논 문

비 파 괴 검 사 학 회 지
Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing
Vol. 15, No. 1 (1995)

선추적기법을 활용한 오스테나이트계 스텐레스강 용접부 초음파탐상 모의

이 삼래, 임 형택, 박 치승, 김 병철
한국원자력연구소

요 약 원자력 발전소의 주요 계통 재료로 사용되는 오스테나이트계 스텐레스강에 대한 초음파탐상은 초음파 에너지가 전파될 경우 재질 자체가 갖는 여러 문제점으로 인하여 결함 위치나 크기 측정에 많은 문제점을 야기한다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 이해하기 위하여 여러가지 경우를 가정하여 선 추적(ray tracing) 기법을 사용한 컴퓨터 모의(simulation)를 실시하였다. 우선 종파를 사용하여 모재에 초음파가 입사하여 진행할 시 어느정도의 휘어짐이 발생하는지를 계산하였으며 재질 특성상 용접부와 모재가 큰 차이를 보이지 않는 경우와 원자로 노즐 부위와 같이 서로 다른 금속으로 용접된 경우에 결함이 존재한 경우를 가정하여 계산하였다.

1. 서론

원자력발전소의 구조물 및 계통의 재료로 많이 사용되고 있는 오스테나이트계 스텐레스강에 대한 초음파탐상은 초음파 에너지가 이들 매질내를 전파될때 재질 자체의 조악한 입자 분포에 의해 많은 산란에 따른 높은 감쇄를 가져와 결함으로부터 반사 에코의 측정이 대단히 어렵게 된다.

이와 관련해서는 특히 일차계통의 냉각재계통 배관 재료로 사용되는 원심주조법에 의하여 제작된 CCSS(centrifugally cast stainless steel)배관의 경우 특히 많은 문제점을 야기하고 있는데 배관자체의 주조시 발생되는 주상정 조직(columnar dendritic structure)에 의해 초음파 에너지 자체가 직진하여 통과하기 보다는 재질의 비균질성에 기인하여 전파속도 차이가 발생하는 등 본질적인 문제는 어느정도 파악되어 이에 대한 대처가 어느정도는 이루어지고 있으나 현재까지도 결함위치나 크기측정의 정확성에 충분한 신뢰성을 주지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 이상과 같은 문제점을 이해하기 위해 초음파의 진행방향을 연구하는데 유용한 선추적(ray tracing) 기법을 사용하여 실제검사에서 많이 접하게 되는 용접부 상황을 가정하여 초음파가 탐촉자로부터 발사되어 모재를 지나 용접부내를 통과하는 과정을 컴퓨터로 모의(simulation)하였다. 이러한 기법만을 통하여 실제 초음파의 재질내에서의 전파를 정확히 기술할 수는 없으나 실제 검사시 반사 및 통과된 신호로부터 이를 해석하고 이해하는데는 어느정도 유용하게 사용될 수 있으리라 생각되며 본 논문에서는 모재로부터 용접부를 통과하여 초음파의 진행방향의 예측과 결함의 존재시 어떠한 결과를 초래하는가를 모의한 결과를 기술한다.

2. 이론적 고찰

2.1. 초음파 전파 특성 일반

재료내에서 결함을 찾기위해 초음파탐상을 실시할 경우 보통 초음파 전파 속도는 순수한 의미에서

(접수 : 1995. 2. 25)

종파 및 횡파의 경우로 생각하고 또한 그것들의 속도는 재료가 보통 균질하며 등방성으로 일정하다고 가정한다. 그러나 실제의 재료는 정도의 차이일 뿐 엄밀한 의미에서 거의 대부분 비균질성 재료라고 볼 수 있기 때문에 비균질성 재료내에서 초음파 전파특성을 알아볼 필요가 있다고 본다. 이와관련 본 절에서는 균질한 상태를 포함하여 일반적으로 비균질한 재료가 다양한 결정 구조를 갖는 경우 plane harmonic wave가 전파시 재료내에서 어떻게 진행하는지를 알아보기로 한다. 우선 재료 내부로 plane harmonic wave가 진행한다고 가정할 경우 초음파의 변위(U)는 다음과 같이 기술될 수 있을 것이다.

$$U_i = A_i d_i \exp[\ ik(n_j x_j - Vt)] \quad \cdots\cdots (1)$$

여기서 A는 진폭, k는 wave number, n은 unit vector of propagation, d는 unit vector of displacement, V는 위상 속도(phase velocity)를 나타낸다.

여기서 상기 식 (1)을 운동방정식인 아래식 (2)에 대입하여 정리하면 식(3)을 얻게된다.

$$\rho U_{i,tt} = C_{iklm} U_{m,\ lk} \quad \cdots\cdots (2)$$

$$(\rho V^2 \delta_{im} - C_{iklm}\ n_k\ n_l) U_m = 0 \quad \cdots\cdots (3)$$

상기 식(3)이 의미를 갖기 위해서는 아래 식(4)와 같은 관계가 성립되어야 한다.

$$\Rightarrow\ |\lambda_{im} - \rho V^2\ \delta_{im}| = 0 \quad \cdots\cdots (4)$$

여기서 ρ는 밀도를 나타내고 C는 재료의 탄성계수를 나타낸다.

또한 상기 식(4)를 정리하게 되면 등방성 재질의 경우 3개의 서로 수직된 순수한 종파 및 횡파의 속도를 얻게된다.

2.2. 입방계(cubic system) 재료에서의 초음파 전파 특성

이방성 재료를 가상하여 탄성계수를 고려할 경우 초음파의 전파 특성을 계산하는데는 많은 시간과 노력이 들게된다. 그러므로 여기에서는 이들중 가장 간단한 구조로 이루어졌다고 생각되고 또한 오스테나이트계를 비교적 잘 나타낸다고 생각되는 입방계 재료를 예로하여 초음파 전파 거동을 계산해 보기로 한다.

이를 계산하기 위해서 직각좌표계에서 초음파가 재료내에 (β, θ)란 각도로 전파되고 그 다음 결정축과 시편축 간의 각도 α를 유지하여 local coordinate으로 표시하여보면 propagation vector "n"은 다음과 같이 쓸 수 있을 것이다.

$n_1 = \cos\theta\ \sin\beta\ \cos\alpha + \cos\beta\ \sin\alpha$
$n_2 = \sin\theta\ \sin\beta$
$n_3 = -\cos\theta\ \sin\beta\ \sin\alpha + \cos\beta\ \cos\alpha$ 가 된다.

또한 이 경우 탄성계수가 C_{11}, C_{12}, C_{44}의 3개로 구성되어 있기때문에 식 (4)를 풀어 속도 V를 구해낼 수 있으며 unit vector of displacement "d"도 구해낼 수 있다.

2.3. 군 속도(group velocity)

이상에서 구한 고유값 V_i^p는 재료내부의 초음파 전파시의 위상 속도를 의미하며 종파, 횡파 등으로 구분지어질 수 있다. 그러나 비균질성이 심한 이방성 재료내에서 초음파의 전파현상을 설명하기 위해서는 군 속도의 개념을 이해할 필요가 있다. 보통 위상 속도, $V^p = \omega/k$로 정의되나 군 속도, $V^g = \frac{\partial w}{\partial k}$로 정의된다.

이를 약간 수정하여 두 속도의 관계를 정리해보면

$$V_j^{\ g} = \frac{\partial V}{\partial n_j} = C_{ijkl}\frac{n_k d_i d_l}{\rho V} = \Gamma_{jk}^{\ d} m_k \quad \cdots\cdots (5)$$

로 볼수가 있으며 여기서 $m_k = n_k/V$이고 slowness vector라 한다.

만일 재질이 등방성이라고 한다면 상기 식 (5)를 운동 방정식인 $C_{ijkl}n_j n_k d_i d_l = \rho V^2 d_i^2$ 와 연계하여 보면 $V^g = V$가 됨을 쉽게 알 수 있을 것이다.

그러나 여기서 눈여겨 보아야 할 곳은 이방성 재료의 경우 군 속도, V_j^g는 slowness vector와 $\Gamma_{jk}^{\ d}$의 영향[1] 때문에 등방성 재료에서와는 달리 위상 속도 V_p와 평행하지도 않다는 것을 알 수 있을 것

이다.

이상의 이유로 인하여 초음파는 등방성 재질에서와 같이 wave front에 수직한 방향으로 전파되지 못하고 beam은 위상 속도의 진행방향으로 편위(deviation, skewing)되어 진행하기 때문에 초음파에 의한 결함탐상시 특별한 주의를 요하는 이유가 여기에 있다.

즉, 초음파 직진 방향에서 결함 탐상을 하지 못하기 때문에 위치나 종류, 크기등의 측정에 특별한 주의를 요하게된다. 그러면 결정 구조가 입방계인 재료에서의 군 속도와 전파방향을 구해보자

우선 식 (5)로 부터 구해진 unit vector of displacement "d"를 사용하여 군 속도, V^g를 구해보면

$$V_j^g = 2n_j\left\{\frac{d_j^2}{n_j^2(C_{12}+C_{44})}\left[(C_{12}+C_{44})(\rho V^2-\lambda_{ij})+n_j^2(C_{12}+C_{44})C_{11}\right]+C_{44}(1-d_j^2)\right\}$$

로 볼 수 있고 direction cosine "γ"는

$$\gamma_j = \frac{V_j^g}{\sqrt{\sum_{i=1}^{3} V_i^{g2}}}$$

로 표시 될 수 있을 것이다. (여기서 j=1,2,3)

즉 초음파 beam은 각 점에서 V_j^g란 속도와 방향 γ_j를 갖고서 진행하기 때문에 각 점마다 초음파의 진행을 추적해 보는것도 흥미있는 일이 될 수 있을 것이다.

3. 모델링

3.1. 용접부의 수식화

용접부내의 조직방향을 수식화한다는 것은 대단히 어려운 문제임이 틀림없다. 그러나 만일 재료가 마크로 조직을 갖고 있다고 가정하여 이를 단순화하여 평균치를 취하게되면 전체계에 있어서 조직의 방향을 수식화할 수 있을 것이다.

우선 Fig.1과 같은 V-butt 용접부를 수식화하기 위해 Fig.2와같이 모델링[2]할 필요가 있고 이로부터

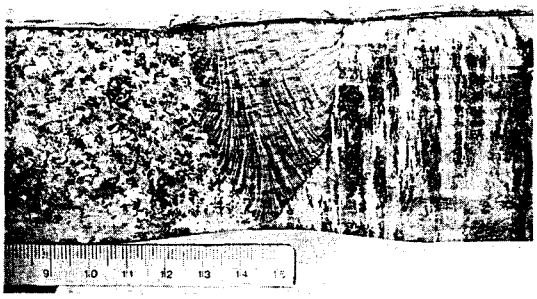

Fig. 1. A sample weld joint of cast stainkess-steel pipe.

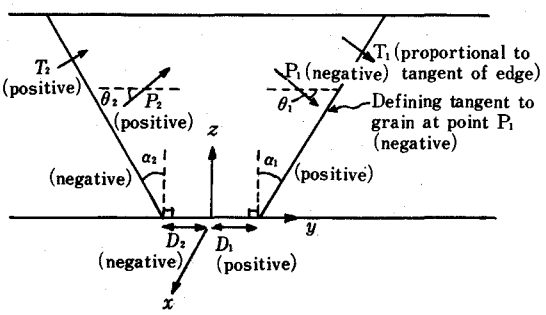

Fig. 2. Definition of parameters used to describe the grain structure within a V-butt weld.

조직방향은 다음과 같이 쓸 수 있을 것이다.

$F_1(y, z) = T_1(D_1 + Z^* \tan \alpha_1)/y^\eta : y > 0$

$F_2(y, z) = T_2(D_2 + Z^* \tan \alpha_2)/|y|^\eta : y < 0$

여기서 T, D, α, y등은 Fig. 2에 나타낸 것과 같으며 함수 F_1과 F_2는 국부적인 입자 방향 θ_1과 θ_2와 다음과 같이 관련되어있다.

$F_1(y, z) = \tan \theta_1$

$F_2(y, z) = \tan \theta_2$

즉, 각 점에서 입자의 위치 방향 θ_1과 θ_2가 구해질 수 있는 것이다.

또한 본 논문에서 사용된 값은 $T_1 = T_2 = -0.3$, $D_1 = D_2 = 3mm$, $\alpha_1 = \alpha_2 = 30$도 , $\eta = 0.85$ 이었다.

위에 기술된 수식은 용접부내의 결정 구조를 수식화하기 위한 것으로 V-butt 용접부의 금속 현미

경 사진을 검토한 결과 용접부는 중심선에서 볼 때 좌우 대칭형이며 경사(slope)는 중심선에서 멀어져 갈수록 감소하면서 모재와 만나게되는 곳에서는 대략 일정한 값을 갖게 된다는 가정을 사용하고 있다.

3.2. 선 추적(ray tracing)을 위한 컴퓨터 프로그램

재료의 모재에서 용접부 내부까지 초음파 빔이 전파하는 현상을 추적하기 위한 선 추적 기법은 등방성이나 이방성 재질을 막론하고 초음파 beam의 전파 경로를 수치적으로 구하는데 대단히 유용한 방법으로 우선 ray의 현재 위치와 그 점에서의 결정 방향을 구한 다음 군 속도 방향으로 주어진 거리만큼 이동시킨다. 이동시킨 점의 위치와 그 점의 결정 방향(crystal orientation)을 얻은 다음 그 점에서 수직 방향을 결정하고 추적하고 있는 beam 모드가 어느방향으로 얼마만큼 굴절되는가를 위에 주어진 방정식들을 사용하여 구하고 그 방향으로 beam을 주어진 거리만큼 이동시킴으로써 각 점에서의 진행방향, 굴절각도 및 진폭을 연속적으로 추적해볼 수 있는 방법이다. 우선 첫번째 적용대상은 기 발표된 논문[3]에서 나타난 결과를 보기위하여 모재 내부에서 초음파 입사각도의 변화에따라 어느 정도의 편위 현상이 발생하는가를 계산해 보았다.

두번째 예제는 모재를 통과한 빔이 용접부를 통과한 다음 다시 반대편 쪽의 모재를 통과할 경우의 초음파 beam 거동을 계산키 위한 것으로 관심 방향은 용접부와 모재 경계면에서 초음파 beam의 방향이 어떻게 변화해 가는지를 계산해 보기 위함이다.

마지막 예제는 실제의 검사시에 나온 결과를 평가해 볼 수 있는 프로그램이다. 사용된 탐상방법은 펄스 에코(pulse-echo) 방식으로 용접부내에 결함이 다양한 방향으로 존재한 경우를 가정하여 모의해 보았다.

4. 시뮤레이션 결과 및 고찰

4.1. 예 제 1

예제 1은 원자로 1차 계통을 구성하는 배관재인 주상정 조직내를 초음파가 어떻게 전파되어 가는가를 기술하며 입사각이 달라질 경우 원래의 진행방향인 직진 방향에서 어느정도 편위(deviation, skewing)가 발생하는가를 계산하였다.

계산결과는 입사각도를 달리함으로써 원래의 진행 방향과는 변경된 방향으로 진행되어 가는것을 볼 수 있는바 이와같은 편위 차이를 입사각도와 관련지어 나타내보면 Fig. 3과 같으며 특히 45도 근방에서 편위가 대단히 작아짐을 볼 수 있는바 이는 기 발표된 논문[4), 5)] 등의 결과와 대단히 비슷함을 볼 수 있을것이다.

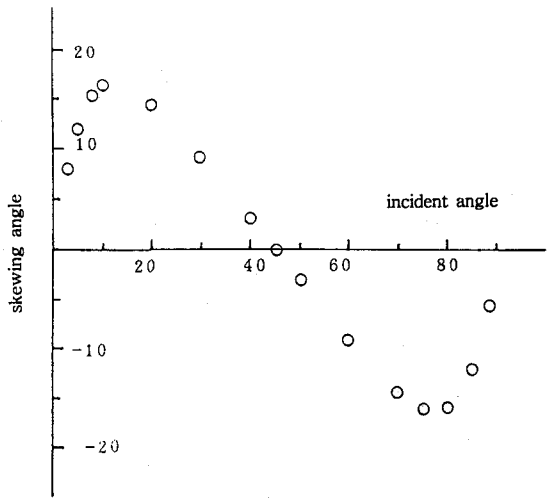

Fig. 3. Beam skewing as a function of wave mormal.

4.2. 예 제 2

예제 2는 상기 예제 1과는 달리 모재와 모재사이에 용접부를 갖고있는 경우를 나타낸 것으로 송신탐촉자 T에서 모재를 거쳐 용접부로 들어간 다음 다시 모재를 거쳐 모재 표면에 있는 수신탐촉자 R에 탐지될 수 있도록 되어있다.

이 결과는 Fig. 4a 및 4b에서 보는바와 같으며 모재의 경우에서와 같이 종파(L) 및 횡파(S)를 막론하고 용접부 경계 및 내부에서 직진하지 않음을 볼 수 있을 것이다.

이러한 초음파 beam의 편위 현상은 Fig. 3을 통하여 이미 어느정도는 예측될 수 있으며 용접부내에서 입자의 배치에 따라 각 점에서 초음파의 전파시 초음파 진행 방향이 어느정도 변화를 한다는 것은 충분히 가능한 일이다. 그러므로 이와같은 예제

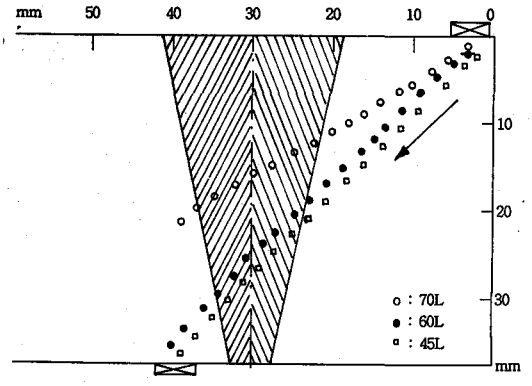

Fig. 4a Longitudinal wave propagation through weld by through transmission method.

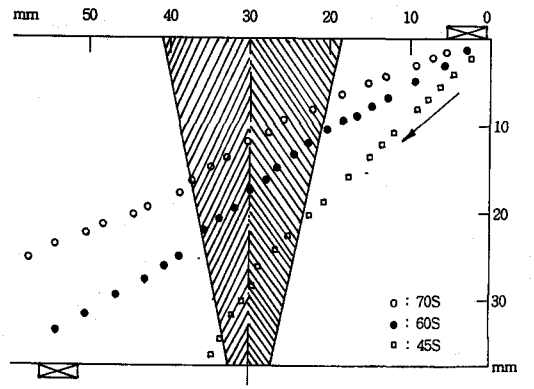

Fig. 4b. Shear wave propagation through weld by through transmission method.

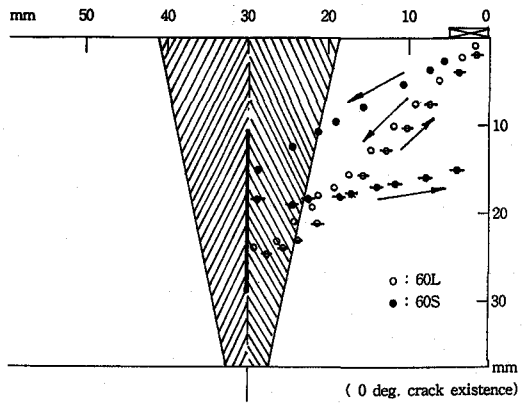

Fig. 5a. Wave progagation through weld by P-E method with 60 deg. incidence angle.

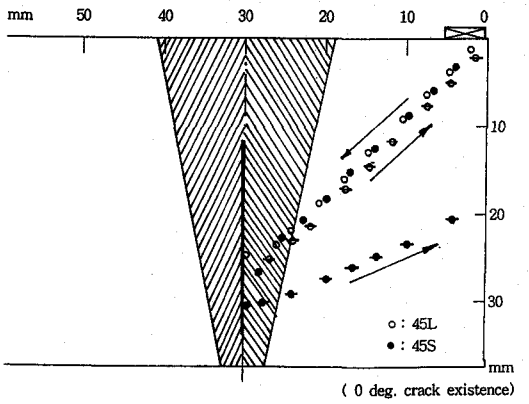

Fig. 5b. Wave propagation through weld by P-E method with 45 deg. incidence angle..

에서도 보여주듯이 초음파 beam의 편위현상은 실제 초음파 탐상시 많은 문제를 야기할 수도 있다는 것을 이해할 필요가 있다.

4.3. 예 제 3

예제 3의 경우는 예제 2의 경우와 대단히 유사하나 실제의 검사를 가정하여 모의한 결과이다. 사용된 탐상 방법은 펄스 에코 방식이고 또한 용접부 중앙에 직선 형태의 결함을 가정하여 이 결함으로부터 반사되어 나오는 신호를 검사 표면에 위치한 탐촉자가 다시 수신할 수 있도록 되어 있다. 이 결과는 Fig. 5a 및 5b에 표시되어 있는 바와 같으며 Fig. 6과 Fig. 7은 결함이 각각 -15도 및 +15도로 용접부 중앙에서 방향성을 갖고 존재한 경우를 가정한 것이다. 이상의 결과에서 보듯이 사용된 초음파의 종류가 종파일 경우가 횡파보다 훨씬 좋은 결과를 보여줌을 볼 수 있는데 이는 참고문헌 4에서 보았듯이 횡파의 경우가 종파보다 훨씬 편위가 크다는 이유로 쉽게 설명이 될 수 있을 것이다.

이상의 경우는 용접부와 모재가 동일한 재료로 구성된 예를 보여주는 것으로 이와는 달리 용접부와 모재가 이종 금속(dissimilar metal)으로 이루어진 경우를 해석해 보기로하자.

원자력 발전소에 있어서 원자로 노즐과 일차 계통 배관의 연결부인 용접부를 검사할 경우 노즐부위의 모재인 탄소강을 보강하기 위해 스텐레스 강

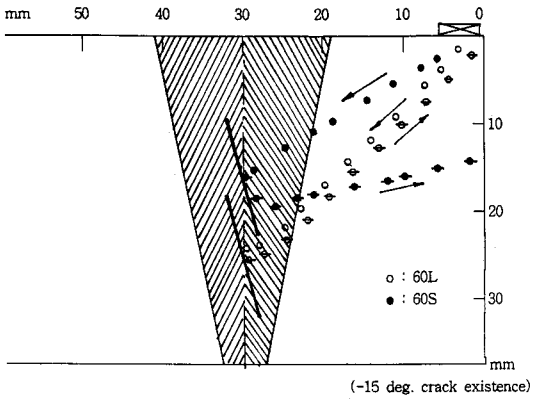

Fig. 6a. Wave propagation through weld by P-E method with 60 deg. incidence angle.

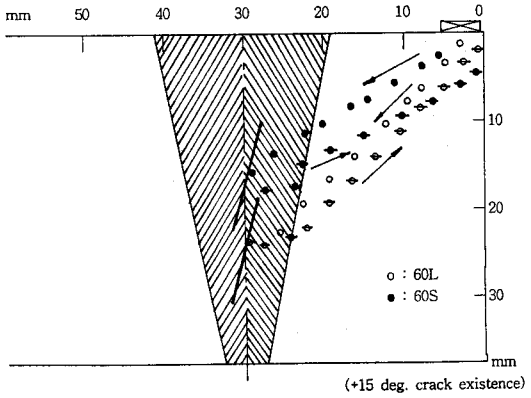

Fig. 7a. Wave progagation through weld by P-E method with 60 deg. incidence angle.

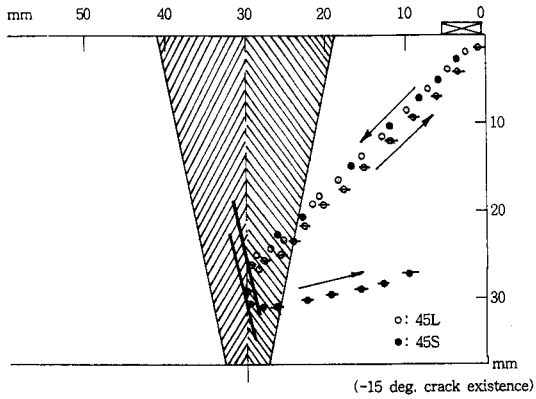

Fig. 6b. Wave propagation through weld by P-E method with 45 deg. incidence angle.

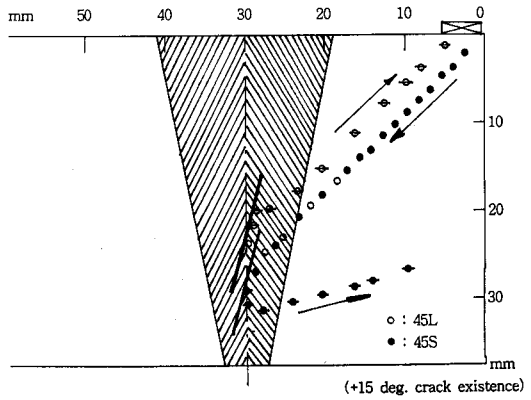

Fig. 7b. Wave propagation through weld by P-E method with 45 deg. incidence angle.

으로 피복이 되어 있으며 모재인 탄소강과 배관재와의 용접을 원할하게 하기위해 두 재료의 성질과 비슷한 인코넬로 버터링을 하였기때문에 실제 노즐 내부에서 결함을 탐상할시 많은 어려움을 내포하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 결함이 용접부 중앙에 수직하게 존재한다고 가정하여 Fig. 8a와 같이 탐촉자의 위치를 현재의 위치에서 좌로 충분히 이동시킬때는 버터링 부분과 탄소강 간의 경계에서 모드 변환 각도가 대단히 작아 탄소강 모재에서 반사된 초음파가 수신 탐촉자로 들어올 가능성이 작아지나 이를 현재의 위치인 용접부 중앙에서 약 18mm정도 이동시켜 신호 수집을 할 경우에는 그림에서 보듯이 훌륭한 결과를 얻을 수 있었다. 이와같은 결과를 근거로하여 용접부의 중앙부에 직선 형태의 결함이 수직 방향과 어떤 각도를 가지고 존재할 경우를 가상하여 계산된 결과를 Fig. 8(a,b,c)에서는 보여주고 있다. 이들 결과를 잘 분석하여 보면 -10도로 위치한 결함이 +10도 방향의 결함보다는 수신된 신호가 좀 더 나은 것을 볼 수 있으며 특히 -10도의 경우는 대단히 훌륭한 결과를 보여주고 있다. 이것은 결함의 방향성이 결함면에 입사하는 초음파의 방향과 반사하여 수신 탐 촉자에 가장 잘 도달할 수 있는 형상을 갖고 있기 때문인 것으로 사전에 충분히 예견될 수 있는 결과이다.

상기 그림들에서 보듯이 일단 탐촉자에서 송신된 초음파가 결함 부위까지 접근하여 그 곳에서 반사

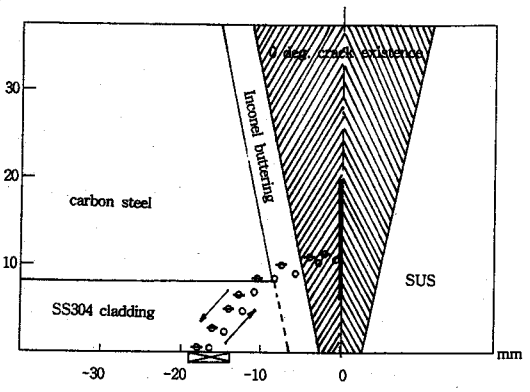

Fig. 8a. Beam propagation through multiple media by P-E method with 0 deg. crack.

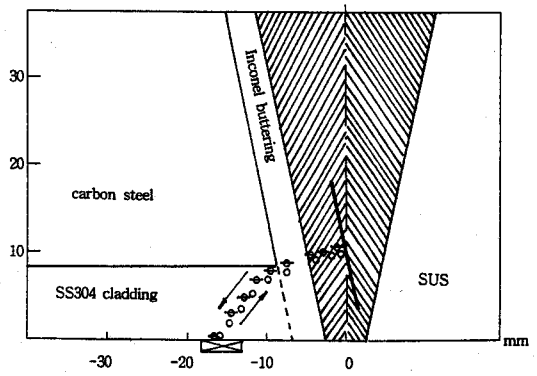

Fig. 8b. Beam propagation through multiple media by P-E method with -10 deg. crack.

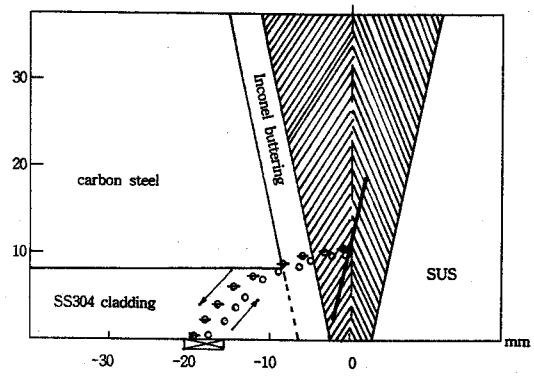

Fig. 8c. Beam propagation through multiple media by P-E method with +10 deg. crack.

된 신호가 다시 처음의 탐촉자에 수신되도록 되어 있는바 그림과 같이 정확한 원점에 다시 되돌아 오지 못하는 경우도 있으나 이 부분은 초음파가 일직선으로 중심부에서만 전파되는 것이 아니고 beam spread를 갖기 때문에 수신될 초음파는 단지 진폭에서만 감소가 있을 뿐 원래의 탐촉자에 수신되게 되어있다. 더욱더 정확한 결과를 얻으려면 dual element 센서를 갖고 있는 탐촉자를 사용하여 pitch-catch 형식의 탐상을 하게되면 반사된 신호의 진폭을 더 정확하게 수신할 수 있을 것이다.

5. 결론

1) 오스테나이트계 스텐강 용접부에 대한 초음파 탐상을 선 추적 기법을 사용한 컴퓨터 프로그램을 작성하여 모의해 보았다.
   선 추적에 의한 이러한 기법은 다양한 형상의 용접부 및 결함을 내포한 경우에도 모의가 가능하기 때문에 실제 결함 탐상시 신호의 해석 및 이해에 도움이 될 수 있다.
2) 주상정 구조를 갖는 1차 계통 배관의 모재에서의 초음파 beam 전파 거동 해석을 선 추적 프로그램에 의해 모의한 결과 기 실시된 실험[2] 결과와 대단히 유사한 형상을 나타냈으며 특히 입사각 45도 근방에서 beam 편위에 의한 영향이 최소화 된다는 것을 보여주고 있다.
3) 선 추적 기법은 다양한 형상의 용접부 및 결함을 내포한 경우에도 모의가 가능하기때문에 모재와 용접부가 동일한 조직으로 이루어져 있거나 이보다 구조가 복잡한 이종금속(dissimilar metal)으로 용접된 부분의 초음파 탐상시 신호의 해석 및 이해에 도움이 될 수 있을 것이다.

참고 문헌

1) B. A. Auld, *"Acoustic Fields and Waves in Solids"*, John Wiley & Sons, Newyork, Vol. 1 (1973)
2) J. A. Ogilvy, *"Computerized Ultrasonic Ray Tracing in Austenitic Steel"*, NDT Int'l, Vol. 18, No. 2 (1985), p 67-77

3) Y. H. Jeong, *"An Ultrasonic Material State Classifier for Elastically Anisotropic Materials"*, PhD Thesis, Drexel Univ., U.S.A. (1987)
4) M. G. Silk, *"In Research Technique in NDT"*, Academic Press, London and New York, Vol. iv(ed. R. S. Sharpe), (1980.)
5) 박대영 외,"원전 압력 경계면에 대한 비파괴 검사 기술 개발",한국 원자력 연구소, KAERI/RR-856-89 (1989.)

Ultrasonic Testing Simulation in Austenitic Stainless Steel Weld by Ray Tracing Technique

S. L. Lee, H. T. Lim, C. S. Park and B. C. Kim
Korea Atomic Energy esearch Institute

Abstract Crack detection technique by ultrasonics in structures and components made of austenitic stainless steel often loses its reliability due to the material characteristics during inservice inspection of nuclear power plants, especially in the area of detection and sizing in centrifugally cast stainless steel pipings. In order to understand and overcome this problem, computer program for tracing the ultrasonic rays within material has been developed to simulate the process of defect detection within weld. The program simulates through transmission and reflection technique in crack detection of austenitic stainless steel as well as ultrasonic beam propagation through multiple media including stainless steel cladding interface.

(Received : Feb. 25, 1995)