

천연가스 배관 용접부의 미세조직의 변화에 따른 파괴특성 평가

† 주 장 복 · 이 정 석 · 장 재 일* · 김 철 만** · 김 우 식** · 권 동 일
서울대학교 재료공학부, *(주) 프론틱스, **한국가스공사 연구개발원
(2001년 5월 20일 접수, 2001년 8월 23일 채택)

Assessment of Fracture Characteristics of Natural Gas Pipeline Weldment According to the Change of Microstructures

Jang-Bog Ju · Jung-Suk Lee · Jae-il Jang · Cheol-man Kim
Woo-sik Kim and Dongil Kwon

School of Mater. Sci. & Eng., Seoul National University, Seoul 151-742, Korea
Frontics, Inc., Seoul 151-742, Korea
Korea Gas Corporation, Ansan 150-340, Korea
(Received 20 May 2001 ; Accepted 23 August 2001)

요 약

세계적으로 천연가스의 사용은 높은 효율을 가진 청정에너지로서의 장점으로 인하여 꾸준히 증가하는 추세이며, 국내에서도 급격한 경제규모의 증대와 함께 사용량이 증가하고 있다. 천연가스 배관 용접부는 금속학적 및 역학적으로 파괴에 영향을 미치는 인자들을 다양하게 가지고 있는데, 이들 인자들에 의하여 파괴역학적 인성의 열화가 발생함과 동시에 파괴시험 결과의 해석에 많은 어려움이 유발된다. 본 연구에서는 우선 국내 천연가스의 주 배관으로 사용되고 있는 API 5L X65 등급의 고장력강 용접부의 파괴역학적 안전성을 평가하기 위한 목적으로, 실제 원주 용접부와 심 용접부의 파괴인성 시험을 수행하여 미세조직의 변화를 중심으로 미시적 혹은 거시적인 관점에서의 금속학적 인자가 파괴인성에 미치는 영향에 대해 평가하였다.

Abstract - Reliability evaluation of welded structures by mechanical testing of weld heat-affected zones (HAZs) has become general practice throughout the world. HAZs of steel welded joints show a gradient of microstructure from the fusion line to the unaffected base metal. This study is concerned a correlation between the microstructural change and the fracture characteristics in HAZs of both seam and girth welds of API 5L X65 pipeline steel, which is generally used for natural gas transmission pipelines in Korea. The focus in this study is the investigation of macroscopic fracture behavior of the various regions within HAZ. Changes in microstructure and toughness were observed using actual HAZ specimens. To evaluate the macroscopic toughness of actual HAZ, Charpy V-notch impact test and CTOD test were performed.

Key words : Fracture toughness, Steel weldment, Microstructural factor, API 5L X65 pipeline steel

1. 서 론

세계적으로 천연가스의 사용은 높은 효율을 가진 청정에너지로서의 장점으로 인하여 꾸준히 증가하는 추세이며, 국내에서도 80년대 중반 처음으로 천연가스가 도입된 이래로 급격한 경제규모의 증대와 함께 사용량이 증가하고 있다. 이러한 천연가스는 LNG 상태로 수입된 것을 기화시켜서 전국 환산망 형태를 가지고 있는 치하매설 가스배관을 통하여 공급되고 있다. 현재 국내에서 건설되고 있는 천연가스 수송용 배관재로는 미국 석유회사(API: American Petroleum Institute) 규격에서 정한 API 5L X65 및 X42 등급 강이 사용되고 있으며, 이 강관의 소재로는 1990년 국산화를 시작한 TMCP 공정에 의해 제조되는 고장력 강관을 사용하고 있다.

천연가스 공급배관을 안전성 평가대상부위로 분류하면 TMCP 공정에 의하여 제조된 고장력 강을 소재로 하는 모재와 강관 제조시 GTAW 및 SAW를 수행한 심 용접부, 시공현장에서 GTAW와 SMAW를 실시한 원주 용접부의 세 부위로 크게 나눌 수 있다. 이 중에서도 배관의 안전성 및 건전성 확보를 위하여 가장 주의를 가지고 평가해야 할 대상은 손상 및 결함의 발생 비율이 가장 높은 원주 용접부 및 심 용접부이다. 이들 천연가스 배관 용접부는 금속학적 및 역학적으로 파괴에 영향을 미치는 인자들을 다양하게 가지고 있는데, 이들 인자들에 의하여 파괴역학

적 인성의 열화가 발생함과 동시에 파괴시험 결과의 해석에 많은 어려움이 유발된다. 이러한 천연가스 배관 용접부에 존재하는 다양한 금속학적, 역학적 인자들은 파괴안전성의 평가에 지대한 영향을 미치므로 배관 용접부 파괴특성 연구시 우선적으로 연구되어야 할 대상으로 인식되어 일본, 미국 등 가스배관 선진국에서는 이러한 인자들에 대한 연구를 꾸준히 수행해 오고 있다. 하지만 국내에서 기존에 수행된 배관 용접부 파괴관련 연구는 선택된 용접부위의 파괴시험결과를 단순히 규격요구치와 비교하여 안전성 가부를 결정하는 초보적인 수준에 머물러 있고, 상기 인자들에 대한 기초 학술연구는 거의 전무한 상태에서 이루어져서 시험 및 해석방법의 신뢰성에 다소 취약한 부분이 있다.

그러므로, 본 연구에서는 우선 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 1 에는 이에 대한 화학적 조성과 상온에서의

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

	C	Mn	P	S	Si	Fe	Ceq
Composition (%)	0.08	1.45	0.019	0.003	0.31	Bal.	0.32
Yield strength	450 MPa		Tensile strength		550 MPa	Elongation	39 %

Table 2. Welding materials and welding conditions used in this study.

	Welding method	AWS	Groove Configuration	Heat Input (kJ/cm)
Seam weldment	GTAW+ SAW	ER70S-G F8A4-EA3-A4	X	10.8-17.9
Girth weldment	GTAW+ SMAW	ER70S-G E9016-G	V	3.0-30.0

천연가스 배관 용접부의 미세조직의 변화에 따른 파괴특성 평가

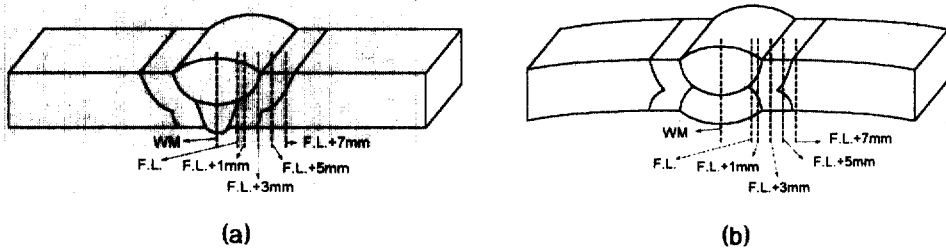


Fig. 1. Tested position of fracture toughness test; (a) girth and (b) seam weldment.

기계적 물성을 나타내었다. 이러한 API 5L X65 강재는 국내 강관 제조회사에 의해 실제 지하매설 배관에 사용할 수 있도록 제작된 배관을 사용하였는데, X 개선 형상을 가지고 있는 심 용접부의 경우에는 GTAW 및 SAW 방식으로 용접이 되어 있다. 이러한 배관의 원주용접부는 V 개선 형상을 가지도록 가공한 이후에 GTAW 및 SMAW 방식으로 용접을 행하였는데, 용접조건은 실제 천연가스 배관의 용접에 사용되는 조건으로 행하였고, 이를 표 2에 나타내었다.

용접부의 파괴인성을 평가하기 위하여 먼저 샤피 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. 그림 1에는 용접 열영향부의 파괴특성 변화를 확인하기 위한 용접부의 실험 평가대상 위치를 나타내었다. 평가대상 위치는 용접 용융선으로부터의 거리에 따라 달리하였으며, 각각의 위치에 두께 관통형 노치(through-thickness notch)를 도입하였다. 샤피 충격시험은 용량이 407J인 Tinius Olsen사 충격 시험기를 이용하였으며, 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.

CTOD 실험은 원주 용접부의 경우에는 17.5mm 두께의 실배관 용접부를 최소로 표면가공하여 14mm 두께의 시험편을 이용하였으며, 심 용접부의 경우에는 배관의 곡률을

고려하여 12mm 두께의 시험편을 사용하였다. 평가대상 위치는 충격시험과 동일한 위치에 두께 관통형 균열을 도입하였다. 피로예비 균열은 ASTM E1290[2]을 따라 도입하였으며, 초기 균열의 길이(a_0/W)가 0.45~0.55를 유지하도록 하였다. CTOD 실험은 10ton급 Instron 만능시험기를 이용하여 상온과 -40 $^{\circ}$ C에서 수행하였다.

용접 열영향부 및 모재의 미세조직을 관찰하기 위해 광학현미경을 사용하였으며, 이때 에칭액으로는 3% Nital을 이용하였다. 파면 관찰을 관찰을 위해서 샤피 충격실험 및 CTOD 실험 후 파괴된 시험편에 대하여 SEM(주사전자 현미경)을 이용하여 800배로 관찰하였다.

집합조직 관찰은 본 천연가스 배관의 경우에 제조공정 상 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.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 원주 용접부의 파괴특성 평가

그림 2(a)에는 원주 용접부의 온도에 따른 샤피 충격실험 결과를 나타내었다. 본 천연가스 배관의 경우에는 운용조건이 -30 $^{\circ}$ C~40 $^{\circ}$ C로서 본 연구에서는 극한 상황을 가정하기 위해서 상온 및 0 $^{\circ}$ C, -40 $^{\circ}$ C에서 실험을 수행하였다. 이를 살펴보면, 모든 온도에서 평가대상 위치가 용융선인 경우에 충격인성이 가

장 낮게 나타났으며, 용융선에서 멀어짐에 따라 충격 에너지 값이 증가하는 경향을 나타내었다. 특히, 모든 온도에서 F.L.+3mm 이후의 시험편에 대한 충격에너지 값이 모재와 비슷한 수준으로 나타났는데, 이는 본 연구실에서 보유한 충격시험기의 용량의 한계로 인해 모재와 유사한 값을 얻은 것으로 실제로는 이보다 더 큰 인성을 나타내는 것으로 판단할 수 있었다. 용융선 시험편의 -40℃에서의 충격인성 값이 가장 낮게 나타났지만, 이는 API 5L 규격[3]에서 요구하는 모재에 대한 수치인 0℃에서 평균 68J, 각각 27J보다는 높게 나타나 본 천연가스 배관 원주 용접부는 일단 재료선정에는 아무런 문제가 없음을 알 수 있었다.

파괴역학적 안전성 평가를 위한 CTOD 실험을 원주 용접부의 HAZ 내 여러 위치로부터

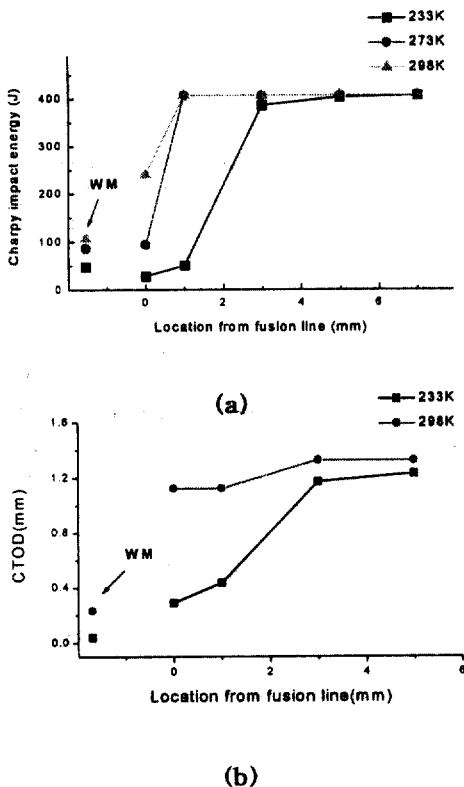


Fig. 2. Results of (a) Charpy impact test and (b) CTOD test for girth weldment.

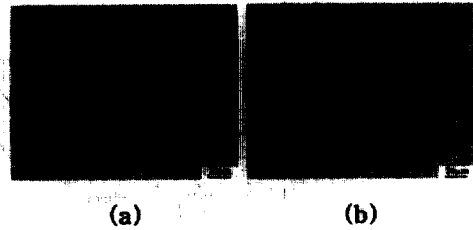


Fig. 3. Microstructures of girth weldment near (a) fusion line and (b) base metal.

터 상온, -40℃에서 수행한 결과를 그림 2(b)에 나타내었다. 본 천연가스 배관 원주 용접부의 파괴인성, 즉 CTOD 값은 용융선에 평가대상 위치가 접근할수록 감소함을 알 수 있었고, 예상한 대로 온도의 감소와 함께 일부 영역에서의 인성 감소가 관찰되었다. 이러한 결과는 앞서의 샤피 충격인성 값의 변화양상과 동일한 것으로 샤피 충격시험으로 충분히 본 천연가스 배관 원주 용접부의 파괴인성 변화양상을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

CTOD 실험 후의 평가법을 통하여 균열의 전파경로를 살펴보았는데, 용융선 근처의 시험편의 경우에는 균열의 성장이 거의 직선도를 유지하고 있으나, F.L.+3mm 이후의 시험편의 경우에는 상온과 -40℃에서 균열의 전파경로가 연한 모재쪽으로 진행된 이후에 파괴가 일어남을 관찰할 수 있었다. 즉, F.L.+3mm 이후의 시험편의 경우의 CTOD 값은 이러한 균열 전파경로의 휨에 따른 인성의 과대평가 효과가 포함된 것이라 보여진다[4-5].

이러한 용접열영향부 내의 인성변화 요인을 분석하기 위하여 평가대상 위치에 대하여 광학현미경을 이용한 미세조직 분석을 실시하였는데, 그 예를 그림 3에 나타내었다. 용융선 근처의 열영향부의 경우(그림 3(a))에는 매우 조대한 페라이트가 형성되었으며, 페라이트 결정립 내부에 상부 베이나이트나 마르텐사이트를 관찰할 수 있었다. 본 천연가스 배관과 같은 고장력 강 경우에는 느린 냉각속도 즉, 큰 입열량에서 생성되는 상부 베이나이트는 인성이 매우 낮은 조직으로 마르텐사이트나 하부 베이나이트에 비해 고온에서 변태가 일어나기 때문에 후속 pass에 의

한 열영향 또는 후열처리에 의해서 쉽게 분해되지 않아 HAZ 인성에 나쁜 영향을 미치게 된다[6]. 또한, 이러한 상부 베이나이트가 많이 생성되는 용접 입열량 조건에서 이 조직과 함께 나타나는 도상 마르텐사이트는 취성 균열의 발생 및 전파를 조장하게 된다. Kim 등[7]의 연구결과에 의하면, LBZ를 형성하는 급속화학적 인자 중 도상 마르텐사이트 조직이 충격인성에 가장 나쁜 영향을 미친다고 발표하고 있다. 특히, 도상 마르텐사이트는 이상역으로 재가열된 조립역 부위에서 가장 많이 나타나고 있는데, 이는 이상역으로 재가열될 때 생성된 탄소 함량이 높은 오스테나이트가 냉각되면서 침상의 고탄소 마르텐사이트 조직으로 변화하기 때문이다.

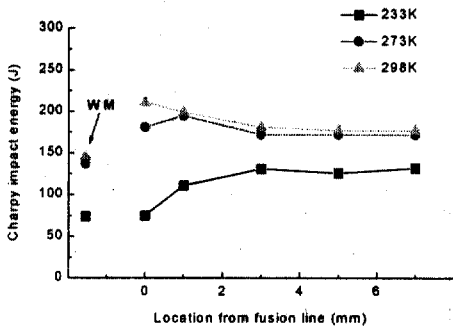
하지만, 용융선에서 멀어짐에 따라 결정립

의 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. 즉, 본 천연가스 배관 원주 용접부의 경우에는 용접 열영향부 내의 파괴인성의 변화양상이 주로 원주 용접부가 가지는 급속화학적 인자에 의해 가장 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

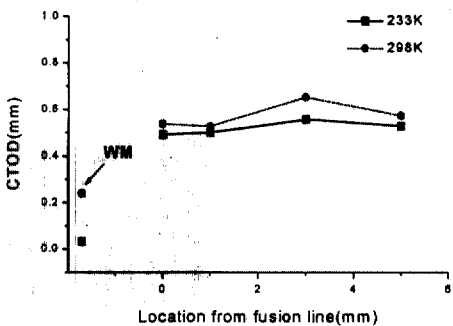
3-2. 심 용접부의 파괴특성 평가

원주 용접부와 마찬가지로 본 천연가스 배관 심 용접부에 대해서도 상온, 0℃ 및 -40℃에서 샤피 충격실험을 수행하였으며, 실험결과를 그림 4(a)에 나타내었다. 이를 살펴보면, 먼저 상온 및 0℃ 실험결과에서는 원주 용접부와는 달리 파괴인성 평가대상 위치에 따라서 열영향부 내의 샤피 충격인성이 거의 일정한 것을 관찰할 수 있었다. 하지만, -40℃에서의 실험결과를 살펴보면, 평가대상 위치가 용융선에 가까워짐에 따라 충격인성이 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 용융선 시험편의 -40℃에서의 충격인성 값이 가장 낮게 나타났지만, 이는 원주 용접부와 마찬가지로 API 5L 규격[3]에서 요구하는 모재에 대한 수치보다는 높게 나타나 본 천연가스 배관 심 용접부도 일단 재료선정에는 아무런 문제가 없음을 알 수 있었다.

그림 4(b)에는 심 용접부에 대한 CTOD 실험결과를 나타내었다. 샤피 충격실험과는 달리 상온과 -40℃에서 모두 평가대상 위치에 따른 파괴인성의 변화양상을 관찰할 수 없었다. 하지만, 그림 5에 나타낸 바와 같이 미세조직의 경우에는 원주 용접부와 유사하게 용융선 근처에서의 조대한 페라이트 및 상부 베이나이트와 도상 마르텐사이트가 관찰되었



(a)



(b)

Fig. 4. Results of (a) Charpy impact test and (b) CTOD test for seam weldment.



(a)

Fig. 5. Microstructures of girth weldment near (a) fusion line and (b) base metal.

고, 모재 근처에서는 미세한 페라이트와 필라이트 복합조직으로 나타났다.

본 연구에 사용되는 가스배관의 설계상의 운용온도는 $-30^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ 로써, 본 연구에서는 상온 및 극한 상황을 가정한 -40°C 에서의 파괴특성 평가 실험(CTOD 평가 및 샤피 충격 실험)을 수행하였다. 하지만, API 강 용접부의 파괴특성에 대한 기존의 연구들을 살펴보면, 운용온도에서의 평가뿐만 아니라 다양한 온도에서의 실험을 통한 평가대상 위치에서의 시험편의 연성-취성 천이온도(DBTT) 및 파괴인성의 상한값(upper shelf value)을 측정하여 이로부터 각각의 파괴특성을 결정짓는 연구가 이루어지고 있다. 특히, 본 가스배관의 운용온도 구간은 원주 및 심 용접부의 천이영역에 해당된다고 할 수 있으므로 평가대상 위치에 따른 DBTT 및 상한값의 변화를 평가할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 온도에 따른 샤피 충격실험을 수행하여 기존

의 실험에서와 동일한 평가대상 위치에 대해서 DBTT 및 샤피 충격인성의 상부에너지를 측정하였다.

그림 6에는 원주 및 심 용접부에 대하여 평가대상 위치에 따른 DBTT의 변화를 나타내었다. 이를 살펴보면, 원주 용접부의 경우에는 앞서의 샤피 충격인성이나 CTOD 인성에서 예측할 수 있는 바와 같이 평가대상 위치가 용융선에 가까워짐에 따라 점점 더 높은 DBTT, 즉 더 낮은 인성 값을 나타내고 있다. 이에 반해 심 용접부의 경우에는 앞서의 샤피 충격인성과 CTOD 인성과는 달리 용융선 시험편에서 가장 높은 DBTT를 보이며, 다른 영역에서는 DBTT가 큰 차이를 보이지는 않았다. 이는 그림 5의 심 용접부에 대한 미세조직의 관찰 결과와 일치하는 경향으로 본 천연가스 배관 심 용접부의 경우에도 용접 열영향부 내의 인성변화가 주로 금속학적 인자에 의해 결정된다고 결론지을 수 있다. 용착금속의 경우에는 원주 용접부에서 가장 높은 DBTT를 나타내어 용융선 시험편과 더불어 가장 취약한 영역이라고 할 수 있는데 비해, 심 용접부에서는 용융선 시험편보다 오히려 낮은 DBTT를 가졌다. 하지만, 상부에너지 측면에서는 원주 및 심 용접부 모두 다 용착금속이 제일 낮게 측정되었다.

3-3. 집합조직의 평가

용접 열영향부 내의 미세조직의 변화양상만으로는 심 용접부의 경우에 평가대상 위치에 관계없이 상부에너지 값이 원주 용접부에 비해 비교적 낮은 인성 값을 갖게 되는 원인을 설명할 수는 없다. 기존의 연구에 의하면, 모재의 파괴특성 평가 위치가 심 용접부 방향인 경우가 원주 용접부 방향인 경우보다 인성이 낮게 나온다는 보고가 있으며, 본 연구에 사용되는 가스배관에 대한 기존 인장 실험 결과에서도 이와 유사하게 원주 용접부 방향의 연신율이 5%정도 더 작게 나오는 것까지도 일치한다. 이러한 결과에 대한 설명으로 가장 많이 언급

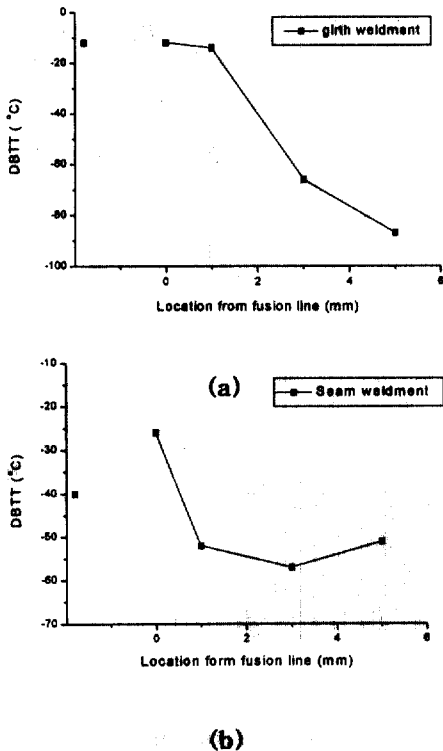


Fig. 6. DBTT of (a) girth and (b) seam weldment.

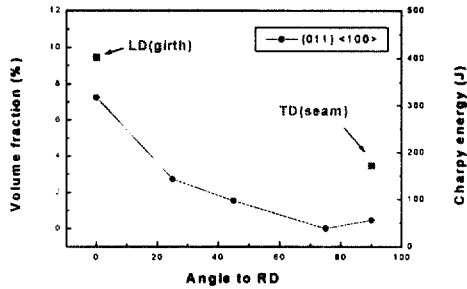


Fig. 7. Volume fraction of {110} planes and impact toughness.

하는 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.

본 천연가스 배관의 경우에는 고강도와 고인성을 동시에 얻기 위해서 TMCP 공정을 이용하였다. 이러한 TMCP 공정은 재료의 최종 미세조직 및 결정구조의 집합조직 형성에 영향을 미치는 인자로서 작용하게 된다. Allen 등[8]의 결과에 의하면 다양한 방위를 가지는 순수한 철의 취성파괴가 {001} 슬립면을 포함하게 되며, 이는 이후에 다결정인 경우에 있어서도 일반적인 현상이라고 알려지고 있다. 즉, {001} 형태의 집합조직은 이면에 작용하는 국부적인 취성 파괴용력을 감소시켜서 압연방향으로의 delamination의 밀도를 증가시키는 효과를 가져오게 된다. 이에 비해 연성파괴의 경우에는 {110}과 {112} 슬립면의 분포가 {001} 취성파괴 면의 분포보다 더 중요하며, 재료 내부의 결정립이 {110}과 {112} 슬립면을 포함할 분율이 충격인성에 지대한 영향을 미치게 된다[9]. 즉, 연성파괴는 결정립계나 첨가물, 금속간 화합물과 같은 불연속부에서 발생하는 microvoid가 덩뿔을 형성하게 되어 발생한다. 이러한 void의 발생과 성장에 대한 전위기구로 집합조직의 연성파괴에 미치는 영향을 설명할 수 있다. 앞서 설명한 {110} 슬립면은 철강재와 같은 BCC 금속에 있어서의 소성변형의 주된 원인인 {110}<111> 슬립계에서 매우 중요한 역

할을 수행하게 된다. 즉, void 형성과 성장을 가능하게 하는 {110} 슬립면의 분율의 증가는 소성변형의 양의 증가를 유발하고, 인성과 관련된 충격에너지의 증가를 가져오게 된다.

그림 7에는 본 천연가스 배관의 압연방향의 차이에 따른 {110} 슬립면의 분율과 원주 및 심 용접부 방향으로의 모재의 충격인성 동시에 나타내었다. 즉, 본 천연가스 배관의 경우에는 {110} 슬립면의 분율 차이로 인해 원주 및 심 용접부의 파괴인성이 차이가 난다고 결론 내릴 수 있었다. 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.

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 충격인성 및 CTOD 인성이 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. ASTM Standard E1290 (1989)
3. API(American Petroleum Institute): Spec. 5L, Line Pipe, 15, (1992).
4. Toyoda, M.: IIW Doc. X-1217-91, (1991).
5. Denys, D.: Proc. EVALMAT 89, 1013, (1989).
6. Ohmori, Y., Ohtani, H., and Kunitake, T.

- : J. Japan Welding Society, 57(10), 1690, (1971).
7. Lee, S., Kim, B.C., and Kwon, D.: Met. Trans. A, 23A, 2803, (1991).
8. Allen, N.P., Earley, C.C., Hale, K.F., and Rendall, J.H.: J. Iron Steel Inst., 808, (1964).
9. Baczynski, G.J., Jonas, J.J., and Collins, L.E.: Met. Trans. A., 30A, 3045, (1999).