

## 마멸량의 대소에 따른 구름접촉 피로의 X선적 해석

이한영

계명대학교 공과대학 재료공학과

### Discussion on Rolling Contact Fatigue with Wear Amount by X-ray Reflection

Han-Young Lee

Department Material Science, College of Engineering, Keimyung University

**Abstract**—Rolling friction test was carried out to investigate the effect of the wear amount on rolling contact fatigue process in lubrication oil. The methods of this process were conducted at two Hertzian contact pressure and three slide ratio in each case by employing normalized and annealed carbon steel. During process of the rolling contact fatigue, the number of rotation until surface damage was occurred, the wear amount of rolling contact surface, and residual stress and half-value breadth using X-ray reflection on rolling contact surface were investigated. The result of this study shows that rolling contact fatigue process was directly influenced by wear trend and was confirmed by change of residual stress and half-value breadth on rolling contact surface.

#### 1. 서 론

두개의 물체가 접촉하여 상대운동을 하는 부위에는 일반적으로 두면간에 윤활제를 개입시켜 사용한다. 그중 구름마찰을 하는 부위의 윤활제의 개입은 접촉면간의 응착방지를 피하므로써 마찰저항의 감소는 물론이고 마멸량의 감소 특히 구름접촉시 가장 문제가 되는 구름접촉피로에 의해 발생하는 피팅현상(마멸량이 급증하는 현상)의 발생시기를 늦추는 역할을 한다.

또한 윤활상태하에서도 만일 윤활제의 막두께가 충분하지 않을 경우는 경계윤활상태가 형성되어 돌기간 직접접촉의 확률이 커지므로 마멸량이 증대하고 구름접촉피로에 의한 표면손상(피팅현상)도 조기에 발생하게 되는 것으로 알려져 있다[1]. 또한 극단적인 상황(환경조건)에 따라서는 액상윤활제 대신 고체윤활제를 사용하고 있으나 고체윤활제는 그 자체의 마멸에 의해 윤활역할을 하는 것으로 기지의 구름접촉피로에 의한 표면손상의 발생시기는 당연히 그 마멸량에 의존할 것이 예상된다.

이런 의미에서 현재도 구름접촉시의 수명이나 마멸형태에 미치는 윤활조건 및 윤활제의 종류에 대해

많은 연구가 행해지고 있는 실정이다[2-9].

일반적으로 베어링을 위시한 구름마찰요소등에는 기본정격하중과 같은 규격이 설정되어 있다[10]. 이들은 이상적인 순수구름접촉만을 고려하여 얻어진 것으로 이것과 기존의 여러 응력해석방법을 이용함으로써 표면손상의 발생시기를 예측하고 있다. 그러나 실제상황에서는 경계윤활상태의 경우가 많아 마멸이 발생하므로 그들의 적용은 불가능하다 할수 있으나 실제 이들 적용의 가부는 마멸량의 대소와 밀접한 관계가 있을 것으로 판단되어 진다. 아울러 최근의 고체윤활제의 사용확대추세를 고려할 때 구름접촉면의 마멸의 대소가 구름접촉피로에 의한 손상발생에 미치는 영향을 명확히 해야 할 필요성이 있다고 생각된다.

이런 의미에서 본 연구에서는 일반구조용탄소강을 이용해 윤활상태하 구름마찰 시의 미끄럼을 및 접촉압력을 변화시키는 구름마찰마멸시험을 행하여 구름접촉면의 마멸량이 구름접촉피로에 의한 손상발생에 미치는 영향을 조사하였다. 아울러 구름접촉면의 X-ray 회절시험을 행해 손상발생까지 구름접촉에 의한 잔류응력변화와 미세조직의 상태를 반영하는 회절선

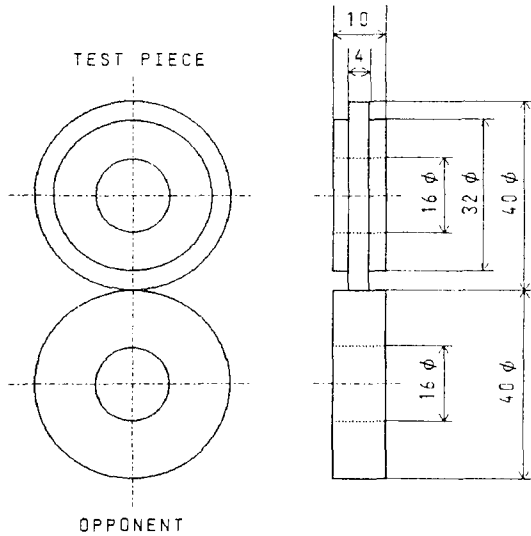


Fig. 1. Configuration of test-piece and opponent

의 반가폭의 변화를 추적하여 그 성상을 해석하였다.

## 2. 실험방법

공시재는 시편의 일반기계구조용 탄소강 SM45C(C 0.46%)로 870°C에서 1시간 가열후 노르말라이징처리를 행한 뒤, 시편을 선삭으로 제작하였다. 이때 시편의 구름접촉면의 표면조도는 약 4.5 μm (Rmax)를 나타내었다. 그 뒤에 진공( $10^{-4}$  torr)속에서 어닐링처리(660°C × 30분)을 하여 가공에 의한 잔류응력을 제거하였다. 상대재로는 퀘칭 및 템퍼링 처리한 STB2(Hv 790, Rmax=1.45 μm)를 사용하였다.

본 연구의 구름마찰시험은 Armsler형 구름마찰시험기[11]에서 행하였다. 이때의 윤활유(turbine oil #90)의 보급은 상대재를 윤활유조속에 일부 담근 뒤 회전에 의해 공급하는 방법을 취했다. 일반적으로 두물체 사이에 마멸입자가 개입되어 구름마찰면에 압흔을 남기게 되면 수명은 감소한다. 본 연구에서 채택한 윤활방법은 압흔을 남길 정도의 커다란 마멸입자는 침전되고 압흔형성과 관계없는 미세한 입자의 개입은 배제할 수 없으나 시편교환 시 윤활유의 교환도 행해 수명의 상대적 평가에는 영향이 적은 것으로 판단되어 진다. 본 연구의 시험편의 형상 및 접촉상태를 Fig.1에 나타내었고, 각 시험편의 수명은 접촉표면에 피팅에 의한 표면손상이 소정의 면적에 달하였을 때까지의 전회전수로 하였다. 또한

Table 1. X-ray diffraction condition

Tube of X-ray	CrKa
Diffraction plane	$\alpha$ -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	$2^\circ 2\theta/\text{sec}$
Angles of $\phi^*$ and $\psi^{**}$	$\phi = 0^\circ, 180^\circ$ $\psi = 0^\circ, 12^\circ, 27^\circ, 42^\circ, 57^\circ$

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

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

마멸량은 소정의 회전수마다 시편을 충분히 세척한 후 질량감소로 측정하여 얻었다.

시험하중은 Hertz의 최대접촉압력(이하 접촉압력)이 900 MPa 및 1200 MPa로 되는 조건을 택했고, 각하중조건에 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 시험조건은 시험편의 구름접촉면에 작용하는 접선력 방향과 구름방향이 일치하고 있다는 것을 알 수 있다.

구름마찰면의 X-ray회절시험은 소정의 회전수마다 행했다. 이때의 X-ray회절시험조건을 Table.1에 나타내었고 미세조직의 평가는 구름마찰면에 평행한  $\alpha$ -Fe(211)를 측정할 때의 회절선의 반가폭으로 하였다. 잔류응력은 회절선의 회절각과 X-ray의 입사각과의 관계를 이용하여 계산하는  $\sin^2\psi$ 법을 사용, 계산하였다[12].

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3-1. 구름마찰에 의한 표면손상발생수명과 마멸량

Table 2는 구름마찰시험결과, 각 시험편의 수명을 미끄럼율별로 비교한 것이다. 그 중 미끄럼율 10%, 24%에 대해서는 각각 2개씩 동일조건으로 시험했으나 그 결과가 잘 일치하고 있어 시험정도가 높다는 것을 알 수 있다.

Table 2에 의하면 접촉압력에 따라 수명에 미치는 미끄럼율의 영향이 서로 다르다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 미끄럼율의 증대는 수명을 저하시키는 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 접촉압력이 900

MPa의 경우에는 그들 일반적인 경향과 동일하게 수명이 0%, 10%, 24%순으로 되어 있음을 보이고 있다. 그러나 1200 MPa의 경우에는 수명이 미끄럼율 0%, 24%, 10%의 순으로 미끄럼율 24%의 수명이 10%의 수명보다 약 2.5배 증대된 것을 알 수 있다.

Fig. 2는 각접촉압력에서 미끄럼율 10%, 24%시의 회전수에 의한 마멸의 진행상태를 나타낸 것이다. 어느 것도 접촉압력이 클수록 마멸량이 많아진다는 것을 알 수 있다. 그러나 미끄럼율에 따라 수명의 역전이 일어난 1200 MPa, 24%의 마멸경향은 마멸량이 회전수에 거의 비례하여 증대하는 경향을 보이고 있으나 그것을 제외한 다른 조건에서는 약  $10^4$ 회전이 후에 거의가 정상마멸영역을 나타내고 있음을 알 수 있다.

따라서 1200 MPa, 24%의 경우 수명이 역전된 것은 구름마찰시의 정상마멸영역의 유무와 관련이 있는 것으로 판단되어 진다. 본 연구에 사용된 어닐링한 탄소강과 같이 연질의 재료는 구름마찰에 의한 균열 발생이 일반적으로 표면부근으로 알려져 있다. 즉 이 경우 정상마멸영역이 존재하면 이 영역에서는 같은 부위의 손상축적에 의해 균열이 발생하나 1200 MPa, 24%의 경우처럼 정상마멸영역이 존재하지 않으면 표면층이 순차탈락하므로 손상축적이 늦어지기 때문에 이러한 현상이 일어난 것으로 생각되어 진다.

### 3-2. X-ray 회절에 의한 표면손상 발생과정의 평가

구름마찰면의 미세조직의 평가는 X-ray 회절선의 반가폭을 사용하였다.

Fig. 3와 Fig. 4은 각접촉압력하에서의 회전수에 의한 반가폭의 변화를 나타낸 것이다.

그림에서는 미끄럼율에 관계없이 어느것도 수명에도달할 때까지 극대극소의 변화를 보이고 있다는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 4의 24%의 경우를 제외하면 어느것도 수명시에 약  $1.7 \sim 1.75^\circ(2\theta)$ 를 나타내고 있다. 이와같이 수명시에 반가폭이 일정한 값을 나타내고 있다는 사실은 재료마다 구름접촉피로에 의한 손상 발생에 대한 미세조직의 포화치가 존재한다는 저자의 보고[13]와 상응하는 것으로 판단되어 진다.

Fig. 3의 미끄럼율 0%의 경우는  $5 \times 10^6$ 회전에서도 표면손상이 관찰되지 않아 시험을 중단하였으나 이 시점에서의 변화는 극소점에서 벗어나 증대하는 영역에 들어 있고 그 값도 약  $1.7^\circ$ 이므로 시험을 속행하였다면 표면손상이 곧 발생할 것임을 예측할 수 있다.

Fig. 4의 경우 미끄럼율 0%, 10%의 변화는 900 MPa 시의 경향과 거의 같으나 극대점에서 수명때까지의 변화가 빨라 고접촉압력에서 수명이 짧은 것과 잘 일치하고 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 미끄럼율 24%의 경우는 반가폭이  $1.75^\circ$ 가 되어도 수명에 도달하지 않았고 수명시에  $1.8^\circ$  이상의 값을 나타내고 있다. 따라서 이 조건하에서는 전술(Fig. 2)한 대로 마멸량이 많으므로 표면의 미세조직의 상태도 다른 조건과 틀리다는 것을 알 수 있다.

일반적으로 어닐링한 재료의 구름접촉에 의한 표면손상은, 시험전에는 밀도가 낮은 전위들이 서로 탕글된 상태이나 반복된 구름접촉에 의해 전위의 증식과 아울러 셀조직형성 그리고 미세균열의 발생과 전파에 의해 일어난다[14]. 이 경우 접촉면의 마멸이 거의 일어나지 않는다면 손상과 관련된 미세조직의 형성에 도달되는 접촉의 횟수는 물론 구름마찰면의 초기상태, 윤택상태, 접촉압력, 점선력의 크기 등에 영향을 받게 되나 결국 미세조직의 상태가 일정(즉 반가폭의 포화치)해 진뒤 손상이 발생할 것이다. 그러나 구름접촉면이 마멸하여 순차 탈락하게 되면 손상축적이 늦어질 뿐만 아니라 표면은 마멸에 의한 거시적인 소성변형을 수반하므로 다른 형태의 변화를 하는 것으로 생각되어 진다.

회전수에 의한 구름접촉면의 잔류응력의 변화의 일례를 Fig. 5에 나타내었다.

이것은 접촉압력 1200 MPa의 결과이나 시험전에는 어닐링처리에 의해 잔류응력은 거의 존재하지 않으나 구름접촉에 의해 발생하는 잔류응력은 압축으로 수명때까지 그변화는 반가폭의 경우와 마찬가지로 극대극소를 보이며 변화하고 있음을 알 수 있다. 그러나 수명시에는 반가폭이 증대하고 있으나 응력은 감소하는 경향으로 결정립의 손상은 커지나 미세균열발생에 의해 격자변형이 일부 해방되는 것으로 추측된다.

또한 Fig. 3~5에서 미끄럼율이 커질수록 구름접촉의 초기( $10^4$ 회전부근)의 반가폭의 극대치는 적어지나 잔류응력은 반대로 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 점선력이 커지게 되면 마멸에 의한 소성변형량이 증대되어 최표면 부위의 격자변형이 커짐을 시사하고 있다. 구름접촉수가 증가할수록 반가폭의 경우는 표면의 돌기부가 소성변형을 하므로 증대하게 되나 셀조직이 형성되기 시작하면서 다시 감소하게 된다. 이에 반해 잔류응력은 표면과 내부의 소성유동의 정도의 차가 증대하므로 커지고 미세균열발생과 아울러

감소하는 것으로 판단되어 진다.

### 3-3. 구름마찰면하부의 소성유동 및 경도분포

구름마찰면 하부에 소성유동이 형성되면 균열은 그것을 따라 전파하는 것으로 알려져 있다[15]. 미끄럼율이 커지면 접선력이 커지므로 마찰면에 소성유동이 크게 생성될 것이 예상된다. 그 상황을 Fig. 6에 나타내었다. 미끄럼율 0%의 경우, 최표면 부근에서는 소성유동을 거의 관찰할 수 없으나 최대전단응력이 작용하는 깊이 부근에서만 관찰되고 있다는 것을 알 수 있다. 24%의 경우에는 최표면에서부터 관찰되고 있고 그 크기도 크다는 것을 알 수 있다. 이 경우는 마멸량이 많아 수명은 연장되었으나 일단 균열이 발생하면 그 전파는 빠를 것으로 추측된다.

Fig. 7은 구름마찰면 하부의 경도분포를 측정된 결과이다. 각각의 경도상승은 소성유동의 정도에 따른 가공경화에 의한 것이다. 각각의 극대치는 Hertz의 최대전단응력의 위치(900 MPa: 0.12 mm, 1200 MPa: 0.16 mm)에 존재하는 것을 알 수 있다.

일반적으로 마찰계수가 1/9 이상일때는 전단응력의 최대치는 표면에서 나타나는 것으로 알려져 있다[16]. 미끄럼율 24%의 경우는 마찰계수가 1/9 이상으로 생각되어 지나 최표면의 경도측정이 불가능하지만 내부보다 높은 값을 가질 것이 예상된다. 그러나 표면부근과 내부에 있어서는 미끄럼율이 커짐에 따라 경화의 폭도 넓어져 가공경화의 정도가 크다는 것을 알 수 있다.

그러나 구름접촉에 의한 표면손상을 논할 때는 균열발생과 전파는 별개의 문제로 거론 되지 않으면 안된다고 생각되어 진다. 확실히 24% 시의 심한 소성유동은 균열전파의 좋은 여건으로 생각되어 지나 균열발생에 있어서는 마멸에 의해 손상이 축적되는 부분이 탈락되어 버린다. 또한 가공경화가 극도로 커지면 그 부분의 shake-down limit도 커지므로[17] 균열의 발생은 일어나기 어렵게 될 것이다. 접촉압력 1200 MPa 의 미끄럼율 24%의 수명이 10% 보다 길어진 것이 이와같은 상황에서 일어난 것으로 생각되어 진다.

## 4. 결 론

어닐링처리한 표준조직의 중탄소강의 구름마찰마멸시험을 접촉압력 900 MPa 및 1200 MPa, 그리고 미끄럼율을 각각 0%, 10%, 24%에서 행해 회전수에 따

른 마멸량의 변화와 X-ray회절시험등에 의해 얻어지는 각종 정보를 표면손상발생과 관련시켜 해석하였다. 그 결과, 이하의 결론을 얻었다.

- 1) 구름마찰시 접촉압력 900 MPa의 경우의 마멸 형태는 미끄럼율에 관계없이 전부 정상마멸영역을 나타내었다. 이때 수명은 미끄럼율이 커질수록 크게 저하하였으며 소성유동의 크기와 경도분포도 미끄럼율의 크기와 좋은 상관관계를 나타내었다.
- 2) 접촉압력 1200 MPa의 경우는 미끄럼율 24%의 수명이 0%의 수명보다는 짧았으나 10%의 수명에 비해 약 2.5배 증대하였다. 이 조건에서는 정상마멸영역이 존재하지 않고 회전수에 대해 마멸량이 증대하는 경향을 나타내었다. 이것은 구름접촉면이 순차마멸탈락하므로써 균열발생이 늦어지는 것으로 생각되었다. 그러나 소성유동은 최표면에서도 관찰되어 균열진전저항은 낮을 것으로 추측되었다.
- 3) X-ray회절시험결과, 반가폭 및 잔류응력은 회전수에 따라 어느정도 극대극소의 변화를 보였다. 그러나 미세조직의 상태를 나타내는 반가폭은 수명의 역전이 일어난 1200 MPa, 24%의 경우를 제외하면 수명시에 일정한 값을 나타내었다.

이상의 결과, 구름마찰시에 정상마멸영역이 존재하지 않을 정도로 마멸량이 커지면 정규의 구름접촉피로의 과정을 따르지 않는다는 것이 분명하다.

## 참 고 문 헌

1. J.C. Skurka, "EHL of roller bearing", J. Lub. Tech., 92, 2, 281, 1970.
2. 佐佐木外喜雄, 豊島敏雄, " 固體潤滑劑を使用した場合のころがり摩擦について", 日本機械學會 論文集, 26, 3, 841, 1960.
3. 黒田昌夫, "軸受鋼の轉動疲れに對する 潤滑劑の影響", 潤滑, 5, 10, 283, 1960.
4. H.V. Cordiano, E.P. Cochran, Jr, and R. J. Wolfe, "Effect of combustion resistant hydraulic fluids on Ball bearing fatigue life", Preprint 55-Lub-21, ASME, 1955.
5. I. Koved, "The effect of three mineral base oils on roller bearing fatigue life", ASLE Trans, 9, 222, 1966.
6. F.T. Barwell and D. Scott, "Effect of lubricant on pitting failure of ball bearings", Engineering, 182, 9, 1956.
7. D. Scott, "Study of the effect of lubricant on pitting failure of balls", Proc. Conf. Lubrication and Wear,

- 463, 1957.
8. F.G. Rounds, "Some effects of additives on rolling contact fatigue", ASLE Trans, 10, 234, 1967
  9. D.Scott, "Treatise on materials science and technology(Vol.13)", Academic Press, 321, 1979.
  10. 日本規格協會, JIS , B1519 (1993).
  11. 小川喜代一, "金屬の潤滑摩耗と その對策", 20, 養賢堂, 日本, 1981.
  12. 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)", トライボロジスト, 34, 1, 43, 1989.
  13. 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)", トライボロジスト, 34, 1, 51, 1989.
  14. 藤田公明, 吉田 彰, 山本敏夫, S45C燒なましローラの 轉がり疲れに 關する 研究(第1報), 潤滑, 21, 4, 256, 1976
  15. 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)", トライボロジスト, 34, 11, 815, 1989.
  16. J.O. Smith and C.K. Liu, "Stress due to tangential and normal loads on an elastic solid with applications to some contact stress problems," J. Appl. Mech. (ASME), 20, 2, 157, 1953.
  17. K. L. Johnson, "A shakedown limit in rolling contact", Proc. Fourth U.S. Nat. Congr. Appl. Mech., Berkeley, California, 6, 1962