

합성 Hard - α Inclusion의 다단계 적응형 노이즈 제거기법 연구

Multi-Stage Adaptive Noise Cancellation Technique for Synthetic Hard - α Inclusion

김재준

Jaejoon Kim

초 록 초음파 비파괴 평가에서 적응 노이즈 제거 기법은 시험 재료의 결정립 구조(grain structure)로 인해 공간적으로 변화하는 노이즈를 감소시키는데 적합하다. 일반적으로 결정립 노이즈는 비상관 관계성을 가지고 있는 반면에 결점(flow) 신호는 상관 관계성을 띄고 있기 때문에 적응 필터링 알고리즘으로 출력 신호의 신호 대 잡음비를 향상시키기 위해 신호의 상관관계 특징을 이용한다. 본 논문에서는 초음파 탐상의 결함 검출 능력 향상을 위해 적응 LMSE(least mean square error) 필터를 이용한 다단계 적응 노이즈 제거기법(multi-stage adaptive noise cancellation)을 제시한다.

주요용어: 결정립노이즈, 적응필터링, 다단계적응형 노이즈제거기법

Abstract Adaptive noise cancellation techniques are ideally suitable for reducing spatially varying noise due to the grain structure of material in ultrasonic nondestructive evaluation. Grain noises have an un-correlation property, while flaw echoes are correlated. Thus, adaptive filtering algorithms use the correlation properties of signals to enhance the signal-to-noise ratio (SNR) of the output signal. In this paper, a multi-stage adaptive noise cancellation (MANC) method using adaptive least mean square error (LMSE) filter for enhancing flaw detection in ultrasonic signals is proposed.

Keywords: grain noise, adaptive filtering, multistage adaptive noise cancellation

1. 서 론

초음파 탐상에서 작은 결점(flow)들을 찾기는 흔히 재료의 결정립 구조(grain structure)로 인해 발생하는 클러터(clutter) 때문에 쉽지 않다. 결정립 경계로부터 나오는 초음파들의 분산은 때때로 작은 결점으로 인해 수신된 신호에서 결점 신호의 징후를 감추거나 간섭한다. 예를 들면, 결정립 노이즈는 Ti 합금 성분 내에 미세구조(microstructure)로 작지만 잠재적으로 hard- α 성분이 내포된 결점들의 검출

을 방해할 수 있다[1-3]. 일반적으로 결정립 구조는 재료 내에서 공간적으로 변화하기 때문에 결정립 노이즈는 비정상(non-stationary) 신호이다[4].

지금까지 공간 평균[5], band-pass 필터링[6], split-spectrum 처리 방법[7], 적응 신호처리(adaptive signal processing) 방법[8-11], 웨이브렛 기반 신호처리 기법[12] 등 많은 신호처리 기법들이 결정립 노이즈를 줄이기 위해 개발되어 왔다. 여러 방법들 중에 적응 신호처리 알고리즘은 주로 신호 성분에 공간적으로 다양하게 분포되어 있는 노이즈를 다룰 수 있는

능력 때문에 최근에 부각되고 있다. 유한 임펄스 응답(FIR; finite impulse response)과 무한 임펄스 응답(IIR; infinite impulse response)을 사용하여 초음파 신호들에 적용할 수 있는 적응형 결정립 노이즈 제거 알고리즘은 참고문헌에 잘 나타나 있다[11,13]. 적응 필터는 자동적으로 두개의 센서 또는 두개의 스캐닝 포인트로부터 primary input과 reference input 신호들 사이의 상관관계를 이용함으로써 파라미터 값들을 조정한다. 그러나, 신호와 노이즈의 상관관계가 정이 완전히 만족되지 않을 때, 적응 신호처리 알고리즘은 최적의 효과를 보여주지 못한다.

본 논문은 신호 대 노이즈 비율(SNR; signal-to-noise ratio)을 향상시키기 위해 결정립 노이즈 신호를 제거하는 다단계 적응형 필터링 기법을 제안한다. 일반적으로 다단계로 신호 SNR을 향상시킬 때는 단계의 MSE(mean square error)가 작아진다. 본 논문의 참고문헌[14]는 MSE설명에서 나타나는 오류를 수정 보완하고자 한다. 즉, 에러 신호의 MSE값을 최소화한다는 의미는 시스템의 출력 SNR를 최대화하는 의미를 나타낸다. 제안된 기법을 간단히 살펴보면, 각 단계에서 필터는 트랜스듀서(transducer)로부터 얻어지는 신호(A-scan)내에 결정립 노이즈와 결점 신호들의 통계적 상관관계를 조사하고 이 특징을 연속적인 적응 신호처리 시스템에 적용함으로써 신호의 SNR을 증가시킨다. 적응 노이즈 제거(adaptive noise cancellation) 기법의 추가 단계는 출력 신호의 SNR값을 증가시킬 뿐 아니라 결점 신호와 노이즈 신호와의 상관관계를 줄인다. 이러한 다단계 적응 필터링 과정을 통해 나온 결과는 하나의 적응 필터링 결과보다 뛰어난 것을 보여준다. 특히, FIR(finite impulse response) 필터를 이용한 적응 노이즈 제거 원리를 설명하고 향상된 성능을 얻기 위해 연속적으로 두개의 적응 필터를 이용한 가능성을 보여준다. 다단계 적응 필터링 과정의 수학적 분석과 실험을 통해 다양한 파라미터 값, 예를 들면, 필터길이, 수렴율, 트랜스듀서의 스캐닝 포인트 거리 등의 효과를 보여준다. 마지막으로 제안된 적응형 필터링 기법의 장단점 및 실험 결과가 논의된다.

2. 적응 최소 평균자승오차 필터 (Adaptive Least Mean Square Error Filter)

최적의 필터 가중치를 가진 노이즈 제거 알고리즘들은 신호 특성들의 사전 정보에 따라 고정적

(fixed) 이거나 적응적(adaptive)일 수 있다. 많은 경우에, 입력 조건의 범위가 정확하게 알려져 있지 못할 수도 있고 시간에 따라 변할 수도 있으므로 그러한 경우에 계속해서 최적값을 찾는 적응 시스템은 고정 필터보다 우수한 성능을 나타낸다. 적응형 노이즈 제거 알고리즘은 filter output 과 primary input 신호사이에서 일어나는 에러를 최소화하기 위해 반복 과정을 통해 필터의 임펄스 응답을 측정한다. 가장 간단한 적응형 필터 기법은 노이즈를 제거하기 위해 LMSE FIR 필터를 이용한다. 비록 FIR 적응 시스템들이 최적 상태에 오히려 시간적으로 오래 걸리더라도 구현하기 편리하고 용이해서 많은 적응 시스템들에 사용된다.

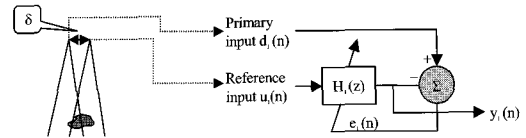


Fig. 1 Adaptive noise cancellation system used in ultrasonic nondestructive evaluation[13]

Fig. 1은 reference input $u_1(n)$ 과 primary input $d_1(n)$ 을 이용한 적응 필터 시스템의 블록 다이어그램을 보여준다. reference input은 순수한 노이즈 신호로 표현되며 일반적으로 고정된 값을 가진다. 고전적인 적응형 노이즈 제거 알고리즘들에서 reference input은 신호와 노이즈 성분을 포함하고 있는 primary input으로부터 필터링되고 감산된다. Fig. 1에서 필터는 에러 신호를 최소화 하기 위해 임펄스 응답을 자동적으로 조정하려고 적용된다. 이 알고리즘은 노이즈 성분이 공간적으로 변화하고 있는 초음파 비파괴평가(ultrasonic nondestructive evaluation)에 적용될 때, primary input과 reference 신호들은 일정한 스캐닝 포인트 거리를 유지하면서 얻을 수 있다. $u_1(n)$ 과 $d_1(n)$ 은 δ 거리만큼 떨어진 위치의 신호로부터 얻을 수 있거나 primary input 신호의 δ 시간 지연을 이용해서 나타낼 수 있다. 일반적으로, 측정된 신호는 결점과 노이즈 성분을 포함하고 있다.

primary input 신호 $d_1(n)$ 은 결점신호 성분 $f_d(n)$ 과 노이즈 성분 $n_d(n)$ 으로 구성되어 있고 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$d_1(n) = f_{d_1}(n) + n_{d_1}(n) \tag{1}$$

유사하게, 참조 신호는 결점신호 $f_u(n)$ 과 노이즈 성분 $n_u(n)$ 의 합으로 구성되어 있고 다음과 같이 표현된다.

$$u_1(n) = f_{u_1}(n) + n_{u_1}(n) \tag{2}$$

적응형 노이즈 제거 알고리즘의 근원이 되는 가정은 결정립 구조로부터 생성되는 노이즈 성분 $n_{d_1}(n)$ 과 $n_{u_1}(n)$ 은 비상관 관계를 가지고 있는 반면에, 결점 신호성분을 가지고 있는 $f_{d_1}(n)$ 과 $f_{u_1}(n)$ 은 서로 상관관계를 가지고 있다 (Table 1 참조). 필터 출력 $y_1(n)$ 과 primary input $d_1(n)$ 사이의 평균 자승 에러(MSE; mean square error)는 다음 식과 같이 표현된다.

$$MSE_1 = E[e_1^2(n)] = E[(d_1(n) - y_1(n))^2] = E[(f_{d_1}(n) - y_1(n) + n_{d_1}(n))^2] \tag{3}$$

Table 1 Correlation of adaptive noise cancellation algorithm

	Reference signal $u_1(n) = f_{u_1}(n) + n_{u_1}(n)$		
		f_{u_1}	n_{u_1}
Primary signal f_{d_1}	correlated	uncorrelated	
$d_1(n) = f_{d_1}(n) + n_{d_1}(n)$	n_{d_1} uncorrelated	uncorrelated	

만약 필터의 임펄스 응답을 $h_1(n)$ 으로 표현된다면 필터 출력 $y_1(n)$ 은 $y_1(n) = h_1(n) * u_1(n) = h_1(n) * f_{u_1}(n) + h_1(n) * n_{u_1}(n) = f_{y_1}(n) + n_{y_1}(n)$ 으로 쓸 수 있다. 식 (3) 에 대입해서 계산하면 MSE_1 은 식 (4)로 표현될 수 있다.

$$MSE_1 = E[(f_{d_1}(n) - f_{y_1}(n))^2] + E[(n_{d_1}(n) - n_{y_1}(n))^2] + 2E[(f_{d_1}(n) - f_{y_1}(n))(n_{d_1}(n) - n_{y_1}(n))] \tag{4}$$

최적 필터 계수들은 MSE_1 이 최소로 될 때 결정된다. 만약 노이즈와 결점 신호들이 비상관 관계성을 가진다면 식 (4)의 마지막 항목의 기대치는 0이 된다. $f_{u_1}(n)$ 이 $f_{d_1}(n)$ 의 시간 지연 버전, 즉, $f_{d_1}(n - n_0)$ 이라 가정하자. 그러면 필터 계수들은 필터 적응과정에서 $h_1(n + n_0)$ 에 적용되고 식 (4)의 첫

번째 항목은 0의 값으로 근접하게 된다. 이 경우에 최소 자승에러 MSE_1 은 $E[(n_{d_1}(n) - n_{y_1}(n))^2]$ 이 되고 필터 출력은 0으로 가까워진다. primary input과 reference input이 결점성분과 노이즈 성분 모두를 포함하고 있다면 필터는 에러 $E[(f_{d_1}(n) - h_1(n) * f_{u_1}(n))^2] + E[(n_{d_1}(n) - h_1(n) * n_{u_1}(n))^2]$ 를 최소화하고 필터 출력은 보다 낮은 노이즈 신호를 갖는다. 즉, SNR은 신호가 결점성분과 노이즈 성분 모두를 포함할 경우에 향상된다.

LMSE 알고리즘은 필터 가중치를 추정하기 위해 사용하는 가장 간단하고 보편적인 기법이다[9]. FIR 필터의 입출력 관계식은 식 (5) 처럼 표현되는데 여기서 $h_{1,n}(k)$ 는 시변 (time-varying) 특성 필터 계수를 나타내고 $u_{1,k}$ 는 참조입력 그리고 L 은 필터길이를 나타낸다.

$$y_1(k) = \sum_{n=0}^L h_{1,n}(k) u_{1,k-n} \tag{5}$$

특히, 필터 계수를 업데이트 시키기 위해 LMS 알고리즘을 활용된 기술은 steepest descent 방법에 바탕을 두며 그것은 다음과 같이 쓸 수 있다[15].

$$h_{1,k+1} = h_{1,k} + 2\mu e_k u_{1,k}, \quad k=1,2,3, \dots, N. \tag{6}$$

식 (6)에서 μ 는 수렴률, e_k 는 에러신호, $u_{1,k}$ 는 reference input신호 그리고 N 은 신호길이를 나타낸다. 수렴 파라미터 μ 를 선택하는 것에 대하여 일반 규칙들이 없기 때문에, 우리는 주어진 입력 신호 파워에 안정적인 값을 사용한다. 일반적으로 정규화된 수렴 파라미터는 식 (7)에 따라 선택될 수 있다.

$$\mu_n = \frac{\mu}{(1 + L)\sigma^2}, \quad 0 < \mu < 1 \tag{7}$$

$(1+L)$ 는 필터계수의 전체 개수를 나타내고 σ^2 은 입력 신호 파워를 표현한다.

많은 어플리케이션에서 신호파워는 모르거나 비정상 환경에서 시간에 따라 변하기 때문에 일반적으로 식 (8)에서 처럼 추정신호파워는 $\hat{\sigma}^2$ 로 정의될 수 있다.

$$\hat{\sigma}_k^2 = \alpha u_{1,k}^2 + (1 - \alpha)\hat{\sigma}_{k-1}^2, \quad 0 \leq \alpha \ll 1 \tag{8}$$

식 (6)에 정규화된 수렴 파라미터와 추정된 신호 파워를 대입시키면 식 (9)를 얻을 수 있다.

$$h_{1,k+1} = h_{1,k} + \frac{2\mu e_k u_{1,k}}{(1+L)\sigma_k^2}, \quad 0 < \mu < 1 \quad (9)$$

LMSE 알고리즘에서 파라미터 α , μ , L 의 값들은 적응 필터의 성능이 만족되게 최적의 값들로 취해져야 한다. 그러나, 수렴 파라미터 μ 는 디자인 설계와 계산 시간에 따라 적절히 선택되어야 한다. 적응 프로세서의 목표는 필터계수가 어떠한 초기 조건상에 최소 평균자승에러 솔루션까지 이동하는 과정에서 필터 계수들을 조정하는 것이다. 그러나, 실제 응용에 우리는 비정상 신호들을 다루고 있고 신호 조건들이 변화할 때 적응 프로세서는 계속적으로 LMSE 솔루션을 추적하기 위하여 계수들을 갱신하여야 한다. 그러므로 신호들은 안정성(stationarity) 요구 조건들을 만족시키면서 천천히 변화한다는 가정을 취하고 있다.

3. 다단계 적응필터(Multi-Stage Adaptive Filter)

고전적인 적응 노이즈 제거 기법들의 성능은 결점과 결점형 노이즈 신호들의 통계적 상관관계 특성에 의존한다. 만약 이러한 가정들이 충분히 만족하지 않는다면, 알고리즘들은 초음파 데이터의 SNR를 향상시키는 과정에서 시스템의 sub-optimal 성능 결과를 가져온다[16,17]. 본 논문에서는 노이즈 레벨을 줄이기 위해 다단계 적응 필터링 방법을 제안한다. Fig. 2는 제안된 다단계 적응 노이즈 제거 기법을 보여준다. 첫번째 단계에서의 목적은 향상된 SNR 값을 가진 신호와 보다 나은 상관관계 특성을 가지는 신호를 얻는 것이다. 즉, 결점신호 성분들의 높은 상관관계와 노이즈 성분의 낮아진 상관관계는 두번째 단계에서 현저하게 우수한 성능을 가능하게 해준다. 첫번째 단계의 적응 필터 출력은 두번째 단계의 적응 필터 입력으로 취해진다.

두번째 적응 필터 $H_2(z)$ 의 입출력 관계성은 이전장에서 기술된 관계식과 같다. 두번째 단계의 필터 출력 $y_2(n)$ 는 식 (10)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} y_2(n) &= h_2(n) * y_1(n) \\ &= h_2(n) * f_{y_1}(n) + h_2(n) * n_{y_1}(n) \\ &= f_{y_2}(n) + n_{y_2}(n) \end{aligned} \quad (10)$$

$h_2(n)$ 은 두번째 단계의 적응 필터 임펄스 응답을 나타낸다. 두번째 단계와 관련된 MSE는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} MSE_2 &= E[e_2^2(n)] = E[(d_2(n) - y_2(n))^2] \\ &= E[(f_{d_1}(n) - f_{y_2}(n))^2] + E[(n_{d_1}(n) - n_{y_2}(n))^2] \\ &\quad + 2E[(f_{d_1}(n) - f_{y_2}(n))(n_{d_1}(n) - n_{y_2}(n))] \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 $d_2(n) = d_1(n) = f_{d_1}(n) + n_{d_1}(n)$ 로 표현된다. 이 경우 최적 필터는 MSE_2 를 최소화한다.

이전 장에서 설명한 것처럼 만일 $f_{d_1}(n)$ 이 단순히 $f_{d_1}(n)$ 의 시간 지연 버전이라면 MSE_2 는 $E[(n_{d_1}(n) - n_{y_2}(n))^2]$ 로 주어진다. 일반적으로 에러 신호의 MSE 값을 최소화 한다는 의미는 시스템의 출력 SNR값을 최대화 하는 의미와 같다[15]. 따라서, 다단계 노이즈 제거 기법의 두번째 단계에서 $MSE_2 < MSE_1$ 이라는 관계식이 성립하고 필터 출력은 $n_{y_2}(n) < n_{y_1}(n)$ 이 성립한다. 이것은 $MSE(SNR)$ 이 연속 단계에서 단조롭게 감소(증가)한다는 것을 보여준다. 이러한 처리 방법은 m -단계에도 유사하게 확장될 수 있고 출력은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} y_m(n) &= h_m(n) * y_{m-1}(n) = h_m(n) * f_{y_{m-1}}(n) + h_m(n) * n_{y_{m-1}}(n) \\ &= f_{y_m}(n) + n_{y_m}(n) \end{aligned} \quad (12)$$

최소 에러 MSE_m 은 식 (13)과 같이 확장할 수 있다.

$$\begin{aligned} MSE_m &= E[e_m^2(n)] = E[(d_m(n) - y_m(n))^2] \\ &= E[(f_{d_1}(n) - f_{y_m}(n))^2] + E[(n_{d_1}(n) - n_{y_m}(n))^2] \\ &\quad - 2E[(f_{d_1}(n) - f_{y_m}(n))(n_{d_1}(n) - n_{y_m}(n))] \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 $d_m(n) = d_1(n) = f_{d_1}(n) + n_{d_1}(n)$ 이고 $MSE_m < MSE_{m-1} < \dots < MSE_2 < MSE_1$ 의 관계식이 성립된다.

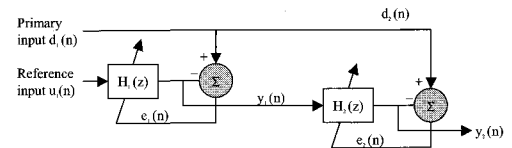


Fig. 2 A multi-stage adaptive noise cancellation filter configuration

4. 실험 데이터와 결과

테스트 샘플은 지름과 높이가 각각 3/64" 인 8개 원통 모양의 합성 경질 재료물(synthetic hard-

α inclusion)을 포함하는 폭 1/2" 길이 4", 높이 4" 의 Ti 블록이다. Fig. 3(a) 와 (b)는 각각 간략하게 표현한 수침 탐상 스캐닝 방법[18]과 테스트 블록의 구조도를 보여준다. 이 구조도에 보여진 것처럼 원통 모양의 합성 경질 계재물은 테스트 표면으로부터 1인치 아래 위치하고 있다. 실험에 사용한 테스트 영역은 8개의 합성 경질 계재물 중에 2개의 합성 Ti64 2.7% 질소 경질 계재물을 포함한다. 경질 계재물의 신호들은 물노정(water path) 4" 와 10MHz, 0.75" 지름, 그리고 8" 초점 거리(focal length) 광대역 트랜스듀서를 이용하여 얻은 것이다. 실험에서 사용된 A-스캔의 길이는 100MHz 샘플링 비율을 이용하여 얻은 1024 샘플이고 트랜스듀서의 이동 크기(step size)는 0.008" 이다. 테스트 블록의 표면 반사와 물노정 신호는 일반적으로 제외되고 테스트 샘플로부터 얻은 전형적인 C-스캔 이미지는 Fig. 3(c)에 보여진다. (30,30)과 (30,90)근처의 밝은 원들이 내포된 합성 경질 계재물을 가리키고 주변의 흰 부분은 결정립 성분을 가리킨다. 매우 작은 알갱이로 이루어진 초소형 구조(microstructure)는 Fig. 3(c)에서 보여진 것처럼 초음파 신호 추출 시 간섭 노이즈를 발생시킨다. C-스캔 이미지에서 합성 경질 계

재물이 위치한 지점에서 채취한 A-스캔 신호는 Fig. 3(d)에 나타내었다.

일반적으로 진동자의 진동면에서 발생하는 구형파는 인접 점원으로부터 발생한 파와 간섭을 일으켜 평면파를 형성하는데, 파의 간섭에 의한 상호작용으로 인해 진동자 표면으로부터 일정한 거리 내에서는 거리에 따라 초음파의 강도가 최대, 최소가 되는 매우 불규칙한 영역을 만들어 낸다. 이 일정한 거리를 근거리 음장(Fresnel zone 또는 near field)이라고 한다. 근거리 음장 내에서는 하나의 결합이 여러 개의 표시(indication)로 나타날 수 있으며, 결합크기에 관계없이 변화하기 때문에 결합의 해석이 매우 어렵다[18]. 근거리/원거리 음장거리(N)는 일반적으로 사용한 트랜스듀서의 주파수와 직경으로 계산한다. 본 실험에서 사용한 주파수와 직경을 이용하면 N의 값이 약 24인치가 되지만 수침탐상에서 이러한 간섭으로 인해 발생하는 근거리 음장 문제를 해결하기 위하여 초점거리(focal length)가 8인치인 트랜스듀서를 사용한다.

두 단계 적용 노이즈 제거 알고리즘은 Fig. 3에 있는 데이터에 적용된다. 알고리즘의 성능에 영향을 미친 파라미터들은 (i) 스캐닝 포인트 사이 거리 δ (δ 는 Fig. 3-(b)에 표시된 격자점(grid point) 거

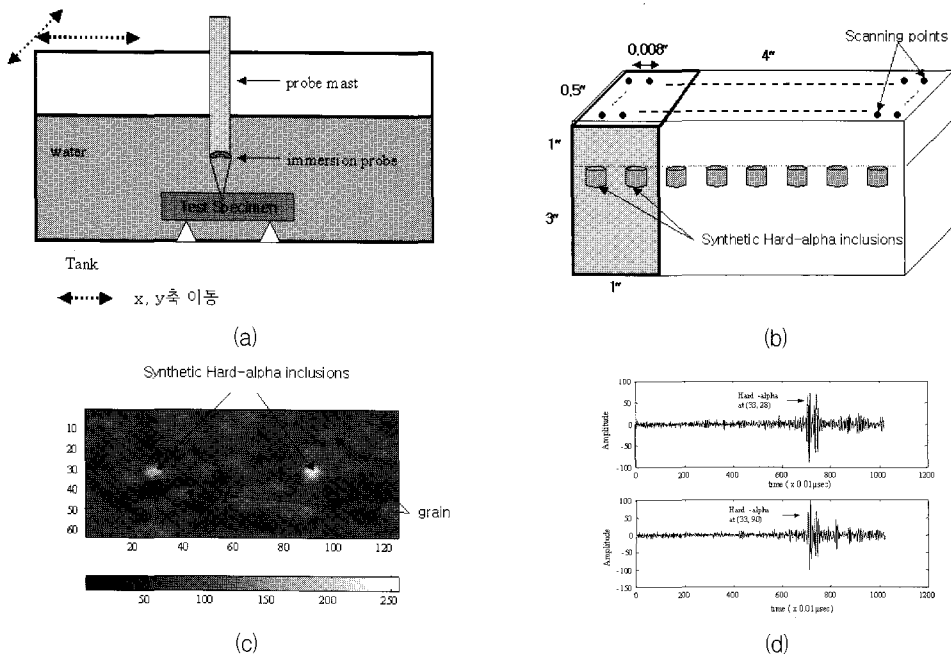


Fig. 3 A Ti specimen including synthetic hard- inclusion. (a) A simplified immersion scanning (b) A test specimen block diagram (c) C-scan ultrasonic image on 63x124 test area, (d) An example of A-scan signal

리임), (ii) 수렴 비율 μ , (iii) 필터 길이 L 이다. 각각 경우에 성능은 2개의 파라미터로 환산하여 평가된다. 즉 SNR과 상관계수를 이용한다. 입력 데이터의 상관특성과 출력에서 처리된 신호들을 통해 다음과 같이 상호 상관 계수를 계산한다.

$$\rho_{du} = \frac{\text{cov}(\mathbf{d}, \mathbf{u})}{\sqrt{\text{cov}(\mathbf{d}) * \text{cov}(\mathbf{u})}} \quad (14)$$

\mathbf{d} 와 \mathbf{u} 는 2개의 입력 벡터이고 $\text{cov}(\cdot)$ 는 공분산을 표현한다.

다단계 적응 필터의 성능을 평가하는데 있어 primary input 신호(결점)의 버스트 특성(burst nature)과 2개 입력신호의 상호 상관관계를 고려한 방법에서 SNR을 정의하는 것이 도움이 된다. LMSE 알고리즘이 최적화하게 수행하기 위하여 결점 지역에서는 높은 상관관계를 보여주고 배경 픽셀에는 낮은 상관관계 특성이 요구된다. 비록 SNR 정의는 많이 있지만 수정된 SNR_{flaw} 함수는 결점 신호에 초점이 맞춰있고 다음과 같이 정의된다[14].

$$SNR_{flaw} = 10 \log \left(\frac{\frac{1}{N_s} \sum_{k=M-N_s/2}^{M+1+N_s/2} y^2(k)}{\frac{1}{M_{d_1}} \sum_{k=1}^{M_{d_1}} y^2(k) + \frac{1}{L-M_{d_2}} \sum_{k=M_{d_1}+N_s}^{L-(M_{d_1}+N_s)} y^2(k)} \right) \quad (15)$$

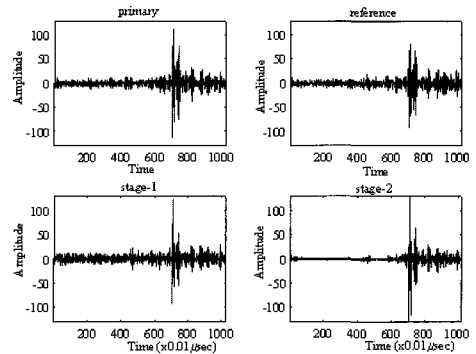
M 은 목표 위치, N_s 는 목표 신호 구간, M_{d_1} 와 M_{d_2} 는 목표 신호구간의 시작과 끝을 나타낸다. 이 파라미터들은 사용자의 시각적 검사를 통해 수동적으로 구할 수 있다.

4.1. 필터길이 효과 (Effect of Filter Length)

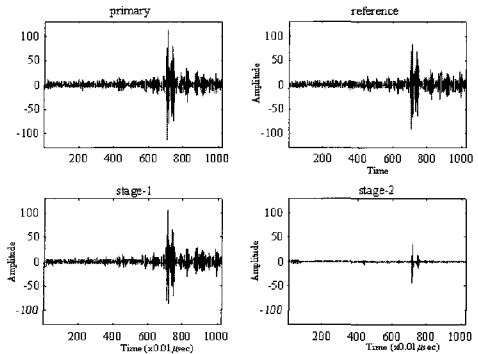
다단계 적응 필터 시스템은 첫번째와 두번째 단계에서 각각 L_1 과 L_2 로 표현되는 다양한 필터 길이를 가진 FIR 적응 필터를 이용해 구현된다. 본 논문에서는 수렴율 $\mu_1 = \mu_2 = 0.1$ 을 이용하여 3가지 서로 다른 필터길이의 효과를 고찰한다 (1. $[L_1, L_2] = [3, 5]$, 2. $[L_1, L_2] = [7, 7]$, 3. $[L_1, L_2] = [7, 9]$). 첫번째와 두번째 단계의 출력에서 감소된 노이즈신호는 Fig. 4에 보여진다. Primary input과 reference input은 트랜스듀서를 0.016"만큼 떨어져서 얻은 신호이고 이 두신호는 모두 결점과 결정립 노이즈 성분을 포함한다.

실험 결과들은 Table 2에 요약된 것처럼 각 단계에서 SNR과 상관관계의 향상으로 평가된다. Table

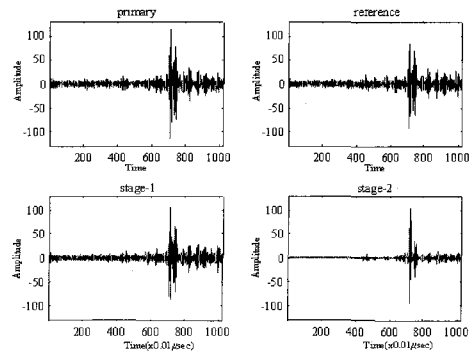
3에서는 두 단계의 적응필터를 사용했을 때 성능향상을 보여준다. 필터 길이 L_1 의 선택은 SNR과 상관계수 ρ 평가방법에서 첫번째 단계의 출력 결과에 영향을 미치지 않는다. 그러나, L_2 의 선택이 2번째 단계 출력 신호의 SNR에 상당히 영향을 미친다는 결과를 나타낸다. 2번째 단계 SNR 칼럼들은



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 A result of adaptive filtering containing flaw and noise signal components-(a) $L_1=3, L_2=5, \mu_1=\mu_2=0.1$, (b) $L_1=L_2=7, \mu_1=\mu_2=0.1$, (c) $L_1=7, L_2=9, \mu_1=\mu_2=0.1$

Table 2 Definition of SNR_{flaw} and cross-correlation coefficients used in multi-stage adaptive noise cancellation technique

Parameters		$SNR_{flaw}(dB)$			ρ	
L_1	L_2	Input	Stage-1	Stage-2	Stage-1	Stage-2
3	5	27.6502	28.1205	37.0675	0.8388	0.8919
7	7	27.6502	29.0110	41.1783	0.8388	0.9014
7	9	27.6502	29.0110	42.9493	0.8388	0.9014

Table 3 SNR_{flaw} and cross-correlation coefficients ($L_1=7, L_2=9$)

Parameters		$SNR_{flaw}(dB)$			ρ	
μ_1	μ_2	Input	Stage-1	Stage-2	Stage-1	Stage-2
0.01	0.01	27.6502	27.427	25.8304	0.8388	0.7379
0.05	0.05	27.6502	29.1195	38.9023	0.8388	0.8511
0.1	0.1	27.6502	29.011	42.9493	0.8388	0.9014
0.05	0.1	27.6502	29.1195	45.4681	0.8388	0.8511

Table 4 SNR_{flaw} comparison based on scanning point distance of transducer

Distance (d)	2	4	6	8
Input SNR	27.6502	27.6502	27.6502	27.6502
Stage-1 SNR	29.011	28.4862	28.0523	30.174
Stage-2 SNR	42.9496	38.8604	35.9458	30.885

노이즈 감소 측면에서 현저한 향상을 보여주고 마지막 컬럼은 결점 신호들 사이의 상관 관련성 역시 증가함을 보여준다. 마찬가지로, Fig. 5에서는 노이즈 신호만을 테스트했을 경우의 결과를 보여 주는 것으로서 노이즈 레벨의 현저한 감소를 보여준다. 이런 경우 결정된 노이즈 구성 요소들에 상호 상관 계수는 1번째 단계에서 0.6534로부터 2번째 단계 0.4665로 감소되었다.

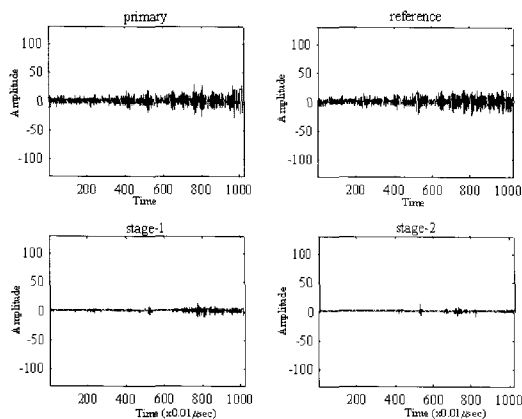


Fig. 5 A result of adaptive filtering on noise signal component ($L_1=7, L_2=9, \mu_1=\mu_2=0.1$)

4.2. 수렴율의 효과 (Effect of Learning Rate)

일반적으로, 적응형 노이즈 제거 시스템의 time complexity는 LMSE 알고리즘의 수렴율 μ 에 의존한다. 다양한 수렴율이 ($\mu=0.01, 0.05, 0.1$) 다단계 적응필터 시스템에 적용되었으며 그 결과는 Table 3에 요약했다. 특히, 이 실험에서는 $L_1=7, L_2=9$ 에서 최적값의 결과를 얻었다. 다단계 적응형 노이즈 제거 시스템에서 수렴율 파라미터는 2번째 단계에서 보다 나은 성능을 보여준다.

4.3. 트랜스듀서의 스캐닝 포인트 거리 효과 (Effect of Transducer Scanning Distance)

노이즈 성분과 관련된 상관관계 정도는 reference와 primary input 신호를 취한 트랜스듀서의 스캐닝 포인트 거리 δ 에 매우 의존적이다. 적응형 노이즈 제거 시스템은 다양한 δ 값을 가지고 FIR 적응필터를 이용해 구현되었고 그 결과들은 Table 4에 요약되어 있다. 최적의 SNR 향상은 트랜스듀서의 스캐닝 포인트 거리가 0.016" (2개의 픽셀)이었을 때 구해진다. 만일 트랜스듀서의 스캐닝 포인트

거리가 증가될 때 두번째 단계 출력의 SNR은 줄어든다. 정규화된 자기 상관과 상호 상관 파라미터들은 트랜스듀서의 스캐닝 포인트 거리가 0.016"만큼 떨어진 두개의 노이즈 신호를 가지고 계산된다 (Fig. 6 참조). 상호 상관 함수는 결정립 노이즈 신호들이 주어진 가정들을 만족시키려는가를 검토한다. 자기 상관 특성은 또한 임펄스에 대한 근접성 (closeness)을 체크한다. Fig. 7는 필터 길이 ($L_1=7$, $L_2=9$), 수렴율 ($\mu_1=\mu_2=0.1$), 트랜스듀서의 스캐닝 포인트 거리 0.016"를 이용한 MANC 결과의 3차원 이미지를 보여준다.

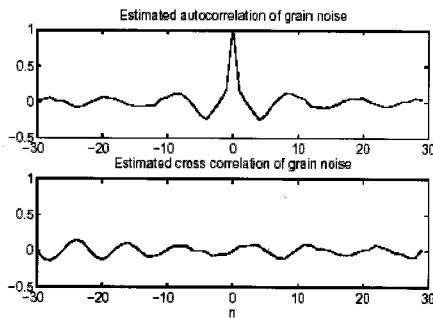


Fig. 6 Normalized auto-correlation and cross-correlation function

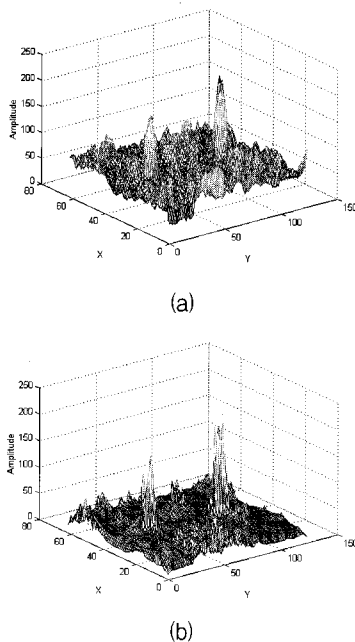


Fig. 7 3-Dimensional resulting image using adaptive filtering (a) Ti specimen containing synthetic hard-inclusion, (b) MSNC resulting image

5. 결론

본 연구의 목적은 초음파 신호들에 있어 상호 관계가 있지 않은 결정립 노이즈를 감소시키는데 있다. 고전적인 고정 기법들은 여기서 논의된 시변 (time-varying) 노이즈에 적용하기에는 부적합하기 때문에 본 논문은 LMSE적용필터를 이용한 다단계 적응 노이즈 제거기법을 제안한다. 다중 단계 적응 노이즈 제거(MANC) 알고리즘은 노이즈를 제거하는데 상당한 성능 향상을 보여주고 있다 (Table 2와 Fig. 7 참조). 제안된 알고리즘은 구현하기 간단하고 용이하며 첫번째 단계에서 적용된 필터 파라미터가 최적값을 가질 때 더 좋은 성능을 보여준다. 알고리즘의 단점은 추가적인 ANC시스템으로 인해 시간에 따른 복잡성(time complexity)이 증가한다. 그러나 제안된 알고리즘은 온라인 검사 응용분야에서 TMS320C25 또는 TMS320C30 DSP 칩을 이용하여 실시간으로 구현할 수 있다. 앞으로의 연구분야로는 제안된 알고리즘의 성능이 필터 파라미터 선택에 따라 영향을 받기 때문에 최적의 필터 파라미터를 자동적으로 선택하는 알고리즘이 연구되어야 한다.

감사의 글

본 논문은 2002년도 대구대학교 교내연구비 지원에 의해 수행되었음.

참고문헌

- [1] J. G. Costa, R. E. Gonzalez, R. E. Guyotte, D. P. Salvano, T. Swift, and R. J. Koenig, "Titanium rotating components review team report," Federal Aviation Administration, Aircraft Certification Service, Engine and Propeller Directorate, Boston, MA, December, (1990)
- [2] K. S. Chan, L. Perocchi, and G. R. Leverant, "Constitutive Properties of Hard-Alpha Titanium," Metallurgical and Materials Transactions, Vol. 31A, pp. 3209-3040, (2000)
- [3] R. B. Thompson, "A Generalized Model of the Effects of Microstructure on Ultrasonic Backscattering and Flaw Detection," Rev. of prog. in Quant. NDE, N.Y., Plenum Press, Vol. 15, pp. 1471-1477, (1996)

- [4] R. L. Scheaffer, and J. T. McClave, Probability and Statistics for Engineers, 2nd Edition. Boston, Duxbury Press, (1986)
- [5] Chien-Ping Chiou, R. Bruce Thompson and Lester W. Schmerr, "Ultrasonic Signal-to-Noise Ratio Enhancement Using Adaptive Filtering Technique", Rev. of prog. in Quant. NDE, N.Y., Plenum Press, Vol. 14, pp.727-732, (1995)
- [6] R. Murthy, N. M. Bilgutay and J. Saniie, "Application of bandpass filtering in ultrasonic nondestructive testing", Rev. of prog. in Quant. NDE, N.Y., Plenum Press, Vol. 8, pp. 759-767, (1989)
- [7] V. L. Newhouse, N. M. Bilgutay, J. Saniie, and E. S. Furgason, "Flaw-to-grain echo enhancement by split-spectrum processing", Ultrasonics, Vol. 20, pp. 59-68, (1982)
- [8] Y. Zhu and J. P. Weight, "Ultrasonic Nondestructive Evaluation of Highly Scattering Materials Using Adaptive Filtering and Detection", IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 41, No.1, pp. 26-33, (1994)
- [9] B. Widrow and S. D. Stearns, Adaptive Signal Processing, Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, (1985)
- [10] B. Widrow, J. R. Glover Jr., J. M. McCool, J. Kaunitz, C. S. Williams, et al, "Adaptive noise cancelling: principles and applications", Proceedings of the IEEE, Vol. 63, No. 12, pp. 1692-1716, (1975)
- [11] C. P. Chiou, R. B. Thompson and L. W. Schmerr, "Ultrasonic Signal-to-Noise Ratio Enhancement Using Adaptive Filtering Technique," Rev. of prog. in Quant. NDE, N.Y., Plenum Press, Vol. 14, pp. 727-732, (1995)
- [12] S. Prasad, S. S. Udpa, L. Udpa and C.-P. Chiou, "Detection of Hard-Alpha Regions in Titanium Using Wavelet Transform Based Techniques," Rev. of prog. in Quant. NDE, N.Y., Plenum Press, Vol. 13, pp. 801-808, (1994)
- [13] S. Bae, J. Kim, L. Udpa and S. S. Udpa, "A New Adaptive Grain Noise Cancellation Filtering Technique", Rev. of prog. in Quant. NDE, N.Y., Plenum Press, Vol. 17, pp. 759-766, (1997)
- [14] J. Kim, L. Udpa, and S. Udpa, "Multi-stage adaptive noise cancellation for ultrasonic NDE", NDT&E International, Vol. 34, pp. 319-328, (2001)
- [15] B. Widrow and J. M. McCool, "A Comparison of Adaptive Algorithms Based on the Methods of Steepest Descent and Random Search", IEEE Trans. on ASSP, Vol. 24, pp. 615, (1976)
- [16] Simon Haykin, Adaptive Filter Theory, 2ed Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, (1991)
- [17] C. P. Chiou, L. W. Schmerr and R. B. Thompson, "Statistical Detection for Ultrasonic NDE," Rev. of prog. in Quant. NDE, N.Y., Plenum Press, Vol. 13, pp. 871-878, (1994)
- [18] Josef Krautkramer and Krautkramer, Herbert, Ultrasonic Testing of Materials, 4th/revised edition, Springer Verlag, (1990)