

TOFD 법에서의 근거리 분해능 향상에 관한 연구 Deconvolution Method for TOFD Technique

이순흠*, 김선형*, 공용해*, 이원흠**

Sunheum Lee*, Sunhyoung Kim*, Yonghae Kong* and Weonheum Lee**

초 록 Time of flight diffraction(TOFD)법은 초음파의 회절현상을 이용한 검사방법으로 일반적인 pulse echo 법에 비해 검사수행 속도가 빠르며, 보다 알기 쉽게 결함을 유무를 표시하고 검사표면의 상태와 결함의 방향에 의한 검사 결과가 기존에 방법에 비해 안정적인 특징을 갖는다. 그러나 TOFD 법은 결함의 위치가 검사체의 표면 근처에 위치하는 경우 표면을 따라 전파되는 lateral wave의 영향으로 결함의 검출에 어려움이 따른다. 본 연구에서는 TOFD 법을 이용한 초음파 탐상 시스템을 개발하였고, TOFD법의 단점이라 할 수 있는 표면 근처에 존재하는 결함을 보다 쉽게 검출하기 위하여 deconvolution 법을 사용하여 근거리 분해능을 향상시켰다.

Abstract Time of flight diffraction(TOFD) method is used in nondestructive tests of piping and pressure vessels because of its advantages over a pulse echo technique: its speed, objectivity, repeatability and its insensitivity to specimen surface conditions and discontinuity orientation. But it is the one of weak points in TOFD method that it has the dead zone in sub-surface resolution induced by lateral waves. We solved the dead-zone problem near the sub-surface by using the deconvolution method and the developed ultrasonic testing system showed high performance.

1. 서 론

Time of flight diffraction(TOFD)법은 G.M Silk[1~3]에 의해 개발되었으며, 현재 영국, 독일을 중심으로 방사선투과검사를 대용할 수 있는 방법으로 각광을 받고 있다. 초음파 검사장치의 성능 향상으로 선진국을 중심으로 검사에 필요한 각종 code 및 standard가 제정되어 산업현장에서 널리 응용되고 있다. TOFD법은 음파의 회절현상을 이용한 초음파 탐상검사의 한 방법으로서 기존의 pulse echo법에 비해 검사 수행 속도가 10배 이상 빠르며, 보다 알기 쉽게 결함을 검출, 표시하고 검사표면의 상태와 결함의 방향에 의한 검사결과가 기존의 방법에 비해 안정적인 특징을 갖고 있는 것으로 알려져 있다[1~4].

그러나 TOFD법은 결함의 위치가 검사체의 표면 근처에 위치하는 경우 표면을 따라 전파되는 Lateral

wave의 영향으로 표면 근처에 존재하는 결함의 검출에 어려움이 따르며, 일반적으로 검사체 표면으로부터 4-6mm이내에 존재하는 결함에 대해 검출이 불가능한 불감대(dead zone)가 존재하게 된다.

본 연구에서는 초음파 탐상시스템 개발 및 특히 deconvolution method[5,6]를 이용한 근거리 분해능 향상법을 이용하여 TOFD법의 단점이라 할 수 있는 표면 근처에 존재하는 결함의 검출력을 향상시켜 검사 시스템의 전반적인 성능향상을 꾀하였다.

2. 검사원리 및 이론

2.1. TOFD Technique

Time of flight diffraction technique(TOFD)은 구조물에서 사용중에 발생하는 Crack과 같은 형태

의 결합 끝부분(tip)에서 입사한 초음파가 회절되는 현상을 이용하는 기술이다. 회절된 초음파 신호는 무지향성(동심원)의 패턴을 갖으며, 이러한 현상을 이용하여 결합의 유무를 검출하고 크기 및 위치를 측정하는데 있어서 정확성을 기할수 있으며, 용접부와 같이 길이가 매우 긴 경우에 검사를 신속하고 정확하게 수행할 수 있다. Fig. 1와 같이 초음파 송신자(transmitter)와 수신자(receiver), 두 개의 탐촉자를 사용하여 검사체 표면에서 검사를 수행한다. 일반적으로 산업현장에서 용접부와 같은 검사체의 경우 내부에 음파를 경사지게 입사 시킬 경우 횡파(shear wave)를 사용하나 TOFD의 경우 굴절각 45° - 70° 사이의 압축파(종파)를 사용한다. 검사체 내부에 결합이 없는 경우 송신자로부터 발생된 초음파는 검사체의 표면을 따라 전파된 Lateral wave와 저면에서 반사된 파만이 수신된다. 그러나 검사체 내부에 결합이 존재할 경우 검사체 내부로 입사된 초음파는 크랙의 양쪽 끝 부분에서 회절(diffraction)현상에 발생되고 이 회절된 음파는 무지향성을 갖게 된다. 무지향성을 갖는 회절된 초음파 에너지의 일부가 검사체 표면에 위치한 수신기에 도달되어, 결합의 유무를 확인할 수 있다. 즉 Fig. 1에서 B, C 신호가 나타남으로서 결합의 존재를 확인할 수 있는 것이다. 또한 검사체의 표면부에 결합이 존재할 경우

표면을 따라 전파하는 lateral wave가 수신자에 전달되지 않기 때문에 Fig. 1에서 A신호가 존재하지 않는 경우 표면부에 결합이 존재함을 알 수 있게 된다. 이와 마찬가지로 D의 신호가 수신되지 않게 되면 검사체의 밑부분에 결합이 존재함을 알 수 있다. 즉 TOFD법은 기존에 사용되고 있는 펄스-에코법에 비해 한 번에 검사체의 내부 전체에 존재하는 결함을 검출할 수 있는 장점을 갖으며 펄스-에코 방식의 초음파 탐상검사 방법의 경우 결합에 의해 반사된 초음파 신호의 에너지의 양에 의해 평가되는 반면, TOFD 법은 초음파 송신자에 의해 발생된 초음파가 검사체에 입사되고 이때, 검사체에 존재하고 있는 크랙과 같은 선형결합의 끝단부에 의해 회절되며, 회절된 초음파 에너지는 무지향성의 형태를 갖게 되어 초음파 수신자에 의해 검출되는 방법으로 이러한 음파의 회절현상을 이용한 TOFD법은 보다 정확한 결합의 검출 및 크기를 알아내는데 유용한 방법이다. 이렇게 검출된 신호는 D-scan으로 검사 결과를 표시하게 된다.

TOFD법을 이용한 결합의 크기 및 위치의 측정방법은 Fig. 2에서와 같이 초음파 송신자(T)와 수신자(R) 사이의 거리를 2S, 검사체 표면에서 결합의 끝단부까지의 결합깊이를 d, 초음파 탐촉자 사이의 중앙에서부터의 결합위치를 x 일 때 송신자로부터 발생된 초음파가 결합 끝단부까지의 진행경로 M과 끝단부에서 입사된 초음파가 회절된 후 수신자에 이르는 진행경로 L은 식 (2)와 식 (3)과 같다.

$$L^2 = d^2 + (S - X)^2 \dots\dots\dots (2)$$

$$M^2 = d^2 + (S + X)^2 \dots\dots\dots (3)$$

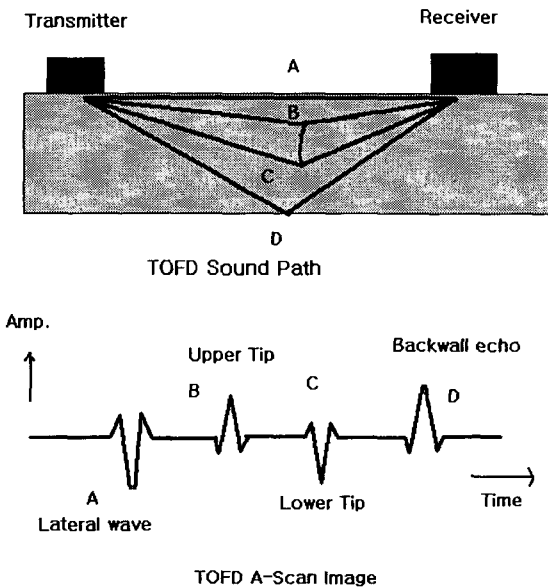


Fig. 1 Principle of Time of Flight Diffraction method

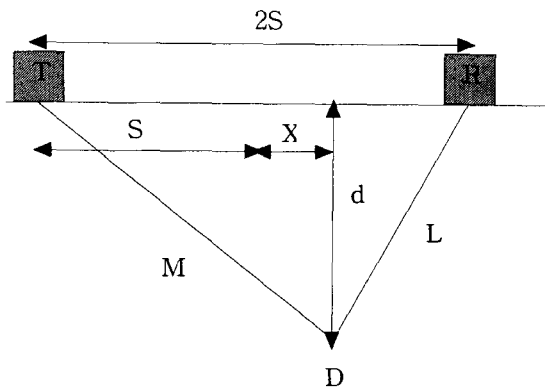


Fig. 2 Sizing and location of defect using TOFD

결합의 끝단부인 Diffracting point, D 는 식 (4)에 의해 구해진다.

$$CT = [d^2 + (S - X)^2]^{\frac{1}{2}} + [d^2 + (S + X)^2]^{\frac{1}{2}} \dots\dots (4)$$

C : 초음파의 속도

T : 초음파가 송신되어 회절된 후 수신된 시간

식 (4)에서 X는 시간 T가 최소일 때 Crack Tip은 탐촉자 사이의 정 중앙에 위치하게 되므로 0이 된다. 그러므로 식 (4)은 식 (5)와 같이 되며,

$$CT = 2[d^2 + S^2]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (5)$$

결합의 끝단부의 위치는 식 (5)로부터 구해지고, 다른 끝단부의 위치도 같은 방법으로 구할 수 있다. 결합의 양쪽 끝단부의 위치를 구함으로써 결합의 크기 또한 얻을 수 있으며, 이렇게 측정된 결합의 크기 및 위치는 일반적인 펄스-에코법에 비해 매우 우수하다.

2. 2. Deconvolution Method

초음파 탐상검사는 결합 및 불연속부등 음향경계면에서 반사되는 초음파 신호의 시간차 및 진폭의 크기를 이용하여 결합 및 불연속부의 위치 및 크기를 알아내는데 사용되고 있다. 그러나 검사체내에 반사원의 사이가 매우 가까울 경우 초음파반사신호의 중첩으로 인하여 각각의 구별이 매우 어렵게 된다. 예를들어 대용량 화력 발전소의 보일러 수명평가에 사용되는 보일러 튜브의 산화층 두께측정시 산화층의 두께가 얇은 경우 모재와의 경계면에서의 신호와 중첩되어 산화층의 두께측정이 어렵게 된다. 또한 표면강화를 위한 이중금속 도금 재료의 경우 접합부의 접합상태 및 도금재료의 건전성 평가시에도 이러한 현상이 발생하게 된다. deconvolution에 의한 거리분해능 향상의 기본원리는 다음과 같다.

Pulse echo(A-scan) 초음파 탐상검사시 반사원의 사이가 가까울 경우 각각의 반사신호인 R₁과 R₂가 중첩되어 Fig. 3과 같이 R₁ + R₂ 로 나타나게 되며 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_1 + R_2 = \rho_1 \delta(x_1) S_T(t - 2x_1/v) + \rho_2 \delta(x_2) S_T(t - 2x_2/v) \dots\dots\dots (6)$$

여기서 ρ₁, ρ₂는 반사원 R₁의 R₂ 반사계수이며 x₁,

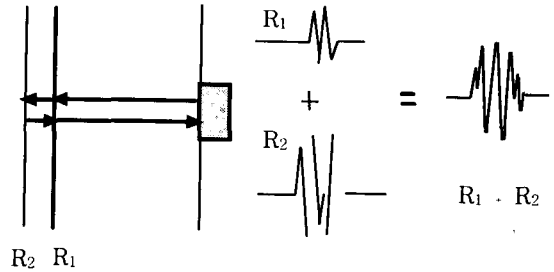


Fig. 3 Superposition of Ultrasonic signal

x₂ 초음파 탐촉자에서 반사원까지의 거리이다.

S_T(t - 2x/v) 은 시간 t = 0에서 탐촉자로부터 송출된 초음파 pulse가 피검사체의 매질중을 속도 v로 전파해서 x의 위치에 있는 반사원에서 반사되어 t = 2x/v에 수신되는 것을 나타낸 것이다. 검사체 내에 반사원이 n개가 존재할 경우 수신신호 S_{Rn}(t)는 식 (7)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{Rn}(t) = \int_0^{\infty} \rho_i \delta(x_i) S_T(t - 2x_i/v) \dots\dots\dots (7)$$

즉, 반사되어진 RF신호 S_R(t)는 식 (8)과 같이 센서에서 송신된 신호 S_T(t)가 2x/v 만큼 지연된 신호에 반사계수 ρ(x)의 convolution으로 나타낼 수 있다.

$$S_R(t) = \int_0^{\infty} \rho(x) S_T(t - 2x/v) dx \dots\dots\dots (8)$$

2x/v=t', ρ(x)=ρ'(t'), S_T(t - 2x/v)dx=S'_T(t - t') dt' 로 치환한 후

$$S_R(t) = \int_0^{\infty} \rho'(t') S'_T(t - t') dt' \dots\dots\dots (9)$$

$$= \rho'(t) * S'_T(t)$$

식 (9)에 대한 푸리에 변환은 식 (10)와 같다.

$$S_R(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \rho'(t') S'_T(t - t') \exp(-j \omega t) dt' dt$$

$$= \rho(\omega) S_T(\omega) \dots\dots\dots (10)$$

$$\rho(\omega) = S_R(\omega) / S_T(\omega) \dots\dots\dots (11)$$

여기서 1/S_T(ω)는 deconvolution kernel 이라고 하는 필터의 역할을 하게된다.

식 (11)의 함수로부터 ρ'(t)를 위해 역푸리에 변환을

하면 식(12)와 같다.

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(\omega) \exp(-j\omega t) d\omega \rightarrow p(t) \dots\dots\dots (12)$$

이되고 이것으로부터 반사원의 상태를 알 수 있다.

그러나 데이터의 이산화와 양자화로 부터의 오차 및 전기적 노이즈, 초음파 산란 신호등의 노이즈를 억제하도록 deconvolution kernel을 수정하여 최적화를 하여야한다. 즉 Filter $W(\omega)$ 를 사용하여 $p(\omega)$ 는 식 (13)과 같다.

$$p(\omega) = W(\omega) S_R(\omega) \dots\dots\dots (13)$$

여기서

$$W(\omega) = \frac{S_T^*(\omega)}{|S_T(\omega)|^2 + N(\omega)}$$

여기에서 $N(\omega)$ 은 노이즈 성분의 파워 스펙트럼이며, * 표시는 공액 복소수를 나타낸다

3. 실험

3.1. 실험장치 및 시험편

본 연구에서는 사용한 실험 장치는 2개의 탐촉자를 사용한 TOFD용 scanner 장치 및 ultrasonic pulse/receiver board, 고속 A/D convertor board를 내장한 pentium PC로 구현하였다.

굴절각의 결정은 시험체의 두께에 따라 결정하는 것이 일반적이며, 본 연구에서는 시험체의 두께가 10-15mm 정도의 시험편을 사용하고 표면하 분해능력을 검증을 위해 70°의 굴절각을 갖는 종파를 사용하였다. 탐촉자의 제원은 Panametrics사의 공칭 주파수 5MHz, 직경 0.5" 탐촉자를 사용하였고, 시험체에 사각 종파입사를 위해 별도의 아크릴 wedge를 제작하였다.

본 연구에서 개발된 software는 Window 98/NT 환경에서 동작하며, 사용하기 편리한 user Interface를 구현하였다.

Program의 구성은 real-time A-scan 및 D-scan display 가 가능하고 검사 결과를 저장할 수 있다. 시험편은 FlawTech사의 ultrasonic examination flawed specimen kits를 사용하였다.

3.2. 실험결과

FlawTech사의 ultrasonic examination flawed specimen kits의 도면 및 개발된 TOFD 장치의 검사결과는 Fig. 4-9와 같다. TOFD 법에서 사용하는 종파 초음파 파장의 길이 크기 때문에 결합의 경계가 명확하게 나타나지 않는 결과를 얻을 수 있었다. 또한 결합이 시험체의 표면에 근접하게 되면 표면하 분해능의 감소로 구별이 어려울 것을 예측 할 수 있었다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 10은 시험편의 건전 부분에서 얻어진 lateral wave를 추출하여 이것을 입력 신호(reference signal)로 한 Weiner deconvolution 처리 결과를 나타낸다. 처리 결과를 볼 때 시험체의 표면을 따라 전파되어진 낮은 주파수의 lateral wave의 영향으로 두께 16mm의 시험편의 상단 및 하단의 신호만이 명확히 구별되며, 크랙의 상단부 신호는 lateral wave와의 중첩으로 인해 구별되지 않고 크랙의 하단부 신호만이 검출되게 된다. 그러나 deconvolution 된 결과는 크랙의 존재에 따라 발생된 회절 초음파의 영향으로 lateral wave에 영향을 주며 결합의 크기 측정 및 lateral wave의 진폭변화 및 위상변화를 쉽게 구별할 수 있는 결과를 얻었다. 그림의 위쪽 부분은 일반 TOFD법의 결과를 spectrum color로 표시한 것이고 하단부는 deconvolution 처리한 결과를 나타내고 있다. 이때 사용된 노이즈 성분의 진폭은 장치의 전기적 특성 및 초음파 주파수를 고려하여 적절한 값을 사용하였다.

Fig. 11, 12는 시험편 UT609, UT610 을 decon-

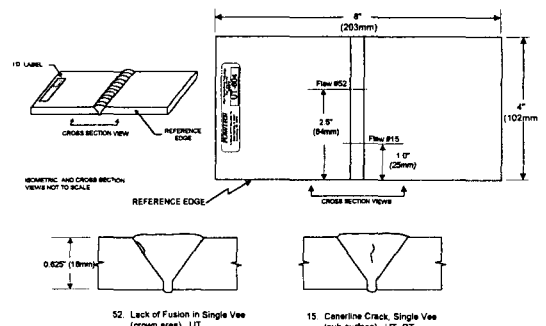


Fig. 4 Drawing of specimen UT604

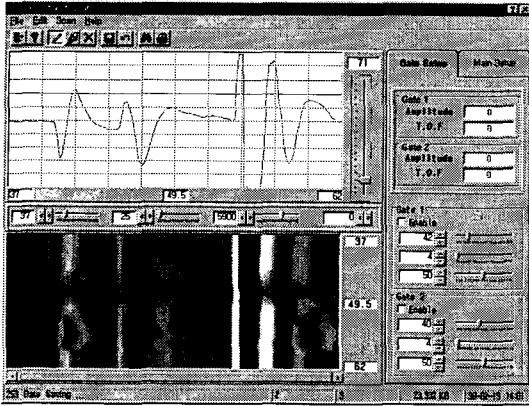


Fig. 5 Result of TOFD method for UT604

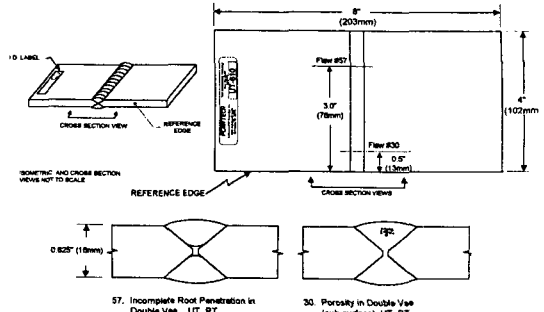


Fig. 8 Drawing of specimen UT610

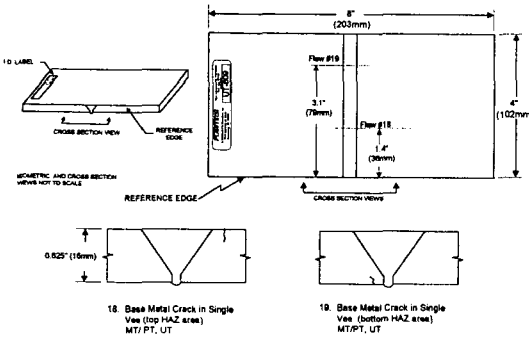


Fig. 6 Drawing of specimen UT609

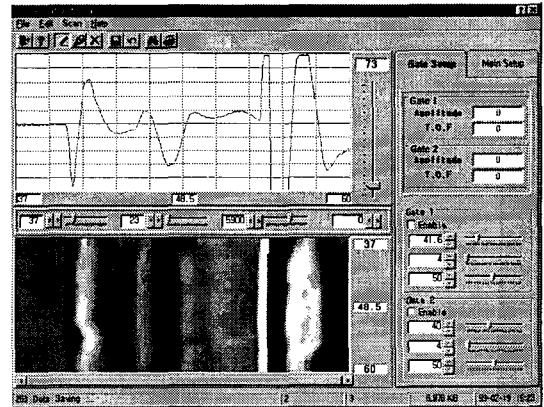


Fig. 9 Result of TOFD method for UT610

있다.

5. 결론

본 연구를 통하여 용접부와 같은 검사 취약 부위를 기존의 초음파 탐상검사 방법인 pulse-echo 법에 비해 검사의 속도가 10배 이상 빠르며, 검사의 신뢰도 또한 우수한 초음파 회절현상을 이용하는 TOFD 법의 초음파 검사장치 및 응용 프로그램을 개발하였다.

TOFD법의 단점이라 할 수 있는 lateral wave의 영향에 의해 검출하기 어려운, 검사체 표면 근처에 존재하는 결함의 검출을 위해 deconvolution 방법을 적용한 결과 표면하 분해능의 향상을 가져왔고 결함의 크기 및 위치 해석에 유용함을 알 수 있었다.

또한 보다 높은 주파수의 탐촉자를 사용할 경우 현재 TOFD법에서의 결함검출이 어려운 것으로 알려진 표

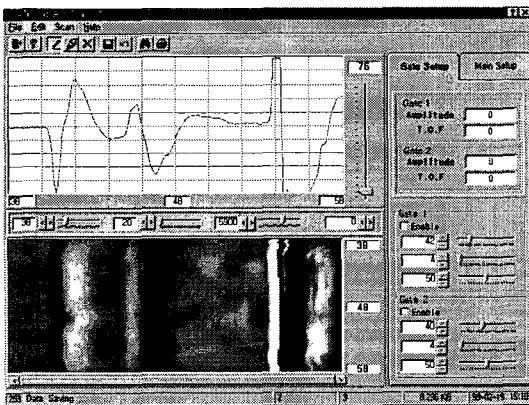


Fig. 7 Result of TOFD method for UT609

volution 처리 전, 후의 결과를 나타내며 처리결과가 결함의 경계가 보다 선명하게 나타남을 알 수 있었고 이로 인해 결함의 위치 및 크기 결정에 보다 유용하며, 표면에 근접하고 있는 결함의 검출에 유리하다고 할 수

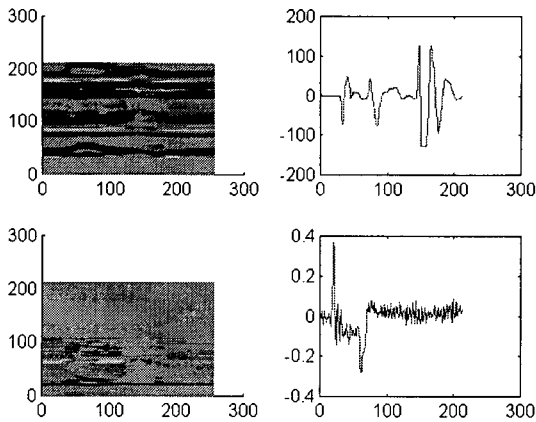


Fig. 10 Result of deconvolution processing for UT604

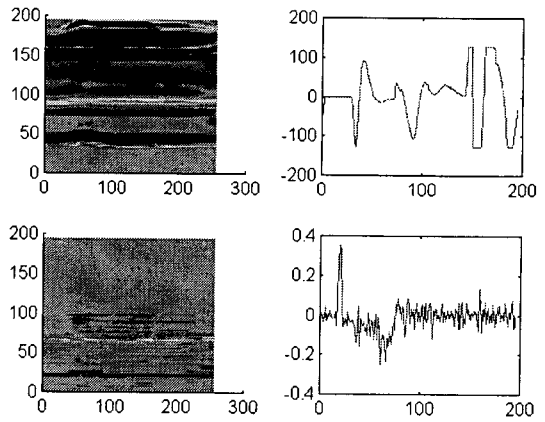


Fig. 12 Result of deconvolution processing for UT610

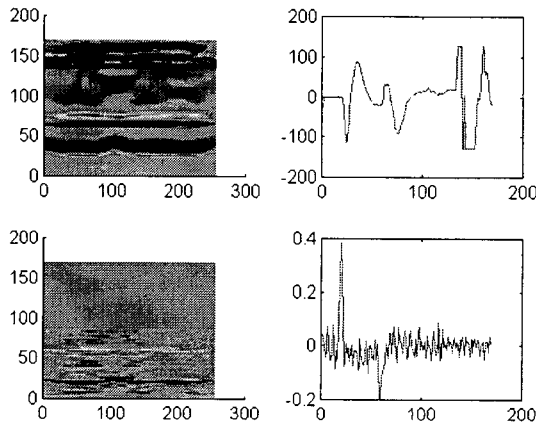


Fig. 11 Result of deconvolution processing for UT609

면하 4-6mm 이내의 결함 검출에 적용될 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 1998년도 순천향대학교 지원에 의한 결과임(과제명 : 비파괴검사장비 개발에 관한 연구)

참고문헌

[1] M.G. Silk, "The interpretation of TOFD data in the light of ASME XI and similar

rules", British Journal of NDT, May, (1989)

- [2] M.G. Silk, P.E.Kear, "The time of flight diffraction technique theoretical aspects and practical application", L'informatica nelle technigie non distruttive, Feb. (1993)
- [3] ASNT "Nondestructive testing handbook" Vol. 7, 2nd Edition, (1991)
- [4] Bernard, L. "Time of flight diffraction technology for ultrasonic inspection of piping and pressure retaining components" Materials Evaluation, Vol.45, No.5, (1987)
- [5] K. I. McRae, "Deconvolution technique for ultrasonic imaging of adhesive joints", Material Evaluation, Nov. (1990)
- [6] 日本機械學會, "非破壊計測技術", pp. 109-112