

탄소강 담금질 공정의 온도 측정방법에 대한 고찰

김동규¹· 정경환¹· 강성훈²· 임용택[#]

A Study on Temperature Measurement for Quenching of Carbon Steel

D. K. Kim, K. H. Jung, S. H. Kang, Y. T. Im

(Received November 26, 2009 / Revised December 10, 2009 / Accepted December 21, 2009)

Abstract

To achieve desired microstructure and mechanical property of a manufacturing product, heat treatment process is applied as a secondary process after forging. Especially, quenching process is used for improving strength, hardness, and wear resistance since phase transformation occurs owing to rapid heat transfer from the surface of the specimen. In the present paper, a study on surface temperature measurement for water quenching of eutectoid steel was investigated. In order to determine the temperature history in experiments, three different measuring schemes were used by varying installation techniques of K-type thermocouples. Depending on the measured temperature distribution at the surface of the specimen, convective heat transfer coefficients were numerically determined as a function of temperature by the inverse finite element analysis considering the latent heat generation due to phase transformation. Based on the inversely determined convective heat transfer coefficient, temperature, phase, and hardness distributions in the specimen after water quenching were numerically predicted. By comparing the experimental and computational hardness distribution at three different locations in the specimen, the best temperature measuring scheme was determined. This work clearly demonstrates the effect of temperature measurement on the final mechanical property in terms of hardness distribution.

Key Words : Quenching, Phase Transformation, Inverse Analysis, Convective Heat Transfer Coefficient

1. 서론

열처리는 금속에 원하는 기계적, 물리적, 화학적 성질을 부여할 목적으로 가열과 냉각을 여러 형태로 조합시키는 기술로 열처리 시에 대부분의 금속은 상변태를 수반한다. 상변태를 수반하고 대표적으로 널리 쓰이는 열처리 공정 중에는 최종 제품의 경도, 인장력, 표면강도를 증가시킬 목적으로 행해지는 담금질이 있다. 최근에 담금질 과정 중에 발생하는 상변화와 온도변화를 컴퓨터를 활용한 수치해석으로 분석하여 효율적으로 온도

이력 제어를 함으로써 원하는 기계적 성능을 얻고자 많은 연구 및 시도가 있었다[1~4].

본 연구에서는 원통형 공석강의 담금질 공정을 수치해석으로 분석하여 상변태에 따른 각 상의 체적분율과 잠열을 고려한 온도이력을 계산하고 그 결과를 기반으로 시편 내의 경도분포를 예측하였다. 단, 담금질 동안 시편의 표면에 직접적으로 접촉하는 냉매의 냉각 특성을 정확히 모사하기 위해 열전대를 세 가지 방법으로 시편의 표면에 설치하여 표면온도를 측정하였고, 이를 이용하여 역해석(inverse analysis) 기법으로 대류 열전달

1. 한국과학기술원 기계공학과 대학원
2. 한국기계연구원 부설 재료연구소
한국과학기술원 기계공학과, E-mail: ytim@kaist.ac.kr

계수를 온도의 함수로 구하였다. 세 가지의 다른 냉각 특성을 나타내는 대류 열전달 계수를 담금질 공정 해석에 적용하여 대류 열전달 계수가 온도해석, 상의 체적분율 및 경도 예측에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 담금질 실험

본 연구에 사용된 재료는 POSCORD 80S로서 시편의 화학적 조성은 Table 1과 같다. 강편압연을 거친 빌렛으로부터 기계가공을 거쳐 직경 40mm, 길이 140mm인 원통형 시편을 제작하였다. 내부 온도 측정을 위해 Fig. 1에 제시된 바와 같이 방전가공으로 표면으로부터 20mm와 35mm 깊이의 구멍을 만들어 직경 1mm인 K-type 열전대를 삽입하고 레이저 용접하였다. 시편의 표면 온도를 측정하기 위해서 Fig. 1의 세 가지 열전대 설치법을 이용하였다. 시편 A에서는 표면에 열전대를 덧붙였고, 시편 B에서는 깊이 0.5mm, 폭 1mm의 홈을 만들어 열전대를 삽입한 뒤 0.5mm 두께의 니켈 조각으로 덮었다. 그리고 시편 C에서는 구멍을 반대쪽 표면까지 관통시킨 뒤 열전대를 삽입하되 열전대 끝 부분이 시편 표면에 일치하도록 하고 레이저 용접하였다. 담금질 실험 시 온도이력을 측정하기 위해 DAQ system(National Instrument PCI-6220)을 사용하였다.

담금질에 앞서 상온의 초기 시편을 860°C까지 가열한 후 균일한 온도분포에 도달시켜 1시간 유지하여 완전한 오스테나이트 상을 얻은 뒤 23°C의 충분한 용량의 수조 (100 ℓ)에 넣어 담금질을 하였다.

담금질 후 경도를 측정하기 위해 중심축에 수직이 되도록 시편을 절단한 뒤 연마하였다. 압입 하중 0.5kg, 하중 유지 시간 10초로 설정하여 Vickers(Mitutoyo HM-122) 경도를 단면 중심에서 네 방향으로 측정한 뒤 평균값을 구하였다.

3. 수치해석

3.1 상변태 모델 및 해석 조건

탄소강은 담금질 공정 동안 온도 이력에 따른 상변화를 반드시 수반한다. 즉, 오스테나이트 조직으로부터 탄소함유량이나 냉각조건에 따라 페라이트, 펄라이트, 마르텐사이트 등의 다양한 조

Table 1 Chemical composition of POSCORD 80S

	C	Si	Mn	P	S
Wt%	0.80	0.22	0.6	0.01	0.10

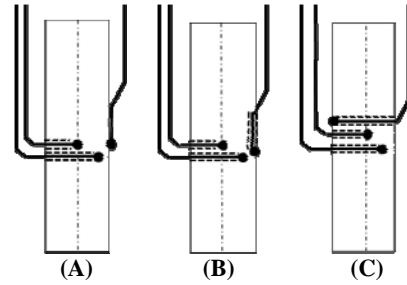


Fig. 1 Configuration of the thermocouple installation methods

식이 얻어진다.

본 연구에서는 담금질과 같은 연속적인 냉각공정에서 각 상의 체적분율을 구하기 위해 본 연구실에서 개발된 CAMPphase[1]를 이용하였다. 확산변태의 경우 탄소함유량에 해당하는 등온 변태선도에 따른 반응속도(reaction kinetics)를 모사하기 위해 JMAK식[5, 6]을 이용하였다.

$$F_i^j = 1 - \exp\{-A \cdot t_j^B\} \quad (1)$$

F_i^j 는 j 번째 시간 증분에서 i 번째 상의 체적분율을 의미하며 A와 B는 재료상수로서 등온변태선도로부터 계산된다. 상변태 개시 (α) 및 종료 (β) 시간에서 각 상의 체적분율을 F_α (= 0.01)과 F_β (= 0.99)라고 한다면 A와 B는 다음과 같이 계산된다.

$$A = -\frac{\ln(1-F_\alpha)}{\alpha^B}, \quad B = \ln\left\{\frac{\ln(1-F_\alpha)}{\ln(1-F_\beta)}\right\} / \ln\left(\frac{\alpha}{\beta}\right) \quad (2)$$

식 (1)에서 변태시간 t_j 는 유한요소해석에서의 주어진 시간 증분 Δt_j 와 전 스텝에서 계산된 각 상의 체적분율 F^{j-1} 을 바탕으로 다음과 같이 계산한다.

$$t_j = \Delta t_j + \left\{-\frac{\ln(1-F_\alpha)}{A}\right\}^{1/B} \quad (3)$$

식 (2)와 (3)을 식 (1)에 대입하면 각 상의 체적분율을 계산할 수 있다.

비등온 연속 냉각공정에서의 상변태를 모사하기 위해 가법정리 (additive rule) [7]를 도입하여 각

상의 핵생성 시기를 계산하였다.

$$\sum_{j=1} \frac{\Delta t_j}{\tau_j} = 1 \quad (4)$$

여기에서 τ_j 는 등온변태선도에서 j번째 시간증분에서의 변태개시 시간을 의미한다.

마르텐사이트 변태와 같은 무확산 변태의 경우에는 Koistinen-Marburger의 경험식 [8]을 도입하여 마르텐사이트의 체적분율을 예측하였다. 이는 다음과 같이 온도에만 의존하는 식으로 표현된다.

$$F_m = [1 - \exp\{-0.011(M_s - T)\}] \cdot (1 - \sum_i F_i) \quad (5)$$

여기에서 F_m 은 마르텐사이트상의 체적분율을 의미하고, M_s 와 T 는 각각 마르텐사이트의 변태개시온도 및 현재온도를 의미한다. 단, 이미 오스테나이트로부터 펄라이트로 변태된 상은 마르텐사이트로 변태하지 않으므로 $(1 - \sum_i F_i)$ 항이 추가되었다.

온도 계산시 상변화에 따른 잠열은 엔탈피 변화를 고려함으로써 계산되며 확산변태에 의한 잠열은 Darken과 Gury[9], 무확산변태에 의한 잠열은 Ericsson[10]이 제안한 다음의 식을 적용하였다.

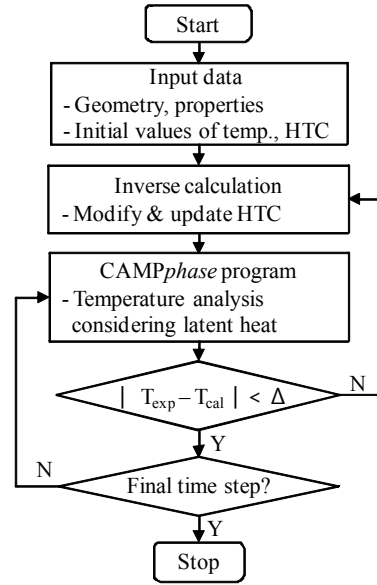
$$\begin{aligned} \Delta H_p (J/m^3) &= 953.0 + 0409T - 0.0012T^2 \\ \Delta H_f (J/m^3) &= 1769.0 - 5.725T + 0.0063T^2 \\ &\quad - 2.303 \times 10^{-6} T^3 \\ \Delta H_m (J/m^3) &= 640 \end{aligned} \quad (6)$$

ΔH_p , ΔH_f , ΔH_m 은 각각 오스테나이트에서 펄라이트, 펄라이트, 마르텐사이트로의 상변태 시 발생하는 온도에 따른 엔탈피변화량을 의미한다.

상변태 예측을 위해 시편을 탄소함유량이 0.80 wt%인 무한히 긴 원통형으로 가정하고 해석을 하였다. 초기 시편은 860°C의 균일한 오스테나이트로 가정하였으며 시편 주변 매질의 온도는 23°C로 하였다. 또한, 각 상의 체적분율 계산 시 탄소함량과 조성이 거의 같은 AISI 1080의 등온변태선도[11]를 이용하였다.

3.2 대류 열전달 계수의 결정

냉매의 냉각 특성에 대한 전산 모사의 성패는 대류 열전달 계수에 의해 크게 좌우된다. 대류 열전달 계수를 온도의 함수로 나타냄으로써 냉각 특성을 정확히 모사할 수 있다. 대류 열전달 계수를 온도의 함수로 구하기 위해 사용된 역해석의



HTC : heat transfer coefficient
 T_{exp} : experimental temperature
 T_{cal} : calculated temperature

Fig. 2 Algorithm for obtaining a convective heat transfer coefficient

알고리즘을 Fig. 2에 나타내었다. 역해석 알고리즘은 온도해석과 최적화 부분으로 이루어진다. 매 시간 스텝에 대해 실험으로부터 측정된 표면 온도와 상변태에 따른 잠열을 고려한 유한요소해석으로 계산된 표면 온도를 비교해 그 차이가 특정값 ($\Delta = 0.1^\circ\text{C}$) 이하로 수렴하도록 대류 열전달 계수를 계산하였다.

3.3 경도 예측 방법

경도를 예측하기 위해 두 가지 방법을 이용하였다. 첫 번째 방법으로 각 상의 경도[12~13]를 가정하고 예측된 상의 체적분율을 이용하여 선형혼합법칙으로 경도를 구하였다. 즉, 펄라이트는 382 HV로 가정하고 마르텐사이트와 잔류 오스테나이트는 865HV로 가정하여 각 상의 경도(HV_i)에 대해 분율(F_i)에 따른 가중 평균을 식 (7)과 같이 구하였다.

$$HV = \sum_i HV_i F_i \quad (7)$$

두 번째 방법은 조미니 시험 결과를 이용하는 것으로 경도는 조미니 거리 JD, 탄소함유량 C, 그리고 조미니 냉각 시간 JCT의 함수로서 계산된다.

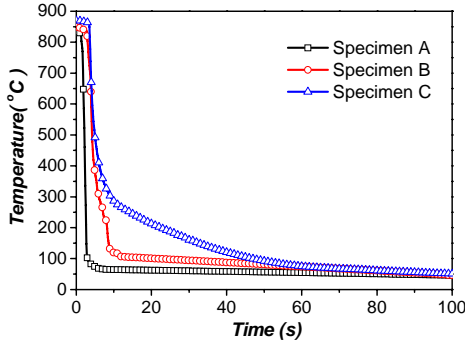


Fig. 3 Measured surface temperatures corresponding to thermocouple installation methods

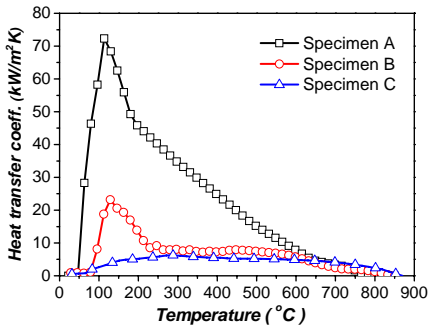


Fig. 4 Convective heat transfer coefficients depending on thermocouple installation methods

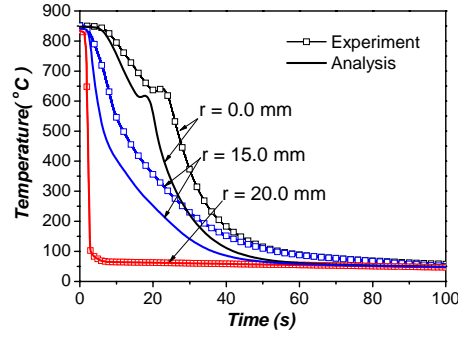
즉, 조미니 원형봉의 각 위치에 따라 800°C에서 500°C까지 냉각되는 데 걸리는 시간이 고유하므로 조미니 원형봉의 위치에 따른 경도를 이용해 시편의 경도분포를 계산할 수 있다[14].

4. 결과 및 고찰

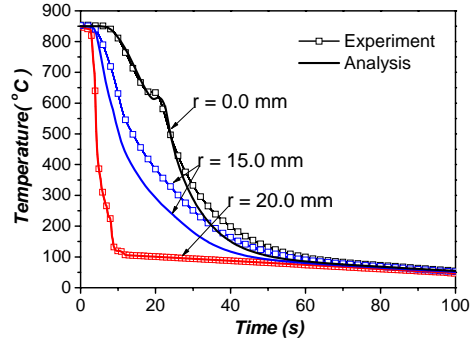
4.1 표면 온도 및 대류 열전달 계수

Fig. 3은 세 시편의 표면에서 측정된 온도 이력이다. 열전대의 설치법에 따라 측정된 표면온도 이력에 차이가 있었으며, A, B, C 시편 순으로 냉각 속도가 빠른 것으로 측정되었다.

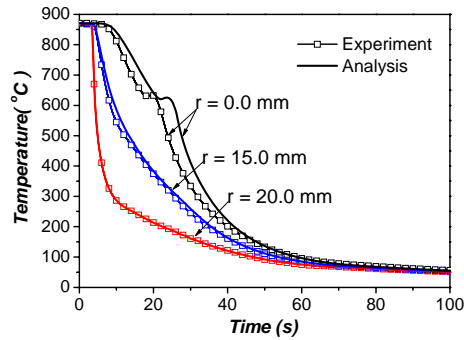
Fig. 4는 각 시편의 표면 측정 온도로부터 역해석을 이용해 얻은 대류 열전달 계수를 나타낸다. 측정된 온도의 냉각속도가 빠를수록 대류 열전달 계수가 전체적으로 높았는데 이는 열유속이 냉각속도에 비례하기 때문이다. 역해석을 이용해 얻어진 대류 열전달 계수는 냉매의 증기막 단계, 핵비등 단계, 그리고 대류냉각 단계의 세 단계로 구



(A)



(B)

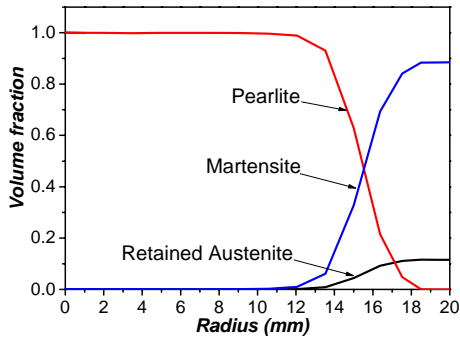


(C)

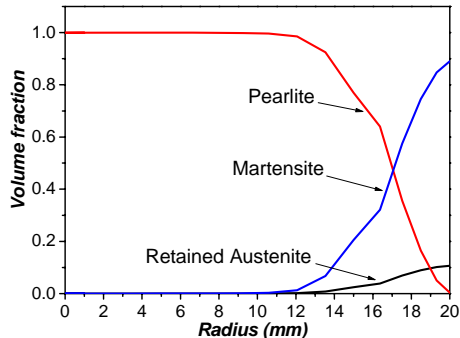
Fig. 5 Comparison of temperature histories according to the time at various positions of the cylindrical specimen obtained from the finite element analyses and experiments

분되는 일반적인 냉각특성을 잘 보여준다.

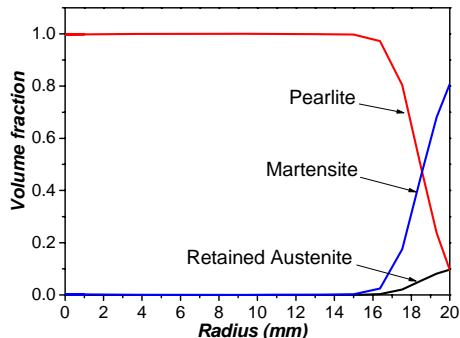
냉각 초기 동안 시편 주변에 냉매의 증기막이 형성되어 증기막이 절연체 역할을 함으로써 냉각이 서서히 이루어지므로 열전달 계수는 상대적으로 낮은 값을 보인다. 냉각이 진행됨에 따라 증기막이 파괴되면서 냉매가 시편 표면에 직접 접촉하여 냉매의 핵비등이 일어나고 시편의 냉각속도



(A)



(B)



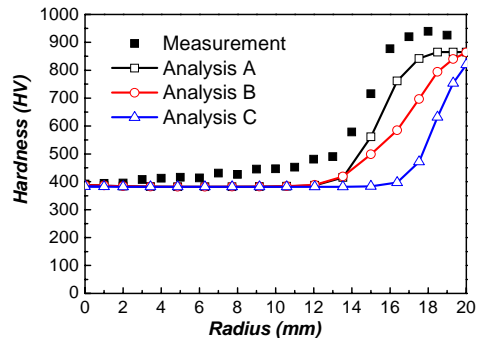
(C)

Fig. 6 Predicted phase distribution along the radius of the cylindrical specimen

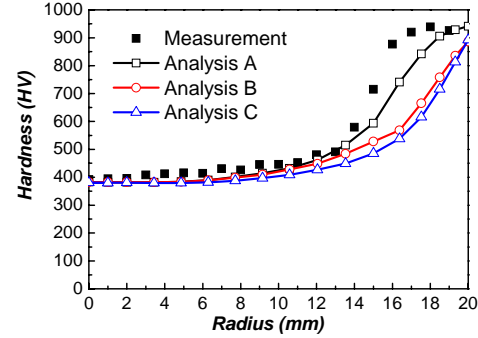
가 매우 빨라지므로 열전달 계수가 매우 높아진다. 시편의 표면 온도가 냉매의 끓는점에 이르면 냉매의 비등이 멈추고 단지 전도와 대류에 의해서만 냉각이 진행되므로 열전달 계수는 다시 낮아진다.

4.2 온도 및 상의 체적분을 예측

Fig. 5는 유한요소해석과 실험으로부터 얻어진 온도이력을 나타낸다. 실험에서 측정된 온도를 보



(a)



(b)

Fig. 7 The measured and calculated hardness distributions using (a) the rule of mixture, (b) Jominy test result in the water quenched cylindrical specimen

면 내부 온도($r=0.0, 15.0\text{mm}$)는 세 시편 모두에서 거의 같았으나 표면 온도($r=20.0\text{mm}$)는 열전대의 설치법에 따라 달랐다. 시편 A에서는 열전대와 냉매가 직접 접촉하기 때문에 가장 급격히 냉각되는 것으로 측정된 반면, 시편 B와 시편 C에서는 상대적으로 완만하게 냉각되는 것으로 측정되었다.

각 위치에서 해석과 실험으로부터 얻은 온도이력을 비교해보면 모든 시편에 대해 표면에서는 거의 일치하고 내부에서는 시편에 따라 다소 차이를 보인다. 이는 각 시편에서 측정된 표면온도와 계산된 표면온도의 차이가 $0.1\text{ }^\circ\text{C}$ 이하로 수렴하도록 표면온도를 기준으로 역해석하였기 때문이다.

Fig. 6은 계산된 각 상의 체적분율 분포를 반경 방향에 대해 나타낸 것이다. 담금질 시에 냉각이 급속히 진행되는 표면에서부터 마르텐사이트 변태가 일어난다. 이 때 마르텐사이트층의 두께는

경화능의 척도가 되며 해석 결과를 비교해 보면 시편 A에서 가장 두껍고 시편 C에서 가장 얇았다. 이는 각 시편에서 측정된 표면온도의 냉각속도 차이가 해석에 반영된 결과이다.

4.3 경도 예측

Fig. 7(a)는 실험으로부터 측정된 경도분포와 선형혼합법칙으로부터 예측된 경도분포를 나타낸다. 해석 결과의 경향은 실험과 상당히 일치함을 알 수 있다. 단, 펄라이트의 형태(morphology)에 따른 경도 차이를 고려하지 않았기 때문에 중심에서부터 표면경화가 관찰되는 위치($r=14\text{mm}$ 이하)까지 실험과 약간의 차이를 보인다. 표면경화층($r=14\text{mm}$ 이상)에서는 각 해석에 따라 실험과 차이를 보이는 정도가 다른 데 이는 다른 대류 열전달 계수를 이용했으므로 마르텐사이트층의 두께가 달라지기 때문이다.

Fig. 7(b)는 실험으로부터 측정된 경도분포와 조미니 실험 결과를 이용하여 예측된 경도분포를 나타낸다. 해석 결과는 실험과 경향이 잘 일치한다. 특히, 중심에서부터 표면경화가 관찰되는 위치까지 경도분포는 약간의 증가를 보이고 있는데, 이는 실험 결과와 거의 일치함을 관찰할 수 있다. 하지만 표면경화층에서는 각 해석에 따라 차이를 보이기도 하는 데, 이는 각 해석에서 다른 대류 열전달 계수를 이용한 결과 800°C 에서 500°C 까지 냉각되는 데 걸리는 시간이 달랐기 때문이다.

5. 결론

본 연구에서는 탄소강의 담금질 시 열전대의 설치법을 달리하여 표면온도를 측정하였고, 역해석을 통해 대류 열전달 계수를 온도의 함수로서 구하였다. 각 경우에 구해진 대류 열전달 계수를 이용해 해석을 수행하여 온도, 상의 체적분율, 경도를 예측하였다.

(1) 역해석으로부터 구한 대류 열전달 계수를 이용하여 상변태 해석을 수행했을 때 온도이력은 해석 B, C의 결과가 실험 결과와 비교적 잘 일치한 반면에 경도는 해석 A의 결과가 실험에서 측정된 경도분포와 상대적으로 잘 일치하였다.

(2) 이 결과를 통해 볼 때 담금질 후 경도를 예측하기 위해서는 열전대를 시편 A에서와 같이 설치하여 표면 온도를 측정하는 것이 좋다. 이는 표

면 부에서 마르텐사이트층에 의한 급격한 경도 증가를 측정 방법 A가 잘 예측할 수 있기 때문이다.

후 기

이 논문은 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 국가지정연구실사업으로 수행된 연구임(No. R0A-2006-000-10240-0).

참 고 문 헌

- [1] S. H. Kang, Y. T. Im, 2005, Three-dimensional finite-element analysis of the quenching process of plain-carbon steel with phase transformation, *Metall. Mater. Trans. A*, Vol. 36, pp. 2315~2325.
- [2] S. H. Kang, Y. T. Im, 2007, Finite element investigation of multi-phase transformation within carburized carbon steel, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 183, pp. 241~248.
- [3] S. H. Kang, Y. T. Im, 2007, Three-dimensional thermo-elastic-plastic finite element modeling of quenching process of plain-carbon steel in couple with phase transformation, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 49, pp. 423~439.
- [4] P. R. Woodard, S. Chandrasekar, H. T. Y. Yang, 1999, Analysis of temperature and microstructure in the quenching of steel cylinders, *Metall. Mater. Trans. B*, Vol. 30, pp. 815~822.
- [5] W. A. Johnson, R. F. Mehl, 1939, Reaction kinetics in processes of nucleation and growth, *Trans. AIME*, Vol. 135, pp. 416~458.
- [6] M. Avrami, 1939, Kinetics of phase change I, *J. Chem. Phys.*, Vol. 7, pp. 1103~1112.
- [7] E. Scheil, 1935, Anlaufzeit der austenitumwandlung, *Arch. Eisenhüttenwes.*, Vol. 12, pp. 564~567.
- [8] D. P. Koistinen, R. E. Marburger, 1959, A general equation prescribing the extent of the austenite-martensite transformation in pure iron-carbon alloys and carbon steels, *Acta. Metall.*, Vol. 7, pp. 59~60.
- [9] L. S. Darken, R.W. Gury, 1953, *Physical Chemistry of Metals*, McGraw-Hill, New York, NY, p. 415.
- [10] T. Ericsson, S. Sjöström, M. Knuutila, 1983, *Predicting Residual Stresses in Castings*, D.E.

- Diesburg, ed., Case Hardened Steels, Metallurgical society of AIME, Warrendale, PA.
- [11] E. C. Bain, 1963, Isothermal transformation diagrams, Third ed., United States Steel Corporation, Pittsburgh, PA, USA.
- [12] C. A. Siebert, 1977, The hardenability of steels, ASM, Metals Park, OH.
- [13] R. D. Manning, H. M. Reichhold, J. M. Hodge, 1967, Transformation and hardenability in steels, Symp. Proc., Climax Molybdenum Company, Ann Arbor, MI.
- [14] A. Sugianto, M. Narazaki, M. Kogawara, A. Shirayori, S. Y. Kim, S. Kubota, 2009, Numerical simulation and experimental verification of carburizing-quenching process of SCr420H steel helical gear, J. Mater. Process. Technol., Vol. 209, pp. 3597~3609.