

고강도 열연 API강의 화학조성이 SAW 용접부 인성에 미치는 영향 (I)

Effect of chemical compositions on the CVN toughness in SAW joint of high strength API steel hot coil (I)

김 충 명

POSCO 기술연구소, 경북 포항

1. 서론

석유 자원 채굴 환경이 점차 열악해짐에 따라 극한지 등에서의 자원 채굴이 확대되고 있으며, 따라서 생산 및 수송비용의 절감 등을 위하여 line pipe의 수송 효율을 증가시킬 필요가 있다. 이에 따라 pipe용 소재의 강도 수준은 지속적으로 증가하고 있으며, 더불어 극한지와 같은 저온 환경 및 고압에서 사용하여도 파손이 발생하지 않도록 강재에 요구되는 인성 수준 또한 크게 증가하고 있다. 한편 대구경 line pipe용 강재는 pipe 직경 및 소재 두께가 큰 것이 사용되기 때문에 일반적으로 후판재를 사용하여 UOE 조관법으로 제작된 pipe가 주로 사용되어 왔다. 그러나 최근에는 용접부 품질관리를 충분히 하는 경우 hot coil 형태로 생산된 강재를 이용한 spiral 조관 pipe를 대용량의 석유 수송용 line pipe로 사용하는 사례가 증가하고 있다. 이와 같은 추세에 따라 본 연구에서는 hot coil 형태로 제조되는 API 강재의 고강도화에 따른 화학성분 첨가량의 변화에 따른 용접부 미세 조직의 변화와 그에 따른 용접부 인성 변화 및 용접 재료 선정 조건 등을 검토하였다.

2. 시험재 및 시험방법

본 연구에서 사용한 소재는 C-Mn-Si-Nb-V type의 기본 성분계를 가진 API-X65급 강재를 기준으로 강도를 증가시키기 위한 Mo의 첨가량 변화 및 인성을 고려한 Ti의 첨가 효과 등을 검토하기 위한 소재들을 준비하였으며, 용접 입열량의 영향을 고찰하기 위하여 우선 용접 열 cycle 재현시험을 통하여 충격 인성의 변화 평가 및 SH-CCT diagram을 작성해 보았다. 이들에 대한 고찰 결과를 근거로 하여 API-X80급 강재를 현장 생산하여 실 용접 이음부에 대한 물성 평가를 실시하였으며, 그 소재의 화학 조성은 Table 1에 나타내었다. 시험재의 두께는 17.5mm이며, 제철소 현장 생산 hot coil에서 시험편을 채취하였다. 한편 용접부 품질을 평가하기 위하여 적용한 SAW 조건은 Table 2에 나타내었으며, 비교재로서 국내 조관사에서 적용한 용접 조건을 Table 3에 나타내었다.

3. 시험결과 및 고찰

Fig.1은 API-X65강의 C-Mn-Si-Nb-V type 기본 성분계에 대한 SH-CCT diagram을 나타낸 것이다. 10 ~ 18mm 두께의 소재를 내외면 각 1 pass씩 2-run 용접으로 조관하는 용접부의 800°C로부터 500°C까지의 냉각시간은 대략 10 ~ 30sec 정도이다. Fig.1에서 이 조건에 해당하는 냉각 속도에서의 미세조직은 주로 bainite 조직으로 나타나고 있으며, 냉각시간이 증가할수록 일부 grain boundary ferrite 및 intra-granular ferrite plate 등이 나타나게 된다. 이러한 조건에서의 충격인성 분포를 평가하여 Fig.2에 나타내었다. X65강의 기본 성분계에 있어서 상당 입열량이 약 18kJ/cm에서부터 약 27kJ/cm 정도로 변화하는 동안 충격인성의 변화는 거의 나타나지 않고 있으며, 저온에서의 인성 보증 여부는 -20°C 정도까지 안전하게 확보할 수 있는 것으로 나타났으나 -40°C에서는 상당히 낮은 수준을 보이고 있다. 한편 용접 열 cycle 재현재에 대한 충격인성은 실제의 용접 이음부에 대한 인성 수준보다 낮게 나타나는 경향이 있음을 감안할 때 화학조성의 미세한 조정을 통하여 저온 충격인성의 개선을 기대해 볼 수 있다. 한편 이러한 기본 성분계에서 강도

를 향상시키기 위한 Mo 첨가 효과는 우선 SH-CCT diagram 상으로는 0.15%첨가에서 0.3%로 증가함에 따라 bainite 및 grain boundary ferrite 변태 개시 nose가 점차 장시간 축으로 이동하여 martensite 및 bainite 변태 구간이 넓어지고 grain boundary ferrite 변태 구간은 축소되어 사라지고 있었다. 따라서 강도 향상을 위한 Mo의 첨가는 적정 수준으로 제한하여야 하며, 압연 및 냉각 등의 제조 조건의 적절한 설정을 통하여 얻을 필요가 있다. 또한 인성 개선을 위한 Ti첨가 효과는 기존의 많은 문헌들에서 고찰한 바와 같이 미시 조직상으로 큰 변화를 주고 있었는데, 그것은 특히 $\Delta t_{800-500} = 10 \sim 30\text{sec}$ 범위의 냉각 조건에서 intra-granular ferrite plate가 상당량 분포하게 되는 점이다. 알려진 바와 같이 이러한 조직은 충격인성의 향상에 큰 기여를 하고 있었다. 따라서 고강도화에는 적정 수준의 경화성 원소 및 micro-alloying 원소 첨가 및 적정 제조 조건 설정에 의하여 저온 인성을 확보할 수 있다.

상기의 시험 결과를 고려하여 API-X80 수준의 hot coil을 생산하여 실제로 SAW 용접을 실시하고 그 용접부에 대하여 충격 인성을 평가한 결과를 Fig.3에 나타내었다. 용접부에서 가장 취약한 위치인 fusion line 부위에서의 충격 인성을 보면 -20°C에서는 평균 95 joule 정도, -40°C에서는 평균 55 joule 정도로 나타나고 있다. 즉 이 경우 -20°C에서는 충분한 충격 인성 보증이 가능한 수준이지만, -40°C의 경우는 비록 통상의 요구 인성 값보다는 높게 나타나고 있으나 안정된 수준으로 보기에는 무리가 있다. 이러한 충격 인성 분포를 볼 때 Table 1에 나타난 본 시험재의 화학 조성으로서 -40°C 저온에서의 충격 인성을 보증하기에는 부족한 점이 있는 것으로 판단된다. 특히 용접 열 영향부 충격 인성은 용접 열의 작용에 의하여 압연 및 냉각 조건 등의 제조 조건은 그 효과가 거의 상실되고 거의 화학 조성에 의하여 결정되게 되는데, 본 시험재의 경우 열 영향부 미시조직에 영향을 미치는 micro-alloying 원소의 비율이 다소 적절하지 못한 것으로 판단된다. 즉 열 영향부 미시 조직에 있어서 우수한 충격 인성을 보이는 것으로 알려진 intra-granular ferrite plate의 생성에는 TiN의 효과에 크게 기대하고 있으며, 특히 적절한 크기와 양의 TiN 석출물 분포를 얻기 위해서는 적정한 수준의 Ti/N 비율이 필요한 것으로 알려져 있다. 따라서 본 시험재의 경우 이 비율이 적절하게 얻어지지 않은 것으로 판단되며, 이에 대한 개선을 필요로 하고 있다.

한편 용접부에 있어서 용착 금속 부위의 충격 인성은 사용하는 용접 재료와 밀접한 관련이 있으며, 현재 시판중인 pipe 용접용 용접재료들 중에서 적절한 재료를 선정하기 위하여 본 연구에서 사용한 용접 재료에 있어서의 충격 인성과 국내 조관사에서 다른 용접 재료를 사용한 경우의 충격 인성을 비교해 보았다. 이것을 위하여 국내 조관사에서 용접한 SAW 용접부의 충격 인성 분포를 Fig.4에 나타내었다. 이 경우에는 용착 금속의 충격 인성이 fusion line 보다도 낮은 분포를 보이고 있는 것으로 나타나고 있어 조관사에서 사용한 용접 재료는 저온 인성 확보에 부적절한 것으로 보인다. 또한 이 용접 재료의 강도 수준은 재료 maker의 제시 자료에 있어서 강도 수준이 X80강 수준에 미치지 못하는 것으로 나타나고 있어 X80 급 수준의 고강도 API강의 용접 재료로서는 부적절한 것으로 판단된다. 본 연구에서 사용한 용접 재료에 의한 용착 금속의 경우에는 Fig.3에서 보는 바와 같이 fusion line의 인성 수준보다 높은 분포를 보이고 있어 저온 인성의 확보 측면에서 볼 때 적절한 것으로 생각된다.

이상의 결과에 따라 원 소재의 화학 조성을 일부 수정하였으며, 차기 보고에서는 수정 성분계에 대한 용접 이음부 충격 인성과 함께 제반 품질 특성을 고찰한 결과를 근거로 용접부 저온 인성이 우수한 고강도 API 강재의 최종 제조 조건을 제시할 예정이다.

Table 1 Chemical compositions of material used for considering the effect of compositions.

구분	C	Mn	Si	P	S	Sol.A	Nb	Ti	Mo	Ni	Cr	N	Ca
목표	0.060	1.70	0.20	-	-	0.030	0.050	0.020	0.20	0.40	0.20	-	20ppm
실적	0.061	1.65	0.23	0.006	14ppm	0.036	0.050	0.025	0.17	0.39	0.18	72	7

Table 2 SAW conditions for weld joint test.

Method	Location	Pole	Polarity	Current (A)	Voltage (V)	Speed (m/min.)	Heat I. (kJ/cm)	Wire φ (mm)
SAW	1st (inside)	Leading	AC	770	32	1.1	27.4	4.0
		Tail	AC	640	40			
	2nd (outside)	Leading	AC	1050	32	1.1	35.5	4.0
		Tail	AC	750	42			

Table 3 SAW condition of pipe mill.

Parameter	Welding Conditions	
Speed	1.0 m/min	
Conditions	Inside	Outside
	DC: 900A/30V	DC: 1000A/30V
	AC: 700A/30V	AC: 700A/30V
Consumables	Wire : H-14 Flux : S-77/MX	

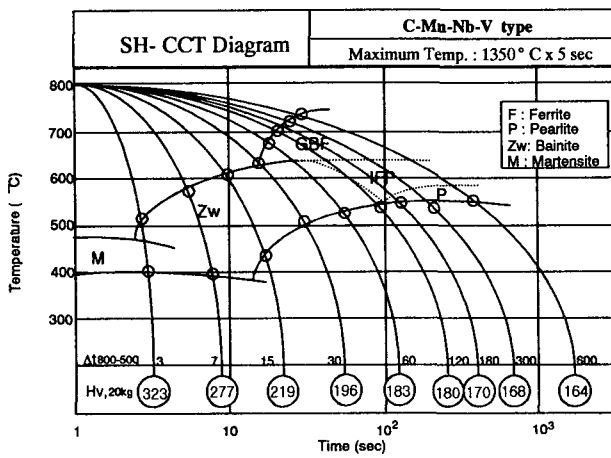


Fig.1 SH-CCT diagram of basic type X65 steel.

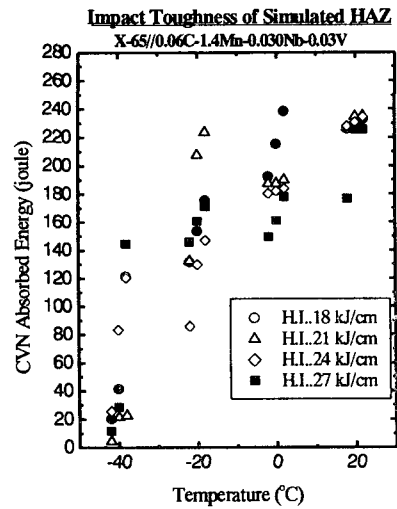


Fig.2 CVN toughness of S.H. of basic type.

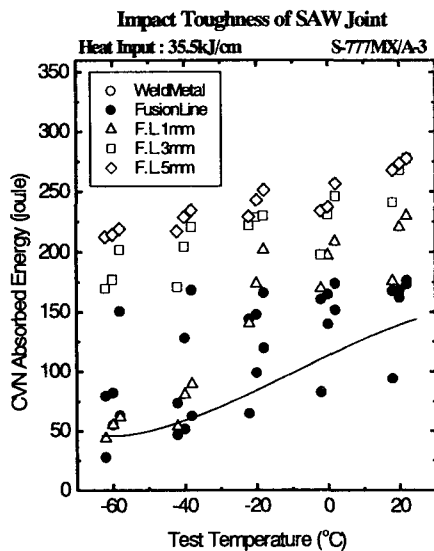


Fig.3 Impact toughness of SAW joint (A-3).

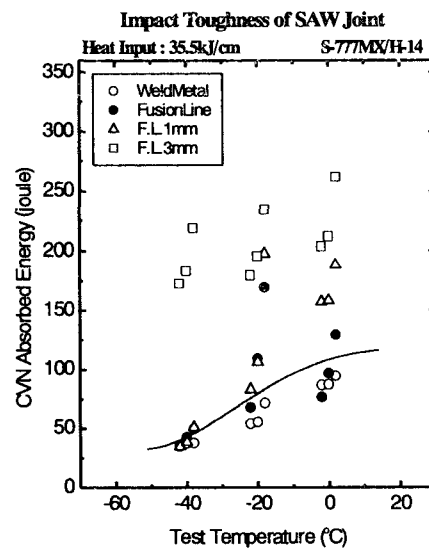


Fig.4 Impact toughness of SAW joint (H-14)