

# 박판 용접부 좌굴 변형 제어에 관한 연구

## A Study on the Control of Buckling Distortion of the Thin Panel Structure

신상범\*, 이동주

현대 중공업(주), 산업 기술 연구소

### 1. 서 론

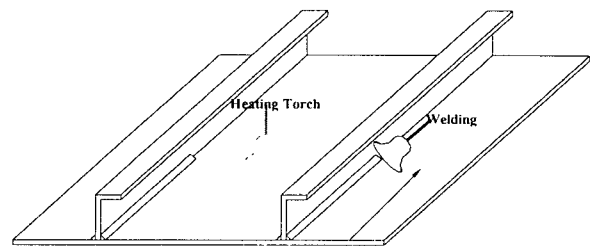
박판 용접 구조물에서 발생하는 변형 양상은 용접부의 주판 두께 방향의 수축 하중의 차이에 기인한 각 변형(angular distortion)과 용접선 방향의 수축 하중이 용접부의 좌굴 강도를 초과하는 경우 유발되는 좌굴 변형(buckling distortion)이 주를 이루고 있다. 특히, 좌굴 변형은 변형의 크기뿐 아니라 변형 모드(mode)의 복잡하므로 교정 작업이 매우 어려울 뿐 아니라, 교정 후에도 치수 감소 등과 같은 추가적인 정도 불량 문제를 야기한다. 박판 용접 구조물의 좌굴 변형에 관련된 초기 연구는 주로 변형 제어 방안에 주목하여 왔던 것이 사실이다. 예를 들면, 용접부의 강성을 증가시키기 위하여 주판의 두께나 보강재의 크기 및 간격을 변경하는 설계적인 방안과 fit-up 정도 향상을 통하여 용접 입열량을 제어함으로써 용접 수축 하중을 감소시키거나, 열 및 기계적 하중을 이용하여 용접 수축 하중을 이완시키는 생산적인 제어 방안에 관한 연구가 거의 대부분을 차지하고 있다. 그러나, 선체 구조는 운항 하중 특성에 기인하여 설계 초기 단계에서 거의 결정되므로 구조 변경 자체가 매우 어렵고, 박판 용접부의 변형 특성이 정반 조건, 작업자의 workmanship 그리고, 용접 장비의 특성등과 같은 작업 조건에 대한 의존성이 매우 크므로, 기 제안된 변형 제어 방안의 활용도는 극히 제한적이라고 할 수 있다. 이에 최근 여러 연구 기관에서는 최소한의 설비 투자를 이용하여 효율적으로 박판 용접부의 좌굴 변형을 제어하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 박판 용접 구조물의 제작 시 좌굴 변형을 제어하기 위하여 열적 하중에 의한 용접 수축 하중의 제어 효과를 유한 요소 해

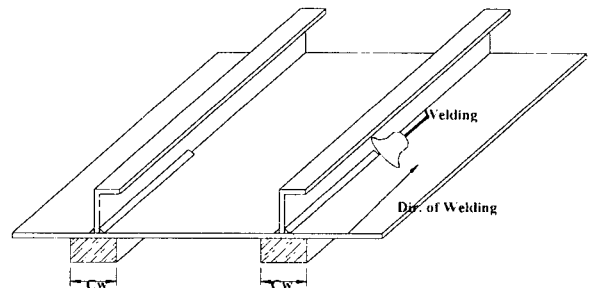
석을 이용하여 평가함으로써 박판 용접부의 변형 제어를 위한 생산 공정시 적용 가능한 변형 제어 인자를 제안하고자 한다.

### 2. 해석 모델 및 방법

박판 용접부의 변형 즉, 좌굴 변형의 제어를 위하여 본 연구에서 선정한 방안은 Fig. 1의 (a)와 (b)에 도시한 바와 같이 용접과 동시에 보강재 사이를 flame torch로 가열하는 transient tensioning method (TTM)와 용접 이면부의 설치된 water duct를 이용하여 강제 냉각하는 water cooling method (WCM)이다. 이때, 사용된 해석 모델은 길이(L)와 폭(W)이 각각 3200과 1600mm인 6mm 두께의 주판에 76 x 75 x 6mm



(a) Transient tensioning method



(b) Water Cooling Method

Fig. 1 Schematic diagram of distortion control methods

UA(unequal angle)가 800mm 간격으로 부착된 panel 용접부이며, 보강재 용접시 적용된 용접 기법은 FCA (flux cored arc) 용접이고, 용접 입 열량은 340cal/mm이다. TTM의 변형 제어 효과를 평가하기 위한 유한요소해석(FEA)시 flame에 의한 열속은 식(1)과 같이 1차 화염(R<sub>1</sub>)과 2차 화염의 길이(R<sub>2</sub>) 그리고, 2차 화염 보정 계수(β)에 의한 double gaussian 분포의 열속으로 가정하였다. WCM의 적용시 water chamber를 통한 열 손실은 용접부의 이면에서는 부재의 표면과 냉각수의 평균 온도에 따라 자연 대류 및 비등 그리고, 복사에 의존하는 것으로 가정하였으며, 상부 표면에서는 공기와의 자연 대류 및 복사에 의한 열 손실이 작용하는 것으로 가정하였다.

$$q(r) = \frac{6Q_{eff}}{(R_1^2 + \beta R_2)} f\left(\frac{r}{R_1}, \frac{r}{R_2}\right) \quad (1)$$

### 3. 해석 결과

TTM (transient tensioning method) Fig. 2는 Fig. 1 (a)의 해석 모델의 1/2영역에서 TTM의 적용 유무에 따른 주판에 작용하는 잔류 응력의 분포를 도시하고 있다. 이때, flame의 가열 속도는 300mm/min이다. Fig. 2에 도시한 바와 같이 TTM에 의하여 보강재간의 중앙부에 작용하는 최대 압축 잔류 응력은 증가하는 반면에 free edge의 압축 잔류 응력은 감소하며, 이 영역에서 잔류 응력 분포 또한 완전히 상이한 양상으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 TTM에 의한 잔류 응력의 재 분포 및 크기 변화는 용접과 함께 수행된 flame 가열에 기인한 것이다, 즉, flame 가열시 보강재간의 중앙부에는 용접과 거의 동일하게 높은 인장 잔류 응력이 발생하였는데, 이러한 인장 잔류 응력이 panel 용접부의 구속도를 증가시킴으로써 중앙부에는 매우 높은 압축 잔류 응력을 형성한 반면에 free edge영역에서는 잔류 응력의 재 분포를 야기한 것이다.

Fig. 3은 Fig. 2와 동일한 용접 조건하에서 panel 용접부의 center 즉, 보강재 사이의 영역과 free edge에서 flame 가열 속도에 따른 평균 압축 잔류 응력의 변화를 도시한 것이다. 여기서 평균 압축 응력은 보강재 사이(center)와 edge에서 각각 작용하는 압축 응력의 평균값이다. Fig. 3과 같이 보강재간의 사이 영역 즉, center에서의

평균 압축 잔류 응력은 flame의 가열 속도가 증가함에 따라 감소하나, free edge영역에서 평균 압축 잔류 응력은 증가한다. 그리고, TTM에 의한 panel 용접부의 각 위치에서의 평균 압축 잔류 응력은 flame 가열 속도가 증가함에 따라 TTM이 적용되지 않은 panel 용접부의 잔류 응력 수준으로 접근함을 알 수 있다.

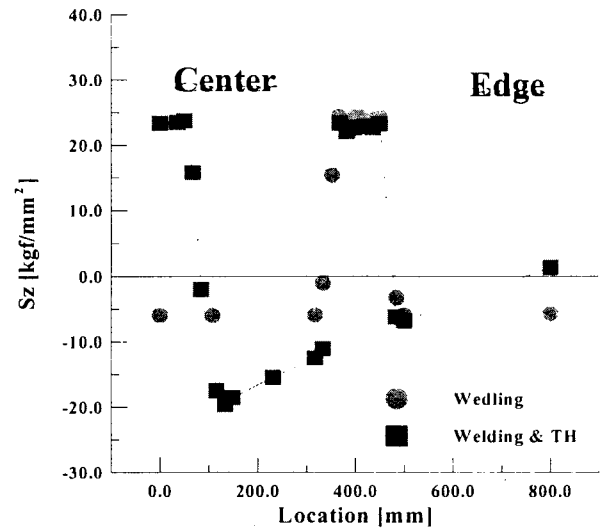


Fig. 2 Residual stress distribution at the locations perpendicular to the welding line of the panel with TTM

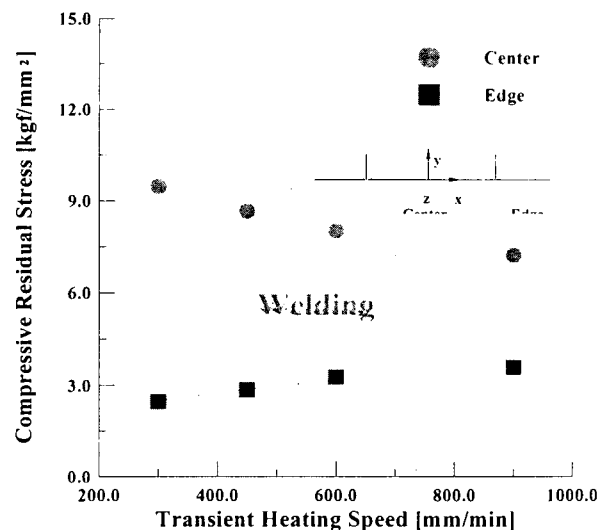


Fig. 3 Variation of average compressive residual stress with heating speed of TTM

이상의 해석 결과로부터 TTM은 박판 panel 용접부에서 상대적으로 좌굴 변형에 대한 저항성이

낮은 free edge 영역에서 압축 잔류 응력 수준을 감소시키고, 좌굴 변형에 대한 저항성이 상대적으로 높은 보강재 사이에서는 압축 잔류 응력을 증가시킴으로써 좌굴 변형을 제어하고자 고안된 방법임을 알 수 있다. 따라서, TTM을 이용하여 좌굴 변형을 제어하기 위해서는 보강재의 강성이 충분히 커야함을 의미한다.

WCM (Water Cooling Method) Fig. 4는 Fig. 2와 3의 TTM과 동일 용접 조건하에서 Fig. 1의 (b)와 같이 water cooling (Cw=50mm)을 이용하여 용접부 이면을 강제 냉각하는 경우 panel 용접부의 용접선 방향의 잔류 응력 분포를 도시한 것이다. Fig. 4와 같이 panel 용접선 방향의 인장 및 압축 잔류 응력의 크기는 panel 용접부의 전 영역에서 water cooling에 의하여 모두 감소하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 WCM의 water chamber(Cw) 크기에 따른 panel 보강재의 각 위치에서의 평균 잔류 응력의 크기 변화를 도시한 것이다. Fig. 5와 같이 panel 용접부의 각 위치에서 발생하는 잔류 응력은 Cw가 증가함에 따라 감소하지만, Cw가 100mm 이상 증가하는 경우 잔류 응력의 감소율은 매우 미미하다. 이는 용접부의 가열부가 매우 국부적으로 이루어짐으로써 water chamber가 어느 이상 증가하는 경우에는 열 손실이 더 이상 증가하지 않기 때문이다,

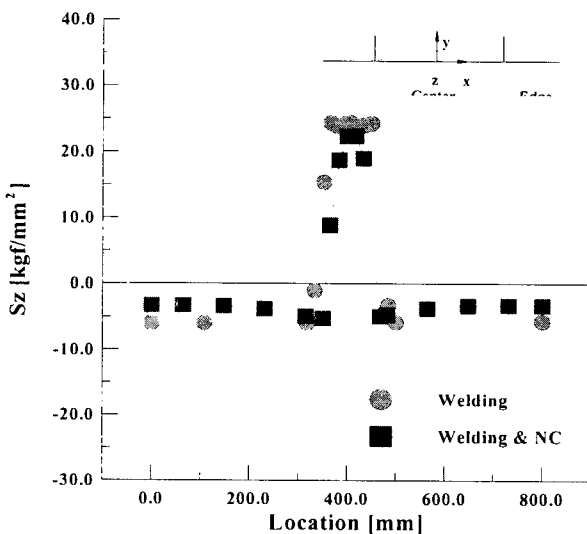


Fig. 4 Residual stress distribution at the locations perpendicular to the welding line of the panel with WCM

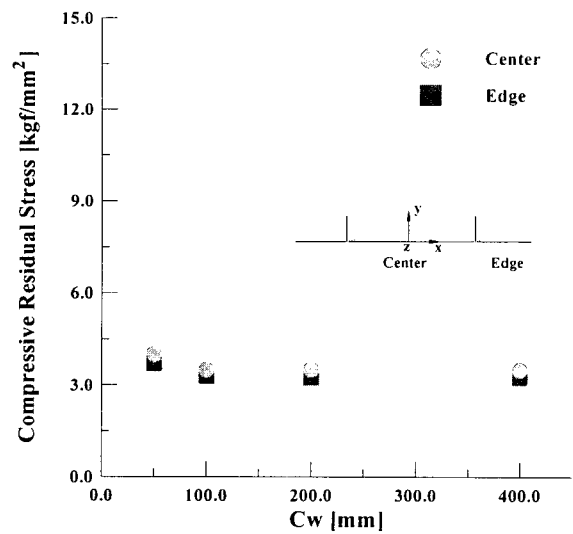


Fig. 5 Variation of average compressive residual stress with width of water chamber

#### 4. 결 론

본 연구에서는 박판 용접 구조물의 제작시 좌굴 변형을 제어하기 위하여 TTM (transient tensoning method) 및 WCM (water cooling method)의 적용시 용접 수축 하중의 거동을 유한 요소 해석을 이용하여 평가하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) TTM에 의한 panel 용접의 용접선 방향으로 작용하는 수축 하중의 크기는 보강재 사이에서는 증가하는 반면에서 free edge 영역에서는 flame 열원의 잔류 응력의 재 분포 효과에 기인하여 감소한다.
- 2) WCM을 이용한 panel 용접시 용접부의 수축 하중의 제어 효과는 열 하중을 부가하는 방법에 비하여 매우 우수하다. 이는 박판 panel 용접부의 면외 변형을 효율적으로 제어하기 위해서는 강제 냉각을 통하여 용접 열원의 확산을 최대한 억제하는 것이 가장 효과적임을 알 수 있다.

#### 참고문헌

1. P. Michaleris and A. Debicari : A Predictive Technique for Buckling Distortion of Thin Panels Due to Welding”, Jr of Ship Production, Vol. 12, No 4, Nov., 1996, pp. 269-275