연속압입시험에 의한 발전소용 배관의 용접잔류응력 평가에 관한 연구

A Study on the Evaluation of Welding Residual Stress of Pipe used in Power Plant by Indentation Method

박상기 · 최원두 · 길두송 · 고준빈 · 이규천 · 이영호

S. K. Park, W. D. Choi, D. S. Gil, J. B. Ko, K. C. Lee and Y. H. Lee

Key Words : Residual stress(잔류응력), Indentation method(연속압입시험법), Saw cutting method (톱절단법), Strain gage(스트레인게이지)

Abstract: In this study, to verify the reliability of the indentation for measuring welding residual stresses to get in method we compared the results of the method with those measured by the saw cutting method. Also for the same purpose we used a 4 point bending test and confirmed the reliability of indentation method. The specimens used in this experiment are made with the same conditions for hot reheater pipes and cold reheater pipes used in the electric power plant.

Therefore we could know that the results of the methods showed the reliability of the method to obtain welding residual stresses.

기호설명

h_c : 접촉깊이
L_T : 압입하중
h_t : 최대압입깊이
h_s : 무응력 상태의 깊이
h_c^c : 압축응력 상태의 접촉깊이
h_c^T : 인장응력 상태의 접촉깊이
L_o : 무응력 상태의 압입하중
L_c : 압축응력 상태의 압입하중
L_{res} : 잔류응력 상태의 압입하중
PWHT : 후열처리

1. 서 론

용접작업은 급격한 가열과 냉각이 국부적으로 이루어지기 때문에 잔류응력이 필연적으로 발생하게 된다. 용접에 의한 잔류응력은 용접변형, 저온균열, 취성파괴, 좌굴강도 등에 영향을 미치는 것으로 알려져 있기 때문에, 재료의 기계적 성질이나 구조물의 역학적 거동에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 잔류응력의 분포를 정량적으로 평가하는 방법을 확립하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있다[1,2]. 최근 발전설비 용접사고 유형은 용접결함으로 인한 손상은 거의 발생하지 않고 있으나 용접열 영향부와 용접 재질의 물성 부적정에 의한 것이 대부분이다[3]. 각종 배관 용접부의 손상 조사 결과 용접방법과 부적절한 후 열처리가 주요 원인인 것으로 밝혀지고 있어 용접 시공과정에서 이러한 부적절한 요소를 발견하여 사전 조치하는 것이 용접사고를 방지할 수 있다[4,5].

또한 발전설비의 운전 특성상 높은 신뢰도가 요구되는 배관 용접부에서 특히 잔류응력이 안고 있는 문제점은 매우 크기 때문에 그것의 분포와 크기에 대한 명확한 정보를 파악해야 한다.

잔류응력의 측정 방법에는 이론적인 해석 방법과 실험적 계측방법으로 나뉘며, 실험적인 방법은 다시 파괴적인 방법과 비파괴적인 방법으로 분류될 수 있다[6]. 실험적인 방법은 측정값의 신뢰성뿐만 아니라 신속성 및 편리성 또한 매우 중요한 요

접수일 : 2004년 2월 3일
박상기(책임저자), 길두송 : 전력연구원
E-mail : skpark@kepri.re.kr TEL : 042)865-5139
최원두, 고준빈 : 한밭대학교
이규천 : 두원공과대학 자동차과
이영호 : 충남대학교 기계공학과

소이나, 기존의 방법은 이러한 조건을 만족시켜 주지 못하고 있다. 연속압입시험법은 실험의 간편성 때문에 현장에서 물성을 측정하는데 사용되어 왔고, 이러한 장점으로 잔류응력을 측정해보고자 하는 연구도 시도되고 있다. 따라서 본 연구에서는 화력발전소에 사용되는 핫 리히터(Hot reheater), 콜드 리히터(Cold reheater)의 배관 용접부를 Frontics사가 개발한 AIS를 이용한 연속압입시험법(Indentation Method)과 톱절단(Saw Cutting)법을 사용하여 열처리 전, 후의 잔류응력을 측정한 후 그 결과를 비교평가 하였다. 그리고 4점 굽힘시험을 통하여 압입시험의 신뢰성을 확인하였다.

2. 연속압입시험법에 의한 잔류응력 측정

응력이 존재하는 시편에 압입을 행할 경우 Fig. 1과 같은 현상을 나타내게 된다. 즉 경도값에는 차이가 없지만 재료가 반응하는 현상에는 차이를 보여 연속적으로 하중과 변위를 측정하게 되면 그 값에 차이를 보이게 된다. 즉 Fig. 2에서 재료에 인장응력이 존재하는 경우에는 무응력 상태와 비교할 때 완만한 기울기를 갖고, 압축응력에서는 좀 더 큰 기울기를 갖게 된다. 이러한 곡선의 변화양상과 압입자 하부의 응력상태를 비교하면 재료에 존재하는 응력을 정량적으로 판단할 수 있다.

Fig. 1의 (a)에서 인장 잔류응력을 가진 시편에 L_T의 하중을 인가하여 최대 압입깊이 h_t를 형성시킨 뒤, 강체의 프레임으로 압입자와 시편을 구속하여 잔류응력 제거시에도 최대 압입깊이는 h_t로 유지되도록 하였다. 이때 인장 잔류응력이 완화되면 압입자를 시편표면으로 밀어내려는 힘이 작용하게 된다. 그러나 강체 프레임의 구속에 의해 최대 압입깊이는 유지되고, 시편이 압입자를 밀어내려 했던 힘은 압입하중의 증가로 발생한다. 즉, 응력의 완화과정에 의해서 잔류응력 유도 수직하중 만큼 압입하중이 증가하고, 접촉깊이도 h_c^T에서 h_c로 증가한다. 인장 잔류응력시 압입하중과 최대 압입깊이인 (L_T, h_t)는 최대 압입깊이를 유지하면서 잔류응력을 제거한 상태인 (L_0, h_t)와 동가인 상태로 볼 수 있으며, 두 상태에 대한 압입하중 사이에는 L_0 $L_T + L_{res}$의 관계가 성립된다. 반면 (c)의 경우와 같이 압축 잔류응력 상태에서 최대 압입깊이를 일정하게 유지하면서 잔류응력을 제거하면, 접촉깊이의 감소와 함께 잔류응력 유도 수직하중만큼 압입하중이 감소한다[7,8].

3. 실 험

3.1 시편

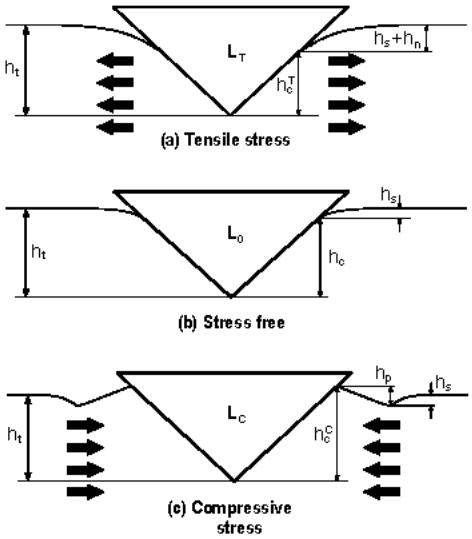

Fig. 1 Modeling of surface changed by indentation

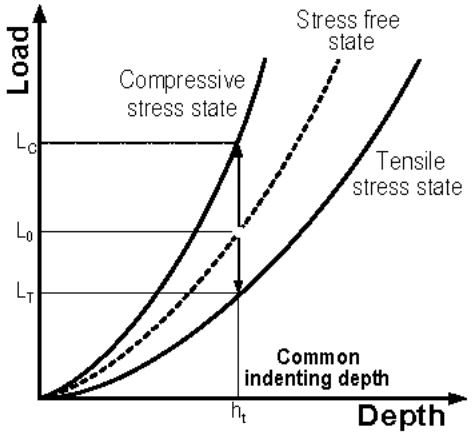

Fig. 2 Variation of loading slope

실험에 사용된 시편은 사용 환경에 따라서 핫 리히터 배관과 콜드 리히터로 나뉘고, 재질은 고온 배관용 페라이트(Ferrite)계 합금강관으로서 기계적 성질 및 화학 조성은 각각 Table 1, Table 2에 나타나있다. 이 재료들은 표준 석탄화력발전소의 고온, 고압배관 재료로 많이 사용된다.

시편의 용접조건은 발전소 건설시 용접작업에 사용되는 용접 절차 사양서(Welding process specification)를 적용하였다. 용접방법은 GTAW (Gas tungsten arc welding)을 일부 사용한 후 SMAW (Sub merged arc welding)로 나머지 부분을 채우는 순서로 진행하였다.

Table 1 Mechanical properties (min : minimum)

Material	Yield strength (Mpa)	Tensile strength (Mpa)	Elongation (%)
A335 P91(hot)	min. 415	min. 585	min. 13
A335 P12(cold)	min. 220	min. 415	min. 14

Table 2 Chemical composition

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	N
A335 P91	0.12	0.50	0.60	0.02	0.01	0.40	9.50	1.05	0.25	0.07
A335 P12	0.15	1.15	0.30	0.025	0.025		1.25	0.64		

Table 3 Welding condition

Specimen	Electrode		Preheating temp(℃)
	Type	Size	
Hot reheat Pipe (φ722×T21)	E9016	φ2.4㎜	204℃
Cold reheat Pipe (φ719×T17.9)	E8016	φ2.4㎜	152℃

Table 4 Condition of PWHT (min:분)

Pipe	Temp. (℃)	Heat rate(℃/h)	Cooling rate(℃/h)	Heating time(min)
Hot reheat	760	140	180	90
Cold reheat	750	140	180	60

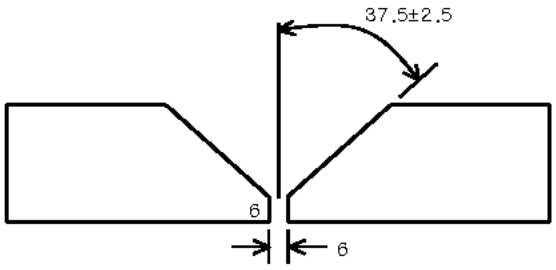

Fig. 3 Schematic shape of welding joint

각각의 시편에 따른 용접조건을 Table 3에 나타냈다. 또한 사용된 시편이 후판이기 때문에 Fig. 3과 같이 그루브 가공 후 용접을 실시하였다. 후 열처리에 의한 잔류응력의 이완 효과를 측정하기 위하여 Table 4와 같이 후 열처리를 실시하였다.

3.2 잔류응력 측정

Fig. 4는 용접부 절단 후 응력이완 상태를 보기 위하여 스트레인 게이지를 설치한 그림이며, 잔류응력 측정을 위하여 용접선과 수직방향으로 5 mm 간격으로 압입시험을 실행하였다. 압입조건은 최대하중 50 kgf, 압입속도 0.5 mm/min, 하중유지시간 500 ms이다. 잔류응력을 구하기 위하여 응력이 완전히 이완된 상태의 기준값이 필요하기 때문에 잔류응력이 존재하는 상태에서 압입시험을 실시한 후 톱절단법의 절단방법과 동일하게 절단하여 잔류응력이 이완되었다고 생각되는 절단면 부근의 3 mm지점에 같은 방법으로 압입시험을 하였다. 이러한 두 조건에서 얻어진 하중인가곡선의 비교를 통하여 잔류응력이 계산된다[9~11].

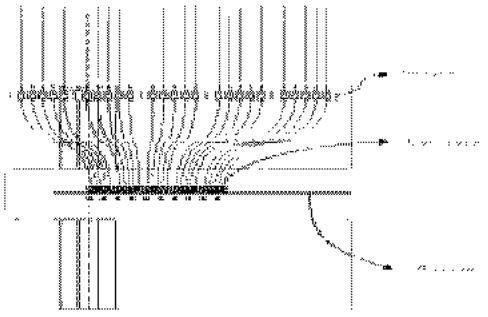

Fig. 4 A schematic of the Indentation Method to measure residual stress using specimen

이렇게 얻은 시험결과는 톱절단법을 이용하여 얻은 잔류응력의 결과와 비교하였다. 기계적인 방법 중 대표적인 톱절단법은 잔류응력을 이완시키면서 발생하는 변형률을 스트레인 게이지를 이용하여 측정한 후 탄성영역에서 응력 변형률의 선형

적인 관계를 이용하여 잔류응력으로 환산하는 것이다. 스트레인게이지를 용접부 중앙에서 일정한 간격으로 부착한 후 절단 톱을 이용하여 응력을 이완시켜 변형량을 측정하였다. 절단시 열에 의하여 미세조직의 변화와 응력이 완화되기 때문에 세심한 주의가 요구된다. 사용된 스트레인게이지는 게이지율이 2.11+1%인 KFG 120 D19 11N10C2 (120+0.8Ω) 이다.

3.3 4점 굽힘시험을 통한 신뢰성 검증

4점 굽힘시험은 인위적으로 응력을 가하여 내부응력을 알고 있는 상태에서 압입시험을 실시한 후 두 가지의 응력을 비교함으로써 압입시험에 의해 얻어진 잔류응력의 정확도를 평가하기 위함이다.

시편의 안쪽 2점사이에서는 길이방향으로 응력분포가 동일하기 때문에 여러 번 압입시험이 가능하고, 그러므로 실험결과의 재현성을 확인할 수 있다. Fig. 5의 경우와 같이 시편자체에 구획선을 그리고 상, 하의 최대 인장, 압축응력이 작용하는 부위에 스트레인게이지를 부착하고, 이점의 스트레인에 의하여 응력을 구하여 시편 전체의 응력을 계산할 수 있다. Fig. 6은 위의 시험 절차에 따라서 압입시험을 통한 응력측정을 하는 모습이다.

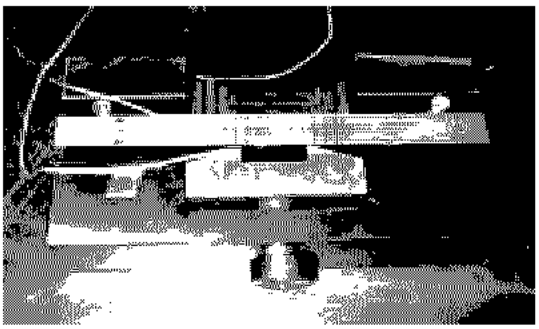

Fig. 5 Photo of the jig and specimen for 4 point bending test

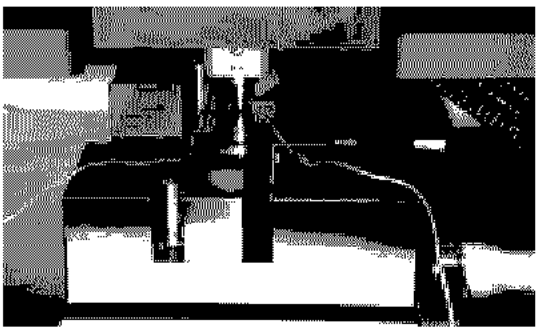

Fig. 6 Photo of the Indentation test to compare with calculated value

4. 실험결과 및 고찰

4.1 4점 굽힘시험의 결과

시편에 임의의 응력을 가한 후 인장과 압축이 작용하는 두 지점의 스트레인게이지로부터 얻은 변형량으로 빔에 가해진 응력을 계산한 이후, 응력이 가해진 상태의 빔을 연속압입시험기를 사용하여 얻은 측정값을 비교한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 빔의 굽힘 이론에 의한 계산값과 압입시험에 의한 측정값이 매우 유사한 것으로 보아 압입시험에 의해 얻은 잔류응력값이 신뢰할 수 있는 수준임을 확인할 수 있었다.

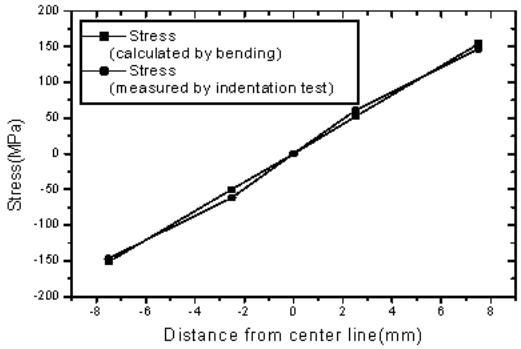

Fig. 7 Comparison of calculated stresses with measured stresses

4.2 잔류응력의 측정 결과

Fig. 8은 용접 후열처리 전, 후의 잔류응력 분포를 톱절단법으로 측정한 결과이다. 열처리 전의 잔류응력 분포는 용접부에서 나타나는 전형적인 형태를 가지고 있다. 최대인장잔류응력은 대략 250 Mpa로 측정되었고, 후판을 톱으로 절단하기 때문에 게이지와의 거리를 일정하게 유지하지 못하여 동일한 잔류응력의 이완이 아닐 수 있다. 열처리 이후의 잔류응력은 열처리 전과 비교하여 매우 낮아지기 때문에 열처리의 효과는 매우 크다고 볼 수 있다. 콜드 리히터 배관의 용접부에 대하여 후열처리 전과 후의 잔류응력을 연속압입시험을 통하여 측정한 결과 Fig. 9와 같이 나타났다. Fig. 8과 Fig. 9를 비교하여 볼 때, 금속조직의 불균일로 인하여 두 그래프가 정확히 일치하지는 않지만 대체로 비슷한 경향을 나타내고 있는 것을 알 수 있으며, 용접부 및 열영향부에 압축응력이 작용하고 있기 때문에 잔류응력 값이 높게 나타나고 모재부에 이르기까지 점차로 감소함을 알 수 있다.

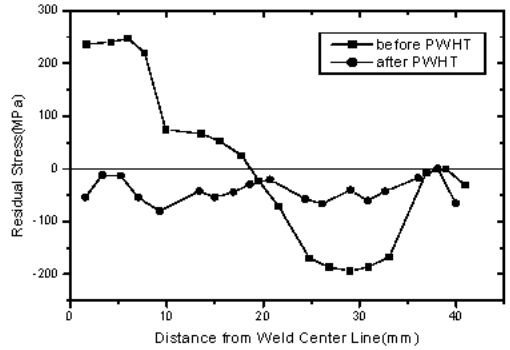

Fig. 8 Distribution of residual stress measured by saw cutting method on hot reheater pipe before and after PWHT

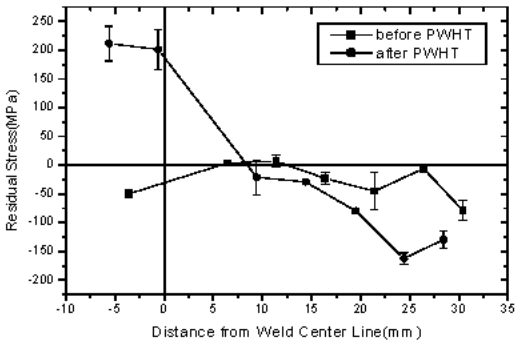

Fig. 9 Distribution of residual stress measured by indentation method on cold reheater pipe before and after PWHT

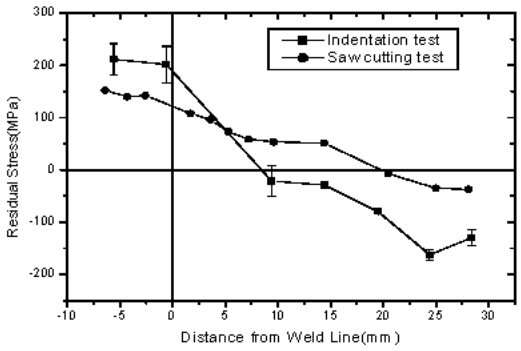

Fig. 10 Comparison of residual stress between saw cutting and indentation method on cold reheater pipe before PWHT

또한, 후열처리 후에는 잔류응력이 거의 존재하지 않기 때문에 용접선에서 멀어짐에 따라 열처리 전,후의 값이 거의 일치하는 것으로 보아 모재부분은 용접부나 열영향부에 비해 열처리의 영향을 적게 받고 있음을 알 수 있다[12].

Fig. 10, Fig. 11은 톱절단법과 연속압입시험법을 이용하여 얻은 결과를 비교한 그래프이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 결과값의 절대값은 다소 차이를 보이고 있지만 존재하는 잔류응력의 정성적인 경향은 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

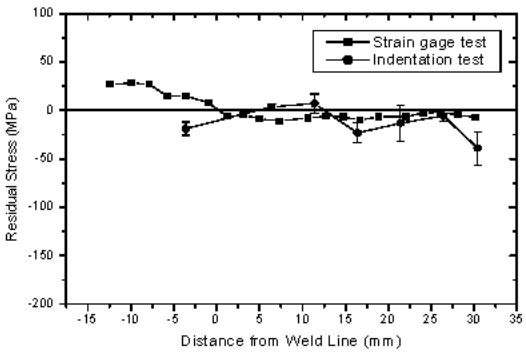

Fig. 11 Comparison of residual stress between saw cutting and indentation method on cold reheat pipe after PWHT

5. 결 론

본 연구에서는 화력발전소에 사용되는 핫 리히터, 콜드 리히터의 배관 용접부를 연속압입시험법(Indentation Method)과 톱절단(Saw Cutting)법을 사용하여 열처리 전, 후의 잔류응력을 측정한 후 그 결과를 비교, 평가하였다. 그리고 압입시험의 검증을 위하여 4점 굽힘시험을 실행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 발전설비 주요배관 용접부의 잔류응력을 연속압입시험법과 톱절단법으로 측정하여 비교한 결과 정성적으로 매우 유사한 경향으로 나타나는 것을 알 수 있었다.

2. 4점 굽힘시험을 실시하여 연속압입시험에 의한 잔류응력의 측정결과가 신뢰할 수 있는 수준임을 검증할 수 있었다.

3. 열처리 전, 후의 잔류응력을 측정하여 비교한 결과 최대 잔류응력은 항복강도와 비슷한 수준이었고, 후열처리의 효과를 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 2002학년도 두원공과대학 학술연구비 지원에 의해 수행되었으며, 관계자 여러분께 깊은

감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 안정훈, 최열, 권동일, 2000, “압입하중 변위곡선의 해석을 통한 재료의 소성유동특성 평가,” 대한금속재료학회지, Vol. 38, No. 12, pp. 1606~1611.
2. 변택상, 김진원, 홍준화, 1997, "압입시험을 이용한 원자로압력용기강의 파괴인성 예측 모델," 제 11회 재료강도 심포지엄 논문집, 한국과학기술회관, 서울, pp. 467~473.
3. RD. Stout, 1987, "Weldablilty of Steel", 4th edition, Welding research council, 104 4. Yamamoto, T. and Kayano, H., 1996 "Nuclear Mater", pp. 219~227.
5. API RP 579, 2000, "Recommended Practice for Fitness for Service," 1st Edition, American Petroleum Institute.
6. 장 재일, 이 정석, 주 장복, 권 동일, 최 열, 2001, "FAD를 이용한 용접구조물의 사용적합성 평가와 재료공학적 개선 방안," 대한용접학회지, 제 19권 5호, pp. 474~480.
7. J. Mather, 1936, "Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformations Around Drilled Method", ASME, pp. 249~254.
8. Delameter, W. R. and Mauraros, T. C., 1985, "Measurement of Residual Streses by hole Driling Method", Sandia Laoratories Report, pp. 77~83.
9. F. M. Haggag, R. K. Nanstad, and R. Swain, 1990, "Use of Automated Ball Indentation Testing to Measure Flow Propertied Fracture Toughness in Metallic Materials," ASTM STP 1092, pp. 188~208.
10. 안정훈, 2001, "Derivation of plastic stress strain relationship from ball indentation," RES., Vol. 16, pp. 3170~3178.
11. Oliver, W. C. and Pharr, G. M., 1992, "An Improved Technique for Determination Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments", J. Mater. Res. pp. 1564~1583.
12. 이상국, 길두송, 손석만, 이욱륜, 이선기, 이준신, 2003, “발전소용 배관의 용접 잔류응력 평가를 위한 톱절단법과 연속압입시험법에 관한 연구,” 2003 한국원자력학회 추계학술발표회 논문집, pp. 210~213.