

퀵칭과정에서 상변태를 고려한 탄소성 열응력의 유한요소 해석(II)

— 오오스테나이트에서 마르텐사이트로의 변태 —

김 옥 삼* · 송 관 훈** · 구 본 권***

*여수수산대학교 기계공학과

**대우자동차(주) 중앙연구소

***서울산업대학교 금형설계과

An Analysis Finite Element for Elasto-Plastic Stresses
Considering Phase Transformation at the Quenching Process(II).

— From Austenite to Martensite —

O. S. Kim*, G. H. Song** and B. K. Koo***

*Dept. of Mechanical Engineering, Yosu National Fisheries University

**Central Research Center, Daewoo Motor Co., LTD

***Dept. of Die and Mould Design, Seoul National Polytechnic University

ABSTRACT

In this a set of constitutive equation relevant to the analysis of thermo-elasto-plastic materials with phase transformation during quenching process was presented on the basis of continuum thermo-dynamic. In calculating the transient thermal stresses, temperature between coolant and specimen(SM45C) surface was determined from the heat transfer coefficient. A calculation was made for specimen with 40mm in diameter quenched in coolant from 820°C and the results are as follow.

Stresses at starting point of transformation always show the maximum tensile value. Reverse of stresses takes place after completion of transformation of inner part at specimen.

1. 서 론

각종 열처리, 용접 및 열간가공 등의 열적공정을 이용한 재료의 가공에 있어서는 물체 내부의 온도 변화와 더불어 조직 및 응력의 변화가 일어나고, 이것들 사이의 相互 連成效果(coupled effect)에

의하여 잔류응력 및 변형 등이 Fig. 1과 같이 기계적, 열적 및 조직적 변화를 다양하게 발생시키는 원인¹⁾이 되고 있다. 따라서 고온상태에서 사용되는 기기 및 열적공정을 이용한 가공시 열응력 해석은 필수적이며 이러한 문제를 다루는데 있어서 解析(analysis solution)나 有限差分法(finite diff-

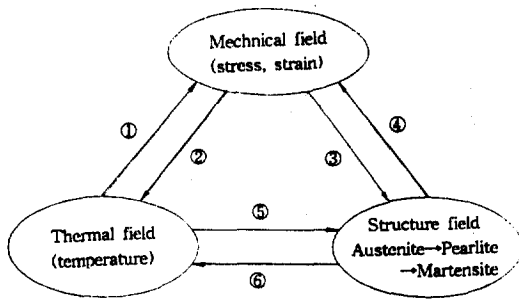


Fig. 1 The diagram of some coupled effects.

- ① Thermal stress and Thermal expansion
- ② Heat of deformation
- ③ Stress or strain induced transformation
- ④ Transformation strain
- ⑤ Structure change due to transformation
- ⑥ Latent heat

erencial method) 같은 近似解法 (approximation method) 이 이용^{2, 3)} 되어져 왔다. 그러나 이들 방법은 한정된 문제에만 적용가능한 단점이 있었고 아울러 열처리공정은 퀴칭처리 후 템퍼링 등의 재반 후속공정이 수반되므로 보다 정확한 해석을 위하여 재료의 물성치에 대한 溫度依存性 (temperature dependance) 과 組織依存性 (structure dependance) 등의 영향을 고려하여야만 한다.

강을 열처리 할때 오오스테나이트 (austenite) 상태에서 온도를 저하시키면 냉각속도 또는 온도에 의하여 금속조직의 相이 變態를 한다. 이러한 상변태는 擴散變態, 無擴散變態 및 混合變態 등으로 분류⁴⁾ 할 수 있는데 그 가운데 오오스테나이트의 확산변태는 A_1 변태점 이하로 과냉을 시키면 임의의 온도에서 본래 존재하여야 할 퍼얼라이트에 비해서 큰 자유도 (degree of freedom) 와 자유에너지 (energy of freedom)⁵⁾ 를 지니게 되고 순간적으로 오오스테나이트를 마르텐사이트 (martensite) 로 변태 시키는데 필요한 에너지 이상이 되면 확산 등에 의하지 않고 오오스테나이트는 마르텐사이트 조직으로 변태를 일으킨다. 그러므로 母相의 全領域에서 剪斷에 의하여 경계면이 넓어지고 새로운 결정이 만들어지는 변태 기구를 통하여 마르텐사이트

조직이 형성된다.^{6, 7)} 이러한 과정들을 해석하기 위한 일련의 수식화가 용이하지는 않으나 몇가지의 가정과 간략화를 시도하고 경계 및 초기조건들을 적절하게 선정하면 마르텐사이트 변태의 체적변화 와 변태구동력에 의한 열응력 및 열변형의 지배방정식을 구성할 수 있다.

또한 퀴칭처리 과정에서 물 및 鑛物性 冷却油와 水溶性 物質에 의한 냉각능력의 정량적인 평가^{8, 9)} 나, 퀴칭응력의 거동에 관한 일부의 연구¹⁰⁾ 들이 이미 수행되어졌으므로 이에 관한 자료를 충분히 이용하였다.

본 연구는 3차원 축대칭 물체 (SM45C, 직경 및 길이 40mm) 의 완전퀴칭 (full quenching) 과정을 모델로 하고 열전도에 의한 모델의 온도분포의 변화를 유한요소법 (finite element method) 으로 해석한 결과¹¹⁾ 를 이용하여 타당성을 검토한 후, 퀴칭처리 과정 등의 열처리에 의한 체적분율, 잔류 탄소성 열응력 및 변형량의 정도를 추정하는데 그 목적이 있다. 아울러 선행연구 결과¹²⁾ 에 후속하여 퀴칭 과정에서 상변태를 고려한 열응력의 해석 가운데 오오스테나이트 조직에서 마르텐사이트 조직으로의 변태거동을 중점적으로 유한요소법에 의하여 정식화하였다. 그러므로 이 연구의 결과는 퀴칭과정과 같은 실험적 측정이 어려운 비정상 상태 (non-steady state) 하의 물체내의 응력 및 변형의 거동을 시간에 따라서 변화하는 개념으로 분석함으로써 퀴칭처리 등의 열처리 공정 이후 물체내에 발생하는 여러가지 열적현상을 규명하는데 기초자료로서 이용될 수 있을 것이다.

2. 변태응력 및 열응력해석

온도가 저하될때 오오스테나이트에서 마르텐사이트로의 변태 구동력은 증가하기 때문에 마르텐사이트의 변태를 야기시킬 경우 오오스테나이트를 M_s 점까지 과냉할 필요가 있다. 온도 $\theta \leq M_s$ 에서 퍼얼라이트량은 일정하며 불안정한 오오스테나이트는 $\theta = M_s$ 에서 마르텐사이트로 변태를 시작한다.

온도범위 $\theta \geq 0$ 에서 변태의 특성은 첫째 강에서 마르텐사이트 변태는 無熱變態⁴⁾이라는 점과, 둘째 냉각중의 변태량은 순간온도의 함수이다. 셋째 塑性變形과 應力은 오오스테나이트-마르텐사이트 변태에서 오오스테나이트-퍼얼라이트변태보다 훨씬 더 영향을 미친다는 사실과 넷째 결정립의 크기는 변태량에 영향을 주고 非共析鋼중의 합금원소와 탄소함량은 마르텐사이트 변태기구에 영향을 준다 등이 있고 변태기구에 있어서는 응력과 소성변형율의 영향을 무시하는데 그 이유는 應力場과 變形場 사이의 상호 연성효과는 경계치 문제의 응력해석을 위한 수치해석의 해를 구하는데 많은 난점이 있기 때문이다.

마르텐사이트 조직의 移行方程式은 SM45C탄소강에 대하여 井上達雄⁴⁾이 제시한 식을 다음과 같이 사용하였으며 잔류오오스테나이트는 발생하지 않은 것으로 가정하였다.

$$\xi_M = 1 - \text{Exp}[\phi(\theta)] \quad \text{----- (1)}$$

$$\phi(\theta) = \begin{cases} -4.046 \cdot 10^{-5} \cdot (\theta_{Ms} - \theta)^2, & (\theta_{Ms} - \theta) < 62 \\ -1.580 \cdot 10^{-2} \cdot (328 - \theta), & (\theta_{Ms} - \theta) \geq 62 \end{cases} \quad \text{----- (2)}$$

변태에 의한 체적변화와 열팽창에 관해서는 응력을 σ_{ij} , 변형을 ϵ_{ij} 로 하면 평균응력과 평균변형율의 관계는 다음과 같이 표시된다.

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{3K} \sigma_{ij} + 3\epsilon^T \quad \text{----- (3)}$$

여기서 K는 체적탄성계수이고 $3\epsilon^T$ 는 변태에 수반하는 조직변화와 열팽창에 의한 체적변화를 표시하게 된다. V_M 와 V_A 를 각각 마르텐사이트 및 오오스테나이트의 比體積으로 하고 $V_0 = V_A(\theta_0)$ 를 초기온도 θ_0 에 있어서의 오오스테나이트의 비체적이라고 하면

$$3\epsilon^T = \xi_M \frac{V_M(\theta)}{V_0} + (1 - \xi_P - \xi_M) \frac{V_A(\theta)}{V_0} \quad \text{----- (4)}$$

로 되는 관계식이 얻어 지는데 이 수식을 이용하여 탄소함유량 C%를 갖는 여러종류의 탄소강에 대하

여 실험결과⁵⁾를 정리하면

$$\epsilon^T = \xi_M(r_M - \alpha_M \theta) + \alpha_A(\theta - \theta_0) \quad \text{----- (5)}$$

$$r_M = \frac{1}{\omega} (1.42 + 0.21C) \quad \text{----- (6)}$$

$$\omega = 122.82 + 2.15C + 8.56 \cdot 10^{-3} \theta_0 \quad \text{----- (7)}$$

이 된다. α_A 및 α_M 은 오오스테나이트 및 마르텐사이트의 열팽창계수이며 r_M 은 마르텐사이트의 일정한 온도에서 체적변화를 나타낸 것이고 θ_0 는 초기온도, C는 탄소함량의 중량%이다. 탄소성 열응력의 해석에 있어서는 변분법(variational method)중 가상일의 원리(principle of virtual work)를 적용하였고 平衡方程式은

$$\text{div } \hat{\sigma} + \hat{\rho} b = 0 \quad \text{----- (8)}$$

과 같고 변형을 증분과 변위증분의 관계식은

$$\hat{\epsilon} = \frac{1}{2} \{ \text{grad } \hat{u} + (\text{grad } \hat{u})^T \} \quad \text{----- (9)}$$

이며 응력증분과 변형증분의 관계는 아래와 같다.

$$\hat{\epsilon} = \hat{\epsilon}^{\Delta \sigma} + \hat{\epsilon}^{\Delta p} + \hat{\epsilon}^{\Delta \xi} \quad \text{----- (10)}$$

$$\begin{aligned} \hat{\epsilon}^{\Delta \sigma} = & \frac{1+\nu}{E} \hat{\sigma} - \frac{\nu}{E} (\text{tr } \hat{\sigma}) \hat{1} + \sum_I \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi_I} \left(\frac{1+\nu}{E} \right) \hat{\sigma} \right. \\ & \left. - \frac{\partial}{\partial \xi_I} \left(\frac{\nu}{E} \right) (\text{tr } \hat{\sigma}) \hat{1} + \int_{\theta_0}^{\theta} \frac{\partial \alpha}{\partial \xi_I} d\theta \hat{1} \right\} \xi_I \\ & + \left\{ \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1+\nu}{E} \right) \hat{\sigma} - \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\nu}{E} \right) (\text{tr } \hat{\sigma}) \hat{1} \right\} \hat{\theta} + \text{ad} \hat{\theta} \hat{1} \end{aligned} \quad \text{----- (11)}$$

$$\begin{aligned} \hat{\epsilon}^{\Delta p} = & \frac{1}{4} \frac{\partial f_0}{\partial \xi_I} \left\{ \text{tr}(\hat{S} \hat{\sigma}) - \frac{2}{3} f_0 \frac{\partial f_0}{\partial \theta} \hat{\theta} \right. \\ & \left. - \frac{2}{3} f_0 \sum_I \frac{\partial f_0}{\partial \xi_I} \xi_I \right\} \hat{S} \end{aligned} \quad \text{----- (12)}$$

$$\hat{\epsilon}^{\Delta \xi} = \sum_I \beta_I \xi_I \hat{1} \quad \text{----- (13)}$$

또한 항복조건은 Von-Mises 조건을 이용하였고 변형을 경화법칙, 경계조건 및 초기조건은 아래와 같이

$$k = \frac{2}{3} \text{tr}(\hat{\epsilon}^{\Delta \sigma} \cdot \hat{\epsilon}^{\Delta p})^{1/2} \quad \text{----- (14)}$$

$$\hat{\sigma} n = t, \hat{u} = u, \hat{\sigma} = 0, \hat{\epsilon} = 0, \hat{u} = u \quad \text{----- (15)}$$

이며 여기서 \hat{n} 은 외력 \bar{t} 가 작용하는 표면 S_i 상에서의 외향 법선벡터이다.

이와같이 초기치 및 경계치문제의 해를 구하는데 있어서 방정식의 계(system)를 취급하는 것이 필요하나 온도, 조직 및 응력등의 관계를 동시에 처리하는 것은 곤란하다. 따라서 미소중분이론에 의하여 근사적으로 해를 구하고 이를 유한요소법에 의하여 해석하여야 하는데 탄소성체내의 변위를 적합조건에 맞도록 가정하고 변형을 정의한 후 응력성분을 계산한 변위법(displacement method)을 이용하였다. 물체의 영역을 유한개의 요소로 분할하고 절점 i 의 변위를 중분형으로 표시하면 임의의 요소내의 변위 du_i, du_e 는 다음과 같이 표시된다.

$$\{du\} = [N] du^{(e)} \dots\dots\dots (16)$$

$$\{du\} = \{du_i, du_e\}^T,$$

$$\{du\}^{(e)} = \{du_{i1}, du_{e1}, \dots, du_{iN}, du_{eN}\}^T \dots\dots\dots (17)$$

이다. $[N]$ 은 좌표의 함수 결정되어지는 형상함수(shape function)이고 사변형요소(quadrilateral element)를 취하면

$$N_i^{(e)} = \frac{1}{4}(1 + \xi_i \xi)(1 + \eta_i \eta) \quad i=1, 2, 3, 4 \dots (18)$$

로 표시되며 ξ, η 는 국부좌표(local coordinate)이다. 각 절점당으로 형상함수를 표시하면 다음과 같다.

$$N_1 = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 - \eta) \dots\dots\dots (19)$$

$$N_2 = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 - \eta) \dots\dots\dots (20)$$

$$N_3 = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 + \eta) \dots\dots\dots (21)$$

$$N_4 = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 + \eta) \dots\dots\dots (22)$$

강성방정식(stiffness equation)을 유도하기 위한 가상일의 원리는

$$I = \sum_e \left\{ \int_v \{d\sigma\}^T \{d\epsilon^0\} dV - \int_v \{db\}^T \{du^0\} dV \right\} - \int_s \{\hat{d}t\}^T \{du^0\} dS \dots\dots\dots (23)$$

을 이용하고 운동학적으로 허용가능한(kinematically admissible) 임의의 변형을 중분 $\delta\{du^0\}$ 에 의하여 표시되는 양

$$\delta I = \int_v \{d\sigma\}^T \delta\{d\epsilon^0\} dV - \int_s \{db\}^T \delta\{du^0\} dS - \int_s \{\hat{d}t\}^T \delta\{du^0\} dS \dots\dots\dots (24)$$

는 眞의 解에 의하여 絶對最小로 되므로 식(24)로부터 행렬형태의 강성방정식은 다음과 같이 유도된다.

$$[K]\{du\} = \{dF_b\} + \{dF^e\} + \{dF_t\} \dots\dots\dots (25)$$

여기서

$$[K] = \sum_e [K]^{(e)}, \quad \{dF_b\} = \sum_e \{dF_b\}^{(e)}$$

$$\{dF^e\} = \sum_e \{dF^e\}^{(e)}, \quad \{dF_t\} = \sum_e \{dF_t\}^{(e)} \dots (26)$$

이며 모델 전체 영역의 요소에 대한 수식은 아래와 같다.

$$[K]^{(e)} = \int_{v^{(e)}} [B]^T [D^{ep}] [B] dV \dots\dots\dots (27)$$

$$\{dF_b\}^{(e)} = \int_{s^{(e)}} [N]^T \{d\bar{F}\} dS \dots\dots\dots (28)$$

$$\{dF^e\}^{(e)} = \int_{v^{(e)}} [B]^T [D^e] \{\bar{\alpha}\} d\theta dV$$

$$- \int_{v^{(e)}} \frac{1}{3} \frac{\partial f_0}{\partial k} f_0^2$$

$$[B]^T [D^e] \{S\} \frac{\partial f_0}{\partial \theta} d\theta dV \dots\dots\dots (29)$$

$$\{dF_t\}^{(e)} = \sum_I \int_{v^{(e)}} [B]^T [D^e] \{\bar{\beta}_I\} d\xi dV$$

$$- \int_{v^{(e)}} \frac{1}{3} \frac{\partial f_0}{\partial k} f_0^2 [B]^T [D^e] \{S\}$$

$$\frac{\partial f_0}{\partial \xi_I} d\xi dV \dots\dots\dots (30)$$

소성행열 $[D^p]$ 는

$$[D^p] = [D^e] - \frac{4G^2}{S_0} \begin{vmatrix} \hat{S}_r^2 & \hat{S}_r \hat{S}_\theta & \hat{S}_r \hat{S}_z & \hat{S}_r \hat{S}_{rz} \\ & \hat{S}_\theta^2 & \hat{S}_\theta \hat{S}_z & \hat{S}_\theta \hat{S}_{rz} \\ & & \hat{S}_z^2 & \hat{S}_z \hat{S}_{rz} \\ \text{sym.} & & & \hat{S}_{rz}^2 \end{vmatrix} \quad (31)$$

로 표시되며 $[D^e]$ 행열은 탄성행열을 의미한다. 수치적분은

$$I = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 f(\xi, \eta) d\xi d\eta = \sum_{i=1}^m N_i f(\xi_i, \eta_i) \quad (32)$$

와 같이 Gauss적분법을 이용하여 2점공식을 적용하였다. 비선형의 문제를 해석하는 경우에는 식(25)을 만족하지 못하고

$$d\phi = [K]\{du\} - (\{dF_b\} + \{dF_s\} + \{dF_t\}) \neq 0 \quad (33)$$

인 잔류량(residual force vector)이 남게 되며 탄소성 문제에 있어서 재료의 강성방정식은 연속적으로 변화하므로 각 시간마다 강성방정식을 만족하는 새로운 변위를 구하여야 하며 본 해석에서는 접선 강성법(tangential stiffness method)를 사용하였고 수렴조건은 다음과 같이 설정하였다.

$$\frac{\left[\sum_{i=1}^N (d\phi_i)^2 \right]^{1/2}}{\left[\sum_{i=1}^N (df_i)^2 \right]^{1/2}} \times 100 \leq 1\% \quad (34)$$

N 은 총절점수이며 r 은 현재의 반복횟수(no. of iteration)이고 $\{df\}$ 는 모든 等價節点力의 합으로 다음과 같이 표시된다.

$$\{df\} = \{dF_b\} + \{dF_s\} + \{dF_t\} \quad (35)$$

강을 켄칭처리한 후 물체내부에 발생하는 잔류응력 및 변형에 관한 해석은 설계자료 또는 열처리 조건을 지정하는데 매우 효과적인 기초자료로 이용될 수 있다. 일반적으로 어떤 재료에 국부적인 소성변

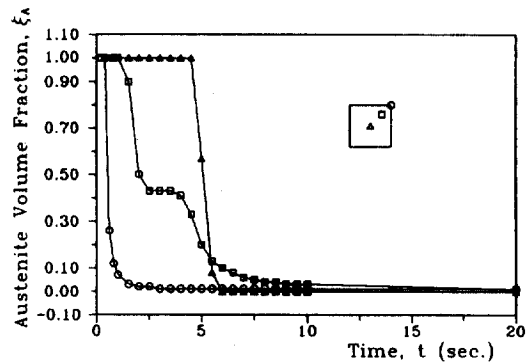
형을 주고 除荷(unloading)하면 탄소성 잔류응력이 발생하므로 그때 발생하는 잔류응력의 계산은

$$\{\sigma\} = \{\sigma\}_{elasto-plastic} - \{\sigma\}_{elastic} \quad (36)$$

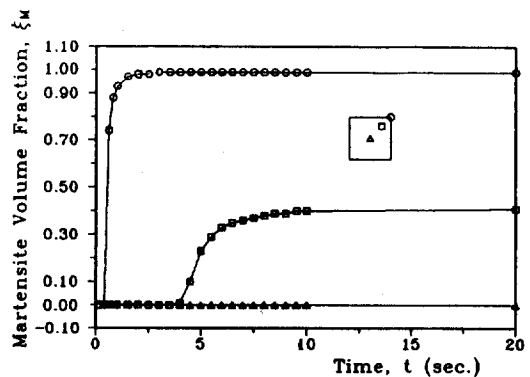
과 같이 수행하였고 모델설정 및 해석과정은 선행 연구^{11, 12)}의 경우를 이용하였으나, 응력계산을 위한 요소분할에서는 4절점 사변형 요소(4-node quadrilateral element)의 각 절점에서 온도가 구해져야 하므로 온도계산을 위한 2개의 삼각형 요소(triangular element)로 1개의 사각형 요소(rectangular element)로 구성하였다.

3. 해석결과 및 고찰

Fig. 2는 $r, z=10\text{mm}$ 와 $r, z=15\text{mm}$ 및 $r, z=20\text{mm}$



(a) Austenite



(b) Martensite

Fig. 2 Volume fraction of metallic structure according to cooling time.

위치에서의 시간에 따른 오오스테나이트와 마르텐사이트조직의 체적분율(ξ_A 와 ξ_M)에 대한 계산 결과를 나타낸 것이다. (a)그림의 오오스테나이트 조직의 경우는 $r, z=20\text{mm}$ 위치에서 상부 임계냉각속도(upper critical cooling rate, unit : $^{\circ}\text{C}/\text{sec.}$)이상의 냉각속도로 인하여 냉각개시 후 1초경에 마르텐사이트의 변태를 완료하였으며 $r, z=15\text{mm}$ 의 위치에서는 2.5초까지 퍼얼라이트로 변태 후 4초부터 마르텐사이트로 변태되므로 퍼얼라이트와 마르텐사이트가 混在시간이 1.5초 정도 유지되고 있음을 알 수 있다. 중심부측인 $r, z=10\text{mm}$ 에서는 5.3초부터 7.5초사이에 99% 이상 변태를 완료하였다. 마르텐사이트 조직의 냉각시간에 따른 체적분율의 변화를 보여주는 (b)는 $r, z=20\text{mm}$ 위치에서 냉각초기에 변태가 완료하지만 $r, z=15\text{mm}$ 에서는 냉각개시 4초 이후 부터 변태가 일어나 10초가 경과하여야 $\xi_M=0.4$ 정도의 변태가 발생되며 $r, z=10\text{mm}$ 에서는 거의 마르텐사이트 변태가 일어나지 않는다. 이것은 시편의 중심부로 진행할수록 하부임계냉각속도(lower critical cooling rate)이하로 냉각이 이루어져 솔바이트(sorbite)나 퍼얼라이트(pearlite) 조직이 창출되기 때문으로 사료된다.

냉각개시 1초후 조직분포를 나타낸 Fig. 3은 (a) 그림의 경우 시편 전영역에서 $\xi_A=0.7\sim 1.0$ 의 오오스테나이트가 형성되었으나 시편의 상단과 원주면 부근에서는 $\xi_A=0.7$ 에 가깝고 내부로 진행할수록 $\xi_A=1.0$ 에 근접한 조성을 나타낼 것으로 사료된다. (b)그림은 시편의 상단과 원주면 일부의 표면으로부터 $1.5\sim 2\text{mm}$ 위치에서 마르텐사이트($\xi_M=0.7\sim 1.0$ 과 $\xi_M=0.5\sim 0.7$) 조직이 발생하였다.

Fig. 4는 냉각이 이루어진후 3초가 경과하였을 때 시편의 조직변화를 보여주는 것으로 오오스테나이트는 원주와 상단면에서 거의 소멸되었고, 시편의 중심부에서는 그때까지 오오스테나이트가 잔존하고 있다. 아울러 오오스테나이트 체적분율이 $\xi_A=0.01\sim 0.3$ 사이의 양쪽에 $\xi_A=0.7\sim 1.0$ 및 $\xi_A=0.3\sim 0.7$ 의 조직이 나타난 이유는 냉각개시후 3초

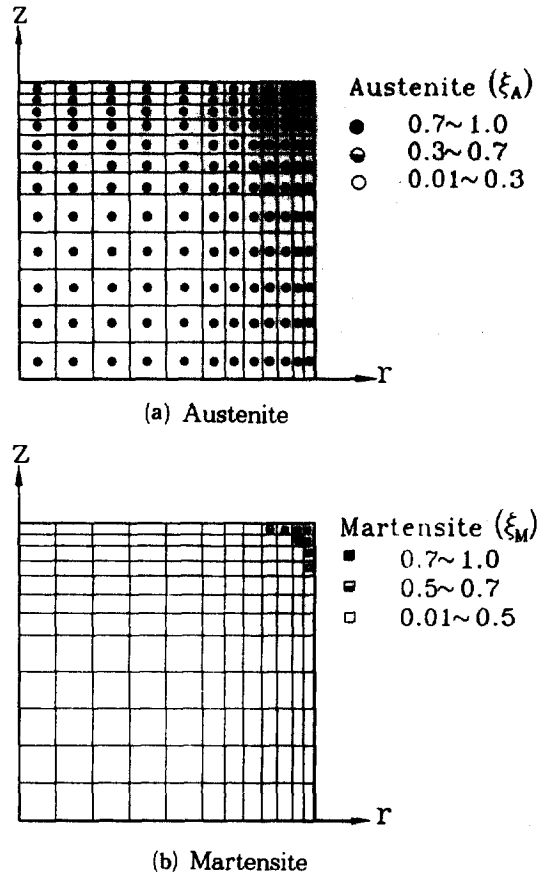


Fig. 3 Distribution of metallic structure after quenching(1 sec.).

정도는 냉각과정에서 膜沸騰이 소멸되고 遷移沸騰 및 核沸騰으로 진입하는 단계로서 냉각과정이 불균일하게 형성되기 때문이며 이후 냉각시간이 경과됨에 따라서 시편 표면부와 근접한 $\xi_A=0.7\sim 1.0$ 및 $\xi_A=0.3\sim 0.7$ 조직들은 모두 마르텐사이트 조직으로 변화할 것으로 사료된다.

냉각과정의 말기인 대류단계에 해당하는 냉각개시 10초후의 시편 조직을 나타내는 Fig. 5는 (a)의 경우 오오스테나이트 조직은 시편의 전영역에서 소멸되었고 마르텐사이트 조직은 시편의 표면부인 상단부와 원주면에 집중적으로 분포하고 있음을 알 수 있었다. 직경 및 길이가 40mm인 SM45C의 탄소강을 820 $^{\circ}\text{C}$ 의 초기온도와 25 $^{\circ}\text{C}$ 증류수에 완전

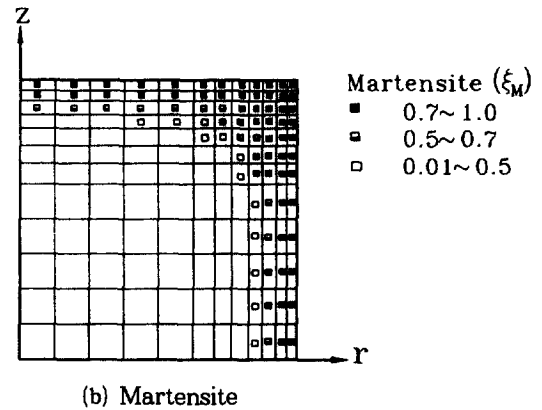
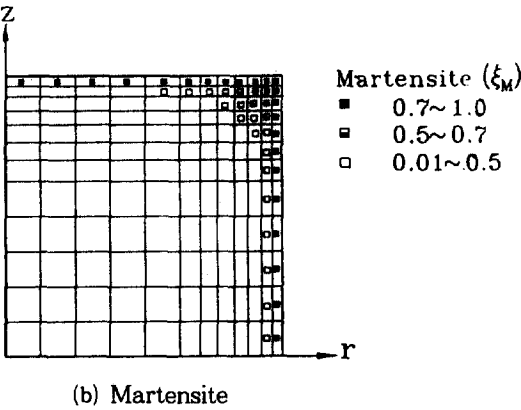
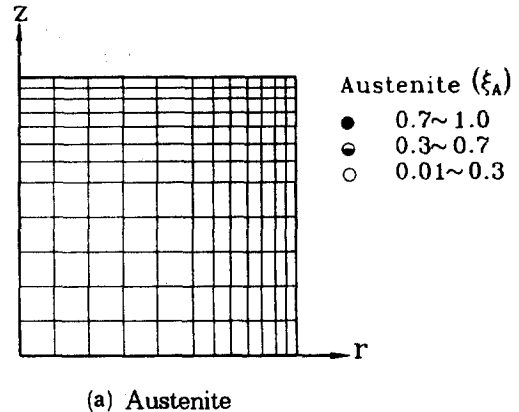
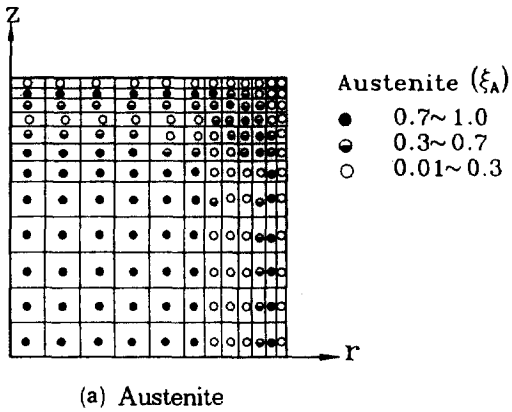


Fig. 4 Distribution of metallic structure after quenching(3 sec.).

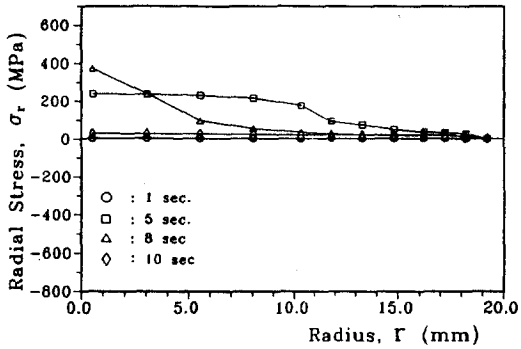
Fig. 5 Distribution of metallic structure after quenching(10 sec.).

펄칭처리를 할 경우 마르텐사이트 조직층은 시편의 표면부에서 두께 3mm 정도 까지 얻을 수 있다. 그리고 정확한 정도의 분포도를 파악하기 위해서는 향후 경화능에 대한 후속연구가 필요할 것으로 사료된다.

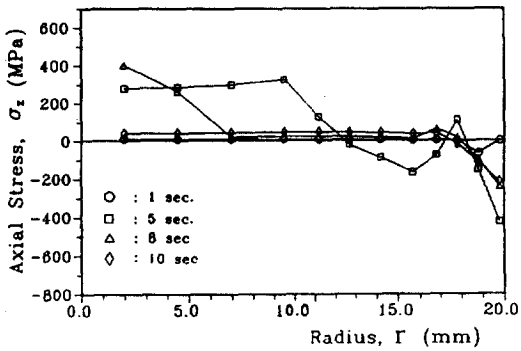
Fig. 6은 $z=0\text{mm}$ 에서 반경방향에 따른 radial, axial 및 tangential stress(σ_r, σ_z 및 σ_θ)의 변태 응력을 냉각시간에 따라 도시한 것이다. σ_r 은 냉각개시후 8초가 경과하였을때 중심부에서 최대 380MPa의 인장응력을 발생하고 있고, 시험편 전영역에 대해 모두 인장응력이 분포하고 있다. (b)와 (c) 그림의 σ_r 과 σ_θ 는 표면부($r=17\sim 20\text{mm}$)에서 냉각 초기에 마르텐사이트로 팽창되므로 압축응력이 발

생하고, 냉각개시 5초 이후에 점차 퍼얼라이트 변태가 일어남에 따라 변태팽창으로 인한 인장응력이 시편의 중심으로부터 10~13mm 위치에서 발생하며, $r=17\sim 18\text{mm}$ 부근의 일부와 $r=10\text{mm}$ 이하의 시편 중심부에서는 100MPa 및 200~300MPa의 인장응력을 나타내고 있다. 냉각시작 10초 이후에서는 마르텐사이트의 팽창량이 퍼얼라이트보다 크므로 내부에는 인장응력이, 표면에는 압축응력을 보여주는데 이들 응력은 시편 전영역에 대한 대수합이 zero가 된다.

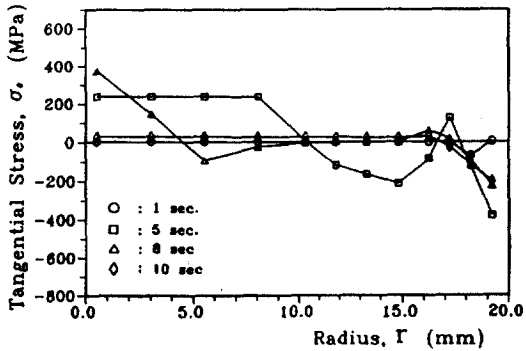
냉각시작 1초가 경과하였을때 radial stress(σ_r)와 axial stress(σ_z) 및 tangential stress(σ_θ)의 거동을 나타낸 Fig. 7은 (a)그림에서 σ_r 이 시편의 상



(a) Radial stress



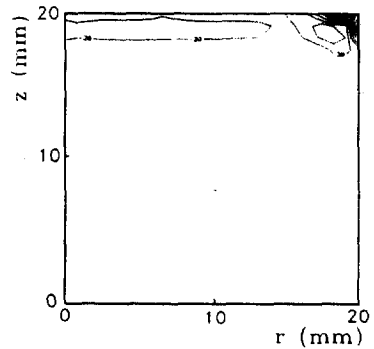
(b) Axial stress



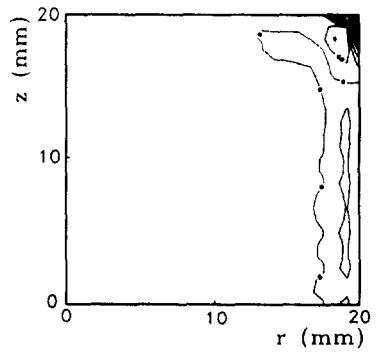
(c) Tangential stress

Fig. 6 Transformation stress according to r-direction.

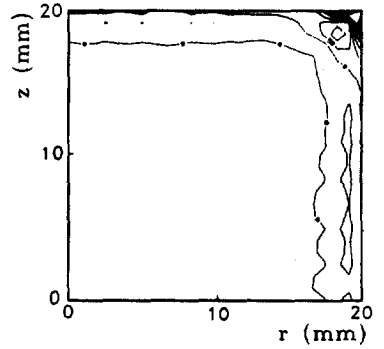
단면에서 -20MPa 의 압축응력을, 시편의 모서리면에서는 30MPa 의 인장응력을 보여준다. σ_z 및 σ_θ 는 시편의 원주와 상단면에서 거의 zero상태이나 모서리면에서는 급격한 변화의 징후가 나타난것은 차후



(a) Radial stress



(b) Axial stress



(c) Tangential stress

Fig. 7 Transformation stress contour(1 sec.). unit : MPa

응력의 변화가 이 부근에서 활발하게 이루어질 전 망임을 의미한다.

Fig. 8은 냉각개시후 5초가 지났을때 각종 응력의 거동을 나타낸 것으로 σ_r 의 (a)경우 시편 중심부

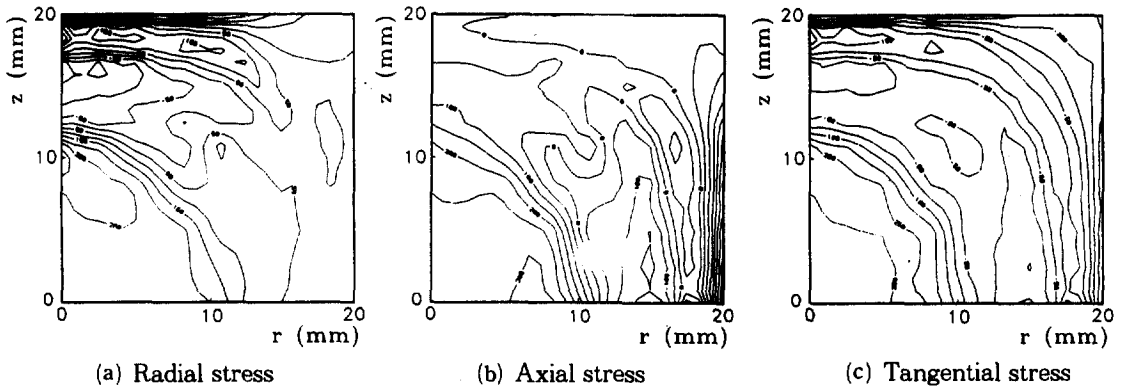


Fig. 8 Transformation stress contour(5 sec.). unit : MPa

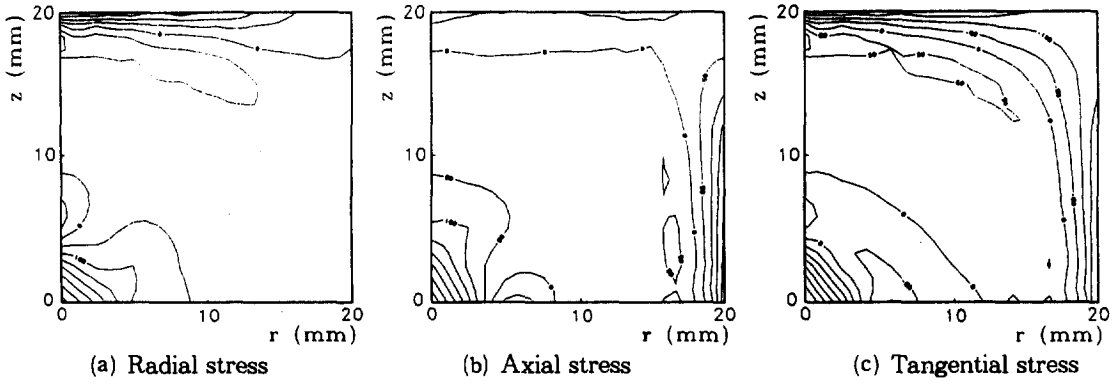


Fig. 9 Transformation stress contour(8 sec.). unit : MPa

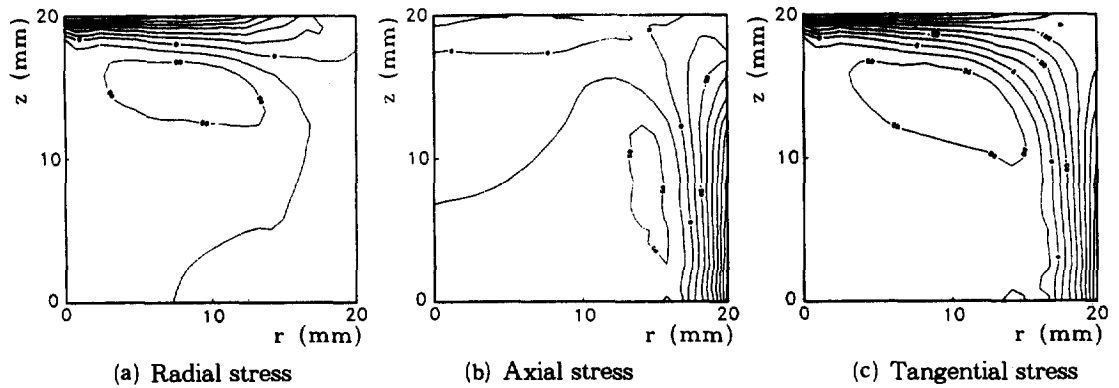


Fig. 10 Transformation stress contour(10 sec.). unit : MPa

에는 250MPa의 인장응력이 그 주변은 -50MPa의 인장응력이 발생하고 있다. (b)에서는 σ_z 의 변화 양상을 표시한 것으로 중심부에 300MPa의 인장 응력과 그 주위는 응력반전을 통한 -100MPa 정도의 압축응력을 보여준다. σ_r 에 비교하여 σ_z 는 원주면에서 급격한 변화를 수반하고 있음이 서로 상이하다. σ_θ 는 시편내부에 250MPa의 인장응력이 형성되나 균질한 응력이완 과정을 걸쳐 모서리부, 원주 및 상단부에서 -200MPa의 압축응력이 나타난다.

냉각개시후 8초 및 10초가 경과하였을때 응력 분포를 도시한 Fig. 9와 Fig. 10은 等應力線 한개의 간격이 $\pm 50^\circ\text{C}$ 를 의미한다. 앞의 그림과 비교하면 보다 부드러운 곡선의 형태와 분포를 형성하므로 응력 변화의 양상이 다소 완만하여졌음을 알 수 있다. 그리고 두 그림 모두 σ_r 은 시편의 상단부, σ_z 는 원주, σ_θ 는 원주와 상단부면에서 급격한 변화의 과정을 나타내고 있다.

Fig. 11은 퀴칭과정시 퀴칭처리전(냉각개시 0초)과 5초, 30초 및 90초가 경과하였을때 시편의 변형량의 양상을 확대하여 나타낸 것으로서 냉각이 점차 진행되면서 시편의 모서리부에서 Ar[~]변태 팽창으로 인한 굴곡진 변형 양상이 보이고, 5초가 경과하였을때는 모서리부에 비교하여 원주면과 상단

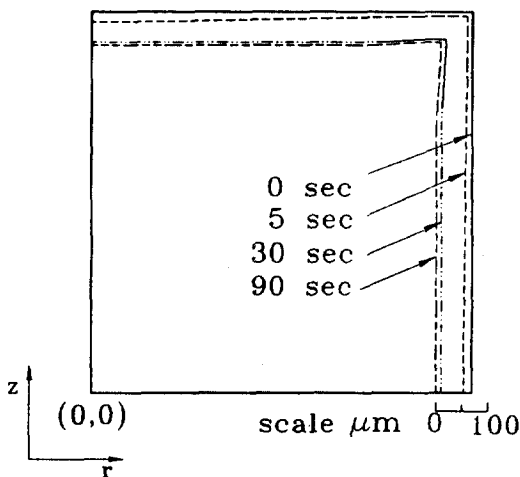


Fig. 11 Deformation behavior during quenching

부의 변형량이 미소량이나마 더 큰 것을 알 수 있었다. 이러한 경향은 냉각이 완료되는 과정까지 지속되고 최대 변형량은 약 65~70 μm 정도이다.

$z=0\text{mm}$ 에서 반경방향에 대한 퀴칭응력을 나타낸 Fig. 12는 냉각단계에서 큰 열응력 구배로 인하여 有效 塑性變形率이 발생하며, 이로 인한 소성변형은 열응력의 크기가 소성변형에 의한 응력분포보다

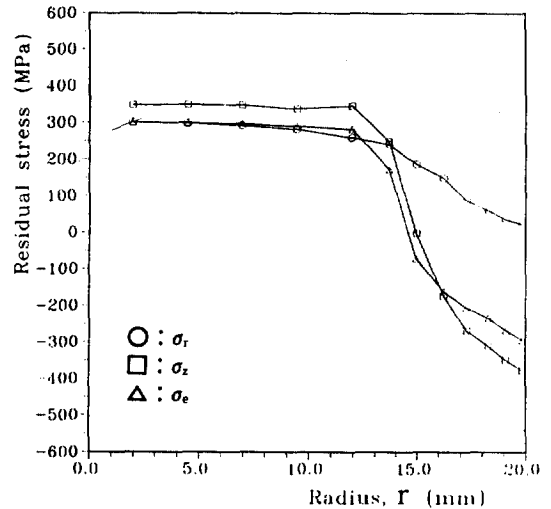


Fig. 12 Residual stress distribution according to r-direction, $z=0\text{mm}$.

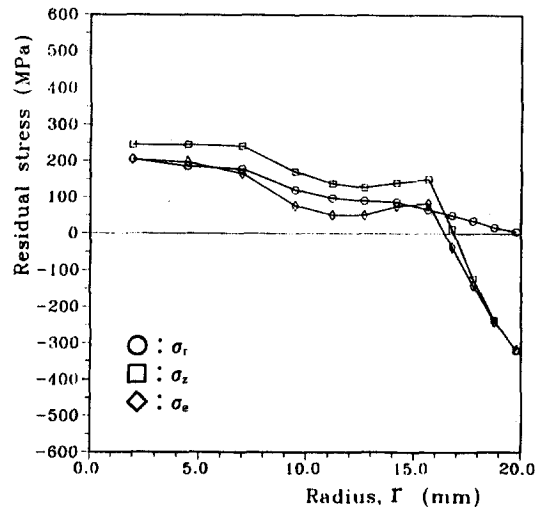


Fig. 13 Residual stress distribution according to r-direction, $z=0\text{mm}$. (with transformation dilatation)

작계됨에 따라 표면에 잔류 압축응력, 내부에 잔류 인장응력으로 분포한다. 그 크기는 표면에 -350 MPa 내부에 350 MPa 정도의 인장응력을 나타내고 있으며 應力反轉 위치는 σ_r 와 σ_θ 가 r 14.5~15mm에서 형성되지만 σ_r 은 시편 전영역에서 인장 응력 거동을 유지하고 있다.

Fig. 13은 $z=0$ mm에서 반경방향에 대한 퀵칭 잔류응력을 나타낸 것으로 변태팽창을 고려한 것이다. 열응력만을 고려한 담금 잔류응력(Fig. 12)보다 시편의 내외부에 응력 크기는 감소하여 인장응력 250 MPa, 압축응력 -300 MPa정도이다. 이 이유는 열응력과 변태응력이 중첩되어 열응력에 의한 소성변형이 변태팽창에 의하여 저지되었기 때문으로 사료되며 응력의 반전은 열응력만을 고려한 경우보다 약간 표면부로 이동하여 r 16.5~17mm 위치에서 형성된다.

4. 결 론

SM45C 기계구조용 탄소강을 상온의 증류수에 완전 퀵칭처리된 한 경우에 대하여 2차원 비정상 열응력분포 해석을 기초로 오오스테나이트 및 마르텐사이트 조직의 체적분율의 변화 과정과 각종 열응력의 시간 경과에 따른 거동변화를 유한요소법으로 해석한 결과는 다음과 같다.

오오스테나이트 조직은 시편의 표면부에서 냉각 초기에 변태완료를 하였으며 $r, z=15$ mm 및 $r, z=10$ mm 위치는 4초 및 8초 사이에 변태가 종료되었다. 또한 마르텐사이트는 표면부에서 냉각개시 1초 후에 변태가 모두 이루어졌으며 $r, z=15$ mm에서는 10초이후에 마르텐사이트의 체적분율(ξ_M)이 0.4 정도로 진행되었고 $r, z=10$ mm에서는 거의 마르텐사이트 변태가 발생하지 않았다. 그리고 $\xi_M=1.0$ 의 완전한 마르텐사이트층은 시편 외곽으로부터 3mm 깊이까지 존재하고 있었으며 정확한 경도를 분석하기 위해서는 경화능에 대한 후속 연구가 수반되어야 할 것이다. radial stress는 냉각개시후 8초가 경과하였을때 시편의 중심부에서 380MPa 정도

의 인장응력으로 발생하며 axial 및 tangential stress는 냉각개시 5초후 $-400\sim 420$ MPa 정도의 압축응력으로 시편 표면부에서 형성되었다. 퀵칭과정에서의 변형은 시편의 Ar 변태 팽창으로 인하여 모서리부에서 왜곡진 형태를 보여주며 원주면과 상단부의 변형량이 모서리부에 비교하여 다소 크게 나타났고 최대 변형량은 $65\sim 70\mu\text{m}$ 정도였다. 열응력만을 고려한 퀵칭응력의 반전 위치는 r 14.5~15mm 부근이며 변태팽창을 고려한 퀵칭 잔류응력의 반전은 r 16.5~17mm로 시편의 표면부를 향하여 이동하였고, 응력의 크기는 인장응력의 경우 약 30%, 압축응력은 약 15% 감소한 250 MPa와 -300 MPa 정도를 나타냈다.

參 考 文 獻

1. H. G. Landau and J. H. Weiner : J. of Applied Mechanics, 1958, pp. 459~465.
2. O. C. Zienkiewicz and I. C. Corneau : Int. J. Num. Meth Engrg., 1974, Vol. 8, pp. 821~845.
3. M. B. Kanchi, O. C. Zienkiewicz and D. R. Owen : Int. J. Num. Meth Engrg., 1978, Vol. 12, pp. 169~181.
4. 井上達雄 : 日本機械學會論文集(A編), 1984, 第50卷, 第451號, pp. 285~290.
5. R. Schroder : International Symposium on the Calculation of Internal Stresses in Heat Treatment of Metallic Materials (Sweden), 1984, pp. 23~42.
6. J. K. Rai, A. Mishra and U. R. K. Rao : Int. J. Mach. Tool. Des., 1980, Vol. 20, pp. 1~8.
7. 岸野考信, 長岐滋, 井上達雄 : 材料, 1979, 第28卷, 第312號, pp. 861~867.
8. 閔壽泓, 具本權, 金相烈 : 大韓機械學會論文集, 1989, 第13卷, 第3號, 通卷60卷, pp. 411~423.

9. 金鈺三, 崔殷淳, 閔壽泓: 韓國熱處理學會誌, 1992, 第5卷, 第4號, pp. 224~232.
10. 閔壽泓, 具本權, 宋寬欽: 大韓機械學會 秋季學術大會抄錄集, 1992, pp. 277~281.
11. 金鈺三, 曹義一, 辛榮雨: 韓國熱處理學會誌, 1994, 第7卷, 第2號, p. 103~110.
12. 金鈺三, 具本權: 韓國熱處理學會誌, 1994, 第7卷, 第4號, pp.(심사증).