

가스 절단 개선면의 변형 및 잔류 응력 특성

A Study on the Distortion and Residual Stress Caused by Groove Cutting with Flame

이희태*, 송민철, 신상범
현대 중공업(주)

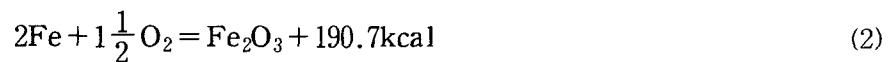
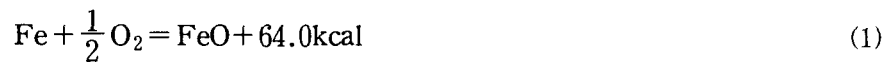
1. 서론

선체 제작 공정은 절단 및 용접 그리고, 부재의 운반 및 반전등의 일련의 작업 공정을 통하여 제작된다. 따라서, 선체에서 발생하는 변형 양상은 일반적으로 이들 제작 공정에 발생하는 변형 양상 및 변형 인자들 상호간의 복합적인 작용에 기인하여 발생하는 것으로 알려져 있다. 특히, 절단 공정에서 유발되는 변형은 용접 공정의 초기 변형원으로 작용할 뿐 아니라, 기 발생된 절단 변형은 선체 제작시 과대 용접 각장을 유발함으로써 예상치 못한 과도한 용접 변형의 발생원으로 작용한다. 따라서, 최근에는 이러한 절단 변형에 의한 초기 변형 및 용접 변형의 유발 효과를 최소화하기 위하여 plasma나 laser등과 같이 피 가열재로 유입되는 입열량을 최소화하는 절단 방안이 거의 대부분의 사업장에서 작용되고 있다. 그러나, 선박의 소절재와 같이 동일 형상의 대량 생산 품목이나, 절단 부재의 두께가 큰 경우에는 과도한 설비 투자에 의한 경제성 및 작업의 효율성 측면에서 아직까지 대부분 가스 절단에 의존하고 있다. 또한 용접 개선면을 위한 절단 가공은 거의 대부분이 가스 절단에 의존할 수밖에 없기 때문에 지금까지 설계 및 용접 작업 기준치를 만족하지 못하는 절단 변형 사례가 빈번하게 보고되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 개선면의 가스 절단에 의한 효율적인 변형 제어 기법을 확립하기 위한 기초 연구단계로써, 실험 및 해석적 기법을 이용하여 산화열 및 가스 화염을 고려한 가스 절단시 입열 모델을 개발하고자 한다. 그리고, 유한 요소 해석 및 실험을 통하여 개발된 입열 모델의 타당성을 평가하고, 아울러 이를 이용하여 절단 부재의 개선시 발생하는 변형 및 잔류 응력의 전이 거동 특성을 규명함으로써 개선면 가공시 변형 발생 기구를 정립하고자 한다.

2. 실험 및 해석 방법

가스 절단시 발생하는 변형 및 잔류응력은 예열 및 철의 산화에 의해 유입되는 입열량, 구속조건, 그리고 부재의 강성에 의존하므로, 변형 및 잔류응력의 정확한 해석을 위해서는 입열 모델의 정식화에 따른 입열량 평가가 필요하다. 절단홈에서 일어나는 철과 산소의 반응식 및 산화 발열량을 알기 위해 발생한 슬래그에 대해 XRD(X-Ray Deflection)실험을 수행한 후 식 (1)~(3)의 반응식으로부터 산화 발열량을 계산하였다



또한, 예열에 의한 열원 모델은 가스 화염 특성상 1차와 2차 화염에 의한 효과를 고려하기 위하여 식 (4)와 같이 가정하였으며, 각각의 입열량을 절단공정과 유사한 조건으로 시간이력에 따라 적절히 고려하여 유한 요소 해석을 수행한 후 실험에서의 절단면의 열영향부(HAZ)의 크기와 비교함으로써 개발된 입열모델의 타당성을 평가하였다.

$$q(r) = \frac{6Q}{\pi(R_1^2 + R_2^2)} f(R_1, R_2) \quad (4)$$

여기서, R_n 은 1차 및 2차 화염의 길이이며, Q 는 가스의 발열량이다.

3. 해석 및 실험 결과

Fig. 1은 절단시 발생한 슬래그의 XRD 실험 결과로 슬래그에 존재하는 주요 결정상들은 식 (1)~(3)에서와 같이 산소와 반응하여 발열량을 발생시키는 $\text{FeO}(\blacklozenge)$, $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_3\text{O}_4(\blacktriangle)$, 그리고 산화되지 않은 철인 $\alpha\text{-Fe}(\blacktriangledown)$ 임을 알 수 있으며, $\alpha\text{-Fe}$ 는 산소와 반응하지 않기 때문에 kerf량을 고려한 산화열 계산시 무시되어야 한다.

Fig. 2는 가스 절단후 절단면에서 나타나는 열영향부의 크기에 대한 실험과 유한 요소 해석 결과로 가스 화염에 의한 효과가 지배적인 상부 영역에서의 해석결과는 실험결과를 잘 예측하였으며, 산화열에 의한 효과가 지배적인 하부에서는 약간 크게 예측하고 있음을 알 수 있으나, 해석결과는 실험결과를 비교적 잘 예측하고 있어 산화열과 식 (4)와 같이 정의된 입열 모델은 가스 절단시 변형 및 잔류 응력 해석을 위한 모델로써 타당함을 알 수 있다.

Fig. 3의 (a)와 (b)는 각각 원판에 대해 300mm의 폭을 가지도록 양쪽 측면을 동시에 초기 절단한 후, 이를 다시 한쪽면이 40° 의 각도를 가지는 bevel 개선으로 절단하였을때 부재의 최상면과 최하면에서 발생하는 길이 방향의 잔류응력 분포에 대한 유한 요소 해석 결과이다. 초기 절단후의 잔류응력 분포는 도심을 기준으로 좌우 대칭을 이루고 있으나, bevel 개선후 개선면 부근의 잔류응력이 초기 절단에 비해 약간 크게 나와 대칭을 이루지 않음을 알 수 있다. 또한 초기 절단에 의해 발생한 잔류응력은 거의 재분포되지 않으나, 압축 잔류응력은 감소함을 알 수 있었다.

Fig.4의 (a)와 (b)는 각각 bevel개선 40° 와 X개선 40° 일때의 굽힘변형량에 대한 유한 요소 해석결과와 실험결과를 나타내고 있다. Fig. 4의 (a)와 (b)에 도시한 바와같이 실험 및 유한 요소 해석결과 모두 절단 개선시 발생한 인장 잔류응력에 의하여 동일한 변형 양상을 보이며, 개선형상이 X개선의 경우 bevel개선에 비해 변형량이 매우 작음을 알 수 있다. 이는 굽힘변형에 영향을 미치는 잔류응력이 양쪽 절단면에서 균형을 이루었기 때문으로 판단된다.

3. 결론

가스 개선 절단시 발생하는 변형 및 잔류응력 특성을 평가하기 위해 가스 절단시 입열 모델을 개발하여 유한 요소 해석을 이용하여 평가하고 실험과 비교하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 산화열 및 가스 화염을 고려한 입열 모델은 열영향부 크기에 대하여 실험 결과를 잘 예측하였다.
2. 초기 절단후 발생한 잔류응력은 대칭형의 분포를 가지나 이후 개선 절단시 유입되는 입열에 의해 잔류응력은 재분포되며, 이때 개선면에서의 잔류응력의 크기가 초기 절단후의 것보다 커짐을 알 수 있다.
3. 굽힘변형에 영향을 미치는 잔류응력이 양쪽 절단면에서 균형을 이룰 경우 입열량이 많아도 변형량이 작음을 알 수 있었다.

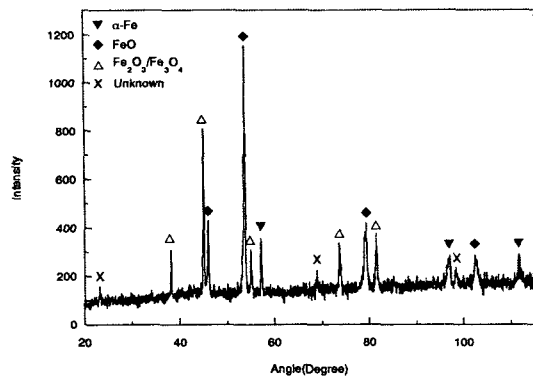


Fig. 1 XRD analysis of slag by gas cutting

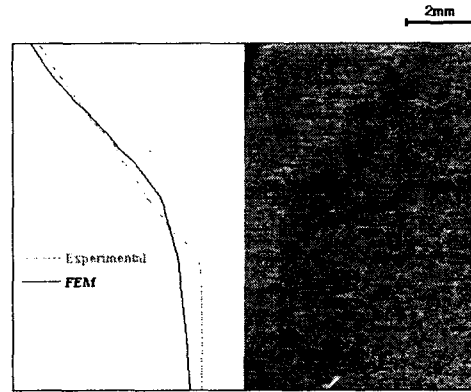
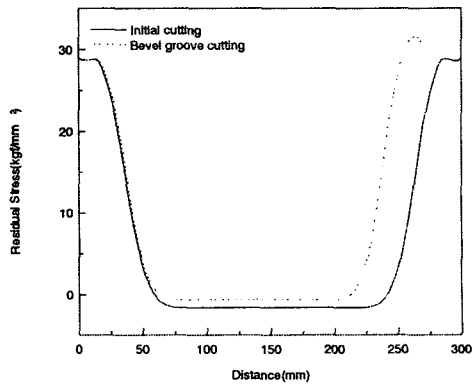
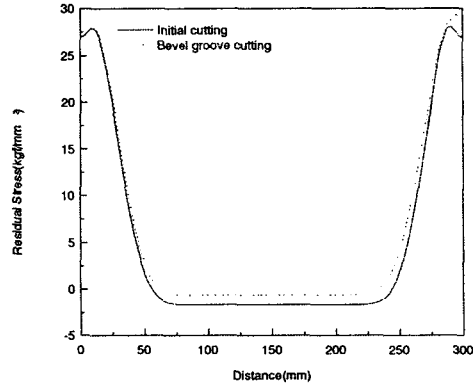


Fig. 2 Comparison of HAZ with experimental and FEM results

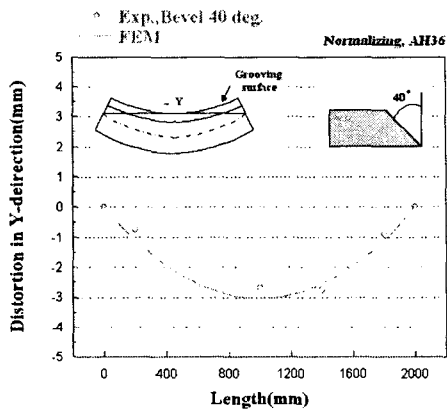


(a) Top

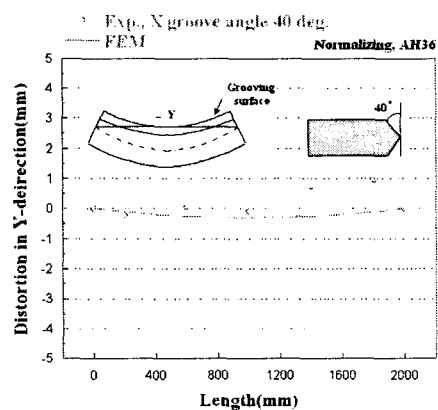


(b) Bottom

Fig. 3 Length direction residual stress distribution along cutting process



(a) Bevel groove 40°



(b) X groove 40°

Fig. 4 Comparisons of distortion between FEM and experiments