

## 레이저 키홀 용접의 열원 모델링: Part 2-간극과 두께 차이의 영향

이재영\* · 이원범\*\* · 유중돈\*\*\*

\*LG 전자, 생산기술원

\*\*POSCO, 기술연구소

\*\*\*한국과학기술원, 기계공학과

## Heat Source Modeling of Laser Keyhole Welding: Part 2-Effects of Gap and Thickness Difference

Jae-Young Lee\*, Won-Beom Lee\*\* and Choong-Don Yoo\*\*\*

\*Production Engineering Research Center, LG Electronics, Pyungtack 451-713, Korea

\*\*POSCO Technical Research Lab., Gwangyang 545-711, Korea

\*\*\*Dept. of Mech. Eng., KAIST, Daejeon 305-701, Korea

## Abstract

A three-dimensional Gaussian heat source model is modified to include the effects of the gap and thickness-difference for the laser keyhole welding. The gap of the butt joint influences the welding efficiency such that the melting area decreases linearly with the gap. When the different plate thickness is used such as the tailored blank welding, melting areas of the thick and thin plates are predicted by introducing the thickness-difference factor. The calculated results using the modified heat source show reasonably good agreements with the experimental results.

\* Corresponding author : mecca@lge.com

(Received August 9, 2004)

Key Words : Laser welding, Heat source model, Gap, Thickness difference, Tailored Blank Welding

## 1. 서 론

레이저 용접은 우수한 용접 품질과 높은 생산성을 얻을 수 있기 때문에 활용도가 증가하고 있으며, 최근 자동차 산업에서 경량화와 안전성을 향상시키기 위해 차체 용접과 TB (Tailored Blank) 용접에 적용되고 있다<sup>1)</sup>. 레이저를 이용한 TB 용접의 용접부를 정확하게 해석하려면 Fig. 1의 맞대기 용접(butt welding)에 사용하는 판재 사이의 간극(gap)과 두께 차이의 영향을 고려한 레이저 열원 모델이 필요하다. 이와 같은 열

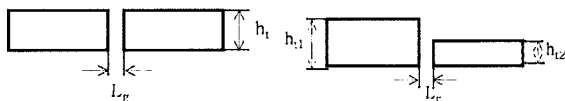


Fig. 1 Schematic of butt joint and TB joint

원 모델은 TB 용접 뿐만 아니라 일반적인 레이저 용접의 열 해석과 응력 해석에 사용할 수 있다.

TB 용접을 포함하는 일반적인 맞대기 용접에서 용접 품질은 판재 사이의 간극에 의해 큰 영향을 받기 때문에 간극을 일정하게 유지하기 위한 정밀한 치공구(jig)가 필요하다. 서정<sup>2)</sup> 등은 맞대기 용접에서 간극과 두께 차이가 기계적 성질과 소성 변형에 미치는 영향을 실험을 통해서 분석하였으며, 장원석<sup>3)</sup> 등은 신경회로망(neural network)을 이용하여 겹치기 조인트(lap joint)에서 간극의 영향, 용접부의 크기와 용입을 예측하였다. Sudnik<sup>4,5)</sup> 등은 맞대기 용접 및 겹치기 용접에서 간극을 고려한 수치해석을 수행하여 용접부 형상을 계산하였다. 그러나 많은 경우에 레이저 열원을 정량적으로 결정하지 않았기 때문에 잔류 응력과 열변형을 계산하기 위한 유한요소법과 같은 수치해석에 적용하기 곤란하다.

본 연구에서는 선행 연구에서 제안한 3차원 가우시안 열원 모델을 간극과 두께 차이의 영향을 포함할 수 있도록 보완하였으며, 실험을 통하여 측정된 용접부의 형상을 이용하여 열원의 인자를 결정하였다. 수정된 열원을 이용하여 완전용입 모드의 용접부 형상을 계산하였으며, 실험 결과와 비교하여 제안한 열원 모델의 타당성을 검증하였다.

## 2. 간극과 두께 차이를 고려한 레이저 열원 모델링

### 2.1 간극의 영향

선행 연구에서 비드 용접에서 발생하는 키홀의 형상을 고려하여 제안한 3차원 가우시안 열원 모델은 다음과 같다.

$$Q(x, y, z) = \frac{2\eta_{eq}P}{\pi r_f^2 h} e^{-2(x^2+y^2)/r_f^2} \left(1 - \frac{\alpha z}{h}\right) u(z) \quad (1)$$

$$u(z) = 1, \text{ if } z < h \\ = 0, \text{ if } z > h$$

이때, P는 레이저 출력,  $r_f$ 는 레이저 빔의 반경, h는 키홀 깊이,  $\eta_{eq}$ 는 등가 용접 효율(equivalent welding efficiency),  $\alpha$ 는 깊이 방향의 열원밀도 인자(power density distribution factor)를 나타낸다. 위의 식을 Fig. 1의 맞대기 용접과 TB 용접에 적용하려면 간극과 두께 차이의 영향을 포함해야 한다.

레이저를 이용한 맞대기 용접에서 간극은 레이저 빔의 흡수율에 영향을 미친다. 판재 사이의 간극이 레이저의 초점 직경보다 크면, 대부분의 레이저 빔은 간극을 통과하기 때문에 판재에 흡수되는 양은 크게 감소하여 0에 가까워진다. 실험 결과로부터 간극과 초점 직경의 비율에 따라 흡수율이 증가하기 때문에 본 연구에서는 간극과 흡수율의 관계를 선형적이라고 가정하여 아래와 같이 열원 모델을 보완하였다.

$$Q(x, y, z) = F_g \frac{2\eta_{eq}P}{\pi r_f^2 h} e^{-2(x^2+y^2)/r_f^2} \left(1 - \frac{\alpha z}{h}\right) u(z) \quad (2)$$

$$F_g = 1 - a_g \frac{L_g}{2r_0} \quad (3)$$

이때,  $F_g$ 는 간극 인자(gap factor),  $L_g$ 는 간극의 크기,  $r_0$ 는 초점 직경,  $a_g$ 는 간극 인자의 비례 상수이다.

Fig. 2에 보인 바와 같이 맞대기 용접에서 간극이 증가하면 비드 두께  $h_b$ 가 감소하기 때문에 용접된 판재의

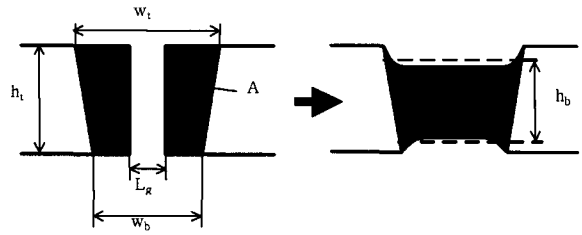


Fig. 2 Notation of butt weld

기계적 성질과 성형성이 감소한다<sup>2,6)</sup>. 간극에 의해 변화하는 비드 두께를 예측하기 위해 용융된 비드의 형상은 사다리꼴로 가정하며 비드

$$h_b = \left(\frac{A}{A + L_g h_t}\right) h_t \quad (4)$$

이때, A는 비드 단면의 용융 면적,  $h_t$ 는 판재의 두께를 나타낸다. 호스우에 의해 용융 면적이 사다리꼴로 변한다고 가정하면, 용융 면적을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A = F_g A_0 \quad (5)$$

이때,  $A_0$ 는 간극이 0일 때의 용융 면적을 나타낸다. 식(4)과 식(5)로부터 비드 두께와 판재 두께의 비는 다음과 같다.

$$\frac{h_b}{h_t} = \frac{F_g A_0}{F_g A_0 + L_g h_t} \quad (6)$$

위의 식으로부터 비드 두께비 ( $h_b/h_t$ )를 증가시켜 용접 품질을 향상시키려면, 간극을 줄이거나 용융량을 증가시켜야 하며, 판재의 두께가 증가할수록 비드 두께비가 감소함을 알 수 있다.

### 2.2 두께 차이의 영향

TB 용접에서 사용하는 판재의 두께가 다르기 때문에 Fig. 3과 같이 박판의 경우에는 윗 부분이 제거된 키홀

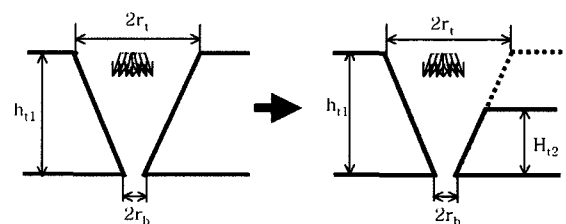


Fig. 3 Keyhole shape of TB welding

형상이 된다. 판재의 두께가 다르지만 키홀 깊이  $h$ 를 후판 두께와 일치시키고, 열원밀도 인자  $\alpha$ 는 맞대기 용접의 값을 사용하였다. TB 용접에서 박판과 후판에 인가되는 레이저의 열량에 따라 용융 형상이 변화하기 때문에 본 연구에서는 박판과 후판에 흡수되는 열은 분리하고 박판의 입열량에 가중치(weight factor)를 부가하여 판재에 인가되는 열량의 비율을 조절하였다.

$$Q(x, y, z) = (F_g \frac{2\eta_{eq}P}{\pi r_f^2 h} e^{-2(x^2+y^2)/r_f^2} (1 - \frac{\alpha z}{h}) u(z))_{thick\ plate} + (F_t F_g \frac{2\eta_{eq}P}{\pi r_f^2 h} e^{-2(x^2+y^2)/r_f^2} (1 - \frac{\alpha z}{h}) u(z))_{thin\ plate} \quad (7)$$

이때,  $F_t$  는 두께 차이 인자(thickness-difference factor) 로서 실험을 통하여 결정하는 상수이다. 레이저 빔의 초점이 두 판재의 이음부 중심에 있는 경우에 대해서 두께 차이 인자에 따라 용융 형상이 변화하는 개략적인 추세를 Fig. 4에 나타내었으며,  $F_t$ 가 1보다 커질수록 박판의 용융량이 증가한다. 위의 식(7)에서 후판과 박판의 키홀 깊이가 동일하기 때문에  $F_t$ 가 1이면 박판과 후판에서 판재 깊이 방향의 열원 밀도는 동일하다.

맞대기 용접에 비해 TB 용접의 흡수율이 감소하며, 두께 차이에 의해 감소되는 용접 효율을 ray-tracing 방법으로 결정하면 등가 용접 효율을 다음의 식으로 구하였다.

$$\eta_w P = \int_V Q(x, y, z) dV = \int_{thick} F_g \frac{2\eta_{eq}P}{\pi r_f^2 h} e^{-2(x^2+y^2)/r_f^2} (1 - \frac{\alpha z}{h}) u(z) dV + \int_{thin} F_t F_g \frac{2\eta_{eq}P}{\pi r_f^2 h} e^{-2(x^2+y^2)/r_f^2} (1 - \frac{\alpha z}{h}) u(z) dV \quad (8)$$

### 3. 수치 해석과 실험

제안한 3차원 가우시안 열원을 이용하여 용접부의 온도를 계산하였으며, 계산을 위해 3차원 유한차분법

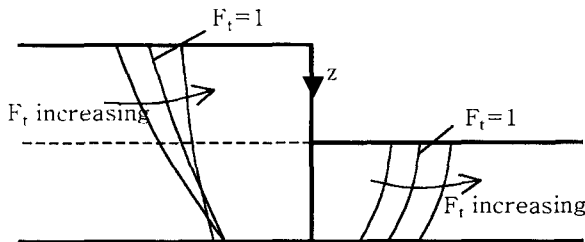


Fig. 4 Effects of thickness-difference factor  $F_t$  on melting shape

(Finite Difference Method, FDM) 코드인 EL3D<sup>7)</sup>를 사용하였다. 맞대기 용접은 용접선을 중심으로 대칭이므로 한쪽 부분의 온도를 계산하였고, TB 용접의 경우에는 판재의 두께가 다르기 때문에 판재 전체의 온도를 계산하였다. 수치해석 결과를 이용하여 열원 모델의 인자들이 용접부 형상에 미치는 영향을 분석하고 계산 결과와 실험 결과를 비교하여 제안한 열원 모델의 타당성을 검증하였다.

레이저 용접 실험은 간극 인자와 두께 차이 인자의 값을 결정하고 열원 모델을 이용한 수치 해석 결과를 검증하기 위해 수행하였다. 맞대기 용접과 TB 용접을 위해 출력 6kW인 TEM<sub>01</sub>\* 모드의 CO<sub>2</sub> 레이저를 사용하였다. 길이 300m인 SAPH370 강판을 시편으로 사용하였으며, 강판의 물성치를 Table 1에 정리하였다. 보호가스로 헬륨 가스 (15 liter/min)를 사용하였으며, 레이저 빔의 초점을 용접선 중심부의 표면에 위치시켰다.

간극의 효과를 고려하기 위해 두께 1.6, 2.3, 3mm인 판재를 이용하여 맞대기 용접을 하였으며, 최대 간극은 0.4mm이다. 용접속도는 완전용입이 발생하는 용접 속도인 3~8m/min 범위에서 1m/min단위로 변화시켰다. TB 용접은 두께 1.4와 0.7mm인 판재를 사용하였으며 최대 간극은 0.4mm이다. 레이저 빔의 초점을 후판의 윗면에 위치시켜 용접하였으며, 용접 속도는 4~9m/min이다.

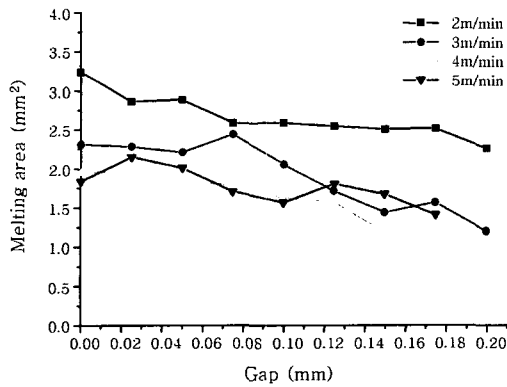
## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 맞대기 용접 결과

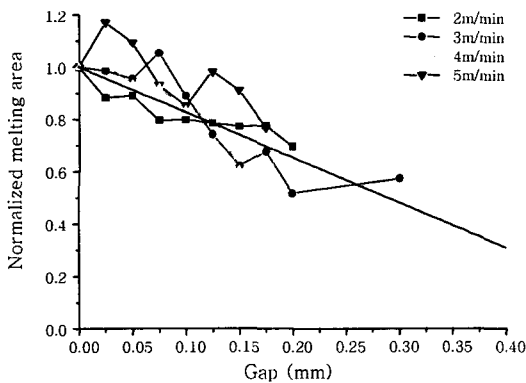
간극의 영향을 고려한 열원식인 식(2)에서 용접 효율과 열원밀도 인자의 값은 선행 연구에서 사용한 비드 용접의 값을 사용하였다. Fig. 5은 두께 2.3mm인 실험으로 구한 판재의 용융 면적과 간극의 관계를 나타내며, Fig. 5(a)에서 간극이 0인 경우에 용융 면적이 최대이고, 용접 속도가 증가함에 따라 열입력이 감소하여 용융 면적이 감소한다. 용접 속도가 동일한 조건에서 간극의 폭이 증가함에 따라 용융면적이 거의 선형적으

Table 1 Material properties of base metal

Mass density	7860 kg/m <sup>3</sup> (steel) 1.161 kg/m <sup>3</sup> (air)
Thermal conductivity	30 W/mK (steel) 2.63×10 <sup>-2</sup> W/mK (air)
Specific heat	795 J/kg K
Melting temperature	1860K



(a) Variation of melting area due to gap and travel speed

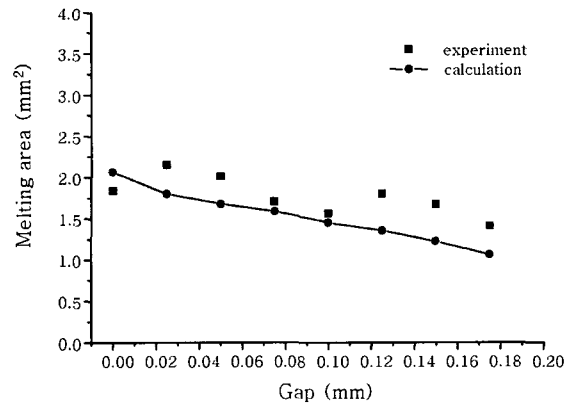
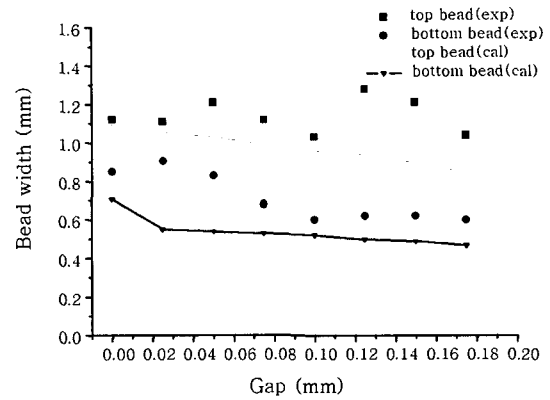


(b) Normalization and linear fitting

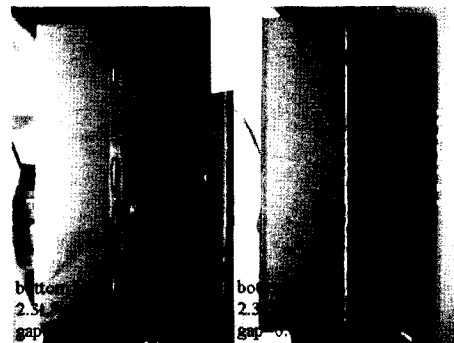
**Fig.5** Effect of gap on melting area for 2.3mm thick kness plate

로 감소하며, 이는 키홀 바닥면의 열린 정도가 증가하여 흡수율이 감소하기 때문이다. 간극에 의해 변화하는 용융 면적을 간극이 0일 때의 용융 면적으로 나누어 정상화(normalized) 시킨 값을 Fig. 5(b)에 나타내었으며, 직선 맞춤(linear fitting)으로 계산한 식(3)의  $a_g$ 는 0.97이다. 판재 두께가 1.6과 3mm인 경우의 실험에서도  $a_g$ 의 값이 유사하기 때문에 판재 두께가 변화하여도 동일한 값을 사용할 수 있으며, 본 연구에서  $a_g$ 의 값으로 1을 사용하였다.

수치해석으로 계산한 비드 형상과 실험 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 두께 2.3mm인 판재를 5m/min의 속도로 용접하는 경우, Fig. 6(a)에 보인 바와 같이 비드 폭의 경우 20%이내의 오차 범위에서, 용융 면적의 경우 10% 이내의 오차 범위에서 예측하였다. Fig. 6(b)의 아랫면 비드 형상으로부터 간극이 없는 경우에는 불규칙적인 부분용입이 발생하지만, 0.05mm의 간극이 존재하면 균일한 완전용입 비드를 얻을 수 있었다. 실험에 사용한 용접 속도가 비드 용접의 천이 모드에 해당하는 속도이기 때문에 간극이 0인 경우에는 부분적으로 부분용입이 발생하지만, 간극이 존재하면 간극에 의



(a) Bead width and melting area

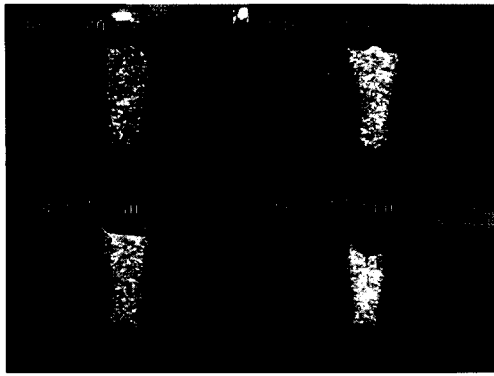


(b) Bottom bead shape - gap 0 vs. gap 0.05mm

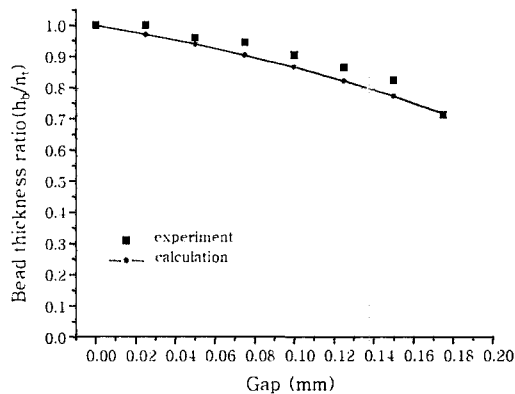
**Fig. 6** Comparison of calculated and experimental butt welds with 2.3mm thickness plate and 5m/min travel speed

해 키홀 아랫면의 열린 상태가 유지되기 때문에 안정적인 완전용입이 발생하는 것으로 판단한다.

Fig. 7은 두께 2.3mm인 판재를 5m/min의 속도로 용접하는 경우의 간극에 따른 비드의 단면 형상과 비드 두께의 비를 나타낸다. 적절한 간극은 완전용입을 얻는데 유리하지만, Fig. 7(a)에 보인 바와 같이 간극이 증가하면 용융 면적과 비드 두께가 감소하며, 과도한 간극은 비드의 두께를 감소시키므로 용접 품질을 저하시킨다. 소성 가공시 용접부의 파괴를 방지하려면 비드 두께와 판재 두께의 비 ( $=h_b/h_t$ )가 0.8 이상이 필요한



(a) Cross-sections of butt joints



(b) Comparison of bead thickness ratio

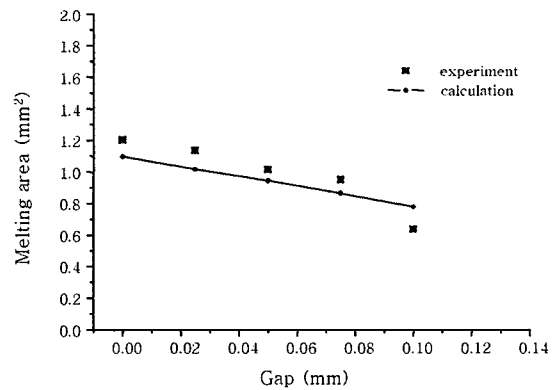
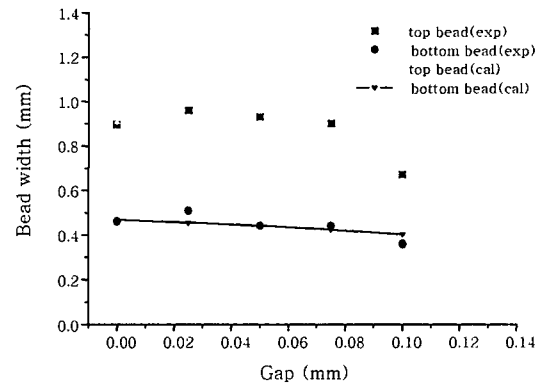
Fig. 7 Bead geometry and bead thickness ratio for 2.3mm thickness plate and 5m/min travel speed

것으로 보고되었다<sup>2)</sup>. 수치해석으로 비드 두께와 판재 두께의 비를 계산하고 실험 결과와 비교하여 Fig. 7(b)에 나타내었다. 간극이 0.13mm 보다 크면  $h_b/h_t$ 가 0.8 이하로 되어 불량 발생하는 것으로 예측할 수 있으며, 이는 실험 결과와 일치하였다.

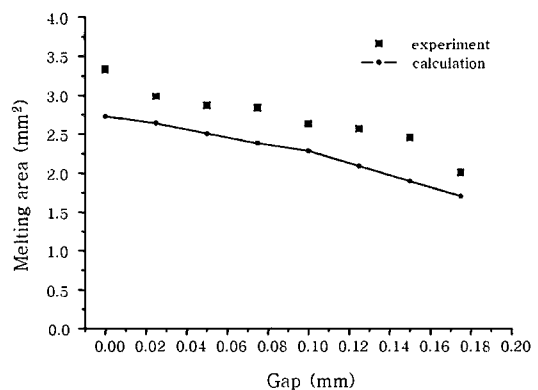
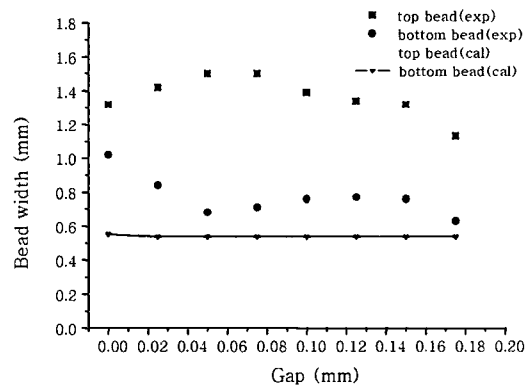
판재의 두께가 1.6mm와 3mm의 경우에 대해 열 해석을 수행한 결과를 Fig. 8에 나타내었으며, 이 경우의 용융 모드는 정상 모드이다. 두께 1.6mm 인 판재의 경우, 간극에 의한 비드 폭과 용융 면적의 변화를 매우 정확하게 예측하였으며, 두께 3mm 인 판재의 경우에 비드 폭에서 비교적 큰 오차가 발생하지만 용융 면적을 비교적 정확하게 예측하였다. 판재의 두께가 증가할수록 비드 폭의 계산에서 오차가 증가하지만, 용융량을 비교적 정확하게 계산할 수 있으며 이는 용접 품질을 판정하는데 유용하다.

#### 4.2 TB 용접 결과

두께 0.7mm와 1.4mm인 판재를 이용한 TB 용접의



(a) Results of 1.6mm thickness plate with 7m/min travel speed



(a) Results of 3mm thickness plate with 3m/min travel speed

Fig. 8 Comparison of bead geometry for 1.6 and 3mm thickness plate

수치 해석을 위해 열원 모델에 사용하는 인자의 값을 결정하여야 한다. Fig. 9의 비드 형상이 정상 모드를 나타내기 때문에 열원 밀도 인자는 정상 모드의 값인 0.6을 사용하였다. 간극 인자는 판재 두께의 변화에 크게 영향을 받지 않기 때문에 TB 용접에서도 맞대기 용접의 간극 인자 상수값인 1을 사용하였으며, 키홀 깊이  $h$ 는 최대 용융 깊이인 후판의 두께 1.4mm로 선정하고,  $F_t$ 의 값으로 1을 사용하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 TB 용접에서 키홀이 비대칭 형상이므로 다중반사 효과가 감소한다. 맞대기 용접에서 정상 모드의 용접 효율은 50%이지만, ray-tracing 방법으로 계산하면 TB 용접의 용접 효율이 맞대기 용접에 비해 20% 정도 감소하므로 TB 용접의 용접 효율로 40%를 사용하였다.

Fig. 9에 보인 바와 같이 후판의 윗면에서 용융 금속이 박판의 윗면으로 흐르면서 완만한 비드를 형성한다. 간극이 0인 경우에는 용융량이 충분하여 완만한 비드를 형성하지만, 간극이 0.15mm로 증가하면 용융량이 충분하지 못하여 비드 두께가 급격한 변화한다. 계산 결과는 용접부의 고액 경계면을 비교적 정확하게 예측하기 때문에 비드의 형상에 의한 TB 용접의 용접 품질을 예측하는데 활용할 수 있을 것으로 판단한다.

## 5. 결 론

레이저 키홀 용접에서 간극과 두께 차이의 영향을 고려한 열원을 이용하여 열해석과 실험을 수행하였으며, 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 간극 인자와 두께 차이 인자를 이용하여 기존의 3차원 가우시안 열원을 보완하였으며, 이를 맞대기 용

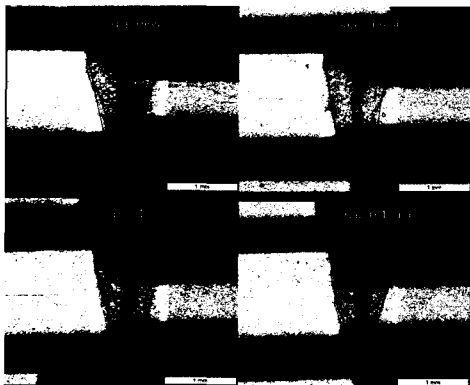


Fig. 9 Bead shapes with calculated results of TB welding with 7m/min travel speed

접과 TB 용접의 완전용입 모드에 적용하였다.

(2) 간극의 크기에 비례해서 용융량이 선형적으로 감소하기 때문에 간극은 용접 효율을 감소시키는 역할을 하며, 간극 인자의 상수인  $a_g$ 는 판재 두께에 크게 영향을 받지 않는다. 적당한 간극이 존재하면 완전용입 비드를 안정적으로 얻을 수 있지만, 과도한 간극은 용융량이 감소하여 용접 품질을 감소시킨다.

(3) TB 용접과 같이 판재 두께가 다른 경우에는 키홀이 비대칭 형상이므로 흡수율이 감소하며, 두께 차이 인자를 이용하여 박판과 후판에 가해지는 열을 분리하였다. 레이저의 초점을 용접선 중심에 위치시키는 경우에 두께 차이 인자의 값으로 1을 사용하였다.

(4) 제안된 레이저 열원 모델을 이용하여 맞대기 용접과 및 TB 용접의 용접부 형상을 10% 오차 범위 내에서 비교적 정확히 예측하였다.

## 후 기

본 연구는 POSCO 기술연구소의 지원을 받아 수행하였으며, 이에 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. J. B. Lee and H. D. Park : Current status of tailored blank technology, Journal of KWS, 18-3 (2000), 266-2723 (in Korean)
2. J. Suh, Y. H. Han, J. O. Kim and Y. S. Yang : CO<sub>2</sub> laser beam welding and formability of steel plates with different thicknesses, Journal of KWS 14-1 (1996), 45-54 (in Korean)
3. W. S. Chang and S. J. Na : Prediction of Laser-Spot-Weld Shape by Numerical Analysis and Neural Network, Metallurgical and Materials Transactions B, 120 (2001), 723-731
4. W. Sudnik, D. Radaj and W. Erofeew : Computerized simulation of laser beam welding, modeling and verification, Journal of physics D: Applied Physics 29 (1996), 2811-2817
5. W. Sudnik, D. Radaj and W. Erofeew : Computerized simulation of laser beam weld formation comprising joint gaps, Journal of physics D: Applied Physics, 31 (1998), 3475-3480
6. K. C. Kim and J. W. Kim : Welding Technology for Tailored blank manufacturing, Journal of KSW 18-3 (2000), 273-280 (in Korean)
7. S. V. Patankar : Numerical heat transfer and fluid flow, Taylor & Francis, 1998