

회전접촉피로수명에 미치는 합금원소 및 침질탄화처리의 영향

陳載寬·金東健

전북대학교 공과대학 금속공학과

Effects of Alloying Elements and Nitrocarburizing on
Rolling Contact Fatigue Life

Jai Koan Jin and Dong Keon Kim

Department of Metallurgical Engineering,
Chonbuk National University, Chonju 560-756

ABSTRACT

This study has been carried out to evaluate effects of alloying elements and nitrocarburizing on rolling contact fatigue life. Manganese has a significant influence on the distribution of retained carbides and microstructural changes after rolling contact fatigue test. The effect of the manganese addition stabilized fine retained carbide particles during rolling contact fatigue life test, and so increased fatigue life markedly. High carbon chromium bearing steel with different matrixes were nitrocarburized by austenitic nitrocarburizing process at 850°C for 4hrs.

Rolling contact fatigue life of the nitrocarburized specimen was increased 2 times than full hardening treated.

1. 서 론

회전기계 요소 부품의 하나인 베어링은 고속·고하중을 받는 각종 기계 및 기구들의 크기를 결정하는데 지대한 영향을 미친다. 따라서 베어링소재의 절대적인 내구수명을 향상시키기 위하여 고청강강제조, 합금원소조정, 열처리방법 및 피로특성등에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다.^{1) 4)}

내마모성을 크게 향상시킬 수 있는 표면경화법으로서 고주파·열처리, 가스질화, 염욕질화 및 이온주입법

에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있지만 고하중하에서의 베어링 파손은 표면적하의 조직변화에 의해서 발생되기 때문에 내부가 크게 연화되어 경도구배가 발생되는 표면경화법을 베어링제조에 적용하기는 용이하지 않았다.

그러나 최근에 표면으로부터 경도구배가 거의 발생되지 않는 오스테나이트 침질탄화법(austenitic nitrocarburizing)을 베어링 제조에 적용하는 연구가 이루어지고 있다.²⁾

일반적으로 침질탄화법은 570°C 부근에서 처리하는

페라이트 침질탄화법(Ferritic Nitrocarburizing)을 말하고 있으나 오스테나이트 침질탄화법은 800°C 이상에서 표면에 탄소와 질소를 침입 확산시킨 후 소입하기 때문에 경도구배는 거의 발생하지 않고 표면에 경한 마르텐사이트 조직과 내마모성이 우수한 질탄화물이 혼재되어 피로저항성을 증가시키는 방법이다.

본 실험에서는 일반적으로 고탄소 크롬베어링강인 SUJ-2와 냉각능과 강인성을 향상시키기 위하여 Mn 첨가한 100CrMn6를 오스테나이트 열처리 및 침질탄화 처리하여 피로내구수명을 비교분석하며 그에 따른 피로거동을 연구하였다.

Table. 1 Chemical composition of specimen used (wt. %)

Grade	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Ti	O
SUJ-2 (JIS)	1.02	0.25	0.31	0.02	0.015	1.53	0.20	0.026	0.0010	7 ppm
100 CrMn6(DIN)	1.03	0.62	1.12	0.02	0.018	1.49	0.25	0.021	0.0010	8 ppm

2. 2 열처리

전경화 열처리는 875°C에서 16분간 유지시킨 후 210°C 염욕에 퀘칭한 후 220°C에서 2시간 템퍼링 처리한 템퍼드 마르텐사이트 조직으로서 경도 60~62 HRC 정도를 확보할 수 있도록 처리하였다.

침질탄화처리는 전열식 침질탄화 박스로를 이용하였다. 침질탄화에 사용된 분위기 가스는 흡열형 변성로에서 1,050°C로 가열된 heating chamber내의 Ni 촉매를 통해 프로판가스(C_3H_8)와 공기를 반응시켜 만든 일산화탄소, 수소 및 질소의 혼합가스인 흡열성 변성가스(endo-gas 또는 Rx gas)에 암모니아(NH_3)가스를 혼입시켰다. 이때 암모니아 가스와 Rx가스의 혼합 비율은 6.5 : 10(m^3/hr)로 하였다. 로내 분위기 조절은 이슬점(dew point)이 $-10^\circ C$ 되도록 조절하였다. 열처리 조건은 850°C에서 4시간 유지시킨 후 80°C 오일에 퀘칭하여 170°C에서 2시간 템퍼링 처리하였다.

2. 3 조직관찰

열처리하기전의 구상탄화물, 템퍼드 마르텐사이트 및 침질탄화조직을 광학현미경과 주사전자현미경을 사용하여 관찰하였다. 또한 회전접촉피로시험 후 미세조직 변화와 크랙생성과정을 조사하였다. 이때 템퍼드

2. 실험방법

2. 1 시편준비

침질탄화처리 하기전의 고탄소크롬 베어링강의 화학 성분은 표1과 같고 SUJ-2는 일본 SANYO Special Steel Co. 제품이며 100CrMn6는 독일 WRG에서 제조한 봉재를 시편으로 제작하였다. 이때 두 강종 모두 진공탈가스 처리한 후 잉곳트 주조한 제품으로서 피로 거동에 영향을 미칠 수 있는 인자들을 최소화 시키도록 하였다. 침질탄화처리, 회전접촉 피로시험 및 분석용 시편을 직경 30mm 두께 8mm의 원판상태로 가공하였다.

마르텐사이트 조직은 2%나이트로 에칭하였고 크랙생성과정과 미세조직변화는 퍼크린산 4%로 에칭하여 관찰하였다.

2. 4 침질탄화 표면분석

광학 및 전자현미경으로 표면 질탄화물의 변화를 관찰하였고 X-선 디프랙토미터를 사용하여 표면층을 0.05mm 간격으로 제거하면서 잔류오스테나이트 및 상변화를 분석하였다. 빅커스 미소경도기(Vickers microhardness)를 사용하여 200g의 하중으로 궤도면 직하의 미소경도변화를 측정하였다.

2. 5 회전접촉피로시험

피로강도는 시편의 형태, 시편의 운동방법, 표면거칠기, 윤활유의 종류, 속도, 온도, 하중 및 접촉상태등에 따라 커다란 영향을 받는다.

Thrust type 회전 접촉 피로 시험기를 이용하여 피로 수명을 측정했으며 이때의 시험 조건은 표2와 같다. 피로수명의 결정은 시험기 레버에 진동계 센서를 부착하여 구름 접촉에 의한 윤활궤도에서 피팅 또는 균열이 발생할때 자동으로 정지되며 이때까지의 회전수를 수명의 값으로 계산하였다.

Table. 2 Test condition for rolling contact fatigue

Load	1,000kgf
Speed of motor	1,500rpm
Lubricant	shell tellus oil 37
Roughness of ball(Ra)	0.004 ± 0.002(μm)
Roughness of specimen	0.03 ± 0.001(μm)
Used bearing	thrust ball bearing 51202

3. 실험결과 및 고찰

3. 1 열처리 조직관찰

사진 1은 경화열처리하기 전의 구상화된 탄화물 상태를 4% 피크탈로 부식한후 주사전자현미경으로 관찰한 것이다.

SUJ-2 강의 구상 탄화물은 약 17% 함유되어 있으며 탄화물의 크기가 1.5~2μm이고 실리콘과 망간이 첨가된 100CrMn6의 구상탄화물은 약간 조밀하고 미



Photo. 1 Microstructure showing Spheroidized Carbide
a) SUJ-2 b) 100 CrMn6

세하게 분포되어 있다. 기지 조직은 페라이트이며 구상탄화물은 (Fe₃Cr)₃C 카바이드로써 조밀할 경우 경화열처리시 마르텐사이트 입자를 미세하게 하여 구름피로수명을 향상시킨다.⁶⁾

사진 2는 SUJ-2와 100CrMn6 두 강종을 875℃에서 16분간 유지시킨후 210℃ 염욕으로 퀴칭하여 220℃에서 2시간 템퍼링 처리한 템퍼드 마르텐사이트와 850℃ 침질탄화 분위기에서 4시간 유지시킨후 80℃ 오일에 퀴칭하여 170℃에서 2시간 템퍼링 처리한 중심조직을 비교 관찰한 조직이다.

일반적으로 열처리조직에 영향을 미치는 인자는 조성, Ms온도 및 냉각속도등을 들 수 있다.⁷⁻⁹⁾ SUJ-2보다 실리콘과 망간이 첨가된 100CrMn6의 템퍼드 마르텐사이트 조직에서 미용해 탄화물이 조대하게 나타났고, 또한 동일강종에서 전경화 열처리 조직보다 침질탄화처리한 중심조직의 미용해 탄화물이 조대하게 나타났다. 구상탄화물은 오스테나이트화 처리중에 용질원자가 오스테나이트 기지내로 확산용입되며 그 용되는 양은 온도가 상승함에 따라 증가하여 미용해 탄화물이 현저하게 감소한다.¹⁰⁻¹²⁾ 동일강종에서 침질탄화처리는 전경화처리에 비해 오스테나이트화 온도가 낮고 80℃ 오일에 퀴칭시켰기 때문에 미용해 탄화물이 조대하게 나타났다고 판단된다.

3. 2 침질탄화 표면분석

사진 3은 침질탄화 표면층을 나이탈 4%로 부식하여 관찰한 조직을 나타낸 것이며 표면의 질탄화물 형성과 탄소 및 질소의 확산으로 인한 미세조직 변화가 실리콘과 망간에 거의 관계 없이 0.25mm까지 발생되었다. 화합물층 아래에 확산층이 있으나 기지 조직과 구별할 수 없는데 이는 퀴칭에 의해서 질화물의 형성이 억제되었기 때문에 고온 템퍼링 처리하면 과포화 고용된 질소는 Fe₄N 질화물을 형성하여 특정한 결정면에 따라 석출될 수 있다.¹³⁾

침질탄화 표면층을 빅커스 미소 경도기(Vickers microhardness)를 사용하여 화합물층은 25g의 하중으로, 그리고 확산층은 200g의 하중으로 측정된 결과 표면층으로부터 경도구배는 거의 나타나지 않으며, SUJ-2는 780~810 HV이고 실리콘과 망간이 첨가된 100CrMn6는 810~850 HV로 약간 상승하였다. 이것은 경화능을 상승시키는 망간 첨가원소의 영향으로 상승되었다고 판단된다.

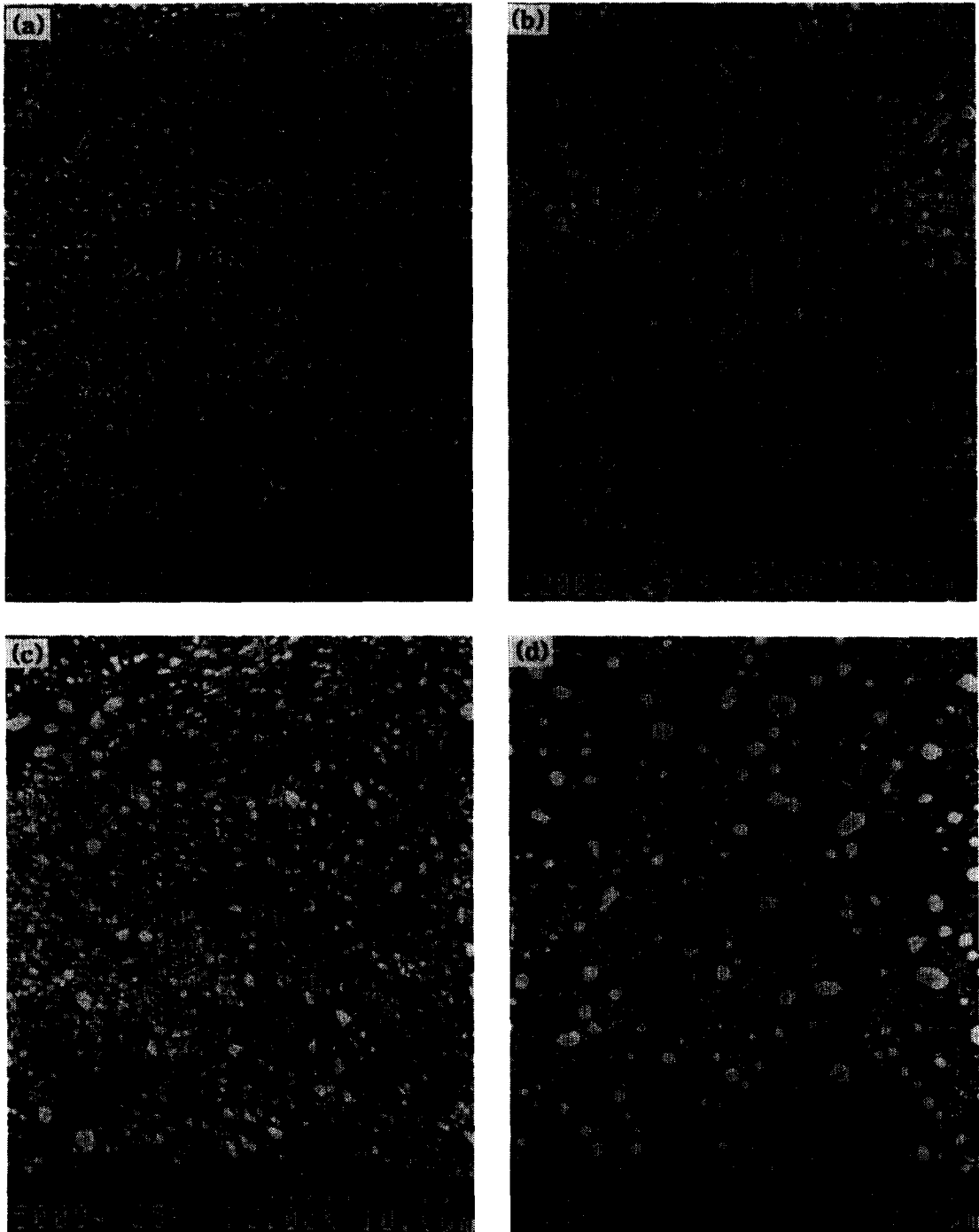


Photo. 2 Microstructure showing tempered martensite and nitrocarburizing
a) Tempered martensite of SUJ-2 c) Nitrocarburizing of 100 CrMn6
b) Tempered martensite of 100 CrMn6 d) Nitrocarburizing of 100 CrMn6

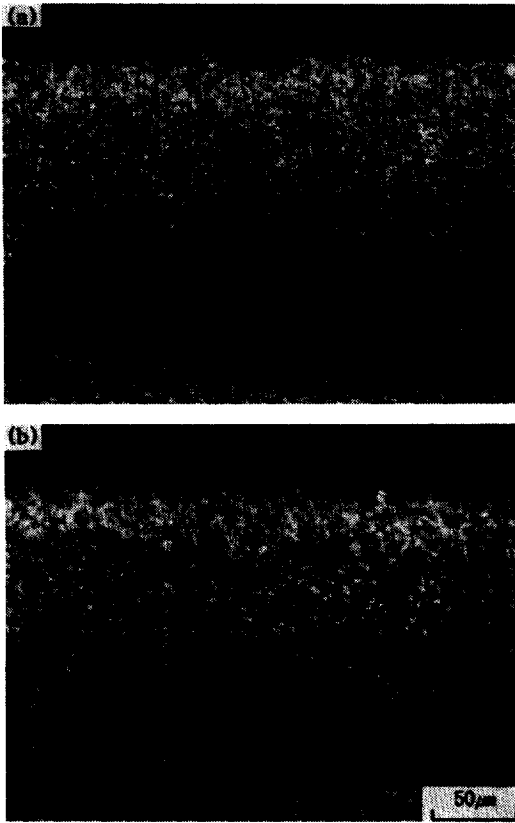


Photo. 3 Microstructure showing surface of nitrocarburizing
(a) SUJ-2 (b) 100 CrMn6

그림 1은 침질탄화 표면으로부터 깊이별로 잔류오스테나이트를 측정된 결과이다. 표면은 Fe_2O_3 산화물이 생성되어 약간의 탈탄 또는 탈질효과로 인하여 잔류오스테나이트가 감소하였고 Fe_2N 및 Fe_3N 화합물 층에는 오스테나이트 안정화원소인 질소에 의해서 잔류오스테나이트는 증가되었으며 깊이에 따라 질소함량은 감소하므로 잔류오스테나이트 함량도 감소되었다. 중심부의 잔류 오스테나이트량은 SUJ-2에서 18%, 100CrMn6에서 23%로 나타났는데 이것은 실리콘과 망간이 첨가됨으로 인하여 오스테나이트를 안정화 시킴으로 약간 상승되었다고 판단된다.

3.3 회전 접촉 피로 특성

그림 2는 열처리 방법에 따른 회전 접촉 피로시험 결과를 나타낸 것이다. SUJ-2강종에서 침질탄화 처리

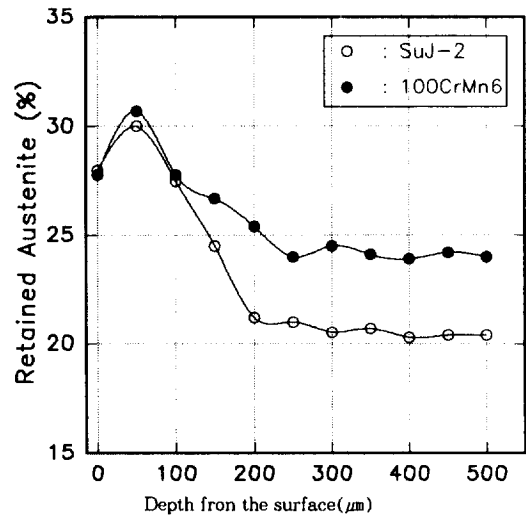


Fig. 1 Measured retained austenite vs. depth below surface.

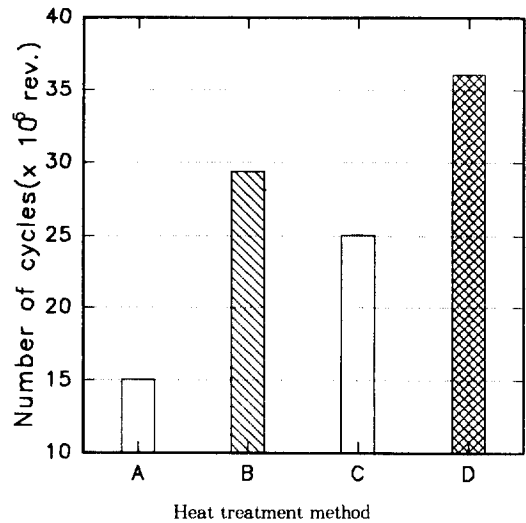


Fig. 2 Rolling contact fatigue life with heat treatment method

- A) Full hardening with SUJ-2
- B) Nitrocarburizing with SUJ-2
- C) Full hardening with 100 CrMn6
- D) Nitrocarburizing with 100 CrMn6

한 회전접촉 피로수명은 일반 전경화 열처리방법보다 약 2배가 향상되었고 실리콘과 망간이 첨가된 100CrMn6에서는 약 1.5배 상승되었다. 그림 2에서 기본 강종인 A 시편보다 망간함량이 증가된 C 시편은 망

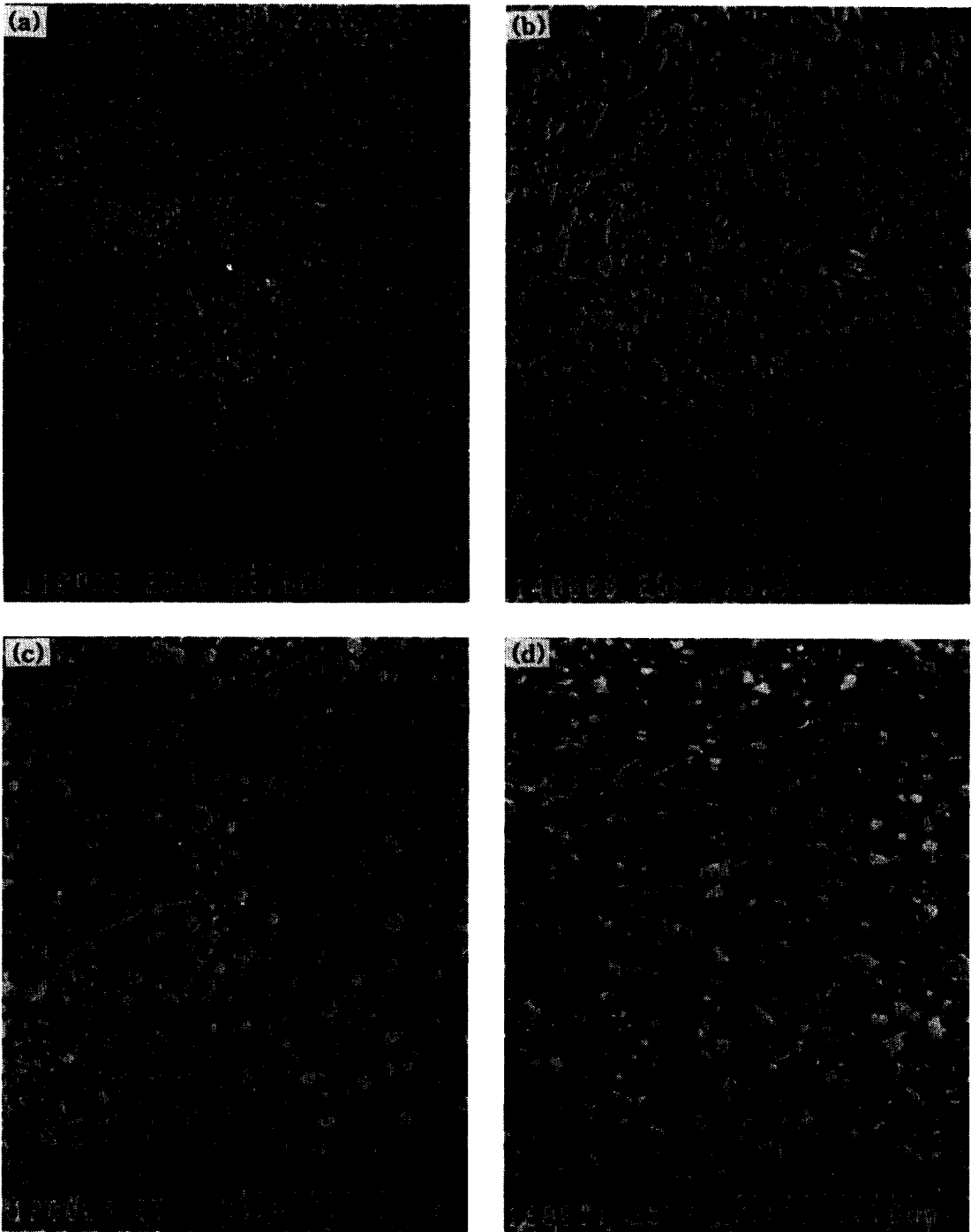


Photo. 4 Microstructure changes vs. crack propagation.

A) Full hardening with SUJ-2
B) Nitrocarburizing with SUJ-2

C) Full hardening with 100 CrMn6
D) Nitrocarburizing with 100 CrMn6

간접가로 인하여 강인성이 증가되기 때문에 크랙의 전파가 둔화될 뿐만 아니라 균일한 잔류탄화물의 분포로 인하여 내마모성이 향상되어 피로 내구수명이 증대되었다고 판단된다.

회전 접촉 피로 수명에 영향을 미치는 궤도면 직하의 조직 변화 및 균열 양상을 분석하기 위하여 궤도 접선 방향으로 절단하여 관찰하였다.

사진 4는 크랙선단 부위의 조직 변화를 나타낸 것이다.

회전 접촉 피로를 받는 궤도면 아래에 접촉 응력에 의해서 과포화 고용된 탄소가 확산이동하여 미세한 구형 잔류 카바이드가 Lenticular Carbide(L. C) 및 판상탄화물로 변화되어 크랙생성과 크랙성장을 촉진시킨다고 하였다.^{14, 15)}

사진 4에서 전반적으로 미세한 잔류탄화물들이 재배열 되어 크랙을 이끌고 있지만 망간이 첨가된 사진 4-C는 망간이 탄화물의 안정화에 기여하여 탄소의 확산이동을 억제시킬 뿐만 아니라 조대한 조정 탄화물이 크랙의 진전을 억제하고 있다. 오스테나이트 열처리시 잔류된 탄화물의 역할은 경도 향상 및 내마모성 향상 효과를 가지나 잔류 탄화물이 조대한 경우 탄화물과 기지의 계면이 응력 집중원으로 작용되어 균열발생이 가능하게 된다고 하였다.¹⁶⁾

본 연구에서는 조대한 잔류탄화물이 내마모성을 향상시키고 크랙 성장을 억제하는 역할을 한다고 생각한다. 질탄화 처리한 사진 4-b, d에서는 조대한 질탄화물들이 분포되어 크랙성장을 억제하고 질탄화물의 내마모 및 내피로 특성으로 인하여 회전 접촉 내구수명이 크게 증대되었다고 판단된다.

그림 3은 회전 접촉피로 시험후 궤도면에 수직으로 표면으로부터 깊이에 따라서 미소경도를 측정된 결과이다. 표면 경도 보다 궤도면 직하 150~200 μ m 영역에서 경도의 증가가 이루어졌으며 회전 접촉 응력 분포에서 최대 Hertzian 응력이 작용하는 깊이와 일치하며¹⁷⁾ 그 이유는 소성변형에 따른 가공경화가 발생되었다고 생각한다.

A 시편보다 Mn이 첨가된 C 시편에서의 경도증가가 크게 발생되었고 전경화 열처리 시편보다 질탄화 처리한 시편에서 경도가 크게 증가하였다. 이것은 잔류 오스테나이트가 접촉응력에 의해서 마르텐사이트로의 응력 유기 변화가 이루어지는데 잔류오스테나이트

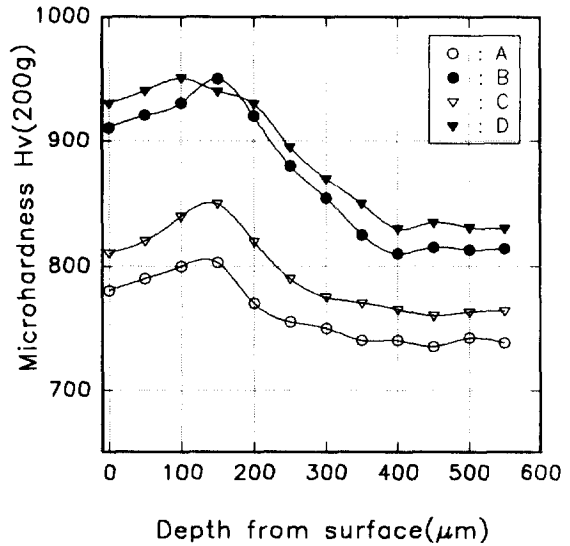


Fig. 3 Microhardness vs. depth below surface after rolling contact fatigue test.

- A) Full hardening with SUJ-2
- B) Nitrocarburizing with SUJ-2
- C) Full hardening with 100 CrMn6
- D) Nitrocarburizing with 100 CrMn6

량이 증가함에 따라서 미소 경도 증가량이 크게 나타나고 있다고 판단된다.

R. H. Richman¹⁸⁾은 응력 유기 변태로 생성된 마르텐사이트는 퀴칭시 생성된 마르텐사이트보다 강인성이 크기 때문에 피로강도를 증가시킨다고 보고하였다.

궤도면 직하 300~500 μ m 영역은 전단응력의 집중으로 인하여 템퍼드 마르텐사이트의 국부적인 응력 유기 변화가 이루어지며 변태 페라이트와 퇴화된 마르텐사이트(decayed martensite)의 혼합조직으로 경도 저하 현상이 발생된다고 하였다.^{19, 20)} 그러나 본 실험에서는 경도 감소 영역은 나타나지 않고 최대경도가 나타난 0.2mm 이상에서는 완만하게 경도가 감소하며 0.5mm 이상에서 거의 일정한 경도를 유지하고 있다.

4. 결 론

고탄소크롬 베어링강 SUJ-2와 Mn이 첨가된 100-CrMn6를 오스테나이트 열처리 및 침질탄화처리하여 회전접촉 피로시험을 한후 피로특성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 침질탄화 처리는 일반 경화처리보다 내구수명이 SUJ-2에서는 2배, 망간이 첨가된 100CrMn6에서는 1.5배 향상되었다.

2) 회전 접촉 응력에 의해서 궤도면 직하에 가공경화 현상이 발생되며 경도가 증가한다. 침질탄화처리한 시편에서 가공경화가 크다.

3) 망간이 첨가된 100CrMn6의 잔류탄화물들이 안정화되어 접촉응력에 의한 조직변화가 적게 이루어진다.

참 고 문 헌

1. J. Akesson and T. lund : SKF steel Tech. Report (1986)
2. S Enekes : JISI, 2(1972) 83
3. T. Yamamoto and Y. Wakikato : Testo-to-Hagane, 57(1971) 1514
4. J. M. Beswick : Metall. Trans. A, 18(1987) 1897
5. Y. Fuhta and T. Hoshino : Koyo technical report, Engineering journal No. 126(1984) 28
6. K. Monma et al. : J. Jap. Inst. Metals., vol. 32 (1968) 1198
7. S. K. Das et al. : Trans. ASM62, (1969) 659
8. Gareth Thomas : Met. Trans. 2, Sep (1971) 2373
9. G. R. Speich et al. : J. Iron Steel Inst., 206 (1970) 385
10. 中野平 : 鐵と鋼, 62, (1976) 1239
11. 彼多野知好 : 日本鐵鋼學會誌 44, (1980) 764
12. Coran Molinder : Acta Met. 4, Nov (1956) 565
13. 李相允·T. Bell : 熱處理工學會誌 1卷 1號 (1988) 8
14. J. Buchwald and R. W. Heckel : Trans. ASM, 61 (1968) 750
15. 坪田 --- : 鐵と鋼, 68, (1982) 8, p153.
16. 南元琮·崔海昌 : 大韓金屬學會誌 vol. 31, No. 6, (1993) 712
17. J. O. Smith and C. K. Liu : ASME Trans., 6 (1953) 157
18. R. H. Richman and R. W. Landgrat : met. trans. 6A (1975) 955
19. H. Swahn, P. C. Becker and O. Vingsbo : Met. Sic., (1976) 35
20. A. P. Voskamp, R. Osterlund et al. : Met. Tech., (1980) 14