

파괴역학의 응용 개념

李 康 鏞
연세대학교 기계공학과 교수



●1947년 1월 19일생
●파괴 및 피로공학을 전공하고 파괴원인 및 방지를 위한 이론 정립, BEM 전산연구, 특히 AE법의 현장응용에 관심이 있다.

1. 머리 말

파괴역학은 역사적으로 볼 때 1960년대부터 본격적인 연구가 진행되었고, 1970년대에 와서 산업에 응용되기 시작하였으나 국내에서는 방위 산업, 원자력 산업에서 응용하고 있을 뿐 기타 자동차, 조선, 철강 산업에서는 지금 관심을 갖기 시작한 단계이다. 본 고에서는 파괴역학이 설계에서 어떻게 응용되며 피로파괴 원인 분석은 어떻게 하는 것인지에 대해 간략히 소개하고자 한다.

2. 파괴역학적인 설계 개념

2.1. 평면 변형을 파괴 인성

임계 응력세기계수(critical stress intensity factor) K_{Ic} 와 시험편 두께 B 와의 실험 결과를 그림 1에서 보여주고 있다.

그림 1에 의하면 2mm 이상의 얇은 평판일수록 균열이 존재하는 경우, 두꺼운 평판보다 더 파괴되기 어렵다는 실험결과를 주고 있다. 파괴되기 더 어렵다는 것은 곧 균열선단에 더 큰 응력이 걸려야만 파괴된다는 뜻이다. 따라서 더 큰 하중하에서 파괴된다는 풀이가 된다. 이러한 실험결과는 기존의 균열이 없는 시험편의 파괴강도 실험결과와 정반대 현상이다. 즉 균열이 없다면 시험편 두께가 두꺼울수록 파괴강도는 증가하였었다. 그러나 물체는 항상 내

부에 미소균열(micro crack)을 내포하고 있으며 이 미소균열은 물체가 사용중에 있을 때 당연히 자라게 되는 수가 허다하다. 그래서 결국은 미소균열이 거시적균열(macro crack)으로 성장하여 결국은 더 두꺼운 평판일수록 파괴에 저항하는 정도를 떨어뜨리게 되는 결과로 더 쉽게 파손되고 있다. 따라서 무턱대고 물체의 두께를 증가시키는 데는 상당한 주의를 요한다.

그림 1에서 또 다른 한 가지 특기할 사항은 두께가 어느 정도 크면 두께를 더 증가시켜도 K_{Ic} 의 변화가 없는 실험결과를 보인다는 것이다. 이러한 두께 변화에 따른 K_{Ic} 의 일정한 값을 K_{Ic} 로 표기하고 이를 평면변형을 파괴인성(plane strain fracture toughness)라고 칭한

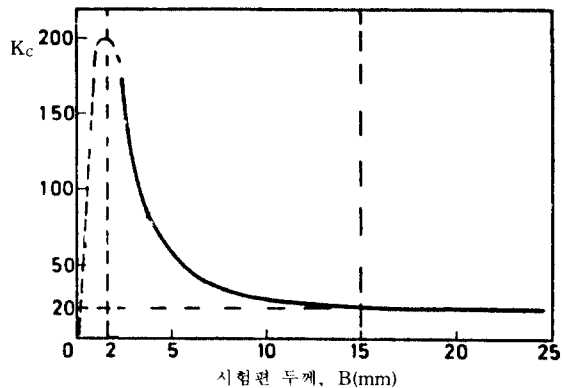


그림 1 알루미늄 7075-T6 합금의 임계 응력세기계수와 두께의 상관 관계

다. 이를 줄여서 파괴인성이라고 부르기도 하지만 K_{IC} 도 파괴인성이라고 부르고 있기 때문에 구별하여 사용하는 편이 바람직하다.

평면변형을 파괴인성 K_{IC} 는 항복응력 σ_{ys} , 탄성계수 E , Poisson의 비 ν 와 같이 재료상수이다. K_{IC} 값은 그 재료에서 얻을 수 있는 K_C 값의 최소값이라는 것은 이미 그림 1에서 설명된 바 있다. $K_C > K_{IC}$ 이므로 K_{IC} 가 얻어지는 시험편의 파괴응력 σ_c 는 $\sigma_c > \sigma_{IC}$ 이다. 그런데 실제 기계구조물이나 부품의 두께는 평면변형울상태가 일어질 만큼 두꺼운 것은 찾아보기 어렵고 그보다 얇은 것이 일반적이다. 그렇다고 하여 K_C 를 기준으로 하여 설계를 하는 것은 K_{IC} 를 기준으로 설계하는 것보다 허용파괴응력을 더 크게 보기 때문에 안전도에서 떨어진다. 따라서 안전한 설계를 위해서는 K_{IC} 를 기준으로 설계하는 것이 바람직하다. 이러한 의미에서 K_{IC} 의 측정은 중요하다. 이러한 K_{IC} 의 값은 파괴역학의 역사가 짧은 관계로 아직

까지는 재료물성 핸드북에 항복강도, 탄성계수와 같이 한 난을 차지하여 표시되지는 않지만 머지 않아서 그렇게 될 것은 확실하다. K_{IC} 는 ASTM(American Society for Testing and Materials) E399-81, Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials에 근거하여 측정되어진다.

K_{IC} 시험방법에 의한 각 재료의 시험결과를 표 1에서 보여주고 있다. 이 표에 의하면 같은 재료이더라도 열처리 조건의 변화에 따라 항복응력 σ_{ys} 를 증가시키면 K_{IC} 는 감소하는 결과를 알 수 있다. 이 경향을 그림 2에서 잘 보여주고 있다.

이 그림에서 보는 바와 같이 고강도 저인성 재료(high strength low toughness material)는 고강도여서 항복은 쉽게 되지 않으나 균열이 존재하면 쉽게 부서지는 경향이 있고 반대로 저강도 고인성재료(low strength high toughness material)는 저강도이기 때문에 쉽게 항복하나 균열이 존재하여도 쉽게 부서지지 않는 경향을 보인다는 것을 알 수 있다. 이상적인 재료라면 항복강도의 증가에 따른 K_{IC} 의 감소율이 적은 재료로서 항복에도 강한 고강도이며 균열에 의한 파괴저항도 높은 고인성을 보여야 한다. 앞으로 이러한 신소재가 요구된다. 따라

표 1 각 재료의 K_{IC} 와 σ_{ys} 값

재료명	K_{IC}		σ_{ys}	
	MPa \sqrt{m}	ksi $\sqrt{in.}$	MPa	ksi
2014-T651	24.2	22	455	66
2024-T3	~44.	~40	345	50
2024-T851	26.4	24	455	66
7075-T651	24.2	22	495	72
7178-T651	23.1	21	570	83
7178-T7651	33.	30	490	71
Ti-6Al-4V	115.4	105	910	132
Ti-6Al-4V	55.	50	1035	150
4340	98.9	90	860	125
4340	60.4	55	1515	220
4335+V	72.5	66	1340	194
17-7PH	76.9	70	1435	208
15-7Mo	49.5	45	1415	205
H-11	38.5	35	1790	260
H-11	27.5	25	2070	300
350 Maraging	55.	50	1550	225
350 Maraging	38.5	35	2240	325
52100	~14.3	~13	2070	300

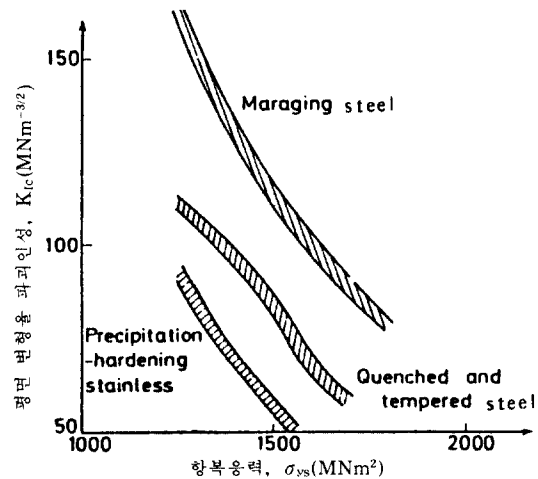


그림 2 평면변형을 파괴인성과 항복응력의 관계

서 재래식 항복에 근거한 설계방법 (conventional design method based on yielding)에 의해서만 설계하여서도 안되며 파괴역학적인 설계방법 (fracture mechanics design method)에 만 의존하여 설계하여서도 좋은 결과를 얻지 못하며 이 두 방법을 모두 적용하여 항복도 일어나지 않으며 파괴도 되지 않는 설계를 하여야 한다.

2.2 파괴역학적인 설계 방법

파괴역학적인 설계 방법으로는 설계자가 설계 대상을 생각하여 중요한 설계 치수를 무엇이냐고 생각하는가 여하에 따라 설계 순서가 달라질 수 있다. 그에 대한 예로서 설계자가 원자료를 설계한다고 하자. 그러면 설계자는 먼저 방사선에 의한 부식에 저항하는 재료를 선정하여야 할 것이다. 재료를 선정한다는 말은 바꾸어 이야기하여 재료상수를 정해 놓는다는 것과 같은 의미가 되어 재료상수 K_{IC} 는 정하여진 것이다. 그리고 중요시 다루어야 할 것이 균열의 허용길이이다. 균열의 허용길이 크면 가동중에 방사선 유출이 되어 고용인 뿐만 아니라 인근주민들의 건강에까지 피해를 주게 될 것이다. 따라서 허용 균열길이를 비파괴 시험에서 검출할 수 있는 최소의 길이로 설정한다. 그러면 응력세기계수가 $K = \sigma\sqrt{\pi a}$ (여기에서 균열길이 a 에 비해 물체는 무한히 크다고 가정한다.)이므로 안전한 설계가 되기 위한 파괴응력 σ_c 를 구하기 위해 임계 응력세기계수 K_c 대신에 최소 임계 응력세기계수인 K_{IC} 를 K 대신 대입하고 정한 허용균열 길이를 a 에 대입하므로써 σ_{IC} 를 구할 수 있다. 이 파괴응력의 값에 의해서 결정되는 것은, 가동에 필요한 압력은 정하여져 있기 때문에, 재료의 단면적이다. 따라서 원자로 전체의 크기라든가 또는 재료의 두께가 결정되게 된다. 또다른 예로서 비행기 날개판을 설계한다고 하자. 설계자는 무엇보다 비행기의 구실을 할 수 있게 하기 위해 가볍고 강도가 높은 재료를 선정하게 될 것이다. 그에 따라 K_{IC} 는 정해진다. 그 다음

에 비행기의 이착륙시 과도 응력으로 인한 파괴를 방지하기 위해 높은 허용 파괴응력을 설정한다. 그러면 $K = \sigma\sqrt{\pi a}$ (역시 균열길이에 비해 물체는 무한히 크다고 가정한다.)에서 K 대신 안전한 설계를 위해 파괴시 최소 임계 응력세기계수인 K_{IC} 를 대입하고 정한 허용 파괴응력값을 대입하므로써 파괴시 균열길이 a_c 를 구한다. 이 균열길이는 비파괴 시험에서 검출될 수 있는 크기 이상이어야 하며 리벳 머리에 가리어 있을 만한 크기이면 안된다. 실화로서 균열길이가 리벳 머리에 가리어 있을 만한 크기로 설계한 관계로 비파괴 시험에서 검출되지 않아 임계 균열길이가 존재하는 상태로 이륙시킨 결과 파열된 사례가 있다.

그러면 아래에서 파괴역학적인 설계가 어떠한 것인가를 살펴보기 위해서 구체적인 예제를 들어본다.

【예제 1】 길이 $h=3.048m$, 폭 $w=1.83m$ 인 판재가 폭에 수직으로 하중 $p=4.5MN$ 을 받아서 판재 중앙에 균열이 생길 것을 예상하여 균열의 허용길이 $a=0.254cm$ 로 설정한다. 설계자는 밀도가 같은 α 와 β 재료를 놓고 항복도 파괴도 일어나지 않으면서, 설계된 판재의 무게를 작게 하는 재료를 선택하고자 한다. α 재료의 $(K_{IC})_\alpha=115MPa \cdot m^{1/2}$, $(\sigma_{ys})_\alpha=910MPa$ 이고 β 재료의 $(K_{IC})_\beta=55MPa \cdot m^{1/2}$, $(\sigma_{ys})_\beta=1035MPa$ 이다.

【풀이】 두 가지 관점에서 설계가 될 수 있는데 하나는 고전적인 항복에 근거한 설계이다.

(1) 항복에 근거한 설계

최대 응력 $\sigma_{max} \leq \sigma_{ys}$ 이어야 하므로 α 재료인 경우 두께 $B_\alpha \geq 2.7mm$ 가 되고 β 재료의 경우 $B_\beta \geq 2.38mm$ 가 되어 항복에 근거한 설계로서는 β 재료를 택하는 것이 경량화 입장에서 좋다.

(2) 파괴역학에 근거한 설계

먼저 예제의 구조물 하중 상태에 대한 K 식을 핸드북에서 찾으면 그림 3과 같다. 이 그림에서 $2a/w=0.0014$, $h/w=1.67$ 에 대한 $K/K_0=1.0$ 이므로 $K = \sigma\sqrt{\pi a}$ 가 된다. 안전한 설

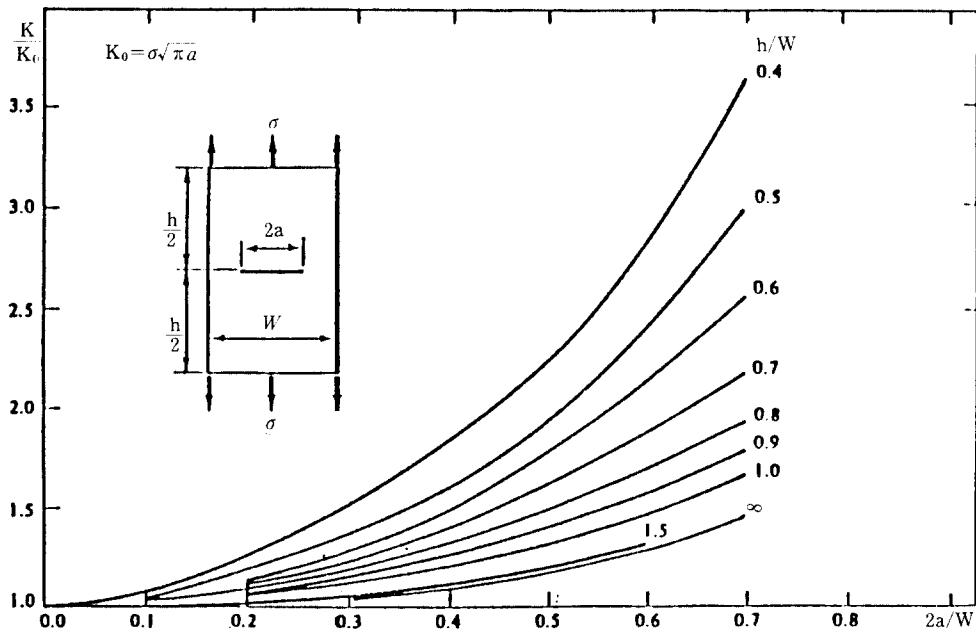


그림 3 균일한 단축 인장 응력을 받는 직사각형판의 중앙균열에 대한 응력세기계수 K

계를 위해 파괴시에 $K = K_{Ic}$ 를 사용하여야 하므로 $K_{Ic} = \sigma_c \sqrt{\pi a}$ 가 된다. α 재료인 경우에 $(\sigma_c)_\alpha = 1.82\text{GPa}$ 이 얻어지고 $\sigma_{max} \leq (\sigma_c)_\alpha$ 이어야 하므로 $B_\alpha \geq 1.35\text{mm}$, β 재료인 경우에 $(\sigma_c)_\beta = 870\text{MPa}$ 이 얻어지고 $B_\beta \geq 2.82\text{mm}$ 가 얻어진다. $(\sigma_c)_\alpha > (\sigma_{ys})_\alpha$ 이므로 $B_\alpha \geq 1.35\text{mm}$ 에서 항복후 파괴됨을 예상할 수 있고 $(\sigma_c)_\beta < (\sigma_{ys})_\beta$ 이므로 $B_\beta \geq 2.82\text{mm}$ 에서는 항복 이전에 파괴됨을 의미한다. 따라서 항복도 파괴도 되지 않는 설계로서 경량화를 기하려면 α 재료를 선정하여 $B_\beta \geq 2.7\text{mm}$ 로 하여야 함을 알 수 있다. 이 예제에서 말하고자 하는 것은 항복만 기준한 설계라든가 파괴역학만 기준한 설계만으로는 좋은 설계가 되지 못하고 두 방법을 모두 고려하여야 항복도 파괴도 되지 않는 설계가 될 수 있다는 것이다.

3. 피로파괴 원인 분석 개념

피로파괴에서는 Paris법칙과 Forman법칙이

있으나 수식상 간편한 Paris법칙이 실제 많이 응용되고 있으므로 여기에서는 Paris법칙을 응용한 피로파괴 원인 분석 방법을 간단한 예를 들어 설명한다.

【예제 2】 시험편 폭 $W = 15\text{cm}$ 인 2024-T3 알루미늄 합금판은 길이 방향으로 피로하중을 받는다. 그런데 어느날 비파괴검사요원이 하중과 수직하게 가장자리 균열길이 5cm 인 균열을 발견하고 파괴해석담당자(fracture analyst)에게 보고함으로써 균열발생 원인조사가 시작되었다. 첫번째 작업으로 이 부품을 인위적으로 파괴하여 균열면을 관찰한 결과 피로균열 성장인 경우에 나타날 수 있는 줄무늬(striation 또는 beach mark)를 찾아내고 또 줄무늬가 연속적이라는 것에 착안하여 균열성장은 피로에 의한 것이라 단정하였다.

현미경 조사에 의해 균열길이 $a = 1.5\text{cm}$ 인 곳에서 줄무늬 간격을 두께 방향으로 여러 곳에서 측정하여 평균값을 얻었는데 그 값은 10^{-4}mm 이었고 같은 방법으로 $a = 3\text{cm}$ 에서 평

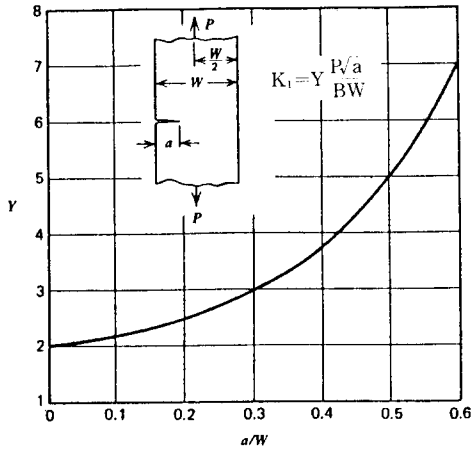


그림 4 가장자리 균열의 응력세기계수

균열무늬 간격은 10^{-3} mm임을 알아냈다. 무엇이 균열을 발생시켰는지 알기 위해 파괴해석담당자는 우선 이 부품에 설계에서 허용한 응력 범위 $0.2\sigma_{ys}$ 에서 작동되었는지 여부를 캐고자 한다. 재료의 σ_{ys} 는 345MPa이다.

【풀이】 이 부품의 균열형상과 하중에 적용할 수 있는 응력세기계수식은 그림 4에 주어졌다. 즉,

$$K = Y \frac{Pa^{1/2}}{BW} = Y\sigma\sqrt{a}$$

$a=1.5$ cm인 경우 $a/W=1/10$ 이므로 그림에서 $Y=2.1$ 이며, $a=3$ cm인 경우 $a/W=1/5$ 이므로 $Y=2.43$ 이다. 그런데 문제에서 $a=1.5$ cm인 경우 da/dN 은 줄무늬 간격으로부터 10^{-4} mm/cycle로 주어지며 $a=3$ cm인 경우 $da/dN=10^{-3}$ mm/cycle로 주어진다.

따라서 그림 5로부터 $a=1.5$ cm인 경우 즉 $da/dN=10^{-4}$ mm/cycle에서 $\Delta K=12.7$ MPa \sqrt{m} , $a=3$ cm인 경우 $da/dN=10^{-3}$ mm/cycle이므로 $\Delta K=20.9$ MPa \sqrt{m} 가 얻어진다. 따라서 $a=1.5$ cm인 경우 $\Delta\sigma=\Delta K/(Y\sqrt{a})=49.4$ MPa, $a=3$ cm인 경우 $\Delta\sigma=49.7$ MPa이 계산된다. 이 값들은 설계하중 $0.2\sigma_{ys}$ 즉 69MPa보다 작으므로 운전자는 아무튼 작동상에 잘못이 없음이 입증된다. 그러면 왜 균열이 발생되었

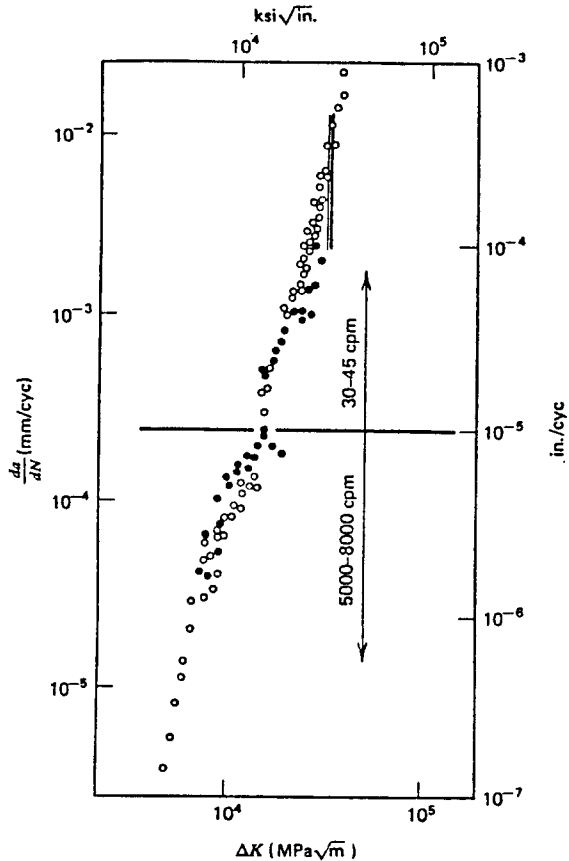


그림 5 2024-T3 알루미늄 합금의 Paris법칙

되므로 부식에 의해 균열발생점을 제공하였을 수도 있다. 위의 예제와 같이 균열발생과 성장 및 파괴의 원인을 조사하기 위해서는 시험편의 파단면이 매우 중요하므로 파단면을 어떠한 방법에 의해서도 원래대로 보존하는 것이 무엇보다 중요하다.

을까? 그 이유는 탄곳에 있을 수 있다. 예를 들어 균열발생지점에 원래부터 재료에 결함이 있었다든가 아니면 주위 공기중에 부식을 일으킬 수 있는 공해물질이 날아들어 그곳에 밀착 선진국에서는 이와같이 파괴원인 분석을 하는 파괴해석기사가 많으며 상당 수의 회사가 설립되어 있으며 앞으로 우리나라에서도 보급되리라 전망한다.