KIGAS Vol.2, No.1. April, 1998.
(Journal of the Korean Institute of Gas)

LNG 저장탱크 내조용 강 용접부의 파괴인성 평가

장재일 · 주장복 · 양영철*, · 김우식*, · 홍성호*, · 권동일

서울대학교 재료공학부
한국 가스 공사 연구개발원*

(1997년 11월 17일 접수, 1998년 3월 19일 채택)

Evaluation of Fracture Toughness in Steel Weldment for Inner Wall of LNG Storage Tank

J.-i. Jang · J.-B. Ju · Y.-c. Yang* · W.-s. Kim* · S. H. Hong* · and D. Kwon

Division of Materials Science and Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea
**Research and Development Center, Korean Gas Corporation, Ansan, 425-150, Korea*

(Received 17 November 1997; accepted 19 March 1998)

요 약

본 연구에서는 LNG 저장탱크의 안전성을 확보하기 위한 연구의 일환으로서, 실제 탱크의 건설에서와 같은 조건으로 SMAW(Shielded Metal Arc Welding) 방식으로 용접된 9% Ni강의 X-개선 후판용접부내의 파괴인성의 변화를 평가하고 미세조직을 분석하였다. 이때 파괴인성의 평가는 본 연구자들이 제안한 '개선한 CTOD(crack tip opening displacement) 시험법'으로 행하였으며 열영향부내의 미세조직 및 파면은 광학현미경, 주사전자현미경 및 X-선 회절 분석기로 관찰하였다. 결과로부터 열영향부 내의 CTOD 값은, 평가위치가 용융선(Fusion Line-F.L.)으로 접근할수록 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 잔류 오스테나이트의 양이 줄어들고 결정립 미세화 효과가 없어지는 영역인 결정립 조대화영역이 열영향부내에서 차지하는 분율이 증가함에 따른 것이다. 한편, 잔류 오스테나이트의 열적 안정성이 상대적으로 감소하게 되는 F.L.~F.L.+3㎜에서 온도감소에 따른 인성감소의 정도가 F.L.+5㎜~F.L.+7㎜보다 상대적으로 매우 큼을 알 수 있었다.

Abstract - In this study, for the safety performance of LNG storage tank, the fracture toughness in X-grooved weld HAZ(heat-affected zone) of 9% Ni steel was evaluated qualitatively and quantitatively, and the relation with the change in microstructure was analyzed. The toughness assessment was performed through the modified CTOD test proposed for thick weldment with X-groove. Additionally, microstructures of HAZ were evaluated by OM, SEM and XRD. From the results, HAZ toughness of SMA(shielded metal arc)-welded 9% Ni steel decreased as the evaluated region approached the fusion line. The decrease in toughness was apparently caused by the increase in the fraction of coarse-grained zone within HAZ. On the other hand, toughness drop with decreasing test temperature in F.L.(fusion line)~F.L.+3mm was larger than that in F.L.+5mm~F.L.+7mm region due to the fact that in the former regions, retained austenite had poor stability.

Key words : Modified CTOD(crack tip opening displacement) test, LNG storage tank, 9% Ni steel, HAZ(heat-affected zone) toughness

1. 서 론

높은 효율을 가진 청정에너지로서의 장점 때문에 액화천연가스(이하 LNG : liquefied natural gas)의 사용은 세계적으로 꾸준히 증가하는 추세이며 특히, 국내에서는 급격한 경제발전에 힘입어 사용량이 폭증하고 있다. 이러한 LNG 수요의 증가는 많은 LNG 저장탱크의 건설을 필요로 하였고, 이에 최근에는 국내의 POSCO에서도 LNG온도인 -162℃에서의 우수한 저온인성때문에 LNG 저장탱크의 내조로 널리 사용되는 9% Ni강을 자체 생산하고 있다. POSCO에서는 9% Ni 강의 인성을 더욱 높이기 위하여 P와 S를 극저화하는 한편 QLT열처리를 채택하였다. 이는 기존에 3.5% Ni강과 5.5% Ni강에서 사용되었던 방법으로 Q처리(quenching)와 T처리(tempering)사이에 L처리(lamellarizing treatment-A_{c1}과 A_{c3}사이의 페라이트와 오스테나이트의 2상 영역으로 가열후 quenching)를 추가로 행하여 열적으로 안정한 잔류오스테나이트 함량의 증가와 결정립 크기의 미세화를 통하여 저온 인성의 증가를 얻는 열처리방법이다. 9% Ni강은 LNG저장탱크의 건설시 내조로서 SMAW(Shielded Metal Arc Welding), SAW(Submerged Arc Welding)와 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding)방식으로 용접되는데, 이때 용착금속으로는 Inconel타입과 Hastelloy타입의 70% Ni기 초합금이 이용된다. 용접열영향부(이하 HAZ: heat-affected zone)는 일반적으로 용접구조물에서 가장 취약한 부위로 알려져 있으므로, 9% Ni강의 HAZ의 파괴인성 평가는 LNG 저장탱크의 안전성 평가를 위하여 필수적이다. 따라서 기존의 QT-처리 9% Ni강의 HAZ의 경우는 K-개선 용접부에서 채취한 시편이나 모사시편을 이용한 살피 V-노치 시험과 CTOD시험이 행하여져 왔다[1-3].

본 연구는 합목(合目:fitness-for-purpose)개념을 바탕으로한 LNG 저장탱크의 안전성 확보를 위한 연구의 일환으로서, 국내에서 개발한 QLT-공정 9% Ni강 HAZ의 파괴인성 평가를 실제 LNG 저장탱크의 상황과 동일한 X-개선 후판용접부에 대하여 실시하였다. 이를 위하여 본 연구자들이 제안한[4] 개선한 CTOD시험(modified CTOD test)을 사용하였으며, 미세조직 관찰 및 파면분석 등은 X선 회절(XRD), 광학현미경(OM), 주사전자현미경(SEM)을 통하여 수행되었다.

2. 실험 방법

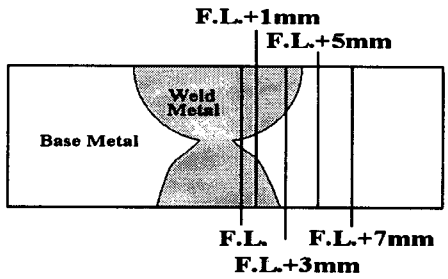

Fig. 1. Notch location of CTOD specimen with X-groove.

실험에 사용된 시험편은 POSCO에서 QLT 열처리를 통하여 제작 생산한 9% Ni 강으로 두께는 실제 LNG 저장탱크의 최고 후판부와 같은 22mm로 택하였다. 사용된 강의 화학 성분과 상온에서의 기계적 성질을 Table 1에 나타내었다. 이러한 후판 9% Ni강을 실제 LNG 저장탱크의 건설시 사용되는 것과 같은 조건으로 SMAW방식 용접을 행하였는데 그때의 용접조건을 Table 2에 나타내었다.

우선 CTOD시험의 평가대상위치로는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 용융선(fusion line-F.L.), F.L. + 1㎜, F.L. + 3㎜, F.L. + 5㎜, F.L. + 7㎜로 선택하여 기계적 결함을 도입하였으며, 이는 POSCO를 비롯한 국내외의 여러 철강회사에서 용접부 특성평가를 위하여 선택하는 평가대상위치와 동일한 것이다. 본 연구의 경우와 같이 강한 모재에 연성의 Inconel타입 용착금속(연신율:43%)을 사용함에 따른 강도적 불균질을 가진 X-개선 후판용접부의 파괴인성을 평가하기 위해서, 기존의 ASTM과 BS에 규격화된 CTOD 시험들[5-7]이나 K-개선이나 half-V-개선 용접부에만 적용가능한 기존의 용접부 CTOD시험의 draft들[8-10]을 사용하기에는 많은 어려움이 있다. 이에 본 연구자들은 앞서의 논문에서 제안한[4], 본 연구의 경우에 맞게 개선한 방법을 사용하여 CTOD시험을 행하였다. 개선한 CTOD시험[4]은, Kajimoto 등[11]의 방법을 검토, 보완한 잔류응력의 측정을 통한 균일한 피로예균열의 도입과 시험후 시험편의 평가법 등을 내용으로 하고 있고, 게이지로부터의 CTOD의 환산에는 F.L.~F.L.+3㎜에는 (1)식을, F.L.+5㎜~F.L.+7㎜에는 Toyoda 등[12]의 hinge model을 이용한 (2)식을 사용하고 있다.

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

Chemical Composiitons (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

Tabel 2. Welding conditions used for this study.

Welding method	Edge preparation	Multi-pass layer	Welding materials	Current (A)	Voltage (V)	Speed (mm/min)	Heat input (kJ/cm)
SMAW	X	6	Inconel type	100~120	25	50~70	28

(본 식들에서 사용된 모든 기호들은 ASTM E1290[6]에 따른 것이다.)

$$\delta = \frac{K^2(1-\nu^2)}{2[\sigma_{YS,WM}X + \sigma_{YS,BM}(1-X)]E} + \frac{r_p(w-a_0)}{a_0+r_0(w-a_0)}V_p \quad \cdots\cdots(1)$$

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

(1)식에서 항복강도인 σ_{YS}는, 용착금속의 경우 오스테나이트(fcc결정구조)계열이므로 온도에 따른 강도변화가 미미하다고 가정하여 -162℃에서도 상온에서와 같이 450 MPa을 사용한 반면, 페라이트계열인 모재의 경우 상온에서는 650 MPa을, -162℃에서는 문헌[13]을 참조하여 910 MPa을 이용하였다. (1)식에서 X는 용착금속의 평가대상 위치에서의 길이 분율이고 (2)식에서 α는 균열개구변위비이다. 한편, CTOD시험은 50ton급 Instron 만능시험기를 이용하여 상온과 -100℃, 그리고 LNG온도인 -162℃에서 행하였고 시험편은 상대적으로 취약할 것으로 예상되는 압연방향에 수직하게 채취하였다.

HAZ내의 미세조직을 알아보기 위하여 광학현미경을 사용하였는데 이때 에칭액으로는 2% Nital을 이용하였다. X선 회절분석(XRD)은 균일한 피로예균열을 얻기위한 잔류응력의 측정과 HAZ내의 잔류오스테나이트의 함량변화를 알아보기 위하여 이용되었다. 잔류응력의 평가를 위하여 평가대상지역이 모재에 속한 경우 CrKα선을, 용착금속에 속한 경우에는 CrKβ선을 각각 이용하여 측정하였고, 잔류 오스테나이트를 측정하기 위해서는 CuKα선을 이용하여 (110)α와 (200)γ면의 회절선의 적분강도를 비교하였다. 각각의 경우, 연마에 의한 압축잔류응력의 발생과 잔류 오스테나이트의 기계적 소멸을 피하기 위하여 10% HF + 90% H_2O_2로서 thinning한 후 관찰하였다. 마지막으로 파면은 거시적 관찰과 함께 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 2000배로 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

개선한 CTOD시험법을 이용한 파괴인성의 평가

우선 균일한 피로예균열을 얻기 위하여 두께방향으로의 잔류응력의 분포인 $\sigma_x(Z)$를 측정하였는데 Fig. 2와 같은 결과를 얻었다. 이 결과에 따라 상대적으로 압축응력이 걸려있는 두께방향의 한 쪽 또는 양쪽 끝에 국부 아크 노치(partial arc notch)를 도입함으로써 균일한 피로예균열 직선도를 성공적으로 얻을 수 있었다.

본 QLT-9% Ni강의 X-개선 후판 용접부내 HAZ에 대하여, 앞 절에서 간단히 소개한 개선화한 CTOD시험을 행한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 그림으로부터 HAZ내의 파괴인성, 즉 CTOD값은 평가대상위치가 모재로부터 멀어져

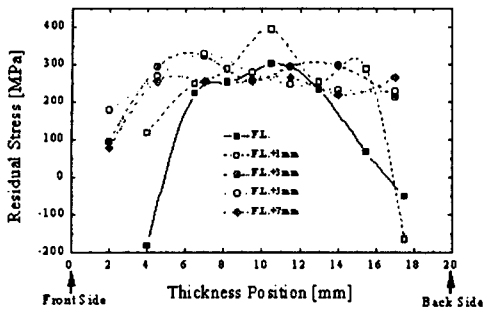

Fig. 2. Results of welding residual stress measurements.

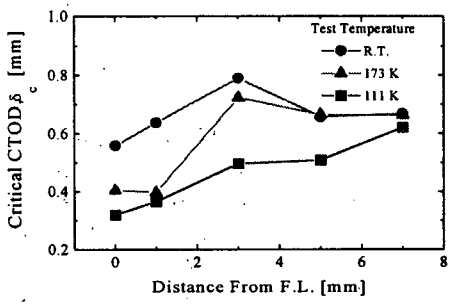

Fig. 3. CTOD values at the various notch locations and the various temperatures.

그러나 최소값을 나타내는 F.L에서도높은 파괴인성을 보인다. 참고로 최근의 보고에 의하면 [14], 길이 0.1t 깊이 0.2t 크기의 초기 결함이 존재하는 두께 40mm의 고인성 9% Ni강의 경우, LNG온도에서 단주기 지진이 발생하였을 때 취성파괴의 발생을 위하여 필요한 CTOD값은 0.085mm이다.

또, 예상한대로 CTOD값은 온도의 감소에 따라 감소하는 일반적인 경향을 나타내었는데, F.L.~F.L.+3mm의 경우가 F.L. +5mm와 F.L.+7mm의 경우에 비하여 훨씬 큰 결과를 나타내었다. 이러한 파괴인성의 변화기구는 다음 절에서 설명하였다.

Fig. 4에서 본 시험에서 적용된 개선한 CTOD 환산법을 통한 결과와 기존의 규격화된 CTOD환산법을 통한 결과의 비교를 나타내었다. F.L.~F.L.+3mm의 경우에는 차이가 미미하

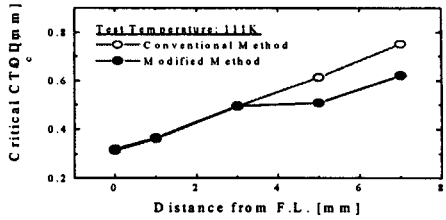

Fig. 4. Comparison of the modified method with the conventional method.

였는데 이는 식(1)의 첫째항이 둘째항에 비하여 상대적으로 아주 작은 값을 나타내기 때문이다. 하지만 강도적 불균질에 따른 균열개구변위의 비, α를 고려한 F.L.+5㎜와 F.L.+7㎜의 경우는 개선된 환산법에 의한 값이 훨씬 작은 값을 나타내어, 구조물의 극단적인 안전성 평가에는 개선한 시험법의 적용이 충분히 검토될 필요성이 있음을 알 수 있었다.

한편, 시험후의 평가법을 통하여 균열의 전파경로를 살펴보았는데 모든 평가대상위치에서 조금씩 균열의 성장이 용착금속 쪽으로 향함을 알 수 있었지만 1㎜이상의 급격한 편차를 보이지는 않았으므로 그 값을 그냥 취할 수 있었다. 하지만 F.L.+3㎜의 경우에는 상온과 -100℃에서 균열의 전파경로가 용착금속 쪽으로 상당히 진행된 후 파괴가 일어남을 발견하였는데 결과적으로 Fig. 3의 상온과 -100℃에서의 F.L.+3㎜ 경우의 CTOD값은 과대평가된 것이라 보여진다. 이러한 균열전파경로 편차는 강도적 불균질에 기인한 것으로 예상되며 이에 대한 자세한 연구는 현재 진행 중이다.

Fig. 5와 Fig. 6에 -162℃에서의 미시적, 거시적 파면관찰 결과를 나타내었다. 두 가지 경우 모두 평가대상위치가 F.L.으로 다가갈수록 연성파괴의 양상이 감소함을 확인할 수 있었다. F.L.+5㎜와 F.L.+7㎜인 경우에는 딤플로 이루어진 전형적인 연성파면을 나타내지만 노치의 위치가 F.L.에 접근할 수록 파면에 수직으로의 이차상 파괴의 분율의 증가하여 F.L.의 경우는 미세공동 합체에 의한 딤플외에도 입내파괴형태의 준 벽개파괴(transgranular quasi-cleavage)의 분율이 매우 증가해 있음을 관찰할 수 있다. 한편 파면의 거시적인 관찰에서도, F.L.에서의 거리가 증가할 수록 연성파괴의 척도를 나타내는 전단입술(shear lip)의 증가를 관찰할 수 있었다.

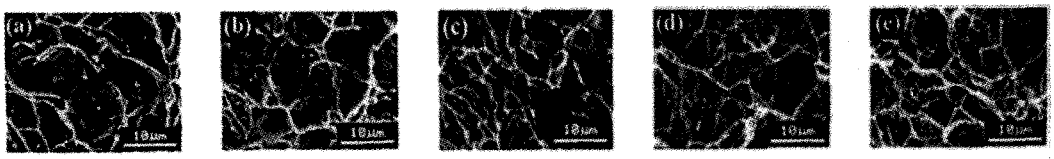

Fig. 5. SEM fractographs of CTOD specimens at -162℃ : (a)F.L., (b)F.L.+1mm, (c)F.L.+3mm, (d)F.L.+5mm, and (e) F.L.+7mm.

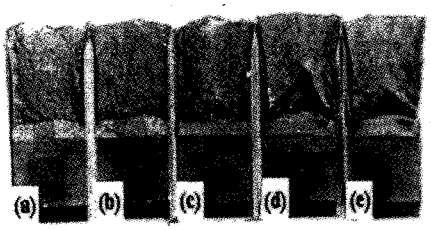

Fig. 6. Macro-views of fractured specimens (a)F.L., (b)F.L.+1mm, (c)F.L.+3mm, (d)F.L.+5mm, and (e)F.L.+7mm.

야금학적 분석을 통한 인성변화의 고찰

본 재료의 HAZ 내의 평가대상위치에 대하여 미세조직적인 분석을 실시하였는데 그 예를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 나타낸 바와 같이 각각의 미세조직을 용착금속을 제외한 세 부위에 대해 관찰하였다. 그림에서 보듯이 기본조직은 tempered martensite로 이루어져 있고 잔류 오스테나이트가 래쓰 경계(lath boundary)와 전(前)오스테나이트 경계(prior austenite boundary)에 존재하는 전형적인 9% Ni강 조직으로 이루어져 있다. 그림에서 보이는 검은 띠는 초기 응고 동안의 편석에 의한 것이다. 일일히 사진을 게재하지는 않았지만 예상되었던 바와 같이 결정립 조대화영역이 HAZ 내에서 차지하는 분율이 F.L.으로부터 멀어짐에 따라 급격히 감소함을 확인 할 수 있었다. 이에 대한 개략도를 Fig. 8에 나타내었다. 결정립 조대화영역의 분율이란 Fig. 8에서 L_{CGHAZ}/L_{HAZ}를 가리킨다.

앞 절에서 보여진 HAZ내의 인성변화는 이러한 결정립 조대화영역의 분율로서 설명할 수 있다. 일반적으로 9% Ni강의 저온 인성의 증가는 크게 잔류 오스테나이트의 존재와 결정립 미세화효과로서 설명되고 있다. Fig. 9에는, 각 평가대상위치에서 XRD를 통해 측정한 잔류 오스테나이트의 평균 함량을 나타내었다. Fig. 9로부터 잔류 오스테나이트 함량의 변화는, Fig. 3의 인성의 변화와 과대평가된 인성을 나타내는 F.L.+3㎜를 제외하고는 잘 일치함을 알 수 있다. 이러한 잔류 오스테나이트 함량의 변화는 결정립 조대화영역의 분율의 변화에서 기인한 결과이다. 다층용접시 HAZ 내의 결정립 조대화영역에서는, 후속 열사이클에 의해 $\alpha \rightarrow \gamma$ 역변태가 일어날 핵생성자리(nucleation site)가 결정립이 미세한 영역과 비교할 때 매우 작아서 오스테나이트의 석출이 감소하게 된다. 따라서 결정립 조대화 영역이 거의 전부를 차지하는 F.L.의 경우는 잔류 오스테나이트가 아주 작은 함량만을 가지게 되어 낮은 인성을 가지게 되는 것이다. 여기에 더하여, 결정립 조대화영역은 그 자체로도 결정립 미세화효과를 상실하여 낮은 인성치를 가지게 된다. 위의 사실들로부터 결정립 조대화영역이 HAZ내에서 차지하는 분율이 증가할수록, 즉 F.L.에 접근할수록 파괴인성은 감소하게 되는 것이다. 결론적으로 본 연구에서 파괴인성에 가장 중요한 영향을 미치는 인자는 HAZ내에서의 결정립 조대화영역의 분율이라 할 수 있다.

한편, 용착금속과 모재가 혼합된 평가대상위치인 F.L.~F.L.+3㎜에서는, F.L.+5mm와 F.L.+7mm에 비하여, 열이력을 받는 영역이 매우 좁아서, 더욱 복잡한 열이력을 받게 된다. 이러한 복잡한 열이력으로부터 확산에 의한 잔류 오스테나이트내의 합금원소의 재분배가 F.L.~F.L.+3㎜에서 더욱 활발하게 일어나게 된다. 그러므로 이 영역에서의 잔류 오스테나이트의 열적 안정성이 F.L.+5mm와 F.L.+7mm 영역에 비해 상대적으로 저하하게 된다. 결국 Fig. 3의 결과에서 나타난 바와 같이, 상온에서 -162℃로 온도를 내렸을 때 인성의 감소 정도가 F.L.~F.L.+3㎜의 경우가 F.L.+5 F㎜와 F.L.+7㎜의 경우보다 매우 큰 것은 상대적으로 열악한 잔류 오스테나이트의 열적 안정성에 기인한 것으로 사료된다

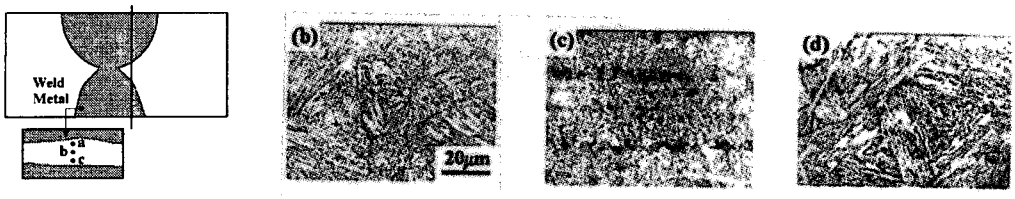

Fig. 7. Examples of optical micrographs for the change of microstructure in HAZ (F.L.+1mm): (a) location of detection point, (b) a point, (c) b point, and (d) c point.

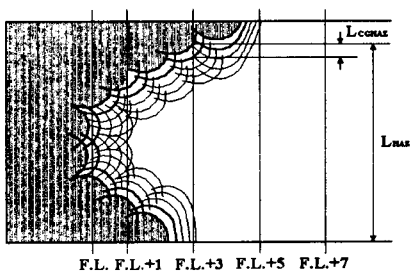

Fig. 8. schematic diagram for the change of coarse-grained region fraction.

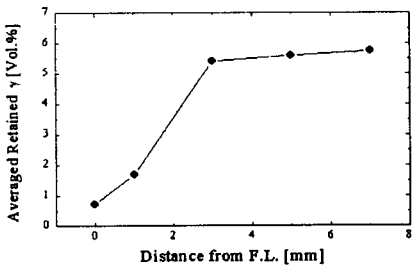

Fig. 9. Change of averaged retained austenite at the various locations. (at room temp.)

4. 결 론

본 연구에서는 QLT공정 9% Ni 강의 X-개선 용접부 HAZ 내에서의 파괴인성의 변화를 평가하였다. 그 주요결과는 다음과 같다.

1. 평가대상과 같은 강도적 불균질을 가진 X-개선 후판용접부의 파괴인성 평가를 위하여, 피로예균열의 도입, CTOD의 환산, 시험후의 검사법 등을 내용으로 개선한 CTOD시험법을 사용하여 성공적으로 파괴인성을 평가할 수 있었다.

2. 평가된 CTOD값은 용융선(F.L.)으로 접근할 수록 감소하였고 이를 SEM을 통한 파면사진과 거시적 파면 관찰을 통하여 경향성을 확인할 수 있었다. 그러나 최소값을 보이는 F.L.에서도 상당히 높은 CTOD값을 나타내었다.

3. 이러한 인성의 감소는 결정립 조대화영역내에서의 잔류 오스테나이트의 감소와 결정립 미세화효과의 부재에 기인한 것이고, 이 때 잔류 오스테나이트의 감소는 $\alpha \rightarrow \gamma$ 역변태자리의 감소에 의한 것이다. 그러므로 평가대상영역이 F.L.으로 접근할수록, HAZ내에서 결정립 조대화영역이 차지하는 분율이 증가하여 최종적인 인성이 감소하는 것이다. 결국 본 연구에서 평가대상위치에 따른 인성변화의 가장 중요한 인자는 HAZ내에서의 결정립 조대화영역의 분율이었다.

4. 온도감소에 따른 인성감소의 크기가 F.L.~F.L.+3㎜에서 F.L.+5㎜와 F.L.+7㎜에서 보다 상대적으로 매우 큼을 알 수 있었다. 이는 용착금속과 모재의 혼합영역인 F.L.~F.L.+3㎜에서, 다른 영역보다 상대적으로 좁은 영역에서 복잡한 열이력을 받게 되어, 잔류 오스테나이트의 열적 안정성이 더욱 열화한데서 기인한 것이라 사료된다.

참고문헌

1. Tamura, H.T., Onzawa, G. and Uematsu, S. : J. Japanese Welding Soc., 49, 854 (1980)
2. Nippes, E.F. and Balaguer, J.P. : Welding Journal, 65, 237-s(1986)
3. 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)
4. Jang, J.-i., Yang, Y.-c., Kim, W.-s. and Kwon, D. : Adv. Cryo. Eng. -Mater., in press(1998)
5. British Standard BS 5762(1979)
6. ASTM Standard E1290(1989)
7. British Standard BS 7448(1991)
8. Squrrel, S.J., Pisarski, H.G. and Dawes, M.G. : Working Party Report, BSIISM/4 /4 (1986)
9. ASTM E24 Committee, Draft ASTM Test Standard for Fracture Toughness Testing of Weldments, ASTM E24. 06.05.(1991)
10. Toyoda, M. IIW Doc., X-1217-91(1991)
11. Kajimoto, K., Tani, M. and Ikutoh, N. : Quartely J. Japanese Welding Soc., 4, (1983) 182
12. Arimochi, K., Nakanishi, M., Satoh, S., Minami, F., Toyoda, M. and Satoh, K. : J. Japanese Welding Soc., 52, 148(1983)
13. Korea Gas Corporation research report, DA-CR-059-94019412(1994)
14. Lee, J.-B. and Han, J.-K. : Journal of Korean Welding Society, 13(3), 34(1995)