

상변태 예측 및 열응력 해석에 의한 CrMoSC1 강의 열처리 공정 설계

최봉학* · 곽시영 · 김정태 · 최정길
한국생산기술연구원 디지털설계센터

Heat Treatment Process Design of CrMoSC1 Steel by Prediction of Phase Transformation and Thermal Stress Analysis

B. H. Choi[†], S. Y. Kwak, J. T. Kim and J. K. Choi

Center for e-Design, Korea Institute of Industrial Technology, Incheon 406-800, Korea

Abstract Although heat treatment is a process of great technological importance in order to obtain desired mechanical properties such as hardness, the process was required a tedious and expensive experimentation to specify the process parameters. Consequently, the availability of reliable and efficient numerical simulation program would enable easy specification of process parameters to achieve desired microstructure and mechanical properties without defects like crack and distortion. In present work, the developed numerical simulation program could predict distributions of microstructure and thermal stress in steels under different cooling conditions. The computer program is based on the finite difference method for temperature analysis and microstructural changes and the finite element method for thermal stress analysis. Multi-phase decomposition model was used for description of diffusional austenite decompositions in low alloy steels during cooling after austenitization. The model predicts the progress of ferrite, pearlite, and bainite transformations simultaneously during quenching and estimates the amount of martensite also by using Koistinen and Marburger equation. To verify the developed program, the calculated results are compared with experimental ones of casting product. Based on these results, newly designed heat treatment process is proposed and it was proved to be effective for industry.

(Received June 27, 2005; accepted July 25, 2005)

Key words: Numerical analysis, Phase transformation, Multi-phase decomposition model, Heat treatment, CrMoSC1, Thermal stress

1. 서 론

열처리공정은 제품의 최종 품질을 결정하는 중요한 공정으로 제품이 요구되는 기계적 성질을 얻기 위하여 소입, 소려, 소둔, 담금질 등의 열처리 공정 중 적합한 공정을 선택하고 열처리로 내에서 적절한 열처리조건을 설정하여 열처리를 행하면 최종제품의 품질을 얻게 된다. 이 열처리 과정에서 가열 속도, 가열 유지시간, 냉매의 선택, 냉각조건 등의 여러 공정 변수가 부적절할 경우에는 목표로 하는 기계적 성질을 얻지 못하거나 잔류응력, 열응력 등의 영향으로 치수 변형, 크랙 불량 등이 발생하게 되고 이는 제품의 불량을 초래하게 되는 등 고열 및 냉각 이에

수반하는 금속 조직의 다양한 변화로 인하여 공정의 최적 조건을 결정하는 것은 매우 어려운 일이다.

열처리 공정은 일반적으로 실험을 통하여 축적된 경험을 바탕으로 설계되고 있으며 최근에는 컴퓨터를 이용한 열처리 공정의 해석이 연구되었다. 열처리 분야에서 Avrami[1]에 의해 시작된 확산 변태에 대한 모델링은 Brinacombe[2,3] 등에 의해 수치해석이 도입되면서 많은 발전을 이루었다. TTT 곡선 등을 이용하여 공정 후의 조직분포의 예측이 가능하게 되었으며 경도와 같은 기계적 성질의 예측도 가능하게 되었다. K.F. Wang[4]은 퀴칭공정에서 냉각수뿐만 아니라 폴리머 수용액에 대한 퀴칭과정에서도 온도, 조직, 경도 및 응력 분포를 예측하고 실험을 수행하

[†]E-mail : alexchoi@kitech.re.kr

여 좋은 결과를 얻었다. 또한 Denis[5,6], Inoue[7,8] 등도 일련의 연구를 통하여 조직해석과 응력의 연성 효과까지 고려하게 되었다. 하지만 열, 조직, 응력의 상호 연성 작용을 완전히 기술하는 모델은 현재까지도 많은 연구자들에 의해 계속적으로 연구되고 있다[9]. 근래에는 냉각 시의 열전달 효과를 유체역학적으로 고려하여 열처리 공정 전반에 대한 해석이 시도되고 있다[10,11].

본 연구에서는 다상 확산 변태 모델을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 CrMoSC1합금강의 조직 변태를 예측하고 또한 냉각조건에 따른 열응력 해석을 수행함으로써 금속의 기계적 성질을 만족하며 제품의 변형과 잔류응력이 최소로 되는 열처리 공정을 설계 하였다.

2. 수치 해석 방법

열처리 시 가열과 냉각에 의해 조직의 상변태가 발생함으로 수치해석을 위해서는 열전달 해석이 필수적이다. 본 연구에서는 유한 차분법을 적용하여 열전달 해석을 수행하였으며 열전달 해석과정에서 다상 확산 변태 모델을 이용하여 조직변태를 예측하였다. 또한 여러 냉각 조건에서의 열응력 해석은 유한 요소법을 사용하였다. 사용된 유한차분법과 유한요소법은 저자의 다른 논문에 자세히 기술되어 있다[12].

2.1 다상 확산 변태 모델

1980대까지 개발되었던 확산변태에 대한 모델들은[6] 대부분 오스테나이트에서 펄라이트로의 변태에만 국한된 것으로 여러 상이 다양한 냉각속도에 따라 혼재하여 나올 수 있는 일반적인 합금강의 경우에는 적용이 불가능하다. 그러므로 본 연구에서는 페라이트, 펄라이트, 베이나이트를 확산변태에 의한 상으로 규정하고 이를 위한 Multi-Phase Decomposition Model[13]을 적용하였다.

위의 3가지 상의 변태는 오스테나이트의 소멸에 따라 생성되는 것으로 생각할 수 있으므로 임의의 온도, 시간에서 4가지 상들 간의 관계식은 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$F_{\gamma} = 1 - (F_{\alpha} + F_P + F_B) \tag{1}$$

단, 변태의 초기에 오스테나이트 전체 분율은 1이고 오스테나이트에서 페라이트, 펄라이트, 베이나이트로의 변태는 비가역적반응으로 가정을 한다.

이와 같이 여러 상이 혼재해 있을 때의 확산 변태를 계산하기 위한 식은 Reti 등이 제안한 아래의 (2)식을 사용하였다[13].

$$f_i(t) = F_i(T)[1 - \exp(-B_i(T)t^{N_i(T)})] \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^N F_i(T) = 1 \tag{3}$$

는 각 상(α, P, B)을 나타내며 $F_i(T)$ 는 임의의 온도에서 각 상의 최대 변태분율이다.

새롭게 도입된 최대 변태분율의 의미는 해당온도에서 항온변태를 진행했을 때 각 상이 가질 수 있는 최대 분율을 의미하는 것으로 TTT 곡선 상에서 변태 종료선에서 각 상의 분율을 나타낸다. Fig. 1에

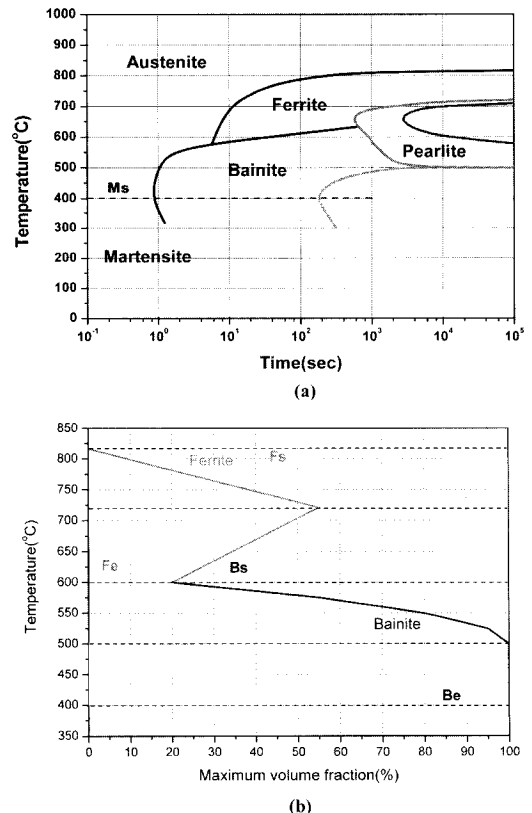


Fig. 1. Diagrams of CrMoSC1 steel[14]; (a) IT diagram, (b) Estimated maximum volume fraction.

는 CrMoSC1강의 IT diagram[14]과 온도에 따른 각 상의 최대 변태분율을 나타내었다. 이 최대 변태분율들은 다상확산변태 모델에서 필수적인 데이터로 Reti 등이 제안한 34Cr4강의 최대 변태분율 곡선 [13]을 기본으로 CrMoSC1강의 CCT diagram 상의 각 상의 변태분율을 참고하여 수정한 것이다. 이러한 데이터를 얻어내기 위해서는 TTT나 CCT 데이터 상에 변태의 시작과 종료선 외에 변태분율이 표시된 데이터가 필요하며 페라이트의 경우에는 Fe-C 상태도를 외삽하는 방법으로 계산이 가능하다.

또한 식(2)의 $B_i(T)$, $N_i(T)$ 는 TTT 곡선 상에서 각 온도에서의 등온변태의 시작(s)과 끝점(e)에 의해서 결정될 수 있으며 프로그램 내에서 아래의 식(4), (5)와 같이 각 온도에서의 값을 계산해 낼 수 있다.

$$N_i(T) = \frac{\ln\left[\frac{\ln(1-F_s)}{\ln(1-F_e)}\right]}{\ln\left[\frac{t_s}{t_e}\right]} \quad (4)$$

$$B_i(T) = \frac{\ln(1-F_s)}{t_s^{N_i(T)}} \quad (5)$$

이제 각각의 time step에서 상(phase)별 변태량을 계산하기 위해서 식(2)을 풀어보면

$$\frac{df_i}{dt} = N_i B_i^{1/N_i} [F_i - f_i] \left\{ \ln \frac{F_i}{F_i - f_i} \right\}^{1-(1/N_i)} \quad (6)$$

위 식과 같이 되고 이 식을 이용하여 변태율의 변화를 계산할 수 있고 매 time step 마다 각 상의 변태 변화율을 계산하여 이를 누적해 나가게 된다.

식(6)의 물리적인 의미는 페라이트 변태만을 고려한 Johnson-Mehl-Avrami 식과 유사하지만 Multi-Phase에서의 분율을 동시에 계산할 수 있고 식(6)과 같이 변환 후에 이전의 계산식에서 해석과정 중의 incubation time의 계산이 필요 없이 바로 변태율을 계산할 수 있는 관계식을 얻을 수 있게 해준다.

2.2 마르텐사이트 변태

오스테나이트가 확산 변태하는 것을 급랭에 의하여 저지시키는 경우 오스테나이트는 저온에 있어서 준평형상태로 유지된다. 과냉도가 증가하면 오스테나이트가 분해되기 위한 구동력이 증가하여 다른 상으로 변태를 일으키기에 충분하며 모상의 전 영역에 걸쳐서 전단에 의하여 계면이 넓혀지고 새로운 결정이 생성된다. 이러한 변태를 무확산 변태라고 하며 마르텐사이트 변태가 이에 속한다. 마르텐사이트 변태는 Koistinen & Marburger[4]가 제시한 아래의 식(7)을 이용하여 변태율을 예측하도록 하였다.

여기에서 $\bar{\alpha}$ 는 재질에 따른 비례 상수로 일반적으로 $1.10 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$ 를 사용하며 T_{ms} 는 마르텐사이트 변태온도이다.

$$F_m = [1 - \exp[-\bar{\alpha}(T_{ms} - T)]] \left[1 - \sum_i F_i \right] \quad (7)$$

3. 유한요소법에 의한 열응력 해석

열탄소성 응력 해석에 있어 전변형율은 다음과 같이 표현된다.

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p + \varepsilon_o \quad (8)$$

여기서 ε_e , ε_p 와 ε_o 는 각각 탄성변형율, 소성변형율 및 초기변형율을 나타낸다. 해석 영역을 유한요소로 이산화한 후, 유한요소 내의 한 점에 대한 변위는 형상함수(shape function, $[N_i]$)를 이용하여 식(9)와 같이 표현할 수 있다.

$$\{\Delta u\}^e = [N_i] \{\Delta u\}_i^e \quad (9)$$

또한 변형율벡터 및 응력벡터는 변형율-변위행렬 $[B]$ 와 탄소성행렬 $[D_{ep}]$ 을 이용하여 식(10)과 식(11)로 각각 나타낼 수 있다.

$$\{\varepsilon\} = [B] \{\Delta u\} \quad (10)$$

$$\{\sigma\} = [D_{ep}] \{\varepsilon - \varepsilon_p - \varepsilon_o\} \quad (11)$$

유한요소 정식화 과정을 통하여 i 번째 유한요소에 대한 평형방정식은 식(12)와 같이 주어진다.

$$[K]_i^e \{\Delta u\}_i^e = \{\Delta F_o\}_i^e + \{\Delta F_p\}_i^e \quad (12)$$

여기서

$$\{\Delta F_o\}_i^e = \int_{\Omega} [B]_i^e{}^T [D_{ep}]_i \{(\alpha) \Delta T\} d\Omega \quad (13)$$

$$\{\Delta F_p\}_i^e = \int_{\Omega} [B]_i^e T [D_{ep}]_i \left(\frac{\partial [D_{ep}]_i^{-1}}{\partial T} \{\sigma\} \Delta T + \frac{[D_{ep}]_i^{-1} [D_e]_i \{\sigma\}}{S} \frac{\partial f}{\partial T} \Delta T \right) d\Omega \quad (14)$$

여기서 S는 다음과 같다.

$$S = \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T [D_e]_i \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} - \frac{\partial f}{\partial k} \left\{ \frac{\partial f}{\partial \epsilon_p} \right\}^T \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} \quad (15)$$

식(13)의 $\{F_o\}_i^e$ 는 열변형에 의한 등가절점력을 나타내며, 식(14)의 $\{F_p\}_i^e$ 는 탄성계수, 포와송 비, 항복응력 등의 기계적 물성치가 온도의존적인 거동을 함에 따라 발생하는 등가절점력을 나타낸다. 해석영역 전체의 평형방정식은 각 유한요소의 기여분을 조합함으로써 얻어진다.

$$[K] = \{\Delta U\} = \{\Delta F_T\} \quad (16)$$

여기서 [K]는 강성행렬, $\{\Delta U\}$ 는 변위벡터, $\{\Delta F_T\}$ 는 절점력벡터이다. 식(10)의 각 항은 다음과 같이 표현된다.

$$[K] = \sum_{i=1}^{NE} [K]_i^e \quad (17)$$

$$\{\Delta F_T\} = \sum_{i=1}^{NE} (\{F_o\}_i^e + \{F_p\}_i^e) \quad (18)$$

여기서 NE는 해석영역을 구성하는 유한요소의 개수이다. 위의 유한요소방정식은 등방경화성 소성거동을 표현하는 구성방정식에 기초하여 유도되었다.

열처리 또는 주조공정에서 유한차분법을 이용하여 얻은 온도 및 조직변태 등의 해석 데이터는 응력해석을 위해 유한요소망의 절점 데이터로 변환되어야 한다. 이러한 변환 절차에 대해서는 참고문헌[12]에 자세히 기술되어 있다.

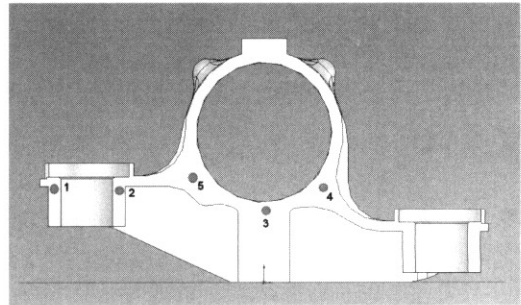
4. 해석 결과 및 고찰

4.1 해석 제품 및 해석 조건

개발된 프로그램의 적용을 위하여 Fig. 2(a)와 같은 전동차 차량의 하부 구조품으로 사용되는 journal box에 대한 열처리 공정 설계를 실시하였다. 이 제품의 크기는 길이 315 mm, 높이 275 mm, 그리고 두께 110 mm이며 강종은 저합금강의 일종인 CrMoSC1으로 아래의 Table 1에 CrMoSC1강의 목표 조성 및 실험시의 조성을 나타내었다.



(a)



(b)

Fig. 2. A cast journal box for heat treatment process design application; (a) Shape of journal box, (b) Schematic illustration of 5 test points for examination of temperature and microstructure.

Table 1. Chemical composition of CrMoSC1 steel

	Composition, wt.%						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Nominal	0.2~0.3	0.3~0.6	0.5~0.8	< 0.04	< 0.04	0.8~1.2	0.15~0.3
Specimen	0.272	0.354	0.581	0.031	0.003	0.998	0.170
Product	0.24	0.44	0.72	0.021	0.016	0.92	0.24

Table 2. Physical properties of CrMoSC1 steel

Temp. (°C)	Density (kg/m ³)	Specific heat (J/kg K)	Heat conductivity (W/m K)
100	7840	477	42.7
300	7820	544	40.7
500	7720	657	37.2
700	7660	829	31.0
800	7630	837	30.1

Table 3. Mechanical properties of CrMoSC1 steel[15,16]

Temp (°C)	Young modulus (Pa)	Poisson ratio	Expansion coefficient (K-1)	Yield stress (Pa)
25	221 × 10 ⁹	0.287	11.3 × 10 ⁻⁶	274 × 10 ⁻⁶
200	180 × 10 ⁹	0.292	13.1 × 10 ⁻⁶	268 × 10 ⁻⁶
400	151 × 10 ⁹	0.298	14.3 × 10 ⁻⁶	262 × 10 ⁻⁶
600	95 × 10 ⁹	0.308	14.8 × 10 ⁻⁶	178 × 10 ⁻⁶
800	60 × 10 ⁹	0.340	15.4 × 10 ⁻⁶	57 × 10 ⁻⁶

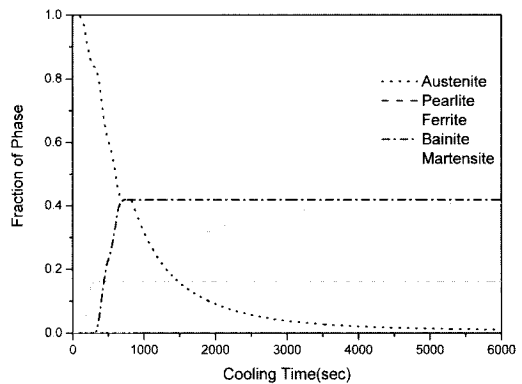
Table 2는 열처리 공정 해석을 위한 CrMoSC1강의 각 온도에서의 열물성치를[15] 보여주고 있고, Table 3은 열응력 해석을 수행하기 위한 CrMoSC1강의 기계적 물성치를 나타내고 있다. 특히 열응력 해석을 위한 기계적 물성치를 확보하기 위해 참고문헌[15,16] 및 Y-block의 주조 시편을 제조하고 주방상태의 인장 시편(KSD 0026-1997,II-6)을 이용하여 상온, 200°C, 400°C, 600°C, 800°C에서 고온 인장 시험을 병행하였다.

Fig. 2(b)에는 해석의 수행 시 온도이력, 조직의 변태이력을 기록하기 위한 5개소의 위치를 나타내었으며 이 위치에서 제품의 시편을 채취하여 조직사진과 경도를 측정하여 해석한 결과와 비교하였다.

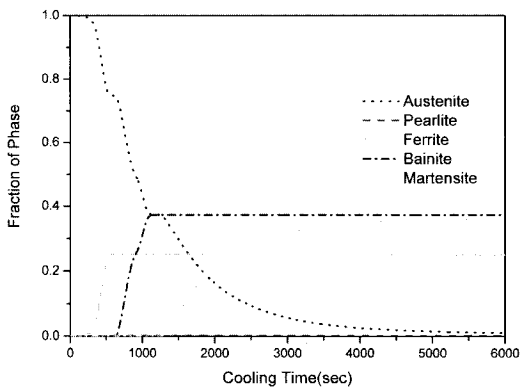
4.2 CrMoSC1 강에 대한 상변태 해석

4.2.1 Normalizing

제품을 880°C에서 3.5시간 동안 가열한 후 공랭하는 열처리공정에 대한 해석을 실행하여 시간에 따른 각 부위별 조직 분율의 변화를 살펴보았다(Fig. 3). 상온까지의 냉각시간은 대략 1시간 40분 가량 소요될 것으로 예측되며 펄라이트의 생성은 예측되지 않고 페라이트의 변태가 우선 시작되어 제품의 두께에 따라 최대 25% 정도의 변태량이 예측되며(point #5) 두께가 얇은 부위에는 마르텐사이트와 베이나이트의 혼합조직이 예측되어진다. 페라이트의 변태량이



(a)



(b)

Fig. 3. Predicted fraction of phases at test points after normalizing; (a) Point #1, (b) Point #5.

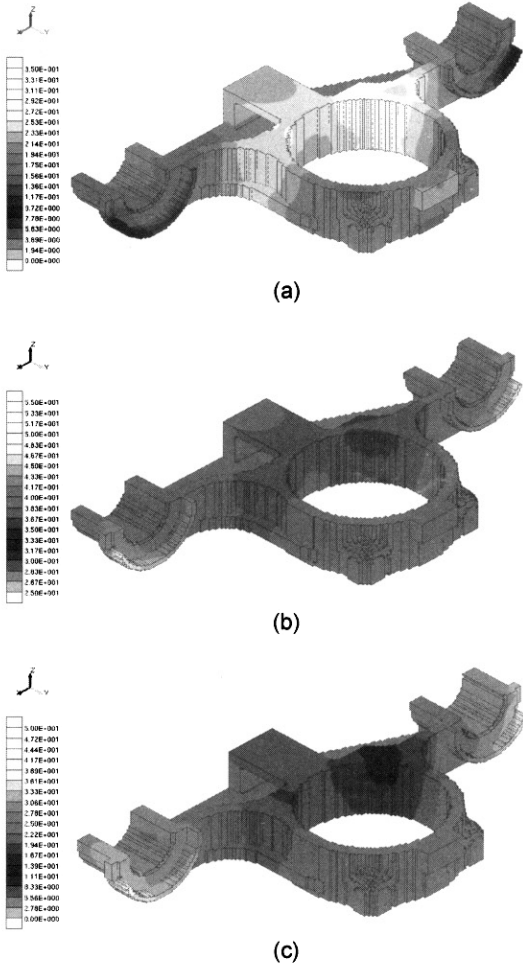


Fig. 4. Distribution of phases at 30 minutes in normalizing; (a) Ferrite, (b) Bainite, (c) Martensite.

25% 정도가량 얻어지는 지점에서 경도의 저하가 예상되었으며 Fig. 4에는 부위별 상분율의 분포를 단면형상에 나타내었다.

Normalizing 공정 해석 결과 목표 경도에 미치지 못할 것으로 예상되기에 80°C의 oil에 quenching한 결과를 해석하여 보았다. 빠른 냉각으로 펄라이트와 페라이트의 변태는 없을 것으로 예측되며 마르텐사이트의 변태도 대략 250초 후에 완결될 것으로 예상된다(Fig. 5). 표면부위에는 마르텐사이트 100%, 두께가 두꺼운 부위에는 베이나이트가 최대 20% 가량이 예상되어 공랭의 경우에 비하여 경도의 현저한 증가가 예상된다.

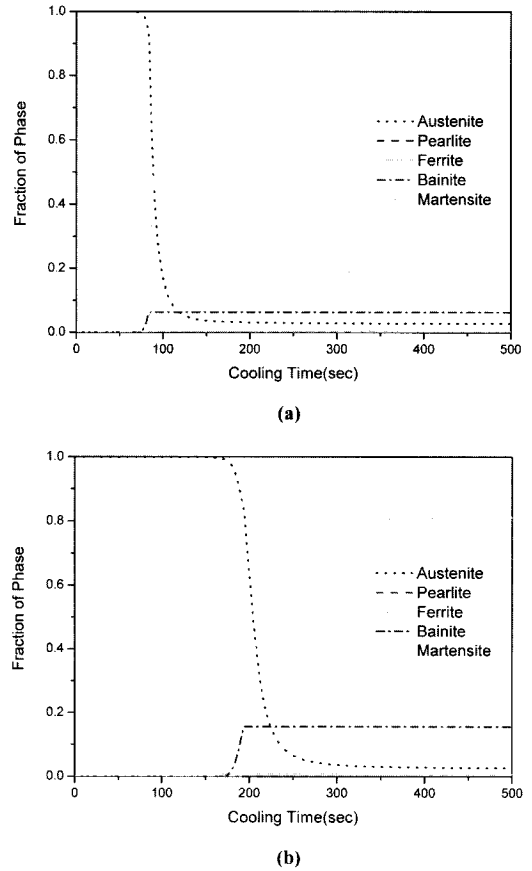


Fig. 5. Predicted fraction of phases at test points after oil quenching; (a) point #1, (b) point #5.

4.3. CrMoSC1 강에 대한 열응력 해석

4.3.1 Normalizing

제품을 880°C로부터 25°C의 공기중에서 공냉하는 열처리공정에 대한 열응력 해석 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(a) Von-Mises 응력 결과를 나타내었는데 최대 응력이 85 Mpa로 서냉에 의해 매우 작은 것을 알 수 있다. 변형 또한 큰 비틀림이 발생하지 않았다.

4.3.2 Quenching

Fig. 8에서는 880°C에서 80°C의 오일에 냉각하는 열처리공정에 대한 열응력 해석 결과를 보여주고 있다. Fig. 8(a) Von-Mises 응력 결과를 나타내었는데 최대 응력이 500 MPa로 공냉에 비해 급격히 증가한 것을 알 수 있다. 하지만 CrMoSC1 강의 상온에서의 인장강도가 약 1 Gpa임을 감안 할 때 공정상의

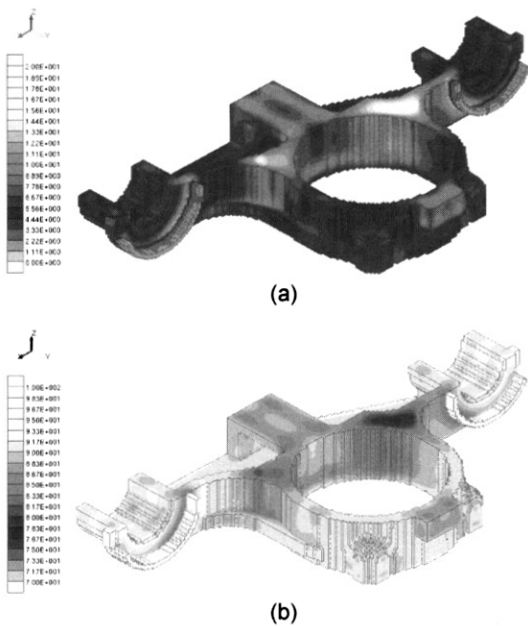


Fig. 6. Distribution of phases at 250 seconds in oil quenching; (a) Bainite, (b) Martensite.

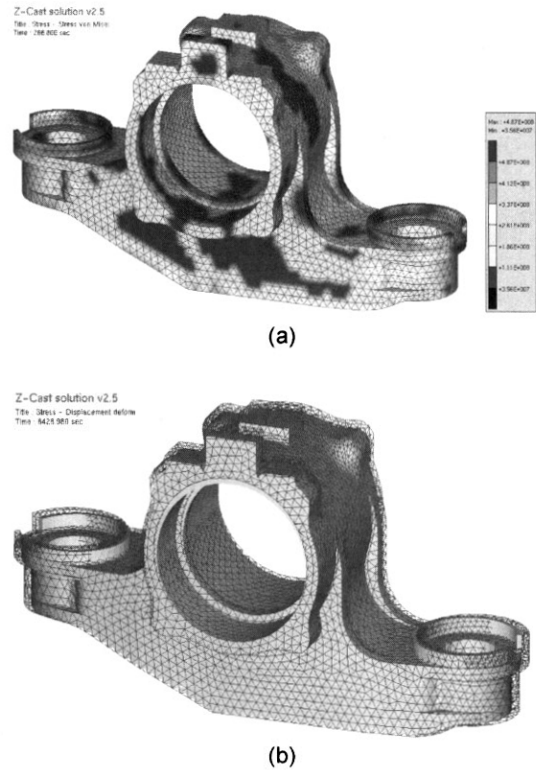


Fig. 8. Distribution of thermal stress and deformation shape after oil quenching; (a) Distribution of Von Mises stress at 25°C, (b) Final deformation shape ($\times 20$).

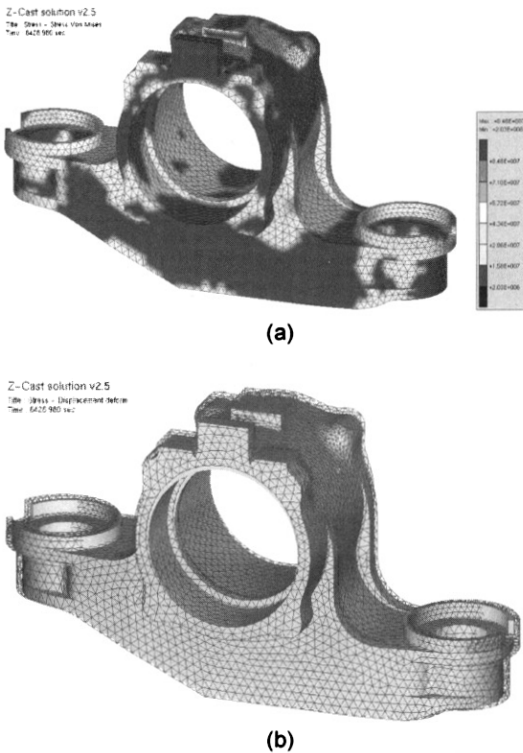


Fig. 7. Distribution of thermal stress and deformation shape after normalizing; (a) Distribution of Von Mises stress at 25°C, (b) Final deformation shape ($\times 20$).

큰 문제는 발생하지 않을 것이다.

4.4 고찰

유냉에 의해 Journal Box의 열처리를 행할 경우 마르텐사이트와 베이나이트만으로 이루어진 조직을 얻을 수 있어 공랭 시에 페라이트의 변태(최대 35%)로 인한 경도의 저하를 개선할 수 있을 것으로 기대된다. 해석에 의해 예측된 각 부위의 조직분율에 대한 검증은 광학현미경이나 화상분석기 등의 장비를 사용하여 정확한 상분율을 측정하여 비교하는 것이 좋으나 베이나이트와 마르텐사이트만으로 이루어진 조직의 경우 정확한 상분율의 측정이 어려워 경도를 측정한 후 이 값으로부터 상분율의 분포를 검증하는 방법을 많이 사용한다. 상분율의 검증을 위해서는 전체 마르텐사이트 조직과 전체 베이나이트 조직의 경도를 측정하고 2상이 혼재된 조직의 경도를 측정하고 후 해당 부위의 예측된 조직분율로부터 Mixed rule

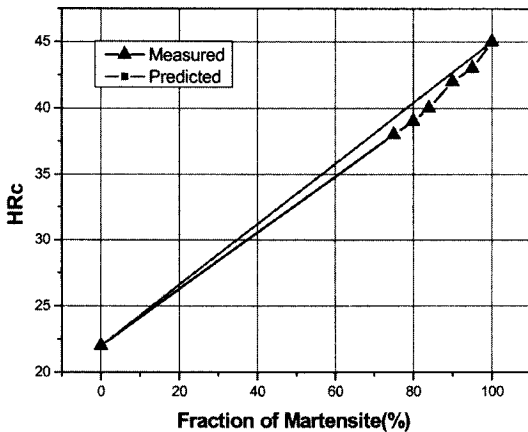


Fig. 9. Comparison of predicted hardness with measured one.

에 의해 경도값을 계산한 후 이 값을 실제 측정된 결과와 비교하여 유사할 경우 예측된 조직분율이 타당함으로 결정할 수 있다.

마르텐사이트와 베이나이트의 단상으로만 된 조직을 얻기 위하여 dilatometer용 시편을 제작하였고 두가지 조건으로 dilatometer 실험을 행하였다. 전체 마르텐사이트 조직을 얻기 위해서는 80°C/sec의 냉각속도로 시편을 냉각하였고 베이나이트 변태를 위해서는 펄라이트나 페라이트 변태구간을 피하기 위하여 450°C까지 80°C/sec로 급랭한 후 10분간 항온 변태시켜 다시 급랭하였다. 이렇게 얻은 마르텐사이트와 베이나이트의 경도값은 각각 46HRC, 22HRC이다.

실제 유래에 의해 열처리된 제품을 중심부를 따라 절단한 후 Fig. 2(b)에 표시된 위치별로 시편을 채취하고 경도측정을 하였다.

Fig. 9에는 측정에 의한 경도값과 각 위치별 조직분율에 의해 예상되는 경도값과의 비교 그래프를 나타내었다. 전술한 바와 같이 해석에 의하여 결정된 조직분율 데이터에 근거하여 Mixed Rule을 사용하여 구한 예상 경도치는 측정치에 근접하는 결과를 나타내었으며 이로써 조직분율 해석의 정확성을 입증할 수 있다.

냉각속도가 빠르면 잔류응력이 증가하고 공냉에 비하여 비틀림이 심하여 냉각 시에 주의를 필요하며 경도의 증가만으로 연신율과 충격치의 저하가 우려되지만 템퍼링 공정을 통하여 경도를 낮추며 인성을 증가시키면 유능으로 최종제품의 전반적인 기계적 성

질을 만족시킬 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 유한차분법을 이용하여 열처리 공정에서의 온도 해석을 수행하였고 이러한 온도 해석 결과를 이용하여 다상 확산 변태 모델을 적용하여 변태된 조직의 분포를 그리고 유한요소법에 의해 열응력 분포를 구하였다. 상기 해석 방법들에 의한 온도, 조직, 열응력 해석을 통합하여 열처리 공정 설계 시스템을 구성 하였고 이를 이용하여 CrMoSC1강에 대해 열처리 공정 설계를 수행하였다. 또한, 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 실제 제품에 대한 결과와 비교하여 본 열처리 공정 해석 시스템의 유용성을 확인하였다.

이러한 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 가열 및 냉각에 따른 온도변화 및 응력분포, 조직의 변화 등을 해석함으로써 각종 복잡형상의 대형제품의 열처리 공정조건을 보다 정확하게 설정, 제어하여 사전에 열처리 불량을 방지하고 실제 열처리를 하지 않고도 컴퓨터 내에서 다양한 시행착오를 통한 최적화된 열처리방안을 설계할 수 있다.

이러한 해석 시스템은 국내외에서 활발한 연구가 진행되고 있으며 다양한 열처리 공정의 적용과 정량적 예측의 정확성을 확보하기 위해서는 향후 가열 공정과 tempering 공정 등에서의 조직변화 예측 모델 개발과 상변태에 따른 변태응력의 고려 등 지속적인 연구가 요구되고 있다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 중기거점기술개발사업에 의해 수행되었음.

참고문헌

1. M. Avrami, "Kinetics of Phase Change II," J. Chem. Phys., **8** (1940) 212.
2. P. K. Agarwal and J. K. Brimacombe, "Mathematical Model of Heat Flow and Austenite-Perlite Transformation in Eutectoid Carbon Steel Rods for Wire," Metallurgical Transactions, **12B** (1981) 121-133.

3. E. B. Hawbolt, B. Chau, and J. K. Brimacombe, "Kinetics of Austenite-Pearlite Transformation in Eutectoid Carbon Steel," *Metallurgical Transaction A*, (1983) 1803~1815.
4. K. F. Wang, Analysis of the Carburization and Quenching of steels, Ph D Thesis, PURDUE UNIVERSITY (1996).
5. S. Denis, E. Gautier, A. Simon, and G. Beck, "Stress-Phase Transformation Interactions-Basic Principles, Modeling and Calculation of Internal Stresses," *Mater. Sci. Technol.*, **1** (1985) 805-814.
6. S. Denis, S. Sjoström, and A. Simon, "Coupled Temperature, Stress, Phase Transformation Calculation Model Numerical Illustration of the Internal Stresses Evolution during Cooling of a Eutectoid Carbon Steel Cylinder," *Metallurgical Transactions A*, **18A** (1987) 1203-1212.
7. T. Inoue and K. Tanaka, "An Elastic-Plastic Stress Analysis of Quenching When Considering a Transformation," *Int. J. of Mech. Sci.*, **17** (1975) 361-367.
8. T. Inoue, S. Nakaki, T. Kishino, and M. Monkawa, "Description of Transformation Kinetics, Heat Conduction and Elastic-Plastic Stress in the Course of Quenching and Tempering of Some Steels," *Ingenieur-Archiv*, **50** (1981) 315-327.
9. J. Rohde, A. Jeppsson, "Literature Review of Heat Treatment Simulations with Respect to Phase Transformation, Residual Stresses and Distortion," *Scandinavian Journal of Metallurgy*, **29(2)** (2000) 47-62.
10. A. Thuvander, A. Melander, M. Lind, N. Lior, and F. Bark, "Prediction of convective heat transfer coefficients and their effects on distortion and mechanical properties of cylindrical tubes quenched by gas cooling," *La Metallurgia Italiana*, **XCI(4)** (1999) 25-32.
11. M. de Oliveira, J. Ward, D. R. Garwood, and R. A. Wallis, "Quenching of Aerospace Forgings from High Temperatures using Air-assisted, Atomized Water Sprays," *Journal of Materials Engineering and Performance*, **11(1)** (2002) 80-85.
12. S.Y. Kwak and C. Cho, "Thermal Stress Analysis Field Data Conversion between FDM and FEM," *Journal of The Korea Society for Heat Treatment*, **14(4)** (2001) 1-7.
13. T. Reti, Z. Fried and I. Felde, "Computer simulation of steel quenching process using a multi-phase transformation model," *Computational Materials Science*, **22** (2001) 261-278.
14. 이수진 외 3인 공역(막스 프랑크 연구소), 강의 열처리도해와 조직2, 원창출판사, p. II-126E
15. High-Temperature Property Data: Ferrous Alloys, ASM International (1988) 3.5-3.8.
16. ASM handbook, Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, ASM International (1990) 628.