

유한요소법을 이용한 탄소강의 경화능해석(II)

Analysis of Hardenability for Carbon Steel using Finite Element Method(II)

김 옥 삼

O. S. Kim

Key Words : Hardenability Analysis(경화능 해석), Carbon Steel(탄소강), Quenching Process(담금처리) Coupled Effects(연성효과), Finite Element Method(유한요소법), Structural Analysis(조직해석), Phase Transformation(상변태)

Abstract : This study presents a methodology to predict the hardenability of quenched carbon steels. The equation of transient heat conduction is analyzed to formulate a cooling curve by a finite element method which incorporates coupled effects of temperature on physical properties, the metallic structures and also the latent heat by phase transformation. The volume fraction of martensite and pearlite are the structural analysis for hardenability analysis. In order to demonstrate the feasibility of adopting a full quench model respectively. This procedure could be used as the database for optimal condition of heat treatment processes.

1. 서 론

액체상태에서 고체상태로 상변태를 동반하는 주조나 용접 등의 비철삭 가공, 고체상태내 조직변태를 수반하는 열처리¹⁾ 등에 있어서 변형 및 잔류응력의 분석은 제품의 최적설계에 필수적이다. 열처리 중에서 담금처리 과정에 발생하는 열응력, 변태응력, 잔류 내부응력 및 변형에 관한 일련의 연구²⁻⁵⁾가 시도되어 왔다. 각종 냉각제(coolant)에 담금강열도(severity of quench)를 도입한 분석은 Leblond 등⁶⁾이 제시하고 있다. 국내에서는 민 등⁷⁾이 물, 기름 및 수용성 용액의 냉각능을 실험적, 해석적인 결과를 발표한 바 있으며, 김 등⁸⁾은 특히 나트륨계의 냉각제 유동상태, 온도 및 농도 등을 변화시켜 임계구역인 펄라이트(pearlite) 변태영역과 위험구역인 마르텐사이트(martensite) 영역으로 대별하여 냉각능 파라미터⁹⁾를 결정한 바 있다. 그러나 상변태과정에 따른 실험이 용이하지 않고 온도, 응력 및 조직 등의 상호 연성효과(coupled effect)의 해석적인 연구에 어려움이 많기 때문에 독립적으로 해를 구하는 방법이 대부분이었다.

한편 재료내부의 온도구배는 냉각과정 중에 열

응력을 발생시키며, 이때 발생한 열응력은 고온에서 쉽게 소성거동을 일으키고 변형 및 내부응력으로 잔류하게 된다. 그러므로 본 연구에서는 해석적 기법으로 냉각곡선을 도출한 선행연구¹⁰⁾의 결과를 등온변태 곡선과 중첩시켜 탄소강의 담금과정에서 상변태 과정을 해석하며, 이를 이용하여 경화능을 추정함으로써 실제 담금처리작업전에 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션을 통하여 보다 합리적이고 정확한 담금처리조건을 모색하고자 한다.

2. 체적분율과 이행방정식(移行方程式)

2.1 조직의 체적분율

A₃변태 이상의 온도범위에 있는 임의의 요소에서 펄라이트 조직이 전체 시편에서 차지하는 비율을 나타내는 펄라이트 체적분율은 오스테나이트(austenite)가 공석온도에서 펄라이트변태를 시작하면 계산할 수 있다. 이때 펄라이트 생성속도 $\dot{\xi}_p$ 가 응력과 변형율의 영향을 무시하고 진행하는 것으로 가정한다면, 온도만의 함수 $f_1(\theta)$ 와 펄라이트양의 함수 $g(p)$ 로 수식화⁹⁾ 할 수 있다.

$$\dot{\xi}_p = f_1(\theta) \cdot g(p) \tag{1}$$

접수일 : 1999년 6월 16일

김옥삼 : 여수대학교 기계·자동차공학부

여기서 $g(p)$ 를

$$g(p) = \frac{dG^{-1}}{dp} \quad (2)$$

로 두고, 식(1)의 미분방정식을 풀면

$$p = G(z), \quad z = \int_0^t f_1[\theta(t_1)] dt_1 \quad (3)$$

의 해가 얻어진다. 즉 임의의 시간 t 에 의존하는 온도 $\theta(t_1)$ 의 함수 $f_1(\theta)$ 를 알면 온도이력 함수 $G(z)$ 에 의하여 식(1)과 같이 펄라이트의 중량분율을 $\xi_p(w/o)$ 가 결정된다. 펄라이트 변태는 온도이력 (z) 에 의하여 결정되는 반면, 마르텐사이트 변태는 온도만의 함수 $m_1(\theta)$ 에 의하여 결정되므로 마르텐사이트의 체적분율을 $\xi_M(v/o)$ 라고 하면

$$\xi_M = (1 - \bar{\xi}_p) m_1(\theta) \quad (4)$$

$$m_1(\theta) = \begin{cases} 0 & M_s < \theta \\ m_2(\theta) & \theta_a \leq \theta \leq M_s \end{cases} \quad (5)$$

식으로 표시할 수 있다. 함수 $m_1(\theta)$ 는 잔류오스테나이트(retained austenite)의 체적분율을 $\bar{\xi}_r$ 로 하면

$$m_1(\theta) = (1 - \bar{\xi}_r) \phi(\theta_2) \quad (6)$$

식으로 표시되며, 여기서 $\phi(\theta_2)$ 는 θ_2 를

$$\theta_2 = \frac{(M_s - \theta)}{(M_s - M_f)} \quad (7)$$

식으로 표시할 수 있는 무차원 함수이다. 아울러 식(7)의 분자와 분모에 있는 M_s 는 마르텐사이트 변태 개시온도이고, M_f 는 마르텐사이트 변태 종료온도를 의미한다.

2.2 조직의 이행방정식

마르텐사이트 변태의 구동력을 얻기 위해서는 오스테나이트를 마르텐사이트 변태 개시온도 M_s 까지 과냉(過冷)할 필요가 있으며 온도강하에 따라

변태구동력이 증가한다. 여기서 구동력은 모상(母相)과 생성상(生成相) 사이의 자유에너지(free energy)의 차이 $d(G_A - G_M)$ 라고 하면, 생성되는 마르텐사이트 판의 수 dN 은

$$dN = -\phi d(G_A - G_M) \quad (8)$$

과 같다. ϕ 는 비례상수이며, 마르텐사이트 판의 평균체적을 \bar{V} , 단위체적 중의 마르텐사이트 판 수의 변화를 dN_V 로 할 때, 마르텐사이트 체적분율 $\xi_M(v/o)$ 의 변화는

$$d\xi_M = \bar{V} dN_V \quad (9)$$

식과 같고 dN_V 는 dN 을 사용하면 다음과 같다.

$$dN_V = (1 - \xi_M) dN \quad (10)$$

한편, 체적분율의 미소증분은

$$\begin{aligned} d\xi_M &= -\bar{V}(1 - \xi_M) \left\{ \frac{\partial}{\partial \sigma} + \frac{\partial}{\partial \theta} (G_A - G_M) d\theta \right\} \\ &= \bar{V}_\phi (1 - \xi_M) \{ (\bar{\epsilon}^e d\sigma) - (\eta_A - \eta_M) d\theta \} \end{aligned} \quad (11)$$

과 같이 된다. 마르텐사이트 변태온도를 θ_{Ms} 로 하고 \bar{V} , ϕ 가 일정하다고 가정하여 식(11)을 적분하면

$$\xi_M = 1 - \text{Exp} \{ \phi(\theta_{Ms} - \theta) + \phi(\bar{\epsilon}^e \sigma) \} \quad (12)$$

로 되나, 마르텐사이트 변태에서는 체적변화만이 아니라 전단변형도 생기므로 우변 중괄호 제2항을 체적변형(體積變形)일과 전단변형(剪斷變形)일로 나누어

$$\phi(\bar{\epsilon}^e \sigma) = A \sigma_m + B J_2^{1/2} \quad (13)$$

으로 하였다⁹⁾. 본 연구에서는 펄라이트 변태의 경우, 항온변태 곡선을 큐빅 스플라인 곡선(cubic

spline curve)로 함수화하여 식(14)를 이용하였으며, 마르텐사이트 변태의 이행방정식은 다양한 강종(鋼種)에 적용할 수 있는 식 (15)의 Lomakin 이행방정식²⁾으로 해석하였다.

$$\xi_P = \frac{t - \phi_i^s(\theta)}{\phi_i^f(\theta) - \phi_i^s(\theta)} \quad (14)$$

$$\xi_M = (1 - \xi_P)m_1(\theta) \quad (15)$$

여기서 ϕ_i 는 i 번째 요소의 비례상수이다.

3. 해석 및 실험방법

3.1 조직의 해석과정

시험편의 냉각곡선은 유한요소법(finite element method)에 의하여 Fig. 1의 흐름도와 같이 재료의 온도의존성과 조직의존성이 고려되었다. 표면 열전달계수가 보다 정확하게 결정될 수 있도록 시행착오법을 사용하였다. 베이나이트(bainite) 변태는 확산형 변태, 즉 펄라이트 변태에 포함시켰으며 상변태를 해석하는데 있어 모델전체는 오스테나이트, 펄라이트, 마르텐사이트 등 3개의 조직으로 이루어진 혼합체로서 가정하였다. 미소체적 V 중에 존재하는 각 조직의 체적을 V_I 로 하면 조직의 체적분률을 ξ_I 는

$$\xi_I = \frac{V_I}{V} \quad I=1,2,3 \quad (16)$$

으로 주어지며, 이때

$$\sum_{I=1}^3 \xi_I = 1 \quad (17)$$

의 관계가 성립한다. 상변태에 의한 조직변화를 고려하는데 있어 임의의 물질점의 조성은 시간에 따라 변화하기 때문에 식(17)의 혼합법칙을 적용하였다. SM50C의 조직에 의존하는 물리적 성질은 Table 1과 같으며, 여기서 θ 는 온도를 의미한다.

3.2 실험

시험편의 조직변화를 추정하고 그 결과를 해석결과와 비교 및 고찰하기 위하여 담금처리 장치

를 선행연구¹⁰⁾와 같이 제작하였다. SM50C 기계구조용 탄소강의 직경 40mm, 높이40mm의 유한 원주형 담금시험편을 직립 원통전기로 내에서 A₃변태보다 약간 높은 온도로 60분 정도 유지시간(holding time)을 가져, 전체시험편을 오스테나이트로 균질화시킨 후 전기로 아래에 설치된 담금조(quenching bath)에 완전담금시켰으며, 이때 담금제(quenchant)의 온도는 상온이다. 센서는 K-type의 열전대(thermocouple)을 사용하였으며 실험도중 단락현상이 발생하지 않도록 알루미늄 파우더로 냉각제가 센서와 접촉하지 못하도록 밀봉하였다.

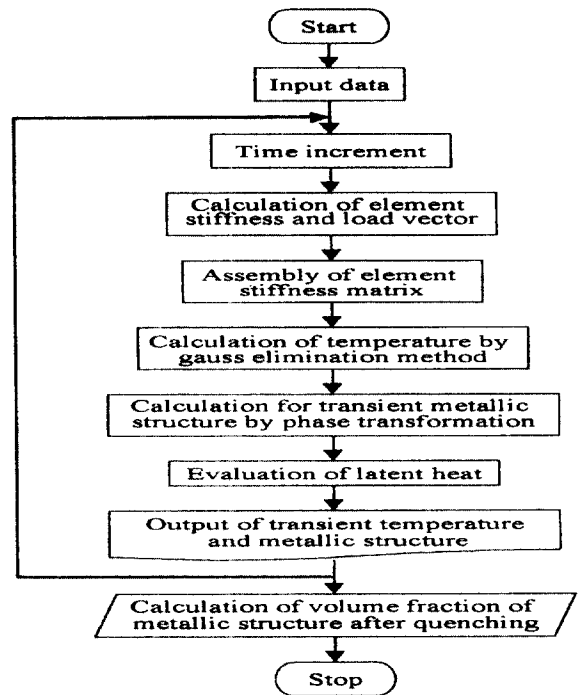


Fig. 1 Flow diagram for finite element method

Table 1 Physical properties of phases

	Austenite	Pearlite	Martensite
Thermal conductivity (W/m°C)	$14.65 + 1.25 \times 10^{-2} \times \theta$	$52.34 - 3.52 \times 10^{-3} \times \theta - 3.48 \times 10^{-5} \times \theta^2$	$52.34 - 3.52 \times 10^{-3} \times \theta - 3.48 \times 10^{-5} \times \theta^2$
Specific heat (J/kg°C)	586.15	$443.8 + 0.42 \times \theta$	$443.8 + 0.42 \times \theta$
Density (kg/m ³)	8.15×10^3	7.85×10^3	7.85×10^3
Latent heat(J/kg)	-	7.54×10^{-4}	8.37×10^{-4}

4. 결과 및 고찰

유한요소법을 이용한 해석결과의 타당성을 입증하기 위하여 Fig. 2에 실측 냉각곡선과 해석적인 냉각곡선을 비교하였다. 해석적인 냉각곡선을 도출할 때, 표면 열전달계수는 ae^{bt^c} ($a=1.44 \times 10^4$, $b=8.39 \times 10^4$, $c=-2.39$)의 계수값을 사용했다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 냉각 초기단계인 핵비등단계(核沸騰段階)에서는 잘 일치하나 하부 천이구역과 대류단계에서는 실험 결과와 해석 결과가 약간의 편차를 나타내고 있다.

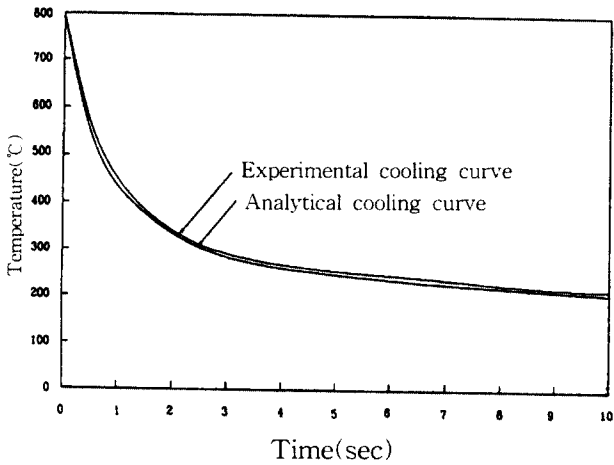


Fig. 2 Comparison of experimental and analytical cooling curves

냉각개시 1초 후의 양상을 나타내는 Fig. 3은 원주축($r=20\text{mm}$)과 상단부($z=20\text{mm}$)의 표면에서 약 360°C 정도를 나타내고, 모서리부에서는 200°C 를 보여주고 있다. 아울러 $r, z=15\text{mm}$ 이후부터 표면 까지는 $120^\circ\text{C}/\text{mm}$ 의 급격한 온도구배를 나타내고 있어 마르텐사이트 발생확율이 높을 것으로 예견되며 등온도선 한개의 간격은 40°C 를 의미한다.

완전담금(full quenching) 처리를 하는 경우, 시편의 전체영역에 대하여 냉각개시 5초 후의 거동을 보여주는 Fig. 4는 다소 완화된 온도구배 경향을 보여주고 있다. 상단부 표면부($z=20\text{mm}$)와 원주면($r=20\text{mm}$)에서는 180°C , 모서리부는 60°C 정도를 나타내며 표면까지는 비교적 완만한 1mm 당 44°C 정도 온도기울기를 형성하고 있다.

Fig. 5는 냉각과정의 대류 말기단계에 시편내부 온도분포를 나타내고 있으며 거의 균일한 분포로 열확산이 이루어지고 있다. 등온도선 한개의 간격은 10°C 이며 온도편차는 1mm 당 8°C 의 기울기를 보

여준다. 그러므로 냉각초기부터 30초까지는 시편 상단부($z=20\text{mm}$)와 원주표면($r=20\text{mm}$)에서 1초당 평균 24.3°C 정도, 모서리부($r, z=20\text{mm}$)에서는 26.3°C 가량 온도가 감소하였다. 이것은 시편의 상단부와 원주표면이 모서리부에 비하여 90%정도 냉각효율이 보유됨과 모서리부에서 마르텐사이트의 조직이 많이 생성될 것을 예측할 수 있다.

탄소함유량이 0.48~0.53%인 기계구조용강의 시편에서 $r=10, z=10\text{mm}$ (Δ 표시), $r=15, z=15\text{mm}$ (\square

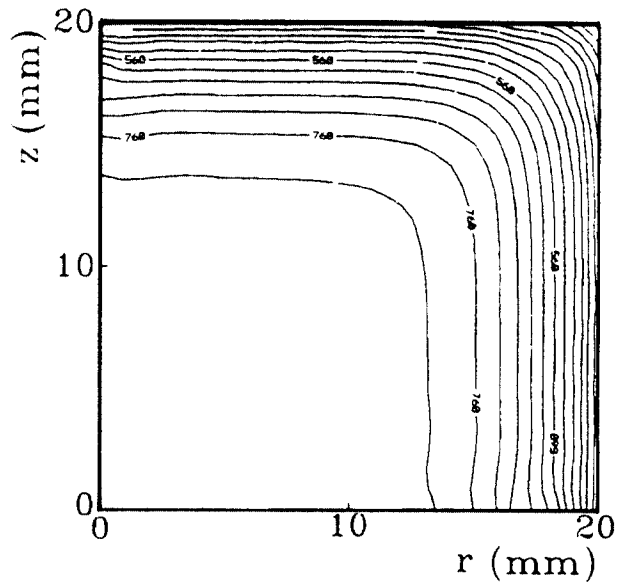


Fig. 3 Temperature contours of SM50C at 1 sec after quenching

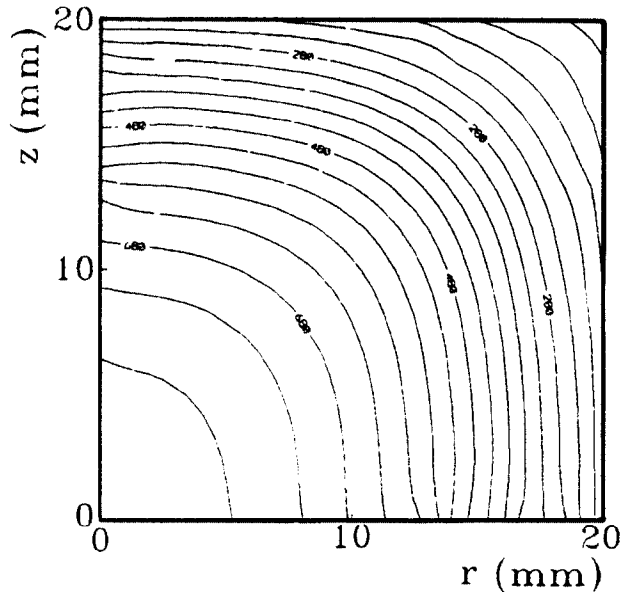


Fig. 4 Temperature contours of SM50C at 5 sec after quenching

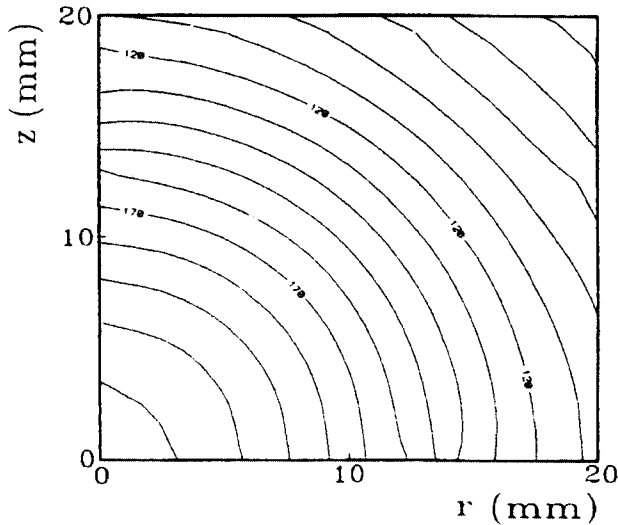


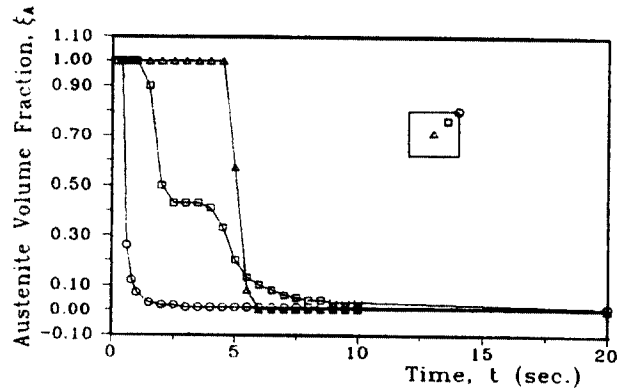
Fig. 5 Temperature contours of SM50C at 30 sec after quenching

표시) 및 $r=20, z=20\text{mm}$ (○표시) 위치에서의 시간에 따른 각 조직의 체적분율을 시뮬레이션한 결과가 Fig. 6이다. 그림 (a)와 (b)에서 알 수 있듯이 시편중심부 $r=10, z=10\text{mm}$ (△표시)에서는 5초부터 6초까지에서 오스테나이트가 소멸되었다. 그림(b)에서는 $r=15, z=15\text{mm}$ (□표시) 위치에서 5.5초부터 6.5초까지 펄라이트와 마르텐사이트가 혼재하는 영역이 광범위하게 형성되었다. 그림(c)에서는 $r=20, z=20\text{mm}$ 위치(○표시)에서 냉각개시 1초 이내에 마르텐사이트로 변태하였다.

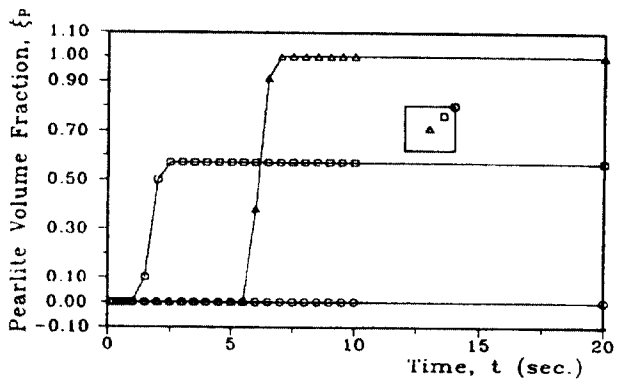
Fig. 7~9의 (a), (b), (c)는 냉각개시 후 1초, 5초 및 30초에서 전 영역에 대한 조직의 변화를 나타낸 것이다. 냉각시간 1초인 Fig. 7의 (a)에서는 전체가 체적분율 0.7~1.0의 오스테나이트, (b)에서는 모서리부에 마르텐사이트가 가장 먼저 발생함을 보이고 있고, (c)의 상단면과 원주면 모두 표면부로부터 2mm 이내 거리에서 미량의 체적분율 0.01~0.3의 펄라이트가 골고루 분포하고 있다.

냉각개시후 5초(Fig. 8)에서는 모서리부의 오스테나이트가 소멸되었고 (b)와 (c)에서는 상단면 및 원주면의 표면이 마르텐사이트로 변태하였고 펄라이트 변태영역은 점차 중심부로 확대해 가는 변화 추이를 나타내고 있다.

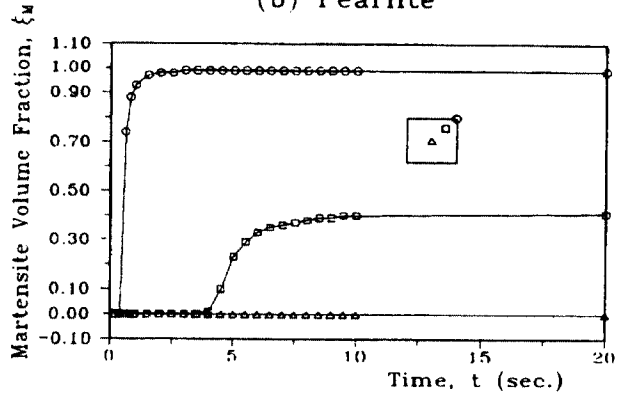
30초의 경과 후에는 전체 영역에서 상변태가 완료하였음을 보여주는 그림이 Fig. 9이다. 오스테나이트는 전혀 존재하지 않고 마르텐사이트는 표면에서 2~3mm까지 50% 이상, 중심부로부터 16~18mm까지 90% 이상의 펄라이트로 변태함을 나타



(a) Austenite



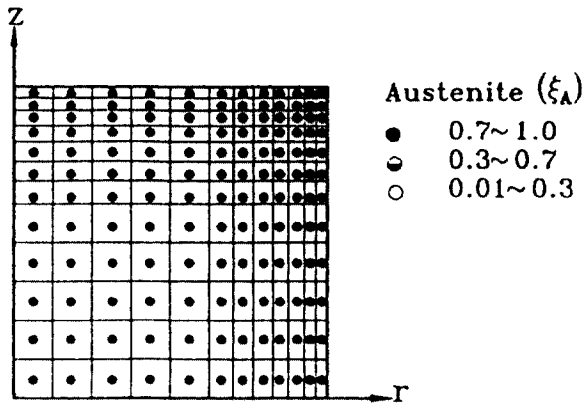
(b) Pearlite



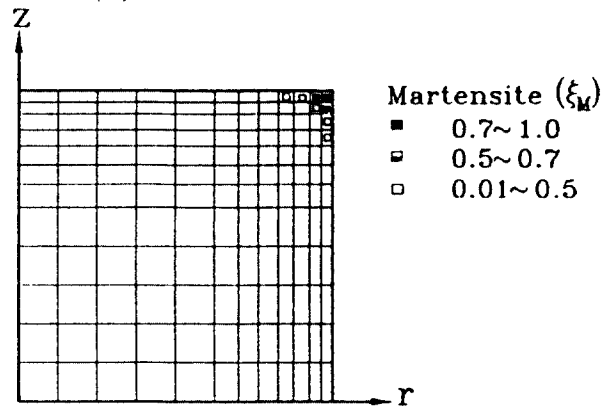
(c) Martensite

Fig. 6 Volume fraction with respect to the cooling time(SM50C)

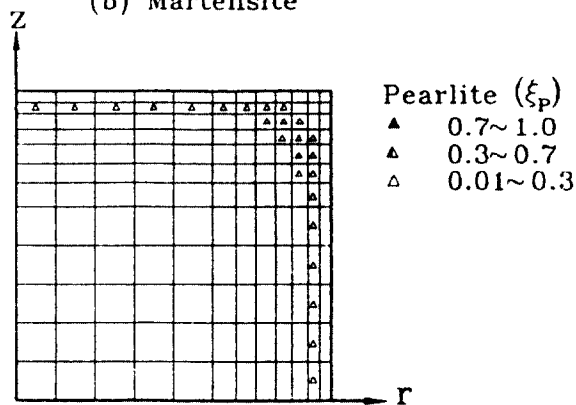
내고 있는데, 잔류 내부응력의 영향을 고려하지 않을 경우 마르텐사이트의 체적분율은 $\xi_M = 1 - \text{Exp}\{\phi(M_s - \theta)\}$ 과 같이 되며 ϕ 의 값으로서 SM50C 탄소강의 경우 -0.016을 제시할 수 있다. 아울러 등은 변태곡선이나 연속냉각곡선의 함수화에 큐빅 스플라인 곡선(cubic spline curves)을 이용하면 실제의 열처리에 유사한 영향인자들의 해석에 도움을 줄 수 있을 것으로 사료되므로 향후 보다 적극적인 관심을 가질 필요가 있다.



(a) Austenite

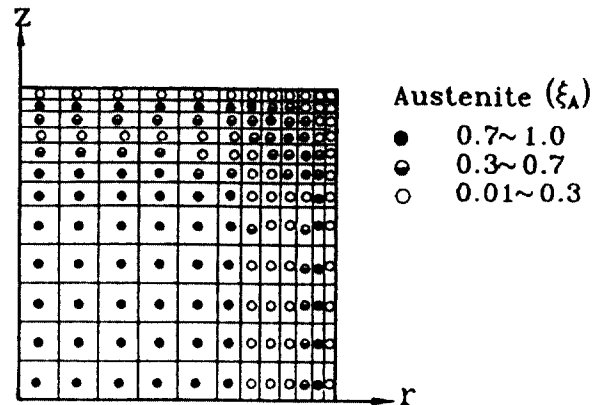


(b) Martensite

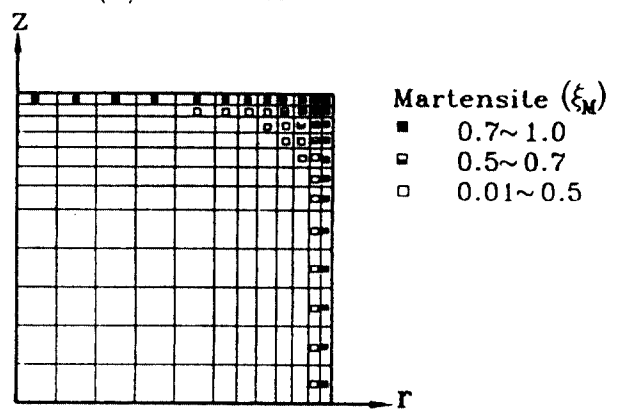


(c) Pearlite

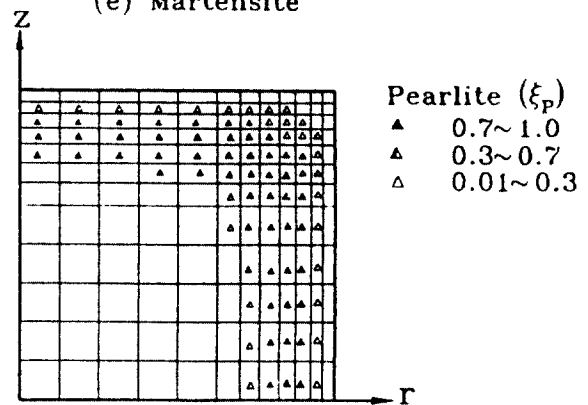
Fig. 7 Distribution of metallic structure during quenching of SM50C at 1 sec after quenching



(d) Austenite



(e) Martensite



(f) Pearlite

Fig. 8 Distribution of metallic structure during quenching of SM50C at 5 sec after quenching

5. 결 론

아공석강을 모델로 하여 모델의 온도분포와 조직변태 양상을 유한요소법에 의하여 유도된 냉각곡선과 이행방정식을 이용하여 상변태 과정의 해석이 가능하였다. 이를 기초로 시간의 경과에 따른 조직의 체적분율과 변태 과정을 계산하여 아래와 같은 결과를 얻었다.

- 1) 냉각개시 1초 후 $r, z=15\text{mm}$ 이후부터 표면부에는 $120^\circ\text{C}/\text{mm}$ 정도 가파른 온도구배를 나타내고, 냉각개시 5초 후에는 1mm 당 44°C 정도의 다소 완만한 온도기울기를 보여준다. 시편의 상단부와 원주표면은 모서리부에 비하여 90%정도의 냉각효율을 나타내므로 열처리 공정에서 냉각속도 편차를 적절하게 고려한 담금처리 공정설계가 필수적일 것으로 사료된다.

참고문헌

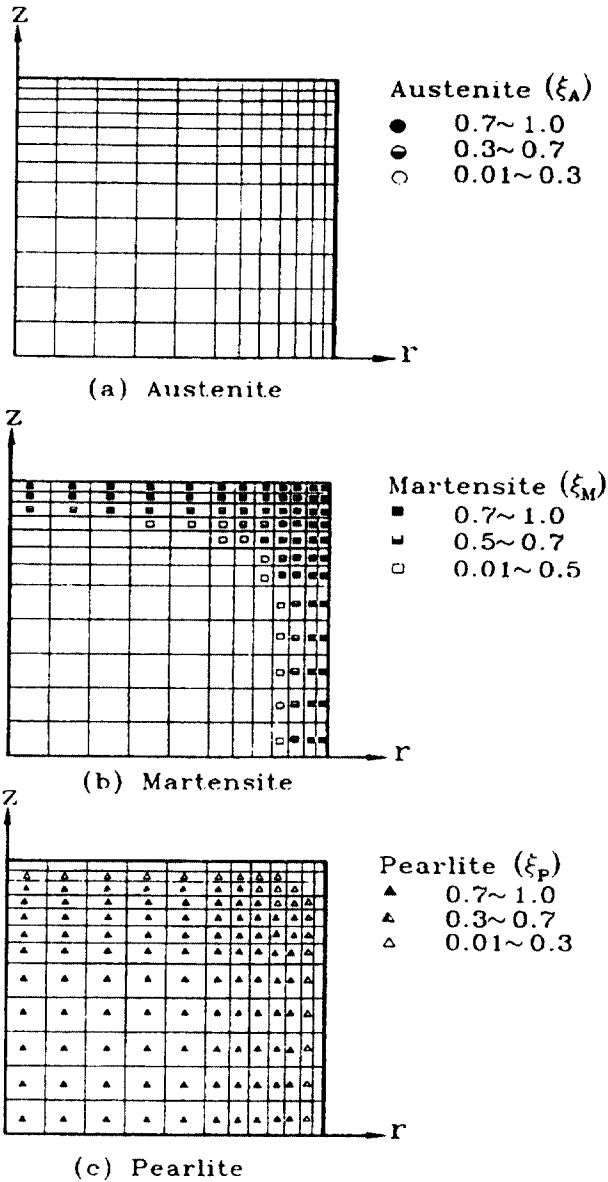


Fig. 9 Distribution of metallic structure during quenching of SM50C at 30sec. after quenching

- 2) 시간에 따른 조직의 변화는 시편중심부에서는 펄라이트로, $r=15, z=15\text{mm}$ 위치에서는 냉각개시 5.5초부터 6.5초 사이 펄라이트와 마르텐사이트의 혼재영역이 형성되었고 시험편 모서리부에서는 냉각개시 1초 이내 마르텐사이트 변태를 완료하였다.
- 3) 냉각개시 1초 후 시편의 모서리부에 마르텐사이트가 가장 먼저 시편의 표면에서 2~3mm까지 50%이상 발생하였고, 상단면과 원주면 공히, 중심부로 부터 16~18mm까지는 90%이상 펄라이트로 변태가 완료되는 양상이 이루어졌다.

1. 多賀谷正義, 田村今男, “焼入冷却剤の研究(第9報)-鋼焼入によって求めに焼入強烈度 Hについて”, 日本金屬學會誌, Vol. 20, No. 6, pp. 356~362, 1956
2. T. Jekot, “The Comparison of Thermal Stresses in Metallic Materials in Cases of Linear and Nonlinear Constitutive Equations of Thermoelasticity”, *ibid.*, pp. 73~79, 1984, Sweden
3. A. J. Fletcher and C. Lewis, “The Effect of a Free Edge on the Thermal Stresses in quenched Steel Plates”, *ibid.*, pp. 80~97, 1984
4. J. C. Boyer and M. Boivin, “Numerical Prediction of Residual Stresses Relaxation in Quenched Plates”, *ibid.*, pp. 98~117, 1985
5. J. K. Rai, A. Mishra and U. R. Rao, “Residual Stresses due to Quenching Process”, *Int. J. Mach. Tool. Des. Res.*, Vol. 20, pp. 1~8, 1980
6. J. B. Leblond, G. Mottet and J. Devaux, “Mathematical Models for Description of Anisothermal Phase Transformations in Steel and Their Consequences on the Plastic Behavior”, *ibid.*, pp. 191~199, 1984, Sweden
7. 민수홍, 구본권, 김태욱, “담금액의 냉각성능 평가에 관한 연구”, 대한기계학회 '86년도 추계 학술대회 초록집 pp. 422~426, 1986
8. 김옥삼, 최은순, 민수홍, “켄칭시 나트륨계 수용액의 냉각성능에 관한 연구”, 한국열처리공학회지, 제5권, 제4호, pp. 224~232, 1992
9. 多賀谷正義, 田村今男, “焼入冷却剤の研究(第10報)-銀製試片の冷却曲線より求めに焼入強烈度 Hについて”, 日本金屬學會誌, Vol. 20, No. 7, pp. 357~363, 1956
10. 김옥삼, 구본권, “유한요소법을 이용한 탄소강의 경화능해석(I)”, 한국열처리공학회지, 제11권, 제2호 pp. 131~139, 1998