

얇은 layer 가 존재하는 접촉표면의 열적 거동에 대한 연구

한국과학기술원
기계운활연구실
안효석

1. 서론

상대 접촉하고 있는 물체에 미끄럼 운동이 가해질 경우 마찰에 의해 발생하는 거의 모든 에너지는 열로써 나타나게 된다. 이러한 마찰열은 주로 adhered junctions 의 파괴 및 표면돌기 (surface asperities) 들의 소성 변형에 의한 열역학적 비가역 반응의 결과로 발생된다.

접촉부위의 발생열은 양 접촉체의 접촉면에 전달되어 접촉표면 온도의 급격한 증가를 초래하며 그 결과로 여러가지 surface phenomena, 즉 마찰, 마모, 산화 (oxidation), 부식 및 구조적 열화 (structural degradation) 금속학적 상변화등에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 볼 및 로울링 엘레먼트 베어링, 기어, 캠과 태핏, 브레이크등 기계요소의 설계를 위한 주인자로서 근래에 들어 접촉표면의 온도가 주목받고 있다[1,2,3].

표면에 존재하는 layer 가 표면온도에 미치는 영향은 매우 큰 것으로 알려져 있다. layer로서는 금속표면에 응착시킨 coating layers, contaminant films, physisorbed 또는 chemisorbed films, oxide layers 또는 마찰열에 의해 형성되는 경도가 아주 높은 내마모층 (hard wear-resistant layers) 등이 고려될 수 있다.

낮은 열전도성을 가진 oxide film이 접촉 표면의 온도를 증가시킨다는 것이 Jaeger[2]에 의해 지적되었으며 Ling과 Lai[4]는 moving heat source가 가해지는 layered surface의 표면온도분포를 구하면서 substrate와 thermal property가 다른 layer가 존재하게 되면 그 두께가 아주 얇더라도 (1 마이크로 정도) 표면온도는 크게 변화됨을 보였다.

본 연구에서는 유한차분법 (Finite Difference Method)을 이용하여 fast moving heat source가 작용하는 layered solid의 접촉표면의 온도뿐만이 아니라 subsurface의 온도변화를 조사하였고 layer의 두께, 접촉하중, 미끄럼 속도와 마찰계수의 변화가 접촉표면 및 그 주변의 온도형성에 미치는 영향을 알아 보았다. 또한 실제 기계요소의 경우와 같이 접촉이 주기적으로 되풀이 되는 경우에 대하여 연구하였다.

2. 이 론

2.1 해석 모델

Fig.1에서 보는바와 같이 cylinder 형의 solid 1 이 하중 P, 속도 V로 semi-infinite layered solid 2와 미끄럼 접촉운동을 할때, 접촉압력 분포 P(x)와 heat flux 분포 q(x)는 다음과 같다.

$$p(x) = P_0 [1-(x/a)^2] \quad (1)$$

$$q(x) = \lambda f p(x) V \quad (2)$$

fast moving body 1 으로 흡수되는 열량을 나타내는 heat partition 계수 λ 는 [1]

$$\lambda = (0.146 + A) / (1+A) \quad (3)$$

여기에서

$$A = (Va/8D)^{1/2} \cdot (k_1/k_2)$$

$$D = k_1 / \rho_1 C_1 \quad : \quad \text{thermal diffusivity}$$

layer와 substrate의 물성 (material properties) 이 온도변화에 무관하다고 가정하면 fast moving heat source가 작용하는, layer와 substrate에 관련한 heat equation은

$$\frac{\partial^2 T_f}{\partial z^2} = \frac{1}{D_f} \frac{\partial T_f}{\partial t} \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} = \frac{1}{D_s} \frac{\partial T_s}{\partial t} \quad (5)$$

여기에서 subscript s, f는 각각 substrate와 layer (film)을 표시한다.
 상기 방정식은 다음과 같은 경계조건 및 초기조건을 만족시켜야 한다.

1) 표면의 에너지 balance

$$\text{접촉 부위 : } k \frac{\partial T}{\partial z}(0,t) = -q(t) \quad (6.a)$$

$$\text{접촉외부분 : } k \frac{\partial T}{\partial z}(0,t) = h_c \Delta T \quad (6.b)$$

여기에서 $q(t) = q_0 [a^2 - (tV-a)^2]^{1/2} / a$ (see Fig.2)

h = heat transfer coefficient

2) layer-substrate interface 의 에너지 balance 및 연속성

$$k_f \frac{\partial T}{\partial z} + k_s \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\Delta z}{2} (\rho_f C_f + \rho_s C_s) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6.c)$$

3) regularity condition

$$T(z_b, t) = T_b \quad \text{--- bulk temperature} \quad (6.d)$$

4) 초기 조건

$$T(z, 0) = T_b \quad (6.e)$$

상기 방정식의 경계조건 및 초기조건을 만족시키는 모델은 Fig.3 과 같다.

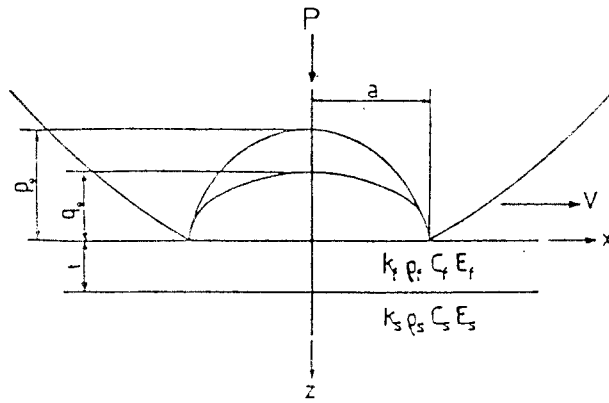


Fig. 1 General configuration for a layered solid under semi-elliptically distributed moving heat source and contact pressure

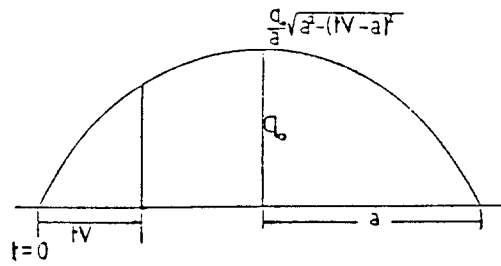


Fig. 2 Semi-elliptical distribution of heat flux on the contact surface

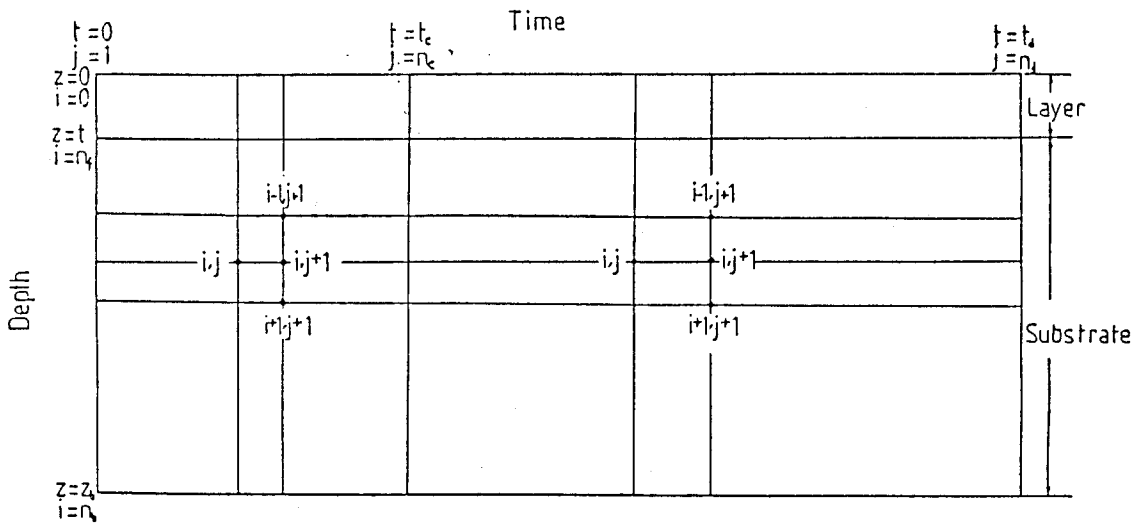


Fig. 3 Depth/time grid for the finite-difference model

3. 결과 및 고찰

3.1 Meta-stable temperature 의 형성

meta-stable temperature의 형성은 주로 접촉간층거리, 가해진 heat input, 접촉간 소요시간, thermal property에 의해 좌우된다. 이중 미끄럼속도의 변화 및 접촉간층거리의 변화와 열전도의 변화에 따른 meta-stable temperature가 형성될 때까지 소요되는 접촉횟수를 조사한 결과를 Fig.4 에서 볼 수 있다. 열전도도가 낮아짐에 따라 소요되는 접촉횟수가 크게 증가되고 있음을 알 수 있으며 접촉간층거리가 아주 작을 경우 접촉횟수 또한 크게 증가하고 있음을 볼 수 있다. Fig.5 는 접촉면에 수직인 방향으로의 접촉횟수에 따른 온도변화를 보여준다. 여기에서 주목할만한 사실은 접촉에 의한 온도상승이 처음 접촉이 발생할 때에 거의 형성이 되고 있으며 또한 온도상승이 극히 얇은 subsurface 내에 극한되고 있다는 사실이다.

3.2 Fast moving heat source에 의한 layered solid의 온도증가는 크게 두가지 경우로 나누어 조사하였다.

1) Substrate에 비해 열 전도도가 작은 경우

$$k_s/k_S = 1/4, k_S = 40 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

2) Substrate에 비해 열 전도도가 큰 경우

$$k_f/k_S = 5, k_S = 40 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

미끄럼속도와 접촉하중은 직접적으로 heat input의 형성에 관계되므로 표면최대온도상승에 미치는 그 영향을 먼저 알아보았다. Fig.6에서 보는 바와 같이 속도와 하중의 증가는 layer의 thermal property에 관계없이 거의 선형적인 온도증가를 초래함을 알 수 있다. Substrate에 비해 열전도도가 작은 layer의 경우와 열전도도가 큰 layer의 경우에 대한

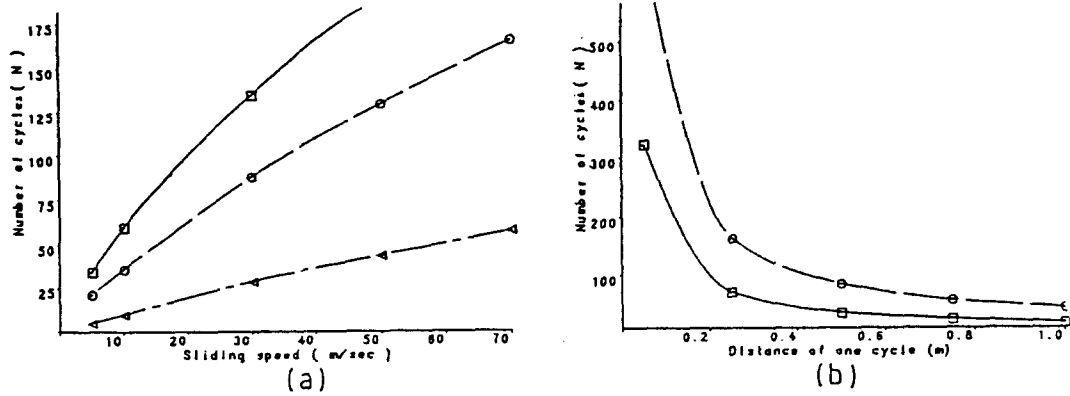


Fig. 4 Number of cycles to reach the meta-stable surface temperature, (a) for various thermal conductivity and sliding speed and (b) for various distance of one cycle

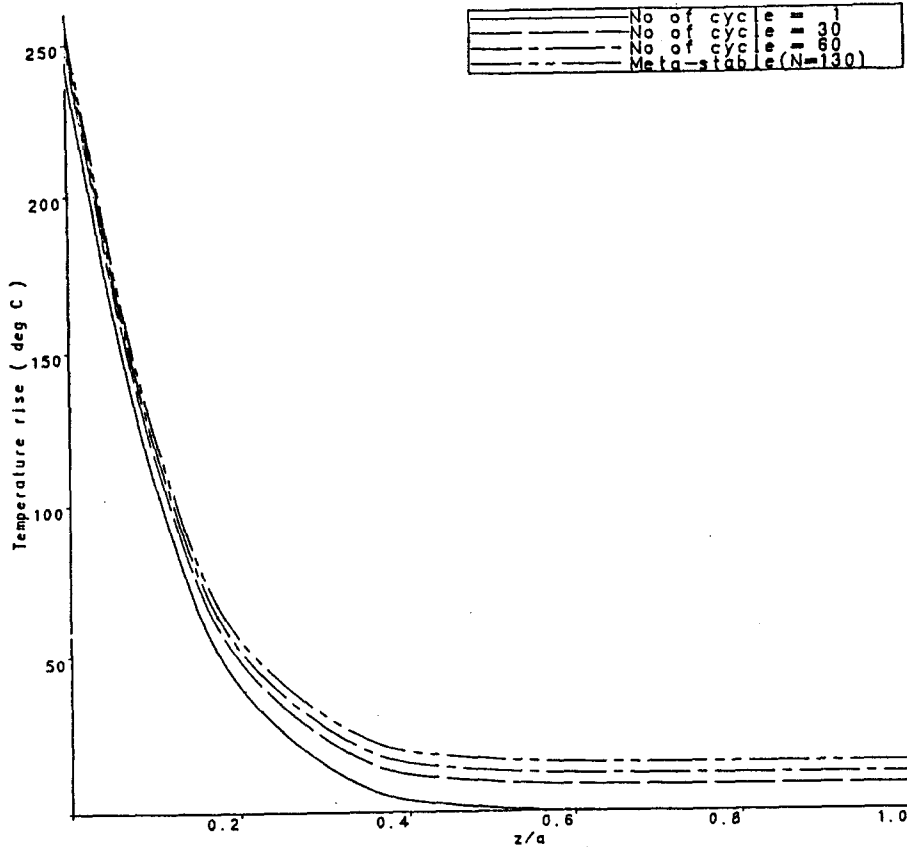


Fig. 5 Development of temperature perpendicular to contact surface until surface temperature reaches meta-stable state.

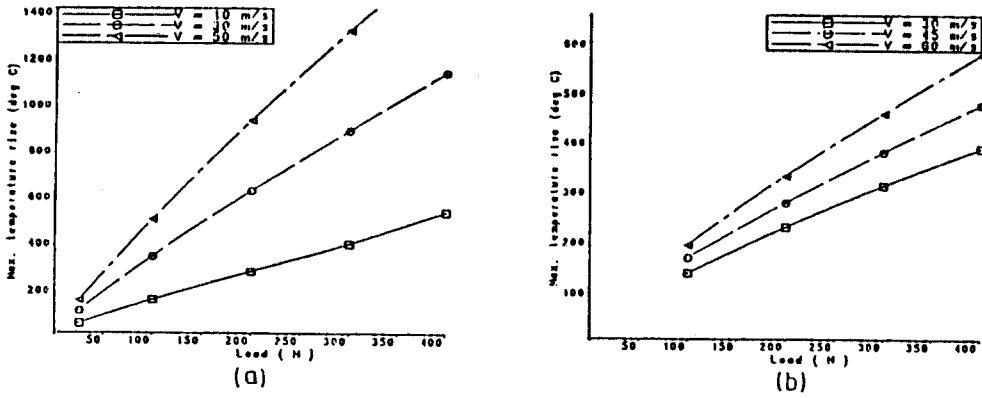


Fig. 6 Maximum temperature rise in the surface of a layered solid for various speed and load. (a) $K_f/K_s=1/4$, (b) $K_f/K_s=5$ ($K_s=40$ W/m·C)

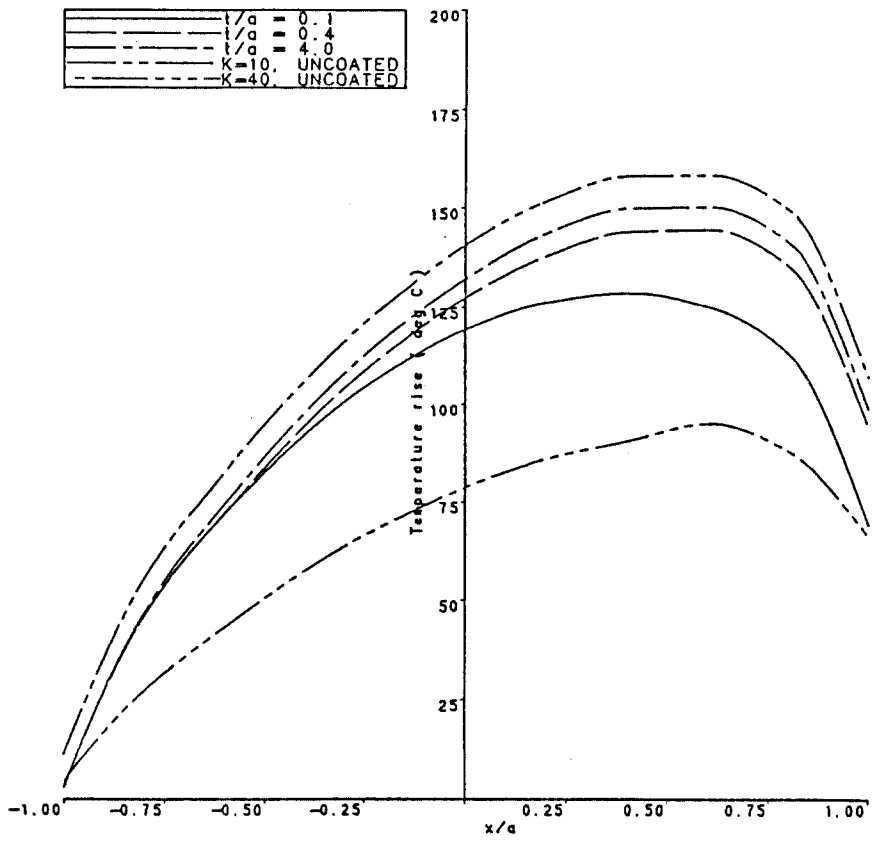


Fig. 7 Meta-stable surface temperature rise distribution at the heating zone along the direction of sliding for less conductive layer than the substrate, ($K_f/K_s=1/4$, $D_f/D_s=1/4$, $K_s=40$ W/mC)

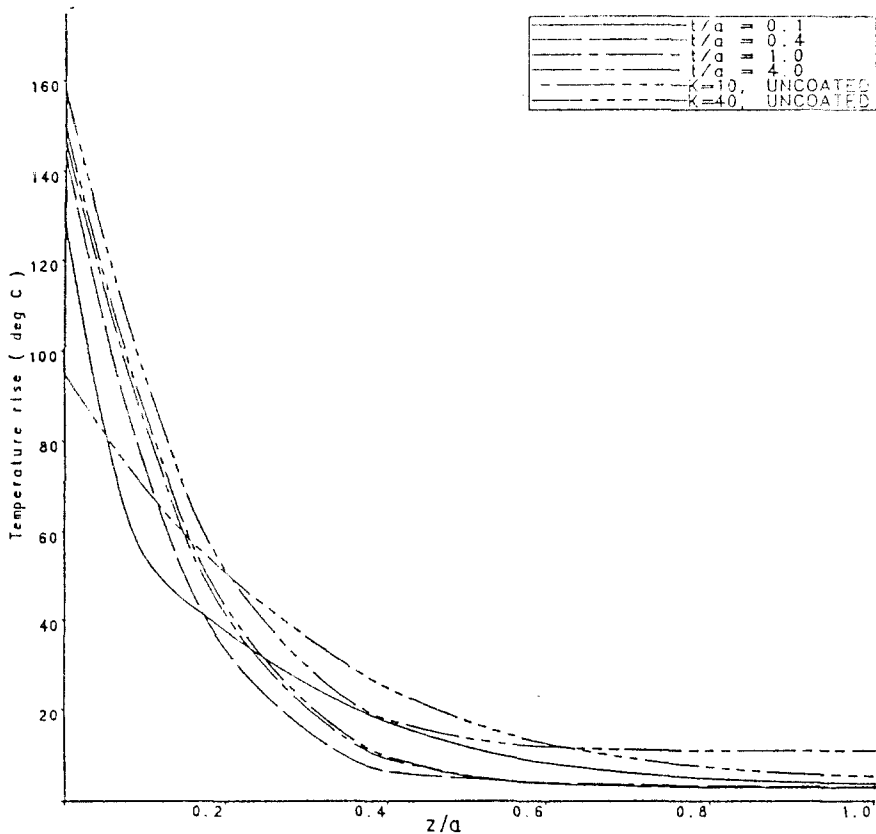


Fig.8 Temperature distribution perpendicular to contact surface at position where maximum temperature is achieved for less conductive layer. ($K_f/K_s=1/4$, $D_f/D_s=1/4$, $K_s= 40$ W/m°C)

결과를 각각 Fig.7 - Fig.11 과 Fig.12 - Fig.14 에서 볼 수 있다.

Fig.7은 layer의 두께를 변화시켜가며 이에따른 표면의 미끄럼 운동 방향의 온도상승치를 알아본 것으로 일단 layer가 존재할 경우 비록 그 두께가 아주 얇더라도 표면온도를 크게 증가시키고 있음을 알 수 있다. 또한 두께가 커짐에 따라 표면의 온도분포는 coating이 되어있지 않은, layer의 property로 이루어진, semi-infinite body의 표면온도분포에 수렴해가고 있다. 또 한가지 주목할 것은 sliding effect에 의해 온도분포가 outlet쪽으로 비틀어지는 현상이다.

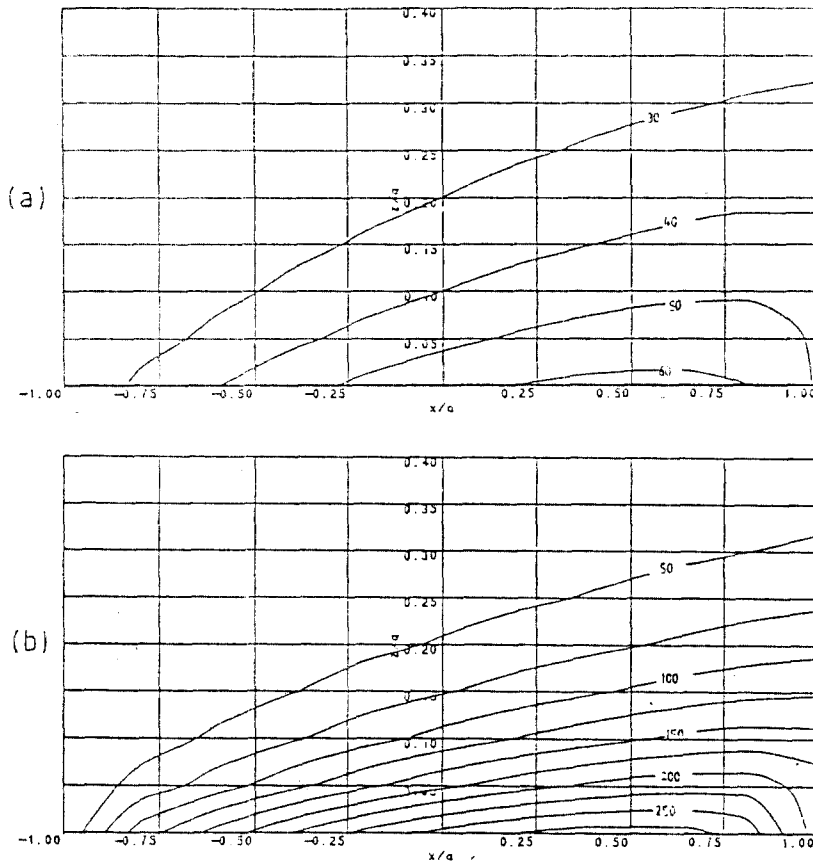


Fig.9 Temperature contour of less conductive layer than the substrate for the variation of applied load (P). ($Kf/Ks=1/4$, $Df/Ds=1/4$, (a): $P=25$ N, (b): $P=200$ N, $V=10$ m/sec, $t/a=0.4$)

Fig.8은 표면온도가 최대로 상승된 부분에서 표면과 수직인 방향으로의 온도 상승치 분포이다. 열전도도가 작은 layer의 존재에 의해 layer내의 온도가 크게 증가되어 있음을 볼 수 있으며 온도분포 유형도 역시 layer의 두께가 증가함에 따라 layer의 property로 이루어진 semi-inf. solid의 온도분포에 수렴해가고 있음이 보인다.

Fig.9 - Fig.11은 각각 하중, 속도, 마찰계수의 변화에 따른 subsurface($z = 0.4a$ 까지)의 temperature contour이다. 상기한 factor들의 증가는 heat input의 증가를 가져오므로 따라서 표면온도의

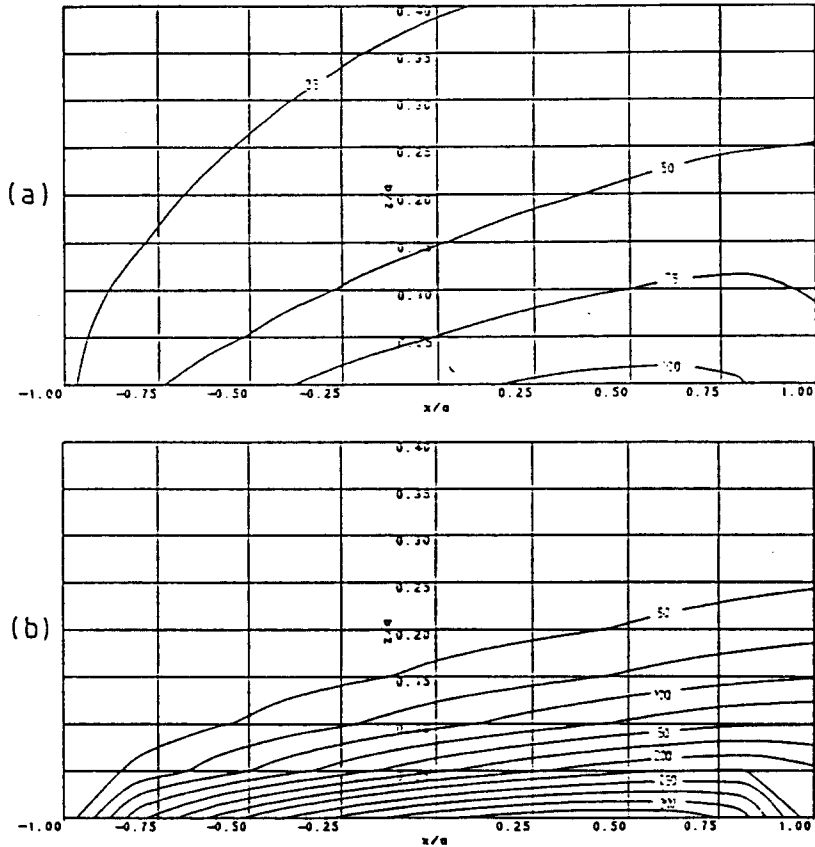


Fig.10 Temperature contour of less conductive layer than the substrate for the variation of sliding speed. ($t/a=0.4$, $Kf/Ks=1/4$, $Df/Ds=1/4$, $P=100$ N, (a) : $V = 5$ m/sec, (b) : $V = 30$ m/sec)

증가는 필연적이거나 그림에서 보는바와 같이 아주 조밀하게 등온선들이 배열되는 것을 알 수 있다. 특히 heat source의 moving speed가 증가할 경우 layered solid로의 열유입이 더욱 증가하므로 (즉, heat partition 계수가 높아지므로) temperature gradient는 더 급하게 됨을 알 수 있다.

layer의 thermal property가 나쁜 경우에 대해 조사한 상기 결과와 비교 하기 위해 행해진 열전도도가 큰 layer의 경우의 분석결과중 표면의 온도 상승치 분포는 Fig.13 과 같다. 이 경우 역시 layer의 존재가 표면 및 subsurface에 미치는 영향은 지대함을 알 수 있으며 layer의 존재에 의해 subsurface의 temperature contour의 대표적인 예로 하중변화의

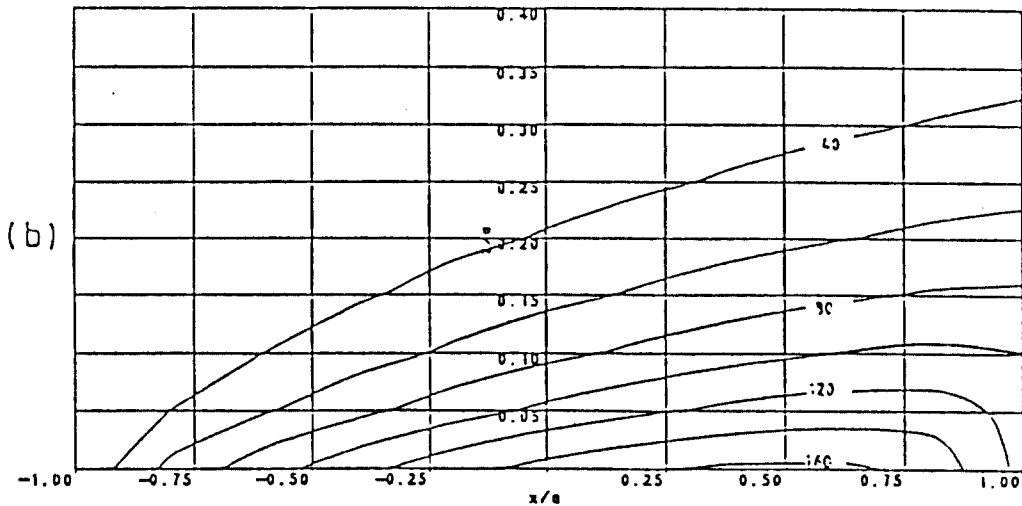
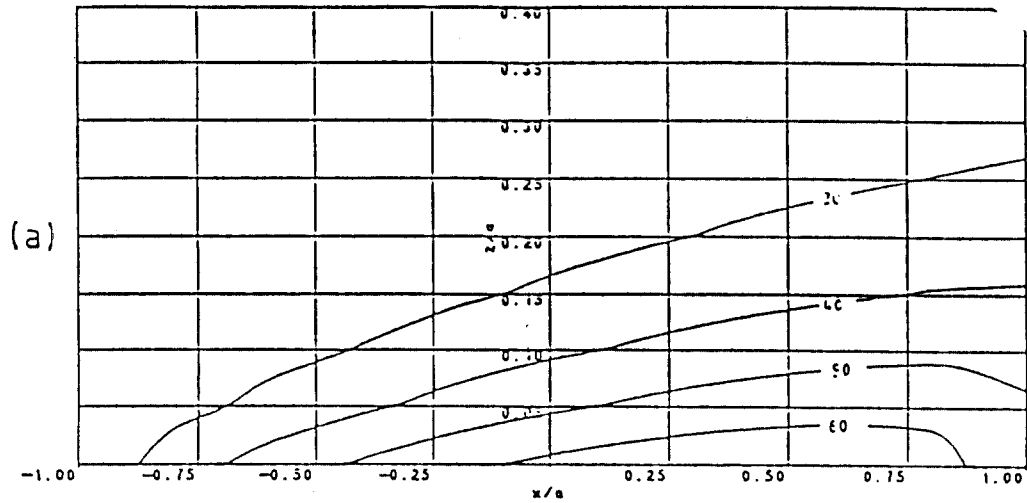


Fig.11 Temperature contour of less conductive layer than the substrate for the variation of coefficient of friction. ($t/a = 0.4$, $K_f/K_s = D_f/D_s = 1/4$, a: $f=0.1$, b: $f=0.3$, $P = 100$ N, $V = 10$ m/sec)

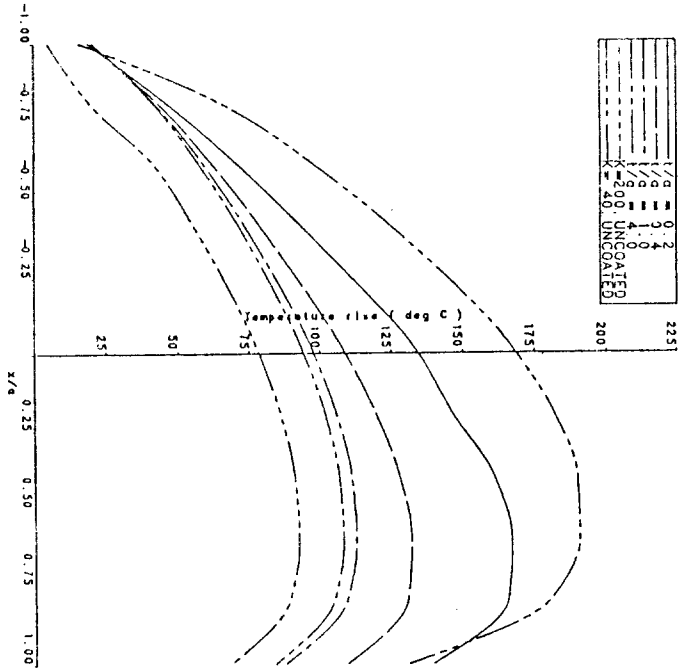


Fig. 12. Meta-stable surface temperature rise distribution of the heating zone along the direction of sliding for more conductive layer than the substrate. ($K_f/K_s=0.2, 0.4, 1.0, 2.0, 4.0, 10.0, 20.0, 40.0, \text{UNCOATED}$)

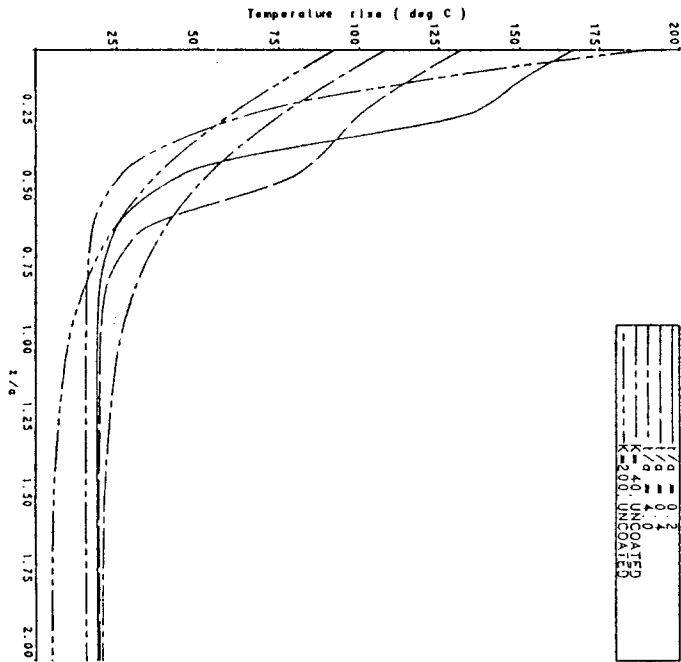


Fig. 13. Temperature distribution perpendicular to contact surface at position where maximum temperature is achieved for more conductive layer. ($K_f/K_s=0.2, 0.4, 1.0, 2.0, 4.0, 10.0, 20.0, \text{UNCOATED}$)

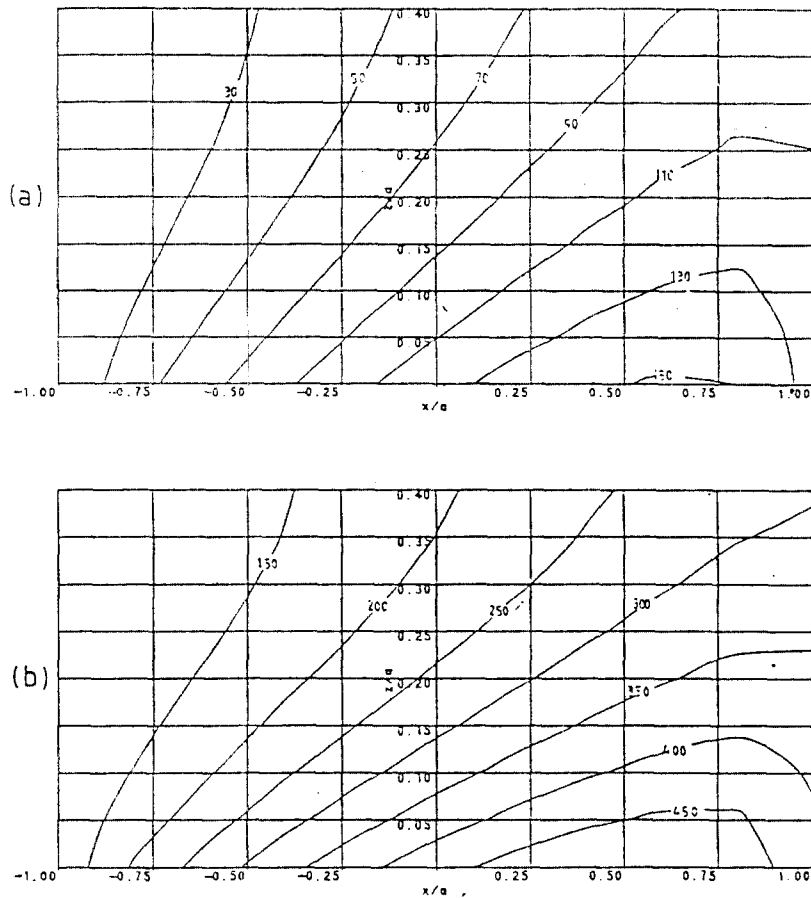


Fig.14 Temperature contour of more conductive layer than the substrate for the variation of applied load (P). ($K_f/K_s = 5$, $D_f/D_s = 8.3$, (a): $P = 100$ N, (b): $P = 400$ N, $V = 30$ m/sec, $t/a = 0.4$)

영향을 알아본 결과가 Fig.14 이다. 이 경우 역시 subsurface의 온도 역시 크게 상승해 있음이 보이며 등온선들은 Fig.9 - Fig.11 의 경우에 비해 완만하게 분포되고 있다.

4. 결 론

- 1) Sliding contact시의 온도상승은 주로 첫번째 접촉시에 결정된다.
- 2) 아주 얇은 layer가 존재하더라도 그것이 표면 및 subsurface의 온도 상승에 미치는 영향은 매우 크다.
- 3) layer의 존재는, 그 두께에 관계없이, 표면 및 subsurface의 열적거동

을 substrate의 유형에서 layer의 유형으로 전이시킨다.

- 4) 하중, 속도 및 마찰계수등의 증가는 heat input을 증가시켜 접촉부위의 온도증가를 가져오며, thermal property가 나쁜 layer의 경우 온도 상승은 surface layer에 극한되나 thermal property가 좋은 경우 비교적 내부깊이 열이 침투하므로 이에따른 온도상승이 예측된다.

5. 참고 문헌

- 1) BLOK, H., 'Theoretical study of temperature rise at surfaces of actual contact under oiliness conditions', Proc. Inst. of Mechanical Engineers General Discussion of Lubrication, Vol.2, I.Mech.E., London (1937) 222-235.
- 2) JAEGER, J.C., 'Moving sources of heat and the temperature at sliding contacts', Proc.R.Soc.N.S.W., 76 (1942) 203-224.
- 3) ARCHARD, J.F., 'The temperature of rubbing surfaces', Wear, 2 (1958-1959) 438-455.
- 4) LING, F.F. and LAI, W.M., 'Surface mechanics of layered media', Solid Contact and Lubrication, ASME AMD, Vol.39(1980) 27-50.