

거친 표면의 마찰온도 해석 및 온도측정 실험에 관한 연구

이상돈[†] · 조용주^{*}

부산대학교 정밀기계공학과, *부산대학교 기계공학부

Analysis and Measurement of Rough Surface Temperature Rise in Lubricated Condition

Sangdon Lee[†] and Yongjoo Cho^{*}

Precision and Mechanical Engineering, Pusan National Univ.

**School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.*

Abstract – The main object of this study is to compare the results that have been concluded by the experiment and to estimate the temperature rise that can cause the contacting surface to be damaged. The former studies are based on the Blok and Jaeger formula. By these formulas we assume that two of the contacted objects are a kind of semi-infinite solid and with this assumption we can make a temperature analysis. But this method doesn't consider lubrication conditions and the calculation time requires a lot of time in that we have to face many difficulties in measuring the actual temperature rise. In this study we combines the semi-infinite solid method and the finite volume method to analyze the temperature of the contacting surface. And we measure temperature rise of the contact surface by dynamic thermocouple.

Key words – contact surface, friction, temperature rise, dynamic thermocouple, frictional heat.

1. 서 론

슬라이딩 하는 접촉표면에서의 온도 상승은 마찰열에 기인하는데, 이러한 마찰열의 크기는 접촉압력, 마찰속도, 마찰계수에 따라 커지게 된다. 그러나 마찰열에 의해 상승되는 표면의 온도는 재료의 물성치, 접촉면의 형상, 윤활조건 등에 따라 같은 접촉압력, 마찰속도, 마찰계수를 가지더라도 달라지게 된다.

이러한 마찰열에 의해 접촉표면의 온도가 상승하면 표면손상이 발생하고, 이러한 손상은 기계전체의 손상을 발생시킨다. 때문에 마찰에 의해 상승된 표면의 온도를 예측하는 것은 기계의 설계단계에서 반드시 필요한 작업이고, 손상이 발생했을 때, 손상원인을 밝히기 위해서도 반드시 필요한 작업이다. 일반적으로 이러한 표면온도의 상승은 열전대를 이용해 표면근방의 온도를 측정하거나, 상용해석 프로그램을 이용하여 온도변화를 계산

한다. 하지만, 일반적인 측정기법으로는 실제 접촉표면의 온도를 측정하기 매우 어렵고, 상용해석 프로그램 또한 실제 표면의 접촉을 고려하거나, 거친 표면의 형상을 이용하여 해석하는 데에는 아직까지 어려움이 많다.

때문에 본 연구에서는 반무한체 해석기법과 유한체적법(Finite Volume Method)을 조합하여 마찰에 의한 표면의 온도상승값을 계산하였다. 또한 기존의 열전대를 표면근처에 설치하여 측정하는 방법이 아닌 다이아믹 서모커플 기법을 이용하여 실제 접촉표면의 온도를 측정하여 비교하여 해석결과값과 비교하였다.

2. 온도 해석

본 연구에서는 반무한체 기법과 유한체적법을 조합하여 접촉표면의 온도상승을 계산하였다. 일반적인 열해석과 달리 마찰에 의한 온도상승을 계산할 때는 접촉면에서 발생한 열이 두 표면에 나누어 전달되기 때문에 열분할계수를 계산해주어야 한다. 일반적으로 이

[†]주저자 · 책임저자 : lsd1975@pusan.ac.kr

러한 열분할계수를 적용한 온도해석에서는 반무한체 기법이 널리 사용되나, 이 기법은 접촉면을 제외한 부분에서 유효율에 의한 대류 열손실이나 유한체의 온도를 계산하기에 매우 어렵다.

본 연구에서는 이러한 단점을 보완하여 반무한체 기법과 유한체적법을 조합하여 열분할계수를 적용함과 동시에 대류 열손실을 고려한 유한체의 온도해석을 수행하였다.

2-1. 반무한체 기법

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

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

식 (1)을 무차원화 하면

$$d\bar{T} = \frac{\bar{q}(\bar{x}', \bar{y}', 0, \bar{t}') d\bar{x}' d\bar{y}' d\bar{t}'}{4\alpha(\bar{t}-\bar{t}')} \times \exp\left[-\frac{(\bar{x}-\bar{x}')^2 + (\bar{y}-\bar{y}')^2}{(\bar{t}-\bar{t}')} \right] \quad (2)$$

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

따라서 표면 1의 온도상승은

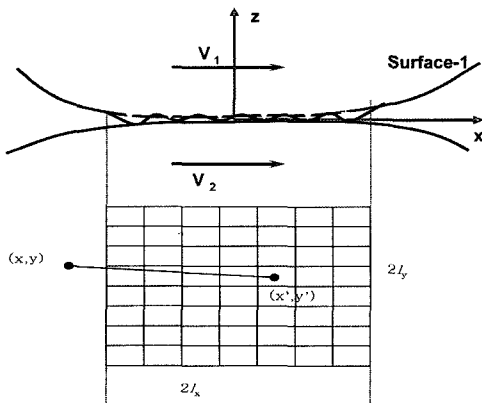


Fig. 1. Model of surface contact.

$$d\bar{T}_1 = [1 - f(\bar{x}', \bar{y}', \bar{t}')] \frac{\bar{q}(\bar{x}', \bar{y}', 0, \bar{t}') d\bar{x}' d\bar{y}' d\bar{t}'}{(\bar{t}-\bar{t}')^{3/2}} \times \exp\left[-\frac{[(\bar{x}-\bar{x}') - V_1(\bar{t}-\bar{t}')]^2 + (\bar{y}-\bar{y}')^2}{(\bar{t}-\bar{t}')} \right] \quad (3)$$

표면 2의 온도상승은

$$d\bar{T}_2 = [f(\bar{x}', \bar{y}', \bar{t}')] \frac{\bar{q}(\bar{x}', \bar{y}', 0, \bar{t}') d\bar{x}' d\bar{y}' d\bar{t}'}{(\bar{t}-\bar{t}')^{3/2}} \times \exp\left[-\frac{[(\bar{x}-\bar{x}') - V_1(\bar{t}-\bar{t}')]^2 + (\bar{y}-\bar{y}')^2}{(\bar{t}-\bar{t}')} \right] \quad (4)$$

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 Ω_c , 시간 \bar{t} 에서 임의의 점 (x, y, t') 의 온도상승은 식 (5)에 나타나 있다.

$$\Delta\bar{T}_1(\bar{x}, \bar{y}, \bar{t}) = \int_0^{\bar{t}} \int_{\Omega_c} d\bar{T}_1(\bar{x}', \bar{y}', \bar{t}') \quad (5)$$

$$\Delta\bar{T}_2(\bar{x}, \bar{y}, \bar{t}) = \int_0^{\bar{t}} \int_{\Omega_c} d\bar{T}_2(\bar{x}', \bar{y}', \bar{t}') \quad (6)$$

$$\bar{T}_{1b} + \Delta\bar{T}_1(\bar{x}', \bar{y}', \bar{t}') = \bar{T}_{2b} + \Delta\bar{T}_2(\bar{x}', \bar{y}', \bar{t}') \quad (6)$$

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

2-2. 유한체적법

유한체적법은 운동량 및 질량보존의 법칙을 만족시키기에 용이하도록 적분하여 기초방정식을 이산화하는 방법이다. 구체적으로는 고려하고 있는 격자점을 중심으로 한 미소영역 내에서 방정식을 적분하고, 그 경계 값을 인접 격자점을 이용하여 요구되는 정확도로 주어진 적분식을 이산화 하는 것이다.

Fig. 2에서 검사체적을 일차원 정상상태라 가정하면 에너지보존법칙에 의하여 이 검사체적에서의 에너지 방정식은 식 (10)과 같다.

$$\frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) + \dot{q} = 0 \quad (7)$$

식 (7)을 검사체적에서 적분하면 다음과 같고

$$\int_w^e \left[\frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) + \dot{q} \right] dx = 0 \quad (8)$$

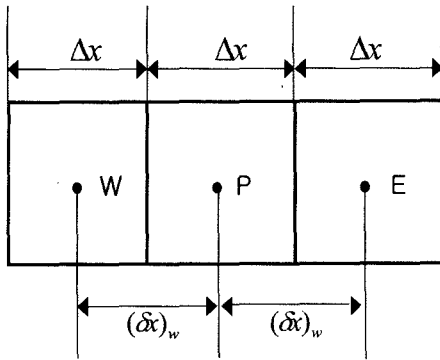


Fig. 2. Control volume (1-dimension).

식 (7)은 각각의 항을 식 (9)(10)과 같이 적분하여,

$$\int_w^E d\left(k \frac{dT}{dx}\right) = \left(k \frac{dT}{dx}\right)_E - \left(k \frac{dT}{dx}\right)_w \quad (9)$$

$$\int_w^E S dx = \bar{S} \int_w^E dx = \bar{S} \Delta_x \quad (10)$$

T의 항으로 정리하면 다음과 같다.

$$\left(\frac{k_E}{(\delta x)_E} + \frac{k_W}{(\delta x)_W}\right) T_P = \left(\frac{k_E}{(\delta x)_E}\right) T_E + \left(\frac{k_W}{(\delta x)_W}\right) T_W + \bar{S} \Delta_x \quad (11)$$

이 식을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + b \quad (12)$$

Fig. 3과 같이 온도를 구하고자 하는 물체를 N+2개의 노드로 자르면 식 (12)는 다음과 같은 이산화방정식으로 나타낼 수 있다.

$$a_i T_i = b_i T_{i+1} + c_i T_{i-1} + d_i \quad (13)$$

여기서, 각각의 계수값은 다음과 같다.

$$b_i = \frac{k}{(\delta x_i + \delta x_{i+1})/2}$$

$$c_i = \frac{k}{(\delta x_{i-1} + \delta x_i)/2}$$

$$a_i = b_i + c_i, \quad d_i = S_i \delta x_i \quad (14)$$

T₁과 T_{N+2}는 경계조건으로부터 구할 수 있고 구하고자 하는 온도는 i=2,...,N+1을 대입하여 얻은 N개의 방정식을 계산함으로써 구할 수 있게 된다. 이 방법을

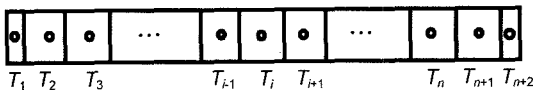


Fig. 3. Index notation.

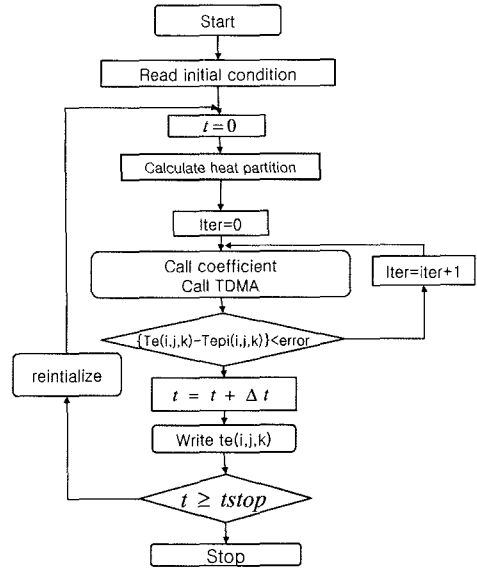


Fig. 4. Flowchart of temperature analysis.

2차원 및 3차원에도 적용하여 유한체의 온도해석을 수행할 수 있다.

2.3. 반무한체 온도해석과 FVM과의 결합

Fig. 4는 반무한체 해석과 유한체적법을 조합하여 3차원 미끄럼 접촉시 두 물체의 온도를 구하는 플로우 차트를 도시한 것이다. 유한체적법은 앞에서 기술한 바와 같이 형태를 가진 물체의 온도해석과 주위의 대류 열손실과 같은 요건들을 반영하기에 쉽다는 장점이 있지만, 미끄럼 접촉에서 발생한 열원의 크기가 경계조건으로 주어져 있어야만 계산할 수 있다는 단점이 있다. 두 물체의 접촉면에서 발생한 마찰열은 열 분할 계수 f(m,n)에 의해 a×f(m,n)과 q×(1-f(m,n))으로 두 물체의 접촉면에 나누어져 전달된다. 본 연구에서는 열 분할 계수 f(m,n)을 반무한체 해석을 수행하여 구한 후 이 값을 유한체적법의 경계조건으로 하여 미끄럼 접촉시 두 물체의 온도해석을 수행하였다.

3. 마찰온도 측정실험

일반적으로 온도를 측정하기 위해 많이 사용하는 방법은 열전대를 측정하고자 하는 부위에 부착하는 방법이고, 대개 접촉면의 가까운 부분에 부착하거나 표면아래에 열전대를 삽입하여 온도를 측정한다. 하지만, 이러한 경우 접촉면에 열전대를 가까이 부착하지

못함으로써 실제 접촉면의 온도를 정확하게 측정하기 어렵다.

때문에 본 연구에서는 다이내믹 써모커플을 원리를 이용해 접촉면의 실제 온도를 측정하였다.

3-1. 다이내믹 써모커플의 원리

열전대란 종류가 다른 금속선 두 개의 양 끝단을 접촉하여 만든 것으로 이 양 끝단 접점에 온도차가 발생할 때 폐회로에 열기전력이 발생하여 회로에 전류가 흐른다. 이 열기전력의 크기와 극성은 양단의 온도와 두 개의 금속선의 조합에 의해 결정되며 금속선의 굵기 또는 길이에 무관하다. 따라서 특정 열전대의 온도에 따른 열기전력을 미리 읽을 수 있으므로 온도 측정이 가능하다.

다이내믹 써모커플은 이러한 열전대 원리를 이용하여 실제 접촉하는 두 물체의 마찰면을 접합점으로 하여 열전대회로에 발생하는 기전력을 측정함으로써 접촉면의 온도를 측정하는 기법이다.

3-2. 실험장치 및 시편

본 연구에서는 K-Type 열전대의 재료인 크로멜과 알루멜을 이용하여 핀과 플레이트를 제작하여 마찰온도 측정실험을 수행하였다. Table 1에 열전대 재료의 성분을 나타내었다.

Fig. 5와 6에 실험에 사용한 시편의 사진과 장치도를 나타내었다.

Table 1. K-type Thermocouple

K-type	Chemical composition
Chromel	90% Ni, 10% Cr
Alumel	95% Ni, 2% Mn, 2% Al

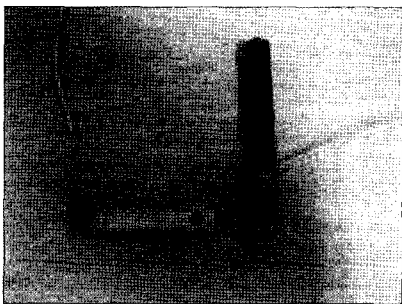


Fig. 5. Test specimens.

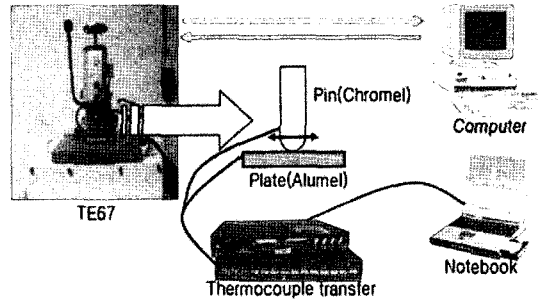


Fig. 6. Temperature measuring system.



Fig. 7. Temperature measuring system.

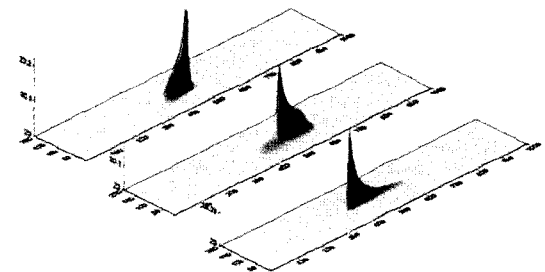


Fig. 8. Temperature rise analysis.

3-3. 온도해석 및 온도측정 실험결과

Fig. 7은 실험에 사용된 시편의 표면거칠기 형상을 측정한 결과와 해석에 사용할 접촉압력 해석결과이다. 표면 거칠기 형상 데이터는 3차원 표면거칠기 측정 장비를 사용하였으며, 접촉해석을 통해 핀과 플레이트가 접촉할 때의 표면접촉 압력을 해석하였다.

Fig. 8은 마찰열에 의한 표면온도의 상승을 계산하기 위한 시뮬레이션 결과이다. 크로멜 핀이 알루멜 플레이트 위를 직선 왕복운동하는 것을 모델링 한 그림이다.

Fig. 9는 마찰열에 의한 표면온도의 상승을 계산한 결과와 실험결과를 비교한 그림이다. 다이내믹 써모커플은 접촉면의 온도의 평균값을 측정하게 됨으로 측정면적이 달라짐에 따라 데이터의 분포가 크기 때문에 디지털 데이터 필터링을 통해 구한 값을 나타내었다. 실험을 통해 측정된 결과값이 해석값보다 낮게 나타났는데 이는 데이터 필터링 과정에서 실제 온도상승값의 일부

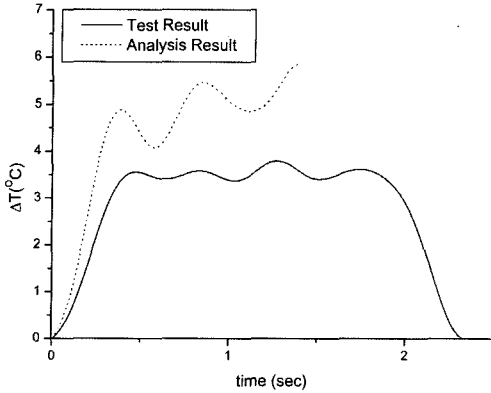


Fig. 9. Test and analysis results.

분도 필터링이 되었을 가능성이 높은 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 윤활상태에서 실제 거친표면의 접촉에 의한 온도상승을 반무한체 해석기법과 유한체적법을 조합하여 계산하고, 다이나믹 써모커플 기법을 이용하여 마찰실험시의 표면의 온도상승을 측정하였다.

반무한체 해석기법을 통해 열분할계수를 계산하고, 유한체적법을 이용하여 경계조건들을 고려하여 유한체의 온도를 계산함으로써, 윤활조건을 고려한 접촉면의 마찰온도 상승을 계산하였다. 또한 다이나믹 써모커플을 이용한 온도측정기법의 경우 기존의 열전대를 이용한 방법에서는 측정하지 못했던 접촉표면에서의 온도를 측정할 수 있었다.

하지만 아직 해석의 경우 실제 큰 크기의 접촉면과 슬라이딩 길이가 긴 경우를 계산하는 기법의 개발이 요구되고, 다이나믹 써모커플의 경우 데이터 필터링 등에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 사료된다.

기호설명

$f(x, y, t)$: heat partition factor
$q(x', y', t')$: heat flux
l_{xy}	: 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
$\bar{x}, \bar{y}, \bar{t}$: dummy variables of respectively
$\bar{T}, \bar{x}, \bar{y}, \bar{t}, \bar{q}, \bar{p}$: nondimensional variables of T, x, y, t, q, p
ρ	: density of solid
Ω_c	: contact area
α	: thermal diffusivity of solids
μ	: friction coefficient
$S = \pi^{3/2} \sigma K_f / l_x K_f$: nondimensional variable
$h(x, y)$: lubricant film thickness
K_f	: thermal conductivity of fluid
K_s	: thermal conductivity of solids

참고 문헌

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 Hertzian Contact," *ASLE Transaction*, Vol. 14, pp. 41-54, 1970.
5. 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.
6. Lai, W. T. and Cheng, H. S., "Computer Simulation of Elastic Rough Contact," *ASLE Trans.*, Vol. 28, No. 2, pp. 172-180, 1985.
7. O. S. Dinc, "The measurement of surface temperature in dry or lubricated sliding," *Transactions of the ASME*, Vol. 115, pp. 78-82, January, 1993.
8. 김태완, 이상돈, 조용주, "FVM과 반무한체 해석을 이용한 표면온도예측에 관한 연구," *한국윤활학회지*, 제18권, 제6호, pp. 389-395, 2002.