

파괴강도해석 및 설계기법



이 역 섭*

1. 서 론

여러 가지 공학 구조물들이 아무런 예고 없이 순식간에 파괴되는 사고들이 세계도처에 많이 발생되고 있다(350억 달러/1년). 재료역학적으로 충분한 안전여유를 고려하여 건설하게 설계·제작되었다고 생각한 구조물들이 갑자기 파괴되어 경제적인 손실은 물론 인명의 손실을 초래하게 되어 많은 사람들의 가슴을 아프게 하고 있다.

구조물의 파괴강도에 대하여 최초로 관심을 가지고 연구한 사람은 이태리의 레오나르도·다빈치¹⁾이었으며, 영국의 A.A. Griffith²⁾의 실험적인 연구, 미국의 G. Irwin³⁾의 실험적·이론적인 연구들에 의해서 파괴강도해석의 기초가 되는 파괴역학이 발전되었다.

본 논문에서는 구조물재료의 탄성파괴강도를 해석하기 위한 파라메타들을 소개하고 구조물의

파괴강도파라메타들을 정확하게 해석하기 위하여 많이 응용되고 있는 실험적인 기법과 수치해석적인 기법에 대해서 논의한다. 또한 구조물들의 파괴강도설계기법에 대한 원리를 설명하고, 몇가지 실재적인 예를 들어 이해를 도우려 한다.

2. 파괴강도해석 파라메타

2.1 전체적인 파라메타

선형탄성체의 이론적인 파괴강도는 각 고체의 탄성계수의 10% 정도로 산정되나, 수정(crystal)이나 유리의 실재적인 강도는 이론강도보다 2차수 낮게 나타난다⁴⁾. 이론강도와 실재적인 강도의 차이에 대해서 Griffith가 그 이유를 제시하였으며, 이것을 바탕으로 구조물재료의 파괴강도파라메타를 측정하는 방법적이 개발되었다²⁾. Griffith의 주된 업적은 구조물재료에 존재하는 균열의 길이가 증가(성장)함에 따르는 구조물재료의 전체에너지의 변화를 고려하여 파괴현상에 대한 열

* 인하대학교 공과대학 기계·항공·자동화 공학부, 교수

역학적 기준을 유도한 것이다. 즉, 응력을 받고 있는 구조물재료에 대한 표면 에너지(γ) 포텐셜 에너지(변형에너지)(U)의 합인 전체에너지가 감소하게 되는 경우에는 균열이 성장하게 된다. 균열성장의 추진력을 균열이 성장할 때에 필요한 방출에너지와 새로운 균열표면생성에 필요한 표면에너지의 차이로 이해한 것이다. 이러한 에너지 접근법은 균열선단에서의 국부적인 변형률의 양상을 고려하지 않아도 파괴응력에 대한 표현식을 유도할 수 있게 한다. 즉, 길이 $2a$ 인 균열을 갖고 있는 무한판에 원격하중 σ 가 균열에 수직하게 작용할 때에 Griffith의 에너지접근법을 응용하면 균열단위면적에 대한 변형에너지방출률(전체적인 파라메타) $G = \frac{\partial U}{\partial a}$ 과 표면에너지 (γ) 사이의 관계식을 이용하여 파괴응력, σ_f 를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}} \quad (\text{평면응력}),$$

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a(1-\nu^2)}} \quad (\text{평면변형}) \quad (1)$$

여기서, E = 탄성계수, ν = 포와송비

2.2 국부적인 파라메타

빠른 파괴에 의한 파손은 반드시 구조물내·외부에 존재하는 균열과 같은 응력집중을 발생시키는 결함부근의 국부적인 높은 응력, 높은 변형률과 관련이 있기 때문에 구조물의 실제적인 파괴강도를 해석하기 위해서는 이들 응력과 변형률의 크기 및 분포상태를 면밀히 평가하여야 한다. 이 경우에는 Griffith의 에너지방법(전체적인 파라메타 방법)과는 달리 균열선단영역(구조물체 보다는 작고, 원자크기보다는 충분히 커서 선형탄성이론을 적용할 수 있는 영역)에 관심을 둔다. 2차원 무한판내에 존재하는 균열표면(균열길이 = $2a$)에 수직하게 하중(σ)이 작용하는 경우(모드I 하중), 균열선단부근에 발생하는 응력은 Westergaards해⁵⁾를 응용하고, Irwin이 제안한

응력확대계수(국부적인 파라메타) $K_I = \sigma\sqrt{\pi a}$ 를 사용하여 간결하고 명확하게 표시할 수 있다. 균열표면과 평면내에서 모드II하중이나 평면외에서 평행하는 모드III하중에 대해서도 동일하다. 복잡한 구조물에 존재하는 균열에 대한 응력확대계수는 일반적으로 $K_i = \sigma\sqrt{\pi a} f_i(g)$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 $f_i(g)$ = 균열의 모양과 외력의 작용양상에 따르는 형상계수, $i = (I, II, III)$.

2.3 전체적인 파라메타(G)와 국부적인 파라메타(K)와의 관계

Irwin은 G 와 K 가 다음과 같은 관계가 있음을 이론적으로 밝혀내어 실제적인 구조물의 파괴강도해석 및 설계에 지대하게 공헌하였다³⁾.

$$K_I = \sqrt{GE} \quad (\text{평면응력})$$

$$K_I = \sqrt{\frac{GE}{1-\nu^2}} \quad (\text{평면변형}) \quad (2)$$

2.4 파괴인성치

구조물재료의 탄성파괴강도를 해석하고 이에 상응하는 설계기법을 개발하기 위해서는 각 구조물재료가 파괴될 경우의 응력확대계수로 정의되는 파괴인성치를 실험적으로 결정해야 한다. 파괴인성치는 Fig. 1과 같이 두께에 따라서 변화하는 구간이 있고 어느 정도 이상의 두께(B)에서는 (K_{Ic})하게 된다.

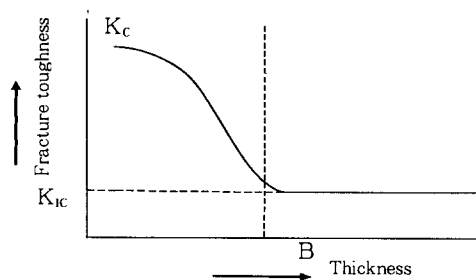


Fig. 1 Fracture toughness vs. thickness.

3. 파괴강도 해석

3.1 실험적인 방법

여러 가지 공학구조물들의 강도를 해석하기 위해서는 여러 가지 기하학적인 형상을 갖는 구조물의 내부에 존재하는 균열에 대한 파괴강도파라메타들을 정확하게 결정해야 한다. 이론적으로 파괴강도파라메타를 정확하게 결정할 수 있는 구조물의 기하학적 형상은 매우 단순한 것들에 제한되어 있으므로 실험적 혹은 수치적인 방법을 사용하고 있다. 실험적인 방법으로는 고전적이지만 아직도 매우 유용하게 세계 여러나라에서 응용되고있는 광탄성실험법이 있고, 광학적인 방법(모아레, 코스틱스, 홀로그래피, 광간섭계, 스펙클방법 등)과 스트레인게이지를 사용하는 방법들이 있다. 여기에서는 광탄성방법을 응용하여 응력확대계수들을 정확하게 산정하는 예를 소개하기로 한다. 광탄성재료(예폭시, 폴리카보네이트, Homalite-100, 등)로 만든 시편에 인위적으로 가공한 균열선단주위에 발생하는 응력장을 해석하여 광탄성시편과 동일한 기하학적 형상과 하중조건에 있는 탄성구조물 재료내부에 존재하는 균열선단주위의 응력장의 양상을 규명하는 방법이다. 광탄성방법은 다른 광학적인 방법과는 달리 2차원과 3차원 구조물형상에 동일하게 적용할 수 있는 장점이 있다. Fig. 2와 같은 복잡한 기하학적인 형상을 갖는 2차원 구조물내부에 곡선균열이 존재하고 있을 경우 주어진 하중조건에 대한 파괴강도해석을 면밀하게 수행하기 위하여

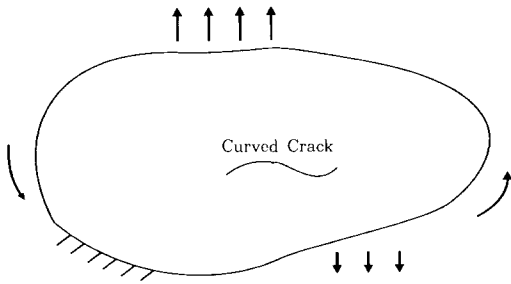


Fig. 2 A Curved crack under varying load condition in a composite structure.

는 균열선단에서의 응력확대계수들을 정확하게 결정해야한다. 광탄성재료로 만든 모델에 경계조건들을 만족시키는 하중을 작용시키면 균열선단에서는 등색선(광탄성무늬)가 나타나며, 이 등색선상에서는 τ_m (최대전단응력)이 일정하므로 다음과 같은 파괴강도파라메타. 즉, 응력확대계수들이 포함되는 수식이 만족된다.

$$\frac{Nf_s}{t} = \tau_m = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \quad (3)$$

$$\frac{1}{2} \left\{ \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f(\theta) + \sigma_0 + A\sqrt{r} + \dots + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} g(\theta) + A'\sqrt{r} + \dots \right\}$$

- 여기서,
- N = 광탄성무늬차수,
- f_s = 광탄성재료상수,
- t = 광탄성재료두께,
- σ_0 = 원거리응력,
- (γ, θ) = 균열선단에 원점을 둔 극좌표,
- A, A' = 상수,
- K_I, K_{II} = 모드 I, 모드 II 응력 확대계수

Fig. 3에 모드 I 하중과 모드 II 하중이 동시에 작용할 경우에 균열선단에서 발생하는 혼합모드 광탄성무늬를 나타내었다.

식 (3)과 광탄성실험결과를 이용하고, overdeterministic 최소자승법(ODLSQ)을 응용하면 미지수인 응력확대계수 K_I, K_{II} 와 실험상수 σ_0, A, A' 등을 결정할 수 있다. ODLSQ를 이용하여 결정한 파라메타들이 실험조건을 만족하는 유일한 값들이라는 것을 증명하기 위하여 ODLSQ를 이용하여 결정한 파라메타들을 이용하여 생성시킨 광탄성무늬들을 Fig. 3의 오른쪽에 도시하였다. 실험으로 얻은 광탄성무늬와 ODLSQ로 결정한 파라메타들로 생성시킨 광탄성무늬가 잘 일치할 때 ODLSQ로 결정한 파라메타들의 정확성이 검증된다.

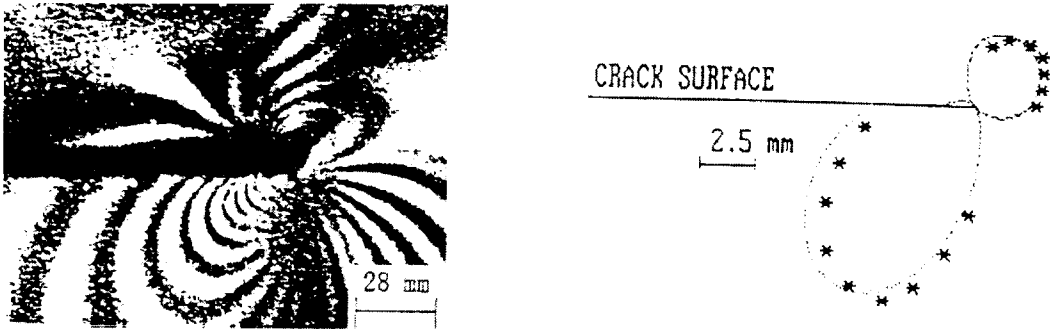


Fig. 3 Photoelastic isochromatic fringe loops at a crack tip under mixed loading condition and its counterpart generated by computer graphics.

3. 2 수치적인 방법

파괴강도 파라메타를 수치적으로 결정하기 위하여는 유한요소법, 경계요소법, 유한차분법들이 응용되고 있으며, 이중 유한요소법이 가장 많이 사용되고 있다. 유한요소법으로 전체적인 파라메타인 G 를 먼저 결정한 후 식(2)을 사용하여 K 를 산정하는 경우와 국부적인 파라메타 K 를 직접 결정하는 방법들이 있다. G 의 정의는 $\frac{\partial U}{\partial a}$ 이

므로 유한요소법에서는 $\frac{\partial U}{\partial a} = \frac{U_2 - U_1}{a_2 - a_1}$ 을 계산하면 된다. 즉, 먼저 균열길이 a_1 을 갖는 구조물재료에 대한 변형에너지 U_1 을 산정한다. 그 다음 균열길이 $a_2 = (a_1 + \Delta a)$ 에 대한 변형에너지 U_2 를 산정하여 G 를 결정하게 된다. 국부적인 파라메타 K 를 유한요소법으로 결정할 경우에는 균열선단에서 발생하는 응력의 특이성 때문에 균열선단부근에서는 요소분할을 매우 세밀하게 하든지 혹은 특이요소를 사용하여야 한다. G 는 균열선단부근의 요소분할의 영향을 크게 받지 않은 특성이 있기 때문에 수치적인 방법에서는 G 를 먼저 결정한 후에 K 를 산정하는 경우가 많다.

수치적인 방법은 근사적인 방법이기 때문에 특히 많은 반복적인 계산을 필요로 하는 유한요소법을 이용하는 경우에는 오차의 누적때문에 발생하는 G 나 K 의 부정확성에 대한 검토를 수행하여야 한다. 유한요소법으로 균열이 존재하는 구조물을 모델링한 후 계산한 K 값과 동일한 형상을 갖는 광탄성재료에 대한 K 값을 비교하여 유한요소법의 모델링과 계산절차를 검증하여야 한다.

실제적인 대형 구조물에 존재하는 균열에 대한 파괴강도파라메타를 결정할 필요가 있을 경우에는 전체적인 구조물을 유한요소법으로 모델링해야 하는 경우와 균열이 존재하는 부근의 경계조건을 명확하게 알 수 있는 경우로 구분하는 것이 좋다. 경계조건을 명확히 알 수 있는 경우에는 균열을 포함하는 구조물의 부분에만 유한요소 모델링을 수행하여 계산시간을 단축할 수 있다.

4. 파괴강도 설계기법

4. 1 파괴강도 설계파라메타결정

실제적으로 구조물의 설계자가 당면하는 기본적인 문제는 방법의 정확성, 해를 결정하는데 소요되는 시간과 경비를 고려하여 파괴강도파라메타를 산정하는 방법을 결정하는 것이다.

여러 가지 기하학적 형상과 하중조건에 대응하는 응력확대계수들에 대한 600여개의 식들이 편람형식으로 편찬되어 있으므로 이를 적절히 활용하는 것이 좋다^{6,7,8)}. 이들 편람들에 수록되지 않은 기하학적인 형상이나 하중조건들에 대해서는 3장에서 논의한 실험적인 방법 혹은 수치적인 방법으로 응력확대계수를 정확하게 결정하여야 한다. 또한 기존의 해를 증첩하여 여러가지 모양의 균열문제에 응용할 수 있다.

4. 2 파괴강도 설계특성

파괴역학을 실제적인 구조물설계에 응용하는

목적은 기계나 구조물이 급작스럽게 파손하지 않도록 보호하는 것이다. 이러한 목적을 달성하기 위해서는 모든 공학재료는 결합과 불균일성을 가지며 어떤 응력범위에서는 파괴과정이 시작된다고 가정해야 한다. 특히 고강도 저인성재료는 취성 파괴되는 경향이 있으므로 이러한 재료를 사용하는 구조물을 설계하는 설계자는 균열성장을 유발하지 않는 작용하중범위를 정확하게 결정해야 한다. 따라서 설계자는 적절한 설계공식과 공인된 기계적인 특성을 갖춘 재료를 선택해야 한다. 재료역학적인 설계의 기본개념은 구조물의 어느 부분에서의 작용응력(σ)도 구조물재료의 항복응력(σ_y)을 넘지 않게 유지되도록 한다.

$$\sigma < \sigma_y \quad (4)$$

파괴역학적인 설계의 기본개념은 균열성장을 유발하지 않는 작용응력(σ)범위를 파괴강도파라메타(K)와 파괴인성치(K_{Ic})를 응용하는 식 (5)를 사용하여 결정한다.

$$K (= \sigma \sqrt{\pi a} \times \text{상수}) < K_{Ic} \quad (5)$$

식 (4)와 (5)의 오른쪽 항은 구조물재료의 기계적인 재료특성을 나타내며 실험을 통하여 결정되는 각 재료에 대한 고유한 값이다. 왼쪽 항은 구조물재료에 작용되고 있는 실제적인 상황을 나타내고 있다.

4.3 부분-관통균열이 있는 압력용기의 파괴강도 설계에

대부분의 하이테크 구조물은 파괴역학적인 개념을 기본으로 하여 설계되어야 한다. 압력기체나 액체를 담고 있는 용기(선박이나 항공기 및 우주선 같은 수송기들의 주요한 구조물인 연료탱크, 로켓트 모터케이싱, 등과 같은 압력용기)의 부분에 발생하는 균열은 압력기체나 액체를 누출시키며 큰 사고로 발전될 가능성이 크다. 완전 관통된 균열이 있는 경우는 용기가 압력을 충분히 받기 전에 누수가 일어나기 때문에 가동 전에

조치를 취할 수가 있지만 Fig. 4와 같이 부분-관통균열이 있는 가동도중 관통균열로 발전되어 큰 사고가 발생할 가능성이 크다.

4.3.1 설계조건정의

Fig. 5와 같이 압력용기(직경 2.8m, 높이 6.5m)를 설계하고자 한다⁹⁾. 공동용적헤드(common-

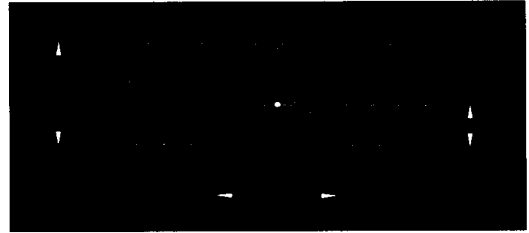


Fig. 4 Part-through surface crack.



Fig. 5 A Cross sectional view of the pressure vessel designed.

bulk-head, CBH)가 용기를 두 부분으로 나누고 있으며, 두개의 구형 캡이 원통형용기상하양단에 연결되어 있다. 파괴응력을 산정하는 위치들이 Fig. 5에 표시되어 있으며, 실제운전에 들어가기 전 압력시험시 각 위치에서 발생하는 응력을 측정하여 Table 1에 나타내었다.

압력용기의 재료는 Al합금 7020-T6이며 기계

Table 1 Stresses at various location of the pressure vessel under different proof loading conditions.

Location	Wall Thickness(mm)	Type of load	σ_A acting stress (MPa)
1 ^a	3.6	Proof test II	193
1(a) ^c	2.8	Proof test II	217
2 ^a	3.6	Proof test II	205
2(a) ^c	4(in Y-ring)	Proof test II	213.7
3 ^a	10	Max. bending momentum	182.5
4 ^a	5.3	Proof test II	114
5 ^a	5.3	Proof test II	194
5(a) ^c	4.1	Proof test II	251
6 ^a	5.3	Proof test II	137
7 ^b	10	Proof test I	242
8 ^a	3.6	Proof test I	121
8(a) ^a	1.8	Proof test I	203
9 ^a	3.0	Proof test I	112.5
10 ^a	4.6	Proof test II	140
11 ^c	3.6	Proof test II	255
12 ^a	4.6	Proof test II	200
13 ^b	10	Max bending moment	300
14 ^a	3.6	Proof test II	149.5
14(a) ^c	2.8	Proof test II	187
15 ^a	3.6	Proof test II	187

^aLocation at the weldment.

^bParent material.

^cParent material, chemically milled region.

적 특성은 Table 2에 주어져 있다.

균열의 형상은 Fig. 4에 보인 것과 같다고 가정하고 세가지의 외형비율 : ① $a \times c = 1 \times 1.5\text{mm}$ ② $a \times c = 1 \times 3\text{mm}$ ③ $a \times c = 1.5 \times 2\text{mm}$ 에 대하여 고려한다.

4. 3. 2 이론적인 배경

부분관통타원형 균열정면(front)(Fig. 4)에서 응력확대계수값이 제일 큰 위치는 A이며 이곳에서의 응력은 평면변형응력상태이다. 따라서 이곳의 응력확대계수 K_{IA} 가 평면변형파괴인성치 K_{IC} 에 도달하면 부분관통균열은 두께를 완전히 관통하게 되고 누수가 발생하게 되며 이러한 임계조건을 사용하여 압력용기의 허용응력을 산정한다. K_{IA} 값은 편람을 사용하여 다음과 같음을 알 수 있다.

$$K_{IA} = \sigma \left(\sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \right) M \tag{6}$$

여기서, $Q = 1 + 1.47(a/c)^{1.67}$ ($a/c < 1.0$ 에 대하여),

$$M = 1.12 - 0.23(a/t) + 10.55(a/t)^2 - 21.71(a/t)^3 + 30.38(a/t)^4$$

압력용기를 가동하기전 시운전하는 동안 균열이 성장하는 양상에 대한 고찰도 필요하다. 시운전시 균열성장량은 Paris' law인 식(7)을 사용하여 산정할 수 있다(여기에 관한 상세한 사항은 본 특집의 "구조물의 파괴강도해석기법"을 참조하기 바람).

Table 2 Mechanical properties of Al-7020-T6.

항복강도(MPa)	280
극한강도(MPa)	350
연신율(%)	10
탄성계수(GPa)	70.5
포아송비	0.33
평면변형파괴인성치($MPa\sqrt{m}$)	24.22

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (7)$$

여기서,

a = 균열길이,

N = 시운전사이클 수,

C와 m = 재료상수 (C = 5.7×10^{-7} , m = 1.68
for Al 7020-T6)

Table 3은 각각의 위치에서 초기균열길이를 a_0 으로 가정했을 때 여러 가지 시험조건에 의해서 성장하는 균열길이 (Δa)를 식 (7)을 이용하여 계산한 것이다. 여러 가지 시험하중조건은 Table 4에 나타내었다.

Table 3 Crack growth at varying locations along the pressure vessel (initial crack depth $a_0 = 1.0\text{mm}$, and $a/c = 0.33$).

Location	Thickness (mm)	$\Delta a(\text{mm})$	$a_c = a_0 + \Delta a(\text{mm})$
1	3.6	0.71695×10^{-3}	1.00071695
1a	2.8	0.75384×10^{-3}	1.00075384
2	3.6	0.71695×10^{-3}	1.00071695
2a	4	0.70694×10^{-3}	1.00070694
3	10	0.67525×10^{-3}	1.00067525
4	5.3	0.68967×10^{-3}	1.00068967
5	5.3	0.68967×10^{-3}	1.00068967
5a	4.1	0.70493×10^{-3}	1.00070493
6	5.3	0.68967×10^{-3}	1.00068967
7	10	0.67530×10^{-3}	1.00067530
8	3.6	0.71695×10^{-3}	1.00071695
9	3	0.74142×10^{-3}	1.00074142
10	4.6	0.69695×10^{-3}	1.00069695
11	3.6	0.71695×10^{-3}	1.00071695
12	4.6	0.69695×10^{-3}	1.00069696
13	10	0.67525×10^{-3}	1.00067525
14	3.6	0.71695×10^{-3}	1.00071695
14a	2.8	0.75384×10^{-3}	1.00075384
15	3.6	0.71695×10^{-3}	1.00071695

Table 4 Test loading cycle on the pressure vessel used for the evaluation of crack growth.

Sl.No	Loading condition	No. of load cycles	Stress levels (MPa)
1	pneumatic leak test	4	100.25
2	low pressure leak test	26	40.06
3	operating pressure	10	234.35
4	proof pressure	2	257.8

4. 3. 3 파괴강도 설계기법

압력용기의 파괴강도 설계기법(원리와 순서)은 모든 구조물에 대해서도 동일하게 적용될 수 있다. 파괴강도설계기법은 다음과 같은 순서로 체계적으로 설명될 수 있다.

첫번째 : Table 4의 시험하중에 의한 균열성장량을 계산하여 Table 3과 같은 초기결함의 크기를 결정한다. 여기서는 각 위치에서의 초기결함의 크기를 $a_0=1\text{mm}$ 로 가정하였으나 실제로는 비파괴탐상의 결과를 이용할 수 있다.

두번째 : 식(6)을 사용하여 압력용기의 각 위치에 대한 파괴임계응력(σ_c)을 계산한다. 여러가지 기하학적 형상 (a, c)=(1, 1.5),(1, 3),(1.5, 2)을



Fig. 6 Fracture critical stress curve for various crack shapes with different aspect ratios at location 5(a).

갖는 균열이 위치 5(a) 존재할 경우의 계산 예를 Fig. 6에 나타내었다.

세번째 : 잔류강도곡선을 그린다. $\sigma_i/\sigma_y = 1.44$ 인 A점에서 가장 낮은 응력분포를 나타내는 $a/c = 1/3$ 에 대한 곡선에 접선AB를 그린다. 이 경우 안전율은 1.44로 취했다.

$a/t = 1.0$ 에서 $a/c = 1/3$ 에 대한 곡선에 접선 DC를 그려서 위치 5(a)에 대한 잔류 강도곡선 ABCD를 완성한다. 다른 위치에 존재하는 균열에 대해서도 동일한 과정으로 잔류강도곡선을 그릴 수 있다.

네 번째 : 초기균열길이 $a_0=1\text{mm}$ 에 대한 Fig. 6에서 점선으로 나타나는 잔류강도곡선을 그린다.

마지막 단계 : Table 2에서의 작용응력과 잔류 응력선도에서 결정된 파손응력과의 비인 안전여유를 산정한다. Table 5에 각 위치에 대한 파손응력과 안전여유를 나타내었다.

Table 5에서 알 수 있듯이 위치 8a를 제외하고는 모두 안전여유가 1보다 크다. 위치 8a에서는 두께가 1.8mm이므로 초기균열을 1mm로 가정하면 잔류강도가 매우 낮게 되는 것을 알 수 있다. 이 곳은 작용응력이 203MPa인데 파손응력이 155MPa로 산정되어 매우 불안정한 지점이므로 주의를 요하여 파손응력을 203MPa정도로 상승시키기 위해서 표면균열의 깊이 (a)가 0.65mm보다 작게 유지되어야 한다.

5. 결 언

본 논문에서는 선형파괴역학의 관점에서의 파괴강도해석 기법들에 대해서 포괄적으로 논의하였다. 파괴강도해석을 위하여 규정되어야 할 파라메타들의 결정방법들에 대하여 설명하고 이들 파라메타들을 파괴강도설계에 적용시키는 과정들을 압력용기를 예를 들어 체계적으로 설명하였다.

선형파괴강도해석을 근간으로 한 파괴강도설계

Table 5 Fracture stress and margin of safety at various locations of the pressure vessel.

Location	Thickness (mm)	σ_A acting stress (MPa)	σ_p failure stress (MPa)	Factor of safety σ_p/σ_A
1	3	193	218.91	1.134
1a	2.8	217	261.8	1.100
2	3	193	218.91	1.134
2a	4	213.7	281.28	1.316
3	10	182.5	347.2	1.716
4	5.3	114	275.4	2.410
5	5.3	194	275.4	1.419
5a	4.1	261	326.7	1.302
6	5.3	137	275.4	2.010
7	10	242	347.2	1.435
8	3	121	202.2	1.070
8a	1.8	203	155.5	0.727 ^a
9	3	112.5	186.68	1.659
10	4.6	140	208.11	1.915
11	3.6	255	315.97	1.239
12	4.6	200	268.11	1.340
13	10	300	347.2	1.157
14	3.6	149.5	218.91	1.464
14a	2.8	187	261.82	1.347
15	3.6	187	218.91	1.167

^athis has a factor of safety less than 1.0 for a detectable flaw depth of 1.0mm. In order to have this factor > 1 a minimum flaw of 0.65mm should be detected by NDT.

방법으로 구조물을 설계하면 파괴응력에 대한 안전계수를 정확하게 산정할 수 있어서 안전성이 제고된 구조물을 설계·제작할 수 있게 될 것이다.

후 기

본 내용은 KOSEF지정 인하대RRC(황해권 수송시스템 연구센터)의 후원을 받아 이루어진 것이며 관계제위에게 감사드립니다. 또한 원고를 정리하여준 변귀환 군에게도 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

1. W.B. Parson, Engineers and Engineering in the Renaissance, Williance and Wilkins, Baltimore, 72(1939).
2. A.A. Griffth, "the Phenomena of Rupture and Flow in Solids." Philosophical Transaction, Series A, Vol. 221, 1920, pp.163-198.
3. G.R. Irwin, "Fracture Dynamics." Fracturing of Metals, American Society for Metals, Cleveland, 1948, pp.147-166.
4. A.de.S. Jayatilaka, Fracture of Engineering Brittle Materials, Applied Science Publishers LTD, London, 1979.
5. H.M. Westergaard, "Bearing Pressures and Cracks." Journal of Applied Mechanics, Vol.6, 1939. pp.49-53.
6. H. Tada, P.C. Paris, and G.R. Irwin, The Stress Analysis of Crack Handbook. (2nd Ed) Paris Productions, Inc., St. Louis, 1985.
7. Y. Murarami, Stress Intensity Factors Handbook. Pergamon Press, New York, 1987.
8. D.P. Rooke and D.J. Cartwright, Compendium of Sress Intensity Factors. Her Majesty's Stationary Office, London, 1976.
9. K.B. Narayana, B. Dattaguru and T.S. Ramamurthy, "Fracture Mechanics based Design Procedures for Pressurized Components having Part-through Cracks." Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol.27, 1997, pp.149-159. 