

고주파 열처리를 고려한 액슬 축 비틀림 거동 연구

강대현^{*†} · 이범재^{*} · 윤창배^{*} · 김강욱^{*}

* 현대위아주식회사

Study on Torsional Strength of Induction-Hardened Axle Shaft

Dae Hyun Kang^{*†}, Bum Jae Lee^{*}, Chang Bae Yun^{*} and Kang Wuk Kim^{*}

* HYUNDAI WIA CORP.

(Received April 24, 2009 ; Revised February 24, 2010 ; Accepted March 3, 2010)

Key Words : Induction Hardening(고주파 열처리), Residual Stress(잔류응력), Torsional Strength(비틀림 강도)

초록 : 고주파열처리(induction hardening)는 엔진의 구동력을 차동장치에서 바퀴까지 전달해주는 부품인 액슬축(axle shaft)의 비틀림 강도를 증가시키기 위해 적용되는 열처리 방법이다. 고주파 열처리 과정의 급속가열과 급속냉각은 소재에 잔류응력과 물성치를 변화시켜 액슬축의 허용 전달토크를 변화시킨다. 본 연구에서는 고주파 열처리한 액슬축의 잔류응력의 분포와 열처리 깊이에 따른 비틀림 강도 변화를 열물성 및 상변태를 고려한 유한요소 해석을 통해 예측하였으며 이를 시험과 비교하였다.

Abstract: Induction hardening has been used to improve the torsional strength and characteristics of wear for axle shaft that is used to transmit driving torque from the differential to the wheel in automobiles. After the rapid heating and cooling processes of induction hardening are carried out, the shaft has residual stress and material properties change; this affects the allowable transmitted torque. The objective of this study is to predict the distribution of residual stress and estimate the torsional strength of induction-hardened axle shafts with residual stress. In this study, the finite element method is used to study the thermo-mechanical behavior of the material, and the results are compared with experimental results. The results indicate that the torsional strength of the axle shaft depends on the surface hardening depth and distribution of residual stress.

- 기호설명

- c : 비열(J/kg °C)
- E : 탄성계수(GPa)
- h : 대류 열전달 계수(W/m²°C)
- T : 온도(°C)
- Q_r : 반경에 따른 줄(Joule) 발생열(W/m³)
- Q_s : 표면의 줄(Joule) 발생열(W/m³)
- r : 반경(m)
- k : 전도 열전달 계수(W/m °C)
- ρ : 밀도 (kg/m³)
- σ_y : 항복응력(MPa)
- κ : 전기전도도(S/m)
- μ : 투자율(H/m)
- ω : 주파수(rad/s)

1. 서론

표면경화 열처리는 기계, 자동차, 항공기 부품의 고출력화, 내구수명 향상, 경량화 요구의 증대로 강도, 마모 및 파괴 특성을 향상시키기 위한 목적으로 이용되고 있다. 일반 열처리에 비해 고주파 열처리는 요구하는 재료의 표면층만을 급속가열, 냉각에 의해 경화하기 때문에 강도, 표면 경도, 내마모성, 피로강도, 형상정밀도 측면에서 우수한 특성을 보인다.⁽¹⁾ 이 같은 급속가열과 냉각에 의해 재료의 금속 조직 변태 및 잔류응력이 발생한다.

본 연구에서는 엔진의 구동력을 차동장치에서 바퀴까지 전달해주는 역할을 하는 자동차 부품인 액슬 샤프트(axle shaft)의 고주파 열처리 잔류응력의 분포 및 열처리 깊이에 따른 비틀림 강도 변화에 대한 해석을 수행하였으며 이를 시험 결과와 비교하였다. 유한요소해석(FEM)은 상용유한요소

† Corresponding Author, dhkang@hyundai-wia.com

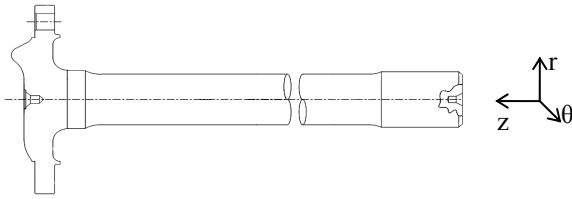


Fig. 1 Schema of axle shaft

프로그램인 ABAQUS 및 user subroutine 을 이용하였으며 온도에 따른 열물성을 고려하여 수행하였다.

2. 유한요소해석

2.1 해석 모델 및 조건

고주파 열처리하는 유도가열기로부터 생성된 고주파전류가 도체주위의 표면에 와전류(eddy current)를 발생시켜 열이 발생하게 된다. 이를 해석하기 위해서는 전기장 해석과 열 전달 해석이 수반되어야 하며 가열 및 냉각 과정에서 도체의 자기 물성치 및 기계적 물성치 등의 변화를 고려하여야 한다. 따라서 유도가열 해석은 전기장(electromagnetic field) 해석과 열전달 해석이 연관된 문제이다.⁽²⁾

기존의 유도가열에 대한 유한요소해석은 도체(work piece)와 주변의 공기에 대한 유한요소를 생성하여 전자기장에 대한 해석과 열전달 해석을 수행하였으나⁽³⁾ 본 연구에서는 해석의 효율성을 고려하여 전자기장 모델을 단순화하였다.

2.2 전자기장 해석

축대칭 형상의 도체 표면에 발생된 와전류로 인해 발생된 열원의 분포에 대한 방정식은 맥스웰 방정식을 이용하여 준정적 전자기장(quasi-stationary electromagnetic field)임을 가정하면 다음과 같이 표현할 수 있다.⁽⁴⁾

$$Q_r = Q_s e^{-2r\sqrt{\omega\mu k}/2} \tag{1}$$

2.3 열전달 해석

와전류에 의한 줄(Joule)열을 내부 발생열(body heat flux)로 고려하면 다음과 같은 열전도 방정식을 얻을 수 있다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + q \tag{2}$$

표면에서의 대류 열전달 방정식은 다음과 같고 복사 열전달은 무시하였다.



Fig. 2 Axisymmetric FE model for heat transfer and thermal stress analysis

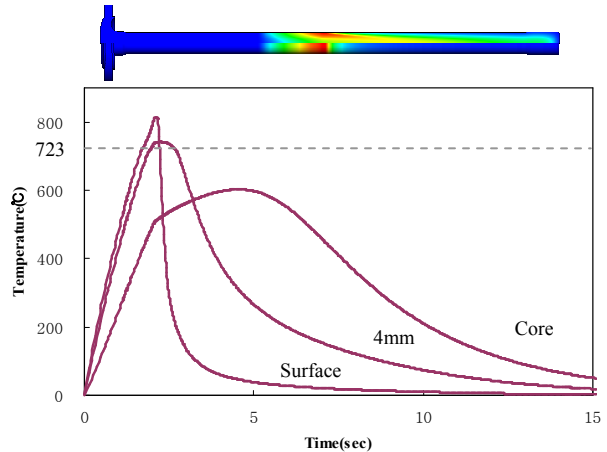


Fig. 3 Various of temperature cycles of surface, 4mm and core in the case of hardening depth 4mm

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_0) \tag{3}$$

2.4 형상 및 물성치

액슬 샤프트의 재질은 SM45C 이며 형상은 Fig. 1 과 같다.

고주파 유도가열로 오스테나이트 변태 시작온도(Austenite start temperature, A_s)인 723°C 이상에 도달 후 마르텐사이트 변태 시작온도(Martensite start temperature, M_s)를 거쳐 마르텐사이트 변태 완료온도(Martensite finish temperature, M_f)인 200°C 까지 급냉(quenching)의 과정을 거친 영역까지를 열처리된 영역(SM45C-H)으로 고려하여⁽⁵⁾ 물성치를 적용하였으며 Table 1, 2 는 각 영역별 온도에 따른 물성치를 나타내었다.^(1,5)

본 해석과 시험에서는 열처리 깊이를 3mm 와 4mm 인 두 가지 경우를 대상으로 하였다.

3. 해석 및 시험결과

본 연구에서는 열처리 깊이 변화에 따른 비틀림 거동을 대상으로 하였다.

열전달 및 열응력 해석은 Fig. 2 에 나타난 바와 같이 축대칭 요소(axisymmetric elements)를 사용하였고 비틀림 해석은 축대칭 요소를 중심축(symmetry axis)을 기준으로 요소 및 해석결과를 회전시킨 후 비틀림 하

중을 적용하였다.

3.1 고주파 열처리

열처리 깊이 4mm 인 축의 경우, 고주파 열처리 과정에서 각 부위 온도 이력은 Fig. 3 에 나타난 바와 같다. 가열시 축의 표면 최고 온도는 814°C에 이른 후 급냉되고 열처리 깊이인 4mm 지점도 As 점 이상인 741°C까지 상승한 후 급랭됨을 알 수 있다. 이는 일반적인 고주파 열처리 시 나타나는 온도 이력의 경향과 잘 일치한다.⁽⁵⁾

SM45C 의 CCT 선도를 이용하여, 최고온도(T_{max})가 723 °C 이상이며 냉각속도(dT/dt)가 140°C/sec 이상인 두가지 조건을 모두 만족하는 영역이 상변태 발생하는 영역으로 계산하였다.⁽⁵⁾

고주파열처리를 시행한 시편의 절단면을 Fig. 4 에 나타내었으며 표면에서 일정한 깊이의 영역이 열처리 되었음을 알 수 있다. 열전달 및 열응력 해석에 의해 예측된 마르텐사이트 변태 발생 영역을 Fig. 5 에 나타내었다. 표면에서 균일한 깊이에 해당하는 부분까지 변태가 발생함을 보여주고 있으며 시험결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 6 에 고주파 열처리 잔류응력의 분포를 각 성분별로 나타내었다. R 방향은 전 영역에 걸쳐 인장 잔류응력을 보이는 반면, θ 방향과 z 방향은 표면에서 압축 잔류응력이 발생하고 축 중심부에는 인장 잔류응력이 나타남을 알 수 있다. 표면의 압축 잔류응력은 피로수명을 증가시키는 것으로 알려져 있다.⁽⁶⁾

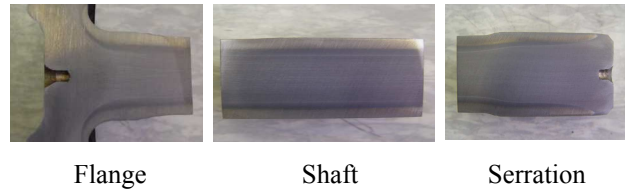


Fig. 4 Sections of induction hardened axle shaft

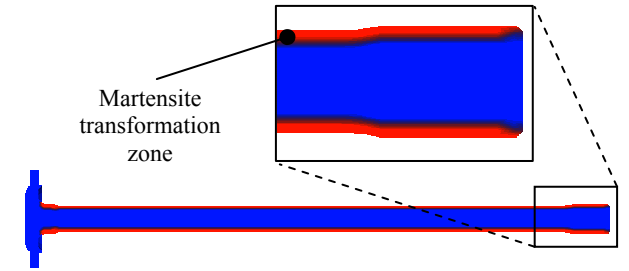


Fig. 5 Analysis result of phase transform area in the case of hardening depth 4mm

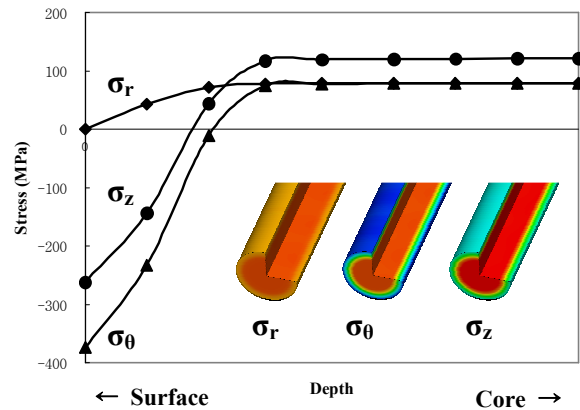


Fig. 6 Residual stress states of the radial, angular and axial direction in the case of hardening depth 4mm

Table 1 Mechanical properties of shaft

Temp. (°C)	E ()	σ_y ()	
		SM45C	SM45C-H
0	210	530	891
200	205	489	819
400	180	439	439
600	100	330	-
800	3.8	178	-

Table 2 Thermal expansion coefficient of shaft

Temp. (°C)	Heating (mm/mm °C)	Quenching (mm/mm °C)
20	1.00E-05	8.20E-06
100	1.15E-05	9.50E-06
300	1.35E-05	1.12E-05
500	1.47E-05	1.30E-05
700	1.54E-05	1.45E-05
900	1.60E-05	1.55E-05

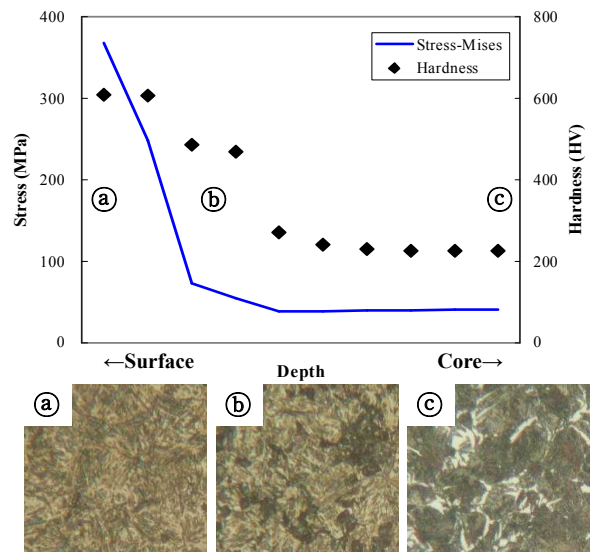


Fig. 7 Hardness(HV) and microstructure(x500); (a) Surface, (b) Transient area, (c) Core

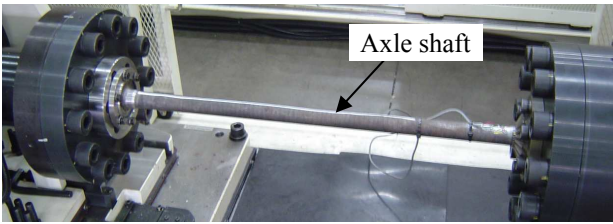


Fig. 8 Installation of axle shaft torsion test

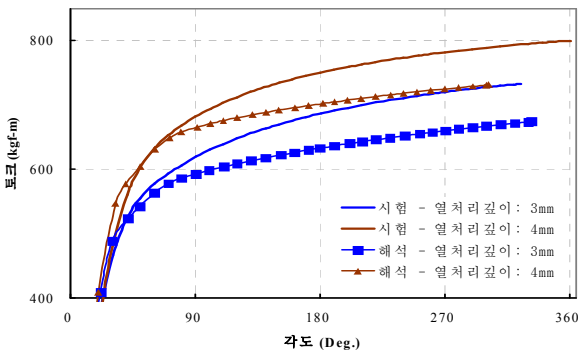


Fig. 9 Torque vs. torsion angle diagram

고주파 열처리 시편의 경도 및 현미경조직사진을 Fig. 7에 나타내었다. 경도는 표면에서 가장 높고 고주파 경화층 경계영역을 지나면서 급격히 떨어진다. 표면의 고주파 경화층(㉠)은 대부분이 마르텐사이트 조직이며, 고주파경계부위(㉡)에는 마르텐사이트 기지에 펄라이트(pearlite)가 혼합된 조직을 보이며 내부(㉢)에는 조직은 펄라이트기지에 초석페라이트(ferrite)가 혼합된 조직이다.

3.2 비틀림 거동

비틀림 파단 시험장치는 Fig. 8과 같이 액슬 샤프트는 변형속도에 대한 영향을 최소화하기 위해 400 kgf-m 까지 1 deg/sec의 속도로 그 이후로는 0.1 deg/sec로 비틀면서 토크와 각도를 측정하였다. 해석은 열응력해석 결과를 초기조건으로 적용한 상태에서 시험과 동일 경계조건으로 비틀림토크를 가하였으며, Fig. 9에 열처리 깊이에 따른 토크와 비틀림 각도변화의 시험 및 해석 결과를 나타내었다.

비틀림 각도가 증가할수록 토크도 선형적으로 증가하다가 일정 각도에 도달하면 소재에 항복으로 인해 비틀림 강성(torsional stiffness)의 저하가 발생하며 비틀림 각도가 더욱 증가하면 액슬축이 파단된다. 비틀림의 경우 항복점을 명확하게 결정할 수 없으므로 비교적 간단한 방법으로 항복점을 결정할 수 있는 JAEL(Johnson's Apparent Elastic Limit)을 사용하여 Table 3에 나타내었으며 Table 4는 파단토크를 나타내었다.

Table 3 Yield torque of axle shaft by JAEL method

Hardening Depth	Torque (MPa)		Error (%)
	Experiment	FEA	
3mm	355	350	1.4
4mm	435	410	5.7

Table 4 Ultimate torque of axle shaft

Hardening Depth	Torque (MPa)		Error (%)
	Experiment	FEA	
3mm	732	674	7.9
4mm	799	731	8.5

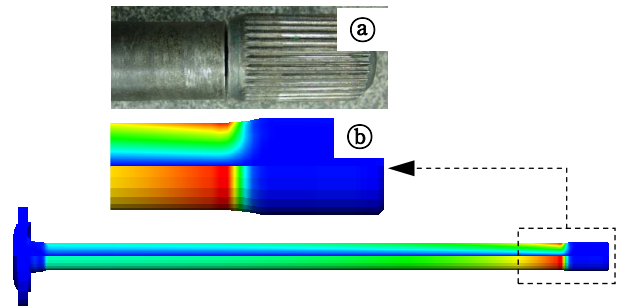


Fig. 10 Fracture of axle shaft; ㉠ Experiment, ㉡ FEA - distribution of equivalent plastic strain

열처리 깊이가 증가함에 따라 항복토크와 파단 토크 모두 증가하는 경향을 보이며 파단토크의 증가보다 항복토크의 증가율이 더 크음을 확인할 수 있다. 이는 표면 경화층의 마르텐사이트 변화가 액슬 샤프트의 항복토크 증가에 크게 기여함을 보여준다. 액슬 샤프트의 파단은 열처리 깊이와 무관하게 serration 부와 shaft 부간 단면의 변화가 발생하는 부분에서 발생하는 경향을 보인다.

이는 비틀림각도가 증가하면서 액슬 샤프트 전 길이에 걸쳐 비교적 균일하게 분포하던 응력 및 변형률이 일정 비틀림 토크이상에서 단면 감소부위에 집중되게 되어 국부적인 부분에서 소성변형률(plastic strain)의 급격한 증가를 일으키면서 파단에 이르게 된다. Fig. 10은 비틀림 파단된 액슬 샤프트와 파단시 등가소성변형률의 분포를 나타내었으며 시험시 파단 위치와 해석 결과로부터 알 수 있는 최대 소성변형률 발생위치가 잘 일치함을 알 수 있다.

4. 결 론

참고문헌

본 연구에서는 고주파 표면경화 열처리된 액슬 샤프트에 대한 열처리 잔류응력 및 비틀림 거동을 알아보았다.

(1) 고주파 열처리 해석을 위한 간단한 입열모델 및 온도에 따른 물성을 적용하였으며 열처리에 의한 잔류응력분포 양상이 시험결과와 유사한 경향을 보임을 확인하였다.

(2) 열처리 잔류응력을 고려하여 경화깊이에 따른 비틀림 강도 및 강성을 해석을 통해 예측하였다.

(3) 경화깊이가 증가할수록 항복토크의 증가율이 파단 토크의 증가율보다 큼을 해석 및 시험 결과를 통해 확인하였다.

(4) 해석을 통해 비틀림 파단은 응력집중으로 인한 급격한 소성변형률 증가로 인해 발생하며 단면 변화부에서 발생함을 시험결과와 비교하였다.

(5) 유한요소해석을 통해 액슬 샤프트의 고주파 열처리 및 비틀림 거동을 예측하여 실험결과와 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) Metals Handbook Ninth Edition - Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, Vol. 1, *ASM International*, pp. 455~542.
- (2) Yun. J. O. and Yang. Y. S., 2004, "A Study on the Flat-Type Induction Heating of Steel Plate," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 28, No. 7, pp. 948~954.
- (3) Dominique Coupard, Thierry Palin-luc, Philippe Bristiel, Vincent Ji and Christian Dumas, 2008, "Residual Stresses in Surface Induction Hardening of Steels: Comparison Between Experiment and Simulation," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 487, pp. 328~339
- (4) Cajner, F., Smoljan, B. and Landek, D., 2004, "Computer Simulation of Induction Hardening," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 157, pp. 55~60
- (5) George E. Totten, Maurice A. H. Howes and Tatsuo Inoue, 2002, *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*, ASM International, pp. 220~295.
- (6) Ko. J. B., Kim. W. K. and Won. J. H., 2005, "The effect on Fatigue Strength of Induction Hardened Carbon Steel," *Trans. of Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 14, No.6, pp. 83~87.
- (7) ABAQUS User's Manual, 2008, Version 6.8, *Dassault Systèmes Simulia Corp*, Providence, RI, USA.