

이종재료 이음부의 용접후 열처리

강 성 수 · 이 용 준

PWHT of Joint in Dissimilar Materials

Sung-Soo Kang and Yong-Jun Lee

1. 서 론

각종 용접 구조물에서 화학성분이 다른 재료를 접합한 이종재료 이음부가 사용되고 있다. 한 기계에 있어서도 각종 부품 또는 부재가 다른 조건 또는 환경에서 사용되는 경우가 많다. 이러한 경우 각가지 요구되는 성능을 확보하기 위하여나 비용절감을 위해 각 부재에 적합한 재료가 사용되기 때문에 이종재료 용접 이음부가 생긴다. 이종재료 접합의 대표적인 것으로서 스테인리스강과 탄소강, 저합금과 탄소강 그리고 저합금과 다른 종류의 저합금강의 경우가 있다. 일반적으로 이러한 용접 이음부에서는 두 재료의 PWHT 조건이 다르기 때문에 요구되는 조건을 동시에 만족시킬 수 있도록 후열처리 하기가 불가능하다.

따라서, 쌍방의 재료의 강도, 인성, 내식성 등의 열처리 조건을 충분히 고려하여 용접부에 요구되는 성능을 만족시킬 수 있는 PWHT 조건을 선정하는 것이 필요하다.

2. 탄소강과 저합금강 간의 용접과 저합금강 간의 용접

이러한 재료를 접합한 이종재료 이음부에 사용되는 용가재는 이음부에 요구되는 성능에 따라서 저급강이나 또는 고급강측의 용가재를 사용한다. 어느 경우에도 용접경계에는 이종재료 접합부가 존재한다. Cr 등 탄소와의 친화력이 큰 원소가 다량으로 함유하고 있는 저합금강과 함유량이 적은 저합금강 간의 접합 또는 전혀 함유하지 않은 탄소강 간의 접합과 같은 경우, 탄소와의 친화력이 큰 원소의 함유량의 차가 있는 재료 접합부의 용접 이음부에서는 PWHT에 의해 용접 경계부에 탄소의 이동이 일어나는 현상이 발생한다.

Fig. 1은 2¼Cr-1Mo강을 5Cr-½Mo강 용가재로 용접한 경우로 735°C, 10h의 PWHT를 시공한 후, 용

접 경계부에서의 미세조직이다.

저Cr 측인 2¼Cr-1Mo강 측의 용접경계에 탄소의 이동에 의한 명료한 탈탄층이 형성되어 조립 페라이트 조직으로 변했음을 알 수 있다. 또한 고Cr 측인 5Cr-½Mo강 측의 용접경계에는 저Cr 측으로부터 이동되어 온 침탄층이 확인된다. 이러한 탈탄층 또는 침탄층의 형성에는 용가재 또는 모재에 함유되어 있는 탄소량과 Cr 등의 탄화물 생성 원소량의 차와 함께 PWHT 열처리 조건의 영향을 많이 받는다.

Fig. 2에는 Cr함유량이 다른 재료의 용접 이음부에 있어서 PWHT조건과 형성된 탈탄층과의 관계를 보여 주고 있다. 세로축은 탈탄층 발생 용이도의 지표로서 생성속도 X^2/t (X:탈탄층폭, t:시간)를 나타내고 가로축은 절대온도(T)의 역수를 나타내었다.

모재는 2¼Cr-1Mo강과 9Cr-2Mo강으로서 용가재 Cr함유량의 영향을 조사한 것이다. 어느 경우에도 Cr 함유량의 차가 클수록, PWHT 온도가 높을수록, 유지 시간이 길수록 탈탄층의 형성이 현저하게 나타난다.

용접부의 특성을 보여주는 예로서 Fig. 3은 1¼Cr-½Mo강과 5Cr-½Mo강 용가재의 이종 용접부에 700°C, 8h의 PWHT를 시공한 경우 용접 경계부에서의 비커스

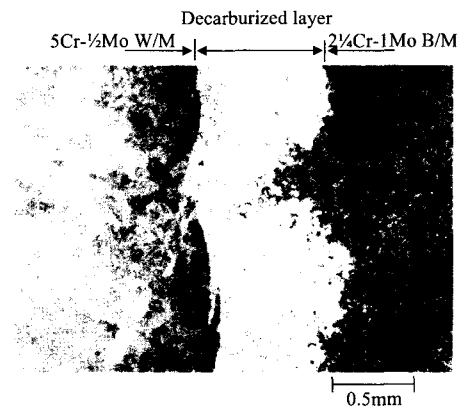


Fig. 1 2¼Cr-1Mo강과 5Cr-½Mo강 용접 이음부, PWHT(735°C×10h)

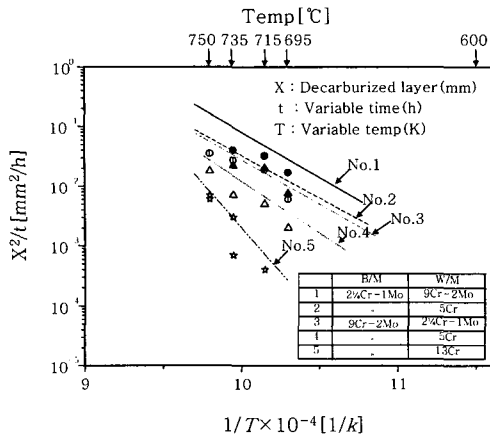


Fig. 2 각종 용접재료에서 PWHT 조건과 탈탄층폭, 가열시간, 가열온도와의 관계

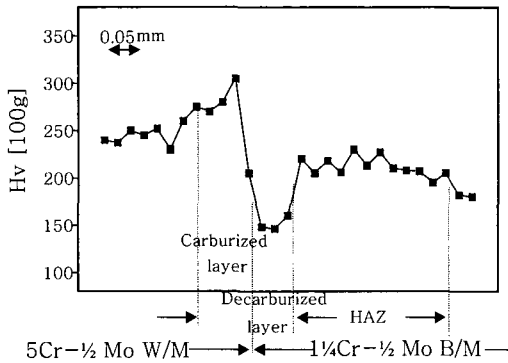


Fig. 3 1¼Cr-½Mo강과 5Cr-½Mo강 용접부의 경도분포, PWHT(700°C×8h)

경도분포를 나타낸 것이다. 5Cr-½Mo강 용가재 측에 침탄층 형성에 의한 경도상승을 확인할 수 있고 1¼Cr-½Mo강 모재 측에서는 탈탄층 생성에 의한 경도저하가 확인된다. 이러한 침탄층 또는 탈탄층의 존재는 용접 이음부의 굽힘시험 등에서 미세균열 발생의 원인이 될 수 있기 때문에 주의가 필요하다. 또한 고온에서 오랫동안 응력이 걸리는 상태에서 사용하면 탈탄층에 의한 균열이 발생할 수도 있다.

따라서, PWHT 조건은 용접부에 요구되는 성능, 중요도에 따라서 적절하게 선정하지 않으면 안된다. 일반적으로 이종 용접부에서 강도가 중시되는 경우에는 강도저하를 피하기 위해 저급강측의 온도가 선정되고 수소소치환 등의 내환경성이 중시되는 경우에는 고급강측의 PWHT 온도가 선정되고 있다.

3. 오스테나이트계 스테인리스강과 탄소강, 저합금강과의 용접

오스테나이트계 스테인리스강과 탄소강, 저합금강과

의 용접의 경우 용가재로서 오스테나이트계 스테인리스강이나 Ni기 합금이 쓰이고 있다. 어느 쪽의 재료를 선정하는가는 용접부에 요구되는 PWHT 조건과 사용조건(온도, 응력, 환경 등)에 따라서 결정된다.

이러한 이종재료의 용접부는 Cr함유량의 크게 다른 재료의 용접이기 때문에 PWHT에 의해 오스테나이트계 스테인리스강 측의 용접 경계에 탄화물이 석출되어 침탄층이 형성된다. 한편 탄소강 또는 저합금강 측에는 탈탄층 생성에 의한 조립 페라이트층이 형성되어 강도저하의 원인이 된다. Fig. 4에 1¼Cr-½Mo강을 309L stainless 용가재와 용접한 이음부로서 690°C×30h의 PWHT를 시공한 경우, 용접경계의 미세조직을 보여주고 있다.

탄소강과 저합금강, 저합금강 간의 용접부의 경우와 비교하면 침탄층이 보다 명료하게 확인되고 있다. 이 침탄층 또는 탈탄층 형성의 정도는 용가재로서 Ni기 합금을 사용했을 경우, 오스테나이트계 용가재를 사용한 경우에 비하여 크게 줄어든다. 또한, Ni기 합금은 오스테나이트 스테인리스강과 탄소강 또는 저합금강의 열팽창계수의 거의 중간이기 때문에 열응력의 경감에도 도움이 된다. 일반적으로 탄소강 또는 저합금 PWHT 온도범위는 오스테나이트계 스테인리스강의 예민화(입계에 탄화물을 석출하여 입계 근방에 Cr농도를 줄임으로써 내식성을 저하시키는 과정)를 일으키는 조건과 일치한다.

따라서, 이러한 조합의 용접부에서는 PWHT를 실시하면 오스테나이트강의 모재의 내식성 저하를 초래하기 때문에 PWHT를 실시하지 않는 경우가 많다. 그러나 아주 두꺼운 용접재료의 용접에 있어서는 용접부 성능 개선을 위해 PWHT가 요구되는 경우가 있다. 이러한 경우에는 Fig. 5에 나타내었듯이 미리 탄소강이나 저합금강 측에 개선면에 오스테나이트강 또는 Ni기 합금을 육성용접하여 그 상태에서 탄소강 또는 저합금강 측의

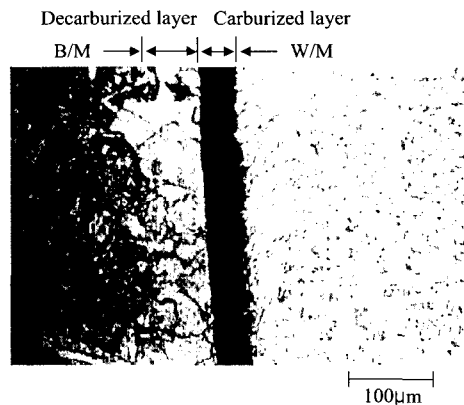


Fig. 4 1¼Cr-½Mo강과 309L 스테인리스강 용접 이음부, PWHT(690°C×30h)

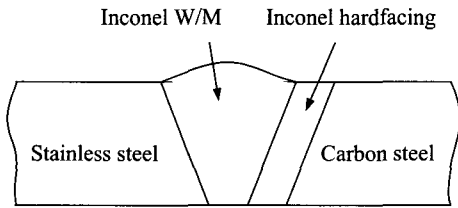


Fig. 5 육성용접을 이용한 탄소강과 스테인리스강의 이종용접의 예

조건에 맞는 PWHT를 시공하는 방법이 채택되고 있다. 그 이후의 용접은 오스테나이트계와 동종이므로 용접이후의 PWHT를 시공할 필요가 없다.

4. 페라이트계 또는 마르텐사이트계 스테인리스강과 탄소강, 저합금강의 용접

이러한 재료의 용접에서는 용가재로서 고Cr계인 페라이트계 스테인리스강 또는 오스테나이트계 스테인리스강 또는 Ni기 합금이 쓰인다.

일반적으로 페라이트계 또는 마르텐사이트계 스테인리스강의 용접부는 열영향부의 경도저하 또는 인성 등의 회복을 위해 PWHT가 필요하다. 이 재료의 용접부의 경우의 용접경계부에 일어나는 현상은 3절의 예와 마찬가지로 Cr량의 차에 따라서 침탄층, 탈탄층이 형성된다. 이 경우의 PWHT온도는 탄소강 또는 저합금강측의 조건이 적용되는 경우가 많으나, 침탄층 또는 탈탄층의 형성과 모재의 열처리 특성을 충분히 고려하여 PWHT 온도나 시간을 선정할 필요가 있다.

5. 스테인리스강의 용접후열처리

화학공장이나 발전소에서는 고온 내부식성과 화학성분의 내부식성을 위해 스테인리스 용접구조물을 많이 사용한다. 그런데 그 자료는 의외로 적은 편이다.

오스테나이트계 스테인리스강에 대한 독일압력용기에 대한 AD기준은 다음과 같다.

- ① Nb 또는 Ti를 함유하고 있는 강은 920±20℃의 안정화처리 또는, 1020℃(Mo와 Cu를 함유한 경우는 1050℃) 이상의 고용화처리.
- ② 탄소함유량이 0.03% 이하의 것은 920(980)±20℃의 안정화처리 또는, 1000(1050)℃ 이상의 고용화처리.
- ③ 0.03~0.07% 탄소강은 1000(1050)℃ 이상의 고용화처리.

단, 모재가 정규의 열처리를 받고 즉, 두께가 50mm를 넘지 않아 열처리가 필요없다로 되어 있으나, 1989

년판에서는 용접후의 열처리는 규격상으로 필요없다로 변했다.

규격상으로는 요구되지 않지만 용접후열처리가 옛날부터 자주 행해지고 있다. 그 주된 목적은 다음과 같다.

(1) 고용화처리

650℃ 근방의 가열 또는 다중용접 사이클을 받아서 탄화물이 입계에 석출하여 입계에 Cr이 부족하여 내식성이 저하될 때, 1050℃ 근처까지 가열, 급랭하여 탄질화물을 고용시킨다. 동시에 잔류응력과 가공조직을 없앤다.

(2) 안정화처리

Ti나 Nb를 함유한 스테인리스강을 850~930℃로 가열하여 탄질화물을 우선적으로 입내에 석출시켜, 입계부식을 방지한다. 분산석출에 의해 크립강도를 향상시킨다.

(3) 과시효처리(불감수성처리)

Ti나 Nb를 함유하지 않은 스테인리스강에서도 900℃ 근처로 가열하면 Cr탄화물 석출에 의해 발생한 입계의 Cr농도저하가 회복되는 방향으로 진행된다. 그러기 위해서는 판두께에 관계없이 4~8시간을 유지한다. 이 처리를 불감수성처리라고 부른다. 위의 열처리는 탄화물 석출의 과시효를 이용한 것으로서 예를 들면, C를 0.06%정도 함유한 스테인리스강을 750℃로 20시간 가열(Fig. 6 참조)하면 내입계부식성이 향상된다.

(4) 응력제거처리

용접잔류응력을 줄일 목적으로 850~930℃ 정도로 가열, 공랭 또는 서냉한다. 열처리조건과 잔류응력 완화율과의 관계를 Fig. 7에 나타내었다. 약 900℃로 가열하여 Fig. 7에 보여준 정도로 잔류응력을 줄이면, 응력부식균열은 방지되지만 내식성에는 좋은 영향을 미칠 리가 없다. 내식성과 열처리조건과의 관계는 C함유량을 변화시킨 재료의 데이터를 Fig. 6에, 또 저탄소로서 합

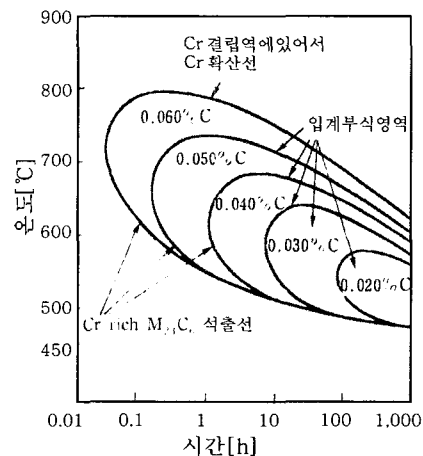
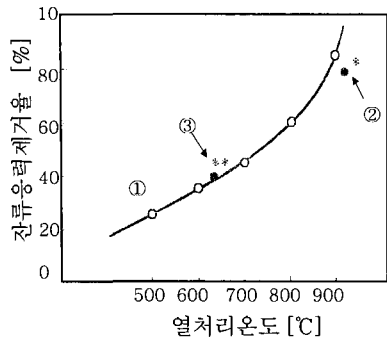


Fig. 6 오스테나이트계 스테인리스강의 용접후열처리 온도와 잔류응력 제거율



① SUS304 판 이음부 열처리온도1h
 ② SUS347TP(12B) 맞대기 용접부900°C × 2h의 열처리를 라슨, 밀러 파라미터로 1h 환산
 ③ SUS347TP(12B) 맞대기 용접부580°C × 1000의 열처리를 1h로 환산

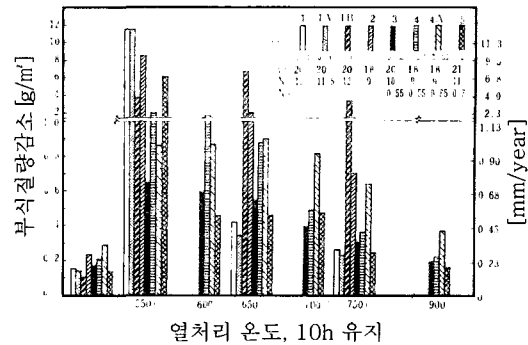
Fig. 7 C함유량에 따른 19Cr-10Ni강의 입계부식의 열처리조건 의존성

유량을 변화시킨 재료데이터를 Fig. 8에 나타내었다. 이 열처리에 의해 기계가공이나 사용 시에 있어서 치수 안정화를 기대할 수 있다.

(5) 응력제거 안정화처리

위에서 언급한 바와 같이 응력제거와 조직안정화를 겸한 열처리는 내응력부식성을 현저하게 향상시킨다. Nb를 함유한 오스테나이트계 스테인리스강(예: STS347)을 600°C 근처의 온도에서 사용하는 경우 용접 열영향부의 연성이 일시적으로 저하하여, 사용 중에 균열이 발생하는 수가 있다. 이러한 종류의 균열을 방지하기 위해서는 균열이 발생할 우려가 있는 600~650°C의 위험역을 빨리 지나고 850~930°C로 가열하여 응력제거와 조직안정화를 기하는 것이 유효하다.

이상의 열처리는 내식성을 고려하여 C함유량이 0.08% 이하의 일반적으로 사용되고 있는 오스테나이트계 스테인리스강을 대상으로 하고 있다. 따라서, 고



열처리 온도, 10h 유지

Fig. 8 Cr, Ni, Nb 함유량에 따른 오스테나이트계 스테인리스강 용접부의 Huey시험(65%초산부식) 결과에 미치는 용접후열처리 온도의 영향

온강도를 증시한 C함유량이 높은 것이나 특수합금원소를 함유한 강에 대해서는 거기에 적절한 조건을 선정할 필요가 있다.

고온강도를 증시하는 경우, 고용화처리 온도를 높게 하여 결정립을 크게하는 경우가 있으나, 입계의 내식성은 고온에서도 미세입자의 경우가 바람직하다. 보통 고온강도의 개선을 목적으로 PWHT를 행하는 경우는 없지만 보일러와 파이프 등에서는 냉간가공(15%이상)을 한 것에 대해서는 크립파단강도를 회복시키기 위해서 고용화처리가 행해지고 있다.

참 고 문 헌

1. 坂本, 超厚肉容接構造物の 容接後熱處理, 容接技術, 27-2 (1979)
2. Ohmae et al. : Study on Welding of 405 Stainless Clad Steel, 4th JWS, 1982
3. 容接學會編, 容接·接合便覽, 丸善, 1990, 152



- 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