

용접의 기초

1. SMAW

SMAW (Shielded metal arc welding, 피복아크용접)은 현재 여러 가지 용접법 중에서 가장 많이 사용되는 용접법이다. 원리는 피복제를 바른 용접봉과 모재 사이에 발생하는 아크의 열을 이용하여 모재의 일부와 용접봉을 녹여서 용접하는 방법이다. 현장에서 일반적으로 아크용접이라고 하는데 이는 옳지 않은 표현이다. 앞으로 설명할 GTAW, GMAW, FCAW, SAW 모두 아크 용접에 해당되기 때문이다.



사진: SMAW 용접봉 홀더



사진: 휴대용 용접봉 건조기

용접봉을 살펴보면 모재의 동일 또는 유사한 성질의 심선(core wire)의 외부에 피복제가 씌워져 있다. 현장 또는 공장에서 검사를 수행하다 보면 용접 작업자들이 피복제가 벗겨진 용접봉을 사용하는 모습을 볼 수가 있는데 이는 용접품질차원에서는 엄격히 규제되어야 한다. 그럼 피복제는 무슨 역할을 하는지 알아보도록 하자.

◆피복제의 역할

- 1) 아크 안정
- 2) 가스 발생 : 중성 또는 환원성 가스를 발생하여 아크를 대기로부터 차단하여 보호라는 작용을 한다.
- 3) 슬래크 생성: 용융점이 낮은 슬래그를 만들어 용융부의 금속표면을 덮어서 산화나 질화를 방지하고 냉각을 천천히 하여 탈산작용을 돕는다.
- 4) 탈산작용: 용융금속중의 산소와 결합하여 산소의 유해한 영향을 줄인다.
- 5) 합금 첨가: 용착금속의 성질을 개선하기 위해 Mn, Si, Ni, Mo, Cr 등을 첨가하기도 한다.

◆용접시 주의 사항

- 1) 용접봉의 건조 : 심선을 감싸고 있는 피복제는 수분을 흡수하기 쉬운데, 수분은 용접부에 기공이나 균열의 원인이 된다. 따라서 사용전에는 2~3 시간정도의 건조가 필요하다.
- 2) 균열에 대한 감수성이 큰 고장력강, 고탄소강, 쾌삭강의 용접에는 저수소계 용접봉을 사용한다. 저수소계 용접봉은 다른 용접봉에 비해 수소의 양이 1/10 정도로 낮아서 용착금속의 인성과 기계적 성질에 좋다.
- 3) 적정 용접전류의 선택: 지나치게 높은 용접전류는 입력량이 높아져서 모재의 변형을 초래하고, 비드면이 거칠며, 언더컷, 기공이 발생하기 쉬우며, 낮은 전류는 슬래그, 용입불량 등이 생기기 쉽다.
- 4) 환기: 용접장소는 항상 환기 및 통풍이 잘되도록 하고, 방진 마스크를 착용하는 것이 안전하다. 국내에서는 조선소에서 작업하던 용접사들이 장기간 유해가스 흡입으로 직업병이 발생하였다는 신문기사도 있다.

2. GTAW (Gas tungsten arc welding, TIG)은 용접토치에 텅스텐 전극을 끼우고, 용가재를 용해 시키면서 용접하는 방법으로 전류의 종류에 따라 용접부에 큰 영향을 끼친다. 텅스텐 전극봉은 순 텅스텐봉과 1~2%의 토륨이 포함된 것 토륨-텅스텐 전극봉이 있다.

GTAW는 용접봉에 피복제가 없으므로 외부에서 별도의 차폐가스를 공급하면서 용접을 하는데 Ar-gas를 주로 사용한다.



사진: GTAW 용접

◆GTAW의 특징

- 1) 용접 입열량이 작아서 박판의 용접에 적당하다.
- 2) 용입성이 좋아서 back-gouging이 불가능한 소구경 배관용접에서는 초층의 용접에 많이 사용된다.

3) 용접시 텅스텐 전극봉의 파편이 모재에 들어가는 경우 텅스텐 혼입의 결함이 발생되며 RT 필름상에는 모재보다 밝은 흰색으로 나타난다.

3. FCAW (Flux Cored arc welding)은 SMAW와는 달리 피복재가 심선의 중앙에 있는 것이다. 즉 피복재가 심선을 감싸는 SMAW와는 달리 심선이 피복재를 감싸고 있다고 생각하면 쉽게 이해가 될 것이다. FCAW는 용접봉이 자동으로 공급되며, 외부에서 Co₂ 가스를 공급하여 용접부를 보호한다.



FCCAW의 특징

- 1) 용접 속도가 SMAW 보다 최소 4 배이상 빠르다. 따라서 비용 절감차원에서 SMAW 보다 선호되고 있다.
- 2) 용접 전류에 따라 용접봉이 모재로 진행되는 형태가 변한다. short arc, spray arc, grobral arc 가 있다. (자세한 설명은 다음으로 미루기로 한다.). ASME Sec. IX에서는 PQR에 반드시 용접이행 형태를 명시하게 되어 있으나, 실제 제작업체의 WPS/PQR을 검토하다 보면 이것에 대한 이해가 많이 부족하여, 엉뚱한 내용을 써놓은 경우도 많다.
- 3) FCAW는 CO₂ 가스를 사용하므로 AWS나 해외의 engineering사의 용접 spec.을 보면 용접 자세를 규제하는 경우가 있다. 또한 입열량이 크므로 압력용기에서는 압력부에서는 사용을 규제하기도 한다.
- 4) 용접부를 보면 슬래그가 얇은 껍질처럼 쌓여 있고 잘 벗겨져서, SMAW보다 slag 제거 작업이 용이한 이점도 있다

* filler metal(용가재)과 electrode(용접봉)의 차이

텅스텐 전극은 - electrode, 우리가 흔히 TIG 용접봉이라고 부르는 것은 여기서는 용가재가 된다. 용접관련 서적을 보면 GTAW를 비소모식 용접법이라고 하는 이유가 바로 이것이다.

4. GMAW (Gas metal arc welding, MIG)은 피복재가 없는 심선을 용접봉으로 사용하고 외부에서 Ar, He, CO₂과 같은 불활성 가스를 공급하여 용접한다. FCAW와 유사점이 매우 많으나 용접봉 자체에 flux가 없다는 큰 차이점이 있고, 이 때문에 용접비드가 다소 거칠고, spatter가 많이 발생하는 단점이 있다.

◆GMAW의 특징

- 1) 용접 속도가 SMAW 보다 최소 4 배이상 빠르다. FCAW와는 비슷하다.
- 2) FCAW 처럼 용접 전류에 따라 용접봉이 모재로 진행되는 형태가 변한다. short arc, spray arc, grobral arc 가 있다. (자세한 설명은 다음으로 미루기로 한다.).
- 3) GMAW는 spatter 감소 및 용접 아크의 안정화를 위하여 여러 가지의 가스를 혼합하여 사용하기도 한다. (자세한 설명은 다음으로 미루기로 한다.).
- 4) FCAW 처럼 가스의 종류와 혼합비율 공급속도등이 Sec. IX에서는 필수 변수로 지정되어 있다. 그 만큼 이러한 변화에 민감하다고 해석하면 된다.

4. SAW (Submerged arc welding, 잠호용접)은 flux 를 외부에서 공급하며 용접불꽃이 flux 에 덮여 있어 Spatter 는 없고, 용접 속도가 빠르고 일정한 품질의 유지가 가능하여 자동용접으로 사용된다. flux 알갱이는 물론 건조가 중요하며, flux 의 조성에 따라 용접부의 미세한 성질이 변화하기 때문에 용접봉과 flux 의 조합이 PQ-test 때 반드시 check 되어야 한다.



사진: SAW 용접

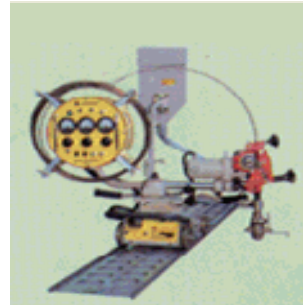


사진: SAW 용접기

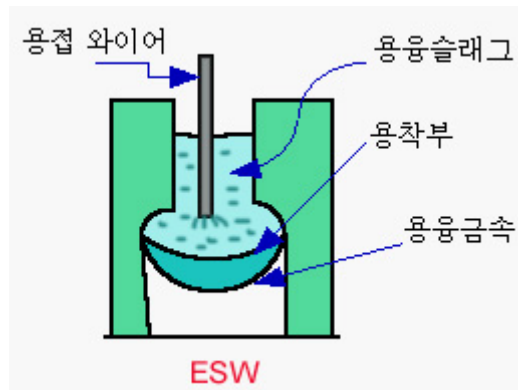
◆SAW 의 특징

- 1) Flux 로 용접비드를 덮어야 하기 때문에 다양한 자세의 용접은 불가능하고 아래보기용접에 사용된다.
- 2) 프로그램만 setting 하면 자동으로 용접이 되고 때문에 대량생산에 적합하다.
- 3) 용접속도도 수동보다 수십배 빠르고, 능률이 좋으며, 용입이 대단히 깊다.
- 4) 용접홈의 크기가 작아도 되며, 용접재료의 소비가 적어서 경제적이다.
- 5) 설비비가 비싸고, 용접부가 구부러져 있거나, 용접 길이가 짧은 경우에는 비능률적이다.
- 6) 용접 시공을 잘못하면 대량으로 불량률이 날 위험이 있다.

5. ESW (Electro Slag Welding): 이 용접법은 전문 철골업체에서 box 형 column 제작에 많이 사용하고 있는 방법입니다. 철골검사 때 공장구경하면서 본적이 있는데, 길이는 길고 사람이 직접 용접할 수 없는 사각형의 box 를 제작하는데 효과적이더군요. box 의 틀을 만들 때 backing metal 을 내부에 부착하여 용접을 하는데 수직자세에서 모재에 직각으로 구멍을 뚫고 용접을 하는데 대용량의 전류를 가하여 용접을 하는데 주물을 붓는 느낌이 들더군요. 이 용접법의 단점은 후판(두꺼운 판)에만 쓸 수 있고, 용접방향은 아래보기로 제한 되어있고, 용접작업전 드릴가공이 직각으로

가공이 안되면 결함이 한 면 전체에 발생할 수 있으며, 비파괴 검사방법으로는 초음파 수직 탐상만이 가능합니다.

◆원리 : 용접열이 아닌 와이어와 용융 슬래그 사이에 동전된 전류의 저항열을 이용하는 용접법으로 연속 주소식 용접법이라고 한다. 전극은 고정식과 진동식이 있으며 후판(150mm)이상에는 진동식이 사용된다. 와이어 1 개로 120mm 두께까지 용접이 가능하며 2 개로는 100~250mm 까지, 3 개는 250mm 이상의 용접이 가능하다.

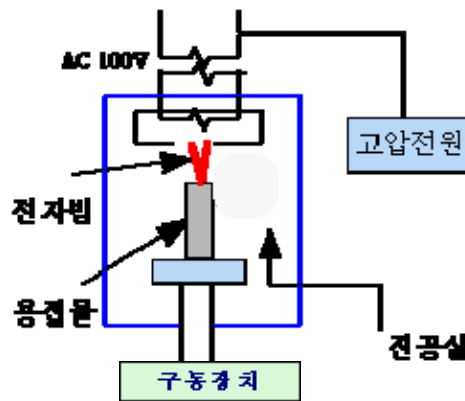


◆특징

- 1) 매우 두꺼운 판의 용접에 적당하다.
- 2) 특별한 홈 가공없이 I 형 홈이면 된다.
- 3) 수동 용접에 비해 4~6 배의 용접이 빠르다.
- 4) 한 pass 로 용접할 수 있어 모재의 변형이 적다.
- 5) 구리로 만든 수냉판을 모재에 밀착시켜서 비드 외관이 아름답다.

6. EBW (Electron Beam Welding):

◆원리 : 진공상태에서 고속의 전자 빔을 형성시켜 그 전자류가 가지고 있는 운동에너지를 용접 열원으로 한 용접법이며, 전자 운동에너지를 열 에너지로 변화 시켜 용접하는 것이다. 용접물이 놓이는 용접실은 진공 정도에 의해서 고 진공형, 저 진공형 및 대기압형으로 분류되며 전자빔의 가속 및 수송이 가능하므로 높은 에너지 밀도 용접이 가능하다. 용접 비드 폭이 좁고 용입이 깊은 용접부가 얻어진다.



◆특징

♠장 점

- 1) 용접 입열이 적고 용접부가 좁으며 용입이 깊으므로, 용접 변형이 적고 정밀 용접이 가능하다.
- 2) 고 용융점(텅스텐, 몰리브덴 등) 재료 또는 용융점이나 열전도율이 다른 이종 금속 사이의 용접도 가능하다.
- 3) 진공 중에서 용접하므로 불순가스에 의한 오염이 적고, 높은 순도의 용접이 되며, 활성 금속의 용접도 가능하다.
- 4) 예열이 필요한 재료를 예열 없이 국부적으로 용접할 수 있으며 잔류 응력이 적다.

♠단 점

- 1) 시설비가 많이 든다.
- 2) 진공 작업실이 필요한 고진공형에서는 용접물의 크기가 제한된다.
- 3) 진공중에서 용접하기 때문에 기공의 발생 및 합금성분의 감소 등이 발생한다.
- 4) 진공 용접에서 증발하기 쉬운 아연, 카드뮴 재료등은 부적당하다.
- 5) 대기압형의 용접기를 사용할 때에는 X선 방호가 필요하다.

6. IIW 의 metal transfer mode 분류

용적이행에 영향을 주는 인자들에는 차폐가스의 종류와 조성, 용접의 전류와 전압, 용접봉의 조성과 직경 등이 있다.

Transfer mode 의 종류	관찰 가능한 용접형태
● Free transfer mode (1) Globular - Drop - Repelled (2) Spray - Projected - Streaming - Rotating	저전류 GMAW Co₂ 차폐 GMAW Intermediate-current GMAW Medium-current GMAW 고전류 GMAW
● Bridging transfer (1) Short-circuiting (2) Bridging without interruption	short-arc GMAW, SMAW Welding with filler wire addition
● Slag-protected transfer (1) Flux-Wall guided (2) Other modes	SAW SMAW, FCAW, ESW

Globular transfer (입상 용적이행) :

용적의 직경이 사용된 와이어의 직경보다 큰 상태로 이행하는 형태를 말하는 것으로, 낮은 용접 전류와 중간 정도의 전류 범위에서 일어나는 drop transfer 과 비교적 높은 전류로 CO₂ 용접을 실시할 때 발생하는 repelled transfer 로 세분화기도 한다.

Short circuiting transfer (단락 용적이행) :



와이어의 끝에서 만들어진 용적이 용융지에 직접 접촉함으로써 용적이 이행하는, 낮은 용접 전류와 전압으로 CO_2 용접을 실시하거나 불활성 가스의 조성을 높인 용접조건 즉, MAG 또는 MIG 용접에서도 볼 수 있다.

Rotating transfer :



GMAW의 대전류 영역에서 일어나는 현상인데 전류가 높으면 용착 효율이 향상되기 때문에 능률측면에서는 전류가 높을수록 좋다. 그러나 용융지의 control이 어려워 용접 불량 발생하기 쉽다. 현재는 용접 능률향상에 대한 연구가 rotating mode의 control 측면에서 이루어지고 있다.

Spray transfer (단락 용적이행) :



이것은 용접 와이어의 크기보다 작은 용적이 이행하는 형태로, 비교적 고전류 영역에서 Ar 을 주성분으로 하는 보호가스 용접에서 관찰된다. 스프레이 이행 중에서 용적의 하나 하나가 규칙적으로 이행하는 것은 특히 projected transfer 라고 하고, 뿔죽하게 녹아 내린 와이어의 선단에서 작은 입자를 형성하면서 용적이 흐르는 형태의 이행은 streaming transfer 이라고 부른다. 또 용융된 와이어의 선단부가 길게 늘어지면서 고속으로 회전하는 상태로 이행하는 것은 rotating transfer 이라고 한다.

Flux-wall guided transfer (계면 용적이행) :

SAW 에서 발생하는 이행 형태의 하나로, SAW 에서의 용적이행은 project transfer 이 지배적이지만, 계면 이행은 아트를 덮고 있는 용융 플럭스내의 공간에서 용융금속이 옆으로 비산하는 모양을 나타내는 것이다.

II. 금속이행별 특성비교

금속이행의 종류	특성	Bead 외관	용입	적용
Short-circuit 이행	SMAW, GMAW 공정의 저전류 대역에서 발생	SPATTER 가 거의 없음. 외관 양호	용입 얇음.	박관 및 Root bridge 용접, 수직 용접 가능.
Globular 이행	탄산가스 사용 GMAW 공정에서 나타남.	SPATTER 가 많으며, 외관 형태가 미려하지 못함.	용입 깊음.	일반 Co2 용접
Spray 이행	아르곤, 탄산가스 혼합 GMAW 공정 및 티탄계 용접봉 사용 FCAW, SMAW 공정	SPATTER 가 거의 없음. 외관 미려	GMAW 는 용입 양호, FCAW 및 SMAW 는 용입 얇음	외관이 중요한 용접. Pulse 용접기에 혼합 가스 사용시 Pulse Spray Mode

Structural Welding Code - Steel

Significant Changes from AWS D1.1-96 to AWS D1.1-98

Please note: This is not a complete list of changes. These are considered to significant technical changes. There are many other minor technical changes and editorial changes.

1.1 Scope

Following "fabricating", added "and erecting". Changed "When conformance to the code is stipulated in contract documents, all provisions of this code shall be complied with, except ..." to "When this code is stipulated in contract documents, conformance with all provisions of the code shall be required, except ..."

2.2.4.2 Prequalified Joint Dimensions

This section has been replaced in its entirety with the following:

The joint details specified in 3.12 (PJP) and 3.13 (CJP) have repeatedly demonstrated their adequacy in providing the conditions and clearances necessary for depositing and fusing sound weld metal to base metal. However, the use of these details in prequalified WPSs shall not be interpreted as implying consideration of the effects of welding process on material beyond the fusion boundary nor suitability for a given application.

2.4.7 Fillet Weld Terminations This section has been extensively revised, with new provisions and reorganization and clarification of existing provisions. Replace this section in its entirety with the following:

2.4.7.1 Drawings. - The length and disposition of welds, including end returns or boxing, shall be indicated on the design and detail drawings. Fillet weld terminations may extend to the ends or sides of parts or may be stopped short or may be boxed except as limited by 2.4.7.2 through 2.4.7.5.

2.4.7.2 Lap Joints. - In lap joints between parts subject to calculated tensile stress in which one part extends beyond the edge or side of the part to which it is connected, fillet welds shall terminate not less than the size of the weld from the start of the extension. (See Commentary.)

2.4.7.3 Maximum End Return Length. - Flexible connections rely on the flexibility of the outstanding legs. If the outstanding legs are attached with end returned welds, the length of the end return shall not exceed four times the nominal weld size. Examples of flexible connections include framing angles, top angles of seated beam connections and simple end plate connections.

2.4.7.4 Stiffener Welds. - Except where the ends of stiffeners are welded to the flange, fillet welds joining transverse stiffeners to girder webs shall start or terminate not less than four times, nor more than six times, the thickness of the web from the web toe of the

web-to-flange welds.**2.4.7.5 Opposite Sides of Common Plane.** - Fillet welds which occur on opposite sides of a common plane shall be interrupted at the corner common to both welds. (See Figure 2.12)

2.4.8 Lap JointsThe second sentence of section 2.4.8.2 has been moved to become a general statement under 2.4.8.

2.26 Connections or Splices - Tension and Compression

MembersThis section has been retitled, replacing "Complete Joint Penetration Groove Weld Splices".**2.26.1 RT and UT Requirements**Add "When required by Table 2.4," to the beginning of the sentence.**2.28 Fillet Weld Terminations**

This section has been replaced in its entirety with the following: "For details and structural elements such as brackets, beam seats, framing angles, and simple end plates, the outstanding legs of which are subject to cyclic (fatigue) stresses that would tend to cause progressive failure initiating from a point of maximum stress at the weld termination, fillet welds shall be returned around the side or end for a distance not less than two times the weld size or the width of the part, whichever is less."

Table 3.1 Prequalified Base Metal - Filler Metal

Combinations for Matching Strength"Added API 2W, API 2Y, and ASTM A913 steels to the Table. API Grades 42, 50 and 50T are Group II steels, as is A913 Grade 50. API Grade 60 and ASTM A913 Grades 60 and 65 are Group III steels. Note 9 was added stating "The heat input limitations of 5.7 shall not apply to ASTM A913 Grade 60 or 65."

Table 3.2 Prequalified Minimum

Preheat and Interpass TemperaturesThe following steels have been added as Group B:ASTM A710, Grade A, Class 2 (> 2 in.)ASTM A913, Grade 50API 2W, Grades 42, 50, 50TAPI 2Y, Grades 42, 50, 50TThe following steels have been added as Group C:ASTM A710, Grade A, Class 2 (<= 2 in.)ASTM A710, Grade A, Class 3 (> 2 in.)ASTM A913, Grades 60 and 65API 2W, Grade 60API 2Y, Grade 60The following steels have been added to Group D:ASTM A913, Grades 50, 60, 65The "Welding Process" column for Group D has been limited as follows:"SMAW, SAW, GMAW, and FCAW with electrodes or electrode-flux combinations capable of depositing weld metal with a maximum diffusible hydrogen content of 8 ml/100g (H8), when tested according to ANSI/AWS A4.3."Related to this change in Group D, Note 3 has been deleted from the 96 table. Note 4 stating "The heat input limitations of 5.7 shall not apply to ASTM A913 Grade 60 or 65" has been added.

5.3.2.1 Low Hydrogen Electrode Storage Conditions

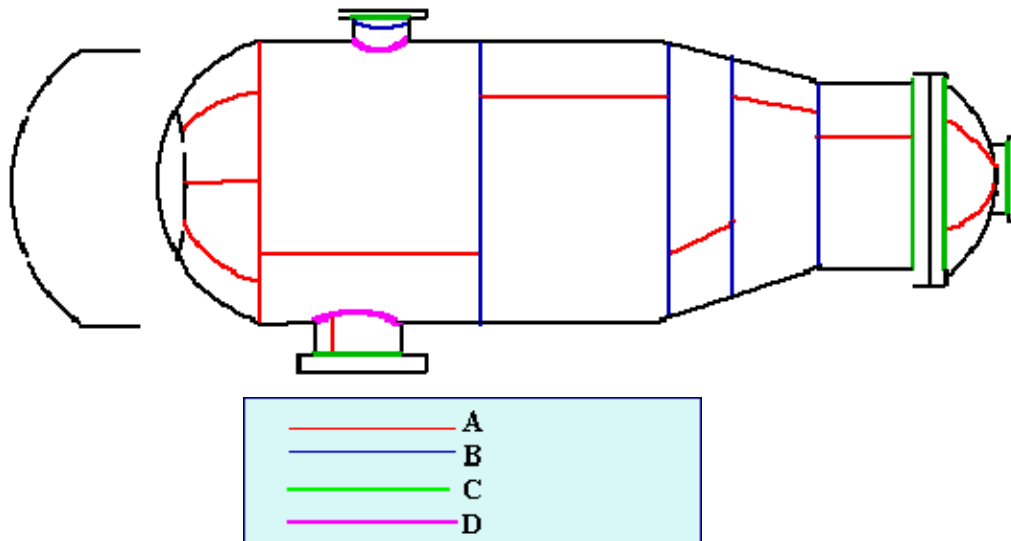
Add the underlined text to the first sentence: "All electrodes ... sealed containers or shall be ~~rebaked~~ baked by the user in accordance with 5.3.2.4 prior to use."

5.3.2.4 Baking ElectrodesAdd the following paragraph to the end of this section:"All electrodes shall be placed in a suitable oven at a temperature not exceeding one half the final baking temperature for a minimum of one half hour prior to increasing the oven temperature to the final baking temperature. Final baking time shall start after the oven reaches final baking temperature."

6.3.1 WPSThis section has been replaced in its entirety with the following:"The inspector shall verify that all WPSs have been approved by the Engineer in conformance with 4.1.1."*Two things must be noted. First, 4.1.1 applies only to*

qualified procedures, not prequalified procedures. Second, it has been determined by the Committee that this change was inappropriate, and a return to the 96 language is anticipated for D1.1-2000. **Table 4.10 Welding Personnel Performance Essential Variable Changes Requalification** The first item of the 96 provision "(1) To a steel not listed in Tale 3.1 or Annex M" has been deleted. Item 9 (now item 8 in the 98 code) has been corrected to read "(8) To multiple electrodes (if a single electrode was used in the WPQR test) but not vice versa."

8. 압력용기 용접부의 분류



압력용기의 용접 joint 별 구분을 이해하기 쉽게 KS 기준으로 작성하였다. ASME Sec.VIII.와는 조금의 차이가 있지만 초보자들의 이해를 돕기 위하여 KS 를 기준으로 하였다. 이것을 이해하여야 압력용기에 대한 비파괴 검사를 제대로 선정할 수 있다.

분류 A : 압력을 받는 부분의 모든 길이 이음, 각종의 경판안에 있는 모든 이음 또는 각형 용기의 측면 평판 안에 있는 모든 이음 및 전반구형 경판을 동체등에 부착하는 둘레 이음을 말한다.

분류 B : 압력을 받는 모든 둘레 이음을 말한다.

분류 C : 플랜지, 관판, 또는 평경판을 동체, 노즐 등에 부착하는 용접 이음 및 각형 용기의 측면 평판을 다른 측면 평판에 부착하는 용접 이음을 말한다.

분류 D : 돔, 섬프, 맨홀, 노즐 등을 동체 또는 경판 등에 부착하는 용접 이음 및 노즐 등을 돔, 섬프 등이 부착하는 용접 이음을 말한다.

용접 이음의 효율

용접 이음의 종류	이음의 효율(%)	
	Full RT	Spot RT
맞대기 양쪽 용접 또는 이와 동등이상이라 할 수 있는 맞대기 한쪽 용접 이음	100	98
받침쇠를 사용한 맞대기 한쪽 용접 이음으로 받침쇠를 남기는 경우	90	85

9. 주철용접

◆ 주철의 종류

- 1) 회주철 (GRAY CAST IRON) : 흑연이 다량으로 석출되어 있어 파면이 회색으로 되어 있어 붙여진 이름으로 퍼얼라이트와 페라이트가 주요 조직으로 페라이트는 흑연의 주위에 석출되어 있다.
- 2) 구상흑연주철 : NODULAR CAST IRON :
- 3) 백주철 : WHITE CAST IRON : 흑연의 석출이 없고 탄화철의 형식으로 함유되어 있는 것으로 파면이 은백색을 띄고 있다. 백주철의 일종으로 chill 주철이 있다. 이것은 주철주물의 표면에 금형을 대서 급냉시켜, 그 조직을 백선화하여 경도를 높여서 내마모성과 내경화성을 준 것이다.
- 4) 가단주철 : MALLEABLE IRON : 주물성이 좋은 주철을 이용하여 백선주철을 만들고, 그 다음 900~950℃로 가열하여 시멘타이트로 만들거나 또는 표면을 탈탄하여 강과 비슷한 성질을 준 주물을 가단주철이라한다. 가단주철내의 흑연은 대략 구상화하고 있으므로 연신율이 5~8%이상의 연성이 있는 주철이 된다.
- 5) 연성주철 : DUCTILE CAST IRON : 흑연이 판상이면, 주철이

취약해짐으로 주철에 Mg 또는 Ce 을 소량가하여 구상흑연을 생성시켜서 연성을 준 것이다.

◆ 주철의 용접성

주철은 야금학적 특성에 의해 오늘날 가장 어려운 용접중의 하나로 생각되고 있다.

- 1) 주철은 용융상태에서 급냉되면 HAZ 부위에 급격한 경화로 인한 STRAIN 에 의해 냉각수축현상에 의한 균열 CRACK 발생의 위험이 크다.
- 2) 용접시 모재의 불순물로 인한 BLOW HOLE 을 발생한다.
- 3) 용접에 의해 장시간 열을 받는 부위의 GRAPHITE 는 탄소입자들을 형성하여 BRITTLE 하게 된다.

백선주철을 제외한 주철은 용접이 용이하며 회주철 (Cr, Ni 포함)은 가장 널리 사용되는 주철이다. 마모성을 고려한 제품에는 구상흑연주철을 사용하고 제품의 성질상 유연성에 대한 내성을 요구하는 곳에는 인장성주철을 사용하고 특히 주철관에 널리 사용된다. 백선주철은 소위 칠드라는 속칭이 있듯이 경도가 대부분 HRC 60 이상이 되어 용접이 거의 불가능 하다.

◆ 용접방법

주철용접에는 냉간용접과 열간용접으로 구분되며 냉간용접은 예열없이 아주 낮은 온도로 용접하는 방법이고 열간용접은 용접하는 동안 600~700℃를 계속유지하여 용접하는 방법이다.

※용접의 기본원칙

- 1) 용접 접합점 (모재와 용착금속의 경계부분)의 입열을 가능한 최소로 한다.
- 2) CRACK 의 경우 CRACK 의 양쪽 끝에 구멍을 뚫거나, CRACK 방향과 직각으로 3~4Cm 의 다리 용접을 해준다.
- 3) 중앙 CRACK 의 경우는 CRACK 의 끝쪽에서부터 CRACK 의 중앙쪽으로 용접을 해나가고 한쪽끝만 CRACK 이 있는 경우는 안쪽에서 바깥쪽으로 용접하여 나간다.
- 4) 용접후 반드시 가벼운 망치질을 하여 수축응력을 제거하여야 한다.
- 5) CROOVE 가공은 V 형은 피하고 항상 U 형으로 가공한다.
- 6) 얇거나, 중간정도의 GROOVE 가공은 부드러운 U 를 형성토록 하고 가능한 사이각은 넓게함과 동시에 높이는 두께의 50%이상 필요없다.
- 7) 두꺼운 용접은 ROOT FACE 를 5mm 이상 크게 해서는 안된다. 그리고 각 부위를 부드럽게 가공한다.

(1) 냉간 용접시 일반적인 사항

- 1) 용접 물체 표면을 깨끗이 한다.
- 2) 가능한 낮은 전류로 WEAVING 없이 용접한다.
- 3) 수축응력을 제거하기 위하여 용접은 짧은 비드로 한다.
- 4) 첫 PASS 가 용접된후 남아 있는 응력(STRESS)을 제거하기 위하여 PEENING 을 하여 이를 계속 반복한다.
- 5) 일반적으로 약 100~200℃ 정도의 예열을 한다.

(2) 고온예열용접

- 1) 용접하는 주물의 본체를 약 540~560℃로 전체 또는 일부를 예열하여 아크 용접또는 가스 용접법으로 용접하는 방법이다. 용접중에도, 용접직후에도 고온을 유지함과 동시에 후열 또는 서냉을 수반한다. 600℃ 로 10 시간 어닐링을 하면 잔류응력이 제거된다. 백선화를 방지하기 위하여는 흑연활를 촉진할 필요가 있으며, 이 때문에 Si, Al 를 함유한 용접봉을 사용한다. 또한 강도를 증가시키기 위해서는 Ni 을 2_3% 첨가한 용접봉을 쓰기도 한다.

10. 용접 품질상의 검토 사항

§1. 용접 야금

A. Hot crack (고온 균열)

Hot crack 은 재결정 과정에서 일어나는 편석(segregation)에 의한다. 즉 용융점이 낮은 황(sulphur)등이 응고 과정에서 액상 상태로 존재하다가 나중에 응고 하면서 체적의 차이(액체와 고체)에 의한 공간을 형성한다. 이것은 micro crack 으로 현미경상으로 확인가능하며,이것을 피하기 위하여는 모재의 선정에 신중을 기하여야 한다. 일반적으로 용접 구조용강은 황의 함유량이 0.02%이하 이며, 일반 구조용 강도 0.04%를 초과해서는 안된다.

B. Lamellar tearing

이것도 또한 황화합물의 존재에 기인한다. 제강 압연중에 편석된 황화합물은 film 상태로 존재 하며, 이것이 응력을 받을 경우 층상의 형상이 갈라져 crack 을 유발 시키는 것이다. 이것은 모재의 황 함유량도 중요하지만 황이 골고루 분포되지 않고 집중 되었을 때 문제가 된다. 그러므로 모재의 황

함유량보다 얼마나 집중되어 분포되어 있는가 하는 것이 더 중요하다. 압연 과정에서의 문제를 발견하기 위하여 압연후 UT(초음파 탐상)를 시행하면 lamination 을 발견할 수 있다. 그러나 이때는 수요자가 제강 회사에 별도의 계약을 맺어야 하며, special charge 를 지불 해야 한다.

C. Cold crack (냉간 균열)

냉간 균열은 응고 과정이 아니라 응고된 이후에 나타나는 crack 이다. 주로 확산성 수소에 의해 나타나며, 취성 파괴의 위험이 매우 크기 때문에 설계자는 모재의 선정을 고장력강, 합금강으로 할 때 시공 방법 및 예후열 문제를 깊이 인식 하지 않으면 안된다. 우선 탄소 당량 (C_{eq})이 0.4 이상일 경우 및 고장력강은 냉간 균열의 위험이 있다고 생각 하라. 이 경우 예후열은 꼭 필요하며, 용접 방법도 중요하다. 예를 들면 피복 아크 용접에서는 꼭 저수소계 용접봉을 사용해야 하며, 그것도 잘 관리된 용접봉(250 도-300 도에서 2 시간 이상 건조 시킨 용접봉, 포장을 개봉 한지 오래 되지 않은 용접봉 등) 즉 수분에 의한 수소 발생 여지가 없는 용접봉을 사용해야 한다. 또한 예 후열에서 예열은 강의 재결정 온도(500-550 도) 이상은 금지 되어 있다. 이것은 예열로 인해 용접부 주위 조직이 변화(열처리 효과)될 수 있기 때문이며, 후열의 경우도 조직의 변태(a_c3 온도 이상)를 일으키지 않도록 해야 한다. 일반적으로 주의 해야 하는 것은 강이 열을 받아 색깔이 변하면 이미 재결정 온도 이상이라는 것이다. 이것은 예후열의 관리가 매우 힘들다는 것을 의미하며, 실험적인 방법으로 예열 온도 산정은 용접 H.A.Z 의 경도가 로크웰 C scale 32 이하가 될 때이며, 피로 하중을 받을 때는 28 이하가 될 수 있는 예열 온도 및 시공 방법을 정하는 것이다. 용접 후 응력 제거 열처리는 이런 내용과는 관계 없다는 것을 명심해야 한다. Stress relieving annealing 은 문자 그대로 잔류 응력 제거에만 영향을 미친다.

D. 용접량의 과소에 의한 문제

철은 공기보다 열전달 속도가 빠르다. 두꺼운 철판이 얇은 철판 보다, 3 차원적인 형상이 2 차원 보다 열전달이 잘된다. 그러므로 두꺼운 철판에 지나치게 적은 각장의 용접을 하면, 열전달 속도가 빠르므로 용접부도 빠르게 냉각되어 연실율의 저하에 의한 잔류 응력 발생과 toe 부의 균열을 만든다. 이것에 대한 독일 기준은 다음과 같다. 최소 목두께 $a =$ 두께 $1/2 - 0.5 \text{ mm} * \text{기준}$ 보다 적은 각장의 용접은 예열로 해결! (냉각 속도 증가)

E. Corrosion 의 문제

Corrosion 의 문제는 austenitic steel 에서는 상당한 문제가 되나, 일반 강에서는 크게 문제되지 않는다. 그러나, 이 경우에도 염분이 많은 곳에서 사용될 경우 설계상에서 고려 해야 한다. Corrosion 의 문제는 할로젠 원소의 전리 반응에서 생기며, 대표적인 할로젠 원소인 Cl(염소)에 의한다. 각 금속은 할로젠 원소에 대한 potential energy 전위를 가지고 있고, 이 에너지의 상태에 따른 이온 전리에 의해 부식이 발생한다. 여기서 간과해서는 안되는 것은 stress corrosion 이다. Stress 가 존재하는 부위에도 상승작용으로 corrosion 의 문제가 발생한다. 예를 들면, 바닷가에서는 용접부의 h.A.Z 부위가 쉽게 부식이 일어나는 것이다. 이것의 해결 방안으로는 용접부의 잔류 응력 경감, 부식 방지를 위한 용접부의 보호 (passive 금속의 coating)를 행하여야 되며, corner 부 및 구석진 곳의 용접은 피하여야 한다. 또 하나의 해결책은 가까이 potential energy 의 minus 전위가 높은 금속은 주위에 부착하여, corrosion attack 을 유도 하는 것이다. 이것은 선박의 프로펠라 샤프트 등의 용접에 많이 적용된다.

F. Cold deformation

금속은 저온에서도 가공 과정을 거치면, 재결정이 일어나 성질이 변한다. 즉 grain size 가 조대 해지며, 횡방향, 종방향의 특성이 틀러지는 이방성을 띄게 된다. 이의 특징으로 가공 경화(coldwork hardening) 및 부식 저항력의 약화가 일어나므로 냉간 가공을 거치는 부위에 대한 직접적인 용접은 피하여야 한다.

§ 2. 용접부 형상 (외부)

A. 형상 notch

형상 notch 는 특히 피로 하중을 받는 부분에서는 굉장히 중요하다. 응력의 선도는 물이 흐르는 것과 같이 생각하여 응력 선도가 집중되지 않도록 이음을 설계하고, 외관 형상을 고려해야 한다. 특히 fillet 용접부는 butt 용접부 보다 notch 형성이 쉽기 때문에 피로에 취약하다는 점을 잊어버려서는 안된다. Bead 단면의 notch 형성은 Tig dressing 으로 외관을 부드럽게 하며, 응력 제거에 효과가 있다. Fillet 용접부의 외관 형상에 따라 강도 특성이 틀린다. 가장 자리 용접에서 비대칭 (각장의 비 2:1)일 경우 notch 효과를 감소 시킨다.

B. 완전 용입의 검토

피로를 받는 부분은 완전 용입을 원칙으로 하나, 완전 용입을 위한 용접 시공은 상당히 까다롭다. 완전 용입에 대한 검토는 재료의 두께, groove의 형상이 설계 부분에 속한다 할 것이다. 그러나 여기에는 용접 방법이 중요한 변수이다. 피복 아크 용접과 co2 용접은 heat input가 틀리고 용입 가능량도 상이하다. 또한 용접 자세에서도 큰 차이가 난다. 참고로 co2 용접으로 아랫보기 자세일 경우 일반 mild steel에서는 4-5mm까지의 용입이 가능하나, 수평 fillet 용접일 경우 3mm도 아주 숙달된 용접사가 아니면 불가능하다. 또한 용입성이 좋은 경우에는 용락의 위험도 동반되기 때문에 지경에 처할 때가 많다. 이것을 일률적으로 기준하기는 힘들으나, 몇가지 일반론을 이야기 하고자 한다.

첫째 용락 가능성을 염두에 두자

Root gap은 Co2 용접에서 용락과 직결된다. 일반적 기준으로 Co2 용접 와이어 직경 이상의 root gap은 용락을 유발시킨다. 그러나 이것도 root face의 양과도 관계가 있다. 실제의 경우 Co2 용접 와이어의 직경보다 root gap을 크게 해야 될 필요성이 있고, 현장의 제관 작업 상태를 보면 이론이 얼마나 헛된 것인가를 알게 된다.

이 경우 용접사가 어떻게 용락 위험을 피하면서 용접하고 있는지를 주의 깊게 관찰해야 한다.

저자의 경험으로는 용접사들이 용락 방지를 위해 취하는 행동은 한가지가 용접시 arc length(stick out)를 길게 하는 것이다. 이 경우는 용접 전압 조건의 상승으로 용입 부족 및 융합 부족의 위험이 있다. 또 한가지는 낮은 전류 전압 조건으로 root gap 부위를 메꾸는 것이다. 이것은 융합 불량 위험이 있으나, 전자 보다는 바람직스럽다. 결론적으로 용락 위험이 있는 root gap 부위는 실제상 용접 품질의 큰 신뢰성을 요구할 수 없다는 것이다.

back plate는 용락의 위험성을 방지하고 완전 용입을 가능하게 하는 절대적인 방법이다. 그러나, 이런 이음은 경제적인 면에서 바람직 못하고 차선책으로 back gouging 방법을 사용하거나, back run(sealing run)을 요구하는 경우가 있으며, 각각 장단점이 있다. back run과 back plate의 경우 용접의 이면부가 용접시 대기중에 노출되어 산화되는 위험성을 주의해야 한다.

둘째 어떤 용접 방법을 요구 할 것인가?

앞서 언급 한대로 용접 공정의 종류에 따라 용입 가능량은 틀린다.

셋째 groove 의 형상은 완전용입 문제뿐만 아니라 경제성 문제 및 용접 변형, groove 형성을 위한 공정등을 염두에 두어야 하며, 비드폭과 깊이의 비가 2:1 이상이 되어야 한다.

넷째 용접 시작점과 끝나는 점은 완전 용입을 기대하기 힘들며, 야금학적인 notch 가 존재 한다.그러므로 구조물의 취약부에 용접 시작 또는 끝나는 점의 형성은 곤란하다.그러므로, 이 문제에 의해 수염 용접 또는 용접부의 단축, 전둘레 용접 등의 기교를 사용하는 것이다

다섯째 불완전 용입이 불가피할 경우 용입 부족 부분은 내부의 notch 이다.이때는 notch 의 형성 방향이 응력과 같은 방향이 되도록 하며, 내부 notch 의 형상이 sharp 하지 않다면, 강도에 큰 지장이 없다.(브로우 홀과 스래그 혼입 차이- 스래그 혼입이 더 위험)

C. 형상에 따른 적절한 용접 이음 (예)

- free cut 활용 (용접으로 메꾸지 말것)
- skewed t welding
각장 $l > 3/2 t$
- 용접선의 교차는 위험
- 용접선 중복을 피할 것

§3. 시공 방법

현재 주로 적용되는 용접 방법은 MMA, MACG, MAMG, TIG 등이 있으며, MAMG, MACG 에서는 와이어 종류에 따라 SOLID WIRE 용접, FLUX COARED WIRE 용접등이 있다.

이것에 대한 특징은 다음과 같다.

용접 방법		특 징
MMA	피복 아아크 용접	- 용접기의 설치가 쉽고 장소의 제한이 적다. - 손쉽게 용접 할 수 있고, 현장 보수 용접에 사용 경향이 많다. - 용락의 위험성이 적어 root gap 이 큰 곳에 주로 첫번째 pass 에 사용한다. - 용접봉의 종류가 많고 각각 특성이 틀리므로 용접봉 선정에 상당한 주의를 요한다.

		- 고장력 강의 용접이 손쉽다(용접봉의 종류 다양) - 열 영향부가 적다. - Back bead 형성이 쉽다. - vertical, over head 용접이 가능하다. - 용입이 얇다.
MAG	Co ₂ 용접(MACG)	- 용접 효율이 높다. - 용접 와이어는 국내에 인장 강도 50kg 만 생산된다 - 양산품 용접에 일반적으로 널리 사용하고 있다. - 용접 와이어의 종류가 단순하나 경우에 따라 spec 지정 필요 용입이 깊다
	혼합가스(MAMG)	- Spatter 가 적다. - 용접 외관이 아름답다.(concave 가능) - 저온 취성이 높다 (와이어 선택 주의) 용접 와이어는 국내에 인장 강도 50kg 만 생산된다. - Gas 의 혼합비가 중요하다. - 용입은 sharp 한 모양으로 되기 때문에 겨냥 위치가 중요하다
FCAW	FLUX COARED	- 일반적으로 spatter 및 bead 형상이 좋다. - 용접 와이어가 다양하고 고장력강 용접와이어도 생산된다. - 용입 정도는 낮다. - Flux 의 종류에 따라 다양한 특성을 가질 수 있다. Gas 사용과 non gas type 두 종류가 있다. 용접 와이어의 지정이 중요하다.

11. 용접 결함

§ 불연속 지시와 용접결함

불연속 지시 : 균일한 형상에서 불 균일한 형상을 총칭

용접결함 : 용접구조물의 안전성 및 사용목적에 손상 시킬 수 있는 특정한 형태의 불연속 지시를 지칭한다.

현실적으로 특정한 불연속 지시가 용접결함인지, 아닌지를 결정하기 위해서는, 해당 불연속지시의 합격기준을 결정하는 어떤 기준이 필요하다.

1. 균열

균열은 가장 치명적인 불연속 지시이다. 선형의 날카로운 끝단부의 균열에 응력이 작용하면 균열이 성장하는 경향이 있다. 하중 또는 응력이 해당 재료의 인장강도를 초과하여 작용하면 균열이 시작되는 것이다. 용접균열은 몇 가지 방법으로 분류되는데 균열이 발생하는 금속의 온도를 기준으로 분류하면 고온균열과 저온 균열로 분류할 수 있다.

고온균열은 금속이 응고되면서 발생한다.결정립계에서 발생하기 때문에 고온균열은 결정립사이로 진행한다.

저온균열은 금속이 응고된 후 발생한다. 현장 사용중에 발생하는 균열은 저온균열로 분류한다. 수소취성에 의한 지연 또는 언더비드 균열은 저온균열로 분류된다.저온균열은 결정립사이 또는 결정립을 관통하는 형태로 전파성장된다.

균열은 용접 축방향을 기준해서 분류하기도 한다. 용접부의 축과 평행한 방향으로 발생하는 균열을 종균열(longitudinal crack)이라 부르고, 용접부의 축과 수직으로 발생한 균열은 횡균열 (Transverse crack)이라고 부른다.

균열의 발생부위에 따라 분류하기도 하는데 throat, root, toe, crater, under bead, HAZ crack 등이 있다.

throat crack 은 fillet 용접부의 중앙부에서 잘 발생하기 때문에 붙여진 이름이다. 용접축의 횡방향으로 강한 응력이 작용하는 경우 얇은 루트패스와 오목한 필렛용접과 같은 것들은 throat 균열이 잘 발생된다.

root crack 은 root 간격이 너무 넓은 경우, 루트용접부에 응력이 집중되는 경우 발생된다. toe 균열은 용접부의 toe 에서 발생하는 모재의 균열이다. 용접덧살 또는 지나치게 볼록한 용접부의 형상에서 기인한 응력의 집중으로 발생된다.

crater 균열은 용접패스가 끝나는 지점에서 발생된다. 용접 마무리 지점에서 용접부가 완전히 채워지지 않은 경우 그 부위에 얇은 용착부위가 형성되어 용접수축응력에서 균열이 발생하는 것이다.

마지막으로 under bead 균열이다. 이것은 용착금속이 아닌 열영향부에서 발생한다. 언더비드 균열은 용접이 완료된 후 많은 시간이 지나도록 진행되지 않을 수도 있기 때문에 특별히 위험한 균열이다. 때때로 지연균열(delayed crack)로 불리기도 한다. 지연균열에 민감한 강재의 용접에 대한 최종 육안검사나 비파괴검사는 용접완료후 48~72 시간후에 수행되어야 한다. 고강도의 강재는 특히 이러한 균열에 매우 민감하다. under bead crack 은 용접부위에 수소가 있을 때 잘 발생된다. 용접봉, 오염된 모재, 대기등으로부터 흡수된 수소는 용착금속에 포함되어 있다가 냉각 후 열영향부로 이동하게 된다. 열영향부에서 모인 수소는 분자 형태로 모이려고 하고 그 만큼 많은 체적이 필요하게 된다. 이때에 주위의 금속이 충분한 연성을 갖지 않는다면 갇힌 수소분자에서 형성된 내부응력이 언더비드 균열을 유발하게 되는 것이다.

2. 융합부족(Incomplete fusion)

용융부족은 용착금속과 주위의 용접비드 또는 융합면 사이에 융합이 되지 않은 형태의 불연속부이다. 선형의 모양으로 날카로운 끝단부를 형성하기 때문에 균열과 비슷하게 다루어 진다. 용접부의 수많은 위치에서 발생한다. 제일 큰 원인은 용접사의 운봉기술이 부적절하기 때문이다. 일부는 부적절한 용접법을 선택하여 용접할 부위의 모재를 충분히 녹이지 못하여 용융부족을 발생시키기도 한다. 불충분한 개선크, 오염된 용접부, 부적절한 용접봉 크기 등이 원인으로 지적될 수도 있다.

3. 용입 부족(Incomplete joint penetration)

용융부족과는 달리 홈 용접에서만 볼 수 있는 불연속 지시이다. 이것의 위치는 언제나 용접루트이다. 발생원인은 융합부족과 같은 조건에서 발생할 수 있다.

4. 개재물(inclusion)

개재물이란 슬래그, 플럭스, 텅스텐 등과 같이 용접부 내에 들어 있는 이물질들을 말한다. 슬래그 개재물이란 용해된 금속을 보호하기 위해 사용되는 플럭스가 용착금속의 내부 또는 용접표면에 박혀 있는 것을 말한다.

텅스텐 개재물은 GTAW, PAW 처럼 텅스텐 전극봉을 사용하는 경우 발생된다.

원인별로는 텅스텐 전극봉과 용접봉의 접촉, 스패터에 의한 텅스텐 전극봉의

오염, 전극봉의 과열, 과도한 전류 사용, 너무 작은 구경의 전극봉, 부적절한 차폐가스의 사용등이 있다.

5. 기공(porosity)

AWS A3.0에서는 기공을 용착금속의 응고 과정에서 가스의포집에 의해 생성되는 공동형상의 불연속지리 라고 정의하고 있다. 이것은 특성상 구형이므로 가장 미미한 불연속으로 간주되기도 하지만 압력용기의 경우 아주 위험할 수도 있다.기공의 형상에 따라 분산된 기공, 크러스터 기공, 선형기공, 피이핑 기공과 같은 명칭들로 불리기도 한다. 기공은 용접부위의 오염물 또는 습기가 용접열에 의해 분리되어 가스를 형성함으로서 발생된다.

6. 언더컷(under cut)

용접부 주위의 모재에서 발생하는 표면결함이다. 용접과정중 모재가 함몰되어 생기는 것으로 상대적으로 날카로운 형상을 가지고 있어 응력집중에 의한 균열로 발생할수 있다.특히 피로하중을 받는 강교의 경우는 엄격하게 관리되어야 한다.언더컷은 일반적으로 용접사의 기량부족 에서 발생한다. 용접 시공시 용접속도가 지나치게 빠르면 용접부 주위의 모재가 녹아서 발생되기도 한다. 또한 용접 입열량이 너무 많아 모재가 과도하게 녹을 때도 발생된다.

7. Under fill

홈용접에서 용접부를 용착금속이 충분히 채우지 못한 경우 발생된다.파이프 용접부의 루트패스의 언더필을 때때로 such back 이라고 부르는데, 이것의 원인은 두 번 째 패스를 용접할 때 지나친 입열량을 사용하여 루트패스가 완전히 녹아서 발생된다.

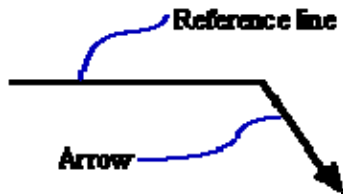
8. 오버랩 (over lap)

용접토우 또는 용접루트 위로 용착금속이 돌출된 형상으로 용접부 의 표면에 날카로운 노치를 형성하기 때문에, 매우 위험한 용접결함으로 분류된다.또한 응력집중으로 발생된 균열이 오버랩 내부에 숨어 있을 수도 있기 때문에 엄격히 관리되어야 한다. 발생 원인을 살펴보면 용접속도가 너무 느려서 용착금속이 과도하여 흘러 넘치는 것이다.

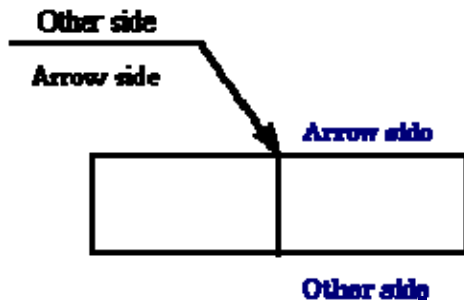
12. 용접 기호

용접기호를 그리기가 쉽지 않군요. 스캐닝을 하여도 그림이 선명하지 않아서 일요일 오전을 투자하여 직접 그려 보았습니다.

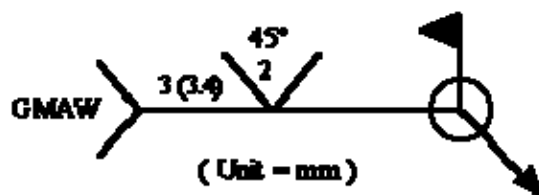
1. 용접기호



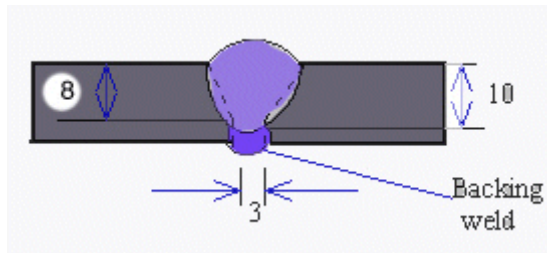
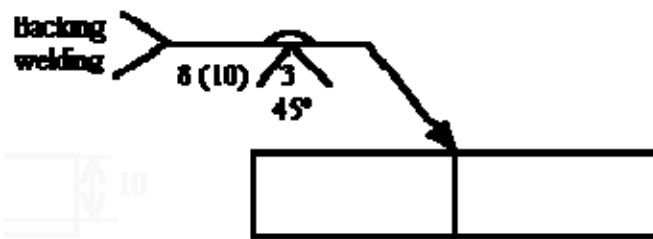
2. 용접부호가 reference line 의 위에 표기된 경우와 아래에 표기된 경우가 있다. 이 경우 용접의 방향에 주의하세요.



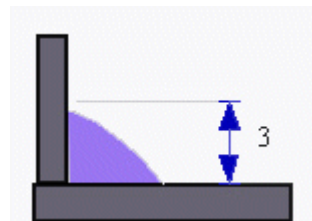
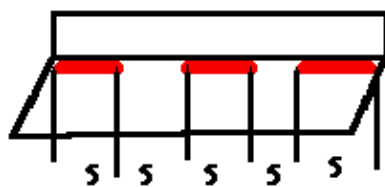
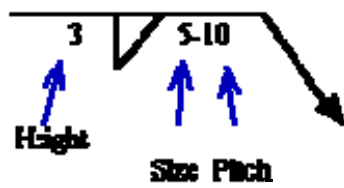
3. 현장에서 GTAW 으로 개선각은 45° , root opening 은 2mm , bevel 깊이는 3mm, 용입 깊이는 3.4mm 로 둘레를 용접하라는 기호이다.



4. 용접기호에 따라 실제 용접된 형상



5. Fillet 용접부 용접기호 와 용접 형상



12. FILLER METAL SELECTION WELD OVERLAY AND CLAD RESTORATION

CLADDING MATERIAL	WELD OVERLAY MATERIAL (NOTE 1)	
	FIRST LAYER	TOP LAYER(S)
405 /410S	ENICRFE-2 OR ENICR-3 (NOTE 2 & 3)	
304 SS	E/ER309	E/ER308
304L SS	E/ER309L	E/ER308L
316 SS	E/ER309Mo	E/ER316
316L SS	E/ER309MoL	E/ER309L
321/ 347SS	E/ER309Cb	E/ER347
MONEL	ENiCu-7	E/ERNiCu-7
ALLOY 600, 800, 800H, 800HT (NOTE 4)	ENiCuFe-2 or ENiCr-3	
ALLOY 600, 800, 800H, 800HT (NOTE 5)	Filler Metal ERNiCrCoMo-1 or electrodes ENiCrCoMo-1	

NOTE:

1. Para. NF7 and NF of appendix NF in part UNF of ASME section VIII, division 1 are mandatory for nonferrous cladding.
2. For design temperature above 100 F (538), specific requirement shall be requested from the purchaser.
3. E/ER309 may be used for all layers when design temperature is less than 700 (371) and thermal cycling condition are not anticipated.
4. Design temperature application thru 1500 (816)
5. Design temperature application thru 1500 (816)

13. 용접의 피로파괴 원인 및 방지대책

1. 서 론

기계제품의 피로파괴 방지를 위한 무척 오랜 연구 결과에도 불구하고 현재 기계제품의 피로파괴는 계속 보고되고 있다. 특히 현대에 와서 최적 설계 개념이 도입되고 경량화 추세가 진행됨에 따라 상대적으로 기계제품의 안전율이 낮아지게 되어 설계시에 예측하지 못했던 결함이 제품 내에 잠재하고 있는 경우, 그 결함이 변동하중에 의해 성장 할 수 있기 때문에 피로파괴에 매우 취약하게 된다. 그러나 복잡한 제조공정을 거치는

과정에서 모든 공정을 통해 결함이 발생하지 않도록 관리하는 것이 실제로 매우 어렵기 때문에 관리자는 결함이 도입되기 쉬운 공정을 사전에 파악하여 그에 대한 대비를 하는 것이 피로파괴 방지의 최선책이다. 현재 피로파괴 현상은 미시적으로 파괴 인성의 개념을 도입하여 균열의 전파거동이 이론적으로 잘 정리되어 있으며, 특정 부위의 재료 물성을 정확히 알면 그의 피로 수명까지도 예측 할 수 있는 단계까지 발전되어 있다. 그러나 실제 제품들에 있어서는 실험실에서 실험하는 재료와 같이 균일하지 않을 뿐만 아니라, 응력상태도 일축(uni-axial) 상태가 아닌 다축상태가 많고 더우기 잔류응력이 중첩되어 있는 경우도 있으며 형상인자도 수학적으로 단순히 modelling 할 수 없는 복잡한 경우가 대부분이기 때문에, 이론적인 해석이 전반적인 추세를 짐작 하는데는 도움을 줄 수 있으나 정확한 정량 해석을 하는데는 역시 부족하다.

피로파괴가 발생한 파면은 beach mark 혹은 shell mark 와 같은 특징적인 부위가 관찰 됨으로 해서 식별하기가 쉬우나, 저주기(low cycle) 피로파면은 취성파괴와 비슷하여 식별하기 매우 곤란하다. 참고로 그림 1에 대표적인 beach mark 를 보였다. 그리고 피로파괴 현상에 접했을때는 재료 자체의 문제 뿐만아니라 형상 및 하중 조건등을 종합적으로 검토해야만 비로서 그의 원인과 방지대책을 규명할 수 있음에 유의해야 한다.

그 동안 국내에서도 학교나 전문기관을 통해 재료의 피로 현상에 대한 교육이 수행된 결과 대부분의 기술자들이 재료의 피로 현상에 대한 인식을 갖고 있으나 주로 단순한 이론적인 내용에 한정되어 있는 형편이다. 본고에 있어서는 실제 제품에서 발생하였던 피로파괴 사례를 중심으로 하여 고찰함으로써 피로파괴가 일어나기 쉬운 부위나 공정을 소개하고 그의 방지대책 수립에 도움을 주고자 함을 목적으로 하고 있다.

2. 피로파괴 사례 고찰

2.1. Bolt 의 피로파괴

기계부품의 체결용으로 가장 광범위하게 널리 사용되고 있는 요소부품인 bolt 류 의 피로파괴 사례는 현장에서 흔히 접할 수 있다. 특히 10.9T Grade 이상의 고장력 bolt 가 널리 사용되면서 bolt 에 인가되는 하중 수준도 따라서 상승하여 bolt 에 결함이 있는 경우 쉽게 피로파괴를 일으키게 된다. 파손된 bolt 를 조사한 결과 표면에 미세균열들이 다수 발견되었다. 이러한 미세균열의 발생 원인은 표면처리 결과로 판명되었는데, 조사된 bolt 는 통상적으로 고장력 bolt 에서는

금지되어 있는 아연도금 공정으로 표면처리를 실시하였다. 아연도금 공정 중에 전기분해에 의해 발생된 수소원자가 bolt의 내부로 확산 침투한 후 응력이 인가되면 결함부 주위로 수소원자들이 모이게 되어 그 부위가 취약해 지면서 균열이 발생되는데, 이것을 수소 유도균열 현상 (Hydrogen induced cracking) 이라 한다. 한편 bolt의 나사부위를 조사한 결과 파손된 bolt의 불완전나사부가 매우 예리하게 가공되어 있었는데, 조사결과 bolt의 제조공정이 일반적인 전조공정이 아닌 선반가공으로 제조되었음을 알 수 있었다. 그 결과 예리한 불완전나사부에 큰 응력집중이 발생되었고, 동시에 수소원자의 침투에 의한 조직의 취성증가가 균열발생을 조장시켰으며, 그 뒤 반복하중에 의해 균열성장이 성장하여 파단으로 진행되었다. 이 bolt는 그 뒤 전조공정으로 변경하여 제조하고 불완전나사부도 0.4R 이상이되게 관리 할 뿐아니라, 표면처리도 수소 취성파괴를 일으키지 않는 흑피처리나 인산염처리로 공정을 변경시켜서 파손을 방지 하였다. 참고로 고장력 bolt의 표면에 여러가지 제약상 반드시 아연도금을 실시해야 할 경우는 아연도금 처리 후 즉시 100~200℃에서 탈수소 처리를 반드시 해야 한다.

2.2. 용접물의 피로파괴

용접물에서는 자주 피로파괴 현상이 발생하는데 그 이유로는 용접 bead의 toe가 notch 효과를 야기시킬 뿐만아니라, undercut와 같은 표면 결함이 발생하기 쉽고 기타 혼입된 비금속개재물이 응력집중을 일으켜 피로균열 발생점들로 작용하게 되기 때문이다. 한편 용접부는 보통 인장 잔류응력이 중첩되어 있고 조직 또한 취화되어 있어 균열의 진전속도가 빨라 쉽게 파단이 일어나게 된다. 용접물의 피로파괴를 방지하기 위해서는 우선 응력집중부가 나타나지 않도록 표면상태를 잘 관리해야 하는데, 높은 피로강도가 필요한 경우에는 용접 후 grinding을 실시하여 용접 bead를 평평하게 가공 해 주어야 한다. 한편 탄소 함량이 높은 재료를 용접 할 때는 용접도중 재료가 열처리 되어 용접 열영향부에 취성이 큰 조직이 발생되고 경우에 따라서는 균열이 발생하기도 한다. S45C 재질의 부품과 SS41 강판이 용접되는 구조물에서 S45C 부품쪽의 열영향부에서 관찰된 균열을 나타내었다. 이 구조물은 균열이 성장되어 피로파괴로 발전되어 파손되었다. 용접 열영향부의 경도를 측정한 결과 부분적으로 Hv700 이상이 관찰되었으며 조직은 취성이 큰 마르텐사이트 조직이었다. 일반적으로 용접부에서는 용접 열영향부의 경도가 Hv350 이하가 되도록 관리하고 있는데 그와 같은 경도를 얻기 위해서 탄소 함량이 높은 강재나

합금강등은 용접 전에 모재를 예열한다. 예열을 실시하면 용접 후 냉각속도가 느려지게 되어 비교적 연성을 갖는 조직으로 상변태 되므로 취성이 방지되며 따라서 균열이 발생 되지 않는다. 한편 피복 용접봉을 사용하여 용접 할 경우 염기성 피복 용접봉의 사용은 특별한 주의가 필요하다. 염기성 피복재는 그의 특징상 흡습성이 있는데 습기를 함유한 용접봉을 사용하여 용접하면 수소원자가 용접 도중에 용접부에 흡수되어 앞서 bolt 의 피로파괴에서 설명한 수소 유도 균열이 발생한다. 그러므로 염기성피복 용접봉은 사용전 충분히 건조시켜 습기를 방출 시키고, 저장 할 때도 습기가 침투하지 않게 포장하거나 oven 에 넣어서 보관하여야 한다.

3. 결 언

앞서 여러가지 요소부품의 다양한 피로파괴 사례에 대하여 고찰 해 보았는데 현재 생산현장에서 자주 발생하는 문제이기 때문에 주의를 기울일 필요가 있다. 피로파괴의 발생 원인을 살펴보면 다음과 같이 4 가지로 구별된다.

- 1) 설계 불량
- 2) 가공 불량
- 3) 소재 불량
- 4) 부적절한 사용

그러나 현재 기계설계시 일반적으로 형상계수 및 충격계수를 포함한 안전율을 여유있게 고려하기 때문에 피로강도가 간접적으로 설계시 반영되어 피로파괴는 주로 가공이나 원소재 불량 및 사용상의 부주의에 의한 경우가 대부분이다. 즉, 기계가공 도중에 notch 가 유입되어 응력집중을 발생시키거나, 규정된 표면처리 혹은 열처리가 이루어지지 못해서 재료의 피로강도가 저하한 경우가 많으며, 소재 역시 비금속개재물이 다량 함유되어 있거나 열처리 특성이 조악한 소재가 사용되어 요구되는 강도를 확보하지 못한 경우도 많다. 그 반면 사용자 측에서도 설계강도를 무시한 과부하를 인가하거나, 부식환경 혹은 고온에서 사용하여 피로파괴를 촉진시키는 경우도 있으므로 사용자도 설계조건을 인식하여 그 한계를 넘지 않도록 해야 한다. 피로파괴는 단순한 원인에 의한 경우가 적고 복잡한 여러 현상이 중첩되는 경우가 많기 때문에 해석하기 어려운 경우가 많다. 결국 피로파괴의 방지는 피로강도를 저하시킬 수 있는 요인들을 종합하여 설계단계에서부터 최종 사용단계까지 지속적인 관리에 의해서만 달성 될 수 있다.

용접기의 원리와 구성

1.SMAW (Shielded Metal Arc Welding) ; 교류아크 용접기

◆ 원리

현장에서 흔히 얘기하는 전기용접, 피복아크용접이 바로 SMAW 이며, 금속선 주위에 피복제를 도포한 전극봉을 이용한 용접방법이다. 즉 용접하려는 모재표면과 피복아크 용접봉의 선단 사이에 발생 유지되는 아크열에 의해 모재의 일부를 용융시킴과 동시에 용접봉에서 이행되는 용융금속에 의해 결합을 얻는 용접법이다.

이때 용접봉의 피복은 대기중의 산소, 질소 등의 침입을 막고 용융금속을 보호하며 아크 안정성을 가져오고 나아가서는 용접금속중에 합금원소를 첨가하는 목적으로 도포된다. 따라서 뒤에 언급될 GMAW, GTAW 등에 비해 별도의 보호가스 공급장치가 필요없다. 또한 토치부에 있어서도 용접봉을 잡아주고 전류를 통전 시키는 기능의 용접봉홀더만 있으면 된다.

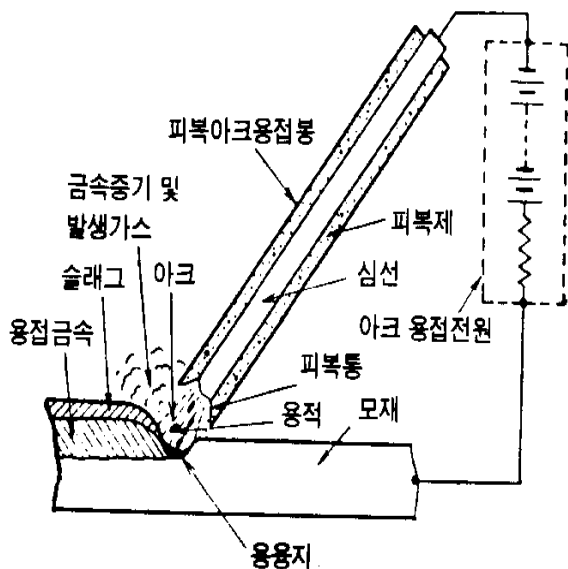


그림 1): SMAW 의 원리그림

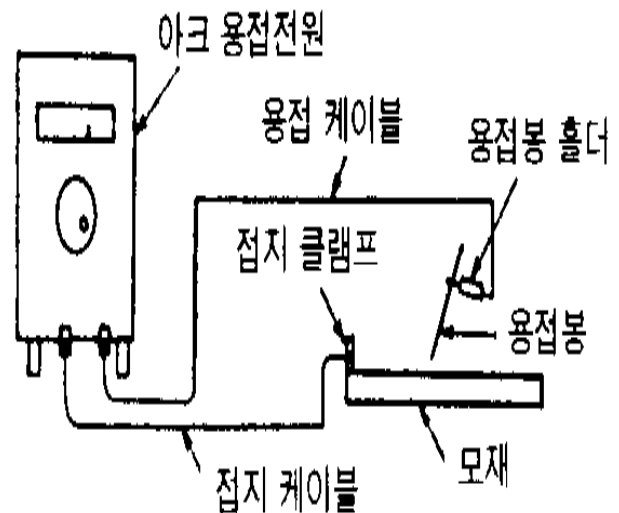


그림 2): 피복아크용접 장치의 구성

◆ 장치

SMAW 의 용접장치는 교류 또는 직류 아크 용접전원, 용접봉 홀더, 용접 케이블로 구성되어 있다. 용접전원의 경우 직류를 사용하는 것이 아크의 안정성 문제에 있어서는 유리하나(특히 저전류의 경우), 연강 등의 강자성체에 직류를 사용하는 경우 아크쫄림이 발생하므로 용접이 어려워진다. 또한 장비의 구성도 교류에 비해 복잡해진다. 따라서 주로 교류아크 용접기가 이용되고 있다. 이때 작업안전을 위하여 전격방지기가 설치되어야 한다.

2. GTAW (Gas Tungsten Arc Welding); TIG 용접기

◆ 원리

아크 발생시 거의 비소모성인 텅스텐 전극을 이용하여 불활성 가스 속에서 아크 용접을 하는 것으로, 통상적으로 모든 금속에 사용될 수 있으며, 특히 박판의 모재에 가장 적합하다.

◆ 장치

아크용접전원(정전류 용접기), 가스공급장치, 용접토치 또는 용접헤드, 아크스타트를 위한 고주파 발생장치, 텅스텐전극의 수냉장치, 제어장치 등으로 구성된다.

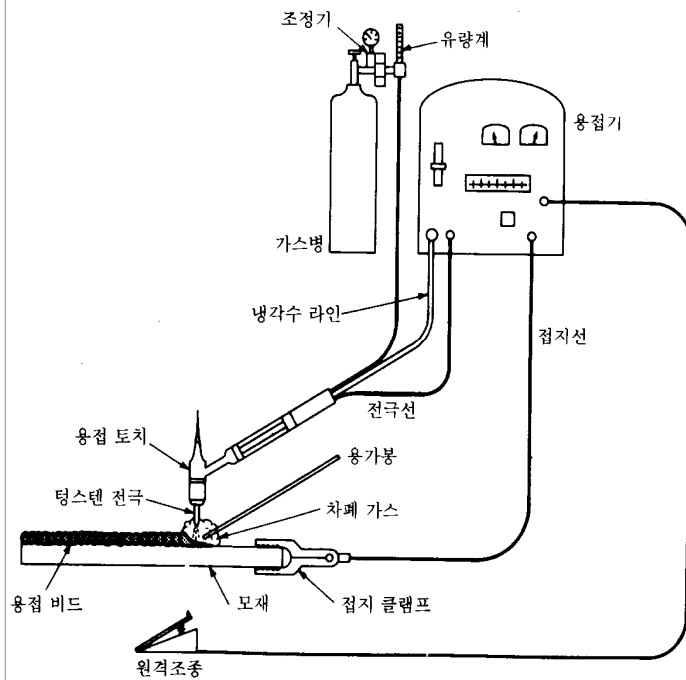
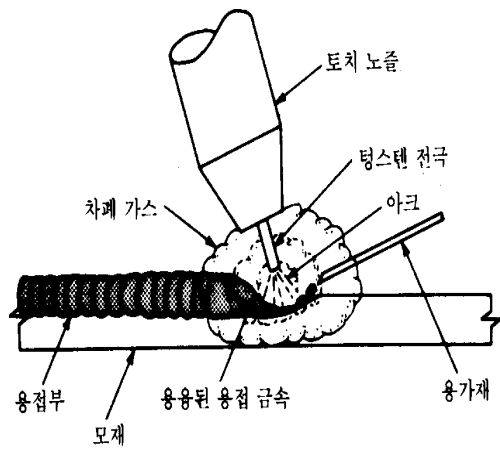


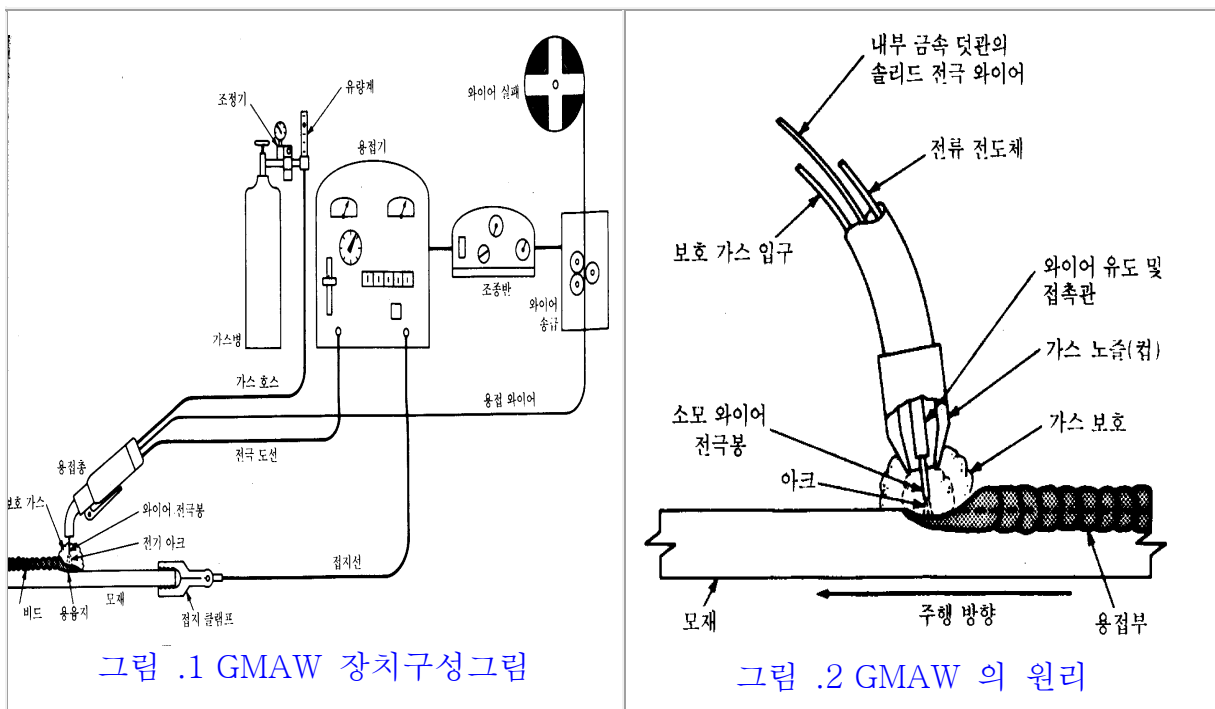
그림.1 GTAW 의
원리그림
장치구성

그림 2. GTAW

3. GMAW (Gas Metal Arc Welding)/FCAW(Flux Cored Arc Welding) ; 탄산가스 아크(MAG), MIG 용접기

◆ 원리

연속적으로 공급되어지는 와이어 전극봉과 모재 사이에 발생하는 아크열에 의해서 용접이 되는데. 대기오염으로 부터 용접부를 보호하기 위하여 연속적으로 공급되어지는 보호가스 분위기 속에서 아크 용접이 이루어진다. 이때, MAG, MIG 는 SOLID WIRE 를 이용하고, FCAW 는 WIRE 내부에 FLUX 가 충전된 FLUX CORED WIRE 를 이용한다.



◆ 장치

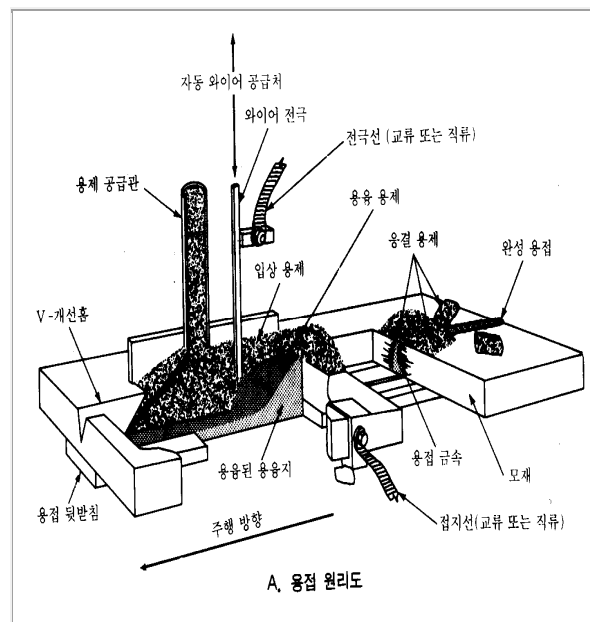
기본적인 구성 요소는 아크용접 전원, 와이어 송급장치, 설파가스 공급장치, 제어장치, 용접토치 이다.아크용접 전원은 일반적으로 직류용접기가 사용되나 박판의 경우에는 교류용접기가 이용되기도 한다. 전류제어방식에 따라 SCR, INVERTER (Transister 이용, IGBT 이용,...) 방식으로 분류되며, 최근에 INVERTER 방식의 수요가 증가하고 있고, 펄스제어 방식의 용접기도 시판중에 있다. 제어장치는 용접전류,전압의 조정 및 와이어 송급속도의 조정을 담당하는데, 사용자 편의 및 용접품질 향상을 위한 각종기능(크레이터 처리, 일원화 조건..)을 보유하고 있다. 또한 ROBOT 등을 이용한 자동 용접의 경우 로봇과 의 INTERFACE 를 위한 기능이

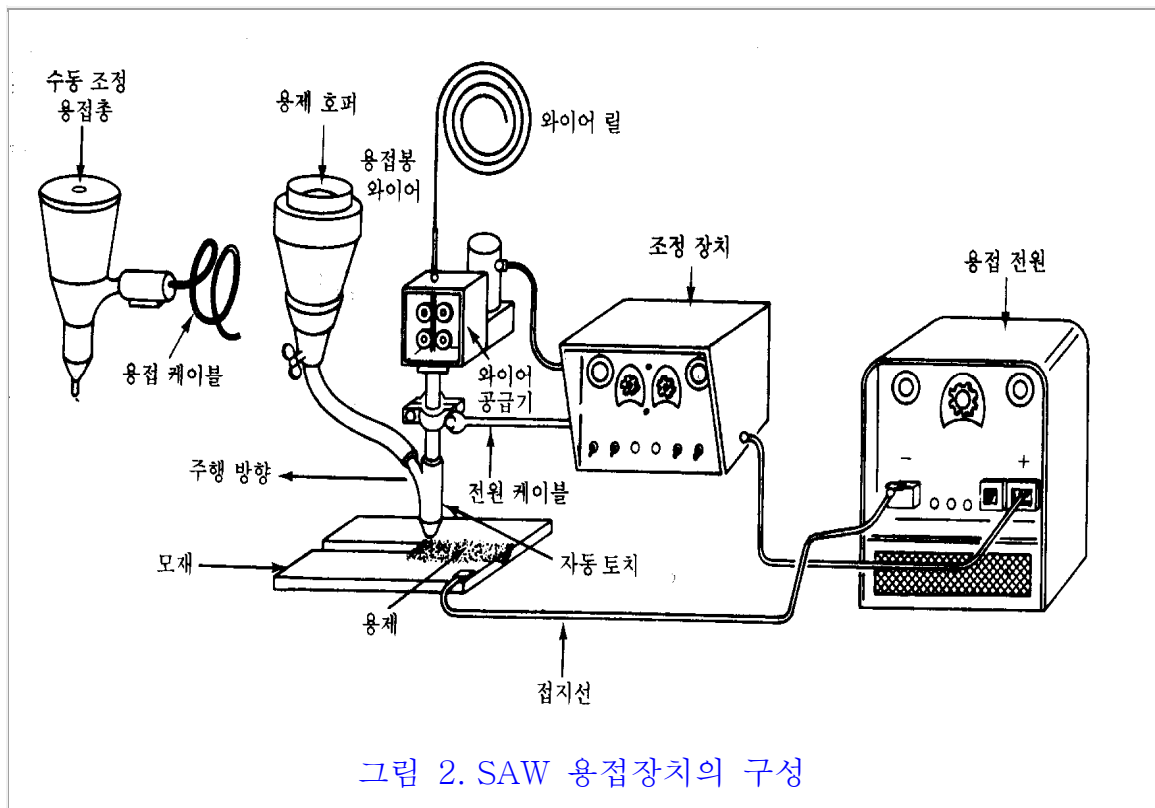
요구된다. 토치의 경우 정격 출력이 350 A 이하인 경우에는 공냉식을 이용하나, 그 이상에서는 수냉식 토치를 사용하여야 하며, 따라서 별도의 냉각 장치가 필요하다

4. SAW (Submerged Arc Welding); Submerged 용접기

◆ 원리

1935 년 미국의 Union Carbide 社가 고안하여 1936 년에 실용화된 용접방법으로 [그림. 1](#) 에 나타난 바와 같이 모재의 용접부에 미세한 가루 모양의 입상용제 (granular flux)를 쌓아놓고, 그속에 전극 와이어를 공급하여 와이어의 선단과 모재와의 사이에 아크를 발생시켜, 그 아크열에 의하여 모재와 용제를 용해하는 자동 아크 용접이다. 또한 아크는 물론 발생되는 가스도 외부에서 볼 수없으므로 submerged arc welding 또는 잠호 용접이라고도 한다. SAW 는 종래의 아크 용접에 비하여 고능률적이면서 양호한 용접을 얻을수 있기 때문에, 조선공업 뿐만 아니라 모든 기계공업의 발달과 더불어 많은 각광을 받고있다. SAW 는 주로 조선, 압력용기, 강관, 차량, 교량, 기타 구조 부재의 접합 및 덧붙이 용접등 비교적 용접선이 길고 연속용접이 가능한 후판에서 위력을 발휘하고 있다.





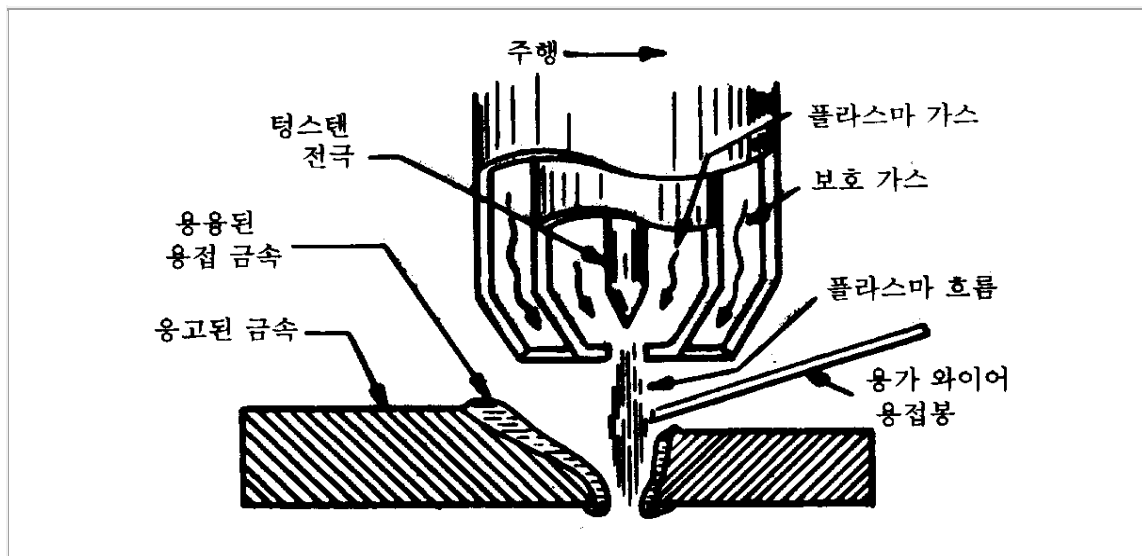
◆ 장치

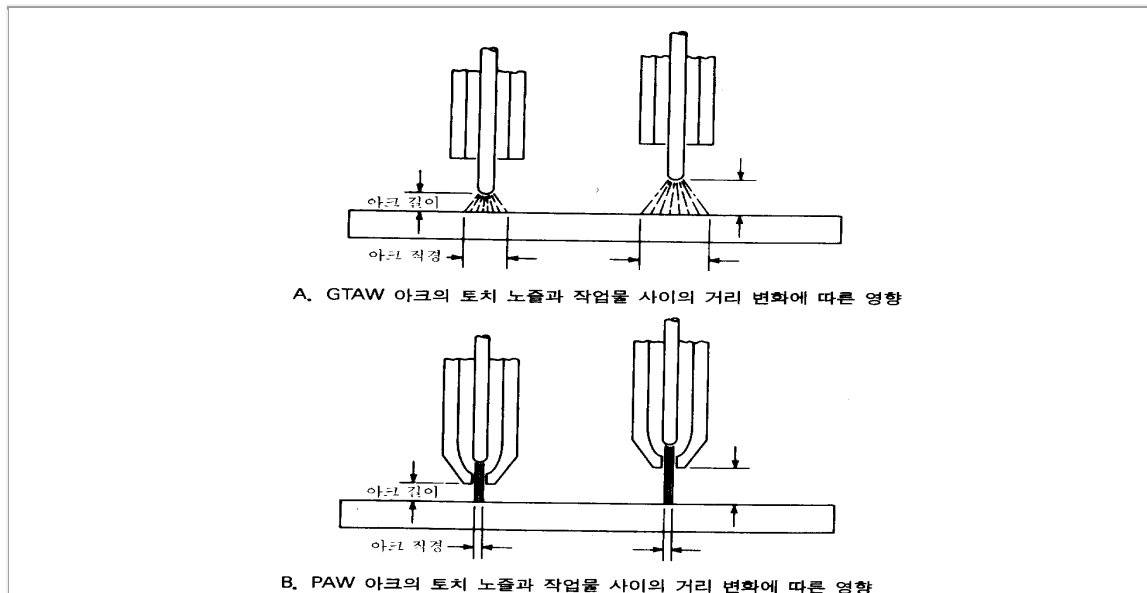
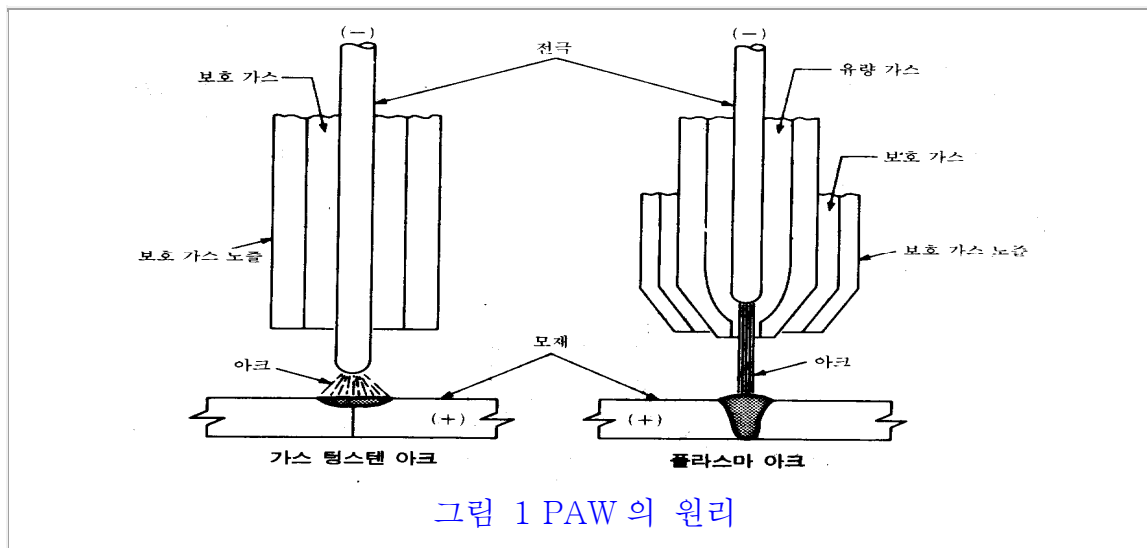
SAW의 중요장비는 용접전원, 와이어 공급장치 및 조정장치, FLUX 공급장치, 토치, 주행대차 등으로 구성되어 있다. 다른 용접장비(SMAW, GMAW, GTAW)에 비하여 특이할만한 점은 ① 용접전류 값이 크다 ② 대차가 필요하다. ③ 복수의 전극 와이어를 쓰는 경우도 있다. 용접기의 전원으로는 직류, 교류 양쪽 모두 사용되나, 현장에서는 용접 전류선이 길어서 이것에 따라서 아크의 전압 강화등의 불안정등이 문제가 될수 있다, 이 용접기의 형태는 권총형 공구로써, 아크 발생 시간은 모재의 두께 및 스테드의 직경에 알맞게 미리 제어 장치로써 조종해 두면, 소정 시간 아크가 발생 된후에 소멸과 동시에 전자석에 전류가 차단됨으로써, 전자석에 의해 위로 올라가 있던 스테드가 스프링의 힘에 의해 용융지에 눌러 지므로 용접이 된다.

5. PAW (Plasma Arc Welding) ; Plasma 용접기

◆ 원리

PLASMA 란 아크의 단면적을 수축하여 부분적으로 이온화된 가스로 구성되는 고밀도의 에너지를 전달하는 특성을 가진 에너지원으로서, 이때 아크의 수축은 아크가 토치에서 모재로 이동할 때 감압노즐(reducing nozzle) 을 통과하게 함으로써 발생된다. PAW 는 GTAW 와 밀접한 관련이 있다. 이 두 방법은 모두 아크를 발생시키는데 텅스텐 및 텅스텐 합금의 전극과 용접부의 보호를 위한 차폐가스를 이용한다. PAW 와 GTAW 의 중요한 차이점은 PAW 가 아크 수축의 장점을 갖고있다는 것이다. 따라서 플라즈마 아크는 기둥 모양이고, GTAW 아크는 원뿔 모양이 된다. 기둥내에 플라즈마 아크의 수축은 아크 방향의 안정성을 증가시키며, 수축된 아크는 좁은 구역에서 높은 전류량을 가지고 더큰 고열 에너지 수축을 가지게 되어서 좁고 깊은 용입을 주는 용접부를 만든다.





PAW의 장점 ---* 작동이 용이하다.* 뒤틀림이 적다.
* 전극의 오염이 적다.* 좁은 열 영향부를 준다.

◆ 장치

PAW 용접장치는 대략적으로 아래와 같이 6가지 구성요소로 이루어져 있다. 용접기 구성 1) 용접전원 (POWER SOURCE) 2) 용접토치 3) 제어판 4) 유량가스와 보호가스의 공급장치 5) 토치 냉각장치 6) 원격조정장치 (전류)

