

〈論 文〉

# 재료물성치 측정 및 피로수명평가 시스템의 개발

박종주\* · 서상민\* · 서명원\*\* · 최용식\*\*\* · 김영진\*\*\*\*

(1993년 11월 19일 접수)

## Development of Material Properties Measurement and Fatigue Life Evaluation System

Jong-Joo Park, Sang-Min Seo, Myung-Won Seo, Yong-Shick Choy and Young-Jin Kim

**Key Words :** Fatigue Failure(피로파손), Fatigue Usage Factor(피로사용계수), Life Prediction (수명예측)

### Abstract

This paper describes the development strategy and contents of a fatigue life evaluation system, FLEVA. The system is composed of 4 parts; material properties, load histories, cycle counting and life prediction. The cycle counting is based on the rain-flow counting method and peak counting method, and the life prediction is performed based on the linear damage rule. Material properties (static, fatigue) are also provided as a database obtained by a computer aided test system. Case study is performed to verify the developed program.

### 기 호 설 명

- $\epsilon_0$  : 항복점에서의 변형률
- $\sigma_0$  : 항복응력
- $a$  : 상수
- $n$  : 가공경화지수
- $K'$  : 반복강도계수
- $n'$  : 반복변형률 경화지수
- $\sigma_f$  : 피로강도계수
- $\epsilon_f$  : 피로연성계수
- $b$  : 피로강도지수
- $c$  : 피로연성지수
- $D$  : 피로사용계수
- $n_i$  : 각 응력범위의 사용회수

$N_i$  : 각 응력범위의 파단수명

### 1. 서 론

반복하중을 받는 기계시스템의 경우, 피로파손은 설계과정에서 반드시 고려되어야 할 중요한 사항이다. 지난 수십년간의 지속적인 연구결과로 피로현상의 원인은 학문적으로 규명되었으며, 재료의 피로수명을 예측하기 위한 여러기법<sup>(1~3)</sup>들이 제시되어 설계분야에 성공적으로 적용되고 있다.

피로수명평가법은 그 동안 상당한 발전을 이루어 단순한 형상의 시편이나 기계요소의 피로수명예측에는 잘 적용되고 있으나, 복잡한 기계시스템에 적용되는 데는 많은 문제점이 있다. 그 이유는 기계시스템의 경우 기계요소애 작용하는 실제 하중을 정의하기가 매우 어렵고, 피로시편의 시험조건과

\*정회원, 성균관대학교 대학원 기계공학과

\*\*정회원, 기아자동차(주) 기술센터

\*\*\*정회원, 성균관대학교 기계공학과

\*\*\*\*정회원, 성균관대학교 기계설계학과

기계시스템의 사용조건이 서로 다르기 때문이다. 그러나 시스템 동적 해석 및 유한요소해석같은 컴퓨터를 이용한 CAE(Computer Aided Engineering) 해석기술이 발전함에 따라, 복잡한 기계시스템의 피로수명 해석도 효율적으로 수행될 수 있을 것이다.

피로수명평가법에는 응력-수명접근법(stress-life approach), 변형률-수명접근법(strain-life approach) 및 선형 탄성 파괴역학(linear elastic fracture mechanics)의 3가지가 있다. 응력-수명 접근법은 일정 범위의 하중이 오랫동안 작용하는 경우에 적합하다.<sup>(4)</sup> 이 방법에서는 재료의 진응력-진변형률 거동을 무시하고 모든 거동을 탄성으로 간주하므로 소성성분의 변형률이 큰 저주기(low cycle)영역에서는 적합하지 않다. 변형률-수명접근법<sup>(5)</sup>은 노치 선단과 같은 취약부위(critical location)에 작용하는 국부변형률(local strain)을 고려하여 탄소성적으로 수명을 평가하는 방법으로 저주기영역에 적합하다. 이 방법은 기계시스템의 기하학적 형상이 복잡한 경우에 잘 적용된다. 그러나 취약부위의 변형률을 구하기 위해 복잡한 해석과정을 거쳐야 한다. 한편 선형 탄성파괴역학에 근거한 피로수명평가법<sup>(2)</sup>은 결함이 존재하는 기계시스템의 균열 전파수명을 평가하기 위한 방법으로서 응력확대계수(stress intensity factor)와 균열 성장속도(crack growth rate)를 연관지음으로서 수명을 평가한다.

기계시스템의 피로강도설계를 위해서는 먼저 대상소재의 재료시험을 수행하여 재료물성치를 측정하고 이를 데이터베이스화 할 필요가 있다. 이어서 기계시스템에 반복적으로 작용하는 하중조건에 대한 응력해석을 수행하여 취약부위를 선정하고 최대 응력값을 구한다. 끝으로 반복회수계수법을 통해 기계시스템에 작용하는 실제 하중파형을 분석한 후 피로해석을 통하여 피로사용계수(fatigue usage factor)를 구한다.

본 연구에서는 이와 같은 피로강도설계 절차를 효율적으로 수행할 수 있는 종합적인 피로강도설계 시스템을 개발하고자 한다.

본 보에서는 그 첫번째 연구로 재료물성치 측정 시스템과 국부변형률 접근법에 기초하여 개발한 피로수명평가 시스템 FLEVA(Fatigue Life Evaluation)의 개요와 구조에 대하여 기술하고 사례연구를 통하여 이의 적용 가능성을 검토하고자 한다.

## 2. 피로수명평가법

### 2.1 재료물성치 측정

재료의 정적 및 동적 특성을 파악하는 단계로서, 단순 응력-변형률선도, 반복응력-변형률선도 및 변형률-수명선도 등이 있다. 이들 각각은 다음 식으로 표현할 수 있다.

○ 단순 응력-변형률선도

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (1)$$

○ 반복 응력-변형률선도

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha \left( \frac{\sigma}{K'} \right)^{1/n'} \quad (2)$$

○ 변형률-수명선도

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\Delta \epsilon_e}{2} + \frac{\Delta \epsilon_p}{2} = \frac{\sigma'}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_p (2N_f)^c \quad (3)$$

여기서,  $2N_f$ : 각 변형률 범위에서의 파단수명

### 2.2 국부 응력-변형률해석

변형률-수명접근법에서는 해석하고자 하는 대상의 노치선단과 같은 취약부위에 작용하는 국부 변형률을 계산하여 식(3)으로부터 피로수명  $N_f$ 를 구한다. 국부변형률을 구하는 방법에는 다음 3가지가 있다.

① Neuber해석법

② 유한요소해석법

③ 스트레인게이지를 이용한 측정법

Neuber해석법<sup>(7)</sup>은 공칭응력( $S$ ) 및 공칭변형률( $e$ )로부터 노치선단의 국부응력( $\sigma$ ) 및 국부변형률( $\epsilon$ )을 개략적으로 구하는 방법이다. 이는 비교적 간단한 구조물에 적합한 방법으로서, 해석하고자 하는 구조물이 복잡한 경우에는 공칭응력, 공칭변형률 등을 정의하기가 매우 어렵기 때문에 부적합하다. 스트레인게이지를 이용한 측정법은 스트레인게이지를 붙인 곳의 응력 및 변형률은 측정할 수 있으나 구조물 내부의 응력을 측정할 수 없으며 실험의 복잡성때문에 보편화되지 못하고 있다. 그러므로 국부변형률의 정확한 계산을 위해서는 유한요소해석법을 활용하는 것이 가장 바람직한 것으로 알려져 있다.

### 2.3 반복회수계수

해석하고자 하는 기계시스템에 불규칙적인 변동

하중이 작용하는 경우에 대한 피로수명평가에서는 어떤 범위의 하중이 몇번 작용하였는가를 파악할 필요가 있다. 바람직한 반복회수계수법은 작용하중 전범위의 모든 사이클을 단지 한번만 고려해 주고, 미리 정해진 최대 범위까지의 모든 사이클을 계수할 수 있어야 한다. 반복회수계수법<sup>(8)</sup>에는 크게 산과 골계수법 (peak counting), 횡단회수계수법 (level crossing counting), 범위계수법 (range counting) 등이 있다.

2.4 누적피로손상평가법

피로시험 데이터는 대체로 일정한 응력진폭(혹은 변형률진폭)과 주파수에서 시험하여 구한 것이기 때문에 불규칙한 하중을 받는 기계시스템의 수명평가에 직접 적용할 수는 없다. 이를 위해서는 반복회수계수를 통해 사용회수를 구한 후 누적피로손상 (cumulative fatigue damage)을 평가하여야 한다. 본 논문에서는 가장 일반적으로 사용되는 방법인 Miner<sup>(9)</sup>의 누적피로손상이론을 적용하였다.

누적피로손상이론에서는 다음의 식(4)에 의하여 피로사용계수(D)를 구하고 이 D값이 1에 도달할 때 파손이 일어난다고 가정한다.

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (4)$$

3. 재료물성치 측정시스템

3.1 측정시스템의 구조

본 측정시스템은 20톤 용량의 전기유압식 피로시험기 (Instron model 1332)에 맞도록 구성하였다. 시험의 정확성과 신속성을 높이기 위하여 A/D변환기 및 16비트 컴퓨터로 구성된 자동화시스템을 구성하였다. Fig. 1은 본 시스템의 구성을 도식적으로 나타낸 것으로서 구동부, 제어부 및 해석부로 나누어져 있다.

구동부에서는 시편에 하중을 가하고 하중이나 변위 등을 감지한다. 구동장치는 제어부의 명령에 따라 유압실린더가 구동하여 시편에 하중을 가한다. 이때 로드셀에서 감지한 하중, 유압실린더의 변위계에서 감지한 변위, 그리고 시편에 장착한 변위계에서 측정된 변위를 제어부에 전달한다.

제어부에서는 해석부의 명령에 따라 구동부를 제어한다. 해석부의 명령에 따라 유압실린더를 구동하는데, 이때의 하중, 유압실린더의 변위, 및 시편

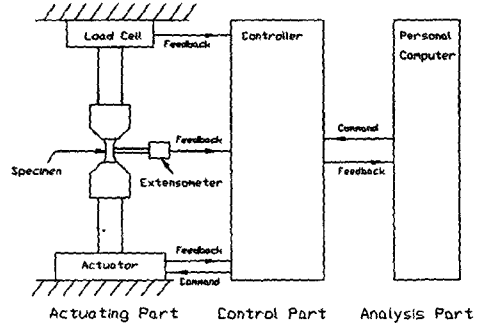


Fig. 1 Schematic diagram of computerized material testing system

의 변위를 입력받아 해석부의 명령과 비교하여 구동을 제어하는 피드백(feedback)제어 방식으로 되어있다. 제어부의 조절방식 선택스위치에서는 하중, 유압실린더의 변위, 및 시편의 변위중 하나를 선택하여 조절한다. 그리고 파형조절 스위치는 시편에 하중을 가하는 파형을 선택하고, 속도조절 스위치는 하중이나 변위등의 속도를 조절한다.

해석부에서는 입력자료를 기억하고 처리하는 일과 입력된 시험조건에 따라 제어명령을 발생시키는 일, 재료시험을 통하여 얻어진 자료를 화일의 형태로 저장하고 각 시험법의 해석절차에 따라 처리하는 일을 한다. 본 시스템에서는 시험해석을 일괄적으로 수행하고자 C-언어로 해석프로그램을 작성하였다.

3.2 단순 인장시험

단순 인장시험(monotonic  $\sigma$ - $\epsilon$  test)은 ASTM E8-89b(standard test methods of tension testing of metallic materials)에 따라 수행되도록 컴퓨터에 시험조건을 입력하였다. 해석부의 컴퓨터는 시험조건에 따라 제어명령을 제어부를 통해 시험기의 구동회로에 전달하고, 시험기의 구동에 따른 하중-변위값들의 변화를 A/D변환을 거쳐 컴퓨터로 전달받는다. 컴퓨터에서는 이 데이터를 이용하여 공칭응력-공칭변형률(nominal stress-nominal strain)값들을 자동적으로 환산한다. 또한 진응력-진변형률(true stress-true strain) 선도를 Ramberg-Osgood 식으로 곡선맞춤(curve fitting)하여 상수항  $a$ ,  $n$ 을 결정한다.

3.3 반복 인장시험

반복 응력-변형률선도를 구하는 방법에는 다수시

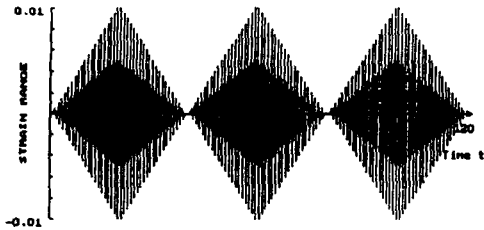


Fig. 2 Incremental spectrum

편법 (companion specimen method) 과 증분단계법 (incremental step test) 이 있다. 본 논문에서는 증분단계법을 채택하여 시스템을 구성하였다.

증분단계법은 한 개의 시편에 Fig. 2와 같은 점진적으로 증가하였다가 감소하는 변형률변력을 가하고 수개의 블럭이 지난 후의 hysteresis loop로부터 반복 응력-변형률선도를 얻는 방법이다. 이와 같은 방법을 시스템에 적용하기 위해 Fig. 2와 같은 변형률변력을 데이터화일화하여 프로그램 제어부에 전달하고, 제어부에서는 반복적으로 인장, 압축하중을 가하도록 제어하였다. 시험기 구동으로 발생하는 아날로그신호는 A/D변환기를 통하여 디지털신호로 바꾼 후 컴퓨터로 전송하게 하였다.

3.4 저주기 피로시험

저주기 피로시험 (low cycle fatigue test)은 ASTM E606-80<sup>(10)</sup>(standard recommended practice for constant-amplitude low-cycle fatigue testing)에 따라 수행될 수 있도록 컴퓨터에 시험조건을 입력하게 하였다. 본 시험의 목적은 변형률 제어하에서 시험편에 양진 인장-압축하중을 가하고 시편이 파단될 때의 사이클수를 기록하여 변형률-수명선도를 구하는 것이다. 시편에 작용하는 하중이 최대 작용하중의 75%로 떨어지면 시편이 파단된 것으로 간주하였다.

해석부에서는 시험을 통해서 얻어진 데이터를 이용하여 탄성변형률 범위 ( $\Delta\epsilon_e$ ), 소성변형률 범위 ( $\Delta\epsilon_p$ ), 전체변형률 범위 ( $\Delta\epsilon_t$ ) 및 파단수명 ( $N_f$ )을 데이터파일로 저장하도록 하였다.

4. FLEVA 프로그램의 개발

4.1 주 프로그램

Fig. 3은 본 연구에서 개발한 FLEVA프로그램의 구조를 도식적으로 나타낸 것이다.

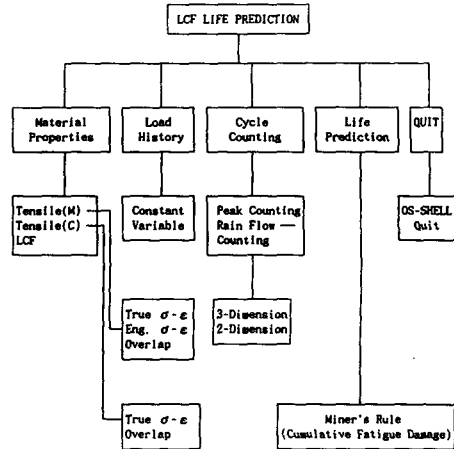


Fig. 3 Structure of FLEVA program

프로그램은 수명평가의 전체적인 흐름을 한 눈에 알아볼 수 있도록 시스템을 구성하였다. 주 프로그램의 환경은 Fig. 4와 같이 화면전체가 4부분으로 나누어져 있으며, 모든 정보들은 그래픽으로 처리하여 사용자에게 쉽고 빠르게 전달될 수 있도록 하였다. 프로그램은 재료물성치부(material properties), 하중이력부(load history), 반복회수 계수부(cycle counting) 및 수명예측부(life prediction)로 구성되어 있으며, 초기 환경은 진응력-진변형률선도, 변동 하중이력선도, 낙수계수(rainflow counting) 선도 및 변형률범위-파단수명( $\Delta\epsilon-2N_f$ )선도로 구성되어 있다. 여기서 원하는 메뉴를 선택하여 부 프로그램으로 들어가면 자세한 정보와 선도를 화면으로 출력된다. 또한 주 프로그램은 통합관리 시스템으로 구성되어 있기 때문에 모든 부 프로그램들을 선택, 관리할 수 있다.

4.2 재료물성치부

주 프로그램의 제1부로서 재료물성치 측정시험을 통해 얻은 자료들이 수록된 부 프로그램이다. 단순 응력-변형률, 증분단계 시험을 통한 반복 응력-변형률 및 저주기 피로데이터 등의 부 메뉴중에서 원하는 메뉴를 선택하면 주 메뉴화면이 Fig. 5와 같이 부 메뉴화면으로 바뀌면서 필요한 정보와 선도들이 화면에 출력된다.

4.3 하중이력부

주 프로그램의 제2부에 해당하는 부분으로 실제 작용하는 변형률이력이나 실험실에서 작성한 변형

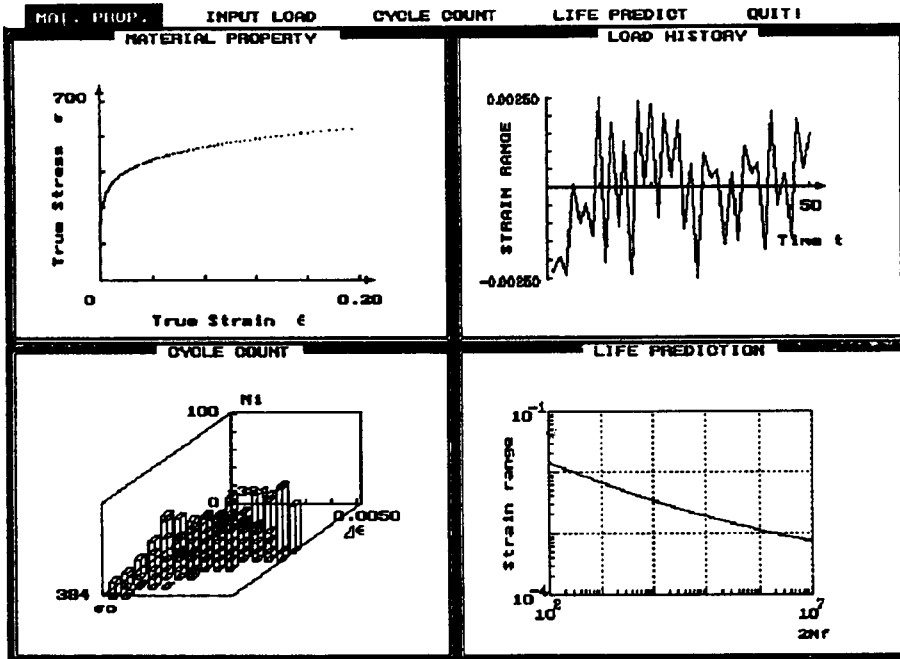


Fig. 4 Main menu screen of FLEVA program

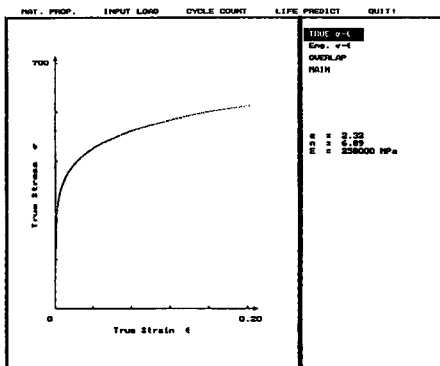


Fig. 5 Sub menu screen of material property part

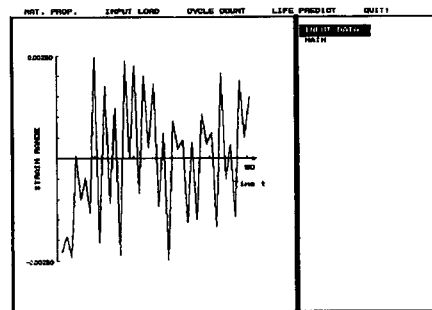


Fig. 6 Sub menu screen of load history part

률이력 등의 정보와 선도를 화면에 출력하도록 구성되어 있다. Fig. 6은 주 메뉴화면에서 하중 이력부를 선택한 후 바뀐 부 메뉴화면을 보여주고 있다. 또한, 이곳에서 변동 하중하의 수명에측에 필요한 정확한 응력(변형률)-이력을 얻을 수 있다.

#### 4.4 반복회수 계수부

주 프로그램의 제3부로서 취약부위에 대한 응력(변형률)-이력으로부터 파형을 계수하는 부분으로, 본 프로그램에서는 극대치계수법(peak counting)과 낙수계수법(rainflow counting)을 사용하였다.

Fig. 7은 파형을 계수한 결과를 화면에 출력한 경우로서, 평균응력의 효과를 고려할 수 있는 3차원 선도와 평균응력을 무시한 2차원 선도로 출력된다.

#### 4.5 수명에측부

본 프로그램의 제4부로서 앞에서 얻은 파형 특성으로부터 누적피로손상법칙을 사용하여 최종적으로 수명평가를 하는 부분이다. 여기서 사용된 수명과 잔류수명을 화면에 도시하여, 사용자로 하여금 수명을 평가한 후 설계목적에 부합되는지를 결정하게

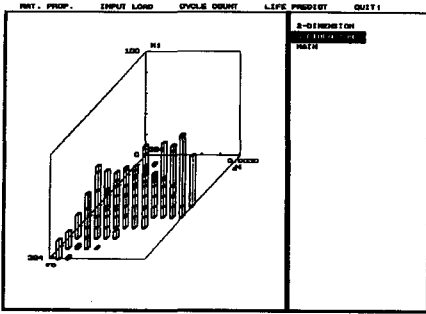


Fig. 7 Sub menu screen of cycle counting part

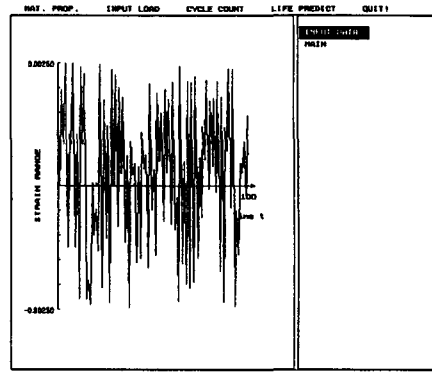


Fig. 9 Strain-time data for case study

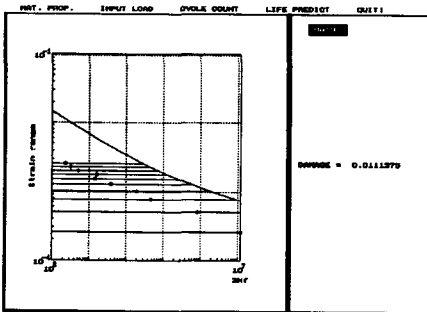


Fig. 8 Sub menu screen of life prediction part

Table 1 Cycle counting result by rain flow counting method

$\Delta\epsilon$ ( $\times 10^{-4}$ )	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$N_i$	425	322	401	215	309	321	166	262	292	283

된다. Fig. 8은 수명평가를 수행한 후 최종적으로 화면에 출력되는 상태를 보여주고 있다.

### 5. FLEVA 사례연구

본 연구에서 개발한 피로수명평가 프로그램 FLEVA를 검증하기 위하여 사례연구를 수행하였다. Fig. 9는 사례연구에 사용된 변형률-이력데이터를 도식적으로 나타낸 한 예이다. 반복회수계수법은 낙수계수법과 극대치계수법을 이용하였으며, 낙수계수법의 경우에는 평균응력이 피로수명에 미치는 영향도 함께 검토하였다. 사례연구 결과는 다음과 같다.

#### 5.1 낙수계수법에 의한 평가

##### 5.1.1 평균응력( $\sigma_0$ )을 무시한 경우

낙수계수법을 이용하여 구한 변형률 파형분석은 Table 1과 같고, 이를 도식화하면 Fig. 10과 같다. 각 변형률 범위에 해당되는 파단수명은 식(3)에 이분법(bisection method)<sup>(11)</sup>을 적용하여 구하였다.

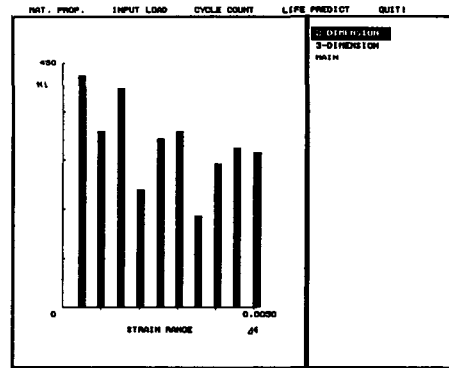


Fig. 10 Plotting of strain level and elapsed cycle data by rainflow method

여기서, 구한  $2N$ 과 사용회수  $2n_i$ 로부터 식(4)의 누적피로손상법에 의한 손상( $D$ )을 계산하면 0.024가 된다. Fig. 11은 얻어진 결과를 화면에 출력시킨 것이다. 여기서 실선은 각 변형률 범위에서의 파단수명을 나타내며, 원은 사용된 수명을 나타낸다.

##### 5.1.2 평균응력( $\sigma_0$ )을 고려한 경우

앞의 방법에서는 피로변형률 범위만을 고려하였으며, 평균응력의 효과는 무시하였다. 그러나 실제

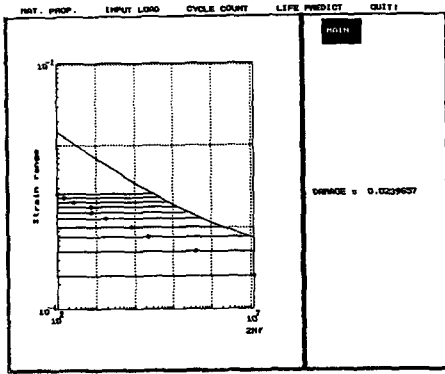


Fig. 11 Cumulative fatigue damage analysis result without considering mean stress effect

로는 동일한 변형률 범위인 경우라도, 높은 평균응력이 작용하게 되면 작용응력의 피크값이 인장강도에 더 가까우므로, 손상이 더 크고 피로수명이 짧을 것이라고 생각된다. 이와 같은 이유로 Morrow<sup>(12)</sup>가 제안한 평균응력의 효과를 고려한 수명평가가 필요하다. 본 프로그램에서 사례연구에 사용한 데이터는 변형률-이력데이터이기 때문에 평균응력을 구하기 위하여는 반복 응력-변형률선도를 이용하여야 한다. 이와 같은 과정을 통하여 구한 변형률 범위, 평균응력 및 사용한 회수와의 관계를 Table 2에 나타내었으며 이를 3차원 도표로 나타내면 Fig. 12와 같다.

얻어진 데이터로부터 누적피로손상을 평가하면 0.025가 된다. 여기서 구한 결과가 평균응력을 고려하지 않은 첫번째 경우와 비슷한 이유는 일반적으로 인장 평균응력이 구조물의 피로수명에 나쁜 영향을 미치는 반면에 압축 평균응력은 피로수명에 좋은 영향을 미치기 때문인 것으로 생각된다. 실제로 Table 2에서 압축 평균응력이 작용한 사용회수와 인장 평균응력이 작용한 사용회수의 차는 크지 않은 것으로 평가되었다. Fig. 13은 얻어진 결과를 화면에 출력시킨 것이다. 여기서 실선은 파단수명을 나타낸 것이고 원은 사용된 수명을 표시한다. 실선이 변형률 범위-파단수명곡선을 벗어난 것으로 평가된 것은 압축 평균응력의 효과에 의해 파단될 때까지의 수명이 증가하였기 때문인 것으로 생각된다.

5.2 극대치계수법에 의한 평가

극대치계수법을 사용하여 계수한 변형률 진폭과

Table 2 Cycle counting result by rain flow counting method with considering mean stress effect

$\sigma_0$	-384	-298	-213	-128	-43	43	128	213	298	384
$\Delta\epsilon$										
0.0005	17	15	29	27	73	106	64	45	25	24
0.001	0	1	0	56	43	38	114	61	7	2
0.0015	0	0	13	38	75	97	70	89	19	0
0.002	0	0	10	63	40	1	38	63	0	0
0.0025	0	0	15	39	81	92	67	15	0	0
0.003	0	0	0	15	58	127	121	0	0	0
0.0035	0	0	0	1	46	73	46	0	0	0
0.004	0	0	0	0	120	141	1	0	0	0
0.0045	0	0	0	0	150	142	0	0	0	0
0.005	0	0	0	0	102	181	0	0	0	0

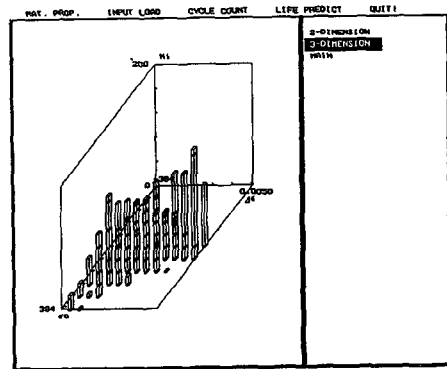


Fig. 12 Three dimensional display of strain level, mean stress and elapsed cycle

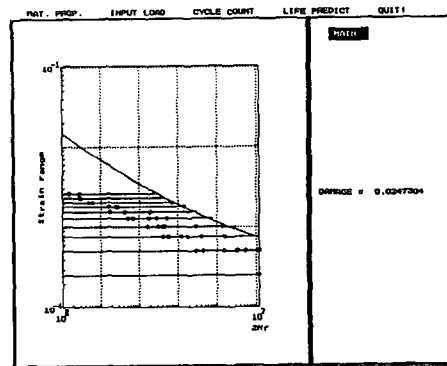
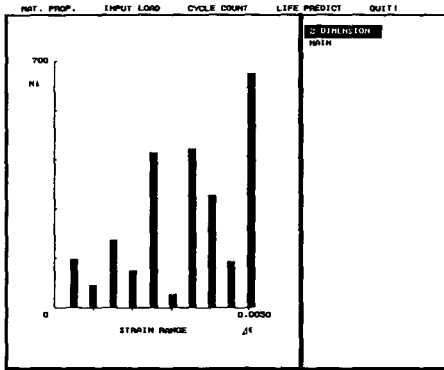


Fig. 13 Cumulative fatigue damage analysis result with considering mean stress effect

**Table 3** Cycle counting result by peak counting method

$\Delta\varepsilon$ ( $\times 10^{-4}$ )	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$N_i$	134	62	189	105	438	37	449	316	127	664

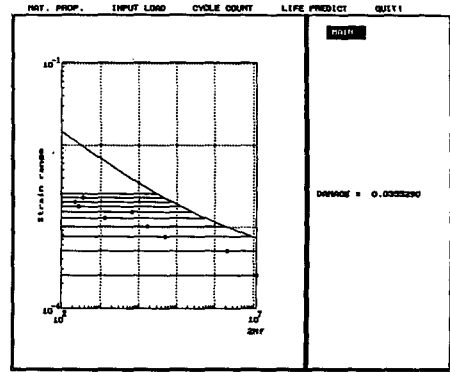


**Fig. 14** Plotting of strain level and elapsed cycle data by peak counting method

사용회수를 Table 3과 Fig. 14에 각각 나타내었다. 위와 같은 방법으로 누적피로손상을 평가하면 0.036이 된다.

극대치계수법으로 구한 누적피로손상 값은 낙수계수법의 경우보다 크게 나타났다. Table 1과 Table 3을 비교해 보면 변형률 범위가 작은 경우에는 낙수계수법으로 평가한 사용회수가 극대치계수법의 경우보다 높게 평가되었지만, 손상수명에 절대적인 영향을 미치는 높은 변형률 범위의 경우에는 극대치계수법의 경우가 낙수계수법의 경우보다 훨씬 높게 평가되고 있다. 결국 손상수명에 영향을 미치는 높은 변형률 범위가 많은 것으로 평가된 극대치계수법이 더 큰 손상을 입는 것으로 평가되었다. 그 이유는 2가지 계수방법의 차이로부터 기인된다고 생각된다.

극대치계수법은 기준변형률 이상의 경우에는 국부최고 변형률만을 계수하고 기준변형률 이하의 경우에는 국부 최소변형률만을 계수하기 때문에 최대, 최소치 사이에 있는 반환점들은 무시된다. 이에 반해 낙수계수법은 극대치계수법에서 무시되었던 반환점들도 모두 포함시켜서 계수하게 된다. 실제로 Table 1과 Table 3을 비교하면 전체 계수값에 약간의 차이를 보임을 알 수 있다. 무시되는 반



**Fig. 15** Cumulative fatigue damage analysis result by peak counting method

환점들의 조합은 피로손상수명에 거의 영향을 미치지 않는 작은 변형률 범위의 값들이다. 그러나 카운트들을 완전한 사이클로 조합시키는 과정에서 극대치계수법은 전체 변형률-이력데이터중에서 최대, 최소를 결합한 사이클을 구하는 반면에 낙수계수법은 최대, 최소를 결합시키지 않고 인접한 반환점의 영향을 받게되어 최대, 최소값들이 다른 반환점값들과 결합하게 된다. 이와 같은 이유로 손상수명에 큰 영향을 미치는 높은 변형률 범위값들이 낙수계수법에 비해 극대치계수법에서 많이 평가되게 된다. 결국 손상수명평가시 극대치계수법을 사용한 경우가 낙수계수법을 사용한 경우보다 더 큰 손상을 입는 것으로 평가를 하게 된다.

Fig. 15는 극대치계수법을 이용하여 평가한 손상수명을 화면으로 출력시킨 것이다. 여기서 실선은 파단수명을 표시한 것이고 원은 사용수명을 표시한 것이다.

## 6. 결 론

피로강도설계를 체계적으로 수행하기 위한 연구의 첫번째 단계로 재료물성치 측정시스템과 피로수명평가 시스템을 구성하였다. 재료물성치 측정시스템에서는 인장시험 및 저주기 피로시험을 제어하는 자동화시스템을 구축하였다. 국부 변형률접근법에 기초한 저주기 피로수명을 평가하도록 하기 위하여 재료물성치부, 하중이력부, 반복회수계수부 및 수명에측부로 구성된 FLEVA프로그램을 개발하고, 기계시스템의 피로수명평가를 효율적으로 수행할 수 있도록 하였다. 사례연구를 통하여 극대치계수



법을 이용한 피로수명평가가 낙수계수법을 이용한 평가보다 보수적인 것으로 평가되었다.

## 후 기

이 연구는 한국과학재단의 터보동력기계연구센터와 한국 IBM의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 깊은 감사의 뜻을 표합니다.

## 참고문헌

- (1) Juvinall, R. C., 1967, *Engineering Considerations of Stress, Strain and Strength*, McGraw-Hill, New York, p. 268.
- (2) Fuchs, H. O. and Stephens, R. I., 1980, *Metal Fatigue in Engineering*, Wiley-Interscience, New York, p. 69.
- (3) Bannantine, J. A., Comer, J. J. and Handrock, J. L., 1990, *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, p. 179.
- (4) 하재선, 송지호, 이시중, 1988, "변동하중하의 피로수명예측," 대한기계학회논문집, 제12권 제4호, pp. 760~780.
- (5) Coffin, L. F., 1954, "A Study of the Effects of Cyclic Thermal Stresses on a Ductile Metal," *Trans. ASME*, Vol. 76, pp. 931~950.
- (6) Paris, P. C. and Erdogan, F., 1963, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws," *Trans. ASME, J. Basic Eng.*, Vol. D85, pp. 528~534.
- (7) Neuber, H., 1961, "Theory of Stress Concentration for Shear-Strained Prismatical Bodies with Arbitrary Nonlinear Stress-Strain Laws," *J. Appl. Mech.*, *Trans. ASME*, Vol. E28, p. 544.
- (8) *ASTM Standard E1049-85*, 1985, "Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis," ASTM Philadelphia.
- (9) Miner, M. A., 1945, "Cumulative Damage in Fatigue," *J. Appl. Mech.*, Vol. 12, *Trans. ASME*, Vol. 67, pp. A159~A164.
- (10) *ASTM Standard E606-80*, 1980, Annual Book of ASTM Standards, ASTM Philadelphia.
- (11) Steven, C. C., and Raymond, P. C., 1988, *Numerical Methods for Engineers*, McGraw-Hill, New York, p. 128.
- (12) Morrow, J., 1968, "Fatigue Design Handbook," *Advances in Engineering*, Vol. 4, *Society of Automotive Engineers*, Warrendale, Pa., Sec. 3.2, pp. 21~29.