

결함 및 구조물의 안전성에 있어서 비파괴평가(II)

- 결함에 대한 역학 -

Nondestructive Evaluation on Safety Assurance of Structures and Defects(II)

- Mechanics of defects -

남기우

K. W. Nam

6. 허용응력

결함검출은 재료를 파괴하여 파괴면을 관찰하는 파괴시험과, 파괴하지 않고 비파괴적으로 검출하는 방법으로 나눌 수 있다. 파괴시험은 일반적으로 재료시험이라 부르고 각종의 시험이 실시되고 있으며, 재료강도에 관계가 있는 탄성계수, 항복응력, 인장응력, 피로한도 그리고 충격치 등 재료고유의 특성이 얻어진다. 또 파괴면을 관찰함으로써 각종의 결함을 관찰하는 것이 가능하다. 그러나 실제의 제품에서는 파괴하기 전에 결함을 검출해야 한다. 여기에 비파괴 평가법이 등장한 유래이다. 즉 부품, 구조물에 손상을 주지 않고 내부의 결함을 검출하는 것이 비파괴평가법이다.

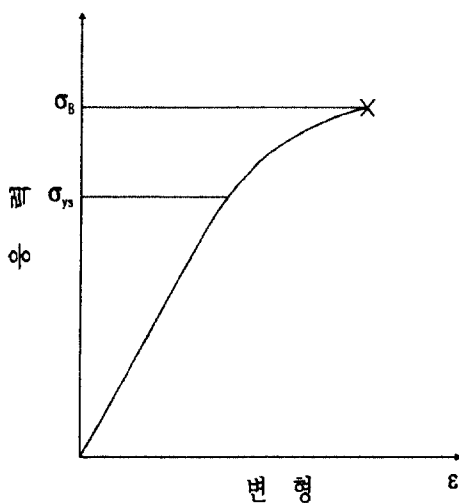


Fig. 3 평활재의 응력-변형의 관계

Fig. 3에 평활재의 인장시험에 있어서 응력-변형률의 관계를 보인다. 이것은 강의 예로, 응력 σ_{ys} 까지는 탄성변형, 그 후 소성변형을 하고 σ_B 의 인장응력에서 파단한다. 응력-변형률관계의 최초의 기울기에서 탄성계수 E 가 얻어진다. 이와 같은 시험에서 얻어지는 E, σ_{ys}, σ_B 등이 강도특성을 나타내는 기본적인 재료특성치이다. 이 외에 반복응력이 가해진 피로파괴에 있어서 피로한의 강도 σ_{Wk} 고온에 있어서 크리프강도 등이 중요한 재료특성치라 할 수 있다.

기계, 구조물 등의 치수를 결정할 경우에, 그것들이 사용기간중에 변형, 파괴하지 않도록 설계하여야 한다. 변형 혹은 파괴하는 원인은 응력이 존재하기 때문에 사용응력을 설정할 경우, 하중의 상태와 사용재료의 강도와 성질을 충분히 알고 있을 필요가 있다.

재료는 작용응력이 탄성한도 이하라고 하여도 안전하다고 단언할 수 없다. 그것은 응력 작용의 방법에 의하여 안전한 응력값이 변화기 때문이다. 이것을 고려하여 부하하여도 지장이 없는 응력으로 허용응력(σ_a)을 사용하고 있다. 여기서 허용응력이란 기기, 구조물이 파괴하지 않도록 재료에 부하하여도 지장이 없는 최대의 응력을 말한다. 따라서 허용응력은 앞에서 논한 것과 같이 여러 가지 인자를 고려하여 결정하여야 하는데, 주요 인자가 인장강도, 항복점 또는 내력($\sigma_{0.2}$) 및 피로 한도이다. 일반적으로 이들을 기준강도라고 부르며, 기기·구조물의 설계에 극히 중요한 수치이다. 이들 기준강도와 허용응력과의 비를 안전율(safety factor) S_f 라고 부르며, 기기, 구조물의 강도설계상

접수일 : 2000년 4월 18일
 남기우 : 부경대학교 재료공학부

에서 안전성 목표로 하고 있다. 안전율은 허용응력에 대한 기준강도의 비로 나타내어 진다.

그리고, 앞에서 논했듯이 기준강도를 무엇으로 할 것인가에 의하여 안전율의 값은 차이가 있다. 즉, 기준강도를 인장강도로 할 경우(이것이 일반적이다)의 안전율은 다음 식으로 주어진다.

$$S_f = \sigma_B / \sigma_a \quad (1)$$

기준강도로써는 항복점 혹은 내력과 피로한도를 사용하는 것도 가능하다.

예를 들면, 일반구조용압연강재를 보자. 일반구조용압연강재는 인장강도 $\sigma_B = 402 \text{N/mm}^2$, 항복점 $\sigma_S = 235 \text{N/mm}^2$ 정도이다. 지금, σ_B 를 기준강도로 하고, 그때의 안전율을 5로 설계하고자 하면 허용응력은 80N/mm^2 이 된다. 만일 기준강도를 σ_S 로 하면, 안전율을 3으로 해도 허용응력은 같은 80N/mm^2 가 된다. 어느 방법을 취하는가는 설계구상에 의해 다르다. 현재, 일반적으로 인장강도의 1/3 혹은 항복점의 1/2라는 수치가 허용응력으로 자주 사용되고 있다.

또, 피로한도 σ_W 는 인장강도 σ_B 와 밀접한 관계가 있다. 탄소강 및 구조용 합금강에 있어서는 회전(평면)굽힘피로한도 $\sigma_W \approx 0.5 \sigma_B$ 와 같은 관계가 있다.

7. 응력집중

앞절에 있어서 논한 재료의 강도는 어느 경우도 재료 중에 결함이 존재하지 않는 경우이다. 그러나 결함이 존재할 경우에는 일반적으로 재료의 강도는 저하한다. 이것은 결함에 의해 하중을 받는 단면적이 감소하고, 결함의 존재를 고려하지 않고 구한 응력(공칭응력이라 하고 σ_n 으로 나타냄)보다 큰 응력이 작용한다. 그리고 결함부에 있어서는 응력 집중 현상이 발생하여 결함의 선단에 공칭응력보다 상당히 큰 응력이 생기기 때문이다. 이와 같은 결함은 재료 표면에 있는 경우 또는 내부에 있는 경우에도 노치라 부른다. 일반적으로 노치란 재료의 단면적과 형상이 급변하는 장소를 나타내는 용어로 사용된다.

시험체에 노치가 존재하면, 이 부분에 발생하는 응력은 응력이 단면전체에 일정분포하는 값보다도 크게 된다. 이 현상을 응력집중이라 한다. Fig. 4에 원공을 가진 무한 평판을 종방향으로 인장하였을 때, 원공(직경은 $2a$)근방의 응력분포를 나타낸다. 인장방향과 수직한 원공의 A, A'부에는 최대

응력 σ_{max} 가 생기고, 원공에서 멀어질수록 응력은 급격하게 감소하고 있다. 이 최대응력 σ_{max} 과 공칭응력 σ_n 의 비를 응력집중계수 혹은 형상계수라고 하고, α (혹은 K_t 로 표현)로 나타낸다. 즉, 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$\alpha = \sigma_{max} / \sigma_n \quad (2)$$

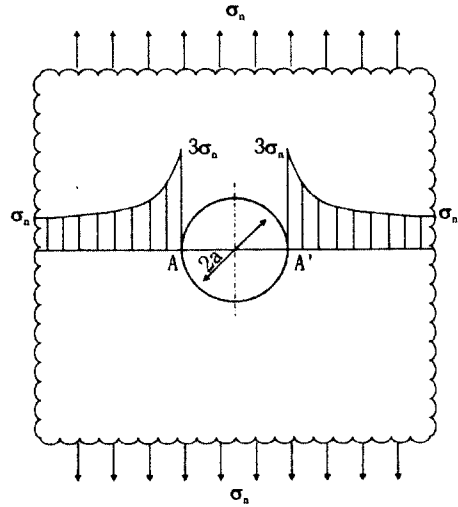


Fig. 4 원공 근방의 응력분포

Fig. 5는 타원형 원공을 가진 무한 평판을 세로로 인장하였을 때, 타원형 원공근방의 응력분포를 보인다. 이때의 응력집중계수 α 는 다음 식으로 주어진다.

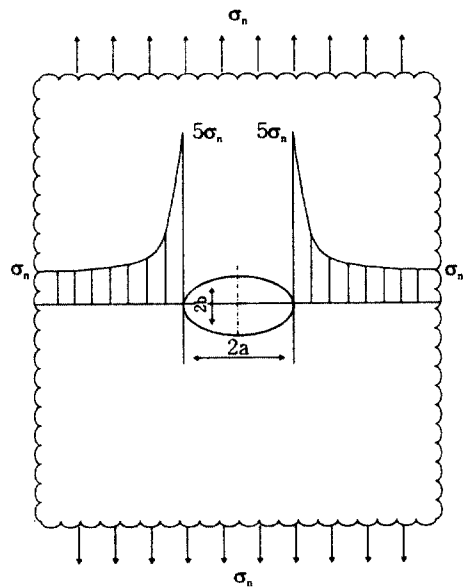


Fig. 5 타원형 원공 근방의 응력분포

$$\alpha = 1 + 2a/b \text{ 혹은}$$

$$\alpha = 1 + 2(a/\rho)^{1/2} \quad (3)$$

여기서 a는 타원형 원공의 장경, b는 타원형 원공의 단경, ρ 는 장경선단의 곡률반경이다. Fig. 5는 $a=2b$ 이므로, 타원형 원공의 A, A'부에서는 $\alpha=5$ 가 된다. Fig. 4에 보인 원공의 경우에는 $a=b$ 이므로 $\alpha=3$ 이 된다. 이와 같이 예리한 노치가 되면, 응력 집중계수는 상당히 크게 되고, 재료는 파괴될 위험성이 크게 된다.

8. 균열에 대한 역학

8.1 결함과 강도-파괴역학의 필요성

위에서 논한 재료특성에는 재료중에 결함이 존재하지 않고, 또한 균일하게 변형한다는 가정이었다. 그러나 실제의 재료에는 미시적으로 불순물 등의 혼입에 의한 결함(결함치수는 $\sim \mu m$), 거시적으로는 선박 등의 용접부에 발생하는 큰 결함(결함치수는 $\sim mm$)을 가지며, 결함을 가지는 재료의 강도 특성이 중요하게 된다.

더욱이 중요한 것은 이와 같은 경우의 강도특성은 결함이 없을 때의 특성에 비례하는 것은 아니라는 것이다. 예를 들면, 평활재의 인장강도 σ_B 가 A강이 B강보다 높다고 하여도, Fig. 6에 나타낸 것과 같이 각각의 재료에 동일 치수의 결함이 존재할 경우, 파괴강도 σ_B 는 B강이 A강보다도 높게 되는 것이 보통이다. 따라서, 인장강도가 큰 재료를 사용하여 충분히 안전한 설계를 하였다고 생각되는 구조물에서도 그 부재에 어떤 원인으로 결함

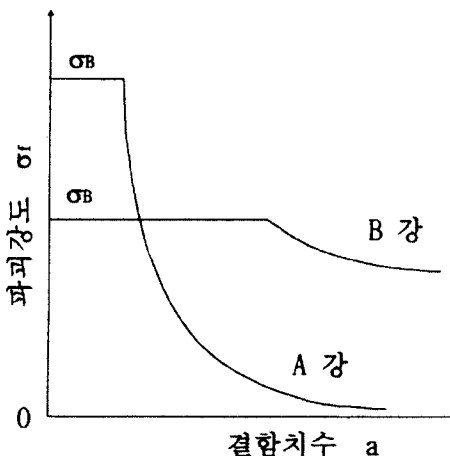


Fig. 6 결함재의 파괴강도

이 존재하기도 하고, 혹은 균열이 발생할 경우, 인장강도가 큰 재료를 사용한 것은 예상과는 달리 구조물은 역으로 파괴하기 쉬워지는 결과가 된다.

8.2 파괴역학이란

위에서 논하였듯이 결함을 포함하는 재료의 역학특성 취급에는 다른 역학적 방법이 필요하다는 것을 알았다. 여기서 탄생한 것이 파괴역학이다. 노치선단반경 ρ 를 가진 타원형 원공 노치 선단에는 앞에서 논한 것과 같이 큰 응력집중이 생긴다. 매우 예리한 노치, 즉, 균열($\rho=0$)을 가지는 물체의 균열선단 응력분포는 Fig. 7에 나타내듯이 무한대의 응력이 된다. 요컨대, ρ 가 작아지면 작아질수록 응력집중이 크게 되고, $\rho \rightarrow 0$ 에서는 식(3)에서 응력은 무한대가 된다. 외력이 작아도 균열은 확대하고 성장할 가능성이 있다.

요약하면, 파괴역학이란, 균열로 대표되는 결함을 포함한 재료의 강도학으로, (1)결함을 가진 재료의 파괴응력, (2)어떤 설계응력하에서 허용되는 결함의 최대치수, (3)결함이 피로, 크리프, 응력부식균열등에 의하여 시간과 함께 성장할 경우, 결함이 최종파괴를 일으키는 한계치수에 달할 때까지의 수명 등을 취급하는 것이 가능하다.

그리고, 이들 문제를 해결하기 위해서는 종래의 항복응력, 인장응력등과는 다른 균열의 상태를 나타내는 파라미터인 응력확대계수(stress intensity factor)가 제안되어 있다.

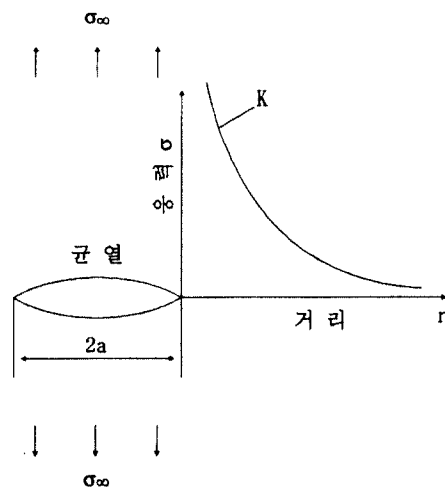


Fig. 7 균열근방의 응력분포

8.3 응력확대계수

균열재에는 Fig. 7에 나타낸 것같이 응력집중이 생긴다. 그 응력 σ_s 는 균열선단근방에서 거리r의

함수로써 근사적으로 다음 식으로 주어진다.

$$\sigma_y = K / (2\pi r)^{1/2} \quad (4)$$

K 는 부재나 균열의 형상, 치수에 의하여 변하며, 응력확대계수라고 부르고, 균열선단 응력장의 강도를 나타낸다. 여기서 주의할 것은 r 이 큰 곳에서는 위의 식은 성립하지 않고, 균열근방에 있어서만 성립하는 것으로 이것이 파괴역학의 적용의 범위를 나타내는 것이다. 일반적으로 Fig. 7에 나타낸 것 같은 균열 길이 $2a$ 를 가지는 무한판에서 부하응력이 σ 일 때의 응력확대계수 K 는

$$K = \sigma (\pi a)^{1/2} \quad (5)$$

로 정의된다. K 의 단위는 $Pa\sqrt{m}$ 혹은 $(kgf/mm^{3/2})$ 이다.

식(5)에서 결합, 특히 균열을 가지는 재료의 역학적 특성을 나타내는 응력확대계수 K 가 정의되었다. 또 형상이 다른 경우라도 같은 형식의 식으로 나타내는 것이 가능하다. 이 식이 의미하는 것은 K 가 응력과 결합 크기의 두 값의 관계로 부하응력 σ 가 같아도 균열의 크기 a 가 클수록 K 가 크게 되는 것을 나타낸다. 즉, K 로 대표되는 파괴역학은 앞에서 논한 것과 같이 균열재의 강도를 취급하는 학문이라고 할 수 있다. 이와 같은 파괴역학은 선형파괴역학이라 불리어 지고 있다. 재료역학과 파괴역학의 공통점과 상이점은, 모두 역학적 파라미터에 의해 구조부재의 강도를 다루지만, 재료역학은 결합이 없는 재료를 대상으로 하는 것에 대하여 파괴역학은 결합을 가지는 재료를 다룬다는 것이다.

9. 재료의 강도, 인성

9.1 파괴인성 K_{IC}

결합이 없는 재료의 항복응력을 σ_{ys} , 파단응력을 σ_B 라 하면, 부하응력 σ 가 σ_{ys} , σ_B 에 달하면 항복 및 파단이 생긴다. 그러나 결합을 가지는 재료에서는 응력확대계수 K 가 어떤 일정한 임계치 K_C 에 도달하면 파괴가 생긴다. 이 관계를 간단히 나타낸 것이 Fig. 8이다. 즉, 파괴의 조건은

$$\begin{aligned} \sigma &\geq \sigma_B \text{ (무결합재)}, \\ K &\geq K_C \text{ (결합재)} \end{aligned} \quad (6)$$

가 된다. $K = \sigma (\pi a)^{1/2}$ 에 의하여

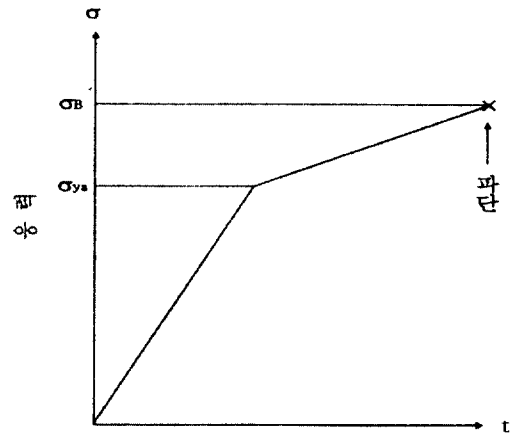
$$\sigma (\pi a)^{1/2} \geq K_C \quad (7)$$

가 파괴의 조건이 되고, 응력 또는 균열에 따라서 파괴가 결정된다.

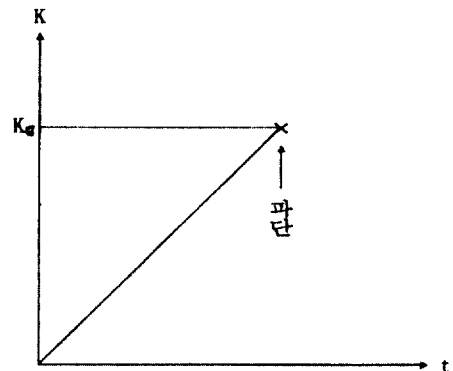
재료고유의 값인 이 정수 K_C 를 파괴인성이라 부른다. 이것은 물리적으로는 균열이 진전을 개시할 때의 저항의 크기이다. 즉 K_C 가 크면, 균열이 진전하지 않는 인성이 높은 강인한 재료라고 말할 수 있다. 또 Fig. 9와 같이 인장개구형 파괴(모드 I이라 부른다)의 경우, K_C 의 최소치는 평면 변형을 파괴인성 K_{IC} 라는 재료고유의 정수가 된다.

9.2 K_{IC} 와 결합치수의 크기

Table 1에 각 재료의 평면 변형을 파괴인성 K_{IC} 의 값을 나타내었다. 금속에 비하여 첨단재료로 개발이 기대되는 세라믹은 K_{IC} 값이 낮다.



(a) 인장 시험 (무결합재)



(b) 파괴역학에 기초한 실험 (결합을 포함한 재료)

Fig. 8 강도와 파괴인성

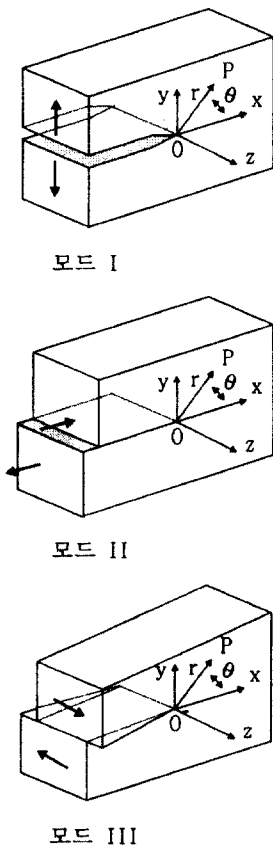


Fig. 9 균열선단의 변형양식

고장력강과 실리콘 나이트라이드에 동일한 응력 $\sigma = 500\text{MPa}$ 이 가해진 경우, 재료가 파괴하지 않는 허용결함의 크기를 구하면, 고장력강에서는 2mm, 세라믹에서는 $100\mu\text{m}$ 가 된다. 그러므로, 파괴의 기점이 되는 결함을 검출할 경우 세라믹에서는 급속에 비하여 한층 작은 결함을 검출하여야 한다. 이것은 신소재에 있어서 비파괴평가의 중요성을 의미한다. 파괴역학에 있어서 파괴인성이란 재료 내에 존재하는 균열에서 새로이 균열이 진전하는 저항력을 의미한다. 또 앞에서 논한 것과 같이 재료

Table 1 각종 재료의 파괴인성

재 료	$K_{IC} (MPa\sqrt{m})$
알루미나(세라믹스)	4.0
실리콘 나이트라이드(세라믹스)	4.8
지르코니아(세라믹스)	6.0
실리콘 카바이드(세라믹스)	3.0
티타늄합금	50
알루미늄합금	35
마르에이징강	90
주철	20

역학에 있어서 인장응력 σ_B 와 평면 변형을 파괴인성 K_{IC} 의 유사점과 상이점은 무결합재에서는 부하응력 σ 가 인장응력 σ_B 에 달하면 파괴하는 것에 대하여 결함재에서는 응력확대계수 K 가 K_{IC} 에 달하면 파괴한다.

9.3 균열진전

이상은 취성파괴(불안정파괴)에 관해 다루었으나, 응력부식균열과 피로파괴에 있어서는 불안정파괴에 이르기 전에 시간 의존형의 안정 균열성장 (slow crack growth)이 존재한다. 즉, Fig. 10에 나타낸 것과 같이 K_{ISCC} , ΔK_{th} 는 피로균열성장의 개시조건이고, K_C 와 같이 불안정파괴가 발생하는 조건과 달리 최종불안정파괴에 이르기까지 상당한 균열 성장이 있고, 균열이 존재하여도 ΔT 사이의 재료수명이 보증된다. 여기서 K_{ISCC} 는 응력부식균열의 하한계 응력확대계수, ΔK_{th} 는 균열진전의 하한계 ΔK 를 나타낸다. 또는 ΔK 는 가해진 최대와 최소의 응력확대계수의 차를 나타낸다. 그러므로 이와 같은 시간의존형의 파괴에 있어서 앞의 K_C 에 대응하는 한계 균열 a_c 보다 작은 결함의 검출이 가능하면, 각 K 값으로 부터 부재의 잔여수명 평가가 가능하다.

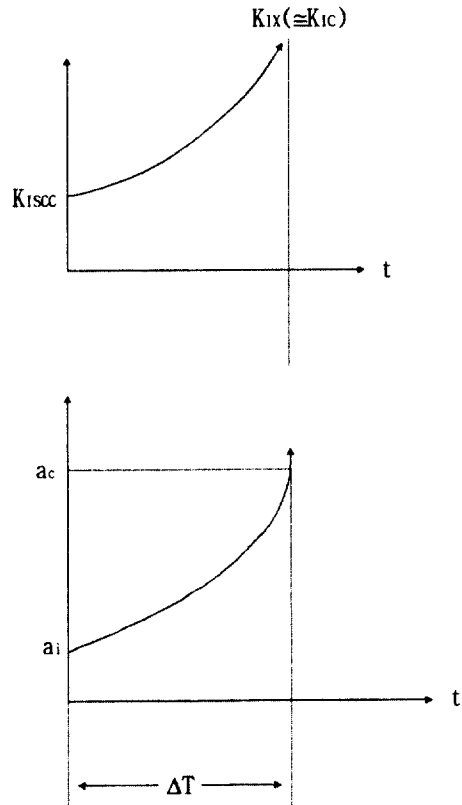


Fig. 10 시간 의존형의 균열진전

세라믹의 안정균열성장속도는 금속과 같은 형태의 다음의 관계식으로 표시된다.

$$da/dt \propto K^n \quad (8)$$

그렇지만 금속에서는 $n=2\sim5$ 의 값을 갖지만, 세라믹에서는 $n=10\sim40$ 의 값을 가진다. 그리고, 균열성장이 시작되면 가속되어 최종파괴에 이르는 것이 용이하다. 예를 들어 최종파단에 이르기까지 파단 수명의 예측을 하기에는 a_c 의 $1/3\sim1/2$ 크기의 균열을 검출할 필요가 있고, 수명예측에는 $20\sim200\mu\text{m}$ 의 결함 검출이 필요하게 된다.

9.4 高靱化기구

파괴인성이 높은 재료를 설계, 제조하는 것이 취성극복의 가장 지름길이라 말할 수 있다. 그렇지만, 공유결합, 이온결합으로 된 세라믹은 본질적으로 변형능력이 없어서, 인성 향상은 바라기 어렵다. 그러나 소결조건을 변화시킴으로써 생성하는 입계에서의 잔류응력의 효과에 의하여 인성을 향상시키는 경우가 있다. 한편, 균열진전에 따른 파괴저항은 균열선단의 각각의 현상에 의하여 균열진전에 따라서 향상하는 경우가 있다.

이와 같은 인성의 향상은 파괴에너지를 상승시키며, 조직 균일과 미세화를 통하여 균열선단의 응력집중을 완화함으로써 달성된다. 응력 집중 완화 기구로써는

- 1) 소성변형, 쌍정변형
 - 2) 상변태
 - 3) 미시균열
 - 4) 균열의 분지
 - 5) 복합재료화에 의한 균열의 정체
- 등이 고려된다. 이들을 Fig. 11에 간단하게 나타낸다.

지르코니아의 인성 향상은 상변태를 이용한 것이지만, 세라믹은 소성변형이 발생하기 어려우므

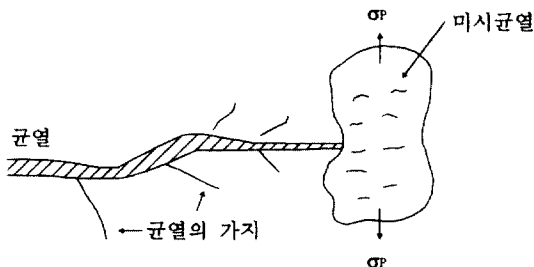


Fig. 11 균열선단의 고인화기구

로, 보이드와 같은 미소결합 혹은 이상계면에 있어서 균열의 미세한 분열 등에 의하여 파괴저항이 상승한 것이라고 말할 수 있다.

이와 같은 결함, 특히 부하중에 생긴 미소결합은 균열 선단의 응력집중을 완화하고, 인성향상에 유익한 결함이라 할 수 있다. 그러므로 최종파괴에 연결되는 유해한 결함과 구별해서 생각할 필요가 있고, 결함 즉 파단이라 생각할 수 없다.

균열선단에서 미소균열이 생성하는 영역을 process zone이라 한다. 여기서 취급하는 결함의 크기는 최종파단으로 이어지는 것보다 작고, 미크론 단위의 결함을 검출하는 기술은 제조기술에 연결되는 중요한 과제라고 말할 수 있다.

10. 강도의 통계적 취급

세라믹과 같이 취성재료에 있어서는 그 강도의 분산은 와이블계수(Weibull modulus) m 을 사용해서 표현한다. 응력과 그 응력 σ 이하에서 파괴하는 확률 P 는

$$P = 1 - \exp[-(\sigma/\sigma_0)^m] \quad (9)$$

로 주어지고, 와이블계수 m 이 클수록 분산이 작은 재료라 할 수 있다. 또 m 은 형상계수, σ_0 은 척도계수라고도 불려지고 있다. 당연히 부품의 체적이 크면 강도는 저하한다. 그것을 Fig. 12에 나타낸다.

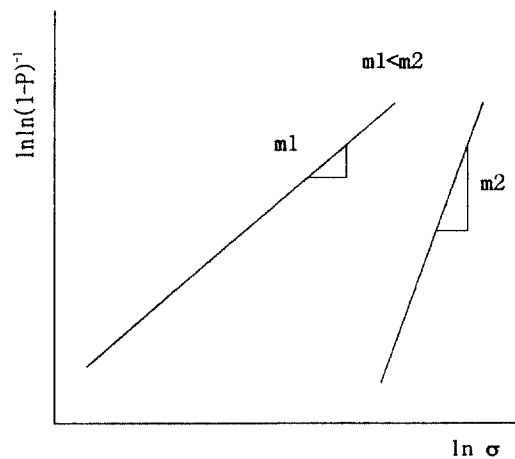


Fig. 12 와이블계수의 강도 분산평가

(다음호에 계속)