

## 特輯 : 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션

# 용접부에 작용하는 구속응력의 해석

신 상 범 · 윤 중 근

## Analysis of Restraint Stress Acting on the Weldment

S. B. Shin and J. G. Youn



신상범 / 현대중공업  
산업기술연구소 /  
1969년생 / 용접을 포  
함한 재료의 열간가공  
분야 연구



윤중근 / 현대중공업  
산업기술연구소 /  
1960년생 / 구조물 수  
명항상 분야 연구

### 1. 서 론

구조용 강재의 용접부 특히 열영향부에서는 중 중 저온 균열이 발생되고 있는데, 그 원인은 용접에 따른 용접부의 취화, 대기중이나 용접재에 함유된 수분이 용접 arc에 의해 분해되어 용접부내로 유입되는 확산성 수소 그리고 내외적 구속 응력 등의 복합적인 작용에 기인된다<sup>1)</sup>. 균열 발생원 중에서 용접부의 취화나 확산성 수소등은 모재의 선정이나 저수소계 용접재료의 사용과 적정 용접 조건의 적용으로 저온 균열발생을 제어할수 있다. 그러나 대형 노즐이나 구형탱크의 원주 용접부 혹은 대형 압력 용기의 용접부등과 같이 자체 구속력이 높은 용접부에서는 모재의 조성과 확산성 수소량을 고려한 용접조건하에서도 균열은 빈번하게 관찰되고 있다. 이는 실 구조물의 용접부에 작용하는 구속응력에 대한 평가가 정량적으로 이루어지지 못했기 때문이다. 용접부에 작용하는 구속응력을 계산하는 방법이 보고되어 있으나<sup>2)</sup>, 이는 탄성론에 기인하였을 뿐아니라 구해진 응력값 역시 용착금속의 중앙부에 작용하는 것으로, 용접 열영향

부에서 발생·전파되는 균열 현상에 직접적으로 적용할 수 없는 실정이다.

본 보에서는 용접부 특히 열영향부에 작용되는 구속응력을 유한요소법에 의하여 평가하는 것에 대하여 기술하고자 한다. 본 보에서 대상으로 한 용접부는 구속도(restraint degree, Rf)를 변수로 할 수 있는 modified H-type (MHT) 시편의 용접부이다<sup>3,4)</sup>. 구속응력 해석시 주된 변수는 시편에서의 구속도이였으며, 실제 용접부 및 구속응력의 편차등을 고려하고자 용접입열량(Q), 루트면과 용착금속간의 경사각( $\theta$ ) 및 구속 용접각장의 크기도 변수로 하였다.

### 2. 구속응력의 해석 방법

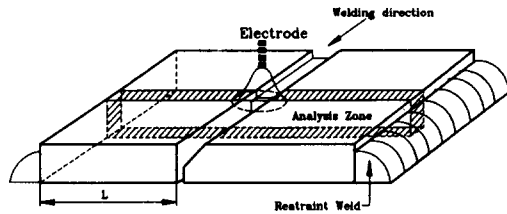
해석의 대상인 MHT 시편은 Fig.1과 같으며, 구속도(restraint degree, Rf)는 시편의 크기 및 구속 용접장의 길이 ( $R = 4L+400$ )를 변경함으로써 변화시켰다. 구속도는 Table 1에서 보여 주듯이 시편 크기가 증가함에 따라 감소하고 있다. 이는 구속 조건이 유사한 RRC (rigid restraint cracking)법에

대한 Satoh 등의 연구 결과<sup>2)</sup>와 잘 일치하고 있다.

**Table 1.** Effect of specimen size (L) on restraint degree (Rf)

|                             |     |     |      |     |
|-----------------------------|-----|-----|------|-----|
| L(mm)                       | 75  |     | 100  |     |
| R(mm)                       | 505 | 200 | 600  | 200 |
| Rf (kg/mm <sup>2</sup> /mm) | 193 | 144 | 146  | 108 |
| L(mm)                       | 125 |     | 450  |     |
| R(mm)                       | 700 | 200 | 2000 | 200 |
| Rf (kg/mm <sup>2</sup> /mm) | 136 | 86  |      | 45  |

\*R: 구속용접장의 길이

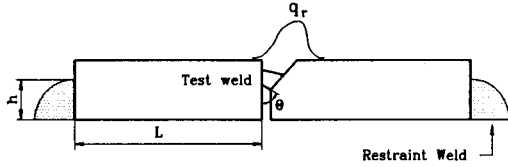


**Fig. 1** Schematic diagram of MHT specimen

유한요소법을 이용하여 Table 1과 같은 구속도 하에서 용접부 특히 열영향부에 작용되는 구속응력을 평가하였다. 이외에도 Table 2와 Fig. 2과 같이 구속응력에 미치는 용접 시공방법 즉, 용접 입열량(Q), 용착금속과 루트면 간의 경사각( $\theta$ ) 및 구속 fillet 용접각장(h) 등에 따른 구속응력의 변화를 함께 계산하였다. 용접부 구속응력의 평가시 열전달과 열응력의 연성된 해석이 요구되나, 용접부의 실제 크기에 비해 발생하는 변형량이 매우 미세하기 때문에 즉, 변형이 용접부 및 모재로의 열전달 기구에 미치는 영향이 매우 작기 때문에 본 연구에서는 열전달 및 열응력문제를 각각 비연성된 것으로 가정하고 해석을 수행하였다<sup>5)</sup>.

**Table 2.** Welding Heat Input (Q)

| Welding Process | Q(=ηVI), (W) |
|-----------------|--------------|
| SMAW            | 2912         |
| FCAW            | 9120         |
| SAW             | 12825        |



**Fig. 2** Analysis variables

용접부는 가열 및 급냉의 복잡한 열 이력을 겪게 되므로 이를 해석하기 위해서는 온도에 따른 재료의 물성변화를 고려하여야 하므로, 기존 보고된 자료를 이용하였다.<sup>2,5)</sup> 열전달 해석시 고상과 액상의 상변화에 의한 잠열(latent heat)에 대한 효과를 고려하였으며, 용착금속의 stirring effect에 의한 열전달 효과를 고려하기 위해 유효 열전도계수를 도입하였다. 또한 용접부는 급열 및 급냉시 국부적으로 결정 구조의 변화(오스테나이트 조직에서 페라이트 조직으로)에 의한 체적변화가 수반되므로 strain dilatation관계를 적용하여 해석을 수행하였다<sup>4~6)</sup>.

시간에 따른 용접부의 온도 분포 해석을 위한 지배 방정식은 식(1) 과 같다.

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

여기서, T는 온도,  $\rho$ 는 밀도, C는 비열 그리고 k는 X, Y, Z 방향으로의 열 전도 계수이다.

열 전달 해석시 Fig.1과 같이 용접 아크가 일정 속도 및 일정 경로를 따라 이동하는 즉, 준 정상상태(quasi-stationary state)로 가정하고, 용접 아크의 개시 및 종료시 발생하는 효과를 배제함으로써 3차원 열 전달 문제를 용접선에 수직한 단면, 즉 Fig.1의 사선 영역에 대한 2차원의 비정상 온도 분포 문제로 가정하였다<sup>7)</sup>. 해석 영역에 대한 요소망은 Fig.3과 같이 8 nodes isoparametric brick element를 이용하여 구성하였으며, 해석시 용접 아크에 의한 열 하중을 식(2)와 같이 gaussian 분포로 모델링 하였다<sup>6,7)</sup>.

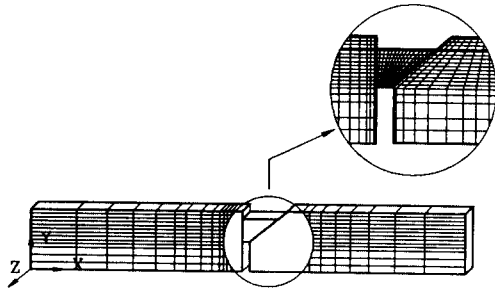


Fig. 3 Mesh design for restraint stress analysis

$$q_r = \frac{3 \cdot Q}{\pi \cdot \bar{r}^2} e^{-3\left(\frac{r}{\bar{r}}\right)} \quad [\text{W/mm}^2] \quad (2)$$

여기서,  $q_r$ 은 열속 (heat flux),  $r$ 은 용접 아크 중심으로부터의 거리,  $\bar{r}$ 는 아크의 유효 반경 그리고,  $Q$ 는 용접부에 전달되는 에너지이다.

Gaussian 분포의 열속 (heat flux)은 용접선을 따라 일정 속도로 이동하며 용접아크가 해석 영역에 접근시  $t/2$  ( $t$ : 용접 아크가 해석영역을 지나는 시간) 동안은 용접부 개선면을 가열하고 나머지  $t/2$  동안은 용착금속을 형성하면서 용착금속의 상부를 가열하는 것으로 모델링 하였다. 열 경계조건은 열속이 용접부의 개선면에 위치한 경우와 용착금속의 상부에 위치한 경우 Fig. 4와 같이 경계 표면에서 자연 대류에 의한 경계조건을 적용하였으며, 분포 열속이 해석영역을 지난 후에는 용착금속의 상하부를 포함한 전 경계면에 자연대류에 의한 경계조건을 적용하였다. 이때, 용접시 아크에 의한 열 손실이나 복사에 의한 열 손실은 그 정도가 매우 미비하므로 이에 대한 효과는 배제하였다.

열응력 해석시 재료는 등방성이며, 탄·소성 거동을 하고, 재료의 항복 개시는 von-Mises의 항복 조건을 적용하였다. 항복이 발생하면 incremental plastic strain을 계산하기 위해 associated flow rule을, 경화 조건으로는 reverse plasticity 및 Bauschinger 효과를 구현하기 위해 비교적 단순한 bilinear kinematic hardening theory를 적용하였다. 해석시 사용된 경계조건은 Fig. 5와 같으며, 열전달 해석을 통해 얻어진 각 시간에 따른 절점의 온도를 열하중 조건으로 적용하였다.

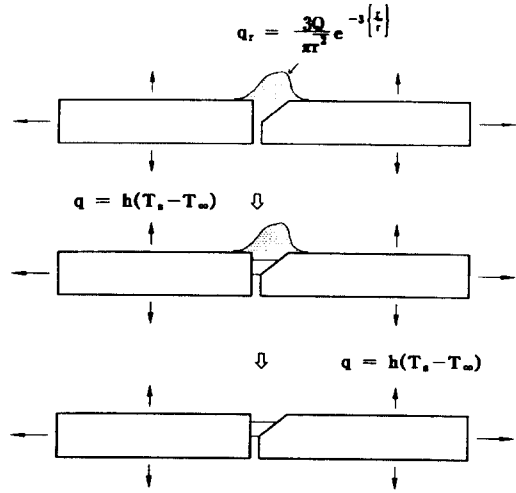


Fig. 4 Thermal boundary conditions

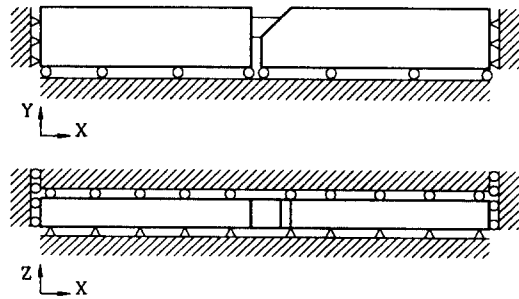


Fig. 5 Displacement boundary conditions

### 3. 해석 결과 및 고찰

#### 온도 분포

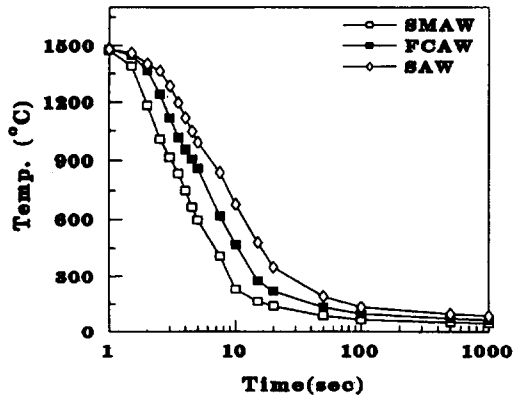
해석시 적용한 분포 열속등의 하중조건, 열 전달에 대한 경계조건 그리고 구성된 요소망등에 대한 신뢰성 평가를 위해 실제 용접부의 조직변태가 발생된 열영향부의 크기에 대해 실험 및 해석 결과를 상호 비교 평가하였다. Table 3에서 보여주듯이 여러 가지 시공법으로 형성된 용접부에 대하여 현미경으로 측정된 열영향부의 크기와 열 전달해석에 의한 크기간의 차이는 매우 적으며, 최대 5% 정도의 오차를 보이고 있다.

**Table 3.** Difference in HAZ size

|      | 실측치    | FEM 계산치 | 오차(%) |
|------|--------|---------|-------|
| SMAW | 1.05mm | 1.10mm  | 4.76  |
| FCAW | 1.49mm | 1.47mm  | 1.30  |
| SAW  | 2.22mm | 2.05mm  | 5.40  |

\* 오차 (%) = [(실측치 - FEM 계산치) / 실측치] × 100

Fig. 6은 각 용접시공법에 대하여 시간에 따른 용접 root부에서의 온도 변화를 나타내고 있다. 용접부의 온도는 300℃까지는 저온인 모재로의 열 전달에 의해 따라 급격히 감소하나 그 이후에는 완만한 거동을 보이고 있다. 용접후 3600초 이상 경과 후에 용접부 및 모재의 온도는 비로써 상온으로 된다. 이와 같은 시간에 따른 온도변화 다시 말해서 냉각속도는 용접시공방법에 의존되어 수동용접의 경우 가장 빠르고 입열량이 큰 SAW 방법의 경우 가장 느림을 알 수 있다.

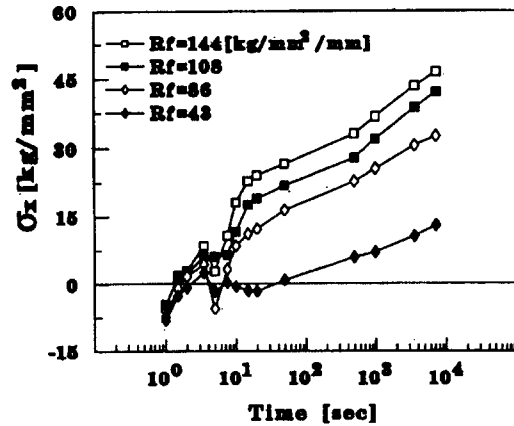


**Fig.6** Temperature changes at the weld root

구속 응력

Fig. 7은 수동용접시 MHT 시편의 길이 (L)가 각 75, 100, 125 그리고, 450mm 즉, 구속도 Rf가 144, 108, 83, 그리고, 42kg/mm<sup>2</sup>/mm 로 변경될 때 용접 루트부에 작용되는 응력(σ<sub>x</sub>)을 냉각시간(t)의 함수로 도시한 것이다. Fig.7과 같이 용접 완료 직후 용접 root부에는 용접 아크에 의해 용접부 및 그 근방의 모재가 가열되어 팽창하나 온도가 낮

은 모재에 의해 팽창이 제한되어 용접 루트부에 압축응력이 작용한다. 그러나, 시간이 경과함에 따라 용접부 및 가열된 모재가 수축함으로써 인장으로 천이되는 거동을 보이게 된다. 그러나, 이러한 거동은 변태온도 이상으로 가열된 모재가 상변태에 의해 체적팽창에 기인하여 일시적으로 압축응력이 작용하게 되나 시간이 경과함에 따라 용접부와 모재가 다시 수축되고 이러한 수축이 구속용접에 의해 제한됨으로써 인장응력으로 다시 천이된다. 냉각시간에 따른 σ<sub>x</sub>의 천이거동은 구속도에 관계없이 유사한 경향을 보이고 있으나 그 크기는 매우 큰 차이를 보이고 있다. 즉, 구속도가 42에서 144kg/mm<sup>2</sup>/mm으로 증가함에 따라 용접 루트부에 작용하는 구속응력은 10에서 46kg/mm<sup>2</sup>로 증가하게 된다. Fig.8은 용접부가 완전히 상온으로 냉각된 후 용접 루트부로 부터 모재 방향으로의 σ<sub>x</sub>의 분포를 나타내고 있다. 용접부가 구속 용접에 의해 냉각시 X방향으로의 변위가 제한됨으로써 용접재와 그 근방의 모재에는 인장 응력이 발생하는데, 구속도가 감소하는 경우 용접부에 작용하는 응력 수준은 현저하게 감소한다.



**Fig. 7** Variation of σ<sub>x</sub> at the weld root with cooling time for various restraint degree (Rf)

Fig.9는 구속도가 144kg/mm<sup>2</sup>/mm인 경우 용접 조건 즉, 입열량(Q)에 따른 용접 루트부에 작용되는 응력(σ<sub>x</sub>)의 변화를 냉각시간의 함수로 도시한 것이다. 용접 입열량(Q)의 증가에 따른 용접 루트

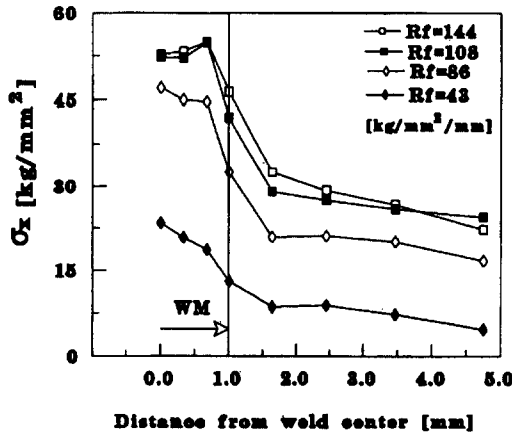


Fig. 8 Distribution of  $\sigma_x$  along direction from the weld root to the base metal for various Rf

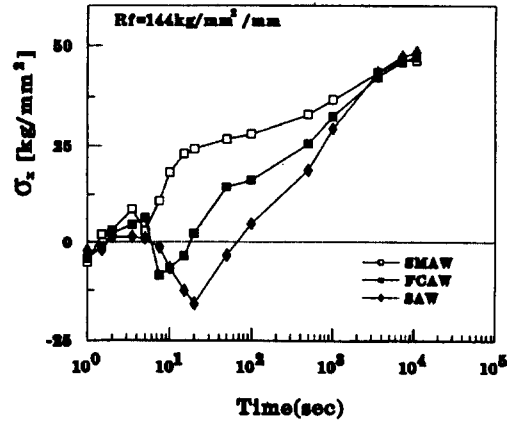


Fig. 9 Variation of  $\sigma_x$  at the weld root with welding process

부에 작용하는 구속응력은 큰 차이를 보이지 않는다. 이는 입열량이 증가함에 따라 용착금속이 증가하게 되어 단위 체적당 입열량의 크기에는 큰 차이가 없기 때문이다. 그러나 냉각시간에 따른  $\sigma_x$ 의 천이거동에는 커다란 차이를 보이고 있는데, 이는 입열량의 증가에 따른 상변태 영역의 증가로 인해 냉각시 용접부에 발생하는 수축량이 상변태에 의한 체적팽창에 기인하여 수축량이 감소하기 때문이다. 이러한 해석 결과는 본 저자들의 동일한 강재에 대한 MHT 균열 감수성 시험 결과 즉, SMAW, FCAW 그리고, SAW 로 갈수록 균열 감수성은 감소되었는데, 이는 입열량의 증가에 따른 용접부의 단면적의 증가 및 수축량의 감소로 인한 구속응력의 감소에 따른 결과임을 알수 있다.

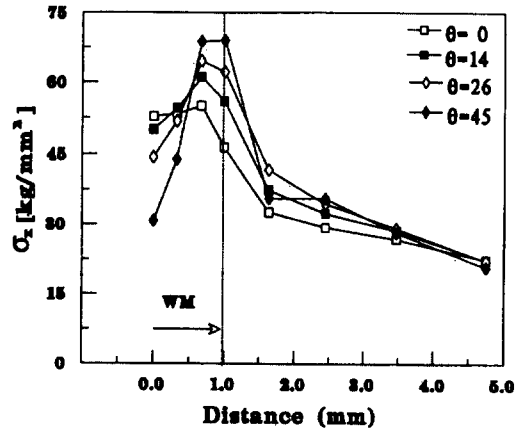


Fig.10 Distribution of  $\sigma_x$  along direction from the weld root to the base metal for various slant angle( $\theta$ )

Fig. 10은 용접부가 상온으로 냉각되고 구속도가 144kg/mm<sup>2</sup>/mm인 경우, 수동 용접 루트부에 작용되는 응력에 미치는 용착금속과 루트면간의 경사각( $\theta$ )의 영향을 도시한 것이다. 경사각이 증가함에 따라 용접부의 루트부에 작용하는 구속응력은 거의 비례적으로 증가하고 있다. 그러나 경사각의 증가로 인하여 용착금속의 중앙에 작용되는 응력은 오히려 감소되고 있다. 이와 같이 경사각의 증가에 따라 용접 루트부에서 구속응력의 증가는 모재와 용접부간의 단차 및 노치 효과에 기인한 것이다.

Fig. 11은 MHT 시편을 이용한 균열 감수성 평가시 사용된 구속 fillet 용접 각장(h)에 따른 용접 루트부에서 모재로의 응력분포 변화를 도시한 것이다. 용접루트부에 작용하는 구속응력은 각장이 증가함에 따라 다소 증가하는 양상을 보이나 용접 각장이 20mm 이상인 경우 구속 용접 각장의 증가에 따른 응력 증가율은 현저하게 감소하고 있다.

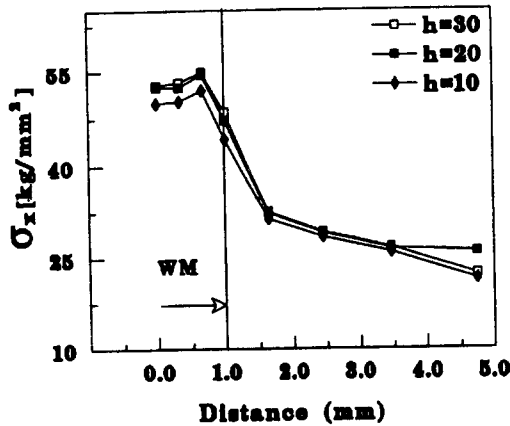


Fig. 11 Distribution of  $\sigma_x$  along direction from the weld root to the base metal for various leg length (h)

#### 4. 결 언

본보에서는 용접열영향부에 작용되는 구속응력을 유한요소법으로 평가하는 방법에 대하여 소개하였다. 이를 통하여 주어진 용접부에 작용되는 구속도는 물론 구속응력을 정량적으로 평가할 수 있다. 이와 같은 구속응력은 용접부 주변의 구속여건 뿐만아니라 용착금속의 형상인 루트부 경사각이나 용접시공방법에 영향을 받게 된다. 따라서

용접부 균열방지를 위한 구속응력을 정량적으로 평가하기 위해서는 상기된 인자들을 고려해야 한다.

#### 참 고 문 헌

1. K. Masubuchi : "Analysis of Welded Structures", Pergamon Press Ltd., 1st Edition.
2. K. Satoh and S. Matsui : J. of the Japan Welding Society, Vol. 36, 1967, pp. 1096~1109
3. 신상범, 윤중근, 권오중 : 용접학회 1995년 춘계학술발표초록집, pp.142~144
4. S. B. Shin and J. G. Youn : Proc. Int. workshop "NDT & Safety 96", Sep. 1996, Taegu, Korea, pp. 187~199
5. Anderson : Trans of ASME, Vol. 100, Oct., 1978, pp. 356~362
6. V. J. Papazoglou and K. Masubuchi : Trans of ASME, Vol. 104, Aug., 1982, pp. 198~203
7. K.Y. Bae and D. H. Park : J. of Engineering of Manufacture, Vol. 208, 1994, pp. 217~227