

파손평가도표를 이용한 구조물 건전성 평가법

김윤재

성균관대학교 기계공학부 산업설비안전성평가센터

Structural Integrity Assessment Based on Failure Assessment Diagram

Yun-Jae Kim

SAFE Research Center, Sungkyunkwan University

1. 서론

현대 산업 분야에 사용되는 산업설비는 점차 대형화 및 고성능화되는 추세이며, 이에 비례하여 가동조건 또한 가혹해지는 경향을 보이고 있다. 이에 따라 국내 산업설비의 주요기기도 가동년수의 증가에 따른 노후화로 인하여 균열 발생 가능성이 높아지고 있으며, 이로 인해 파괴역학적 건전성 평가가 요구되고 있다. 예로 국내의 발전 설비 및 중화학 설비(정유 플랜트, 석유화학 플랜트 등)는 1970년대 초에 건설된 것이 많기 때문에 설계 수명이 소진된 노후 설비가 많으며, 현재 설계 수명을 연장하여 사용하고 있는 실정이다. 따라서 이러한 가동중 설비의 사용 안전성 평가 및 향후 잔여 수명을 예측할 수 있는 수명 평가 기술의 개발은 필수적이다.

산업설비에 존재하는 균열의 안전성을 평가하는 방법은 크게 유한요소해석(finite element analysis)을 이용한 방법과 해석적 평가법(analytical assessment methods)을 이용한 방법으로 나눌 수 있다. 유한요소해석을 이용한 방법은 해석 결과가 비교적 정확하다는 장점이 있으나 해석시 많은 지식과 경험이 필요하므로 현장에서 신속하게 적용하기는 어려우며, 신뢰성이 검증된 해석적 평가법을 적용하는 것이 경제성 측면에서는 바람직하다고 할 수 있다. 따라서 최근 30여년간 각국의 산업계와 연구소 등을 중심으로 이에 대한 활발한 연구를 수행하여 균열 구조물의 안전성 평가를 위한 많은 해석적 균열 평가법을 제시한 바 있다. 해석적 균열 평가법은 평가 방법에 따라 크게 두 가지 종류로 구분할 수 있다. 첫 번째는 파손평가선도(Failure Assessment Diagram; FAD)^(1,2)를 이용한 방법이며, 두 번째는 균열진전력(crack driving force)⁽³⁾을 이용한 방법이다. 두 가지 방법은 근본적으로는 서로 동일하지만⁽⁴⁾ 적용의 편의성과 확장성의 용이성을 고려하여 최근에는 FAD를 이용한 방법이 각종 코드에 널리 적용되고 있다⁽⁵⁻⁹⁾.

본 고에서는 먼저 최근 널리 사용되고 있는 FAD를 이용한 균열 안전성 평가법에 대해 설명하고 현재의 FAD의 문제점에 대해 기술하였다.

2. FAD의 개념

현재 사용되고 있는 FAD는 Ainsworth가 제시한 참조응력법(reference stress method)⁽¹⁰⁾을 기반으로 작성되었으며, 탄소성 파괴역학 이론에 근거한다는 점에서 초기의 FAD와는 구별된다. R6 Rev. 3에서 제시된 현재의 FAD는 해석적 균열 평가법 가운데 전세계적으로 사용되는 가장 일반적인 방법으로 현재 API 579⁽⁷⁾, SAQ⁽⁸⁾, BS 7910⁽⁹⁾ 그리고 RSE-M⁽¹¹⁾ 등의 여러 코드에 적용되고 있다. 현재의 FAD에서는 다음과 같은 두개의 무차원 변수가 사용된다.

$$K_r = \frac{K}{K_{mat}} \quad (1)$$

$$L_r = \frac{P}{P_L} \quad (2)$$

여기서, K 는 작용하중에 의한 응력확대계수(stress intensity factor)이며, K_{mat} 는 재료의 대표 파괴인성치(fracture toughness)이다. 또한 P 는 작용하중이며, P_L 은 재료의 항복강도(yield strength, σ_y)를 사용하여 정의된 구조물의 소성 한계 하중(plastic limit load)이다. 현재의 FAD는 재료의 인장 특성(tensile property)의 보유율과 정확도에 따라 3가지의 식으로 구성되어 있다. 만약 재료의 항복강도와 인장강도(ultimate tensile strength)만을 알고 있다면 다음과 같은 옵션 1식을 사용하여 FAL(failure assessment line)을 작성하며, 이는 재료물성치 및 구조물의 형상에 무관한 가장 보수적인 하한계 곡선(lower bound curve)이다.

$$K_r = f(L_r) = (1 - 0.14L_r^2) \{0.3 + 0.7 \exp(-0.65L_r^6)\} \quad (3)$$

만약 재료의 전체 응력-변형률 곡선을 알고 있을 경우에는 다음과 같은 구조물의 형상에 무관한 옵션 2식을 사용하여 FAL을 작성하며, 현재 가장 일반적으로 사용되고 있다.

$$K_r = f(L_r) = \left(\frac{E\varepsilon_{ref}}{L_r\sigma_y} + \frac{1}{2} \frac{L_r^3\sigma_y}{E\varepsilon_{ref}} \right)^{-1/2} \quad (4)$$

여기서 ε_{ref} 는 진응력-진변형률 선도에서 정의되는 σ_{ref} 에서의 진변형률을 의미한다. 옵션 3식은 구조물의 탄소성 J -적분을 알고 있을 때 사용되는 식으로, J -적분은 탄소성 유한요소해석이나 검증된 공학적 계산식을 사용하여 구한다. 일반적으로 옵션 3식이 가장 정확하지만 해석시 많은 노력이 필요하다는 단점이 있다. 옵션 3식은 다음과 같이 표현된다.

$$K_r = \sqrt{\frac{J_e}{J}} \quad (5)$$

Fig. 1은 현재의 FAD를 도식적으로 나타낸 것으로 L_r^{max} 는 다음과 같이 정의된다.

$$L_r^{max} = \frac{\sigma_y + \sigma_u}{2\sigma_y} \quad (6)$$

여기서, σ_y 는 재료의 항복강도이며, σ_u 는 인장강도이다.

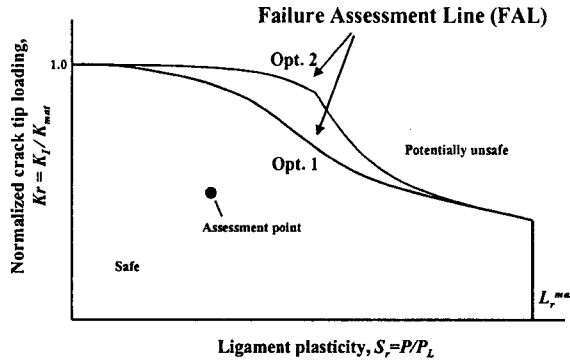


Fig. 1 Schematic illustration of FAD according to R6 Rev. 3

3. FAD를 이용한 균열 평가법

Fig. 2는 FAD를 이용한 균열 평가 단계를 도식적으로 나타낸 것으로 각 단계별 세부적인 내용은 다음과 같다.

Step 1	Determine Tensile Properties
Step 2	Draw FAD Diagram, $K_r = f(L_r)$
Step 3	Categorise stress/Characterise flaw
Step 4	Determine fracture toughness, K_{mat}
Step 5	Calculate $K_r = K_i / K_{mat}$
Step 6	Calculate $L_r = P / P_L$
Step 7	Plot point(s), (K_r, L_r)
Step 8	Assess significance of results

Fig. 2 Flow chart of FAD based assessment

3.1 인장 물성치의 결정

옵션 2식 또는 옵션 3식을 이용하여 FAD를 작성하기 위해서는 실험으로 구한 재료의 진응력-진변형률 곡선이 있어야 한다. 만약 재료의 항복강도와 인장강도만을 알고 있다면 옵션 1식을 이용하여 FAD를 작성한다.

3.2 FAD의 작성

재료의 인장 물성치를 이용하여 옵션 1 (식 (3)) 또는 옵션 2 (식 (4)) FAD를

작성한다. 만약 옵션 3 FAD를 사용하려면, 해석하고자 하는 균열 구조물에 대한 탄소성 유한요소해석 또는 다른 검증된 공학적 계산식에 의해 계산된 J -적분을 이용하여 식 (5)에 입각하여 FAD를 작성할 수 있다.

3.3 하중 및 균열 형상의 특성화

구조물에 작용하는 하중을 1차 하중(primary load)과 2차 하중(secondary load)으로 분류한다. 1차 하중은 주로 내압(internal pressure), 굽힘 모멘트(bending moment) 등과 같은 기계적 하중(mechanical loading)으로 구조물을 소성 붕괴에 이르게 할 수 있는 하중이다. 이에 반해 열하중(thermal loading), 용접잔류응력 등은 그 자체로는 구조물의 소성 붕괴를 일으키지 않으므로 2차 하중으로 분류한다. 또한 실제 구조물에서 발견되는 균열의 형상은 매우 복잡한 경우가 많으므로 이를 직접 평가에 적용하기는 어렵다. 따라서 FAD에 의한 균열 안전성 평가를 위해서는 발견된 균열의 형상을 이상화하여야 한다.

3.4 파괴인성치의 결정

재료의 파괴 인성치를 ASTM Standard⁽¹²⁾, British Standards⁽¹³⁾등의 코드에 제시된 K_c , J_c 혹은 CTOD (crack tip opening displacement, δ_c) 실험 절차에 따라 결정한다. 일관성을 위해 결정된 값들을 다음과 같은 식을 사용하여 재료의 파괴인성치 (K_{mat})로 변환한다.

$$K_{mat} = K_c ; K_{mat} = \sqrt{\frac{EJ_c}{(1-\nu^2)}} ; K_{mat} = \sqrt{\frac{1.5E\sigma_y\delta_c}{(1-\nu^2)}} \quad (7)$$

참고로 K_{mat} 과 δ_c 의 관계는 문헌에 따라 상이할 수 있다.

3.5 K_r 의 결정

앞에서 결정된 파괴인성치를 이용하여 식 (1)에 따라 균열 구조물의 K_r 을 계산한다. 균열 구조물의 응력확대계수는 다양한 구조물과 균열의 형상, 하중 조건에 대해 핸드북^(14,15) 형태로 많은 해가 제시되어 있으므로 이를 이용하여 쉽게 구할 수 있다.

3.6 L_r 의 결정

L_r 은 균열 구조물의 소성 한계 하중과 구조물에 작용하는 1차 하중의 비로 정의된다. 2차 하중은 구조물의 소성 붕괴에 영향을 미치지 않으며, 따라서 L_r 의 계산시 포함되지 않는다. 균열 구조물의 한계 하중은 재료의 항복강도에 선형 비례하므로 보수적인 해석을 위해서는 하한계 항복강도 값을 사용한다.

3.7 평가점의 결정과 균열 안전성 평가

3.5절과 3.6절에서 결정된 K_r 과 L_r 값을 사용하여 Fig. 1의 FAD상에 평가점을 도시한다. 만약 평가점이 FAL의 내부에 있으면 안전하다고 평가할 수 있고, 평가점이 FAL의 외부에 존재하게 되면 그 구조물은 안전하지 않을 수 있다고 평가된다.

4. 현재의 FAD의 문제점

최근 각종 평가 코드에 FAD가 널리 적용되고 있으나 재료에 따른 제약성 및 정확한 참조 하중 결정의 어려움 등의 많은 개선되어야 할 점이 있다. 먼저 현재의 FAD는 재료의 가공 경화 거동에 따라 그 정확성이 달라진다는 것이다. 일반적으로 재료의 가공 경화 거동은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 먼저, 일반 오스테나이트강들은 연속적인 가공 경화 거동(continuous hardening)을 보이며(Fig. 8a), 현재의 FAD는 이런 재료들에는 잘 부합한다. 하지만 큰 완전 소성 변형 영역(Lüders strain)이 나타나는 경우에는 상당히 부정확할 수 있다는 것이 잘 알려져 있다. 최근 유럽공동체연구 SINTAP에서도 완전 소성 변형 영역이 나타나는 재료에 대한 보다 정확한 옵션 1식을 제시하기 위한 연구를 수행한 바 있으며, 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터(이하 SAFE 연구센터)에서도 이러한 재료에 대한 새로운 옵션 1식과 2식을 제시하기 위한 연구를 진행 중에 있다.

또한 앞에서 설명한 바와 같이, 참조응력법에 입각한 기존의 FAD법에서 가장 중요한 요소는 가장 적합한 소성 한계 하중을 결정하는 것이다. 이는 특히 표면균열과 같이 그 정의의 모호성으로 인해 여러 가지 한계 하중해가 존재할 경우에는 더욱 중요한 요소로 대두된다. 이러한 측면에서 최근 SAFE 연구센터에서 새로이 제시한 최적참조하중(optimised reference load) 기반의 개선된 참조응력법(enhanced reference stress method)^(16,17)은 기존의 참조응력법에 입각한 FAD법의 단점을 개선할 수 있다는 점에서 유리하다 할 수 있다.

참고문헌

- [1] "Assessment of the integrity of structures containing defects," CEGB Report R/H/R6, 1976; Revision 1, 1977; Revision 2, 1980
- [2] R6 Revision 3, "Assessment of the integrity of structures containing defects," British Energy Generation Ltd., Amendment 10, May, 1999
- [3] V. Kumar, M.D. German and C.F. Shih, "An engineering approach for elastic-plastic fracture analysis," EPRI-Report NP-1931, EPRI, Palo Alto, 1981
- [4] R.A. Ainsworth, Y.J. Kim, U. Zerbst, and J. Ruiz, "Driving force and failure assessment

- diagram methods for defect assessment,” Proc. of OMAE 98, OMAE 98/2054, 1998
- [5] R6 Revision 4, “Assessment of the integrity of structures containing defects,” British Energy Generation Ltd., 2001
 - [6] SINTAP Final Procedure, Brite Euram Project, BE95-1426, 1999
 - [7] API 579, “Recommended practice for fitness-for-service,” American Petroleum Institute, 2000
 - [8] M. Bergman, B. Brickstad, L. Dahlberg, F. Nilsson and I. Sattari-Far, “A procedure for safety assessment of components with cracks – handbook,” SA/FoU Report 91/01, ABSvensk Anläggningsprovning, Swedish Plant Inspection Ltd., 1991
 - [9] BS 7910, “Guide on methods for assessing the acceptability of flaws in fusion welded structures,” London, British Standards Institution, 1999
 - [10] R.A. Ainsworth, “The assessment of defects in structures of strain hardening materials,” Engineering Fracture Mechanics, Vol. 19, pp. 633~642, 1984
 - [11] RSE-M Code, 1997 ed. and 2000 Addenda, “Rules for in-service inspection of nuclear power plant components,” AFCEN, Paris
 - [12] “Standard test method for measurement of fracture toughness,” ASTM E1820, Rev. A, American Society for Testing and Materials, 1999
 - [13] “Method for determination of K_{IC} , critical CTOD and critical J values of metallic materials,” BSI 7448 Part I, British Standards Institution, London, 1991
 - [14] Y. Murakami, “Stress intensity factor handbook, Vols 1-3,” 1987, 1992
 - [15] T. Fett and D. Munz, “Stress intensity factors and weight functions,” Computational Mechanics Publications, Southampton, UK, 1997
 - [16] Y.J. Kim, N.S. Huh and Y.J. Kim, “Enhanced reference stress based J and crack opening displacement estimation method for leak-before-break analysis and comparison with GE/EPRI method,” Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 24, No. 4, pp. 243~254, 2001
 - [17] Y.J. Kim, D.J. Shim, J.B. Choi and Y.J. Kim, “Elastic-plastic analyses for surface cracked plate under combined bending and tension,” Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2002, 37(1), 33-45.