

< 논 문 >

원자력배관 건전성평가 전문가시스템 개발(1) — 평가법 제시 및 재료물성치 추론 —

김영진* · 석창성* · 전현규** · 최영환*** · 이정배***

(1995년 9월 4일 접수)

Development of Nuclear Piping Integrity Expert System (I) — Evaluation Method Recommendation and Material Properties Inference —

Y. J. Kim, C. S. Seok, H. K. Jun, Y. H. Choi and J. B. Lee

Key Words : Expert System(전문가시스템), Sensitivity Analysis(민감도분석), Fracture Mechanics(파괴역학), J-Integral(J-적분), Possession Ratio(보유율), Nuclear Piping(원전배관)

Abstract

The objective of this paper is to develop an expert system for nuclear piping integrity. This paper describes the selection methodology of integrity evaluation method and the inference of material properties. To select the integrity evaluation method, the weight factor for respective material properties was obtained by the sensitivity analysis of the effect of material properties on integrity evaluation method. Subsequently the possession ratio for respective integrity evaluation method was computed, and the most appropriate integrity evaluation method for given input information is selected. In the material properties inference, stress-strain curves and J-R curves were predicted from tensile properties such as yield strength and tensile strength.

기 호 설 명

C_1 : J-R 곡선적합 재료상수
 C_2 : J-R 곡선적합 재료상수
 K_I : 인장모드에서의 응력확대계수
 J : J적분
 α : Ramberg-Osgood 재료상수
 n : 변형률 경화지수
 σ_f : 유동응력
 σ_y : 항복강도
 σ_u : 인장강도

σ_0 : 기준응력
 ϵ_0 : 기준변형률
 ϵ_c : 과단변형률
 PR : 물성치 보유율
 μ : 가중치함수

1. 서 론

원자력·화력 발전설비, 석유화학 설비 및 제강·제철설비 등의 압력용기, 보일러, 배관 등의 주요기기는 운전연한이 증가함에 따라 기기에 가해지는 고응력 및 피로 등의 하중과 열, 부식 및 침

*회원, 성균관대학교 기계설계학과

**성균관대학교 대학원

***회원, 한국원자력안전기술원

식 등 환경의 영향으로 인해 점차로 노후화(aging)되며, 이로 인해 기기의 건전성이 상실될 경우 산업설비 안전성에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 따라서 산업설비의 수명기간중 주요 기기의 건전성을 확인하기 위해 주기적인 가동중검사(ISI: in-service inspection) 프로그램이나 온라인 모니터링(on line monitoring)을 통한 기기의 운전중 감시 프로그램이 현재 운전중인 산업설비에서 수행되고 있다. 이들 프로그램을 통해 발견된 기기내 균열의 발생 및 성장, 벽두께의 감소, 파괴인성치의 저하 및 누적피로손상의 증가와 같은 기기 건전성 저하 및 상실 징후는 정량적 또는 정성적으로 평가되어 수명기간 내의 기기 건전성확보에 활용되고 있다. 그러나 기기 건전성평가는 단순한 평가과정을 거쳐 쉽게 그 타당성 여부를 결정할 수 있는 경우보다는 평가자의 경험과 공학적 판단 및 여러 분야의 종합적 판단이 요구되는 경우가 더 많다. 이러한 이유로 지금까지는 기기의 건전성평가를 신속하고 효율적으로 수행하는 데 많은 어려움이 있었다. 또한, 기기의 하중조건, 환경조건 및 재료물성치를 효율적으로 관리하고 처리하기 위한 데이터베이스의 구축과 이의 활용을 위한 시스템의 개발이 요구되고 있다.

이러한 요구에 부응하기 위하여 80년대 초부터 전문가시스템(expert system)을 이용한 건전성평가 시스템에 관한 연구가 여러 연구자들에 의해 시도되어 ESR,⁽¹⁾ RAMINO⁽²⁾ 및 JAPEIC⁽³⁾ 등의 전문가시스템이 개발되었다. ESR 시스템은 고온, 고압하에서 가동되는 원전기기의 잔존수명평가와 관리 및 건전성확보를 위해 개발되었으며, RAMINO 시스템은 원자력발전소의 압력용기 및 해양구조물의 가동중검사 및 보수유지의 효율성을 증진시키기 위하여 개발되었다. 또한, JAPEIC 시스템은 원자력발전소의 가동중 검사로 검출되는 결함에 대한 건전성평가를 위하여 개발되었다.

한편, 국내에서는 본 저자들이 탄소성 파괴역학 건전성평가 시스템 EPIES(Elastic-Plastic Integrity Evaluation System)⁽⁴⁾를 개발한 바 있으며, 원자로용기의 건전성평가를 위한 프로토타입(prototype) 전문가시스템 RVIES(Reactor Vessel Integrity Expert System)⁽⁵⁾를 개발한 바 있다.

지금까지 개발된 건전성평가 시스템에서는 주어진 문제의 상황에 따라 사용자가 재료물성치를 입력하고 적절한 평가법을 선정할 후 해석을 수행하

였다. 그러나 초기에 건설된 원자력발전소의 경우에는 주요 기기에 대한 파괴역학적 평가가 수행되지 않았던 관계로 파괴저항 실험데이터가 거의 확보되어 있지 않으며, 인장실험의 경우도 데이터를 확보하기 어려운 경우가 있다. 평가에 필요한 재료물성치를 얼마나 정확히, 그리고 얼마나 많이 확보, 또는 추론할 수 있는가는 전문가시스템의 성능을 결정하는 중요한 요인이 된다. 또한 어떤 방법을 사용하여 배관 건전성을 평가할 것인가도 해석 결과의 정확성에 큰 영향을 미친다. 그러나 제안된 많은 평가방법중에서 주어진 조건에 가장 적절한 배관 건전성평가 방법을 선정하는 것도 쉬운 문제가 아니다.

본 연구에서는 재료물성치의 추론과 평가방법의 선정에 대한 내용을 포함하는 원자력배관 건전성평가를 위한 종합적인 전문가시스템을 개발하고자 한다. 이를 위해서는 먼저 배관 건전성평가법, 건전성평가법의 선택기준 및 재료물성치의 추론을 위한 지식베이스 등과 같은 이론적 배경에 대한 연구가 선행되어야 한다. 이를 바탕으로 데이터베이스, 지식베이스, 추론기관 및 사용자 인터페이스 등과 같은 전문가시스템 구성요소를 개발하며 전체적인 전문가시스템을 구성한다. 본 논문에서는 전문가시스템 구성의 첫번째 연구로 배관 건전성평가 방법, 건전성평가법의 선택법 및 재료물성치 추론 지식베이스에 대한 이론적 배경에 대한 연구를 수행하였다. 한편, 지식베이스, 추론기관, 데이터베이스 및 사용자 인터페이스 등과 같은 전문가시스템 개발에 관한 연구는 추후 발표할 예정이다.

2. 배관 건전성평가

배관 건전성을 파괴역학적인 관점에서 평가하는 방법은 여러가지가 제안되어 있으나, 크게 나누면 탄성파괴역학(LEFM)법, 탄소성파괴역학(EPFM)법, 그리고 소성거동에 근거한 한계하중법(limit load method)으로 나눌 수 있다. 원전 배관의 건전성을 평가하는 기준으로 가장 널리 사용되는 ASME Boiler & Pressure Vessel Code Sec. XI에서는 배관 재질별로 배관 건전성을 평가하는 기준을 제시하고 있다.

2.1 오스테나이트계 배관의 건전성평가

결함이 존재하는 오스테나이트계 배관은 ASME

Sec. XI IWB-3640⁽⁶⁾의 절차에 따라 건전성평가를 수행한다. 오스테나이트계 배관은 파괴인성이 매우 높은 재료이며 균열을 제외한 잔여영역(remaining ligament)에 작용하는 응력값이 배관재료의 유동응력(flow stress)에 도달하면 소성붕괴 형태로 파괴가 발생할 수 있다. 따라서 한계하중법을 사용하여 배관 건전성평가를 수행하며, 한계하중을 견디지 못하고 불안정파괴를 일으키는 용접부위에 대해서는 재료의 인성, 배관크기 및 가동조건을 고려한 Z계수(factor)로서 배관에 작용하는 응력비(stress ratio)를 보정하여 건전성평가를 수행한다.

2.2 페라이트계 배관의 건전성평가

결함이 존재하는 페라이트계 배관은 ASME Sec. XI IWB-3650⁽⁶⁾에 따라 건전성평가를 수행한다. 페라이트계 배관은 오스테나이트계 배관보다 대체로 인성이 낮으며, 배관형상, 결함형상 및 재료물성치에 따라 소성붕괴, 탄소성파괴 및 취성파괴를 일으킬 수 있다. Fig. 1은 세로축이 취성파괴기준, Kr' , 가로축이 소성파괴기준, Sr' 로 정의되는 전변형률파손 평가도(DPFAD: Deformation Plasticity Failure Assessment Diagram) 상에 나타낸 배관파괴형태에 대한 판별기준이다. 이때 Kr'/Sr' 이 0.2보다 작을 경우에는 한계하중법으로 건전성평가를 수행하며 Kr'/Sr' 이 0.2보다 크고 1.8보다 작으면 EPFM법으로 건전성평가를 수행한다. 한편, Kr'/Sr' 이 1.8보다 크면 LEFM법으로 건전성평가를 수행한다.

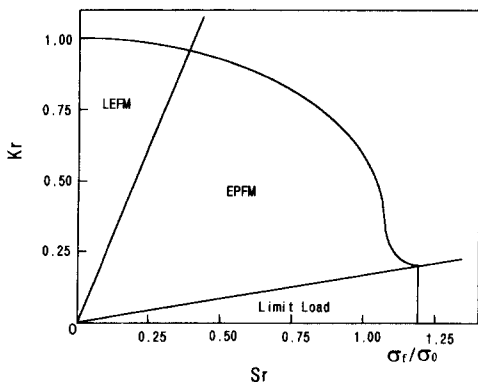


Fig. 1 Screening criteria(ASME Sec. XI)

3. 건전성평가법

배관 건전성평가는 앞의 2장에서 기술한 바와 같이 LEFM법, EPFM법 및 한계하중법 등으로 나눌 수 있으며 본 연구에서 개발하고자 하는 전문가 시스템에는 이들 방법에 대한 평가모듈을 수록할 예정이다. 세 가지 방법중 LEFM법은 그 평가절차가 잘 알려져 있기 때문에 여기서 설명을 생략하였으며 EPFM법과 한계하중법에 관한 건전성평가 절차에 대해 설명한다. 특히, EPFM법에서는 균열진전력선도(CDFD: Crack Driving Force Diagram)법, J-적분/찢김계수(J/T)법 및 DPFAD법에 대하여 설명한다.

3.1 EPFM법

3.1.1 CDFD법

재료의 진응력-변형률(true stress-strain)곡선은 다음과 같이 Ramberg-Osgood⁽⁷⁾ 식으로 곡선적합하여 사용한다.

$$\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right) = \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) + a\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^n \quad (1)$$

여기서, a , n 은 곡선적합 재료상수, σ_0 는 기준응력(reference stress)이며 ϵ_0 는 σ_0/E (E : 탄성계수)이다.

재료의 거동을 전변형률 소성이론과 Ramberg-Osgood 식에 의해 나타내면, 하중 P 가 작용하는 구조물에 존재하는 길이 a 인 균열의 균열진전력, J 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$J = J^e(a_{eff}, P) + J^p(a, P, n) \quad (2)$$

여기서, J^e 값은 Irwin의 소성역을 고려한 유효균열 길이(a_{eff})에 근거한 J 값의 탄성성분이며, J^p 값은 전변형률 소성이론에 근거한 J 값의 소성성분이다. J^e 값 및 J^p 값은 EPRI에서 발간한 연성파괴핸드북⁽⁸⁾에 균열의 형상, 가공경화지수(n) 및 형상계수(h)값의 함수형태로 제시되어 있다.

CDFD법은 실험으로 측정되는 균열진전 저항력 J_R 값과 역학적으로 계산되는 균열진전력 J 값을 비교함으로써 균열의 성장 및 파괴과정을 해석하는 방법이다. Fig. 2는 CDFD를 도식적으로 나타낸 것으로서 균열의 안정성장에 대한 평형조건은 다음과 같다.

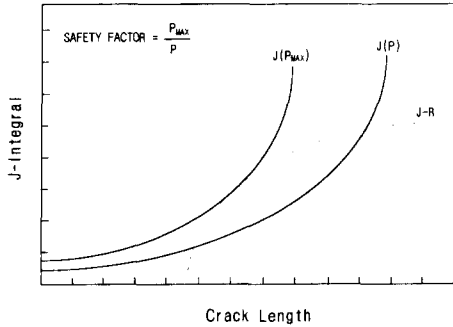


Fig. 2 A typical crack driving force diagram

$$J(a, p) = J_R(\Delta a) \tag{3}$$

여기서, Δa 는 균열진전량이다.

CDFD에서 하중이 고정되어 있는 경우 불안정 균열성장(unstable crack growth)조건은 다음과 같으며,

$$\left(\frac{\partial J}{\partial a}\right)_p \geq \frac{\partial J_R}{\partial a} \tag{4}$$

안전계수는 J_R 곡선과 접하는 균열진전력 J 에 해당하는 P_{max} 를 작용하중 P 로 나눈 값, 즉 P_{max}/P 의 비로서 정의된다.

3.1.2 J/T법

CDFD법을 사용하면 해석결과는 정확하나 불안정균열성장점을 찾는 데 시간이 오래 걸리므로 이를 개선하기 위하여 J/T법이 제시되었다. 작용하중이 P 일 때 균열진전력선도의 기울기($\partial J/\partial a$)로부터 탄성계수(E) 및 유동응력(σ_f)을 이용하여 균열진전력에 대한 찢김계수 T_J 와 균열저항력에 대한 찢김계수 T_{JR} 를 정의하면 각각 다음과 같으며

$$T_J = \frac{E}{\sigma_f^2} \left(\frac{\partial J}{\partial a}\right)_p \tag{5}$$

$$T_{JR} = \frac{E}{\sigma_f^2} \frac{\partial J_R}{\partial a} \tag{6}$$

이때 불안정 균열성장조건은 다음과 같다.

$$T_J \geq T_{JR} \tag{7}$$

불안정 균열성장의 시작점은 $T_{JR} = T_J$ 의 조건을 만족하는 경우이므로 Fig. 3과 같이 두 선도의 교점으로부터 불안정 균열성장점의 J 값(J_{INST})을 찾을 수 있다.

J/T 선도에서 안전계수는 J_{INST} 에 해당하는 최대 지지하중(P_{max})을 J-P 선도로부터 구하여 작용하중

P 값으로 나눈 값 즉, P_{max}/P 의 비로서 정의된다.

3.1.3 DPFAD법

영국 CEBG 전력연구소에서 개발한 FAD 평가법⁽⁹⁾은 취성파괴와 소성붕괴를 파괴기준으로 삼고 있다. Bloom⁽¹⁰⁾은 이 평가법을 바탕으로 하여 재료의 가공경화 효과와 구조물의 기하학적 조건을 고려한 DPFAD법을 제안하였다. Fig. 4는 취성파괴기준, Kr 을 세로축, 연성파괴기준, Sr 을 가로축으로 한 DPFAD법을 도식적으로 나타낸 것으로 파손평가곡선은 다음식으로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} J/J^e(a, P) &= 1/K^2 \\ &= \frac{J^e(a_{eff}, P)}{J^e(a, P)} + \frac{J^p(a, P, n)}{J^e(a, P)} \\ &= f(Sr) \end{aligned} \tag{8}$$

한편, DPFAD 평가점의 좌표는 다음과 같이 계산된다.

$$K'r(a_o + \Delta a) = \sqrt{J^e(a_o + \Delta a)/J_R(\Delta a)} \tag{9a}$$

$$S'r(a_o + \Delta a) = \frac{P}{P_o(a_o + \Delta a)} \tag{9b}$$

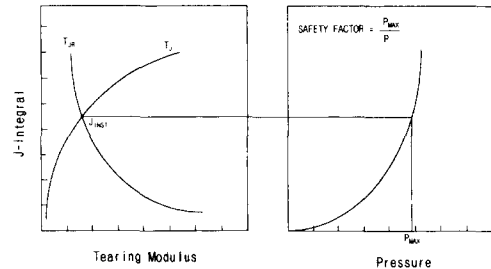


Fig. 3 A typical J/T diagram

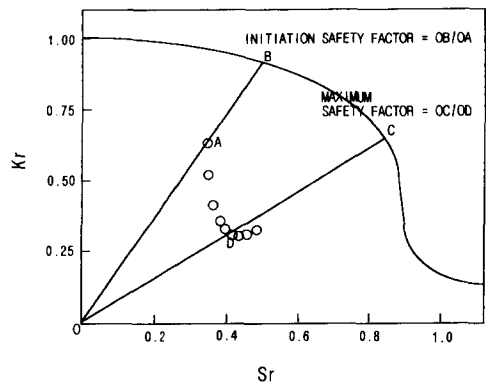


Fig. 4 A typical deformation plasticity failure assessment diagram

여기서, a_0 는 초기균열길이이며, P_0 는 배관의 한계하중이다.

DPFAD법에서 안전계수는 원점에서 평가점을 통과하는 직선과 파손평가곡선이 만나는 점으로부터 구할 수 있다. 즉, 균열개시점에서는 안전계수가 OB/OA로 구해지며, 균열성장의 경우 최대안전계수는 OC/OD로 구해진다.

3.2 한계하중법

결함이 존재하는 고인성의 배관은 불안정균열성장이 일어나기 전에 균열을 제외한 배관의 잔여부분이 완전소성상태에 도달하고 배관 실단면응력(net-section stress)은 더 이상 증가하지 않는다. 이때의 임계 실단면응력은 배관재료의 유동응력 또는 파괴응력으로 정의되며, 배관응력이 이 값에 도달되면 배관은 파괴되었다고 볼 수 있다. 이렇게 소성붕괴가능성이 있는 배관은 한계하중법으로 건전성평가를 수행한다.

ASME Sec. XI에서 제시하는 원주방향 균열에 대한 한계굽힘응력 σ'_b 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\sigma'_b = 2\sigma_f \{2\sin\beta - (a/t)\sin\theta\} / \pi \quad \text{단, } \theta + \beta \leq \pi \quad (10a)$$

$$\sigma'_b = 2\sigma_f \{2 - (a/t)\sin\beta\} / \pi \quad \text{단, } \theta + \beta > \pi \quad (10b)$$

한편, 축방향 균열에 대한 한계응력은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\sigma'_b = \frac{\sigma_f}{\sqrt{1 + (1.61/4Rt)l^2}} \quad (11)$$

여기서, R 은 배관의 평균반경, t 는 배관두께이며, l 은 균열길이이다.

한계하중법에서의 안전계수는 배관이 견딜 수 있는 한계응력 σ'_b 를 작용응력으로 나눈 값으로 정의된다.

4. 건전성평가법의 선택

이 논문의 2장에서 기술한 바와 같이 배관건전성을 평가하는 데 가장 널리 사용되는 ASME Sec. XI에서는 배관 건전성평가법을 선정하는 데 있어 배관재질, 작용하중 및 배관 재료물성치를 종합하여 판정하고 있다. 그러나 이 방법은 평가법을 선

택하는데 필요한 모든 정보를 가지고 있다는 것을 전제로 하고 있으나 많은 경우 배관과 관련된 정보를 모두 가지고 있지 못하며 이 경우 ASME Sec. XI방법을 사용할 수 없다. 여기서는 “재료물성치 보유율”을 배관 건전성평가법의 선정기준으로 제안하고, 재료물성치 보유율(PR : Possession Ratio)을 계산하기 위한 전 단계로서 재료물성치가 파괴거동에 미치는 영향, 즉 가중치를 민감도분석에 의해 정량화하였다.

4.1 재료물성치 보유율에 의한 평가법제시

주어진 입력조건에 대한 가장 정확한 평가결과를 구하기 위하여 PR을 기준으로 하여 평가법을 제시하였다. PR은 각 평가법에서 사용되는 모든 재료물성치에 대한 주어진 재료물성치의 비로 정의하였다. Fig. 5는 PR을 정의하기 위하여 수행된 연구절차이며 그 내용은 다음과 같다.

1 단계: 각 평가법에 사용되는 모든 재료물성치를 파악하여 실제의 배관실험데이터⁽¹¹⁾에서 이들 재료물성치의 분포데이터를 얻은 후 경계값을 구한다.

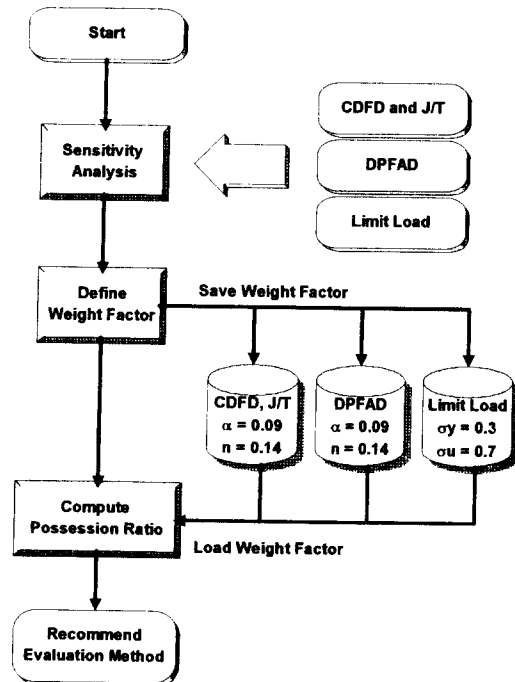


Fig. 5 Flow chart for the definition of possession ratio

2 단계 : 각 재료물성치를 경계범위 내에서 $\pm 20, \pm 40\%$ 변화시키면서 긴 축방향 표면결함(long axial surface crack)이 존재하는 배관에 대하여 각 평가법으로 해석을 수행한다.

3 단계 : 해석결과를 이용하여 재료물성치 변화-최대하중 변화 그래프를 구하며 각 재료물성치의 기울기를 이용하여 가중치를 부여한다.

4 단계 : 사용자가 배관평가시 재료물성치를 입력하면 가중치를 이용하여 PR을 계산한다.

4.1.1 민감도 분석

Fig. 6은 민감도분석에 사용된 길이 a , 길이 l 인 긴 축방향표면결함이 존재하는 반지름 R , 두께 t 인 배관형상이다.

(1) CDFD법 및 J/T법

민감도해석 모델에 대한 균열진전력 J 는 다음과 같다.⁽⁸⁾

$$J = \pi t f \sigma_h^2 / E' + \alpha \sigma_0 \epsilon_0 t h_1 (\sigma_h / \sigma_0)^{n+1} \quad (12)$$

여기서,

$$f = (a_{eff}/t) [1.1 + A\{4.951(a_{eff}/t)^2 + 1.092(a_{eff}/t)^4\}]$$

$$\sigma_h = 2pR_0^2 / (R_0^2 - R_i^2)$$

h_1 = 형상계수

p = 작용내압

한편, J-R곡선은 다음과 같이 곡선적합(curve fitting)하여 사용한다.

$$J_R = C_1 (\Delta a)^{C_2} \quad (13)$$

식 (12)와 식 (13)을 이용하면 배관의 J/T해석을 수행할 수 있으며 이때 필요한 재료물성치는 인장실험데이터(α, n, σ_0)와 파괴저항 실험데이터(C_1, C_2)이다. 따라서 이 재료물성치들이 주어지지 않았을 경우에 CDFD법 및 J/T법의 평가결과에 미치는 영향을 정량화하기 위하여 재료물성치를 각각

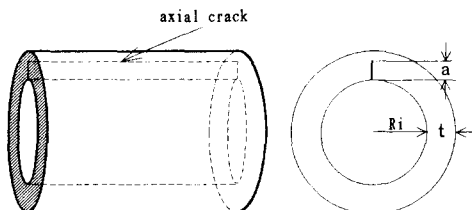


Fig. 6 Long axial surface crack

$\pm 20, \pm 40\%$ 변화시키면서 최대하중, P_{max} 의 변화를 살펴보았으며 그 결과는 Fig. 7과 같다. 최대하중은 재료물성치에 따라 선형적으로 변화였으며 σ_0 의 변화에 의한 최대하중의 기울기 변화가 가장 크므로 σ_0 가 평가결과에 가장 큰 영향을 준다고 생각된다.

(2) DPFAD법

DPFAD법을 이용하여 평가를 수행하기 위해서는 식 (8)의 파손평가곡선이 필요하며 파손평가곡선을 구하기 위해서는 인장실험데이터(α, n, σ_0)와 파괴저항 실험데이터(C_1, C_2)가 필요하다. 따라서 이 재료물성치들이 주어지지 않았을 경우에 DPFAD법의 평가결과에 미치는 영향을 정량화하기 위하여 재료물성치를 각각 $\pm 20, \pm 40\%$ 변화시키면서 최대하중의 변화를 살펴보았으며 그 결과는 Fig. 8과 같다.

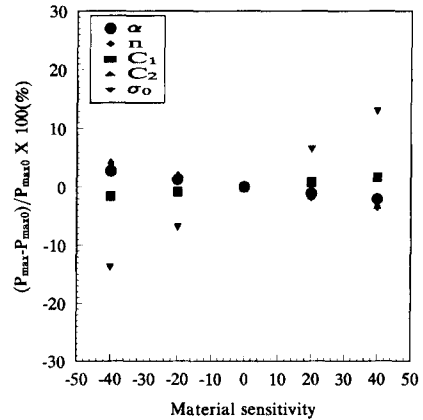


Fig. 7 Sensitivity analysis result for CDFD and J/T analysis

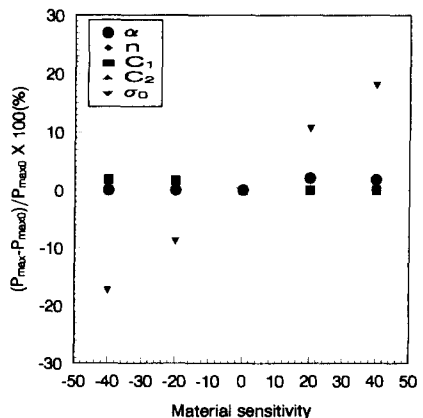


Fig. 8 Sensitivity analysis result for DPFAD analysis

DPFAD법의 경우도 CDFD법의 경우와 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. DPFAD법에서도 σ_0 의 변화에 의한 최대하중의 기울기 변화가 가장 크므로 σ_0 가 평가결과에 가장 큰 영향을 준다고 생각된다. 그러나 DPFAD법에서는 α , n , C_1 및 C_2 의 기울기 변화가 뚜렷이 나타나지 않았으며 이 이유는 과소 평가곡선과 평가점이 접하는 점인 불안정균열성장 점을 계산하기 위하여 이분법(bisection method)을 사용하였으나 데이터의 개수가 적어 정확한 계산을 수행할 수 없었다.

(3) 한계하중법

민감도해석 모델에 대한 한계하중 P_L 은 다음과 같다.⁽⁸⁾

$$P_L = \sigma_f \{ (1-x) / (1-x/M_2) \} \quad (14)$$

여기서,

$$M_2 = \sqrt{1 + (1.61/4Rt) l^2}$$

$$x = a/t$$

$$\sigma_f = \text{유동응력}$$

$$= \frac{\sigma_y + \sigma_u}{2}$$

σ_y 값과 σ_u 값이 P_L 에 미치는 영향을 정량화하기 위하여 σ_y 값과 σ_u 값을 각각 $\pm 20, \pm 40\%$ 변화시키면서 P_L 의 변화를 살펴보았으며 그 결과는 Fig. 9와 같다. P_L 은 재료물성치에 따라 선형적으로 변하며, 인장강도의 변화에 의한 기울기가 항복강도의 변화에 의한 기울기보다 크므로 인장강도가 P_L 에 더 큰 영향을 준다고 생각된다.

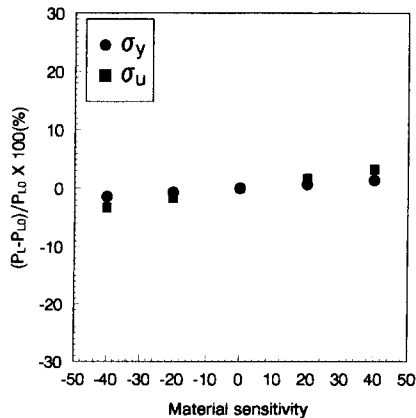


Fig. 9 Sensitivity analysis result for Limit Load analysis

4.1.2 가중치

Table 1은 민감도 분석결과로부터 각각의 재료 물성치가 해석결과에 미치는 영향을 정량화한 가중치(weight factor)를 계산한 것이다.

한계하중법에서는 σ_u 의 변화에 의한 기울기가 σ_y 의 변화에 의한 기울기보다 크므로 σ_u 값의 불확실성이 P_L 값의 계산결과에 미치는 영향이 더 크다. 그러므로 가중치 μ 는 σ_u 값의 경우 0.7, σ_y 값의 경우 0.3을 부여하였다.

J/T법에서는 σ_0 , C_1 의 변화가 평가결과에 큰 영향을 미쳤다. 따라서 $\mu(\alpha)=0.09$, $\mu(n)=0.14$, $\mu(\sigma_0)=0.56$, $\mu(C_1)=0.07$, $\mu(C_2)=0.14$ 를 부여하였다.

한편, DPFAD법에서도 CDFD법에서와 비슷한 경향을 보이므로 CDFD법과 같은 가중치를 부여하였다.

4.1.3 재료물성치 보유율

본 연구에서 PR은 가중치의 합으로 정의하였다. 사용자가 파괴저항실험데이터를 알지 못해 인장실험데이터(α , n , σ_0)만을 입력하였을 경우에 대한 PR을 계산하는 절차는 Fig. 10과 같다.

입력데이터가 충분하지 못하여 추론으로 재료물성치를 구하지 못하면 PR은 다음과 같이 계산된다.

$$PR = \alpha(9\%) + n(14\%) + \sigma_0(56\%) = 79\% \quad (15)$$

한편, 추론으로 재료물성치를 구하면 추론에 사용된 규칙의 신뢰도를 고려하기 위하여 가중치가 재정의되며 PR은 다음과 같이 계산된다.

Table 1 Weight factors for material properties

Method	Material properties	Weight factor
LEFM	K_{IC}	$\mu(K_{IC}) = 1.00$
	α	$\mu(\alpha) = 0.09$
EPFM	n	$\mu(n) = 0.14$
	σ_0	$\mu(\sigma_0) = 0.56$
	C_1	$\mu(C_1) = 0.07$
	C_2	$\mu(C_2) = 0.14$
Limit Load	σ_y	$\mu(\sigma_y) = 0.30$
	σ_u	$\mu(\sigma_u) = 0.70$

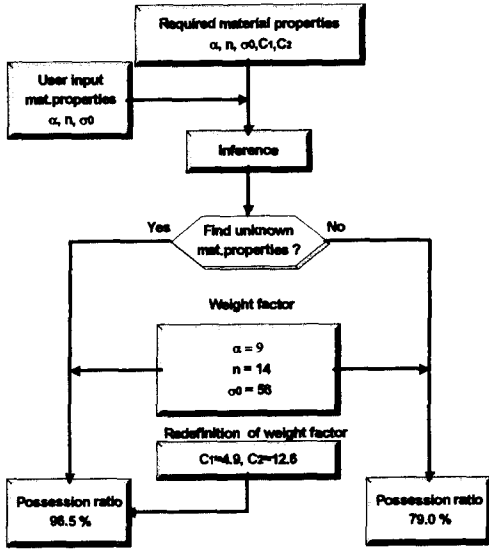


Fig. 10 Flow chart for computing possession ratio

가중치 재정의 (C_1) = $7\% \times (70\%) = 4.9\%$

가중치 재정의 (C_2) = $14\% \times (90\%) = 12.6\%$

$$PR = \alpha(9\%) + n(14\%) + \sigma_0(56\%) + C_1(4.9\%) + C_2(12.6\%) = 96.5\% \quad (16)$$

각 평가법에 대한 PR을 모두 계산한 후에 보유율이 가장 높은 평가법을 현재의 입력조건에 가장 적절한 평가법으로 제시하도록 하였다.

4.2 ASME Sec. XI에 의한 평가법 제시

ASME Sec. XI 절차는 제2장에서 설명한 것과 같이 오스테나이트계 배관에 대해서는 모재해석에 한계하중법, 용접재해석에 EPFM법을 적용하며, 페라이트계 배관에 대해서는 판별기준으로 분류한 후 LEFM법, EPFM법 및 한계하중법으로 평가를 수행한다. 그러나 앞서서도 언급한 바와 같이 ASME Code Sec. XI에 의한 평가법은 관련 정보를 모두 알고 있다는 것을 전제로 하기 때문에 한 정된 정보만을 알고 있는 경우에는 그 적용에 어려움이 있다.

5. 재료물성치 추론

이 장에서는 재료의 항복강도와 인장강도로부터 σ - ϵ 곡선과 J-R 곡선을 예측하는 이론에 대하여 설명한다.

5.1 σ - ϵ 곡선 예측 지식베이스

탄소성과괴역학을 이용하여 배관해석을 수행하기 위해서는 구조물의 J_a 곡선이 필요하며, J_a 곡선을 구하기 위해서는 σ - ϵ 곡선이 필요하다. 따라서 배관재료의 σ - ϵ 곡선이 주어지지 않은 경우에는 식 (1)의 α , n 을 예측해야 한다. 재료상수 n 은 EPRI⁽¹⁰⁾ 및 FRAMATOME⁽¹¹⁾에서 제시한 다음 식을 이용하여 구할 수 있으며

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_y} \frac{2.718^{1/n}}{1.002 + \sigma_y/E} = \left\{ \frac{1/n}{\ln(1.002 + \sigma_y/E)} \right\}^{1/n} \quad (17a)$$

$$\frac{\sigma_y}{\sigma_u} (1.002 + \epsilon_0) = \{n \times 2.718 \ln(1.002 + \epsilon_0)\}^{1/n} \quad (17b)$$

재료상수 α 는 EPRI,⁽¹⁰⁾ Battelle⁽¹¹⁾ 및 FRAMATOME⁽¹¹⁾에서 제시한 다음 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\alpha = \frac{1}{(\sigma_y/E)} \times \left\{ \frac{\ln(1.002 + \sigma_y/E)}{(1.002 + \sigma_y/E)} \right\}^{(1/n)} \quad (18a)$$

$$\alpha = \frac{E}{en\sigma_0} \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_u} \right)^n \quad (18b)$$

$$\alpha = \frac{\frac{1}{\epsilon_0} \ln(1.002 + \epsilon_0) - 1.002 - \epsilon_0}{(1.002 + \epsilon_0)^n} \quad (18c)$$

여기서, e 는 2.7183이다.

5.2 J-R 곡선 예측 지식베이스

탄소성과괴역학을 배관에 적용하기 위해서는 구조물의 균열진전력선도(J_a) 및 배관소재의 파괴저항곡선(J-R)이 필요하다. 배관재료의 J-R 곡선이 주어지지 않은 경우에는 추론으로 곡선적합 재료상수 C_1 , C_2 를 예측하여야 한다. 재료상수 C_1 은 성균관대⁽¹³⁾에서 영광 원자력발전소 3, 4호기 배관소재의 인장시험 및 파괴저항시험 결과를 통계처리하여 제시한 다음 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$C_1 = 2250Ek(S'_u \times \sqrt{\epsilon_c})^{2.201} \quad (19a)$$

$$C_2 = 0.38 \quad (19b)$$

여기서, E 는 탄성계수, k 는 무차원상수, S'_u 는 인장강도와 탄성계수의 비(s_u/E), 그리고 ϵ_c 는 파단 변형률(true fracture strain)이다.

5.3 저경계값 제시 지식베이스

재료물성치 데이터베이스 및 지식베이스를 공동

하기 위해서는 항복강도 및 가동온도 등 최소한의 입력정보가 필요하다. 그러나 기본적인 정보도 알고있지 못하면 데이터베이스 또는 지식베이스에 의해서는 건전성평가에 필요한 재료물성치를 구할 수 없다. 본 시스템에서는 이러한 문제에 대한 대응책으로 미국 EPRI 연구소⁽¹⁴⁾에서 LBB평가를 위해 제시한 원자력발전소 배관재료의 σ - ϵ 및 J-R 저경계(lower bound) 기준곡선을 제시하도록 하였다.

Fig. 11은 페라이트계열의 배관소재인 SA106 재료와 오스트나이트계열의 배관소재인 SA312 TP316, SA312 TP304 재료의 모재 및 용접재(SMAW, SAW)에 대한 저경계 σ - ϵ 곡선이며 Fig. 12는 저경계 J-R 곡선이다.

이 값을 이용하면 보수적이지만 배관 건전성평가를 수행할 수 있으므로 긴급상황하에서 배관의 운

전정지, 보수 및 가동 등의 결정을 내리는 판단기준에 도움을 줄 수 있을 것이라고 생각된다.

본 시스템의 지식베이스부에는 위에서 설명한 J-R 곡선, σ - ϵ 곡선 및 저경계값을 예측할 수 있는 지식뿐만 아니라 J_{IC} , K_{IC} 및 σ_y 등도 구할 수 있는 지식들이 저장되어 있다.

본 연구과정에서 개발한 데이터베이스, 지식베이스 및 추론기관 등에 관한 컴퓨터프로그램은 지면관계상 여기서는 언급하지 못하며, 곧 별도로 보고할 예정이다.

6. 결 론

본 연구에서는 원자력발전소 배관의 건전성평가를 위한 전문가시스템 개발에 적용하기 위해 배관 건전성평가법의 선정법과 배관소재 재료물성치 추론방법에 대한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 평가방법의 선정법으로 재료물성치 보유율에 의한 선정법을 제시하였으며, 재료물성치 보유율의 평가를 위해 CDFD법, J/T법, DPFAD법 및 한계하중법에 대한 민감도분석을 수행하였다. 재료물성치가 평가결과에 미치는 영향에 대한 민감도분석을 토대로 각 평가방법에 대해 재료물성치의 가중치를 결정하였다. CDFD법, J/T법 및 DPFAD법에 가장 큰 영향을 미치는 재료물성치는 기준응력이었으며, 한계하중법에 가장 큰 영향을 미치는 재료물성치는 인장강도였다.

(2) 항복강도와 파단변형률만을 가지고 σ - ϵ 곡선과 J-R 곡선을 추론하는 방법을 제시하였으며, 전혀 재료물성치 정보가 없는 경우를 위해 저경계값 제시를 위한 지식베이스를 구축하였다.

후 기

본 연구는 1994년도 교육부 학술연구조성비(ME94-3-06)에 의하여 수행되었으며, 이에 교육부 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Jovanovic, A., 1989, "ESR Project : Expert System Aided Assessment and Management of Remaining Life of Pressured High Temperature

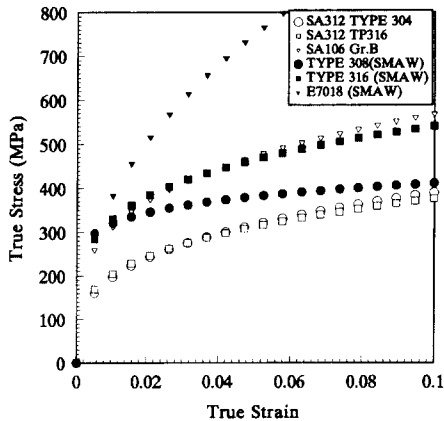


Fig. 11 Lower bound-curves of nuclear piping material

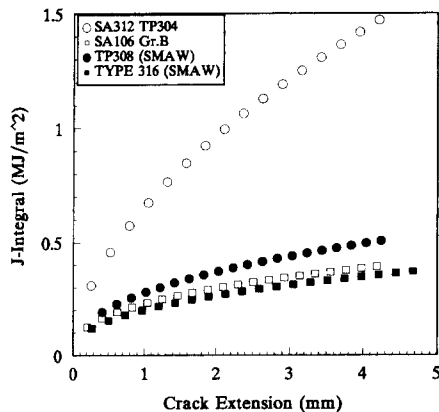


Fig. 12 Lower bound J-R curves of nuclear piping material

- Component," *Lecture Notes in Engineering (Expert System in Structural Safety Assessment)*, pp. 237~249.
- (2) Lucia, A. C. and Volta, G., 1991, "A Knowledge Based System for Structural Reliability Assessment," *Trans. of the SMiRT Conference*, Vol. SD1, pp. 91~96.
- (3) Okamoto, A., Kataoka, S. and Watanabe, M., 1987, "The Development of Expert System for Defect Identification and its Assessment *Trans. of 9th SMiRT Conference*," Vol. B, pp. 247-252.
- (4) Kim, Y. J., Son, S. H, Choi J, B. and Chung, H. D., 1993, "Development of Elastic-Plastic Integrity Evaluation System for Pressure Vessel and Piping," *Nuclear Engineering and Design* 142, pp. 61~68.
- (5) Kim, Y. J., Son, J. H. Chung H. D. and Kim, J. G., 1994, "Expert Systems Approach for Reactor Vessel Integrity," *KSME Journal*, Vol. 8, No. 2, pp. 198~205.
- (6) ASME Section XI, 1992, "Rules for Inspection and Testing of Components of Light Water Cooled Plants," *ASME Task Group*.
- (7) Ramberg, W. and Osgood, W. P., 1943, "Description of Stess-strain Curves by Three Parameters," *MACA Technical Note* No. 902.
- (8) Zahoor, A., 1989, "Ductile Fracture Handbook," *Electric Power Research Institute Technical Report*, NP-6301-D.
- (9) Harrison, R.P., Loosemore L., and Milne, I., 1976, "Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects," *CEGB Report* NO. R/H/R6.
- (10) Bloom, J. M. and Malik, S. N., 1982, "Procedure for the Assessment of the Integrity of Nuclear Pressure Vessels and Piping Containing Defects," *EPRI NP-2431*.
- (11) 이정배 외 11인, 1993, "원전배관 건전성평가 기술 개발," 과학기술처.
- (12) 김영진 외 12인, 1992, "영광원자력발전소 3·4호기용 2차계통 배관소재의 응력변형($\sigma \cdot \epsilon$) 및 파괴저항(J-R)특성," 성균관대학교 과학기술 연구소.
- (13) 장운석, 석창성, 김영진, 1995, "원자력 배관 재료의 파괴저항곡선 예측," 대한기계학회논문집, 제19권, 제4호, pp. 1051~1061.
- (14) Chexal, V. K., Norris, D. M. and Server, W. L., 1988, "Leak Before Break : An Integrated Approach For High Energy Piping," *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, Vol. 34.