

## 압력용기용 강재 및 용접재료 현황 및 동향

한 일 욱 · 흥 순 택

### Development Trend of Steel and Welding Consumables for Pressure Vessel

Il Wook HAN and Soon Taik HONG

#### 1. 서 론

최근 BRICS를 위시한 신흥국가들의 급속한 산업화와 기술 고도화 추세에 따라 압력용기용 강재의 고기능성, 친환경, 내구성 등에 대한 요구가 증대되고 있다. 액화가스 및 원유정제, 원자력, 화력 플랜트 등 에너지 산업의 발달과 더불어 Table 1과 같이 저온 또는 고온, 고압하에서 제품을 안전하고 효율적으로 생산하거나 운반 및 운전할 수 있는 설비의 제작이 필요하게 되었다. 저온에서 액화시키거나 액화시킨 물질을 저장하고 수송하는 설비가 점차 대형화되어 감에 따라 저온용 용기에 쓰이는 재료의 강도와 저온인성에 대한 요구성능도 매우 엄격해지고 있다. 또한 Steam의 사용 온도와 압력이 점차 높아지고 이들이 적용되는 플랜트도 대형화, 다양화함에 따라 이러한 목적에 적합한 압력용기강을 적용한 구조물의 용접에 있어서의 용접부의 신뢰성 확보는 국내중공업의 발전과 함께 필수적으로 요구

되는 중요한 사항이다. 보일러 시스템과 같은 구조용강재에 있어서는 생산성, 가공성, 용접성 및 Creep 강도에 따른 열피로 특성 등과 같은 인자들이 고려되어야만 하는데, 이를 위해 기존의 내열강에 W, Cu, Ni 등의 원소를 추가로 첨가하여 크립강도와 인성을 증가시킨 강들이 적용되고 있다.

이러한 배경하에 약 20여년 전부터 저온용 Al-Killed 강에서 9%Ni강 및 9%Cr-1%Mo용 중고온용강의 내열합금에 이르기까지 저,중,고온용 강재들의 고품질화 및 다양화가 꾸준히 이루어져 왔다. 9~12%Cr, 0.17~0.25%C의 마르텐사이트계 내열강의 경우 500~600°C의 온도에서 사용 가능했던 기존의 오스테나이트 스테인리스강의 대체 재료로서 경제적이면서도 우수한 열피로 강도와 내산화성 등의 장점을 지닐뿐 아니라 9~12%Cr 마르텐사이트 내열강은 높은 고온 Creep 강도를 가지고 있다. 이는 Pipe나 보일러의 강재 적용두께를 기존의 Cr-Mo강보다 더 낮출 수 있어서 구조물 제작 비용과 운전비용을 낮출 수 있기 때문에 발전산업에서 폭 넓게 적용이 고려될 수 있다<sup>1)</sup>. 그러나 이런 장점들은 구조물에서 용접부의 완전함을 전제로 했을 때만 가능해진다.

현재 저온용 압력용기강의 용접은 주로 생산성이 높은 플럭스 코어드 아크용접(Flux Cored Arc Welding : FCAW) 및 서브머지드 아크용접(Submerged Arc Welding : SAW)을 위주로 개발 및 적용이 진행되어 왔지만 내열강용 압력용기강의 아크용접은 피복 아크용접(Shield Metal Arc Welding : SMAW)와 가스 텅스텐 아크 용접(Gas Tungsten Arc Welding : GTAW) 프로세스가 주종이었으나, 용접부 신뢰성 확보와 함께, 플랜트의 생산성 향상을 고려해 능률이 뛰어난 FCAW 및 SAW의 적용을 통한 플랜트의 저 코스트화를 위한 연구도 활발히 진행되고 있다<sup>2)</sup>. 본 고에서는 사용환경에 따라 구분하여 압력용기용강을 소개하

**Table 1** Relationship between design temperature and pressure vessel steels

| Design temperature(°C) | Steels                                                |
|------------------------|-------------------------------------------------------|
| -273 ~ -196            | Stainless steel                                       |
| -196 ~ -10             | Al killed steel, Fe-Ni steel                          |
| -10 ~ 350              | Plain carbon steel, Si-Mn steel, Mn-Mo-Ni steel       |
| 350 ~ 450              | Fine grained steel, Mn-Mo steel, Mn-Mo-Ni steel       |
| 450 ~ 500              | C-Mo steel, 2.25Cr-1Mo steel                          |
| 500 ~ 550              | 1Cr-0.5Mo steel, 1.25Cr-0.5Mo steel, 2.25Cr-1Mo steel |
| 550 ~ 600              | 2.25Cr-1Mo steel, Austenitic stainless steel          |
| Above 600              | Austenitic stainless steel                            |

고 시장의 요구사항을 바탕으로 한 강재의 개발현황 및 이들 강재의 적용에 사용되는 각종 용접 시공에 적합한 용접재료의 선택 및 개발현황에 대해서 간략하게 소개하고자 한다.

## 2. 압력용기강의 분류 및 규격

### 2.1 압력용기강의 분류

압력용기로 간주되는 기기의 종류는 매우 다양하며, 용도로 분류하면 보일러, 반응기기, 축압기, 저장조, 호울더, 증류탑, 열교환기 등이 있다. 사용되는 압력은 진공으로부터 1,000기압에 이르기까지 다양하며 사용 온도도 Table 1에 보여주는 것과 같이 액체 He의 저장에 가능한  $-273^{\circ}\text{C}$ 에서  $600^{\circ}\text{C}$  이상의 고온에 까지 사용되기도 한다<sup>3)</sup>.

### 2.2 압력용기강의 규격

압력용기강의 기본규격은 ASTM A20을 따르며 총 압력용기강 36종을 망라하고 있다<sup>4)</sup>. 최근 철강기술의 발달에 의해 규격에도 상당한 변화가 초래되었다. 기존에는 Slab두께에 대한 plate의 총 압하비 요구조건이 3:1이었으나 A299, A515, A516, A537, A662, A737 등 두께 75mm 이상의 강에 대해서는 Slab두께에 대한 plate의 총 압하비 요구조건이 2:1로 완화되었다. 이와 같은 완화된 압하비의 적용을 위해서는 구입자가 동의하여야 하고, S와 같은 불순물의 농도를 더욱 엄격하게 관리해야 함은 물론 강판의 두께방향 인장 시험과 초음파 탐상조건의 강화에 의한 내부흠 관리를 하여야 한다. 또한 압력용기용 강 중에서 사용범위가 가장 광범위한 강종 중의 하나인 A516강의 경우 0.5인치 이하 두께를 갖는 박물재의 경우를 제외하고 주로 노말라이징 열처리 강재가 사용되었으나 극후물( $\sim 200\text{mm}$  두께), 저온인성( $-49^{\circ}\text{C}$ ), 내 HIC(Hydrogen Induced Cracking) 특성, 장시간 PWHT(Post Weld Heat Treatment) 보증 조건 등의 다양하고 까다로운 요구물성 조건에 따라 그 제조법 및 성분도 변화되었다. 노말라이징 열처리 방법에서 NACT(Normalizing and Accelerated Cooling + Tempering)를 수용하는 방향으로 변화되었고, Mn의 허용 범위도 Mn 0.06% 증가에 따라 C의 함량은 0.01% 감소하는 조건하에 최대 1.2%에서 1.5%까지 확대되었다. 또한 최근에는 압력용기강에도 가속냉각 기술을 적용할 수 있는 강종 규격인 ASTM A841강 보완되어 용접성과 저온인성이 향상된 강재의 적용을 기대할 수 있게 되었다.

## 3. 압력용기강의 개발방향

### 3.1 저온용 강재

저온용 강재는 보통  $-10^{\circ}\text{C}$ 미만의 온도 구역에서 사용되는 소재로 크게 저탄소 Al killed강과 Ni강으로 나누어진다. 저탄소 Al killed 강과 다양한 Ni함량(2.5~9%)을 포함하는 Ni첨가강의 경우 P, S, N등과 같은 불순물 원소를 제어하고 결정립 미세화에 의한 저온인성 개선이 요구된다. 그리고 고가인 Ni함량을 Mn 등과 같은 저가의 합금원소로 대체할 수 있는 방향으로 개발이 전개될 것으로 기대된다.

### 3.2 중상온용 강재

중상온용 강재는 Table 2에 나타낸 것과 같이 종류가 많고 그에 상응하는 요구하는 물성 및 성능도 매우 다양하다. A516강의 경우 압력용기의 대형화에 따라 두께 100mm 이상의 극후강재의 사용이 확대되고 있으며, 용접성과 용접부 물성의 확보를 위해 탄소당량을 0.41이하 및 18시간 이상의 장시간 PWHT 보증을 요구하는 경우도 있고, 한냉지역에 사용이 확대되어짐에 따라  $-49^{\circ}\text{C}$  저온인성의 확보, Sour 환경에 대한 저항성을 갖는 HIC 및 SSC(Sulfide Stress Cracking) 보증 등의 복합 다기능을 갖는 강재의 요구가 점차 증대되고 있다. 이러한 복합적인 물성의 확보를 위해 미세한 합금성분조정, 불순물 원소의 저감, NACT와 같은 새로운 제조 프로세스의 도입 등이 필요하다.

### 3.3 고온용 강재

중고온용 강재는 보통  $350^{\circ}\text{C}$  이상의 온도 구역에서 사용되는 소재로  $400^{\circ}\text{C}$ 이하의 사용조건에서는 크립 특성을 요구하지 않으나 그 이상의 온도에 사용되는 강재의 경우는 크립 특성을 요구한다.

고온에서 장시간 사용하는 경우 소려취화 현상에 유의할 필요가 있다. 소려취화를 예상할 수 있는 방법들이 많이 제시되어 있으나<sup>5)</sup> ASTM A387에 규격화되어 있는 Step Cooling이라 불리는 소려취화 가속화 시험법이 널리 사용되고 있다.

최근 중고온용 강재도 후물화와 더불어  $-30^{\circ}\text{C}$  저온인성과 동시에 용접부 물성의 확보를 위해 장시간 PWHT 보증을 요구한다. 특히 Cr-Mo강의 경우 P, Sn과 같은 불순물 함량을 제한하는가 하면 용접 이음부에서도 불순물 함량을 제한하고 있다. 이러한 까다로운 물성의 확보를 위해 미세한 합금성분조정 및 성분의 협폭제어, P와 Sn 등의 불순물 원소의 저감, NACT와 같은 새로

Table 2 각종 저합금 내열강 ASTM 규격화 화학 성분

| 강 종                 | 대표 규격                                                              | 화학 성분(%)                |           |           |        |        |           |           |                                     |       |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------|-----------|-----------|--------|--------|-----------|-----------|-------------------------------------|-------|
|                     |                                                                    | C                       | Si        | Mn        | P      | S      | Mo        | Cr        | Ni                                  | V     |
| C - 0.5Mo           | A204 G.A<br>G.B<br>G.C                                             | ≤0.25<br>≤0.27<br>≤0.28 | 0.15/0.30 | ≤0.90     | ≤0.035 | ≤0.040 | 0.45/0.66 | -         | -                                   |       |
| 0.5Cr-0.5Mo         | A387 G .2 C1.1<br>C1.2                                             | ≤0.12                   | 0.15/0.30 | 0.55/0.8  | ≤0.035 | ≤0.040 | 0.45/0.60 | 0.50/0.80 | -                                   |       |
| 1Cr-0.5Mo           | A387 G.12 C1.1<br>C1.2                                             | ≤0.17                   | 0.15/0.3  | 0.4/0.65  | ≤0.035 | 0.040  | 0.45/0.60 | 0.8/1.15  |                                     |       |
| 1.25Cr-0.5Mo        | A387 G.11 C1.1<br>C1.2                                             | ≤0.17                   | 0.50/0.80 | 0.4/0.65  | ≤0.035 | ≤0.035 | 0.45/0.65 | 1.00/1.50 |                                     |       |
| 2.25Cr-1Mo          | A387 G.22 C1.1<br>C1.2                                             | ≤0.15                   | ≤0.5      | 0.3/0.6   | ≤0.035 | ≤0.035 | 0.90/1.10 | 2.00/2.50 |                                     |       |
| 3Cr-1Mo             | A387 G .21 C1.1<br>C1.2                                            | ≤0.15                   | ≤0.50     | 0.30/0.60 | ≤0.035 | ≤0.035 | 0.90/1.10 | 2.0/2.5   |                                     |       |
| 5Cr-0.5Mo           | A387 G1.5 C1.1<br>C1.2                                             | ≤0.15                   | ≤0.50     | 0.30/0.60 | ≤0.040 | ≤0.030 | 0.45/0.65 | 4.0/6.0   |                                     |       |
| 7Cr-0.5Mo           | A182 F7                                                            | ≤0.15                   | 0.50/1.00 | 0.30/0.60 | ≤0.030 | ≤0.030 | 0.44/0.65 | 6.0/8.0   |                                     |       |
| 9Cr-1Mo             | A182 F9                                                            | ≤0.15                   | 0.50/1.00 | 0.30/0.60 | ≤0.030 | ≤0.030 | 0.90/1.10 | 8.0/10.0  |                                     |       |
| Mn-Mo 및<br>Mn-Mo-Ni | A302 A                                                             | ≤0.25                   | 0.15/0.70 | 0.95/1.30 | ≤0.035 | ≤0.040 | 0.45/0.60 |           |                                     |       |
|                     | A533 T.A C1.1.2.3<br>T.B C1.1. 2.3<br>T.C C1.1.2.3<br>T.D C1.1.2.3 | ≤0.025                  | 0.15/0.30 | 1.15/1.50 | ≤0.035 | ≤0.040 | 0.45/0.60 |           | 0.40/0.70<br>0.70/1.00<br>0.20/0.40 |       |
| Ni-Cr-Mo-V          | A508 C1.1                                                          | ≤0.35                   | 0.15/0.40 | 0.40/1.05 |        |        |           | ≤0.25     | ≤0.40                               |       |
|                     | C1.1a                                                              | ≤0.30                   | 0.15/0.35 | 0.70/1.35 |        |        | ≤0.10     | ≤0.25     | ≤0.40                               |       |
|                     | C1.2                                                               | ≤0.27                   | 0.15/0.40 | 0.50/1.00 | ≤0.025 | ≤0.025 | ≤0.10     | 0.25/0.45 | 0.50/1.00                           |       |
|                     | C1.2a                                                              | 0.15/0.25               | 0.15/0.40 | 0.50/1.00 |        |        | 0.55/0.70 | 0.25/0.45 | 0.50/1.00                           | ≤0.05 |
|                     | C1.3                                                               |                         | 0.15/0.40 | 1.20/1.50 |        |        |           | ≤0.25     | 0.40/1.00                           | ≤0.05 |

운 열처리 방법의 도입 등이 필요하다.

#### 4. 압력용기용 용접재료개발

##### 4.1 저온용 강재용 용접재료

산업사회의 발달과 함께 저온에서 가스나 액체상태의 물질을 생산하거나 이를 운반하는 일이 매우 빈번해지고 있으며 기체를 저온에서 액화시켜 물질을 한번에 생산, 저장, 이송 하는 복합단일화 체제로 진보하고 있다. 최근에는 온난한 지역에서의 LNG나 원유의 고갈 및 이들 자원들에 대한 가격 상승 등으로 극지나 심해까지 채굴을 실시하게 된다. 이에 따라 이들을 처리하는 선박이나 구조물에 해당되는 압력용기 및 Tube들은 혹독한 저온 환경하에서도 저온인성이 확보되고 용접결합 등이 없는 건전한 용접부에 대한 보증 요구가 한층 중요시 되고 있다.

저온용강의 용접에는 피복 아크용접(Shielded Metal Arc Welding), 서브머지드 아크용접(Submerged Arc Welding), 가스실드아크용접(Gas Shield Arc Welding: CO<sub>2</sub>, MAG, MIG, TIG)법 등이 오래 전부터 활용되고 있으며 최근 플라즈마 및 레이저를 이용한 용접도 채택되어지고 있는 추세이다<sup>6)</sup>.

용접재료의 선택에 있어서는 해당 저온용강의 종류, 강도, 열처리의 유무, 관두께와 구조물의 사용 목적에 따라 하중, 저온 인성, 내식성, 기밀성, 능률성, 경제성 등을 종합적으로 충분히 고려하여야만 한다. 강재에 대응하는 용접재료는 각각의 규격에 근거하여 일차적으로 선정하지만 용접부의 성능은 용접재료의 Flux성분, 재료관리상태, 용접방법, 용접조건(예, 후열처리, 용접전류, 용접속도 등), 용접자세, 용접패스 및 적용방법 등에 의하여 영향을 받게 되므로 이러한 요인들에 대하여 사전에 충분히 주의하고 확인한 후 시공해야 한다.

##### 4.1.1 Al킬드강용 용접재료

-10℃ 미만의 저온용 Al킬드강의 경우는 모재와 유사한 성분만으로는 용착금속의 저온 충격인성을 만족시킬 수가 없게된다. 피복아크 용접봉의 경우 -20℃까지는 C- Si- Mn계 고장력강용인 AWS A5.1(탄소강용 피복아크용접봉 규격)의 E7016계 저수소계 용접봉으로, -20℃이하에서는 AWS A5.5(저합금강용 피복아크 용접봉 규격)의 1~4%의 Ni를 함유한 저수소계 용접봉인 E8106-C1, -C2, -C3, -C4 또는 E8016- G계를 주로 적용하고 있다<sup>6)</sup>. 특히 하향 수평 필렛용접도 많이 적용되기 때문에 Al킬드강의 경우 E7018,

E7024, E7017, E7028계의 고능률의 용접봉이 사용되어지기도 한다. 저온용강을 비교적 저입열로 용접하게 되면 용접금속중의 세립역이 증가하므로 고인성의 용접부를 얻을 수 있게 된다.

서브머지드 아크용접은 시공특성상 높은 생산성을 보장해 주지만 반대로 입열량이 증가하게 되므로 저온용강 용접부의 강도와 인성저하의 위험성이 높아지게 된다. 모재와의 희석도 크므로 용착금속의 화학성분은 모재의 영향을 고려해 두어야 한다. 일반적으로 모재가 용접재료보다 합금성분이 적은 경우가 대부분이므로 모재 희석현상은 용착금속의 인성확보에 악영향을 끼치는 경우가 많다. 따라서 저온용강의 용접에서의 생산성 향상은 용접HAZ부의 대립화에 따른 인성저하 문제 외에도 희석 등에 의해 입열을 증대 시키는데 한계가 발생하게 된다. 또한 개선내 용접을 실시할 경우, 초충부 용입 특성 및 슬래그 박리성이 저하되므로 이러한 슬래그 박리성 문제와 아크 안정성을 충분히 향상시킨 염기성계의 용접재료의 사용 및 개발이 필요하게 된다. 현재 국내의 저온용강의 서브머지드 아크용접용 용접재료로서는 AWS A5.17의 F7A(P)6-EM12(K) 또는 F7A(P)8-EH14 등이 주로 사용된다. 인성확보를 위해 Ti, B 또는 이들을 산화물 형태로 첨가하거나 소량의 Ni 등을 함유시켜 용착금속부의 인성을 증가시킨 용접재료가 판매되고 있다. 저온에서의 충격 및 파괴인성을 한층 더 보충하기 위해서는 피복 아크 용접봉에서와 마찬가지로 용착금속부에 Ni이 일정량(1%) 함유된 AWS A5.23의 F7A(P)8-ENi1, -ENi2를 만족하는 Ni 함유 SAW용 솔리드 와이어를 염기성계 Flux와 조합해 적용하거나 와이어 내부에 Ni성분을 첨가한 Composite Wire를 용융형 플럭스와 조합해 적용하는 용접재료도 소개되어 있다<sup>7)</sup>. 서브머지드 아크용접은 용접과 이어와 플럭스를 조합해서 용접하게되므로 용접부의 강도와 인성은 실제 용접현장에서의 시공요건 등을 잘 검토하여 용접재료를 선정해야 한다. 저온용강의 GMA용접와이어로서는 CO<sub>2</sub>를 보호가스로 하는 플럭스 코어드 와이어가 가장 널리 사용되어지고 있다. 비교적 저렴한 시공비, 양호한 용입 특성 및 비드형상 뿐만 아니라 뛰어난 전자세 용접성능을 보유하고 있어 목적하는 고품질과 고생산성을 달성 할 수가 있다. 용접부 요구 성능에 따라 용접 와이어의 Core내부에 다양한 합금원소 및 Flux성분의 조정도 가능하다. 용착금속중에 1.0%~3.0%정도의 Ni 및 소량의 Ti, B를 함유시킴으로서 -60℃까지의 저온충격인성 및 -40℃ 저온 CTOD을 만족시키는 용접재료의 개발이 활발히 진행되고 있다. 저온용강용 저합금 플럭스 코어드 와이어는 AWS A5.29의 E81T1 -Ni1, -Ni2 및 -K2, -K3에 해당되는 티타나아계 플럭스 코어드 와이어가 가장 널리 사용되어지고 있다. MAG 용접 프로세스를 적용하는 염기성계 플럭스 코어드 와이어의 경우, 보호가스로 Ar에 CO<sub>2</sub>를 5~25% 혼합하여 용접하므로 아크 안정성과 용입성의 확보가 어느정도 가능한 AWS A5.20 E71T-5계 용접재료와 1.0%~3.0%정도의 Ni를 함유한 AWS A5.29 E81T5-Ni1M, -Ni2M 및 E81T5-K2M, -K3M 등의 용접재료가 적용된다<sup>6,7)</sup>. 100%CO<sub>2</sub>가 아닌 혼합가스를 보호가스로 사용하는 경우 앞서 언급한 바와 같이 100% CO<sub>2</sub>용접에 비해 용접금속중의 산소함량이 감소하게 되어 저온충격인성은 유리하지만 표면활성원소의 상대적 부족으로 인한 용융Pool의 용입부족을 충분히 감안해서 적합한 보호가스를 선택해야 한다.

어난 전자세 용접성능을 보유하고 있어 목적하는 고품질과 고생산성을 달성 할 수가 있다. 용접부 요구 성능에 따라 용접 와이어의 Core내부에 다양한 합금원소 및 Flux성분의 조정도 가능하다. 용착금속중에 1.0%~3.0%정도의 Ni 및 소량의 Ti, B를 함유시킴으로서 -60℃까지의 저온충격인성 및 -40℃ 저온 CTOD을 만족시키는 용접재료의 개발이 활발히 진행되고 있다. 저온용강용 저합금 플럭스 코어드 와이어는 AWS A5.29의 E81T1 -Ni1, -Ni2 및 -K2, -K3에 해당되는 티타나아계 플럭스 코어드 와이어가 가장 널리 사용되어지고 있다. MAG 용접 프로세스를 적용하는 염기성계 플럭스 코어드 와이어의 경우, 보호가스로 Ar에 CO<sub>2</sub>를 5~25% 혼합하여 용접하므로 아크 안정성과 용입성의 확보가 어느정도 가능한 AWS A5.20 E71T-5계 용접재료와 1.0%~3.0%정도의 Ni를 함유한 AWS A5.29 E81T5-Ni1M, -Ni2M 및 E81T5-K2M, -K3M 등의 용접재료가 적용된다<sup>6,7)</sup>. 100%CO<sub>2</sub>가 아닌 혼합가스를 보호가스로 사용하는 경우 앞서 언급한 바와 같이 100% CO<sub>2</sub>용접에 비해 용접금속중의 산소함량이 감소하게 되어 저온충격인성은 유리하지만 표면활성원소의 상대적 부족으로 인한 용융Pool의 용입부족을 충분히 감안해서 적합한 보호가스를 선택해야 한다.

#### 4.1.2 9%니켈강의 용접재료

9%니켈강은 육상식 LNG 저장탱크 건설에 오랫동안 적용되어 왔다. 최근에는 Al 합금 및 스테인리스강과 더불어 해상 LNG Tank Carrier의 저장 Tank제작 소재로도 주목 받고 있다. 9%Ni강의 용접에는 Table 3과 같이 고가의 인코넬 및 하스텔로이계의 Ni합금계 용접재료가 주로 적용되어져 왔다. 우리나라의 육상식 9%Ni강 LNG저장 탱크의 제작에 사용된 용접재료를 보면 피복 아크 용접봉은 Ni계인 AWS A5.11의 ENiCrFe-2, -4 및 ENiCrMo-6계로 보수용접을 포함한 수직 자세용접에 약 20 ~ 30% 사용되고 있고, Fig. 1과 같이 9%Ni 전용의 Flux 와 ENiMo-8 또는 ENiCrMo-3계 와이어를 조합해 수평 원주 전용 서브머지드 아크 용접으로 저장탱크를 대부분 제작하고 있

Table 3 9%Ni강용 용접재료별 물성

| Welding Wire     | 0.2% Y.S (MPa) | T.S(MPa) | E.L(%) | R.A(%) | vE <sub>-196℃</sub> (J) |
|------------------|----------------|----------|--------|--------|-------------------------|
| 50Ni-15Cr-Mo     | 410            | 630      | 36     | 38     | 72                      |
| 70Ni-15Cr-Mo-Nb  | 420            | 690      | 45     | 44     | 75                      |
| 70Ni-13Cr-Nb-Mn  | 460            | 780      | 38     | 40     | 73                      |
| 60Ni-15Cr-15Mo-W | 490            | 790      | 42     | 42     | 52                      |

Table 4 대표적인 Ni합금의 특성

| 합금명          | 밀도<br>(g/cm <sup>3</sup> , 292K) | 용점(K)     | 열팽창 계수<br>(μ m/m·K, 273~373K) | 열전도도<br>(cal/cm·s·k, 273~373K) | 전기저항<br>(μ Ω·cm, 293K) |
|--------------|----------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------------------|------------------------|
| Nickel 200   | 8.89                             | 1708~1718 | 13.3                          | 0.145                          | 9.5                    |
| Monel 400    | 8.83                             | 1573~1623 | 13.8                          | 0.052                          | 51.0                   |
| Inconel 600  | 8.43                             | 1627~1686 | 13.3                          | 0.037                          | 103.0                  |
| Hastelloy-B  | 9.24                             | 1575~1641 | 10.0                          | -                              | 135.0                  |
| Hastelloy-C  | 8.94                             | 1538~1616 | 11.3                          | -                              | 130.0                  |
| Incolloy 800 | 8.02                             | 1630~1658 | 14.2                          | 0.026                          | 99.0                   |
| Incolloy800  | 7.87                             | 1809      | 13.0                          | 0.142                          | 13.0                   |



Fig. 1 육상식 LNG Tank의 Horizontal SAW용접

다<sup>8)</sup>. 70Ni-13Cr-Nb-Mn계 인코넬 용접재료는 기계적 성능 및 X-선 성능이 뛰어나고 용착금속의 강도도 비교적 높은 특성을 나타낸다. 60Ni-15Cr-15Mo-W계 하스텔로이계의 용접재료는 용착금속의 강도가 높고 내균열성이 매우 우수한 특성을 가지지만 기지가 오스테나이트 조직이므로 용접부의 고온균열을 방지하기 위해서는 용접시 용접재료 운봉(Weaving)을 최소화하고 용접 크레이트 처리를 실시하여 고온균열을 방지해 주어야한다. 9%Ni강과 용접재료인 고Ni계 합금은 화학

성분이 크게 다르므로 모재의 희석정도에 따라 용접금속의 성능이 영향을 받게 된다. 즉 모재의 희석률이 높을수록 용접금속중의 합금성분이 저하하기 때문에 필요로 하는 물성을 보증하기 위해서 지나친 모재의 희석을 제어해 주어야 한다. 또한 고Ni계 용접재료는 용융점이 9%Ni강에 비해 약 150℃ 낮으므로 (Table 4참조) 용입성능이 저하하고, 특히 전자세 용접에서는 용융 Pool의 유지가 어려우므로 비드가 열악해지게 된다. 이에 따라 TIG나 MIG 용접인 경우 용접와이어 직경을 작게하거나 용접전류를 낮추어 줄 필요가 있다. 또한 자성을 띄기 쉬우므로 DC로 용접시 아크 쏠림 등에 의한 용합불량이 발생 될 수 있으므로, 50가우스 미만으로 탈자처리에 주의를 기울여야 한다<sup>8,9)</sup>.

4.2 중,고온 강재용 용접재료

중고온 압력강재에 사용되는 용접재료는 Fig. 2와 같이 주로 저합금 내열강용 용접재료로 일반 500MPa급 용접재료에 함유된 원소(C, Si, Mn)에 Cr, Mo, Ni, V 등의 내열성을 향상시키는 합금 원소들을 첨가한 소재가 대부분을 이루고 있다<sup>6,9,11)</sup>. 석유화학 Plant, 발

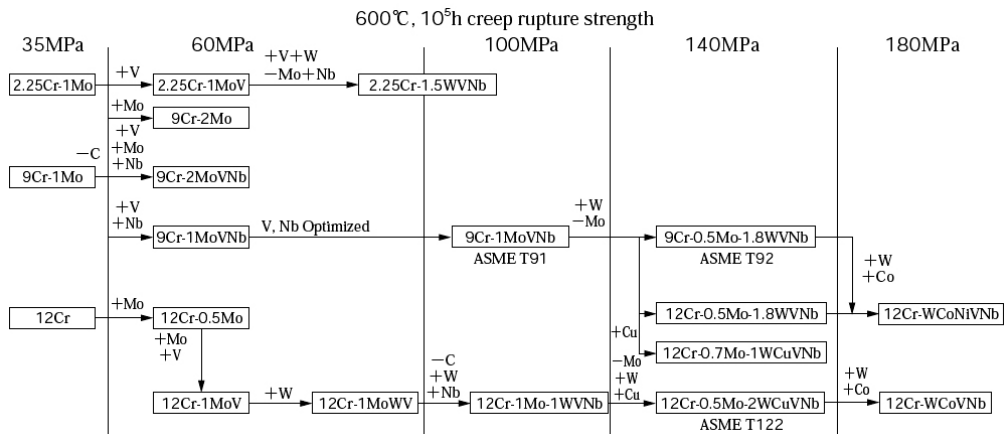


Fig. 2 화력발전 보일러용 Ferritic계 내열강 개발 개요도

전용 보일러 등 고온 고압하에 사용 되는 각종 압력용기 및 보일러용 강재에 적용되는 용접재료의 요구 특성은 1) 기계적 성질 (강도, 인성, 내 Creep성 등)이 우수 2) 안정한 아크성능 및 양호한 비드형상 확보 3) 열처리에 의한 취화(소려 취성이)최소화 4) 내균열성, 가공성이 우수한 용접부의 성능확보 5) 사용환경 하에서의 우수한 내산화성을 제공할 수 있어야 한다. 저합금계 내열 압력용기강의 용접재료는 C-0.5%Mo계, Cr - Mo계, Mn-Mo-Ni & Ni-Cr-Mo-V(원자력 압력 용기)계로 크게 나누어 분류할 수 있다. Mn-Mo-Ni계 강의 용접재료는 고온, 고압하에 장시간 원자로에 노출 시 취화현상이 일어나므로 강재 및 용접부의 인성 확보가 중요하여, Cu, P, V, Sn 등과 같은 미량 성분에 대해서도 관리가 엄격해야 한다<sup>12)</sup>. 특히 용접금속은 Quenching - Tempering 열처리 등을 통해 형성된 모재에 대비해 상당한 차이가 있으므로 용접부의 강도와 인성확보가 최우선으로 선결되어야만 한다. 이러한 기술적인 한계를 극복하기 위해서는 기존의 용접재료인 Mn- 0.5Mo Base에 인성향상을 목적으로 Ni이 첨가된 용접재료가 개발되어 있다<sup>6,11)</sup>.

500℃ 후판 내열 합금용으로 인장강도 550~690MPa, 항복강도 345MPa, 연신율 20% 이상이 요구되는 내열강 부품소재용인 Mn- 0.5Mo- 0.5Ni계 피복 아크 용접용 용접재료는 CaO, CaF<sub>2</sub>, Fe-Si를 주요 Flux 성분으로 하는 저수소계로 AWS A5.5 E8018-NM1 또는 전용의 E9016-G 타입이 개발되어져 있으며, 일본 및 유럽의 경우 MIG 나 TIG 용접재료로 ER80S-G 및 ER90S-G를 상용화 하였으며, SAW용 용접재료도 AWS A5.23의 F9P4-EG-G용 용접재료가 개발되어 있다. Mn-Mo-Ni계 이외에도 Ni-Cr-Mo-V, C-Mo,

Cr-Mo계 등 대부분의 강재에 대응하여 용접재료들이 개발 및 상용화되어 있다. 중,고온 강재용 용접재료는 다음과 같은 몇 가지 관점을 고려해 선택한다. 일반적으로 동일 강종의 용접일 경우 사용 모재와 가능한 동일한 조성 및 물성을 가진 용접재료를 선정하며, 특히 용착금속내 입계 편석에 따른 취화 방지를 위해 P, Sb, Sn, As 등의 억제가 필요하다. 내열강의 경우 Table 5의 E9016-B3 피복봉에서 예와 같이 X-bar값((10P + 5Sb + 4Sn + As)/100 (ppm))과 J-Factor 값((Mn + Si) (P + Sn) × 10<sup>4</sup> (%)) 을 제어해 주어야 하므로 합금과 불순물이 제어된 용접재료 설계가 중요하다. 또한 장시간 후열처리시에도 Temper embrittlement 가 발생하지 않도록 성분 설계를 해 주어야한다. 이중재의 저합금계 내열강들 간의 용접을 시행할 경우에는 사용 온도 및 적용 분위기등에 따라 합금성분 함량이 낮거나 상대적으로 낮은 강도를 가진 용접 재료를 기준으로 선정하는 것이 일반적이다<sup>12,13)</sup>. 하지만 Cr 함량이 높은 강재와의 접합인 경우(예 : 탄소강 + 9%Cr - 1Mo강 등)에는 Table 6을 참조하여 용접시 예, 후열처리를 실시하는 과정에서 모재와 용접금속의 경계부에 탈탄 및 침탄층이 생성되게 되면 강도상의 문제가 발생하게 된다. 이러한 경우 용접재료는 탈,침탄층의 형성을 방지하기 위해 C 고정화 원소인 V, Nb 등을 소량 첨가한 저수소계의 용접재료를 선택하는 것이 효과적이다.

4.3 화력발전 보일러용 9%~12%Cr계 용접재료

1970년대부터 전력산업에서 Steam의 온도와 압력이 높아짐에 따라 페라이트 내열강 재료의 개발에 대한 요구가 증가하고 있다<sup>13)</sup>. 차세대 초초임계압(Ultra Super Critical ; USC) 화력발전 시스템은 21세기 발전산업에서 요구하는 특성인 대용량/고효율/환경친화형을 만족시키는 발전시스템으로 Fig. 3에 나타난 바와 같이 발전소의 증기온도는 593℃이상 이고, 기존의 증기온도보다 55℃더 높기 때문에 기존의 내열 용접재료보다 한 단계 더 높은 신재료의 적용이 불가피하다. 보일러와 같은 구조용재의 재료 선정에 있어서는 생산성, 가공성, 용접성과 Creep 강도에 따른 열피로 특성 등과 같은 인자들이 고려 되어야만 하는데, 최근에는 기존의

Table 5 Typical chemical composition of E9016-B3 (5Ø)weld metal by AC welding in the flat position (%)

|      |       |       |       |          |             |      |
|------|-------|-------|-------|----------|-------------|------|
| C    | Si    | Mn    | P     | S        | Ni          | Cr   |
| 0.11 | 0.27  | 0.79  | 0.008 | 0.006    | 0.19        | 2.42 |
| Mo   | Sb    | Sn    | As    | X-bar(1) | J-factor(2) |      |
| 1.03 | 0.002 | 0.003 | 0.002 | 10       | 17          |      |

Table 6 저합금 강의 예열 및 중간 온도

|           |              |            |           |           |           |           |           |
|-----------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| C-0.5Mo   | 1.25Cr-0.5Mo | 2.25Cr-1Mo | 3Cr-1Mo   | 5Cr-0.5Mo | 7Cr-0.5Mo | 9Cr-1Mo   | Mn-Mo-Ni  |
| 100 ~ 200 | 150 ~ 300    | 200 ~ 350  | 200 ~ 350 | 250 ~ 350 | 250 ~ 350 | 250 ~ 400 | 150 ~ 250 |

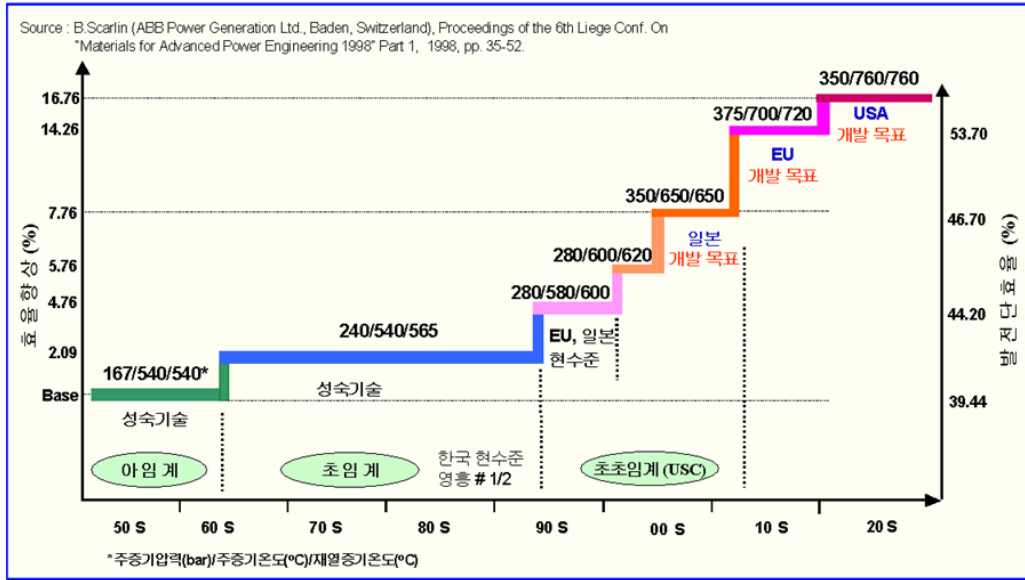


Fig. 3 연도별 주 증기의 온도 및 압력 변화

내열강에 W, Cu, Ni 등의 원소를 첨가하여 크립강도와 인성을 증가시킨 강들이 활발히 개발되고 있다<sup>14)</sup>.

9Cr~12Cr-1Mo modified강 용접의 주Process는 현재 SMAW와 GTAW가 주종을 이루고 있지만, 생산성이 낮아 고능률의 SAW, FCAW의 적용을 위한 연구가 많이 진행되고 있다<sup>19)</sup>. 미국의 경우 USC화력발전소용 터빈케이싱 소재의 기술개발을 EPRI(Electric Power Research Institute)의 주도에 의해 593°C의 증기온도에 적용할 목적으로 합금성분 중 V, Nb, N 등이 조정된 9%Cr강에 대하여, 크리프, 저주기 피로, 장시간 시효취성 등의 소재성능 및 용접성에 대한 검토가 1992년 완료되어 EPRI RP1403-15에 이미 정리한 바 있고<sup>17,18)</sup>, 용접성에 대한 검토도 SAW, SMAW, GTAW, GMAW에 대해 실시되었다. 그러나 사용온도가 600°C 이상일 경우 크리프 강도가 급격히 낮아지는 문제점이 있어 이를 개선할 방안으로 B의 첨가, 석출강화 원소인 V와 Nb양의 최적화, 그리고 고용강화 원소인 Mo를 W로 치환하는 방법도 연구되고 있다. 이상과 같이 9%Cr, 12%Cr강 및 Modified강의 Base Metal에 관련된 크립특성, 저주기 피로특성, 크립-피로 특성 들은 Fig. 4와 같이 어느 정도 데이터가 현재 마련되어 있으나, 이들의 용접부와 용접재료에 대한 자료는 최근에 들어서야 연구가 활발히 진행중인 실정이다. Table 7에서 보는 바와 같이 일본의 Sumikin Welding Industries, Ltd, 독일의 Thyssen Krupp Stahlunion GmbH와 같은 몇몇 용접재료 생산 업체에서 이 분야의 기술을 보유하고 있는 것으로 보인다<sup>18,19)</sup>.

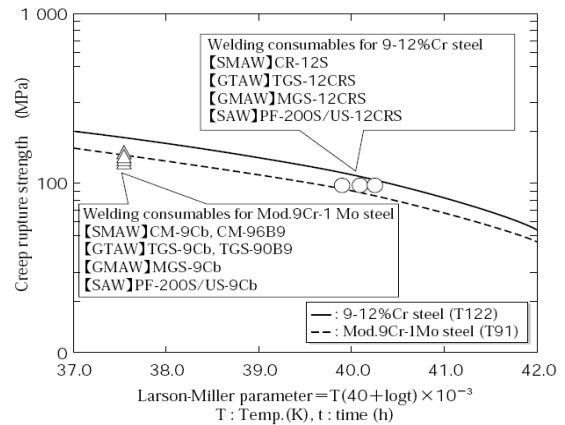


Fig. 4 Creep rupture strength of welding consumables for high Cr ferritic steels (3)

### 5. 결 론

압력용기에 사용되는 강재는 -10°C미만의 온도 구역에서 사용되는 Al-Kill강과 -196°C의 극저온용 저장탱크에 사용되는 9%Ni강에서 내열강용 압력용기에 적용되는 A516 강재 및 9Cr~12Cr-1Mo modified강에 이르기까지 일반 탄소강용과는 달리 실로 다양한 온도와 압력과 사용환경에 노출되어 지게 된다. 최근에는 압력용기의 사용환경이 더욱 가혹화되고 친환경화 설계가 요구되는 추세로, 저온, 고온, 고압환경하의 용접성이 우수한 저합금계강, 고Cr계 내열강재 등에 대한 강종과 용접재료에 대한 국산화 개발 및 신뢰성 확보에 대한 요구들도 점차 엄격화 되고 있다. 특히 이들 강재들의 용접은 구조물의 제작 과정에서 가장 중요한 작업

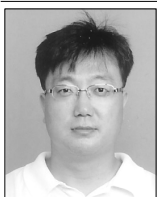
**Table 7** 각 용접 Process별 P92, P122강용 개발 용접재료의 화학성분(wt%)

|                                          | C    | Si   | P     | S     | Mn   | Ni   | Cr    | Mo   | V    | Nb   | W    | Cu   | N    | 비고   |
|------------------------------------------|------|------|-------|-------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| Thyssen<br>Krupp<br>Stahlunion<br>GmbH   | 0.11 | 0.20 |       |       | 0.60 | 0.70 | 8.80  | 0.50 | 0.20 | 0.05 | 1.60 |      | 0.05 | SMAW |
|                                          | 0.10 | 0.30 |       |       | 0.45 | 0.60 | 8.80  | 0.40 | 0.20 | 0.06 | 1.60 |      | 0.04 | GTAW |
|                                          | 0.09 | 0.30 |       |       | 0.60 | 0.60 | 8.70  | 0.43 | 0.20 | 0.06 | 1.60 |      | 0.04 | GMAW |
| Sumikin<br>Welding<br>Industries,<br>Ltd | 0.09 | 0.22 | 0.006 | 0.002 | 0.84 | 0.93 | 10.13 | 0.29 | 0.20 | 0.05 | 1.60 |      | 0.05 | SAW  |
|                                          | 0.09 | 0.32 | 0.010 | 0.002 | 0.52 | 1.13 | 10.16 | 0.29 | 0.19 | 0.03 | 1.41 | 1.49 | 0.04 | SMAW |
|                                          | 0.10 | 0.08 | 0.005 | 0.002 | 1.14 | 0.93 | 10.41 | 0.28 | 0.21 | 0.05 | 1.65 | 1.44 | 0.05 | GTAW |

중의 하나이고, 용접부의 요구 성능 확보와 생산성을 고려해 적합한 용접 프로세스 및 용접재료의 선택 및 개발 그리고 이들에 대한 시공관리가 반드시 적절히 이루어져야만 한다. 이를 위해서는 강재의 개발뿐만 아니라 용접 프로세스에 적합한 용접재료의 국산화 개발 및 이들에 대한 Packaging 보증도 필요하다고 생각된다. 향후에는 국내 소재업체와 시공업체간 공동된 관심사항을 공유해가면서, 압력용기의 제작 및 용접 프로세스 특성에 맞는 소재와 용접재료 개발 및 고품질화 연구가 한단계 성숙하도록 노력해야 할 것으로 생각된다.

**참 고 문 헌**

1. Y. Suwaragi, et al : Development of a high strength low alloy steel for boiler materials, Proceedings of the 2nd international conference of heat resistance materials II, ASM, 1995, 287
2. 대한용접접합학회 : 산업분야별 용접기술, 접접합편람(I) 252
3. 日本鐵鋼協會 : 鐵鋼便覽(第3版) IV, 鐵鋼材料. 81
4. Annual book of ASTM standards(2007), Vol. 01.04
5. 日本鐵鋼協會 : 鐵鋼便覽(第3版) IV, 鐵鋼材料. 92
6. Kobelco "Welding Today", Quick guide to suitable welding consumables for heat-resistant low alloy steel
7. Shaun Studholme : Submerged arc welding with cored wires, ESAB, Reg. No. XA000100720
8. ESAB AB, Welding LNG gas tanks and vessels in 5% and 9% nickel steels, Sweden, Reg. No. XA00099220
9. "Filler Metal Procurement Guidelines", ANSI/ AWS A5.01-93, American Welding Society
10. W.S. Chang, et. al : Improvements in strength and weldability of Cr-Mo steel plates for pressure vessels and boiler, Journal of KWS. **Vol. 20**(No2, 2002)
11. Kobelco : Welding of power generation boiler part(I) how to select filler metals
12. Newell, Jr. W.F. and Swain, R. A.: "Filler Metal Procurement Made Easy", Welding Journal, 2001
13. W.F.Newell, Jr.and D.W Gandy. "Advances in P(T)91 Welding Using Flux and Metal Cored Wires", EPRI Welding and Repair Technology For Power Plants, Third International RPRI Conference, 9-12 June 98, Scottsdale, AZ
14. Dr. S. Dittrich, Dr. H. Heuser, R. Swain, "Optimized Filler Metals for the Fabrication /Installation of T(P)91" January 31, 1994, North Carolina
15. K. S. Park, S. H. Kim, D. R. Kim and W. S. Ryu : Effect of W Creep Properties of Martensitic Heat Resistant HT9M Steels, J.Kor. Inst. Met & Mater. **38-9**(2000)
16. Byung-Ha Chi : "New Aspects of research trends and problems on pressure vessel steels", Journal of KWS. **Vol. 18**(No1, 2000)
17. J.W. Schinkel, P. L. F. Rademakers, B. R. Drenth and C. P. Scheepens : Ferritic Steels for High-Temperature Applications, A, K. Khare(ED.), ASM (1983) 181
18. Ken Yamashita, Akinobu Golo : Welding consumables of high Cr ferritic heat resisting steels for fossil fuel power boilers, Kobelco Kiho, **53-2**, 2003
19. vetsaren : Rutile flux cored wires for creep-resistant steels, (No 1-2), 1996



- 한일옥
- 1963년생
- POSCO 기술연구원
- 용접야금
- e-mail : elookhan@posco.com



- 홍순택
- 1959년생
- POSCO 기술연구원
- 물리야금
- e-mail : sthong@posco.com