

<論 文>

각종 담금제의 냉각성능에 관한 연구(I)

— 물을 주성분으로 한 담금제의 냉각성능 평가 —

민 수 홍* · 구 본 권** · 김 상 열***

(1989년 1월 12일 접수)

A Study on the Coolingability of Several Quenchants (I)

— Coolingability of Selected Aqueous Solution —

Soo Hong Min, Bon Kwon Koo and Sang Yeoul Kim

Key Words : Coolingability(냉각성능), Quenching Effect(담금효과), Characteristics Temperature(특성온도), Film Boiling(막비등), Nucleate Boiling(핵비등), Cooling Rate(냉각속도), Non-Volatile Solution(비휘발성 용매)

Abstract

Quenching effect depends upon coolingability of quenchant as well as the composition of steel. Study on the coolingability of quenchants is important in cooling process and heat treatment of steel. Experimental apparatus and measuring method follow Korean Industrial Standard. Distilled water, different concentration of NaCl, NaOH and Na₂CO₃ solutions were compared. Also the effect of temperature of distilled water were calculated. Experimental results were examined with F.E.M. analysis.

기 호 설 명

- B_i : 비오 數
- c : 比熱(Kcal/°C)
- H : 담금강열도(m⁻¹)
- h : 열전달계수(W/m² °C)
- [K] : 강성매트릭스
- k : 열전도계수(W/m °C)
- L_r, L_z : 경계에서의 방향여현
- [N] : 形狀函數
- [P] : 等價節點荷重벡터
- s : 시편의 표면적(m²)
- t : 시간(sec)
- V_c : 冷却速度(°C/sec)

- v : 시편의 체적(m³)
- W_A, W_S : 加重函數
- ρ : 密度
- $\theta, \theta_{in}, \theta_{\infty}$: 溫度, 試片의 初期溫度, 冷却劑의 溫度

1. 서 론

철강재료의 가열과 냉각과정의 거동은 제철, 제강 및 열처리 산업분야에서 매우 중요한 문제이며, 특히 담금과 같은 열처리에서는 과냉 오스테나이트에서 페라이트, 펄라이트 및 상부 베이나이트 등의 변태를 저지하여 경도가 높은 마르텐사이트 조직을 얻을 목적으로 시행하고 있으나, 급냉에 의한 열응력과 변태응력으로 인한 잔류응력 및 치수변화를 발생하는 경우가 많다.

또한 강의 담금처리에 있어서 A_r' 변태를 일으

*정회원, 인하대학교 공과대학 기계공학과

**서울산업대학 금형설계과

***한국기계연구소 정밀기계부

키는 임계구역(critical zone) 및 Ar'' 변태를 일으키는 위험구역(dangerous zone)에서의 냉각속도는 재료의 물리적 및 기계적 성질에 큰 영향을 미치고 있으므로 합리적인 냉각과정을 통하여 재료의 성능을 향상시킬 수 있다.

한편 담금제의 냉각성능(coolingability)에 관한 연구 중 담금제의 냉각특성에 관한 연구로서는 French⁽¹⁾ 및 Grossmann⁽²⁾ 등이 시도한 이후 Thelling⁽³⁾, Monroe⁽⁴⁾ 등이 냉각곡선을 이용하여 실험적인 냉각곡선을 평가하는 방법을 제시하였고, Tamura^(5,6), Peter⁽⁷⁾ 및 민⁽⁸⁻¹⁰⁾ 등은 해석적 방법 및 실험자료의 통계처리를 통하여 보다 일반화된 실험식을 구하려는 시도를 하였다.

본 연구에서는 물 및 물을 주성분으로 하는 NaCl, Na₂CO₃, NaOH 등의 비휘발성 수용액을 담금제로 하고 KS M 2172의 열처리용 냉각성능 실험방법⁽¹¹⁾에서 채택하고 있는 은시편(순도 99.9%)을 이용한 표준냉각곡선으로부터 냉각속도 열전달계수 및 담금강열도 등 담금제의 냉각성능 파라미터를 구하였으며, 각종 담금제의 온도 및 수용액의 농도 변화에 따른 냉각성능을 평가하였다. 그리고 실험에서 채택한 시편 및 담금제를 모델로 하여 축대칭 비정상 열전도방정식을 유한요소법에 의하여 해석하고 냉각시간에 따른 시편의 온도분포를 계산하여 실험결과와 비교하였다.

2. 냉각성능 평가방법 및 모델해석

2.1 냉각성능 평가방법

담금액의 냉각성능 평가방법에는

- (1) 냉각속도(cooling rate, V_c , °C/sec)로 평가하는 방법
- (2) 열전달계수(heat transfer coefficient, h , W/m² °C)로 평가하는 방법
- (3) 담금강열도(severity of quench, H , m⁻¹)로 평가하는 방법

과 같은 방법들이 제시되고 있다. 여기서 냉각속도는 시편표면에서 단위시간당의 온도강하율이다. 이와 같이 냉각속도로 냉각성능을 평가하였을 때 유리한 점은 펄라이트 변태 및 마르텐사이트 변태의 거동을 파악하여, 충분한 경도를 확보하고 급속냉각에 의한 열응력 및 변태응력에 기인한 잔류응력의 영향을 최소화시키는데 효과적이기 때문이다.

한편, 담금과정은 비등열전달에서 고찰되고 있는

바와 같이 각 냉각단계마다 막비등, 천이비등, 핵비등 및 대류 등의 복잡한 전열과정을 수반하며 시편의 냉각시 열유동이나 기포의 발생으로 시편위치에 따라 열전달이 상이하다. 그러나 본 연구에서는 냉각과정에 미치는 질량효과의 영향이 작기 때문에 Newton의 냉각으로 가정하여 표면열전달계수 및 담금강열도를 구하였다. 따라서 에너지 방정식의 Lumped형인

$$-h \cdot s(\theta_s - \theta_\infty) = \rho \cdot v \cdot c \frac{d\theta}{dt} \quad (1)$$

식이 성립한다. 식 (1)에서 ρ , c , v 및 s 는 시편의 밀도, 비열, 체적 및 표면적이며 시편표면에서의 냉각시간에 따른 온도, 즉 각 냉각단계마다 열전달계수 h 를 구하였다. 담금강열도 H 는 Tamura 등이 제시한 $H = h/k$ 를 사용하였으며, h 는 표면열전달계수 [$W m^{-2} °C^{-1}$]이고, k 는 열전도계수 [$W m^{-1} °C^{-1}$]로서 일정하게 하였다.

2.2 유한요소법에 의한 모델해석

유한요소법에 의한 온도해석은 시편과 같은 크기의 모델을 설정하고 유한원주의 종단면에 대하여 다음과 같은 가정하에서 해석하였다.

- (1) 담금초기의 시편온도는 일정하다.
- (2) 담금과정 중 냉각제온도 및 물리적 성질은 변화하지 않는다.
- (3) 시편은 등방성체(isotropic material)이다.

이러한 가정하에서 지배방정식, 경계조건 및 초기조건은

$$c \cdot \rho \cdot \dot{\theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial \theta}{\partial z} \right), \quad t > 0 \quad (2)$$

$$k \frac{\partial \theta}{\partial r} = -h(\theta_s - \theta_\infty), \quad t > 0 \quad (3)$$

$$\theta = \theta_{in}, \quad t > 0 \quad (4)$$

로 표시되며 Galerkin 방법을 적용하여 이산화(discretization) 정리하면 다음과 같은 방정식이 얻어진다.

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

단, 여기서

$$[K] = \iiint_v [B]^T [D] [B] dv + h \iint_s r [N]^T [N] ds \quad (6)$$

$$[K_3] = \rho \cdot c \iiint_v r [\dot{N}]^T [N] dv \quad (7)$$

$$\{P\} = h \theta_\infty \iint_s r [N] ds \quad (8)$$

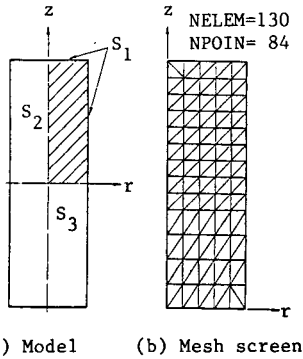


Fig. 1 Finite element model and mesh for temperature analysis

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

와 같이 표시되며 식 (8) 중의 표면열전달계수는 실험을 통하여 각 냉각단계마다 구한 값을 이용하였으며 식 (9)의 비정상항은 implicit법을 적용하여 최후 강성방정식

$$[\bar{K}]\{\theta\}_{t+\Delta t} = \{\bar{P}\}_{t+\Delta t} \quad (10)$$

을 얻을 수 있다.

$$[\bar{K}] = [K] + [K_s]/\Delta t \quad (11)$$

$$\{\bar{P}\}_{t+\Delta t} = \{P\}_t + [K_s]\{\theta_t\}/\Delta t \quad (12)$$

이상과 같이 표시되는 강성방정식에 초기조건을 이용하여 미소시간 증분에 따른 비정상 온도를 해석하였으며 시편의 요소분할 및 경계조건을 Fig. 1에 나타냈다.

3. 실험장치 및 실험방법

각종 담금제의 실측냉각곡선을 얻기 위하여 열처리유 냉각성능 시험방법에서 규정하고 있는 실험방법을 채택하였으며 Fig. 2에 실험장치의 개요도를 나타냈다. 시편(S)은 P.I.D. 방식의 전기로(F) 내에서 가열하며 자동온도조절기(C)를 이용하여 810+3°C로 유지하였다. 시편의 온도를 digital thermometer(D)로 확인한 후 전기로 밀뚜껑을 열고 시편을 강하하여 정지상태의 담금제(E)에 담금을 행하여 pen-type X-Y 레코더(M)를 이용하여 시편표면에서의 시간변화에 따른 온도변화를 기록하였다.

실험에 사용된 시편의 재질은 열전도도 및 전기전도도가 크고 냉각과정에서 조직의 변화가 일어나지 않으며 고온산화가 적은 순도 99.99%의 순은이

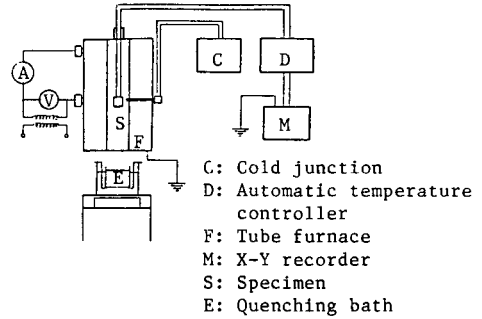


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

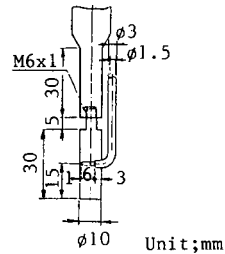


Fig. 3 Configuration of the specimen

며 Fig. 3에 시편의 형상과 치수를, Table 1에 시편의 물리적 성질을 나타내었다. 시편제작시 알루미늄, 은선 및 은관의 연결은 질산은 결정용 용융시켜 완전히 결합하고 은막대의 표면은 #600 샌드페이퍼로 미끄럽게 마무리 가공을 하였으며 특히 은관 내의 알루미늄선 절연에 주의하여 알루미늄선과 은선의단자에서 저항차가 0.8~1.5Ω 정도로 유지하도록 제작하였다.

열전대는 직경 0.6mm의 silver-alumel 열전대를 사용하였으며 담금제는 가열기(H)에 의하여 온도조절이 가능하도록 하였으며, 담금제는 1000ml로 일정하게 하고, 정지된 상태에서 투입시켰다.

실험의 반복성과 재현성을 확인하기 위하여 KS M 2172의 규정대로 D.O.P. 표준액(dioctyl ph-

Table 1 Physical properties of silver specimen

Purity	99.99 (%)
Density	10525 (kg/m ³)
Specific heat	234 (J/kg °C)
Thermal conductivity	425 (W/m °C)
Electrical resistivity	0.0163(μΩm)

Table 2 Standard and experimental values of D.O.P. solution

Contents		Standard values	Experimental values
Characteristic point	Electromotive force (mV) at 500°C	10.8	10.7
	Temperature (°C)	500±10	495
Cooling time (800~400°C)	Time (sec)	4.5±0.3	4.2

Coolants temperature : 80°C, Volume of D.O.P. : 25ml

thalate) 250ml를 80°C로 가열하여 냉각곡선을 측정하였을 때 특성온도가 500±10°C로 되고 800°C에서 400°C까지의 냉각시간은 4.5±0.3초 이내로 나타남을 확인하였다. Table 2는 표준액에서의 규정치와 실측치를 나타낸 것으로 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 4는 증류수의 온도변화에 따른 냉각곡선을 비교한 것으로서 증류수의 온도가 20°C, 40°C, 60°C, 80°C로 상승할수록 초기냉각단계 및 막비등단계는 길어지고 핵비등단계가 짧아지며 특성온도는 각각 600°C, 520°C, 400°C, 320°C 정도로 저하한다. 물인 경우의 담금제 냉각성능은 온도가 증가함에 따라 증기압이 상승하게 되므로 이로 인하여 특성온도는 저온부로 이동하고 막비등단계가 길어지기 때문이다. 일반적으로 절대온도로 표시한 특성온도의 역수는 증기압 대수에 비례하는 경향이 있다.

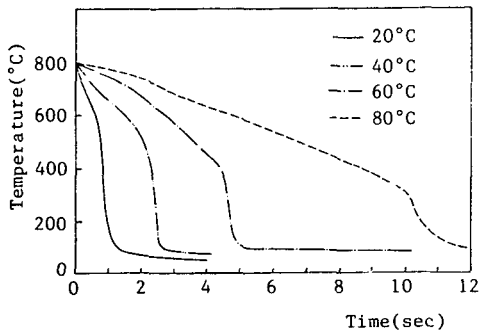


Fig. 4 Cooling curves during quenching from 800°C into distilled water of various temperature

Fig. 5는 담금제로서 NaCl 수용액의 농도를 변화시켰을 때의 냉각곡선을 도시한 것으로서 일반적으로 증류수보다 냉각이 빠르게 진행되는 양상을 나타낸다. 1% NaCl 수용액에서의 냉각곡선은 증류수에서의 냉각곡선과 비슷한 거동을 나타내지만 10% 수용액의 경우에는 막비등단계가 거의 나타나지 않고 초기온도강단계로부터 직접 핵비등단계로 진입하기 때문에 특성온도는 담금온도까지 상승한다. 그러나 수용액의 농도가 20%일 때는 10%때보다도 오히려 냉각이 느리게 진행되는데 이것은 수용액 결정의 석출여부 및 정도에 따른 것으로 사료된다.

Fig. 6은 NaCl 수용액의 농도변화에 따른 냉각속도를 각 냉각단계마다의 시편온도에 대하여 나타낸 그림이다. 1% 수용액에서는 초기냉각단계에서 낮은 냉각속도를 나타내고, 이후 냉각속도가 점차 증가하여 핵비등단계에서 최대냉각속도를 나타내며 냉각이 진행됨에 따라 냉각속도가 떨어지고 있다. 그러나 10%, 20% 수용액에서는 막비등단계가 거의 나타나지 않으므로, 초기냉각단계에서 1% 수용

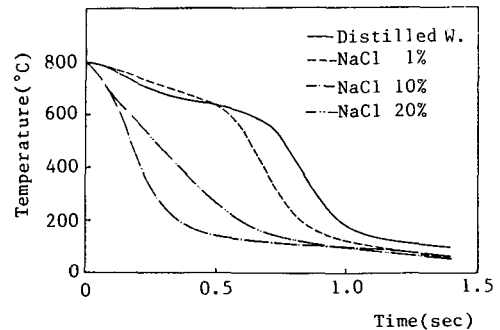


Fig. 5 Cooling curves during quenching from 800°C into solutions of NaCl at 20°C

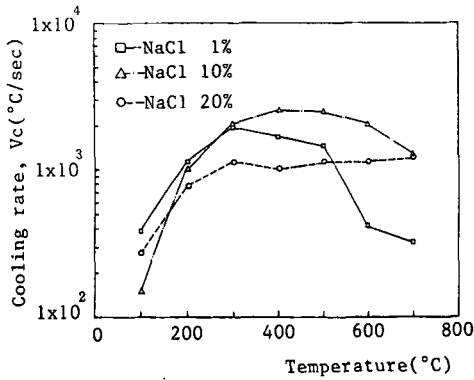


Fig. 6 Cooling rate curves during quenching from 800°C into solutions of NaCl at 20°C

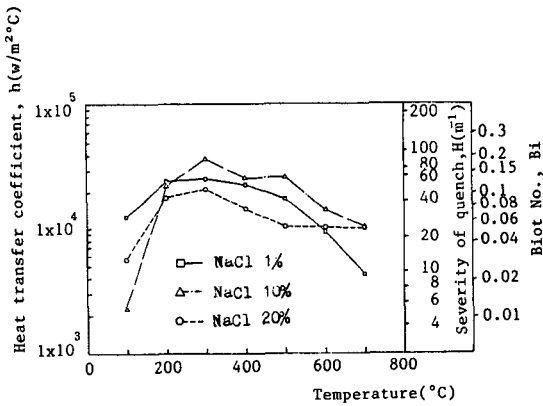


Fig. 7 Coolingability (h , H , B_i) curves during quenching from 800°C into solutions of NaCl at 20°C

액보다 높은 냉각속도를 나타내고 있다.

Fig. 7은 NaCl 수용액의 농도변화에 따른 냉각 성능 파라미터(h , H , B_i)들을 표시한 것으로 10% NaCl 수용액의 h 는 약 35,200(W/m²°C), H 는 83(m⁻¹), B_i 는 0.18 정도로 나타나고 있다.

Fig. 8은 Na₂CO₃ 수용액의 농도변화에 의한 냉각곡선을 도시한 것으로서 1%, 20%, 10%의 순서로 냉각이 빠르게 진행되고 있다. Na₂CO₃ 수용액이 비등단계 후반의 냉각이 매우 느리게 나타나며 NaCl과 유사한 경향을 나타내는 이유는 비등점의 상승에 관계가 있으며 특히 시편표면에 석출하는 Na₂CO₃의 결정층이 대류열전달을 방해하고 있기 때문이다.

Fig. 9는 Na₂CO₃ 수용액의 농도변화에 따른 냉각속도를 각 냉각단계마다 시편표면온도에 대하여

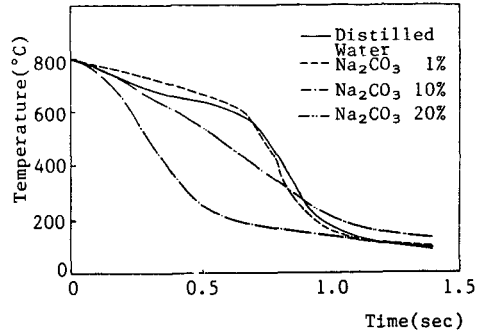


Fig. 8 Cooling curves during quenching from 800°C into solutions of Na₂CO₃ at 20°C

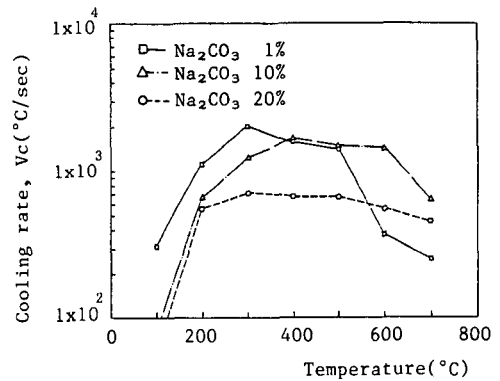


Fig. 9 Cooling rate curves during quenching 800°C into solutions of Na₂CO₃ at 20°C

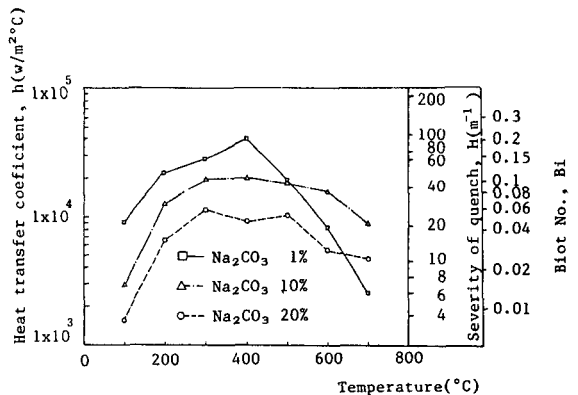


Fig. 10 Coolingability (h , H , B_i) curves during quenching from 800°C into solutions of Na₂CO₃ at 20°C

도시한 것으로서 1% 수용액에서는 마르텐사이트 변태영역(300~200°C)에서 최대의 냉각속도를, 10% 및 20%의 수용액에서는 펄라이트 변태영역(700~500°C)에서 빠른 냉각속도를 나타낸다.

Fig. 10은 Na_2CO_3 수용액의 농도변화에 대한 여러 냉각성능 파라미터들을 나타낸 것으로 1% 수용액의 경우 400~200°C 온도구간에서 최대치를 나타낸다. 또한 10%와 20%의 수용액에서는 초기냉각 단계에서 냉각이 빠르게 진행되어 높은 냉각성능을 보여주고 있으며 점차 저온부로 이동함에 따라 냉각성능 값들도 급격히 저하되고 있음을 보여준다.

Fig. 11은 NaOH 수용액의 농도변화에 따른 냉각곡선들을 증류수에서의 냉각곡선들과 비교한 그림으로서 NaCl, Na_2CO_3 수용액의 경우와는 달리 1%, 10%, 20%로 농도의 증가에 따라 냉각은 더욱 빠르게 진생되며 20% 수용액에서는 냉각제의 특성온도가 거의 담금온도까지 증가하는 양상을 나타내고 있다.

Fig. 12는 NaOH 수용액의 농도변화에 따른 냉각속도곡선들을 도시한 것으로 막비등단계가 매우 짧게 나타나는 10% 및 20% 수용액이 1% 수용액보다 빠른 냉각속도를 보여주고 있다.

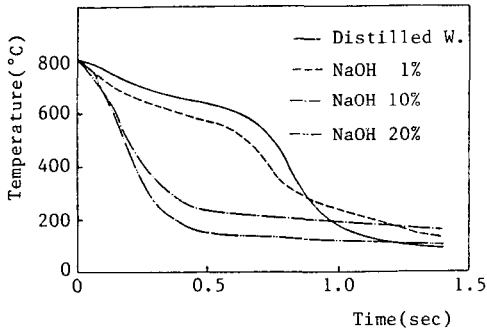


Fig. 11 Cooling curves during quenching from 800°C into solutions of NaOH at 20°C

Fig. 13은 NaOH 수용액의 농도변화에 따른 냉각성능 파라미터들을 각 냉각단계마다 시편표면온도에 대하여 나타낸 것으로 1% 수용액이 냉각초기 단계에서 비교적 낮은 냉각성능을 나타내고 있으며

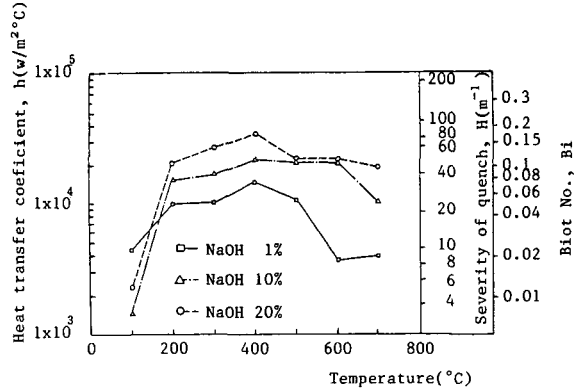


Fig. 13 Coolingability (h, H, Bi) curves during quenching from 800°C into solutions of NaOH at 20°C

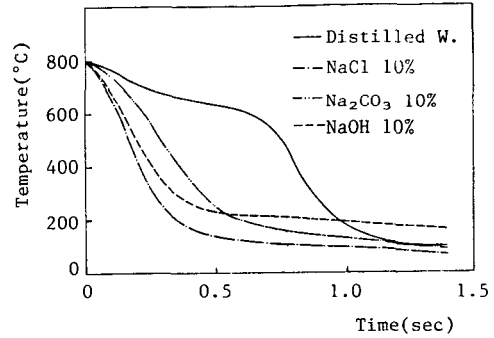


Fig. 14 Cooling curves during quenching from 800°C NaCl, Na_2CO_3 and NaOH at 20°C

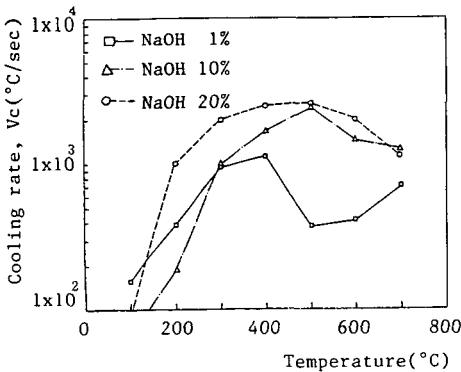


Fig. 12 Cooling rate curves during quenching from 800°C into solutions of NaOH at 20°C

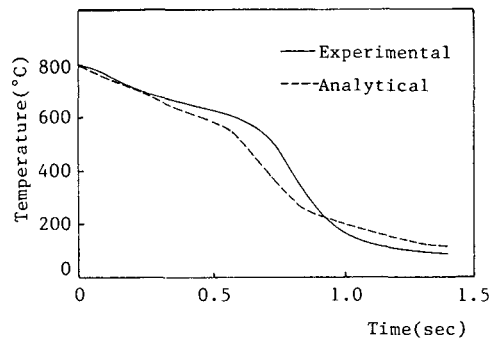


Fig. 15 Comparison of experimental and analytical cooling curves by F.E.M. (Distilled water, 20°C)

Table 3 Coolingability parameters of various quenchants

Quenchants			V_c (°C/sec)		h (W/m ² °C)		H (m ⁻¹)		Pearlite stage		Martensite stage	
Spec.	Temp. (°C)	(%)	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	V_c	H	V_c	H
Distilled water	20		1667	313	26804	3488	63.07	8.21	400	8.21	1667	53.44
NaCl	20	1	2000	323	25916	3298	60.98	7.76	417	21.77	2000	60.98
NaCl	20	10	2500	152	36842	2274	86.69	5.35	2000	33.22	2000	86.69
NaCl	20	20	1250	270	21124	5687	49.70	13.38	1111	23.99	1111	49.70
Na ₂ CO ₃	20	1	2000	256	39505	2541	92.95	5.98	370	19.38	2000	64.99
Na ₂ CO ₃	20	10	1667	77	19953	2969	46.95	6.99	1429	43.12	1250	45.90
Na ₂ CO ₃	20	20	714	52	15099	1559	35.53	3.67	556	12.90	714	26.72
NaOH	20	1	1111	156	14583	3640	34.31	8.56	417	8.56	1000	23.65
NaOH	20	10	2500	32	21527	1484	50.65	3.49	1429	48.17	1000	39.91
NaOH	20	20	2500	89	34720	2309	81.70	5.43	2000	51.38	2000	64.31

냉각이 가장 활발한 핵비등단계에서 10% 및 20%의 수용액들은 유사한 경향을 보여주고 있다.

Fig. 14는 10% 수용액들의 냉각곡선을 증류수에서의 냉각곡선과 비교한 그림으로서 NaCl, Na₂CO₃, NaOH 등과 같은 비휘발성 용질을 첨가하였을 때 증류수보다는 빠른 냉각과정을 보여주고 있으며 동일온도 및 동일농도의 조건에서 Na₂CO₃, NaOH, NaCl의 순서로 냉각이 점차 빠르게 진행된다.

Fig. 15는 증류수 20°C에 대하여 실험으로부터 구한 냉각곡선과 유한요소해석을 통하여 얻은 냉각곡선을 비교한 그림으로서 초기냉각단계인 막비등단계와 특성온도가 잘 일치하고 있으나 천이비등단계 및 핵비등진입단계에서 약 0.1초의 차이를 보여주고 있다. 그러나 이 차이는 천이비등단계의 불안정한 냉각과정을 고려하면 무시할 수 있다고 사료되므로 본 연구에서 채택한 lumped 시스템에 의한 가정은 열전달률의 결정에 타당하다고 생각된다. 또한 3차원 축대칭 유한원주의 비정상온도분포에 대한 유한요소법의 해석적 방법은 각 냉각단계에서의 열전달계수가 보일되면 보다 정확한 담금액의 냉각성능 추정이 이루어질 수 있을 것이다.

Table 3은 증류수의 온도와 증류수를 주성분으로 한 NaCl, NaOH 및 Na₂CO₃ 수용액 농도변화

에 대한 냉각성능 파라미터들의 최대, 최소값 및 펄라이트 변태구역(700~500°C)과 마르텐사이트 변태구역(300~200°C)에서의 냉각속도, 담금강열도를 정리한 것이다.

5. 결 론

본 연구에서 행한 담금제의 온도와 비휘발성 수용액의 농도변화에 따른 냉각곡선의 측정 및 여러 냉각성능 파라미터들에 대한 비교, 분석의 결론은 다음과 같다.

(1) 증류수의 초기온도를 20°C에서 80°C까지 20°C씩 변화시켰을 때 담금제의 온도가 높아질수록 초기냉각단계인 막비등단계는 길어지고 핵비등단계가 짧아지며 특성온도는 각각 600°C, 520°C, 400°C, 320°C 정도로 현저히 저온부로 이동하며 담금제 초기온도 1°C 상승할 때 특성온도는 약 4.7°C 저하한다.

(2) 증류수를 주성분으로 한 NaCl, Na₂CO₃, NaOH 수용액은 증류수보다 열전달률, 담금강열도 등의 냉각성능이 전반적으로 양호하게 나타났다. NaCl, Na₂CO₃ 수용액에서는 냉각성능이 1%, 20%, 10% 농도 순서로 좋아지고 있으나, NaOH 수용액은 농도증가와 더불어 냉각성능이 더욱 좋아

진다. 이상과 같이 비휘발성 용질인 NaCl, Na₂CO₃ 및 NaOH를 첨가할 경우 농도에 따라서 약간의 차이는 있지만 결정석출물 및 증기압의 영향으로 특성온도가 상승한다.

(3) 동일온도 및 동일농도의 수용액에서는 물농도와 관계없이 Na₂CO₃, NaOH, NaCl의 순서로 냉각이 빠르게 진행된다. 또한 냉각성능이 우수한 NaCl, Na₂CO₃ 10% 수용액과 NaOH 20% 수용액에서는 강의 임계구역인 펄라이트 변태구역(700~500°C)에서 빠른 냉각속도를 보이고, 마르텐사이트 변태구역(300~200°C)에서는 냉각이 느리게 이루어지므로 증류수와 비교할 때 담금능력 및 경화능력이 우수할 것으로 기대된다.

(4) 증류수에서의 실측냉각곡선과 유한요소법에 의한 해석적 냉각곡선이 오차범위 7% 이내로 비교적 일치하고 있다. 그러므로 실측냉각곡선에서 Newton 냉각으로 가정하여 구한 냉각성능 파라미터들이 담금제의 냉각성능 평가에 타당하다고 볼 수 있다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 연구비에 의한 결과이며 이에 사의를 표하는 바이다.

참 고 문 헌

- (1) French, H.J., 1930, Transaction of the ASME Vol. 17, p. 646, 798.
- (2) Grossmann, M.A., 1952, Element of Hardenability, ASME, p. 74.
- (3) Thelling, K.E., 1983, ASM New Aspects on the Appraisal of the Cooling Process during Hardening Steel, Vol. 3, No. 2, pp. 100~107.
- (4) Moroe, R.W. etc., 1983, Evaluating Quenchants and Facilities for Hardening Steel, ASM, Vol. 3, No. 2, pp. 83~89.
- (5) Tagaya, Tamura, 1951, 焼入冷却劑の研究(第4報) 水及び水の主成分とする液體の冷却能, 日本金屬學會誌, 第16卷, 第2號, pp. 107~111.
- (6) Tamura, I., 1980, 差分方程式による冷却曲線の導出, 鐵と鋼, S317.
- (7) Peter, W., Arch. Eisenhuttenwes., 20 (1949) Heft 7/8, s. 263.
- (8) 민수홍 등, 1983, “조미니 시험에서 냉각제온도 및 수류밀도가 냉각성능에 미치는 영향”, 대한기계학회 추계학술대회 초록집, pp. 73~83.
- (9) 민수홍 등, 1986, “담금액의 냉각성능 평가에 관한 연구”, 대한기계학회 추계학술대회 초록집, pp. 422~426.
- (10) 민수홍 등, 1985, “담금액 냉각성능 시험방법의 평가”, 인하대학교 산업과학기술연구소논문집 제13집, pp. 23~30.
- (11) KS M 2172, 열처리유 냉각성능 시험방법.
- (12) Welty, R., 1978, “Engineering Heat Transfer”, John Wiley and Sons, pp. 114~143.
- (13) Ozisik, M.O., 1980, “Heat Conduction”, John and Sons, pp. 612~649.
- (14) Hinton, E. and Owen, D.R.J., 1977, “An Introduction to Finite Element Computation”, Pineridge Press Ltd., pp. 203~241.
- (15) Hinton, E. and Owen, D.R.J., 1977, “Finite Element Programming”, Academic Press pp. 96~122.