

용접부 초음파 사각 탐상에서 디컨볼루션을 이용한 균열신호와 기하학적 반사신호의 식별

Identification of Flaw Signals Using Deconvolution in Angle Beam Ultrasonic Testing of Welded Joints

송성진*, 김준영**, 김영환*[†]
 Sung-Jin Song*, Jun Young Kim** and Young H. Kim*[†]

초 록 용접부 초음파 사각탐상은 용접 루트부나 counter bore와 같은 결함과 관련없는 신호를 발생하는 기하학적 반사체로 인하여 신호의 식별이 매우 어렵다. 본 논문에서는 이와 같은 상황에서 결함신호를 식별하는 새로운 기법을 제안하였다. 디컨볼루션(deconvolution)을 사용한 유사성함수의 개념을 도입한 새로운 기법에서는 먼저 결함과 기하학적 반사체에 대하여 기준신호와 대상신호를 획득하였으며 이들을 정규화 하였다. 대상신호를 기준신호로 디컨볼루션하여 얻은 유사성함수의 패턴으로부터 기하학적 반사 신호와 결함신호를 구분할 수 있었다. 그 결과로, 제안하고 있는 기법이 기하학적 반사체와 노치 모서리부에서 반사되는 신호를 분리하는데에 유용함을 알 수 있었다.

주요용어: 초음파 사각탐상, 용접부, 신호식별, 기하학적 반사체, 유사성함수, 디컨볼루션

Abstract The identification of ultrasonic flaw signals is a truly difficult task in the angle beam testing of welded joints due to non-relevant signals from the geometric reflectors such as weld roots and counter bores. This paper describes a new approach called "technique for identification of flaw signal using deconvolution(TIFD)" in order to identify the flaw signals in such a problematic situation. The concept of similarity function based on the deconvolution is introduced in the proposed approach. The "reference" signals from both flaws and geometric reflectors and test signals are acquired and normalized. The similarity functions are obtained by deconvolution of test signals with reference signals. The flaw signals could be identified by the patterns of similarity function. The initiative results show great potential of TIFD to distinguish notch corner signals from the geometric reflections.

Keyword: angle beam ultrasonic testing, welded joints, signal identification, geometric reflectors, similarity function, deconvolution

1. 서 론

기계나 설비들의 조립을 위해 널리 사용되는 용접은 모재의 재질변화와 열화(degradation)를 동반하여 재료가 반복하중이나 충격하중에 취약한 성질을 가지게 하며, 용

접공정 중에 발생할 수 있는 균열 등의 결함은 부품의 수명을 급속히 단축시키는 요인으로 작용한다. 따라서 용접 부에 존재하는 결함을 검출하고 그 영향을 정량적으로 평가하는 것이 설비나 부품의 기계적 성능 보장을 위해 필수적인 단계로 인식되고 있다.

용접부에서 초음파 탐상을 수행했을 때 획득되는 대표적인 신호는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 매우 복잡한데, 이는 용접부의 기하학적인 구성에 기인한다. 즉, 용접부는 균열과 같은 치명적인 결함에 의한 신호뿐만 아니라, 기하학적 반사체인 counter bore나 용접 루트부에서 반사되는 비관련신호에 의한 신호가 뒤섞여 검출되기 때문이다[1].

이와 같은 신호를 검출하고 정확히 해석하는 것은 비록 어려운 일이지만, 초음파 비파괴검사의 신뢰도를 향상시키기 위해서는 반드시 수행해야 할 필수적인 과정이다. 일반적으로 지금까지 산업현장에서 이용되는 재래식 초음파 탐상 시험은 작업자가 초음파 탐상기(flaw detector)를 이용하여 직접 피검체를 검사하는 방식이 대부분이다. 이러한 재래식 탐상에서는 검사자가 용접부 기하학적 반사체에 대한 일반적인 정보를 미리 인지하고, 그 위치에서 나타나는 지시를 기하학적 반사 신호로 간주하는데,

이 과정에서 지시가 나타나면 숙련된 검사자는 탐촉자를 움직이면서 피검체 내부를 진행하고 반사된 신호의 에코 동태턴(echo dynamic pattern)을 보고, 피검체 형상, 물성치, 탐상기의 설정값 등을 고려하여 반사체의 위치와 종류를 판단한다[2]. 그러나 이러한 작업은 검사자의 주관적인 경험과 지식, 작업환경이나 장비의 설정 등에 따라 그 결과가 크게 변화할 수 있는 문제점을 가지고 있으며, 피검체 형상의 복잡성이나 피검체 재질의 변화 등으로 인한 반사신호의 변화 때문에 많은 경우 실질적인 문제를 푸는데는 어려움이 많은 것이 현실이다. 또 한편으로는 자동 초음파 탐상기를 사용하는 방법이 있는데, 이는 결함의 형상 정보를 주는 B-scan이나 C-scan으로부터 기하학적 형상과 결함을 분류하는 방법이다[3]. 대표적인 예로 자동 초음파 탐상장비를 가지고 터빈 디스크를 검사하여 얻어진 C-scan 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

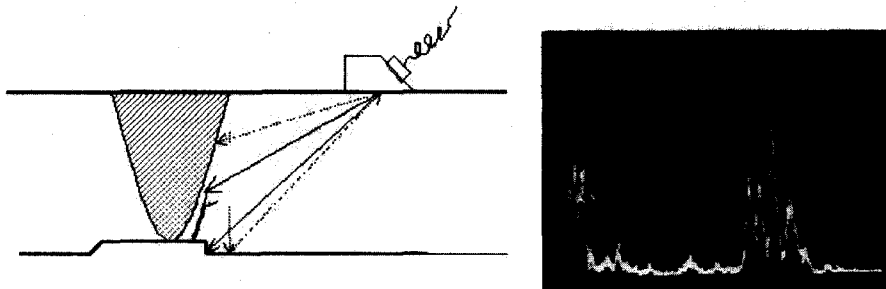


Fig. 1 Ultrasonic testing of welded joints. (a) geometry of testing and (b) ultrasonic A-scan signal

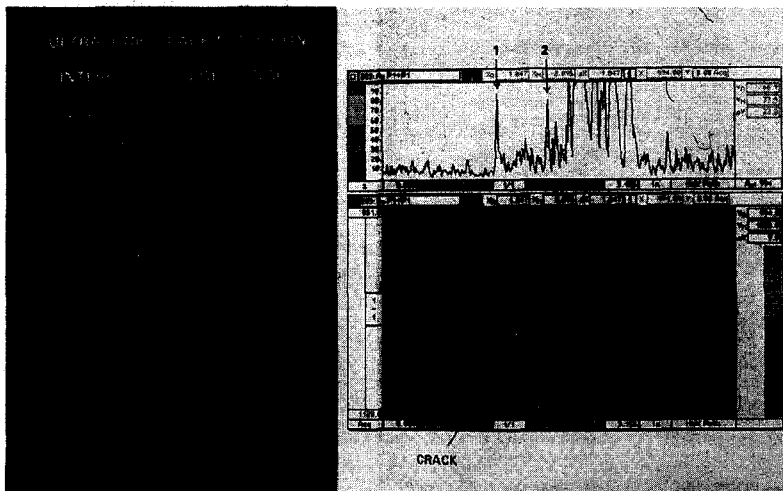


Fig. 2 An example of ultrasonic testing for welded joints with automated ultrasonic testing equipment

C-scan의 결과로부터 1번과 2번이 기하학적 반사신호임을 알 수 있으며, 그와는 별도로 결합의 위치를 판별할 수 있다. 그러나 이러한 방법은 고가의 초음파 탐상장비가 필요함은 물론이고, 또한 검사가 다 끝난 후에야 결합과 기하학적 반사체를 구별할 수 있으며, 기하학적 구조가 복잡할 경우에는 그 구별 자체가 매우 어려워지는 단점이 있다.

본 연구의 목적은 이와 같은 종래의 용접부 초음파 비파괴 검사시 신호식별 능력을 개선하고자 하는 것이다. 여기서 신호 식별이란 결합의 종류판별이나 크기 산정에 앞서 균열신호와 기하학적 반사신호를 구분하는 것을 말한다. 본 연구에서는 검사자의 주관성을 배제하고, 실제 현장에서도 적용 가능한 객관적이며 또한, 실시간으로 균열신호와 기하학적 반사신호를 식별하기 위해서, 유사성 함수를 정의하고, 이를 이용하여 결합신호를 식별하는 새로운 기법인 TIFD (technique for identification of flaw signal using deconvolution)를 제안하였으며, 그 성능을 실험적으로 검증하였다. 이 기법은 각각의 반사 신호가 그 반사 원의 특성에 따라 다르다고 가정하고, 그 각각의 고유한 반사패턴의 특성을 찾아내는 것에 기반을 두고 있다.

2. 이론적 배경

2.1 컨볼루션 과 디컨볼루션

일반적으로 자연계의 많은 현상은 Fig. 3과 같이 컨볼루션계(convolution system)로 표현할 수 있다[4].

이 컨볼루션계를 식으로 표현하면 식(1)과 같다.

$$h(t) = \int g(\tau) f(t-\tau) d\tau = f(t) * g(t) \quad (1)$$

여기서 ‘*’는 컨볼루션(convolution)을, $f(t)$, $h(t)$,

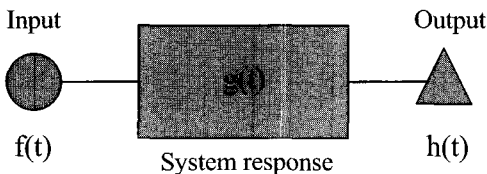


Fig. 3 Convolution system

$g(t)$ 는 각각 시간대역 입력, 출력 및 응답함수를 나타낸다. 보통 식(1)을 컨볼루션 적분 (convolution integral)이라 하는데, 이는 자연계를 기술하는 중요한 수단으로 이용된다. 식(1)을 선형계(linear system)에 대한 주파수대역(frequency domain)으로 표현하면 식(2)와 같다.

$$H(\omega) = G(\omega) F(\omega) \quad (2)$$

여기서 $F(\omega)$, $H(\omega)$, $G(\omega)$ 는 각각 주파수대역 입력, 출력 및 시스템 응답의 주파수 특성이다.

디컨볼루션(deconvolution)은 $g(t)$ 를 구하는 것으로, 시스템의 응답함수를 구하거나, 초음파 신호의 분해능을 향상시키기 위해서 사용되기도 하며[5], 수신된 초음파 신호에서 탐촉자와 탐상기의 특성을 보정하기 위해서도 사용된다[6]. 식(2)에서 $G(\omega)$ 를 식(3)과 같이 변환 한 후, 이를 역 푸리에변환(inverse Fourier transform)하면 된다.

$$G(\omega) = \frac{H(\omega)}{F(\omega)} \quad (3)$$

그러나 식(3)에서 때때로, 분모 $F(\omega)$ 의 값이 매우 작아지면 영(零)으로 나뉘게되어 그 값이 발산하게 된다. 또한, 디컨볼루션 과정은 노이즈에 매우 민감하여 결과를 매우 큰 값으로 보여주기도 한다. 이를 해결하기 위한 디지털 필터 중의 하나로[7], 본 연구에서는 Wiener filter[8]를 사용하여 이를 해결하였으며, 식(3)을 식(4)와 같이 바꾸어 사용하였다.

$$G(\omega) = H(\omega) \frac{F(\omega)^*}{|F(\omega)|^2 + \epsilon^2} \quad (4)$$

여기서, $F(\omega)^*$ 는 $F(\omega)$ 의 복소공액(complex conjugate)이며, ϵ 는 Wiener filter 특성을 결정하는 상수이다.

2.2. 디컨볼루션에 의한 신호 분류

초음파 탐상 신호는 반사체의 특성에 따라 그 진폭과 도달시간은 물론이고 파형이 달라진다. 따라서 수신된 파형의 패턴으로부터 반사체의 특성을 분류할 수 있다. 디컨볼루션은 수신된 파형의 패턴을 분류하는 데에 매우 유용하게 사용될 수 있다. 기준신호를 $f(t)$ 라 하고 비교 대상신호를 $h(t)$ 라 하자. Fig. 4(b)와 같이 $h(t)$ 가 Fig. 4(a)의 $f(t)$ 와 형태는 같고 크기가 달라지며, 시간대역으로 평행이동한 경우에는

$$h(t) = Af(t - t_0) = f(t) * A\delta(t - t_0) \quad (5)$$

와 같이 주어진다. 여기서, δ 는 Kronecker delta 함수, A 는 임의의 상수를 나타낸다. $h(t)$ 를 $f(t)$ 로 디컨볼루션하면 식(6)을 얻을 수 있는데, 그 해를 도시하면 Fig. 4(c)에서의 같은 임펄스 형태가 된다.

$$g(t) = h(t) *^{-1} f(t) = A\delta(t - t_0) \quad (6)$$

여기서, $*^{-1}$ 은 디컨볼루션이다.

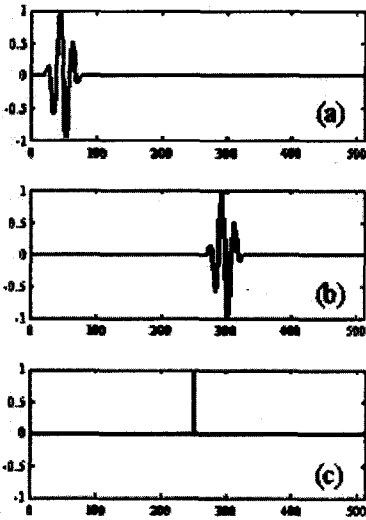


Fig. 4 (a) reference, (b) target and (c) deconvolution result for similar signals

반면, Fig. 5(b)에서의 같이 대상신호 $h'(t)$ 가 기준신호 $f(t)$ 와 비교하여 시간대역으로의 평행이동하고 그 크기가 변할 뿐만 아니라, 그 형태도 변하는 경우에는 식(7)과 같이 표현 할 수 있다.

$$h'(t) = \sum_i f(t) * A_i \delta(t - t_i) \quad (7)$$

이 때, 식(7)을 디컨볼루션을 취하면 식(8)을 얻을 수 있다.

$$g'(t) = h'(t) *^{-1} f(t) = \sum_i A_i \delta(t - t_i) \quad (8)$$

식(8)의 유사하지 않은 신호에 대한 디컨볼루션의 결과를 도시하면 Fig. 5(c)와 같으며, 이는 유사한 신호에 비하여 복잡한 형태를 나타낸다.

따라서, 디컨볼루션의 결과는 유사한 신호에 대해서는 임펄스 형태를 나타내는 반면에, 유사하지 않은 신호에 대해서는 복잡한 형태를 나타낸다는 것을 알 수 있으므로 본 연구에서는 이를 유사성함수(similarity function)로 정의하였다. 본 연구에서는 이 유사성함수를 이용하여 초음파 탐상 신호를 분류하는 TIFD 기법을 제안하였다.

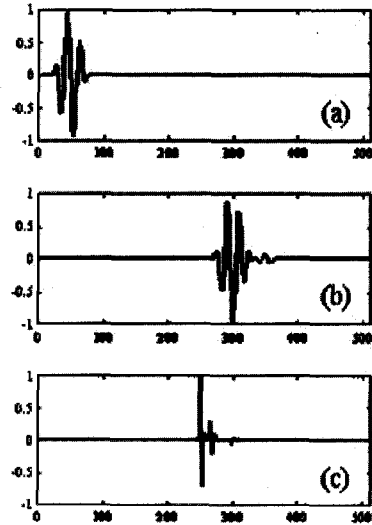


Fig. 5 (a) reference, (b) target and (c) deconvolution result for dissimilar signals

3. 실험

3.1. 실험장치

초음파의 발진과 수신을 위하여 Panametric사의 Model 5800 pulser/receiver를 사용하였다. 중심주파수가 5MHz 이고, 입사각이 45° 인 경사각 초음파 탐촉자를 사용하였으며, 접촉매질(couplant)은 기름(oil)을 사용하였고, Lecory 9310A 디지털 오실로스코프를 사용하여 수신된 초음파 탐상 신호를 저장하였다. 용접부의 형상을 모사할 목적으로 SM 45C강을 사용하여 시험편을 제작하였다. 시험편에는 균열을 모사하는 EDM 노치(notch)는 물론이고 counter bore와 용접 루트(weld-root)부와 같은 기하학적 형상을 모사하여 가공하였다. 이들 결합과 기하학적 반사체를 독립적으로, 그리고 혼재하여 가공하였다.

3.2. 기준(reference)신호의 획득

용접부 각각의 요소를 모사한 시험편으로부터 45° 경사각 탐촉자를 사용하여 펄스-에코(pulse-echo) 탐상방법으로 TIFD에 사용할 기준신호를 획득하였다. 다른 반사체에 의한 영향을 줄이기 위하여 Fig. 6에서와 같이 독립적으로 존재하는 counter bore(60°)와 용접 루트부의 기하학적 반사신호와 모의 균열인 노치(6mm)의 모서리에서 반사되는 신호를 획득하였다. 이때, 각각의 진폭이 최대로 표시될 때를 각각의 기준신호로 선정하였다.

3.3. 대상(target)신호의 획득

대상신호란 실제 식별하고자 하는 신호를 말한다. 먼저 균열을 모사한 노치의 대상신호로 Fig. 7(a)에서 보인 시험편으로부터 높이가 두께의 20%, 40%, 60%, 80%에 해당하는 3, 6, 9, 12mm의 독립(isolated) 되어 있는 수직 노치에서 신호를 획득하였으며, Fig. 7(b)에 보인 시험편으로부터 수직 노치가 용접루트부 또는 counter bore와 혼재하는 신호를 획득하였다. Fig. 7에서 화살표는 초음파 탐촉자의 이동경로를 표시한다.

4. 결과 및 토의

4.1. 신호의 정규화 및 디컨볼루션을 통한 유사성함수의 획득

실제 초음파 탐상에서 얻어지는 신호는 탐촉자와 시험편과의 접촉 상태, 게인 등과 같은 장비설정에 따라서 신호의 크기가 달라지게 되는 현상의 상황을 고려해 볼 때, 이러한 요인들에 의한 영향을 최소화하기 위하여 수신신호 즉, 기준신호 및 대상신호 모두를 최대 진폭이 특정한 값이 되도록 정규화 하였다. 그리고 이 정규화된 신호에 Wiener filter를 사용하여 디컨볼루션을 수행하였다. 신호의 식별은 바로 이 디컨볼루션의 결과인 유사성함수의 분석을 통하여 이루어진다.

4.2. 유사성함수의 분석을 통한 신호의 식별

노치 모서리, counter bore 및 용접 루트부 신호에 대하여 각각 TIFD를 적용하여 보았다. Fig. 8은 기준신호와 대상신호가 같은 경우로 N-1, C-1, W-1은 각각 노치 모서리, counter bore 및 용접 루트부 신호이다. 각각의 기준신

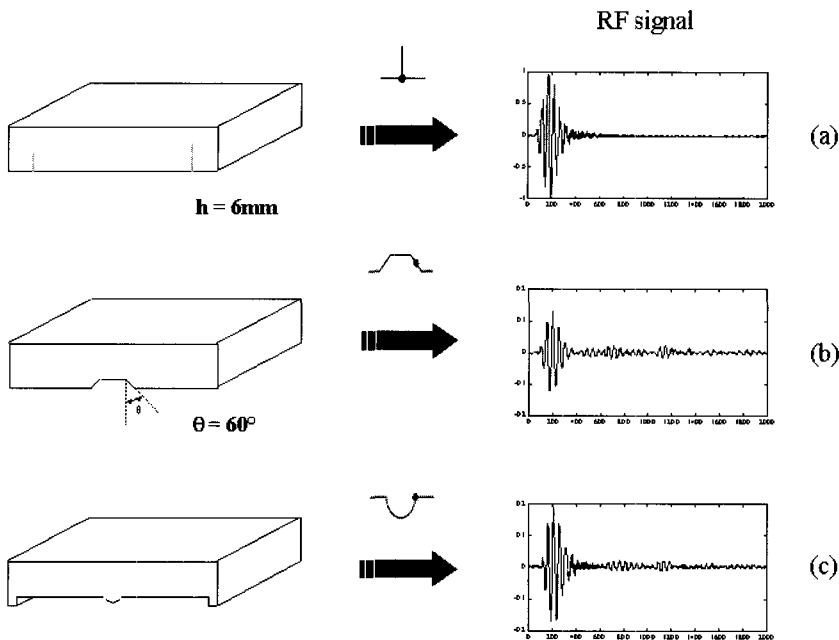


Fig. 6 Acquisition of reference signals from (a) notch, (b) counter bore and (c) weld-roots

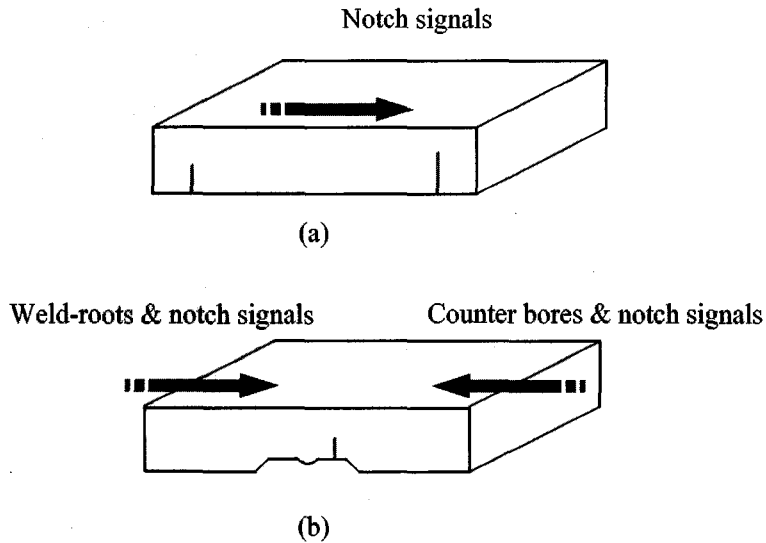


Fig. 7 Acquisition of target signals from notch corner signals at different position (a) without, and (b) with geometric reflections

호를 시간대역에서 단순 평행 이동하여, 그 신호를 대상 신호로 선정하여 디컨볼루션을 한 유사성함수를 나타내었다. 기준신호와 대상신호가 같은 종류의 신호에 대한 유사성함수는 좌우 대칭의 좁은 임펄스 형태이며 상대적으로 진폭이 큰 “임펄스 모양의 대칭형태(impulse-like symmetry pattern)”를 띄는 반면, 다른 종류의 신호에 대해서는 넓게 퍼지고, 비대칭이며 상대적으로 진폭이 작은 “넓게 퍼진 비대칭형태(broad non-symmetry pattern)”를 볼 수 있다. 이 결과는 매우 중요한 결과로 유사성함수를 통해 신호를 식별하는 기준이 된다.

Fig. 9에 기준신호와 대상신호가 다른 경우에 TIFD를 적용한 결과를 나타내었다. 이 경우에서 각 종류의 대상 신호는 기준신호와와는 다른 위치에서 획득한 신호를 사용하였다. 노치의 대상신호(N-2)로는 다른 높이를 가진 노치의 모서리에서 반사된 신호를, counter bore의 대상신호(C-2)는 반대편에서 획득된 신호를, 용접 루트부의 대상신호(W-2)는 반대편 모서리에서 반사된 신호를 사용하였다.

이 결과도 같은 종류에 대해서는 임펄스 모양의 대칭 형태를, 다른 종류에 대해서는 넓게 퍼진 비대칭 형태를 나타내는 경향을 보이고 있다. Fig. 8에 비해 파형을 분류하는 능력이 다소 떨어지나, 특히 기준신호를 노치 모서리신호로 사용할 경우에는 Fig. 8과 마찬가지로 노치의 신호를 정확히 분리해 내었다. 따라서, 본 연구의 목적인

기하학적인 반사신호와 결합신호를 구별하는 데에 TIFD는 유용하게 사용될 수 있음을 알 수 있다.

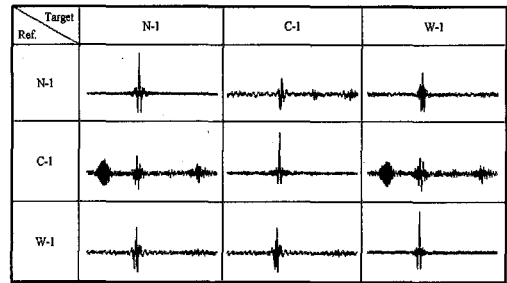


Fig. 8 Similarity functions obtained by using same set of reference signal

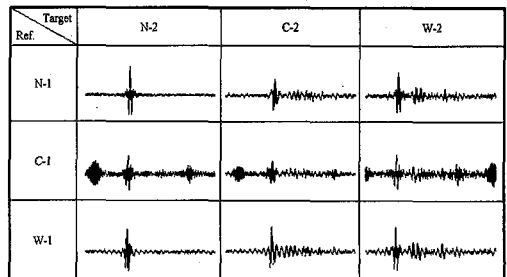


Fig. 9 Similarity functions obtained by using different set of reference signal

앞선 경우와 같이 각각의 반사신호가 단독으로 존재하는 경우뿐만 아니라, 둘 이상의 반사신호가 혼재하는 경우에서도 TIFD기법의 적용이 가능하다. Fig. 10은 노치 신호가 용접 루트부 신호와 혼재하는 경우이다. 이 경우에 있어서 대상신호는 Fig. 10(a)와 같은 방법으로 획득하였는데, 1-1~1-4의 신호가 그것이다. 탐촉자를 시험편 좌측에서 우측으로 이동하면, 가장 먼저 1-1신호를 얻을 수 있다. RF신호를 보면 시간상으로 먼저 수신된 좌측 신호를 용접 루트부라고 예상할 수 있으며, 1-1은 이 신호의 진폭이 최대가 될 때이다. 반면에 시간상으로 나중 수신된 우측의 신호는 노치 모서리에서 반사된 신호라고 예상된다. 탐촉자를 좀더 우측으로 움직이면 1-2, 1-3를 얻을 수 있으며, 이는 1-1신호의 용접 루트부라고 예상되는 신호의 진폭은 감소하나 노치 모서리신호라고 예상되는 신호의 진폭은 점차 커지고 있는 것을 보여준다. 탐촉자를 계속 우측으로 움직여, 초음파 방사음장의 중심축이 노치 모서리와 일치하면 1-4신호와 같이 노치 모서리 신호가 최대가 된다. 이렇게 획득한 대상신호들을 노치 기준신호와 용접 루트부 기준신호로 디컨볼루션 하면 Fig. 10의 유사성함수를 얻을 수 있다. 여기에서도 같은 종류의 신호에 대한 유사성함수가 임펄스 모양의 대칭형태를 나타내며, 다른 종류의 신호에 대해서는 넓게 퍼진 비대칭인 형태가 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 즉, 1-1신호의 경우 기준신호를 용접 루트부로 하였을 때, 유사성함수로

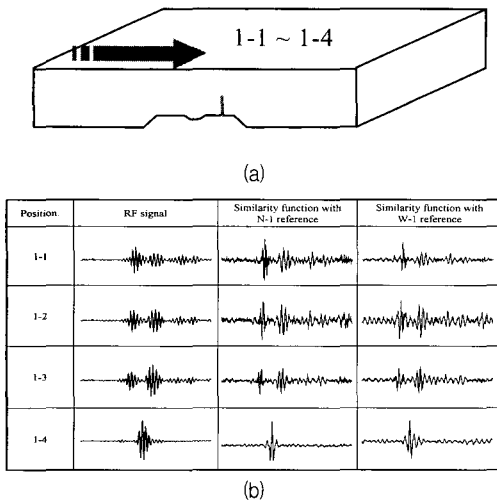


Fig. 10 Identification of complicated signals with notch and weld-root reflection. (a) signal acquisition, and (b) similarity functions

임펄스 모양의 대칭형태를 얻을 수 있었다. 이는 좌측의 큰 신호가 기준신호와 동일한 용접 루트부 신호라는 것을 의미한다. 기준신호를 노치 신호로 하였을 때에는 1-4 위치에서 임펄스 모양의 대칭 신호를 얻을 수 있었고, 이는 우측의 신호가 노치 신호라는 것을 의미한다.

노치 신호와 counter bore 신호가 함께 나타날 경우에도 마찬가지로 생각할 수 있다. Fig. 11은 노치신호가 counter bore신호와 혼재하는 경우이다. 이 경우에도 유사성함수의 형태를 통하여 노치 모서리신호와 counter bore신호 각각을 식별할 수 있었다. 즉, 2-1 위치의 RF 파형에 대하여 기준 신호를 counter bore로 하였을 때, 그리고 2-4 위치에서는 기준신호를 노치로 하였을 때, 유사성 함수가 임펄스 모양의 대칭 형태이다. 따라서, 2-1 위치에서의 신호는 counter bore 신호이고, 2-4 위치에서의 신호는 노치 신호임을 알 수 있다.

이상의 결과로 기준신호를 노치 모서리신호로 사용할 경우에는 노치의 신호를 정확히 분리할 수 있어서, 기하학적인 반사신호와 결합신호를 구별하는 데에 TIFD는 유용하게 사용될 수 있음을 알 수 있다. TIFD의 다른 장점으로는 유사성 함수의 폭이 RF 파형에 비하여 좁다는 점으로, 이는 결합의 위치 및 크기 산정, B-scan, C-scan 등에 사용되는 초음파 빔 거리를 보다 정밀하게 결정할 수 있다.

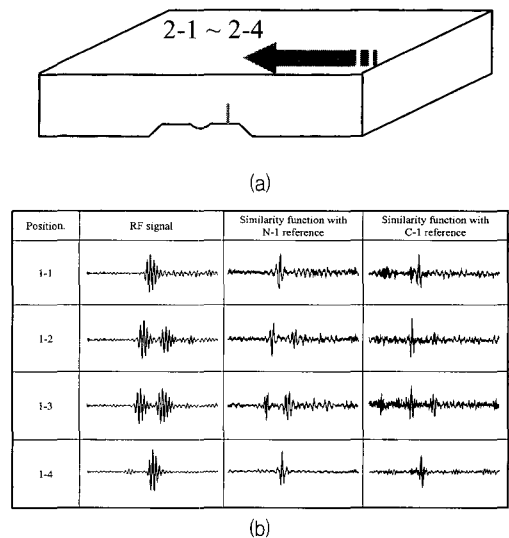


Fig. 11 Identification of complicated signals with notch and counter bore reflection. (a) signal acquisition, and (b) similarity functions

5. 결 론

본 논문에서는 용접부 초음파 탐상에서 디컨볼루션을 이용한 균열신호와 기하학적 반사신호를 식별하는 새로운 기법을 제안하였다. 이 기법을 본 연구에서는 TIFD 라고 명명하였다.

신호식별은 유사성함수라고 정의한 디컨볼루션 결과를 분석함으로써 가능하며, 같은 종류의 신호에 대한 유사성 함수는 '임펄스 모양의 대칭형태'를 지니고 상대적으로 큰 진폭을 가지는 반면, 다른 종류의 신호에 대해서는 '퍼진 비대칭형태'를 지니고 상대적으로 작은 진폭을 보인다. 이 결과는 신호를 식별하는 기준이 된다. 특히, 노치 모서리 신호를 기준신호로 하여 구한 유사성함수의 형태를 통하여 노치 즉 균열신호와 기하학적 반사체인 counter bore와 용접 루트부와의 식별이 가능하였다. 더불어, 유사성함수는 시간대역에서 RF신호에 비해 좁은 펄스 폭을 지니기 때문에 결함 위치에 대한 정밀도를 향상시킬 수 있는 장점이 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터 및 과학기술부 원자력 기초연구사업과제의 연구비 지원으로 이루어진 것으로, 이에 관계자 여러분들에게 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] J. Krautkrämer and H. Krautkrämer, *Ultrasonic Testing of Materials*, 4th ed., pp.431-465, Springer-Verlag, Berlin (1990)
- [2] L. W. Schmerr and J. Xin, "Ultrasonic flaw classification: Focusing on feature," *Review of Progress in QNDE*, Vol. 20, pp.672-678 (2001).
- [3] A. Lhémy, P. Calmon, I. Lecouer-Taïbi, R. Raillon and L. Paradis, "Modeling tools for ultrasonic inspection of welds," *NDT & E Int.*, Vol. 33, pp. 499-513 (2000)
- [4] R. Bracewell, R., *The Fourier Transform and Its Applications*, pp.24-27, McGraw-Hill, New York (1965)
- [5] 장경영, 장효성, 박병일, 하읍, "웨이브렛 변환을 이용한 초음파 펄스 에코 신호의 디컨볼루션," *비파괴검사학회지*, 제 20권 6호, pp. 511-520 (2000)
- [6] S. M. Nugen, L. W. Schmerr, K. E. Kristensen and B. K. Lovewell, "Design and implementation of an expert system for flaw classification," *Microcomputer Applications*, Vol. 9, pp. 1-8 (1990)
- [7] R. W. Ramirez, *The FFT, Fundamental and Concepts*, pp. 152-153, Prentice-Hall, Englewood Cliffs (1985)
- [8] Schmerr, L. W., *Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation A Modeling Approach*, pp. 283-300, Plenum, New York (1996)