

Spot Heating에 의한 용접부 피로 특성에 관한 연구

A Study on the Fatigue Characteristics at the Weldment by Spot Heating

박윤기*, 김현수**, 신상범***, 김경규**

* 현대중공업 (주), 산업기술연구소

** 현대중공업 (주), 산업기술연구소

*** 현대중공업 (주), 산업기술연구소/울산대학교

ABSTRACT The purpose of this study is to evaluate the effect of spot heating on the fatigue strength at the weldment. To do this, the transitional behavior of residual stress at the weld toe induced by spot heating was identified using FEA and experiment. The amount and distribution of residual stress at the weld toe strongly depends on the locations of spot heating. Based on the results, the proper spot heating condition was established. The fatigue strength of the spot-heated specimen increases compared with as-welded specimen.

1. 서 론

용접부의 피로 강도를 향상시키기 위한 용접 후처리 방법의 하나인 spot heating은 특별한 장비가 필요하지 않고 실구조물에 용이하게 적용할 수 있으며 근골격계 질환을 유발하지 않는다는 장점이 있다. Gurney 등은 spot heating에 의한 용접부 피로강도의 증가가 야금학적 특성의 변화가 아닌 초기 용접 잔류응력의 제거에 기인한 것임을 확인하였다. 그러나, 이전의 연구 결과는 spot heating에 의한 용접잔류응력 감소 효과를 정성적으로 설명하고 있다. 따라서, 실 구조물에 이를 적용하기 위해서는 spot heating에 의한 잔류응력 제거 효과에 대한 규명 및 이의 시공 방안의 적정화에 대한 연구가 선행되어야 한다.

본 연구에서는 유한 요소 해석 및 실험을 이용하여 용접 피로 시험편을 대상으로 spot heating시 용접 잔류 응력 거동 특성을 규명하고 피로 시험을 통하여 spot heating에 의한 용접부 피로 거동 특성을 평가하고자 하였다.

Spot heating에 의한 용접부의 잔류응력 거동 특성 평가를 위한 유한 요소 해석의 타당성을 규명하기 위해 용접 및 spot heating 후의 잔류응력 분포를 HDM(hole drilling method, ASTM E-837)을 이용하여 측정하였다. 용접 시편은 평활부의 폭이 70mm이고 길이 340mm, 두께가 10mm인 연강이며 시험편의 중앙에 FCA기법으로 120mm 길이를 1차 용접한 다음 용접선의 양 끝단 30mm의 둘레를 2차 용접하여 제작하였다. 그리고, spot heating은 시편 폭이 70mm로 일반 화염 토치를 이용하는 경우 인장 잔류응력이 작용하는 반경이 35mm를 초과하여 용접부의 toe에 압축 잔류응력을 생성시킬 수 없기 때문에 가열 반경의 조절이 용이하고 열 집속도가 높은 laser로 spot heating의 가열 열원으로 이용하였다. Table 1은 시험편 제작시 시용된 용접 및 spot heating 조건을 나타낸 것이다.

Table 1 Welding and spot heating conditions

Welding			Spot Heating	
Current	Voltage	Speed	Laser	Power
250A	28V	15cpm	Nd-Yag	2 kW

2. 실험 및 해석 방법

용접 잔류 응력의 천이 거동 특성 평가를 위한 유한 요소 해석시 1차 및 2차 용접이 30분 간

격으로 순차적으로 용접되는 것으로 가정하였으며, spot heating은 용접부가 완전히 상온으로 냉각된 후 적용되는 것으로 가정하였다. 이때, spot heating시 사용된 laser의 효율은 가열표면 중심에서 8, 13, 18 그리고 23mm에 열전대를 부착하여 온도 변화를 측정하고 이를 유한 요소 해석 결과와 비교하여 정의하였다. 해석시 사용된 spot heating에 의해 피 가열체로 유입되는 열속 $q(r)$ 의 분포는 Fig. 1과 식 (1)에 나타낸 바와 같이 laser의 특성을 고려하여 laser spot size 내에서 균일하게 분포하는 것으로 가정하였다. 여기서, η 는 효율, Q_0 는 laser 출력 그리고 R 은 laser spot의 반경이다,

$$q(r) = \begin{cases} \frac{\eta Q_0}{\pi R^2} & (r \leq R) \\ 0 & (r > R) \end{cases} \quad (1)$$



Fig. 1 Mesh design and loading condition for laser efficiency

3. Spot Heating에 따른 잔류응력 거동

Fig. 2는 Table 2의 가열 조건으로 spot heating을 실시했을 때, 가열 중심으로부터 각 위치에 부착된 열전대를 이용하여 측정된 온도 변화와 해석 결과를 도시한 것이다. Fig. 2와 같이 spot heating 해석 및 실험 결과는 5°C 이내의 편차로 매우 잘 일치하고 있다. 이는 해석시 사용된 등 분포의 laser 입열 모델이 실제 laser의 열원 특성을 잘 반영하고 있음을 의미한다.

Fig. 3은 피로 시험편에 대한 용접을 수행하고 용접 선단의 toe에서 Y축 방향으로 13mm 떨어진 위치에서 spot heating의 적용 유무에 따라 용접 선단의 toe에서 X 및 Y 축 방향의 각 위치에서 발생하는 잔류 응력에 대한 해석 및 실험 결과를 도시한 것이다. Fig. 3과 같이 용접 완료 후 용접 선단의 toe에서 X 및 Y 방향으로 항복

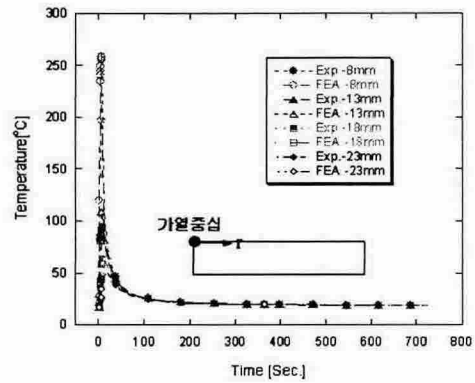
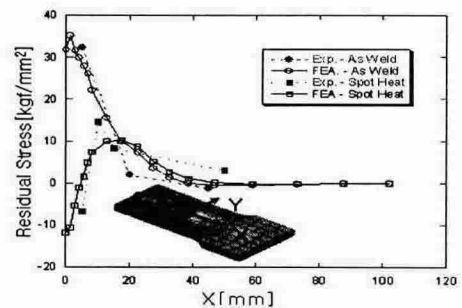
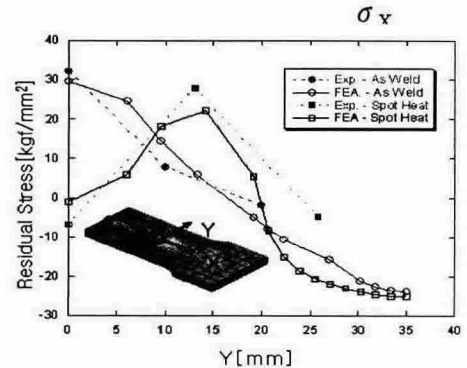


Fig. 2 Changes of temperature at the plate heated by spot heating

응력 수준의 인장 잔류 응력이 작용하며, 용접 선단에서 거리가 증가함에 따라 압축으로 천이된다. 그러나, spot heating 적용 후에 피로 시험편에 작용하는 잔류 응력은 가열 영역에서는 X 및 Y방향으로 항복 응력 수준이 인장 응력이 생성된 반면에 용접 선단의 toe에 압축 잔류 응력이 생성되었음을 알 수 있다. 이러한 잔류 응력에 대한 거동 특성에 대한 해석 결과는 실험 결과와 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.



(a) X 좌표에 따른



(b) Y 좌표에 따른

Fig. 3 Distributions of residual stress obtained by FEA and experiment

Fig. 4는 spot heating의 가열 위치(13, 19, 25mm)에 따라 용접 toe에서 폭 방향의 각 위치에서 용접선 길이방향(X)으로 작용하는 잔류응력 해석 결과를 도시한 것이다. Fig. 4와 같이 spot heating시 용접부 선단의 toe에 작용하는 압축 잔류 응력은 가열부와의 거리에 의존함을 알 수 있다. 즉, spot heating과 용접 toe에서 거리가 감소함에 따라 압축 잔류 응력은 증가하지만, 일정 수준 이상으로 감소하면, 용접 toe에 작용하는 잔류 응력은 2차 용접 및 선 수행된 spot heating에 의하여 형성된 인장 잔류 응력의 영향에 기인하여 다시 감소함을 알 수 있다. 이는 spot heating 적용시 용접부의 잔류 응력을 효과적으로 제어하기 위해서는 적정 가열 위치의 선정이 무엇보다도 중요함을 의미한다.

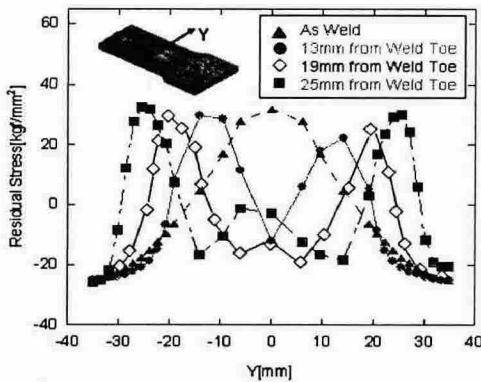


Fig. 4 Changes of the distribution of residual stress at the weld toe with the location of spot heating

4. 피로특성 평가

Fig. 5는 수행된 후처리 방법에 따른 용접부 피로강도 시험 결과를 도시한 것이다[2]. 여기서, spot heating은 용접 toe에서 13mm 떨어진 위치에서 수행되었다. Fig. 5와 같이 spot heating 적용시 용접부의 FAT는 기계적 후처리 방법중의 하나인 hammer peening과 거의 유사한 수준이었으며, 용접 시편보다는 약 13%이상 증가하였음을 알 수 있다. 이는 spot heating에 의한 피로강도 개선에 대한 기존의 결과와 매우 잘 일치한다.

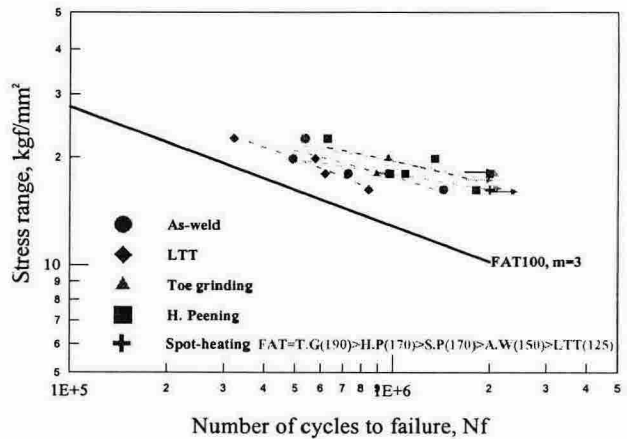


Fig. 5 S-N diagram at the bead-on weldment of the fatigue test specimen with post treatment

4. 결 론

Spot heating에 의한 용접부의 잔류 응력 거동 특성을 유한 요소 해석 및 실험을 이용하여 평가하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Spot heating의 적용시 용접 선단의 toe에 작용하는 인장 잔류 응력은 압축 잔류 응력으로 천이되며, 최대 압축 잔류 응력의 크기 및 분포는 용접부의 toe와 spot heating에 의한 가열부의 거리에 의존한다.

2) 적정 spot heating 적용시 용접 선단의 toe에 작용하는 인장 잔류 응력의 감소에 기인하여 용접부의 피로 강도는 증가한다.

참고문헌

- Gurney, T. R., "Fatigue of Welded Structures", Cambridge University Press, 1968
- 김현수, 박윤기, 윤중근. "용접부 피로강도 특성에 미치는 후처리의 영향", 용접학회 2004 춘계학술대회