

파괴역학을 이용한 기계요소 및 구조물 설계방안 (4)



Application of Fracture Mechanics to Design of Machine and Structure Element

仁荷大學校 工大 機械工學科
李 億 燮

4-3-1. 피로하중을 받는 경우

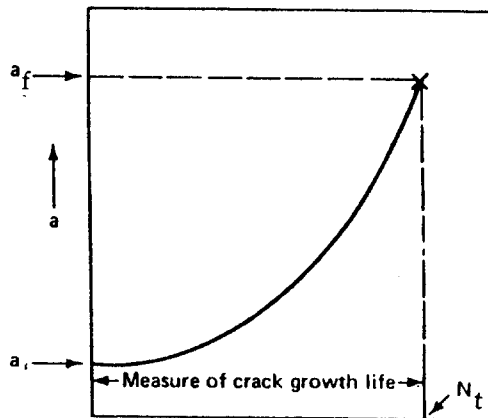
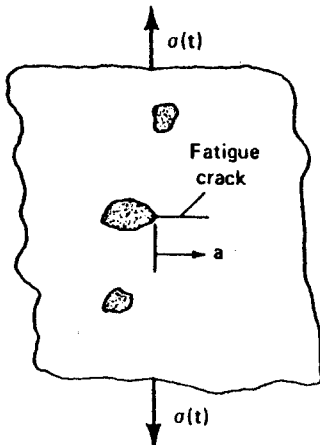
부재가 피로하중을 받을 경우에는 피로하중의 변동과 균열의 성장에 인한 균열크기의 변동때문에 각 순간에서의 응력확대계수가 변화하게 된다. 피로균열성장을 모델링할때 응력확대계수를 이용할 수 있는 타당성은 균열성장속도가 매우 느리므로 순간순간에서의 형상계수의 변화가 거의 무시할 수 있다는 사실에 근거하고 있다. 즉 균열의 길이는 순간순간에 일정하다고 생각하는 즉 준-정적인 문제로 귀착되며, 이 경우에는 순간순간에 대응하는 단지 변동

하는 하중에 대한 응력확대계수의 변동양상을 검토하면 되는 것이다.

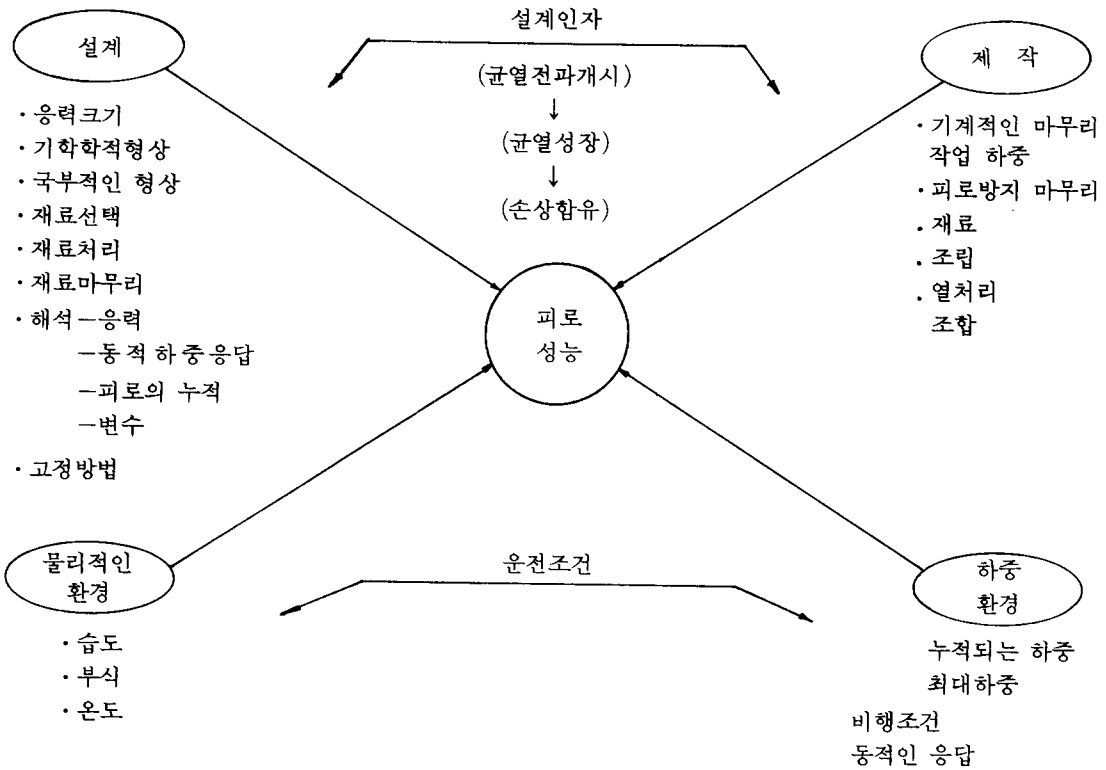
지금 균열이 존재하는 아래와 같은 구성품이 있다고 가정하고, 이때의 균열성장의 양상이 아래와 같다고 하자.

변위-제어하중조건이 아닌 대부분의 구조물의 균열의 거동이 아래 그림과 대동소이 할 것이다. 균열의 길이가 길면 균열전파속도는 빠르다. 피로균열의 초기전파 및 피로수명에 중요한 영향을 미치는 인자들을 아래에 정리하였다.

파괴역학적인 방법으로 설계를 할려면 균열선단



하중사이클 수



의 거동에 초점을 맞추어야 한다. 위에서의 여러가지 조건에 대응하는 피로균열의 성장거동에 대한 많은 실험데이터를 구축해 놓아야 하는 것도 매우 중요한 과제인 것을 알 수 있다. 설계자들이 전형적으로 제기하는 의문은 크게 두가지이다. ① 여러가지 제작과정에서 발생하는 초기결함의 크기는 얼마만 한가? ② 부품의 사용과정에서 이 초기 결함이 점점 커져서 임계균열크기로 발전하며, 예상한 수명범위 내에서 급작스런 파손사고를 발생시킬까?

초기결함의 크기를 정확하게 측정하거나 산정하기가 쉬운일이 아닌 경우가 많이 있다. 이런 경우에는 초기균열크기를 적당하게 가정해야 한다. 기본적인 설계과정은 ①초기균열크기를 가정하고 ②운전하중하에서 초기균열이 성장하는 것을 해석하여 ③비파괴 검사에 의해서 성장된 균열을 검출할 수 있어서 ④급작스런 파손사고가 일어나기 전에 보수작업을 할 수 있도록 한다. ⑤만약 성장된 균열을 검출할 수 없다면 응력을 받고 있는 부재가 파손될 때까

지 균열이 성장하게 될 것이다. 아래에 각 과정에 대해서 더 상세히 논의해 보기로 하자.

4-3-1-1. 초기 결함의 크기

안전설계의 기본이 되는 초기결함의 크기는 다음과 같이 결정될 수 있다.

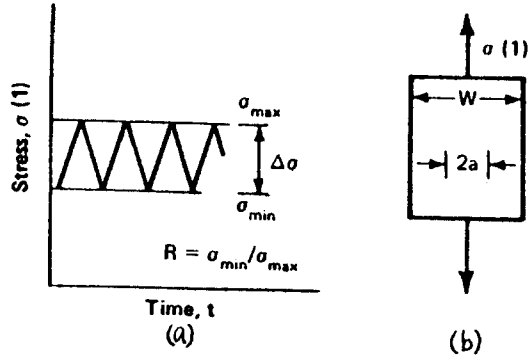
① 비파괴 검사에 의해서 : 검사의 한계나 신뢰성으로부터 초기결함의 크기를 정의할 수 있다. 이 경우에는 특수한 검사방법의 신뢰성을 정의하는 과정들을 명확하게 공표해야 한다.

② 교정시험에 의해서 : 많은 재료들에 대해서 과부하나 과압력을 가하여 초기균열크기를 정의할 수 있다. 재료의 파괴인성치와 교정시험동안 가한 적용응력들에 기초를 두고 파괴역학 방법론을 이용하여 초기균열크기를 결정한다.

③ 피로균열개시에 의해서 : 특수한 검사방법을 사용하는 경우에는(엔진의 회전부분 등), 초기균열

크기를 가정하는 것이 응력의 관점에서 보아서 매우 위험하다고 판단될 때가 있다. 이러한 경우에는 균열이 개시되어 어떤 정해진 크기(보통 1.0mm 혹은 0.04inch)까지 커지는데 요하는 시간을 고려하는 것이다. 일반적인 피로개시와 피로균열 해석방법으로 기계부분품의 전체수명을 예측할 수 있다.

④ 규정에 의해서 : 역사적인 데이터로부터 정해진 공업계의 설계규정이나 정부의 규정에 의한 균열의 크기

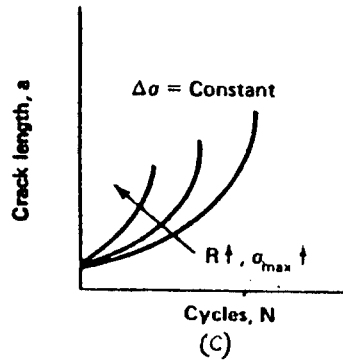


4-3-1-2. 갑작스런 파괴가 시작되는 임계 균열크기

임계균열의 크기도 파괴조건 설계방법에 의해서 설정된다. ①육안으로 검사될 수 있는지, 비파괴검사로부터 검출될 수 있는 균열의 크기나 길이

② 곧 파손될 것이라고 생각되는 균열의 크기나 길이, 이것은 탱크의 누수나정상진동보다 이상한 진동의 양상, 평소보다 많은 처짐량등에서 결정된다.

③ 파괴역학 방법론으로부터 계산가능한 균열의 크기나 길이로서 급작스런 파손이 일어날 임계균열 크기의 결정.

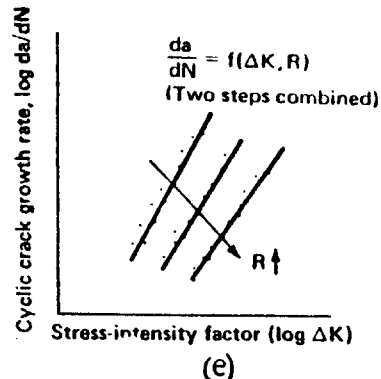
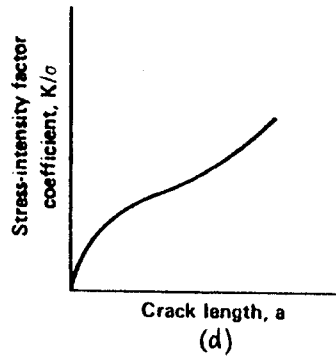


4-3-1-3. 균열성장곡선

운전하중이나 운전환경하에서의 균열 성장 양상이나 균열이 있는 구조물의 수명산정은 파괴역학적인 설계를 행하기 위하여 필요한 정보들이다.

파괴역학 방법론을 사용하지 않는다면 균열성장에 영향을 미치는 모든 기계적인, 구조적인, 환경적인, 재료적인 양상(영향)들을 그대로 재현하여 균열 성장의 거동을 결정해야 한다.

파괴역학 방법론은 소규모의 실험실 시험으로 균열의 거동을 연구함으로써 기계적인, 환경적인, 재료적인 양상을 그대로 재현하여야 하는 번거로움을 없애준다. 따라서 파괴역학 방법론은 구조물에 대한 전달함수(Structural transfer function)를 제공할 것이며 실험실 데이터와 운전수명해석을 관련짓는 새로운 방법을 제시해준다. 아래그림은 고정진폭 하중을 받는 시험편에서 피로균열이 성장하는 양상을 결정하는 과정을 단계별로 표시한 것이다.



□ 講 座

- (a) 일정진폭하중 (b) 실험실에서 사용하는 시편
(c) 균열성장거동(여러가지 경우) (d) 응력확대계수(解) (e) da/dN 을 ΔK 의 함수로 표시하는 과정

시험편의 응력확대계수 범위 (ΔK)는 실험실에서 균열성장거동을 감지하는데 필요한 전달함수를 제공하여 주며 동일한 하중, 환경조건하에서의 구조물에 대한 수명을 예측하는데 실험실에서 얻어진 데이터를 사용할 수 있도록 길을 열어주며, 구조물의 거동을 산정하는데 도움을 준다. 전형적으로 수명예측은 적분과정으로 얻어진다. 즉 앞의 그림에서 나타난 미분과정의 역과정인 것이다.

실제로 ㉑성장을 계산과정 ㉒성장을 피로수명에 적용하는 과정에 연관된 파괴역학 방법론의 정확성을 예시하기 위한 방법으로 적분과정으로 실험실에서 만들어진 균열의 크기와 하중사이클과의 관계를 재현시키는 것이다. 아래그림에 피로수명을 예측하는 일반적인 과정을 도시하였다.

서는 식 (6)과 같이 피로 수명에 대한 식을 유도할 수 있으며 피로수명을 예측하는데 성공적으로 사용되어지고있다. 피로균열진전과 피로수명을 예측하기 위하여 앞의 그림(그림 12)에서와 같은 손상증분 적분모델을 사용하기도 한다. 손상적분모델에서는 초기균열길이, a_i , 와 어떤 중간균열길이 a_k 사이에서 반복법이 적용된다. 따라서 $a_i < a_k < a_f$ 임을 주의하라. 결과적으로 다음과 같은 식을 얻게된다.

$$a_k = a_i + \sum_{j=1}^N \Delta a_j, \dots\dots\dots(8)$$

여기서 N =중간균열길이 a_k 에 대응하는 사이클 수

N 사이클 다음의 사이클 즉 $N+1$ 사이클에 대한 균열길이의 증분은 Δa_{N+1} 이다.

손상적분모델은 균열길이의 증분을 결정하는 해석능력을 제공한다. 균열성장증분 Δa_{N+1} 은 사이클 증분 ΔN 의 함수로 표시하며, 이것을 고정진폭 균열성장률(da/dN)과 같게 놓고, 그다음 이것을 응력확대계수 범위, ΔK , 응력비, R ,의 함수로 표시한다. 즉

$$\Delta a_{N+1} = \frac{da}{dN} \Big|_{N+1} \Delta N = f(\Delta K \Big|_{N+1}, R_{N+1}, \Delta N) \quad (9)$$

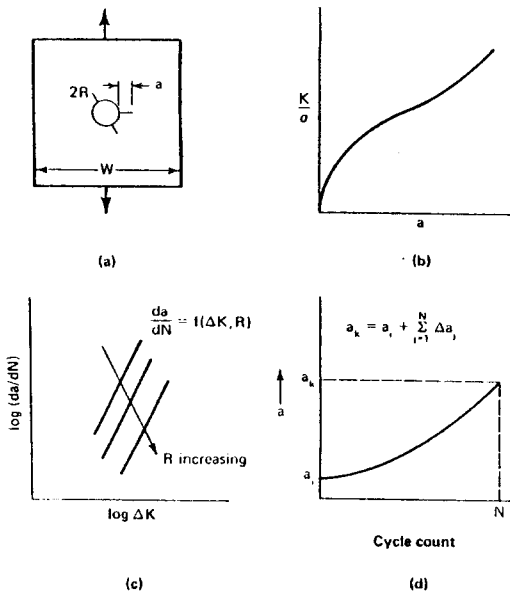
[여기서 $(\frac{da}{dN})_{N+1} = \frac{\Delta a_{N+1}}{\Delta N}$ 으로 놓았다]

식 (9)에서 ΔK 와 R 은 균열길이 a_k 에서 구조물의 기하학적 형상과 관련된 응력확대계수와 하중이력의 $N+1$ 사이클에서의 최대하중과 최소하중값들을 이용하여 결정한다. ΔK 와 R 을 서로 연관시켜 주는 균열성장률 방정식은 손상적분모델과 관련되는 매우 유용한 식이다. 이러한 정보를 포함한 식 가운데 하나가 아래의 식이다.

$$\frac{da}{dN} = \frac{C \Delta K^n}{(1-R)K_c - \Delta K} \dots\dots\dots(10)$$

아래그림에 A533강의 피로균열성장거동을 나타내었다.

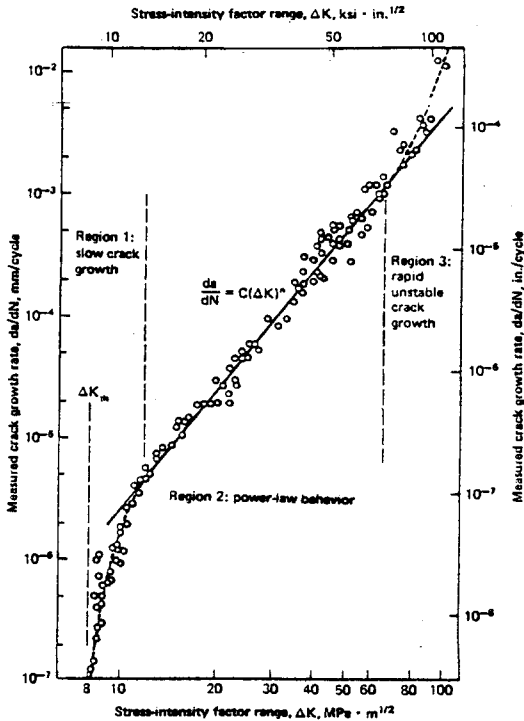
식 (10)은 임계응력확대계수, K_c 의 영향을 포함하고 있으므로 영역3에서의 균열성장거동도 포함하고 있다.



(a) 시편의 형상 (b) 응력 확대계수의 해(解)
(c) 균열성장거동 (d) da/dN 을 적분한 것

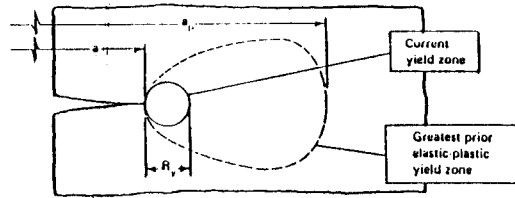
단순한 기하학적형상이나 어떤 운전조건에 대해

(여기서 K_c = 평면응력이나 평면변형을 경우의 임계응력확대계수)



The material was ASTM A533 B-1 steel, with a yield strength of 470 MPa (70 ksi). Test conditions: R = 0.10; ambient room air; 24°C (75°F).

하중진폭이 변화될 때에는 손상적분모델에 고하중-저하중의 상호작용에서 발생하는 “균열진전 둔화현상”을 고려해야 한다. 가장 잘 알려져 있는 개념은 초기의 고하중에 의해서 발생하는 “항복영역”을 고려하여 그다음에 계속되는 균열성장이 지연되는 현상을 규명하여 균열이 고하중에 의해서 발생된 항복영역을 통과하는 양상을 모델하는 것이다. 이 개념에 기초를 둔 두가지 모델을 아래에 소개한다. 하나는 Wheeler 모델로서 아래 그림에 나타내었다. 이 모델에서는 현재의 저하중사이클과 바로 전의 고하중사이클로부터 결정되는 ‘항복 영역’을 이용하여 지연계수, C_p , 을 계산한다. 이렇게 결정된 C_p 를 고정진폭하중에 대한 실험 데이터에서 결정된 균열진전율에 적용시켜서 이전의 고하중의 영향을 고려하도록 하는 것이다.



$$C_p = \left(\frac{R_p}{a_p - a}\right)^m \text{ for } (a + R_p) < a_p$$

$$\text{or}$$

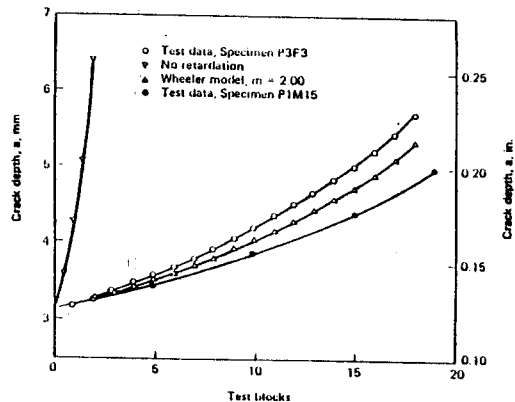
$$C_p = 1 \text{ for } (a + R_p) > a_p$$

위의 개념을 수식으로 정리하면 다음과 같다.

$$a_k = a_i + a_f + \sum_{j=1}^N C_{qj} \left[\frac{da}{dN} \right] \dots\dots\dots(11)$$

Wheeler 모델은 실제의 하중스펙트럼에 의존한다. 즉 스펙트럼지수, m, 에 영향을 받는다(위의 그림 참조).

특수한 재료와 특수한 하중 스펙트럼의 조합에 대해서 유일한 “m”값이 존재하므로 Wheeler 모델은 특수한 재료와 하중에 제한되는 단점이 있다. 다른 모델은 Willenborg 모델이며 과부하다음에 나타나는 균열지연현상을 유효응력개념으로 처리한 것이다. 다음그림에 손상적분모델에 지연효과를 고려한 것과 하지 않은것들과 실험실의 데이터와의 비교를 나타내었다.



윗그림의 실험데이터를 얻기위한 하중 스펙트럼은 군용비행기에 작용되는 하중모양과 같은것을 선택하였다.

4-3-2. 응력부식크래킹, 수소취성 및 부식피로

하중을 받고있는 부재에 발생하는 환경적인 크래킹 현상을 해석하기 위하여 응력부식 크래킹이나 수소취성 데이터를 이용하는 것은 피로하중 데이터를 해석할 때 이용한 반복적인 방법과 동일한 순서를 사용한다. 피로하중의 경우와 다른것은 하중의 변화가 없기 때문에 균열달힘 효과가 없다는 것이다. 따라서 해석은 피로하중의 경우보다 꽤 간단하며 수명을 예측하기 위하여 곧바로 적분할 수 있는 것이다. 부식과 피로가 동시에 작용하며 상호영향을 미치는 경우의 해석은 꽤 복잡하며 아직 명쾌한 학설이나 이해가 형성되지 않고 있는 실정이다.

중강도나 고강도 강이나, 티타늄합금에 대해서는, 응력부식크래킹 (Stress Corrosion Cracking SCC)와 수소취성은 동일한 현상으로 취급된다. 이 경우 수소의 발생기구만은 같지 않다. 여기에서는 SCC 경우의 해석만을 예시하나 수소취성에 대한 해석도 동일한 과정으로 행하면 된다.

예시한 재료는 고강도 알루미늄 합금인 7075-T651이며, 이재료는 특히 짧은 횡방향으로 (Shore transverse orientation) SCC에 대해서 민감하다고 알려져있다. 균열이 성장하고 있는 어느시간 t_i 에서 균열을 예측하는 가장 쉬운방법은 피로하중시의 해석방법과 동일한 해석과정을 취하여

$$a_n = a_i + \sum_{j=1}^{N_{\Delta t}} \Delta a_j \quad \dots \dots \dots (12a)$$

$$a_{n+1} = \frac{da}{dt} \Big|_{t_{n+1}} \Delta t = f(K_{IK}, T, C_o, \Delta t) \quad \dots (12b)$$

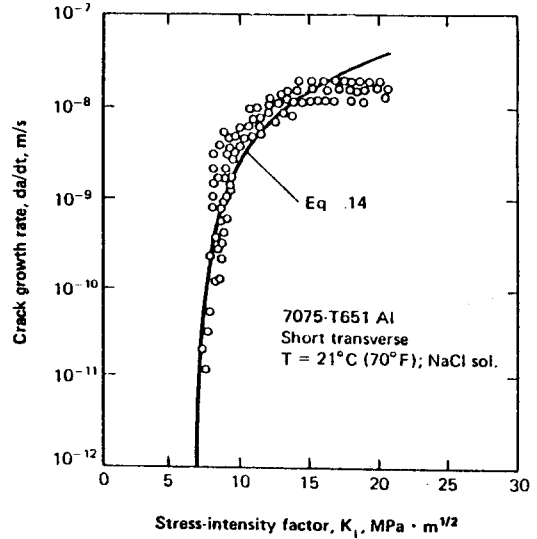
여기서 $N_{\Delta t}$ =중간균열길이, a_n 에 대응하는 증분 시간스텝의 수

Δt =반복법에서의 시간증분

Δa_{k+1} =다음 시간 증분에서 균열진전 증분

따라서 $\frac{da}{dt}$ 는 응력부식크래킹의 속도이며 이것은 증분시작시의 작용응력확대계수, K_{IK} , 주위의 온도, T , 환경정수, C_o ,의 함수이다. 만약 K_I 의 함수표시 ($f(K_I)$)가 간단하고 환경이 변하지 않는다면, 곧바로 적분을 행할 수 있다. 첫번째 단계가 다

음 그림과 같이 균열성장율과 $f(K_I)$ 의 관계를 찾는 것이다.



윗그림은 균열성장율을 AL7075-T651시편에 작용한 응력확대계수의 함수로 표시한 것이다. 시험 환경은 3.5%소금물이었으며 온도는 21°C (70°F)이었다. 윗그림에 대한 해석적인 방정식은 아래와 같으며 피로하중의 경우와 유사하다.

$$\frac{da}{dt} = \alpha(T)(K_I - K_{I,SCC})^{n_0}; \quad \frac{da}{dN} = C(\Delta K - \Delta K_{th})^n \quad (13)$$

여기서 $\alpha(T) = C_o \exp(-\Delta H/RT)$

$K_{I,SCC}$ =대응하는 응력부식크래킹의 threshold values

ΔK_{th} =대응하는 피로크래킹의 threshold values

윗그림의 곡선을 더 정확히 표시하기 위하여 식 (13)을 약간 수정하면

$$\frac{da}{dt} = C_o \left\{ \frac{K_I - K_{I,SCC}}{K_{I,SCC}} \right\}^2 \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right) \quad \dots \dots (14)$$

여기서 $C_o \exp(-\Delta H/RT) \approx 10^{-8} \text{ m/s}$

$(3.9 \times 10^{-7} \text{ in/s})(\text{Al 7075-T 651})$

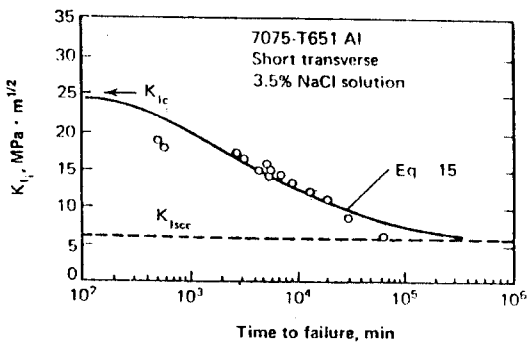
$K_{I,SCC} = 6.7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} (6.1 \text{ K}_{St}\sqrt{\text{in}}) (\text{Al 7075-T 651})$

윗그림을 자세히보면 K_I 값이 threshold 값에서 이재료의 K_{IC} 값인 $25\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 까지는 식(14)가 잘 맞는다는 것을 알 수 있다. 이것을 고정하중을 받는 몇개의 시험편에 적용시킬 수 있다. 이때 초기 작용 응력확대계수는 K_{II} 이며 파괴가 일어날 때까지 고정 하중조건을 유지한다. 식(14)를 변수분리법을 써서 적분하면

$$t_f = \frac{2K_{ISCC}^2 a_i}{C_o \exp(-\frac{\Delta H}{RT}) K_{II}^2} \left\{ \ln \left[\frac{K_{IC} - K_{ISCC}}{K_{II} - K_{ISCC}} \right] - \frac{K_{ISCC}}{K_{IC} - K_{ISCC}} + \frac{K_{ISCC}}{K_{II} - K_{ISCC}} \right\} \dots\dots\dots (15)$$

여기서 a_i =초기균열의 반

$C_o \exp(-\Delta H/RT) \approx 10^{-8} \text{m/s}$, $K_{ISCC} = 6.7\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, $a_i = 0.02\text{m}$, $K_{IC} = 25\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 을 식(15)에 대입하면 아래와 같은 그림을 얻는다.



만약 파손과정이 피로와 SCC의 단순한 중첩에 의해서 이루어진다면 부식피로에 대해서도 위에서 적용한 과정을 사용할 수가 있다. 마레이징 강에 대한 부식피로현상은 피로와 SCC의 단순한 중첩에 의해서 모델링 할 수 있다는 실험보고도 있다. 이 경우에는 da/dt 가 작용하중 K_I 의 크기의 함수이므로 식(12)에서 사용한 반복법과 같은 수치적분법을 사용하면 된다. 이때 주의해야 할 것은 적분할 때 주어진 피로사이클에 걸쳐서 적분해 줘야 한다는 사실이다. 결과는

$$\frac{da}{dN} = \left(\frac{da}{dN}\right)_f + \left(\frac{da}{dN}\right)_{SCC} = \left(\frac{da}{dN}\right)_f + \int \frac{da}{dt} \{K(t)\} dt \dots\dots\dots (16)$$

여기서 $\frac{da}{dt}\{K(t)\}$ =SCC의 성장율이며 피로 싸이클의 최대응력크기 ; 시간과 더불어 증가하는 균열의 크기의 함수이다.

즉, $\frac{da}{dt}\{K(t)\}$ 는 시간에 따라서 변화하는 응력확대계수의 함수인 변동하중을 지속하여 받는 균열성장율이라고 생각하여도 좋다. 위의 중첩모델링을 해석적으로 규명한 연구결과도 있다. 이 경우에도 $\frac{da}{dt}$ 는 식(14)로 주어진다. 이 경우에는 응력부식크랙킹 개시점을 정의하는데 정적인 하중조건에서의 값(K_{ISCC})보다도 피로조건($K_{ISCC}(f)$)에서는 낮은값을 취해야 함을 주의해야 한다. 즉 $K_{ISCC}(f) < K_{ISCC}$ 이며, 식(14)을 이용하여 SCC 계의 중첩모델링을 해석적으로 개발하여 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

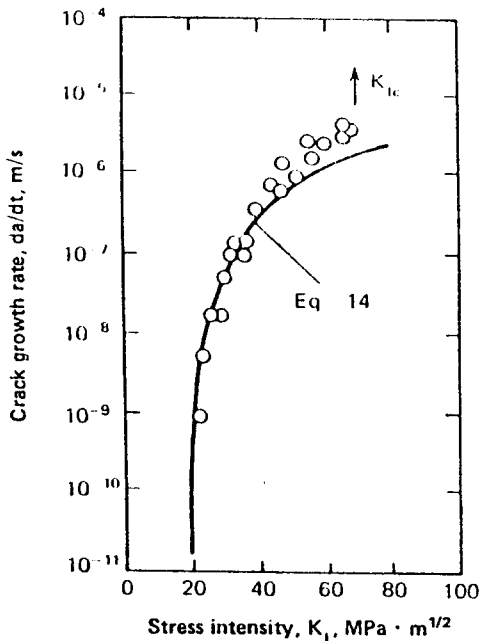
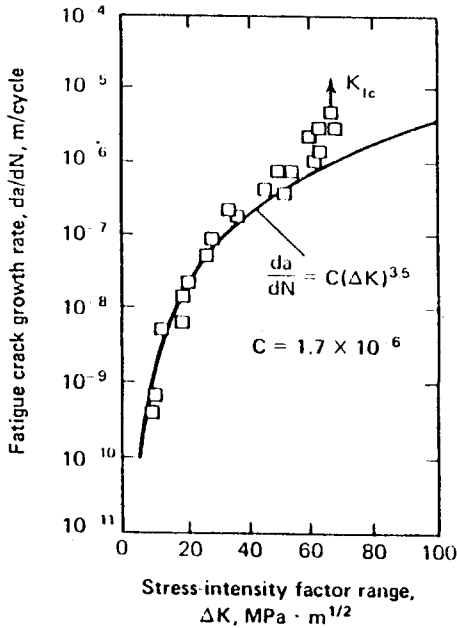
$$\frac{da}{dN} = \left(\frac{da}{dN}\right)_f + \frac{C_o \exp(-\frac{\Delta H}{RT})}{3\omega K_{ISCC}^2(f)} \cdot \left[\frac{\Delta K \left(\frac{1}{1-R} \right) - K_{ISCC}(f)}{\Delta K} \right] \dots\dots\dots (17)$$

여기서 W=사이클 시험주과수

R=피로하중비율

(17)식은 최소 응력확대계수, K_{min} , 이 $K_{ISCC}(f)$ 보다도 작은 경우 즉, $K_{min} < K_{ISCC}(f)$ 인 경우에 이용된다. 12%크롬스테인레스강에 대한 실험결과를 살펴보자. 먼저 피로시험데이터를 다음그림과 같이 $(da/dN)_f$ 와 (ΔK) 의 관계식에 대응시킨다.

그다음 SCC부분에 대해서는 식(14)를 이용하여 da/dt 와 K_I 의 관계에 대응되는 것을 다음그림을 보아 알 수 있다. 이 경우의 $C_o \exp(-\Delta H/RT) = 2.8 \times 10^{-7} \text{m/s}$, $K_{ISCC} = 20\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 이며 피로하중 하에서의 K_{ISCC} 는 감소하므로 $K_{ISCC}(f) = 8\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 로 취했다.

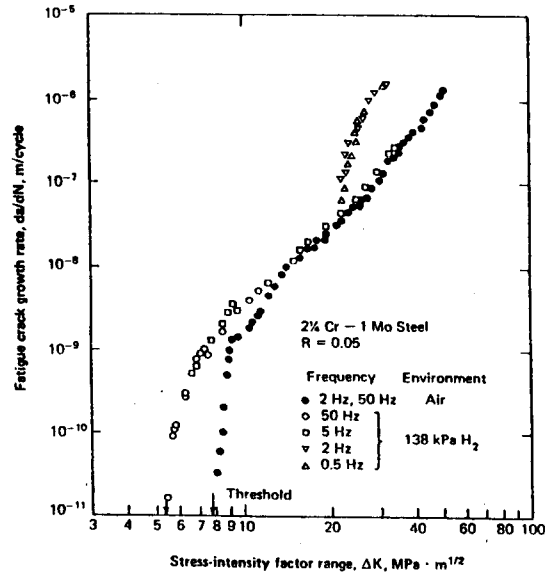


위에서의 데이터를 식 (17)에 대입하면 주파수 2.3Hz로 증류수 환경에서 행한 실험실결과와 잘 일치하고 있음을 다음 그림으로 알 수 있다. 그러나 낮은 주파수의 실험결과와는 잘 일치하지 않음에 주목

해야 한다.

그 이유는 $K_{ISCC}(f)$ 가 하중사이클의 70%정도를 초과할지라도 낮은 주파수에서의 부식피로 균열성장율이 높은 ΔK 의 하중사이클에 대한 균열성장율의 20%정도 밖에 되지 않기 때문이다. 따라서 중첩법은 정성적인 경향은 나타내 줄 수 있으나 다른 여러 영향이 게재될 수 있고 이 경우에는 균열단합효과도 영향을 미칠것으로 생각된다.

부식피로현상의 모델링에 환경적인 요소가 복합적인 영향을 미칠때는 더 복잡해지므로 주의해야 한다. 예를들면, 진수소가스가 주파수에 민감한 환경적인 영향을 나타내는 것은 중간크기의 ΔK 값에서의 SCC현상과, threshold 부근에서 주파수에 민감한 환경적인 영향과 유사하다는 실험결과에서도 모델링의 복잡성을 알 수 있다. 이것의 한계가 다음 그림에 예시되어 있다.



사용재료는 2 1/4 Cr-1Mo 강이며 실험은 공기중에서와 138KPa의 수소가스 환경에서 행하여졌다. 이 재료에 대한 하중유지 threshold (Sustained-load sustained) 값이 $90 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ 정도이며 $K_{th}(f) = 22 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ 이므로 $K_{th}(f) \ll K_{th}$ 이다.

$\Delta K > K_{th}(f)$ 의 경우에는 저주파수에서 균열진전속도가 증가되는 것을 알 수 있으며, 고주파수에서

는 이런현상이 나타나지 않는다. 따라서 이 영역에서 중첩법을 사용할 수 있을 것이다. 주파수에 영향없는 ΔK_{th} 가 존재하나 수소취성때문에 약 30% 감소되어 5.4MPa 정도가 됨을 주의하라. 이러한 여러가지 복합적인 영향은 아직 완전히 규명되지 않은 상태에 있으며 여러 실험데이터들이 창출되어야 하겠다. 따라서 현장설계자들은 단순한 중첩법을 사용할 때 그의 타당성을 충분히 검토하여야 하며 온도/환경/응력의 조합적인 영향을 고려함에 충분히 주의를 기울여야 한다.

설계과정의 중요성을 간단히 논의하였다. 이외에도 품질관리, 파손해석의 관점에서 과거, 현재, 미래의 성능에 미치는 영향요소를 결정해야하는 경우도 많을 것이므로, 아래에 간단히 설명한다.

(다음호에 계속)