

# 새로운 압입시험을 이용한 후열처리 전후 용접잔류응력의 비파괴적 평가

## Nondestructive Evaluation of Welding Residual Stress before and after PWHT through New Indentation Technique

장재일, 손동일, 최열, 이윤희\*, 지원재\*, 권동일\*, 박상기\*\*  
(주) 프론틱스 기술연구소, \*서울대학교 재료공학부, \*\*한전 전력연구원

### 1. 서론

용접과정을 통해 다양한 금속학적, 역학적 변화를 경험하게 되는 용접부는 대형 강 구조물/설비의 건전성을 확보하기 위해서 가장 주의를 기울여야 하는 평가 대상 부위임에 분명하다. 따라서 이와 같은 구조물/설비의 수명예측 및 사용적합성(fitness-for-service) 평가를 위해서는 용접부가 가지는 금속학적 및 역학적 특성 인자들을 정량적으로 평가하여야 한다. 이중에서도 용접열원 주위의 불균일한 급속 가열 및 냉각에 의해 발생하는 용접잔류응력은 가장 중요한 역학적 인자의 하나로서 취급되어 왔다. 특히 경우에 따라 모재의 항복강도를 넘어서기도 하는 인장잔류응력은 용접구조물의 피로 및 응력부식균열 현상에 큰 악영향을 미치는 등, 구조물의 안전한 운용을 위해서는 용접잔류응력의 크기에 대한 정량적 평가가 공학적 개념에서 매우 중요하다.

용접 및 가공에 따른 잔류응력을 정량적으로 평가하고자 하는 연구는 오래전부터 꾸준히 진행되어 왔으며, 현재까지 정립된 방법은 크게 두 가지로 나뉠 수 있다. 첫째는 구멍뚫기(hole-drilling), 톱절단(saw-cutting) 등 스트레인게이지를 이용한 기계적인 응력이완 시험법으로서, 이는 비교시험편을 필요로 하지 않고 정확한 잔류응력을 평가할 수 있으며 우수한 재현성을 나타내므로 가장 널리 사용되어 온 시험방법이지만 실험실적으로 수행하여야 하는 파괴적인 시험 특성에 따른 제약조건 때문에 현장의 다양한 용접부에 직접 적용하기에는 어려움이 있다. 둘째는 X-선, 중성자 회절, 마크하우젠 노이즈, 초음파 등을 이용한 물리적인 시험법이 있는데, 이는 비파괴적인 시험법이라는 장점이 있는 반면에, 금속학적 인자에 대한 의존도가 매우 크다는 시험방법의 특성 때문에 시험결과로 얻어지는 물리적 변수들중에서 순수 잔류응력에 의한 효과를 미세조직적 변화에 따른 효과로부터 분리하기가 어렵다는 단점이 있고, 재현성이 그리 높지 않다는 해석시의 제약조건이 문제점으로 지적되어 왔다. 최근에는 이러한 기존 방법들의 제약조건을 극복하기 위해서 비파괴적인 동시에 기계적 시험법인 계장화 압입 시험을 통한 평가법이 개발되었다. 본 연구에서는 계장화 압입시험법을 이용하여 용접잔류응력 측정법의 유용성을 평가하고자 하였으며, 발전설비의 용접부에 적용하여 후열처리(PWHT) 전후의 용접잔류응력 변화를 측정하였다.

### 2. 실험방법

본 연구의 평가대상 용접부는 화력발전소의 주요배관인 cold reheater line pipe의 용접부로서 사용된 모재는 A335 P12 강이고, 두께 17.9mm의 배관에 대해 GTAW와 SMAW 방식을 통해 실제 발전설비 건설시와 동일한 조건으로 용접을 수행하여 시험편을 제작했다. 용접된 시험편중 일부는 전기저항 방식으로 998 K 부근에서 2시간 후열처리하였으며, 후열처리 전과 후의 시험편에 대하여 계장화 압입시험 및 톱절단 시험으로 용접선 길이방향의 잔류응력 평가를 실시하였고 그 결과를 비교하였다. 그림 1에 그 시험편을 나타내었다. 그림 2와 같이 계장화 압입시험시 잔류응력의 존재에 따라 얻어지는 압입-변위 곡선의 이동현상으로부터 잔류응력을 평가하는 방법은 이미 여러 문헌[1-4]을 통해 자세히 소개되어 있으므로 본 연구에서는 세부 절차소개를 생략하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

후열처리 전후 시험편에 대하여 톱절단 시험법으로 용접선 길이방향의 잔류응력을 평가한 결과를 그림 3(a)에 나타내었다. 후열처리 전 용접부의 최대잔류응력은 모재의 최소 요구 항복강도인 220

MPa를 능가하는 250 MPa의 잔류응력이 존재함을 알 수 있었고, 후열처리를 통해 이러한 잔류응력은 매우 크게 감소되어 후열처리가 매우 효과적임을 알 수 있다.

그림 3(b)는 새로 개발된 계장화 압입 시험을 통하여 잔류응력을 평가한 결과이다. 톱절단으로부터 구한 시험결과와 매우 유사한 경향성을 나타냄을 확인할 수 있고, 작은 시험오차 폭으로부터 시험결과와 재현성 역시 비파괴적인 시험법으로서는 매우 우수함을 알 수 있다. 톱절단 시험에 따른 결과와 비교할 때 발생하는 절대값의 차이는 톱절단 시험이 용접선 길이 방향의 잔류응력만을 반영한 결과인데 반해 계장화 시험으로부터 얻은 결과는 완벽한 대칭성을 가진 압입자의 특성에 따라 용접선 길이 방향 뿐 아니라 그 수직방향의 잔류응력의 영향까지 반영되었기 때문인 것으로 판단된다. 다만, 용접선과 수직인 방향의 잔류응력 크기는 용접선 방향의 잔류응력에 비해 매우 작으므로 그 경향성에는 크게 영향을 미치지 않았다.

### 3. 결론

본 연구에서는 계장화 압입시험을 통해 용접잔류응력을 정량적으로 평가할 수 있고, 다른 비파괴적 시험법에 비해 상대적으로 우수한 재현성을 나타냄을 확인할 수 있었다. 따라서 앞으로 현장 설비/구조물 용접부의 비파괴적 잔류응력 평가에 계장화 압입시험법의 많은 활용이 기대된다.

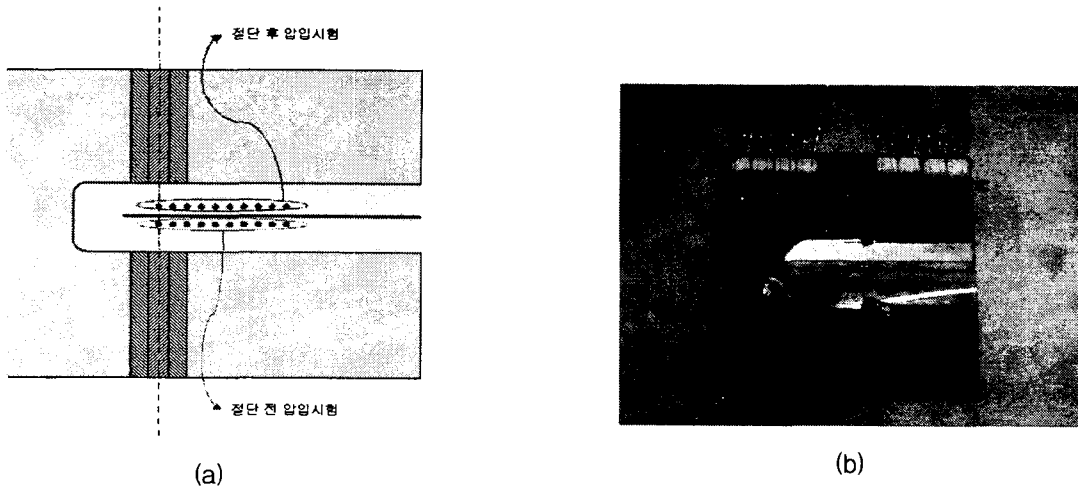


Fig. 1. (a) Schematic and (b) actual view of tested specimens, on which both saw-cutting and indentation were performed.

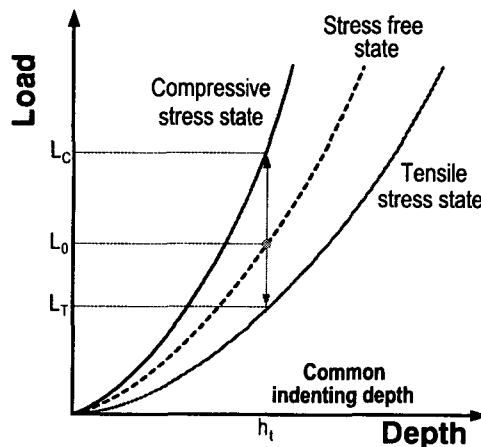
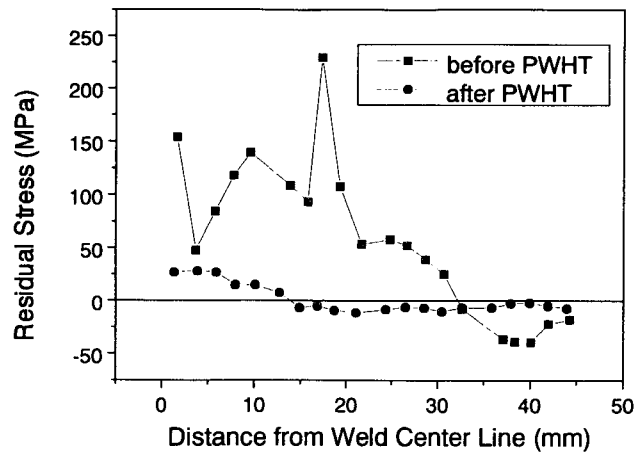
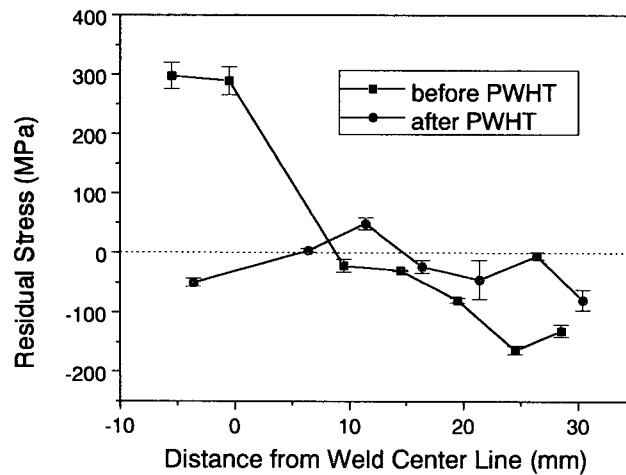


Fig. 2. Variation of the indentation loading curves with the changes in the stress states.



(a)



(b)

Fig. 3. Variation in residual stress along the distance from weld centerline, obtained from (a) saw-cutting method, and (b) newly developed indentation method.

#### 참고문헌

1. 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.
2. LaFontaine, W. R., Paszkiet, C. A., Korhonen, M. A. and Li, C.-Y., 1991, "Residual stress measurements of thin aluminum metallizations by continuous indentation and x-ray stress measurement techniques", *J. Mater. Res.*, Vol. 6, pp. 2084-2090.
3. 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.
4. Suresh, S. and Giannakopoulos, A.E., 1998, "A New Method for Estimating Residual Stresses by Instrumented Sharp Indentation," *Acta mater.*, Vol. 46, pp. 5755-5767.