

초대형 단강 압력용기 제작 기술의 동향

지 병 하 · 김 정 태 · 박 화 순

State of the Art in the Manufacture of Heavy Forging Reactor Vessel

Byung-Ha Chi, Jeong-Tae Kim and Hwa-Soon Park

1. 서 론

압력용기의 제작에는 사용 압력, 온도, 내부에 수용되는 유체의 종류 등에 따라 다양한 소재와 제작 방법이 사용된다. 최근의 플랜트 효율 상승과 프로세스의 발전에 따른 급격한 대형화 추세는 1기 중량 1200톤의 초대형 압력용기를 상용화 하는 수준에 이르렀다. 이러한 초대형 압력용기의 제작은 단순한 Manufacturing의 개념을 넘어 설계, 소재, 부식, 용접, 가공, 운송, 비파괴 검사, 안전 및 신뢰성 등 광범위한 지식이 요구되는 고도의 Engineering 수준에서 이해되어야 한다.

전보¹⁾에서는 압력용기용 강 중에서 가장 기술변화의 추이가 빠르고 가혹한 환경에서 사용되는 Cr-Mo계 압력용기용 강(소재)에 대한 기술 개발 동향과 야금학적인 문제점을 중심으로 상세히 논하였다. 본 해설에서는 압력용기 중에서 고도의 엔지니어링 수준이 요구되는 초대형 극후 단강 압력용기의 제작기술, 특히 용접시공에 관련된 국내의 기술 현황 및 야금학적 문제점에 대하여 설명하였다. 내용에 있어서 압력용기에 일반적으로 적용되는 경우를 제외하고는 원자력 압력용기와 화학 플랜트용 압력용기를 구분하여 설명하였다. 원자력 압력용기의 경우 국내에서 가동 중인 원자력발전의 대부분을 점하는 가압경수로형 원자로 (Pressurized Water Reactor)를 주대상으로 하였으며, 화학플랜트용 압력용기의 경우는 중질유분해, 중유직접탈황 등 고온고압 수소분위기의 가장 가혹한 환경에서 사용되는 Cr-Mo계 압력용기를 중심으로 설명하였다. 특히 문헌 등으로부터 입수하기 어려운 국내 제작 현장의 기술 현황과 문제점을 가능한 범위 내에서 언급하였다.

2. 압력용기의 제작 기술 현황

2.1 압력용기 소재의 기술 개발 현황

2.1.1 압력용기용 강의 개발 동향

원자력 압력용기용 강(ASME SA508 Cl.3)의 경우

소재의 두께에 비해 중성자 조사손상, 유도방사화 등의 문제점으로부터 소입성 개선을 위한 합금원소의 첨가에 상당한 제약이 있으므로, alloy modification에 의한 방법 보다는 주로 열처리, 단조, 제강 등의 개선에 의한 강도 및 인성의 확보에 지속적인 노력을 기울여 왔다. 그 결과 종래의 VCD(Vacuum Carbon Deoxidation) 정련에 Si 탈산 및 Al에 의한 결정립 미세화 효과를 추가하는 방안²⁻⁴⁾, Ac1과 Ac3 변태점 사이의 intercritical 영역에서의 열처리를 통해 결정립을 미세화 하는 방안^{5,6)} 등이 검토되어 과거에 비해 현저하게 인성이 개선된 압력용기의 제작이 가능하게 되었다.

한편 원자력 압력용기 재료의 사용 중 소재열화 형태인 중성자 조사손상(irradiation embrittlement)은 그 중요성의 측면에서 오랫동안 방대한 연구가 이루어졌으나^{7,8)}, 본 해설에서는 소재 제작과 관련된 중요한 내용만을 요약하였다. 야금학적 측면에서 일반적으로 결정립이 미세한 조직의 조사취화에 대한 저항성이 조대한 조직에 비해 큰 것으로 알려져⁹⁾ 있어 앞에서 언급한 결정립 미세화에 의한 인성 개선의 노력은 조사손상의 억제에도 유효한 효과가 기대된다. 불순물 원소의 영향으로는 Cu¹⁰⁾, B¹¹⁾, N¹²⁾, P¹³⁾ 등이 대표적인 유해 원소로 알려져 있으나, 제강과정에서 이미 이러한 원소는 엄격한 scrap의 선별, 정련 등을 통하여 spec. 요구치에 비해 극히 낮은 수치로 관리가 가능하므로 사실상 제작시의 변수로는 그다지 고려되지 않고 있다. 용접부위는 모재에 비해 동일한 중성자 조사에 의해 현저한 취화를 나타내므로¹⁴⁻¹⁵⁾, 제작 계획단계에서 최대 취화역인 beltline과 용접부가 가능한 한 일치하지 않도록 고려하여 제작되고있으며, 그 외의 용접부위에 대해서도 후술하는 것과 같이 가급적 최소화하기 위한 여러 가지 방안들이 강구되고 있다.

화공압력용기의 경우 중질유 분해(hydrocracking), 중유 직접탈황(hydro-desulphurizing), 석탄액화(coal liquefaction) 등 고온고압수소 환경하에서 사용되는

압력용기의 사용 조건은 화학 반응의 효율 향상에 대응하여 급격히 고온고압화 추세에 있다. 이에 부응하여 그 동안 대표적인 상용 소재로 사용되던 conventional 24Cr-1Mo강 (ASME SA336F22)에 대한 재평가 작업^{16,17)}을 거쳐 이 소재를 대체할 새로운 강종의 개발과 평가에 대한 연구가 일본과 미국을 중심으로 80년대 초반부터 활발히 이루어져 왔다. 그 결과 일본의 maker를 중심으로 3Cr-1Mo-V계 강이 개발되어 ASME Code (SA336F3V) 취득을 거쳐 실용화가 완료되었으며, 이에 이어 미국의 API/MPC 주관하에 24Cr-1Mo-V(ASME SA336F22V) 강이 개발되어 역시 현재 수기의 압력용기가 가동 중에 있다. Fig. 1은 고온고압의 수소분위기에서 사용되는 대표적인 3강종에 대하여 ASME B & PV Code에 규정된 design stress intensity를 비교한 것으로 종래의 강에 비해 뛰어난 고온강도특성을 나타냄을 알 수 있다.

국내에서는 저자가 소속된 업체에서 1990년대 초부터 3단계의 program으로 단조강에 대해 국산화에 착수하여 2000년 말 3단계가 모두 완료되었다. 1단계로서 시작된 conventional 24Cr-1Mo강의 경우 94년

이미 국내에 설치되어 7년 여의 기간에 걸쳐 가동 중에 있으며^{18,19)}, 2단계인 3Cr-1Mo-V 강은 100톤 mock-up 제작 및 평가를 거쳐²⁰⁻²²⁾ 용접성의 검토^{23,24)}까지 완료되었다. 3단계인 24Cr-1Mo-V 강도 이미 개발이 완료되어²⁵⁾ 현재 국외로부터의 수주가 이루어져 350톤 규모의 압력용기 2기가 제작 중에 있다.

이상의 국내 현황에 대한 설명과 같이 국내 기술에 의해 가압 경수로형 원자력 압력용기와 극후 Cr-Mo계 단강 압력용기에 대한 완전한 국산화가 달성 되었다.

2.1.2 소재 제작 기술 동향

Fig. 2는 압력용기 소재의 기술개발 방향을 간략히 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 design concept는 주로 플랜트의 효율 및 출력의 향상, 안전 및 신뢰성의 향상, 보수 용이성, in-service inspection(ISI) 주기의 장기화 및 검사기간의 단축, 플랜트 건설 공기 단축에 집중되어 있으며, 이에 대응해 압력용기 소재는 일체화, 대형화, 용접선의 감소화 등의 기술개발에 많은 노력이 집중되었다. 이러한 기술의 실현을 위해서는 앞 절에서 설명한 새로운 압력용기용 강의 개발이 그 전인 역할을 했음은 물론이다.

용접기술의 눈부신 발전에도 불구하고 용접부위는 모재와 기계적 성질의 불연속부인 점, 비평형 조직으로 사용 중의 경년열화가 크고 중성자에 의한 조사열화가 현저한 점^{14,15)} 등으로부터 가급적 용접선의 감소를 위한 노력이 동시에 이루어져 단조강의 채용 비율이 급격히 증가했으며, 각종 attachment를 본체와 일체형으로 제작하는 비율이 현저히 증가하였다. 용접부위의 감소를 위한 일체화, 단강화, 대형화의 예는 다음과 같으며, Fig. 3은 이러한 노력의 결과에 따른 design의 변화를 도식적으로 나타낸 것이다²⁵⁾.

- 판재의 열간 굽힘성형에 의해 원통형으로 소성한 후 용접에 의해 단관(shell)을 제작하는 방식에서 shell 단조에 의해 단관을 제작함으로써 long seam 용접의 생략.

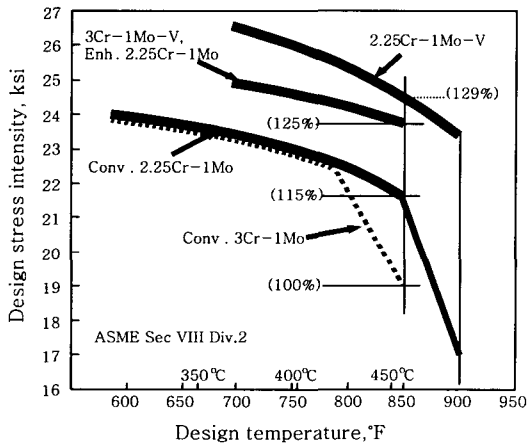


Fig. 1 Design stress intensity of pressure vessel steels

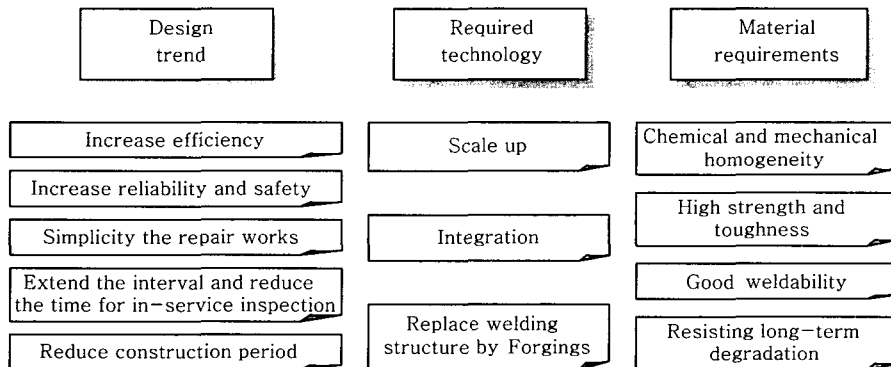


Fig. 2 Pressure vessel technology concept and requirement for material

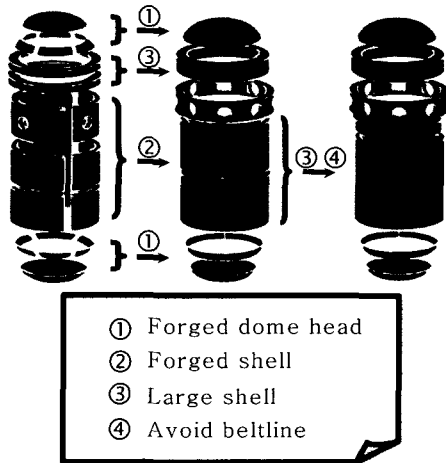


Fig. 3 Design change of nuclear reactor vessel for reducing the welding lines and irradiation damage²⁵⁾

- Ingot의 대형화로 각 단관의 길이를 늘여 전체 단관의 수를 감소시킴으로써 원주용접부를 감소.
 - 3차원 곡면상에서 set in 방식으로 접합되는 단관과 노즐의 용접은 구속도가 매우 높아 용접결합의 발생 위험이 크나 형단조에 의해 노즐 일체형 단관을 제작함으로써 용접결합 방지.
 - 육성 용접에 의해 제작되던 압력용기 내부장치를 지지하기 위한 support ring을 형단조에 의해 일체형 단관으로 제작.
 - 곡면으로 열간 성형된 6 조각의 pedal plate를 용접하여 반구형 dome head를 제작하는 대신 die forging에 의해 일체형 dome head 제작.
- 이상의 일체화 기술은 대부분 대형 ingot의 형단조 기술에 의한 것으로 국내에서는 적용의 실적이 부족하

며 향후 열간 소성 전산해석, die 설계기술 등의 연구에 많은 노력이 따라야 할 것으로 생각된다.

2.2 원주 용접 (Girth Seam Welding)

2.2.1 용접 조립

Fig. 4는 압력용기 제작과정 중 중요한 단계를 사진으로 설명한 것으로 제작 순서는 판재의 열간소성 또는 단조에 의해 각각 제작된 단관, dome head, 플랜지, 노즐에 대하여 내부 오버레이 cladding을 실시한 후, 단관과 단관 또는 단관과 dome head, 노즐, 플랜지 등을 순서대로 원주 용접에 의해 조립한다. 원주용접에 있어서 원자력 압력용기의 경우 최대 두께가 270mm에 달하며 중질유분해 등 석유정제에 사용되는 압력용기의 경우 300mm 전후의 극후육 압력용기의 제작이 일반화되어 있어 종래의 그루브 형상에 의한 용접시 최대 그루브 폭이 100mm 이상에 달하게 된다. 따라서 용접 생산성의 측면에서 자동화, 그루브의 narrow gap 화, tandem 용접의 적용은 필연적이며 이 분야에 있어서의 기술개발에 많은 resource가 집중되어 이미 눈부신 기술개발이 이루어졌다. Fig. 5는 극후 압력용기의 용접에 주로 사용되는 SAW와 GMAW에 의해 저자가 소속된 회사에서 제작된 300mm두께의 Cr-Mo 합금강의 용접부 macro 조직을 나타낸 것이다¹⁹⁾. SAW의 경우 적용된 그루브의 각은 3° 이하로 표면부 간격이 30mm를 넘어서지 않는다. GMAW의 경우 BHK 방식의 arc oscillation으로 용입불량을 방지하며 간격 10mm이하의 I형 그루브에 각층 1 pass로 용접 되었다.

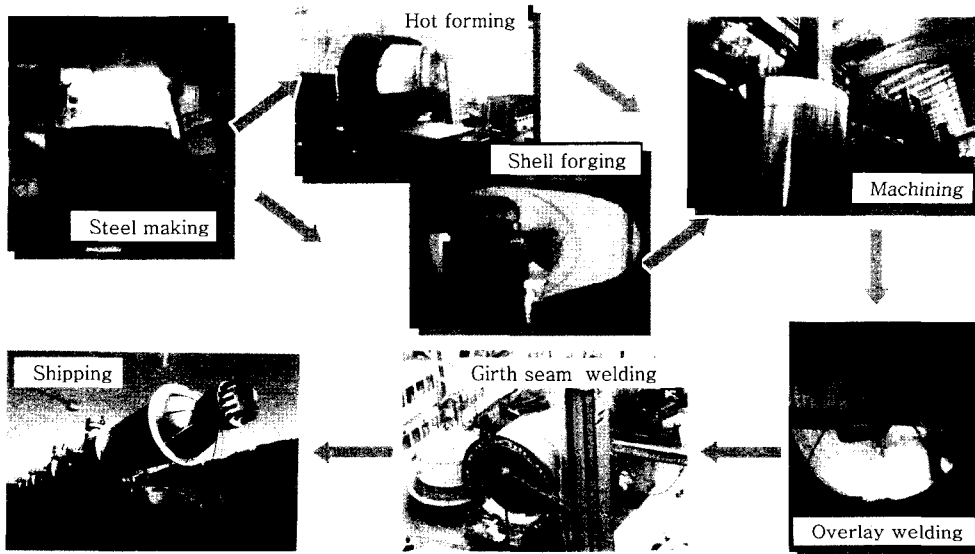


Fig. 4 Manufacturing sequence of reactor vessel

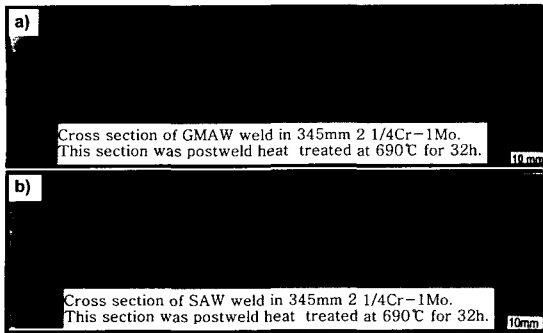


Fig. 5 Macro structure of the narrow gap weld joint¹⁹⁾

2.2.2 용접부의 야금학적 현상

● 용접 열영향부 인성

원자력 및 각종 화학 플랜트 용 압력용기의 초대형화, 극후속화 경향은 입열량의 증가로 이어지며 그 결과 열영향부의 인성 저감을 초래한다. 더욱이 텀퍼취화, 수소취화, 수소침식, 중성자 조사취화 등 사용 중 재질 열화와 관련된 취화요인은 용접부의 초기인성을 가능한 한 낮은 수준으로 요구한다.

Cr-Mo계 강의 경우 일반적으로 열영향부가 모재 및 용접금속에 비해 월등히 뛰어난 충격인성을 나타내는데 비해 원자력 압력용기용 강(ASME SA508 Cl.3)의 경우 모재에 비해 매우 낮은 충격인성을 나타내어 이에 대한 개선 노력이 지속적으로 이루어졌다. PWHT 단계의 용접열영향부의 미세조직관찰에 의한 연구결과²⁶⁾에 의하면, 열영향부의 최고 도달온도가 높을 수록, 용접 후 냉각속도가 느릴수록 인성이 저하하며 이는 M-A constituent의 형성거동과 직접 관련되어 있음을 시사하였다. 동 소재에 대해 김정태²⁷⁾ 등은 앞에서 설명한 intercritical 영역에서의 열처리에 의해 결정립을 미세화하여 인성을 개선한 강의 실용접부 HAZ에 대하여 충격 인성을 조사한 결과, 열처리에 의한 모재의 인성개선 효과가 PWHT 후의 HAZ에서도 그대로 유지됨을 확인하였다. 또 VCD에 의한 정련에 추가하여 Si 탈산 및 Al에 의한 결정립 미세화 처리에 의해 모재의 인성을 개선한 효과 역시 실용접부 HAZ에서 그대로 유지됨을 확인 하였다³⁾.

이상의 설명과 같이 HAZ의 인성 개선에 대한 노력의 결과 현재 적용되고있는 대단히 보수적인 용접방법에서는 사실상 거의 문제가 없으나, 향후 생산성 향상을 위한 입열량 증가 등의 움직임에 대비해 더욱 개선할 필요성은 여전히 높다고 할 수 있다.

● 용접부 수소침식

수소침식이란²⁸⁻³²⁾ 고온고압 수소 환경하에서 강 중에 확산 침입한 수소가 고용탄소 또는 열역학적으로 불

안정한 탄화물과 반응해 메탄가스(CH_4)를 형성함으로써, 표면탈탄, fissuring 등을 유발하거나 결정립계에 기포(methane bubble)를 형성해 인장강도, 연성, 인성 등의 현저한 저하를 초래하는 고온 수소손상의 한 형태로서 수소취성과는 달리 탈수소 처리에 의해서도 회복 되지않는 비가역적 영구 손상이다. 따라서 기지 중의 탄소의 활동도(activity)는 메탄가스의 생성반응에 직접적인 영향을 미치는 가장 중요한 인자이며 수소 침식의 억제에 관한 대부분의 연구는 이의 저감에 귀결된다.

용접부의 경우는 모재에 비해 비평형 조직으로 수소 침식이 발생하기 쉬운 취약점을 갖는다. 김동진 등³³⁾은 autoclave를 이용하여 3Cr-1Mo-V 강의 실용접부에서 채취한 시험편을 600°C, 450기압의 수소분위기에 유지한 후 충격인성의 변화를 조사한 결과, 용융경계부가 가장 심한 열화를 나타내며 HAZ, 용접금속, 모재의 순으로 열화의 발생 정도가 완화된 것을 관찰되었다. 한편, 동일 강종에 대한 김병훈 등³⁴⁻³⁶⁾의 Thermicmaster를 이용한 재현용접열영향부의 수소침식시험 결과에 의하면 Fig. 6에서와 같이 용융경계부 부근의 조대정 영역의 열사이클을 모사한 시험편은 입계의 거의 전면을 메탄 기포가 덮고있는데 비해 세립역의 열사이클을 모사한 시험편에서는 연성파면을 나타내는 것을 알 수 있다. 파 단재의 전해분리 추출잔사의 X선 회절 시험에서 용접 금속, HAZ, 용융경계부의 순으로 열역학적으로 불안정한 M_7C_3 type 탄화물의 상대 회절강도 비가 높아 수

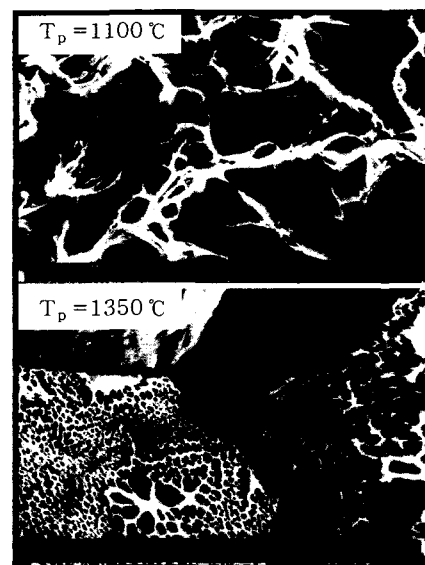


Fig. 6 Sem image of the impact fractured surface of the simulated haz specimen after exposure to high pressure and temperature hydrogen³⁴⁾ (3Cr-1Mo-V Steel, at 600°C for 300hr, P_{H_2} = 45MPa)

소침식의 정도가 용접부의 열적 불안정성에 따른 탄화물 형성특성과 밀접한 연관성을 가지고 있음을 시사하였다.

이상과 같이 모재의 경우 이미 수소침식에 대한 장시간의 실증시험이 완료되어 안전성이 검증되었으나, 용접부의 경우에는 적용 process, 용가재의 종류, 용접 parameter, 후열처리 조건 등에 따라 수소침식에 대한 감수성이 큰 차이를 나타낼 수 있으므로 향후 이 부분에 대한 기술기준 및 검사기술의 개발에 많은 노력이 요구된다.

● 용접부 템퍼취화 감수성

일반적으로 극후 압력용기용 강은 조질처리에 의해 높은 인장강도와 뛰어난 충격인성을 나타내지만 대체로 사용온도 영역이 템퍼취화 온도역과 일치하며 수소취화, 수소침식 등 장시간 운전에 따른 인성 저감 요인이 상존하므로 인성의 확보는 매우 중요한 요구 특성이다. 특히 복잡한 용접 열cycle에 의해 모재에 비해 불안정한 조직을 갖는 용접부의 경우 장시간 사용에 따른 열화에 의한 충격인성의 저하가 우려되므로 용접부의 초기 인성의 확보는 중요한 과제로 주목된다.

입계에 편석하여 입계의 결합력을 떨어뜨리는 P, Sb, Sn, As 등의 불순물원소와 그 효과를 조장하는 Mn, Si 등의 원소에 의해 발생하는 템퍼취화의 기구 및 최근의 연구 동향에 대해서는 전보에서 비교적 상세히 해설 하였으므로 본 해설에서는 용접부에 국한하여 언급하였다.

템퍼취화에 직간접적으로 영향을 미치는 원소의 함량을 parameter로 하여 템퍼취화 감수성을 예측하는 몇 가지 parameter가 제안 되어 있으나 그 중 용접금속에는 Bruscato factor ($\bar{X} = (10P+5Sb+4Sn+As)/100$, ppm)가 일반적으로 사용되고 있다. 용접금속의 템퍼취화 감수성 계수에 대한 일반적인 규제치는 없으나 중질유분해, 중유직접 탈황 등 가혹한 분위기에서 운전되는 설비의 경우 정유 플랜트 관련 엔지니어링사에서 10이하를 규정하는 경우가 있다. 이러한 계수는 용가재의 화학조성에 절대적으로 의존하므로 필요에 따라 용가재의 발주시점에 요구치를 명기하여 엄격한 관리하에서 제작된 용가재를 사용하여야 한다.

한편 김동진³⁷⁾ 등의 3Cr-1Mo-V 강 실용접부에 대한 3000시간에 걸친 등온열처리에 의한 연성취성 파면천이 온도(DBTT)의 변화를 조사한 결과에 의하면 모재와 거의 동등한 수준으로 나타났다. 또 GMAW와 SAW로 용접 process를 달리한 경우에도 초기 인성은 약간의 차이를 나타내나 역시 등온 가열에 의한 템퍼취화의 정도에서는 명료한 차이를 관찰할 수 없었다.

2.3 오버레이 용접 (Overlay Welding)

2.3.1 용가재 및 적용 Process

대부분의 경우 압력용기의 내벽은 내부 유체에 의한 부식을 방지하기 위하여 내식합금으로 cladding된다. Cladding 재질은 내부에 수용하는 유체의 종류에 따라 달라지나 일반적으로 austenite계 스테인리스 강이 사용된다. 적용 용접 process는 주로 strip 용가재에 의한 SAW가 사용되나 모재의 용입에 의한 희석(dilution)을 억제하기 위하여 arc에 의한 발열대신 용융슬래그의 저항발열을 이용한 ESW의 적용이 점차 확대되는 추세에 있으며, 특히 이를 더욱 개선하여 magnetic force에 의해 용융금속의 퍼짐을 원할히 하여 미려한 bead 외관을 얻을 수 있는 MAGLAY³⁸⁾ 등이 보편화되는 추세에 이르렀다.

용접은 압력용기의 넓은 내면에 시공되므로 효율 및 생산성의 향상을 목적으로 strip 용가재가 점차 광폭화되어 최근에는 국내에서도 150mm 광폭 strip의 사용이 보편화되었다.

현재 국내 원자력 발전의 대부분을 점하는 가압경수로형 원자력 압력용기(PWR)의 경우, 과거에는 모재에 의한 penetration에 의한 희석을 고려하여 SAW에 의한 TP309L 스테인리스 강 strip의 초층 용접 시공 후 TP308L을 사용하여 둘째 층의 오버레이 용접을 시공하는 double layer 오버레이 용접이 적용되었으나, 현재는 전용으로 개발된 특수 strip의 사용과 합금조성의 희석을 플럭스에 의한 합금원소첨가로 보상함으로써 TP309L단층 용접시공만으로 요구되는 성능을 만족하게 됨으로써 생산성 측면에서 획기적인 개선이 이루어졌다³⁹⁾.

화학 플랜트에 사용되는 압력용기의 경우 엄격히 관리되는 고온고압수 분위기에서 사용되는 원자력 압력용기에 비해 폴리티온산 침식 등 훨씬 가혹한 부식분위기에서 사용되므로 Nb, Ti 등에 의해 안정화 처리된 TP347, TP321 등의 안정화 스테인리스 강이 내식금속으로 사용되는 경우가 많다. 시공은 일반적으로 SAW에 의해 TP309L이 초층 시공되고 둘째 층에는 ESW에 의해 TP347이 시공되는 double layer 오버레이 용접법이 적용되어 왔다. 그러나 생산성 향상의 요구에 부응하여 최근에는 모재에 의한 용접금속의 희석을 고려해 적절한 범위의 화학조성으로 up-grade한 용가재를 사용한 single layer 오버레이 용접의 적용이 확대되는 추세에 있다. 이 경우 사전 시험용접(PQ)에 의해 모재의 조성 및 용접 parameter를 적절히 조절할 필요가 있다. Fig. 7은 single layer 오버레이 용접에 의해 얻어진 용접금속에 대하여 Nb와 C 함량의

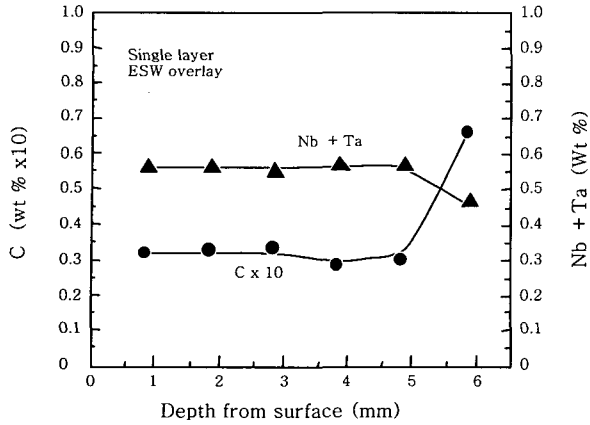


Fig. 7 Depth profile of C and Nb+ Ta concentration for TP 347STS ESW single layer overlay³⁷⁾(TP347 STS / 3Cr-1Mo-V steel)

depth profile을 조사한 것으로 TP347 스테인리스 강의 spec.의 요구조건을 깊이 3mm의 유효깊이 까지 충분히 만족함을 알 수 있다⁴⁰⁾.

2.3.2 오버레이 용접부의 조직

- δ-ferrite

Austenite계 용접금속의 경우 일반적으로 고온균열의 방지를 위해 5~10%의 δ-ferrite의 함량을 규정하고 있다. 스테인리스 강 용접부의 고온균열에 미치는 δ-ferrite의 영향과 그 기구 규명에 관한 연구는 지금까지 방대하게 수행되어져 많은 우수한 결과⁴¹⁻⁴²⁾들이 발표되어 있으므로 본 해설에서는 이에 대한 상세한 설명은 제외한다.

용접금속의 δ-ferrite 함량은 일반적으로 용가재의 조성에 크게 의존하나 압력용기의 오버레이 용접과 같이 이종재질과의 용접인 경우 모재의 회석에 의해 용접금속의 조성이 변하므로 모재에의 용입에 영향을 미치는 용접 전류, 전압 등의 용접 parameter의 변화는 δ-ferrite 함량과 밀접한 연관을 갖는다. 따라서 사전 PQ를 통하여 모재, 용가재, 용접조건에 따른 δ-ferrite 함량을 조사하고 용접시공에서도 PQ에서 결정된 WPS를 준수해야만 정확한 함량의 조절이 가능하다.

- 계면 조직

저합금계의 모재는 대부분 bainite 또는 ferrite-pearlite(이하 austenite에 대비하여 넓은 범위의 ferrite로 통칭) 조직을 나타내는데 비해 오버레이 용접금속의 경우 austenite 조직을 가지므로 두 소재의 경계부는 bcc와 fcc의 결정 구조가 다른 이종재료의 접합계면을 형성하여 기계적 성질의 차이 외에도 압력용기의 제작 및 운전 중의 승온, 냉각시 austenite/

ferrite 양자의 열팽창 계수의 차에 기인하는 응력의 발생이 예상된다. 금속조직 측면에서는 PWHT시 양소재의 Cr 함유량의 차에 기인하는 탄소에 대한 chemical potential차로 인해 모재의 C이 용접금속 측으로 확산 이동함으로써 모재측에 탈탄층을 형성함과 동시에 경계부 용접금속 층에 Cr탄화물 층을 형성하게 된다. 이러한 계면의 특성은 오버레이 용접금속의 박리 저항성과 직접 관련되므로 중요한 의미⁴³⁾를 갖는다.

2.3.3 고온고압 수소 분위기에서 사용되는 오버레이 용접부의 수소유기박리 (HID, Hydrogen Induced Disbonding) 현상

압력용기의 사용 중 내면 오버레이 층의 박리에 관한 현상은 제작 중 발생하는 under bead cracking과는 구분되며 주로 중질유분해 등 고온고압의 수소 분위기에서 사용되는 압력용기에서 발생의 빈도가 높아 주의를 요한다. 발생 유형은 주로 운전 종료시 상온으로 shut-down하여 수~수십시간 경과한 후 오버레이 용접금속과 모재의 경계부를 따라 경계면에 평행한 파단의 형태로 나타난다. Fig. 8은 2Cr-1Mo-V강 모재에 TP347 스테인리스 강을 오버레이 용접한 시험편을 고온고압(575°C, 300기압) 수소 분위기의 autoclave에서 유지한 후 급냉하여 초음파 C-scan에 의해 경계부위의 박리현상(disbonding)을 시간의 경과에 따라 관찰한 것이다. 그림에서와 같이 초기에 거의 관찰되지 않던 박리부위가 시간의 경과에 따라 수일에 걸쳐 점차 확대됨을 알 수 있다.

이러한 박리의 원인은 大西敬三 등⁴⁴⁻⁴⁵⁾의 광범위한

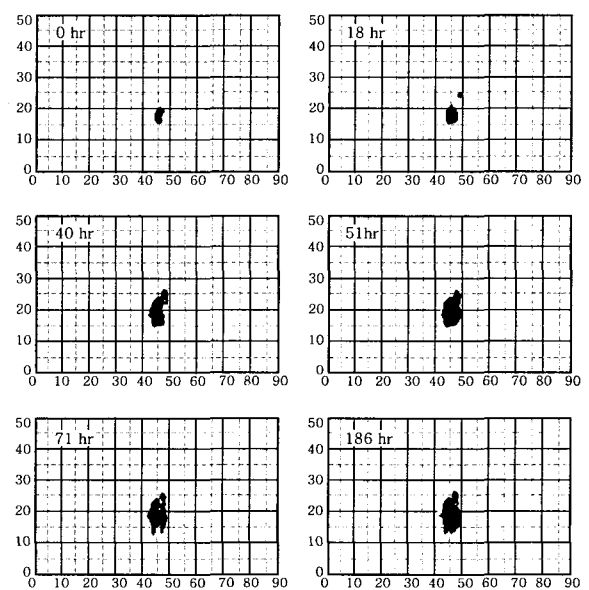


Fig. 8 Ultrasonic C-scan test results for the hydrogen induced disbonding test specimen⁴⁰⁾

연구결과 몇 가지 전형적인 특징을 가지며, 이를 요약하면 다음과 같다.

- ① Disbonding의 발생 기구는 운전 중 모재 및 오버레이 용접금속 층으로 확산 침입한 수소가 shut-down(냉각)시 austenite/bainite계면에 집적하여 발생하는 일종의 지연파괴(delayed fracture)현상이다.
- ② 균열의 발생 및 전파는 대부분 경계면을 따라 평행하게 형성된 조대한 austenite 결정립계를 따라 발생한다.
- ③ 계면에는 용접후열처리(PWHT) 시 앞에서 설명한 것과 같이 저합금강 모재로부터 확산 이동한 C에 의해 다량의Cr 탄화물이 석출되어 입계파괴를 더욱 조장한다.
- ④ Disbonding 발생에 작용하는 응력은 내압에 의한 hoop-stress, 운전 중의 열이력에 기인하는 열응력, 압력용기 제작시 도입된 잔류응력, 과포화 고용수소의 분자화에 의한 고압수소 가스에 의한 응력 등이 복합적으로 작용한다.

이러한 원인적 측면으로부터 disbonding의 억제를 위한 많은 연구가 진행 또는 이미 보고되어⁴⁶⁾ 있으나, 소재의 화학 조성, 조업조건의 개선 등의 방안은 본 해설의 범주를 벗어나므로 압력용기의 제작과 관련된 연구결과들 만을 설명하면 다음과 같다. 용접법 및 용접조건의 개선에 의한 disbonding 억제방안으로는 용접parameter의 조절에 의해 disbonding의 균열전파 경로가 되는 경계층의 조대 austenite 결정립의 생성을 억제⁴⁷⁾하거나, 용접금속의 모재에 의한 회석의 정도를 조절하여 Cr탄화물의 석출을 억제⁴⁸⁻⁵⁰⁾하는 등의 개선방안이 보고되어 있다. 조대 austenite 결정립의 생성을 억제하기 위한 구체적인 방법으로는 대입열 고속용접에 의해 경계층에 martensite를 생성시키거나 적당량의 δ-ferrite를 생성시켜 용접금속의 응고시 조대정

의 생성을 억제하는 방안이 적극적으로 이용되고 있다. 최근 김동진⁵¹⁾, 강정운 등⁵²⁾의 3Cr-1Mo-V강 모재에 TP309L 스테인리스 강을 전류범위 1200~2200A, 용접속도 10~40cm/min의 광범위한 용접 조건으로 오버레이 용접한 시편에 대하여 미세조직과 disbonding의 상관관계를 조사한 연구결과에 따르면, 비교적 고속의 용접 조건에서 경계층의 반응층에 martensite가 생성되어 disbonding 균열전파의 경로가 되는 조대 austenite 결정립의 생성이 억제됨으로써 disbonding 저항성이 현저히 개선됨을 시사하였다. 한편 disbonding이 가장 발생하기 쉬운 오버레이 용접 접침부의 최소화를 위해 가급적 광폭의 strip을 이용해 용접 패스의 수를 줄이는 것도 효과적인 방법으로 생각된다.

현실적으로 disbonding 현상은 압력용기 사용자에 큰 관심사로 되어 있어 압력용기 제작시 대부분의 경우 오버레이 용접부의 disbonding 특성에 대한 검증을 요구하고 있으며, 이에 부응해 연구자 개개인에 의해 임의로 수행되던 수소유기박리 시험이 1996년 ASTM Standard Practice G146-96으로 정식으로 규격화 되기에 이르렀다.

2.4 용접후열처리 (PWHT, Post Weld Heat Treatment)

2.4.1 용접후열처리 기준

플랜트의 효율상승 및 출력 증대를 위하여 급격히 대형화, 후유화 경향을 나타내는 압력용기의 용접조립에 있어서 PWHT는 압력용기의 안전 및 신뢰성, 기계적 성질의 확보면에서 중요한 변수이다. Table 1은 ASME Sec.VIII Div.2에 규정된 Cr-Mo계 압력용기용 강의 PWHT 조건을 나타낸 것이다. 압력용기 제작의 경우 PWHT 규정은 엄격히 관리되며 경우에 따라서는 발주자측의 보다 엄격하게 규정된 code (customer mandatory)에 따라야 할 경우도 있다.

Table 1 Requirement for PWHT of pressure vessel by ASME Sec. VIII Div. 1 & 2

		½Mo ½Cr-½Mo ¾Cr-½Mo	1Cr-½Mo 1¼Cr-½Mo	2¼Cr-1Mo 3Cr-1Mo	2¼Cr-1Mo-V 3Cr-1Mo-V
P No.		3-1.3-2	4-1	5A-1	5C-1
Min.Holding temp. (°C / °F)		590/1100	590/1100	675/1250	675/1250
Min. Holding time (hr)	t ≤ 2"	1hr/inch (Min. 1hr)	1hr/inch (Min. 1hr)		
	2" ≤ t ≤ 5"	2 + (t - 2) / 4"	5 + (T - 5) / 4"		
	t > 5"				

용접 결함의 방지 측면에서 볼 때 PWHT는 가능한 한 용접직후 실시하는 것이 바람직하나 생산 현장의 설비 및 작업조건 상의 제약으로 인하여 사실상 용접직후 PWHT를 실시하는 것이 불가능할 경우가 많다. 따라서 현장에서는 저온균열 방지를 위하여 용접직후 약 300°C~350°C에서 확산성 수소의 방출을 목적으로 탈수소 열처리(DHT, De-hydrogen Heat Treatment) 또는 550°C~625°C에서 중간 PWHT(ISR, Intermediate Stress Relief Annealing)를 실시 한다. 전자의 경우 저온 PWHT(LTPWHT)라고도 하며 극저수소계 용접 봉과의 조합 적용에 의해 중간 PWHT를 생략하는 방안에 대한 검토가 大前 등⁵³⁾에 의해 이루어져 저온균열의 방지에 적극 활용되고 있다.

2.4.2 최적 PWHT 조건의 설정

대부분 조질처리된 저합금 고장력강으로 제작되는 압력용기의 경우 PWHT온도 범위는 모재의 템퍼링온도 범위를 약간 상회하는 것이 일반적이다. 따라서 PWHT에 의해 인성의 회복과 더불어 급격한 강도의 저하를 초래할 우려가 있으므로 온도 및 유지시간의 선택에 신중을 기할 필요가 있다.

Fig. 9는 2.25Cr-1Mo-V강의 템퍼링 parameter에 따른 인장강도와 충격인성 값의 변화를 나타낸 것이다²⁵⁾. 그림에서와 같이 Larson-Miller parameter에 따라 직선적인 강도의 감소와 충격전이온도의 저하(인성의 증가)를 나타낸다. 따라서 압력용기의 최종 기계적 성질은 거의 PWHT 조건에 의해 결정되므로 이의 최적 조건 설정은 용접부 잔류응력의 제거, 균열발생 억제 외에 최종 기계적 성질의 중요한 변수로 작용하게 된다.

더욱이 가혹한 환경에서 사용되는 일부 압력용기의 경우 heating band에 의한 local PWHT의 적용이 제한되어 furnace에 의한 full body PWHT를 실시할

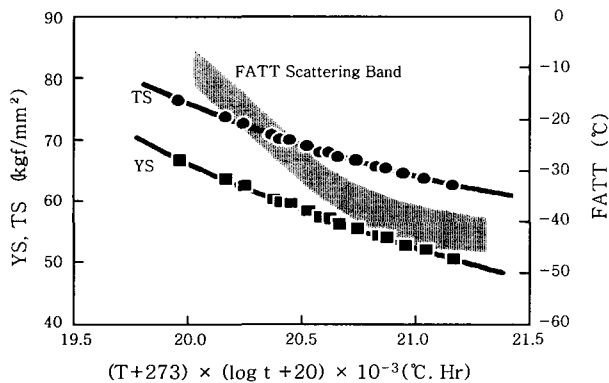


Fig. 9 Tensile strength and FATT change of the 2.25Cr-1Mo-V steel with tempering parameter⁵⁴⁾

경우 제작공정 및 단관의 수에 따라 최고 3회 이상의 PWHT가 반복 실시될 가능성도 있다. 이러한 경우 모재부는 over tempering되어 spec.에서 요구하는 인장 강도를 만족하지 못하게 되는 문제가 발생할 우려가 있으므로 용접조립의 계획단계에서부터 제품의 최종 기계적 성질의 추정에 신중을 기할 필요가 있다. 즉, 모재의 템퍼링, 중간 PWHT, PWHT등 모재 및 용접부의 기계적 성질에 직접적인 영향을 미치는 열이력에 대해서는 Larson-Miller parameter 등의 템퍼링 parameter에 의해 총합개념으로 관리되어야 한다⁵⁴⁾.

3. 맺 음 말

초대형 단강 압력용기의 제작 전반에 대해 극히 일부 분에 해당 되는 내용이나마 간략히 해설하였다. 특히 문헌에서 접하기 어려운 현장의 제작기술 현황은 엔지니어링에 종사하는 기술자로부터 자주 문의 되는 내용으로 제작 현장의 현황을 이해하는데 약간의 참고가 될 것으로 기대한다.

현재 압력용기의 국산화의 측면에서는 어느 정도의 결과가 달성되었으나, 설계, 소재, 부식, 용접, 가공, 운송, 비파괴 검사, 안전 및 신뢰성 등 광범위한 분야의 지식과 경험 등 높은 수준의 엔지니어링이 요구되는 초대형 압력용기의 기술개발에는 국내의 산업계, 학계, 연구기관 등의 resource와 infra.의 상호 연계에 의한 synergy가 요망된다.

특히 그 중에서도 용접기술은 생산성 향상이나 비용상의 중요성을 거론하지 않더라도 안전성의 측면에서 제작기술의 중심이며 향후 이 분야의 비약적인 기술 향상이 요구된다

참 고 문 헌

1. 지병하, 김정태, 박화순 : 압력용기용 강 기술개발 동향 및 문제점, 대한 용접학회지, 18-1 (2000) 16
2. 한국 원자력 연구소 : 영광 3, 4호기 원자로 압력용기 조사전 재료특성(Baseline Test) 보고서, (1995)
3. 한국중공업(주) 기술연구원 : 영광 5,6호기 원자로 압력용기 조사전 재료특성(Baseline Test) 보고서, (1999, 2000)
4. J.T.Kim, H.K.Kwon, K.C.Kim and J.M.Kim: Improvement of Mechanical Properties of the SA508 Cl.3 Steel for Nuclear Pressure Vessel Through the Steel-making, ASTM STP1259, (1996) 135
5. J.T.Kim, H.K.Kwon, H.S.Chang and Y.W.Park : Improvement of Impact Toughness of the SA508 Cl.3 Steel for Nuclear Pressure Vessel Through Steel-making and Heat-treatment Practice, Nuclear Engineering and Design 174 (1997) 51
6. Y.S.Ahn, H.D.Kim, T.S.Byun, Y.J.Oh, G.M.Kim and

- J.H.Hong : Application of Intercritical Heat-treatment to Improve Toughness of SA508 Cl.3 Reactor Pressure Vessel Steel , Nuclear Engineering and Design 194 (1999) 161
7. F.W.Wiffen : Defect and Defect Cluster in bcc Metals and Their Alloys , AIME Nucl. Metall., 18 (1973) 176
 8. J.D.Elen et al. : Jour. Nucl. Mater., 39 (1971) 194
 9. G.M.Gordon and H.H.Klepfer : Engineering Significance of Ferrite Grain Size on the Radiation Sensitivity of Pressure Vessel Steels , ASTM STP 426 (1967) 48
 10. U.Potapovs and J.R.Hawthorne : The Effect of Residual Elements on 550°F Irradiation Response of Selected Pressure Vessel Steels and Weldments , Nuclear Applications 6 (1969) 27
 11. D.R.Harries and B.L.Eyre : Effects of Irradiation Sensitivity of Pressure Vessel Steels , ASTM STP 484 (1971) 64
 12. E.A.Little and D.R.Harries : Effect of Interstitial Elements on Radiation Hardening in Mild Steels, ASTM STP 457 (1969) 215
 13. F.A.Smidt and H.E.Watson : Effect of Residual Elements on Radiation Strengthening in Iron Alloy , Metallurgical Trans., 3 (1972) 2065
 14. C.Z.Serpan, Jr. : Neutron Irradiation Embrittlement of LaCrosse Reactor Pressure Vessel Steel and Weldment , Nuclear Engineering and Design 8 (1968) 95
 15. L.E.Steele : The Influence of Composition on the Fracture Toughness of Commercial Nuclear Vessel Welds , Proc. 2nd Interamerican Conf. on Material Technology, Mexco City (1970)
 16. W.E.Erwin and J.G.Kerr : Welding Research Council Bulletin No. 275 (1982)
 17. G.S.Sangdahl and M.Semchyshen, Eds. : Application of 2.25Cr-1Mo Steel for Thick-wall Pressure Vessels , ASTM STP 755 (1980)
 18. J.T. Kim, D. J. Kim and B.H. Chi : Mechanical Evaluation of 400 mm Thick 2.25Cr-1Mo Steel Forgings , Proc. 12th Int. Forgemasters Meeting, Vol.1, Chicago (1994)
 19. 김정태 등 : 중질유 분해 및 탈황용 압력용기 제조기술 , 한국중공업(주) 기술연구원 연구과제 최종 보고서 (1994)
 20. D.J.Kim, J.T.Kim, B.H.Chi, B.H.Kim and J.C.Choi : Mechanical Properties of 3Cr-1Mo-1/4V-Ti-B Steel and its Weld Joint for Oil Refinery Pressure Vessel , Proc. 13th Int. Forgemasters Meeting, Vol. 2, Pusan (1997) 243
 21. 김동진, 김병훈 : 3Cr-1Mo-V강의 강도 및 인성에 미치는 열처리조건의 영향 대한금속학회 춘계학술대회 (1997) 31
 22. 김병훈, 김동진, 공병욱 : 3Cr-1Mo-V강의 기계적 성질에 미치는 미세조직의 영향 , 대한금속학회 춘계학술대회 (1998) 103
 23. 김동진, 강정윤, 박화순 : 압력용기용 3Cr-1Mo Base강 용접부의 기계적 성질 및 균열감수성에 관한 검토 , 대한용접학회 추계학술대회 (1998) 301
 24. 지병하 등 : Advanced 화학 압력용기 소재 및 용접기술 개발, 두산중공업 기술연구원 연구과제 최종 보고서 (2000)
 25. R.Heidner, K.J.Kessler and E.Weiss : New Fabrication Techniques for Components , Nuclear Engineering and Design 84 (1985) 253
 26. 권기선, 김주학, 홍준화, 이창희 : SA508 Cl.3 강의 ICCG HAZ의 인성에 미치는 M-A Constituents의 영향 , 대한용접학회지, 17-3 (1999) 203
 27. J.T.Kim, B.I.Yang and H.K.Kwon : The Effects of Intercritical Heat-treatment of the SA508 Gr.3 Cl.1 Steel Before Welding on the Mechanical Properties in its Welded Joint , ASME Pressure Vessel and Piping, Vancouver, Aug. (2002)
 28. F.Vitovec : Current Solution to Hydrogen Problems in Steel , ASM (1982) 236
 29. D.M.Allen-Booth and J.Hewitt. : Acta Metallurgica, 22 (1974) 171
 30. P.G.Shewmon et al. : Scr. Metall, 14-5 (1980) 545
 31. 横川清志, 福山誠司, 工藤清勝 : 日本金屬學會誌, Vol.46 (1982) 1009
 32. D.Elizer : Journal of Materials Science, 16-11(1981) 2962
 33. 김동진, 김병훈, 강정윤, 박화순 : SAW에 의한 3Cr-1Mo-V 강 용접부의 수소침식에 관한 연구 , 대한용접학회 춘계학술대회 (1998) 115
 34. 김동진, 김병훈, 공병욱, 김정태, 권용형, 박화순, 강정윤 : 3Cr-1Mo-V 강의 재현 열영향부에서 최고가열온도가 수소 침식 감수성에 미치는 영향 , 대한용접학회지, 18-2, (2000) 232
 35. J.T.Kim, D.J.Kim, B.H.Kim and B.H.Chi : Hydrogen-assisted Degradation at Weld Joint of the SA336F3V Steel for a Hydro-processing Refinery , The 9th ICPVT, Sydney Australia (2000) 469
 36. J.T.Kim, D.J.Kim, B.H.Kim and B.H.Chi : Hydrogen-assisted Degradation at Weld Joint of the SA336F3V Steel for a Hydro-processing Refinery ASME PVP Vol.413 (2000) 23
 37. 김동진 등 : 화학설비용 Reactor 소재 및 용접공정 개발 (II), 한국중공업(주) 기술연구원 연구과제 완료보고서 (1998)
 38. S. Nakano et al. Electro-magnetic Controlled Overlay Welding Process with ESW , Kawasaki Steel Technical Report No.2 (1981) 31
 39. 김종오, 정인철, 송근호 : 원자력 발전소 NSSS 설비의 보수용접 , 대한용접학회지, 16-4 (1998) 19
 40. 김병훈, 김동진, 김민수, 성운학, 김정태 : Cr-Mo Steel/Austenitic Stainless Steel Overlay 용접부의 수소유기 박리균열 , 대한용접학회 춘계학술대회 (2001) 248
 41. F.C.Hull : Effect of Delta-ferrite on the Hot-cracking of Stainless Steel , Welding Jour. 46 (1967) 399
 42. F.Matsuda et al.: A New Explanation for Role of Delta-ferrite Improving Weld Solidification Crack Susceptibility in Austenitic Stainless Steel , Trans. Japan Welding Research Inst., 8 (1979) 105
 43. R.Blondeau et al. : Contribution to a Solution to the Disbonding Problem , ASM (1982) 356
 44. 大西敬三 : 日本溶接學會誌, 54-3 (1985) 154-163

45. 渡邊, 池本 : 壓力技術, Vol.9, No.5 (1970) 2471
 46. R.Wiswanathan : Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components ASM Int. (1989) 371
 47. S.Nakano et al. : Tech. Rep. of Kawasaki Steel Corp., (1981)
 48. J.Watanabe et al. : JHPI, Vol.18, No.5 (1980) 31
 49. ibid : p.39
 50. ibid : p.47
 51. 김동진, 김병훈, 지병하, 김정태, 김성곤, 강정운, 박화순 :

3Cr-1Mo강/STS309L 오버레이 용접부의 천이영역 조직에 미치는 용접조건에 영향, 대한용접학회지, 제18권, 제2호 (2000) 176
 52. 강정운, 박화순 : 압력용기용 3Cr-1Mo강의 용접성에 관한 연구 최종보고서, 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소 (1998)
 53. 大前 等 : 壓力容器的中間燒鈍合理化に關する研究, 三菱重工業技報, Vol.12, No.2 (1975)
 54. 社團法人日本高壓技術協會應力燒鈍(SR)委員會編 : 熔接後熱處理基準とその解説, 日刊工業新聞社, (1994) 171



- 지병하 (池秉河)
- 1959년생
- 두산중공업 기술연구원 소재개발 연구팀 근무
- 합금설계, 재료손상 및 수명평가, 용접야금
- e-mail : ifm97@doosanheavy.com



- 김정태 (金廷泰)
- 1957년생
- 두산중공업 기술연구원 소재개발 연구팀 근무
- 발전용 소재 개발 및 평가, 철강정련 및 조괴
- e-mail : h107527@doosanheavy.com



- 박화순 (朴和淳)
- 1955년생
- 부경대학교 재료공학부
- 용접결합, 용접금속학, 표면개질학
- e-mail : parkhs@pknu.ac.kr