

전력 캡스트럼 기법을 이용한 다층구조물 접착면의 두께측정

Thickness Measurement of Adhesive Layer of Multilayer Using Power Cepstrum Technique

신진섭*, 전계석*
(Jin Seob Shin*, Kye Suk Jun*)

요약

본 논문에서는 전력 캡스트럼 신호처리 기법을 이용하여 다층구조물 접착면의 두께를 측정하는 방법을 제안하였다. 각 층에서 반사된 초음파 중첩신호의 피크치들은 전력 캡스트럼 기법에 의해 분리되었으며, 접착면의 두께는 피크간의 간격으로 측정되었다. 본 실험에서는 알루미늄과 황동 사이의 에폭시(2-Ton과 Plastic Steel Putty(A)) 접착층 두께를 0.5mm에서 0.75mm까지 변화시켜 다층구조물을 제작하였다. 접착층 두께측정은 초음파 펄스-에코 방법을 사용하였으며 측정된 결과 실제 두께와 1.34% 오차범위내에서 일치하였다.

ABSTRACT

In this paper, the thickness measurement method of adhesive layers of multilayers using power cepstrum signal processing technique has been proposed.

The peak values for reflected signal from each layer have been separated by power cepstrum technique. Therefore, thickness of adhesive layers have been measured by the intervals of peak signal. In the experiment, the adhesive layers of 0.5mm-0.75mm thickness using epoxy(2-Ton and Plastic Steel Putty(A)) between the aluminum and the brass were formed. The adhesive layer thickness which is calculated with data of reflected signal by ultrasonic pulse-echo method was within error 1.34% of the measured values.

I. 서론

현대의 산업사회는 PCB를 비롯한 IC, 트랜지스터 등의 소자들이 다층구조로 제작되고 있으며 이 가운데 접착층이 존재하는 다층구조물은 그 접착층의 두께에 따라 강도에서 차이를 나타내므로 이를 초음파를 이용하여 해석하는 것은 비파괴검사에서 중요하다.

초음파를 이용한 매질의 두께 측정은 시간영역에서 실시간 측정이 가능할 때 반사파의 표면신호와 배면신호의 시간지연값으로 얻어진다. 그러나, 전달된 펄스는 대역이 제한되며 층이 너무 얇을 때 반사파 신호는 매질에서 반사, 굴절, 그리고 시편의 특성에 의한 영향에 의한 링잉현상으로 중첩되어 나타난다.^{[1],[2]} 따라서 최근에 이러한 신호들로부터 층과 층 사이에서 반사된 신호를 시간영역에서 분리하여 두께를 측정하기 위한 디지털 신호처리 기법들이 여러문헌에서 발표되고 있다. 그 중에서 디컨벌

루션 기법은 전달된 파의 에코신호에 대한 분해능을 개선시키는데 유력한 신호처리 기법이나 대부분 잡음에 영향을 많이 받는 단점이 있다.^{[3],[4]} Bogert 등에 의해 처음 제안된 캡스트럼 기법은 중첩된 반사 신호를 시간영역에서 분리하여 도착된 시간을 구하므로써 하나의 얇은 층의 두께를 측정하는 데 효율적이며, 잡음에 대하여 상대적으로 민감하지 않다.^[5] 또한 전력 캡스트럼 기법은 가중치의 증가로 시간영역에서 잡음에 비해 반사신호의 피크치가 증가하여 가시도가 개선되는 잇점이 있다. 본 논문에서는 접합면을 갖는 다층구조물에 초음파를 입사시켰을 때 반사된 중첩신호를 전력 캡스트럼 기법을 이용하여 층과 층 사이의 피크 신호를 분리하여 접착면의 두께를 측정하고자 한다. 실험에서는 알루미늄과 황동 사이에 에폭시 접착층이 존재하는 다층구조물의 시편을 제작하였으며, 중심주파수가 5MHz인 초음파 변환기를 사용하여 펄스-에코 측정방법으로 획득한 초음파 반사신호는 신호처리하여 얻어진 측정치를 실제 시편의 두께와 비교 분석한다.

*경희대학교 전자공학과

접수일자: 1996년 10월 7일

II. 전력 cepstrum(Power Cepstrum)분석에 의한 두께측정

2-1. 이중 반사(double reflection)의 경우

면의 서로 다른 두께의 평면 경계면에 임펄스파가 수직으로 입사하여 반사된다고 가정하면, 반사신호는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.^{[1],[2],[6],[7]}

$$x(t) = v_1 u(t) + v_2 u(t - \theta) \quad (1)$$

여기에서 θ 는 두 반사체 사이의 시간지연(time delay)을 나타낸다. 첫번째 반사파의 시작점에 비해 후면에서 반사되는 반사파는 매질내에 전파되는 시간 때문에 시간축에서 지연되어 나타나게 된다. v_1 은 표면에서의 반사계수, v_2 는 배면에서의 반사계수를 나타낸다. 그리고 $j=i+1$ 일 때의 반사계수는 식 (2)로 나타낼 수 있으며, 여기서 Z 는 매질의 음향임피던스이다.

$$v_i = \frac{Z_j - Z_i}{Z_j + Z_i} \quad (2)$$

식 (1)의 푸리에(Fourier) 변환은 식 (3)와 같이 표현할 수 있다.

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt = v_1 + v_2 e^{-j\omega\theta} \quad (3)$$

여기서 ω 는 각주파수이며, 식(3)의 전력 스펙트럼은 식 (4)와 같다.

$$S(\omega) = X(\omega) X^*(\omega) = g(1 + \alpha \cos \omega\theta) \quad (4)$$

여기서 g 는 반사파의 총 전력, α 는 정규화(normalize)된 전력을 나타내며, 각각 식(5)와 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$g = v_1^2 + v_2^2 \quad (5)$$

$$\alpha = 2v_1 v_2 / (v_1^2 + v_2^2) \quad (6)$$

식 (4)의 전력 스펙트럼에 로그를 취하면 식(7)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\log S(\omega) = \log(g) + \log(1 + \alpha \cos \omega\theta) \quad (7)$$

ω 값에 대하여 $\log(g)$ 는 상수값이 되며, 여기서는 ω 값에 따라 변화하는 부분에만 관심이 있으므로 식 (7)의 상수 부분 $\log(g)$ 는 무시한다. $|\alpha| < 1$ 인 범위에서, 식(7)의 두번째 로그부분은 테일러 급수(Taylor series)로 확장될 수 있으며, 식(8)와 같은 코사인 급수(cosine series)로 로그 스펙트럼을 표현할 수 있다.

$$\log S(\omega) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(n\omega\theta) + Constant \text{ term} \quad (8)$$

여기서

$$b_n = \begin{cases} \sum_{m=n}^{\infty} \frac{\alpha^m}{m 2^{m-1}} Cr(m, \frac{m-n}{2}), & \text{for } n \text{ odd} \\ m \text{ odd} \\ - \sum_{m=n}^{\infty} \frac{\alpha^m}{m 2^{m-1}} Cr(m, \frac{m-n}{2}), & \text{for } n \text{ even} \\ m \text{ even} \end{cases} \quad (9)$$

을 나타낸다.

$y(t)$ 로 표현되는 식 (8)의 역푸리에 변환은 다음과 같이 주어진다.

$$y(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \log S(\omega) e^{-j\omega t} d\omega = \sum_{n=-\infty}^{\infty} b_n u(t' - n\theta) \quad (10)$$

$y(t)$ 는 시간 간격 θ 이고 b_n 에 비례한 가중치를 갖는 n 번째 정현파로 구성된 여러개의 임펄스로 구성되어 있다. b_n^2 의 +가중치를 갖는 임펄스열로 구성된 전력 cepstrum인 $y_p(t)$ 진폭의 자승값을 계산하면 $y_p(t)$ 으로 표시되는 전력 cepstrum은 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_p(t') = y^2(t') = \sum_{n=-\infty}^{\infty} b_n^2 u(t' - n\theta), \quad \text{for } 0 < t' < \infty \quad (11)$$

2-2. 다중반사(multiple reflection)의 경우

반사면의 갯수가 N개인 경우 관찰되는 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$x(t) = \sum_{i=1}^N v_i u(t - \theta_i) \quad (12)$$

식 (12)을 푸리에 변환한 후 전력스펙트럼을 구하면 다음과 같다.

$$S(\omega) = \sum_{i=1}^N v_i^2 + 2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N v_i v_j \cos \omega(\theta_j - \theta_i) \quad (13)$$

$$= v + 2 \sum_{j=1}^N \sum_{i=j+1}^N v_i v_j \cos \omega(\theta_j - \theta_i)$$

식 (13)식에 로그를 취한 전력스펙트럼 식은 다음과 같다.

$$\log S(\omega) = \log(v) + \log[1 + 2 \sum_{j=1}^N \sum_{i=j+1}^N (v_i v_j / v) \cos \omega(\theta_j - \theta_i)] \quad (14)$$

윗식에서 ω 에 따라 변하는 성분들만 고찰하였을 경우 두번째 항을 테일러 급수로 전개하면 다음과 같다.

$$\log[1 + \sum_{j=1}^N \sum_{i=j+1}^N (2/v) v_i v_j \cos \omega(\theta_j - \theta_i)]$$

$$= \sum_{j=1}^N \sum_{i=j+1}^N (2/v) v_i v_j \cos \omega(\theta_j - \theta_i) \quad (15)$$

위의 결과값은 cosine으로 표시된 선형조합의 결과이므로 분석하기 용이한 형태가 된다.

다음과 같은 방법으로 전력 캡스트럼 $y_e(t')$ 을 구하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_e(t') = \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N ((2/v) v_i v_j)^2 |u(t' - \theta_j + \theta_i) + u(t' + \theta_j - \theta_i)| \quad (16)$$

캡스트럼의 피크간의 간격은 주어진 이상적인 반사파의 피크간격과 일치하며 이는 금속의 두께와 관계되어 식 (17)에 의해서 금속의 두께가 구해진다.

$$s = c\theta/2 \quad (17)$$

여기서 c 는 금속재료에서의 음향속도이고 s 는 금속의 두께이다.

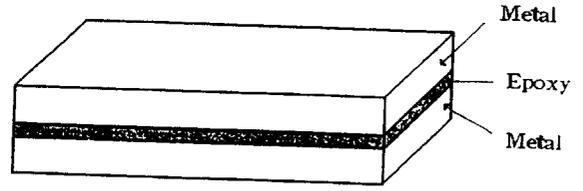
III. 실험 및 고찰

실험에서는 산업분야에서 널리 사용되고 있는 알루미늄, 황동 등을 이용하여 두께가 서로다른 금속을 이용하여 금속과 금속 사이에 2-Ton 에폭시(시편 A, B)와 Plastic Steel Putty(A) 10110 에폭시(시편 C, D, E, F)를 사용한 접착층을 갖는 다층구조물을 제작하였다. 제작된 시편의 형태는 그림 1과 같다. 접착층의 두께는 마이크로메타(micrometer)를 이용하여 먼저 접착하기 전의 각각의 금속 두께를 측정하여 더한 후 접착한 다음의 전체두께에서 뺀 값을 접착층의 두께로 하였으며, 이러한 접착층을 감추어진 층으로 간주하여 두께를 측정하였다. 표 1은 사용된 금속과 에폭시의 특성을 나타낸 것이다. 초음파 변환기의 중심주파수는 5 MHz이며 펄스-에코 방법으로 반사신호를 구하였고, 이때 얻어진 데이터는 샘플링을 25 MHz로 하여 HPIB 보드를 이용하여 획득하였다. 반사신호를 전력 캡스트럼 처리하여 나타난 첫 번째 피크와 두 번째 피크 사이의 간격을 구한 후 식 (17)에 대입하여 측정한 두께값과 마이크로미터(micrometer)로 얻은 두께값을 비교하였다.

표 1. 실험에 사용된 재료의 특성

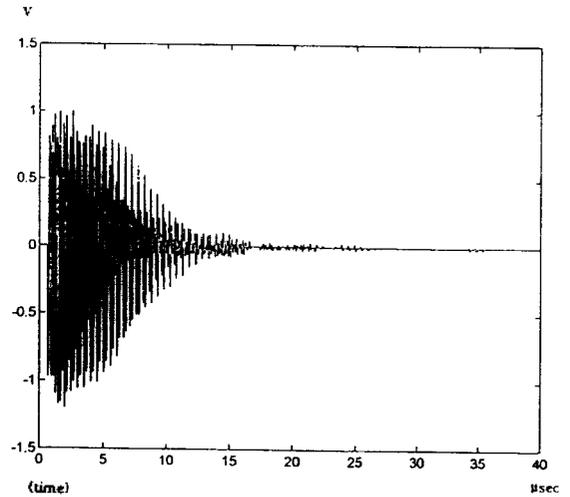
Table 1. Properties of material using in experiment

재 료 명	밀도(kg/m ³)	음향파 속도(m/s)
알루미늄(Aluminum)	2700	6420
황 동(Brass)	8640	4700
에폭시(2-Ton)	1100	2650
에폭시(Plastic Steel Putty(A))	2330	2190

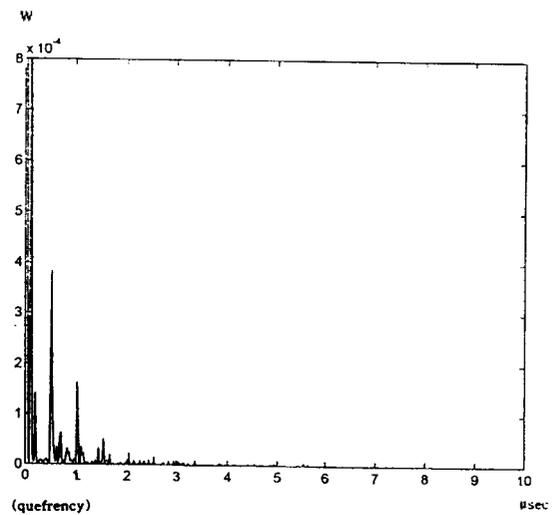


Metal(Aluminum, Brass)
Epoxy(2-Ton, Plastic Steel Putty(A) 10110)

그림 1. 제작된 시편의 형태
Fig 1. Form of test specimen

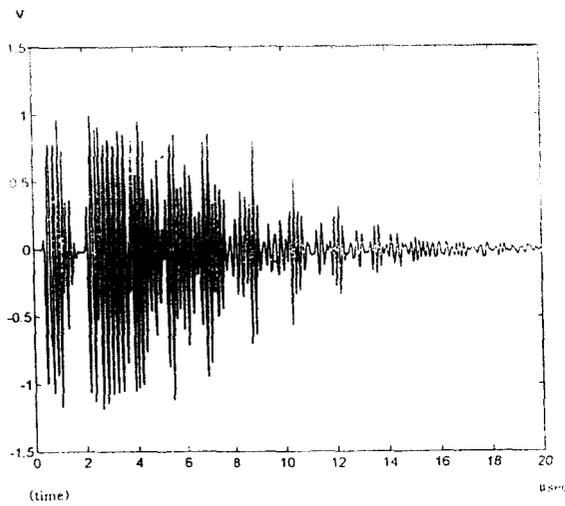


(a) 초음파 반사신호
(a) Waveform of reflected signal

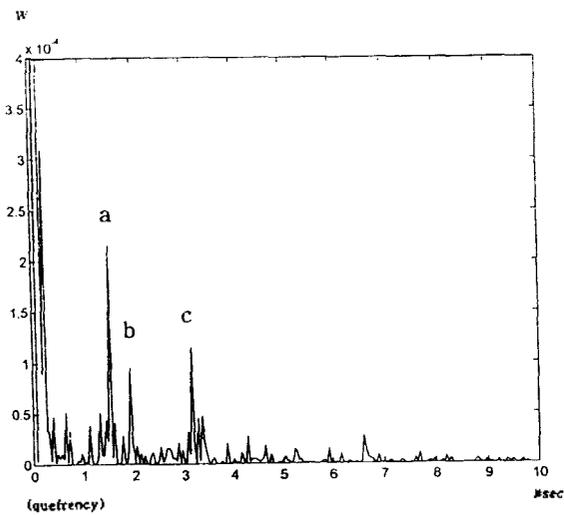


(b) 전력 캡스트럼
(b) Power spectrum density

그림 2. 황동 금속의 반사신호와 신호처리 결과(1.450mm인 경우)
Fig 2. Reflected signal of brass metal and its processed result(case of 1.450mm)



(a) 초음파 반사신호
(a) Waveform of reflected signal



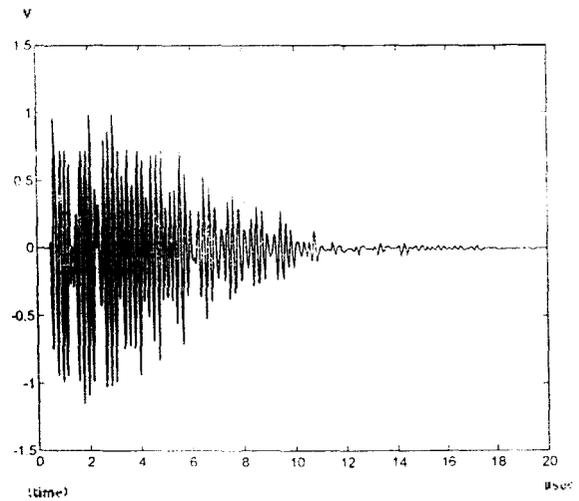
(b) 전력 캡스트럼
(b) Power spectrum density

그림 3. 다층구조물의 반사신호와 신호처리 결과(예폭시 두께 0.500mm인 경우)

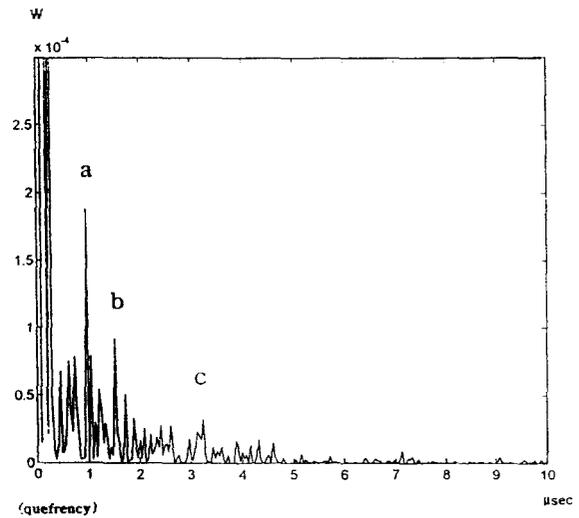
Fig 3. Reflected signal of multilayer and its processed result(case of epoxy thickness 0.500mm)

그림 2(a)의 반사신호는 얇은 단층에서 반사된 신호를 나타내며, 에코 신호들이 인접하여 연속되게 반사되고 있다. 그림 2(b)는 단층에서 반사된 신호의 전력 캡스트럼 처리 후의 신호이며 시간영역에서 가시도가 개선되어 일정 간격으로 피크 신호가 발생하였다. 이러한 간격은 층의 두께와 관련되어 두께가 커지면 간격도 일정하게 커진다.

또한 그림 3(a)와 그림 4(a)의 반사신호는 접착층을 갖는 다층구조물에서 반사된 신호를 나타낸 것이다. 금속 표면에서 반사된 신호를 제외하고 접착면에서 반사된 신호들은 중첩되어 나타나고 있으며 나머지 층에서 반사된 신호는 거의 나타나지 않았다. 그림 3(b)와 그림 4(b)는



(a) 초음파 반사신호
(a) Waveform of reflected signal



(b) 전력 캡스트럼
(b) Power spectrum density

그림 4. 다층구조물의 반사신호와 신호처리 결과(예폭시 두께 0.613mm인 경우)

Fig 4. Reflected signal of multilayer and its processed result(case of epoxy thickness 0.613mm)

다층구조물에서 반사된 신호의 전력 캡스트럼 처리 후의 신호이며 시간영역에서 가시도가 개선되어 나타났다. 첫 번째 층의 두께변화에 따른 캡스트럼 영역에서의 피크 신호의 변화를 보기 위하여 두께가 서로다른 금속을 사용한 결과 피크신호 a는 그림 3(b)와 그림 4(b)에서 다른 위치에 나타났으며 이것은 첫 번째 층의 두께도 측정할 수 있음을 보여주었다. 또한 단층에서와는 달리 피크 신호 a 옆에 인접하여 관심의 대상이 되는 에폭시 층의 피크 신호 b가 나타났다. 그림 4(b)에서 나타난 피크신호 c는 세 번째 층과 다른 층에서 겹쳐진 신호가 나타난 것으로 사료된다. 이러한 첫 번째 피크신호와 두 번째 피크신호간

의 간격으로 층의 두께를 구하며 여기에서는 두번째 층을 감추어진 층으로 간주하여 두번째 층인 접착면의 두께를 측정하였으며 실제의 두께와 비교한 결과 표 2의 결과값을 얻었다.

표 2. 접착층의 두께측정 결과

Table 2. Result of thickness measurement of adhesive layers

시 편	실제값(mm)	측정값(mm)
A(2-Ton)	0.500	0.530
B(2-Ton)	0.630	0.636
C(Plastic Steel Putty(A))	0.570	0.570
D(Plastic Steel Putty(A))	0.613	0.613
E(Plastic Steel Putty(A))	0.704	0.701
F(Plastic Steel Putty(A))	0.750	0.745

IV. 결 론

본 논문에서는 다층구조물의 접착면에 초음파를 입사시켰을 때 반사되는 신호를 전력 캡스트럼의 신호처리 기법을 이용하여 시간영역에서 반사신호를 분리하므로써 접착층의 두께를 측정하였다.

접착층에서 반사된 초음파 신호의 가시도는 전력 캡스트럼 기법에 의해 개선되었으며, 이로부터 신호파형의 피크치 간격을 측정하여 접착층의 두께를 결정하였다. 실험을 위하여 황동의 단층시편과 알루미늄과 황동 사이에 0.5mm에서 0.75mm까지의 에폭시 두께를 갖는 다층 시편을 제작하고 중심 주파수가 5MHz인 초음파 변환기를 사용하여 펄스-에코 방법으로 반사 신호를 측정한 결과 단층시편에서 반사된 신호는 에코 신호들이 인접하여 연속되게 반사되었으며, 접착층이 존재하는 다층시편에서 반사된 신호는 접착면에서 반사된 신호들이 중첩되어 나타나고 있으며 세번째 층에서 반사된 신호는 감쇄로 인하여 거의 나타나지 않았다. 따라서 각 층에서 반사된 신호를 전력 캡스트럼 처리한 결과, 단층시편에서는 일정한 간격으로 피크신호가 발생하였으며 다층시편에서는 접착면과 접착면 사이의 피크신호들이 분리되므로써 반사신호의 가시도를 상당히 개선할 수 있었다. 다층 시편의 두께측정은 개선된 가시도에 의해 반사신호의 피크치 간격을 구하여 이루어졌으며 측정결과는 표 2에서 보여진다. 실제의 두께와 실험에서 얻어진 두께를 비교해 보면 평균적으로 1.34%의 오차범위내에서 잘 일치하였다.

본 연구의 결과는 자동차 및 항공산업 등의 비파괴 검사 분야에 활용을 기대할 수 있다.

참 고 문 헌

1. L.E.Kinsler, "Fundamentals of Acoustic", John Wiley & Sons, 1980.
2. J.Sanie, "Pattern Recognition in the Ultrasonic Imaging of Reverberant Multilayered Structure", IEEE trans.ultra. Vol. 36, No.1, pp.80-92, 1989.
3. K.I.McRae, "Deconvolution Techniques for Ultrasonic Imaging of Adhesive Joints", Materials Evaluation, pp.1380-1384, 1990.
4. Sam-Kit Sin, "A Comparison of Deconvolution Techniques for the Ultrasonic Nondestructive Evaluation of Materials", IEEE TRANS. on IMAGE PROCESSING, Vol.1, No.1, pp. 3-10, 1992.
5. B.P.Bogert, M.J.Healy, and J.W.Tukey, "The Quefrency Analysis of Time Series for Echoes; Cepstrum, Pseudo-Autocovariance, Cross Cepstrum, an Shape Cracking", in Time Series Analysis, M.Rosenblatt, Ed. New York: Wiley, chap 15, pp.209-243, 1963.
6. R.Kue, "Presence of Cepstral Peak in Random Reflected Ultrasound Signal", Ultrasonic Imaging 8, pp.196-212, 1986.
7. J. Saniie, "Resolution and Visibility Enhancement of Ultrasonic Echoes Reflected from Targets Hidden by Highly Reverberant Thin Layers", Ultrasonic Symposium, pp.903-907, 1984.
8. P.Fraisse and F.Schmit, "Ultrasonic Inspection of Very Thin Adhesive Layers", J.Appl.Phys. 72(8), 15, pp.3264-3271, 1992.
9. Alan V. Oppenheim, "Discrete-Time Signal Processing", Prentice Hall, 1989.
10. D.L Folds, "Transmission and Reflection of Ultrasonic Wave in Layered media", J.Acoustic.Soc.Am. Vol.62, No.2, pp.1102-1108, 1977.

▲전 계 석(Kye Suk Jun)

제14권 6호 참조

현재: 경희대학교 공과대학 전자공학과 교수

▲신 진 섭(Jin Seob Shin)

1965년 12월 21일생

1989년 2월: 호서대학교 정보통신공학과 졸업(공학사)

1991년 2월: 경희대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

1991년 3월~현재: 경희대학교 대학원 전자공학과 박사과정

