

## 가스 절단 개선면의 변형 및 잔류 응력 특성(II)

### A Study on the Distortion and Residual Stress Caused by Groove Cutting with Flame(II)

이희태\*, 신상범  
현대 중공업(주)

#### 1. 서론

하중 전달형 T joint의 경우 완전 용입에 의하여 시공되는데, 개선 절단시 발생하는 과도한 종 방향의 굽힘 변형은 변형 제어 및 교정이 매우 힘들뿐 아니라, 용접 gap의 증가에 의한 과도한 용접 입열을 유발함으로써 예기치 못한 변형원으로 작용한다. 따라서, 용접 구조물의 변형 제어라는 측면에서 초기 변형의 제어, 특히 절단 단계에서의 효율적인 변형 예측 및 제어는 매우 중요한 문제라고 할 수 있다. 일반적으로, 가스 절단시 발생하는 변형 및 잔류 응력은 연소 가스에 의한 초기 예열 및 철의 산화에 의해 유입되는 산화열에 의한 입열량, 구속 조건, 그리고 부재의 면내 강성에 의존하므로, 이에 대한 정량적인 예측을 위해서는 가스 절단시 모재로 유입되는 입열 모델의 정식화가 요구된다. 이에, 본 연구자들은 전 보에서 산화 열 및 가스 화염을 고려한 가스 절단시 입열 모델을 제안하고, 유한 요소 해석 및 실험을 통해 개발된 입열 모델의 타당성을 평가하였다.[1]

본 보에서는 절단 가공시 변형 발생 기구를 규명하기 위한 기초 연구 단계로써 전 보에서 정립된 가스 절단시 입열 모델을 이용하여 개선 절단을 위한 가스 절단시 발생하는 제작 공정별 변형 및 잔류 응력의 천이 거동 특성을 유한 요소 해석을 통해 해석하고, 이를 실험 결과와 비교함으로써 타당성을 평가하였다.

#### 2. 실험 및 해석 방법

가스 절단은 순수한 산소와 연소 가스에 의하여 예열된 금속의 화학적인 반응에 의하여 발생된 산화열에 의해 이루어지므로, 본 보에서는 유한 요소 해석을 이용한 변형 및 잔류 응력의 거동 평가시 가스 화염과 산화열에 의한 입열을 각 단계별로 구분하여 해석하였다. 가스 절단 해석을 위한 비선형 열 탄소성 해석에 앞서 열 전달 해석을 수행하였으며, 이때 준 정상 상태(quasi-stationary state condition)로 가정하여 2차원 해석을 수행하였다. 비선형 열 탄소성 해석시 절단 방향으로의 변위를 제어하는 generalized plane strain 요소를 사용하였으며, 개선 절단시 보다 정확한 해석을 위해 절단되는 부분의 요소들은 산화열에 의한 입열이 끝난 뒤 제거하였다.

유한 요소 해석 결과의 타당성 평가를 위한 실험시 flat bar를 위한 초기 절단은 NC장비를

Table 1. Variables used for experiments and FEA

Base Metal	Thickness [mm]	Width [mm]	Length [mm]	Tip No.	Cutting Speed [mm/sec]	Groove	Groove Angle[°]
AH36	30	200, 300	7000	KOIKE NO. 2, 4	2.3~4.1	V	15 - 40

이용하여 여러개의 시편을 동시에 절단하였으며, 이때 동일한 예열 가스량과 절단 팁(tip)을 사용하여 절단면에 같은 양의 입열이 작용하도록 하였다. 개선 절단은 semi-auto carriage를 사용하여 수행하였으며, 이때, 사용된 모재 및 개선 각도 및 절단 조건은 Table 1과 같다. 그리고, 가스 절단 후 부재 내부에 존재하는 잔류 응력은 Hole Drilling Strain gage Method(ASTM E-837)를 이용하여 측정하였으며, 각 공정별 변형 양상은 3차원 측정기를 이용하였다.

## 2. 해석 및 실험 결과

개선 절단은 원판을 일정한 폭을 가지는 flat bar 형태로 절단한 후, 절단된 flat bar를 다시 여러 가지 개선 형상으로 절단하는 순으로 이루어 진다. 일반적으로 원판 절단시 작업의 효율을 높이기 위해 NC장비를 이용하여 동시에 여러개의 flat bar로 절단하는데, 이때 절단면의 양면에 균일한 입열이 동시에 작용하게 된다. Fig. 1은 원판을 200mm의 폭을 가지도록 양쪽 측면을 동시에 초기 절단하였을 때 부재 내부에 존재하는 절단 방향 잔류 응력 분포를 보여주는 유한 요소 해석 결과를 나타내고 있는데, 절단시 발생하는 예열과 산화열에 의해 절단면에서는 인장 잔류 응력이 발생하며 중앙부에서는 압축 잔류 응력이 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한, 동일한 입열에 의해 부재의 중심을 기준으로 잔류 응력 분포가 좌우 대칭을 이루고 있으나, 화염에 의한 예열로 인해 부재의 상부에서는 하부보다 넓은 인장 잔류 응력 분포를 보이고 있음을 알 수 있다.

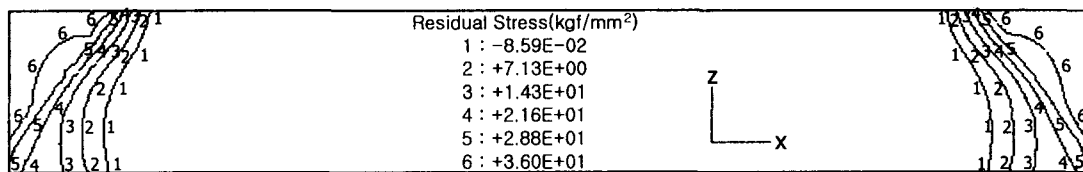


Fig. 1 Longitudinal residual stress distribution after initial cutting

Fig. 2는 원판을 300mm와 400mm의 폭을 가지는 flat bar로 절단후 부재의 윗면에 존재하는 잔류 응력에 대한 실험 및 해석 결과를 나타내고 있다. 절단선 부근에서 큰 인장 잔류 응력이, 중앙부에서 압축 잔류 응력이 발생하였으며, 유한 요소 해석 결과는 실험 결과를 비교적 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 초기 flat bar 절단시 발생하는 부재의 상부와 하부에서의 인장 잔류 응력 차이는 각기 다른 크기를 가지는 인장 하중으로 작용하여 z방향으로의 면내 굽힘(Fig. 1 참조)을 유발하는데, 이때 발생하는 변형량은 식 (1)을 통해 구할 수 있다.

$$\delta = \frac{Ml^2}{2EI_z} \quad (1)$$

Fig. 3은 길이가 7000mm이고 폭이 각각 200, 300mm인 부재의 초기 절단시 발생하는 z방향 굽힘 변형량에 대한 실험 및 해석 결과를 비교하여 도시한 것이다. Fig. 3과 같이 Fig. 1의 잔류 응력 구배와 식 (1)을 이용하여 구한 계산 결과는 실험 결과를 비교적 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 원판에 대해 200mm의 폭을 가지도록 양쪽 측면을 동시에 초기 절단한 후, 이를 다시 한쪽면이 30°의 각도를 가지는 bevel 개선으로 절단하였을 때 부재 내부에 존재하는 잔류 응력 분포를 보여주는 유한 요소 해석 결과를 나타내고 있다. Fig. 1의 초기 절단과 달리 잔류 응력 분포가 좌우 대칭을 이루고 있지 않으며, bevel 개선후 개선면 부근의 잔류 응력의 크기와 영역은 초

기 절단에 비해 크며 개선 반대면에서는 잔류응력의 크기와 영역이 작아져 잔류 응력이 재 분포되었음을 알 수 있다.

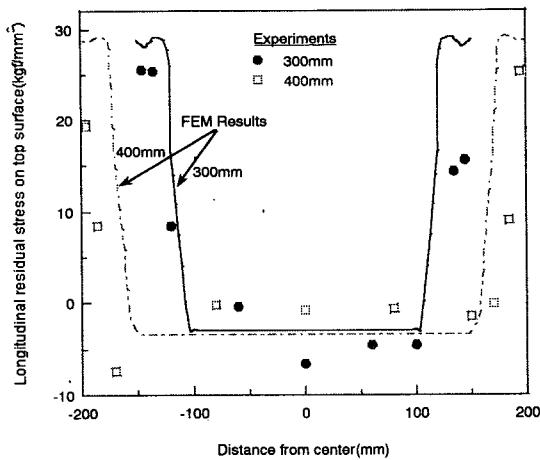


Fig. 2 Experimental and FEA results of longitudinal residual stress after initial cutting for flat bar

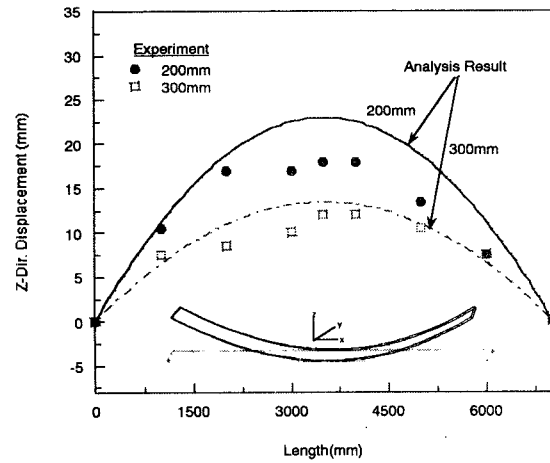


Fig. 3 Comparisons of z-dir. distortion between the results of FEA and experiment

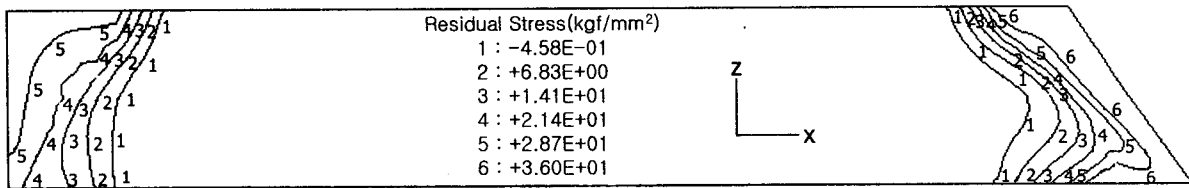


Fig. 4 Longitudinal residual stress distribution after 30° groove cutting

### 3. 결론

가스 개선 절단시 발생하는 변형 및 잔류 응력 특성에 대해 유한 요소 해석을 이용하여 평가하고 실험과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 초기 절단시 절단 방향의 잔류 응력은 부재의 중심을 기준으로 잔류 응력 분포가 좌우 대칭을 이루고 있으나, 부재의 상부에서는 하부보다 넓은 인장 잔류 응력 영역이 발생하며, 이는 절단 부재의 두께 방향으로 종 굽힘 변형을 유발한다.

3. 초기 절단후 발생한 잔류 응력은 이후 개선 절단시 유입되는 입열에 의해 재 분포되며, 이때 개선면에서의 잔류 응력의 크기가 초기 절단후의 것보다 커짐을 알 수 있다.

### 참고문헌

1. 이희태, 신상범, 송민철 : 가스 절단 개선면의 변형 및 잔류 응력 특성, 대한용접학회지, 37-1(2001), pp143-145