

열원의 온도분포 해석을 통한 접촉표면의 온도측정

정 동 윤

육군사관학교 병기공학과

Temperature Measurement of the Contact Surface from the Analysis of Temperature Distribution of the Hot Spots

Dong-Yoon Chung

Department of Ordnance Engineering, Korea Military Academy

Abstract—A method has been developed to measure the surface temperature in a sliding tribosystem. The determination of the surface temperature was inferred from the temperature of hot spots which were generated by frictional heat. The temperature of hot spots was determined by regressing those digitized data on Gecim-Winer's theoretical model. The experimental results are discussed considering the important factors such as PV and frictional heat. The surface temperature rise is related to the thermal conductivity in low PV range. As PV increases, it reaches nearly constant value called the critical temperature.

1. 서 론

공업재료의 표면은 수많은 돌기들로 구성되어 있으며 이러한 돌기들의 접촉으로 진실접촉이 이루어진다. 그러므로 마찰은 겉보기 접촉면적과는 무관하며 진실접촉면에서 일어난다. 표면의 한 돌기가 접촉면과 상대운동을 함으로 인하여 마찰열이 발생된다. 이러한 마찰에너지 발산의 결과로서 진실접촉면적 주위의 국부적인 표면온도가 상승되며 따라서 표면의 평균온도가 상승된다. 표면온도를 결정하기 위한 이론적 및 실험적인 방법이 많이 제시되어 왔다. 정적상태에서의 표면온도는 Blok[1]과 Jaeger[2]에 의해 이론적으로 연구되기 시작하였다. Blok은 반무한 절연체 위의 움직이는 열원을 이용하여 섬광온도(flash temperature) 이론을 소개하였다. Jaeger는 열원의 위치와 상대적인 접촉운동 그리고 크기 및 경계조건 등의 특정한 조건 하에서 진실접촉점의 온도를 계산하였다. 이에 Barry와 Barber[3]는 그들의 경계조건이 잘못 정의되었음을 지적하고 더욱 세분화된 경계조건으로 온도분포를 유도한 바 있다. Ling[4]은 접촉점에서의 온도가 주변의 겉보기 접촉면적의 온도보다 훨씬 높다는 것을 수치해석으로 밝혀냈다. 최근에는,

Kuhlman-Wilsdorf[5,6]가 Blok과 Jaeger의 이론에 기초한 섬광온도를 간략화한 이론해로 풀어서 제시하였다.

표면온도를 측정하는 방법으로는 열전대와 적외선 카메라를 이용하는 것이 가장 많이 알려져 있다. 그러나 전자의 경우는 junction의 크기에 의해 정밀도가 영향을 받기는 하지만, 반응시간이 느려서 빠른 과도 섬광온도를 포착하지 못한다는 제약이 있다. 그러나 후자의 경우 Winer와 그의 연구진[7]에 의해 Hertzian 압력하에서의 탄성유체윤활 접촉면의 온도를 측정하는데 사용되었으며, 그 결과 Blok의 이론과 좋은 상관관계를 보였다. 또한 Griffioen, Bair 그리고 Winer[8]가 동일한 방법으로 Si_3N_4 세라믹의 표면온도를 측정하는 바 있으나 적외선 카메라에 대한 무리한 보정곡선의 사용으로 인하여 표면온도가 세라믹의 가용온도보다 훨씬 더 높게 나타나는 결과를 보였다. 최근에는 Bair[9]가 적외선 빔 분광기를 이용하여 자성 헤드와 컴퓨터 디스크 사이의 섬광온도를 측정하였다.

Gecim과 Winer[10]는 미소한 원형의 정적 열원(Hot Spot) 주위에서 2차원의 과도 온도분포를 구했다. 그들은 열원이 상대적으로 훨씬 큰 겉보기 접촉

면에 존재하므로, 열원 주위를 반무한체로 가정하였으며 적분변환법에 의하여 과도 국부온도의 상승을 계산하였다. 그 결과 온도 상승은 극히 짧은 시간에, 열원의 주위에서 극히 국부적으로 일어난다는 것을 발표하였다.

따라서 본 연구는 고속정밀촬영기를 이용하여 진실접촉점에서 발생하는 열원의 온도분포를 실험을 통하여 규명하고 그 결과를 Gecim과 Winer의 이론식에 적용함으로써 식의 유용성을 검증함과 아울러 접촉표면의 온도를 측정하는데 그 목적이 있다.

2. 열원온도 해석의 이론 해

2-1. 열원온도 해석

Gecim과 Winer는 겔보기 접촉면적을 반무한체로 가정하여 식 (1)과 같은 원통형좌표계에서의 지배방정식을 정의하였다. 왜냐하면 열원이 되는 진실접촉점이 주위의 겔보기 접촉면적에 비해 매우 작기 때문이다.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{D} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

여기서 D는 열확산율이다. 각 변수를 무차원화 시키면,

$$\rho = \frac{r}{r_0}, \quad z = \frac{z}{r_0} \quad \text{and} \quad u = \frac{kT}{qr_0}$$

지배방정식이 식 (2)와 같이 유도된다. 여기서 q는 단위면적당 heat input이다.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial u}{\partial \rho} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{r_0^2}{D} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2)$$

결과적으로, 과도 표면온도는 식 (3)과 같이 되며 대류열전달 효과를 무시할 경우 식 (4)와 같이 절연체에 대한 간략화된 정적상태의 표면온도 방정식을 유도하였다.

$$u = \int_0^\infty \frac{J_0(\gamma\rho)J_1(\gamma)}{\gamma} \operatorname{erf}\left(\frac{\gamma}{r_0}\sqrt{Dt}\right) d\gamma \quad (3)$$

$$u = \int_0^\infty \frac{J_0(\gamma\rho)J_1(\gamma)}{\gamma} d\gamma \quad (4)$$

2-2. 이론 해의 응용

Fig. 1은 이론 해의 결과를 도시한 것으로서, 정적

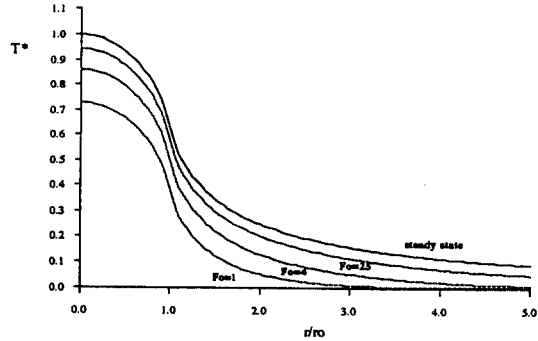


Fig. 1. Axisymmetric dimensionless temperature versus dimensionless radius graph in the steady state and transient state for a circular heat source

상태 및 과도상태의 최대칭 해를 통하여 원형의 정적 열원이 절연경계조건 하에서 갖는 온도구배를 살펴볼 수 있다. 그림에서 정적상태를 나타내는 곡선은 식 (4)로서, 그리고 과도상태를 나타내는 곡선은 식 (3)의 오차함수를 급수전개하여 나타내었다. 이때 Fourier 수가 100 이상일 경우를 정적상태로 간주하였다. Fourier 수는 열원의 반경과 유지시간 그리고 열확산율의 함수로서 정의된다.

3. 실험장치 및 실험방법

3-1. 실험장치의 구성 및 시편 재료

Fig. 2는 사용된 Pin-on-Disk형 실험장치를 개략적으로 도시한 것이다. 시편은 압축공기에 의해 Disk로부터 수직하중을 받도록 구성되어 있으며, 중심축은 timing belt로 모터에 의해 구동된다. 시편의 직경은 6 mm, 그리고 Disk의 직경은 51 mm 두께는 3.2 mm이다. 봉형의 시편에는 접촉표면으로부터 2 mm 하단에 열전대를 삽입할 수 있는 구멍을 중심부까지 뚫어서 시편의 표면평균온도를 측정하도록 하였다. Disk 재료로는 단결정 사파이어를 사용하였다. 사파이어는 투명하다는 것 외에도 기계적 성질이 철과 비슷하다는 장점이 있다. 따라서 미끄럼 마찰시 접촉면에서 나타나는 열원을 투명한 Disk를 통하여 포착하여 고속의 영상처리장치로 확대 녹화하였다. 시편의 재질은 열원의 발생에 큰 영향을 미치므로 O1 공구강과 316 스테인레스강을 시편으로 사용하였다. O1 공구강의 경우, 600°C 에서 2시간 동안 뜨임 처리를 하므로써 40HRC의 경도를 유지하여 열원이 잘 발생토록 열처리하였다. Table 1은 실험에 사용된 재

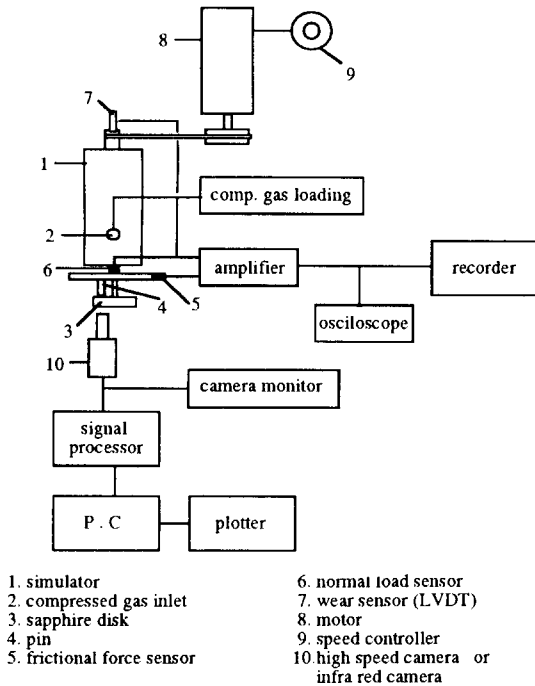


Fig. 2. Schematic illustration of the experimental equipment

료의 기계적 성질을 나타낸다.

3-2. 실험방법

각 시편에 대한 실험조건은 나타난 열원들을 분리하여 해석하기에 용이하게 하기 위하여 너무 많은 열원이 중첩되어 나타나지 않는 범위 내에서 최저치로 선정하였다. 따라서 하중은 15-25 N으로 하였으며, 미끄럼속도는 공구강의 경우 2.33-3.67 m/s로 그리고 스테인레스강의 경우는 1.0-2.0 m/s로 하였다. 열원의 온도를 측정하기 위하여 고속 촬영기와 영상분석기(Kodak Ektapro 1000 Motion Analyzer)가 사용되었다. 정밀한 영상을 포착하기 위하여 1.5배의 광학증폭기가 부착된 Zoom렌즈(Bausch & Lomb Mono Zoom 7)를 사용하였다. 접촉면에서 발생하는 열원의 밝기의 강도는 영상분석기에 의해 gray level로 변환된 후 PC에 입력되었으며, 보정곡선에 의해 온도로 환산되었다.

4. 열원의 온도분포와 표면온도

Fig. 3은 하중 20 N, 미끄럼속도 2.0 m/s에서 공구강

Table 1. Properties of sapphire disk and pin materials

Property	O1 steel	316 steel	disk
E(GPa)	228	217	365
ρ (kg/m ³)	7800	9027	3980
C_p (J/kgK)	460	500	418
k(W/mK)	32	16	27
H(GPa)	1.25	0.58	19
ν	0.25	0.25	0.25
D(10 ⁻⁵) (m ² /s)	0.90	0.36	1.62

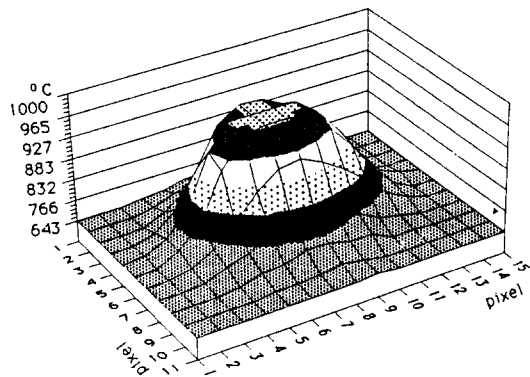


Fig. 3. Three dimensional temperature distribution in a hot spot. (1 pixel=38.5 μ m)

표면에 나타난 임의의 열원의 온도분포를 3차원으로 도시한 것이다. 그림에서 X-축과 Y-축은 열원의 크기를 나타내며(1 pixel=38.5 μ m) Z-축은 gray level을 온도로 환산하여 나타낸 것으로서 온도분포 해석의 방법을 보여주고 있다. 두 가지 시편의 표면에서 열원의 형태는 Fig. 4에서의 흰 점들과 같이 대부분 원형으로 나타났으며, 그림에서 화살표는 Disk의 회전 방향을 나타내고 있다. 열원의 위치는 매 순간 접촉점에서의 마멸이 진행됨에 따라 어느 순간 새로운 접촉점이 나타나게 되므로 계속해서 변하게 된다. 그러나 각 열원은 생성되어 소멸되기까지 비교적 이동이 없이 한 위치에 머무르는 것을 알 수 있었다.

Fig. 5는 Fig. 3의 방법에 의해 결정된 열원의 온도분포를 Gecim과 Winer[10]의 이론 해와 비교하여 나타낸 것으로서 실험 결과가 이론 해와 매우 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 그러나 본 실험은 열원의 가시광선에 의한 분석이므로 온도가 약 550°C 이하는 촬영기에 포착되지 않았다. 따라서 낮은 T*의 영역에서는 이론해와 비교할 수 없었다.

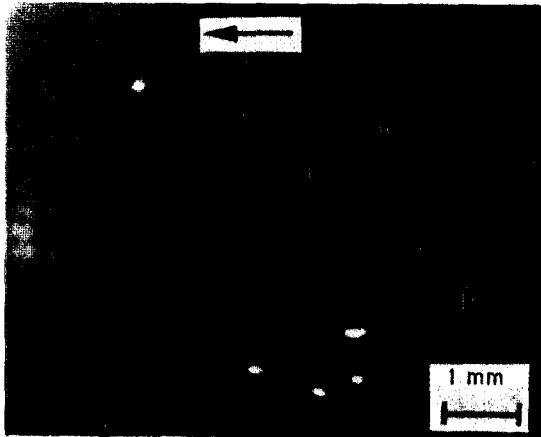


Fig. 4. Hot spots on the surface of the tool steel pin from high speed video at 30 rps of image rate with 20 N, 2.0 m/s

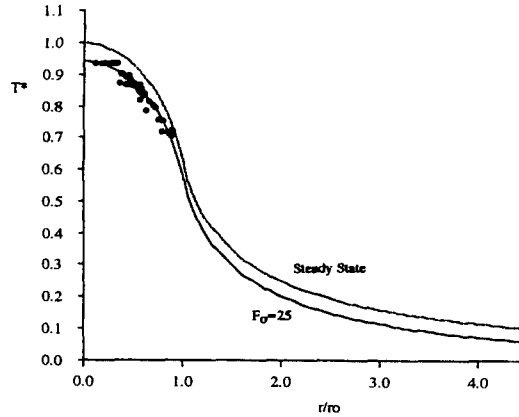


Fig. 6. The dimensionless temperature versus dimensionless radius of tool steel at 15 N normal load and 3.0 m/s sliding speed

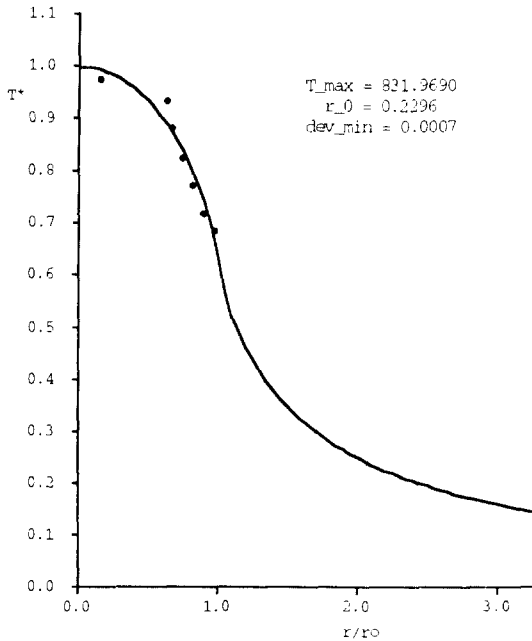


Fig. 5. The dimensionless temperature versus dimensionless radius in a hot spot

Fig. 6-8은 공구강의 표면에서 발생한 열원들의 온도구배를 일정한 미끄럼속도에서 하중의 변화(15, 20, 25 N)에 따라 나타난 전형적인 결과를 도시한 것이다. 하중과 속도가 증가함에 따라 Fourier 수도 증가하였으며, 이는 마찰열이 증가함에 따라 열원이 정적상태에 도달하였음을 의미하며 실제로 Fig. 8은 모든

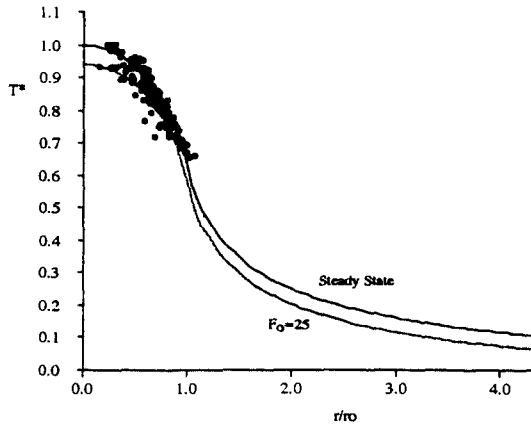


Fig. 7. The dimensionless temperature versus dimensionless radius of tool steel at 20 N normal load and 3.0 m/s sliding speed

열원이 정적상태에 도달했음을 보여주고 있다. 한편 Fig. 9는 스테인레스강의 결과를 도시한 것으로서 공구강의 결과와 유사한 내용을 나타내고 있다. 단지 Fourier 수가 낮은 것은 스테인레스강의 열전도율이 공구강보다 낮기 때문인 것으로 보인다. 또한 Table 2는 두 가지 시편에 대하여 하중과 속도(PV)의 증가에 따른 마찰열(FPV)의 변화와, 열원의 평균반경과 평균 최고온도 및 걸보기 면적의 표면평균온도를 나타내고 있다.

열원의 생성은 하중과 속도 그리고 재료의 열전도율과 매우 깊은 관계가 있다. Bowden과 그의 연구진 [11]은 열원이 생성될 때 재료의 열전도율과 마찰력

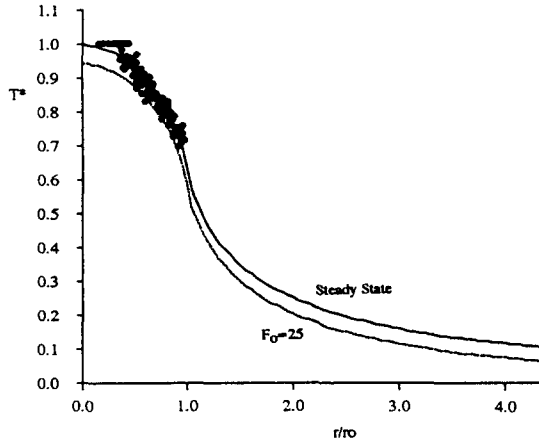


Fig. 8. The dimensionless temperature versus dimensionless radius of tool steel at 25 N normal load and 3.0 m/s sliding speed

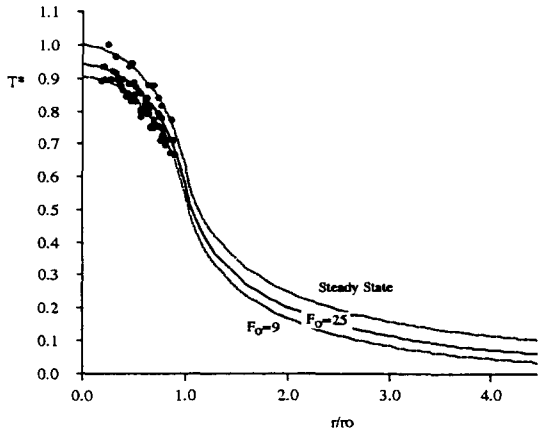


Fig. 9. The dimensionless temperature versus dimensionless radius of stainless steel at 15 N normal load and 2.0 m/s sliding speed

의 관계를 일찌기 발표한 바 있으며, 열전도율이 작은 재료일수록 열원이 더 잘 생성됨을 보였다. 본 실험에 사용된 공구강의 열전도율은 스테인레스강보다 약 2 배가 크다. 이것은 공구강의 표면에서 발생된 마찰열이 내부로 더 빨리 전도됨을 의미하며, 따라서 열원을 생성하는데 스테인레스강 보다 더 큰 마찰열이 요구됨을 의미한다. 결과적으로 Table 2에 나타난 바와 같이 열원을 생성하기 위한 최소 마찰열은 공구강이 스테인레스강에 비해 2배이다.

낮은 PV 영역에서는 열전도율이 열원의 최고온도에 영향을 미침을 알 수 있다. Fig. 10에서와 같이 곡선을

Table 2. Experimental data of the steel pin materials

(a) Tool Steel

PV (Nm/s)	fPV (W)	r_{ave} (mm)	T_m (°C)	σT_m (°C)	T_b (°C)
34.9	29.7	0.089	725	33	100
45.0	37.4	0.120	735	42	110
46.6	33.1	0.100	789	71	105
55.1	47.3	0.120	738	51	120
58.3	39.0	0.120	772	50	110
60.0	41.4	0.095	821	52	120
73.4	50.6	0.097	784	56	130
75.0	43.5	0.100	833	46	135
91.8	57.8	0.112	822	56	140

(b) Stainless Steel

PV (Nm/s)	fPV (W)	r_{ave} (mm)	T_m (°C)	σT_m (°C)	T_b (°C)
14.9	11.1	0.100	750	54	75
19.9	13.6	0.116	737	47	85
20.0	14.2	0.107	744	57	85
24.9	16.2	0.120	745	58	100
25.0	17.5	0.113	761	54	95
26.6	17.6	0.116	752	60	100
30.0	20.7	0.123	754	54	100
33.2	21.3	0.118	764	55	110
33.3	22.0	0.118	752	62	115
40.0	27.2	0.121	773	65	125
41.6	25.4	0.107	765	60	125
50.0	30.0	0.118	785	50	140

낮은 PV 영역까지 연장하여 그리면, 동일한 마찰열에서 열전도율이 낮은 재료의 열원의 최고온도가 열전도율이 높은 재료보다도 더 높게 나타났다. 또한 동일한 마찰열에서 측정된 표면평균온도의 경우도 그 차이는 작지만 스테인레스강이 더 높음을 알 수 있다. 이러한 결과는 식 (5)와 식 (6)에 의해서 설명될 수 있는데, 즉 낮은 PV 영역에서 열원의 최고온도는 열전도율과 반비례 관계임을 알 수 있다.

$T_r = T_m$ 일 때,

$$T^* = \frac{T_r - T_b}{T_m - T_b} = \frac{kT}{qr_0} = 1 \quad (5)$$

$$T = \frac{qr_0}{k} \quad (6)$$

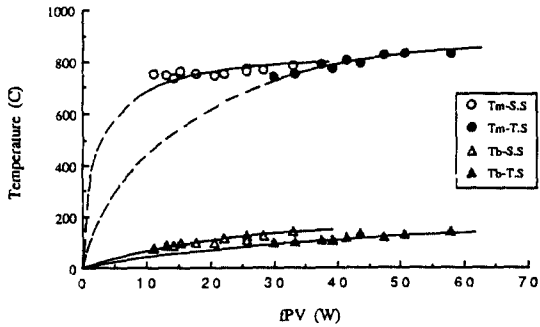


Fig. 10. Maximum hot spot temperature and bulk temperature versus frictional heat on the steel pin surfaces

한편 높은 PV 영역에서는 최고온도가 두 재료 모두 임계온도에 도달하여 일정하며, 표면평균온도보다 약 600-700°C 정도 높음을 알 수 있다. 이러한 현상은 마멸입자들이 파단되어 떨어져 나가면서 열을 방출하여 접촉면의 온도를 임계온도로 일정하게 유지하는 것으로 보여진다. 실제로 실험에서 공구강의 경우 ($5.51-10.2 \times 10^{-13} \text{ m}^3/\text{m}$) 그리고 스테인레스강의 경우 ($2.3-3.87 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{m}$)의 높은 마멸율을 얻었다. 또한 이 결과는 최근에 발표된 Yang, Cowan 그리고 Winer[12]의 결과와 대체적으로 일치하고 있다. 그들은 접촉면이 심한 Thermomechanical 마멸을 일으킬 때 임계온도가 거의 일정함을 이론적으로 도출하였으며, AISI52100강의 경우 mild wear에서 severe wear로 전환될 때의 임계온도가 표면평균온도보다 약 600°C 정도 높음을 보였다.

5. 결 론

공구강과 스테인레스강을 단결정 사파이어와 마찰하였을 때, 접촉면에 생성된 열원의 온도를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Gecim과 Winer의 이론은 열원의 온도를 예측하는데 적합하다.
2. 열원의 온도는 낮은 PV 영역에서는 열전도율에 반비례하나, 높은 PV 영역에서는 거의 일정함을 보였다.
3. 국부적으로 발생하는 열원의 온도는 표면평균 온도보다 약 600-700°C 정도 높았다.

기호설명

J_0, J_1 : Bessel 함수

T : 열원온도
 k : 열전도계수
 r, r_0 : 열원의 반경
 u, z, ρ : 무차원 변수
 γ : Bessel 함수의 변수

참 고 문 헌

1. Blok, H., "Theoretical Study of Temperature Rise at Surfaces of Actual Contact under Oiliness Conditions," Inst. Mech. Eng. General Discussion of Lubrication, Vol. 2, 1937, pp. 222-235.
2. Jaeger, J.C., "Moving Surces of Heat and Temperature of Sliding Contact," J. Proc. Roy. Soc. N.S.W., Vol. 76, 1942, pp. 203-224.
3. Berry, G.A. and Barber, J.R., "The Division of Frictional Heat-A Guide to Nature of Sliding Contact," Journal of Tribology, Vol. 106, 1984, pp. 405-412.
4. Ling, F. F., "On Temperature Transients in Sliding Interface," Jour. of Lubrication Tech., Vol. 91, 1969, p. 397-405.
5. Kuhlmann-Wilsdorf, D., "Flash Temperature Due to Friction and Joule Heat at Asperity Contacts," Wear, 105, 1985, pp. 187-198.
6. Kuhlmann-Wilsdorf, D., "Temperatures at Interfacial Contact Spots: Dependence on Velocity and on Role Reversal of Two Materials in Sliding Contact," Jour. of Tribology, Vol. 109, 1987, pp. 321-329.
7. Nagaraj, H.S., Sanborn, D.M. and Winer, W.O., "Direct Surface Temperature Measurement by Infrared Radiation in Elastohydrodynamic Contacts and the Correlation with the Blok Flash Temperature Theory," Wear, 49, 1978, pp. 43-59.
8. Griffioen, J.A., Bair, S. and Winer, W.O., "Infrared Surface Temperature Measurements in a Sliding Ceramic-Ceramic Contact," Proc. Leeds-Lyon Symposium, 1985, pp. 238-245.
9. Bair, S., Green, I. and Bhushan, B., "Measurements of Asperity Temperatures of a Read/Write Head Slider Bearing in Hard Magnetic Recording Disks," Journal of Tribology, Vol. 113, 1991, pp. 547-554.
10. Gecim, B., and Winer, W.O., "Transient Temperatures in the Vicinity of an Asperity Contact," Trans. ASME, Jour. of Tribology, Vol. 107, 1985, pp. 333-342.
11. Bowden, F.P., Stone, M.A. and Tudor, G.K., "Hot spots on Rubbing Surfaces and the Detonation of Explosive by Friction," Proc. Royal Soc., 188. Ser. A, 1947, pp. 329-349.
12. Yang, J.S., Cowan, R.S. and Winer, W.O., "Prediction of Failure Transitions in Sliding Contacts by a Thermomechanical Wear Theory," To be Published, 1992.