

초저온용 강의 용접열영향부의 파괴특성 평가

Evaluation of Fracture Characteristics in Cryogenic Steel HAZ

장 재일, 주 장복, 김 철만*, 양 영철*, 김 우식*, 권 동일
서울대학교 재료공학부, 151-742, 서울
한국 가스 공사 연구개발원, 425-150, 안산*

1. 서론

청정 연료 에너지로 각광을 받고 있는 천연가스(natural gas)는 운반성과 저장성의 문제로 천연가스를 -162°C 에서 액화시킨 후 배관이나 LNG 선박으로 운반된 후에는 저장탱크를 건설하여 최종 소비자에게 공급하기 전까지 저장하고 있다. 이에 국내의 POSCO에서는 LNG온도에서의 우수한 초저온 인성때문에 LNG탱크의 내조로 널리 사용되는 9% Ni강을 자체 생산하여 국내의 LNG저장탱크에 공급하고 있다. 국내의 LNG저장탱크 건설시 9% Ni강은 내조용 소재로서 SAW, SMAW방식으로 용접되는데, 이때 용착금속으로는 Inconel타입과 Hastelloy타입의 70% Ni기 초합금이 이용된다. 용접열영향부(HAZ:heat-affected zone)는 용접구조물에서 가장 취약한 부위이므로, 9% Ni강의 HAZ의 파괴인성 평가는 LNG저장탱크의 안전성 평가를 위하여 필수적이다.

이에 본 연구자들은 국내에서 개발한 9% Ni 강을 SMA용접한 HAZ부의 파괴인성 평가를 개선한 CTOD시험을 통하여 실시한 바 있다[1]. 이러한 LNG 저장탱크의 안전성을 위한 합목(合目:fitness-for-purpose) 연구의 다음 단계로서 본 연구에서는, 실제 LNG 저장탱크의 상황과 동일하게 SA용접된 X-개선 후판용접부에 대하여 파괴인성평가를 실시하였다. 또한 이러한 파괴인성변화의 야금학적 원인을 살펴보기 위하여 다층용접시의 다양한 HAZ를 재현한 모사시편을 가지고 인성시험 및 미세조직 분석을 행하였다.

2. 실험 방법

실험에 사용된 시편은 POSCO에서 QLT열처리를 통하여 제작된 22mm두께의 9% Ni강으로 그 화학 성분과 상온에서의 기계적 성질을 표 1에 나타내었다. 이러한 후판 9% Ni강을 SAW방식으로 용접을 행하였는데 용접조건은 실제 LNG저장탱크의 용접에 사용되는 조건으로 행하였고 이를 표 2에 나타내었다.

우선 CTOD시험과 샤피충격시험의 평가대상위치로는 POSCO를 비롯한 일본의 여러 철강회사에서 강재평가지 선택하는 평가대상 위치와 동일하게 용융선으로부터의 거리에 따라 선택하였다. 본 연구의 경우와 같은 강도적 불균질을 가진 X-개선 후판용접부의 파괴인성을 평가하기 위해서는, 기존의 규격화된 CTOD 시험들[2-4]이나 K-개선이나 half-V-개선 용접부만을 위한 용접부 CTOD시험의 draft들[5-7]을 사용하기에는 많은 어려움이 있다. 이에 본 연구자들이 앞서 제안한[1] 방법을 사용하여 CTOD시험을 행하였다. 제안한 방법에서는 잔류응력의 측정과 적절한 피로하중의 선택을 통한 균일한 피로예균열을 도입하였고 시험후의 시편을 평가하였으며, CMOD로부터의 CTOD의 환산에는 F.L.~F.L.+3mm에는 (1)식을, F.L.+5mm~F.L.+7mm에는 (2)식을 사용하였다. (본 식들에서 사용된 모든 기호들은 ASTM E1290[3]에 따른 것이다.)

$$\delta = \frac{K^2(1-\nu^2)}{2[\sigma_{YS,WM}X + \sigma_{YS,WM}(1-X)]E} + \frac{r_p(w-a_0)}{a_0+r_p(w-a_0)} V_p \quad \dots\dots(1)$$

$$\delta = \frac{K^2(1-\nu^2)}{2\sigma_{YS}E} + \left[\frac{r_1(w-a_0)}{a_0+r_1(w-a_0)} \frac{\alpha}{1+\alpha} + \frac{r_2(w-a_0)}{a_0+r_2(w-a_0)} \frac{1}{1+\alpha} \right] V_p \quad \dots\dots(2)$$

(1)식에서, X는 용착금속의 평가대상 위치에서의 길이 분율이고 (2)식에서 α 는 균열개구변 위비이다. CTOD시험은 50ton급 Instron 만능시험기를, 샤피시험은 409 J용량의 시험기를 각각 이용하여 상온과 -100℃, 그리고 LNG온도인 -162℃와 액체질소온도인 -196℃에서 행하였고 시험편은 압연방향에 수직하게 채취하였다.

한편, HAZ내의 각 미세조직이 파괴인성에 어떠한 영향을 미치는 가를 구체적으로 알아보기 위하여 MTCS(metal thermal cycle simulator)를 사용하여 모사시편을 제작하였다. 주된 평가대상은 가장 취약할 것으로 예상되는 결정립 조대화 영역을 선택하였으며 2차 열사이클의 온도를 1200℃부터 550℃까지 다양하게 변화시켜서 -196℃에서의 인성과 미세조직을 비교하였다. 또한 2차 사이클의 온도를 고정시키고 1차 사이클의 최고온도를 1350℃부터 800℃까지 변화시키는 실험도 병행하였다. 이때 Ac1과 Ac3의 온도는 dilatation test를 통하여 측정하였다.

HAZ의 미세조직을 알아보기 위하여 광학현미경을 사용하였는데 이때 에칭액으로는 2% Nital을 이용하였다. X선 회절분석(XRD)을 이용하여 잔류 오스테나이트를 측정하기 위해서 잔류오스테나이트의 기계적 소멸을 피하기 위하여 전해연마한 후 CuK α 선을 이용하여 (110) α 와 (200) γ 면의 회절선의 적분강도를 비교하였다. 또한 잔류오스테나이트의 양과 분포를 조금 더 거시적으로 관찰할 수 있게 하기 위하여 전해연마후 Beraha 용액을 이용하여 color etching하여 image analyzer를 이용하여 관찰하였다. 파면의 관찰을 위하여 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 2000배로 관찰하였다.

3. 결과 요약

우선 개선한 CTOD 시험법을 이용하여 각 온도에서 파괴인성을 평가한 결과 용융선에서 멀어질수록 인성은 증가함을 알 수 있었다. 이러한 샤피충격시험의 결과로도 확인할 수 있었는데 이는 이전의 SMAW용접부와 같은 경향을 나타내는 것이다. 이에 개선한 CTOD 시험법이 강도적 불균질을 가진 X-개선 후판용접부의 인성평가에 매우 효과적인 방법임을 재 확인할 수 있었다. 한편, 최소한의 인성치를 나타내는 용융선에서도 저장탱크에서 요구되는 인성 기준치를 모두 상회하는 높은 값을 나타내었다. 이러한 용융선으로부터의 거리에 따른 파괴인성의 증가는 미시적, 또는 거시적인 파면관찰을 통하여 확인할 수 있었는데 두 가지 경우 모두 용융선에서의 거리가 증가할 수록 연성파괴의 양상이 증가함을 확인할 수 있었다.

시험후의 평가법을 통하여 균열의 전파경로를 살펴보았는데 모든 평가대상위치에서 조금씩 균열의 성장이 용착금속 쪽으로 향함을 알 수 있었지만 1mm이상의 급격한 편차를 보이지는 않았으므로 그 값을 의문없이 취할 수 있었으나 F.L.+3mm의 경우에는 상온에서 균열의 전파경로가 용착금속 쪽으로 상당히 진행된 후 파괴가 일어남을 발견하였는데 결과적으로 SMAW의 경우와 마찬가지로 상온에서의 F.L.+3mm 경우에는 매우 높은 CTOD값을 나타내었다. 이러한 원인을 살펴보기 위하여 미세조직의 변화를 연속적으로 관찰하였는데 F.L.+3mm에 도달하였을 때 완전히 모재의 미세조직을 회복함을 알 수 있었다. 결론적으로 이

F.L.+3mm에서 가장 큰 소성축적량의 비대칭을 가지기 때문에 균열이 심하게 휘는 결과를 보이며 일부 존재하는 용착급속은 분율이 매우 작고 표면에 존재하므로 아무런 구속도를 가지지 못했다. 이는 샤프시험 결과에서도 같은 경향을 나타내었고, notch root의 인성이 동일하더라도 주위의 재질적 불균질에 영향을 받는다는 기존의 연구결과들[8-9]과도 일치한다.

앞서의 평가대상위치에 대하여 OM을 통하여 미세조직학적인 분석을 실시하였는데 SMAW시험의 결과와 같이 본 SA용접된 X-개선 HAZ내에서 조대화 결정립이 차지하는 분율(L_{CGHAZ}/L_{HAZ})도 F.L.으로부터 멀어짐에 따라 감소하고 따라서 잔류오스테나이트의 함량이 증가함을 확인 할 수 있었고 따라서 잔류오스테나이트의 양은 결정립 조대화영역의 분율의 변화에 따라 결정됨을 알 수 있었다. 이는 HAZ내에서 전(前) 패스에서의 열 사이클효과에 의하여 매우 조대화된 영역에서는 후속 패스에 의하여 열 사이클을 받아도 용접 열사이클에 의한 $\alpha \rightarrow \gamma$ 역변태가 일어날 자리(site)가 결정립이 미세한 영역과 비교할 때 매우 작아져서 오스테나이트의 석출이 감소하기 때문으로 추측할 수 있었다.

이러한 인성변화와 미세조직과의 관계를 더욱 자세히 알아보기 위하여 모사시편을 통하여 실험한 결과, 잔류오스테나이트의 양과 prior 오스테나이트 결정립크기가 실용접부인성에 미치는 영향이 혼합물 지배형태인지 최고 취약부 지배형태인지를 평가할 수 있었다.

참고문헌

1. J.-i. Jang, Y.-c. Yang, W.-s. Kim, and D. Kwon : Metals and Materials, vol. 3, (1997) 230
2. British Standard BS 5762 (1979)
3. ASTM Standard E1290 (1989)
4. British Standard BS 7448 (1991)
5. S.J. Squirrel, H.G. Pisarski, and M.G. Dawes : BSIISM/4/4, Working Party Report (1986)
6. ASTM E24 Committee, Draft ASTM Test Standard for Fracture Toughness Testing of Weldments, ASTM E24. 06.05. (1991)
7. M. Toyoda, IIW Doc., X-1217-91 (1991)
8. K. Satoh, M. Toyoda, and F. Minami : J. Japanese Welding Soc., 50, (1981) 743
9. K. Satoh, M. Toyoda, K. Nohara, S. Takeda, and M. Nayama : J. Japanese Welding Soc., 51, (1982) 679

Table 1. Chemical compositions and mechanical properties of QLT-9% Ni steel

Chemical Compositions (wt%)						Mechanical Properties (at R.T.)		
C	Si	Mn	P	S	Ni	YS (MPa)	TS (MPa)	EL (%)
0.066	0.24	0.65	0.005	0.005	9.28	650	720	36.30

Table 2. Welding conditions used for this study

Welding method	Edge preparation	Multi-pass layer	Polarity	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)	Heat input (KJ/cm)
SAW	X	6	DCEP	320~360	25~28	25~53	Max. 23.2