

동적인장하중시 무기력상수에 의한 수명 예측

권 석 진*, 송 준 혁**, 김 하 수**, 강 희 용***, 양 성 모***

Life Prediction by Lethargy Coefficient under Dynamic Load

S.J. Kwon*, J.H. Song**, H.S. Kim**, H.Y. Kang***, S.M. Yang***

ABSTRACT

Because of a complicated behavior of fatigue in mechanical structures, the analysis of fatigue is in need of much researches on life prediction. A method is developed for the dynamic tensile strength analysis by simple tensile test, which is for the failure life prediction by lethargy coefficient of various materials. Then it is programmed to analyze the failure life prediction of mechanical system by virtue of fracture. Thus the dynamic tensile strength analysis is performed to evaluate life parameters as a numerical example, using the developed method.

Key Words: Simple Tensile Test(단순 인장 시험), Dynamic Tensile Strength(동적 인장 강도), Failure Life Prediction(파단 수명 예측), Lethargy coefficient(무기력 상수)

1. 서 론

공업재료는 다소를 막론하고 재료결합(비금속 개재물, 편석 등)을 가지고 있다. 더구나 부재의 제조 때에 제조 결함(주조결함, 용접결함, 가공상처 등)의 발생은 피할 수가 없다. 또 부재의 사용기간 중에도 결함이 발생하며 재료결합이나 제조결함을 기점으로 하여 부식자극, 피로 균열, 응력부식균열 등이 진전한다.

이러한 결함의 모든 것을 파악하여 설계하는 것은 불가능에 가까우며, 또 설계대로 제조, 사용되리라는 보증도 없다. 그러나 많은 경우 설계시에 결함이 없는 것을 원칙으로 한다. 즉 종래의 강도 설계의 입장(응력기준)에 의해 부재의 적하능력, 사용기간을 정한 후에, 파괴역학의

입장에 의해 결함평가를 하여 구조건전성을 보증하는 것이 일반적이다. 파괴 수명 예측에 관한 연구는 균열의 발생과 거동을 해석에 의해 산출하는 해석법(간접 평가법)과 사용중인 설비로부터 얻어진 실상태의 데이터로부터 수명을 예측하는 비파괴법(직접 평가법)으로 나뉘어져 연구되고 있으며, 수명 평가 기술 분야의 연구도 병행되어 진행되고 있다.

현재의 피로파괴 현상은 미시적으로 파괴인성의 개념을 도입하여 균열의 전파거동이 이론적으로 잘 정리되어 있으며 특정 부위의 재료 물성치를 알면 그의 파괴수명까지도 예측할 수 있는 단계에까지 발전되어 있다.⁽¹⁾⁽²⁾

기존의 많은 연구기관과 실험실에서는 각종 기계 구조물이나 기계 제품에 대하여 피로파괴 실험을 행해 왔으

* 한국철도산업기술연구원
 ** 전북대학교 대학원
 *** 전북대학교 기계공학부

며, 이를 이용하여 건전성에 대해 평가해 왔다. 그러나 이러한 실험을 통한 평가는 오랜 시간과 많은 비용을 필요로 하며, 현재는 축적된 데이터 베이스(database)를 가지고 시간과 경비를 절약할 수 있는 컴퓨터에 의한 시뮬레이션적인 방법이 상용화되고 있다.⁽³⁾⁽⁴⁾

현대에 와서는 최적 설계 개념이 도입되고 경량화 추세가 진행됨에 따라 상대적으로 기계 제품의 안전율이 낮아지게 되어 설계시에 예측하지 못했던 결함이 제품 내에 잠재하고 있는 경우, 피로 파괴에 매우 취약하게 된다.

그러나, 그러한 파괴의 원인을 분석하고 대책을 세우는 데에는 시간과 비용 등의 많은 어려움이 따르게 된다. 그러므로 부재가 내포하는 각종 결함에 의존하는 부재상수이며, 그 부재의 화학조성만으로 결정되는 상수가 아니라 화학성분이 같은 부재일지라도 그 부재의 공정 처리과정에 따라 설계인자들의 영향도는 다르다. 즉 그 부재의 이력에 따라 그 속에 내포하는 결함의 물질상수인 무기력상수(Lethargy Coefficient)의 개념을 도입한다.

따라서 본 연구에서는 기계 시스템의 파괴-건전성 평가에 있어서 인장 시험시의 파괴가 피로파괴와 동등하다는 것에 착안해서 간단한 인장 시험만으로 인장 파단시간을 측정 한 후, 재료의 초기 크랙 포함시킨 동적 강도 해석을 하여 피로 수명을 예측할 수 있는 방법을 제시한 다음, 컴퓨터를 이용하여 짧은 시간과 저렴한 경비를 가지고 무기력상수에 의한 수치 계산 및 시뮬레이션에 의해서 건전성을 평가한다.

건전성 평가를 토대로 변동 인장하중을 받고 있는 부재의 신뢰성을 가질 수 있는 설계 파라메타를 연구하는데 그 주안점이 있다.

2. 정적 수명 예측식

2.1 정적 수명 예측식(Static Life Prediction)의

통계 역학적인 의미

고체의 재료를 연구할 때 고체를 고유한 성질의 원자, 분자의 집합체로서 취급하면 편리할 때가 있고, 반면에 원자 또는 분자 집합체의 거시적 평균값이 그 고체의 성질을 대표하는 연속체로서 생각하는 경우 편리할 때가 있다. 예를 들어 응력하에서 고체 재료의 시간 의존성을 분자 체인의 시간에 따른 운동으로 취급할 수 있다. 일정한 온도 T에 있는 부재가 일정한 인장 응력 σ 를 받고 있는 상태에서 파단 수명 예측식을 고려해 보면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp\left(\frac{U_0 - F(\sigma)}{kT}\right) \quad (1)$$

여기에서, τ = 수명(sec)
 U_0 = 결합 에너지(k J/mole)
 τ_0 = 수명 상수(sec)
 k = Boltzmann상수(k J/mole K)
 T = 절대 온도(K)
 $F(\sigma)$ = 가해진 단축 응력의 함수

식 (1)은 Zhurkov가 20년간의 체계적인 실험 연구를 토대로 하여 섬유 형태의 고분자 재료를 포함한 다양한 재료에 단축 응력(또는 진응력)을 가하여, 수많은 실험치로부터 반실험식으로 세워진 정적(static) 파단 수명 예측식이다.⁽⁵⁾

통계 역학적인 관점에서 식 (1)은 어떤 부재의 파단 에너지를 얻을 확률을 표현한 것으로, 어떤 물질(또는 부재)이 파단될 경우의 파라메타와 수명과의 관계를 의미하는 것이라고 할 수 있다. 그러나, 식 (1)은 $F(\sigma) = 0$ 일 경우에도 결함의 파단이 일어나는 모순을 포함하고 있으므로 수명 예측식의 적용에 있어서, 주어진 응력이 충분히 큰 경우에만 적용해야 한다.⁽⁶⁾

2.2 정적 수명 예측식의 파라메타

식 (1)의 정적 파단 수명식에서 강도에 대한 결합 파괴 확률로 결정되는 결합 에너지(bonding energy) U_0 는 어떤 물질 1 mole에 대한 원자(또는 이온, 분자)를 분리하는 데 필요한 에너지이다. 즉, 결합 에너지 U_0 는 안정한 격자점(lattice point)으로부터 한 개의 원자를 제거하는 데 요하는 에너지이며, 고분자 재료의 활성화 에너지와 일치한다.

이것은 다른 결정 격자점을 가진 금속에서 승화 에너지와 잘 일치되며, 금속의 결정 격자점에서 원자 결합 에너지와 같다. 또한, Zhurkov는 결합 에너지 (U_0)의 값을 19종의 원소(element)에 대해 Table 1과 같이 발표하였다.⁽⁷⁾

τ_0 는 수명 상수로서 10^{13} (sec)의 값을 가지고, 모든 재료에 대해 화학적 성질이나 구조에 무관하게 공통적으로 적용이 된다. 또한, Boltzmann 상수인 k 는 8.384×10^{-3} (kJ/mole K)의 값을 가진다. 가해진 단축 응력의 함수인 $F(\sigma)$ 는 일반적으로, 무기력 상수 γ 와 응력 σ 로 표현된다. 그래서, 수명상수 τ_0 , 결합 에너지 U_0 는 일정 계수이다.

Table 1 Bonding energy

Element	U ₀ [kJ/mole]	Element	U ₀ [kJ/mole]
Al	309.6	Nb	627.6
AgCl	127	Ni	364.0
Ag	260.4	Pb	175.7
Cd	117.2	Pt	504.
Cu	338.9	Si	351.5
Fe	418.4	Ti	506.3
Ge	313.8	V	539.7
LiF	1004.2	Zn	127
Mg	142.3	Zr	504
NaCl ₂	766.7		

3. 동적 수명 예측식 및 무기력 상수

3.1 동적 수명 예측식(Dynamic Life Prediction)의 통계 역학적 기초

정적 수명 예측식인 식(1)을 응력과 온도에 대해 시간(t)의 함수로서 표현할 수 있는 동적 수명 예측식으로 전환하였을 경우 동적 수명 예측식이 타당성이 있는지를 검토해야 할 것이다. 그래서, 통계 역학적 관점에서의 동적 파단 수명 예측식에 대한 근거를 초기 크랙 길이가 있을 경우에 대하여 적용시켜 고찰해 보면 다음과 같이 3가지로 표현된다.⁽⁸⁾

1) 원자의 열운동으로 인하여 에너지 U₀를 공급할 수 있는 확률은

$$e^{-\frac{U_0}{kT}}$$

이 된다.

2) 어떤 응력 σ가 걸려 있다면, 안전한 격자점으로부터 한 개의 원자를 제거하는 데 우선 작용하는 응력 σ에 비례하는 F의 에너지량만큼 감소한다고 할 수 있기 때문에

$$e^{-\frac{F}{kT}}$$

이 된다.

3) 초기 크랙(initial crack) 포함 여부에 따라 소비되는 에너지량 W를 고려하여 표현하면

$$e^{-\frac{W}{kT}}$$

가 된다.

따라서, 시간 dt 사이에 열진동의 회수는 dt/τ₀로 쓸 수 있기 때문에 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$e^{-\frac{U_0 - F(t) - W(t)}{kT}} \frac{dt}{\tau_0} \tag{2}$$

즉, 시간 dt 사이에 열진동에 의해서 한 개의 원자가 격자의 위치로 부터 제거되는 확률이 된다.

이들 확률을 모두 합해서 100%가 되면 이것은 확실하게 격자상의 안전한 위치로 부터 제거되어 파손이 일어남을 의미한다. 그러므로, 이때까지 걸리는 시간이 바로 그 부재의 수명이 된다. 따라서, 식(2)에 따라 Zhurkov의 정적 파단 수명 예측식을 동적 파단 수명 예측식으로 바꾸어 식(1)을 변형해 보면

$$\int_0^r \frac{dt}{\exp\left(\frac{U_0 - F(t) - W(t)}{kT(t)}\right)} = 1 \tag{3}$$

와 같이 쓸 수 있다. 그러므로, 식(3)은 정적 수명 예측식을 시간의 함수로서의 동적 수명 예측식으로 전환이 가능함을 나타낸다.

식(1)의 정적 파단 수명 예측식을 동적 파단 수명 예측식으로 변환시에 동적 파단 수명 예측식의 파라메타는 온도(T), 평균응력(σ̄), 변동응력(σ̇), 인장강도(σ_u), 결합에너지(U₀), 주파수(f) 등 이외에 소성변형에너지(γ_s), 두께(B), 초기크랙 크기(a_i)의 인자(factor)가 첨가 적용된다.

초기 크랙에 대해서는 지수 함수로 가정하여(식(5) 참조) 동적 수명 예측식에 적용하였다.⁽⁹⁾ 그리고, 응력 작용조건(load condition)은 Fig. 1과 같이 피로 시험에

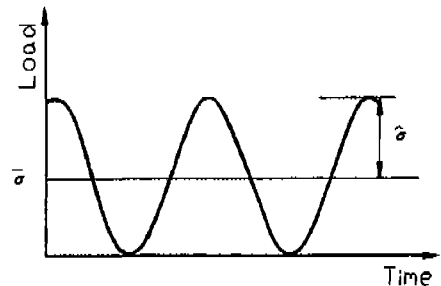


Fig.1 Loading condition

서 일반적으로 쓰이는 사인(sinusoidal) 함수 형태를 적용시켰다.

3.2 동적 수명 예측식의 정립

Zhurkov가 제안한 정적 파단 수명식 즉, 온도 T에 있는 부재가 일정한 인장 응력 σ 를 받고 있는 상태에서의 수명 예측식을 동적 하중이 작용하는 시간의 함수로써 동적(dynamic) 수명 예측식으로 변환되는 과정을 표현하면 다음과 같이 된다.

$$\tau = \tau_o \cdot \exp\left(\frac{U_o - F(\sigma)}{kT}\right) \quad (4)$$

$$\rightarrow \int_0^L \frac{dt}{\tau_o \exp\left(\frac{U_o - F(t) - W(t)}{kT(t)}\right)} = 1$$

식(4)에서 부재의 수명(L)은 식(4)의 적분의 상한으로 주어지며, 적분의 우측에 있는 1의 값은 파괴(failure)를 의미한다. 따라서, 식(4)를 가지고서 본 연구의 동적 파단 수명 예측식을 정립하였다.

다음은 무기력 상수 γ 와 재료의 초기 크랙 길이를 포함시켜 동적 파단 수명 예측식으로 변환시킨 후 파단 수명 예측값을 산출해 내는 과정이다. 또한, 일반적인 경우에 있어서 초기 크랙 길이의 유무가 영향을 끼치지 때문에 초기 크랙 길이가 있을 경우와 없을 경우에 대해 동적 파단 수명 예측식을 분리하여 해석하였다.

1) 초기 크랙이 있을 경우

$$\int_0^L \frac{dt}{\tau_o \exp\left(\frac{U_o - F(t) - W(t)}{kT(t)}\right)} = 1$$

여기에서, $F(t) = \gamma\sigma(t)$
 $\sigma(t) = (\hat{\sigma} + \bar{\sigma} \cos \omega t)$
 $W(t) = \frac{2\gamma_s a_1}{B}$ (5)
 $a(t) = a_1 \exp(t)$
 $T(t) = T = \text{const.}$

$$\int_0^L \frac{dt}{\tau_o \exp\left(\frac{U_o - \gamma\sigma(t) - \frac{2\gamma_s a_1}{B}}{kT(t)}\right)} = 1, \text{ Failure} \quad (6)$$

$$\int_0^L \frac{dt}{\tau_o \exp\left(\frac{U_o - \gamma(\hat{\sigma} + \bar{\sigma} \cos \omega t) - \frac{2\gamma_s a_1 \exp(t)}{B}}{kT}\right)} = 1 \quad (7)$$

식(7)을 변수변환하여 요구 수명 L을 구하면

$$L = \frac{\tau_o \exp\left(\frac{U_o - \gamma\bar{\sigma}}{kT}\right) \times \pi}{\int_0^\pi \frac{dx}{\left(e^{\frac{\gamma\hat{\sigma}}{kT} \cos(x) + \frac{2\gamma_s a_1}{kT B} \exp\left(\frac{x}{\omega}\right)}\right) \omega}} \quad (8)$$

이 된다.

수명이 다할 때까지의 반복 회수 N은 요구 수명에 대한 주파수의 곱으로서 다음과 같이 표현된다.

$$N = L \cdot f$$

결과적으로, 반복회수 N은

$$\therefore N = \frac{\tau_o \exp\left(\frac{U_o - \gamma\bar{\sigma}}{kT}\right) \times \pi \times f}{\int_0^\pi \frac{dx}{\left(e^{\frac{\gamma\hat{\sigma}}{kT} \cos(x) + \frac{2\gamma_s a_1}{kT B} \exp\left(\frac{x}{\omega}\right)}\right) \omega}} \quad (9)$$

이다. 여기서,

- $\bar{\sigma}$ = 평균응력 (N/mm²)
- $\hat{\sigma}$ = 변동응력 (N/mm²)
- γ_s = 소성변형에너지 (kJ/mole)
- a_1 = 초기 결함 (mm)
- B = 시편 두께 (mm)
- f = 주파수 (Hz)
- N = 수명 (cycle)

일반적으로, 금속의 경우 소성변형에너지 γ_s 는 6.02×10^{-1} (kJ/mole)의 값을 가지게 된다.⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾ 또한, 주파수 f (Hz)는 변동응력 $\hat{\sigma}$ 과 평균응력 $\bar{\sigma}$ 으로 인한 파단까지의 주파수를 의미한다.

2) 초기 크랙 길이가 없을 경우

초기 크랙 길이가 존재하지 않을 경우 즉, $a_1 = 0$ 이므로 식(5)에서 a(t) 항(term)이 0 (zero)이 되어서 W(t) 항이 상쇄된다. 따라서 다음과 같이 식(10)으로 표현된다.

$$\int_0^L \frac{dt}{\tau_o \exp(\frac{U_o - F(t)}{kT})} = 1$$

$$\int_0^L \frac{dt}{\tau_o \exp(\frac{U_o - \gamma(\bar{\sigma} + \hat{\sigma} \cos \omega t)}{kT})} = 1 \quad (10)$$

그러므로 요구하는 수명은 식(11)로 나타내지고, 반복 회수 N은 식(12)로 표현된다.

$$L = \frac{\tau_o \exp(\frac{U_o - \gamma \bar{\sigma}}{kT}) \times \pi}{\int_0^\pi (e^{\frac{\gamma \hat{\sigma} \cos(x)}{kT}}) \frac{dx}{\omega}} \quad (11)$$

$$\therefore N = \frac{\tau_o \exp(\frac{U_o - \gamma \bar{\sigma}}{kT}) \times \pi \times f}{\int_0^\pi (e^{\frac{\gamma \hat{\sigma} \cos(x)}{kT}}) \frac{dx}{\omega}} \quad (12)$$

3.3 무기력 상수(Lethargy Coefficient)의 산출

부재가 내포하는 각종 결함에 의존하는 재료 상수의 값은 각각의 재료마다 물성치가 틀리기 때문에 달리 계산한다. 그래서 실험적인 방법을 동원하여 무기력 상수 값을 산정한다. 그래야만 실험적으로 재질에 충실한 상수값을 획득할 수 있다.

구체적인 방법은 부재에 대해 단순 인장 시험을 실시하여 인장파괴를 일으켜 가지고, 그때의 하중속도 (stress rate)를 일정히 하여 얻은 인장강도 (σ_u)와 파괴가 일어날 때까지의 하중시간 (τ_u)을 가지고서 무기력상수 γ 를 구한다.

$$\int_0^{\tau_u} \frac{dt}{\tau_o \exp(\frac{U_o - \gamma \dot{\sigma} t}{kT})} = 1$$

$$= \frac{1}{\tau_o} e^{-\frac{U_o}{kT}} \frac{kT}{\gamma \dot{\sigma}} (e^{\frac{\gamma \dot{\sigma} \tau_u}{kT}} - 1)$$

(단, $\dot{\sigma} \tau_u = \sigma_u$ 라고 한다.)

$$\exp(\frac{\gamma \sigma_u}{kT}) = 1 + \frac{\gamma \sigma_u}{kT} (\frac{\tau_o}{\tau_u}) \exp(\frac{U_o}{kT}) \quad (13)$$

이 방정식은 무기력상수 γ 에 대하여 초월방정식이므로 시행착오법(trial and error method)으로 수치 계산을 하게 되면, 무기력상수 γ 에 대한 파라메타 의존도(parametric dependence)가 없어지기 때문에 즉, 구하고자 하는 무기력상수의 γ 의 값이 상쇄되기 때문에, 무기력 상수 γ 에 대한 해를 풀기 위해서는 Perturbation Method를 이용하였다.

무기력상수 γ 를 구하는 식은 다음과 같이 산출된다.

$$\gamma = \frac{U_o}{\sigma_u} (1 - \eta)$$

$$\eta = \frac{\ln(\frac{\tau_u}{\tau_o})}{\frac{U_o}{kT}} (1 - \frac{\ln[\frac{U_o}{kT} - \ln(\frac{\tau_u}{\tau_o})]}{\ln(\frac{\tau_u}{\tau_o}) [1 - \frac{U_o}{kT} - \ln(\frac{\tau_u}{\tau_o})^{-1}]}) \quad (14)$$

- 여기서, τ_u = 파괴시간 (sec)
- σ_u = 인장강도 (N / mm²)
- $\dot{\sigma}$ = 하중속도
- γ = 무기력상수 ($\frac{kJ}{mole} \cdot \frac{mm^2}{N}$)

식(14)의 결과로부터 무기력상수 γ 는 결함 에너지 인장 강도 σ_u 로 나눈 값에서 파괴 시간 τ_u , 수명상수 τ_o , 하중 시간 등으로 구성된 η 분을 만큼 감소됨을 알 수 있다. 그래서, 무기력상수 γ 의 값은 간단한 인장 시험을 해서 얻은 인장 강도 σ_u 와 하중 속도 $\dot{\sigma}$, 파단 시간 τ_u 과 결함 에너지 U_o , 그리고 수명상수 τ_o 를 포함하여 용이하게 산출할 수 있다.

3.4 동적 수명 예측식에 의한 수명 평가

본 연구에서 정립한 동적 수명 예측식의 수명 예측 평가 순서는 다음 단계에 따라 실시한다.

1) 어떤 부재에 대해 단순 인장 시험을 실시하여 그 부재의 Fig. 2와 같이 인장 강도에 대한 파단 시간 (τ_u)을 구한 다음, 인장 강도(σ_u), 결함 에너지(U_o), 수명상수 (τ_o), 온도 (T) 등의 값을 대입하여 무기력상수 γ 값을 산출해 낸다.

2) 여기에서 얻어진 무기력상수 값과 본 연구에서 도출해 낸 동적 파단 수명 예측식에 각각 변동응력, 평균응력, 주파수, 온도, 두께, 초기 크랙 길이 등 인자들의 수치를 프로그램에 입력하여 파단 수명 예측 (N) 값을 얻어낸다.

3) 그 다음 실험치와의 값을 비교 평가한다.

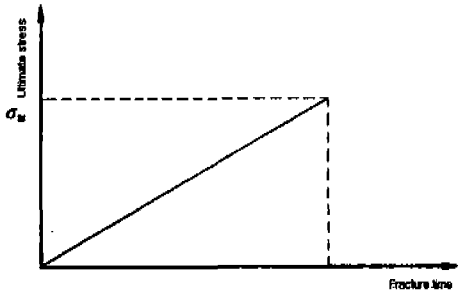


Fig. 2 Tensile fracture with constant loading rate

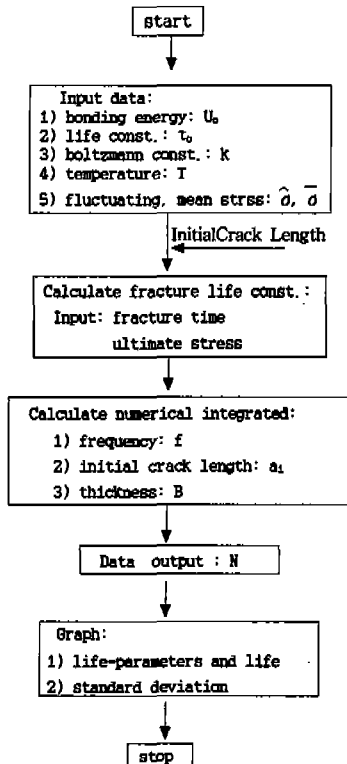


Fig. 3 Flow chart of life prediction

4. 수치 계산 및 고찰

4.1 수치 계산 프로그램

본 논문에서는 파단 수명 예측식에 따라 각각의 물성치에 대해 data input을 가지는 프로그램을 작성하여 수명

값을 산출하고 해석하였으며, 프로그램의 구성은 Fig. 3과 같이 결합 에너지, 수명상수, 온도, 주파수, 변형응력, 평균 응력, 두께 등의 data input 부분과 단순 인장 시험에 의한 인장 강도, 파단 시간에 의한 무기력 상수값의 타당성 결정 부분, 수치 적분 과정의 해석 부분, 최종 output인 수명값의 산출 부분으로 되어 있다.

4.2 수명의 계산치 및 실험치

본 연구에서 연구된 동적 파단 수명 예측식에 의한 결과를 가지고 수치 계산 프로그램으로 계산한 결과값과 실제 실험값과의 관계를 살펴보기 위해 기 발표된 논문의 자료를 이용 비교·검토하였으며, 본 연구에 의한 동적 파단 수명 예측식에 따라 다음과 같이 초기크랙 길이가 있는 경우와 없는 경우에 대해 비교하였다.⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾ 시편의 재질은 SS41 구조용 강이며, 시편의 기계적 성질은 Table 2와 Table 3과 같다.

1) 초기크랙 길이가 포함되는 경우

초기크랙 길이가 4 mm인 SS41 구조용강(인장 강도 = 450.8 N/mm²)에 대해 단순 인장 시험에 의한 파단 시간을 산출해 낸 다음, 식(8)과 (9)에 수명상수와 결합 에너지, 인장 강도, 파단 시간을 대입하여 무기력 상수 값을 구하면 값이 $\gamma = 0.7667 \left(\frac{\text{kJ} \cdot \text{mm}^2}{\text{mole} \cdot \text{N}} \right)$ 이다.

또한, 위에서 구한 무기력 상수값과 초기크랙 길이, 두께, 주파수 등 각각의 값들을 본 연구 방법에 의한 동적

Table 2 Mechanical properties of SS41 steel with initial crack, 4mm

Material	SS41	
Yield strength [N/mm ²]	343	
Tensile strength [N/mm ²]	450.8	
Elongation (%)	22	
Reduction of area (%)	27	

Table 3 Mechanical properties of SS41 steel with out initial crack, 0mm

Material	SS41	
Yield strength [N/mm ²]	332.22	
Tensile strength [N/mm ²]	472.36	
Elongation (%)	31.9	
Reduction of area (%)	-	

파단 수명 예측 프로그램에 적용 시켜 본 결과 예측 수명 값($=1.99 \times 10^4$)이 실험 수명값($=2.3 \times 10^4$)에 근접하였으며 본 연구의 수명 계산식의 타당성을 검토할 수 있었다(Fig. 4, Table 4 참조).

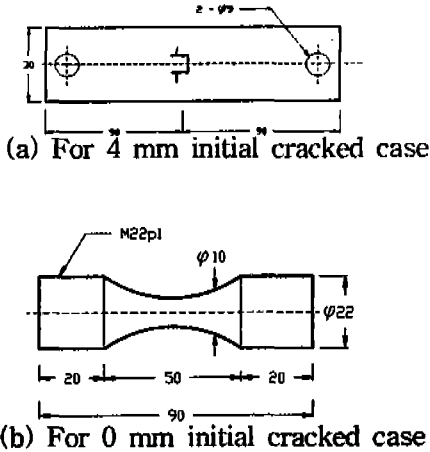


Fig. 4 Speciman for tensile test

Table 4 Program input and output (initial crack = 4)

Bonding Energy	418.4	(kJ/mol)	Fluctuation Stress	132.3	(N/mm ²)
Life Coefficient	10^{-14}		Mean Stress	299.39	(N/mm ²)
Boltzman Const.	8.384×10^{-3}	(kJ/mole K)	Tensile Strength	450.8	(N/mm ²)
Temperature	R.T	300 (K)	Initial Crack size	4	(mm)
Frequency	15	(Hz)	Thickness	3.2	(mm)
Fracture	103	(sec.)	Plastic Deformation Energy	6.02×10^{-1}	(kJ/mole)
	Experimental		Prediction		Error (%)
Life	2.3×10^4		1.99×10^4		15.6

Table 5 Program input and output (initial crack = 0)

Bonding Energy	418.4	(kJ/mol)	Fluctuation Stress	183.25	(N/mm ²)
Life Coefficient	10^{-14}		Mean Stress	262.64	(N/mm ²)
Boltzman Const.	8.384×10^{-3}	(kJ/mole K)	Tensile Strength	472.36	(N/mm ²)
Temperature	R.T	300 (K)	Initial Crack size	0	(mm)
Frequency	15	(Hz)	Diameter	10	(mm)
Fracture	103	(sec.)	Plastic Deformation Energy	6.02×10^{-1}	(kJ/mole)
	Experimental		Prediction		Error (%)
Life	5.35×10^5		5.03×10^5		6.36

2) 초기크랙 길이가 포함되지 않는 경우

초기크랙 길이가 없을 경우 SS41(인장 강도 = 472.36 N/mm²)의 재질에 대해 단순 인장 시험에 의한 파단 시간을 산출하고, 식(12)의 파단 수명 예측식에서 요구되는 응력, 두께, 주파수 등의 파라메타들을 대입하여 본 연구에 의한 동적 파단 수명 예측 프로그램을 시뮬레이션 하여 실험값($=5.35 \times 10^5$)과 예측값($=5.03 \times 10^5$)을 비교하였다. 그 결과 예측값과 실험값의 오차가 6.36%이었다 (Table 5 참조).

5. 결론

본 연구는 Zhurkov가 제안한 다양한 재료의 정적 수명 예측식을 재질 SS41에서 동적 수명 예측식으로 환원하여 파단 수명 예측에 관한 식을 새롭게 정립하였다. 그리고 파손에 따른 기계 시스템의 수명 예측식을 초기크랙 길이의 유무에 따라 해석을 할 수 있도록 프로그램하여 수치 계산한 결과를 실험치와 비교 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 파손에 의한 파단 수명을 간단한 인장 시험으로 파단시간을 측정함으로써 동적 강도 해석을 통해서 매우 용이하게 예측할 수 있으며, 예측 방법의 과정에서 시간과 비용을 절감할 수 있다.

2) 재료 강도의 시간 의존성 문제를 본 연구의 수명 예측식으로 해결을 할 수 있으며, 피로강도 평가를 위한 전문가 시스템을 구축할 수 있는 기반을 마련할 수 있다.

후 기

이 연구는 1995년도 교육부 학술 연구조성비(기계공학 분야)에 의한 연구결과입니다(과제번호 ME95-C-16). 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김건영, "기계장치의 잔존 수명 예측 및 평가", 대한기계학회지, 제30권 제2호, 1990.
2. 失川元基, "破壊力学 理論 解析から 工學的 應用まで", 培風館, 1988.
3. 백경운, Ralph I. Stephens, "Computational life prediction methodology for mechanical systems using dynamic simulation, finite

- element analysis, and fatigue life prediction methods.", Univ. of Iowa, 1990.
4. V.A.Avakov, "Fatigue Reliability Functions", ASTM, vol.111, 1989.
 5. S.N.Zhurkov, "Kinetic concept of the strength of solids", Int. J., 1965.
 6. 김엄기, "고분자 재료에서의 파괴역학", 대한기계학회지, 제 34권 제 5호, 1994.
 7. 李炳昊, "A General Theory on Fatigue Creep Life", Lec.at Univ Tokyo, 1982.
 8. 金相哲, "破壞力學", 民音社, 제3장, 1985.
 9. 권재도, 곽상국의 3인, "신뢰성 공학적 피로 균열의 발생, 진전 수명 평가 및 예측에 관한 연구 (II)", 대한기계학회 논문집, 제15권 제 3호, 1991.
 10. "疲勞強度 デ-タ集", 日本材料學會, Vol. I, CODE-SERIES 135-010, 1996.