

# 합목성에 기초한 9% Ni 강 용접열영향부 파괴특성의 종합적 고찰

## Evaluation of Fracture Characteristics in 9% Ni Steel HAZ on the Basis of Fitness-for-Purpose Concepts

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

### 1. 서론

21세기의 주요에너지원으로서 각광받고 있는 액화천연가스(LNG : liquefied natural gas)는 고에너지 효율을 가진 청정에너지로서의 장점 때문에, 국내에서도 그 수요가 점차 증가하고 있다. LNG 저장탱크와 같은 가연성 저온액화가스의 저장탱크의 안전성을 평가하기 위해서 무엇보다도 우선되어야 하는 것은 만일의 경우 발생할지 모르는 취성파괴에 대한 안전성 확보이다. 이러한 안전성 확보에 대한 재료적인 기본 요구물성으로서 파괴역학이 발달하기 전에는 샤피 충격시험을 통한 최소 충격에너지만이 이용되었으나 파괴역학의 적용 및 시험이 활발해진 현재는 보다 실제상황에 근접한 해석이 가능한 파괴역학 시험결과가 요구되고 있는 실정이다. LNG 저장탱크의 취성파괴에 대해 파괴역학적인 안전성을 확보하기 위해서는 취성파괴를 일으키지 않는 충분한 균열발생저지성능을 가지고 있어야 할 뿐만 아니라, 이중안전성의 개념에 기초하여 만일의 경우, 예측치 못한 취성파괴가 발생하였다 하더라도 액의 유출을 불러일으킬 만한 대규모 파괴에 다다르기 전에 스스로 취성파괴 균열이 정지하는 성능이 요구된다. 한편, 9% Ni강은 높은 저온 인성으로 인하여  $-162^{\circ}\text{C}$ 의 액화점을 가진 LNG외에 액체산소(LOX,  $-183^{\circ}\text{C}$ ), 액체질소(LIN,  $-196^{\circ}\text{C}$ ) 등 저온액화가스 저장용기재료로 세계적으로 수많은 사용실적을 가지고 있으며, 아직까지도 대규모의 파괴사례는 보고된 바가 없는 우수한 저온재료로 국내에서도 저장탱크 내조로 널리 사용되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 국내에서 생산하여 실제 현장에서 널리 사용되고 있는 9% Ni강 용접부에 대하여 균열 발생저지성능과 취성균열 전파정지성능의 양쪽 모두에 대하여 파괴역학 시험을 수행하고 이 결과를 파괴역학적 안전성 확보에 대한 합목성(fitness-for-purpose)에 기초하여 고찰하고자 하였다.

인성요구치의 결정에 사용된 방법으로는 취성균열 발생저지인성의 경우는 일본의 Osaka gas가 14만 kl급 저장탱크에 관하여 수행한 FEM해석결과[1-2]를 바탕으로 상당히 많은 양의 관련 연구사용실적이 있는 WES -2805[3-4]를 겸하여 사용하였고, 취성균열전파 정지인성의 경우는 1982년~1985년 GRI(Gas Research Institute)가 주관한 국제공동 프로젝트[5]에서 나온 다양한 결과들을 응용하였으며 이에 따른 안전성 관련요구치들을 앞서 수행한 시험결과와 비교하여 9% Ni강의 파괴저항성을 종합적으로 고찰하였다.

### 2. 실험 방법

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

먼저 균열발생에 대한 파괴인성을 평가하기 위하여 HAZ내의 다양한 위치에 노치를 둔 HAZ CTOD 시험을 BS 7448에 근거하여 수행하였고, 동일한 노치위치에 대한 균열정지 파괴인성을 평가

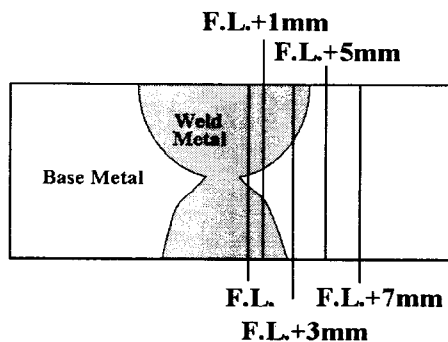
하기 위해서 CCA시험을 ASTM E1221에 준하여 수행하였다. 이때 사용된 시험기로는 Instron사의 50ton급 동적시험기를 사용하였다. HAZ 내의 평가대상위치로는 그림 1에서 나타낸 바와 같이 용접 용융선으로부터 시작하여 용융선+7mm에 이르기까지의 거리에 따라 선정하였고, SMA용접부와 SA 용접부에 대하여 각각 수행하였다. 또 T-형 이음부의 심한 열화가능성에 대하여 확인하기 위하여 이에 대한 CTOD시험을 겸하였는데, 시편채취위치는 그림 2에서 나타낸 바와 같다. 한편, 모든 시험 위치에서는 샐피충격시험을 병행하여 파괴역학적 시험의 경향성에 대한 신뢰도를 높이는 동시에 분석자료로 활용하였다.

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

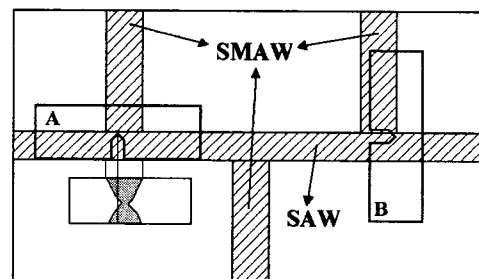
Chemical Compositions (wt%)						Mechanical Properties (at R.T.)		
C	Si	Mn	P	S	Ni	YS (MPa)	TS (MPa)	EL (%)
0.066	0.24	0.65	0.005	0.005	9.28	685	755	36

**Table 2. Welding conditions used for this study.**

Welding method	Edge preparation	Polarity	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)	Heat input (KJ/cm)
SAW	X	DC	320~360	25~28	25~53	Max. 24
SMAW	X	AC	100~130	25	5~7	Max. 30



**Fig. 1. Notch locations for toughness evaluation.**



**Fig. 2 The schematic view of specimen location for T-joint test..**

### 3. 결과 요약

본 9% Ni강의 SA와 SMA 용접 HAZ내 각위치에 대한 CTOD와 CCA시험 및 샐피 충격시험을 수행한 결과, 모든 부위에서 아주 높은 파괴인성을 나타냄을 확인할 수 있었다. HAZ내의 인성변화 경향으로는 CTOD인성과 샐피 충격인성의 경우는 용융선으로부터의 거리가 증가함에 따라 상승하는 경향을 나타내었고, CCA인성의 경우는 오히려 모재보다 용융선 부근의 인성이 더 높은 경향을 나타내었다. 그 예로서 균열정지인성의 LNG온도에서의 실험결과와 실두께로 보정한 결과를 그림 3에 나타내었다. 특히 9% Ni강 HAZ내의 취성균열정지인성  $K_a$ 는 취성균열발생인성인  $K_c$ 에 비하여 동일 위치에서 매우 높은 값을 나타내어 취성균열이 발생하더라도 곧바로 높은 균열정지 파괴인성을 가진 주위영역에 의하여 균열이 정지할 것을 쉽게 예측할 수 있다. 이러한 시험결과를 기존의 파괴역

학 코드로부터 예측한 요구인성치와 비교한 결과, 모든 영역에서 충분한 파괴역학적 인성을 가지는 것으로 판명되었고, 결론적으로 본 국산화 9% Ni강 용접부는 LNG 사용온도에서 저장탱크에 충분한 구조적 안전성을 제공함을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. S. Machida, N. Ishikura, N. Kubo, N. Katayama, Y. Hagiwara and K. Arimochii : JHPI, 29, (1991) 341.
2. S. Machida, N. Ishikura, N. Kubo, N. Katayama, S. Muratomo, Y. Hagiwara and K. Arimochii : JHPI, 31, (1993) 19.
3. WES 2805-1983 : “溶接継手の脆性破壊發生に對する缺陷の評價方法” (1983).
4. WES 2805-1997 : “溶接継手の脆性破壊發生および疲勞き裂進展に對する缺陷の評價方法” (1997).
5. Consortium of five Japanese company : “Crack arrest properties of 9% nickel steel and relation between crack-initiation and crack arrest test”, GRI report, GRI\_86-0007(1986).

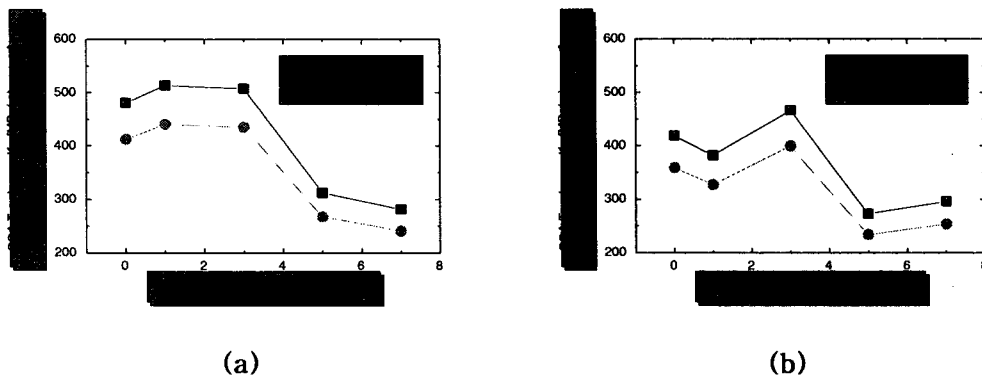


Fig. 3. Results of CCA tests at LNG temperature :(a) SMAW case and (b)SAW case.