

초음파탐상 수행시 Polarity Thresholding 알고리즘을 이용한 재료잡음 억제

Material Noise Reduction in Ultrasonic Test Using Polarity Thresholding Algorithm

구 길 모*, 고 대 식**, 김 태 현***, 전 계 석***
(Kil Mo Koo*, Dae Sik Ko**, Tae Hyoun Kim***, Kye Suk Jun***)

요 약

본 논문에서는 Polarity Thresholding(PT) 알고리즘을 원자력 발전소의 중요 배관 재료인 스테인레스강(SUS-304) 탐상에 응용하여 초음파 수신신호를 개선시키는 방법을 연구하였다. PT 알고리즘은 수신신호의 스펙트럼을 분할하여 얻은 각각의 주파수분할 신호들이 갖는, 결정립에 의한 간섭패턴의 분산적 신호와 결함에 의한 비분산적 신호를 구분하여 S/N 비를 개선시키는 것이다. 실험을 위하여, 실제 검사부위의 특성과 유사하게 스테인레스강을 각각 1125, 1150, 1175, 1200°C로 열처리하였고, 시료의 배면에 원통형 결함을 인공 가공하였다. 중심주파수가 5MHz인 초음파변환기를 사용하여, 펄스-반사법에 의해 데이터를 획득한 후 PT 알고리즘을 적용한 결과 개선된 S/N 비는 평균 14.2 dB로 나타났다.

ABSTRACT

In this paper, Polarity Thresholding(PT) algorithm has been studied to enhance the received signal in ultrasonic inspection of the stainless-steel(SUS 304) which is the primary piping material of a nuclear power plant. The spectral decomposition components obtained by splitting the spectrum of received signals are composed of dispersive signal of the interference pattern produced by the grain boundaries and nondispersive signal by the flaw. PT algorithm enhance the SNR of received signal by using above properties. In experiment, the stainless-steel has been chosen as the sample and heat-treated at 1125, 1150, 1175, and 1200°C, respectively. And the flat-bottom hole type defects have been made artificially in samples. The pulse-echo signals from the sample by using ultrasonic transducer of center frequency 5 MHz have been processed by PT algorithm. It has been shown that PT algorithm enhanced the SNR by average 14.2 dB.

I. 서 론

원자력 발전소의 가동전이나 가동중에 행해지는

안전검사 방법(ASME SEC. V, VI 1989 EDITION REQUIREMENT)에서 초음파탐상은 매우 중요한 역할을 하고 있다. 그러나 검사 부위중 약 60% 이상을 차지하고 있는 스테인레스강(SUS-304)은 용접작업시 열의 영향에 의하여 결정립(grain)이 성장하게 되고 또한 용접 부위의 내부는 수직상 조직과 같은

*한국원자력연구소 비파괴검사사업부

**목원대학교 전자공학과

***경희대학교 전자공학과

접수일자: 1994년 8월 30일

구조적 특성을 갖기 때문에 이에 대한 신뢰성 있는 결함 판정이 어려운 실정이다[1]. 특히 이와 같은 재료에 대하여 초음파탐상을 실시할 때 재료 내부에서는 결정립 경계로부터 다중 산란 및 감쇠현상이 발생하여 수신신호의 시간축 상에는 결함 진폭의 감쇠 뿐만 아니라 구조적 잡음인 결정립신호 및 grass 반사 등이 발생한다[2]. 이러한 경우에 초음파신호의 S/N 비를 개선시키기 위해 지금까지 적용된 주요 기술은 Signal Averaging Technique, Spatial Compounding Technique, 정합 필터를 이용하는 방법 및 호모모픽 처리 등이었으나 이러한 기술들은 결정립신호와 같은 시불변신호를 감소시키는데는 한계성이 있다[1].

N. M. Bilgutay[3,4,5] 등은 결정립신호를 감소시키기 위해 수신된 광대역신호를 필터링을 통해 협대역신호로 분할한 후 SSP(Split-Spectrum Processing)-minimization 알고리즘을 이용하여 개선된 S/N 비를 얻었다. 그러나 이 방법은 결정립 크기가 큰 재료에 효과적이지 못하다.

따라서 본 논문에서는 초음파신호의 산란 및 감쇠가 심하게 일어나는 원자력 발전소의 중요 배관 재료인 스테인레스강의 탐상시 산란잡음을 감소시키기 위하여 수신신호에 SSP-minimization 알고리즘을 적용한 다음에 PT(Polarity thresholding) 알고리즘을 이용하여 보다 개선된 S/N 비를 얻고자 한다.

실험을 위하여, 실제 검사 부위의 특성과 유사한 시료로써 스테인레스강(SUS-304)을 선택하여 각각 1125, 1150, 1175, 1200 °C 로 열처리하고, 시료의 배면에 원통형 인공 결함을 가공하여 제작하였다. 초음파변환기는 수직 빔이며 중심주파수가 5 MHz 이고 대역폭이 2MHz 인 디스크형을 사용하였고, 필스-반사법을 이용하여 반사신호를 검출한 후 초음파 신호처리 시스템에 의하여 획득한 데이터에 PT 알고리즘을 적용하여 S/N 비의 개선을 확인한다.

II. PT 알고리즘을 이용한 재료잡음 억제

SSP 기술은 초음파의 입사신호가 재료의 결정립 구조에서 발생하는 랜덤한 산란자들과 상호 물리적 관계를 해석하는데 이용되었다[5]. 결정립에 의한 산란은 재료의 불규칙한 결정립 크기와 초음파 파장과 상호 간섭에 의해서 발생된 간섭 패턴이라 볼 수 있다.

결정립의 경계들은 초음파변환기와 시료의 공간적

위치뿐만 아니라 전송된 신호의 주파수에 따라 영향을 받게 된다[6]. 공간적 위치에 따른 상호 간섭 패턴을 해석할 경우에는 Spatial-Compounding 기술이 사용되고, 신호의 주파수 변화에 따른 상호 간섭 패턴을 해석할 때는 SSP 기술이 사용된다[7]. SSP 기술은 1 개의 초음파 변환기를 사용하여 수신된 광대역신호를 N 개의 가우시안 대역통과 필터들을 이용하여 N 개의 협대역 스펙트럼 집합으로 분할한 다음 역 FFT를 취하여 다시 시간 영역으로 변환하는 기술이다[4].

초음파가 시료에 입사될 때 시료로부터 반사된 신호는 일반적으로 식 (1)과 같이 표현 할 수 있다.

$$X(\tau_i) = m(\tau_i) + n(\tau_i) \quad \tau_0 \leq \tau_i \leq \tau_r \quad (1)$$

여기에서 $X(\tau_i)$ 는 지연 시간 τ_i 에서 반사 신호 진폭이고, $m(\tau_i)$ 는 지연 시간 τ_i 에서 결함으로부터 반사신호의 평균값 진폭이며, $n(\tau_i)$ 는 지연 시간 τ_i 에서 결정립에서의 산란 잡음신호이다.

그림 1의 신호는 시료로부터 얻은 결함 신호 및 결정립잡음을 나타내고 있다.

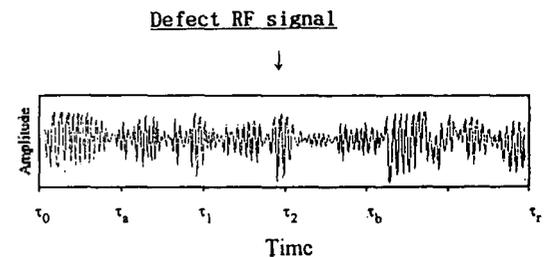


그림. 1. 스테인레스강 시료에서 얻은 초음파 수신신호
Fig. 1. Received ultrasonic signal from the stainless-steel sample

그림 1의 신호를 수식적으로 모델링하기 위해서 결함이 없을 경우 가우시안 분포는 평균이 0이며 분산 σ_n^2 를 갖는다고 하면, 지연 시간 1에서는 결함이 존재하지 않는 경우이므로 $X(\tau_1) = n(\tau_1)$ 으로 표현되며 이때 평균값은 0 이고 분산은 σ_n^2 이다. 그러나 지연 시간 τ_2 에서는 결함이 존재할 경우이므로 $X(\tau_2) = m(\tau_2) + n(\tau_2)$ 으로 표현할 수 있다. 그러므로 지연 시간 τ_2 에서 동시에 샘플링되는 다중 채널에서 확률 변수의 평균값이 $m(\tau_2)$ 임을 알 수 있으며 그 때 분산

은 결합의 유무에 관계없이 σ_n^2 이되므로 식 (1)을 식 (2)와 같이 간단히 할 수 있다.

$$X(\tau_i) = m(\tau_i) + n \quad \tau_a < \tau_i < \tau_b$$

$$= n \quad \text{otherwise} \quad (2)$$

초음파 변환기로부터 수신된 광대역 신호를 N 개의 대역통과 필터를 사용하여 스펙트럼 분할된 각각의 신호들의 결과 식은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_j(\tau_i) = \mu(\tau_i) + n_j^* \quad j=1, 2, \dots, N \quad (3)$$

여기에서 $\mu(\tau_i) = m(\tau_i)/N$ 이고, n_j^* 는 평균이 0이며, $\sigma_j^{*2} = \sigma_n^*/N$ 는 가우시안 분포 랜덤 잡음의 분산이고, N 은 필터의 수이다.

잡음 성분이 각각 상호 독립적일 때 결합신호가 존재할 경우 식 (3)은 식 (4a)와 같이 표현할 수 있고, 결합신호가 존재하지 않을 경우 식 (4b)와 같이 간단히 할 수 있다.

$$W_j(\tau_i) = \mu(\tau_i) + n^* \quad j=1, 2, \dots, N \quad (4a)$$

$$W_j(\tau_i) = n^* \quad j=1, 2, \dots, N \quad (4b)$$

식 (4)에서, 각각의 n^* 는 상호 독립적이며 N 의 변화에 따라 확률값은 매우 작게 나타나지만 결합이 존재할 때는 각각의 협대역 분할신호에서 동일 극점으로 표현되므로 극점에서 진폭의 변화가 발생할 때는 결합이 존재하지 않는 것으로 가정할 수 있다. 따라서 각각의 주파수 분할신호는 결정립에 의한 간섭 패턴의 분산적 신호와 결합에 의한 비분산적 신호간에 구분이 가능하게 한다. 이러한 원리를 적용하여 PT 알고리즘을 다시 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$Z(\tau_i) = X(\tau_i) \quad \text{if all } W_j(\tau_i) > 0 \quad (5a)$$

$$j=1, 2, \dots, N$$

$$= X(\tau_i) \quad \text{if all } W_j(\tau_i) < 0 \quad (5b)$$

$$j=1, 2, \dots, N$$

$$= 0, \quad \text{otherwise} \quad (5c)$$

여기에서 $Z(\tau_i)$ 는 PT 알고리즘 출력, $X(\tau_i)$ 는 SSP-minimization 처리된 신호 진폭이며, $W_j(\tau_i) \quad j=1,$

2, ..., N 는 분할 시영역신호이다. 최소화된 신호와 수신신호의 스펙트럼을 분할하여 얻은 시영역신호는 PT 알고리즘의 입력이 된다. 여기서 잡음신호는 주파수 종속적이며 결합신호는 주파수에 독립적이므로 잡음신호는 주어진 τ 에서 진폭이 모두 양 또는 음일 확률이 매우 적으며, 그 확률은 N 값에 반비례하게 된다. 반대로 결합 신호는 모든 진폭이 양 또는 음일 확률이 입력 S/N 비의 역함수로 증가하게 된다. 따라서 PT 알고리즘의 출력은 결정립신호를 억제하고, 결합 신호에서 최대 진폭을 얻을 수 있다.

III. 실험 및 고찰

3.1 실험 장치의 구성

그림 2는 PT 알고리즘 구현을 위한 초음파 신호처리 시스템의 블록선도이다.

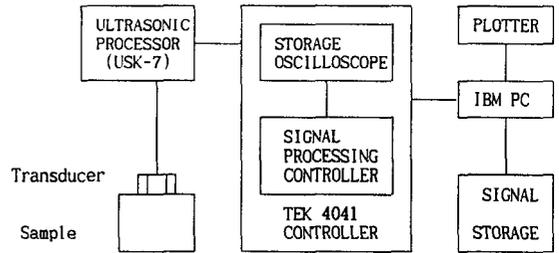


그림. 2. 초음파 신호처리 시스템의 블록선도
Fig. 2. The Block diagram of ultrasonic signal processing

그림 2에서 초음파 탐상장비(ultrasonic processor)는 아날로그 시스템인 USK-7(Krautkramer)을 사용했고 TEK2430 오실로스코프의 입력단은 USK-7의 26927f 보드와 연결하여 RF 및 video 신호를 얻었다. 초음파변환기는 중심주파수가 5 MHz, 반전력 대역폭이 2 MHz 인 디스크형을 사용하였으며, 초음파변환기를 시료에 접촉시켜 펄스-반사신호를 수신하였다. 데이터 획득 및 신호처리를 위해, 디지털 오실로스코프에 임시 저장된 수신신호는 GBIB 인터페이스를 통해 IBM PC 입력단으로 전달되고 PC 에서는 동시에 플로피 디스크에 신호를 저장하고 레코더에 입력신호를 기록한다. 그리고 이 신호는 PT 알고리즘에 의해 신호처리된다.

그림 3 은 중심 주파수 f_0 의 변화에 따른 시영역신호 및 동일 중심 주파수 간격 δf 와 대역폭 b 를 갖는 필터뱅크 구성방법을 나타낸다. 여기서 δf 와 b 값은 PT 알고리즘 수행시 최대의 S/N 비를 얻도록 반복 수행하여 구한다[3]. 그림 3의 시영역신호에서 중요한 결과는 결합으로부터 얻어진 진폭은 일정한 값을 유지하나 결정립으로부터 발생된 진폭은 변화가 크게 일어남을 알 수 있다.

그림 3(a)는 첫번째 협대역 가우시안 필터로 처리된 신호를 IFFT 하여 하단 블럭에 시간영역 video

signal로 나타내었고 상단 블럭의 신호는 탐측자에서 시편을 통과하여 반향된 신호를 FFT 한 것이다. 이 수신된 신호는 특별히 산란영역 신호의 전력 분포를 normalized spectrum 으로 취하면 결과적으로 FFT 할경우 탐측자의 대역폭을 벗어난 광대역 주파수 영역으로 나타남을 알 수 있다.

마찬가지로 그림 3(b)는 4 번째, 그림 3(c)는 8 번째, 그림 3(d)는 14 번째 협대역 가우시안 필터 처리한 신호를 IFFT 하여 상기과정과 같은 방법으로 나타내었다.

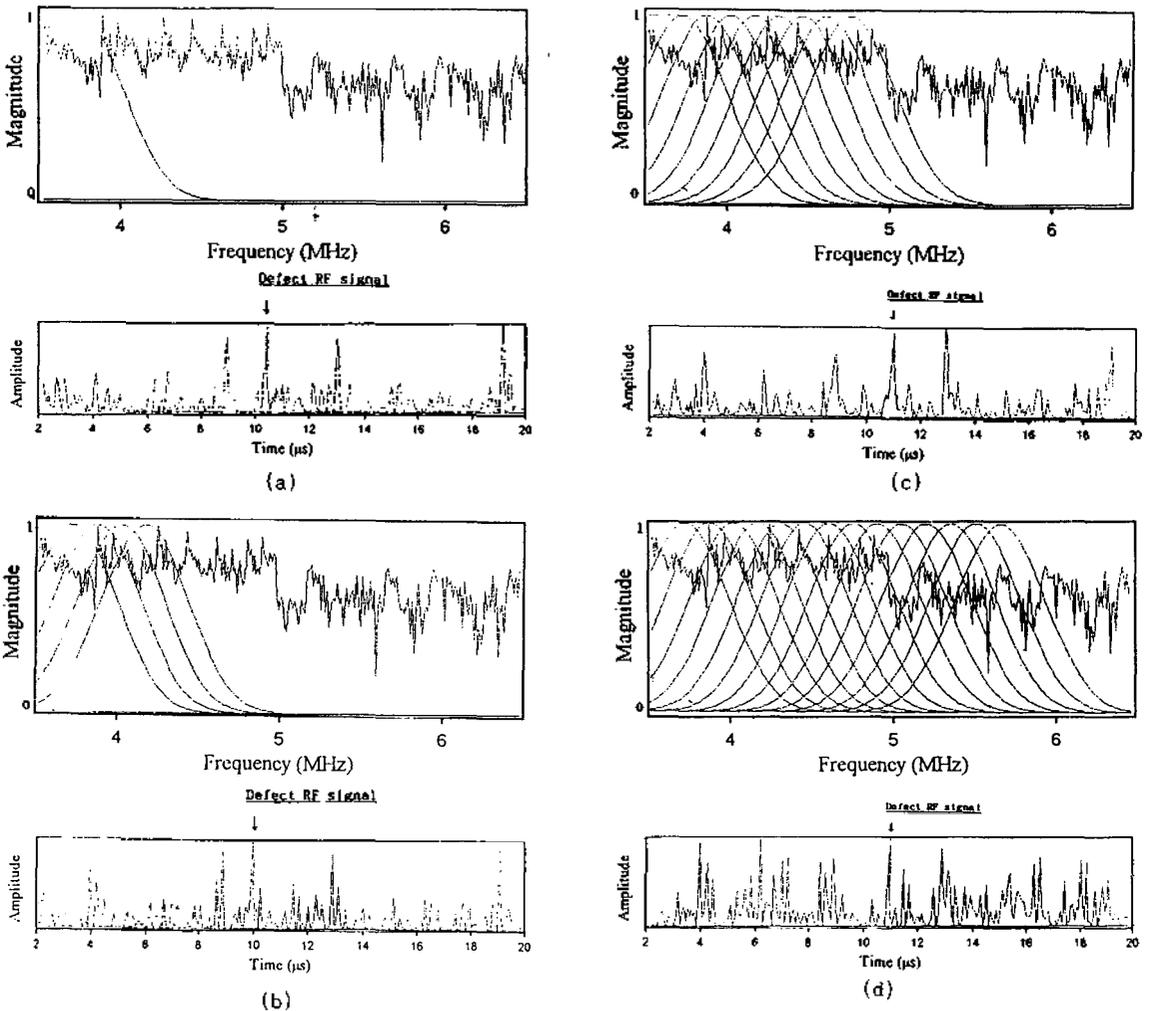


그림 3. 필터의 중심주파수(f_0)의 변화에 따른 시영역신호 및 스플릿-스펙트럼 필터뱅크 구성
 Fig. 3. Time domain signal and split-spectrum filter bank scheme as a function of variation of center frequency(f_0) of filter

3. 2 시료의 제작

원전의 주배관재료인 스테인레스강에 자주 나타나 는 다양한 결정립 크기와 유사한조건을 만들기 위하여 스테인레스강 시료를 각각 1125, 1150, 1175, 1200℃ 로 열처리하여 결정립 크기를 다르게 제작하였다. 본 실험에 사용된 시료의 감쇠 및 산란 조건을 실제 열 영향을 받은 용접 상태와 동일 조건으로 보기에는 어렵지만 결정립 크기 및 열 영향 부위의 온도 조건과 유사한 조건으로 접근시켰다.

시료들에 만들어진 인공 결함의 치수는 결정립 및 인공 결함으로부터 두 초음파의 반사의 비가 대략 동일하도록 가공하였다. 인공 결함의 치수는 배면의 수직인 원통형 구멍으로써 직경이 각각 1.59, 1.87, 2.03 mm 이고 이때 각각 시료의 열처리 온도는 1125, 1150, 1175, 1200 ℃ 이며 사간은 각각 다르게 주었다.

결정립의 크기는 결정립 평균에 해당하며 절편 방법[3]에 의해 구한 크기는 각각 138, 160, 190, 312 μm 이며 각 시료에 대한 파라미터는 표 1 에 실었다.

표 1. 열처리된 시료의 파라미터
Table 1. Parameter of heat-treated sample

열처리 온도(℃)	평균 결정립 크기(μm)	결함 구멍 직경(mm)	결함 깊이 (mm)	감쇠차* (dB)
1125	138	1.59	28.6	14
1150	160	1.87	30.8	16
1175	190	2.03	29.7	24
1200	312	2.03	30.4	32

*열처리 전의 재료와 열처리후 재료의 초음파 신호의 증가된 감쇠차

3.3 결과 및 고찰

열처리된 시료로부터 수신된 신호 처리전 입력신호는 결함신호뿐만 아니라 결정립신호 및 랜덤 잡음이 합성된 상태로 볼 수 있기 때문에 전단에서 교차상관을 취하였다.

그림 4(a), (b), (c), (d) 의 상단 블럭은 주파수 영역에서 결정립신호가 합성된 광대역 신호를 나타낸 것이며 하단 블럭의 위에 신호는 PT 알고리즘의 처리 결과이며 아래의 신호는 신호처리전 시간영역 수신신호를 보다 개선된 PT 알고리즘의 신호해석을 위한 출력신호를 얻기 위해 랜덤한 잡음과 교차상관하였고, 상관시키기 전에 입력신호들은 시간축상에

근거리장(near field)에서 발생하는 불필요한 신호가 제거되었다. 그림 4(a), (b), (c), (d) 에서는 가우시안 필터 설정 및 FFT 된 상태를 동시에 나타내었다. 또한 N 개의 협대역폭을 정규화함으로써 서로의 진폭과 주파수 함수가 가지는 체적이 동일하게 하였다. 주파수 분할은 초음파변환기의 반전력 대역폭 내에서 중심주파수의 간격이 동일한 20 여개의 협대역 필터뱅크로 수행되었다. 그리고 각 시료에 대해 수신된 광대역신호를 필터링하여 얻은 협대역 시영역신호들은 PT 알고리즘을 적용하여 처리되었다.

PT 알고리즘의 출력신호는 최종적으로 평균 신호 처리하였고 이 때 개선된 값은 표 3 에 결함신호대 결정립신호의 비를 시료의 조건에 따라 정리하였다. 그림 4(a) 에서 (d) 까지 열처리 온도가 1125, 1150, 1175 1200 ℃에 해당하는 최종 결과들은 그림 4 와 같으며 아래블록은 입출력 video 신호를 나타내며 시간영역에서 RF 신호보다는 video 신호로 나타내었다.

그림 4의 입출력 video 신호에 보는 바와 같이 결정립신호가 현저하게 제거되어 모든 인공 결함 반사체로부터의 신호가 뚜렷하게 구분이 되었다.

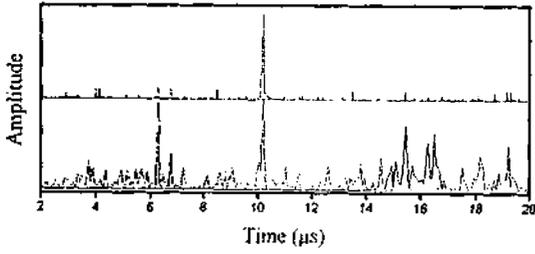
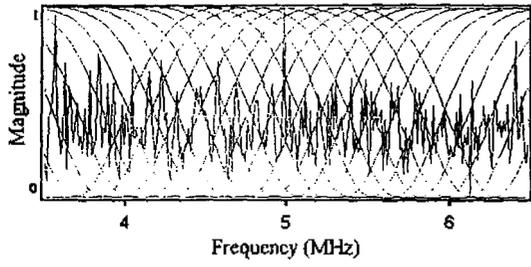
그림 4(a)에서 1125 ℃로 열처리된 시료는 가우시안 필터의 중앙 주파수 간격 $\delta f = 100 \text{ kHz}$ 일 때 필터의 대역폭 $b = 350 \text{ kHz}$ 에서 최종 개선된 S/N 비는 약 18.6 dB이다. 개선비가 양호한 이유는 초음파변환기와 결함의 거리가 가깝고 평균 결정립 크기가 작으므로 산란 진폭이 미약하여 최대의 S/N 비를 얻었다.

그림 4(b)에서 1150 ℃로 열처리된 시료는 $\delta f = 120 \text{ kHz}$ 일 때 $b = 350 \text{ kHz}$ 에서 개선된 S/N 비는 약 12.7dB 이다.

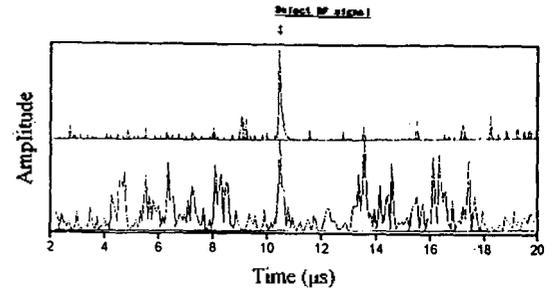
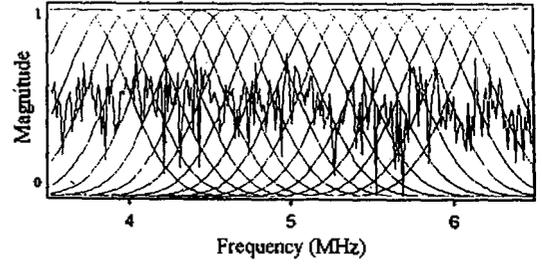
그림 4(c)에서 1175 ℃ 로 열처리된 시료는 $\delta f = 100 \text{ kHz}$ 일 때 $b = 300 \text{ kHz}$ 에서 개선된 S/N 비는 약 15.8 dB 이다. 여기에서 1150 ℃ 로 열처리하여 평균 결정립 크기가 160 μm 인 시료보다 더 개선된 S/N 비를 얻을 수 있었는데 그 이유는 1175 ℃로 열처리된 시료의 결함 위치와 초음파 변환기의 거리가 가까우며 보다 큰 인공 결함을 가지고 있기 때문이다.

그림 4(d)에서 1200 ℃로 열처리된 시료는 $\delta f = 100 \text{ kHz}$ 일 때 $b = 350 \text{ kHz}$ 에서 개선된 S/N 비는 약 9.5 dB 이다. 여기에서 S/N 비가 가장 낮은 이유는 평균 결정립이 크고 초음파변환기와 결함의 거리가 멀어서, 다중 산란 및 신호감쇠가 상대적으로 증가하였기 때문이다.

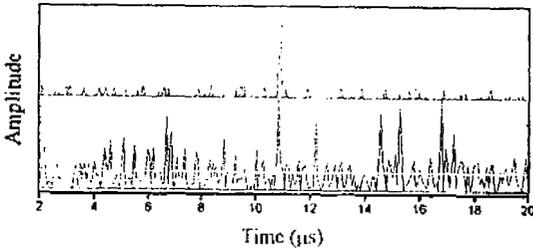
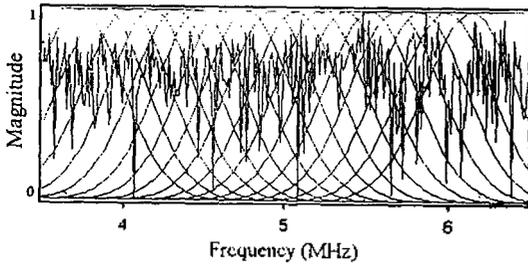
각 시료의 조건에 따라 얻은 실험 결과는 표 2와 같다.



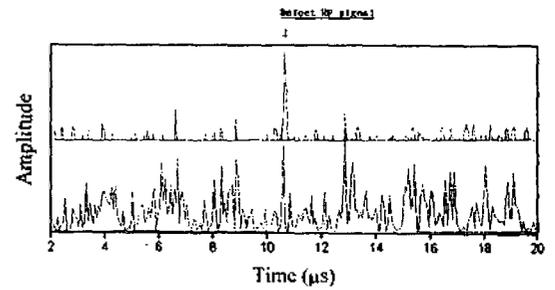
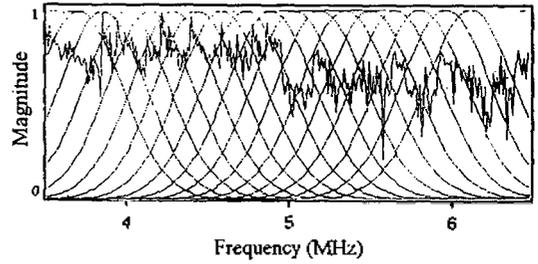
(a) 1125 °C



(c) 1175 °C



(b) 1150 °C



(d) 1200 °C

그림. 4. PT 알고리즘 처리 결과
 Fig. 4. The result of PT algorithm processing

표 2. 개선된 S/N 및 신호처리 파라미터

Table 2. Enhanced SNR and parameter of signal processing

열처리 온도(℃)	$S/N_{enh} = \frac{S/N_{out}}{S/N_{in}}$ (dB)	신호처리 매개변수	
		필터뱅크 간격(kHz)	필터의 대역폭(kHz)
1125	18.6	100	350
1150	12.7	120	350
1175	15.8	100	300
1200	9.5	120	350

IV. 결 론

본 논문에서는 최근에 발표된 PT 알고리즘을 원자력 발전소 1차계통의 중요 배관 재료인 스테인레스강의 탐상에 응용하여 초음파 수신신호를 개선시키는 방법을 연구하였다.

실험을 위하여, 중심주파수가 5 MHz인 초음파변환기를 사용하였으며, 시료로 스테인레스강(SUS-304)을 1125, 1150, 1175, 1200℃로 열처리하여 평균 결정립 크기가 각각 138, 160, 190, 312 μm 가 되도록 제작하였다.

실험을 통하여 얻은 각 데이터를 PT 알고리즘에 적용한 결과, 각각 1125, 1150, 1175, 1200℃로 열처리된 시료에 대해 개선된 S/N 비는 표 2 와 같이 각각 18.6, 12.7, 15.8, 9.5 dB 였다.

1125℃ 시료는 초음파 변환기와 결함의 거리가 가깝고 평균 결정립 크기가 작아 산란 진폭이 미약하여 최대의 S/N 비를 얻을 수 있었으며, 1150℃ 시료(평균 결정립 크기: 160 μm)보다 평균 결정립 크기가 큰 1175℃ 시료(평균 결정립 크기: 190 μm)에서 더 높은 S/N 비를 얻은 이유는 시료의 결함 위치와 초음파 변환기의 거리가 가깝고 보다 큰 인공 결함을 가지고 있기 때문이다. 또한 1200℃ 시료의 S/N 비가 가장 낮은 이유는 평균 결정립의 크기가 크고 초음파 변환기와 결함의 거리가 멀리 떨어져 있기 때문에 다중 산란 및 감쇄가 증가하였다.

따라서 초음파 변환기로부터 결함의 거리와, 결정립의 크기가 증가함에 따라 S/N 비가 감소함을 알 수 있다. 또한 신호 처리 매개변수의 적절한 선택이 본 연구의 매우 중요한 관점이라 할 수 있으며 이는 실제 용접 부위 같은 복잡한 구조에서는 지속적인 연구

가 필요하다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. J. R. Tomlinson, A. R. Wagg and M. J. Whittle. Ultrasonic Inspection of Austenitic Welds, March, 1978.
2. P. Karpur, "split spectrum processing: process modeling and evaluation of polarity thresholding algorithm for material noise reduction in ultrasonic NDE," Ph. D. Thesis, Drexel University, Philadelphia, PA, 1987.
3. N. M. Bilgutay and J. Saniie, "The effect of grain size on flaw visibility enhancement using split-spectrum processing," Mat. Eval., vol. 42, pp. 808-814, May 1984.
4. N. M. Bilgutay, "split spectrum processing for flaw-to-grain echo enhancement in ultrasonic detection," Ph. D. Thesis, Purdue University, West Lafayette, IN, TR-EE 81-20, June 1981.
5. N. M. Bilgutay, X. Li and J. Saniie, "Spectral analysis of randomly distributed scatterers for ultrasonic grain size estimation," Ultrasonics, vol. 27, pp. 19-25, Jan. 1989.
6. V. L. Newhouse, P. Karpur, J. L. Rose, and I. Amir, "A new technique for clutter reduction in ultrasonic imaging," in proc. 1985 IEEE ultrasonic symp. vol. 2, Oct. 1985, pp-998-1003.
7. L. G. Merkulov, "Absorption and diffusion scattering of ultrasonic waves in metals," (English transl.) sov. phys. tech. phys. 2, p. 953 (1957)
8. A. V. Oppenheim, and R. W. Schaffer, Digital Signal Processing, Prentice-Hall, Inc., Princeton, NJ, 1975.
9. J. Saniie, D. T. Nagle and Kevin D. Donohue, "Analysis of order statistic filters applied to ultrasonic flaw detection using split-spectrum processing," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr., vol. 38, no. 2, Mar. 1991.
10. P. M. Shanker, P. Karpur, V. L. Newhouse and J. L. Rose, "Split Spectrum Processing: Analysis of the polarity thresholding algorithm for improvement of signal-to-noise ratio and detectability in ultrasonic signals," on review for publication in IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.

▲구 길 모(Kil Mo Koo) 1952년 7월 15일생



1979년 2월 : 광운대학교 전자통신학과(공학사)
1983년 9월 : 경희대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
1991년 9월~현재 : 경희대학교 대학원 전자공학과 박사과정

1984년 10월~현재 : 원자력연구소 선임연구원

▲김 태 현(Tae Hyoun Kim) 1966년 3월 23일생



1992년 2월 : 경희대학교 전자공학과(공학사)
1994년 2월 : 경희대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
1994년 3월~현재 : 경희대학교 대학원 전자공학과 박사과정

▲고 대 식(Dae Sik Ko) 1959년 4월 24일생



1982년 2월 : 경희대학교 전자공학과(공학사)
1987년 9월 : 경희대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
1991년 2월 : 경희대학교 대학원 전자공학과(공학박사)

1989년 9월~현재 : 목원대학교 전자공학과 조교수

▲전 계 석(Kye Suk Jun)

현재 : 경희대학교 공과대학 전자공학과 교수