

유한요소해석을 이용한 탄소강의 담금질 공정에 대한 상변태 및 기계적 성질 예측

김동규¹ · 정경환¹ · 강성훈² · 임용택[#]

Prediction of Phase Transformation and Mechanical Property of Carbon Steel in Quenching based on Finite Element Analysis

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

Abstract

A great emphasis has been placed on the design of heat treatment process to achieve desired microstructure and mechanical property of final product. In this study, finite element analysis was carried out to predict temperature, microstructure and hardness of eutectoid steel after water quenching. Convective heat transfer coefficients were determined by inverse analysis using surface temperatures measured with three different installation methods of thermocouples. Finally, the effect of convective heat transfer coefficients on the prediction of temperature history and hardness was analyzed by comparing experimental and simulation results.

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 온도이력 제어를 함으로써 원하는 기계적 성능을 얻고자 많은 연구 및 시도가 있었다 [1,2].

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 모사하

기 위해 열전대를 세 가지 방법으로 시편의 표면에 설치하여 표면온도를 측정하였고 이를 이용하여 역해석 (inverse analysis) 기법으로 대류 열전달 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 80S으로서 시편의 화학적 조성은 Table 1과 같다. 강편압연을 거친 빌렛으로부터 기계가공을 거쳐 직경 40 mm, 길이 140 mm인 원통형 시편을 제작하였다. 내부 온도 측정을 위해 Fig. 1에 제시된 바와 같이 방전

1. 한국과학기술원 기계공학과 대학원

2. 한국기계연구원 부설 재료연구소

한국과학기술원 기계공학과, E-mail: ytim@kaist.ac.kr

가공으로 표면으로부터 20 mm와 35 mm 깊이의 구멍을 만들어 직경 1 mm인 K-type 열전대를 삽입하고 레이저 용접하였다. 시편의 표면 온도를 측정하기 위해서 Fig. 1의 세 가지 열전대 설치법을 이용하였다. 시편 A에서는 표면에 열전대를 덧 붙였고 시편 B에서는 깊이 0.5 mm, 폭 1 mm의 홈을 만들어 열전대를 삽입한 뒤 0.5 mm 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 1 시간 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. 압입하중 0.5 kg, 하중 유지 시간 10 초로 설정하여 Vickers (Mitutoyo HM-122) 경도를 단면 중심에서 네 방향으로 측정한 뒤 평균값을 구하였다.

3. 수치해석

3.1 상변태 해석

탄소강은 담금질 공정 동안 온도 이력에 따른 상변화를 반드시 수반한다. 즉, 오스테나이트 조직으로부터 탄소함유량이나 냉각조건에 따라 페라이트, 펄라이트, 마르텐사이트 등의 다양한 조직이 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 [3,4]을 이용하고 가법정리 (additive rule) [5]를 도입하여 비등온 변태 과정에 대해 모사하였다. 마르텐사이트 변태와 같은 무확산 변태의 경우에는 Koistinen-Marburger의 경험식 [6]을 도입하여 마르텐사이트의 체적분율을 예측하였다. 그리고 온도 계산시 상변화에 따른 잠열을 고려하였다.

상변태 예측을 위해 시편을 탄소함유량이 0.80

Table 1 Chemical composition of POSCORD 80S

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

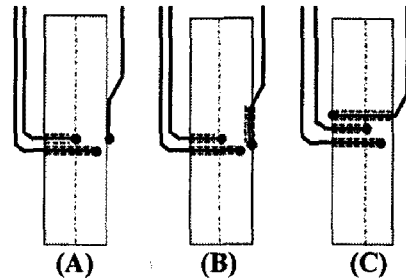


Fig. 1 Configuration of the thermocouple installation methods

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 체적분을 계산시 AISI 1080의 등온변태선도 [7]를 이용하였다.

3.2 대류 열전달 계수의 결정

냉매의 냉각 특성에 대한 모사는 대류 열전달 계수에 의해 크게 좌우된다. 대류 열전달 계수를 온도의 함수로 나타냄으로써 냉각 특성을 정확히 모사할 수 있다. 대류 열전달 계수를 구하기 위한 역해석에서는 실험으로부터 측정된 표면 온도와 유한요소해석으로 계산된 표면 온도를 비교해 그 차이가 특정 값 ($\Delta = 0.1$ °C) 이하로 수렴하도록 열전달계수를 최적화하였다.

3.3 경도 예측 방법

각 상의 경도 [8,9]를 가정하고 예측된 상의 체적분율을 이용하여 선형혼합법칙으로 경도를 구하였다. 즉, 펄라이트는 382 HV 가정하고 마르텐사이트와 잔류 오스테나이트는 865 HV로 가정하여 각 상의 경도 (HV_i)에 대해 분율 (F_i)에 따른 가중 평균을 식 (1)과 같이 구하였다.

$$HV = \sum_i HV_i F_i \quad (1)$$

4. 결과 및 고찰

4.1 표면 온도 및 대류 열전달 계수

Fig. 2는 세 시편의 표면에서 측정된 온도 이력이다. 열전대의 설치법에 따라 측정된 표면온도 이력에 차이가 있었으며 A, B, C 시편 순으로

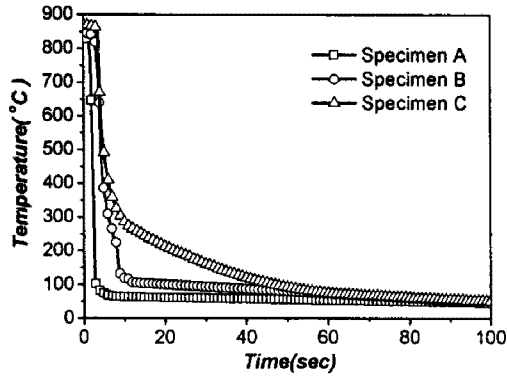


Fig. 2 Measured surface temperature corresponding to thermocouple installation methods

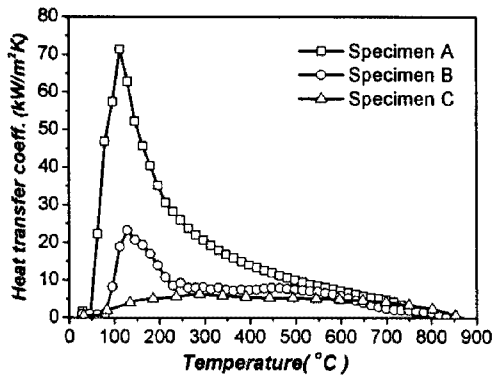


Fig. 3 Convective heat transfer coefficients according to the temperature

냉각 속도가 빠른 것으로 측정되었다.

Fig. 3은 각 시편의 표면 측정 온도로부터 역해석을 이용해 얻은 대류 열전달 계수를 나타낸다. 측정된 온도의 냉각속도가 빠를수록 대류 열전달 계수가 전체적으로 높았는데 이는 냉각속도와 열유속이 비례하기 때문이다. 역해석을 이용해 얻어진 대류 열전달 계수는 냉매의 증기막 단계, 핵비등 단계 그리고 대류냉각 단계의 세 단계로 구분되는 일반적인 냉각특성을 잘 보여준다.

4.2 온도 및 상의 체적분을 예측

Fig. 4는 유한요소해석과 실험으로부터 얻어진 온도이력을 나타낸다. 실험에서 측정된 온도를 보면 각 시편의 표면 온도 ($r = 20.0$ mm)는 열전대의 설치법에 따라 다르게 측정되었고 내부 온도 ($r = 0.0, 15.0$ mm)는 세 시편 모두에서 거의 같았다. 시편 A에서는 열전대와 냉매가 직접 접촉하기 때문에 표면 온도가 가장 급격히 냉각되는 것으로 측정되었고 시편 C에서는 열전대가 시편을 관통하므로 시편 내부의 열이 열전대관을 통해 전도되어 표면 온도가 가장 완만하게 측정되었다.

각 위치에서 해석과 실험으로부터 얻은 온도이력을 비교해보면 모든 시편에 대해 표면에서는 거의 일치하고 내부에서는 다소 차이를 보인다.

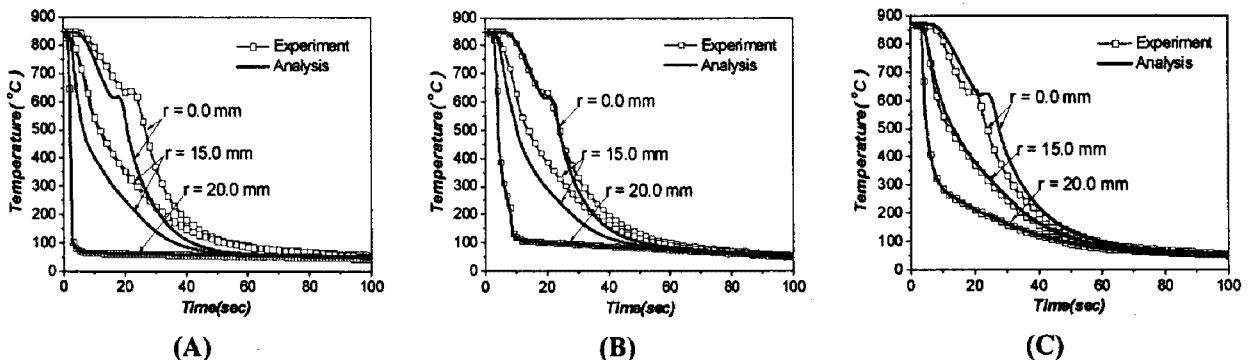


Fig. 4 Comparison of temperature histories according to the time at various positions of the cylindrical specimen obtained from the FE analyses and experiments

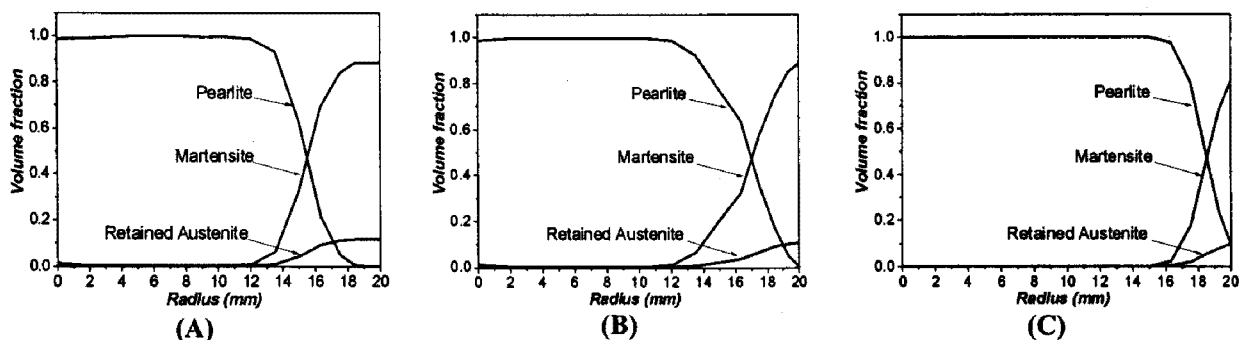


Fig. 5 Predicted phase distribution along the radius of the cylindrical specimen

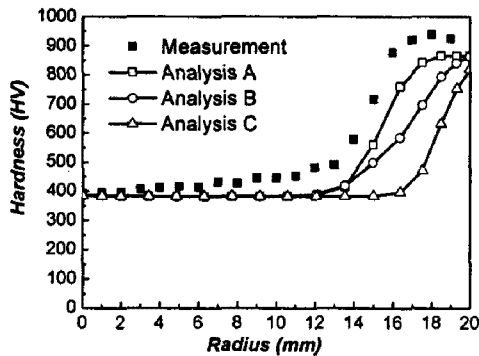


Fig. 6 The measured and calculated hardness distribution in the quenched cylindrical specimen

이는 시편 내부에서의 열전도를 지배하는 열물성치가 정확하지 않았기 때문이다.

Fig. 5는 계산된 각 상의 체적분율 분포를 반경 방향에 대해 나타낸 것이다. 담금질 시에 냉각이 급속히 진행되는 표면에서부터 마르텐사이트 변태가 일어난다. 이때 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. 6은 실험으로부터 측정된 경도분포와 선형 혼합법칙으로부터 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 ($r = 14$ mm 이하)까지 실험과 약간의 차이를 보인다. 표면경화층 ($r = 14$ mm 이상)에서는 각 해석에 따라 실험과 차이를 보이는 정도가 다른데 이는 다른 대류 열전달 계수를 이용했으므로 마르텐사이트층의 두께가 달랐기 때문이다.

5. 결론

본 연구에서는 탄소강의 담금질 동안 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 실험과 비교적 잘 일치한 반면에 경도는 해석 A의 결과가 실험에서 측정된 경도분포와 상대적으로 잘 일치하였다.

(2) 담금질 후 경도를 예측하기 위해 열전대를 시편 A에서와 같이 설치하여 표면 온도를 측정하는 것이 좋다. 표면 부에서 마르텐사이트층에 의한 급격한 경도 증가를 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, 2007, Finite element investigation of multi-phase transformation within carburized carbon steel, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 183, pp. 241~248.
- [2] 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. 30B, pp. 815~822.
- [3] W. A. Johnson, R. F. Mehl, 1939, Reaction kinetics in processes of nucleation and growth, *Trans. AIME*, Vol. 135, pp. 416~458.
- [4] M. Avrami, 1939, Kinetics of phase change I, *J. Chem. Phys.*, Vol. 7, pp. 1103~1112.
- [5] E. Scheil, 1935, Anlaufzeit der austenitumwandlung, *Arch. Eisenhüttenwes.*, Vol. 12, pp. 564~567.
- [6] 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.
- [7] E. C. Bain, 1963, *Isothermal transformation diagrams*, third ed., United States Steel Corporation, Pittsburgh, PA, USA.
- [8] C. A. Siebert, 1977, *The hardenability of steels*, ASM, Metals Park, OH.
- [9] R. D. Manning, H. M. Reichhold, J. M. Hodge, 1967, Transformation and hardenability in steels, *Symp. Proc.*, Climax Molybdenum Company, Ann Arbor, MI.