

FAD를 이용한 용접구조물의 사용적합성 평가와 재료공학적 개선 방안

장재일 · 이정석 · 주장복 · 권동일 · 최 열

A Materials-Based Approach to the Enhanced Fitness-For-Service Assessment for Welded Structures

Jae-il Jang, Jung-Suk Lee, Jang-Bog Ju, Dongil Kwon and Yeol Choi

1. 서 론

용접 구조물 및 설비에는 제작과정 혹은 사용과정 중에 결함이 발생하여 안전성 또는 건전성을 위협할 가능성이 존재한다. 제작과정에는 용접결합, 기계가공에 의한 결함, 설계에 따른 기하학적 불연속부에 의한 결함, 수송시의 사고에 의한 결함 등이 발생할 수 있으며, 사용과정 중에는 하중 또는 온도 변화 사이클에 의한 결함, 수소유기균열이나 황화물 응력부식균열 등의 부식환경에 의한 결함, 매설배관에서 발생하는 타공사나 지반침하와 같은 외력에 의한 결함 등이 생성될 수 있다. 이에 따라 결함 존재의 위협으로부터 공학적 관점에서 용접구조물 및 설비의 건전성을 확보하기 위하여 안전성과 경제성의 최적 균형을 확보할 수 있는 결함 허용기준을 개발하려는 노력이 이어져왔다.

70년대까지는 대부분의 용접부 결함 평가가 축적된 현장경험을 기초로 하는 WMS(Workmanship Standard)를 이용해 수행되었다. 이는 해석이 어려운 부분에 발생한 결함에 대하여 매우 높은 안전계수를 적용하여 안전성을 확보하는 방법으로서, 지나친 보수성으로 인하여 구조물의 경제적 운용을 방해한다는 단점을 지니고 있다.

이러한 문제점을 극복하기 위하여 70년대 중반, 국제용접협회의 제10분과를 중심으로 '사용적합성(FFS, Fitness-For-Service, 혹은 Fitness-For-Purpose)' 관점에서 용접구조물의 결함평가를 수행하고자 하는 논의가 활발히 시작되었고, 이후 영국중앙전력청(CEGB, 현 BEGL)의 R6¹⁻²⁾와 영국규격협회의 BS PD 6493³⁾, 일본용접협회규격 WES 2805⁴⁾, 미국전력연구원(EPRI)의 J/T 평가법⁵⁻⁷⁾ 등 파괴역학을 기초로 한 다양한 결함평가 기준의 초안들

이 70년대 후반에서 80년대 초반에 걸쳐 완성되었다. 이 중에서 CEGB R6와 BS PD 6493은 Dowling 등이 제안한 두 가지 손상조건 접근법⁸⁾에 기초하여 정립된 손상평가도(Failure Assessment Diagram, 이하 FAD)를 사용하여 결함을 평가하는 방법을 명시하고 있다. 파손모드의 양극단인 취성 파괴와 소성 붕괴 및 그 중간 모드인 연성 파괴에 대하여 결함의 허용도와 안전 여유치를 손쉽게 평가할 수 있는 FAD의 효율성과 유용성 때문에 FAD를 이용한 결함평가는 파괴역학적 사용적합성 평가의 대표적 방법으로 사용되어 왔고, 최근에는 BS PD 6493³⁾을 발전시킨 BS 7910(1999년)⁹⁾, 유럽공동체 규격인 SINTAP(1999년)¹⁰⁾, 미국석유협회 규격 API 579(2000년)¹¹⁾ 등의 다양한 FAD 관련 규격들이 등장하고 있다.

이러한 규격들은 용접잔류응력과 강도적 불균질 효과 등의 역학적 인자들을 고려할 수 있지만 재료공학적 측면에서 다양한 물성 변화 가능성을 고려하는 데에는 한계를 지니고 있다. 본 고에서는 FAD 결함평가법의 기본적인 내용을 알아보고 재료공학적 측면에서 물성변화를 고려함으로써 결함평가 결과의 정확도가 향상될 수 있음을 제시하였다.

2. 손상평가도에 의한 결함평가

2.1 손상평가도의 기본 구성

손상평가도란 선형파괴역학이 성립하는 취성영역부터 균열 성장없이 소성거동만으로 파손이 발생하는 소성붕괴영역에 이르기까지의 모든 파괴역학적 가능성에 대하여 응력확대계수(결함의 크기 및 형상의 함수)와 작용하중의 두 변수를 대입해 균열이 존재하는 구

구조물의 사용적합성을 평가할 수 있는 방법이다. 실제 구조물의 손상은 일반적으로 취성파괴와 소성붕괴의 조합으로 나타나기 때문에 손상평가도에서는 그림 1에 나타낸 예¹²⁾와 같이 x축에는 소성붕괴의 영향을, y축에는 취성파괴의 영향을 변수로 나타내어 두 손상모드를 고려한다. 그림 1에서 SAFE 영역과 FAIL 영역 사이의 경계선은 파괴역학적 이론으로부터 구축된 손상 임계선(Failure Assessment Curve, 이하 FAC)을 나타낸다. 구조물이 가진 결함의 현재상태는 FAD 상에서 하나의 점(L_r (또는 S_r), K_r)으로 표시될 수 있다. 이때 이 점이 FAC 안쪽에 위치하면 평가대상 결함은 허용 가능한 것으로 평가하고, FAC 바깥쪽에 위치할 경우는 허용 불가능한 결함으로 판정하게 된다.

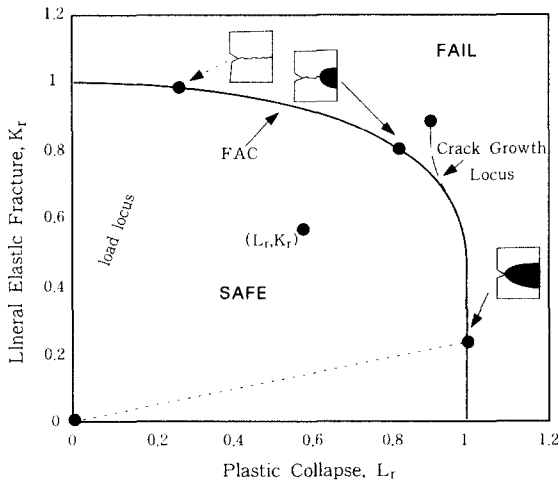


Fig. 1 Typical failure assessment diagram (FAD)¹²⁾

2.1.1 소성붕괴에 대한 저항

L_r (또는 S_r)로 표시되는 x축은 소성붕괴에 대한 저항으로 식 (1)과 같이 정의된다. 식 (1)에서 σ_c 는 재료의 유동 응력(S_r 의 경우), 또는 항복 응력(L_r 의 경우)으로 정의되며, σ_{ref} 는 결함을 포함한 구조물에 작용하는 응력이다. 작용 응력이 커지면 L_r 값이 커지게 되고, 작용응력이 σ_c 에 이르면 구조물에 소성붕괴가 발생한다.

$$L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_c} \tag{1}$$

2.1.2 취성파괴에 대한 저항

K_r 로 표시되는 y축은 취성파괴에 대한 저항으로 식 (2)와 같이 정의된다. 식 (2)에서 K_{mat} 는 재료의 고유 파괴인성값을 나타내며, K_r 는 구조물에 존재하는 결함에 작용 응력이 가해질 때의 응력확대계수값이다. 구조물에 작용하는 응력확대계수값이 커지면 K_r 값이 증

가하고, 응력확대계수가 K_{mat} 값에 도달하면, 취성파괴가 일어난다.

$$K_r = \frac{K_r}{K_{mat}} \tag{2}$$

2.2 FAD의 적용 등급

각 규격에서는 예측되는 파괴모드 및 보수성의 정도에 따라 FAD의 등급을 구분하여 사용한다. 사용자는 주어진 등급(level 또는 option) 가운데에서 자신이 평가하고자 하는 대상 구조물의 성격에 적합한 등급을 선택하여 사용한다. 이에 대한 기준을 설정하지 못한 경우는 일반적으로 낮은 등급부터 평가를 실시한다. 각 규격들은 일반적으로 세 가지 서로 다른 등급의 FAD로 구성되어 있는데, 규격마다 세부 등급의 정의 방법에 다소 차이가 있지만 실질적으로는 유사한 내용을 포함하고 있다. 대표적인 FAD 규격들^{2,3,9,11)}의 등급에 관한 관계를 표 1에 정리하였다.

Table 1 Relationship between levels of various codes^{2,3,9,11)} (◆ Compared with other code such as level 2 of API 579, level 2 of BS PD 6493 has different equation)

| Used FAD | Level in this paper | Level of each code | | | |
|-----------------|---------------------|--------------------|----------|---------|----------|
| | | API 579 | BS 7910 | R-6 | PD 6493 |
| Empirical Curve | not introduced | level 1 | - | - | - |
| Fig. 2 | level 1 | - | level 1 | - | level 1 |
| Fig. 3 | level 2 | level 2 | level 2A | option1 | ◆level 2 |
| Fig. 4 | level 3 | level 3B | level 2B | option2 | level 3 |
| Fig. 6 | (level 4) | level 3D | level 3C | option3 | - |

본 고에서는 그림 2에서 4까지의 FAD 등급을 각각 표 1에 나타낸 level 1, level 2, level 3으로 표기하였다. 스크리닝 등급의 성격을 가진 1단계부터 3단계로 갈수록 FAC의 구성을 위해서 요구되는 물성이 많아지게 된다. 이들 물성이 고려됨에 따라 보수성이 줄어들고 정확도가 높아지게 된다. 따라서 결함이 발견되었을 경우 우선 규격에 명시된 방법에 따라 결함을 특성화한 후, 구조물을 구성하는 재료 물성을 고려하여 L_r (또는 S_r)값과 K_r 값을 구해서 좌표 점 (L_r (또는 S_r), K_r)을 level 1의 FAD 상에 위치를 표시하고 결함의 허용가능성을 평가한다. Level 1에서 허용불가 판정을 받은 결함의 경우, level 2로 다시 판정하게 되고, level 2에서 역시 허용불가 판정을 받은 경우에

는 level 3로 등급을 높여 결함의 허용가부를 결정하게 되며, 이 경우에도 허용불가 판정을 받게된 결함의 경우는 보수나 교체 작업을 수행하여야 한다. 이러한 평가 절차의 개략도를 그림 5에 나타내었다.

level 3보다 더욱 높은 등급으로는 R6-Revision 3²⁾의 option 3, BS 7910⁹⁾의 level 3C나 API 579¹¹⁾의 level 3D 등이 제안되어 있다. 표 1에서 level 4라 표기한 이 등급은 그림 6⁹⁾에서 예를 나타내었듯이 FAC의 함수식으로 $K_r = \sqrt{J_e/J}$ 를 사용하는데, 점 (L_r, K_r) 를 도식하는 방법은 이전 단계의 등급들과 동일하지만 결함길이의 증가에 따라 하나의 점 대신 여러 (L_r, K_r) 을 연결한 점선(locus)으로 현 결함상태를 표현하고 있다. 이때, 점선의 모든 영역이 FAC 바깥쪽에 존재하면 안전성에 문제가 있다고 보게 되고, 점선의 일부분만이라도 안쪽으로 들어오면 안전하다고 평가된다. 하지만 이 단계는 유한요소해석을 통한 탄소성 파괴역학적 해석결과(J 분석)가 요구되어 해석 결과의 신뢰성 증명에 많은 시간이 소요될 뿐 아니라, 보수성을 극소화한 만큼 안전 여유분 역시 극소화되어

판정결과에의 사용에 최대한 신중할 것을 요구하게 되므로 아직 현장에서 적용한 예는 많지 않다.

2.3 FAD 작성을 위한 요구 물성

등급이 높아짐에 따라 FAD 작성을 위해 필요한 물성도 증가한다. level 1의 경우 그림 2에서 보듯이 FAC를 구축하는데는 재료물성이 요구되지 않는다. 하지만, (S_r, K_r) 을 도식하려면 항복강도(σ_Y), 인장

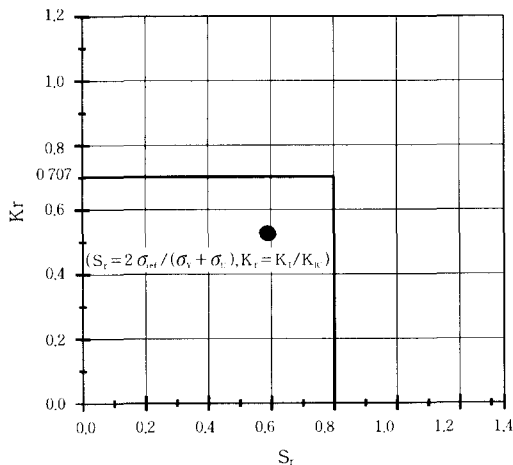


Fig. 2 Level 1 FAD (in this paper)

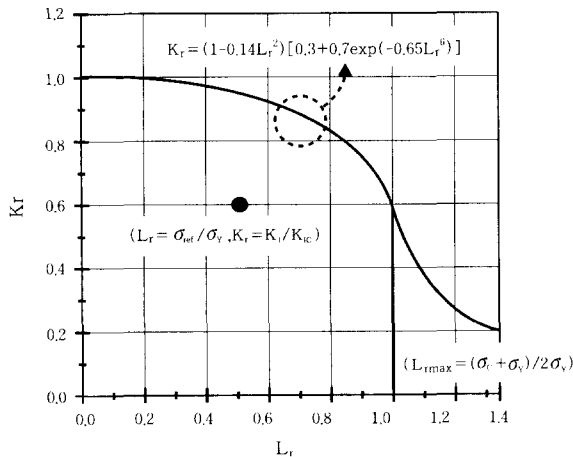


Fig. 3 Level 2 FAD (in this paper)

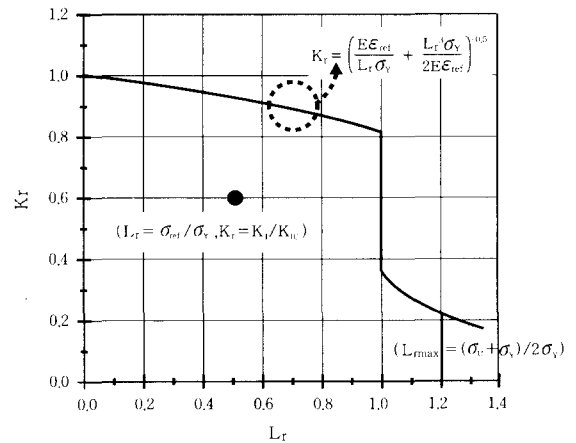


Fig. 4 Level 3 FAD (in this paper)

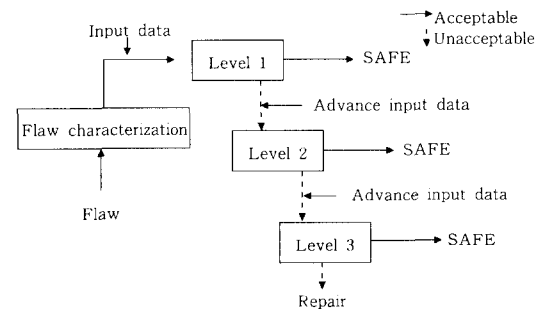


Fig. 5 General procedure of flaw assessment using FAD

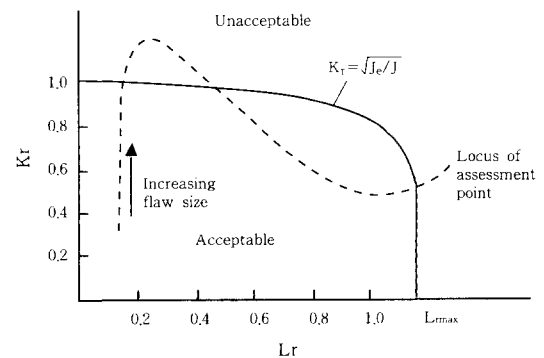


Fig. 6 High level FAD (level 4 in Table 1) established through the elastic-plastic fracture mechanical analysis⁹⁾

강도(σ_U), 파괴인성(K_{IC} 또는 δ_{IC})이 요구된다. Level 2에서는 FAC를 구축하는데는 재료물성이 요구되지 않으나, 소성 붕괴에 대한 한계값인 $L_{r,max}$ 를 결정하기 위해서는 항복강도와 인장강도가 요구되며, (L_r , K_r)을 도식하기 위해 항복강도와 파괴인성이 요구된다. 현장에서 결함평가의 최종 등급으로 사용되고 있는 level 3에서는 FAC의 함수식에 ϵ_{ref} , 탄성계수(E), 항복강도가 포함되어 있어 재료의 결함 발생 부위별 인장곡선이 요구된다. 이는 ϵ_{ref} 가 인장곡선 상에서 σ_{ref} 에 대응하는 변형률 값으로 정의되기 때문이다. 또한, (L_r , K_r)의 도식을 위해서 항복강도와 파괴인성이 요구되며, $L_{r,max}$ 결정을 위해서 인장강도와 항복강도가 요구된다. 이를 정리하여 표 2에 나타내었다.

Table 2 Required material data of each level

| 표 1의 등급 | FAC 구축 | (L_r (or S_r), K_r) 결정 | $L_{r,max}$ 결정 |
|------------------|--------|---------------------------------|-------------------------|
| Level 1 (Fig.2) | 불필요 | $\sigma_Y, \sigma_U, K_{IC}$ | 불필요 |
| Level 2 (Fig. 3) | 불필요 | σ_Y, K_{IC} | σ_Y, σ_U |
| Level 3 (Fig. 4) | 인장곡선 | σ_Y, K_{IC} | σ_Y, σ_{II} |

3. FAD의 정확도 향상을 위한 재료공학적 개선 방향

3.1 고려되어야할 인장물성의 변화

3.1.1. 용접열영향부 내의 미세 조직 변화

용융과 재응고의 과정을 거치는 용착금속과 달리 용접열영향부(heat-affected zone, HAZ)는 용접공정 동안 열이력에 의한 미세조직 변화를 경험하게 된다. 단일 패스(single pass)의 용접열을 받은 구조용 페라이트 계열 강재의 용접열영향부는 해당부위에 가해지는 용접열의 최고도달온도(T_p)에 따라 크게 4개의 영역으로 구분되는데, T_p 가 가장 높은 결정립 조대화 HAZ(Coarse Grained HAZ, CGHAZ)와 T_p 가 재결정 온도 영역에 있는 결정립 미세화 HAZ(Fine Grained HAZ, FGHAZ), T_p 가 A_{c1} 과 A_{c3} 온도사이의 오스테나이트와 페라이트의 2상영역에 있는 HAZ(Intercritical HAZ, ICHAZ) 및 T_p 가 A_{c1} 온도이하의 템퍼링 영역에 있는 HAZ(Subcritical HAZ, SCHAZ)의 4가지 영역이 그에 해당된다¹³⁾. 실제 구조물에는 일반적으로 다층(multi-pass) 용접이 행해짐

에 따라 상기한 영역들은 더욱 작은 세부 영역으로 구분되게 된다.

강재 조성과 용접공정에 따라 다양한 분포를 가지는 각 미세 영역들은 서로 다른 기계적 특성을 나타내는데, 복잡한 미세조직이 혼재하기 때문에 모재나 용착금속과는 달리 표준 시험법을 통해 HAZ의 대표 물성을 얻는데는 많은 어려움이 있다. 따라서, 기존의 level 3 FAD는 용착금속과 모재에 관한 인장물성만을 FAC 구축에 사용하고 있다는 한계가 있다. HAZ는 (1) CGHAZ 영역에서 발생하는 집합부 취화, T_p 가 A_{c1} 점 이하의 온도인 영역에서 일어나는 열변형 취화, 용접후열처리에 의해 일어나는 응력회복취화, 탄화물, 유화물 등의 형태로 존재하는 금속간 화합물이 입계에 액상막으로 존재하여 발생하는 액상취화 등에 의해 결함이 발생할 가능성이 높은 영역이며, (2) 사용 중에도 수소유기 균열, 환경유기 균열, 피로 균열, 크리프 균열, 크리프-피로 균열, 응력부식균열 등의 각종 결함이 집중적으로 발생 가능한 영역이므로 결함평가의 주요 대상임은 분명하다. 따라서 HAZ에 발생한 결함에 대하여 정확한 허용 여부 평가를 수행하기 위해서는 HAZ의 물성 변화가 고려된 FAD를 사용하여야 한다.

3.1.2. 고온, 고압 설비의 경년열화

발전설비, 석유화학설비 처럼 고온, 고압 환경에서 장시간 운용되는 경우 원자들의 확산이 쉽게 이루어지므로 미세조직의 변화 및 열화가 빈번히 발생하게 된다. 이들은 (1) 석출물 및 전위조직의 변화에 따른 연화, (2) 입계 편석 및 취성 상의 석출 등에 의한 취화(템퍼 취화, 열시효 취화, 탄화물 유기 취화 등), (3) 고온 산화 및 부식, (4) 크리프 손상, (5) 피로균열 발생 등의 결과로 나타나게 된다. 이러한 재질 열화는 균열 거동에도 심각한 영향을 미쳐 수명을 단축시키고 안전성 평가기준을 모호하게 만든다. 정확한 재료물성의 평가는 정량적인 고온플랜트의 수명평가와 결함에 대한 사용적합성평가에 모두 적용된다.

3.2. 재료물성 변화의 고려를 통한 재료공학적 개선 방안

3.2.1. 인장물성 변화를 고려한 결함 평가의 예

기존 코드에서는 HAZ 영역에 결함이 존재할 때, 용착금속과 모재의 물성 중 더 낮은 물성치를 적용하여 평가하였다. API 579¹¹⁾에서는 HAZ의 재료물성이 없을 경우, 용착금속 중앙부터 용융선까지 거리의 2배에 해당하는 영역에 대하여 용착금속의 물성을 기준으로

결합평가를 수행하도록 추천하고 있다. 하지만, HAZ에 결합 존재 시, 용착금속의 물성을 이용하게 되면 그림 7과 같이 실제 HAZ의 물성을 이용한 평가와는 차이를 보인다. 이는 안전성 평가에 오류를 범할 우려가 있으므로 HAZ의 정확한 파괴인성과 인장물성의 평가가 요구된다

또, 경년열화가 발생하는 구조물의 결합평가 시에도 초기 물성을 바탕으로 구축된 손상평가도를 그대로 사용하는 것은 정확성 측면에서 문제를 야기할 수 있다. 그림 8은 열화에 의해 항복강도가 변화할 때, 동일한 조건에서 신재의 물성을 사용했을 때와 열화재의 물성을 사용했을 때의 평가 결과 차이를 일례로 보여준다. 따라서 FAD 평가법의 정확도를 높여 실 구조물 결합평가의 안전성 및 보수성을 동시에 최적화하기 위해서는 재료물성 값들의 변화를 고려해야만 한다.

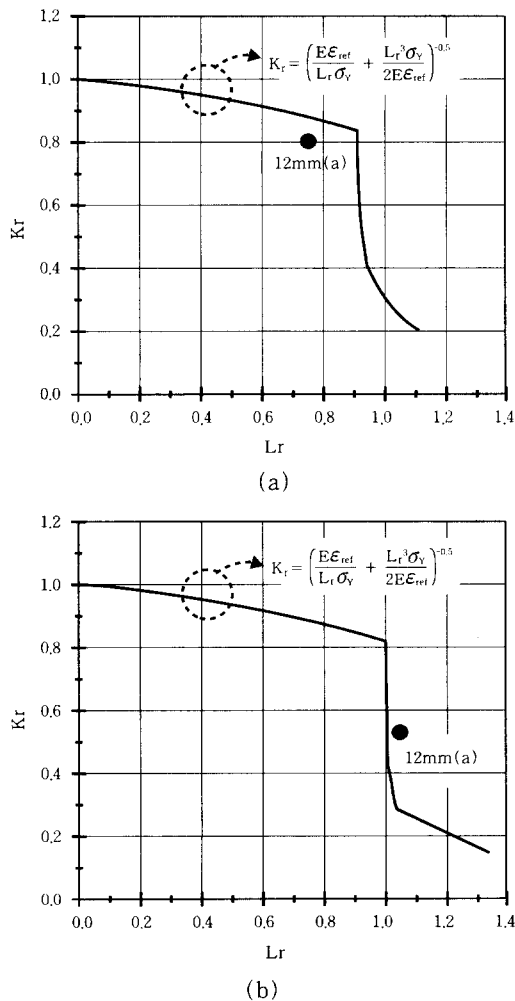


Fig. 7 Difference in FFS assessment result between (a) weld-metal-based FAD and (b) HAZ-based FAD (a: flaw depth)

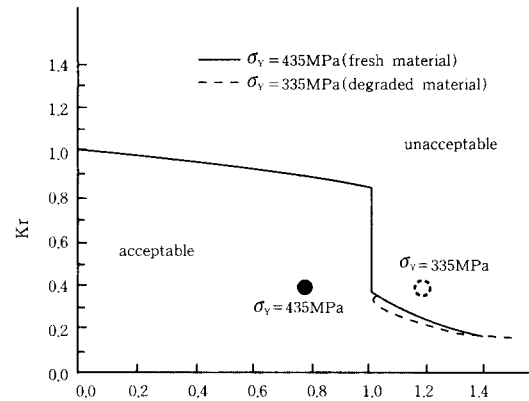


Fig. 8 Difference in assessment result between fresh-material-based FAD and degraded-material-based FAD

3.2.2. 신기술을 이용한 개선 방안

HAZ 물성변화를 측정하는 방법은 실험실적 파괴 방법과 현장에서의 비파괴적 방법으로 구분된다. 대표적인 실험실적 평가방법은 그림 9에 나타난 마이크로 인장 시험이다. 미소 시험편을 용융선부터 거리에 따라 HAZ 영역을 절단, 제작하여 실험함으로써 대표적인 인장물성 변화 데이터를 구하여 FAD 구축 및 응용에 활용할 수 있다. 또, 경년열화 물성을 FAD 구축에 적용하는 방법은 실험실적으로 인공 가속열화를 수행하여 변화 물성치를 구조물의 운용시간에 맞게 적용하는 것이 있다.

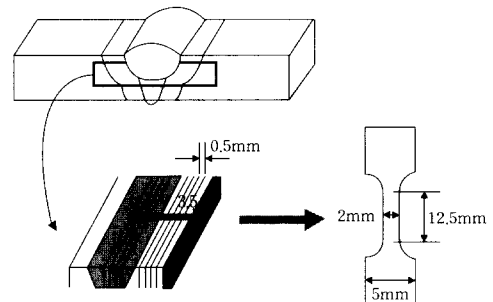


Fig. 9 Micro-tensile specimens used for evaluating tensile properties of HAZ

하지만 이 두 가지의 실험실적 평가 모두 현장 물성을 정확히 반영하기에는 한계점이 있다. 마이크로 인장시험의 경우 시험법 자체의 난이도를 극복하더라도, (1) 두께방향으로 혼재하는 다양한 미세조직의 전체 평균값을 나타내는데 불과하고, (2) 미세조직이 인접한 영역에서 급변하게 되므로 실험실적 평가 대상과 현장 실 구조물 사이에 재현성이 발견되지 않을 수 있는 어려움이 있다. 실험실적 인공 가속 열화시험의 경우에도 (1) 미세조직 내 공공과 탄화물의 분율이 증가

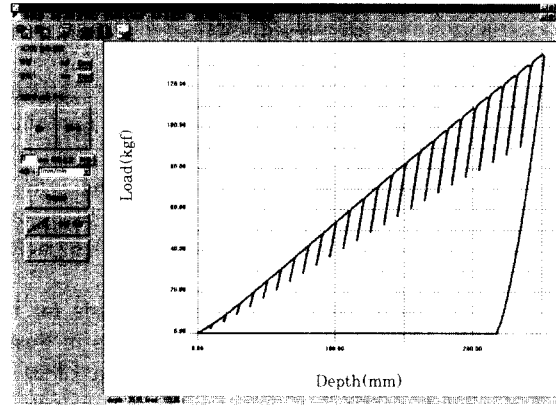
해 큰 취성을 나타내는 경우는 표준 인장시험시 탄성 영역에서 파단 가능성이 높아 올바른 시험 결과를 얻기가 힘들고, (2) 인공 열화상태와 실시간 열화상태 사이에 가속조건에 따라 상당한 차이가 존재하게 되는 문제점을 지니고 있다. 또한 실 구조물에서는 결합부위에 열화 효과와 HAZ 미세조직 변화 효과가 중복되어 나타나는 경우가 많은 것이 실험실적 평가결과 활용시의 큰 난점이다.

따라서, 정확한 결합평가를 위해서는 현장에서 결합 발생 부위의 물성을 비파괴적으로 평가하여 FAD에 반영하는 것이 가장 효과적인 방법이라고 할 수 있는데, 이에 적합한 비파괴 방법으로 연속압입 시험법이 있다^{14,15)}. 연속압입 시험법은 일정크기 이상의 시험편 수급이 어려운 경우, HAZ와 같이 미세조직이 국부적으로 급변하는 경우, 인장 시험편 채취가 불가능한 현장 설비 소재와 같이 표준 인장시험 방법을 사용할 수 없는 경우에 적용하기 위해서 80년대 후반이후 개발되었다. 그림 10 (a)와 같이 압입하중을 다중 인가 및 제거하고, 압입하중에 따른 압입깊이의 변화를 계장화장치를 이용하여 연속적으로 측정후 그 결과로 얻는 압입하중-깊이 곡선을 분석함으로써 그림 10 (b)와 같이 인장물성을 얻는 시험법이다. 압입깊이가 150 μm 에 불과하여 현장 구조물에서 비파괴적으로 인장물성을 파악할 수 있어 결합이 발생한 영역에 대한 현장물성을 평가에 반영할 수 있다는 큰 장점이 있다. 최근에는 연속 압입시험을 통하여 파괴인성을 비파괴적으로 평가하려는 연구들^{16,17)}이 진행 중에 있어 정확도 높은 FAD의 구축에 대한 연속압입시험의 역할은 더욱 증대될 것으로 예상된다.

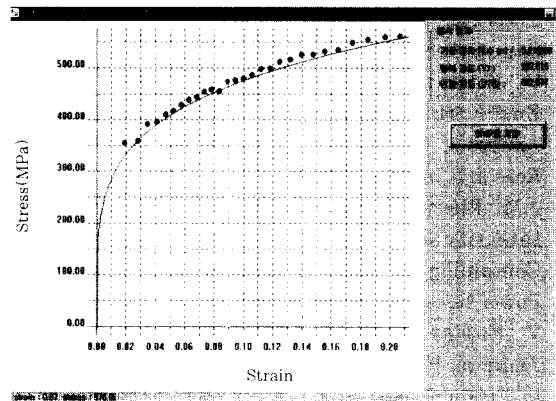
그림 11에 FAD를 이용한 구조물 결합 평가방법의 최적화를 이루기 위해 필요한 요소들을 요약하였다. 재료공학 측면의 기여방안으로 현장에서 비파괴적으로 결합발생 부위의 물성을 평가하여 입력자료로 활용함으로써 FAD 해석 결과의 정확도를 높일 수 있다는 점이 있다. 또한 구조물의 운용시간 및 환경에 따른 손상 메커니즘을 분석하여 그 결과를 FAD 활용에 제공할 경우, 시간의존적 및 환경의존적인 FAD를 구축할 수 있다.

4. 결 론

손상평가도(FAD)를 이용한 결합평가 방법의 개요와 함께 재료공학적 측면에서의 물성변화를 고려함으로써 평가 정확도를 개선할 수 있는 방안을 소개하였다. 국내에서도 노화된 용접구조물의 수가 증가하면서 건설 못지 않게 유지 및 관리가 중요한 관심사로 대두되고 있다. 따라서 정확한 사용적합성 평가에 대한 요구가 안전성 및 경제성의 양면에서 급증할 것으로 예상되는



(a)



(b)

Fig. 10 Examples showing the results from continuous indentation test: (a) indentation load-depth curve and (b) tensile flow curve obtained from (a)

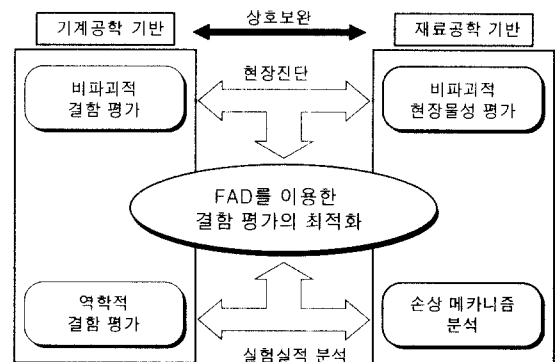


Fig. 11 Various factors for the enhanced fitness-for-service assessment using FAD

내에서도 노화된 용접구조물의 수가 증가하면서 건설 못지 않게 유지 및 관리가 중요한 관심사로 대두되고 있다. 따라서 정확한 사용적합성 평가에 대한 요구가 안전성 및 경제성의 양면에서 급증할 것으로 예상되는 만큼 재료공학적인 시각을 보완한 새로운 결합평가 기준의 지속적인 개발 및 실용화가 이루어지길 기대한다.

참 고 문 헌

1. R.P. Harisson, L. Loosemore, and I. Miline: Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects, CEBG Report No. R/H/R6(1976)
2. I. Miline, R.A. Ainsworth, N.R. Dowling, and T. Stewart: Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects, CEBG Report No. R/H/R6-Revision 3(1986)
3. BS PD 6493: Guidance on Some Methods for the Derivation of Acceptance Levels for Defects in Fusion Welded Joints, British Standards Institution(1980)
4. WES 2805: Method of Assessment for Defects in Fusion-Welded Joints with Respect to Brittle Fracture, 2nd Edition, Japan Welding Engineering Society(1980)
5. V. Kumar, M.D. German, and C.F. Shih: An Engineering Approach for Elastic-Plastic Fracture Analysis, EPRI Reports NP-1931, Electric Power Research Institute(1981)
6. J.M. Bloom: A Procedure for the Assessment of the Integrity of Nuclear Pressure Vessels and Piping Containing Defects, EPRI Report NP-2431, Electric Power Research Institute(1982)
7. V. Kumar, M.D. German, W.W. Wikenning, W.R. Andrews, H.G. deLorenzi, and D.F. Mowbray: Advances in Elastic-Plastic Fracture Analysis, EPRI Report NP-3607, Electric Power Research Institute (1984)
8. A.R. Dowling and C.H.A. Townley: The Effects of Defects on Structural Failure: A Two-Criteria Approach, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 3(1975) 77-137
9. BS 7910: Guide and Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Fusion Welded Structures, British Standards Institution(1999)
10. SINTAP: Structural Integrity Assessment Procedures for European Industries, Final Procedure, Brite-Euram Project Number BE95-1426(1999)
11. API RP 579: Recommended Practice for Fitness-for-Service, First Edition, American Petroleum Institute (2000)
12. M.N. Balsara: Application of Advanced Fracture Mechanics to the Assessment of Linepipe Defects, Proceeding of the 15th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE 1996), Florence, Italy, Vol. 5. Pipeline Technology (1996) 569-585
13. B.C. Kim, S. Lee, N.J. Kim, and D.Y. Lee: Microstructure and Local Brittle Zone Phenomena in High-Strength Low-Alloy Steel Welds, Met. Trans., Vol. 22A(1991) 139-149
14. F.M. Haggag: In-situ Measurement of Mechanical Properties Using Novel Automated Ball Indentation System, ASTM 1204(1990) 27-44
15. J.-H. Ahn, Y. Choi, and D. Kwon: Evaluation of Plastic Flow Properties of Materials through the Analysis of Indentation Load-Depth Curve, Journal of Korean Institute of Metals and Materials, Vol. 38(2000) 1606-1611
16. T.-S. Byun, J.W. Kim, and J.H. Hong: A Theoretical Model for Determination of Fracture Toughness of Reactor Pressure Vessel Steels in the Transition Region from Automated Ball Indentation Test, Journal of Nuclear Materials, Vol. 252(1998) 187-194
17. F.M. Haggag, T.-S. Byun, J.H. Hong, P.Q. Miraglia, and K.L. Murty: Indentation-Energy-To-Fracture Parameter for Characterization of DBTT in Carbon Steels Using Nondestructive Automated Ball Indentation Technique, Scripta Materialia, Vol. 38(1998) 645-651



• 주장복(朱章福)
 • 1973년생
 • 서울대학교 재료공학부
 • 용접부 파괴 및 건전성 평가
 • e-mail: jjbbb@snu.ac.kr



• 장재일(張宰溢)
 • 1968년생
 • (주) 프론틱스 연구개발부
 • 구조물 파괴 및 건전성 평가
 • e-mail: jijang@frontics.com



• 권동일(權東一)
 • 1957년생
 • 서울대학교 재료공학부
 • 마이크로 신뢰성 및 박막역학
 • e-mail: dongilk@gong.snu.ac.kr



• 이정석(李正錫)
 • 1977년생
 • 서울대학교 재료공학부
 • 구조물 파괴 및 사용적합성 평가
 • e-mail: jslee119@snu.ac.kr



• 최열(崔烈)
 • 1975년생
 • (주) 프론틱스 연구개발부
 • 재료의 강도물성 및 건전성 평가
 • e-mail: ychoi@frontics.com