

산업설비용 압력용기 용접시공 기술

채 현 병

Manufacturing Welding Technology of Pressure Vessels for Industrial Applications

Hyunbyung Chae

1. 서 론

압력용기라 함은 대기압 이상의 운전환경에서 기체나 유체에 의해 작동되는 산업설비라고 정의할 수 있다. 인간이 사용하고자 하는 의도에 맞게 실로 다양한 용도의 압력용기가 이용되고 있지만 크게 산업설비라는 관점에서 발전분야와 석유화학분야에서 그 용도가 빛을 발하고 있다. 이 두 분야에서 사용되는 압력용기는 모두 고온, 고압, 고부식 등 운전환경이 매우 가혹하다는 공통점이 있고 앞으로도 효율을 높이기 위한 노력이 수반되어 운전환경은 더욱더 가혹해질 것이 예상된다. 따라서 이와 같은 환경에서 견딜 수 있는 압력용기용 강재뿐만 아니라 장기간 운전에 대한 안전성 보증을 위해 용기를 제작하는 용접방법이나 기타 시공법에 대한 신뢰성 확보는 매우 중요한 문제이다.

사용용도에 따라 설계된 강도와 기능을 갖춘 압력용기를 시공함에 있어서 계획한 납기와 비용으로 시공을 마치기 위해서는 설계자로부터 공장관리자, 현장감독관, 용접사 및 세세한 작업을 하는 사람들에 이르기까지 유기적으로 관리할 수 있는 체계가 중요하다. 그 중에도 용접기술은 높은 비중을 차지하기 때문에 철저한 용접시방서 작성이 필요하다. 이 시방서에는 용접방법, 용접재료, 개선형상, 예열온도 등을 포함한 용접조건과 용접후열처리 조건, 비파괴검사방법 등에 대해서도 효율적인 측면과 품질, 비용 등의 인자가 충분히 고려되어야 한다. 용접은 압력용기 제작목적에 맞게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫째는 압력용기 자체의 구조적인 제작을 하기 위한 이음부 용접이며, 또 한가지는 압력용기에 부가적인 기능을 추가하기 위한 내면 오버레이 용접이다.

압력용기 제작을 위한 용접에서 용접이음부는 용접금속, 열영향부 및 모재로 이루어져 모재와는 다르게 야금학적인 성질 및 기계적 성질이 균일하지 않으나 용접

이음부 전체로 볼 때는 모재와 동등 혹은 그 이상의 성능이 요구된다. 용접이음부의 요구특성으로서는 우선 내압을 유지하기 위한 저온, 상온 또는 고온의 연신 및 압축을 포함한 정적 인장 특성과 피로강도 특성이 있다. 또한, 용기가 약 400℃ 이상에 사용되는 경우에는 연성을 포함한 크립강도 특성이 고려되어야 한다. 다음으로는 용기의 취성과파괴 방지를 위한 인성 특성이 있으며, 고온용 용기에는 장기간 사용에 의해 인성이 열화되는 템퍼링 취화에 대한 저항성이 있어야 한다. 그리고 운용 중 반복적인 열응력과 부식 및 수소 등 다양한 원인으로부터 야기되는 취화크랙에 대한 저항성 등 여러가지 요구성능에 대한 용접이음부의 신뢰성을 확보하기 위해서 용접시공법, 용접재료 및 용접후열처리 조건 등을 신중하게 검토하여야 한다.

압력용기의 내면 오버레이용접은 용기의 내면에 내식성 및 내수소성을 부가하기 위해서 스테인리스강, 인코넬 등의 고합금재료를 용접하는 것을 말한다. 이때 오버레이용접부의 성분제어와 두께를 확보하는 것이 중요하고 운용 중 모재와 오버레이층의 박리가 발생되지 않도록 하기 위해 압력용기 제작 전에 소형시험편에 의한 모사실험을 통하여 용접조건이 최적화가 필수적으로 요구된다.

이와 같이 압력용기 용접부에 요구되는 성능은 곧 압력용기의 신뢰성으로 연결되며, 실제로 압력용기 사용 중 여러 가지 손상사례가 용접부에서 발견되었다. 산업설비로서의 압력용기는 설계된 수명이 다할 때까지 수십년 동안을 사고없이 안전하게 사용될 수 있도록 성능이 우수한 강재사용과 더불어 신뢰할 수 있는 용접시공이 뒷받침되어야 한다. 따라서 본 기고에서는 압력용기 제작관련 코드나 규격, 그리고 논문 등을 통하여 압력용기 용접시공시 고려되어야 할 사항을 정리하여 소개하고자 한다.

2. 압력용기 시공에 사용되는 용접공정 및 장치

2.1 압력용기 시공 용접공정의 종류 및 특징

압력용기제작 및 오버레이용접에 사용되는 용접공정에는 SMAW(Shielded Metal Arc Welding), SAW(Submerged Arc Welding), GMAW(Gas Metal Arc Welding), GTAW(Gas Tungsten Arc Welding), FCAW(Flux Cored Arc Welding), PAW(Plasma Arc Welding), Strip SAW, 그리고 ESW(Electro Slag Welding) 등이 있다. 또한 최근에는 높은 효율과 품질의 EBW(Electron Beam Welding)와 레이저가 압력용기 제작에 적용이 되고 있다^{1,2)}. SMAW는 압력용기 구조상 형상이 복잡하여 자동용접을 적용하기 어려운 부분 또는 아래보기 자세로 용접이 불가능한 부분에도 간단히 용접시공이 가능하고 고가의 장비를 필요로 하지 않기 때문에 거의 모든 재료에 대해서 적용이 되고 있다. GMAW, FCAW 또는 GTAW는 장치가 저렴하고 특수한 장비없이 반자동용접이 가능하기 때문에 종래 SMAW에 의해 시공되는 부분에 대해 능률을 향상시키고자 이와 같은 용접법 들이 널리 적용되고 있다. 또한 간단히 Carriage를 이용하여 이들 용접법을 기본으로 하는 하향, 입향, 파이프전자세 전용용접기를 구성하여 장비의 경량화와 자동화가 용이하기 때문에 적용범위가 매우 넓다. SAW공정은 단위시간당 용착효율이 속도가 높아 생산성이 높고 자동화에도 용이하지만 하향용접만이 가능하기 때문에 스케일이 큰 피용접물을 회전 또는 이송시키기 위한 크고 고가의 장비가 필요한 단점이 있다. 또한 입열량이 높기 때문에 용접열영향부 열화와 같은 부작용이 나타나기 쉽기 때문에 취급에 주의를 요한다. 생산성을 극대화하기 위하여 부재의 세팅이나 준비시간을 단축시키고 아크타임율을 높여 효율을 향상시키기 위해 부재형상, 용접위치, 용접자세 등을 고려한 종합적인 관점에서 용접장비와 부속장비를 포함한 용접시공법을 결정해야 한다.

2.2 용접전원 및 주변 장치

2.2.1 용접전원

압력용기 제작 및 오버레이용접에는 주로 아크용접법을 사용하기 때문에 아크용접전원의 발전은 압력용기의 신뢰성향상에 큰 영향을 미친다 하겠다. 지난 10여년 동안 전자기술의 진보로 기존의 아크용접전원은 아나로그에서 디지털로의 전환을 이루어내어 정밀한 제어가 가능해졌고 반도체를 기본으로 하는 전력소자의 발달은

용접전원의 대용량화와 소형화를 이루어 원가절감을 위한 인건비 저감과 생산성 향상을 위한 용접자동화의 요구에 부응하여 안정성이 높은 용접전원이 개발되었다³⁾. 특히, GMAW와 GTAW의 진보는 현저하여 베이스전원과 피크전원을 주기적으로 변환시켜 스파터 저감, 비드외관개선, 박판용접성 개선 외에도 용접결함을 감소시켜주는 효과를 구현하고 있다.

2.2.2 용접자동화 장치와 가조립용 지그

압력용기는 용도에 따라 그 모양이 실로 다양한데 일반적으로는 실린더형의 타워로 제작되는 경우가 많다. 따라서 압력용기 몸체자체를 제작하는 경우와 몸체에 노즐이나 기타 부속물을 장착하는 공정으로 나눌 수가 있는데, 이때에 나타나는 다양한 개선형상과 용접자세에 따라서 자동화에 적용하는 기기가 다르다. 자동화를 위한 주변장치에는 일반적으로 매니플레이터(Manipulator), 포지셔너(Positioner), 턴테이블(Turn table), 터닝롤(Turning roll)이 있다. 매니플레이터는 자동용접기를 탑재해서 용접헤드를 상하좌우로 이동시키는 것과 매니플레이터 자체가 주행하는 것도 있다. 터닝롤은 피용접물을 원주방향으로 회전시키고 터닝테이블은 테이블 위에 피용접물을 위치하여 회전시키고, 포지셔너는 용접을 위한 최적위치로 피용접물을 위치시키는 장치이다.

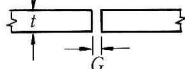
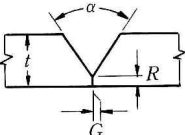
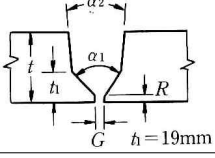
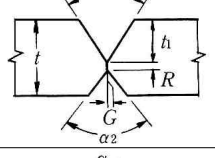
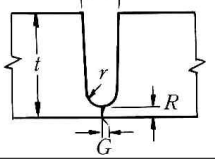
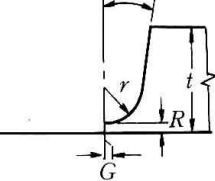
또한 압력용기 제작을 위한 본 용접을 하기 전에 용기의 형태를 잡고 유지시키기 위해 가조립용 지그를 사용하는데 이러한 가조립은 용접작업에 있어서 중요한 공정으로 용접부 품질에 중요한 영향을 미친다. 본체에 용접하는 가조립용 지그 및 부속물은 압력용기 몸체가 회전 등 이송할 때 변형 및 파손되지 않을 충분한 강도를 가지면서 가능한 한 소형이 될 수 있도록 설계하고, 또한 직접 몸체와 용접되므로 지그소재와 용접재료는 모재와 동일한 성분의 소재를 사용하는 것이 바람직하다.

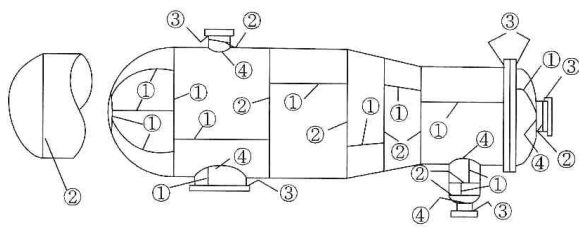
3. 압력용기 용접시공의 종류

3.1 압력용기 몸체 이음부 용접

압력용기는 몸체를 구성하는 셸(Shell)의 소재가 단조재인지 압연재인지에 따라서 제조공정을 구분할 수 있는데, 단조품인 경우에는 셸에 심(Longitudinal seam) 용접부가 없으므로 원주용접만으로 용기를 제작할 수 있으나 압연재는 판재이므로 벤딩성형공정 후 심용접을 해야 한다. Fig. 1에 압연후판재를 이용한 압력용기의 용접이음의 종류를 나타내고 있다⁴⁾. 또한 이와 같은 압력용기의 용접에 이용되는 다양한 형태의 용접이음부

Table 1 Various types of butt weld grooves for pressure vessels

	Groove Type	t(mm)	G(mm)	R(mm)	R(mm)	α(deg.)
I		≤6	2~t	-	-	-
V		≤75	0~2	≥2	-	≥40°
V'		≤75	3~5	2	-	α ₁ ≤75 α ₂ ≤20
X		≤100	0	≥2	-	α ₁ , α ₂ ≥40
U		≥50	0	>5	≥10	≤5
J		≥50	0	≥5	≥18	≤5

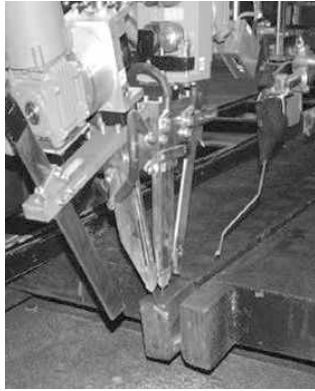


- ① Logitudinal seam welds
- ② Circumferential seam welds
- ③ Flange, Tube sheet, etc
- ④ Nozzle to Shell welds

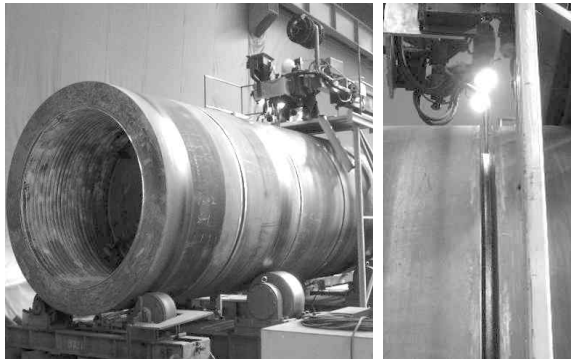
Fig. 1 Classification of weld joint positions in pressure vessel manufacturing

예를 Table 1에 나타내었다⁵⁾. 용접개선형상은 개선가공시간, 용접시간, 용접재료양, 용접변형 등 직접적으로 비용과 품질 면에서 큰 영향을 미치기 때문에 신중한 검토가 필요하다. 개선단면적을 적게 해서 용착금속량

을 줄이는 것은 비용 및 용접변형 저감의 관점에서 바람직하지만 용접작업의 여유도 작아져 결함이 발생되기 쉽기 때문에 적절한 개선폭이 존재한다. 일반적으로 판두께가 100mm전후까지는 V, X형이 많고, 그 이상이 되면 I, U개선이 이용된다. 최근에는 Fig. 2에서 나타내는 바와 같이 개선단면적을 대폭 감소한 각종 내로우갭(Narrow gap)용접법이 실용화되고 있다. 압력용기에서 내로우갭용접이란 판두께가 약 30mm이상의 후판을 판두께에 비해서 좁은 간격으로 개선(판두께 200mm까지는 20mm이하, 이상은 30mm이하)을 만들어 자동화한 용접법을 일컫는 것으로, 본 방법에 의하면 300mm까지의 후판에도 고효율로써 기계적 성질이 우수한 균일한 이음부를 얻는 것이 가능한 것으로 알려져 있다⁶⁾. 개선이 좁기 때문에 슬래그가 완전히 배출되기 어려우므로 슬래그박리성이 우수한 플럭스를 사용한 SAW가 대표적이고 핫와이어(Hot wire)를 사용하여 용착속도를 높인 GTAW, 세경 플럭스코어드와이어를



(a) Narrow gap tandem SAW for longitudinal seam



(b) Narrow gap tandem SAW for circumferential seam

Fig. 2 Applications of narrow gap tandem SAW for longitudinal and circumferential weld joints

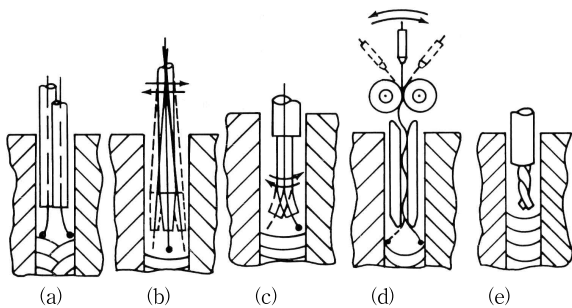


Fig. 3 Various types of wire feeding techniques for narrow gap welding

이용한 ESW(Electro Slag Welding) 등이 사용된다. Fig. 3은 내로우갭용접에서 가지는 고질적인 결함인 융합불량(Lack of fusion)을 방지하기 위하여 와이어를 개선 내에서 진동시키거나 아크를 회전시켜서 개선벽에 용착금속의 젖음성을 향상시키고 또는 용입을 증가시켜 결함발생을 방지하는 방법에 대한 예를 소개하고 있다⁷⁾. 이와 같은 내로우갭 용접은 개선중앙의 전극을 세팅 및 유지하는 것이 중요하기 때문에 용접선 추적을 위한 다양한 기술이 적용되며, 좁은 개선형상에서 나타나는 급격한 용접조건변화에 대응할 수 있는 진보된 용접진

Table 2 Various types of butt weld grooves for clad plates

모재 두께	모재측 용접시	Clad 측 용접시
≤15mm		
16~22mm		
23~38mm		
≥38mm		
High Clad Ratio		

원을 통해 하향자세뿐만 아니라 횡방향자세에도 안정된 용접이 가능하게 되었다.

한편 압력용기의 대형화에 따른 강재의 극후물화에 따라서 내로우갭용접도 적용하기 곤란한 곳에서는 개선 간극이 없이도 극후판에서 맞대기 1패스용접이 가능한 EBW공정도 일부 적용되는 것으로 알려져 있다^{1,8)}. 그러나 EBW는 진공에서 용접이 이루어져야 하기 때문에 규모가 큰 피용접물을 넣을 수 있는 진공챔버와 대규모 이송장치 등 고가의 장비가 필요하기 때문에 적용에 한계가 있다.

클래드강의 용접은 모재와 클래드재의 종류에 따라 달라진다. 클래드재가 Ti, Al과 같이 모재와 용융용접이 불가능한 것은 클래드면에 클래드재와 동일한 판을 붙여서 랩조인트 용접을 실시한다. 클래드재가 스테인리스강으로써 모재와 용융용접이 가능한 경우에는 Table 2에 보여주는 개선형상이 적용된다⁶⁾. 용접전 용접부의 클래드부를 벗겨내고 경우에 따라서는 모재측을 가우징한 후 클래드재 쪽을 용접한다. 클래드재가 STS 304, 316, 347 등 오스테나이트계 스테인리스인 경우에는 Fig. 4에서 나타내는 바와 같이 1패스에 모재와의 희석을 고려하여 Cr 및 Ni의 함량이 높은 STS 309용접 재료가 사용되고 2패스 이상에는 클래드재와 동일한 성분계를 사용해서 용접하는 것이 일반적이다. 예열, 패스간 온도, 용접부 열처리 는 모재에 준해서 적용한다. 용기의 배관부분에는 탄소강, 저합금강과 STS, Ni의

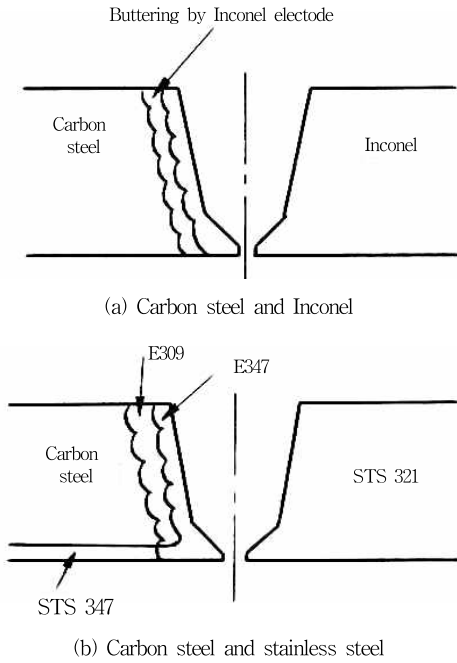


Fig. 4 Schematic drawings of butt welding methods for dissimilar metals

이종용접이 된다. 탄소강 측의 개선면에 상대재와 동일한 성분의 용접재료로 오버레이용접 후 개선가공해서 고합금성분의 용접재료로서 맞대기 용접한다.

3.2 오버레이용접

오버레이용접은 부재조립이나 부착을 위해 형상을 조정하는 조형오버레이용접과 용기에 부가적인 기능을 주기 위한 이종오버레이용접이 있다. 조형오버레이용접은 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 용기본체에 노즐 등 외부부착물을 붙이거나 내부부착 등에 이용된다. 모재와 동일한 성분의 용접재료를 사용해서 이음부용접과 동일한 성능을 확보한다. 용기내면의 STS, NI합금 등을 붙이는 경우에는 경판으로부터 노즐의 내면까지 유체가 접하는 모든 면을 오버레이용접한다. 따라서 오버레이금

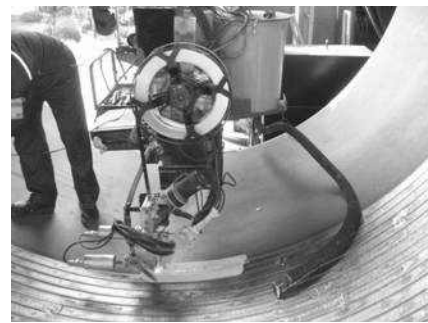


Fig. 5 Overlay welding for joining between nozzle to shell

속에 필요한 성분확보를 위한 용접시공과 검사는 매우 중요하다.

용기의 내면을 오버레이용접하기 위해서 비교적 두께가 얇고 넓은 스트립(strip)전극을 사용한 SAW나 ESW은 효율이 높아 각종 재질의 오버레이용접에 폭넓게 적용되고 있으며 실제 용접광경을 Fig. 6에서 보여주고 있다. 오버레이용접부의 화학성분과 연성확보를 위해서는 초층 모재용용 희석율의 관리가 중요하다. 스트립전극을 사용하면 와이어형 전극에 비해 희석율을 낮출 수 있고 편평하고 균일한 비드를 얻을 수 있기 때문에 Shell, 경판, 노즐, 내면 오버레이용접에도 널리 적용된다. 용접조건의 설정에 있어서 전류, 전압, 속도 외에 전극돌출길이, 플럭스도포량, 모재경사 등의 항목도 관리되어야 한다. Fig. 7에 모재경사와 희석율의 관계를 나타낸다⁶⁾. 모재의 경사가 높아질수록 희석율이 높아지는 것을 알 수가 있다.

SMAW나 GMAW 등에 의한 오버레이용접은 통상 2층 이상으로 용접이 이루어진다. 이와 같이 수동이나 반자동의 오버레이용접은 사람이 직접 용접을 수행하므로 패스마다 희석율의 차이가 나타나 초층의 화학성분을 안정하게 확보하는 것이 어렵다. 오스테나이트 스테인리스강이나 13Cr강의 오버레이용접에서 초층에는 STS 309이나 STS 430과 같이 Cr/Ni 또는 Cr함량이 높은



(a) Strip SAW



(b) Strip ESW

Fig. 6 Photos of overlay weldings by strip electrode

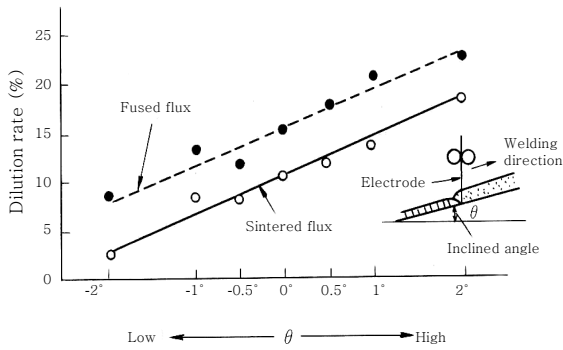


Fig. 7 Variation of dilution rate according to the inclined angle of base metal

용접봉이 각각 적용된다. 오스테나이트계 스테인리스용 접에는 고온균열을 방지하기 위해 Scheffler diagram 등에 의해 계산된 δ페라이트를 수% 함량할 수 있도록 한다. 희석율이 크면 δ페라이트가 적어져 용접금속에 균열이 발생한다. 반대로 희석율이 작으면 Cr이 높은 δ 페라이트가 증가하기 때문에 용접후열처리에 취약한 시그마상을 형성한다. 오버레이금속의 δ페라이트양이 많으면 용접후열처리 후에 연성이 극단적으로 저하한다. SMAW는 용접사의 기량편차에 의해 용접부 품질의 결과가 크게 나타나기 때문에 자동오버레이용접으로의 변환이 바람직하다. 또한 전극을 요동시켜서 비드폭을 증가시켜 희석율을 감소시키는 GMAW, GTAW 및 PAW 오버레이용접도 널리 적용되고 있다.

3.3 보수용접

용접시공에 있어서 용접결함 저감을 위한 노력은 항상 계속되고 있지만 결함발생을 완전히 방지하는 것은 실제 불가능하다. 결함을 유발시키는 원인으로는 모재에 편석되어 있는 비금속개재물 및 라미네이션, 용접재료 잔류수분량, 용접조건과 순서의 불량, 용접사의 기량부족 등 여러가지가 있으며 용접결함의 유형도 다양하다. 그 중에서도 고온 및 저온균열이나 융합불량과 같이 결함선단이 날카롭고 길이를 가지는 평면상 결함은 용기의 안정상 허용되지 않는다⁹⁾. 따라서 용접 후에 RT(Radiographic Test), UT(Ultrasonic Test), MT(Magnetic Particle Test) 및 PT(Penetrant Test) 등 비파괴검사로 유해하다고 판단되는 용접결함은 관련 코드 또는 사양서에 따라 보수용접을 수행해야 한다¹⁰⁾.

보수용접은 비파괴검사 결과에 근거하여 결함위치를 확인하고 표면 또는 이면 어느 쪽으로 결함을 제거할까를 결정한다. 결함깊이까지 아크가우징(Arc gouging)을 수행하고 결함을 제거한다. 그 후 보수용접하기 용이한 개선으로 조립해서 그라인더로 스케일 등의 오염

물질을 제거한 다음, MT 등으로 결함이 없는 것을 확인하고 지시서에 따라서 보수용접을 수행한다. 보수용접 후에는 다시 한번 비파괴검사를 수행하고 결함이 없는 것을 확인하고 완료한다.

4. 용접변형과 교정

용접변형은 각 부재간 취부정밀도와 용기제작 중 과도한 입열이나 용접선이 긴 경우에 주로 발생되며 이음부의 강도를 저하시키거나 제품외관을 손상시키기도 한다. 또한 터닝롤과 접촉한 부분이 국부적으로 과대하중을 받아 변형하거나 용접후열처리 중 가열로 내부에서 제품을 받치고 있는 지그가 적당하지 않을 때에도 제품자중에 의해 변형하기도 한다. 용접변형을 완전히 제거하기는 어렵기 때문에 변형량을 시뮬레이션 등을 통하여 미리 예상하여 가공치수에 반영하거나 변형을 최소화할 수 있도록 제품의 조립순서를 검토해야 한다. 또한 용접변형을 방지하기 위해 Fig. 8에 보이는 바와 같이 가조립지그나 구속지그가 사용된다. 용접개선형상이나 입열량도 용접변형에 큰 영향을 미치는데 개선 단면적이 크고 다층패스로 이루어지는 SMAW인 경우 용접 변형량도 크다. 적은 용착금속량으로 패스수가 적은 내로우갭용접은 변형량이 작기 때문에 제품치수 확보에 유리하다. 개선형상이 V형이나 X형의 이음부는 표면

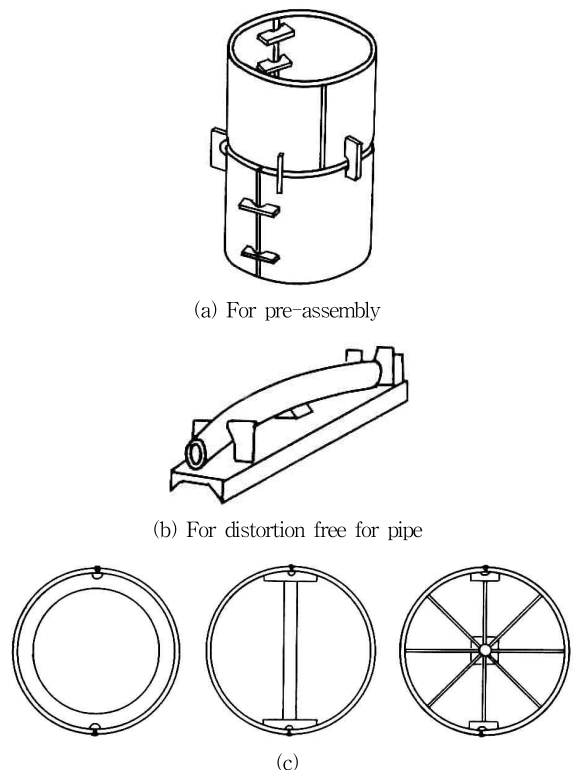


Fig. 8 Various types of jig attachments for distortion prevention

측 변형을 이면 측 용접으로 조정하는 역변형 대책으로 용접변형을 적게 할 수 있다. 이와 같은 용접변형은 시공경험을 토대로 어느 정도 변형이 생기는가에 대한 데이터 수집을 통한 예측에 의해 용접변형을 저감할 수 있는 방안을 모색해야 한다.

치수정밀도의 허용범위를 벗어나지 않도록 하기 위해서 여러가지 방법으로 용접변형 대책을 세우더라도 변형량이 커 교정이 필요한 경우가 발생된다. 교정방법에는 기계적 교정과 열적 교정이 있는데, 기계적 교정에는 프레스나 자키 등으로 소성변형을 시키거나 용접부를 피닝하는 방법이 있다. 그러나 부재의 탄성이 큰 경우에는 소성이 힘들기 때문에 지그로 원하는 치수로 교정하고 지그와 함께 열처리해서 치수를 교정한 후 지그를 제거하는 방법이 있다.

5. 용접후열처리(PWHT)

5.1 용접후열처리의 목적

용접후 모재의 열영향부는 용접 열사이클에 의해 야금학적 조직과 기계적인 성질이 크게 변화한다. 또한 용접금속은 다층패스에서 이어지는 패스의 용접 열사이클을 반복적으로 받는 응고조직이다. 따라서 용접금속 및 열영향부에는 경화조직 발생, 연성저하, 열응력에 의한 잔류응력의 발생 등 복잡하게 변화되므로 불균질한 용접부의 제 성능을 부활시키고 사용신뢰성을 향상시키기 위해 용접후열처리를 실시한다¹¹⁾.

용접후열처리는 Ac1 변태점 이하의 온도에 일정시간 용접부를 가열 및 유지하는 열처리이다. Table 3과 Table 4에 나타낸 바와 같이, 강종 및 두께에 따라 가열속도, 냉각속도, 유지온도 및 시간이 정해져 있으며 각 규격 별로 내용에 큰 차이는 발견할 수 없다¹²⁾.

용접후열처리의 주요 효과는 다음과 같다.

- 1) 열영향부와 용접금속에서 경화조직 감소와 연성 증대 등의 재질개선
- 2) Creep강도 향상
- 3) 잔류응력의 저감
- 4) 용접부의 잔류수소 방출

경화된 용접부는 용접후열처리 후 템퍼링 효과에 의해 연성이 회복된다. 또한, 용접부에는 모재의 항복점에 가까운 잔류응력이 존재하지만, 용접후열처리 후 잔류응력이 저감되며, 용접부에 잔류되어있는 수소가 방출되어 수소로부터 야기되는 지연균열감수성은 현저히 경감된다. 용기사용 중 잔류응력과 재료의 연화에 기인하는 손상 가능성도 저감되어 용기의 신뢰성 및 안전성 확보를 도모할 수 있다.

5.2 전체 용접후열처리

전체 용접후열처리는 Fig. 9에서 보여주는 바와 같이 제작된 용기 전체를 노내에 삽입하고 용접후열처리를

Table 3 Temperature range of PWHT by steel classifications

강 종	ISO TC/11	ASME Sec. VIII-1	ASME Sec. VIII-2	JIS Z 3700	화력발전	원자력발전
Carbon Steel	550~600	≥593	≥593	≥600	≥595	≥595
C-0.3Mo	580~620	≥593	≥593	≥600	≥595	≥595
C-0.5Mo	580~620	≥593	≥593	≥600	≥595	≥595
0.5Cr-0.5Mo	620~660	≥593	≥593	≥600	≥595	≥595
1Cr-0.5Mo	620~660	≥593	≥593	≥680	≥595	≥595
1.25Cr-0.5Mo	620~660	≥593	≥593	≥680	≥595	≥595
2.25Cr-1Mo	625~750	≥677	≥677	≥680	≥680	≥680
5Cr-0.5Mo	625~740	≥677	≥677	≥680	≥680	≥680
7Cr-0.5Mo		≥677	≥677	≥680	≥680	≥680
9Cr-1Mo		≥677	≥677	≥680	≥680	≥680
2-2.4Ni		≥593	≥593			≥595
3.5Ni	550~580	≥593	≥593			≥621
1.45Mn-0.10V		≥593	≥593			≥595
1Cr-0.15V		≥593	≥593			

Table 4 PWHT conditions according to the thickness of base metal

		ISO TC/11	ASME Sec. VIII-1	ASME Sec. VIII-2	JIS Z 3700	화력발전	원자력발전	
유지시간 (hr)	탄소강	두께	t/30	t/25.4	t/25.4	t/25	t/25	
		최소	0.5	0.25	1	0.25	1(pipe 0.5)	
		최대	2			(150+T)/100		
	합금강	두께	t/25	t/25.4	t/25.4	2 x t/25	t/25	t/25
		최소	1.2	0.25	1	0.25	1(pipe 0.5)	1(pipe 0.5)
		최대				(375+t)/100		
최고투입온도(°C)		400	427	427	400	300	300	
가열	가열속도 (°C/hr)	두께	≤220 x (25.4/t)	≤204 x (25.4/t)	≤204 x (25.4/t)	≤220 x (25/t)	≤220 x (25/t)	
		최소	55	38	38	50		
		최대	220	204	204	220	220	
최고추출온도(°C)		400	427	427	400	300	300	
냉각	냉각속도 (°C/hr)	두께	≤275 x (25.4/t)	≤260 x (25.4/t)	≤260 x (25.4/t)	≤275 x (25/t)	≤275 x (25/t)	
		Min.	55	38	38	≤50	55	
		Max.	275	260	260	≤275	275	
가열/냉각 중 최대온도차 (°C/m)		150/4.57	121/4.57	121/4.57	130/4.5	100/4.5	140/4.5	
유지중 최대온도차(°C)			66	38	80	50	50	
2회분할 열처리시 최소접침길이(m)		1.5	1.52	1.52	1.5	1.5	1.5	

t: Thickness of Base Metal



Fig. 9 Photo of large scale furnace for PWHT

하는 방법이다. 대차에 올린 후 노내에 제품을 넣고 중유 또는 가스를 열원으로 하여 열처리를 한다. 가열 버너의 화염이 직접 제품에 닿지 않게 하고, 용접부 근방이나 정해진 위치에 온도측정용의 열전대를 설치하여 모든 열전대의 온도값을 규정된 온도범위에서 관리한다. 다수의 제품을 동일한 노에서 열처리할 때에는 각 제품의 크기에 따라 온도의 scattering이 발생되기 때문에 노내의 위치, 삽입방법, 열전대의 위치 및 수 등에 주의를 하고 균일한 가열이 될 수 있도록 고려해야 한다.

5.3 국부 용접후열처리

제품이 크거나 전체를 한번에 노내에 삽입할 수 없는 경우, 또는 현지에 시공되어져 조립하는 경우 등은 국부가열로를 사용해 용접부 근방만을 가열하는 국부 용접후열처리를 수행한다. 가열은 가스나 중유 등 가연성 매체를 이용하는 경우와 유도가열 등 전기에너지를 이용하는 경우가 일반적이다. 가스토치와 같은 연소방식은 단위공간당 발열량이 크기 때문에 열용량이 큰 극후물 압력용기의 가열에 적합하다. 전기식은 발열량은 작

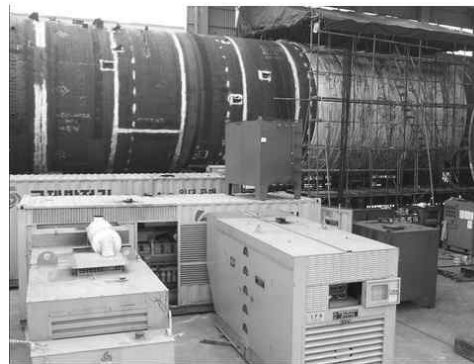


Fig. 10 Photo of electric heating band for local PWHT

지만 단위 히터의 형상, 수, 용량 등을 자유롭게 선택할 수 있기 때문에 용기 크기에 제한이 없으며 시공도 비교적 간단히 할 수 있기 때문에 박육압력용기 및 파이프 등의 용접후열처리에 많이 적용된다. Fig. 10에 전기히터에 의한 국부 용접후열처리의 예를 보여준다. 국부 용접후열처리 시에는 가열부와 비가열부와의 온도 구배가 완만할 수 있도록 고려해야 한다.

6. 맺 음 말

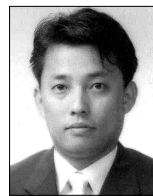
지금까지 압력용기 분야에 있어서 용접기술을 바탕으로 한 시공기술을 개략적으로나마 살펴보았다.

인구의 증가와 더불어 석유, 천연가스 및 전기와 같은 에너지 수요가 지속적으로 증가함에 따라서 석유화학플랜트 및 발전소의 건설이 증가되고 또한 효율을 높이기 위한 고성능 압력용기 개발이 지속적으로 진행되고 있다. 석유화학플랜트에 사용되는 반응기의 예를 들더라도 불과 십여년 전에는 한기당 무게가 300~400톤 가량이 대부분이었던 반면 최근에는 1,300톤 규모의 반응기가 설계되고 있다. 이는 곧 압력용기가 대형화 및 극후물화되어 가고 있는 증거이며 그 운전환경도 매우 가혹화 된다는 것을 의미한다. 이러한 제작 및 운전환경에 대응하기 위해서 강재는 고강도, 극후물화 및 고기능화 되어가고 있으며 그에 따른 용접을 포함한 시공조건은 더욱더 까다로워지고 있다. 예를 들어 강재가 극후물화되면 용접개선이 깊고 넓어져 용접생산성 저하와 함께 결함발생 가능성도 높아져 용접조건의 여유도가 적어지며 용접후열처리도 강재두께방향으로 균일한 가열이 어렵게 되므로 조건설정에 신중을 기하여야 한다.

향후 국내 발전 및 석유화학플랜트 산업의 경쟁력을 지속적으로 유지시키기 위해서는 위와 같은 문제들을 극복할 수 있는 성능을 가진 우수한 강재 개발과 함께 신뢰성 있는 용접시공기술 개발에 끊임없는 연구와 노력이 경주되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Dipl.-Ing. H. Schultz: Electron beam welding, Abington publishing, 1993, 93-114
2. K. C. Kim et al.: Application of CW Nd:YAG laser welding in small pressure vessel, Proceedings of the 2004 Autumn Meeting of Korean Welding Society, 2004, 52-54
3. M. J. Kang, et al.: Trend in digitalization of welding power source and application of information technology, Journal of The Korean Welding and Joining Society, 21-1(2003), 14-20
4. 용접집합편람 : I.철강 및 비철재료, 251-266
5. E. J. Kim : Welding Fabrication Technology of Pressure Vessels, Journal of The Korean Welding and Joining Society, 18-1(2000), 38-45
6. 稻垣道夫, et al: 壓力容器用鋼材溶接의 實際, 産報出版, 1986
7. Welding Handbook: 8th Edition, Vol. 2, Welding process, 145
8. I. C. Chung, et al.: The comparison of characteristic between electron beam welding and narrow-gap TIG welding with 316LN stainless steel, Proceedings of the 2005 Spring Meeting of Korean Welding & Joining Society, 2005, 82-83
9. ASME : Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. IX, Welding and Brazing Qualifications
10. ASME : Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. V, Nondestructive Examination
11. C. D. Lundin et al.: Postweld heat treatment cracking in Cr-Mo steels, Welding Reserch Bulletin, No. 349, 1989
12. 神戶製鋼所: 重油脫硫裝置用壓力容器的 溶接, 溶接施工教材 化工機編(2), 神戶製鋼所, 1984



·채현병
 ·1969년생
 ·POSCO 기술연구원
 ·용접공정
 ·e-mail : hbchae@posco.com