

## 손상평가도를 이용한 구조물의 사용적합성 평가

이정석, 주장복, 권동일, 장재일\*, 김우식\*\*, 백종현\*\*  
서울대학교 재료공학부, (주)프론틱스\*, 한국가스공사 연구개발원\*\*

### Fitness-for-service Evaluation of Structure by Using Failure Assessment Diagram(FAD)

Jung-Suk Lee, Jang-Bog Ju, Dongil Kwon, Jae-il Jang\*,  
Woo-sik Kim\*\*, Jong Hyun Baek\*\*  
School of Material Science & Engineering, Seoul National University  
FRONTICS Inc.\*  
Research and Development Center, Korea Gas Corporation\*\*

#### I. 서론

손상평가도(failure assessment diagram, FAD)는, 작용응력과 소재의 파괴인성 및 존재하는 결함의 크기 사이의 관계를 다루는 파괴역학을 가장 직접적으로 이용하여 구조물의 사용적합성(fitness-for-service, FFS), 또는 안전에 관한 여유치(margin of safety)를 평가할 수 있는 방법이다. 일반적으로 널리 사용되는 손상평가도로는 BS PD6493[1]과 CEBG R-6[2], EPRI/GE J & CTOD 평가도법[3] 등이 있고, 각각의 규격은 예측되는 파괴모드(완전취성 파괴로부터 소성붕괴에 따른 파괴까지)에 따라 등급을 구분하여 대상 구조물의 성격에 적합한 접근법을 사용하도록 요구하고 있는데, 최근에는 강재의 발달에 따라, 고강도재료에 대한 기준인 PD6493의 3등급(level 3)이나 R-6의 2조건(option 2)이 주로 사용되고 있다. 하지만, 이러한 기준으로부터도 정확한 손상평가도를 작성하기에는 용접부 잔류응력 예측의 어려움, 용접부 파괴인성의 과도한 scatter 등의 오래된 문제점에서부터, 최근에 집중적으로 연구되고 있는 강도적 불균질에 따른 crack driving force의 변화, 잔류응력확대계수의 추정 등에 이르기까지 많은 어려움이 있다. 이에 최근에는 유럽의 다국적 프로젝트인 SINTAP(structural integrity procedure for Europe)을 필두로, 이러한 손상평가도의 정확도를 한층 향상시키기 위한 연구가 진행되고 있다. 그 내용은 (1) 강도적 불균질 효과의 평가, (2) 균열부위의 기계적 거동, (3) 데이터의 최적화 작업, (4) 잔류응력을 포함한 2차 응력의 고려 및 (5) 알고리즘의 개발 등 5가지 주제를 포함하고 있다. 따라서 여기서는 손상평가도를 이용해 구조물의 안전성을 평가하는 일반적인 방법에 관한

소개 및 세계적으로 널리 사용되고 있는 사용적합성 코드에 관한 비교, 분석을 수행하고자 한다.

## II. 본론

### 1. 손상평가도의 개념

#### (1) 개요

손상평가도란 선형파괴 역학이 성립하는 취성영역으로부터 소성붕괴영역까지의 모든 파괴역학적 가능성에 대하여 응력확대계수(결함의 크기 및 형상의 함수)와 작용하중, 두 개의 변수를 대입하여 평가할 수 있는 방법이다. 영국 중앙전력청이 80년대 중반 개발한 이래, 영국의 공업 규격(BS)이 만들어졌고 이에 따라 미국과 유럽, 일본, 캐나다 등의 기술선도국들의 구조물 안전성 평가자료로 활용도를 높이고 있으며, 특히 천연가스 배관을 운용하는 각종 회사들은 결함 발견 시나 가동조건의 변화 시 배관의 운용적합성을 확보하기 위해 많이 사용되고 있다[4]. 초기에는 구조물들의 특성을 고려한 손상평가도를 구축하는데 많은 노력을 요하지만, 일단 확보된 후에는 구조물의 결함 발견 시 결함크기와 응력값을 대입하면 손쉽게 구조물의 파괴에 대한 안전성을 평가할 수 있다.

#### (2) 이론적 배경

##### i) 파괴역학

고전 역학에서는 구조물을 구성하고 있는 재료의 항복강도 이상의 응력이 작용하면 안전성에 문제가 있다고 보았으나, Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 파괴역학에서는 결함의 크기, 재료의 파괴인성, 작용응력의 세 변수가 상호작용하여 안전성 여부를 결정한다[5]. 즉, 구조물의 재료가 일정할 때 파괴인성 값이 동일하므로, 결함의 크기와 응력, 두 개의 변수로 구조물의 파괴에 대한 안전성 평가가 가능하다. 이와 같은 파괴역학의 개념을 바탕으로 손상평가도가 만들어진다.

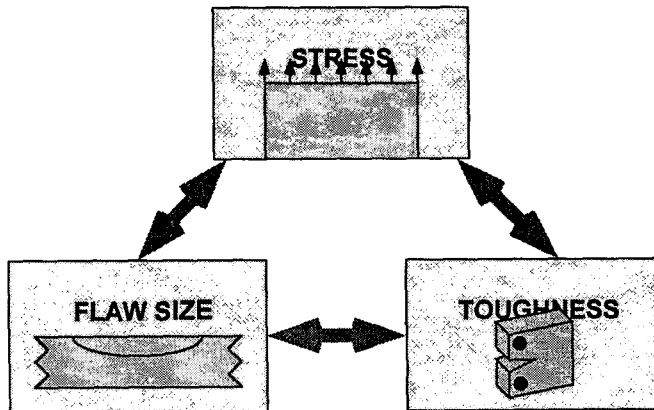


Fig. 1. Application of fracture mechanics

ii) 구조물의 손상모드

구조물의 손상모드는 크게 취성파괴와 소성붕괴로 나뉘어지며, 일반적으로 두 현상이 복합적으로 파괴에 영향을 미친다.

① 취성파괴

Fig. 2(a)와 같이 균열첨단에서 응력이 증가함에 따라 균열이 점차 진전되어 파괴에 이르는 손상모드이다.

② 소성붕괴

Fig. 2(b)와 같이 균열첨단에서 소성역이 발생하고, 응력 증가에 따라 소성역이 확대되어 붕괴를 일으키는 손상모드이다.

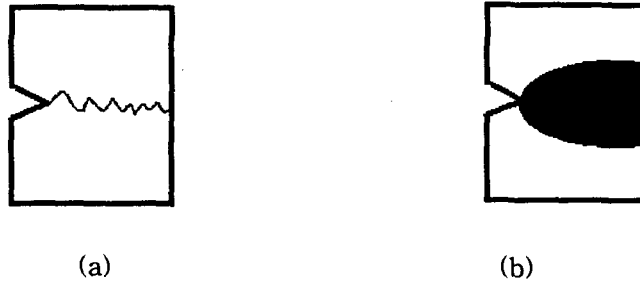


Fig. 2. Failure mode of structure; (a) Elastic fracture and (b) plastic collapse

iii) 손상평가도

① 소성붕괴에 대한 저항(x축)

손상평가도의 x축은  $L_r$ 로 표시하는데, 이는 소성붕괴에 대한 저항을 나타내며 식 (1)과 같이 정의된다[6].

$$L_r = \frac{\sigma}{\sigma_c} \quad (1)$$

( $\sigma$ : 작용응력,  $\sigma_c$ : 소성붕괴를 일으키는 응력)

구조물에 작용하는 응력이 커지면  $L_r$ 값이 커지게 되고, 작용응력 값이  $\sigma_c$ 에 이르게 되면 구조물에 소성붕괴가 일어난다.

② 취성파괴에 대한 저항(y축)

손상평가도의 y축은  $K_r$ 로 표시하는데, 이는 취성파괴에 대한 저항을 나타내며 식 (2)와 같이 정의된다[6].

$$K_r = \frac{K}{K_{mat}} \quad (2)$$

( $K$ : 응력확대계수,  $K_{mat}$ : 파괴인성)

구조물에 작용하는 응력확대계수 값이 커지면  $K_r$ 값이 증가하고, 응력확대계수가

$K_{mat}$ 값에 도달하면, 취성파괴가 일어난다.

실제의 손상은 일반적으로 소성붕괴와 취성파괴의 조합으로 나타나기 때문에 이 둘을 고려해 주기 위해 Fig. 3과 같이 x축에는 소성붕괴의 영향을 y축에는 취성파괴의 영향을 나타낸 것이 손상평가도이다. 손상평가도에서 x축, y축을 제외한 실선 부분은 구조물의 안전성 여부를 결정하는 임계선이며, 이에 대한 함수식은 파괴역학의 이론으로부터 얻어진다.

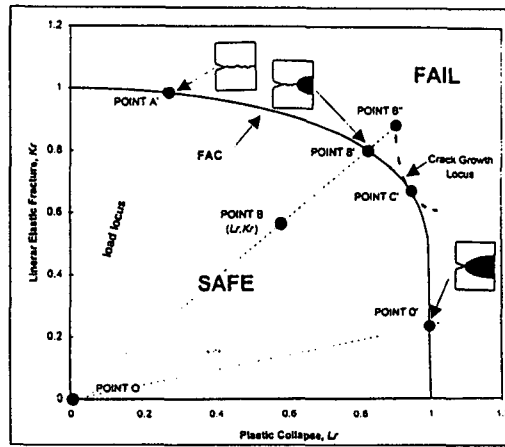


Fig. 3. Typical failure assessment diagram(FAD)

(3) 구조물에 적용

구조물에 결함 발견 시 그 결함을 특성화시켜서 간략히 나타내고, 구조물을 구성하는 재료의 물성을 고려하여  $L_r$ 값과  $K_r$ 값을 구해서 좌표 점, ( $L_r$ ,  $K_r$ )을 손상평가도에 도시한다. Fig. 3의 point B와 같이 도시한 점이 임계선보다 안쪽에 있으면 구조물은 사용적합한 것이나, 임계선보다 바깥쪽에 위치하면(Fig. 3의 point B') 사용적합성 여부를 정확히 알 수 없으므로 더 높은 단계의 평가가 수행되어야 한다. 최종 단계의 평가에서 안전하지 못하다는 결론이 나올 시에는 구조물을 수리 또는 교체해야 한다(Fig. 4).

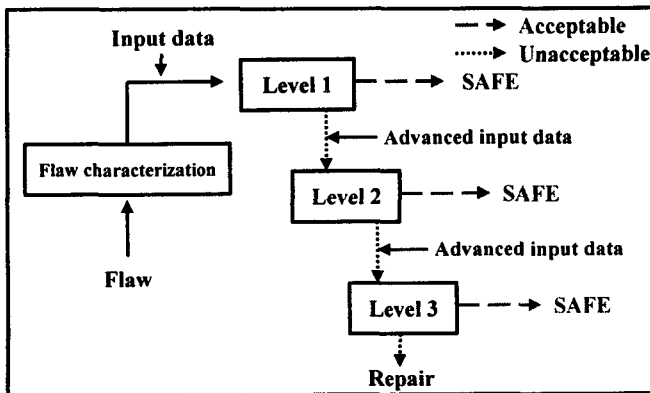


Fig. 4. Flow of fitness-for-service evaluation by using FAD

## 2. 기존코드의 분석

구조물의 안전성 평가를 위해 손상평가도에 관한 연구는 이미 세계적으로 활발하게 진행되고 있는 실정이다. 이에 준하여 선진국에서는 각국의 FFS 코드를 구축하고 있다. 대표적인 손상평가도로 알려져 있는 BS(영국규격협회) PD6493[1]과 개정판인 BS7910[7] 및 CEGB(영국중앙전력청: 현재 NE) R-6[2], API579[8]를 중심으로 파괴역학 코드들의 비교, 분석을 수행하였다. 기존코드의 구조물 사용적합성 평가의 순서는 Fig. 4와 같이 결함의 특성화 후, 구조물을 구성하는 재료의 물성을 고려해 낮은 단계부터 수행한다. 낮은 단계에서 안전성이 검증되지 않으면 점차 높은 단계로 올라가게 된다.

### (1) 결함의 특성화

결함의 모양에 관한 특성화는 세 코드가 동일하나, 결함의 방향에 관한 특성화에서는 결함의 투영 평면이 다르다는 차이를 보이고 있다. API579는 결함을 투영시킬 시 주응력에 수직인 평면으로 투영을 시키는 반면, R-6는 결함의 특성을 잘 반영하면서 응력에 관한 해석이 쉬워,  $K_I$ ,  $\sigma_{ref}$ 의 해를 구하기 쉬운 방법을 코드에 명시된 바와 같이 선택해 투영시킨다[2].

### (2) Level 1

먼저 BS7910은 손상평가도의 임계선의 함수에 어떤 데이터도 요구되지 않는 가장 간단한 손상평가도를 사용하며, 결함을 가진 구조물의 안전성 평가 시 인장강도, 항복강도, 파괴인성 및  $K_I$ ,  $\sigma_{ref}$ 의 해를 요구한다. 차선택으로 수식을 이용해 최대허용결함 길이를 구하는 방법도 있다. 이에 반해, API579는 온도에 따른 최대 허용결함의 크기를 결정해 주는 스크리닝곡선을 사용하며, 구조물을 구성하는 재료가 취성파괴에 견딜 수 있는 최소온도만을 재료의 물성으로 요구한다[8].

### (3) Level 2

BS7910에서는 BS7910 level 1보다 임계선의 함수가 파괴역학적으로 더 발전된 손상평가도를 사용하며, 재료의 물성으로 항복강도, 파괴인성을 요구하는 2A 방법과 현재 작용하는 응력값에 대한 변형률로 정의되는  $\epsilon_{ref}$ 의 항이 손상평가도의 임계선 함수식에 존재하기 때문에 재료의 인장곡선까지 요구하는 2B 방법이 있고, 평가 절차는 BS7910 level 1과 유사하다. API579경우, BS7910 level 2A의 손상평가도와 동일한 손상평가도 사용하기 때문에 동일한 데이터를 요구하고, 평가 방법도 유사하다. 하지만, 자체 내에 구축해 놓은  $K_I$ ,  $\sigma_{ref}$ 의 해가 BS7910과는 달리 반경에 비해 두께가 얇은 구조물에도 적용이 가능하다[9, 10].

### (4) R-6

#### i) Option 1

BS7910 level 2A (또는 API579 level 2)와 동일한 손상평가도를 사용하고 있어, 요구되는 데이터와 평가절차가 유사하다. 다른 두 코드와의 차이점은 파괴인성의 결정 시 연성 찢김에 관한 효과를 고려해 준다는 점이다.

#### ii) Option 2

BS7910 level 2B와 동일한 손상평가도를 사용하고 있어, 요구되는 데이터와 평가절차가 유사하다. Option 1과 같이 연성 찢김에 관한 효과를 고려해 파괴인성

을 고려해 준다는 것이 BS7910 level 2B와 다른 점이다.

### III. 요약

취성과파괴와 소성붕괴의 구조물 손상모드를 모두 고려해 줄 수 있는 손상평가도는 그것을 구조물에 알맞게 구축하기는 어렵지만, 한번 구축해 놓으면 작용응력과 존재하는 결함의 크기만으로 손쉽게 구조물 사용적합성을 평가할 수 있다.

### IV. 참고문헌

- [1] PD6493: 1980, Guidance on Some Methods for the Derivation of Acceptance Levels for Defects in Fusion Welded Joints, British Standards Institution (1980)
- [2] CEGB R/H/R-6-Revision, Assessment of the integrity of structures containing defects (1998)
- [3] Kumar. V, German M.D. and C.F. Shih: An Engineering Approach for Elastic-Plastic Fracture Analysis, EPRI, Final Report to NP 1931 (1981)
- [4] Gordon J.R.: Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 32, No. 3, pp.195-203 (1993)
- [5] Anderson T.L.: Fracture Mechanics, Second edition (1995)
- [6] Balsara M.N.: Application of Advanced Fracture Mechanics to the Assessment of Linepipe Defects, Pipe Technology, Vol. V, ASME (1996)
- [7] BS7910: Guide and methods for assessing the acceptability of flaws in fusion welded structures, British Standads Institution (1999)
- [8] API Recomendad Practice 579, Fist Edition, January 2000, American Petroleum Institute (2000)
- [9] Folias E.S.: International Journal of Fracture Mechanics, Vol. 1, pp.104-113 (1965)
- [10] Kiefner J.F., Maxey W.A., Eiber R.J. and Duffy A.R., ASTM STP 536, pp.461-481 (1973)