

SCMH2 고속회전축재의 표면처리조건에 따른 VHCF 피로특성에 관한 연구

서 창 민* · 서 창 희** · 서 민 수***,†

*경북대학교 기계공학부

**대구기계부품연구원

***한국에너지기술연구원

VHCF Characteristics of SCMH2 Steel Depending on the Surface Treatment Conditions

C.M. Suh*, C.H. Suh** and M.S. Suh***,†

*School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Daegu 702-701 Korea

**Daegu Mechatronics & Materials Institute, Daegu 704-240 Korea

***Korea Institute of Energy Research, Daejeon, 305-343 Korea

†Corresponding author : mssuh@kier.re.kr

(Received June 23, 2013 ; Revised August 7, 2013 ; Accepted August 26, 2013)

Abstract

SCMH2 steel is widely used in the industrial members of car and tractor. This study focused on material properties and evaluation technology of the SCMH2 steel regarding the surface treatment followed by carburizing and nitriding, by means of impact test, hardness test, and fatigue test including HCF (high cycle fatigue) and VHCF (very high cycle fatigue). Drop weight impact tester (Instron, 9250 Hv) and Cantilever type rotating-bending fatigue tester (YRB200, 3150 rpm) were used to characterize the SCMH2 standard specimen before and after carburizing/nitriding. In order to understand those effects on fatigue characteristics and material properties, the fractured surfaces were carefully observed and analyzed by SEM (scanning electron microscope) and EDS (energy-dispersive X-ray spectroscopy).

Key Words : SCMH2, VHCF(Very High Cycle Fatigue), Impact, Carburizing, Nitriding

1. 서 론

최근 산업 발달로 고속, 고하중하에서 기계부품들이 사용되는 경우가 빈번하다. 이에 따라 금속재료들은 지속적인 반복하중으로 인해 피로균열이 발생하고, 급격한 파괴에 이르는 경우도 발생한다. 따라서 금속재료는 피로강도와 피로수명의 향상 및 그 신뢰성, 무한수명으로서의 요구가 증대되고 있다¹⁻⁹⁾. 특히 고강도 재료의 표면특성을 향상시켜 필요한 기계적인 특성을 얻을 수 있는 표면처리법이 매우 중요시되고 있다^{7,8,13)}.

표면처리법에는 침탄법, 질화법, 침탄질화법등과 같

은 표면경화법과 shot peening, UNSM(Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification) 등의 방법이 있다. 이 방법은 표면조직을 미세화시키고 잔류응력을 발생시켜 피로균열의 발생을 지연시켜 제품의 내구성 향상에 영향을 준다^{4-8,13)}.

또한 SCMH2강재가 자동차와 농기계 등의 회전축에 널리 사용되므로써 이 재료에 관한 파괴인성 평가, S-N 곡선 및 VHCF(Very High Cycle Fatigue) 자료 획득과 평가기술이 요구되고 있다.

본 연구에서는 SCMH2강의 침탄, 질화처리에 의한 표면처리에 따른 인성과 재료특성을 파악하기 위해서 조직 관찰, 경도시험, 충격시험, HCF(High Cycle Fatigue)

과 VHCF의 회전굽힘피로시험, SEM관찰 등을 행하여 충격과 피로특성을 평가하였고 피로균열의 발생 특징을 조사 연구하였다. 또한 파괴된 시험편의 파면분석을 위해 SEM/EDS/광학현미경으로 파단면을 관찰하여 원인을 규명하였고 산업에 응용할 VHCF의 정량적인 자료의 축적을 시도하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편

본 연구에 사용된 시험편의 재료는 SCMH2강재로 화학조성은 Table 1과 같다. 즉 Cr 0.98%, Mn 0.95%, Mo 0.28%를 가진 Cr-Mo강이다. Table 2는 미처리 상태의 시험편의 기계적 성질을 나타내고 있다.

인장시험편은 KS규격의 표준 인장시험편을 사용하여 실험하였으며, 피로시험편은 최소 직경 4mm, 곡률 반경 7mm, 전체 길이 100mm이다. 시험편은 봉의 길이 방향으로 시험편을 가공하였으며, 이는 균열이 축에 직각방향으로 진전하도록 하기 위함이다¹¹⁾. 시험편의 침탄조건은 최고온도 930C, 850C에서 소입, 180C에서 템퍼링하였다. 질화처리조건도 질화깊이 13um과 24um가 되도록 처리하였다. 열처리 후 최소 직경부를 연마지(emery paper)를 이용하여 #100부터 #2000까지 연마한 후, 산화알루미늄(Al_2O_3)으로 버핑하였다.

2.2 조직 및 파단면 관찰

SCMH2강의 미처리재와 표면처리된 시료를 절단하여 마운팅(mounting)한 후 연마지 #2000까지 연마한 후 산화알루미늄으로 버핑하여 경면(mirror surface) 상태로 가공하였다. 이렇게 가공한 시험편을 5% Nital 부식액으로 에칭(etching)하여 깊이방향 조직을 보기 위해서 광학현미경(BX60M, Olympus)으로 촬영하였다. 또 미처리재와 표면처리된 강의 충격파면과 피로균

Table 2 Mechanical properties of SCMH2 steel

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction in area (%)
530	770	26.5	51

Table 1 Chemical composition of SCMH2 steel (wt.%)

Element	C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S	Cu	Ni
Specimen	0.20	0.19	0.95	0.98	0.28	0.0015	0.0018	0.183	0.491
Standard	0.17~0.23	0.15~0.35	0.75~1.0	0.85~1.2	0.25~0.45	0.030↓	0.030↓	0.30↓	0.4~0.8

열의 발생원인 및 진전거동을 규명하기 위하여 파단면은 주사식 전자현미경(SEM: Hitachi, S-4700)과 광학현미경을 사용하였다.

2.3 충격시험

SCMH2강의 파손원인 분석을 위한 기초물성조사를 위하여 Fig. 1a와 같은 KS규격의 충격시험편을 제작하여 Fig. 1b와 같은 낙하식 충격시험기(Instron 9250Hv)로 실험하였다. 이 낙하식 충격방법은 기존의 진자식 Charpy충격시험기와 달리 하중선도의 초기 구간에 진동 발생 없이 비교적 매끄러운 직선으로 나타나는 것이 장점이다. 또한 데이터 취득 및 분석용 소프트웨어에 의하여 충격성능 데이터를 자세하게 수집, 분석할 수 있다. 본 연구에서는 이 시험기를 사용하여 충격시험을 실시하였고, 이 시험은 재료의 연성(ductility) 또는 인성(toughness)의 크기를 판정하는데 매우 유용한 방법으로 널리 사용되고 있다¹⁶⁻¹⁸⁾.

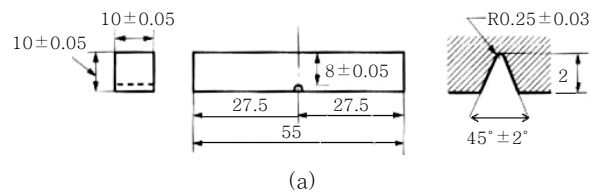


Fig. 1 (a) Geometry of impact test specimen (unit : mm), (b) Drop weight impact tester (Instron 9250Hv) (unit : mm)

2.4 경도시험

경도시험은 각 시험편에 대하여 표면에서 중심으로 0.1mm의 일정한 간격으로 각 깊이에 대해서 상온에서 3번의 경도를 측정하여 평균값을 구하였다. 이때 Micro Vickers hardness tester (Future-tech, FM 700)를 이용하였으며 압입하중 200g, 부하시간은 30초로 하였다.

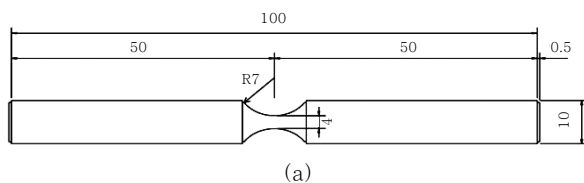
2.5 피로시험

피로시험은 Fig. 2a와 같은 표준시험편을 제작하여 침탄, 질화처리 전후의 피로특성을 연구, 검토하였다. 본 실험에서 사용한 피로시험기는 종래의 단순지지보식 Ohno 피로시험기와는 달리 네 개의 시험편을 동시에 장착할 수 있으며 또한 하중레벨도 각각 다르게 가할 수 있는 Fig. 2b와 같은 Cantilever식 회전굽힘피로 시험기(Yamamoto, YRB200)이다. 이 피로시험은 무부하 상태에서 편심이 생기지 않도록 시험편을 장착한 후, 응력비는 $R=-1$, 시험온도는 실온, 회전수 3150rpm에서 실시하였다.

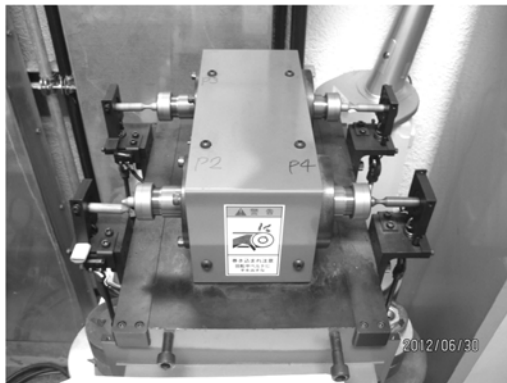
3. 연구결과 및 고찰

3.1 충격시험 결과와 파면특징

Fig. 3은 SCMH2강재로 사용되는 PTO(Power Take Out)축의 파손원인 분석을 위한 기초물성조사를 위하여 Fig. 1a와 같은 KS규격의 충격시험편으로 낙



(a)



(b)

Fig. 2 (a) Geometry of fatigue test specimen(unit : mm), (b) VHCF tester (Yamamoto, YRB200)

하식 충격시험기로 얻은 자료를 정리한 것이다.

Fig. 3a는 SCMH2강재의 미처리재 4개(A1~A4)의 충격에너지를 비교하여 나타낸 것으로 평균충격에너지는 약 114.8J이다. Fig. 3b는 침탄되어 PTO축으로 사용된 소재에서 충격시험편(U1~U5)으로 채취하여 측정된 충격치를 시간에 따라 나타낸 것으로 평균충격에너지는 약 42.7J이다. 이 값을 미처리재의 평균충격에너지(114.8J)와 비교하면 약 2.7배만큼 감소하였으며 에너지 면적이 충격시간에 따라 감소함을 알 수 있다.

Fig. 3c는 미처리재로 침탄된 충격시험편(C1~C3)의 에너지의 변화를 나타낸 것으로 평균충격에너지는 약 7.5J이다. 또 PTO축으로 사용된 것의 재침탄(CU)재는 14.5J로 약 2배의 차가 생겼고, Fig. 3b의 결과보다 에너지 면적이 매우 크게 감소하는 곡선을 나타내어서 취성파괴를 유발할 가능성이 큼을 알 수 있다. 이러한 특성은 타 보고서와 유사한 결과이다^{17,18)}.

또 Fig. 3d는 미처리재로 질화된 충격시험편(N1-1~N1-4)의 평균충격에너지(19.5J)와 PTO축으로 사용한 것을 질화처리한 충격시험편(N1-U)의 평균충격치(90J)와 비교하여 나타낸 것이다. 이 그림에서 두 재료 사이에는 약 4.6배의 차가 있다.

이와같이 PTO축으로 사용된 재료의 재침탄재와 재질화재의 충격에너지가 미처리재의 침탄, 질화재보다 큰 이유는 재열처리에 따른 결정조직의 성장에 의한 연성증가에 의한 것 같다^{19,20)}.

Fig. 3e-3g는 낙하식 충격시험편의 파면예를 제시하였다. Fig. 3e는 미처리재의 충격파면의 특징으로 shear lip이 크게 형성되었으며, 충격에 의한 연성파면을 나타내었다. 즉 충격부는 16.5%의 변형이 생겼고, 시험편 4개중 3개는 그림과 같이 V형으로 분리되지 않은 상태로 파단되었는데, 이는 SCMH2강재가 충분한 인성을 갖고 있음을 나타낸 것이다. 그러나 PTO축으로 제작되어 사용된 재료(U)의 충격파면의 특징은 작은 shear lip이 형성되었지만 충격에 의한 변형은 작은 편이고, 충격부는 약 4%의 변형이 생겼다.

Fig. 3f는 미처리재로 충격시험편으로 가공, 침탄후의 충격파면의 특징으로 매우 작은 shear lip이 형성되었고 충격에 의하여 주로 취성파면을 나타내었다. Fig. 3g는 미처리재로 충격시험편으로 가공, 질화처리 후의 충격파면의 특징으로 shear lip이 거의 형성되지 않았으며, 충격에 의한 취성파면을 나타내었다. 그러나 PTO축으로 사용한 재료를 충격시험편으로 가공한 시료(N1-U)의 경우, 충격부는 15%의 변형이 생겨 침탄의 경우보다 높은 충격에너지와 변형이 형성되었다.

그러나 미처리재로 질화후의 시료의 충격파면의 특징

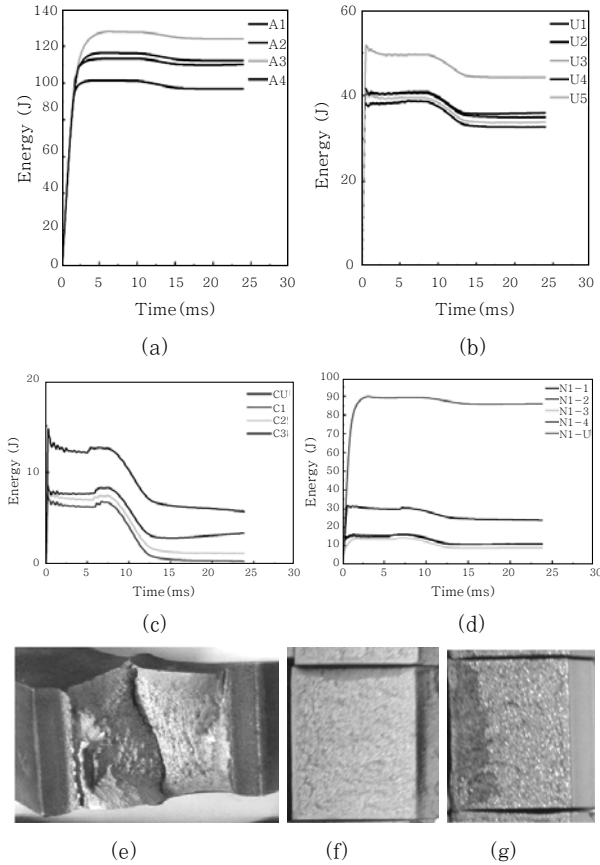


Fig. 3 (a) Variation of impact energy of untreated SCMH2 steel, (b) Variation of impact energy of SCMH2 steel used for PTO axis, (c) Variation of impact energy of carburized SCMH2 steel, (d) Variation of impact energy of nitrided SCMH2 steel, (e) Impacted fracture surface of untreated SCMH2 steel, (f) Impacted fracture surface after carburizing, (g) Impacted fracture surface after nitriding

도 shear lip이 형성되지 않았으며, 충격에 의한 취성 파면을 나타내었다. 이러한 shear lip의 형성비율과 변형의 발생 비율의 대소는 Roll Shell강의 파괴특징과 매우 유사하였다^{17,18)}.

3.2 경도치의 깊이에 따른 변화

Fig. 4는 4가지 시험편(미처리재(B4), 침탄(C4, C5), 질화재(N1-2, N1-3, N1-6, N2-7, N2-9) 2종류)의 8개의 시료표면에서 깊이방향으로의 경도변화를 상온에서 측정된 결과를 나타낸 것이다. 미처리재의 경도는 179 - 224Hv(평균경도치 200.8Hv) 정도이다.

침탄재의 표면경도는 미처리재의 평균경도는 200.8Hv에 비하여 3.7배 높은 756Hv의 경도치를 나타내었다. 질화깊이(13um)재는 3.2배 높은 638.3Hv의 경도치를 나타내었고, 질화깊이(24um)재는 2.9배 높은 584.5Hv

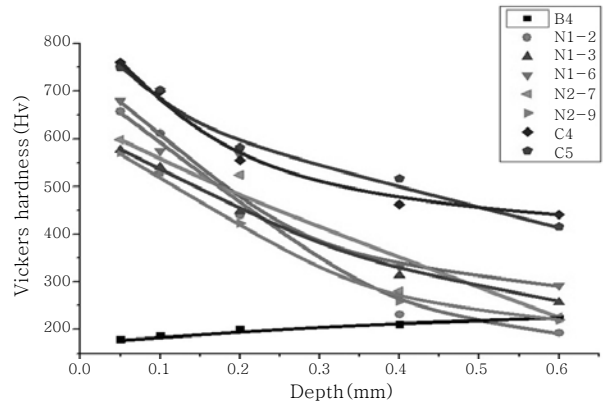


Fig. 4 Changes in hardness values of various SCMH2 specimens from surface to depth direction

의 경도치를 각각 나타내었다. 이러한 표면경도는 표면에서 내부로 점차적으로 경도치가 감소하여 침탄재를 제외하고 깊이 0.6mm에서 미처리재의 경도치가 비슷한 경향을 나타내었다. 이와같이 표면처리재는 표면보다 중심부의 경도는 각 시료에 따라 감소하는 경향을 나타내었고, 이러한 경도감소 경향은 다른 연구보고와 유사하였다¹³⁾.

3.3 조직관찰 결과

Fig. 5는 미처리재, 침탄, 질화재의 조직사진을 정리하였다. Fig. 5a는 미처리(B4)재의 단면 조직사진으로 페라이트 및 펄라이트를 관찰 가능하다. Fig. 5b는 침탄(C4)재의 조직사진(x200)으로 마르텐사이트 조직을 나타내었다. Fig. 5c와 Fig. 5d는 각각 질화처리(N1-

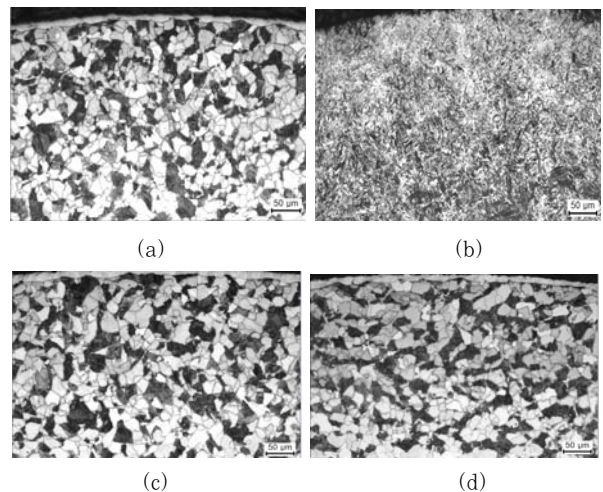


Fig. 5 (a) Cross-sectional microstructure of untreated specimen, (b) Cross-sectional microstructure of carburized specimen, (c) Cross-sectional microstructure of nitrided specimen(N1), (d) Cross-sectional microstructure of nitrided specimen(N2)

3)와 질화처리(N2-9)재의 단면 조직사진(x200)으로 표면근처에 미처리재와 비슷한 페라이트 및 펄라이트를 가졌고 미처리재보다 약간 미세한 경향을 나타내었다.

3.4 피로시험결과와 파면특징

Fig. 6a는 미처리재를 기계가공한 상태와 경면가공상태에서 피로시험한 결과인 S-N곡선이며, 약 400MPa의 피로한도를 얻었다. 그림상의 화살표는 각 수명에서 파단되지 않았음을 나타내었다. Fig. 6b는 침탄상태의 피로시험결과인 S-N곡선이며, 피로한도는 약 950MPa이다. Fig. 6c는 질화깊이 약 13um재의 경우의 피로시험결과인 S-N곡선으로 피로한도는 약 600MPa이다. Fig. 6d는 본 연구에서 실시된 4가지 조건의 전체 피로시험결과의 S-N곡선이다.

이 S-N곡선에서 미처리재에 비교하여 침탄재가 가장 큰 피로한도를 나타내었고 약 138% 가량 상승하였다. 그 다음 질화깊이 24um재가 피로한도 약 680MPa으로 미처리재에 비교하여 약 70% 높았고, 질화깊이

13um재는 미처리재에 비교하여 약 50% 높았다.

피로균열은 시험편 표면에서 작은 표면균열이 발생하여 성장, 합체 파단하는 경향을 주로 나타내었고, 이는 탄소강의 결과와 유사하였다^{11,12)}. 또 본 연구에서는 10⁹ 사이클까지 파단되지 않는 경우는 피로시험을 종료하였다.

Fig. 7a는 굽힘응력 1001MPa, N_f=8.3x10⁵에서 파단된 침탄재(C6)의 파면을 SEM관찰한 예로 붉은 원으로 표시된 fish eye 균열이 침탄된 내부에서 발생, 성장되어 파단되었다.

Fig. 7b는 굽힘응력 700MPa, N_f=3.96x10⁶에서 파단된 질화재(N1-7)의 파면을 SEM관찰한 예로 드물게 fish-eye 균열이 발생, 성장되어 파단되었다. 보통 베어링과 고강도강에서는 fish-eye 균열은 개재물(inclusion)에서 발생하는 것이 널리 보고¹⁻⁴⁾되고 있지만, 본 연구에서는 Ti재¹³⁾ 및 Waspaloy재¹⁵⁾처럼 facet에서 fish-eye 균열이 발생, 성장한 경우이었다.

이상의 연구결과 침탄과 질화에 의한 표면처리는 표

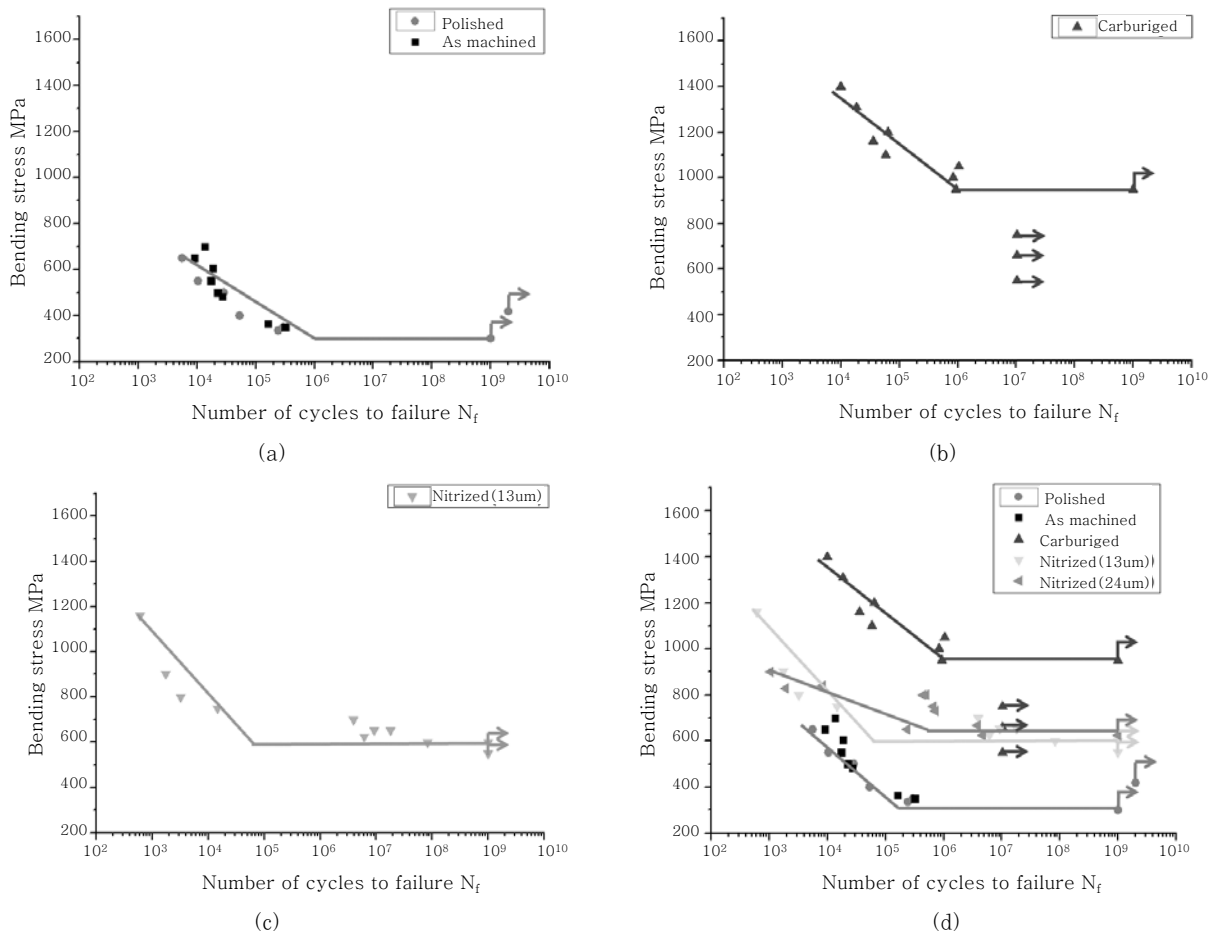


Fig. 6 (a) S-N curve of untreated SCM2 specimen, (b) S-N curve of carburized SCM2 specimen, (c) S-N curve of nitrided SCM2 specimen, (d) S-N curves of surface treated SCM2 specimen

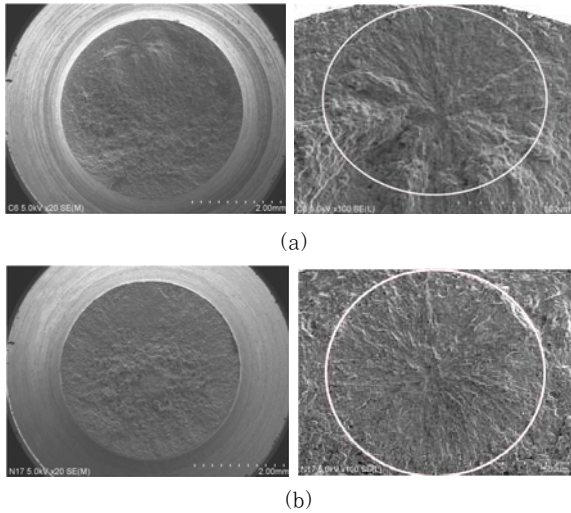


Fig. 7 (a) Fractured surface of carburized SCM435 specimen including a fish eye crack, (b) Fractured surface of nitrided SCM435 specimen including a fish eye crack

면경도와 피로한도는 표면처리에 의하여 미처리재 보다 크게 증가하였지만, 재료의 인성을 나타내는 충격치는 15.3배로 크게 감소하는 경향을 나타내었다. 따라서 침탄과 질화에 의한 처리재에 표면피로균열이 생기면 취성파괴 될 가능성이 매우 크게 됨을 알 수 있었고 다른 결과와도 유사하였다¹⁶⁻¹⁸⁾.

4. 결 론

1) SCM435강재로 침탄된 PTO(Power Take Out) 축의 충격치는 약 42.7J로 미처리재의 충격치 114.8J와 비교하면 약 2.7배 감소하였다. 미처리재로 침탄된 경우 약 7.5J이며, PTO축으로 사용된 재료의 재침탄된 경우 14.5J로 약 2배의 차가 있었다. 미처리재로 질화된 경우 약 19.5J이며, PTO축으로 사용된 재료의 재질화된 경우 약 90J로 약 4.6배의 차가 있었다. 즉 침탄과 질화에 의한 처리재의 충격치는 미처리재에 비교해서 크게 감소하므로 만일 표면피로균열이 생기면 취성파괴 될 가능성이 매우 높다.

2) 미처리재의 표면경도 200.8HV에 비하여 침탄재는 3.7배, 질화깊이 13um재는 3.2배, 질화깊이 24um재는 2.9배로 표면처리재의 표면경도는 미처리재보다 크게 상승하였다.

3) 10^9 사이클 피로한도는 침탄재 > 질화24um재 > 질화13um재 > 미처리재 순으로 상승하였고, 미처리재의 400MPa에 비교하여 침탄재는 약 138%, 질화 24um재는 약 70%, 질화 13um재는 약 50%씩 각각 상승하였다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2012R1A1B6001483).

Reference

1. Sakai, T., Okada, K., Furuichi, M., Nishikawa, I. and Sugeta, A. : Statistical fatigue properties of SCM435 steel in ultra long-life regime based on JSMS database on fatigue strength of metallic materials. *Inter. Jour. of Fatigue* **28-11** (2006) 1486~ 1492
2. Shiozawa, K., Morii, Y., Nishino, S., and Lu, L. : Subsurface crack initiation and propagation mechanism in high strength steel in a very high cycle fatigue regime. *Inter. Jour. of Fatigue* **28-11** (2006) 1521~1532
3. Sakai, T., Sato, Y., Nagano, Y., Takeda, M. and Oguma, N. : Effect of stress ratio on long life fatigue behavior of high carbon chromium bearing steel under axial loading. *Inter. Jour. of Fatigue* **28-11** (2006) 1547~1554
4. Marco Boniardi, Fabrizio D'Errico, Chiara Tagliabue. : Influence of carburizing and nitriding on failure of gears -A case study, *Engineering failure Analysis* **13** (2006) 312~33
5. S.H. Song, S.H. Lee : A study on stress analysis and fatigue behaviors of carbonitrided Cr-Mo(SCM415) steel, *J. of the Korean Soc. of Precision Eng.* **15-8** (1998) 135~144 (in Korean)
6. Zettl, B., Mayer, H., Ede, C., Stanzl-Tschegg, S. :Very high cycle fatigue of normalized carbon steels. *Inter. Jour. of Fatigue* **28-11** (2006) 1583~1589
7. Suh, C.M., Kim, J.H. : Fatigue characteristics of bearing steel in very high cycle fatigue, *Journal of Mechanical Science and Technology* **23** (2009) 420~425
8. Suh, C.M., Song, G.H., Park, H.D. and Pyoun, Y.S. : A Study on the Mechanical Characteristic of Ultrasonic Cold Forged SKD61. *Inter. Journal of Modern Physics B* 20(25-27) (2006) 4541~4546.
9. Barsom, J.M. and Rolfe, S.T. : *Fracture and Fatigue Control in Structure* (1999), Prentice-Hall Inc, 163~192
10. Kwak, B.M. and Gil, Y.J. : An Indirect Experimental Method for the Determination of Mechanical Properties of Ion-nitrided Layer and Residual Stress Distribution, *Trans. of the Korean Society of Mechanical Engineers(A)* **9(2)**, (1985) 240~249 (in Korean)
11. Suh, C.M. and Kitagawa, H. : Fatigue Microcracks in a Low Carbon Steel, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* **8-2** (1985) 193-203
12. Suh, C.M. and Kitagawa, H. : Crack Growth Behaviour of Fatigue Microcracks in Low Carbon Steels, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* 9-6 (1987) 409~424

13. Suh, M.S., Pyoun, Y.S., Suh, C.M. :Variation of fatigue characteristics by UNSM on Ti-6Al-4V- Comparison of rotating fatigue test and axial load tension-comparison fatigue test- Trans. of the Korean Society of Mechanical Engineers(A), **36-4** (2012) 443~449 (in Korean)
14. C.M. Suh, M.S. Suh, N.S. Hwang: Growth behaviors of small surface fatigue crack in AISI 304 steel, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. 35, **1** (2011) 22~ 29
15. C.M. Suh, M.S. Suh, S.K. Kim: Fracture Mechanics of Surface Fatigue Crack Growth by Ductile Striation Space Measurement in Notched Waspaloy, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. 35, **1** (2011) 30~36
16. Chang-Min Suh and Min-Soo Suh : Variations of Impact Value and Hardness for Roll Shell Steel and S25C under Various Tempering, International Journal of Modern Physics B, 25, **31** (2011) 4245~ 4248
17. Chang-Min Suh, Min-Soo Suh, Hae-Yong Cho : Variation of Impact Values by Heat Treatment Temperature to Prevent Brittle Fracture of Roll Shell Steel, J. of Ocean Engineering and Technology, **25-5** (2011) 33~39 (in Korean)
18. Chang-Min Suh, Min-Soo Suh and Sang-Yeob Oh : Variation of Impact Values by Heat Treatment Temperature to Prevent Brittle Fracture of Roll Shell Steel (II) J. of Ocean Engineering and Technology, **25-5** (2011) 40~46 (in Korean)
19. Lawrence H. Van Vlack, Elements of Materials Science & Engineering 6th ed. (1989) Addison-Wesley Pub. Co. Inc, 292~301
20. C.S. Kang, C.M. Suh : The effect of carburization on the fatigue of low carbon steel, J. of the Society of Naval Architects of Korea, **10-2** (1973) 9~18 (in Korean)