

# 고주파 유도 가열을 이용한 BLT 변형 제어에 관한 연구

## A Study on the Distortion Control of Built-up T bar Using the High Frequency Induction Heating

신상범\*, 김성윤, 이동주  
(현대 중공업)

### 1. 서론

Built-up T bar(BLT) 제작은 일반적으로 취부 및 용접 그리고, 변형 교정 part로 구성되어 있다. 최근 당사를 비롯한 국내의 각 조선소에서는 수주 물량의 증가에 따라 BLT 수요가 급격히 증가하고 있을 뿐 아니라, 선체의 경량화 목적으로 기존의 angle을 BLT로 대체하기 위한 노력이 다각적으로 진행되고 있어 생산성 및 품질 향상을 위해 완전 자동화된 BLT 제작 line의 건설에 대한 필요성이 제기되고 있다. BLT 제작시 발생하는 변형 양상은 용접부의 냉각시 용접선 방향으로의 수축 하중과 BLT 도심간의 거리 차에 기인한 굽힘 모멘트에 의한 굽힘 변형이 주를 이룬다. 이러한 굽힘 변형은 용접부와 BLT의 도심간의 상대 위치에 따라 concave 또는 convex 양상을 가지지만, 선체에 적용되는 BLT에서 유발되는 변형 양상은 거의 convex 형태를 보인다. 이러한 굽힘 변형 양상은 angle을 대체하기 위한 작은 크기의 BLT에 있어 굽힘 변형 양이 급격히 증가함으로써 용접 후 crane을 이용한 이송을 제외하고는 기존의 conveyor를 이용한 이송 및 기계적 변형 교정 장비를 이용한 교정 작업은 거의 불가능하다. 또한 기계적 변형 교정시 교정기의 설치에 따라 작업 공간이 증가하게 되고, 별도의 교정 시간이 요구되므로 생산성 향상 측면에서는 큰 장애 요소로 작용하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 용접중 용접 변형 제어 방안의 일환으로써 고주파 유도 가열기를 이용한 BLT의 종 방향의 굽힘 변형을 제어 기법을 표준화하고자 하였다. 이를 위하여 일차적으로 BLT의 기하학적 형상 및 용접 조건에 따른 굽힘 변형을 유발하는 수축하중과 고주파 가열 방안에 따른 수축하중을 유한 요소 해석을 이용하여 정식화하고 이를 실험 모델에 적용함으로써 그 타당성을 평가하였다.

### 2. 유한 요소 해석

#### 2.1 해석 모델 및 방법

고주파 유도 가열을 이용하여 BLT 제작시 용접 변형을 제어하기 위해서는 용접시 발생하는 용접부의 수축 하중과 BLT의 도심간의 거리 차로 유발되는 굽힘 모멘트와 동일한 굽힘 모멘트를 유발하는 고주파 유도 가열을 선정해야 한다. 이를 위해서는 일차적으로 BLT 용접시 용접부의 수축 하중과 고주파 유도 가열에 의한 수축 하중의 정식화가 선행되어야 한다.

따라서, 본 연구에서는 BLT의 종 굽힘 변형을 제어하기 위한 고주파 유도 가열 방안을 정식화하기 위하여 Table 1과 같이 BLT의 기하학적 형상과 용접 입열량에 따른 수축 하중과 고주파 유도 가열시 유입되는 입열량에 따른 수축 하중을 전자기장 해석을 통한 열속 평가 및 과도 열 전달 및 열 탄소성 해석을 이용하여 평가하고 이를 정식화하였다.

Table 1 Variables used for FEA

Dimension [mm]		Welding condition		High Frequency Induction Power [kW]
Flange (t x w)	Web (t x h)	Leg length [mm]	Speed [mm/min]	
10-20 x 150	10-20 x 250-600	4 - 8	1000 - 1300	10 - 80

2.2 해석 결과

**용접 수축 하중** Fig. 1은 용접 입열 세기 및 BLT의 굽힘 강성의 함수로 정의되는 q와 굽힘 변형에 의한 BLT의 곡률 1/r의 관계를 유한 요소 해석 및 실험 결과를 상호 비교하여 도시한 것이다. Fig. 1에 도시한 바와 같이 BLT 용접부의 굽힘 변형에 의한 곡률은 용접 입열 세기(Q) 및 BLT 도심과의 거리(y<sub>i</sub>)에 비례하며, BLT의 용접선 방향으로의 관성 모멘트(I)에 반비례하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 1과 보 이론을 적용하면 용접선 방향으로의 수축 하중(F<sub>w</sub>)은 식(1)과 같이 정의 할 수 있다.

$$F_w = f\left(\frac{1}{r}, I, y_i\right) \quad \text{식(1)}$$

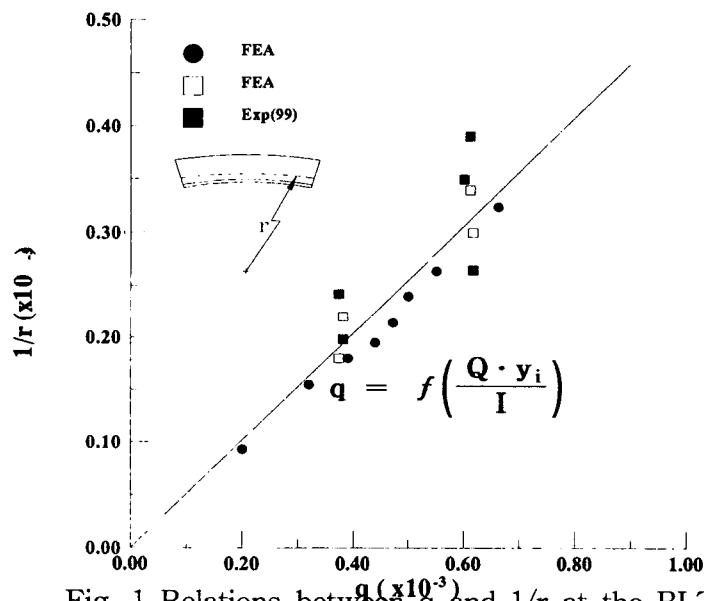


Fig. 1 Relations between q and 1/r at the BLT

**고주파 유도 가열에 의한 수축 하중** Fig. 2는 고주파 유도 가열시 BLT에 작용하는 수축 하중(F<sub>H</sub>)과 BLT의 web에 유입되는 입열 세기(Q)와 web의 면내 강성의 비(D<sub>i</sub>)와의 관계를 도시한 것이다. Fig. 2와 같이 입열 세기 및 판의 면내 강성의 비가 증가함에 따라 BLT의 web에 작용하는 수축 하중은 선형적으로 증가한다. 따라서, 고주파 가열시 BLT에 작용하는 수축 하중은 식(2)와 같이 입열 세기와 판의 면내 강성비로 정의할 수 있음을 알 수 있다.

$$F_H = f\left(\frac{Q}{D_i}\right) \quad \text{식(2)}$$

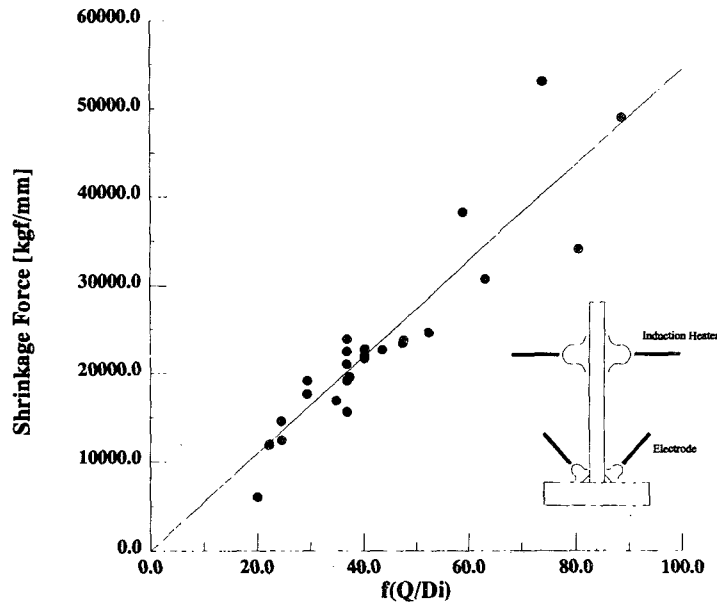


Fig. 2 Variation of shrinkage force with the function of heat intensity and in-plane rigidity

따라서, 식(1)과 (2)로부터 BLT의 용접 변형 제어를 고주파 유도 가열 방안은 선정될 수 있으며, 이의 타당성 평가를 위하여 실 BLT에 이를 적용하였으며, 그 결과를 Table 2에 도시하였다. Table 2에 나타낸바와 같이 본 고에 선정된 고주파 유도 가열에 의하여 중 굽힘 변형이 거의 완벽하게 제어됨을 알 수 있다.

Table 2 Experimental results for BLT with high frequency induction heating

Dimension [mm]			Induction condition		Distortion [mm]	
Flange (t x w)	Web (t x h)	Length	Input Power [kW]	Heating Location [mm]	Welding	Residual
18 x 140	12 x 400	15000	30	145	58	-2
20 x 150	11.5 x 475		25	145	50	-1

### 3. 결론

BLT 제작시 용접부의 중 굽힘 변형을 제어하기 위한 적정 고주파 유도 가열 조건을 선정하기 위하여 유한 요소 해석 및 실험을 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. BLT 제작을 위한 용접시 발생하는 용접부의 수축 하중은 용접부의 입열량 및 굽힘 강성의 함수로 정의되며, 고주파 유도 가열에 의한 수축하중은 고주파 유도 가열시 입열 세기 및 면내 강성의 함수로 정의하였다.
2. 정식화된 고주파 유도 가열 조건에 의한 BLT의 잔류 변형은 BLT의 추가적인 교정 작업 없이 사용할 수 있는 조건(최대 3mm)을 매우 잘 만족한다.