

《 論 文 》

탄소강의 퀘칭과정에서 유한요소법을 이용한 온도해석

金鈺三*·曹義*·辛榮雨**

*여수수산대학교 기계공학과

**여수수산대학교 냉동공학과

Temperature Analysis for Carbon Steel at Quenching
Process by F. E. M.(Finite Element Method)

Kim Ok Sam*, Cho Eui Il* and Shin Young Woo**

*Dept. of Mechanical Engineering, Yosu Fisheries Univ.

** Dept. of Refrigeration Engineering, Yosu Fisheries Univ.

ABSTRACT

It is well-known that the analysis of temperature distribution is substantially important in optimal design of quenching process.

The unsteady state temperature gradients generated during the quenching process were numerically calculated by the Finite Element Method(F. E. M.). Formulations of F. E. M. based weighted residual method were presented for the analysis of the two dimensional heat conduction problem. In the process of calculation, the temperature dependency of physical properties of the material was in consideration. At early stage of the quenching process, the abrupt temperature gradient has been shown in the surface of the carbon steel(SM45C).

1. 서 론

강을 재결정온도 이상으로 가열하여 일정시간 온도로 유지한 후 급냉에 의하여 변태의 일부를 억제함으로써 탄소가 과포화된 마르텐사이트조직을 얻는 열처리 방법을 퀘칭처리¹⁾(quenching)라 한다. 강의 퀘칭 처리시 재료 내부에 발생하는 온도구배에 의한 열응력, 변태팽창의 위치편차에 의한 변태응력 및 소성변

형에 따른 응력등의 퀘칭응력이 발생하며 이 가운데에서 온도구배에 따른 열응력의 변화가 열처리 균열이나 변형 및 피로파괴의 주요 원인²⁾이 되고 있다. 따라서 열처리 과정중 재료거동에 관한 해석 및 고온에서 상온까지 냉각하는 동안 발생하는 응력반전등은 각종 부품의 강도설계에서 매우 중요한 인자로 작용하므로, 이와같은 문제를 규명하려는 시도³⁾가 있었다. 하지만 지금까지의 일선 산업 현장에서, 퀘칭처리후 제품을

육안이나 간단한 검사기기로 상태를 파악한 후 그 작업과정의 적부성을 경험에 의하여 정성적으로 평가하는 경우가 대부분이었다.

그러므로 퀘칭처리 공정중에 제품 전체에 대한 영역의 온도분포나 구배를 수치해석적으로 추찰하는 것은 제품 성능 향상을 위하여 효과적인 방법이라 생각한다. 퀘칭과정중에 발생하는 온도구배 및 분포를 해석하고자 하는 시도는 컴퓨터가 널리 보급되어진 이후에 가능하여 졌으므로 많은 연구가 이루어지지는 못하였으나 지금까지 진행된 주요 연구는 아래와 같다.

각종 냉각제의 냉각성능에 관한 실험적 연구를 M. A. Grossmann⁴⁾과 多賀谷⁵⁾ 등이 하였고, 시편형 냉각과정중의 변태과정에서 발생하는 용력거동의 분석에 관한 연구를 Z. G. Wang⁶⁾과 J. Burke⁷⁾ 등이 수행하였다. 아울러 국내에서는 민, 구, 김⁸⁾ 등이 수용액 및 퀘칭유등의 냉각특성과 퀘칭과정에서의 변태 및 잔류응력의 거동해석등을 연구하였다.

본 연구에서는 각종 구조물과 기계의 부품으로 많이 사용되는 기계구조용탄소강(SM450C)을 A₃ 변태 이상의 온도로 가열한 후 급냉시키는 과정중에 일어나는 시편의 온도변화 거동을 2차원 비정상 열전도문제라 치환하여 유한요소법으로 해석하였다.

2. 유한요소법의 이론식

퀘칭과정에 있는 탄소강의 온도해석을 위하여 weighted residual법 중 Galerkin법⁹⁾을 이용하여 2차원 비정상 열전도 방정식의 해를 구하였고 가상일의 원리와 미소중분 이론을 통하여 시간변화에 따른 온도분포 및 구배의 추이를 컴퓨터로 계산하였다.

고온 물체의 신속한 냉각과정을 해석하는 모델을 분석함에 있어서 기준상태(reference state)에서 시편전체의 온도($\theta=820^{\circ}\text{C}$)와 냉각제의 온도 ($\theta_{\infty}=25^{\circ}\text{C}$)는 일정하다. 시편의 재질은 등상성체(isotropic material)일 것과 시편의 형상변화는 미소변형장이므로 작다고 가정하여 열전달계수에 미치는 영향은 무시하며, 완전퀘칭(full quenching)이 이루어진 것으로 가정하였다. 또한 이 현상을 표현할 수 있는 지배방정식, 경계조건 및 초기조건¹⁰⁾은 다음과 같다. 지배방정식은

$$\rho \cdot c \cdot \theta = \frac{1}{\gamma} \frac{\partial}{\partial \gamma} (K_r \cdot \gamma \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \gamma}) + \frac{\partial \theta}{\partial z} (K_z \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z}) + \rho \cdot l$$

$$t > 0 \text{ 일때} \quad (1)$$

과 같고 경계조건은

$$K_r \frac{\partial \theta}{\partial \gamma} L_r + K_z \frac{\partial \theta}{\partial z} L_z + q + h(\theta - \theta_{\infty}) = 0$$

$$t > 0 \text{ 일때} \quad (2)$$

이며, 초기조건은

$$\theta = \theta_{\infty}$$

$$t = 0 \text{ 일때} \quad (3)$$

이다. 여기서 K_r , K_z 는 재료의 r 및 z축의 열전도계수, ρ 는 밀도, c는 비열, l은 잠열, h는 시편 표면의 열전달 계수로서 Table 1과 같이 온도의존성을 고려하였다. θ 와 θ_{∞} 는 시편과 냉각제의 초기온도, t는 시간, L_r 과 L_z 는 경계면에서 외향법선 vector와 z, r축 사이의 방향여현(direction cosine)을 나타낸다. 그리고 유한요소법의 지배방정식과 경계조건을 Galerkin method에 적용⁹⁾하여 離散化(discretization)한 후 汎函數(functional)를 유도¹¹⁾하면

$$\iiint \nu \left\{ \frac{1}{\gamma} \frac{\partial}{\partial \gamma} (K_r \cdot \gamma \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \gamma}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z}) + \rho \cdot l - \rho \cdot c \cdot \dot{\theta} \right\}$$

$$\omega_A \cdot dV + \iint_S \left\{ K_r \frac{\partial \theta}{\partial \gamma} L_r + K_z \frac{\partial \theta}{\partial z} L_z + h(\theta - \theta_{\infty}) \right\} \omega_s \cdot dS = 0$$

$$(4)$$

가 되며 (4)식을 정리하면, 모델 全領域에 대한 剛性方程式¹²⁾은

$$[K]\{\theta\} + [K_3]\{\theta\} = \{P\} \quad (5)$$

와 같다. 단 여기서

$$[K] = \iiint \nu [B]^T [D] [B] dV + h \iint_S \gamma [N]^T [N] dS \quad (6)$$

$$[K_3] = \rho \cdot c \int \gamma [N]^T [N] dV \quad (7)$$

$$\{P\} = \rho \cdot l \iiint \nu \gamma [N] dV + h \cdot \theta_{\infty} \iint \gamma [N] dS \quad (8)$$

$$\{\theta\} = \left\{ \frac{\partial \theta}{\partial t} \right\} \quad (9)$$

$$[N] = [N_1 \ N_2 \ N_3] \quad (10)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial \gamma} & \frac{\partial N_2}{\partial \gamma} & \frac{\partial N_3}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \frac{\partial N_3}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Table 1. Physical properties considering of temperature and structure.

Structure Properties	Austenite	Pearlite	Martensite
Thermal Conductivity (W/m°C)	14.65 + 1.25E-2*θ	52.34 - 3.52E-3*θ - 3.48E-5*θ ²	52.34 - 3.52E-3*θ - 3.48E-5*θ ²
Specific Heat (J/kg°C)	586.15	443.8 + 0.41868*θ	443.8 + 0.41868*θ
Density (kg/m)	8.15E03	7.85E03	7.85E03
Latent Heat (J/kg)	-	75362.4	83736
Heat Transfer Coefficient h(W/m ² °C)	14443.5*Exp (83944.1*θ ⁻²³⁹¹⁸)	14443.5*Exp (83944.1*θ ⁻²³⁹¹⁸)	14443.5*Exp (83944.1*θ ⁻²³⁹¹⁸)

$$[D] = \begin{bmatrix} \gamma \cdot K_r & 0 \\ 0 & \gamma \cdot K_z \end{bmatrix} \quad (12)$$

식과 같이 표현할 수 있다. [K]와 [K₃] 및 [N]은 시편과 냉각제의 강성방정식(stiffness equations) 및 形狀函數行列(shape function matrix)이며 {P} 및 ω_A와 ω_S는 平衡函數力行列(equablent nodal force matrix)과 加重函數(weighted function)들을 의미한다. 표면 열전달 계수는 각 냉각단계마다 구한 수치를 이용하였으며, 非定常項¹³⁾인 {θ}를 前進 差分化하면

$$\{\theta\} = \frac{\{\theta\}_{i+4_i} - \{\theta\}_i}{\Delta t} \quad (13)$$

식이 되고 유한요소법에 적용가능한 최종 강성방정식은

$$[\bar{K}]\{\theta\}_{i+4_i} = \{\bar{P}\}_{i+4_i} \quad (14)$$

식과 같이 이루어진다. Δt는 시간증분이며 [\bar{K}]와 {\bar{P}}_{i+4_i}는

$$[\bar{K}] = [K] + \frac{[K_3]}{\Delta t} \quad (15)$$

$$\{\bar{P}\}_{i+4_i} = \{P\} + \frac{[K_3]}{\Delta t} \{\theta\}_i \quad (16)$$

식을 의미한다. 이상과 같이 표시되는 [\bar{K}]는 강성벡터, {\bar{P}}는 평형 절점력벡터이며 최종 강성방정식에 초기조건을 이용하여 미소 시간증분에 따른 2차원 비

정상 온도분포를 구하였다.

3. 모델설정 및 해석과정

본 연구에서 설정한 모델은 직경 40mm, 높이 40mm의 유한원주 형상으로 시편의 초기온도 820°C에서 25°C의 증류수에 급냉시키는 경우에 대하여 비정상 온도 분포를 시간 변화에 따라 구하였다.

퀵칭과정 중에는 복잡한 전열과정을 수반하므로 물리적 성질 및 기계적 성질에 대한 온도의존성을 고려하지 않고 일정하게 하는 경우, 실제과정을 충분히 표현하기에는 어려운 문제가 발생하므로, 참고문헌¹⁴⁾에 언급된 실험장비를 이용하여 구한 열전달 계수를 적용하였다. 시편의 형상은 대칭이므로 Fig. 1과 같이 원주의 중단면부에 대하여 고려하고, 시편의 형상 및 경계조건이 좌우상하 대칭이므로 모델의 우측상단 1/4 부분만을 해석하였다.

해석과정으로는 유한요소 해석을 위한 data작성은 입력시간을 줄이고 정확성을 기하기 위하여 자동요소분할을 위한 auto mesh generation program¹⁵⁾을 이용하였다. Fig. 2에는 온도계산을 위한 요소분할도를 나타내었으며 중심점을 부터 r 및 z방향으로 2.5mm 간격으로 5줄, 2mm 간격으로 1줄, 1.5mm 간격으로 2줄, 0.75mm 간격으로 2줄 및 0.5mm 간격으로 2줄로 설정하였다. 시편의 표면부에는 온도의 변화가 격렬하

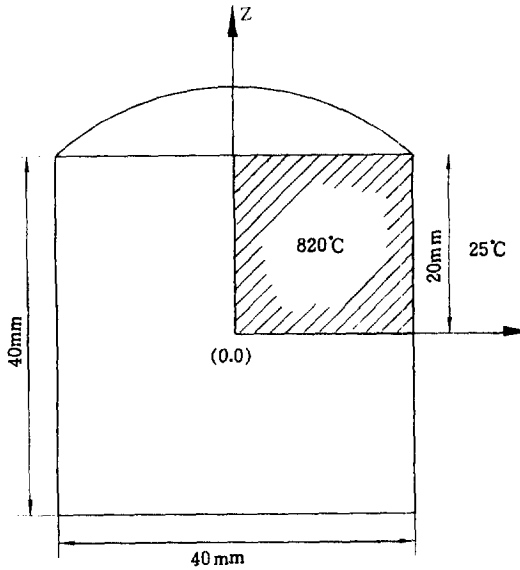
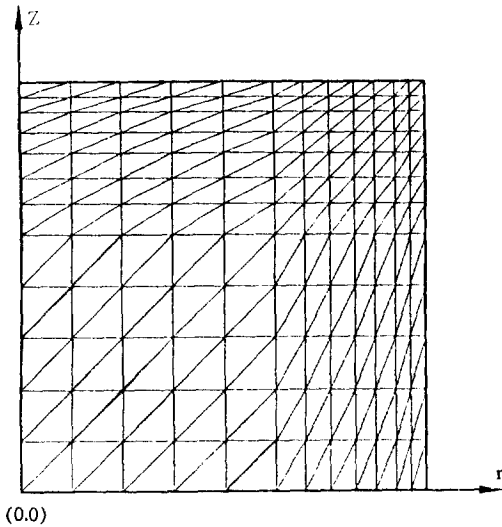


Fig. 1 The shape of model and boundary condition.



Number of elements = 288

Number of nodes = 169

Fig. 2 Finite element mesh for temperature analysis.

게 나타나므로 요소를 세밀하게 분할하여 결과의 신뢰성을 향상시키고자 하였으며 169개의 절점과 288개의 삼각형요소로 구성하였다. 구속조건은 r축에서 z방향 변화량을 구속하고 z축에서는 r방향의 변화량을 구속

시켰고 3 Gauss points를 사용하여 각 요소에서 온도 변화량을 계산하였다. 온도분포의 계산에 필요한 유한 요소 프로그램의 흐름도는 Fig. 3에 나타내었다.

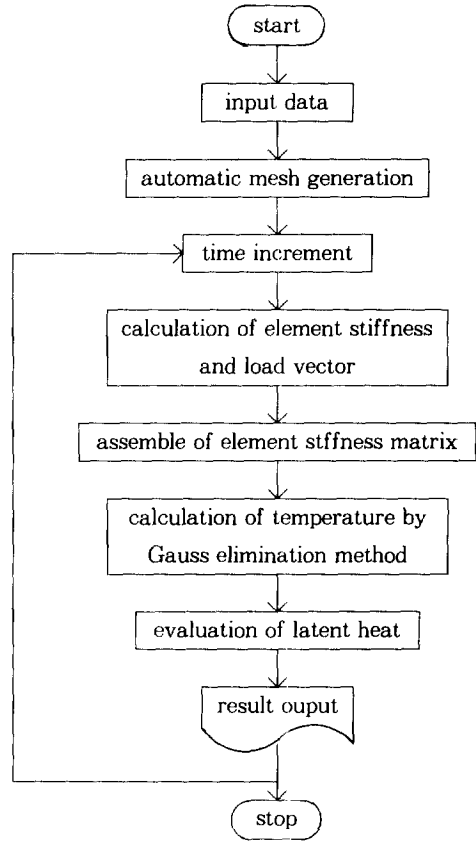


Fig. 3 Flow chart for temperature analysis.

4. 해석결과 및 고찰

결과의 타당성을 검토하기 위하여 시편 중심부로 부터 r=11mm, z=19mm의 위치에서 초기온도로 부터 상온에 이르기까지 K type 열전대로 구한 실측 냉각곡선과 유한요소법 해석의 결과를 Fig. 4에 도시하였고, 각 냉각단계에서 측정점의 온도와 해석에 의한 온도가 5~8% 이내 오차로 비교적 일치하였다. 이 그림에서는 시편주변의 냉각제가 비등점에 도달할때까지의 냉각단계인 초기 온도강하단계와 시편표면에 증기막이 형성되는 막비등단계가 거의 나타나지 않고, 냉각초기부터 천이비등 및 핵비등단계로 진입한다. 핵비등단계

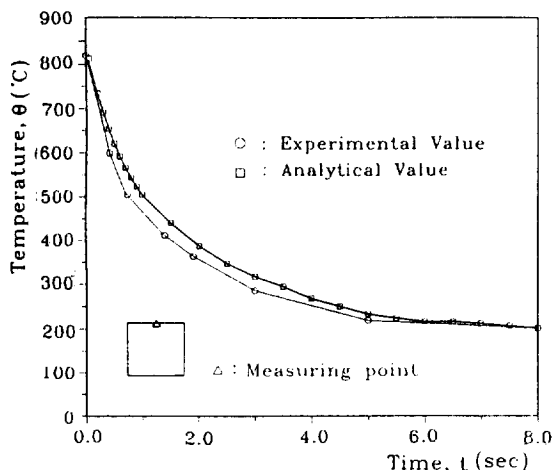


Fig. 4 Comparison of experimental and analytical cooling curve at $r=11\text{mm}$, $z=19\text{mm}$.

와 대류 초기단계에서 실험과 해석의 결과가 차이를 나타내는 것은 막비등과 핵비등단계에서 형성된 수많은 기포가 맹렬한 운동량을 가지고 유동하여 온도변화 실측을 불안정하게 만들기 때문으로 사료된다. 이후 대류에 의하여 냉각이 이루어지는 단계에서는 냉각속도는 느리지만 냉각제 온도와 비등점의 온도차 및 점도등이 일정하기 때문에 안정적인 냉각거동을 보여준다.

$z=0\text{mm}$ 이고 r 방향을 0에서 20mm까지 진행시킨 경우 냉각시간이 0.2, 1, 5, 10, 30 및 50sec로 변화할 때 온도 구배를 나타낸 것이 Fig. 5이다. 냉각시간이 0.2 및 1sec정도 경과할 경우 r 방향 약 12mm까지는 초기온도를 유지하나 그 이후에 1sec에서 급격한 온도 저하를 보여준다. 아울러 냉각시간이 5와 10sec가 지났을 때 완만한 온도 하강의 경향을 나타내면 30 및 50sec에서는 중심부와 시편표면부가 거의 일직선화된 온도분포를 유지한다.

Fig. 6은 $r=0\text{mm}$ 로 하고 z 방향을 변화시킨 경우 냉각시간에 따른 온도구배를 보여주는 것으로 Fig. 5와 비슷한 양상을 보인다. 그러나 10sec와 30sec 경과시는 시편의 표면부 온도가 거의 일치하고 있는 이는 r 방향을의 표면부와 달리 z 방향에서는 막비등에서 형성된 열의 불량전도체인 증기막이 신속히 파괴 및 이탈되지 못하여 열전달율이 저하되었기 때문으로 생각된다. 그리고 Fig. 5와 6은 반경비(r/R)와 축비(z/Z)가 0.8,

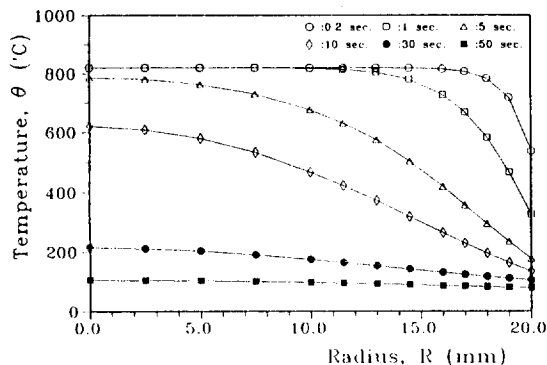


Fig. 5 Temperature gradient of $z=0\text{mm}$ and r -direction during quenching

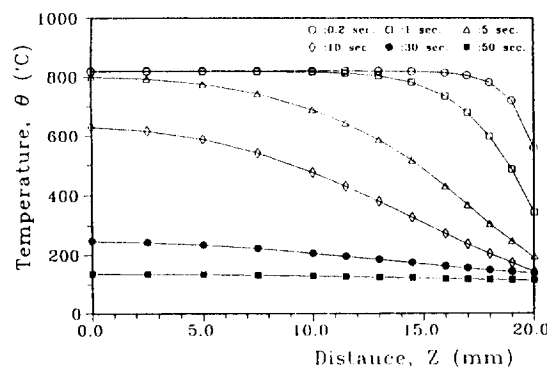


Fig. 6 Temperature gradient of z -direction and $r=0\text{mm}$ during quenching

즉 중심점으로부터 16mm이상에서, 0.2와 1 sec에서는 냉각속도가 급격히 증가하므로 시편의 표면부로 진행할수록 Ar' 보다 Ar'' 변태가 이루어질 것으로 예상된다.

r 방향에 따른 온도분포를 냉각시간에 따라 도시한 Fig. 7은 냉각초기(약 10 sec)에는 큰 온도구배를 보이거나 냉각말기(약 50sec)이후에는 시편의 전영역온도가 100°C이하로 냉각되는 양상을 나타낸다. 이는 잔류 오스테나이트와 마르텐사이트조직을 창출하는 Ar'' 변태온도가 시편 전영역에 도달되어지는 시간은 냉각 개시후 약 35 sec이후 인것을 알 수 있다.

Fig. 8은 시편의 중심부에서 z 방향에 따른 온도분포를 냉각시간에 따라 나타낸 것으로 Fig. 7과 유사한 경향을 보여준다. 아울러 축비가 0.9 및 1의 경우에는 200°C까지 온도가 저하하는 과정에서 평균 30°C/sec

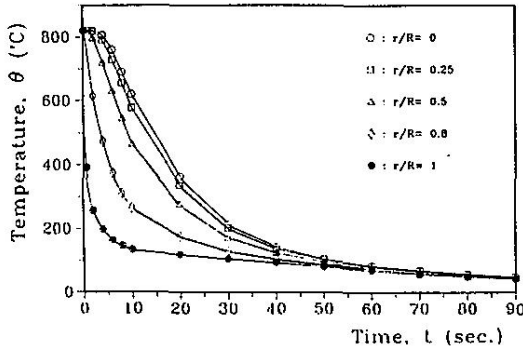


Fig. 7 Analytical cooling curve of r-direction, z=0mm.

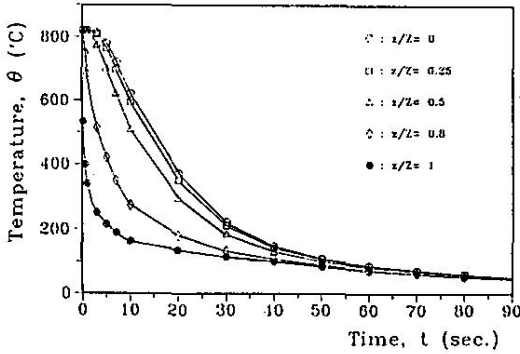


Fig. 8 Analytical cooling curve of z=0mm, r-direction.

및 88°C/sec의 냉각속도를 보여주므로 임계냉각속도 (critical cooling rate)보다 빠른 냉각으로 인하여 오스테나이트가 무확산 변태인 Ar¹ 변태를 통해 마르텐사이트조적으로 변할 것으로 사료된다. 그러나 이 과정에서 마르텐사이트는 오스테나이트에 비하여 비중이 작아 0.4% 정도 부피의 팽창을 유발하므로 형상이 예리한 모서리부등에서는 퀴칭균열이나 변형을 야기시킬 우려도 배제할 수 없다.

기준상태 ($\theta=820^{\circ}\text{C}$, $\theta_{\infty}=25^{\circ}\text{C}$)에서 완전퀴칭으로 하여 1sec가 경과하였을때 시편내의 등온도서 (contour of isothermal)을 보여주는 Fig. 9는 반경비와 축비가 0.8이상 즉, 시편표면부 부근에서 매우 급격한 온도변화를 나타낸다. 반경방향 최외각($r=20\text{mm}$)의 상단부인 모서리부는 r과 z축상의 표면부보다 약 160°C 이상 온도가 저하되어 200°C 정도까지 냉각되므로

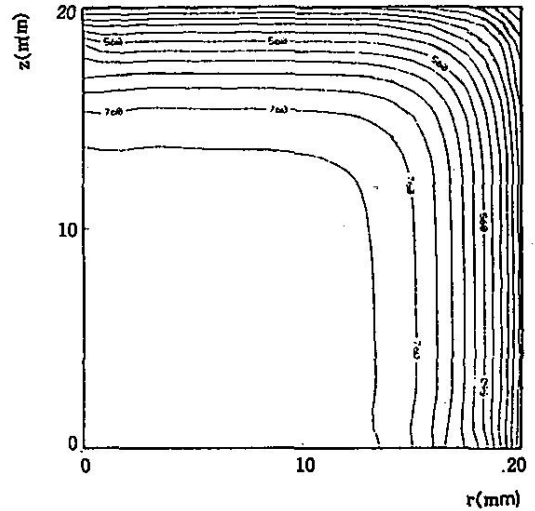


Fig. 9 Temperature contour of 1sec after quench

620°C/sec의 냉각속도를 가진다. 여기에서 표현된 실선 한개의 간격은 40°C의 온도차이를 의미한다.

Fig. 10은 냉각시간이 5sec경과한 후 시편내 온도분포를 나타내는 그림으로서 약 r, z=10mm까지와 r=20mm의 상단부 위치에서는 비교적 완만한 온도구배를 가진다. 그러나 전자의 경우는 시편 표면부에서 발생하는 냉각작용에 의하여 시편내부의 열전도 작용으로 일어나는 정상적인 냉각과정을 보여주지만, 후자의 경

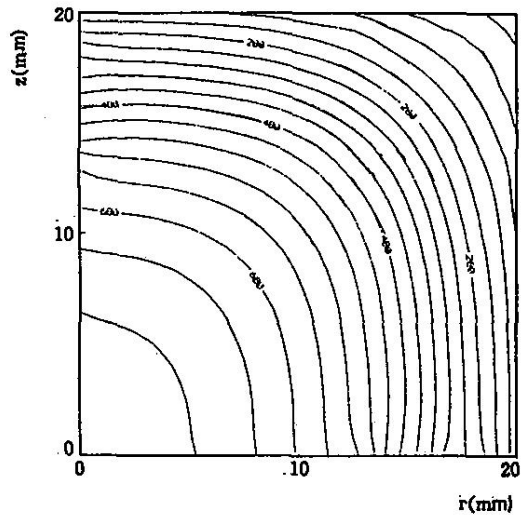


Fig. 10 Temperature contour of 5sec after quenching.

우는 Ar^γ 변태온도까지 냉각이 충분히 이루어져 이 영역의 일부에서는 마르텐사이트의 조직이 생성되어 있을 것으로 사료된다.

냉각개시 10sec 이후 시편의 온도분포를 나타내는 Fig. 11은 Fig. 10에 비교하여 중심부의 등온도선은 최고 660°C로 저하되었을뿐 아니라 r, z=10~15mm 이상의 위치에서 등온도선의 간격이 점차 확대되어진 것을 알 수 있다. 이는 시편의 중간부와 외각부에서는 열전거동이 거의 안정한 상태로 진입하고 있음을 의미하며 최저온도 한계선(80°C)도 r, z=15mm 위치로 Fig. 10에 비해 약 3.3mm 정도 중심부로 이동하였다.

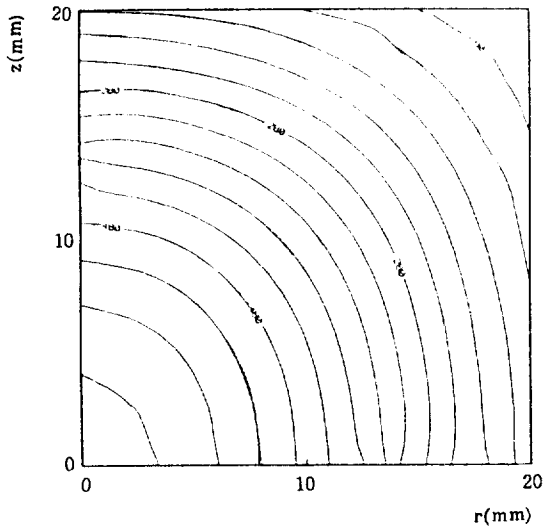


Fig. 11 Temperature contour of 10sec after quenching.

Fig. 12는 냉각제를 수용액이나 H₂O성분을 사용한 경우, 냉각말기에 해당하는 30sec경과시 시편의 온도분포를 나타낸 것이다. 등온도선의 간격이 거의 일정하므로 고른 온도구배를 보유하고 있음을 알 수 있고 등온도선 한개의 간격은 10°C이며, 최고온도 210°C 최저온도 70°C 정도를 보여주므로 온도구배는 약 5°C/mm에 이른다. 이 경우 시편의 중심부가 Ar^γ 변태 온도에 도달하였으나 마르텐사이트조직이 창출되는지 여부는 임계냉각속도, 실량효과 및 잠열들을 고려하여야 할 인자들이 다양하므로 현재의 상태로는 미지수이다.

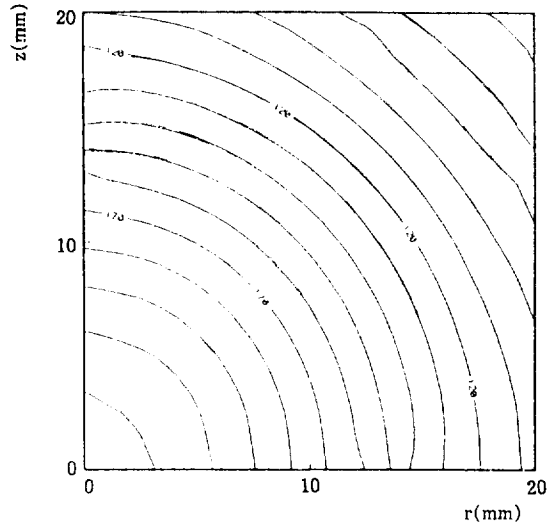


Fig. 12 Temperature contour of 30sec after quenching.

5. 결 론

공학전반에서 많이 사용하고 있는 유한요소법으로 쿨링과정의 탄소강시편에 대한 열적거동을 해석한 본 연구에선 첫째 증류수 25°C에 대한 원주 시험편의 실측 냉각곡선과 유한요소법을 통한 수치해석적 기법으로 도출한 냉각곡선의 비교에서는 핵비등 단계와 초기 대류단계에서 오차 5~8% 이내로 잘 일치하고 있으므로 축대칭 유한원주의 2차원 비정상 온도분포 계산이 담금과정시 시편의 온도분포 예측에 효과적인 방법으로 사용할 수 있을 것으로 사료된다. 둘째 r과 z방향에서 냉각시간에 따른 온도구배는 상호 유사한 경향을 보여 r/R과 z/Z가 0.8이상에서는 Ar^γ이나 Ar^β 변태가 이루어질 것으로 사료된다. 셋째 r/R 및 z/Z가 0.8 이상의 경우 200°C까지 온도가 저하되는 동안 30°C/sec에서 88°C/sec 정도의 평균냉각속도를 나타내고, 냉각시 가장 먼저 열적 안정상태에 도달하는 부위는 반경방향의 최외각의 상단부인 모서리부분으로서 평균 620°C/sec의 냉각속도를 가진다. 등의 사실을 알 수 있었다. 아울러 고온물체의 급속냉각과정에서 수치해석적 기법을 도입할 경우, 물체 표면의 열전달 계수가 시편 재료의 시간과 온도에 의존하는 현상들을 정량적으로 분석하는 관련 연구가 계속 이루어지는 것이 바람직하다고 사료된다.

참 고 문 헌

1. 機電研究社 編輯部 : 鋼의 熱處理, 改訂5版, 機電研究社, 서울, 1979, pp.15~26.
2. T. Inoue and K. Tanaka : Int. J. Mech. Sci., 1975, Vol. 17, No. 2, pp.361~367.
3. T. Inoue, K. Haraguch and S. Kimura : J. of the Society of Material Science Japan, 1976, Vol. 25, No. 276, pp.1624~1631.
4. M. A. Grossmann : Hardenability of Alloy Steel, 1939, pp.124~135.
5. 多賀谷, 田村 : 日本金屬學會誌, B16, No. 12, 1951, pp.589~594.
6. Z. G. Wang : J. of the Society Material Science Japan, 1983.
7. J. Burke, The Kinetics of phase Trasformation in Metals, 1st. Ed., Pergamon Press Ltd., New York, 1965. pp.346~359.
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號, pp.411~423.
9. E. Hinton and D. R. J. Owen : Finite Element in Plasticity, 2nd. Ed., Pineridge Press Ltd., New York, 1977. pp.431~464.
10. D. W. Pepper and J. C. Heinrich : The Finite Element Method, 3rd. Ed., Hemisphere Pub. Co., New York, 1992. pp.422~426.
11. K. H. Huebner and E. A. Thornton : The Finite Element Method for Engineers, 2nd. Ed., John Wiley and Sons, New York, 1982. pp.126~149.
12. Zienkiewicz : The Finite Element Method in Engineering Science, 2nd. Ed., McGraw-Hill Co., New York, 1982., pp.256~286.
13. 閔壽泓, 具本權, 金泰旭 : 大韓機械學會 秋季學術大會 論文集, 1986. pp.422~426.
14. 金鈺三, 崔殷淳, 閔壽泓 : 韓國熱處理學會誌, 1993, Vol 5 No. 4, pp.224~232.
15. E. Hinton and D. R. J. Owen : Finite Element Programming, 2nd. Ed., Academic Press Ltd., New York, 1987. pp.48~67.