

발전설비 주요배관 신뢰도 확보를 위한 연속압입시험 적용

Application of Continuous Indentation Technique for Reliability Evaluation in Power Plant Facilities

박상기*, 안연식*, 정계조*, 조용상*, 최 열**

Sang-Ki Park*, Yeon-Shik Ahn*, Gye-Jo Jung*, Yong-Sang Cho* and Yeol Choi**

초 록 발전설비에서 용접 구조물의 신뢰성은 매우 중요하며, 구조물 신뢰성평가를 위해서는 재료물성의 정확한 평가에 근거되어야 한다. 발전설비의 건설중 용접부의 물성평가는 실제 용접부에서의 파괴시험이 어려우므로 현장 용접부와 유사하게 용접, 시험한 결과인 PQR(Procedure Qualification Record)에 의해서만 보증을 하고 있다. 이런 문제점을 해결하기 위하여 현장 용접부에 대하여 비파괴적으로 기계물성 측정이 가능한 연속압입시험법을 적용하였다. 연속압입시험법은 압입시 압입하중-깊이를 측정하여 항복강도, 인장강도 그리고 가공경화지수와 같은 기계적 특성들의 분석이 가능한 시험법으로, 화력 발전소 건설 및 운전중 주증기관과 재열증기관의 기계인장물성을 평가하기 위하여 적용하였다.

주요어: 연속압입시험법, 인장물성, 용접부, 용접잔류응력

Abstract Reliability of welded structures in power plant facilities is very important, and their reliability evaluation requires exact materials properties. But, the conventional PQR (Procedure Qualification Record) can hardly reflect the real material properties in the field because the test is only done on specimens with simulated welding. Therefore, a continuous indentation technique is proposed in this study for simple and non-destructive testing of in-field structures. This test measures the indentation load-depth curve during indentation and analyzes the mechanical properties such as the yield strength, tensile strength and work hardening index. This technique has been applied to evaluate the tensile properties of the weldment in the main steam pipe and hot reheater pipe in power plants under construction and in operation.

Keywords: continuous indentation technique, tensile properties, weldment, welding residual stress

1. 서 론

화력발전설비는 고온과 고압의 환경에서 운전되므로 결함 발생 가능성이 높으며, 이에 따른 사고 발생시는 국내 산업전반에 미치는 파급 여파가 크고, 많은 경제적 손실도 뒤따른다. 화력 발전소의 주요설비 중 보일러는 수많은 배관들로 용접시공

되어 설치되어 있는데, 이들 배관들은 고온의 화염, 증기들과 접촉되어 운전되고 있다. 보일러 배관의 주요 손상원인은 고온에 의한 재료의 열화에 따른 손상과 취약부인 용접손상이 주류를 이루고 있어 발전소 유지보수업무 중에서 주요관심분야이다. 하지만 사용 중인 설비의 재료 적합성과 용접의 적정성을 평가하기 위해서는 크리프시험, 기계적

강도시험, 잔류응력시험 등 각종 파괴적인 시험법을 실시해야 하는 문제점이 있으므로 경도 및 조 직복제시험과 같은 방법을 적용하고 있으나 이런 시험법들은 비교적 정확도가 낮고, 엔지니어링 자료로 활용할 수 없다는 것이 가장 큰 문제점으로 되어 왔다.

현재 발전소 건설시 용접강도는 시험편을 실험실에서 시험을 한 PQR(procedure qualification record)로만 보증을 하고 있으며, 실제 현장의 용접강도는 측정을 하지 못하고 있다. 만일 현장에서 설비의 기계물성을 비파괴적으로 측정할 수 있다면 용접부의 품질평가와 장기사용재료의 열화도 평가가 가능하게 되어 발전설비의 신뢰도 향상에 크게 기여할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 연속압입시험법을 적용하여 화력 발전소 주요배관의 용접강도와 잔류응력측정 그리고 장기 사용한 고온재열증기관의 열화도 평가에 적용한 사례를 소개하고자 한다.

2. 본 론

2.1. 연속압입시험에 의한 발전설비 재료의 비파괴적 기계적 물성 평가

연속압입시험으로부터 일축인장의 유동특성을 평가하기 위해서는 압입시험 결과분석을 통한 유동응력과 압입 변형률의 유도로서 탄성, 탄소성, 완전소성에서 평균 접촉압력과 유동응력 사이의 관계를 소성구속인자 ψ 를 통하여 식 (1)과 같이 결정할 수 있고 압입변형률은 압입깊이 방향의 변위를 미분하여 평가한 변형률 개념으로부터 식 (2)와 같이 정의할 수 있다[1].

$$\sigma = \frac{P_m}{\psi} \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{a}{\sqrt{1-(a/R)^2}} \frac{a}{R} \quad (2)$$

ψ 는 평균 접촉압력과 유동응력의 비인 소성구속인자이고 R은 압입자 반경, a는 접촉반경, ϵ 는 상수이다. 연속 압입시험 시, 구형 압입자/시편 간의 접촉 깊이 및 접촉반경은 Fig. 1에 나타나 있는 압입하중 제거곡선을 분석하여 평가한다. 이는 최대 압입깊이에서 하중제거에 따른 탄성회복을 묘

사한 것이며, 이에 추가적으로 탄성굽힘 및 pile-up 현상에 의한 오차가 보정되어야 실제 접촉 깊이가 결정된다. 우선 하중제거 곡선을 역함수로 나타내고, 이를 최대 압입깊이에서 미분하여 구한 기울기 값으로써 재료의 stiffness인 S를 평가한다.

따라서 탄성 굽힘을 반영한 압입자와 시편의 접촉깊이 h_c^* 는 elastic flat punch 이론을 이용하여 앞서 결정된 기울기를 따르는 직선을 압입하중 L이 0인 상태까지 외삽하여 평가하게 된다[2].

그러나 일반적으로 회복과정은 압입자 하부에서도 동반되며, 이에 따라 압입자의 기하학적 형상이 주요한 영향을 끼치게 되고, 이를 ω 라는 압입자 형태상수로 보정한 식 (3)이 제시되었다[3].

$$h_c^* = h_{\max} - \omega \frac{L}{S} \quad (3)$$

구형압입자의 경우 ω 는 0.75가 된다. 따라서 평가된 접촉깊이와 압입자의 기하학적 형상을 고려하면 압입자/시편의 접촉반경 a_c 를 평가할 수 있다.

그러나, 실제 재료와 압입자가 접촉하는 깊이는 압입자 주변의 탄성, 소성 변형양상에 의해서 측정된 압입깊이와 달라지므로 이를 고려하여야 한다. 즉, 압입자 주변의 재료가 탄성적으로 굽혀지는 현상에 의한 접촉깊이의 변화 및 압입자 주변에 소성변형이 진행됨에 따라 Fig. 2와 같이 변형된 재료가 압입자 주변에 쌓이는 pile-up 또는 압입자 하부로 밀려들어가는 sink-in현상이 발생한다.

따라서, 이를 고려할 때, 수정된 접촉반경을 아래의 식 (4)와 같이 구해야 더욱 정확한 시험결과치를 얻을 수 있다.

$$a^2 = \frac{5}{2} \frac{2-n}{4+n} a_c^2 = \frac{5}{2} \frac{2-n}{4+n} (2Rh_c^* - h_c^{*2}) \quad (4)$$

이 때, n은 가공경화지수, a는 실제 접촉반경, a_c 는 하중제거 곡선의 분석을 통하여 구해진 h_c^* 로부터 평가된 접촉반경을 의미한다. 최종적으로 평가된 실제 접촉반경을 식 (1), (2)에 대입하여 각각의 하중제거 곡선에서의 유동응력 및 압입 변형률을 유도할 수 있다. 그리고 이를 Hollomon 식에 따라 적합화하면 Fig. 3과 같이 유동곡선을 유도하고, 이를 통하여 재료의 항복강도와 인장강도 및 가공경화지수를 최종적으로 구할 수 있게 된다.

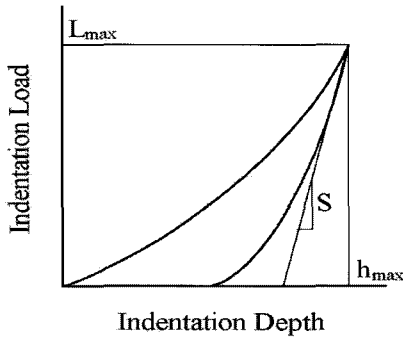


Fig. 1 Schematic illustration showing the parameters for analyzing indentation load-depth curve

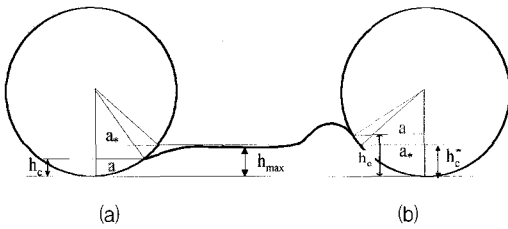


Fig. 2 The schematic diagram of indentation (a) sink-in and (b) pile-up phenomena

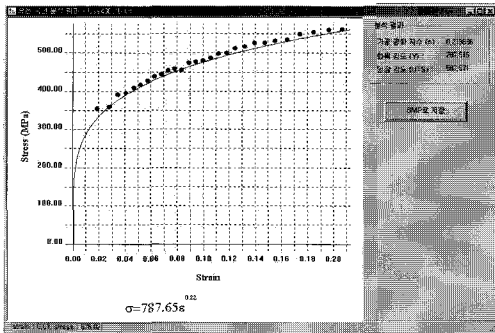


Fig. 3 An example of flow curve derivation from indentation load-depth curve

2.2. 용접구조물의 인장물성 평가를 위한 연속압입 시험법의 적용

건설 중인 화력발전소 배관 용접부에 대하여 연속압입시험을 수행하였다. 사용된 압입시험기는 프론틱사의 AIS 2000을 이용하여 측정하였으며, 시험조건은 반경 500 μm 의 압입자를 최대압입깊이 300 μm , 압입속도 0.3 mm/min, 다중압입회수 15 회로 실시하였다. Fig. 4는 주증기관의 용접부에 압

입시험을 하는 사진이며 Fig. 5는 시험결과 용접부에 대한 모재/열영향부/용착금속의 압입하중-변위 곡선과 인장곡선 그래프이다. 압입시험을 수행한 결과 기존의 용접부 인장시험에서는 한 개의 시험데이터를 얻었으나 압입시험으로는 용접 각 부위별 물성을 평가할 수 있는 잇점이 있었다. 또한 열영향부의 경우 2 mm 간격의 시험위치에 따라 인장물성의 변화를 확인할 수 있었으며, Table 1은 시험설비의 사양과 운전조건이며, Table 2는 측정결과이다.

Table 1 Specification of main steam pipe

Material	Pipe size(mm)		Operating Condition	
	Out dia	Thickness	Pressure	Temperature
A335-P91	406	53	3,621 Psi	541 $^{\circ}\text{C}$

Table 2 Tensile properties obtained using continuous indentation test

Testing position	Yield strength(MPa)	Tensile strength(MPa)
Weld	1,128	1,501
HAZ	826	1,417
Base	598	810



Fig. 4 View of continuous indentation test to main steam pipe

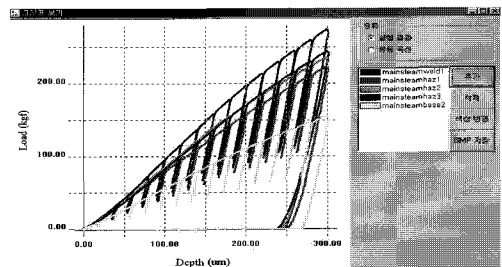


Fig. 5 Comparison of indentation load-depth curves at weldment

2.3. 연속압입법에 의한 잔류응력측정 원리

압입시험시 잔류응력의 영향에 따라 압입하중-변위곡선의 변화가 발생하는 현상을 이용하여 잔류응력을 정량적으로 평가하는 기법이 개발되었다[4,5]. Fig. 6과 같이 잔류응력의 크기 및 방향에 따라, 동일 깊이까지 압입하기 위해 요구되는 압입하중은 변화하게 된다. 따라서 잔류응력이 인가되어 있는 상태와 인가되어 있지 않은 상태에의 하중 차이(식 (5))와 같이 측정하고, 잔류응력에 의해 발생한 하중차이를 그 때의 접촉 면적으로 나누어 식 (6)과 같이 잔류응력을 결정한다. 이 때 L_T 는 인장잔류응력시 하중, L_0 는 잔류응력 제거시 하중이며, C 는 잔류응력 상태에 따른 상수이다.

$$L_0 = L_T + L_{res} \quad (5)$$

$$\sigma_{res} = C \frac{L_{res}}{A_c^0} \quad (6)$$

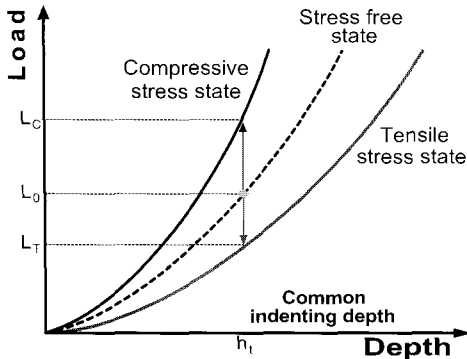


Fig. 6 Variation of indentation load-depth curve with residual stress[6]

2.4. 재열증기배관 용접잔류응력 측정

압입시험법에 의한 잔류응력 측정은 표준석탄화력 고온재열증기 배관(hot reheat steam pipe) 용접부에 대하여 실시하였다.

고온재열증기배관은 과열증기가 고압터빈을 회전시킨 후 습증기로 변환되는데 이것을 보일러에서 재 가열하여 저압터빈을 운전하게 함으로 터빈보호와 효율을 향상시키는 역할을 하며, 설비 사양과 운전조건은 Table 3에 나타내었다.

압입시험에 의한 잔류응력측정의 정확도를 검증하기 위한 방법으로 톱 절단 시험법(saw cutting test)

을 병행하였다. 톱 절단 시험법은 다채널 스트레인 게이지를 Fig. 7과 같이 부착하여, 쇄톱으로 용접선 수직방향으로 절단하는 순간 발생하는 스트레인을 측정하고, 이로부터 각 부위에서 용접잔류응력을 측정하였다. 압입시험에 의한 잔류응력측정은 용접선 수직방향으로 5 mm 간격으로 측정하였다. 잔류응력 측정시험결과 압입시험법에 의한 잔류응력측정값은 톱 절단 시험법(saw cutting test)에 의한 결과와는 약 20 MPa 정도의 오차로서 대체로 만족할 만한 것으로 평가되었다. Fig. 8 및 Fig. 9와 같은 현장 용접부 잔류응력 측정시험 결과 잔류응력의 분포는 용착 금속부에서는 최대의 인장잔류응력이 측정되었고, 용접부 양단에서는 압축잔류응력이 측정되었다. Fig. 10에서 나타낸 바와 같이 용접부 후열처리 전에 잔류응력은 최대크기는 250 MPa 정도의 인장잔류응력이 측정되었고 용접부 후열처리로 인하여 최대 200 MPa의 잔류응력이 이완된 것을 확인할 수 있었다.

Table 3 Specification of hot reheat pipe

Material	Pipe size (mm)		Operating Condition	
	Out dia	Thickness	Pressure	Temperature
A335-P91	722	21	579 Psi	541℃

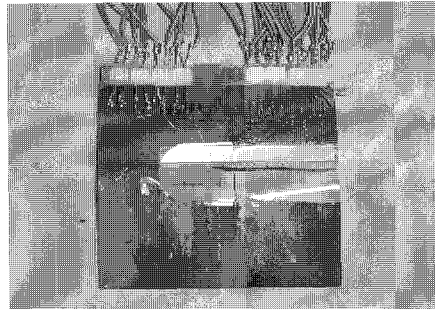


Fig. 7 Saw-cutting tested specimens



Fig. 8 Indentation testing for welding residual stress of pipeline

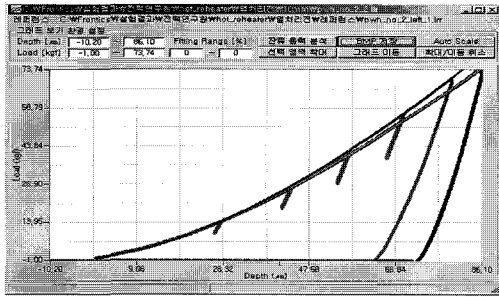


Fig. 9 Indentation load-depth curve variation with residual stress

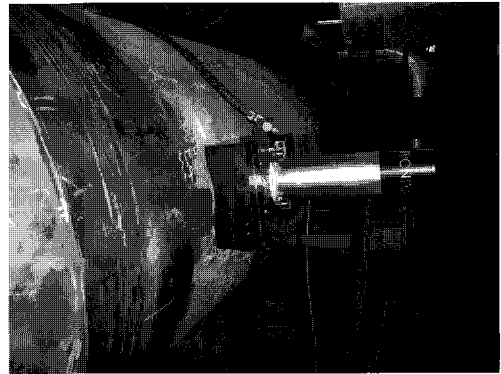


Fig. 11 Indentation testing for tensile properties of reheated pipeline used for 25 years

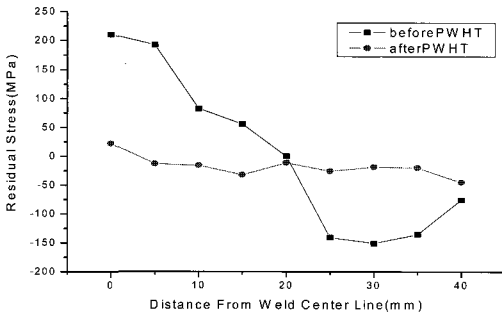


Fig. 10 Residual stress values obtained by using indentation technique before and after PWHT

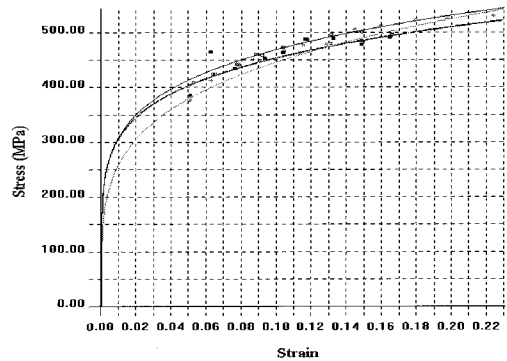


Fig. 12 Tensile stress-strain curves derived by indentation technique in reheated pipeline.

2.5. 연속압입시험법에 의한 고온배관 경년 열화 측정

25년 이상의 장기간 사용된 재열증기관에 대해 연속압입시험으로 Fig. 11과 같이 기계인장물성을 측정하고 그 결과를 이용하여 배관 재료의 열화도를 평가하고자하였다. 재열증기관의 사양은 외경 970 mm, 두께 60 mm 로서 재질은 10CrMo910이다. 본 재질은 DIN 17175에서 항복강도는 280 MPa 인장강도는 450 ~ 600 MPa 이상일 것으로 규정하고 있다. 다중압입시험으로 Fig. 12와 같은 응력-변형을 곡선으로 얻어 인장강도, 항복강도, 가공경화지수와 같은 기계인장물성을 측정하였다. Table 4는 시험대상 설비의 열화 정도를 분석하기 위하여, 연속압입 시험을 통하여 각각 얻어진 사용재의 인장물성과 사용하지 않은 신재의 물성을 비교한 결과이다. 연속압입시험을 이용하여 열화도를 평가할 경우 가공경화지수와 항복비가 중요한 인자로 사용되는데, 가공경화지수가 작은 경우에는 항복이후 재료의 소성변형 정도가 작아지므로 균열발생 시 균열전파속도가 상당히 빠르게 진행되어 취성과파괴의 위험이

Table 4 Tensile properties of reheated pipe

Test part	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Work hardening index(n)	Yield ratio (%)
New material	282	496	0.22	57
Horizontal piping A part	319.1	487.4	0.173	65
	356.1	492.2	0.140	72
Average	337.6	489.8	0.157	69
Change/new material(%)	19.7	-1.2	-28.0	21
Horizontal piping B	307.6	464.2	0.169	66
	306.7	483.6	0.170	63
	309.5	483.4	0.180	64
Average	307.9	477.1	0.173	65
Change/new material(%)	9.2	-3.8	-20.5	13

높아지게 된다. 항복비는 항복강도와 인장강도의 비를 %로 표현한 것으로, 항복비가 클수록 항복직 후 파단에 바로 이르게 되어 재료의 취성과파괴 위험이 높아진다. Table 4에 나타난 시험결과를 분석하면 다음과 같은 양상이 나타남을 확인할 수 있다. 평가대상 소재 DIN 17175인 10CrMo910의 최소강도 요구치인 항복강도 280 MPa 이상, 인장강도 450~600 MPa를 만족하고 있어 강도만으로는 열화 정도를 평가하기는 곤란하였으나 모든 시험부위에서 큰 폭의 가공경화지수 감소와 항복비 증가를 확인할 수 있었다. 이런 현상은 항복강도의 증가가 인장강도의 증가 또는 감소양상에 비해 심화되어 이러한 경화양상이 발생하였고, 가공경화지수 감소율과 항복비의 증가율이 확인된 점으로 비추어 보아 이 측정 부위는 항복이후 가공경화량이 현저히 감소하여 취성과파괴가 발생할 확률이 높은 것으로 분석되었다. 고온설비의 재질 경년변화를 보다 정확하게 평가하기 위해서는 각 재료별로 크리프시험과 파괴인성특성시험을 실시하여 압입시험에 의한 기계물성 데이터 구축이 필요하다.

3. 결 론

본 연구에서는 화력발전설비에 신뢰도 확보를 위한 연속압입시험법의 적용사례를 소개하였다. 그동안 현장설비의 기계적 물성과 특성들은 파괴적으로 시험이 이루어 졌으나 연속압입시험에 의하여 비파괴적으로 평가가 가능하게 됨으로서 발전설비 신뢰도를 크게 확보 할 수 있게 되었다.

연속압입시험기의 정확도는 표준인장시험과 결과와 비교하여 3% 이내의 차이가 있었으며, 잔류응력 측정 결과도 튜 절단법과 비교하여 20 MPa 이내로서 비교적 정확한 값을 얻을 수 있었다. 고온, 고압 발전설비의 정확한 상태진단과 수명평가를 위해서는 설비의 사용초기부터 기계물성을 측정하여 관리한다면 보다 정확한 수명평가가 가능하게 될 것으로 예상된다.

참고문헌

- [1] 안정훈, 최 열, 권동일, "압입하중-변위곡선의 해석을 통한 재료의 소성 유동특성 평가", 대한금속재료학회지, 38권 12호, pp. 1606-1611, (2000)
- [2] W. C. Oliver and G. M. Pharr, "An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement sensing Indentation Experiments," *Journal of Materials Research*, Vol. 7, No. 6, pp. 1564-1583, (1992)
- [3] A. L. Norbury and T. J. Samuel, "The Recovery and Sinking-in or Piling-up of Material in the Brinell Test, and the Effects of These Factors on the Correlation of the Brinell with Certain Other Hardness Tests," *The Journal of the Iron and Steel Institute*, Vol. 117, pp. 673-687, (1928)
- [4] Yeol Choi, Joo Seung Park and Dongil Kwon, "Advanced Indentation Techniques for Evaluating Tensile Properties and Residual Stresses," *Journal of Material Testing Research Association of Japan*, Vol. 48, pp. 208-215, (2003)
- [5] Y.-H. Lee and D. Kwon, "Residual Stresses in DLC/Si and Au/Si Systems: Application of a Stress-Relaxation Model to the Nano-indentation Technique," *Journal of Materials Research*, Vol. 17, No. 4, pp. 901-906, (2002)
- [6] T. Y. Tsui, W. C. Oliver and G. M. Pharr, "Influences of stress on the measurement of mechanical properties using nanoindentation: Part I. Experimental studies in an aluminum alloy," *Journal of Materials Research*, Vol. 11, No. 3, pp. 752-759, (1996)