

“Split-Spectrum Processing”을 使用해서(結晶粒 크기에 따른)
超音波 缺陷判讀 改善
具吉謨*·沈鐵茂*·安秉完*

Split-spectrum Processing for Improved Flaw Detectability
by Ultrasound System

Kil Mo Koo, Chul Moo Shim and Byeong Wan Ahn

Abstract A split-spectrum processing technique for an ultrasonic flaw detection system has been developed, which improves the flaw-to-grain echo ratio in large-grained materials. The enhancement is achieved by partitioning a wide-band received spectrum to obtain frequency shifted bands, which are then processed to suppress the grain echoes with respect to the flaw echo, using a novel signal minimization algorithm. A technique for suppression of grain echoes has also been devised which takes advantage of the fact that the grain echo amplitude changes with the frequency of the incident ultrasound whereas the flaw echo amplitude does not. The combination of this technique and the new flaw detection system greatly improve the capabilities of ultrasonic evaluation of large grain materials.

NOMENCLATURE

P : 초음파의 음압
D̄ : 결정립자의 평균 지름
L̄ : 결정립의 평균 경계공간
K : 결정립 모양에 따라 정해주는 상수
ge : 단위 면적당 결정립 개수
X : 초음파 진행거리
Δf : 소대역폭 중앙주파수 공간

b : 소대역폭
m : B 대역폭을 b 대역폭으로 만들수 있는 매개
변수
F/G | enh : 결함대 결정립 에코의 개선비
α : 초음파 감쇄정수
Δk/k : 탄성 이방성 인자
λ : 초음파의 파장

1. 서 론

원자력발전소의 비파괴검사를 수행함에 있어서 오스테나이트계 스테인레스강은 재료의 특성 때문에 종래에 사용한 아나로그적 초음파탐상방법으로 정확한 결함 평가하기란 힘든 과제라 할 수 있다.¹⁾

일반적으로 스테인레스강은 결정립 경계로부터 강한 다산란 및 반사현상이 일어난다.²⁾

첫번째, 결정립이 작은 경우에는 에코의 강도(intensity)를 약화시키므로 검사체의 두께가 증가할 경우에 크랙에코들은 수신잡음에 의해서 불분명해지고 두번째, 결정립이 큰 경우는 결함이 결정립보다 클 경우도 종종 결함에코는 결정

*韓國에너지研究所 非破壞試驗研究室

接受 : 1987年 12月 16日

림에코에 의해서 숨어버린다.³⁾

위와 같은 사실들을 원인적으로 분석해 보면 용접수행시 온도가 재료의 용점까지 증가함으로써 모재의 열영향 부위(HAZ)의 결정립의 크기도 이에 비례해서 증가하기 때문이다.⁴⁾

이로인하여 초음파의 파장과 성장한 결정립의 크기가 동일 배수범위 내에서 산란조건이 형성된다.⁵⁾

또한 용접내부는 수지상조직으로 초음파의 굴절현상까지 발생한다.” 결정립 크기 변화와 용접 내부조직 때문에 “Background noise” 일명 grass echo 및 “false indication” 일명 grain echo 등이 나타나게 되므로 결합신호가 산란신호에 묻히게 되는 요인이 된다.

그러므로 본 연구에서는 오스테나이트계 스테인레스강 용접부의 초음파탐상시에 발생하는 문제점들을 규명해 보고자 원자력발전소 배관재료 sus 304 스테인레스강을 선택하여 실험하였다.

본 논문에서 수행될 시편들은 용접내의 열영향부위에 존재하는 결정립크기와 동일한 배수로 갖기 위해서 열처리하였다. 그래서 결정립크기에서 오는 에코를 억제하기 위한 방법으로 다른 분야에서 이미 적용된 주파수 diversity 또는 agility로 잘 알려진 기술을 도입한다.

본 논문에서 초음파탐상방법으로서 결합 검출을 하기 위한 “Split-spectrum processing” 기술은 결정립이 큰 재료에서 결합대 결정립 에코의 비를 개선하기 위해 개발되었다.

Split-spectrum 신호처리를 이용하여 정확한 결합 판독을 하고 결정립크기에 영향을 주도록 열처리된 시편에 대해서 실험 데이터를 구하였다. 본 기술의 원리는 decorrelate 한 결정립경계의 에코를 얻기위한 넓은 대역 수신 스펙트럼을 임의의 대역폭으로 분해한다.

다음은 새로운 신호처리기법인 minimization 알고리즘을 사용해서 결정립에코를 억압한다. 스테인레스스틸시편에 대한 개선된 신호 data는 평균 알고리즘에 비교해서 minimization 알고리즘을 사용하므로 높은 결합검출 능력을 얻을 수 있다.

2. 초음파 감쇄이론

균질한 재료내부에 초음파가 진행하면 초음파 에너지는 진행거리에 따라 감쇄되며 거리에 따라 초음파음압은 식(2-1)과 같이 표시한다.⁶⁾

$$P = P_0 \exp(-\alpha d) \dots \dots \dots (2-1)$$

본 식에서 초음파의 진행거리가 증가함에 따라서 초음파의 음압이 감소하는 원인은 다결정체 내부에 초음파가 진행할때, 초음파의 흡수와 산란이 동시에 일어나기 때문이다. 초음파가 매질을 진행할 때 그 매질을 구성하고 있는 분자나 원자들이 진동하고 이때 진동하는 입자들의 kinetic 에너지가 입자들의 충돌로 인하여 thermal 에너지로 변환되어 초음파에너지가 손실된다.⁶⁾

이러한 구조를 갖지 않는 균질한 재질이라면 초음파의 감쇄는 오직 흡수에 의한 에너지 손실로써 나타난다. 그러나 다결정체에서는 초음파의 흡수손실은 물론 결정립자의 크기, 재료의 탄성이방성, 초음파주파수에 따라 산란이 일어난다. 이것을 초음파산란이라 하고 이러한 산란손실에 의해서 초음파에너지가 감쇄하게 된다.⁶⁾

따라서 다결정체에서의 초음파 감쇄는 흡수와 산란에 의해서 에너지의 손실이 일어나며 감쇄정수는 다음과 같이 표시된다.

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_s \\ = \alpha_1 f + \alpha_2 (f) \dots \dots \dots (2-2)$$

또한 초음파의 파장(λ)과 결정립자의 평균지름(\bar{D})의 비율에 따라 초음파 산란이 이론적으로 수식화 된것을 보면, Table 1과 같이 세가지 기본 mechanism으로 요약된다.

Table 1. The three basic loss mechanisms involved in the scattering of ultrasound.

WAVELENGTH TO GRAIN DIAMETER RANGE	MECHANISM	ATTENUATION
$\lambda \gg D$	RAYLEIGH	$\left(\frac{\Delta K}{K}\right)^2 \bar{D}^3 f^4$
$\lambda \approx D$	PHASE (STOCHASTIC)	$\left(\frac{\Delta K}{K}\right)^2 \bar{D} f^2$
$\lambda \ll D$	DIFFUSION	$\left(\frac{\Delta K}{K}\right)^2 \bar{D}^{-2}$

3. 시편준비

다양한 결정립 크기 조건에서 split-spectrum 신호 처리기법으로 검사하기 위하여 스테레스스틸 시편들의 직경은 2"이며 산란조건을 변화시키기 위하여 결정립 크기를 조정하였다.

재료의 화학적 성분을 Table 2에 나타내었고 제조방법은 결정립 성장의 비를 결정하는데 필요하다. 그리고 실험상 편의를 돕기 위해서 본 시험편의 열처리후 성질 보다는 열처리전 재료의 성질을 알아보았다.

각기 시험편들은 결정립 성장을 얻기 위해서 1000°C로 부터 1200°C까지의 온도범위로 열처리하였다.

Table 2. Chemical compositions of the base metal.

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
BASE METAL	0.06	0.53	1.95	0.02	0.01	8.67	19.1

(Wt. %)

각기 인공결합의 치수는 결정립 및 인공 결합으로부터 두 초음파의 에코의 비가 대략 동일하도록 가공하였다. 인공 결합의 치수는 1.59mm, 1.87mm, 2.03mm, 2.03mm 이고 이때 각각 시험의 열처리 온도는 1125°C, 1150°C, 1175°C, 1200°C이다.

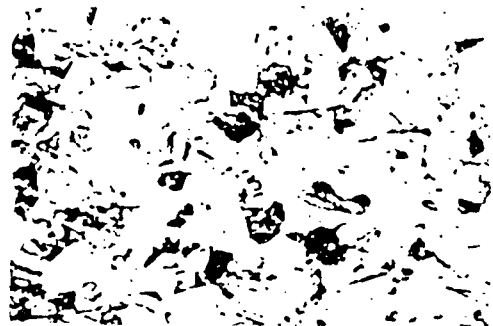
열처리된 시편들의 측면 및 측면들은 평균 결정립 크기를 결정하기 위해서 현미경 사진을 검토하였고 그 결과는 Fig. 1에 표시하였다.

또한 Fig. 2는 결정립 신호를 얻기위한 간단한 시험편 및 탐촉자와의 구성도를 나타내었다. 본 그림의 특징으로써 초음파 신호를 감쇄시키기 위해서 시험편과 Metal Block 사이에 Couplant를 사용하였다.

여기에서 주어진 결정립 크기는 결정립 평균 경계공간에 해당한다. 그러나 때로는 평균 결정립 직경이 기본이 된다. 그래서 \bar{D} 와 \bar{L} 사이 관계식은 다음과 같다.

$$\bar{D} = K \bar{L} \dots\dots\dots (3 - 1)$$

그리고 식(3-1)에 근거로 하여 열처리시편들 내의 평균 결정립 지름은 경계공간과 비교해서 대략 두배가 된다.²⁾



Raw material radial surface



Axial surface



Radial surface

Fig. 1. Micrograph of stainless-steel sample heat-treated at 1200°C and raw material.

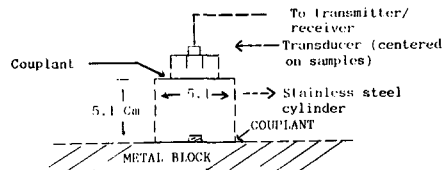


Fig. 2. Experimental setup for grain measurements.

또한 ASTM 분석방법으로서 g_e 를 얻기 위해서 (3-2) 식에 평균 결정립 크기 값을 대입하였다.²⁾

$$g_e = -10.0 + 6.64 \log_{10} (1/\bar{L}) \dots (3-2)$$

여기에서 \bar{L} 의 단위는 cm이다.

결정립 크기는 열처리된 시편에 대하여 두점을 선형 교차값으로 산정하고 ASTM 결정립 크기에 해당하는 대략치는 Table 3에 나타낸다.

Table 3. Grain size estimates in terms of ASTM grain size number.

	열처리 온도 (°C)	열처리 시간 (Hr)	평균 결정립 크기 \bar{L} (μm)	ASTM 결정립 크기 수 g_e
1	1125	8	69	4
2	1150	15	80	4
3	1175	30	95	3
4	1200	43	156	2

4. 실험방법 및 이론적 배경

4.1 System 개요 및 데이터 수집

신호결합 검출기 system은 1/2 전력 대역폭이 2 MHz이고 5 MHz의 중앙주파수를 갖는 광대역 전송신호를 이용한다. system에서 나온 전기적 신호들은 탐측자에 의해서 초음파로 바뀌고 시편속으로 전송되고 다시 수신된다. 비균일성으로 부터 반사된 에코들은 같은 탐측자에 의해서 수신되고 correlator의 입력으로 전달된다.

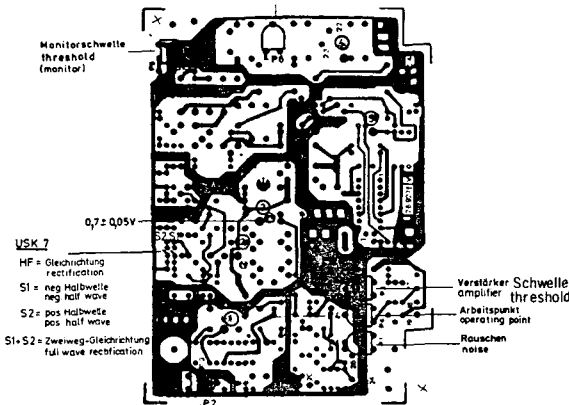


Fig. 3. Circuit to obtain RF and video mode from test-points of USK 7 board.

Fig. 4는 초음파 신호수집 및 신호처리 흐름을 블록 다이어그램으로 나타내었고 또한 Correlation 수행전단의 신호를 얻기 위해서 초음파탐상장비는 아나로그 system인 USK-7을 사용했고 TEK 2430 오실로스코프의 입력단은 USK-7의 26927 f Board와 연결하여 RF 신호를 얻었다. 이때 이 Board의 test points는 RF mode와 Video mode를 각기 ②, ③ test points에서 선택하여 얻을 수 있었고 회로도에는 Fig. 3에 표시하였다.

RF 신호를 임시 저장하기 위하여 디지털 저장 오실로스코프인 TEKTRONIX 2430 모델을 사용하였고 내장된 A/D 변환기를 거친 2진 부호는 GPIB Interface를 통해서 IBM PC 입력단으로 전달되고 PC에서는 동시에 floppy disk에 신호를 저장하고 레코더에 입력신호를 기록하였다.

최종적으로 IBM PC는 floppy disk에 저장된 correlation 신호를 programming된 microprocessor 및 SPD software로서 신호처리 하였다. 그리고 최종 decorrelation을 취해주기 위한 minimization 알고리즘의 programs는 IEEE에서 발행한 Text를 참고하여 완성하였다.

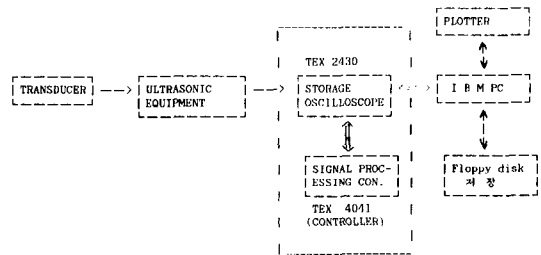


Fig. 4. Block diagram of the data acquisition and the signal processing.

4.2 Split-spectrum 기술

Split-spectrum 기술의 첫단계는 프로그램을 이용해서 frequency-shift한 신호를 얻는 것이다. 입력단의 초음파신호를 correlation하고 탐측자로부터 넓은 대역폭 신호를 소대역폭으로 split하기 위해서 software적으로 컴퓨터 프로그램을 이용하여 얻을 수 있다.

또한 에코의 진폭 스펙트럼을 얻기 위해서 넓은 대역 system 출력을 Fourier 변환하고 디지털 여파기로서 스펙트럼이 요구되는 대역폭 수로 나누고 또 다시 각각의 주파수 함수로 얻기 위해서 역 Fourier 변환을 한다.

다음은 이들 신호의 진폭을 normalize 하고 unity의 최대크기는 zero-mean 출력을 갖는다. 그리고 이들 신호들의 특징은 주파수를 shift 함에 따라 결정된 에코의 진폭이 변화됨을 알 수 있다. 결정된 에코들의 진폭은 spectrum window의 중앙주파수에 따라서 강하게 영향을 받음을 알 수 있고 주파수를 shift 한 신호를 평균 및 minimization 알고리즘을 함으로서 결합 관측의 개선이 됨을 알 수 있다.

또한 여파된 신호의 normalization은 실제 스펙트럼 대역폭의 범위 내에서 이루어지며 그러므로 시스템 분해능을 개선할 수 있다.

본 기술의 블록 다이어그램은 Fig. 5에 나타낸다.

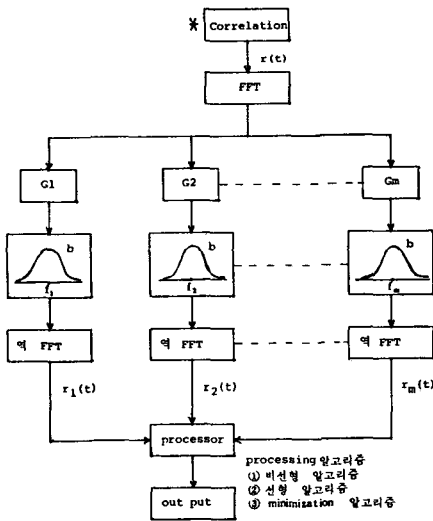


Fig. 5. Flow-graph of split-spectrum processing.

4.3 신호 처리기술

거론된 바와 같이 원상태의 광대역 에코신호로부터 얻은 set 신호를 최종 신호처리하기 위한 알고리즘들은 아래의 세가지 기법을 사용하였다.

4.3.1. 자승하고 평균한 신호처리 알고리즘

$$y(t) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m r_i^2(t) = \bar{r}^2(t) \dots\dots\dots (4-1)$$

4.3.2. 평균하고 자승한 신호처리 알고리즘

$$y(t) = \left\{ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m r_i(t) \right\}^2 = \bar{r}^2(t) \dots\dots\dots (4-2)$$

4.3.3. minimization of squared signals

*Group에 의해서 소개된 minimization 기법은 m개의 정합여파기를 사용하여 원신호를 여파하고, normalized 하고 자승한다.

소대역폭 각각 범위내의 진폭중 최소값을 선택한다. 이때의 minimization 알고리즘에 대한 출력은 다음과 같다.

$$y(t) = \min\{r_i(t) : i=1,2,3,\dots,m\}^2 = r \min(t) \dots\dots\dots (4-3)$$

*Group은 N. M. Bilgutay, J. Sanie, V. L. Newhouse 이다.

4.4 신호처리 매개변수

다른 주파수 범위에 해당하는 신호의 set 를 얻기 위해서 중앙주파수 공간인 Δf 및 소대역폭 b를 선택할 수 있는 Gaussian스펙트럼 출력 여파기들을 사용한다. 탐측자로부터 얻은 광대역신호는 중앙주파수 공간 및 소대역폭 으로 주어진 매개변수로 여파되어 출력으로 얻을 수 있고 그때 여파된 신호 구성도는 Fig. 6에서 나타낸다.

가우시안(Gaussian) 여파기들의 중앙 주파수들은 탐측자의 1/2 광대역폭(B) 범위에서 선택할 수 있다. 그러므로 탐측자의 1/2전력대역폭이 fi에서 fn 사이에 놓이게 된다면 그때 여파기의 중앙 주파수들은 다음식으로 정의할 수 있다.

$$f_i = f_1 + (i-1) \Delta f, i=1,2,3,\dots,m \quad (4-1)$$

그러므로 중앙 주파수공간 Δf에 대해서 set 내에 여파된 신호들의 전체의 수는 다음 식으로 정의할 수 있다.

$$m = B / \Delta f + 1 \dots\dots\dots (4-2)$$

또한 실제 대역폭은 다음식으로 정의한다.

$$B_{eff} = B + b \dots\dots\dots (4-3)$$

그리고 Fig. 6에서 위의 그림은 중앙 주파수 공간 Δf와 소대역폭 b에 관해서 Split-spect-

rum filtering scheme을 주파수 함수로 나타내었고 또한 아래 그림은 각기 중앙주파수 증가에 따라 여파된 신호를 시간함수로 나타내었다.

Fig. 6에서 중요한 사실은 시간함수 측면에서 볼때 결함으로부터 얻어진 진폭은 일정한 값을 유지하나 결정립으로 부터 발생된 진폭은 변화가 심하게 일어남을 알 수 있었다.

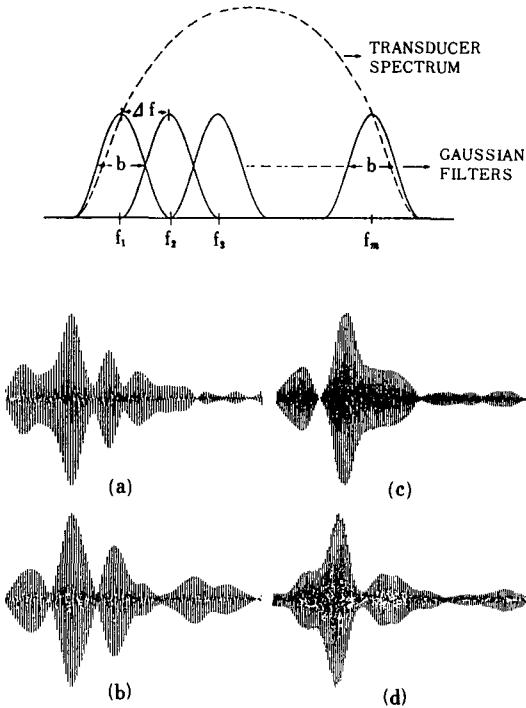


Fig. 6. Split-spectrum filtering scheme and four typical narrow band signals resulting center frequency increases from a to b.

5. 결과 및 고찰

5.1 window 설정 및 결정립 크기의 영향

열처리된 시편을 사용하여 입력측의 초음파 신호를 correlation 시키고 gaussian 여파기에 의해서 n개의 set된 신호들을 최종으로 최저한도 알고리즘(minimization algorithm)으로 신호처리 하였다.

Fig. 7. (a), (b) 들은 입력신호와 최종 신호처리된 출력신호와 개선된 결과를 나타낸다.

또한 최종 신호처리된 결과값을 각 시편에 대

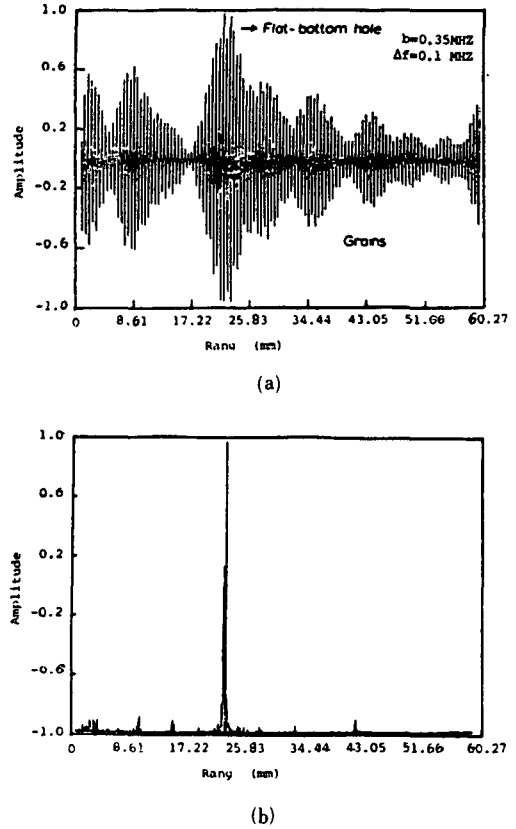


Fig. 7. (a) Correlation signal for stainless-steel sample heat-treated at 1200° C. (b) Minimization algorithm output.

Table 4. Result and consideration about minization algorithm.

열처리 온도	산란 조건	$\frac{F/G _{enh} = F/G _{out}}{F/G _{in}}$	신호처리 매개변수	비고
1125°C	RAYLEIGH REGION	9.1	f=100KHz b=350KHz	탐촉자와 결함의 거리가 작고 평면 결성립 크기가 작으므로 최대의 신호개선
1150°C	STOCHASTIC REGION	6.1	"	탐촉자와 결함의 거리가 1175°C 보다 크다.
1175°C	STOCHASTIC REGION	7.8	f=100KHz b=300KHz	탐촉자와 결함의 거리가 1150°C 보다 작다.
1200°C	DIFFUSION REGION	3.0	f=100KHz b=350KHz	결정립이 크고 탐촉자와 결함의 거리가 크므로 전체적으로 감쇄현상이 강하게 나타남.

한 열처리조건에 따라 정리하면 Table 4와 같이 요약할 수 있었다.

열처리된 시편들에 대한 F/G | enh의 도면구성(plots)은 주파수공간 $\Delta f=100\text{kHz}$ 에 대하여 window 대역폭 b 변화를 나타내었다. 개선된 최대값은 소대역폭 b가 300kHz-350kHz 범위 내에서 얻을 수 있었다.

그리고 최종 신호처리 기법으로서 decorrelation 하기 위한 각각의 알고리즘들이 Fig. 8에서 나타내었다.

본 그림에서는 평균차승 알고리즘 및 자승 평균 알고리즘과 비교해서 minimization 알고리즘이 결함대 결정립의 개선비가 우수함을 알 수 있었다.

그러나 minimization 및 평균 알고리즘을 수행함에 있어서 결함 대 결정립 에코의 비로서 단지 결함을 평가하기는 타당하지 못한 점이 있다. 왜냐하면 시편(stainless steel)의 내부적 물리적 특성에 따라서 본 논문에서 선택된 매개변수(parameter)들은 또 다른 신호처리 알고리즘에서는 최적조건이 아닐 수도 있다.

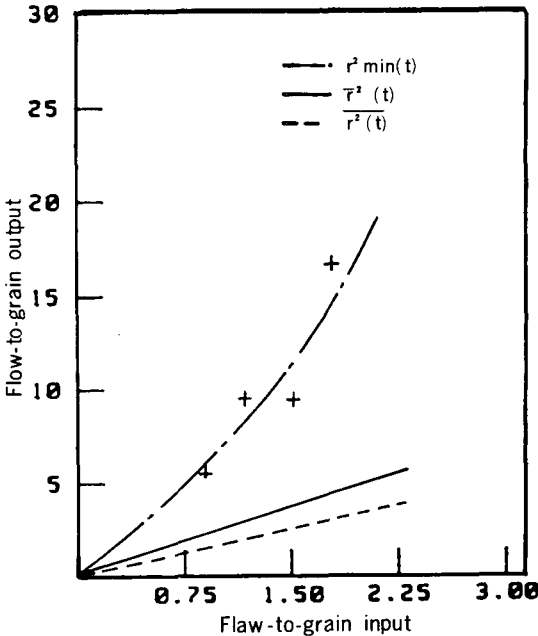


Fig. 8. Input-output flow-to-grain echo ratio curves for the minimization and averaging from flaw data.

5. 2 결함진폭의 영향

Fig. 9는 4개의 각 시편으로 부터 얻은 개선된 결함대 결정립의 비와 소대역폭 b의 함수관계를 유도하였다.

Fig. 9에서 b가 변화함에 따라서 개선비가 민감한 반응으로 나타남을 알 수 있고 특별히 1,125°C로 열처리된 시편에서 소대역폭(b)가 증가함에 따라 개선된 최대값은 급격히 감소함을 알 수 있다.

또한 1,150°C, 1,175°C, 1,200°C로 열처리된 시편들의 최대 F/G| enh 값은 b가 증가함에 따라 약간의 감소됨을 나타낸다.

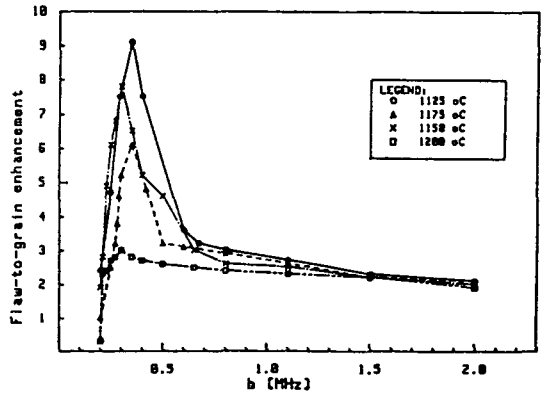


Fig. 9. Flow-to-grain echo ratio enhancement against bandwidth in sample for the minimization algorithm.

Fig. 7에서 나타난 신호처리된 data 및 Table 5의 결과들은 탐촉자와 가까운 거리에 있는 인공결함과 평균결정립이 작은 시편들이 신호개선의 결과가 좋음을 알 수 있었다.

이와같은 사실은 매질내에 결정립 크기 증가

Table 5. Data corresponding to heat-treated stainless-steel samples.

	열처리 온도 (°C)	평균결정립 크기 (μm)	통 크기 (mm)	후 위치 (mm)	감쇄차 (dB)	F/G in	F/G out	F/G enh
1	1,125	69	1.59	30.3	14	1.83	16.8	9.1
2	1,150	80	1.87	36.3	16	1.54	9.4	6.1
3	1,175	95	2.03	33.6	24	0.87	6.8	7.8
4	1,200	156	2.03	39.4	32	1.36	4.1	3.0

※ 열처리된 raw material과 열처리후 material의 초음파신호의 감쇄차

및 초음파 진행거리가 증가함에 따라서 감쇄의 원인이 됨이 이론적으로 일치함을 알 수 있었다.

6. 결 론

본 논문은 가동전· 중 검사시에 원자력발전소의 압력용기 및 파이프가 스테인레스인 경우에 종전에 초음파탐상방법으로 문제시 되었던 초음파의 감쇄현상과 또한 산란에 의한 결정립 에코들을 억제하기 위해서 새로운 초음파 신호처리 시스템을 제시했다. 이 기술은 산란조건에서 큰 결함의 에코와 결정립 에코가 합성된 신호를 결함에코만 추출하는데 사용하였다.

그리고 최종 신호처리 알고리즘으로는 평균 알고리즘 보다는 minimization 알고리즘이 뛰어나게 개선됨을 알 수 있었다. 또한 minimization 알고리즘의 결과적 특성은 다양한 target 특성 매개변수에 따라 변화함을 알 수 있었다.

본 실험에서 사용된 시편들은 용접시 조건과 유사하게 하기 위해서 고온으로 열처리 하였고 그때 시편의 결정립 크기는 산란조건을 유도할 수 있었다.

최저한도 알고리즘은 결정립크기에 따라 신호 개선비도 변화됨을 알 수 있었다. 본 알고리즘은 결함 검출 개선이 심히 요구되는 용접부위에 결정입자가 초음파의 피장과 산란 유도시 유용하게 적용될 수 있음을 증명하였다.

끝으로 이 기술을 도입함으로써 원자력 발전소의 스테인레스 용접부를 NDT 검사함에 있어서 보다 정확한 결함 평가하는데 기여할 것으로 믿는다.

참 고 문 헌

1. J. R. Tomlinson, A. R. Wagg and M. J. Whittle. Ultrasonic Inspection of Austenitic Welds. March. 1978.
2. 이범민, 석사학위논문, 한양대학교 대학원 (1986).
3. B. B. Lee and E. S. Furgason. "An Evaluation of Ultrasound NDE Correlation Flaw Detection Systems." IEEE Transactions Ultrason. In Press.
4. Cotterill, p, and P. R. Mould, recrystallization and Grain Growth in metals, 1976. Surrey University Press, London, England.
5. *Bilgutay. N. M., E. S. Furgason, and V. L. Newhouse, "Evaluation of a Random Signal Correlation System for Ultrasonic Flaw Detetion," "IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, Vol. SU-23, 1976, pp. 329-333.
6. 박대영 외 "ISI, PSI를 위한 비파괴검사 기술 개발" 한국에너지연구소(1984).
7. *V. L. Newhouse and E. S. Furgason. "Development of Digital Techniques for Improve Flaw Detectibility by ultrasound Systems:Flaw-to-Grain Enhancement by Frequency Agiliber 1980. NP-1690-SR.
8. L. G. Merkulov, "Absortion and diffusion scattering of ultrasonic waves in metals,," (English transl.) Sov. Phystech. Phys. 2, p. 953(1957).
9. Development of Nondestructive Testing Techniques for ISI, PSI. KAERI/RR-449-1/84.
10. Furgason, ES., V. L. Newhouse, N. M. Bilgutay, and G. R. Cooper. "Application of Random Signal Correlation System for Ultrasonics Flaw Detection," Vol. 13, 1975, pp. 11-17.