

원심 주조 스테레스 강에서의 이론적 모델을 통한 Beam Skewing 영향 고찰

이 삼 래* · 임 형 택* · 이 윤 상*

A study on the effect of ultrasonic beam
skewing based on theoretical model approach in CCSS

S. L. Lee, H. T. Lim and Y. S. Lee

Abstract Centrifugally Cast Stainless Steel generally shows similar structure to the weld in austenitic stainless steel in the point of casting. When examining this material ultrasonically, the beam does not generally propagate straightforward but rather deviates from its original direction and this phenomenon called skewing is originally caused by anisotropic material. In order to calculate the beam skewing effect theoretically, work has been performed based on a model approach which has regarded material itself as having been composed of multi-layered columnar dendrite structure and the result was compared with the one from experiment. The result from both theory and experiment showed good correlation and ultrasonic beam showed the least skewing with around 45 degree incident angle.

I. 서 론

원자력 발전소의 일차 계통의 배관에 사용되는 원심 주조법에 의하여 제조된 스테레스 강 (Centrifugally Cast Stainless Steel)의 미세 조직은 배관의 원심 주조시 벽면에서부터 성장한 Columnar Dendrite Structure의 형태를 띄고 있다.

이러한 조직의 재질을 초음파 탐상에 의하여 결함을 찾기 위해 검사를 실시할 경우 초음파 Beam이 통과하여야 할 실제의 경로를 지나가지 못하고 휘어지는 현상(Beam Skewing Phenomena)을 보여주어 결함

탐상에 많은 문제점을 야기하게 된다.

이러한 Beam Skewing의 영향은 본질적으로 재료 자체의 이방성(Anisotropy)때문에 발생하는 것으로 이에 대한 기초적인 연구가 실시 요망된다. 즉 초음파 탐촉자로부터 Beam이 재료 내부를 전파할 때 이방성이 존재할 경우 속도와 같은 Beam Parameter들이 어떻게 달라지는가 등이 규명되어야 하고 특히 이 경우 Columnar Dendrite Structure와는 다를 것으로 생각되는 또 다른 Boundary Layer에서 반사 및 굴절이 어떻게 이루어지는가를 연구해 볼 필요가 있다.

본 연구에서는 이러한 내용과 관련하여 초음파

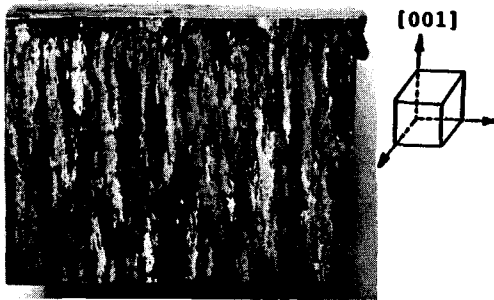
* 한국원자력연구소 비파괴시험연구실
접수 : 1990년 2월 1일

Beam의 전파과정을 재료자체의 구조를 층(Layer)들로 이루어진 것으로 생각하는 이론 모델을 통하여 예측 하며 아울러 계산된 Beam Skewing의 정도를 원자력 발전소의 일차측 배관에 사용되는 재료에 대하여 실시한 실험에서 얻은 결과와 비교 검토하였다.

II. 본 론

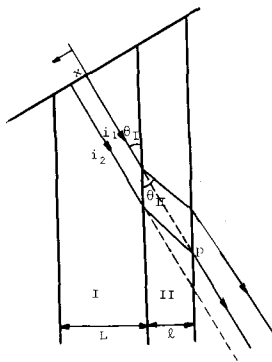
1. Theoretical Approach

원심 주조(Centrifugally Cast Stainless Steel, CCSS)된 스테레스 강의 조직 사진은 Fig 1과 같다. 이와같은 Column 형태의 조직을 고려하여 우선 Fig 2와 같은 가장 간단한 Beam 전파 모델을 생각해 보자.



(a) CCSS

Fig. 1 Macrograph of CCSS



L : Dendritic Columnar Structural Layer
 l : Structural Boundary Layer
 x : Transducer Travel Distance
 P : Point where Two Incident Wave i_1, i_2 Meet.

Fig. 2 Beam propagation model in columnar dendrite structural material.

이 경우 초음파 Beam은 먼저 Columnar Dendrite 부분에 입사하여 진행하다가 다음 Dendrite 부분으로 진행하기 전에 이 두 부분 사이에 존재한다고 생각되는 경계 매질(Boundary Layer)에서 굴절 및 반사하게 되며 굴절되어 통과된 Beam은 다음 Dendrite 부분으로 진행하게 된다.

이와 같은 논리적 Sequence를 좀더 일반화된 수식으로 나타내 보면 다음과 같다.

균일하며 이방성인 재료에서의 파동 방정식은 다음 식 (1)로 쓸 수 있다.

$$\rho \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} = E_{ijkl} \frac{\partial^2 U_k}{\partial X_j \partial X_l} \tag{1}$$

여기서 ρ 는 재료의 밀도이며 E_{ijkl} 은 탄성 계수이다. 진행하는 파가 Plane harmonic wave라고 가정할 경우 상기 식으로부터 변위 \underline{u} 는 다음 식(2)와 같이 간략하게 쓸 수 있을 것이다. 즉

$$\underline{u} = A \underline{d} \exp(i\eta) \tag{2}$$

여기서 $\eta = k(\underline{p} \cdot \underline{r} - ct)$ 이며

A는 진폭이고 \underline{d} 는 unit direction of motion, \underline{p} 는 unit direction of propagation을 나타내며 c는 phase velocity이다.

만일 이방성의 경우 상기 변위 \underline{u} 를 파동 방정식에 대입하여 풀 경우 3가지 서로 다른 속도(종파 및 2개의 서로 다른 횡파)가 존재하게 되며 이로부터 3개의 서로 다른 slowness surface 작성과 더불어 group velocity를 구할 수 있다. 물론 여기서 Beam skewing의 근본 원인은 slowness vector와 group velocity(dw/dk)가 서로 평행하지 않고 크기도 같지 않다는데 있다는 것은 널리 알려진 사실이다. [2]그러나 여기에서는 이와같은 복잡한 이방성 재료의 해석과는 달리 Fig 2에서 보는 바와 같이 columnar dendrite structure와 boundary layer가 서로 다른 탄성계수만을 갖는 단순한 등방성 재료의 층(layer)들로 구성되어 있다는 단순한 모델을 세워 문제를 접근하여 보기로 한다.

일단 탐촉자를 통과한 Beam은 상기에 기술된 변위 식 (2)에 의하여 진행하다가 이와는 다른 dissimilar structural boundary layer에 접하게 되면 이 두면에서

굴절과 반사가 이루어져 굴절된 Beam은 boundary layer를 통과하게 된다. 이 경우의 경계조건은 두 면이 완전 접촉되어 있다고 생각되기 때문에 변위와 응력이 양 면에서 같아야 한다. [3] 즉

$$u_j^{(I)} = u_j^{(II)} \quad (3)$$

$$\sigma_{2j}^{(I)} = \sigma_{2j}^{(II)}, j=1, 2$$

여기서 생각할 수 있는 Beam의 전파 거동은 종파의 입사와 더불어 종파 및 횡파의 반사 및 굴절을 생각할 수 있다. 우선 매질 I (dendrite structure)과 매질 II (boundary layer)에 입사하는 종파 및 반사하는 종파를 각각(0), (1)의 인덱스를 사용하고 반사하는 횡파를 (2), 매질II로 통과하는 종파를 (3), 횡파를 (4)라고 하여 식(3)을 다시 써 보면,

$$u_j^{(0)} + u_j^{(1)} + u_j^{(2)} = u_j^{(3)} + u_j^{(4)}$$

$$\sigma_{2j}^{(0)} + \sigma_{2j}^{(1)} + \sigma_{2j}^{(2)} = \sigma_{2j}^{(3)} + \sigma_{2j}^{(4)} \quad (4)$$

여기서 $\alpha_{ij} = E_{ijkl} \epsilon_{kl}$, $\epsilon_{kl} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_k}{\partial X_l} + \frac{\partial u_l}{\partial X_k} \right)$

상기의 식(4)중에서 응력의 경우는 진행하는 파의 진폭을 계산기 위한 것이며 변위의 경우는 굴절각 계산을 위해 적절히 이용된다. 즉 변위의 경우를 보면 특히 종파의 경우만을 생각해 볼 때 $\eta_0 = \eta_0$ 가 되며 이로부터 $k_I \sin \theta_I = k_{II} \sin \theta_{II}$ 가 된다. 이로부터

$$\theta_{II} = \sin^{-1} (c_L^{II} / c_L^I \cdot \sin \theta_I) \quad (5)$$

가 되며 상기 식(5)는 우리들이 자주 접하는 Snell's law와 같은 형태가 된다.

일단 θ_{II} 가 결정이 되면 Beam skewing은 쉽게 계산이 될 수 있다. 즉 boundary layer가 1개인 경우를 보면 그림 2에서 x만큼 이동 거리로 인하여 Beam deviation이 발생을 못하게 하는 것이 되므로 beam skewing angle은 식(6)과 같이 결정될 수 있다. 즉

$$\theta_S^T = \tan^{-1} \left\{ \frac{(\cot \theta_I - \tan \theta_{II}) \sin \theta_I}{\operatorname{cosec} \theta_I + \frac{(\cot \theta_I - \tan \theta_{II}) \sin \theta_I}{\cos \theta \cdot \sec \theta_I}} \right\} \quad (6)$$

여기서 $\theta = \pi/2 - \theta_I$

상기의 공식은 n개의 boundary layer가 있는 경우도 이와 유사한 형태를 갖는다. 즉

$$\theta_S^{Tn} = \tan^{-1} \left\{ \frac{nI(\cot \theta_I - \tan \theta_{II}) \sin \theta_I}{[nI + L(n-1)] \operatorname{cosec} \theta_I + \frac{nI(\cot \theta_I - \tan \theta_{II}) \sin \theta_I}{\cos \theta \cdot \sec \theta_I}} \right\} \quad (7)$$

가장 간단한 경우인 n=1인 경우를 plotting해 보면 그림 3과 같다.

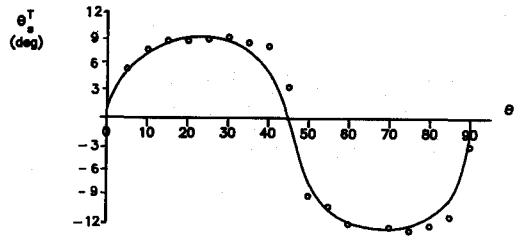


Fig. 3 Beam skewing effect diagram by theoretical model.

2. 실측과의 비교 검토

이론적인 모델에 의하여 얻은 결과와 실측치와를 비교하기 위하여 원자력 발전소의 일차측 배관과 동일한 재료로 제작된 보정 block을 사용하여 Fig4와 같은 시편을 제작하였다. Columnar dendrite structure와의 beam 입사 방향을 0°, 15°, 25°, 30°, 45°, 60°, 65°, 75° 되도록 하였으며 반사파를 잡기 위하여 $\phi 3.2\text{mm}$ 의 hole을 가공하였다. 실제 실험에서는 감쇠가 대단히 심한 재료이기 때문에 2.25MHz, 0°, 3/4 인치 직경의 종파 탐촉자를 사용하였고 탐상 장비는 K-K사의 digital 장비인 USD-10을 사용하였다.

실제 실험에서 측정할 수 있는 각종 파라미터들은 phase velocity와 echodynamic curve로 이들은 각각

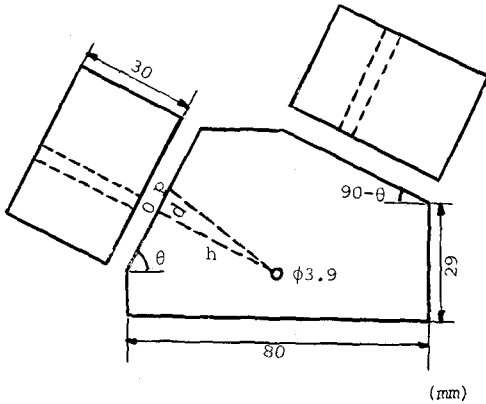


Fig. 4 Specimen in CCSS experiment.

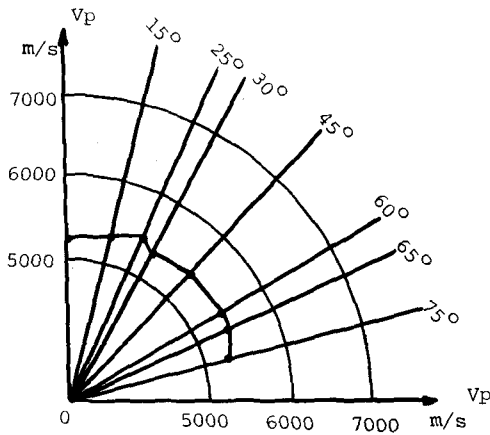


Fig. 5 Phase velocity diagram.

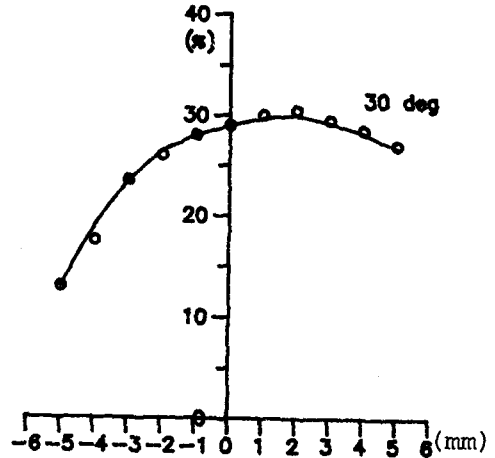
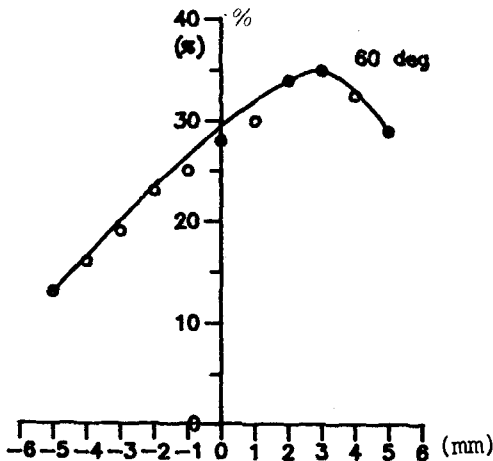


Fig. 6 Echo dynamic curve at $\theta = 30^\circ$ and $\theta = 60^\circ$

Fig5와 6에 수록되어 있다. 여기서 주목할 만한 내용은 Fig5에서 본 바와 같이 Phase velocity가 입사 각도에 따라 서로 다르다는 것과 Fig6의 echo dynamic curve에서 보는 바와 같이 최대의 진폭이 Fig. 4의 "0"점에서 나타나는 것이 아니라 "p"점에서 최대가 된다는 것이다. 실제의 Beam skew angle은 Fig. 4에서 쉽게 구할 수 있다. 즉

$$\theta_s^E = \tan^{-1}(d/h) \quad (8)$$

상기 식(8)을 이용하여 각각의 주어진 각도로부터 얻어진 beam skew angle은 Fig7과 같다.

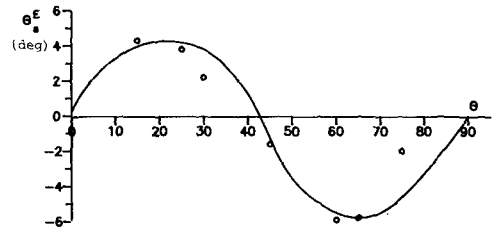


Fig. 7 Beam skewing effect diagram by experiment.

이상과 같이 실측에서 얻은 그림7($\theta_s^E - \theta$)과 이론 모델로부터 얻은 그림3($\theta_s^E - \theta$)은 대단히 유사한 점을 보여주고 있다. $40^\circ \sim 45^\circ$ 근방으로 입사한 경우 둘 다

Beam skew angle이 최소값을 보여준다는 것은 대단히 흥미로운 결과이다.

못할 경우 이러한 영향이 일어날 수 있을 것을 항상 염두에 두어야 할 것이다.

III. 결 론

사용된 재질이 균질하지 않거나 특히 용접부와 같은 조직에서는 columnar dendrite structure를 갖기 때문에 보통의 casting 재질의 초음파 검사와는 다른 현상을 보여주게 된다. 이 중 특기할 만한 내용을 기술해 보면 다음과 같다.

1) 제시된 수학적 모델은 실제 실험에서 얻어진 결과와 상당히 유사함을 보여주고 있으며 특이할만한 점은 입사각이 45° 근방에서 Beam skewing angle을 도시할 경우 부호를 바꾸게 되어 이곳에서 가장 Beam skewing의 영향이 작다는 것을 보여주고 있으며 이 결과는 기 발표된 논문(4, 5)들과 유사한 것으로 생각된다.

2) 실제의 검사시에는 dendrite structure의 orientation을 이미 알고서 이 방향에 따라 초음파 탐촉자의 입사각을 적절히 선정하는 것이 최선의 길이며 그렇지

References

1. P. H. Jeong, "An Ultrasonic material state classifier for elastically anisotropic materials", PH. D thesis, Drexel Univ. 1987.
2. J. A. Ogilvy, "Computerized ultrasonic ray tracing in austenitic steel", NDT international, p67-77, vol. 18, no. 2, Apr. 1985.
3. J. D. Achenbach, "Wave propagation in elastic solids", North-Holland publishing Co. 1975.
4. J. R. Tomlinson, A. R. wagg and M. J. Whittle, "Ultrasonic inspection of austenitic welds", Brit. J. of NDT, p119-127, May, 1980.
5. R. J. Hudgell and H. Seed, "Ultrasonic longitudinal wave examination of austenitic weld", Brit. J. of NDT, p78-85, Mar. , 1980.