

비파괴시험에 의한 균열크기의 측정

朴 璵 洙
서울산업대학 재료공학과 교수



● 1938년 12월 6일생
● 금속공학을 전공하였으며, 특히 재료의 비파괴검사 등에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

최근 파괴역학의 발전으로 하중을 받는 구조물의 파괴에 대한 안전성을 추정할 수 있게 되고 있다. 그러나 안전성을 좀 더 정확하게 추정하려면 결함에 대한 정보가 더 정확해야 한다는 것을 우리는 이미 잘 알고 있다. 이들 결함에 대한 정보가 부정확하면 파괴역학이 이론적으로 발전하였다 하더라도 실용에 어려움이 있을 것이다. 따라서 비파괴시험에 의한 결함의 정보를 정확히 얻어내는 일은 구조물의 수명예측에 필수적이라고 아니할 수 없다.

그러나 비파괴시험은 그것이 가지는 특성 때문에 지금까지 주로 결함의 존재를 알아내는데 치중하였을 뿐 아니라 결함의 상대적 평가에 그쳤으므로 결함의 정량적 측정기술개발에 소홀한 점이 많았다. 그러므로 비파괴시험에 의한 결함의 정확한 정보를 얻는데 아직 많은 문제를 가지고 있다. 그러나 요즘 시험장치의 발전에 힘입어 국내외적으로 결함의 정량적 측정기술개발에 힘을 기울이고 있다.

주지하는 바와 같이 비파괴시험은 재료의 물리적 성질이 결함으로 인해 변하는 사실을 이용하여, 그 성질의 변화량을 측정함으로써 결함의 존재를 추정하고 그것에 대한 제반정보를 얻어내는 기술이다. 따라서 그 기초가 되는 것은 재료의 물리적 성질이라 할 수 있고 정확한 시험기법의 개발은 정확한 재료의 물성파악과

그것의 측정기술의 진보에 있다고 볼 수 있다.

현재 비파괴시험에 이용되고 있는 재료의 물리적 성질로, 방사선에 대한 성질, 탄성파에 대한 성질, 전기적/자기적 성질, 열적 성질 및 표면에너지의 성질 등이 있다. 이들 성질의 특성에 따라 비파괴시험법의 종류가 나누어지며 각 시험법마다 장단점을 지니고 있다. 공업적으로 균열검출에 많이 이용되는 비파괴시험법을 검출가능한 균열의 발생위치를 중심으로 나누어 보면, 표면균열(표면으로 개방되어 있거나 표면적하에 있는 균열)의 검출에, 자분탐상시험, 침투탐상시험, 전자유도시험 등이 이용되고 있고, 내부균열의 검출에, 방사선투과시험이나 초음파탐상시험이 주로 이용된다. 여기서는 표면균열과 내부균열의 정량적 측정에 이용되는 초음파 탐상시험의 여러가지 측정기법과 그 밖의 몇 가지 비파괴시험에 의한 균열크기 측정법을 소개하고자 한다.

2. 초음파에 의한 균열의 검출과 크기의 측정

초음파 탐상시험법은 여러가지 비파괴시험법 중에서 표면 및 내부균열의 검출에 우수한 시험법이므로 원자력플랜트를 비롯한 각종 구조물의 잔여수명이나 안전성 평가를 위한 시험법으로 활용되고 있다. 여기서는 초음파를 이용하여 구조물이나 기기류를 검사할 때 균열의 검출성과 균열의 크기측정 원리에 대해 검토해

보겠다.

2.1 균열의 검출

초음파 탐상시험에 의한 균열검출법에는 수직법, 사각법, 표면파법, 판파법 등이 있다. 이것에 대한 기본적인 탐상방법에 대해서는 이미 잘 알고 있는 일이므로 설명을 생략하고 여기서는 균열의 검출성을 향상시키기 위한 방안 및 유의할 점에 대해 말하고자 한다.

(1) 수직법

수직법에서는 종파가 주로 이용되는데 종파는 입자의 진동방향이 파의 진행방향과 같은 (즉 균열면에 직각) 방향이므로 밀착된 균열은 통과하기 쉽고 반사율이 낮기 때문에 에코우가 작아 검출하기 어렵다. 그러나 횡파일 경우 입자의 진동방향이 균열과 평행하기 때문에 균열면이 밀착되어 있어도 비교적 반사가 잘 일어나므로 에코우가 크고 검출이 쉬워진다. 따라서 시험면에 평행한 내부균열의 검출성은 횡파수직법이 효과적이라 할 수 있다.

과거에는 횡파수직법이 강도가 낮아 별로 실용화되지 않았지만 최근 횡파용 고감도 탐촉자가 개발되었고 접촉매질도 좋은 것이 만들어져서 실용화되고 있다.

균열의 검출성을 향상시키기 위해 에코우의 SN(신호대 잡음)비를 높일 필요가 있다. I.N. Ermolov⁽¹⁾ 등에 의하면 균열에코우의 SN비는 원거리음장에서 다음 식의 관계를 가진다.

$$\frac{S}{N} = \frac{2s}{\lambda^2 x} \sqrt{\frac{2\pi A}{\alpha \cdot C \cdot I}}$$

- 여기서 S : 균열에코우의 높이
 N : 잡음에코우의 높이
 s : 균열의 면적
 λ : 초음파의 파장
 x : 초음파의 비임행정
 A : 진동자의 면적
 α : 감쇠계수
 C : 초음파의 음속
 I : 초음파 펄스의 폭

이다. 윗 식에서 SN비를 크게 하면 균열의 검출성이 높아지므로 다음과 같은 점에 유의하지 않으면 안 된다.

(가) 펄스폭이 좁은 초음파를 사용한다. 고분해능을 가지고 광대역주파수특성을 가진 탐촉자를 사용한다.

(나) 큰 진동자 즉 지향각이 좁은 탐촉자를 사용한다. 비임폭이 좁은 것을 쓰면 SN비가 좋아진다.

(다) 감쇠계수가 작은 피검사체에서는 될 수 있는대로 짧은 파장 즉 높은 주파수의 초음파를 사용한다.

(라) 비임행정을 가능하면 짧게 잡아 탐상한다. 더 말할 필요도 없이 균열면에 될 수 있는대로 초음파 비임을 수직하게 입사시키는 것이 검출성을 향상시킬 수 있다.

(2) 사각법

사각법에서는 일반적으로 횡파를 사용한다. 횡파는 진동방향이 표면에 평행한 SH파와 이것과 직각방향으로 진동하는 SV파로 나누어 생각할 수 있다. 보통 사각법에는 SV파가 이용되고 있지만 표면으로 개방된 균열인 경우 비임의 입사각에 따라 균열 끝에서 종파나 표면파로 모드변환이 일어나 반사손실이 생기므로 균열검출성이 나빠질 때가 있다. 이 때 SH파를 사용하게 되면 모드변환이 없고 반사손실이 적으므로 비임의 입사각에 따라 SV파를 사용할 때보다 균열검출성이 좋아진다.

(3) 표면파법

표면으로 개방된 균열을 검출할 때는 표면파를 사용하는 것이 좋다. 이 방법에는 1탐촉자에 의한 반사법과 그 탐촉자에 의한 투과법이 있다. 반사법을 사용할 경우 균열높이가 크다고 해서 반드시 에코우의 높이가 커지지 않는다는 점에 유의하여야 한다. 그리고 표면파법에서는 투과법이든 반사법이든 어느 경우에도 목적에코우 이외에 모드변환에 의한 에코우 등 다수의 에코우가 나타날 경우가 있으므로 에코우의 판별에 주의하지 않으면 안 된다. 또 균열속에 기름 등이 스며들었을 때 반사율이나

투과율이 크게 변화하기 때문에 주의해야 한다.

2.2 균열의 크기 측정

초음파 탐상시험에 의한 균열의 크기 측정에 대한 연구^(2~4,11)가 국내외적으로 많이 이루어지고 있으며 실험실 단계에 있는 것에서부터 실용 가능한 것까지 여러 가지 방법이 제안되어 있다.

여기서는 균열의 크기 중에서 특히 강도평가에 중요시되는 균열의 높이(두께방향의 균열크기) 측정법에 의해 측정정밀도, 문제점 및 적용상 유의할 사항에 대해 간략히 논의하겠다.

(1) 표면으로 개방된 균열의 크기

(가) 표면파의 전파시간을 이용하는 방법

그림 1과 같이 균열을 사이에 두고 양쪽에서 표면파의 송수신용 탐촉자를 마주보게 배치한다음, 송수신사이에 요하는 시간과 균열높이 사이에 비례관계가 있는 것을 이용하는 방법이다.⁽⁹⁾

실험실적으로 $\pm 0.5\text{mm}$ 의 오차를 측정 가능하다. 그러나 균열틈에 기름과 같은 액체가 들어 있다든가 압축응력이 작용할 경우, 또는 균열끝이 아주 예리할 경우에는 표면파가 균열끝쪽을 돌아가지 않고 통과하게 되어 측정이 어려울 때도 있다.

(2) 회절파법^(2,3,5)

그림 2에 나타난 바와 같이 초음파가 매질과 균열의 경계면으로 입사될 때 입사된 초음파는 계면에서 일부 반사되고 균열표면의 거칠기의 영향을 받아 일부 산란되며 일부는 균열 양쪽 가장자리에서 회절한다. 균열 끝에서 회절하는

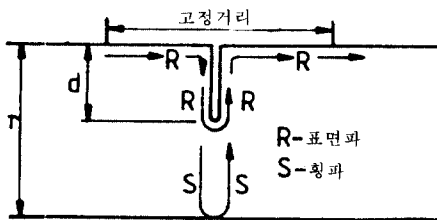


그림 1 표면파법

현상을 이용하여 균열의 높이를 측정하는 것이 이 방법이다. Bottcher⁽⁵⁾ 등이 제안한 방법으로 그림 3(a)와 같이 두 개의 탐촉자를 간격 d 로 마주보게 놓고, 탐촉자 T_r 로부터 횡파나 종파를 입사시켜 균열 끝쪽에서 회절하게 하고 그 회절파를 탐촉자 R 로 수신한다. 이 때 거

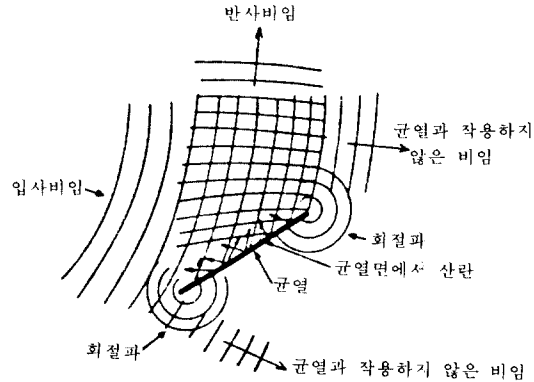


그림 2 균열과 초음파의 상호작용

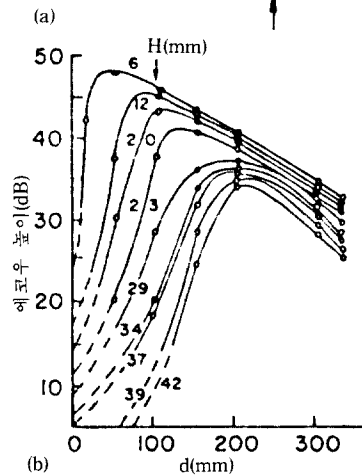
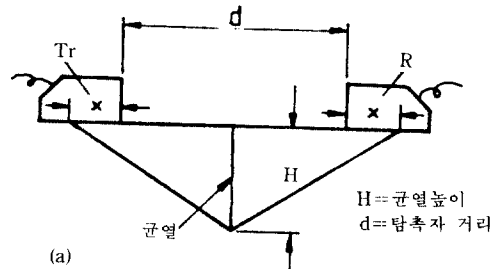


그림 3 회절파법

리 d 와 에코우높이와 균열높이 H 사이에 그림 3(b)와 같은 관계가 있으므로 에코우 높이와 d 로부터 균열높이를 구할 수 있다. 이 방법은 굴절각이 $60^\circ \sim 70^\circ$ 인 종파를 사용할 때 적용성이 좋다. 실험실적으로 $\pm 0.3\text{mm}$ 의 측정정밀도를 가진다. 그러나 이 방법은 탐촉자의 접근한계거리에 따라 제한을 받기 때문에 균열높이가 $3 \sim 4\text{mm}$ 이상이어야 적용할 수 있다.

앞에 설명한 방법 이외에 종파-횡파 모드변환법, 수직 2탐촉자법, 균열끝 에코우간섭법 등이 있으나 여기서는 설명을 생략한다.

(2) 내부균열의 크기

(가) dB drop법

그림 4와 같이 전후주사를 하여 최대 에코우 높이로부터 De dB 낮아질 때 비임행정의 차 ($x_2 - x_1$)와 굴절각 θ 로 균열높이 H 를 구하는 방법이 있다. 보통 De 값으로 6dB, 10dB, 또는 20dB를 사용한다. 균열의 크기, 형상, 기울기, 표면거칠기 등에 따라 적절한 De 값이 있을 것이므로 미리 실험으로 적당한 De 값을 구해 놓는 것이 바람직하다. 이 방법은 균열면에 대해 수직으로 비임을 입사시켰을 때에는 정확도가 좋지만 5° 이상의 기울기를 가지면 그림 2에 보인 바와 같이 반사가 균열 끝쪽에서 생겨 이 에코우로 인해 평가하려는 균열면의 정보가 얻어지지 않으므로 정확도가 크게 떨어진

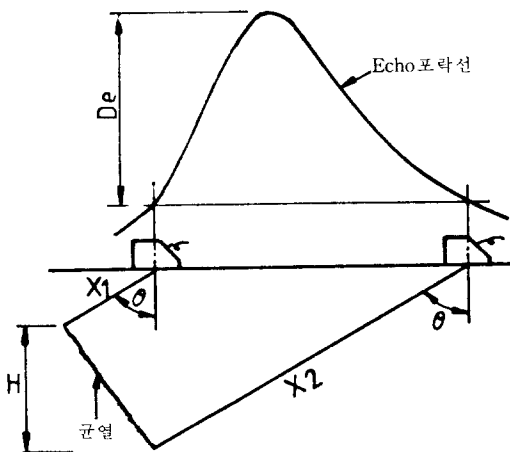


그림 4 dB drop법

다⁽⁴⁾. 이 같은 경우에는 탐촉자의 지향각을 미리 측정해 두는 것이 바람직하다. 이 방법은 ASME Code, Section V, Article IV 등⁽⁷⁾ 여러 공업규격에서 채택하고 있으나 균열높이가 비임폭보다 작을 때에는 균열이 크게 평가되는 경향이 있다. 그러나 균열높이가 비임폭보다 크고 균열면에 수직하게 비임이 입사할 경우 측정정밀도가 높다.

(2) DGS 도표법⁽⁸⁾

이상적인 형태의 결함인 원형평면결함에 초음파가 수직으로 입사할 때, 비임행정거리 (distance), 반사에코우의 크기 (gain), 결함의 크기 (size)와의 관계를 도표화한 것이 DGS도표이다. 이 도표를 이용하여 균열의 높이(등가 원형평면의 직경)를 구하는 방법을 DGS (AVG)법이라 한다. 이 방법은 균열이 비임중심축에 수직한 원형평면 균열로 가정했을 때의 크기 측정법이며 이와 같은 조건을 만족하는 두꺼운 판이나 단강품의 미압착균열에 대해서는 아주 정확히 측정할 수 있지만 용접부의, 사각탐상에서는 대체로 과소평가 되는 경향이 있어 주의하여야 한다⁽⁶⁾.

BS 3923, part 2에서 이 방법을 채택하고 있지만 사용탐촉자의 비임모양, 주파수, 진동자의 크기가 오차에 영향을 미치므로 이 방법을 사용하기에 앞서 탐촉자의 특성을 확인해 두지 않으면 안 된다.

이 이외에 내부 균열크기를 측정하는 방법으로 균열 끝에코우법⁽¹¹⁾, 모드 변환 회전 표면파법, Tandem법, 평가 Level법, 유효비임법, 주파수분석법 등 다수 있지만 설명을 줄인다.

3. 방사선에 의한 균열크기의 측정

방사선투과시험은 초음파 탐상시험에 비해 균열검출성이 떨어지므로 균열의 검출목적으로 주로 사용하지 않지만 필름에 나타난 균열상을 직접 확인할 수 있는 장점이 있어 초음파 탐상시험으로 측정된 결과를 확인하고자 할 때 이용될 경우가 있다. 여기서는 방사선 투과시험

에 의한 균열의 검출성에 관한 문제는 생략하고 초음파 탐상시험에 의해 측정된 균열의 높이와 균열의 단면길이를 방사선 투과시험으로 확인하는데 이용되는 세 방향 촬영법을 소개하고자 한다.

3.1 3방향 촬영법

그림 5와 같이 균열이 재료의 두께방향으로 놓여 있는 것이 확인되었을 때 다음과 같은 방법으로 세 장의 투과사진을 촬영하여 분석한다.

(1) 그림 5와 같이 균열의 길이방향의 중심을 지나고, 길이방향에 직각으로 그리고 시험면의 표면에 세운 법선과 이룬 각이 $0^\circ, \pm\theta^\circ$ 로 세 방향에서 방사선을 조사하여 세 장의 투과사진을 얻는다. θ 값은 균열에 의해 10° 이하로 하며 5° 정도가 좋다.

(2) 세 장의 투과사진이 얻어진다면 균열의 길이방향의 상에서 그 중심부분의 상의 폭을 측정한다. 이 때 세 장의 필름을 겹쳐 놓고 같은 지점의 상의 위치를 표시해 두면 편리하다. 균열이 기울어져 있을 때 조사방향에 따라 균열상의 폭이 그림 5와 같이 달리 나타나게 된다. 만약 균열의 길이가 길거나 필름에 나타난 균

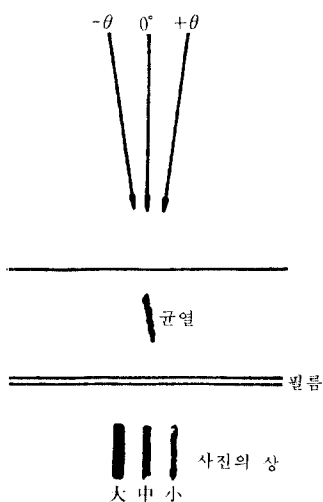


그림 5 세 방향 촬영법

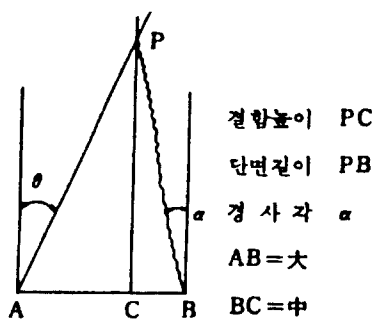


그림 6 그림에 의한 균열높이의 측정

열상의 폭의 변화가 클 경우에는 몇 개의 지점으로 나누어 높이를 측정하는 것이 좋다. 세 장의 필름에서 측정한 균열상의 폭이 제일 큰 것을 $大(W_r)$, 다음을 $中(W_m)$, 제일 작은 것을 $小(W_s)$ 라 하면 균열의 높이를 알아낼 수 있다.

(3) 그림을 그려 균열높이를 구할 수 있다. 그림 6과 같이 AB 를 제일 큰 균열상의 폭으로 맞추어 놓고, BC 를 중간크기의 균열상의 폭으로 한다. A 에서 각 θ 의 방향으로 직선을 긋고, C 점에 세운 수선과 만나는 점을 P 라 하면 그림에서 균열높이 H 는 PC , 단면길이는 PB , 경사각은 α 가 된다.

(4) 다음 식으로 계산하여 균열높이(H)를 구할 수 있다.

$$H = \frac{W_L - W_M}{\tan \theta}$$

이 방법을 적용할 때에는 균열상이 필름에 뚜렷이 나타나도록 촬영하여야 하며 촬영하기 전 미리 균열의 위치와 배향을 알고 방사선의 조사각도를 정확히 맞추지 않으면 안된다.

4. 그 밖의 비파괴시험법에 의한 균열의 검출

4.1 자분 탐상시험에 의한 균열의 검출

자분 탐상시험은 강자성재료의 표면 부근에 있는 균열을 검출하는데 널리 쓰이는 감도 높은 시험법으로 자화된 금속의 표면부근에 균열

이 존재할 때 누설자속이 나타나고 이 자속을 검출해서 균열의 존재를 알아내는 방법이다.

이 시험법은 피시험체의 자기적 성질 자화강도, 자분의 종류, 피시험체의 표면상태 등에 따라 검출성이 달라지지만 공업적으로 생각할 때 0.5mm 이상의 균열이면 검출할 수 있다고 본다.

4.2 침투탐상시험에 의한 균열의 검출

침투 탐상시험은 표면으로 개방되어 있지 않은 균열은 검출할 수 없으므로 그 검출성은 표면상태에 크게 영향을 받게 된다. 균열틈에 기름이 묻어 있거나, 개구부에 녹이 슬고 스케일 등이 붙어 있으면 검출되지 않는다. 그러므로 이들 방해요인을 제거하는 작업을 완전히 하지 않으면 안된다. 자분 탐상시험에 비해 검출성이 좀 떨어지지만 비자성 재료에 널리 적용되고 있다.

그 밖의 비파괴시험법으로 음향 방출시험을 비롯하여 금속재료의 표면개구균열의 높이 측정법에 쓰이는 누설자속 측정법, 전기저항 측정법, 전자유도 시험법 등이 있고 양전자 소멸을 이용한 미세균열 탐지법⁽¹⁰⁾도 시도되고 있으나 아직 표준화되지 못한 실정이다.

5. 맺 음 말

지금까지 몇가지 균열검출법 및 크기의 측정법에 대하여 개요, 문제점, 정량적 측정에 유의해야 할 점을 살펴보았다. 아직 어느 방법도 모든 균열에 적용할만큼 완전한 방법은 없지만 적용범위와 유의사항을 이해하고 측정대상에 맞는 방법을 올바르게 적용한다면 목적에 부합하는 결과를 얻을 것으로 본다.

기구나 구조물의 파괴원인을 정확히 규명하고 잔존수명을 정확히 예측하여 파괴를 방지하려면 재료의 강도특성이나 파괴역학적 해석법의 연구에 못지 않게 비파괴적 균열검출법과 정량적 측정법에 관한 연구도 깊이 이루어져야 하리라 믿는다. 그러나 아직 우리나라에서는 이 점에 미흡함이 많다. 더 나은 측정방법을 고안해 내고, 측정장치를 개발하여 균열에 대한 정보의 정확성을 높여 구조물의 안전성 평가의 신뢰성을 향상시킬 수 있는 연구가 활발히 진행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- (1) I.N. Ermolov & B.P. Pilin; NDT Inter., (1976. 12), p. 275.
- (2) 이재옥 외 2, 1988, 비파괴검사, Vol. 7, No. 2, pp. 35~41.
- (3) 정현규 외 2, 1988, 비파괴검사, Vol. 7, No. 1, pp. 42~50.
- (4) 小倉, 1978, 非破壊検査, Vol. 27, No. 2, pp. 118~119.
- (5) B. Bottcher, etc., 1975, proc. 7th Int. Conf. on NDT.
- (6) T. Fujimori, 1976, proc. 8th WCNDT, 2B.
- (7) ASME Code, Section V, Article IV.
- (8) BS 3923, Part 2.
- (9) R.J. Hudgel etc., 1974, Brit. J. of NDT, Sep. pp. 144~149.
- (10) 박용기, 1986, 측정표준, Vol. 9, No. 3, pp. 8~16.
- (11) 小倉, 1978, NDI資料, No. 2710, pp. 144~152.

