

# 압력용기 제작에 적용되는 용접기술의 특성

김 응 준

대전산업대학교 신소재공학부

## Welding Fabrication Technology of Pressure Vessels

Eung-Joon Kim

### 1. 서 론

일반적으로 압력용기란 압력을 가진 유체를 수용하는 용기로서 넓은 의미로는 boiler를 포함한다. 압력용기는 각종의 제조공업, 발전(화력, 원자력), 교통과 물류 등 현대 산업의 많은 분야에서 근간이 되는 설비의 하나로서 커다란 역할을 하고 있는 반면 안전성 및 신뢰성 확보라는 커다란 과제를 안고 있다.

압력용기의 안전성에 관하여서는 boiler 개발 초기 속출한 폭발사고가 구미선진 제국에 있어서 일찍이 압력용기규격을 제정하게 하였으며, 최근에 이르러서는 기기의 대형화 및 고성능화에 따라 만약의 사고 시에 예상되는 막대한 피해로 인하여 안전성에 대한 요구는 종래 보다 더욱 커지고 있다.

한편, 압력용기의 대형화와 성능향상의 과정에서 그 제작방식은 초기의 rivet 구조 혹은 일체형 단조구조로부터 용접구조로 변화되었으며, 따라서 압력용기의 제작에 적용되는 용접기술은 압력용기의 안전성은 물론 성능과 관련한 신뢰성의 확보에도 커다란 영향을 미치게 되었다.

이와 같은 배경으로부터, 본고에서는 압력용기의 설계, 재료선정, 시공의 각 단계에 있어서 용접기술의 관점에서 고려되어야 할 사항에 대하여 검토하였다.

### 2. 압력용기와 용접기술

압력용기 등 용접구조물의 생산공정은 설계-재료-시공-시험·검사-성능평가의 흐름으로 되어있다.

용접구조물의 설계는 그 구조물의 사용을 위한 process 설계와 강도를 중시한 구조설계로 나누어진다. 압력용기의 구조설계에 있어서는 온도, 압력 및 내

용물이 중요하며, 특히 부식환경에 있어서는 부식대책을 고려한 설계가 이루어져야 한다. 또한, 용접기술에서는 수많은 재료와 용접방법 중에서 선택된 재료 및 용접방법의 조합을 기본으로 하여 용접구조물의 제작 system이 구성되므로 우선 재료의 선택이 중요하다.

압력용기 등 용접구조물의 재료는 구조물의 구조규격 및 관련 법규에 바탕한 설계이념, 요구 사용성능, 품질등급, 재료가격 등에 의하여 선택되므로, 재료규격에서 규정된 화학성분의 범위, 기계적 성질 및 치수 공차 등은 물론 용접성이나 내식성 등에 특히 주의하여야 한다. 여기서 용접성이란 재료를 용접할 때 만족할 만한 접합이 이루어졌는가 라는 접합성과 더불어 용접이음이 그 구조물의 요구 사용성능을 만족시키고 있는가 라는 광의의 용접성을 이르는 것으로 재료고유의 성질뿐만 아니라 모재와 용접방법과의 조합에 의하여 평가된다.

용접시공법의 선정에 있어서는 용접구조물의 종류, 요구성능, 규격 및 기준에 의한 품질수준, 모재의 재질 및 형상치수, 용접기자재, 이음의 종류 및 정확도, 사용성능, 시공의 합리성 및 효율성, 용접기술자 및 작업자의 확보, 생산공정, 공장 용접과 현장 용접, 용접자세, 용접후열처리의 유무, 품질관리, 용접보수의 용이성과 그 방법 등을 고려한다.

압력용기의 용접시공기술에서는 back bead 용접이나 고급재료의 용접 시 품질 고급화를 목표로 한 GTA 용접의 적용, 고 능력과 더불어 품질 고급화를 지향한 후판재료의 narrow-gap welding이나 전자빔용접 등의 적용, 용접 작업성과 비드 형상의 개선을 위한 아크 제어법의 적용 등이 주목된다. 용접의 자동화에 있어서는 전용기와 함께 용접 robot의 적용이 과제로 되어 있다.

# 압력용기 제작에 적용되는 용접기술의 특성

김 응 준

대전산업대학교 신소재공학부

## Welding Fabrication Technology of Pressure Vessels

Eung-Joon Kim

### 1. 서 론

일반적으로 압력용기란 압력을 가진 유체를 수용하는 용기로서 넓은 의미로는 boiler를 포함한다. 압력용기는 각종의 제조공업, 발전(화력, 원자력), 교통과 물류 등 현대 산업의 많은 분야에서 근간이 되는 설비의 하나로서 커다란 역할을 하고 있는 반면 안전성 및 신뢰성 확보라는 커다란 과제를 안고 있다.

압력용기의 안전성에 관하여서는 boiler 개발 초기 속출한 폭발사고가 구미선진 제국에 있어서 일찍이 압력용기규격을 제정하게 하였으며, 최근에 이르러서는 기기의 대형화 및 고성능화에 따라 만약의 사고 시에 예상되는 막대한 피해로 인하여 안전성에 대한 요구는 종래 보다 더욱 커지고 있다.

한편, 압력용기의 대형화와 성능향상의 과정에서 그 제작방식은 초기의 rivet 구조 혹은 일체형 단조구조로부터 용접구조로 변화되었으며, 따라서 압력용기의 제작에 적용되는 용접기술은 압력용기의 안전성은 물론 성능과 관련한 신뢰성의 확보에도 커다란 영향을 미치게 되었다.

이와 같은 배경으로부터, 본고에서는 압력용기의 설계, 재료선정, 시공의 각 단계에 있어서 용접기술의 관점에서 고려되어야 할 사항에 대하여 검토하였다.

### 2. 압력용기와 용접기술

압력용기 등 용접구조물의 생산공정은 설계-재료-시공-시험·검사-성능평가의 흐름으로 되어있다.

용접구조물의 설계는 그 구조물의 사용을 위한 process 설계와 강도를 중시한 구조설계로 나누어진다. 압력용기의 구조설계에 있어서는 온도, 압력 및 내

용물이 중요하며, 특히 부식환경에 있어서는 부식대책을 고려한 설계가 이루어져야 한다. 또한, 용접기술에서는 수많은 재료와 용접방법 중에서 선택된 재료 및 용접방법의 조합을 기본으로 하여 용접구조물의 제작 system이 구성되므로 우선 재료의 선택이 중요하다.

압력용기 등 용접구조물의 재료는 구조물의 구조규격 및 관련 법규에 바탕한 설계이념, 요구 사용성능, 품질등급, 재료가격 등에 의하여 선택되므로, 재료규격에서 규정된 화학성분의 범위, 기계적 성질 및 치수 공차 등은 물론 용접성이나 내식성 등에 특히 주의하여야 한다. 여기서 용접성이란 재료를 용접할 때 만족할 만한 접합이 이루어졌는가 라는 접합성과 더불어 용접이음이 그 구조물의 요구 사용성능을 만족시키고 있는가 라는 광의의 용접성을 이르는 것으로 재료고유의 성질뿐만 아니라 모재와 용접방법과의 조합에 의하여 평가된다.

용접시공법의 선정에 있어서는 용접구조물의 종류, 요구성능, 규격 및 기준에 의한 품질수준, 모재의 재질 및 형상치수, 용접기자재, 이음의 종류 및 정확도, 사용성능, 시공의 합리성 및 효율성, 용접기술자 및 작업자의 확보, 생산공정, 공장 용접과 현장 용접, 용접자세, 용접후열처리의 유무, 품질관리, 용접보수의 용이성과 그 방법 등을 고려한다.

압력용기의 용접시공기술에서는 back bead 용접이나 고급재료의 용접 시 품질 고급화를 목표로 한 GTA 용접의 적용, 고 능력과 더불어 품질 고급화를 지향한 후판재료의 narrow-gap welding이나 전자빔용접 등의 적용, 용접 작업성과 비드 형상의 개선을 위한 아크 제어법의 적용 등이 주목된다. 용접의 자동화에 있어서는 전용기와 함께 용접 robot의 적용이 과제로 되어 있다.

### 3. 용접이음의 설계

압력용기를 구성하는 부재의 강도설계를 완료하여 주요수치와 형상이 결정되면, 그 다음단계가 용접이음의 설계이다. 용접이음의 설계에는 다음 사항을 고려하여야 한다.

- 1) 용접 그루브는 필요 이상으로 크지 않게 하고, 용접 길이는 가능한 한 줄여서 용접량을 적게 한다.
- 2) 접합부재의 강도의 균형을 생각하여 용접재료 및 용접방법을 결정한다. 여기서 모재의 강도보다 용접금속의 강도가 너무 높으면 오히려 해가 된다.
- 3) 용접시공 및 이음검사가 용이하도록 이음설계를 한다.
- 4) 용접이음의 교차나 근접을 피한다.
- 5) 단면형상의 급격한 변화를 피하여 응력집중을 줄인다.

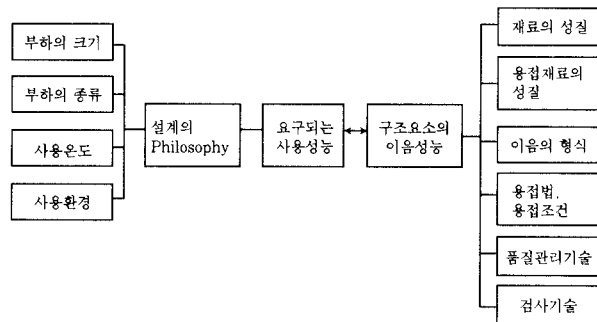


Fig. 1 용접구조물의 설계와 재료, 공작의 관계

- 6) stainless강 등과 같이 용접에 의하여 변형이 발생하기 쉬운 재료에 대하여서는 용접에 따른 수축을 사전에 고려한다.
- 7) 내압부에 보강판을 용접할 때는 보강판을 등글게 하여 원주용접에 의한 연속용접이 가능하도록 한다. 보강판에 기공을 만드는 것도 중요하다.
- 8) 경제성과 능률향상을 고려하여 시공시간의 단축을 꾀한다.

그림 1에 일반적인 용접구조물의 경우 구조요소에 요구되는 성능과 구조요소의 이음성능과의 관계를 나타내었다<sup>1)</sup>.

#### 3.1 용접이음의 위치

압력용기의 용접이음의 위치는 그림 2에 나타낸 것과 같이, A, B, C, D로 분류된다<sup>2)</sup>. 이들 이음은 중요도에 따라 설계, 시공, 검사의 품질요구가 달라지게 된다. 또한 각 이음에 발생하는 응력이 다르고, 용접이음 형식과 그루브의 형상도 다르기 때문에 한 종류의 비파괴시험을 적용하는 것으로 결함의 검출이 곤란한 경우에는 다른 비파괴 시험을 병용하게 된다.

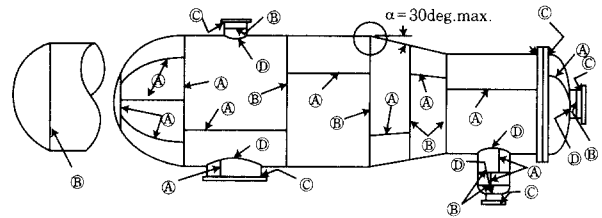


Fig. 2 압력용기에 있어서 용접이음의 위치에 따른 분류  
 (1)분류 A : 동체(shell), nozzle 및 동체에 연결되는 부위(communication chamber)의 모든 길이 방향 용접이음.  
 (2)분류 B : 동체, nozzle을 포함한 communication chamber의 모든 원주 방향 용접이음. 반구형을 제외한 경판을 동체에 연결하는 용접이음.  
 (3)분류 C : flange, tube sheet, 평경판을 동체, 경판, nozzle에 연결하는 용접이음.  
 (4)분류 D : communication chamber, nozzle을 동체 또는 경판에 연결하는 용접이음 nozzle과 communication chamber와의 용접이음.

#### 3.2 이음형식과 그루브의 형상

압력용기에 사용되는 용접이음은 다음과 같다.

- 1) 맞대기 양면용접 또는 이와 동등 이상으로 간주되는 맞대기 편면 용접이음. 여기서 동등 이상으로 간주된다 함은 다음을 이른다.
    - a) backing strip을 사용하는 방법 외의 방법으로 충분한 용입이 얻어져 안쪽 표면이 평활한 경우.
    - b) backing strip을 사용하여 용접한 후, backing strip을 제거하여 평활한 표면이 얻어진 경우.
  - 2) backing strip을 사용한 맞대기 편면 용접에서 backing strip을 남겨 놓는 이음.
  - 3) 1), 2) 이외의 맞대기 편면 용접이음.
  - 4) 양면 전 두께 겹치기 fillet 이음.
  - 5) T형 용접이음 (완전 용입 용접).
  - 6) T형 fillet 용접이음 (부분 용입 용접을 포함).
- 이들 이음은 압력용기 이음부의 중요도에 따라 선택된다. 또한 그루브의 형상은 T형, V형, X형으로 대표되는 여러 종류의 형상이 이용된다.

그루브 형상은 용접이음의 종류와 용접방법의 조합에 의하여 결정된다. 여기서 중요한 것은 용접하기 쉽고 경제적이며 건전한 용접이음이 얻어질 수 있는 형상이어야 하는 것이다. 그루브 각도, 루트 간격 등의 치수 공차가 용접이음 성능에 미치는 영향에 대하여서는 수동용접 및 반자동 용접의 경우에는 용접봉 또는 와이어의 직경이나 조작법의 변경에 의하여 대응할 수 있으나, 자동용접의 경우에는 그루브의 정확도가 이음성능에 크게 영향을 미치므로 주의하여야 한다. 그림 3에 압력용기의 동체와 경판의 용접에 적용

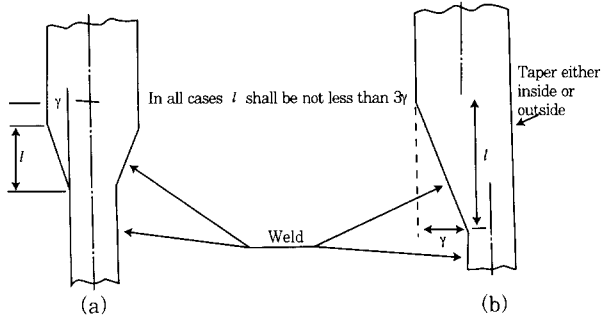


Fig. 3 두께가 다른 판재의 맞대기 용접이음부

되는 두께가 다른 판재의 맞대기 용접이음부의 형상을 나타내었다<sup>2)</sup>.

#### 4. 용접이음의 성능을 지배하는 요인

용접된 구조요소에 있어서 용접이음의 파괴강도, 연성강도 등의 성능은 몇 가지의 원인으로 인하여 반드시 모재와 동등한 성능을 나타내지 못한다. 그 원인은 주로 용접부가 용접시 받는 열이력에 기인하는 것으로, 그 원인을 크게 나누면 다음에서 언급하는 역학적 요인과 재질적 요인으로 나눌 수 있다(그림 4)<sup>1)</sup>.

##### 4.1 역학적 요인

용접이음의 성능을 지배하는 역학적 요인으로 들 수 있는 것은 용접결함(weld defect), 이음의 형상적 불연속, 용접잔류응력(welding residual stress)이나 용접변형(welding deformation) 등이다. 용접균열, 융합불량(lack of fusion), under cut, slag inclusion, blow hole 등의 각종 용접결함, 특히 용접균열과 같은 평면상 결함은 때때로 용접이음부에 있어서 파괴의 기점이 된다. 강구조물의 제작 시에는 재료의 적절한 선택과 용접기술, 품질관리기술, 검사기술의 향상에 의하여 이들 결함을 가능한 한 줄이는 노력을 하여야 하지만 시공환경과 경제성과의 관련으로 인하여 이들 결함을 간과할 수밖에 없는 경우도 있다. 또한 용접이음에서는 덧살(reinforcement), 미용착부 등 이음 특유의 형상적 불연속부나 시공오차에 따른 mismatching 등이 존재하여 이들 형상적 불연속이 응력, strain 집중원으로 작용, 이음 성능에 영향을 미치는 요인이 되기도 한다. 뿐만 아니라, 용접이음에는 용접 잔류응력이나 용접변형이 반드시 존재하게 된다. 잔류응력, 용접변형이 존재하면 용접부는 국부적으로 설계 등에서 고려한 것보다도 큰 변형상태로 되는 경우가 생기게 된다. 또한, 용접 잔류응력이나 용접변형은 용접결함 특히 용접균열, 융합불량 등의 평면상 결

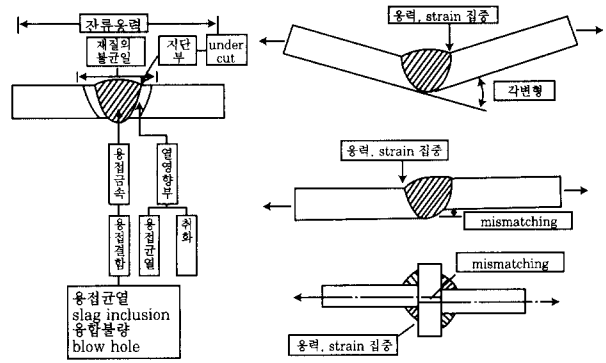


Fig. 4 용접이음의 역학적, 재질적 불연속성

함과 중첩되어 용접이음의 성능에 커다란 영향을 미치는 경우가 있다.

##### 4.2 재질적 요인

용접이음의 성능을 지배하는 재질적 요인으로는 용접 열영향에 의한 조직변화, 열 strain 이력의 영향, 용접후열처리(Post Weld Heat Treatment, PWHT) 등의 열가공에 따른 취화 등을 들 수 있다. 용접이음에 있어서 용접금속은 모재와는 다른 조직일 뿐만 아니라, 용접에 의한 열 cycle로 인하여 용접금속에 인접한 열영향부의 금속조직도 모재와는 다른 조직을 갖게 된다 또한 열영향부의 외측에 인접한 부분은 반드시 조직변화가 인정되지 않더라도 용접 열 cycle 과정에서 복잡한 소성 strain 이력을 받아 재질적 변화를 일으키게 된다. 이들 열영향 때문에 용접이음 각부의 역학적 성질은 모재의 성질과 달라지게 된다. 또한 용접 잔류응력이나 용접변형을 제거하기 위하여 수행되는 용접후열처리나 선상가열 등의 방법은 경우에 따라서는 용접이음 각부에 재질열화를 초래하기도 한다. 이상에서 언급한 각종의 요인은 어느 것이나 용접이음부에 바람직하지 못한 불균질성을 가져와 이음성능에 영향을 미친다.

용접이음부의 성능을 지배하는 역학적, 재질적 요인은 실제 용접이음부에서는 복잡하게 중첩되어 때로는 구조물에 치명적인 파괴를 일으키게 된다. 이들 제 요인은 용접구조물의 설계, 재료, 공작기술과 밀접한 관계를 갖고 있다. 표 1에 양자의 상호 관계를 나타내었다. 구조요소에 있어서 용접이음의 성능을 지배하는 역학적, 재질적 요인을 정량적으로 평가함과 동시에 설계, 재료, 공작과의 관련을 명확히 하는 것은 용접구조물의 파괴에 대한 안전성을 확보하기 위하여 반드시 필요한 것이다.

Table 1 용접이음의 성능에 영향을 미치는 요인

요 인		모재의 성 질	용접재료의 성질	이음의 형 식	용접법과 용접조건	공 작 정밀도	용접후처리 (PWHT등)
역학적 요 인	용접결합	○	○	○	○	○	○
	이음형상의 불연속			○		○	
	잔류응력, 용접변형	○	○	○	○	○	○
재질적 요 인	조직변화	○	○		○		○
	열 strain 이력	○	○		○		○

### 5. 압력용기의 용접시공

목표로 하는 강도와 기능을 갖춘 압력용기를 제작하기 위한 일련의 공정 중 용접기술이 차지하는 비중은 매우 크므로 용접시공법, 용접재료, 그루브 형상이나 예열온도 등을 포함한 용접조건, 후열, 작업순서, 검사방법 등이 고능률, 고품질, 저가격으로 수행될 수 있도록 치밀한 계획이 필요하다.

압력용기제작에 사용되는 용접은 용접의 목적에 따라 다음 2종류로 나눌 수 있다.

- 1) 부재와 부재를 접합하는 이음 용접으로 맞대기, fillet 용접 등.
- 2) 부재의 형상을 갖추기 위한 육성용접이나, 용기에 부가적 기능을 갖추기 위한 용기내면에 오버레이 용접(overlay 용접) 등.

압력용기 제작을 위한 용접은 이음용접이 주체이며,

용기의 신뢰성이나 안전성의 면에서 치밀한 관리가 필요하다.

압력용기 내면에 내식성이나 내수소성을 부여하기 위하여 stainless steel이나 inconel 등의 고합금 재료를 육성용접하는 경우에는 육성금속의 성분과 두께를 확보하는 것이 가장 중요하다. 따라서 이음용접과 달리 특별한 관리점이 있음에 주의하여야 한다.

### 5.1 구성부재와 용접방법

그림 5는 대형 압력용기의 용접 및 검사의 공정을 나타낸 것이다<sup>3)</sup>. 압력용기의 용접에는 피복아크용접, 서브머지드용접, MIG 또는 MAG 용접, TIG 용접, 플럭스코어드아크(flux cored arc)용접, 띠형전극 용접, 플라즈마아크(plasma arc)용접, 일렉트로슬래그(electroslag)용접 등이 사용된다. 특수 용접법으로

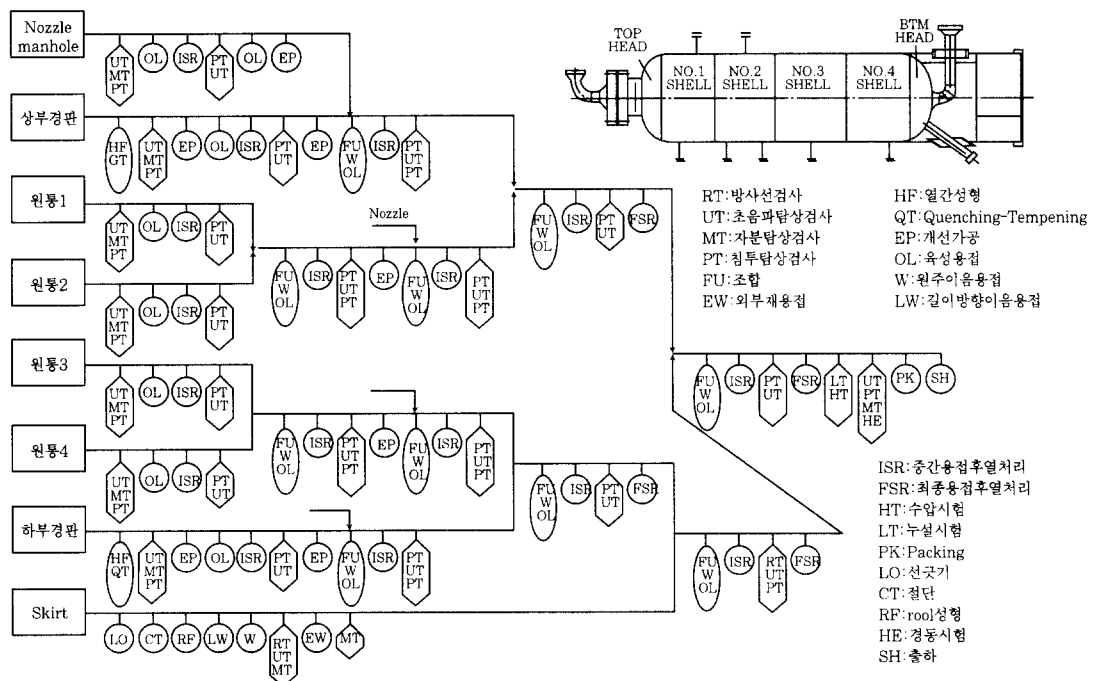


Fig. 5 대형 압력용기 조립 및 검사공정

전자빔용접이나 레이저용접 등도 압력용기 제작에 적용되고 있다.

피복아크용접은 형상이 복잡한 부분이나 하향자세에서 용접이 불가능한 부분에서도 손쉽게 적용할 수 있으며, 또한 특수한 장치를 필요로 하지 않으므로 저가일 뿐만 아니라 범용성이 뛰어나므로 거의 모든 재질의 용접에 사용되고 있다.

MIG 또는 MAG 용접, TIG 용접, 플럭스코어드아크용접도 특수한 장치를 사용하지 않고 반자동 용접이 가능하므로, 종래의 피복아크용접으로 시공되었던 부분에 능률향상을 목적으로 이들 용접법이 널리 적용되고 있다. 이들 용접법을 기본으로 하는 하향, 입향 또는 pipe의 전자세전용 용접기도 있다.

서브머지드용접 등의 자동용접은 시간당 용착속도가 크지만 용접 장치의 설치와 용접준비에 시간이 걸린다. arc time율을 높여 능률을 향상시키기 위하여 부재형상, 용접위치, 용접자세 등을 고려한 종합적인 관점에서 용접장치나 조립구속장치 계획을 포함한 용접 방법을 명확히 하여야 한다.

일반적으로 용접시공법을 결정하기 위하여서는 다음 사항을 명확히 하여야 한다.

- 1) 용접법(피복아크용접, 서브머지드용접, MIG 용접 등).
- 2) 용접재료(화학적성분, maker, 봉직경, flux 등).
- 3) 그루브의 형상(이음종류, 형상 등).
- 4) 용접조건(전류, 전압, 속도, 자세, 운봉, 입열량, gas 등).
- 5) 예열, pass간 온도.
- 6) 용접순서, 적층법.
- 7) 용접후처리(끝손질, 열처리).
- 8) 기타(backing strip, back chipping, 검사방법, 용접사 자격등).

용접시공법의 결정에는 그 용접법에 의한 용접부가 요구품질을 만족시킨다는 보증이 필요하다. 능률을 높이기 위하여 고전류를 사용하면 기계적 성질이 저하하고 균열 등의 용접결함이 발생하기 쉬우므로, 용접조건 수정이나 새로운 용접법의 채용에 있어서는 계획 단계에서 상세한 용접조건 검토를 통하여 용접부 품질의 사전확인이 필요하다.

### 5.2 용접이음

압력용기의 용접이음은 일반적으로 3.1항에 나타난 것과 같다. 또한 5.1항에서 언급한 바와 같이 용접시공법은 용접부에 요구되는 특성을 만족시키는 것이어

Table 2 표준이음 그루브 형상의 예

	groove형상	두께 t (mm)	G (mm)	R (mm)	γ (mm)	α (°)
I형		≤ 6	2~t	-	-	-
V형		≤ 75	0~2	≥ 2	-	α1 ≥ 75 α2 ≥ 20
V형*		≤ 75	3~5	2	-	α1, α2 ≥ 40
X형		≤ 100	0	≥ 2	-	α1, α2 ≥ 40
U형		≥ 50	0	> 5	≥ 10	≤ 5
J형		≥ 50	0	≥ 5	≥ 18	≤ 5

\* back bead 용접의 groove

야 한다.

용접이음의 그루브 형상은 용접시간, 용접재료비, 품질에 커다란 영향을 미치게되므로, 다음 사항을 고려하여 신중히 결정하여야 한다.

- 1) 용접량이 적을 것.
- 2) 용접결합이 발생하기 어려울 것.
- 3) 그루브 가공비가 적을 것.
- 4) 용접변형이 작을 것.

그루브 단면적을 작게하여 용착 금속량을 적게하면 소요경비, 용접변형의 면에서 유리하나, 용접작업의 여유도가 작아져 결합이 유발되기 쉬우므로 적절한 그루브 폭의 결정이 필요하다. 그루브 형상의 예를 표 2에 나타내었다.

최근에는 그루브 단면적을 대폭 감소시킨 각종의 narrow gap 용접법이 실용화되고 있다. 그림 6에 후판 재질의 동체에 대한 맞대기 용접이음의 일례로 종래의 용접법과 narrow gap 용접법의 그루브 형상을 비교하여 나타내었고<sup>4)</sup>, 그림 7에는 그림 6의 각 용접법에 있어서의 소요 용접경비를 비교하여 나타내었다<sup>5)</sup>.

또한 실용화가 검토되고 있는 전자빔용접에 의하면 그루브 간격이 없는 극후판의 관통 맞대기 용접이 1 pass로 가능하다. 집속된 고 에너지 밀도의 전자빔 특

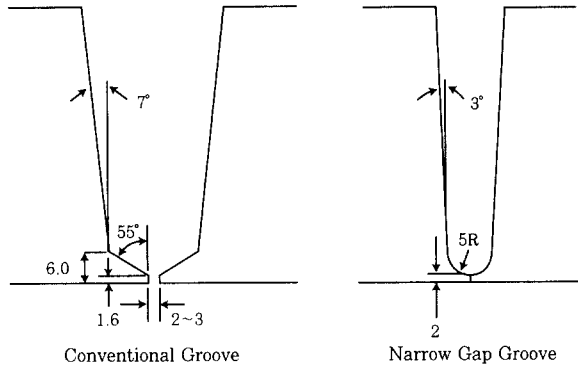


Fig. 6 종래의 용접법과 narrow gap 용접법의 그루브 형상

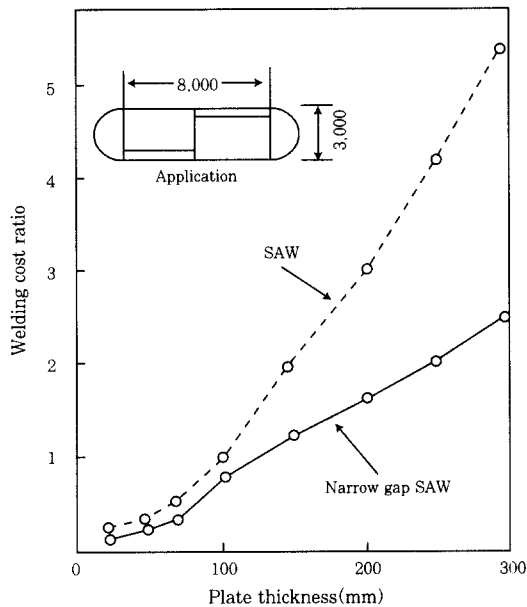


Fig. 7 종래의 용접법과 narrow gap 용접법의 용접소요 경비

유의 deep penetration 현상을 이용하기 때문이다. 저진공 또는 국소진공 방식에 의한 전자빔용접은 압력 용기 제작에 이미 적용되고 있다.

### 5.3 용접조건

전류, 전압, 용접속도는 용접의 기본조건으로 용접부의 인장강도특성, 인성 등의 기계적 성질과 함께 용입 불량, 융합불량 등의 용접결함 발생에도 커다란 영향을 미친다. 수행하고자 하는 용접조건으로부터 다음식에 의하여 구하여 진 입열량이 사전에 결정된 최대 입열량 이하가 되어야 한다.

$$\text{입열량} = \frac{60 \cdot EI}{v} \text{ (Joullcm)}$$

여기서  $v$ : 용접속도 (cm/min)

$E$ : 아크전압 (V)

$I$ : 용접전류 (A)

용접시의 예열온도 관리는 용접부의 수소에 의한 delayed crack의 방지, 열영향부(HAZ)의 경도저하를 위하여 중요하다. 다층 용접시에는 용접열이 축적되어 온도가 상승하게 되므로, pass간 온도의 관리도 기계적 성질의 확보면에서 중요하다. 또한 판두께가 커지면 용접부의 확산성 수소를 방출시켜 균열의 발생을 방지하기 위한 목적으로 용접후 200~400℃ 정도로 유지하는 탈수소처리나 500~650℃의 중간 용접 후열처리를 실시하기도 한다.

### 5.4 용접시공

용접시공시 관리상 주의사항은 용접 지시서에 명기되지만, 일반적으로 다음 사항을 주의하여야 한다.

- 1) 그루브 부위는 용접전 scale이나 기름 등의 오염물질을 grinder로 제거하며, 용접완료 후 침투 탐상 시험이나 자분탐상 시험으로 유해한 결함이 없음을 확인한다.
- 2) 용접대상물을 적당한 지그를 사용하여 가조립 해보고 필요시에는 gas나 전기로 예열한다. 지그류의 본체에의 용접은 가능한 한 적게 한다.
- 3) 지정된 용접기, 용접재료를 준비하여 전류, 전압, 용접속도 등의 용접조건이 정해진 범위에 있는 것을 미리 확인한 후 본 용접을 실시한다.
- 4) 다층용접시 용접 중에 bead 형상이 나빠져 결함이 발생하기 쉬운 경우에는 grinder 등으로 bead 형상에 수정을 가한다.
- 5) 용접중, 예열 및 pass간 온도가 규정의 범위 내에 있는가를 온도 chalk나 표면온도계로 확인한다. 또한 전류, 전압, 용접속도도 적당한 시간 간격으로 측정, 기록 한다.
- 6) 최종 bead 부근에서는 용접두께가 균일하게 되도록 조정하여 평활한 reinforcement의 형상을 갖춘다.
- 7) spatter, slag를 충분히 제거한다.
- 8) back chipping시에는 arc air gauging으로 용입 불량부를 완전히 제거하여 결함을 없앤후 용접한다.
- 9) 재열균열(SR 균열)을 일으키기 쉬운 재료는 최종 bead의 적층 방법에 주의하여야 한다. 그림 8과 같이 temper bead를 놓거나 bead 토우부를 grinder로 연마하여 부드러운 곡선으로 한다<sup>3)</sup>.
- 10) 용접후 열처리가 필요한 경우에는 규정된 온도 및 유지시간으로 열처리를 수행한다. 판두께가 큰 경우에는 그루브가 깊어지므로 전극위치의 정확한 설정이 어려워진다. 또한 용접 중 그루브가 수축하므로, 미리 수축량을 예측하여 그루브 형상을 결정하여야 한다.

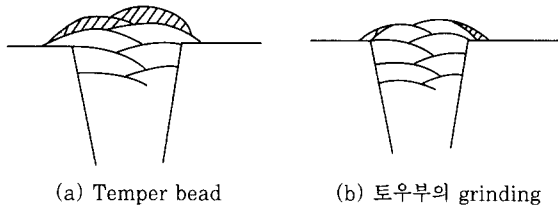


Fig. 8 최종 비드에 있어서의 재열균열방지법

5.5 용접결함

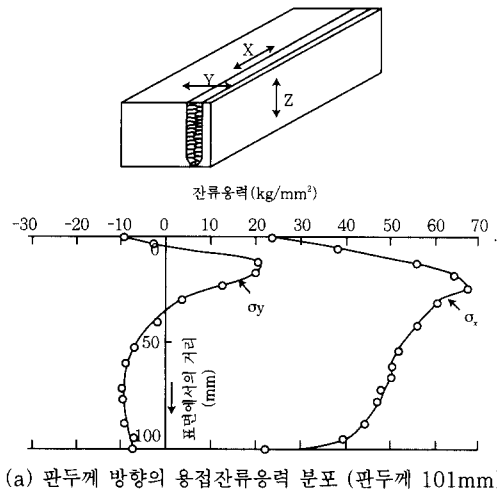
용접결함이 발생하지 않도록 용접시공을 하는 것은 당연한 일이나, 결함의 발생을 완전히 방지하는 것은 시공기술상 불가능한 일이다. 용접후 방사선 시험, 초음파 탐상시험, 자분탐상시험 등의 비파괴 시험에 의하여 유해하다고 판정된 용접결함은 관계규정 및 지시서에 따라 보수용접하여야 한다.

일반적으로 압력용기용 강재는 고온균열, 저온균열 혹은 SR 균열의 감수성이 작도록 설계된 용접성이 뛰어난 강종이다. 그러나 모재의 lamination이나 편석 등과 같은 조직의 불균일, 용접재료의 과다한 수소량이나 건조의 불충분, 용접조건과 순서의 불량, 용접사의 기량부족, 지시사항 이행 불철저 등의 요인이 복합적으로 영향을 미쳐 각종의 용접결함이 발생하게 된다. blow hole이나 slag inclusion 등과 같이 용접부의 취성과파괴에는 크게 영향을 미치지 않는 결함, 그리고 균열이나 용합불량 등과 같이 결함선단이 예리하고 길이를 가진 평면상 결함으로 압력용기의 안전상 허용될 수 없는 결함이 있다. 또한 undercut, overlap, reinforcement의 과다 등의 bead 불량, slag inclusion, 용입불량 등 용접사의 기량에 의한 결함도 있다.

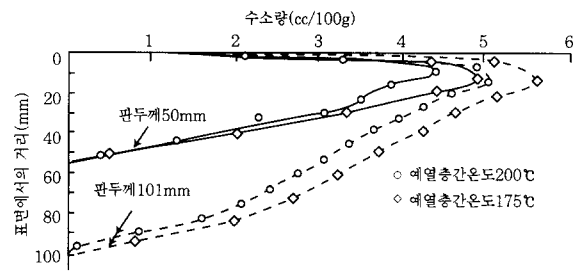
균열에는 고온균열과 저온균열이 있으며, 모재와 용접재료의 종류에 따라 달라지는 균열 감수성을 고려하지 않은 용접조건, 부적절한 용접순서 등 용접시공계획에 기인하는 경우가 많다.

후판의 다층 용접에서는 그림 9에서 보인 것과 같이 표면으로부터 10~20mm 정도의 위치에서 잔류응력과 수소량이 커지므로 이 부근에서는 미세한 크랙 또는 판두께를 관통하는 균열이 발생할 수 있다. 적절한 예열온도 관리와 용접후의 열처리 또는 최종 비드의 적층방법에 의하여 이와 같은 저온 균열의 발생을 억제할 수 있다.<sup>6)</sup>

Cr, Mo, V 등을 포함한 저합금강에서는 용접후열처리를 완료한 후에 바깥쪽 또는 안쪽 표면의 bead토우부 등의 응력집중부에 미세한 균열이 발생하는 일 있다. 이러한 균열이 재열균열이며 재열균열은 용접후 열처리 과정(그림 10)중 결정입내가 탄화물 석출에



(a) 판두께 방향의 용접잔류응력 분포 (판두께 101mm)



(b) 판두께 방향의 용접잔류응력분포 (판두께 101mm)

Fig. 9 2 1/4Cr-1Mo강 후판용접부의 잔류응력과 수소농도

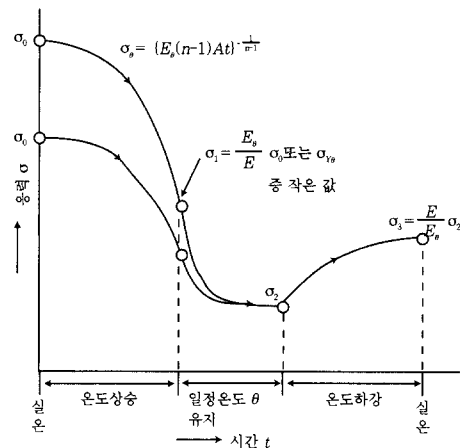


Fig. 10 용접후열처리 과정에서의 응력변화<sup>1)</sup>

의하여 경화하는 반면 결정입계는 오히려 강도가 저하하는 현상으로 인하여 입계에 발생한 국부적 strain집중에 의하여 유발되는 전형적인 입계균열이다.

6. 결 론

압력용기 제작공정의 각 단계에 있어서 적용되는 용접기술의 특성에 대하여 용접이음부의 성능향상을 위하여 고려하여야 할 사항을 중심으로 검토하였다.



압력용기의 제작에 용접기술은 필수 불가결한 것으로, 그 기술의 특징은 사용재료가 탄소강, 저합금강 및 고합금강 등 그 종류가 많고, 고온강도, creep 강도, 피로강도, 내산화성, 내식성 등의 성능이 요구되며 또한 사용 판두께가 3mm 정도의 박판에서 200mm를 넘는 초후판까지 그 종류가 다양한 것 등에 대응하여야 한다는 점이다.

최근의 압력용기는 대형화, 고기능화에 따라 그 신뢰성에 대한 요구는 더욱 엄격해지고 있으며 인공지능에 의한 제어기술의 발전에 힘입어 압력용기의 용접시공에 있어서도 NC 제어 및 computer 제어 등의 도입이 활발해지고 있다.

### 참 고 문 헌

1. 佐藤邦彦, 向井喜彦, 豊田政男 : 溶接工學, 理工學社, 1979.
2. ASME Boiler & Pressure Vessel Code VIII Division 1, 1998
3. 稻垣道夫, 小野寺眞作, 安達振作 : 壓力容器用鋼材溶接の實際, 産報出版, 1986
4. 溶接學會 溶接法研究委員會(編) : ナロウギャップ溶接, 1984
5. 牛尾誠夫, 松田福久, 益本 功 : ナロウギャップ溶接技術, 溶接學會誌, 第54卷, 第8号, 451-455, 1985
6. 高橋英司, 岩井健治 : 厚板突合溶接部のビード横割れに関する研究, 溶接學會 溶接構造委員會 資料 WD-22-77, 1977



- 김응준(金應俊)
- 1949년생
- 대전산업대학교 신소재생산공학과의
- 용접구조물의 강도평가 및 설계와 관련한 용접역학, 파괴역학분야 연구
- e-mail : ejkim@hyunam.tnut.ac.kr