

論 文

# 켄칭시 나트륨계 수용액의 냉각성능에 관한 연구

金 鈺 三 · 崔 殷 淳\* · 閔 壽 泓\*\*

여수수산대학 기계공학과

\* 인하대학교 기계공학과

## A Study on the Coolingability of Sodium Aqueous Solutions by Quenching

Kim Ok Sam, Choi Eun Soon\* and Min Soo Hong\*

Dept. of Mechanical Engineering, Yosu National Fisheries University

\* Dept. of Mechanical Engineering, Inha University Graduate School

\* Dept. of Mechanical Engineering, Inha University

### ABSTRACT

Coolingability of coolants is important factor in cooling processor heat treatment of steel. Using standard apparatus and method defined in the Korean Industrial Standard three different shapes of probe were designed, ie, cylindrical, spherical and square on shape with same volume of standard probe. Distilled water and sodium aqueous solutions with different concentration of NaOH, NaCl and Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> were examined. Estimation of coolingability of each quenchants for the probes of cylindrical, spherical or square shape, the cooling rate is greater square, cylinder and sphere in order. Coolingability of sodium aqueous solution of NaCl, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> and NaOH is found generally greater then that of distilled water. Effectiveness of ingredients is in the order of Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, NaOH and NaCl. In both solutions coolingability increases in 20%, 5%, and 10%in order. Analytical results obtained from Finite Element Method were compared with experimental ones and found as practically satisfactional.

### 1. 서 론

철강재료를 재결정온도 이상으로 가열하여 얻은 오오스테나이트조직으로부터, 페라이트의 석출 또는 퍼얼라이트 공석반응을 일으키는 Ar<sup>1</sup>변태구역을 신속히 통과하고 마르텐사이트 변태를 일으키는 Ar<sup>2</sup>변태구역을 완만하게 진행시켜 탄소가 과포화된 마르텐사이트 조직을 얻는 켄칭(quenching)은 재료의 화학적성분 뿐만 아니라 냉각제의 여러가지 요인에 의해 담금효과<sup>1)</sup>가 다양

하게 변화한다. 즉 경화능<sup>2)</sup>은 냉각제의 구성성분, 온도, 시험편의 형상 및 크기 등에 영향을 받으므로, 일반적인 방법으로 냉각곡선을 구하여 냉각제의 냉각능을 정량적으로 평가할 수 있다면 재료의 기계적성질 변화를 용이하게 추정할 수 있을 것이다. 이에 관한 연구로서는 실험자료의 통계처리에 의하여 일반화된 실험식을 만들거나, 비정상 열전도 방정식을 수치해석적 방법에 의하여 시험편의 온도분포를 구하고 임의의 시간과 위치에서 냉각곡선을 구하는 방법이 시도되고 있다.

그러나 전자의 경우는 냉각능에 미치는 제반인자들을 충분히 고려한 실험식을 구성하기 어렵고, 후자의 경우는 시험편 표면부의 경계에서 각 냉각단계 및 측정위치에 따른 표면 열전달률을 실험적으로 먼저 구해야만 한다. 각종 냉각제의 냉각특성에 관하여는 H.J. French<sup>3)</sup>, M.A. Grossmann<sup>4)</sup>, 多賀谷, 田村<sup>5-11)</sup> 등이 독자적으로 연구하여 그 결과를 발표한 바 있다. 특히 多賀谷 등은 이론 및 실험적으로 냉각곡선을 도출하여 냉각제의 냉각성능 변화를 연구하였으며 민수홍, 구분권, 김상열<sup>12)</sup> 등은 여러가지 담금제의 냉각성능에 관한 연구를 하였다.

본 연구에서는 실제 열처리에 이용되는 철강재료와 열전도도가 유사한 순도 99%의 니켈시험편을, KS 열처리용 냉각성능 시험방법<sup>13)</sup>에 규정된 은시험편과 같은 제작의 원주, 사각주 및 구형의 시험편으로 제작하여 사용하였다. 아울러 실험을 통하여 얻어진 냉각곡선을 이용하여 냉각제의 냉각성능을 나타내는 열전달계수, 담금강열도 및 냉각속도등을 구하였고 2차원 비정상 열전도 방정식<sup>14,15)</sup>을 유한요소법<sup>16)</sup>(Finite Element Method)으로 구성하여 냉각시간 증분에 따른 측정점의 온도변화를 계산하여 실험의 결과와 비교하였다.

## 2. 냉각성능 평가방법 및 유한요소법 모델해석

### 2.1. 럼프드 시스템(Lumped system)에 의한 표면 열전달률 계산

일반적으로 럼프드 시스템<sup>17)</sup>은 열의 제1법칙<sup>18)</sup>으로부터 유도할 수 있다.

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{dw}{dt} = \frac{dE}{dt} \dots\dots\dots (1)$$

$\frac{dQ}{dt}$  = 단위시간당 물체로부터 방출되는 열량

$\frac{dw}{dt}$  = 계에 의하여 수행되는 일

$\frac{dE}{dt}$  = 단위시간당 계에 유입되는 내부 에너지

이다. 그러나

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dws}{dt} + \frac{dvw}{dt} \dots\dots\dots (2)$$

가 되며

$$\frac{dws}{dt} = \text{shaft work, } \frac{dvw}{dt} = \text{viscous work}$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dE \sigma}{dt} - \sum_{i=1}^N \left( \epsilon_i + \frac{p}{\rho} \right) \frac{dmi}{dt} \dots\dots\dots (3)$$

으로 표시할 수 있다.

$\frac{dE \sigma}{dt}$  = 재료의 단위 시간당 에너지 변화량

$\sum_{i=1}^N \left( \epsilon_i + \frac{p}{\rho} \right) \frac{dmi}{dt}$  = 물질의 이동량 등을 의미한다.

이 이론을 본 연구에 적용시키면

$$\frac{\delta ws}{dt} = \frac{\delta Wv}{dt} = 0$$

이므로

$$\sum_{i=1}^N \left( \epsilon_i + \frac{p}{\rho} \right) \frac{dmi}{dt} = 0$$

가 된다. 그러므로

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dE \sigma}{dt} \dots\dots\dots (4)$$

이 성립하며, 또한

$$\frac{dQ}{dt} = -h \cdot S(T_s - T_w) \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{dE \sigma}{dt} = \rho \cdot v \cdot c \frac{dT_s}{dt} \dots\dots\dots (6)$$

이다. 즉 물체의 냉각시 단위시간당 방출되는 열량은 물체표면에서 전달열량과 같고, 재료의 단위시간당 에너지의 변화량은 질량변화가 없고 열량변화만이 발생하는 것으로 가정<sup>19)</sup>하였기 때문에 윗식을 만족한다. 그러므로

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dE \sigma}{dt} \dots\dots\dots (7)$$

식은

$$-h \cdot S(T_s - T_w) = \rho \cdot v \cdot c \frac{dT}{dt} \dots\dots\dots (8)$$

이 된다.

결국 (8)식은 에너지 방정식의 럼프드형(Lumped type)이며

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{h \cdot S(T_s - T_w)}{\rho \cdot v \cdot c} \dots\dots\dots (9)$$

가 된다. 상기식에서 dT/dt를 Lagrange 5점 보간다항식에 의하여 실측 냉각곡선에서 구하였고, 또한 열전달률 h 값을 각 냉각구간마다 구하였다. 다만 (9)식에서

negative 부호가 붙은것은 열의 흐름이 반대의 방향으로 이루어 진다는 의미이다.

2.2. 담금강열도 (severity of quench)와 냉각속도 (cooling rate)

담금강열도 H를 구하는 방법에는 Grossmann에 의한  $H = h/2k$ 와 多賀谷등이 제안한  $H = h/k$ 가 있으나 본 연구에서는 상대 열전달의 의미로 多賀谷, 田村등이 제안한 방법을 사용하였다. 여기서 h는 표면열전달계수 ( $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$ )이며 k는 열전도도 ( $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ )이다. 냉각속도는 일정 강하온도까지 걸리는 시간을 말하는데 단위시간당 시편의 온도차에 의하여 결정된다. 열유속 (hwat flux,  $W/m^2$ )은 단위면적당 열량의 변화로 계산하였다.

2.3. 유한요소법에 의한 모델의 해석

유한 원주 시편의 담금과정에 대한 온도분포 해석은 X와 Y축에 대하여 대칭이므로 종단면 1/4에 대하여 하였다. 고온물체의 신속한 냉각과정을 해석하는 모델을 분석함에 있어서 가정은 다음과 같다.

- (1) 시편의 재질은 등방성체(isotropic material)이다.
- (2) 시편과 냉각제의 초기온도는 일정하며 완전담금(fullquenching)한다.
- (3) 온도변화에 따른 시편과 냉각제의 물리적 성질은 변하지 않는다. 또한 이 현상을 표현할 수 있는 지배방정식, 경계조건 및 초기조건은 다음과 같다.

a) 지배방정식

$$\rho \cdot c \dot{T} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( k \cdot r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) \dots (10)$$

$t > 0$  일때

b) 경계조건

$$k \frac{\partial T}{\partial r} L_z + k \frac{\partial T}{\partial z} L_z + h(T_s - T_w) = 0 \dots (11)$$

$S_1$ 에서  $t > 0$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \dots (12)$$

$S_2, S_3$ 에서

c) 초기조건

$$T_s = T_{in} \quad t = 0 \dots (13)$$

여기서 k는 재료의 열전도도,  $\rho$ 는 밀도, c는 비열,  $T_s$ 는 시편의 온도, t는 시간,  $L_r$ 와  $L_z$ 는 경계면에서 의

항법선 vector와 z, r 축 사이의 방향여현(direction cosine), h는 시험편 표면의 열전달율,  $T_w$ 는 냉각제의 초기온도를 나타낸다. 그리고 지배방정식과 경계조건을 Galerkin method에 적용하여 이산화(discretization)하면

$$\iiint_v \left[ \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( k \cdot r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \rho \cdot c \dot{T} \right] W_A dv + \iint_s \left[ k \cdot \frac{\partial T}{\partial r} L_z + k \frac{\partial T}{\partial z} L_z + h(T_s - T_w) \right] W_s ds = 0 \dots (14)$$

가 되며 (14)식을 정리하면 모델 전영역에 대한 강성방정식은

$$[K]\{T\} + [K_3]\{\dot{T}\} = \{P\} \dots (15)$$

단 여기서,

$$[K] = \iiint_v [B]^T [D] [B] dv + h \cdot \iint_s r [N]^T [N] ds$$

$$[K_3] = \rho \cdot c \iiint_v r [N]^T [N] dv$$

$$\{P\} = h \cdot T_w \iint_s r [N] ds$$

$$\{\dot{T}\} = \{\partial T / \partial t\}$$

$$[N] = [N_1 \ N_2 \ N_3]$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{N_1}{r} & \frac{N_2}{r} & \frac{N_3}{r} \\ \frac{N_1}{z} & \frac{N_2}{z} & \frac{N_3}{z} \end{bmatrix}$$

$$[D] = \begin{bmatrix} rk & 0 \\ 0 & rk \end{bmatrix}$$

과 같이 표현할 수 있다. 표면 열전달 계수는 실험을 통하여 각 냉각단계마다 구한 수치를 이용하였으며, 한편 비정상항인  $\{\dot{T}\}$ 를 전진차분화(implicit)하면

$$\{\dot{T}\} = \frac{[\{T\}_t + \Delta_t - \{T\}_t]}{\Delta t} \dots (16)$$

으로 되고 유한요소법에 적용가능한 최종 강성방정식은

$$[K]\{T\}_t + \Delta_t = \{P\}_t + \Delta_t \dots (17)$$

이 된다.  $\Delta_t$ 는 시간증분이며  $[K]$ 와  $\{P\}_t + \Delta_t$ 는

$$[K] = \frac{[K] + [K_3]}{\Delta t}, \quad [P]_t + \Delta_t = \frac{\{P\}_t + \Delta_t + [K_3]\{T\}_t}{\Delta t}$$

이상과 같이 표시되는 최종 강성방정식에 초기조건을

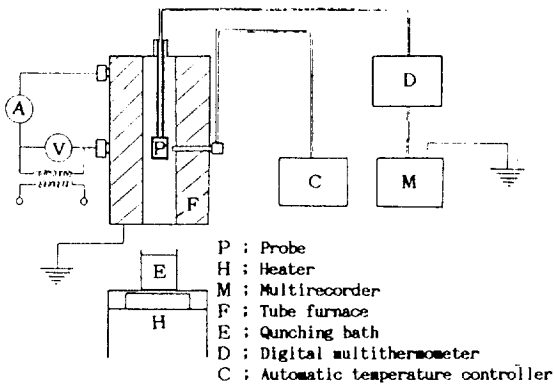


Fig.1. Schematic diagram of experimental apparatus.

이용하여 미소시간증분에 따른 2 차원 비정상 온도분포를 구하였다. Fig.1은 모델의 요소분할(요소수 100 개, 절점수 66 개) 및 경계조건을 나타낸 것이며 해석에 이용된 컴퓨터는 MV-10000으로 소요시간은 약 6분정도이다.

### 3. 실험

#### 3.1. 실험장치 및 실험방법

냉각곡선을 실측하기 위한 실험장치의 개요도는 Fig. 2와 같다. 전기로(F)는 내경 80mm 외경 300mm 높이 650mm의 직립개방형로이며 사용전원은 220V, 최대발열량은 4.8Kw이다. 또한 로내온도를  $810 \pm 5^\circ\text{C}$ 로 유지하기 위하여 비례감도와 동적특성 제어를 효과적으로 처리하는 P.D.I.(Proportional-plus-Derivative-plus-Integral)방식의 자동온도 조절기(C)를 사용하였다. 실

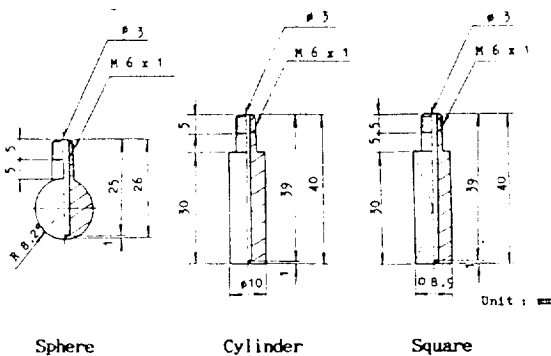


Fig.2. Configuration of the probes.

험방법은 시험편(P)를 가열로에 넣고  $807 \pm 3^\circ\text{C}$ 부근까지 가열한 후 10분 정도 유지시간을 가져 digital multithermometer(D)로 시험편 온도를 확인한 후 가열로 하부 뚜껑을 열고 정지상태의 냉각제(E)에 시험편을 강하시켜 시간의 경과에 따른 온도변화를 mutirecorder(M)으로 기록하였다. 시험편은 KS 규격과 동일한 체적의 원주, 사각주 및 구형으로 저면 1mm 위치에서 온도변화를 측정하였고 냉각제는 순수한 증류수, 5%, 10% 및 20%로 농도를 변화시킨 NaCl, NaOH 및  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  수용액을 2000 ml 비이커에 담아 국부적인 유동이 없도록 안정을 시켜 냉각제로 이용하였다.

#### 3.2. 시험편제작

시험편의 재질은 순도 99%의 순 니켈을 사용하였으며 Fig.3은 시험편의 형상과 치수를 나타내었다. 시험편을 제작하기 위하여 시험편의 표면은 #600 샌드 페이퍼로 매끄럽게 마무리 가공을 하였으며, 시험편 상단부에서 측정위치까지  $\phi 3\text{mm}$ 의 드릴로 구멍을 낸 후 구멍의 밑부분에 남아 있는 드릴날각 여유부를 제거하기 위하여 엔드밀 작업을 통하여 평면으로 가공하였다. 센서의 구성은  $\phi 0.4\text{mm}$ 의 CA 열전대를 먼저 점 접한 후 절연이 유지되도록 2-way 애자에 넣어 시험편 내부에 삽입하고 condenser welding machine으로 시험편 측정부와 점 접함 하였다. 한편 시험편의 상단부의 방수처리에는 약  $1200^\circ\text{C}$ 까지 사용 가능한 세라믹 파우더 본드로 밀봉시켰고 CA 열전대는 digital multithermometer와 multirecorder에 lead 선으로 접속하였다.

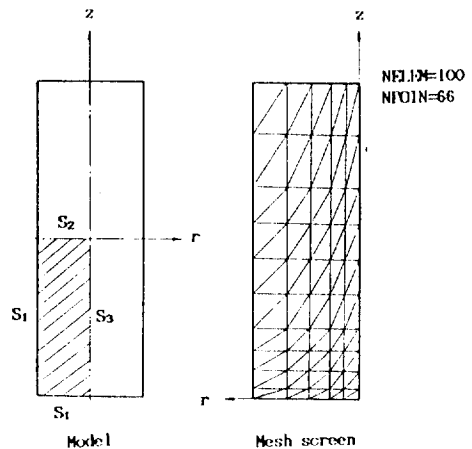


Fig.3. Finite element model and mesh screen temperature analysis.

4. 실험 및 해석결과의 고찰

Fig.4는 20℃ 증류수에 대한 원주, 사각주 및 구형 시험편들의 실측 냉각곡선을 비교한 그림이다. 원주와 구형 시험편은 강의 퍼얼라이트(pearlite) 변태구역(약 700~500℃ 부근)에서 0.1~0.3초 가량 지연된 시간 간격으로 유사한 냉각과정을 보이나 마르텐사이트(martensite) 변태구역(약 300~200℃ 부근)에서는 구형 시험편이 원통형 시험편보다 0.6초 정도 빠르게 냉각되며 사각주형 시험편은 두 변태구역에서 현저하게 느린 냉각과정을 나타낸다. 여기서 사각주, 원주 및 구형의 순서로 냉각이 이루어짐을 알 수 있는데 그 이유는 막비 등 단계에서 형성된 열의 불균전도체인 증기막이 핵비 등 단계에서도 시험편의 밀면에 국부적으로 정체하고 있으며 그 정체시간이 시험편의 밀면 넓이(구형은 0, 원통형은 78.5mm<sup>2</sup> 및 사각주형은 79.2mm<sup>2</sup>)와 수직방향의 단면 변화율에 관계하기 때문이다.

20℃ 증류수의 냉각곡선으로 부터 100℃ 간격으로 구한 냉각속도를 각각 도시한 Fig.5는 초기 냉각단계인 막비등 단계에서 형성된 두터운 증기막으로 인하여 낮은 냉각속도를 나타내고, 그 후 천이단계(600~500℃)를 걸쳐면서 냉각속도가 상승하여 핵비등 단계에서 구형은 750℃/sec., 원주형은 약 620℃/sec. 및 사각주형은 약 240℃/sec. 정도의 최고치를 나타내며 대류단계로 갈수록 냉각속도는 급격히 감소한다.

Fig.6은 20℃ 증류수에서 각 형상의 시험편에 대한 표면의 열전달률, 담금 강열도등의 냉각성능들을 좌우

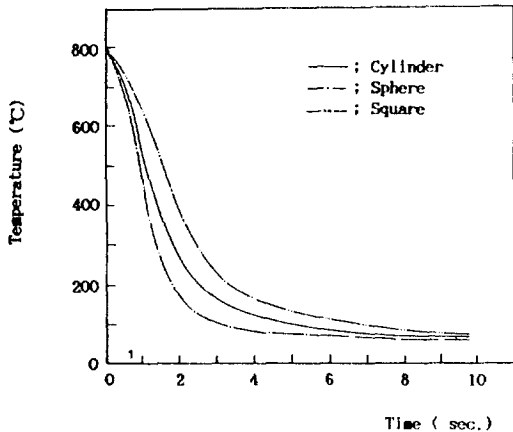


Fig.4. Cooling curves of the distilled water at the probes.

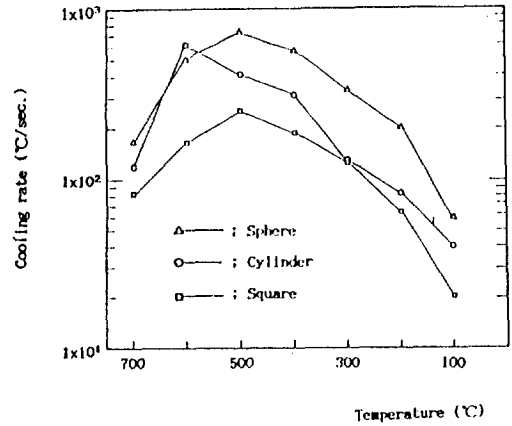


Fig.5. Cooling rate curves of the distilled water at the probes (Bath temperature : 20°C).

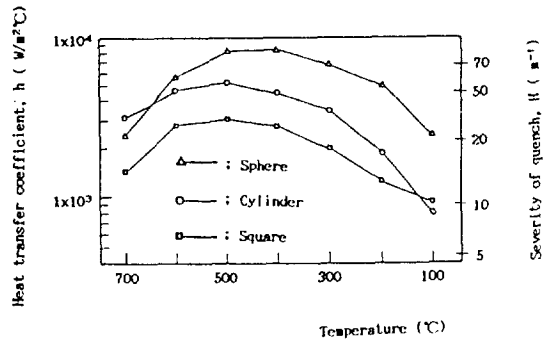


Fig.6. Coolingability(h, H) curves of the various probes in distilled water (Bath temperature : 20°C).

Y 축에 나타낸 그림으로서 구형 시험편의 600~400℃ 사이에서 열전달률은 약 8200(W/m<sup>2</sup>·℃), 담금강열도는 약 80(m<sup>-1</sup>)의 최대값을 나타내고 계속 냉각이 진행됨에 따라 성능값들은 낮은 수치를 가지게 되어 냉각속도 곡선의 경향과 유사한 형태로 나타나고 있다.

20℃의 NaCl 10% 수용액에 대한 각 형상 시험편의 냉각곡선을 나타낸 Fig.7은 냉각 초기인 막비등단계가 거의 나타나지 않음으로 퍼얼라이트 변태구역이 매우 빠르게 냉각되며 핵비등 단계가 현저하게 길어진다. 아울러 구형시험편은 원주형이나 사각주형 시험편과 비교하여 빠른 냉각을 보여주며, 원주형은 사각주형보다 약 210℃까지는 근소한 차이로 냉각이 빠르게 진행되나 반전하여 사각주형이 오히려 신속한 냉각거동을 보여준

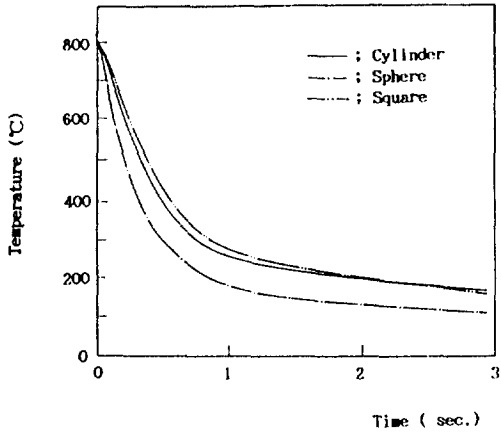


Fig. 7. Cooling curves of the various probes shape in the solution of NaCl 10% (Bath temperature ; 20°C).

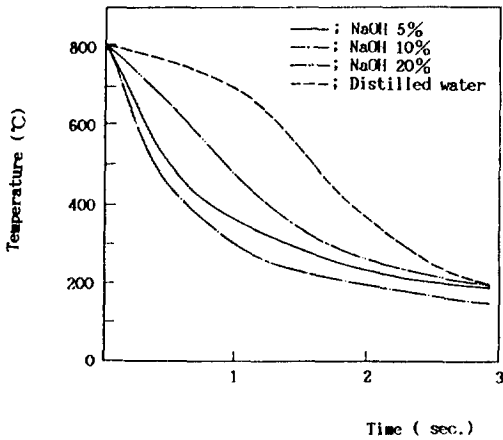


Fig. 8. Cooling curves of the various probes according to the various concentrated solution of NaOH (Bath temperature ; 20°C).

다. 그 이유는 수용액에 포함된 용질이 사각주형의 예리한 모서리부의 영향으로 활발한 유동을 함으로서 시험편 표면부의 열전달율을 향상시키기 때문으로 사료된다.

Fig. 8은 원주형 시험편에서 NaOH 수용액의 농도를 5%, 10%, 20%로 변화 시켜 순수한 증류수와 비교한 것으로 전반적으로 증류수보다 NaOH 수용액이 냉각을 빠르게 진행시킴을 알 수 있고 수용액의 농도는 20%, 5%, 10%의 순서로 신속한 냉각효과를 나타내고 있다.

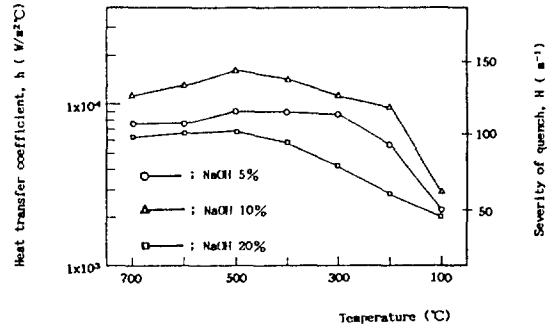


Fig. 9. Coolingability (h, H) curves of the sphere probe in various concentration of the NaOH solutions (Bath temperature ; 20°C).

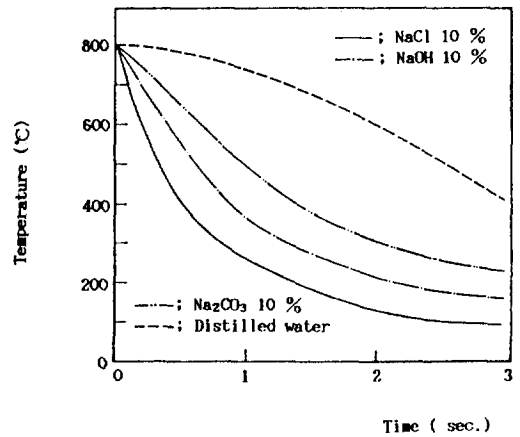


Fig. 10. Cooling curves of the square probe in each solutions of NaOH, NaCl and Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 10% (Bath temperature ; 20°C).

농도의 영향은 10%까지 증가할수록 초기 냉각단계인 막비등 단계가 거의 나타나지 않고 핵비등 단계로 곧장 진입하기 때문에 특성온도가 크게 높아져 냉각성능이 양호하게 된다. 그 원인으로는 비취발성 용질을 첨가하면 증기압이 감소하여 특성온도가 상승하고, 용질의 입자들이 시험편 표면에서 석출하여 운동에너지를 보유하게 되므로 막비등 단계에서의 증기막을 파괴하는 작용을 하기 때문이다.

NaOH 수용액의 농도차에 의한 시험편 표면부의 열전달률과 담금 강열도를 나타낸 Fig.9는 10%까지 농도의 증가에 따라 냉각성능 값이 커지나 20%는 오히려 감소하는 경향을 보여주므로 10%와 20% 사이에 냉각효과

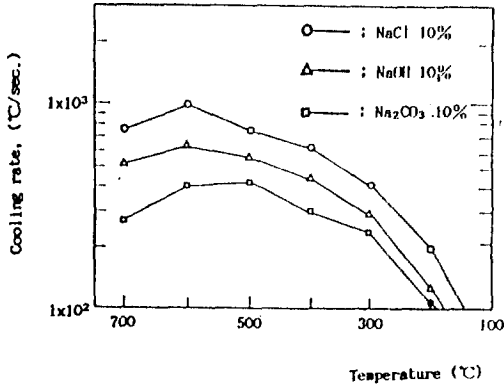


Fig. 11. Cooling rate curves of square probe in each solutions of NaCl, NaOH and Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 10% (Bath temperature : 20°C).

를 발전시키는 변환점이 있을 것으로 사료되며, 막비등 단계가 거의 사라지는 것이 비휘발성 나트륨계 용질을 첨가하는 경우의 일반적인 추세로 나타난다.

Fig. 10은 사각주 시험편을 이용하여 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, NaOH, NaCl 10%의 수용액들과 순수한 증류수의 냉각곡선을 나타낸 그림으로서 400°C까지 냉각에 소요된 시간을 보면 NaCl의 경우 0.55초, NaOH는 0.9초 및 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>는 1.4초인 반면 순수 증류수는 3.1초 가량이 소요되므로 순수 증류수보다 비휘발성 수용액들이 매우 빠르게 냉각됨을 알 수 있고 동일 농도의 수용액 중에서는 활성도가 큰 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, NaOH 및 NaCl의 순서로 냉각속도가 결정된다.

사각주 시험편을 이용하여 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, NaOH 및 NaCl 10% 수용액들의 냉각양상을 나타낸 것이 Fig. 11이며 600°C 부근에서 NaCl은 1000°C/sec., NaOH는 약 600°C/sec., Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>는 약 390°C/sec. 정도의 냉각속도를 나타내고 있으며 냉각이 진행되어 마르텐사이트 변태구역으로 진입할 수록 낮은 냉각속도를 가지게 되므로 바람직한 냉각과정을 고안하면 양호한 담금효과를 수반할 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 12는 NaOH 10%와 순수증류수 20°C에 대한 각각의 형상에 대한 시험편의 열유속(Heat flux, W/m<sup>2</sup>)을 비교한 그림이다. 열유속은 퍼얼라이트 변태구역에서는 낮은 값을 가지나 마르텐사이트 변태구역에서 NaOH 수용액의 경우 구형 1.2 × 10<sup>6</sup> W/m<sup>2</sup>, 원통형 5 × 10<sup>5</sup> W/m<sup>2</sup> 및 사각주형 3.3 × 10<sup>4</sup> W/m<sup>2</sup> 이었으며 순수 증류수는 구형 2.95 × 10<sup>5</sup> W/m<sup>2</sup>, 원통형 2.4 ×

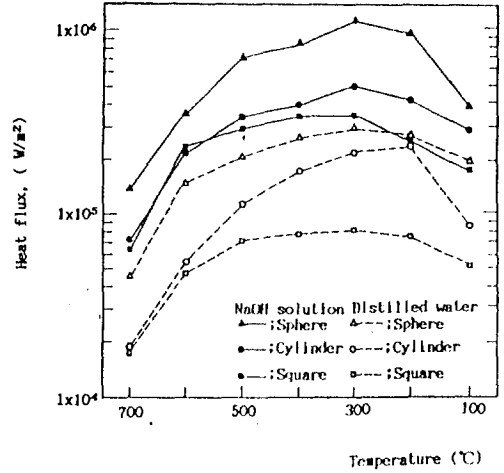


Fig. 12. Comparison of the heat flux according to the various probes shape in NaOH 10% distilled water at 20°C.

Shape	Solution	%	T	Evaporation area	Heat transfer area	Cooling rate, W/m <sup>2</sup> (10 <sup>4</sup> )	Average cooling rate, W/m <sup>2</sup> (10 <sup>4</sup> )
Cylinder	distilled water	100	20	100	100	100	
		100	40	34	59		
		100	60	16	119		
		100	80	8	152		
	NaCl	5	20	229	65		
		10	20	178	71		
		5	20	191	181		
		10	20	228	189		
		20	20	187	188		
		5	20	167	179		
	NaOH	10	20	154	154		
		20	20	151	174		
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>		100	20	102	272		
		100	40	44	214		
		100	60	25	205		
		100	80	11	154		
	5	20	210	180			
	10	20	356	208			
Sphere	distilled water	100	20	101	115		
		100	40	189	178		
		100	60	154	149		
		100	80	161	180		
	NaCl	5	20	185	191		
		10	20	194	180		
Square	distilled water	100	20	148	177		
		100	40	37	107		
		100	60	21	112		
		100	80	16	122		
	NaCl	5	20	9	199		
		10	20	146	160		
NaOH	10	20	94	247			
	20	20	114	148			
	5	20	167	164			
	10	20	120	147			
	20	20	110	143			
	5	20	143	122			
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	10	20	169	125			
	20	20	138	147			

— Average Cooling rate of Quenchant at 700°C ~ 500°C  
 — Average Cooling rate of Distilled Water at 700°C ~ 500°C × 100  
 - - - Average Cooling rate of Quenchant at 300°C ~ 200°C  
 - - - Average Cooling rate of Distilled Water at 300°C ~ 200°C × 100

Fig. 13. Comparative table coolinability of various specimens.

10<sup>5</sup> W/m<sup>2</sup> 및 사각주형 8 × 10<sup>4</sup> W/m<sup>2</sup> 정도의 최대값을 보여준다.

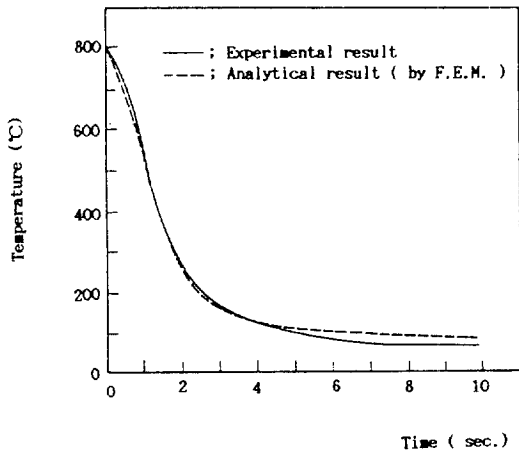


Fig.14. Comparison of experimental cooling curve with analytical cooling curve by F.E.M. at cylindrical probe.

여러 형상의 시험편과 다양한 냉각제에 대한 퍼얼라이트 변태구역과 마르텐사이트 변태구역의 냉각속도 (cooling rate,  $^{\circ}\text{C}/\text{sec.}$ )를 도표화 한 Fig.13은 원주형 시험편의 증류수  $20^{\circ}\text{C}$ 에 관한 냉각속도 (cooling rate,  $^{\circ}\text{C}/\text{sec.}$ )를 100으로 하였을때 비례관계를 나타낸 그림으로서, 실선은 퍼얼라이트 변태구역의 냉각곡선을 파선은 마르텐사이트 변태구역의 냉각속도를 의미한다. 순수한 증류수를 냉각제로 사용한 경우보다 나트륨계 수용액을 냉각제로 하였을때 약 2~2.5배 이상의 빠른 냉각속도를 나타내고, Bain's S 곡선에서 퍼얼라이트 변태가 시작되는 nose 영역은 신속하게 통과하고 베이나이트 및 마르텐사이트 변태를 시작하는 bay 구역은 비교적 느리게 진입하는 열처리 공정의 설계를 통하여 담금 효과가 이루어 질것으로 사료된다.

Fig.14는 증류수  $20^{\circ}\text{C}$ 에 대한 원주 시험편의 실측 냉각곡선과 유한요소법(FEM, Finite Element Method)을 통한 해석적 냉각곡선을 비교한 것으로, 대류단계에서는 다소의 차이를 보이고 있으나 막비등과 핵비등의 단계에서는 약 3~5% 이내의 오차로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 실험에서 채택한 여러형상의 Nickel 시험편을 Lumped system으로 가정하고 시험편 표면부의 열전달률 및 담금강열도등을 구하여 냉각성능 평가에 이용하여도 축대칭 유한원주의 2차원 비정상 온도분포의 유한요소법 해석을 통한 냉각곡선과 비교적 일치하므로 본 실험의 타당성을 입증할 수 있을 것으로

사료된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 나트륨계 수용액의 종류 및 수용액의 농도등을 변화시켰을 경우에 대하여 냉각곡선과 여러 냉각성능 파라미터들을 측정 및 비교, 분석을 하였다. 아울러 공학 전반에 널리 사용되어지고 있는 유한요소법(Finite Element Method)을 이용하여 보다 간단하고 정확하게 냉각제의 냉각성능 추정을 가능하게 하는 새로운 방법을 모색하였으며, 이와같은 실험 및 해석을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 여러 형상의 시험편에 대한 나트륨계 수용액의 냉각성능을 평가하는 경우 냉각속도는 사각주, 원주 및 구형의 순서로 빨라진다. 그 원인은 퍼얼라이트 변태구역인 막비등 단계에서 형성된 증기막이 시험편 저면부에 일시적으로 잔류하게 되는데 그 정체시간이 시험편 저면부의 넓이와 수직방향의 단면변화율에 관계하기 때문이다.

2) 증류수를 주성분으로 한 NaCl, NaOH 및  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  나트륨계 수용액은 일반적으로 순수한 증류수보다 냉각을 빠르게 진행시키며 같은 농도에서 여러수용액들은  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , NaOH 및 NaCl의 순서로 냉각성능이 좋아지고 같은 수용액에서는 10%까지 농도가 증가함에 따라 빨리 냉각되나 20%에서는 오히려 늦은 냉각양상을 볼 수 있다. 이와같이 비휘발성 용질을 첨가한 경우, 용질의 유동이 증기막을 파괴하는 작용을 하여 냉각제의 특성온도를 상승시키므로 막비등단계가 거의 나타나지 않고 빠른 냉각거동을 나타낸다.

3) 증류수  $20^{\circ}\text{C}$ 에 대한 원주형 시험편의 실측 냉각곡선과 유한요소법에 의한 수치해석적 기법으로 도출한 냉각곡선을 비교하였을때 대류단계에서는 다소 차이가 있으나 막비등과 핵비등에서 오차 3~5% 이내로 잘 일치하고 있으므로, 실측 냉각곡선으로 부터 럼프드 시스템을 이용하여 구한 냉각성능 파라미터에 대한 평가가 타당하다. 단 고온의 물체에 대한 신속한 냉각과정의 수치해석적 기법을 시도할 경우, 물체 표면의 열전달률이 시간에 의존하는 문제와 재료의 물리적 성질이 온도에 의존하는 현상등에 관한 연구가 추가적으로 이루어져야 할것으로 사료된다.



## 6. 참고문헌

1. 機電研究社 ; 鋼의 熱處理, 개정 5 판 (1979), pp.8 ~15.
2. KS D 0206 ; 鋼의 硬化能 試驗法.
3. H.J. French ; Trasaction of the ASME, Vol. 17 (1930), pp.646 656.
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, B 15 (1951) 11, pp.535~538.
6. 多賀谷, 田村 ; 日本金屬學會誌, B 15 (1951) 12, pp.589~591.
7. 多賀谷, 田村 ; 日本金屬學會誌, B 16 (1952) 2, pp.107~110.
8. 多賀谷, 田村 ; 日本金屬學會誌, B 20 (1956) 3, pp.124~128.
9. 多賀谷, 田村 ; 日本金屬學會誌, B 20 (1956) 6, pp.336~340.
10. 多賀谷, 田村 ; 日本金屬學會誌, B 20 (1956) 7, pp.357~360.
11. 多賀谷, 田村 ; 日本金屬學會誌, B 20 (1956) 8, pp.428~431.
12. 閔壽泓, 具本權, 金相烈 ; 大韓機械學會 論文集 제 13 권 제 3 호 통권 60 호 pp.411 423, 1989.
13. KS M 2172 ; 熱處理油 冷却性能 試驗方法.
14. K.H. Huebner ; "The Finite Element Method for Engineers," John Wiley and Sons, 1982.
15. S.S. Rao ; "The Finite Element Method in Engineering," Pergamon press, 1982.
16. E. Hinton and D.R.J. Owen ; "Finite Element Programming," Academic press, 1977.
17. Zienkiewicz ; "The Finite Element Method," 3rd, McGraw-Hill book Cd., 1982.
18. R. Welty ; "Engineering Heat Transfer," John Wiley and Sons, 1978.
19. M.N. Ozisik ; "Heat Conduction," John Wiley and Sons, 1980.