

스플릿-스펙트럼 처리의 자동화를 위한 가용대역폭의 결정방법

The Determination method of Available Bandwidth for
Automation of the Split-Spectrum Processing고 대 식*
(Dae Sik Ko*)

※ 이 논문은 1994년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

요 약

이 논문에서는, 스플릿-스펙트럼 처리(split-spectrum processing)의 자동화를 위한 가용대역폭의 결정방법을 연구하였다. SSP는 결정립(grain) 잡음을 갖는 초음파신호의 가시도를 개선하는데 이용된다. SSP가 S/N 비를 개선하는 유용한 기술임에도 불구하고 가용대역폭 결정의 모호성 때문에 응용이나 자동화에는 제한이 있었다. 최근까지도 가용대역폭을 최적으로 하기 위해 시행착오 방법에 의존하고 있다. 스펙트럼 히스토그램은 수신된 초음파신호 스펙트럼의 전대역에 걸친 최소화 알고리즘에 의하여 얻어진 스펙트럼 윈도우의 통계적 분포도이다. 가용대역폭은 스펙트럼 히스토그램을 이용하여 적용적으로 결정되기 때문에 SSP의 자동화가 가능하다. 스펙트럼 히스토그램을 이용한 가용대역폭의 결정방법을 조사하기 위해 이 방법을 실험 데이터에 적용하였다. 실험결과, 스펙트럼 히스토그램은 SSP의 가용대역폭의 결정과 자동화를 위한 효율적인 방법임을 알 수 있었다.

ABSTRACT

In this paper, the determination method of available bandwidth for automation of the split-spectrum processing (SSP) has been studied. The SSP is used for the visibility enhancement of the ultrasonic signal with grain noise. Even though the SSP has proved useful in signal-to-noise ratio enhancement, its application and automation have been limited due to ambiguity in the determination of available bandwidth. Until recently, it is the usual practice to optimize the available bandwidth by trial and error. The spectral histogram is the statistical distribution of the spectral windows that is selected by the minimization algorithm with the whole band of the spectrum of the received ultrasonic signal. Since the available bandwidth can be determined adaptively using spectral histogram, this method can be used for automation of the SSP. In order to evaluate the determination technique of the available bandwidth using spectral histogram, this method is applied to experimental ultrasonic data. The experimental results show that the spectral histogram is an efficient method for determination of the available bandwidth and automation of the SSP.

I. 서 론

초음파를 이용한 결함검출에서 가장 어려운 문제는 결정립 잡음과 결함신호가 동시에 존재하는 경우에 비파괴 검사의 신뢰성을 확보하는 것이다. 왜냐하면 결정립의 경계로부터 발생하는 초음파 산란으로 인하여 결함에서

의 반사신호가 숨어버리면 결함의 유무나 위치를 판단할 수 없기 때문이다.^(1,2,3)

스플릿-스펙트럼 처리(split-spectrum processing)기술은 1970년대 레이더 시스템을 위하여 제안되었으며 1981년 미국의 N. M. Bilgutay 는 이 기술을 초음파 신호처리 분야와 비파괴검사 분야 등에 적용시키기 위한 연구를 시도하였다. 이 기술은 열처리 과정을 통하여 성장된 결정립에 의한 잡음신호가 실제적으로 처리하고자 하는 결함신호에 중복되어 S/N 비를 저하시키는 경우에 매우

*목원대학교 이공대학 전자공학과
Dept. of Electronic Eng., Mokwon Univ.
접수일자: 1995년 7월 28일

유용한 기술이다.^[1,2]

SSP에서 사용되는 파라미터인 가용대역폭을 결정하는 과정은 최대의 S/N 비를 얻기 위하여 거쳐야 하는 반복적인 것이기 때문에 처리시간이 길고 전문가의 도움이 필요하였다. J. D. Ausel 등에 의하여 개발된 SSP 소프트웨어의 경우도 수신신호의 가용대역폭은 프로그램 운용자의 지식과 경험에 의하여 결정해 주어아만 하는 어려움이 있었다.

이 논문에서는 SSP의 자동화 구현을 위하여 가용대역폭을 자동적으로 결정하는 방법을 연구, 분석하였다. 스펙트럼 히스토그램은 초음파 반사신호 스펙트럼의 전대역에 걸친 최소화 알고리즘을 수행하여 얻어진 스펙트럼의 통계적 분포로써 가용대역폭을 결정하는데 이용된다.

실험에서는, 열처리된 304 스테인레스강을 시료로 사용하여 배면에 인공결함을 만들고, 중심 주파수가 5 MHz 인 초음파변환기를 사용하여 반사신호를 획득하였다. 스플릿-스펙트럼 처리는 신호처리 분야에서 널리 이용되고 있는 Matlab을 이용하여 프로그램 하였으며 스펙트럼 히스토그램에 의하여 처리된 결과를 비교, 분석하여 그 유용성을 확인하였다.

II. 스펙트럼 히스토그램을 이용한 가용대역폭 결정

1. 스플릿-스펙트럼 처리의 기본원리

미소한 결정립을 갖는 재료에 결함이 존재할 때, 재료에 초음파를 입사하면 초음파는 재료에서 투과, 반사, 산란 등의 현상이 발생한다. 재료내에 결함이 존재한다면 반사된 초음파 신호는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.^[4,5]

$$r(t) = u(t) + n(t) \neq 0 \quad 0 \leq t \leq T$$

$$= 0 \quad \text{otherwise} \quad (1)$$

여기서 $r(t)$ 는 수신된 초음파 신호이고, $u(t)$ 는 결함에 서 반사된 신호이며 $n(t)$ 는 결정립에 의한 잡음함이다. 이 잡음은 결정립 경계에서 후방 산란된 것이기 때문에 초음파변환기의 위치와 주파수에 의존하는 특성이 있다.

SSP 기술에서 수신신호 $r(t)$ 는 주파수 영역으로 푸리에 변환된 뒤 N 개의 가우시안 모양의 대역통과 필터를 통과하여 협대역 신호의 집합으로 분할된다. 분할된 N 개의 신호들은 각각 역 푸리에 변환되어 식 (2)와 같이 N 개의 시간 영역 함수들로 바뀐다.

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

여기서 협대역 신호 $u_j(t)$ 는 모두 동일한 결함에서 발생되었기 때문에 거의 일정한 특성을 갖는 반면에 잡음 성분인 $n_j(t)$ 는 크기가 서로 다른 결정립에 의한 초음파 간섭 패턴으로 부터 발생되었기 때문에 일정치 않은 특성을 갖는다. 곧, 결함에서 수신된 신호 $u_j(t)$ 는 초음파변환

기의 대역폭 내에서 거의 균일하게 분포하는 반면 결정립 신호 $n_j(t)$ 는 주파수에 의존하기 때문에 그 진폭이 크거나 작게 나타난다. 따라서 $r_j(t)$ 집합의 각 신호 구간에서 최소값을 선택하면 거의 일정한 크기를 갖는 신호가 상대적으로 크게 나타날 것이다. 이와같은 방법을 SSP 최소화 알고리즘(minimization algorithm) 이라고 하며 최소화 프로세서의 출력 $s(t)$ 는 식 (3)과 같이 표현된다.

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

여기서 w_j 는 $r_j(t)$ 를 정규화하기 위한 가중치이며, $r_i(t)$ 는 각 신호구간에서 선택된 최소값으로 출력 $s(t)$ 가 된다. SSP 최소화 알고리즘의 흐름도는 그림 1과 같다.

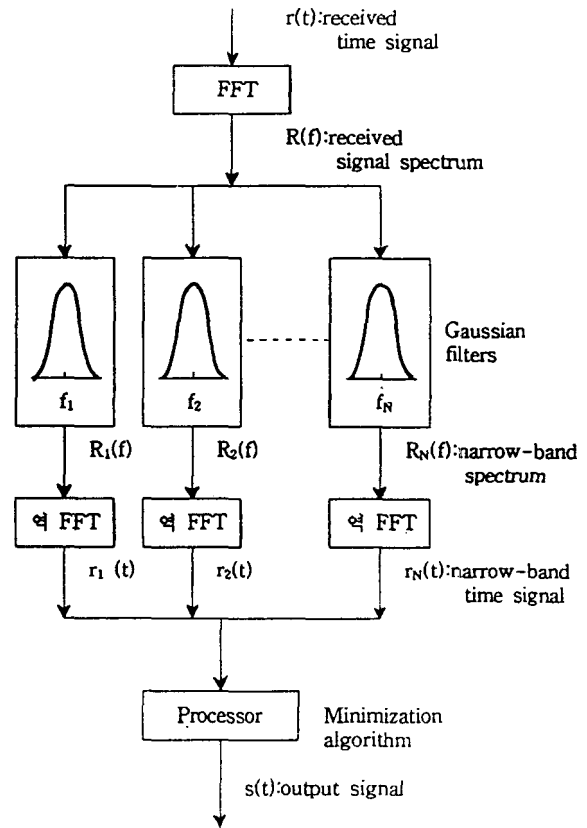


그림 1. SSP 최소화 알고리즘의 흐름도
Fig 1. Flowchart of SSP minimization algorithm

2. 스펙트럼 히스토그램

서로 다른 주파수를 갖는 N 개의 신호를 얻기 위해 수신신호를 N 개의 대역통과 필터에 통과시키는데 여기서 중요한 파라미터는 그림 2에서 보는 바와 같이 협대역 필터의 수(N), 인접 필터간의 간격(Δf), 필터의 대역폭(b), 수신신호의 가용대역폭(B_{ava}) 등이 있다.

기존의 SSP에서 이러한 파라미터는 경험과 반복에 의해 결정되었으며 특히 수신신호의 가용대역폭은 초음파 변환기의 3dB 대역폭이나 수신신호의 3dB 대역폭을 이

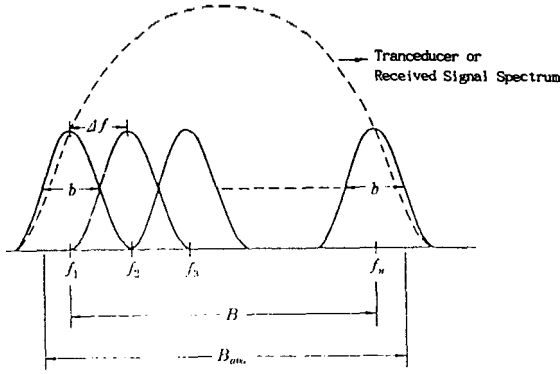


그림 2. 스플릿-스펙트럼을 위한 파라미터들
Fig 2. Parameter for split-spectrum

용하였으며 실제 신호처리시 이 가용대역폭은 최대의 S/N비율 얻기 위해 약간의 조정이 허용되었다. 이러한 인위적 조정은 SSP의 자동화에 장애요인이 되므로 통계분포를 이용하는 스펙트럼 히스토그램을 SSP에 도입하였으며, 그 흐름도는 그림 3과 같다.

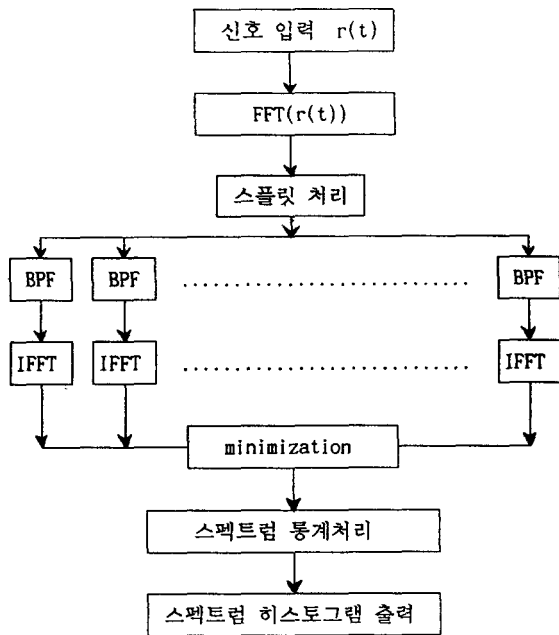


그림 3. 스펙트럼 히스토그램 처리를 위한 흐름도
Fig 3. Flowchart of spectral histogram processing

그 과정은 먼저 수신신호 전대역에 대해 SSP 최소화 알고리즘을 수행하여 그 결과 얻어진 출력신호의 주파수별 빈도수를 히스토그램으로 나타내고, 이 히스토그램을 통해 가용대역폭을 결정한다. 스펙트럼 히스토그램에서 높은 빈도수를 나타내는 주파수대역은 신호성분을 가장 많이 포함하고 있으므로 그 대역을 가용대역폭으로 하여

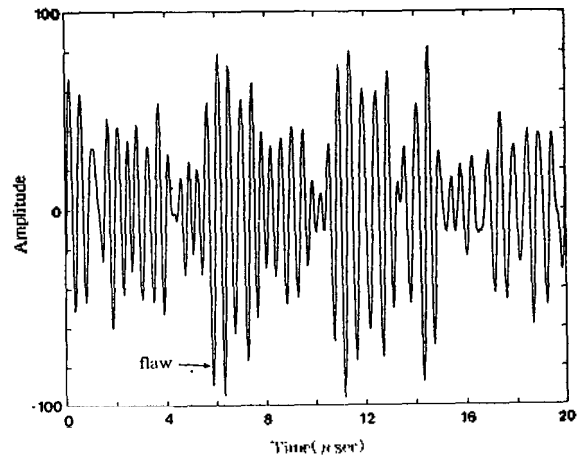
SSP 최소화 알고리즘을 다시 한번 수행하면 더 양호한 S/N 비를 갖는 출력을 얻을 수 있을 것이다. 스펙트럼 히스토그램이 기존의 위너필터링과 다른 점은 위너필터링은 잡음에 대한 스펙트럼 정보를 미리 알아야 하지만 스펙트럼 히스토그램은 잡음의 스펙트럼 정보 곧 결정립의 크기를 알 수 없는 경우라도 효과적으로 잡음을 제거할 수 있다는 점이다. 이와같이 SSP에 필요한 가용대역폭을 자동적으로 선택할 수 있다면, 적절한 대역폭을 선택하지 못하여 S/N 비가 저하되는 것과 적절한 대역폭을 선택하기 위하여 반복적으로 수행해야 하는 처리시간의 낭비를 감소시킬 수 있다는 점에서 SSP의 자동화와 밀접한 관계가 있다.

III. 실험 및 고찰

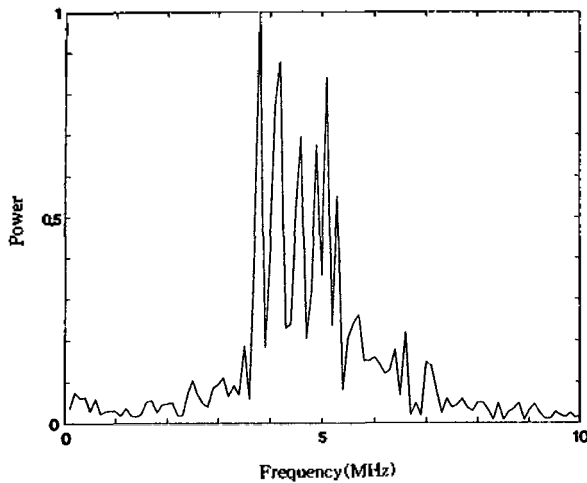
실험에서는, 재료 내의 결함 탐상에 널리 사용되고 있는 주파수 범위인 중심주파수가 5 MHz 이며 대역폭이 2 MHz 인 초음파 변환기를 사용하였으며, 304 스테인레스강의 결정립 크기를 성장시키기 위하여 1200℃로 8 시간 이상 열처리하였다. 시료의 인공결함(hole)은 시료의 배면에 열처리 전 드릴로 가공하였으며, 그 크기는 1.87 mm, 시료의 홀 위치는 30.8 mm, 평균 결정립 지름은 0.16 mm 이다. 결정립을 포함하는 스테인레스강 시료에서 음향 속도는 5.6×10^3 m/s 이며, 따라서 파장은 약 1.12 mm이다.

시료에 초음파 변환기를 접촉시켜 펄스-반사법으로 수신된 신호와 스펙트럼은 그림 4와 같다.

그림 4에서 표본화 주기는 0.04 μs 이며 신호 수신시간 T는 20 μs 이고 표본화점은 500 개 이다. 그림 4에서 결정립 신호로 인해 결함신호의 위치를 판단할 수 없고 스펙트럼 또한 저역 차단주파수는 3.7 MHz 이고 고역 차단주파수는 5.7 MHz 이며 중심 주파수는 4.7 MHz 로 변형되어 있는 것을 알 수 있다.



(a) 반사신호(unprocessed signal)



(b) 스펙트럼

그림 4. 시료로부터 반사된 초음파신호
Fig 4. Received signal from the sample

그림 5는 수신신호 전대역에 걸쳐 SSP 최소화 알고리즘을 수행하여 얻어진 스펙트럼 히스토그램이다.

그림 5에서 진폭은 각 주파수별로 선택된 데이터의 빈도수를 나타내므로 3 MHz 근처에서 가장 많은 데이터가 획득됨을 알 수 있다. 스펙트럼 히스토그램의 분포가 3 MHz 근처에서 최대값을 나타내는 이유는 결정립 경계의 산란으로 인한 잡음신호는 고역으로 천이되고 시료에서 감쇠되는 신호성분은 저역으로 천이되어 신호성분이 저역에 많이 존재하기 때문이다.

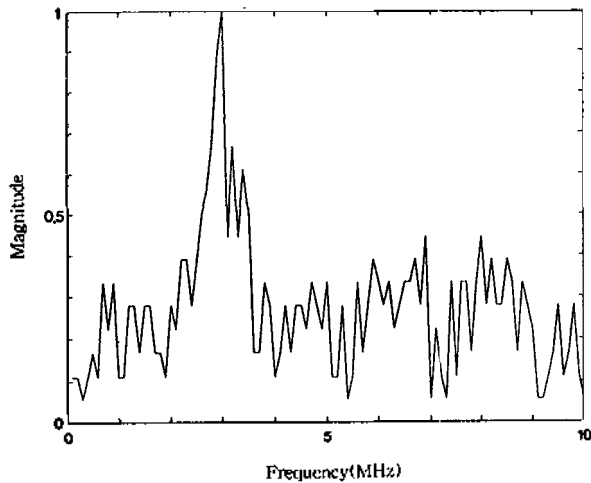
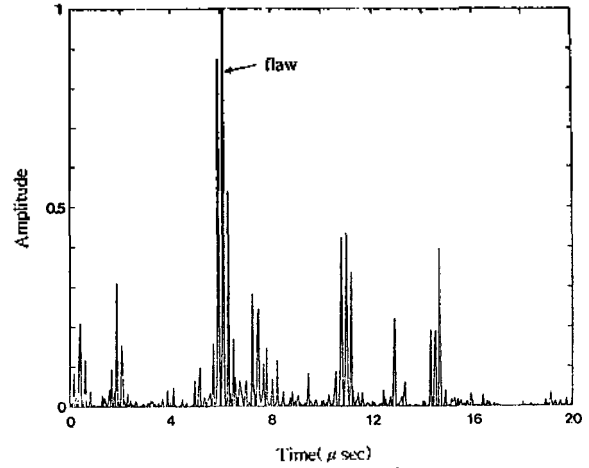
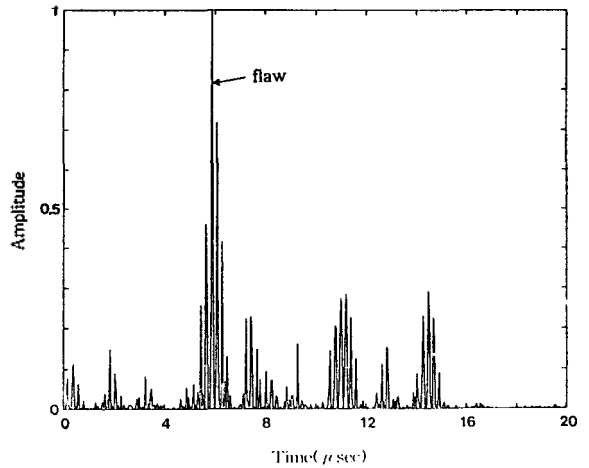


그림 5. 스펙트럼 히스토그램
Fig 5. Spectral histogram

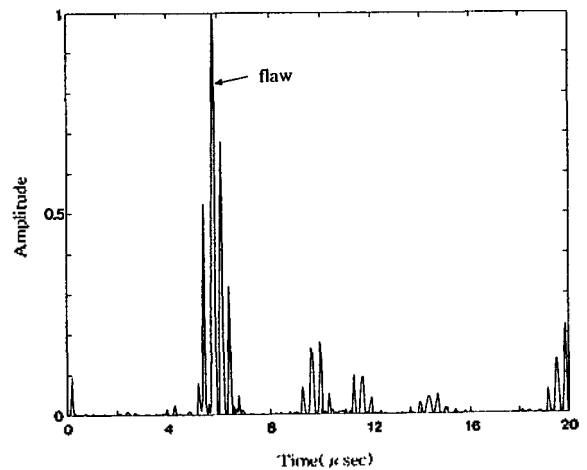
그림 6은 동일한 데이터에 대하여 가용대역폭을 결정하는 세가지 방법을 이용하여 (a)는 초음파변환기의 대역폭인 4 MHz~6 MHz 범위를, (b)는 수신신호의 대역폭인 3.7 MHz~5.7 MHz 범위를, (c)는 스펙트럼 히스



(a) 초음파변환기의 대역폭 이용



(b) 수신신호의 대역폭 이용



(c) 스펙트럼 히스토그램을 이용

그림 6. 가용대역폭의 결정방법에 따른 스플릿-스펙트럼 처리 결과

Fig 6. The results of split-spectrum processing by determination methods of available bandwidth

토그램에서 최대 빈도를 보이고 있는 2.5 MHz~3.5 MHz 범위를 가용대역폭으로 결정하고 SSP 최소화 알고리즘을 적용한 결과이다.

표 1은 가용대역폭의 결정방법에 따른 스플릿-스펙트럼 처리성을 비교한 것이다.

표 1. 가용대역폭 결정방법의 비교

Table 1. The comparison of available bandwidth methods

구 분	시행착오 (처리속도)	S/N비(dB)	자동화 여부
초음파변환기의 대역폭 이용	없음(고속)	불량(7.3)	가능
수신신호의 대역폭 이용	다수(저속)	양호(10.8)	불가능
스펙트럼 히스토그램의 이용	없음(중속)	양호(13.0)	가능

그림 6과 표 1에서 보는 바와 같이 초음파변환기의 대역폭을 이용하는 방법은 실제로 사용한 초음파변환기의 사양에 따라 가용대역폭이 결정되므로 시행착오 없이 고속으로 신호처리할 수 있어 자동화는 가능하지만 S/N 비가 불량한 단점이 있다. 수신신호의 대역폭을 이용하는 방법은 수신신호의 중심주파수가 결정립의 환경에 따라 유동적이어서 가용대역폭을 변화시켜야 하므로 신호처리시 여러번의 시행착오가 존재하며 자동화가 불가능하다. 스펙트럼 히스토그램을 이용하는 방법은 먼저 수신신호의 전대역에 걸쳐 SSP 최소화 알고리즘을 적용하고 빈도수가 높은 대역을 가용대역폭으로 하여 다시 신호처리를 수행하여야 하므로 처리 속도는 다소 오래 걸리지만 S/N 비가 양호하고 자동화가 가능하다.

IV. 결 론

이 논문에서는 스플릿-스펙트럼 처리에서 가장 어려운 과정인 가용대역폭을 결정하는 방법을 연구, 분석하였다.

연구결과, 스펙트럼 히스토그램은 최소화 알고리즘을 통하여 결합신호가 집중되어 있는 주파수대를 찾아 가용대역폭을 자동적으로 결정해 주기 때문에 스플릿-스펙트럼 처리의 자동화에 크게 기여할 수 있음을 확인하였다.

인공결함이 있는 304 스테인레스강을 시료로 사용하여 수행한 실험결과에서 초음파 신호의 스펙트럼을 이용한 결과보다 2.2 dB 더 높은 S/N 비를 얻을 수 있었으며 처리 시간도 반복실행이 불필요하기 때문에 단축할 수 있었다.

참 고 문 헌

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, "Analysis of a nonlinear frequency diverse clutter suppression algorithm," *Ultrasonics*, Vol. 28, pp. 90-97, Mar. 1990.
3. P.Karper, "Split-spectrum technique as a preprocessor for enhanced reliability in ultrasonic signal analyses," *Materials Evaluation*, Vol.50, pp. 793-797, June 1992.
4. 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.
5. P.M.Shankar and P.Karpur, "Split-Spectrum processing: determination of the available bandwidth for spectral splitting," *Ultrasonics*, Vol.26, pp. 204-209, July 1988.
6. D.Nicoletti and N.M.Bilgutay, "Scaling properties of ultrasonic attenuation for inverse power-law grain-size distribution for different annealing durations," *Materials Evaluation*, Vol.50, pp. 788-792, June 1992.
7. P.Karper, "Split spectrum processing: optimizing the processing parameters using minimization," *Ultrasonics*, Vol.25, pp. 204-208, July 1987.
8. X.Li, N.M.Bilgutay and R.Murthy "Spectral histogram using the minimization algorithm-Theory and applications to flaw detection," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.*, Vol.39, No.2, pp. 133-140, Mar. 1992.

▲高 大 植(Dae-Sik Ko)

正會員

14권 1호 참조