

특 집 : 용접부 후열처리 기술

현장 PWHT의 시공

강 성 수 · 이 용 준

Procedure of PWHT in Actual Welding Industry

Sung-Soo Kang and Yong-Jun Lee

조선이나 강교 등 강구조물 제작 시 잔류응력과 용접부 기계적 성질의 불연속이 클 때, 조립용접을 실시한 후 현장 PWHT를 시공하는 것이 강구조물의 신뢰성 향상을 위해서 바람직하며, 실제로 현장에서 많이 실시되고 있는 실정이다.

1. 현장 PWHT의 분류

PWHT 시공방법을 Fig. 1에 표시하였다.

Fig. 1의 ③이하가 현장 PWHT의 대상이지만, ③, ④는 기본적으로 ①, ②를 약간 변형시킨 것이다. 따라서 여기에서 대상이 되는 것은 ⑤이하이다. ⑥은 노내 PWHT의 분할삽입과 마찬가지로 원통용기 등에 격벽을 설치하여 부분적으로 가열하는 방법이다. ⑧은 배관 등의 PWHT 방법이지만, 판두께 방향의 온도차가 필연적으로 생기기 때문에 시공에 있어서 주의가 필요하다. ⑨, ⑩은 원통연결부 이외의 연결부나 노즐 등의 접속용접부 PWHT 방법이다. 용접선 중횡 방향의 온도구배가 발생하는 점이 국부가열의 한계이다. ASME 등의 규격에서는 이러한 경우도 원주band가열을 행하고 있다.

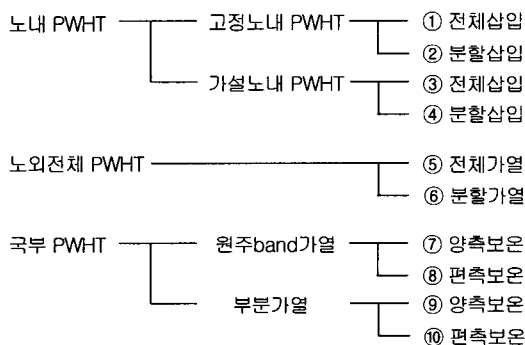


Fig. 1 시공방법의 분류

2. 가열방법

2.1 전기저항가열

전기저항가열은 저항체에 직접 통전하여 발열하는 것으로 PWHT에 가장 많이 보급되어 있는 방법이다. 현장 PWHT로서 사용되는 저항체로 다음과 같은 것이 있다.

(1) 니크롬 : 니켈과 크롬의 합금으로 열간강도가 우수하고 굽혀지기 쉬우며 고온에서도 산화되기 어려운 장점이 있으나 가격이 고가이다.

(2) 철크롬 : 철과 크롬의 합금으로 가격이 저렴하여 가정용의 히터로 사용되고 있다. 용융온도는 니크롬보다 높으나 고온강도는 떨어지기 때문에 고온에서 형상변화가 일어나기 쉽다.

(3) 철크롬알루미늄 : 철크롬에 알루미늄을 첨가한 합금으로 고온이 되면 알루미늄이 표면에 석출하여 산소와 결합하여 산화알루미늄 피막을 형성한다. 용융온도가 높아 고온에서 사용하기가 적당하지만 고온에서의 굽혀지는 성질은 니크롬에 비해 떨어진다. 더욱이 일단 고온에서 한번 사용되면 상온에서의 굽힘성은 거의 상실되어 고온에서만 가공이 가능하다. 칸탈, 파이론 막스 등의 상품명으로 시장에 나와있는 것이 이 재료이다.

PWHT 대상물의 형상에 맞추어 이러한 재료를 꼬은 선, 원형선, 리본상 등으로 가공하여 절연을 위해 세라믹 형상 재료 등 여러 가지 고안을 하여 수많은 종류의 히터가 보급되어 있다. 압력용기의 현장 PWHT에 가끔 사용되는 적외선 히터도 이 분류에 들어간다. 이것은 철-크롬 리본으로 강에 열흡수 효율이 좋은 파장의 원적외선을 발생하는 세라믹 도료를 도포한 것으로 효율은 좋으나 히터부분이 노출되어 있으므로 취급상 주의가 필요하다.

가열장치는 히터에 적당한 전력을 공급하는 전압조정기를 장착한 전원부, PWHT의 온도를 설정한 프로그

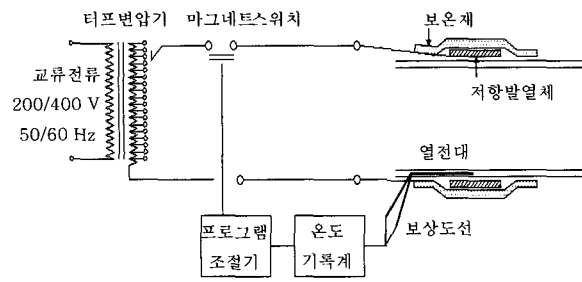


Fig. 2 전기저항가열 시스템의 예

램 조절기, 신호를 수신하여 전력의 ON-OFF를 행하는 마그네트 스위치, 온도기록계 또는 전류, 전압계로 구성되어 경제성을 위해 동시에 복수의 히터의 제어가 가능한 다점제어 가열장치가 가장 많이 보급되어 있다. 외국산의 가열장치는 저전압, 대전류의 장치가 많으나 안전성이 우수한 것으로 장치의 중량이 증가하여 입출력 케이블에 큰 지름의 것이 사용되므로 기동성이 결여되고 비용이 높게 된다. 전기저항가열 시스템의 예를 Fig. 2에 나타내었다.

전기저항가열의 이점은 가열 폭의 신축이 비교적 자유롭고 가열하고 싶은 부분을 용이하게 가열할 수 있으며, 초기비용 및 운영비용이 비교적 저렴하고 히터의 종류가 풍부하여 목적에 맞는 선택이 용이하다는 점 등이다. 한편 피가열부에 발열체를 직접 접촉시켜 가열하는 방식이 많기 때문에 발열체를 피복한 세라믹이 파괴되어 대상물을 상하게 하는 수가 있다. 가열할 때 필연적으로 발생할 수 있는 누설전류가 문제점이다.

2.2 유도가열

유도가열은 전자유도작용에 의해 피가열부에 전류를 유기시켜 피가열물 자체를 가열하는 방법으로 넓게 분류하면 전기저항가열에 속한다. 피가열물에 발생하는 전류는 표피효과에 의해 피가열물의 표면에 집중하는 경향이 있고, 그러한 효과는 주파수가 높을수록 높아지는 경향이 있다. PWHT에 사용되는 유도가열장치의 주파수는 대별하면 다음 Table 1과 같다.

유도가열에 사용되는 유도코일은 두 가지 방식이 있다. 하나는 동연선으로 고온에 의한 열화를 막기 위해 주석도금을 한 것으로 절연성이 있는 grass-cross-lib

Table 1 유도가열장치의 주파방식

저주파	상용주파방식	50/60Hz
	3배주파수방식	150/180Hz
고주파	M-G방식	500-2000Hz
	인버터방식	

를 피복한 것으로 사용하는 전류에 따라서 선의 굵기가 다르다. 상용주파수 유도가열에 사용되는 유도코일은 선 직경이 크고 주파수가 높은 유도가열에 사용되는 유도코일은 선 직경이 작다. 또 하나의 방식은 구리선을 메시상으로 스크리브를 제작하여 속에는 냉각수를 통과시켜 코일의 과열을 막아서 보다 많은 전류를 통과시키고자 한 것으로 피복은 전자와 같으나 현장에서는 물의 공급이 어려워 그다지 사용되지 않는다.

냉각수를 통과시키지 않는 방식의 유도코일의 단면적은 38mm²으로부터 325mm² 정도의 것이 많다. 가열 장치의 구성은 전기저항 가열장치와 거의 같으나 상용주파를 사용하지 않는 것은 주파수를 변환하는 컨덴서를 구비하고 있기 때문이다. 또한 출력전류가 전기저항 가열장치와 비교하여 아주 크기 때문에 다점제어 장치보다 1점제어 장치가 많다. 유도가열시스템의 예를 Fig. 3에 나타내었다.

유도가열의 이점은 열원의 장착이 간단하고 피가열물 자체가 발열하기 때문에 두께가 두꺼운 피가열물에서는 두께방향의 온도차가 작고 전기저항 가열의 문제점인 누설전류가 거의 발생하지 않아서 안전면에서 우수하다는 점 등이다. 한편 인버터방식이나 고주파가열방식에서는 컨덴서를 설치하기 때문에 효율은 어느 정도 개선되지만 전기저항가열과 비교하여 효율이 떨어지기 때문에 비용이 올라간다. 또한, 전기저항가열과 같이 블록 제어가 되지 않기 때문에 큰 직경의 수평관의 경우 꼭대기 부분과 밑바닥 부분 사이에 온도차가 생긴다. 그러므로 보조가열이 필요한 경우도 있다.

2.3 버너가열

버너가열은 기체·액체를 연소시켜 얻어지는 열을 이용하는 방법이다. 배관의 PWHT에서는 수동버너를 사용하는 경우가 있으나 온도관리에 어려움이 있기 때문에 주류는 되지 못하고 있다. 그러나 압력용기나 대형 구조물의 경우 대형버너와 연료공급장치를 적절히 조합하여 사용하는 경우가 많다. 연료에는 액체연료와 기체

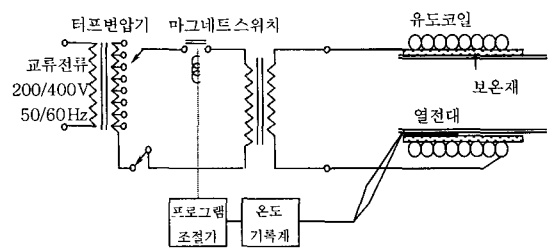


Fig. 3 유도가열 시스템의 예

연료가 있다. 액체연료는 발열량이 연료비가 싼 반면 이송 시 배관과 펌프를 필요로 하는 연소장치가 다소 복잡하게 된다. 기체연료는 점화·소화가 용이하여 이송에는 배관만으로 좋으나 연료비가 액체연료에 비해 많이 든다. 배관 등의 비교적 소형 대상물의 PWHT에서는 이종의 필요성과 연료사용량이 비교적 적기 때문에 기체연료를 사용하는 경우가 보통이나 압력용기, 대형구조물의 경우는 경제성을 고려하여 액체연료를 사용하는 경우도 적지 않다.

압력용기나 대형 구조물의 PWHT를 위한 연소장치는 대용량의 버너 및 송풍장치, 점화장치, 긴급차단밸브, 유량조절밸브, 감압밸브, 공기혼합밸브 등을 구비한 연료공급계통으로 구성되어 있다. 버너가열 시스템의 예를 Fig. 4에 나타내었다.

버너가열의 이점은 장소를 가리지 않고 용이하게 대용량의 열원을 얻을 수 있고 아주 큰 구조물을 가열할 경우 전력보다 경제적이라는 점이지만, 조작에는 상당한 숙련을 요구한다.

3. 온도측정

3.1 온도측정 방법

현장 PWHT에 사용되는 온도측정은 JIS Z 8704에 규정되어 있는 측정방법 중 대상물에 열전대를 사용하는 방법으로 열전대, 보상도선 또는 계측기 등을 조합하여 사용한다. JIS C 1602에 규정되어 있는 7종류의 열전대 중 가열하는 온도범위와 경제적 문제를 고려하여 온도에 대한 허용차가 0.75% 이내인 0.75급의 K-type을 주로 사용한다. K-type은 십자형으로 니켈과 크롬을 주로 한 합금으로 되어 있고, 한쪽은 니켈을 많이 함유한 합금이다. 종류는 스테인레스강 보호관에 들어가 있는 시스열전대, 세라믹파이프에 보호된 열전대, 열전대선에 glass fiber로 전기절연된 소모형 등이 있다. 열전대선의 지름이 작을수록 응답이 빠르나 수명이 짧게 된다.

Table 2에 K-type 열전대의 상용한도와 과열사용한도

Table 2 K-type 열전대의 상용한도와 과열사용한도

구성재료의 기호	지름 [mm]	상용한도 [°C]	한계사용한도 [°C]
K	0.65	650	850
	1.00	750	950
	1.60	850	1050
	2.30	900	1100
	3.20	1000	1200

도를 나타내었다. 이 상용한도는 공기 중에 연속사용에 견디는 최고온도를 말한다. 과열사용한도는 단시간 사용 가능한 온도의 한도를 말한다. 이러한 한계온도를 넘어서 사용하면 열기전력의 변화가 0.75%를 넘게 되는 것이다.

3.2 온도계측 위치

온도계측 위치는 균열부의 온도와 그 외측의 온도구배가 적정한가를 확인할 수 있을 정도의 측정위치의 수를 확보하는 것이 원칙이지만 PWHT 시공법이 확립되어 즉 과거 충분히 경험하여 온도제어가 가능한 수만으로도 충분하다. 배관의 PWHT, 특히 수평관의 경우 지름이 크면 윗 부분과 바닥 부분의 온도차가 크게 된다. 호칭지름이 10B이상에서 24B까지 온도측정점은 2점 이상, 초과하면 3점 이상을 설치하는 것이 바람직하다. 압력용기의 원주band가열의 경우 고압가스보안협회의 「원주용기의 원주연결부에 있어서 국부가열에 의한 응력제거 열처리 시공기준(자주기준)」에서는 온도계측 위치는 가열히터의 수에 따른 계측점(원주상 최소 3점)의 위치로써 당해 원주연결부의 용접선의 중심 또는 용접선 근방과 용접선을 중심으로 하여 양쪽에 간격 $1.25\sqrt{Rt}$ 의 위치로 규정되어 있다.

대형구조물의 PWHT의 경우 고압가스보안협회의 「구형 Tank의 내부가열 열처리에 의한 응력제거 시안」에서 온도측정 개소로서 다음과 같이 규정되어 있다.

- (1) 상하 꼭지점에 1개소 이상.
- (2) 상하 꼭지점 이외에는 상하방향으로 구각에 연하여 4.5m를 넘지 않는 길이로 분할한 각 수평선상에 적어도 다음과 같이 자세한 식에 의해 얻어진 개수 이상의 측정개소를 설치할 것.

- ① $Li \leq 18$ $Li/4.5$
- ② $18 \leq Li < 30$ $4 + (Li - 18)/6$
- ③ $30 \leq Li < 60$ $6 + (Li - 30)/10$
- ④ $60 \leq Li$ $9 + (Li - 60)/15$

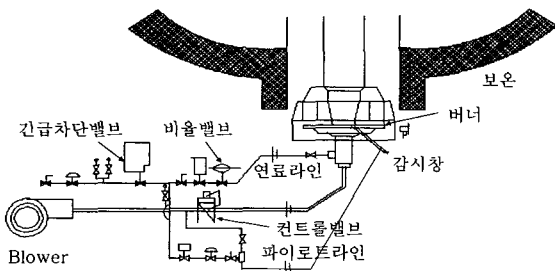


Fig. 4 버너가열 시스템의 예

이 식에 있어서 Li (단위, m)은 수평선상의 원둘레를 나타내는 것이다.

4. 보온재

4.1 보온재의 종류

보온재의 필요조건은 단열효과가 높고 부피밀도가 작고 열간강도가 높으며 장기사용에 견디서 시공이 용이해야 한다. 즉, 싼 가격으로 단열이 되어야 한다. 현장 PWHT의 경우 때로는 1000℃를 넘는 고온에서 하거나 현장에서의 작업하는 경우도 있으므로 열간강도와 작업성이 좋은 점이 충분한 조건이 된다. 현재 주로 사용되는 보온재로써 유리섬유를 형질결레로 직조하여 내열 처리한 glass cross와 rock wool이나 ceramic fiber를 판모양, 담요모양으로 가공한 rock wool 보온판, ceramic blanket 등이 있다.

일반적으로 이러한 재질은 고온에서도 변화하지 않지만 경제적인 이유로 보온재의 안전사용온도보다 높은 온도로 사용하는 경우도 많기 때문에, 이러한 보온재를 결합하고 있는 교결제(binder)의 특성에 의해 연기를 발생하거나 개중에는 유독가스를 발생하는 경우도 있으므로 사용에 있어서 충분한 주의가 필요하다.

4.2 보온시공

현장 PWHT의 보온은 반영구적 보온과는 다르게 PWHT가 종료되면 제거하지 않으면 안된다. 따라서 내열온도 이하에서 사용하여도 부착작업과 제거작업에

의해 보온재를 손상시키기 때문에 보온재의 수명이 짧다. 보온재의 피가열물에서의 부착은 작은 것은 금속선 등으로 대형의 것은 스파이크 밴드 등으로 한다. rock wool 보온판을 사용하여 보온두께 100mm, 피가열물 온도 600℃의 경우, 보온재 표면온도는 80℃로 되게 한다. 이 경우 보온두께 75mm에서는 보온재 표면온도는 약 100℃ 이하, 보온두께 125mm에서는 보온재 표면온도는 약 60℃ 이상으로 한다. 보온효과를 보아서는 보온두께가 두꺼우면 두꺼울수록 좋으나 보온재와 보온시공의 비용에 맞게 두께를 결정하여야 한다.

대형의 피가공물을 보온하는 경우 보온폭, 보온길이 가 보온판의 치수보다 크게 되어 연결부분이 생기게 되는데 연결부분에는 또 한 장의 보온재를 겹쳐서 연결부로부터 열이 새는 것을 막아야 한다.

참 고 문 헌

1. 松本, 飯田, イギリスにおける壓力容器の局部焼鈍に関する調査報告, 高壓ガス, 24-5(1987)
2. 圓筒容器の周縁手における局部加熱による応力除去熱處理施工基準 (自主基準) 及び局部焼鈍實驗報告(第1報), 高壓ガス, 23-11(1986)
3. 球形貯槽の内部加熱處理による応力除去方法試案, 第 6 回 高壓ガス設備擔當者會議(1983)
4. AWS D10.10-75
5. 日本容接協會化學機械容接研究委員會現地焼鈍施工委員會, 球形貯槽の全体焼鈍施工指針書(1983)
6. 日本容接協會化學機械容接研究委員會現地焼鈍施工委員會, 配管容接後熱處理手順書(1985)
7. 日本容接協會化學機械容接研究委員會現地焼鈍施工委員會, 壓力容器容接後熱處理手順書(1988)



- 강성수(姜成守)
- 1948년생
- 부산대학교, 기계공학부
- 용접부피로, 열처리
- e-mail : sskang@pusan.ac.kr



- 이용준(李庸準)
- 1977년생
- 부산대학교, 정밀기계공학
- 용접부피로 및 변형해석
- e-mail : yongjun@pusan.ac.kr