

압입변형의 응력의존성 분석을 통한 SS400 강제용접부 잔류응력평가

Evaluation of Residual Stress on Welded joint of SS400 Steel plate by Analyzing the Stress-dependency of Indentation Deformation

지원재*, 이윤희*, 장재일**, 권동일*

* 서울대학교 재료공학부

** 주) 프론틱스 기술연구소

1. 서 론

불균질한 소성가공이나 용접과 같은 이종 소재의 접합으로 발생하는 잔류응력은 그 존재 정도에 따라 구조물의 안정성을 크게 저하시킬 수 있다. 특히 용접부에 발생하는 잔류응력은 미세균열의 발생을 촉진시켜 전체 구조물의 신뢰성을 매우 떨어뜨린다는 사실은 기존의 여러 연구에서 보고되어 있다. 잔류응력을 측정하는 기존 방법^{1,2)}으로는 hole-drilling 방법 및 절단법이 있으나 절단을 통해 특정 크기의 시편으로 가공하여야 하기 때문에 용접부에 손상없이 적용하는 것이 불가능하다. 따라서 비파괴적이면서 실 용접부에 손상을 주지 않는 새로운 측정 기법의 개발이 요구되었다.

연속압입시험법은 압입하중-변위곡선의 분석을 통해서 다양한 기계적 물성을 얻을 수 있는데, 측정 범위가 수백 μm 이내이기 때문에 시편에 거의 흔적을 남기지 않으며, 국부 영역에서의 물성변화 측정이 가능하다. 응력의 유무에 따라 변화가 보고되고 있으므로, 잔류응력과 압입인자간의 관계를 도출하게 되면, 잔류 응력의 정량적인 평가가 가능하다. 또한 잔류응력 완화 시의 압입하중-변위곡선의 형태변화로부터 잔류응력을 계산하는 연구^{3,4)}가 저자들에 의해 진행되어 왔다. 본 연구에서는 연속압입시험에서 도출된 압입하중-변위곡선의 변화추이 분석을 통해서 잔류응력의 정량적 측정을 시도하였다.

2. 이론 해석

잔류응력에 의해 발생하는 압입거동의 변화는 두 가지로 정리할 수 있다. 우선, 그림 1과 같이 일정 압입깊이에 도달하기 위해 인가되는 압입하중은 잔류응력의 부호에 따라 달라진다. 또한 잔류응력과 고유경도는 상호의존성이 없다고 보고되었다.^{3,5,6)} 따라서 이 두 가지 조건을 만족시키는 잔류응력에 영향을 받는 압입자/시편간의 접촉 형상이 그림 2로 모델링되었다. 그림 2에서 최대 압입깊이 h_t 를 유지하면서 인장 잔류응력을 제거하면, h_t 의 최대 압입깊이에 대응하는 무응력 상태에서의 압입하중 L_0 가 발생하여야 하므로 압입자에는 잉여하중 L_{res} 가 추가되어야 된다. 인장 잔류응력 시의 (L_T, h_t) 은 잔류응력이 완화된 (L_0, h_t) 에서 압입하중사이에는 식 (1)의 관계가 성립한다.

$$L_0 = L_T + L_{res} \quad (1)$$

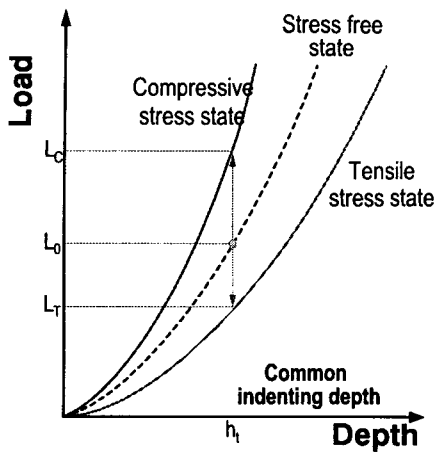


Fig. 1. Schematic diagram showing the variation of indentation loading curves by the change of stress states.

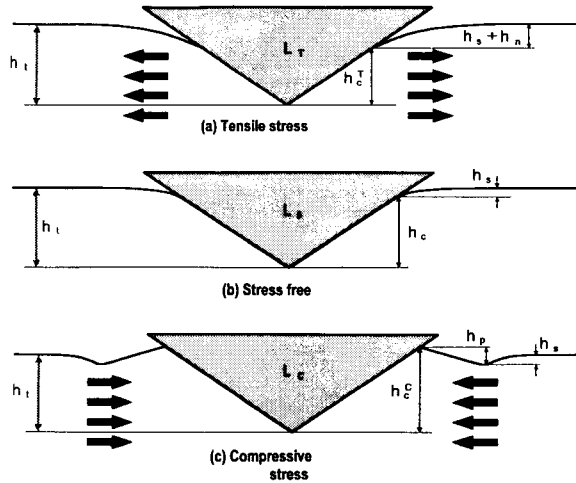


Fig. 2. Theoretically modeled surface morphologies around the contacts for (a) tensile stress, (b) stress free and (c) compressive stress states.

이 잉여하중을 그때의 접촉면적 A_c^0 로 나누어주면 잔류응력은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다³⁾.

$$\sigma_{res} = \frac{L_{res}}{A_c^0} \quad (2)$$

3. 실험방법 및 결과

SS400 강재를 동종의 재료로 용접하여 80x35x6.5 mm 의 크기를 갖는 시편을 제작하였다. 시편의 조성과 기계적 물성을 표 1에 표시하였다. 용접비드를 제거한 시편은 기계연마를 거친 후 2% Nital 용액으로 에칭하여 용착금속과 용접 열영향부(HAZ), 모재 간의 경계를 명확히 하였다. 압입시험은 모재로부터 용접부를 가로질러 압흔의 상호영향을 피하기 위해 3mm의 간격을 두고 일직선을 따라서 행하였으며 보다 정밀한 결과를 얻기 위해 각 선 사이에 3mm 간격을 두고 3회 행하였다. 무응력 상태의 압입하중-변위곡선은 용접부로부터 충분히 떨어진 모재를 무응력 상태로 고려하여 측정하였다.

절단실험은 그림 3, 4와 같이 시편상 용접부의 양옆에 strain gage를 2열로 부착시킨 후 절단하면서 절단 전후의 변형률의 변화량을 측정하고, 얻어진 변형률의 변화량에 탄성계수를 곱해줌으로써 잔류응력 값을 구하였다. 또한 용접부와 나란한 방향으로도 strain gage를 부착시켜 측정영역변화에 따른 잔류응력분포를 측정하였다.

Table 1. Chemical composition(wt%) and mechanical properties of SS400 steel.

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	E (GPa)	σ_y (MPa)
0.048	0.21	0.10	0.006	0.016	0.009	0.15	0.001	0.004	210.85	285

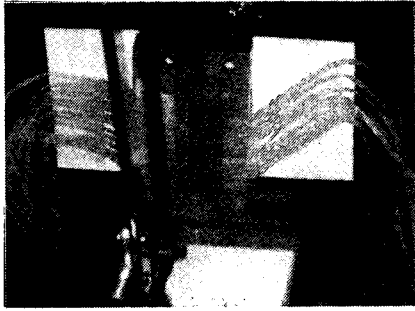


Fig. 3. Specimen with attached strain gage used in saw-cutting procedure.

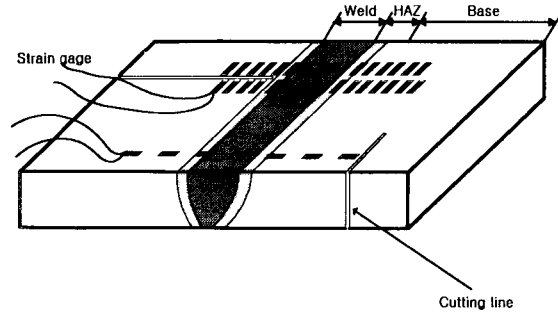


Fig. 4. Detailed schematic of specimen with attached strain gage.

그림 5에서 보는 바와 같이 압입위치에 따라서 압입하중-변위곡선의 천이가 보임을 알 수 있었으며 이를 토대로 하중곡선간의 차이를 통하여 잔류응력값을 정량적으로 평가하였다. 그림 6에 나타난 바와 같이 모재로부터 HAZ, 용착금속을 거치면서 각각 압축-인장-압축의 잔류응력이 존재함을 뚜렷이 볼 수 있었으며 절단 실험과 압입실험에 의해서 측정된 잔류응력값이 동일한 경향을 보임을 알 수 있다.

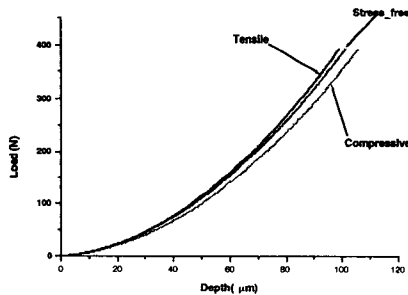


Fig. 5. Loading curve shifting on local region by the effect of residual stress.

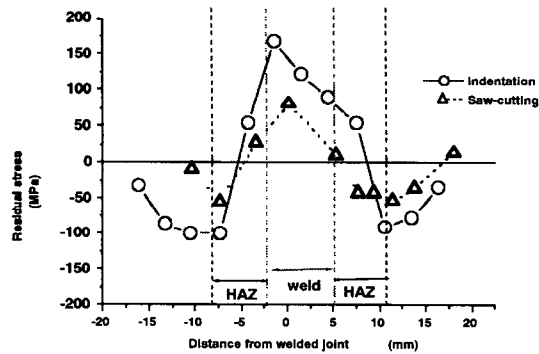


Fig. 6. Residual stress distributions from indentation and saw-cutting.

모재상에서보다 HAZ와 실제 용접부 영역에서 더 큰 오차가 발생함을 알 수 있는데, 이는 우선 용접 시에 발생하는 조직의 변화에 의한 오차를 모재 영역에서 다중 압입으로 유도된 무응력 상태의 압입하중-변위곡선 상에서 보정하지 못했기 때문으로 추정되며, 또 다른 가능성으로는 기존에 적용되었던 식이 이축 등방향 잔류응력의 존재 하에서 유도되었기 때문에 비등방적인 용접부의 응력상태에 적용하면서 오차가 발생한 것으로 사료된다. 한편, 용접선에 평행한 방향의 응력은 전반적으로 10MPa 이내의 낮은 응력상태를 나타내었다.

4. 결론

연속압입시험을 이용해서 용접부의 잔류응력의 크기를 정량적으로 평가하였는데 절단실험에서 얻

어진 결과와 일치하는 경향성을 보임을 알 수 있었고, 두 방법에서 평가된 잔류응력 절대치의 차이는 조직상의 변화에 의한 것과 이축 등방향 응력 평가모델을 비등방향 잔류응력에 적용한 점에서 찾을 수 있다. 용착금속상의 무응력 상태를 구한다면 이러한 오차를 보정할 수 있을 것으로 생각되며 추후 연구가 진행되어야 될 것으로 생각된다. 평행한 방향의 잔류응력은 기존의 연구결과와 마찬가지로 고려할 만한 크기를 갖고 있지 못함을 다시 한번 확인하였다.

후 기

본 연구는 2002년도 포항제철 사의 위탁연구의 일환으로 이루어졌습니다.

참고문헌

1. Ruud, C. O., DiMascio, P. S. and Yavelak, J. J., 1985, "Comparison of three residual-stress measurement methods on a mild steel", *Experimental Mechanics*, Vol. 25, pp. 338-343.
2. 주진원, 박찬기, 1998, "구멍뚫기 방법을 이용한 깊이 방향으로 변하는 잔류응력 측정 방법", *대한기계학회 논문집 A*, Vol. 22, pp. 268-277.
3. Lee, Y. H. and Kwon, D., 2002, "Residual stresses in DLC/Si and Au/Si systems: Application of a stress-relaxation model to the nanoindentation technique", *J. Mater. Res.*, Vol. 17, pp. 901-906
4. 이윤희, 권동일, 2000, "연속압입 곡선과 소성 변형에너지의 분석을 통한 압력 용기강의 잔류응력 평가", 2000년도 제2회 재료 및 파괴부문 학술대회 논문집, 성균관대학교, pp.184-189.
5. Tsui, T. Y., Oliver, W. C. and Pharr, G. M., 1996, "Influences of stress on the measurement of mechanical properties using nanoindentation: part I. experimental studies in an aluminum alloy", *J. Mater. Res.*, Vol. 11, pp. 752-759.
6. Bolshakov, A., Oliver, W. C. and Pharr, G. M., 1996, "Influences of stress on the measurement of mechanical properties using nanoindentation: part II. finite element simulations", *J. Mater. Res.*, Vol. 11, pp. 760-768.