

파괴역학을 이용한 기계요소 및 구조물 설계방안 (2)

Application of Fracture Mechanics to Design of Machine and Structure Element

이 역섭

3. 파괴역학 개념을 이용한 재료특성 시험

3-1. 일반론

제 2 장에서 선형탄성체에 대한 파괴역학의 일반적인 개념을 요약하였다. 즉 응력확대계수(K)와 응력집중계수(K_C)의 차이, 에너지 해방율(1_y) 및 1_y 와 K 의 관계를 이론적으로 살펴보았다. 물론 식(2-35) 및 (2-36) 등은 균열전파 경로가 직선이 아닌 경우에 적용한다는 것은 우리가 있으나 전체적인 이해를 돕기위해서 앞에서와 같이 기술하였다. 세가지 경우의 응력확대계수 K_I , K_{II} 및 K_{III} 는 하중과 균열의 크기 및 시편의 크기 또는 균열이나 결함을 포함하고 있는 기계요소 및 구조물의 기하학적인 형상에 관련이 되어져서 결정이 된다. 여러가지의 경우에 대한 응력확대계수들은 몇가지의 핸드북으로 출판되어있으니 독자들은 참고하기 바란다.

(① Tada 등 공저 : The Stress Analysis of Cracks Handbook, Del Research Corporation (1973) : Hellertown, Pennsylvania

(② Rooke 등 공저 : Compendium of Stress Intensity Factors, Her Majesty's Stationery Office (1976) : London

(③ Sih저 ; Methods of Analysis and Solutions of Crack Problems, Noordhoff International Publishing (1973) : Leyden)

여기에서 파괴역학 개념에 기본을 둔 재료특성인 임계응력확대계수에 대해서 생각해 보자. 이것은 재래식 설계과정에서 가장 많이, 쉽게 사용되고 있는 재료의 특성들인 인장강도 혹은 항복강도 등의 기계적인 특성에 등가하는 하나의 또 다른 재료의 특성이라 생각할 수 있다. 즉, 어떤 초기 균열이 있는 특수한 기하학적인 형상을 갖는 시편이 임계하중을 받으면서 파손이 시작될 때의 응력확대계수를 그 재료의 임계응력확대계수라 할 때 이것은 그 재료의 고유성질인 재료의 특성이라 할 수 있으며 이 값을 이용하여 균열이 있는 실제구조물의 하중조건을 검토할 수 있으며 구조물의 수명도 계산할 수 있고 내구성도 알아낼 수 있는 것이다. 이 임계응력확대계수는 실제로 시편의 온도 등의 환경조건과 두께 등에 영향을 받는다. 그림 3-1에 시편의 두께와 시편의 기하학적 형상에 대한 임계응력확대계수의 변화하는 양상을 나타내었다.

그림 3-1에서 나타낸바와 같이 임계응력확대계수는 두께와 시편의 기하학적 형상에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 그러나 시편의 두

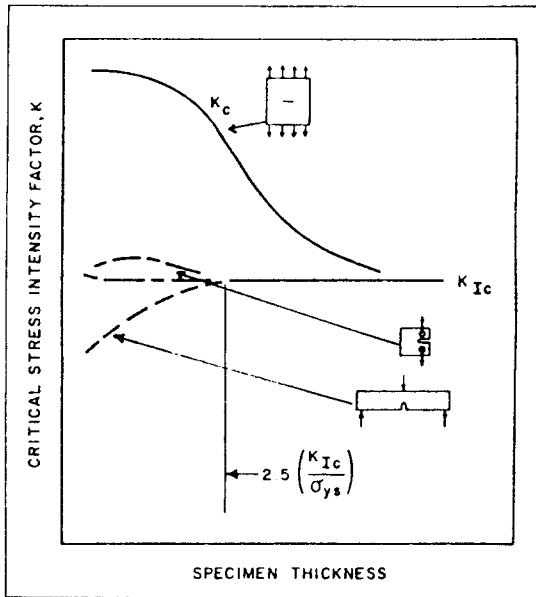


그림 3-1 (a). 시편의 두께 VS. 임계 응력확대계수

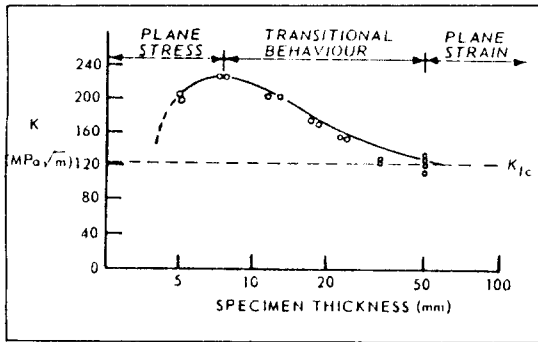


그림 3-1 (b). 고장력 마레이징강의 임계응력확대 계수와 시편 두께와의 관계

계가 어느 임계두께보다 두꺼우면 임계응력확대 계수는 재료의 특성값인 일정한 값에 접근하게 된다.

이 특성값을 파괴인성치 (Plane strain fracture toughness)라 부르며 K_{IC} 라 쓴다. K_{IC} 는 대개의 다른 기계적인 성질들과 마찬가지로 시험온도나 하중속도에 관계된다.

K_{IC} 를 구하는 시험방법, 시편규격 등은 이미 ASTM이나 JIS, BS, DIN에는 규격화되어 있다. 우리나라에도 이미 늦은감이 있으나 서둘

러 KS로 규격화하여 기계재료 및 여러가지 구조물의 재료(유리질 중합체를 포함한 여러가지 복합재료들)의 고급화 및 안전설계, 정밀설계를 할 수 있도록 도움을 주도록 해야 할 것이다.

다음에 ASTM에서 규격화한 K_{IC} 시험방법을 서술한다.

3-2. 파괴인성치, K_{IC} , 시험방법

2장에서 논의한 응력확대계수개념은 순수하게 탄성적인 응답을 하는 재료에 대한 것이다. 그러나 거의 대부분의 재료는 균열이 성장되는 경우 즉 파괴될 때에 균열선단이 순수하게 탄성적으로 응답하지는 않는다. 그러나 균열선단에 발생하는 소성적으로 응답되는 영역(소성영역)의 크기가 시편의 다른 기하학적인 치수에 비해 무시할 정도로 작을 때는 작은 소성영역 주의를 둘러싸고 있는 탄성영역이 소성영역에서 일어나는 파괴현상을 지배한다고 생각해도 큰 무리가 없음이 밝혀졌다. 따라서 이런재료 혹은 시편에 대해서는 선형탄성파괴역학의 이론을 적용하여 불안정한 균열성장에 대한 저항력 즉 파괴인성치를 규정해 오고 있는 것이다. ASTM의 파괴분과위원회인 E-24에서는 여러가지 시편의 모양과 시험방법에 대해서 계속 논의해오고 있는 실정인데 최근 1984년에 금속재료의 파괴인성치 (Plane - Strain Fracture Toughness), K_{IC} 를 시험하는 표준규격을 최신판 (Version)으로 발표하였는데 여기에 소개하기로 한다.

3-2-1. 표준 K_{IC} 시편 형상

ASTM에서 추천하는 시편의 형상을 그림(3-2)와 (3-3)에 나타내었다. 미국의 여러 연구소의 실험실에 위의 시험편 형상을 사용하여 얻은 실험결과를 수집하여 본 결과 15% 이내의 산포를 나타내었다고 보고되고 있다.

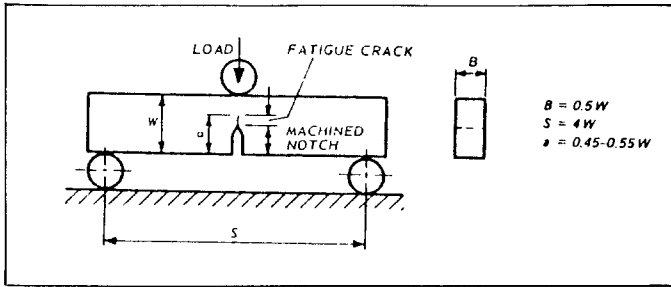


그림 3-2. 3점 굽힘시험

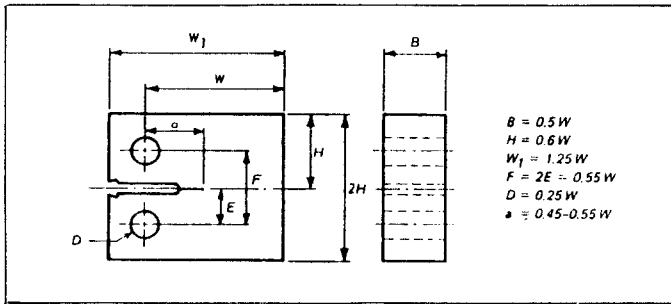


그림 3-3. 소형인장시험편

3점굽힘시험편 및 소형인장시험편(CT 시험편)의 응력확대계수, K_I 은 아래와 같다.

$$K_I = \frac{\text{LOAD} \cdot S}{BW^{\frac{3}{2}}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

여기서

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3\left(\frac{a}{W}\right)^{\frac{1}{2}} [1.99 - \frac{a}{W} (1 - \frac{a}{W}) (2.15 - 3.93 \frac{a}{W}) + 2.7\left(\frac{a}{W}\right)^2]}{2(1 + 2\frac{a}{W})(1 - \frac{a}{W})^{\frac{3}{2}}}$$

..... (3.1) (3점굽힘시험편)

$$K_I = \frac{\text{LOAD}}{BW^{\frac{3}{2}}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

여기서

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{(2 + \frac{a}{W}) [0.886 + 4.64\left(\frac{a}{W}\right) - 13.32\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72\left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.6\left(\frac{a}{W}\right)^4]}{(1 - \frac{a}{W})^{\frac{3}{2}}}$$

..... (3.2) 소형인장시험편

시험편의 균열선단은 실제 균열의 기하학적인 형상(체적이 없이 몹시 날카롭게 뾰족한 형상)을 취해야 하므로 미리 기계적으로 가공한 노치 선단에 피로하중을 주어서 실제 균열선단을 만들어야 한다. ASTM에 몇가지 방법들을 예시하였는데 그중에서도 피로하중으로 대칭균열선단 제작이 용이하기 때문에 소위 쉐브론-노치형이 가장 많이 쓰이며 그림(3-4)에 그 형상을 나타내었다.

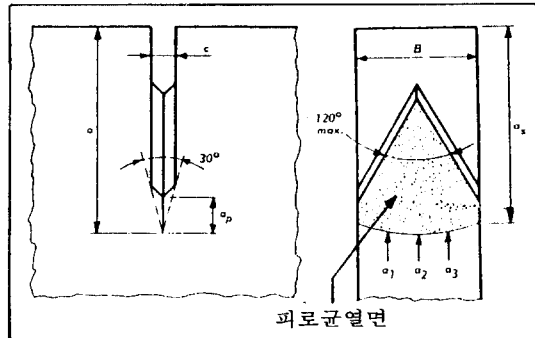


그림 3-4. 쉐브론 노치(Chevron-Notch)와 피로균열면

(Chevron 석유회사의 상표모양과 비슷하여 불린 이름이다)

3-2-2. 시편에 대한 요구사항

파괴인성치, K_{IC} 로서 파괴현상을 검토하고, 규명하여야 하기 때문에 가능한한 정확한 K_{IC} 값을 결정해야 한다. 정확한 K_{IC} 값을 결정하기 위하여 아래와 같이 여러가지 실험적인 시도후에 시편에 대한 요구사항들을 규정하였다.

첫째로, 그림(3-4)에서의 피로균열선단 곳곳에서의 균열길이 a_1, a_2, a_3 는 a 의 95% 이 내이어야 하며 또 표면 균열길이 a_s 는 a 의 90% 이내이어야 한다고 규정하고 있다. (여기서 $a = (a_1 + a_2 + a_3) / 3$) 이다.

둘째로 시편의 크기에 대하여서도 규정이 있다. 즉 균열선단에서 발생하는 소성구역의 크기는 응력확대계수에 영향을 미치므로 시편의 대표적인 치수인 균열의 길이, a , 시편 두께, B , 시편의 균열되지 않는 부분의 폭, $W-a$, 는 소성구역의 크기보다는 충분히 크게 제작하여야 한다는 것이다. 소성구역은 K_{IC} 값과 σ_{ys} 의 값 즉 $(K_{IC} / \sigma_{ys})^2$ 에 비례하므로 많은 실험적인 시도를 거친후 공칭파괴인성치를 결정하기 위하여 아래의 조건을 만족해야 한다고 규정하고 있다.

$$a \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \dots\dots\dots (3.3)$$

$$B \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \dots\dots\dots (3.4)$$

$$W \geq 5.0 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \dots\dots\dots (3.5)$$

여기서 σ_{ys} 는 재료의 항복응력이다.

어떤재료의 파괴인성치를 시험하기 전에 a , B 및 W 를 즉 시편의 크기를 어렵잡아 산정할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 K_{IC} 의 어렵값을 추정해야 하는데 아래와 같은 방법을 사용할 수도 있다.

① 시험할려는 재료와 유사한 재료의 K_{IC} 값을 알고 있으면 이 K_{IC} 값보다 과대평가된 K_{IC} 값을 추정하는 방법이다.

② 살피충격시험값과 K_{IC} 사이의 경험적인 상호관계로 K_{IC} 값을 추정하는 방법

③ 가능한한 두꺼운 시편을 사용하는 방법

④ 고강도 재료에 대해서는 (σ_{ys}/E) 의 비를 보고 a 와 B 의 최소값을 결정하는 방법이다. ASTM에서 발표한 한에는 다음과 같다(여기서

E : 탄성계수).

σ_{ys}/E	minimum values of a and B (mm)
0.0050-0.0057	75.0
0.0057-0.0062	63.0
0.0062-0.0065	50.0
0.0065-0.0068	44.0
0.0068-0.0071	38.0
0.0071-0.0075	32.0
0.0075-0.80	25.0
0.0080-0.0085	20.0
0.0085-0.0100	12.5
≥ 0.0100	6.5

3-2-3

① 시편의 주요한 치수를 결정한다.

즉 a, B, W 등

② 시편의 형상을 결정하고 도면을 그린다.

③ 시편제작

④ 기계가공한 노치선단에 피로하중에 의한 피로균열선단 형상

⑤ 시험하기 위한 도구들 준비 (Test Jig 및 균열개구변위 측정을 위한 클립-게이지 등)

⑥ 시험

⑦ 하중-변위곡선 해석

⑧ K_{IC} 값 계산

⑨ K_{IC} 값의 타당성 검토

순서 ④에서의 피로하중의 범위는 최대피로하중에 의한 응력확대계수가 나중에 결정될 K_{IC} 값의 60% 이상이 되지 않도록 해야한다. 순서 ⑦에서 균열개구변위 (Crack mouth opening displacement) 를 하중과 함께 기록계에 기록해야 하는데 이 균열개구변위는 그림(3-5)와

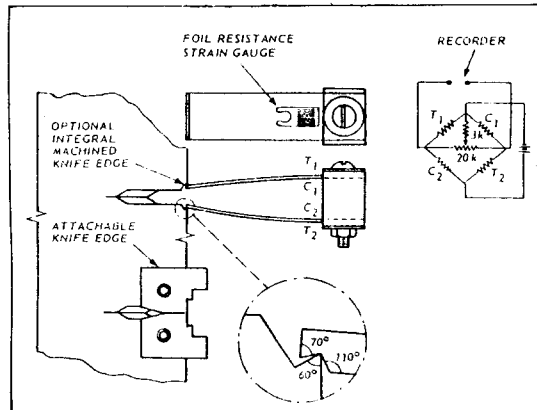


그림 3-5. 균열개구변위 측정을 위한 클립-게이지의 취부.

같은 클립-게이지를 균열어구에 취부하여 측정한다.

실제 시험할 때 주의해야 할 사항들 중의 하나는 하중속도인데 응력확대계수의 증가율이 0.55 ~ 2.75 Mpa√mm / sec 되도록 하여 정적인 하중조건이 되도록 해야 한다. 시험후 즉 시편이 파단된 후 K_{IC} 계산에 필요한 치수들을 측정하고 a_1, a_2, a_3 및 a_s 도 측정하도록 한다.

3-2-4. 하중-변위 곡선의 해석과 K_{IC} 값의 결정

보통 종축에 하중, 횡축에 변위를 취하여 하중-변위 곡선이 X-Y 기록계에 도시되도록 하며 초기 경사가 0.7 ~ 1.5 사이에 있어야 한다 하중-변위 곡선상에서 하중이 더이상 증가하지 않을 때까지 하중을 가해주어야 한다. 재료의 특성에 따라서 하중-변위 곡선의 모양에는 그림 3-6 과 같은 세가지 대표적인 형태로 나타난다.

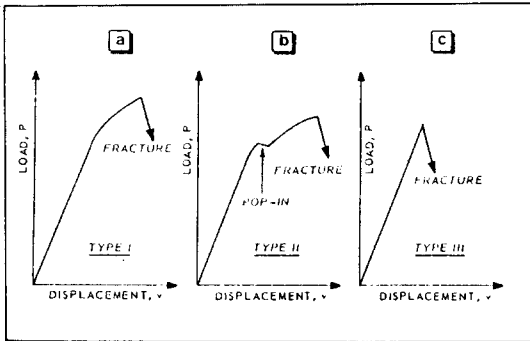


그림 3-6. 파괴인성치 시험에 나타나는 세가지 대표적인 형태의 하중-변위곡선

그림 3-6 (a) 는 균열선단이 전파되기 얼마전에는 하중과 변위관계가 비선형을 나타내는 경우이며 그림 3-6 (b) 는 균열이 어느정도 전파하여 갑자기 정지하는 소위 “pop-in” 현상을 나타내는 경우이며 그림 3-6 (c) 는 거의 완전한 탄성인 재료에 나타내는 하중-변위곡선이다. 하중-변위관계가 비선형인 것은 균열선단에서의 소성변형에 의한 영향이며 불안정한 균열전파 전에 아주 천천히 균열선단이 안정하게

전파하였다는 것을 말해준다.

여기에서 문제로 대두되는 것은 K_{IC} 값을 결정할 때 응력확대계수를 구하는 식 (3.1) (3.2) 에 대입해야 할 하중값 (P_Q) 를 어떻게 결정하는 것이다. ASTM에서는 P_Q 를 많은 실험과 논의를 거친후에 그림 (3-7) 과 같이 결정하기로 규정하고 있다.

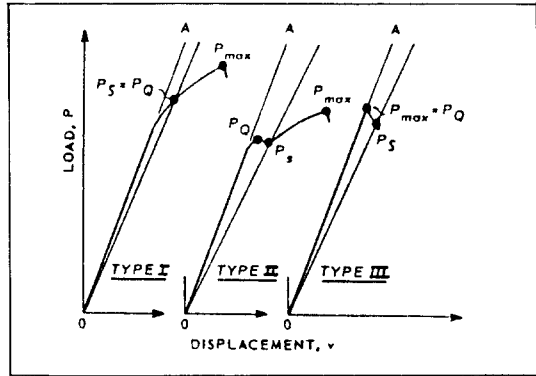


그림 3-7. 파괴인성치를 계산하기 위한 하중값을 결정하는 방법

$$a \geq 2.5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_{ys}} \right)^2$$

$$B \geq 2.5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_{ys}} \right)^2$$

$$W \geq 5.0 \left(\frac{K_Q}{\sigma_{ys}} \right)^2$$

즉 실험으로 얻은 하중-변위 곡선의 직선 부분의 기울기보다 5% 작은 기울기를 갖는 직선과 만나는 하중을 P_5 라 할 때 그림 (3-7) 의 타이프 I 과 같이 P_5 이전의 하중-변위곡선상의 하중들이 모두 P_5 보다 작을 때는 P_5 가 P_Q 이다. 타이프 II, III 과 같이 P_5 이전의 하중-변위곡선상의 하중 가운데 P_5 보다 큰 하중이 있을 때는 이 하중을 P_Q 로 취한다. 이들 P_Q 를 사용하여 구한 K_Q 값이 아래의 조건들을 만족하면 이 K_Q 를 K_{IC} 값으로 간주하는 것이다.

만약 이 조건들이 만족되지 않으면 시험편의 치수들 변경하여 다시 시험을 해야한다. 그림 (3-7) 에서 P_{max} / P_Q 는 1.1 보다 작아야 되

□ 講 座

는데 이 값이 1.1 보다 큰 경우는 균열선단에 발생하는 소성영역이 비교적 크기 때문에 발생하는 안정균열전파 거리가 비교적 크다는 의미이

므로 순수한 선형탄성 파괴역학적인 개념으로 파괴인성치를 결정할 수 없는 경우이다.

(다음호에 계속)
