

研 究 論 文
---------

大韓熔接學會誌  
 第10卷 第4號 1992年 12月  
 Journal of the Korean  
 Welding Society  
 Vol.10 No.4, Dec., 1992

## 유한 요소법을 이용한 CO<sub>2</sub>아아크 용접부의 용입깊이와 열영향부 크기 예측

이 정 익\* · 박 일 철\* · 박 기 영\* · 엄 기 원\*

### Prediction of Penetration And Heat Affected Zone By Using Finite Element Method in CO<sub>2</sub> Arc Welding

J.I.Lee\*, I.C.Park\*, K.Y.Park\*, K.W.Um\*

**Key Words** : Penetration(용입깊이), Heat Affected Zone(열영향부), ANSYS 4.4A(범용유한요소 프로그램 앤시스 4.4A), Isotherms(등온선), Convection Heat Loss(대류 열손실), Gauss Distribution(가우스 온도분포), Arc Efficiency(아아크 효율), Natural Convection(자연대류), Forced Convection(강제대류), Shielding Gas(차폐가스)

#### Abstract

A prediction of penetration and heat affected zone by using Finite Element Method in CO<sub>2</sub> Arc Welding has been discussed this paper.

The temperature distribution of a base metal produced by the CO<sub>2</sub> arc welding processing is analyzed by using a three dimensional finite element model.

The common finite element program ANSYS 4.4A was employed to obtain the numerical results.

Temperature dependent material properties, effect of latent heat, and the convective boundary conditions are included in the model.

Numerically predicted sizes of the penetration and the heat affected zone are compared with the experimentally observed values.

As a result, there was a slight difference between numerical analysis values and experimentally observed values.

For in the case of heat affected zone, it was not considered a precise forced convective coefficient value, and in the case of penetration, it was not, considered a arc force.

\* 정희원, 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

### 1. 序 論

전기용접기술은 대체로 현재까지는 경험과 실험을 바탕으로 한 것이 대부분이었다. 그러나 computer시대의 출현으로, 전기용접기술에 computer를 이용하려는 많은 시도들이 있었다. 1930년대에 Rosenthal<sup>1)</sup>은 용접에서 열유동과 잔류응력을 정량화하기 위해 해석모델을 개발했다. 이 해석모델은 실질적으로 사용되기에는 너무 이상화되어 있어 실용적으로 사용되지는 않았다. 그럼에도 불구하고, 이 방법은 수치해석에 대한 기초를 제공해왔으며 최근 전산기의 대형화 및 고속화에 힘입어 수치해석 방법중 유한요소법이 열전도 해석(heat conduction analysis)문제를 푸는 강력한 도구로 개발되어졌다<sup>2)</sup>. 이 유한요소법을 사용하면 용접시의 온도분포를 복잡한 형상이나 열전달 상수의 변화, 용접시 경계조건의 변화들을 고려하여 해석할 수 있으므로 보다 정확한 해석을 할 수 있다. 본 논문에서는 연강(SS41)에 대한 CO<sub>2</sub>아크 용접시 온도분포를 해석하여 용착급속과 열영향부의 크기를 예측하였으며 이 온도분포의 해석은 준정상상태(quasi-stationary condition)의 3차원 유한요소모델을 사용했다. 그리고 이 과정은 범용성 유한요소 프로그램인 ANSYS Package를 사용했으며 또한 같은 용접조건에서 bead on plate 용접실험을 행하여 수치해석결과와 비교했다.

본 연구의 목적은 모재의 용융온도를 알고 있다는 가정하에서 용접온도를 측정하지 않고도 용입깊이와 열영향부의 크기를 예측하는데 있다.

### 2. 解析 모델의 設定

본 연구에서는 준정상상태의 3차원 유한요소에 의한 CO<sub>2</sub> 아크용접시 온도분포를 해석함으로써 용착급속과 열영향부의 크기를 예측하고자한다.

#### 2.1. 모델에 대한 가정

용접중의 열전달 과정을 modelling함에 있어 다음 사항들을 적용했다.

- 1) 재료의 물성치들은 온도의 함수이다. Fig.1에 연강에 대한 비열과 열전도계수의 온도의존을

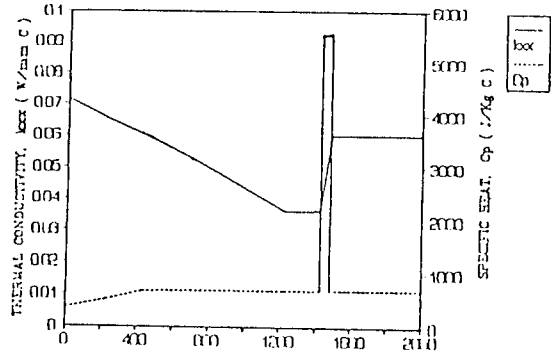


Fig.1 Specific Heat versus Thermal Conductivity Depending on Temperature for Mild Steel

나타내었으며, 여기에서 kxx는 x축 방향으로의 열전도도이며 Cp는 비열이다.

- 2) 열은 대류에 의해 표면으로부터 방출된다.
- 3) 연강의 용융온도는 1427°C이며 열영향부(HAZ)는 이 온도와 공석온도(eutectoid temperature) 사이에서 형성된다. 이전의 연구를 바탕으로 용착급속경계에 대한 기준은 1482°C의 등온선이고 열영향부의 경계는 727°C의 등온선이라고 취했다<sup>3)</sup>.
- 4) 용접 wire의 첨가는 입열에 영향을 미치지만 요소 modelling에 어려움이 있으므로 요소분할에 더해지지 않는다.
- 5) 열의 유동은 중심축에 대해 대칭이다.
- 6) 열유속의 형태는 반경방향으로 대칭인 Gaussian distribution이라고 가정된다.
- 7) 모델은 2차원이고 축대칭으로 인해 1/2만이 해석된다.
- 8) 아크입열에 대해서 모재가 일정속도로 이동되므로 유동속도와 온도분포는 원점에 대해서 정상상태이며, 따라서 해석을 할때에 준정상상태로 가정하였다.

Fig.2에 CO<sub>2</sub> 아크용접과정시의 좌표계와 전체적인 개략도를 보였다.

아크로부터 일어나는 에너지의 손실은 매우 복잡하므로 이 복잡성을 피하기 위해 아크효율(η)을 사용하여 공급되는 에너지를 정량화하였다. Q=η·V·I는 아크에 의해 공급된 에너지로서 이전의 참고문헌<sup>4)</sup>에 의해 본 연구에서는 η의 값을 80%로 가정했다.

아크에 입사되는 초기입열(Heat Input) 조건은 η(효율)이 0.8V(전압)이 25(V)이고 I(전류)가 220(A)

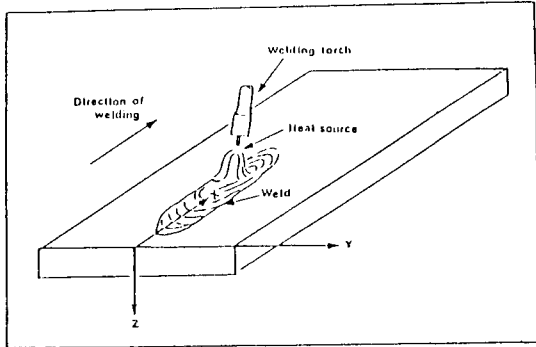


Fig.2 Coordinate System for Analysis of CO<sub>2</sub> Arc Welding Process

이다.(Table.1 참조)

열전도계수(k), 비열(C<sub>p</sub>)과 같은 온도의존 열물성치들은 Fig.2에 주어졌으며 이 자료는 ANSYS 4.4A에 의해 얻어진 것이다.

아크로부터 공작물로의 에너지전달은 가우스분포의 열유속에 의해 표현되어진다.

공작물의 윗표면에서 열유속 a(r)은

$$\text{Gaussian 분포 : } q''(r) = q_0'' \cdot \exp(-3r^2/r_b^2) \quad (1-a)$$

또는,

$$q''(x,y,t) = \frac{3 \cdot \eta_{\text{eff}} \cdot V \cdot I}{\pi \cdot r_b^2} \exp(-3[(x-vt)^2 + y^2]/r_b^2) \quad (1-b)$$

여기서, q''(r) = 평판상 위치 r에 입사된 단위면적 단위시간당의 열유속

q''<sub>0</sub> = 최대 q''(r=0에서)

r = 아아크 중심에서의 거리

r<sub>b</sub> = 全熱의 95%가 평판상에 입사되는 영역을

표사한 Arc Beam반경

(본 연구에서는 r<sub>b</sub> = 4mm)

V = Arc전압, I = 용접전류,

η<sub>eff</sub> = 0.8

x = 용접방향, y = 용접방향에 수직방향,

t = 용접시간

내부의 열발생이 없을 경우 3차원 열전도 지배방정식(Energy Equation)

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X} (K \frac{\partial T}{\partial X}) + \frac{\partial}{\partial Y} (K \frac{\partial T}{\partial Y}) + \frac{\partial}{\partial Z} (K \frac{\partial T}{\partial Z}) \quad (2)$$

ρ = 금속의 밀도(kg/m<sup>3</sup>)

C<sub>p</sub> = 금속의 비열(J/Kg°C)

K = 금속의 열전도도(W/m°C)

T = 금속의 온도(°C)

공작물 윗표면에서 경계조건은

$$k \frac{\partial T}{\partial X} = q(r) - h_r(T - T_a) \quad (X=0에서) \quad (3)$$

여기서 k는 열전도계수, h<sub>r</sub>는 강제대류계수, T<sub>a</sub>는 주위온도이다. 다른 표면에서는, 자연대류가 일어나며 경계조건은 다음과 같다.

$$k \frac{\partial T}{\partial X} = h_n(T - T_a) \quad (X=D에서) \quad (4)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial Z} = h_n(T - T_a) \quad (Z=W/2에서) \quad (5)$$

여기서 h<sub>n</sub>은 자연대류계수, D는 시편두께 그리고 W는 시편 폭이다. 아크가 움직이는 시편의 중심선상의 단면에서는 열유속의 대칭성으로 인해 온도구배가 무시되어질 수 있고 따라서 대응하는 경계조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k \frac{\partial T}{\partial Y} = 0 \quad (Y=0에서) \quad (6)$$

여기서 자연대류열전달계수의 값은 이전의 모델에 바탕을 두고, h<sub>n</sub> = 10W/m<sup>2</sup> · °C이 차폐개스에 의해 영향 받지 않는 모든 표면에 대해 사용되었다. 그리고 차폐개스의 영향을 받는 윗표면에서는 다음 식을 사용하여 강제대류계수를 구했다<sup>3)</sup>.

$$h_r = 13Re^{1/2} \times Pr^{1/3} \times k_{\text{gas}} / NPD \quad (7)$$

$$\text{Reynolds number, } Re = \frac{V_{\text{gas}} \times D \times \rho_{\text{gas}}}{\mu_{\text{gas}}} \quad (8)$$

$$\text{Prandtl number, } Pr = \frac{v_{\text{gas}}}{\alpha_{\text{gas}}} = \frac{\mu_{\text{gas}} \times C_{p\text{gas}}}{k_{\text{gas}}} \quad (9)$$

여기서 K<sub>gas</sub>는 차폐개스의 열전달계수,

V<sub>gas</sub>는 차폐개스의 유출속도,

D는 노즐의 지름,

ρ<sub>gas</sub>는 차폐개스의 밀도,

μ<sub>gas</sub>는 차폐개스의 동점성계수,

C<sub>p</sub>는 차폐개스의 비열

이다.

Fig.3에 열전달 경계조건을 표시하였다.

$$q = \frac{3q}{\pi r_b^2} \exp(-3(r/r_b)^2)$$

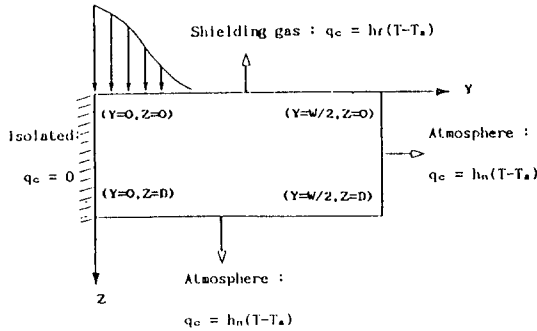


Fig.3 Heat Transfer Boundary Condition

### 2.2. 有限要素法에 의한 解析

유한요소해석은 평면 및 축대칭 열전도문제에 대하여 해석이 가능한 ANSYS프로그램을 사용하였다. ANSYS프로그램 1) 데이터들을 입력하는 전처리(Pre-processing) 단계, 2) 행렬을 형성하고 해를 구하여 온도를 얻고 얻어진 값들을 뒤에 필요를 위해 저장하는 해석(Solution)단계, 3) 해석(Solution)단계에서 저장된 데이터로 필요한 자료를 인쇄하고 검출하는 후처리(Postprocessing)단계로 나누어진다.

Fig.4는 ANSYS프로그램의 개략도(Computation scheme)를 보여준다.

용접이 진행되고 일정시간이 지나면 용접은 전체적으로 준정상 상태가 되므로 해석은 정상상태에서

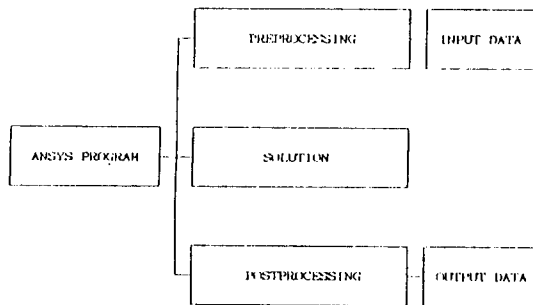


Fig.4 Computation Scheme Using of ANSYS

실시하였으며, X=0에서 Y-Z면은 중심선 기준으로 좌우대칭이므로 대칭축의 1/2면에 대하여 계산을 하였다. 요소분할은 Fig.5와 같은 사각형요소를 사용하

Table.1 Data used for Numerical Results

Ambient Temperature = 20°C  
 Solidus temperature = 1427°C  
 Liquidus temperature = 1482°C  
 Latent heat of fusion = 273790 J/kg  
 Density of M.S. = 7870 kg/m<sup>3</sup>

온도에 따른 연강의 열전달 계수의 값

T(°C)	(W/m°C)
0	74.00
227	65.31
727	52.25
1227	36.92
1677	31.35
1727	60.00
1727이상	60.00

온도에 따른 연강의 비열

T(°C)	C <sub>p</sub> (J/kg °C)
0	320
227	502
477	668.8
477이상	668.8

용접전압 = 25V

용접전류 = 220A

아크효율 = 0.67

용접속도 = 6.25cm/ses

아크 beam 반경 = 4mm

용접 wire 직경 = 1.2mm

용접 wire 송급속도 = 10cm/s

노즐-평판 거리 = 20mm

노즐 직경 = 18mm

노즐 각도 = 0°C

Shielding gas(100% CO<sub>2</sub>) 자료

유량 = 13 litre/min

열전달 계수 = 0.01655 W/m°C

비열 = 851 J/kg°C

동점성계수 = 149 \* 10<sup>-7</sup> kg/ms

밀도 = 1.773kg/m<sup>3</sup>

였으며 용착금속 부근에서는 요소를 세분하였다.  
 본 연구에서는 960요소, 1309절점을 사용하였다.  
 그리고 해석을 위해 사용된 데이터는 Table.1에 나타냈다.

Fig.5는 유한요소 모델링이다.

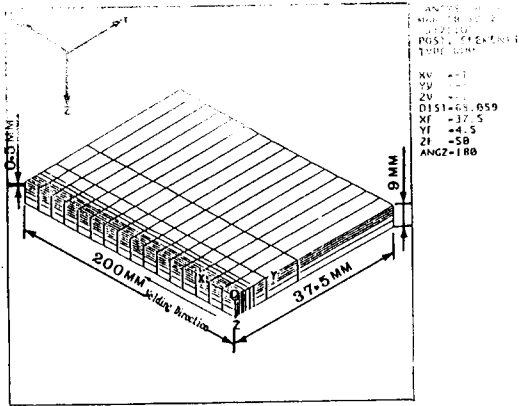


Fig.5 Finite Element Modelling

### 3. 實 驗

#### 3.1. 實 驗 裝 置

본 실험에 사용된 용접기 기종은 YM-3502TU CO<sub>2</sub> 아크 용접기로서 Photo.1에 나타나 있으며 속도제어 장치는 Photo.2에 나타나 있다. 그 제원은 Table.2에 나타나 있다.

#### 3.2. 實 驗 試 片

본 실험에 사용된 시편은 SS41 강판으로서 크기는 200mm(L)×75mm(W)×9mm(T)이며, 이것을 Bead on Plate 용접을 하였다. 그 형상과 치수는 Fig.6에 나타나 있다.

#### 3.3. 實 驗 方 法

ANSYS Package를 사용해 얻은 결과와의 비교를 위해 Table.1에 제시된 용접조건으로 bead on plate 용접을 실시하였다. 용착금속과 열영향부의 크기를

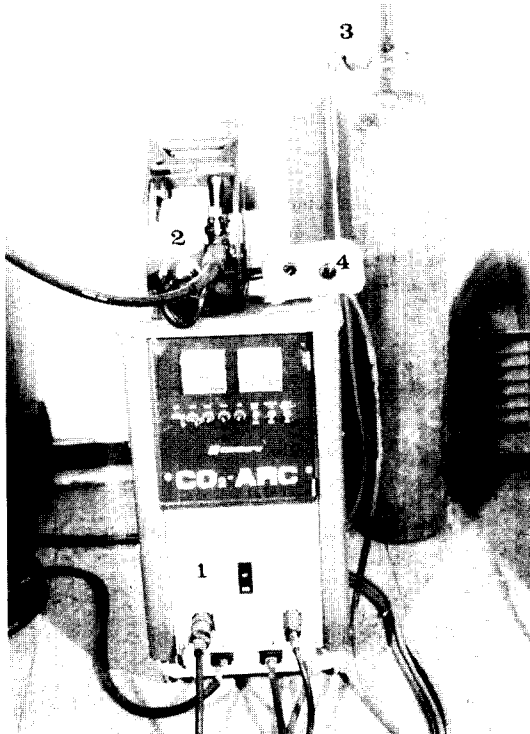


Photo.1 CO<sub>2</sub> Arc Welding Machine

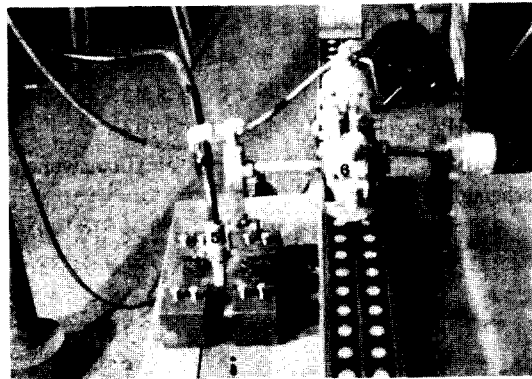
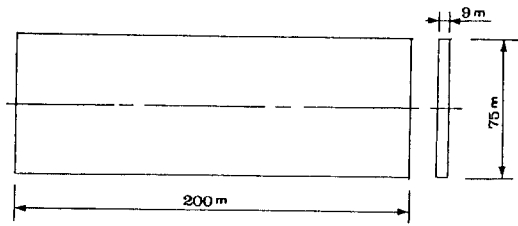


Photo.2 Speed Control Unit and Welding Torch

관찰하기 위해 용접부 시편을 채취하여 연마, 폴리싱, 에칭(5ml NHO<sub>3</sub>+100ml 에칠알코올)한 후 그 크기를 측정하였으며 그 결과는 Table.3에 지시되어 있다. Photo.3는 Bead on Plate 용접을 시행한 후 형성된 용접 bead의 단면을 나타낸다.

**Table.2** Specification of CO<sub>2</sub> Arc Welding Machine and Speed Control Unit

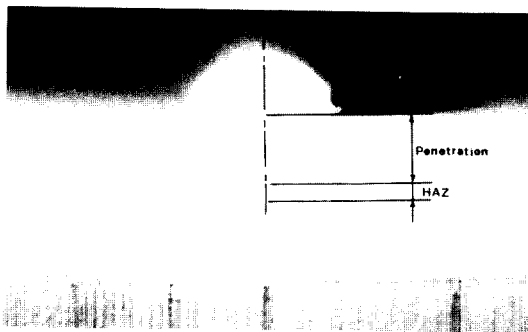
No.	Item	Specification
1	Title	CO <sub>2</sub> ARC
	Style	YM-3502TU
	정격용량(A)	350
	정격입력(KVA)	20.3
	정격주파수(Hz)	60
	출력전류조정범위(A)	50 ~ 350
	출력전압조정범위(V)	16 ~ 36
	외형치수(W×D×H)(mm)	425×540×900
2	Title	Wire Feed Unit
	사용 wire 직경(mm)	1.2
3	Wire Feed Rate(mm/sec)	1.5 ~ 15
	CO <sub>2</sub> 가스 유량 조절기	
4	유량(l/min)	1 ~ 25
5	Remote Controller	
6	Welding Torch	
6	Speed Control Unit	



**Fig.6** Shape and Dimension of Specimen

**Table.3** Comparison of Numerical and Experimental Results at 7 sec(Quasi Stationary State)

Quantity	Numerical Value		Experimental Value		Error (%)	
	Width	Depth	Width	Depth		
HAZ	12.2mm	5.7mm	10.8mm	5.1mm	12.9	11.8
Penetration	7.4mm	3.1mm	7.8mm	3.4mm	5.12	8.82

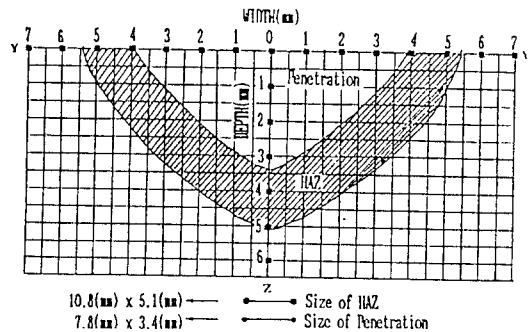


**Photo.3** Cross Section of CO<sub>2</sub> Arc Weld made in Horizontal Position on 9mm thickness(SS41)

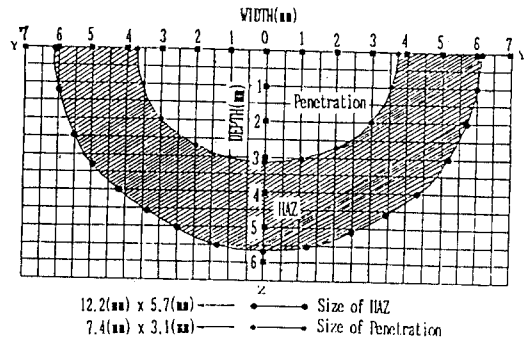
## 4. 解析結果 및 考察

### 4.1. 解析結果

Photo.3은 Bead on Plate 용접을 시행한 후 형성된 용접 Bead의 형태와 용접부의 단면이며 관측된 값을 Fig.7에 도시하였다.



**Fig.7** The Size of Penetration and HAZ Measured from Experiment (At 7 sec)



**Fig.8** The Size of Penetration and HAZ measured from Numerical Results (At 7 sec)

그리고 Fig.8은 ANSYS로 구한 온도분포에서 용입 깊이와 열영향부의 경계를 그린 것이다.

Fig.7은 실험결과에 의한 것이고, Fig.8은 수치해석 결과에 의한 것이다. 용접조건에 따른 실제 실험결과와 모델을 통한 수치계산 결과가 Table.3에 제시되어 있다.

표에서 실험치와 계산치는 단면상의 용입깊이와 열영향부의 폭과 깊이로 나타냈으며 그 차이를 실험

값을 기준으로하여 백분율(%)로 나타냈다. Fig.9와 Fig.10은 같은 그림이나, 관측위치에 따라 나타낸 것으로 Fig.9는 YZ면에 대해서, Fig.10은 XY면에 대해 3차원으로 수치해석한 온도에 따른 등온선을 나타낸다.

이들 조건은  $V=25V$ ,  $I=220A$ ,  $\eta=0.8$ , 용접속도=6.25mm/s에 대해서,  $Q=\eta VI$ 에 의한  $Q$ 를 초기입열(Heat Input)로 하였다.

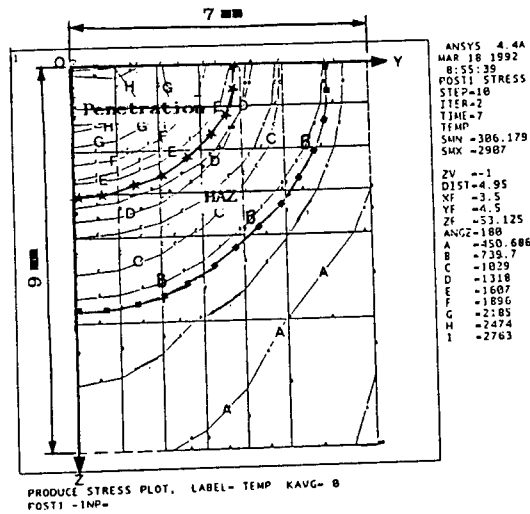


Fig.9 Temperature Distribution at 7 sec(at YZ Plane)

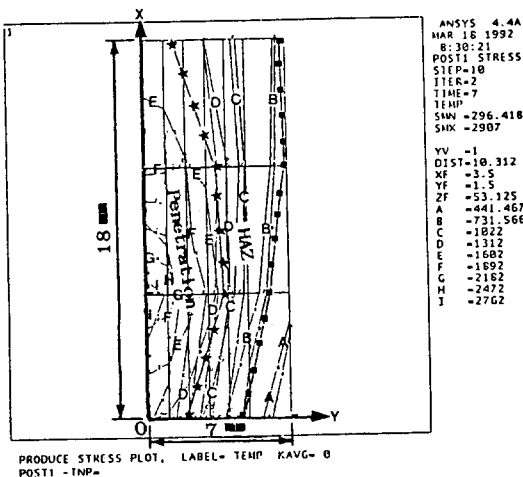


Fig.10 Temperature Distribution at 7 sec(at XY Plane)

## 4.2. 考 察

본 연구의 목적은 온도분포에 의한 열영향부(HAZ)와 용입깊이(Penetration)의 크기를 예측하는 것으로, 기준은 연강경우 열영향부가 727°C, 용입깊이의 경계를 1482°C로 가정하고 예측한 결과, 용접시간 7초후(준정상상태)일때 Fig.9 및 Fig.10에서 열영향부 경계는 등온선 AB 영역사이에, 용입깊이 경계는 등온선 DE 영역사이에 형성됨으로써 예측에 대한 타당성을 뒷받침 해주고 있다.

Fig.8은 Fig.9의 결과를 이용해서 나타낸 것이므로, Fig.9는 시편상 YZ면 일부분(7mm×9mm)의 온도분포를 나타낸 것이지만, Y축 및 Z축상에서 용입깊이와 열영향부의 분포위치는 동일하다.

참고로, Fig.9 및 Fig.10의 축상에 관찰영역의 눈금을 표시하였으며, 각 등온선 마다의 기호를 알파벳으로 표시했다.

수치해석 결과 Fig.9 및 Fig.10의 등온선 기호가 중첩되는 현상을 보이는데, 이는 3차원 해석결과로 인해 나타나는 현상이다.

부식 상태의 측정과 수치해석에 의한 온도분포만으로 용입깊이와 열영향부를 예측할 수 있었던 것은, 본 연구의 경우는 SS41의 모재 용융온도와 용입깊이 및 열영향부를 알고 있다는 모델에 대한 가정에서 출발한 이유도 있겠지만, 통상 용접개시 2초 후부터 시작되는 준정상상태로 가정하여 해석했기 때문에 용입깊이 및 열영향부라고 판단할 수 있었다.

오차를 줄이기 위해서는 열영향부(HAZ)의 경우 CO<sub>2</sub> 차폐개스의 정확한 강제대류값을 사용하고, 용입깊이(Penetration)의 경우 아아크력(자기력)을 고려해야 할 것이다.

추후 보다 정확한 강제대류값과 아아크력을 고려한 수치해석 결과를 연구 검토후 발표할 예정이다.

## 結 論

본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) CO<sub>2</sub> 아아크 용접에 의해 열전도 수치해석을 수행하여 온도 분포를 해석하고 이로부터 용입깊이와 열영향부의 크기를 예측할 수 있었다.
- 2) 3차원 열전도 해석을 통해서도 용입깊이 및 열영향부의 크기는 실험치와 측정결과치와의 약

간의 오차를 보이고 있는데 이는 수치 해석상에서 복사(Radiation)조건을 고려하고 재료물성치 오차를 줄인다면 보다 정확한 결과가 얻어지리라 예측된다.

- 3) 앞서 표의 결과에서, 수치해석한 열영향부의 크기가 실험치보다 크게 나오는 반면, 용입깊이의 크기는 수치해석에 비해 실험치가 크게 나오는데, 열영향부의 경우 정확한 강제대류값을 사용하고, 용입 깊이는 아아크력(자기력)을 고려한다면 수치해석과 실험치 사이의 오차를 줄일 수 있을 것으로 예측된다.

### REFERENCE

- 1) D.Rosenthal : Mathematical Theory of Heat Distribution During Welding and Cutting, Welding Journal, Vol.20, (1941), pp.220-234
- 2) G.W.Krutz, L.J.Segerlind : Finite Element Analysis of Welded Structures, Welding Journal, Vol.57, (1987), pp.211-217
- 3) P.Tekriwal, J.Mazumder : Finite Element Analysis of Three Dimensional Transient Heat Transfer in GMA Welding, Welding Journal, Vol.67, (1988), pp.150-156
- 4) P.Tekriwal, M.Stitt, and J.Mazumder : Metal Construction(USA), (1987), pp.252-263
- 5) H.B.Smartt, J.A.Stewart, and C.J.Einerson : GTA heat input distruction measurements, (A.W.S), 66th annual convention, Las Vegas USA, (May 1985)
- 6) J.Goldak, A.Chakravarti, and M.Bibby : Met. Trans, Vol.15, No.6, (1984), pp.299-305
- 7) G.J.DeSalvo, R.W.Gorman : ANSYS User's Manual, Swansan Analysis Systems, Inc(USA), (1989), Vol.1-Vol.2
- 8) P.Tekriwal, and J.Mazumder : Finite Element Modelling of Arc Welding, Advances in Welding Science and Technology(A.M.S), (1986), pp.71-80
- 9) 黃地尙義, 近藤勝義, 西口公地, 森安雅治, 平本誠剛 : 아아크 용접의 최적 입열제어, 용접학회 논문집(J.W.S), Vol.8, No.2, (1990), pp.48-53
- 10) 黃地尙義, 近藤勝義, 西口公地 : 최적 입열 조건의 추정의 알고리즘, 용접학회 논문집(J.W.S), Vol.8, No.1, (1990), pp.48-53
- 11) 益本, 高野, 吉田 : CO<sub>2</sub> I형 맞대기 일층 용접 parameter 설정 program", 용접학회지(J.W.S), Vol.48, No.1, (1979), pp.17-21
- 12) N.S.Boulton, and H.E.Lance Martin : Proc. Inst. Mech. Engrs.123, London, England, (1936), pp. 295-347
- 13) E.L.Wilson, and R.E.Nickell : Nuclear Engr, and Design 4, (USA), (1966), pp.276-286
- 14) J.S.Arora : Introduction to Optimum Design, McGraw-Hill Company (USA), (1989), pp.45-49
- 15) S.V.Dubovetskii, G.I.Sergatskii, and O.G.Kasatkin : Optimization of CO<sub>2</sub> Welding Conditions, Automatic Welding, Vol.33, No.12, (1980), pp.22-26