

## 압력용기 및 보일러용 Cr-Mo계 후판의 열처리 및 용접특성(II)

-Cr, Mo 함량에 따른 용접성 변화

Heat Treatment and Welding Characteristics of Cr-Mo Steel Plates for Pressure Vessels and Boilers(I)      -Effect of Cr, Mo Contents on Weldability of the Steels

장웅성

포항산업과학연구원      설비용접연구팀

### 1. 서론

국내에서는 압력용기 및 보일러용 Cr-Mo계 압연강과 관련하여 1991년 A387-11 grade 1.25Cr-0.5Mo강을 개발한 이후 생산실적이 없었으나 98년부터 국내 제작사들의 국산화 요구가 높아져 다양한 종류의 A387 grade Cr-Mo강을 개발하여 양산 공급 중에 있다. 이 중에서 Cr 함량이 1~2.25%, Mo 함량이 0.5~1.0% 수준인 A387-12, 11, 22 grade 강재들이 가장 범용적으로 적용되는 대표적인 중고온용강이다. 본 연구는 상업적으로 생산된 위의 강재를 대상으로 용접경화성, 저온 균열감수성 등의 용접성을 평가하고 다양한 용접공정별 용접이음부 시험을 통해 국내에서 처음으로 생산된 Cr-Mo계 압연강재에 대한 용접 특성을 종합적으로 정리하였다.

### 2. 실험방법

본 연구에서 사용한 강재는 앞서 발표한 논문에서 언급한 ASTM A387 grade 12(1Cr-0.5Mo), grade 11(1.25Cr-0.5Mo) 및 grade 22(2.25Cr-1Mo)강으로 열간압연과 Normalizing-Tempering 열처리에 의해 제조되는 Class2에 해당되는 강이다. 위 강들의 용접경화성은 용접열영향부의 최고경도를 JIS Z 3101에 규정되어 있는 시험방법에 준하여 측정하였다. 시험재는 상온용접(200Lx75Wx20t)과 예열용접(200Lx150Wx20t)으로 구분하여 사용한다. 용접부 저온균열감수성은 JIS Z 3158에 규정되어 있는 경사 Y형 용접균열시험으로 평가하였다. 현장생산 A387강에 대한 실용접시험은 보일러 제조시 적용되는 WPS에 준하여 실시하였으며 이 시험편을 활용하여 기계적성질 및 미세조직을 관찰하였다. A387-12강(1Cr-0.5Mo)과 A387-22강(2.25Cr-1Mo)의 용접공정별 용접조건은 각각 Table 1과 Table 2에 요약하여 나타내었다.

Table 1 Welding conditions applied to A387-12 steel plate(28mm)

Process	Consumable(mm)	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)	Preheat (°C)	Interpass Temp.(°C)	Heat Input (kJ/cm)
FCAW	E71-T9(1.2)	200-230	30-32	32.4	Min. 125	Max. 350	13.9
GMAW	ER80S-G(1.2)	235-250	32	28.2			18.7
SMAW	E8016-B2	160-245	18-27	15.6			22.9
SAW	F9PZ-EG-B2(2.4)	340-360	38-40	28.1			29.5

Table 2 Welding conditions applied to A387-22 steel plate(23mm)

Process	Consumables(mm)	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)	Preheating (°C)	Interpass Temperature (°C)	Heat Input (kJ/cm)
FCAW (3G)	E91T1-B2 (1.2Φ)	120-162	26-28	14.5	Min. 160	Max. 350	Max. 19
GMAW (3G)	ER90S-G (1.2Φ)	170-220	30-33	27			Max. 15
SMAW (1G)	E9016-B3 (3.2, 5.0Φ)	107-185	12-20	5.4			Max. 29

용접이음부 성능시험은 용접상태와 PWHT 적용후로 구분하여 실시하였으며 PWHT는 700°C에서 4시간 유지한 후 서냉하였다. 인장시험은 PWHT 실시 유무에 따라 ASTM A370 또는 ASME SEC IX에 준하여 최소 2set 이상 실시하였다. 굽힘시험은 인장시험과 동일한 규격에 따라서 Side bending을 실시하였다. 충격시험은 용접금속과 용융선 그리고 열영향부에서 notch를 가공하여 20°C에서 실시하였으며 최소 3set 이상의 평균을 산출하였다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 용접성

Cr-Mo강의 용접 시공시 발생되기 쉬운 저온균열에 대한 저항능을 평가하기 위해 용접열영향부 최고경도시험을 통한 용접경화성을 평가한 결과 A387-11강은 상온 용접한 경우 최고경도는 Hv 390 이고 100°C에서 200°C 범위에서 예열을 실시한 경우 최고경도는 Hv 385에서 Hv 341로 감소한다. A387-22강의 경우 상온 용접시 최고경도는 Hv 407 수준이고 100°C에서 200°C 범위에서 예열을 실시하면 경도는 Hv 364~386 수준으로 낮아진다. 이들 강재의 경우 예열 적용 후에도 여전히 용접 열영향부 최고경도는 높은 값을 지니는데 예열에 의한 열영향부의 연화가 뚜렷하지 않아도 확산성 수소 함유량을 저감시키는 효과가 있으므로 저온균열 방지에는 큰 효과가 있다고 판단된다. 용접부 연속냉각변태도 작성시험을 통한 용접경화성 조사 결과 A387-11-CL2강의 SH-CCT도 시험결과  $\Delta T_{8/5}$  가 10초까지는 완전 마르텐사이트 조직이 생기고 경도 역시 Hv 400 이상의 높은 값이 얻어진다. 그러나 냉각시간이 20초로 길어지면 베이나이트 변태가 개시되고 경도 역시 Hv 362로 낮아진다. 냉각시간이 더 길어져 300초(1°C/sec)를 넘게되면 비로소 페라이트 변태가 개시되는데 경도는 Hv 287로 낮아진다. 2.25Cr-1Mo 계의 A387-22-CL2강의 경우 베이나이트 변태는  $\Delta T_{8/5}$  가 20초를 넘으면 개시되고 페라이트 변태는 가장 느린 냉각속도인  $\Delta T_{8/5}$  1500초 조건에서도 거의 진행되지 않는다. 한편, 경사 Y형 구속균열시험을 이용한 저온균열시험 결과 A387-22강의 예열방지를 위한 한계예열온도는 약 200°C이었다. 이 경우 저온균열의 발생은 toe부에서 열영향부를 따라 전파되다가 용접금속 내부로 전파되어 들어가는 양상을 보이는데 이 경우 결정립조대화역을 따라 전파하는 균열은 입계균열양상을 지닌다.

#### 3.2 용접이음부 특성

A387-22강의 경우 GMAW, FCAW, SMAW 공정을 적용하여 용접이음부에 대한 인장, 경도 및 충격시험을 실시하고 이들 기계적성질과 미세조직과의 관련성을 조사하였다. Fig. 1은 PWHT 유무에 따른 용접공정별 용접이음부 충격시험 결과를 나타낸다. 용착금속은 모재에 비해 상대적으로 낮은 충

격인성을 지니며 PWHT에 의해 비로소 탄화물의 석출이 진행되므로써 강도와 인성이 회복되는 특징을 보인다. 충격인성의 경우 용접이음부 위치에 관계없이 GMAW의 경우가 가장 우수하게 얻어지며 FCAW의 경우 용접금속의 인성이 매우 낮은 수준이며 이는 PWHT 후에도 회복되지 않아서 저온 충격인성에 대한 보증 요구가 있는 경우 용접공정 및 재료 선정에 주의를 필요로 함을 확인하였다. 용접열사이클 재현장치를 이용한 재현열영향부 충격인성시험 결과  $\Delta T_{8/5}$ 가 10초~100초 범위에서 변화한 경우 냉각시간 증가에 따른 충격인성의 감소는 현저히 나타나지 않고 상온에서의 흡수에너지가 50J 수준으로 얻어진다.

#### 4. 결 론

Cr-Mo계 중고온용강은 높은 합금원소 함량으로 인해 용접시 발생하는 저온균열, 재열균열에 대한 발생방지 대책이 필요하며 용접부 성능 확보 차원에서는 저온인성을 요구하는 경우 적절한 용접공정 및 재료의 선정이 필수적이다. 향후 이들 강재의 중고온용강으로서 기본적인 모재 성능 개선과 병행하여 용접성 개선을 위한 노력이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

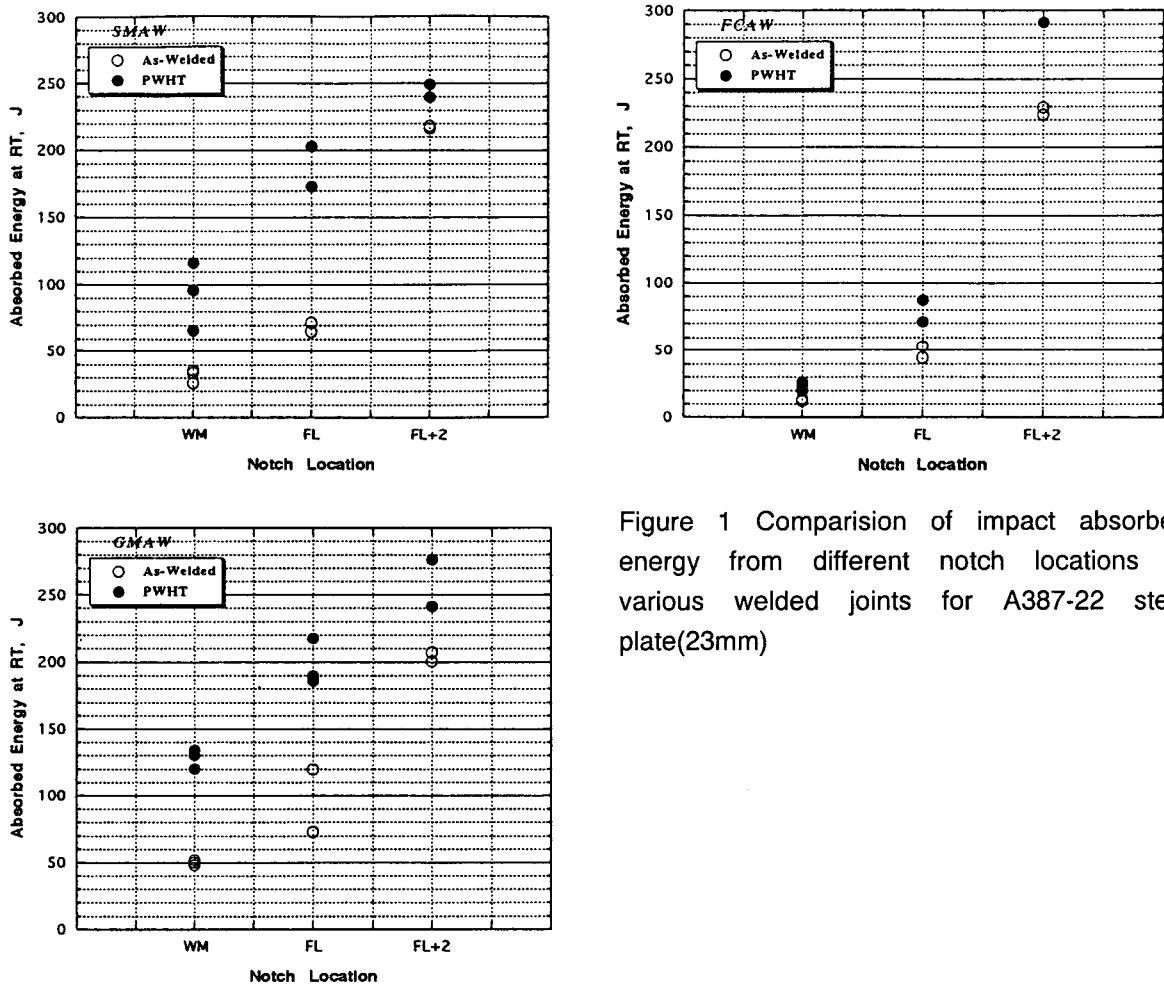


Figure 1 Comparison of impact absorbed energy from different notch locations in various welded joints for A387-22 steel plate(23mm)