

연속압입시험법에 의한 발전용 배관 용접부의 잔류응력 평가

A Study on the Evaluation of Welding Residual Stress of Pipeline in Power Plants by Indentation Methods

이 상국*, 길 두송**

* 한전 전력연구원

** 한전 전력연구원

ABSTRACT It is widely recognized that the residual stress of weldment affects steel construction and causes fracture initiation of welded structures. It is necessary to know since the power plants adopt a variety of welding processes distribution and magnitude of residual stresses. Therefore the purpose of present study is to investigate the validity of the indentation method to measure residual stresses of steel plates by residual stresses measured from the specimens of hot reheater pipes, cold reheater pipes and feed water lines used in power plants.

1. 서 론

현재 금속기술이 매우 발달했음에도 불구하고 강 용접 구조물의 용접은 건전성을 확보하기 위해서 가장 주의를 기울여야 하는 대상이다. 국내의 제강기술이 상당한 수준에 도달하였기 때문에 모재의 기계적 성질 보다 용접부의 기계적 성질을 효율적으로 측정하고, 평가할 수 있어야 한다. 특히 발전소 용접부 품질은 건설 중 용접시공 정도에 따라 결정되게 되므로 양호한 용접품질을 확보하기 위해서는 용접으로 인한 결함을 방지하고, 용접재질의 적절한 물성관리가 이루어져야 한다.

최근 발전설비 용접사고 유형은 용접결함으로 인한 손상은 거의 발생되지 않고 있으나 용접 열영향부와 용접 재질의 물성이 부적절하여 발생하는 것이 대부분이다¹⁾. 각종 배관 용접부의 손상 조사결과 용접방법과 부적절한 후열처리가 주요 원인인 것으로 밝혀지고 있어 용접 시공과정에서 이러한 부적절한 요소를 발견하여 사전 조치하는 것이 용접사고를 방지할 수 있는 최선책이라 할 수 있다²⁾.

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

따라서 본 연구에서는 발전소에 사용되는 hot reheater, cold Reheater, feed Water의 배관 용

접부와 동일한 시편을 제작하여 열처리 전, 후의 잔류응력 분포의 변화를 비교하고자 하였으며, 연속압입시험법(indentation method)을 이용하여 잔류응력을 측정하고, 이들 방법을 일반배관 및 후속배관에 적용하는데 있어서의 적절성을 판단하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 시험편

본 실험에 사용된 시험편은 발전소의 배관용 재료로서 Table 1에 운전조건에 따른 배관의 명칭과 크기를 나타내었다. 이 재료들은 발전소의 고온, 고압배관 재료로 많이 사용되고 있으며, 사용 위치에 따라 hot reheater pipe, cold reheater pipe, feed water pipe로 나눌 수 있다. Feed water pipe의 재질에 따른 기계적 성질 및 화학 조성은 각각 Table 2와 Table 3에 나타내었다. 시편의 두께에 따라 hot reheat와 cold reheat pipe은 일반 배관으로, 비교적 후판에 속하는 feed water pipe은 후속 배관으로 구분하였다.

Table 1 Types of specimen and their operating conditions

Type of pipes	Material	Dimension (mm)	Operating Conditions	
			Pressure (kg/cm ²)	Temperature (°C)
Hot reheat pipe	A335-P91	∅722 × T21	40.8	541
Cold reheat pipe	A335-P12	∅710.2 × T17.9	40.7	292
Feed water pipe	A106-C	∅400 × T63	288.6	286

Table 2 Mechanical properties

Material	Yield strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)	Elastic modulus 70°F(×10 ⁶)
A335-P91	min 415	min 585	min 13	30.9
A335-P12	min 220	min 415	min 14	29.7
A106-C	min 275	min 485	min 16.5	29.3

Table 3 Chemical compositions

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		
A106-C	0.35	0.10	1.06	0.035		0.40	0.40	0.15	0.08	

2.2 용접조건

시편의 용접조건은 발전소 건설시 용접작업에 사용되는 용접절차 사양서를 그대로 적용하였다. 용접방법은 GTAW(gas tungsten arc welding)이고, 각각의 시편에 따른 용접조건을 Table 4에 나타냈다. 또한 사용된 시편이 후판이기 때문에 Fig. 1과 같이 그루브 가공 후 용접을 실시하였다. 후 열처리에 의한 잔류응력의 이완 효과를 측정하기 위하여 Table 5와 같이 후열처리를 실시하였다.

Table 4 Welding conditions

Specimen	Electrode		Preheating temp(°C)
	Type	Size	
Hot reheat Pipe	E9016	∅ 2.4mm	204°C
Cold reheat Pipe	E8016	∅ 2.4mm	152°C
Feed water Pipe	E7016	∅ 2.4mm	152°C

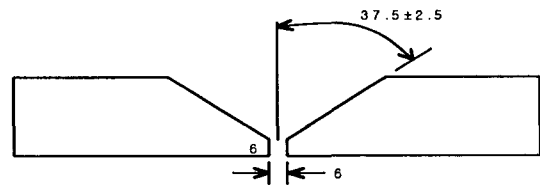


Fig. 1 A schematic presentation of the welded joint

Table 5 Conditions of PWHT

Pipe	Temp. (°C)	Heat rate(°C/h)	Cooling rate(°C/h)	Heating time(min)
Hot reheat	760	140	180	90
Cold reheat	750	140	180	60
Feed water	650	140	180	180
Hot reheat	600	140	180	90
Cold reheat	600	140	180	60
Feed water	500	140	180	180

2.3 잔류응력측정

본 실험에 사용된 시편은 일반 배관에 속하는 cold reheater와 feed WTR 배관, 후속배관인 feed의 2가지이고, 열처리 전과 후로 나누어 실험하였다. 이 실험에서도 앞의 톱절단 시험과 마찬가지로 용접부와 수직인 방향의 5 mm 간격으로 측정하였고, 압입조건은 최대하중 50 kgf, 압입속도 0.5 mm/min, 하중유지시간 500 ms로 설정하였다.

잔류응력을 구하기 위하여 응력이 완전히 이완

된 상태의 기준값이 필요하기 때문에 압입시험을 실시한 후 절단하여 잔류응력이 이완되었다고 생각되는 절단면 부근의 3 mm지점에 같은 방법으로 압입시험을 하였다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 재료에 인장응력이 존재하는 경우에는 무응력 상태와 비교할 때 완만한 기울기를 갖고, 압축응력에서는 좀 더 급한 기울기를 갖게 된다.

이러한 곡선의 변화양상과 압입자 하부의 응력 상태를 비교하면 재료에 존재하는 잔류응력을 정량적으로 판단할 수 있으며, 이러한 두 조건에서 얻어진 하중인가곡선의 비교를 통하여 잔류응력이 계산된다^{3,4)}.

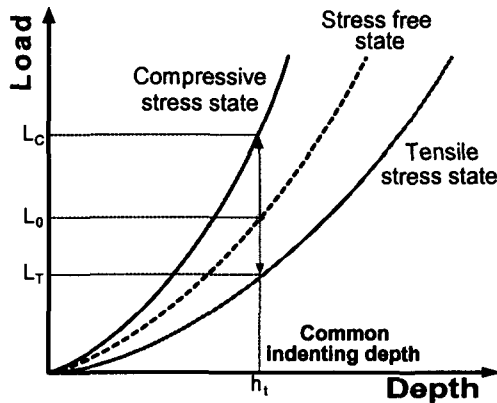


Fig. 2 Comparison with residual stresses according to load and depth

3. 실험결과 및 고찰

두께가 18 mm인 cold reheat 배관의 용접부에 대하여 후 열처리 전과 후의 잔류응력을 연속압입시험을 통하여 측정된 결과 Fig. 3과 같이 나타났다. 그래프에서 압입 위치는 각 용접부마다 weld metal의 넓이, 즉 용접 비드의 넓이 차이가 많아서 정확한 HAZ 및 모재의 위치를 판단하기가 어렵기 때문에 용접 중심선에서의 거리 대신 용착 금속과 모재의 경계면으로부터의 거리로 나타내었다. 그래프에서 볼 수 있듯이, 열처리 후의 잔류응력이 큰 폭으로 완화되어 후열처리가 매우 효과적이었다는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과를 보이는 이유는 후속 배관에서 응력 이완을 위한 절단작업을 수월하게 하기 위하여 사전에 두께 하부를 절단하게 되는데, 이 과정에서 두께방향의 구속 응력이 이완되면서 전체의 잔류응력이 재분포되기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 후판의 잔류응력 측정에 있어서 연속압입시험법은 무응력상태의 기준값이 설정되어야 함을 알 수 있다.

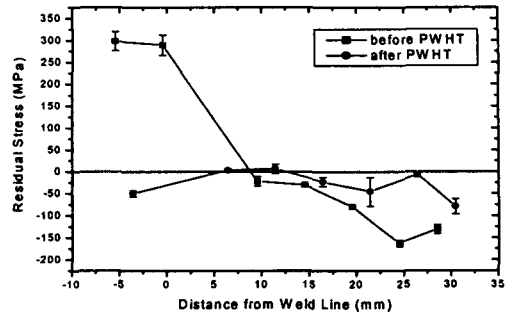


Fig. 3 Distribution of residual stresses measured by the indentation methods on the cold reheat pipe specimen before and after PWHT

4. 결 론

발전설비 주요배관 용접부의 잔류응력을 측정 한 결과 열처리에 의해서 잔류응력의 완화를 확인할 수 있었다. 연속압입시험을 통하여 발전설비 주요배관 용접부의 잔류응력을 평가할 수 있었으며, 일반 두께의 배관에서 비교적 정확한 잔류응력의 측정이 가능하였다. 또한 기준값이 준비된다면 시편의 절단과정이 필요 없게 되므로 스트레인게이지 방법으로 측정이 어려운 후속배관의 잔류응력도 압입시험을 통하여 더욱 정확하게 측정할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. R.D. Stout : Weldability of Steel, Forth edition, Welding Research Council(1987), 104
2. T. Yamamoto, and H. Kayano : Nuclear Material, Vol. 18(1996), 219-227
3. F. M. Haggag, R. K. Nanstad, and R. Swain : Use of Automated Ball Indentation Testing to Measure Flow Propertied Fracture Toughness in Metallic Materials, ASTM STP 1092 (1990), 188-208
4. J. H. Ahn and D. Kwon : Derivation of plastic stress-strain relationship form ball indentation, J. Mater. Res., Vol. 16(2001), 3170-3178