

웨이브렛 변환 평면에서 적응 필터를 이용한 초음파 비파괴검사의 스펙클 잡음 감소

Speckle Noise Reduction of Ultrasonic NDT Using Adaptive Filter in WT Domain

전 철 완*, 전 광 석**, 이 영 석*, 이 진*, 김 덕 영*, 김 성 환*
(C. W. Jon*, K. S. Jon**, Y. S. Lee*, J. Lee*, D. Y. Kim*, S. H. Kim*)

*본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행되었음.

요 약

발전소와 같은 산업 시설물들은 높은 온도와 압력 등의 환경 하에서 지속적으로 안전하게 동작하는 것이 중요하다. 초음파를 이용한 비파괴 검사는 효율적이고 간편하기 때문에 이러한 시설물의 구조적 결함이나 안전성을 조사하기 위해 널리 이용되고 있다. 본 논문에서는 불 균일한 매질의 산란 입자들에 의해 생기는 스펙클 잡음을 제거하기 위하여 웨이브렛 변환 평면(wavelet transform domain)에서 LMS 알고리즘을 적용하였다. 사용한 신호의 통계적 특성을 알기 위하여 RUN 테스트를 수행하여 신호가 비정상성을 나타냄을 보였고, WTLMS 알고리즘을 사용하여 잡음을 제거한 후 입력 자기상관 행렬의 condition number 및 독립 입력과 지연된 입력 각각에 대한 출력의 신호 대 잡음비, 그리고 3차원 영상의 관점에서 LMS 알고리즘과 비교하였다. 실험 결과 웨이브렛 변환 평면에서 LMS 알고리즘을 이용해 수행한 결과가 시평면에서 수행한 결과보다 우수한 성능을 나타내었다.

ABSTRACT

Industrial equipment, such as power plant, is required to operate reliably, continuously and economically under rather severe conditions of temperature, stress, and environment. To test structural integrity and fitness, ultrasonic nondestructive testing is used because of effectiveness and simplicity. In this paper, wavelet transform based least mean square(LMS) algorithm is applied to reduce the influence of the interference occurring between randomly positioned small scatters. The RUN test is performed to check the nonstationarity of the speckle noise signal. The performance of this new approach is compared with that of the time domain LMS algorithm by means of condition numbers, signal-to-noise ratio and 3-D image. As a result, the wavelet transform based LMS algorithm shows better performance than the time domain LMS algorithm in this experiment.

1. 서 론

중요 산업 시설물들의 신뢰성 있고 안전한 동작을 유지하기 위한 정기적인 검사의 필요성은 시설물의 효율성이나 경제적 측면에서 날로 중요시되고 있다. 한 예로 발전소에서 전력을 생산하는데 필요한 여러 가지 설비, 특히 원자로나 회전기기, 또는 고온, 고압의 증기나 물이 지나가는 스테인레스 스틸 수송관등은 미세한 결함이 존재

해도 발전설비 전체에 위험을 초래하기 때문에 발견을 중지하고 적절한 조치를 취해야 한다. 발전소에서 계속적인 설비 가동에 의해서 발생하는 결함은 갑자기 생기기보다는 미세한 크기에서 시작해 점차 커지면서 문제를 야기하기 때문에 정기적인 검사를 통해 결함의 크기와 심각한 정도를 정확히 파악하여 적절히 대처해야 한다. 발전소 설비의 고장은 드물지만 만약 발생하였을 경우 발전소 자체의 손실뿐 아니라 다른 산업에도 커다란 파급효과를 초래하여 막대한 물질, 인적 손실을 입힐 수 있기 때문에 사고에 대한 예방이 중요하다. 이러한 예방 방법으로 초음파, 방사선, 전자기 등을 이용한 비파괴 검사(nondestructive test)가 이용되고 있는데, 그 중 초음파를

*서울시립대학교 전자공학과

**주성전문대학 전자통신과

접수일자: 1996년 4월 8일

이용한 검사 방법은 장비의 휴대가 간편하고 검사가 용이하기 때문에 널리 이용되고 있으며 국내외에서 다양하게 연구되고 있다[1][2].

초음파는 음파의 성질을 가지면서도 파장이 훨씬 짧기 때문에 재질 내의 미세한 결함에서도 특정 반사파를 내보냄으로써 미세측정에 이용할 수 있다. 하지만 반사된 신호에는 원하는 신호 성분 이외에 배경을 구성하고 있는 입자들의 산란에 의해 발생하는 스펙클 잡음(speckle noise)을 포함하고있기 때문에 신호 대 잡음비가 떨어지는 등 신호 해석에 큰 어려움을 준다. 초음파 비파괴 검사 분야에서 스펙클 잡음은 일종의 알갱이 잡음(grain noise)으로써 B-모드 스캔(B-mode scan)등 영상화했을 경우 얼룩이나 점으로 나타나게 된다[3][4]. 스펙클 잡음의 원인은 초음파가 불균일한 매질의 산란 입자들에 의해 간섭(interference) 현상을 일으키기 때문인데 이외에도 탐촉자의 특성, 입사 조건(투사하는 방향)등의 복합적인 원인을 갖고 있어 완전히 제거하는데 어려움이 따른다. 스펙클 잡음이 클 경우 결함에 의해 반사된 신호를 효과적으로 분석할 수 없으므로 원하는 신호성분을 보존하면서 스펙클 잡음 성분을 제거하는 것이 무엇보다 중요하다.

이러한 스펙클 잡음을 제거하기 위하여 그 동안 선형 대역통과 필터링 방법[5][6]이나 주파수 분할 방법[7][8]등의 여러 방법이 시도되었다. 그 중 주파수 분할 방법은 널리 이용되고 있는 반면에 파라미터 선택에 민감하다는 단점이 있다[9]. 또한 이의 제거를 위하여 적응 필터링 방법을 적용한 연구가 계속되어 왔는데[10], 근래에 들어 Y. Zhu[11]는 반사된 초음파 신호에서 잡음을 제거하기 위하여 LMS 알고리즘을 이용함으로써 신호 대 잡음비를 개선하여 보다 효율적으로 결함을 검출할 수 있게 하였다. 하지만 초음파 신호의 통계적 특성이 갑자기 변화하는 부분, 즉 신호가 비정상성(nonstationary)을 나타낼 경우 수렴률이 떨어져서 효과적으로 잡음을 제거하지 못하는 한계를 갖고 있다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 비정상신호 해석[12]-[14]에 효과적인 웨이브렛 변환(wavelet transform)을 이용하여 웨이브렛 변환 평면으로 초음파 신호를 옮긴 후 LMS 알고리즘을 수행함으로써 알고리즘의 수렴률을 높이고, 신호 대 잡음비를 개선하고자 하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 일반적으로 산업 시설물에 많이 사용되는 재질인 스테인레스 스틸(stainless steel)을 이용해 시편을 만들어 데이터를 수집한 다음 신호의 통계적 특성을 알기 위해 RUN 테스트[15]를 수행하였고, WTLMS(wavelet transform least mean square) 알고리즘을 사용하여 잡음을 제거한 후 입력 자기 상관 행렬(input autocorrelation matrix)의 condition number 및 독립 입력과 지연된 입력 각각에 대한 출력의 신호 대 잡음비, 그리고 3차원 영상의 관점에서 Y. Zhu가 제안한 방법과 성능을 비교 검토하였다.

II. 웨이브렛 변환 평면에서의 적응 필터

1. 웨이브렛 변환

웨이브렛 변환 이론은 신호를 특정한 함수들의 집합(wavelet set)을 가지고 모델링하는 수학적 도구이다. 웨이브렛 함수는 진동하며 평균값이 0인 유한 에너지 함수라고 할 수 있으며, 특정한 하나의 웨이브렛(mother wavelet)으로부터 발생하는 웨이브렛 함수들의 집합은 임의의 함수를 스케일링 파라미터(scaling parameter)와 병진 파라미터(translation parameter)의 2차원 평면에 근사화하는데 사용될 수 있다. 즉, 임의의 함수는 적당한 가중치를 준 웨이브렛 집합의 각 원소의 선형적 결합으로 근사화될 수 있으며, 이 가중치는 웨이브렛 집합의 각 원소에 신호를 투사시켜 얻을 수 있는데 이를 식 (1)과 같이 웨이브렛 변환으로 나타낼 수 있다[16].

$$W_g f(a, \tau) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int f(t) g^*\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt \quad (1)$$

a : 스케일링 파라미터

τ : 병진 파라미터

$g(t)$: mother 웨이브렛 함수

웨이브렛 변환 평면에 투사된 함수는 웨이브렛 역변환을 거쳐 식 (2)와 같이 복원될 수 있다.

$$f(t) = \frac{1}{C_g} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_g f(a, \tau) |a|^{-\frac{1}{2}} g\left(\frac{t-\tau}{a}\right) \frac{d\tau da}{a^2} \quad (2)$$

웨이브렛 변환은 스케일링 파라미터 a 와 병진 파라미터 τ 에 대해 서로 직교성을 갖는 웨이브렛 계수를 발생시키며, 특히 스케일링 파라미터 a 의 변화에 따라 신호의 주파수

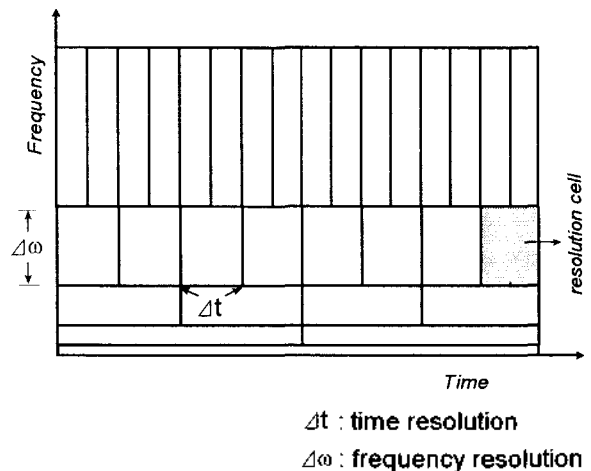


그림 1. 웨이브렛 변환의 시간-주파수 분해능
Fig. 1. Time-frequency resolution of wavelet transform

대역이 변화하는 특징을 갖고 있다. 즉, a 가 커지면 mother 웨이브렛 함수 $g(t)$ 로부터 발생된 웨이브렛 함수의 폭이 작아지기 때문에 신호의 고주파 성분 해석에 용이하며, a 가 작아지면 반대로 저주파 성분 해석에 용이하다.

이와 같은 웨이브렛 변환의 특성은 신호의 주파수 특성에 맞추어 효율적으로 웨이브렛 계수를 조절할 수 있기 때문에 그림 1과 같이 주파수 및 시간 영역에 대한 분해능(resolution)이 서로 다른 형태를 띠면서 신호를 다양하게 관측할 수 있는 multiresolution 해석을 가능하게 해준다.

2. 웨이브렛 변환 평면에서의 LMS 알고리즘

평균 자승 오차 (mean square error)의 관점에서 LMS 알고리즘은 간단한 연산으로 원시 신호(primary signal)와 기준 신호(reference signal)사이의 오차를 최소화시킬 수 있는 효율적인 알고리즘으로서 식 (3)에 의해 필터 계수를 갱신할 수 있다.

$$W_{k+1} = W_k + 2\mu_k e_k X_k \quad (3)$$

$W_k = [w_k(0), w_k(1), \dots, w_k(M-1)]^T$: 필터의 계수 벡터
 $X_k = [x_k(k), x_k(k-1), \dots, x_k(k-M+1)]^T$: 기준 신호 벡터
 μ_k : 입력의 전력으로 정규화된 적응 상수(adaptation constant)

식 (3)에서 k 는 k 번째 순환을 의미하며, M 은 필터의 차수를 나타낸다. 그러나 LMS 알고리즘은 구조의 간편성과 효율성에도 불구하고, 과도상태에서의 수렴 시간이 느리다는 단점 때문에 빠른 수렴 특성을 요구하는 분야에서는 사용이 제한 될 수밖에 없다. 그러므로, LMS 알고리즘이 빠른 수렴 시간을 얻을 수 있다면, 간단한 구조와 더불어 다양한 분야에서 사용될 수 있다.

일반적으로 LMS 알고리즘의 수렴 시간은 식 (4)와 같이 입력 자기 상관 행렬의 condition number와 관계가 있다[17].

$$Cond \triangleq \lambda_{\max}(t) / \lambda_{\min}(t) \geq 0$$

$\lambda_{\max}(t)$: R_x 의 가장 큰 고유치
 $\lambda_{\min}(t)$: R_x 의 가장 작은 고유치
 R_x : 입력 자기 상관 행렬

식 (4)로부터 condition number가 1에 가까울 값을 가질수록 LMS 알고리즘의 수렴 시간이 더 빨라질 수 있으며, 특히 수렴시간은 식 (5)와 같은 하한(lower bound)을 갖는다[17].

$$t_c \geq t_r(R_x) / 2\lambda_{\min}(t) \quad (5)$$

$tr(\cdot)$: trace of \cdot

식 (4)와 (5)로부터 입력 자기 상관 행렬이 적절한 적교

변환에 의해 대각 성분만 기준 신호의 전력으로 존재하고 나머지 성분은 0으로 할 수 있다면 LMS알고리즘의 수렴 시간을 빠르게 할 수 있다.

웨이브렛 변환 행렬을 Q 라 할 때 시평면 기준 신호 x_k 에 대한 입력 자기 상관 행렬 R_x 와 웨이브렛 변환 평면에서의 입력 자기 상관 행렬 R_w 사이에는 식 (6)과 같은 관계식이 성립한다

$$R_w = Q R_x Q^T \quad (6)$$

식 (6)으로부터 각각 양쪽 평면의 가장 큰 고유치들 $\lambda_{\max}(t)$ 와 $\lambda_{\max}(w)$ 로 나타낼 때 이들이 갖는 상한은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_{\max}(t) \leq tr(R_x)$$

$$\lambda_{\max}(w) \leq tr(R_w) \quad (7)$$

행렬 이론으로부터 식 (7)의 양쪽 평면에서의 trace는 서로 같다. 즉,

$$tr(R_x) = tr(R_w) \quad (8)$$

식 (8)로부터 시평면 및 웨이브렛 변환 평면에서의 condition number는 각각 입력 자기 상관 함수의 가장 작은 고유치인 $\lambda_{\min}(t)$ 와 $\lambda_{\min}(w)$ 에 의해 결정됨을 알 수 있다.

그러나, R_w 는 식 (6)에 의해 이미 대각화되어 있으므로, $\lambda_{\min}(t) \leq \lambda_{\min}(w)$ 관계가 성립함을 알 수 있으며, 이로부터 식 (9)와 같은 관계가 성립함을 알 수 있다.

$$Cond(R_x) \geq Cond(R_w) \geq 1 \quad (9)$$

결국, 식 (9)를 통하여 LMS 알고리즘을 웨이브렛 변환 평면으로 옮겨서 수행하였을 경우 수렴 시간이 빨라짐을 알 수 있다.

본 논문에서 사용한 적응 잡음 제거기(adaptive noise canceller)[17]는 기준 신호를 웨이브렛 변환을 한 후 LMS 알고리즘을 이용하여 잡음을 제거하도록 설계하였다. 그림 2는 이에 대한 블록선도를 나타내고 있다. 여기서 $d(n)$ 은 원시 신호, $x(n)$ 은 기준 신호이고, $g_m(n)$ 은 웨이브렛 대역 통과 필터의 임펄스 응답이고, $w_m(n)$ 은 LMS필터 계수이다. 그림 2(a)는 원시 신호와 서로 독립적인 신호를 기준 신호로 선택한 경우이고 그림 2(b)는 원시 신호를 일정시간 동안 지연시켜 기준 신호로 사용하였다.

III. 실험 및 결과 고찰

실험을 위하여 본 논문에서는 금속이 고온, 고압등의 요인에 지속적으로 노출되었을 때 발생하는 금속의 균열, 부식과 같은 환경 조건을 고려하여 직경이 90mm, 높이가

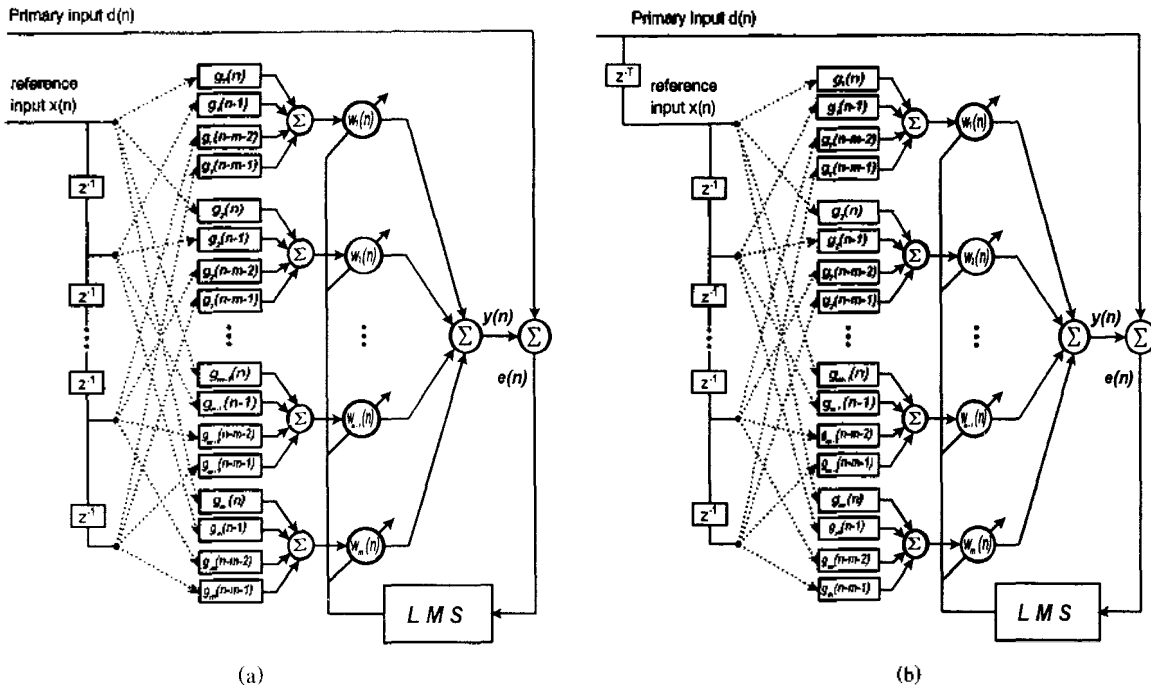


그림 2. 웨이브렛 변환 평면에서의 적응 필터

- (a) 독립적인 기준 신호를 사용한 경우
- (b) 지연시킨 기준 신호를 사용한 경우

Fig. 2. Adaptive filter in wavelet transform domain

- (a) In case of independent reference signal
- (b) In case of delayed reference signal

50mm인 원통의 스테인레스 스틸(type 303)의 중앙에 직경 1.4mm의 바닥이 평평한 구멍(FBH: flat-bottomed hole)을 24mm의 길이로 뚫어서 실험 시편을 만들었다.

실험은 Panametrics사의 5MHz, A109S모델의 무초점(unfocused)탐촉자를 이용하여 데이터를 얻은 후 이를 디지털 오실로스코프(Hewlett Packard 54505 B)를 통과하여 IEEE 488 인터페이스로 연결된 IBM PC에서 알고리즘이 수행되도록 하였다. 수행된 알고리즘은 시평면 LMS 알고리즘과 웨이브렛 변환 평면 LMS 알고리즘

로서, condition number를 비교하고, 알고리즘 수행후 그 결과는 스펙클 잡음 제거 성능을 나타내는 신호 대 잡음비를 이용하여 평가하였으며, 3차원 영상을 통하여 스펙클 잡음 제거 성능을 살펴보기 위하여 64년의 A-scan을 통하여 얻은 데이터를 이용하여 스펙클 잡음 제거 전과 제거 후의 상태를 나타내었다.

그림 3은 본 연구에서 사용한 실험장치의 블록선도를 나타낸 것이다.

초기 데이터의 수집은 동일한 조건의 실험환경에서 5번의 실험을 연속 수행하여 얻었으며, 특히 독립적인 신호를 기준 신호로써 이용하는 그림 2(a)와 같은 구조의 적응 필터에서는 기준 신호를 받은 위치에서 옆으로 1.0mm떨어진 부분에서 원시 신호를 수집하였다. 수집한 데이터를 이용하여 LMS 알고리즘과 WTLMS 알고리즘을 수행할 때에는 각 데이터에 대하여 가장 좋은 신호 대 잡음비를 갖는 차수와 파라미터에 고정시켜 사용하였으며, 실험적으로 LMS의 경우 수렴상수는 0.01-0.1, WTLMS의 경우에는 0.001-0.1사이에서 가장 좋은 신호 대 잡음비를 얻을 수 있었다.

그림 4는 LMS와 WTLMS필터에 들어가는 입력 데이터의 자기 상관 행렬의 condition number를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 LMS 알고리즘을 수행하기 전에 웨이브렛 변환을 거치면 condition number가 줄어

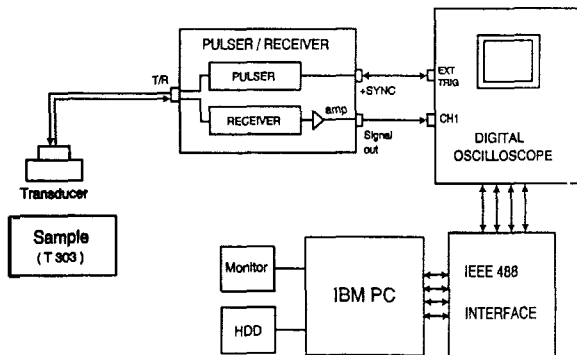


그림 3. 초음파 신호 검출 장치의 블록선도

Fig. 3. Block diagram of ultrasonic signal detection unit

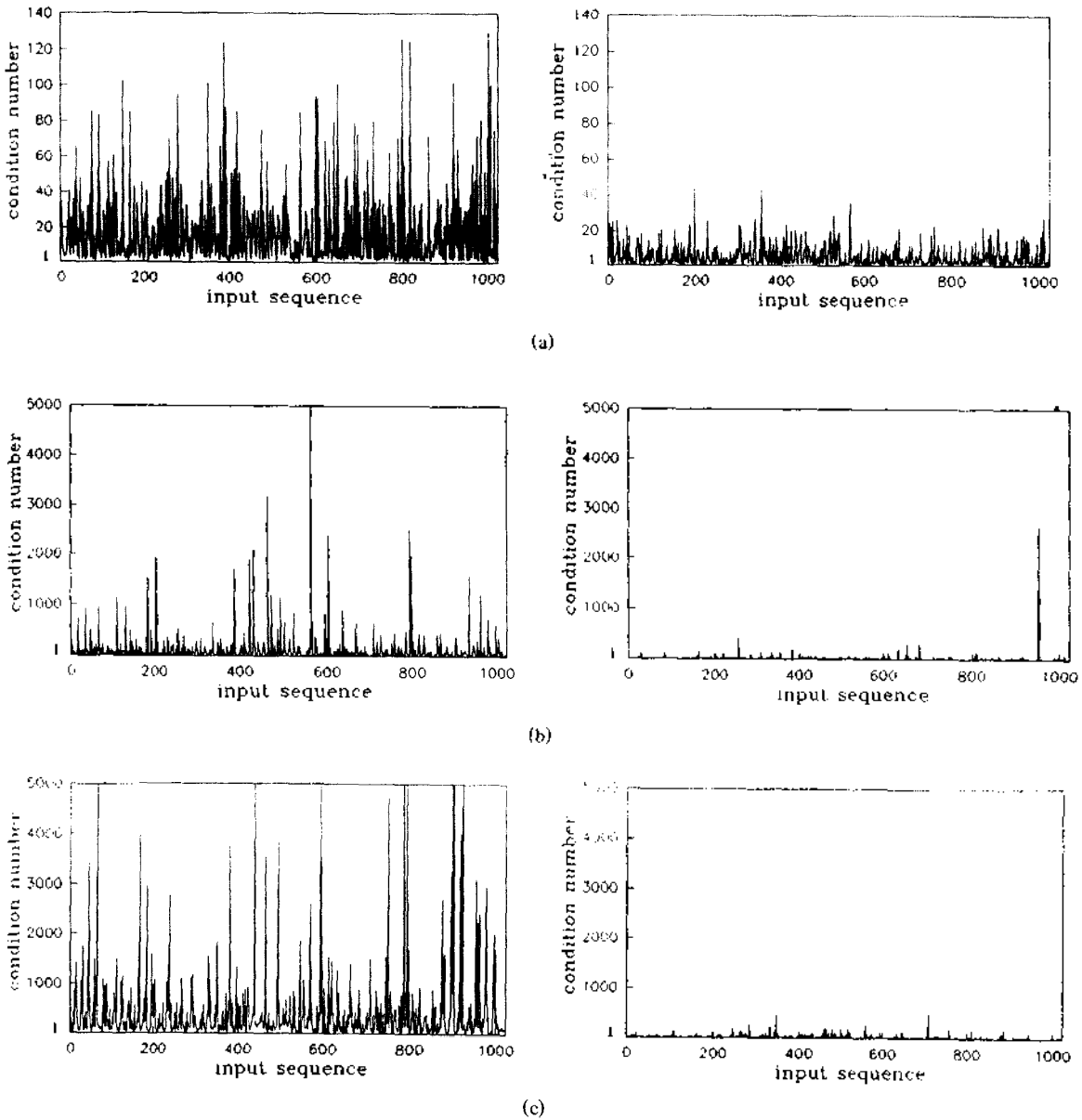


그림 4. LMS 필터(좌측) 및 WTLMS 필터(우측)의 입력 자기 상관 행렬의 condition number (a)4차 (b)8차 (c)16차

Fig. 4. Condition number of input autocorrelation matrix for LMS filter(left) and WTLMS filter(right) (a)4'th order (b)8'th order (c)16'th order

들을 알 수 있다. 이는 앞에서 설명하였듯이 수렴 시간과 밀접한 관련이 있기 때문에 웨이브렛 변환을 거칠 경우 수렴 시간이 줄어들 수 있다.

그림 5는 서로 독립인 경우에 적응 필터에 들어가는 원시 신호와 기준 신호를 나타내고 있는데 전반적인 신호 경향이 시간축에 따라 약간 증가하는 특성을 나타내고 있다. 이는 매질의 입자 및 탐촉자의 특성 등에 의해 발생하는 스펙트럼 잡음의 비정상성을 나타낸다.

표 1은 기준 신호의 비정상성을 검증하기 위한 신호의

통계적 특성값을 구한 것이다. 신호의 통계적 특성을 이용하여 비정상성을 검증하는 방법은 Bendat와 Piersall[15]이 제안한 방법을 이용하였다. 기준 신호의 각 구간별 평균과 표준편차를 구하여 Run 테스트를 수행하고 이로부터 유의수준(level of significance)을 이용하여 대상 신호의 상태를 검사하였다. 표 1의 통계값을 이용해 유의수준을 0.05로 하여 RUN 테스트를 수행한 결과 임계 하한값은 9이고 임계 상한값은 21로 나타나 RUN의 수가 7이 임계값의 범위에 포함되지 않아 신호의 비정상성을 검증할

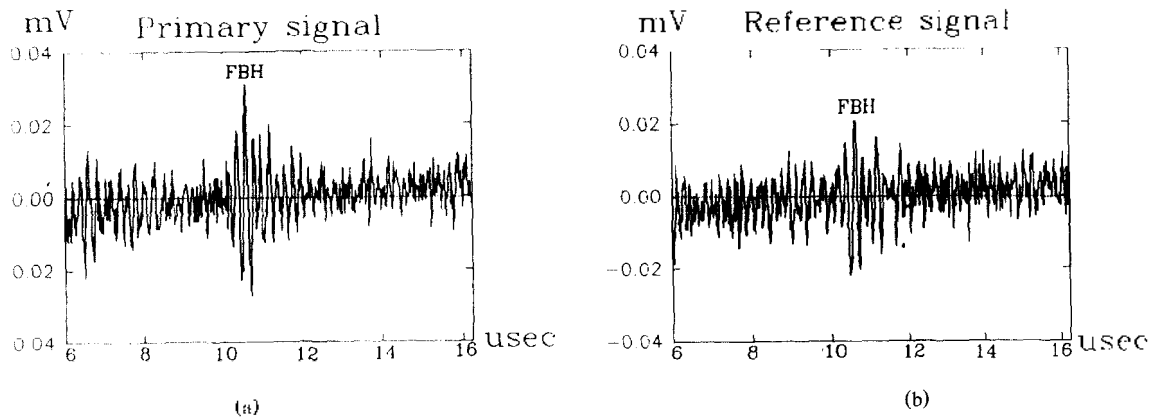


그림 5. 적응 필터의 입력 신호 (기준 신호와 원시 신호가 서로 독립)
(a)원시 신호 (b)기준 신호

Fig. 5. Input signal of adaptive filter(reference signal is independent to primary signal)
(a)Primary signal (b)Reference signal

표 1. 기준 신호의 식 구간별 통계값(평균, 표준편차)
Table 1. Interval statistical value of input signal(mean, standard deviation)

블럭	평균 ($\times 10^{-3}$)	표준편차 ($\times 10^{-3}$)	블럭	평균 ($\times 10^{-3}$)	표준편차 ($\times 10^{-3}$)
1	-3.849	6.975	16	2.281	8.579
2	-4.125	3.791	17	0.710	5.641
3	-2.526	3.474	18	0.167	5.272
4	-3.123	4.011	19	1.757	4.311
5	-2.893	5.449	20	1.592	3.231
6	-1.358	5.270	21	1.665	4.282
7	-1.248	4.804	22	0.866	3.828
8	-2.673	5.173	23	1.261	4.589
9	-1.211	6.516	24	2.290	4.063
10	-0.982	5.730	25	2.171	4.072
11	-1.074	4.156	26	2.116	3.099
12	-0.623	4.106	27	1.693	4.812
13	2.300	6.010	28	2.300	4.930
14	-2.801	15.234	29	3.485	3.491
15	-1.257	6.791	30	2.042	4.084

수 있었다.

그림 6은 기준 신호가 원시 신호와 독립일 때 LMS필터와 WTLMS필터의 출력 파형을 나타내고 있다. 이때 신호 대 잡음비는 LMS가 5.8dB WTLMS가 7.1dB 개선

표 2. LMS와 WTLMS의 신호 대 잡음비 비교(독립 입력)
Table 2. SNR Comparison of LMS and WTLMS(independent input)

데이터	입력 SNR(dB)	LMS 출력 SNR(dB)	WTLMS 출력 SNR(dB)
데이터 1	10.867	17.840	21.244
데이터 2	13.343	19.573	19.740
데이터 3	14.679	21.107	25.306
데이터 4	16.812	22.384	23.520
데이터 5	18.743	22.759	23.881
평균	14.889	20.733	22.738

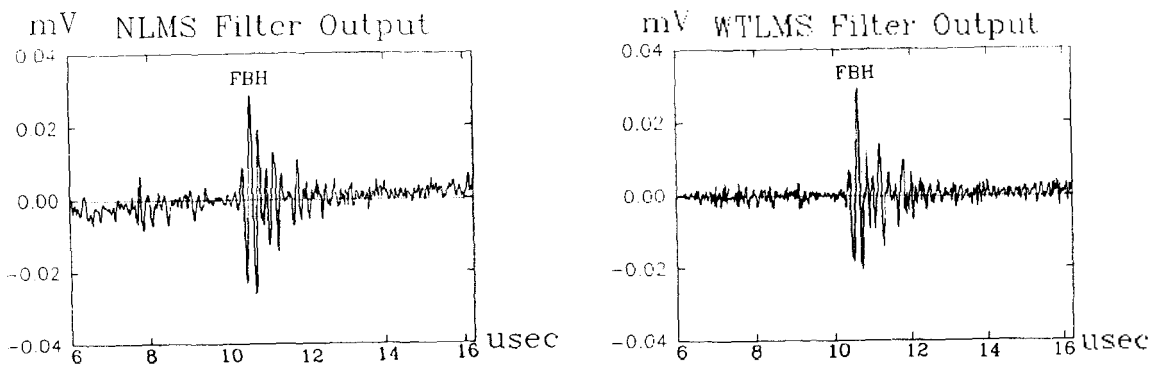


그림 6. 적응 필터의 출력 신호 (기준 신호와 원시 신호가 서로 독립)
(a)LMS(Y.Zhu 방법) (b)WTLMS(제안된 방법)

Fig. 6. Output signal of adaptive filter(reference signal is independent to primary signal)
(a)LMS(Y.Zhu's method) (b)WTLMS(proposed method)

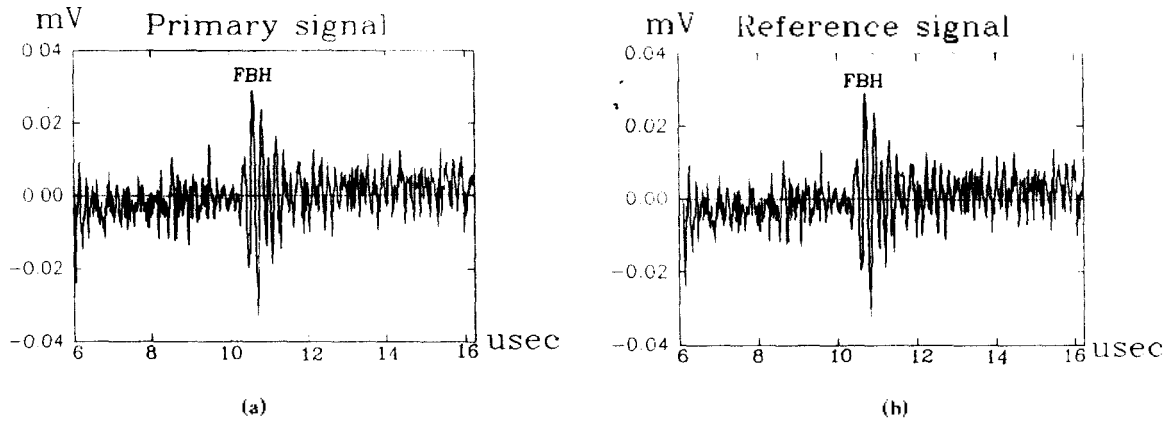


그림 7. 적응 필터의 입력 신호 (지연된 원시 신호가 기준 신호로 되는 경우)
(a)원시 신호 (b)기준 신호

Fig. 7. Input signal of adaptive filter(reference signal is delayed version of the primary signal)
(a)Primary signal (b)Reference signal

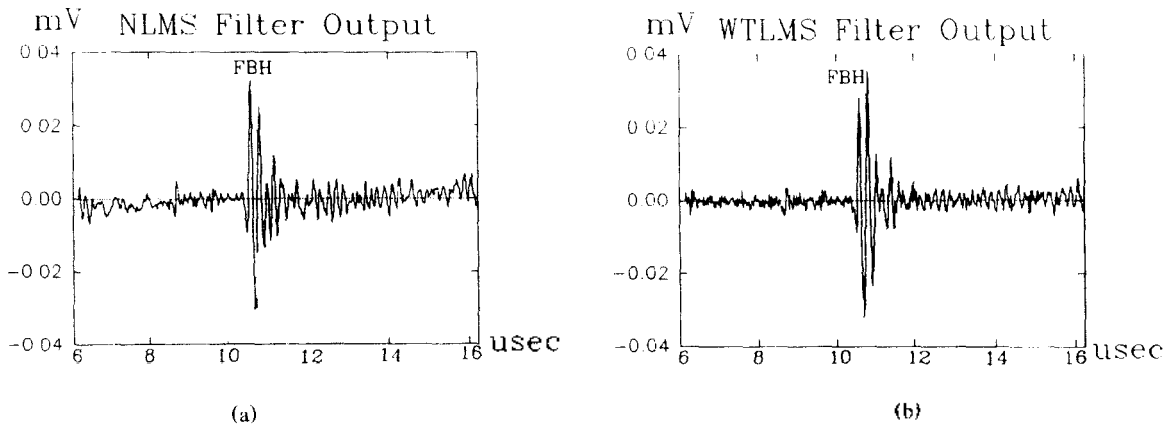


그림 8. 적응 필터의 출력 신호 (지연된 원시 신호가 기준 신호로 되는 경우)
(a)LMS(Y.Zhu 방법) (b)WTLMS(제안된 방법)

Fig. 8. Output signal of adaptive filter(reference signal is delayed version of primary signal)
(a)LMS(Y.Zhu's method) (b)WTLMS(proposed method)

되어 WTLMS가 좀더 나은 성능을 보였다. 이는 실제로 현장에서 매우 미세한 결함까지 검출할 수 있음을 나타낸다.

표 2는 기준 신호와 원시 신호가 서로 독립일 때 신호 대 잡음비가 서로 다른 다섯 개의 기준 신호를 사용하여 파라메터 값을 변화시키면서 출력 신호의 신호 대 잡음비를 구하여 평균한 것이다. 데이터에 따라서 차이는 있지만 LMS는 신호 대 잡음비가 4-7dB개선을 보였으며 WTLMS는 5-10dB정도 개선 시켰다. 전체적인 평균을 보면 약 2dB정도 WTLMS의 개선정도가 좋음을 보였다.

그림 7에서 기준 신호는 원시 신호를 0.1 μ sec 지연시켜

서 얻은 것이다. 실제로 산업 현장에서 두개의 독립적인 신호를 원시 신호와 기준 신호로 사용하기 위해서는 두개의 센서를 사용해야 하기 때문에 이와 같이 원시 신호를 받아 일정시간 지연시켜 사용하는 것이 응용하는데 적합하다고 할 수 있다.

그림 8은 원시 신호를 지연시켜 기준 신호로 사용하였을 때 구한 출력 파형이다. 이 경우 LMS가 6dB WTLMS가 8dB 정도의 개선을 보였다.

표 3은 5개의 데이터를 가지고 파라메터 값을 변화시키면서 각 필터의 출력에 대한 신호 대 잡음비를 평균한 것이다. 데이터에 따라서 약간의 차이는 있지만 LMS가

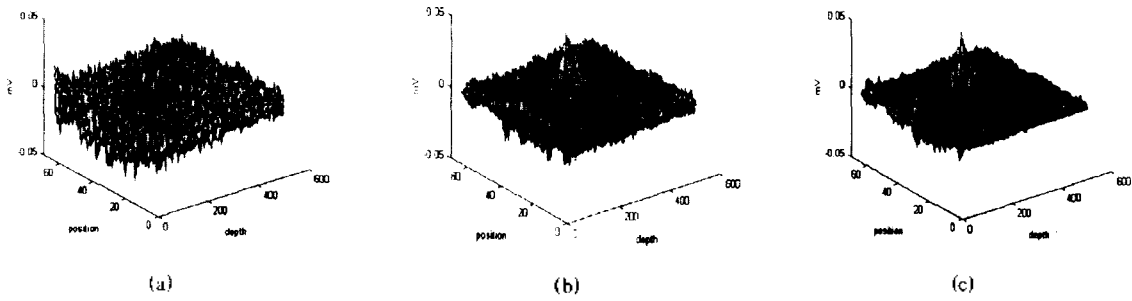


그림 9. 64 A-scan 신호에 대한 입력과 출력 영상
 (a)입력 영상 (b)출력 영상(LMS 방법)
 (c)출력 영상(WTLMS 방법)

Fig. 9. Input and output image for 64 A-scan signal
 (a)Input image (b)Output image(LMS method)
 (c)Output image(WTLMS method)

표 3. LMS와 WTLMS의 신호 대 잡음비 비교(지연된 입력)
 Table 3. SNR Comparison of LMS and WTLMS(delayed input)

데이터	입력 SNR(dB)	LMS 출력 SNR(dB)	WTLMS 출력 SNR(dB)
데이터 1	10.867	14.663	20.036
데이터 2	13.343	18.459	20.049
데이터 3	14.679	22.385	24.300
데이터 4	16.812	22.512	23.770
데이터 5	18.743	24.307	26.914
평균	14.889	20.465	23.014

4-8dB, WTLMS가 6-10dB정도의 개선을 보여 전체적으로는 WTLMS가 LMS에 비해서 2.5dB정도의 개선을 보였다.

이상의 두 가지 구조에 대한 분석 결과 WTLMS가 LMS에 비해 신호 대 잡음비가 2-3dB 더 개선되었음을 알 수 있으며, 그림 6과 그림 8의 출력 결과로부터 약 13μsec에서 16μsec 사이에 발생하는 선형 증가 현상과 같이 신호의 비정상성이 발생하는 부분을 WTLMS 알고리즘이 LMS 알고리즘에 비해 강하게 억제하는 경향이 있음을 알 수 있다.

그림 9는 탐촉자를 연속해서 0.375mm씩 이동하면서 데이터를 받아 LMS와 WTLMS 알고리즘을 이용하여 스펙클 잡음을 제거한 후 3차원 영상으로 나타낸 것이다. 그림으로부터 본래 스펙클 잡음에 쌓여 구분할 수 없었던 결함이 LMS와 WTLMS 알고리즘을 수행한 후 뚜렷이 나타나는 것을 관측할 수 있다. WTLMS알고리즘을 수행한 결과 기존의 LMS알고리즘에 의한 영상과 비교해 볼 때 2-3dB정도의 개선 효과가 나타나므로 영상이 크게 향상되어 보이지는 않지만 초음파 신호의 비정상성이 두드러질 경우 영상 개선 효과가 뚜렷이 보일 것으로 생각된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 현재 산업 현장에서 폭넓게 사용되고

있는 초음파를 이용한 비파괴 검사 방법을 이용하여 결함을 추출하는데 있어서 발생하는 스펙클 잡음을 감소시키기 위해 WT 평면에서 LMS 알고리즘을 수행하였다.

처음에 탐촉자로 받은 데이터는 원하는 신호 성분에만 포함된 잡음의 영향으로 신호 해석에 많은 장애 요인이 되기 때문에 신호 해석에 앞서 이러한 잡음을 제거하는 것이 중요하다. 특히 재질의 특성이 주 원인이 되어 나타나는 스펙클 잡음을 제거하여 매우 작은 결함에 의해 발생하는 순수한 신호를 추출하는 것은 정확한 신호 해석을 하는데 있어 필수 요소라 할 수 있다. 이러한 잡음 제거를 위해 많은 연구가 진행되고 있는 시점에서 본 논문에서 사용한 WTLMS 알고리즘을 잡음 제거에 적용을 시도한 결과 기존의 시평면 LMS알고리즘에 비하여 신호 대 잡음비를 향상시킬 수 있었다. 기존의 시평면 LMS알고리즘과 비교해 볼 때 신호 대 잡음비가 평균 2-3dB 개선됨을 알 수 있었다.

발전소 설비와 같이 위험 요소가 항상 존재하는 산업 현장에서 원자로나 회전기기등 높은 온도와 압력을 받는 시설물 및 부식에 의한 결함이 발생하기 쉬운 시설물에 대해서 정기적인 검사를 위한 효율적인 알고리즘이 중요하다고 볼 때, WT평면에서의 스펙클 잡음 감소 방법을 사용할 경우 커다란 도움이 되리라 사료된다.

참 고 문 헌

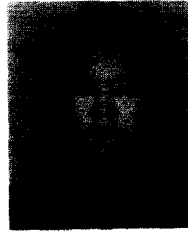
1. J. Michael, Jr. Avioli, "A DSP-based PC system for power plant inspection," EPRI NDE Centre Charlotte, North Carolina.
2. 산 전철, 전 계석, "고체내부의 결함형태에 따른 초음파 신호의 특징추출," 한국음향학회지, 제 14권, 제 6호, pp. 62-67, 1995.
3. J. S. Lim and H. Nawab, "Techniques for speckle noise removal," Opt. Eng., vol. 20, May/June 1981.
4. F. S. Cohen, "Modeling of ultrasound speckle with application in flaw detection in metals," IEEE Trans. Signal

Proces., vol. 40, No. 3, pp. 623-631, March 1992.

5. P. M. Shankar, U. Bencharit, N. M. Bilgutay and J. Saniie, "Grain noise suppression through bandpass filtering," *Materials Evaluation*, vol. 46, pp. 1100-1104, July 1988.
6. R. Murthy, N. M. Bilgutay and j. saniie, "Application of bandpass filtering in ultrasonic nondestructive testing," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation of Materials(QNDE)*, 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, Mar 1982.
8. N. M. Bilgutay and j. Saniie, "The effect of grain size on flaw visibility enhancement using split-spectrum processing," *Materials Evaluation*, vol. 42, pp. 808-814, May 1984.
9. P. Karpur, et. al., "Split spectrum processing: determination of the available bandwidth for spectral splitting," *Ultrasonics*, vol. 26, pp. 204-209, July 1988.
10. J. C. Bamber and C. Daft, "Adaptive filtering for reduction of speckle in ultrasound pulse-echo images," *Ultrasonics*, vol. 24, pp. 41-44, 1986.
11. Yong Zhu and John P. Weight, "Ultrasonic nondestructive evaluation of highly scattering materials using adaptive filtering and detection," *IEEE Trans. UFFC*, vol. 41, No. 1, pp. 26-33, January 1994.
12. 김 중원, "WT 평면에서의 비정상 시변 신호 인식을 위한 알고리즘과 병렬 컴퓨터를 이용한 실시간 구현," 서울시립대학교 대학원 전자공학과 박사학위 논문, 1994.
13. 김 중원, 김 성환, "웨이브렛변환평면에서의 병렬신호추정 알고리즘의 제안," *전자공학회지*, 제 32권, 제 B호, pp. 55-61, 1995.
14. 김 중원, 김 성환, "웨이브렛변환평면에서의 근전도 신호인식에 관한 연구," *의공학회지*, 제 15권, 제 3호, pp. 305-315, 1994.
15. J. S. Bendat, A. Piersol, "Measurement and analysis of random data," New York, wiley, 1966.
16. Randy k. Young, "Wavelet theory and its application," Kluwer Academic Publishers, pp. 19-24, 1993.
17. B. Widrow and S. D. Stearns, "Adaptive signal processing," Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1985.

▲전 철 완(Chol Wan Jon)

1971년 5월 23일생



1995년 2월: 서울시립대학교 전자공학과 졸업(공학사)

1995년 3월~현재: 서울시립대학교 전자공학과 석사과정 재학중

▲전 광 석(Kwang-Seok Jon)

1964년 4월 13일생

1987년 2월: 서울시립대학교 전자공학과 졸업(공학사)
1992년 2월: 서울시립대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학 석사)

1995년 2월: 동대학원 박사과정 수료

1993년 3월~현재: 주성전문대학교 조교수

▲이 진(Jin Lee)

1964년 8월 11일생



1987년 2월: 연세대학교 응용공학과 졸업(공학사)

1990년 2월: 서울시립대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학 석사)

1994년 2월~현재: 동대학원 박사과정 재학중

▲이 영 석(Young-Seok Lee)

1968년 2월 13일생



1993년 2월: 서울시립대학교 전자공학과 졸업(공학사)

1995년 2월: 서울시립대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학 석사)

1995년 3월~현재: 동대학원 박사과정 재학중

▲김 덕 영(Duck-Young Kim)

1970년 9월 11일생



1994년 2월: 연세대학교 의용전자공학과 졸업(공학사)

1996년 2월: 서울시립대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학 석사)

1996년 3월~현재: 동대학원 박사과정 재학중

▲김 성 환(Sung-Hwan Kim): 제15권 제1호 참조