

구름접촉피로에 미치는 압흔의 영향

The Influence of Indentation on Rolling Contact Fatigue

이 동엽*, 이한영**

* 계명대학교 공과대학 재료공학과 대학원 ** 계명대학교 공과대학 재료공학과

ABSTRACT Most of the results of recent research for the influence of indentation on rolling contact fatigue has been carried out with high strength material under the point contact. The plastic lug around the indent also has been known as a source of stress concentration.

This study is undertaken to analyze the influence of indentation on rolling contact fatigue with low strength material under the line contact. The results in this study show that the plastic flow around indentation by rolling friction has a major influence, differed from the results of high strength material. And the change of residual stress and half-value breadth measured to the failure by X-ray diffraction can be identified to predict the rolling contact fatigue life of indented materials.

1. 서론

최근의 각종 기계나 장비 등은 고정도화·고품질화를 지향하고 특히 maintenance free의 요구가 품질측면에서 크게 대두되어 지고 있다. 이러한 측면에서 구름접촉을 하는 부재에 있어서도 최근은 구름접촉시 이물질개입(먼지, 마모분 등)으로 수명이 급격히 저하하는 현상이 커다란 과제로 부상하여 많은 연구가 진행되고 있다.[1~9] 이와 관련된 연구로는 주로 소재개발 측면과 설계개선 측면 그리고 기구해석 측면 등에서 연구되고 있으나 이중 이물질개입에 따른 영향해석 및 손상기구해석의 규명이 시급한 기초연구분야로 생각된다.

최근에는 이와 관련하여 압흔주변의 돌기부가 조기파손에 지대한 영향을 미치는 것으로 알려 졌으나, 이들은 대부분 점접촉을 하는 경질재료를 대상으로 하는 결과임이 조사결과 밝혀졌다. 그러나 실제로 선접촉을 하는 연질재료의 요소도 상당히 존재

하여 이들에 대한 연구도 시급하다 할 수 있다.

이런 의미에서 본 연구에서는 일반 구조용 탄소강의 시편에 여러 종류의 압흔을 남긴 다음 윤회상태하 선접촉의 구름마찰시 구름접촉면의 압흔이 구름접촉피로에 미치는 영향을 규명함과 동시에 구름접촉면의 X선회절기술을 이용하여 압흔부의 구름접촉피로과정을 추적, 수명예측의 가능성도 조사하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 시편의 일반기계구조용 탄소강인 S45C의 환봉을 사용하였다. 열처리로는 850°C에서 1.5시간 가열후 공냉하는 Normalizing처리를 행하였고 그 뒤 선삭 및 연마를 하여 시편(Ra 0.47)을 제작하였다. 그리고 일부의 시편에 대해서는 진공(10^{-4} Torr)속에서 Annealing처리(660°C×45분, 로냉)를 하여 기계가공에 의한 잔류응력을 제거하였다.

상대재는 퀸칭 및 템퍼링처리한 SUJ2 (JIS 규격) 베어링강(Ra 0.08)을 사용하였다.

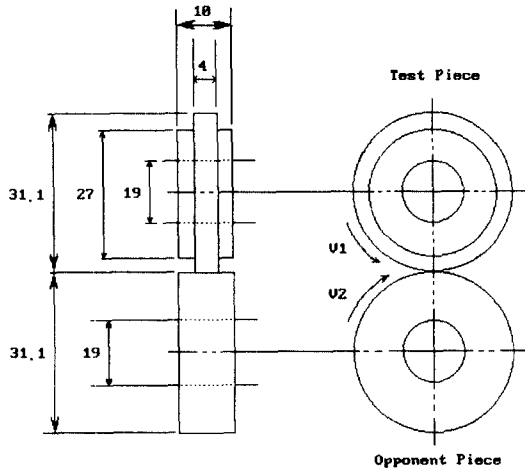


Fig.1 Configuration of Test-Piece

Fig.1에 본 연구에 사용된 시험편의 형상 및 접촉상태를 나타내었다.

압흔은 로크웰 경도계 및 비커스 경도계의 압자를 이용하여 구름접촉면 중앙 (3곳 : 120° 간격)에 Table.1에 나타난 하중조건으로 제작하였다. 이때 비커스 압흔의 경우는 구름방향에 Sharp Edge가 오도록 한 것(◇)과 구름방향과 45° 방향이 되는 것(□)의 2 종류로 하였다.

Table. 1 Conditions of Indentation

Indent	Load (kg)
Rockwell Indet	60, 80, 100, 150
Vickers Indent	30, 50

본 연구의 구름접촉피로시험은 Amsler 형 구름마찰마모시험기를 이용하였다. 시험은 Hertz의 최대접촉압력이 90kgf/mm² (880 MPa)로 되는 하중에서 상대재

의 회전속도를 207.5rpm으로 일정하게 하고 시험편의 회전속도를 변화시켜 미끄럼율 0% 및 10%로 시편에 작용하는 접선력의 방향이 구름방향과 일치하게 하였다. 그리고 윤활유(ISO VG 46)의 보급은 상대재를 윤활유조 속에 일부 담근 뒤 회전에 의해 공급하는 방법을 취했다.

또한 수명시험시 수명의 판정은 접촉표면에 구름접촉피로의 전형적인 표면손상이 소정의 면적에 달하였을 때까지의 전 회전수로 하였다.

구름마찰면의 X선회절시험은 소정의 회전수마다 접촉면 중앙에서 행하였다. X선은 Cr-Kα선(V-Filter)을 이용 α-Fe (211)면을 측정하였다. 이때 잔류응력은 $\Psi=0^\circ \sim 45^\circ$ 까지 4각도에서 측정하여 $\sin^2\Psi$ 법 [10]으로 계산하였으며 반가폭은 $\Psi=0^\circ$ 때의 회절선의 반가폭을 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 구름접촉피로수명

Table.2는 세 가지 압흔 형태 및 크기를 부여한 시험편을 동일조건에서 각각 2~3개씩 시험하여 수명에 달한 회전수를 평균하여 미끄럼율 별로 비교한 것이다.

미끄럼율 0%의 결과에서는 전반적으로 압흔재의 수명이 비압흔 시편의 수명에 비해 다소는 감소되었으나 이 경우의 구름접촉피로에 의한 손상이 전부 압흔과 무관하게 발생하여 미끄럼율이 적은 경우의 압흔은 수명에 별 영향을 미치지 않는 것으로 생각되어 진다.

그러나 미끄럼율 10%의 경우는 전부가 압흔부위에서 균열이 발생된 것으로 확인되어 수명에 미치는 압흔의 영향은 접선력의 크기에 좌우되는 것으로 밝혀졌다. 또한 접선력이 클 경우의 압흔의 영향은 압흔 하중이 증가수록 수명이 감소하고 압흔도 Sharp

Table.2 Rolling Contact Fatigue Life

No.	Indent		Life(rev.)	
	Shape	Load (kg)	SR 0%	SR10%
ST	-	-	630,000	83,400
R06	Rockwell	60	-	60,000
R08		80	-	44,500
R10		100	-	41,000
R15		150	570,000	40,600
VD3		Vickers	30	-
VD5	50		541,800	30,400
VC3	30		-	56,200
VC5	50		580,000	45,600

Edge를 가질수록 또한 Sharp Edge가 구름 방향과 일치할수록 수명이 짧아 진다는 것을 알 수 있다.

3-2. 압흔부의 구름접촉피로과정에 따른 변화

Fig.2는 압흔의 영향이 없었던 미끄럼율 0% 시험후 R15의 압흔부위를 관찰한 결과이다.

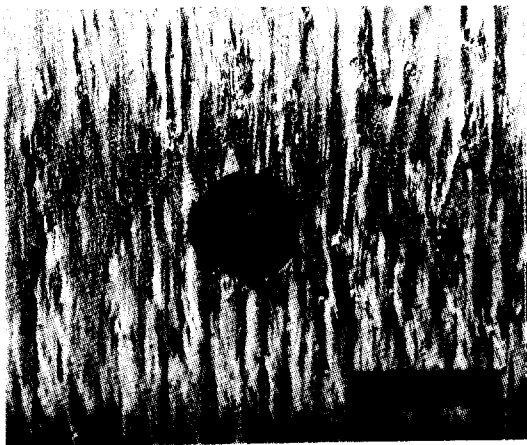


Fig.2 Change of Rockwell indent on R15 after test at slide ratio 0%(×50)

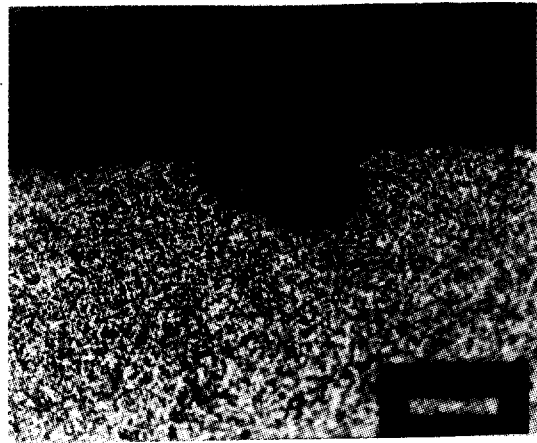


Fig.3 Micrograph of parallel section to rolling direction for Fig.2(×100)

초기 압흔에 비해 압흔면적이 상당히 감소하였음을 알 수 있고 압입하중이 적은 시편의 경우는 거의 소멸되었고 특히 비커스 압흔의 경우는 압자의 대각선의 흔적만이 남아 있었다. R15의 단면조직 사진을 Fig.3에 나타내었다. 그림에서도 알 수 있듯이 압흔의 표면은 상당히 변형되어 있으나 내부는 원래의 둥그런 압흔의 형상을 그대로 유지되고 있음을 알 수 있다. 미끄럼율 10% 시험의 경우는 표면의 압흔이 전부 소실되어 관찰이 불가능하였다. Fig.4는 R15를 수명의 약 1/2정도(1.8×10^4 회전후)에서 시험을 중단한 상태에서 압흔부위의 단면조직을 관찰한 결과이다. 0%에 비해 접선력이 크므로 표면은 이미 소성변형으로 거의 압흔을 덮고 있음을 알 수 있고 내부의 둥그런 압흔의 좌우가 밀착되어 있다는 것을 알 수 있다. 결국 밀착부는 윤활유 개입으로 완전 결정학적 결합이 불가능하므로 notch로서 작용, 그 부위의 응력집중을 유발하여 Crack이 전파되어 전형적인 구름접촉 손상 형태로 발전하게 된다는 것을 알 수 있다. 이때 이미 표면압흔주변에 미세 Crack이 발생하고 있음이 관찰되었다. 이러한 측면

에서 미끄럼을 0%의 경우는 압흔표면은 변화가 되나 내부는 압흔의 Crack화가 이루어지지 않았기 때문에 압흔의 영향이 없었던 것으로 추측되어 진다.

Fig.5는 미끄럼을 10%하에서 로크웰 150kg 압흔시편의 회전수에 따른 직경감소 정도를 측정한 결과이다. 10^4 회전 부근에서 급격한 직경감소가 발생하여 이 부근에서 소성유동이 급격히 이루어짐을 알 수 있다.

이상의 결과, 저경도강의 압흔부의 파손은 압흔돌기부 및 주변의 소성변형에 기인하여 발생함을 알 수 있다. 따라서 미끄럼율이 증가할수록 소성유동량이 증가하므로 초기에 압흔부를 Crack화하여 응력집중을 유발하고 이것이 수명저하를 초래하는 것이 분명하다.

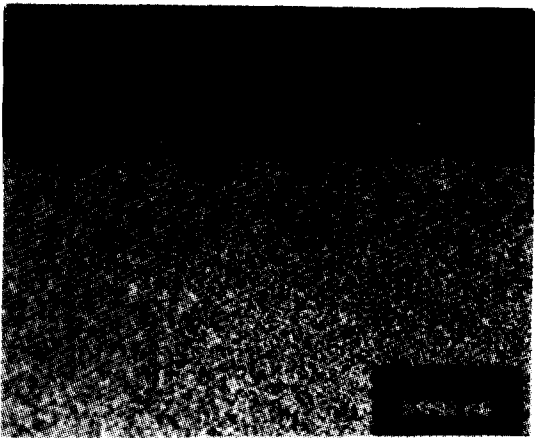


Fig.4 Micrograph of parallel section to Rolling direction on R15 after 18,000 rotation at slide ratio 10%

3-3. X선회절에 의한 압흔부의 구름접촉피로 수명예측

일반적으로 구름피로시험에 의한 손상측정은 dislocation반응에 의해 일어나는 것으로 알려져 있다. 또한 이러한 과정은 회전

수에 따른 구름접촉면의 X선회절에서 얻어

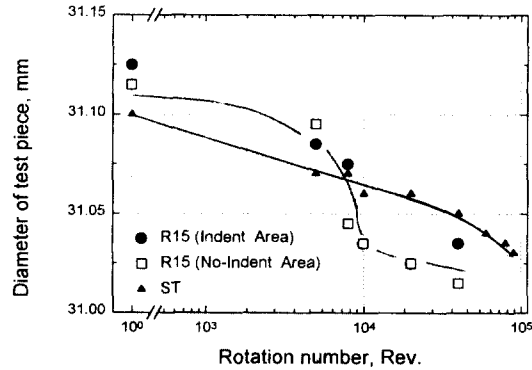


Fig.5 Variations of diameter of testpiece with rotation number (R15, 10%)

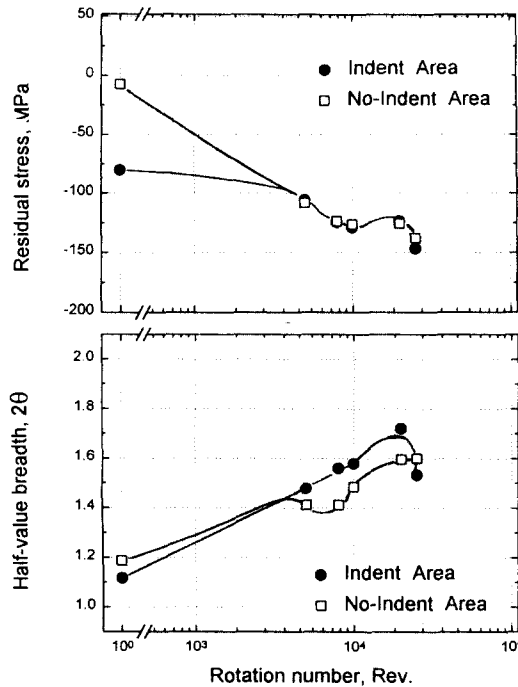


Fig.6 Variation of residual stress and half-value breadth (Annealed R15, 10%)

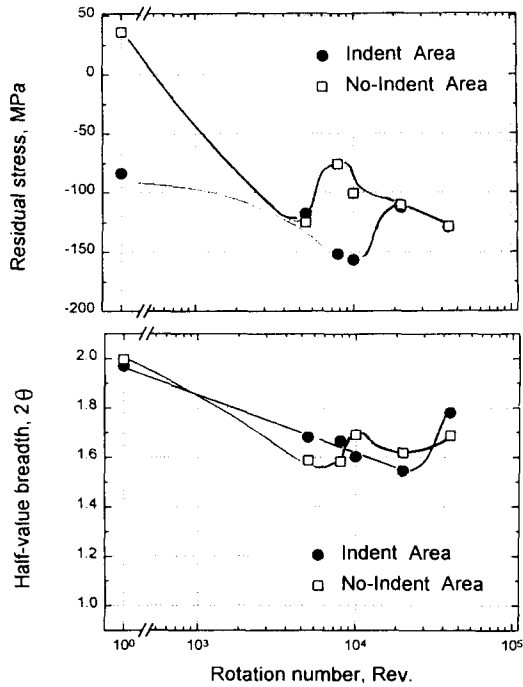


Fig.7 Variation of residual stress and half-value breadth (Non-annealed R15, 10%)

지는 잔류응력 및 반가폭의 변화가 극대극소현상을 나타내고 수명시에 일정한 점근치를 가지는 것으로 알려져 있다.[11,12]

Fig.6은 응력제거한 R15를 이용해 미끄럼율 10%에서 회전수에 따른 잔류응력 및 반가폭의 변화를 나타낸 것이다.

잔류응력은 압흔의 유무와 관계없이 일반적인 경향과 동일하게 극대극소현상이 나타남을 알 수 있다. 반가폭의 변화에서는 비압흔부에서 극대극소현상을 보이나, 압흔부는 거의 직선적인 변화를 하고 전반적으로 큰 값을 알 수 있다.

Fig.7은 수명시험시에 사용한 R15에 대해 잔류응력 및 반가폭의 변화를 나타낸

것이다. 이것도 앞의 결과와 동일한 결과임을 알 수 있다. 그러나 앞의 응력제거시험의 경우(Fig.6)와 달리 비압흔부의 잔류응력변화의 극소값이 저회전수에 나타남을 알 수 있다. 이것은 시험전 연마가공에 의한 초기 인장잔류응력에 의한 것으로 추정되나 명확하지는 않다.

Fig.6과 Fig.7의 잔류응력변화에서 응력제거재의 경우는 저회전수에서 가공재의 경우는 수명에 가까워지면(약 2×10^4 회전 부근) 압흔부와 비압흔부의 응력값이 일치하고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 압흔부의 파손을 예측할 수 있는 수단으로 사용할 수 있을 것으로 생각되어 진다.

일반적으로 잔류응력 및 반가폭의 극대극소 변화는 구름접촉에 따른 손상축적과정과 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다. 특히 반가폭은 재료의 미시적 변형상태를 반영하는 것으로 알려져 있다. 이러한 측면에서 Fig.5에서도 관찰되듯이 소성변형이 급증하는 회전수와 잔류응력 및 반가폭변화의 극소값의 위치가 일치하고 있어 압흔부에서 반가폭의 극대극소현상이 관찰되지 않는 것은 압흔부가 이미 상당한 Cell조직이 형성되어 있기 때문으로 추측된다.

Fig.8은 수명시험에 사용된 시편에 대해 비손상부에서 측정된 표면의 잔류응력 및 반가폭을 나타낸 것이다. 잔류응력의 경우 미끄럼율 0% 시는 다소 오차가 있으나 -60 MPa정도, 미끄럼율 10%시는 -125MPa 정도의 일정한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 반가폭의 경우는 미끄럼율에 관계없이 약 1.7° (2θ)로 일정함을 알 수 있다. 따라서 이 값이 이 재료의 손상발생에 대한 점근치로 추정되어 결국 이 값에 도달하여야 구름접촉피로의 손상이 발생하게 됨이 분명하다.

이상과 같은 결과를 이용하면 압흔부재의 구름접촉피로 과정을 X선회절에 의해 수명

예측이 가능할 것으로 생각되어 진다.

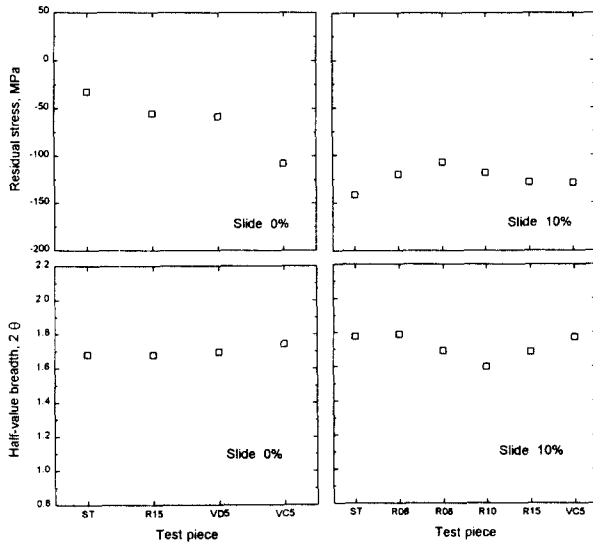


Fig.8 Residual stress and half-value breadth on surface after their life

4. 결론

S45C 일반구조용 탄소강을 이용해 선접촉 시 압흔이 구름접촉피로에 미치는 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 압흔이 수명에 미치는 영향은 접선력의 크기에 따라 상이하어 접선력이 적을 경우는 영향이 적으나 큰 경우는 미소압흔이라도 영향을 미친다. 그리고 이 경우는 압흔의 형태가 Sharp Edge를 가질수록 또한 Sharp Edge가 구름방향과 일치할수록 수명이 짧아진다.
- 2) 압흔의 영향은 소성유동과 밀접한 관계가 있음이 밝혀졌다. 이것은 압흔 주변의 소성돌출부위가 구름접촉횟수 증대에 따라 소성변형이 일어나 내부압흔의 좌우가 밀착 Crack화 되어 선단에서 응력집중을 유발하게 된다.
- 3) X선회절에 의해 얻어지는 회전수에 따

른 잔류응력의 변화는 압흔부, 비압흔부 관계없이 극대극소현상을 나타내고 수명전에 그 값이 일치된 후 수명에 달하는 것으로 밝혀졌다.

4) 반가폭변화의 극대극소 현상은 압흔부에서 관찰이 안되어 압흔부가 이미 상당한 Cell조직이 형성되어 있어 결국 극대극소 현상이 관찰되지 않는 회전수만큼 균열발생과 관련된 점근치까지의 도달속도가 빠른 것으로 밝혀졌다.

5) 이러한 X선회절 결과 얻어지는 압흔부와 비압흔부의 잔류응력 일치여부, 극대극소현상유무, 점근치도달 정도를 평가하면 수명예측이 가능할 것으로 생각되어 진다.

5. 참고문헌

- 1) G.Xu, F.Sadeghi, "Wear",201(1996) 106
- 2) V.Gupta,P.Bastias,G.T.Hahn,C.A.Rubin, "ASME(J. of Tribology)",117(1995)
- 3) V.Gupta,G.T.Hahn,P.C.Bastias,C.A. Rubin, "ASME(J. of Tribology)",117(1995)
- 4) H. Fan, L. M. Keer, W. Cheng, H. S. Cheng,"ASME(J. of Tribology)", 115(1993)
- 5) P.C.Bastias,G.T.Hahn,C.A.Rubin,V.Gupta,X. Leng,"Wear",171(1994)169.
- 6) W. Cheng, H. S. Cheng, L. M. keer, X. Ai, "ASME (J. of Tribology)",115(1993)
- 7) A.A.Lubrecht,R.S.Dwyer-Joyce,E.loannides, Elsevier Science Pub. B. V.(1992)
- 8) 戸田, 三上, 星野, "トライボロジスト", 38, 6(1993)526.
- 9) 自動車技術會, "自動車のトライボロジ", 養賢堂(1994)137
- 10) 日本材料學會,"X線材料強度學",養賢堂, (1973),301.
- 11) 藤田,吉田,山本,"潤滑", 21,4(1976)256.
- 12) 李 漢瑛, 川本 信, 岡林邦夫, "トライボロジスト", 34,10(1989)772.