

# 비철금속과 용접특성

정 승 부

## Non-ferrous Metals and Welding Characteristics

Seung-Boo Jung

### 1. 서 론

알루미늄, 동, 니켈 및 마그네슘 및 그 합금들은 우수한 기계적인 특성을 보유하고 또한 기능성도 겸비하여 구조용재료 및 전기 전자부품에 적용이 기대되고 있으며 기존의 Fe base 재료가 가지지 못하는 우수한 특성을 가지고 있는 재료이다. 비철재료의 대표적인 알루미늄합금은 경량이지만 철계 재료에 필적할 만한 기계적인 특성을 가지고 있기 때문에 구조용재료 및 항공기, 선박재료에도 널리 이용되고 있다. 동합금의 경우 철과 유사한 비중을 가지고 있지만 은(Ag) 다음으로 우수한 전기 및 열 전도성을 가지고 있어 전기, 전자재료등에 사용되고 있다. 마그네슘 합금은 구조용 재료로 쓰이고 있는 재료 중 가장 대표적인 경량재료로서 내진 특성과 수월한 재활용성 때문에 최근 각광을 받고 있다. 니켈 및 니켈 합금은 우수한 내식, 내산화성 및 내열성이 우수하며 동시에 저온 및 고온까지 우수한 특성을 보이기 때문에 저온, 고온의 각종화학장치 및 내열재료등에 광범위하게 이용되고 있다. 그러나 이와 같은 우수한 특징을 가진 비철금속들은 사용목적에 따라 특성을 더욱 향상시키기 위해 다양한 첨가원소가 첨가되어 있다. 그러나 첨가원소들은 용접시 용접열에 의해 자체의 특성이 변화되어 용접부근방에서 모재에서와는 다른 거동을 하게 되어 용접이 어려운 경우가 많다. 따라서 본 고에서는 비철금속재료 중 알루미늄, 동, 니켈 및 마그네슘 합금들의 특징 및 용접특성에 대하여 검토하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 알루미늄 및 알루미늄 합금의 접합성

알루미늄 합금은 대부분 알려진 접합공정(용접, Brazing, Soldering, Adhesive bonding 또는 기계적인 접합)

으로 접합가능하며 합금은 다른재료의 접합에 사용되는 일반적인 장비와 기술에 의해 접합이 가능하며 특수한 경우 특별한 용접장비 및 기술이 필요하다<sup>1)</sup>.

##### 2.1.1 알루미늄 및 알루미늄합금의 특징<sup>2)</sup>

알루미늄 합금은 비열과 잠열이 크기 때문에 용융에 필요한 열량이 동보다도 크다. 또 열전도율은 철에 비하여 3배 정도 높으므로 철에 비하여 많은 열량을 급속히 가해야 하기 때문에 고 전류로 빠르게 용접을 해야 한다<sup>3)</sup>. 알루미늄 합금은 열 전도도가 우수하여 용접시 열이 모재에 넓게 퍼지며, 온도상승에 따라 팽창이 일어나면서 열변형을 일으킨다. 특히 탄성계수가 작고, 고온강도가 낮기 때문에 변형이 더욱 커진다. 따라서, 알루미늄 합금 용접 시 용접변형을 감소시키기 위해서는 모재쪽으로는 열의 확산을 줄이거나 충분히 구속하여야 한다.

알루미늄의 산화피막은 내식성 측면에서는 유용하지만, 용접시에는 유해한 경우가 많다. 아크 용접시 산화피막 중 함유된 결정수가 아크중에 분해되어 수소를 방출시키므로 기공(blow hole)을 만들기 쉬우며 브레이징시에는 산화피막이 삼입재의 젖음(wetting)을 방해한다. 또한 알루미늄 산화피막은 부도체이기 때문에 저항용접시에도 문제를 야기시킨다.

알루미늄 합금은 전신재와 주물 다이캐스팅 합금으로 나누거나 또는 열처리형 합금과 비열처리성 합금으로 나뉜다<sup>4)</sup>.

##### (1) 1000계 합금

1000계는 공업용 순 알루미늄(순도 99.0% - 99.9%)과 고순도 알루미늄(순도)99.9%)로 나뉠 수 있다. 기계적 강도는 합금재에 비하여 나쁘지만 내식성, 빛의 반사성, 전기 및 열의 전도성이 좋고, 가공성 및 용접성도 우수하다.

(2) 2000계 합금

2000계 합금은 Al-Cu계와 Al-Cu-Mg계로 나눌 수 있다. Al-Cu 계합금은 내식성이 좋지 않기 때문에, 항공용으로 사용할 때는 내식성을 개선하기 위해 순 알루미늄을 압연한 클래드재를 사용한다. Al-Cu-Mg 계 합금은 상온시효성이 좋으며, 두랄루민(2017)은 강도가 거의 강(steel)과 유사하다. Cu를 다량함유한 2219를 제외하고 용접성 및 브레이징 성이 좋지 않다.

(3) 3000계 합금

비 열처리형이지만 냉간가공에 의해 다양한 성질을 얻을 수 있다. 1.3%Mn을 함유한 3003이 대표적인 합금이다. 성형성과 내식성이 순 알루미늄과 동등하지만 강도는 약간 높으며 용접성이 양호하다.

(4) 4000계 합금

Si 함량이 12%까지는 Si의 증가에 따라 용점이 저하되며, 취화되지 않은 범위내에서 Si를 첨가하면 용융상내에서 유동성이 좋고 응고시 균열이 잘 발생하지 않는다. 따라서, Al-Si계 합금(4043, 4045등)은 플럭스를 사용하는 브레이징용 삽입재료 사용되고, Al-Si-Mg계(4004, 4005)는 용접균열 억제효과가 있어서 균열 감수성이 높은 Al-Cu 계 합금용접의 용가재료 사용된다.

(5) 5000계 (Al-Mg계)

Mg 첨가에 따라 인장강도 및 변형에 대한 저항은 증가되어 가공이 곤란해진다. Mg가 5%이상 함유되면 응력부식이 발생하기 쉽지만 Mn, Cr 등을 첨가로 응력부식을 감소시킬 수 있다. 5052 (2.5%Mg), 5083 (4.5%Mg) 합금은 200-300MPa 의 인장강도를 가지며 용접구조용 재료로 사용될 수 있으며, 특히 5083 합금은 비열처리 합금으로 강도가 우수하며 용접성, 내식성, 가공성 또한 양호하다.

(6) 6000계 (Al-Mg-Si 계)

6000계 합금은 성형가공성, 강도, 내식성이 우수하고, 용접성도 양호하지만, 용접부가 용접열에 의하여 연화되는 단점이 있다.

(7) 7000계 (Al-Zn-Mg 계)

Zn 이 주된 첨가원소이며, Mg 는 소량 첨가된다. Al-Zn-Mg계는 인장강도가 약300MPa 로 용접성이 우수하며, 용접구조재로 사용된다. 또한 상온시효성이 우수하여 용접열에 의해 경도가 저하된 연화부가 용접 후의 시간이 경과됨에 따라 원래의 기계적인 특성이 회복된다.

2.1.2 알루미늄의 용접법

(1) TIG, MIG용접

모든 알루미늄 합금은 일반적인 용접조건에서도 우수한 용접특성을 보인다.

(2) 가스 용접

가스 용접은 설비비가 싸고 작업이 용이하기 때문에 박판이나 소형재의 용접에 사용되고 있다. 알루미늄 및 알루미늄 합금의 가스용접열원으로는 산소-아세틸렌 가스가 가장 많이 사용되며, 기타 산소-수소, 산소-석탄 가스등을 사용할 수 있다. 알루미늄 및 알루미늄 합금은 산화되기 쉽기 때문에 중성 혹은 약간 환원성의 불꽃으로 용접한다. 용접시 염화물(LiCl)이 포함된 플럭스를 사용하여 모재의 표면의 강한 알루미늄 산화막의 형성을 감소시킬 수 있다.

(3) 플라즈마 아크용접

알루미늄 합금은 표면의 산화피막 때문에 종래의 플라즈마 아크 용접에서는 양호한 용접부가 형성되지 않았다. 그러나 용접전원에 인버터(inverter)가 채용됨에 따라 역극성과 정극성의 극성을 조절할 수 있게 되어 알루미늄 합금의 플라즈마 용접이 실용화되었다. 효과적인 아크의 청정작용을 얻기 위해서는 역극성 전류값을 정극성보다 다소 높게 하고, 역극성 및 정극성의 시간을 각각 2-5ms 및 15-20ms 범위로 설정한다.

(4) 저항용접

알루미늄 합금의 저항용접은 철도차량, 가전 제품, 항공기등에 적용되고 있으며 점 용접, 심(seam) 용접, 플래시(flash) 용접등이 있다. 용융용접이 곤란한 합금의 경우 기계적인 특성의 감소 없이 접합이 가능하다. 알루미늄 합금의 저항용접은 전기 및 열전도도가 좋아 대전류를 단시간에 통전시켜야 하며, 합금표면의 강한 산화피막은 전기저항이 크고, 불균일 발열에 따른 변형 너깃(nugget)의 형성, 전극의 오손의 원인이 되므로 전처리를 통해 제거 시켜야 한다. 알루미늄 합금은 용접 후 응고시 체적 수축률이 6-7%로 크기 때문에 합금에 따라 균열이나 기공의 발생을 감소시키기 위해 감쇄(decay) 전류나 단압을 가하기도 한다.

(5) 브레이징

알루미늄은 열전도성이 좋고 동에 비해 가벼워서 (30% 경량화 가능) 열교환기를 중심으로 많이 사용되고 있으나<sup>5)</sup> 용점이 낮은 2000계, 7000계 합금의 경우 브레이징 대신에 솔더링이 이용되고 있으며, 그 외

합금계에서는 브레이징으로 양호한 접합성을 얻을 수 있다. 브레이징에 사용되는 삽입금속은 진공 브레이징이 아닌 경우에는 Al-Si 합금, 진공 브레이징에서는 Al-Si-Mg합금이나 Al-Si-Mg-Bi 합금이 주로 사용되고 있다.

#### (6) 솔더링<sup>6)</sup>

알루미늄의 솔더링은 비교적 단순하여 Pb-Sn계 솔더를 사용 시 접합부에 수분이 존재하는 경우 갈바닉부식에 의해 박리가 일어나기 때문에 Sn-Zn계 합금을 이용한다. 그외에 Cd-Zn(17.5-90%) 계 솔더, Zn-5%Al 솔더등이 이용된다.

#### (7) 압접

압접은 냉간(상온) 압접, 열간(고온) 압접, 롤(roll) 압접등이 있다. 접합전에 연마 및 화학적인 세정등 전처리를 통해 산화막을 제거해야 한다. 접합온도는 상온-597℃범위이며 접합분위기는 대기, 불활성 가스 및 진공중에 실시한다.

#### (8) 마찰용접<sup>7-8)</sup>

대부분의 알루미늄 합금계의 경우 동종 및 이종재료와의 접합은 마찰압접이 이용되고 있으나<sup>9)</sup> 피접합재가 회전 대칭성이 있는 경우에만 가능하며, 봉재의 경우 직경 100mm까지, 고온에서는 외경 250mm까지 적용이 가능하다.

#### (9) 확산접합

알루미늄 합금은 대체로 확산접합이 가능하며, 시공면에서 주요인자는 온도, 압력, 시간등이다. 접합온도는 0.5Tm이상으로, 대부분 0.6-0.8Tm에서 주로 실시된다. 접합시간은 수 분-수 시간이 필요하며 접합압력은 온도에 따라 다르지만 모재나 삽입금속의 항복점이하의 압력에서 실시된다.

#### (10) 초음파 용접

알루미늄 합금 포일(foil)이나 전자부품, 박판의 접합에 사용되며, 판 두께는 수  $\mu\text{m}$ -수 mm로서 사용 주파수는 15-60kHz, 용량은 25W-8kW 범위가 적용된다. 변형이 적고, 표면처리가 간단하며 이종금속의 접합이 가능하다는 장점이 있지만, 경도가 다른 이종재료의 접합이 어렵고, 진동에너지를 흡수하는 형상이나 크기에서는 접합이 곤란하다.

#### (11) 전자빔 용접

전자빔을 이용한 알루미늄 합금을 용접한 경우 폭이

좁고, 깊은 용입을 얻을 수 있으며(폭/깊이=1/10-1/20), 150mm의 후판도 1층 용접으로 가능하며, 동시에 급냉으로 인한 용접부의 조직이 미세해지고, 불순물의 오염이 적으며 열영향부의 폭이 협소하여 용접부의 변형이 적다. 그러나 장비가 고가이고 고진공이 필요하며 피 용접물의 크기가 제한되는 단점이 있다.

#### (12) 마찰교반 용접(Friction Stir Welding)

마찰교반용접은 최근 개발되어 알루미늄합금의 접합에 적용이 되고 있는 대표적인 고상접합기술로서, 용융용접으로 접합이 곤란하다고 알려진 석출경화형 합금(2000계, 7000계) 및 6000계 알루미늄 합금계 금속기 복합재료(MMC)등에 적용하여 우수한 접합특성을 보이고 있다<sup>10-12)</sup>.

#### (13) 이종재료와의 접합

알루미늄 및 알루미늄 합금과 이종금속접합체의 접합특성은 다음과 같은 간단한 기준으로 평가해 볼 수 있다. 전술 고용체, 공정, 포정, 편정반응을 나타내면 가능하고, 접합계면에서 금속간 화합물이 발생되면 용접이 곤란하며, 특히 상온고용도가 작고 취약한 화합물을 만드는 것은 직접용접이 불가능하다. 이와 같은 금속간 화합물의 생성을 억제하기 위해서는 고상용접 혹은 접합부사이에 금속간화합물의 생성을 억제할 수 있는 삽입금속을 이용하면 개선 할 수 있다<sup>9)</sup>.

## 2.2 마그네슘 합금의 접합

마그네슘은 비중이 실용금속중 가장 가볍고, 비강도, 진동감쇄능, 충격흡수성, 피삭성등 우수한 특성을 보유하고 있다<sup>13)</sup>. 최근 고순도 합금의 제조기술 및 용해기술의 확립에 의해 내식성의 현저한 향상에 의해 각종 산업분야에서 구조용 재료로 이용되고 있다. 특히 경량화, 고속화라 일컫을 수 있는 시대의 흐름에 부흥할 수 있는 재료일 뿐 만 아니라 자원적으로 풍부하고 재활용이 가능한 재료로서 주목을 받고 있다. 구조재료로서 마그네슘을 적절하게 사용하기 위해서는 가공기술의 하나인 용접기술을 이용하는 것이 매우 중요하다. 마그네슘의 합금의 접합에는 타 금속에 적용되는 접합법이 거의 사용될 수 있다.

### 2.2.1 마그네슘 및 마그네슘 합금의 특성 및 용접성<sup>14)</sup>

마그네슘 및 마그네슘 합금은 저용점, 저열용량 및 용융열도 작기 때문에 용접입열을 제어하여 용접속도를 증가시킬 수 있다. 그러나 열전도율이 높고, 열 팽창계수가 크기 때문에 용접결함이 크고, 용접결합의 발생하

기 쉬운 문제점이 있다.

마그네슘 합금내의 첨가원소가 용접성에 미치는 영향은 원소들간의 상호작용으로 인해 간단하게 나타낼 수 없지만, 대략적으로 나타낼 수 있다.

\*Al : 10%정도까지 첨가는 용접성의 향상과 응고조직의 결정입미세화 효과가 있다.

\*Zn : 첨가량의 증가에 관계없이 결합감수성이 높고 Zn>3%이면 현저하게 용접결합이 발생한다.

\*Ca : 첨가량 0.15%까지는 허용된다.

\*Li, Th, Mn, Zr : 일반적으로 합금조성범위 내에서는 용접성을 어느 정도 향상시킨다.

\*Rare earth element : 일반적으로 용접성이 향상되며, 특히 Zn를 함유한 합금에서는 그 효과가 현저하다.

Mg-Al-Zn 계 주조합금에서는 Al은 용접성을 향상시키며, 1%이상의 Zn는 AZ92A 합금의 결합감수성이 높아져 용접성에 나쁜 영향을 미친다. AM100A 합금, AZ92A 합금, AZ63A 합금의 순으로 용접특성은 양호하며, Zn의 첨가량이 적으면 AZ91E 합금도 AM100A 합금과 거의 유사한 용접성을 나타낸다. Mg-Zn-Zr 주조합금은 Zn 첨가량이 적은 경우 결합이 발생하지 않지만, Zn 첨가량이 많은 ZK51A 합금, ZK61A 합금은 극히 용접이 곤란하다. Zn의 첨가량을 줄이고 희토류 원소를 2.5-4.0% 첨가한 EZ33A 합금은 AZ91C 합금, ZK51A 합금에 비하여 우수한 용접성을 보인다. 이와 같은 용접성은 전신재의 경우도 거의 비슷한 경향으로 나타난다.

## 2.2.2 마그네슘 합금의 용접법

### (1) TIG 및 MIG 용접<sup>15)</sup>

아크의 안정성 때문에 고주파 부교류 TIG 용접이 가장 적당하지만, 직류용접에서도 양호한 접합부의 제작이 가능하다. 박판에서는 교류 및 직류봉이 (+) 적당하지만, 판두께가 5mm이상일 경우 직류봉이 (-)인 경우가 용입이 깊어지기 때문에 적절하다. 그러나 직류봉이 (+)인 경우 표면의 청정작용이 없고 조작성 복잡하여 사용빈도가 적다. 교류자동용접에서는 양호한 접합부가 쉽게 얻어질 수 있으며 이때 전극으로는 순 텅스텐(W), 토륨(Th)이 첨가된 텅스텐, 실리콘(Si)이 첨가된 텅스텐이 이용된다.

MIG용접의 극성으로 직류봉으로 (+)가 적용되며, shielding gas로는 아르곤 가스, 아르곤 가스에 헬륨(He)을 25%첨가하여 사용된다. 용접속도는 TIG 용접의 3배이상의 고속도로 설정 가능하여 판재에 적당한 TIG 용접에 비해 기술적으로 매우 쉬운 용접법이다.

### (2) 전자 빔 용접<sup>16)</sup>

전자 빔 용접은 낮은 입열로서 매우 좁고 깊은 용입이 얻어지는 특징이 있으며, 열영향부가 현저히 좁고, 또한 진공 챔버 내에서 행하기 때문에 마그네슘합금에 적당한 용접법이라 할 수 있다. 그러나 장치가 고가인 단점이 있다.

### (3) 레이저 용접<sup>17)</sup>

금속재료의 레이저 용접은 105W/cm<sup>2</sup>이하의 저 power 밀도에 의한 융합용접과 106W/cm<sup>2</sup>이상의 고 power 밀도에 의한 심용입용접이 있다. 또한 YAG 레이저는 마이크로 용접, CO<sub>2</sub> 레이저는 마크로 용접에서 이용되고 있지만 마그네슘 합금을 레이저 용접하는 경우는 거의 없다. 순 마그네슘과 AZ31 합금의 레이저 용접은 모재의 재질의 차이에 따라 용입형상 및 비드형상의 차이가 있고 AZ31 합금은 출력 2kW이하에서도 용접이 가능하지만 순 마그네슘으로는 양호한 접합부는 얻기 힘들다. 이는 레이저빔의 흡수가 재질에 따라 다르기 때문이다. 그러나 2.5kW이상에서는 모재와 관계없이 용입이 양호한 접합부가 얻어진다.

### (4) 저항용접<sup>18)</sup>

저항용접은 접합하고자 하는 소재를 전극에 의해 가압하고 대전류를 단시간에 통전하며 저항발열로서 접합이 이루어진다. 많은 장점을 가지고 있는 접합법이지만 대전류의 입력이 필요로 하기 때문에 전원설비가 크고 용접기도 복잡하고 고가이기 때문에 양산분야에서는 적용이 적고 소량생산에서 적용할 수 있다.

저항용접은 용접형식에 따라 판과 판 혹은 판과 부품을 겹쳐서 접합하는 spot 용접, projection 용접, seam 용접등 겹치기 저항용접과 판 또는 봉과 봉을 맞대서 접합하는 upset 용접, flash-butt 용접, butt-seam 용접과 같은 맞대기 저항 용접으로 분류된다. 실용적으로는 spot 저항용접이 가장 널리 사용되고 있지만 seam 및 flash 용접은 거의 사용되지 않는다.

### (5) 압접

압접은 고상접합법으로 분류되며 재결정온도 이상의 온도에서 행해지는 고온압접과 그 이하의 온도에서 행해지는 냉간 압접이 있다. 냉간압접으로는 상온압접, 초음파압접, 폭발압접등이 있고 비교적 단순한 장치로 압접하지만, 접합부에 큰 소성변형과 가공경화를 생기게 하기 때문에 마그네슘 합금에 적용되는 경우는 거의 없다. 고온압접은 단접, 가스압접, 마찰압접 및 마찰교반용접이 있고 단접 및 가스압접의 마그네슘 합금의 적용에는 거의 없고 마찰압접 및 마찰교반용접을 이용하

여 접합이 가능하다. 이종재료의 접합으로서 AZ31 합금과 공업용 순 알루미늄을 접합시킨 경우, 접합면에 금속간화합물이 생성되고 압접조건에 따라 고강도의 접합성을 얻을 수 없었지만 삽입금속을 동시에 사용하면 고 강도의 접합부를 얻을 수 있다는 보고도 있다<sup>19)</sup>. 그 외 마그네슘합금과 탄소강 또는 스테인레스강의 접합도 가능하다. 마찰교반접합한 AZ31 전신재의 경우 접합속도 267mm/min, 톨 회전수 1800rpm 이상에서 모재의 85%이상의 접합부 강도를 얻을 수 있고 반응용법으로 제조한 AZ91합금의 경우 고속의 톨 회전수, 낮은 용접속도에서는 모재에 비해 우수한 기계적인 특성을 얻을 수 있다<sup>20-21)</sup>.

#### (6) 브레이징 (brazing) 및 솔더링 (soldering)<sup>22)</sup>

항공기산업 등에 있어 마그네슘합금의 브레이징이 적용되고 있다. Al이 3%이하, Mn이 1.2%이하, Zn,가 2%이하의 합금의 브레이징 성은 양호하지만 그 이상의 합금원소를 첨가한 경우는 저하된다. 특히 Zn을 5%이상 함유한 합금 및 고온용 합금에 속하는 Mg-Th계 합금, Mg-Zn-Zr계 합금의 브레이징은 불가능하다.

솔더링은 접합부가 취약하기 때문에 마그네슘합금에는 거의 사용되지 않는다. 그러나 전기 도금을 이용하여 마그네슘합금의 부품을 전기 부품과 접합할 경우 이용된다. 동, 은, 아연 또는 주석 도금을 이용하여 마그네슘합금 부품으로 Pb-Sn, Sn-Zn 합금 solder 가 이용된다.

## 23 니켈 및 니켈합금의 용접<sup>23)</sup>

### 2.3.1 니켈 및 니켈합금의 특징 및 용접성

저온부터 고온까지 우수한 내식성 및 기계적인 특성으로 인하여 각종 화학장치 및 고온기기재료에 광범위하게 이용되고 있는 니켈 및 니켈합금은 그 목적에 따라 다양한 합금계 재료들이 개발되어 실용화되고 있다. 니켈 합금은 오스테나이트계 스테인레스강과 비슷한 FCC구조를 가지며 응고과정에서 조직변태가 일어나지 않기 때문에 용접금속은 고온 결합 감수성이 높다. 또한 고온에서 강도를 높이기 위해 Al, Ti등의 원소를 함유한 니켈합금은 원소의 석출경화성 때문에 용접결합이 발생하기 쉽고, 용접을 할 경우 주의가 필요한 부분이다

대표적인 니켈 및 니켈합금은 모넬(Monel) 및 인코넬(Inconel)과 같이 상품명으로 부르는 것이 많고, 또한 숫자의 번호로서 분류되고 있다. 예를 들면 인코넬 및 인코로이(Incoloy)합금의 경우 통상 3개의 숫자로 나타내며, 머리숫자가 짝수(625, 800등)인 경우는 고온강화형 합금을, 홀수(718,901등)인 경우는 석출경화

형을 일반적으로 나타낸다. 이와 같은 이유로 전자보다 후자의 재료에 용접성에 문제가 있다.

최근 니켈에 각종 원소 첨가 및 조절을 통해 여러 부식환경에 견딜수 있는 재료가 개발되어 화학장치에 적용되고 있다. 특히 Cr을 첨가하면 내식성이 양호하여 고온환경에 견딜 수 있으며, Al, Ti 등을 첨가하여 석출경화, 고온강화등을 이용하면 고온강도, 크립강도 등이 개선되어 고온에서도 사용될 수 있다.

### 2.3.2 용접방법<sup>24)</sup>

#### (1) 가스 아크용접 (TIG, MIG)

불활성 가스를 실딩가스로 이용하는 TIG, MIG용접은 와이어 성분 그 자체가 용접금속이 된다. 특히 Al, Ti 등 산소와 결합하기 쉬운 원소를 많이 함유하고 있는 니켈합금의 경우에는 TIG법이 예전부터 이용되고 있다. 용접성, 용접금속 성질등이 안정하여 우수한 접합부 특성을 얻을 수 있다.

#### (2) 피복아크용접

예전부터 비교적 용이하게 이용되고 있는 방법이다. 그러나 용접중에 산소와 결합하기 쉬운 원소가 다수 함유된 경우에는 불가능하기 때문에 그 적용은 한계가 있다. 니켈, 인코넬, 모넬합금등의 접합에 이용된다.

### 2.3.3 용접결합

#### (1) 고온결합

응고결합 및 재열결합등의 고온결합은 응고과정에 용접금속중에 함유된 미량의 저용점화합물 및 저용점금속이 액상 film으로서 최종 응고라인에 잔류하며 보통 응고부분의 수축이 시작에 의해 수축응력이 발생하여 틈(開口)이 생기는 것으로 크레이터 결합 및 비드 결합으로 나타난다<sup>25)</sup>. 특히 P, S등과의 공정화합물이 그 원인이 되기 쉽기 때문에 불순물들을 완전히 제거시킨 모재 및 용접재료가 사용되어야 하며 용접시 냉각속도를 빠르게 하는 것이 효과적이다<sup>26)</sup>. 그러므로 용접시공시의 관리로서 1) 용접입열을 낮게 억제, 2) 예열과 pass 간 온도를 낮게 억제하고, 3) 볼록 비드를 형성하고, 4) 가공면의 유지 및 불순물을 제거한다. 석출경화형 니켈합금의 경우에 있어서, 합금성분으로 다수 함유되고 있는 Al, Ti등이 Ni과 화합물을 형성하여 고온에서 기계적 특성을 향상시키지만 Ni<sub>3</sub>Al, Ni<sub>3</sub>(Al, Ti) 등의 LI2 ( $\gamma'$ ) 상을 형성하여, 연성이 감소하여 응고과정에 결합을 발생시킬 수 있다.

#### (2) 용접결합

니켈합금의 경우는 용융상태와 응고상태의 고용도가

크게 차이가 나기 때문에 용융금속 중에 다량 용입된 가스성분 (H, O, N)이 응고조직에서는 고용되지 않고 응고과정에서 방출되어서 blow hole로서 잔류되기 쉽다. 또한 니켈합금은 일반적으로 강에 비해 용점이 낮고 용탕유동성이 감소하여 접합불량도 발생하기 쉽기 때문에 적정 용접조건에서의 용접시공이 요구된다.

### 2.3.4 각종 니켈 및 니켈합금의 용접

니켈 및 니켈합금의 용접에 있어서 기본적으로 모재와 동일 성분의 용접재료를 선택하여 용접을 행할 필요가 있다. 그러나 내열재로서 이용되고 있는 것은 용접성이 좋지 않은 것이 많고 필히 모재와 유사한 재료로 용접을 하지 않으면 안되기 때문에 고온강도, 크립강도, 연성등도 고려하여 용접성이 좋은 재료를 선택해야 한다.

#### (1) 니켈

통상 용접재료로서 Al, Ti가 blow hole방지 등을 위해 다량함유되고 있다. 이 때문에 TIG용접을 행한 것이 많다. 고온결합 감수성이 비교적 낮다.

#### (2) 모넬 (Ni-Cu)

니켈과 비슷하게 용접재료중에 Al, Ti, Nb등이 탈산 원소로서 비교적 다수 함유되고 있고, 용접성의 개선된다. 그러나 고온영역에서 급격한 연성저하를 나타내기 때문에, 서냉시킨 경우에는 고온결합의 위험성도 있으므로 예열, pass 간 온도를 낮게 억제시켜, 과열에 주의할 필요가 있다. TIG, 피복 아크용접으로도 가능하다.

#### (3) 인코넬 (Ni-Cr, Ni-Cr-Fe)

인코넬 600, 625등이 양호하다고 알려지고 있으며 용접재료는 모재와 유사한 재료가 이용된다. TIG용접, MIG용접, 피복아크용접을 이용한 용접등의 방법이 이용된다. 후판의 경우에는 마이크로 결함을 발생하기 쉽기 때문에 용접입열을 억제, 예열, pass 간 온도를 낮게 유지할 필요가 있다.

#### (4) 인코로이 (Fe-Ni-Cr)

인코로이 800, 825등이 양호하다고 알려졌으며, 인코넬에 비해 고온결합 감수성이 높기 때문에 일반적으로 인코넬계 용접재료가 이용되는 경우가 많다. 특히 입열 및 예열, pass 간 온도관리를 엄격하게 할 필요가 있다.

#### (5) 하스테로이 (Ni-Mo, Ni-Cr-Mo)

하스테로이 C, C-276, B등 외에 각각의 재료가 개발

되고 있으며, 각각의 공금계(共金系)재료를 이용하여 용접한다. 용접방법은 TIG용접방법이 가장 일반적이며, 니켈 합금 중에서는 비교적 용접성이 양호하다.

## 2.4 동 및 동합금의 용접

### 2.4.1 동 및 동합금의 특징 및 용접성<sup>27)</sup>

동 및 동합금은 대부분 FCC 구조를 가지기 때문에 우수한 소성가공특성을 가진다. 순 동의 경우는 대략 알루미늄의 3배로 8.94 mg/m<sup>3</sup>의 밀도값을 나타낸다. 동의 전기 및 열 전도도는 Ag보다 약간 낮은 수준이며, Al에 비해서는 1.5배정도 높은 값을 보인다<sup>28)</sup>.

동 및 동합금들은 대개 높은 전기 및 열 전도도, 부식 저항, 금속끼리의 마모 저항과 훌륭한 외관으로 인하여 구조재료 및 기능성 재료로 널리 이용되고 있다. 특히 동합금은 우수한 전기전도도로 인해 전기 컨덕터와 전기 부품 소재로서 널리 쓰이고 있다. 동은 높은 부식 저항성 때문에 water tubing, 밸브, fitting, 열교환기, 화학 부품 및 베어링등에 이용될 수 있다. 동 및 동합금은 용융용접, brazing, soldering, 마찰용접 등의 방법을 이용하여 접합할 수 있다

동 및 동합금은 높은 전기 및 열 전도도로 인하여 용접특성에도 영향을 미친다. 용접열이 모재로 빠르게 전도되어 용접물에 불완전한 용융을 진행시킬 수도 있다. 동 합금의 예열은 좋은 용융을 위해 필수적인 용접 입열량 요구 최소치를 감소시킬 수 있다.

동 및 동합금은 종종 기계적 냉간 가공으로 재료를 강화시키지만 열이 가해지면 연화되는 경향이 있다. 따라서 접합부 근방의 열영향부(Heat Affected Zone)부는 인접한 모재에 비하여 연화되어 기계적인 강도를 저하시킨다. 열영향부는 수 차례의 냉간 가공되는 과정에서 고온균열이 일어날 수도 있다. 따라서 최소한의 예열과 pass 간 온도조절이 열영향부의 연화를 최소한으로 억제시킬 수 있다.

동 및 동합금의 용접은, 피복아크용접, TIG용접, MIG용접, 가스 용접, 브레이징등이 이용되며, 열집중성이 높은 전자빔용접 및 확산접합등이 이용된다. 최근에는 피복아크용접의 이용은 감소되는 추세이며 열집중성이 높아 결합 발생율이 매우 낮은 TIG, MIG용접법이 능률면에서 양호하여 널리 이용되고 있다. 최근에는 Target 재료의 구성법으로 마찰교반접합법의 이용이 보고 되고 있다<sup>29)</sup>.

동 및 동합금을 용접한 경우 역저도 및 역파장이 크기 때문에 급냉하면 응고수축량이 커져 기공 및 결함이 발생하기 쉽다. 높은 예열온도는 결정의 조대화를 초래하여 결함 및 강도저하의 원인이 된다.

### 2.4.2 용접결합<sup>30)</sup>

#### (1) 기공

용접중에 흡수된 수소가 응고온도영역에서 용해도 감소에 의해 응고시에 방출되어 기공이 된다. 또한 용접중의 수소가 산소와 반응하여 수증기를 생성하는 경우 및 응고중에 생기는 산화물이 수소에 의해 환원되어 수증기를 생성하는 경우가 있다. 산화물의 환원에 의해 발생된 수증기는 고상내에서 큰 가스압을 생성하여 결정입계에 다수의 미소결합을 발생한다.

#### (2) 용접결합

용접시 발생하는 결함으로서 응고결합과 연성저하에 의한 결함이 있다. 응고결합은 다른 금속 합금과 비슷하게 입계에 집중되며 저용점물질 납(Pb), As 등이 원인이 된다.

연성저하는 인청동, 규소청동등의 고온에서 취화역이 존재하는 합금에서 볼 수 있다.  $\alpha$  단상의 알루미늄청동의 경우도 고온취화역이 존재하기 때문에 용접결합감수성이 높고 다층용접의 전층 비드에 결함이 생기기 쉽다. 이러한 결함을 방지하기 위해 용접시 과열을 억제하고 peening을 행하는 것이 효과적이다.

#### (3) 열영향

동 및 동합금은 주로  $\alpha$  고용체 단상의 합금이기 때문에 고상변태가 없고 재가열에 의해 결정은 조대화되기 쉽다. 동 및 동합금은 열전도성이 양호하기 때문에 높은 예열온도 및 용접중 온도유지가 필요하다. 따라서 가공경화에 의해 강도가 얻어진 부재는 연화되어 강도가 낮아진다. 이는 재결정에 의해 가공 응력이 해소된다. 열영향을 방지하기 위해 peening을 이용하여 결정의 조대화를 막아 결함 방지 효과를 발휘하여 강도의 저하가 방지된다.

### 2.4.3 용접법<sup>30)</sup>

#### (1) TIG, MIG 용접

동 및 동합금의 용접에 TIG 및 MIG 용접법이 많이 이용되고 있다. 이 방법으로는 아연을 다수 함유한 황동계를 제외하고 거의 대부분의 동 및 동합금에 적용된다. TIG 용접은 입열 제어가 쉬워 박판용접에 적용하고, MIG 용접은 후판 용접 및 육성용접에 적용된다. 용접조건 또한 다른 비철재료에 적용했던 것과 거의 유사한 조건에서 접합이 가능하다.

#### (2) 피복아크용접

TIG, MIG 용접에 비해 간단하지만 열집중성이 좋지

않고 스파터가 자주 발생하며 blow hole 및 slag 혼입 등의 결함이 발생하기 쉽기 때문에 현재에는 이용빈도가 낮다. 열전도율이 낮은 백동 및 규소청동의 접합에 이용된다.

#### (3) 레이저 용접(Laser Beam Welding)

동 및 동합금의 LBW(Laser Beam Welding) 용도는 크게 제한되어 있다. 동 및 동합금을 LBW을 이용하여 용접한 경우 가장 큰 문제점은 동의 레이저 반사력이 크다는 점과 열전도도가 높다는 점이다. 동은 CO<sub>2</sub> 레이저 적외선 파장의 빛 에너지를 약 99% 반사한다.

CO<sub>2</sub> 레이저 보다 더 낮은 파장을 가지는 레이저는 몇몇 동 합금의 접합에 이용되고 있다. 동은 Nd로부터의 입사 레이저를 조금 더 많이 흡수한다. 1.06 $\mu$ m의 파장을 가지는 YAG 레이저는 Ni와 같이 높은 흡수율을 가진 금속으로 도금된 동에 보다 높은 용접 효율을 나타낸다.

#### (4) 초음파 용접(Ultrasonic Welding)

동 과 동을 접합하는 초음파 용접은 microelectronic 접속에 있어서 매력적인 기술이 되고 있다. 접합 보존 및 청결에 특별한 주의가 요망되며, 그렇지 않을 경우 접합부의 신뢰성을 보장받을 수 없게 된다.

#### (5) 저항용접 (Resistance Spot Welding)

동 및 동합금의 저항용접은 재료의 전기 및 열 전도도가 낮을수록 용이하다. Spot 용접은 베릴륨 동, 황동, 청동 및 백동(Cu-Ni)과 같은 30% IACS 혹은 그 이하의 전기 전도도를 갖는 판형 동 합금등에 이용될 수 있다. 60% IACS를 초과하는 전기 전도도를 갖는 동합금은 저항용접법으로는 용접할 수 없다.

#### (6) 마찰 용접(Friction Welding)

적용부품의 형상에 제한이 있지만, Friction Welding은 동 및 동합금의 접합부에서 열영향부가 대단히 좁고, 취약한 주조조직이 없으며 접합부의 특성도 매우 우수하다. 적용 가능한 접합으로는 동 및 동합금 동종 재료의 접합 외에도 알루미늄, 은, 탄소강, 스테인리스 스틸 및 타이타늄 등의 다른 금속과의 접합도 가능하다<sup>31)</sup>.

#### (7) 브레이징 (Brazing)

동 및 동합금은 적당한 필러 메탈과 플럭스를 이용하거나 혹은 보호 분위기내에서 브레이징으로 쉽게 접합될 수 있다. 몇몇 모재 금속에서는 취약, 균열, 혹은 필

러 금속과의 과도한 합금화를 피하기 위하여 특별한 주의가 필요하다.

### (8) 이종금속의 용접

동 및 동합금은 상대적으로 Al, Mg 합금에 비해 물리적 성질 및 내식성이 우수하므로 각종 용기 및 플랜트 구조물에 이종금속과 접합하여 이용된다. 예를 들면 열교환기의 관판과 동관의 접합 및 탄소강등 강도가 높은 재료와 클래딩 강의 용접 및 육성 용접등 이종재료와의 접합이 많이 요구되고 있다. 또한 탄소강과의 용접시 동에 대한 탄소의 고용도가 낮기 때문에, 용입된 철이 응고되면서 정출되어 결함이 발생하는 점을 방지하기 위하여 니켈 및 모넬합금(65%Ni-35%Cu합금)이 중간재로서 이용되고 있다. 그러나 이러한 용융접합의 문제점을 해결하기 위해 최근 고상접합법이 주로 이용되고 있다. 고상접합법인 마찰용접을 이용하여 알루미늄합금 및 철강재료와 접합하여 용융용접시 문제가 된 계면에서 금속간화합물의 생성 및 성장을 억제하고, 계면 연화도 극소화 시킬 수 있다. 그러나 장비가 고가이며 접합체 형상의 제약으로 인하여 극히 일부 산업부품에 적용이 되고 있는 실정이다.

## 3. 결 론

이상에서 살펴본 것처럼 비철금속의 용접에는 여러가지 용접법이 적용되고 있으며, 각 합금의 종류 및 특성에 맞는 용접법이 개발되어 적용되고 있다. 또한 접합부계면에서 발생하는 결함을 최소화하기 위한 실탕가스, 입열량조절, 냉각방법 및 후열처리등 후 처리공정이 이용되고 있다. 최근 이러한 비철재료가 여러가지 기계적, 전기적인 특성을 이용하여 구조용재료 뿐만 아니라 기능성층면을 고려한 전자부품등으로 널리 이용되고 있다. 따라서 적절한 용접법의 선택은 부품에 사용시 접합부의 신뢰성을 높이고 제품전체의 수명향상을 위해 필수적이라 생각된다.

## 참 고 문 헌

1. W.R.Oates: Welding hand book 8th Edition, AWS 550 N.W. Lejeune Road Miami, FL 33126, (1996) 2-119
2. 대한용접학회편: 용접·접합편람, 대한 용접학회, 1998, 242-244 (in Korean)
3. 西川: 알루미늄용접의 かんどころ, 現代溶接技術大系, 産報出版, 22, (1980), 20 (in Japanese)
4. Metal Handbook, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials., 2, 10th

- edition, ASM International
5. 山田: プレートフィン式 アルミニウム熱交換器について, 經金屬溶接, 19-1, (1981), 17 (in Japanese)
6. Aluminum Soldering Handbook, The Aluminum Association, 1st ed., New York. (1971)
7. 田中: アルミニウム合金の溶接(2), 溶接技術, 36-2, (1988), 111 (in Japanese)
8. AWS, Welding Handbook Vol.3, 7th ed., (1980)
9. 中川: 新しい金屬材料, 工業調査會, (1980), 130 (in Japanese)
10. C.G.Rhodes, M.W.Mahoney, W.H.Bingel, R.A.Spurling and C.C.Bampton: Scripta Materialia, 36-1, (1997), 69-75
11. S.Benavides, Y.Li, L.E.Murr, D.Brown and J.C.McClure: Scripta Materialia, 41-8, (1999) 809-815
12. K.Nakata, Y.G.Kim, M.Ushio, T.Hashimoto and S.Jogan: Transactions of JWRI, 29-2, (2000), 97-99
13. B.L.Mordike and T.Ebert: Mater. Sci. and Engineering, A302, (2001), 37-45.
14. 時末 光: 溶接技術, February (2001), 58-64 (in Japanese)
15. M.M.Avedesian, H.Baker: ASM Specialty Hand book, Magnesium and Manesium Alloys, The Information Society, (1999), 106
16. 朝比禁敏勝, 時末 光: 經金屬, 50-10, (2000), 515 (in Japanese)
17. 日本マグネシウム 協會編: マグネシウム技術編覽, カロス出版, (2000), 358 (in Japanese)
18. Dow Magnesium:Joinning Magnesium, Dow Magnesium U.S.A (1984), 20.
19. 加藤數良, 朝比禁敏勝, 時末 光: 經金屬, 45-5, (1995), 255 (in Japanese)
20. W.B.Lee, Y.M.Yeon, Shae.K.Kim, Y.J.Kim and S.B.Jung: Proc. of Magnesium Technology 2002, TMS, Seattle, USA, (2002), 309-312.
21. K.Nakata, S.Inoki, Y.Nafano, T.Hashimoto, S.Jorgan and M.Ushio: J. of Jpn. Inst. of Light Met., 51-10, (2001), 528-533.
22. 經金屬協會マグネシウム委員會編: マグネシウム編覽, (1975) (in Japanese)
23. 夏目 松吾: 溶接技術, February, (2001), 72-76 (in Japanese)
24. 青本: インコネルおよびハステロイ系溶接材料について, 第8回耐熱材料溶接小委員會 (in Japanese)
25. T. Atsuta: The application of Laser and Electron Beam to the Manufacturing of Gas Turbine and Steam Turbine Engine Components, Proceedings of Laser Advanced Materials Proceesing, May (1987), Osaka, Japan
26. 青本: Incoloy800 合金の溶接高温割れに関する検詞, 日本溶接協會耐熱材料小委資料, SWR-59-14, (1984) (in Japanese)
27. W.R.Oates: Welding hand book 8th Edition, AWS 550 N.W. Lejeune Road Miami, FL 33126, 164-216
28. W.F. Smith: Structure and properties of Engineering Alloys, McGraw-Hill, (1993), 235



29. K.Okamoto, M.DoI, S.Hirano, K.Aota, H.Okamura, Y.Aono, T.C.Ping: 3rd International Symposium on Friction Stir Welding, Kobe, Japan, Sepmtember, (2001)
30. 伊葉 正: 溶接技術, March, (2001), 111-115 (in Japanese)
31. S. Fukumoto, H.Tsubakino, K. Okita, M.Aritoshi and T.Tomita: Material Science and Technology 14 (1998) 333



- 정승부(鄭承富)
- 1959년생
- 성균관대학교 신소재공학과
- 마이크로조이닝, 금속간화합물 생성 및 성장, 마찰교반접합
- e-mail : sbjung@skku.ac.kr