

## 두께가 다른강판의 레이저 용접시 열유동에 관한 연구

양 영 수\*

### A Study on the Heat Flow in Laser Welding of steel Sheet of the Different Thickness

#### ABSTRACT

Laser welded blanks are finding increased usage in many industrial applications, which are made of different sheet thickness or different material strengths joined together. In this study the heat flow problem in laser welding of the different steel sheet thickness was solved by using a finite element method, and a series of experiments were carried out to confirm the validity of the numerical method.

**Key Words :** Laser Welding(레이저 용접), Heat Flow(열유동), Different Sheet Thickness(두께가 다른판), Finite Element Method(유한요소법)

#### 1. 서론

레이저 용접은 좁은 열 영향부, 적은 열변형, 빠른 용접속도 등 여러가지 장점을 갖고 있기 때문에 최근 항공기, 자동차 등 여러 산업분야에서 각광을 받고 있다. 특히 자동차 산업 분야에서 에리저 가공에 관한 연구가 많이 행해지고 있는데, 그중의 하나가 자동차 body 생산에 관한 것이다. 예로서, 지금까지는 자동차 문짝(door)를 생산 할때 일체형의 박판을 블랭킹한 후 성형가공하여 만들기 때문에 깨끗하고 정밀한 제품을 얻을 수 있으나 문짝 전체가 균일한 두께이므로 각부위의 요구되는 강도에 따라 두께를 조절할 수 없다. 그러나 판을 적절한 크기로 절단한 후 각 조각을 레이저 용접하여 성형가공하면(Fig. 1), 필요에 따라 강도가 요구되는 부분에 두꺼운 판을 사용할 수 있고, 필요한

부분만 절단 후 용접하여 제작하므로 재료의 이용율이 높아 재료비를 크게 절감 할 수 있다(Fig. 2) (1, 2, 3). 이러한 공정에서 요구되는 것이 두께가 다른 판의 용접이다. 이것은 용접후 최후 공정으로 stamping 공정이 요구되므로 용접부의 강도는 용접후 뿐 아니라 용접후 성형가공 까지를 고려한 용접부 강도가 요구된다. 용접부 강도는 잔류응력에 크게 지배됨으로 이중 두께의 레이저 용접시 잔류응력 해석이 요구되고 또한 용접후 성형가공이 끝난 상태까지의 잔류응력 해석이 필요하다.

본 연구에서는 잔류응력 해석을 위한 전 단계로 필수적으로 요구되는 것이 열유동해석이므로, 두께가 다른 판의 레이저 용접시 나타나는 열 유동현상을 유한요소법을 이용하여 해석하였다.

#### 2. 이론해석

\* 전남대학교 공과대학 기계공학과

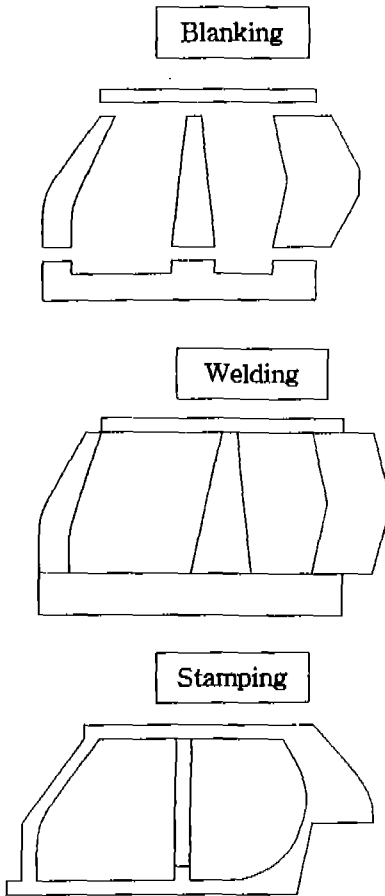


Fig. 1 Integrated side member by laser welded blanks.

2.1 유한요소 수식화

공작물에 가해진 열량은 전도(conduction)에 의해 재료내부로 전달된다. 이때 열전달 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_i = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

- $T$  : Temperature [ $^{\circ}C$ ]
- $k$  : Heat conduction coefficient [ $J / s m^{\circ}C$ ]
- $Q_i$  : Internal heat generation rate unit volume [ $J / m^3$ ]
- $\rho$  : density [ $kg / m^3$ ]
- $c$  : specific heat [ $J / kg^{\circ}C$ ]
- $t$  : time [sec]

식 (1)의 해를 구하기 위해서는 해석영역 내부의 초기 조건과 모든 경계에서 경계조건을 필요로 한다. 초기조건은 시작 시간에서 온도는 상온이므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z) \quad (2)$$

$T_0$  : Initial temperature [ $^{\circ}C$ ]

경계조건은 표면에서 열이 Flux로 유입되고, 대기로 대류에 의해 열전달이 일어난다.

Compared item	Individual type		One-sheet type	
Schematics				
① Cleanness	bad	x	good	o
② Number of dies	20 dies	x	4 dies	o
③ Accuracy	low	x	high	o
④ Material yield	high(65%)	o	low(40%)	x
⑤ Material flexibility	selectable	o	fixed	x
⑥ Weight	light	o	heavy	x

Fig. 2 Comparison of conventional side member panels

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = q \quad \text{on } S_1 \quad (3)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_a - T_s) \quad \text{on } S_2 \quad (4)$$

$q$  : Heat flow rate per unit area [ $J / s m^2$ ]

$T_s$  : Surface temperature [ $^{\circ}C$ ]

식(1)-(4)을 Galerkin 방법에 의하여 유한요소 수식화 결과는 다음과 같다(4).

$$[C] \left[ \frac{dT}{dt} \right] + ([K_c] + [K_h])[T] = [R_q][K_h]$$

where

$$[C] = \int_{\Omega} \rho C_p [N]^T [N] d\Omega$$

$$[K_c] = \int_{\Omega} [B]^T [k] [B] d\Omega$$

$$[R_q] = \int_{S_1} q [N]^T dT \quad (5)$$

$$[K_h] = \int_{S_2} h [N]^T [N] dT$$

$$[R_h] = \int_{S_2} h T_a [N]^T dT$$

식(5)는 시간에 대한 1차 미분방정식이 되기 때문에 해를 구하기 위해서는 시간에 대한 적분을 필요로 한다. 최종형태의 유한요소 방정식은 다음과 같다.

$$(\theta [K] + \frac{1}{\Delta t} [C])[T]_{n+1} = \left\{ -(1-\theta) \right.$$

$$\left. [K] + \frac{1}{\Delta t} [C] \right\} [T]_n + (1-\theta)[R]_n + \theta [R]_{n+1} \quad (6)$$

$\theta = 0$  : Euler forward difference method

$\theta = 1/2$  : Crank-Nicolson method

$\theta = 2/3$  : Galerkin method

$\theta = 1$  : Backward difference method

## 2.2 경계조건

공작물에 국부적으로 열을 가하여 생성된 불균일한 온도분포를 구하기 위해서는 비정상 상태(unsteady state)의 천이(transient) 과정을 3차원으로 해석해야 한다. 그러나 3차원 해석은 컴퓨터 용량과 경제성 문제 때문에 주로 2차원 해석을 하고있다(5). 특히 레이저 재료가공은 가공속도가 빠르기 때문에, 열원진행방향으

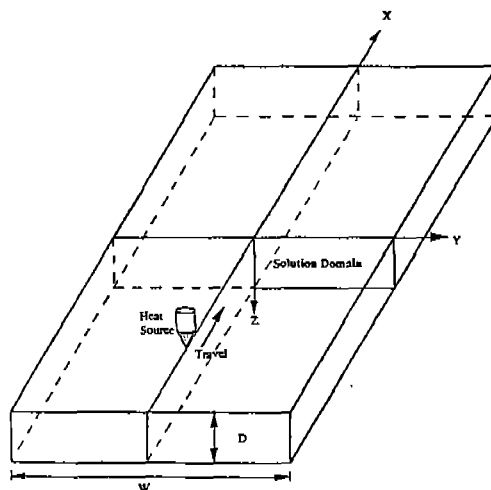


Fig. 3 Schematic diagram of solution domain and coordinate system for analysis of similar square butt welding

로 열전달을 무시한 2차원(Y-Z plane, Fig. 3) 해석이 큰 문제점을 포함하고 있지는 않다. Fig. 3과 같이 열원이 평판위에 일정속도로 이동할때, 준정상상태로 가정하면 해석영역내의 임의점(point)과 시간에서 온도는 다음과 같이 표시된다.

$$T(x, y, z, t) = T(x - vt, y, z) \quad (7)$$

$v$  = the speed of the heat source [ $m / s$ ]

$x, y, z$  = spatial coordinates

식(7)을 주어진 한단면( $X=0$ 인 Y-Z평면)에 대한 천이 과정 온도식으로 표현하면 다음과 같다.

$$T(x, y, z, t) = T(0, y, z, t - x/v) \quad (8)$$

식(8)은  $X=0$ 인 단면에 대해 2차원(Y-Z) 비정상상태를 나타낸다. 즉, 3차원 비정상상태의 문제를 준정상상태로 가정하여 2차원 비정상상태로 변환하였다.

### 2.2.1 동일두께의 맞대기용접

열원을 중심으로 양쪽이 대칭이므로 반쪽 단면만을 해석영역을 하였으며, 열원의 입력은 keyhole내에서 모두 flux로 유입된다고 생각하였다(Fig. 3).

$$q(z) = \frac{Q(3D-z)}{10\gamma k D^2} \quad \text{at } y=0 \quad (9)$$

$q(z)$  = the power transferred into the substrate  $[J / s m^2]$

$Q = \eta p$

$\eta$  = the efficiency coefficient

$p$  = the laser beam power  $[W]$

$D$  = the specimen thickness  $[m]$

$r_k$  = the radius of keyhole  $[m]$

대기와 접하고 있는 부분에서는 자연대류로 처리하였다.

$$k \frac{\partial T}{\partial z} = h_n(T - T_a) \quad \text{at } z=0 \text{ or } z=D \quad (10)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial y} = h_n(T - T_a) \quad \text{at } y = \frac{W}{2} \quad (11)$$

$h_n$  = the natural convection coefficient  $[J / m^2 s ^\circ C]$

$k$  = the thermal conductivity  $[J / s m ^\circ C]$

$T_a$  = the atmospheric temperature  $[^\circ C]$

$D$  = the specimen thickness  $[m]$

$W$  = the specimen width  $[m]$

2.2.2 이중두께의 Flush Side 용접

Figure 4와 같이 열원을 중심으로 양쪽이 대칭이 이 나므로 전단면을 해석영역으로 선정하였으며, 열원의 입력에 관한 것은 동일두께의 맞대기 용접과 같은 형태로 아래와 같다.

$$q(z) = \frac{Q(3D-z)}{10r_k(D_2)^2} \quad \text{at } y = \frac{W}{2} \quad (12)$$

$0 \leq z \leq D_2$

$$k \frac{\partial T}{\partial z} = h_n(T - T_a) \quad \text{at } \begin{cases} z=0 \\ \text{or } 0 \leq y \leq \frac{W}{2}, z=D_1 \\ \text{or } \frac{W}{2} \leq y \leq W, z=D_2 \end{cases} \quad (13)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial y} = h_n(T - T_a) \quad \text{at } y=0 \text{ or } y=W \quad (14)$$

where  $D_1, D_2$  = thickness of sheets  $[m]$

2.2.3 이중두께의 Step Side 용접

Figure 5와 같은 step side 용접에서는 접합부위는

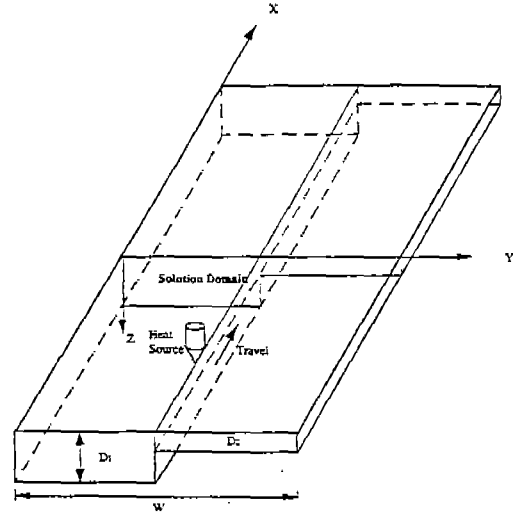


Fig.4 Schematic diagram of solution domain and coordinate system for analysis of different thickness square butt, flush welding

keyhol에 의해 열이 입력되고 우측판의 뒷면에서도 열이 flux로 유입된다.

$$q(z) = \frac{Q(2D_2 + D_1 - z)}{10r_k(D_2)^2} \times \frac{1}{2} \quad \text{at } y = \frac{W}{2} \quad (15)$$

$D_2 \leq z \leq D_1$

$$q(r) = \frac{3Q}{\pi(\bar{r})^2} \exp\left\{-3\left(\frac{r}{\bar{r}}\right)^2\right\} \quad \text{at } \frac{W}{2} \leq y \leq W, z=D_1-D_2 \quad (16)$$

$$q = \frac{Q}{4(\bar{r})^2} \times \frac{1}{2} \quad \text{at } y = \frac{W}{2}, 0 \leq z \leq D_2 \quad (17)$$

$r$  = the radius distance from the laser beam center  $[m]$

$\bar{r}$  = the characteristic radius ( defined as radius at which the intensity of the laser beam falls to five percent of the maximum intensity )  $[m]$

$$k \frac{\partial T}{\partial z} = h_n(T - T_a) - q(r) \quad \text{at } \frac{W}{2} \leq y \leq W, z=D_1-D_2 \quad (18)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial z} = h_n(T - T_a) \quad \text{at } z=0 \text{ or } z=D_1 \quad (19)$$

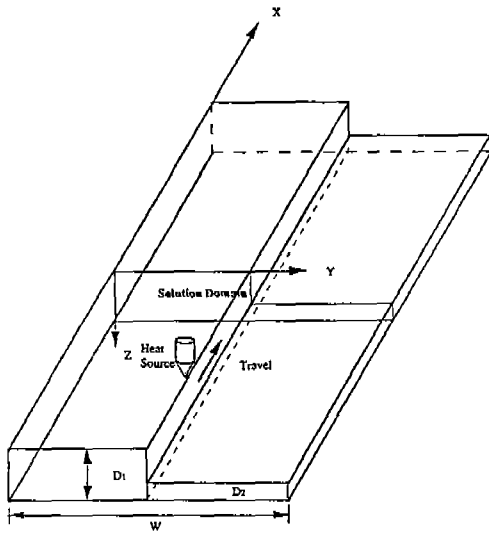


Fig. 5 Schematic diagram of solution domain and coordinate system for analysis of different thickness square butt, step welding

$$k \frac{\partial T}{\partial y} = h_n(T - T_a) \quad \text{at } y=0 \text{ or } y=w \quad (20)$$

### 2.3 수치해석 조건

계산에 재료의 열적성질은 참고문헌(6)을 참조하였으며, 열원부근에서 요소의 크기를 미세하게 하였다. 처음 시작에서 가열, 냉각 전과정을 약 1000단계 정도로 나누어 각시간에 계산을 수행하였으며, 계산시 흡수율은 50%로 생각하고 계산하였다(7).

### 3. 실험

실험 시편은 자동차 body에 사용되고 있는 아연도금 강판(galvanized steel)을 사용하였으며, 3KW 급 CW

-CO<sub>2</sub> 레이저를 사용하여 용접하였다. 시편의 두께 및 용접조건은 Table. 1에 나타나 있다. 시편 1은 참고문헌(8)의 실험결과를 프로그램의 신빙성을 증명하고자 사용하였다. 시편 2는 동일두께의 경우이고, 시편 3은 두께가 다른 경우에 레이저 빔이 조사되는 면적이 평행한 Flush Side 용접이며, 시편 4는 Step Side 용접시 조건이다. 금속학적 조직을 관찰하기 위하여 시편을 절단, Mounting, Polishing 후 Nital 용액에서 Etching하여 현미경을 이용하여 관찰하였다. 그리고 열영향부의 크기는 계산값의 830°C와 일치 시켰다(9).

### 4. 결과 및 고찰

참고문헌(8)의 실험조건하에서 계산한 결과가(시편1) 그림6에 나타나 있다. 용융부위의 크기와 Local Point 1, 2, 3에서 열이력(thermal history)의 결과가 잘 일치되

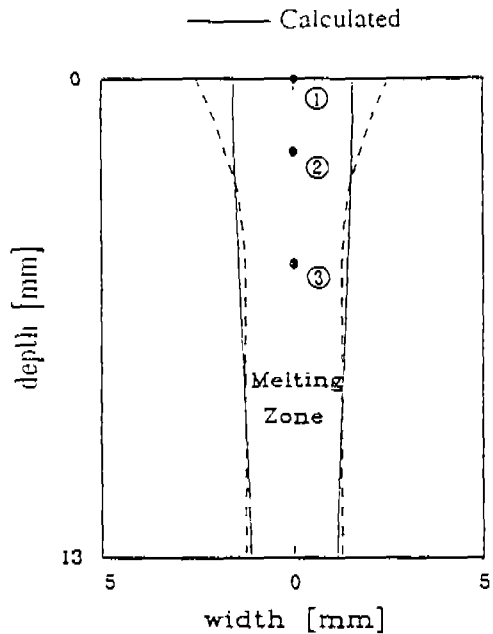


Table 1. Welding Conditions

Sample#	Thickness (mm)	Power (kW)	Travel (mm/s)	Description
1	13.0-13.0	12.0	12.7	Experiment by Moon(8)
2	0.8-0.8	2.5	200.0	butt joint
3	2.0-0.8	3.0	76.2	flush side heating
4	2.0-0.8	3.0	67.7	step side heating

고 있음을 보여주고 있다. 최고점의 온도차이가 나타나고 있는데, 이것은 실험에서 측정 최고온도에 한계가 있기 때문으로 생각된다. 또한 우리의 주 관심은 최고점의 온도보다는 냉각과정으로 문제가 되지는 않는다. 우리는 이결과를 토대로, 작성한 프로그램이 레이저 용접 공정 해석에 사용하기에 충분할 것으로 사료된다.

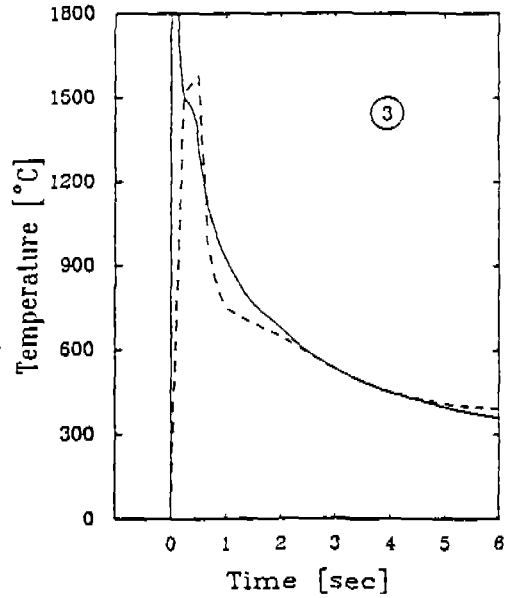
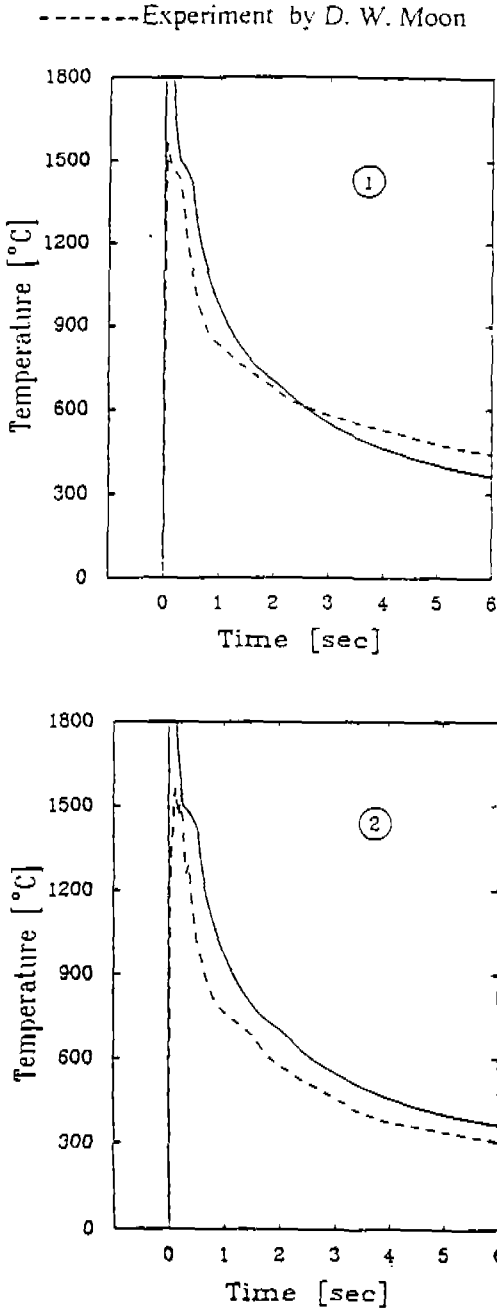


Fig. 6 Comparison of calculated results and the experiments of Moon<sup>(8)</sup> for sample #1 (12kW, 12.7m/sec)

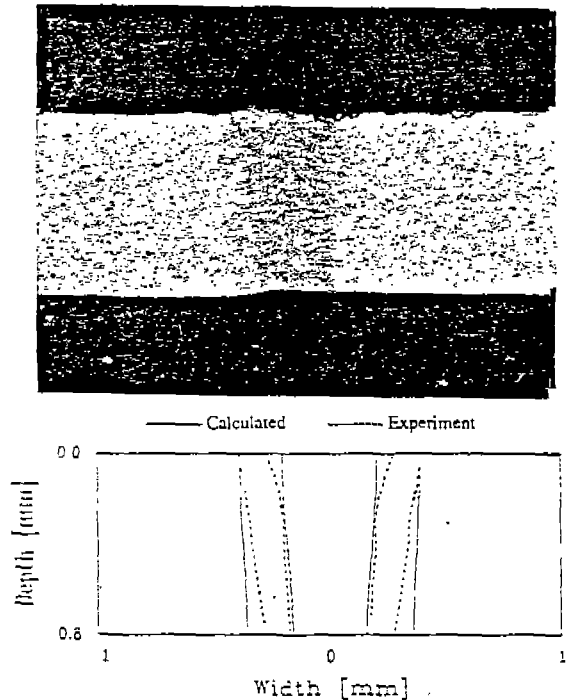


Fig. 7 Shapes of experimental and predicted fusion and HAZ for sample #2 (2.5kW, 200mm/sec)

그림 7은 두께가 같은 정판(시편2)의 레이저 용접시 용융부와 열영향부의 크기를 계산값과 실험값과 비교하여 나타내었고, 그림 10은 용융부 및 열영향부 주위에서 열이력을 나타내주고 있다. 이론값과 실험값은 비교적 잘 일치되고 있음을 알수있고 미세조직은 급냉에 의해 영향을 받았을 것으로 생각된다.

그림 8은 두께가 다른 강판의 flush side 용접(시편3)시 용접부 미세조직, 실험과 이론값의비교를 나타내고 있으며 그림 11는 각점에서 열이력을 나타내주고 있다. Table 2에 나타난것과 같이 용융부와 열영향부의 면적의 차이는 거의 나타나지 않고 있으나 형상이 약간 다르게 나타나고 있다. 이것은 용융부가 흘러내리는 현상

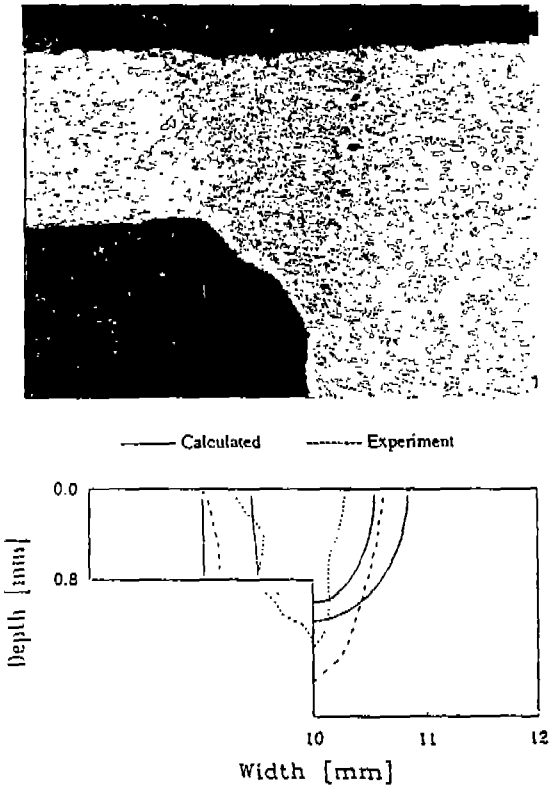


Fig. 8 Shapes of experimental and predicted fusion and HAZ for sample #3(3kW, 76.2mm/sec)

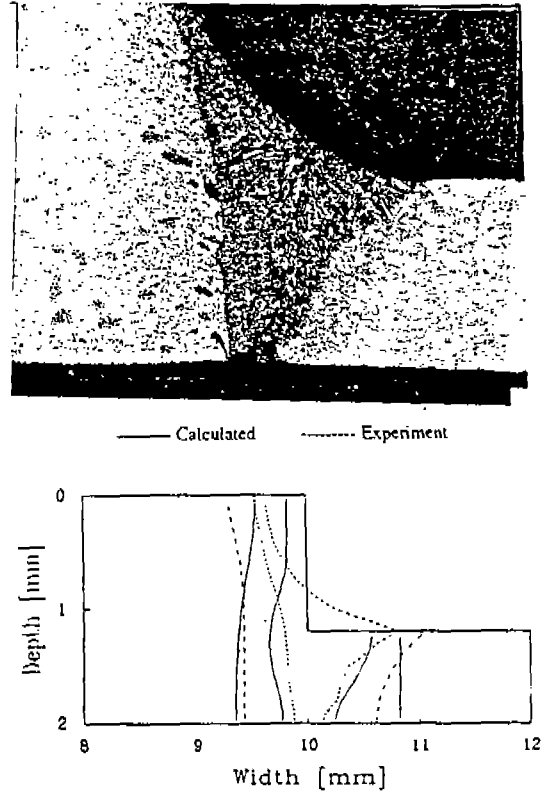


Fig. 9 Shapes of experimental and predicted fusion and HAZ for sample #4(3kW, 67.7mm/sec)

Table 2. Fusion Zone and HAZ Areas

Sample#	(Power x Efficiency)/Speed	Fusion Zone Area(mm <sup>2</sup> )		HAZ Area(mm <sup>2</sup> )	
		Calculated	Experiment	Calculated	Experiment
1	472.4	34.473*	37.181*	...*	...*
2	6.3	0.289	0.319	0.600	0.536
3	19.7	0.199	0.193	0.381	0.385
4	22.1	0.202	0.186	0.435	0.414

\*...From Moon and Metzbowser[8], no HAZ data available

을 고려하지 않았기 때문이다. 즉, 용융부의 유동현상을 고려하여야만 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 그러나 본 연구의 최종 목적은 잔류응력을 해석하여, 용접후 가공시의 영향을 검토하자 하는 것이므로 용융부 유동까지를 고려한 열유동 해석은 그 자체만으로도 너무 복잡한 문제이므로 주어진 결과로서 만족할

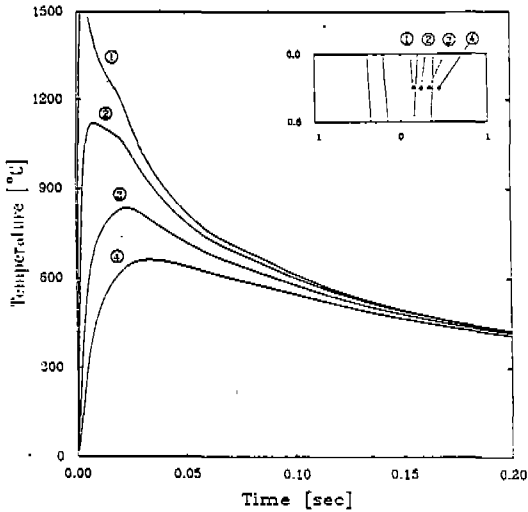


Fig. 10 Calculated thermal cycles for sample #2 (2.5kW, 200mm/sec)

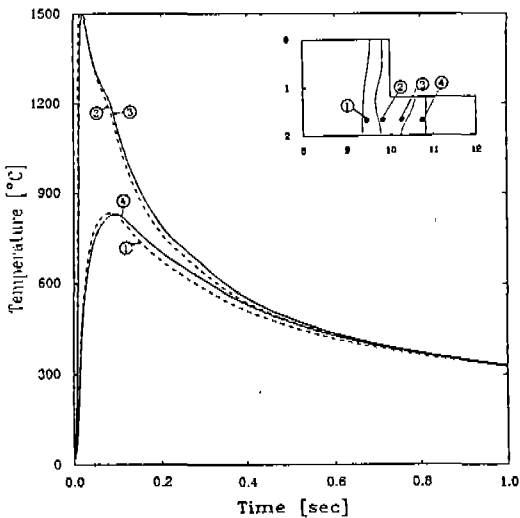


Fig. 11 Calculated thermal cycles for sample #3 (3kW, 76.2mm/sec)

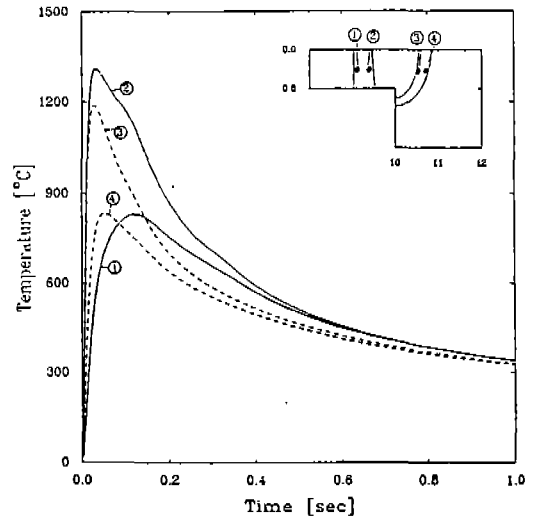


Fig. 12 Calculated thermal cycles for sample #2 (2.5kW, 200mm/sec)

만하다. 즉 두께가 다른 경우 양쪽에서의 열분포를 관찰하기 위해서는 충분한 결과이다.

그림 9은 두께가 다른 강관의 step side 용접(시편4)시 용접부 미세조직, 실험과 이론값의 비교를 나타내고 있으며 그림 12은 각점에서 열이력을 나타내주고 있다. 이중 두께의 step side 용접에서는 가열부위가 계단형상을 이루고 있으므로 열의 입력에 대한 모델이 정확하지를 못하였을 것으로 생각된다. 실제 실험에서 동일 실험조건이라도 각 경우마다 상당히 다른 경우의 용접부를 얻었다. 그러므로 계가 다른판의 용접시에는 실제 작업에서 step side 용접 보다는 flush side 용접이 유리함을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 두께가 다른 강관의 레이저 용접시, 용접후 양쪽의 잔류응력을 예측하여 후가공시 강도해석에 사용하기 위한 선행단계로서 열유동을 해석을 위한 유한요소 모델을 개발하였으며, 해석결과는 충분히 만족할만하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 두께가 같은 강관의 레이저 용접시 용융부와 열영향부의 크기 및 열이력은 계산값과 실험값이 비교적 잘 일치한다.



- 2) 두께가 다른판의 용접시에는 step side 용접보다는 flush side 용접이 유리하다.
- 3) 두께가 다른판의 flush side 용접시, 계산값과 실험 값 비소에서 용융부와 열영향부의 면적의 차이는 거의 없으나 형상이 약간 다르게 나타난다.  
이것은 계산에서 용융부가 흘러내리는 현상을 고려하지 않았기 때문이다.

### 후 기

본 연구는 1992년도 전남대학교 학술연구비에 의하여 이루어졌다. 이에 관계자 여러분에게 깊이 감사드립니다.

### 참고문헌

1. Kazuo Azuma, Kimikazu Ikemoto and Hiroaki Sugiura, "Press Formability of Laser Welded Blanks", Toyota Technology Society, 1990, pp.305~311.
2. Klaus W. Blumel and Christoph Schneider, "Laser Beam Welded Sheet Steel Improves Pane Properties" Proceeding of IDDRG. Goteborg, Sweden, 1990, pp. 1~11.
3. K. Azuma, H. Sugiura, F. Natami, H. Kato, Tanaka and T. Takasago "Laser Welding Technology of Joining Different Sheet Metal for One Piece Stamping", Proceedings of ISATA, Vienna, 1990, pp. 350-357.
4. K. H. Huebner and E. A. Thornton, "The Finite Element Method for Engineers", John Wiley & Sons, New York, 1982, pp.411~425
5. Y.-S. Yang and S.-J. Na, "A Study on Thermal and Residual Stress by Welding and Laser Surface Hardening Using a New Two-Dimensional Finite Element Model" PIME part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 204, 1990, pp.167~173
6. Metal Handbook, American Society for Metals, Metal Park, Ohio, Vol. 1, 9th edition, 1978, pp.148~149
7. D.W. Moon and E. A. Metzbowr, "Temperature Measurements in a Mid-plane of a Laser Beam Weldment in A36 Steel", Proceedings of IPBC, San Diego, 1988
8. D.W. Moon and E. A. Metzbowr, "Temperature Measurements of Molten Weld Pool along the Keyhole in Laser Beam Welding", Proceeding of the interntional Conference on Welding for Challenging Environments, Toronto, Canada, 1985, pp.41~50,
9. S.-J. Na and Y.-S. Yang, "Influence of Heating Rate on the Laser Surface Hardening of Medium Carbon Steel", Surface and Coatings Technolgy, Vol. 34, 1988, pp.319~330