

# Butt 용접부 역학 거동의 천이 특성

## Transitional Characteristics of Mechanical Behavior at Butt Weldment

이희태\*, 신상범  
현대 중공업(주), 산업기술연구소

### 1. 서론

선체와 같은 대형 철 구조물의 제작후 잔류하는 변형은 절단 및 용접, 그리고, 블록의 이송, 반전 및 탑재 공정중에 발생하는 여러 인자들의 상호 복합적인 작용에 의하여 영향을 받으나, 기존의 연구 결과들은 용접 및 절단과 같은 thermal 하중에 따른 변형 거동 평가에 제한되어 왔던 것이 사실이다. 따라서, 선체 제작시 발생하는 변형을 보다 효율적으로 제어하기 위해서는 블록의 이송, 반전 및 탑재시 블록에 작용하는 외력 즉, mechanical 하중에 의한 용접부 근처에서의 변형 및 잔류 응력에 대한 거동에 대한 평가 또한 수반되어야 한다.

본 연구에서는 I-butt 용접부에 외력이 작용하는 경우 용접 잔류 응력 및 변형 거동 특성을 유한 요소 해석을 이용하여 평가하고, 잔류 응력 및 변형의 재 분포 특성을 규명하고자 한다.

### 2. 유한 요소 해석 방법

I-butt 용접 시 발생하는 변형 및 잔류 응력 평가를 위해 유한 요소 해석시 열 전달 및 열 탄소성 해석을 각각 비 연성된 것으로 가정하였다. 열 전달 해석은 준 정상 상태 조건(quasi-stationary state condition)으로 가정하여 2차원 해석을 수행하였으며, 용접 arc에 의한 열 하중 조건은 gaussian 분포의 체적 열원이 등속으로 생성되는 용착 금속에 작용하는 것으로 가정하였다. 비선형 열 탄소성 해석시 용접선 길이 방향으로의 변위를 제어하는 generalized plane strain 요소를 사용하였으며, 해석을 위한 용접 조건은 Table 1과 같다.

Table 1. Butt welding condition

Thickness [mm]	Width [mm]	Run	Current [A]	Voltage [V]
11	900	Backing	650	40
		Finishing	800	40
20		Backing	1000	38
		Finishing	900	40

용접선 방향 인장 및 압축 하중에 대한 잔류 응력 재 분포 해석의 경우 실제 해석 모델이 2차원인 관계로 하중을 부여할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 2차원 해석 모델을 용접선 방향으로 단위 두께를 가지도록 3차원으로 치환하고 2차원 해석을 통해 얻은 잔류 응력 해석 결과를 3차원 해석 모델의 초기 응력으로 입력한 후 하중을 부여하였다. 용접선 직각 방향 인장 및 압축 하중에 대한 잔류 응력 및 변형 해석의 경우 초기 용접에 의한 각 변형으로 인해 압축 하중에서 좌굴이 발생하기 때문에 해를 구하는 것이 어려워진다. 이를 위해 본 연구에서는 Riks에 의해서 제안된 일정 호장법(constant arc-length method)을 사용하여 해석을 수행하였다.

## 2. 해석 결과

**변형** Fig. 1은 두께가 11mm인 강재의 butt 용접 후, 모재 항복 강도의 50, 80, 그리고, 100%의 면 내 인장 하중이 용접선에 수직인 방향으로 작용할 때와 제거되었을 때의 각 변형량 변화를 나타내고 있다. Fig. 1과 같이 butt 용접부의 잔류 각 변형량은 탄성 한도 이하의 인장 하중에 대해서는 변화가 없으며, 그 이상의 인장 하중이 작용하는 경우 재 분포됨을 알 수 있다,

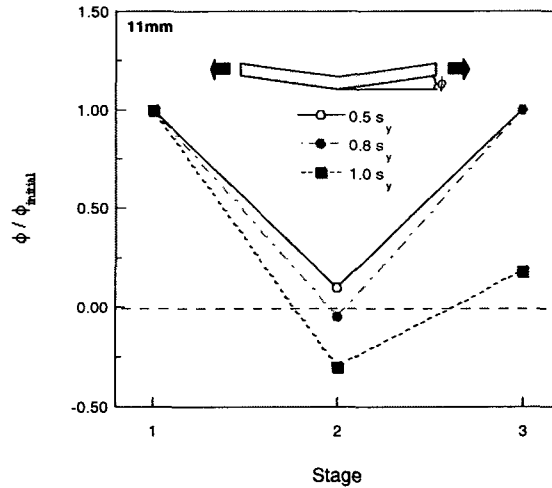


Fig. 1 Change of angular distortions for butt weldment with loading and unloading condition

Fig. 2는 두께가 20mm인 강재의 butt 용접 후, 판의 최대 수직방향 변형에 대한 압축 하중의 변화를 나타내고 있다. 압축 하중의 경우 일정 하중 이상에서는 판의 좌굴이 발생하여 어느 한계 이상에서는 변형량이 증가할수록 하중이 감소하고 있음을 알 수 있다. 또한, Fig. 2에서 잔류 응력이 없는 경우(점선)의 좌굴 강도는 실제 좌굴 강도와 거의 같으나 용접에 의한 잔류 응력이 존재하는 경우(실선)의 좌굴 강도는 실제 좌굴 강도보다 작음을 알 수 있다

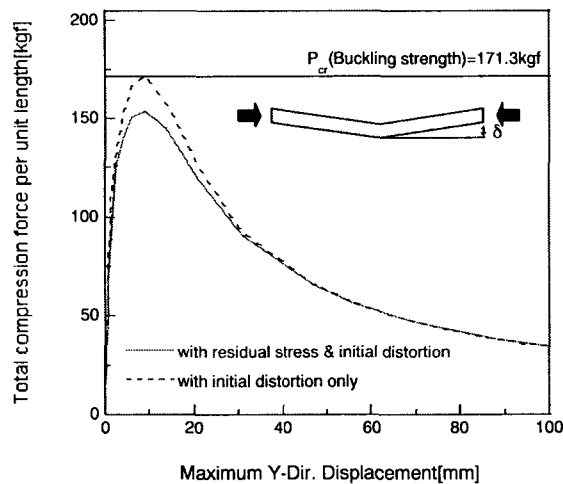


Fig. 2 Load-displacement response for butt weldment subjected to compression load

**잔류 응력** 용접 후 용접선 방향으로 존재하는 잔류 응력의 mechanical 하중에 의한 재 분포를 검토하기 위해 앞서 용접선 직각 방향의 경우와 동일한 용접 조건으로 butt 용접 후, 용접선 방향으로 각각 항복 응력(25kgf/mm<sup>2</sup>)의 50, 80, 그리고 100%의 하중을 작용한 다음 제거하는 과정에 대한 잔류 응력 해석을 수행하였다. Fig. 3의 (a)와 (b)는 각각 butt 용접된 두께 11mm인 강재에 대해 항복

응력의 50, 80, 그리고 100% 크기로 인장 하중과 압축 하중을 작용시킨 후 하중을 제거했을 때 발생하는 판의 밑면에서의 잔류 응력 분포를 나타낸다. 인장 하중을 작용시켰을 때의 잔류 응력 분포를 나타내고 있는 Fig. 3(a)의 경우 항복 응력의 50%, 80%, 100%를 작용시켰을 때 용접부에서의 최대 인장 잔류 응력은 각각 14%, 24%, 31% 감소하였다. Fig. 3(b)는 압축 하중을 작용시켰을 때의 잔류 응력 분포를 나타내는데 인장 하중의 결과와 달리 항복 응력의 50%, 80%, 100% 크기의 압축 하중에 대해 용접부에서의 인장 잔류 응력의 재 분포가 발생하지 않음을 알 수 있다.

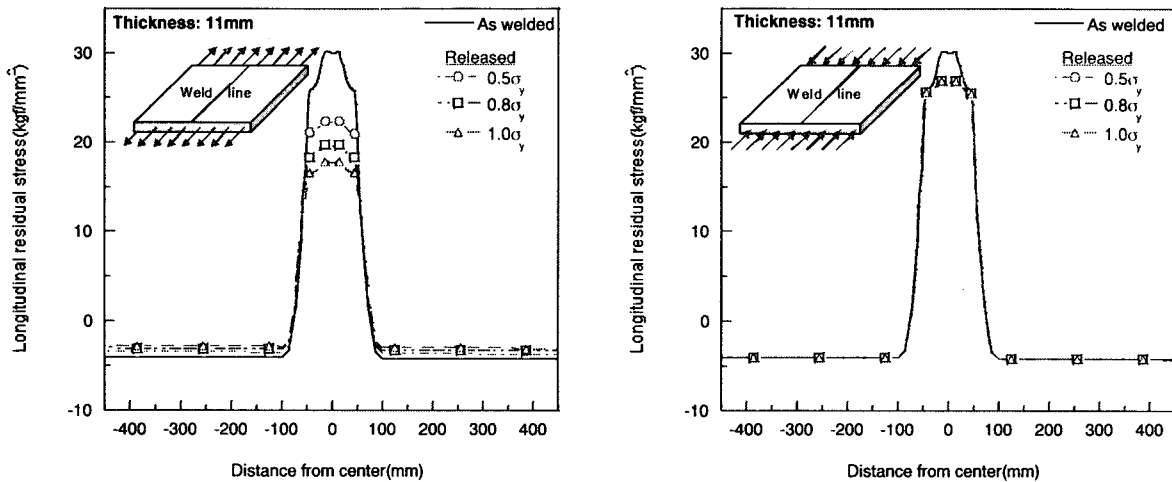


Fig. 3 Distributions of residual stress at the I-butt weldment after unloading

### 3. 결론

I-butt 용접부에 작용하는 외력에 대한 변형 및 잔류 응력 특성을 검토하기 위해 다양한 크기와 방향의 하중을 butt 용접부에 작용 및 제거하였을 때의 잔류 응력 재분포 및 변형 특성을 유한 요소 해석을 이용하여 평가하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Butt 용접 후 발생한 각 변형은 용접선 직각 방향의 인장 하중을 작용에 대해 탄성 한도 이하의 하중에서는 하중 제거후의 최종 각 변형의 변화가 없으나, 항복 응력 수준의 하중에서는 최종 각 변형은 감소한다.
- 2) 용접선 직각 방향으로 압축 하중이 작용하는 경우 I-butt 용접부의 좌굴 강도는 용접후의 잔류 응력에 기인하여 감소한다.
- 3) 용접 잔류 응력은 잔류 응력과 동일한 방향으로 작용하는 외부 하중과 중첩되어 소성 변형을 유발함으로써 재 분포되며, 소성 변형을 수반하지 않는 경우 잔류 응력의 재 분포는 발생하지 않는다.