

# 피로수명예측 프로그램

## For the software program "Fatigue Life Prediction(FLP)"

이역섭, 이진구\*

인하대학교 기계·항공·자동화공학부, 인하대학원생\*

### 1. 서론

공업의 발전과 더불어 금세기 초반부터 선박, 항공기, 지하매설물, 차량 등의 대형 파괴사고가 자주 발생하면서 이들의 파괴원인을 규명하는 연구가 활발해졌고, 이에 따라 파괴역학의 중요성이 인식되기 시작했다. 따라서 피로파괴에 대한 연구 및 이해가 크게 진전되었다[1-7]. 그러나 대, 중, 소형 기계구조물의 설계, 제작, 운용 및 구성부품과 구조물의 안전성 유지와 보수에 관심이 있는 공학자들에게는 해결되지 않은 많은 문제가 남아있다. 본 연구의 목적은 기존의 파괴역학적 개념과 이를 기초로 새로 창안된 모델들이 포함된 피로수명예측 프로그램을 개발하고 이를 실제 구조물의 수명 예측에 적용하여 신뢰성을 확인하는데 있다.

### 2. 이론

피로파괴는 가장 일반적으로 행해지는 기계구조물의 파손형태이고 가장 취급하기 어려운 것 중의 하나이다. 피로수명에 영향을 미치는 요인들에는 상용 하중의 특징, 재료의 물성치, 구성부품내의 응력 분포, 구성부품의 표면 마무리, 작업환경과 손상 축적 과정 등이 있다. 이런 요인들은 수명 산정에서 여러 방법으로 고려되어야 한다. 일반적으로, 금속재료에서 피로파괴의 진행과정은 균열 개시, 균열 성장 및 최종 파괴의 3단계로 나누어진다. 그리고 구조물의 피로 수명은 대개 균열 개시 수명과 균열 성장 수명의 두 부분으로 구성된다. 이것이 일반적으로 수용되어 왔지만 균열 개시에 대한 정확한 정의는 여전히 논쟁의 여지가 있다.

피로수명예측에는 두 가지 접근법이 있는데, 경험적인 수명 곡선에 기초한 전통적인 피로 접근법(Palmgren-Miner 방식, PM 접근법)과 경험적인  $da/dN$ -곡선(Paris-Erdogan 방식)을 갖는 파괴역학 접근(FM 접근법)이 그것이다.

#### (1) PM 접근법[5]

PM 접근법에는 명목상의 응력 접근법과 국부 변형법이 있다.

##### 1) 명목상의 응력(S-N 곡선)접근법

이 방법은 고사이클 피로에 주로 사용된다. *Wöhler*의 S-N 곡선은 특정 기하(응력집중계수  $K_t$ )에 대해 얻어진다. N은 파손시(또는 균열 개시시) 사이클 수를 나타낸다. 하나의 시편은 곡선상의 한 점을 나타내므로 하나의 S-N 곡선은 여러

개의 시편을 필요로 한다. 응력 범위 S가 작을수록 수명은 더 길다[4].

$$SN^m = \text{Constant} \quad (1)$$

## 2) 국부 변형법

이 방법은 저사이클 피로에 사용되며 변형-수명 곡선(strain-life curve)이 경험에 의해 얻어진다. 변형은 탄성 부분과 소성 부분으로 나눌 수 있고, 수명곡선은 일반적으로 아래의 Manson-Coffin식으로 모델링된다.

$$\epsilon_a = \sigma'_f (2N_f)^b / E + \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (2)$$

여기서,  $\sigma'_f$ ,  $\epsilon'_f$ , b, c는 각각 재료 물성치, 피로 강도, 연성 계수 및 지수이다.

## (2) 파괴역학 접근법(FM 접근법)[5]

응력확대계수, K의 계산은 FM 접근법에 공통된 사항이고 다음과 같이 표현된다. 그리고 다른 기하학적 영향을 중첩(superposition)을 통해 기술할 수 있다.

$$K = \beta \sigma \sqrt{\pi a}, \quad \beta = \Sigma \beta_i \quad (3)$$

여기서 K는 응력확대계수,  $\beta$ 는 형상계수, a는 균열길이,  $\sigma$ 는 응력을 나타낸다.

FM 접근법에는 비지연 방법과 지연/가속 방법이 있다.

### 1) 비지연 방법

균열 성장의 Paris-Erdogan법칙(Paris 방식)이 가장 일반적인 방법이다.

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (4)$$

여기서, C와 m은 실험으로부터 구해지는 재료의 물성치이다. Paris 식이 응력비 R의 변화를 허용하지 않기 때문에 Forman은 응력비 R과 불안정 상태 Kc에 가까운 빠른 균열 성장의 영향을 고려하여 다음의 식을 제안하였다.

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^m}{(1-R)K_c - \Delta K}, \quad R > 0 \quad (5)$$

Walker는 음의 응력비 R 부분을 포함하였고, 다음과 같이 나타내었다.

$$\frac{da}{dN} = [C(1-R)^p \Delta K]^m \quad R \geq 0, \text{ (or } = [C(1-R)^q \Delta K]^m \quad R < 0) \quad (6)$$

여기서 C, m, p, q는 각각 다른 응력비에서의 실험으로부터 유도된 물성치이다.

### 2) 지연/가속 방법

Wheeler 모델에서는 지연계수를 최초의 균열 성장률에 단순히 곱함으로써 초과하중 사이클로 인한 지연만이 고려된다. 지연계수는 균열선단의 소성영역 크기 r의 개념으로부터 다음과 계산된다.

$$C_w = \left( \frac{r_i}{a_0 + r_0 - a_i} \right)^n \quad (7)$$

여기서 아래첨자 i와 o는 현재 하중과 초과하중 사이클에서의 계수이고 n은 경험에 의해 결정된다. Elber는 균열 단합을 처음으로 주목하였고, 응력비 효과를 고려하기 위하여 유효응력범위를 제안하였다. Willenborg의 모델은 유효응력 개념을 갖는 소성영역의 크기를 결합함으로써 Wheeler의 모델을 개량한 것이다. 초

과 하중에 인하여 지연된 균열 성장률은 유효 응력비,  $R_{eff}$ 와 유효응력확대 범위,  $\Delta K_{eff}$ 를 Forman 식으로 치환함으로 보정된다. 평면 응력( $\gamma=1$ ), 평면 변형( $\gamma=2\sqrt{2}$ )에 대하여  $K_{ab} = \sigma_y \sqrt{2\gamma\pi(a_{0v} + r_{0v} - a)}$ 이다.

$K_{red} = K_{ab} - K_{max}$ 을  $K_{max\,eff} = K_{max} - K_{red}$ ,  $K_{min\,eff} = K_{min} - K_{red}$ 에 각각 대입하면,  $R_{eff}$ 와  $\Delta K_{eff}$ 를 계산하기 위한 방정식은 아래와 같다.

$$R_{eff} = K_{min\,eff}/K_{max\,eff}, \quad \Delta K_{eff} = K_{max\,eff} - K_{min\,eff} \quad (8)$$

여기서  $K_{eff}=0$ (if  $K<0$ )이다.

위의 Eq. (8)를 수정한 일반화된 Willenborg 모델은 다음과 같다.

$$K_{eff} = K - \Phi K_{red}, \quad \Phi = \frac{1 - K_{max,th}/K_{max}}{\gamma_c - 1} \quad (9)$$

여기서,  $K_{max,th}$ 는  $K_{max}$ 에 대한 임계치,  $\gamma_c$ 는 초과 하중에 대한 컷-오프 값이고, 실험 데이터에 의해 결정된 재료의 물성치이다.

Wheeler와 Willenborg가 모두 양의 초과하중에 인한 지연효과만을 고려한 것에 비하여 Chang은 양, 음의 R 효과를 고려하였는데 이는 Willenborg-Chang 모델이라 불린다. HeQingZhi 모델은 소성영역에서 잔류압축응력 개념을 이용하였고, 또한 응력 완화(stress relaxation)를 고려하였다.

본 연구에서 제시하는 피로수명예측 프로그램에 포함된 Chen-Lee 모델은 Elber의 닫힘 개념을 사용하여 과대하중 후에 균열 닫힘 응력이 커진다고 가정하는 과대하중 지연현상을 설명한 것이다. Chen-Lee 모델과 관계된 상호작용구역(Interactive Zone) 개념은 과대/과소 하중에 의한 지연/가속에 영향을 미치는 균열 선단의 소성구역의 크기를 고려한 것이다.

### 3. 실험

피로실험에 있어서 시편은 보통 일정한 진폭을 갖는 사인곡선 모양의 응력 변화하에서 시험되나, 현실의 외부 하중은 항상 불규칙하므로 피로수명예측에 적용하기 위해서는 얼마간의 가정이 필요하다.

Fatigue Life Prediction 프로그램으로 수행할 수 있는 작업은 다음과 같다.

- 1) CT, CCT, SENB 등의 시편을 포함하는 일반적인 형상과 그린 함수 적분(Green function integration)을 이용하여 구한 균열에 따른 불규칙적인 응력분포에서의 응력확대계수를 이용해 형상함수,  $\beta$ 를 계산할 수 있다.
- 2) 일정진폭하중에서의 피로 균열 성장 실험(a-N) 자료로부터 특정 기하학적 형상에 대한 응력확대계수의 범위와 da/dN의 관계를 얻는다. 여기서는 수표(numerical table)를 이용할 수 있다.
- 3) Paris, Forman, Walker, Forman-Walker 등의 방정식에서 이와 관계된 각종

변수들을 결정해준다. 여기서도 단순하게 수표를 이용할 수 있다

- 4) 균열 성장 분석에 있어서 다양한 하중조건에서의 피로 수명을 계산할 수 있고 다양한 상호작용 모델이 여러 가지 상황에 적합하게 적용될 수 있다.
- 5) S-N 곡선과 국부 변형법을 포함하는 균열 개시 분석에서는 다양한 하중하에서의 피로 개시 수명을 계산해준다.

다음은 개발된 피로수명예측 프로그램(Fatigue Life Prediction)의 주화면이다.

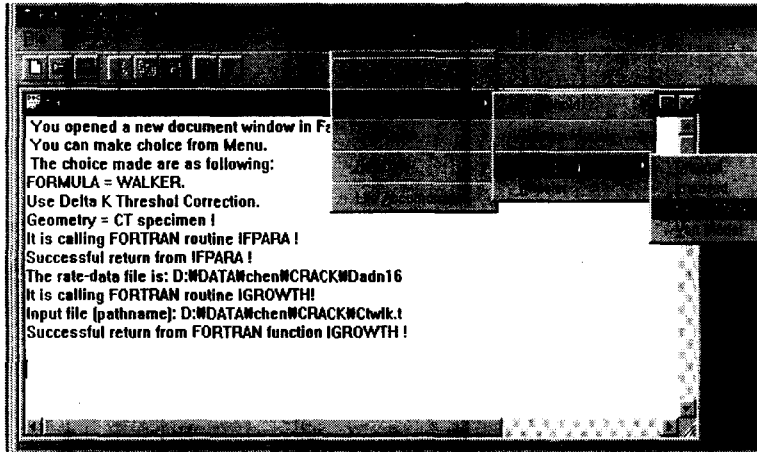


Fig. 1 Main Diagram Menu of Fatigue Life Prediction Software

본 피로수명예측 프로그램의 주 화면에는 일반적인 Window환경의 software와 같이 File, Edit, View, Help 등의 메뉴가 있다. 그리고 균열 개시와 성장을 함께 해석할 수 있도록 Fatigue-Initiation과 Crack-Growth의 메뉴가 있고, 이들 메뉴에는 시편의 종류를 선택하고, 비지연/지연 피로해석을 위한 방정식과 모델들을 선택하는 등의 하위메뉴가 있다. 또한 하중조건을 입력하는 LoadData에서는 원하는 불규칙적인 하중 조건을 입력할 수 있다. 모든 메뉴는 사용자의 편의를 위해 화면상에서 직접 자료를 입력하거나 입력파일을 사용할 수 있도록 되어 있다.

#### 4. 결과 및 토의

구조물의 피로수명예측과 안전진단이 가능하도록 시편 종류, 재료의 물성치, 하중 조건에 따른 수명을 예측하는 프로그램을 개발하였다. 각 입력데이터는 파일로 입력하거나 직접 화면상에서 입력할 수 있고, 각각의 결과는 입력파일명 뒤에 .dat라는 확장자가 붙어 저장된다. 또한 처음 정해진 출력파일에는 피로수명예측에 관한 대부분의 결과가 수록된다. 만약 필요한 조건이 입력되지 않으면 수명산정메뉴는 비활성화 상태로 있다. 본 피로수명예측 방법의 특징은 다음과 같다.

- 1) 균열 개시와 균열 성장에 관한 분석을 동시에 수행할 수 있도록 한 Package에 통합하여 해석의 용이함을 도모하였다.
- 2) 균열 성장 분석 메뉴에 대부분의 기존 모델들을 포함시켰다. 예로 Broek의 프

- 로그에는 Elber의 단함 개념이 들어있지 않다[4]. 모든 모델들이 각각의 분석 요구조건에 따라 계산되고 출력파일을 통하여 서로 비교할 수 있다.
- 3) 최근에 본 연구자에 의해 개발된 Chen-Lee 모델과 기존 프로그램에서는 없었던 상호작용구역(Interactive Zone) 개념을 갖는 개선된 모델들을 포함시켰다.
  - 4) 모델들 및 각각 변수들이 보다 쉽게 계산되고 결과를 비교하기 위하여 da/dN 시험자료처리(곡선 피팅) 기능을 통합된 Package로 포함시킴으로써 피로실험 결과와 FLP 수명예측을 함께 비교할 수 있어 매우 편리하고 사용자에게 익숙한 윈도우95에 기반을 두고 FORTRAN 및 Visual C++ 언어로 개발되었다. 피로수명의 산정은 다음과 같은 순서로 이루어진다.

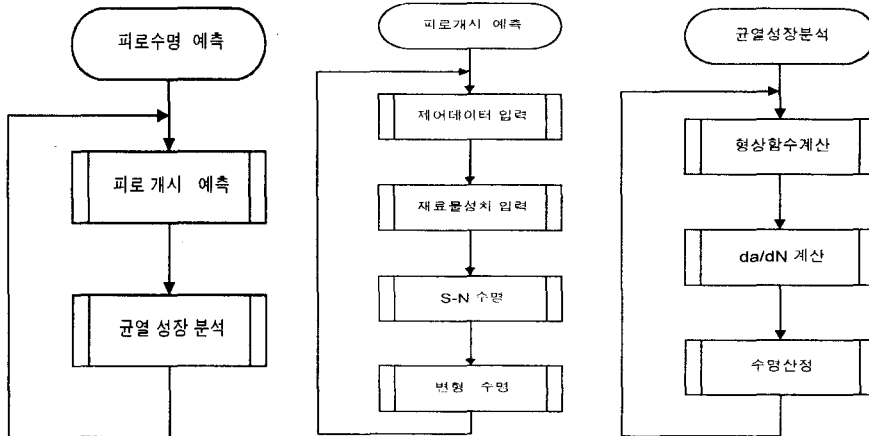


Fig. 2 Flow Chart of Fatigue Life Prediction Software

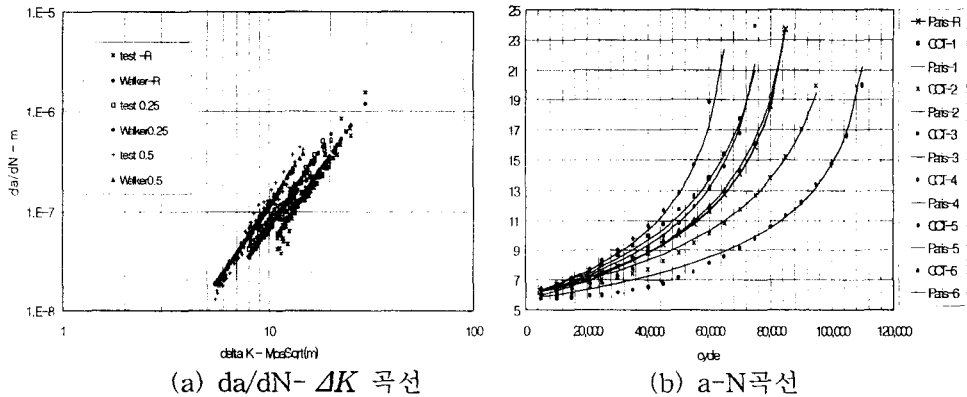
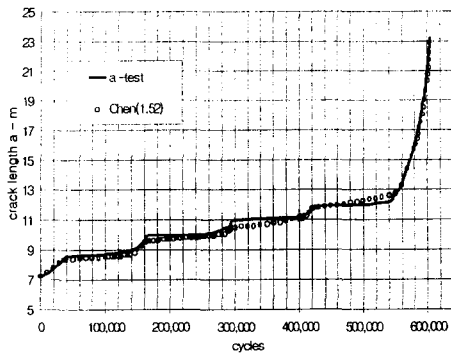
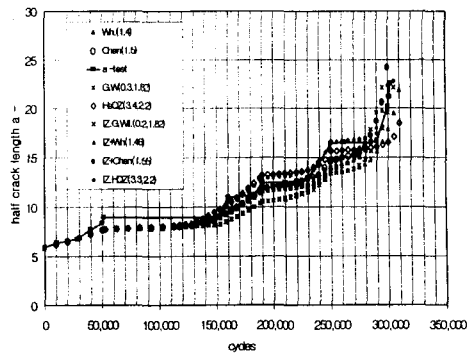


Fig. 3 일정진폭하중에서의 피로 실험과 FLP를 이용한 피로 수명의 비교

프로그램의 개발과 함께 항공기 재료로 쓰이는 Al 2024-T3을 이용하여 많은 피로실험을 수행하였고 이를 Figs. 3, 4에서 제시하였다[3, 6]. 본 피로수명예측 프로그램과 창안된 Chen-Lee 모델 등이 상당한 신뢰도를 가짐을 알 수 있었다. Fig. 3은 일정진폭하중에서의 피로 실험과 FLP를 이용한 피로수명의 결과를 비교한 것이다. (a) da/dN-  $\Delta K$ 곡선과 (b) a-N곡선 모두 실험 결과와 FLP를 이용한 예측이 비슷함을 알 수 있다.



(a) 여러 번의 과대하중



(b) 여러 번의 과대/과소하중

Fig. 4 과대/과소하중에서의 피로 실험과 FLP를 이용한 수명의 비교

Fig. 4(a)는 여러 번의 과대하중을 적용한 피로실험과 FLP에서 Chen-Lee 모델을 선택하여 예측한 결과를 비교한 것이고 Fig. 4(b)는 여러 번의 과대/과소하중을 적용한 피로 실험과 Wheeler, Willenborg, HeQZ, Chen-Lee 등의 모델을 비교한 결과이다. 피로 실험을 수행하면서 본 연구자들은 기존의 Wheeler, Willenborg 등의 모델이 한번의 과대하중에서는 적용이 가능하지만 더 불규칙적인 여러 번의 과대/과소하중하에서는 Chen-Lee 모델이 더 높은 신뢰도를 가짐을 알 수 있었다. 본 프로그램은 향후 가스배관의 재료인 API 5L X42를 이용하여 더욱 불규칙적이고 현실과 가까운 피로실험을 수행하고, 프로그램에 적용하여 결과를 비교, 분석하는데 사용할 예정이다.

후기 : 본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업 설비 안전성 평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 5. 참고문헌

- (1) Bannantine, J.A. et al Fundamentals of Metal Fatigue Analysis. Prentice Hall Inc., New Jersey, (1990).
- (2) Lemaitre, J. A Course on Damage Mechanics. Springer, Berlin, (1996).
- (3) Lee, O. S. "Fatigue Life Prediction by Statistical Approach Under Constant Amplitude Loading". KSME Journal, Vol. 12, No. 1 : pp. 67~72, (1998).
- (4) Broek, D. The Practical Use of Fracture Mechanics. Kluwer Academic publishers, The Netherlands, (1988).
- (5) Anderson, T.L. Fracture Mechanics. CRC Press Inc.,(1995).
- (6) 이억섭, 김승권 "일정진폭 및 과대하중하에서의 피로 균열 성장 수명 예측". 한국정밀공학회지, 제15권, 제10호 : pp.113~119, (1998).
- (7) Lee, O. S. "Enhancement of Fracture Safety in Engineering Structure". APOSHO 14 : pp. 334~341, (1998).