

SCM440강의 결정입도와 조직의 변화에 따른 초음파 감쇄

박은수 · 강계명 · 김선진* · 장순식**

서울산업대학교 재료공학과

*한양대학교 재료공학과

**한국원자력안전기술원 연구기획실

Ultrasonic Attenuation due to the Changes of Grain Size and Microstructure of SCM440 Steel

Un Su Park, Kae Myung Kang, Seon Jin Kim and Soon Shik Jang

Dept. of Materials Engineering, Seoul National Polytechnic Univ.

*Dept. of Materials Engineering, Hanyang Univ.

**Dept. of Research Planning, KINS

초 록 여러 온도에서 급냉 및 템퍼링시킨 SCM440강을 이용하여 결정입도와 조직의 변화가 초음파감쇄에 미치는 영향에 관하여 연구하였다. 초음파감쇄는 주로 결정립에 의한 산란에 기인하였으며 감쇄계수는 결정립의 크기가 클수록 증가하였으나 템퍼링시킨 조직의 경우 템퍼링온도가 높아질수록 감쇄계수는 감소하는 것을 알 수 있었다. 주파수의 의존성은 직선적인 log-log 관계를 가지며 Roney의 식과 비례하는 것으로 조사되었다.

Abstract The effects of grain size and microstructure on the ultrasonic attenuation was investigated with SCM440 steel quenched and tempered at various temperatures. The ultrasonic attenuation was primarily due to the grain boundary scattering and the ultrasonic attenuation coefficient increased with increasing grain size. In the meantime, it was found that the ultrasonic attenuation coefficient decreased with increasing tempering temperature. The dependence of ultrasonic attenuation coefficient on the frequency of ultrasonic wave had linear relationship on a log-log scale and was proportional to the Roney's equation.

1. 서 론

다결정체인 금속재료내에서 일어나는 초음파의 감쇄는 미세조직의 내부마찰 등에 의한 흡수손실(absorption attenuation)과 결정입계에 의한 산란손실(scattering attenuation)에 의해 발생된다¹⁻³⁾.

재료의 결정입도와 조직은 재료의 강도특성을 지배하므로, 초음파를 이용하여 이들의 관계를 밝히고자 하는 연구가 부각되고 있다. 즉 초음파의 전파특성에서 감쇄현상을 이용하여 재료의 파괴실험이나 현미경조직을 관찰하지 않고, 비파괴적으로 재료의 강도추정과 경화상태의 평가 등 재료의 기계적 성질의 예측에 관한 연구³⁻⁶⁾가 관심의 대상으로 남아 있

다.

1894년 균일한 유동체에서의 음파산란이론을 수식화시킨 Lord Rayleigh의 연구 이래, Mason 등⁷⁾은 금속재료에서 결정입도의 변화에 따른 초음파의 감쇄관계를 수식화하였고, Roderick 등⁸⁾은 연강에서 결정입도가 초음파 감쇄에 미치는 영향에 관하여 이론적 고찰과 아울러 초음파감쇄와 임계산란에 대한 실험결과를 연구·보고하였다.

최근 이들 이론과 실험에 근거하여 Vary²⁾는 초음파감쇄량의 측정으로 재료의 파괴인성과 파괴형태의 예측을 시도하였다. 또한 Klinman 등⁹⁾은 연강판에 대하여 결정입도와 감쇄에 관한 Mason-McShimin 식으로부터 초음파의 감쇄량을 측정함으로써 결정입도를 예

측하고, Hall-Petch식을 이용하여 항복강도 등의 기계적성질을 추정한 바, 파괴시험결과와 잘 일치하는 것으로 보고하였다. 이와같이 결정입도와 초음파의 감쇄계수와 관계로부터 재료의 기계적성질을 예측·평가하여 보고자하는 연구^{10~14)}는 활발히 진행되어 상당한 발전을 보이고 있다.

초음파감쇄에 관한 많은 연구^{15~17)}는 주로 감쇄에 주요 인자인 결정입계에 의한 산란손실에 관한 것으로 집약되고 있다. 그러나 이들은 실제 사용상의 정량적 연구결과로는 아직 미흡한 점이 있고, 조직과 감쇄와의 상관관계에 관한 규명은 중요하나 해석상의 어려운 점이 많아 명쾌한 이론적 정립이나 실험적 고찰에 관한 연구는 많이 이루어지지 않고 있다.

본 연구에서는 SCM440강을 시료강으로 하여 800°C와 1200°C의 온도범위에서 급냉하여 austenite 결정입자의 크기를 조절한 후 결정립크기에 따른 초음파 감쇄현상을 조사하였다. 또한 일정한 오스테나이트화 온도로 austenite의 입자크기를 같게 하여 급냉시킨 시험편을 150°C와 650°C 구간에서 100°C 간격으로 1시간 템퍼링시켜 템퍼드마르텐사이트조직을 형성시킨 후, 이들 각각의 시험편들에 대한 감쇄계수를 측정하여 조직의 변화에 따른 초음파감쇄를 조사·연구하였다.

2. 실험 방법

시험편

본 연구에 사용된 시료강은 SCM440강으로 그림 1에 열처리과정을 나타내었다. 시료강은 공히 진공로에서 870°C, 1시간 유지시킨 후 공냉하여 균질화처리하였고 이를 800°C, 870°C, 930°C, 1000°C, 1100°C 및 1200°C에서 각각 30분간 유지시킨 후 40°C의 오일에 급냉시켜 austenite의 결정립 크기가 각기 다른 마르텐사이트의 조직을 얻었다. 또한 austenite 결정입자의 크기가 동일한 템퍼드마르텐사이트조직의 시험편을 얻기 위하여 870°C와 1000°C에서 급냉시킨 시험편을 150°C와 650°C의 온도구간에서 100°C 간격으로 Ar 가스 분위기에서 1시간 템퍼링시켜 템퍼드마르텐사이트조직을 갖는 시험편을 구하였다.

이상과 같은 급냉-템퍼링(Q-T)처리를 한

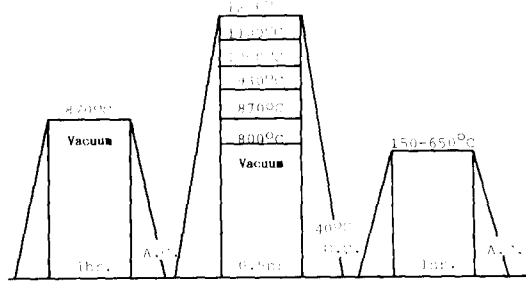


Fig. 1. Schematic diagram of heat treatment cycle.

각 시험편의 양면을 연마하여 시험편의 평행도가 0.005mm 이하로, 최종두께가 9mm가 되도록 하여 본 실험의 시험편으로 사용하였다.

결정입도와 미세조직

급냉 및 템퍼링에 따른 각 시험편의 조직은 광학현미경 및 전자현미경(SEM)을 사용하여 관찰하였다.

Austenite 결정립의 관찰은 계면활성제(2gr teepole, $C_{12}H_{25}C_6H_4SO_3Na$)를 첨가시킨 피크릭 용액(4gr picric acid + 100ml 증류수)을 80°C로 가열하여 각 시험편을 2~4분간 부식시킨 후 메틸알코올과 암모니아수로 시험편의 표면을 깨끗이 닦아내고 광학현미경을 사용하여 ASTM E 112(81)의 Heyn 방법에 의거하여 수행하였다.

초음파의 감쇄계수의 측정

초음파감쇄계수의 측정은 진동자/완충층(buffer column)/시험편의 계로 구성되어 있는 water buffer column을 사용한 1 탐촉자 pulse-echo 실험방법을 이용하였으며 종파를 사용하였다.

감쇄계수의 측정방법은 진동자에 전기적 신호를 가하면 buffer방향으로 종파가 발생하고 파는 완충층과 시험편의 계면을 지나, 시험편 내에서 반사와 투과가 반복하여 일어난다. 따라서 그림 2에 도시한 바와같이 완충층과 시험편의 계면에서 반사되는 첫번째 신호(B_0), 시험편의 저면에서 반사되어 나오는 두 개의 초음파신호(B_1 , B_2)가 시험장치의 oscilloscope 상에 나타나게 하여 진폭의 변화량을 oscilloscope상의 종축높이의 백분율로(%)로 측정하였으며, pulse-echo방법을 이용한 측정에서는

탐촉자에서 발생하는 초음파의 비임이 탐촉자를 따라 일정한 각도로 퍼지기 (beam spreading) 때문에 측정된 진폭을 diffraction correction한 후¹⁸⁾ 다음 식으로부터 초음파감쇄계수, α 를 구하였다¹⁹⁾.

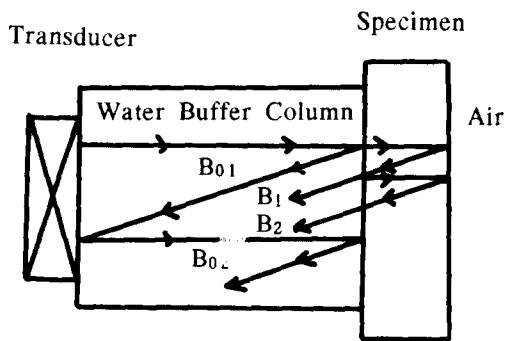
$$\alpha = [\ln(-R/A_{2C})/2l] \dots\dots\dots(1)$$

$$R = [A_{0C}A_{2C}/(A_{0C}A_{2C}-1)]$$

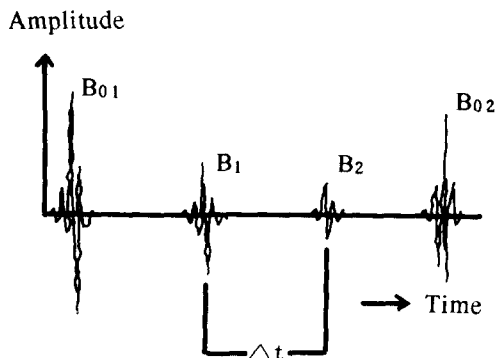
$$A_{0C} = A_{0C}/A_{1C}$$

$$A_{2C} = A_{2C}/A_{1C}$$

여기에서 A_{0C} , A_{1C} , A_{2C} 는 각각 그림 2의 완충층과 계면에서 반사된 신호(B_0), 시험편의 저면에서 반사된 신호(B_1)와 (B_2) 진폭의 교정된 진폭이고, l 은 거리이다. 또한 직경이



(a)



(b)

Fig. 2. Schematic diagram of echo system. (a : transducer/buffer/specimen system, b : signals of reflected echoes)

6mm이고 주파수가 2.5, 5, 10, 15 및 20MHz 인 각각의 수침형 탐촉자를 이용하여 주파수 변화에 따른 감쇄의 영향도 함께 조사하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Austenite 결정립의 크기와 조직

그림 3은 각각의 오스테나이트화 온도에서 유냉시킨 시험편의 austenite 결정립크기를 관찰한 광학현미경사진이다. 사진에서 볼 수 있는 바와같이 오스테나이트화 온도가 800°C, 870°C, 930°C, 1000°C, 1100°C 및 1200°C로 높을수록 austenite 결정립의 크기는 현저히 증가하여 평균 austenite 결정입자의 크기는 870°C의 경우 10 μ m에서 1000°C와 1200°C에서는 27 μ m와 82 μ m로 각각 증가하였다.

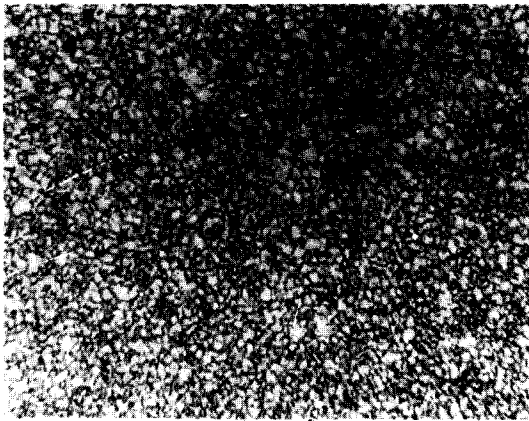
그림 4는 각 오스테나이트화 온도에서 유냉시킨 시험편들의 마르텐사이트 조직의 광학 사진으로서 사진에서 볼 수 있듯이 높은 오스테나이트화 온도에서 얻은 조직일수록 마르텐사이트의 lath는 뚜렷하여지고, lath형태도 보다 acicular하게 관찰되었다.

Austenite 결정입도와 초음파의 감쇄

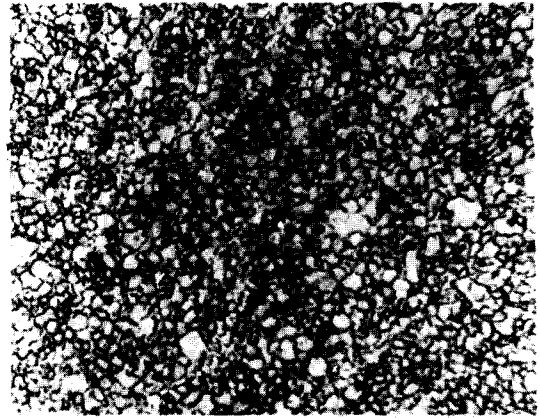
표 1은 각 오스테나이트화 온도에서 처리된 시험편에 대하여 주파수변화에 따른 초음파감쇄계수로 계산하여 구한 결과이고, 이를 결정입도와 감쇄계수와의 관계로 도식화하여 그림 5에 나타내었다.

표 1과 그림 5에서 알 수 있듯이 오스테나이트화 온도가 높을수록, 즉 austenite 결정립 크기가 클수록 전 주파수범위에 걸쳐 감쇄계수는 증가하고 있으며, 또한 주파수가 고주파수 영역으로 갈수록 감쇄계수 역시 증가하는 것으로 조사되었다.

이와 같이 초음파감쇄계수가 결정입자의 크기에 따라 변화하는 것을 볼 때 austenite 결정입자의 크기는 초음파감쇄의 원인임을 알 수 있다. 이는 탄성이방성이 큰 다결정금속재료내에서 초음파의 감쇄는 결정입계에 의한 산란감쇄와 내부마찰에 의한 미세조직의 흡수감쇄로 대별되는데 본 실험의 경우, 시험편의 조직은 그림 4에서 볼 수 있었듯이 모두 단일상의 마르텐사이트조직이므로 조성의 변화는 없고 내부조직내에 감쇄에 미치는 영향이 극히 적은 방위차만이 발생하여 이들이 흡수



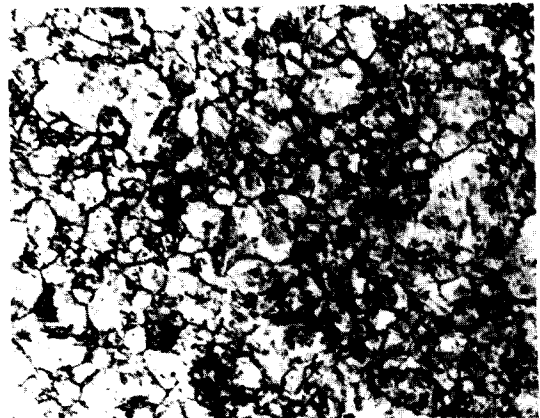
(a) at 800°C quenching



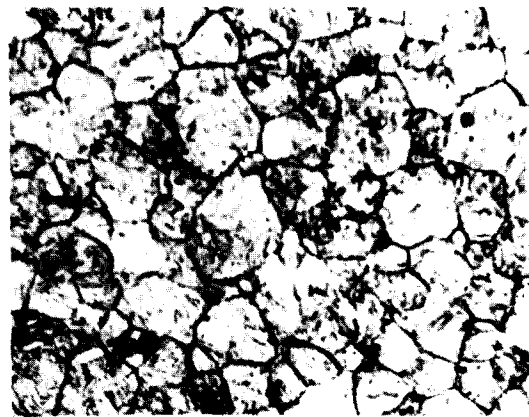
(b) at 870°C



(c) at 930°C



(d) at 1000°C

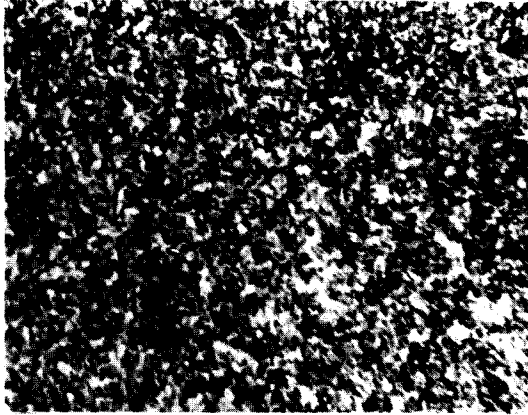


(e) at 1100°C

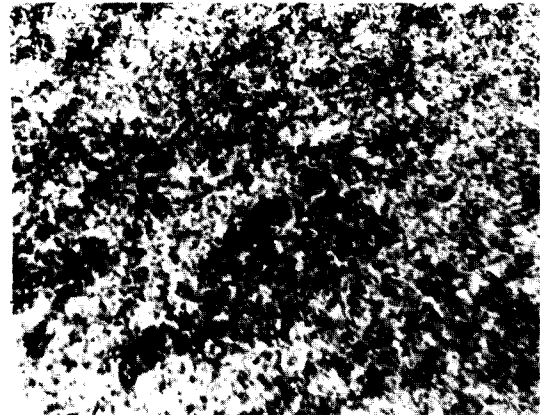


(f) at 1200°C

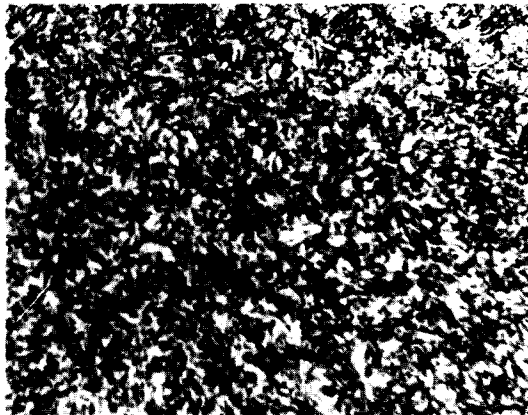
Fig. 3. Optical micrographs of austenite grains of the quenched specimen from various austenitizing temperatures. ($\times 200$)



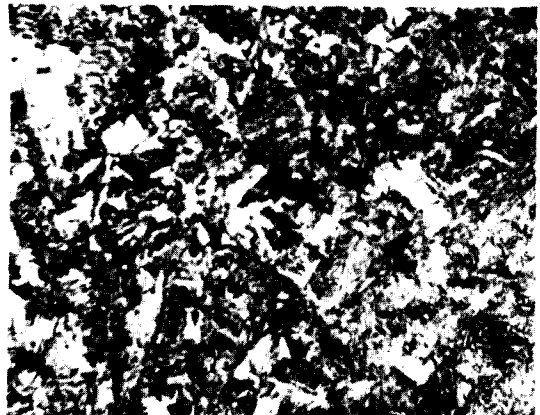
(a) at 800°C



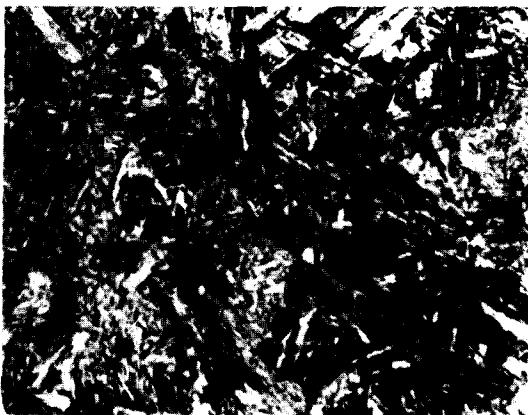
(b) at 870°C



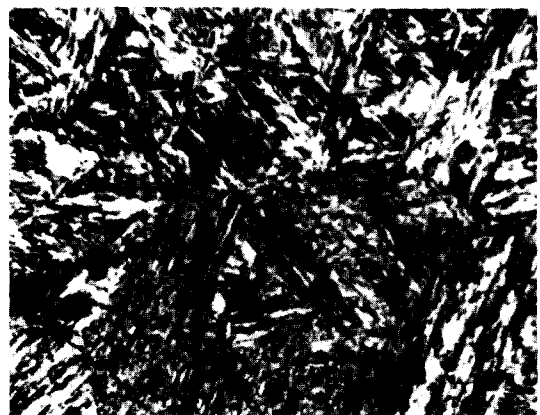
(c) at 930°C



(d) at 1000°C



(e) at 1100°C



(f) at 1200°C

Fig. 4. Optical micrographs of the quenched specimens from various austenitizing temperatures. ($\times 200$)

감쇄에 미치는 영향은 적은 것으로 생각할 수 있다^{2,3,20)}. 그러나 결정립의 크기는 오스테나

이트화 온도에 따라 큰 변화를 가져 여러 연구자들의 연구결과에서도 결정입계에 의한 산

Table 1. Ultrasonic attenuation coefficient with various frequencies at the specimen quenched from each austenitizing temperature.

Austenitizing Temperature, [°C]		800	870	930	1000	1100	1200
Grain Size	Average grain dia. [μm]	7	10	13	27	56	82
	ASTM Number	11	10	9	7	5	4
Hardness, H _R C		58	57	57	56	52	49
Frequency, [MHz]		Attenuation Coefficient, [dB/mm]					
2.5		0.030	0.036	0.046	0.060	0.081	0.110
5.0		0.038	0.045	0.060	0.074	0.110	0.150
10		0.065	0.080	0.102	0.132	0.215	0.300
15		0.105	0.130	0.160	0.210	0.320	0.580
20		0.130	0.180	0.250	0.290	0.502	0.698

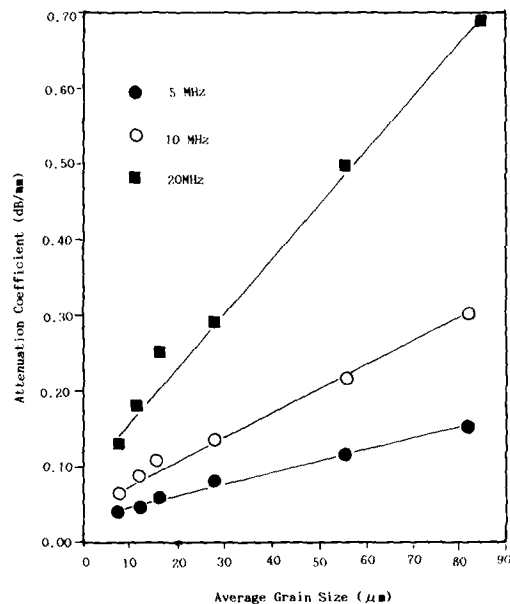


Fig. 5. The relationship between average grain diameters and attenuation coefficients of longitudinal ultrasonic wave with ultrasonic frequencies.

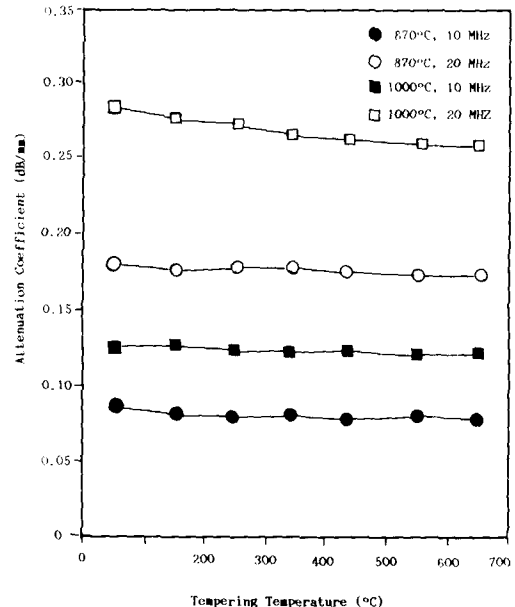


Fig. 6. The change of ultrasonic attenuation coefficients with tempering temperature at 870°C and 1000°C quenched specimen.

관감쇄가 초음파감쇄의 주요인으로 보고된⁷⁻⁹⁾ 바와같이 결정립크기의 영향이 감쇄에 가장 큰 인자로서 작용함을 알 수 있다.

미세조직과 초음파의 감쇄

흡수감쇄에 미치는 미세조직의 영향을 검토하기 위하여 결정입도가 ASTM No. 10과 No. 7의 크기를 갖는 870°C와 1000°C 급냉조직을 템퍼링을 하여 감쇄계수에 미치는 미세조직의 영향을 그림 6에 나타내었다.

두 시험편 모두 템퍼링온도가 증가함에 따라 감쇄계수는 다소 감소하였으며, 1000°C 급냉조직의 경우 주파수 20MHz에서 감쇄계수

는 템퍼링온도가 높아짐에 따라 0.290dB/mm에서 0.252dB/mm로 감소하였다. 이는 마르텐사이트조직을 템퍼링함에 따라 조직의 결정학적 방위의 불규칙도의 완화로 인하여 초음파의 전파속도는 증가하는 반면에²¹⁾ 감쇄는 불규칙도의 완화로, 즉 산란인자의 감소로 인하여 감소하는 것으로 생각된다. 그러므로 이들의 결과를 조사, 비교함으로써 급냉 후 템퍼링의 정도를 평가할 수 있다고 생각된다.

주파수 변화에 대한 초음파의 감쇄

초음파의 감쇄는 재료의 조직, 입자크기, 탄성률 등에 의해 큰 영향을 받고 있으나 주파

수에 의한 영향도 고려하여야 한다. 그림 7은 동일한 평균결정입도를 가진 시험편에 대한 주파수변화와 감쇄와의 관계를 log-log 좌표로 도시한 것이다. 그림에서 결정립의 크기가 13 μm 의 시험편의 경우, 주파수가 2.5, 5, 10, 15 및 20MHz로 변화함에 따라 감쇄계수는 0.046, 0.060, 0.102, 0.160 및 0.250dB/mm로 각각 증가하는 것으로 나타났으며, 표 1에서 결정입도가 감쇄계수에 미치는 영향과 비교하여 보면 주파수변화에 따른 감쇄계수의 증가가 더 큰 것을 알 수 있다.

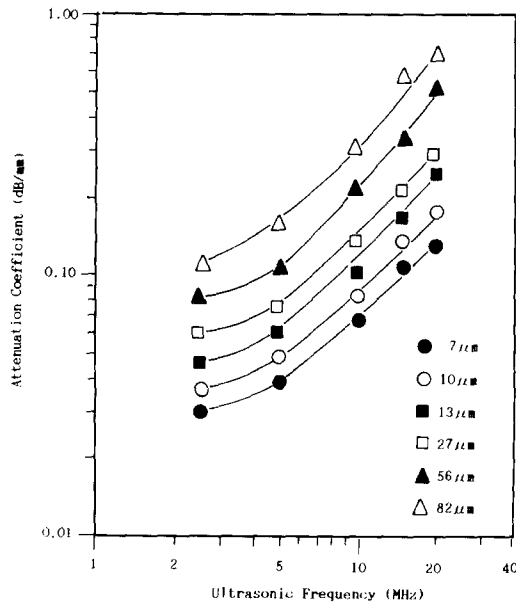


Fig. 7. Relationship between frequencies and attenuation coefficients of longitudinal ultrasonic wave.

산란에 의한 초음파감쇄를 결정입자의 크기와 주파수의 함수로 수식화하여 나타낸 Rayleigh 산란, Phase 산란, Diffusion 산란을 검토하여 보면, 본 실험에서 초음파의 파장이 결정입자보다 훨씬 크므로, 본 실험에서 나타나는 초음파감쇄는 Rayleigh mechanism¹⁶⁾을 따를 것으로 보인다.

이들 결과를 log-log 좌표로 도시하면 $\log(\alpha) = C_1 + C_2 \log(f)$ 의 직선적 관계를 가지며 여기서 f 는 주파수, C_1 , C_2 는 상수이다. 본 실험의 경우 결정립의 크기에 관계없이 구배 C_2 는 거의 1에 근사한 값을 가졌다.

다결정체에서 초음파의 감쇄는 산란체인 결정입자의 크기와 초음파주파수에 의존한다는

Mason의 입자산란에 의한 이론식⁷⁾으로 재차 고찰하여 보았다. 즉 입자산란에 의한 감쇄계수 α_s 는 아래의 (2)식으로 나타낸다. 여기서 산란인자(ζ), $\zeta = C_{11} + C_{12} - 2C_{44}$ 의 관계를 가지며¹⁸⁾, 여기서 C_{ij} 는 이방성에 따른 탄성계수를 뜻한다. ζ 는 냉각속도의 차이에 따라 변화하는 것으로 Papadakis²¹⁾는 보고하였다.

$$\alpha_s \propto \zeta \pi^n D^{n-1} f^n \dots \dots \dots (2)$$

D = grain diameter

n = 상수: 대략 1~4

위 식에 주파수, f 대신 파장, λ 를 대입하여 보면, 식 (2)는 식 (3)으로 변환되어 Roney²²⁾가 제안한 식이 된다.

$$\alpha_s \propto \zeta (\pi D / \lambda)^n \dots \dots \dots (3)$$

이는 초음파의 감쇄를 결정입도와 주파수의 항으로 직접 나타내지 않고 무차원변수의 항으로 감쇄기구를 설명함으로써 앞에서 설명한 세 가지 감쇄기구를 정성적이고 정량적으로 함께 나타낼 수 있게 된다.

본 실험의 결과를 식 (3)에 대입하여 log-log 좌표로 도시한 것이 그림 8이다. 감쇄에 미치는 결정입도와 주파수 의존성은 높은 상관관계를 가지며 그림 7의 관계에서 보다 큰 변화를 가져 1.5(C_2)의 구배로 조사되었다.

이와같이 결정입도-주파수-감쇄계수의 관계에 관한 본 실험의 결과는 다결정체에서 초음파감쇄는 산란체인 결정입자의 크기와 주파수에 의존한다는 Serabian의 연구결과²³⁾와도 정성적으로 일치하였다.

4. 결 론

급냉 및 템퍼링한 SCM440강의 결정입도와 조직이 초음파감쇄에 미치는 영향에 관한 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 초음파의 감쇄는 주로 결정립에 의한 산란에 기인하였으며, 감쇄계수는 결정립의 크기가 증가함에 따라 증가하였다. 또한 감쇄계수는 주파수 증가에 따라 $\log(\alpha) = C_1 + C_2 \log(f)$ 의 관계를 가지며, 본 실험의 5MHz에서 20MHz범위에서 구배(C_2)는 1에 근사하였다.

2) 결정립의 크기가 13 μm 의 경우 감쇄계수는 주파수가 2.5MHz에서 20MHz로 증가할수록 0.046dB/mm에서 0.250dB/mm로 더욱 크

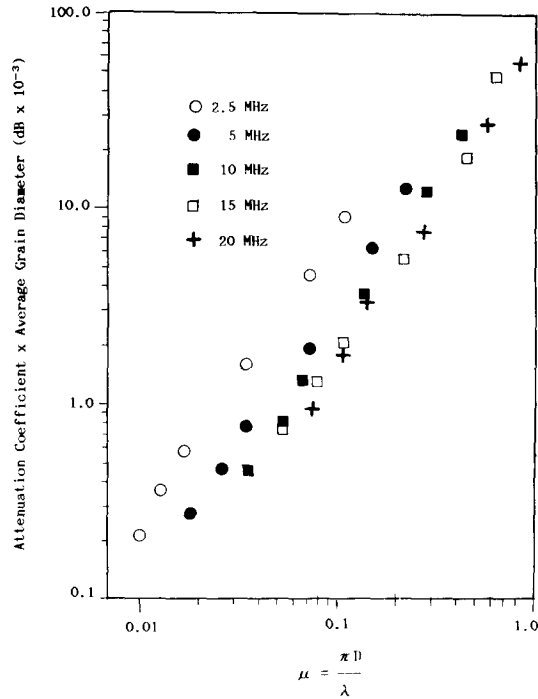


Fig. 8. Relationship between average austenite grain sizes, frequencies and attenuation coefficients.

계 증가하였다.

3) 마르텐사이트의 템퍼링온도에 따른 조직에 미치는 초음파감쇄계수의 변화는 적었으나, 1000°C 급냉조직의 경우 주파수 20MHz에서 감쇄계수는 템퍼링온도가 높아짐에 따라 0.290dB/mm에서 0.252dB/mm로 감소하였다. 또한 템퍼드마르텐사이트 조직에서의 감쇄는 주파수 의존성이 낮았다.

4) 감쇄에 미치는 결정입도와 주파수의 의존성은 log-log 좌표에서 직선적 관계를 가지며 Roney가 제시한 관계식과 비례하는 것으로 조사되었고, 본 실험에서는 1.5의 구배로 측정되었다.

참고 문헌

1. Japan Society for the Promotion of Science; Ultrasonic Material Testing, 2nd ed., Nikkan Kogyo Shimbun, Ltd., Tokyo, (1974), 76
2. A. Vary; Materials Evaluation, Vol. **46**, (1988) 642
3. J.F. Bussiere; *ibid*, Vol. **44** (1986), 560
4. Oda and Isamu; J. of Japan Welding

- Society, Vol. **5**, (1987), 120
5. A. Vary; Mechanics of NDT, W.W. Stinchcomb(Ed.), Plenum Press, N.Y., (1980), 123
6. W.P. Mason; Physical Acoustics and The Properties of Solids, D. Van Nostrand Co., Toronto, (1958), 87
7. W.P. Mason and H.J. McShimin; J. Appl. Phys., Vol. **19**, (1948), 940
8. R.L. Roderick and R. Truell; J. Acoust. Soc. Am., Vol. **23**, (1952), 267
9. R. Klinman, G.R. Webster, F.J. Marsh and E.T. Stephenson; Materials Evaluation, Vol. **38**, (1980), 26
10. Sigrun Hirsekorn; J. of Acoust. Soc. Am., Vol. **79**, (1986), 296
11. R. Klinman and E.T. Stephenson; Materials Evaluation, Vol. **39**, (1981), 1116
12. R.L. Smith, K.L. Rusbridge, W.N. Reynolds and B. Hudson; *ibid*, Vol. **41**, (1983), 219
13. G. Canella and M. Taddei; Nondestructive Characterization of Materials II, J.F. Bussiere(Ed.), Plenum Press, N.Y., (1986), 261
14. A. Hecht, R. Thiel, E. Neumann and E. Mundry; Materials Evaluation, Vol. **39**, (1981), 934
15. T. Mihara, M. Obata and M. Yamashita; J. of JSNDI, Vol. **38**, (1989), 898
16. E.R. Generazio; *ibid*, Vol. **44**, (1986), 198
17. Generazic, E.R.; Materials Evaluation, Vol. **48**, (1988), 1198
18. E.S. Park; "Nondestructive Characterization of Grain Size and Microstructure of Surface-Hardened Layers by Ultrasonic Method" Ph. D dissertation 1991. Hanyang Univ.
19. E.P. Papadakis; J. of Testing and Evaluation, Vol. **12**, (1984), 273
20. A. Vary; Materials Evaluation, (1978), 55
21. E.P. Papadakis; J. Acoust. Soc. Am., Vol. **35**, (1964), 1474
22. R.K. Roney; Ph.D. Thesis, California Inst. of Technology, (1950).
23. S.Serabian; Brit. J. NDT., Vol. **22** (1980), 69.