

균열선단의 미세조직분포에 따른 용접열영향부 CTOD인성의 해석

Analyses of HAZ CTOD Toughness using Microstructures Distribution in Crack Tip Front

장 재일, 이 백우, 김 철만*, 양 영철*, 김 우식*, 권 동일

서울대학교 재료공학부, 151-742, 서울

한국가스공사 연구개발원, 425-150, 안산*

1. 서론

청정에너지로 각광을 받고 있는 천연가스(natural gas)는 운반성과 저장성의 문제로 천연 가스를 -162°C 에서 액화시킨 후 LNG(Liquefied Natural Gas) 형태로 운반되어 LNG 저장탱크에 저장된 후에 최종 소비자에게 공급되고 있는데, 9% Ni강은 우수한 초저온 인성에 근거하여 지상형 LNG 저장탱크의 내조로 많은 사용실적을 가지고 있다. 국내의 경우에도, LNG 저장탱크에 사용되는 9% Ni강은 P와 S를 극저화하였을 뿐만 아니라 QLT 방식의 열처리를 채택하여 매우 우수한 초저온 인성을 보유하고 있다. 이 QLT 방식의 9% Ni강은 국내의 LNG저장탱크 건설시 내조용 SAW 및 SMAW방식으로 용접되는데, 이때 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 가장 기초적이며 필수적이다. 그러므로, 본 연구자들은 국내 저장탱크에 사용되는 9% Ni강에 대하여 실제 저장탱크 용접시와 동일한 용접조건인 SMAW와 SAW방식으로 각각 용접한 실두개의 X-개선 HAZ 시험편의 파괴인성 평가를 수행하였고, 한편으로 용접부내 각 미세조직에 대한 모사시험편을 이용하여 9% Ni강이 가지는 독특한 “초저온 국부적 취화부(cryogenic LBZ - local brittle zone) 현상에 관한 연구를 병행한 바 있다[1-3].

본 연구에서는, 이러한 X-개선 HAZ 인성시험을 통한 거시적인 인성변화와 모사시험편을 이용한 극히 미시적인 인성변화 연구결과에 대한 연결고리로서 K-개선 용접부 파괴인성시험을 수행하여 균열선단의 미세조직 분포가 HAZ의 인성에 어떠한 영향을 미치는가를 체계적이고 정량적으로 평가하고자 하였다. 이를 위하여 K-개선 HAZ 내의 다양한 위치에 대하여 CTOD시험과 샤프충격시험을 수행하였고, 이와 병행하여 모사시험으로부터 얻은 결과를 기초로 작성한 노치선단에 존재하는 미세조직의 특성분포도를 작성하여 활용하였다. 한편, CTOD값에 영향을 미치는 균열주위의 거시적 강도 불균질(용착금속과 HAZ 사이)과 함께 균열선단의 미시적 강도 불균질(HAZ 내 조직사이)에 대한 연구도 수행하였다.

2. 실험 방법

실험에 사용된 시험편은 POSCO에서 QLT열처리를 통하여 제작된 22mm두께의 9% Ni 강으로 그 화학 성분과 상온에서의 기계적 성질을 표 1에 나타내었다. 이러한 후판 9% Ni강

을 SMAW 및 SAW방식으로 용접을 행하였는데, K-개선 이음부를 제외한 나머지 용접조건은 실제 LNG저장탱크의 용접조건에 접근하도록 행하였고 이를 표 2에 나타내었다.

우선 CTOD시험과 샤피충격시험의 평가대상위치로는 POSCO를 비롯한 일본의 여러 철강 회사에서 강제평가시 선택하는 평가대상 위치와 동일하게 용융선으로부터의 거리에 따라 선택하였다. 본 용접부의 경우는 오스테나이트 계열의 용착금속으로 인하여 연질이음부의 강도적 불균질을 가지고 있고, 피로예비균열의 직선도를 만족하기 어려워 표준화시험을 수행하기에는 어려움이 있어 본 연구자들이 X-개선 후판용접부의 파괴인성을 평가하기 위해서 사용한 개선한 CTOD시험법을 사용하였다[1-2]. 균일한 피로예비균열을 얻기위하여 시험편에 도입한 이중아크노치의 모양을 그림 1에 나타내었다. 그림 2는 각시험편에서 균열전파경로 및 개구변위량의 비대칭성을 알아보기위해 시험편위에 그린 0.25×0.25mm의 피치를 보여주고 있다. CTOD시험은 50ton급 Instron 만능시험기를, 샤피시험은 409J 용량의 시험기를 각각 이용하여 상온과 -100℃, 그리고 LNG온도인 -162℃와 액체질소온도인 -196℃에서 행하였다.

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	K	DC	320~360	25~28	25~53	Max. 24
SMAW	K	AC	100~130	25	5~7	Max. 30

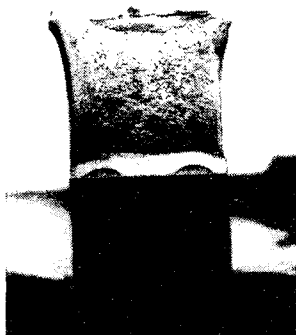


Fig. 1. Macro-view of double arc notch in CTOD specimen.

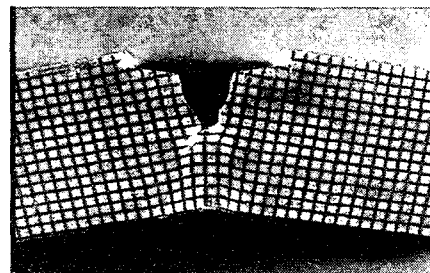


Fig. 2. Example of introduced mesh for the measurement of fracture behaviors.

3. 결과 요약

9% Ni강의 SA와 SMA 용접한 K-개선 HAZ내의 인성변화를 관찰한 결과, 용융선으로부터의 거리가 증가할수록 인성이 증가하였던 X-개선 용접부의 경우와는 달리 용융선근처의

인성이 상당히 증가해 있음을 알 수 있었다. 이는 X-개선 용접부의 경우, 용융선에서 균열 선단을 차지하는 용착금속의 비율이 매우 높아 HAZ와 용착금속사이의 상대적인 강도적 불균질 효과를 완화하여 균열전파경로의 편차를 줄이는데 비하여, 본 K-개선 용접부의 경우는 균열선단에 순수한 HAZ만이 존재하여 균열의 전파경로를 연한 용착금속쪽으로 전환시키기 때문이다. 하지만 용융선+1mm까지의 위치에 대한 시험결과, 균열전파경로가 편차를 보인후 최종파괴가 인성이 낮은 용착금속내에 도달하여 일어나는데 반하여, 동일한 편차를 보이는 +2와 +3mm의 경우는 HAZ내에서 최종파괴가 일어나 상대적인 인성은 훨씬 큰 결과를 나타내었다.

균열선단의 미세조직의 분포를 알기 위하여 우선적으로 그림 3(a)와 같이 각 시험편에 대하여 시험후 절단을 수행하여 정확한 피로예비균열의 위치를 평가하였다. 이 자료를 기초로 하여 순간선열원을 가정한 열전달 방정식을 이용하여 용접 열사이클의 최고가열온도(peak temperature)를 해석하였다. 최종적으로 그림 3(b)에 나타낸 바와 같은 각 영역에 대하여 기수행한 LBZ에 관한 연구결과를 도입함으로써 균열선단을 차지하는 정확한 미세조직분포 및 특성분포도를 작성할 수 있었고, 미소경도시험으로부터 얻은 자료도 같이 활용하여, SAW 및 SMAW 방식으로 용접된 각각의 HAZ 노치 시편에 있어서 균열선단을 차지하는 미세조직의 분포 및 성질이 CTOD 인성 및 파괴거동에 미치는 영향을 해석할 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 : '98 대한용접학회 춘계학술발표대회 (1998) 39
3. 장재일, 양영철, 김우식, 주장복, 권동일 : '98 대한용접학회 추계학술발표대회 (1998) 292
4. Y. Nagano, H. Oshige, and S. Nai : Journal of Japanese Welding Society, Vol.3 (1985) 766
5. S. Suzuki, K. Bessyo, M. Toyoda, and F. Minami : Quarterly Journal of JWS, Vol.13 (1995) 302

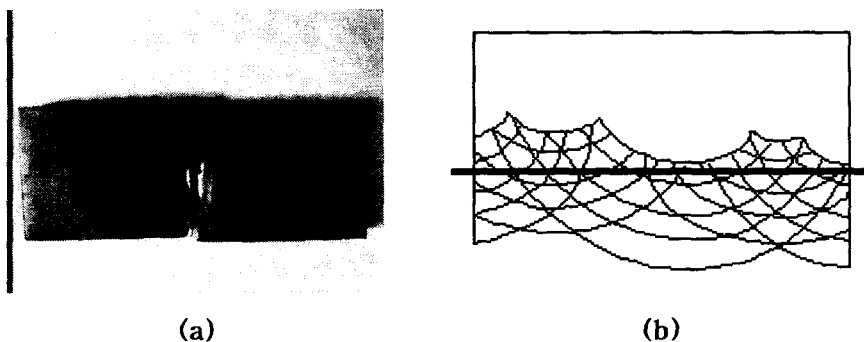


Fig. 3. Examples of (a) examination of fatigue precrack location, and (b) distribution of weld thermal cycles in its crack tip front using heat transfer equations.