

집속 신호 합성 기법에 의한 초음파 탐상 신호 개선

이삼래*, 장기옥*, 김병철*, 김기길**

* 한국원자력연구소

** 대전산업대학교

초 록 비파괴검사는 검사 자체와 검사 결과를 해석 또는 평가하는 것으로 크게 둘로 나눌 수 있다. 검사 자체는 전자 기술 수준의 발전에 따라 많은 양을 단시간 내에 정밀하게 수행할 수 있으나 검사 결과 발견된 지시(indication)가 결함인지 혹은 이와 유사한 거짓 결함인지를 확인하기는 대단히 어려운 일이다. 초음파 탐상의 경우 검사 결과 결함의 형상을 정확하게 인식하기 위해 컴퓨터를 활용한 다양한 첨단 신호 해석 기술이 개발되어 일부 활용되어오고 있는데 본 논문에서는 신호처리 기법의 하나인 집속 신호합성 기법(synthetic aperture focusing technique, SAFT)을 활용하여 탄소강에서의 결함 신호 해석을 시도하였으며 탄소강 평판 내에 가공된 hole을 대상으로 수집된 초음파 신호를 이 기법을 적용하여 처리한 결과 결함으로부터의 신호 대 잡음비에 있어서 많은 개선이 이루어진 것으로 판단된다.

1. 서 론

비파괴검사법중 초음파에 의한 탐상은 그간 검사원의 수동 조작에 의해 탐촉자를 검사체에 직접 접촉시켜 검사체내의 결함 유무를 판정하였고 에너지 강하법 등 여러 검사 기법에 의해 그 형상 및 크기를 경험이 많은 검사자에 의하여 판별해왔다. 그러나 검사자의 수동 조작에 의한 검사법은 검사 결과의 재현성(repeatability)을 가져다주지 못하는 등 여러가지 문제점을 내포하고 있으며 최근의 전자 기술의 발전에 힘입어 검사 자체가 자동화됨으로써 모든 검사 결과가 컴퓨터에 수록되어 검사 결과의 재현성을 입증할 수 있게 되었고 아울러 신호처리 기술을 활용하여 현재까지 많은 검사 경험을 소유한 전문가의 영역인 결함의 형태 및 크기를 손쉽게 판별할 수 있는 기술 개발이 가능하게 되었다. 특히 음향 홀로

그래피¹⁾, 컴퓨터 토모그래피²⁾, 위상 어레이 기법^{3,4)}, 집속 신호 합성 기법(SAFT)^{5,6)}, 패턴 인식 등 다양한 첨단 신호 해석 기술의 개발이 가능하게 되었다. 이와 같은 여러 첨단 신호 처리 기법들은 아직까지는 현장에 활발히 적용되고 있지는 못하나 최근 이에 대한 기술 개발은 활발히 진행되어 오고있는 실정이다. 본 연구에서는 이상과 같은 여러 방법중 현장 적용이 비교적 용이하다고 생각되는 집속 신호합성 기법(SAFT)을 활용하여 결함평가를 실시해 보았다.

SAFT는 원래 비행물체의 위치 추적을 위한 레이더 추적장치에 사용되어온 것으로 그 역사는 대단히 길다. 레이더 시스템의 안테나가 공기를 매질로 하여 신호를 발신 및 수신함으로써 물체의 크기 및 형태를 알아내는 것과 대단히 유사한 원리로 초음파 탐상의 경우 전달 매질이 금속 등과 같은 물체를 대상으로 하여 그 내부에서 결함 크기 및 형상을 추적

하는데 그대로 적용될 수 있는 것이다.

초기의 SAFT에 의한 초음파 탐상은 센서에서 수집된 신호를 증폭시키고 위상이 동일한 신호가 외부에서 주입되어 수신된 신호와 혼합되어 위상이 동일한 신호들로 변조를 거치면서 오실로스코프에 기록되고 또한 이동하는 카메라에 기록되도록 설계되었다. 오늘날의 SAFT에 의한 초음파 탐상은 N개의 센서를 동시에 작동시키는 평면파 방법과 한개의 센서로 송·수신을 하는 제로 오프셋 방법, 마지막으로 한개의 센서가 송신을 하고 N개의 센서가 수신을 하는 통합 데이터셋 방법 등 크게 세가지로 나눌 수 있는데 이중 통합 데이터셋 방법은 일반적으로 SAFT의 적용이 균질한 재질에서 사용되는 것을 기본으로 하고 있는 것과는 달리 비 균질성 재료의 경우에 사용 가능하다는데서 하나의 큰 장점이 될 수 있다.

본 연구에서는 이상의 세가지 방법중 속도는 느리나 한개의 채널을 사용하여 데이터 수집이 가능한 제로 오프셋 방법을 사용하여 수집된 일련의 A-스캔으로부터 SAFT가 어떻게 초음파 탐상 결과에 영향을 미치는지를 알아보기로 한다.

2. 집속 신호 합성 기법(SAFT) 알고리즘^{7,8)}

앞장에서 설명한 바와 같이 SAFT는 기초 데이터인 RF신호 자체를 적절한 알고리즘을 사용하여 위상이 동일한 신호로 만들어 이들을 재구성(reconstruction)하는 것이다. 초음파 탐상의 경우에는 매질내의 각 점을 음원(source)으로 생각하여 이

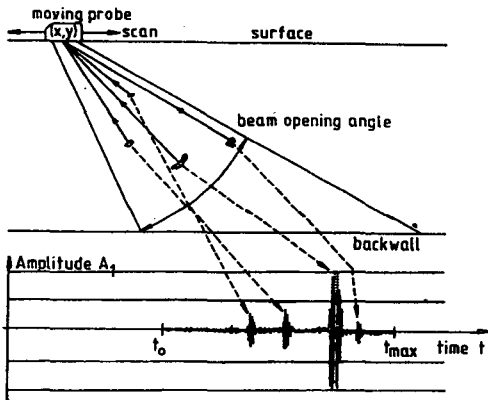


Fig. 1 Ultrasonic testing signals from defects for SAFT program

들로부터 반사된 신호를 호이겐스의 중첩의 원리를 사용하여 적분하는 것이다. 즉, Fig. 1과 같이 매질내에 각종 결함이 존재하는 경우 초음파 탐촉자로부터 송신되어 입사된 에너지는 각종의 결함에서 반사되어 각각의 위치 및 시간에서 신호 A₁(x, y, t)으로 수신될 것이다. 이로부터 매질내의 각점의 신호를 위상이 동일한 것으로 재구성하여 호이겐스의 중첩의 원리를 사용하여 합성해보면 아래 식 (1)과 같이 나타낼 수 있을 것이다.

$$A_2(\alpha, \beta, z) = \iint (1/r) A_1\{(x-\alpha), (y-\beta), t\} dx dy \dots \dots \dots (1)$$

여기서 $r = \{(x-\alpha)^2 + (y-\beta)^2 + z^2\}^{1/2}$, $t = (1/c) \{(x-\alpha)^2 + (y-\beta)^2 + z^2\}^{1/2}$, x, y는 검사체 표면에서의 센서 위치, α, β 는 검사체 내부 위치 좌표, c는 매질내의 음속을 나타내며 z는 깊이 방향의 좌표를 의미한다.

이렇게 하여 재구성된 신호 진폭 A₂(α, β, z)는 소위 D-스캔이라고 하는 시편내의 3차원의 진폭 분포를 나타낸다.

만일 상기 식(1)에서 y축 방향으로의 스캐닝을 없게하면 A₂(α, β, z)는 아래 식 (2)와 같이 단순화될 수 있을 것이다.

$$A_2(\alpha, z) = \int (1/r) A_1\{(x-\alpha), (1/c)\{(x-\alpha)^2 + z^2\}^{1/2}\} dx \dots \dots \dots (2)$$

여기서 A₂(α, z)를 도시해보면 초음파 탐상에서의 소위 B-스캔이라고 하는 단면도를 나타내게 될 것이다.

상기 식 (2)에서 A₂(α, z)를 계산하기 위해서는 적분을 수행해야 하는데 실제 적분은 다음 식 (3)과 같이 합에 의해 이루어질 수가 있을 것이다.

즉,

$$A_2(\alpha_i, z_k) = \sum_1 (1/r) A_1\{(x_1-\alpha_i), (1/c)\{(x_1-\alpha_i)^2 + z_k^2\}^{1/2}\} \dots \dots \dots (3)$$

으로 수행되며 일단 원하는 국부적인 부위 전체를 대상으로 스캐닝을 실시하여 스캐너의 위치와 각 점에서의 RF 신호 수집을 실시한 다음 상기 식 (3)을 이용하여 각각의 신호를 재구성한다.

SAFT에 의한 재구성 원리는 결함으로부터 신호가 최대가 되는 점을 포함하여 각각의 스캐닝 위치

에서 신호의 양이 모두 수집되어있기 때문에 각각의 신호에 대한 위치 정보를 활용하여 신호가 최대로 되는 위치로 이동시켜 이들 모두를 중첩시키면 Fig. 2에서 보는 바와 같이 위상이 다른 것은 소멸됨으로써 결함으로부터의 최종 신호는 원래의 모든 신호에 의한 것보다 형상을 분간하기가 훨씬 용이하게 되는 것이다. 여기에서 대단히 중요하게 고려되어야 할 점은 스캐닝 위치 정보를 활용하여 신호의 재구성 및 중첩이 이루어지기 때문에 정확한 위치 정보에 따른 정밀 스캐닝이 이루어지지 못하면 SAFT의 장점은 확보될 수가 없게 되는 것이다. 그러므로 실제 현장 검사에서처럼 대상 물체가 대형 구조물일 경우에는 정밀 스캐닝에 따른 다량의 정보량과 신호처리에 따른 많은 시간이 소요되기 때문에 구조물 전체는 검사 자동화에 의하여 일반적인 검사가 이루어지고 검사가 이루어진 부위중에서 결함의 존재가 특히 의심되는 부위만 선정하여 SAFT에 의한 결함신호의 재구성 처리를 실시함으로써 결함의 형상을 정확하게 파악할 수 있다. 이렇게 함으로써 위에 언급한 일반적인 검사에서 발견된 결함의 실제 크기 및 형상에 대한 정확한 정보를 확보하게 됨으로써 구조물

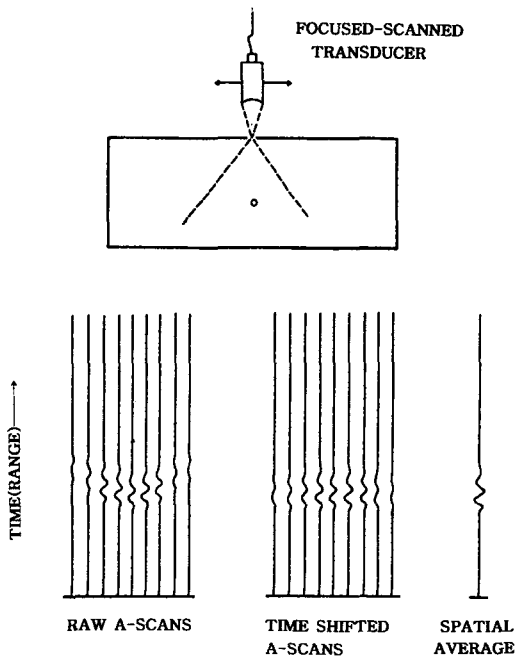


Fig. 2 An example of UT signal reconstruction by SAFT⁷⁾

의 건전성 여부를 해석하는 파손 해석에 대한 기본 자료로 활용될 수 있는 것이다.

3. 1차원 SAFT에 의한 S/N비 개선 실험⁹⁾

SAFT 알고리즘에 의하여 재구성된 신호 진폭을 구하기 위한 프로그램은 상기 식 (3) 및 Fig. 2를 참고로 하여 평판인 경우에 작성되었으며 이를 시험하기 위해 다음과 같은 두 가지 경우가 시도되었다.

탐상 자체는 UltraPac사의 자동 검사 장비를 사용한 바 스캐닝은 2.25MHz 주파수를 갖는 집속형 탐촉자와 수침법으로, 신호 수집은 샘플링 비율을 10MHz로 하여 이루어졌고 계산된 결과를 도시하기 위해 범용 3D 프로그램을 이용하여 $A_2(\alpha, z)$ 를 나타내었다. 두가지 경우 모두가 평판상에서의 탐상이었기 때문에 일정한 형태의 데이터를 쉽게 수집할 수 있었다.

첫번째 실험은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 hole이 윗면과 수평하게 또한 일직선으로 가공된 시험편을 대상으로 초음파 신호 수집을 실시한 경우이다. 각 점에서 수신된 RF 신호는 900개의 디지털 데이터로 구성되어있고 1인치 정도만을 대상으로 스캐닝한 바 신호 수집 간격을 0.01인치로 하였기 때문에 101포인트에서 수집이 이루어졌다. 즉 총 (101 × 900)개의 데이터로부터 앞에서 기술한 SAFT 알고리즘을 사용하여 데이터 처리가 이루어졌다.

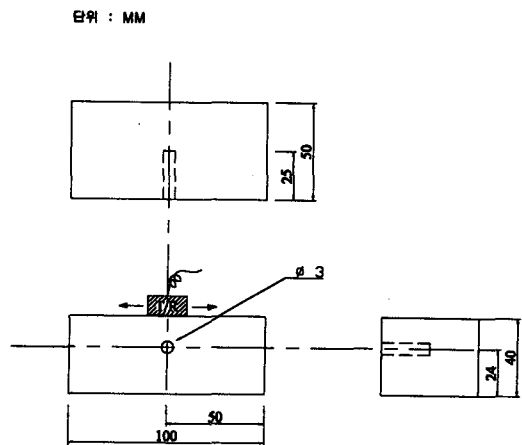


Fig. 3 Test specimen with a hole located horizontally in flat plate

기초 데이터를 가공하지 않고 3차원 형태의 그림을 보여주는 소프트웨어를 사용하여 그려보면 Fig. 4와 같으며 미소한 잡음이 대단히 많이 보임을 알 수 있고 또한 hole 주변에서도 그 폭이 대단히 넓은 것을 쉽게 알 수 있을 것이다. 우리가 원하는 것은 실제로 존재하는 hole 근방에서는 S/N비가 대단히 높고 그 이외의 부분에서는 신호 자체가 대단히 작아 hole의 크기 및 형태를 쉽게 분간할 수 있어야 한다는 것이다.

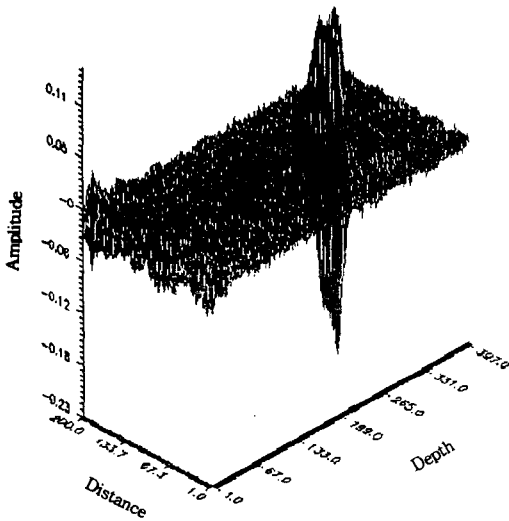


Fig. 4 Raw RF signal acquired from hole in Fig. 3

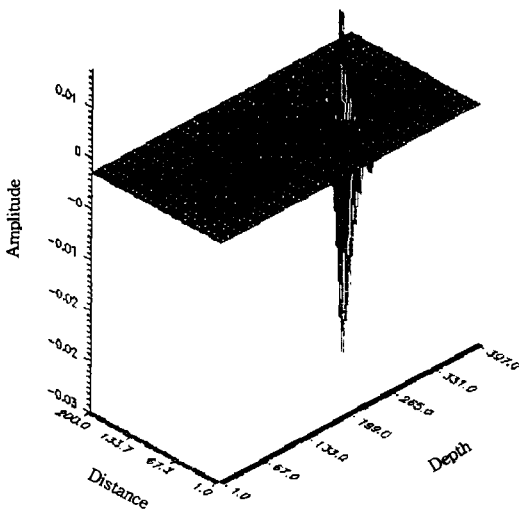


Fig. 5 Result processed by SAFT algorithm from RF signals in Fig. 4

Fig. 5는 SAFT 알고리즘을 사용하여 기본 데이터를 처리한 결과를 보여준다. 이 그림에서 보듯이 결함으로부터의 신호 대 잡음비가 SAFT에 의하지 않은 경우와 비교해 볼 때 결함 형태의 분간은 훨씬 용이한 것으로 보인다.

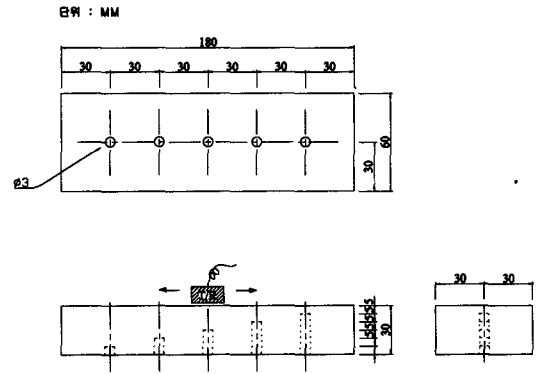


Fig. 6 Test specimen with holes located vertically in flat plate

두번째 실험은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 hole이 윗면에 수직으로 가공된 것으로 그 높이에 있어서 여러 형태를 갖고 있는 시험편에서 초음파 신호 수집을 실시한 경우이다.

이 중에서 hole3(H3)만을 대상으로 하여 기본 데이터와 처리된 데이터를 비교하여 보았다. 이 경우는 스캐닝 각 점에서 800개의 RF 신호를 디지털 데이터 형태로 수록하였고 앞절에서와 같이 101개의 스캐닝 포인트에서 데이터의 저장에 이루어졌다. 총 (101×800)개의 디지털 데이터로부터 SAFT 알고리즘을 사용하여 데이터 처리가 이루어졌다. 기본 데이터를 도시해보면 Fig. 7과 같으며 이는 앞의 Fig. 4와 같이 많은 잡음과 낮은 신호 대 잡음비를 보여주고 있으며 또한 hole로부터의 신호도 우리가 원하는 신호 형태에 크게 미치지 못함을 볼 수 있다. 이와 같은 신호로부터 SAFT 알고리즘을 사용하여 데이터 처리를 거친 경우를 보면 Fig. 8과 같으며 수집된 기본 데이터에 비해 훨씬 향상된 신호 대 잡음비를 보여주고 있음을 알 수 있다. 물론 이 경우에는 여러 개의 hole들이 일직선으로 가공되어 있기 때문에 세번째 hole인 H3으로부터의 신호 수집 시에도 두번째나 네번째 hole인 H2나 H4와 같은 인근 hole들로부터의 신호 간섭이 상당히 있는 것을 Fig.

7과 8에서 볼 수 있으나 주요 관심 대상인 hole H3으로 부터의 신호 인식은 SAFT에 의한 Fig. 8에서는 그다지 어렵지 않게 이루어질 수 있었다.

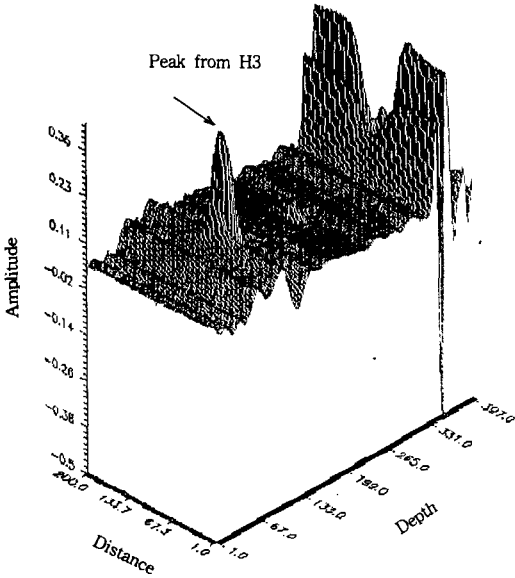


Fig. 7 Raw RF signal acquired from hole in Fig. 6

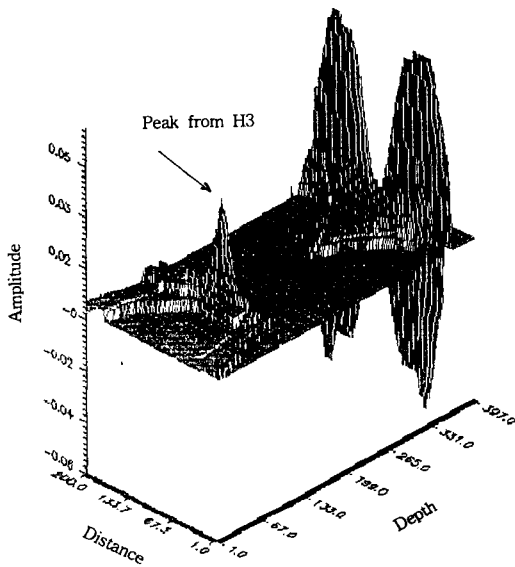


Fig. 8 Result processed by SAFT algorithm from RF signals in Fig. 7

이상의 두 결과에서 기초 데이터와 SAFT에 의하여 처리된 신호를 비교하여 보여주는 그림들을 볼 경우 "distance"는 탐촉자의 스캐닝 방향의 거리와 "depth"는 초음파의 진행 방향인 두께를 의미하며 이들 방향에 대한 숫자는 범용 3D 프로그램으로 계산 결과를 화면에 도시하기 위하여 임의로 스케일을 조정하여 나타낸 숫자이다. 특히 수직 방향인 진폭의 값에 있어서 처리 전의 기본 데이터와 비교할 때 차이가 그다지 크지 않음을 볼 수 있는데 이는 계산 결과들을 화면에 도시하는 소프트웨어를 사용할 시 자체적으로 스케일을 고려하여, 도시하기 때문에 진폭 방향의 숫자를 실제 값과 비교한다는 것은 큰 의미가 없고 도시된 신호의 형상 자체에만 의미를 부여할 수 있다.

4. 결론

초음파 탐상에 의한 결합 신호를 적절히 판별하기 위해서 그간 많은 연구 개발이 이루어지고 있다. 본 연구에서는 결합 신호로부터의 신호 대 잡음비를 향상시켜 결합의 크기 및 형태를 쉽게 분간하기 위해서 레이더로 비행 물체를 추적하는 시스템에 사용되어온 집속 신호 합성 기법(synthetic aperture focusing technique, SAFT)을 적용시키기 위한 시도를 하였으며 결합을 가정하여 hole을 내포한 재료 시험편을 대상으로 하여 본 기법을 적용해 본 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

결합을 평가하기 위해 신호처리 기법의 하나인 SAFT 알고리즘을 활용한 기본 소프트웨어가 단순 평판 시험편에 대하여 수직 초음파 탐상 결과를 적용할 수 있도록 작성되었으며 탄소강 평판에 가공된 hole들에 대하여 적용해 본 결과 한 개의 hole만이 존재하는 경우에는 기존의 기초 데이터와 비교할 때 상당히 개선된 신호 대 잡음비를 보여주었으며 여러 개의 hole들이 존재하는 경우에도 주변 hole들로부터 신호 간섭이 있었으나 평가 대상으로 하는 hole로부터의 신호는 커다란 어려움없이 구별해낼 수 있었다.

아울러 본 연구에서는 평판에 대해서 수직 탐상인 대단히 단순한 경우만을 대상으로 프로그램을 작성하여 보았으나 사각 탐상, 곡률을 갖는 시험편, 비균질 재질 등 다양한 형태를 갖는 시험편 및 x, y 방향 전체를 스캐닝하여 그 결과를 처리할 수 있는

통합 프로그램 개발이 추가적으로 필요하다고 생각된다.

참고 문헌

- 1) Juha Ylitalo, Esako Alasaarela and John Koivukangas, "Ultrasound Holographic B-scan Imaging", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 36, No. 3(1989), pp. 376-383
- 2) M. C. Tsao, "Industrial Ultrasonic Tomography-Principle, Practice, and Limitation", Materials Evaluation, Vol. 41(1983), pp. 1248-1254
- 3) W. Gebhardt, "Improvement of Ultrasonic Testing by Phased Arrays", Nuclear Engineering and Design, Vol. 76(1983), pp. 275-283
- 4) I. Komura, S. Nagai, H. Kashiwaya and T. Mori, "Improved Ultrasonic Testing by Phased Array Technique and Its Application", Nuclear Engineering and Design, Vol. 87 (1985), pp. 185-191
- 5) S. Ganapathy, W. S. Wu and B. Schmult, "Analysis and Design Considerations for a Real-Time System for Non-destructive Evaluation in the Nuclear Industry", Ultrasonics, Vol. 20, Nov.(1982), pp. 249-256
- 6) S. R. Doctor, et. al., "Development and Validation of a Real-Time SAFT-UT System for Inservice Inspection of LWR", Nuclear Engineering and Design, Vol. 89 (1985), pp. 357-369
- 7) L. J. Busse, H. D. Collins and S. R. Doctor, "Review and Discussion of the Development of Synthetic Aperture Focusing Technique for Ultrasonic Testing(SAFT-UT)", NUREG/CR-3625, PNL-4957, Pacific Northwest Laboratory(1984)
- 8) W. Muller, V. Schmitz and G. Schafer, "Reconstruction by the Synthetic Aperture Focusing Technique(SAFT)", Nuclear Engineering and Design, Vol. 94(1986), pp. 393-404
- 9) 박대영 외, "원전 압력 경계면에 대한 비파괴 검사 기술 개발", KAERI/RR-1067/91, 한국원자력연구소(1991)

Improvement of Signal to Noise Ratio by Synthetic Aperture Focusing Technique in Ultrasonic Testing

S. L. Lee*, K. O. Chang*, B. C. Kim* and G. G. Kim**

* Korea Atomic Energy Research Institute, Taejon 305-353

** Taejon National University of Technology, Taejon 300-717

Abstract Nondestructive method can include both testing itself and analysis or evaluation of the testing results. Although vast amount of testing can be accomplished in a fairly short amount of time due to the advancement of electronic technology, it is really difficult matter to identify whether the indication found during testing corresponds to be a real defect. Thus, in ultrasonic testing, advanced digital signal processing techniques have been widely studied in order to identify the shape of the defect during testing, and one of the signal processing techniques, synthetic aperture focusing technique(SAFT) was tried for holes machined in carbon steel plate in this study. Result showed that signal to noise ratio has been improved considerably compared to the result from original RF signals.