

탄소강의 담금질 열전달에 관한 연구

(대형 롤에 대한 담금질 시뮬레이션)

김 경 근* · 윤 석 훈*

A Study on the Heat Transfer of Carbon Steels in Quenching

(A Quenching Simulation for Large Rolls)

K. K. Kim · S. H. Yoon

Key words : Quenching(담금질), Carbon steel(탄소강), Cooling curve(냉각곡선), Coolant(냉각제), Subcooled transient boiling curve(과냉과도비등곡선)

Abstract

The very rapid cooling problem from 820℃ to 20℃ on the surface of the steel by thermal conduction including the latent heat of phase transformation of steel and by transient boiling heat transfer of water are considered to the principal problem in quenching.

The transient boiling process of water at the surface of specimen during the quenching process were experimentally analyzed. Then the heat flux was numerically calculated by the numerical method of inverse heat conduction problem.

In this report, the simulation program to calculate the cooling curves for large rolls was made using the subcooled transient boiling curve as a boundary condition. By this simulation program, the cooling curves of rolls from D=50mm to D=200mm were calculated and the effects of agitation or circulation of water also investigated.

1. 서 론

담금질이란 강재의 경도를 향상시키기 위하여 변태점 이상의 적당한 온도로 가열한 후, 냉각제로 급속히 냉각시키는 조작¹⁾을 말하며, 이러한 과정을 통하여 생기기 쉬운 변형이나 크랙, 잔류응력 등을 최소로 줄이면서 요구되는 경도, 인성 및 강

도를 얻는 것이 바람직하다. 담금질에 사용되는 냉각제로는 여러가지 첨가제가 포함된 기름, 물, 폴리머 수용액 및 염이나 알칼리계 수용액 등의 액체냉각제와 헬륨, 알곤 및 염소 등의 불활성기체 냉각제가 있으며 열처리재료의 경화능, 단면두께, 형상 및 원하는 조직 등에 따라서 적당한 냉각제를 선택하여 사용해야 한다.

* 정회원, 한국해양대학교 해사대학

강재의 냉각곡선은 담금질효과의 분석과 냉각제의 냉각능력에 관한 연구에 매우 중요한 자료이며, 이를 이용하여 강재의 냉각속도를 계산할 수 있다. 담금질시 강재의 A_1 변태점 부근에서의 냉각속도인 A_1 냉각속도²⁾와 M_s 온도역인 300 부근 영역에서의 냉각속도는 매우 중요하다. 이러한 이유는 A_1 냉각속도가 상부임계냉각속도 이상일 때에는 제2단계 변태는 지연되고 제1단계 변태만 일어나며, 오스테나이트 조직으로부터 마르텐사이트 조직이 형성되기 시작하는 M_s 온도역에서는 균열이나 변형을 줄이기 위하여 냉각속도를 최소로 하는 것이 바람직하기 때문이다.

이와 같이 담금질효과를 예측하고 이를 판별하기 위한 중요한 근거가 되는 강재의 냉각곡선을 예측하기 위해서는 냉각조건에 따른 정확한 비등곡선을 구하는 것이 필요하다. 그러나 지금까지 비등곡선에 관한 연구는 포화비등에 관한 연구^{3),7)}가 대부분이며, 실제의 열처리시에 적용될 수 있는 과냉도가 큰 과냉과도비등곡선에 관한 연구결과^{4),7),8)}는 매우 부족한 실정이다. 또한 기계구조용 강으로써 널리 사용되고 있는 탄소강의 담금질시에는 변태열이 발생하여 냉각곡선의 형상에 큰 영향을 미치므로 이러한 상변태열의 발생을 고려하여 실제에 가까운 냉각곡선을 구하는 것이 보다 정확한 담금질결과와의 예측과 열처리기술의 개선을 위하여 매우 중요한 요소이다.

그러므로 본 연구에서는 열전달률에 미치는 시편 직경의 영향을 검토하고, 탄소강의 담금질시에 발생하는 상변태열⁹⁾을 고려한 담금질 시뮬레이션을 행하여, 담금질 조건에 따른 열처리결과를 예측할 수 있는 전산프로그램을 개발하고자 한다.

2. 실험

직경의 크기가 열전달에 미치는 영향을 검토하기 위하여 직경이 다른 여러 종류의 시편을 이용하여 비등곡선을 구하는 실험을 행하였다. Fig. 1은 본 실험에 사용된 실험장치의 개략도로써, ①은 시편 가열용 전기로, ②는 변압기, ③은 전기로내의 승온시간과 유지시간 등을 조절할 수 있는 PID 온도조절기, ④는 전기로내에 공급되는 분위기 가스

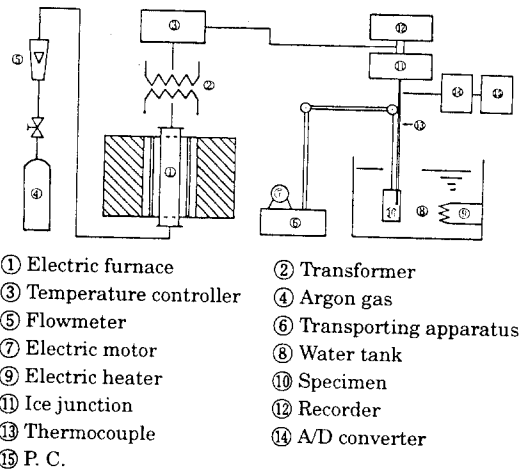


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

인 알콘가스, ⑤는 분위기 가스의량을 조절할 수 있는 유량계, ⑥은 시편 이송장치, ⑦은 시편 이송용 전기모터. ⑧은 냉각탱크, ⑨는 냉각수 온도조절용 히터, ⑩은 시편, ⑪은 Ice junction, ⑫는 온도기록계, ⑬은 열전대, ⑭는 A/D converter(12bits, 32ch.)이며 ⑮는 P.C.이다. 냉각액으로는 용존가스가 비등에 미치는 영향을 감소시키기 위하여 일반수도물을 끓여서 사용하였으며, 냉각과정중의 시편온도는 열전대를 시편 내부에 취부하여 측정하였다.

직경의 크기가 열전달률에 미치는 영향을 조사하기 위하여 직경이 다른 9종류의 시편을 이용하여 과냉과도비등곡선을 구하는 실험을 행하였다.

냉각과정중의 시편온도를 측정하기 위하여 각각의 시편에 직경 1.1mm의 구멍을 시편 표면으로부터 중심방향으로 3mm의 위치에 길이 방향으로 가공하였다. 길이가 80mm이고 직경이 4, 6, 8, 10mm인 시편은 깊이 40mm인 구멍을, 길이가 100mm이고 직경이 12, 14, 16, 19mm인 시편은 깊이가 50mm인 구멍을, 그리고 길이가 120mm이고 직경이 32mm인 시편은 깊이가 60mm인 구멍을 가공하여 C-A Sheathed 열전대를 취부하였다.

이와 같이 열전대를 설치한 시편을 전기로내에 넣어서 850℃까지 가열하여 5분간 유지시킨 후, 시편 이송장치에 의하여 신속하게 냉각탱크에 투

입하여 냉각곡선을 측정하였다.

3. 실험결과

일반적으로 열전달은 직경의 영향을 많이 받게 되므로 열전달율도 직경의 크기에 따라서 달라지게 된다. Fig. 2는 수평원주의 포화막비등열전달에 관한 연구결과를 정리한 그림이며, ●로 표시된 것이 본 실험에 의하여 구해진 수직원주의 포화막비등열전달율이다. 본 그림에서 알 수 있는 바와 같이 직경의 크기에 따라서 열전달율의 크기가 매우 달라지지만 이것은 직경이 매우 작은 경우이며, 직경이 약 12mm 이상의 경우에는 직경의 영향이 급격히 작아짐을 알 수 있으며, 본 시뮬레이션 대상인 직경 50~200mm인 물의 경우에는 직경의 크기에 따른 영향이 미미함을 알 수 있다.

Fig.3은 직경이 12mm인 Cu시편을 이용하여 과냉도가 다른 냉각제로 냉각할 때의 냉각곡선을 구하고, 이 곡선을 이용하여 과도비등곡선을 계산한 그림이다. 본 그림에서 알 수 있는 바와 같이 주로 담금질에서 많이 이용되는 $\Delta T_{sub}=80K$ 인 경우의 비등곡선에서는 막비등현상이 거의 발생하지 않

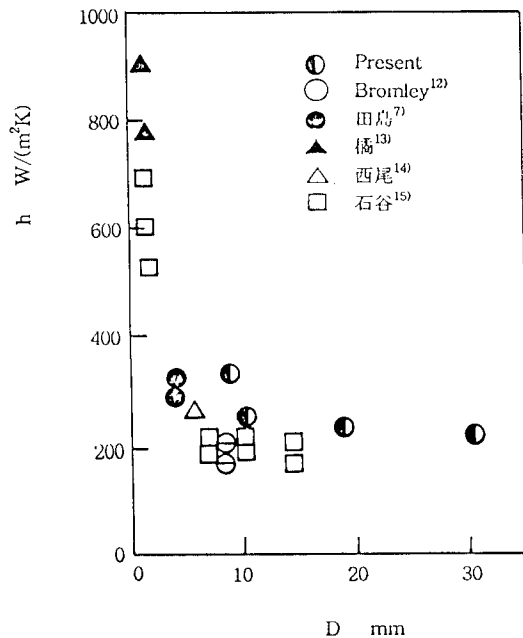


Fig. 2 The heat transfer coefficient

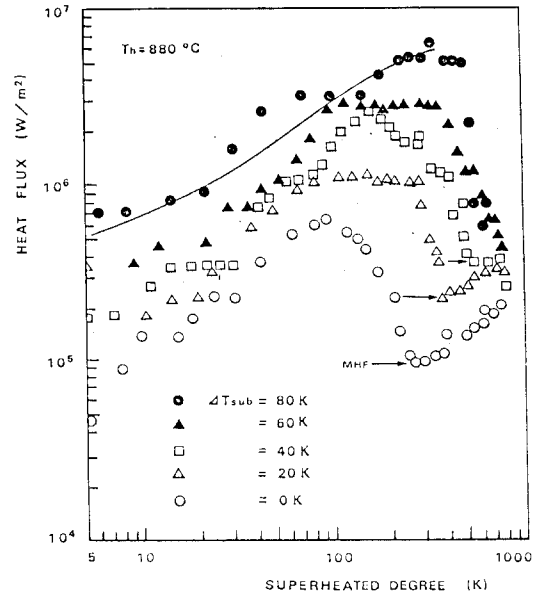


Fig. 3 The calculated boiling curves in case of the Cu specimen(D=12mm)

음을 알 수 있으며, 핵비등영역에서의 열유속의 식은 다음과 같다.

$$q = 2.015 \times 10^5 T_{sat}^{0.55} \quad (3.1)$$

$$: T_{sat} \leq 500K$$

4. 대형 물에 대한 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 방법

강재의 냉각곡선을 구하는 방법에는 열처리시마다 강재의 내부에 열전대를 설치하여 냉각곡선을 실측하는 방법과 열처리의 조건과 강재의 형상 및 물성치 등을 고려한 수치시뮬레이션을 통하여 냉각곡선을 구하는 방법이 있다. 이러한 방법들 중에서 실측에 의하여 냉각곡선을 구하는 방법이 가장 정확한 방법이겠지만, 이 방법은 열처리의 대상이 되는 모든 종류의 시편에 열전대를 설치하여 냉각곡선을 측정해야 하므로 현실적으로 불가능하며 또한 비능률적이다. 따라서 본 장에서는 전장에서 구한 과냉과도 비등곡선을 경계조건으로 하여 실험이 불가능한 대형 물의 냉각곡선을 계산하고 이 결과로부터 열처리 효과를 예측할 수 있는 시뮬레이션 방법에 관하여 기술한다.

본 시뮬레이션에서는 TDMA법¹¹⁾을 사용하여 수치계산을 행하였으며, 경계조건으로는 전장의 과냉과도 비등곡선으로부터 구한 표면열유속을 택하였다.

전장의 실험결과에서, 과냉도 $\Delta T_{sub}=80K$ 의 비등곡선의 CHF점 온도는 대략 $\Delta T_{sat}=500K$ 이었으므로 핵비등영역인 CHF점 온도 이하의 영역에서는 식(3.1)을 시뮬레이션의 경계조건으로 하였다. 또한 냉각액의 과냉도가 큰 경우에는 냉각중에 천이비등과 막비등현상이 거의 나타나지 않으므로 시편표면의 과열도 $\Delta T_{sat}=500K$ 이상인 경우에는 표면열유속이 일정하다고 간주하고 냉각액의 과냉도 $\Delta T_{sub}=80K$ 에서의 CHF인 $q=5.0 \times 10^6 W/m^2$ 을 표면열유속으로 하여 계산을 행하였다. 실제의 계산에서 시편표면의 과열도 $\Delta T_{sat}=500K$ 이상인 경우는 냉각 초기의 짧은 순간 뿐이므로 냉각 초기를 제외한 대부분의 계산단계에서는 핵비등영역의 열유속식이 계산에 사용되었다.

경계조건으로는 시편의 중심에 대하여 온도분포가 대칭이라는 조건과 전장의 비등곡선으로부터 구한 표면열유속으로, 다음 식과 같다.

$$r=0 : \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (4.1)$$

$$r=A : q_{(A,t)} = q_s \quad (4.2)$$

상기 식의 q_s 는 다음과 같다.

$$q_s = 5.0 \times 10^6 \quad (4.3)$$

$$: \Delta T_{sat} > 500K$$

$$q_s = 2.015 \times 10^5 \Delta T_{sat}^{0.55} \quad (4.4)$$

$$: \Delta T_{sat} \leq 500K$$

그리고 초기조건으로는 다음과 같이 각 절점이 균일한 온도분포를 갖는다고 가정하였다.

$$T_{(i,0)} = 820^\circ C \quad (4.5)$$

유도된 이산화 방정식의 일반형은 다음과 같다.

$$\left(\frac{\rho c_A \Delta W_A}{\Delta t} + \frac{k_A r_{i-1/2}}{\delta r_{i-1}} + \frac{k_i r_{i+1/2}}{\delta r_i} \right) T_i^1 - \frac{k_i r_{i+1/2}}{\delta r_i} T_{i+1}^1 - \frac{k_i r_{i-1/2}}{\delta r_{i-1}} T_{i-1}^1 + \frac{\rho c_i \Delta W_i}{\Delta t} T_i^0 = \dots \quad (4.6)$$

상기 식(4.6)으로부터 물 표면에서의 이산화 방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$\left(\frac{\rho c_A \Delta W_A}{\Delta t} + \frac{k_A r_{A-1/2}}{\delta r_{A-1}} \right) T_A^1 - \frac{k_A r_{A-1/2}}{\delta r_{A-1}} T_{A-1}^1 + \frac{\rho c_A \Delta W_A}{\Delta t} T_A^0 - \frac{k_A r_{A-1/2}}{\delta r_{A-1}} (T_A^1 - T_{A-1}^1) \quad (4.7)$$

식 (4.7)에서 $\frac{k_A r_{A-1/2}}{\delta r_{A-1}} (T_A^1 - T_{A-1}^1)$ 항은 시편의 표면에서 냉각액으로 흐르는 열유속을 의미하며 이 열유속은 경계조건에서 q_s 로 주어졌으므로 이산화 방정식 (4.7)의 각 계수는 다음과 같이 된다.

$$a_A = -\frac{\rho c_A \Delta W_A}{\Delta t} + \frac{k_A r_{A-1/2}}{\delta r_{A-1}} \quad (4.8)$$

$$b_A = 0 \quad (4.9)$$

$$c_A = \frac{k_A r_{A-1/2}}{\delta r_{A-1}} \quad (4.10)$$

$$d_A = -\frac{\rho c_A \Delta W_A}{\Delta t} T_A^0 - q_s \quad (4.11)$$

이산화 방정식의 일반형은 다음과 같다.

$$a_i T_i^1 = b_i T_{i+1}^1 + c_i T_{i-1}^1 + d_i \quad (4.12)$$

TDMA법에 따라 온도 T_i^1 는 다음과 같이 표시할 수 있다.

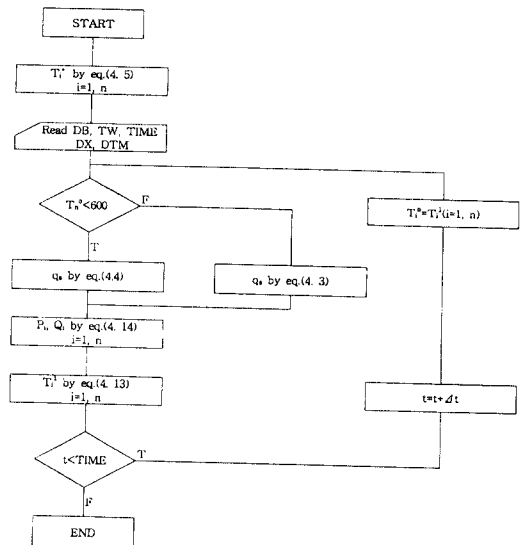


Fig. 4 Flow chart of simulation program

$$T_i' = P_i T_{i-1}' + Q_i \quad (4.13)$$

식 (4.13)의 계수 P_i, Q_i 는 다음과 같다.

$$P_i = \frac{c_i}{a_i - b_i P_{i+1}}, \quad Q_i = \frac{d_i + b_i Q_{i+1}}{a_i - b_i P_{i+1}} \quad (4.14)$$

식(4.14)에 의하여 P_i, Q_i 를 구한 후, 이 계수를 식(4.13)에 대입하여 각 절점의 온도를 계산한다. 이에 관한 전체적인 플로우 차트는 Fig. 4와 같다.

4.2 계산결과

Fig. 5는 재질이 S45C 탄소강으로 직경이 50mm에서부터 200mm까지인 대형 물의 중심부 냉각곡선을 계산한 결과를 연속변태냉각선도(CCT diagram)위에 나타낸 것이다. 이 그림을 고찰하면 계산에 사용된 모든 물의 중심부에서는 Ar'변태만이 일어나고 Ar''변태는 전혀 일어나지 않는다. D=200mm 물의 경우는 냉각시간이 100초 이상 경과한 후에도 물의 중심부에서는 전혀 냉각이 이루어지지 않고 초기온도를 그대로 유지하고 있음을 알 수 있으며 D=50mm 물은 냉각액에 투입되어 약 8초 경과한 후 급격히 냉각되고 있음을 알 수 있다.

담금질 냉각시의 냉각능력은 냉각제의 종류와 냉각방법 등에 따라서 큰 차이가 있으며 이러한 냉각능력을 나타내는 방법으로는 다음 식으로 표시되는 그로스만 H (Grossmann H, G_F)가 많이 사용되고 있다.

$$G_F = \frac{h}{2k} \quad (4.15)$$

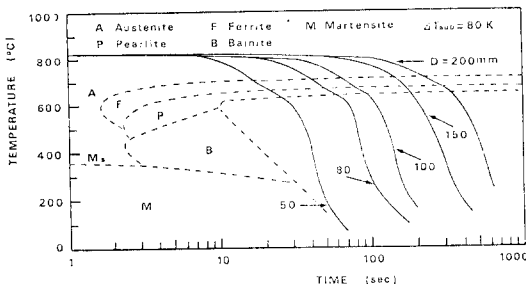


Fig. 5 Calculated cooling curves at the centers of various diameters

Table 1 Quench severity factor(G_F) of various coolant and cooling methods

Cooling methods	Coolants			
	Brine	Water	Oil	Air
None	2.0	0.9 - 1.0	0.25 - 0.30	0.02
Mild	2.0 - 2.2	1.0 - 1.1	0.30 - 0.35	
Moderate		1.2 - 1.3	0.35 - 0.40	
Good		1.4 - 1.5	0.4 - 0.5	
Strong		1.6 - 2.0	0.5 - 0.8	
Violent	5.0	4.0	0.8 - 1.1	0.08

여기서 G_F 는 그로스만 H, k는 강재의 열전도계수, h는 표면에서의 열전달률을 의미한다.

Table 1'은 1947년에 발표된 여러 종류의 냉각제에 대한 G_F 값을 보여 주고 있는데, 이 표는 냉각제의 물성치를 자세히 고려하지 않았음에도 불구하고 지금까지 열처리 현장에서 중요한 자료로 사용되고 있다. 이와 같이 냉각제의 종류와 냉각방법에 따라 G_F 가 다르므로 이 값을 본 연구에서 구한 정지수($G_F=1.0$)중에서의 표면열유속인 식(4.3)와 (4.4)에 곱하면 냉각제의 종류 및 냉각방법별 표면 열유속을 구할 수 있다.

$$q_s' = G_F \times q_s \quad (4.16)$$

열처리 효과를 극대화시키고 강재의 사용목적에 부합되는 금속조직을 얻기 위하여는 효과적인 담금질방법과 적절한 냉각제를 선택해야 하며 이러한 선택의 기준이 되는 것은 냉각제의 냉각능력(cooling power)이다. 따라서 본 연구에서는 냉각제의 종류별 냉각능력과 냉각방법에 따른 냉각효과를 정확하게 예측하기 위하여 Table 1의 냉각능력을 기준으로 하여 냉각제의 종류별 및 냉각방법별로 냉각곡선을 계산하여 열처리 결과를 고찰하였다

Fig. 6은 직경 100mm의 S45C 탄소강 물을 이용하여 $\Delta T_{sub}=80K$ 이며 교반이 없는 여러 종류의 냉각제로 담금질하는 경우의 중심부 냉각곡선을 계산한 그림이다. 그림의 곡선들은 계산에 사용된 냉각제별 냉각능력의 대소에 관계 없이 전체적으로 곡선들의 기울기가 매우 완만하며 냉각제의 종류별 차이가 매우 적다. 이 그림에서 냉각능력이

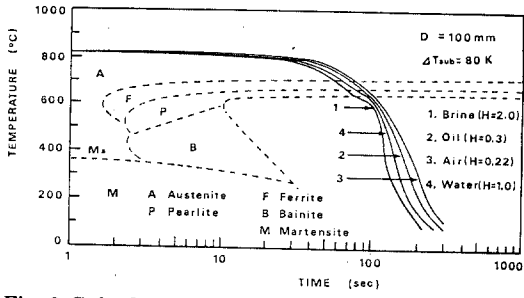


Fig. 6 Calculated cooling curves at the center of roll for various coolants

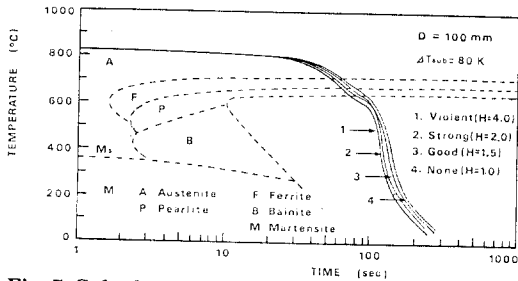


Fig. 7 Calculated cooling curves at the center of roll for intensity of agitation or circulation

제일 큰 Brine($G_F=2.0$)을 이용하여 냉각하는 경우의 중심부 냉각곡선과 냉각능력이 제일 작은 공기($G_F=0.22$)중에서 냉각하는 경우의 냉각곡선을 비교하면, Brine과 공기의 냉각능력은 약 10배의 차이가 있으나 중심부 냉각곡선의 경사나 전체적인 냉각시간은 냉각능력의 차이만큼 크게 나타나지 않고 있다.

Fig. 7은 냉각제로 가장 많이 사용되는 물을 기준냉각제로 택하여 Fig. 6과 동일한 크기의 물에 대하여 교반의 정도에 따라 중심부 냉각곡선이 어떻게 변화하는가를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 냉각수의 교반이 전혀 없는 경우($G_F=1.0$)와 교반이 매우 심한 경우($G_F=4.0$)의 냉각곡선을 비교하면 롤러의 중심부에서는 냉각제의 종류 및 냉각방법의 영향을 크게 받지 않음을 알 수 있다.

Fig.8은 비교적 물의 표면에 가까운 부분에서의 열처리 효과를 고찰하기 위하여 직경 100mm이며 재질이 탄소강인 물을 Fig. 7과 같이 물을 기준냉각제로 택하여 교반의 정도에 따라서 $r/R=0.8$, 즉 롤러 표면하 10mm ($r=40$ mm) 위치에서의 냉각곡선이 어떻게 변화하는가를 나타낸 그림이다. 이 그림을 고찰하면 동일한 크기의 물에 대하여 동일

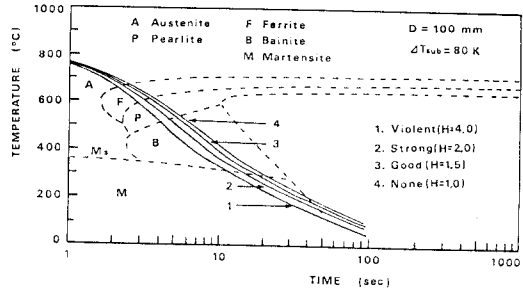


Fig. 8 Calculated cooling curves at the position of $r/R=0.8$ for the intensity of agitation or circulation

한 조건하에서 계산된 Fig. 7의 중심부 냉각곡선들 보다는 냉각능력(G_F)의 효과가 다소 크게 나타나고 있다. 즉 교반이 없는 냉각수($G_F=1.0$)로 냉각하는 경우에는 A_r 변태가 거의 일어나지 않지만 교반의 정도가 강해질수록 냉각곡선의 기울기가 약간씩 증가하여 A_r 변태량이 점차 증가한다.

5. 결 론

이상과 같은 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 과냉과도비등곡선을 이용하여 표면열유속을 구하고 이를 경계조건으로 하여, 대형 물에 관한 담금질 시뮬레이션을 할 수 있었다.

2) 강재의 크기, 담금질의 방법과 냉각제의 종류별 시뮬레이션을 할 수 있는 전산프로그램을 개발하므로써 담금질 조건에 따른 담금질효과를 예측할 수 있다.

3) 탄소강의 담금질시에 발생하는 상변태열을 고려한 계산을 하므로써 보다 실제에 가까운 열처리결과를 예측할 수 있다.

후 기

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

참고문헌

- 1) 금속열처리기술편람 편집위원회, "금속열처리기술 편람", 서울, 기전연구사, pp. 19 - 20(1987)
- 2) 機電研究社 譯, "강의열처리", 서울, 기전연구사, pp. 51 - 52(1979)
- 3) A. E. Bergles and W. G. Thompson, "The relationship of quench data to steady - state pool boiling data", *Int. J. Heat & Mass Transfer*, Vol. 13, pp. 55 - 68(1970)
- 4) 西尾茂文, 上村光宏, "靜止水の冷却能力に關する實驗的研究(サブクール度の影響)", *熱處理*, 第23卷 5號, pp. 260 - 265(1983)
- 5) 稻田茂昭, 宮阪芳喜, 泉亮太郎, 小長谷芳彦, "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およぼすサブクール度の影響)", *日本機械學會論文集(B編)*, 第47卷 417號, pp. 852 - 861(1981)
- 6) Y. Kikuchi, T. Hori and I. Michiyoshi, "Minimum film koiling temperature for cooldown of insulated metals in saturated liquid", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 28, No. 6, pp. 1105 - 1114 (1985)
- 7) 田島守, 牧忠, 片山功藏, "鍋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)", *日本機械學會論文集(B編)*, 第54卷 508號, pp. 3491 - 3496 (1988)
- 8) 蜂巢毅, 佐佐木敏美, 祖父江昌久, 田口啓二, "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編)*, 第45卷 397號, pp. 1354 - 1362(1979)
- 9) 윤석훈, 김경근, "탄소강 담금질시의 상변태열과 이를 포함한 냉각곡선의 계산", *한국박용기관학회지*, 제18권 3호, pp. 260 - 266(1994. 8)
- 10) 윤석훈, 홍영표, 김경근, 김용모, "고온강재의 담금질 열전달에 관한 연구(제1보 : 과냉과도 비등열전달과 냉각곡선)", *대한기계학회논문집*, 제17권 6호, pp. 1529 - 1540(1993)
- 11) S. V. Patankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere, New York, pp. 41 - 78(1980)
- 12) L. A. Bromley, "Heat transfer in stable film boiling", *Chemical engineering progress*, Vol. 46, No. 5, pp. 221 - 227(1950)
- 13) 橋藤雄, 鹽治震太郎, "焼入れの熱傳達に關する研究", *日本機械學會論文集(B編)*, 第38卷 309號, pp. 1056 - 1064(1987)
- 14) 西尾茂文, 上村光宏, "靜止水の冷却能力に關する實驗的研究", *熱處理*, 第23卷 5號, pp. 260 - 265(1983)
- 15) 石谷, *日本機械學會論文集*, 第29卷 198號, p. 348(1963)