

170.

반복 미끄럼 접촉에 의한 표면층의 경화에 대한 해석

박준목 · 김석삼*

경북대학교 대학원 기계공학과
*경북대학교 공과대학 기계공학부

The Analysis for Surface Hardening by Repeated Sliding Contact

Jun-Mork Park and Seock-Sam Kim*

Department of Mechanical Engineering, Graduate school, Kyungpook National University
*Department of Mechanical Engineering, Kyungpook National University

Abstract—Wear is affected by numerous factors—contact load, sliding velocity and distance, friction coefficient, material properties and environmental conditions. Among these wear factors, surface hardness is one of very important factors to determine wear. But surface hardness is varied by work hardening during repeated sliding contact. In this reason wear rate is increased or decreased with varying surface hardness, and transition of wear mechanism is happened. In this study, the surface hardening by accumulating residual stress was analyzed by considering the repeated sliding Hertzian contact model. The results showed that surface hardness was increased with increasing contact load, friction coefficient and contact number. And the depth of hardening layer, plastic layer and elastic layer depended upon contact load and number, but they didn't depend upon friction coefficient. The predicted surface hardness was about 1.5~1.8 times as hard as the material.

Key word—contact load, friction coefficient, hardness, repeated sliding contact, residual stress, wear volume, work hardening.

1. 서 론

표면에서의 상호 접촉에 의한 마찰 마멸기구를 이해하려는 시도는 실험적 연구와 이론적 해석으로 나눌 수 있다. Hertz에 의한 접촉이론은 Liu 등[1], Hamilton[2], Suh 등[3]의 해석적 연구를 거쳐 발전하여 왔다. 그러나 이러한 이론적 접근 방법에도 불구하고 마멸기구 해석에 어려움을 겪고 있는 것은 Meng[4]의 지적에서와 같이 마멸기구에 영향을 미치는 100여가지 이상의 많은 마멸 인자들이 존재하기 때문이다. 이러한 인자들 중에서 온도, 습도 등의 환경적 인자들을 제외하면 접촉하중, 마찰계수, 미끄럼거리와 재료의 물성치인 영률, 항복강도 및 경도 등을 고려할 수 있다. 그러므로 마멸에 있어 대부분의 이론적, 실

험적 접근방법으로 이러한 마멸인자들이 주로 사용되어 왔다.

그러나 반복적인 접촉이 있을 경우 재료 내부에는 잔류응력이 발생하여 표면층은 경화되며, 이러한 경화에 의해 표면층의 경도는 변화를 가져오므로 1회 접촉에 의한 해석보다는 반복적인 접촉을 고려해야 할 것이다. 최근 반복접촉에 의한 잔류응력의 영향을 고려한 실험과 응력해석이 많이 수행되고 있다. 미끄럼접촉에서는 Jahanmir[5], Kral 등[6]의 이론적 연구와 Alpas 등의 여러 실험적 연구들이 있다[7-9]. 잔류응력을 고려한 대부분의 연구는 그 대상이 베어링, 철로와 휠 등에 적용될 수 있는 구름접촉에 의한 마멸에 관심이 모아졌으며, 국내에서는 강 등[10]이 구름접촉에서 X선 회절시험을 이용한 표면층의 잔류응력을

측정하여 그 연구 결과를 발표한 바 있다. 미끄럼 접촉의 경우 Archard[11]의 마멸식에서와 같이 마멸량은 접촉하중, 미끄럼거리, 재료의 경도에 의해 결정되므로 미끄럼접촉에 있어 마멸기구를 이해하고 마멸량을 예측하기 위해서는 반복 미끄럼접촉에 의한 표면층의 경화에 대한 이론적 해석이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 이론해석을 통하여 접촉하중, 마찰계수 및 접촉회수의 변화에 따른 잔류응력을 수치해석적 방법으로 구하여, 표면층의 경화층 깊이 및 경도를 예측하고자 한다.

2. 이론 해석

2-1. Hertz 접촉하중에 의한 표면층의 응력

한 개의 돌기(asperity)가 표면에 미끄럼 접촉하는 것으로 가정한 Hertz와 Mindlin에 의한 접촉이론에서 Fig. 1과 같이 반경 a 인 원형 접촉압력을 가진 반무한 평면에 있어서의 응력을 구할 수 있다.

경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_y &= \frac{3P}{2\pi a^3} (a^2 - x^2 - z^2)^{3/2} \\ \tau_{xy} &= \frac{3Q}{2\pi a^3} (a^2 - x^2 - z^2)^{3/2} \quad x^2 + z^2 \leq a^2 \\ \tau_{yz} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 P 는 y 방향의 전 접촉하중이며 Q 는 x 방향의 전 마찰력이다.

접촉경계 바깥에서의 응력은 영이며, z 방향은 마찰력을 영으로 하면 2차원으로 해석할 수 있다. 그러므로 전 마찰력은

$$Q = \mu P \quad (2)$$

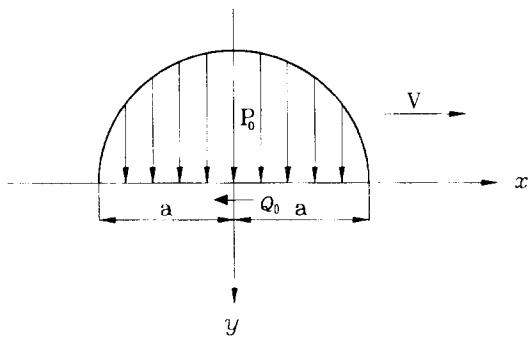


Fig. 1. Analytical model of Hertzian contact.

접촉원 반경 a 는 잘 알려진 Hertz의 식으로 주어진다. 즉

$$a = \left\{ \frac{3\pi P R_1 R_2}{4(R_1 + R_2)} \left[\frac{1 - \nu_1^2}{\pi E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{\pi E_2} \right] \right\}^{1/3} \quad (3)$$

여기서 E 와 ν 는 영률과 프와송비이며 R 은 곡률반경이다. 1, 2는 접촉하는 두 물체를 나타낸다.

최대 접촉압력은 $P_0 = \frac{3P}{2\pi a^3}$ 이다.

경계에서의 전단응력은 접촉원의 반경과 접촉압력 둘 다에 영향을 주지 않는다.

그러므로 응력은 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E}{1} + \nu \left(\frac{\nu \Delta}{1 - 2\nu} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\ \sigma_y &= \frac{E}{1} + \nu \left(\frac{\nu \Delta}{1 - 2\nu} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ \sigma_z &= \frac{E}{1 + \nu} \left(\frac{\nu \Delta}{1 - 2\nu} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ \tau_{xz} &= \frac{E}{2(1 + \nu)} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

이 식을 접촉하중과 마찰력에 대해 각각 적분하여 중첩하면 응력을 구할 수 있다[9].

2-2. 반복 미끄럼 접촉에 의한 잔류응력 해석

2-2-1. 소성응력 해석

잔류응력을 계산하기 위해서는 Merwin[12]의 식을 도입하였다. 잔류응력을 계산하기 위해서는 Hertz 탄성응력 계산에서 소성 영역내의 값들이 필요하다. 이는 반복적인 미끄럼접촉에서 발생하는 변형률의 크기에서 구할 수 있다. 완전탄소성(elastic-perfectly plastic) 재료라고 가정하고, 다음과 같은 Prandtl-Reuss의 식에서 구할 수 있다.

편차응력은 다음과 같다.

$$s_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_h, \quad i, j \quad (5)$$

편차 변형률은 다음과 같다.

$$e_{ij} = \epsilon_{ij} - e, \quad i, j \quad (6)$$

여기서 정수응력과 변형률의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma_h = \frac{\sigma_{ii}}{3} \quad (7)$$

$$e = \frac{\epsilon_{ii}}{3} \quad (8)$$

혹크의 법칙에서 탄성 변형은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s_{ij} = 2G e_{ij} \quad (9)$$

여기서 G 는 전단 탄성계수이다.

소성 변형임을 판정하기 위해서는 미세스의 항복 조건을 적용하여 제2차 편차응력 불변량 J_2 는 일정한 값을 가지며 k_2 와 같다. 여기서 k 는 전단 항복강도 값이다.

그러므로 J_2 를 정의하면

$$J_2 = \frac{1}{2}(s_{ij} s_{ij}) \quad (10)$$

소성영역에서의 응력-변형률의 관계를 구하면

$$\dot{e} = \dot{e}_{ij}^e + \dot{e}_{ij}^p \quad (11)$$

소성 변형률(plastic strain rates)은 Prandtl-Reuss의 식에서 구할 수 있다.

$$\dot{e}_{ij}^p = \frac{\dot{W}^p}{2k^2} s_{ij} \quad (12)$$

여기서 \dot{W}^p 는 소성 변형률 에너지(plastic strain energy rate)이다.

$$\text{즉, } \dot{W}^p = \dot{e}_{ij}^p s_{ij} \quad (13)$$

식 (11)에 식 (9)와 (12)를 대입하면

$$\dot{e}_{ij} = \frac{\dot{s}_{ij}}{2G} + \frac{\dot{W}^p}{2k^2} s_{ij} \quad (14)$$

을 얻을 수 있으며, 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$\dot{s}_{ij} = 2G \left(\dot{e}_{ij} - \frac{\dot{W}^p}{2k^2} s_{ij} \right) \quad (15)$$

또한 소성 변형률 에너지는 탄성 변형률 에너지보다 매우 크기 때문에

$$\dot{W}^p \approx \dot{W} \quad (16)$$

여기서 \dot{W} 는 전 변형률 에너지이다. 그러므로

$$\dot{s}_{ij} = 2G \left(\dot{e}_{ij} - \frac{\dot{W}}{2k^2} s_{ij} \right) \quad (17)$$

여기서 \dot{e}_{ij} 는 혹크의 법칙에서 구해진 탄성 변형률에 대해 동일한 값을 가질 것이다.

소성변형이 진행되는 동안 J_2 는 k_2 와 같고 \dot{W} 는 양의 값을 가진다.

한편 Hertz의 식은 응력을 구하는데 이용된다. 식 (13)을 적분하기 위하여 x 축에 대한 시간 변화를 고려하면 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\frac{d}{dt}(s_{ij}; e_{ij}; W) = V \frac{\partial}{\partial x}(s_{ij}; e_{ij}; W) \quad (18)$$

여기서 V 는 미끄럼 속도이다. 그러므로 식 (17)에 식 (18)을 대입하면 식에서 V 는 소거되고, x 에 대한 식으로 유도될 수 있다. 그러므로 식 (17)에서 편차응력의 x 축에 관한 구배의 값을 구할 수 있다. 이러한 구배는 step by step numerical analysis인 Runge-Kutta-Gill method[13]를 사용하여 적분함으로써 응력을 구할 수 있다.

2-2-2. 잔류응력과 변형률

x 가 x_0 에서 x_∞ 까지 반복해서 움직인다면 접촉에서 발생하는 잔류응력이 반복되므로 잔류응력이 축적될 것이다. 그러므로 미끄럼 위치 x 는 잔류응력, 변형률과는 독립적이라고 할 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned} (\sigma_{xx})_r &= f_1(y) \\ (\sigma_{yy})_r &= f_2(y) \\ (\sigma_{zz})_r &= \nu(f_1 + f_2) \\ (\sigma_{xy})_r &= f_3(y) \end{aligned} \quad (19)$$

평형방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\sigma_{xx})_r}{\partial x} + \frac{\partial (\sigma_{xy})_r}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial (\sigma_{xy})_r}{\partial x} + \frac{\partial (\sigma_{yy})_r}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \quad (20)$$

$$\text{따라서 } \frac{d f_3}{d y} = 0 \text{ or } f_3 = c_1$$

$$\frac{d f_2}{d y} = 0 \text{ or } f_2 = c_2$$

경계조건 $x=\infty, y=0$ 에서 $\sigma_{yy} = 0, \sigma_{xy} = 0$

그러므로 $c_1 = c_2 = 0, f_2 = f_3 = 0$

경계조건을 만족하는 잔류응력은

$$\begin{aligned}
 (\sigma_{xx})_r &= f(y) \\
 (\sigma_{yy})_r &= 0 \\
 (\sigma_{zz})_r &= \nu f(y) \\
 (\sigma_{xy})_r &= 0
 \end{aligned} \tag{21}$$

식 (15)에서 구해지는 응력장은 σ_{yy} 와 σ_{xy} 가 '0'이 아니기 때문에 식 (21)에 의해 정의된 조건을 만족할 수 없다. 식 (21)을 만족하기 위해서는 $(\sigma_{yy})_r$, $(\sigma_{xy})_r$ 를 제거하기 위해 제하(unloading)시의 탄성응력과 등가인 반대응력 $-(\sigma_{yy})_r$ 와 $-(\sigma_{xy})_r$ 를 적용한다. 이러한 결과가 잔류응력과 변형률이다. 부하와 제하 사이클의 최종 접촉에서의 잔류변형률은 식 (22)와 같다.

$$(\epsilon_{yy})_r = \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)G} (\sigma_{yy})'_r \tag{22}$$

$$(\gamma_{xy})_r = -\frac{(\sigma_{xy})'_r}{G}$$

여기서 $(\sigma_{yy})'_r$, $(\sigma_{xy})'_r$ 는 준잔류응력(pseudo-residual stress)이며 $(\gamma_{xy})_r$ 은 잔류하는 공학적 전단 변형률이다. 잔류응력 $(\sigma_{xx})_r$ 과 $(\sigma_{zz})_r$ 은 다음과 같다.

$$(\sigma_{xx})_r = (\sigma_{xx})'_r - \frac{\nu}{(1-\nu)} (\sigma_{yy})'_r \tag{23}$$

$$(\sigma_{zz})_r = (\sigma_{zz})'_r - \frac{\nu}{(1-\nu)} (\sigma_{yy})'_r \tag{24}$$

최종 단면에서의 잔류응력을 구하기 위해서는 초기 조건으로 $(\sigma_{xx})_r$, $(\sigma_{zz})_r$ 의 값을 사용하여 새로운 잔류응력의 값을 구하게 된다. 이러한 반복적인 계산방법은 $(\sigma_{xx})_r$, $(\sigma_{zz})_r$ 의 값이 더 이상의 변화가 없을 때까지 (즉 $(\sigma_{yy})'_r$ 의 값이 '0'이 될 때까지) 수행된다. 이러한 경우 한 번의 접촉에서 발생하는 잔류 전단변형률 $(\gamma_{xy})_r$ 은 일정한 값으로 수렴하게 된다. 전 전단 변형률은 반복 접촉하중에 의해 누적된다. 미끄럼 접촉 표면에서의 잔류 응력은 한번 정상상태에 도달하면, 표면 위를 지나는 많은 접촉돌기가 이동하더라도 불변이지만, 잔류 전단 변형률은 표면을 지나는 접촉 돌기의 매회 접촉에 대하여 전단 변형률의 정상 상태 증분에 의해 연속적으로 증가하게 된다[14].

2-3. J_2 와 표면층 경도와의 관계

반복 접촉에 의한 표면층의 응력을 경도로 표현하기 위해서는 미세스 항복이론을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sqrt{J_2} \geq \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_{yp} \tag{25}$$

일반적인 금속의 경우 항복강도와 경도와의 관계는 다음과 같다.

$$\sigma_{yp} = \frac{H}{3} \tag{26}$$

그러므로 식 (26)을 식 (25)에 대입하면

$$\sqrt{J_2} \geq \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{H}{3} \right) \tag{27}$$

즉 $H \leq 3\sqrt{3}J_2$ 로 경화된 경도 값을 표시할 수 있다. 그러나 모재 경도(H)와의 비교를 위해 경화된 경도(H*)를 나타내면 식 (28)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{H^*}{H} = \sqrt{\frac{J_2^*}{J_2}} \tag{28}$$

3. 결과 및 고찰

3-1. 표면층의 응력 해석

Fig. 2는 접촉하중 $P_0=3k$, 마찰계수 $\mu=0.3$, 1회 접촉 일때 미끄럼 이동거리인 x/a 에 대한 무차원수 $\sqrt{J_2}/k$ 값의 변화를 나타내었다. 무차원수 $\sqrt{J_2}/k$ 값은 미세스에 의한 제2차 편차 응력 불변량을 재료의 전단 항복강도로 나눈 값으로서 탄성 및 소성영역을 판정하기 위해 도입하였다. 그러므로 $\sqrt{J_2}/k$ 의 값이 "1" 이하이

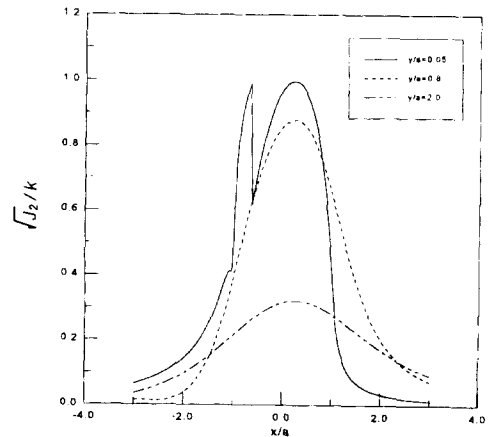


Fig. 2. Variation of $\sqrt{J_2}/k$ with sliding location, x/a for various depth at $P_0=3 k$, $\mu=0.3$ and 1 cycle.

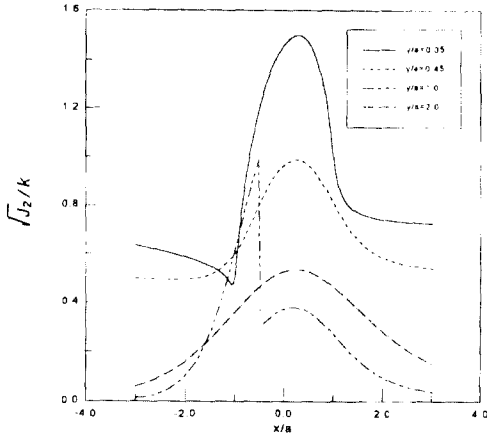


Fig. 3. Variation of $\sqrt{J_z}/k$ with sliding location, x/a for various depth, y/a at $P_0=5$ k, $\mu=0.3$ and 10 cycles.

면 탄성역내에 있으므로 항복이 발생되지 않았음을 의미한다. $y/a=0.05$ 의 위치에서의 응력 계산에서는 "1"의 값을 지나 소성상태에서 경화가 시작된 상태에서 1회 접촉에서 표면은 모재의 경도와 동일한 정도에 도달하였음을 나타낸다. $y/a=0.8$ 이상의 깊이에서는 탄성영역임을 나타내고 있다. 이러한 접촉조건에 의한 소성층은 $y/a=0.8$ 이하의 깊이임을 알 수 있다. 그러므로 접촉하중과 마찰계수가 작은 경우 탄성상태임을 나타내고 있다.

Fig. 3은 접촉하중 $P_0=5$ k, 마찰계수 0.3, 미끄럼 접촉 10회로 경화가 진행된 상태일 때 미끄럼이동거리인 x/a 에 대한 $\sqrt{J_z}/k$ 값의 변화를 나타내었다. 표면인 $y/a=0.05$ 위치에서는 이미 잔류응력의 누적에 의한 경화가 진행되었음을 나타내고, $y/a=0.45$ 의 위치에서는 경화 직전의 상태를, $y/a=1.0$ 의 위치에서는 소성영역내에 있으나 경화는 진행되지 않고 있다. 또한 $y/a=2.0$ 의 위치는 탄성역내에 있어 표면위 미끄럼 접촉하중에 의한 영향을 받지 않음을 나타낸다. 그러므로 접촉하중 $P_0=5$ k, 마찰계수 0.3의 조건에서 반복미끄럼 접촉 회수가 10회인 경우 예측되는 경화층의 두께는 접촉돌기 반경의 0.45배임을 알 수 있다. 또한 $y/a=0.05$ 의 깊이에서는 $x/a=0.265$ 에서 $\sqrt{J_z}/k=1.50$ 의 값을 가지므로 경화에 의한 경도는 모재의 경도보다 1.5배로 증가한다.

3-2. 접촉하중의 변화에 대한 영향

Fig. 4는 표면에서의 깊이 $y/a=0.05$ 일 때 일정 마찰계수 0.3, 미끄럼 접촉 10회의 경우 미끄럼 접촉하중

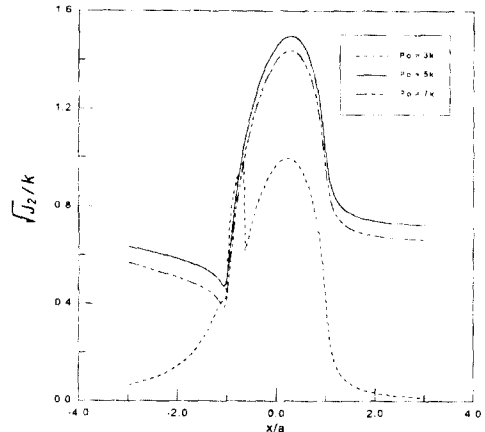


Fig. 4. Variation of $\sqrt{J_z}/k$ with sliding location, x/a , for various contact normal load, P_0 , at $y/a=0.05$, $\mu=0.3$ and 10 cycles.

의 변화에 따른 $\sqrt{J_z}/k$ 값을 미끄럼이동거리인 x/a 에 대하여 나타내었다. $P_0=3$ k의 경우 잔류응력에 의한 경화는 발생하지 않고 있으나, $P_0=5$ k의 경우 경화에 의해 표면층의 경도가 증가되었다. 그러나 접촉이 $P_0=7$ k인 경우 $P_0=5$ k 보다 감소하였다. 이는 접촉하중이 증가하면 표면은 보다 큰 응력하에 있게 되어 큰 소성변형이 발생함을 의미한다. 이는 Arnell[12]이 밝힌 바와 같이 완전 탄성 영역은 $P_0=3$ k이하이며, 탄소성 영역은 $P_0=3$ k~6 k, 그 이상이면 완전 소성영역으로 해석하는 것과 일치한다. 그러므로 반복 미끄럼 접촉에 있어 잔류응력에 의한 경화 해석의 적용 범위는 재료의 탄-소성 범위내의 접촉하중에서 해석되어야 할 것으로 판단된다. 이는 재료의 탄-소성 범위내의 접촉하중이면 잔류응력에 의해 경화층이 생성되므로 이러한 마멸상태에서 발생된 마멸입자는 모재보다 경도가 크기 때문에 볼과 디스크 사이에 3-body 접촉에 연삭마멸기구가 예측된다.

3-3. 마찰계수의 변화에 따른 영향

Fig. 5는 표면에서의 깊이 $y/a=0.05$ 일 때 일정 접촉하중 $P_0=5$ k, 반복미끄럼 접촉이 10회인 경우 마찰계수의 변화에 따른 $\sqrt{J_z}/k$ 값을 미끄럼 이동거리인 x/a 에 대하여 나타내었다. 마찰계수의 변화는 미끄럼 접촉에 있어 무윤활상태를 고려하여 0.3, 0.5, 0.7에 대하여 계산하였다. 마찰계수가 증가할 수록 $\sqrt{J_z}/k$ 의 값이 증가함을 나타내고 있다. 이는 마찰계수가 커질수록

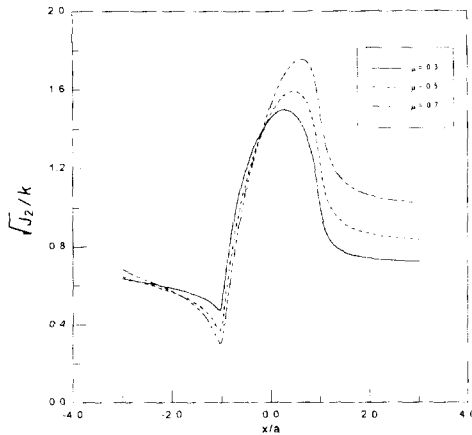


Fig. 5. Variation of $\sqrt{J_2}/k$ with sliding location, x/a for various friction coefficient, μ at $P_0=5$ k, $y/a=0.05$ and 10 cycles.

록 표면층의 잔류응력에 의한 경도가 커짐을 나타낸다. 또한 마찰계수가 커질수록 $\sqrt{J_2}/k$ 의 최대값은 접촉부의 선단부(leading edge)로 이동함을 보여준다. 마찰계수 0.7의 경우에 있어 최대 위치인 $x/a=0.6$ 에서 $\sqrt{J_2}/k$ 의 값이 1.8로서 모재에 비해 경도는 1.8배 증가하였음을 나타낸다.

그러나 Fig. 6은 Fig. 5와 동일한 조건에서 마찰계수 0.7, 0.8, 1.0에 대하여 계산한 결과를 나타내었다. 마찰계수가 0.7에서 최대값을 나타내며, 마찰계수가 0.8인 경우 오히려 감소하였다가 마찰계수가 커질수록

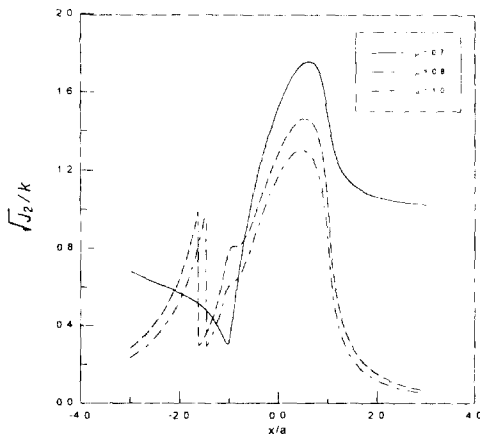


Fig. 6. Variation of $\sqrt{J_2}/k$ with sliding location, x/a for various friction coefficient, μ at $P_0=5$ k, $y/a=0.05$ and 10 cycles.

점점 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 해석결과는 잔류응력에 의한 표면층의 경화가 최대가 되는 마찰계수가 존재함을 의미한다. 접촉회수 10회에서는 마찰계수 0.8~1.0의 범위에서는 소성역내에서 경화가 진행중임을 의미하며 완전한 경화가 되기 위해서는 보다 많은 접촉회수를 필요로 한다. 그러므로 마찰계수 0.8~1.0의 범위에서의 미끄럼접촉에서 나타나는 마멸기구와 마멸량 등은 마찰계수 0.3~0.7 범위내의 마멸기구, 마멸량 등과 다르게 나타날 수 있음을 예측할 수 있다.

3-4. 반복 미끄럼 접촉회수의 변화에 따른 영향

Fig. 7은 접촉하중 $P_0=5$ k, 마찰계수 0.5의 경우 깊이 $y/a=0.05$ 에서 반복 접촉회수의 변화에 따른 $\sqrt{J_2}/k$ 을 나타낸 그림이다. 접촉회수가 증가할수록 $\sqrt{J_2}/k$ 값은 점점 증가하여 경화의 크기는 급격히 일정값으로 수렴되어 진다. 1회 접촉에 있어 $\sqrt{J_2}/k$ 의 값이 소성역내에 존재하면 발생하는 잔류응력에 의해 접촉회수의 증가에 따라 경화됨을 보여준다. Fig. 8은 접촉하중 $P_0=5$ k, 마찰계수 0.5의 경우 깊이 $y/a=0.2$ 에서 반복 접촉회수의 변화에 따른 $\sqrt{J_2}/k$ 를 나타낸 그림이다. 접촉회수가 증가할수록 경화가 빠르게 이루어지고 있다. 접촉회수의 변화에 따른 표면층의 경화에 의한 경도 변화는 깊이 $y/a=0.05$ 에서 1회 접촉에서 모재의 경도에 비해 1.1배, 3회 접촉에서 1.4배,

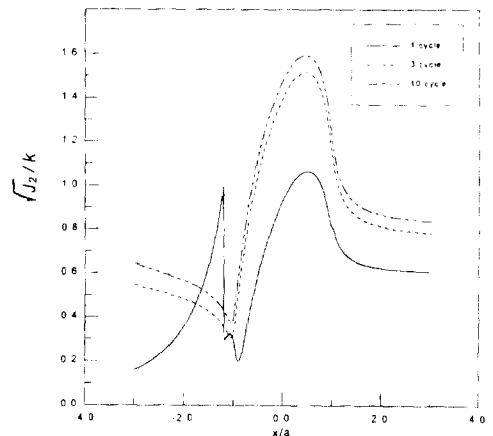


Fig. 7. Variation of $\sqrt{J_2}/k$ with sliding location, x/a for various sliding contact number at $P_0=5$ k, $\mu=0.5$ and $y/a=0.05$.

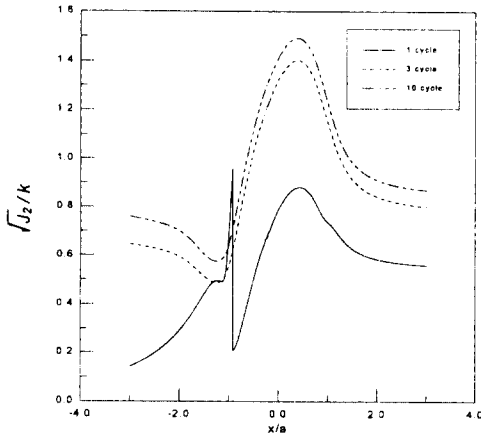


Fig. 8. Variation of $\sqrt{J_2}/k$ with sliding location, x/a for various sliding contact number at $P_0=5$ k, $\mu=0.5$ and $y/a=0.2$.

10회에서 1.5 배로 증가하였다. $y/a=0.2$ 인 위치에서는 1회 접촉에서 0.9배, 3회 접촉에서 1.4배, 10회 접촉에서 1.5배로 증가하였다. 그러므로 소성역내에서의 경화는 깊이 방향으로 접촉회수의 증가에 따라 빠르게 경화되고 있음을 알 수 있었으며 경화층의 깊이는 $y/a=0.2\sim 0.5$ 의 깊이까지로 해석되었다. 이는 접촉반경이 40 μm 인 경우 경화층의 깊이는 20 μm 이 됨을 의미한다. 마멸면에서 탈락되는 마멸입자의 크기는 약 30 $\mu\text{m}\sim 50$ μm 으로 알려져 있으며, 표면층의 균열 전파에 의한 마멸의 생성을 고려한다면 이러한 경화층과 소성층의 경계에서 균열의 생성, 전파를 예측할 수 있다.

3-5. 표면층의 경도변화

Fig. 9는 표면층의 무차원 경도 H^*/H 를 미끄럼 접촉회수 10회, 마찰계수 $\mu=0.3$ 에서 접촉하중의 변화에 따라 깊이 방향으로 나타내었다. 접촉하중 3k에서는 경화에 의해 모재의 경도와 동일하였으며, 접촉하중 5k, 7k에서는 $y/a=0.05$ 에서 표면의 경도는 모재의 경도에 비해 1.5배 임을 알 수 있었다. 경화층 깊이는 $y/a=0.4$ 이내임을 알 수 있었다. 또한 접촉하중의 증가에 따라 소성층의 깊이도 증가하고 있다.

Fig. 10은 표면층의 무차원 경도 H^*/H 를 미끄럼 접촉회수 10회, 접촉하중 5k에서 마찰계수의 변화에 따라 깊이 방향으로 나타내었다. 일정 접촉하중에서 마찰계수가 증가할수록 표면에서의 경도는 증가하였으

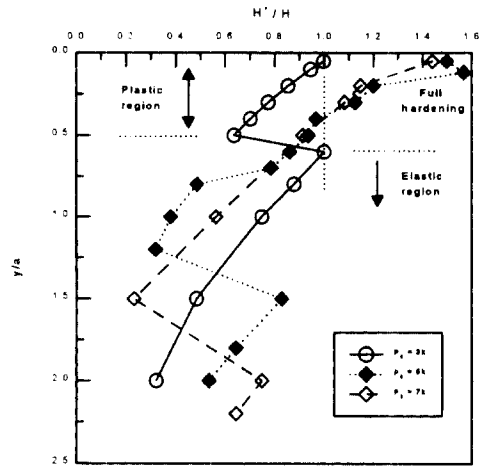


Fig. 9. Variation of H^*/H with depth, y/a for various contact normal load, P_0 at $\mu=0.3$ and 10 cycles.

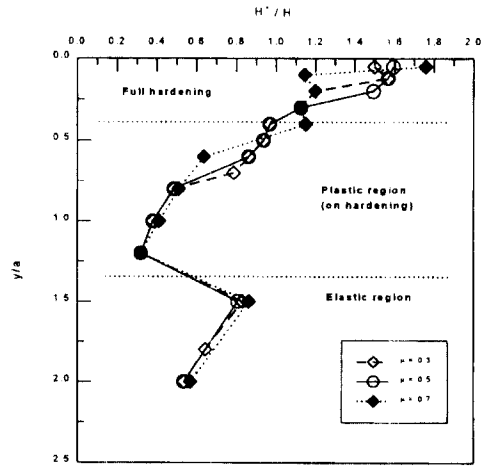


Fig. 10. Variation of H^*/H with depth, y/a for various friction coefficient, μ at $P_0=5$ k and 10 cycles.

며 마찰계수 0.7의 경우 $y/a=0.05$ 에서 표면의 경도는 모재의 경도에 비해 1.8배 임을 알 수 있다. 이러한 결과는 Kral 등[6]의 FEM에 의한 해석결과인 2~4배보다 작은 값을 나타내고 있다. 일정 접촉하중 조건에서 경화층과 소성층의 깊이는 마찰계수의 변화와 관계없이 일정깊이를 가짐을 알 수 있었다.

4. 결 론

반복미끄럼 접촉이 있는 표면층의 잔류응력에 의한 경화를 반무한 평면 위의 Hertz 접촉을 모델로 하여

해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 표면층의 경화는 미끄럼 접촉회수 10회 이내에서 완전 경화에 도달하였으며, 표면층은 일정 깊이의 완전 경화층, 경화가 진행중인 소성층, 완전 탄성층으로 구분되었으며 그 깊이를 예측할 수 있었다.

2. 일정 마찰계수, 10회 접촉의 조건에서는 접촉하중의 증가에 따라 표면의 경도와 경화층 및 소성층의 깊이는 증가하였으며, 일정 접촉하중의 조건에서는 마찰계수의 증가에 따라 경도는 증가하나 경화층 및 소성층의 깊이는 마찰계수의 변화와 무관하게 일정깊이를 가짐을 알 수 있었다.

3. 표면층의 경화에 의한 경도는 $y/a=0.05$ 의 깊이에서 접촉하중 5~7 k에서 모재의 경도보다 1.5~1.8배 증가한 것으로 해석되므로, 마멸기구와 마멸량의 변화에 영향을 미칠 수 있을 것으로 예측되었다.

기호설명

a	: 접촉 반경
P	: y 방향의 접촉 하중
e	: 변형률
P_0	: 최대 접촉압력
e_y	: 편차변형률
Q	: x 방향의 전 마찰력
k	: 전단 항복강도
R	: 접촉부의 곡률반경
s''	: 편차응력 텐서
V	: 미끄럼 속도
u	: x 방향의 속도 성분
\dot{W}	: 전 변형률 에너지
v	: y 방향의 속도 성분
\dot{W}^p	: 소성 변형률 에너지
w	: z 방향의 속도 성분
ϵ_{ij}	: 변형률 텐서
E	: 영률
ν	: 프와송비
H	: 모재의 경도
μ	: 마찰계수
H^*	: 경화층 경도
σ_n	: 정수압응력, 평균 수직응력
H^*/H	: 무차원 경도
σ_{sp}	: 인장항복강도
f^2	: 제2차 편차응력 불변량
Δ	: 체적변형률(dilation)

참 고 문 헌

1. J. O. Smith and C. K. Liu, "Stresses due to tangential and Normal Loads on elastic solid with application to some contact problems," J. Appl. Mech., Trans., ASME, 20, pp. 157-166, 1953.
2. M. Hamilton, "Explicit equations for the stresses beneath a sliding spherical contact," Proc. Instn. Mech. Engrs. vol 197c, pp. 53-59, 1983.
3. N. P. Suh, "An Overview of the Delamination Theory of Wear," Wear, 44, pp. 1-16, 1977.
4. H. C. Meng and K. C. Ludema, "Wear models and predictive equations: their form and content," Wear, 181-183, pp. 44-457, 1995.
5. S. Jahanmir and N. P. Suh, "Mechanics of Subsurface void nucleation in delamination wear," Wear, vol. 44, pp 17-38, 1977.
6. E. R. Kral, K. Komvopoulos and D. B. Bogy, "Finite Element Analysis of Repeated Indentation of an Elastic-Plastic Layered Medium by a Rigid Sphere, Part I: Surface Results," Transactions of the ASME, Vol. 22, pp. 20-42, 1995.
7. A. T. Alpas, H. Hu and J. Zhang, "Plastic deformation and damage accumulation below the worn surfaces," Wear, 162-164, pp. 188-195, 1993.
8. D. A. Hughes, D. B. Dawson, J. S. Korellis and L. I. Weingarten, "A micro-structurally based method for stress estimates," Wear, 181-183, pp. 458-468, 1995.
9. Z. Chen, P. Liu, J. D. Verhoeven and E. D. Gibon, "Sliding wear behavior and microstructure change of deformation processed Cu-20vol.%Nb in situ composite," Wear, 181-183, pp. 263-270, 1995.
10. 강계명, 김진진, "회전접촉에 의해 발생하는 Sub-surface Zone의 잔류응력에 관한 해석," 한국재료학회지, 제3권 제1호, pp. 58-64, 1993.
11. J. F. Achard, "Contact and rubbing of flat surfaces," J. App., Physics, 24, pp. 981, 1953.
12. J. E. Merwin and K. L. Johnson, "An analysis of plastic deformation in Rolling contact," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, vol. 177, pp. 676-690, 1963.
13. B. Carnahan, H. A. Luther and J. O. Wilkes, Applied numerical method, Chap. 6, pp. 361-365, John Wiley & Sons, New York, 1976.
14. N. P. Suh, Tribophysics, Chap. 4, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1986.