

천연가스 배관 용접부의 파괴특성에 미치는 역학적 인자의 영향

Effect of Mechanical Factors on Fracture Characteristics of Natural Gas Pipeline Weldment

주장복, 이정석, 김철만*, 장재일**, 김우식*, 권동일
 서울대학교 재료공학부
 *한국가스공사 연구개발원
 **(주) 프론틱스 연구개발부

1. 서론

현재 국내에서 사용 중인 관경 24인치 이상의 천연가스 배관은 API 5L X65 등급의 배관으로써 배관 제작 시 심 용접부의 경우에는 GTAW 및 SAW 방법으로 용접하며, 원주 용접부의 경우에는 GTAW 및 SMAW 방법으로 용접이 이루어지고 있다. 이들 천연가스 배관용접부는 금속학적 및 역학적으로 파괴특성에 영향을 미치는 인자들을 다양하게 가지고 있는데, 이들 인자들에 의하여 파괴 역학적 인성의 열화가 발생함과 동시에 파괴시험 결과의 해석에 많은 어려움이 유발된다. 그러므로, 천연가스 배관 용접부가 가지는 금속학적 및 역학적 인자에 대해 이해하고, 이러한 인자들이 배관 용접부의 파괴특성에 미치는 영향에 대해서 정량적으로 평가해야 될 필요가 있다.

본 연구에서는 천연가스 배관 용접부가 가지는 다양한 금속학적 및 역학적 인자들에 대해서 살펴 보고, 특히, 강도적 불균질과 잔류응력 등의 역학적 인자가 배관 용접부의 파괴특성에 미치는 영향을 평가하여 보았다.

2. 실험방법

실험에 사용된 시편은 천연가스 주배관으로 사용되고 있는 직경 30인치, 두께 17.5mm의 API 5L X65 강으로 표 1에는 시편의 화학적 조성을 나타내었다. 먼저 천연가스 실배관 용접부의 파괴특성을 평가를 통한 금속학적 인자의 영향을 조사하기 위해서 샤피 충격실험을 수행하였다. 실험은 -19.6℃에서부터 상온까지 20℃ 간격으로 ASTM E23에 따라 수행하였다.

천연가스 배관의 파괴특성에 미치는 잔류응력의 영향을 평가하기 위해서 먼저, Barkhausen Noise 방법에 의해서 배관 용접부에 존재하는 잔류응력을 평가하였다. 그림 1에는 잔류응력 평가를 위해 필요한 표준 시편의 채취 위치를 나타내었다. 이러한 표준 시편 및 STRESSCAN 500C를 이용하여 배관 용접부에 존재하는 잔류응력을 평가하였다. 또한, 이러한 잔류응력이 파괴특성에 미치는 영향을 조사하기 위해서 시편에 응력제거 열처리를 수행한 후에 CTOD 실험을 수행하였다.

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

	C	Mn	P
Composition (%)	0.08	1.45	0.019
	S	Si	Fe
	0.003	0.31	Bal.

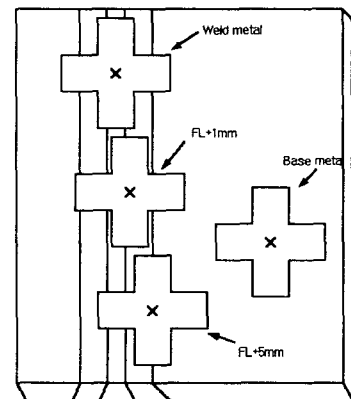


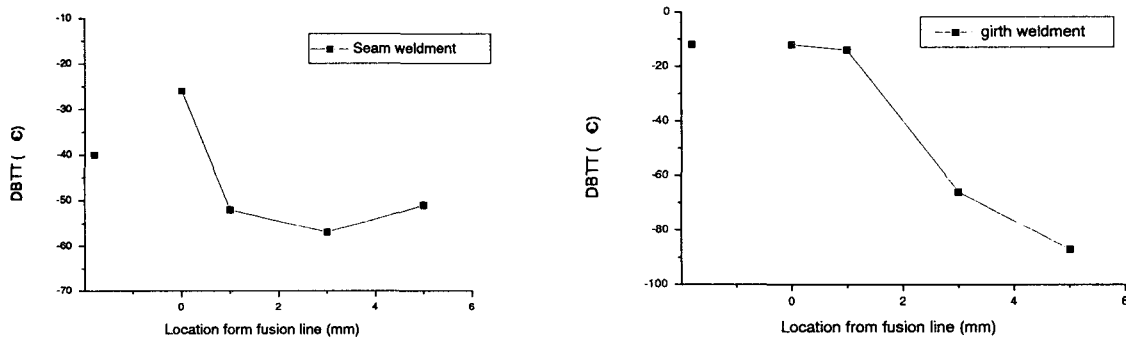
Fig. 1. Standard specimens for BN methods.

3. 결과요약

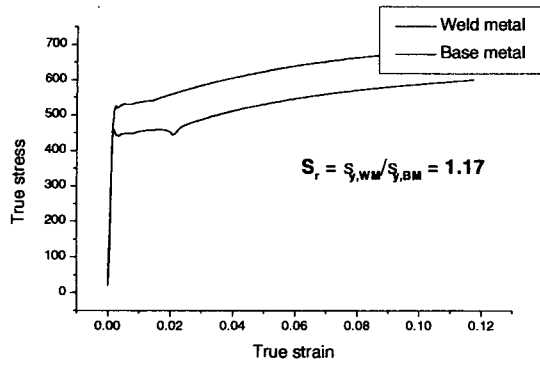
그림 2에는 천연가스 실배관 용접부의 연성-취성 천이온도를 용융선(fusion line)으로부터의 거리에 따라 나타내었다. 이를 살펴보면, 먼저 원주 용접부의 경우에는 용착금속과 용융선 근처의 시편에서 가장 낮은 인성값을 나타내었으며, 용융선으로부터 거리가 멀어짐에 따라 파괴인성이 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 미세조직의 관찰 및 열모사 실험결과, 조대한 결정립 및 저온 변태생성물인 하부 베이나이트나 M-A조직이 용융선 근처에서 나타나기 때문인 것으로 보인다[1-2]. 이는 기존의 샤피 충격실험이나 CTOD 실험결과[3]와도 유사한 결과이다. 심용접부의 경우에도 이와 유사하게 용융선 근처 시편에서 가장 낮은 인성값을 나타내었다. 이로부터 주로 천연가스 배관 용접부에 존재하는 금속학적 인자가 취성과파괴를 일으키는 주된 인자로서 작용한다는 것을 알 수 있었다.

이러한 금속학적 인자 뿐만 아니라, 천연가스 배관 용접부에 존재하는 다양한 역학적 인자들도 용접부의 파괴특성에 지대한 영향을 미치게 된다. 본 API 강재의 경우에는 원주 및 심 용접부의 경도 및 인장실험 결과, 경질이음부(overmatched joint)의 특성을 가지고 있다. 즉, 그림 3에서 나타낸 바와 같이 원주 및 심 용접부에 대하여 1보다 큰 강도비, $Sr(= \sigma_{y,WM} / \sigma_{y,BM})$, 여기서 $\sigma_{y,WM}$ 과 $\sigma_{y,BM}$ 는 각각 용착금속과 모재의 항복강도)를 가지고 있다. 이러한 강도적 불균질은 균열첨단의 소성구속의 정도를 변화시켜 파괴발생인성에 영향을 미치게 된다[4-5]. 특히, 균열첨단 부근에 고강도재가 존재하는 용착금속부의 경우에는 고강도재에 의한 변형이 구속되어서 얻어지는 파괴인성이 실제 파괴인성보다 더 작게 나타나게 된다. 또한, CTOD 실험 후 균열의 진전 양상에서도 알 수 있는 바와 같이 주위에 고 인성부가 존재하는 경우에는 균열의 만곡현상을 야기하게 된다.

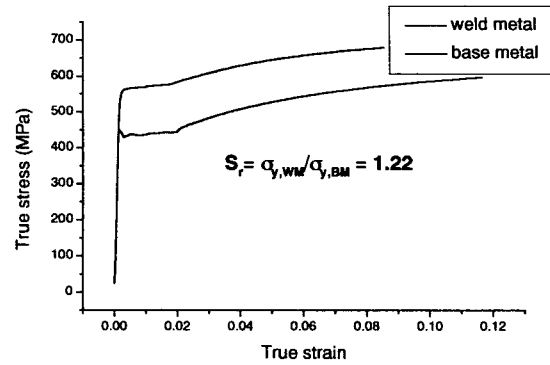
천연가스 배관 용접부에 존재하는 잔류응력은 수치해석 결과[6] 및 Barkhausen Noise 실험결과에서 알 수 있는 바와 같이 용착금속부에서 주로 인장 잔류응력이 존재하나, 열영향부 및 모재의 경우에는 압축 잔류응력이 존재하게 된다. 그러나, 그림 4에서 나타낸 바와 같이 잔류응력의 영향을 제거하기 위해 응력제거 열처리를 수행한 시편에 대한 CTOD 실험결과를 살펴보면, 전반적으로 파괴인성 값이 약간 감소하기는 하지만, 파괴특성에 거의 영향을 끼치지 않는 것으로 나타났다.



(a) (b)
Fig. 2. Ductile-brittle transition temperatures of actual weldment.

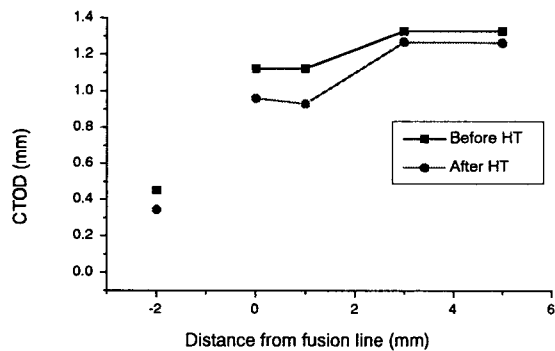


(a)

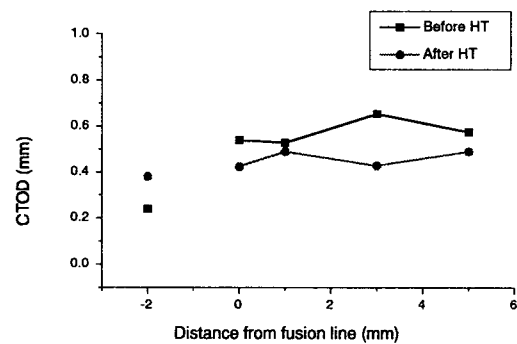


(b)

Fig. 3. True stress and strain curves for (a) girth and (b) seam weldment.



(a)



(b)

Fig. 4. CTOD test results for (a) girth and (b) seam weldment.

References

- [1] B.C. Kim, S. Lee, N.J. Kim, and D.Y. Lee : Metallurgical Transactions A, 22A (1991) 139-149.
- [2] K. Satoh and M. Toyoda : Proc. of 7th Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Houston, Texas, (1988) 495-502.
- [3] J.B. Ju, J.I. Jang, W.S. Kim, and D. Kwon : Proc. of 3rd International Pipeline Conference, Calgary, Canada, (2000) 169-175.
- [4] F. Minami, M. Toyoda, C. Thaulow, and M. Hauge : IIW Doc. X-F-008-94.
- [5] R. Denys : IIW Doc. X-1222-91.
- [6] A. Stacey, J.Y. Barthelemy, R.H. Leggat, and R.A. Ainsworth : Engineering Fracture Mechanics, 67 (2000) 573-611.