

철강재료의 구름마찰시에 발생하는 마모형태에 관한 연구

이 한 영

계명대학교 공과대학 재료공학과

Discussion on Wear Type of Steel in Rolling Friction

Han-Young Lee

Department of Materials Engineering, Keimyung University

Abstracts – It has been cleared in previous author's paper that the fatigue life before the pitting on the rolling contact surface with lubricant are influenced by the wear amount. In this study, the wear type has been clarified when wear amount is extremely large such as the case without lubricant. The test of rolling contact fatigue has been conducted under two different of herzian pressures and three different of slide ratios without lubricant. In addition, residual stress and half-value breadth using X-ray diffraction on worn surface have been measured as well as the wear amount. The results show that the pitting type wear by rolling contact fatigue has not been occurred when the wear amount is considerably large. Thus this type of wear has been deduced by the fatigue wear depending on delamination theory.

Key words – X-ray diffraction, wear type, pitting, rolling contact fatigue, delamination.

1. 서 론

미끄럼 접촉시의 마모는 초기마모 영역 및 정상마모 영역에서 정도는 상이하나 대부분 거리증대에 따라 마모량이 증대하는 것이 일반적인 형태이다. 그러나 구름접촉에 의해 발생하는 마모는 미끄럼 접촉에 의한 것에 비하면 무시할 수 있을 정도로 적으나 일반적으로 일정 구름접촉시간 뒤에 마모량이 급증하는 마모형태를 보인다.

구름접촉시의 이러한 급증하는 마모형태는 표면에 피팅(pitting)이라 하는 손상이 발생하여 박리되므로써 발생하는 것[1]으로 베어링을 비롯하여 철도차륜과 레일, 치차, 압연roll 등에서 문제시 되고 있는 일반적인 현상이다. 이 현상은 Hertz[2]나 Way[3]에 의해 밝혀진 바와같이 표면하부에 반복적인 최대전단응력이 작용함으로써 발생하는 일종의 피로현상(소위 구름접촉피로)으로 알려져 일반적인 마모형태중 하나인 피로마모와는 구별하고 있다[1].

미끄럼마찰과 구름마찰의 근본적인 차이는 사실 두 접촉물체간의 선속도차 즉 미끄럼속의 대소라

할 수 있다. 실제 미끄럼접촉요소와 미끄럼속의 크기는 100%로 간주되나 구름접촉요소의 경우는 대부분 수% 내외이므로 최대 10% 정도까지로 생각할 수 있다. 저자는 그간 구름접촉시의 pitting 발생(구름접촉 피로수명)에 미치는 미끄럼속의 영향을 확인[4-8]하여 접촉면에 미끄럼속이 커질수록 pitting 발생의 시기가 빨라지나 극단적으로 커져 마모량이 많아지면 이러한 일반적인 경향에서 벗어 난다는 사실[8]을 이미 확인한 바 있다. 이것은 결국 구름접촉시 표면의 마모량이 많아지면 마모형태가 천이된다는 사실을 시사하는 현상이라 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 마모량이 극단적으로 많을 것으로 예상되는 무윤활상태에서 구름접촉마모시험을 행한 뒤 그간의 윤활상태의 결과[4-8]와 비교분석함으로써 구름접촉시에 발생하는 마모형태에 대해 고찰하였다.

2. 실험방법

시험은 앞의 보고[8]와 마찬가지로 시판되는 일반

기계구조용 탄소강 SM45C(C 0.46%)을 870°C에서 1시간 가열후 노르말라이징처리를 행한 뒤, 시편을 선삭으로 제작하였다. 이때 시편의 구름접촉면의 표면조도는 약 $4.5 \mu\text{m}$ (Rmax)를 나타내었다. 그 뒤에 진공(10^{-4} torr)속에서 어닐링처리($660^\circ\text{C} \times 30\text{분}$)을 하여 가공에 의한 잔류응력을 제거하였다.

상대재로는 일반적으로 베어링강으로 알려진 STB2를 기계가공후 켄칭 및 템퍼링처리(Rmax= $1.45 \mu\text{m}$)를 하였다.

시험전 시편의 경도는 Hv 200 정도이고 상대재는 Hv 790 정도인 것으로 밝혀 졌다.

본 연구의 구름마찰마모시험은 앞의 보고[8]와 동일한 Armsler형 구름마찰마모시험기[9]에서 행하였

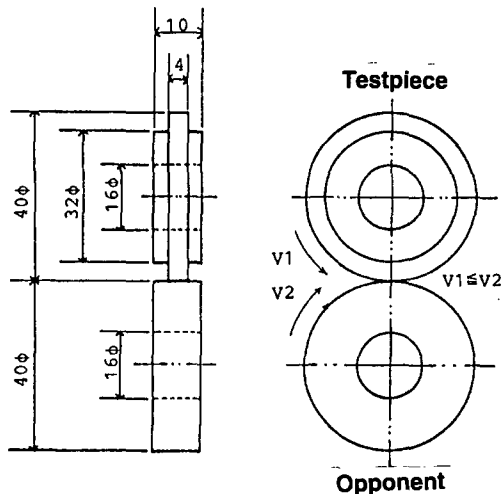


Fig. 1. Configuration of testpiece and opponent.

Table 1. Conditions of X-ray diffraction

Tube of X-ray	CrK α
Diffraction plane	$\alpha\text{Fe}(211)$
Current and voltage in tube	20 mA, 40 kV
Irradiation area	$2 \times 2 \text{ mm}^2$
Time constant	4 sec
Scan speed	$2^\circ 2\theta/\text{min}$
Angle of ϕ^* and ψ^{**}	$\phi=0^\circ, 180^\circ$ $\psi=0^\circ, 12^\circ, 27^\circ, 42^\circ, 57^\circ$

* angle between the incident angle of X-ray and the rolling direction.

** angle between the specimen normal and the normal of the diffracting plane.

며 시험편의 형상 및 접촉상태는 Fig. 1에 나타내었다. 그리고 마모량산출은 소정의 회전수마다 시편을 초음파 세척한 후 중량감소로 측정하였다.

시험하중은 Hertz의 최대접촉압력(이하 접촉압력)이 900 MPa 및 1200 MPa로 되는 조건을 택했고, 각 하중조건에 있어서의 미끄럼율의 변화는 상대재의 회전속도를 220 rpm으로 고정하고 시험편의 회전속도를 220 rpm, 200 rpm, 177 rpm으로 변화시킴으로써 각각 0%, 10%, 24%의 3종류로 하였다. 따라서 이 시험조건에서는 시험편의 구름접촉면에 작용하는 접선력의 방향과 구름방향이 일치하고 있다는 것을 알 수 있다. 이때 무윤활상태의 시험에 따른 마찰열의 발생을 고려하여 접촉부를 fan에 의해 강제공냉을 시키고 5×10^3 회전수마다 시험을 중단하였으나 실제 온도상승은 무시할 수 있을 정도로 미미한 것으로 확인되었다.

구름마찰면의 정상해석을 위한 X선회절시험은 소정의 회전수마다 행하였으며 이때의 X선회절시험 조건을 Table 1에 나타내었다. 구름마찰면의 미세조직의 평가는 구름마찰면에 평행한 $\alpha\text{-Fe}(211)$ 를 측정 한 $\psi=0^\circ$ 때의 회절선의 반가폭으로 하였으며 잔류응력산출은 $\sin^2\psi$ 법[10]을 사용, 계산하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1 구름마찰에 의한 표면손상 및 마모량

윤활상태하에서 행한 지난 보고[8]에서는 표면상태가 매우 양호하였을 뿐만 아니라 전부 전형적인 pitting 현상이 관찰되었다.

그러나 본 무윤활상태의 시험에서는 상대재에 시편의 이착물이 관찰되어 응착현상이 발생하고 시편에 마모 및 거시적인 소성유동 등으로 인한 표면손상이 심한 것으로 확인되었다. 그 중 접촉압력 1200 MPa, 미끄럼율 10%, 24%의 경우는 5×10^3 회전 부근에서 900 MPa, 미끄럼율 24%의 경우는 1.5×10^4 회전 부근, 10%의 경우는 5×10^4 회전 부근에서 표면에 커다란 변형이 생겨 이들은 이 시점에서 시험을 중단하였다. 이들의 변형양상은 roll이 점토관상을 굴러 갔을 때 점토의 변형형태[11]와 유사하여 구름면간의 응착과 높은 접촉압력 및 접선력에 의해 저항도 재료의 표면이 심하게 소성유동되었기 때문으로 추측되어 진다. 결국 윤활상태에서는 유막에 의해 급속간접촉이 적어 접촉면적내에 균일한 수직하중 및

전단력만이 작용하나 무윤활시는 금속간접촉이 다수 존재하므로 구름방향뿐만 아니라 시험편의 직각방향으로의 분력도 작용하게 되어 결국 3축응력상태를 형성하므로써 소성변형량이 많아진 것으로 추측되어진다. 따라서 변형이 현저했던 이들 시험편은 마모에 의한 미세조직 변화와 소성변형에 의한 조직변화가 공존할 것이 예상되어 X선회절시험에서 제외하였다.

이외의 조건에서의 시험편은 거시적인 소성변형이 거의 없었고 표면상태도 양호하였으나 더 이상 시험을 수행하여도 pitting 발생을 기대할 수 없다고 판단되는 시점에서 시험을 중단하였다.

Fig. 2는 무윤활상태하 미끄럼율 0% 시험시의 회전수에 따른 마모량의 변화를 나타낸 것이다.

윤활상태하에서의 마모발생은 마모량이 많아 수명이 길어졌던 1200 MPa, 24%의 경우를 제외하면 시험초기에 접촉압력 및 미끄럼율이 클수록 증대하였으나 정상마모영역에서는 이들에 관계없이 거의 일어나지 않는 것으로 밝혀졌다[8].

이에 반해 본 연구에서는 거시적인 미끄럼이 거의

없는 미끄럼율 0%에서도 접촉압력 900 MPa의 경우는 회전수에 거의 비례, 1200 MPa에서는 회전수의 제곱승에 비례하여 마모량이 증가할 정도로 마모율이 크다는 것을 알 수 있다.

이와 같은 마모경향에 대해 구름접촉면이 균일하게 마모하였다고 가정하고 강의 밀도를 고려해서 시험을 중단한 시점의 전 마모량에서 반경감소깊이를 계산하면 각각 70 μm , 120 μm 정도로 산출된다. 같은 방법으로 윤활상태하의 결과[8]에서 반경감소량을 계산하면 접촉압력 1200 MPa, 미끄럼율 24%의 경우는 약 12 μm 이고 그 외는 1 μm 이하로 산출되었다. 일반적으로 구름접촉에 의한 pitting 발생에 대해 표면기점설과 내부기점설등이 알려져 있으나[12] 저경도재일 경우는 일반적으로 전자로 알려져 있다. 그러나 어느 쪽이든 본 연구에 사용된 시험편의 표면조도가 4.5 μm 정도이고 최대전단응력이 작용하는 깊이가 900 MPa 시약 120 μm , 1200 MPa 시약 165 μm 인 점을 고려한다면 윤활상태의 1200 MPa, 24%의 경우 수명이 연장되고 무윤활상태에서 pitting을 관찰이 불가능하였다는 것은 구름접촉면이 순차 탈락하므로써 손상축적이 늦어져 일어난 현상임을 추측할 수 있다.

Fig. 3은 시험후의 구름접촉면하부의 소성유동을 나타내고 있다.

윤활상태하에서는 수명의 역전이 일어난 24%의 경우는 다소 표면부근에서도 소성유동이 관찰되었으나 대부분 hertz의 최대전단응력이 작용하는 표면하부에서 심한 소성유동이 관찰되었다[8]. 이에 반해

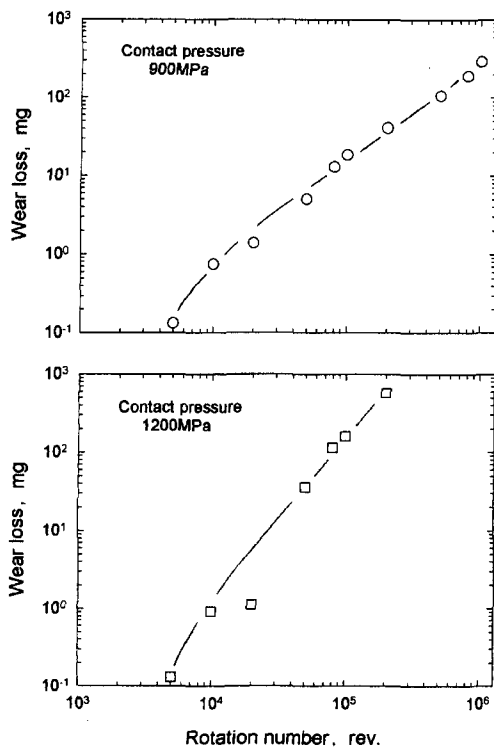


Fig. 2. Variation of wear loss with rotation number at slide ratio 0%.

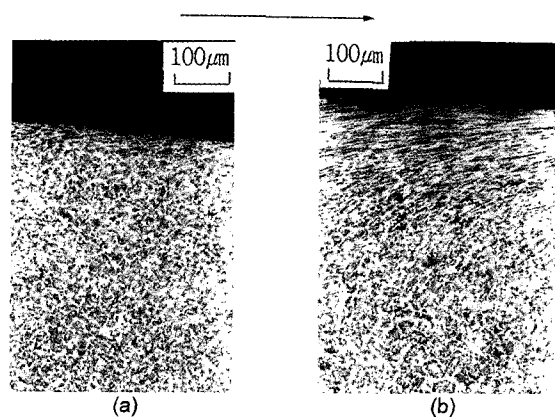


Fig. 3. Optical micrograph of parallel section with rolling direction after test (900 MPa). (a) after 2×10^6 rev. at slide ratio 0% and (b) after 5×10^3 rev. at slide ratio 24%.

본 실험결과에서는 최표면부위의 소성유동이 심하다는 것을 알 수 있다. 이때의 경도분포를 Fig. 4에 도시하였으나 어느 것도 최표면에서 경도의 최대치를 나타내어 최대전단응력이 작용하는 부위는 최표면인 것이 분명하다. 이러한 소성유동양상 및 경도분포형태는 일반적인 미끄럼접촉시의 경우와 유사하다는 것을 알 수 있다.

일반적으로 윤활상태하의 구름접촉에 의한 마모는 초기의 구름접촉에 의해 표면의 요철간에 금속간접촉 및 소성변형이 발생하므로 소량의 응착현상이 일어나 마모량이 증대한 뒤 running-in 상태(shake down-limit)가 되면서 마모량이 적어지고 순수한 dislocation의 반응에 의해 손상축적 → 미세균열발생 → 전파 → 박

리현상으로 이어지는 과정을 따른다[7]. 그리고 전보 [8]에서와 같이 수명의 역전이 일어난 미끄럼을 24%의 경우처럼 다소 마모량이 크더라도 표면하부에 최대전단응력이 작용하면 정규 구름접촉피로과정에 의한 pitting이 발생하였다.

결국 본 연구에서 pitting이 관찰되지 않는 것은 최대전단응력이 표면에 작용하여 손상축적이 일어나는 표면층이 순차 탈락하므로써 손상축적이 늦어지기 때문으로 추측된다.

3-2. X선회절에 의한 구름마찰면의 평가

윤활상태하 구름접촉시험에서 회전수에 따라 X선 회절에 의해 측정된 표면의 잔류응력 및 반가폭의 변화는 구름접촉피로 손상축적이 진행되면서 극대극소현상을 보이며 pitting 발생전에 일정한 값을 나타낸다는 것[4-7]이 확인되었다.

그러나 윤활상태하 마모량이 많아 미끄럼율과 수명에 대한 일반적인 경향에서 벗어났던 1200 MPa, 24%의 경우는 이러한 경향에서 벗어나 응력상태 및

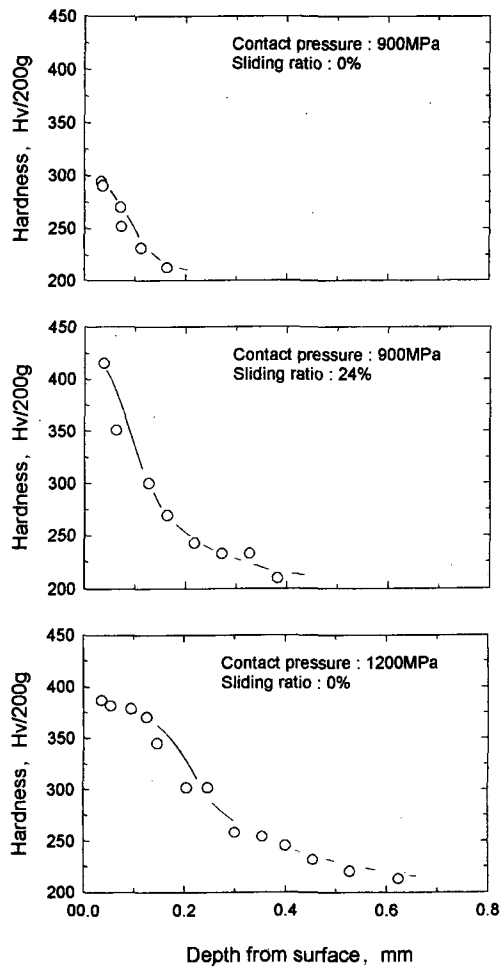


Fig. 4. Distribution of hardness on depth from surface.

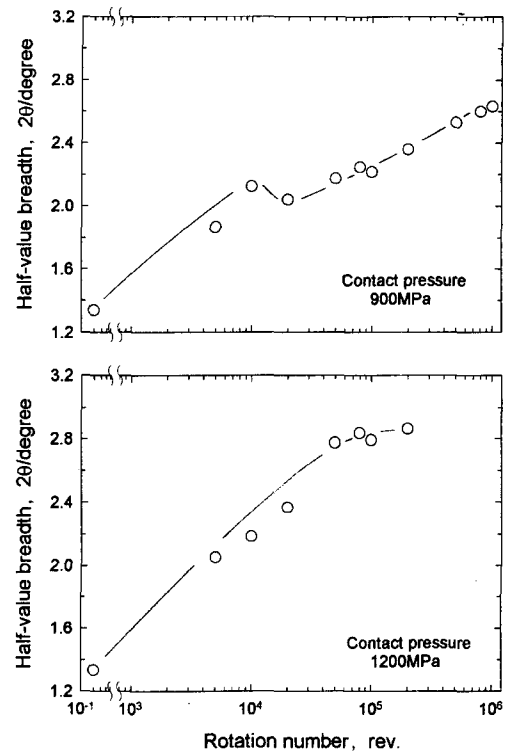


Fig. 5. Variation of half-value breadth with rotation number (Slide ratio 0%).

미세조직이 정상적인 구름접촉에 의한 손상축적과정과는 다소 상이한 것으로 밝혀졌다[8].

Fig. 5는 미끄럼율 0%, 무윤활상태에서 시험한 시편에 대해 회전수에 의한 X선회절선의 반가폭의 변화를 나타낸 것이다.

접촉압력 900 MPa의 경우는 약 10^4 회전 부근에서 극대극소현상을 나타내고 있으나 현저하지 않고 2×10^4 이후에도 계속 증가하여 절대값이 윤활상태[8] 보다 상당히 크다는 것을 알 수 있다. 접촉압력 1200 MPa의 경우는 극대극소현상을 관찰할 수 없고 회전수에 따라 계속 증가하다가 5×10^4 이후에 일정한 값을 나타내고 있다.

일반적으로 재료에 외력이 가해지면 그 재료 및 외력에 상응되는 Cell 하부조직이 형성되고 일정한 크기를 갖는 것[13]으로 알려져 있다. 이러한 측면에서 마모발생이 큰 것은 수반되는 전단력이 크므로 조기에 일정 크기의 cell조직을 형성하고 일정해 지나 마모발생이 다소 적은 900 MPa의 경우는 늦어 진다는 것을 알 수 있다. 그러나 900 Mpa의 경우도 이미 1200 Mpa의 일정치와 유사한 값에 도달한 것으로 미루어 계속 시험하여도 변화폭은 크지 않을 것이 예상된다.

Fig. 6은 무윤활상태에서 회전수에 따른 표면의 잔류응력변화를 나타낸 것이다. 윤활상태시험의 결과[8]와 마찬가지로 시험후 압축의 잔류응력을 나타내고 있으나 절대값은 상당히 크고 상이한 변화형태를 보이고 있음을 알 수 있다.

접촉압력 900 MPa의 경우는 반가폭과 마찬가지로 약 10^4 회전 부근에서 극대극소현상을 나타내고 5×10^5 회전이후에 -350 MPa 이상의 값으로 일정해 지고 있다. 그러나 1200 MPa의 경우는 5×10^4 회전 부근에서 극대를 나타낸 후 감소하고 있으나 이 회전수 이후에 반가폭(Fig. 5)이 거의 변화하지 않고 있는 것으로 미루어 이것은 잔류응력 해방과 관련된 재료내의 변화발생을 시사하는 현상으로 판단된다.

Fig. 7은 무윤활상태하에서 접촉압력 1200 MPa, 미끄럼율 0%의 시편과 900 MPa, 10%에서 시험한 시편의 단면을 부식하지 않고 관찰한 것이다. 각 단면에서는 구름접촉면하부에 crack이 다수 발생하고 있음을 알 수 있다. 그러나 이러한 형태는 거의 접촉면과 연결되지 않아 일반적인 구름접촉피로에 의한 pitting과는 형태가 상이함을 알 수 있다. 또한 재료의 경도로 미루어 표면하부의 crack발생은 생각할 수

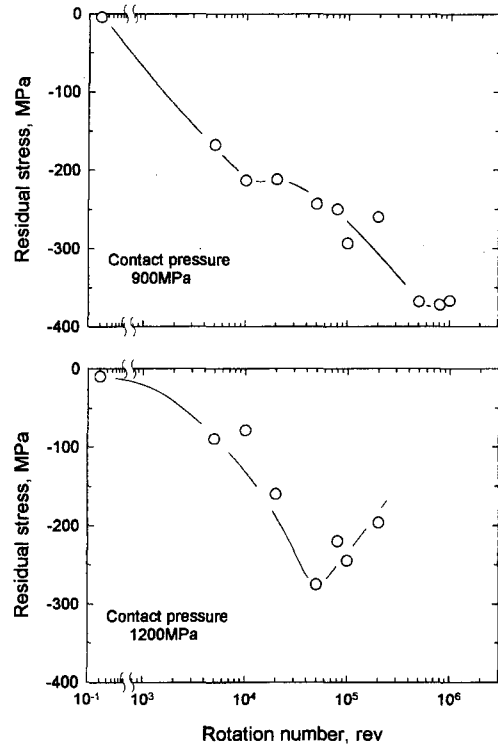


Fig. 6. Variation of residual stress with rotation number (Slide ratio 0%).

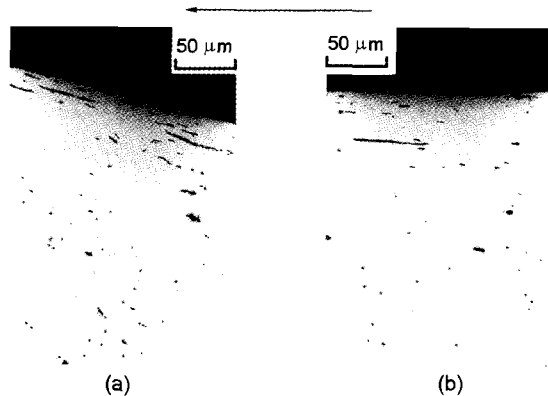


Fig. 7. Optical micrograph of parallel section with rolling direction after test (unetched). (a) after 2×10^6 rev. at slide ratio 0%, 1,200 MPa (b) after 5×10^4 rev. at slide ratio 10%, 900 MPa.

없으므로 이들 crack은 결국 표면의 마모과정상에서 생성된 것으로 추정된다.

이러한 형태의 crack 발생원인은 명확하지 않으나 crack형상으로 미루어 일반적으로 미끄럼접촉시 피로

마모기구로 알려진 delamination 이론[14,15]과 관계가 있을 것으로 추정된다.

일반적으로 구름접촉에 의해 발생하는 마모는 미끄럼 접촉에 의한 것에 비해 현저히 적다. 그런데 delamination이론이 미끄럼 접촉시 비교적 마모량이 적을 때 적용된다는 사실을 감안하면 구름접촉시 마모량이 증대할 경우는 delamination 이론에 따른 crack발생이 가능할 것으로 사료된다.

즉 표면부근의 돌기부는 수직하중과 마찰력에 의해 심한 소성유동(Fig. 3)과 이로 인해 현저한 가공경화(Fig. 4)를 보이고 있다는 사실로 미루어 표면부근은 정수압상태가 형성되고 이로인해 제2상이나 입계의 삼중점 또는 불순물주위를 기점으로 표면과 평행한 crack이 형성된 것으로 추정된다. 결국 이들 crack이 전파되어 표면까지 달한 뒤 순차 탈락하면서 마모가 진행되므로 pitting 발생을 억제하는 것으로 생각된다.

따라서 구름접촉시 마모율이 적으면 정규의 구름접촉피로에 의해 pitting이 발생하는 마모형태이나 마모율이 커지면 delamination이론에 따른 피로마모로 마모형태가 천이되는 것으로 생각된다.

4. 결 론

강의 구름마찰에 의한 마모형태를 해석하기 위하여 접촉압력 및 미끄럼율을 변화시키면서 무윤활상태에서 시험한 뒤 윤활상태에서의 결과[8]를 비교 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 구름접촉시 마모율이 크면 미끄럼 접촉시와 유사하게 표면의 소성유동이 현저하였다. 그 결과 회전수에 따른 X선회절선의 반가폭 및 잔류응력의 변화는 정규의 구름접촉피로의 경우보다 절대값이 크고 상이한 경향을 보였다.

2) 구름마찰시 마모율이 커지면 표면에 pitting발생이 없고 접촉면 하부에 표면에 도출되지 않는 다수의 균열이 관찰되었다. 이것은 delamination 이론에

의한 피로마모에 의해 생성된 것으로 추정되었다.

3) 결국 구름마찰시 마모율이 적으면 정규의 구름접촉피로에 의해 pitting이 발생하는 마모형태이나 마모율이 커지면 delamination에 의한 피로마모로 마모형태가 천이되는 것으로 추정된다.

참고문헌

1. 遠藤好郎, “表面工學,” 養賢堂, 日本, 1985, pp.80
2. J. Halling, “Principle of Tribology,” (松永正久譯, 近代科學社, 日本, 1984), pp.46.
3. S. Way, “Pitting due to rolling contact,” J. Appl. Mech. (ASME) 2, A-29, 1935.
4. 李漢瑛, 川本 信, 岡林邦夫, “X線回折による鋼のころがり疲れの研究(第1報),” 트라이보로지스트, 34, 1, pp43-50, 1989.
5. 李漢瑛, 坂本伸之, 川本 信, 岡林邦夫, “X線回折による鋼のころがり疲れの研究(第2報),” 트라이보로지스트, 34, 1, pp51-57, 1989.
6. 李漢瑛, 川本 信, “X線回折による鋼のころがり疲れの研究(第3報),” 트라이보로지스트, 34, 11, pp772-778, 1989.
7. 李漢瑛, 川本 信, “X線回折による鋼のころがり疲れの研究(第4報),” 트라이보로지스트, 34, 12, pp815-822, 1989.
8. 이한영, “마멸량의 대소에 따른 구름접촉피로의 X선적 해석,” 한국윤활학회지, 10, 3, pp71-77, 1994.
9. 小川喜代一, “金屬の潤滑摩耗とその對策,” 養賢堂, 日本, pp20, 1981.
10. 日本材料學會, “X線應力測定標準,” 日本, 1982
11. 三由 久, “鋼の轉がり疲れの研究,” 第33期日本潤滑學會全國大會豫稿集, pp285-291, 1988.
12. 木村好次, 岡部平八郎, “Tribology概論”(이흥구역, 동명사, 1987), pp250.
13. George E. Dieter, “Mechanical Metallurgy(3rd),” McGraw-Hill, pp230, 1986.
14. N.P. Suh, “The delamination theory of wear,” Wear, 25, pp111-124, 1973.
15. S. Jahanmir, N.P. Suh and E.P. Abrahamson, “The delamination theory of wear and the wear of a composite surface,” Wear, 32, pp33-49, 1975.