

研究論文
------

## 아연도금 강판의 CO<sub>2</sub> 레이저 용접에서 접치기 용접의 FEM 시뮬레이션

김 재 도\* · 조 치 용\*\*

### FEM Simulation of Lap Joint in CO<sub>2</sub> Laser Welding of Zn-coated Steel

Jae-Do Kim\* and Chi-Yong Cho\*\*

#### Abstract

Laser beam welding of zinc-coated steel, especially lap joints, has a problem of zinc vapor produced during welding which has a low vaporization temperature of 906°C. It is lower than the melting temperature of steel (1500°C). The high pressure formed by vaporization of zinc during laser welding splatters the molten pool and creates porosities in weld. During laser lap welds of zinc-coated steel sheets with CW CO<sub>2</sub> laser the gap size has been analyzed and simulated using a FEM. The simulation has been carried out in the range of gap between 0 and 0.16mm. The vaporized zinc gas has effected to prevent heat from conducting toward the bottom of sheets. In the case of too small gap size, zinc gas has not ejected and existed between two sheets. Therefore heat was difficult to conduct from the upper sheet to lower sheet and the upper sheet could over-melted. In the case of large gap size the zinc gas has been perfectly ejected but only a part of lower sheet has melted. The optimum range of gap size in the lap welds of zinc-coated steel sheets has been calculated to be between 0.08 and 0.12mm. According to the comparison of experiment, the simulation is proved to be acceptable and applicable to laser lap welds.

※ 1997년 8월 25일 접수

\* 정회원, 인하대학교 기계공학과

\*\* 비회원, 호남석유화학

## 1. 서 론

고출력 CO<sub>2</sub> 레이저 가공은 제어성이 우수하고 비접촉 국부가공이 가능하며, 다품종 소량생산에 우수한 시스템으로서 국내에서도 산업체에서 널리 이용될 것이다. 레이저 용접은 고밀도 에너지 가공으로 열용입량이 적어서 재료의 변형이 거의 없으며, 가공 속도가 다른 용접 방법보다 빠르다. 또한, 용접비와 열영향부가 매우 좁으며, 용접하기 어려운 형상이나 재료도 가공할 수 있다.<sup>1-3)</sup>

아연도금강판은 내구성이 뛰어나고, 값이 싸며, 내부식성이 강하다. 아연도금강판의 용접은 강과 아연 두 이종 재료간의 물리적 특성 차이로 용접에서 문제점을 안고 있다. 특히 겹치기 용접에서 모재의 용융점보다 낮은 온도에서 아연이 증발(906°C)하기 때문에 용접 후 용접부에 기공을 형성하는 등의 문제점을 안고 있다. 이것은 재료의 기계적 성질을 저하시키고 있다. 레이저 용접은 자동차와 같은 박판가공에 많이 사용되고 있으며 생산성 측면에서 매우 우수하다. 레이저는 이미 Benz, Ford, Volkswagens 등의 자동차 메이커에서 절단, 드릴링 및 용접에 사용되고 있다. 아연도금강판의 맞대기 용접에서는 별다른 어려움 없이 레이저를 이용할 수 있었으나 겹치기 용접에서는 박판 사이의 갭이 필요하다.<sup>4-5)</sup>

레이저 용접의 응용할 수 있는 해석적인 모델은 Rosenthal<sup>6)</sup>에 의해 점열원과 선열원에 관한 열유속식이 처음 제시된 이후, Alwang 등<sup>7)</sup>에 의해 CO<sub>2</sub> 레이저 용접에 관한 모델, Arata 등<sup>8)</sup>에 의해 CW 레이저 용접에 관한 모델, Cline 등<sup>9-10)</sup>에 의해 3차원 열유동 모델 등을 발표하였다. Westby<sup>11)</sup>, Paley 등<sup>12)</sup>의 의해 레이저 용접에 대한 온도 분포에 관한 수치해석적인 모델을 제시하였다. Mazumder 등<sup>13)</sup>은 키펀을 움직이는 가우시안 열원을 사용한 3차원 열전달 모델로 발전시켰다.

레이저 용접의 주요변수로는 레이저 출력, 초점 크기, 이송속도 등이 있다. 겹치기 용접에서는 중요한 변수의 하나는 두 용접 재료 사이의 간격을 들 수 있다. 통상적인 간격은 재료 두께의 25% 이내로 하는데, 그 이유는 갭이 커지면 중간의 공기층이 절연작용을 하여 유입된 열이 밑부분으로 전달되지 못하기 때문에 양호한 용접이 이루어지지

못하고, 레이저 에너지가 윗부분에만 조사되는 역할을 하기 때문에 온도가 쉽게 비등점 이상으로 상승하여 천공이 되는 경우가 생기기 때문이다. 너무 밀착된 경우는 증발된 아연 증기가 빠져나가지 못하여 기공 등의 결함이 발생된다. 이런 이유 때문에 아연도금강판의 레이저 용접시 갭 사이즈의 크기는 용접 특성을 결정하는 중요한 변수가 된다. 최적의 용접 특성을 유지하기 위해서는 다른 용접 변수들의 변화에 따른 최적의 갭 사이즈를 예측할 필요가 있다. 해석적인 이론은 Akhter 등<sup>4)</sup>이 증발량이 갭 사이로 빠져나가는 증기량이 같다는 조건으로 최소 갭 크기를 제시하였고, Suh 등<sup>5)</sup>은 실험적인 수치로 최적의 갭 크기를 제시하였다.

본 연구에서는 아연도금 강판의 겹치기 레이저 용접시 최적의 갭 사이즈를 유한요소법으로 해석하였다. 아연가스의 거동을 분석하여 아연 도금강판의 레이저 용접시 아연 가스가 용접성에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. 겹치기 용접 해석을 위한 유한요소법

### 2.1 모델선정

레이저빔 용접은 재료의 상변화가 내재해 있기 때문에 해석이 대단히 복잡하다. 경계 조건, 초기 조건, 무차원 변수와 지배방정식을 가지고 피가공물의 용접과정에 상변화와 용융물의 대류를 포함한 모델을 결정한다. 먼저, 주어진 지배방정식을 가지고 least-squares Galerkin weak form과 유한요소 형태로 식을 유도하였다.

길이를 L, 밀도를  $\rho$ , 비열을 C, 열전도도를 K, 열확산도를  $\alpha$ , 점성계수를  $\mu$ , 동점성계수를  $\nu$ 라고 놓는다. 참고온도를 T<sub>0</sub>, 용융온도를 T<sub>m</sub>이라 한다. 아랫 첨자 s와 l은 각각 고체와 액체를 나타낸다. 시간에 대한 특성 크기를 L<sup>2</sup>/a<sub>l</sub>라 하고 a<sub>l</sub>/L을 속도로 놓는다. 무차원 온도  $\theta$ 는 실제온도 T에 의해  $\theta = (T - T_m) / (T_0 - T_m)$  이다. R<sub>c</sub> = C<sub>s</sub>/C<sub>l</sub>이고 R<sub>k</sub> = K<sub>s</sub>/K<sub>l</sub>이다. 동압  $\underline{p}$ 는  $\underline{p} = p - \rho_0 g \underline{f} \cdot \underline{x}$ 로 표현되는데 여기서  $\underline{f}$ 는 중력 방향의 단위 벡터이고 g는 중력가속도이다. 무차원 압력은 특성압력 ( $\rho a_l^2 / L^2$ )을 동압으로 나눈 것이다. 무차원양의 주요 변수로는 Ste

(Stefan number,  $= C_L(T_0 - T_m)/L_H$ ), Pr (Prandtl number,  $= \nu/a_l$ ), Ra (Rayleigh number,  $= g\beta(T_0 - T_m)L^3/\nu a_l$ )를 사용하는 데, 여기서  $L_H$ 는 잠열이고  $\beta$ 는 열팽창 계수이다.

순수한 금속의 상변화 과정이라 가정한다. 시간  $t = 0$  에서 용융금속은 고정된 2차원 영역  $\Omega_0$  안에 있다고 가정한다.  $t > 0$  때, 영역  $\Omega_0$  안에는 시간에 따라 각각  $\Omega_S(t)$ 와  $\Omega_L(t)$ 로 표현되는 고체와 액체 영역이 존재한다(Fig. 1). 이 영역은 냉각 전진선 ( $\partial\Omega_1(t)$ )에 의해 분리된다.

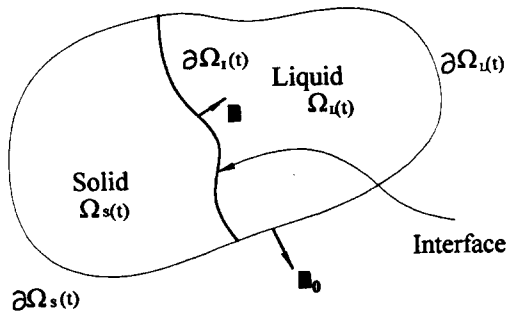


Fig. 1 Geometry of a welding process

자연대류에 의해 용융영역 속의 유동을 해석하기 위해 비압축성의 Navier-Stokes eq.을 이용한다.<sup>14,15)</sup> 이것은 층류유동이고 점성에너지 손실이 없다고 가정한다. 밀도에 관한 변수는 Boussinesq approximation (i.e.  $\rho = \rho_0[1 - \beta(T - T_m)]$ )을 이용한다.<sup>16)</sup>

액체 영역에서 속도장의 운동량 보존식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (\nabla u)u = \nabla \cdot \tau - PrRa \theta_l f \quad (1)$$

여기서, 응력  $\tau$ 에 관한 방정식은

$$\tau = -pI + 2Prsym(\nabla u) \quad (2)$$

여기서,  $I$ 는 2차 텐서이고  $sym()$ 는 대칭을 나타낸다. 비압축성 유동은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (3)$$

또는 수정 비압축성 조건<sup>17)</sup>에 의해

$$p + \lambda(\nabla \cdot u) = 0 \quad (4)$$

여기서 페널티 수는  $\lambda \gg \mu$ 라 가정한다.

온도장은 열전달 방정식에 의해서 다음과 같이 정의된다.

$$R_K \frac{\partial \theta_s}{\partial t} = \nabla \cdot (R_K \nabla \theta_s) \quad (5)$$

$$\frac{\partial \theta_L}{\partial t} + u \cdot \nabla \theta_L = \nabla \cdot \nabla \theta_L \quad (6)$$

식 (5)는 고체영역  $\Omega_S(t)$ 에 식 (6)는 액체영역  $\Omega_L(t)$ 에 각기 적용할 수 있다. 고체/액체의 경계  $\partial\Omega_1(t)$ 를 따라 에너지 평형은 다음과 같이 표현된다.

$$R_K \frac{\partial \theta_s}{\partial n} - \frac{\partial \theta_L}{\partial n} = (Ste)^{-1} V \cdot n \quad (7)$$

여기서 벡터  $V$ 는 고체/액체의 경계속도를 나타내고  $n$ 은 고체/액체 경계에 수직인 단위 벡터이다.

식 (1), 식 (5), 식 (6)에 사용되는 경계 조건은 다음과 같다.

$$u(x_1, x_2, t) = 0, \quad (x_1, x_2) = \partial\Omega_L(t) \quad (8)$$

$$R_K \nabla \theta_s(x_1, x_2, t) \cdot n_0 = Bi(\theta_m - \theta_s(x_1, x_2, t)), \quad (x_1, x_2) \in \partial\Omega_0 \quad (9)$$

$$\theta_s(x_1, x_2, t) = \theta_L(x_1, x_2, t) = \theta_m = 0, \quad (x_1, x_2) \in \partial\Omega_1(t) \quad (10)$$

단위 벡터  $n_0$ 는 경계  $\partial\Omega_0$ 에 수직인 벡터이다. 식 (9)의 경계조건은 일반적으로 쉽게 적용이 가능하다. 여기서, 혼합형태의 조건을 나타내는  $Bi$ 는 Biot 수로  $Bi = Lh/K_L$ 로 정의되고 이때의  $h$ 는 대류계수이고  $\theta_m$ 는 주위의 온도이다. 식 (10)에서 용융 온도는  $\partial\Omega_1(t)$ 를 따라 표현된다.

초기조건은 다음과 같다.

$$\Omega_S(0) = \Phi, \quad \Omega_L(0) = \Omega_0 \quad (11)$$

$$u(x_1, x_2, 0) = u_m(x_1, x_2), \quad (x_1, x_2) \in \Omega_0 \quad (12)$$

$$\theta_L(x_1, x_2, 0) = \theta_{in}(x_1, x_2), \quad (x_1, x_2) \in \Omega_0 \quad (13)$$

### 2.2 유한요소법의 적용

용접공정은 용융 금속의 응고과정에서 고체와 액체 영역 모두가 시간에 따라 상변화가 일어난다. 이런 특수한 모델을 일반화하는 방법은 끊임 없이 움직이고 변형할 수 있는 유한요소를 사용함으로써 해결할 수 있다. 고체와 액체 영역이 전진할 때 같은 유한요소 절점을 공유하고 있다고 가정한다. 본 논문에서는 Lynch 과 Gray<sup>18)</sup>, Zabarar 와 Ruan<sup>19)</sup> 에 의해 제안된 유한요소 형태를 이용하였다.

형상함수는 시간에 의한 함수이기 때문에 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>20)</sup>

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = \frac{d u_i^\alpha}{dt} \Phi^\alpha - u_i^\alpha v_j \frac{\partial \Phi^\alpha}{\partial x_j} \quad (14)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \theta^\alpha}{\partial t} \Phi^\alpha - \theta^\alpha v_j \frac{\partial \Phi^\alpha}{\partial x_j} \quad (15)$$

여기서  $u_i^\alpha(t)$ ,  $\theta^\alpha(t)$ ,  $p^\alpha(t)$ 는 각각 절점  $a$  ( $a = 1, 2, \dots, N^{ck}$ )에서  $i$ 번째 속도요소 ( $i = 1, 2$ ), 온도, 압력이다.  $v_j$ 는 식 (16)으로부터 계산된 절점속도이다.

$$v_1 = \frac{dX_1^\alpha}{dt} \Phi^\alpha(\xi, \eta), \quad v_2 = \frac{dX_2^\alpha}{dt} \Phi^\alpha(\xi, \eta) \quad (16)$$

여기서  $(X_1^\alpha, X_2^\alpha)$ 는 각 요소의 절점 좌표이고, 이러한 절점의 이동을 이용하여 식 (1), 식 (5), 식 (6)를 다음과 같이 수정할 수 있다.

$$\frac{du}{dt} + (\nabla u)u = -\nabla p + \nabla \cdot [2Prsym(\nabla u)] - PrRa \theta_L f \text{ in } \Omega_L(t) \quad (17)$$

$$\sigma \frac{d\theta}{dt} + \sigma u \cdot \nabla \theta = \nabla \cdot (\kappa \nabla \theta) \text{ in } \Omega_0 \quad (18)$$

여기서 상대운동  $\bar{u} = u - v$ 로 표현된다. 고체영역에서  $u = 0$ ,  $\sigma = R_c$ ,  $\kappa = R_k$ 이고, 액체영역에서  $\sigma = 1$ ,  $\kappa = 1$ 이다.

식 (18)을 weak form으로 유도하면 다음과 같다.<sup>19, 20)</sup>

$$\left[ \frac{M_{n-1+\gamma}}{\Delta t} + \gamma(C_{n-1+\gamma} + K_{n-1+\gamma}) \right] \{\theta_n\} = \{F_{n-1+\gamma}\} + \left[ \frac{M_{n-1+\gamma}}{\Delta t} - (1-\gamma)(C_{n-1+\gamma} + K_{n-1+\gamma}) \right] \{\theta_{n-1}\} \quad (19)$$

위의 행렬은  $N^{ck} \times N^{ck}$  ( $N^{ck}$ 은  $\Omega_0$ 영역 안에서의 전체 노드 수)의 차원을 갖고 다음과 같이 정의된다.

$$[M_{n-1+\gamma}] = \sum_{e=1}^E [M_e^{n-1+\gamma}], [C_{n-1+\gamma}] = \sum_{e=1}^E [C_e^{n-1+\gamma}], [K_{n-1+\gamma}] = \sum_{e=1}^E [K_e^{n-1+\gamma}] \quad (20)$$

여기서 앞의 각 항은 아래와 같은 절점 성분을 갖는다.

$$M_e^{\alpha\beta, n-1+\gamma} = \int_{\Omega_e} \sigma \Phi^\alpha \Phi^\beta d\Omega_e + \int_{\Omega_e} \sigma \gamma \Delta t u_{n-1+\gamma} \cdot \nabla \Phi^\alpha \Phi^\beta d\Omega_e \quad (21)$$

$$C_e^{\alpha\beta, n-1+\gamma} = \int_{\Omega_e} \sigma u_{n-1+\gamma} \cdot \nabla \Phi^\alpha \Phi^\beta d\Omega_e + \int_{\Omega_e} \sigma \gamma \Delta t u_{n-1+\gamma} \cdot \nabla \Phi^\alpha u_{n-1+\gamma} \cdot \nabla \Phi^\beta d\Omega_e \quad (22)$$

$$K_e^{\alpha\beta, n-1+\gamma} = \int_{\Omega_e} \kappa \nabla \Phi^\alpha \cdot \nabla \Phi^\beta d\Omega_e \quad (23)$$

여기서  $\alpha, \beta = 1, \dots, N^{ck}$ 이고, 만일  $\Omega_e \in \Omega_s(t)$ 이거나  $\Omega_e \in \Omega_L(t)$ 이면 각각 고체 또는 액체의 성질을 이용한다. 또한 하중벡터  $F$ 는  $N^{ck} \times 1$ 의 차원을 갖는다.  $\partial \Omega_0$ 를 따라 각 절점  $A$ 는 다음과 같다.

$$F^{A, n-1+\gamma} = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega_e} \Phi^A q d\Gamma_e \quad (24)$$

여기서  $E_B$ 는  $\Omega_0$  위에 위치한 경계 영역의 요소 수이고  $q$ 는 경계 플럭스를 나타낸다. 경계  $\Omega_L(t)$ 를

따라서 경계 절점에 대한 하중 벡터는 다음과 같다.

$$F^{A,n-1+\gamma} = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega_e} \Phi^\alpha \left( R_x \frac{\partial \theta_x}{\partial n} - \frac{\partial \theta_L}{\partial n} \right) d\Gamma_e \quad (25)$$

여기서  $E_i$ 는 냉각전진 선상의 영역 전체 수이다. 위 식의 괄호 안의 양은 고체/액체 경계를 따라 존재하고 있는 불연속 플럭스이다. 식 (25)는 용융 잠열의 에너지와 관계되어  $Q_i(t)$ 를 따라 존재하고 있는 경계 속도  $V$ 를 결정한다. 고체/액체 경계 속도는 Zabarav와 Ruan<sup>19)</sup>의 계산을 이용하였고, 운동량 방정식에서 동압의 항을 제거하기 위해 penalty method<sup>21)</sup>를 사용하였다

$u_{j;n}$ 를 시간  $t_n (n = 1, 2, \dots)$ 에서 미지의  $j$ 번째 속도 성분 ( $j = 1, 2$ )을 나타낸다고 정하고  $u_{j;n-1}$ 는 알고 있다고 가정한다.  $u_{j;n}$ 를 계산하기 위해 에너지 방정식과 유사한 방법으로 식 (17)의 잉여항  $R_j(u_{1;n}, u_{2;n})$ 를 다음과 같이 표현한다.

$$R_j(u_{1;n}, u_{2;n}) = \frac{u_{j;n} - u_{j;n-1}}{\Delta t} + \frac{\partial u_j}{\partial x_m} \Bigg|_{n-1+\gamma} + \frac{\partial p}{\partial x_j} \Bigg|_{n-1+\gamma} - (\nabla \cdot [2Prsym(\nabla u_{n-1+\gamma})])_{j;n-1+\gamma} + Pr Ra \theta_{n-1+\gamma} f_{j;n-1+\gamma} \quad (26)$$

least-squares optimization의 형태는 다음과 같다.

$$\sum_{e=1}^E \int_{\Omega_e} \frac{\partial R_j(u_{1;n}, u_{2;n})}{\partial u_{i;n}^\alpha} R_j(u_{1;n}, u_{2;n}) d\Omega_e = 0 \quad (27)$$

for  $\alpha = 1, 2, \dots, N^{de}, i = 1, 2$

구조방정식과 압력방정식을 사용하여 다음의 대수방정식과 같은 벡터

$\{u_n\} = \{u_1^1, u_2^1, u_1^2, u_2^2, \dots, u_2^2\}^T$ 를 유도할 수 있다.  $n = N^{bu}$ (액체상태의 절점 수)

$$\left[ \frac{\mu_{n-1+\gamma}}{\Delta t} + \gamma(l_{n-1+\gamma} + K_{n-1+\gamma} + P_{n-1+\gamma}) \right]$$

$$\begin{aligned} & \{u_n\} + [D_{n-1+\gamma}]\{\theta_{n-1+\gamma}\} \\ & = \{F_{n-1+\gamma}\} + \left[ \frac{\mu_{n-1+\gamma}}{\Delta t} - (1-\gamma) \right. \\ & \quad \left. (l_{n-1+\gamma} + K_{n-1+\gamma} + P_{n-1+\gamma}) \right] \{u_{n-1}\} \end{aligned} \quad (28)$$

경계항의 하중벡터는 다음과 같이 주어진다.

$$F^{i\omega n-1+\gamma} = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega_e} \Phi^\alpha (\tau_{ij}(n_{\omega})) \Bigg|_{n-1+\gamma} d\Gamma_e \quad (29)$$

$\partial Q_L(t)$ 와  $\partial Q_i(t)$ 를 따라 속도 경계조건과  $\partial Q_i(t)$ 를 따라 용융온도 조건의 구배는 없다. 열유속과 혼합 온도/플럭스 조건은  $\partial Q_0(t)$ 에 하중벡터  $F$ 의 계산으로 적용할 수 있다.

### 3. 유한요소법에 의한 용접 해석

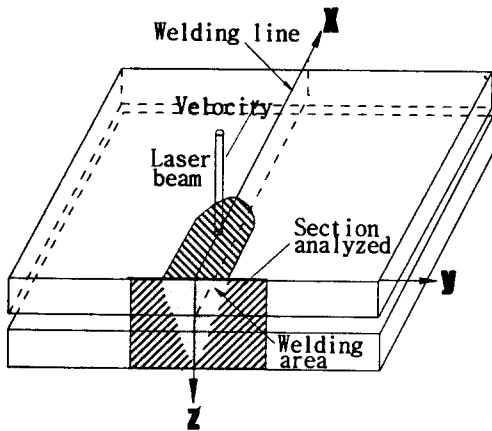
#### 3.1 용접 시뮬레이션

두 아연도금 강판의 접치기 용접시 용접 형상과 유동장을 해석하기 위해 빔의 이송 방향으로는 온도 변화가 거의 없다고 가정하고 2차원 문제로 해석하였으며, 재료는 등방체로 취급하였다. 비열이나 열전도도 등 온도에 따라 변하는 물성치들은 평균값을 이용하고 이를 상수로 가정하였다(Table 1). 레이저 빔의 초점 크기는 일정하고 아연도금강판 사이의 갭의 크기와 레이저 출력 변화에 대하여 레이저 용접 시뮬레이션을 하였다.

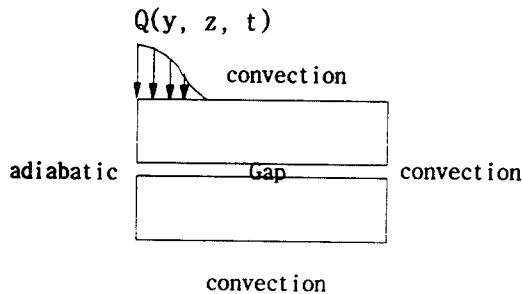
Table 1. Thermal properties of zinc-coated steel

	Symbol	Value	Unit
Latent heat	$L_v$	15.2	kJ/mol
Density	$\rho$	7870	kg/m <sup>3</sup>
Kinematic viscosity	$\nu$	$5.5 \times 10^{-6}$	m <sup>2</sup> /s
Thermal expansion coefficient	$\beta$	$1.52 \times 10^{-5}$	1/°C
Melting temperature	$T_m$	1536	°C
Boiling temperature	$T_b$	2860	°C

Fig. 2는 해석에 이용된 용접시의 모델을 도시한 것이다. FEM 모델에서 Fig. 2(b)와 같이 Z축에 대칭으로서 한면은 단열되어 있고 삼면은 자연 대류로 하였다. 온도 분포 해석을 위하여 해석 모델을 3절점 요소를 사용하였고 각 절점은 용융 상태일 때 유동에 의해 이동한다. 유한요소해석 방법을 이용한 용접 해석에 있어서 시편의 열교환은 레이저 빔에 의한 열유속이 재료와 상호작용에 의해서 발생하는 열전달 및 자연 대류 현상을 시간의 변화에 따른 비정상 상태의 온도 해석으로 하였



(a)



(b)

Fig. 2 (a) Welding configuration of model  
(b) FEM simulation model

다. 이러한 해석 방법을 위해 재료 표면에 열전도 및 자연 대류의 과정을 Crank-Nicolson 차분식에 의하여 순차적으로 Fig. 3와 같은 순서도로 진행하였다.

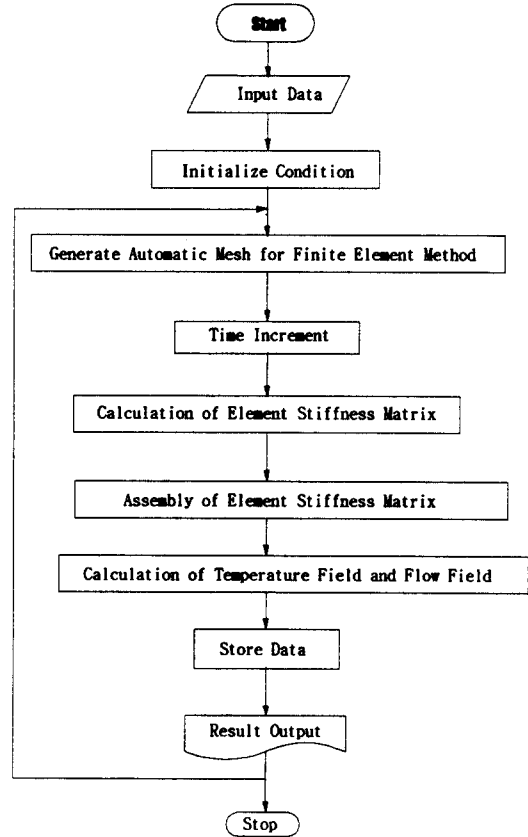


Fig. 3 Flow chart for laser weld simulation by FEM

겹치기 용접의 레이저 출력을 1.7kW로 초점 크기는 150, 200, 250 $\mu$ m, 빔의 이송속도는 1.7m/min로 하여 갭 크기를 0.2mm씩 증가시키면서 시뮬레이션을 수행하였다. 이는 아연도금강판의 실제 실험 결과와 비교하기 위해서였다.<sup>20</sup>

레이저 겹치기 용접을 유한요소법으로 시뮬레이션하기 위해서 다음과 같은 가정을 하였다.

- (1) 레이저 빔이 인입되는 영역이 고체 상태이면 흡수율은 20%이고 액체 상태이면 70%이다.
- (2) 재료는 등방체이다.
- (3) 레이저 이송 방향으로의 온도 변화는 없다.

(4) 복사에 의한 손실은 없다.

(5) 고체 영역의 절점은 고정되어 있고 액체 영역의 절점은 움직인다.

### 3.2 재 료

본 연구에서 사용된 시편은 자동차 body에 사용되고 있는 두께 0.8mm의 아연도금강판을 사용하였으며 아연 도금층의 두께는 4 $\mu$ m이다. 시물레이션에 사용된 시편의 규격은 길이 100x100x0.8mm이다. 시편의 물리적 물성치는 Table 1에 나타내었다. Table 2은 용접 시물레이션에 사용된 레이저 용접 변수를 나타낸 것이다.<sup>22)</sup>

**Table 2.** Conditions of welding simulation

Power (kW)	Velocity (m/min)	Spot size ( $\mu$ m)	Gap size ( $\mu$ m)
1.7	1.7	150, 200, 250	0, 20, 40, 60, 80 100, 120, 140, 160

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 시물레이션 결과

아연도금강판의 겹치기 용접의 유한요소법을 이용한 수치 해석을 한 결과, 최적의 갭 크기는 0.08mm에서 0.12mm사이인 것을 알 수 있었다. 이는 Akhter 등<sup>4)</sup>이 해석적인 방법에 의해 제시한 결과와 일치와 비교적 잘 일치한다(Table 3). 갭 크

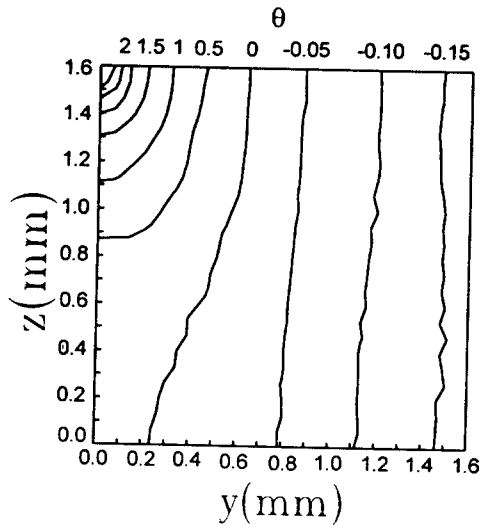
기가 0.06mm이하일 때에는 아연 가스가 갭 사이에서 완전히 방출되지 않는다. 이는 아래 강판에 용융되어 용접이 되더라도 많은 기공이 발생될 수 있으며, 실험에 의해서도 증명되고 있다.<sup>22)</sup> 갭 크기가 0.14mm 이상일 때는 공기가 절연층의 역할을 하여 상판의 과용융이 발생한다.

레이저 출력이 1.7kW, 초점 크기가 200 $\mu$ m, 이송속도가 1.7m/min일 때의 최적의 갭 크기인 0.1mm에서의 온도분포장을 Fig. 4에 도시하였다. 이때  $\theta=0$  일 때는 고체/액체 경계를 나타내고,  $\theta=1$  일 때는 기체/액체 경계를 나타낸다.  $\theta>1$  일 때는 피가공물이 증발하여 기체 상태를 나타내고,  $1>\theta>0$  일 때는 액체 상태를 나타내며,  $\theta<0$  일 때는 고체 상태를 나타낸다. 이러한 조건을 이용하여 용접 형상을 예측할 수 있다. Fig. 5는 출력 1.7kW, 이송속도 1.7m/min 일 때, 갭 크기를 0.1mm로 유지시키고 초점 크기가 250 $\mu$ m 일 때 온도 분포를 보여 주고 있다. Fig. 6은 초점 크기를 200 $\mu$ m로 고정하고 이송 속도 1.5와 2.5m/min 일 때 시물레이션 결과이다. 이송속도 2.5 m/min에서는 단위 시간당의 에너지가 부족하여 하부 강판까지 용입이 충분히 이루어지지 않음을 본 시물레이션에서는 알 수 있다.

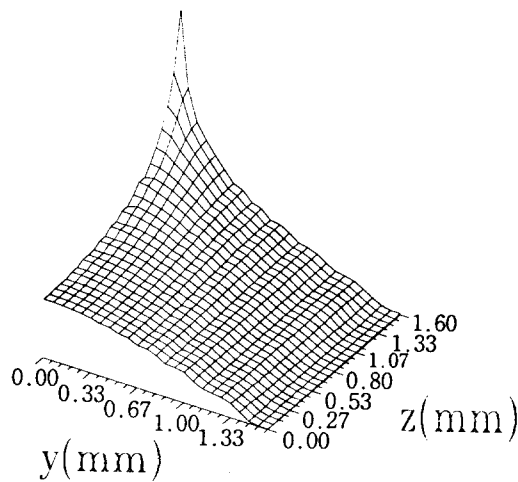
Fig. 7은 초점 크기의 변화에 따른 비드 폭의 변화를 나타낸 것이고, Fig. 8은 이송속도의 변화에 따른 비드 폭의 변화를 나타낸 것이다. 초점 크기가 증가함에 따라 상부 비드 폭은 증가하지만, 하부 비드 폭은 감소하다 증가한다. 이는 초점 크기가 작을수록 열영향부가 작아져서 기존의 다른 용

**Table 3.** Comparison of optimal gap size in lap joint of zn-coated steel

	Optimal gap size, $G_{opt}$
Akhter et al.	Theoretical equation, $G_{opt} = AVtzn/tp \frac{1}{2} A$ , material coefficient, V, welding speed, $t_m$ , zinc thickness, $t_p$ , base metal thickness
Suh et al.	Experimental result $G_{opt} = 0.075 \sim 0.125$ mm for laser power 1.8~4.0 kW and welding speed 1.5~4 m/min
Na il	Experimental result $G_{opt} = 0.1$ mm for laser power 1.3, 1.7 kW and welding speed 1.6~2.2 m/min
FEM Simulation by authors	FEM analysis $G_{opt} = 0.08 \sim 0.12$ mm



(a)

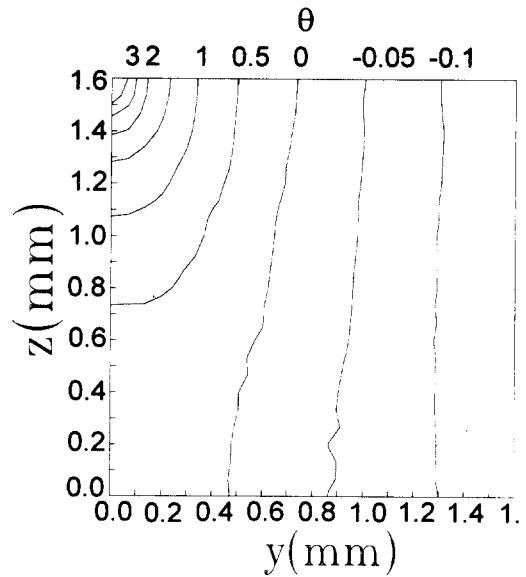


(b)

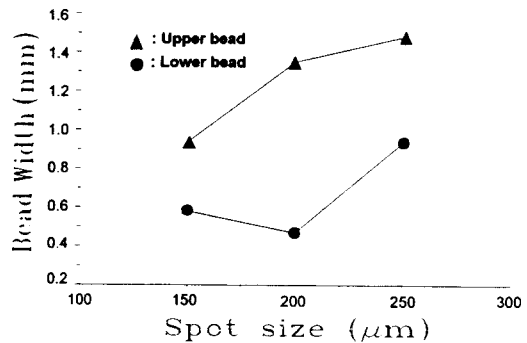
**Fig. 4** Temperature distribution for gap size 0.1mm at time = 1.48 msec, P=1.7kW, V=1.7m/min.

- (a) Temperature field contour
- (b) Temperature field surface

접 방법보다 우수한 용접성을 갖는다는 것을 알 수 있다. 반면, 초점 크기가 증가하면 열영향부가 약간 커지게 된다. 따라서 초점 크기가 작을 수록 좋은 용접 결과를 얻을 수 있을 것이다. 이송속도가 증가함에 따라 상부 및 하부 비드 폭이 감소함을



**Fig. 5** Temperature distribution for gap size 0.1mm at time=1.48msec, P=1.7kW, V=1.7m/min.



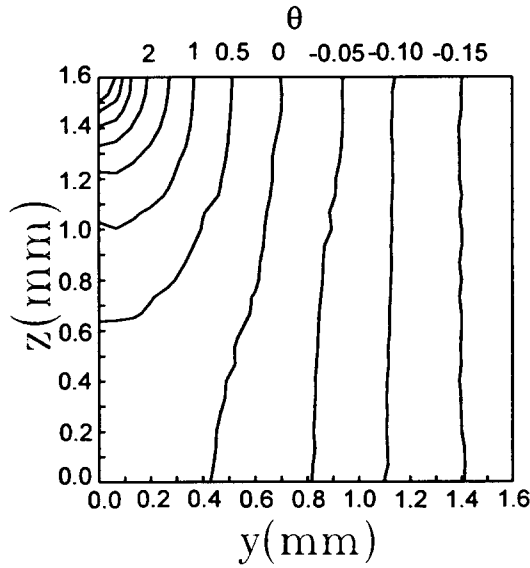
**Fig. 7** Bead width for various spot sizes

알 수 있다. 이는 이송속도가 증가하면 단위 시간당 열유입량이 감소하여 용입 깊이나 비드 폭이 감소하는 것이다.

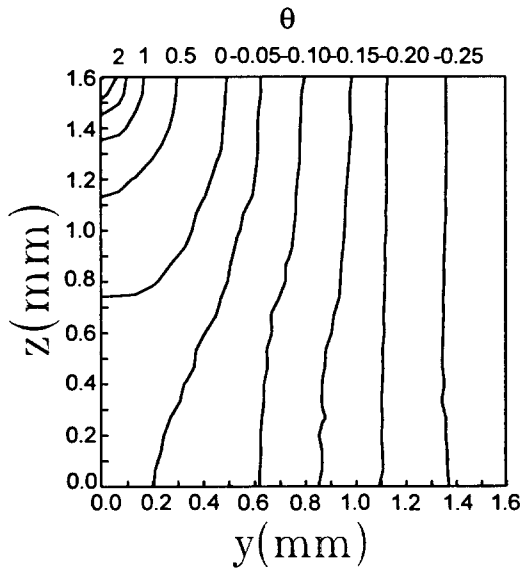
#### 4.2 해석치와 실험치의 비교

아연도금강판의 용접성 실험에 대한 연구는 그동안 국내외에서 많이 수행되었다. 유한요소법을 이용한 본 해석 방법의 타당성을 논하기 위해서 실험 결과<sup>29)</sup>와 비교해 보았다. Fig. 9를 보면 갭의 크





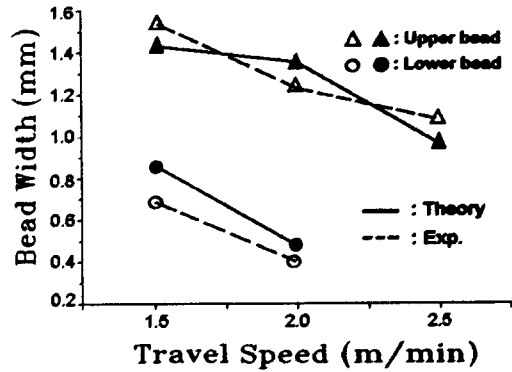
(a)



(b)

**Fig. 6** Temperature field for gap size 0.1mm at time=1.48msec, P=1.7kW  
(a) V=1.5m/min (b) V=2.5m/min

기가 불충분하면 용접부에 기공이 형성됨을 알 수 있다. 갭 크기의 최적값은 용접중 발생된 아연 가스량과 갭 사이로 빠져나가는 양이 같다는 조건하



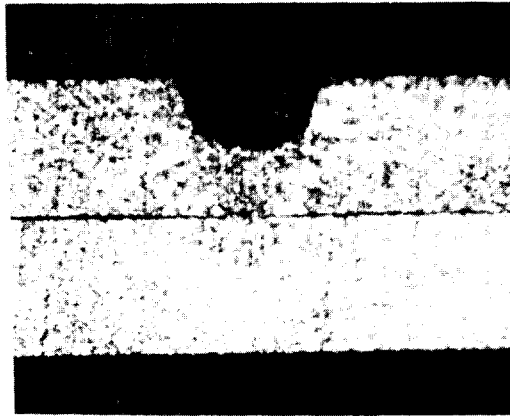
**Fig. 8** Bead width for various travel speeds

에 Akhter 등<sup>4)</sup>이 제시한 이론값에 의하면 아연도금강판의 레이저 용접에서 아연 도금층의 두께에 따라서 조금씩 다르지만 약 0.1mm 이다. 이 수치는 Suh 등<sup>5)</sup>과 Na<sup>28)</sup>가 제시한 실험 결과와도 거의 일치하는 값이며, 본 시뮬레이션의 결과와도 거의 일치함을 알 수 있다(Table 3). 시뮬레이션 결과에 의하면 용접 형상에서 상부 비드 폭은 실험치와 비교적 잘 일치 하였다(Fig. 8).

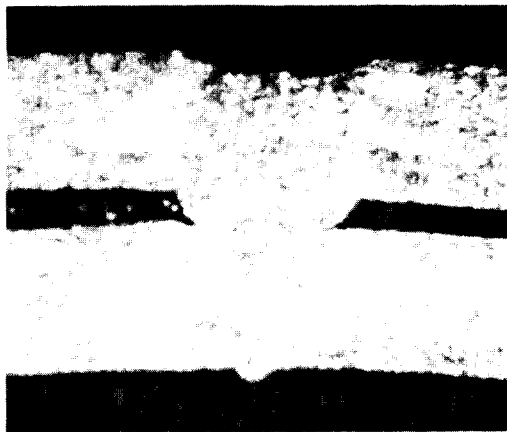
### 5. 결 론

자동차 차체 재료인 아연도금강판의 레이저를 이용한 겹치기 용접시, 아연가스의 발생으로 인한 최적의 갭 크기를 구하기 위해서 유한요소법으로 해석하여 시뮬레이션 하였다. 아연도금강판의 용접시의 유동장과 온도장을 해석함으로써 적절한 레이저 용접조건을 예측하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 아연도금강판의 레이저 용접시 필요한 갭 사이즈의 범위는 0.08mm에서 0.12mm 사이이다.
- (2) 갭이 작으면 배출되지 못한 아연 가스가 절연 작용을 하여 상판은 과도하게 용융되고 하판은 거의 용융되지 않는다.
- (3) 갭이 큰 경우 열전달은 원활하나 상판의 용융부가 갭의 체적만큼 침강하기 때문에 용접성이 약화된다.
- (4) 아연도금강판의 용접 시뮬레이션에서 비드 폭은 실험값과 비교적 잘 일치하였다.



(a)



(b)

**Fig. 9** Microsections of laser lap welds with gap sizes ( $\times 25$ )  
 (a) No gap, (b) Gap size 0.1mm.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 지원(KOSEF 941-1000-060-2)에 의해서 연구된 것이며, 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. R. Walker, "Applying Multikilowatt CO<sub>2</sub> Lasers in Industry", *Lasers & Applications*, Apr. 1984, pp. 62-69.
2. J. M. Darchuk and L. R. Migliore, "The Basic of Laser Welding", *Laser & Applications*, March 1985, pp. 59-66.
3. E. A. Metzbower, P. E. Denny, F. W. Fraser and D. W. Moon, "Mechanical Properties of Laser Beam Welds", *Welding J.*, July 1984, pp. 39-43.
4. R. Akhter, W. M. Steen and K. G. Watkins, "Welding Zinc-coated Steel with a Laser and the Properties of the Weldment", *J. of Laser Applications*, 1991, pp. 9-20.
5. J. Suh et al., "CW CO<sub>2</sub> Laser Beam welding and Formability of Zn-coated Steel Plates", *J. of KWS*, Vol. 14, No. 3, 1996, pp. 140-146.
6. Rosenthal, D., "Mathematical Theory of Heat Distribution During Welding and Cutting", *Welding J.*, Vol. 20, No. 5, 1941, 220s-234s.
7. Alwang, W. G., Cavanaugh, L. A. and Sammartino, E. *Weld. J.*, Vol. 43, No. 3, 1965, pp. 105.
8. Arata, Y. and Miyamoto, I., "Some Fundamental Properties of High Power Laser Beam as a Heat Source", *Trans. of JWS*, Vol. 3, No. 1, 1972, pp. 141-151.
9. Cline, H. E. and Anthony, T. R., "Heat Treating and Melting Material with a Scanning Laser or Electron Beam", *J. Appl. Phys.* Vol. 48, No. 9, 1977, pp. 3895-3900.
10. Jae-Do Kim, "Prediction of the Penetration Depth in Laser Beam Welding", *J. of KSME*, Vol. 4, No. 1, 1990, pp. 32-39.
11. Westby, O., "Temperature Distribution in the Workpiece by Welding", *Dept. of Metallurgy and Metals Working, The Technical Univ. of Norway, Dissertation*, 1968.
12. Paley, Z and Hibbert, P. D., *Weld. J.*, Vol. 54, No. 11, 1975, pp. 385S.

13. Mazumder, J. and Steen, W. M., "Heat Transfer Model for CW Laser Material Processing", J. Appl. Phys., Vol. 51, No. 2, 1980, pp. 941-947.
14. R. Viskanta, "Natural Convection in Melting and Solidification", in S. Kakac, W. Aung and R. Viskanta (eds.), Natural Convection; Fundamentals and Applications, Hemisphere, New York, 1985, pp. 845-877.
15. A. N. Brooks and T. J. R. Hughes, "Streamline Upwind/Petrov-Galerkin Formulations for Convection Dominated Flows with Particular Emphasis on the Incompressible Navier-Stokes Equations", Comput. Methods Appl. Mech. Eng., Vol. 32, 1982, pp. 199-259.
16. G. f. Carey and J. T. Oden, Finite Elements VI, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1986.
17. T. J. R. Hughes, The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1987.
18. D. R. Lynch and W. G. Gray, "Finite Element Simulation of Flow in Deforming Regions", J. Comp. Phys., Vol. 36, 1980, pp. 135-153.
19. N. Zabarar and Y. Ruan, "Moving and Deforming Finite Element Simulation of Two-dimensional Stefan Problems", Compu. Appl. Numer. Methods, Vol. 6, 1990, pp. 495-506.
20. T. J. R. Hughes, "Unconditionally Stable Algorithms for Nonlinear Heat Conduction", Comput. Methods Appl. Mech. Eng., Vol. 10, 1987, pp. 135-139.
21. M. S. Engleman, R. L. Sani, P. M. Gresho and M. Berconier, "Consistent vs. Reduced Integration Penalty Methods for Incompressible Media Using Old and New Elements", Int. J. Numer. Methods eng., Vol. 2, 1982, pp. 25-42.
22. Na il, "Mechanical Properties of Laser Welds in Zn-coated Steel Sheets", Inha University, MS Thesis, 1994.