

연속압입시험기법을 이용한 용접부 잔류응력 평가

이정석[#] · 이윤희¹ · 최 열^{1,2} · 김광호² · 권동일¹

Evaluation of Residual Stress for Weldments Using Continuous Indentation Technique

J. S. Lee, Y. H. Lee, Y. Choi, K. H. Kim, D. Kwon

(Received May 12, 2005)

Abstract

Apparent mechanical properties in structural components can be different from the initially designed values due to the formation of the residual stress in metal forming and welding. Therefore, the evaluation of residual stress has great importance in the reliability diagnosis of structural components. A nondestructive continuous indentation technique has been proposed to evaluate various strength concerning mechanical properties from the analysis of load-depth curve. In this study, quantitative residual stress estimation on API X65 welded joints for natural gas pipeline was performed by analyzing the variation of indentation loading curve by residual stress through a new proposed theoretical model. The residual stress from the indentation method was compared with that from the saw-cutting method.

Key Words : Weldment, API X65, Residual Stress, Continuous Indentation Technique

1. 서 론

불균질한 소성가공이나 용접과 같은 이종 소재의 접합으로 발생하는 잔류응력은 구조물의 안정성을 크게 저하시킬 수 있다[1~2]. 또한, 부품들의 기계 가공 및 용접 등의 방법으로 형성된 대형 구조물에서는 잔류응력의 영향에 의해서 구조물의 왜곡을 유발하기도 하며, 장기간 열화과정을 거칠 때는 용접 잔류응력이 미세조직적인 영향과 결합함으로써 예기치 않은 구조물의 파괴를 동반할 수도 있다.

잔류응력을 측정하는 기존 방법[3~4]으로는 hole-drilling 방법 및 절단법, X선 회절법 등을 들 수 있다. 절단법은 잔류응력이 걸린 일부 소재를 기계적으로 절단하여 완화되는 응력을 측정하는 방법이므로 잔류응력이 존재하지 않는 기준 시편이 필요없

다는 장점이 있는 반면, 파괴적인 특징으로 인해 용접부에 손상 없이 적용하는 것이 불가능하다. 이에 비해 X선 회절법은 비파괴적인 방법이지만 잔류응력이 없는 상태에 대응하는 회절 피크의 측정이 필요하며, 미세조직의 영향도 복합적으로 나타난다는 단점이 있다. 이러한 기존의 잔류응력 측정 방법은 응력완화가 수반되는 시편 채취과정이 필요하다는 단점과 더불어 시험실 수준의 정밀한 환경 제어와 복잡한 시험과정이 요구된다는 점에서 현장 구조물에 적용하기에는 한계가 있을 수밖에 없다. 따라서 비파괴적이면서 실 용접부에 손상을 주지 않는 새로운 잔류응력 평가기법의 개발이 요구된다.

본 연구에서는 용접시편의 위치에 따라 연속 압입시험[5~8]을 행하고 각각의 시험에서 도출된 압입하중-변위곡선의 변화추이를 분석을 통해서 비

1. 서울대학교 재료공학부

2. ㈜프론틱스

교신저자 : 서울대학교 재료공학부

E-mail: jslee119@plaza.snu.ac.kr

과파적으로 용접부 잔류응력의 평가를 시도하였으며, 절단실험을 병행하여 각 실험에서 얻어진 결과값들을 상호비교함으로써 연속 압입시험법을 통한 잔류응력 평가기법의 타당성을 검증하고자 하였다.

2. 이론적 배경

표면 잔류응력을 연속 압입시험을 이용하여 분석하기 위해서는 잔류응력과 압입응력간의 상호작용에 대한 이론적인 모델링이 필요하다. 초기 연구에서는 잔류응력에 의해 압입축 방향으로 발생하는 가상 응력과 접촉면적의 곱인 $\sigma_{res}A_c$ 로 잔류응력 유도하중을 나타내었으나[9] 잔류응력의 소성변형에 대한 영향을 분석하기 위하여 부가된 1 축 가상 응력에는 여전히 소성변형과 무관한 정수압 혹은 평균 응력(mean stress, σ_m) 성분이 포함되어 있다.

잔류응력 유도 수직하중을 정의하기 위하여 소성변형과 직접 관련된 편차 응력 성분만으로 압입 변형과 잔류응력 간의 상호작용을 분석하였다. Johnson 모델에 의하면 강성 압입자(rigid indenter)에 의한 압입 변형은 셸(shell) 모양으로 확장한 소성역이 비압축성 코어(incompressible core)를 둘러싸고 있는 Fig. 1 의 단면 형태로 모델링되었다¹⁰⁾. 또한 압입자 직하에 존재하는 코어는 구형 공동 모델(spherical cavity model)로 고려하면, 공동 내부의 정수압 응력(hydrostatic stress)은 $-2\sigma_y/3$ 로 결정되었다[9]. 여기서 σ_y 는 재료의 항복강도를 의미한다. 재료가 탄성-강소성 거동(elastic-rigid plastic behavior)을 보이면, 정수압의 증가에 대응해 공동 외각의 소성역이 점차 확장하게 되는데, 이때 소성역 내부의 응력 분포도 구형 셸에 대한 응력 해석과 항복조건을 결합하여 분석되었다. 본 연구에서는 Fig. 1 에 나타낸 복잡한 압입변형 응력장에서 코어 내부의 응력($-2\sigma_y/3$)과 외부에서 인가되는 등방향 2 축 잔류응력, σ_{res} ($\sigma_{res,x}=\sigma_{res,y}$, $\sigma_{res,z}=0$) 와의 상호중첩을 고려하였다. 등방향 2 축 잔류응력을 코어에 인가하면 내부의 정수압은 변화되어 전단응력 성분이 부가적으로 발생하게 되며 식 (1)의 코어 내부 정수압과 등방향 2 축 잔류응력의 합, σ_{com} 은 정수압과 편차 응력(deviatoric stress)으로 재분해될 수 있고, 편차 응력 성분에서 잔류응력의 압입 소성 변형에 대한 영향을 확인할 수 있다. 식 (1)의 편차 응력 성분 중 시편 표면에 수

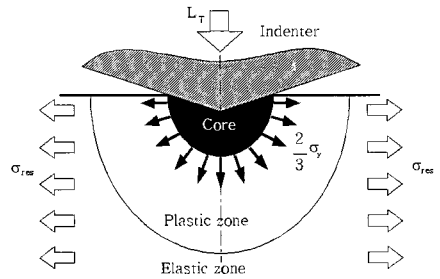


Fig. 1 Stress interaction between residual stress and hydrostatic stress in the incompressible core of an elastic/plastic indentation

$$\begin{aligned} \sigma_{com} &= \begin{pmatrix} -2/3\sigma_y & 0 & 0 \\ 0 & -2/3\sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & -2/3\sigma_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_{res} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{res} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} -2/3(\sigma_y - \sigma_{res}) & 0 & 0 \\ 0 & -2/3(\sigma_y - \sigma_{res}) & 0 \\ 0 & 0 & -2/3(\sigma_y - \sigma_{res}) \end{pmatrix} \\ &+ \begin{pmatrix} 1/3\sigma_{res} & 0 & 0 \\ 0 & 1/3\sigma_{res} & 0 \\ 0 & 0 & -2/3\sigma_{res} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

$$L_{res} = -\frac{2}{3}\sigma_{res} \cdot A_c \quad (2)$$

직인 압입 하중에 미치는 잔류응력의 영향은 σ_{33} 으로 나타나는 $-2\sigma_y/3$ 이다. 본 연구에서는 식 (2)로 표현된 인가하중의 증가분을 잔류응력 유도 수직하중으로 새롭게 정의하였다. 여기서 L_{res} 는 잔류응력 유도 수직하중이며 A_c 는 이때의 접촉면적을 의미한다. 즉, 최대 압입 깊이가 일정하도록 압입 시험을 제어하면 잔류응력 유무에 의해서 잔류응력 유도 수직하중 만큼의 압입 하중 차이가 발생한다.

3. 실험 방법

직경 750mm, 두께 15.5mm의 규격을 갖는 천연 가스운반용 API X65 강재 용접배관상의 일부를 채취하여 시편으로 가공하였다. 각각의 시편은

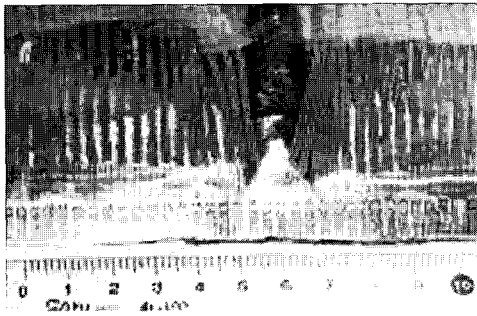


Fig. 2 Specimen used in saw-cutting test

2000번 사포까지의 기계적 연마를 거친후 2% Nital 용액으로 에칭하여 용착금속과 용접 열영향부(HAZ), 모재 간의 경계를 명확히 하였다. Saw-cutting 실험의 경우 정확한 값의 측정을 위하여 용접선을 가로질러 3mm 간격으로 스트레인게이지를 부착한 후, 절단 전후의 변형률의 변화량을 식 (3)에 대입하여 잔류응력값을 정량적으로 측정하였다. 용접선의 수직방향에 대해서도 스트레인게이지를 부착시켜 절단시 완화된 잔류응력치를 측정하였으며 절단실험 후의 시편사진은 Fig. 2로 제시하였다.

$$\sigma_{res} = E\varepsilon \quad (3)$$

압입시험을 위하여 시편 상단에 압입자와 만나는 폭 25mm 영역을 평평하게 가공한 후, 모재로부터 용접부를 가로질러 각각의 압입시험을 행하였다. 압흔 간의 상호 변형중첩을 피하기 위하여 압입시험은 용접선을 가로질러 약 5mm 정도의 충분한 간격을 두고 행하였으며 실험오차를 줄이기 위해 3 회에 걸쳐 압입시험을 반복하였다. 최대압입하중은 50kgf 로 결정하였고 압입속도는 0.2mm/min 로 설정하였다. 잔류응력상태의 압입곡선과 비교하기 위한 무응력 상태를 얻기 위해서 600℃에서 2 시간 어닐링시킨 후 노냉시키는 열처리 과정을 통해서 잔류응력을 제거하고, 용접 중심선에 대해 열처리 이전에 압입실험을 행하였던 거리만큼 떨어진 위치에 대하여 각각 열처리 이전과 동일한 조건의 압입실험을 행하였다. 접촉면적 계산을 위하여 10, 20, 30, 40, 50kgf 하중에서 각각의 하중제거 단계를 거쳤다. 잔류응력 존재시의 압입곡선은 하중인가 부분만 분리하여 떡급수 형태로 적합화하여 정리하였으며, 무응력 상태의 압

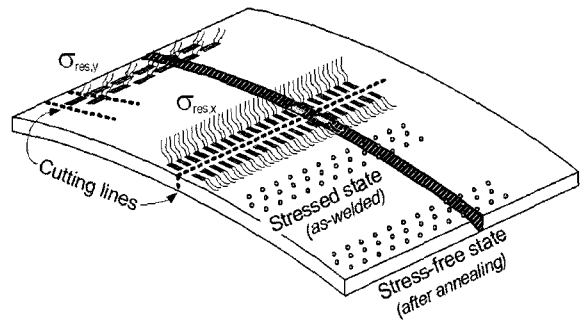


Fig. 3 Detailed schematic diagram of experimental procedure

입하중-변위곡선은 하중인가 곡선의 분리와 함께 하중제거 곡선 분석을 통해서 접촉면적을 유도하였다. 실험과정을 전체적으로 도식화하여 Fig. 3으로 나타내었다.

4. 결과 및 고찰

4. 1 절단 시 용접 잔류응력의 이완

Fig. 4는 절단 시 측정된 각 방향의 변형률을 나타낸 것이다. 일반적으로 용접 잔류응력의 분포 양상은 Fig. 5와 같으며 (+)부호는 인장을, (-)부호는 압축 잔류응력을 나타낸다. 전형적인 용접선 방향의 잔류응력, $\sigma_{res,x}$ 는 용접선의 수직방향의 잔류응력, $\sigma_{res,y}$ 에 비해 몇 배 이상으로 큰 것으로 보고되었으며, $\sigma_{res,x}$ 가 주된 연구 대상이다[1,11]. 기존 연구결과[11]에서 보고된 바와 같이 용접부와 평행한 방향의 변형률이 수직방향의 변형률에 비해 비교적 큰 값을 나타냄을 알 수 있다. 각 방향의 변형률을 식 (3)에 대입하여 정리하는 과정을 통해서 완화된 잔류응력값을 평가하였으며 압입시험과의 비교 결과는 Fig. 6에 도시하였다.

4. 2 잔류응력에 따른 압입곡선 형상천이

Fig. 7과 같이 무응력 상태의 압입곡선과 잔류응력 존재 시 압입곡선과의 형상차이가 발생한다. 하중변위곡선 분석과정과 이론적 배경 및 실험방법에서 제시된 분석 절차에 의하여 각각의 압입 위치에서 잔류응력 값을 정량적으로 평가하고 이를 Table 1에 나타내었다. Table 1과 Fig. 6은 압입 시험에서 얻어진 잔류응력치와 절단 실험결과를

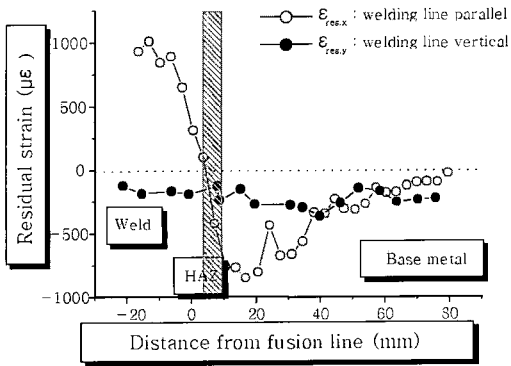


Fig. 4 Saw-cutting result (strain)

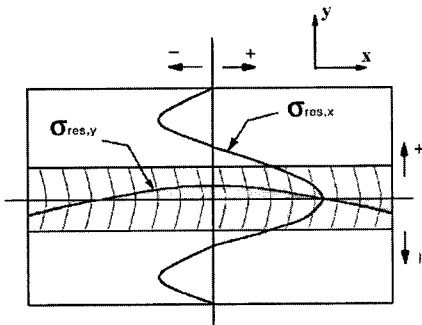


Fig. 5 General stress distribution around welded joint

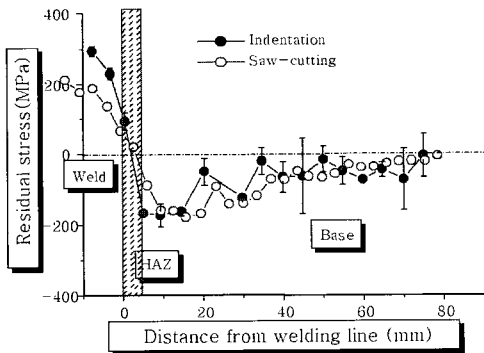


Fig. 6 Comparison of experimental results from saw-cutting and advanced indentation

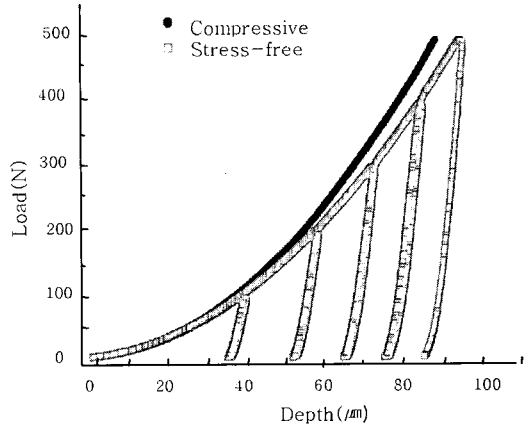


Fig. 7 Loading curve shifting on local region by the effect of residual stress (HAZ: 4,96mm from welding line)

Table 1 Summary of evaluated residual stress by indentation and saw-cutting

Indentation		Saw-cutting	
Indentation position from welding line (mm)	Residual stress (MPa)	Strain gage position (mm)	Residual Stress (MPa)
74.9	-4.82	75.2	-20.37
69.94	-72.86	68.8	-21.21
64.59	-43.86	65.7	-26.67
59.8	-72.31	59.4	-38.01
54.69	-47.72	56.2	-29.82
49.87	-15.32	49.7	-66.36
44.7	-62.41	43.4	-48.51
39.81	-65.76	40.2	-72.45
34.55	-19.79	33.3	-118.23
29.66	-123.25	30	-139.44
20.2	-49.42	19.4	-168.63
14.51	-163.06	15.6	-178.29
9.29	-172.5	9.4	-159.39
4.96	-166.17	6	-88.2
0.46	93.66	-0.6	65.94
-3.2	228.57	-3.9	135.66
-7.67	294.16	-7.5	187.32

비교하여 나타낸 것으로, 정량적 크기 및 응력의 부호에서 서로 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수

있다.

응력의 부호는 절단실험에 의한 값과 압입시험을 통해서 얻어낸 결과가 완전히 일치하고 있음을 보여주고 있다. 모재로부터 HAZ, 용착금속을 거치면서 각각 압축-인장의 잔류응력이 존재함을 뚜렷이 볼 수 있었으며, 이는 기존 연구보고[1,11]와 같은 경향을 보이고 있다.

4.3 실험 결과 및 고찰

절단 실험과 연속 압입시험을 이용하여 평가한 각각의 잔류응력 값이 그 부호와 크기에서 잘 일치한다는 사실을 Fig. 6에서 확인할 수 있었다.

두 실험값 간의 오차는 다음의 발생원인에서 생각해 볼 수 있다. 우선 앞에서 전개된 연속 압입시험을 이용한 잔류응력 평가의 이론적 모델이 이축 등방향 잔류응력의 존재라는 가정 하에서 유도된 것이므로 이를 비등방적인 응력 분포를 가지고 있는 용접부의 응력 해석에 직접 적용하면서 생기는 문제점이 존재한다. 기존 연구 보고 [1,11]에 있어서뿐 아니라, 본 실험결과상에서도 용접선 방향을 기준으로 각 방향의 변형률은 서로 다른 부호와 크기를 가짐이 확인되었다(Fig. 6). 그러나 압입시험을 이용한 잔류응력 평가시 적용된 축 등방향 평가모델에서 실제와 다른 응력상황을 가정하여 반영하였으므로 필연적인 오차가 발생한다. 이와 함께 실제 압입시험결과 분석에 있어서 응력 및 무응력 상태의 각 시편에서 측정된 위치가 상이한 것 또한 원인으로 들 수 있다. 이는 실험을 행할 시에 용접선에 기준하여 같은 거리만큼 떨어진 지점의 잔류응력은 서로 같다는 가정에서 출발한 것이다. 즉 결과해석 시 용접선 수직방향의 변형률 ϵ_y 를 일정하다고 가정하였으나, ϵ_y 값에 변화량을 무시한 만큼의 오차발생분이 존재함을 예상할 수 있다.

또다른 원인으로서는 열처리를 통해 응력이 완전히 제거되지 않았을 가능성을 생각할 수 있다. Fig. 6에 나와있는 결과를 보면 모재쪽으로 이동할수록 절단실험 및 압입실험결과와 응력상황이 거의 일치함을 알 수 있다. 이를 통해 모재쪽에서는 열처리를 통해 응력이 완전히 제거되었다는 결과로 유추할 수 있는 반면, 용착금속 영역에서는 두 결과간의 차이가 상대적으로 큼을 볼 수 있는데 용착금속영역에서는 적용한 열처리 조건에 의해 완전한 응력제거가 이루어지지 않았다고 생각할 수 있다.

5. 결론

연속 압입시험을 이용해서 용접부의 잔류응력의 크기를 정량적으로 평가하여 절단실험에서 얻은 결과와 비교하였다. 연속 압입시험에서 얻은 결과는 절단실험에서 얻어진 결과와 비교하여 응력의 방향성뿐 아니라 잔류응력의 크기 또한 비교적 잘 일치한다는 사실을 알 수 있었다. 두 방법에서 평가된 잔류응력 절대치의 차이는 압입시험 결과분석에서 적용된 이축 등방향 모델의 가정상의 오류에 의한 것으로 보인다. 적용모델의 경우 응력의 방향성을 인지할 수 있는 방향으로의 추후 연구가 필요할 것으로 생각되며, 무응력 선택상의 원인은 용착 금속이나 HAZ 부분의 무응력 상태를 각각 구하여 적용한다면 해소할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] M. Koichi, 1980, Analysis of welded structure, Pergamon Press, p. 148.
- [2] I. C. Noyan, J. B. Cohen, 1987, Residual Stresses, Springer-Verlag, p. 1.
- [3] C. O. Ruud, P. S. DiMascio, J. J. Yavelak, 1985, Comparison of three residual-stress measurement methods on a mild steel, Experimental Mechanics, Vol. 25, pp. 338~343.
- [4] J. W. Joo, C. K. Park, 1998, Determination of Non-uniform Residual Stress by the Hole Drilling Method, Trans KSME A, Vol. 22, pp. 268~277.
- [5] A. V. Zagrebelny, C. B. Carter, 1997, Indentation of strained silicate-glass films on alumina substrates, Scripta. Mater., Vol. 37, pp. 1869~1875.
- [6] Y.-H. Lee, D. Kwon, 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.
- [7] Y.-H. Lee, W.-j. Ji, D. Son, J.-i. Jang, D. Kwon, 2002, Analysis of bending residual stress in SS400 steel beam using continuous indentation technique and stress interaction model, J. Kor. Inst. Met. & Mater., Vol. 40, pp. 1042~1047.
- [8] W. C. Oliver, G. M. Pharr, 1992, An improved technique for determining hardness and elastic

modulus using load and displacement sensing indentation experiments, J. Mater. Res., Vol. 7, pp. 1564~1583.

[9] R. Hill, 1956, The Mathematical Theory of Plasticity, Clarendon, Oxford.

[10] K. L. Johnson, 1985, Contact Mechanics, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, pp. 84~106.

[11] H. S. Bang, 1992, Study on the mechanical behavior of welded part in thick plate, J. Kor. Weld. Soc., Vol. 10, pp. 250~258.