

스테인리스강 압력용기 용접부의 각 변형 제어를 위한 적정 용접순서

Proper Welding Sequence for Control of Angular Distortion at the Weldment of Stainless Steel Pressure Vessel

김하근*, 신상범, 김대순
현대중공업(주)

1. 서론

실 용접 구조물의 용접 변형은 부재의 형상 및 치수 그리고, 재질뿐만 아니라, 용접 조건이나 구속조건, 용접 순서등의 다양한 인자들의 상호 작용에 의해 매우 복잡한 양상으로 발생한다. 그러나, 현재 용접 변형의 제어를 위한 방안은 strong back 등과 같은 jig등에 의한 단순 구속이나 작업자의 경험 또는 용접부의 각 구속도의 단순 계산에 의존하고 있다. 따라서, 대형 압력용기와 같이 다수의 butt joint 용접으로 제작되는 용접 구조물에 있어 기존의 제어 방안을 이용하여 효율적으로 변형을 제어하는 것은 매우 어렵다. 또한 기존의 용접 변형 간이 예측 기법의 경우 용접 순서에 따른 변형 제어 효과를 규명하기에는 매우 제한적이다.

따라서, 본 연구에서는 유한 요소 해석 및 실험을 이용하여 용접 변형 예측을 위한 간이 해석 기법을 제안하고, 이 결과를 바탕으로 압력 용기의 용접 변형 제어를 위한 적정 용접 순서를 평가하고자 하였다.

2. 간이 예측 기법을 위한 해석 및 실험 방법

용접 변형 간이 해석 기법을 위한 유한 요소 해석시 요소망은 용접부 및 모재는 두께방향의 layer를 가진 shell element로 구성하였으며, Fig. 1 과 같이 단순화된 실험에 의한 각 변형량과 횡 수축량으로부터 정의된 유효 열팽창 계수와 shell 표면(front surface)과 이면(rear surface)의 온도 구배로부터 열탄소성 해석(elastic-plastic analysis)을 수행하였다. 이때, 유효 열팽창계수는 측정된 용접 변형에 부합하도록 종 방향과 횡 방향으로 독립적으로 정의하였다. 즉, 종 방향의 열팽창계수는 용접부의 용접선 방향으로 횡 수축량이 매우 미미하므로 용착금속의 용점과 상온의 중간 온도에서의 열팽창계수와 동일한 값으로 정의하였으며, 횡 수축을 야기하는 횡 방향의 열 팽창 계수는 용접부의 변형량이 용접부의 개선면내에서 발생한다고 가정하고 이를 정의한 후, 용접부의 두께 방향의 수축 하중의 차이는 용접부의 상·하면의 온도 구배를 달리 각각 정의함으로써 고려하였다. 이때, 유효 열팽창 계수를 얻기 위한 시험 모델의 주요 치수 및 용접 조건은 각각 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Main parameters of the flat plate welding test

Test pieces			Dimension (mm)	Material	Welding conditions		
Types	Conditions				Ampere (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)
Butt joint	Root gap	2 mm	400 × 600 × 12t	SUS 316LN	90~100	10~11	4~6
		4 mm			120~160	12~13	10~16

3. 해석 결과 및 고찰

3.1 간이 해석 기법 타당성 평가

Fig. 2는 Table 1에서 제시한 실험 조건을 바탕으로 2mm 루트 갭을 가진 시험편 실험에 의한 각 변형량과 간이 해석법에 의한 각 변형량을 plate 중앙에서 용접선에 수직한 방향을 따라서 비교한 결과를 제시하였다. 실험 및 해석 결과 각 변형량의 상대 오차는 6.05% 정도로 상당히 유사한 결과를 보여주고 있으며, 이는 본 연구에서 제안된 간이 해석 기법이 매우 타당함을 의미하는 것이다.

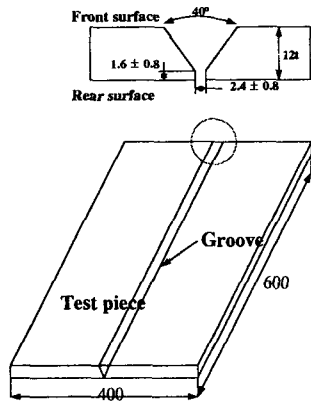


Fig. 1 Test piece of welding deformation

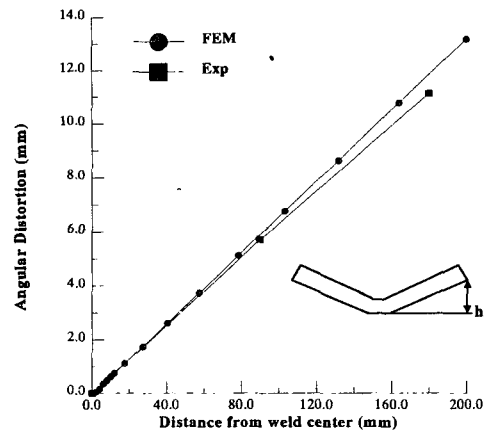
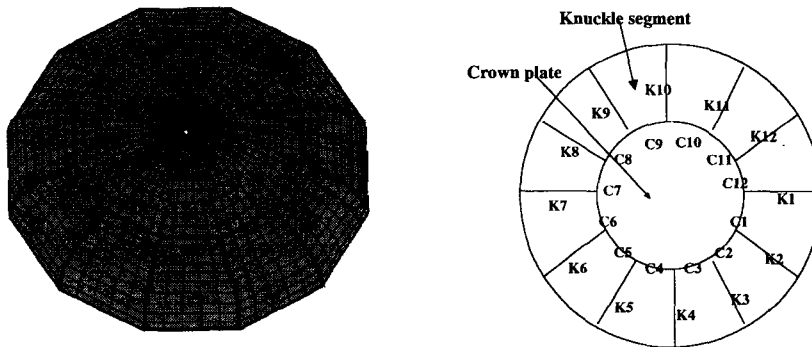


Fig. 2 Comparison of angular distortion

3.2 용접 순서에 따른 변형 해석

Fig. 3은 스테인리스강 압력용기에 대한 해석 모델 및 용접선을 나타내고 있다. 해석 모델은 압력용기의 경판(head segment plate)부로 상부의 crown plate와 측면에 12개의 knuckle segment로 구성되어 있으며 각 부재간에 butt 용접 이음에 의해 제작된다. 압력용기의 기하학적 대칭성에 의해 크게 knuckle segment를 선행 용접한 후 crown plate의 용접을 행하는 경우와 crown plate의 선행 용접 후 knuckle segment를 용접하는 2가지로 분류한 다음 세부적인 용접 순서를 각 type 별로 구분하였다. 이때, 각 segment의 용접은 가접 후 수행되는 것으로 가정하였다. Type 별 용접 순서 및 본 연구에서 제안한 간이 해석 기법에 의한 각 용접 순서에 따른 변형량은 Table 2와 같다. Table 2와 같이 전반적으로 crown plate의 선행 용접 후 knuckle segment를 용접하는 경우보다 knuckle segment를 선행 용접한 후 crown plate의 용접하는 것이 각 변형의 제어 및 변형 감소에 상당히 유리함을 알 수 있다. 간이 해석법에 의한 열탄소성 해석 결과 용접 순서에 따른 각 변형량이 가장 큰 type 6과 비교해서 적정 용접 순서에 의한 type 3의 경우가 84%의 변형 감소율을 제시하였다. Fig. 4는 type 3 및 type 6의 용접 순서에 따른 변형 양상을 비교 제시하였다.



(a) Analysis model

(b) weld line

Fig. 3 Analysis model and weld line

Table 2. Comparison of welding distortion by change of welding sequence

Types		Welding sequence	Welding distortion (Max.)
Knuckle segment 선행 용접 후 Crown plate 용접	Type 1	K : 1-5-9-3-7-11-2-6-10-4-8-12 C : 1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12	51.30
	Type 2	K : 1-5-9-3-7-11-2-6-10-4-8-12 C : 1-3-5-7-9-11-2-4-6-8-10-12	61.80
	Type 3	K : 1-7-10-4-2-8-5-11-3-9-6-12 C : 1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12	45.12
	Type 4	K : 1-3-5-7-9-11-2-4-6-8-10-12 C : 1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12	49.11
Crown plate 선행 용접 후 Knuckle segment 용접	Type 5	C : 1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12 K : 1-5-9-3-7-11-2-6-10-4-8-12	260.3
	Type 6	C : 1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12 K : 1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12	281.4

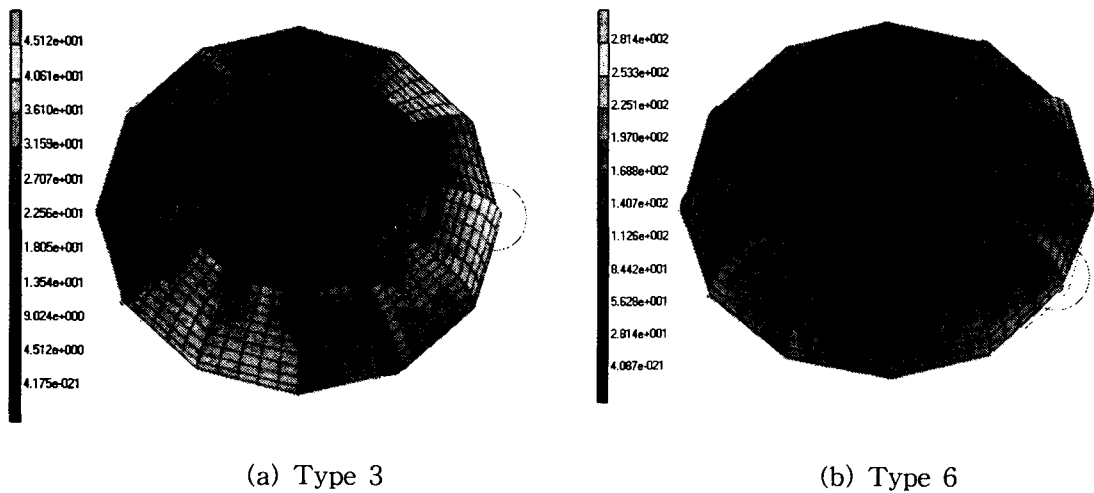


Fig. 4 Contour of welding distortion

4. 결론

유한 요소 해석 및 실험을 이용하여 용접 변형 예측을 위한 간이 해석 기법 및 이를 이용한 압력 용기의 용접 변형 제어를 위한 적정 용접 순서를 평가하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 압력 용기와 같은 대형 용접 구조물에서 용접 변형 예측을 위하여 유효 열팽창 계수 및 용접 상하부의 온도 구배차에 의한 열 탄소성 해석 및 실험으로부터 용접 변형 간이 해석 기법을 제안하였다.
- 2) 압력 용기의 경관부와 같이 기하학적으로 대칭일 경우 변형 제어를 위해서는 용접부를 균등하게 나누어 대칭적으로 용접하고 비대칭 형상일 경우 내부 중심에서 전후, 좌우, 상하로 진행하면서 대칭적으로 용접을 수행해야 한다.

5. 참고 문헌

- 1) Koichi Masubuchi : Analysis of welded structure
- 2) Itsuro Tatsukawa : Process of Transverse Angular Distortion during Burt Welding, Journal of the Japan Welding Society, 39-2 (1970) pp.65-71
- 3) Toshio Terasaki : Effect of Welding Conditions on Welding Deformations in Welded Structural Materials, Journal of the Japan Welding Society, 45-4 (1976), pp.54-60