

발전설비에 적용되는 보수용접 조건 및 사례분석

홍석주·홍성호

The Status of Repair Welding for Power Plant

Seok-Joo Hong and Sung-Ho Hong

1. 서 론

성공적인 보수용접은 먼저 손상원인을 분석하고 적절한 용접절차에 따라 수행해야 한다. 용접부의 손상원인은 크게 구조상의 문제, 시공상의 문제와 재료 자체의 문제로 나눌 수 있다. 특히 예열 및 후열처리의 미비와 용접 잔류응력은 용접구조물을 제작하는데 있어 크게 고려해야 할 사항이다.

발전설비의 경우 사용되는 재질의 종류는 일반 탄소강부터 고합금강까지 매우 다양하다. 또한 대규모 전력설비 보일러는 50,000 Point 이상 용접부위가 발생하며 각 용접부위마다 결함 발생 가능성이 높다. 실제로 용접 결함에 의한 파열사고는 전체 보일러 사고의 2.5%를 차지한다고 알려져 있다. 용접에 의한 사고는 증기조건이 고온, 고압인 헤더, 튜브부터 수냉벽 및 각종 부속 설비에 이르기까지 다양하게 발생하고 있으며 현재 국내 발전설비의 운전시간이 설계수명을 경과함에 따라 용접 및 보수작업이 중요한 문제가 되고 있다. 따라서 올바른 절차를 통한 보수용접이 필요하여 본 논문에서는 발전설비중 특히 압력용기에 대한 보수기준과 사례를 살펴보고자 하였다.

2. 발전설비 보수 기준

발전설비에 적용되는 압력용기는 보일러 헤더를 비롯하여 탱크, 열교환기 등 다양하며 열처리 및 용접절차가 까다롭고 용접후 비파괴검사를 통해 판정기준을 만족시켜야 한다.

보통 보수용접이란 압력용기 및 기계부품의 마모된 부분에 대해 다시 원래 상태가 되도록 덧붙이 용접을 행하는 것을 말한다. 클래딩(Cladding)이 내부식, 내마모 특성을 갖는 재료를 접촉 부위에 판으로 붙인 것과 구별된다.

압력용기용 재료의 보수에 있어서는 보수하고자 하는 설비의 재료와 동일하거나 대응 재질을 사용하여야 한다. 이때 적용하고자 하는 재료가 0.35% 이상의 탄소강이거나 합금강일 경우 사용이 제한적이며 열처리 조건도 그에 맞게 수행되어야 한다.

용접부의 열처리는 예열처리와 후열처리로 나눌 수 있는데 예열처리는 용접전에 용접부 및 모재의 균열방지, 용접성 향상과 냉각속도 지연을 통해 수축응력 감소와 변형방지를 위해 실시한다. 그러나 예열처리는 보통 조철고장력강과 시효경화 특성이 있는 재질은 하지 않으며 다층용접시 층간 온도가 다음 용접 작업시 예열 온도가 되므로 층간 최고 온도에 대한 별도의 규제를 받기도 한다.

용접후열처리는 넓은 의미로는 용접후 실시하는 열처리를 총칭하지만 일반적으로 응력제거를 위한 열처리를 지칭한다. 용접후열처리의 목적과 효과는 용접잔류응력을 완화시키고 잔류응력에 의한 구조물의 변형을 방지하고 치수를 안정화시킨다. 그리고 경화된 열영향부를 연화시켜 용접금속의 연성을 증대시키고 파괴인성을 향상시킨다.

보수용접의 경우 클래드, 덧살붙임 및 내식재료로 라이닝된 재료로 제작된 부분의 경우 모재가 후열처리를 요하는 경우 수행하도록 되어있으며 압력용기의 경우 수압시험 전에 보수용접이 끝난 후 하도록 되어있다. 만일 용접후열처리 후에 보수용접을 한 경우에는 재열처리를 해야 한다. 일반적으로 후열처리는 노내에서 수행되는데 직접 화염에 노출되지 않도록 한다. 각종 금속에 대한 유지온도 및 유지시간에 대한 예는 다음 표 1과 같다.

서로 다른 P 번호, 그룹번호의 재료를 용접하는 경우는 용접후열처리 온도가 높은 쪽 규정을 따르도록 한다.

덧살붙임, 클래드 또는 라이닝된 재료의 보수용접 부분은 전술한 바와 같이 모재가 용접후열처리가 요구될

표 1 금속의 후열처리 온도 및 유지시간

금속		온도(℃)	유지시간 (판두께 25mm당)
회주철		430-500	5-1/2
탄소강	0.35% C 이하, 19mm 미만	보통 응력제거 불필요	-
	0.35% C 이하, 19mm 이상	590-680	1
	0.35% C 이상, 12mm 미만	보통 응력제거 불필요	-
	0.35% C 이하, 12mm 이상	590-680	1
	저온사용 목적의 특수킬드강	590-680	1
C-Mo 강	0.20% C 미만	590-680	2
	0.25~0.35% C 미만	680-760	3-2
Cr-Mo 강	1Cr-0.5Mo	720-750	2
	2.25Cr-1Mo 5Cr-0.5Mo	730-760	3
	9Cr-1Mo	745-775	3
스테인리스강	410 & 430	775-800	2
	405, 19mm 미만	보통 응력제거 불필요	-
	304, 321, 347, 19mm 미만	보통 응력제거 불필요	-
	316, 19mm 이상	815	2
	309, 310, 19mm 이상	870	2
이종재료의 이음부	Cr-Mo강과 탄소강 또는 C-Mo강	730-760	3
	410, 430 및 기타 강종	730-760	-
	Cr-Ni계 스테인리스강 및 기타 강종	Cr-Ni계 스테인리스강에 접합되는 강에 필요한 응력 제거	3

때 수행하도록 되어있으나 안정화되지 않은 오스테나이트계 스테인리스강인 경우 유해한 σ 상 및 탄화물 석출이 되는 온도 범위를 피해야 한다.

용접후열처리는 저온으로 응력을 제거하는 경우를 제외하고 노내에서 수행하도록 한다. 다만 둘레이움의 경우이거나 플랜지를 부착하는 경우, 또는 중요도가 높지 않은 경우 국부가열방법에 따를 수 있다. 대부분 발전설비의 보수용접시에 현장 여건상 국부가열에 의한 후

표 2 모재별 용접부 두께에 대한 유지시간

모재구분	최저유지 온도(℃)	용접부 두께에 대한 최소유지시간		
		t≤50	50<t≤12	t>50
P-1	595	t/25	2+1/4×(t-50)/25	
P-3	595	t/25	2+1/4×(t-50)/25	
P-4	595	t/25		5+1/4× (t-125)/25
P-5	680			
P-6	680	t/25	2+1/4×(t-50)/25	
P-7	770			
P-9A P-9B	595	t/25		5+1/4× (t-125)/25
P-11A	550-585	t/25		

열처리를 실시한다.

용접후열처리시 가열 및 냉각시 온도 기울기를 완만하게 유지하여 모재에 나쁜 영향을 주지 않도록 하며 가열 및 냉각중에 전부분에 걸쳐 가능한 고른 온도가 되도록 유지하여야 한다. 다음 표 2에서는 모재별 용접부 두께에 대한 최소 유지시간을 보여주고 있다.

이때 t/25가 1 미만일 경우 최소유지시간은 t/4와 1/4 중 큰 쪽을 따른다.

3. 보수용접사례

3.1 급수가열기

급수가열기의 경우 튜브 누설이 발생할 경우 MCP (Manway Closure Plate)를 열고 정비를 수행한다. 표준석탄화력발전소의 MCP는 Weld seal type으로 제작되었다. 사진 1의 급수가열기는 용접작업 종료 후 운전 중에 용접부에서 균열이 발생되어 누설되는 사고가 있었다. 균열은 under bead에서 toe crack 형태로 발생되었다. 용접균열이 발생된 원인으로는 용접과정에

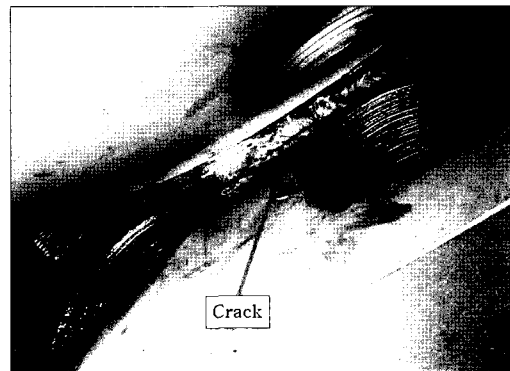


사진 1 MCP 용접부 균열 사진



사진 2 용접부 정비



사진 3 수냉벽 균열발생 사진

서 습증기가 내부로 침투하여 저온균열이 발생된 것으로 보이며 예열처리가 부족하여 용접열영향부의 급랭 및 내부응력이 증가하여 발생하였다. 다음 사진 1, 2는 균열 발생된 급수가열기 MCP와 용접작업을 수행하는 모습이다.

용접부의 모재는 P-1 재료로 압력용기용 탄소강으로 Pad 두께가 300mm로 열처리에 애로사항이 있고 용접부는 수분이 항상 존재하는 부위다.

따라서 용접시 Manway pad와 MCP 용접선에서 습분유출을 확인하고 습분이 없는 상태에서 균열부위를 제거한 후 보수용접을 실시하였고 후열처리를 실시하였다.

3.2 수냉벽 튜브

튜브 재질은 2.25Cr-1Mo 강(T22)으로 9mm 두께의 수냉벽 튜브이다. 균열이 발생한 튜브의 경우 튜브 내면의 경도가 330~350Hv 인데 비해 표면의 경도는 290Hv 정도이다. 이 재료는 상용화후 약 50여 년간 보일러 튜브로 널리 사용된 재질이다. 주로 보일러 bundle tube에 사용되어 왔으며 용접시 별다른 문제점이 보고되지 않았으나 수냉벽 튜브로 사용 시 용접 경화능이 커서 예후열처리가 필요한 재료이다.

용접부에 발생한 균열은 튜브 내면에서 표면으로 전파되었으며 용접금속의 횡방향으로 진행된 다수의 crater 균열이 발생되었다.

수냉벽 튜브는 구조적으로 잔류응력이 발생하는데 원인으로 일정 root gap에서 용접을 시행한 후 냉각시 수축됨에 따라 고장력강의 경우 허용응력 수준의 잔류응력이 용접금속에 작용하게 된다.

수냉벽 튜브 용접시 crater 처리는 층간 cascade 형식으로 용접하여야 하지만 동일한 부위에 적층 시공되어 결과적으로 불순물 석출 및 급랭이 되었다. 사진 4에서 보는 바와 같이 튜브 상부에서 90% 가량의 결함이 발생하였으며 약 8% 정도가 좌우측의 연결부위에서

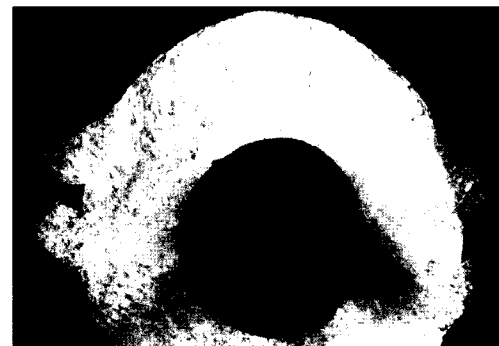


사진 4 튜브 단면 사진

발생하였다.

수냉벽 튜브는 전열면적이 넓어 냉각속도가 빠르므로 현장 용접시 적절한 예열 온도까지 유지하기 곤란하다. 현재의 표준석탄화력발전소의 증기조건에서 수냉벽 튜브로 사용중인 2.25Cr-1Mo 강의 경우 보수용접시 fit-up 및 tack welding 후 최소 2 pass 이상 전주용접을 시행한 후 인접 튜브에 용접을 수행하였다.

3.3 재열기 헤더

출구측 헤더 배관 용접부에서 운전 중 균열이 발생되어 원인 분석 및 보수용접을 실시하였다. 재질은 9Cr-1Mo 강으로 출구측 배관의 두께는 16.7mm 이다. 균열은 용접부 root 부위에서 최초 발생하였다. 이 재료의 특성은 노말라이징후 공기 중에서 냉각시켜도 조직이 마르텐사이트로 변태된다. 그러나 냉각시간을 10,000 초 이상 유지할 경우 조직이 페라이트와 카바이드로 변태되어 경도가 급격히 저하되는 특징이 있다.

사진 5, 6은 재열기 출구측 헤더 부위와 균열에 대한 사진이다.

용접부위의 손상은 운전 중에 발생하는 배관의 열팽창 및 수축에 따른 움직임에 의해 기동 정지시 약 130mm 정도의 이동량이 발생하여 용접부에 응력이 더욱 가중되었다.



사진 5 재열기 헤더 출구측 사진

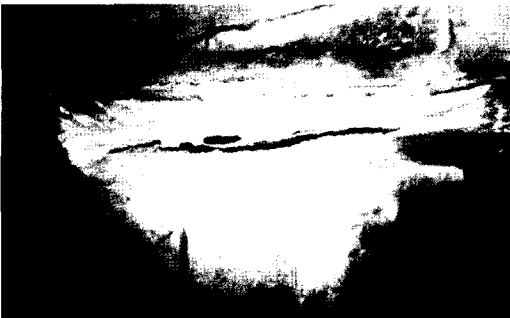


사진 6 균열부위 사진

균열부위의 보수는 결함부를 제거한 후 보수용접을 실시하였고 상기와 같은 구조적인 문제로 인하여 재열 증기관에 대한 건전성 확보를 위해 지지물중 일부가 교체되었다.

후 기

본 논문은 당진화력본부 기술전문팀의 도움으로 작성되었습니다.

참 고 문 헌

1. Nalco Guide to Boiler Failure Analysis
2. 서상일 : 보일러 손상해석, 1997, 259
3. ASME BPVC 2002 Ed.
4. 보일러 터빈 정비기술 Workshop, 2004
5. KS B6733, 2003
6. David N. French : Metallurgical Failures in Fossile Fired Boilers, 2nd Ed., 1993, 422



- 홍석주
- 1970년생
- 한국전력기술(주) 전력기술개발연구소
- 발전설비 수명평가
- e-mail : hsj@kopec.co.kr



- 홍성호
- 1959년생
- 한국전력기술(주) 전력기술개발연구소
- 발전설비 재료분석, 용접부 건성성평가
- e-mail : pmas@kopec.co.kr