

비대역폭 분할 방법을 이용한 초음파 신호의 S/N 비 개선

(Signal-to-noise ratio enhancement of ultrasonic signal by using constant frequency-to-bandwidth ratio decomposition method)

金太現*, 具吉謨*, 高大植**, 田啓石*

(Tae Hyoun Kim, Kil Mo Koo, Dae Sik Ko and Kye Suk Jun)

要約

초음파를 이용하여 재료를 비파괴 검사할때 재료의 그레인(Grain) 경계면에서 발생하는 후방 산란신호는 수신신호의 S/N 비를 감소시키는 중요한 요인이 된다. 본 논문에서는 수신신호의 비대역폭(frequency-to-bandwidth ratio)을 일정하게 분할하고 스플릿-스펙트럼 처리(split-spectrum processing) 기술을 이용하여 S/N 비를 개선하였다. 이 알고리즘은 필터뱅크의 최적 파라미터를 이론적으로 산출할 수 있으며, 기존의 대역폭분할 방법보다 신호처리 시간을 단축시킬 수 있는 장점이 있다. 실험을 위하여 304 스테인레스강 시료를 열처리하여 제작한 후 대역폭분할 방법과 비대역폭분할 방법으로 스플릿-스펙트럼 처리하였다. 그 결과 비대역폭분할 방법이 대역폭분할 방법에 비해 S/N 비가 약 1.4dB 개선되었으며, 필터수가 4개 더 적게 사용됨을 확인하였다.

Abstract

In the non-destructive evaluation techniques using ultrasonic signal, backscattering noise from grain interface decreases the SNR of received signal. In this paper, SSP(split-spectrum processing) based on the constant FBR decomposition method has been applied to enhance the SNR. This algorithm helps to find optimal parameters of filter bank through a simple theory and has an advantage that reduce the signal processing time compared with the conventional constant bandwidth decomposition method. In this experiment, the 304 stainless steel sample is heat-treated and received ultrasonic signal is processed by SSP using the constant bandwidth decomposition method and the constant FBR decomposition method. In conclusion, it has been shown that the constant FBR decomposition method enhanced the SNR by 1.4 dB and reduced the required number of filters by 4 compared with the constant bandwidth decomposition method.

1. 서론

* 正會員, 慶熙大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Kyunghee Univ.)

** 正會員, 牧園大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Mokwon Univ.)
接受日字 : 1993年 7月 27日

초음파를 이용한 결함검출은 산업분야에서 유용한 비파괴 검사기술로 이용되어 왔으며, 근래에 와서는 원자로나 반도체분야에서 미소결함을 측정하는 기술로 발전 되어오고 있다.

특히, 금속을 용접할때 열에 의하여 크기가 변화되는 성질이 있는 그레인은 용접부위에 발생하는 미소 결함을 검출하는데 방해요인이 되며, 특히 그레인 크기가 초음파의 한파장 정도일 때 그레인 경계로부터 발생하는 후방 산란신호는 수신신호의 S/N 비에 심각한 영향을 주기 때문에 그레인 경계에서 발생하는 구조적 잡음(structure noise)을 제거하기 위한 기술이 요구되고 있다.^[1]

미국의 N.M.Bilgutay^{[1], [2]} 등은 이러한 그레인 신호를 제거시키기 위하여 수신신호를 필터링에 의해 대역폭이 일정한 협대역신호들로 분할하고 이 신호들의 최소값을 취하여 S/N 비를 개선시키는 SSP (split-spectrum processing) 기술을 발표하였다. 그러나 이 방법은 최대의 S/N 비를 얻기 위한 필터의 최적 파라미터(필터의 수, 대역폭)를 구하는 작업이 반복적이며 경험적이기 때문에 신호처리 시간이 길며 적절한 파라미터의 설정이 이루어지지 않으면 S/N 비가 감소하게 되는 단점이 있다.^[3]

본 논문에서는 그레인으로부터 발생되는 후방 산란 신호에 의한 잡음 영향을 감소시키기 위해 수신신호의 비대역폭을 일정하게 분할하고 스플릿-스펙트럼 처리하여 S/N 비를 개선시키는 방법을 연구하였다. 비대역폭분할 방법(constant FBR decomposition method)은 대역폭분할 방법(constant bandwidth decomposition method)과 달리 필터의 중심 주파수가 증가할 때 필터의 대역폭도 함께 증가하는 방법으로써 필터의 최적 파라미터를 수신신호의 주파수대역과 수신시간의 함수로써 결정할 수 있기 때문에 최적 필터수를 구하기 위한 반복처리 작업이 감소되므로 신호처리 시간을 단축시킬 수 있는 장점이 있다.

실험을 위하여 시료로써 열처리된 304 스테인레스 강을 선택하였고, 중심 주파수가 5MHz인 초음파변환기를 사용하여 펄스-에코(pulse-echo) 방법으로 반사신호를 수신한 후, A/D 변환시켜 컴퓨터에 의해 비대역폭분할 방법으로 스플릿-스펙트럼 처리하여 이론치와 잘 일치함을 보였으며, 기존의 대역폭분할 방법에 의한 결과와 비교 분석 하였다.

II. 초음파 신호에 대한 SSP 기술

1. 기본 원리

다수의 미소 산란자(즉, 그레인)를 갖는 시료에 결함이 존재할때, 시료에 초음파를 입사시키면 초음파는 시료에서 투과, 반사, 산란 등의 현상이 발생한다. 이 중에서 반사된 초음파신호는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.^[1]

$$r(t) = u(t) + n(t) \tag{1}$$

여기서 $r(t)$ 는 수신된 초음파신호이고, $u(t)$ 는 결함에서 반사된 신호이며 $n(t)$ 는 구조적 잡음이다. 이 때 구조적 잡음은 그레인 경계에서 후방 산란된 것으로 초음파변환기의 위치와 주파수에 의존하는 특성이 있다.^[2]

SSP 기술에서, 수신신호 $r(t)$ 는 주파수영역으로 푸리에 변환되어 가우시안 (Gaussian) 모양의 대역통과 필터를 통과하여 정규화된 크기의 협대역신호의 집합으로 분할된다. 이 신호들은 각각 역푸리에 변환되어 식 (2)와 같이 N 개의 시간영역 함수들로 바뀐다.

$$r_j(t) = u_j(t) + n_j(t) \quad j=1, \dots, N \tag{2}$$

여기서 협대역신호 $u_j(t)$ 는 모두 동일한 결함에서 발생되었기 때문에 일정한 특성을 갖는 반면에 잡음 주파수성분 $n_j(t)$ 는 크기가 서로 다른 그레인에 의한 초음파 간섭패턴으로부터 야기되었기 때문에 일정치 않은 특성을 갖는다.^[1]

즉, 결함에서 수신된 신호 $u_j(t)$ 는 초음파변환기의 대역폭 내에서 거의 균일하게 분포하는 반면 구조적 잡음 신호 $n_j(t)$ 는 주파수에 의존하기 때문에 그 진폭이 크거나 작게 나타난다. 따라서 $r_j(t)$ 집합의 각 신호구간에서 최소값을 선택하면 거의 일정한 크기를 갖는 결함신호가 상대적으로 커다란 신호를 나타낼 것이다.

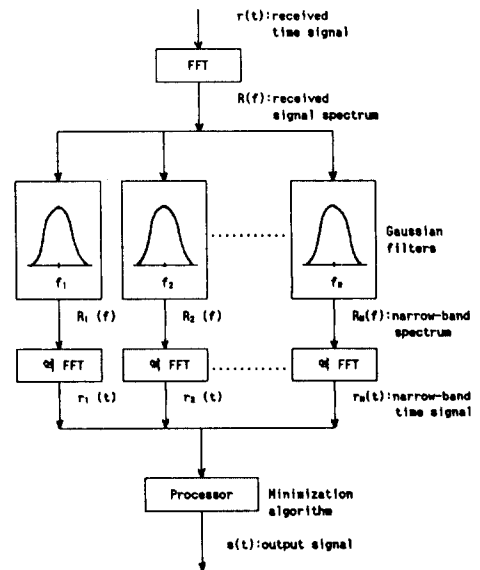


그림 1. 최소화 알고리즘을 이용한 SSP 기술의 흐름도
Fig. 1. Flow chart of SSP using minimization algorithm.

이와 같은 방법을 최소화 알고리즘(Minimization algorithm) [1, 3, 4]이라 하며 최소화 프로세서의 출력 $s(t)$ 는 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.

$$s(t) = \min[r_j(t)]^2 \quad j = 1, \dots, N \quad (3)$$

위에서 설명한 최소화 알고리즘을 이용한 SSP 기술의 흐름도는 그림 1과 같다.

2. 대역폭 분할 방법을 이용한 SSP 기술

기존의 SSP 기술에서 입력신호의 분할은 그림 2와 같이 대역폭이 일정한 동일간격의 협대역 가우산 필터에 의하여 수행되며, 그 과정은 식 (4)에 의해 처리된다.

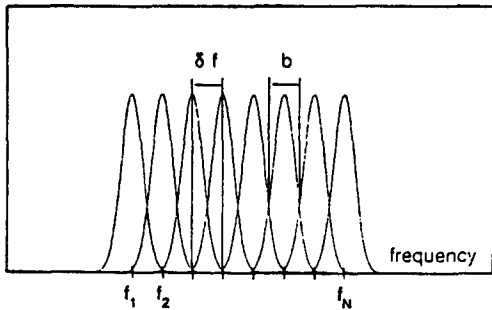


그림 2. 대역폭이 일정한 동일간격의 가우산 필터뱅크
Fig. 2. Bank of equally spaced Gaussian filters of constant bandwidth.

$$R_j(f) = R(f)H_j(f) \\ = R(f) \left[e^{-\frac{(f-f_j)^2}{b^2}} + e^{-\frac{(f-f_j)^2}{b^2}} \right] \quad (4)$$

여기서 $R(f)$ 는 수신신호 $r(t)$ 를 푸리에 변환시킨 것이며, $H_j(f)$ 는 가우산 필터 함수이고, f_j 는 각 필터뱅크의 중심 주파수, b 는 필터의 대역폭이다. N 개의 시간영역 분할신호 $r_j(t)$ 의 집합은 분할 주파수 성분 $R_j(f)$ 의 역푸리에 변환에 의해 얻어지며 진폭은 정규화된다.

번째 필터는 중심 주파수 f_j 와 반전력 대역폭 b 를 갖는다. 수신신호의 저역차단 주파수와 고역차단 주파수가 각각 f_l 과 f_u 라면 중심 주파수 f_j 는 주파수분할 간격 δf 에 의해 식 (5)와 같이 등가적으로 배열된다.

$$f_j = f_l + (j-1) \delta f \quad j = 1, \dots, N \quad (5)$$

독립 함수 $H_j(f)$ 의 수는 유한 수신시간 T 와 수신신호의 대역폭에 의해 결정되며 주파수 간격 $\delta f = 1/T$ 이므로, 각 데이터의 손실을 막기 위해 최적 필터의 수 N 은 식 (6)과 같은 범위를 갖는다.

$$N \geq T(f_u - f_l) + 1 \quad (6)$$

그리고 필터의 중심 주파수 간격 δf 에 대해서 필터링된 신호의 총 수 N 은 식 (7)과 같다.

$$N = B / \delta f + 1 \quad (7)$$

여기서 B 는 수신신호의 반전력 대역폭이다. 따라서 실효 대역폭은 식 (8)과 같이 정의된다.

$$B_{eff} = B + b \quad (8)$$

여기서 필터의 최적 대역폭 b 는 신호처리시 최적의 S/N 비가 되도록 반복처리 해야하며, 특정한 필터수에서 최대의 S/N 비를 나타내므로 이 값을 구하기 위한 반복 수행을 요한다. 이와 같이 대역폭분할 방법을 이용한 SSP 기술은 필터의 최적 파라미터를 경험적으로 구해야 하므로 신호처리의 시간이 길어질 뿐만 아니라 최적 파라미터를 선택하지 못한 경우 S/N 비가 감소하게 된다.

3. 비대역폭분할 방법을 이용한 SSP 기술

대역폭이 일정한 동일간격의 가우산 필터뱅크와 달리 FBR(frequency-to-bandwidth ratio)이 일정한 필터뱅크는 그림 3과 같이 필터의 중심 주파수 f_j 가 증가 할 때 필터의 대역폭 b_j 도 함께 증가하며, 그 과정은 식 (9)에 의해 수행된다.

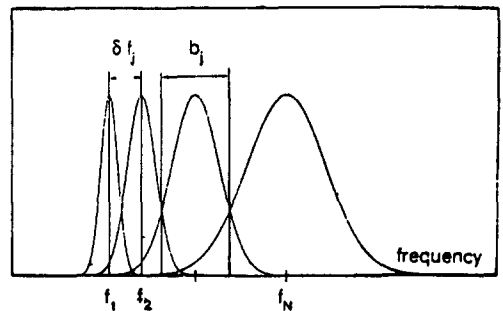


그림 3. 비대역폭이 일정한 가우산 필터뱅크
Fig. 3. Bank of Gaussian filters of constant FBR.

$$R_j(f) = R(f)H_j'(f) = R(f) \left[e^{-\frac{1}{2}(f-f_c)^2/b_j^2} - e^{-\frac{1}{2}(f-f_1)^2/b_j^2} - e^{-\frac{1}{2}(f-f_u)^2/b_j^2} \right] \quad (9)$$

여기서 필터의 대역폭 b_j 와 중심 주파수 f_j 의 비 FBR은 식 (10)과 같이 정의되는 상수이다.

$$f_j / b_j = FBR \quad j=1, \dots, N \quad (10)$$

필터의 중심 주파수 f_j 는 수신신호의 저역과 고역차단 주파수 f_1 과 f_u 의 함수로써 식 (11)과 같다.

$$f_j = f_c (f_u / f_1)^{[(j-1)/(N-1)]} \quad j=1, \dots, N \quad (11)$$

독립 함수 $H_j'(f)$ 의 수는 유한 수신시간 T와 수신신호의 대역폭에 의해 결정되며, 각 데이터의 손실을 막기 위한 최적 필터의 수 N은 식 (12)와 같은 범위를 갖는다.

$$N \geq T(f_u - f_1) + 1 \quad (12)$$

수신신호가 대역 f_1 과 f_u 사이에서 일정한 주파수 스펙트럼 분포를 갖는다면 수신신호의 반전력 대역폭 대 중심 주파수 f_c 의 비 Q는 식 (13)과 같다.

$$Q = 2f_c / (f_u - f_1) \quad (13)$$

따라서 수신신호의 대역폭이 너무 크면 가우시안 스펙트럼은 주파수대역 f_1 과 f_u 밖으로 완만하게 감소할 것이다. 따라서 가우시안 스펙트럼의 최대 에너지는 f_1 과 f_u 사이에 있어야 한다. f_1 과 f_u 내부 에너지를 최대화하기 위해서는 FBR/Q를 최대화하는 것이다. 그러나, FBR/Q 비가 증가함에 따라 더 많은 에너지가 수신자의 주파수대역에 포함되지만 가우시안 스펙트럼은 수신자 주파수대역 안에서 매우 낮은 값에 도달하므로 주파수성분이 제거된다. 따라서 최적 FBR은 식 (14)의 범위를 갖는다.

$$1.8 Q \leq FBR \leq 2.1 Q \quad (14)$$

이것은 최적 FBR이 Q값의 약 2배가 되어야 한다는 것을 의미하며, FBR의 범위는 Q값이 작은 수신기를 사용했을 때보다 Q값이 큰 수신자를 사용했을 때 더 확대된다는 것을 의미한다.

비대역폭분할 방법에서 필터의 최적 파라미터들을

결정하기 위하여 먼저, 수신신호의 스펙트럼 분포에서 중심 주파수 f_c 및 반전력 저역차단 주파수 f_1 과 고역차단 주파수 f_u 를 측정하여 식 (13)에 의해 Q값을 결정하고 식 (14)에 의해 Q값의 약 2배가 되도록 FBR값을 결정한다. 그리고 식 (12)과 식 (11)에 의해 최적 필터수의 경계치 N과 필터의 중심 주파수 f_j 를 구한 다음 식 (6)에 FBR 값과 f_j 값을 대입하여 필터의 대역폭 b_j 를 결정한다.

이와 같이 비대역폭분할 방법을 이용한 SSP 기술은 모든 파라미터를 수학적으로 표현할 수 있기 때문에 대역폭분할 방법보다 필터의 최적 파라미터를 쉽게 결정할 수 있는 장점이 있다.

III. 실험 및 고찰

그림 4는 본 실험을 위하여 구성한 전체 시스템 구성도이다. 주요 구성요소는 펄스발생기, 초음파변환기, 반사신호 수신장치, 데이터획득 및 신호처리 장치 등이다.

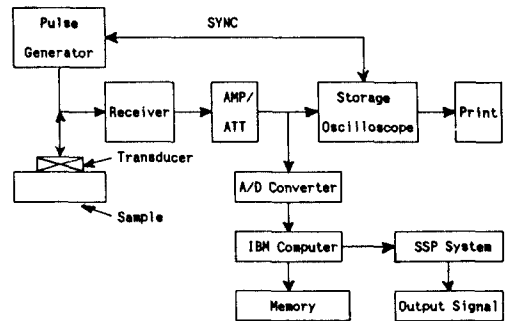


그림 4. 시스템 구성도
Fig. 4. System block diagram.

그림 4에서 초음파변환기는 중심 주파수 5MHz, 반전력 대역폭 1.4MHz, 직경 1.0 Inch인 원통형을 선택하여 사용하였으며, 초음파변환기를 시료에 접촉시켜 펄스-에코 신호를 수신하였다.

데이터획득 및 신호처리를 위해, 디지털 저장 오실로스코프에 임시 저장된 수신신호는 A/D 변환되어 GPIB interface를 통해 IBM PC 입력단으로 전달되고, PC에서는 동시에 플로피 디스크에 신호를 저장하고 레코더에 입력신호를 기록 한다. 그리고 이 신호는 MATLAB 소프트웨어로 신호처리된다.

시료의 인공 결함(hole)은 그림 5와 같이 열처리 전 드릴로 가공하였고, 결함의 크기 R은 1.87 mm이며, 시료의 홀 위치 D는 16.2 mm 이다. 그리고

스테인 레스강 시료에서 음향 속도 v 는 5.6×10^3 m/s이며, 따라서 λ 파장은 약 1.12 mm이다.

으로 수신된 신호는 그림 6과 같으며, 그레인신호로 인해 결합신호를 판단할 수 없음을 알 수 있다.

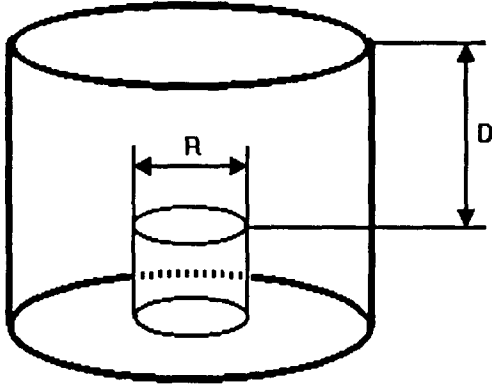


그림 5. 시료의 설계
Fig. 5. Design of sample.

그레인 크기를 성장시키기 위해 304 스테인레스강 시료를 1200℃로 8시간 이상 열처리하였으며, 시료의 그레인 크기를 결정하기 위해 광학현미경사진을 분석하였다. 현미경검사는 시편의 단면을 폴리싱(polishing)한 후 에칭(etching)하여 현미경사진으로 기록하는 것이다. 사진을 절편방법으로 분석한 결과 평균 그레인 지름은 0.16mm였다. 스테인레스강 시료의 현미경사진을 사진 1에 실었다.

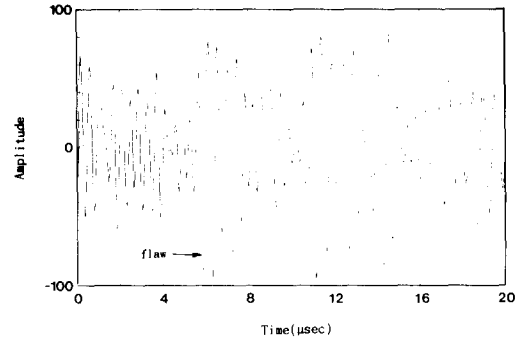


그림 6. 시료에서 반사되어 수신된 신호
Fig. 6. Received reflect signal from the sample.

그림 6에서 초음파의 결합까지 왕복시간 $t=v/2D$ 이므로 5.8 μ sec 지점이 결합의 위치로 추정된다. 여기서 샘플링 주기는 0.04 μ sec이며 신호의 수신시간 T 는 20.48 μ sec이고 샘플링 포인트는 512이다.

시료에 대한 수신신호의 진폭 스펙트럼 분포는 그림 7과 같다.



사진 1. 1200℃로 열처리된 스테인레스강의 그레인 구조(배율: 250)
Photo 1. Grain structure of heat-treated stainless steel sample at 1200℃. (magnification: 250).

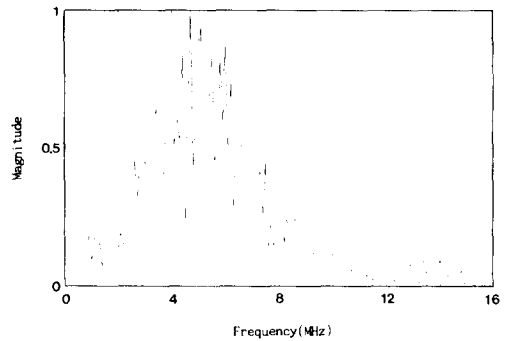


그림 7. 수신신호의 진폭 스펙트럼
Fig. 7. Magnitude spectrum of received signal.

그림 7의 진폭 스펙트럼을 분석하여 본 결과 저역 차단 주파수 f_1 은 4.2MHz이고 고역차단 주파수 f_u 는 5.6MHz이며 중심 주파수 f_c 는 4.9MHz였다.

그림 8은 비대역폭분할 방법과 대역폭이분할 방법을 이용한 SSP 수행 결과를 필터의 수 N 에 따라 각각 비교하여 나타낸 출력 S/N 비 곡선이다.

시료에 초음파변환기를 접촉시켜 펄스-에코우 방법

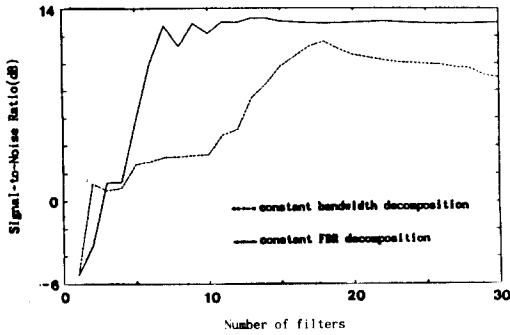


그림 8. SSP의 필터수에 따른 S/N 비 곡선
Fig. 8. The SNR curves of SSP as a function of the number of filters.

그림 8에서 비대역폭분할 방법과 대역폭분할 방법을 이용한 SSP 수행 결과 S/N 비가 각각 최대 13.0 dB와 11.6dB가 개선되어, 비대역폭 분할 방법을 이용한 SSP 수행 결과 약 1.4dB 더 높은 S/N 비를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

비대역폭분할 방법을 이용한 SSP 수행시 실험적 최적 필터의 수는 그림 8의 최대의 S/N 비에서 결정되며 $N_{exp}=14$ 개로 식 (8)로 부터 계산된 이론적 경계치 $N_{theo}=15$ 와 거의 일치하며 그 이상의 필터 수에서도 거의 일정한 출력 S/N 비를 얻을 수 있었다.

한편, 대역폭분할 방법을 이용한 SSP에서 각 필터수에 대한 필터의 가우산 대역폭을 비대역폭분할 방법과 동일한 조건인 필터간격 δf 의 약 4배로 주어 실행한 결과, 실험적 최적 필터의 수 $N_{exp}=18$ 개로 이론적 경계치 보다 더 많은 필터수에서 최대의 S/N 비를 나타내며 그 이상의 필터수에서는 S/N 비가 오히려 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 대역폭분할 방법을 이용한 SSP 수행시 S/N 비를 높이기 위해서는 최적 필터수를 결정하기 위한 반복처리 작업이 필요하며, 비대역폭분할 방법보다 더 많은 필터수를 필요로 하기 때문에 필터링 시간이 길어진다.

그림 9는 FBR의 값에 따라 최소화 알고리즘을 이용한 SSP 기술에 의해 얻어진 출력신호의 S/N 비 곡선이다.

그림 9에서 필터수는 그림 8에 의해 결정된 최적치인 $N_{exp}=14$ 개로 동일하다. 그림 9에서 결정된 FBR의 실험적 최적치는 $FBR_{exp}=14$ 로 수신 신호의 Q값의 약 2배임을 알 수 있고 식(10)에 의해 계산된 이론치와 잘 일치한다. FBR이 최적치로부터 감소할 때는 가우산 필터의 중첩이 최적치보다 많아져 주파수분할을 통해 얻어진 협대역신호가 독립적이지 못해

S/N 비가 감소한 것이며, 반대로 FBR이 최적치로부터 증가할 때는 중첩이 최적치보다 감소하여 적응 필터 사이의 주파수성분이 손실되어 S/N 비가 감소한 것이다.

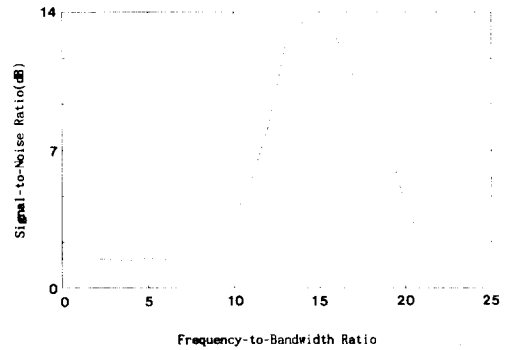


그림 9. FBR 값에 따른 S/N 비 곡선
Fig. 9. The SNR curve as a function of FBR.

그림 10은 그림 8과 그림 9를 통해 얻은 필터의 최적 파라미터를 적용하여 $N_{exp}=14$, $FBR_{exp}=14$ 일 때 비대역폭 분할방법을 이용한 SSP 수행 결과를 나타낸 출력 신호이다.

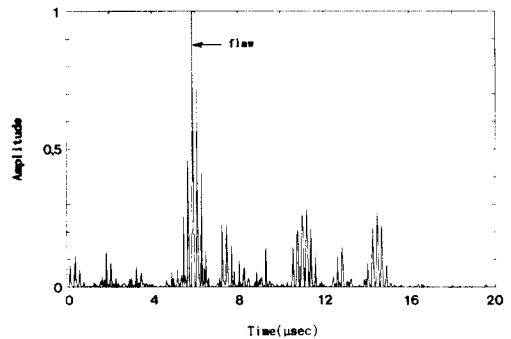


그림 10. 비대역폭분할 방법을 이용한 SSP 출력신호($N_{exp}=14$, $FBR_{exp}=14$)
Fig 10. Processed signal of SSP using the constant FBR decomposition method.

그림 10에서 비대역폭분할 방법을 이용하여 SSP를 수행하였을 때 그림 6에서 그레인신호가 제거되어 S/N 비가 현저히 개선되며, 5.8 μ sec 지점이 결함의 위치임을 확인할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는, 비대역폭분할 방법을 이용한 SSP 기술을 수행하여 초음파 수신신호를 개선시키는 방법을 연구하였다.

연구 결과, 비대역폭분할 방법은 수신신호의 스펙트럼 분포에서 중심 주파수와 반전력 차단 주파수를 측정하면 이론적으로 FBR값, 필터수, 필터의 대역폭을 산출할 수 있기 때문에 기존의 대역폭분할 방법보다 필터의 최적 파라미터를 쉽게 결정할 수 있는 장점이 있었다.

실험을 위하여 중심 주파수가 5MHz인 초음파변환기를 사용하였으며 시료로 304 스테인레스강을 1200℃로 8시간 이상 열처리 하여 그레인을 성장시켰다. 시료의 인공 결함의 크기는 1.87mm이며 평균 그레인 지름은 0.16mm였다.

실험을 통하여 획득한 데이터를 비대역폭분할 방법을 이용한 SSP 기술을 수행한 결과, 대역폭분할 방법보다 4개 더 적은 필터 수에서 최대의 S/N 비를 나타내어 필터링 속도가 향상되었으며, 약 1.4dB 정도 더 높은 S/N 비를 얻을 수 있었다. 한편 FBR의 최적치는 Q값의 약 2배가 되어 이론적 결과와 잘 일치함을 확인할 수 있었으며 최적 파라미터를 SSP 기술에 적용한 결과, 그림 9와 같이 그레인신호가 제거된 최종 출력신호를 얻을 수 있었다.

본 논문의 연구 결과는 반도체 분야 또는 원자력 발전소의 스테인레스강 용접부의 비파괴검사에 있어서 보다 신뢰성 있는 평가에 기여할 것으로 믿으며, 앞으로 S/N비를 더욱 향상시키기 위한 새로운 알고리즘의 개발에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 본다.

參考文獻

- [1] N.M.Bilgutay and J.Saniie, "The effect of grain on flaw visibility enhancement using split-spectrum processing", *Materials Evaluation*, vol.42, pp.808-814, May 1984.
- [2] 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.
- [3] X.Li, R.Murthy and Bilgutay, "Adaptive robust filtering techniques for ultrasonic flaw detection", *Ultrasonics Symposium*, pp.1145-1149, 1989.
- [4] J.D.Aussel, "Split-spectrum processing with finite impulse response filter of constant frequency-to-bandwidth ratio", *Ultrasonics*, vol. 28, pp.229-240, Jul. 1990.
- [5] J.Saniie, D.T.Nagle and K.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, pp.133-140, Mar. 1991.
- [6] P.Karpur, "Split-spectrum technique as a preprocessor for enhanced reliability in ultrasonic signal analysis", *Materials Evaluation*, vol.50, pp.793-797, Jun. 1992.
- [7] B.Baligand, M.Grozellier, and D.Romy, "Improvement in ultrasonic examination of austenitic steels", *Materials Evaluation*, Vol.44, pp.577-581, Apr.1986.
- [8] R.Shankar, P.Jeong and M.Avioli, "Signal-processing applications in the electric utility industry", *Materials Evaluation*, Vol.48, pp.1365-1373, Nov. 1990.
- [9] V.L.Newhouse, N. M. Bilgutay and J. Saniie, "Flaw-to-grain echo enhancement by split-spectrum processing", *Ultrasonics*, vol.20, pp.59-68, 1982.
- [10] K.Karpur, P.M.Shankar and Newhouse, "Split spectrum processing: optimizing the processing parameters using minimization", *Ultrasonics*, vol. 25, pp.204-208, Jul.1987.
- [11] 김태현, 전계석, "고체내부의 결함검출에 영향을 미치는 그레인신호 제거를 위한 스플릿-스펙트럼 처리기술", *대한전자공학회 학술대회 논문집*, vol.16, no.1, 1993.

— 著 者 紹 介 —



金太現(學生會員)

1966年 3月 23日生. 1992年 2月 경희대학교 전자공학과(공학사). 1994年 2月 경희대학교 대학원 전자공학과(공학석사). 1994年 3月 ~ 현재 경희대학교 대학원 전자공학과 박사과정. 주관심 분야는 비파괴검사, 초음파 신호처리 및 영상처리, M/W 필터 및 안테나 설계 등임.



具吉謀(正會員)

1952年 7月 15日生. 1979年 2月 광운대학교 전자통신학과(공학사). 1983年 9月 경희대학교 대학원 전자공학과(공학석사). 1991年 9月 ~ 현재 경희대학교 대학원 전자공학과 박사과정. 1984年 10月 ~ 현재 원자력연구소 선임연구원. 주관심 분야는 초음파 신호처리 및 영상처리 등임.



高大埴(正會員)

1959年 4月 24日生. 1982年 2月 경희대학교 전자공학과(공학사). 1987年 9月 경희대학교 대학원 전자공학과(공학석사). 1989年 2月 경희대학교 대학원 전자공학과(공학박사). 1989年 9月 ~ 현재 목원대학교 전자공학과 조교수. 주관심 분야는 신호처리, 초음파 영상처리, 광음향신호처리 등임.

田啓石(正會員) 第 26券 2號 參照

현재 경희대학교 전자공학과 교수