

직 BLT 변형 제어용 고주파 유도가열 Coil 설계

A Study on Inductive coil design to control longitudinal distortion of Built-up T bar

이 동주*, 신 상범
현대 중공업(주)

1. 서 론

Built-up T bar(BLT) 제작시 용접선 방향의 수축 하중이 발생하는 용접부가 부재 횡단면의 중립축 위치와 일치하면 단순히 면내 수축만 발생하지만, 용접부와 BLT의 도심간에 편차가 발생하는 경우 용접부의 수축 하중은 굽힘 모멘트를 유발시켜 BLT에 종 변형을 발생시킨다. 따라서 최근에는 용접 열원과 중립축의 차이에 의해 발생하는 굽힘 모멘트를 상쇄시키기 위해 중립축을 기준으로 하여 반대편에 고주파 열원을 용접과 동시에 가함으로써 종변형을 제어하는 방법이 사용되고 있다. 그러나 고주파 가열을 이용한 용접 변형 제어를 위해서는 용접뿐 아니라 고주파 가열에 의하여 유발되는 수축 하중의 정량적인 평가가 수반되어야 하므로 이를 정식화하는 것은 매우 어렵다. 특히, 용접 변형 제어를 위한 정확한 유도 가열 조건을 산출하기 위해서는 각각의 가열 변수에 따른 가열 양상을 정확하게 평가하는 것이 필수적일 뿐만 아니라 피 가열재의 형상 및 가열 위치, 고주파 유도 장치, 가열 목적 등이 고려된 적절한 코일을 설계하는 것이 매우 중요하다. 그러나 현재 고주파 유도가열에 있어 가열 조건 및 코일 설계는 정량적인 것보다는 경험적, 실험적 현장 지식에 의존하고 있어 이의 이론적 해석적 접근 방안을 통한 작업의 표준화가 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 유한 요소 해석을 이용하여 고주파 유도 가열과 관련한 다양한 변수에 따른 유도 가열 양상을 평가함으로써 고주파 가열 입열 모델을 개발하고 실험을 통해 타당성을 검증하였으며 이를 토대로 효과적인 변형 제어를 위한 유도 가열 코일을 설계 기준을 제안하고자 하였다.

2. 해석방법 및 절차

고주파 유도 가열의 원리는 유도 코일에 전류가 흐르면 코일 주위에는 자기장(magnetic field)이 형성되고 피 가열재의 표면에는 유도 전류가 발생하는 현상을 이용한 것으로 유도 전류에 의해 피 가열 소재의 표면에서 발생하는 줄열을 이용하여 가열한다. 이때 발생한 줄열은 대부분 자기장의 변화에 의해 피 가열재에 유도된 전류가 표면을 따라 이동하면서 가지고 있던 전기에너지가 피가열재의 저항에 의해 열에너지로 소모될 때 발생하는 저항 열이다. 따라서 본 연구에서는 유도 가열의 전산 해석을 위해 먼저 전자기장 해석을 통해 유도 전류에 의한 줄열을 계산하였으며 발생된 줄열을 경계조건(surface heat flux)으로 하여 유도 코일의 이송 속도를 고려하여 과도 열전달 해석을 수행하였다. 전자기장 해석을 위한 2차원 조화 전자기(harmonic magnetic) 해석시 사용한 하중조건은 식 (1)과 같이 정의되는 유도 코일에 흐르는 전류 밀도이다. 특히, 정밀한 변형 제어를 위해서는 고주파 입력에 따른 정확한 입열량이 평가되어야 하기 때문에 고주파 가열기에 대해 입력에 따른 전류밀도를 측정을 하여 전자기 해석의 하중으로 가하였다.

$$J.S = \frac{[\frac{V_e}{Z}]}{A} \quad (1)$$

$$Z = [R^2 + (XL - XC)^2]^{1/2} \quad (2)$$

여기서, V_e 는 유도 코일에 흐르는 실효 전압이며, Z 와 A 는 각각 식 (2)로 정의되는 교류(AC)에서 저항의 개념인 임피던스(impedance)와 유도 코일의 단면적을 나타낸다. 식 (2)의 R 은 유도 코일의 저항이며, XL 과 XC 는 각각 inductive reactance와 capacitive reactance를 나타낸다. 먼저, 코일설계

에 앞서 유도 가열 입열 모델이 정립되어야 하기 때문에 Table 1과 같이 주요 유도 가열 변수에 대해 해석을 수행하여 각 변수가 가열에 미치는 영향을 평가하였다.

Table 1 Variables used for FEA (magnetic field analysis)

Web dimension (mm)			Heat input (kW)	Coil gap (mm)	Frequency (kHz)	Temperature (°C)
Thickness	Height	Length				
15	300	Infinite	20 ~ 80	3 ~ 10	33 ~ 36	20 ~ 462

3. 해석 및 실험 결과

입열 모델 개발 Fig. 1은 코일 간극이 4mm이며 주파수 33kHz인 경우 입력 전력에 따른 단위 길이 당 발생 줄열을 나타낸다. 실제 고주파 가열시 발생하는 줄열은 일정 침투 깊이를 갖는 체적 열원의 형태로 나타나지만, 유도 가열 특성상 발생 열의 대부분은 표피 효과(skin effect)에 의해 피 가열재의 표면에 집중되기 때문에 전체 발생 줄열을 표면 heat flux로 환산하여 나타내었다. 여기서, 유효 반경(R_{eff})은 발생 줄열이 최대 줄열의 5%가 되는 지점까지의 거리로 정의하였다. Fig. 1에 도시된 바와 같이 입력 전력이 증가함에 따라 최대 줄열은 증가하지만, 유효 반경은 거의 일정함을 알 수 있으며 코일 중앙에 대해 대칭적인 분포를 가짐을 알 수 있다.

Fig. 2는 고주파 유도 가열시 피 가열재와 코일의 간극에 따른 발생 줄열 및 유효 반경의 변화를 도시하고 있다. Fig. 2와 같이 코일 간극이 증가할수록 유효 반경은 증가하지만, 최대 발생 줄열은 감소한다. 따라서, 고주파 유도 가열을 이용한 BLT 제작시 변형 제어의 효율 향상을 위해서는 적정 coil의 간극에 대한 설계 기준이 선정되어야함을 알 수 있다.

이상의 전자기 해석의 결과로부터 열 전달 해석을 수행하고 그 타당성 평가를 위해 실험과 비교하였다. Fig. 3은 소재의 두께는 15mm이고 코일간극 4mm, 입력 전력 80kw, 주파수 33kHz인 경우의 유한 요소 해석 결과와 실험 결과를 나타낸다. 온도 측정은 평판에 홀을 기계 가공한 후 K type의 열전대를 사용하여 측정하였다. 전반적으로 해석 결과가 실험 결과를 비교적 잘 예측하고 있어 개발된 입열 모델은 유도 가열 온도 분포 해석 모델로서 타당함을 알 수 있다.

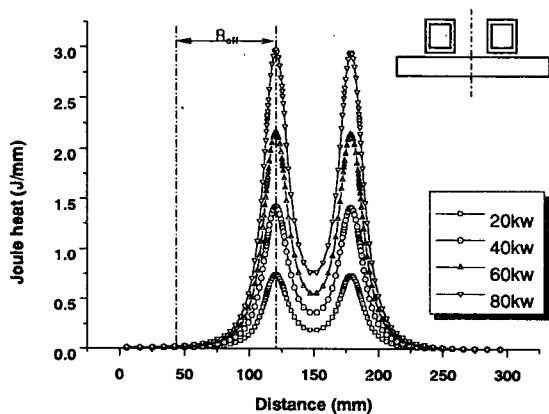


Fig. 1 Joule heat distribution according to input power

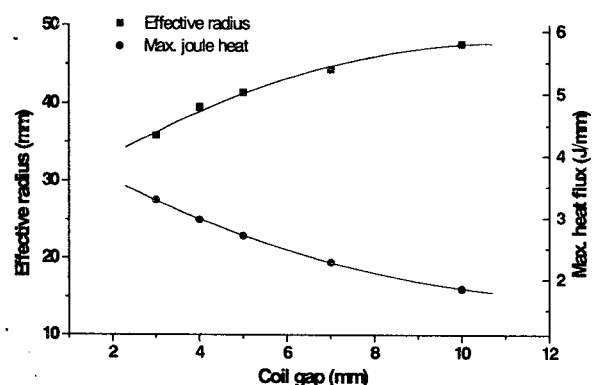


Fig. 2 Effective radius and max. joule heat versus coil gap

유도 코일 설계 본 연구에서 고려된 고주파 가열은 평판 가열용으로서 기본적인 코일 형상은 직사각형으로 하여 코일의 형상에 따라 가열특성을 평가하여 동일 입력전력에 대해 최대 입열량을 얻을 수 있는 코일을 설계하였다. 식 (3)은 Terman이 제안한 사각 루프코일의 인덕턴스 계산식으로

코일 형상에 따라 동일한 인덕턴스를 가지게 하기 위한 조건은 전체 코일의 길이를 같게 함으로써 가능하다는 것을 보여준다.

$$L = PN^2(G + H) \quad (3)$$

여기서, P 는 사각루프의 둘레이며, N 은 회전수, G 와 H 는 코일의 기하학적 특성과 코일단면 특성에 관련된 상수이다. 따라서, 본 고에서는 초기 유도 가열기의 설계 주파수와 유도 코일 인덕턴스를 고려하여 코일의 전체 둘레를 400mm로 고정하고, 코일 진행 방향의 폭에 따른 가열 특성을 평가하고 이를 Table 2에 나타내었다. 이때, 코일 설계 변수는 가열부의 최대 온도로써 상변태에 기인한 소재의 물성 변화를 방지하기 위한 A_{cl} 변태 온도를 최대 허용 온도로 정의하였다. Table 2와 같이 유도 가열부의 최대 온도는 코일 폭이 감소함에 따라 증가한다. 이는 코일의 길이가 증가함에 따라 가열 속도가 동일한 경우 가열 시간이 증가하고, 코일 폭의 감소에 따른 최대 발생 줄열이 증가하기 때문이다. 그러나, Fig. 4와 같이 코일 폭이 56mm 이하로 감소하는 경우 가열부의 최대 온도가 A_{cl} 변태 온도인 780°C 이상 증가하기 때문에 최대 허용 가열 온도의 설계 조건을 만족하지 못함을 알 수 있다.

Table 2 Results of FEA

Width (mm)	40	50	60	70
Heating time (sec)	4.88	5.25	5.63	6.0
Max. joule heat (J/mm)	4.21	3.53	3.16	2.97
Max. heating temperature (°C)	923	910	673	576
Heating rate (°C/s)	263.7	175.	129.4	120

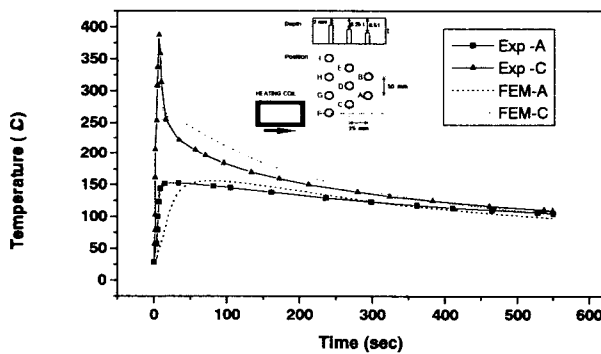


Fig. 3 Comparison of temperature distribution with FEM and experiment results

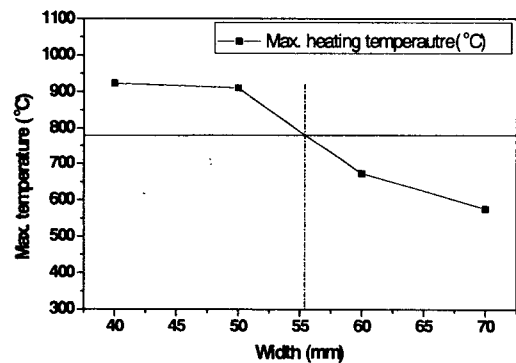


Fig. 4 Change of maximum temperature with coil width

4. 결론

유한 요소 해석을 이용하여 BLT 변형 제어를 위한 고주파 유도 가열 특성 및 효율적인 변형 제어를 위한 코일 설계를 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 고주파 유도 가열시 최대 발생 줄열은 입력 전력이 증가함에 따라 증가하지만, 피 가열재와 코일의 간극이 증가함에 따라 감소한다. 그리고, 발생 줄열의 유효 반경은 코일의 간극이 증가함에 따라 증가한다.
2. 유도 코일의 인덕턴스가 동일한 경우 가열부의 최대 온도는 코일의 폭에 반비례하므로, 소재의 상변태를 방지하기 위한 적정 코일 폭에 대한 설계가 선행되어야 한다.