

용접부결함과 비파괴시험

안 회 성

Weldment Flaw and Nondestructive Examination

Hee-Sung Ann



- 안회성 (한국원자력안전기술원 개발3실)
- 1953년생.
- 용접 및 비파괴시험을 전공하였으며, 용접야금, 응고, 공정최적화, 용접부 평가 및 품질보증 관리에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

용접부결함은 구조물 건전성측면에서 항상 문제가 되어 왔다. 따라서 용접시 발생할 수 있는 결함들을 사전에 방지하기 위한 대책들이 꾸준히 연구되어 왔으며, 용접부의 최종 품질확인 및 부품 사용중 용접부의 건전성을 평가하기 위한 수단으로 비파괴시험법들이 오래전부터 적용되어 왔다.

따라서 이 글에서는 용접부의 특성, 용접부 결함의 중요성에 대해 기술하고 부품 건전성의 진단목적으로 결함의 유무 및 크기측정을 위해 사용되는 비파괴시험법의 종류 및 특징, 비파괴시험법 중에서 결함의 길이 및 두께방향의 높이측정을 위해 유일하게 이용되는 초음파시험법에 대해, 특히 결함크기 측정법 중 현재 널리 사용되는 몇 가지 방법에 대해 소개하고자 한다.

2. 용접부 결함

압력용기를 비롯한 구조물들은 모두 용접

부를 가지게 된다. 이때 구조물 건전성 면에서 두 가지의 중요한 문제점들이 있는데, 하나는 용접과 관련된 모든 야금학적인 결함들이 높은 잔류응력이 존재하는 용접부나 열영향부에서 나타난다는 것과, 둘째는 일단 결함이 발단되면 파손의 정도가 용접구조물에서 크다는 것이다.

이와 같이 복잡한 구조물을 설계하면서 구조물에 대한 용접은 필수적이며 그 양 역시 대단히 많고, 용접구조물에는 어떤 용접부도 완전하지 않으며 결함이 항상 존재하게 마련이므로 구조물을 사용중 용접부의 결함이 구조물에 어떤 영향을 미칠 것인가를 설계자는 항상 염두에 두어야 한다. 용접부내에 결함들이 중요한 이유는 결함들은 용접부내에서 응력을 변화 혹은 집중, 확대시킬 뿐 아니라, 금속야금학적인 결함들은 국부적으로 응력분포 양상을 변화시키며 재료의 성질을 변화시키거나 야금학적인 노치효과를 주기 때문이다.

현재까지 구조물 파괴사고의 대부분은 용접부나 용접에 관련된 것이었다. 불행이도 용접부는 응력이 집중되는 부위이며 응력분

포해석이 어렵고 잔류응력을 비롯한 국부응력이 높아짐으로써 전체 응력향상을 준다. 따라서 잔류응력 완화 및 금속조직의 변화를 위하여 응력완화 열처리를 하게 되는데, 이것 역시 시간과 경비가 드는 것이며 오작을 함으로써 재료의 성질을 변하게 할 수 있는 것이기도 하다.

용접부는 작은 주조품이라 할 수 있다. 다른점은 용접은 극히 짧은 시간에 금속이 용융 및 응고를 한다는 것이다. 따라서 용접부는 급열, 급랭을 받아 높은 열응력이 생기고, 급속한 야금적 화학반응 등으로 불순물 편석이 일어나고, 가스나 이물질이 남을 수 있으며, 팽창, 수축 등의 물리적변화가 일어나므로 용접부에는 각종 용접결함, 잔류응력, 수축, 비틀림 등을 유발하게 된다. 또한 일반적으로 용접부는 모재보다 취성이 커서 상기 여러가지의 복합작용으로 사용중 용접부는 모재보다 쉽게 조기 파손을 일으키게 된다.⁽¹⁾

최근에는 파괴역학의 발전으로 내압, 외압 및 하중을 받는 압력용기 및 구조물의 파괴에 대한 안전성을 추정할 수 있으며, "어떤 용접부도 완전하지 않다"는 개념 아래 설계시 용접부에 어떤 크기의 결함을 미리 가정하고 설계를 한다. 그러나 압력용기 및 구조물들이 아무리 잘 관리된 용접절차에 따라 용접을 하였다 하더라도 용접시 결함의 발생을 피할 수 없으며, 설계시의 가상결함 이상의 결함들이 만들어질 수 있으며, 또한 부품들은 사용중 우리가 예상할 수 없는 단일 혹은 복합적인 영향 등을 받고 있는데, 이들 중요한 영향들은 응력, 온도, 수소흡수, 진동, 부식, 침식 및 원자력부품의 경우 방사선 노출 등으로서 이들 모든 요소들은 부품의 사용시간에 의존하게 된다. 이들 영향들은 시효, 취성, 피로 및 결함의 성장들을 일으키면서 재료의 성질을 변하게 하고 있다.

따라서 부품들의 지속적인 사용을 위해 안전한지 혹은 기타 다른 시정조치가 필요한지

여부를 판단키 위해 비파괴시험이 필요하며, 파괴역학적으로 파괴에 대한 안전의 정확성을 높이기 위하여 반드시 재료에 존재하는 결함에 대한 정보, 즉 결함의 종류, 모양, 크기 및 위치 등을 비파괴시험으로 정확히 알지 않으면 안 된다. 이들 결함에 대한 정보가 없으면 파괴역학이 아무리 이론적으로 잘 발달하였다 하더라도 무용하게 된다.

국제용접학회(IIW : International Institute of Welding)에선 용접부에서 발생할 수 있는 전 결함들을 84개로 나누었는데, 이들 용

표 1 용접부 결함의 분류⁽²⁾

- | | |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 용접공정 및 절차관련 결함 | |
| 가. 기하학적 결함 | -조인트 부정렬, -언더 컷,
-오목(concavity) 및 볼록(convexity),
-과잉 보강 및 저질 보강, -부적합 보강각,
-오버 랩, -용락,
-백킹 링(backing ring)-용입부족,
-링 삼입-용합부족, -백킹 비제거,
-용입부족, -용합부족, -수축공
-불균일 표면-리플(ripple). |
| 나. 기타 | -아크 스트라이크, -스랙 개재물,
-팅스텐 개재물, -산화 피막,
-용접 마무리(weld dressing),
-스패터, -크레이터. |
| 2. 야금학적 결함 | |
| 가. 균열 및 파열 | -고온결함, -저온 및 지연결함
-재열, 응력완화결함, -라멜라결함
-응력부식 결함 |
| 나. 기공 | -구형기공, -지렁이형 기공, -파이프기공 |
| 다. 열영향부 금속조직 변화 | 라. 용접부 및 열영향부 편석
마. 모재 라미네이션 결함 |
| 3. 설계 결함 | |
| 가. 부품 두께 변화, 응력집중 | |
| 나. 용접조인트 형태 | |

접부 결함들은 결함의 형태, 성격 등에 따라 여러가지로 분류할 수 있겠으나, 일반적으로 표 1과 같이 용접공정, 금속야금학적인 사항 및 설계 등 세 가지로 나눌 수 있다. 그러나 각 분류속에 있는 결함들도 사용중 2차적인 작용으로 인해 다른 분류속의 결함으로 발전할 수 있다.

결함을 분류함에 있어 결함들의 고유성격을 고려하는 것도 중요하지만, 결함이 2차원적인 평면결합(planar defect)인가, 체적을 가지는 3차원적인 결함(volumetric defect)인가에 따라 구별하는 것도 대단히 중요하다. 왜냐하면 균열, 라미네이션, 융합불량, 용입불량과 같은 평면성결함은 3차원결함보다 더 심각한 응력집중 효과를 주기 때문이다. 따라서 결함들에 대해선 항상 다음 사항들을 고려하여야 한다. 즉, 크기, 날카로움, 주응력이나 잔류응력방향과의 기울기, 위치 등이다. 3차원 평면성결함이 주응력 방향과 수직으로 있을 경우 더 위험하며 결함의 위치가 내부에 있는 것보다 표면에 있을 때 2~3배나 더 위험한 것은 잘 알려진 사실이다.

일반적으로 압력용기의 경우, 슬랙개재물이 제일 많아 84%, 기공이 3%, 평면결함이 13%나 된다. 각종 압력용기 파손의 90% 이상이 피로파괴임을 고려할 때 부품의 사용중 평면결함들에 대한 결함 진전거동은 수시로 점검을 해야 하며, 원천적으로 균열성 결함들은 용접시 제거가 되어야 할 것이다.

용접부 결함의 중요성이 인식되기 시작한 것은 1940년대 선박(liberty ship)의 파손이 발생하기 시작한 때부터이며, 각종 용접부 결함의 원인, 파괴시험, 비파괴시험의 활성화도 이때 이후부터이다. 또한 그후 파괴역학이론이 정립되면서 파괴안전설계 개념이 시작되었다.

정하중 혹은 피로파괴시험시 결함의 영향을 본격적으로 연구하기 시작한 것은 1960년대부터이며, 구조물의 파괴안전 설계에서

결함의 영향에 대해 파괴역학이 연구되기는 하였으나 그 당시엔 금속야금학자나 재료공학자, 용접공학자의 가담없이 단순히 파괴역학자만으로 시작이 되었으므로 관념의 차이도 많았다.

용접부 결함의 중요성을 평가함에 있어 고려하여야 할 사항으로서 구조물의 파괴양상이 있다. 파괴양상은 보통 다음의 7가지로 나뉜다. 즉, 탄성 혹은 소성변형, 과부하-과변형-연성파괴 혹은 누설, 일반부식, 응력부식, 취성파괴, 피로-고주기·저주기 및 부식피로, 크리프. 이중 처음 3가지가 설계를 할 때 간주하는 사항이다. 응력부식은 용접부나 열영향부의 금속조직, 잔류응력, 기하학적 응력집중지역, 표면의 부식성분위기와 관련이 되는 2차원 평면결함들으로써 발생이 되며, 내부결함은 일반적으로 응력부식과는 무관하다. 응력부식은 사용중 결함을 유발하면서 임계결함 크기까지 성장하면서 취성파괴의 원인이 될 수 있다.

취성파괴는 구조물의 벽두께가 갑자기 붕괴가 되는것으로서 사용재료(일반적으로 탄소강에서 많으며 오스테나이트 스테인리스강이나 니켈강, 알루미늄합금 등의 고연성 재료에선 잘 안 나타남), 환경, 사용온도, 재료두께나 크기, 응력상태, 임계결함크기 등의 영향을 받는다. 피로는 모든 파괴의 90% 이상을 차지하며 취성파괴의 직접적인 원인인 만큼 중요한 파괴기구이다. 대부분의 용접부결함들은 응력집중지역에서 피로에 의한 반복응력·변형을 받게 되는데 이런면에서 2차원 평면결함인 균열은 대단히 위험한 반면, 3차원 구형결함들은 2차원 결함이 되기 위한 잠복시간이 요구되므로 덜 위험하다. 크리프는 일반적으로 재료가 연성의 성질을 가지는 고온에서 발생하는 것이므로 용접부 결함과는 무관하다고 할 수 있다. 상기 여러 가지를 볼 때 취성파괴와 피로가 용접구조물의 결함들에 대한 파괴의 대부분을 차지하게 되며 따라서 큰 관심을 갖게 된다.

3. 비파괴시험

용접부의 품질을 확인하기 위하여 비파괴 시험을 수행하는데 시험의 정도는 최종 사용자의 요구에 따라 부품 전부위의 완전한 시험에서부터 일부시험으로 국한할 수 있다. 이들 요구사항들은 관련규격에 명시가 되거나 구매자에 의하여 결정이 되는 것으로서 궁극적인 목적은 사고를 예방함에 있다. "비파괴 시험은 예술이다. 과학이 아니다." 이는 비파괴시험이 아직도 과학성이 없다는 점에서 유래된 것이다. 비파괴시험을 함에 있어 신뢰성있는 결함검출을 한다는 것은 쉬운일은 아니다. 비파괴시험은 용접부에 대해 단지 만족할만한 시험결과를 얻을 때만이 의미있는 시험이다. 따라서 용접부는 비파괴시험이 가능토록 설계가 되어야 한다. 이외에도 결함검출의 한계에 영향을 주는 요소들은 대단히 많은데 그 몇 가지 예는 표 2와 같다.

이중에서도 특히 비파괴시험요원의 경험과 숙련도, 시험방법, 작업환경에 따라 검출결함의 한계가 크게 좌우된다는 것은 누구나 공히 인정하는 사실이며, 또한 비파괴시험요원, 시험방법, 작업환경 등은 시험편을 사용할 때나 제작 후 혹은 사용 후 검사에서 서로 일관성이 있어야 신뢰성있는 데이터를 얻을 수 있다.

3.1 비파괴시험법의 종류

비파괴시험은 재료의 물리적 성질이 결함의 존재로 인해 변화하는 사실을 이용해서 그 변화량을 측정함으로써 결함의 존재를 추정하고 이에 대한 제반정보를 얻어내는 기술이다. 재료의 물리적 성질로 현재 비파괴시험에 이용되는 것으로는, 방사선에 대한 성질, 탄성파에 대한 성질, 전기·자기적성질, 열적 성질 및 표면에너지의 성질 등으로 구별할 수 있다.

비파괴시험법에는 크게 표면시험(surface examination)과 체적시험(volumetric examination)으로 대별되는데 많은 비파괴 시험법 중 각종 공업규격에서 많이 활용하는 것으로서 표면시험엔 육안시험(VT; visual testing), 액체 침투 탐상 시험(PT; liquid penetrant testing), 자분 탐상 시험(MT; magnetic particle testing), 및 와류탐상 시험(ET; eddy current testing)이 있으며, 체적시험에는 초음파탐상 시험(UT; ultrasonic testing), 방사선투과 시험(RT; radiographic testing)이 있다. 와류탐상 시험을 혹자는 체적 시험에 포함하기도 한다. 각 시험법의 특징을 간단히 정리하면 다음과 같다.

(1) 육안시험

용접중 및 용접후 거의 모든 결함은 육안 시험으로 결함의 대부분을 제거할 수 있을 정도로 육안 시험은 비파괴 시험법중 가장 기

표 2 비파괴시험의 결함검출능에 영향을 주는 요소⁽¹⁾

- 가. 재료 특성 : 결정립크기, 석출물의 양과 분포, 기타 야금학적 요소
- 나. 결함 형태 : 체적결함, 평면결함, 표면결함, 내부결함
- 다. 공정 상태 : 표면조건 및 마무리처리, 전공정처리효과, 잔류응력 및 적용응력
- 라. 부품 형태 : 두께, 기하학적인 급격변화, 중요부위의 접근성
- 마. 결함발생형태 : 가공, 방전가공, 급랭, 용접, 피로
- 바. 시험자변수 : 시험자 경험 및 숙달도, 시험결과 해석능력 차이
- 사. 시험장비 및 절차서 : 시험장비 교정차이, 시험장비간의 차이, 시험절차서간의 차이
- 아. 시험 환경 : 시험실, 공장, 현장간의 조건
- 자. 결함검출 한계 : 검출기준차이

본이면서 가장 중요하다.

(2) 액체침투탐상시험

금속이나 비금속에 적용이 가능하나 표면 개구결합만을 검출할 수 있다. 균열의 깊이는 측정이 어렵다. 시험편의 시험전 세척, 시험온도, 침투제의 종류, 침투시간, 현상기술 등이 검출도에 영향을 준다.

(3) 자분탐상시험

강자성재료의 표면 및 표면하 결함을 검출할 수 있으며, 열처리균열과 같은 미세한 표면균열을 검출할 수 있다. 표면균열일 때 그 길이는 알 수 있지만 균열의 깊이는 측정하기 곤란하다. 자화방법, 자분의 적용, 검사원의 숙련도가 검출도에 영향을 주며 자성재료에만 가능하다.

(4) 와류탐상시험

도체표층에 생긴 균열, 부식공 등을 찾아낼 수 있다. 비접촉으로 고속탐상이 가능하므로 튜브, 파이프, 봉 등의 자동탐상에 많이 이용된다.

(5) 초음파탐상시험

균열 등 면상결합의 검출능력이 방사선투과시험보다 우수하다. 그러나 초음파가 균열면에 될 수 있는대로 수직하게 입사하도록 탐상조건을 선정하는데 주의해야 한다. 균열 깊이 측정법으로 여러가지 방법이 제안되어 있다.

(6) 방사선투과시험

방사선의 조사방향에 평행한 방향으로 놓인 결함을 검출하는데 우수하다. 결함의 종류, 형상을 쉽게 알 수 있으나 라미네이션과 같이 방사선의 조사방향에 직각방향으로 기울어져 있는 균열은 검출되지 않는다. 특별한 촬영기법을 사용하여 결함깊이를 측정할 수 있다. 이 시험법은 면상결합보다 구상결합의 검출도가 높다.

(7) 기타시험법

용접을 전부 완성한 후 구조물 및 압력용기의 최종 건전성을 확인하기 위하여 유압시험 및 누출시험을 행한다. 이외에 음향방출

시험(AE; acoustic emission examination)이 있는데, 상기의 비파괴시험법은 넓은 면적을 한번에 시험할 수 없으며, 시험부위에 다른 구조물이 부착되어 있어 시험이 어렵거나, 시험자의 숙련도에 크게 좌우되고 균열발생원인의 규명이 어렵다는 단점을 가지고 있는데 반해, 음향 방출시험은 이런 문제를 다소나마 해결할 수 있다. 음향방출시험은 재료가 변형을 일으킬 때나 균열이 발생하여 성장할 때 원자의 재배열이 일어나며 이때 탄성파를 방출하게 된다. 따라서 이에 대한 연구가 계속되고 있으나 현장 적용엔 아직 미흡한 단계다.

3.2 비파괴시험의 적용

결합들의 검출을 위해 모든 비파괴시험법을 적용할 수는 없다. 한 예로서 구조물 내부에 있는 균열의 경우 방사선투과시험으로는 결함부위와 결함이 없는 부위의 농도차가 거의 없으므로 식별이 어려우며, 액체침투탐상시험, 자분탐상시험, 육안시험, 와류시험 등의 방법 역시 결함이 내부에 있을 경우 검출이 안 된다. 균열성 결합의 검출을 위해선 초음파탐상시험이 가장 좋다. 표 3은 용접중 가장 많이 발생하는 결합들에 대한 적절한 비파괴시험법을 보여준다.

3.3 파괴역학측면에서의 비파괴시험

비파괴시험법으로 검출된 결합들은 관련규격의 합격기준치와 비교를 함으로써, 관련규격의 허용크기를 초과하는 결함에 대해서는 수리나 대체를 하는 것이 원칙이나 수리나 대체가 어렵거나 수리나 대체를 하였을 경우 국부적으로 악영향을 미쳐 더 큰 문제를 야기시키는 경우도 있다. 따라서 비파괴시험법으로 검출된 결함에 대해 수리나 대체 이전에 결합의 파괴역학해석이 수행된다.

파괴역학해석을 위해 사용되는 결합의 크기는 결합의 길이도 중요하지만 결합의 두께 방향의 높이도 중요하다. 이런 측면에서 상

표 3 각 결함들에 대한 비파괴시험법⁽¹⁾

결함	비파괴시험법					
	방사선 투과시험	초음파 탐상시험	액체침투 탐상시험	자분탐상 시험	육안 시험	와류 시험
기공	A	O	A ¹	O ²	A ¹	O
슬랙개재물	A	A	U	O ²	U	O
융합불량	O	A	U	U	U	O
용입불량	A	A	U	U	U	O
언더컷	A	O	O	O	A	O
오버랩	U	O	A	A	O	O
균열	O	A	A ¹	A ²	A ¹	A
라미네이션	U	A	A ^{1,3}	A ^{2,3}	A ^{1,3}	U

(주) 1. 표면검사만 가능, 2. 표면 및 표면하검사만 가능, 3. 용접부사상가공면 혹은 모재두께면
 A: 접합한 방법, O: 부품두께, 결함크기, 방향성 및 위치 등에 좌우되며 적절한 방법, U: 적용할 수 없는 방법

기 비파괴시험법중 결함의 길이와 높이를 동시에 정확하게 측정할 수 있는 것으로선 초음파탐상시험밖에 없다. 방사선투과시험도 입체방사선법, 이중노출법, 혹은 시차변위법 등을 이용하여 어느 정도 결함높이 측정이 가능하나 초음파탐상시험만큼 정확하지 못하며 또한 방사선투과시험은 면상결함보다는 구상결함의 검출능력이 좋은 반면, 초음파탐상시험은 면상결함의 검출 능력이 뛰어나다. 따라서 부품의 건전성에 큰 영향을 주는 면상결함에 대해 길이 및 높이를 동시에 측정할 수 있는 초음파탐상시험법에 대해 현행되는 결함크기 측정기술을 중점으로 좀더 자세히 기술코자 한다.

4. 초음파시험에 의한 결함크기 측정

초음파시험결과의 해석을 위하여 3가지의 평가체계를 간주할 수 있겠는데 고전적인 방법으로 초음파시험으로 얻은 데이터를 평가작업을 거친 후 합격 및 불합격 판단하는 것으로 현재 많이 사용하고 있으며, 신방법으로는 초음파시험으로 생산된 데이터가 데이터의 생산과 동시에 평가작업이 이루어지는

것으로 개인의 능력에 의한 평가는 없다. 이외에 신방법으로 결함결과가 화상으로 나오며 분석되는 방법이다.

표 4 결함크기 측정법⁽³⁾

1. 탐촉자이동법
 - 가. dB 강하법
 - 6dB 강하법, -10dB 강하법, -20dB 강하법
 - 나. 기준선비교법
 - 거리진폭곡선 비교법, -에코 수멀법
 - 다. 효율적 빔폭법
 - 20dB 강하법, -에코 소멀법
2. 에코진폭법
 - 에코진폭법, -AVG 법, -단층법, -산란 및 회절파법, -탄뎀법, -투과 및 반사법
3. 초음파 전달시간차법
 - 균열선단회절법, -최대에코법, -중파산란파법, -파변형 표면파법, -표면파-횡(종)파 변형법, -횡파-종파 변형법
4. 주파수법
 - 주파수 분석법, -스펙트럼법
5. 화상법
 - B스코프법, -합성구경초점법, -홀로그래피법, -결함패턴인식법

이와 같이 초음파시험법에 의하여 결함을 측정하는 데는 현재 여러가지 기술이 사용되고 있으며, 새로운 결함크기 측정기술이 계속 연구·개발되고 있다. 그러나 여러 비파괴시험법들이 그 고유의 장단점과 한계점이 있는 바와 같이 초음파시험법의 여러 결함크기 측정기술도 마찬가지로 그 장단점과 한계점은 있기 마련이다. 따라서 어떤 특정기술을 적용할 때는 이의 정확한 특성, 한계점 및 장단점을 잘 이해하여야 할 필요성이 있다. 다음은 표 4에 나타난 바와 같이 현재 사용되고 있는 여러 결함크기 측정방법 중 각국에서 널리 사용되고 있는 몇 가지에 대하여 간략하게 기술한다.

4.1 데시벨 (dB) 강하법

결함을 검출하여 크기를 평가하는 여러 방법 중에서 가장 널리 사용되는 방법중의 하나이다. 이 방법에는 6dB 강하, 10dB 강하, 20dB 강하 등 여러 방법이 사용되고 있으나, 이들 이외에도 12dB 강하, 15dB 강하 등의 방법이 사용되기도 한다.

dB 강하에 의한 결함의 크기 평가법중에서 제일 먼저 사용되었을 뿐만 아니라 이론적 설득력을 갖는 것은 6dB 강하법이다. 즉 결함에서 반사되어 오는 최대신호 진폭값을 얻을 수 있는 위치에서 초음파탐촉자를 최대신호 진폭이 반으로 강하되는 지점까지 이동시켰을 때가 결함의 한쪽 끝이 되며 동일한 방법에 의해 그 반대 방향으로 탐촉자를 이동시켜 6dB강하(최대 결함 에코가 반으로 떨어지는 점)가 되는점이 결함의 나머지 끝점이 된다. 그림 1은 6dB 강하법에 의한 결함크기 측정법을 보여 준다.

그림 1에서 결함의 높이는 6dB 강하로 결정된 결함의 상단 및 하단에 의해 삼각함수를 이용하여 간단하게 계산될 수 있다. 그림 1에서 결함의 끝점은 기 언급한 바와 같이 최대 신호진폭이 반으로 감소되는 점에 의해 결정된다. 즉 초음파탐촉자에 수신된 결함신

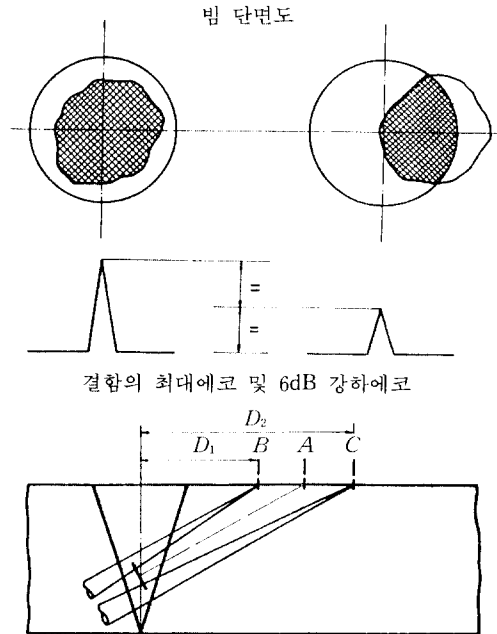


그림 1 6dB 강하법에 의한 결함크기 측정
A: 최대 에코점의 탐촉자위치, B, C: 최대 에코가 반(6dB 강하)으로 떨어지는 점의 탐촉자 위치

호와 최대진폭이 반으로 감소되었다는 것은 결함의 끝점에 초음파빔의 중심이 일치됨을 의미한다. 이 방법에 의한 결함의 크기 평가 결과가 실제 결함의 크기와 일치하려면 몇 가지 전제조건이 만족되어야 한다. 즉 결함의 형상이 너무 불규칙하지 않아야 하며 결함이 동일 평면상에 있고 초음파 빔방향과 결함면이 거의 수직을 이루어야 한다.

그러나 실제 자연결합은 위와 같은 조건을 만족하기란 상당히 어려우며 결함의 기울기, 결함면의 거칠기, 결함과 초음파빔의 직경의 상대적인 크기 등에 따라 6dB 강하법보다는 오히려 10dB 또는 12dB 강하에 의해 정해지는 결함의 끝점들로 구성되는 결함의 크기보다 정확한 값을 준다는 것이 10dB 강하 또는 12dB 강하법이다. 물론 이들 방법 역시 결함의 특성에 따라 아주 정확한 결함크기 측정이 이루어질 수도 있으나 경우에 따

라서는 과대평가의 여지도 많다. 20dB 강하법은 빔의 퍼짐교정과 함께 결함의 크기를 측정하는 방법이다.

복잡한 다평면결함일 경우 6dB 강하법은 과소평가 가능성이 많으며 이 때는 오히려 10dB 또는 그 이상의 dB 강하법이 오히려 실제 결함크기에 가까운 측정값을 준다. 따라서 실제 결함의 검출과 크기평가에 있어서 결함자체는 미지이기 때문에 여러 방법을 동원하여 결함의 특성을 조사하고 이에 따라 적당한 방법을 선택하여 결함크기를 선택하는 것이 바람직하다.

dB 강하법은 검사자가 쉽게 장비를 조작하여 결함을 측정할 수 있는 장점이 있으며 현재 가장 널리 사용되고 있다. 이 방법은 사각빔 검사시 결함의 상단 및 하단 결정(결함높이 측정)시 빔 노정에 따라 감쇄가 고려되지 않는 단점이 있다.

4.2 거리진폭곡선 비교법

결함의 검출 및 평가에 있어 측면공, 저면공, 노치 등의 인공결함으로 거리진폭 곡선을 작성하고 실제 결함을 인공결함의 상대적 크기로 측정하는 방법으로 현재 국내외 여러 관련규격에서 채택하고 있다. 그림 2는 측면공을 갖는 보정시험편으로 거리 진폭곡선의 설정예를 나타낸다.

결함의 검출과 크기 평가도 인공결함의 크기 및 형태에 따라 달라지며 관련규격마다 서로 다른 크기의 인공결함 크기를 규정하고 있다. 따라서 적용규격이 다르면 설정되는 거리진폭곡선(DAC; distance amplitude curve)의 감도도 달라진다. 결함의 검출기준 및 결함크기측정 기준은 거리진폭곡선 작성시 사용한 인공결함의 형태, 크기뿐만 아니라 검사부품의 품질정도에 따라 달라지는데 현재 결함 검출기준으로 50% DAC, 20% DAC 가 많이 사용되고 있고 결함크기 특정기준으로 50% DAC, 100%DAC 또는 1/2Max. 법(6dB 강하법) 등이 적용되고 있다. 일부 규

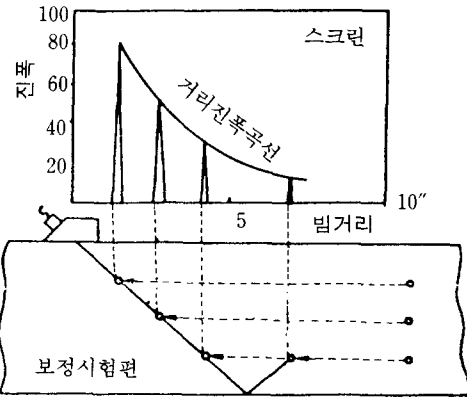


그림 2 보정시험편에 의한 거리진폭 곡선 작성

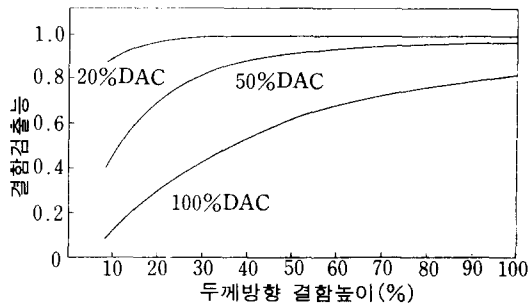


그림 3 결함 검출능

격에선 결함의 길이만 측정토록 하는 반면 일부 규격 특히 원자력부품 시험규격에선 결함의 길이뿐만 아니라 두께방향의 높이까지도 측정토록 규정하고 있다. 그림 3은 결함의 검출기준이 20% DAC, 50% DAC, 100% DAC일 때의 두께방향의 결함크기에 따른 결함 검출능을 나타낸다. 결함높이가 작을수록, 즉 작은 결함일수록 20%DAC, 50% DAC, 100% DAC 간의 검출차이가 많음을 보여주고 있다.

그림 4는 DAC법에 의한 결함의 끝점 측정을 그림 5는 6dB 강하 및 50%DAC에 의한 결함의 길이측정을 나타내고 있다. 사각탐상법으로 50%DAC법에 의한 결함의 두께방향의 높이측정은 그림 6과 같다.

거리진폭보정곡선의 설정시 사용되는 측면

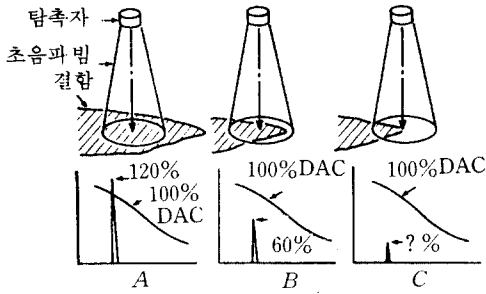


그림 4 거리진폭곡선 비교법에 의한 결함길이 측정

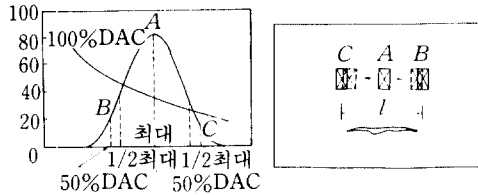


그림 5 50%DAC 및 6dB 강하법에 의한 결함 길이 측정

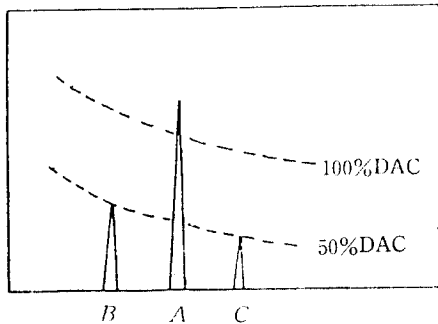
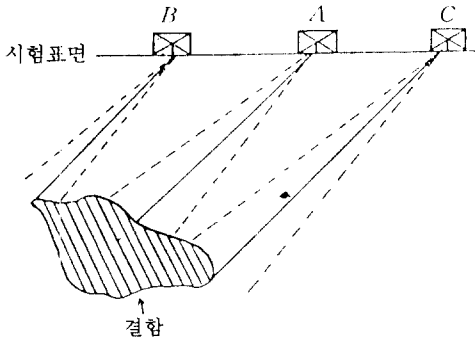


그림 6 사각탐상법 및 50%DAC법에 의한 결함 높이 측정

공에서 반사되는 신호의 크기는 식 (1)과 같다.⁽⁴⁾

$$\frac{V_c}{V_o} = \frac{S}{\lambda \sqrt{\delta}} \sqrt{\frac{d_c}{r^3}} e^{-2\delta r} \quad (1)$$

여기서, V_c 는 측면공으로부터의 반사신호의 진폭, V_o 는 최대 신호 진폭, δ 는 감쇄 계수, r 는 탐촉자와 측면공까지의 거리, d_c 는 측면공 직경, λ 는 초음파 파장, S 는 탐촉자 면적을 나타낸다.

식 (1)에서 동일 탐촉자, 동일 재질 내에 위치한 서로 다른 구경의 측면공에 대한 신호 크기의 비는 식 (2)와 같다.

$$\frac{V_{1c}}{V_{2c}} = \sqrt{\frac{d_{1c}}{d_{2c}}} \quad (2)$$

단일 평면을 갖는 반사체에서의 신호크기는 다음과 같다.⁽⁵⁾

$$A(\theta) = \underbrace{\left(\frac{r}{r_0}\right)^2}_{F_1} \underbrace{\{D_T^2(\theta_T) D_R(\theta_R) \cos(\theta_R/2)\}}_{F_2} \underbrace{\left\{\left(\frac{l_0}{l_\theta}\right)^2 e^{-2(\alpha l_\theta - \alpha l_0)}\right\}}_{F_3} \quad (3)$$

여기서, $A(\theta)$ 는 결함과 보정시험편의 반사체로부터의 신호 크기 비, r, r_0 는 결함과 인공결합의 반경, $D_T(\theta_T) D_R(\theta_R)$ 는 송신 및 반사파의 지향함수, l_0, l_θ 는 보정시험편 반사체 및 결함까지의 거리, α 는 초음파 감쇄계수를 나타낸다.

F_1 은 보정시험편 반사체와 결함의 상대적 크기 비에 관련된 요소이며 F_2 는 결함의 방향성, F_3 는 재료의 특성 및 결함의 위치에 따른 요소들을 나타낸다. 식 (3)과 같이 인공결함에 대한 실제 결함신호 크기는 여러 요소에 의해 좌우된다. 식 (3)은 아주 이상적인 결함에 대한 것이므로 실제검사 및 결함크기 평가시에는 기타 다른 여러 요소들도 영향을 미칠 수 있다. 따라서 거리진폭곡선을 이용한 방법은 현재 여러 실험 및 경험적

데이터에 근거하여 실험편 반사체의 크기, 크기 기준의 설정이 이루어지고 있다.

현재 사용되고 있는 결함 크기 측정기술 (20%DAC, 50%DAC, 100%DAC) 중 어느 한 방법이 모든 결함에 대해서 좋은 결과를 줄 수는 없다. 또한 dB 강하법과 비교할 때 검사자의 데이터 수집과 검사 및 결함의 크기 방법이 비교적 복잡한 편이다. 보정시험편이 실제 검사코자 하는 부품 또는 재료의 음압적 특성과 같을 때 좋은 결과를 줄 수 있으며 거리진폭보정곡선의 설정이 결함의 크기 측정시 매우 중요한 역할을 한다.

dB 강하법이나 거리진폭곡선 비교법에 의한 결함크기 측정기술은 주로 신호 진폭에 근거를 둔 방법이다. 이 방법은 실제 결함으로부터의 초음파반사신호가 결함면의 거칠기, 기울기, 재료의 음향임피던스, 탐촉자의 굴절각, 주파수 및 크기 등에 따라 달라지는 단점을 가지고 있다.

4.3 초음파 전달시간차법

dB 강하법이나 거리진폭곡선비교법에 의한 결함크기 측정기술이 가지고 있는 문제점을 해결하기 위한 방법으로 개발된 것이 초음파전달시간(time of flight)을 측정하여 결함의 크기를 결정하는 방법이다. 초음파전달시간차법은 사용탐촉자 개수, 초음파 모드, 측정시 이용되는 신호 특성에 따라 몇 가지로 구분되는데 이중 많이 쓰는 결함선단 회절파 전달시간차(TOFD; time of flight diffraction)법, 최대에코법(PET; peak echo technique) 및 위성펄스관측법(SPOT; satellite-pulse observation technique)에 대해 기술한다.

(1) 결함선단 회절파 전달시간차법⁽⁶⁾

(가) 이중 탐촉자법

결함크기 측정시 그림 7에 나타난 결함선단의 회절파의 전달시간을 측정하여 결함의 상하단 끝을 정하고 결함의 높이를 간단한 기하학적인 계산에 의해 평가하는 방법이다.

초음파가 결함에 와서 부딪칠 때 초음파의 변화형태는 크게 전면반사, 난반사 및 회절로 나뉘는데 초음파회절은 초음파 빔 경로에 놓여 있는 매질의 날카로운 선단에서 초음파가 구부러지는 경향이 있는 현상으로 구

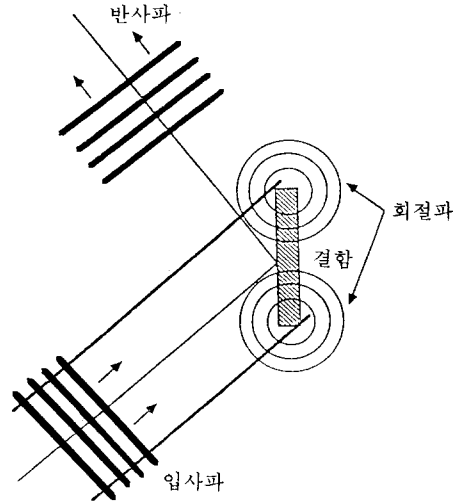


그림 7 결함선단 회절

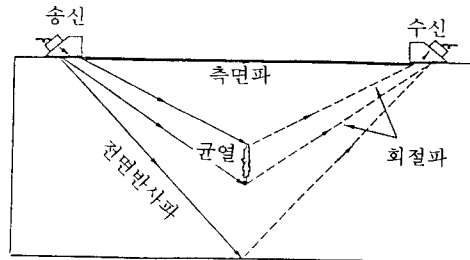


그림 8 결함선단 회절파 전달시간차법의 원리

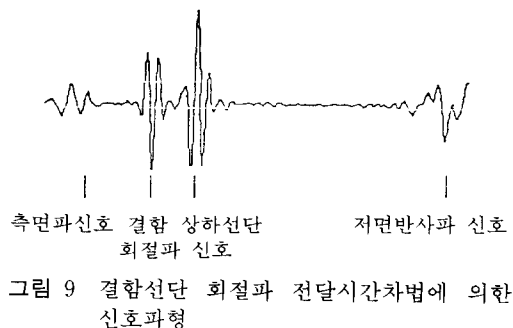


그림 9 결함선단 회절파 전달시간차법에 의한 신호파형

부러지는 경향은 초음파의 파장이 길수록 선단이 날카로울수록 심하다.

측정원리는 균열성 결함에 대해 두 개의 탐촉자를 이용(한 탐촉자는 송신용, 다른 한 개의 탐촉자는 수신용)하여 결함의 상하단 선단에서 회절되어 도달하는 신호, 측면파(lateral wave 혹은 creeping wave) 신호 및 저면에서 반사되어 오는 신호들의 초음파 전달시간을 측정하여 기하학적 계산에 의해 결함의 높이를 평가하는 방법이다. 그림 8은 결함선단회절과 전달시간차법을 도식적으로 나타낸 것이며 그림 9에서 처음 도달한 신호는 측면파이고 두번째 및 세번째 신호는 각각 결함 상·하단에서 회절된 회절파이며 마지막신호는 저면반사신호를 나타내고 있다.

결함의 한쪽 끝 선단이 시험체 표면으로부터 d 깊이에 있을 때 결함 한쪽 끝 선단을 진행하는데 걸리는 파의 시간(t)은 식 (4)와 같다.

$$t = \frac{2(S^2 + d^2)^{1/2}}{V} + 2t_0 \quad (4)$$

여기서, S 는 탐촉자간 거리/2, V 는 종파 속도, t_0 는 탐촉자 웨지내에서의 초음파(종파) 전달시간을 나타낸다.

그러므로 표면으로부터 결함의 한쪽 끝 선단까지의 거리 d 는 식 (5)와 같게 된다.

$$d = [(t - 2t_0)^2 (V/2)^2 - S^2] \quad (5)$$

따라서 결함의 상선단 d_1 과 하선단 d_2 를 구하면 결함의 높이가 결정된다.

(ㄴ) 단일 탐촉자법

이 방법은 일명 최대에코법(PET; peak echo technique)이라고도 하는데, 이 방법은 그림 10과 같이 한 개의 탐촉자를 가지고 결함선단 회절파를 이용하여 결함의 높이를 결정하는 방법으로서 굴절 종파를 사용했을 경우 표면으로부터 결함까지의 거리(d)는 식 (6)과 같다.

$$d = [V(t - 2t_0)/2] \cos \theta \quad (6)$$

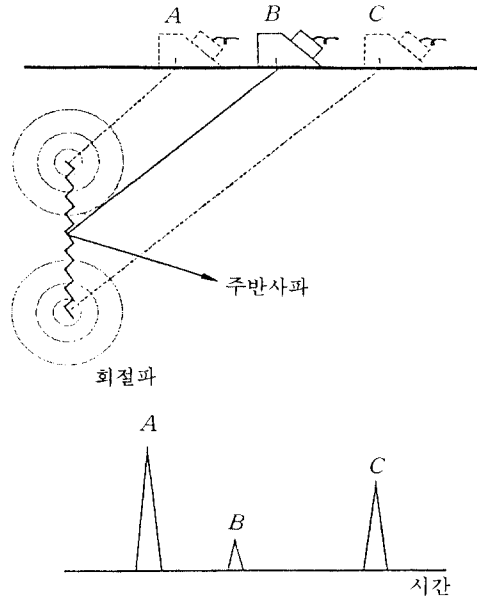


그림 10 단일탐촉자 결함선단 회절파 전달시간차법

여기서, V 는 종파속도, t 는 탐촉자의 초기펄스로부터 결함선단 신호까지의 거리, t_0 는 탐촉자 웨지내에서의 초음파(종파) 전달 시간, θ =굴절각을 나타낸다.

만약 입사빔으로 횡파를 사용하고 시험체가 탄소강이라고 할 때 시험체내에서 횡파와 종파의 속도가 서로 다르므로 전달 시간도 다르다. 총 전달시간(t)은 다음과 같다.

$$t = t_0 + t_s + t_1 + t_0 = t_s + t_1 + 2t_0 \quad (7)$$

여기서, t_s 는 결함까지 전달되는 횡파시간, t_1 는 탐촉자 웨지까지 전달되는 회절종파시간을 나타낸다.

탄소강내에서 횡파속도(V_s) = 3.23×10^6 mm/sec, 종파속도(V_l) = 5.85×10^6 mm/sec 이므로 동일 거리를 진행하는 두 파간의 전달시간관계는 식 (8)과 같다.

$$t_s = (5.85/3.23) t_1 = 1.81 t_1 \quad (8)$$

따라서 식 (7)은 식 (9) 및 식 (10)이 된다.

$$t = 2.81t_1 + 2t_0 \quad (9)$$

$$t_1 = (t - 2t_0) / 2.81 \quad (10)$$

따라서 입사빔으로 횡파를 사용했을 경우, 표면으로부터 결함 한쪽 끝 선단까지의 거리 (d)는 식 (11)과 같이 된다.

$$d = (V_l)(t_1) \cos \theta \\ = [(t - 2t_0) / 2.81] \cos \theta \quad (11)$$

결함선단회절과 전달시간차법들은 결함 선단으로부터 회절파를 이용하기 때문에 신호의 세기가 약하다. 따라서 신호·잡음비를 높이며 각종 신호를 처리하고 해석할 수 있는 컴퓨터 프로그램이 필요하다. 한편 회절파는 구형결함에 대해선 발생이 어려우므로 이 기술을 적용하기 어려운 문제가 있다.

(2) 위성펄스 관측법⁽⁷⁾

면상결함에 대한 결함높이의 측정원리는 그림 11과 같다. 이는 단일 탐촉자를 이용하여 주로 표면결함, 특히 피로균열 또는 응력

부식균열의 높이 측정시 많이 사용된다. 균열높이는 균열상단선단에서 회절된 신호와 균열저면에서 반사된 신호와의 시간차를 측정함으로써 계산할 수 있다. 실제 이 방법을 이용하여 결함을 정확히 평가하기 위해서는 결함 높이가 서로 다른 여러 개의 노치로 거리 보정하여 실제결함 높이를 평가하면 아주 정확한 값을 구할 수 있다. 그러나 결함이 표면과 수직하지 않고 기울기를 가질 경우 측정값과 실제 결함 높이와는 차이가 많이 발생할 수 있다.

결함의 형태가 구형 또는 원통형일 경우 결함측정 원리는 그림 12와 같다. 이는 입사횡파가 구형결함에서 표면파로 파변형을 일으켜 표면파가 결함 원둘레를 따라 진행한 후 다시 횡파로 파 변형을 일으킨 후 탐촉자로 돌아오는 것으로 결함에서 직접 반사한 반사파와 파 변형을 일으켜 돌아온 파 사이의 시간 차이를 계산함으로써 결함의 크기를 결정하는 방법이다.

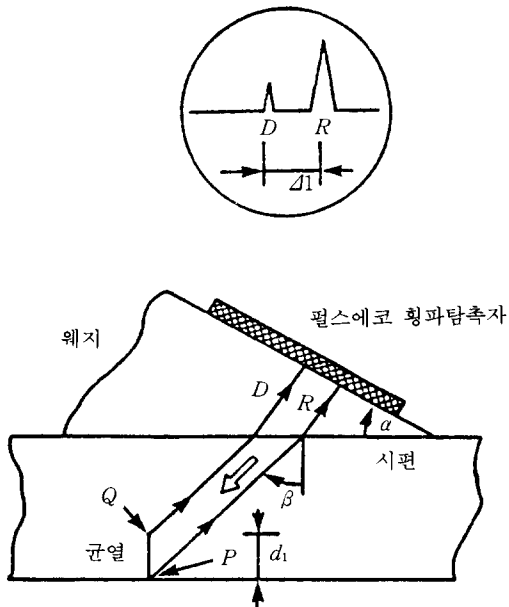


그림 11 위성펄스 관측법에 의한 평면결함측정

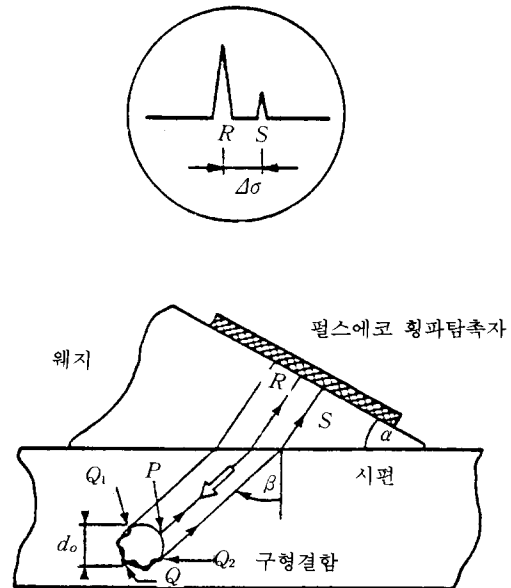


그림 12 위성펄스 관측법에 의한 구형 또는 원통형결함의 측정

5. 초음파신호 데이터의 기록 및 처리

데이터의 기록으로 크게 정류파 비디오 기록과 라디오 주파수 기록 두 가지를 사용하는데 모두 초음파신호의 진폭높이와 탐촉자 위치, 에코도착시간 등을 기록한다. 정류파 비디오기록은 대부분의 수동식 초음파검사장비에서 사용되는 표준방식으로 현재 초음파 시험기법의 주류를 차지한다. 그러나 큰 단점으로 진폭이 항상 결함의 크기와 관련되어 있지 않다는 것이다. 요즘 자동화 시험장비가 개발되고 많은 데이터를 저장할 수 있는 컴퓨터의 발달과 함께 라디오 주파수파의 기록이 이루어지고 있다.

초음파신호를 여러 양식으로 처리하여 영상화시킬 수 있다면 시험자에게 결함해석을 위해 많은 도움을 줄 것이다. 영상형성은 크게 A, B, C 세 가지가 있는데 A-스코프는 반사되는 신호의 진폭을 스크린에 시간함수로 나타내는 법이고 B-스코프는 단면투시로써 시험체의 단층을 영상화하는 것이다. 단층을 영상화하는 것으로 특히 옆측면도(side view)를 보는 것을 B, 끝측면도(end view)를 보는 것을 B'-스코프라고 한다. C-스코프는 검사표면에서 하부를 위에서 투시해보는 즉 윗면도(plan view)를 보는 방법이다. B, B' 및 C-스코프를 조합하면 결함의 3차원 영상을 만들 수 있는 것으로 A-스코프로 관찰해낼 수 없는 결함의 모호한 정보를 파악해낼 수 있다. 영상정보중 특별한 부분을 결함 지도로 만들거나 확대, 축소시키는 기능이 요즘 개발되어 활용되고 있다.

평균화(averaging) 기법은 신호의 신호대 잡음비를 높이는 것으로 이엔 시간평균화와 공간평균화가 있다. A-스코프 정보는 보통 시간함수로 평균화되는데 이는 동일 탐촉자 위치에서 결함까지 취해진 몇 개의 A-스코프 신호들을 총합하여 평균화하는 것이다. 공간 평균화는 탐촉자에서 결함까지 빔 전달

이 예상진로를 따라 이동할 때 신호의 도착 시간이 예상 진로내에서 변한다는 사실에 따라 만들어진 기법으로 자동화 초음파시험계통에서 많이 사용된다.

합성구경초점(SAFT; synthertic aperture focused techniuqe)은 탐촉자 면적보다 넓은 부위에 있는 결함들에 대해 초음파빔을 한점으로 초점화시키므로 결함의 해상도를 증대시키는 방법이다. 그림 13은 합성구경초점법을 이용하여 결함을 영상화시킨 예를 보여주고 있다.

이미 알고 있는 결함의 특성과 기하학적인 형태에 따라 반사되는 초음파 파형의 특성정보를 미리 컴퓨터에 입력하여 실제부품 검사시 미지 결함에 대한 미지의 초음파신호가

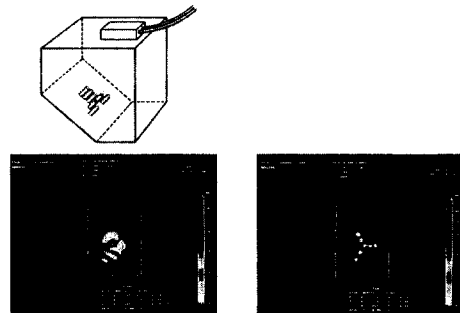


그림 13 재래식방법과 합성구경초점법에 의한 결함형상의 비교

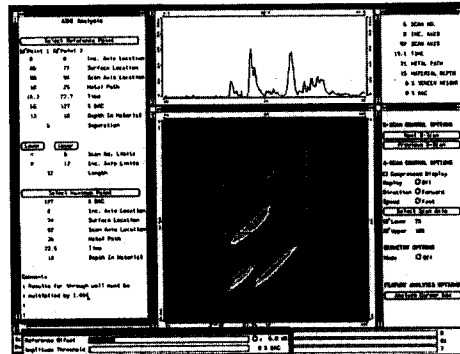


그림 14 피복하부노치결함에 대한 45횡파 시험 결과

이 계통에 들어오면 미지 신호의 특성을 분석하여 저장된 신호와 비교하여 분류함으로써 미지결함을 해석하는 인공지능방법으로 이엔 지식적응회로망(adaptive learning network), 패턴인식(pattern recognition) 및 특성추출(feature extraction)법 등이 시험자동화 장비 등에 활용되고 있다.

그림 14는 피복하부 노치결함에 대해 클래드(clad) 표면 반대면에서 45도회와 자동화장비를 이용하여 결함을 시험한 결과이다. 균열의 하단 선단에서 강한신호가 나타나며 상단선단에선 약한 회절과가 나타남을 알 수 있다. 균열의 하단선단 아래에 여러 상들이 나타나고 있는데 이는 클래드 표면에서 회파의 산란에 기인한 것이다.

6. 맺음말

“어떤 용접부도 완전하지 않다.” 이는 용접부가 잘 관리된 용접절차서에 따라 용접을 하였다 하더라도 결함의 발생은 피할 수가 없다는 말이다. 따라서 용접중 발생가능한 결함들의 발생 방지대책에 대해 연구가 되어 오고 있으며, 또한 실제로 용접부에 어떤 크기의 결함을 미리 가정하고 설계를 하기도 한다. 그러나 부품들은 사용중 여러 복합적인 영향들을 받아 결함의 발생 및 성장을 유도하기도 한다. 따라서 부품들이 건전하게 용접이 되었는지, 지속적인 사용을 위해 안전하지 혹은 기타 다른 시정조치가 필요한지 여부를 판단기 위해 비파괴시험이 필요하며, 파괴역학적으로 파괴에 대한 안전의 정확성을 높이기 위하여 반드시 재료에 존재하는 결함에 대한 정보, 즉 결함의 종류, 모양, 크기 및 위치 등을 비파괴시험으로 정확히 알지 않으면 안된다. 이들 결함에 대한 정보가 없으면 파괴역학이 아무리 이론적으로 잘 발달하였다 하더라도 무용하게 된다.

“비파괴시험은 예술이다. 과학이 아니다.” 이는 비파괴시험이 아직도 과학성이 없다는 점에서 유래된 말이다. 비파괴시험을 함에 있어 신뢰성있는 결함검출을 한다는 것은 쉬운일은 아니다. 비파괴시험은 용접부에 대해 단지 만족할만한 시험결과를 얻을 때만이 의미있는 시험이다. 따라서 의미있는 시험결과를 얻기 위한 많은 연구가 계속되고 있으나 여전히 불확실성이 많고 아직도 관련규제에선 기존방법(데시벨 강하법, 거리진폭곡선 비교법)을 요구하고 있는 실정으로, 이로 인해 결함발견시 결함크기 측정결과에 대한 논란이 아직도 사용자, 시험자간에 많이 발생하고 있는 실정이다.

참고문헌

- (1) 안희성, 1988, “용접물리아금 특론,” 국제산업정보시스템 발행, pp. 430~437, 459~464.
- (2) Welding Handbook, “Welding Technology,” Vol. 1, 8th ed., pp. 350~369.
- (3) Korea Society for Nondestructive Testing, “Nondestructive Testing(Advanced Course),” pp. 98~115.
- (4) Ermolov, I. N., 1972, “The Reflection of Ultrasonic Waves from Targets of Simple Geometry,” Nondestructive Testing, pp. 87~91.
- (5) Serabian, S., et al., 1985, “Pulsed Ultrasonic Flaw Detection Model.” Materials Evaluation, Vol. 43, pp. 873~878.
- (6) Sattler, F. J., 1989, “Report on Ultrasonic Systems.”
- (7) Gruber, G. J., et al., 1984, “Characterization of Flaws in Welds Using Satellite Pulses,” Materials Evaluation, Vol. 42, pp. 426~432. 