

# API-X65강 ERW용접부 인성,HIC,SSCC특성에 미치는 입열 및 후열처리 영향 (I)

## Effects of power and post seam annealing on the toughness, HIC, SSCC characteristics of ERW joint of API-X65 (I)

김충영\*, 노광섭\*, 김용석\*\*  
\*POSCO 기술연구소, 경북 포항  
\*\*홍익대학교 재료화학공학부, 서울

### 1. 서론

세계의 석유 자원 채굴 환경이 점차 열악해짐에 따라 유화 수소를 함유한 석유 자원을 수송해야 하는 경우가 증가하고 있으며, 이러한 원유를 수송하기 위한 강관의 제조시 유화 수소 부식에 대한 저항성이 우수한 강재의 사용이 요구되고 있다. 강관 제조 방법으로서 대구경 강관의 경우는 장호용접(SAW; Submerged Arc Welding)에 의한 조관이 주류를 이루고 있으며, 중경관 이하에서 상당한 역할을 하고 있는 용접 방법이 고주파 전기저항용접(HF ERW; High Frequency Electric Resistance Welding)이다. 내 부식 환경에서 사용되는 강관용 소재의 개발시 용접부 품질 특성에 대한 충분한 규명이 있어야 하며, 본 연구에서는 API-X60/X65급 강관재에 대하여 ERW에 의한 조관 및 후열처리를 실시할 때 충분한 기계적 성질 및 기타 요구 특성을 만족시키는지를 확인하고, 이러한 품질을 만족시키기 위하여 필요한 적절한 용접 조건 및 후열처리 조건을 설정하고자 한다.

### 2. 시험재 및 시험방법

본 연구에서 사용한 소재는 내HIC/SSCC 보증용 API-X60/X65급 강관으로서 내HIC/SSCC 특성을 향상시키기 위하여 일부 미세한 합금 원소의 첨가량을 조절하여 Nb-V-Ti type의 성분계를 가졌다. 시험재의 두께는 10mm로 제조되었으며, 시험재의 화학 조성은 그 적용 규격의 요구치와 함께 Table 1에 나타내었다. 한편 용접부 품질을 평가하기 위하여 적용한 ERW 조건은 Table 2에 나타내었는데, 용접부 bead 형상, 고속 비디오카메라 관찰에 의한 용적의 이동현상 등을 관찰하여 적정 입열로 간주되는 T1 조건을 설정하고 이 조건을 기준으로 상하 편차를 가진 입열 조건을 추가하여 입열량의 차이에 의한 영향을 고찰하였다. 기존 입열 조건으로 선정된 입열량에서의 용접 현상을 Photo.1에 나타내었다. ERW 용접부의 경화 조직에 의한 품질 저하를 회복시키기 위한 post seam annealing 처리는 고주파 가열 장치를 이용하여 각각의 시험편에 대하여 열처리를 실시하였다.

### 3. 시험결과 및 고찰

용접 이음부에 대한 경도 분포는 표면에서  $\frac{1}{2}$ t 선을 따라서 용접부로부터 모재에 이르기까지 연속적으로 경도를 측정하였으며, 우선 입열량 변화에 따른 경도 분포 차이를 비교한 것이 Fig.1이다. 본 소재의 용접부에서는 화학 조성 감소에 의한 백색 선이 거의 나타나지 않았으며, 따라서 bond line에서의 경도 저하가 거의 나타나지 않았다. Bond line에 인접한 HAZ에서는 bond line에 비하여 경도가 상승하는 것으로 나타났으며, 이어서 모재 쪽으로 갈수록 점차 낮아지는 현상을 보였다. Bond line에 인접한 HAZ의 경도 분포는 저 입열에서 고 입열로 갈수록 낮아지고 있으나 그 차이는 매우 근소하였으며, HAZ 내의 다른 부분은 거의 유사한 수준을 나타내고 있었다. 전반적으로 가장 경도가 높은 부분의 경도 값이 대략 Hv 206 정도였으며, 이것은 HIC 발생의 한계치로 알려진 Hv 248에 비하여 훨씬 낮은 수준으로서 용접 경화성에 의하여 HIC가 발생할 우려는 약한 것으로 생각된다. Fig.2에서는 T1 용접부에 대하여 후열처리에 의하여 경도 분포 편차가 개선되는 것을 볼 수 있다.

T1 조건의 용접부에 대한 충격 시험 결과는 Fig.3과 같이 나타났는데, Mid-HAZ나 End-HAZ 부위는 비슷한 수준으로 -60℃의 저온에서도 매우 우수한 인성을 나타내고 있으나, bond line의 충격 인성은 -20℃에서도 25joule 내외의 낮은 값을 보여주고 있다. 이러한 수준은 시험편이 sub-size 시험편이라는 점을 감안한다 하여도 그대로 사용하기에는 부족한 인성이라고 생각된다. 따라서 이 용접부에 대해서는 용접 후 열처리를 실시하여 bond line의 인성을 개선시킬 필요가 있다.

T1 용접부 bond line에서의 이와 같은 낮은 충격 인성 분포를 개선시키기 위하여 seam annealing 처리를 실시한 후 동일한 notch 위치에서 충격 시험을 실시해 보았다. 970℃에서 seam annealing을 실시한 T1B 조건의 충격 인성 분포를 Fig.4에서 나타내었다. 여기에서 bond line의 충격 인성은 약 2배 정도 향상되는 것을 볼 수 있으며, Mid-HAZ 위치에서도 다소 상승하였고, End-HAZ에서도 매우 우수한 값을 보여주고 있다. 따라서 970℃의 seam annealing 열처리에 의한 충격인성 개선 효과는 성공적으로 볼 수 있다.

세 가지의 용접부에 대하여 강산성 조건에서 HIC시험을 실시한 결과를 모재에 대한 시험 결과와 함께 Table 3에 정리하였다. 표의 결과에서 보는 바와 같이 우선 세 가지 용접 조건 모두 용접부에 대한 균열 발생율이 모재의 균열 발생율에 비하여 향상된 것으로 나타났다. 또한 용접 입열량의 차이에 따른 영향을 보면 가장 적정한 입열 조건이라고 간주되고 있는 T1 용접부의 균열 발생율이 가장 낮게 나타났다. 따라서 앞 절에서 지금까지의 용접 현상 및 충격 시험 결과로부터 우선 적정 입열 조건이라고 간주되고 있는 229kW의 T1 용접 조건이 HIC의 관점에서도 가장 적정한 조건임을 확인할 수 있었다.

T1 용접부에 대하여 용접한 그대로의 시험편으로 SSCC 시험을 실시한 결과 실제의 항복 강도의 80% 조건에서는 48시간, SMYS의 80% 조건에서는 312시간 만에 파단이 발생하였으며, 파단면은 주로 접합선인 bond line을 따라서 전파되었다. 이와 같이 bond line을 따라서 SSCC가 발생하는 원인은 이 부분의 강도가 연화되어 발생할 수 있는 가능성과, 이 부분의 충격 인성이 낮은 취약한 품질을 가지기 때문이라는 가능성을 생각해 볼 수 있다. 이러한 결과로 볼 때 본 소재의 경우 용접한 그대로의 상태로서는 규정된 시간 동안 SSCC를 방지할 수 없는 것으로 생각된다. 따라서 이러한 용접부 조직을 완화시키기 위한 seam annealing 처리가 반드시 필요한 것으로 판단된다.

다음은 각각의 용접 조건에 대하여 세 수준의 최고 가열 온도 구분을 가진 후 열처리를 실시한 시험편에 대하여 SSCC 시험을 실시해 보았다. 그 결과 Fig.5에 나타난 바와 같이 지금까지 ERW 용융 현상 및 경도나 충격 인성 등의 품질을 비교해 볼 때 가장 적절한 입열 조건으로 평가되었던 229kW의 T1 소재에서는 모든 열처리 조건에서 규격에 규정된 시간 이내에 파단이 발생하였다. 반면에 저 입열로 간주되었던 212kW의 T2 소재에서는 900℃ 열처리 조건에서는 규정 시간 이내에 파단되었으나, 970℃ 열처리 조건과 1050℃ 열처리 조건에서는 SMYS의 80% 하중 조건은 물론 SMYS의 90% 조건에서도 규정된 720 시간 동안 파단되지 않았다. 또한 과 입열로 간주되었던 244kW의 T3 소재에서도 970℃ 열처리 조건에서 SMYS의 80%와 90%의 하중 조건 모두 규정된 720시간 동안 파단이 발생하지 않았다. 이러한 결과를 볼 때 본 소재의 SSCC 발생 방지의 관점에서는 우선 T2나 T3 조건 중에서 적정 열처리 조건을 설정하여 최적 조건으로 선정 해 볼 수도 있으나, ERW 용접부는 단순히 용접부의 미시 조직만으로 결정되는 것이 아니라, 미시 조직 내에 존재하는 석출물들의 재석출 거동이나 용접 결함의 존재 유무 등에 의해서도 영향을 받게 된다. 따라서 다음 단계에서는 이러한 측면의 검토를 위하여 용접부 결함에 대하여 고찰해 보았으며, 이에 이어서 향후 화학조성의 변화에 의한 영향을 고찰할 예정이다.

Table 1 Chemical compositions of material used.

	Thick - ness (mm)	Chemical Compositions (wt.%)										
		C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Ti	N (ppm)	Ceq *	Pcm **
Spec.	API -X65	≤0.26	-	≤1.4	≤0.03	≤0.03	≥0.005	≥0.02	-	-	-	-
Used	10	0.054	0.16	1.44	0.007	0.001	0.038	0.029	0.014	43	0.300	0.134

Table 2 ERW conditions.

Material Type	Nb-V-Ti	Thickness	10mm
Power	T1	229 kW	Line Speed
	T2	212 kW	Frequency
	T3	244 kW	Apex Angle
			6°

Table 3 HIC test results of ERW joint.

강종	용접 조건	CLR (%)	CAR (%)
Nb-V-Ti type API-X65	모재	5.4	3.99
	T1	1.23	0.87
	T2	3.48	2.02
	T3	3.0	2.29

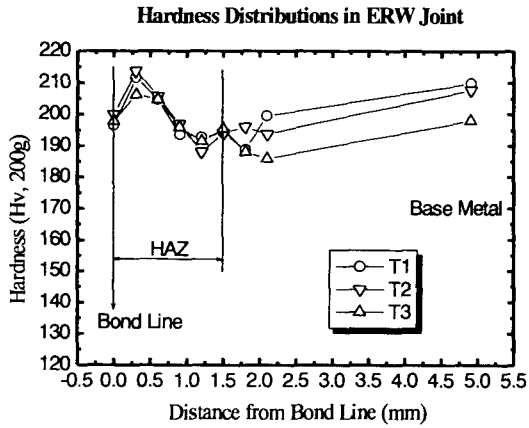


Fig.1 Hardness distributions of ERW joint.

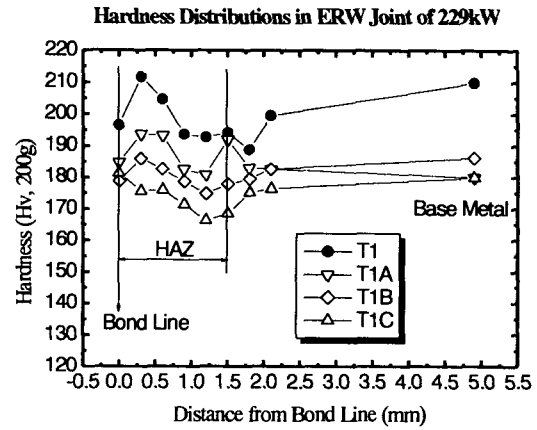


Fig.2 Hardness distribution of ERW joint after PSA

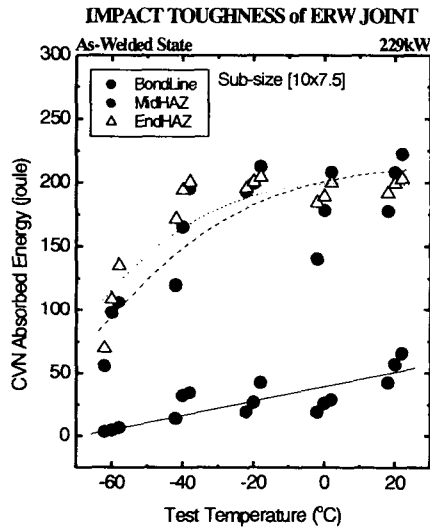


Fig.3 Impact toughness of ERW joint.

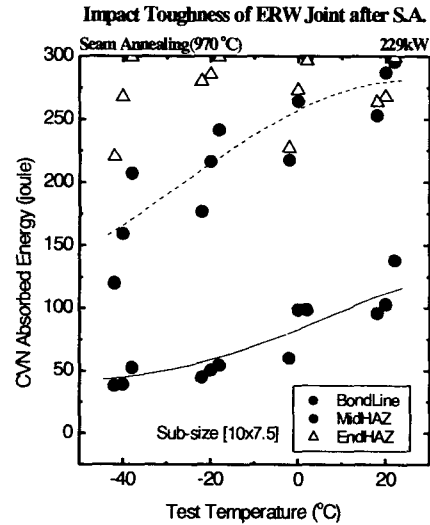


Fig.4 Impact toughness of ERW joint after PSA



Photo.1 ERW melting phenomena.

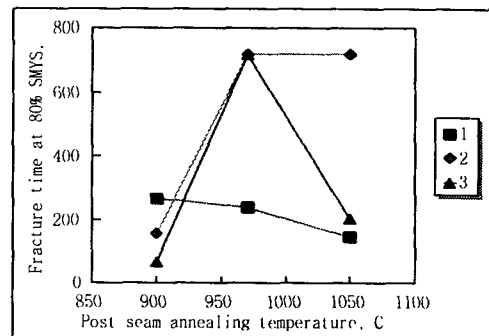


Fig.5 SSCC test results of ERW joint after PSA.