

미세조직의 변화에 따른 천연가스 배관 용접부의 파괴특성 평가

Assessment of Fracture Characteristics of Natural Gas Pipeline Weldment According to the Microstructural Changes

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

1. 서 론

구조용강이 용접공정을 겪게 되면, 다층 용접열사이클로 인해 열영향부가 생성된다. 용접부, 특히 이러한 용접열영향부에서는 상변태 및 다양한 화학반응으로 인해 금속학적 불균질성이 존재하며, 이는 파괴 저항성과 같은 재료의 물리적 특성들에 크게 영향을 끼치게 된다. 이러한 특성들로 인해 용접열영향부에서의 물성평가법들의 복잡성 및 데이터 해석에 있어서 여러 가지 문제점을 야기하여 용접열영향부의 파괴특성에 관한 다양한 연구들이 행하여져 왔다.

본 연구에서는 국내 천연가스의 주배관으로 사용되고 있는 API 5L X65 등급의 고장력강 용접부의 파괴역학적 안전성을 평가하기 위해 실제 원주 용접부와 심 용접부의 파괴인성 시험을 수행하여 미세조직의 변화를 중심으로 미시적 혹은 거시적인 관점에서의 금속학적 인자가 파괴인성에 미치는 영향에 대해 평가하였다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 재료는 관경 30 inch, 관 두께 17.5mm인 API 5L X65 강으로서 표 1에는 이에 대한 화학적 조성과 상온에서의 기계적 물성을 나타내었다. 이러한 API 5L X65 강재는 국내 강관 제조회사에 의해 실제 지하매설 배관에 사용할 수 있도록 제작된 배관을 사용하였는데, 용접조건은 실제 천연가스 배관의 용접에 사용되는 조건으로 행하였고, 이를 표 2에 나타내었다.

용접부의 파괴인성을 평가하기 위하여 먼저 샐피 충격시험을 행하였다. 원주 용접부와 심 용접부 각각에 대하여, 실두께 용접배관의 1/2t 위치에서 채취한 표준 시험편을 2% Nital 용액으로 에칭하여 용접부 평가대상 위치를 결정한 다음 250 μ m의 V형 노치를 평가대상 위치에 형성시켰다. 평가대상 위치는 용접 용융선으로부터의 거리에 따라 달리하였으며, 각각의 위치에 두께 관통형 노치(through-thickness notch)를 도입하였다. 실험은 온도에 따른 파괴인성의 변화양상을 관찰하기 위해서 상온을 비롯하여 0 $^{\circ}$ C에서부터 20 $^{\circ}$ C의 간격으로 완전 취성파괴가 발생하는 온도까지 ASTM E23[1]에 따라 수행하였다.

집합조직 관찰은 본 천연가스 배관의 경우 제조공정상 압연공정을 수반하기 때문에 방향에 따른 인성변화 양상을 확인하기 위해 이용하였다. 우선 시험편 제작에 따른 집합조직의 변화효과를 제거하기 위하여 10% HF + 90% H₂O₂로서 에칭한 후에 Rich. Seifert & Co.의 3000PTS 장비를 이용하였다.

Table 1. Chemical compositions and mechanical properties of API 5L X65 steel.

	C	Mn	P	S	Si	Fe	Ceq
Composition (%)	0.08	1.45	0.019	0.003	0.31	Bal.	0.32
Yield strength	523MPa		Tensile strength		591MPa	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 원주 및 심 용접부의 온도에 따른 샤프 충격실험 결과를 나타내었다. 본 천연가스 배관의 경우에는 운용조건이 $-30^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ 로서 본 연구에서는 극한 상황을 가정하기 위해서 상온 및 0°C , -40°C 에서 실험을 수행하였다. 이를 살펴보면, 모든 온도에서 평가대상 위치가 용융선인 경우에 충격인성이 가장 낮게 나타났으며, 용융선에서 멀어짐에 따라 충격 에너지 값이 증가하는 경향을 나타내었다. 용융선 시험편의 -40°C 에서의 충격인성 값이 가장 낮게 나타났지만, 이는 API 5L 규격[2]에서 요구하는 모재에 대한 수치인 0°C 에서 평균 68J, 각각 27J보다는 높게 나타나 본 천연가스 배관 원주 용접부는 일단 재료선정에는 아무런 문제가 없음을 알 수 있었다.

이러한 용접열영향부 내의 인성변화 요인을 분석하기 위하여 평가대상 위치에 대하여 광학현미경을 이용한 미세조직 분석을 실시하였는데, 그 예로서 원주 용접부의 미세조직을 그림 2에 나타내었다. 용융선 근처의 열영향부의 경우(그림 2(b))에는 매우 조대한 페라이트가 형성되었으며, 페라이트 결정립 내부에 상부 베이나이트나 마르텐사이트를 관찰할 수 있었다. 본 천연가스 배관과 같은 고장력 강도의 경우에는 느린 냉각속도 즉, 큰 입열량에서 생성되는 상부 베이나이트는 인성이 매우 낮은 조직으로 마르텐사이트나 하부 베이나이트에 비해 고온에서 변태가 일어나기 때문에 후속 pass에 의한 열영향 또는 후열처리에 의해서 쉽게 분해되지 않아 HAZ 인성에 나쁜 영향을 미치게 된다[3]. 또한, 이러한 상부 베이나이트가 많이 생성되는 용접 입열량 조건에서 이 조직과 함께 나타나는 도상 마르텐사이트는 취성 균열의 발생 및 전파를 조장하게 된다[4-6].

하지만, 용융선에서 멀어짐에 따라 결정립의 크기는 작아지고, 매우 넓은 영역에서 미세한 결정립의 페라이트-펄라이트 복합조직을 관찰할 수 있었다. 이러한 미세조직은 앞서의 파괴인성 실험결과에서 F.L.+3mm 이후의 시험편에서의 높은 인성의 원인인 것으로 확인할 수 있었다.

심 용접부의 경우에 평가대상 위치에 관계없이 충격에너지 값이 원주 용접부에 비해 비교적 낮은 인성 값을 나타내었는데, 기존의 연구에 의하면, 모재의 파괴특성 평가 위치가 심 용접부 방향인 경우가 원주 용접부 방향인 경우보다 인성이 낮게 나온다는 보고가 있으며, 본 연구에 사용되는 가스 배관에 대한 기존 인장 실험 결과에서도 이와 유사하게 원주 용접부 방향의 연신율이 5%정도 더 작게 나오는 것에도 일치한다. 이러한 결과에 대한 설명으로 가장 많이 언급되는 것이 집합조직의 존재이다. 즉, 본 API 강재와 같이 압연에 의해 제조된 경우에는 최종 미세조직이 측정 위치 및 방향에 따라 비슷하게 나타나더라도 집합조직의 강도에 의해 인장물성 및 파괴인성이 크게 달라지게 된다. 그림 3(b)에는 본 천연가스 배관의 압연방향의 차이에 따른 {110} 슬립면의 분율과 원주 및 심 용접부 방향으로의 모재의 충격인성을 동시에 나타내었다. 즉, 본 천연가스 배관의 경우에는 {110} 슬립면의 분율 차이로 인해 원주 및 심 용접부의 파괴인성이 차이가 난다고 결론 내릴 수 있었다[7-8]. 하지만, 심 용접부의 파괴인성 수준은 앞 절에서 설명한 바와 같이 규격 요구치를 충분히 만족시키고 있으며, 다른 규격의 강재들과 비교할 경우에도 매우 양호한 인성값을 가지고 있어서 본 천연가스 배관의 안전성에는 크게 영향을 끼치지 않을 것으로 판단된다.

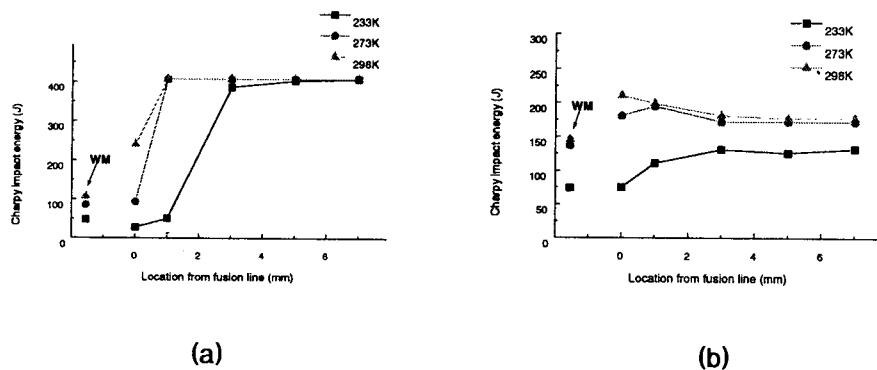


Fig. 1. Charpy impact energy vs. testing position according to the testing temperature: (a) girth weldment and (b) seam weldment.

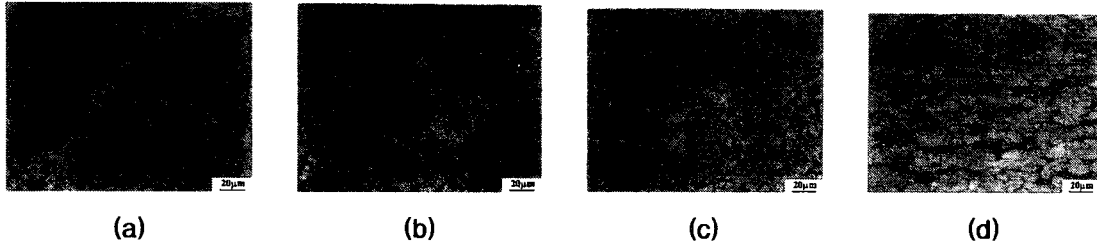


Fig. 2. Microstructures of girth weldment: (a) weld metal, (b) HAZ near WM, (c) HAZ near BM, and (d) base metal.

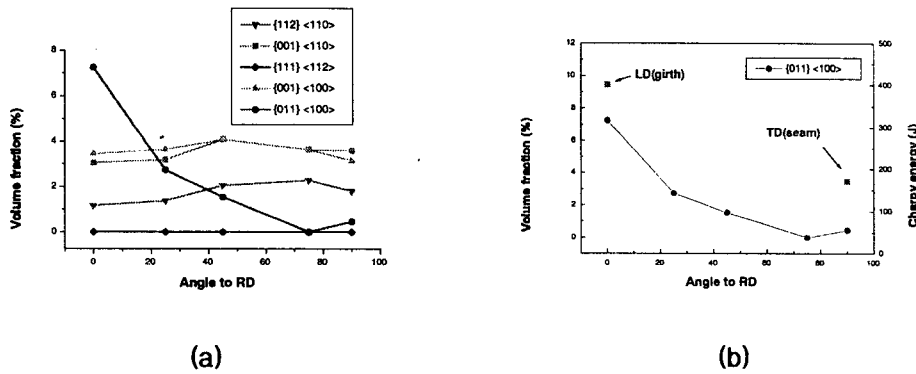


Fig. 3. Volume fractions of {110} planes according to the angle to RD.

4. 결 론

국내 천연가스 주배관 재료로 사용되고 있는 API 5L X65 고장력 배관 용접부에 대한 파괴인성 실험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 원주 용접부의 경우에는 평가대상 위치가 용융선에 가까워짐에 따라 샤프 충격인성이 감소하였으며, 이를 미세조직의 관찰결과로부터 확인하였다.
2. 심 용접부의 경우에는 평가대상 위치에 따라 인성값의 변화가 거의 없었지만, DBTT 평가결과 미세조직 관찰결과에서 확인할 수 있는 바와 같이 용융선 근처에서 가장 낮은 인성값을 나타내었다.
3. 원주 및 심 용접부에서의 인성값의 차이는 압연공정에 의해서 생성되는 {110} 형태의 집합조직 때문인 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- [1] ASTM Standard E23 (1996)
- [2] API(American Petroleum Institute): Spec. 5L, Line Pipe, 15, (1992).
- [3] Ohmori, Y., Ohtani, H., and Kunitake, T.: J. Japan Welding Society, 57(10), 1690, (1971).
- [4] Toyoda, M.: IIW Doc. X-1217-91, (1991).
- [5] Denys, D.: Proc. EVALMAT 89, 1013, (1989).
- [6] Lee, S., Kim, B.C., and Kwon, D.: Met. Trans. A, 23A, 2803, (1991).
- [7] Allen, N.P., Earley, C.C., Hale, K.F., and Rendall, J.H.: J. Iron Steel Inst., 808, (1964).
- [8] Baczynski, G.J., Jonas, J.J., and Collins, L.E.: Met. Trans. A., 30A, 3045, (1999).