

論文

컴퓨터 시뮬레이션에 의한 구조용 합금강의 경화능특성 해석

金 桂 洙 · 洪 俊 杓
연세대학교 공과대학 금속공학과

Computer Simulation of Hardenability Characteristics of Alloy Steel for Structural Purposes

K. S. Kim and C. P. Hong

Department of Metallurgical Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749

ABSTRACT

In this study, the specimens of SCM 22 H steel were quenched in oil and water baths at various agitation conditions in order to investigate the effects of quenchants and agitation conditions on the quench-hardening. A multi-channel temperature measurement apparatus was employed to obtain the cooling curves at several predetermined positions of specimens. Microstructural observation and hardness test were also carried out.

Computer simulation of heat treating process was carried out using the modified finite difference method. Prediction of thermal history and hardness distribution by 2-dimensional computer analysis was in good agreement with the experimental results. It was found that the quantitative design of heat treating process can be made by the computer aided heat-treating analysis.

1. 서 론

최근 컴퓨터기술의 급속한 발전과 더불어 각종 금속 가공분야에 있어서, 생산성 향상, 생산비 절감 및 품질 향상을 위해 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 많은 응용연구가 발표되고 있다.^{1)~4)} 이 중에서도 특히 열전달해석은, 구조물의 설계, 용접설계 및 컴퓨터에 의한 금형의 냉각수로 설계등에 널리 이용되고 있으며, 열처리 프로세스의 해석에 관한 응용연구도 발표되고 있다. 그러나 종래에는 대부분 단순한 형상의 열처리 부품에 대하여 실험적인 연구를 중심으로 열처리부품의 성능향상을 위한 시도를 했었으므로, 실제의 열처리 프로세스에의 응용에는 크게 기여하지 못하고 있는 실정이다.^{5)~7)}

열처리 제품의 품질은 제품이 사용되는 목적에 맞는 합금의 선택, 바람직한 미소조직과 기계적 성질을 얻을 수 있는 열처리조업의 선택 및 정량적인 열처리 실시에 의해서 결정되어 진다. 또한 합금의 종류에 따른 등온 변태곡선, 연속냉각변태곡선의 정확한 결정과 분석이 필요하며, 이들 변태곡선의 실제 열처리 작업에의 정량적인 적용이 요구된다. 변태곡선을 실제 열처리 작업에 적용하기 위해서는 제품을 가열, 유지, 냉각시키는 동안의 열이력(thermal history)을 정확하게 해석할 필요가 있다.

종래의 경우에는 단순한 형상에 대한 모형실험과 해석적인 방법에 근거를 둔 근사해에 의하여 이러한 목적을 추구하였으나 실제 열처리 제품의 형상은 복잡하고,

열처리 조건도 다양하므로 이들의 적용에는 한계가 있어 실제적으로 광범위한 응용에는 어려운 실정이다.

따라서 본 연구에서는 기초실험을 행한 후, 개량차분법을 도입하여 비정상열전달해석을 행함으로써 형상이 복잡한 열처리 제품을 냉각매질과 교반조건을 변화시키면서 소입한 경우 각 냉각조건에 따른 강재의 소입효과 및 이에 의존하는 질량효과(mass effect)를 예측하고 제어하는 것을 목적으로 하였다.

2. 해석 방법

2.1 기본미분방정식과 경계조건

온도변화와 더불어 상변화 및 이에 따른 열응력의 발생이 수반되지만 여기에서는 열적변화만을 고려하기로 한다. 따라서 제품내의 열전도 기초미분방정식은 원주 좌표의 경우 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(K \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(K \frac{\partial T}{\partial Z} \right) \quad (1)$$

경계조건은, 제품의 표면이 가열 및 냉각매질(기체 또는 액체)과 접촉하였을 때 다음과 같이 표시된다.

(i) 대류열전달의 경계조건에 의해 지배되는 경우 즉, 매질의 온도 T_s 와 열전달계수 h 가 주어지는 경우

$$q = h(T_s - T) \quad (2)$$

(ii) 복사열전달에 의해 지배되는 경우

$$q = \sigma \epsilon (T_s^4 - T^4) \quad (3)$$

(3)식에서 σ 는 Stefan-Boltzmann정수 ($1.356 \times 10^{-12} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}^4$), ϵ 은 복사율이다. 제품을 로내에서 가열하는 경우를 제외하고는, 냉각매질에 침지하여 냉각하므로 식(2)와 같은 뉴톤의 냉각법칙에 의하여 열전달이 지배된다.

2.2 수치해석의 모델

열처리 과정에서 기본이 되는 가열, 유지, 냉각의 프로세스를 컴퓨터 시뮬레이션하기위해서 Fig.1과 같은 쿨링모델을 사용하였다. 1 단계는 복사에 의한 냉각, 2 단계는 비등에 의한 냉각, 3 단계는 대류에 의한 냉각단계로서 비열, 열전도도는 온도의 함수로서, 열전달계수는 시간의 함수로서 변화시키면서 시간에 따른 온도변화를 해석하였다.^{15),16)}

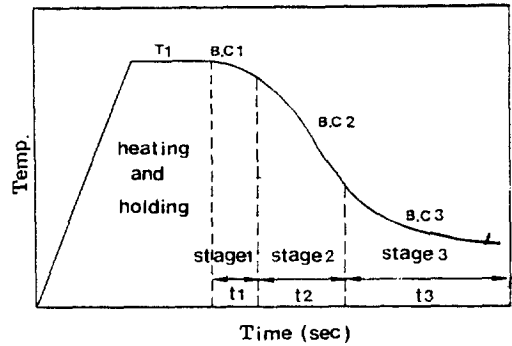


Fig.1. Modeling of quenching process for computer simulation.

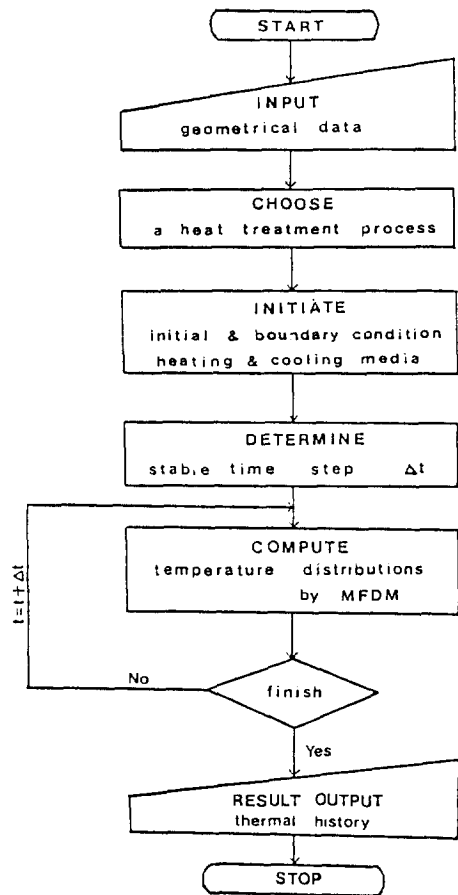


Fig.2. Flow diagram for heat-treating simulation.

본 연구에 사용한 열처리 해석용 프로그램의 흐름도를 Fig.2에 나타냈으며, 컴퓨터 시뮬레이션에 사용된

Table 1. Thermal and physical properties used in computer simulation.

밀도 (g/cm ³)	7.84			
비열 (cal/g·°C)	300°C 이하	0.059		
	300 - 400°C	0.139		
	400 - 500°C	0.140		
	500 - 600°C	0.156		
	600 - 700°C	0.176		
	700 - 800°C	0.206		
	800 - 900°C	0.206		
열전도도 (cal/cm·s·°C)	300°C 이하	0.206		
	300 - 400°C	0.088		
	400 - 500°C	0.108		
	500 - 600°C	0.104		
	600 - 700°C	0.100		
	700 - 800°C	0.093		
	800 - 900°C	0.090		
열전달계수 (cal/cm ² ·s·°C)	수냉 정지교반	0 - 4 초	0.0267	
		4 - 8 초	0.1710	
		8 - 12 초	0.0458	
		12 초 이상	0.0458	
	수냉 교반	0 - 4 초	0.0541	
		4 - 8 초	0.1711	
		8 - 12 초	0.0466	
		12 초 이상	0.0459	
	유냉 정지교반	0 - 4 초	0.0063	
		4 - 8 초	0.0185	
		8 - 20 초	0.0365	
		20 초 이상	0.0160	
		유냉 교반	0 - 4 초	0.0066
			4 - 8 초	0.0512
			8 - 16 초	0.0365
			16 초 이상	0.0228

열 물성치는 Table 1 과 같다.

3. 실험 방법

본 연구에 사용한 시편으로는 자동차의 엑셀샤프트, 커넥팅로드, 피스톤 핀, 링 기아, 피니온 기아, 트랜스미션 기어로 사용되는 SCM 22 H (JIS SCM 420 H 해당) 강을¹⁾ 선택하였다.

Table 2. Chemical composition of SCM 22 H steel in weight percent.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.22	0.33	0.87	0.014	0.018	1.12	0.17

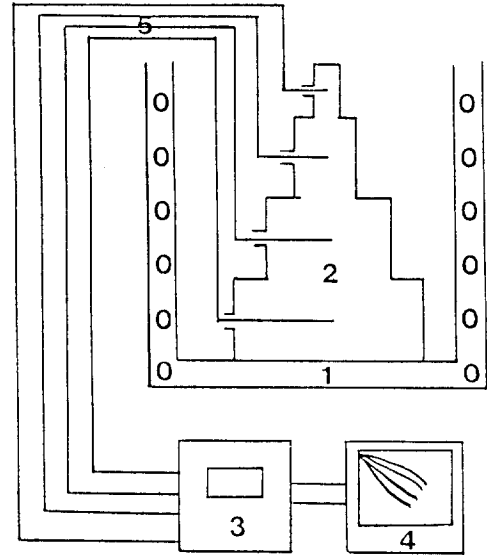


Fig. 3. Schematic of experimental apparatus.

- 1 : furnace 2 : specimen
- 3 : multi-channel temperature measurement apparatus
- 4 : personal computer 5 : thermocouple (CA type)

본 연구에 사용된 시편의 화학조성은 Table 2 와 같다. 질량효과에 따른 냉각속도 (시간-온도) 측정을 위해서 ϕ 55 mm×L 210 mm의 환봉을 ϕ 55 mm×L 50 mm, ϕ 40 mm×L 50 mm, ϕ 25 mm×L 50 mm, ϕ 10 mm×L 50 mm로 4 단가공한 후, 시편 각 단의 중심 부위에 직경 ϕ 3.8 mm의 작은 구멍을 뚫고 CA열전대를 삽입한 후 아르곤 용접으로 완전히 밀봉하고 이 시편을 900°C에서 2 시간 가열, 유지한 후 30°C의 물 또는 기름에 교반을 행할 때와 행하지 않을 때에 각각 소입하였다. 이때 상기 각 부위의 냉각속도를 8 bit personal computer를 이용한 다중회로 온도측정장치 (multi-channel temperature measurement apparatus)로써 측정하였고 각 부위에서의 조직관찰 및 경도측정을 행하였다.

본 실험장치의 개략도를 Fig.3에 나타내었다. 소입시

Table 3. The characteristics of quenching oil(Voluta C).

density	flash point (°C)	pour point (°C)	viscosity (cst)		viscosity index
0.872	229	-15	40°C	36.2	103

냉각매질의 온도상승을 억제할 만큼 냉각능력이 큰 500×1000×400 mm 용량의 냉각조를 사용하였으며, 교반조는 냉각매질의 흐름이 전혀없는 데드 존(dead zone)을 가급적 줄이고 교반효과를 극대화하기 위해서 1/8 H.P 단상유도모터에 4각 임펠러를 부착한 후 24 V (235 rpm) 전압으로 교반을 행하였다.

소입용 기름으로는 공업용 일반 열처리유인 Voluta C 를 사용하였으며, 이 열처리유의 특성은 Table 3 과 같다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 냉각곡선의 거동에 대한 냉각매질과 교반조건의 영향

유냉시, 교반을 행할 때와 행하지 않을 때의 다중회로 온도측정장치로 측정된 직경 ϕ 10 mm, ϕ 25 mm, ϕ 40 mm, ϕ 55 mm 중심부위에서의 냉각곡선을 Fig.4

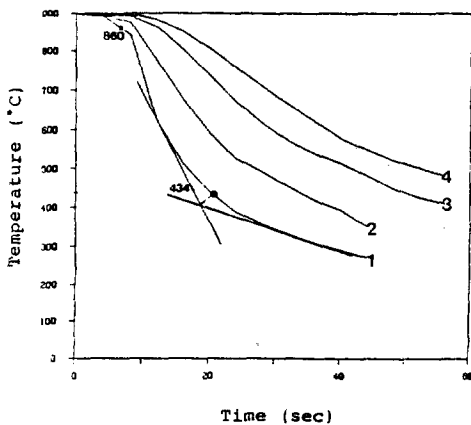


Fig.4. Experimental cooling curves of SCM 22 H steel for oil quenching without agitation.

- 1 : center for $\phi = 10$ mm
- 2 : center for $\phi = 25$ mm
- 3 : center for $\phi = 40$ mm
- 4 : center for $\phi = 55$ mm

와 Fig.5 에 나타내었다. 냉각곡선은 증기막단계(vapor blanket stage), 비등단계(vapor transport or boiling stage), 대류단계(liquid cooling or convection state)의 3 단계로 구별된다.^{9,11)}

제 1 단계인 증기막 단계는 냉각제의 증기막이 형성되는 과정으로서 강재의 열전달이 증기막을 통한 복사와 전도에 의해서 일어나므로 상대적으로 서서히 냉각되는 단계이다.

제 2 단계인 비등단계는 강제 표면과 접한 냉각매질의 비등이 일어나면서 증기막을 분해시키므로 냉각속도가 3 단계중 가장 빠른 단계이다. 제 3 단계인 대류단계는 비등이 끝나고 냉각매질로의 대류 열전달이 발생하므로 다시 서서히 냉각되는 단계이다. 3 단계중 증기막 단계가 붕괴되어 비등단계로 옮겨지는 때의 온도를 특성온도(characteristic temperature)라 하며, 냉각매질로의 대류 열전달에 의해 냉각이 시작되는 온도는 대류단계 개시온도(convection stage start temperature)이다.

특성온도, 대류단계 개시온도는 냉각매질의 냉각능을 결정하는 중요한 인자이다. 열처리 냉각제의 냉각능은 특성온도가 높을수록 대류단계 개시온도는 낮을수록 크게 되며, 냉각능이 부족한 경우에는 교반을 통해 증기막을 가급적 빨리 붕괴시키고 냉각매질의 온도를 균일하게 유지하여 비등, 대류단계에서의 전도와 대류 열전

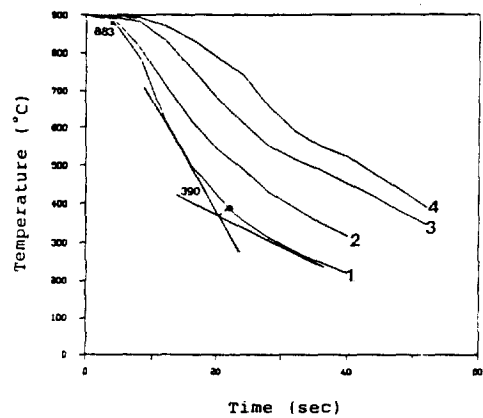


Fig.5. Experimental cooling curves of SCM 22 H steel for oil quenching with agitation.

- 1 : center for $\phi = 10$ mm
- 2 : center for $\phi = 25$ mm
- 3 : center for $\phi = 40$ mm
- 4 : center for $\phi = 55$ mm

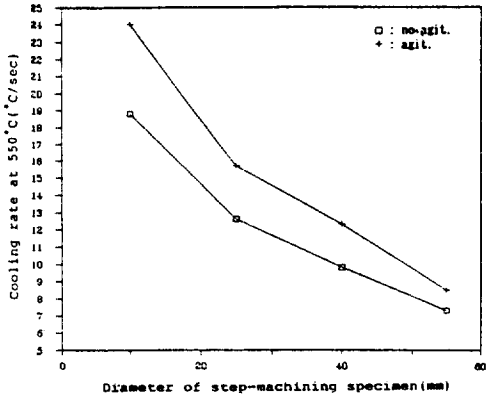


Fig. 6. Variation of cooling rate at 550°C as changing the diameter of step-machined specimen under various agitation conditions in oil quenching.

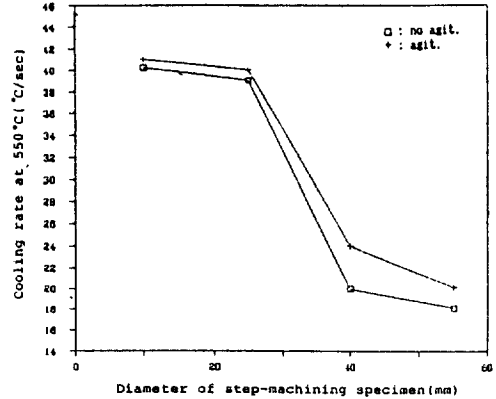


Fig. 7. Variation of cooling rate at 550°C as changing the diameter of step-machined specimen under various agitation conditions in water quenching.

달을 개선함으로써 냉각능을 향상시킬 수 있다.

교반을 행할 때와 행하지 않을 때의 냉각곡선을 비교 하면 교반을 행한 경우 특성온도는 증가하고 대류단계 개시온도는 감소하고 있다. 교반없이 소입한 경우 특성온도는 약 860°C인 반면에 교반시에는 약 883°C로 상승하여 교반으로 인해 소입직후 강재표면과 접한 냉각매질의 증기막층이 빨리 붕괴되고 있음을 알 수 있다. 대류단계 개시온도는 교반없이 유냉한 경우 약 434°C에서 교반시에는 약 390°C로 감소하고 있다.

이와같이 교반을 행한 경우 특성온도는 증가하고 대류단계 개시온도는 감소하므로 냉각속도가 가장 빠른 단계인 비등단계가 그만큼 길어지게 되고 시편 주위의 냉각매질의 온도를 균일하게 유지할 수 있으므로 열처리 냉각제의 냉각능 향상이 기대된다. 따라서 교반조건은 냉각제의 냉각능에 커다란 영향을 미치며 이러한 영향을 잘 고려함으로써 냉각능을 향상시킬 수 있다.

유냉 및 수냉시, 교반을 행할 때와 행하지 않을 때의 550°C에서의 냉각속도의 변화를 Fig.6 과 Fig.7에 나타내었으며 수냉인 경우가 유냉에 비하여 직경의 크기에 따른 냉각속도의 차이가 보다 현저하다는 것을 알 수 있다. 두 경우 모두 교반에 의해 냉각속도가 증가하고 있다.

여기서 550°C에서의 냉각속도를 설정한 이유는 대다수 강의 TTT Diagram 상에서 상변태 시간이 가장 짧은 페라이트, 펄라이트 노즈가 500°C-700°C 사이에 존재

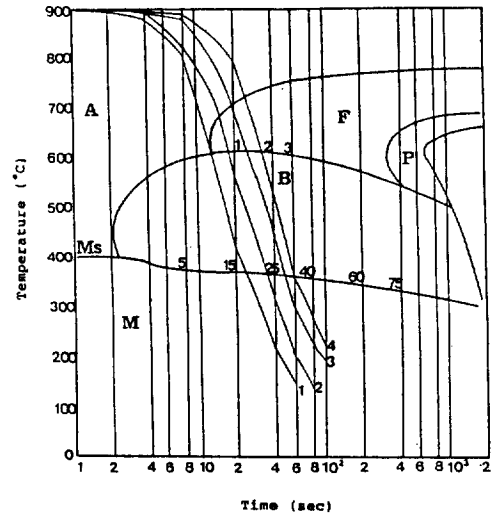


Fig. 8. Cooling curves of SCM 22 H steel (step-machined specimen) superimposed on CCT diagram for oil quenching with agitation.

- 1 : center for $\phi = 10$ mm
- 2 : center for $\phi = 25$ mm
- 3 : center for $\phi = 40$ mm
- 4 : center for $\phi = 55$ mm

하므로 이 온도구간에서의 냉각속도가 소입된 강의 미세조직(마르텐사이트 변태량)을 결정하기 때문이다.¹²⁾

교반을 행하면서 유냉한 경우의 연속냉각 변태곡선(CCT Diagram)을¹³⁾ Fig.8에 나타내었다. 소입 후 냉

각과정을 고려하면, 직경 ϕ 10 mm의 중심부위는 소입한 후 부터 약 14 초 후에 Bs선에 도달하여 이때부터 오스테나이트가 베이나이트로 변태하기 시작한다. 약 25 초까지 오스테나이트의 18% 정도가 베이나이트로 변태한 후 Ms선에 도달하여 약 72% 정도의 잔류 오스테나이트가 마르텐사이트로 변태한다. 따라서 직경 ϕ 10 mm 중심부위의 최종조직은 18% 베이나이트+ 72% 마르텐사이트의 혼합조직이 된다.

반면에 직경 ϕ 55 mm 중심부위는 소입한 후 부터 약 25 초 후에 Fs선에 도달하여 페라이트가 석출하기 시작하며, 약 32 초까지 오스테나이트의 2% 정도가 페라이트로 변태한 후 Bs선에 도달하여 베이나이트 변태가 시작된다. 약 60 초까지 전 오스테나이트의 32% 정도가 페라이트와 베이나이트로 변태한 후 Ms선에 도달하여

약 68% 정도의 잔류 오스테나이트가 마르텐사이트 변태를 일으키게 된다. 따라서 직경 ϕ 55 mm 중심부위의 최종조직은 32% 페라이트+베이나이트 및 약 68% 마르텐사이트의 혼합조직을 갖게 된다. 이와같이 연속냉각 변태곡선상에서의 최종조직 예측은 대략적인 것으로서 임의의 형상인 복잡한 열처리 제품의 경우 각 부위에서의 조직의 분율을 예측하고 제어할 수 있는 기준을 제공할 수 있다. 한편 유냉시 교반을 행할 때와 행하지 않을 때의 직경 ϕ 55 mm 중심부위의 조직사진을 Photo.1에 나타내었다.

유냉의 경우 모든 조직이 혼합조직을 나타내고 있으며 직경 ϕ 55 mm 중심부위는 많은 페라이트와 베이나이트가 존재하고 있음을 알 수 있다. 교반을 행한 경우 직경 ϕ 10 mm 중심부위는 마르텐사이트가 침상의 형태

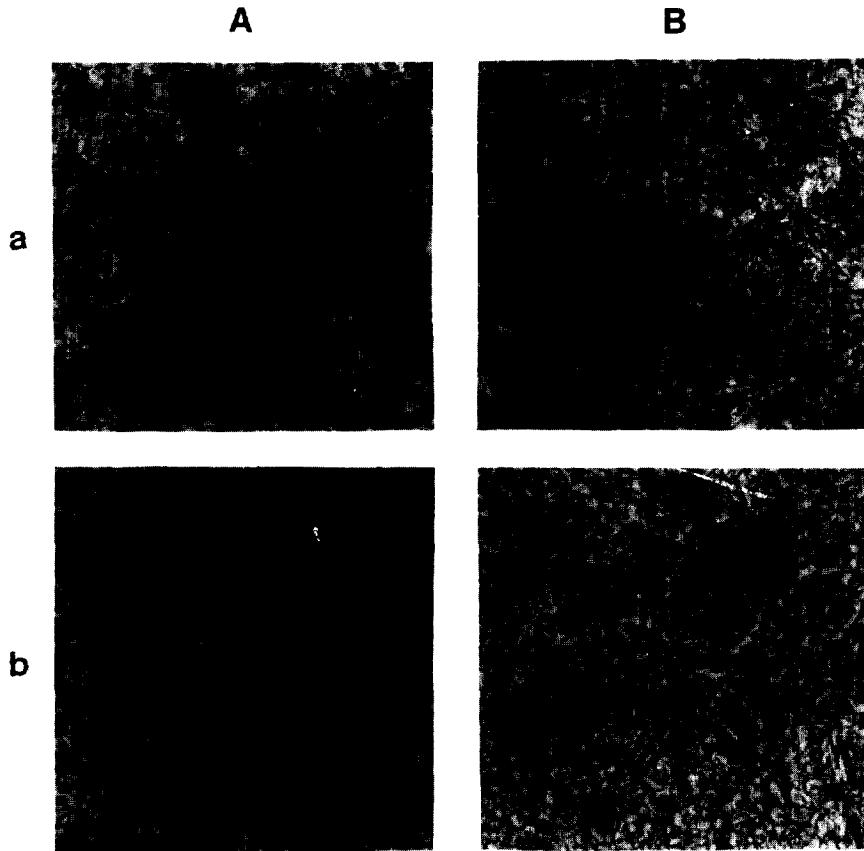


Photo.1. Microstructures of SCM 22 H steel(step-machined specimen) for oil quenching.
 A : center for ϕ =10 mm B : center for ϕ =55 mm
 a : no agitation b : agitation

로 미세하게 나타나고 있으며 직경 ϕ 55 mm 중심부위 도 같은 경향을 보이고 있다. 따라서 교반을 행할 경우, 변태 페라이트 분율의 감소 및 마르텐사이트 분율의 증가로 인하여 경도값의 상승이 예상된다.

수냉의 경우를 고려하면 직경 ϕ 10 mm 중심부위의 조직은 유냉에 비하여 침상 마르텐사이트가 보다 많이 존재하고 있으며 직경 ϕ 55 mm의 경우도 같은 경향을 보이고 있다.

4.2 실험적인 냉각곡선과 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 냉각곡선과의 비교

임의의 형상의 복잡한 열처리 제품에 있어서 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 열전달 해석의 적용 가능성을 알아보기 위하여 4 단 가공한 시편을 유냉 및 수냉시 교반을 행할 때와 행하지 않을 때 8 bit personal computer를 이용한 다중회로 온도측정장치로 측정된 실험적인 냉각곡선과 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 비정상 열전달해석을 통하여 계산된 냉각곡선을 상호 비교하였다.

교반을 행하지 않으면서 유냉한 경우의 냉각곡선 비교결과를 Fig.9에 나타내었다. 그림에서 실선은 직경 ϕ 25 mm, ϕ 40 mm, ϕ 55 mm 각 중심부위에서의 컴퓨터 시뮬레이션에 의해서 계산된 냉각곡선이며, 기호는 실험적으로 측정된 냉각곡선으로서 '□'는 직경 ϕ 25 mm, '+'는 직경 ϕ 40 mm, '◇'는 직경 ϕ 55 mm 중심부위에서의 냉각곡선을 나타내고 있다. 그림에서 보는

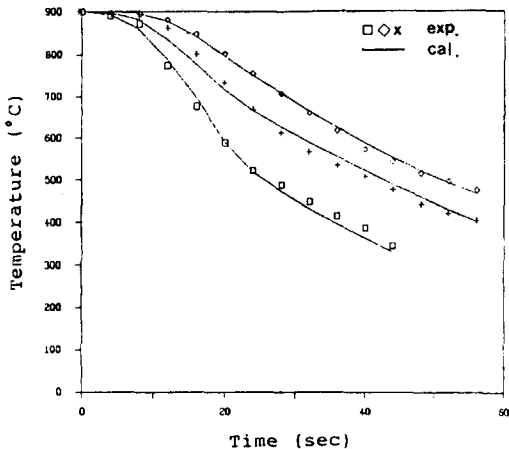


Fig.9. Comparison of experimental cooling curves with calculated cooling curves for oil quenching without agitation.

바와 같이 전형적인 냉각곡선의 3 단계가 나타나고 있으며 실험적인 냉각곡선과 컴퓨터에 의해서 계산된 냉각곡선은 각 단계에 있어서 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

이러한 해석결과로부터 강제와 냉각매질의 물성치 즉 비열, 열전도도, 열전달계수를 정확히 확보할 수 있다면 실험적인 열처리 해석이 용이하지 않은 형상이 복잡한 열처리 제품의 경우 개량차분법에 의한 열전달 해석을 통하여 열처리 제품 각 부위에서의 최종조직 및 경도분포등을 예측할 수 있다.

4.3 실험적인 경도분포와 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 등경도곡선과의 비교

본 연구에서 4 단가공한 시편을 유냉 및 수냉시 교반을 행할 때와 행하지 않을 때에 900°C부터 400°C까지의 냉각시간에 따른 경도변화를 Fig.10에 나타내었다.

그림에서 실선은 SCM 22 H강의 연속냉각 변태곡선으로부터 900°C-400°C까지의 냉각시간에 따라서 계산된 경도값을¹⁴⁾ 나타낸 것이며, 기호는 실험적인 냉각곡선으로부터 900°C-400°C까지의 냉각시간에 따라서 측정된 경도값을 나타낸 것이다.

●는 교반을 행하면서 수냉한 경우의 직경 ϕ 10 mm, ϕ 25 mm, ϕ 40 mm, ϕ 55 mm 중심부위에서 측정된 경도값이며 '□'는 교반을 행하지 않고 수냉한 경우, '▲'는 교반을 행하면서 유냉한 경우, '★'는 교반을 행하지 않고 유냉한 경우의 경도값을 나타내고 있다.

냉각매질이 기름일 때 교반을 행한 경우가 900°C

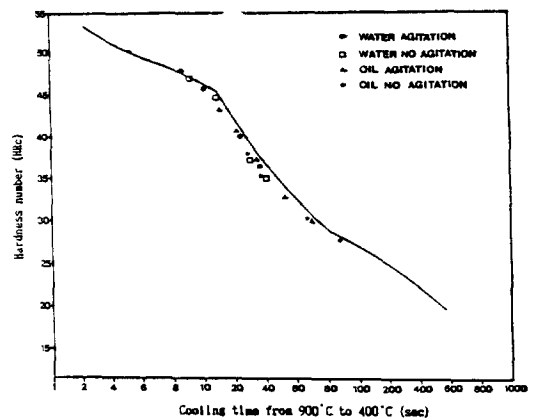


Fig.10. Relation between cooling time and hardness.

-400°C까지의 냉각시간이 감소하고, 즉 냉각속도가 증가하고 이에 따른 페라이트와 베이나이트 분율의 감소 및 마르텐사이트 분율의 증가로 인하여 경도값은 전반적으로 증가하고 있다. 이러한 경도상승의 효과는 앞의 조직사진과 잘 일치하고 있다. 교반을 행하면서 수냉한 경우도 유냉의 경우와 마찬가지로 교반에 의해 경도값이 상승하고 있음을 알 수 있다.

그림에서 보는 바와 같이 실험적으로 측정된 경도값이 연속냉각 변태곡선으로부터 냉각시간에 따라서 계산된 경도값과 모든 냉각조건에 있어서 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 한편 유냉시 교반을 행할 때와 행하지 않을 경우 각 단의 중심부위가 900°C부터 400°C까지의 측정된 냉각시간 및 실험적인 경도분포와 컴퓨터 시뮬레이션에 의해서 계산된 등냉각시간곡선 및 등경도곡선을 Fig.11 과 Fig.12에 나타내었다.

2 차원 개량차분법에 의한 비정상 열전달해석을 통해 900°C-400°C까지의 냉각시간을 계산한 후 그래픽 시스템에 의해서 등냉각시간곡선을 출력하였으며, 등냉각시간곡선을 앞의 연속냉각변태 곡선으로부터 계산한 냉각시간과 이론적인 경도와와의 관계로부터 경도값으로 치환한 후 등경도곡선을 동일한 방법으로 출력하였다. 그림에서 실선으로 나타난 부분이 컴퓨터 시뮬레이션에 의해서 계산된 등냉각시간 및 등경도곡선이며, 기호는 900°C부터 400°C까지의 측정된 냉각시간 및 실험적인 경도값이다.

유냉인 경우를 고려하면 교반에 의해서 900°C-400°C까지의 냉각시간이 45 초, 60 초 이상인 지역이 감소하고 있으며, 따라서 경도분포가 32, 35 이상인 지역은 증가하고 있다.

그림에서 보는 바와 같이 실험적으로 측정된 냉각시간 및 경도분포와 컴퓨터 시뮬레이션에 의해서 계산된 등냉각시간곡선 및 등경도곡선은 모든 냉각조건에 있어서 잘 일치하고 있다.

이와같이 임의의 형상인 제품의 열처리시, 컴퓨터시뮬레이션을 통해 제품의 형상 및 냉각조건에 따른 온도분포를 해석하고 냉각시간 및 이에 의존하는 경도분포를 예측함으로써 보다 더 정량적인 열처리 해석이 가능하고 열처리 조업을 효율적으로 제어할 수 있다.

5. 결 론

4 단가공한 SCM 22 H(JIS SCM 420 H)강을 냉각매질과 교반조건을 변화시키면서 소입한 경우, 개량차분법을 도입한 비정상열전달 해석을 통하여 제품의 형상 및 냉각조건에 따른 소입효과 및 질량효과를 예측하고 제어하는 연구로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 교반을 행한 경우, 특성온도는 증가하고 대류단계 개시온도는 감소함으로 인해 냉각속도가 가장 빠른 단계인 비등단계가 길어지게 되고, 강제주위의 냉각매질의 온도를 균일하게 유지하여 비등, 대류단계에서의 전도와 대류열전달을 개선함으로써 냉각능을 향상시켰다.

(2) 컴퓨터 시뮬레이션 결과, 실험적인 냉각곡선과 계산에 의한 냉각곡선은 모든 냉각조건에서 잘 일치하였으므로, 본 연구에서 개발된 열처리 과정에서의 열전달 해석 프로그램을 제품의 열전달해석에 적용할 수 있게 되었다.

(3) 실험적으로 측정된 냉각시간 및 경도분포와 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 계산된 등냉각시간곡선, 등경도곡선은 잘 일치하였다. 이와같이 제품의 형상 및 냉각조건에 따른 냉각속도를 예측하고 이에 의존하는 미소조직 및 기계적 성질을 제어하므로써 최종열처리 제품의 품질향상을 가능하게 하였다.

참고문헌

1. S.Ankem and H.Margolin : Metall. Trans., 13 A, p.595, 1982.
2. S.V.Patankar and D.B.Spalding : Int. J. Heat and Mass Transfer, 15, p.1787, 1972.
3. R.N.Ghosh and S.K.Mitra : Met. Sci. J., 17, p.590, 1983.
4. C.P.Hong, T.Umeda and Y.Kimura : Metall. Trnas., 15 B, p.91, 1984.
5. D.H.Breen and G.H.Walter : Met. Prog., 104, p.83, 1973.
6. 山本一道, 田村和彦, 井口信洋 : 熱處理, 26, p.274, 1986.
7. B.Liscic and T.Filetin : Heat Treatment of Metals, 14, p.62, 1987.
8. A.G.Gray : Met. Prog., 100, p.84, 1971.
9. I.Tamura, N.Shimizu and T.Okada : J. Heat Treating, 3, p.333, 1984.

10. K.E.Thelning : J. Heat Treating, 3, p.100, 1983.
11. R.T.Bergen : The Fifth Annual Conference and Exhibition of I.M.T., p.81, 1979.
12. S.Segerberg : Heat Treatment 84, p.19, 1984.
13. 日本鐵鋼協會 : 鋼의 熱處理, 丸善株式會社, p.388, 1969.
14. K.Masubuchi : Analysis of Welded Structures, Pergamon Press, p.82, 1980.
15. 이계완, 박운유, 홍준표 : 대한금속학회지, 25, 5, p.344, 1987.
16. 권동철, 홍준표, 김문일 : 대한금속학회지, 26, 3, p.242, 1988.

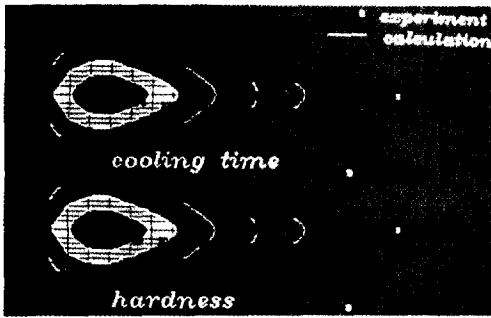


Fig.11 Comparison of experimental cooling time and hardness distribution with calculated cooling time and hardness contour line for oil quenching without agitation.

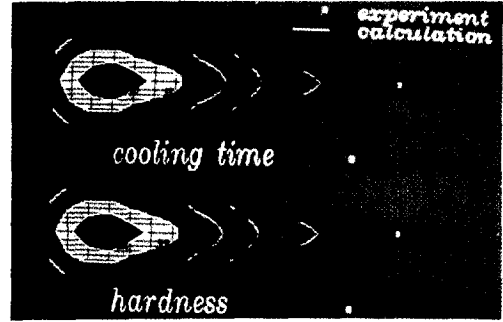


Fig.12. Comparison of experimental cooling time and hardness distribution with calculated cooling time and hardness contour line for oil quenching with agitation.