



켄칭한 SCM 440 강에서 초음파 전파특성에 미치는 템퍼링온도의 영향

이 계 완 · 김 문 일* · 박 은 수**

한양대학교 금속공학과

*연세대학교 금속공학과

**서울산업대학 재료공학과

The Effect of Tempering Temperature on Ultrasonic Velocity Property at the Quenched SCM 440 Steel

K.W.Lee, M.I. Kim* and U.S.Park**

Dept. of Metallurgical Engineering, Hanyang University

*Dept. of Metallurgical Engineering, Yonsei University

**Dept. of Material Engineering, Seoul National Polytechnic University

ABSTRACT

The effect of tempering temperature on the ultrasonic propagation velocity at SCM 440 steel quenched from 870°C and 1000°C has been studied by metallurgical and crystallographical observation. The measurements of ultrasonic velocity were made on the specimen by applying an immersion ultrasonic pulse-echo technique with a constant frequency of 10 MHz. The quenched microstructure of this steel was a lath martensite. As the tempering temperature was increased, the martensite was transformed into the tempered martensite composed of cementite and carbide. The ultrasonic velocity increased with increasing the tempering temperature. It was thought that these were resulted from the microstructural transformation. The change of ultrasonic propagation velocity with quenching and tempering heat treatment was resulted from microstrain due to the change of internal stress. Considering these results concerning to the change of ultrasonic propagation velocity, the phenomena of microstructural transformation were estimated. Consequently, it was thought that the degree of quenching and tempered heat treatment of steel could be nondestructively evaluated with the change of ultrasonic propagation velocity.

1. 서 론

초음파 전파속도의 변형의존성에 관한 이론적 해석이

Heges-Kelly¹⁾에 의하여 발표된 이래, 초음파전파특성을 이용한 재료물성의 연구가 많은 관심의 대상이 되어 왔다. 최근에는 초음파전파특성의 변형의존성을 이용하여

재료의 내부응력을 평가하고자 하는 일련의 실험이 행하여져, 재료강도의 추정과 경화상태평가 및 재료의 조직의 평가에 관한 연구²⁻⁴⁾가 보고되고 있다.

그러나 미세조직변화가 초음파 전파특성에 미치는 영향에 대하여는 해석상에 여러가지 어려운 점이 많아 아직까지 명확한 해석을 내리지 못하고 있다. 따라서 미세조직특성과 초음파 전파속도와의 상관관계에 관한 연구는 재료의 미시적 특성연구에 기초적 자료를 제공할 수 있어 이에 대한 연구가 필요시 되고 있다.

강을 급냉하면 bct결정의 마르텐사이트생성으로 체적변화가 일어나며, 동시에 열응력으로 인하여 불균일한 소성변형을 일으켜 변태종료후 잔류응력이 발생하게 된다. 그러므로 강은 퀘칭한 후 인성의 향상을 위하여 적당한 온도에서 템퍼링처리하여 사용하는 것이 보통이다. 즉 완전히 퀘칭되어 마르텐사이트조직으로 된 강은 템퍼링처리에 의해 마르텐사이트조직에서 세멘타이트등의 미세한 탄화물을 석출시키면서 변태응력이나 열응력으로 생긴 잔류응력이 풀리게 되고 이러한 변화에 의하여 초음파 전파속도의 변화는 기대된다.

본 연구에서는 기계구조용강인 SCM 440 강을 870°C와 1000°C에서 각각 퀘칭처리하여 마르텐사이트조직을 얻은 후, 150°C와 650°C구간에서 100°C 간격으로 1시간 템퍼링처리하여 이들 미세조직의 변화에 따른 초음파 전파속도의 변화를 측정하고 그 원인을 규명함으로써 초음파를 이용하여 비파괴적으로 강의 퀘칭, 템퍼링처리의 정도를 평가할 수 있는 기초자료를 마련하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1. 시험편 준비

실험에 사용된 시료는 삼미특수강제품의 시판용 SCM 440 강으로 직경 24 mm의 환봉을 길이 10 mm로 절단하여 사용하였고, 그의 화학적 조성은 Table 1과 같다.

Fig.1은 본 실험의 시험편 준비를 위한 열처리 과정

Table 1. Chemical Composition of SCM 440 Specimen. (wt%)

C	Si	Mn	Cr	Mo	S	P	Fe
0.391	0.273	0.822	1.050	0.197	0.003	0.017	bal.

을 나타낸 것으로서, 먼저 870°C에서 1시간 유지시킨후 공냉하여 균질화처리하였다. 이를 진공로에서 870°C와 1000°C에서 각각 30분 유지시킨후 40°C의 oil에 급냉시켜 모두 단일상의 마르텐사이트의 초기조직을 얻었다. 이와같이 준비된 두 종의 마르텐사이트조직강을 150°C와 650°C구간에서 100°C 간격으로 1시간 각각 템퍼링하여 각각의 템퍼마르텐사이트조직시험편을 얻었다. 이때 템퍼링열처리의 분위기는 아르곤가스분위기로 하여 템퍼링에 따른 시료강의 탈탄을 방지하고자 하였고, 템퍼링 후 각 시험편의 양면을 연마하여 평행도가 0.005 mm이하로 최종길이가 9 mm가 되도록 시험편을 준비하였다.

2.2. 초음파 전파속도의 측정

앞서와 같이 준비된 각 시험편의 초음파전파속도측정을 위한 개략도를 Fig.2에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 바와같이 RF mode를 사용하여 상온에서 수침법으로 각 시험편에서 초음파펄스의 왕복시간을 측정하고, 이를 0.001 mm단위로 측정된 시험편의 두께로 초음파의 종파속도를 계산하여 각 시험편의 초음파전파속도의 변화를 조사하였다. 본 실험에 사용된 장치는 Kraut-

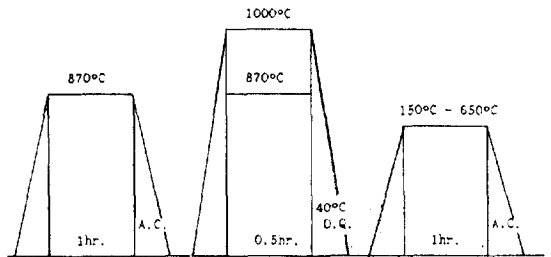


Fig.1. Schematic diagram of heat treatment cycle.

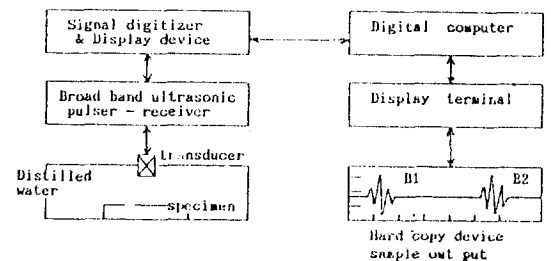


Fig.2. Block diagram of ultrasonic velocity measurement system using pulse-echo method.

Table 2. The XRD Experimental Conditions.

Generator setting	40 KV, 30 mA
Cu alpha 1, 2 wave lengths	1.54060, 1.54439 Å
Step size, Sample time	0.010 deg. 0.50 s, 50.00 s/deg.
Monochromator used	Yes
Divergence slit	Fixed(1 deg.)
Peak angle range	40.000-120.000 deg.

kramer-Bramson사 제품의 펄스반사식 초음파실험장치로서 model USD 10 을 이용하였으며, 이때 직경 6 mm, 주파수 10 MHz의 수침형 탐촉자를 사용하였다.

2.3. XRD시험 및 미세조직의 관찰

열처리조건을 달리한 각 시험편에 XRD시험을 행하여 얻어진 회절각도의 변화로부터 결정격자상수를 계산하였고, 본 실험에 사용된 X-선 실험장치는 Philips회사제품의 model PW 1700 Automated Powder Diffractometer System 으로 Copper target를 사용하였으며, 이의 실험조건은 Table 2 와 같다.

또한 25°C에서 증류수를 사용한 침적법으로 각 시험편의 밀도를 측정하여 템퍼마르텐사이트로의 조직변태에 기인한 부피팽창률을 구하였다.

조직관찰은 4% 나이탈에 과부식시킨 시험편의 미세조직을 광학현미경을 사용하여 관찰하였다. 또한 템퍼링을 행함에 따라 마르텐사이트조직으로부터 분해되는 세멘타이트나 탄화물의 석출상을 주사전자현미경(SEM)을 사용하여 관찰하였고, 이때 EDS분석도 병행하여 미소석출상의 성분분석도 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

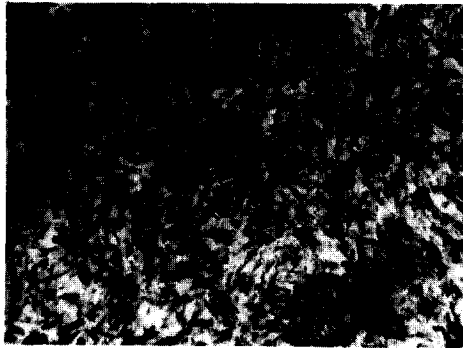
3.1. 미세조직의 관찰

앞서 Fig.1의 열처리경로에 따른 각 시험편의 미세조직을 광학현미경으로 관찰하여 Photo 1과 Photo 2에 각각 나타내었다. Photo 1은 870°C에서 급냉후, 각각의 온도에서 템퍼링을 행한 광학사진이다. 사진(a)에서 볼 수 있는 바와같이 급냉만시킨 경우 전형적인 마르텐사이트조직으로 lath형 마르텐사이트를 보였다. 템퍼링온도가 150°C인 사진(b)에서부터 마르텐사이트내에 과포화되어 있는 탄소가 템퍼링처리에 따라 이동이 원활

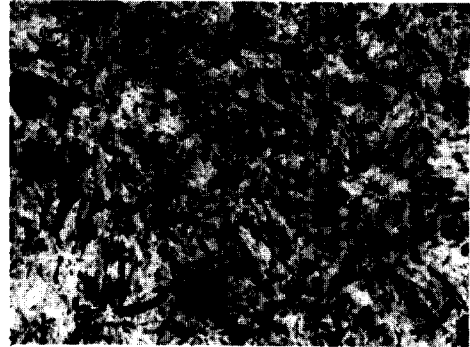
하여져 마르텐사이트의 분해현상이 서서히 나타나기 시작함을 볼 수 있다. 사진(c)부터 미세석출상이 많이 나타나기 시작하며 acicular한 마르텐사이트의 lath가 점차로 무디어짐을 관찰할 수 있다. 이는 템퍼링온도의 증가에 따라 마르텐사이트의 분해는 더욱 급속히 진행되어짐을 알 수 있고, 450°C에서 템퍼링시킨 사진(e)로부터는 미세한 템퍼마르텐사이트조직과 점상의 석출상이 혼재되어 있음을 쉽게 관찰할 수 있다. 이와같은 템퍼링온도에 따른 마르텐사이트조직의 변태는 급냉에 의해 형성된 마르텐사이트조직내의 탄소확산이동에 의한 것으로서 bct구조에서 bcc 구조로 천이하는 과정이다. Photo 2는 1000°C에서 급냉시킨후 템퍼링온도를 앞서의 Photo 1과 동일한 온도구간에서 템퍼링하여 관찰한 광학사진이다. 앞서 Photo 1의 조직보다는 마르텐사이트조직이 보다 acicular한 lath형태를 가짐을 볼 수 있다. 이는 1000°C에서 급냉시킨 조직변태의 결과로서 변태전 오스테나이트결정립의 영향에 의한 현상으로 앞서 보다는 급냉조직인 마르텐사이트조직이 보다 뚜렷한 lath 형태를 보이고 있다. 그러나 템퍼링을 행함에 따라 Photo 3의 변태조직과 동일한 조직으로 변화함을 볼 수 있다.

또한 템퍼링온도의 증가에 따라 관찰되는 미소석출상의 분포형태와 성분분석을 위하여 SEM으로 관찰, 조사한 결과는 Photo.3과 같다. SEM사진에서 보는 바와같이 템퍼링온도의 증가에 따라 석출상의 수와 크기가 다소 증가함을 관찰할 수 있다. 이는 기지조직인 마르텐사이트가 템퍼링을 행함에 따라 세멘타이트와 기타의 탄화물로 분해되어감을 알 수 있게 하고, 이를 앞서 Photo 1과 2에서 확연히 관찰할 수 있었다. 또한 점상의 미소석출상을 EDS로 분석, 조사하여 Fig.3에 나타내었듯이 이들 석출상에서는 Cr과 Mn의 성분이 조사되어 이로부터 석출상은 Cr 탄화물이거나 Mn 탄화물로 생각된다.

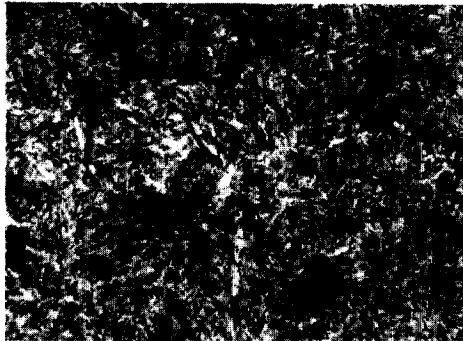
한편 템퍼링온도에 따른 마르텐사이트조직변태를 정도값의 변화로서 조사하여 Fig.4에 나타내었다. 마르텐사이트의 초기급냉조직에서는 H_{rC} 57의 고경도를 가졌으나 템퍼링온도가 증가함에 따라 정도값의 감소가 일어나 650°C에서 템퍼링시킨 경우 H_{rC} 27의 최저경도값으로 나타났다. 이는 마르텐사이트상에서 템퍼마르텐사이트상으로의 변태의 양이 증가함에 의한 것으로 생각되며, 조직관찰에서도 볼 수 있었듯이 템퍼링온도가



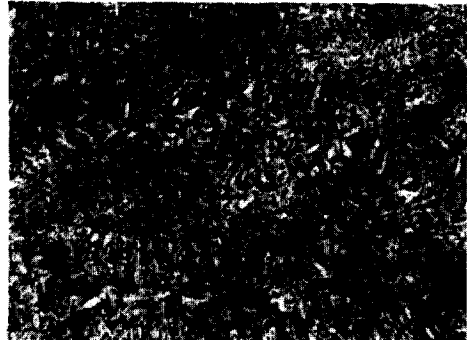
(a) as-quenched (870°C)



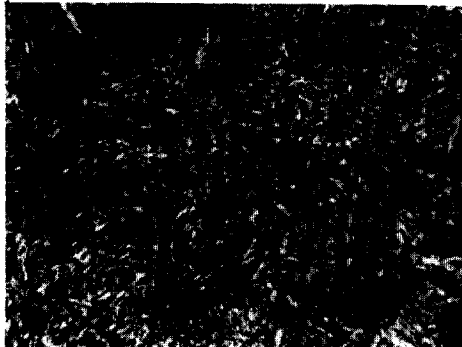
(b) at 150°C tempering temp.



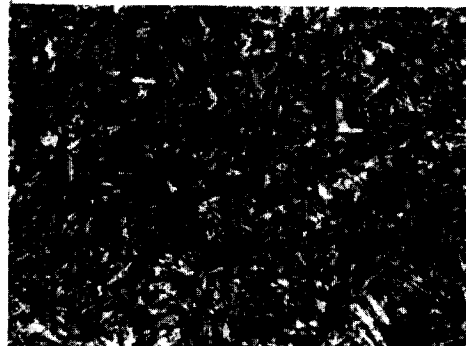
(c) at 250°C.



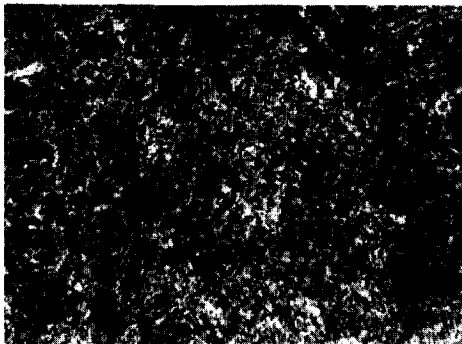
(d) at 350°C.



(e) at 450°C.

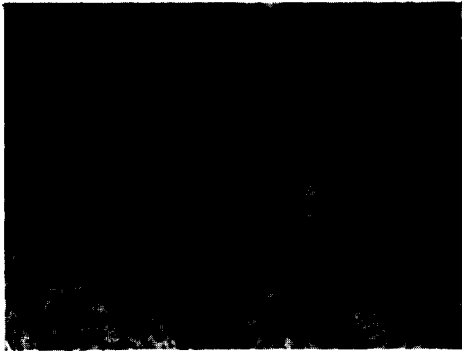


(f) at 550°C.



(g) at 650°C.

Photo 1. Optical micrographs of the 870°C quenched specimen with various tempering temperature ($\times 1,000$).



(a) as-quenched (1000°C)



(b) at 150°C tempering temp.



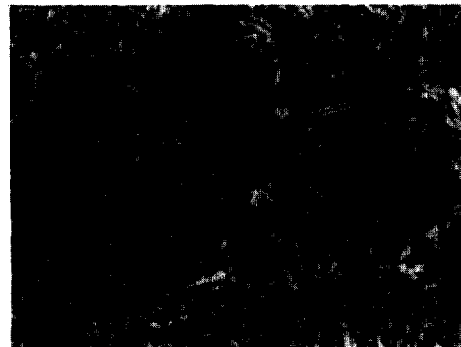
(c) at 250°C



(d) at 350°C



(e) at 450°C



(f) at 550°C



(g) at 650°C

Photo 2. Optical micrographs of the 1000°C quenched specimen with various tempering temperature ($\times 1,000$).

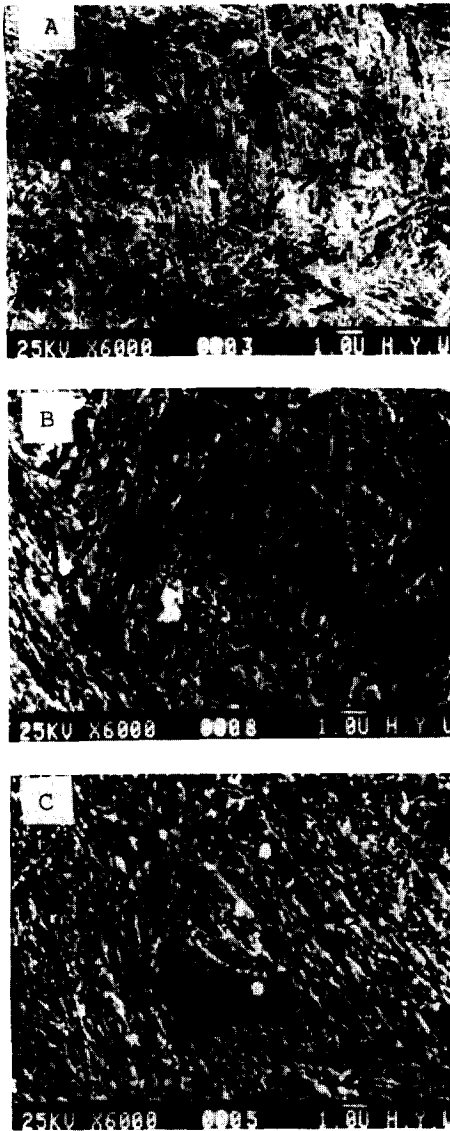


Photo 3. SEM micrographs of the 1000°C quenched specimen with (A) 250°C, (B) 450°C, and (C) 650°C tempering temperature.

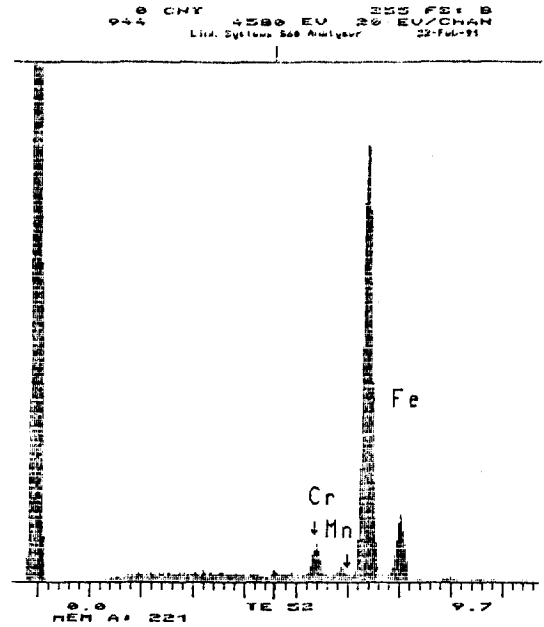


Fig.3. EDS result of the specimen tempered at 450°C.

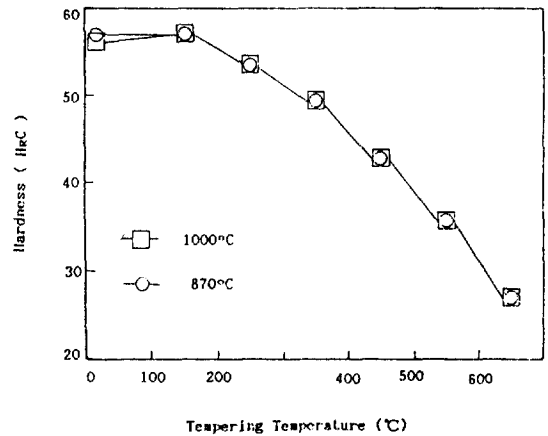


Fig.4. The distribution of hardness with tempering temperature.

350°C를 넘는 템퍼링온도로부터 마르텐사이트조직의 급격한 분해를 보여 이 온도에서 경도값의 저하가 급격히 시작하는 것을 알 수 있다.

3.2. 초음파 전파 특성

초음파 전파속도는 Fig.5에 나타나있듯이 초기조직인

마르텐사이트조직에서 가장 늦었으며 템퍼링온도가 증가함에 따라 증가하였다. 이러한 초음파속도의 변화는 마르텐사이트조직의 결정학적 방위의 불규칙도에 기인한 현상이라고 Papadakis⁵⁾는 설명하고 있다. 결정학적 이론으로 마르텐사이트변태는 불규칙한 habit plane을 가

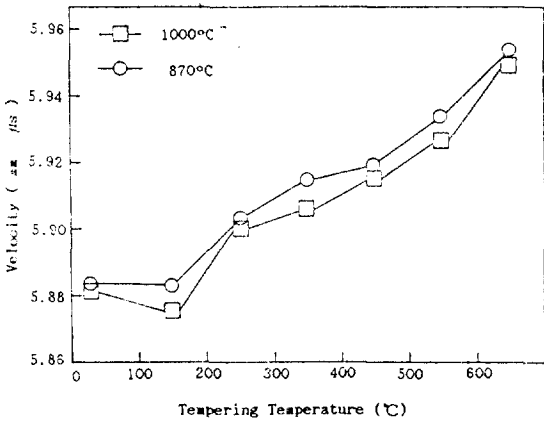


Fig. 5. Longitudinal wave velocity versus tempering temperature of the specimen quenched from 870°C and 1000°C.

지며 마르텐사이트의 하부조직은 매우 미세한 쌍정의 집합 또는 매우 높은 전위밀도를 가진다고 밝혀져 있으며⁶⁾ 이는 마르텐사이트조직의 결정학적 방위의 불규칙성을 의미한다. 이와같이 결정학적 방위가 불규칙해지면 초음파의 전파경로가 불규칙해지고 초음파전파 시간의 지연을 초래하게 되어 초음파전파속도는 낮아진다고 볼 수 있다.

본 실험의 경우 초기조직은 마르텐사이트이고 템퍼링에 의해 템퍼마르텐사이트로 변태하여감에 따라 미세조직의 변태는 초음파 전파속도에 효과적인 인자로 작용하여 퀀칭한 시험편에서 초음파의 전파속도는 늦지만, 템퍼링온도가 증가함에 따라 마르텐사이트의 불규칙도의 감소로 인하여 초음파 전파속도는 증가하는 것이라 생각된다. 이와같은 마르텐사이트의 불규칙도는 템퍼링에 의하여 마르텐사이트에서 템퍼마르텐사이트로 변태하는 결정구조의 변화에 의한 격자상수의 변화로 설명할 수 있을 것이다.

템퍼링에 따른 비체적의 변화를 Fig. 6에 X-선 회절 시험으로부터 구한 결정격자상수의 변화를 Table 3에 각각 나타내었다. Fig. 6은 템퍼링온도에 따른 각 시험편의 비체적변화를 나타낸 것으로서, 그림에서 볼 수 있듯이 템퍼링온도의 증가는 비체적의 감소로 나타났었다. 이같은 비체적의 변화는 결정내의 격자상수의 변화에 의한 것으로 생각된다. 따라서 템퍼링온도변화에 따른 bct 마르텐사이트결정의 c축과 a축의 변화를 템퍼링

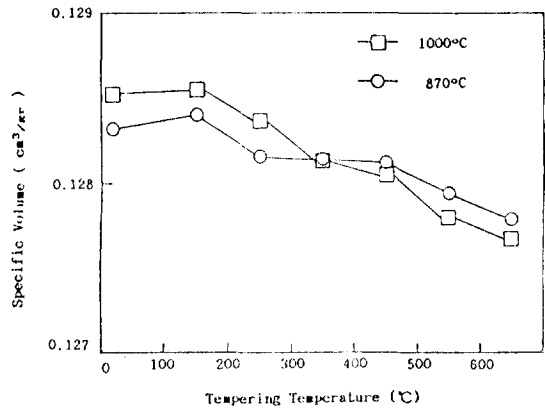


Fig. 6. The effect of tempering temperature on the specific volume.

Table 3. The Variation of Lattice Parameter with Tempering Heat Treatment at the 870°C Quenched Specimen.

Tempering Temp. (°C)	as	150	250	350	450	550	650
	quench						
Lattice Parameter a-axis (10 ⁻¹⁰ m)	2.8662	2.8629	2.8566	(at bcc)			
			2.8729	2.8703	2.8690	2.8657	2.8621
Lattice Parameter c-axis (10 ⁻¹⁰ m)	2.8839	2.8826	2.8765				
			(at bct)	-	-	-	-

온도에 따른 XRD시험의 회절각도(2θ)에 대하여 조사한 결과로부터 구하여 Table 3에 나타내었다. 표로부터 초기 마르텐사이트조직과 템퍼링온도에 따른 템퍼마르텐사이트조직의 격자상수값의 변화에서 알 수 있듯이 c축과 a축의 길이는 기지조직인 마르텐사이트조직에서 2.8839×10⁻¹⁰m와 2.8662×10⁻¹⁰m로, 150°C에서 1시간 템퍼링시킨 템퍼마르텐사이트조직에서는 2.8826×10⁻¹⁰m와 2.8629×10⁻¹⁰m로 감소되어 템퍼링에 따라 기지조직의 결정격자는 줄어가지만 아직은 bct의 결정구조임을 보였다. 그러나 템퍼링온도 250°C에서부터는 템퍼마르텐사이트조직을 bct구조로 보고 c축과 a축을 계산한 결과 2.8765×10⁻¹⁰m와 2.8566×10⁻¹⁰m이었으며, bcc구조로 보고 계산하였을 때 a축이 2.8729×10⁻¹⁰m로 얻어졌다.

즉 250°C의 템퍼마르텐사이트조직을 bct구조로 보았을 때 격자상수 변화율이 퀀칭조직에서 150°C 템퍼마르텐

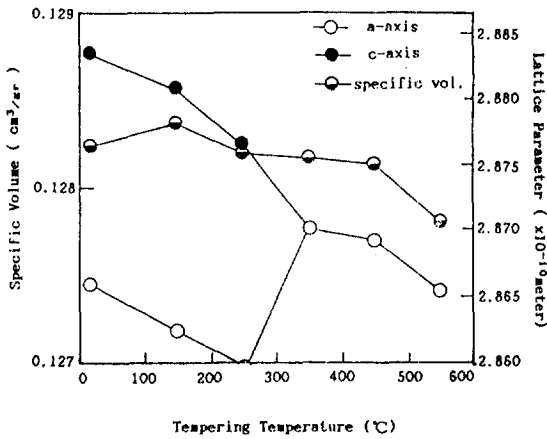


Fig. 7. The relationship between lattice parameter and specific volume with tempering temperature at 870°C quenched specimen.

사이트로 변했을 때의 변화율과 차이가 났으나, 250°C의 템퍼마르텐사이트조직을 bcc구조로 보았을 때 그 온도 이상의 템퍼마르텐사이트의 격자상수 a의 감소율이 일정함을 알 수 있었다. 이는 템퍼링온도 150°C에서 250°C사이의 구간에서 결정구조가 bct로부터 bcc로 전이하는 영역으로 사려되며, 앞서의 조직관찰에서도 250°C 템퍼링처리부터 마르텐사이트조직의 분해가 한층 빨리 진행됨을 확연히 볼 수 있었다. 또한 템퍼링온도가 350°C에서는 a축의 격자상수는 $2.8703 \times 10^{-10}m$ 로 템퍼링온도의 증가에 따라 격자상수는 일정율로 감소하였다. 이는 템퍼링온도의 증가에 따른 단위격자체적이 감소한다는 앞서의 비체적 실험결과와도 일치함을 볼 수 있다. 이들 템퍼링온도에 따른 밀도측정에 의해 계산한 비체적의 변화와 결정격자상수의 변화를 Fig.7에 함께 비교하여 보았다.

이상과 같은 격자상수의 변화는 퀘칭, 템퍼링열처리에 의한 조직변태에 기인한 것으로 이들 조직변태에 의하여 국부적 변형이 발생하게 된다. 즉, 강을 급냉하면 표면부와 내부조직의 열수축의 차와 변태팽창에 기인하여 국부적인 잔류응력이 발생하게 되고 열수축에 의한 잔류응력의 분포는 표면은 압축, 내부에서는 인장응력으로 나타나며 변태팽창에 의한 잔류응력의 분포는 표면에 인장, 내부에 압축응력을 발생하는 것으로 연구자들에 의하여 보고되고 있다. 이에 본 연구에서도 870°C와 1000°C에서 퀘칭한 시편의 표면잔류응력을 X

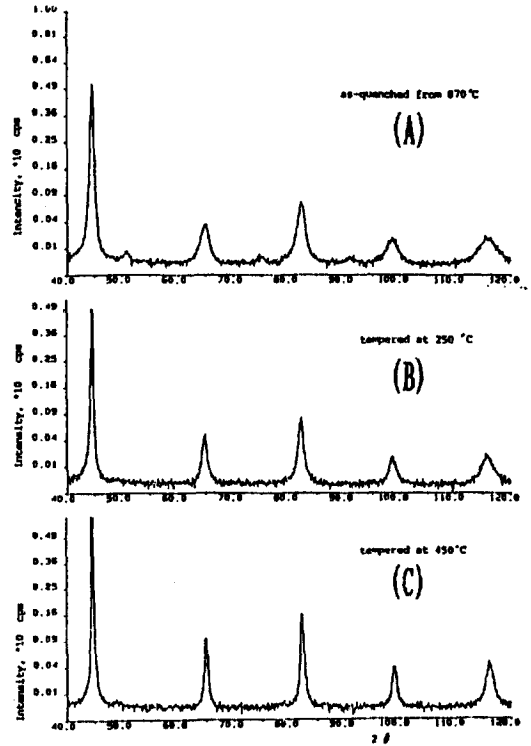


Fig. 8. The variation of half-width as a function of tempering temperature (A)as quenched, (B) 250°C and (C) 450°C.

-선을 이용하여 측정된 결과, 두 시험편 모두 인장응력으로 나타났고 그 값은 평균 +42.14 MPa과 +56.84 MPa이었다. 이로부터 본 시험편의 표면잔류응력은 주로 변태팽창에 기인한 결과임을 알 수 있고 이러한 잔류응력이 내부미세조직에 미소변형을 유발시킨 것으로 생각된다. 더욱이 표면잔류응력의 양과 상대적 내부잔류응력의 양에 의하여 재료의 물성은 변화되고 또한 내부변형에 의하여 초음파전파속도는 변화한다고 생각된다.

각각의 템퍼링온도에 따라 조사된 XRD 실험결과를 회절 peak 반가폭의 변화로 비교하여 Fig.8에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 회절 peak의 반가폭은 템퍼링온도가 증가함에 따라 좁아지고 있음을 알 수 있다. 이는 퀘칭변태조직의 불규칙도와 이에 따라 발생하는 국부적 미소응력에 의한 결과로서 지지조직인 마르텐사이트의 경우 넓게 나타났던 회절 peak의 반가폭이 템퍼링처리에 의하여 불규칙도의 감소와 국부적 미소응

력의 회복으로 인하여 좁게 나타난 것으로 생각된다. 이와같은 X-선을 이용한 회절 peak의 반가폭 변화는 Kurita⁸⁾등이 보고한 강의 켄칭경화의 평가에 관한 실험 결과와도 잘 일치하고 있다.

켄칭온도가 1000°C인 것이 870°C의 것보다 일반적으로 초음파 전파속도가 작은 것은 켄칭온도가 높을수록 열응력과 변태응력이 크므로 이들 응력의 영향력이 크게 작용하고 있음을 알 수 있다. 즉 초음파의 전파속도는 상변태시의 결정방위의 불규칙도, 미세한 쌍정의 집합, 높은 전위밀도 등에 의한 응력 유기 인자에 의존한다고 하겠다.

따라서 초음파 전파 속도를 측정하므로써 재료의 미세조직은 물론 나아가서는 기계적 성질도 비파괴적으로 평가 가능 할 것이며 이를 위해서는 많은 Data축적이 필요하다.

4. 결 론

켄칭 열처리시킨 SCM 440 강을 여러 온도구간에서 템퍼링을 행하여 조직변태에 미치는 템퍼링온도의 영향을 초음파 전파속도의 변화로 조사하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 초음파 전파속도는 템퍼링온도가 증가함에 따라 증가하며, 이는 조직변태에 기인한 열응력 변태응력의 소거진행에 따른다.

2) 켄칭, 템퍼링열처리에 따른 초음파 전파속도의 변

화는 변형된 격자의 정상회복에 따르며, 초음파 전파속도의 변화로서 이와같은 미세조직의 변화현상을 평가할 수 있는 것으로 판단된다.

3) 강의 켄칭상태와 템퍼링의 정도는 초음파 전파속도의 변화로서 비파괴적으로 평가 가능한 것으로 사려된다.

6. 참고문헌

1. D.C. Huges and J.L. Kelly : Physical Review, 92 (1953) 1145.
2. R. Klinman and E.T. Stephenson : Materials Evaluation, 39 (1981) 1116.
3. A. Vary : Materials Evaluation, 46 (1988) 642.
4. C. Rudd and R.E. Green : Nondestructive Methods for Material Property Determination, plenum, Newyork, (1984) 5.
5. E.P. Papadakis : J. of Applied Physics, 35 (1964) 1474.
6. J.D. Verhoeven : Fundamentals of Physical Metallurgy, John wiley & Sons, Inc., (1975) 469.
7. 일본금속학회 : 철강재료편람, 丸善, (1967) 114.
8. M. Kurita, M. Miyagawa, and M. Shindo : J. of JSNDI 39 (1990) 67.