

손상평가도를 이용한 용접구조물의 균열형 결함에 대한 사용적합성 평가

李正錫 · 朱章福 · 張宰溢* · 金禹植** · 高英台** · 權東一

서울대학교 재료공학부
*(주)프론틱스 연구개발팀
**한국가스공사 연구개발원

Fitness-for-Service Assessment for Crack-Like Flaws of the Welded Structure Using Failure Assessment Diagram

Jung-Suk Lee, Jang-Bog Ju, Jae-il Jang*, Woo-sik Kim**,
Young-Tai Kho** and Dongil Kwon

School of Materials Science and Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

*Research and Development Team, Frontics, Inc., Seoul 151-060, Korea

**Research and Development Center, Korea Gas Corporation, Ansan 425-150, Korea

Abstract : Flaws nucleated during operation of structures such as nuclear power plants, petroleum facilities and gas equipment raise many safety problems, and thus the integrity assessment of crack-like flaws in structures has been very important. Since large-scale structures include weldments with complex micro-structures and inhomogeneous material properties, it is essential to consider both metallurgical and mechanical factors. In this study, a methodology for integrity assessment in welded structures was developed based on API 5L X65 grade natural gas pipeline (an approximately 2400 km pipeline in Korea). A failure assessment diagram(FAD), which includes all failure modes from linear elastic fracture to plastic collapse, was used for integrity and fitness-for-service(FFS) assessment of the pipeline. Since tensile properties and fracture toughness of base metal, weld metal and heat affected zone(HAZ) are required for the FAD, tensile tests and fracture toughness tests were performed on each region. In particular, the evaluation of representative properties of HAZ make it possible to assess FFS accurately by using the HAZ-based FAD when crack-like flaws exist in HAZ. This HAZ-based FAD is different from current codes, which assess integrity by the material properties of weld metal or base metal even when flaws exist in HAZ.

(Received May 30, 2002)

Key words : Failure assessment diagram(FAD), Natural gas pipeline, API 5L X65, Weldment, Heat affected zone (HAZ), Integrity, Fitness-for-service(FFS)

1. 서 론

현재 국내에는 원자력발전 설비, 석유화학설비 및 가스설비 등 각종 대형구조물이 설치·운영 중에 있으며 구조물 설치는 지속적으로 증가되고 있다. 이러한 대형구조물은 외부굴착장비에 의한 손상, 지반침하, 지진 등의 외부요인 및 야금학적 결함, spot, 개재물 등의 내부요인에 의해 가동 중 결함이 발생된다. 이들 결함은 일반적으로 균열형 결함의 형태로 존재하며 안전성 측면 및 경제적 측면에서 막대한 피해를 발생시킬 가능성을 포함하고 있다. 따라서 구조물의 균열형 결함에 대한 건전성 평가는 중대한 사안으로 부각되고 있다.

일반적인 구조물의 균열형 결함에 대한 건전성 및 사용적합성 평가를 위해 손상평가도(failure assessment diagram, FAD)가 사용되고 있다¹⁾. 손상평가도는 선형탄성 파괴역학이 성립하는 취성영역부터 소성붕괴영역까지의 모든 파괴역학적 가능성에 대하여 응력확대계수와 작용하중, 두 개의 변수를 이용하는 안전성 평가방법이다. 이는 영국 중앙전력청(Central Electricity Generating Board)이 1970년대 중반에 개발한 이래, 미국, 유럽, 일본, 중국 등의 기술선도국에서 구조물 안전성 평가 자료로 활용도를 높이고 있다²⁻⁹⁾. 최근에는 BS PD 6493¹⁾을 발전시킨 영국규격인 BS 7910²⁾, 미국석유협회 규격인 API 579³⁾, CEBG R-6 Revision

3⁴⁾, 유럽공동체 규격인 SINTAP⁵⁾ 등의 다양한 손상평가도 관련 규격들이 등장하고 있다. 이와 같은 손상평가도를 이용한 안전성 평가 방법은 대형구조물을 운용하는 각종 산업체에서 결함발견 시 또는 가동조건 변화 시 유용하게 사용되고 있어 그 타당성이 입증된 방법이다. 하지만, 대형구조물의 대부분이 용접부를 포함하고 있어 사용적합성 평가 시 용접부의 각종 파괴역학적 인자, 금속학적 인자, 열영향부의 물성변화 등의 고려에는 아직까지 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 현재 국내에 약 2400 km에 달하는 길이가 설치·가동 중에 있는 API 5L X65 등급 천연가스 수송용 주배관을 대상으로 결정해 이들 인자를 적절히 고려한 손상평가도를 구축함으로써 용접부가 존재하는 구조물의 사용적합성 평가방안을 확립하였다.

천연가스배관에 적합한 손상평가도를 구축하기 위해서는 배관용 재료의 인장물성과 파괴인성이 요구된다. 특히 천연가스배관 용접부의 다양한 야금학적 인자를 고려하기 위해서 균열형 결함이 존재할 가능성을 지닌 모든 영역의 부위별 인장물성 및 파괴인성 평가가 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 천연가스배관의 모재, 용착금속, 열영향부에 대한 인장물성 및 파괴인성 평가를 통해 부위별 손상평가도를 구축하였으며, 이를 실제 천연가스배관에 결함 발견 시의 건전성 평가에 적용하였다. 또한 모재와 용착금속의 재료물성 중 더 보수적인 물성을 열영향부 손상평가도에

적용시켜왔던 기존 코드들¹⁻⁴⁾과의 차별성 및 독창성을 확보하기 위해 정확한 열영향부 물성을 고려한 손상평가도를 구축함으로써 건전성 평가에 있어 보수성을 감소시키고 정확성을 증가시켰다.

2. 손상 평가도 작성

구조물의 손상모드는 크게 취성파괴와 소성붕괴로 구분할 수 있다¹⁰⁾. 취성파괴란 균열 침단에서 균열이 급격히 진전되어 구조물을 분리시키는 손상모드이며, 소성붕괴는 균열진전 없이 구조물의 리가먼트(ligament) 전 영역에 소성역이 발생하는 손상모드이다. 일반적으로 두 모드가 복합적으로 구조물의 손상에 영향을 미친다. 따라서 손상 평가도에는 취성파괴 영역부터 소성붕괴 영역까지의 모든 파괴에 대한 가능성이 고려된다. 우선, 손상 평가도의 x축은 L_r 또는 S_r 로 표시하는데, 이는 소성붕괴에 대한 저항을 나타내며 식 (1)로 정의된다¹¹⁾. 구조물에 작용하는 응력이 커지면 L_r 값이 증가하고 작용응력(σ_{ref})이 소성붕괴응력(σ_c)에 이르게 되면 구조물에 소성붕괴가 일어난다.

$$L_r(\text{or } S_r) = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_c} \tag{1}$$

σ_{ref} : 작용응력
 σ_c : 소성붕괴응력

다음으로 손상평가도의 y축은 K_r 로 표시하는데, 이는 취성파괴에 대한 저항을 나타내며 식 (2)로 정의된다¹¹⁾. 구조물에 작용하는 응력확대계수값이 커지면 K_r 값이 증가하고 응력확대계수가 K_{IC} 값에 도달하면 취성파괴가 일어난다.

$$K_r = \frac{K_I}{K_{IC}} \tag{2}$$

K_I : 응력확대계수
 K_{IC} : 평면변형파괴인성

그림 1에는 손상 평가도의 개략적인 모식도를 나타내었다¹⁾. 그림 1에서 x축, y축을 제외한 실선부분은 구조물의 안전성 여부를 결정하는 임계선이며, 손상평가곡선(failure assessment

curve, FAC)으로 정의한다. 이에 대한 함수식은 파괴역학 이론으로부터 도출된다¹²⁻¹³⁾. 구조물에 결함 발견 시 용이한 K_I , σ_{ref} 의 계산을 위해 결함을 특성화시켜 간략히 나타내고, 구조물을 구성하고 있는 재료의 물성을 고려하여 L_r (또는 S_r) 값과 K_r 값을 구해서 좌표점(L_r (또는 S_r), K_r)을 손상 평가도에 도시한다. 도시한 점이 손상평가곡선의 내부에 있으면 구조물은 사용 적합한 것이나 손상평가곡선의 외부에 위치하면 사용적합성 여부를 정확히 알 수 없으므로 더 높은 단계의 평가가 수행되어야 한다. 상위 단계로 갈수록 평가 시 요구되는 재료물성은 더 많아 지나 보수성은 감소된다. 최종 단계의 평가에서 안전하지 못하다는 결론이 나올 시에는 구조물을 보수 또는 교체해야 한다.

현재 구조물의 사용적합성 평가에 널리 사용되는 BS 7910²⁾, API 579³⁾, R-6⁴⁾ 등의 코드에서는 예측되는 파괴모드 및 보수성의 정도에 따라 손상 평가도의 단계를 구분하여 사용한다. 즉, 주어진 단계 중 평가하고자 하는 대상구조물의 성격에 적합한 단계를 선택해 사용해야 한다. 단계 선택이 불가능한 경우 일반적으로 낮은 단계부터 평가를 실시한다. 낮은 단계일수록 손상 평가도 작성에 요구되는 재료물성이 적어서 간편하게 사용할 수 있는 반면, 보수성이 높다는 단점을 가진다. 각 코드들은 일반적으로 3개의 서로 다른 단계의 손상 평가도로 구성되어 있으며 코드마다 세부 단계에 대한 정의 방법에는 다소 차이가 있지만 실질적으로 유사한 내용을 포함한다²⁻⁴⁾. 대표적인 손상 평가도를 사용하는 규격들의 세부 단계에 관한 관계를 표 1에 정리하였다. 본 연구에서는 기존 코드의 손상 평가도를 천연가스배관에 적용하기 위해서 그림 2~4와 같이 3단계로 정의하였다. 각 단계별 손상 평가도의 특징은 다음과 같다. 첫째, STEP 1에서 손상평가곡선을 작성하기 위해서는 재료물성이 요구되지 않지만 구조물

Table 1. Relationship between levels of various codes

| Used FAD | Level in this paper | Level of each code | | |
|-----------------|---------------------|--------------------|----------|----------|
| | | API 579 | BS 7910 | R-6 |
| Empirical curve | Not introduced | Level 1 | - | - |
| Fig. 2 | STEP 1 | - | Level 1 | - |
| Fig. 3 | STEP 2 | Level 2 | Level 2A | Option 1 |
| Fig. 4 | STEP 3 | Level 3B | Level 2B | Option 2 |

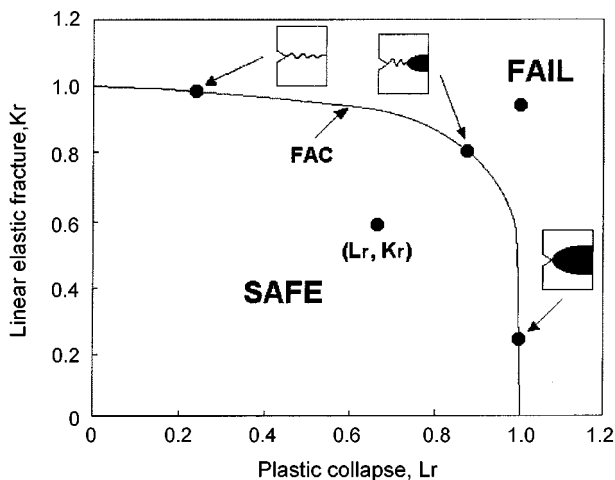


Fig. 1. Typical failure assessment diagram.

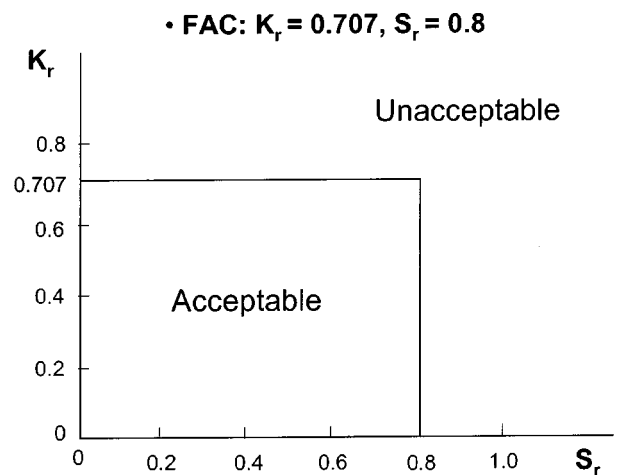


Fig. 2. STEP 1 failure assessment diagram.

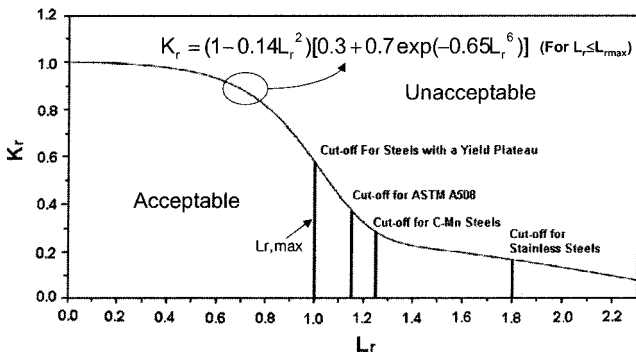


Fig. 3. STEP 2 failure assessment diagram.

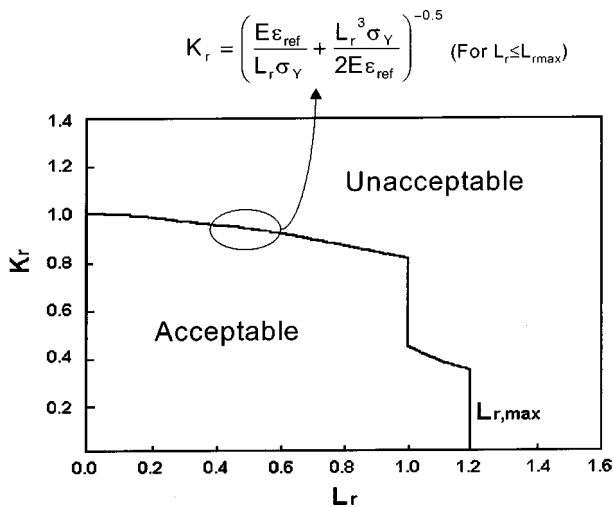


Fig. 4. STEP 3 failure assessment diagram.

의 현재상태를 나타내는 점(S_r , K_r)을 도시하기 위해서 재료물성이 요구된다. 그림 2의 STEP 1 손상평가곡선은 작용응력이 유동응력의 80% 이상 작용하거나 균열길이 임계균열길이의 1/2 이상이 되면 안전성에 문제가 있다고 간주한다. STEP 1에서는 L_r 대신 식 (3)으로 정의되는 S_r 를 사용하며, K_r 의 경우에는 식 (2)를 그대로 사용한다²⁾. S_r 를 계산하기 위해 항복강도와 인장강도가 필요하며 식 (2)의 K_r 을 계산하기 위해 파괴인성이 요구된다. 또한, 주어진 결함 및 배관의 기하학적 형상에 따라 결정되는 K_I , σ_{ref} 값을 계산해야 한다.

$$S_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_{flow}} = \frac{\sigma_{ref}}{(\sigma_Y + \sigma_U)/2} \quad (3)$$

- σ_{flow} : 유동응력
- σ_Y : 항복강도
- σ_U : 인장강도

둘째, 그림 3의 STEP 2의 손상평가곡선은 일반적인 오스테나이드계 강의 실험을 통해 얻은 손상평가곡선의 lower bound 곡선식이 사용된다¹²⁻¹³⁾. STEP 2도 STEP 1과 유사하게 손상평가곡선을 작성하는 데에는 재료물성이 요구되지 않는다. 하지만, L_r 값은 식 (1)의 σ_c 를 항복강도로 사용한다²⁻⁴⁾. 따라서 L_r 값과 K_r 값의 계산을 위해 각각 항복강도와 파괴인성이 요구된다. 또

한 STEP 1과는 달리 소성붕괴가 일어나는 한계점인 $L_{r,max}$ 의 계산을 위해 항복강도 뿐만 아니라 인장강도가 요구된다²⁻⁴⁾. 셋째, 파괴역학적 계산¹²⁻¹³⁾으로부터 유도된 그림 4의 STEP 3은 손상평가곡선은 ϵ_{ref} 를 변수로 사용한다. ϵ_{ref} 는 구조물에 작용하는 응력 값인 σ_{ref} 에 대한 진응력-진변형률 곡선 상에서 변형률에 해당하는 값이다. 따라서 STEP 3 손상평가곡선을 작성하기 위해서는 평가하고자 하는 대상구조물의 인장곡선이 요구된다. 또한 점(L_r , K_r)을 도시하기 위해 STEP 2와 동일하게 항복강도와 파괴인성이 필요하며, $L_{r,max}$ 값의 결정을 위해서도 STEP 2와 동일하게 항복강도와 인장강도가 요구된다. 즉, STEP 3 손상 평가도 작성을 위해서는 인장곡선과 파괴인성이 요구된다. STEP 1에서 STEP 3으로 갈수록 요구되는 물성은 많아지나 보수성이 낮아져 불필요한 보수 및 교체 작업을 줄일 수 있다. 이는 구조물 운용 시 경제적 측면에서 상당한 이익을 얻을 수 있다.

3. 실험 방법

손상 평가도를 이용한 구조물의 사용적합성 평가를 위해서는 대상 구조물의 인장물성 및 파괴인성이 요구된다. 이에 본 연구에서는 표 2의 조성 및 표 3의 용접조건으로 제작된 API 5L X65 등급 천연가스배관을 대상으로 인장물성 및 파괴인성을 평가하였다. 우선, 인장물성평가를 위해 천연가스배관 용접부의 모재, 용착금속, 열영향부에 대해 부위별 시험편을 채취하였다. 모재의 경우 TMCP(Thermo-Mechanical Control Process) 공정으로 제조되므로¹⁴⁾ 압연 시 표면과 중앙의 인장물성 차이를 고려해 두께방향의 상·중·하에 대해 시험편을 채취하였다. 또한, 배관의 방향성을 고려하기 위해 길이방향과 원주방향으로 시험편을 채취하였다. 용착금속의 경우, 용착금속 영역만을 포함시키며 용접방향과 평행하도록 원주용접부 및 심용접부에서 각각의 시험편을 채취하였다. 모재와 용착금속 모두 ASTM E8-91¹⁵⁾을 따라 게이지 길이 25 mm 인 subsize 인장시험편으로 시험을 수행하였다. 열영향부의 경우, 그 영역이 매우 협소해 subsize 인장 시험편의 제작이 불가능 해 두께 0.5 mm, 게이지 길이 12.5 mm 인 마이크로 인장시험편을 제작해 인장실험을 수행하였다. 마이크로 인장시험편 제작 시, 열영향부에서 직접적인 시험편의 채취가 용이하지 않아 용착금속, 열영향부, 모재를 포함하도록 블록

Table 2. Chemical composition of API 5L X65 pipeline steel

| Element | C | P | Mn | S | Si | Fe | C _{eq} |
|-----------------------------|------|-------|------|-------|------|------|-----------------|
| Chemical composition (wt.%) | 0.08 | 0.019 | 1.45 | 0.003 | 0.31 | bal. | 0.32 |

Table 3. Welding conditions used in this work

| Condition | Welding method | AWS | Groove shape | Heat input (kJ/cm) |
|----------------|----------------|------------------------|--------------|--------------------|
| Seam weldment | GTAW +SAW | ER70S-G F8A4-EA3-A4 | X | 10.8~19.9 |
| Girth weldment | GTAW +SMAW | ER70S-G E9016-G | V | 3.0~30.0 |

을 채취하였다. 채취한 블록을 0.5 mm 간격으로 와이어 커팅하여 용착금속, 열영향부, 모재에 대한 마이크로 인장 시험편을 제작하였다. 제작된 시험편의 인장시험을 통해 모재 및 용착금속 영역과는 다른 인장물성을 나타내는 구간을 찾아 열영향부의 대표 인장물성을 결정하였다.

파괴인성 평가를 위해 모재, 용착금속, 열영향부에 대한 CTOD(Crack Tip Opening Displacement) 실험을 수행하였다. 천연가스배관은 두께가 17.5 mm로 상대적으로 얇아 직접적인 K_{IC} 측정이 불가능하므로 CTOD 값을 측정해 이를 K_{IC} 값으로 전환하였다. CTOD 실험도 인장물성평가와 유사하게 모재와 용착금속 모두 균열침단이 배관 두께방향의 상·중·하 영역에 존재하도록 표면균열 CTOD 시험편을 제작해 부위별 파괴인성을 측정하였다. 열영향부의 경우, 손상 평가도에 적용시 안전성 확보측면에서 가장 취약한 부분인 CGHAZ(Coarse Grained Heat Affected Zone) 영역에 균열 침단이 존재하도록 시험편을 제작하였다^{14,16}. CTOD 시험편은 ASTM E1290-93¹⁷)에 따라 상·하층부에서는 10 mm(두께)×10 mm(폭)×50 mm(길이) 시험편을 사용하였으며 중앙부에서는 실험두께를 최대한 반영하도록 14 mm×14 mm×60 mm 또는 16 mm×16 mm×70 mm의 시험편으로 제작하였다.

4. 결과 및 고찰

부위별 인장물성

표 4에는 천연가스배관의 모재, 용착금속, 열영향부의 인장물성 평가 결과를 나타내었다. 모재의 경우 배관의 상층부와 하층부의 항복강도와 인장강도가 중앙부보다 높게 나왔다. 이는 본 연구의 대상물인 천연가스배관이 TMCP 공정을 통해 제작되므로, 압연 시 표면에서 가공경화가 중앙에서보다 더 크기 때문이다. 표 5는 측정된 가공경화지수를 보여주고 있으며, 상·하층부의 가공경화지수가 중앙부보다 작다. 일반적으로 동일한 재료에

Table 4. Tensile properties of natural gas pipeline

| Region | | Yield strength (MPa) | Tensile strength (MPa) | Elastic modulus (GPa) |
|--------------------|--------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|
| Base metal (seam) | Longitudinal (upper) | 497 | 617 | 209 |
| | Longitudinal (middle) | 435 | 598 | 209 |
| | Longitudinal (lower) | 505 | 625 | 209 |
| Base metal (girth) | Circumferential (upper) | 488 | 631 | 210 |
| | Circumferential (middle) | 453 | 601 | 210 |
| | Circumferential (lower) | 499 | 625 | 210 |
| Girth weld metal | | 530 | 678 | 212 |
| Seam weld metal | | 568 | 681 | 212 |
| HAZ (girth) | | 423 | 550 | 210 |
| HAZ (seam) | | 396 | 567 | 210 |

Table 5. Work hardening coefficients of base metal

| Region | Location | n |
|------------------------------|----------|------|
| Base metal of girth weldment | Upper | 0.15 |
| | Middle | 0.18 |
| | Lower | 0.15 |
| Base metal of seam weldment | Upper | 0.16 |
| | Middle | 0.19 |
| | Lower | 0.15 |

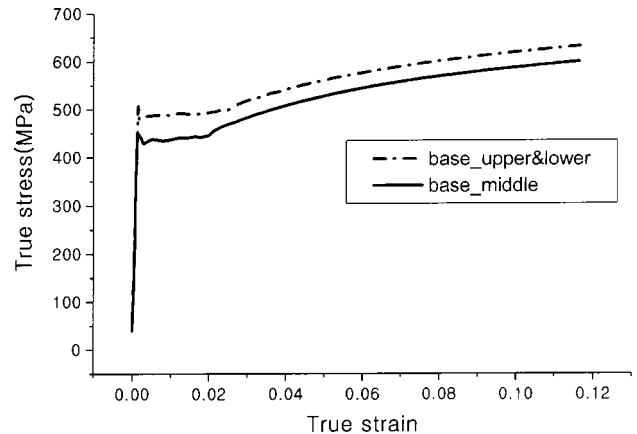


Fig. 5. Representative tensile curves of base metal.

서 가공경화가 더 많이 일어난 경우 가공경화지수는 더 작으므로^{18,19} 상·하층부에서 가공경화가 중앙부에서 보다 크다는 사실을 알 수 있다. 또한 표 4의 결과와 같이 모재에서 인장물성의 방향성은 무시할 수 있었다. 따라서 천연가스배관이 모재영역에 결함 발생 시 결함깊이에 따라 그에 알맞은 상·중·하 인장물성을 사용해야 함을 알 수 있다. 또한, 모재의 인장물성에는 방향성이 무시되므로 원주방향 및 길이방향의 결함 모두 그림 5의 상·하층부 및 중앙부의 인장곡선을 대표인장곡선으로 손상 평가도에 적용 가능하다.

용착금속의 경우 심용접부의 용착금속이 항복강도 및 인장강도가 원주용접부의 용착금속보다 높았으며, 두 용착금속 모두 모재보다 높게 나왔다. 이는 용접 공정 시 안전성 확보를 위해 용착금속의 재료를 강도적 측면에서 모재보다 우수한 재료를 사용했기 때문이다¹⁶. 용착금속 영역에 결함이 존재할 경우 그림 표 4에 포함된 용착금속에 대한 인장물성을 손상 평가도에 적용해야 한다.

표 4의 열영향부 인장물성은 마이크로 인장시험편으로부터 얻어진 것이므로 ASTM E8-91¹⁵)을 만족시키지 못한다. 이에 본 연구에서는 subsized 시험편과 마이크로 인장시험편의 인장곡선을 비교함으로써 마이크로 인장시험편의 타당성을 검증하였다. 그림 6은 원주용접부의 모재와 용착금속에서 두 종류의 시험편에 대한 인장곡선이다. 이는 마이크로 인장시험편의 타당성을 충분히 보여주는 결과이다. 열영향부의 항복강도 및 인장강도는 모재 및 용착금속에 비해 상당히 낮은 값을 나타내고 있으므로, 열영향부에 결함 발생 시 열영향부의 인장물성을 사용해야 안전성을 확보할 수 있다.

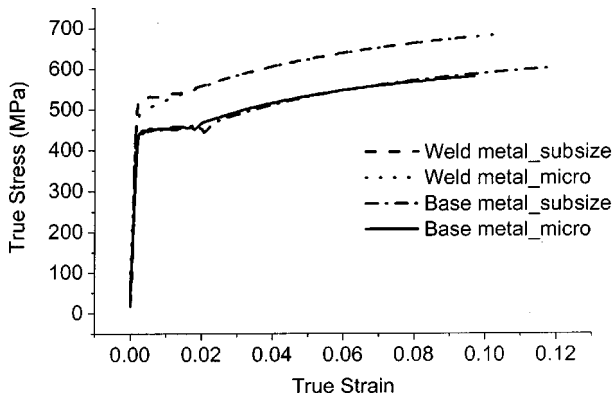


Fig. 6. Comparison between subsized specimen and micro-tensile specimen in girth weldment.

부위별 파괴인성

표 6에 CTOD 실험을 통해 획득한 영역별 CTOD 값 및 이에 대한 K_{IC} 치환값을 나타내었다. 천연가스배관의 경우 BS 7910²⁾, API 579³⁾, R-6⁴⁾ 등의 기존 코드에서 제시하고 있는 CTOD에 대한 K_{IC} 치환 수식 중 식 (4)를 적용하는 것이 가장 보수성을 줄일 수 있어 표 6과 같이 치환하였다.

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{m\sigma_{ys}\delta_{IC}E}{1-\nu^2}} \quad (4)$$

$m=2.0$, δ_{IC} : 임계 CTOD, E: 탄성계수, ν : Poisson 비

표 6의 결과와 같이 CTOD 값은 방향성이 존재하였다. L-S (원주) 방향의 CTOD 값이 T-S(길이) 방향보다 높게 나오는 이유는 TMCP 공정 중 생성되는 집합조직의 영향이다. 배관용 판재의 압연 시 생성되는 집합조직은 내부에 전위를 포함하는데, 이들 전위는 활동전위와 부동전위로 구분된다. 집합조직의 방향성에 의해서 활동전위만이 슬립이 가능하게 되고 활동전위의 슬립계를 포함하는 영역만 소성역이 발생하게 된다. 소성역 발생은 균열진전에 대한 저항을 높이므로 파괴인성을 증가시킨다. 본 연구의 대상물인 천연가스배관의 경우 L-S 방향의 시험편이 T-S

방향의 시험편보다 하중인가 시 활동전위의 슬립이 용이하도록 집합조직이 형성된 것이라 할 수 있다. 또한, 이러한 현상은 인장물성에는 크게 영향을 미치지 않으며 파괴인성에만 영향을 주는 것으로 보고되고 있다⁶⁾. 따라서 인장물성에는 존재하지 않았던 방향성이 파괴인성에서는 존재하게 되었다. 또한 용착금속의 재료는 모재와 상이한 재료이므로 모재와는 전혀 다른 CTOD 값이 얻어졌다. 따라서 용착금속 영역에 결합 존재 시 표 6의 용착금속에 대한 파괴인성을 사용함이 합당하다. 열영향부의 경우 심용접부와 원주용접부에 대해 동일한 값인 0.12 mm의 CTOD 값을 획득하였다. 열영향부는 모재 및 용착금속에 비해 상당히 낮은 CTOD 값을 보이고 있음을 알 수 있다. 따라서 기존 코드와 같이 열영향부의 물성을 확보하지 못했을 경우 용착금속 또는 모재의 물성을 그대로 사용하는 것은 안전성 평가에 오류를 범할 수 있게 된다.

실 구조물에 손상 평가도의 적용

이상에서 획득한 인장물성 및 파괴인성을 바탕으로 실제 천연가스배관의 열영향부에 길이방향으로 외부 표면균열이 존재할 경우에 대해 사용 적합성을 평가하였다. 천연가스배관에 작용하는 하중은 내압만을 가정하였으며, 일반적으로 설치된 천연가스배관의 경우 그 길이가 발생하는 균열길이에 비해 상당히 길기 때문에 균열길이를 800 mm로 고정하고 균열깊이(a)를 변수로 하였다. 그림 7은 모재 및 용착금속에 균열이 있을 시 STEP 1 손상 평가도이다. 모재에 대한 손상 평가도 작성 시 10 mm 균열에 대해서는 모재 중앙부의 인장물성을 사용하였으며 12, 13, 14, 14.1 mm 균열에 대해서는 모재 하층부의 인장물성을 사용하였다. 또한 파괴인성은 균열방향에 따라 상이한 값을 나타내므로 10 mm 균열에 대해서는 길이방향, 중앙부의 파괴인성 값을, 나머지 균열에 대해서는 길이방향, 하층부의 파괴인성 값을 사용해 손상 평가도를 작성하였다. 용착금속에 대한 손상 평가도 작성 시에는 모든 균열에 대해 균열방향과 평행한 길이방향 용접부인 심용접부 인장물성 및 파괴인성을 적용시켰다. STEP 1 손상 평가도에 의하면 용착금속은 모재에 비해 취성파괴 쪽으로

Table 6. Fracture toughness of natural gas pipeline

| Region | | Location of crack tip | CTOD (mm) | K_{IC} (MPa \sqrt{m}) |
|---------------|--|-----------------------|-----------|----------------------------|
| Base metal | Girth weldment (circumferential crack) | Upper | 0.40 | 300 |
| | | Middle | 0.66 | 363 |
| | | Lower | 0.44 | 315 |
| | Seam Weldment (longitudinal crack) | Upper | 0.26 | 242 |
| | | Middle | 0.33 | 257 |
| | | Lower | 0.23 | 228 |
| Weld metal | Girth weldment | Upper | 0.29 | 268 |
| | | Middle | 0.16 | 199 |
| | Lower | 0.43 | 326 | |
| Seam weldment | All | 0.27 | 267 | |
| HAZ | Girth weldment | All | 0.12 | 153 |
| | Seam weldment | All | 0.12 | 148 |

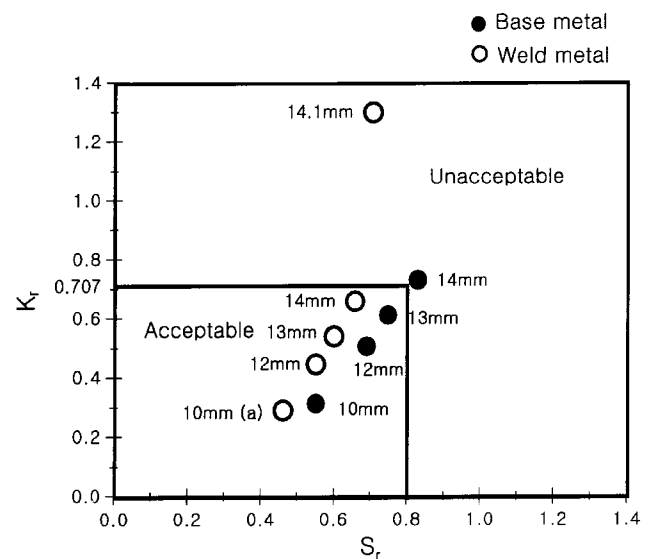


Fig. 7. STEP 1 failure assessment diagram for integrity assessment.

이 사용 가능하다. 하지만 그림 9(b)의 14.1 mm 깊이의 결함은 최종단계인 STEP 3에서도 안전하지 못한 것으로 평가되고 있어 보수 또는 교체가 요구된다.

이상의 모재와 용착금속에서 발생하는 결함에 대한 안전성 평가는 기존 코드들의 평가방법과 유사하다²⁻⁴⁾. 하지만 균열이 열영향부에 존재할 경우 기존의 상용 코드에서는 용착금속의 물성을 열영향부 손상 평가도에 적용시켜 그림 10과 같은 결과가 나온다²⁰⁾. 즉, 열영향부와 용착금속의 손상 평가도가 동일하다. 본 연구에서는 앞서 획득한 열영향부의 인장물성 및 파괴인성을 열영향부에 균열 존재 시 안전성 평가에 적용하였다. 그림 11은 용착금속의 물성을 이용했을 경우와 정확한 열영향부 물성을 이용했을 경우의 차이를 보여준다. 그림 11의 13 mm 깊이의 결함의 경우, 용착금속의 물성을 이용하게 되면 안전하다고 평가되었으나, 열영향부 물성을 대입하면 위험한 것으로 평가된다. 열영향부의 경우 모재 및 용착금속에 비해 상당히 취약하므로 정

확한 물성 대입으로 그림 11(b)와 같이 안전성을 확보해야 한다.

이상의 STEP 1, STEP 2, STEP 3 손상 평가도는 용접부를 포함하고 있는 모든 대형구조물의 건전성 평가에 적용가능하며 구조물의 부위별 인장물성 및 파괴인성 확보 시 보수성을 높이고 정확성을 높일 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 용접구조물의 균열형 결함에 대한 건전성 평가 방안을 확립하고자 천연가스배관을 대상으로 하여 모재, 용착금속, 열영향부에 대해 인장물성 및 파괴인성 평가를 통해 손상 평가도를 구축하여 건전성 평가에 적용하였다.

1. 천연가스배관의 인장물성 평가 결과, 모재, 용착금속, 열영향부의 부위별 인장물성이 상이하게 나타났으며, 모재의 경우 가공경화의 영향으로 상·하층부의 인장강도 및 항복강도가 중앙부보다 높게 나타났다. 따라서 결함이 존재하는 영역의 정확한 인장물성을 손상 평가도에 적용해 보수성을 감소시키고 정확성을 높였다.

2. 천연가스배관의 파괴인성평가 결과, 인장물성과 유사하게 부위별로 파괴인성 값에 차이가 있었으며, 집합조직의 영향으로 인장물성에서는 존재하지 않았던 방향성이 존재하였다. 따라서 결함이 존재하는 영역 뿐만 아니라 방향에 따라서도 정확한 파괴인성을 손상 평가도에 적용하였다.

3. 열영향부의 인장물성 및 파괴인성을 손상 평가도에 적용시킴으로써 열영향부에 결함 존재 시 용착금속의 물성을 이용해 평가하는 기존의 사용 적합성 코드와의 차별성을 확립하였으며 안전성을 확보하였다.

4. 천연가스배관의 모재, 용착금속, 열영향부에 대해 각 단계의 손상 평가도를 구축함으로써 용접구조물의 균열형 결함에 대한 건전성 평가에 관한 기반을 마련하였다.

REFERENCES

1. PD6493: Guidance on Some Methods for the Derivation of Acceptance Levels for Defects in Fusion Welded Joints, British Standards Institution (1980)
2. BS7910: Guide and Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Fusion Welded Structures, British Standards Institution (1999)
3. API Recommended Practice 579, First Edition, January 2000, American Petroleum Institute (2000)
4. CEGB R/H/R-6-Revision 3, Assessment of the Integrity of Structures containing defects (1998)
5. S. Webster and A. Bannister: Structural Integrity Assessment Procedure for Europe of the SINTAP Programme Overview, Engineering Fracture Mechanics, **67** (2000) 481
6. H. Kobayashi, S. Sakai, M. Asano, K. Miyazaki, T. Nagasaki, and Y. Takahashi: Development of a Flaw Evaluation Handbook of the High Pressure Institute of Japan, Int. J. of Pressure Vessels and Piping, **77** (2000) 929
7. P. N. Li, Y. Lei, Q. P. Zhong, and X. R. Li: A Chinese Structural Integrity Assessment Procedure for Pressure Vessels containing defects, Int. J. of Pressure Vessels and Piping, **77** (2000) 945

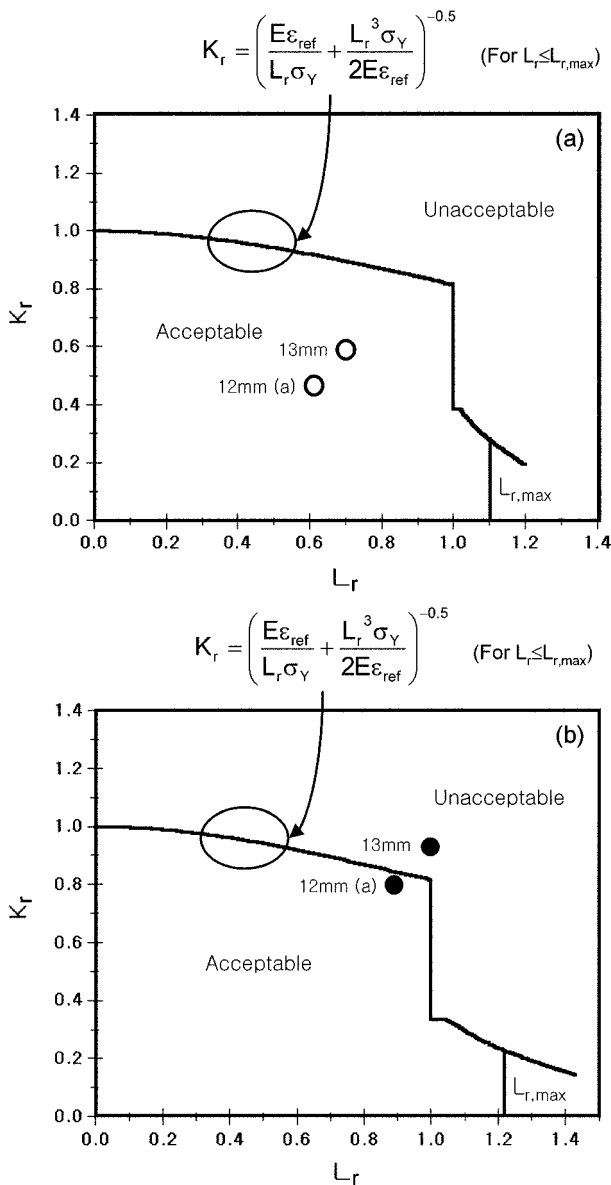


Fig. 11. STEP 3 failure assessment diagrams obtained from this work for (a) weld metal and (b) heat affected zone.

8. B. Brickstad, M. Bergman, P. Andersson, L. Dahlberg, I. Sattari-Far and F. Nilsson: Procedure Used in Sweden for Safety Assessment of Components with Cracks, *Int. J. of Pressure Vessels and Piping*, **77** (2000) 877
9. C. Faïdy: RSE-M. A General Presentation of the French Codified Flaw Evaluation Procedure, *Int. J. of Pressure Vessels and Piping*, **77** (2000) 919
10. M. N. Bansara: Application of Advanced Fracture Mechanics to the Assessment of Linepipe Defects, *Pipe Technology*, **V** ASME (1996)
11. J. R. Gordon: A Review of Fracture Assessment Procedures and Their Applicability to Welded Structures, *Canadian Metallurgical Quarterly*, **32** (1993) 195
12. I. Milne: The State of the Art in Assessing Structural Integrity, *Proc. of Int. Conf. on Fracture Control of Engineering Structures*, ECF6, Paper No. 150 (1986)
13. R. A. Ainsworth: The Assessment of Defects in Structures of Strain Hardening Material, *Engineering Fracture Mechanics*, **19** (1984) 633
14. J. Ju, J. Lee, C. Kim, J. Jang, W. Kim, and D. Kwon: Effect of Mechanical Factors on Fracture Characteristic of Natural Gas Pipeline Weldment, *Proceedings of the 2001 Spring Annual Meeting of Korean Welding Society*, **37** (2001) 130
15. ASTM E8-91: Standard Test Methods of Tension Testing of Metallic Materials
16. J.-B. Ju, J.-i. Jang, W.-s. Kim, and D. I. Kwon: The Effect of Microstructural Change on Fracture Behavior in Heat-Affected Zone of API 5L X65 Pipeline Steel, *Proc. of IPC 2000*, **1** (2000) 169
17. ASTM E1290-93: Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials
18. J. Datsko: *Material Properties and Manufacturing Processes*, pp. 18-20, John Wiley & Sons, Inc., New York (1976)
19. W. B. Morrison: *Trans. Am. Soc. Met.*, **59** (1966) 824
20. <http://www.srt-boulder.com>