

저합금강 기어의 침탄 및 소입 공정에 대한 전산모사

이경호* · 한정호* · 김경수** · 윤상대*** · 이영국*†

*연세대학교 공과대학 신소재공학과, **현대중공업(주), ***성보 P&T(주)

Computational Simulation of Carburizing and Quenching Processes of a Low Alloy Steel Gear

Kyung Ho Lee*, Jeongho Han*, Gyeong Su Kim**, Sang Dae Yun***, Young-Kook Lee*†

*Department of Materials Science and Engineering, Yonsei University, Seoul, 03722, Korea

**Material Research Department, Hyundai Heavy Industries, Ulsan, 44032, Korea

***Quality Assurance Team, Sungbo Powertrain & Technology, Gyeonggi, 18542, Korea

Abstract The aim of the present study was to predict the variations in microstructure and deformation occurring during gas carburizing and quenching processes of a SCM420H planetary gear in a real production environment using the finite element method (FEM). The motivation for the present study came from the fact that previous FEM simulations have a limitation of the application to the real heat treatment process because they were performed with material properties provided by commercial programs and heat transfer coefficients (HTC) measured from laboratory conditions. Therefore, for the present simulation, many experimentally measured material properties were employed; phase transformation kinetics, thermal expansion coefficients, heat capacity, heat conductivity and HTC. Particularly, the HTCs were obtained by converting the cooling curves measured with a STS304 gear without phase transformations using an oil bath with an agitator in a real heat treatment factory. The FEM simulation was successfully conducted using the aforementioned material properties and HTC, and then the predicted results were well verified with experimental data, such as the cooling rate, microstructure, hardness profile and distortion.

(Received October 8, 2015; Revised October 14, 2015; Accepted October 20, 2015)

Key words : Carburizing, Quenching, Computational simulation, Heat treatment, Finite element method, Heat transfer coefficient, Distortion, Microstructure

1. 서 론

자동차 및 산업용 중장비의 고출력화가 요구됨에 따라, 기어와 같은 동력전달부품의 내마모성 및 내구성은 더욱 중요하게 되었다. 이를 향상시키기 위해 종래 가스 침탄 열처리가 널리 활용되어 오고 있다 [1-4]. 가스 침탄 열처리란 저탄소강을 오스테나이트 단상 영역(약 850-950°C)에서 탄화수소 가스를 가스 발생기에서 태워 만든 침탄 분위기에서 열처리를 통해 표면의 탄소함량을 높인 후 이를 급랭시키고 뜨임 처리하는 공정이다[5]. 오스테나이트 영역에서 탄소의 최대 고용량은 온도에 따라 0.8 wt.%-2 wt.%까지 늘어나는데 이에 따라 탄소가 표면부터 내부로

확산하여, 연성이 좋은 내부 조직과 확산층에 형성된 내마모성과 피로 저항력이 큰 고탄소 마르텐사이트 층이 기계적 성능을 향상시키게 된다[5].

이전에는 열처리 조건에 따른 경화능 깊이, 미세조직의 변화, 열처리 후 잔류응력 및 변형에 관한 침탄열처리 연구가 주로 실험적 방법을 통해 이루어졌다[6-8]. 하지만 실험을 통한 분석은 많은 시간과 비용을 필요로 하고 한정된 실험 조건에 대한 결과에만 국한되기 때문에, 이를 해결하고자 수치해석법의 일종인 유한요소법(finite element method, FEM)을 통한 열처리 시 미세조직, 잔류응력, 변형 예측에 관한 연구가 다수 진행되고 있다[9-11]. da Silva et al.[9]은 AISI 4140강으로 제조된 C 자 형상의 링

†Corresponding author. E-mail : yklee@yonsei.ac.kr
Copyright © The Korean Society for Heat Treatment

(ring)의 열처리 공정에 대한 전산모사를 하여, 부위별 미세조직 및 변태소성(transformation plasticity) 차이가 최종 시편의 변형(distortion)에 미치는 영향을 분석하였다. 전산모사에 필요한 기계적, 열적, 상변태 물성은 상용프로그램들(DEFORM™-3D와 JMatPro)내에 기존에 존재하는 값들을 이용하였고, 대류열전달계수는 교반기가 없는 기름욕조(oil bath)에서 측정된 문헌값[12]을 이용하였다.

Eshraghi et al.[10]은 AISI 1045강으로 제조된 스퍼 기어(spur gear)의 급냉 시 소입제(oil, water)에 따른 냉각속도의 변화가 미세조직 및 경도에 미치는 영향에 대해 전산 모사하였다. 전산모사를 위해 대류열전달계수는 상변태가 없는 STS 304강을 실린더 형상으로 가공하여 각 소입제에 대하여 냉각속도를 측정함으로써 구하였다. Kim et al.[11]은 SCM 415H 강 헬리컬 기어(helical gear)의 침탄열처리 및 소입 시, 상변태와 잔류응력을 모사하기 위하여 DEFORM™-HT library로부터 물성을 확보하였고, STS 304를 이용하여 교반이 없는 기름욕조를 사용하여 대류열전달계수를 구했다.

위와 언급한 바와 같이, 현재 유한요소법을 통한 침탄열처리 전산모사에 관한 연구에서는 모사를 위한 기계적, 열적, 상변태 물성을 문헌값이나 실측값 이외에 상용 프로그램을 통해서도 얻고 있다. 특히, 소입공정에 대한 모사 시, 미세조직 분포, 경도, 변형량 등에 결정적인 영향을 미치는 대류열전달계수는 실제 열처리업체의 기름욕조 조업조건(교반, 욕조의 온도와 크기 등)이 아닌 실험실 욕조에서 냉각속도를 측정하여 계산되고 있다[9-11]. 따라서, 상용프로그램을 통해 얻은 재료물성과 실험실 조건에서 구한 대류열전달계수를 사용하여, 실제 열처리 업체에서의 기어 열처리 시 미세조직 및 시편 변형을 예측하는 것은 매우 부정확할 수 밖에 없다. 따라서, 본 연구에서는 SCM 420H강 유성기어의 재료물성들을 직접 실험으로 측정하거나 또는 실험을 통해 얻어진 문헌값으로 확보하였다. 한편, 대류열전달계수는 열처리업체의 도움을 받아 실제 생산에 사용중인 기름욕조 조건에서의 실험을 통해 구하여, 실제 생산 환경에서의 침탄열처리 후 소입 시 미세조직, 침탄 깊이, 변형량을 전산모사하였다.

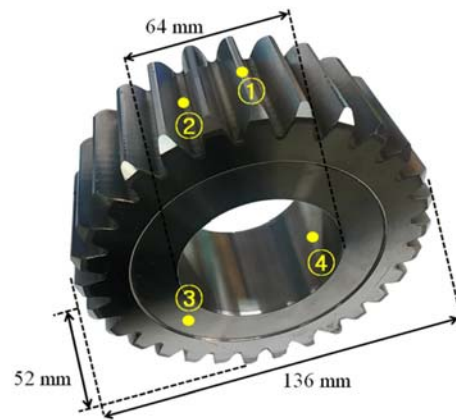


Fig. 1. A planetary gear used for a speed reducer of a 21-ton excavator.

Temperatures were measured using K-type thermocouples at four different positions (① top land, ② bottom land, ③ side surface and ④ inner surface).

2. 실험방법

2.1 침탄열처리

본 연구에서는 SCM 420H 강으로 제조된 21톤 굴삭기 용 유성기어를 사용하였으며, 그 강의 화학조성은 Fe-0.21C-1.10Cr-0.81Mn-0.28Si-0.18Mo-0.07Cu-0.05Ni(wt.%)이었다. 그 기어를 평형 탄소농도(carbon potential, C.P) 약 0.8 wt.% 분위기의 920 °C에서 유지하고, 소입 전 변형량을 최소화 하기 위하여 890°C로 냉각하여 약 40분 유지 후, 60°C 기름욕조에 유냉하였다. 유냉 시 욕조 중심부에 교반기가 기름을 교반하고 있기 때문에 욕조 내 가장자리와 중심부의 냉각속도가 차이가 날 수 있으므로 욕조 내 소입 위치에 따른 냉각속도 차이를 알아보고자, 가열된 기어를 욕조 내 가장자리와 중심부에 각각 소입하였다. 유냉 시 기어의 온도는 ① Top land ② Bottom land ③ Side surface ④ Inner surface의 네 곳에서 측정하여 기어내 위치에 따른 냉각속도의 차이를 측정하고자 하였다(Fig. 1 참조). 상기 네 위치에 두께 1.6 mm인 K-type 열전대를 표면아래 약 1.5 mm까지 직경 약 1.6 mm를 구멍을 통해 삽입하고, 전도성 세라믹 접착제(Product No.865, AREMCO PRODUCTS, INC.)를 이용하여 밀봉 및 고정시켰다.

2.2 미세조직 관찰, 깊이 별 경도 및 변형량 측정

열처리 후 미세조직을 광학현미경(OM, Olympus, BX41M)과 주사전자현미경(SEM, JEOL, JSM-7001F)을 이용하여 관찰하였다. 시편은 기계적 연마 후 4% nital 용액과 10% 메타중아황산나트륨($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) 수용액으로 에칭(etching)하였다.

침탄 된 시편에서 깊이에 따른 탄소량의 변화를 경도 변화로 간접적으로 알아보았는데, 이 때, micro-Vickers 경도기(Mitutoyo VLPK2000)를 이용하였고, 245.2 mN의 하중으로 300 μm 간격으로 각 깊이 별 10회 측정 한 후 그 평균 경도를 구하였으며 같은 기어 내 서로 다른 부위에서 2회 측정을 실시하였다.

유냉 후 기어의 변형량 측정을 위하여, 3D tooth flank measuring machine(Zeiss, zp630)을 이용하여 기어의 오버핀 경 오차(over pin diameter error, O.P.D. error), 전치형 오차(profile error), 리이드 오차(lead error), 크라운잉(crowning)을 측정하였다.

2.3 열팽창계수 및 상변태 속도

SCM 420H강의 상변태 속도와 조직 별 열팽창계수를 측정하기 위하여 두 개의 시편을 준비하였다. 즉, 침탄열처리 전 페라이트, 펄라이트 조직을 갖는 시편과 약 7.5°C/min의 가열속도로 890°C까지 가열하고 그 온도에서 40 분간 진공에서 유지 후 수냉시켜 100% 마르텐사이트 조직을 갖는 시편을 사용하였다. 이 두 시편에서 10×3×1 mm³ 크기의 판상 시편을 제작하여 열팽창계(Theta Inc., Dilatronic III)를 사용해서, 여러 등온유지 시 유지시간에 따른 변형율과 연속가열 시 온도에 따른 변형율을 측정하였다. 등온 실험 열처리 조건은 다음과 같다. 침탄열처리 전 초기 시편을 10°C/s의 가열속도로 890°C까지 가열하여 그 온도에서 40분 유지 한 후, 410°C-700°C 사이의 여러 온도까지 100°C/s로 급랭하였다. 각 온도에서의 유지시간은 온도마다 등온변태 속도가 다르기 때문에, 410°C에서 30분, 450°C에서 30분, 550°C에서 300분, 600°C에서 180분, 650°C에서 30분, 700°C에서 30분이었다. 한편, 연속가열 실험은 마르텐사이트 조직을 갖는 시편을 10°C/s의 가열속

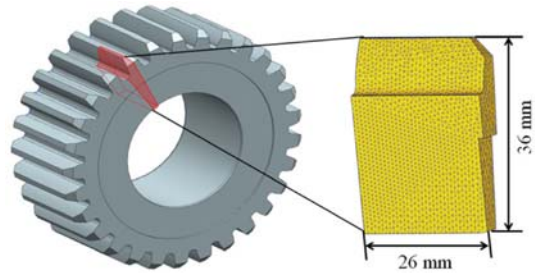


Fig. 2. The shape and meshes of the planetary gear used for the FEM simulation.

도로 890°C까지 가열 후 등온 유지 없이 바로 150°C/s로 냉각시켰다.

2.4 대류열전달계수 측정

침탄열처리 온도 범위에서 상변태가 일어나지 않는 오스테나이트계 스텐레스강(STS 304)을 사용하여 실제 유성기어와 동일한 치수와 형상을 갖는 기어를 제작하였다. 스텐레스 기어를 박스로에서 약 7.5°C/min의 가열속도로 890°C까지 가열하여 40분 유지 후 실제 열처리업체에서 조업에 사용중인 기름욕조에 유냉시켰다. 이 때, 욕조 내 냉각위치 및 조건, 온도 측정 위치 및 방법 등은 앞서 언급한 SCM 420H 기어의 경우와 같았다.

3. 유한요소 해석

3.1 시편 형상 모델링

유한요소해석은 DEFORMTM-HT3(version 11.0) [13] 소프트웨어를 이용하여 전산 모사하였다. 해석의 효율성과 정확도 향상을 위하여, 대칭성으로 기어형상 전체를 표현할 수 있는 기하학적 최소형태로 제작 되었으며 요소(element) 수 약 200,000개, 절점(node) 수 약 45000개의 정사면체 메시(mesh)로 분할하여 전산모사하였다(Fig. 2).

3.2 대류열전달계수

Fig. 3은 STS 304기어의 냉각속도 결과이다. 욕조 내 중심부(center)에서 측정 시 냉각속도(Fig. 3a)가 가장자리(edge) 부위에서의 측정된 냉각속도(Fig. 3b)보다 다소 빠르게 나타났다. 이는 욕조의 중앙부에서 기름을 교반하고 있기 때문에 대류가 활발한

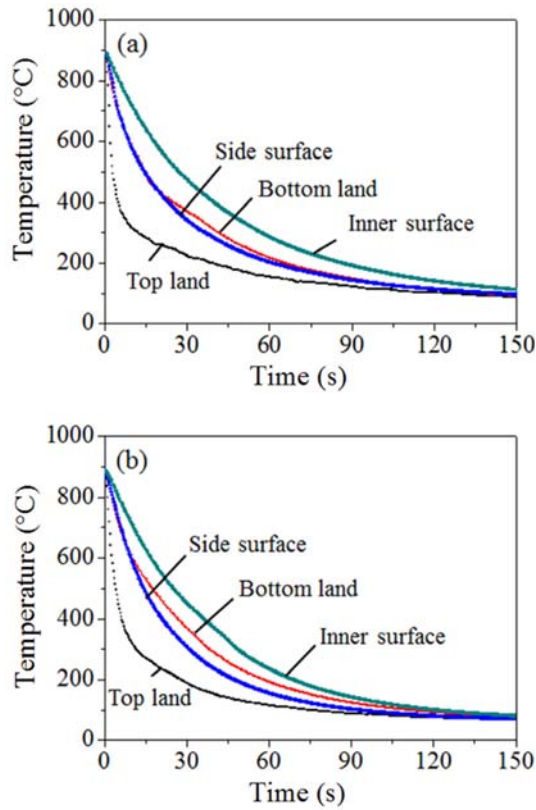


Fig. 3. Cooling curves measured at different positions of STS304 gears, which were quenched in (a) an edge and (b) a center of an oil bath.

중양에서 냉각이 더 빠르기 때문이다. 기어내 측정 부위별 냉각속도는 top land가 가장 빠르고, side surface와 bottom land가 비슷한 냉각속도를 보였고, inner surface가 가장 느렸다.

대류열전달계수 계산에 필요한 STS 304의 물성은 기본적으로 DEFORM-HT3 library에 저장된 물성을 이용하였고, 결과값에 결정적인 영향을 미치는 열물성의 경우는 실험을 통해 구해진 문헌값[14](열전도도, 열용량)을 이용하였으며 이를 표1에 정리하였다.

위와 같이 구한 냉각속도 및 STS 304의 재료 물성을 이용하여, 기어내 온도 측정 부위 및 육조 내 소입 위치에 따른 대류열전달계수를 역추적하여 계산하였다(Fig. 4). 냉각속도가 가장자리에 비해 빨랐던 중심부의 경우(Fig. 4b) 고온에서 저온으로 갈수록 대류열전달계수가 빠르게 증가하였다가 감소하였으며, 반대로 가장자리의 경우 대류열전달계수가 고온

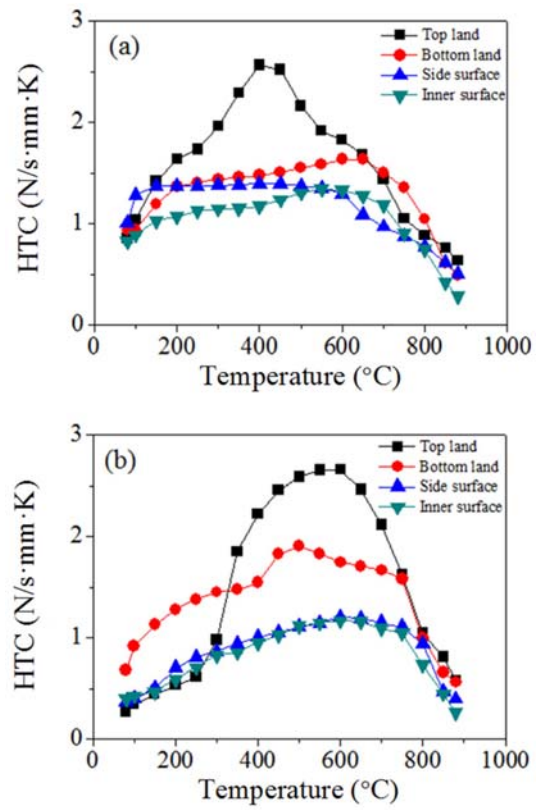


Fig. 4. Variation of heat transfer coefficients (HTC) obtained at different positions of STS304 gears as a function of temperature. The HTC values were calculated from the cooling curves measured in (a) an edge and (b) a center of an oil bath.

에서 저온방향으로 완만하게 증가하여 감소하였다(Fig. 4a). 예상대로, 기어 내에서는 냉각속도가 빨랐던 top land가 제일 높은 대류열전달계수 값을 보였고, 가장 느린 냉각속도를 보인 inner surface가 제일 낮은 대류열전달계수 값을 가졌다.

3.3 재료물성치

침탄열처리 시 상변태, 열전달, 변형, 탄소확산의 물리적 현상이 발생하며 상호 간 영향을 주고받는다. 이러한 관계를 Fig. 5에 나타내었고, 유한요소해석 시 이러한 물리적 현상을 표현하기 위해서는 탄소 농도와 온도에 따른 다음과 같은 재료 물성들이 필요하다.

- ① 상변태 물성(상변태 시 체적 변화량, 잠열, 상변태 속도)

Table 1. The sources of material properties of STS304 steel used for the FEM simulation

Source	Mechanical properties				Thermal properties	
	Flow stress	Elastic modulus	Poisson's ratio	Thermal expansion coefficient	Heat conductivity	Heat capacity
JMatPro	⊙	⊙	⊙	⊙	○	○
Literature					⊙	⊙

The marks ○ and ⊙ indicate available property sources.
The mark ⊙ indicates the selected property sources for the FEM simulation.

Table 2. The sources of material properties of SCM420H steel used for the FEM simulation

Source	Mechanical properties				Thermal properties		Diffusion	Phase transformation		
	Flow stress	Elastic modulus	Poisson's ratio	Thermal expansion coefficient	Heat conductivity	Heat capacity	Diffusion coefficient	Kinetic date	Latent heat	Volume change
JMatPro	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	○	○	○	⊙	⊙
Experiment				⊙				⊙		
Literature		○			○	⊙	⊙	○		

The marks ○ and ⊙ indicate available property sources.
The mark ⊙ indicates the selected property sources for the FEM simulation.

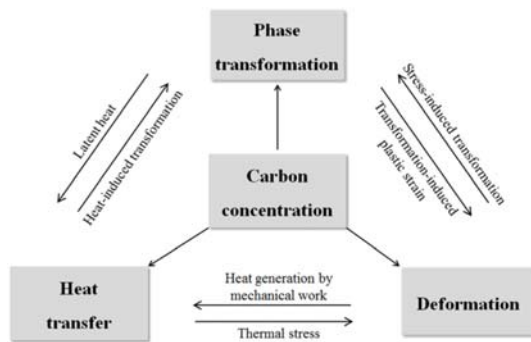


Fig. 5. Physical phenomena occurring during carburizing heat treatment and their interactions.

- ② 기계적 물성(유동응력, 탄성계수, 프와송비, 열 팽창계수)
- ③ 열 물성(열전도도, 열용량)
- ⑤ 탄소의 확산계수

위의 물성치들은 기본적으로는 상용프로그램인 JMatPro(version 8.0)[15] 의 데이터를 사용하였으며, 일부 물성치들은 열팽창계 실험 및 실험을 통해 구해진 문헌값 조사[16-20]를 통해 JMatPro의 물성을 대체하였는데 이를 Table 2에 정리하여 나타내었다.

3.4 확산모델

탄소의 확산계수는 미세조직 별로 탄소와 온도에 대한 값으로 입력이 되었으며 확산에 대한 모델은 다음의 식 (1)이 적용된다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X} \left(D \frac{\partial C}{\partial t} \right) \tag{1}$$

- C: carbon constant
- D: diffusion coefficient
- t: time
- X: distance

3.5 상변태 속도 모델

오스테나이트에서 페라이트 및 베이나이트로의 상변태는 다음과 같은 Avrami 식 (2)으로 주어지며, 이 식의 계수들은 TTT(time temperature transformation) 곡선으로부터 계산되어 프로그램 내에서 사용된다.

$$\xi = 1 - \exp(-kt^n) \tag{2}$$

ξ : Volume fraction
 t: Time
 k: Constant
 n: Avrami number

오스테나이트에서 마르텐사이트로의 상변태는 다음과 같은 식 (3)으로 주어지며, M_s (마르텐사이트 생성 시작 온도) 및 M_{50} (마르텐사이트 50% 생성온도) 값으로 계산이 된다.

$$\xi = 1 - \exp(aT + b) \quad (3)$$

ξ_M : Volume fraction transformed martensite
 T: Absolute temperature
 a, b: Material constants determined by martensite start and 50% temperature

3.6 상변태 체적변화 모델

상변태 시 체적변화는 상변태 변형률 속도로써 값을 취하며 다음의 식 (4)와 같다.

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{Tr} = \sum \beta_{ij} \dot{\xi}_{ij} \delta_{ij} \quad (4)$$

$\dot{\varepsilon}_{ij}^{Tr}$: transformation strain rate
 β_{ij} : fractional length change from phase i to j
 $\dot{\xi}_{ij}$: transformation volume fraction rate
 δ_{ij} : Kronecker delta

4. 모사결과 및 고찰

4.1 냉각속도

SCM 420H 유성기어의 유냉 시, 기어내 위치 별 냉각속도를 유한요소 모사하였고, 그 모사결과를 실측한 냉각속도와 비교하였다. Fig. 6은 욕조 내 가장자리(edge) 부위에 소입한 기어내 위치에 따른 냉각속도 곡선이다. 냉각곡선은 한 개의 실측 곡선(Exp), JMatPro에서 제공하는 물성치만으로 모사된 곡선(JMat), 실험 및 문헌을 통해 수정된 물성치(Table 1 참조)로부터 모사된 곡선(Mod)이다. 기어내 온도 측정 위치에 별로 모사된 곡선과 실측곡선

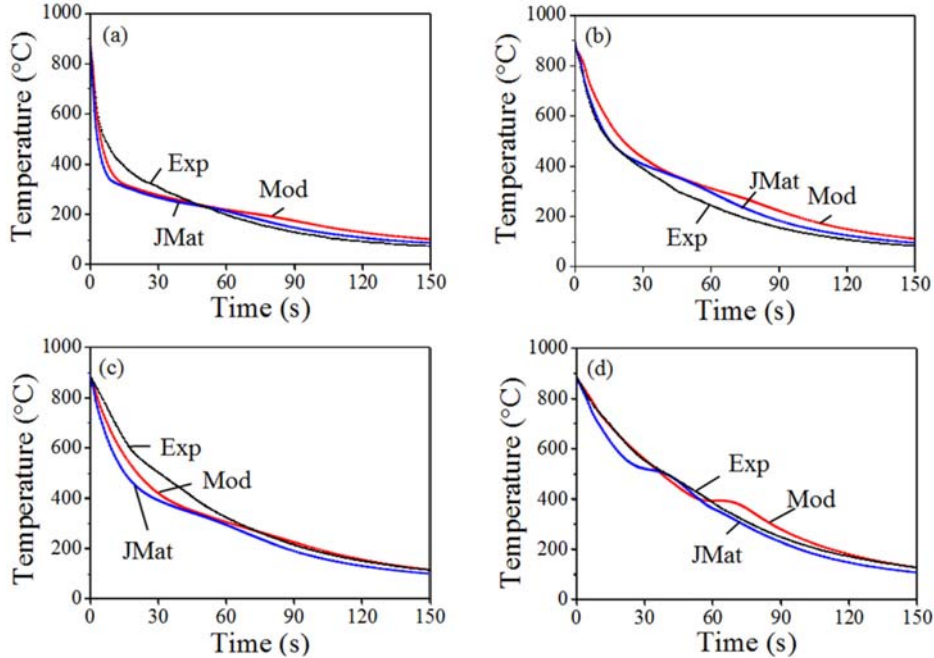


Fig. 6. Cooling curves measured at (a) the top land, (b) the bottom land, (c) the side surface and (d) the inner surface of the SCM420H gear quenched in an edge of an oil bath. Exp means the measured cooling curve; JMat indicates the cooling curve calculated with materials properties provided by JMatPro software; Mod indicates the cooling curve calculated with modified material properties (refer to Table 2).

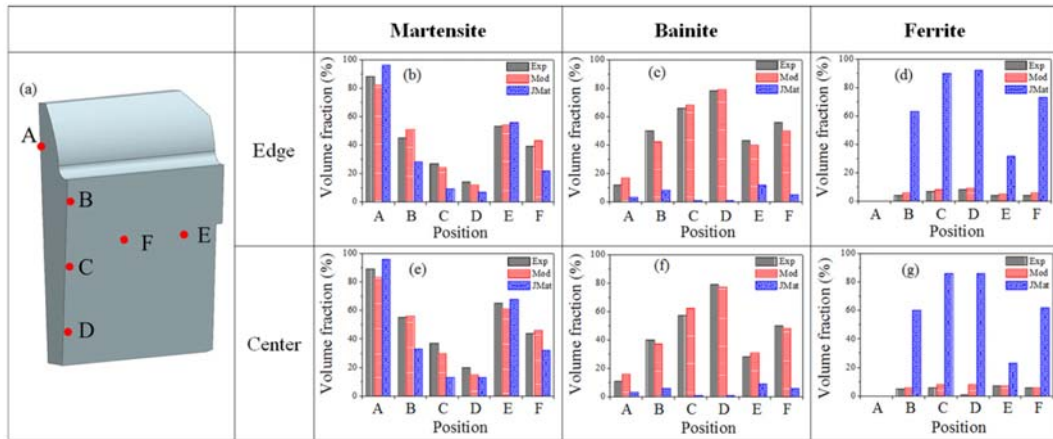


Fig. 7. (a) Locations in the SCM420H gear for microstructural simulation and observation. The changes in volume fractions of (b) martensite, (c) bainite and (d) ferrite with the location in the gear after quenching in the edge of an oil bath. The changes in volume fractions of (e) martensite, (f) bainite and (g) ferrite with the location in the gear after quenching in the center of an oil bath.

Exp is the measured phase volume fraction; JMat is the phase volume fraction calculated with materials properties provided by JMatPro software; Mod is the phase volume fraction calculated with modified material properties (refer to Table 2).

을 차례로 비교하였으며 기어내 위치 및 물성의 출처와 관계없이 JMat과 Mod 모두 Exp와 대체로 잘 일치하였고 이는 재료물성의 차이보다는 대류열전달 계수가 냉각속도에 더 큰 영향을 미친다는 것을 보여준다. 기어내 부위별 냉각속도는 차례대로 top land 부위(Fig. 6a)에서 가장 빠르게 나타났으며, bottom land(Fig. 6b)와 side surface(Fig. 6c)는 거의 유사하게, inner surface(Fig. 6d)에서 가장 느리게 나타났는데 이는 기어 내 위치에 따라 냉각제와의 접촉면적 및 냉각제의 유속 등에 받는 영향이 다르기 때문이다. 욕조 내 중심부에 대한 냉각속도 모사에서도 역시 가장자리에서의 결과와 마찬가지로 JMat, Mod가 실측곡선과 대체로 잘 일치하였고 기어내 위치 별 냉각속도 순서도 같게 나타났다.

4.2 미세조직

침탄열처리 후 유냉한 SCM 420H 유성기어내의 위치 별 미세조직(Fig. 7a 참조)에 대한 전산모사 결과(JMAT, Mod)와 실험결과(Exp)를 비교하였다. 기름욕조 내 가장자리(Fig. 7b-d)와 중심부(Fig. 7e-g) 모두 Mod와 Exp가 잘 일치하였으나, JMat은 Exp와 비교하여 마르텐사이트 분율은 유사하지만(Fig. 7b, e) 베이나이트 분율은 매우 적었고(Fig.

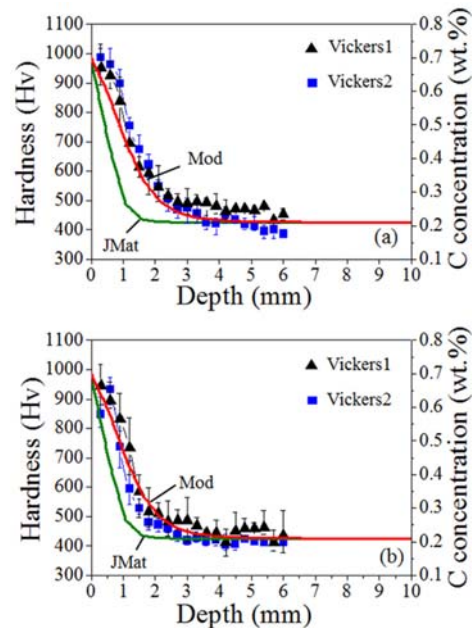


Fig. 8. Variations of both Micro-Vickers hardness and C concentration as a function of the depth from the surface of the SCM420H gear after quenching in (a) the edge and (b) the center of an oil bath.

JMat is the C concentration profile calculated with materials properties provided by JMatPro software; Mod means the C concentration profile calculated with modified material properties (refer to Table 2). The hardness was measured twice per each specimen (Vickers1 and Vickers2).

7c, f) 페라이트 분율은 매우 많게 나타났다(Fig. 7d, g). 이는 JMatPro로부터 구해진 페라이트의 상변태 속도가 실제보다 빠르고, 이로 인해 베이나이트의 상변태가 억제되었기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 미세조직 예측에는 Mod의 상변태 물성들이 더 정확함을 확인하였다.

4.3 깊이에 따른 경도분포

칩탄 소입 후 경화층 깊이를 알아보기 위하여 육조 내 가장자리(Fig. 8a)와 중심부(Fig.8 b)에서 소입시킨 기어의 치끝으로부터 매 300 μm 마다 비커스 경도를 측정하였다. 경도값은 시편당 두 개의 치에서 측정되었기에, 각 기어치의 경도분포를 Vickers1과

Vickers 2로 명명하였다. 이들 실측 경도분포를 JMatPro에서 제공하는 물성치만으로 모사한 깊이에 따른 탄소농도분포(JMat) 및 실험 및 문헌을 통해 수정된 물성치로부터 모사한 깊이에 따른 탄소농도분포(Mod)과 비교하였다(Fig. 8). Vickers 1과 Vickers 2의 경화 깊이와 Mod로 예측한 칩탄 깊이가 약 4.5 mm로 잘 일치하며, 깊이에 따른 경도감소 및 탄소농도 감소 기울기도 잘 일치하였다. 그러나, JMat은 칩탄 깊이가 약 2 mm로 실측된 경화 깊이(4.5 mm)보다 훨씬 얇다. 이는 JMat에서 사용하는 890°C 이상 오스테나이트 역에서의 탄소확산계수가 실제 값보다 작아 확산이 잘 되지 않았기 때문이다.

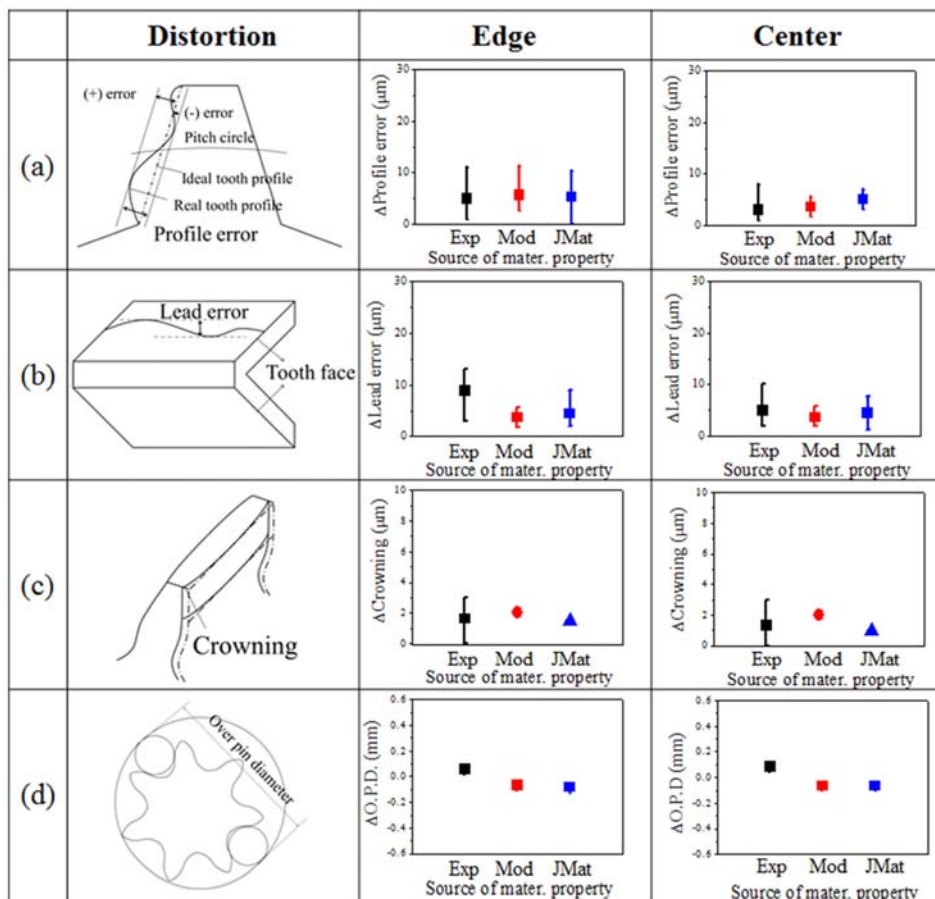


Fig. 9. (a) Profile error, (b) lead error, (c) crowning and (d) over pin diameter (O.P.D.) error of the SCM420H gear after quenching in the edge and the center of an oil bath. Exp is the values measured using a 3D tooth flank measuring machine; JMat is the values calculated with materials properties provided by JMatPro software; Mod is the value calculated with modified material properties (refer to Table 2).

4.4 열처리변형

Fig. 9는 칩탄 열처리 및 소입 이후 기어에서 발생할 수 있는 다양한 변형 종류별로 그 변형량을 실측(Exp)한 값과 JMatPro 값으로부터 모사된 변형량(JMat), 수정된 물성으로 모사된 변형량(Mod)를 비교하여 보여주고 있다. 치형 오차(Profile error)(Fig. 9a), 리이드 오차(lead error)(Fig. 9b), 크라운닝(crowning)(Fig. 9c), 오버핀경 오차(over pin diameter error, O.P.D. error)(Fig. 9d)의 변형량에 대해서는 JMat이나 Mod 모두 실측 변형량(Exp)의 측정 오차범위 안에 들어올 정도로 비교적 정확히 예측함을 알 수 있다. 이는 JMat이나 Mod 모두 변형량에 영향을 미치는 인자들(유동응력, 탄성계수, 페라이트/펄라이트/마르텐사이트/오스테나이트의 열팽창계수를 JMatPro로부터 계산된 동일한 값들을 사용하였기 때문으로 생각된다.

그러나, 오버핀경 오차(O.P.D error)의 경우 JMat과 Mod 모두 Exp와 반대로 최대 외경이 오히려 감소한다는 결과가 나타났다. 이는 최대 외경의 변화는 기어의 표면부의 영향을 많이 받을 수 있는데, 표면부의 0.2 wt.% 초과 탄소농도에 대한 유동응력, 프외송 비, 상변태 체적변화, 상변태 속도에 대한 실측 물성치를 구하지 못하고 JMatPro에서 제공하는 물성치를 그대로 사용하였기 때문이라 판단된다.

5. 결 론

1. 기존 연구들에서는 냉각속도에 중요한 영향을 미치는 대류열전달계수를 실험실 조건 하에서 구함으로써, 그 결과를 실제 현장 열처리 조업조건에 적용하기 어려웠다. 따라서, 본 연구에서는 실제 열처리 조업 현장 육조에서 위치 별로 대류열전달계수를 측정하므로써 향후 실제 조업에서 기어의 냉각속도를 정확히 예측할 수 있게 되었다.

2. SCM420H 강의 기어 열처리에 대한 전사모사를 위해 필요한 상변태 물성, 열물성, 기계적 물성들을 JMatPro를 사용하여 구하거나(JMat) 또는 상기 여러 물성 중 상변태 속도, 열팽창계수, 열용량, 열전도도 등을 본 연구에서 실측하거나 또는 실측된 문헌 값으로 치환하여 물성(Mod)을 확보하였다. 이런 두 가지 물성 데이터베이스를 사용하여 칩탄 소

입 공정을 전산모사하고 실험도 수행하였다. 그 결과, 냉각속도는 동일한 대류열전달계수를 사용하므로써 Mod와 JMat 간에 계산 결과에 큰 차이가 없고 실측 냉각속도와 비교적 잘 일치하였다. 그러나, 칩탄 깊이, 미세조직 분포, 열처리 후 변형량 등은 Mod로 계산한 결과들이 JMat으로 계산한 결과들보다 실측 결과들을 잘 모사하였다.

감사의 글

본 연구는 현대중공업(주)과 성보 P&T주의 적극적인 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 밝힙니다.

References

1. A. Min-Ju, A. In-Hyo, Z. Qi and L. Sung-Ki : J. Korean Soc. Manuf. Process Eng., **10** (2011) 84-89.
2. M. J. Ahn, Z. Z. Xu and S. K. Lyu: The Korean Soc. Manuf. Process Eng., **6** (2011) 74-75.
3. M. F. Yan : Mater. Chem. and Phys., **70** (2001) 242-244.
4. H. S. Lee and B. S. Lim : Transactions of KSAE, **11** (1996) 19-24.
5. G. Krauss : Steels heat treatment and processing principles, 2nd ed, ASM International Ohio (1990) 497.
6. M. M. Shea : J. Heat. Treat., **1** (1980) 29-36.
7. C. Bahnsen, B. Clausen, F. Hoffmann and H. W. Zoch : Mater. Sci. Eng. Tech., **37** (2006) 58-62.
8. P. Stolar, H. Altena, P. Jurci, F. Klima and O. Honzik : Proceedings of the 8th Seminar of the IFHTSE (2001) 95-102.
9. A. D. da Silva, T. A. Pedrosa, J. L. Gonzalez-Mendez, X. Jiang, P. R. Cetlin and T. Altan : Mater. Design, **42** (2012) 55-61.
10. M. Eshraghi-Kakhki, A. Kermanpur and M. Golozar : Mater. Sci. Tech., **28** (2012) 197-204.
11. N. -K. Kim and K. -Y. Bae : Int. J. Precis. Eng. Man., **16** (2015) 73-79.
12. R. Hardin and C. Beckermann : Simulation of Heat Treatment Distortion, 59th Technical and Operating Conference, **3.3** (2005) 1-32.
13. DEFORM-HT3, Columbus, Ohio, USA (2014).
14. D. Deng and S. Kiyoshima : Computational Materials Science, **50** (2010) 612-621.
15. JMatPro® ver8.0, <http://www.sentencesoftware.co.uk/about-us.aspx> (2014).
16. M. F. Rothman : High-temperature property data:

- ferrous alloys, 1st ed, ASM international Ohio (1987) 3.5-3.8.
17. H. Bhadeshia and R. Honeycombe : Steels: microstructure and properties: microstructure and properties, 3rd ed, Elsevier Amsterdam (2011) 11-12.
 18. F. Cverna : ASM Ready Reference Thermal Properties of Metals, 1st ed, ASM International Ohio (2002) 228-229.
 19. G. F. Vander Voort : Atlas of time-temperature diagrams for irons and steels, 1st ed, ASM international Ohio (1991) 34.
 20. S. Hashmi : Comprehensive Materials Processing, 1st ed, Elsevier Amsterdam (2014) 195.