

〈論 文〉

고온 강재의 담금질 열전달에 관한 연구

제1보 : 과냉과도 비등열전달과 냉각곡선

윤석훈* · 홍영표** · 김경근*** · 김용모****

(1992년 10월 5일 접수)

A Study on the Heat Transfer of the High Temperature Metals in Quenching

1st Report; Subcooled Transient Boiling Heat Transfer and Cooling Curves

Suck-Hun Yoon, Yeong-Pyo Hong, Kyung-Kun Kim and Yong-Mo Kim

Key Words : Quenching(담금질), Subcooled Transient Boiling Curve(과냉과도 비등곡선), Latent Heat of Phase Transformation(상변태열), Immersion Cooling Method(침지냉각법), Cooling Curve(냉각곡선), Cooling Rate(냉각속도) Inverse Heat Conduction Problem(열전도역문제)

Abstract

The quenching of steels by water is one of the important problems in the applications of heat treatment, but the fundamental researches by way of theoretical approaches have not been satisfactorily improved yet. This study aimed at measuring the exact subcooled transient boiling curve for cylindrical specimens and at conducting the analytical researches into the prediction of cooling curves, including the latent heat of phase transformation of steel. Experiments of quenching were made with cylindrical specimens of carbon steel S45C of diameters from 12 to 30 mm and with Cu specimens of 12 mm diameter respectively. The internal temperature of specimens during the quenching process was measured by C-A sheathed thermocouple. The heat fluxes were numerically calculated by the numerical method of inverse heat conduction problem, using the measured inner temperature of specimen as a boundary condition. In case of $\Delta T_{sub}=80$ K, q_s is as follows. $q_s=2.02 \times 10^5 \Delta T_{set}^{0.55}$: $\Delta T_{sat} \leq 500$ K. And the numerical analysis of unsteady heat conduction during the quenching process was made and the cooling curves were calculated by TDMA method.

기 호 설 명

A	: 오스테나이트	A_s	: A_s 변태점 (K)
A_1	: A_1 변태점 (K)	Ar'	: 제2단계 변태
		Ar''	: 제1단계 변태
		c	: 비열 (J/kgK)
		CHF	: 한계열유속 (W/m^2)
		D	: 직경 (mm)
		F	: 페라이트

*정회원, 한국해양대학교 선박운항학과
 **정회원, 동의대학교 기계설계학과
 ***정회원, 한국해양대학교 기관공학과
 ****정회원, 한국열유체산업(주) 기술연구소

- k : 열전도계수 (W/m^2)
- M : 마르텐사이트
- MHF : 극소열유속 (W/m^2)
- M_s : 마르텐사이트 생성 시작점 (K)
- P : 퍼얼라이트
- q : 열유속 (W/m^2)
- q_s : 표면열유속 (W/m^2)
- R : 반경 (m)
- r : 임의의 반경 (m)
- r/R : 반경비
- T : 온도 (K)
- T_h : 최고 가열온도 (K)
- T_m : 측정온도 (K)
- T_{MHF} : 극소열유속점 온도 (K)
- T_q : 켈칭점 온도 (K)
- ΔT_{sat} : 과열도 (K)
- ΔT_{sub} : 과냉도 (전열면온도와 액체의 포화온도와의 차이) (K)
- t : 시각 (sec)
- Δt : 시간증분 (sec)
- W : 체적 (m^3)
- ρ : 밀도 (kg/m^3)

첨자

- i : i 절점
- 1 : 시각 $t + \Delta t$
- 0 : 시각 t

1. 서 론

물을 이용한 강재의 강제냉각은 제강공정에서 없어서는 안될 중요한 과정으로, 이에 관한 연구는 제강공정 자체를 위해서 뿐만 아니라 성에너지 차원에서도 매우 중요한 연구분야라고 할 수 있다. 제강공정에서 가장 중요한 온도 범위는 강재의 표면온도가 $200^{\circ}C \sim 1300^{\circ}C$ 로서, 이 중 $300^{\circ}C \sim 800^{\circ}C$ 정도의 범위는 전열공학적으로 볼 때 막비등, 천이비등, 핵비등의 비등현상이 순차적으로 일어나는 영역으로 금속면과 냉각액 사이에서 가장 복잡한 전열현상이 생기는 범위이다. 냉각과정에서의 열적 현상에 관한 연구는 강재 내부의 비정상 열전도에 관한 연구와 강재로부터 냉각액으로의 과도비등 열 전달에 관한 연구로 크게 나눌 수 있다. 강재 내부

의 비정상 열전도에 관한 연구는 현장에서의 응용을 위하여 주로 금속공학자들에 의하여 이루어져 왔으며, (1~4) 금속표면과 냉각액 사이의 과도비등열 전달에 관한 연구는 전열공학자들에 의하여 많이 행하여져 왔으나, (5~8) 실제 열처리현장에서 접하게 되는 과냉도가 큰 냉각액과 고온 표면사이의 과냉과도 비등열전달에 관한 연구는 그렇게 활발하지 못하였다.

또한 강재의 냉각중에는 금속조직의 상변태가 일어나는데 이것은 냉각속도가 빠를수록 지연되며 상변태열도 냉각속도에 따라 그 발생 형태가 달라진다. 이러한 상변태열은 냉각곡선의 형상에 큰 영향을 미치므로 상변태열의 발생 형태에 관한 정량적인 연구는 담금질 효과를 예측하고 그 효과를 향상 시키는데 있어서 매우 중요한 사항이다.

따라서 본 연구에서는 금속 열처리를 위한 고온면의 막비등 급냉각에 관한 1차적 연구로서 과냉과도 비등곡선의 정확한 형상과 냉각제의 냉각조건이 강재의 과냉과도 비등열전달에 미치는 영향, A_1 변태점 부근의 A_1 냉각속도와 상변태열량과의 관계, 그리고 상변태열이 냉각곡선에 미치는 영향 등을 규명하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치의 개요

본 실험장치는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 시편을 가열하기 위한 전기로①, 전기로내의 온도와 시편의 가열시간 및 유지시간 등을 조절할 수 있는 PID 온도 조절기②, 발열체에 인가되는 전압을 측정하기 위한 변압기③, 시편이 급격하게 산화되는

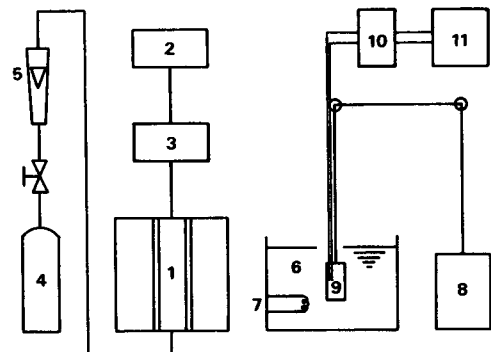


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

것을 방지하기 위하여 전기로내에 공급되는 불활성 가스인 알곤가스의 용기④, 알곤가스의 양을 측정할 수 있는 부자식 유량계⑤, 가열된 시편을 냉각하기 위한 냉각탱크⑥과 냉각수의 온도를 조절하기 위한 전기히터⑦ 등으로 구성되어 있으며, 냉각액으로는 용존가스가 비등에 미치는 영향을 감소시키기 위하여 일반 수도물을 끓여서 사용하였다.

또한 가열된 시편은 전기 모터에 의하여 구동되는 시편 이송장치⑧을 이용하여 냉각탱크에 신속하게 투입할 수 있도록 하였다. 냉각과정중의 시편 온도는 C-A 열전대를 시편에 삽입하여 측정하였으며 기준접점(ice junction)⑩을 거쳐 온도 기록계로 기록하였다.

Fig. 2는 저항 발열체에 의한 시편 가열용 전기로의 구조를 나타낸 그림으로서 ①은 저항 발열체(직경 54 mm, 길이 450 mm, 출력 5.4 kW), ②는

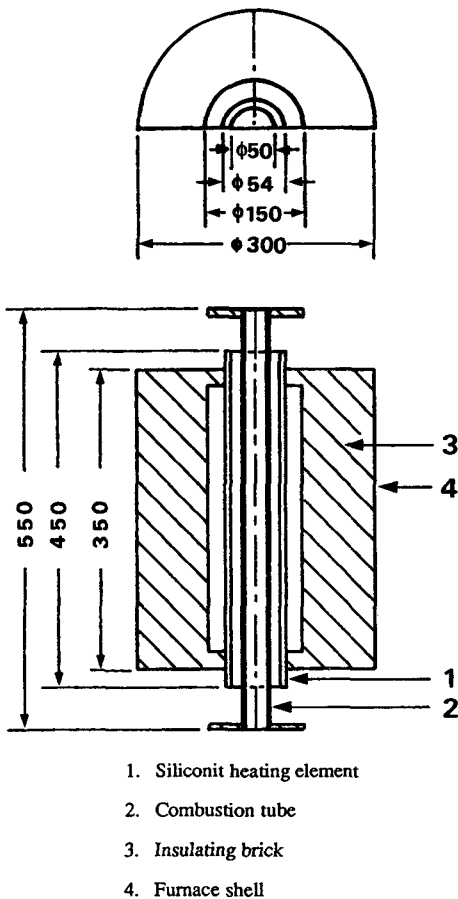


Fig. 2 Electric eurnace

발열체를 보호하고 로내 분위기를 형성하기 위한 연소관(Al_2O_3 60%, 외경 50 mm, 길이 700 mm), ③은 단열벽돌이며 ④는 두께가 2 mm인 철판으로 제작한 로의 외통이다.

2.2 실험용 시편

(1) 동 시편

비등곡선을 구하기 위하여 실험에 사용된 시편은 열전도성이 크고 내산화성 재료인 Cu 봉을 사용하였으며 시편의 크기는 직경 12 mm이고 길이가 100 mm이다. 실제로 열처리에 사용되는 강재를 이용하여 실험을 하는 것이 가장 바람직하지만 일반 강재의 경우는 산화성이 강하여 표면상태의 일관성을 유지하기 매우 어렵다. 또한 열전도계수가 작기 때문에 과냉도가 큰 냉각액으로 냉각하는 경우에는 표면온도가 급격히 저하하므로 역문제 수치해법에 의한 계산시 시간증분을 매우 작게 하여야 하나 이렇게 하였을 경우 무차원 시간간격이 너무 작아져서 계산의 오차가 생길 염려가 있다. 그러므로 본 연구에서는 S45C 탄소강에 의한 비등곡선의 계산과 병행하여 Cu봉을 실험재료로 택하여 정확한 비등곡선을 구하기 위한 열적실험을 행하였다. Fig. 3은 시편의 각부 치수 및 열전대의 설치위치를 나타낸 그림이다.

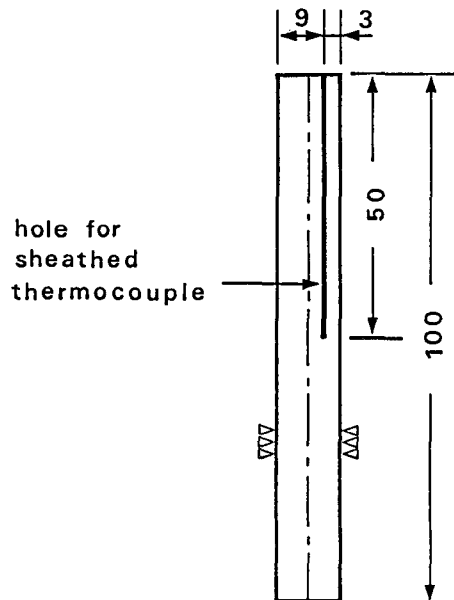


Fig. 3 Dimensions of Cu specimen

(2) 탄소강 시편

강재의 담금질 실험에는 S45C 탄소강으로 제작한 직경이 12, 16, 20, 25, 30 mm이고 길이가 모두 100 mm인 5종류의 시편을 사용하였다.

2.3 실험범위 및 방법

(1) 동 시편 실험

냉각과정중의 시편 온도를 측정하기 위하여 Fig. 3에서 보는 바와 같이 시편의 길이 방향으로 직경 1.1 mm, 깊이 50 mm의 구멍을 뚫어 C-A 열전대를 설치하였다. 열전대를 시편의 길이방향으로 설치한 것은 길이방향으로의 온도구배가 반경방향의 온도구배에 비하여 매우 작으므로 온도의 측정오차를 줄이기 위함이다. 또한 시편의 직경에 비하여 길이를 매우 길게 한 것은 길이방향으로의 열의 흐름은 반경방향으로의 열의 흐름에 비하여 매우 작으므로 길이방향으로의 열의 흐름을 무시하고 반경방향 1차원 수치해석을 하기 위함이다.⁽⁹⁾

본 열전대는 직경 50 μm 의 C-A 소선으로 구성되어 외경 1 mm의 스테인레스강 튜브에 내장되어 있으며, 튜브 선단이 열전대 소선의 끝 접점과 접촉한 상태(grounded junction type)로 제작되어 있다. 본 열전대는 표준온도계에 의하여 검정되었으며, 열전도 역문제 수치계산에서 사용된 샘플링 시간간격은 본 연구에서 사용된 열전대의 시정수를 고려하여⁽⁹⁾ 충분한 값을 택하였다.

시편에 가공된 열전대 설치공과 열전대 선단의 접합은 접착을 확실하게 하여 정확한 온도를 측정하기 위하여 Cu 브레이징(brazing) 재료로 접합하였으며, 구멍과 열전대 사이의 틈은 고온에 견딜 수 있는 세라믹 접착재로 완전하게 밀봉시켰다.

이와같이 열전대를 설치한 시편을 전기로내에 넣어 850°C까지 가열한 후, 시편 이송장치를 이용하여 냉각탱크에 투입, 시편 표면하 3 mm 위치에서의 과도적 온도분포를 측정하였으며 시편의 투입전과 투입후에 냉각액 온도의 차이는 약 4°C 정도였으나 수치계산에서는 동일한 온도로 간주하여 계산을 하였다. 이렇게 하여 얻어진 데이터를 경계조건으로 하여 제3장의 TDMA방법에 의하여 시편의 표면온도와 표면열유속을 구하였으며, 이 계산결과로부터 과냉상태와 포화상태에서의 비등곡선을 구하였다.

(2) 탄소강 시편 실험

실험에 사용된 시편의 재료는 S45C 탄소강이며

열전대는 직경 30 mm의 시편에는 $r=0, 5, 12$ mm의 위치에서 축방향으로 3개를, 그 이외의 시편에는 시편의 중심부와 시편 표면하 3 mm의 위치에 2개를 설치하였으며 열전대의 설치방법은 전술한 동 시편에서 사용한 방법과 같다.

실험방법은 전기로내에서 시편을 820°C까지 가열시킨 다음 시편의 직경에 따라 일정시간을 유지시켜 오스테나이트화가 충분히 되도록^(10,11)한 후, 시편 이송장치로 시편을 냉각탱크로 이송하여 시편의 최상부가 수면하 100 mm에 위치하도록 급속히 냉각탱크에 투입하여 각 점의 온도를 측정하였다.

3. 수치계산

본 연구에서는 시편 중심으로부터 일정 거리 떨어진 위치에서 측정한 온도의 시간적 변화를 경계조건으로 하여 시편 내부 임의점의 온도와 시편 표면의 온도, 표면열유속 및 열전달계수를 구하기 위해 Patankar의 TDMA(tridiagonal matrix algorithm)방법⁽¹²⁾을 이용하여 수치계산을 행하였다. 본 실험과 같은 고온면의 냉각실험에 있어서 축방향의 온도구배 및 전열의 단면적이 반경방향의 값들에 비하여 매우 작은 경우에는 축방향의 열의 흐름은 반경방향의 열의 흐름에 비하여 무시해도 계산결과에 큰 영향을 미치지 않는다는 연구결과⁽¹³⁾를 참고하여 원통좌표에서의 반경방향 1차원 수치계산을 하였다.

(1) 시편의 중심부에서부터 열전대 설치위치까지의 수치계산

발열하지 않는 경우 원통좌표계의 반경방향 1차원 비정상 열전도 방정식은 다음과 같다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (1)$$

본 실험에서는 시편의 중심을 기준으로 하여 온도분포가 대칭을 이루므로 중심부는 단열이라는 조건과 임의의 시각 t 에서 실측한 측정점($r=B$)의 온도인 $T_m(t)$ 을 경계조건으로 하였다.

$$r=0 : \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (2)$$

$$r=B : T(b,t) = T_m(t) \quad (3)$$

그리고 초기조건으로는 다음과 같이 각 절점이 정상상태의 해에 해당하는 온도분포를 갖는다고 가정한다.

$$T(i,0) = T_{i0} \quad (4)$$

수치계산 방법에 관한 연구^(14,15)에 의하면 식(3)과 같이 균일한 온도분포를 가정하여도 초기조건 문제는 $t=0$ 으로부터 몇 시간단계까지의 계산에서 영향을 미칠 뿐 그 이후에는 아무런 영향이 없음이 알려져 있다.

식(1)을 제어체적법(control volume method)에 의한 이산화방정식(discretization equation)을 얻기 위하여 음함수법을 이용하여 중적분을 행하였다.

Fig. 4는 시편의 중심으로부터 열전대가 설치된 위치($i=B$)까지의 절점을 표시한 그림이다. 이 그림에서 i 번째 절점 주위에 양쪽으로 등간격을 취하여 폭이 Δr 인 제어체적을 택한다. 이렇게 하면 중심($i=1$)과 열전대가 설치되어 있는 위치($i=B$)의 절점에서의 제어체적은 이 그림에서 보는 바와 같이 다른 절점의 제어체적의 절반이 된다.

식(1)의 우변을 Fig. 4의 i 절점 주위의 Δr 구간(w 에서 e 까지)과 임의의 시각 t 에서 $t+\Delta t$ 까지에 대하여 적분하면 다음 식이 된다.

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_w^e r \frac{k_i}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) dr dt = k_i \int_t^{t+\Delta t} \left[\frac{r_e (T_{i+1} - T_i)}{\delta r_i} - \frac{r_w (T_i - T_{i-1})}{\delta r_{i-1}} \right] dt \quad (5)$$

식(5)를 음함수법으로 적분하여 정리하면 다음과 같은 반경방향 1차원 원통좌표에서의 비정상 열전도 이산화 방정식을 얻을 수 있다.

$$\left(\frac{\rho c_i \Delta W_i}{\Delta t} + \frac{k_i r_{i-1/2}}{\delta r_{i-1}} + \frac{k_i r_{i+1/2}}{\delta r_i} \right) T_i^1 = \frac{k_i r_{i+1/2}}{\delta r_i} T_{i+1}^1 + \frac{k_i r_{i-1/2}}{\delta r_{i-1}} T_{i-1}^1 + \frac{\rho c_i \Delta W_i}{\Delta t} T_{i0} \quad (6)$$

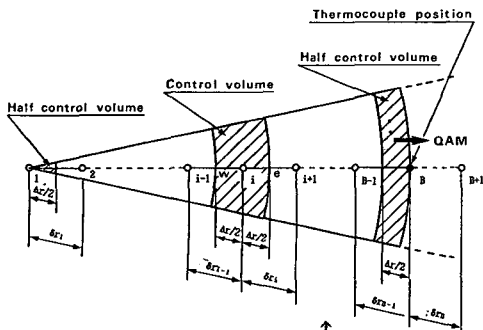


Fig. 4 Nodal points and control volume

이산화 방정식의 일반형은 다음과 같다.

$$a_i T_{i1} = b_i T_{i+1} + c_i T_{i-1} + d_i \quad (7)$$

TDMA방법에 의하여

$$T_{i1} = P_i T_{i-1} + Q_i \quad (8)$$

따라서 위 식을 바꾸어 쓰면 다음과 같다.

$$T_{i+1} = P_{i+1} T_{i1} + Q_{i+1} \quad (9)$$

식(9)를 식(7)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$T_{i1} = \frac{c_i}{a_i - b_i P_{i+1}} T_{i-1} + \frac{d_i + b_i Q_{i+1}}{a_i - b_i P_{i+1}} \quad (10)$$

따라서 식(10)의 계수 P_i, Q_i 는 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$P_i = \frac{c_i}{a_i - b_i P_{i+1}}, \quad Q_i = \frac{d_i + b_i Q_{i+1}}{a_i - b_i P_{i+1}} \quad (11)$$

(2) 시편 내부의 열전대 설치위치에서 외표면까지의 수치계산

본 계산의 경계조건으로는 열전대가 설치되어 있는 절점($i=1$)의 실측온도 $T_m(t)$ 와 표면열유속 q_s 를 택하였다.

$$i=1 : T_{(1,t)} = T_m(T) \quad (12)$$

$$q_s = 0.0 \quad (13)$$

또한 초기조건으로는 전절에서와 같이 각 절점이 정상상태에 해당하는 온도분포를 갖는다고 가정한다. 또한 $\Delta r = 0.5 \text{ mm}$, $\Delta T = 0.1 \text{ sec}$ 을 기본으로 하여 계산을 하였으며 시편의 직경과 냉각속도의 크기에 따라서 약간의 증감이 있었다.

$$T_{(i,0)} = T_{i0} \quad (14)$$

일반적으로 열전도계수와 비열은 온도가 변화함에 따라 매우 다른 값을 갖게 되므로 온도차이가 매우 큰 경우의 계산에서는 해당온도에 대응한 열전도계수와 비열을 택하여 계산하여야 하므로 본 연구에서는 참고문헌^(16~19)에 나와 있는 Cu와 S45C 탄소강의 열전도계수와 비열을 최소자승법으로 처리하여 다음 식과 같은 온도의 함수식으로 만들어 계산에 사용하였으며, 밀도는 온도에 따라 그 값이 크게 변하지 않으므로 일정치를 택하였다.

계산에 사용된 종류별 시편의 물성치는 다음과 같다.

(1) Cu 시편의 물성치

$$k = 427.16 - 0.07(T + 273) \quad (15)$$

$$\rho = 8830 \quad (16)$$

$$c = 329.3 + 0.143(T + 273) \quad (17)$$

(2) S45C 탄소강 시편의 물성치

$$k = 41.0 - 0.016(T + 273) \quad (18)$$

$$\rho = 7830 \quad (19)$$

$$c = 450.0 + 0.037(T + 273) \quad (20)$$

4. 실험결과 및 고찰

4.1 비등곡선

(1) 포화과도 비등곡선

담금질 냉각은 과냉상태에서 이루어지므로 포화 비등열전달에 관한 자료는 직접적으로 필요하지 않지만, 본 실험에서 Cu 시편을 이용하여 구한 과도 비등곡선을 유사한 실험조건하에서 행하여진 종래의 연구결과들과 비교 검토하여 본 실험의 타당성 여부를 확인하였다.

Fig. 5는 직경이 12 mm이고 길이가 100 mm인 Cu 시편을 이용하여 포화과도 비등곡선을 구한 본 실험결과와 Bergles 등⁽²⁰⁾이 행한 수평원주에 대한 막비등 열전달의 실험결과, Nisiho 등⁽²¹⁾이 수평원주를 이용하여 행한 과도 핵비등의 실험결과, Inada 등⁽²²⁾이 수행한 정상상태의 핵비등 실험결

과, Tajima⁽¹⁶⁾가 행한 포화비등 실험결과를 나타낸 그림이다. 실선으로 표시된 것은 본 실험결과로서 극소열유속(minimum heat flux, MHF)은 Bergles의 실험결과와 Inada의 실험결과보다 약간 큰 값을 가지며 MHF점 온도는 이들의 중간 값을 갖는다. 또한 MHF점 이후인 막비등영역에서의 곡선기울기는 본 실험결과가 Bergles의 실험결과 및 Inada의 실험결과와 매우 유사하다. 핵비등 영역에서는 본 실험의 한계열유속(critical heat flux, CHF)이 Inada의 실험결과보다 작게 나타나고 있으나 Bergles의 실험결과와는 유사하며, 핵비등곡선의 기울기는 본 실험에서 구한 비등곡선 기울기가 다른 연구결과들보다 완만한 경향을 나타내고 있다. 또한 본 연구에서 구한 비등곡선이 전체적으로 다른 연구결과들에 비하여 고과열도측으로 약간 치우쳐 있다.

(2) 과냉과도 비등곡선

Fig. 6은 냉각액의 과냉도에 따른 과냉과도 비등곡선을 나타내고 있다. 본 그림에서는 과냉도가 커질수록 막비등-천이비등 영역이 급격히 축소되며 $\Delta T_{sub} = 60K$ 이상에서는 막비등현상이 거의 발생하지 않는다. 따라서 과냉도가 커질수록 핵비등영역이 고과열도측으로 확대되고 있으며, $\Delta T_{sub} = 80K$

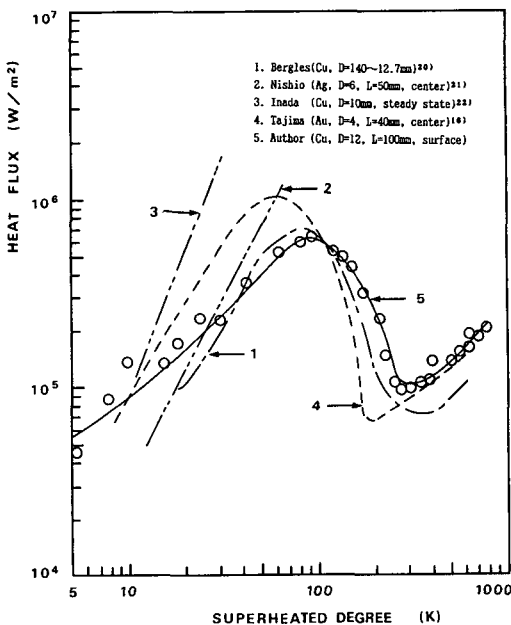


Fig. 5 Saturated transient pool boiling curves

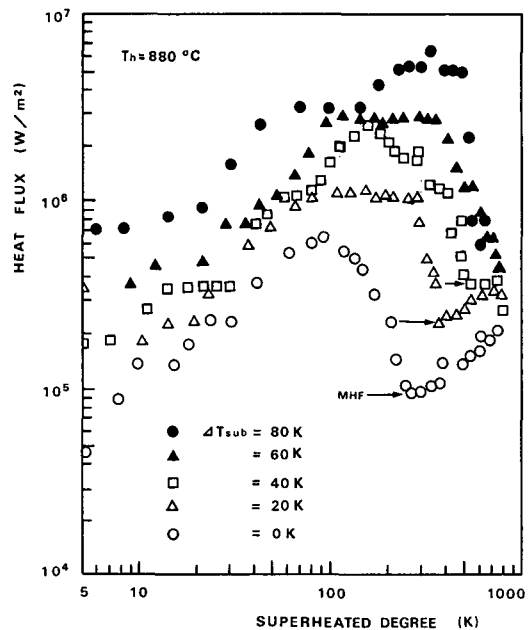


Fig. 6 Transient pool boiling curves under the various subcooling

의 경우에는 $\Delta T_{sat}=500K$ 에서 핵비등이 시작되고 있음을 알 수 있다. 또한 과냉도가 커질수록 한계 열유속과 극소열유속값이 커지며 CHF점 온도 및 MHF점 온도도 상승한다. 그러나 $\Delta T_{sub}=60K$ 이상에서는 막비등현상이 거의 발생하지 않으므로 본 실험범위 내에서 MHF점은 존재하지 않는다.

본 그림의 경우, 과냉도 $\Delta T_{sub}=40K, 20K, 0K$ 의 비등곡선에서는 MHF점이 나타나고 있다. 본 연구에서의 극소열유속식은 식(21)과 같이 표시될 수 있으며 MHF점 온도 식(22)와 같이 나타낼 수 있다.

$$q_{MHF} = (76.7 + 6.0\Delta T_{sub}) \times 10^3 \quad (21)$$

$$T_{MHF} = 350 + 5.0\Delta T_{sub} \quad (22)$$

단, 위 식에서 T_{MHF} 의 단위는 $^{\circ}C$ 이다.

Fig. 7은 Cu 시편으로 측정된 냉각곡선으로서, 냉각액의 과냉도가 증가할수록 냉각곡선의 기울기가 커지며 급냉각이 시작되는 전열면온도, 즉 켄칭점(quenching point) 온도가 상승한다. 본 그림에서 냉각액의 과냉도 $\Delta T_{sub}=80, 70, 60K$ 의 경우에는 켄칭점은 거의 일정한 값을 유지하고 있으나 $\Delta T_{sub}=60K$ 이하에서는 켄칭점은 서서히 저온측으로 이동함을 알 수 있다. 이러한 현상은 Fig. 5의 비등곡선의 형상에서 나타난 바와 같이 냉각액의 과냉도가 커질수록 CHF점 온도가 고과열도측으로 이동하는 것과 유사한 경향이다. 이 그림에서의 전열면 켄칭점을 냉각액의 과냉도 ΔT_{sub} 의 함수로 표시하면 다음 식과 같다.

$$T_q = 300 + 6.2\Delta T_{sub} : \Delta T_{sub} \leq 60K \quad (23)$$

단, 위 식에서 T_q 의 단위는 $^{\circ}C$ 이다.

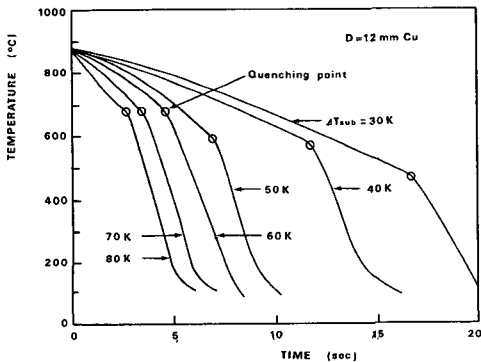


Fig. 7 Cooling curves of Cu specimen

식(22)의 MHF점 온도와 식(23)의 T_q 를 비교하면 켄칭점 온도가 MHF점 온도보다 약간 낮은 값을 가지며, 켄칭점은 비등곡선의 천이비등영역에 속함을 알 수 있다.

Fig. 8은 종래의 다른 연구결과와 본 연구결과를 비교 검토하기 위한 과냉과도 비등곡선이다. 이 그림에서 2점 쇄선으로 표시된 것은 Inada 등⁽¹⁶⁾이 직경 4 mm의 Au-봉을 이용하여 측정된 비등곡선이며, 1점 쇄선은 Hachis 등⁽²³⁾이 직경 35 mm의 Ag-봉을 이용하여 측정된 비등곡선이다. 또한 파선으로 표시된 곡선은 Kitz 등⁽²⁴⁾이 직경 8 mm Cu-봉으로 측정된 비등곡선이며 실선으로 표시된 곡선이 본 실험결과이다. 본 비등곡선들의 과냉도는 모두 70~80K로써 비슷한 조건하에서 측정되었으며, 금, 은 또는 동과 같은 내산화성이 강하며 열전도 계수가 큰 금속을 실험재료로 택하였다. 실선으로 표시된 본 연구의 비등곡선과 다른 연구자들에 의하여 측정된 비등곡선들을 비교하면, 본 연구의 한계열유속은 약 $5 \times 10^6 W/m^2$ 정도로서 이는 Kitz 등의 한계열유속과 비슷하며 기타의 비등곡선들의 한계열유속보다는 다소 작은 값이다. 또한 본 연구의 비등곡선에서 CHF 점 온도는 약 $\Delta T_{sat}=500K$ 이며 이 값은 Kitz 등의 결과를 제외한 모든 비등

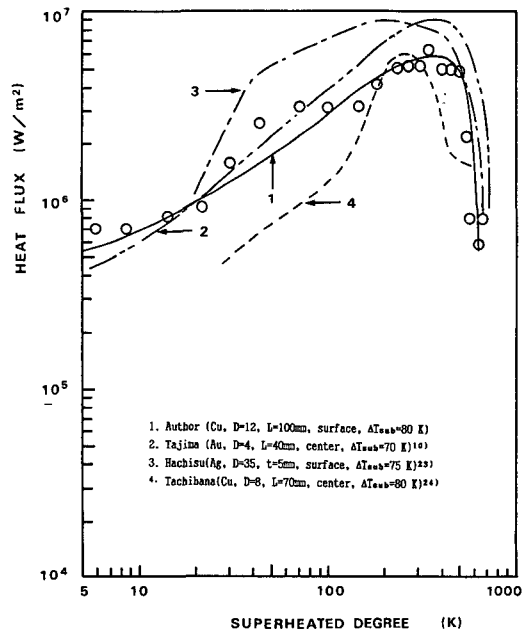


Fig. 8 Subcooled transient pool boiling curves

곡선의 CHF점 온도와 유사한 값이다. 핵비등 영역에서의 비등곡선 기울기는 Inada 등의 비등곡선과 비슷하며 그 이외의 비등곡선들 보다는 기울기가 다소 완만하다. 본 연구에서 구한 $\Delta T_{sub}=80K$ 일 때의 과냉과도 비등곡선 중에서 핵비등영역을 열유속의 식으로 표시하면 다음과 같다.

$$q = 2.02 \times 10^5 \Delta T_{sat}^{0.55} : \Delta T_{sat} \leq 500K \quad (24)$$

Fig. 9는 직경 30 mm인 S45C 탄소강 시편을 이용하여 $\Delta T_{sub}=80K$ 의 냉각수로 침지냉각하는 과정에서 냉각곡선을 측정한 후, 이 자료를 경계조건으로 하여 역문제 수치해석으로 계산한 비등곡선과 Cu 시편을 이용하여 구한 Fig. 8의 비등곡선을 비교한 것이다. Cu 시편과 S45C 시편에 의하여 구해진 결과를 비교하면, 양 곡선들의 형태가 비교적 유사하며 한계열유속, CHF점 온도 등은 거의 비슷한 값을 가진다. 반면에 핵비등 영역에서의 곡선 기울기는 S45C 탄소강의 경우가 크게 나타나고 있다. 이는 탄소강의 열전도계수가 동위원열전도계수보다 매우 작으므로 급격한 냉각시 시편내부의 열전도가 활발하게 이루어지지 못하여 냉각초기에 탄소강 시편 표면이 급격히 냉각되기 때문이다. 그러므로 시편 전체적으로는 서서히 냉각되는 반면, 시편

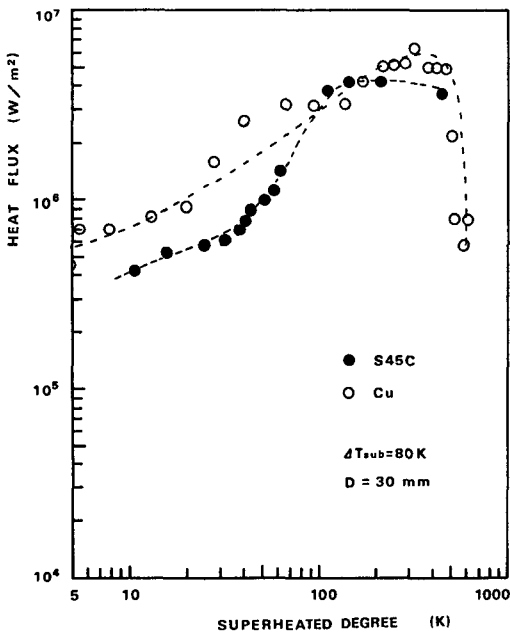


Fig. 9 Subcooled transient pool boiling curves of S45C specimen

표면온도는 담금질 초기에 급격히 저하하므로 고온 영역에서의 비등곡선을 구하는 것이 매우 어려우며 이 그림들에서도 고온 영역에서의 데이터가 매우 부족하다.

4.2 냉각곡선

(1) 시편의 최고 가열온도와 냉각곡선

강재의 담금질 냉각시에는 조직의 변화가 일어나며 이로 인하여 상변태열이 발생하게 되는데 이러한 상변태열은 냉각곡선의 형상에 커다란 영향을 미치게 된다. 순철의 A_3 변태점은 $910^\circ C$ 이며 탄소 함량이 증가할수록 A_3 변태점은 서서히 저하하여 공석강에서는 A_1 변태점과 일치하게 된다. 따라서 강재의 담금질시 조직을 오스테나이트화 하려면 A_3 변태점 이상으로 가열해야 한다.

본 연구에서는 우선 담금질 과정에서 발생하는 상변태열이 냉각곡선의 형상에 미치는 영향을 비교 검토하기 위하여 시편을 $820^\circ C$ 로 가열하여 냉각하는 실험과 S45C 탄소강의 A_3 변태점 이하의 온도인 $700^\circ C$ 로 가열하여 냉각하는 실험을 수행하여 강재의 가열온도에 따른 상변태열의 발생 유무가 냉각곡선의 형상에 미치는 영향을 비교 검토하였다.

Fig. 10은 여러 종류의 시편을 A_3 변태온도 이하인 $700^\circ C$ 로 가열하여 $\Delta T_{sub}=80K$ 의 냉각수로 냉각하는 경우에 $r=B$ 점, 즉 시편의 표면하 3 mm 위치에서 측정된 온도를 경계조건으로 하여 중심부 냉각곡선을 계산한 값이다. 이 그림에서는 시편 크기에 따라서 냉각에 소요되는 시간의 차이가 매우 큼을 알 수 있으며, 실험에 의한 냉각곡선과 상변태열의 반생을 고려하지 않은 수치계산에 의하여 구한 냉각곡선의 형상에 큰 차이가 없다. 또한 냉각

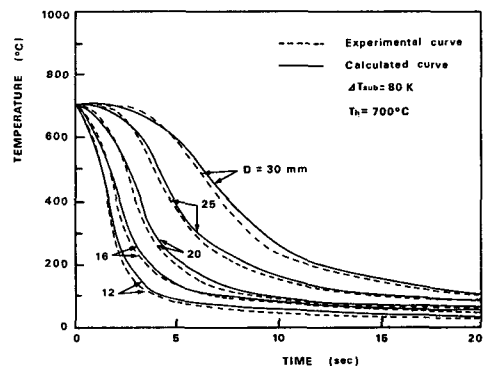


Fig. 10 Cooling curves at the centers of specimen

곡선의 형태에 상변태열이 발생하는 경우 생길 수 있는 굴곡이나 변형 등이 나타나지 않는다. 그러므로 강재를 A_3 변태점 이하로 가열하는 경우에는 조직의 오스테나이트화가 이루어지지 않으므로 담금질 냉각시 상변태가 일어나지 않으며 상변태열도 발생하지 않음을 알 수 있다.

Fig. 11은 Fig. 10의 냉각곡선을 냉각속도곡선으로 변형시킨 그림으로서 시편의 직경이 커질수록 냉각속도가 저하하며, 모든 종류의 시편이 핵비등 영역이라 간주할 수 있는 온도영역에서 비교적 큰 냉각속도를 가진다.

Fig. 12는 Fig. 10과 동일한 냉각조건 하에서 시편을 S45C 탄소강의 A_3 변태온도 이상의 온도인 820°C 로 가열하여 시편의 조직이 오스테나이트화 되도록 충분한 시간 동안 전기로 내에서 유지시키다가 냉각한 경우의 시편 중심부 냉각곡선이다. 파선으로 표시한 곡선은 실험결과이며 실선으로 표시한 곡선은 상변태열을 고려하지 않은 상태에서

수치계산에 의하여 구한 냉각곡선이다. 이 그림에서는 A_3 변태점 이하의 온도인 700°C 로 가열하여 냉각한 경우의 냉각곡선인 Fig. 10과 달리 냉각곡선의 일정한 부분에 심한 굴곡이 생기며, 또한 실측에 의한 냉각곡선과 수치계산에 의한 냉각온도 변화곡선(상변태열 발생을 고려하지 않은 계산임)의 형상에 매우 큰 차이가 발생하고 있다. 이러한 차이는 시편의 직경이 큰 경우가 작은 경우보다 훨씬 큰데, 그 이유는 시편이 서서히 냉각될수록 상변태열이 다량 발생하기 때문이라 생각된다. 또한 상변태열의 발생에 의하여 생기는 곡선의 굴곡점들의 위치도 시편의 직경에 따라서 매우 다르며, 시편의 직경이 큰 경우에는 굴곡점이 높은 온도영역에서 생기는 반면, 시편의 직경이 작을수록 굴곡점이 생기는 온도영역이 저온측으로 하강한다. 이와 같은 이유는 동일한 조건하에서 시편을 냉각하는 경우에는 시편의 크기에 따라서 냉각속도가 다르며 이러한 냉각속도의 크고 작음에 따라서 상변태의 발생형태와 발생 온도영역이 다르기 때문이라고 생각된다.

또한 Fig. 13은 Fig. 12의 실측에 의한 냉각곡선을 냉각속도곡선으로 변형시킨 것으로 냉각속도곡선의 형상이 시편을 700°C 로 가열한 경우의 냉각속도곡선인 Fig. 11과는 매우 다르다. 특히 $D=30$ mm인 시편의 경우에는 냉각속도가 0인 온도영역이 존재하며, 이 위치에서 상변태열이 집중적으로 발생함을 알 수 있다. 또한 $D=30, 25$ mm 시편의 경우에는 냉각속도곡선의 굴곡점이 시편온도 약 630°C 부근에 나타나는 반면, $D=16, 12$ mm 시편의 경우에는 냉각속도곡선의 굴곡점이 시편온도

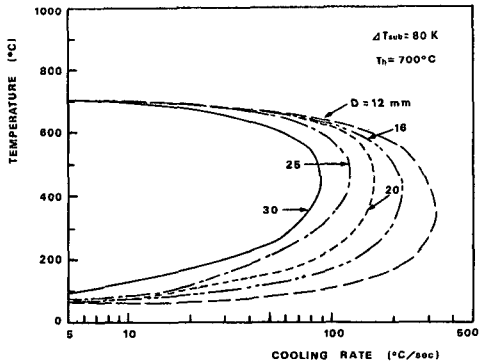


Fig. 11 Cooling rates at the centers of specimen

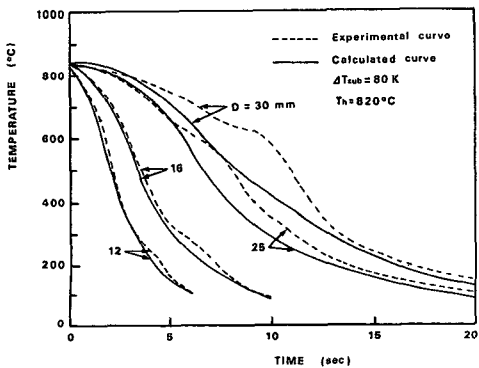


Fig. 12 Cooling curves at the centers of specimen

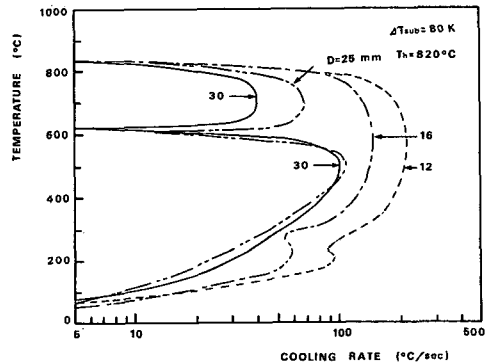


Fig. 13 Cooling rates at the centers of specimen

300°C 부근에 나타나고 있다. 이와 같이 직경의 크기에 따라 냉각속도곡선의 굴곡점의 위치나 굴곡의 정도가 매우 다르게 나타나는 것은 냉각속도에 따라서 상변태의 종류나 발생온도 영역이 다르며 또한 상변태열의 발생량도 다르기 때문이라고 생각된다.

(2) A_1 냉각속도와 상변태열과의 관계

강재의 퍼얼라이트 변태가 발생하는 온도영역은 개략적으로 A_1 변태점 부근이며 이 온도영역에서의 냉각속도를 A_1 냉각속도라 정의한다. Fig. 14는 냉각액의 과냉도에 따라서 냉각곡선의 형상이 어떻게 변화하는가를 규명하기 위하여 $D=20$ mm의 시편을 사용하여 냉각액의 과냉도를 변화시키면서 중심부 냉각곡선을 측정한 그림이다. 이 그림에서 시편의 A_1 냉각속도가 매우 느린 경우, 즉 냉각수의 과냉도 $\Delta T_{sub}=40, 20$ K일 때의 냉각곡선은 시편온도 600~650°C 부근에서 심한 굴곡이 생기는데, 이러한 현상은 이 온도 영역에서 퍼얼라이트 변태에 의하여 상변태열이 집중적으로 발생하고 있음을 의미한다. 또한 냉각수의 과냉도가 커질수록 이 온도 영역에서의 굴곡의 정도가 약해지는데, 과냉도가 중간 정도인 $\Delta T_{sub}=52, 68$ K의 경우에는 냉각곡선의 굴곡점이 상하 두 곳에서 발생하며, $\Delta T_{sub}=78, 90$ K의 경우에는 시편온도 300°C 부근에서 약간의 굴곡만이 발생한다. 이러한 현상은 냉각수의 과냉도가 커질수록, 즉 A_1 냉각속도가 커질수록 고온영역에서 발생하는 상변태열의 발생량이 감소하면서 동시에 시편온도 300°C 부근에서 작은 량의 상변태열이 발생하며, A_1 냉각속도가 아주 커졌을 때에는 시편온도 300°C 부근의 온도영역에서만 상변태열이 발생하기 때문이다. 이는 A_1 냉각속도가 증가함에 따라 Ar' 변태가 억제됨과 동시에 Ar'' 변태가 일어나며, A_1 냉각속도가 더욱 더 증가하여 일정치 이상이 될 때에는 Ar' 변태가 일어나지 않고 Ar'' 변태만이 활발히 일어남을 의미한다.

Fig. 15는 직경 30 mm의 시편을 과냉도 $\Delta T_{sub}=80$ K인 저온의 냉각수로 냉각할 경우, 시편의 반경방향 각 위치에서 측정된 냉각온도 변화곡선을 연속냉각변태선도(continuous-cooling-transformation diagram, CCT diagram) 위에 나타낸 그림이다. 이 그림의 냉각곡선 중에서 가장 표면에 가까운 위치인 반경비 $r/R=0.8$, 즉 $R=12$ mm 위치에서는 곡선의 기울기가 매우 크므로 비교적 결과가 양호한 열처리 조직을 얻을 수 있다. 그러나 반경비가

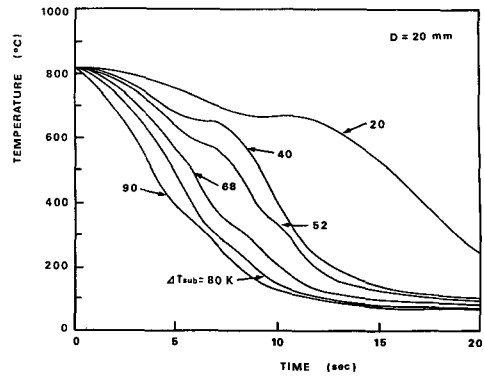


Fig. 14 Experimental cooling curves at the centers of specimen

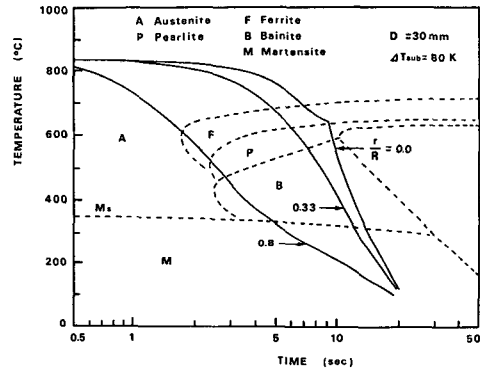


Fig. 15 Experimental cooling curves at the various radial positions

0인 시편의 중심부에서는 냉각곡선의 기울기가 매우 완만하여져서 경도가 높은 마르텐사이트 조직을 기대할 수 없음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문은 강재의 열처리를 위하여 열공학적 측면과 금속공학적 측면에서 복합적으로 수행된 기초적 연구이다. 전열공학적 측면에서는 주로 Cu 시편을 이용하여 막비등 상태에서 시작되는 고온면의 과도적 냉각실험을 수행하였다. 또한 금속공학적 측면에서는 주로 S45C 탄소강 시편을 이용하여 담금질시의 냉각속도와 상변태열과의 관계 등에 관한 연구를 수행하였으며, 본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) Cu 시편과 S45C 탄소강 시편을 이용하여 구한 각각의 비등곡선은 현저한 특성의 차이가 없이 거의 일치하였으며, 과냉과도 비등곡선의 경우 과냉도가 커질수록 한계열유속(CHF)이 증가하며 CHF점 온도도 고과열도측으로 이동하였다.

(2) 실제의 열처리에 이용되는 냉각제의 과냉도 $\Delta T_{sub}=80K$ 의 경우, 시편 표면의 과열도에 따른 표면열유속을 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$q_s = 5.0 \times 10^6 \quad : \Delta T_{sat} > 500K$$

$$q_s = 2.015 \times 10^5 \Delta T_{sat}^{0.55} \quad : \Delta T_{sat} \leq 500K$$

(3) 최고 가열온도가 850°C인 본 실험의 범위내에서는 과냉도 $\Delta T_{sub}=60K$ 이상에서는 극소열유속(MHF)점의 구분이 없었으며, 과냉도 $\Delta T_{sub}=60K$ 이하에서의 극소열유속과 MHF점 온도는 다음 식과 같다.

$$q_{MHF} = (76.7 + 6.0 \Delta T_{sub}) \times 10^3$$

$$q_{MHF} = 350 + 5.0 \Delta T_{sub}$$

(4) 냉각곡선으로부터 구한 켄칭점(T_q)의 온도는 과냉도 $\Delta T_{sub}=60K$ 이상에서 거의 일정한 값을 가지는 반면, 과냉도 $\Delta T_{sub}=60K$ 이하에서는 다음 식과 같다.

$$T_q = 300 + 6.2 \Delta T_{sub} \quad : \Delta T_{sub} \leq 60K$$

(5) 강재의 최고 가열온도를 S45C의 A_3 변태점 이상과 이하로 하여 각각 담금질 실험을 수행한 결과, 양 실험의 냉각곡선 사이에는 상당한 차이가 있음을 확인하였는데, 이러한 현상은 상변태열의 발생에 기인한다. 또한 상변태열이 냉각곡선에 미치는 영향은 시편의 중심부에 가까울수록 더욱 커지며, A_1 냉각속도가 작을수록 냉각곡선의 굴곡이 심해진다. 이러한 현상은 A_1 냉각속도가 작을수록 상변태열의 발생량이 큰 퍼얼라이트변태가 활발히 일어나기 때문이다.

참고문헌

- (1) 岸野孝信, 長岐滋, 井上達雄, 1979, “鋼の焼入れにおける相變態, 熱傳導および彈塑性應力,” 材料, 第28卷, 第312號, pp. 861~867.
- (2) 三塚正志, 福田敬爾, 1974, “高温金屬を水冷するときの冷却曲線における遷移沸騰および特性溫度に關する研究,” 鐵と鋼, 60年, 第14號, pp. 2079~2083.
- (3) 時弘義雄, 田村今男, 1974, “焼入試片の中心部冷却曲線の一般化,” 鐵と鋼, 60年, 第6號, pp. 661~670.
- (4) 時弘義雄, 田村今男, 1974, “焼入試片の冷却曲線の導出方法,” 鐵と鋼, 60年, 第6號, pp. 671~681.
- (5) 三塚正志, 福田敬爾, 1977, “高温鋼板の浸漬冷却過程における沸騰現象および熱傳達に及ぼす水溫の効果,” 鐵と鋼, 63年, 第6號, pp. 1008~1015.
- (6) Irving, M. E. and Westwater, J. W., 1986, “Limitations for Obtaining Boiling Curves by the Quenching Method with Sphere,” Proc. 8th Int. Heat Transfer Conf., San Francisco, pp. 2061~2066.
- (7) David, Y., Lin, T. and Westwater, J. W., 1982, “Effect of Metal Thermal Properties on Boiling Curves Obtained by the Quenching method,” Proc. 7th Int. Heat Transfer Conf., München, pp. 155~160.
- (8) Osman, A. M. and Beck, J. V., 1990, “Investigation of Transient Heat Transfer Coefficients in Quenching Experiments,” Trans. of the ASME, J. of Heat Transfer, Vol. 112, Nov., pp. 843~848.
- (9) 김경근, 1985, “サブクール沸騰流の限界熱流速と膜沸騰遷移,” 동경대학 대학원 박사학위논문.
- (10) 금속열처리기술편람 편집위원회, 1987, 금속열처리기술편람, 기전연구사, 서울, pp. 19~20, pp. 144~164.
- (11) 송광호, 김학운, 양형열, 1988, 기계재료, 보성문화사, 서울, p. 202.
- (12) S. V. Patankar, 1980, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere, New York, pp. 41~78.
- (13) Van der Molen, S. B. and Galjeee, F. W. B. M., 1978, “The Boiling Mechanism During Burnout Phenomena in Subcooled Two-Phase Water Flow,” Proc. 6th Int. Heat Transfer Conf., Toronto, pp. 381~385.
- (14) Ueda, T. and Kim, K. K., 1986, “Heat Transfer Characteristics During the Critical Heat Flux Condition in a Subcooled Flow Boiling System,” Proc. 8th Int. Heat Transfer Conf., San Francisco, pp. 2203~2208.

- (15) 김명환, 김춘식, 김희철, 민우홍, 1987, “수치계산에 의한 비정상열전도 역문제의 시간간격의 한계에 관한 연구,” 한국해양대학 선박공학연구소논문집, 제 6 집, pp. 61~87.
- (16) 田島守, 牧忠, 片山功藏, 1988, “鋼焼入れの傳熱現象の研究(第 3 報, 焼入れの際の冷却曲線と過渡沸騰熱傳達),” 日本機械学会論文集(B卷), 第54卷, 第508號, pp. 3491~3496.
- (17) 日本機械學會編, 1986, 傳熱工學資料輯 4版, pp. 314~317.
- (18) 日本金屬學會編, 1974, 金屬データブック, 丸善株式會社, p. 105.
- (19) ASME編, 1978, Metals Handbook, Vol. 1, 9th ed., ASM, pp. 145~151.
- (20) Bergles, A. E. and Thompson, W. G., 1970, “The Relationship of Quench Data to Steady-State Pool Boiling Data,” Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 13, pp. 55~68.
- (21) 西尾茂文, 上村光宏, 1982, “靜止水の冷却能力に関する實驗的研究(サブクール度の影響),” 熱處理, 第23卷, 第5號, pp. 260~265.
- (22) 稻田茂昭, 宮阪芳喜, 泉亮太郎, 小長谷芳彦, 1981, “サブクールプール沸騰特性曲線の研究(第1報, 局所熱傳達特性とそれによぼすサブクール度の影響),” 日本機械學會論文集(B卷), 第47卷, 第147號, pp. 852~861.
- (23) 蜂巣毅, 佐佐木敏美, 祖父江昌久, 田口啓二, 1979, “水-空氣混合體噴射による 高温加熱面冷却時の熱傳達率,” 日本機械學會論文集(B卷), 第45卷, 第397號, pp. 1354~1362.
- (24) 橘藤雄, 鹽治震太郎, 1972, “焼入れの熱傳達に関する研究, 日本機械學會論文集(B卷),” 第38卷, 第309號, pp. 1056~1064.