

압력 용기 제작시 segment 변경을 위한 연구

(A study for the change of segment size of pressure vessel)

신 상 범*, 윤 중 근
현대 중공업(주), 산업 기술 연구소

1. 서 론

구형 압력 용기는 적도판(equator plate)과 온대판(temperate plate)으로 나누어 제작된다. 각 판의 제작은 각 segment들의 butt 용접으로 이루어지고, 최종적으로 온대판을 적도판에 탑재하여 용접함으로써 완성된다. 구형 압력 용기의 직경이 크면 적도판은 다시 상·하부로 나뉘어 제작되는데, 이러한 경우 적도판 segment 수의 결정은 자재비 및 제작공정에 있어 매우 중요하다. 즉, 구형 압력용기 제작시 생산성의 향상을 도모하기 위해서는 상부 적도판의 각 segment의 크기를 증가시킴으로써 용접선을 감소시키는 방안이 모색되고 있다. 그러나, 적도판의 크기를 변경하기 위해서는 먼저, 각 적도판의 크기 변경시 용접부에 작용하는 구속응력에 따른 용접부의 균열 발생 빈도 즉 균열 감수성에 따른 영향 및 상·하부 적도판의 용접부 갯수 차이에 기인한 상대 수축 변형량이 증가함으로써 단차에 관한 문제도 고려되어야만 한다.

따라서, 본 고에서는 상부 적도판의 용접시 각 segment의 크기에 따라 용접부에 발생하는 구속응력을 유한요소법(FEM)을 이용하여 해석하였으며, 기 제안된 방법을 적용하여 적도판의 크기에 따른 상대 수축량을 평가하였다. 본 고에서 고려된 구형압력 용기의 직경은 약 16m이고, 상부 적도판 segment는 각각 20개와 8개이다.

2. 구속응력

2.1 해석 방법

구형 압력 용기 제작시 적도판의 용접부에 작용하는 구속응력을 위한 열응력 해석시 사용된 해석 변수는 상부 적도판 길이(L)이며, 해석 모델은 Fig. 1과 같다. 구속응력의 해석시 일반적으로 열전달 및 열응력의 연성된 해석이 요구되나 용접부 변형이 용접 아크에 의한 열전달 기구에 미치는 영향이 매우 미세하므로, 이들을 각각 비 연성된 것으로 간주하고 시간에 따른 절점의 온도변화량 및 변위증분량을 Full Newton - Raphson method를 이용하여 해석을 수행하였다. 열전달 해석시 고상과 액상의 상변화에 의한 잠열을 고려하였으며, 용착금속의 stirring 효과를 고려하기 위해서 유효 열전도 계수를 도입하였다. 해석시 용접 아크에 의한 열 하중은 식(1)을 이용하여 용접부에 수직인 단면에 대해 용접 아크의 축을 중심으로 하여 대칭인 gaussian 분포로 가정하였으며, 분포 열속은 해석 영역을 일정한 속도로 이동하는 것으로 모델링하였다

$$q_r = \frac{3 \cdot Q}{\pi \cdot \bar{r}^2} e^{-3\left(\frac{r}{\bar{r}}\right)^2} \quad (1)$$

여기서, q_r 은 열속 [W/mm^2], r 은 아크 중심으로 부터의 거리 [mm], \bar{r} 는 유효 아크 반경 [mm] 그리고, Q 는 용접부로 전달되는 에너지 [W]이다.

구속응력 해석시 재료는 등방성이며, 탄소성 거동을 하고, 항복 개시는 Von-Mises criteria를 적용하였다. 그리고, 재료가 일단 항복이 발생하면 incremental plastic strain을 계산하기 위해 associated flow rule을, 경화조건으로는 reverse plasticity 및 Bauschinger's effect를 구현하기 위해 비교적 단순한 bilinear kinematic hardening theory를 적용하였다.

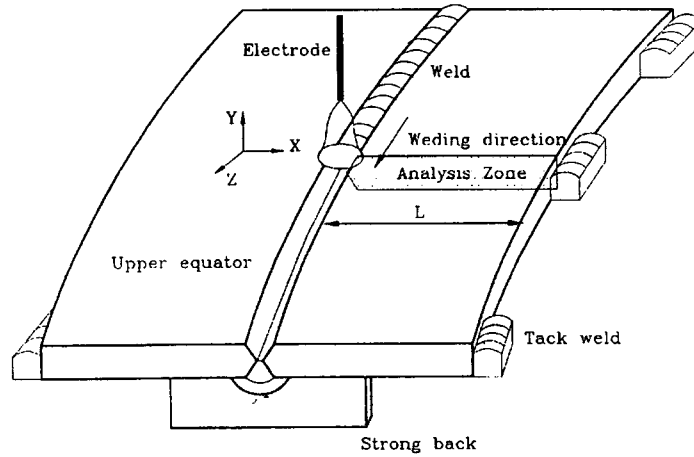


Fig. 1 Analysis model

2.2 해석 결과

열전달

Fig. 2는 냉각시간에 따라서 용접선에 수직한 방향으로 용접부 표면에서 온도 분포를 보이고 있다. 초기에 용접부 및 그 근방의 열 영향부는 용점($1450^{\circ}C$)까지 가열된 후 모재로의 활발한 열 전달로 인해 급격한 온도 구배가 발생하는데 이는 시간이 증가함에 따라 현저하게 감소하여, 50초가 경과한 후에는 거의 일정한 온도 분포를 가지게 된다.

구속응력

Fig. 3과 4는 상부 적도판의 segment가 20개인 경우와 8개인 경우에 대하여 용접부에서 용접부 중심에서 거리에 따른 횡방향 응력 σ_x 의 거동을 냉각시간에 따라 도시한 것이다. σ_x 는 Fig. 3과 같이 용접이 완료된 직후($t=0.5$ 초) 용접부는 액상으로 존재하기 때문에 응력이 "0"인 무응력 상태이며, 모재는 용접 아크 및 액상의 용착금속의 열원

으로 인해 팽창됨으로써 압축응력이 발생하게된다. 이러한 용접부 및 모재에서의 응력 분포는 냉각시간이 증가함에 따라 용접부는 stiffness를 회복하고, 용접부 및 모재는 수축하게 되는데 이러한 용접부 및 모재의 수축이 외부의 구속 및 모재에 의해 제어됨으로써 최종적으로 모재에 인장 잔류응력이 발생하는 양상을 보이게 된다. 이러한 응력분포의 거동 양상은 적도판의 크기에 관계없이 동일한 양상을 보이고 있으나, 각 냉각 시간에 걸쳐서 전반적인 응력 수준은 적도판의 크기가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다. 즉, 구형 압력 용기 제작시 상부적도판의 크기가 큰 경우 균열 감수성은 감소한다는 사실을 보여주고 있다.

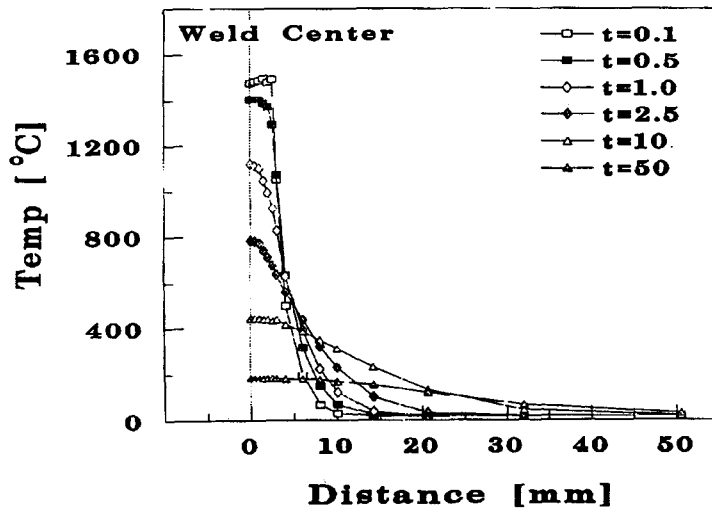


Fig. 2 Temperature distribution at the weldment with cooling time

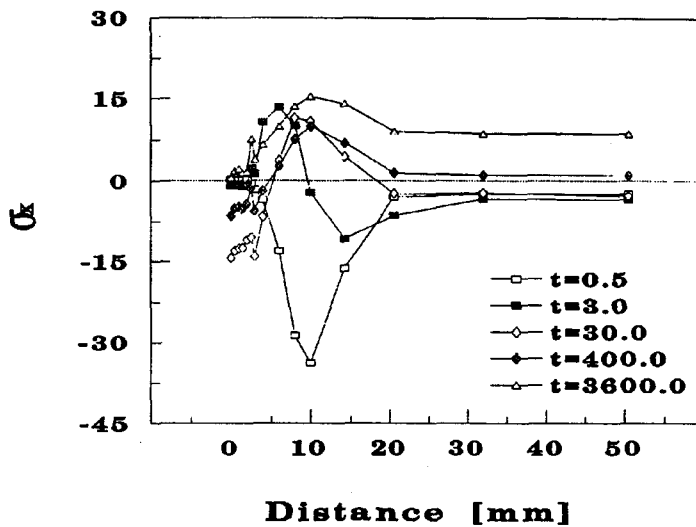


Fig. 3 σ_x distribution at the weldment of with cooling times (20 segments)

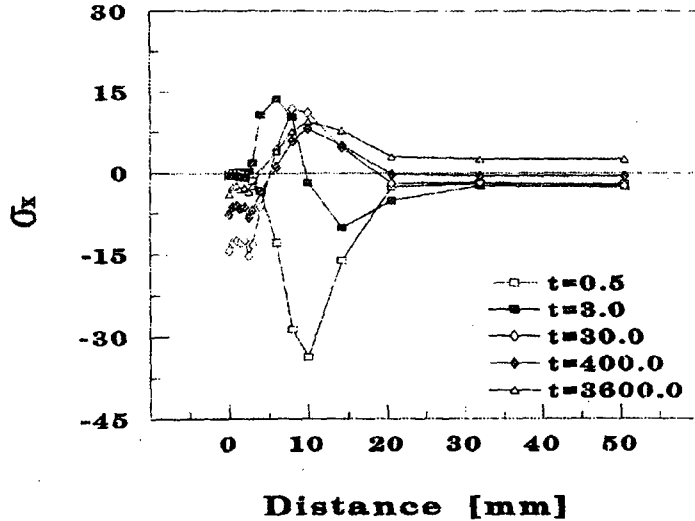


Fig. 4 σ_x distribution at the weldment of with cooling times (8 segments)

3. 상대 수축량

구형 압력 용기의 상·하부 적도판 갯수의 차이에 따른 수축량을 각 용접부의 수가 증가함에 따라 수축이 누적된다는 가정하에 Watanabe와 Satoh가 제안한 식을 이용하여 평가하고 그 결과를 표 1에 나타내었다. Table 1과 같이 상·하부 적도판의 상대 수축량에 의한 원주 길이의 차는 13.7mm, 직경차는 2.27mm가 발생하고 이로인해 상하부 적도판의 용접시 1.135mm정도의 단차를 유발시킨다. 그러나, 이는 ASME SEC. VIII DIV I의 UW-33에서 규정하고 있는 최대 허용 단차인 4mm를 만족하는 수준이므로, 상부 적도판의 크기 변경에 따른 상대 수축량으로 인해 유발되는 문제는 충분히 배제할 수 있다.

표 1 상·하부 적도판의 상대적 수축 변형량

	수축량	총 수축량	단차
8 segments (상부 적도판)	1.130 mm	9.04 mm	2.27 mm
20 segments (하부 적도판)	1.137 mm	22.74 mm	

4. 결 론

1. 상부 적도판의 크기가 증가함에 따라 용접부에 작용하는 구속응력이 감소한다.
2. 상·하부 적도판의 segment의 차이에 따른 즉 상부 적도판의 segment가 8개, 하부 적도판의 segment가 20개인 경우 상·하부 적도판의 상대 수축량에 의한 단차는 1.135mm이다.