

내열재료에 대한 용접기술

김 대 순

Welding Technology of Heat Resisting Material

D. S. Kim



김대순/현대중공업
(주)/1958년생/용접
기법 및 응용기술,
브레이징 기법 및 브
레이징 재료 개발에
관심이 있음

1. 서 론

21세기로 향하는 인류의 공동과제중의 하나가 지구 환경의 보존이다. 이를 위하여 우수한 기술력을 바탕으로 더욱더 많은 노력을 기울여야 한다. 즉, 무공해화 및 크린(Clean) 에너지원의 개발 등 해결해야 할 많은 과제가 남아 있다. 아울러, 화학 플랜트의 고성능화, 고능률화 및 무공해화 등도 해결되어야 할 중요한 문제점이며, 이들에 사용되는 재료 특히 내열재료에 부가되는 역할은 매우 크다. 즉 화력발전 플랜트 분야에서는, 초 임계압 증기조건에서 효율을 개선하는 기술개발이 진행중에 있으며, 이것을 실현하기 위해서 과열기관, 주증기관, 고온고압 밸브 등에 사용하는 내열재료의 개발 및 평가가 진행되고 있다.

또한 석탄의 가스화 및 열병합 발전 시스템에 있어서도 우수한 내열·내식재료가 요구된다. 이 재료의 모재는 물론이고, 용접부에 대해서도 우수한 품질이 필요하다. 원자력 분야에서는 구조재료인 개량형 9Cr 강(9Cr-1Mo-Nb-V), 12Cr 강(12Cr-1Mo-1W-V-Nb) 및 저탄소 316계통의 스테인리스강이 있고, 이들 재료의 용접성에 대해서도 많은

연구가 진행되어 있다. 또한, 합금의 특성 개선 및 금속간 화합물의 재료개발에 대해서도 연구가 되어 있으며, Cu합금과 316계통 스테인리스강의 헤더(Header)와의 이중접합이 확산 접합법으로 개발되어 있다.

석유화학공업 설비중에서는 증유 탈황장치 및 에틸렌(Ethylene) 제조장치 등 1,000℃ 가까운 온도에서 사용되는 화공기기가 많으며, 여기에 사용되는 재질로는 Cr-Mo강, 오스테나이트계 스테인리스강 및 ALLOY 800, 800H, HK합금, HP합금 등의 재료가 사용되고 있으며, 이러한 내열재료 및 용접부는 고온 환경의 특성인 크립(Creep) 특성 및 소려취성(Temper embrittlement) 특성 등이 요구된다.

본고에서는 석유화학 플랜트, 발전용 보일러, 원자력용 기기에 사용되는 내열재료 및 이에 관련된 용접성에 대해 기술하고자 한다.

2. 석유화학 플랜트 분야

2.1 설계 및 재료

석유정제 및 화학공업에 사용되는 고온·고압

용 반응용기는 그 설계조건인 운전온도 및 환경조건에 따라, 주로 0.5Mo강, 1.25Cr-0.5Mo강 및 2.25Cr-1Mo강 등의 고온용 저합금강을 사용하여 제작되는 주로 대형의 용접구조물이다. 증질유 분해설비인 리액터, 리제너레이터, 수소분해 설비인 하이드로-크랙커 등으로, 이에 사용되는 반응용기는 고온·고압 및 수소환경 하에서 사용되기 때문에, 관련된 설계온도에서의 고온강도 및 소려취성(Temper embrittlement), 크립성질 및 수소취성 등이 고려가 되어야 하므로, 설계, 재료선정 및 용접시공의 관점에서 적극적으로 검토가 되고 있다. 이러한 구조물을 1960년대 부터 설계상 고려되지 않았던 사용 분위기에서의 강도문제의 중요성이 지적되었다. 즉, 반응용기의 Shut-down시 발생하는 잔류수소에 기인한 수소취성 또는 오스테나이트계 스테인리스 육성 용접부의 초층에서의 디스본딩(Disbonding) 현상 등은 사용 분위기에서의 강도의 중요성을 보여주고 있고, 반응용기의 설계, 사용재료의 최적화 및 용접시공 기술에서의 개선 등을 통해 방지할 수 있었다.

내열강으로 제작되는 용접구조물 중에는 증질유에 수소를 첨가하여 경질유로 분해하는 반응기에서는 운전온도가 기기류의 설계조건에 따라 조금씩 차이는 있지만 대략 450℃ 부근이기 때문에 2.25Cr-1Mo강 등의 고온강도가 우수한 저합금강이 사용된다. 그러나, 고온에서 장시간 사용하면 함유된 미량원소 때문에 소위 소려취성이 발생되어 재료의 인성이 저하된다. 이러한 현상을 방지하기 위하여 화학성분을 엄격히 제한하는 J값($(Si+Mn)(P+Sn) \times 10^{-4}(\%)$)과 X값($(10P+5Sn+4Sb+As) \times 10^{-2}(\text{ppm})$)을 규정하게 된다. 여기서 J값은 200정도이고 X값은 20정도로 규제되어 있으며 제강법의 발달에 따라 각각 120 및 15이하로까지 요구되고 있다. 또한 고온에서 장시간 사용 및 Shut-down과정 등을 통해 발생하는 Temper Embrittlement의 정도를 평가하기 위해서는 모재 및 용접재료에 대해 소위 스텝쿨링(Step Cooling)이라고 하는 규정된 열처리 패턴에 따라 열처리를 실시하고 평가를 행한 후 실제 압력용기류의 제작을 위한 생산용접의 용접조건으로 적용하게 된다.

이러한 평가조건의 한 예를 들면

$$vTr40 + 1.5 \Delta vTr40 \leq 38^\circ C$$

와 같으며, 여기서 $vTr40$ 은 샤피 브이노치(Charpy V-Notch)시험에서의 천이곡선에서 40ft. lb(약 54 Joule)의 흡수에너지에 해당하는 온도이고, $\Delta vTr40$ 은 Step Cooling시험에 따른 천이곡선의 이동량이며 계수 1.5는 이동량에 해당하는 안전계수로서, 최근에는 요구조건이 보다 까다로운 제작 사양서에는 2.5로도 요구가 되고 있다. 이식은 고온에서 장시간 사용할 경우 Temp Embrittlement가 발생하여도 38℃에 있어서 40ft. lb이상의 인성을 보증하여야 된다는 것을 의미한다.

2.2 용접기술

후판의 2.25Cr-1Mo강의 재질로 된 고온·고압용 반응용기 중에는 설계조건이 고온(450℃ 이상), 고압(200Kg/cm² 이상)인 두께가 300mm를 넘는 경우도 적지 않다. 후판 들레 및 길이용접에는 자동용접이 적용되고 있는데 들레 용접의 용접개선은 협개선 형상으로 2패스 1층의 협개선(Narrow gap)용접이 주로 적용되고 있다. 또한, 확산성 수소량의 감소나 내 소려취화 감수성의 향상 등 반응용기의 품질요구에 충분히 견디는 성능을 확보할 수 있는 용접재료도 이미 개발되어 있다. 이중에서도 저수소계 용접재료의 개발은 Cr-Mo강 용접에 있어 중간응력제거(Intermediate Stress Relieving : ISR)의 생략을 가능하게 하였다. 즉, 종래의 600℃ 전후에서의 ISR처리 대신에, 300℃ 정도에서 2시간 정도의 탈수소처리(Dehydrogenation Heat Treatment : DHT)로 지연 균열을 방지할 수가 있다. 2.25Cr-1Mo강 후판 반응용기는 ISR대신에 DHT처리를 하여, 방사선 검사 및 초음파 탐상 등의 비파괴 검사를 실시한 후 후열처리(Post Weld Heat Treatment : PWHT)를 한다. 또한, 거의 대부분의 경우 일체화된 용기 전체를 로에 한꺼번에 장입하는 것은 불가능하기 때문에 최종 용접부는 국부 PWHT를 실시한다.

고온 및 고압의 수소환경에서 사용되는 반응용기의 내부는 내식성을 위해 Type 347, 316L 등의 오스테나이트계 스테인리스 용접재료로 육성용접을 행하게 된다. 경판(Head)이나 동체(Body)와 같이 용접면적이 넓은 부위에는 스트립 밴드로 된 와이어를 사용하여 SAW 또는 ESW방식의 육성용접이 시공되고 있으며, 이렇게 폭이 넓은 육성용접의 경우는 운전온도의 고온 및 수소분압의 증가

가 있으므로 디스본딩의 문제가 있는데, 이것은 주로 경계면의 탄화물층에 인접한 오스테나이트(γ) 조직의 조대한 결정립계에서 발생 및 진전한다. 이의 방지를 위해 용접조건을 고전류 및 고속 용접을 행하므로써, 냉각속도를 보다 증대시켜 경계면의 조대한 결정립 생성을 방지하며, 또한 경계부의 용접금속의 미세조직의 향상에 따라 경계부로의 수소 집적이 감소되는 등의 효과를 들 수 있다. 이 외에 FCAW 및 GTAW 용접이 협소한 부위와 소구경 노즐의 내면 육성용접에 자동화의 용이성등의 장점을 이용하여 적용되고 있다. 또한, PWHT후의 시그마(σ)상의 석출에 따른 스테인리스 용접부는 델타 페라이트(δ -Ferrite)량의 증가와 함께 취화는 촉진되고, 또한 다량의 수소를 저장하는데 따라 연성의 급격한 저하가 관찰된다. 따라서, 용접금속중의 δ -Ferrite는 3-10% 정도로 조절하는 것이 필요하다.

3. 원자력 부분

원자력에 대해서는 냉각매체로서 주로 경수를 이용하는 비등수형 원자로나 가압수형 원자로가 주종이고, 차세대 원자로로서 고속증식로의 실용화를 위한 연구개발이 진행되고 있다. 이 경수로는 약 300°C 전·후의 고온 수중에서 운전되기 때문에, 장시간 사용하여도 균열이 생기지 않는 고내열재료가 요구된다.

원자로용 고온재료에는 크립(Creep)을 고려할 필요가 있는 온도영역에서 사용되는 재료가 사용된다. 원자력 부분의 고온재료는 연료와 관련된 재료와 기기 구조용 재료로 구분되는데 구조용 재료가 고온 영역에서 사용되는 원자력 플랜트로는 고속증식로가 있다. 고속증식로는 냉각 매체로서 액체토륨(Th)이 사용되고 있다. 이 냉각매체로서의 특징은 사용되는 구조용 재료에 대하여 고온에서의 특성 이외에 냉각매체인 액체토륨이 고온에서 접촉되는 구조용 재료의 접촉표면에서 야금학적인 변화가 일어나기 때문에, 고온재료로서 필요한 특성 이외에 고온의 토륨환경의 효과를 고려한 재료의 선정 및 개발이 중요하게 되었다. 현재까지의 고속증식로용 구조용 재료는 주로 화력 및 보일러 등에 사용되는 고온재료 중에서, 고속증식로 사용에 적합한 내열재료를 선정하여 이에 토륨

등의고속증식로의 특유한 문제를 해결한 개선된 재료가 사용되고 있다.

배관류에는 스테인리스 304, 316 및 321계통 및 Normalizing + Tempering(NT)처리된 2.25Cr-1Mo강이 사용되었다. 고온의 토륨환경 하에 있는 원자로 용기의 1차 냉각계에는 스테인리스 304가 사용되었으나, 토륨환경 및 수·증기환경 하에 운전되고 있는 증기발생기는 응력부식 균열에 강한 페라이트(Ferrite)의 2.25Cr-Mo강의 NT강재가 사용되었다. 또한 증기발생기의 과열기에는 고온강도를 증시하여 오스테나이트계 스테인리스강 중에서도 SCC에 보다강한 Type321이 채용되었다. 이 재료는 화력발전 등에 널리 사용되고 있으며, 고속증식로의 경우는 토륨환경에서의 탈·침탄, 부식 및 수·증기 중의 SCC 및 용접성에 대한 결과를 검토한 후, 성분변화나 열처리 방법등이 결정된다.

증기발생기는 용접부의 건전성과 신뢰성이 아주 중요하기 때문에 고온강도, 내식성 및 장시간 사용에 따른 안정성이 우수하고 용접성이 양호한 재료가 요구된다. 이 중에 개발된 9Cr-1Mo(9Cr-1Mo-Nb-V)강이 고속증식로 증기발생기용 재료로 검토되고 있다. 또한, 이 재료는 고온강도 특성이 매우 우수하기 때문에 화력·보일러에도 적용이 되고 있으며, 용접재료의 개발 및 용접시공에 관한 기술이 축적되어 향후 고속증식로의 실용화에 기여할 수 있다고 판단된다.

개발된 9Cr-1Mo강은 용접 완료후의 응력제거(Stress Relieving : SR)처리의 조건에 따라서, 열영향부의 조직이나 강도에 영향을 줄 수가 있다. 용접 열영향부는 용접시의 열 사이클에 따라 미세조직이 결정되고 이에 따른 강도와 인성의 차이가 있다.

재현 열사이클은 최고온도인 1,200°C 부근에는 조대화 영역이며 900°C 부근에는 미세영역에 해당된다. 크립 파단강도는 조대화 영역에서는 SR온도가 낮을수록 높아지는 경향을 가지며, 보다높은 SR온도(예, 760°C)에서는 모재에 유사한 정도의 강도를 확보한다. 한편, 미세립 영역에서의 크립 파단강도는 SR조건에 영향을 받지 않으나, 모재 강도보다 다소 낮아지는 경향이 있다.

4. 보일러 부분

화력발전 플랜트는 지구의 환경문제 해결의 방안으로 고효율화를 추진해야 하는 바, 이를 위한 수단은 초고온 및 고압 사이클의 도입이다. 즉, 터빈 재료로써 니켈(Ni)계 합금 및 Ferrite계 재료가 검토되고 있으므로 이에 대한 재료 및 시공기술의 개발이 진행되고 있다. 석탄이용에 관련된 문제로는 석탄회에 따른 부식성 및 고온에서의 강도를 확보할 수 있는 재료 등이 있다. 이를 극복하게 된 기술의 하나는 보일러 튜브, 주증기관 및 재가열관에 9Cr-1Mo-Nb-V강(이하 9Cr-1Mo Mod. 강이라 칭한다)이 대폭적으로 적용이 되었다.

보일러용 재료에 사용되고 있는 내열강은 Cr-Mo강이 일반적이나, 사용온도가 고온(예, 500℃ 이상)인 경우에는 일부 보일러 Tube에 스테인리스강이 사용되고 있다. 그러나, 스테인리스강은 Ferrite강에 비하여 열팽창 계수가 크기 때문에, 가동 및 정지에 따르는 열응력이 클 뿐만 아니라, 열전도 특성의 열악 및 내응력 부식균열 감수성이 높다는 등의 결점을 가짐에 따라 사용 범위가 한정된다. 즉 초 고온·고압 보일러도 가능하면 Ferrite강을 채택해야 하나, 증기온도가 600℃ 이상에서 고압력으로 운전되는 경우 2.25Cr-1Mo강에서는 고온강도 및 고온산화에 대한 내식성이 불충분하다. 그러므로, 기존의 고 Cr계 합금에 Nb, V, W 및 N 등을 첨가하여 고온강도를 개량한 9~12Cr계의 Ferrite계 강이 개발되었다. 이 중에서 Nb 및 V를 첨가한 9Cr-1Mo Mod. 강은 627℃까지의 Creep파단 강도가 스테인리스 304강 보다 높아, 매우 높은 허용응력을 가지므로 이미 산업용 보일러의 소구경 가열관, 주증기관, 고온 재열증기관 및 대구경관에 실용화되고 있다. 또한 새로 개발된 9Cr-1Mo-Nb-V강의 일부를 W으로 치환한 9Cr-0.5Mo-1.8W-Nb-V강은 600~650℃ 범위의 고온영역에서도 스테인리스 304 HTS, 321HTS 및 347HTS와 동등 이상의 고온강도가 확보되면서,

고온·고압 보일러용 재료로써 확대 적용이 기대되고 있다. 이러한 고Cr강 재료를 실제 보일러에 채택하는 데는 용접 및 가공성에 충분한 주의가 필요하다.

개량된 9Cr-1Mo Mod. 강과 같은 고합금 및 고강도 재료를 사용하여 용접시공을 할 경우는 탄소당량이 높기 때문에 저온균열의 방지를 위한 용접 전·후에 예·후열의 관리가 중요하다. 또한, Nb 등의 첨가에 따른 용접금속은 고온균열 감수성이 높으므로 특히 협개선에 따른 후판 대구경관의 용접에서는 용접입열 관리가 매우 중요하다. 또한 용접시의 산화와 용합불량의 방지에 특히 유의할 필요가 있다. Cr함유량이 높으므로, GTAW 용접시 이면비드 용접에서 Cr산화물이 발생하지 않도록 반드시 Ar 등의 불활성 가스로 이면에서의 가스로 보호를 완전히 해주지 않으면 안된다. 또한, 용융금속은 점성이 높고 열전도도 나쁘므로 탄소강이나 저 Cr합금강과 달리 블록형 비이드가 되기 쉽다. 그러므로 적층과정에서 개선벽에 좁게 쌓이기 쉽고, 용합불량이 생기기 쉬우므로, 이러한 경우에는 그라인더(Grinder) 등으로 비이드를 수정한 후 용접을 행해야 한다.

5. 결 언

발전설비류 및 플랜트 기기류의 제작산업 등은 일본과 더불어 세계시장에 적극적으로 참여하고 있는 우리의 미래산업이라고 할 수 있다. 이와같은 분야의 건설한 발전은 국제경쟁력의 강화를 위해서는 필수적인 조건이며, 새로운 생산신기술 및 생산원가의 절감과 이에따른 응용기술의 개발 등은 우리가 당면하고 있는 과제에 틀림이 없다.

지금과 같은 고임금시대의 불황속에서는 가장 시급히 풀어야 할 문제가 생산설비의 현대화(자동화)를 통한 생산성 향상 및 원가절감이며 앞서 언급한 각종 기법 및 장치개발과 더불어 재료자체의 국산화도 동시에 진행되어야 할 과제가 되고 있다.