

초음파시험의 미소결함탐지능에 영향을 미치는 미세조직과 시험조건의 영향

이 재 옥 · 김 영 길

(한국표준연구소 비파괴시험연구실)

Effects of the Microstructure and the Testing Conditions for the Detectability of the Small Flaw in Ultrasonic Testing

J. O. Lee and Y. K. Kim

Abstract Effects of the microstructure and the testing conditions for the detectability of the small flaw in ultrasonic testing have been studied. The detectability of the flaw was influenced not only by the grain size but also by the microstructure of the test piece. This is considered to be caused by randomization of the matrix which influences the elastic anisotropy of the grain. It was found that the detectability was improved as the frequency became higher and the beam size became smaller. The experimental results indicate that ultrasonic backscattering measurement is one of the promising methods to evaluate the detectability of the flaw indirectly.

1. 서 론

재료의 결함탐지를 위한 초음파비파괴시험은 소재·제품공업에서의 품질관리와 산업구조물의 안전관리를 위해 널리 이용되고 있다. 종전까지는 제품이나 구조물에서 파괴역학적인 측면에서 고려되는 비교적 큰 결함의 탐지를 위한 초음파시험이 주로 수행되어 왔으나 최근에는 소재의 고급화, 구조물의 경량화 및 사용조건의 혹독함으로 인해 종전에는 고려대상이 되지 않았던 미소결함이 탐상의 대상이 되었다.

현재까지 미소결함탐지와 관련한 많은 연구가 수행되어 탐지능 향상을 위한 신호처리방법 및 장치개발, 최적의 검사조건설정 및 탐지능결정 등의 기술자료가

축적되었으나(1-11) 아직까지 검사 대상체에 따른 탐지 가능한 최소한 결함크기에 대한 의문은 여전히 남아 있다. 따라서 특정대상체에서 미소결함을 탐지하기 위해서는 우선 적용방법으로 일정크기의 미소결함이 탐지가능한지의 사전평가와 탐상시 감도설정이 먼저 해결되어야 한다. 이를 위해서는 대상체의 재질과 동일한 시험편을 필수적으로 제작사용하여야 하는 단점이 있다. 게다가 대상체와 같은 재질의 대비시험편의 제작이 어려운 제품이나 사용중인 구조체에서는 적용방법의 최소한 결함크기를 알 수 없는 실정이어서 문제점으로 대두되고 있다.

따라서 본 연구에서는 대상체에 따른 최소한 결함 크기를 결정하기 위한 방법 연구를 수행하였다. 대상

체의 재질변화에 따른 결함탐지능에 영향을 주는 미세조직인자와 탐상조건에 대해 조사하였다. 또한 조사된 연구결과를 통하여 최소한의 결함크기를 예측할 수 있는 방법을 연구하였다.

2. 실험

2-1. 시편제작

본 연구에 사용된 재료는 ASTM 1340 H 강이며 강의 화학 성분은 Table 1과 같다. 시편은 결함탐지능조사와 후방산란신호 측정을 위하여 각기 다르게 준비되었으며 시편의 두께는 각각 10mm와 20mm이다.

Table 1. Chemical Composition of specimens(wt. %)

C	Si	S	P	Mn	Ni	Mo	Cu	Cr
0.45	0.23	0.06	0.02	1.49	0.13	0.06	0.28	0.19

시편의 열처리는 Table.2에 나타난 바와 같이 하였다. 시편 I, II, III,과 IV는 결정립 크기가 다른 시편을 얻기 위함이고 시편 IV와 V는 결정립 크기가 같고 기지 조직이 다른 시편을 얻기 위함이다.

Table 2. Heat Treatment conditions of ASTM 1340H steel

Specimen No.	Heat treatment condition
I	850°C for 1hr - 725°C for 30 min - F. C.
II	950°C for 1hr - 725°C for 30 min - F. C.
III	1000°C for 1hr - 725°C for 30 min - F. C.
IV	1250°C for 1hr - 725°C for 30 min - F. C.
V	1250°C for 1hr - 725°C for 30 min - A. C.

열처리된 시편에서 비교적 큰 비금속 개재물 및 기공 등과 같은 고유 결함의 존재 유무를 초음파 c-scan으로 검사하여 결함이 없는 부위에 Flat Bottom Hole(FBH) 형의 인공결함을 가공하였다. 각 시편에는 직경이 0.2, 0.3, 0.5, 1 및 2mm이고 metal distance가 5mm인 FBH 결함이 가공되었다.

2-2. 실험장치 및 방법

미세조직 변화에 따른 결함탐지능을 조사하고 후방

산란신호를 관찰하기 위한 장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 장치는 크게 초음파탐촉자의 발신, 수신신호의 증폭 및 결함신호를 관찰하기 위한 Krautkramer 사의 초음파탐상기, 시편의 전면주사 및 c-scan 결과를 도출하기 위한 Testech사의 Scanning & recording system, 초음파 빔 특성을 조사하기 위한 KSRI 자체 제작한 beam profile system과 후방산란신호의 정량적 평가를 위한 Data precision사의 waveform analyzer로 구성되어 있다.

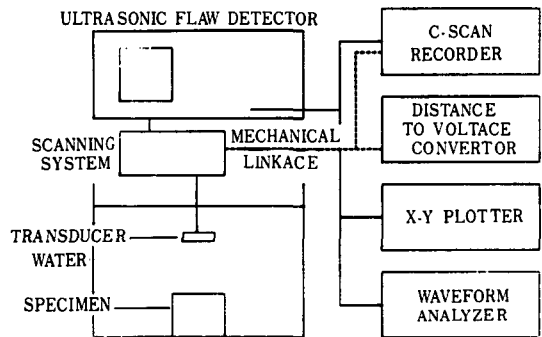


Fig. 1. Schematic diagram of the ultrasonic flaw detecting and backscattering measurement system.

결함탐지능 조사를 위한 c-scan 탐상과 결함의 반사신호 크기 측정은 수침탐상방법으로 하였다. 시편에서 FBH형 결함의 위치는 c-scan 결과로부터 확인하고 각 FBH형 결함에서의 반사신호를 탐상기 scope의 풀스케일의 80%로 탐상기의 gain을 조절하였을 때 탐상기의 reserved gain으로 신호크기를 측정하였다.

후방산란신호의 측정은 pulse echo 방식으로 탐촉자를 초음파 빔폭의 크기내에서 수평으로 미소이동을 반복하면서 측정하는 spatial averaging 방법을 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 현미경 조직 관찰

열처리된 시편의 미세조직 관찰은 Nital 5% 용액으로 에칭하여 실시하였다. 열처리된 시편의 표면미세조직

은 Fig. 2, 3과 같다. Fig. 2는 결정립크기를 변화시키기 위한 열처리에서 얻어진 시편의 미세조직으로써 소준 온도가 증가할수록 오스테나이트 결정입도가 더욱 커짐을 알 수 있다. 시편 I, II, III과 IV의 평균결정입도는 대략 20, 40, 150, 200 μm 정도이다. Fig. 3은 결정립 크기는 같고 기지조직만 변화시키기 위한 열처리에서 얻어진 시편의 미세조직으로써 Fig. 3(a)의 소둔조직은 pearlite 조직을 가지며 Fig. 3(b)의 공냉조직은 martensite 조직을 갖는다.

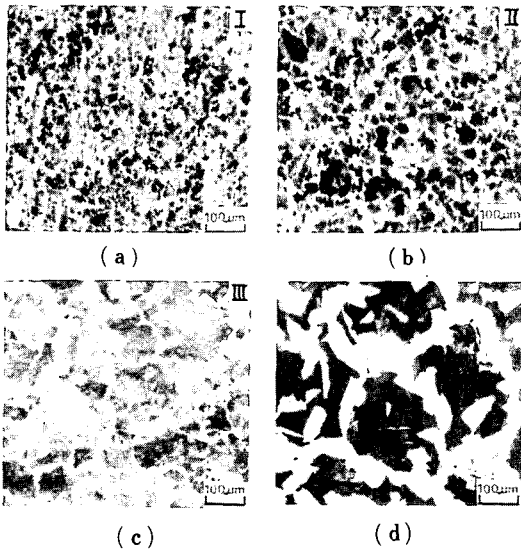


Fig. 2. Original austenite grain size of ASTM 1340H steel after annealing at a) 850°C b) 950°C c) 1000°C and d) 1250°C.

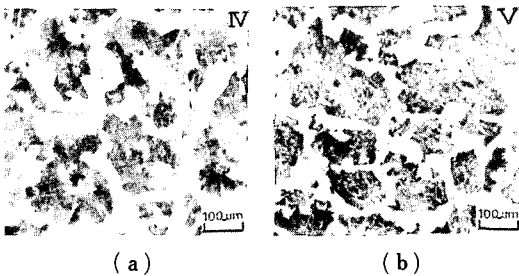


Fig. 3. Microstructure of ASTM 1340H steel (a) austenitized at 1250°C followed by air cooling. The matrix of specimen a is pearlite and that of specimen b is mainly martensite.

3-2. 미세조직에 따른 미소결합 탐지능 조사

미세조직 변화에 따른 결함의 탐지능을 조사하고 결함탐지능에 대한 주파수의 영향을 알아 보기 위하여 탐촉자의 빔 폭이 같고 주파수만 다른 5MHz-2.5" f와 10MHz-4" f.의 두개의 탐촉자를 사용하여 초음파 탐상을 수행하였다.

시편내에 가공된 FBH 결함의 반사신호 크기를 측정하기 위하여 시편내에 존재하는 FBH 결함의 위치를 확인하였다. 그 대표적인 결과는 Fig. 4와 같다. 여기서 FBH 결함은 바탕보다 검게 나타나고 그 형태가 원형으로 나타나 있다. 결함옆에 쓰여진 숫자는 FBH 결함의 실제 가공 치수로써 c-scan 결과에 나타난 크



Fig. 4. C-scan results measured in 5 different specimens using a 6 MHz-2.5" f. transducer.

기와는 다르다. c-scan결과에 도시된 결함의 칫수는 c-scan시 결정되는 threshold level에 따라 달라질 수 있다.

Fig. 4와 같은 c-scan의 결과로부터 미세조직에 따른 결함 탐지능을 보다 정량적으로 분석하기 위하여 각 결함에 대한 결함신호의 크기를 측정하였다. 그 결과는 Table 3과 같다. Table 3의 결과를 보면 5 MHz 탐촉자가 10 MHz 탐촉자보다 전반적으로 모든 결함에서 탐상기의 감도여유값이 크게 나타났다. 그러나 탐지되는 최소의 결함크기는 5 MHz 탐촉자가 10 MHz 경우보다 크게 나타났다. 또한 5 MHz와 10 MHz 주파수 공히 결정립의 크기가 커질수록 탐지되는 결함의 크기 또한 커짐을 알 수 있으나 V 시편의 경우는 예외이다.

Table 3. Comparison of the signal amplitudes corresponding to the different size of flaws measured in 5 specimens using two different transducers

Transducer	Flaw Size (mm)	Reserved gain (dB)				
		Specimen I	Specimen II	Specimen III	Specimen IV	Specimen V
5 MHz -25°f	2	68.5	67.5	67.5	67.5	68.5
	1	60.5	59.5	59.5	59.5	60.5
	0.5	49	47.5	46.5	46	47
	0.3	42	38.5	-	-	41
	0.2	-	-	-	-	-
10 MHz -4°f	2	59	56	56	52	57
	1	51	49.5	47	45	50
	0.5	40	39	36	34	37
	0.3	33.5	39	35	-	33
	0.2	33	28	-	-	32

Fig. 5은 Table 3에서 10 MHz-4°f. 탐촉자의 결과를 도시한 것이다. Fig. 5로부터 V번 시편에서 특이한 결과를 볼 수 있다. 시편 V의 경우 시편 IV와 결정립 크기가 같다. 그러나 탐지되는 결함의 미소크기와 탐상기의 감도여유값은 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 시편 V의 경우 탐지되는 결함 크기나 탐상기의 감도여유값은 결정립크기가 무려 1/10에 해당하는 시편 I과 비슷하다. 일반적으로 초음파 결함 탐상에서 미소 결함 탐지능에 가장 큰 영향을 주는 재료의 미세조직인자는 결정립 크기로 알려져 있다.^{12) 13)} 그러나 본 실험결과는 결정립의 크기보다는 오히려 결정립내의 기지 조직에

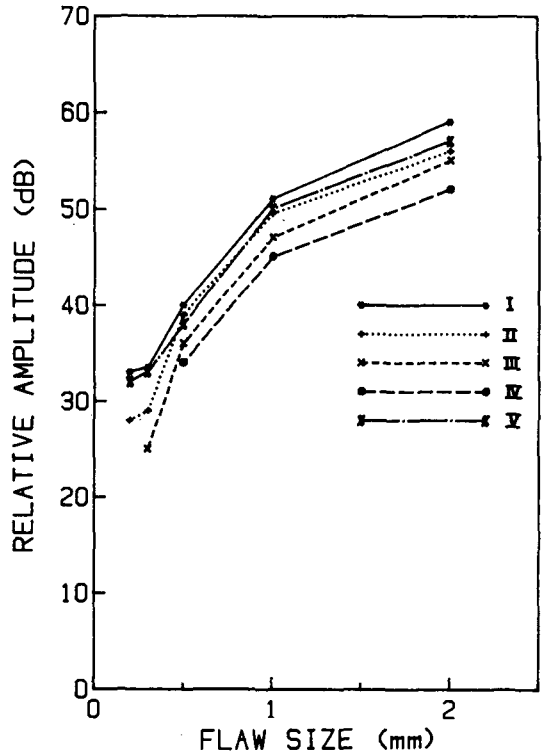


Fig. 5. The reflected signal amplitude from FBH flaws in the five specimens. The measurement was carried out using a 10 MHz-4°f. transducer.

의해 미소결함 탐지능이 결정되는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과를 고찰해 보기로 한다. 다결정체내에서 초음파의 감쇠는 dislocation damping, magnetoelastic 및 thermoelastic 효과로 인한 흡수 손실과 결정립의 크기, 탄성이방성, 기공, 개재물 등에 의한 산란 손실로 나뉜다. 따라서 초음파 감쇠는 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha_T = \alpha_A + \alpha_S = a_1 f + a_2 \psi(f) \dots\dots\dots(1)$$

여기서 α_T 는 전체 감쇠계수, α_A 는 흡수계수, α_S 는 산란계수이며, a_1 과 a_2 는 각각 흡수손실, 산란손실에 관계되는 상수, f 는 초음파 주파수, $\psi(f)$ 는 주파수의 함수이다. 식(1)에서 금속재료에서의 흡수에 의한 손실은 작기 때문에 전체 감쇠계수에 주로 산란에 의한 손실이 작용한다. 이러한 산란손실에 의한 초음파 산란이론을 수식화 한 LPM 이론(Lifshitz-Parkhomovis-

kii-Merkulove theory)은 다음과 같이 표현된다.¹⁴⁾ 파장이 결정립 크기에 비해 아주 클때 ($\lambda \gg D$), 초음파에는 Rayleigh Scattering에 의해 산란되며 이 경우의 산란 감쇠(α_R)는

$$\alpha_R = \frac{8\pi^3 \mu^2 T f^4}{375 \rho^2 V_e^3} \left(\frac{2}{V_e^3} + \frac{3}{V_i^3} \right) \dots\dots\dots (2)$$

로 표현된다. 파장이 결정립 크기와 비슷할 때 ($\lambda \approx D$), 초음파는 Stochastic scattering에 의해 산란되며 이 경우의 산란감쇠(α_s)는

$$\alpha_s = \frac{16\pi^2 \mu^2 \bar{D} f^2}{525 V_e^3 \rho^2} \dots\dots\dots (3)$$

로 표현된다. 여기서 V_e 와 V_i 는 각각 종파와 횡파의 속도, ρ 는 밀도, f 는 주파수, $\mu(=11-C_{22}-2C_{44})$ 는 탄성 이방성, T 는 결정입자의 체적이며 \bar{D} 는 평균 결정립의 직경을 나타내고 있다.

본 실험에 사용된 명목상 중심 주파수가 5 MHz, 10 MHz인 탐촉자는 broad band용 이므로 중심주파수보다 낮고 높은 주파수 성분을 가지고 있다. 따라서 시편의 결정립 크기와 파장을 고려하면 위의 두 scattering 영역에 걸쳐 있다.

식(2)와 (3)식에서 시편 I, II, III과 IV의 경우와 같이 시험하는 탐촉자의 주파수가 같고 시편에서 결정립 크기만 틀릴 경우의 산란은 결정립 크기에 주로 의존성이 있음을 알 수 있다. 그러나 시편 IV, V의 경우는 결정립 크기가 같고 시험한 주파수 또한 같으므로 식(2)와 식(3)에서 볼 때 산란에 의한 감쇠는 재료의 밀도, 초음파의 종파, 횡파 속도 및 재료의 탄성 이방성에 의존성이 있음을 알 수 있다.

Pearlite의 기지조직을 가진 시편 IV와 martensite의 시편 V와의 밀도 차이는 0.3%, 종파 및 횡파의 속도 차이는 각각 1.2%, 1.7% 정도이다.¹⁵⁾ 그러나 감쇠의 차이는 재료의 상태에 따라 pearlite 조직이 martensite의 조직보다 무려 10~100배 정도로 크다고 보고 되어 있다.^{12), 16)} 그러므로 밀도가 0.3%, 초음파속도가 1.7% 정도의 차이로는 기지조직간의 감쇠차이를 설명하기는 어렵다. 밀도와 속도에 따른 결정립계 혹은 상계면의 음향 임피던스는 달라지나 감쇠 차이에 직접적인 요인은 되지 못한다.

일반적으로 변태조직은 결정립내의 기지조직에 따라

randomization이 달라진다. 기지조직의 randomization은 pearlite, banite, martensite 순으로 낮아지며¹⁵⁾ 낮은 randomization은 prior austenite grain의 탄성 이방성을 감소시키므로 결과적으로 결정립으로부터의 산란 신호 크기를 감소시켜 초음파의 감쇠를 낮게 한다. 따라서 본 실험의 IV와 V의 경우와 같이 결정립 크기가 같으나 기지조직의 다름에 의해 결합의 탐지능이 전혀 다른 기지조직의 randomization으로 인한 각 결정립의 탄성 이방성의 차이가 크기 때문으로 사료된다.

미소결합의 탐지능에 초음파 빔 폭의 영향을 조사하기 위하여 10 MHz 주파수의 빔 집속형과 빔 집속이 되지 않는 일반형의 두개의 탐촉자를 사용하여 각 시편에서 결합의 반사 신호의 크기를 측정하였다. 그 결과는 Table 4와 같다.

Table 4. Comparison of the signal amplitudes corresponding to the different size of flaws measured in 5 specimens using two different transducers

Transducer	Flaw Size (mm)	Reserved gain (dB)				
		Specimen I	Specimen II	Specimen III	Specimen IV	Specimen V
10 MHz 4" f	1	51	49.5	47	45	50
	0.5	40	39	36	34	37
	0.3	33.5	29	25	-	33
	0.2	33	28	-	-	32
10 MHz Flat	1.0	20	19	17.5	17.5	20
	0.5	9	-	-	-	-
	0.3	-	-	-	-	-
	0.2	-	-	-	-	-

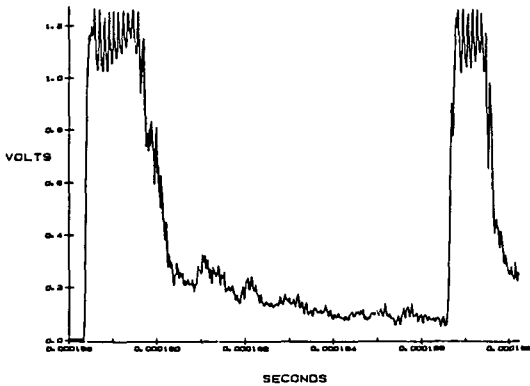
Table 4의 결과를 보면 10 MHz-4" f.의 집속형 탐촉자는 결정립의 크기가 작은 시편 I, II 및 기지조직이 martensite인 시편 V의 경우에는 0.2mm의 FBH형 결합이 탐지되었으나 집속이 되지 않는 일반형인 경우는 시편 I을 제외하고는 1mm의 FBH 결합까지만 탐지 가능하였다. 이상의 결과를 볼 때 초음파의 빔 집속 여부에 따라 미소 결합 탐지능은 상당한 차이가 있으며 빔 폭이 작을수록 미소 결합의 탐지능이 향상됨을 알 수 있다.

3-3. 후방산란 신호측정

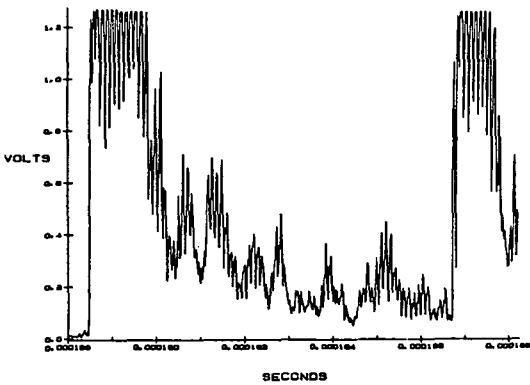
결합탐상시 미소 결합의 탐지에 저해 요인으로 작용하는 잠음신호 즉, 재료의 미세조직으로 인해 발생

되는 후방산란 신호를 측정하였다.

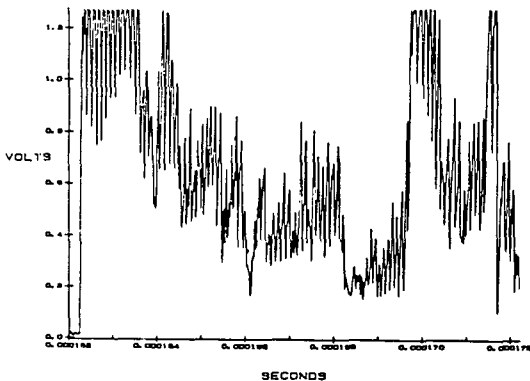
Fig. 6은 10 MHz-4" f. 탐촉자를 사용하여 시편 I, II, IV와 V의 후방산란 신호를 측정 도시한 것이다. 이 결과로부터 결정립과 기지조직의 변화에 대한 후방산란과 신호의 크기를 비교하면 결정립 크기가 커



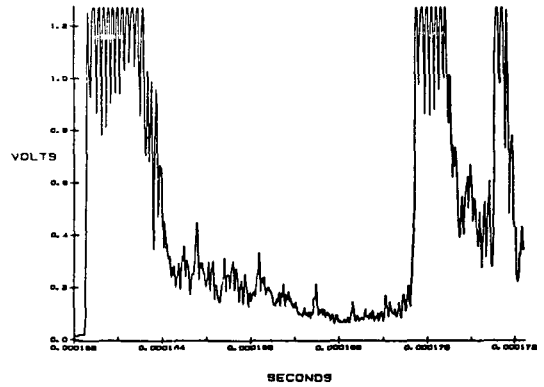
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 6. Back scattered signal measured in (a) specimen I, (b) specimen II, (c) specimen IV and (d) specimen V. A 10 MHz-4" f. transducer was used for the measurement.

짐에 따라 후방산란 신호의 크기가 커짐을 알 수 있다. 또한 martensite의 기지조직인 시편 V의 경우는 pearlite 조직 시편 IV의 경우보다 무려 12 dB 정도의 작은 후방산란 크기를 나타내며 결정립의 크기가 무려 1/10 정도의 시편 I과 거의 같은 크기를 나타내고 있다. 이와 같은 현상이 결정립이 작은 시편에서도 나타나는지를 조사하기 위하여 시편 I과 같은 결정립 크기에 기지

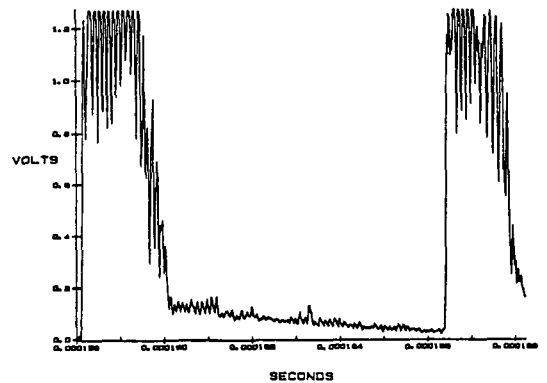


Fig. 7. Back scattered signal measured in the specimen which has the same grain size as specimen I, Note that the matrices of this specimen and specimen I are martensite and pearlite, respectively.

조직이 martensite인 시편에서 같은 방법으로 후방산란 신호의 크기를 측정하였다. 그 결과는 Fig. 7과 같으며 이 결과로부터, 결정립이 작은 경우에서도 기지조직의 변화에 따라 후방산란 신호의 크기가 달라짐을 알 수 있으며 martensite의 조직에서 후방산란 신호의 크기가 작음을 확인할 수 있었다.

이상의 결과를 정리하여 보면 다음과 같다. 후방산란 방법은 미세조직에 의한 산란 신호 크기의 정량적인 측정이 가능한 방법이며 미소결합의 탐지능이 낮은 시편일수록 후방산란 신호가 커짐을 알 수 있었다. 이는 역으로 후방산란 신호의 크기를 정량적으로 측정하면 열처리의 이력을 모르는 시험체에서도 미소결합 탐지능의 한계를 결정할 수 있음을 의미한다.

4. 결 론

ATM 1340 H 탄소강에서 초음파 탐상의 결합 탐지능에 영향을 주는 재료의 미세조직인자에 대하여 조사 연구하였다. 또한 미세조직 변화에 따른 미소결합의 탐지능을 조사하였다.

수행된 연구내용을 통하여 다음과 같은 사실을 알 수 있다. 초음파탐촉자의 주파수 및 빔 폭은 미소결합 탐지능에 영향을 주는 주요 특성인자이며 주파수와 빔폭이 각각 크고 좁을수록 결합의 탐지능이 향상됨을 알 수 있었다.

본 실험에서 최적의 탐상조건으로 탐지된 최소의 결합 크기는 재료의 결정립 크기와 기지조직에 따라 달라지나 기지조직이 pearlite인 경우는 결정립 크기 2배 정도의 결합은 탐지 가능하며 martensite 조직에서는 결정립 크기 정도의 결합이 탐지 가능하였다. 결정립의 크기가 같더라도 기지조직이 다를 경우 본 실험에서의 경우, 결합탐지능은 약 2배 정도의 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 기지조직의 randomization으로 인해 각 결정립의 탄성 이방성에 영향을 주기 때문으로 사료된다. 결론적으로 미소결합의 탐지능은 반드시 결정립의 크기에 의해서만 결정되지 않으며 기지조직에 따라서 결합의 탐지능에 현저한 영향이 있음을 알 수 있다.

후방산란측정 방법은 결정립의 크기 뿐 만 아니라 기지조직의 영향까지도 평가 가능한 방법이며 재료의 미소결합의 탐지능을 간접적인 방법으로 평가가 가능한 방법임을 알 수 있었다.

References

1. R. Saglio, A. C. Prot and A. M. Touffait, *Materials Eval.*, 62-66, Jan. (1978).
2. G. Canella, F. Monti, L. Pedicelli and A. L'Erede, *NDT Int.*, 151-153, June (1983).
3. H. Kwun, G. P. Singh, K. Fujisawa, F. H. Froes and D. Eylon, *NDT Int.*, 73-79, April (1984).
4. W. N. Reynolds and R. L. Smith, *British J. of NDT*, 145-151, May (1982).
5. R. W. Parish, P. E. Kear and E. de Lamotte, *British J. of NDT*, 37-39, Jan. (1982).
6. N. K. Batra and H. H. Chaskells, *NDT Int.*, 261-264, Oct. (1985).
7. J. P. Weight and A. J. Hayman, *J. Acoust. Soc. Am.*, 63(2) 396-404, Feb. (1978).
8. Otto R. Gericke, *Materials Eval.*, 23-30, Jan. (1965).
9. H. A. Crostack and W. Opperman, *Ultrasonics*, 19-26, Jan. (1983)
10. E. Marianeschi and T. Tili, *NDT Int.*, 75-77, April (1983).
11. S. Kumar and A. K. Govil, *Ind. J. of Tech. Vol.* 18, 197-202, May (1980).
12. N. Grayeli and J. C. Shyne, *Rev. of pro. in Quant. NDE*, 927-937 (1984).
13. V. Schmitz and K. Goebbels, *Ultrasonic Sym.* 950-953 (1982).
14. L. G. Merkulov, *Sov. Phys. Tech. Phys.*, 1, 59-69 (1956).
15. E. P. Papadakis, *J. of Applied Physics*, Vol. 35, No. 2, 1474-1482, May (1964).
16. E. P. Papadakis, *J. of Applied Physics*, Vol. 34, No. 2, 265-269, Feb. (1963).