

SSP MPO 알고리즘을 이용한 초음파 결정립 잡음 억제에 관한 연구

A Study on Suppression of UT Grain Noise Using SSP MPO Algorithms

구 길 모*, 전 계 석**
(Kil Mo Koo*, Kye Suk Jun**)

요 약

원전의 1차 계통 건전성 확보를 위한 일환으로서 초음파 검사 방법은 매우 중요하다. 그러나, 초음파는 검사 대상체의 내부 구조 및 형상에 따라 검사의 제한을 받으므로 결정립이 큰 재료에서 후방 산란 잡음 즉 시 불변성(time invariant) 잡음이 발생한다. 이로 인하여 수신 신호는 낮은 신호 대 잡음비의 결과로 나타나게 된다. 주파수 대역 분할 방식(split spectrum processing: SSP) 기술은 이와 같은 잡음을 억제하는데 효율적이다. 그러나, 종래의 SSP 기술은 minimization, PT 알고리즘중 한 알고리즘만 적용하였으나 본 논문에서는 이 두 가지 알고리즘을 동시에 처리하는 MPO(minimization and polarity threshold) 알고리즘을 적용하고, 주파수 대 대역폭비가 일정한 FIR 여파기로서 새로운 constant-Q SSP를 수행하여 신호처리 시간을 단축하였다. 현장 검사 조건과 동일하게 종파와 횡파에도 일부 적용하였다. 한편, 이러한 새로운 SSP 기술을 적용할 수 있도록 초음파 탐상기를 설계 제작하였고, 시험편들의 준비는 원전 모재 대머시험편, 모재와 동일한 재질의 스테인레스 스틸 및 구리 시험편들이며, 이들 시험편으로 부터 초음파 신호를 수집하여 분 신호 처리를 적용한 결과 신호 대 잡음비가 향상됨을 알 수 있었다.

ABSTRACT

It is very important for ultrasonic test method to evaluate the integrity of the class I components in nuclear power plants. However, as the ultrasonic test is affected by internal structures and configurations of test materials, backscattering, that is, time invariant noise is generated in large grain size materials. Due to the above reason, the received signal results in low signal to noise(S/N) ratio. Split spectrum processing(SSP) technique is effective to suppress the grain noise. The conventional SSP technique, however, has been applied to unique algorithm. This paper shows that MPO(minimization and polarity threshold) algorithm which two algorithms are applied simultaneously, was utilized, the signal processing time was shorten by using the new constant-Q SSP with the FIR filter which frequency to bandwidth ratio is constant and the optimum parameters were analysed for the signal processing to longitudinal wave and shear wave with the same requirements of inspection on nuclear power plant site. Moreover, the new ultrasonic test instrument, the reference block of the same product form and material specification, stainless steel test specimens and copper test specimens were designed and fabricated for the application of new SSP technique. As the result of experimental test with new ultrasonic test instrument and test specimens, the signal to noise ratio was improved by applying the new SSP technique.

1. 서 론

원전의 1차 계통 배관은 오스테나이트계 스테인레스 강으로 구성되어 있다. 발전소의 가동년수가 증가함에 따라서 1차 배관 재료의 미세성 결함이 성장하게 되며, 대표

적인 결함으로는 intergranular stress corrosion cracking (IGSCC) 결함이 있다. 이런 미세한 crack성 결함은 ASME Code Section XI, App. VI 89 Edition 에서 요구한 초음파 검사 방법으로 오스테나이트계 스테인레스 강의 결함을 검출할 때 그 실효성이 문제점으로 제시되었다.[1]

초음파의 신호 해석은 재료 특성을 파악하는 비파괴 시험이나 의료 진단에서 매우 중요한 역할을 담당하고 있다. 그러나 대부분의 초음파 검사기술은 검사체의 산란자로부터 발생하는 간섭현상 때문에 제한을 받게 된다. 주파수의 영향에 따라서 A 모드 신호나 B 모드 영상에서 목표물의 신호는 재료의 고유 간섭 신호 때문에 구

* 한국원자력연구소 응용연구그룹 비파괴평가팀
Nondestructive Evaluation Team, Korea Atomic Energy Research Institute

** 경희대학교
Kyung Hee University

접수일자: 1996년 9월 23일

분하기가 어렵게 된다. 따라서 이러한 간섭성 잡음인 결정립잡음을 억제하기 위한 기존의 신호처리 기술로서는 공간 평균 처리 방식[2], 주파수 평균 처리방식[3], 디콘볼루션 여파기법[4], 적응 여파 기법[5], 디코릴레이션 처리법[6], 다중 대역 여파기를 이용한 주파수 분할 방식[7]들이 개발되었으며, 최근에 발표된 기술로는 주파수 대역 분할방식인 SSP가 있다.[8-14]

새로운 constant-Q SSP 기술은 여러 개의 다른 주파수 대역에 걸쳐 수신된 신호 대신에 광대역 스펙트럼을 여러 개의 소대역으로 주파수 분할 처리한다. 본 SSP기술의 특징은 주파수 대 대역폭의 비가 일정하고 중심 주파수가 다른 가우시안 대역 여파기로서 수신된 신호의 스펙트럼을 여러개의 소대역으로 분할한다. 분할된 주파수 대역은 역 푸리에 변환하여 시간영역으로 변환한다. 변환된 시간영역의 구성원들은 최소 진폭선택 알고리즘과 극성치 확률분석 알고리즘을 동시에 처리하는 MPO 알고리즘을 적용하였으며, SSP 분할 처리 시간을 단축할 수 있었다. 그리고 이들 알고리즘들은 종파에만 적용하였으나 본 논문에서는 종파와 대비시험편에는 횡파를 사용하여 주파수 대역 분할 방식의 수학적인 모델을 통하여 알고리즘들의 특성을 파악하고, 알고리즘의 최적 파라미터 선택 방법을 분석하였다.

본 실험을 수행하기 위해 특별히 PC 베이스 초음파 탐상기를 설계 제작하여 신호의 수집과 분석 및 알고리즘들을 적용하여 개선된 신호 대 잡음비를 얻을 수 있었다.

본 실험에서 사용된 시험편은 구리 및 스텐레스 강 시험편 뿐만 아니라 Steam Generator Vessel 모재시험편, Reactor Coolant Line의 KAERI ASTM SA 315 GR.CFEA 31" NOM wall heat No. 25615-3 대비시험편에 적용하여 개선된 신호 대 잡음비를 얻을 수 있었다.

II. 본 론

II-1. FIR 여파기를 이용한 Constant-Q SSP 분할방식

주파수 영역에서 일정한 소대역폭 분할방식[8]과 달리 FIR 여파기를 이용한 시간 영역의 분할방식은 주파수 영역의 굵이 시간 영역은 반분루션이므로 여파기의 주파수 응답과 디스크리트 푸리에 변환된 수신 신호와 굵에 개뉘을 시간 영역 반분루션으로서 처리한다.

$$h_f(t) = 2 \sqrt{\pi} b e^{-\pi b t^2} \cos(2\pi f_j t) \tag{1}$$

식(1)의 파형의 모양은 각각의 일정한 대역 폭과 동일한 공간 주파수 분할 방식의 결과에 대한 시간 영역에서의 입력 응답을 나타내었다. 시간 영역 파형의 포락선은 중앙 주파수 f_j 에 독립적이며 식(2)와 같다.

$$e(t) = 2 \sqrt{\pi} b e^{-\pi b t^2} \tag{2}$$

이들 시간 영역 파형 들의 포락선은 진폭이 동일하게 사서히 감소하게 되며, 파형의 유향 구간의 범위는 $-T_0$ 에서 T_0 로 한정한다. 그리고 시간 영역에서 수신 신호와 필터 합수와 반분루션은 식(3)으로 간단히 표현한다.

$$r_f(t) = \int_{-T_0}^{T_0} r(t-\tau) h_f(\tau) d\tau \tag{3}$$

수신된 아날로그 신호는 샘플링 주기 T_s 로 디지털신호로 변화되며, 식(4)은 디스크리트 반분루션 식이다.

$$r_f(nT_s) = \sum_{i=-m}^m 2 \sqrt{\pi} b T_s e^{-\pi b (n-i)T_s^2} \cos(2\pi f_j i T_s) r(n-i)T_s \tag{4}$$

여기에서 $m = T_0/T_s$ 이다. 식(4)은 FIR 여파기 특성 함수이며, 샘플링 전체 시간 nT_s 이내에 샘플링된 출력 신호는 입력 신호의 샘플링범위인 $-m$ 에서 m 까지의 유향 합이다. 본 여파기의 처리 속도는 $m+1$ 의 샘플링 지연후 처리되며, 식(4)을 $m+1$ 샘플링 지연 시간 식으로 바꾸어 식(5)으로 놓을 수 있다.

$$r_f(nT_s) = \sum_{i=1}^{2m+1} a_f(iT_s) r(n-i)T_s \tag{5}$$

여기에서 출력 신호는 입력 신호 샘플의 $2m+1$ 합으로 되며, $2m+1$ FIR 여파기 계수 $a_f(iT_s)$ 는 식(6)으로 나타낸다.

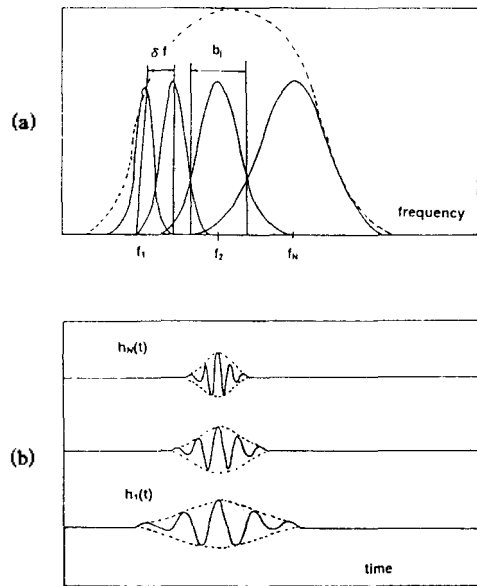


그림 1. SSP 처리를 위한 수신신호의 일정한 주파수 대 대역폭 비 분할방식의 가우시안 여파기 뱁크. (a) 여파기 응답수; (b) 여파기 시간 임펄스 응답

Fig 1. Bank of Gaussian filters of constant frequency to bandwidth ratio used in the decomposition of the received signal for SSP. (a) Frequency response of the filters; (b) time impulse response of the filters

$$a_j(iT_s) = 2\sqrt{\pi} bT_s e^{-i\pi k_i - m \cdot 0T_s} \cos(2\pi f_j(i-m-1)T_s) \quad (6)$$

이들 계수중 시간 영역 샘플링수 i 가 $m+1$ 일 때 대칭점은 중앙 위치가 되며, FIR 여파기는 중앙 주파수 f_j 에 영향을 받지 않고 일정한 위상 지연 $(m+1)T_s$ 값을 갖는다. SSP 처리를 수행함에 있어서 위상 지연은 중앙 주파수에 영향을 받지 않는 것이 선행 조건이 되어야 하는데 그 이유는 최적알고리즘들의 출력은 동일한 시점에서 nT_s 범위를 가지는 협대역 여파 신호의 합수이기 때문이다. 그림 1에서는 여파기의 중앙 주파수 대 대역 폭의 비가 일정할 경우 이러한 조건들이 만족한다. 여파된 파형들의 포락선은 주파수가 증가함에 따라서 감소하며, 이것은 직접 시간 영역 디스크리트 콘볼루션을 사용하여 소프트웨어 방법으로 처리하여 보다 빠른 처리가 가능하다.

II-2. SSP 알고리즘

1. 자동 최소진폭 선택 알고리즘

최소 진폭 선택 알고리즘은 탐촉자의 광대역 수신신호를 m 개로 소대역으로 여파하고 정규화하고 자동한 신호들을 각각 시간 영역의 범위에서 일정한 거리에 해당하는 m 개의 신호 진폭들을 비교하여 최저값을 선택하는 알고리즘이다. 최소 진폭 선택 알고리즘의 출력은 식(7)으로 정의한다.

$$y(t) = \min \{ r_j(t) | j=1, 2, \dots, m \} = r_{\min}(t) \quad (7)$$

식(7)에서 시간 t 와 거리 x 의 관계식은 $x=ct/2$ 이고, 여기에서 c 는 음속도이다. 또한 최종 처리된 데이터 값은 신호 진폭 비교를 위해서 양의 값을 나타낸다. 결정립 반사 신호는 결함 반사신호 보다 주파수 변화에 대한 감도가 예민하다. 그 이유는 결정립 반사신호는 많은 불확실성 목표물로부터 간섭제된 반사신호의 합으로 구성 되어있음으로 이들 반사신호의 진폭과 위상은 상대적으로 단일 결함의 진폭 보다 주파수에 의존하게 된다. 그러므로 이러한 현상이 발생한 때 상기의 알고리즘을 적용하면 결정립 신호를 억제하는 효과를 얻게 된다.

2. PT 알고리즘

본 절에서는 PT 알고리즘에 대하여 이론적 분석과 수학적인 표현을 위해서 초음파 신호를 확률 밀도 함수로서 모델링 한다. 이 밀도 함수를 통하여 PT 알고리즘을 전개할 수 있다.

A. 신호의 수학적 모델링

그림 2에 나타낸 전형적인 초음파 신호를 수식으로 표현하면 식(8)과 같다.

$$X(\tau_i) = mX(\tau_i) + n(\tau_i) \quad \tau_0 \leq \tau_i \leq \tau_c \quad (8)$$

여기에서 $X(\tau_i)$ 는 시연시간 τ_i 에서의 신호진폭, $mX(\tau_i)$ 는 시연시간 τ_i 에서 평균값, $n(\tau_i)$ 는 지연시간 τ_i 에서 결정립 잡음이다. 그림 2는 원심주조 스테레스 강 시험편으로부터 동일 축에서 수신된 신호이다. 이들 신호들은 결정립 잡음에 포함된 두 개의 목표물 신호를 나타낸다. 평균값이 0이 되는 비우적인 목표물 신호 결정립잡음의 모델링은 통계적 처리된다. 그러나 목표물이 없을 경우($mX(\tau_i)=0$)에 랜덤 변수의 집합은 주어진 지연시간내에 동시 다중채널 또는 연속의 단일 채널에서 잡음의 통계적으로 σ_n^2 의 변수 및 평균값이 0을 갖게 된다.

그림 2의 τ_1, τ_2 는 목표물 신호가 없을 경우와 있을 경우의 각각 지연 시간이며, 지연시간 τ_1 에서 신호는 $X(\tau_1) = n(\tau_1)$ 이 되며, 이때 평균값은 0이고 분산은 σ_n^2 이 된다. 그러나 지연시간 τ_2 에서 목표물 신호가 있을 경우에 신호는 $X(\tau_2) = mX(\tau_2) + n(\tau_2)$ 로 표현한다. 그래서 동시에 각 분할된 채널의 τ_2 에서 확률변수 집합의 평균은 $mX(\tau_2)$ 가 된다. 또한 τ_2 에서 변수는 부가된 잡음도 포함 되어 σ_n^2 가 된다. 그림 2에서 단일 채널로 가정하면 RF 신호의 평균은 0이 된다. 잡음신호 $n(\tau_i)$ 을 n 으로 치환하면 식(9)으로 놓을 수 있다.

$$X(\tau_i) = mX(\tau_i) + n \quad \tau_0 \leq \tau_i \leq \tau_b \quad (9a)$$

$$X(\tau_i) = n \quad elsewhere \quad (9b)$$

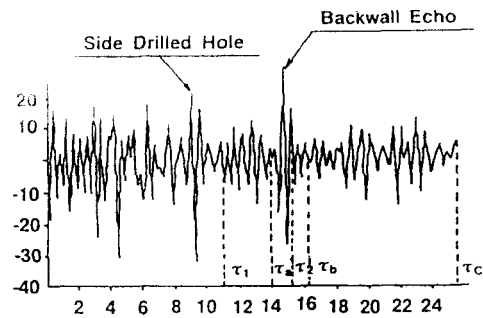


그림 2. 축변공 인공결함을 갖는 스테레스 강 시험편으로부터 초음파 신호

Fig 2. Ultrasonic signal from stainless steel specimen

B. PT 알고리즘 모델링

PT 알고리즘의 이론적 분석을 위하여 수신신호는 N 대역 여파기를 사용하여 주파수 분할되며, N 개의 주파수 분할은 주파수 영역 샘플링 이론으로 설명할 수 있다. $w_j(\tau_i), j=1, 2, \dots, N$ 은 $X(t) = mX(t) + n$ 신호의 스펙트럼을 분할로서 얻게 되며, τ_i 에서 스펙트럼 분할 구성원들이다. $t = \tau_i$ 에서 목표물이 없다면 $mX(t)$ 는 0이고, 목표물이 존재한다면 0이 아니며, n 은 평균값이 0이고 분산 σ_n^2 의 가우시안 분포 랜덤 잡음이다. 스펙트럼 분할 처리된 결과는

식(10)과 같다.

$$w_j(\tau_i) = \mu(\tau_i) + n_j^* \quad j = 1, \dots, N \quad (10)$$

여기에서 $\mu(\tau_i) = m(\tau_i)/N$ 이고, n_j^* 는 평균값이 0이고 분산이 $\sigma_j^{*2} = \sigma_j^2/N$ 의 가우시안 분포 랜덤잡음이다. 수식적으로 간단히 하기 위해서 $n_j^*, j = 1, \dots, N$ 의 통계식은 평균값이 0이고 분산이 σ^{*2} 의 상호 독립적 가우시안 분포로 가정하면 $\sigma_1^{*2} = \sigma_2^{*2} = \sigma_3^{*2} = \dots = \sigma_N^{*2} = \sigma^{*2}$ 로 놓을 수 있다. 그래서 식(10)은 식(11)으로 간단히 표현될 수 있다.

$$w_j(\tau_i) = \mu(\tau_i) + n^* \quad j = 1, \dots, N \quad (11a)$$

(목표물 신호가 존재할 때)

$$w_j(\tau_i) = n^* \quad j = 1, \dots, N \quad (11b)$$

(목표물 신호가 존재하지 않을 때)

식(11a)과 식(11b)은 주파수 영역의 분할된 신호이며, 이때 $w_j(\tau_i)$ 는 결정된 경계에서 발생하는 간섭패턴이 각각 다르게 되지만 목표물은 분산 성질이 없으며, 탐촉자에 의해서 전송된 주파수 범위에서 독립적인 주파수 특성을 갖는다. $w_j(\tau_i)$ 의 n^* 와 또다른 $w_k(\tau_i)$ 의 n^* 는 독립적이므로 모든 $w_j(\tau_i), j = 1, \dots, N$ 는 N 의 함수에 따라서 양과 음수 이든 간에 매우 작은 확률값을 갖게 된다.

따라서 임의의 지연 시간에서 목표물이 존재한다면 모든 원도 안에서 동일한 극점으로 나타나지만 목표물이 존재하지 않을 경우는 극점의 변화를 나타낸다. 이러한 성질을 이용하여 PT 알고리즘을 수식적으로 표현하면 식(12)와 같다.

$$\begin{aligned} Z(\tau_i) &= X(\tau_i) \quad \text{if all } w_j(\tau_i) > 0, j = 1, \dots, N \\ &= X(\tau_i) \quad \text{if all } w_j(\tau_i) < 0, j = 1, \dots, N \\ &= 0 \quad \text{otherwise} \end{aligned} \quad (12)$$

$X(\tau_i)$ 는 스펙트럼 분할 전 τ_i 에서 처리된 신호 진폭이고, $w_j(\tau_i), j = 1, \dots, N$ 는 τ_i 에 해당하는 스펙트럼 분할 구성원이다.

C. PT의 밀도함수

식(12)에서 출력 Z 는 입력 진폭의 두 경우로서 조건확률 밀도 함수로 표현하면 식(13)과 같다.

$$f_z(z/x) = P(Z=x) \delta(z-x) + P(Z=0) \delta(z) \quad (13)$$

여기에서 $P(Z=0)$ 는 $Z=x$ 될 확률이며, $P(Z=x)$ 는 $Z=0$ 될 확률이고, $\delta(z-x)$ 와 $\delta(z)$ 는 각각 $Z=x$ 와 $Z=0$ 일 때의 델타함수이다. X 와 w_j 는 식(9)과 식(11)에서 가우시안 통계로서 가정하면 밀도함수는 식(14a)와 식(14b)으로 표현된다.

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_n} \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma_n^2}\right) \quad (14a)$$

$$f_{w_j}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma^*} \exp\left(-\frac{(w_j-\mu)^2}{2\sigma^{*2}}\right) \quad (14b)$$

$f_x(x)$ 와 $f_{w_j}(x)$ 는 X 와 스펙트럼 분할 구성원 w_j 의 밀도함수이고 이때 $\mu = m/n$ 이고 $\sigma^{*2} = \sigma_n^2/N$ 이며, μ 는 τ_i 에서 목표물의 신호가 없을 경우 0이 된다. 식(13)으로부터 N 주파수 분할 신호로부터 임의의 주어진 지연시간 τ_i 에서 $P(Z=x)$ 와 $P(Z=0)$ 일 경우의 확률을 표현하면 다음과 같다.

$$P(Z=x) = [1 - P_{w_j}(w_j > 0)]^N + [P_{w_j}(w_j > 0)]^N \quad (15a)$$

$$P(Z=0) = 1 - P(Z=x) \quad (15b)$$

여기에서 $P_{w_j}(w_j > 0)$ 는 τ_i 에서 j 번째 스펙트럼 분할 구성원이 0 보다 클 확률이다. 식(14a)과 식(14b)을 사용하면 이들 확률은 식(16)과 같다.

$$\begin{aligned} P(Z=x) &= \frac{[1 - \text{erf}\left(\frac{m}{\sqrt{2N} \sigma_n}\right)]^N + [\text{erf}\left(\frac{m}{\sqrt{2N} \sigma_n}\right)]^N}{2^N} \\ &= A' \end{aligned} \quad (16a)$$

$$P(Z=0) = 1 - A' = B' \quad (16b)$$

여기에서 $\text{erf}(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^y \exp(-t^2) dt$ 가 된다.

그리고 식(16)을 이용한 z 의 조건확률 밀도함수는 식(17)으로 된다.

$$f_z(z|x) = A' \delta(z-x) + B' \delta(z) \quad (17)$$

공동 밀도 함수(joint density function) $f(z, x)$ 는 식(26)과 같다.

$$\begin{aligned} f(z, x) &= f(z|x) f(x) \\ &= [A' \delta(z-x) + B' \delta(z)] \cdot \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_n} \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma_n^2}\right) \right\} \end{aligned} \quad (18)$$

한계 밀도 함수(marginal density function)는 PT 알고리즘의 출력 Z 로서 다음 식들로 표현된다.

$$f(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(z, x) dx \quad (19)$$

$$f(z) = \frac{A'}{\sqrt{2\pi} \sigma_n} \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma_n^2}\right) + B' \delta(z) \quad (20)$$

그러므로

$$E[Z] = mA' |_{m=0} \quad (21a)$$

$$\sigma_z^2 = A' |_{m=0} (m^2 + \sigma_n^2) - (A' |_{m=0} m)^2 \quad (21b)$$

복표본이 없을 경우 $m=0$ 일 때, (21a)와 (21b)는 식 (22a)와 식(22b)으로 간단히 얻을 수 있다.

$$E[Z] = 0 \quad (22a)$$

$$\sigma_z^2 = A' |_{m=0} \sigma_n^2 \quad (22b)$$

III. 실험 절차

III-1. 시험편 준비

본 실험에서 시험편 준비는 두 가지 종류로 크게 구별하면, 첫째는 원전보재와 동일한 Steam Generator Vessel 보재시험편, Reactor Coolant Line의 KAERI ASTM SA 315 GR.CFEA 31" NOM wall heat No. 25615-3 대비시험편과 두 번째로는 원전보재와 동일 재료인 스테인레스 봉과 구리 시험편을 준비하였다. 사진 1a, 1b, 1c, 1d는 각각 시험편들이다. 본 시험편들의 각기에 대한 고체 내에 결정립의 모양, 탄성 계수, 밀도, 속도와 같은 물리적인 파라메타 값이 일정하다고 가정할 때 결정립 크기의 변화에 대한 산란신호를 얻게 된다. 고체 내의 상기의 성질을 가정하면 결정립 크기의 변화는 산란영역 구분이 가능하다. 본 시험편중 스테인레스 강 시험편은 직경이 2"형(type 304)이고 다양한 결정립 크기를 얻기 위해서 열처리하였다. 열처리 전 스테인레스 강의 평균 결정립 크기는 약 28 μ m이다. 열처리 온도 범위는 1100 $^{\circ}$ C와 1200 $^{\circ}$ C 사이의 온도에서는 수배의 결정립 크기가 변화함을 알 수 있었다. 열처리 시간은 약 16시간 정도 장시간 열처리하였으며, 열처리 후 즉시 물 속에 담금질을 하였다. 열처리 후 시험편들에 대한 금속 조직 사진은 사진 2와 같다. 열처리한 시험편의 결정립크기는 인터셉트 방법으로 분석하였고, 결정립 크기는 1125 $^{\circ}$ C 열처리된 시험편에서 69 μ m, 1150 $^{\circ}$ C 열처리된 시험편에서 80 μ m 크기를 얻었다. 여기에서 결정립 크기는 평균 결정립 경계 공간이다. 평균 결정립 경계 공간과 평균 결정립 직경의 관계식은 $\bar{D} = kL$ 와 같고, 여기에서 D 는 평균 결정립 직경, L 는 평균 결정립 경계 공간, k 는 결정립 모양에 따라서 약 1.5에서 2.25 사이의 비례상수를 갖는다. 때로는 결정립 모양을 알 수 있더라도 평균 결정립 직경의 값이 실제와 다른 환경일 경우에 상가식은 적용성이 떨어진다. 그래서 평균 결정립 경계 공간 L 을 결정립 크기로 사용한다. 그래서 평균 결정립 직경은 평균 결정립 경계 공간에 비교하면 약 두배정도가 된다. 약 두배정도의 k 를 적용하면, 열처리 전시험편, 1125 $^{\circ}$ C 열처리한 시험편, 1200 $^{\circ}$ C 열처리한 시험편의 평균 결정립 직경은 각각 56, 160, 312 μ m이 된다.

결정립 신호 측정은 3 dB 대역 폭이 약 1.5 MHz를 갖

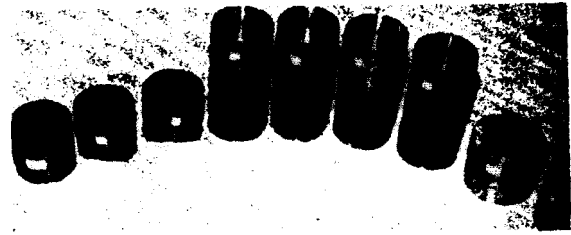


사진 1(a) 스테인레스 강 시험편
Photo 1(a) Stainless steel specimens



사진 1(b) 구리 시험편
Photo 1(b) Copper specimens

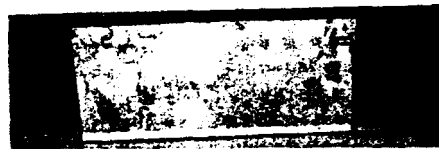


사진 1(c) Steam generator용기 대비시험편
Photo 1(c) Reference block of steam generator vessel



사진 1(d) Reactor coolant line 대비시험편
Photo 1(d) Reference block of reactor coolant line

고 중심주 파수는 5 MHz인 K-B Aerotech사 Gamma 타입 탐촉자와 사각 웨지를 사용하여 횡파를 수집하였다. 본 탐촉자는 침투 깊이와 감도가 좋으며, 탐촉자 야기 펄스는 수 nanoseconds 펄스 폭을 갖는다.

반향된 반사신호는 광대역 RF 수신단에서 진폭한다. 펄스 반복율은 초당 10회를 반복한다. 게이트 범위는 신호 지리급 위해서 반향된 신호를 부분 구역 분할을 한다. 측정 데이터는 AD 변환기에서 50 MHz 샘플링 주파수를 갖는다. 각 실험 데이터는 1024 포인트이고 20.24 μ s 시간

이다. 수신 신호의 진폭에 잡음 비를 개선하기 위해서 광관을 취한다. 탐촉자는 접촉 방법을 사용하며, 이때 접촉 매질은 점성윤이 좋은 젤리를 사용하였다.

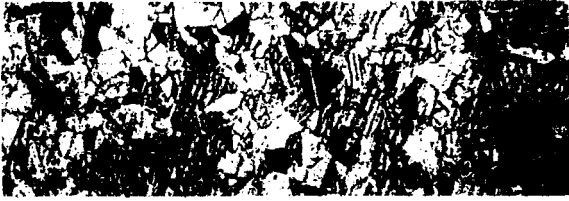


사진 2(a)



사진 2(b)

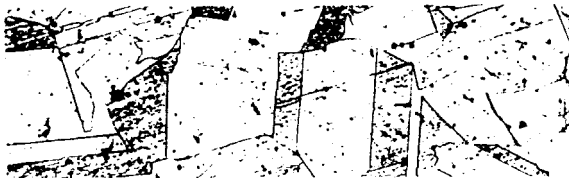


사진 2(c)

사진 2. 스테인레스 강 시험편의 조직 사진(100배 확대) (a)열처리 전 시험편 (b)1125°C로 열처리된 시험편 (c)1200°C로 열처리된 시험편

Photo 2. Micrographic results of stainless steel specimens. (a)raw material;(b)specimen heat treated 1125°C;(c)specimen heat treated 1200°C

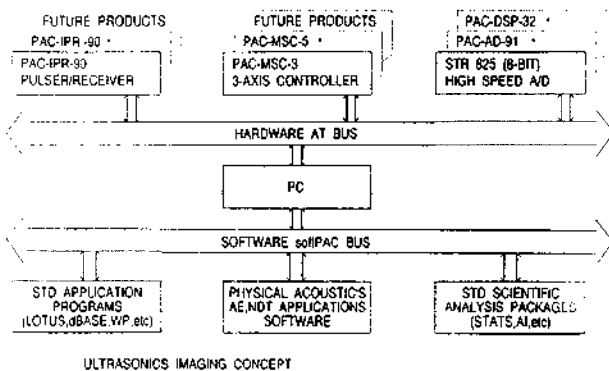


그림 3. PC 베이스 초음파 탐상기의 인터페이스 및 버스
Fig 3. Interface and bus for PC base ultrasonic detector

III-2. PC 베이스 초음파 데이터 수집과 신호처리 시스템
본 실험을 위해서 PC 베이스 초음파 데이터 수집장치와 신호처리 시스템을 설계 제작하였으며, 시스템의 주요 부분은 AD 변환기 보드 및 초음파 송수신 발생장치 보드이다. 본 탐상기의 개괄적인 하드웨어와 소프트웨어의 인터페이스 및 버스의 구조는 그림 3과 같다. 이때 소프트웨어는 DOS 환경에서 동작하며, AD board와 UT test board는 컴퓨터 docking system에 설치하였다.

IV. 신호처리 절차 및 결과

IV-1. 신호 처리 적응 및 순서

본 장비를 이용한 각각의 시험편으로부터 신호수집하고 검사 조건에 따른 주파수 분할방식인 SSP 처리 적용한다. 실험 시험편의 종류 및 특성 매개변수인 중심주파수, 대역폭, 여파기의 수, 소대역폭등에 의한 출력 신호를 데이터 베이스 하였다. 사각탐촉자를 사용하여 횡파 신호를 수집하기 위해서 검사용 대비 시험편에 적용하였고, 이때 이들 신호들은 각각 개선된 신호 대 잡음 비를 얻을 수 있었다. 그리고 일반적인 SSP 분할방식의 신호처리를 위한 흐름도는 그림 4와 같다.

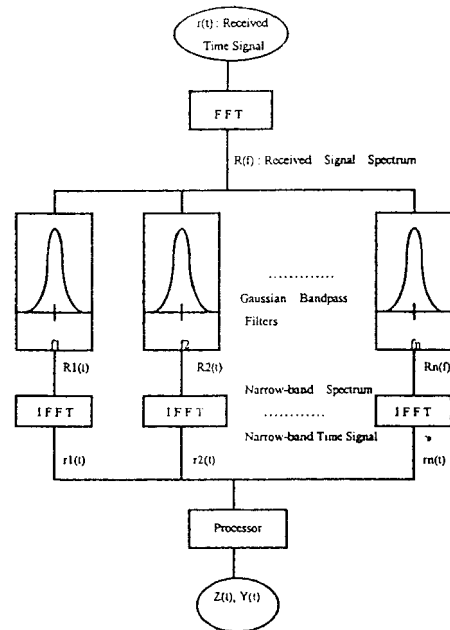


그림 4. SSP 분할방식의 신호 처리 흐름 개략도
Fig 4. Flow chart for split spectrum processing

IV-2. 실험 결과

1. 결함 대 결장립 신호의 비 산출

5 MHz의 광대역 탐촉자를 사용하여 시험편 측면 공의 결함과 산란 잡음을 동시에 잡는다. 이 때 신호 대 잡음 비를 구하는 식(23)은 다음과 같다.

$$SNR = \frac{\text{결함 신호의 최대 Peak to Peak 진폭}}{\text{결정립신호의 최대 Peak to Peak 진폭}} \quad (23)$$

2. 신호 처리 결과

출력 신호는 평균 신호 처리하였고, 이 때 얻은 개선된 값을 표 1에 기록한 결정립 신호의 비를 식별 할 수 있게 따라 정리하였다. 그림 5, 6, 7, 8에서 구리 및 스테레스 강 시험편, cladged steam generator 시험편, reactor coolant 모세 시험편에 대하여 신호 처리했을 때의 결과들이다. 각각의 모든 시험편에 대하여 공통적인 사실은 모든 목표물의 신호가 개선됨을 알 수 있었다. 이때 기존의 SSP 분할 방식과 비교하여 매개변수 Q=2 인 경우 가우시안 여파기의 수가 20개에서 16개로 줄이므로 약 20% 처리 시간을 단축 할 수 있었다.

그림 5는 구리시험 편에서 얻은 신호로 Rayleigh region 산란 조건이었고, 신호 처리 매개 변수인 Q 값이 2 에서 최종 결함 내 결정립의 비는 약 3 배의 개선된 값을 얻을 수 있었다. 이를 개선 비는 평균 결정립 크기가 작으므로 산란적 신호의 진폭이 미약하므로 최대의 신호 개선을 얻을 수 있었다고 판단된다.

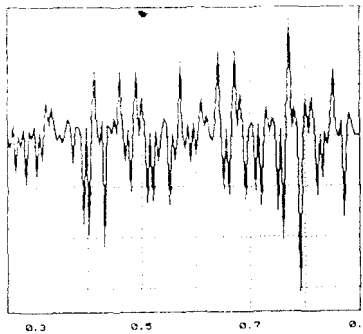


그림 5(a). 구리 시험편의 시간영역 Raw RF 신호
Fig 5(a). Raw RF signal of time domain from copper specimen

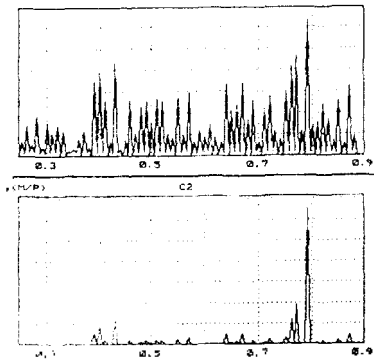


그림 5(b). 구리시험의 신호처리 되지않은 raw video signal(위에 그림)과 신호처리된 video signal(아래 그림)
Fig 5(b). Raw signal(upper) and processed signal(down) from copper specimen

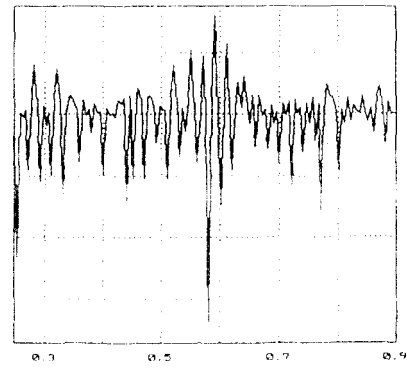


그림 6(a). 스테레스 강 시험편의 시간영역 Raw RF 신호
Fig 6(a). Raw RF signal of time domain from stainless steel specimen

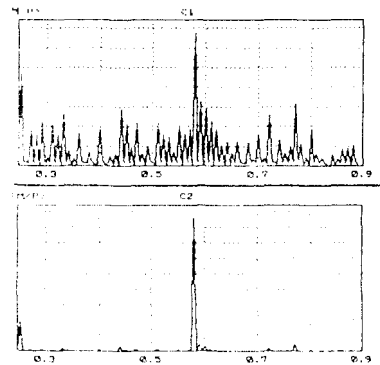


그림 6(b). 스테레스 강 시험편의 신호처리 되지않은 raw video signal(위에 그림)과 신호처리된 video signal(아래 그림)
Fig 6(b). Raw signal(upper) and processed signal(down) from stainless steel specimen

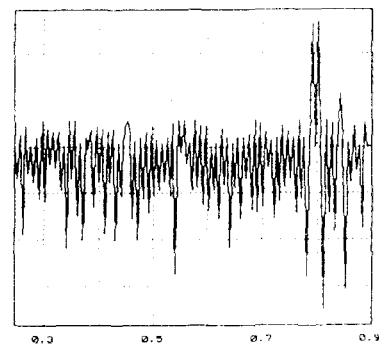


그림 7(a). S/G 대비시험편의 시간영역 Raw RF 신호
Fig 7(a). Raw RF signal of time domain from reference block for S/G cladding material

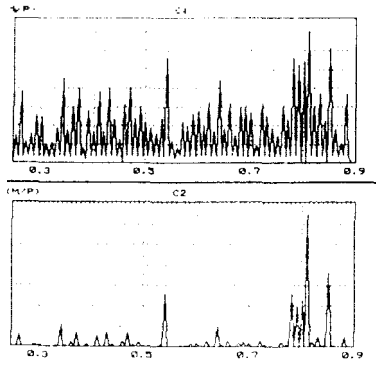


그림 7(b). S/G 대비시험편의 신호처리 되지않은 raw video signal(위에 그림)과 신호처리된 video signal(아래그림)
Fig 7(b). Raw signal(upper) and processed signal(down) from reference block for S/G cladding material

그림 6은 SS 시험편에서 얻은 신호로 Stochastic 영역 조건이었고, 신호 처리 매개변수인 Q 값이 2에서 최종 결함 대 결정립의 비는 3.2 배의 개선된 값을 얻을 수 있었다.

그림 7은 S/G cladding 시험편에서 얻은 신호로 Stochastic region 산란 조건이었고, 신호 처리 매개변수인 Q 값이 2에서 최종 결함 대 결정립의 비는 약 1.6 배의 개선된 값을 얻을 수 있었다.

그림 8은 reactor coolant line의 모재 시험편에서 얻은 신호로 신호처리 매개변수인 Q 값이 2에서 최종 결함 대 결정립의 비는 4.2배의 S/N 비를 얻을 수 있었다. 여기에서는 평균 결정립이 크고, 탐촉자와 결함간 거리가 먼 등 복합적인 원인으로 감쇠가 증가하였고, 또한 산란 신호의 진폭이 상대적으로 증가하였다.

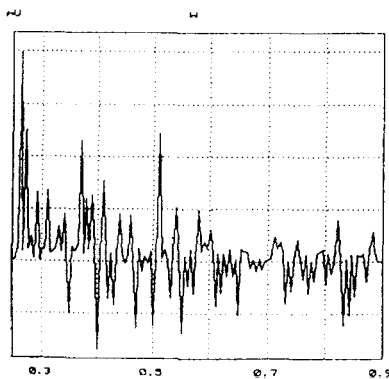


그림 8(a). RC line 대비시험편의 시간영역 Raw RF 신호
Fig 8(a). Raw RF signal of time domain from reference block for RC line material

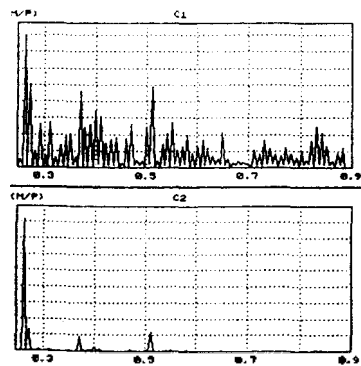


그림 8(b). RC line material 대비시험의 신호처리 되지않은 raw video signal(위에 그림)과 신호처리된 video signal(아래그림)
Fig 8(b). Raw signal(upper) and processed signal(down) from reference block for RC line material

표 1. 4종류 시험편의 최종 데이터

Table 1. Data form four different samples

시험/항목	산란 조건	F/G _{enh} =	
		F/G _{in}	F/G _{out}
		MPO알고리즘	
SS 시험편	Rayleigh Region	3.2	Q = 2
Cu 시험편	Stochastic Region	3.48	Q = 2
Cladded S/G 시험편	None	1.6	Q = 2
R.C Line	None	4.2	Q = 2

V. 결 론

원자력 발전소에서는 가동전, 중검사시에 리액터 압력 용기 및 1차 배관 재료인 스테인레스강에 대하여 초음파 검사를 수행하고 있으나, 검사재료의 결정립 크기 때문에 발생하는 초음파의 감쇠 현상과 산란에 의한 결정립 잡음으로 인하여 실제 결함신호의 구분이 매우 어려운 실정이다. 따라서 본 논문에서는 이러한 잡음신호로부터 결함신호를 구분하여 검출 능력을 향상시키기 위하여 신호 처리 기법인 두 개의 알고리즘을 동시에 처리하는 MPO(minimization and polarity threshold) 알고리즘을 적용하였고, 주파수 대 대역폭비가 일정한 FIR 여파기로서 새로운 constant-Q SSP를 수행하여 신호처리 시간을 약 20% 단축하였다. 본 실험에서는 SSP기술을 적용하기 위해서 초음파 탐상기를 설계 제작하였고, 시험편들은 원전 모재 대비시험편, 모재와 동일한 재료의 스테인레스 강 및 구리 시험편등으로 구분하여 준비하였으며, 각 시험편의 재료 특성에 따라서 초음파 원 신호를 데이터 베이스 하였다. 본 실험에서 SSP은 랜덤한 잡음 뿐만 아니라, 큰 결함 신호와 결정립 잡음이 합성된 시간 불변성

잡음에 대해서 결함 신호만을 추출이 가능하여 재료 내부에서 일어나는 주파수 종속적인 구조적 잡음과 결함과 주파수 특성 분석이 보다 효과적이었다. 또한 원전예 검사에 사용되는 사각 빔 탐촉자를 사용하여 검사 현장 조건과 동일하게 종파와 횡파의 일부를 적용하였으며, 신호처리를 위한 최적의 파라미터 값을 분석하였으며, 신호처리결과는 약 3배의 개선비를 얻을 수 있었다.

초음파 검사 수행시 발생되는 산란잡음의 특성에 적합한 실험 시험편을 열처리하여 인공 결함을 가공하였다. 또한 PC Base 초음파 탐상기를 설계 제작하였으며, 시험편으로부터 얻은 최적 조건으로 실제 원전의 검사 시험편에 적용하여 가능성을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. US. NRC Bulletin 88-08 report
2. C. B. Burckgard, "Speckle in ultrasound B scans", *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*, vol. SU-25, pp. 1-6, Jan. 1978.
3. J. G. Abbott and F. L. Thurstone, "Acoustic speckle", *Ultrasonic Imaging*, vol. 1, pp. 303-327, 1979.
4. S. W. Smith, R. F. Wagner, J. M. Sandrik, and H. Loez, "Low contrast detectability and contrast/detail analysis in medical ultra-sound", *IEEE Trans. Sonics Ultrason*, vol. 30, no. 3, pp. 164-173, May 1983.
5. V. L. Newhouse, N. M. Bilgutay, J. Sanjie, and E. S. Furgasin, "Flaw-to-grain echo enhancement by split-spectrum processing", *Ultrasonics*, vol. 20, pp. 59-68, Mar. 1982.
6. P. A. Maginin, O. T. von Ramm, and F. L. Thurstone, "Frequency compounding for speckle contrast reduction in phased array images", *Ultrason. Imaging*, vol. 4, pp. 267-281, 1982.
7. R. J. Dickinson, "Processing of ultrasound imaged to reduce speckle", in *Proc. IEEE Ultrason. Symp.*, Oct. 1982.
8. J. C. Bamber and C. Daft, "Adaptive filtering for reduction of speckle in ultrasonic pulse-echo images", *Ultrason.*, vol. 24, pp. 41-44, Jan. 1986.
9. P. M. Shankar, "Speckle reduction in ultrasonic B scans using weighted averaging in spatial compounding", *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Frequency Contr.*, vol. UFFC-33, pp. 754-758, 1986.
10. V. L. Newhouse, N. M. Bilgutay, J. Sanjie, and E. S. Furgason, "Flaw-to-grain echo enhancement", *Ultrason. Int.*, Graz, Austria, pp. 152-156, 1979.
11. I. Amir, N. M. Bilgutay, and V. L. Newhouse, "Analysis and comparison of some frequency compounding algorithms for the reduction of ultrasonic clutter", *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.*, vol. UFFC-33, vol. 4, pp. 402-411, July 1986.
12. M. S. Patterson and F. S. Foster, "The improvement and quantitative assessment of B-mode imaged produced by an annular array/cone hybrid", *Ultrason. Imaging*, vol. 5, pp. 195-213, 1983.
13. A. T. Kerr, M. S. Patterson, F. S. Foster, and L. F. vander-Wal, "Speckle reduction in pulse echo images by using phase insensitive summation and multiplicative techniques", in *Acoustical Imaging, Proc. 14th Int. Symp.*, Apr. 1985.
14. M. O. Donnell, "Phase-insensitive pulse-echo imaging", *Ultrason. Imaging*, vol. 4, no. 4, pp. 321-325, Oct. 1982.
15. 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.

▲ 구 길 모 (Kil Mo Koo): 제 14권 1호 참조

▲ 전 계 석 (Kye Suk Jun): 제 14권 1호 참조