

# 다층용접 구조물의 유한요소해석

하준욱\* · 김태완\* · 김동진\*

## Finite Element Analysis of Multi-Pass Welding Structure

Joon Wook Ha, Tae Woan Kim and Dong Jin Kim

**Key Words :** Multi-pass Welding(다층용접), Phase Transformation(상변태), Heat Affected Zone(열영향부), Thermal Cycle(열이력), Residual Stress(잔류응력), Finite Element Analysis(유한요소해석), Hole Drilling Method(천공법)

### Abstract

The finite element analysis by the computer program SYSWELD in consideration of phase transformation was carried out to simulate the multi-pass welding process of SA106 Gr. C which is used for the main steam pipe in nuclear power plant. All the numerical results such as temperatures, the size of heat affected zone and the residual stresses were compared to the experimental results.

### 1. 서론

구조물의 용접 시 열원에 의한 급격한 온도변화는 구조물의 안전성과 내구성에 심각한 영향을 미친다. 특히 용접구조물의 접합부 및 그 주변부인 열영향부에서는 열원에 의한 미세조직의 변화, 기계적성질의 저하와 수축 및 팽창에 의한 잔류응력 등이 복합적으로 작용하여 용접구조물의 강도 저하와 균열발생의 직접적인 원인이 되고 있으며, 모재의 두께가 증가할 수록 용접 층(Pass)의 수도 증가하여 더욱 복잡한 거동을 보이게 된다.

따라서, 구조적으로 건전한 용접구조물의 설계를 위해서는 용접에 따른 온도변화와 용접 후 잔류응력을 정확히 해석하는 것이 매우 중요하다.

본 연구에서는 원자력 발전소에 주로 사용되는 SA106 Gr. C 배관재에 대해 용접 시방서를 기초로 다음과 같은 절차의 다층용접 공정에 대한 실험과 해석을 수행하였다.

- (1) 용접과정에서 나타나는 구조물의 열이력을 측정 한 후 시편의 단면에서 찍은 마크로그래피(Macrography)를 이용하여 용융부와 열영향부를 확인하였다.

- (2) 시편의 표면에서 용융부, 열영향부 및 모재부에 따라 임의의 측정위치를 선정 한 후 스트레인 게이지(Strain Gage)를 부착하여 천공법(Hole Drilling Method)<sup>(1)</sup>을 써서 용접 후 잔류응력을 측정하였다.
- (3) 용접해석 전용프로그램인 SYSWELD<sup>(2)</sup>를 사용하여 상변태(Phase Transformation)를 고려한 온도해석 및 잔류응력해석을 수행하였으며, 이들 결과를 상기 실험에서 얻은 결과와 비교하였다.

### 2. 실험 및 결과

#### 2.1 실험개요

시편의 모재(Base Metal)와 용재(Filler Metal)는 각각 SA106 Gr. C 와 ER70S6 으로 재료의 화학조성을 Table 1 에 나타냈으며 용접 시방서를 기준으로 실험을 수행하였다.

모재의 크기는 200x85x25mm 이며, 용재가 용입되는 부위는 45° 싱글 베벨 그루브(Single Bevel Groove)로 기계가공 하였다. 모재와 그루브의 형상 및 열이력 측정을 위한 열전대의 위치를 Fig. 1 에 보였다.

\* 한국중공업(주) 기술연구원

Table 1 Chemical composition of base and filler metals

	C	Mn	P	S	Si
Base metal	0.35	0.29 ~ 1.06	≤ 0.048	≤ 0.058	0.1
Filler metal	0.06 ~ 0.15	1.4 ~ 1.85	≤ 0.025	≤ 0.035	0.8 ~ 1.15

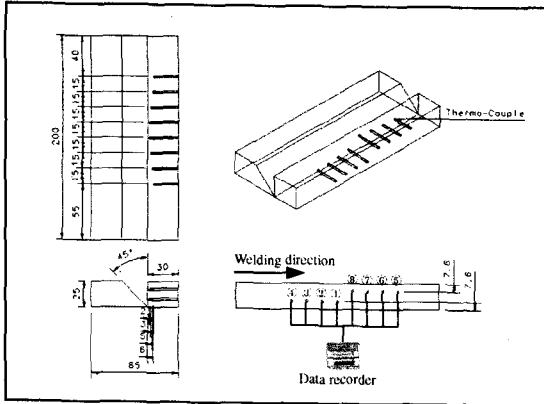


Fig. 1 Schematic drawing of welding specimen and the location of thermocouples

## 2.2 열이력 측정실험 및 결과

가스 텅스텐 아크용접(Gas Tungsten Arc Welding : GTAW)을 사용하여 상기 형상의 시편에 Table 2의 용접조건을 고려한 다층용접을 수행하였다.

측정위치는 모재와 용입부의 경계면에서부터 2, 3, 5, 6mm 위치에 구멍을 뚫어 열전대를 부착했는데 이는 용융경계부, 열영향부 및 모재부를 모두 포함하는 영역으로 실험 및 해석에 있어서 충분한 결과를 얻을 수 있는 영역으로 판단된다.

열이력 측정결과를 Fig. 2에 나타냈으며 이는 열전대와 근접한 4, 5, 6번 용접 층에 대한 1, 2, 7, 8번 측정위치의 결과로서 용접과정 동안의 온도 분포를 잘 표현할 수 있는 측정 데이터이다.

Table 2 Welding conditions

Welding process	GTAW
Pass No.	16
Current (A)	14 ~ 16
Voltage (V)	170 ~ 180
Welding speed (mm/s)	1.2 ~ 1.4
Preheat temperature (°C)	160
Interpass temperature (°C)	180
Post Weld Heat Treatment* (°C/hr)	610±10/2

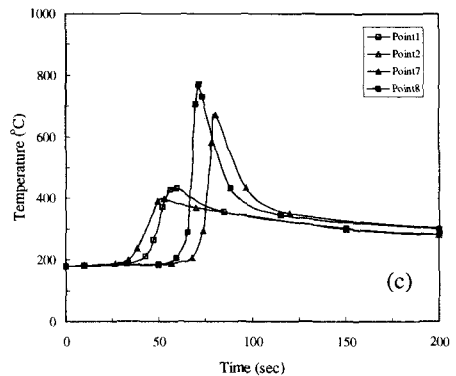
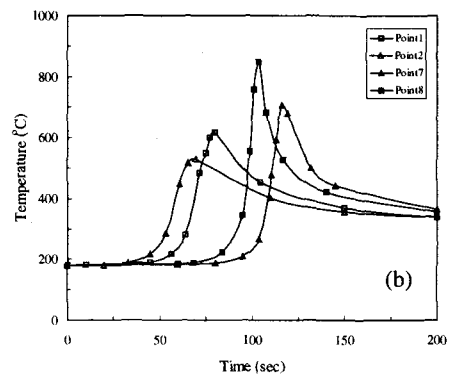
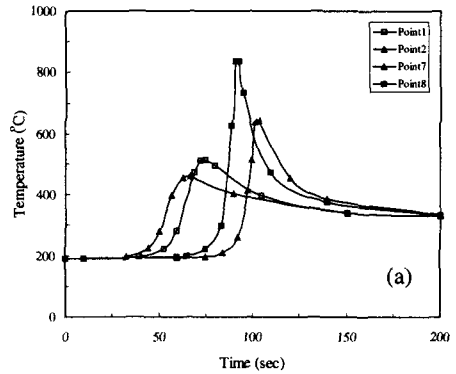


Fig. 2 Thermal cycles of multi-pass welding at the measuring points  
(a)4<sup>th</sup> pass, (b)5<sup>th</sup> pass, (c)6<sup>th</sup> pass

상기 측정 열이력을 통하여 용융경계부, 열영향부 및 모재부의 가열시간, 최고온도 및 800°C에서 500°C로 냉각되는 시간( $\Delta t_{8/5}$ ) 등 용접공정의 중요한 결과들을 알 수 있으며 부가적으로 용접 후 용접방향에 수직인 단면을 절단한 다음 표면처리를 거쳐 시편에 나타난 용융부와 열영향부의 크기 및 분포를 평가할 수 있는 마크로그래피를 관찰할 수 있다.

### 2.3 잔류응력 측정실험 및 결과

열이력 측정실험 후 Fig. 3 과 같이 천공법(Hole Drilling Method)을 사용하여 잔류응력을 측정하였으며 시편의 표면에서 측정된 잔류응력 결과를 Fig. 4 에 보였다.

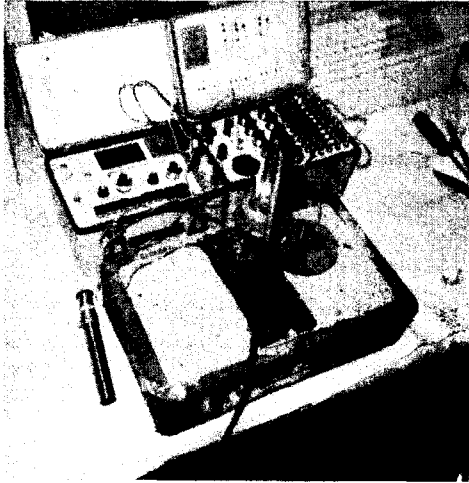


Fig. 3 Measurement of the residual stress using the hole drilling method

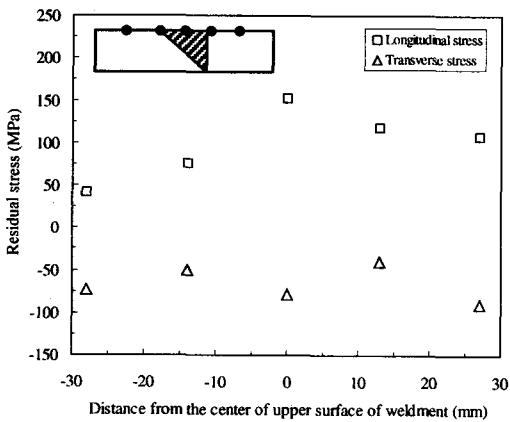


Fig. 4 Residual stresses on the upper surface of the specimen

## 3. 유한요소해석 및 결과

### 3.1 상변태를 고려한 온도해석

상변태를 고려할 수 있는 용접해석 전용프로그램인 SYSWELD 를 사용하여 16층 용접에 대한 온도해석을 수행하였으며, 열전대의 위치에 해당

되는 유한요소 모델의 절점으로부터 시간에 따른 열이력을 계산하였다.

일반적으로 용접문제의 해석에는 용융부와 열영향부에 매우 작은 요소를 설정해야 하며, 온도변화가 급격한 상승 및 냉각 구간에서 많은 해석시간이 요구 되므로 해석의 효율성과 경제성을 위해 각 단면이 동일한 온도변화를 가지는 2차원 문제로 가정하여 해석하는 경우가 많다.

본 연구에서도 준 정상상태(Quasi stationary state)를 고려하고, 용접 아크의 시작과 종료 시 발생하는 효과를 배제한 2 차원 해석을 수행하였다. 해석을 위한 격자형상과 열전대와 동일한 위치의 절점을 Fig. 5 에 보였으며, 이때 용융부와 열영향부 영역은 보다 조밀한 밀도의 요소를 사용했다. 해석을 위해 계산의 초기단계에서부터 요소를 완전히 구성해야 하며, 용접 되는 층의 요소에는 실제 물성치를 그대로 적용하고, 용접이 안 되는 층의 요소들은 매우 낮은 열전도도를 적용함으로써 해석 결과에 영향을 미치지 않도록 했다.

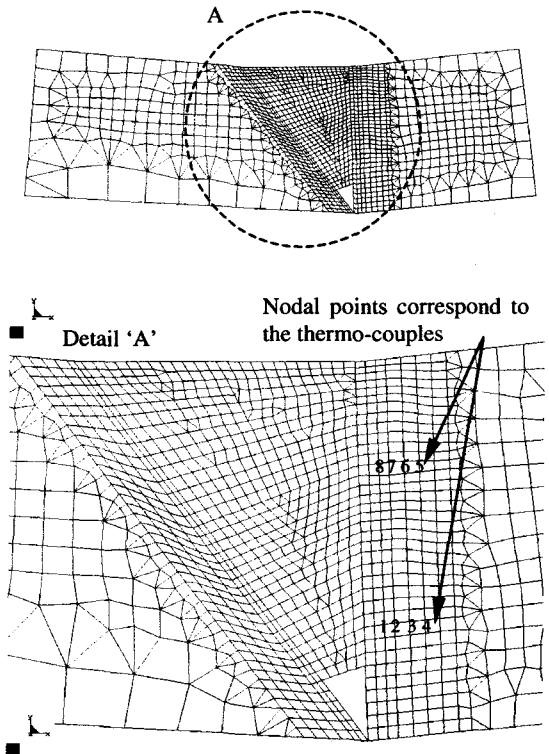


Fig. 5 Finite element model of multi-pass welding specimen

온도해석을 위한 중요한 변수로는 입열량( $Q_0$ , Volumic Source,  $W/mm^3$ )과 용접시간을 들 수 있으며<sup>(3), (4)</sup> 입열량은 식(1)과 같이 용접에 사용된 전류(I), 전압(V) 및 용접속도(v)에 의해 결정되는 에너지로부터 식(2)와 같이 구할 수 있다. 그리고 이러한 입열량은 Fig. 6 및 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 용융부의 체적( $S \times H$ )과 용접시간(t)에 의존한다.

$$E = \frac{I \times V}{v} \quad (1)$$

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

상기 식에서 계산된 입열량은 온도해석 시 용융부에 해당되는 요소 전체에 걸쳐 적용되며, 나머지 요소에는 매우 작은 값의 물성치를 사용하여 결과에 영향을 미치지 않도록 한다. 그리고, 용접 아크에 의한 입열이 이루어지는 동안과 아크가 해석영역을 지난 후에도 모재부의 경계면에 걸쳐 일어난 자연대류에 의한 경계조건을 고려하였다. 그러나, 아크에 의한 열손실이나 복사에 의한 열손실은 입열 되는 아크의 열량에 비해 매우 작으므로 고려하지 않았다.

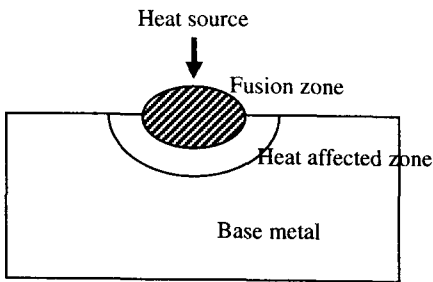


Fig. 6 Fusion zone and heat affected zone in accordance with heat source

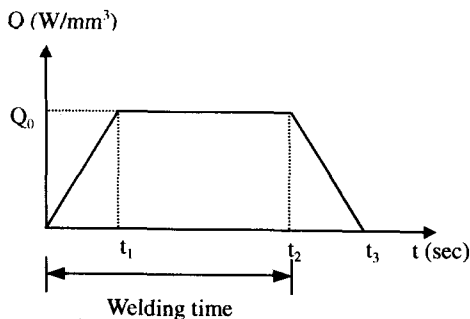
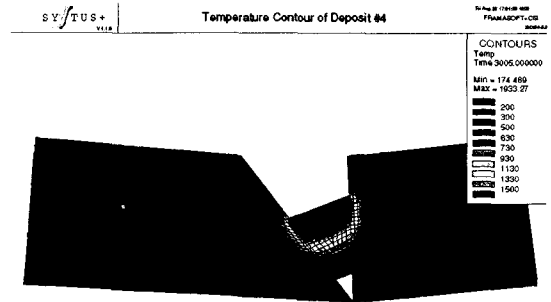


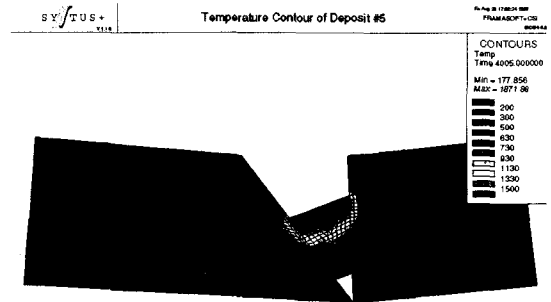
Fig. 7 The relation between heat source and welding time

온도해석 후 측정위치의 결과를 잘 표현할 수 있는 4, 5, 6번 용접 층의 온도분포를 Fig. 8에 나타냈다.

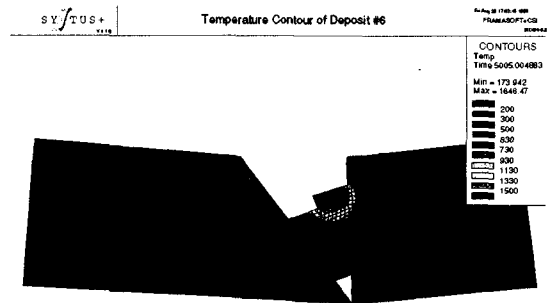
그 결과 대부분의 열원이 용융부 및 열영향부 부근에서 분포하며 실험에서 얻은 열이력과 유사한 양상을 나타냄을 알 수 있다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Temperature distribution of multi-pass welding (a)4<sup>th</sup> pass, (b)5<sup>th</sup> pass, (c)6<sup>th</sup> pass

### 3.2 잔류응력해석

다층용접에 대한 3차원 잔류응력을 2차원 평면응력으로 해석하는 경우 실제 현상과는 오차가 많다. 따라서 본 연구에서는 두께방향의 변형을 고려한 일반 평면변형률 요소(Generalized Plane Strain Element)<sup>(5), (6), (7)</sup>를 사용하여 온도 및 상에 따라 변화되는 기계적 물성치를 대입한 후 2차원 탄소성 응력해석을 수행하였다.

온도해석의 경우와 마찬가지로 응력해석 시 용접이 이루어지는 요소에는 실제 물성치를 그대로 적용하고, 용접이 이루어지지 않는 층의 요소들은 낮은 값의 물성치를 고려함으로써 해석결과에 영향을 미치지 않도록 하였다.

해석의 정확성과 경제성을 위해 감소적분법(Reduced Integration Method)을 대입한 2차요소(Quadratic Element)를 사용하였으며 해석결과 얻어진 용접선 방향(Longitudinal Direction) 및 용접선 직각방향(Transverse Direction)의 응력분포를 Fig. 9에 보였다.

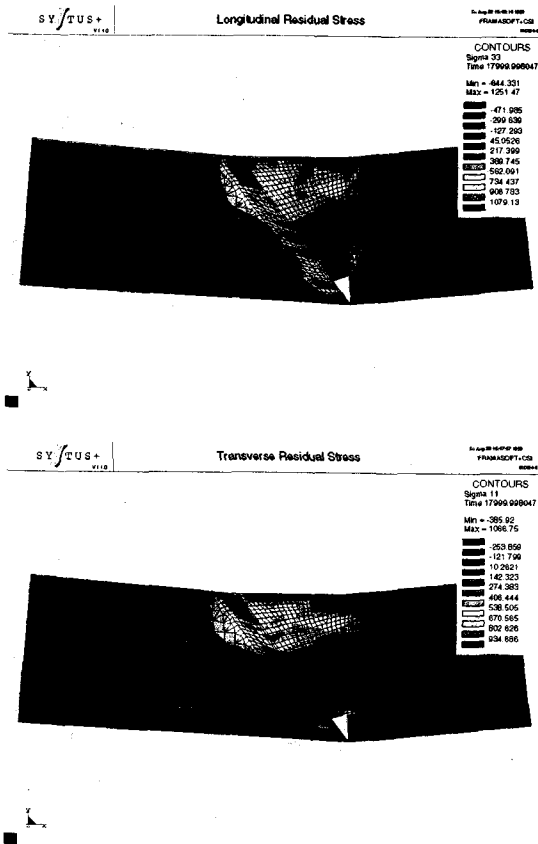


Fig. 9 Longitudinal and Transverse residual stress distribution after multi-pass welding

### 4. 실험 및 해석결과의 비교

다층용접 공정에 따른 열이력, 열영향부의 크기 및 잔류응력의 실험결과와 해석결과를 비교하였다. 먼저 측정위치와 동일한 유한요소모델 절점의 열이력 결과는 유사한 분포를 나타냈고, 이 가운데 4번 용접 층의 결과를 Table 3에 비교하였다.

Table 3 Comparison of experimental and numerical thermal cycle for 4<sup>th</sup> welding pass

Measuring point	$\Delta t_{\text{Heating}}$ (sec)		$T_{\text{peak}}$ (°C)		$\Delta t_{8/5}$ (sec)*	
	Exp.	Num.	Exp.	Num.	Exp.	Num.
1	3.5	3.1	610	609		
2	4.1	3.8	526	552		
3			485	471		
4			454	443		
5			470	451		
6			520	498		
7	11.2	9.8	700	686		
8	9.0	7.2	850	886	15.0	15.2

\* Cooling time from 800°C to 500°C

다음으로 Fig. 10과 같이 마크로그래피와 상분포 결과를 비교하여 해석에 사용된 입열량과 용접 시간의 적절함을 확인할 수 있다.

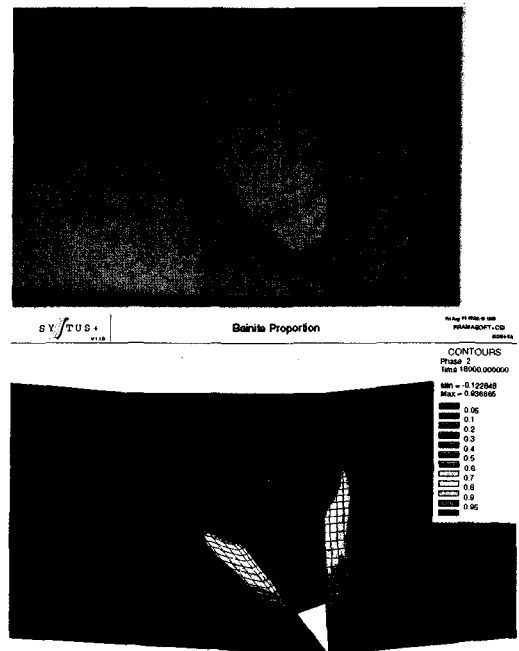


Fig. 10 Comparison of experimental and numerical heat affected zone

해석결과에서 관찰된 열영향부의 크기는 금속조직이 냉각되면서 베이나이트(Bainite)화 한 영역으로 베이나이트 조직이 5% 이상인 영역을 나타내며, 3~4mm 정도의 크기를 보였고, 실험결과 알 수 있는 열영향부의 크기인 2.5~3mm와 유사함을 알 수 있다.

마지막으로 잔류응력 측정결과와 해석결과를 비교하여 Fig. 11에 보였다. 용접선 직각방향의 응력은 거의 유사한 결과를 나타내고 있으며 용접선 방향의 응력은 중심부에서 다소 오차를 보이지만 대체로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

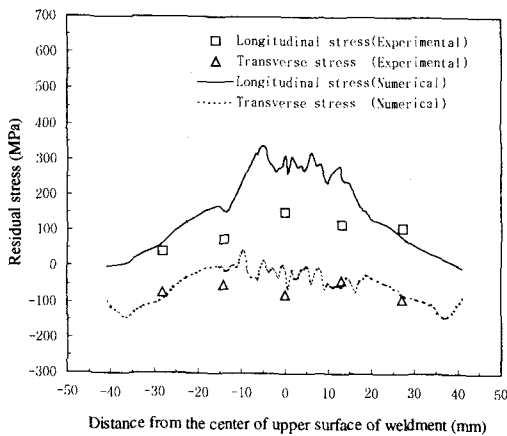


Fig. 11 Comparison of experimental and numerical residual stresses on the upper surface

## 5. 결론

가스텅스텐 아크용접을 사용하여 45° 싱글 베벨 그루브를 가진 SA106 Gr. C 배관재에 대한 16층 다층용접을 수행하였으며 용접공정에 따른 열이력, 열영향부의 크기 및 잔류응력의 실험결과와 해석결과를 비교하여 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 실험과 해석의 열이력 결과는 모든 측정위치에 대해 약 5%의 오차범위 내에 잘 일치함을 알 수 있다.
- (2) 마크로그래피와 해석에 의한 상분포 결과를 통해 해석에 사용된 입열량과 용접시간의 적절함을 확인할 수 있으며 아울러 본 연구에 적용된 용접조건에 대한 열영향부의 크기는 약 3mm 정도임을 알 수 있다.
- (3) 실험과 해석의 잔류응력 결과는 용접선 방향의 응력이 중심부에서 다소 오차를 보이지만

대체로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

상기 결론을 통해 용접조건이 유사한 다층용접의 경우는 실제 용접작업을 수행하지 않고 수치해석만으로 열이력, 열영향부의 크기 및 잔류응력 등 중요한 결과들을 예측할 수 있으므로 경제적이고 효율적인 용접공정 해석이 가능할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- (1) J.J.Janosch, M.Clerge, "Numerical Welding Simulation of Two Pipes / Determination of the Evolution of Residual Stresses during Proof Test Pressure", PVP, Vol. 347, 1997, pp. 103~113
- (2) "SYSWELD+ 2.0 Reference manual", ESI Group
- (3) 심용래 등, "용접 잔류응력 해석을 위한 Heat Input Model 개발", 대한용접학회지, Vol. 11, No. 3, 1993, pp. 110~123
- (4) J.Goldak, A.Chakravarti, M.Bibby, "A New Finite Element Model for Welding Heat Sources", Metallurgical Transactions B, Vol.15B, 1984, pp. 299~305
- (5) E.F.Rybicki, R.B.Stonesifer, "Computation of Residual Stresses due to Multipass Welds in piping Systems", Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 101, 1979, pp. 149~154
- (6) B.A.B.Andersson, "Thermal Stresses in a Submerged Arc Welded Joint Considering Phase Transformations", Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 100, 1978, pp. 356~362
- (7) C.S.Seok, "Investigation of Welding Residual Stress of High Tensile Steel by Finite Element Method and Experiment", PVP, Vol. 347, 1997, pp. 115~123