



고주파표면 경화 처리된 0.45% 탄소강의 템퍼링 거동

심재진* · 이삼윤**

*(주) 기아정기 기술연구소

**동아대학교 공과대학 금속공학과

Tempering Behavior of 0.45% Carbon Steel Treated by a High Frequency Induction Hardening Technique

J. J. Shim* and S. Y. Lee**

*Kia Precision Works Technical Center

**Department of Metallurgical Engineering, Dong-A University, Pusan 604-714

ABSTRACT

The tempering behaviours of 0.45% carbon steel treated by automatic progressive high frequency induction hardening equipment have been investigated. In order to examine the correlation of hardness with both tempering temperature and time, simple regression analysis has been made using the statistical quality control package.

The maximum surface hardness value of induction hardened zone and its effective hardening depth have been determined to be Hv 810 and 0.76mm, respectively. The hardness obtained after tempering has been shown to vary lineary with tempering time at six different temperatures. The activation energies during tempering have been calculated to be 25.34kcal/mole, 32.73kcal/mole and 49.24kcal/mole for HRcs 60, 50 and 40, respectively, showing that tempering process occurs by a complex mechanism. The tempering hardness equation of $H=90.113-4.531 \times 10^{-3} [T(11.996+\log t)]$ has proved to be in a reasonably good agreement with experimently determined data and it is also expected to be useful for the determination of tempering treatment conditions to obtain a required hardness value.

1. 서론

고주파표면 경화법은 요구하는 재료의 표면층만을 급속 가열, 냉각에 의해 경화되기 때문에 일반 열처리에 의해 얻어지는 조직보다 훨씬 미세하고 표면에 압축잔류 응력을 발생시키기 때문에 내마모성 및 내피로강도를 향상시킨다¹⁻⁴⁾. 또한 어떤 하중하에 작동되는 재료의 작용하중은 표면부가 가장 높고 실질적으로 중심부는 거의 하중을 받지 않는다. 따라서 저급의 재료를 사용하여 표면부만 경화하여도 사용가능하며 원가절감을 할

수 있어 표면 경화처리가 많이 적용되고 있다. 퀴칭조직 자체는 매우 취약하기 때문에 인성을 부여하기 위하여 템퍼링처리를 행한다. 그러나 일반 열처리에 의해 얻어진 퀴칭조직의 템퍼링 후의 기계적 성질은 다수 문헌⁵⁻⁸⁾에서 보고되고 있으나 대개가 이상적인 마르텐사이트 조직에 국한되어 있으며, 또한 특정 온도에서 단지 1시간 템퍼링 처리했을 때의 경도만을 나타내고 있으므로 요구되는 성질에 적합한 템퍼링 온도와 시간을 설정하는데는 다소 어려운 실정이며 더욱이 고주파 표면 경화처리 후 템퍼링에 대한 보고는 거의 없다.

따라서 본 연구에서는 고주파표면 경화처리된 0.45% 탄소강의 템퍼링 온도 및 시간에 따른 현미경 조직 및 경도변화, 템퍼링온도와 시간을 포함한 템퍼링 변수의 산출, 경도와 템퍼링 변수간의 회귀분석 그리고 활성화 에너지를 구하여 템퍼링 거동에 대한 정량적 고찰을 하고자 한다.

2. 실험방법

2.1. 시 료

본 실험에 사용된 시료는 일반 구조용강으로 많이 사용되고 있는 시판용 중탄소강(SM45C)을 사용하였으며 화학조성은 Table.1과 같다. 시료의 크기는 직경 $\phi 18.1 \pm 0.025\text{mm}$, 길이 340mm로 선삭 및 연삭하였으며 평균표면 조도는 $1.57\mu\text{m}$ 이었다.

2.2. 열처리

2.2.1. 고주파표면 경화처리

고주파표면 경화처리는 주파수 200kHz의 트랜지스터 인버터(transister inverter)형의 수평식 자동 고주파 유도가열 장치(일본 電氣興業社, 100kw)를 이용하여 이동 고주파표면 경화(progressive high frequency induction hardening) 처리를 하였으며, 처리조건은 Table.2와 같다. 또한 사용된 work coil의 형상 및 주요치수는 Fig.1과 같다.

2.2.2. 템퍼링 처리

템퍼링 처리는 이동 고주파표면 경화처리된 시편을

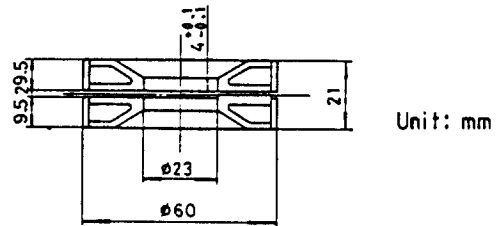
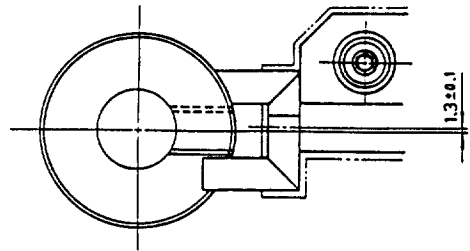


Fig.1. Shape and size of work coil.

4mm 두께로 절단하여 150℃, 200℃, 250℃, 300℃, 400℃ 및 500℃에서 각각 30초~24시간 동안 유지한 후 수냉하였다. Thyristor 제어식 전기로(5kw)를 사용하여 200℃ 이하의 템퍼링 온도는 Silicon oil, 250℃ 이상의 경우는 중온용 염욕($\text{KNO}_3 : \text{NaNO}_3 = 54.2 : 45.8$) 중에서 템퍼링 처리하였으며 온도의 정확도는 $\pm 1.0^\circ\text{C}$ 범위 내로 유지시켰다.

2.3. 현미경 조직시험

고주파 경화층 및 템퍼링 처리에 따른 조직변화를 관찰하기 위하여 연마 및 정마한 후 유동층을 제거하기 위하여 2% nital에 가볍게 부식시킨 후 재연마 및 정마하여 4% nital에 부식시킨다음 광학현미경(Nikon, model VMB)을 사용하여 실시하였다.

2.4. 경도시험

고주파 경화층의 유효경화층 깊이를 측정하기 위하여 고주파표면 경화처리된 시편의 절단면의 가장자리로부터 0.1mm 간격으로 미소경도계(micro-Vickers hardness tester, Shimadzu, model HMV-2,000)를 사용하여 5회 측정된 값의 평균치를 경도값으로 하였으며, 유효경화층 깊이는 $\text{Hv} = 450$ 까지의 거리로 하였다. 또한 템퍼링 처리온도 및 시간에 따른 경도변화는 템퍼링 처리된

Table 1. Chemical composition of specimen. (wt.%)

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Al
0.45	0.21	0.73	0.018	0.007	0.01	0.03	0.058

Table 2. Experimental conditions for progressive high frequency induction hardening.

Applied Voltage	DC 420V	Quenchan flow velocity	80l/min
Applied current	DC 176A	Power density	12.79kw/cm ²
Travel speed	92mm/sec.	Number of revolution	600 r.p.m
Quenchant	12% Sol-uble oil		

시편의 표면에 로크웰 경도계를 사용하여 5회 측정값의 평균치를 구한 다음 표면형상에 대한 보정계수⁹⁾를 적용하여 경도값으로 하였다.

2.5. 전산 처리

실험 자료의 정확한 분석을 위하여 SQC(Statistical quality control) 패키지를 이용하여 퍼스날 컴퓨터(IBM

5540)로 단순 회귀분석(simple regression analysis)을 하였으며, 그래퍼 패키지(Grapher package, Golden Software Inc., USA)를 이용하여 도표를 작성하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 고주파표면 경화층의 특성

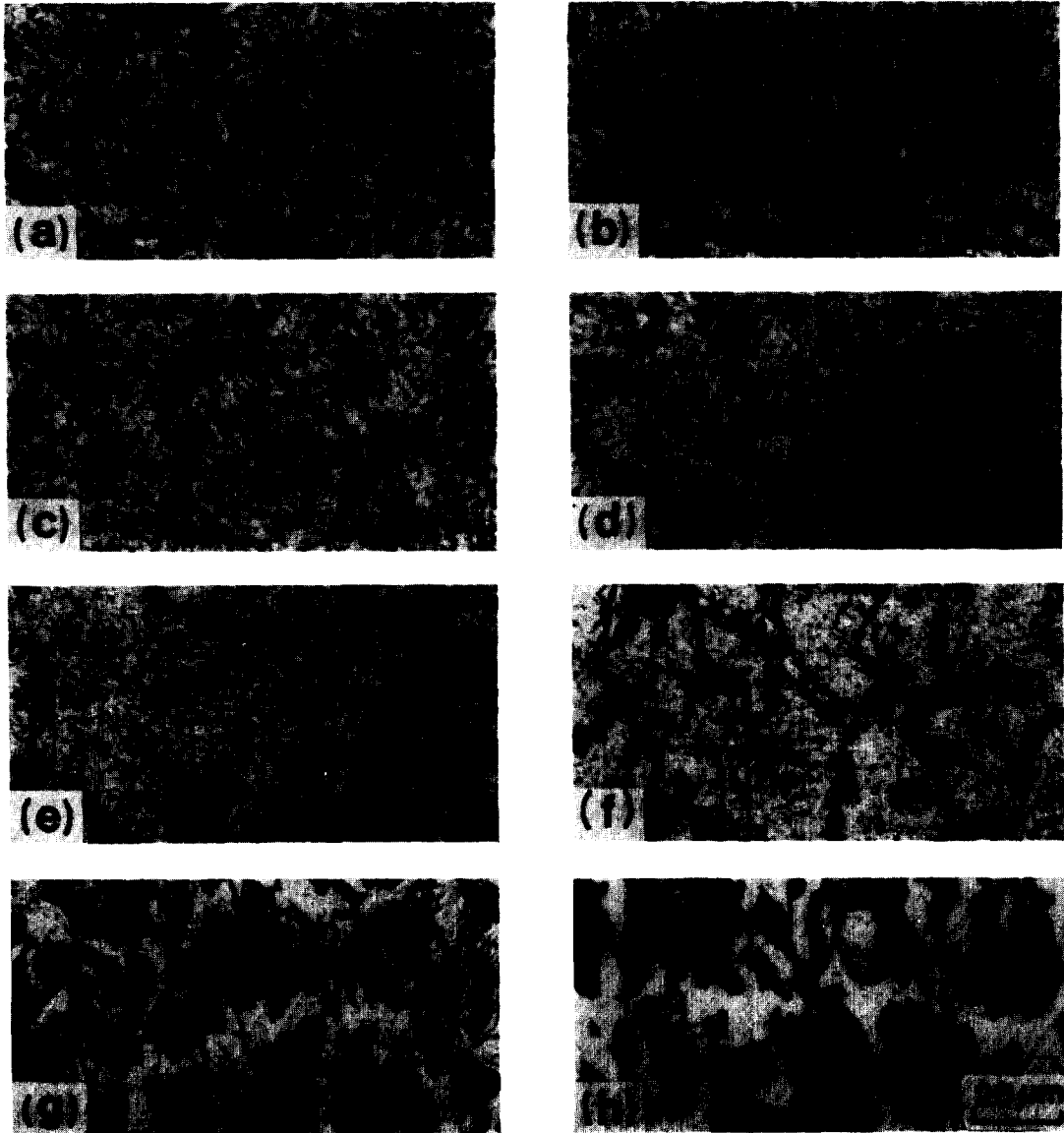


Photo 1. Optical microstructures of induction hardened case at the following distances measured from the surface ;

(a) 0.03mm, (b) 0.2mm, (c) 0.4mm, (d) 0.5mm, (e) 0.6mm, (f) 0.8mm, (g) 1.0mm, (h) 1.2mm

Photo.1.은 경화층 깊이에 따른 현미경 조직을 나타낸 것이며 깊이 0.03mm에서의 경화층의 현미경 조직은 최외표면층에서 급속 가열에 의해 퍼얼라이트(pearlite)의 Fe_3C 가 완전히 오스테나이트(austenite)로 변태되지 않고 미량 존재하며 급냉에 의해서 매우 미세한 침상 마르텐사이트(martensite) 조직으로 구성되어 있다. 경화층의 최외표면층은 이송속도가 느린 경우에는 고온가열에 의해 마르텐사이트의 크기가 표면적하보다 크지만 본 연구의 경우에는 가열속도가 매우 빨라서(92mm/sec) 이러한 영향은 거의 없으며, 깊이 0.5mm까지는 부분적으로 미고용된 탄화물이 약간 증가하고 마르텐사이트의 양도 약간 감소함을 나타낸다. 그러나 내부로 들어갈수록 기지조직이 완전히 오스테나이트로 변태할 수 있는 온도와 시간이 불충분하여 깊이 0.6mm에서부터는 오스테나이트화 과정에서 탄화물의 고용량이 감소하기 시작하며 0.8mm에서 이러한 현상은 현저하며 또한 초석 페라이트가 거의 분해되지 않고 그대로 존재한다. 깊이 1.0mm는 이동가열에 의한 조직변화는 거의 한계점에 달하나 약간의 열영향을 받았음을 볼 수 있으며 그 이상의 깊이에서는 본래의 미세 조직인 퍼얼라이트와 초석 페라이트로 구성되어 있다.

경화층 깊이에 따른 단면 경도변화는 Fig.2에 나타낸 바와 같으며, 최대 표면 경도는 Hv 810이며 이는 동일

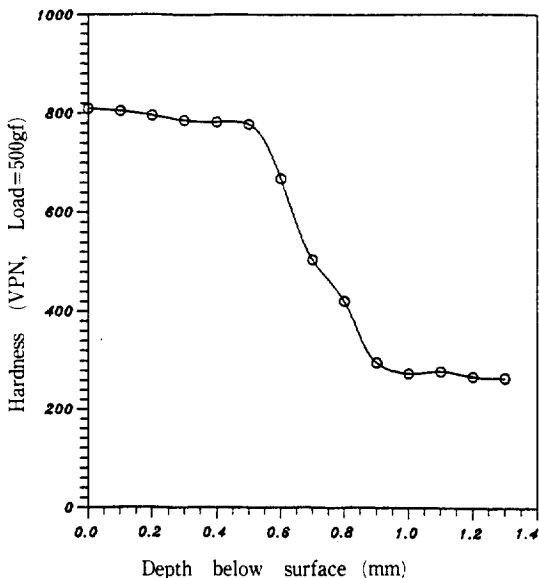


Fig. 2. Hardness profile of induction hardened zone.

시료를 820℃에서 30분 동안 오스테나이트화 처리 후 물에 켄칭하였을 때 얻은 경도 Hv 720보다 훨씬 높다. 이는 고주파표면 경화처리에 의해 형성된 압축잔류응력과 열응력, 고 전위밀도의 미세한 마르텐사이트 조직 등에 의한 것으로 보고되고 있다¹⁰⁾.

고주파 경화층 깊이에 따른 경도변화는 0.5mm까지 매우 완만하게 감소하며 0.5mm부터 급격한 감소를 나타내는데 이러한 현상은 현미경 조직으로부터 알 수 있는 바와 같이 잔존하는 초석페라이트와 불안정한 오스테나이트에서 경화되었기 때문에 마르텐사이트내의 탄소농도가 깊이에 따라 감소하며, 동시에 마르텐사이트량이 급속히 감소하기 때문이라 생각된다. 유효경화층 깊이는 Hv 450까지의 표면으로부터의 깊이로서 0.76mm임을 알 수 있다.

3.2. 템퍼링처리 시간에 따른 현미경 조직변화

Photo.2.는 템퍼링처리 온도 150℃, 300℃ 및 500℃에서 30초와 600분간 템퍼링했을 때의 고주파 경화층 표면으로부터 0.03mm 깊이의 현미경 조직이다. 150℃의 경우에는 템퍼링처리 시간이 증가하여도 현미경조직의 변화가 미소하나 템퍼링 온도가 상승할수록 조직변화는 매우 크며 대개가 고주파 표면 경화시에 변태되지 않은 미량의 탄화물과 템퍼트 마르텐사이트(tempered martensite)로 존재한다. 그러나 500℃의 경우 템퍼링 초기부터 마르텐사이트의 분해가 현저하며, 시간이 증가할수록, 잔존하고 있던 페라이트에서의 재결정 현상과 미세한 탄화물의 석출이 일어난다. 이러한 것은 앞에서 언급한 바와 같이 고주파 표면 경화층에 잔존하고 있는 세멘타이트 때문에 일반적인 경화에 의한 마르텐사이트의 템퍼링 거동과 다소 상이하다. 즉, 마르텐사이트의 탄소 과포화도가 낮기 때문에 탄화물의 석출과 페라이트의 성장을 위한 구동력의 감소에 기인된 것으로 생각된다¹¹⁾.

3.3. 템퍼링처리 시간에 따른 경도변화

템퍼링 온도 150℃, 200℃, 250℃, 300℃, 400℃ 및 500℃에서 템퍼링 시간에 따른 경도 변화를 Fig.3에 나타내었으며, 각각의 템퍼링 처리 온도에서 경도치와 템퍼링 처리 시간의 대수치를 단순회귀분석(simple regression analysis)한 결과 상관계수(r , correlation coefficient)가 0.97이상으로 나타나며, 템퍼링 처리 전 온도에서 직선의 신뢰도는 매우 높음을 알 수 있다. 템

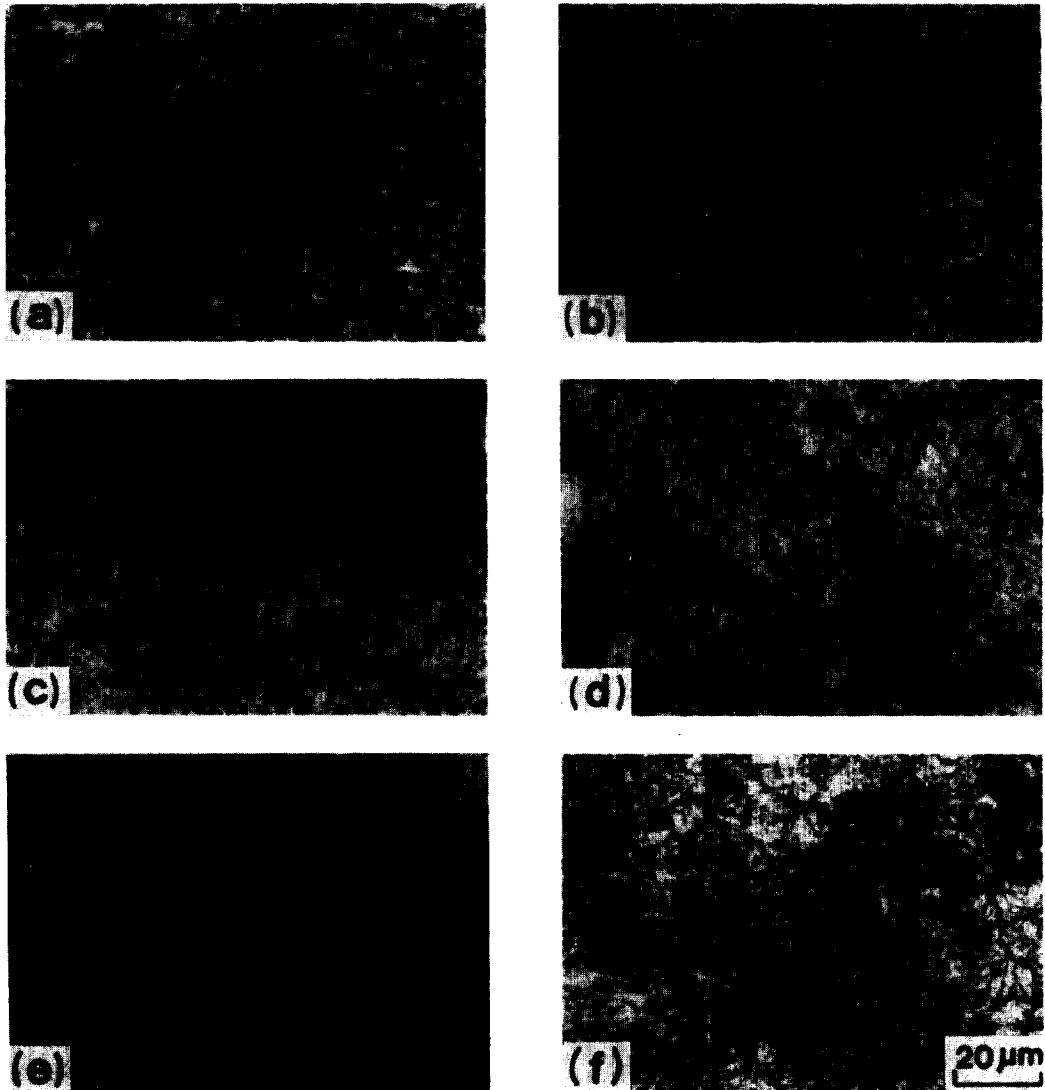


Photo 2. Optical microstructures taken at 0.03mm below surface from medium carbon steel induction hardened and then tempered in the following conditions :
 (a) 150°C × 30sec, (b) 150°C × 600min, (c) 300°C × 30sec, (d) 300°C × 600min, (e) 500°C × 30sec, and (f) 500°C × 600min.

퍼링 온도 200°C에서 400°C까지의 경도변화는 거의 평행관계를 유지하며 직선적으로 감소하나 150°C와 500°C는 경도변화 직선의 기울기가 다르다. 이는 앞에서 분석된 현미경 조직에서 언급한 바와 같이 150°C에서는 마르텐사이트내의 탄소원자의 확산이 매우 어렵고 표면 경화층에 발생된 잔류응력 제거현상이 지배적이기 때문에 경도 감소가 매우 둔하며, 500°C의 경우는 마르텐사

이트내의 탄소원자 확산이 원활해지고 템퍼링 초기부터 마르텐사이트의 분해 및 재결정 현상이 현저하게 되어 경도의 감소가 급격하게 나타난다.

Fig.4는 각각의 템퍼링 처리시간에서 템퍼링 온도에 따른 경도변화를 나타낸 것이다. 경도치는 250°C를 기점으로 하여 급격히 감소하고 있으며 템퍼링시간이 짧은 경우에는 250°C까지는 경도변화가 매우 완만하게 감

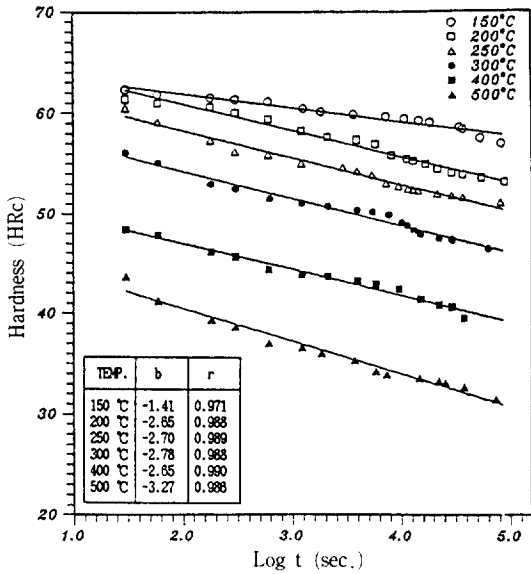


Fig. 3. Relationship between hardness and the log of tempering time with respect to tempering temperatures.

소하나 250°C 이상에서는 급격히 감소하고, 템퍼링시간이 증가할수록 경도감소는 템퍼링온도 전구간에 걸쳐 점진적으로 일어남을 볼 수 있다. 이러한 현상은 여러 연구결과에서¹²⁻¹⁴⁾ 발표된 바와 같이 템퍼링 거동 중 3 단계 과정, 즉 원통형(rod-shape) 탄화물의 석출에 의해 전위와 침상 마르텐사이트의 경계면에 편석된 탄소가 분해하면서 성장하기 때문에 경도의 급격한 감소가 일어나는 것으로 생각된다.

3.4. 템퍼링 처리조건에 따른 경도변화

템퍼링 처리 후 경도를 어떤 온도와 시간을 포함하는 하나의 변수(tempering parameter)로 나타내면 요구하는 경도에 알맞은 템퍼링 처리조건을 선정하기가 매우 편리할 것이다. Fig.3과 Fig.4로부터 템퍼링처리 후의 경도는 템퍼링 온도와 시간의 함수이며, 마르텐사이트 내 탄소원자의 확산과정이 지배하기 때문에 경도를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$H = f[T(C + \log t)] \dots\dots\dots(1)$$

여기서 H는 로크웰 경도(HRC), T는 템퍼링 온도(K), C는 재료상수(material constant) 그리고 t는 템퍼링 시간이다. 따라서 재료상수 C는 동일한 경도를 나타

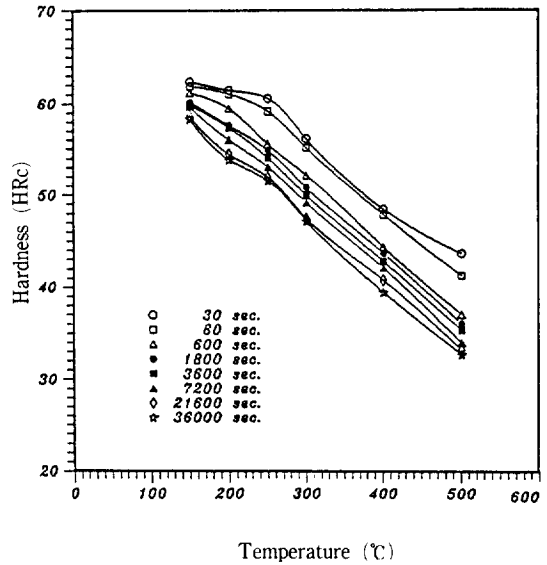


Fig. 4. Variation of hardness with tempering temperature with respect to holding times at each temperatures.

내는 템퍼링 온도와 시간으로부터 구할 수 있으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C = -(T_1 \log t_1 - T_2 \log t_2) / (T_1 - T_2) \dots\dots\dots(2)$$

Fig.5는 재료상수를 구하기 위한 전산 프로그램의 흐름도를 나타낸 것이며, Fig.3에서 20개의 동일한 경도를 갖는 각각의 템퍼링 온도와 시간을 이용하여 퍼스날 컴퓨터(IBM 5540)에 의해 재료상수를 구하였으며, 재료상수 C는 11.966이었다. 이것은 Hollomon과 Jaffe⁷⁾가 탄소강을 서브제로(sub-zero) 처리 등을 통하여 100% 마르텐사이트로 만든 후 템퍼링 처리하여 얻은 재료상수

$$C = 17.7 - 5.8C_0 \dots\dots\dots(3)$$

이 된다고 하였으며, 여기서 C₀는 재료의 탄소농도(wt.%)이고, 본 연구 시료의 탄소함량을 적용하여 재료상수를 계산하면 C는 15.09로서 실제 구한 재료상수 C=11.966과는 다소 차이가 있다. 이러한 차이는 템퍼링 처리전 조직과 미소 합금원소의 함량차이에 기인된 것으로 생각된다.

Fig.6은 위에서 구한 재료상수를 적용한 템퍼링 변수에 따른 경도변화를 나타낸 것이다. 경도는 템퍼링 변

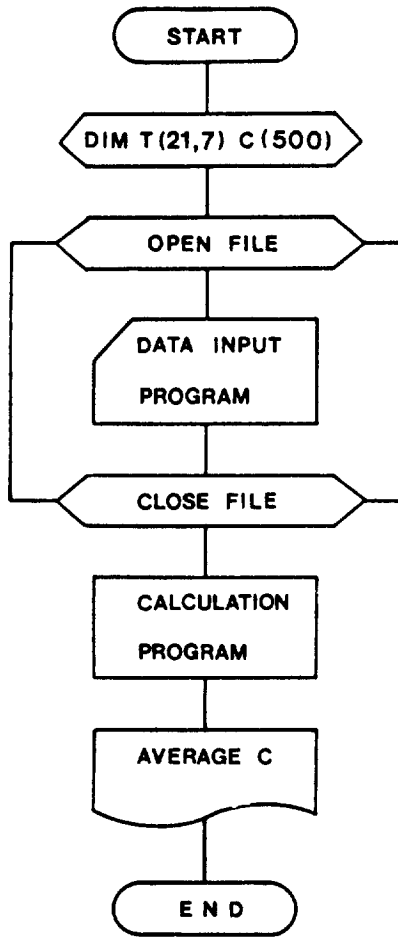


Fig.5. Flow diagram for the calculation of material constant.

수에 따라 거의 직선적으로 변하며 단순회귀분석한 회귀직선식은 다음과 같다.

$$H = 90.113 - 4.531 \times 10^{-3} [T(11.996 + \log t)] \quad \dots(4)$$

3.5. 템퍼링 경도식에 의해 계산된 경도의 변화 특성
 앞절에서 구한 회귀분석에 의하여 유도된 템퍼링 경도식 (4)를 이용하여 컴퓨터에 의해 계산된 경도의 변화특성을 Fig.7, 8 및 9에 나타내었다.

Fig 7은 각 템퍼링 처리 온도에서 템퍼링 처리 시간에 따른 경도 변화를 나타낸 것으로서 전온도 구간에서 직선적으로 변화하고 있으며 실험에 의해 얻은 경도 변화와 비교하여 볼 때 저온에서는 약간의 차이가 있으나, 대체적으로 실험에 의한 것과 잘 일치하고 있음을

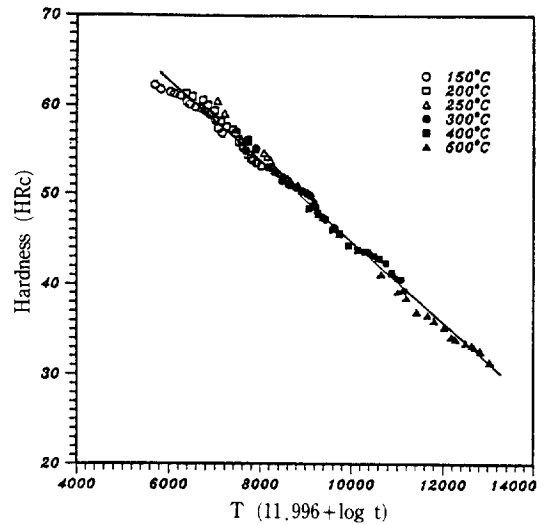


Fig.6. Relationship between hardness and tempering parameter involving tempering temperatures, material constant and tempering times.

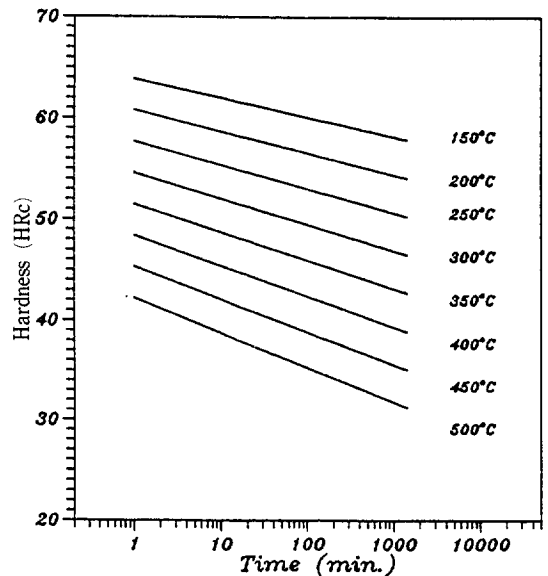


Fig.7. Variation of hardness values calculated from the tempering hardness equation obtained by the regression analysis with tempering time.

알 수 있다.

어떤 주어진 경도에 도달하는데 필요한 템퍼링 온도와 시간과의 관계를 Fig 8에 나타내었으며 합금강의 경우에는 어떤 특정온도까지는 경도변화에 거의 영향을

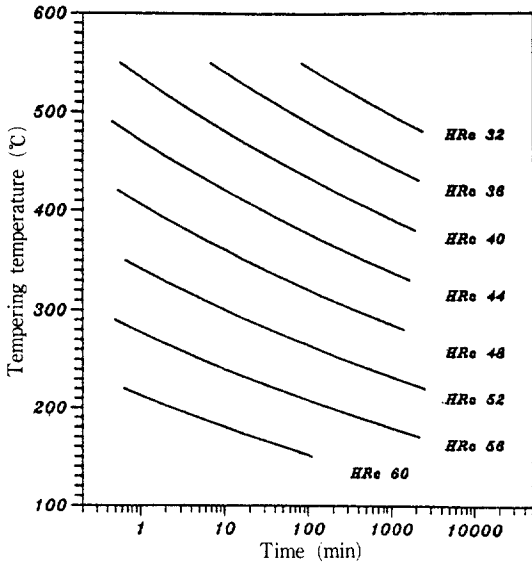


Fig. 8. Relationship between tempering temperature and time required to obtain a given hardness value.

미치지 않으나 일반 열처리된 탄소강에서는 템퍼링 온도에 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 본 연구의 경우 전 경도 범위에서 템퍼링 온도가 주요 인자임을 알 수 있으며 템퍼링 온도를 상승함에 따라 소요시간은 지수 함수적으로 감소함을 볼 수 있다. 일반적으로 특정 온도에서 1시간 템퍼링했을 때의 경도변화에 대한 보고는 있으나 템퍼링 온도를 높인다는지 템퍼링 시간을 길게 하였을 때 얻어지는 경도에 대한 정량적인 자료가 거의 없는 실정이다. 따라서 템퍼링 처리온도에서 1시간 처리하여 얻은 결과를 이용하여 템퍼링 처리온도 및 시간에 따른 경도관계를 Fig.9에 나타내었으며, 템퍼링 처리 조건이 변경되어야 할 경우 변경 후 경도값을 예측할 수 있다. 즉 주어진 템퍼링 온도에서 템퍼링 시간을 연장할 경우 경도값은 (b)의 템퍼링 온도선을 따라 연장할 시간과 교차되는 점에서 (a)의 경도 변화선으로 수직 연장하여 구하며, 템퍼링 온도가 변경될 경우 (b)에서 변경되는 템퍼링 온도선을 따라 동일한 방법으로 경도를 구할 수 있다. 이와 같이 특정 템퍼링 처리에 의한 경도값을 예측할 수 있을 뿐만 아니라 템퍼링 처리 조건을 선정하는데 유용한 자료로 활용될 것으로 생각된다.

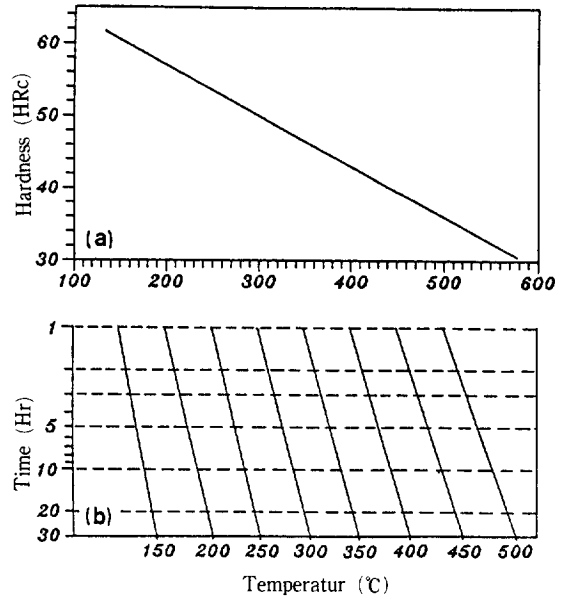


Fig. 9. Tempering time temperature diagram for a required hardness value.

3.6. 활성화 에너지

템퍼링 처리시간에 따른 경도 변화를 나타낸 Fig.3으로부터 외삽하여 HRC=60, 50 및 40에 도달하는데 소요되는 템퍼링처리 시간역수의 대수치 $\log(1/t)$ 의 값으로부터 Fig.7을 얻을 수 있으며, Arrhenius형의 속도방정식을 이용하여 다음 관계식의 기울기로부터 활성화 에너지 값을 구할 수 있다.

$$\log(1/t) = -Q/2.303RT + C \dots\dots\dots (5)$$

이와 같은 방식으로 계산된 활성화 에너지는 HRC=60에서는 25.34kcal/mole, HRC=50에서는 32.73kcal/mole 그리고 HRC=40에서는 49.24kcal/mole이다. 이와 같이 템퍼링 처리동안 활성화에너지는 어떤 일정한 값을 갖지않고 변화하고 있음을 알 수 있다. 따라서 템퍼링 과정은 Speich 등이 보고한 바와 같이 압축잔류응력의 제거, 템퍼드 마르텐사이트의 석출, 탄화물의 석출, 탄화물의 구상화 그리고 페라이트의 재결정 등과 같은 복합적인 기구에 의해 일어나는 것으로 생각된다¹³⁾.

3.7. 연속가열 냉각 템퍼링 작업에의 적용

지금까지는 항온 템퍼링 (isothermal tempering)에 의

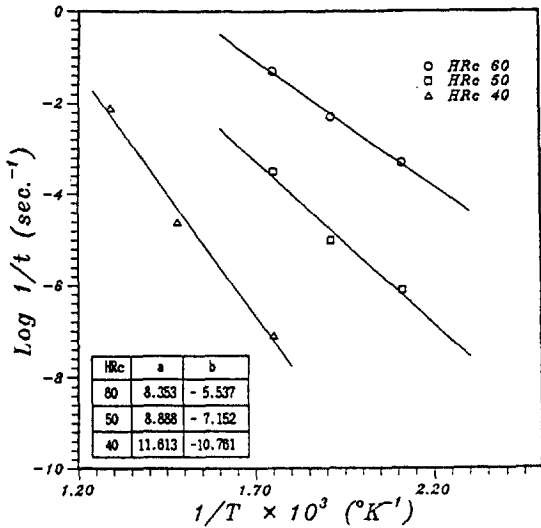


Fig.10. Plot of log 1/t vs. 1/T for the determination of activation energy.

한 것을 고찰하였다. 그러나 실질적인 템퍼링 처리는 연속가열과 냉각이 수반되기 때문에 주어진 템퍼링 온도에 도달하기 까지의 온도와 시간 그리고 냉각과정 중의 온도와 시간을 고려하여야 한다. 연속가열과 냉각중의 온도와 시간을 합은 템퍼링 온도와 시간으로 계산하는 방법은 연속가열과 냉각곡선의 면적을 템퍼링 온도에 상응하는 면적으로 계산하여 시간을 구할 수 있다. 따라서 고주파표면 경화처리된 시료의 표면에 CA 열전대(Chromel-Alumel thermocouple)를 부착시켜 연속 템퍼링로에서 템퍼링 온도와 시간을 온도 기록계(Yokogawa, model $\mu R-180$)로 기록하여 Fig.8에 나타내었다. 연속가열과 냉각 과정을 합은 템퍼링 온도와 시간으로 계산한 결과 228.3°C에서 1시간 38분 처리되고 있음을 알 수 있으며, 경도 측정값의 평균치는 HRC 54.9이었다. 그리고 앞절의 합은 템퍼링 처리에 의해 구한 회귀직선식(4)에 실제 템퍼링 온도와 시간을 대입하여 경도를 계산하여 보면 HRC 54.3으로서 연속템퍼링 처리로서 얻은 경도치와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

고주파 표면경화된 0.45% 탄소강의 템퍼링 거동에 대한 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

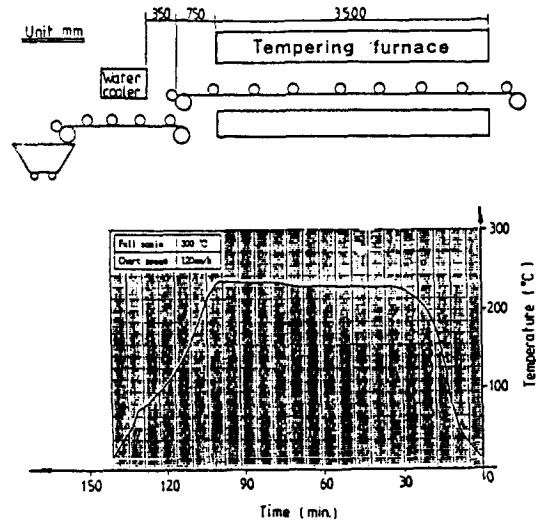


Fig.11. Temperature profile of actual continuous tempering process.

1. 고주파 표면 경화층은 미세한 마르텐사이트와 미량의 미용된 탄화물로 구성되어 있으며, 유효 경화층 깊이는 0.76mm이고, 표면 최대경도는 Hv 810으로 일반 열처리에 의해 얻을 수 있는 정도보다 훨씬 높다.
2. 템퍼링 처리에 의한 경도변화는 각각의 템퍼링 온도에서 처리시간에 따라 거의 직선적으로 감소하며, 250°C를 기점으로 하여 급격히 감소한다.
3. 템퍼링 변수를 결정하는 재료상수는 11.996이며 경도와 템퍼링 변수 관계를 단순회귀분석하여 얻은 회귀직선식은 $H = 90.113 - 4.531 \times 10^{-3} \times [T(11.996 + \log t)]$ 이다.
4. 회귀직선식을 이용하여 계산된 경도 변화 특성은 실험치와 잘 일치하고 있으며, 실제 템퍼링 처리조건을 결정하는데 활용할 수 있는 유용한 자료가 된다.
5. 템퍼링 처리 동안의 활성화 에너지는 HRC 40, 50 및 60에서 각각 49.24kcal/mole, 32.73kcal/mole 및 25.34kcal/mole이며, 템퍼링 특성의 변화는 복합적인 기구에 의해 일어난다.

5. 참고문헌

1. S.L. Case, J.M. Berry, and H.J. Grover, Trans, ASM, (1952), Vol.44, pp.667.
2. 米谷 箴, 中尾秀敏, 伍 尚禮, 熱處理, (1986),

- Vol.26, No.6, pp.162.
3. 水馬克久, 川寄一博, 熱處理, (1987), Vol.27, No.3, pp.162.
 4. V.P. Lobofov and K.Z. Spebelyakoveskii : Metal Science and Heat Treatment (1978), Vol.20, No.6, pp.563.
 5. R.A. Grange, C.R. Hribal, and L.F. Porter : Metall. Trans. A, (1977), Vol.8A, pp.1775.
 6. R.N. Caron and G. Krauss : Metall. Trans. (1972), Vol.3, pp.231.
 7. J.H. Hollomon and L.D. Jaffe : Trans. AIME, (1945), Vol.162, pp.223.
 8. R.A. Grange and R.W. Baughman : Trans. ASM, (1956), Vol.48, pp.165.
 9. Metals handbook, 9th Ed. ASM, Metals park, (1985), Vol.8, pp.82.
 10. S.L. Semiatin and D.E. Stutz : Induction Heat Treatment of Steel ASM, (1986), pp.95.
 11. G. Krauss : Principles of heat Treatment of Steel ASM. Metals park (1980), pp.200.
 12. B.S. Lement, B.L. Auverbach, and M. Cohen : Trans. ASM, (1955), Vol.47, pp.291.
 13. G.R. Speich : Trans. TMS-AIME, (1969), Vol.245, pp.2553.
 14. C.S. Robert, B.L. Averbach, and M. Cohen : Trans. ASM, (1953), Vol.45, pp.576.