變態潛熱을 考慮한 담금試片의 温度 및 組織分布에 대하여

On the Distribution of Temperature and Metallic Structures in Quenching Process Considering Latent Heat of Phase Transformation

閔 壽 泓*·具 本 權**
Soo Hong Min · Bon Kwon Koo

Abstract

The analysis of temperature distribution and change of metallic structures during water quench were presented by finite element method.

In temperature calculation the equation of unsteady state heat conduction problem considering latent heat due to phase transformation was applied to finite solid cylinder, SM 45C of 40 mm diameter and 40 mm height.

In metallic structure analysis iso-thermal transformation curve and the equations of evolution in pearlite-martensite transformation were applied.

The calculated results upon temperature and metallic structures were agreed with those of experimental observations.

1. 緖 論

材料의 加熱 및 冷却過程은 金屬의 熱處理, 製鐵·製鋼工程이나 溶接 등에서 문제가 되고 있으며, 特히 담금질과 같은 신속한 冷却에 있어서는 温度勾配에 起因하는 熱應力이나 變態膨脹 및 收縮에 起因하는 應力이 發生하며 이들에 의하여 殘留應力이나 變形이 발생한다.[1),2)]

- 종래부터 이러한 熱處理의 여러 현상을 파악하려는 試圖는 많으나 冷却速度, 質量効果 및 冷却劑의 상태 등, 여러 影響因子들로 인하여 解析의 어려움이 많았으므로 實驗的인 方法에 의한 硏究가 대부분이었다.

그러나 최근 대형계산기의 발달에 힘입어 連成効果를 고려한 解析的 硏究가 試圖되고 있다.[3)]

一般的으로 담금時의 熱應力, 變態應力 내지 殘留應力을 解析하기 위하여는 温度計算 및 組織變化過程에 대한 解析이 先行되어야 하며, 따라서 本 硏究에서는 相變態時 組織變化과정에서 發生하는 變態潛熱을 考慮하여 담금과정의 温度分布 및 組織變化과정을 考察하였다. 또한 再結晶温度 이상으로부터 담금질하므로 物理的 性質의 組織依存性을 考慮하였으며 이를 考慮하지 않은 경우와 比較하였다.

有限要素法(FEM)에 의한 解析의 타당성을 검토하기 위하여 温度履歷은 實測한 冷却曲線으로부터, 組織分布는 金屬顯微鏡檢査를 通하여 解析結果와 比較하였다.

* 正會員, 仁荷大學校 工科大學 機械工學科
** 正會員, 仁荷大學校 大學院 機械工學科

2. 모델設定 및 解析方法

解析모델로 선정한 試片은 炭素含有量 0.45%의 炭素鋼(SM 45C)으로서 직경 40mm, 높이 40mm의 有限圓柱이며 靜止된 25℃의 물에 水冷하는 경우로서 上下左右 對稱이므로 縱斷面의 右側上端인 1/4面만을 해석하였다.

解析時 假定은 다음과 같다.

(1) 담금中 冷却劑温度는 一定하다.
(2) 變形에 의한 熱發生은 무시하며, 相變態時 潛熱에 의한 逆變態는 일어나지 않는다.
(3) 퍼얼라이트(pearlite) 粒子는 球形이고 퍼얼라이트의 核生成速度 및 核成長速度는 一定하며 方向性은 없다.
(4) 퍼얼라이트의 核은 一定하게 分布한다.
(5) 變態完了後 殘留 오오스테나이트(austenite)는 생기지 않는다.

2-1. 温度分布

非定常 熱傳導문제에 있어서 軸對稱物体에 대한 支配方程式 및 境界條件은

$$\rho c \dot{\theta} = \mathrm{div}(k \,\mathrm{grad}\,\theta) + \rho \ell \quad \cdots\cdots(1)$$

$$k \,\mathrm{grad}\,\theta + h(\theta - \theta_\infty) = 0 \quad \cdots\cdots(2)$$

와 같이 表示된다.[4] 여기서 ρ, c, k, ℓ, h는 각각 모델의 밀도, 비열, 열전도도, 잠열 및 냉각제의 열전달률이며, θ_∞는 냉각제의 온도이다. 여기서 k, c 및 ρ는 組織依存性을 고려하여

$$k = \sum_{\Gamma=1}^{N} k_\Gamma \xi_\Gamma, \quad \Gamma = 1, 2, \cdots, N \quad \cdots\cdots(3)$$

$$c = \sum_{\Gamma=1}^{N} c_\Gamma \xi_\Gamma, \quad \Gamma = 1, 2, \cdots, N \quad \cdots\cdots(4)$$

$$\rho = \sum_{\Gamma=1}^{N} \rho_\Gamma \xi_\Gamma, \quad \Gamma = 1, 2, \cdots, N \quad \cdots\cdots(5)$$

로 하였으며,[5] ξ_Γ는 各組織의 体積分率이고, 잠열 ℓ은 오오스테나이트로부터 퍼얼라이트 및 오오스테나이트로부터 마르텐사이트(martensite) 變態時 일정하게 가정하였다.[6,7] Table 1은 解析에 사용한 物理定數를 나타낸 것이다.[8]

有限要素法에 의한 温度分布의 계산에 있어서는 Galerkin의 Weighted Residual Method를 적용하였으며, 삼각형 요소를 이용하여 離散化 解析하였다. 剛性方程式중 非定常項은 前進差分을 이용하고, Implicit法을 적용하였으며, 연립방정식의 解法은 Gauss소거법을 사용하였다.

Table 1 Physical properties considering structure dependence of SM 45C

Structure / Properties	Symbol	Austenite	Pearlite	Martensite
Thermal conductivity (W/m℃)	1	29.14	35.2	39.94
	2	34.76		
Specific heat (J/kg℃)	1	586.15	628.02	628.02
	2	614.06		
Density (kg/m³)	1	8.15E03	7.85E03	7.85E03
	2	7.93E03		
Latent heat (J/kg)	1	-	7.54E04	8.37E04
Heat transfer coefficient (W/m²℃)	2	9000		

Remark; 1 : Considering of structure dependence, 2 : No considering

Fig. 1은 冷却曲線을 측정하기 위한 실험장치의 概要圖이며, Jominy試驗을 위하여 제작한 것으로서 本 硏究에서는 靜止된 물속에 담금질하는 경우이므로 C의 노즐부를 제거하고 실험하였다.

B의 시편이 所定의 담금温度 800℃로 加熱되는 것을 K의 Digistrip에 의하여 확인한 후 D의 수조에서 담금을 행하였으며, 冷却曲線은 L의 5-channel multi-recorder에서 측정하였다. 수조내의 냉각제 온도는 25℃로 일정하게 유지시켰다.

한편 冷却曲線測定을 위한 試片은 Fig. 2와 같이 직경 40mm, 높이 40mm인 有限圓柱의 軸方向으로 직경 4mm의 드릴로 밑면으로부터 1, 2, 10 및 20mm까지 가공한 후, 이미 접합된 직경 0.7mm의 CA열전대에 단열재의 애관을 삽입한 다음 시편과 열전대를 점용접하고 접합의 유무를 확인한 후, 冷却曲線을 측정하였으며 結果의 再現性을 확인하기 위하여 5回이상 측정하였다.

Fig. 3은 有限要素法을 적용하여 温度 및 組織解析을 하기 위한 要素分割을 圖示한 것이다. 冷却이 빨리 진행되는 표면부는 温度勾配가 크므로 要素를 細分하였으며 128개의 요소에 81개의 절점으로 하였다.

Table 2는 實驗에 使用한 SM 45C炭素鋼의 化學成分 및 機械的性質을 나타낸 것이다.

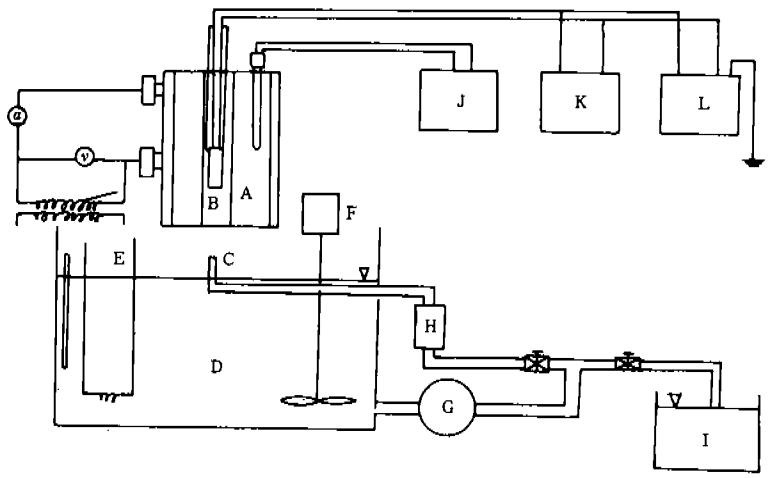

Fig. 1 Experiment apparatus

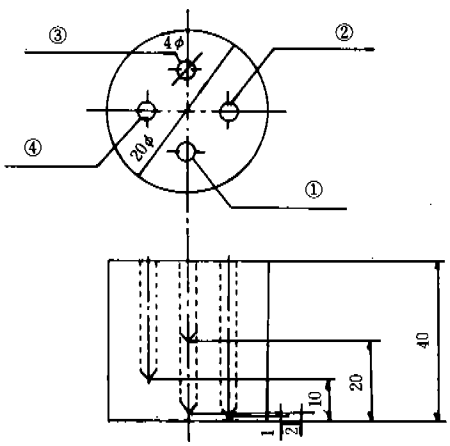

Fig. 2 Configuration of specimen

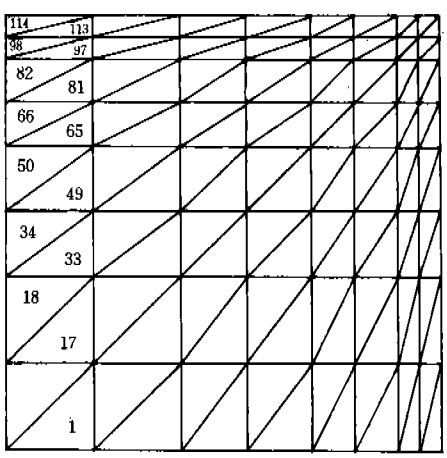

Fig. 3 Mesh Division for Temperature and Structure Analysis

Table 2 Chemical components and mechanical properties

Chemical components								
Steel	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
SM 45 C	0.45	0.26	0.77	0.019	0.028	–	–	–

Mechanical properties					
Steel	Yield strength MPa	Tensile strength MPa	Elongation %	Reduction of area %	Hardness HB
SM 45 C	343	592	24	62	223

2-2 組織分布

담금過程 또는 完了후, 組織變化과정의 推定은 温度履歷을 알고 있는 경우, 連續冷却變態曲線이나 恒温變態曲線을 이용함으로써 가능하다.

初期基準狀態에서는 單一相인 오오스테나이트 組織으로 되나, 임의의 時刻에 있어서 요소는 冷却速度에 따라 N개의 相으로 變態한다. 각 組織의 体積分率을 ξ_r ($\Gamma=1, 2, \cdots, N$)로 하면 組織依存性을 考慮한 物理的 性質 x는 混合法則에 의하여

$$x=\sum_{\Gamma=1}^{N} x_\Gamma \xi_\Gamma,\quad \sum \xi_\Gamma=1,\quad \Gamma=1, 2, \cdots, N \cdots (6)$$

로 表示될 수 있다.

한편 變態過程에 있어서 오오스테나이트로부터 투르스타이트(troostite), 퍼얼라이트, 소르바

이트(sorbite) 등으로 變態하는 高温變態를 오오스테나이트에서 퍼얼라이트로 變態하는 것으로, 또 오오스테나이트로부터 베이나이트(bainite), 마르텐사이트 變態를 오오스테나이트에서 마르텐사이트로 變態하는 것으로 단순화하였다.

各 組織의 移行式(equation of evolution)에 있어서는 Johnson과 Mehl의 式을 利用하여 Inoue가 提示한[8] SM 45C 炭素鋼에 對한 式을 適用하였으며 그 結果式은 다음과 같다.

$$\xi_P = 1 - \exp(-V_e), \quad \text{for } \theta_{MS} < \theta \leq \theta_A \quad \cdots(7)$$

$$\xi_M = (1-\xi_P)\{1-\exp\{\phi(\theta)\}\} \quad \cdots(8)$$

단, $$v_e = \frac{1}{4} f(\theta) t^4 \quad \cdots(9)$$

$$f(\theta) = 0.173\left(\frac{\theta-380}{145}\right)^{6.8}\left(\frac{720-\theta}{195}\right)^{8.2} \quad \cdots(10)$$

$$\phi(\theta) = \begin{cases} -0.544\times10^{-4}(\theta_{MS}-\theta)^2, \\ \qquad \text{for } (\theta_{MS}-\theta) \leq 77 \\ -0.231\times10^{-1}(317-\theta) \\ \qquad \text{for } (\theta_{MS}-\theta) > 77 \end{cases} \quad (11)$$

$$\xi_A = 1-\xi_P-\xi_M \quad \cdots(12)$$

여기서 ξ_A, ξ_P, ξ_M은 각각 오오스테나이트, 퍼얼라이트 및 마르텐사이트의 体積分率이고, $\bar{\xi}_P$는 퍼얼라이트變態후 잔여의 오오스테나이트가 마르텐사이트로 變態하는 경우 變態完了한 퍼얼라이트의 体積分率이다. 그리고 θ_A 및 θ_{MS}는 各各 共析温度, 마르텐사이트變態 開始温度이며 各各 720℃, 380℃로 하여 계산하였다. 실제의 계산과정에 있어서 Inoue등은 50% 퍼얼라이트變態線圖를 適用하였으나, 本 硏究에서는 式(7)로부터 1% 퍼얼라이트變態開始線에 해당하는 恒温變態線圖의 温度와 時間을 逆으로 求하여 이를 利用하여 温度와 時間을 各各 對應시켜서 組織變化過程을 고찰하였다. Fig. 5는 위와같이 計算한 퍼얼라이트 1%, 50%, 99%의 恒温變態線圖를 圖示한 것이다.

3. 結果 및 考察

Fig. 5는 實測한 冷却曲線中 r=11mm, z=1mm의 위치에서 측정한 冷却曲線과 FEM에 의하여 구한 同一位置의 冷却曲線을 비교한 것이다. FEM에 의한 解析結果는 實驗結果와 잘 近似하고 있음을 알 수 있으며 그 차이는 全 冷却段階에 걸쳐서 50℃ 이내에 들고 있고 冷却時間 6초 이후에 그 차이는 줄어들고 있다.

Fig. 6은 r=11mm의 위치에서 試片表面으로부터 중앙부까지 軸方向에 따른 冷却曲線의 變化를 圖示한 것이다. z=0mm인 冷却表面部에서는 빠른 冷却速度로 인하여 潛熱의 영향이 크게 나타나지 않으나 中央部로 갈수록 潛熱의 영향은 현저하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 r=11mm의 위치에서 軸方向에 따른 温度勾配를 나타낸 것이다. 冷却初期段階인 1초~5초 간에는 中央部 및 表面部와의 温度勾

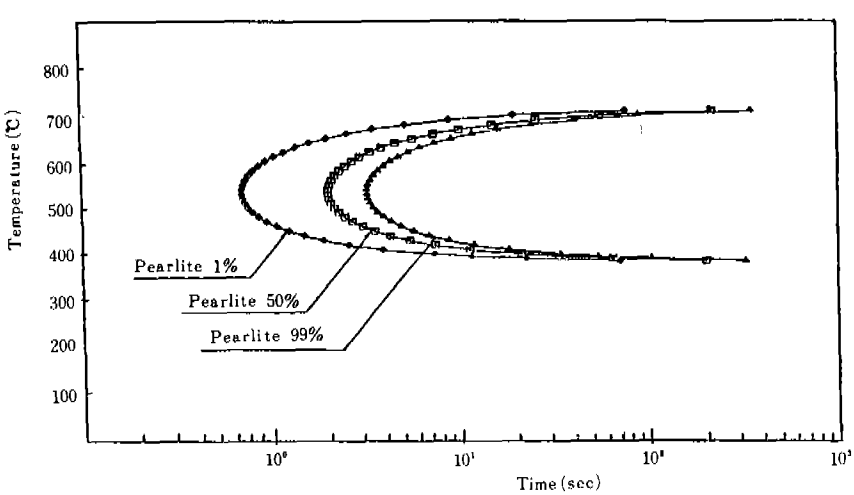

Fig. 4 Isothermal transformation curve for SM 45C

配가 심하게 나타나고 있으며 점차 冷却이 진행되어 30초 경과후에는 試片全体의 温度勾配가 대단히 작아지고 있다. 한편 冷却初期段階인 2초

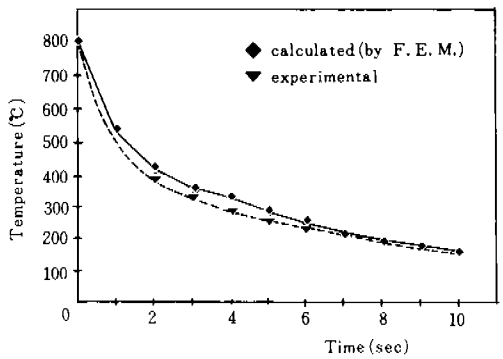

Fig. 5 Experimental and analytical cooling curves

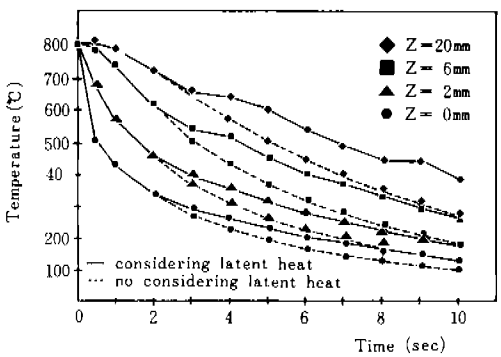

Fig. 6 Analytical cooling curve to Z-direction at R=11mm

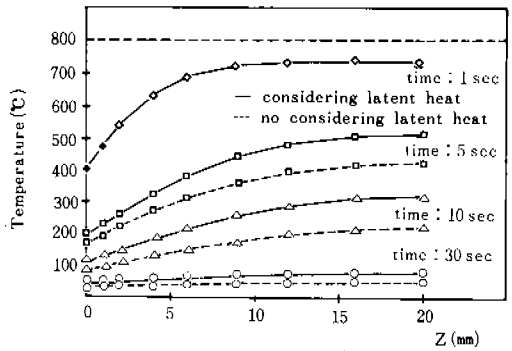

Fig. 7 Temperature gradient according to Z-direction at R=11mm

까지 潛熱의 영향은 나타나지 않으나 그 이후부터 潛熱의 영향으로 인하여 冷却이 지연되고 있으며 그러한 현상은 中央部에서 더욱 심하다.

Fig. 8은 圓周表面部에서 所定要素에 對한 오오스테나이트, 퍼얼라이트 및 마르텐사이트의 時間에 따른 變化를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 冷却速度가 큰 表面部에서 퍼얼라이트는 1% 이내로 대부분이 오오스테나이트에서 마르텐사이트로 變態하며 冷却初期段階에서 마르텐사이트化하고 10초 이상의 冷却時間에서 거의 變化가 일어나지 않는다. 또한 圓柱의 모서리부분으로 갈수록 마르텐사이트變態는 빨리 發生하며 5초 이내에 大部分 마르텐사이트로 變態하였다.

Fig. 9는 r=10mm 부근인 6, 22, 38, 54, 70, 86,

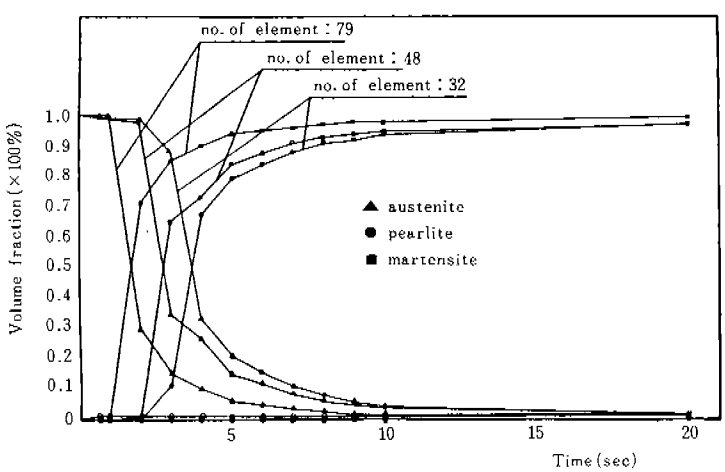

Fig. 8 Variation of volume fraction of metallic structure according to cooling time

102, 118 要素에 있어서 퍼얼라이트 및 마르텐사이트의 体積分率의 變化를 圖示한 것이다.

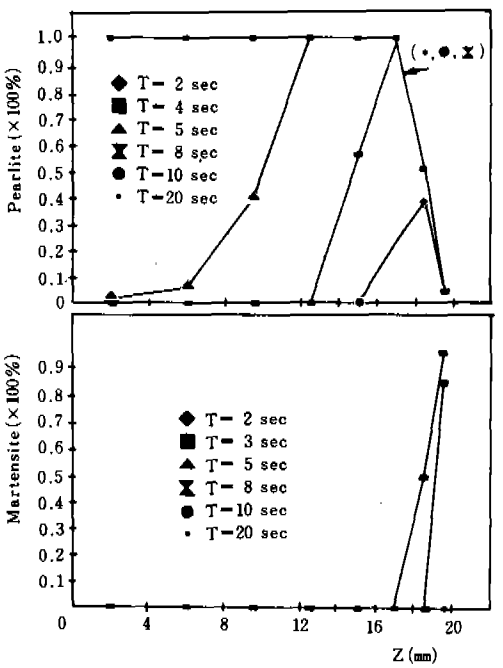

Fig. 9 Transient volume fraction of martensite and pearlite to Z-direction at R=10mm

퍼얼라이트變態에 있어서 冷却時間 20초 경과후 z=17mm이상에서는 퍼얼라이트와 마르텐사이트의 混合組織으로 되며 表面으로 갈수록 퍼얼라이트양은 적어지고 있고 z=17mm 이하에서는 퍼얼라이트變態만이 일어나고 있다. 그러나 마르텐사이트變態에 있어서는 冷却時間 5초이내에서 변태완료하며 z=17mm부터 마르텐사이트組織이 나타나고 表面部로 갈수록 그 양은 增加하고 있다. 이러한 이유는 冷却速度가 下部臨界 冷却速度보다 커지면 퍼얼라이트 및 마르텐사이트變態가 함께 일어나서 微細퍼얼라이트 + 마르텐사이트가 生成되고 上部臨界冷却速度 이상에서는 Ar″ 變態에 의하여 오오스테나이트가 마르텐사이트로 變態하므로 대체로 表面部에서 마르텐사이트로되고 내부로 갈수록 점점 冷却速度는 작아져 마르텐사이트양은 적어지며 어느 이상이 되면 퍼얼라이트變態만이 發生하기 때문이다.

Fig. 10은 변태완료한 冷却時間 30초에서의 組織分布를 圖示한 것으로서 冷却速度가 큰 表面에서는 100% 마르텐사이트化하며 內部로 들어갈수록 마르텐사이트+퍼얼라이트로 되었다가 어느 이상의 내부로 들어가면 퍼얼라이트만의 組織으로 된다. r=11mm인 위치에서 軸方向의 組織變化에 對하여 考察하면 z=16mm이내에서는 퍼얼라이트變態만이 일어나고 z=16~19mm까지 混合組織으로 되며 그 이상에서는 마르텐사이트組織으로 되고 있다.

Fig. 11에서는 Fig. 10과 유사한 위치인 r=10mm에서 軸方向에 따른 組織의 분포를 나타내었으며 金屬顯微鏡(400배)에 의하여 관찰한 사진이다. Fig. 10과 비교하여 볼 때 마르텐사이트가 존재하는 위치는 유사하며 表面部에서 마르텐사이트組織으로 되고 점차 내부로 들어갈수록 微細퍼얼라이트에서 퍼얼라이트組織으로 변화하고 있음을 알 수 있다. 한편 z=15mm이내에서는 퍼얼라이트組織으로 되고 있다.

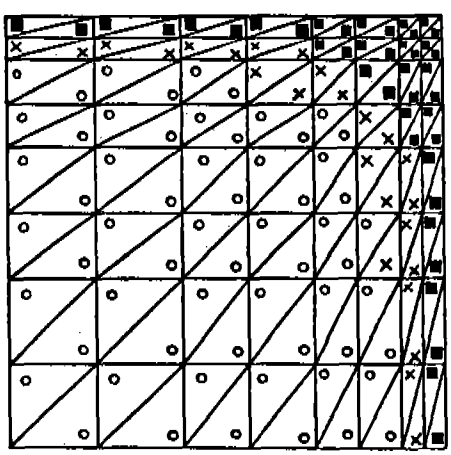

Fig. 10 Distribution of metallic structures after quenching by F. E. M.

4. 結 論

本 研究에서는 炭素鋼의 담금過程에 있어서 相變態에 의한 潛熱을 考慮하여 非定常溫度 및 組織變化過程을 有限要素法에 의하여 구하고 實驗結果와 比較하였다.

解析 및 實驗을 通하여 얻은 結果를 要約하면 다음과 같다.

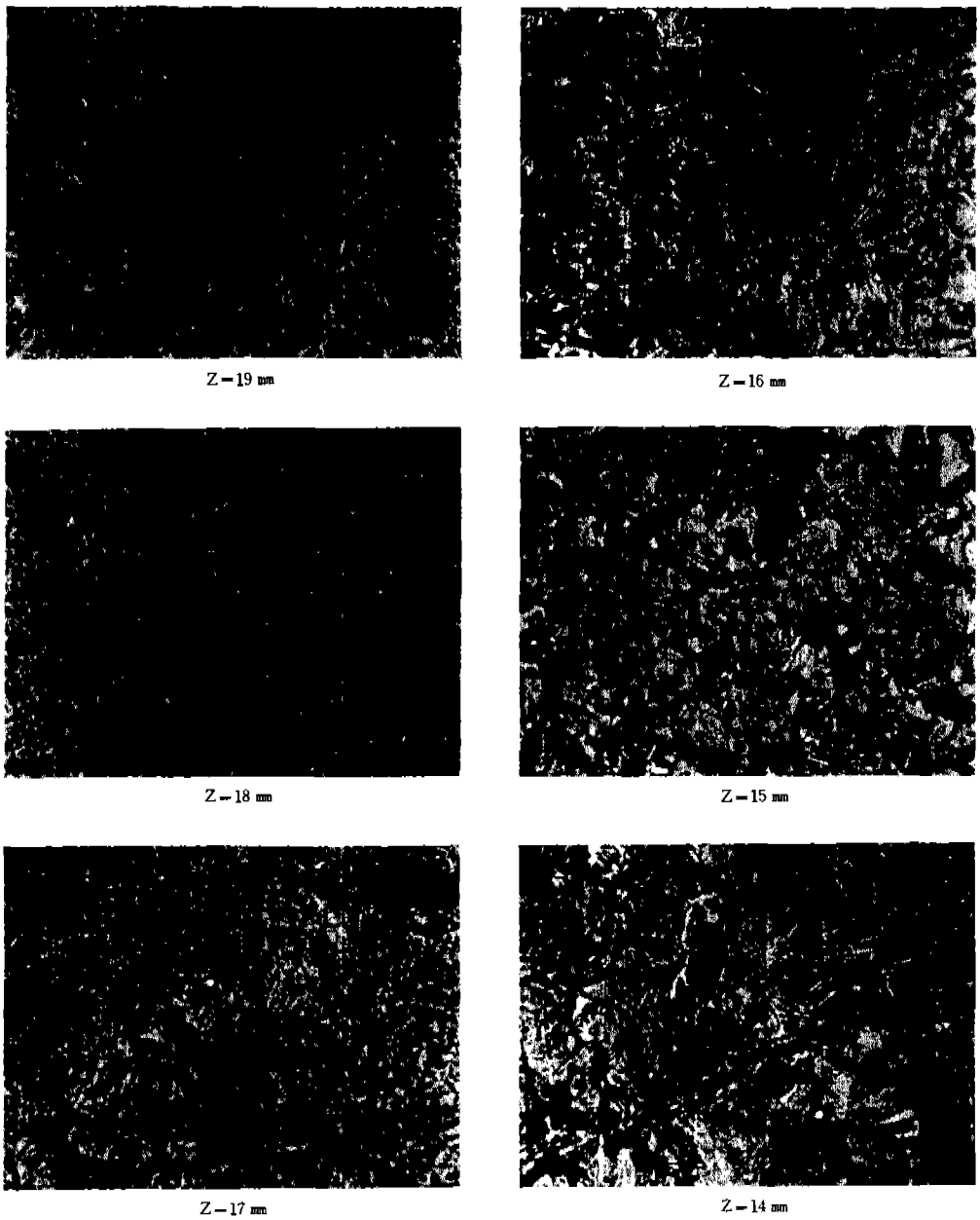

Fig. 11 Micro structure according to Z-direction R－10mm (×400)

(1) 冷却曲線에 미치는 潛熱의 영향은 冷却速度가 큰 表面部에서, 또 温度勾配가 심한 冷却初期段階에서 그 영향이 작으나, 試片內部 및 冷却初期段階 以後에서 현저한 영향을 나타내고 있다.

(2) 解析 및 實驗을 通하여 얻어진 冷却曲線은 全冷却段階에 걸쳐서 50℃ 이내로 들고 있으며 冷却이 진행됨에 따라 그 차이는 작아지고 있다.

(3) 解析的으로 求한 組織分布는 담금完了後 表

面으로부터 3~4mm까지 martensite 및 martensite+pearlite組織으로 되고 그 以上의 內部에서는 pearlite變態만이 일어나며 이는 현미경에 의한 組織觀察結果와 유사한 分布를 나타내고 있다.

參 考 文 獻

1. J. H. Weiner, J. V. Huddleston, "Transient and Residual Stresses in Heat Treated Cylinders," J. of Applied Mech., pp. 31-39, 1958.
2. H. G. Landau, J. H. Weiner, "Transient and Residual Thermal Stresses in An Elastic-Plastic Cylinder," J. of Applied Mech., pp. 481-488, 1960.
3. T. Inoue, Z. G. Wang, "Coupling Phenomena between Stress, Temperature and Metallic Structures in the Process with Phase Transformation," Proc. of Heat Treat. of Metallic Materials, 1984.
4. E. Hinton, D. R. J. Owen, "An Introduction to Finite Element Computations," Pineridge Press, Ltd., pp. 173-241, 1979.
5. T. Kishino, S. Nagaki, T. Inoue, "On Transformation Kinetics, Heat Conduction and Elastic-Plastic Stresses during Quenching of Steel," J. of the Soc. of Mat. Sci., Japan, pp. 861-867, 1979.
6. J. Burke, "The Kinetics of Phase Transformation in Metals," Pergamon Press Ltd., pp. 184-213, 1965.
7. 関壽泓, 具本權, "末端담금시편의 温度 및 彈塑性熱應力分布," 仁荷大學校 産業科學研究所 論文集 發表豫定, 제13집, 1985. 2.
8. K. Uemura, S. Nagaki, T. Inoue, "Analysis of Structural Changes and Elastic-Plastic Stresses during Quenching of Steel," J. of the Soc. of Mat. Sci., Japan, pp. 1152-1157, 1978.