

고체내부의 결함형태에 따른 초음파 신호의 특징추출

The Features Extraction of Ultrasonic Signal to Various Type of Defects in Solid

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

요약

본 논문에서는 금속내부에 존재하는 결함의 다양한 형태로부터 반사된 초음파 신호를 디지털 신호처리에 의하여 특징추출하는 방법을 연구분석하였다.

다양한 형태의 결함으로부터 반사된 초음파 신호는 잡음 등의 영향으로 그 특징의 구별이 애매하므로 자기 회귀법(auto-regressive)을 이용한 위너 필터링(Wiener filtering)과 최소 절대치 노름(least-absolute-values norm) 기법을 사용하여 신호의 특징을 추출하고 상호 비교분석하였다.

실험에서는 알루미늄 시편에 평면결함, 사각결함, 원형결함의 세가지 결함형태를 제작하였으며, 초음파를 입사하고 펄스-에코 방법에 의하여 반사신호를 측정하였다.

반사신호의 디지털 신호처리 결과, 이러한 특징추출방법은 다양한 형태의 결함으로부터 반사된 신호를 효율적으로 분류할 수 있었다.

ABSTRACT

In this paper, the features extraction of reflected ultrasonic signals from various type of defects existing in Al metal has been studied by digital signal processing.

Since the reflected signals from various type of the defects are ambiguous in features distinction from effects of noise, Wiener filtering using AR(auto-regressive) technique and least-absolute-values norm method has been used in features extraction and comparison of signals.

In this experiment, three types of the defect in aluminum specimen have been considered: a flat cut, an angular cut, a circular hole. And the reflected signal have been measured by pulse-echo methods. In the result of digital signal processing of the reflected signal, it has been found that the features extraction method have been effective for classification of the reflected signals from various defects.

I. 서론

산업사회의 고도화에 따라 안전성과 초정밀을 요구하는 반도체 분야, 항공우주 산업분야, 원자력 발전분야에서 제품의 품질관리와 안전성 검사를 위해 초음파를 이용한 비파괴검사가 유용하게 쓰이고 있다. 특히 매우 복잡한 공정단계에서 생기는 보이지 않는 다양한 형태의 결함은 재료의 물리적 특성을 결정할 수 있는 중요 요인이 되므로 결함의 형태를 비파괴적으로 판단하는 것은

중요한 일이다.

일반적으로 초음파를 이용한 비파괴 검사에 널리 사용되고 있는 초음파 펄스-에코(pulse-echo) 방법으로 결함의 특성을 결정하는데는 다음 두 가지 방법이 있다. 첫번째는 결함의 크기가 변환자의 빔폭보다 클 경우이고 두번째는 결함의 크기가 변환자의 빔폭보다 작을 경우이다. 결함의 크기가 빔폭보다 클 경우에 대해서는 결함의 주위를 변환자를 이동시키면서 결함의 크기, 방향성, 형태에 대한 정보를 얻을 수 있으며, 결함의 크기가 빔폭보다 작은 경우에 대해서는 변환자를 고정하여 결함에 대한 정보를 얻을 수 있으나 이때는 반사된 신호의 특징 구

*경희대학교 전자공학과
접수일자: 1995년 9월 25일

별이 어려워 특별한 신호 처리 분석 방법이 필요하다. 이를 위하여 Chen은 매질의 비파괴검사에 신호처리와 패턴인식 기술의 응용을 제시하였으며^[1], 그 후 기하학적 구조가 다른 형태의 결함에서 반사된 신호의 특징을 추출하기 위하여 위너 필터링(Wiener filtering)과 자기 회귀법(auto-regressive)을 이용한 위너 필터링의 디컨볼루션 기법이 적용되어졌다.^{[2], [3]} 이러한 방법들은 결함이 없는 시료에 대한 임펄스 응답을 기준신호로 하여 기하학적 구조가 다른 결함에서 반사된 신호를 디컨볼루션함으로써 결함의 형태를 구분하는 방법이다. 본 논문에서는 자기회귀법을 이용한 위너필터링과 최소 절대치 노름(least-absolute-values norm) 기법을 적용하여 여러 가지 형태의 결함에서 반사신호를 특징추출하고 이를 상호 비교하여 결함의 형태를 해석하고자 한다. 실험을 위하여 알루미늄 시료를 선택하여 결함의 형태가 평면, 사각, 원형이 되도록 제작하였으며, 중심주파수가 15 MHz 인 초음파 변환기를 사용하여 펄스-에코 방법으로 데이터를 획득하고 디지털 신호처리하여 결함에 대한 반사신호의 특징을 추출하였다.

II. 초음파 펄스-에코에 대한 컨볼루션 모델

고체내부의 결함에 대한 전달함수가 선형 시불변 시스템(linear time invariant system)으로 가정되면 결함에서의 반사신호는 임펄스 응답으로 모델링될 수 있다.

고체내부 결함에 대한 임펄스 응답을 $h(t)$ 라 하면 임의의 입력 신호 $r(t)$ 에 대한 결함으로부터의 반사 신호는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$y(t) = h(t) * r(t) \tag{1}$$

여기에서 *는 선형의 컨볼루션(convolution) 기호이다.

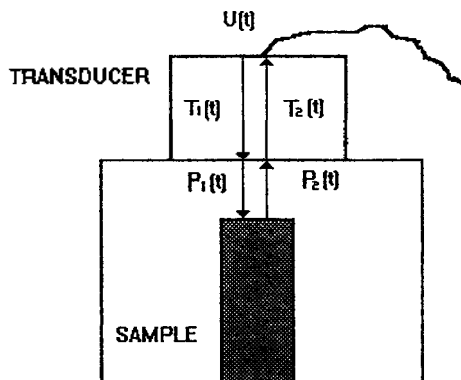


그림 1. 초음파 변환기와 시료의 전파경로
Fig 1. Propagation path between the transducer and the specimen

식 (1)을 그림 1과 같이 변환기와 시료의 전파경로를 모두 고려할 경우 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y(t) = u(t) * T_1(t) * P_1(t) * h(t) * P_2(t) * T_2(t) \tag{2}$$

여기에서 $P_1(t)$ 는 시료 표면에서 결함까지의 전방경로 임펄스 응답, $P_2(t)$ 는 결함에서 시료 표면까지의 후방경로 임펄스 응답을 표시하고, $T_1(t)$ 는 변환기 내에서 시료 표면까지의 전방경로 임펄스 응답, $T_2(t)$ 는 $T_1(t)$ 방향과 반대인 후방경로 임펄스 응답을 나타내고 있다. 그리고 $u(t)$ 는 변환기의 전기적인 임펄스 입력 신호이다. 결함이 없는 시편의 임펄스 응답은 결함이 있을 경우의 전달 함수 $h(t)$ 에 상응되는 임펄스함수 $\delta(t)$ 로 표현될 수 있다. 따라서 결함이 없는 시편에서의 반사 신호 $x(t)$ 는 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} x(t) &= u(t) * T_1(t) * P_1(t) * \delta(t) * P_2(t) * T_2(t) \\ &= u(t) * T_1(t) * P_1(t) * T_2(t) \end{aligned} \tag{2}$$

전파경로를 고려하여 식 (3)을 식 (2)에 대입하면 식 (4)와 같이 쓸 수 있다.

$$y(t) = x(t) * h(t) \tag{4}$$

시편이 등방성이고 무분산 매질이라 가정한다면 $P_1(t)$ 와 $P_2(t)$ 는 결함의 깊이가 다르더라도 감쇠에 의한 경우를 제외하고는 각각의 결함에 대해서는 항상 같게 된다. 따라서 이것은 결함에 대해서 반사된 신호의 기준신호로서 동일하게 사용될 수 있다.

III. 결함에서 반사된 신호의 특징 추출

3-1. 자기회귀법(Auto-Regressive)을 이용한 위너 필터링

위너 필터링은 잡음이 존재하는 신호와 영상에서 잡음을 감소시키기 위해 널리 쓰이는 신호처리기술로써 신호와 잡음의 스펙트럼 밀도가 알려져 있거나 측정 데이터로부터 쉽게 계산될 수 있을 때 신호추정을 위해 사용된다. 식 (4)를 이산시간 컨볼루션으로써 나타내면 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.^[4]

$$y(k) = x(k) * h(k) + n(k) \quad k = 1, 2, 3, \dots \tag{5}$$

여기서 $y(k)$ 는 수신된 RF신호이고, $x(k)$ 는 입력신호, $h(k)$ 는 임펄스 응답을 나타내며, $n(k)$ 는 잡음 신호이다.

자기회귀법 알고리즘과 푸리에 변환을 이용하면 자기회귀법을 이용한 위너필터 전달함수로 식 (6)과 같이 쓸 수 있다.^{[2], [5]}

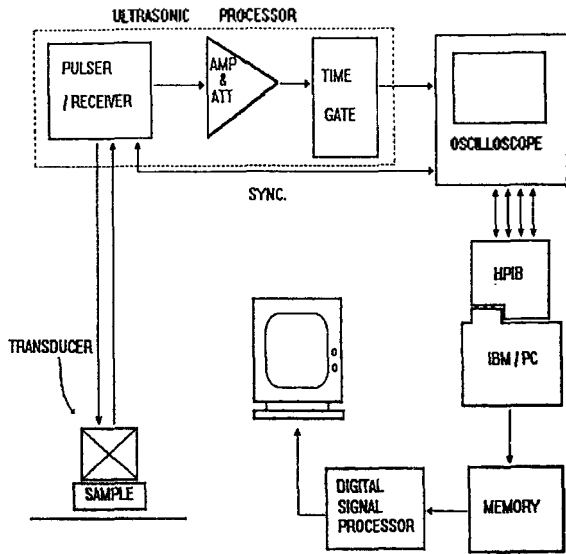


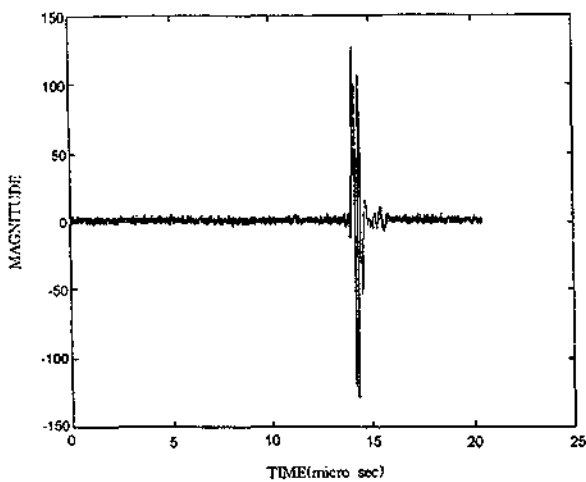
그림 3. 초음파 측정장치의 블록 다이어그램
Fig 3. Block diagram of ultrasonic unit

퓨터에서 2048개의 데이터를 획득한 후 (6)식의 AR을 이용한 위너필터링과 (11)식의 최소 절대치 노름 기법에 의한 오차항의 최소화에 의해 신호처리하였다.

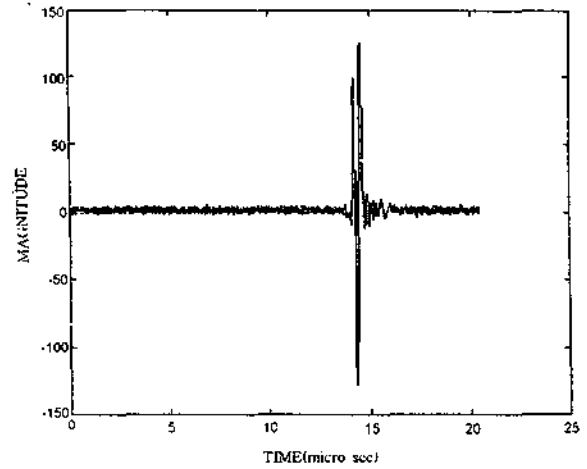
그림 4는 그림 2에서 제작된 시료에서 반사된 신호이다.

그림 5는 결함이 없는 시료의 임펄스응답을 기준신호로 하고 각 결함의 반사 신호를 각각 식(6)(자기회기법에 의한 위너 필터)에 따라 디컨벌루션 시킨 것이다.

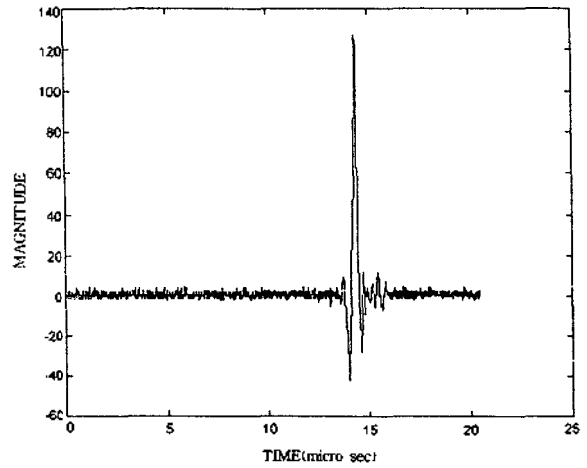
그림 6은 최소 절대치 노름을 이용해서 임펄스 응답을 6 스파이크로 추출한 것이다.



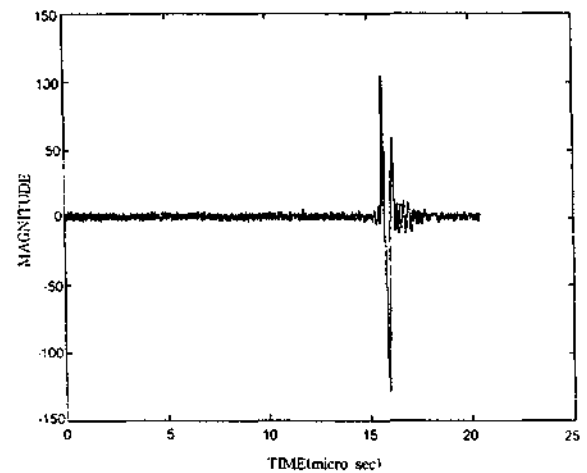
(a) 결함이 없는 시료에서의 반사신호
(a) The pulse-echo reflected from a flawless sample



(b) 그림 2의 a시료에서의 반사신호
(b) The pulse-echo reflected from a flat-cut defect

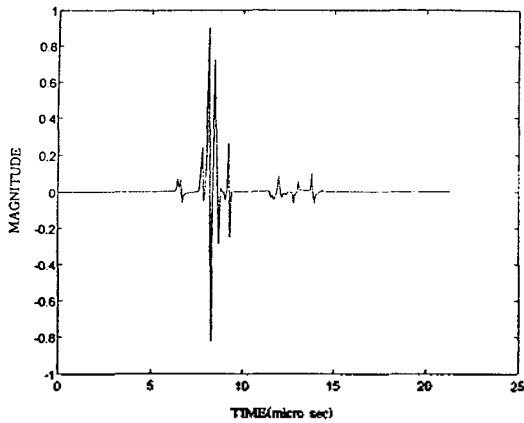


(c) 그림 2의 b시료에서의 반사신호
(c) The pulse-echo reflected from an angular-cut defect

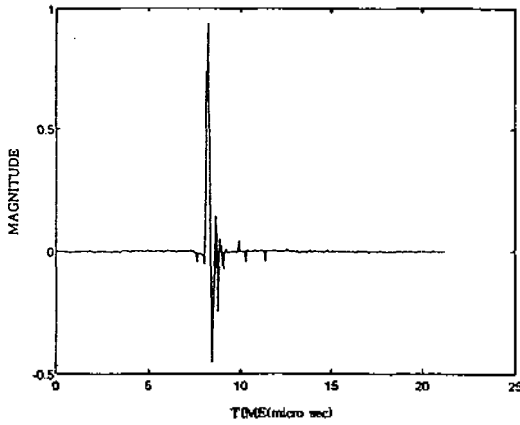


(d) 그림 2의 c시료에서의 반사신호
(d) The pulse-echo reflected from a circular-hole

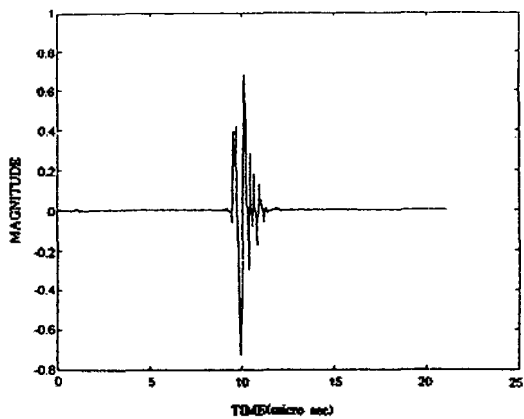
그림 4. 결함으로부터 반사된 펄스-에코 신호
Fig 4. The ultrasonic pulse-echos from different defect geometries



(a) 자기회기법 위너필터에 의한 평면결합에서의 임펄스 응답
 (a) IR's in a flat-cut defect by Wiener filter using AR

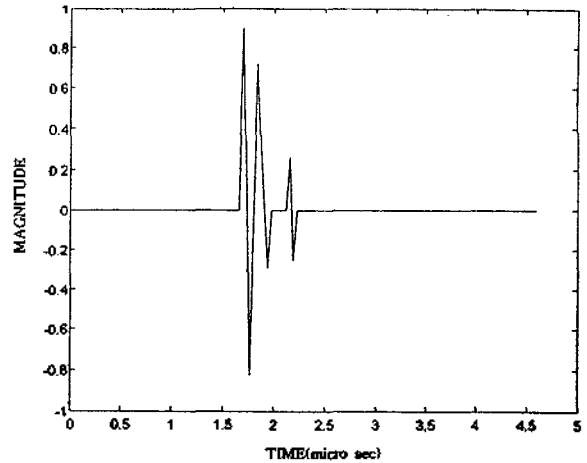


(b) 자기회기법 위너필터에 의한 경사결합에서의 임펄스 응답
 (b) IR's in an angular-cut defect by Wiener filter using AR

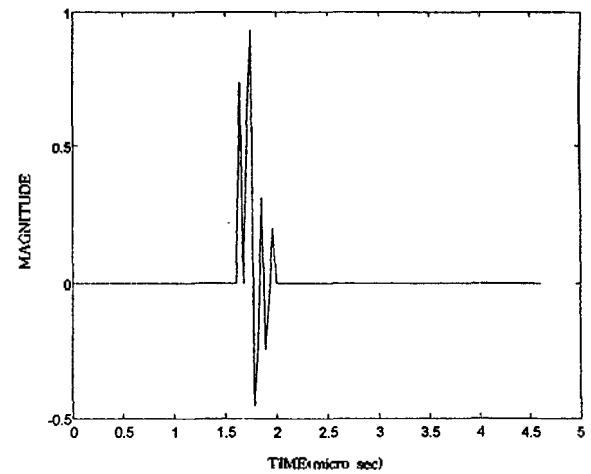


(c) 자기회기법 위너필터에 의한 원형결합에서의 임펄스 응답
 (c) IR's in a circular-hole defect by Wiener filter using AR

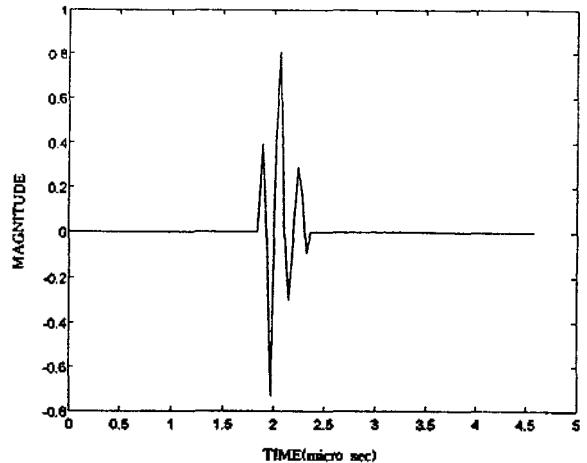
그림 5. 자기회기법 위너필터에 의한 결함의 임펄스 응답
 Fig 5. The impulse response of each defect type by Wiener filter using AR



(a) 최소 절대치 노름에 의한 평면결합에서의 임펄스 응답
 (a) IR's in a flat-cut defect by least-absolute-values norm



(b) 최소 절대치 노름에 의한 경사결합에서의 임펄스 응답
 (b) IR's in an angular-cut defect by least-absolute-values norm



(c) 최소 절대치 노름에 의한 원형결합에서의 임펄스 응답
 (c) IR's in a circular-hole defect by least-absolute-values norm

그림 6. 최소 절대치 노름(6 스파이크 추출)에 의한 결함의 임펄스 응답
 Fig 6. The IR's of each defect type by least-absolute-values norm(6 spike extraction)

그림 4에서 보면, 결함에 대한 반사된 신호는 잡음성분을 포함하고 있고 결함의 형태에 따른 신호의 구분이 확실하지 않다. 이에 비하여 그림 5의 자기회기법을 이용한 위너 필터링 기법에 의한 결과는 잡음에 의한 영향까지 현저히 감소시켜 각각의 결함에서 반사된 신호들이 결함의 다양한 형태에 따라 특징이 더욱 효과적으로 구분되어 있음을 알 수 있었다. 한편, 그림 6의 최소 절대치 노름에 의한 방법은 데이터가 많을수록 스카이크 수의 증가에 따른 반복처리시간이 많이 걸린다는 단점은 있지만 분해능은 매우 좋다는 장점이 있다. 그리고 각 결함의 신호 특징은 결함형태가 평면인 경우에는 반사신호의 첫번째 피크치값이 가장 최대치를 나타내는 특징을 보이고 있으며, 사각의 경우는 두번째 피크치값이 최대치를 나타내며 피크치 사이의 간격이 밀착되어 있음을 알 수 있고, 원형결함의 경우 중심부분에 피크치가 나타나면서 거의 대칭적인 모양을 보여주고 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 금속 내부에 존재하는 결함의 다양한 형태에 대하여 초음파를 입사시켜서 반사된 신호를 임펄스 응답으로 특성화하고 디컨볼루션 기법을 사용하여 결함의 형태에 따른 신호의 특징추출을 연구분석하였다.

실험을 위하여 시료 내부에 결함형태가 평면, 경사, 원형의 결함을 갖는 시료를 제작하였고 초음파 펄스에요 방법으로 반사신호를 측정하였다. 신호처리 기법으로는 자기회기법을 이용한 위너 필터링, 최소 절대치 노름 기법을 사용하여 결함으로부터 반사된 신호의 특징을 추출하였다. 그 결과 신호의 특징은 결함형태가 평면인 경우에 반사신호의 첫번째 피크값이 가장 최대치를 나타내는 특징을 보이고 있으며, 결함형태가 사각인 경우는 두번째 피크치값이 최대치를 나타내며 피크 사이의 간격이 밀착되어 있음을 알 수 있었다. 한편, 원형결함의 경우 중심부분에 피크치가 나타나면서 거의 대칭적인 모양을 보여주고 있다. 따라서, 각 결함의 형태에 따른 고유의 특징을 나타내어 신호를 효율적으로 분류할 수 있었다.

각각의 신호처리 기법을 비교해보면 자기회기법에 의한 위너필터링은 처음의 반사신호보다 결함에 따른 신호의 특징이 뚜렷하게 구분이 되었음을 알 수 있으며, 특히 잡음영향까지 거의 제거시켜 결함에 대한 정보만을 보여주고 있어 더욱 효과적으로 판단할 수 있었다. 따라서 복잡한 처리방법을 기치지 않더라도 결함에 대한 특징을 효율적으로 분류할 수 있는 유용한 방법이라 판단된다. 최소 절대치 노름 기법은 스카이크의 수가 하나 증가될 때마다 배에 해당하는 시간이 걸리므로 데이터 수가 증가할 수록 스카이크 수가 증가하여 많은 처리시간이 요구되는 단점이 있지만 위너 필터링 기법보다 추상 분해능이 뛰어나므로 높은 분해능을 필요로 하는 초음파 영상 시스템에 적합하다 하겠다.

앞으로 보다 다양한 형태를 갖는 결함에 대한 반사신호의 분류를 통해서 비파괴 검사 및 해양탐사의 패턴인식 분야 등에 활용될 유용한 기술이 되리라 기대된다.

참 고 문 헌

1. C. H. Chen, "A signal processing study of ultrasonic nondestructive evaluation of materials," Tech. Rep. MTL TR 87-11, Material Technology Lab., Feb. 1987.
2. Sam-Kit Sin, "A comparison of deconvolution techniques for the ultrasonic nondestructive evaluation of materials," IEEE TRANS. on IMAGE PROCESSING, Vol. 1, NO 1, 1992.
3. 문상택, 신진섭, 고대식, 전계석, "고체내부에 존재하는 결함의 형태에 따른 초음파 신호의 특징추출," 한국음향학회 학술발표회, Vol. 12, No. 1(s), 1993.
4. AV. Oppenheim, Discrete-Time Signal Processing, PRENTICE HALL International INC, 1989.
5. K. I. McRae, "deconvolution techniques for ultrasonic imaging of adhesive joints," Materials Eval., Nov. 1980.
6. Laszlo Adler and H. L. Whaley, "interference effect in a multifrequency ultrasonic pulse echo and its application to flaw characterization," The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 51, No. 3 (Part2), 1972.
7. I. Barrodale and F. D. K. Robert, "An improved algorithm for discrete L_1 linear approximation," SIAM J. Numer. Anal., Vol. 10, NO. 5, Oct. 1973
8. I. Barrodale et al., "Comparison of the L_1 and L_2 norms applied to one-at-a-time spike extraction from seismic traces," Geophys., Nov. 1984.

▲전 계 석(Kye Suk Jun)

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

