초저온용 강 용접열영향부의 국부적 취화부에 관한 연구

A Study on the Local Brittle Zone in Cryogenic Steel HAZ

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

1. 서론

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

이에 본 연구자들은 국내에서 개발한 9% Ni강을 SMAW와 SAW방식으로 각각 용접한 HAZ부의 파괴인성 평가를, 개선한 CTOD시험을 통하여 실시한 바 있다[1-2]. 이러한 초저온용 9% Ni강 용접부 파괴특성연구의 다음 단계로서 본 연구에서는, 국부적 취화부(local brittle zone, 이하 LBZ) 현상에 관한 연구를 수행하였다. LBZ 현상은 해양구조물이나 선박 등 다른 대형구조물 강재의 용접부에 대하여 깊이 연구가 진행된 바 있으나 9% Ni강에 대해서는 진행된 바가 없다. 본 연구를 수행하기 위해서 SA와 SMA용접시의 다양한 HAZ를 재현한 모사시편을 가지고 인성시험 및 미세조직 분석을 수행하였으며, 소형 SENT(single edge notched tension)시험편을 이용한 *in situ* 파괴거동을 주사전자현미경(SEM)을 통하여 관찰하였다.

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

2. 실험 방법

실험에 사용된 시험편은 POSCO에서 QLT열처리를 통하여 제작된 22㎜두께의 9% Ni 강으로 그 화학 성분과 상온에서의 기계적 성질을 표 1에 나타내었다. HAZ내에서의 미세조직과 인성의 변화경향을 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 변화시키면서 -196℃에서의 인성과 미세조직을 비교하였다. 800℃에서 500℃까지의 냉각시간은 열전달 방정식을 응용, 계산하여, SAW와 SMAW HAZ에 대하여 각각 13.5초와 19.4초를 적용하였다. 또한, 2차 사이클의 온도를 고정시키고 1차 사이클의 최고온도를 1350℃부터 800℃까지 변화시키는 실험도 병행하였다. A_{C1}과 A_{C3}의 온도는 dilatation test를 통하여 측정하였다. 파면의 관찰은 SEM을 이용하여 500-2000배로 관찰하였다.

HAZ의 미세조직을 알아보기 위하여 광학현미경 관찰시 2% Nital 에칭액을 이용하였고, X선 회절분석으로 잔류 오스테나이트를 측정하기 위해서, 잔류오스테나이트의 기계적 소멸을 피하기 위하여 화학연마한 후 CrKα선을 이용하여 $(200)_\alpha$와 $(220)_\gamma$면의 회절선의 적분강도를 비교하였다. 한편, 각 모사영역에서의 파괴거동을 직접적으로 관찰하기 위하여 그림 1과 같은 SENT시험편을 사용하여 *in situ* 파괴시험을 수행하였으며, 시험으로부터 겉보기 파괴인성도 구하였다. 이때 국부적 취화부에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 M-A 복합조직(M-A constituents)의 관찰을 위하여 2단 전해에칭법(2 stage electrolytic etching)을 사용하였고, SEM내에 장치한 EPMA로 M-A조직 내의 탄소함량을 조사하였다.

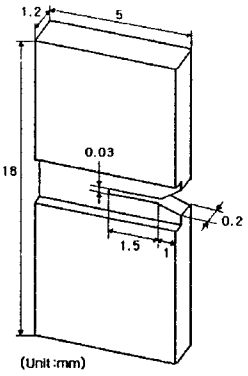

Fig. 1. Schematic view of micro-SENT specimen.

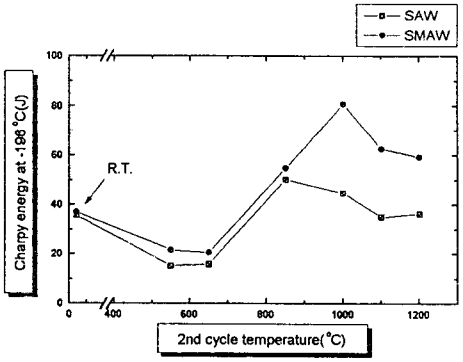

Fig. 2. Change in Charpy impact energies at 77K.

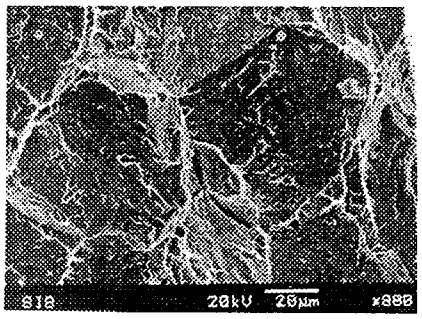

Fig. 3. Fractograph of ICCGHAZ specimen.

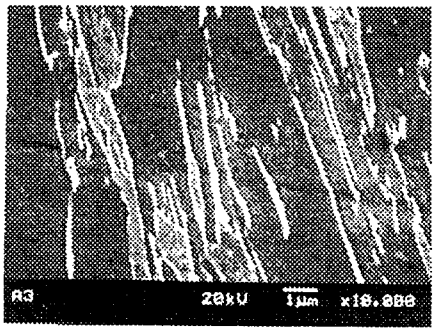

Fig. 4. Scanning electron micrograph of M-A constituents.

3. 결과 요약

9% Ni강의 SA와 SMA 용접한 HAZ의 최고 취약부위라고 예상되는 결정립 조대화 열영향부(CGHAZ : coarse grained HAZ)내의 각 조직을 모사하기 위하여, 1차 최고가열온도(Tp)를 1350℃로 하고 2차 최고 가열온도를 변화시킨 모사시편에 대하여 액체질소온도에서 행한 샬피충격시험 결과를 그림 2에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 두 가지 용접법의 모사시험 결과 모두 2차 최고가열온도가 페라이트와 오스테나이트의 2상영역, 혹은 그 직하일 때가 최저의 충격에너지를 나타냄을 알 수 있었다. 특히 이 영역의 충격에너지는 EEMUA(Engineering Equipment and Materials Users Association)[3], BS(British Standards)[4] 등에서 규정한 LNG 탱크를 위한 improved 9% Ni강의 저온 충격인성요구치인 34J에도 미치지 못하는 매우 낮은 값을 나타내어 이 영역이 본 9% Ni강의 LBZ임을 확인할 수 있었다. 즉, 2상영역으로 재가열된 결정립 조대화 열영향부(ICCGHAZ : intercritically reheated coarse grained HAZ)가 본 강의 LBZ이다. 1차 최고가열온도의 영향을 알아보기 위하여 2차 최고가열온도를 2상영역으로 고정하고 1차가열온도를 변화시켜 저온충격시험을 행한 결과로부터도 ICCGHAZ가 최고 취약부임을 다시 확인할 수 있었다. 이 결과의 검증을 위하여 각각의 파면을 주사전자현미경을 이용하여 관찰한 결과, ICCGHAZ의 경우, 그림 3에서 보는 바와 같이 입계 벽개파괴 양상을 뚜렷이 나타내어, 준벽개파괴거동을 보이거나, 딤플형 파괴거동을 보인 다른 CGHAZ(UACGHAZ, FGHAZ 등)에 비하여 매우 취약한 파괴기구를 가짐을 알 수 있었다.

이러한 ICCGHAZ 영역의 취화원인을 분석하기 위하여 미세조직 관찰을 실시한 결과, 기존 구조용 강에서의 LBZ 현상의 중요원인으로 알려져 있는[5-8] M-A 복합조직(혹은 도상 마르텐사이트)이 본 영역에 상당히 분포해 있음을 알 수 있었다. M-A 조직의 형태는 그림 4에서 나타낸 바와 같이 주로 연신형 M-A 조직(elongated M-A constituents)이었고, *in situ* SEM 관찰 결과, 기지와의 계면분리와 자체 파괴 등 다양한 기구로 벽개파괴를 유발, 혹은 촉진함을 알 수 있었다.

결론적으로, 본 9% Ni강의 초저온에서의 LBZ는 ICCGHAZ 임을 알 수 있었고, 그 주요원인은 결정립 조대화 효과와 M-A 복합조직임을 알 수 있었다. 또한 직접적으로 파괴거동을 관찰함으로써 파괴기구 및 경로를 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. 장재일, 주장복, 김철만, 양영철, 김우식, 권동일 : 대한용접학회 추계학술발표개요집 (1998) 39
3. EEMUA No.147, "Recommendations for the Design and Construction of Refrigerated Liquefied Gas Storage Tanks" (1986)
4. BS 7777, "Flat-bottomed, Vertical, Cylindrical Storage Tanks for Low Temperature Service" (1993)
5. Masao Toyoda : IIW Doc., X-F-006-94 (1994)
6. J.H. Chen, Y. Kikuta, M. Yoneda, and Y. Matsuda : Acta. Metall., 32 (1984) 1779
7. C.L. Davis and J.E. King : Metall. Mater. Trans. A, 25 (1994) 563
8. B.C. Kim, S. Lee, N.J. Kim, and D.Y. Lee : Metall. Trans. A, 22 (1991) 139