

탄소강 담금질시의 상변태열과 이를 포함한 냉각곡선의 계산

윤 석 훈* · 김 경 근*

The Latent Heat of Phase Transformation of the Carbon Steel and the Calculation of Cooling Curves Including the Latent Heat in Quenching

S. H. Yoon · K. K. Kim

Key words : Latent heat of phase transformation(상변태열), Cooling curve(냉각곡선), Quenching(담금질), Cooling rate(냉각속도), Apparent heat capacity method (겉보기열용량법)

Abstract

This study aimed at measuring the latent heat of phase transformation of S45C carbon steel in quenching and at conducting the analytical researches into the calculation of cooling curves including the latent heat.

The temperature of phase transformation of steel and its latent heat are dependant upon the cooling rates at the temperature of A_1 phase transformation point. The effect of the latent heat of phase transformation is especially manifest at the cooling curve of center of specimens. The higher the cooling rates became, the lower fell the temperature region of phase transformation. In the figures of cooling rates, the phenomena of cooling rate dropping into zero was caused by the latent heat of phase transformation.

The cooling curves under the effects of the phase transformation were calculated by apparent heat capacity method.

1. 서 론

열처리 냉각에 관한 열공학적인 연구는 강재의 비정상열전도에 관한 연구와 강재 표면과 냉각제 사이의 과도비등열전달에 관한 연구로 나눌 수 있는데, 열처리에 관한 종합적인 열적현상의 구명을

* 정회원, 한국해양대학교 해사대학

위해서는 복합적인 측면에서 이러한 연구를 수행하는 것이 필요하다.

이에 관한 연구결과를 살펴 보면, 時弘 등¹⁾은 강재 중심부에서의 냉각곡선을 구하여 이것을 일반화 시키기 위한 연구를 수행하였으며 그 결과 냉각에 관계되는 주요 인자는 시편의 치수, 형상, 재

질이라는 점을 밝혔고 이를 근거로 하여 시편의 치수와 형상, 그리고 재질을 독립변수로 하는 중심부 냉각모곡선을 구하는 실험식을 제안하였다. 또한 이러한 냉각모곡선을 이용하여 임의의 위치에서의 냉각곡선을 유도할 수 있는 실험식²⁾을 제시하였으나 이러한 과정에서 상변태로 인한 영향을 전혀 고려하지 않았다.

三塚³⁾은 실제 규모의 대형 탄소강 강판을 이용하여 침지냉각 과정중의 비등현상을 고찰하고 냉각수의 온도변화가 냉각속도에 미치는 영향을 조사하였다. 또한 대형 강재를 정지수중에 침지냉각할 때의 열전달현상과 그 분포 및 강제교반이 열전달에 미치는 효과 등을 구명하기 위하여 대형 강판을 정지수중에 수직 또는 수평으로 침지시켜 강판과 냉각수 사이의 열전달률과 그 분포 및 교반효과에 관한 연구를 수행하였다⁴⁾.

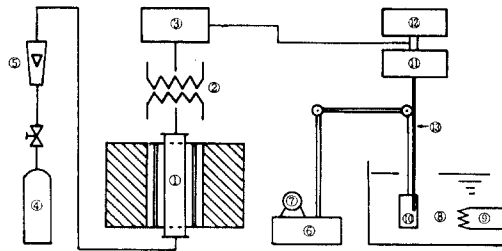
또한 峰巢⁵⁾은 여러 경우의 냉각과정시 강재의 과도온도분포를 계산하여 실험식과 비교 검토하였으며 田島⁶⁾은 탄소강의 담금질 냉각시에 발생하는 상변태열에 관한 연구를 수행하였고, Bryant⁷⁾은 대형 롤러 제작과정에서의 내부온도분포를 수치계산하였다.

담금질 과정에서 조직의 상변태로 인하여 발생하는 상변태열은 냉각곡선의 형상에 큰 영향을 미치며, 열처리 효과에도 상당한 영향을 미치므로 상변태열의 정량적인 구명은 담금질효과를 예측하고, 또한 그 효과를 향상시키기 위하여 매우 중요한 사항이다. 그러나 이에 관한 연구는 야금학적인 측면에서 주로 금속학자들에 의하여 수행되어져 왔을 뿐, 열공학적인 측면에서의 체계적인 연구결과는 매우 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 담금질 냉각과정에서 발생하는 상변태열과 냉각속도와의 상관관계를 정량적으로 구명하고, 이를 냉각곡선의 계산에 반영하여 보다 정확한 냉각곡선을 계산하는 방법을 제시하여 담금질효과의 개선과 열처리 기술의 발전을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 실험장치의 개략도로써, ①은 시편



- ① Electric furnace
- ② Transformer
- ③ Temperature controller
- ④ Argon gas vessel
- ⑤ Flowmeter
- ⑥ Transporting apparatus
- ⑦ Electric motor
- ⑧ Water tank
- ⑨ Electric heater
- ⑩ Specimen
- ⑪ Ice junction
- ⑫ Recorder
- ⑬ Thermocouple

Fig. 1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

가열용 전기로, ②는 변압기, ③은 전기로내의 온도조절을 위한 자동온도조절기, ④는 분위기 가스로 쓰이는 알곤가스, ⑤는 알곤가스용 유량계, ⑥은 시편 이송장치, ⑦은 시편이송용 저속모터, ⑧은 냉각탱크, ⑨는 냉각제의 온도조절용 전기히터, ⑩은 시편, ⑪은 열전대의 기준점, ⑫는 온도기록계, ⑬은 외경이 1mm인 C-A sheathed 열전대이며 구체적인 실험방법은 전보⁸⁾와 같다.

Table 1은 본 실험에 사용된 시편의 재료인 S45C 탄소강의 성분표이다.

Table 1 Chemical Composition of S45C Specimen

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.44	0.22	0.70	0.014	0.15	0.016	0.08	0.08

3. 실험결과 및 고찰

3. 1 상변태열이 냉각곡선에 미치는 영향

강재의 담금질 냉각시에는 조직의 변화가 일어

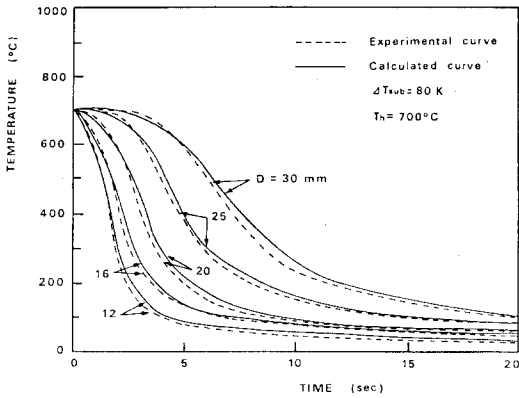


Fig. 2 Cooling Curves at the Centers of Specimens in case of $T_h=700^\circ\text{C}$

나며 이로 인하여 상변태열이 발생하게 되는데 이러한 상변태열은 냉각곡선의 형상에 커다란 영향을 미치게 된다. 순철의 A_3 변태점은 910°C 이며 탄소함량이 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 담금질과정에서 발생하는 상변태열이 냉각곡선의 형상에 미치는 영향을 비교 검토하기 위하여 시편을 820°C 로 가열하여 냉각하는 실험과 S45C 탄소강의 A_3 변태점 이하의 온도인 700°C 로 가열하여 냉각하는 실험을 수행하여 강재의 가열온도에 따른 상변태열의 발생 유무가 냉각곡선의 형상에 미치는 영향을 검토하였다.

Fig. 2는 여러 종류의 시편을 700°C 로 가열하여 과냉도 $\Delta T_{\text{sub}}=80\text{K}$ 의 냉각수로 냉각하는 경우, 시편직경 D에 따른 중심부 냉각곡선이다. 본 그림에서 실선으로 표시된 것이 실험에 의한 결과이며, 파선으로 표시된 것은 상변태열의 발생을 고려하지 않은 상태에서 수치계산^{*)}된 냉각곡선으로 두 종류의 곡선형상에 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

Fig. 3은 Fig. 2와 동일한 냉각조건하에서 시편을 S45C 탄소강의 A_3 변태점 이상의 온도인 820°C 로 가열하여 시편의 조직이 오스테나이트화 되도록 충분한 시간 동안 전기로 내에서 유지시키다

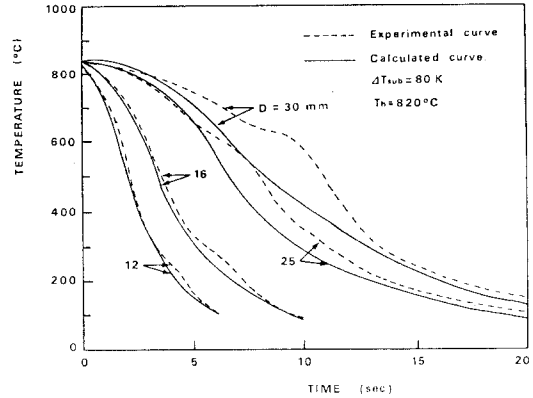


Fig. 3 Cooling Curves at the Centers of Specimens in case of $T_h=820^\circ\text{C}$

가 냉각한 경우의 중심부 냉각곡선이다. 실험에 의하여 구해진 냉각곡선인 실선의 형상은 일정부분에서 심한 굴곡이 생기며 상변태열의 발생을 고려하지 않고 수치계산된 냉각곡선과 큰 차이를 보이고 있는데, 이러한 차이는 냉각과정에서 발생하는 상변태열에 의한 것이며 보다 정확한 냉각곡선을 계산하기 위해서는 이와 같이 담금질 과정에서 발생하는 상변태열의 효과를 계산에 그대로 반영해야 한다.

3.2 냉각속도와 담금질결과

Fig. 4는 직경 30mm의 시편을 과냉도 $\Delta T_{\text{sub}}=80\text{K}$ 인 저온의 냉각수로 냉각하는 경우, 시편의 반경방향 각 위치에서 측정된 냉각곡선을 연속냉각변태선도(continuous-cooling-transformation diagram, CCT diagram)위에 나타낸 그림이다. 이 그림의 냉각곡선 중에서 가장 표면에 가까운 위치인 $r/R=0.8$, 즉 $r=12\text{mm}$ 위치에서는 곡선의 기울기가 매우 크므로 비교적 경도가 양호한 열처리 조직을 얻을 수 있다. 그러나 반경비가 0인 시편의 중심부에서는 냉각곡선의 기울기가 매우 완만해져서 경도가 높은 마르텐사이트 조직을 얻을 수 없음을 알 수 있다.

Fig. 5는 Fig. 4의 냉각곡선을 냉각속도곡선으로 변형시킨 그림이다. 반경비 $r/R=0$ 인 중심부에서는 퍼얼라이트 변태로 상변태열이 다량 발생하여 시편온도 $600\sim 650^\circ\text{C}$ 부근에서 냉각속도가 거

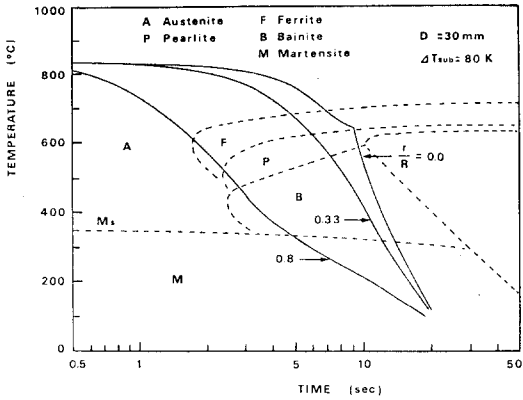


Fig. 4 Experimental Cooling Curves at the Various Radial Positions

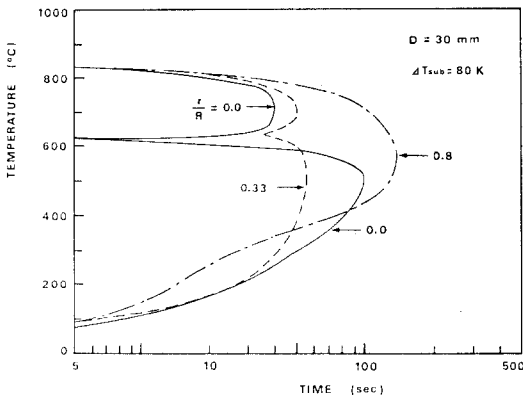


Fig. 5 Cooling Rates at the Various Radial Positions

의 0에 가까운 점이 존재할 정도로 냉각속도곡선이 심하게 변형하고 있으며, $r/R=0.33$ 인 위치에서의 냉각속도곡선에도 상변태열로 인한 변형이 나타나고 있다. 그러나 비교적 시편 표면에 가까운 위치인 $r/R=0.8$ 인 점, 즉 $r=12\text{mm}$ 위치에서의 냉각속도곡선은 상변태열로 인한 영향이 거의 없다. 따라서 상변태열이 냉각곡선에 미치는 영향은 시편의 중심부에 가까워질수록 커지는 반면, 비교적 냉각이 활발히 이루어지는 시편표면 부근의 냉각곡선에는 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

3.3 상변태열의 계산

상변태열량의 계산은 Fig. 6과 같은 모델⁶⁾을 만

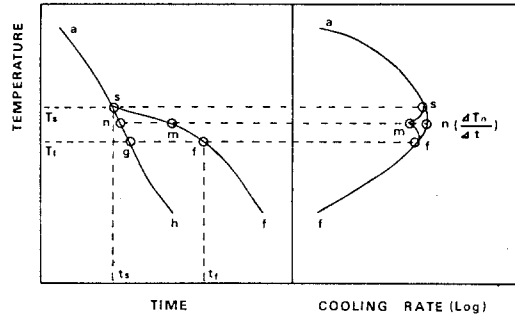


Fig. 6 A Modelling of Cooling Curves and Cooling Rates

들어 실험에 의한 냉각곡선을 이용하여 이를 정량적으로 계산하였다. 본 그림의 냉각속도곡선 모델에서 상변태의 시작점은 2곡선이 분리되는 s점이며 종료점은 2곡선이 합해지는 f점이다. 따라서 상변태가 일어나고 있는 시간은 $t_f - t_s$ 이며 상변태는 n점에서 집중적으로 일어난다고 가정하여 이 점에서의 비열과 냉각속도의 값을 이용하였다. 또한 온도 T_s 로부터 T_f 까지의 현열은 n점에서의 냉각속도로 일정하게 방출된다고 간주하여 다음과 같은 식으로부터 상변태열을 계산하였다.

상변태열과 현열의 합은

$$H_1 = \frac{Q_1}{\rho W} = c_n \frac{\Delta T_n}{\Delta t} (t_f - t_s) \quad (1)$$

식(1)에 포함된 현열은

$$H_2 = \frac{Q_2}{\rho W} = c_n (T_s - T_f) = c_n (T_s - T_f) \quad (2)$$

따라서 상변태열은 다음 식에 의하여 계산될 수 있다.

$$H = H_1 - H_2 = c_n \left\{ (t_f - t_s) \frac{\Delta T_n}{\Delta t} - (T_s - T_f) \right\} \quad (3)$$

Fig. 7은 위와 같은 방법에 의하여 구해진 상변태열과 A_1 변태점 부근에서의 냉각속도인 A_1 냉각속도⁶⁾와의 관계를 나타낸 그림으로써, 실선은 Ar' 변태열을 의미하며 파선은 Ar'' 변태열을 의미한다. 이 그림에서, A_1 냉각속도가 $50^\circ\text{C}/\text{sec}$ 이하에서는

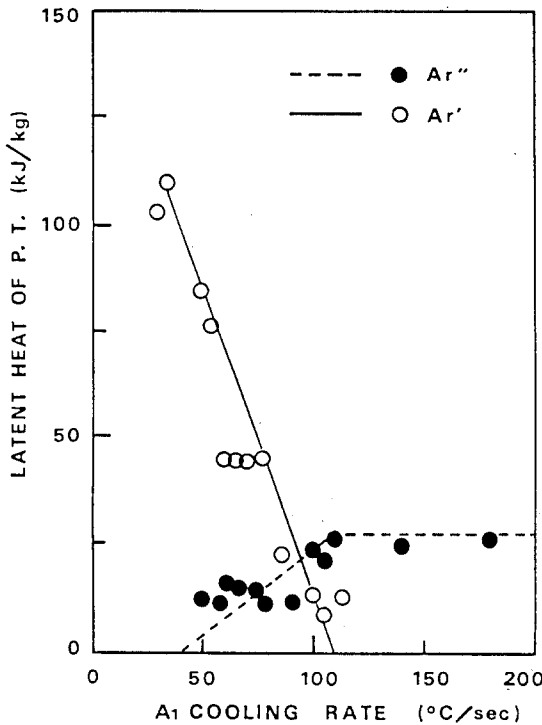


Fig. 7 The Relations between the A_1 Cooling Rates and the Latent Heats of Phase Transformation

Ar'변태열만이 발생하는 퍼얼라이트변태가 되고 A_1 냉각속도가 50 - 110 °C/sec에서는 Ar' 변태와 Ar''변태가 동시에 일어나며, A_1 냉각속도가 더욱 더 증가하면 Ar''변태만이 발생하여 마르텐사이트 조직이 된다. 또한 퍼얼라이트 변태시의 상변태열량은 마르텐사이트 변태시의 상변태열량보다 매우 큰 값을 가진다. 그러므로 냉각수온도가 높은 경우, 즉 A_1 냉각속도가 낮은 경우의 냉각곡선 형상이 더욱 더 굴곡이 심하며, A_1 냉각속도가 빠른 경우의 냉각곡선 형상은 상변태열의 발생량이 작아서 곡선의 굴곡이 크게 나타나지 않는다.

4. 상변태열을 고려한 냉각곡선의 계산

4. 1 겉보기 열용량법의 적용

상변태열을 냉각곡선 계산시 반영하기 위하여 겉보기 열용량법^{10,11)}을 이용하였으며, Fig. 8은 이 방법의 원리를 나타내고 있다. 변태나 동결 등의

상변화시에 존재하게 되는 잠열 $L\rho$ 와 원래의 열용량 ρc 를 합한 량을 겉보기 열용량 ρ^*c 라고 하며 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

비정상 원통좌표계 1차원 열전도방정식은

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k\nabla T) \quad (4)$$

이를 음함수법으로 표시하면

$$\int_{T_n^0}^{T_n^1} \rho c dT = \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \left\{ \int_{T_n^0}^{T_{n-1}^0} k dT + \int_{T_n^0}^{T_{n-1}^1} k dT \right\} \quad (5)$$

식(5)는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\int_{T_n^0}^{T_n^1} \rho^* c dT = \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \left\{ \int_{T_n^0}^{T_{n-1}^0} k dT + \int_{T_n^0}^{T_{n-1}^1} k dT \right\} \quad (6)$$

여기서 ρc , ρ^*c 및 $L\rho$ 의 관계는 다음과 같다.

$$\int_{T_1}^{T_2} \rho^* c dT = L\rho + \int_{T_1}^{T_2} \rho c dT \quad (7)$$

따라서 위식으로부터 $L\rho$ 는 T_1, T_2 사이의 잠열이 된다.

Fig. 7에 의하면 A_1 냉각속도에 따라서 상변태열의 발생형태가 달라지므로 겉보기 열용량도 시편의 A_1 냉각속도에 따라 그 크기와 형태가 다르다.

Fig. 9는 A_1 냉각속도와 겉보기 열용량과의 상관관계를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 삼각형 형태의 빗금쳐진 부분이 상변태열을 의미하는데,

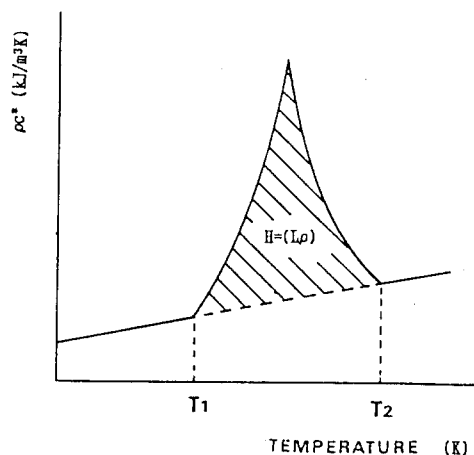


Fig. 8 Apparent Heat Capacity Including the Latent Heat

(A)번 그림은 A_1 냉각속도가 매우 작은 경우로서 퍼얼라이트 변태만이 발생하는 경우이다. 그리고 그림(B)와 (C)는(A)보다 냉각속도가 빨라서 트루스타이트 변태와 마르텐사이트 변태가 함께 발생하는 경우이며, 그림(D)는 A_1 냉각속도가 아주 빠른 경우로 거의 대부분의 조직이 마르텐사이트로 변태하는 경우이다.

따라서 다음과 같이 냉각속도의 속도별, 즉 변태의 형태별로 겉보기 열용량의 식을 나타낼 수 있다.

1) 퍼얼라이트 변태

$$\rho c^*(T) = \rho c(T) + H_p(T) \quad (8)$$

2) 분리 변태

$$\rho c^*(T) = \rho c(T) + H_p(T) + H_m(T) \quad (9)$$

3) 마르텐사이트 변태

$$\rho c^*(T) = \rho c(T) + H_m(T) \quad (10)$$

여기서 $\rho c(T)$ 는 삼각형 아래의 기준선으로 변태가 발생하지 않는 경우의 기본적인 열용량을 의미하고, $H_p(T)$, $H_m(T)$ 은 각각 퍼얼라이트 변태와 마르텐사이트 변태량을 의미하며 그림에서 삼각형으로 표시된 부분이다.

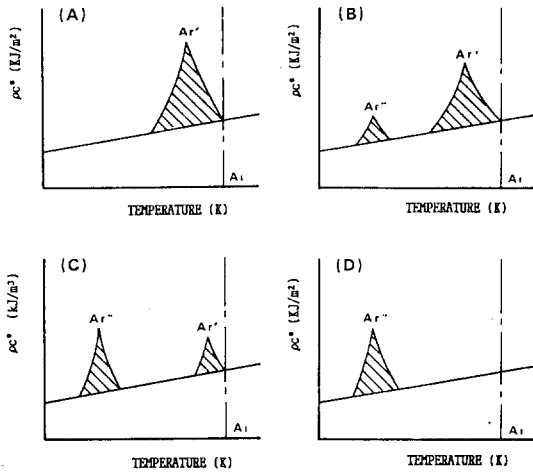


Fig. 9 Change of the Apparent Heat Capacity due to A_1 Cooling Rates

A_1 냉각속도에 따라서 본 그림과 같은 형태로 표시될 수 있는 상변태열을 냉각곡선의 계산에 반영하기 위하여, 본 연구에서는 Fig. 7에 표시된 상변태열량을 식(8), (9), (10)과 같은 형태로 수식화해서 냉각곡선의 계산에 이용하였다.

4.2 계산결과

담금질시에 발생하는 상변태열을 고려한 냉각곡선을 구하기 위하여 겉보기 열용량식을 작성하여 전산프로그램을 만들고, 이 프로그램의 타당성을 확인하기 위하여 계산에 의하여 구하여진 냉각곡선과 실험에 의하여 구하여진 냉각곡선을 비교 검토하였다. Fig. 10은 이와 같은 검토를 위하여, 담금질 냉각시에 발생하는 상변태열을 겉보기 열용량법을 이용하여 계산한 냉각곡선과 상변태열의 발생을 고려하지 않고 계산한 냉각곡선 및 실험에 의하여 구해진 직경이 다른 여러 시편의 냉각곡선을 비교한 것이다. 이 그림에서 실선으로 표시된 곡선은 시편의 표면하 3mm 위치에 설치한 열전대로 측정된 온도를 경계조건으로 하여 상변태열의 발생을 상기와 같은 방식으로 고려하여 수치계산한 시편의 중심부 냉각곡선이다. 또한 파선으로 표시된 곡선은 실측한 중심부 냉각곡선이며, 1점쇄선은 담금질 냉각시 상변태열이 발생하지 않는다는 조건하에서 계산에 의하여 구해진 중심부 냉각곡선이다. 실측한 냉각곡선과 상변태열을 고려하

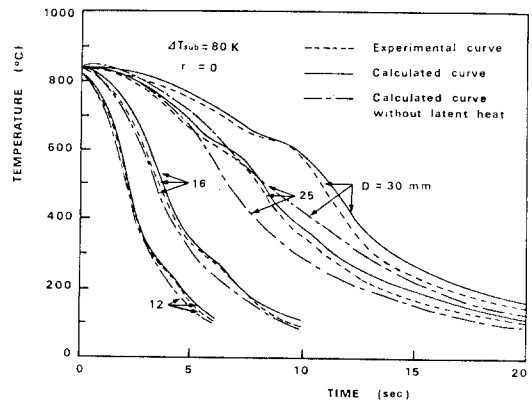


Fig. 10 A Comparison between the Calculated and the Experimental Cooling Curves of Various Diameters

여 계산한 중심부 냉각곡선을 비교하면, 계산에 의하여 구해진 냉각곡선이 저온도영역에서 다소 높은 값을 갖는 것을 제외하고는 양 곡선의 형태가 비교적 잘 일치하고 있으며, 상변태열이 집중적으로 발생하는 온도영역을 의미하는 곡선의 굴곡점도 유사하게 나타나고 있다. 다만 계산에 의하여 구해진 냉각곡선들보다 실측한 냉각곡선들이 전체적으로 약간 낮은 온도를 나타내고 있다. 또한 상변태열의 발생을 고려하지 않은 상태에서 계산된 냉각곡선인 1점쇄선과 다른 냉각곡선들의 형태를 비교하면 전체적으로 매우 큰 차이를 나타내고 있으며, 특히 시편의 직경이 커질수록 이러한 차이는 더욱 현저하게 나타난다. 이와 같이 탄소강의 담금질 냉각시에는 냉각속도에 따라 많은 양의 상변태열이 발생하므로 냉각곡선의 계산시에는 이러한 현상을 필히 반영하여 계산을 해야 한다. 이상과 같은 비교로부터, 겉보기 열용량법에 의하여 상변태열의 발생을 고려한 물성치의 식을 작성하고 이 식을 냉각곡선 계산용 프로그램에 적용시켜 계산한 냉각곡선은 실측한 결과와 매우 유사하다는 것이 확인되었다.

5. 결 론

탄소강의 담금질 실험을 행하여 상변태열이 냉각곡선에 미치는 영향을 구명하였고, 겉보기 열용량법을 이용하여 이를 냉각곡선의 계산에 반영하여 냉각곡선을 정확하게 계산하는 방법을 제시하였으며, 구체적인 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 탄소강을 A_3 변태점 이상으로 가열하여 냉각하는 경우, 냉각속도에 따라서 상변태열의 발생량과 발생형태가 매우 달라진다.

2) A_1 냉각속도가 $50^\circ\text{C}/\text{sec}$. 이하에서는 Ar' 변태만이 발생하는 퍼얼라이트 변태가 되고, A_1 냉각속도가 $50 - 110^\circ\text{C}/\text{sec}$.에서는 Ar' 변태와 Ar'' 변태가 동시에 일어나며 A_1 냉각속도가 더욱 더 증가하면 Ar'' 변태만이 발생한다.

3) 상변태열의 발생을 고려한 냉각곡선의 계산을 위하여 겉보기 열용량법을 이용하는 경우, 실제의 냉각곡선과 계산결과가 잘 일치함을 확인하였다.

이 논문은 1993년도 한국학술진흥재단의 공모 과제 연구비에 의하여 수행되었음을 밝히며, 관계자 여러분께 심심한 사의를 표합니다.

참고문헌

- 1) 時弘義雄, 田村今男: 焼入試片の中心部冷却曲線の一般化, 鐵と鋼, 60年 6號, pp. 661 - 670(1974).
- 2) 時弘義雄, 田村今男: 焼入試片の冷却曲線の導出方法, 鐵と鋼, 60年 6號, pp. 671 - 681(1974).
- 3) 三塚正志, 福田敬爾: 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温の効果, 鐵と鋼, 63年 6號, pp. 1008 - 1015(1977).
- 4) 三塚正志, 福田敬爾: 高温鋼板浸漬冷却時の熱傳達現象および熱傳達に及ぼす攪拌の影響, 鐵と鋼, 64年 1號, pp. 70 - 77(1978).
- 5) 峰巢毅, 佐佐木敏美, 田口啓二: 有限長圓柱の焼入れ冷却時の過渡温度分布, 日本機械學會論文集(B編), 47卷 413號, pp.158 - 165(1981).
- 6) 田島守, 牧忠, 片山功藏: 鋼焼入れの傳熱現象の研究(相變態熱について), 日本機械學會論文集(B編), 50卷 460號, pp.3033 - 3040(1984).
- 7) G. F. Bryant and T. S. L. Chiu: Simplified roll - temperature model(convective cooling), Metal Technology, Vol. 9, December, pp. 478 - 484 (1982).
- 8) 윤석훈, 홍영표, 김경근, 김용모: 고온강재의 담금질 열전달에 관한 연구(제1보: 과냉과도비등열전달과 냉각곡선), 대한기계학회논문집, 17권 6호, pp. 1529 - 1540(1993).
- 9) 기전연구사 역: 강열 열처리, 서울, 기전연구사, pp. 51 - 52(1979).
- 10) 藤井哲: 傳熱工學の進展 3, 養賢堂, pp. 191 - 197 (1976).
- 11) 齊藤武雄: 數値傳熱學, 養賢堂, pp. 177 - 179 (1989).