

초음파를 이용한 공석강의 펄라이트 층상간격 평가

김준수 · 변재원* · 권속인 · 이승석** · 안봉영**

고려대학교 재료금속공학부

*고려대학교 공학기술연구소

**한국표준과학연구원 비파괴평가그룹

Ultrasonic Evaluation of Pearlite Interlamellar Spacing in Eutectoid Steel

J. S. Kim, J. W. Byeon*, S. I. Kwun, Seung Seok Lee** and Bongyoung Ahn**

Division of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul, 136-701

*Research Institute of Engineering and Technology, Korea University, Seoul, 136-701

**NDE group, Korea Research Institute of Standard and Science, Taejeon, 305-600

Abstract The microstructural changes with pearlite formation heat treatment in eutectoid steel(railway steel) consisting of only pearlite structure were evaluated by the ultrasonic attenuation and velocity measurements. The result of this investigation showed a strong linear dependence of ultrasonic attenuation on pearlite interlamellar spacing, and accordingly on fracture strength of the pearlite.

(Received January 11, 2001)

Key words: Ultrasonic attenuation, Velocity, Pearlite nodule, Interlamellar spacing

1. 서 론

현재 철도선로로 사용되는 공석강은 고강도, 내마모성이 요구되며, 이러한 기계적 성질을 지배하는 미세조직 인자로는 펄라이트 층상간격으로 보고되고 있다[1]. 최근에 금속재료의 미세조직 및 기계적 성질을 기존의 현미경관찰이나 파괴적인 실험을 거치지 않고 비파괴적으로 예측하고자 하는 연구가 관심의 대상이 되고 있다. 초음파 산란에 의한 감쇠의 적용 예로는 단상의 결정립 크기 측정[2]을 들 수 있으며, 이는 최근 신일본제철을 비롯한 일본 5대 고로사를 중심으로 연구된 보고서[3]에서도 충분히 입증되고 있다. 그러나 펄라이트와 같은 2상계에서는 현재 정량적으로 잘 정립되어 있지 않으며 정성적인 연구[4,5]만 이루어지고 있다. 따라서 본 연구에서는 공석강을 시료강으로 선택하여 항온변태열처리와 연속냉각열처리를 실시하여 펄라이트 미세조직(층상간격)과 초음파 파라미터간의 상관관계를 알아보고, 그에 따른 기계적 성질 변화와 초음파 파라미터의 변화를 조사하였다.

2. 실험방법

2.1. 시편준비 및 열처리

본 연구에서 사용된 공석강의 조성은 표 1과 같다. 열처리공정은 오스테나이트화 온도, 항온변태온도, 냉각 속도에 따라 펄라이트 미세조직 인자인 노들(nodule), 콜로니(colony), 층상간격이 모두 변한다는 기존 연구들[1, 6~9]의 결과를 토대로 실시하였으며, 이를 표 2에 나타내었다. 열처리 조건의 편의상 이하에서 각 시험편의 오스테나이트화 온도별로 A, B, C, D로 구분하였으며, 항온변태온도에 따라 1, 2, 3으로, 공냉을 air, 노냉을 fur로 명명하였다. 모든 열처리는 중온도용 욕육에서 실시하였다. 각 열처리별 펄라이트 층상간격은 주사전자 현미경을 사용하여 관찰하였고, 부식액으로 5% picral용액을 이용하였다. 층상간격의 정량화는 Underwood법[10]을 이용하여 최소 층상간격의 평균값을 계산하였다. 기계적 성

Table 1. Chemical composition of the eutectoid steel used in pearlite interlamellar spacing investigation.

Eutectoid steel	Composition (wt%)					
	Fe	C	Si	Mn	P	S
	bal.	0.855	0.209	0.51	0.013	0.006

Table 2. Conditions of various heat treatment processes.

sample group	austenitizing temp. (°C)	holding time (min.)	cooling mode	holding time (min.)
A-air	850	240	air cooling	·
A-fur	850	240	furnace cooling	·
B	950	15	690	10
C-1	1050	15	600	10
C-2	1050	15	650	10
C-3	1050	15	700	10
C-air	1050	15	air cooling	·
C-fur	1050	15	furnace cooling	·
D	1150	15	610	10

질은 상온인장시험을 실시하여 파괴 응력값을 측정하였다.

2.2. 초음파 계속

시험편의 두께는 2 ± 0.003 mm로 정밀 연마 가공하였고, 초음파 에너지의 손실을 방지하기 위해 수침법(immersion test)을 이용하였다. 초음파 파라미터인 감쇠계수와 속도측정에 사용된 Pulse-echo방식의 초음파 탐상기에 대한 개략적인 도식을 그림 1에 나타내었다. 초음파의 송수신을 위해 Panametric사의 pulser & receiver 5601A/TT를 사용하였으며, 아날로그/디지털 변환 및 데이터의 획득을 위해 Lecroy 9310 오실로스코프를 사용하였다. Sampling rate는 5GHz이었으며, 이것은 time domain상 분해능이 2 nsec에 해당된다. 또한, 잡음신호의 제거를 위하여 100회의 신호를 시간 평균 낸 신호를 최종적으로 획득하였다. 초음파 파라미터 측정에 중심주파수가 35MHz인 Panametric사의 광대역(broad band) 종파 탐촉자를 사용하였다. 감쇠의 측정은 시험편의 내부를 한번 왕복한 신호의 세기(A), 두 번 왕복한 신호의 세기(B), 그리고 세 번 왕복한 신호의 세기(C)를 측정 후 각각의 신호를 Matlab 5.3으로 짠 프로그램을 이용하여 Fourier변환하고 각 주파수별 신호의 크기를 비교할 수 있는 스펙트럼분석법을 이용하였다. 본 연구에서는 초음파 신호의 진행거리에 따른 빔 세기의 감소(diffraction loss)를 고려하여 회절보정을 하였다. 회절보정을 위한 식은 다음과 같다[11,12].

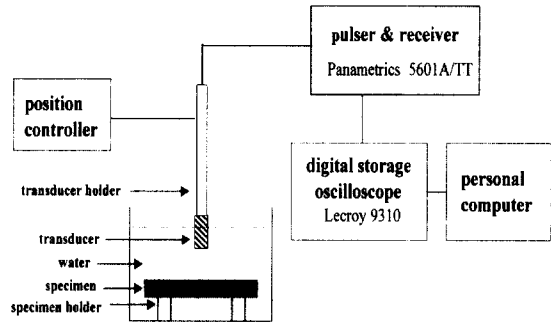


Fig. 1. Schematic diagram of ultrasonic measurement system.

이식에서 J_n 는 Bessel 함수, L 은 수거리, t 는 시편의 두께, V 는 물에서의 초음파 속도, v 는 시험편내의 초음파 속도, a 는 탐촉자 반경, t_n 는 주파수이다.

위의 식으로 보정된 회절보정 전, 후의 신호 세기에는 다음 식의 관계가 성립한다.

$$|D_L| = K/K_0 \tag{2}$$

여기에서 $K(A, B, C)$ 는 측정된 빔의 세기이고, $K_0(A_0, B_0, C_0)$ 는 보정된 빔의 세기이다.

본 연구에서는 물과 시험편의 임피던스 차이로부터 야기되는 반사율은 고려하지 않았다. 회절보정 후 감쇠계수는 다음 식을 이용하여 계산하였다.

$$\alpha = \left(\frac{20}{2\tau}\right) \text{Log}\left(\frac{K(A_0)}{K(B_0)}\right) \tag{3}$$

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

$$S_A = 2LV/a^2f + 2tv/a^2f$$

$$S_B = 2LV/a^2f + 4tv/a^2f$$

3. 실험결과 및 고찰

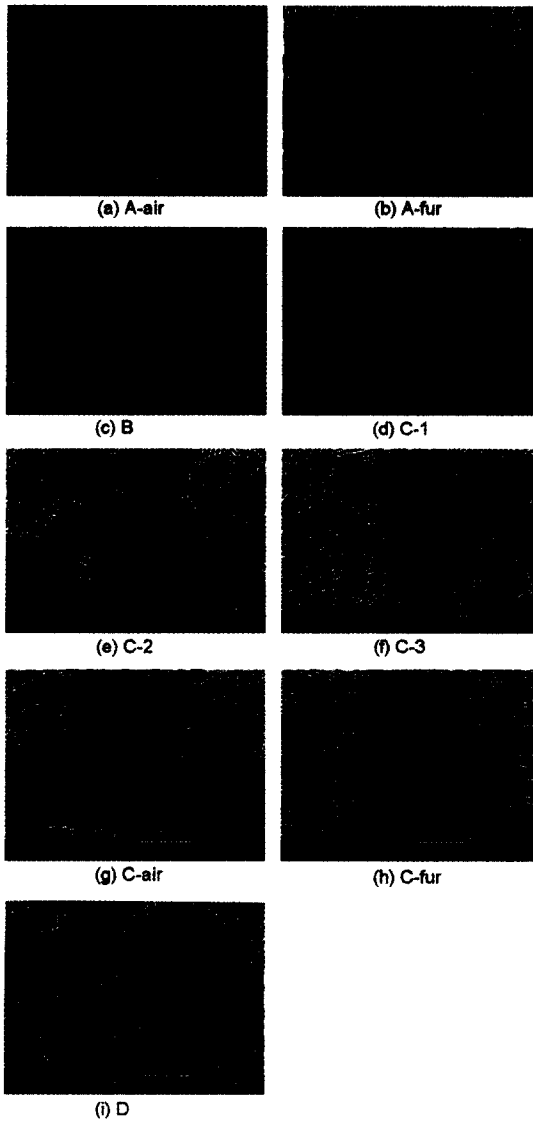


Fig. 2. Scanning electron micrographs of pearlite minimum interlamellar spacing in differently heat treated specimens.

3.1. 펄라이트 형성 열처리에 따른 미세조직 및 기계적 성질의 변화

그림 2는 항온변태열처리와 연속냉각열처리에 따른 펄라이트 층상간격의 주사전자 현미경 사진이며, 미세조직 및 기계적 성질의 정량화 결과를 표 3에 나타내었다. 펄라이트 콜로니의 정량화는 측정상의 어려움으로 측정하지 못하였다. 표 3에서 항온변태온도가 높아질수록(C-1, C-2, C-3), 냉각속도가 느릴수록(A-air, A-fur, C-air, C-

fur) 펄라이트 노들의 크기가 236~1200 μm까지 증가하며, 펄라이트 층상간격 역시 0.102~0.213 μm까지 증가하였다. 이와 같은 현상은 Howell 등[13]이 보고한 결과와 일치하는 것으로 항온변태온도가 높아질수록, 혹은 냉각속도가 느릴수록 작은 과냉에 의해 N_v (펄라이트 핵생성속도)/G(성장속도)의 비가 작아져 몇 개의 조대한 펄라이트 노들만이 성장하게 된다. B의 경우는 작은 오스테나이트 결정립의 영향으로 펄라이트 노들과 층상간격이 작고, D의 경우는 큰 오스테나이트 결정립과 낮은 항온변태온도의 상호 영향으로 중간정도 크기의 펄라이트 노들 및 층상간격을 보이는 것으로 생각된다. 그림 3은 펄라이트 층상간격에 따른 파괴응력의 변화를 나타내고 있다. 일반적으로 파괴응력 및 항복응력은 펄라이트 층상간격(S_{min})의 1승에 반비례하며, 오스테나이트 결정립 및 펄라이트 노들에는 큰 영향을 받지 않는 것으로 알려져 있다[1]. 본 연구에서도 같은 경향을 보이고 있으며 펄라이트의 파괴응력(σ_{FS})을 다음의 식(4)로 표현할 수 있었다.

$$\sigma_{FS}(\text{MPa}) = \sigma_0 + kS_{min}^{-1}(\mu\text{m}^{-1}) \quad (4)$$

$$\sigma_0 = 607.27, \quad k = 39.00$$

$$R = 0.90$$

여기서 R은 상관계수(correlation coefficient)이다.

3.2. 펄라이트 형성 열처리에 따른 초음파 파라미터의 변화(초음파 감쇠계수, 속도)

그림 4는 펄라이트 층상간격에 따른 초음파 속도변화를 보여 주는데 초음파 속도는 펄라이트 층상간격에 대하여 민감한 파라미터가 아님을 확인할 수 있었다.

그림 5는 펄라이트 층상간격에 따른 주파수별 초음파 감쇠계수의 변화 경향을 보여준다. 각각의 주파수에서 펄라이트 층상간격과 초음파 감쇠계수(α) 사이에는 양호한 상호관계가 존재함을 확인하였고, 회귀분석 결과 실험식은 다음과 같이 표현될 수 있었다.

$$S_{min}(\mu\text{m}) = 0.023 * \alpha(\text{dB/cm}) - 0.043 \quad (\text{at } 10\text{MHz}) \quad (5)$$

$$S_{min}(\mu\text{m}) = 0.013 * \alpha(\text{dB/cm}) - 0.074 \quad (\text{at } 20\text{MHz}) \quad (6)$$

$$S_{min}(\mu\text{m}) = 0.008 * \alpha(\text{dB/cm}) - 0.081 \quad (\text{at } 30\text{MHz}) \quad (7)$$

$$S_{min}(\mu\text{m}) = 0.004 * \alpha(\text{dB/cm}) - 0.043 \quad (\text{at } 43\text{MHz}) \quad (8)$$

그림 5에서 알 수 있듯이 초음파의 주파수가 저주파

Table 3. Quantitative analysis for microstructural parameters of differently heat treated pearlite.

sample group	Austenite grain size (μm)	Pearlite nodule size (μm)	Minimum interlamellar spacing (S _{min} , μm)	Fracture stress (MPa)
A-air	76	267	0.102	978
A-fur	76	1000	0.160	827
B	119	236	0.117	938
C-1	204	356	0.145	914
C-2	204	423	0.162	893
C-3	204	587	0.191	836
C-air	204	303	0.132	890
C-fur	204	1200	0.213	742
D	242	473	0.140	878

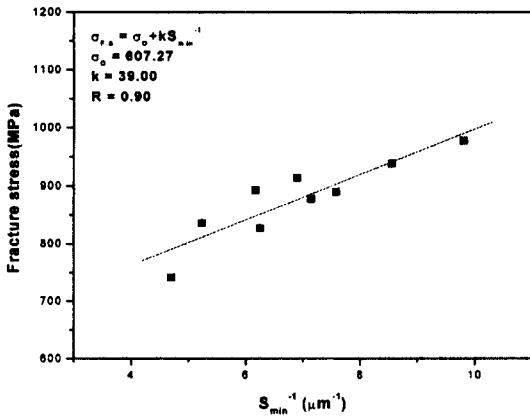


Fig. 3. Change of fracture stress with pearlite interlamellar spacing.

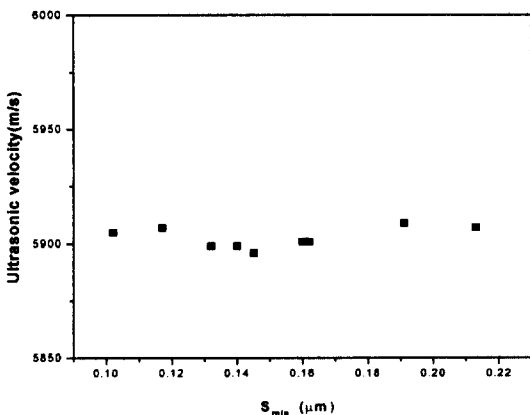


Fig. 4. Change of ultrasonic velocity with minimum interlamellar spacing.

수일때도 펄라이트 층상간격을 구분할 수 있었다. 특징적인 것은 주파수가 높아질수록 기울기($\Delta\alpha/\Delta S_{min}$)가 급격해지는데 이러한 현상은 고주파수일수록 미세조직에

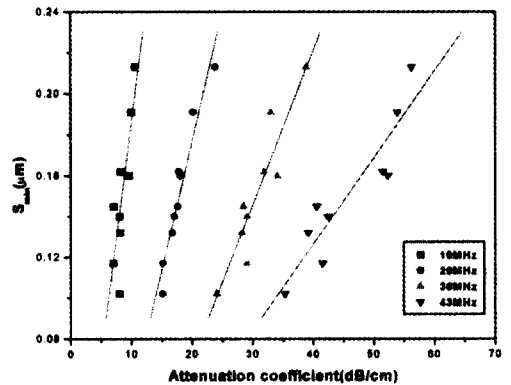


Fig. 5. Change of attenuation coefficient with minimum interlamellar spacing at various frequencies.

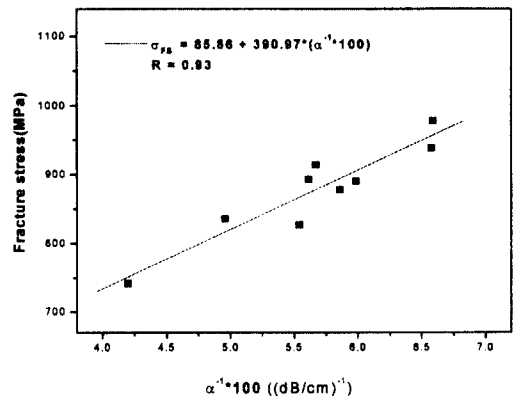


Fig. 6. Change of fracture stress with attenuation coefficient (at 20MHz).

대한 초음파의 분해능이 좋아짐을 말한다. 펄라이트 층상간격이 증가함에 따라 초음파 감쇠계수가 증가하는 현상은 Kopec[14]의 결과와 일치하는 것으로 이러한 현상의 원인은 항온변태온도가 높을수록 또한 냉각속도가

느릴수록, 펄라이트 층상간격이 넓어지게 되어 세멘타이트 두께가 커지게 됨으로써[15], 산란체의 크기가 커져 초음파 감쇠를 증가시키는 것으로 생각된다.

3.3. 초음파 감쇠계수를 이용한 기계적 성질 평가

그림 6은 30MHz의 일정한 주파수에서 초음파 감쇠계수와 펄라이트의 파괴응력간의 상관관계를 보여주고 있으며, 이들간에는 다음과 같은 양호한 직선의 관계를 얻을 수 있었다.

$$\sigma_{FS}(\text{MPa}) = 85.86 + 390.97 * (\alpha^{-1} * 100) \quad (9)$$

$$R = 0.93$$

4. 결론 및 요약

1. 펄라이트 미세조직 분석결과 오스테나이트화 온도, 항온변태온도, 냉각속도에 의해 펄라이트 노들 및 층상간격이 모두 영향을 받음을 확인하였고, 상온 인장시험 결과 파괴응력은 펄라이트 층상간격의 1승에 반비례함을 확인하였다.

2. 펄라이트 미세조직(층상간격)에 대하여 초음파 비파괴평가 결과 초음파 속도보다는 감쇠계수가 민감한 파라미터임을 확인하였고, 저주파수 영역에서도 구분 가능하였으나 고주파수 일수록 더욱 예민하게 변화함을 알 수 있었다. 주어진 주파수에서는 펄라이트 층상간격(S_{min})과 초음파 감쇠계수 사이에는 직선의 양호한 상관관계가 존재하여 층상간격을 감쇠계수의 1차 함수로 나타낼 수 있었다.

3. 일정한 주파수(20MHz)에서 파괴응력과 초음파 감쇠계수간에 다음과 같은 직선의 상관관계를 얻었다.

$$\sigma_{FS} = 85.86 + 390.97 * (\alpha^{-1} * 100)$$

$$R = 0.93$$

이에 따라 공석강의 펄라이트 층상간격과 이에 따른 파괴응력을 초음파를 이용하여 비파괴적으로 평가할 수 있는 가능성을 확인하였다.

후 기

본 연구는 2000년도 고려대학교 교내연구비로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. A. R. Marder and B. L. Bramfitt: Metall. Trans., 7A (1976) 365.
2. R. L. Roderick and R. Truell: J. Acoust. Soc. Am., 23 (1952) 267.
3. 日本鐵鋼協會 基礎研究會: “マイクロ組織の非破壊計測技術に關する 最近の研究” 10月 (1994).
4. K. Kamigaki: Sci. Rept. Tohoku University, First Ser. A-9, 48 (1957).
5. N. Grayeli and J. C. Shyne: QNDE, 4B, 927.
6. Maria das Gracas: Materials Characterization, 39 (1997) 1.
7. A. R. Marder and B. L. Bramfitt: Metall. Trans., 6A (1975) 2009.
8. F. G. Caballero: Scripta Mater., 42 (2000) 537.
9. T. Gladman, I. D. McIvor and F. B. Pickering: J. Iron and Steel Institute, (1972) 916.
10. E. Underwood: ASM Metals Handbook 8th., Vol.8.
11. E. P. Papadakis, K. A. Fowler, and L. C. Lynnworth: J. Acoust. Soc. Am., 53(1973) 1336.
12. P. H. Rogers, A. L. Van Buren: J. Acoust. Soc. Am., 55 (1974) 4.
13. P. R. Howell: Materials Characterization, 40 (1998) 227.
14. B. Kopec: NDT Int., February (1979) 8.
15. Won Jong Nam, Chul Min Bae, Sei J. Oh and Soon-Ju Kwon: Scripta Mater., 42 (2000) 457.