

자동차용 중공 구동축의 고주파 경화 공정에 대한 수치적 연구

강경필¹ · 오병기² · 김용환[#]

Numerical Simulation of Induction Hardening Process of Tubular Drive Shaft for Automobile

G. P. Kang, B. K. Oh, Y. H. Kim

(Received May 19, 2016 / Revised July 25, 2016 / Accepted July 28, 2016)

Abstract

Induction hardening process of tubular drive shaft for automobile is simulated by combining the thermal, mechanical, electro-magnetic and metallurgical analysis models. Various material properties for each analysis model are obtained in a consistent way via material properties calculation software, JMatPro[®]. To consider the scanning process of induction heating, boundary element method is adopted for electro-magnetic field calculation. The distribution of temperature, stress and phase volume fraction are tracked out through the whole process and the effect of scanning velocity is reviewed. The analysis result shows that the critical principal stress is developed at the phase boundary where martensite is formed.

Key Words : Induction Hardening, Multiphysics, Phase Transformation, Finite Element Method, Boundary Element Method

1. 서 론

자동차에서 구동축(drive shaft)은 엔진에서 나온 동력을 트랜스미션을 거쳐 바퀴로 전달해주는 핵심 부품이다. 근래에는 차량에 요구되는 파워 성능이 증가함에 따라, 구동축은 비틀림 강도를 향상하고, 높은 인성 요구조건을 만족하도록 재질 및 공법에 대한 개발이 진행되고 있다. 근래 개발되어 적용된 중공축(tubular shaft)의 경우에는 중앙부위에 튜브를 사용함으로써 기존의 중실축에 비해 약 30% 이상의 무게감소와 함께 NVH 성능도 향상되도록 개선된 부품이다. 중공 구동축의 비틀림 강도 향상을 위해 활용되는 고주파 경화 공정은 유도가열이라는 현상을 이용한 대중화된 열처리 공법 중 하나이다.

최근 전산모사 기술의 발달은 복합물리 모델링을 통해 상호 연계된 복잡한 물리현상을 구현해나가고

있으며, 상용프로그램을 통해서도 많은 분야에 적용되고 있다. 고주파 경화 공정을 모사하기 위해서는 열전달 해석, 상변태 해석, 전자기장 해석, 응력해석 모델이 연성되어야만 한다. 고주파 가열 시뮬레이션 관련 연구사례로는, 전자기장과 열전달 해석을 결합하여 주파수범위에 따른 치형의 가열범위를 해석한 연구[1]와 자동차 스핀들 부품에 대한 온도변화와 상변태 해석을 연계한 연구[2], 실린더 형상에 대해 상변태, 전자기장, 열전달 해석 연계를 시도한 연구[3] 외에 다수가 존재한다.

본 연구에서는 자동차의 중공 구동축을 대상으로 고주파 경화 공정의 수치해석 모델을 구축하고자 한다. 측정 결과를 바탕으로 구축된 신뢰성 있는 해석 모델을 통해 온도 이력과 미세조직 변화뿐 아니라 궁극적으로는 잔류 응력을 평가하여, 제조공정 중 발생할 수 있는 최대 잔류 응력 발생 위치와 원인 및 개선 가능성을 모색한다.

1. ㈜솔루션랩

2. 서한산업㈜

Corresponding Author : Division of Mechanical Engineering, Chungnam National Univ., E-mail: yonghkim@cnu.ac.kr

2. 유한요소해석 모델

2.1 고주파 경화법 개요

고주파 가열 과정을 살펴보면, 코일에 교류가 흘러 전자기장이 교번하여 바뀔 때, 금속과 같은 도체가 변화하는 자기장 내부에 위치하는 경우에는 그 도체 표면부에 와전류(eddy current)가 유도된다. 유도 가열에 있어 열이 생성되는 주된 원인은 이 유도된 전류에 의해 발생한 줄열(joule heating)이나, 일부는 외부 자기장에 의한 자화(magnetization)가 지연되며 나타나는 히스테리시스 손실(hysteresis loss)현상에 의해서도 온도상승이 발생할 수 있다[4]. 소재 가열 온도가 A₁에 도달하면, 오스테나이트로의 변태가 시작 되는데, 이러한 변태는 표면부에서만 국한되어 나타난다. 이후 코일을 따르는 쿨링자켓에 의해 급속 냉각이 되어, 표면부에서 오스테나이트 변태가 일어났던 조직은 마르텐사이트 층으로 변태된다. 이러한 고주파 경화공정을 거친 부품은 적절한 인성을 유지하면서도 표면부는 경화층을 이루게 되어, 요구되는 물성 성능을 만족하게 된다. 이 열처리 공법의 특징은 표면부만 가열함으로써 에너지 효율적이며, 제어가 용이하고, 일반적인 가열로에서 가열한 뒤 쿨칭하는 경우보다 짧은 가열시간으로 인해 결정립이 미세화되어 경도 또한 일반 열처리보다 우수한 특성을 지니게 된다[5].

2.2 고주파 경화 공정 해석

고주파 경화 공정은 다양한 물리적 현상이 복합된 공정으로 시간에 따른 전자기장의 변화와 열전달, 상변태 거동, 그리고 응력변화를 연성한 해석 모델이 필요하다. Fig. 1은 4개의 물리적 해석모델이 연성된 구조와 관계를 보여주고 있다[6]. 열전달 모델을 중심으로, 전자기장 해석을 통한 줄열 계산, 온도 변화에 따른 상변태 거동 계산, 온도와 상변태 거동에 따른 잔류응력 계산 등 각기 다른 물리 모델들간의 상호 관계를 보여주고 있다.

유도가열 공정의 수치해석에서는 유한요소해석 모델이 많이 사용되는데, 스캐닝 공정의 경우에는 공기층의 모델링이 문제되므로, 공기층을 모델링하지 않는 경계요소법(boundary element method)을 추가적으로 사용한다. 즉 소재 내부는 유한요소해석 모델이 사용되며, 소재 경계면과 코일 경계면과의 관계는 경계요소법을 통해 전자기장 계산이 이뤄지

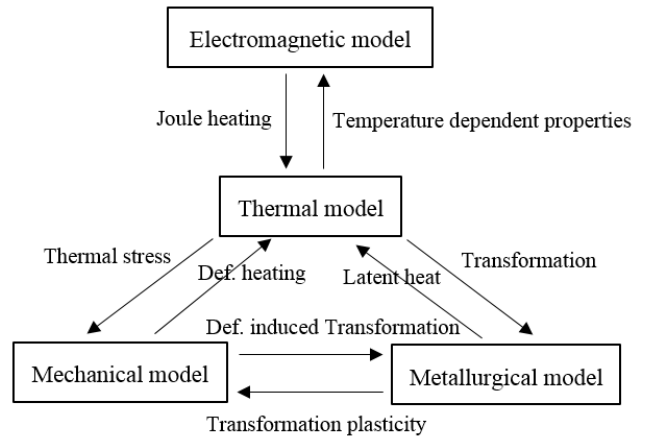


Fig. 1 Schematic diagram of combined analysis model for induction hardening [6]

고, 유도 전류를 계산하게 된다[7].

2.2.1 열전달 및 변형을 계산 모델식

본 연구에서는 고주파 경화과정중 온도 변화뿐만 아니라 상변태와 응력발생도 고려한다. 상변태에 필요한 열전달 모델 수식을 식 (1)에 나타내었다[8]. ρC 는 열용량, k 는 열전도도, σ_{ij} , $\dot{\epsilon}_{ij}^p$, L_{ij} , ξ_{ij} , \dot{Q} 는 각각 편차응력, 변형율속도 성분, 잠열, 상변태 체적분율, 발열항을 나타낸다. 이 식은 일반 열전달 관계식에 상변태중 잠열 발생과 유도가열에 의한 발열항이 추가되어 있는 확장된 열전달 관계식이다. 다만 고주파 경화 공정에서는, 성형과정은 포함되지 않으므로 변형열 항은 무시된다.

$$\rho C \dot{T} = \frac{\partial}{\partial X} \left(k \frac{\partial T}{\partial X} \right) + \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^p + L_{ij} \xi_{ij} + \dot{Q} \quad (1)$$

상변태가 포함되는 경우의 변형율 증분 계산식을 식 (2)에 나타내었다[9]. 우측의 첫번째 항부터 각각 탄성변형, 소성변형, 열변형, 상변태시 체적변화, 그리고 변태소성에 의한 변형율 증분을 나타내며, 총 변형율 증분은 그 대수적 합이 된다. 일반적으로 낮은 온도에서 변태가 발생할수록 체적 편차가 커지게 되므로, 마르텐사이트 변태가 발생할 때 그 체적 팽창량이 가장 크다. 변태소성에 대해서는 본 연구에서 고려하지 않았다.

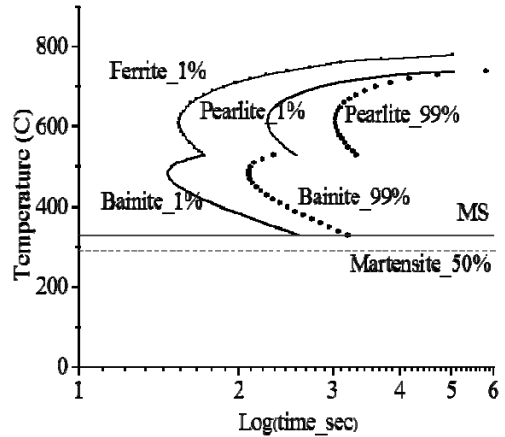
$$d\epsilon = d\epsilon^E + d\epsilon^P + d\epsilon^\theta + d\epsilon^{tr} + d\epsilon^{vp} \quad (2)$$

Table 1 Martensite transformation information

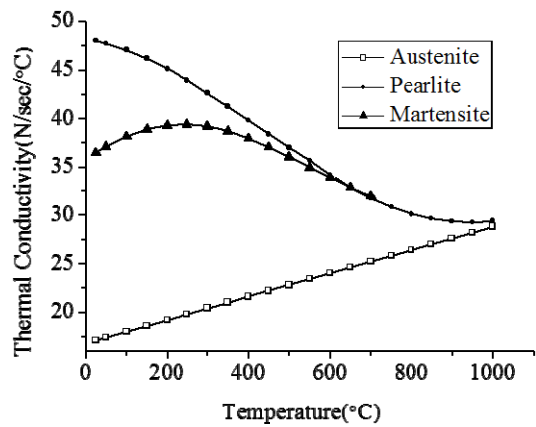
Part	Material	Temperature(°C)	
		Martensite start	Martensite 50% transformed
Stub	SCM440	329	294
Tube	ST35MnB	344	309

2.2.2 고주파 경화 공정 해석 물성

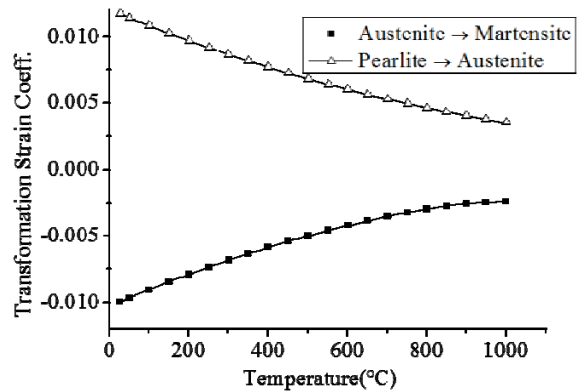
고주파 경화 공정의 전산모사에 필요한 물성은 전자기장 해석을 위해서는 자기투자율과 비저항이 필요하며, 열전달 해석에서는 열용량과 열전도도, 응력해석을 위해서는 탄성계수, 프와송비, 열팽창계수와 유동응력선도가 필요하다. 상변태 해석을 위해서는 앞서 언급한 물성들이 각 상별로 정의되어야 하며, 추가적으로 마르텐사이트 변태정보, 오스테나이트로의 역변태 정보, TTT 확산변태 정보, 상변태시 잠열과 체적변화에 대한 정보가 필요하다. 일반적으로 이러한 물성을 확보하기 위해서는 측정 장비의 가용성 외에도 많은 시간적, 경제적 비용이 문제된다. 본 연구에서는 효율적이고 일관적인 물성확보를 위해 열역학계산에 기반한 고온물성 계산소프트웨어인 JMatPro®[10]을 사용하여 확보하고, Fig. 2에 그 중 일부 물성으로, TTT선도, 온도별 각 상의 열전도도, 상변태시 생성상과 모상간의 물체적 편차를 모상의 물체적으로 나눈 값인 체적변화계수를 그래프로 나타내었다. 자기투자율은 진공조건대비 상대투자율로 나타내었는데, 큐리 온도인 760°C 이후에는 그 값이 1이 된다. 즉, 외부자기장에 의해 도체내 자속밀도는 낮은 온도에서는 높은 반면 큐리온도 이후에는 효율이 급격히 떨어지게 된다. 비저항의 경우에는 온도에 따라 증가하며, 1000°C에서는 상온대비 약 10배의 값을 가지게 된다. 이 전자기장 물성들은 Fig. 3에 그래프로 도시하였다. 고주파 가열은 일반적인 가열과는 다른 특성을 지니는데, 오스테나이트로의 변태를 위해서는 일반적인 가열로 조건하에서의 변태시작과 완료시점 온도인 A₁, A₃ 온도보다 약 50~110°C 가량의 추가 온도상승이 필요하다. 그 이유는 약 200°C/s에 달하는 빠른 가열속도로 인해, 오스테나이트로의 변태시간이 부족하고, 확산변태를 가속화하기 위해 높은 온도가 필요하기 때문이다[4]. 균질화를 위해서는 더 높은 온도가 필요하며 이러한 경향은 Fig. 4에 나타내었다.



(a) TTT diagram



(b) Thermal conductivity of each phase



(c) Transformation strain coefficient

Fig. 2 Material properties of SCM 440 for the simulation of phase transformation

고주파 경화에 있어 각 파트의 재질에 따라, 특히 차별화 되는 물성은 A₁, A₃온도와 함께 마르텐사이트 변태정보이다. 이 정보는 Table 1에 정리하였다.

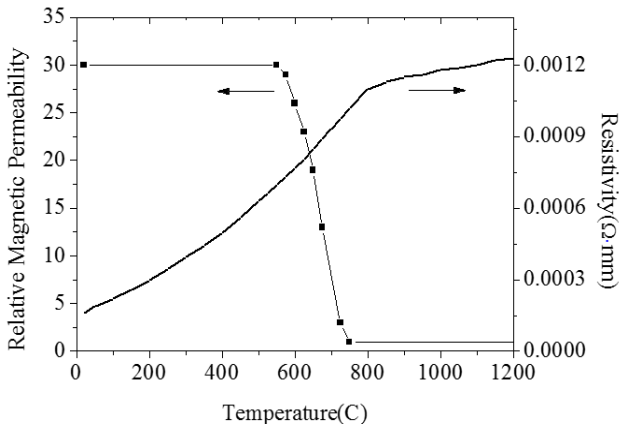


Fig. 3 Electro-magnetic material properties of steel

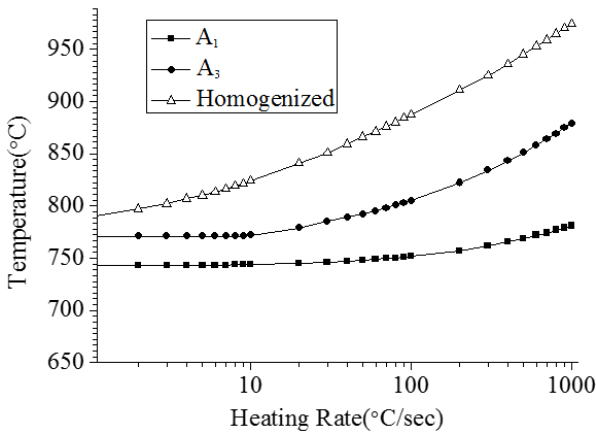


Fig. 4 Reaustenitization temperature of SCM440 w.r.t heating rate

2.2.3 해석 모델 및 공정조건

중공 구동축의 형상은 Fig. 5와 같으며, 좌우측은 스테브(Stub), 중앙부는 튜브(Tube)로 구성되어 있다. 좌측은 바퀴에 연결되며, 우측은 변속기에 연결된다. 이 모델은 고주파 경화공정에 의해 빗금(hatching)된 표면부만 경화됨으로써 전경화의 경우보다 인성이 향상된 모델이다. 해석은 소성가공 및 열처리 전용 상용 소프트웨어인 DEFORM-2D™를 사용하였으며, 해석 모델은 Fig. 6와 같이 축대칭 형상인 2차원 단면 모델로 구성하였다. 해석에서는 1/2 단면만을 고려하였으며, 가열을 위한 코일과 냉각을 위한 쿨링자켓이 배치된다. 코일내부는 과열 방지를 위해 내부에 냉각수가 순환되며, 공정조건으로는 인가 주파수 4.5kHz의 교류전류가 흐르고, 입력 파워는 48~62kW이다. 코일 속도는 5~20mm/s의 프로파일

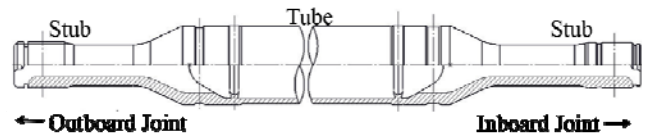


Fig. 5 Case hardness depth of tubular drive shaft

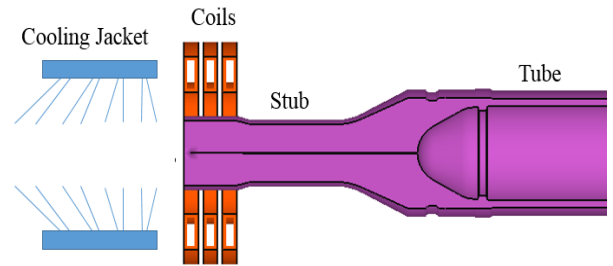


Fig. 6 Configuration of analysis model for the simulation of induction hardening process of tubular shaft

입력하였다. 쿨링자켓은 코일과 22mm의 간격을 두고 동일 속도로 이동하며 노즐분사가 이루어지는 곳이다. 그 모델링은 해당 영역을 냉각 윈도우로 설정하였으며, 온도 20°C의 냉각수가 열전달계수 40N/mm/s/°C의 냉각 효율을 가지는 웬칭 조건을 부여하였다. 재질은 스테브 부위는 SCM440, 튜브는 ST35MnB로 선정하였다.

3. 유한요소해석 결과

해석 결과로서 Fig. 7에 최종 형성된 마르텐사이트 층과 실물 단면사진을 비교하였다. 실물 단면에서 외곽부에 형성된 마르텐사이트 경화층이 해석 결과로 도시한 SCM440의 마르텐사이트 층과 매우 근사함을 보여주고 있다. Table 2에 보인 경도측정 결과도 경화부(56HRC)와 비경화부(22HRC)를 뚜렷이 구분하고 있다. Fig. 7a)에서 상부 재료의 경계면은 마찰용접으로 결합된 경계면을 나타낸다. Fig. 7(c)는 표면부에서 최대주응력이 높게 형성된 지점은 상의 경계층임을 보여주고 있다. 응력성분을 분석해 보면 축방향 응력성분(823MPa), 원주방향 응력성분(-566MPa), 반경방향 응력성분(164MPa)으로, 축방향 응력값이 가장 크다.

내부 표면에서 최대주응력이 발생한 지점(P2)과 경사면을 따라 ±5mm인 지점(P1, P3)에서의 응력

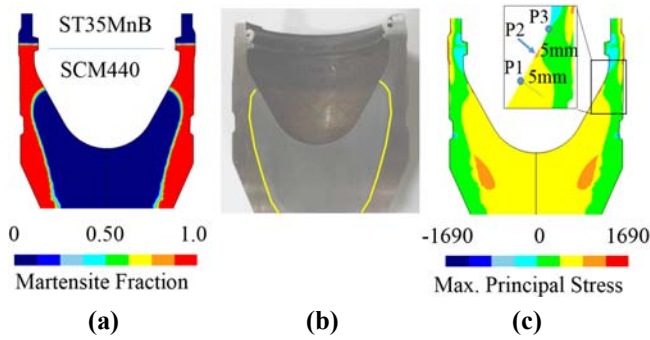


Fig. 7 Distribution of (a) calculated and (b) experimental martensite volume fraction and (c) maximum principal stress with coil speed of 10.5mm/s

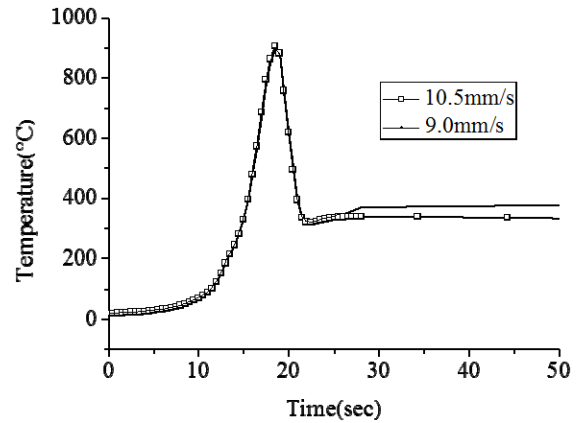


Fig. 9 Temperature change at the center of inner surface of tubular shaft

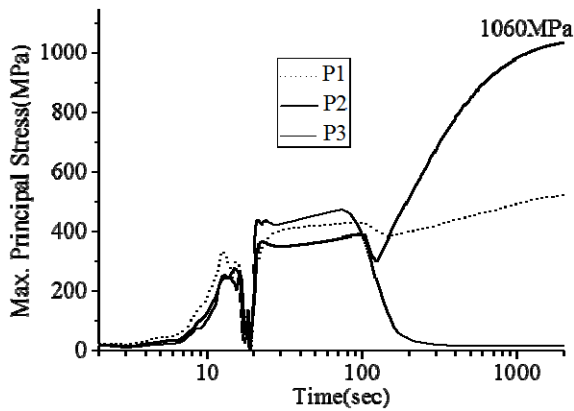


Fig. 8 Stress evolution at selected points with coil speed of 10.5mm/s

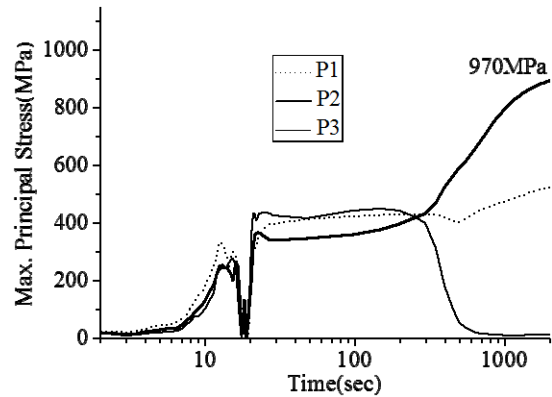


Fig.10 Stress evolution at selected points with coil speed of 9mm/s

Table 2 Measured hardness after induction hardening

Location	Hardness (HRC)
Non-hardened region (P1)	22
Phase boundary (P2)	50
Hardened region (P3)	56

변화를 시간에 따라 관찰하였다. Fig. 8에는 시작 단계부터 냉각 완료시까지의 변화를 도시하였는데, 10~20초 사이에 모든 관찰 지점에서 피크 응력(peak stress)이 발생하는 것은 온도 구배에 의한 열응력에 기인한다. P3 점에서는 20~200초 사이에 두번째 응력의 변동이 관찰된다. 그 원인은 마르텐사이트 상변태가 일어나는 경계 인근에 놓였다가, 이후 전부 마르텐사이트 층이 형성되면서 격자에서의 체적 편차에 의한 응력이 감소하기 때문이다. P2 점은 최종적으로 상의 경계부에 놓인 지점으로, 상온으로

냉각되면서 점점 응력이 증가하여 1060MPa에 이르게 된다. 이러한 결과는 상의 경계층에서는 체적 변화 기울기가 크고, 그에 따른 응력이 크게 발달하여 나타나는 것으로, 상의 경계부가 잔류응력 수준이 높은 부위가 될 수 있음을 제시하고 있다.

공정변수의 영향을 파악하기 위하여 코일의 이송 속도를 기존공정과 달리하여 상변태 경계면에서의 온도와 응력 변화를 관찰하였다. 코일이 구동축 내면에서의 최대주응력 평가지점들(P1, P2, P3)을 나란히 통과하는 시점에서의 이송 속도를 기존값인 10.5 mm/s에서 9mm/s로 낮춘 경우, Fig. 9와 같이 공정시간 50초 시점에서 정중앙부위의 온도가 속도 변경 전보다 약 44도 가량 다소 높게 형성되고 있음을 관찰할 수 있다. Table 1에 보인 바와 같이 SCM440 재질의 마르텐사이트 변태시작 온도는 329°C이므로 이 온도보다 높은 50초 시점에서는 마르텐사이트

변태가 발생하지 않는다. 즉, 코일 이동 속도가 낮아지면서 스테브 부위 내부에 유도가열에 의한 열이 더 많이 축적되어 있는 상태이기 때문에, 쿨링자켓이 지나간 이후에도 복열로 인해 온도가 상승하고, 이는 마르텐사이트 변태를 지연시켜 상의 경계면을 확장하는 효과를 가져오게 된다. 이러한 경향은 또한 Fig. 10에 보인 응력 발달과정을 통해 예측할 수 있는데, P3 점에서 마르텐사이트 변태가 진행된 과정은 20~500초에 이루어지고 있는 것으로 예측할 수 있다. 반면 Fig. 8에 나타낸 기존 공정에서는 20~200초 사이에 상변태가 진행되어 최대주응력 변화가 나타나는 것으로 예측할 수 있다. 코일 이송 속도를 14% 가량 늦추는 경우에는 최대주응력 수준도 1060MPa에서 970MPa로 기존 공정대비 8.5%가량 감소하고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 근래 적용중인 자동차용 중공형 구동축을 대상으로 고주파경화 공정을 모사하기 위하여 전자기장 모델, 열전달 모델, 상변태 모델, 응력 모델을 연성한 다물리(multiphysics) 해석을 수행하였으며, 각 물리적 모델에 필요한 다양한 물성을 확보하는 작업을 수행하였다. 연성 해석을 통해 상분율과 온도분포, 응력변화를 살펴보았으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 구동축 스테브의 내면에 생성된 마르텐사이트 경계층에서는 상변태시 발생하는 격자구조의 체적 차이에 기인한 체적팽창에 의해 높은 수준의 최대주응력이 발생한다.

(2) 스테브의 단면형상이 변하는 인근 영역에서 냉각속도가 기존 공정조건보다 느린 경우에는, 마르텐사이트 경계층이 상대적으로 넓게 분포하게 되고, 그에 따른 응력집중의 효과는 완화된다.

자동차 중공형 구동축의 고주파경화 공정해석을 통해 잔류응력수준을 좌우하는 인자는 부품 형상, 코일 이송속도, 소재물성 등이 연관될 수 있다는 사실을 확인하였다. 최대 잔류응력 발생위치의 확인을 위해서는 전산모사를 통해 이러한 인자들에 대해

정량적인 평가 수행이 필요할 것이다. 또한 기존 구조설계시에는 잔류응력을 고려하여 비틀림 시험에 대한 구조해석이 이루어지지 못하였으나, 본 해석 결과를 이용할 경우 보다 엄밀한 구조해석이 가능할 것으로 판단된다.

REFERENCES

- [1] D. Hoberg, T. Petzold, E. Rocca, 2015, Analysis and Simulations of Multi-frequency Induction Hardening, *Nonlinear Anal. Real World Appl.*, Vol. 22, pp. 84~97.
- [2] J. Yuan, J. Kang, Y. Rong, R. Sisson, 2003, FEM Modeling of Induction Hardening Processes in Steel, *J. Mater. Eng. Perform.*, Vol. 12, No. 5, pp. 589~596.
- [3] H. Liu, 2013, FEM Simulation of Induction Hardening Process, Blekinge Institute of Technology, Kalskrona, Sweden.
- [4] R. E. Haimbaugh, 2001, Practical Induction Heat Treating, ASM International, Ohio, USA, pp. 8~97.
- [5] V. I. Rudnev, 2008, Metallurgical Insights for Induction Heat Treaters, *Heat Treating Progress*, Vol. 8, Issue 5, pp. 35~37.
- [6] K. Sawamiphakdi1, J. Yang, W. T. Wu, 2003, Finite Element Modeling of Induction Hardening Process, Internal Paper, Scientific Forming Technologies Corp., Ohio, USA, pp.1~9.
- [7] D. Lambert, W. T. Wu, K. Arimoto, J. Ni, 1998, Proc. ASM 18th Heat Treat. Conf. and Exposition, Illinois, USA, pp. 93~99.
- [8] T. Inoue, D. Y. Ju, K. Arimoto, 1992, Proc. 1st Intl. Conf. on Quenching and Control of Distortion, Chicago, USA, pp. 205~212.
- [9] T. Inoue, K. Arimoto, 1997, Development and Implementation of CAE System "HEARTS" for Heat Treatment Simulation based on Metallo-thermo-mechanics, *J. Mater. Eng. Perform.*, Vol. 6. No. 1, pp. 51~60.
- [10] Sente Software, 2016, <http://www.jmatpro.co.uk>