

## 저합금 탄소강 배관재의 다층용접 열영향부의 미세조직 및 열이력 해석

김태완<sup>†</sup> · 하준욱\* · 김동진\*\* · 김정태\*\*  
(2001년 7월 19일 접수, 2001년 12월 17일 심사완료)

### Analysis of Thermal Cycles and Microstructure of Heat Affected Zone for a Low Alloy Carbon Steel Pipe under Multipass Weld

Tae Woan Kim, Joon Wook Ha, Dong Jin Kim and Jeong Tae Kim

**Key Words:** Heat Affected Zone(열영향부), Multipass Weld(다층용접), Phase Transformation(상변태), Simulated Heat Treatment(재현열처리), Thermal Cycle(열이력)

#### Abstract

The purpose of this study is to analyze thermal cycles and to investigate microstructures of heat affected zones for a low alloy carbon steel pipe under a multipass weld. The commercial finite element code SYSWELD is used to compute thermal cycles during multipass weld. The numerical results such as thermal cycles and size of heat affected zone are compared with those of the experiment and the two results show a good agreement. In addition, the microstructure and hardness are investigated from the weldment in detail. The weakest location is founded at intercritical region near the base metal.

#### 기호설명

<p><math>t</math> : 시간</p> <p><math>T</math> : 온도</p> <p><math>D_i</math> : 상 <math>i</math> 의 비율</p> <p><math>k_i</math> : 열전도 계수</p> <p><math>H_i</math> : 엔탈피</p> <p><math>\rho_i</math> : 밀도</p> <p><math>c_i</math> : 비열</p> <p><math>K_{ij}, L_{ij}</math> : 상변태 계수들</p> <p><math>q</math> : 용접시 표면에 가해지는 열원</p> <p><math>h</math> : 대류 열전달계수</p>	<p><math>\sigma</math> : 스테판 볼츠만 상수</p> <p><math>I</math> : 전류</p> <p><math>V</math> : 전압</p> <p><math>v</math> : 용접속도</p> <p><math>Q_0</math> : 입열량</p> <p><math>S</math> : 입열면적</p> <p><math>t_1, t_2, t_3</math> : 입열시간</p> <p><math>E</math> : 에너지</p>
---	--

#### 1. 서론

산업 플랜트 등 고온 배관재 강관으로 널리 사용되는 저합금 탄소강은 여러 개의 단관으로 용접되는 구조물로 이루어져 있으며 용접부에서의 균일한 기계적 성질 및 파괴인성의 확보는 매우 중요하다. 용융용접에 있어서 열영향부는 용접열에 의해 변태점 이상으로 재가열되므로, 모재에 비하여 조직, 경도 및 기계적 성질 등이 현저하

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 두산중공업 기술연구원

E-mail : twkim@doosanheavy.com

TEL : (055)278-3670 FAX : (055)278-8593

\* 회원, 두산중공업 기술연구원

\*\* 두산중공업 기술연구원

게 변화되는 영역으로 균열, 인성의 저하 및 내식성 악화 등 여러 가지 문제가 발생되어 왔다. 모재와 용접금속의 경우 많은 연구가들에 의해 기계적물성 및 파괴인성 연구가 수행되어져<sup>(1,2)</sup> 왔으나 실용접부의 열영향부를 평가하기에는 열영향부의 영역이 좁고, 급격히 변화하는 물성으로 인하여 재현성있는 시편을 제작하는데 많은 어려움이 있다. 최근 김주학 등<sup>(3)</sup>은 열사이클 재현법을 이용하여 Rosenthal의 열이력 이론식<sup>(4)</sup>으로 열영향부의 시편을 재현하여 용접 열영향부의 특성을 조사하였다. 보다 정밀한 열영향부의 기계적물성 및 파괴인성을 평가할 수 있는 시편을 제작하기 위해서는 미세조직 특성파악을 통한 취약부의 도출 및 취약부위를 포함한 열영향부의 특정부위에서의 정밀한 열이력 해석은 매우 중요하다.

본 연구에서는 산업 플랜트 등 고온 배관재 강관으로 널리 사용되는 저합금 탄소강의 용접 열영향부에 대한 미세조직의 조사 및 열이력 해석을 수행하였다. 용접시 열영향부 조직의 특성을 조사하기 위해 용접절차서(Welding Procedure Specification, WPS)에 준하여 가스 텅스텐 아크 용접법(Gas Tungsten Arc Welding, GTAW)을 적용하여 16패스의 다층용접을 수행한 후, 열영향부의 미세조직 및 경도분포를 측정함으로써 열영향부 영역내에서의 취약부를 도출하였다. 또한 용접 전용 상용프로그램인 SYSWELD를 이용하여 용접시 상변태를 수반하는 열영향부의 열이력을 계산하였으며, 해석결과와 신뢰성 검증을 위해 실험결과와 비교하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1 재료

본 연구에 사용된 모재는 산업용 고온 배관재로 널리 사용되어 되는 저합금 탄소강으로, 외경 670mm 두께 28.5mm 강관을 절단하여 사용하였으며, 용접재료는 모재와 동일한 동종계의 용접봉을 사용하였다. 모재와 용접재료의 화학조성은 Table 1과 같다.

### 2.2 용접 열이력 측정

용접실험은 용접절차서(WPS)에 준하여 가스 텅스텐 아크 용접법(GTAW)을 적용하여 16패스의

**Table 1** Chemical compositions of base metal and filler metal (wt %)

	C	Mn	P	S	Si
Base metal	0.35	0.29 ~1.06	≤0.04	≤0.05	0.1
Filler metal	0.06 ~0.15	1.4 ~1.85	≤0.02	≤0.03	0.8 ~1.15

**Table 2** Weld conditions

Weld method	GTAW
Pass number	16 Pass
Voltage	14 ~ 16 V
Current	170 ~ 180 A
Welding speed	1.2 ~ 1.4 mm/s
Preheat temperature	160 °C
Interpass temperature	180 °C
PWHT	610 °C / 2h
Heat input	2020 J/mm

다층용접을 수행하였으며, 용접조건은 Table 2에 나타내었다. 용접시편의 치수는 가로, 세로, 높이가 각각 90, 25, 200mm이며, 개선(Groove) 형상은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 45° 싱글 베벨 그루브(Single Bevel Groove)를 가공하였다. 용접시 열영향부의 열이력을 측정하기 위하여 높이 7.5mm에 대하여 용융경계부로부터 2, 3, 5 및 6mm 위치에 오도록 총 4개의 열전대를 설치하였으며 용접이 진행되는 동안 열전대로부터 온도 변화를 측정하여 각 위치에서의 열이력을 구하였다. 용접 완료 후 각 열전대 설치 위치의 단면을 절단하여 조직 검사 및 경도시험을 수행하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 열전대 부착위치에 가장 근접한 5번 용접 패스에 대한 용융경계부로부터 2, 3, 5 및 6mm 떨어진 위치에서의 시간에 따른 온도 변화를 보여주고 있다. 용융경계부로부터 거리에 따

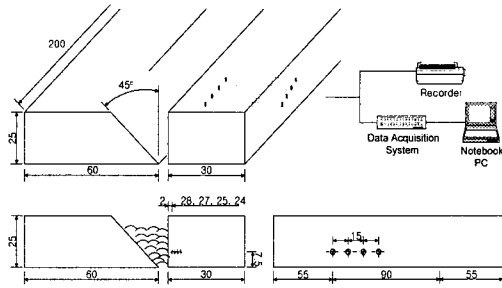


Fig. 1 Schematic of the weld specimen and measuring locations

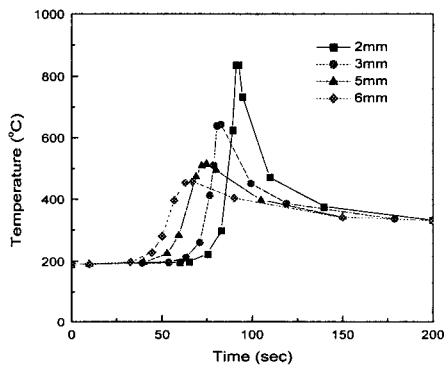


Fig. 2 Thermal cycles at various distances from the fusion boundary during 5th pass weld

라 측정된 열이력의 최고온도(Peak Temperature,  $T_p$ )는 각각 847, 657, 512, 455 °C이며, 측정 결과는 용접 열이력 수치해석 결과를 위한 비교 자료로 사용되어 진다.

Fig. 3은 싱글 베벨 그루브를 가지는 배관재의 GTAW 용접한 용접부 단면을 저배율 관찰한 사진을 나타내고 있으며 다층용접에 의해 용융부, 열영향부 및 모재의 거시적인 조직으로 구분됨을 알 수 있다. 열영향부의 크기는 3~4mm로 관찰되었다. Fig. 4는 GTAW 용접 후 610°C에서 2시간동안 후열처리한 용접부의 미세 조직 사진을 나타내고 있다. (a)는 용융경계부와 인접한 영역에서의 조대한 결정립을 가지는 열영향부를 나타내며, (b)는 미세한 결정립을 가지는 열영향부를 보여주고 있다. 용접열로 인하여 용융경계부와 인접한 영역에서는 고온 가열 및 냉각에 의해 조대한 결정립을 가지나, 용융경계부에서 떨어진 영역에서는 미세한 결정립을 나타내고 있음을 알

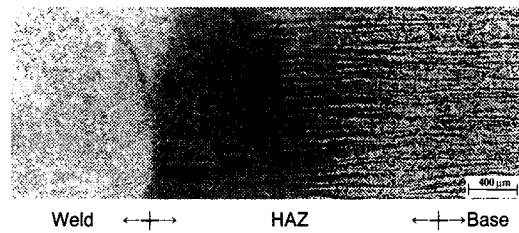
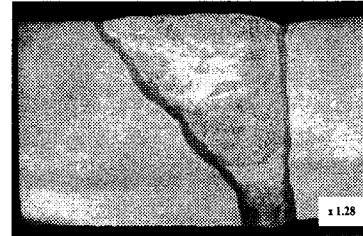
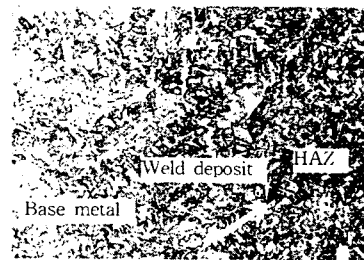
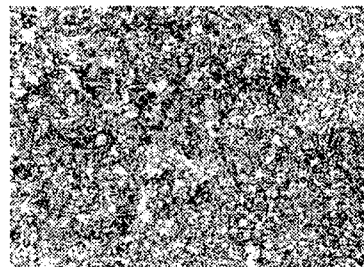


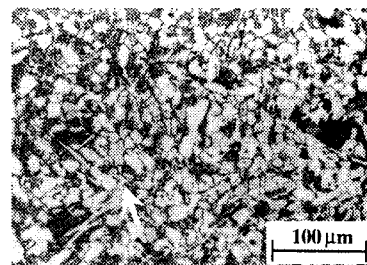
Fig. 3 Macrographs of weld joint.



(a) Coarse grain zone



(b) Fine grain zone



(c) Intercritical zone

Fig. 4 Micrographs of weld joint

수 있다. (c)는 모재의 인접부로 변태점온도(710°C) 이상으로 가열되지 않아 조직의 변화는 없으나, 템퍼링(Tempering) 효과에 의해 탄화물이 응집되어 있는 조직을 나타내고 있다. 따라서 Fig. 4의 미시적 조직 관찰 결과로부터 용접 열영향부의 각 영역들은 기계적 물성치의 변화가 심할 것으로 예측된다. Fig. 5는 610°C에서 2시간 용접 후 열처리한 열전대 부착위치에서 측정된 미소경도 시험결과를 나타내고 있다. 용융경계부와 모재의 경도가 각각 Hv 230, Hv 160의 값이 측정되었으며, 열영향부 영역에서는 조직시험에서 관찰된 결과와 유사하게 심한 경도의 변화를 나타내고 있으며, 용융경계부로부터 모재측으로 접근할수록 경도치가 감소하며 특히, 용융경계부에서 약 3.6mm 떨어진 지점에서 비교적 경도가 낮은 영역이 존재하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 다층용접한 압력용기강인 SA 508 Cl. 3 소재에도 유사한 경향을 나타내고 있다.<sup>(5)</sup> 이는 모재에 인접한 열영향부에서는 용접 후열처리 온도보다는 높으나, 용융경계부로부터 3.6mm 부근의 영역에서는 변태점 이하의 온도로 열영향을 받음으로써 변태는 일어나지 않은 것으로 판단된다. 즉 앞에서 나타낸 Fig. 4(c)의 미세조직과 관련하여 관찰하면 열영향부중에서도 용융경계부에서 3.6mm 떨어진 영역에서 변태점 이하의 온도로 탄화물이 응집되어 있는 것으로 보아 용접 후열처리 온도보다 높게 과열됨에 따라 경도가 모재보다도 상대적으로 낮은 경도연화지역으로 나타난 것으로 사료된다.

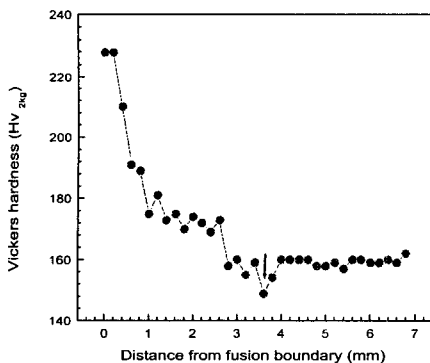


Fig. 5 Hardness of weld joint from the fusion boundary

#### 4. 수치 해석

용접시 용접부는 가열 및 급냉의 복잡한 열 이력으로 인하여 상변태 현상이 수반되므로 상변태 효과 및 상변태에 의한 잠열효과를 고려하는 것이 중요하다.<sup>(6)</sup> 본 연구에서는 용접시 발생하는 상변태 및 잠열효과를 고려할 수 있는 유한요소 해석 프로그램인 SYSWELD를 사용하여 온도해석을 수행하였다.

용접아크가 일정속도 및 일정 경로로 진행되는 정상상태로 가정하여 용접선이 수직한 단면들이 동일한 온도 분포를 가지는 2차원 비정상 온도해석 문제로 가정하였다. 해석 모델은 Fig. 6과 같으며, 1575개의 요소와 4032개의 절점을 사용하였다. 해석시 용융부와 열영향부 영역은 해석 초기부터 조밀한 요소들을 구성하였으며 용접되는 용융부의 요소들은 실 물성치를 적용하고, 나머지 용융부의 요소들은 0에 가까운 열전도도를 적용하였다. 상변태 및 잠열의 효과를 고려하기 위해 온도별, 상별 물성치(오스테나이트, 페라이트, 마르텐사이트, 베이나이트) 및 연속냉각곡선(Continuous Cooling Transformation)을 이용하였다. 모재 및 용접재의 열전도도, 비열, 밀도에 대한 상별물성치를 Fig. 7에 나타내었다.

용접시 용접부의 내부에서는 열전도와 상변태시 발생하는 잠열로 열전달이 진행되며 경계부에서는 복사 및 대류를 통하여 열이 발산하게 된다. 특히 상변태시 잠열 방출이나 흡수를 정량적으로 고려하기 위해서는 열전달 지배방정식과 재료의 상변태 방정식을 동시에 풀어야 한다. 용접시 상변태를 고려한 열전달 지배 방정식과 열적 경계조건은 다음과 같다.<sup>(7)</sup>

$$\sum_i p_i (\rho c)_i \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (\sum_i p_i k_i \nabla T) - Q_0 + \sum_i \frac{dp_i}{dt} \rho_i H_i = 0 \quad (1)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = q \text{ on } S_q \quad (2)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_\infty) + \sigma(T^4 - T_{sur}^4) \quad (3)$$



Fig. 6 Two dimensional finite element model for the multipass weld

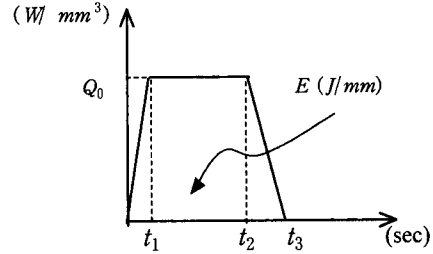


Fig. 8 The relation of heat source and heat input

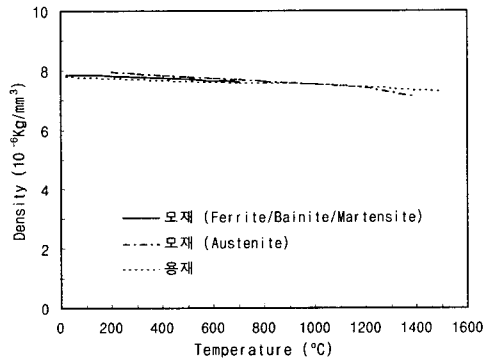
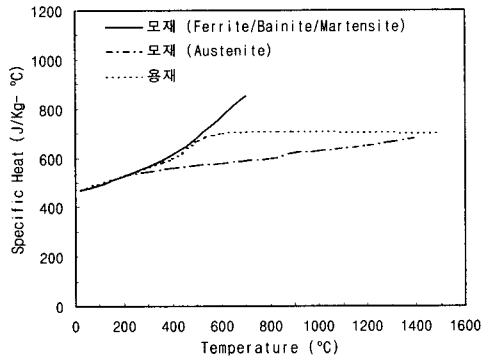
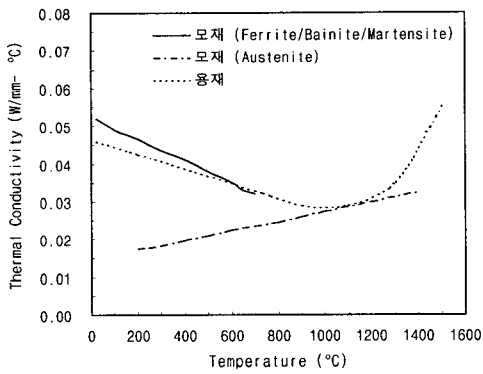


Fig. 7 Thermal material properties

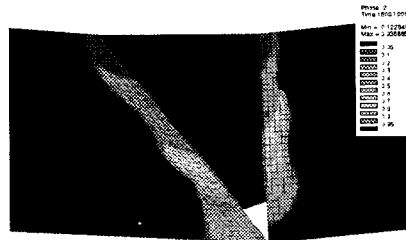


Fig. 9 Distribution of the bainite contents in the multipass weld

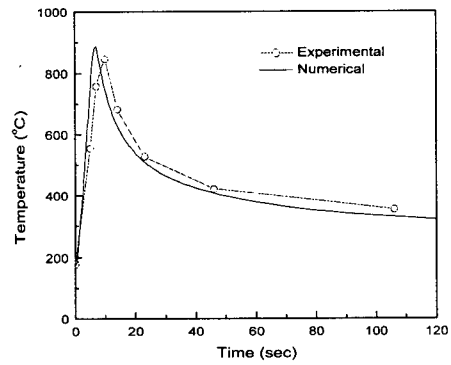


Fig. 10 Comparison of thermal cycles at 2mm distance from the fusion boundary during the 5th pass weld

여기서  $p_i, k_i, H_i, \rho_i, c_i$ 는 각각 상  $i$ 의 비율, 열전도 계수, 엔탈피, 밀도, 비열을 나타낸다. 또한  $q, h, \sigma$ 는 표면 열유속(heat flux), 대류 열전달 계수, 스테판 볼츠만 상수이다. 식 (1)의 마지막 항은 상변태에 의한 잠열효과를 나타내며 식 (4)의 상변태 방정식 모델로써 구할 수 있다.<sup>(7)</sup>

$$\frac{dp_i}{dt} = \sum_{j \neq i} (K_{ij} p_j - L_{ij} p_i) \quad (4)$$

( $i = 1, 2, \dots, n$ )

여기서  $n$ 은 발생할 수 있는 총 상의 개수를 나타내며  $K_{ij}, L_{ij}$ 는 상변태 계수들로 온도 및 온도변화율에 의존하며, 각각의 구체적 의미와 각 계수들을 구하는 방법은 참고문헌<sup>(7,8)</sup>에 자세히 기술되어 있다.

### 5. 수치해석 결과 및 고찰

용접공정 수치해석에 있어서 주요 매개변수로 사용되는 입열량은 대류 및 복사의 형태로 방출되며, 이들을 제외한 대부분의 열이 용접 구조물에 전달되어 용융부와 열영향부를 생성시킨다.<sup>(9,10)</sup> 입열량(Heat Source)은 식 (5)의 용접에 사용된 전류( $I$ ), 전압( $V$ ) 및 용접속도( $v$ )에 의해 결정되는 입열에너지(Heat Input,  $E$ )와 식 (6)의 입열량( $Q_0$ ), 입열면적( $S$ ), 입열시간( $t_1, t_2, t_3$ )에 의해 결정되는 에너지로부터 입열량은 식 (7)과 같이 결정된다.<sup>(7)</sup>

$$E = \frac{I \times V}{v} \quad (5)$$

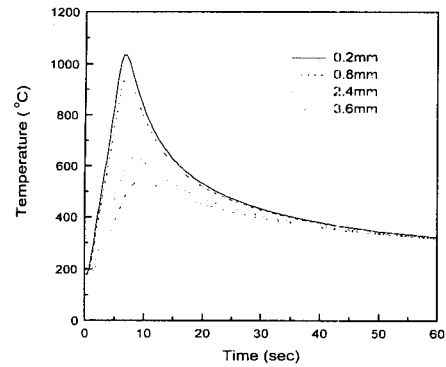
$$E = \frac{1}{2} (t_2 + t_3 - t_1) \cdot S \cdot Q_0 \quad (6)$$

$$Q_0 = \frac{2E}{(t_2 + t_3 - t_1) \cdot S} \quad (7)$$

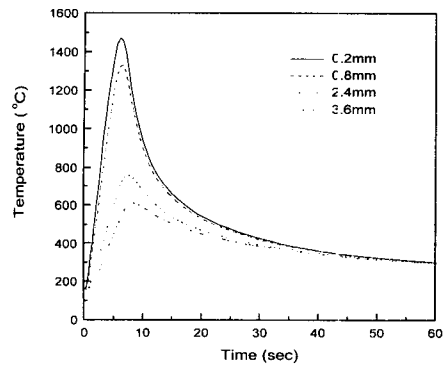
식 (6)은 입열량과 입열에너지의 관계를 나타내며 Fig. 8과 같이 나타낼 수 있다. 수치해석 결과의 신뢰성 검토를 위해 열영향부의 크기와 열전대의 부착위치에 가장 인접한 5번 용접패스에 대해 용융경계부에서 2mm 떨어진 위치에서 계산된 열이력을 실험 결과와 비교하였다. Fig. 9는 수치해석에서 얻어진 용접부의 베이나이트 조직 분포를 나타내었다. 열영향부의 크기는 금속조직이 냉각되면서 베이나이트 조직이 5% 이상인 영역으로 정의되며<sup>(7)</sup> 3~4mm 크기를 나타내었으며

실험결과 현미경으로 측정한 열영향부 크기 3~4mm와 유사한 결과를 얻었다.

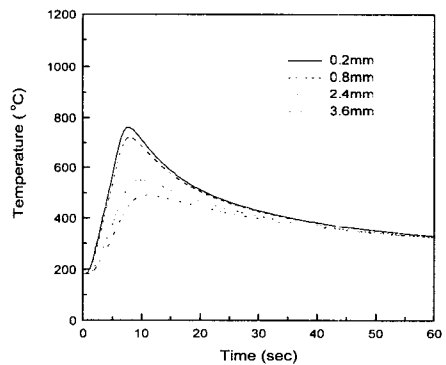
Fig. 10은 5번 용접적층시 용융경계부로부터 2mm 떨어진 위치에서의 열이력에 대한 실험과 수치해석 결과를 나타내었다. 실험치와 수치해



(a) The 4th pass weld



(b) The 5th pass weld



(c) The 6th pass weld

Fig. 11 Thermal cycles at various distances from the fusion boundary during the multipass weld

**Table 3** Comparison of experimental and numerical peak temperatures

Distances	Peak temperatures (°C)	
	Experimental	Numerical
2mm	847	886
3mm	657	686
5mm	512	526
6mm	455	461

의 최고온도는 각각 847°C, 886°C로 수치해가 약 4.4% 큰 값을 나타내었으며 두 결과는 비교적 잘 일치하였다. Table 3은 5번 용접적층시 용융경계부에서 2, 3, 5, 6mm 떨어진 위치에서의 최고온도에 대한 실험결과와 수치해석 결과를 나타내었다. 수치해석결과는 실험결과보다 다소 높은 값을 보여주고 있으며 용융경계부에서 2mm 떨어진 지점에서 최대 4.4% 차이가 나타났으며, 용융경계부로부터 거리가 멀어질수록 두 결과는 잘 일치하였다.

다층용접부의 열영향부는 반복되는 열이력으로 인하여 모재에 비하여 미세조직, 경도 및 기계적 성질 등이 현저하게 변화되는 영역이며 실용접부의 열영향부를 평가하기에는 열영향부의 영역이 좁고, 급격히 변하는 물성을 정량적으로 평가하기가 어렵기 때문에 용접 열영향부의 위치에 따른 열이력을 재현하는 재현열처리방법을 이용하여 열영향부의 기계적특성을 평가하는데<sup>(3)</sup> 이를 위해서는 용접 열영향부의 열이력을 정밀하게 산출하는 것은 매우 중요하다. 앞 절의 미세 조직 및 경도 시험 결과로부터 기계적 물성치가 급격하게 변화하는 열영향부 영역의 열이력을 조사하기 위해 Fig. 11에서 용융경계부로부터 0.2, 0.8, 2.4, 3.6mm 떨어진 위치에서의 4번, 5번, 6번 각각의 용접패스의 열이력을 나타내었다. 최고온도에 도달하는데 소요되는 시간은 용접패스와 용융경계부로부터의 거리에 따라 9~12초로 급격하게 최고온도에 도달하나 층간온도(180°C)로 냉각되는 데는 비교적 긴 시간이 소요되었으며 실험결과와 잘 일치하였다. 또한 용융경계부로부터 거리가 가까울수록 온도 상승율과 온도 냉각율이 급격하게 변화하는 것을 볼 수 있으며, 이 변화율은 열영향부의 특성을 결정하는 중요한 변수가 된다. 용접열영향부의 열이력 수치 해석결과로부터 얻

어진 온도상승율과 온도냉각율은 향후 열영향부의 기계적물성치를 평가하기 위한 재현열처리 시편을 제작하는 기초자료로 활용할 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 산업 플랜트 등 고온 배관재 강관으로 널리 사용되는 저합금 탄소강의 용접 열영향부의 미세 조직과 경도 변화를 조사하였으며, 상변태를 고려한 수치해석을 통하여 열영향부의 열이력을 계산하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 조직시험 결과 열영향부의 크기는 3~4mm로 나타났으며, 열영향부 영역은 용접금속과 모재에 비해 미세조직 및 경도분포의 변화가 심한 양상을 보였다.

(2) 경도시험 결과 용융경계부와 모재의 경도가 각각 Hv 210, Hv 160의 값이 측정되었으며, 용융경계부로부터 모재측으로 갈수록 경도치가 감소하는 경향을 보였으며, 용융경계부에서 3.6mm 떨어진 지점 부근에서 비교적 경도가 낮은 영역이 나타났다.

(3) 상변태를 고려한 수치해석 결과는 실험결과와 잘 일치하였으며, 해석 결과로부터 얻어진 취약부위를 포함한 열영향부의 특정부위의 열이력은 향후 열 영향부위들을 재현하는 시편을 제작하는데 기초자료로 활용될 수 있다.

## 참고문헌

- (1) 정남용, 김문영, 김종우, 1999, "발전용 가스터빈 고온부재의 탄소성 J적분 파괴인성 평가," 대한기계학회논문집 A, Vol. 23, No. 10, pp. 1837~1844.
- (2) 김철만, 정현호, 김형식, 홍성호, 김우식, 1999, "용착금속의 파괴인성에 미치는 불균일 미세조직의 영향," 대한용접학회지, Vol. 17, No. 2, pp. 36~43.
- (3) 김주학, 문종길, 변택상, 이창희, 홍준화, 1997, "열 Cycle 재현법을 이용한 원자력압력용기(RPV)강 용접열영향부(HAZ) 해석," 한국원자력학회논문집, pp. 17~22.
- (4) Rosenthal, D., 1946, "The Theory of Moving Sources of Heat and Its Application to Metal

- Treatments," *Transaction of the ASME*, Nov., pp. 849~866.
- (5) 김주학, 변택상, 지세환, 국일현, 홍준화, 1996, "원자력압력용기강 용접열 영향부의 샤프시험편 노치 위치설정에 대하여," 한국원자력학회논문집, pp. 557~562.
- (6) 조시훈, 김재웅, 2001, "상변태를 고려한 탄소강 용접부의 잔류응력 해석에 관한 연구," 대한기계학회논문집 A, Vol. 25, No. 3, pp. 390~398.
- (7) ESI, 1993, "SYSWELD+ Reference manual," Ver. 2.0.
- (8) Leblond, J. B. and Devaux, J., 1984, "A New Kinetic Model for Anisothermal Metallurgical Transformations in Steels Including Effect of Austenite Grain Size," *Acta Metall*, Vol. 32, No. 1, pp. 137~146.
- (9) 심용래, 이성근, 1993, "용접 잔류응력 해석을 위한 Heat Input Model 개발," 대한용접학회지, Vol. 11, No. 3, pp. 110~123.
- (10) Goldak, J., Chakravarti, A. and Bibby, M., 1984, "A New Finite Element Model for Welding Heat Sources," *Metallurgical Transactions B*, Vol. 15B, pp. 299~305.