

표면 경화된 탄소강의 비틀림 피로강도에 미치는 조직의 경향

고준빈[#], 김우강*, 원종호**

The Effect of Structure on Torsional Fatigue Strength of Surface Hardened Carbon Steel

Jun Bin Ko[#], Woo Kang Kim*, Jong Ho Won**

ABSTRACT

Induction hardening increases hardness near the surface where it's most needed, and leaves the surface in compression which improves fatigue life. Although case depth and chemical composition are same, the structure of induction hardened shaft affects the fatigue strength and life because of austenization during hardening. Therefore torsional fatigue tests of specimens from various structures, which are obtained by normalizing, spheriodized annealing and tempering after quenching, were conducted on induction hardened automotive drive shafts with various case depths and loads applied in order to evaluate the relation between structure and fatigue strength.

Key words : Induction hardening(고주파 경화), Fatigue life(피로수명), Case depth(경화깊이), Fatigue strength(피로 강도), Chemical composition(화학성분)

1. 서론

고주파경화는 금속재료의 열처리방법 중 표면 경화법의 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^{1,2}, 잔류응력³⁻⁵, 노치⁶ 등과의 관계가 명확히 규명되어 있다. 한편 실용적으로는 비틀림 부하를 받는 재료에 고주파 경화를 적용하는 것이 많고 부하형식의 차이로부터 굽힘피로와는

다른 피로거동을 보일 가능성이 있지만 이에 관해서는 많은 연구가 되어 있지 않은 실정이다. 특히, 자동차 구동축으로 사용되는 부품의 경우에 효과적인 고주파경화 열처리를 통해서 자동차의 중량을 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라 생산원가도 줄일 수 있다.

자동차구동축의 강도와 수명을 향상시키는 방법으로 경화깊이를 적당히 조절하거나 소재의 성분을 조절하는 방법 등이 연구되어 왔으며 실용화되어 있다.⁷⁻⁹ 그러나 동일성분, 동일 경화깊이 및 동일한 표면경도로 고주파 열처리된 자동차용 구동축에서 열처리 전 소재의 미세조직의 차이에 따라

... 접수일: 2004년 6월 10일; 게재승인일: 2004년 10월 7일
교신저자, 한밭대학교 기계설계공학과
Email : kjb1002@hanbat.ac.kr Tel. (042)821-1833
* 충남대학교 기계공학과 대학원
** 충남대학교 기계공학과

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.

따라서, 본 연구는 실제 사용하는 자동차 구동축을 고주파경화처리 전에 소재를 열처리하여 노말라이징 처리된 조직과 경화 및 템퍼링된 소르바이트(미세 퍼얼라이트)조직, 구상화 어닐링된 구상화조직인 세 종류의 소재를 준비한 다음 실제 자동차 구동축과 동일하게 가공하여 여러 가지 경화 깊이로 고주파경화처리를 한 후, 경화전 조직과 비틀림 피로강도와의 관계를 검토하고 동일한 강도와 경화층 깊이를 갖는 구동축의 열처리 가공 비용을 경제적인 면에서 상대적으로 비교 검토하였다.

2. 실험방법

2.1 실험재료

실험에 사용된 소재는 현재 자동차의 구동축으로 사용되고 있는 중탄소강에 속하는 SAE 1050M 이고, Table 1에 화학조성을 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of specimen (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0.51	0.20	0.97	0.01	0.01	0.02	0.32	0.01

소재의 미세조직을 변경하기 위하여 세 종류의 열처리를 다음과 같이 시행하여 각각의 조직을 얻었다.

2.1.1 노말라이징(Normalizing)

노르말라이징 조작용 900℃로 승온하여 1.5시간 유지 후 공냉했으며 처리 후 얻은 미세조직은 펄라이트였다. 소재의 열처리작업 중 표면의 탈탄 및 산화를 방지하기 위하여 흡열형 환원분위기가스인 RX-GAS(23.6% CO, 13.5% H₂, 44.9% N₂)와 프로판가스(98% C₃H₈)를 이용하여 노내 분위기를 0.5% C 상태로 조절하면서 작업했으며, 냉각시는 400℃까지 무산화분위기에서 냉각 후 공냉시켰다.

2.1.2 경화 및 템퍼링 (Quenching and Tempering)

경화 및 템퍼링조작은 835℃로 승온 후 1시간 유지한 뒤 70℃의 기름에 급냉 하고, 600℃에서 1.5시간동안 템퍼링하여 냉각시켰으며 처리 후 얻은 미세조직은 소르바이트(미세펄라이트)였다. 소재의 열처리작업 중 표면의 탈탄 및 산화방지를 위하여 노르말라이징 조작시와 같이 노내 분위기를 조절하면서 처리하였다.

2.1.3 구상화어닐링(Spheroidizing Annealing)

구상화 어닐링조작은 700℃로 승온 후 15분간 예열하고 난 후, 750℃까지 승온하여 15분간 유지하고 700℃까지 서냉(냉각속도 1℃/min)하여 30분간 유지한 조작용 3회 반복한 후에 냉각시켰으며 처리 후 얻은 미세조직은 구상펄라이트(페라이트 + 구상세멘타이트)였다. 소재의 열처리 작업 중 표면의 산화방지를 위하여 노내에 질소가스를 투입하며 처리하였다.

소재의 열처리 후 조직별 경도는 Table 2와 같다.

Table 2 Hardness of specimen (SAE 1050M)

Heat treatment	Normalizing	Quenching, Tempering	Spheroidizing Annealing
Microstructure	Pearlite	Sorbite	Spheroidite
Hardness	HB 240	HB 280	HB 165

2.2 시편제작

시험편은 실제 사용하는 구동축의 치수대로 기계가공한 후 고주파 표면경화를 했다.

가공된 시험편의 형상은 Fig. 1와 같고, Fig.1은 고주파 표면경화처리 후 표면경도는 HRc 60 이상이며 경화층깊이는 HRc 50되는 지점까지의 깊이로 2.5mm, 4.0mm, 5.5mm, 7.0mm가 되도록 했다.

미리 몇 개의 시험편으로 예비실험을 하여 소재의 조직별로 고주파표면 경화 조건을 정하였다. 고주파경화장치는 출력주파수가 8.5Hz의 사이리스터(Thyristor) 발진방식이며, 고주파 가열코일의 이동속도를 변화시키고(11.6mm/sec~18.3mm/sec)투입전력을 변화시켜(120 kW ~ 185kW)경화 깊이를 조절하였다. 냉각재로는 수용성 냉각재(UCON-A)를 8%

회석한 물을 사용했다. 각 시편을 고주파경화 후에 170℃로 승온 후 1.5시간동안 템퍼링을 시행하고 교정기로 열처리시 발생한 휨을 교정했다.

경화층깊이를 5.5mm에 맞출 때 미세조직에 따른 소재별 고주파 경화조건을 Table 3에 비교해 보였다. 여기서 EM Value는 가열시간과 투입전력을 곱한 수치에 비례하는 에너지 모니터링(Energy Monitoring) 값이다.

Table 3 Conditions of induction hardening (Case depth 5.5mm)

Description	Microstructure		
	Pearlite	Sorbite	Spheroidite
Progressive speed	13.3mm/sec	18.3mm/sec	11.6mm/sec
Input power	165kW	165kW	165kW
EM Value	668	566	758

고주파 경화처리시 발생한 표면의 얇은 산화스케일은 시험편에서 직경이 가장 작아 강도시험시 주로 파단점이 되는 홈 부위만 연마지(600, 1000 cw)를 사용하여 제거했다.

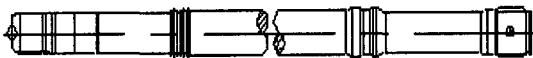


Fig.1 AXLE SHAFT

2.3 비틀림 피로시험

실제 사용하는 자동차용 구동축과 동일한 시험편의 스플라인을 피로시험기의 양측에 고정된 허브(Hub)의 스플라인에 끼워 고정시킨 후 회전토크를 4Hz의 속도로 정.역방향으로 번갈아가면서 반복 시험을 했다. 피로시험기는 비틀림피로 전용시험기(SUM전자기계, Japan)를 사용했으며, 시험은 소재별, 경화층깊이 별로 네 종류의 토오크로 시험하였다. 사이클수는 파단시 까지의 반복회수를 기록하고 106회 반복시험까지 파단되지 않을 경우는 파단없음으로 표시하고 시험을 중단했다.

2.4 경화층깊이 측정, 경도측정, 미세조직 관찰 및 성분분석

경화층깊이는 하중이 1kg인 로크웰경도기를 사용하여 0.2mm 간격으로 표면에서부터 경도를 측정하여 경도가 HRc 50 되는 지점까지의 깊이로 표시하고, 표면경도는 하중이 150kg인 로크웰경도기의 C스케일을 사용하여 측정했으며, 심부경도는 10mm강구(Steel ball)를 사용한 브리넬경도기를 사용하여 3톤의 하중을 가하여 측정했다.

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

소재의 성분은 분광분석기(Vacuum emission spectrometer, Shimazu, Japan)을 이용하여 분석했다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 경화층 깊이와 비틀림 피로강도

고주파표면경화품의 경화층깊이와 피로강도와 의 관계는 많은 연구가 되어 왔으며, 표면경화시 마르텐사이트 변태가 일어나서 체적이 팽창하여 경화층에 압축잔류응력이 생겨 피로강도가 향상된다. 경화층 깊이가 일정깊이까지는 피로강도가 비례하여 증가하며, 그 이상에서는 경화층에 존재하는 압축잔류응력의 영향이 감소하여 피로강도가 감소한다고 보고 되었다.

본 시험결과로부터 경화층 깊이별 파단 Cycle을 Fig. 2, Fig. 3, Fig.4, Fig. 5, Fig.6에 각각 나타내었다. 본 시험결과도 경화층 깊이에 따라 피로수명이 증가하다가 일정 경화층 깊이를 넘어서면 피로수명이 감소함을 그림의 도표를 통해 알 수 있다. 그 경향은 높은 토오크에서 보다 낮은 토오크의 경우가 뚜렷하게 나타났다. 최고토오크인 ±2,260Nm 경우는 완만하지만 피로수명이 오히려 증가했음을 보여주고 있다. 경화층 깊이가 작은 경우는 경화되지 않은 내부의 경도가 가장 높은 소르바이트조직을 가지고 있을 때 어느 토오크가 걸리든 피로수명이 가장 높으며, 경화층 깊이가 가장 깊은 7mm 경우는 낮은 토오크에서는 초기조직이 구상화조직일 때, 높은 토오크에서는 초기조직이 노말라이징된 펄라이트조직인 경우가 가장 긴 피로수명을 나타냈다.

시험된 시험편과 동일한 치수를 사용하는 실제 자동차 구동축에서 요구되는 비틀림 피로강도는

Table 4와 같으며 요구강도를 맞추기 위해 규제된 고주파 표면경화 후 경화층깊이는 4.0mm에서 5.3mm이다. 경화층깊이가 6mm 이상일 경우 낮은 토크인 $\pm 900\text{Nm}$ 에서 250,000 사이클을 만족하기 어려우며 높은 토크인 $\pm 2,260\text{Nm}$ 에서는 경화층깊이가 7mm까지 피로수명이 증가함을 보여주고 있다.

Table 4 Specification of torsional fatigue test (Automotive FWD Shaft)

Test item		Applied load	Required cycle	Remark
High load torsional fatigue	CASE A	$\pm 2,100$ Nm	100 Cycles	1 Hz
	CASE B	$\pm 2,260$ Nm		
Low load torsional fatigue	CASE A	± 900 Nm	250,000 Cycles	4 Hz
	CASE B	$\pm 1,328$ Nm	20,000 Cycles	

CASE A to be applied to FWD Shaft with JAEL(Johnson's Apparent Elastic Limit) load 2,100Nm. CASE B to be applied to FWD Shaft with JAEL(Johnson's Apparent Elastic Limit) load 2,260Nm.

Table 5 Hardness and case depth after induction hardening.

Prior microstructure	Pearlite	Sorbite	Spheroidite
Surface hardness after and temhardening pering	HRc 59,60	HRc 57,58	HRc 58,59
Case depth (at HRc 50)	2.5mm	2.5mm	2.5mm
	4.0mm	4.1mm	4.1mm
	5.5mm	5.5mm	5.5mm
	6.7mm	7.0mm	6.8mm

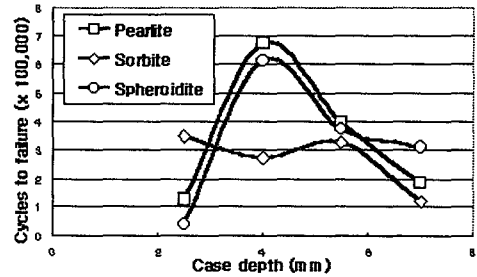


Fig.2 Relation between case depth and cycles to failure (load 900Nm) after induction hardening of structure.

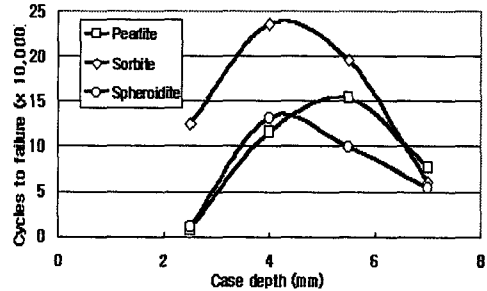


Fig.3 Relation between case depth and cycles to failure (load 1127Nm) after induction hardening of each structure.

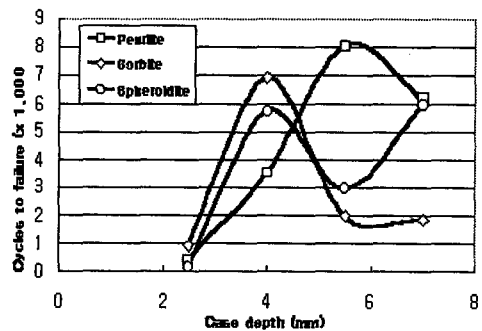


Fig.4 Relation between case depth and cycles to failure (load 1,328Nm) after induction hardening of each structure.

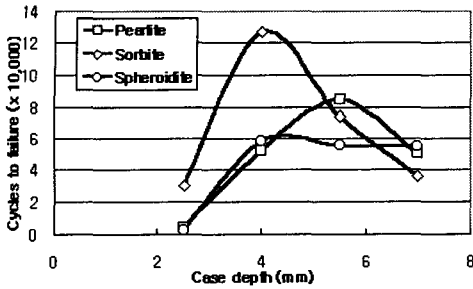


Fig.5 Relation between case depth and cycles to failure (load 1,800Nm) after induction hardening of each structure.

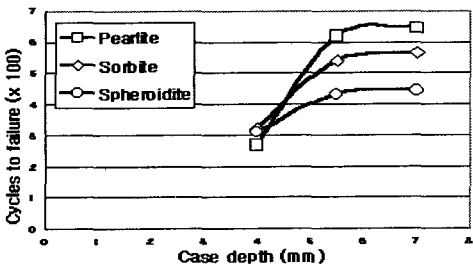


Fig.6 Relation between case depth and cycles to failure (load 2,260Nm) after induction hardening of each structure.

3.2 초기조직과 경도구배

Fig. 7, 8, 9에는 경화층 깊이별로 시험편 중앙부 횡단면에서 반경방향으로의 경도분포를 각각 나타냈다. Fig. 7, 8에서 보는바와 같이 경화층 깊이에 무관하게 초기조직에 따라 경화층 깊이에 따른 경도의 구배가 다르게 나타났다. 초기조직이 구상화 조직일 경우 경도구배가 가장 완만하여 경화층과 미경화층과의 중간 경계구역이 가장 넓게 나타났다. 이것은 초기조직이 구상화조직일 때 불완전경화구역이 가장 많이 나타남을 보여준다. 또한 경화열처리후 경화조직에 남게 되는 압축잔류응력의 분포도 표면으로부터 미경화된 내부로의 변화가 완만하게 변화함을 예측할 수 있다. 따라서 동일한 유효 경화층깊이(Effective case depth)를 얻은 시편 중에서 구상화 조직을 가진 시편은 전체 경화층깊이(Total case depth)가 가장 깊게 되고 결국 깊은 유효경화층 깊이를 얻기가 어렵다. 깊은 유효 경화층 깊이를 얻기 위해서는 많은 에너지가 필요하게

되고 표면경화에 의한 경화층의 압축잔류응력을 얻기 보다는 인장응력을 갖게 되는 전체경화(Through hardening)가 되기 쉽다.

Fig. 9에서는 초기조직이 노말라이징 처리된 펄라이트조직의 시편으로 만들어진 경화층 깊이가 서로 다른 시편의 경도구배를 나타내었다. 초기조직이 동일하므로 경화층 깊이가 서로 다르더라도 동일한 경도구배를 나타내고 있다. 따라서 전체경화층 깊이의 간격도 유사하게 나타난다. Fig. 7, 8에서 경화초기조직이 소르바이트인 경우의 경도구배가 미경화된 균일한 내부경도에 도달하기 전 내부경도보다 약간 낮게 나타나는 것은 경화열처리가 열된 열이 변태온도 이하로 유지되므로 미세펄라이트를 오스테나이트화를 시키지 못하고 결정성장만을 시키므로 경도가 떨어진 것으로 그 영향이 클 경우 파단장도가 급격히 떨어지게 된다.

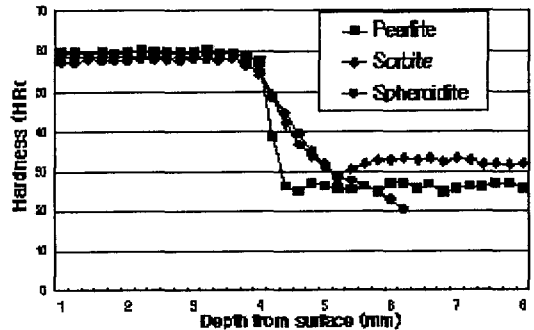


Fig.7 Distribution of hardness in 4.0 mm case depth after induction hardening of each structure

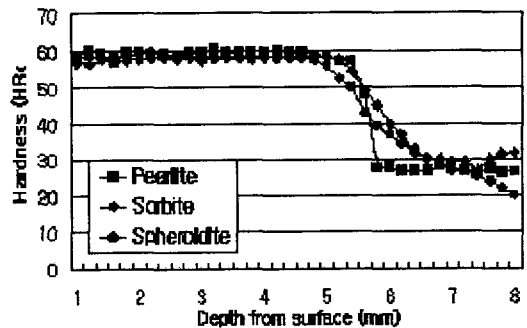


Fig.8 Distribution of hardness in 5.5 mm case depth after induction hardening of each structure

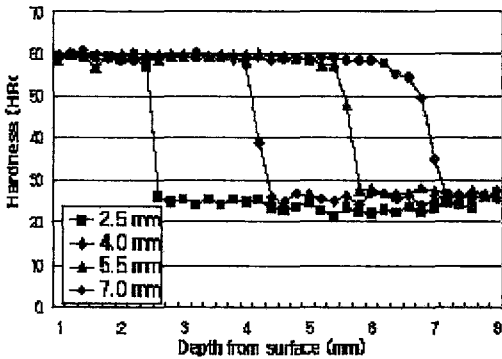


Fig.9 Hardness gradients of each case depth after induction hardening of normalized specimen.

4. 결론

자동차용 구동축으로 사용되는 차축(SAE1050)을 이용하여 초기조직을 여러가지로 변화시킨 후 고주파 경화처리된 시편을 가지고 비틀림 피로강도에 미치는 초기조직의 영향을 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 경화층깊이가 직경의 18% 이하(4mm 이하)로 작은 경우 소르바이트조직의 피로강도가 가장 우수하고, 2.5mm에서는 구상화조직의 피로강도가 가장 작았다.
- (2) 경화층깊이가 직경의 18% 이상으로 크고 낮은 토오크이고 높은사이클이 요구될 경우 소르바이트조직의 피로수명이 가장 작았으며, 경화층깊이가 25%(5.5mm) 이상일 경우 펄라이트조직에 비해 최대 1/5 이하로 피로수명이 떨어졌다.
- (3) 시편에 걸리는 부하에 따라 경화층깊이의 영향이 달랐으며, 낮은 토오크(900~1,800Nm)에서는 경화층깊이에 따라 피로수명이 증가하다 직경의 25%보다 커지면 감소했고, 높은 토오크(2,260Nm)에서는 7.0mm(직경의 32%)까지도 완만하게 증가했다.
- (4) 중간토오크(1,127Nm, 1,328Nm)의 경우 소르바이트조직이 4.0mm 경화층깊이에서 피로수명이 가장 컸으나, 경화층깊이가 깊어짐에 따라 가장 급속히 떨어지고, 낮은 토오크(900Nm)에서는 다른 조직에 비해 1/2 이하로 떨어졌다. 반면 펄라이트조직은 1,328 Nm

이상의 토오크 경우 5.5mm 경화층깊이에서 최대 피로수명을 나타냈다.

- (5) 여러가지 토오크에서 경화층깊이가 공업적 규제범위인 4.0mm와 5.5mm일 때 최대 피로강도를 얻을 수 있고 이 경화층구역에서 가장 좋은 피로수명을 나타내는 초기조직은 펄라이트조직이었다.
- (6) 따라서, 여러가지 토오크를 받는 자동차용 구동축을 고주파 경화처리로 가장 경제적이고, 고강도를 얻을 수 있는 경화열처리된 초기조직은 노르말라이징처리된 펄라이트조직이었다.

참고문헌

1. Fett, G. A., "Induction case depths for torsional applications," *Met. Prog.*, Vol. 127, No. 2, pp. 49-52, 1985.
2. Naito, T., Hanai, K., Ueda, H. and Kikuchi, M. "Torsional fatigue strength of induction hardened steels," *J. Soc. Mater. Sci., Jpn.*, Vol. 32, No. 361, pp. 1132-1136, 1983.
3. Kwak, D.-S., Kim, S. W. and Oh, T. Y., "Effect of Single Overload on the Fatigue Crack Growth Behavior of Laser Welded Sheet Metal," *J. of the Korean Society of Precision Eng.*, Vol. 21, No. 4, pp.161-169, 2004.
4. Yonetani, S., Isoda, S., "Effect of residual stress on fatigue strength of induction hardened specimens of a medium carbon steel," *Tetsu-to-Hagane (J. Iron Steel Inst. Jpn.)*, Vol. 75, No. 8, pp. 1362-1369, 1989.
5. Zayac and Stephen Adam, "Residual stress factors in torsional failure modes of induction-hardened steel axle shafts", *Diss. Abstr. Int.*, vol. 40, no. 12, pp. 150, 1980.
6. Skalli, N. and Flavenot, J. F., "Fatigue strength estimation incorporating residual stresses," *Conf. Advances in Fracture Research (Fracture 84)*, Vol. 3, Pergamon Press Ltd., UK, pp. 1959-1966, 1984.
7. Furakawa, T., Konuma, S., Suzuki, K. and Wakabayashi, Y., "Effect of dull notch on

- fatigue limit of induction surface hardened steel",
J. Soc. Mater. Sci., Jpn., Vol. 37, No.413, pp.
178-184, 1988.
8. Ishijima, M., "Demand of structural steels for automotive parts," *Denki Seiko (Electric Furnace Steel)*, Vol. 61, No. 1, pp. 41-47, 1990.
 9. Shepelakovsky, K. Z., "Induction heat treatment as practical method for achieving high-strength steels," *Ind. Heat.*, Vol. 50, No. 10, pp.14-16, 1983.
 10. Kato, T., Yokouchi, S. and Yoshida, K., "Development of high strength solid shaft for drive shafts," *NTN Technical Review No.61*, pp. 16-20 1992.