\bar{q}(\bar{x}', \bar{y}', 0, \bar{t}') d\bar{x}' d\bar{y}' d\bar{t}'}{(t - t')^{3/2}}$$

$$\times \exp \left[ - \frac{[(\bar{x} - \bar{x}') - \bar{V}_1(\bar{t} - \bar{t}')]^2 + (\bar{y} - \bar{y}')^2}{(t - t')} \right] \quad (4)$$

시간  $\bar{t}' = 0$  에서부터  $\bar{t}' = \bar{t}$  까지 모든 마찰 열원에서 발생한 표면온도 상승은 접촉 열원 면적의 적분에 의해 구할 수 있다. 접촉면적  $\Omega_c$ , 시간  $\bar{t}$  에서 임의의 점  $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{t})$  의 온도상승은 식(5)에 나타나 있다.

$$\Delta\bar{T}_1(\bar{x}, \bar{y}, \bar{t}) = \int_0^{\bar{t}} \iint_{\Omega_c} d\bar{T}_1(\bar{x}', \bar{y}', \bar{t}')$$

$$\Delta\bar{T}_2(\bar{x}, \bar{y}, \bar{t}) = \int_0^{\bar{t}} \iint_{\Omega_c} d\bar{T}_2(\bar{x}', \bar{y}', \bar{t}') \quad (5)$$

$$\bar{T}_{1b} + \Delta\bar{T}_1(\bar{x}, \bar{y}, \bar{t}) = \bar{T}_{2b} + \Delta\bar{T}_2(\bar{x}, \bar{y}, \bar{t}) \quad (6)$$

식 (6)에서 열분할계수  $f(\bar{x}', \bar{y}', \bar{t}')$ 는 접촉점에서의 표면온도의 갑작스러운 변화가 없다는 가정 하에서 돌기 접촉에서의 최대온도가 같다는 가정에 의하여 구할 수 있다.

### 3. 온도측정실험

#### 3.1 온도 측정 이론

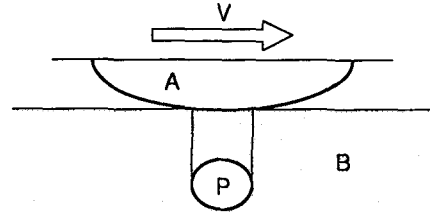


Fig. 2 Circular Contact

정지하고 있는 접촉체 B가 원형의 접촉면을 형성하며 여기에 접촉체 A가 속도 V로 미끄럼 운동을 하고 접촉면에 작용하는 하중이 W라 할 때 접촉면의 총면적 P에 발생하는 전체 열 Q는 다음과 같이 주어진다.

$$Q = \frac{\mu WV}{J} \quad (7)$$

여기서 J는 열의 일상당량이다. 접촉면에 발생한 열 Q는 외부로의 유출이 없이 정지하고 있는 접촉체 A와 움직이는 접촉체 B로 분배가 된다고 가정할 때 접촉체 A로 유입되는 열을  $\lambda Q$ 라 하면 접촉체 B로는  $(1 - \lambda)Q$ 의 열이 유입될 것이다.

한편 정지되어 있는 열원과 빠르게 움직이는 열원이 반무한체에 작용해 그림 3과 같은 원형 접촉면의 형성했을 경우에 대한 표면 온도의 증가 T에 대한 식은 각각 다음과 같다.

정지하고 있는 열원이 작용할 때

$$T = \frac{Q}{4ak} \quad (8)$$

빠르게 움직이는 열원이 작용할 때

$$T = \frac{0.318Q}{a(akpcV)^{\frac{1}{2}}} \quad (9)$$

### 3.2 온도 측정

그림 3은 접촉 온도 측정을 위한 장치도를 나타낸 것이다. 그림 4와 같이 시편에 0.9 φ 드릴을 사용하여 구멍을 뚫은 뒤 T-type 열전대를 부착하였고, TE-67 마멸 시험기를 이용, Ball-on-plate를 행하여 온도를 측정하였다. 열전대는 plate의 정중앙, 표면 아래 0.5mm 깊이에 부착하였다. 표 1에 실험에 사용된 Ball과 Plate의 물성치를 나타내었다.

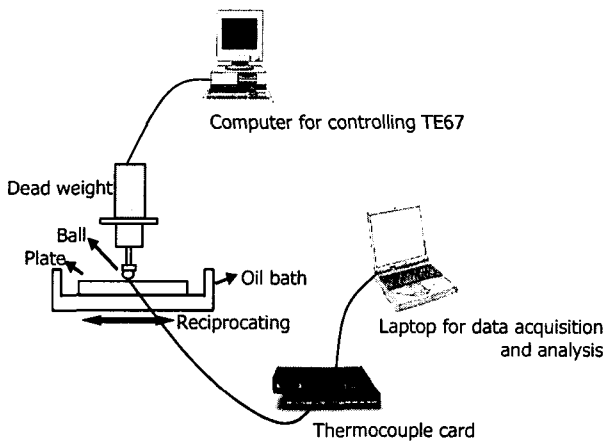


Fig. 3 Temperature Measuring System

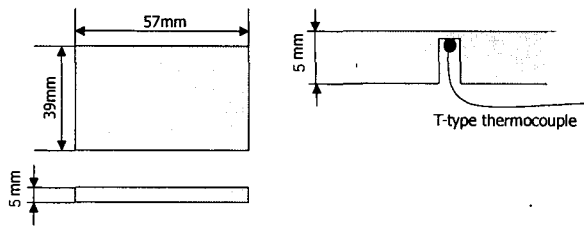


Fig. 4 Specimen

	$\rho(\text{kg/m}^3)$	$c_p(\text{J/kg}\cdot\text{K})$	$k(\text{W/m}\cdot\text{K})$
Ball (STB2)	7810	475	46.6
Plate (SM45C)	7850	486	49.8

Table 1. Material Properties

평판 위에 접촉한 볼에 110N의 정지하중을 가하여 왕복 1Hz의 속력으로 2cm의 거리를 왕복시키는 실험을 하였으며 열전대를 통해 측정된 온도는 noise를 제거하기 위하여 moving average filtering을 이용하였다. moving average filter는 raw data에 대해서 filtering을 하기 위해 가장 간단하게 사용할 수 있는 방법으로 filtering을 하고자하는 값을 앞 부분의 data값의 평균값으로 나타내며 평균값은 data를 따라 움직이는 m길이의 window를 이용하여 구한다.

$$y_k = \bar{x}_k = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^{m-1} x_{k-i} \quad m-1 \leq k \leq N \quad (10)$$

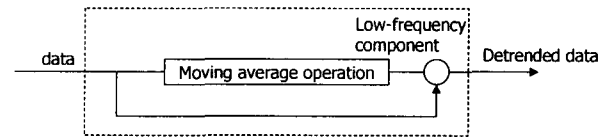


Fig. 5 Filtering process using moving window

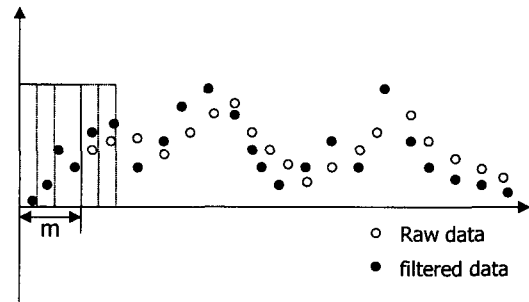


Fig. 6 The schematic of moving average filter operation

### 4. 접촉해석

일반적으로 한 쌍의 거친 표면의 접촉은 하나의 상당표면(equivalent surface)과 강체면의 접촉으로 모델링 할 수 있다. 본 연구에서는 기본적으로 영향함수(influence function)를 이용한 방법으로 3차원 접촉해석을 수행하였으며 접촉 영역은

한 변의 길이가 2a인 원형영역으로 가정하였다.

접촉 문제를 풀기 위해서는 다음의 구속조건에 의한 반복 연산이 필요하다. 즉

접촉영역에서는

$$p(x, y) > 0, \quad h(x, y) = 0 \quad (11-a)$$

접촉영역 밖에서는

$$p(x, y) = 0, \quad h(x, y) > 0 \quad (11-b)$$

이다. 여기서  $p(x, y)$ 는 접촉압력이며  $h(x, y)$ 는 변형 후의 강체면과 거친 표면간의 거리를 나타낸다.

접촉 영역  $\Omega$ 내에서는  $h(x, y) = 0$ 이므로  $u(x, y)$ 를 Boussinesq의 식으로 나타내면 식(11)은 다음과 같은 관계를 가진다.

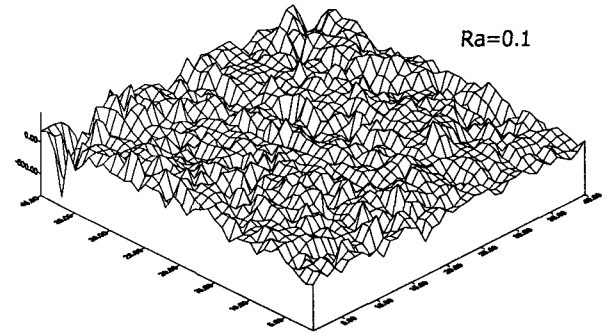
$$\begin{aligned} \frac{2}{\pi E'} \int \int_{\Omega} \frac{p(x', y')}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}} dx' dy' \\ = \delta - e(x, y) \end{aligned} \quad (12)$$

식(11)은 다음과 같이 단순이산화 될 수 있으며

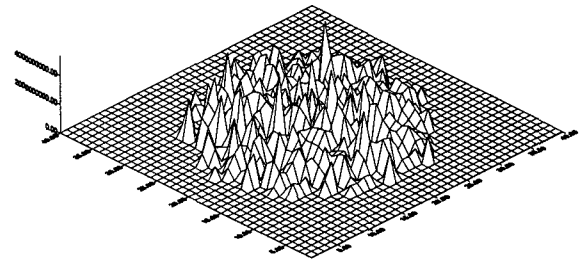
$$\sum_{j=1}^k F_{i,j} P_j = \delta - e_i \quad (13)$$

여기서  $k$ 는 접촉영역  $\Omega$ 에서의 사각조각면(patch)의 수이고  $F_{i,j}$ 는 요소  $j$ 에서의 수직분포하중에 의한 요소  $i$ 에서의 영향을 나타내는 영향함수이다.

표면형상에 대한 데이터는 온도측정실험에 사용된 시편을 표면조도기를 이용하여 측정하였으며 (Fig 7.(a)) 이 표면 데이터를 이용하여 위와 같은 절차에 의해 원형접촉에 대한 접촉압력을 계산하였다.



(a) surface roughness of specimen



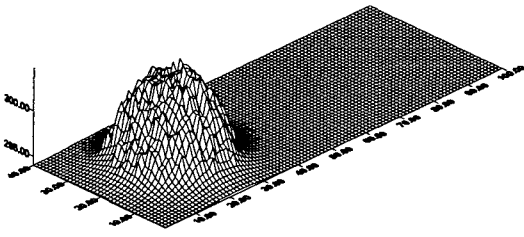
(b) contact pressure distribution

Fig 7. 3D surface roughness and pressure

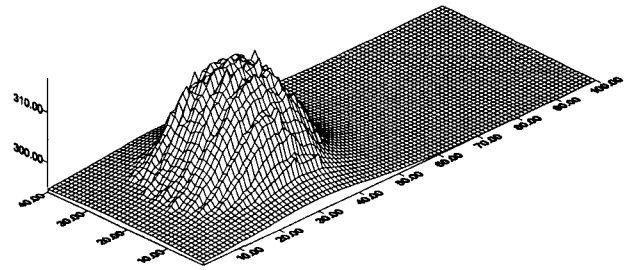
#### 4. 결과 및 고찰

반무한체를 이용한 온도해석은 실험과 동일한 물성치를 입력하여 수행하였다(Fig 4., Table 1. 참조). 접촉모델은 Fig. 4와 같은 평판 위를  $\phi$  6.35mm의 볼이 0.04m/sec의 속력으로 이동하는 것으로 가정하였으며 110N의 하중이 가해졌을 때의 접촉압력을 계산, 해석에 사용하였다.

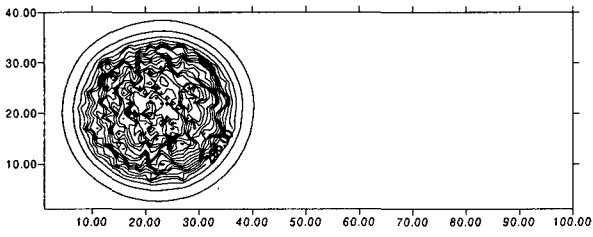
Fig. 8는 이동하는 열원에 대한 온도해석 결과를 나타낸 것이다.



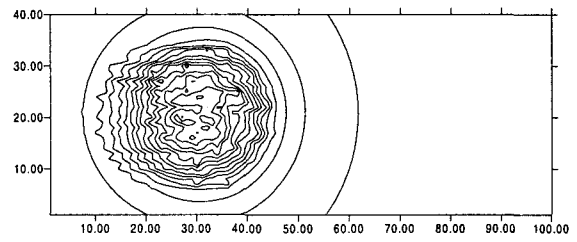
(a) surface temperature at  $t=1\Delta t$



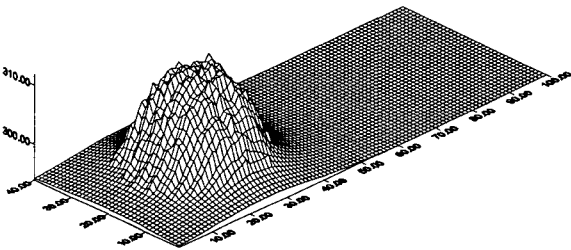
(e) surface temperature at  $t=10\Delta t$



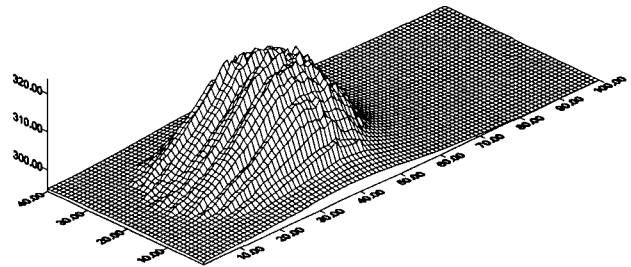
(b) contour at  $t=1\Delta t$



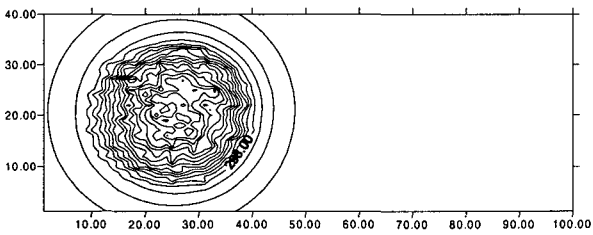
(f) contour at  $t=10\Delta t$



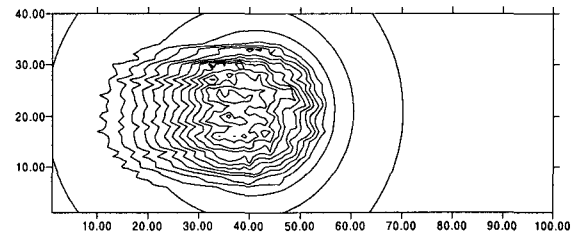
(c) surface temperature at  $t=5\Delta t$



(g) surface temperature at  $t=20\Delta t$



(d) contour at  $t=5\Delta t$



(h) contour at  $t=20\Delta t$

**Fig 8. Temperature distribution with time**

위의 그림에서도 알 수 있듯이 열원이 오른쪽으로 이동해 갈수록 최고 온도가 상승함과 동시에 온도의 최고점이 진행방향으로 이동하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 9는 열전대를 이용하여 측정한 온도를 나타낸 것이다. Fig. 11과 같이 시편에 부착한 열전대 위를 Ball이 지나갈 때마다 온도가 상승하는 것을 볼 수 있다.

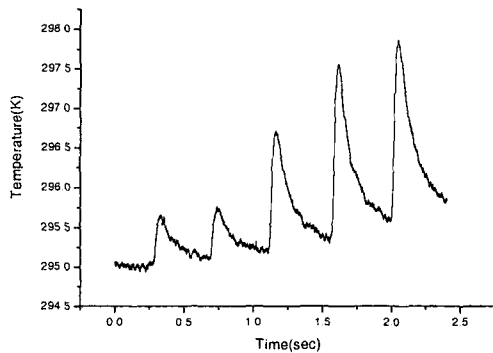


Fig 9. Measured temperature

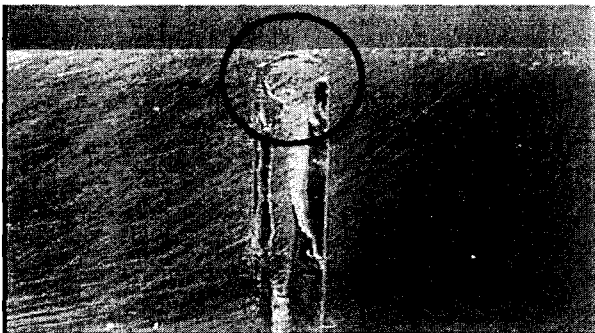


Fig 10. specimen with thermocouple (hot junction in circle)

## 5. 결 론

본 연구에서는 볼과 거친표면의 접촉온도를 구함으로써 실제 표면에서 마찰시 발생하는 온도를 예측할 수 있었다. 보다 다양한 모델링 기법이 개발되면 실제 기계요소에서의 온도해석도 가능할 것으로 사료된다. 또한 열전대와 같이 부분적인 온도측정방법보다는 광학장비를 이용하여 측

정한 온도와 비교하는 것이 더 효율적일 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 : 2001-1-30400-005-3)지원으로 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] Blok, H., "Theoretical Study of Temperature Rise at Surfaces of Actual Contact under Oiliness Lubricating Condition," Proc. General Discussion on Lubrication, Inst. Mech, Engrs., London, Vol. 2, pp.222-235, 1937
- [2] Jaeger, J.C. "Moving Sources of Heat and the Temperature at Sliding Contacts," J.Proc. Roy, Soc, N.S.W., Vol.76, pp.203-224, 1942
- [3] Archard, J.F, "The Temperature of rubbing Surfaces," Wear. Vol.2, pp.439-455, 1958
- [4] Francis, H.A, "Interfacial Temperature Distribution within a Sliding Hertian Contact," ASLE Transaction, Vol.14, pp.41-54, 1970
- [5] Tian. x and Kennedy, F.E, "Maximum and Average Flash Temperatures in Sliding Contact," Journal of Tribology, Vol.116, pp.167-174, 1994
- [6] Qiu, L and Cheng, H.S, "Temperature Rise Simulation of Three-Dimensional Rough Surface in Mixed Lubricated Contact," ASME Journal of Tribology, Vol.120,

pp.310-318, 1998

- [7] Patankar, S.V, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow," Hemisphere, New York, 1980