

## 용접부 초음파 탐상 시험의 최적화·지능화 기술

송 성 진

### Optimized and Intelligent Ultrasonic Testing of Welded Joints

Sung Jin Song

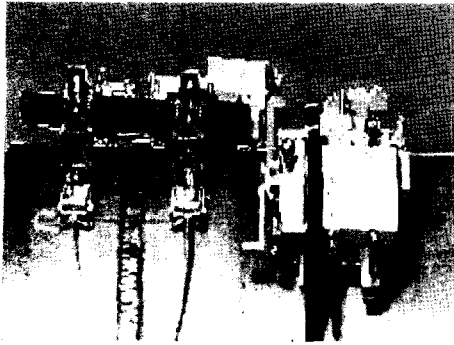
#### 1. 용접부 초음파 탐상시험

용접부는 그 제조 공정의 특성상 다양한 종류의 결함이 발생할 가능성이 높기 때문에, 용접 구조물의 건전성 확보를 위해서는 결함을 검출하고 이에 대한 적절한 조치를 취하는 것이 필수적이다. 용접부에 발생하는 결함의 검출과 그 특성평가(종류판별 및 크기산정)를 위해서 다양한 종류의 비파괴시험이 사용되고 있는데, 그 중에서도 가장 널리 사용되는 방법은 방사선투과시험(Radiographic Testing: RT)이다. RT는 투과력이 큰 방사선을 용접부에 조사하여 결함의 발생에 따른 투과방사선의 양이 변화하는 것을 필름으로 감지하는 것으로서, 용접부에 존재하는 결함의 영상을 장기간 보존할 수 있는 필름 상에 얻을 수 있다는 독특한 장점을 가지고 있다. 그러나, RT는 시험매체로서 고가의 필름을 사용해야 할 뿐 아니라, 방사선 피폭을 방지하기 위한 안전관리의 문제와 이로 인한 공사 기간 지연의 문제를 내포하고 있다. 따라서, 보다 경제적이며 안전한 검사 기법을 채택하는 것이 바람직하는데, 이러한 기술적 대안으로 사용되는 것이 초음파 탐상 시험(Ultrasonic Testing: UT)이다.

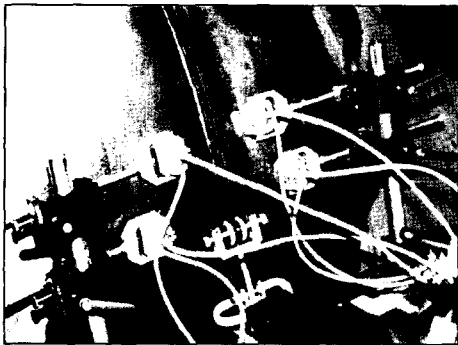
UT는 인간이 들을 수 있는 가청 주파수 이상의 음파인 초음파를 용접부에 투입하여 내재하는 결함으로부터 반사(또는 산란)되는 파를 수신함으로써 결함을 검출하고 그 특성을 평가한다. 따라서, 초음파 탐상기와 관련 부속품을 확보하고 나면, 반복적인 시험에 소요되는 추가적인 비용이 거의 발생하지 않기 때문에 매우 경제적이며, 또한 안전한 시험 방법이다. 그러나, 현재 산업현장에서 널리 적용되고 있는 수동식 초음파 탐상 시험은 검사자가 초음파 탐상기에 나타나는 시험 신호를 보고, 그 신호를 해석하여 결함의 유무, 위치, 종류, 크기 등을 결정하기 때문에, 결함 신호의 획득과 결과 해석에 과도한 주관성이 개입하기 쉽다. 또한, 초음파 탐상 결

과로 획득한 신호를 장시간 보존하는 것이 불편하고, 설사 보존한다 하더라도 결함 신호가 결함의 기하학적 형상을 직접적으로 표현하지 않기 때문에 전문가 이외의 일반인에게는 “난해”하여, RT 필름과 같이 일반인들도 인정할 수 있는 객관적 신뢰성을 확보하기가 어렵다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 지금까지 개발되어 현재 산업현장에 널리 적용되고 있는 기술이 UT 자동화 기술이다. 이 기술은 UT 자동탐상장치를 이용하여 피검체의 용접부위를 따라 탐촉자를 자동으로 이송시키면서 탐촉자로부터 출력신호와 탐촉자의 위치정보를 조합하여 C-scan 이미지라 부르는 결함에 대한 영상을 구축하고 이를 최종 출력으로 제시하는 기술이다. 이를 위해 보통 UT 자동탐상 장비는 탐촉자를 자동으로 이송시키는 기구부와 결함의 영상을 제공하는 신호처리부로 구성되는데, 보통 자동스캐너라 불리는 기구부는 피검체의 표면을 따라 탐촉자가 일정한 압력을 유지하면서 매끄럽게 이동할 수 있게 하는 것이 주요 임무이다. 이를 위해서 탐촉자의 자동이송장치는 가능한 한 기구적으로 단순하되 안정적이고 재현성 있는 표면추적 성능을 갖도록 해야 하며, 또한 가능한 한 이동성과 휴대성이 좋아지도록 제작되어야 한다. 자동스캐너의 경우, 현재 많은 나라에서 이미 개발되어 검사현장에 적용하고 있는데, 피검체와 검사환경, 기술규격에 따라 적합한 형태로 최적화되어야 하기 때문에 끊임없이 새로운 장치들이 선보이고 있기도 하다. 또한 새로운 검사기법을 적용해 자동화한 탐상장치를 이용해 검사를 수행함으로써, 그동안 수작업으로는 불가능해 보였던 많은 문제(예를 들어, 지하매설 배관이나 대형 구조물의 검사에 대한 해법을 제공하기도 한다. 그림 1은 배관 원주 용접부에 대한 자동 초음파 탐상을 위해 제작된 자동스캐너의 예이다. 이 스캐너는 검사속도를 높이기 위해 굴절각이 서로 다른 여러 개의 탐촉자를 동시에 이송시키면서 두께가 두꺼운 배관 용접부를 자동으



AWS-4(Force institute)



AS-200s(Scanmaster)

그림 1 용접부 초음파 탐상용 자동 스캐너의 예

로 검사한다. 이와 같은 자동스캐너를 제작하는 기술은 국내에도 이미 확보되어 있으며, 다양한 형태의 자동스캐너가 국내업체에 의하여 이미 제작된 바 있다.

UT 자동 탐상 장치의 또 다른 구성요소는 신호처리부이다. 신호처리부는 보통 1) 탐촉자 자동 이송을 위한 자동스캐너의 운동을 제어하고 탐촉자의 위치를 결정하기 위한 스캐너제어장치와 2) 탐촉자가 획득한 신호를 수신하여 이를 디지털 데이터로 변환한 후 이를 제어컴퓨터의 중앙처리장치로 전송하는 초음파신호처리 장치로 구성된다. 이 신호처리부를 구성하는 기술 또한 잘 알려진 공기기술 중의 하나로서 세계의 많은 나라가 개발 능력을 확보하고 있으며, 우리나라에서도 자체적으로 제작하여 현장에 적용하고 있다. 그림 2은 국내에

서 제작된 신호처리부의 한 예이다. 신호처리부의 최종 출력은 보통 2차원적인 C-scan image와 현재 위치에서 탐촉자가 수신한 신호(이를 RF 파형이라고 부름)를 동시에 보여주는데, 그림 2에 나타난 신호처리부 역시 이 두 결과를 한 화면에 실시간으로 나타내고 있다.

그림 1에 나타난 기구부와 그림 2에 나타난 신호처리 장치를 조합하면, 용접부에 대한 초음파 탐상 시험을 자동으로 수행할 수 있을 뿐만 아니라, 방사선 투과 사진과 같은 2차원 결합 영상을 얻을 수 있다. 이 2차원 영상은 초음파 검사 결과의 해석에 개입될 수 있는 검사자의 과도한 주관성을 줄일 수 있는 매우 효율적인 기술로 인식되어 매우 널리 사용되고 있다.

그러나, 불행히도 자동 초음파 탐상 장비를 통해 얻는 C-scan image는 방사선 투과 사진의 image와는 달리 검사 조건에 따라 결합의 영상이 달라진다. 물론, 방사선 투과 시험에서도 검사 조건에 따라 결합의 영상이 달라진다. 그런데, 방사선 투과 시험에서 검사 조건에 따라 달라지는 것은 결합 영상의 농도이며 그 형태는 크게 달라지지 않는다. 따라서, 결합을 구별해 낼 수 있는 정도의 검사 조건으로 방사선 투과 시험을 실시한다면, 검사 조건의 변화에 따른 결합 영상의 차이가 크게 문제되지 않는다. (물론, 방사선 투과 사진의 판독, 즉, 획득한 영상의 해석은 판독자에 따라 달라질 수 있으며, 이것이 방사선 투과 시험의 큰 문제 중의 하나이다. 그러나, 여기에서 말하는 것은 영상의 판독이 아니라, 영상 자체가 시험 조건에 따라 얼마나 변할 것인가 하는 것을 말하는 것이다.) 이에 반해, 초음파 탐상 시험에서는 결합의 영상(즉, C-scan image) 자체가 시험 조건에 따라 변하게 되기 때문에 초음파 탐상 시험 조건의 설정이 매우 중요한 과제가 된다. 뿐만 아니라, 초음파 탐상 시험에서 검사 결과의 해석 또한 검사자의 경험과 지식에 따라 크게 변할 수 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해, 현재 개발이 진행되고 있는 기술이 초음파 탐상 시험의 최적화·지능화 기술이다. 여기에서는 이 기술의 개요, 과제 및 해법 그리

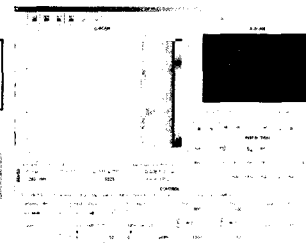
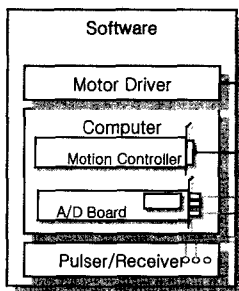
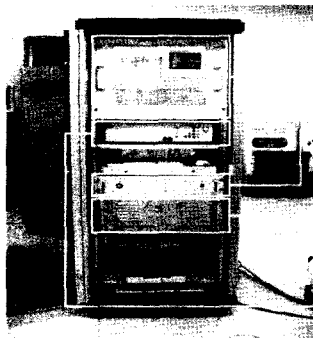


그림 2 신호처리부와 그 출력(C-scan image와 RF 파형)

고 적용 사례 및 향후 전망에 대해서 간략히 소개하고자 한다.

## 2. 용접부 초음파 탐상 시험의 최적화·지능화 기술의 개요

용접부 UT 최적화·지능화 기술이란, 초음파 탐상을 수행할 부위와 검사 장치가 주어졌을 때, 초음파 검사를 수행할 최적 조건을 설정하고, 검사를 수행하여 획득한 결함 신호를 자동으로 해석하여 결함에 대한 정량적 정보(즉, 결함의 위치, 종류, 크기)를 자동으로 결정하는 기술을 말한다. 따라서, 이 기술은 1) 검사 장비가 주어지고 피검체 내에 내재하는 결함 중 검출하고자 하는 결함의 특성(위치, 크기, 방향 등)이 정해졌을 때 최적 검사 조건을 설정하는 최적화 기술과 2) 피검체 내의 결함으로부터 획득한 신호를 해석하여 결함의 위치, 종류, 크기를 결정하는 최적화 기술로 대별할 수 있다. 여기에서는, 이 기술에 대한 현재의 기술 개발 동향에 대해 간략히 소개하고자 한다.

## 3. 용접부 초음파 탐상 시험의 최적화 기술

### 3.1 최적 기법 및 절차 설정 기술

용접부 초음파 탐상 시험의 최적화 기술은 최적의 검사 기법과 절차 그리고 검사 조건을 설정하는 기술을 포함한다. 검사해야 할 용접부의 모양과 크기 그리고 재질, 표면 조건 등이 주어졌을 때, 어떤 기법을 사용하여 어떤 절차에 따라, 그리고 어떤 조건으로 초음파 탐상 시험을 수행해야 하는 가를 결정하는 것은 매우 중요한 일이다. 왜냐하면, 검사 기법, 절차 그리고 조건이 적절히 설정되지 않으면 원하는 검사 감도를 얻을 수 없고, 그 결과로 내재하는 결함도 검출할 수 없게 되기 때문이다. 현재, 산업현장에서는 초음파 탐상 시험에 대한 풍부한 전문지식과 경험을 가진 고급 기술자(보통 기사 혹은 기술사)가 관련 규격이나 표준(codes or standards) 혹은 전문적인 문서를 참조하여 적정 기법과 절차를 도출하고 있다. 그러나 이 결정 또한 기술자의 주관성으로부터 자유로울 수 없다. 이러한 문제를 해결하기 위해 그림 3에 나타난 바와 같은 "최적 검사 기법 및 절차 설정 전문가 시스템"<sup>1,2)</sup>의 개발이 진행 중이다. 이 시스템은 검사자가 검사 해야 할 피검체에 대한 정보를 입력하면, 관련 규격과 표준 그리고 지금까지의 검사 경험을 통해 축적한 지식정보를 검색하여 최적 조건과 절차를 자동으로 결정하는 시스템이다. 이 시스템은 공간적으로 멀리 떨어진 지역에 있는 다수의

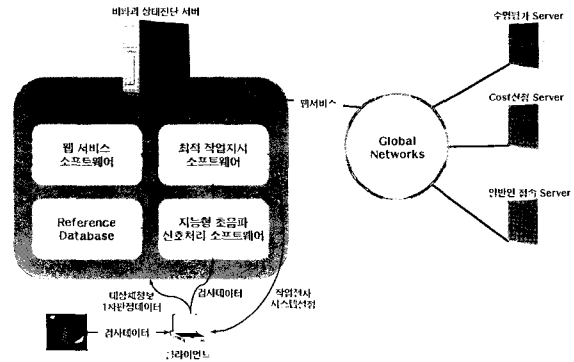


그림 3 최적 기법 및 절차 결정 전문가 시스템

사용자에게 서비스를 제공할 수 있도록 현재 웹기반으로의 개발이 진행 중이다.

### 3.2 최적 검사 조건 설정 기술

최적의 기법과 절차가 정해지면, 이제 사용 가능한 탐상 장비를 이용하여 실제 검사를 수행할 때 결함 검출능을 극대화하기 위한 최적 검사 조건을 결정해야 한다. 이 최적 조건에는 탐촉자의 종류(주파수, 크기, 굴절각), 탐촉자의 위치와 조사 방향, 그리고 탐상기의 설정 조건(탐핑과 증폭 등) 등이 포함되는데, 이 조건들은 피검체 내에 있을 것이라고 예견되는 결함으로부터 최대한 큰 신호를 획득하도록 설정되어야 한다. 그러나, 불행히도 이것은 매우 어려운 일이다. 왜냐하면, 초음파 탐촉자에서 방사되어 시편 내부로 전파되는 초음파 빔이나 결함으로부터 산란된 후 초음파 탐촉자에 의해 수신되는 빔은 모두 눈에 보이지 않기 때문에, 아무리 숙련된 검사자라도 지극히 "주관적이며 정성적인 추측"에 의해 예견되는 신호의 세기를 예측한다. 예를 들어, 그림 4에 나타난 바와 같이, 표면이 곡면인 피검체 내로 초음파 빔이 입사되면, 입사빔은 피검체 내에서 집속된다. 경험이 많은 검사자는 초음파 빔이 집속될 것이라는 것을 잘 알고 있으나, 구체적으로 어느 위

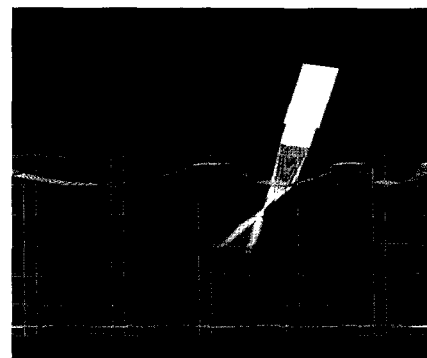


그림 4 곡면 경계면을 통과한 초음파 빔의 집속

치에서 얼마만큼 집중될 것인지를 정량적으로 예측하지는 못한다. 따라서, 탐촉자의 특성이나 검사 위치의 변화에 따른 신호의 세기 변화를 정량적으로 예측할 수 없기 때문에, 최적 조건을 설정한다고 하는 것은 불가능하다. 다만, 숙련된 기술자는 자신의 경험을 통해 최적에 가까운 조건에 대한 “매우 강한 확신”을 가지고 있을 따름이다.

이러한 문제를 해결하기 위해 현재 개발되고 있는 기술이 “초음파 탐상 시험 모델링”<sup>3)</sup> 기술이다. 모델링 기술은 탐촉자로부터 발진된 초음파 빔이 시편 내를 전파하면서 결함이나 기하학적 반사체에 의해 산란되는 전파 과정을 수학적으로 기술함으로써, 탐촉자로부터 방사된 빔이 결함에 얼마만한 세기로 도달되어 그 중 얼마만큼이 다시 탐촉자로 되돌아 왔는지를 정량적으로 계산할 수 있게 해준다. 모델링을 통해 초음파 탐상 신호를 예측하기 위해서는, 먼저 초음파 탐상 시험에 관련된 물리적 현상에 대한 모델을 설정해야 한다. 이 모델은 크게 나누어 3가지 세부 모델을 포함한다. 첫째는 초음파 탐촉자로부터 발진되어 피검체를 전파하는 방사 음장의 모델, 둘째는 결함에 의해 산란되는 산란 음장 모델, 그리고 셋째는 초음파 탐상 장비(펄서/리시버, 케이블, 탐촉자 등 포함)의 특성에 대한 모델이다.

초음파 탐촉자에서 발진되어 피검체 내로 전파되는 음장을 계산하기 위해 가장 널리 사용되는 것이 Rayleigh-Sommerfeld Integral 법이다. 이 방법은 탐촉자 면상의 각 점이 단위 세기의 구면파를 방사한다고 가정하고 탐촉자 면상의 모든 점에서 방사된 구면파를 중첩함으로써 탐촉자에서 방사된 음장을 계산한다. 그러나, 이 방법에서는 탐촉자 면상의 2차원 면적분이 포함되기 때문에 계산 시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 최근에 많이 사용되는 방법으로 Multi-Gaussian Beam 모델<sup>4-6)</sup>이 있다. 이 Multi-Gaussian Beam 모델은 탐촉자가 방사하는 초음파 빔을 약 10여개의 Gaussian 빔을 중첩함으로써 표현한다. 그런데, Gaussian 빔은 그 자체로서 파동방정식을 근사적으로 만족시키기 때문에, 시편 내에서 전파하거나, 반사하거나, 심지어는 경계면을 통과한 후에도 Gaussian 빔 형태를 유지한다. 따라서, Gaussian 빔을 이용할 경우, 계산 시간이 짧으면서도 높은 정확도를 유지하며 초음파 빔의 전파 양상을 모사할 수 있다. 그림 5는 이 Multi-Gaussian Beam 모델을 이용하여 초음파 탐촉자에서 물로 방사된 (단위 세기의 음압을 갖는) 빔이 시편 표면에서 굴절되어 시편 내부로 전파된 후, 다시 시편 경계면에서 반사되어 반사 종파와 횡파로 나뉘는 과정을 가시화하여 제시하는 예를 보여주

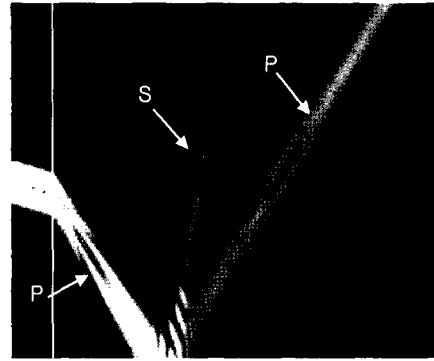


그림 5 Multi-Gaussian Beam 모델을 이용한 초음파 빔의 전파와 바닥면에서의 반사의 가시화

고 있다. 이러한 방사 음장 모델을 이용하면 초음파 탐촉자에서 방사된 음장이 용접부에 존재하는 결함에 얼마만큼 도달하는 지를 쉽게 계산할 수 있다. 또한, 탐촉자의 종류나 주파수, 위치 등 검사 조건의 변화에 따라 결함에 입사되는 음압의 변화를 정량적으로 그리고 신속히 예측할 수 있기 때문에 최적 검사 조건 산정의 도구로 활용할 수 있다.

결함에 도달한 입사파는 결함에 의해 산란된다. 사실, 결함에 의해 생성된 산란 음장을 정확히 계산하기 위해서는 매우 많은 시간이 걸리지만, 그 산란 음장을 근사적으로 계산한다면 계산 시간을 많이 줄일 수 있다. 산란 음장을 근사적으로 계산하기 위해 가장 널리 사용되는 방법은 두 가지이다. 하나는 Kirchhoff 근사법인데, 이 방법은 결함에 의해 산란된 음장을 결함의 표면으로부터 반사되는 음장으로 근사화하여 계산하는 것으로서, 결함의 표면이 입사파의 파장보다 큰 경우에 대해서 잘 맞는다. 결함 중 균열과 같이 곡률 반경이 매우 작은 선단을 가지고 있는 경우에는 균열 선단에서 회절파가 존재한다. 이 회절파는 Geometric Theory of Diffraction 기법<sup>7,8)</sup>을 이용하여 근사적으로 계산한다. 이 방법은 균열 선단에서 생성된 회절파는 입사파에 회절계수를 곱하여 계산할 수 있다고 가정하고, 회절계수는 해석적으로 구한다. 이와 같은 두가지 방법을 이용하여, 결함으로부터 산란되는 음장을 계산할 수 있다. 일단, 결함으로부터 산란된 음장이 알려지면, 이 산란 음장을 초음파 탐촉자로 수신할 때 초음파 탐촉자에 형성되는 음장을 구할 수 있다. 사실 이 수신 음장을 구하는 것은 방사 음장을 구하는 것과 원리적으로 같기 때문에, 방사 음장을 구하는 방법을 그대로 적용하여 구할 수 있다.

초음파 탐촉자로 수신한 산란 음장은 보통 주파수 영역에서 계산한다. 그런데, 초음파 탐상기에 나타나는 결함 신호는 시간 영역의 파형이다. 따라서, 이 파형을

이론적으로 예측하기 위해서는 초음파 탐상 시스템의 주파수 특성을 알아야 하는데, 이 주파수 특성을 "시스템 효율인자"<sup>(10)</sup>로 나타낸다. 이 시스템 효율인자는 보통 대비시험에 의해 실험적으로 결정하는데, 용접부 탐상에 주로 사용하는 사각 탐촉자의 경우에는 STB-A1 표준시험편의 원주 반사면으로부터 획득한 반사신호를 이 반사신호에 대한 이론적인 모델로 "deconvolution"<sup>(7)</sup>하여 결정할 수 있다. 이렇게 결정된 시스템 효율인자를 앞에서 언급한 이론적으로 계산한 탐촉자의 수신음장에 곱한 후, 역푸리에변환을 취하면 시간 영역의 결합신호를 모사할 수 있다. 그림 6은 모델링 기술을 이용하여 배관 내에 존재하는 원형판 균열의 상하 선단(tip), 균열의 코너(corner), 그리고 기하학적 반사체의 하나인 counter bore에서 나오는 신호를 계산한 예를 보여 주고 있다. 이 예에서 보는 바와 같이, 이 기술을 이용하면 주어진 결합으로부터 예견되는 결합 신호의 세기뿐만 아니라 파형까지도 정확히 예측할 수 있다.

따라서, 모델링 기술을 이용하면 검사 전에 미리 예상신호를 획득할 수 있음은 물론이고, 검사 조건의 변화에 따른 수신 신호 세기 변화를 정량적으로 예측함으로써, 최적 검사 조건을 설정할 수 있다. 또한, 여러 가지 결합으로부터 수신하게 될 다양한 결합신호를 산출해냄으로써, 검사 수행 시에는 검사자의 판단을 돕고 분석 시에는 참조신호로서 활용할 수 있다. 또한, 검사를 통해 수집된 신호와 예상신호를 비교 분석함으로써 결합의 이력관리를 보다 용이하게 할 수 있는 길을 제공한다.

#### 4. 신호해석 지능화 기술

초음파 탐상 시험의 결과로 획득한 신호(보통 RF 신호라 부름)를 해석하여 결합의 종류와 크기를 판별하는 것은 매우 어려운 일이다. 실제로 매우 숙련된 전문가들도 때로는 만족할 만한 정확도를 내지 못하는 경우도 많다. 왜냐하면, RF 신호는 탐촉자의 위치나 주사각도가 바뀔 때 따라 계속적으로 바뀌면서 연속적으로 신호를 표시해 주기 때문에 대단한 주의 집중이 필요하다. 그런데, 검사자는 육체적 정신적 피로에 따라 주의가 산만해 지기 쉽기 때문에, 검사자에 의한 결과 해석은 그 객관적 신뢰도가 떨어지게 마련이다. 그리고, 사실 이것이 초음파 탐상 시험의 가장 큰 문제로 지적 받고 있다.

특히, 그림 7에 나타낸 것과 같은 용접부의 초음파 탐상 시험의 경우에는 그 어려움이 더하다. 왜냐하면, 용접부에는 표면 개구 균열과 같은 용접결함 뿐만 아니라 카운터 보어나 용접 루트부와 같은 결합이 아닌 기하학적 불연속부도 존재하는데, 이러한 기하학적 불연속부 또한 입사된 초음파 빔을 반사하기 때문에, 초음파 탐촉자로 수신한 신호는 그림 7에 나타낸 바와 같이 매우 복잡한 형태를 띄게 된다. 따라서, 이러한 신호를 정확히 해석하여 내재하는 결합의 위치, 종류, 크기를 정확히 결정한다는 것은 정말 어려운 일이다.

초음파 탐상 신호해석 지능화 기술은 바로 이러한 문제를 해결하기 위한 기술로서, 다음 3 가지 요소 기술로 구분할 수 있다. 첫째는 결합신호 식별기술로서 초

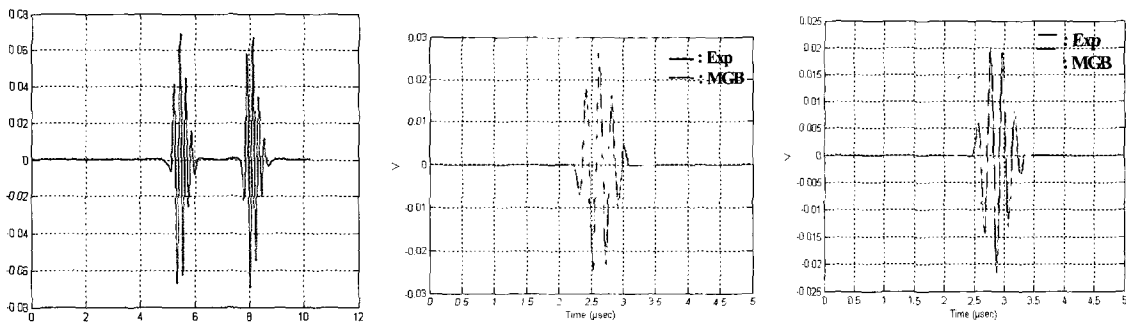


그림 6 모델링에 의한 균열 선단, 균열 코너, 카운터보어 신호의 예측

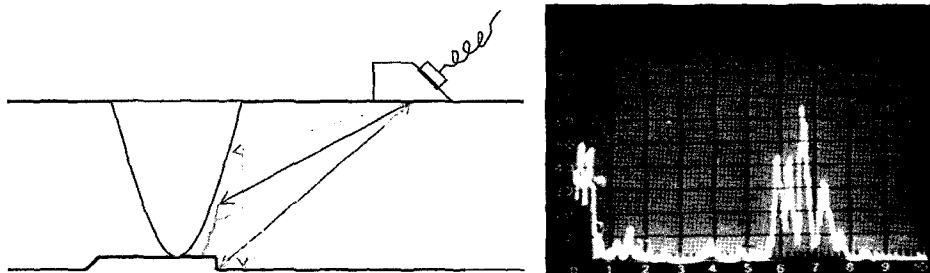


그림 7 용접부의 초음파 탐상 시험에서 획득한 신호

음과 탐촉자가 출력으로 쏟아내는 수많은 신호 중에서 결함으로부터 획득한 신호만을 구별해내는 기술을 말한다. 둘째는 결함신호 분류인데, 결함 신호라고 판단한 신호가 어떤 종류의 용접 결함으로부터 산란된 것인지를 결정하는 것이다. 이때 보통 용접결함을 그 특성에 따라 균열(용입부족, 융합부족 등 균열성 결함 포함), 슬래그 혼입, 기공의 세 가지 중 하나로 분류한다. 그리고, 마지막으로는 결함크기 산정인데, 특히 균열성 결함의 경우 그 크기를 결정하는 작업을 말한다.

### 4.1 결함신호 식별기술

결함신호 식별기술은 그림 7에 보인 바와 같은 초음파 탐상 신호 중에서 기하학적 반사체에 의해 생성된 신호와 결함에 의해 형성된 결함신호를 분리해 내는 기술이다. 지금까지 이 과정이 전적으로 검사자의 경험과 주관적 지식에 의존하여 이루어지고 있기 때문에, 그 객관적 신뢰성이 매우 낮은 상태이다. 그래서, 때로는 결함신호를 놓치기도 하고, 때로는 결함이 아닌 것을 결함으로 잘못 분류하기도 하였다. 이러한 문제를 완전히 해결할 수 있는 완벽한 기술은 아직까지 없는 것이 사실이지만, 최근 개발된 기법 중 "TIFD(Technique for Identification of Flaw signal using Deconvolution)"<sup>7)</sup> 라는 기술이 많은 주목을 받고 있다. 이 기법은 획득한 신호를 기준 신호로 deconvolution 하면 그 결과로 아주 단순한 형태의 신호를 얻게되는데, 그 형태를 보고 그것이 결함신호인지 아닌지를 판단하는 것이다. 이때 기준신호로 사용하는 신호는 STB-A1 표준시험편의 원주로부터 획득한 반사신호이다. 그림 8은 TIFD의 결과를 보여주고 있다. 그림에 보인 바와 같이, 결함에 해당하는 균열선단신호와 균열코너신호는 각각 bi-polar pattern과 negative polarity를 갖는 impulse-like pattern을 갖는데 비해서, 결함이 아닌 counter bore는 positive polarity를 갖는 impulse-like pattern을 가짐을 알 수 있다. 이를 이용하면, 무수히 많은 출력신호 중 결함신호만을 정확하게 구분할 수 있다.

### 4.2 결함신호 분류

신호해석 지능화의 두 번째 과제는 결함의 종류를 판별하는 것이다. 용접부에는 균열, 슬래그 혼입, 기공과 같은 여러 가지 결함이 발생할 수 있다. 앞에서 설명한 결함식별 기법을 통해 결함신호만을 구분했다면, 이제 그 결함이 실제로 용접결함 중 어느 결함으로부터 발생되었는가를 판단해야 한다. 이러한 판단을 행하기 위해 가장 널리 적용되고 있는 기술이 "형상인식"기법<sup>11)</sup>이다. 형상인식 기법은 검출 신호로부터 그 신호의 특성을 잘 표현하는 "특징(feature)"을 추출하고 이를 기반으로 의사결정을 행하는데, 이 의사결정의 도구로 가장 널리 사용되는 것이 인공신경회로망이다. 이러한 기법은 세계 각국에서 많이 연구된 바 있으며, 국내에서도 이미 오래 전부터 연구가 수행되어 초음파신호를 입력하면 결함의 종류를 자동으로 판별하는 프로그램이 개발되었다. 그림 9는 확률신경회로망을 이용한 초음파신호분류 프로그램의 예이다. 이 프로그램은 초음파 탐상 시험신호 중 결함 신호만을 window를 취하여 구분하고, 이 결함 신호의 특징을 추출한다. 추출할 특징으로는 결함 신호의 지속시간, 에너지, 주파수 스펙트럼의 대역, 첨두 주파수 등이 포함되는데, 이러한 특징을 특징 추출 프로그램이 자동으로 추출한다. 이렇게 추출한 특징을 확률신경회로망의 입력 노드에 입력하면, 출력 노드에 해당 결함신호가 균열, 슬래그 혼입, 기공의 세 종류의 결함으로부터 생성되었을 확률이 자동으로 출력되고, 그 값을 막대그래프의 길이로 가시적으로 표시하여 자동으로 출력한다.

### 4.3 결함크기 산정

결함식별과 분류가 끝나면, 마지막으로 수행해야 하는 것이 결함의 크기 산정이다. 보통 용접결함의 크기 산정은 결함신호의 세기보다는 비행시간(time-of-flight)을 이용하여 결정하는데 많은 기법들이 알려져 있다. 그 중에서 용접부에서 가장 문제가 되는 균열의 크기(두께 방향의 높이)를 결정하기 위해 가장 널리 사

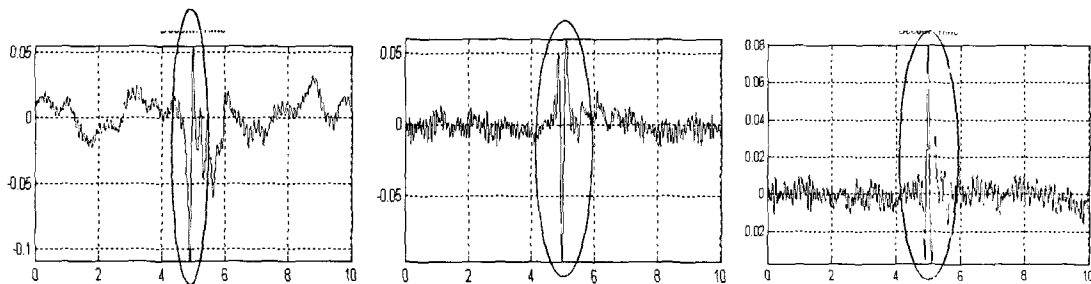


그림 8 TIFD 결과 (crack tip, crack corner, counter bore)

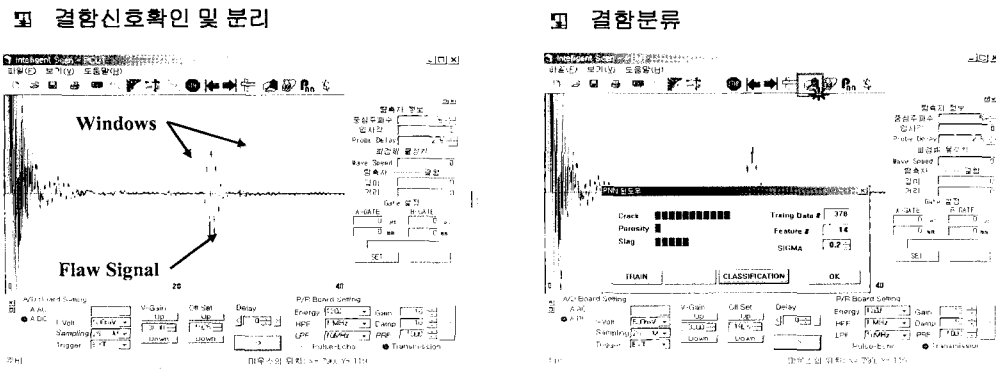


그림 9 확률신경회로망을 이용한 지능형 결함분류 프로그램<sup>10)</sup>

용되는 방법 중의 하나가 PATT(pulse arrival time technique) 혹은 TE(tip echo)라고 부르는 방법이다. 이 방법은 균열 선단 회절 신호의 발생 위치로부터 균열의 크기를 결정하는 것으로, 만약 균열선단 신호를 정확하게 구분해 낼 수 있다면 매우 간단하게 적용할 수 있는 방법이다. 그밖에도 균열선단신호와 균열코너 신호 사이의 시간차를 이용하여 결정하는 SPAT (satellite pulse arrival time) 방법이나 두 개의 탐촉자를 이용하여 균열선단의 회절신호를 측정하는 TOFD(time of flight diffraction) 방법 등이 있다.

최근에는 초음파 탐상 시험의 모델링 결과를 이용하여 표면 개구 수직 균열의 크기를 산정할 수 있는 새로운 기법이 제안되었다. 이 방법은 표면 개구 수직 균열의 코너로부터 반사된 신호의 세기가 균열의 크기와 관련이 있다는 사실을 이용한다. 모델링을 이용하면 주어진 크기의 수직 균열로부터 획득할 수 있는 균열코너 반사 신호의 세기를 계산할 수 있다. 이 모델링을 이용하면, 수직 균열의 크기가 증가함에 따라 균열 코너 반사 신호의 세기가 변화하는 것을 계산할 수 있는데, 이 관계를 그래프로 표시하면 그림 10에 나타난 바와 같은 Size Amplitude Curve (SAC)<sup>12)</sup> 얻을 수 있다. 이

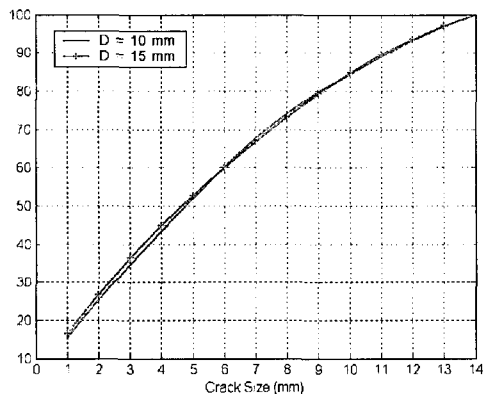


그림 10 Size Amplitude Curve를 이용한 표면 개구 수직 균열의 크기산정

SAC를 이용하면, 크기를 알지 못하는 수직균열의 코너 반사 신호를 획득했을 때 그 신호의 세기를 측정함으로써 수직균열의 크기를 쉽게 결정할 수 있다.

#### 4.4. 용접부 초음파 탐상 시험의 지능화 기술 적용 예

UT 지능화 기술은 현재 세계 각국이 경쟁적으로 개발에 착수하고 있으며, 개발된 기법을 적용한 시스템도 선보이고 있다. 앞에서 언급한 대로, 국내에서도 결함 신호의 식별, 결함의 종류판별, 그리고 결함의 크기산정 기술들이 이미 개발되었으며, 현재는 이를 하나로 통합한 시스템이 개발되고 있다. 그림 11은 국내에서 개발된 네트워크 기반의 UT 지능화 시스템<sup>2)</sup>의 한 예이다. 이 시스템은 6축 간의 자동스캐너의 끝에 부착된 초음파 탐촉자를 작업자가 손으로 조작하면, 그 때 이 탐촉자의 위치가 스캐너의 몸체에 부착된 엔코더에 의해 결정된다. 그리고, 동시에 탐촉자가 획득한 결함신호가 A/D board를 통해 디지털 데이터로 변환되어 PC에 전송된다. 이 PC는 획득한 신호(RF 신호)에 TIFD 기법을 실시간으로 적용하여 이 신호가 결함신호인지 아닌지를 판단하고, 만약 이 수신신호가 결함신호이면 무선 lan을 통해 server로 이 신호를 전송한다. server는 이 신호를 받아 다시 한번 정밀한 TIFD를 수행하여 결함신호인지의 여부를 다시 확인하고, 만약 결함 신호라면 확률신경회로망을 이용하여 결함의 종류가 균열, 슬래그 혼입, 기공 중 어느 것인지를 판단하고, TE 기법을 이용하여 결함의 크기를 산정한다. 그리고, server가 수신한 결함신호와 판단결과에 대한 데이터베이스를 자동으로 구축한다.

그림 11에 소개한 시스템은 UT 지능화 기술과 정보통신기술이 융합된 새로운 형태의 초음파 탐상 기술로서, 검사자에 의한 오류를 줄이고 초음파 탐상 시험의 객관적 신뢰도를 확보할 수 있는 가능성을 제시하고 있다. 또한, 이 시스템은 지금까지 검사자만이 접근할 수

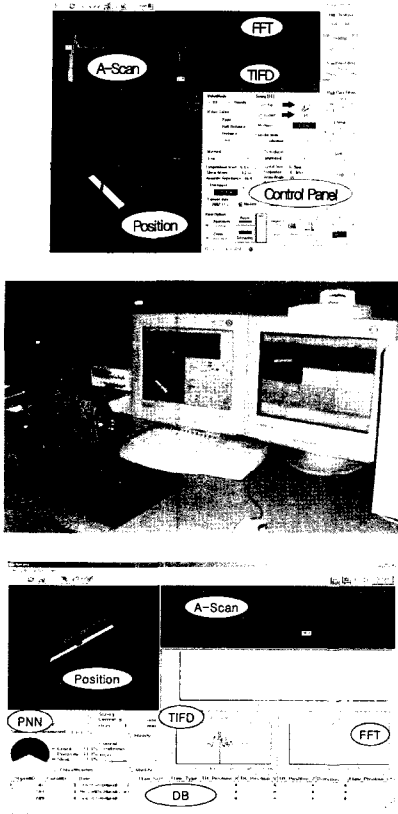


그림 11 네트워크 기반의 지능화된 초음파 탐상 시스템

있었던 초음파 탐상 신호를 관리자들이 모두 공유할 수 있게 함으로써, 초음파 탐상 시험의 "투명성"을 확보할 수 있게 하는 기술이다.

### 5. 맺음말

용접부 초음파 탐상 시험의 원리는 매우 간단하며, 현재 산업 현장에서 널리 사용되는 수동 초음파 탐상 장비나 자동 초음파 탐상 장비 모두 그 구조와 작동 면에서 전혀 복잡하지 않다. 그러나, 실제로 용접부에 대한 초음파 탐상 시험을 수행할 경우, 결함 검출과 결과 해석이 결코 쉽지 않은데, 그 근본적인 이유는 용접부로 투입되어 산란되는 초음파가 눈에 보이지 않기 때문이다. 그래서, 지금까지 초음파 탐상 시험은 잘 훈련된 검사자가 수행하는 경우에도 그 객관적 신뢰성이 매우 낮은 기술로 인식되어 왔다.

여기에서 소개한 초음파 탐상 시험 최적화·지능화 기술은 초음파 탐촉자에 의한 초음파 빔의 발진, 용접부 내에서의 전파, 결함에서의 산란, 그리고 수신 탐촉자에 대한 산란 빔의 수신에 이르는 전 과정을 수식적으로 모델링하고 그 해를 도출함으로써, 초음파 탐상 시험의 물리적 현상을 정확히 이해하고, 정량적으로 예측할 수 있는 길을 제공하였다. 이렇게 객관적으로 체

계화된 지식을 기반으로 초음파 탐상 시험의 시험 조건을 최적화하고 결과 해석을 지능화하는 기술이 현재 개발되고 있는데, 이 기술은 초음파 탐상 시험의 객관적 신뢰성을 획기적으로 제고시켜 궁극적으로는 용접부의 품질과 신뢰성을 향상시키는 핵심 기술로 자리매김되고 있다. 여기에서는 이 기술을 현재 국내에서 개발 중인 내용을 중심으로 간략히 소개하였는데, 이 글이 읽는 이의 이해에 조금이나마 도움이 되었으면 한다.

### 참고 문헌

1. 성균관대학교: "기간산업설비 수명연장을 위한 비파괴진단 및 사용적합성 평가절차확립"과제 1차년도 보고서(2002), 과학기술부
2. 성균관대학교: "지능형 결함평가 프로그램 및 결함정보 원격전송 및 DB구축 시스템 개발"과제 최종보고서(2002), 산업자원부
3. 송성진: "초음파 탐상시험 모델링을 위한 초음파 탐촉자 음장 계산 기법", 제7회 원전기기 건전성 Workshop 논문집 (2000)
4. 송성진: "다중-가우시안 빔 모델을 이용한 초음파 탐상시험 시뮬레이션에 관한 연구", 대한기계학회 춘계학술대회(2001)
5. 송성진, 김학준: "다중-가우시안 빔 모델을 이용한 사각 초음파 탐상시험 시뮬레이션", 추계 한국비파괴검사학회(2001)
6. 송성진: "Prediction of Angle Beam Ultrasonic Testing Signal Using Multi-Gaussian Beams", Review of Progress in QNDE, Vol. 21(2002), pp. 839-846
7. 김영환, 송성진: "용접부 초음파 사각탐상에서 디컨볼루션을 이용한 균열신호와 기하학적 반사신호의 식별", 비파괴검사학회지, 22-4(2002), 422-429
8. 김영환, 송성진, 김준영: "초음파 탐상시험 모델링을 이용한 TIFD기법 개선", 추계한국비파괴검사학회(2002)
9. Sung Jin Song, Hak Joon Kim: "Prediction of Flaw Signals of the Ultrasonic Benchmark Problem by Sungkyunkwan University", Review of Progress in QNDE, Vol. 20(2002), pp. 1941-1948
10. Sung Jin Song, Hak Joon Kim, Hyun Cho: "Development of an Intelligent System for Ultrasonic Flaw Classification in Weldments", Nuclear Engineering and Design, 212/1-3(2002), pp. 307-320
11. 송성진, 조현: "지능형 초음파 탐상시스템 개발에 관한 연구", 성균관대학교 논문집, 기계기술편, 제2권 제2호(2000)
12. Sung Jin Song, Hak Joon Kim, Hee Jun Jung, Young H Kim: "Angle beam ultrasonic testing models and their application to identification and sizing of surface breaking vertical cracks", 한국비파괴 검사학회지, 22-6(2002), 627-636



- 송성진(宋城振)
- 1959년생
- 성균관대학교 기계공학부
- 비파괴평가모델링 및 지능형 신호해석
- e-mail: sjsong@yurim.skku.ac.kr