

고주파 열처리 강에 대한 피로강도에 미치는 영향

고준빈*, 김우강⁺, 원종호⁺⁺

(논문접수일 2005. 8. 22, 심사완료일 2005. 10. 31)

The effect on Fatigue Strength of Induction Hardened Carbon Steel

Jun Bin Ko*, Woo Kang Kim⁺, Jong Ho Won⁺⁺

Abstract

Hardening Constant Velocity joint increases hardness near the surface and the surface improves fatigue life. Although case depth and chemical composition are same, the prior structure of induction hardened Constant Velocity joint affects the fatigue strength and life during hardening. Therefore torsional fatigue tests of specimens from vaere conducted on induction hardened automotive Constant Velocity joint with various case depths and lrious prior structures, which are obtained by normalizing, spheroidized annealing and tempering after quenching, woads applied in order to evaluate the relation between prior structure and fatigue strength.

Key Words : Constant velocity joint(등속 조인트), Induction hardening(고주파 열처리), Case depth(경화 깊이), Fatigue strength(피로 강도), Fatigue life(피로수명)

1. 서론

고주파경화는 금속재료의 열처리방법 중 표면경화법의 하나로서 굽힘 부하를 받거나 토크를 전달하는 부품소재의 피로강도를 향상시키는 유효한 수단으로 널리 이용되고 있다. 고주파경화소재의 피로강도에 관한 연구는 종래부터 많이 수행되어 왔고 주로 굽힘 응력에 대한 피로강도, 미세조직, 경도, 경화깊이, 잔류응력, 노치등과의 관계가 명확히 규명되어있다^(1~4). 한편 실용적으로는 비틀림 부하를 받는

재료에 고주파 경화를 적용하는 것이 많고 부하형식의 차이로부터 굽힘 피로와는 다른 피로거동을 보일 가능성이 있지만 이에 관해서는 많은 연구가 되어 있지 않은 실정이다. 특히 자동차 구동축으로 사용되는 부품의 경우에 효과적인 고주파경화열처리를 통해서 자동차의 중량을 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라 생산원가도 줄일 수 있다^(5~9). 자동차구동축의 강도와 수명을 향상시키는 방법으로 경화 깊이를 적당히 조절하거나 소재의 성분을 조절하는 방법 등이 연구되어 왔으며 실용화되어 있다. 그러나 동일 성분, 동일 경화 깊이

* 한밭대학교 기계설계공학과 (kjb1002@hanbat.ac.kr)

주소: 대전시 유성구 덕명동 산16-1

+ 충남대학교 대학원 기계공학과

++ 충남대학교 기계공학과

및 동일한 표면경도로 고주파 열처리된 자동차용 구동축에서 열처리전 소재의 미세조직의 차이에 따라 강도가 달라지며, 특히 피로수명에 차이가 발생하는 일이 실제 생산 현장에서 자주 발견되고 있다. 이와 같은 결과는 자동차의 성능을 저하시키거나 생산원가를 높이는 원인을 제공하므로 해결하지 않으면 아니 된다^(10~14).

따라서 본 연구는 초기조직을 여러 가지로 변화시킨 후 가장 좋은 피로수명을 나타내는 초기조직은 펄라이트조직을 얻었고, 경화층 깊이가 중간 토오크에서 피로수명이 가장 좋은 조건을 얻었고, 실제 사용하는 자동차 구동축을 고주파 경화처리 전에 소재를 열처리하여 경화 깊이로 고주파경화 처리를 한 후, 비틀림 피로강도와와의 관계를 검토하고 동일한 강도와 경화 층 깊이를 갖는 구동축의 열처리비용을 경제적인 면에서 상대적으로 비교 검토하였다.

2. 실험방법

2.1 실험재료

실험에 사용된 소재는 현재 자동차의 구동축으로 사용되고 있는 등속조인트의 화학성분이고, Table 1에 화학조성을 나타내었다.

2.2 시편제작

시편은 실제 사용하는 등속 조인트를 치수대로 기계가공한 후 고주파 표면경화를 했다.

가공된 시편의 형상은 Fig. 1와 같고, 고주파 표면경화 처리 후 표면경도는 HRc 58이상이며 경화층 깊이는 HRc 62되는 지점까지의 깊이로 2.5mm, 4.0mm, 5.5mm 7.0mm

Table 1 Chemical composition of specimen (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0.53	0.23	0.1	0.008	0.025	0.05	0.21	0.02

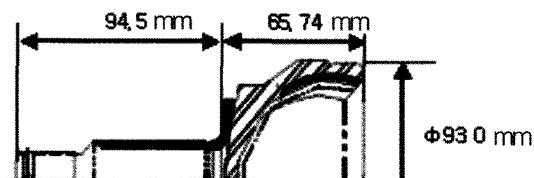


Fig. 1 AXLE C/V JOINT

가 되도록 했다.

미리 몇 개의 시험편으로 예비실험을 하여 소재의 조직별로 고주파표면 경화 조건을 정하였다. 고주파경화장치는 출력주파수가 8.5Hz의 사이 진공 방식이며, 고주파 가열코일의 이동속도를 변화시키고(1.6mm/sec ~ 8.3mm/sec) 냉각수의 온도는 10~40°C이고 소입수 온도는 20~40°C를 유지하고 투입전력과 가열지속시간을 변화시켜 경화 깊이를 조절하였다. 냉각재로는 수용성 냉각재(UCON-A)를 6% 희석한 물을 사용했다. 각 시편을 고주파경화 후에 175°C로 승온후 1.5시간동안 템퍼링을 시행했다^(12,13).

경화층 깊이를 따라 미세조직에 따른 소재별 고주파 경화 조건을 Table 2에 비교해 보았다.

2.3 실험방법

2.3.1 비틀림 피로시험

실제 사용하는 자동차용 구동축과 동일한 시험편의 스플라인을 피로시험기의 한쪽에 고정된 허브(Hub)의 스플라인에 끼워 고정시킨 후 회전토크를 4Hz의 속도로 정.역방향으로 번갈아가면서 반복시험을 했다. 피로시험기는 비틀림 피로 전용시험기(SUM전자기계, Japan)를 사용했으며, 시험은 경화층 깊이별로 토오크 시험하였다. 사이클 수는 파단 시까지의 반복회수를 기록하고 10⁶회 반복시험까지 파단 되지 않을 경우는 파단 없음으로 표시하고 시험을 중단했다⁽¹⁵⁾.

Table 2 Conditions of induction hardening

Description	Case Depth			
	2.5mm	4.0mm	5.5mm	7.0mm
Time(sec)	4.0	5.0	6.0	7.0
Power(v)	428	528	628	728

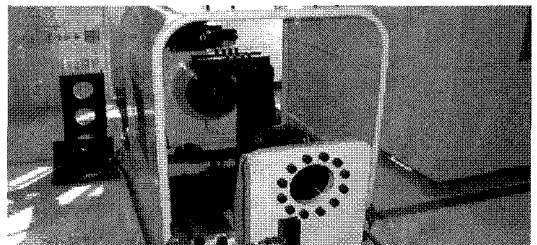


Fig. 2 Fatigue Tester

2.3.2 경화층 깊이 측정, 경도측정, 미세조직 관찰 및 성분분석

경화층 깊이는 하중이 1kgf인 로크웰경도기를 사용하여 0.2mm 간격으로 표면에서부터 경도를 측정하여 경도가 HRc 62되는 지점까지의 깊이로 표시하고 경화층 깊이는 측정기를 사용하여 경화층 깊이를 측정했다.

표면경도는 하중이 150kgf인 로크웰경도기의 C스케일을 사용하여 측정했으며, 심부경도는 10mm강구(Steel ball)를 사용한 브리넬경도기를 사용하여 3톤의 하중을 가하여 측정했다.

미세조직은 질산과 메칠 알콜을 혼합한 Nital 3% 용액으로 폴리싱한 연마면을 부식시킨 후 광학 현미경으로 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 초기조직과 비틀림 피로강도

Fig. 3, 4, 5은 경화층 깊이별 S-N 선도를 초기조직별로 나타낸 것이다. 펄라이트조직과 구상화조직으로부터 경화된 시편은 공업적으로 규제하고 있는 4.0mm, 5.5mm 경화층깊이의 시편과 7.0mm 시편에서는 비슷한 경향을 보이고, 2.5mm 경화층 깊이의 시편은 동일 사이클에 대응하는 파단 토오크가 규제내 경화층 깊이의 시편보다 20%~25% 낮은 값을 보이는 반면 소르바이트조직으로부터 경화된 시편은 시험한 경화층 깊이 전 구역에서 비슷하게 나타났다. 이는 소르바이트조직의 내부 경도가 상대적으로 높아서 비틀림강도에 경화층뿐만 아니라 내부 미경화층의 영향이 작용했다고 보인다. 그러나 낮은 토오크가 걸리는 경우에는 소르바이트조직의 피로수명이 짧게 분포하고, 특히 경화층 깊이가 가장 깊은 7.0mm 경우 전 부하구역에서 피로수명이 가장 짧게 나타났다. 이는 경화되지 않은 미세조직간 피로강도 비교에서

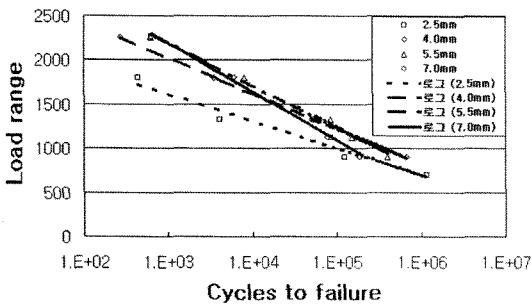


Fig. 3 S-N diagram of each case depth after induction hardening of normalized specimens

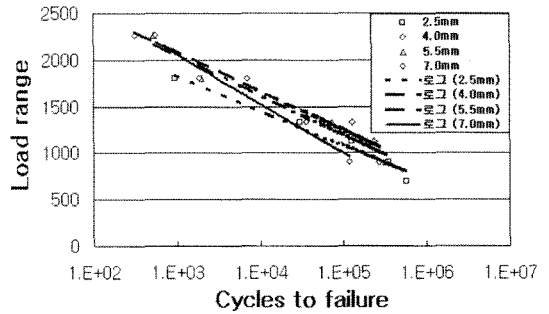


Fig. 4 S-N diagram of each case depth after induction hardening of quenched and tempered specimen

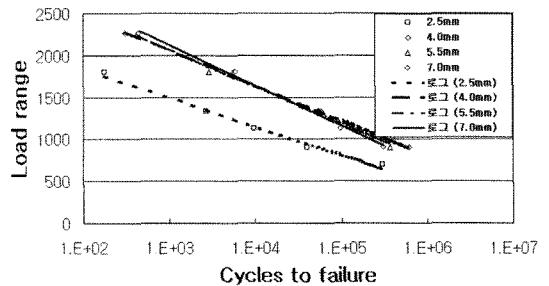


Fig. 5 S-N diagram of each case depth after induction hardening of spheroidizing annealed specimens

층상구조의 조대한 펄라이트공석강이 구상화조직의 스페이사이트 공석강에 비해 피로한도를 훨씬 감소하게 하는 노치의 영향보다 경화층 깊이가 깊어짐에 따른 압축잔류응력의 감소가 크게 영향을 미친 결과로 보인다. 피로강도는 사이클이 증가함에 극격하게 감소하는 현상을 보여주고 있다.

3.2 초기조직과 경화효율

Fig. 6, 7, 8, 9은 초기조직별 S-N 선도를 경화층깊이별로 각각 나타낸 것이다. 동일한 깊이의 경화층이 만들어진 시편에서 초기조직의 영향을 알 수 있다. 경화층깊이가 가장 작은 2.5mm인 경우 초기조직에 따른 영향의 차이가 가장 크게 나타나는데 소르바이트 조직, 펄라이트 조직, 구상화 조직순으로 피로수명이 감소하고 동일한 피로수명에서의 파단토오크는 소르바이트조직에 비해 구상화조직이 15%~30% 낮게 나타났다. 그러나 7.0mm 경화층 깊이에서는 소르바이트조직의 시편이 다른 두 조직의 시편보다 최고 20%까지 낮았다. 경화층깊이가 공업적 규제범위인 4.0mm, 5.5mm인 경우에 펄라이트조직의 시편이 높은 토오크 경우 5.5mm에서,

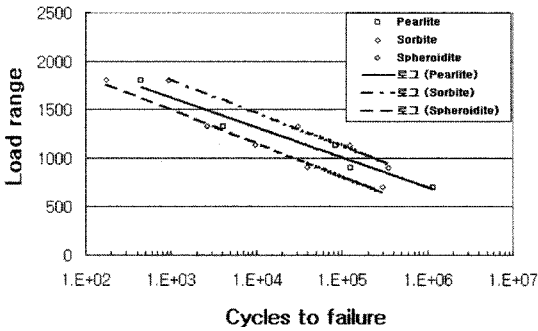


Fig. 6 S-N diagram of each prior structure after induction hardening(case depth 2.5mm)

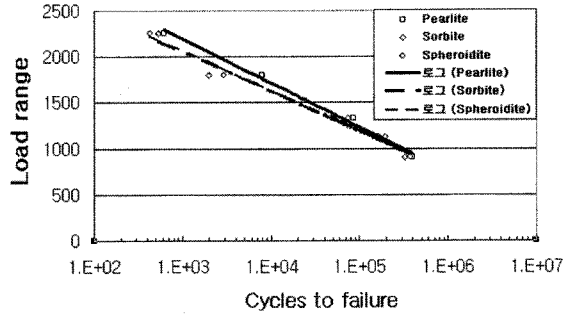


Fig. 8 S-N diagram of each prior structure after induction hardening(case depth 5.5mm)

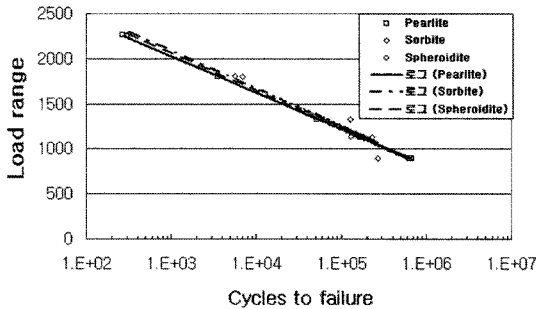


Fig. 7 S-N diagram of each prior structure after induction hardening(case depth 4.0mm)

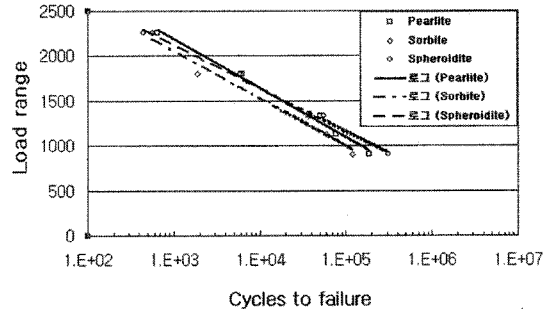


Fig. 9 S-N diagram of each prior structure after induction hardening(case depth 7.0mm)

낮은 토오크 경우 4.0mm에서 피로수명이 가장 좋았다.

Table 3은 동일한 경화층깊이를 얻기 위해 투입된 에너지를 상대적으로 비교하여 나타낸 값이다. 여기서의 수치는 가열시 투입된 전력(kW)과 가열시간을 곱한 값에 비례하는 값으로 고주파경화장비의 에너지 모니터상에 나타나는 값을 취한 것이다.

동일한 에너지에 의해 얻은 펄라이트조직의 시편과 구상화조직의 시편의 경화층 면적비는 1.23 : 1 ($349\text{mm}^2 : 283\text{mm}^2$) 이므로 펄라이트조직의 경우가 동일한 에너지를 투입할 때 23%의 더 많은 면적을 경화시킬 수 있음을 알 수 있었다. 2.5mm, 4.0mm, 5.5mm 경화층을 얻는 모든 경우에 펄라이트조직의 경우에 가장 적은 에너지가 사용되었고 구상화조직의 경우가 가장 많은 에너지가 사용되는 것을 Table 3을 통해 알 수 있다. 동일한 경화층을 얻기 위해 구상화조직의 시편은 펄라이트조직의 시편보다 22% ~ 43%의 더 많은 에너지를 사용했다.

Table 3 Evaluations of energy consumption for induction hardening

Case depth	Pearlite	Sorbite	Spheroidite
2.5mm	388	413	476
4.0mm	481	558	689
5.5mm	566	668	758

4. 결론

자동차용 조향장치인 구동축인 등속조인트를 이용하여 초기조직을 여러 가지로 변화시킨 후 고주파 경화 처리된 시편을 가지고 비틀림 피로강도에 미치는 초기조직의 영향을 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 경화층 깊이가 4.0mm, 5.5mm, 7.0mm의 시편에서는 비슷한 경향을 보이고, 2.5mm 경화층 깊이의 시편은 동일사이클에 대응하는 파단토크가 규제내 경화층 깊이의 시편보다 20 ~ 25% 낮은 값을 보이는 반면 소르바이트조직으로부터 경화된 시편은 시험한 경화층 깊이 전 구역에서 비슷하게 나타났다.
- (2) 경화층 깊이가 가장 작은 2.5mm인 경우 초기조직에 따른 영향의 차이가 가장 크게 나타나는데 소르바이트조직, 펄라이트 조직, 구상화인 경우 5.5mm에서 낮은 토크 경우 4.0mm에서 피로수명이 가장 좋았다.
- (3) 동일한 경화층 깊이를 얻는데 소모되는 에너지는 펄라이트조직이 가장 적게 소모됐으며 구상화조직에 비해 20% ~ 40% 절약됐다.
- (4) 자동차 등속조인트는 여러가지 토크에서 경화층 깊이가 공업적 규제범위인 4.0mm와 5.5mm일 때 최대 피로강도를 얻을 수 있고 이 경화층 구역에서 가장 좋은 피로수명을 나타내는 초기조직은 노르말라이징 처리된 펄라이트조직이었다.

참 고 문 헌

- (1) Shepelakovsky, K. Z., 1983, "Induction heat treatment as practical method for achieving high-strength steels," *Ind. Heat.*, Vol. 50, No. 10, pp. 14 ~ 16.
- (2) Adam, Z. and Adam, S., 1980, "Residual stress factors in torsional failure modes of induction-hardened steel axle shafts," *Diss. Abstr. Int.*, Vol. 40, No. 12, pp. 150.
- (3) Braisch, P. K., 1986, "The principle factors influencing the fatigue behaviour of surface induction hardened machinery parts," *Conf. Fatigue of Engineering Materials and Structures*. Vol. II Scheffield, Mechanical Engineering Publications, UK, pp. 459 ~ 465.
- (4) Skalli, N., and Flavenot, J. F., 1984, "Fatigue strength

- estimation incorporating residual stresses," *Conf. Advances in Fracture Research(Fracture 84)*, Vol. 3, Pergamon Press Ltd., UK, pp. 1959 ~ 1966.
- (5) Semiatin, S. L., and Stutz, D. E., 1986, Induction Heat Treatment of Steel, *ASM, Metal Park*, OH, pp. 13 ~ 18.
- (6) Kato, T., Yokouchi, S., and Yoshida, K., 1992, "Development of high strength solid shaft for drive shafts," *NTN Technical Review*, No. 61, pp. 16 ~ 20.
- (7) Lee, D. D., 1992, Material Strength, Mun Oun Dang, pp. 370 ~ 371,
- (8) Kern, R. F., 1991, "Prior structure determines induction results," *Heat Treating*, Vol. 23, No. 12, pp. 20 ~ 24.
- (9) Matsubara, Y., Kumagawa, M., and Watanabe, Y., 1989, "Induction hardening of gears by the dual frequency induction heating," *Netsu Shori(J. Jpn. Soc. Heat Treat)*, Vol. 29, No. 2, pp. 92 ~ 98.
- (10) Furakawa, T., Konuma, S., Suzuki, K., and Wakabayashi, Y., 1988, "Effect of dull notch on fatigue limit of induction surface hardened steel," *J. Soc. Mater. Sci., Japan.*, Vol. 37, No. 413, pp. 178 ~ 184.
- (11) Kloos, K. H., Braisch, P., and Koch, M., 1986, "Residual stresses and fatigue behaviours of surface induction hardened parts," *Conf. Residual Stresses in Science and Technology*, Vol. 2, Garmisch-Partenkirchen, DGM Information gesellschaft mbH, FRG, pp. 767 ~ 776.
- (12) Hill, J. A., 1986, *Induction heat treatment of steel*, Sam Won Industrial Co Ltd., pp. 125 ~ 130.
- (13) Tipper, J. A., 1986, *Engineering Training Halfshafts*, Vol. 1 ~ 3, pp. 6.1 ~ 6.8
- (14) Schmelz, F., 1986, *The heat treating source book*, Sam Won Industrial Co Ltd., pp. 119 ~ 126.
- (15) Lee, D. P., 1990 *Fatigue strength design*, In-Wha University Publishing, pp. 38 ~ 50.