

초음파법에 의한 저탄소강의 페라이트 결정립 크기 측정

洪淳澤 · 權肅仁* · 周雄龍

포항제철 기술연구소

*고려대학교 금속공학과

Measurement of Ferrite Grain Size by Ultrasonic Method in Low Carbon Steel

Soon Taik Hong*, Sook In Kwun** and Wung Yong Choo*

*Technical Research Lab., POSCO, P.O. Box 36, Pohang 790-785, Korea

**Dept. of Metallurgical Eng., Korea Univ., Seoul 136-701, Korea

ABSTRACT Grain size of steels is one of the most important parameters which influence yield strength and fracture toughness. Ultrasonic wave propagating in polycrystalline materials is mostly attenuated by scattering at grain boundary. Effect of ultrasonic attenuation on average ferrite grain size of carbon steels with tensile strength 40~60kgf/mm² consisting of multi phases such as ferrite + pearlite and ferrite + pearlite + bainite was evaluated. The attenuation of these steels rapidly increased with average ferrite grain diameter. Average ferrite grain diameter(D_{av} , μm) could be expressed as $1.79 + 22.97 \cdot a^{1/2.03}$, where a is attenuation with unit of nepers/cm. From this study, it was confirmed that nondestructive ultrasonic method could be used in measuring average ferrite grain size indirectly.

Key words : Average ferrite grain size, Ultrasonic attenuation, Nondestructive method, Carbon steel.

1. 서 론

철강재료의 결정립 크기는 강도 및 인성 등의 기계적 성질에 매우 지대한 영향을 미치는 야금학적 인자이다. 현재까지 결정립을 평가하기 위해서는 강판의 절단, 마운팅, 연마 등의 공정을 거치기 때문에 제품이 생산된 후에 그 평가가 가능하다. 또한 제품의 over-all 시험이 불가능하고 시편의 채취에서 조직의 관찰에 이르기까지 많은 시간 및 인력과 비용이 소모됨은 물론 제조공정에 신속한 feed-back이 어렵다. 따라서 결정립의 비파괴적 평가는 파괴적 평가의 단점을 극복할 수 있는 충분

한 매력을 가지고 있다. 초음파를 이용하여 구조용 재료의 결정립 크기를 비파괴적으로 평가하기 위한 시도는 오래전부터 관심의 대상이 되었고, 특히 초음파 전파 속도와 더불어 초음파 파라미터인 감쇠계수의 측정에 의해 다결정체 금속의 결정립 평가를 위한 연구를 수행하였다. 감쇠계수(α)는 다결정체의 결정입경(D), 파장(λ), 주파수(f)에 의존하므로 따라서 감쇠의 측정에 의해 결정립 크기를 평가할 수 있다. 감쇠계수는 주파수와 결정립 크기에 따라 그 메커니즘을 달리하며 다음과 같이 요약할 수 있다.¹⁾

$$\lambda > 2\pi D \text{ (Rayleigh 산란) 영역 : } \alpha = C_r D^{3/4}$$

$$\lambda = D \text{ (Stochastic 산란) 영역 ; } \alpha = C_s Df^2$$

여기서 C_r 과 C_s 는 비례상수이다. 어떠한 메카니즘에 의해서도 초음파 감쇠와 결정립 크기에는 상관성이 있으며, 주로 결정립 크기 측정을 위한 초음파 탐촉자의 파장 범위는 주로 Rayleigh 산란영역에서 이루어진다. Rayleigh 산란영역에서 초음파 감쇠와 산란체(결정립) 크기의 관계는 이방성이 없고 구형의 단일상 결정립으로 이루어진 다결정 고체를 가정하고 유도되어진 것이기 때문에 상당량의 퍼얼라이트 조직의 분율을 갖는 2상 또는 펄라이트와 베이나이트 분율을 포함하는 3상 혼합조직에서 페라이트의 결정립을 산출하기 위해서는 페라이트 결정립 크기와 감쇠관계의 새로운 형태의 수식 도출이 필요하다.

본 연구에서는 다양한 조직의 변화를 갖는 인장강도 40~60kgf/mm²급 후강판의 페라이트 결정립 크기를 다양하게 변화시켜 결정립 크기와 초음파 파라미터인 감쇠의 상관관계로부터 페라이트 결정립의 비파괴적 측정을 위한 연구를 수행하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 소재준비

본 연구에서 사용된 강재는 제조조건에 따라 미세조직의 변화가 비교적 큰 인장강도 40~60kgf/mm²급 선급용 강재로 그 화학조성은 다음 표1과 같다.

표 1에서 시편번호 D는 Ti단독 첨가된 조선용 A,DH 32강을 나타내고 시편번호 N은 Nb-Ti복합 첨가 조선용 A,DH 32강을 나타낸다. 그리고 시편번호 E는 Ti단독 첨가된 조선용 EH 36강을 나타

낸다.

열간압연에 앞서 현장에서 생산된 slab를 1,250°C로 가열한 후 각각 70mm 및 50mm로 sizing압연을 실시하였다. sizing압연된 slab를 다시 1200~1250°C에서 2시간 가열하고 각 압연 패스당 약 20%의 압하를 가하여 최종두께 13mm의 강판을 제조하였다. 다양한 미세조직의 형성을 위해 압연조건 및 가속냉각 조건을 변화시켰다. 그리고 결정입경을 변화시키기 위해 일반압연 및 가속냉각 강판에 대하여 노르말라이징 열처리를 행하였다. 노르말라이징은 각각 900°C, 1,000°C, 1,100°C, 1,200°C에서 1시간동안 실시하였다.

2.2 비파괴 측정실험

초음파의 산란 및 감쇠의 정밀한 측정을 위해서는 탐촉자와 재료사이의 접촉의 변화로부터 야기될 수 있는 초음파 신호의 감소를 최대한 줄여야 하므로, 본 실험에서는 수침법을 이용하여 감쇠를 측정하였다. 초음파 탐촉자에 전기적인 펄스를 가하고, 수신된 초음파 신호의 증폭을 위해서는 Panametric사의 pulser & receiver 5052UA를 사용하였으며, 신호의 크기 측정 및 분석은 LeCroy 9345A oscilloscope를 사용하였다. 탐촉자의 위치 제어와 수신된 신호의 주파수 분석, 그리고 감쇠계수 및 전파속도의 계산 등은 Tbasic으로 짜여진 컴퓨터 프로그램을 이용하였다. 초음파 감쇠의 측정에는 중심 주파수가 15 MHz인 평면파용 종파 탐촉자가 이용되었으며, 사용된 탐촉자 지름은 0.25인치를 사용하였다. 그리고 탐촉자와 시편간의 접촉매질인 물의 온도는 20°C로 유지하였고 물에 잠겨진 탐촉자 및 시편의 표면에 온도차이에 의해

Table 1. Chemical composition of specimen used in this study.

Steel No.	Chemical composition (wt.%)								
	C	Mn	Si	P	S	Ti	Nb	sol. Al	N ₂
D	0.16	1.11	0.26	0.019	0.004	0.011	-	0.030	0.0035
N	0.16	1.10	0.26	0.019	0.004	0.012	0.010	0.028	0.0029
E	0.10	1.45	0.22	0.015	0.006	0.011	-	0.042	0.0025

발생되는 기포의 존재는 초음파 전파속도 및 감쇠에 큰 영향을 미치게 되므로 부드러운 붓으로 그 표면에 발생된 기포를 측정 직전에 제거하고 측정하였다.

감쇠의 측정은 시험편의 표면으로부터 반사된 신호(A)와 시험편의 내부를 한번 왕복한 신호(B) 그리고 두 번 왕복한 신호(C)를 측정한 후 각각의 신호를 Fourier변환하고 각 주파수에서의 신호의 크기를 비교할 수 있는 스펙트럼 분석법을 이용하였다. 탐촉자로부터 발생된 초음파는 일정한 폭을 가지고 퍼져 나가므로 탐촉자와 수직인 방향으로 진행하는 빔의 세기는 진행거리에 따라 점차 줄어들게 된다. 그러므로 진행거리에 따라 회절에 의해 줄어든 빔의 세기를 보정하여야 한다. 회절보정을 위한 식은 다음과 같다⁸⁾.

$$|D_L| = \{ [\cos(2\pi/s) - J_0(2\pi/s)]^2 + [\sin(2\pi/s) - J_1(2\pi/s)]^2 \}^{1/2}$$

이 식에서 J_n 는 Bessel함수, $s = lv/a^2f$ 이며, l 은 시험편의 두께, v 는 초음파의 속도, a 는 탐촉자의 반경이고, f 는 주파수이다.

또한 물과 시험편의 임피던스 차이로부터 야기되는 반사율도 보정해야하며 회절보정과 반사보정 후 감쇠는 다음 식을 이용하여 계산된다.

$$\alpha = \frac{\ln(-\frac{R}{C_0})}{2l}$$

여기서 반사계수 $R = \frac{\sqrt{\bar{A}_0 \bar{C}_0}}{\sqrt{(\bar{A}_0 \bar{C}_0 - 1)}}$ 이며, $\bar{A}_0 = \frac{A_0}{B_0}$

$\bar{C}_0 = \frac{C_0}{B_0}$ 이고, A_0, B_0, C_0 는 각각 회절보정된 신호의 세기이다. 그리고 감쇠의 측정에서 잡음신호를 제거하기 위해 200개의 신호를 시간 평균을 하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 페라이트 결정립 크기 및 상분율

표 2에 Ti단독 첨가된 조선용 A,DH 32강을 나

타내는 D강을 다양한 공정변수 및 열처리 조건을 적용시켜 얻은 페라이트 결정립의 크기와 상분율을 나타내었다. 결정립 크기 및 상분율은 영상분석기를 사용하여 분석하였으며 미세조직 사진에서 상분율을 결정할 때 acicular 페라이트 형태는 그 특성이 베이나이트에 가깝기 때문에 베이나이트

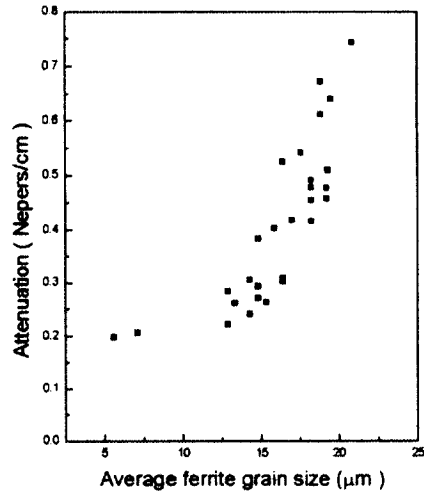


Fig. 1. Dependence of ultrasonic attenuation on average ferrite grain size in D steel.

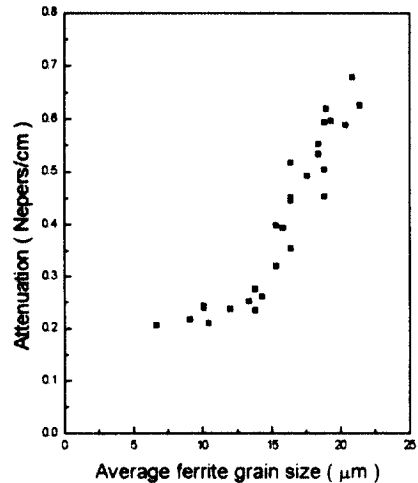


Fig. 2. Dependence of ultrasonic attenuation on average ferrite grain size in N steel.

Table 2. Process conditions, ferrite grain size, and phase volume fraction of D steels(FRT : Finish Rolling Temperature, CR : Cooling Rate, FGS : Ferrite Grain Size).

Process conditions			FGS(μm)		Phase fraction (%)		
FRT($^{\circ}\text{C}$)	CR($^{\circ}\text{C}/\text{sec}$)	Nor. temp.($^{\circ}\text{C}$)	D_{av}	D_{max}	Ferrite	Pearlite	Banite
950	air cooling	-	16.42	36.72	83.50	16.50	-
		900	14.29	27.54	80.10	19.90	-
		1,000	16.42	36.72	80.39	19.61	-
		1,100	18.86	48.19	79.51	20.49	-
		1,200	20.86	48.19	80.00	18.60	1.40
	15	900	14.80	34.42	82.30	17.70	-
		1,000	17.00	36.72	79.43	20.57	-
		1,100	18.22	43.60	73.08	26.92	-
		1,200	19.23	39.01	78.43	21.57	-
	30	900	13.34	32.13	80.67	19.33	-
		1,000	14.80	36.72	84.13	15.87	-
		1,100	18.22	45.90	77.20	22.80	-
1,200		19.22	45.90	77.03	22.97	-	
850	air cooling	-	14.80	27.54	76.40	23.60	-
		900	12.88	27.54	78.26	21.74	-
		1,000	17.60	41.31	76.42	23.58	-
		1,100	18.86	59.67	74.64	25.36	-
		1,200	19.53	50.49	82.18	17.82	-
	15	-	7.14	14.69	73.66	7.32	19.02
		900	12.88	27.54	76.00	24.00	-
		1,000	15.86	36.72	78.47	21.53	-
		1,100	18.22	48.19	77.00	23.00	-
	30	1,200	19.32	57.37	82.30	17.70	-
		-	5.60	11.75	30.29	14.90	54.81
		900	15.32	32.13	81.78	18.22	-
		1,000	14.29	49.01	75.84	24.16	-
		1,100	16.42	34.23	78.95	21.05	-
	1,200	18.22	36.72	80.69	19.31	-	

분율에 포함시켰다. D강의 페라이트 결정립의 평균크기(D_{av})와 최대 페라이트 결정립 크기 D_{max} 는 각각 6~21 μm 과 12~60 μm 의 크기를 갖고 있음을 알 수 있다. 표3 및 표4는 각각 Nb-Ti복합첨가 선용 ADH 32강인 N강 및 Ti단독 첨가된 조선용 EH 36강인 E강의 결정립 크기 및 상분율을 나타내었다. 이들 표에서 알 수 있듯이 N강과 E강은 상당양의 배이나이트 분율을 가지는 3상조직임을

알 수 있다. N강의 페라이트 결정립의 평균크기 분포는 7~21 μm 의 크기를 가지며, 최대 결정립 크기는 13~60 μm 을 가지고 있다. 또한 E강의 페라이트 결정립의 평균크기 분포는 6~20 μm , D_{max} 는 10~53 μm 을 가지고 있다.

3.2 결정립 크기와 초음파 감쇠의 상관관계

그림 1은 D강의 결정립 크기와 중심 주파수

Table 3. Process conditions, ferrite grain size, and phase volume fraction of N steels(FRT : Finish Rolling Temperature, CR : Cooling Rate, FGS : Ferrite Grain Size).

Process conditions			FGS(μm)		Phase fraction (%)			
FRT($^{\circ}\text{C}$)	CR($^{\circ}\text{C}/\text{sec}$)	Nor. temp.($^{\circ}\text{C}$)	D_{av}	D_{max}	Ferrite	Pearlite	Banite	
950	air cooling	-	14.29	34.42	85.85	14.15	-	
		900	13.81	25.24	75.71	22.86	1.43	
		1,000	15.32	36.72	74.64	22.06	3.29	
		1,100	18.86	36.72	73.17	23.42	3.41	
		1,200	20.86	45.90	74.16	21.05	4.79	
	15	-	10.46	14.69	73.49	24.65	1.86	
		900	13.34	27.54	81.55	18.45	-	
		1,000	16.42	36.72	78.28	20.36	1.36	
		1,100	18.86	39.01	77.33	19.33	3.33	
		1,200	21.42	41.31	69.67	25.64	3.79	
	30	900	10.10	22.03	80.34	19.66	-	
		1,000	15.86	39.01	74.76	23.52	1.72	
		1,100	16.42	43.60	70.81	24.26	4.93	
		1,200	19.32	59.67	68.47	25.81	5.72	
	850	air cooling	-	9.11	22.03	81.08	18.96	-
			900	12.02	25.24	78.74	21.26	-
1,000			17.60	39.01	74.00	21.33	4.67	
1,100			18.42	39.01	73.63	20.90	5.47	
1,200			19.00	50.49	73.33	19.05	7.62	
15		-	6.66	13.22	65.03	-	34.97	
		900	10.10	29.38	78.74	21.26	-	
		1,000	15.32	39.01	76.30	21.80	1.90	
		1,100	18.86	43.60	72.20	23.90	3.90	
		1,200	20.42	59.67	70.95	23.72	5.33	
30		900	13.81	34.42	81.43	18.57	-	
		1,000	16.42	36.72	76.19	19.05	4.76	
		1,100	17.62	43.60	75.71	19.52	4.76	
		1,200	18.42	55.08	66.36	24.55	9.09	

15MHz를 갖는 탐촉자에 의해 측정된 초음파 감쇠와의 상관관계를 나타낸 것이다. 페라이트 평균 결정립 크기가 증가할수록 감쇠의 크기는 포물선 형태와 유사하게 증가됨을 볼 수 있다. 그림 2는 N강의 페라이트 평균 결정립 크기와 감쇠와의 상관성을 나타낸 것이다. D강에서와 유사한 형태의 상관성을 가지고 있음을 볼 수 있다. 마찬가지로 E강에서도 결정입경과 초음파 감쇠계수간에는 거의

유사한 상관성을 그림 3에서 볼 수 있다.

초음파 (α) 감쇠와 균일한 구형의 단일상을 갖고 이방성이 없는 금속의 결정립(D) 크기와 초음파 주파수(f)에는 다음과 같은 형태의 수식이 성립함이 알려져 있다⁹⁾.

$$\alpha = \alpha_1 f^{n-2} + \alpha_2 D^m \cdot f^n \dots\dots\dots(1)$$

여기서 α_1 및 α_2 는 비례상수를 나타낸다. 일반적으로 초음파 흡수에 의한 감쇠 항인 첫항은 매우

Table 4. Process conditions, ferrite grain size, and phase volume fraction of E steels(FRT : Finish Rolling Temperature, CR : Cooling Rate, FGS : Ferrite Grain Size).

Process conditions			FGS(μm)		Phase fraction (%)			
FRT($^{\circ}\text{C}$)	CR($^{\circ}\text{C}/\text{sec}$)	Nor. temp.($^{\circ}\text{C}$)	D_{av}	D_{max}	Ferrite	Pearlite	Banite	
950	air cooling	-	12.88	34.42	82.38	13.81	3.81	
		900	9.76	22.03	87.14	10.95	1.91	
		1,000	16.42	36.72	77.48	19.87	2.65	
		1,100	18.29	39.01	73.50	16.50	10.00	
		1,200	19.80	52.78	77.00	11.00	12.00	
	15	-	6.22	17.63	81.72	-	18.28	
		900	7.93	20.56	85.31	14.69	-	
		1,000	13.34	29.83	76.83	21.45	1.63	
		1,100	13.88	39.01	82.76	12.81	4.43	
		1,200	14.29	39.01	71.63	10.73	17.65	
	30	900	12.88	25.24	84.08	13.93	1.99	
		1,000	13.81	32.13	82.08	13.68	4.24	
		1,100	13.81	36.72	83.82	10.30	5.88	
		1,200	14.29	48.19	82.44	6.93	10.73	
	850	air cooling	-	7.66	24.97	81.07	14.08	4.85
			900	7.93	19.09	87.14	12.86	-
1,000			13.81	36.72	83.03	13.30	3.67	
1,100			14.29	39.01	78.74	10.63	10.63	
1,200			15.86	45.90	80.20	8.42	11.38	
15		900	12.02	25.24	89.16	8.43	2.41	
		1,000	13.34	36.72	82.86	11.91	5.24	
		1,100	14.34	41.31	74.64	14.36	11.00	
		1,200	15.29	41.31	77.12	11.42	11.46	
30		900	12.02	34.42	83.33	15.24	1.43	
		1,000	13.81	36.72	82.44	13.17	4.39	
		1,100	17.60	53.37	83.57	8.70	7.73	
		1,200	18.32	41.31	79.10	11.06	9.84	

작기 때문에 그 영향은 무시할수 있으며, 초음파의 파장이 결정립의 크기보다 훨씬 큰 경우 (Rayleigh 산란영역)라면 앞에서 언급한 대로 $\alpha \approx D^3 f^4$ 로 쓸 수 있다. 본 연구에 사용된 탐촉자의 중심 주파수는 15MHz이기 때문에 파장은 약 0.4mm 정도이다. 따라서 Rayleigh 산란조건을 충족시키고 있다. 그러나 본 실험강의 경우 D강은

약 20% 내외의 펄라이트를 포함하는 2상 혼합조직이고 N, E강은 일부 펄라이트와 베이나이트를 포함하는 3상조직을 갖는다. 또한 페라이트 평균 결정립 크기에 비해 최대 결정립크기는 앞서 나타낸 표2, 표3 및 표4에서 볼 수 있듯이 2~3배 정도를 갖고 있다. 따라서 균일한 크기의 단일상을 가정하고 도출한 Rayleigh 산란식을 그대로 적

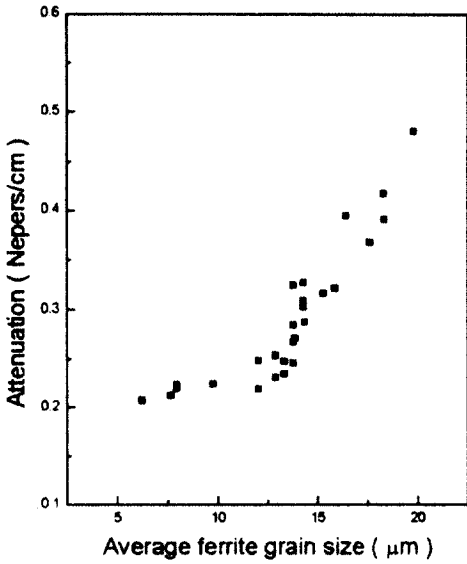


Fig. 3. Dependence of ultrasonic attenuation on average ferrite grain size in E steel.

용시킬 수 없다.

그러므로 감쇠계수가 $m = 3$ 을 만족시키는지의 조사가 중요하다. 따라서 초음파 감쇠와 평균 페라이트의 결정립을 서로 로그-로그형의 그래프로 나타내면 직선의 기울기가 m 값이 되며 이 m 값이 결정되면 초음파 감쇠와 페라이트 평균 결정립간의 정량화가 가능하다. 그림 4에는 초음파 감쇠와 페라이트 평균 결정립간의 상관관계를 서로 로그-로그형의 그래프로 나타낸 것이다. 여기서의 기울기 값 m 은 약 2임을 알 수 있다. 이러한 결과는 5MHz의 주파수를 갖는 횡파용 EMAT(Electromagnetic Acoustic Transducer)를 이용하여 감쇠계수와 페라이트와 펄라이트 2상 혼합 조직을 갖는 일반탄소강의 결정립 크기의 관계에서 구해진 기울기 m 값 1.7과 거의 유사한 값을 보이고 있다¹⁰⁾.

본 실험에 사용된 주파수는 15MHz의 동일 주파수를 사용하였으므로 주파수에 관련된 항은 상수로 되며, 로그-로그 그래프에서 얻은 기울기 값을 이용하여 (1)식은 다음 (2)식으로 표현이 가

능하다.

$$\alpha = A + BD^{2.027} \dots\dots\dots(2)$$

여기서 A와 B는 상수이다.

본 실험강의 페라이트 결정립 크기(D_{av})를 정량적으로 표현하기 위해 페라이트 결정립 데이터와 $\alpha^{1/2.027}$ 간에 선형 회귀분석을 실시하였으며 그 결과는 다음 (3)식과 같다.

$$D_{av} = 1.79 + 22.97 * \alpha^{1/2.03} \dots\dots\dots(3)$$

$$R^2 : 96.31\%, \sigma : 0.95$$

여기서 감쇠계수 α 의 단위는 Nepers/cm이고 페라이트 결정립의 단위는 μm 이다. 회귀분석의 결과식 (3)의 신뢰도를 나타내는 두가지 지표인 R^2 값이 약 96% 수준으로 양호한 값을 보이며 또한 표준편차(σ)도 약 0.95정도로 비교적 낮은 값을 가지므로 예측식으로 사용하기에 타당한 것으로 생각된다.

이 정량화된 수식으로 계산한 페라이트 평균 결정립경과 파괴적인 방법으로 측정된 값을 비교하여 그림 5에 나타내었다. 파괴적 측정값과 초음파 감쇠의 측정으로 예측된 값에는 비교적 좋은

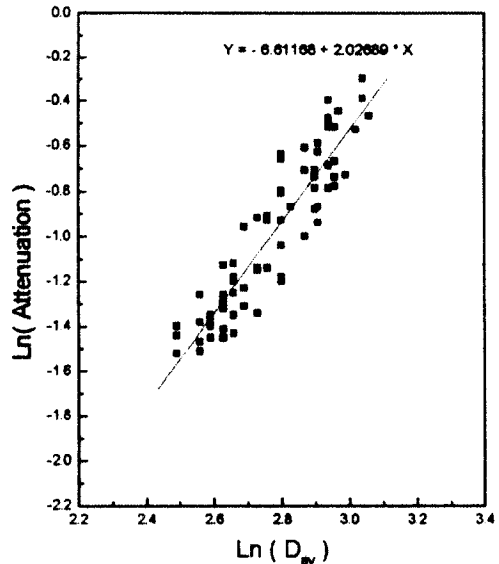


Fig. 4. Log-log dependence of average ferrite grain size and ultrasonic attenuation.

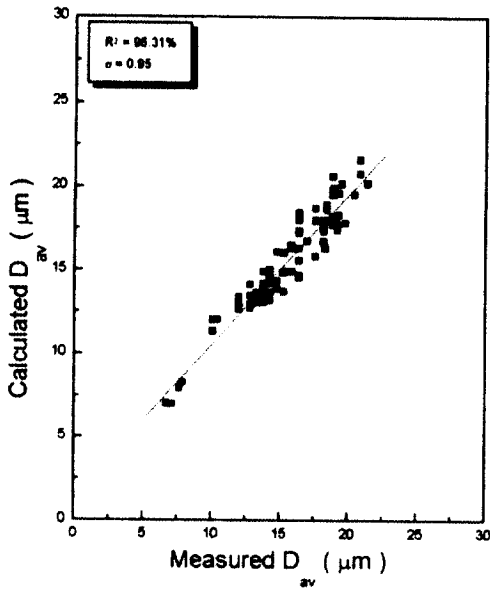


Fig. 5. Relationship between measured average ferrite grain size and calculated ferrite grain size.

상관성을 보이고 있음을 알 수 있다.

3.3 결정립 분포가 초음파 감쇠에 미치는 영향

동일한 페라이트 평균 결정립 크기를 가질 때 결정립 크기가 고르게 분포된 경우와 심한 혼립으로 이루어질 수 있다. 그리고 어떤 결정립 크기의 분포를 갖는 결정립이 혼재할때 초음파 감쇠는 작은 결정립 보다는 큰 결정립에 의해 지배를 받으며 이로 인해 결정립 크기의 예측값에 많은 오차를 발생시킬 수 있다는 사실을 정성적으로 IF(Interstitial Free)강에서 보였다¹¹⁾. 그러나 정량적인 평가와 혼립도가 허용되는 범위의 설정은 없다. 서론에서 언급한대로 적용된 탐촉자의 주파수에 따라 초음파 파장이 결정되게 되며 이 파장과 결정립 크기에 따라 산란 메카니즘이 달라지게 된다. 따라서 감쇠에 큰 영향을 미치지 않는 혼립의 범위를 설정하는 일은 매우 중요하다. 일반적으로 상업용 강에서 압연조건에 따라 심한 혼립이 발생될 수 있다. 본 실험강에서 측정된 페라이트 최대 결정립 크기 및 평균 결정립 크기와 평균 결정립 예

측식인 식(3)을 이용하여 혼립이 존재할 경우 감쇠에 미치는 영향을 산출하여 그림 6에 나타내었다. 이 결과로부터 혼립도($D_{max} - D_{av}$)가 15 μm 이하 일 때는 측정된 감쇠값의 오차를 발생시키지 않음을 볼 수 있으며 그 이상의 혼립도를 가질때는 혼립도의 증대에 따라 감쇠계수의 심한 오차가 발생됨을 볼 수 있다.

4. 결론

제조조건에 따라 미세조직의 변화가 비교적 큰 인장강도 40~60kgf/mm²을 갖는 조선용 A,DH 32 강 및 EH36강의 페라이트 결정립 크기를 다양하게 변화시키고 초음파 감쇠를 측정하여 페라이트 평균 결정립 크기를 비파괴적으로 평가하기 위한 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 페라이트 + 펄라이트, 페라이트 + 펄라이트 + 베이나이트의 2상 또는 3상 혼합조직으로 이루어지는 강에서 감쇠계수의 측정에 의해 페라이트 평균 결정립 크기를 산출하기 위해서는

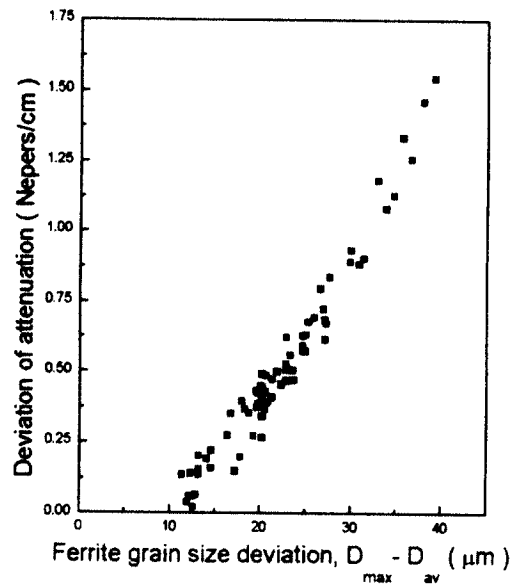


Fig. 6. Relationship between deviation of attenuation and ferrite grain size deviation.

Rayleigh 산란식의 수정이 필요하였다.

2) 페라이트 평균 결정립 크기(D_{av})와 감쇠계수의 정략적인 관계식은 다음과 같다.

$$D_{av} = 1.79 + 22.97 \cdot a^{1/2.03}$$

$$R^2 : 96.31\%, \quad \sigma : 0.95$$

여기서 감쇠계수 a 의 단위는 Nepers/cm이고 페라이트 결정립의 단위는 μm 이다.

3) 혼립도($D_{max} - D_{av}$)가 $15 \mu\text{m}$ 이하일 때는 측정된 감쇠값의 오차를 발생시키지 않음을 볼 수 있으며 그 이상의 혼립도를 가질 때는 혼립도의 증대에 따라 감쇠계수의 심한 오차가 발생되었다.

후 기

본 연구의 초음파 감쇠 데이터의 해석 및 장비 사용에 많은 도움을 주신 한국표준과학연구원의 이 승석 박사님과 안 봉영 박사님의 도움에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) L. Rayleigh : "Theory of Sound, Vol. II", Macmillan Co., New York, (1929), 152.
- 2) H. B. Huntington : J. Acoust. Soc. Am., 22(1950), 362.
- 3) W. P. Mason and H. J. McSkimin : J. Appl. Phys., 19(1948), 940.
- 4) B. Fay ; Acustica, 28(1973), 354.
- 5) J. Koppelman and B. Fay ; Acustica, 29(1973), 297.
- 6) I. N. Ermolov and B. P. Pilin ; NDT International, 9(1976), 275.
- 7) S. Serabian and R. S. Williams ; Mat. Eval., 36(1978), 55.
- 8) H. Seki, T. A. Gray and R. Truell ; J. Acoust. Soc. Am., 28(1956), 230.
- 9) E. P. Papadakis and E. L. Reed ; J. Appl. Phys., 27(1961), 682.
- 10) B. Y. Ahn, S. S. Lee, S. T. Hong, H. C. Kim, and S. L. Kang ; NDT & E International, 32(1999), 85.
- 11) B. Y. Ahn ; "Analysis of ultrasonic attenuation and backscattering noise for microstructure evaluation of low carbon steel", Ph.D Thesis, KAIST, (1997).