

## 초음파 결함 크기 측정 기법 Ultrasonic Flaw Sizing Techniques

박 문 호\*  
 Moo Ho Park\*

초 록 원전의 열성취화 현상으로 발생하는 열 피로균열 및 입계응력부식균열(IGSCC) 등과 같은 결함에 대해서 검사자의 특별한 관심과 노력 없이 초음파를 이용해 이러한 종류의 결함 검출 및 크기 측정이 쉽지 않다. 이러한 결함의 검출 및 크기 측정을 위해서 먼저 초음파 모드 변환 기법을 사용하여 결함 검출 및 결함 크기를 분류한 후에 결함 끝단에서의 초음파 회절파(tip diffraction)를 이용한 여러 가지의 초음파 기법 등으로 정확한 결함 크기를 측정하여 가동전·중점검시 발견된 결함의 추적 관리 및 결함 평가 신뢰도 향상에 기여하고자 한다. 따라서, 여기서는 열 피로균열 및 입계응력부식균열 등과 같은 결함의 정확한 검출 및 크기 측정을 위해 초음파 모드 변환 기법의 특성을 철저히 이해하고 이에 관련된 초음파 신호들을 정확히 구분할 수 있는 방법을 기술하였다.

### 1. 서 론

원전의 열성취화 배관에서 발생하는 열 피로균열(1) 및 오스테나이트 스테인레스강 용접부위 근처의 열영향부 (heated affected zone: HAZ)에서 응력(stress), 환경(environment) 및 예민화(sensitization)의 상황 아래서 발생하는 입계응력부식균열(intergranular stress corrosion cracking: IGSCC)은 용접부 루트 근방에서 불규칙한 크랙 형태로 발생하기 때문에 용접부 루트에 가까우면 가까울수록 용접부 루트 및 counterbore와 같은 다른 지시들로부터도 구분하여 결함 검출하기가 힘들다(2). 특히, 이러한 입계응력부식균열의 위치 및 형상은 배관 직경과 잔여 응력에 영향을 받는다. 즉, Fig. 1에 표시된 것과 같이 배관의 직경이 작고 두께가 얇을수록 균열은 크게 벌어지고 용접부 루트에서 멀리 위치하여 발생하고, 상대적으로 배관의 직경이 크고 두꺼울수록 균열이 작게 벌어지고 용접부 루트 근처에 가까이 위치한다.

이러한 입계응력부식균열은 균열의 벌어진 정도에 따라 초음파 빔을 투과시킬 수 있으므로 결함 검출에 특

별한 주의가 요구되며, 이미 검출된 균열 결함은 시험체 표면에서부터 열려있는 결함이므로 본 고에 기술된 초음파 모드 변환 기법 및 균열 결함 선단의 회절파를 이용하여 결함의 높이를 정확히 측정할 수 있다. 그러나, 오스테나이트 스테인레스강의 용접부위는 열영향부 및 용접부의 조직 이방성과 화학성분(composition) 때문에 초음파 빔의 진행 방향을 변경시켜 용접부 루트 등으로부터의 초음파 빔의 반사 신호를 실제 결함으로 잘못 평가할 수 있는 거짓 지시를 발생(3)시키므로 초음파의 진행 시간과 용접부위의 특성을 잘 파악하여 정확한 분석하여야 한다.

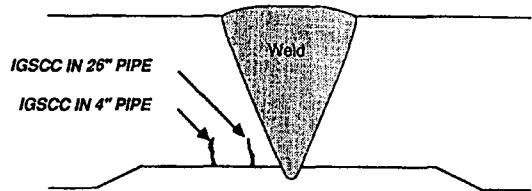


Fig. 1 Relative location of IGSCC for different pipe diameter

2. 결함 검출 및 크기 측정

결함의 특성은 결함의 위치, 방향 및 크기에 따라 결정되므로 시험체의 재질 및 두께에 따라 적절한 탐촉자를 선택하여 결함을 검출한 후에 다음과 같은 여러 가지의 초음파 평가 방법(4)을 이용하여 정확한 결함 크기 및 특성을 분석한다.

2.1. 신호 진폭에 의한 측정 방법 (Amplitude-Based Method)

초음파신호 진폭의 크기에 근거한 결함 크기 측정 방법(일명 dB drop method)은 일반적으로 미국의 ASME Section V 및 Section XI의 가동중점검 (inservice inspection)에 주로 사용되어 왔다. 이 방법은 결함 크기를 결함으로부터 반사된 초음파신호 크기와 Fig. 2와 같이 초음파신호의 설정 레벨(최고

신호 높이로부터 아래로 6dB, 20% DAC 또는 50% DAC)까지 검사체 표면을 따라 움직인 이동 거리를 다음의 간단한 관계 식 (1)으로부터 결함 크기를 계산한다.

$$H = (x_2 - x_1) \cos \theta \dots\dots\dots (1)$$

여기서, H는 결함의 깊이 방향 높이(through wall dimension),  $\theta$ 는 시험체 표면에서의 탐촉자 굴절각(angle of refraction) 및  $(x_2 - x_1)$ 은 빔 노정거리(metal path)의 차이를 나타낸다. 이 방법은 실제 결함으로부터의 초음파 반사신호가 반사체 결함면의 거칠기, 기울기, 결함을 구성하고 있는 재질의 음향 임피던스, 사용 탐촉자의 굴절각, 주파수 및 크기에 따라 측정의 변화가 있으며, 결함이 한 점(one point)이라 할지라도 탐촉자 이동거리는 초음파 빔의 유한한 폭 때문에 영이 되지 않는다(5).

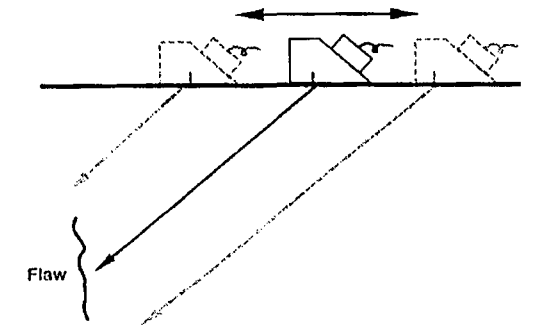
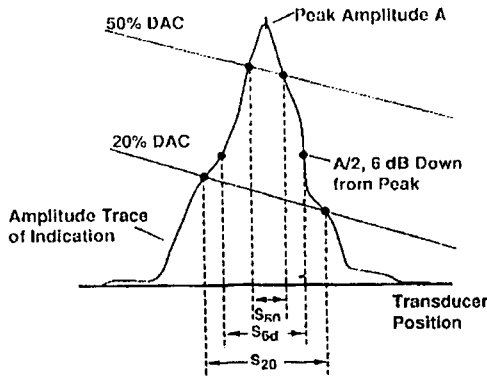


Fig. 2 Illustration of various dB-drop sizing method

2.2. 초음파 모드 변환(30-70-70)을 이용한 방법

이것은 70° 종파(L-wave)를 발생시키는 한 개 탐촉자로부터 Fig. 3과 같이 횡파, 종파 및 creeping wave를 발생시켜 결함의 깊이를 시험체의 내면 (inside diameter: I.D.)에서부터 외면(outside diameter: O.D.) 방향 즉 검사체의 표면 방향으로 shallow, mid-wall 및 deep 크기로 분류하여 평가할 수 있는 방법이다.

이 방법은 Fig. 4와 같이 횡파 30°의 초음파 빔이 시

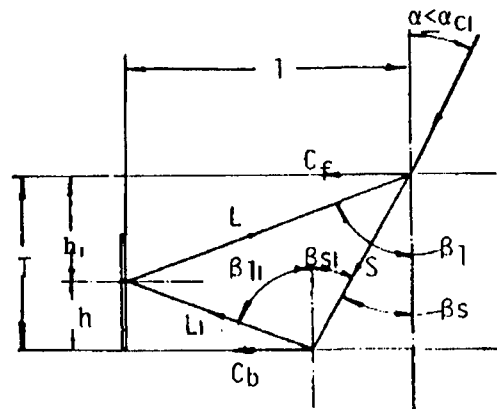


Fig. 3 Scheme of ultrasonic field in a test specimen

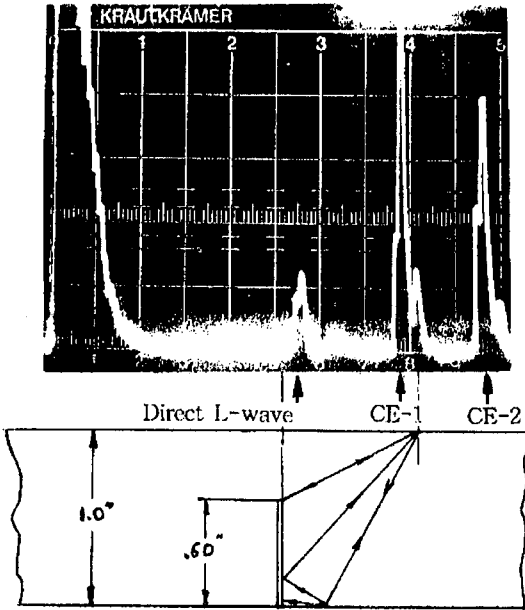


Fig. 4 CE-1 and CE-2 signals of a 60% thickness notch from I.D

험체 내면에서 반사되면서 발생하는 70° 종파를 사용하여 결함 검출 및 크기 측정에 사용한 것을 CE-1(collateral echo-1), 횡파 30° 발생 때에 생기는 direct 종파 70°에 의해 발생하는 신호를 direct L-wave, 시험체 내면을 따라 진행된 creeping wave에 의해 발생된 신호를 CE-2로 표기하였다. 이들 신호를 결함 검출 및 크기 측정에 사용하기 위해 먼저 탐촉자를 보정시험편 가장자리 모서리 부분에 가까이 놓고 CE-1과 CE-2 신호가 최대가 되도록 조정후 탐촉자를 보정시험편의 모서리로부터 멀리 움직이면 CE-1 신호와 CE-2 신호가 진폭 크기만 작아지면서 같이 움직

인다. 이때 탐촉자를 적당히 움직여 CE-1과 CE-2 신호를 화면의 시간 축에 각각 5~6 눈금과 8 눈금에 맞춘다. 이렇게 하여 시험편의 노치 크기 즉 깊이별 신호를 평가하면 시험체 내면에서부터 shallow 노치 깊이에서 대하여서는 CE-2 신호만 검출되어 초음파 화면상에 나타나고, mid-wall 노치 깊이에 대해서는 CE-1과 CE-2 신호가 초음파 화면상에 같이 나타나며, deep 노치에서는 direct L-wave, CE-1 및 CE-2 신호 모두 초음파 화면상에 나타난다. 따라서, 30°-70°-70° 모드 변환 기법으로 결함의 존재 여부 뿐만 아니라 결함의 크기도 대략적으로 시험체 두께의 백분율로 분류할 수 있다. 그러나, 이 방법은 시험체의 내면이 상대적으로 외면과 평행이 되어야하며, 신호가 기대했던 CE-2 빔 노정거리의 약 1.6배에서 나타나면 내면에서 creeping wave가 발생하지 않는다(6).

2.3. 결함 선단 회절에 의한 방법 (Tip Diffraction Method)

30°-70°-70° 방법으로 검출된 대략적인 결함 크기를 정확하게 측정하기 위하여 균열 결함의 저면(base) 모서리와 선단의 회절 반사 신호를 이용하여 결함의 크기를 측정하는 방법(7,8)으로 PATT(pulse arrival time technique)와 SPOT(satellite pulse observation technique)이 있다.

2.3.1. PATT 또는 Pulse Absolute Transit Time

이 방법은 횡파와 종파 모두 사용할 수 있으며, 크랙의 저면 모서리에서 반사된 신호와는 관계없이 Fig. 5와 같이 균열 선단의 회절 신호만을 화면에 위치시켜 상대적으로 결함 크기를 평가(9)하는 것이다. 이

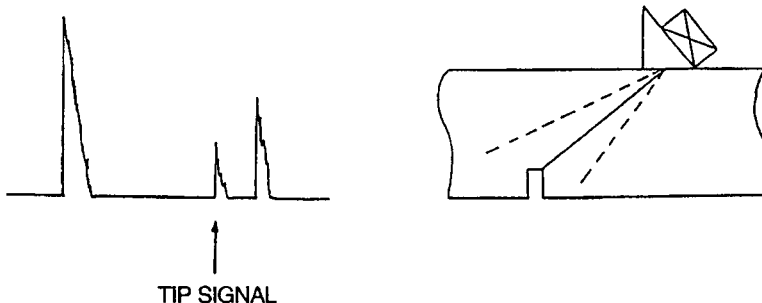


Fig. 5 Pulse arrival time technique

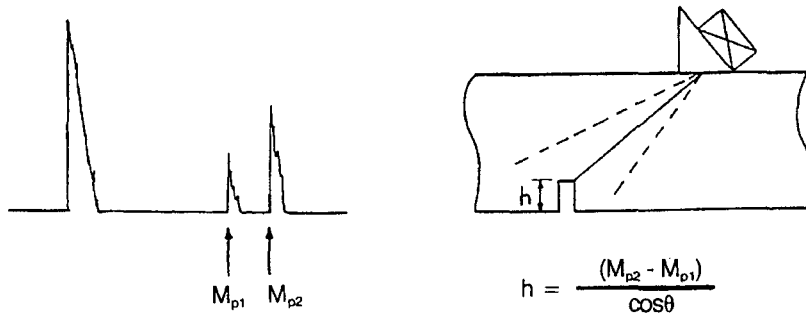
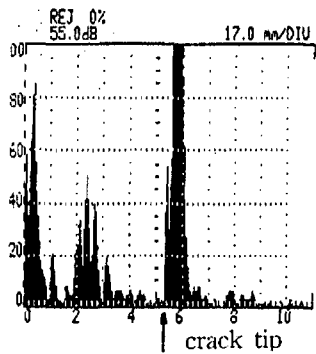
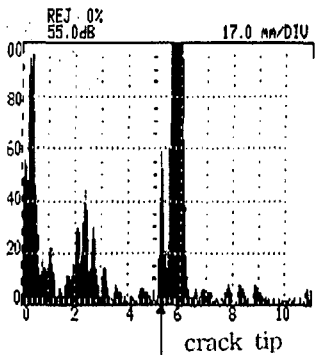


Fig. 6 Satellite Pulse Observation Technique



a) notch height from I.D. : 4 mm



b) notch height from I.D. : 6 mm

Fig. 7 Example of SPOT (45° shear wave)

것은 보정시험편(Calibration Block)에 가공된 각각의 노치로부터 얻은 결함 선단 회절 신호를 장비 화면에 미리 설정해 둔 상태에서 결함 신호 위치를 비교 확인함으로써 결함 크기를 평가한다.

### 2.3.2. SPOT 또는 Relative Arrival Time Technique

이 방법은 Fig. 6과 같이 균열 결함의 저면 모서리 반사 신호 및 선단 신호의 초음파 빔 노정거리 즉 시간 지연의 차이를 이용해 균열 크기를 평가[10, 11]하는 것으로 보정시험편의 노치 깊이(시험체 두께의 10%~90%) 변화에 따라 발생된 균열 결함 저면 모서리와 선단까지 거리 즉 지연시간의 차이를 측정하는 것으로 두 신호간의 시간 차이가 크면 클수록 결함 크기가 크다는 것을 Fig. 7에서 잘 보여주고 있다. 이와 같이 결함 선단과 모서리 사이 신호의 간격(separation)을 이용하여 결함의 크기를 평가하는 방법이다. 따라서, SPOT 방법은 초음파의 감쇠가 심한 스테인레스강에는 적용하기가 곤란하나 감쇠가 적은 탄소강에는 SPOT과 PATT 방법 모두를 사용할 수 있다.

### 2.3.3. HALT (High Angle Longitudinal Wave Technique)

이 방법은 Fig. 8에서 보는 바와 같이 입사각이 큰 70° 종파, 60° 종파 및 외면 creeper 85° 탐촉자를 사용해서 시험체 두께의 50% 이상되는 크기의 deep 균열

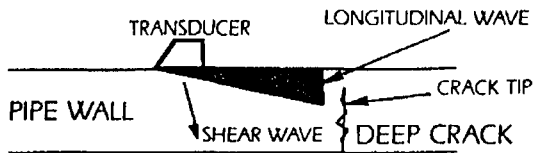


Fig. 8 High angle longitudinal wave technique

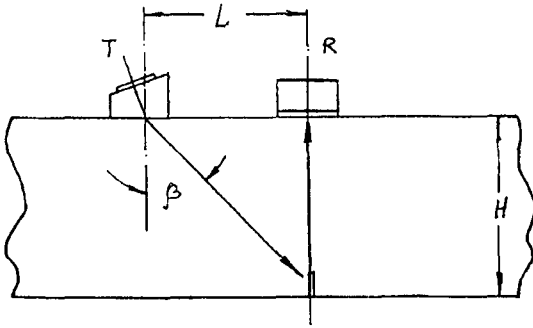


Fig. 9 Scheme of delta technique

결합 평가에 효과적인 방법[12]으로서 step wedge block를 이용하여 0.25", 0.5" 및 0.75"의 거리에서 결합 선단 신호를 검출하여 실제 균열 결합 신호와 비교하여 평가한다.

2.3.4. 델타(Delta) 방법

이 방법은 결함의 위치를 알고 있을 때 Fig. 9와 같이 고주파수의 송신용 사각 탐촉자와 수신용 수직 탐촉자를 사용하여 적용하는 기법으로 원리는 PATT와 동일한 방법[12]이다. 이것은 시험체의 외면에서부터 결함의 깊이가 깊을수록 높은 진폭을 나타내며 종파 및 횡파 사용도 가능하다.

2.3.5. TOFD(Time of Flight Diffraction) 방법

이 방법은 신호 진폭으로 결함 크기를 측정하는 것이 아니라 송수신 탐촉자를 이용하여 Fig. 10과 같이 한 방향에서 초음파를 송신하고 다른 방향에서 균열 결합

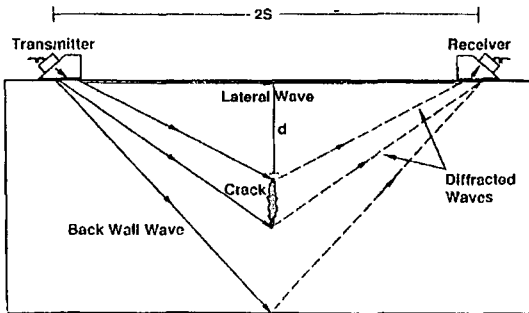


Fig. 10 Typical time of flight diffraction method

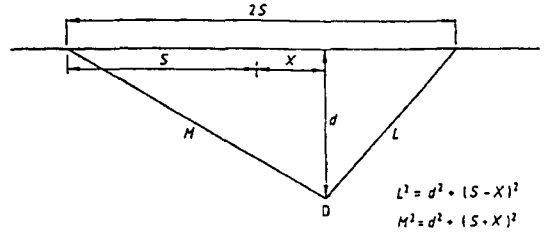


Fig. 11 Generalized geometry of the time of flight diffraction method

선단 신호를 수신하여 Fig. 11과 같이 초음파 빔의 진행시간(time of flight)과 송신 탐촉자와 수신 탐촉자 사이의 떨어진 거리를 이용하여 간단한 기하학적인 관계식 (2)-(4)에 의해 결함 높이를 측정[13,14]한다.

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

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

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

여기서, C는 초음파 속도, d는 시험체 표면 아래의 결함의 깊이, X는 두 탐촉자 사이의 중간 지점에서부터 균열 선단까지의 변위이다. 이 방법은 결함의 방향성이나 사용 탐촉자의 굴절각에 영향을 적게 받으므로 결함 검출이나 크기 평가에는 일관성이 있으나 결함 선단 회절파의 신호 진폭 크기가 작기 때문에 감쇠가 심한 재질이나 반사파가 지배적인 체적 결함에 대해서는 제한이 따른다.

2.3.6. MOST(Multipulse Observation Sizing Technique)

이 방법은 Fig. 12와 같이 탠덤(tandem) 탐촉자 또는 ADEPT-60 (Advanced Dual Element Probe Technology-60)과 같은 특수 탐촉자를 사용하여 결함 선단으로부터의 direct L-wave(direct L-wave from the notch tip), 횡파에 의해 모드 변환된 L-wave(S-L-L wave from the notch face) 및 ID creeping wave에 의해 모드 변환된 S-wave(S-C-S wave from the notch opening)를 수신하여 결함의 크기를 측정하는 것으로서 결함 선단 신호와 잡음의 비가 상당히 좋다.

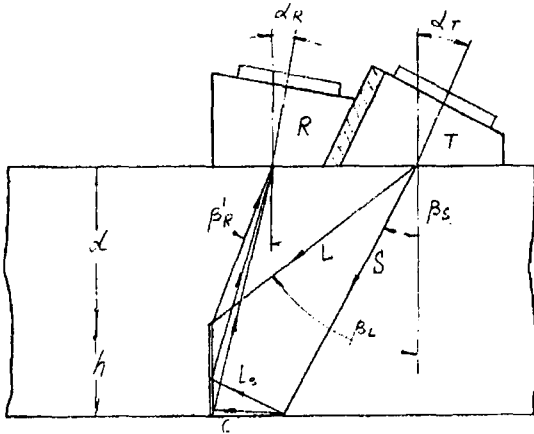


Fig. 12 The tandem transducer testing technique

### 3. 결 론

열성층화 배관의 열 피로균열 및 입계응력부식균열과 같은 결함은 먼저 30-70-70 초음파 모드 변환 기법을 사용하여 균열 결함 크기를 개략적으로 shallow, mid-wall 및 deep 크기로 분류한 후에 결함의 크기 및 특성에 따라 여러 가지의 다른 초음파 기법 등으로 결함 크기를 정확히 측정하는 것이 바람직하다. 또한, 이러한 여러 가지 초음파검사 기법들은 실증을 통해 ASME 코드에서 요구하는 dB drop 방법 외에 정확한 결함 크기를 측정할 수 있는 대체 방법으로서의 역할을 할 수 있도록 지속적인 노력과 기술 확립에 관심을 가져야 할 것이다.

### 후 기

본 고는 과학기술부 원자력증장기 연구개발(과제명 : 가동원전 엔지니어링 서비스 기술개발)의 일환으로 수행된 것입니다.

### 참고문헌

[1] 심철무 외 3명, "원전배관(ECCS)의 열성층화 감시 기술 개발", KAERI/RR-1399/93, (1994)  
 [2] Yingda Zhang, E. R. Dykes and Marvin F. Fleming, "IGSCC detection and classification using the Intraspect/98 ul-

trasonic imaging system", Amdata, Inc., (1987)

[3] Handbook on the Ultrasonic Examination of Austenitic Welds, The American Welding Society, (1986)  
 [4] Yukio OGURA, "Height determination studies for planar defects by means of ultrasonic testing", The Non Destructive Testing Journal, Japan Vol. 1, No. 1, pp. 38-45, (1983)  
 [5] Accuracy of Ultrasonic Flaw Sizing Techniques for Reactor Pressure Vessels, EPRI NP-6273, (1989)  
 [6] UT Operator Training for Detection of Intergranular Stress Corrosion Cracking (IGSCC), EPRI TM 910A, (1992)  
 [7] S. Golan, "Optimization of the crack tip ultrasonic diffraction technique for sizing of cracks", Materials Evaluation/39, (1981)  
 [8] M. G. Silk, "Defect sizing using ultrasonic diffraction", British Journal of NDT, (1979)  
 [9] UT Operator Training for Planar Flaw Sizing, EPRI NDE Center  
 [10] 정현규 외 2명, "초음파의 tip diffraction 방법을 이용한 결함연속감시를 위한 크기 평가", 비파괴검사 제7권 제 1호, pp. 42-50, (1987)  
 [11] G. J. Gruber, G. J. Hendrix, and W. R. Schick, "Characterization of flaws in piping welds using satellite pulses", Material Evaluation/42, (1984)  
 [12] Nondestructive Testing Handbook, Vol. 7, Ultrasonic Testing, (1991)  
 [13] British Standard, "Guide to calibration and setting-up of the ultrasonic time of flight diffraction(TOFD) technique for the detection, location and sizing flaws", BS 7706, (1993)  
 [14] M. G. Silk, "Changes in ultrasonic defect location and sizing", NDT International Vol. 21, Number 1, (1987)