

研究論文

온도구배가 있는 필릿용접에서 초음파의 전파와 탐촉자의 위치 결정

정 선 국* · 조 형 석**

The determination of transducer location and ultrasonic wave propagation through temperature gradients in fillet arc welding

Seon Kook Jeong* and Hyung Suck Cho**

Key Words : Fillet Weld (필릿용접), Temperature Gradient (온도구배), Ray Tracing (경로추적), Ultrasonic Wave Propagation (초음파의 전파), Transducer Location (탐촉자의 위치)

Abstract

The temperature gradient in weldment changes the transit time and distorts the direction of the ultrasound beam to the higher temperature regions due to the lower sound speed in the hotter regions of the weldment.

This paper describes a ray-tracing method for calculating the effects of temperature gradients on ultrasonic propagation in fillet arc welding. In the method, weldment is conceptually divided into a number of layers and the refraction and sound speed at each layer is calculated using the temperature which calculated from analytical solution.

Calculating the time and location of echoes arrived from various interfaces around a molten weld pool determines the optimum location of ultrasonic transducers and the correct position of flaws.

* 정회원, 거제전문대학 기계과

** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

1. 서 론

용접부의 품질을 검사할 때 일반적으로 초음파 탐상이 많이 이용된다. 그러나 이 방법은 탐상액을 이용하여 탐촉자를 제품에 완전히 밀착시켜야 하는 문제로 용접이 완료되고 제품이 완전히 냉각된 후에 검사할 수 밖에 없었다¹⁾. 그리하여 이러한 한계를 극복하고 용접공정 중에 비접촉식 또는 원격으로 초음파탐상을 하고자하는 노력은 많이 시도되었다²⁻⁵⁾.

그러나 용접품질을 공정 중에 탐상할 때는 탐촉자를 밀착시켜야 하는 문제 뿐만 아니라 제품이 온도구배를 지니는 고온의 물체이므로 이러한 온도구배가 초음파의 전달에 영향을 미치므로 이를 이해할 필요가 있다. 초음파가 전파되는 영역에서 온도구배는 크게 두가지 형태로 영향을 미친다.

첫째는 온도에 따른 음속의 변화이다. 철강재료에서 온도가 높아지면 음속은 느려지고 온도가 강재의 용융온도에 도달하면 철강재료는 액체상태가 되어 음속은 현저하게 달라진다. 이러한 결과로 초음파가 송신되어 센서에 수신될 때까지의 시간에 변화를 일으킨다. 그리고 또 다른 영향은 이러한 음속의 변화는 결과적으로 초음파의 전달경로 상에서 굴절을 일으켜 전달 되는 방향을 변화시킨다. 온도구배는 초음파의 전달경로를 온도가 높은 쪽, 즉 음속이 느린 방향으로 기울어지게 한다. 그리하여 최종적으로는 초음파가 전달되어 도달하는 위치를 달리하게한다. 이러한 전달경로의 왜곡은 용융부 근처에서는 현저하게 나타난다.

그러므로 본 연구에서는 용접입열에 의하여 온도구배가 존재하는 상태에서 초음파를 송수신하여 용접품질을 탐상할 때 송신된 초음파가 전달되어 수신될 때 까지의 경로를 해석함으로써 송신장치와 수신장치 사이의 정확한 위치를 결정할 수 있게 하고 수신된 신호로부터 정확한 정보를 구할 수 있게한다.

Lott⁶⁾와 Johnson⁷⁾ 등은 용접 중 고온에서 초음파의 속도가 느려지는 것을 실험을 통하여 확인하였으며 평판의 TIG용접에서 수신된 파형을 분석하여 용입깊이를 유추할 수 있는 가능성을 보여주었다. 그리고 용융부 근처에서 초음파의 전달경로가 고온부 쪽으로 휘어지는 경향을 수치해석으로 검토

하였다.

그러나 위에서 열거된 연구에서는 현상을 확인하고 경향을 보여주는 큰 역할을 하였으나 용접부의 한쪽 면은 물에 잠긴 상태에서 용접한 것, 평판에서의 정지TIG용접, 용접되는 면과 반대되는 면으로 센서의 설치 그리고 수치해석을 이용한 전파경로의 유추 등은 실제 문제와는 너무 거리가 멀다. 그리하여 본 연구에서는 가장 많이 시공되는 필릿용접에서 초음파를 이용하여 용접품질을 실시간으로 탐상하고자 할 때 초음파의 전파 경로와 신호전달시간을 예측하여 초음파의 송신장치와 수신장치 사이의 정확한 설치위치를 결정할 수 있게하며 수신된 신호로부터 정확한 정보를 얻을 수 있게함을 목적으로하고있다.

이를 위하여 최근에 연구된 해석해⁸⁾를 이용하여 필릿용접 시 온도구배를 구하였다. 그리고 송신된 초음파가 전달되어 가는 각 위치에서 온도값에 따른 초음파의 속도와 온도가 다른 영역으로 이동될 때 각 경계면에서 굴절각을 계산하여 전달경로를 수정하는 방법으로 초음파의 전달시간과 최종전달위치 그리고 전달되는 각도를 구하였다. 그리하여 비드용접(Bead on plate)과 필릿용접의 경우에 대하여 온도구배에 의한 초음파 전달의 영향을 검토하여 송수신장치의 설치위치를 결정하였다.

2. 필릿용접부의 온도구배

2.1 온도구배 해석해

용접 시 아크의 열분포는 다음과 같은 이변량정규분포로 가정한다. 이때 α_x , α_y 는 분포정수이며 $q(t)$ 는 시간 t 에서 가해진 입열량이다⁹⁾.

$$Q(x, y, t) = \frac{q(t)}{2\pi\alpha_x\alpha_y} \exp \left[-\frac{\alpha_y^2 x^2 + \alpha_x^2 y^2}{2\alpha_x^2 \alpha_y^2} \right] \quad (1)$$

필릿용접부는 형상이 복잡하여 해석해를 구하기 어려우므로 평판에서의 해를 구하여 필릿용접으로 사상시켜 구한다. 평판에서의 좌표계는 Fig. 1과 같으며 여기서 U, V, W 는 고정좌표계이고, u, v, w 는 아크의 중심 $(U_s, V_s, 0)$ 에 원점을 둔 이동좌표계이

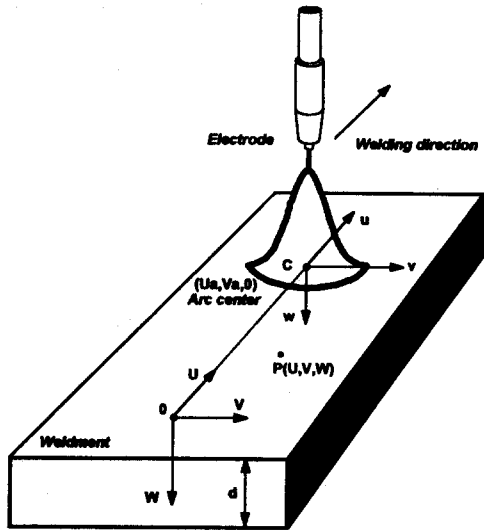


Fig. 1 The coordinates of an infinite plate for calculation of temperature gradients.

다. 여기서 T_u 는 온도, T_0 는 상온, ρ, c, k 는 T_u 에서 모재의 밀도, 비열, 열전도율, t 는 시간, 그리고 $\alpha = k/\rho c$ 로서 열확산계수로 두고 이동하는 분포열원에 의한 온도 분포를 이동하는 좌표계 (u, v, w) 를 기준으로 표시하면 다음과 같다.⁹⁾

$$T_u(u, v, w, t) - T_0 = \int_0^t \frac{q(t_1)}{\pi \rho c d} \cdot \frac{\sigma^2}{\sqrt{\sigma^2 + 2\alpha(t-t_1)} \sigma_z^2} \cdot \exp \left[\begin{aligned} & -(\sigma^2 + 2\alpha(t-t_1)) [u + U_a(t) - U_a(t_1)]^2 \\ & + (\sigma_z^2 + 2\alpha(t-t_1)) \cdot [v + V_a(t) - V_a(t_1)]^2 \\ & \wedge \left[2(\sigma_z^2 + 2\alpha(t-t_1)) \cdot (\sigma^2 + 2\alpha(t-t_1)) \right] \end{aligned} \right] \cdot \sum_{n=0}^{\infty} A_n \exp(-\mu_n^2(t-t_1)) \cdot \left(\cos\left(\frac{\mu_n}{\sqrt{\alpha}}(w - W_a)\right) + \frac{\beta_1 \sqrt{\alpha}}{\mu_n} \sin\left(\frac{\mu_n}{\sqrt{\alpha}}(w - W_a)\right) \right) dt_1 \quad (2)$$

여기서 상수들은 아래와 같으며 h_1, h_2 는 각각 윗 면과 아랫 면에서의 유효대류계수이며 d 는 평판의 두께이다.

$$A_n = \frac{\mu_n^2}{\mu_n^2 + \alpha\beta_1^2 + \frac{2\alpha\beta_1}{d}}, \quad \sigma^2 = \sigma_u \cdot \sigma_v$$

$$\tan\left(\frac{\mu_n d}{\sqrt{\alpha}}\right) = \frac{\sqrt{\alpha}\mu_n(\beta_1 + \beta_2)}{\mu_n^2 - \beta_1\beta_2\alpha}, \quad \beta_1 = \frac{h_1}{k}, \quad \beta_2 = \frac{h_2}{k}$$

필릿용접의 좌표계는 Fig. 2와 같다. 여기서 X, Y, Z 는 고정좌표계이고, x, y, z 는 아크중심, $(X_a, Y_a, 0)$ 에 원점을 둔 이동좌표계이다. 필릿용접에서의 온도분포를 구하기 위하여 아래의 사상합수를 이용하여 u, v, w 를 x, y, z 로 사상시킨다. 식에서 복소수 $W = v + wi$ 는 무한평판의 단면을, 복소수 $R = q + ri$ 는 허수값이 (+)인 전영역을, 복소수 $Z = y + zi$ 는 필릿용접의 단면에 해당하며 L 은 용접 다리 길이이다.

$$R = a \cdot \frac{\exp\left[\frac{\pi}{d}(W - di)\right] + 1}{\exp\left[\frac{\pi}{d}(W - di)\right] - 1} \quad (3)$$

$$Z = K \int_0^R \frac{(\xi^2 - 1)^{1/4}}{(\xi^2 - a^2)} d\xi + \frac{L}{2} + \frac{L}{2} i \quad (4)$$

상수 a 와 K 는 다음 식에서 구한다¹⁰⁾.

$$-d = \text{real} \left[K \int_0^R \frac{(\xi^2 - 1)^{1/4}}{(\xi^2 - a^2)} d\xi + \frac{L}{2} + \frac{L}{2} i \right]$$

$$K = \frac{-\frac{L}{2} + \frac{L}{2} i}{\int_0^1 \frac{(\xi^2 - 1)^{1/4}}{(\xi^2 - a^2)} d\xi}$$

한편 필릿용접으로 사상시킬 때 실제 좌표계와 사상된 좌표계 사이의 대응하는 두 미소영역을 통

과하는 총열량이 동일하다는 조건을 만족시키면 필릿용접부의 온도분포는 다음과 같이 주어진다.

$$T(x, y, z, t) = T_u(u, v, w, t) \cdot \left| \frac{-2ad}{\pi K (R^2 - 1)^{3/4}} \right| \quad (5)$$

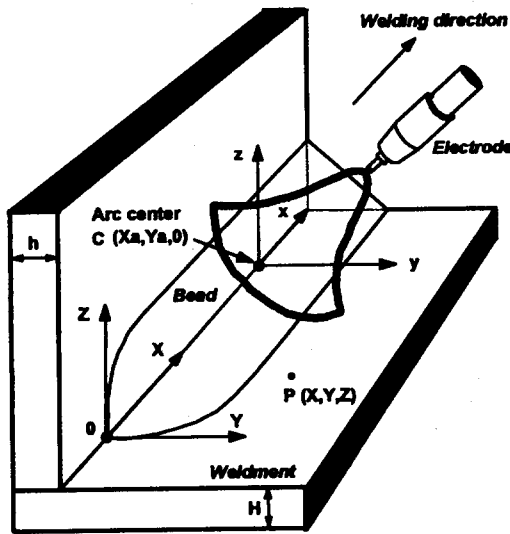


Fig. 2 Coordinates of the fillet weld for calculation of temperature gradients

2.2 해석해를 이용한 온도구배 계산

본 절에서는 식 (2)-(5)로 표시된 해석해를 이용하여 비드용접 및 필릿용접에서 온도구배를 계산하였다.

용접재료의 물리적 성질은 온도의 함수이지만 온도구배 계산에서는 상온과 모재의 용융점 (1495℃)의 거의 중간 부분인 (700℃)의 값을 사용하였다. 그 값은 열전도율 $k = 30.3 \text{ W/m}^\circ\text{K}$, 비열 $c = 752 \text{ J/Kg}^\circ\text{K}$, 밀도 $\rho = 7860 \text{ Kg/m}^3$ 그리고 열전달계수 $h_1 = 50 \text{ W/m}^2\text{K}$, $h_2 = 18 \text{ W/m}^2\text{K}$ 이며 여러 연구결과⁸⁻¹⁰⁾를 참조하여 결정하였다.

계산에서 용접재료는 연강으로 크기는 40 * 200 * 15t를 사용하였으며 용접조건은 전류 200A, 전압 25V, 모재와 노즐사이의 거리는 20mm이며 용접토치의 이송속도는 5mm/s로 하였다.

계산에서 아크열원의 분포는 비드용접에서는

1개의 축대칭인 이변량정규분포로 $\alpha_x = \alpha_y = 2.27 \text{ mm}$ 이고 필릿용접에서는 2개의 이변량정규분포가 조합된 형태를 지니는 것으로 가정하였다. 이때 두 열원 중 하나는 정규분포의 횡단면은 축비율이 $\sqrt{2}$ 인 타원형이 되어 분포정수는 $\alpha_x = 2.27 \text{ mm}$, $\alpha_y = 1.61 \text{ mm}$ 이며 나머지 하나는 열량의 크기는 용착금속이 지닌 총열량과 같으며 분포정수는 용착금속의 분포와 가장 유사한 축대칭인 정규분포로 가정하여 용접 다리길이가 L인 경우 $L/2\sqrt{3}$ 이 된다. 그리하여 분포정수는 다리길이가 8mm이므로 2.31mm이다.¹⁰⁾

Fig. 3 과 Fig. 4는 비드용접 및 필릿용접부의 횡단면과 종단면에서 각각 계산된 온도구배를 보여준다. 계산시점은 Fig. 3이 아크가 시작한지 10초인 시점 그리고 Fig. 4는 아크가 시작한지 14초인 시점의 온도상태를 보여준다. 그림에서 등온선은 200℃ 간격으로 표시하였다. 등온선에 표시된 숫자는 온도를 표시하는 것으로 각 온도의 100분의 1로 표시하였다.

3. 초음파의 전달 경로

3.1 초음파의 반사와 굴절

음파는 진동양식에 따라 입자의 진동이 파의 진행방향과 동일한 종파와 입자의 운동과 파의 진행방향이 서로 수직인 횡파로 구분된다. 이중 종파는 각종 파동의 음속중 가장 빠르며, 액체나 기체에서는 횡파가 존재하지 않는다. 이러한 음파가 음향임피던스가 다른 두 매질 사이의 경계면에서 반사 또는 굴절될 때 진동양식이 변화할 수 있으며 다음과 같은 Snell의 법칙에 따라 반사와 굴절각도가 정해진다.

$$\frac{\sin \theta_i}{C_i} = \frac{\sin \theta_r}{C_r} \quad (6)$$

여기서 θ_i , θ_r 은 각각 입사각과 굴절 또는 반사 각이며 C_i , C_r 은 각각의 매질에서 진동양식에 따른 음속이다. Fig. 5는 서로 다른 매질로서 물, 공기 그리고 철이 접하여 있을 때 물을 통하여 입사된 종파가 철 속으로 전파하면서 일어나는 파형변

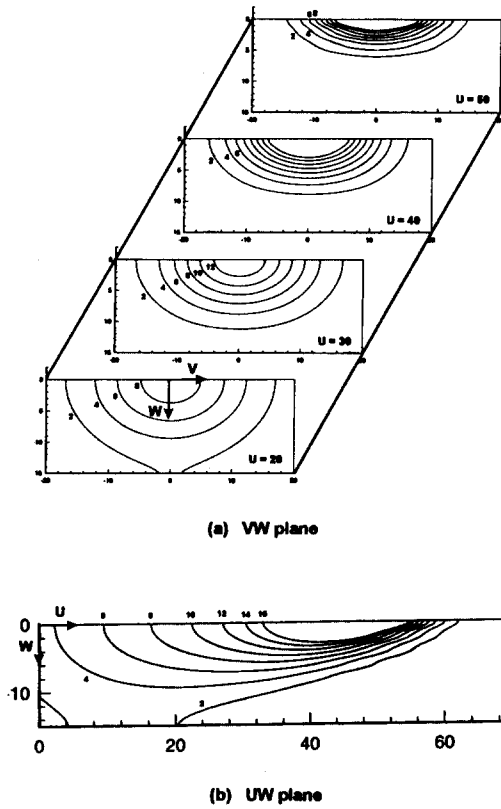


Fig. 3 Calculated temperature distribution in bead-on-plate.

환과 굴절, 반사되는 방향을 나타내었다.

그리고 음파가 각도를 가지고 입사될 때 반사 또는 굴절되는 각종 음파의 크기는 음향임피던스와 입사각도에 따라 정해지며 이 때의 음향임피던스는 매질의 밀도 ρ 와 음속 C 를 곱한 것으로 물질에 따라 정해지는 상수이다.

3.2 고온에서 음속의 변화

고체 내부를 전파하는 음파에는 종파와 횡파가 있으며 종파의 음속 C_b 와 횡파의 음속 C_s 는 각각 아래와 같이 표시된다. 여기서 E 는 종탄성계수, G 는 횡탄성계수이며 ν 는 포아송비이다.

$$C_b = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (7)$$

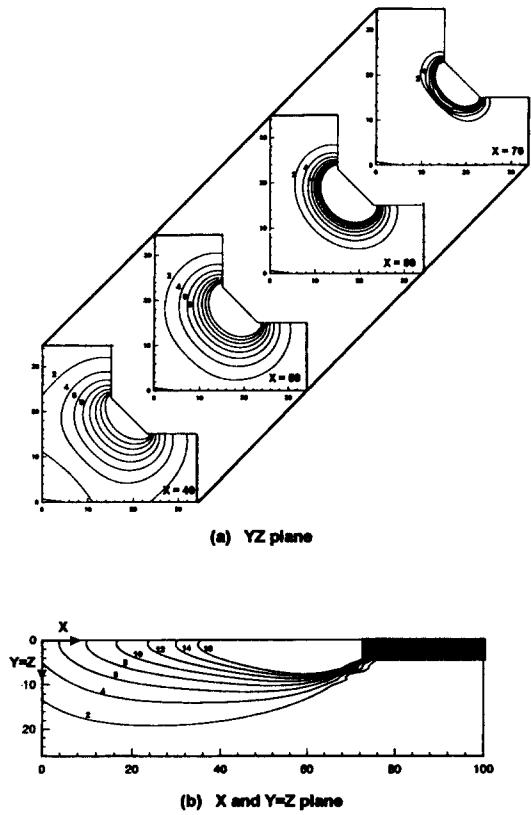


Fig. 4 Calculated temperature distribution in fillet weld

액체에서는 횡파가 존재하지 않으며 종파의 속도 C_u 은 다음과 같이 표시된다. 여기서 K 는 체적탄성계수이다.

$$C_u = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (8)$$

철강재료에서 온도의 증가에 따른 밀도의 변화는 작으나 탄성계수 들은 크게 감소하므로 초음파의 전파속도는 전체적으로 온도의 증가에 따라 감소하게되며 재료의 변태점에서 감소되는 양상이 변화한다. 또한 용융온도에 도달하여 액체상태가 되면 음속은 크게 감소한다. Fig. 6은 여러 문헌^{7, 11, 12}에서 발췌하여 조합한 것으로 강제에서 온도 변화에 따른 종파와 횡파의 음속 변화를 보여주고

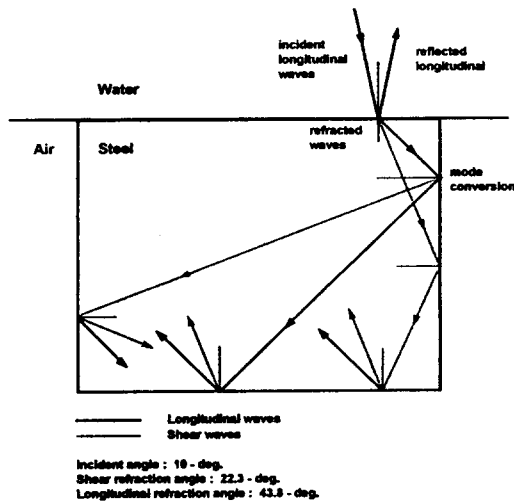


Fig. 5 Ultrasonic wave propagation, refraction, and mode conversion

있다. 이 그림에서 고상선 이하의 온도 범위에서 종파의 음속은 Panametrics¹²⁾에서 제공한것으로 두께 2인치의 시편에서 1MHz의 초음파로 실험하여 구한것이다. 이 그림은 비슷한 여러 강재의 음속 값을 조합하여 만든것으로 용접용 연강과 동일한 재료는 아니지만 초음파의 전파속도는 차이가 거의 없으므로 용접재료에서의 음속으로 가정하여 사용한다. 그리고 액체상태에서도 음속은 온도에 따라 변하지만 자료의 부족으로 액체상태에서는 동일한 음속으로 계산한다. 이 값은 그림에서 1600℃에서의 값으로 3600m/s로 가정하였다.

3.3 온도구배가 있는 용접부에서 초음파의 전달경로

초음파가 전파되는 과정에서 온도구배를 만나면 음속의 변화와 굴절이 생긴다. 철강재료에서 온도가 높아지면 음속은 느려지고 온도가 강재의 용융 온도에 도달하면 액체상태가 되어 음속은 크게 달라지며 횡파는 존재하지 않게된다. 이러한 변화로 초음파가 송신되어 센서에 수신될 때까지의 시간에 변화가 생긴다.

그리고 이러한 음속의 변화는 결과적으로 초음파의 전파경로 상에서 굴절을 일으켜 초음파의 진행각도를 변화시킨다. 온도구배가 있을때 초음파

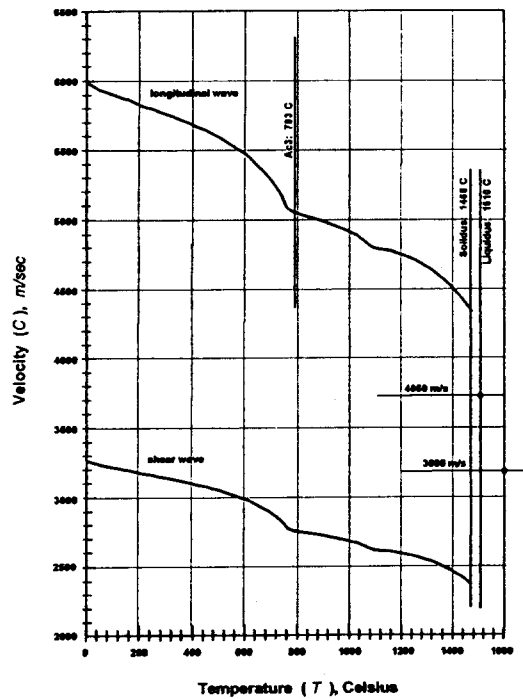


Fig. 6 Velocity-temperature curve for ultrasonic waves in steel

의 전달경로는 온도가 높은 쪽, 즉 음속이 느린 방향으로 기울어지게 된다. 그 결과 최종적으로 초음파가 전달되어 도달하는 위치를 달리하게 한다. 온도구배가 큰 용융부 근처에서는 이러한 전파경로의 왜곡은 크게 나타난다.

초음파는 일정한 각도를 가지고 퍼져나가지만 본 연구에서는 중심선을 지나는 점 파원으로 단순화하여 용접부의 윗면에서 45°로 입사되어 밑면에서 반사되어 표면으로 돌아올 때까지의 경로를 계산한다.

계산방법은 처음 초음파가 일정한 각도로 표면에서 입사되어 진행하면서 일정한 거리 간격으로 온도를 계산한다. 온도차가 정해진 간격, 여기서는 200℃, 이하이면 초음파는 계속 직선으로 구간 내의 평균속도로 전파되는 것으로 하고 온도차가 정해진 간격에 도달하면 그 점의 주변으로 일정한 거리가 떨어진 여러 점의 온도 값을 계산하여 등온선의 법선을 구하여 진행되어 온 초음파와 등온선 간의 입사각도를 계산한다. 이 입사각도를 이용하

여 굴절각을 계산하면 초음파의 진행방향을 결정할 수 있게된다. 물론 초음파의 속도는 온도와 파의 진동양식에 따라 정해지는 값이다.

이러한 방법으로 반복하여 계산하면 초음파가 최종적으로 도달하는 위치와 진행하는데 걸린 시간을 구할 수 있다. 위의 계산방법으로 비드용접과 필릿용접부의 종단면에서 초음파가 진행되는 경로와 시간을 계산하였다. 그리고 토치가 위치하는 지점에서 초음파를 수신하고자 할 때 초음파의 송신위치와 전파경로를 계산하였다. 이러한 결과를 Fig. 7과 8의 (a)에 나타내었다.

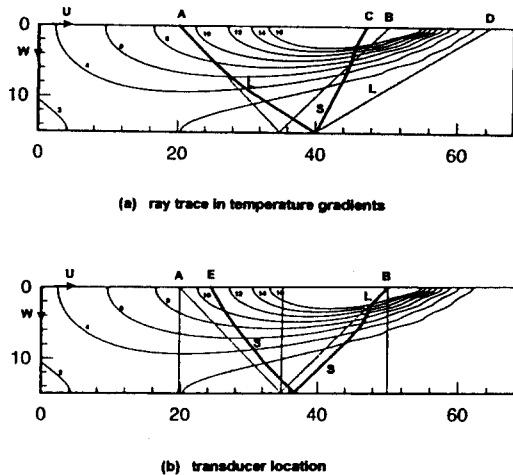


Fig. 7 Ray trace and transducer location in bead-on-plate

4. 검토 및 탐촉자의 위치 선정

Fig. 7과 8은 모두 윗면에서 45°로 초음파를 입사시켜 모재의 아랫면에서 반사되어 오는 신호를 수신하는 매우 일반적인 형태이다. 그림에서 온도구배는 등온선으로 표시하였다. 그림에서 가늘고 연한 실선은 온도구배가 없을 때 초음파의 경로이며, (a)에서 굵은 실선은 그림에서 표시된 온도구배에서 초음파의 경로를 표시한 것이다. 그리고 그림의 (b)는 실시간 측정에서 토치가 위치하는 지점에서 신호를 수신하는 경우 송신위치를 구하고 초음파의 경로를 계산하여 표시하였다.

Fig. 7(a)는 비드용접에서 종파를 입사시킨 경우

이다. 그림의 A에서 B경로는 온도구배가 없는 경우로 A에서 45°로 입사되어 밀면에서 반사되어 B에 도달한다. 이 경우 경로는 42.4mm이며 전파시간은 7.155 μ s가 소요된다. 그러나 온도구배가 있는 경우는 A에서 입사된 종파가 온도구배에 의하여 진한 실선과 같이 경로가 왜곡되어 밀면에 도달하게되고 여기에서 파형변환이 생겨 종파는 D점에 도달하고 횡파는 진행하는 도중 용융부의 경계에서 변환된 종파가 C점에 도달하게 된다. 이 경우 A에서 C까지의 경로는 41.7mm이며 전달시간은 9.873 μ s가 걸려 전달시간에서 38%의 차이가 생긴다. 또한 신호가 윗면에 도달하는 위치는 10.53% 정도의 차이가 생긴다.

그림의 (b)는 토치가 위치하는 지점인 B에서 45°로 종파를 수신하고자할 때 초음파를 입사시켜야하는 위치 E와 이때의 경로를 표시한것이다. 이 경우 E에서는 횡파를 입사시켜야하며 이 횡파가 밀면에서 반사되어 전달되고 다시 용융부의 경계에서 파형변환된 종파가 B에 도달하게되고 이 때의 경로는 39.473mm 이며 전달시간은 12.887 μ s가 소요된다.

Fig. 8은 필릿용접부의 가운데 종단면에서 온도구배를 표시한 것으로 기본 개념은 Fig. 7과 동일하다. (a)에서 온도구배가 없는 경우 초음파 경로는 A에서 B로 연한선으로 표시되어 있으며 이 경우 경로는 76mm이며 전파시간은 12.88 μ s가 소요된다. 그러나 온도구배가 있을 때 A에서 입사된 종파는 진한 실선과 같이 경로가 왜곡되어 밀면에 도달하게되고 여기에서 파형변환이 생겨 종파는 D점에 도달하고 횡파는 C점에 도달하게 된다. A에서 C까지의 경로는 74.356mm이며 전달시간은 16.649 μ s가 소요되어 전달시간에서 29.26%의 차이가 생긴다. 또한 신호가 윗면에 도달하는 위치는 9.8%의 차이가 생긴다.

(b)에서는 토치가 위치하는 지점인 B에서 45°로 종파를 수신하고자할 때 초음파를 입사위치 E와 E에서 입사된 초음파가 전달되어 B에 도달하는 경로를 표시하였다. 이 경로는 65.794mm 이며 전달시간은 21.444 μ s가 소요된다.

Fig. 7에서 온도구배가 없는 경우는 초음파를 송수신하는 위치인 A, B사이의 거리는 30mm이나 온도구배가 있는 경우 E, B 사이는 25.5mm가 되어 온도구배가 없는 경우에 비하여 4.5mm만큼 송신

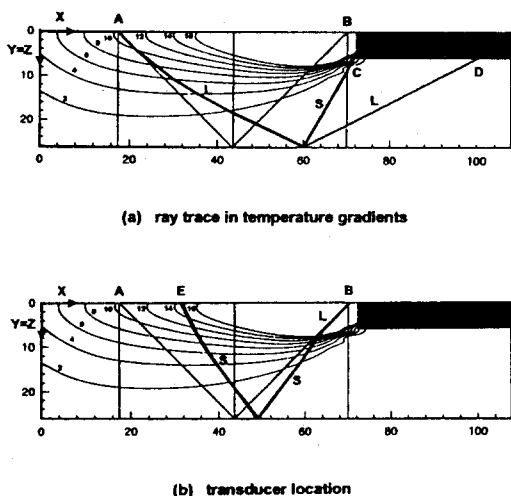


Fig. 8 Ray trace and transducer location in fillet weld.

위치를 앞당겨 설치하여야한다.

Fig. 8에서는 온도구배가 없는 경우는 송수신위치 사이의 거리는 53.74mm이나 온도구배가 있는 경우는 송수신위치가 E가 되어 E, B사이의 거리가 39.69mm되게 송수신장치를 설치하여야한다.

이상과 같이 용접 공정 중에 초음파를 전달시키면 모재의 온도구배에 의하여 전달시간이 상당히 많이 소요된다. 또한 초음파의 도달위치도 변하여 송수신점 사이의 거리가 짧아지게된다. 이러한 두 경향은 용접 입열이 많을 수록 모재가 얇을 수록 크게 나타난다.

5. 결 론

초음파를 이용하여 용접부를 실시간으로 탐상할 때 모재에 형성된 온도구배에 의하여 음속이 변화한다. 이에 따라 초음파 전달 시간이 변하고 전달 경로 상에서 굴절을 일으켜 전달 되는 방향을 변화시킨다.

그러므로 본 연구에서는 비접촉식으로 초음파를 송수신하여 용접 품질을 실시간 또는 원격으로 탐상하고자 할때 송수신된 초음파가 전달되어 수신될 때 까지의 경로와 시간을 온도구배의 영향을 고려하여 해석함으로써 송신 장치와 수신 장치 사이의

최적 설치 위치를 결정할 수 있게하고 수신된 신호로부터 정확한 거리 정보를 구할 수 있게 하였다. 또한 본 연구에서는 온도구배 및 경로 계산에 해석해를 이용하므로써 간단하며 적은 계산 시간으로 쉽게 계산할 수 있게 하였다.

참 고 문 헌

1. Carl R. Weymueller : Know your welding NDT-Ultrasonic testing, Welding design and fabrication, June, (1983), pp. 58-66.
2. George M. Graham, J. Yang, and Charles Ume : Laser ultrasound directivity in CS-3 Ceramic, Materials Evaluation, Vol. 52, May, (1994), pp. 607-610.
3. Douglas A. Oursler, and James W. Wagner : Narrow-band hybrid pulsed laser/EMAT system for noncontact ultrasonic inspection using angled shear waves, Materials Evaluation, Vol. 53, May, (1995), pp. 593-597.
4. R. D. Huber, and R. E. Green : Noncontact acousto-ultrasonics using laser generation and laser interferometric detection, Materials Evaluation, Vol. 49, May, (1991), pp. 613-618.
5. S. I. Rokhlin, K. Cho, and A. C. Guu : Closed loop process control of weld penetration using real-time radiography, Materials Evaluation, Vol. 47, Mar., (1989), pp. 363-369.
6. L. A. Lott : Ultrasonic detection of molten/solid interfaces of weldpools, Materials Evaluation, Vol. 42, Mar., (1984), pp. 337-341.
7. J. A., Johnson, N. M. Carlson, and L. A. Lott : Ultrasonic wave propagation in temperature gradients, Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 6, No. 3, (1987), pp. 147-157.
8. S. K. Jeong, and H. S. Cho : An analytical solution for transient temperature distribution

- in fillet arc welding including the effect of molten metal, *Journal of Engineering Manufacture, Proc. Instn. Mech. Engrs*, Vol 211(B3), (1997),
9. 정 선국, 조 형석 : 필릿용접 공정에서 온도 분포 예측을 위한 해석적 모델, *대한용접학회지*, Vol 13, No 2, (1995), pp. 68-81.
 10. 정 선국, 조 형석 : 용착금속을 고려한 필릿 용접 공정에서 온도분포 예측을 위한 해석적 모델, *대한용접학회지*, Vol 13, No 3, (1995), pp. 260-268.
 11. N. M., Carlson, J. A. Johnson, and D. C. Kunerth : Control of GMAW: Detection of discontinuities in the weld pool, *Welding Journal*, Vol. 69, July, (1990), pp. 256-263.
 12. Panametrics : Velocity-temperature curve for longitudinal waves in 4620 steel, (1996), Panametrics, INC. Waltham, MA U.S.A.