

## 2¼Cr-Mo강의 전자빔 용접성시험 Electron beam weldability test of 2¼Cr-Mo steel

김종오\*, 정인철\*

\* 한국중공업 용접기술개발팀

### 1. 서론

전자빔 용접(Electron Beam Welding, EBW)은 고 진공하에 전자총에서 발생된 전자빔을 자력으로 집속편향시켜 용접물에 주사하여 용융접합하는 방식으로, 고 에너지 밀도에 의한 순간용접으로서 열변형을 극소화할 수 있고 용가재없이 고 품질의 후판용접이 가능한 진보된 용접기법이다. 전체장치는 빔 발생장치(전자총 및 전원), 이송장치, 제어부분, 진공용기, 진공배기장치 등으로 구성되어 있다. 본 시험은 압력용기용 저합금강인 2¼Cr-Mo 강에 대한 빔 용접부위의 기계적 및 화학/조직시험을 통하여 전자빔용접의 적용가능성을 검토하고, 시험 분석결과는 향후 제품 적용시 최적 용접조건을 선정하기 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

### 2. 시험자재 및 방법

Table.1은 시험자재(두께100mm) 사양을 나타낸 것이며, Table. 2의 용접변수는 몇차례 시험을 통하여 얻은 최적의 변수로 선정하였다. 예열은 전자빔 크기를 확대(Defocusing)하여 용접할 시편의 표면에 조사하는 형태로 하였고 온도측정을 위해 열전대를 측면에 부착하였다. 사용한 전자빔 용접장치의 가속전압은 60 KV, 출력은 60 KW 이며 작업실 진공도는  $2 \times 10^{-4}$  Torr 이다. 시편은 후열처리를 기준하여 As-weld 조건과 PWHT 조건으로 구분하여 시험하였으며, ASME 및 관련Code에 준하여 각종 시험을 수행하였다.

### 3. 결과 및 분석

#### 3.1 As-weld 조건

용접비드는 시편 상부표면에 약 2mm의 돌출된 형상을 나타내었으며, 용접부의 PT 및 UT 결과는 양호하였다. 상온인장시험은 ASME IX (QW462.1a)에 준하여 전체두께에 대해 Multi-specimen (3개x2sets)을 제작하여 시험하였으며, 시험결과 모든 시편이 모재부분에서 파단되어 전자빔 용접부위의 강도는 최소한 모재의 강도보다는 큼을 알 수 있었다. 굽힘시험은 ASME IX (QW162)에 준하여 4개 시편에 대한 측면방향으로 Guided-bend test을 하였으며 시험결과 어떠한 결함도 발견되지 않았다. 그러나 하중이 가해진 용접부위는 직선형태로 굽힘이 거의 없음이 특징으로 확인되었다.

충격시험은 SA370에 준하여 Weld, Fusion, HAZ(3곳), Base 부위에 대해 두께 위치별(표면, 25mm, 60mm, 97mm 위치)로 시험하였고 특히 Weld부위는 두께방향으로 상세시험을 실시하였다. As-weld조건에서 시험결과 HAZ부위의 충격치는 모재에 비해 약 2/3의 값을 유지하며 두께방향으로 비교적 고른 분포를 나타내었고, 두께 위치별로는 두께의 중간부가 일정한 충격치를 갖는 반면 양 표면측으로는 값의 차이가 약간 있음을 보였다. Weld부위의 충격치는 매우 불균일하며 특히 두께방향으로 양 표면측으로는 극히 낮은 충격치를 가지며 반면에 중간부는 모재보다도 더 큰 값을 갖는 경우도 있다. 따라서 Weld부의 충격치는 두께방향으로 위치에 따라 큰 차이가 있으며 또한 분명한 경향도 나타나지 않았다. 다만 표면측으로 갈수록 낮은 충격치를 나타내며 전체적으로 모재에 비해 매우 낮았다. 결과적으로 As-weld상태에서의 전자빔 용접부는 불일정하고 낮은 충격치를 가짐으로 취성에 대해 취약함이 예상된다. (Fig.1)

두께 t/4위치에서 화학성분 분석결과, 0.06 wt%의 차이를 나타내는 Mn을 제외하고는 Weld부위와 Base부위 간 성분차이는 거의 없었다. 빔 용접에 기인한 특정성분의 감소는 거의 없음을 알 수 있으나 좀더 추가적인 검토가 필요하다. 경도는 Microhardness (Hv) 방법으로 Weld부위 중심을 기준하여 두께위치별로 (표면, 1.6mm, 25mm, 50mm, 97mm) Weld부위에서 Base부위까지 0.5mm 간격으로 측정하여 경도분포를 조사하였다. Weld부위는 332-385 Hv경도값을 가지며 Base부위에 비하여 매우 높았다. 특히 두께 중간부는 양면용접에 따른 이중용융(Double melting)에 의해 다른 Weld부위에 비해 상대적으로 더 높은 값을 나타내었다. HAZ부위는 206-366 Hv의 넓은 경도분포값을 가지며 Weld와 Base부위의 천이구역 현상을 보였다. Base부위는 184-195 Hv의 균일한 경도값을 갖는다. 따라서 열처리전에 전자빔 용접부의 경도는 모재에 비하여 약 2배정도 높음을 알 수 있다.

조직시험은 Macro (x 0.9) 및 두께25mm 위치의 Micro (x200) 에 대해 관찰하였다. 용접부는 하부 베이나이트 형태를 나타내었고 따라서 고 강도의 경한 재질특성이 예상되었으며 입계의 크기는 모재부분과 유사하거나 약간 크게 보였다. 전체 용접부는 두께에 대해 수직방향으로 응고진행 형태를 나타내며 육안으로 2~3mm의 HAZ부분이 있음을 알 수 있었다.

### 3.2 PWHT 조건

As-weld조건과 동일하게 시험을 하였다. 상온인장시험 결과 모든 시편이 Base부위에서 파단되었고 Code에는 만족하였으나 그 값은 낮아졌다. PWHT후의 충격시험 결과, HAZ부위의 충격치는 251.7~268Joule로서 Base 및 Weld부위에 비해 약 2/3의 값을 유지하며 두께방향으로 비교적 고른 분포를 나타내었다. Weld부위의 충격치는 Base부위보다 오히려 높은 값을 가지며 다만 예열이 된 표면부위는 상대적으로 낮게 나타났다. (Fig.2)

경도시험 결과, Weld부위는 204-220 Hv경도값을 가지며 모재에 비해 약간 높고 두께방향으로 비교적 균일하게 나타났다. HAZ부위는 163-218 Hv으로서 상대적으로 넓은 경도분포를 가지며 Weld와 Base부위의 천이구역 현상을 보였다. Base부위는 170-188 Hv의 균일한 경도값을 얻었다.

### 3.3 비교 및 분석

EBW와 기존의 SAW 용접부에 대한 주요 물성치 (후판압력용기용 기존의 용접시험자료와 비교) 를 비교 분석하였다. 인장강도는 EBW측이 높았으며 충격치는 EBW의 Weld 부위는 As-weld경우 취약하나 PWHT경우에는 SAW보다 양호하였고, HAZ부위는 유사하였다. 경도는 EBW의 As-weld경우 경도치가 매우 높고, PWHT경우에는 SAW와 유사하게 나타났다.

## 4. 결론

2¼Cr-Mo강의 전자빔 용접시험결과, 인장 및 굽힘시험은 양호하였다. 충격치는 As-weld경우에는 낮고 PWHT후에는 높은 값을 얻을 수 있었다. 경도치는 As-weld경우 매우 높았으나 PWHT후에는 훨씬 낮은 양호한 값을 나타내었다. EBW와 SAW 용접부에 대한 주요 물성치를 비교하여 볼 때 PWHT조건하에서는 유사하거나 상대적으로 양호하였다. 특히 충격치의 경우 SAW보다 오히려 더 높은 수치를 나타내고 있으며, 따라서 전자빔 용접은 현재의 SAW용접을 대신할 수 있을 것으로 생각할 수 있다.

본 시험결과로 압력용기 재질에 대한 전자빔 용접의 적용가능성이 제시되었으나 좀더 정확한 분석을 위해서는 기기 운전조건에 해당하는 고온인장, Creep강도, 고온사용중 취화, 및 재열균열 등에 대한 추가시험이 필요하다.

5. 참고문헌

1. A.Sanderson: "Second generation of high power electron beam equipment", TWI, June 1993
2. A.Sanderson & K.R. Nightingale: "High-Power EBW Equipment and Process Trend", Welding journal, April 2-7, 1989, pp45-57
3. J.D.Ferrario et al.: " A Switch-Mode Accelerating-Voltage Regulator for Electron Beam Systems" Welding journal, April 18-21, 1988, pp44-47

Table.1 The specification of test material

시편치수	재질	인장강도	화학조성 (wt%)							
			C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
t100 x w100 x L500mm, 2EA	SA387Gr.22Cl.2 (P-No.5)	Min.52.7 kg/mm <sup>2</sup>	0.14	0.20	0.55	0.012	0.005	0.03	2.39	0.98

Table.2 The condition of weld parameters

Joint부 형상	전압 (KV)	전류 (mA)	용접속도 (cm/min)	작업거리 (mm)	예열온도 (°C)	충간온도 (°C)	입열 (KJ/cm)	열처리 구분	
								As-weld	PWHT
I (양면용접)	60	311	20	200	240	240	56.0	-	690°Cx8Hr

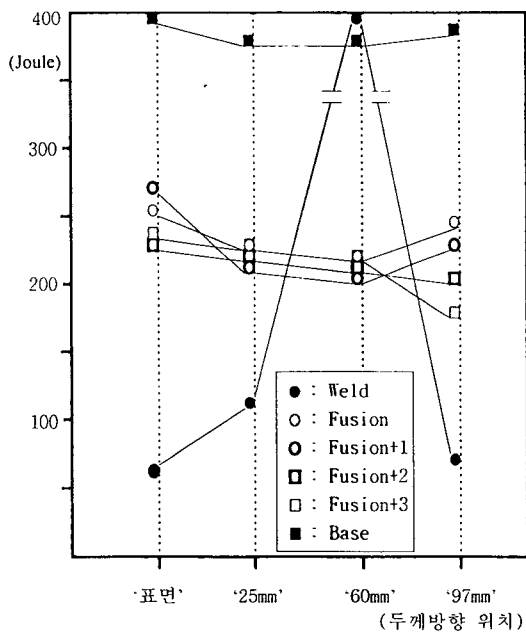


Fig.1 V-notch values of each sections (As-weld)

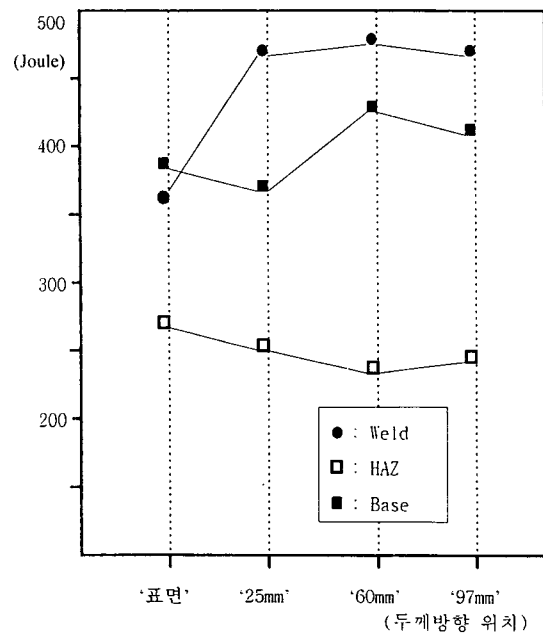


Fig.2 V-notch values of each sections (PWHT)