

천연가스 배관용 API X65 강 용접열영향부의 파괴특성 평가

Evaluation of Fracture Characteristics in API X65 Steel HAZ For Natural Gas Pipeline

주장복, 장재일, 김철만*, 김우식*, 권동일
서울대학교 재료공학부
*한국가스공사 연구개발원

1. 서론

청정가스로서의 장점으로 인하여 천연가스에 대한 수요가 증가하고 있다. 이러한 천연가스는 LNG 상태로 수입된 것을 기화시켜서 지하매설 가스배관을 통하여 공급되고 있다. 현재 국내에서 건설되고 있는 천연가스 수송용 배관재료는 미국 석유회(API : American Petroleum Institute) 규격[1]에서 정한 고장력 배관(API 5L X65 및 X42)이 사용되고 있으며, 이 강관의 소재로는 1990년 국산화를 시작한 TMCP(Thermo-Mechanical Control Process)법에 의해 제조되는 고장력 강판을 사용하고 있다[2-4]. 이 강재는 제조시 가열, 압연 및 냉각공정의 복합적 제어에 의하여 강재의 미세조직을 변화시킴으로써 인성이 풍부하고, 용접성의 측면에서 보면, 기존의 불림(Normalizing) 처리재에 비해 탄소당량(C_{eq} : Carbon equivalent)이 0.04~0.08% 정도 낮아 용접부의 저온균열 발생이 적고 용접 열영향부의 인성도 우수하다. 하지만, 제조상의 특징(가속냉각)에 기인하는 조직의 불안정 및 불균일 잔류응력의 존재로 대입열 용접시 용접부의 연화와 절단가공시 변형의 단점이 있다.

이러한 천연가스 공급배관을 안전성 평가대상부위로 분류하면 TMCP법에 의하여 제조된 고장력 강을 소재로 하는 모재와 강관 제조시 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding) 및 SAW(Submerged Arc Welding)를 수행한 심용접부, 시공현장에서 GTAW 및 SMAW(Shielded Metal Arc Welding)를 실시한 원주용접부의 세 부위로 크게 나눌 수 있다. 이중에서도 배관의 안전성 및 건전성 확보를 위하여 가장 주의를 가지고 평가해야 할 대상은 당연히 손상 및 결함의 발생 비율이 가장 높은 심용접부 및 원주용접부이다. 이들 천연가스 배관용접부는 금속학적 및 역학적으로 파괴에 영향을 미치는 인자들을 다양하게 가지고 있는데, 이들 인자들에 의하여 파괴역학적 인성의 열화가 발생함과 동시에 파괴시험 결과의 해석에 많은 어려움이 유발된다. 천연가스 배관용접부파괴에 영향을 미치는 중요한 금속학적 인자인 배관재료인 TMCP강의 용접부 특성을 반영하는 인자로서, 도상 마르텐사이트(martensite island), 혹은 M-A 조직(M-A constituent)이라고 불리우는 이상 취화 조직의 존재와 용접열사이클에 의한 열영향부내의 결정립 크기 변화, TMCP강의 제조상의 특징(가속냉각)에 기인하는 조직의 불안정 등을 들 수 있다[5-6].

본 연구에서는 우선 천연가스 배관재료로 사용되고 있는 API 5L X65 등급의 고장력강의 용접부 특성에 대하여 살펴보고, 이러한 용접부 평가시 우선적으로 고려해야 될 금속학적 및 역학적 인자에 대해 살펴보았다. 또한, 실제 배관 용접 열영향부의 파괴특성을 평가하기 위해 열모사실험 및 실배관 실험을 수행하여 각 미세조직이 가지는 파괴특성을 평가하여 보았다.

2. 실험방법

실험에 사용된 시편은 천연가스 주배관으로 사용되고 있는 직경 30인치, 두께 17.5mm의 API 5L X65 강으로 표 1에는 시편의 화학적 조성, 모재의 기계적 특성 및 용접조건을 나타내었다. 천연가스 배관 용접열영향부의 파괴특성을 평가하기 위해 원주용접부와 심용접부 각각에 대하여 용접선으로부터의 거리에 따라 노치를 도입하여 샤피 충격실험을 수행하였다. 또한, 열모사 시편은 10×10×70mm 크기의 각봉 시험편을 사용하여 통전방식에 의한 열사이클 장치인 Gleeble 1500을 이용하여 재현하였다. 모사한 용접조건은 실용접조건으로서 SAW 용접부의 경우 13.09 kJ/cm, SMAW 용접부의 경우 19 kJ/cm를 받은 HAZ 내의 각 영역에 대하여 열사이클을 부여하였다. 이 때, 각 용접 열영향부에 대한 모사식은 다음과 같은 Rothenthal의 해석해를 응용한 모사식을 이용하였다. 본 연구에 사용되는 용접조건을 모사한 800℃에서 500℃까지의 냉각시간($\Delta t_{8/5}$)를 구해보면, SMAW와 SAW 용접부의 경우 각각 37.7초와 25.8초이며, 500℃에서 300℃까지의 냉각시간($\Delta t_{5/3}$)은 SMAW와 SAW

용접부의 경우 각각 101.8초와 69.6초였다. 열사이클 부여 조건은 1차 최고가열온도(first peak temperature; T_{p1})를 1350°C로 고정시켜 급속 가열을 한 다음 약 3초간 그 온도에서 유지시키고, $\Delta t_{8/5}$ 및 $\Delta t_{5/3}$ 을 제어하였다. 이 후에 후속 pass의 열열향을 조사하기 위하여 재가열온도(second peak temperature; T_{p2})를 각각 1200°C에서 500°C까지 변화시켰다. 한편, A_{c1} 과 A_{c3} 변태점을 찾기 위해서 우선적으로 자동변태기록장치인 Formaster-F를 이용하여 dilatation test를 실시하였다.

각각의 모사시험편에 대하여 10×10×55mm 크기의 표준 샐피 V-노치 충격시험편을 제조하였다. 이 때, 노치도입부위는 열전대를 부착한 부위로 설정하여 원하는 열사이클을 반영할 수 있도록 하였다. 샐피 충격시험은 ASTM E23의 기준에 따라 상온과 가스배관의 사용온도와 유사한 -30°C에서 Tinius-Olsen 사의 최대용량 408J의 충격시험기를 사용하여 실시하였다.

Table 1. Chemical compositions of mechanical properties of API 5L X65 pipeline steel used in this work.

	C	Mn	P	S	Si	Fe	Ceq
Composition (%)	0.08	1.45	0.019	0.003	0.31	Bal.	0.32
Yield strength	523 MPa	Tensile strength		591 MPa	Elongation		39 %

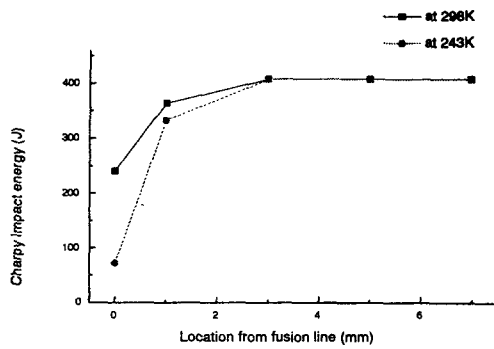
Table 2. Welding materials and conditions in this work.

	Welding method	AWS	Groove Configuration
Seam weldment	GTAW + SAW	ER70S-G F8A4-EA3-A4	X
Girth weldment	GTAW + SAW	ER70S-G E9016-G	V

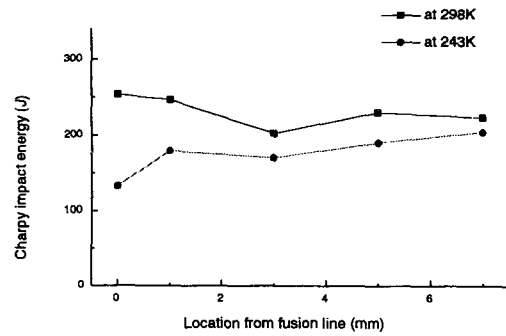
3. 결과 요약

그림 1에는 원주용접부와 심용접부에 대하여 수행한 샐피 충격시험의 결과를 나타내었다. 원주용접부의 경우에는 용접선 근처가 가장 낮은 충격에너지 값을 보이며, 용접선에서 멀어짐에 따라 충격에너지 값이 증가하는 양상을 얻을 수 있었다. 용접선 부근에서의 낮은 충격에너지 값은 용접열이력으로 인한 결정립조대화의 영향이며, F.L.(Fusion line)+3mm 이후의 시편의 경우에는 결정립의 미세화로 인한 결과로 사료된다. 심용접부의 경우에는 뚜렷한 경향은 살펴볼 수 없었다.

본 연구에 사용된 고장력 API 강재에 대한 dilatation 결과, A_{c1} 및 A_{c3} 온도는 각각 720°C와 830°C로 결정할 수 있었다. 그림 3의 (a)와 (b)에는 SAW 및 SMAW로 모사한 시편의 경우에 상온과 -30°C에서의 1차 최고가열온도를 조대화 결정립 온도인 1350°C로 고정시키고, 재가열온도를 변화시켜서 얻은 충격시험결과를 나타내었다. 이를 살펴보면, SMAW와 SAW로 모사한 경우에 있어서 SR CGHAZ(Subcritically Reheated Coarse Grained HAZ)와 IR CGHAZ(Intercritically Reheated CGHAZ)가 가장 낮은 인성값을 보였다. SCR CGHAZ(Supercritically Reheated CGHAZ)의 비교적 높은 인성 값을 나타내었는데, 이는 미세조직을 살펴본 결과 모재에 비해 매우 미세한 페라이트와 펄라이트 때문인 것으로 사료된다.

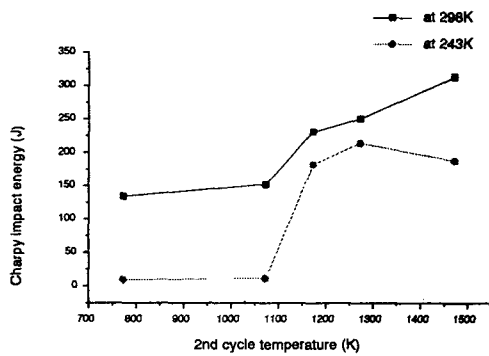


(a)

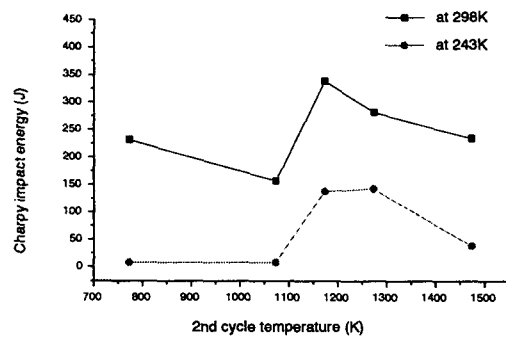


(b)

Fig. 1. Changes in Charpy impact energy for actual HAZ specimens of (a) girth and (b) seam weldment.



(a)



(b)

Fig. 2. Changes in Charpy impact energy for synthetic HAZ specimens of (a) SAW and (b) SMAW.

References

- [1] API (American Petroleum Institute) : Spec. 5L, Line Pipe (1992) 15-23.
- [2] B. de Meester : ISIJ International, 37, (1997) 537-551.
- [3] M. Morikawa, K. Moriyama and K. Itoh : J. Japan Welding Society, 55(2) (1986) 83-90.
- [4] I. Watanabe, M. Suzuki, H. Tagawa, Y. Kunisada, Y. Yamazaki and N. Iwasaki : 日本鋼管技報, 112 (1986) 63-68.
- [5] K. Satoh and M. Toyoda : Proc. of 7th Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineerin, HJouston, Texas, (1988) 495-502.
- [6] B.C. Kim, S. Lee, N.J. Kim, and D.Y. Lee : Metallurgical Transactions A, 22A (1991) 139-149.