

켄칭과정에서 상변태를 고려한 탄소성 열응력의 유한요소해석(I)

— 오스테나이트에서 퍼얼라이트로의 변태 —

김 옥 삼* · 구 본 권**

*여수수산대학교 기계공학과

**서울산업대학교 금형설계과

An Analysis Finite Element for Elasto-Plastic Stresses
Considering Phase Transformation at the Quenching Process(I)
— From Austenite to Pearlite —

OK-Sam Kim* and Bon-Kwon Koo**

*Dept. of Mechanical Engineering, Yosu National Fisheries University.

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

ABSTRACT

Constitutive relation of thermoelasto-plastic material undergoing phase transformation during quenching process were developed on the basic of continuum thermodynamics. The metallic structure, temperature and residual stresses distributions were numerically calculated by the finite element technique. The metallic structure were defined by transformation from austenite to pearlite and characterized as a fuction of thermal history and mixture rule of phase.

On the distribution of thermal stress along the radial direction, axial and tangential stresses are compressive in the surface, and tential in the inner part. Radial stress is tensile in the whole body. The reversion of residual stress takes plase at 11.5~15.5mm from the center.

1. 서 론

공업재료로서 경제성과 기계적성질이 우수한 기계구조용 탄소강은 산업현장에서 널리 사용되고 있는 금속재료이다. 그러나 기계적성질 특히 강도나 인성등은 조직에 민감한 성질이기 때문에 오래전부터 광학 및

금속현미경을 사용한 조직관찰에 의해 금속조직과 성질과의 상관 관계가 연구¹⁾되어 왔다. 역으로 말하면 금속조직을 변화시키므로서 기계적성질을 제어하는 것이 가능하다는 점이다. 탄소강에 있어서는 상변태라고 하는 현상이 있어 금속학적으로 말하면 오스테나이트 상태에서 냉각속도를 변화시키므로서 금속조직이 현재

하게 변하고 이것에 따라서 기계적성질도 광범위²⁾하게 변한다. 이와같은 강의 열처리는 상변태를 이용하여 기계적성질을 개선하는 것이 목적인다고 말할 수 있지만 동시에 여러가지 부수적인 역효과도 발생할 수 있다.

예를들면 켈칭처리는 마르텐사이트변태를 이용하여 재료를 경화 및 강화시키기도 하며 압축 잔류응력을 발생시켜 강도를 향상시키는것을 목적으로 하고 있지만, 이때 잔류응력이나 변형이 유발되어 켈칭균열이나 치수정밀도 저하의 원인³⁾이 된다. 켈칭처리를 할 때, 800°C이상의 초기온도에서 냉각에 의하여 물체내부의 온도구배에 의하여 기인하는 열용력은 쉽게 소성변형을 가져오고, 또 고온에서의 어닐링이나 템퍼링과 같이 장시간 고온하에서 유지하여야 하는 경우에는 크리프등의 시간에 의존하는 비탄성변형도 무시할 수 없다. 그러므로 이와같은 역학적 거동을 고려하면 물체의 특성을 점탄소성체로서의 고찰이 필요하지만 켈칭처리와 같이 단시간에 공정을 마치는 경우에는 점성적인 성질을 무시하고 물체를 탄소성체로 해석하여도 문제가 없다는 것을 밝힌 연구⁴⁾는 이미 많이 이루어졌다.

켈칭과정에 있어서 조직변화 자체를 고려한 것으로는 井上, Raniecki⁵⁾등이 연구를 수행하여 켈칭과정 중의 상변태에 관해서는 해석적인 방법을 기초로 하고 조직변화를 고려한 탄소성체의 구성식의 정식화를 시도하였으나 변태잠열을 고려하는 것은 上村, 長岐, 井上的 방법⁶⁾에 의존하였고 실험적 검토는 米谷⁷⁾에 의하여 행하여 졌다. 국내에서도 냉각제의 냉각능력에 대한 정량적 평가가 민, 구, 김⁸⁾등에 의해 수행되어 수치해석적 방법에 의한 냉각능 추정과 탄소강의 켈칭과정에서 유한요소법을 이용한 온도해석이 김, 조, 신⁹⁾등에 의해 이루어졌다.

켈칭과정중에 발생하는 응력의 원인은 주로 물체내의 온도구배로 발생하는 상변태에 의한 체적변화로 유발되는 것을 고려할 수 있으며 응력이나 변형등의 역학량과 열 및 조직사이에는 밀접한 관계가 있어 상호연성효과가 작용하고 있다. 그러므로 이에 대한 기초적 연구로서 원주강재를 켈칭하는 경우 유한요소법을 이용하여 축대칭 비정상 이차원 온도분포를 선행연구⁹⁾

결과로부터 구하고 이를 이용하여 조직의 변태과정을 해석, 각 조직의 체적분율을 계산 하였으며 열수축 및 상변태에 따른 응력분포 및 거동분석은 미소변형 이론을 사용하여 해석하였다.

2. 탄소성체의 구성방정식과 퍼얼라이트변태의 속도식

2. 1 탄소성체의 구성방정식

켈칭과정에 있어서는 냉각이 이루어짐과 동시에 물체내에는 냉각에 의한 열수축과 상변태에 의한 체적변화가 발생하므로 이와 같은 변화를 고려한 열탄소성체의 구성식을 도출하였다. 소성체의 역학적 거동을 기술하는 경우에는 항복함수, 흐름법칙 및 경화법칙 등이 필요하며 항복함수등은 탄성-소성상태를 구별하는 조건으로서의 항복함수를 일반화시켜 뒤에 연속되는 부하에 대해서도 적용할 수 있도록 구성하며 항복조건은

$$F = F(\sigma, T, \epsilon^p, \alpha, \chi, \xi) \dots\dots\dots (1)$$

로 표현되어 진다. 물체가 소성상태인 임의의 시점에서

$$F(\sigma, T, \epsilon^p, \alpha, \chi, \xi) = 0 \dots\dots\dots (2)$$

이 성립하여야 하며 식(2)의 시간미분

$$\dot{F} = \text{tr} \left\{ \left(\frac{\partial F}{\partial \underline{\sigma}} \right)^T \dot{\underline{\sigma}} \right\} + \frac{\partial F}{\partial T} \dot{T} + \text{tr} \left\{ \left(\frac{\partial F}{\partial \underline{\epsilon}^p} \right)^T \dot{\underline{\epsilon}}^p \right\} + \text{tr} \left\{ \left(\frac{\partial F}{\partial \underline{\alpha}} \right)^T \dot{\underline{\alpha}} \right\} + \frac{\partial F}{\partial \chi} \dot{\chi} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\partial F}{\partial \xi_i} \dot{\xi}_i \dots\dots (3)$$

을 고려하면 시간 t에 있어서 F=0에서 F<0로 변화한 다음의 순간에는 F<0가 되어 탄성상태가 된다. 여기서 $\underline{\sigma}$ 및 T는 응력과 온도이고 $\underline{\sigma}^p$, α , χ 및 ξ 는 내부변수이다. 이와 같은 제하과정(unloading processing)에 있어서는 소성변형은 발생하지 않고 항복곡면 중심 $\underline{\alpha}$ 도 이동하지 않는다. 그러므로 식(3)에 의하여 소성상태로부터 제하의 기준은 다음과 같이 규정된다.

$$\text{제하} : \text{tr} \left\{ \left(\frac{\partial F}{\partial \underline{\sigma}} \right)^T \dot{\underline{\sigma}} \right\} + \frac{\partial F}{\partial T} \dot{T}$$

$$+ \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\partial F}{\partial \xi_i} \dot{\xi}_i < 0, F=0 \dots\dots\dots (4)$$

제하 이외의 경우를 부하(loading), 중립부하(neutral loading)라고 부르고 다음과 같이 정한다.

$$\begin{aligned} \text{부하} : & \text{tr} \left\{ \left(\frac{\partial F}{\partial \underline{\sigma}} \right)^T \dot{\underline{\sigma}} \right\} + \frac{\partial F}{\partial T} \dot{T} \\ & + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\partial F}{\partial \xi_i} \dot{\xi}_i > 0, F=0 \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{중립부하} : & \text{tr} \left\{ \left(\frac{\partial F}{\partial \underline{\sigma}} \right)^T \dot{\underline{\sigma}} \right\} + \frac{\partial F}{\partial T} \dot{T} \\ & + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\partial F}{\partial \xi_i} \dot{\xi}_i = 0, F=0 \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

다음에 흐름법칙으로서 연속유동법칙

$$\underline{\dot{\epsilon}}^i = A \frac{\partial F}{\partial \underline{\sigma}} \dots\dots\dots (7)$$

을 이용하고 식(7)은 소성변형이 항복곡면의 수직으로 생기는 것을 의미한다. 경화법칙으로서의 이동 경화이론을 사용하는 경우는 아래와 같은

$$\underline{\dot{\alpha}} = C_1(T, \chi, \xi_i) \underline{\epsilon}^i \dots\dots\dots (8)$$

를 사용하고 등방경화 이론을 이용한 경우에는 다음의 식을 이용한다.

$$\chi = \bar{\epsilon}^p = \left\{ \frac{2}{3} \text{tr} \left(\underline{\dot{\epsilon}}^p \underline{\dot{\epsilon}}^p \right) \right\}^{1/2} \dots\dots\dots (9)$$

소성변형중 응력점은 항복곡면상에 존재하여야만 된다는 적용조건으로 부터

$$\begin{aligned} \dot{F} = & \text{tr} \left\{ \left(\frac{\partial F}{\partial \underline{\sigma}} \right)^T \dot{\underline{\sigma}} \right\} + \frac{\partial F}{\partial T} \dot{T} + \text{tr} \left\{ \left(\frac{\partial F}{\partial \underline{\epsilon}^p} \right)^T \underline{\epsilon}^p \right\} \\ & + \text{tr} \left\{ \left(\frac{\partial F}{\partial \underline{\alpha}} \right)^T \underline{\dot{\alpha}} \right\} + \frac{\partial F}{\partial \chi} \dot{\chi} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\partial F}{\partial \xi_i} \dot{\xi}_i = 0 \dots\dots (10) \end{aligned}$$

식이 성립을 하여야만 한다. 식(7) 및 (8)를 식(10)에 대입하여 A에 관하여 풀면

$$A = \hat{G} \left[\text{tr} \left\{ \left(\frac{\partial F}{\partial \underline{\sigma}} \right)^T \dot{\underline{\sigma}} \right\} + \frac{\partial F}{\partial T} \dot{T} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\partial F}{\partial \xi_i} \dot{\xi}_i \right]$$

$$\hat{G}^{-1} = - \left[\text{tr} \left\{ \left(\frac{\partial F}{\partial \underline{\epsilon}^p} \right)^T \frac{\partial F}{\partial \underline{\sigma}} \right\} + C_1 \text{tr} \left\{ \left(\frac{\partial F}{\partial \underline{\alpha}} \right)^T \frac{\partial F}{\partial \underline{\alpha}} \right\} \right]$$

$$+ \frac{\partial F}{\partial \chi} \left\{ \frac{2}{3} \text{tr} \left(\frac{\partial F}{\partial \underline{\sigma}} \right)^T \frac{\partial F}{\partial \underline{\sigma}} \right\}^{1/2} \right] \dots\dots\dots (11)$$

를 얻을 수 있다. 식(7) 및 (11)에서 소성 변형속도 $\underline{\dot{\epsilon}}^i$ 는

$$\underline{\dot{\epsilon}}^i = G \left[\text{tr} \left\{ \left(\frac{\partial F}{\partial \underline{\sigma}} \right)^T \dot{\underline{\sigma}} \right\} + \frac{\partial F}{\partial T} \dot{T} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\partial F}{\partial \xi_i} \dot{\xi}_i \right] \frac{\partial F}{\partial \underline{\sigma}} \dots (12)$$

으로 부터 주어진다. 앞에서 언급한 바와 같이 얻어지는 소성 변형속도 $\underline{\dot{\epsilon}}^i$ 는 상변태에 의하여 조직변화에 수반되어 소성변형이 진행되고 있는 것을 나타내고 있다. 그리고 변형 $\underline{\epsilon}^e$ 에 대한 구성식은 각 조직의 자유에너지 밀도 g_i 가 소성변형에 관련된 성분 g_i^p 와 그외에 성분 g_i^e 로 분할하여 생각할 수 있다.

$$g_i = g_i^e(\underline{\sigma}, T) + g_i^p(T, \underline{\epsilon}^p, \underline{\alpha}, \chi) \dots\dots\dots (13)$$

g_i 가 응력 $\underline{\sigma}$ 의 등방함수이므로 $\underline{\sigma}$ 의 불변량과 자연상태에서의 온도차($T - T_0$)로 전개하여 2차의 항까지를 취하면

$$\begin{aligned} -p g_i = & -p g_i^e(\underline{\sigma}, T) = \Phi_{11}(\text{tr } \underline{\sigma}) + \Phi_{12}(\text{tr } \underline{\sigma})^2 \\ & + \Phi_{13}(\text{tr } \underline{\sigma}^2) + \Phi_{14}(T - T_0)(\text{tr } \underline{\sigma}) \\ & + \Phi_{15}(T - T_0)^2 + \Phi_{16}(T - T_0) \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

식이 성립하고 다만 $\Phi_j(j=1, \dots, 6)$ 는 일반적으로 온도 및 응력의 불변량의 함수이므로 여기에서는 정수로 고려한다. 아울러 변형 $\underline{\epsilon}^e$ 는

$$\begin{aligned} \underline{\epsilon}^e = & -p \frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}} = -p \left\{ \frac{\partial g^N}{\partial \underline{\sigma}} + \sum_{i=1}^{N-1} \xi_i \left(\frac{\partial g_i^p}{\partial \underline{\sigma}} - \frac{\partial g_i^N}{\partial \underline{\sigma}} \right) \right\} \\ = & \sum_{i=1}^N \xi_i \{ \Phi_{11} \underline{1} + 2\Phi_{12}(\text{tr } \underline{\sigma}) \underline{1} + 2\Phi_{13} \underline{\sigma} + \Phi_{14}(T - T_0) \underline{1} \} \dots (15) \end{aligned}$$

식으로 된다. Φ_{12}, Φ_{13} 는 각 조직의 탄성정수에 상당하는 것으로 생각하여 조직에 의한 차이는 거의 없다고 보면 간단히 Φ_2, Φ_3 으로 쓸 수 있고 Φ_{14} 은 각 조직의 선팽창계수 α_i 로 생각할 수 있기 때문에 식(15)는

$$\begin{aligned} \underline{\epsilon}^e = & \sum_{i=1}^N \xi_i \Phi_{11} \underline{1} + 2\Phi_{12}(\text{tr } \underline{\sigma}) \underline{1} + 2\Phi_{13} \underline{\sigma} \\ & + \sum_{i=1}^N \xi_i \alpha_i (T - T_0) \underline{1} \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

으로 변환될 수 있다. 혼합체의 종탄성계수 E, 포아송비 ν , 선팽창계수 α 를

$$E = \{2(\Phi_2 + \Phi_3)\}^{-1}, \nu = -\Phi_2(\Phi_2 + \Phi_3)^{-1},$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^N \alpha_i \xi_i \dots \dots \dots (17)$$

로 하면 식(16)은

$$\underline{\epsilon}^e = \frac{1+\nu}{E} \underline{\sigma} - \frac{\nu}{E} (\text{tr } \underline{\sigma}) \underline{1} + \alpha(T - T_0) \underline{1} + \sum_{i=1}^N \xi_i \Phi_{i1} \dots (18)$$

이 되므로 제4항을 제거하면 넓은 의미의 Hooke법칙을 나타내는 것과 마찬가지로이다. 상변태에 수반된 체적변화를 선팽창으로 환산시킨 것을 β_i 라고 정의하고 $\Phi_{i1} \equiv \beta_i$ 라고 한다면 식 (18)는

$$\underline{\epsilon}^e = \frac{1+\nu}{E} \underline{\sigma} - \frac{\nu}{E} (\text{tr } \underline{\sigma}) \underline{1} + \alpha(T - T_0) \underline{1} + \sum_{i=1}^N \xi_i \beta_i \dots (19)$$

식이 되지만 온도 T_0 에 있어서 $\xi_N = 1, \xi_i = 0 (i=1, \dots, N-1), \epsilon^e = 0, \sigma = 0$ 이라고 하는 자연상태가 존재한다고 고려하면 식(19)에 의해

$$\beta_N = 0 \dots \dots \dots (20)$$

가 된다. 결국 $I=N$ 으로 오스테나이트를 표시할 때는 그 체적변화는 영(zero)으로 생각된다. 식(19)에 시간 미분을 취하면

$$\underline{\dot{\epsilon}}^e = \frac{1+\nu}{E} \dot{\underline{\sigma}} - \frac{\nu}{E} (\text{tr } \dot{\underline{\sigma}}) \underline{1} + \alpha \dot{T} \underline{1}$$

$$+ \sum_{i=1}^N (\alpha_i(T - T_0) + \beta_i) \dot{\xi}_i \dots \dots \dots (21)$$

가 되므로 전변형속도 $\underline{\dot{\epsilon}}$ 은

$$\underline{\dot{\epsilon}}^e = \frac{1+\nu}{E} \left\{ \dot{\underline{\sigma}} - \frac{\nu}{1+\nu} (\text{tr } \dot{\underline{\sigma}}) \underline{1} \right\} + G \left[\text{tr} \left\{ \left(\frac{\partial F}{\partial \underline{\sigma}} \right)^T \dot{\underline{\sigma}} \right\} \right.$$

$$+ \frac{\partial F}{\partial T} T + \sum_{i=1}^{N-1} \left. \frac{\partial F}{\partial \xi_i} \dot{\xi}_i \right] \frac{\partial F}{\partial \underline{\sigma}} + \alpha \dot{T} \underline{1}$$

$$+ \sum_{i=1}^N (\alpha_i(T - T_0) + \beta_i) \dot{\xi}_i \dots \dots \dots (22)$$

과 같다.

2.2 퍼얼라이트변태의 속도식

탄소강에 있어서 상변태는 일반적으로 크게 나누어 확산형변태, 무확산형변태 및 이것들의 중간형 변태로 나눌 수 있다. 퀀칭과정중에 발생하는 변태로서는 퍼

얼라이트변태, 베이나이트변태, 마르텐사이트변태를 생각할 수 있으나, 퍼얼라이트변태는 확산형, 마르텐사이트변태는 무확산형변태로 알려져 있고 베이나이트변태는 아직 일치된 견해가 없다. 퍼얼라이트변태는 단위체적의 모상을 고려하고, P를 시간 t까지 생성되어진 퍼얼라이트 생성상의 체적으로 한다. 생성상의 성장속도는 생성상과 모상의 계면이 그것이 수직한 방향으로 이동하는 속도이고 이것을 G로 나타내고 해석의 편의성을 위하여 생성된 생성상은 구형으로 되어 있다고 가정한다. 생성상의 체적증가의 속도는

$$\dot{P} = G \cdot A \dots \dots \dots (23)$$

로 표시되고 여기에서 A는 시료중에서 방해없이 성장하는 생성상-모상계면의 전면적이다. A를 P와 t의 함수로서 부여하기 위하여 확장체적 V_v 와 확장표면적 A_v 의 개념을 도입하였으며 이것은 각각 변태종료 영역의 전부를 서로 충돌시켜 합한것이 아니라 성장완료되어 이미 변태가 종료된 영역도 포함하고, 시료의 전역에서 아직 핵생성이 계속 이루어지는 경우도 존재하는 생성상의 체적 및 표면적으로 정의된다. V_v 와 A_v 는 식(23)과 유사한 식

$$\dot{V}_v = G \cdot A_v \dots \dots \dots (24)$$

의 관계가 있고 또한 핵이 무질서하게 분포된 경우에는

$$A = (1-P)A_v \dots \dots \dots (25)$$

이 성립한다. 식(24), (25)를 이용하면 식(23)은 적분가능하여

$$P = 1 - \exp(-V_v) \dots \dots \dots (26)$$

이 성립하고 시간 t_i 에서 핵 생성된 변태가 진행된 결정은 시간 t에 있어서 체적 $4\pi G^3(t-t_i)^3/3$ 이 된다. 단위체적당의 모상에 대한 핵 생성속도를 \dot{N} 이라고 한다면 확장체적의 정의로부터 V_v 는

$$V_v = \int_0^t \frac{4}{3} \pi G^3(t-t_i)^3 \dot{N} dt \dots \dots \dots (27)$$

식으로 표현할 수 있다. 핵 생성속도 N 및 핵 성장속도 G 는 온도의 함수로서 양자를 포함한 전체로서 변태속도의 온도의존성을 함수 $f(T)$ 에 의하여 표현하고 연속냉각 과정에서의 퍼얼라이트변태를

$$P = 1 - \exp(-V_e), V_e = \int_0^t f(T)(t-t_1)^3 dt_1 \dots\dots (28)$$

으로 지배되어진다고 생각하였다. 식(28)을 등온과정($T=0, T=\text{constant}$)에 적용하면

$$V_e = \int_0^t f(T(t_1))(t-t_1)^3 dt_1 = \frac{1}{4} f(T)t^4 \dots\dots (29)$$

이 되고 어떤 온도 T 에 있어서 등온 변태곡선은

$$P = 1 - \exp\left(-\frac{1}{4}f(T)t^4\right) \dots\dots (30)$$

식으로 나타낼 수 있다. 현재 온도 T_1, T_2, T_3, \dots 에 대한 등온 변태곡선에 있어서 퍼얼라이트량이 어떤 임의의 량 \bar{P} 가 되기까지의 시간을 t_1, t_2, t_3, \dots 라고 한다면 식(30)에 의해

$$f(T_1)t_1^4 = f(T_2)t_2^4 = \dots = \text{const} \dots\dots (31)$$

가 된다. 그러므로 t_1 과 t_2 의 사이에는

$$\left(\frac{t_1}{t_2}\right)^4 = \frac{f(T_2)}{f(T_1)} \dots\dots (32)$$

이 관계가 있고 T_1 를 기준으로 하여 일반화하면

$$\left(\frac{t_1}{t(T)}\right)^4 = \frac{f(T)}{f(T_1)} \dots\dots (33)$$

이 성립한다. 따라서 다음식

$$f(T) = \left(\frac{t_1}{t(T)}\right)^4 f(T_1) = a^4(T) f(T_1) \dots\dots (34)$$

에 의한 함수 $f(T)$ 는 결정 가능하여 진다.

3. 모델설정 및 해석과정

설정된 모델은 직경 40mm, 높이 40mm의 유한 원주 SM45C로써 시편의 초기온도 820°C에서 25°C 상온의 증류수에 급냉시키는 경우에 대하여 탄소성 열응력의 저동 및 시간에 따른 변화양상을 구하였다. 켄칭과정

중에는 복잡한 전열과정을 수반하므로 물리정수를 일정하게 하는 경우 실제과정을 정확하게 표현하기 어렵다. 따라서 응력해석에서는 상변태에 의한 잠열 및 물리적 성질과 기계적성질의 온도의존성 및 조직의존성을 고려하여 해석하였고 각종계수들은 선행연구⁹⁾의 자료들을 이용하였다. 유한요소의 모델은 축대칭의 형상을 이루고 있기 때문에 원주의 종단면부에 대하여 해석대상으로 삼았고 시편의 형상 및 경계조건이 좌우상하 대칭이므로 모델의 우측상단 1/4부분만을 시행하였다.

해석과정으로는 요소 및 절점의 입력시간을 줄이고 데이터의 정확성을 확보하기 위하여 자동 요소 및 절점의 분할을 위해 program of auto mesh generation을 사용하였다. Fig. 1에 응력계산을 위한 요소 및 절점의 분할을 나타내었고 4절점 등방체 요소를 사용하여 169개의 절점과 144개의 요소를 분할하였다. 표면부에서 조직 및 응력의 변화가 급격하게 발생하므로 요소를 세밀하게 나누었다. 조직해석은 요소당으로 하

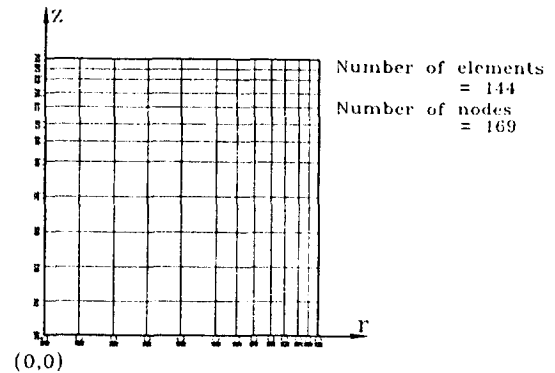


Fig. 1 Finite element mesh for stress analysis.

며 임의의 요소는 그 요소의 4절점의 온도를 평균하여 취하며 각 조직의 체적분율을 계산하였다. 구속조건은 r축에서 z방향의 변위를 구속하고 z축에서 r방향의 변위를 구속하였다. 2 Gauss points를 사용하여 각 요소에서 4점의 응력을 계산하였으며 응력계산을 위한 유한요소의 프로그램의 흐름도를 Fig. 2에 나타내었다.

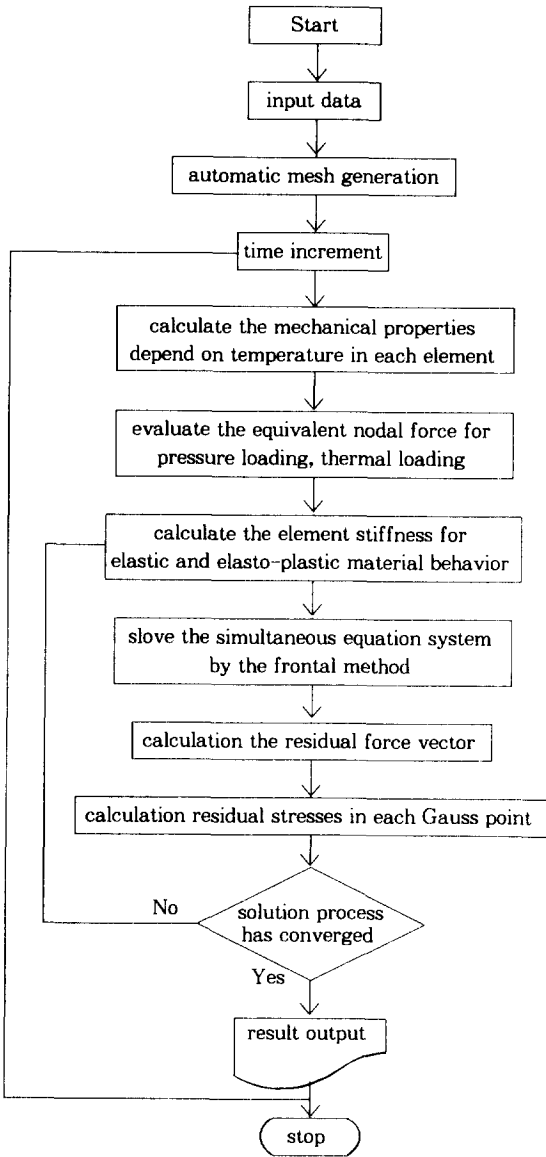
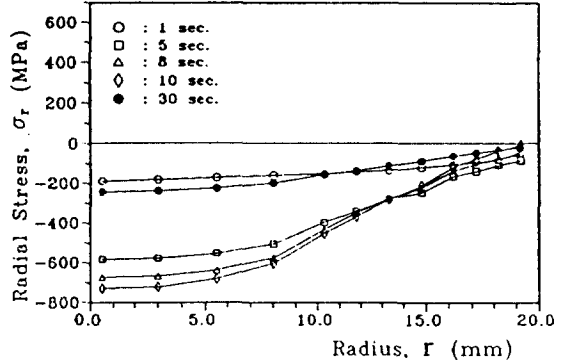


Fig. 2 Flow chart for stress analysis.

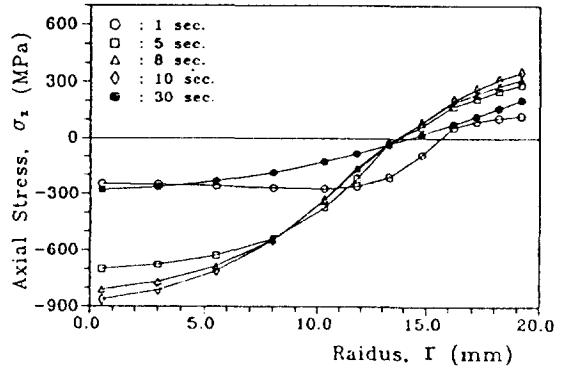
4. 해석결과 및 고찰

$z=0\text{mm}$ 에서 반경방향에 따른 냉각개시후 1초, 5초, 8초, 10초 및 30초가 경과하였을때 radial stress(이하 σ_r), axial stress(이하 σ_z) 및 tangential stress(이하 σ_θ) 등의 열응력 거동을 나타내는 Fig. 3은 (a)에 냉

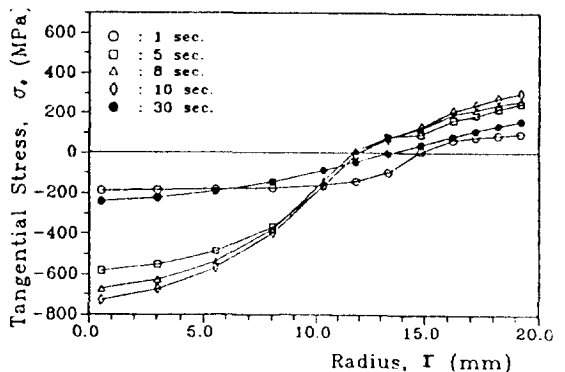
각시작 1초후 $r=0\text{mm}$ 에서 200MPa, $r=20\text{mm}$ 에서는 70MPa이하의 압축응력을 보여준다. 5초가 지난후의 응력거동은 거의 -600MPa의 크기를 $r=0\text{mm}$ 에서 나타내지만 표면부로 진행할 수록 특히 $r=8\sim 13\text{mm}$ 부근



(a) Radial stress



(b) Axial stress



(c) Tangential stress

Fig. 3 Thermal stress according to r-direction.

에서 급격히 감소하며 $r=20\text{mm}$ 에서는 -100MPa 가량으로 저하된다. 최대의 압축응력을 나타내는 냉각후 10초에서는 -720MPa 정도의 응력크기를 나타내고 그 이후에서는 응력감소 현상의 경향이 현저하여 30초의 경우는 1초 경과사와 비슷한 크기와 양상의 응력 거동을 보여준다. (b)와 (c)의 σ_r 및 σ_θ 는 냉각과정 중 각시간에서 시편의 표면에 인장응력, 내부에 압축응력이 발생하며, 그 크기는 10초에서 σ_r 는 중심부에서 -850MPa 이고 원주표면에 400MPa , σ_θ 는 중심부에서 -750MPa 이고 원주표면에 300MPa 의 최대응력이 발생하고 시간이 경과함에 따라 시편 내외부의 응력은 감소한다. σ_r 의 경우 인장응력에서 압축응력으로 반전이 이루어지는 중립면은 $r=13.5\sim 15.5\text{mm}$ 부근에서 생성되고 σ_θ 는 σ_r 에 비교하여 약간 시편 중심부측으로 이동한 $r=11.5\sim 15\text{mm}$ 근방에서 형성한다.

Fig. 4의 (a), (b) 및 (c)는 냉각개시후 1초에서 σ_r , σ_z 및 σ_θ 의 열응력을 시편 전영역에 대하여 도시한 것이다. (a)의 σ_r 은 상단면에 최대 80MPa 정도의 인장응력이 발생하고 있으며, 중심부와 모서리부의 원주면에는 $-160\text{MPa}\sim -240\text{MPa}$ 의 압축응력이 작용하고 있다. (b)의 σ_r 와 (c)의 σ_θ 는 반대의 현상으로 상단면에서 -240MPa 의 압축응력 그리고 원주면에서 인장응력이 발생하고 있고, σ_θ 는 상단면과 원주면 모두 인장응력이 나타나고 있으며 중심부에는 압축응력이 발생하고 있다. 이때 등응력선도에 나타난 선 한개의 간격은 $\pm 40\text{MPa}$ 를 의미한다.

Fig. 5~Fig. 7의 (a), (b) 및 (c)의 응력분포는 Fig. 4에서 보인 압축, 인장응력 발생영역 및 양상이 거의 일치하고 있으나 냉각초기에 표면부에서 나타난 조밀한 응력분포가 점차 전영역으로 확산되어 균일한 응력분포로 전환되고 있음을 보여준다. 초기 표면부의 조밀한 응력분포는 쿨링시편의 질량효과에 따른 온도변화 차이에 의하여 발생한 급격한 응력구배의 형성에 기인한 것으로 사료된다. 등응력선도에서 선 한개의 간격이 의미하는 것이 아래의 표와 같은데 이것은 응력크기의 범위가 서로 다르기 때문에 발생한 결과이다.

$r, z=10\text{mm}$ 와 $r, z=15\text{mm}$ 및 $r, z=20\text{mm}$ 의 위치에서 시간에 따른 오스테나이트와 퍼얼라이트 조직의 체적분율(ξ_A 와 ξ_P)을 나타낸 그림이 Fig. 8이다. (a)는 오스테나이트 조직의 변태과정을 나타낸 것으로 $r=20, z=20\text{mm}$ 위치에서 빠른 냉각속도로 인해 냉각개시후 1초가 경과하였을때 오스테나이트가 거의 마르텐사이트로의 변태를 완료한 것으로 추정되며 $r, z=15\text{mm}$ 의 위치에서는 2.5초까지 퍼얼라이트로 변태후 4초부터

unit : MPa

	(a)	(b)	(c)
Fig. 5	± 20	± 40	± 30
Fig. 6	± 50	± 100	± 50
Fig. 7	± 20	± 40	± 30

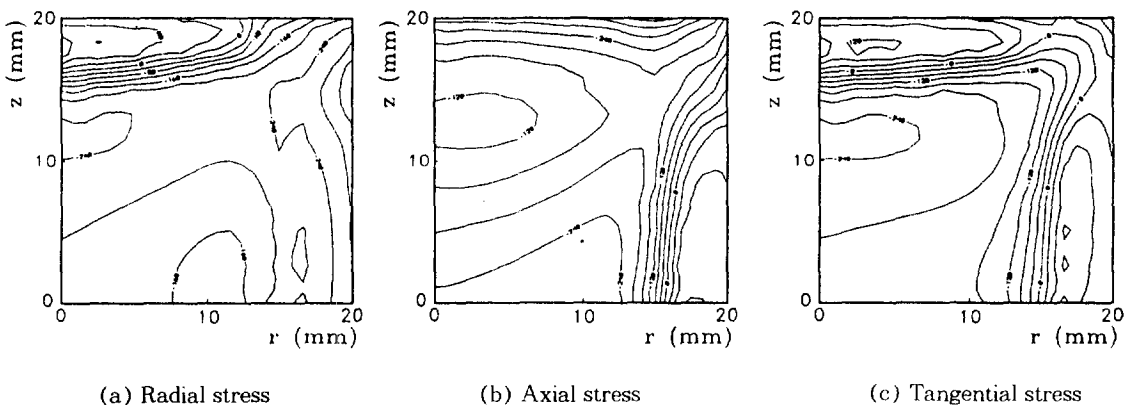


Fig. 4 Thermal stress contour(1 sec.). Unit : MPa

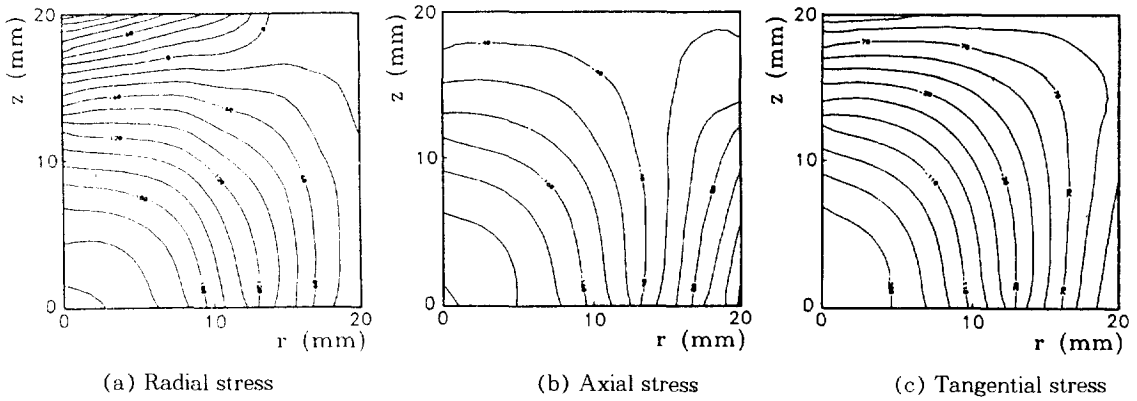


Fig. 5 Thermal stress contour(5 sec.). Unit : MPa

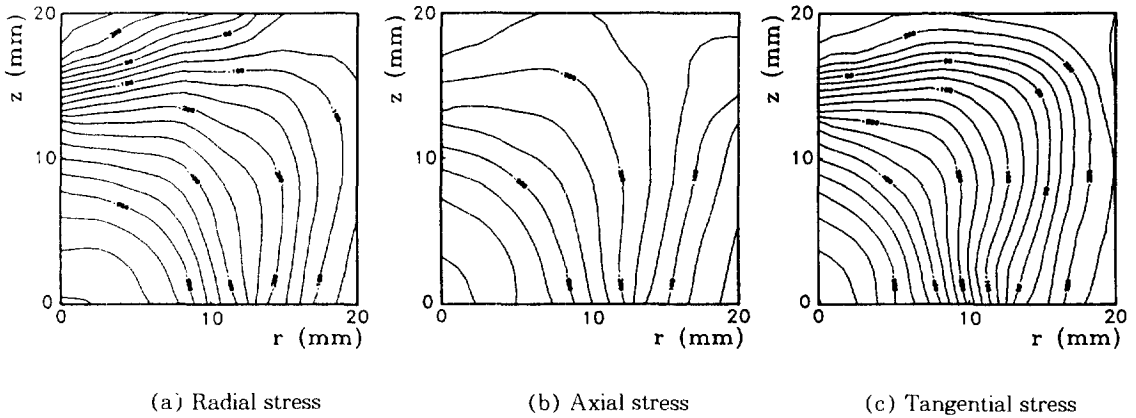


Fig. 6 Thermal stress contour(10 sec.). Unit : MPa

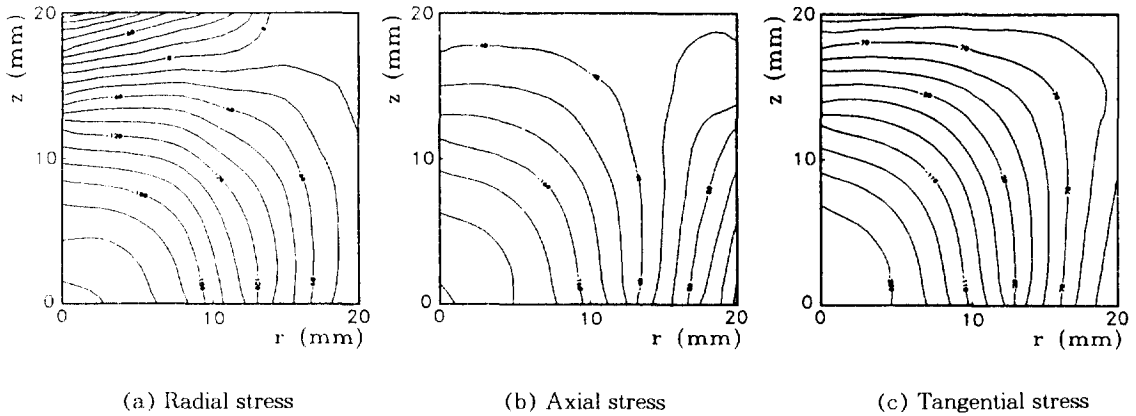


Fig. 7 Thermal stress contour(30 sec.). Unit : MPa

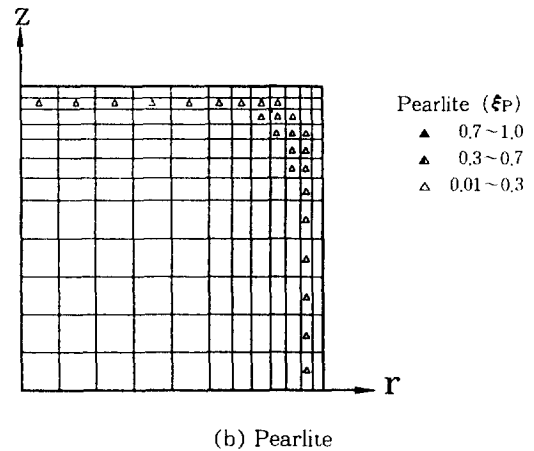
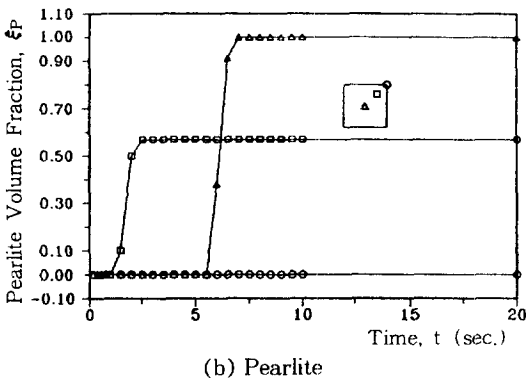
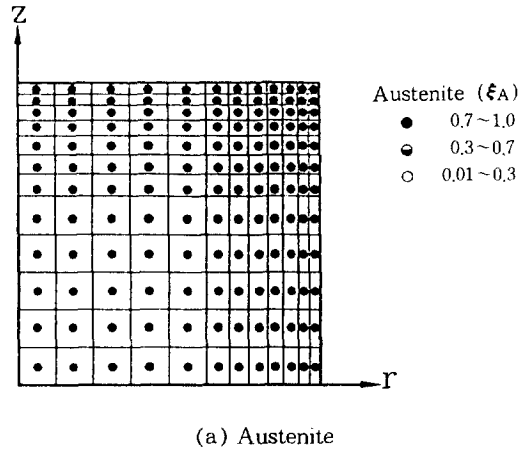
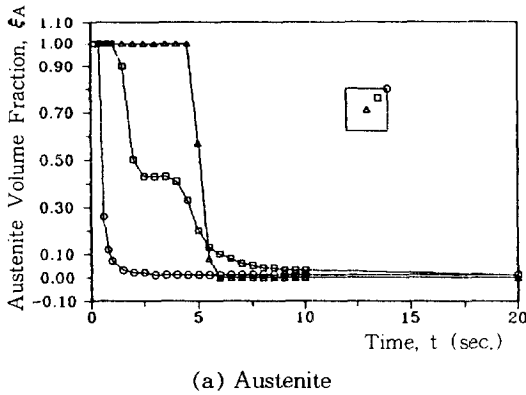


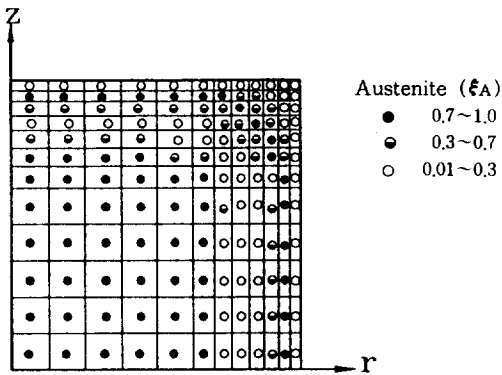
Fig. 8 Volume fraction of metallic structure according to cooling time.

마르텐사이트로 변화하는 것으로 사료되어 1.5초간의 퍼얼라이트와 마르텐사이트가 혼재하고 있는 상태임을 알 수 있다. 중심부인 $r, z=10\text{mm}$ 에서는 5.5초 이후에 98% 이상의 퍼얼라이트로 변화하고 일부의 잔류 오스테나이트가 있다. (b)는 퍼얼라이트 조직의 생성과정을 체적분율(ξ_P)로 표현한 것으로 $r, z=20\text{mm}$ 에서는 거의 존재하지 않고 $r, z=15\text{mm}$ 에서는 냉각시간 2.5초 부근에 약 57%가량이 있으며 $r, z=10\text{mm}$ 는 5.5초 이후에 거의 퍼얼라이트로 변화하였음을 알 수 있어 시편 내부의 위치에 따른 조직들의 소요 생성 시간을 유추할 수 있다.

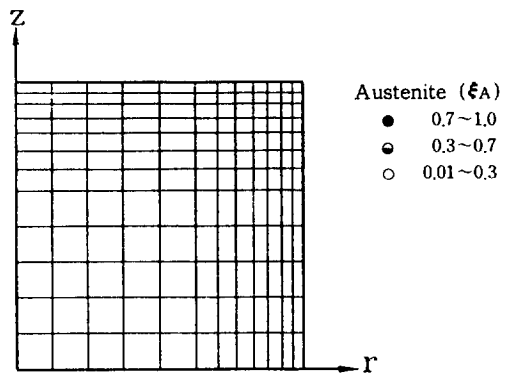
Fig. 9에서 Fig. 11까지는 냉각개시 후 1초, 3초 및 10초에서 시편 전영역에 대한 조직의 변화를 나타낸 것이다. 냉각시간이 1초인 Fig. 9의 (a)는 상단면과 원

Fig. 9 Distribution of metallic structure after quenching(1 sec.).

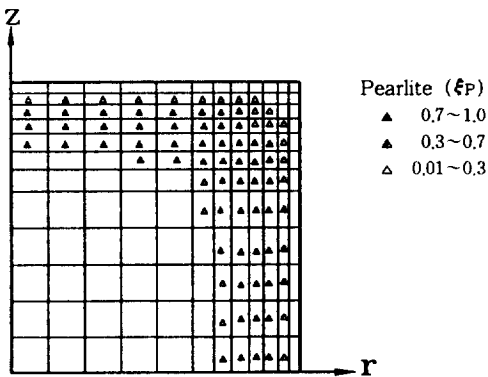
주면 모두 오스테나이트 조직이고, (b)에는 표면으로부터 2mm 정도 깊이에 미량의 퍼얼라이트($\xi_P=0.01\sim 0.3$)가 분포하고 있다. 냉각개시후 3초가 경과한 시점의 조직분포를 나타낸 Fig. 10은 상단면 및 원주면의 표면의 오스테나이트가 마르텐사이트로의 변화를 완료하였음을 추정할 수 있고 (b)에서는 퍼얼라이트 변태영역은 점차 중심부로 확대해 가고 있음을 의미하고 있다. 10초가 경과한 후의 양상을 표현한 Fig. 11은 시편의 전영역에서 상변태가 완료하고 중심부로부터 약 16~18mm까지 대부분의 퍼얼라이트($\xi_P=1.0\sim 0.3$)로 변태완료하였음을 나타내고 있다.



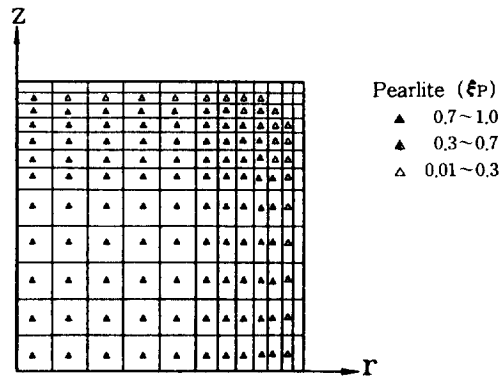
(a) Austenite



(a) Austenite



(b) Pearlite



(b) Pearlite

Fig. 10 Distribution of metallic structure after quenching (3 sec.).

Fig. 11 Distribution of metallic structure after quenching (10 sec.).

5. 결 론

물리적 성질의 온도의존성, 조직의존성 및 상변태에 기인한 잠열등을 고려하여 비정상 온도분포의 해석을 기초로 오스테나이트 및 퍼얼라이트의 체적분율과 radial stress, axial stress 및 tangential stress 등의 열응력의 거동을 시간의 변화에 따라서 계산하였으며 얻어진 결론은 아래와 같다.

열응력의 발생에 있어서 냉각이 신속히 진행되는 상 단면 및 원주면에서 인장 열응력이 발생하고 내부로 들어갈 수록 압축 열응력이 커지며 최대 열응력은 8~10초 사이에 발생하고 그 크기는 $r=0\text{mm}$ 에서 -

850MPa~720MPa 정도에서 $r=20\text{mm}$ 에서 100MPa~400MPa 사이로 분포하였다. 인장응력에서 압축응력으로 반전되는 중립면은 σ_r 나 σ_θ 모두 $r=11.5\sim 15.5\text{mm}$ 위치에서 형성되었다. $r, z=20\text{mm}$ 에서는 빠른 냉각속도로 인하여 냉각개시 1초후에 오스테나이트 조직이 거의 소멸되었고 $r, z=15\text{mm}$ 에서는 2.5에서 4초까지 퍼얼라이트와 마르텐사이트의 혼재상태가 형성되었고 $r, z=10\text{mm}$ 에서는 5.5초 이후에는 98% 이상의 퍼얼라이트 조직으로 변태를 한 것으로 계산되었다. 향후 마르텐사이트로의 변태에 대한 체적분율 및 변태응력에 관한 현재 수행되고 있으므로 이분야에 대한 연구 결과가 발표되어질 예정이다.

参考文献

1. 機電研究社 編輯部：鋼の熱處理，改訂5版，機電研究社，서울，1979，pp. 15~26.
2. Z. G. Wang, J. Soc. Mat. Sci. Japan, 1983, Vol. 32, No. 360, pp. 991~996.
3. 利岡靖繼：機械の研究，1978，Vol. 30, No. 8, pp. 938~942.
4. P. Prezyna : Advan. Appl. Mech., 1971, Vol. 11, pp. 313~369.
5. T. Inoue, B. Raniecki : J. Mech. Phys. Solid, 1978, Vol. 26, pp. 187~212.
6. 上村，長岐，井上：材料，1979，Vol. 28, pp. 24~29.
7. 米谷：機械の研究，1972，Vol. 24, pp. 61~66.
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，曹義一，辛榮雨：韓國熱處理學會誌，1994，Vol. 7, No. 2, pp. 103~110.