

원자로의 건전성 평가에의 파괴역학 응용



이 익 섭
인하대학교 기계공학교 교수

● 1947년생
● 파괴역학을 전공하였으며, 특히 동적균열전파 및 동적균열정지 특성, 또한 Optics를 이용한 K 및 J의 직접 측정에 대한 방법론을 연구하고 있으며, 초음파 탐상에도 관심이 있다.

1. 머리 말

원자로는 방사성물질을 수십년간 보존해야 하므로 신뢰성이 극도로 높아야 한다. 따라서 원자로의 압력용기나 배관계통등을 충분한 안전여유를 가지도록 어떻게 설계할 것인가하는 문제가 원자로의 안전성 및 경제성에 직결되는 최대과제라 생각된다.

일반구조물의 설계시에 구조물 내부에서의 결함의 발생, 성장 및 파괴의 메카니즘을 미리 알고 있으면, 비파괴검사등으로 결함이 검출되었을 경우 안전도 평가를 적절하게 할 수 있게 된다. 원자로의 경우에는 일반적인 하중조건외에, 중성자조사 취화현상, 부식, 피로, 열응력, 소성, 크리프등 여러가지 복잡한 조건들이 부가되게 된다. 따라서 이러한 여러가지 환경조건에 대한 사항들을 철저히 연구하여 100% 건전한 원자로를 건설하여 가동하기 위하여 많은 노력이 경주되고 있다.

각종 중요구조물에 대하여 어떻게 건전성과 안전성을 확보하는가는 매우 중요한 과제이며 원자력분야에도 많은 노력이 계속되고 있는데 몇가지 예를 들면 아래와 같다.

(1) 현재 가동중인 원자로의 수명을 어떻게 하면 좀 더 연장시킬 수 있을까?

(2) 원자력 플랜트를 간소화하기 위하여 LBF(leak before fracture)개념을 도입하기

위한 연구.

(3) LOCA(loss of coolant accident) 사고시 발생할 가능성이 있는 가압열충격사고를 방지하기 위한 동적균열인성치 측정에 관한 연구.

(4) 고온에서의 재료강도 및 재료의 경년열화상태 측정.

(5) 고온구조설계법의 개발.

여기에서는 원자로구조설계 및 건전성 평가에 어떻게 파괴역학이 응용되는가에 대해서 간단하게 기술하고 그 문제점등에 대해서 논의하고자 한다. 참고로 영국과 일본에서 발생한 압력용기의 중요한 파괴사고의 예를 기술한다. (그림 1참조).

(1) 1970년(Robert Jenkins Company, 영국) 제조직후의 압력용기가 수압시험하는 도중 용기가 두동강으로 파괴된 사고가 발생하였다. 이 사고의 원인은 manhole을 본체에 취부할

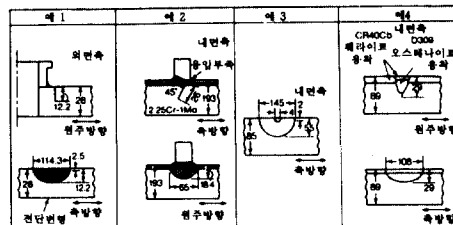


그림1 압력용기의 파괴발생점과 결함의 위치와 크기(단위 mm)

때 용접 끝부분에 존재한 용접균열이 깊이 12 mm의 취성균열로 성장하여 급작한 파손사고를 유발시켰다.

(2) 1974년(岡山縣, 일본)

약 3만시간 사용한 중유의 탈유황 반응로를 다른 목적에 사용하기 위하여 개조공사하는 도중에, 용접보수부에 열처리를 하였는데 열응력이 용기의 내면에 존재한 균열에 작용하여 용기의 원주방향의 1/2정도가 취성파괴하는 사고가 발생하였다.

(3) 1979년(神奈川縣, 일본)

약 14년간 가동중이던 폴리에틸렌 제조장치의 역화방지 탱크에 갑자기 파손사고가 발생하여 에틸렌이 누수되고 화재가 일어나는 사고가 발생했다. 이것은 가동초기에 생성되었다고 생각되는 비금속 개재물 결함이 내압변동에 의한 피로를 받아 표면길이 145mm, 깊이 55mm까지 성장하여 급작스런 파괴사고로 발전된 것이었다.

(4) 1986년(山口縣, 일본)

경유의 탈유장치의 정기점검 작업시 질소가스를 사용하여 기밀시험을 행할 때 큰 소리와 함께 반응탑이 파괴되어 용기는 44개의 조각으로 파괴되었다. 이 사고는 보수시에 생긴 보수용접부의 용착금속과 모재의 경계에 발생한 길이 108mm, 깊이 29mm의 균열에 기밀시험의 압력이 작용한 것이 원인이었다.

2. 파괴역학과 건전성 평가

파괴역학을 구조물 설계나 건전성 평가에 응용하기 위하여는 먼저 구조물 내부에 존재하는 균열의 모양, 크기 등이 측정 혹은 예측되어야 한다. 그 다음 작용응력(변형률)과 구조물재료의 파괴인성치와 서로 상관관계를 형성하게 된다(그림 2 참조).

파괴역학에서는 그림 2의 요소들을 조합하여 파괴역학 파라메타를 외력과 균열의 모양, 크기, 균열을 포함하는 구조물의 형상, 구조물의 재료특성과 연관시켜서 구조물의 안전성과 건

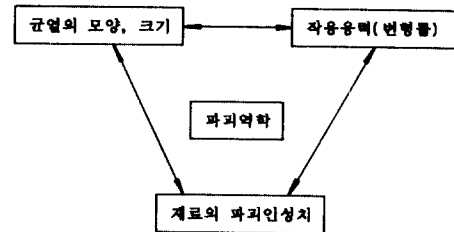


그림2 파괴역학의 요소

전성을 평가하게 된다.

그림 2의 세가지 요소중 2가지의 요소는 알려지거나 예측되어야 하며 나머지 한가지 요구에 대한 안전성 및 건전성을 평가한다. 예를 들면

(1) 작용응력(변형률) 평가(설계하중평가) : 균열의 모양, 크기와 재료의 파괴인성치에서 작용응력(설계하중) 혹은 압력용기들의 내압시험압력등을 결정한다.

(2) 재료의 특성평가 : 작용응력이나 존재하는 균열의 모양, 크기에 대하여 충분한 파괴인성치를 가지는 재료인가의 여부.

(3) 균열의 모양, 크기평가 : 작용응력(설계하중)과 파괴인성치로 구조물 내부에 허용가능한 결함의 모양, 크기를 평가한다.

3. 파괴역학을 이용한 구조건전성 평가법

3.1 ASME Code Sec. XI의 건전성 평가법

원자력발전소의 안전성을 확보하기 위하여서는 주요기기, 배관등에 대해서 사용기간중에 검사를 실시해야 한다. 다음 그림 3은 ASME Code Sec.XI의 결함평가를 위한 흐름도(flow chart)이다.

평가순서는 초음파 탐상시험등에 의해서 결함의 크기, 위치등을 가능한 한 상세하게 결정한 후 (1)결함을 분류하고 (2)허용결함인가를 판정한 후 (3)허용기준을 만족하지 않는 경우는 파괴역학을 이용하여 결함을 재판정한다.

다음에 각각에 대해서 좀더 상세히 알아보기

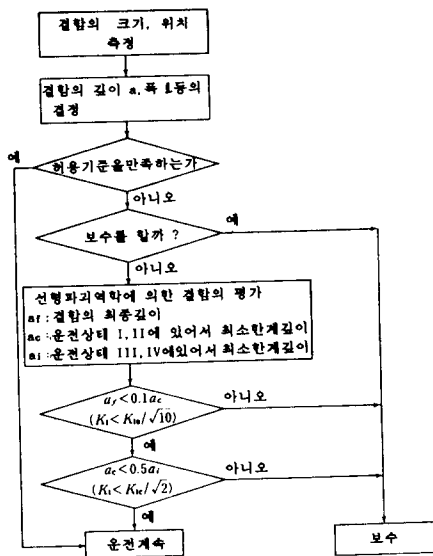


그림3 ASME Code Sec.XI의 결함평가 흐름도

로 한다.

(1) 결함의 분류

체적시험(내부결함시험)에서 발견된 결함을 평가하기 위하여 결함의 면방향과 주응력방향과의 관계에서 다음 (a) (b)로 분류한다.

(a) 평판형결함(planar flaw)결함면이 기기의 표면에 평행하지 않는 경우.

(b) 라미나결함(laminar flaw) : 결함면이 기기의 표면에 평행한 경우.

평판형결함은 다시 표면결함(surface flaw)과 내부결함(subsurface flaw)으로 분류하여 각각에 대한 허용기준을 설정한다. 대개 평판형결함이 라미나 결함보다 허용기준이 엄격하고 표면결함에 대한 허용기준이 내부결함보다 엄격하다.

실제 결함의 기하학적 3차원적이지만 이것을 파괴역학적으로 평가하기 위해서는 단순한 형상으로 치환시킬 필요가 있다. 이것을 위해서 ASME Code Sec.XI에는 다음과 같은 방법을 채택하고 있다.

(가) 표면결함의 경우는 반원이나 반타원으로, 내부결함의 경우는 원이나 타원으로 치환

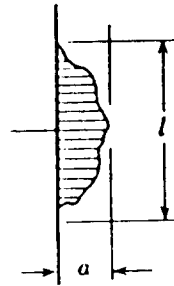


그림4 표면결함의 길이(a) 및 폭(l)의 결정방법

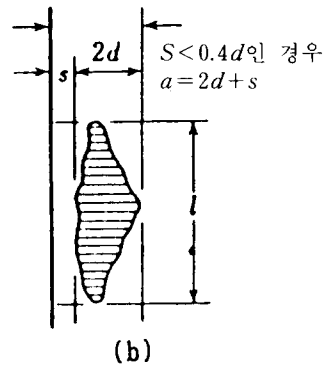
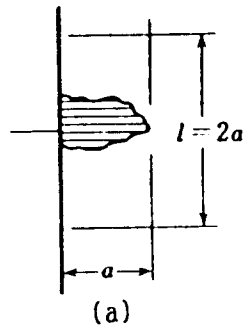


그림5 특수한 표면결함의 치환방법

한다.

(나) 최대주응력면에 수직으로 투명한 크기를 균열의 크기로 간주한다.

그림 4에 표면결함의 길이(a) 및 폭(l)의 결정법을 예시하였는데, (axl)의 사각형에 내접하는 반타원 혹은 반원형 표면결함으로 치환한다.

그림 5(a)와 같이 특수한 경우, 즉 깊이방향으로 긴 결함은 안전하게 표면방향으로 $2a$ 만큼 성장한 반원형 표면결함으로 그림 5(b)와 같은 표면에 근접하는 내부결함은 안전하게 표면까지 성장한 반타원형 표면결함으로 치환한다.

두개의 결함이 인접한 경우를 그림 6에 보인다.

두 결함 사이의 간격 $S \leq (2d_1$ 과 $2d_2$ 중 큰 것)일 경우에는 두개의 결함을 합해서 단독결함으로 간주한다.

(2) 결함의 허용기준

결함이 분류되면 이 결함이 포함되어 있는 부분의 중요도에 대응하여 정해진 허용기준에 의하여 결함의 허용가능성 여부를 판정한다. 이때 사용되는 허용기준의 한 예로서 용기의 내압용접부의 허용기준을 그림 7에 나타내었다 (원자로용기도 포함된다).

여기에서 허용결함 치수는 재료의 파괴인성치와 설계하중등을 이용하여 결정한 최대가상 결함(깊이= $t/4$, 길이= $1.5t$ 의 반타원형 표면 균열, t =두께) 크기의 $1/10$ 에 상당한다. 즉, 중성자 조사등의 영향을 고려하여 비연성파괴 즉, 취성파괴가 발생하지 않도록 결함크기에 안전계수를 10으로 취한 것으로 된다. 이것을 응력확대계수로 생각하면 $\sqrt{10} \approx 3$ 의 안전계수에 상당한다.

(3) 파괴역학에 의한 결함의 재판정

앞에서 제시한 허용기준을 초과하는 결함에 대해서는 보수를 하든가 또는 파괴역학을 이용하여 다음 검사시까지 결함이 어떻게 성장할까를 해석하든지 혹은 남은 수명을 산정하여 계속 운전여부를 판정하도록 한다.

· 결함크기에 의한 재판정기준

(a) $a_f < 0.1a_c$ 및 $a_f < 0.5a_i$

여기서

a_f = 다음 검사시 혹은 수명의 말기에서의 최대 예측 결함 치수.

= 운전상태 I 및 II에 대해서 균열 전파정지 인성치 K_{Ia} 에 의해서 정

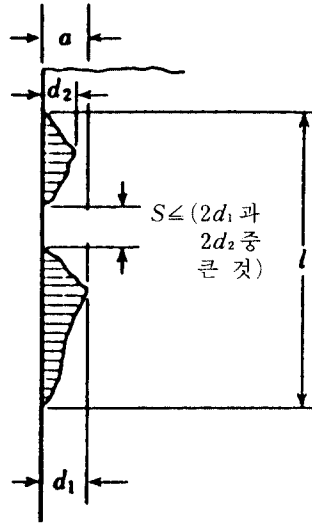


그림 6 두개의 결함이 인접한 경우의 치환방법

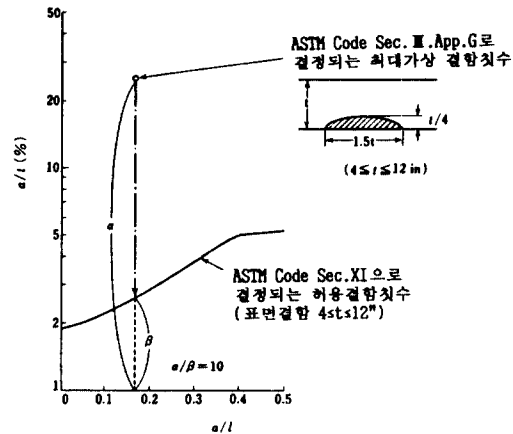


그림 7 ASME Code Section XI에 정해져 있는 허용결함과 ASME Code Section III 부록 G에 정해진 최대가상 결함과의 관계

해지는 최소 한계치수.

= 운전상태 III 및 IV에 대해서 정하지 않고 성장하는 최소한계치수.

위와 같은 결함크기에 의한 판정 대신에 다음과 같이 응력확대계수에 의한 기준을 이용해도 좋다.

표 1. 각 운전상태의 정의와 예

| 구분 | 정 의 | 예 |
|----------|---|-----------------------------|
| 운전상태 I | 정상운전상태. 즉, 계획적인 운전상태 | 기동상태, 정지상태, 출력운전, 고온대기상태 |
| 운전상태 II | 운전상태 I, III, IV 및 시험상태 이외의 상태 즉, 예상되는 기기의 단일고장, 운전원의 단일 오조작등으로 인하여 원자료가 정상운전상태가 아닌 상태 | 외부전원상실 부하상실 |
| 운전상태 III | 원자로시설의 고장, 이상한 작동등에 의해 원자로의 운전정지가 긴급하게 필요한 상태. 즉, 발생빈도가 매우 낮은 사고에 의해서 발생하는 상태로서, 단일고장, 단일오조작등에 의해서 일어나는 사고 가운데 발생빈도가 매우 낮다고 생각되는 경우에 해당 | 제어봉의 오조작, 반경이 작은 1차 배관 파손사고 |
| 운전상태 IV | 원자료를 안전설계하기 위하여 가정한 돌발적인 사고가 발생한 상태. 즉, 발생빈도가 매우 낮아서 원자로의 수명중에는 발생되지 않을 것이라고 가정한 사고가 일어난 상태 | 1차냉각수 유량상실 사고 |
| 시험상태 | 내압시험에 의해 원자로시설에 최고사용압력을 넘는 압력을 가한 상태 | |

· 응력확대계수에 의한 결함의 재판정 기준 $K_I < K_{Ia} / \sqrt{10}$ (운전상태 I 및 II에 대해서)

여기서

K_I = 운전상태 III 및 IV (시험상태 포함)에 대한 결함치수 a_f 에 대응하는 응력확대계수의 최대치.

=고려하고 있는 온도에서의 균열전파 정지 인성치.

$K_I < K_{Ic} / \sqrt{2}$ (운전상태 III 및 IV에 대해서)

여기서

K_I = 운전상태 III 및 IV에 대한 결함치수 a_f 에 대응하는 응력확대계수의 최대치.

K_{Ic} = 고려하고 있는 온도에서의 정적 파괴 인성치.

참고로 각 운전상태의 정의와 예를 표 1에 나타내었다.

(b) 결함부분의 면적을 제외한 부분은 1차 응력에 대한 제한범위를 만족할 것

다음에는 a_f (=다음 검사시까지 혹은 수명의 말기에서의 결함의 최대예측치수)를 산정하는 과정을 살펴보자.

· 결함의 성장평가

균열의 피로성장은 Paris의 법칙을 적용하여 평가할 수 있다.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

여기서 a = 균열길이(치수), N = 하중의 반복 횟수, ΔK = 응력확대계수 범위, C , m = 환경, 재료등에 관련되어 결정되는 상수.

이 경우, 하중(응력)의 변화양상은 주어져 있다고 생각한다(보통 응력의 변화양상은 예측된다). 그 한 예를 그림 8에 나타내었다.

응력의 변화에 대응하여, 위의 Paris식을 이용하면 각 하중사이클에 상당하는 균열크기의 증분 Δa 를 구할 수 있고 이것을 다음 검사 사이클 f 까지 합해주면 된다. 즉, $a_f = a_0 + \sum_{k=1}^f \Delta a_k$ 로 되어 결함성장후의 결함크기 a_f 를 결정할 수 있다. 다음 그림 9는 결함의 성장과정을 스케치해본 것이다.

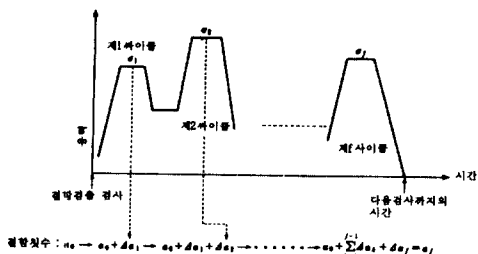


그림 8 응력의 변화양상(예측)

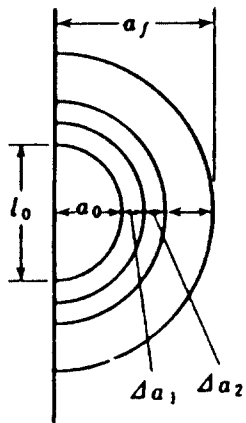


그림 9 결함의 성장과정

ASME Code Sec.XI에는 결함이 성장할 동안의 형상은 $a/l = \text{일정인}$ 형상(얇은 형상)으로 가정하고 있다.

다음에 각종 운전상태에서 결함의 한계크기(치수)를 평가해 보자.

· 결함의 한계치수의 평가

a_c 및 a_i 의 평가과정은 거의 비슷하기 때문에 a_i 의 평가과정만을 설명하기로 한다. 운전상태 III, IV의 사고중 결함을 포함하는 부재의 내면층이 급격하게 냉각되는 경우를 생각해 보자(이것을 열충격문제라 부르며 원자로 용기가 압력을 받고있는 상태에서 열충격을 받는 경우를 가압열충격(PTS, pressurized thermal shock)라 부르며 진전성을 평가할 때 문제가 된다(그림 10).

아래에 그림 10에서의 각 과정들에 대한 설명

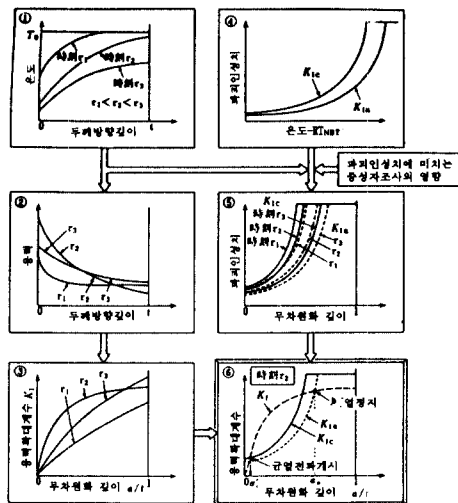


그림 10 a_i 의 결정과정

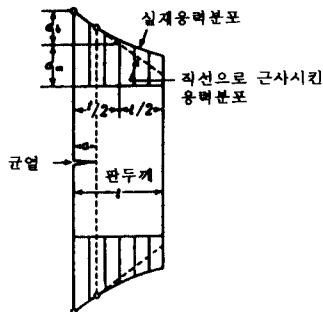


그림 11 직선적으로 근사시킨 응력분포와 σ_m 과 σ_b 의 분해

을 첨가한다.

(1) 해석대상부재의 각 시각에 대한 온도분포를 구한다.

(2) (1)에서 구한 온도분포에 대응하는 응력분포를 구한다.

(3) 결함이 얇은 형태 즉 a/l 가 일정한 상태를 유지하면서 성장한다는 가정을 한다. (2)의 각 시각에 대응하는 응력분포에 대한 응력 확대계수 K_I 을 균열의 깊이인 a 의 함수로 구한다. (2)에서 구한 응력분포가 직선이 아니기 때문에 이것을 직선적 분포로 근사화시키면 막

응력(membrane stress) σ_m 과 굽힘응력 σ_b 를 분해할 수 있으며(그림 11 참조) 응력확대계수 K_t 를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$K_t = \sigma_m M_m \sqrt{\pi} \sqrt{\frac{a}{Q}} + \sigma_b M_b \sqrt{\pi} \sqrt{\frac{a}{Q}}$$

여기서 Q =소성구역 보정된 형상계수(그림 12)

M_m =막응력에 대한 무차원화된 응력 확대계수(그림 13)

m_b =굽힘응력에 대한 무차원화된 응력 확대계수(그림 14)

(4) 정적파괴인성치 K_{Ic} , 균열전파정지인성치 K_{Ia} 의 온도의존성을 구한다. ASME Code Sec.XI에서는 K_{Ic} 및 K_{Ia} 에 대해서 그림 15와 같은 데이터를 제시하고 있다.

(5) (1)에서 구한 온도분포와 (4)에서의 K_{Ic} 와 K_{Ia} 의 온도의존성에서 각 시각에서의 K_{Ic} 및

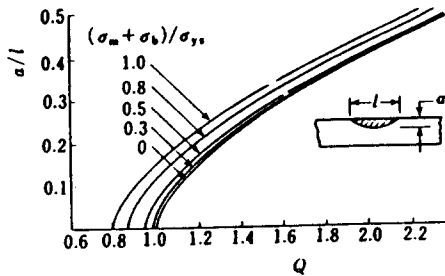


그림 12 형상계수 Q (ASME Code Sec. XI, App. A)

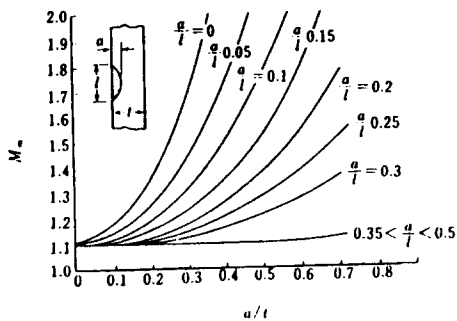


그림 13 막응력에 관한 무차원화된 응력확대계수 M_m (ASME Code Sec. XI, App. A)

K_{Ia} 의 판두께에 따른 분포양상을 결정한다.

이 경우 파괴인성에 미치는 중성자조사에 의한 영향도 고려해야 한다.

(6) (3)에서 구한 응력확대계수 K_t 와 (5)에서 구한 파괴인성치 K_{Ic} 및 K_{Ia} 를 각 시각에 대하여 비교한다(그림에서는 시각= τ_2 의 경우를 나타내었다). 균열전파의 개시점은 K_t 가 K_{Ic} 곡선을 오른쪽 위로 횡단하는 점 a_i 로 예측할 수

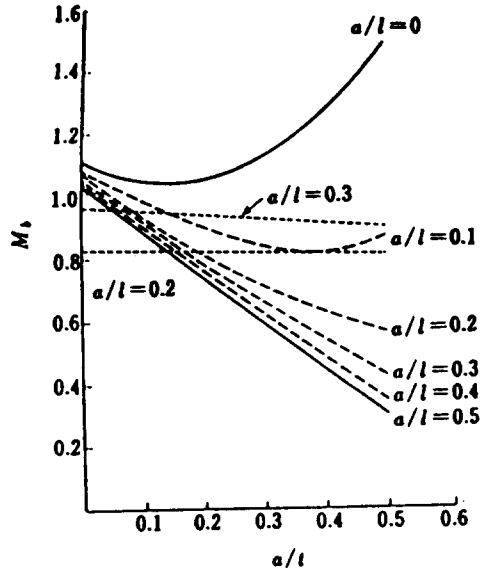


그림 14 굽힘응력에 관한 무차원응력확대계수 M_b (ASME Code Sec. XI, App. A)

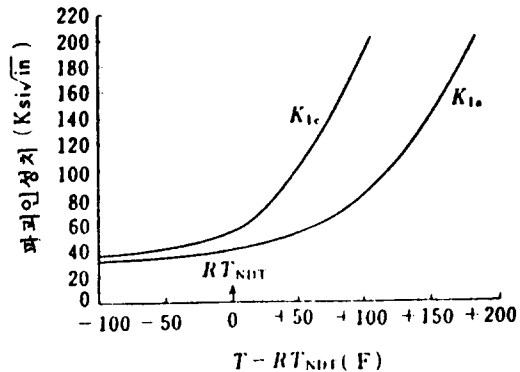


그림 15 ASME Sec. XI의 결함의 재평가에 사용된 K_{Ia} 및 K_{Ic}

있다. 또 균열의 정지점은 K_I 가 K_{Ia} 곡선을 왼쪽 아래로 횡단하는 점 a_a 로 예측된다.

운전상태 III, IV의 각 시각에 대해서 (6)에서와 같은 과정으로 a_i 를 구하고, 균열전파 정지점이 판 관통두께에 가까운 $a_a/t \geq 0.75$ 로 되는 값 가운데 가장 작은 값을 한계치수 a_i 로 결정한다. 즉, 일단 균열전파가 개시된 후에도 충분한 두께여유를 남길 수 있도록 한계치수를 결정하는 것이다. 균열이 판두께를 관통하는 경우나 반대 벽까지 전파되는 경우($a_a/t \geq 0.75$)에는 한계치수 a_i 가운데 최소의 것을 선택하여 한계결합으로 취한다.

K_I 가 시간에 따라서 단조하게 감소하는 경우에 대해서는 균열진전개시의 저지효과 또는, K_I 가 정점(peak)에 달한 이후의 균열진전이 다시 개시되는 것이 방지되는 증온예비용력(warm-prestress)효과를 기대할 수 있다(warm-prestress=인성이 높은 고온상태에서 큰 부하를 결정하면, 균열선단이 브런팅(blunting)된 후의 효과가 남아 있어 인성이 낮은 저온상태에서 미리 경험한 하중보다 낮은 하중에서 한

계($K_I = K_{Ic}$)에 도달하여도 결보기 인성이 상승되었기 때문에 파괴되지 않는 현상) a_c 를 결정하는 순서는 운전상태가 I, II로 바뀌는 것 이외에도 a_i 를 결정하는 순서와 동일하다.

4. 맺음말

운전상태 II의 여러가지 각종 파괴사고의 원인을 한 두가지의 원인으로 명확하게 구분할 수는 없다. 여러가지의 복잡한 원인과 조건들이 복합적으로 작용하여 대·소형 구조물의 안전성·건전성이 위협받는 경우가 대부분일 것이다. 여기에서는 원자로의 건전성 평가에 파괴역학의 이론·개념등을 어떻게 응용하는가를 간단하게 기술하였다. 여기에서 논의된 사항들 뿐만 아니라 소형시험편을 사용하여 정확한 파괴인성치를 측정하는 방법론이라든지, 급속히 발달되고 있는 전자장비들을 어떻게 우리들의 파괴역학적인 개념들과 접목시켜서 건전성, 안전성을 평가·유지하는데 이용할 것인가 등의 방법론들의 개발·연구되어야 하겠다.



북경 메카트로닉스 국제 학술대회

주관 : 중국기계학회 (CMES)

참여학회 : ASME, JSME 등 10개 학회

일시 : 1991년 10월 7일~11일(전시회 및 관광포함)

장소 : 중국 북경시

일정 : 등록마감 : 1991년 5월 30일

연락처 : 한국과학기술원 기계공학과 이종원 교수(국제협력 담당이사) 문의 바람.

전화 (02)966-1931 (교)3616