

# 원전내 이방성 용접부에 대한 초음파검사의 정밀 수치 모델링

임 현 준

홍익대학교 기계공학과

## Accurate numerical modeling for ultrasonic testing of anisotropic welds in nuclear power plants

Hyunjune Yim

Dept. of ME, Hong-Ik Univ.

### Abstract

Due to their elastic anisotropy, ultrasonic testing of austenitic welds, frequently used in nuclear power plants, is much more difficult than that of isotropic elements. For accurate testing of austenitic welds, ultrasonic wave phenomena therein must be full understood. This study uses an accurate and effective numerical model, the mass-spring lattice model, for such phenomena. By comparing the numerical results with the corresponding analytical results, it is shown that the model is capable of accurately predicting the generation, reflection, refraction, and scattering phenomena of ultrasonic waves in anisotropic austenite welds. Therefore, the mass-spring lattice model will provide a very useful tool for simulating ultrasonic testing of austenitic welds, and thus will contribute to the enhancement of reliability of such ultrasonic testing.

### 1. 서 론

원전은 수많은 부품으로 이루어져 있으며 이 부품들은 대개의 경우 용접으로 연결되어 있다. 이러한 용접 연결부는 균열 발생, 파괴 등의 관점에서 가장 취약한 부위이므로, 이 부위에 대한 비파괴검사가 필수적이다. 용접부 검사에 있어서, 특히 초음파검사가 편리하고 안전한 방법으로서 많이 적용되고 있다.

그러나, 초음파검사는 그 결과를 해석함에 있어서 숙련된 검사자가 아니면 큰 어려움이 있다는 문제점이 있으며, 이로 인해 그 검사 신뢰성에 의문이 제기되는 경우가 발생한다. 이러한 문제를 해결

하기 위한 한 방법으로서 초음파검사에서 일어나는 모든 물리적 현상을 모델링하여 시뮬레이션이 가능하도록 하려는 노력이 경주되어 왔다. 국내에서는 이와 같은 모델링 기술에 대한 연구가 매우 초기 단계이며, 주로 등방성 매질에 대한 연구가 주를 이루고 있다.

원전내에 존재하는 오스테나이트 용접부를 초음파검사하는 경우에는 용접부 형상의 복잡성과 비균질성 및 이방성으로 인해, 측정신호로부터 결함의 크기와 위치 등을 평가하는 것이 용이하지 않으며 주관적인 평가에 의존하는 경우가 많다. 따라서, 비균질 이방성 매질을 포함하는 오스테나이트 용접부에서 균열이나 공극과 같은 결함에 의해 초음파가 산란되는 현상을 정확하게 모델링할 수 있는 수치적 기법이 절실하게 필요하다.

본 연구는 이방성 용접부의 초음파검사를 모델링하는 수치적 기법을 개발하는 것을 목적으로 한다. 이를 위한 수치적 모델링 기법으로서 질량-스프링 모델(mass-spring lattice model)을 활용하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 이방성 매질에 대한 모델

등방성 매질에서와는 달리, 이방성 매질에서는 평면파(plane wave)의 수직방향, 에너지의 전파방향, 매질의 변위 방향이 모두 상이하여 등방성 매질에 비해 그 해석이 훨씬 복잡하다. 이방성 매질에서의 탄성과 전파현상을 수치적으로 시뮬레이션하고, 그 결과를 해석해와 비교하였다.

오스테나이트 용접부를 횡등방 이방성으로 간주할 수 있으므로[1], 수치모델로서는 횡등방 이방성에 적합한 Fig. 1과 같은 질량-스프링모델을 사

용하였다.

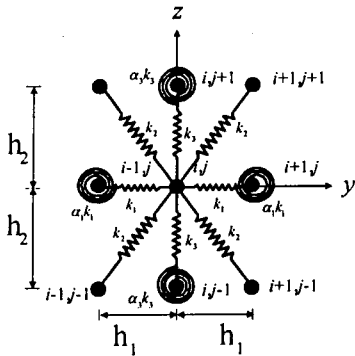


Fig. 1 Rectangular MSLM

초음파의 전파에 관해서는 두 경우를 고려하였는데, 점원(point source)과 선원(line source)으로부터 초음파가 방사되는 양상에 대해 수치해를 구한 것이 Fig. 2 및 3에 나타나 있다. Fig. 2의 수치해 결과는 Fig. 4에 보인 해석해법[2,3]으로 구한 파면(wave surface)과 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있다. Fig. 3의 결과는 이방성 매질에서의 복잡한 파동 전파 특성을 잘 보여준다. 즉, 등방성 매질의 경우에는 선원에 수직인 방향으로 가진하면, 이 선원으로부터 발생하는 파동은 순수한 종파이다. 그러나, 이방성 재료의 경우에는 (유사)종파의 변위 방향이 평면종파에 수직이 아니므로, Fig. 4와 같이 (유사)횡파도 함께 발생하는 것이다.

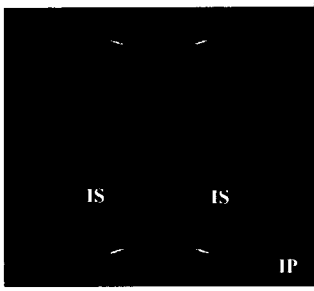


Fig. 2 Computed wavefield generated from point source located at center

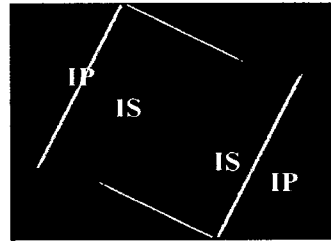


Fig. 3 Computed wavefield generated from line source, located at center, excited perpendicularly

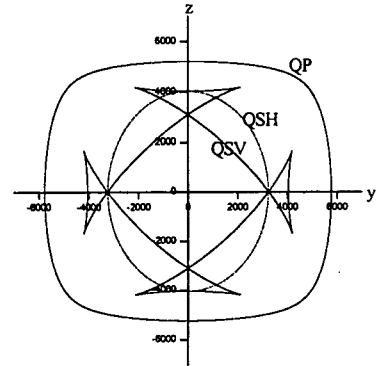


Fig. 4 Analytical wave surface

## 2.2 이방성 매질의 자유표면에서의 반사 모델링

MSLM에서 자유표면을 모델링하기 위하여, 트랙션 조건식을 차별화하여 적용하였다. 입사파가 유사종파(QP파)인 경우에 대해 자유표면에서의 반사 현상을 시뮬레이션한 결과가 Fig. 5에 나타나 있다. Fig. 3에서 보았듯이 QP 및 QSV 모드의 입사파(IP, IS)가 모두 존재하며 입사각은 18.4°인데, 두 입사파 모두 자유표면에서 반사하면서 모드변환(mode conversion)이 발생하여 두 가지 모드의 반사파(RP, RS)가 생성되는 것을 볼 수 있다.



Fig. 5 Computed wavefield, showing reflected waves, for a mostly QP line source near free boundary

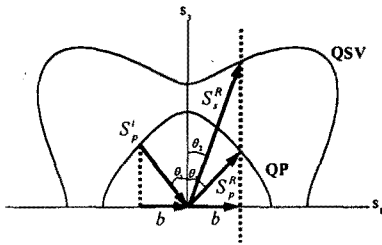


Fig. 6 Analytical determination of reflection angles from slowness surfaces

Fig. 5와 같이 자유표면에서 반사파가 발생하는 문제의 반사각은 해석적인 방법으로 구할 수 있는데, Fig. 6과 같이 완도표면(slowness surface)을 이용하는 도식적 방법[4]이 가장 많이 사용된다. 즉, 입사파에 대한 완도벡터(slowness vector)의 기저벡터(base vector)  $\mathbf{b}$ 를 구한 후, 동일한 기저벡터를 갖는 반사파의 slowness vector를 QP파와 QSV파의 완도표면에 그리면, Fig. 6과 같이 이들 반사파의 완도벡터에 의해 반사각  $\theta_1, \theta_2$ 가 결정된다.

다양한 입사각을 갖는 QP파 및 QSV파의 반사각을 수치해로부터 구한 결과, 이들이 모두 1% 이내의 오차 범위에서 해석해와 잘 일치함을 확인하였다.

### 2.3 등방성-이방성 매질 경계에서의 굴절 모델링

오스테나이트 용접부를 초음파로 검사하기 위해서는 용접부 주위의 등방성 매질을 통해 초음파를 입사시키게 되며, 이 파동에너지가 용접부 내로 전달되어 검사가 수행된다. 이러한 과정에서 초음파는 등방성 매질과 이방성 매질의 경계를 통과하게 되며, 이때 발생하는 굴절 및 반사현상을 정확하게 모델링하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서 사용하고 있는 MSLM이 이러한 현상을 정확하게 모델링할 수 있는 지를 검토하기 위하여 등방성-이방성 매질 경계에서의 반사 및 굴절 현상에 대한 수치해석을 수행하였다.

MSLM에서 이방성 매질과 등방성 매질의 경계를 모델링하기 위해, 트랙션 연속 조건을 차별화하여 적용하였다. 등방성을 갖는 강(steel)으로부터 입사한 P파 및 SV파가 횡등방 이방성을 갖는 오스테나이트와의 경계면에서 반사 및 굴절되는 현상을 시뮬레이션 하였다. 입사 P파에 대해 시뮬레이션

한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 이 경우, 입사각은  $45^\circ$ 이며, 반사 P파(RP), 반사 SV파(RS), 굴절 QP파(RFP), 굴절 QSV파(RFS)가 발생하는 것을 관찰할 수 있다.

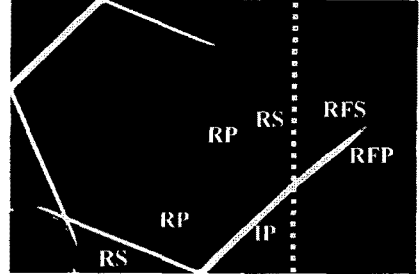


Fig. 7 Reflected and refracted wavefield from interface (dashed line), computed for P incident wave generated in isotropic steel

Fig. 6과 유사한 도식적 방법을 사용하여, 이종 매질간 경계에서의 반사각 및 굴절각을 구하는 방법이 있다. Fig. 7에 보인 것과 같은 형태의 문제에서 입사파 모드(P파, S파)와 입사각을 다양하게 하여 수치 시뮬레이션을 수행하였으며, 수치해로부터 반사각과 굴절각을 구한 결과를 해석해와 비교해 보았다. 이 경우 역시 자유표면 반사의 경우와 유사하게 1% 이내의 오차를 가지고 해석해와 수치해가 잘 일치하는 것을 확인하였다.

### 2.4 등방성-이방성 매질 경계에서의 굴절 모델링

균열을 모델링하는 방법에 대한 기본적인 이해를 도모하기 위해 등방성 매질 내에 존재하는 균열의 문제를 고려하였다.

균열을 모델링하기 위해, 균열선단에서는 전형적인 MSLM의 방법대로 스프링을 끊고, 자유표면인 균열면에서는 트랙션 경계조건을 적용하였다. 이렇게 모델링한 균열의 선단으로부터의 원거리 회절장에서 변위 진폭을 수치적으로 구하였다.

수치해와 비교하기 위한 해석해로서는 기하학적 회절이론(geometrical theory of diffraction)에 근거한 근사해[5]를 고려하였다. 한 예로서, 위에 설명한 방법으로 원거리장에서  $u_r$ 의 변위 진폭을 방향에 따라 구하여 극좌표그래프(polar plot)으로 그린 것이 Fig. 8에 나타나 있다. 이들은 본 연구에서 고려한 근사 해석해와 대체로 그 로브(lobe)의 위치와 형상에 있어서 일치함을 확인하였다.

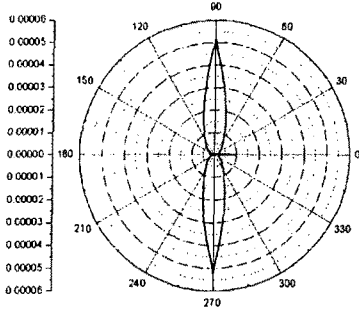


Fig. 8 Computed distribution-in-angle of radial displacement amplitude of far diffracted P wave for P wave incident normal to crack

### 2.5 이방성 매질에서의 균열에 의한 산란 모델링

오스테나이트 용접부 내의 균열에 의해 초음파가 산란되는 현상을 모델링하고 그 수치해를 고찰하였다. 균열과 입사파의 상대적인 방향을 다양하게 변화시키면서 수치해를 구하였는데, 두 가지 예만 보이면 Fig. 9, 10과 같다.

Fig. 9(a)는 수평방향의 균열에 평행한 방향의 입사파가 입사하여 산란되는 문제로서 Fig. 9(b)는 입사파가 종파인 경우, 9(c)는 횡파인 경우의 수치해 파동장이다. Fig. 9에서 균열선단을 중심으로 회절 QP파와 회절 QSV파가 발생되고, 헤드파(head wave, H)도 발생하는 것을 관찰할 수 있다.

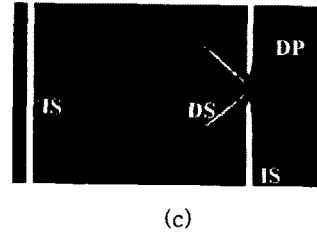
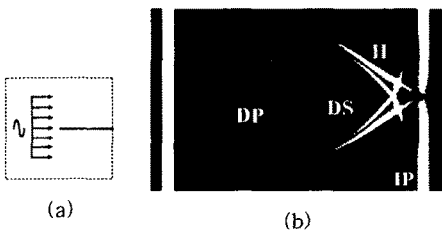


Fig. 9 Computed wavefield, as scattered from horizontal crack, for incident (b) QP, and (c) QSV waves, in the configuration shown in (a)

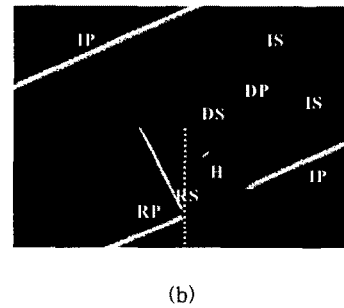
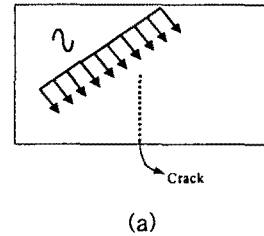


Fig. 10 Computed wavefield(b), as scattered from horizontal crack, for incident QP, and QSV waves, in the configuration shown in (a)

Fig. 10은 균열이 수직으로 놓여 있고, 입사파의 입사각이  $26.6^\circ$ 인 경우이다. Fig. 10(b)에서 균열면으로부터 입사파가 반사되는 현상을 관찰할 수 있으며(RP, RS), 균열선단을 중심으로 한 회절 QP파와 회절 QSV파, 그리고 이들을 연결하는 헤드파(head wave, H)도 발생하는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 9와 10에서 관찰되는 모든 파동 역시 파동역학(wave mechanics)으로 설명할 수 있는 파동들이다.

### 3. 결론

본 연구에서는 횡등방 이방성을 갖는 오스테나이트 용접부에 대한 초음파검사를 수치적으로 모델링하는 기법을 개발하였다. 사용한 수치모델은 이

방성에 적합한 직사각형 격자를 갖는 질량-스프링 모델(MSLM)이며, 이를 이용하여 구한 수치해와 해석해를 비교해 본 결과, 다음과 같은 문제들에 있어 MSLM이 신뢰성 있는 수치해를 제공하는 것을 확인하였다.

- 이방성 매질 내 점원에 의한 파동 발생 및 전파
- 이방성 매질 내 선원에 의한 파동 발생 및 전파
- 등방성-이방성 매질 경계에서의 반사 및 굴절
- 등방성 매질 내 균열에 의한 산란
- 이방성 매질 내 균열에 의한 산란

또한, 이 수치모델은 유한요소법과 같은 여타의 모델에 비해 계산 속도가 월등히 빠르다는 장점이 있다. 따라서, 본 연구에서 개발된 수치해법은 이방성 용접부에서 균열을 검출하기 위한 초음파 비파괴 검사에 있어서 매우 신뢰성 높고 효과적인 기법인 것으로 평가된다.

#### 4. 참고문헌

- [1] Ogilvy, J.A., "Ultrasonic beam profiles and beam propagation in an austenitic weld using a theoretical ray tracing model", *Ultra.*, Vol. 24, 1986, pp. 337-347.
- [2] Musgrave, M.J.P., "Deviation of ray from wave normal for elastic waves in principal planes of crystal symmetry", *J. Mech. Phy. Solids*, Vol. 18, 1970, pp. 207-211.
- [3] Musgrave, M.J.P., "On the propagation of elastic waves in aeioptropic media", *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A*, Vol. 226, 1954, pp. 339-355.
- [4] Henneke II, E.G., "Refelction-Refraction of a Stress Wave at a Plane Boundary between Anisotropic Media", *J. Acous. Soc. Am.*, Vol. 51, No. 1, 1972, pp. 210-217.
- [5] Ogilvy, J.A. and Temple, J.A.G., "Diffraction of elastic waves by cracks: application to time-of-flight inspection", *Ultra.*, Vol. 21, No. 6, 1983, pp. 259-269.