

곡 BLT 제작시 변형 제어

Distortion Control of Curved Built-up T bar during Fabrication

이 동주*, 신 상범

현대 중공업(주), 산업기술연구소

1. 서론

선체 선수 및 선미부의 곡 BLT는 곡의 형태에 따라 다양하게 분류되며, 설계 곡률로 web 을 절단하는 plasma 절단 및 web과 face plate의 취부 및 용접 공정에 의하여 제작된다. 따라서 곡 BLT의 web 절단시 제작 공정에서 유발되는 변형량이 고려되지 않는 경우, 용접이 완료된 후 flame torch를 이용하여 교정하는 작업이 수행됨으로써 비용 상승 및 생산성 저하를 초래한다. 일반적으로 곡 BLT의 제작시 변형 유발 인자로는 web의 곡 형상을 위한 plasma 절단의 경우 절단 순서 및 N/C 장비의 zero setting 정도, 그리고 절단 부재의 곡 형상에 따른 절단선의 길이 차에 기인한 수축 하중의 차 및 용접시 용접부의 수축 하중과 도심과의 거리 차에 의한 굽힘 하중으로 대별된다. 따라서, 곡 BLT의 절단 및 제작 조건을 고려한 web의 초기 절단 형상을 선정하기 위해서는 절단 및 용접에 따른 수축 하중의 정식화를 통한 변형 예측 기법 개발이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 곡 BLT 제작시 web 부 plasma 절단시 절단선 방향의 수축 하중 및 용접부의 수축 하중을 유한 요소 해석을 통하여 평가함으로써 변형 주 인자를 규명하고, 이를 정식화하고자 하였다.

2. 유한 요소 해석

2.1 해석 모델 및 방법

Plasma 절단시 발생하는 수축 하중을 정식화하기 위해서는 절단시 모재로 유입되는 입열 모델의 정식화가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 NC plasma 절단기로 절단 실험을 수행한 후 절단 부재의 열 영향부(HAZ)의 크기 및 형태를 열 전달 해석 결과와 비교함으로써 plasma 입열 모델의 열속의 분포 및 효율을 정의하고, 이를 이용하여 열 전달 해석 및 비 선형 열 탄소성 해석을 수행함으로써 plasma 절단시 절단선 방향으로의 수축 하중을 정식화하였다. 그리고 용접에 의한 수축 하중은 절단 수축 하중과 동일하게 과도 열 전달 해석 및 비선형 탄소성 해석을 이용하여 평가하고 이를 정식화하였다. 본 고에서 절단 및 용접 수축 하중의 정식화를 위해 사용된 해석 변수는 Table 1 과 같다.

Table 1 Variables used for FEA

Dimension [mm]			Heat Intensity [cal/mm]	
Flange ($t_f \times w$)	Web ($t_w \times h$)	Length	Plasma Cutting, Q_p	FCAW, Q_w
12-15 x 150	10-20 x 300-800	13500 -15000	90 - 480	180 - 450

2.2 해석 결과

Plasma 입열 모델 Plasma 절단 실험 결과 Fig. 1과 같이 절단면의 각 위치에서 두께 방향으로 열 영향부 크기는 거의 일정함을 알 수 있었다. 이는 plasma 절단시 발생하는 열원이 고 밀도의 에너지 빔의 특성을 가지고 있어 절단시 발생하는 열원의 분포를 결정하는 유효 반경이 매우 작기 때문이다. 따라서, plasma 절단시 모재로 유입되는 열속은 두께 방향으로 일정한 크기를 가지는 열속으로 정의할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 1은 절단 부재의 두께와 폭이 각각 18, 300mm인 경우 plasma 절단시 모재로 유입되는

plasma 입열 효율에 따른 열 영향부의 크기를 도시하고 있다. 이때, 절단면에서의 열 영향부의 크기 선정 기준 온도는 온도 증가율에 따른 상 변태 온도를 고려하여 절단시 유한 요소 해석 모델의 절점 온도가 780°C 이상 증가하는 영역으로 정의하였다. Fig. 1과 같이 plasma 절단시 plasma 열원에 대한 효율이 증가함에 따라 열 영향부의 크기는 선형적으로 증가한다.

Plasma 수축 하중 Fig. 2는 plasma 절단시 절단선 방향으로의 단위 두께 당 수축 하중(SF_p/t_w)의 크기와 입열량과 면내 강성의 비(Q_p/D_i)와의 관계를 도시한 것으로 입열 세기와 면내 강성의 비가 증가함에 따라 단위 두께당 수축 하중은 선형적으로 증가함 알 수 있다. 따라서 plasma 절단시 작용하는 수축 하중은 입열 세기와 판의 면내 강성비로 정의할 수 있음을 알 수 있다. 그러나, Fig. 2와 같이 plasma 절단시 절단선 방향으로의 수축 하중의 크기는 매우 작아 곡 BLT의 web의 제작시 초기 변형에 의한 곡률 변화에 대한 효과는 배제될 수 있음을 알 수 있다. 즉, 곡 BLT 제작에서 유발될 수 있는 초기 변형은 절단 입열에 의한 수축 하중보다는 절단 순서 및 N/C 장비의 zero setting 정도에 의존한다고 할 수 있다.

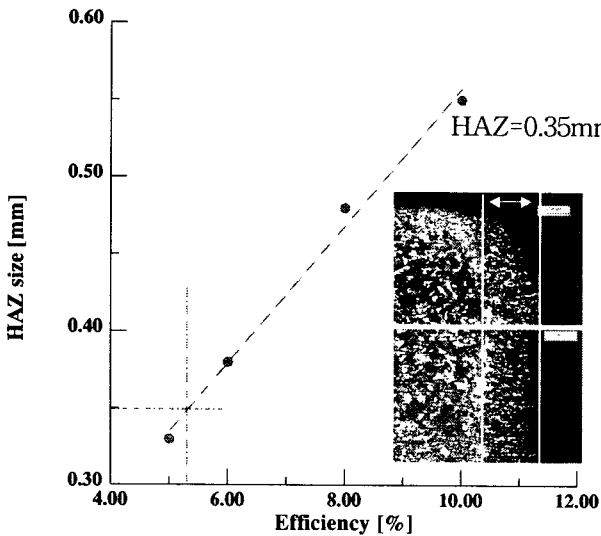


Fig. 1 Variations of sizes of HAZ at the plasma cutting section with efficiency

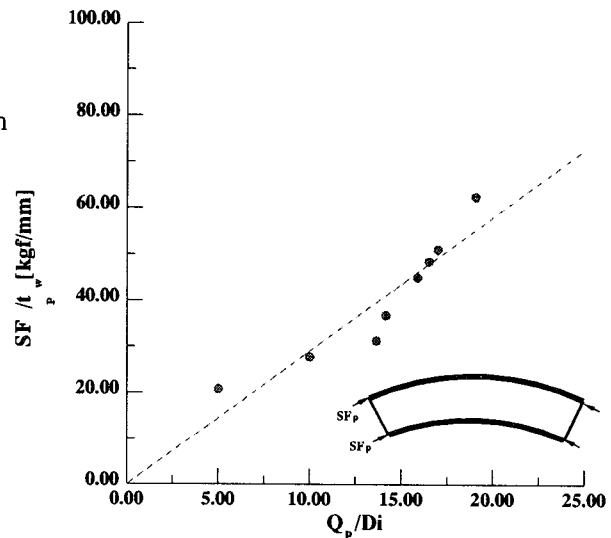


Fig. 2 Relations between Q_p/D_i and shrinkage force by plasma cutting

용접 수축 하중 Fig. 3은 fillet 용접부의 face plate의 두께와 용접부의 입열 세기(Q_w)에 따른 용접부의 수축 하중의 분포를 도시하고 있다. Fig. 3과 같이 용접 입열 세기가 증가함에 따라 용접부의 수축 하중은 선형적으로 증가하며, 용접 입열 세기가 일정한 경우 face plate의 두께가 증가함에 따라 수축 하중도 증가하지만 그 차이는 매우 미미함을 알 수 있다. 따라서 곡 BLT 제작시 용접부의 수축 하중(SF_w)은 식 (1)과 같이 용접 입열 세기와 선형적인 함수로 정의할 수 있으며, 굽힘 변형량은 보 이론으로부터 식 (2)와 같이 용접 입열 세기(Q_w)와 BLT 도심과의 용접부 수축 하중 작용 위치와의 거리차(r_w)에 비례하며 굽힘 강성(I)에 반비례하는 함수로 정의 될 수 있다. 제안된 곡 BLT의 용접 후 굽힘 변형 예측 기법의 타당성을 평가하기 위하여 용접이 완료된 후 곡 BLT의 곡률 변화를 3차원 변위 측정기를 통해 평가하고 그 결과를 Table 2에 나타내었다. Table 2에 나타내는 바와 같이 예측된 최대 굽힘 변형량(δw)은 최대 오차가 3mm 이내로 실험치를 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

$$SF_w = f(Q_w) \quad (1)$$

$$\delta_w = f\left(\frac{Q_w r_w}{I}\right) \quad (2)$$

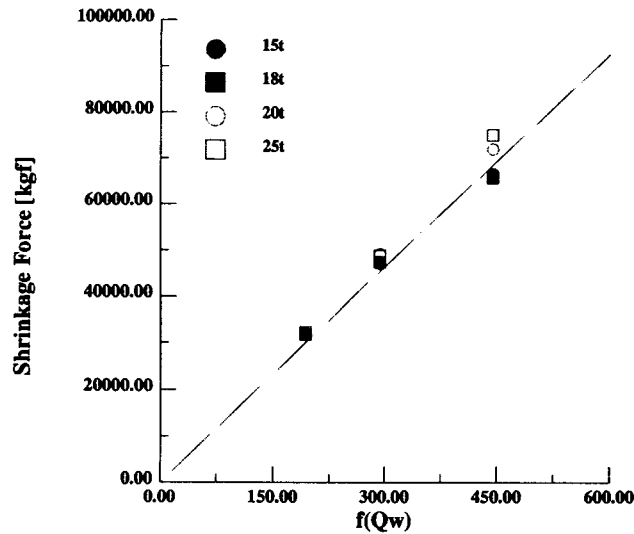


Fig.3 Changes of welding shrinkage force, SF_w with heat intensity, Q_w

Table 2 Comparison between experimental and predicted bending distortion at the curved BLT

Dimension [mm]			Q_w [cal/mm]	δ_w [mm]		Difference [mm] Pred. - Exp.
Web (t x w)	Face plate (t x h)	Length		Exp.	Predict	
12 x 450	18 x 150	13836	293	33	32	-1
15 x 450	17 x 150	13506		40	37	-3

3. 결론

곡 BLT 제작시 web의 초기 절단 조건을 표준화하고자 실험 및 유한 요소 해석을 이용하여 plasma 절단 및 용접시 발생하는 수축 하중의 거동을 평가하고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 곡 BLT 제작시 plasma 절단에 의한 수축 하중은 plasma 입열 세기 및 주판의 면내 강성의 비에 비례하고, 용접 수축 하중은 용접부의 입열 세기의 선형 함수로 정의된다.

2) 곡 BLT 제작시 굽힘 변형의 주 인자는 용접 수축 하중이다. 따라서, 본 고에서는 용접 수축 하중에 의한 굽힘 변형 예측 기법을 보 이론을 이용하여 정식화하고 실험을 통하여 이의 타당성을 검증하였다.