

〈논문〉 SAE NO. 953725

# CAE 기법을 이용한 서스펜션 너클의 피로수명 평가

## Fatigue Life Prediction of Suspension Knuckle by CAE Technology

김 영 진,\* 서 명 원,\* 서 상 민,\*\* 서 재 호,\*\*\* 김 중 재\*\*\*\*  
Y. J. Kim, M. W. Suh, S. M. Suh, J. H. Suh, J. J. Kim

### ABSTRACT

Various CAE technologies are used in automobile industries for the purpose of design and analysis. In this paper, a fatigue life evaluation system FLEVA based on the local strain approach is developed and the system is applied for the fatigue strength design of the suspension knuckle, an automobile component. Various steps such as material test, finite element analysis and cumulative fatigue damage analysis of the suspension knuckle were taken. The usefulness of the approach was verified by the fatigue test on the suspension knuckle.

주요기술용어 : Low Cycle Fatigue(저주기피로), Finite Element Method(유한요소법), Local Strain Approach(국부변형률접근법), Fatigue Life(피로수명)

### 1. 서 론

자동차 산업에서는 차체의 경량화와 파손방지의 두가지 목표를 모두 만족시키는 설계시스템의 개발이 요구되어 왔다. 반복하중을 받는 기계요소의 피로파손은 설계과정에서 반드시 고려되어야 할 중요한 사항이다. 이 분야에서의 지속적인 연구결과로 피로현상은 학문적으로 규명되었고 피로수명 평가를 위한 여러 기법<sup>1-3)</sup>들이 개발되었다. 피로수명 평가기법은 단순한 형상의 시편에는 잘 적용되어 왔으나 복잡한 기계시스템에

적용하는데는 많은 문제점들이 있다. 이러한 문제점들의 주된 이유는 기계요소에 작용하는 실제 하중을 정의하기가 매우 어렵다는 것과 또 시편에 작용하는 시험조건과 시스템에 작용하는 사용조건이 서로 다르다는 것이다. 그러나 시스템 동적해석(system dynamic analysis) 및 유한요소해석(finite element analysis) 같은 컴퓨터를 이용한 CAE(Computer Aided Engineering) 기법의 발달로 복잡한 기계시스템의 피로수명도 효율적으로 평가할 수 있게 되었다. CAE 기법은 자동차업계의 설계공정에 큰 영향을 주었으며, 이를 이

\* 정희원, 성균관대학교 기계설계학과  
\*\* 생산기술연구원 품질평가센터  
\*\*\* 기아중앙기술연구소  
\*\*\*\* 한라공업전문대 자동차공학과

융합으로써 새로운 생산품의 개발기간 단축이 가능하게 되었다. 또한 CAE 기법은 시제품 제작전에 설계개념의 검토와 성능시험시 발견된 문제점에 대한 효과적인 설계변경에도 사용될 수 있다.

본 연구의 목적은 자동차 부품의 피로강도 설계를 효율적으로 수행하는 절차를 구축하는 것이다. 이를 위해 국부변형률접근법(local strain approach)에 근거한 FLEVA(Fatigue Life Evaluation) 시스템을 개발하였으며, 이 시스템을 자동차 부품인 서스펜션 너클(suspension knuckle)의 피로강도 설계에 적용하기 위하여 재료시험, 유한요소해석 및 피로시험을 수행하였다.

## 2. 피로수명 평가기법

### 2.1 피로수명 평가절차

#### 1 단계 : 재료시험

피로수명평가에는 단순응력-변형률 선도, 반복응력-변형률 선도 및 변형률-수명 선도등의 재료물성치가 필요하다. 진응력-진변형률( $\sigma$ - $\epsilon$ )선도는 다음의 Ramberg-Osgood 식으로 곡선적합(curve fitting)하여 구할 수 있다.

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

여기서

$\epsilon_0$  = 항복점에서의 변형률

$\sigma_0$  = 항복응력

$\alpha$  = 상수

$n$  = 가공경화지수

반복응력-변형률 선도는 다음과 같이 표현된다.

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

여기서

$E$  = 탄성계수

$K$  = 반복강도계수(cyclic strength coefficient)

$n$  = 반복경화지수(cyclic strain hardening exponent)

저주기 피로에서의 변형률-수명 선도는 다음의 Manson-Coffin 식<sup>4)</sup>으로 주어지며

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

여기서

$\Delta\epsilon$  = 전체변형률 준위(total strain amplitude)

$\Delta\epsilon_e$  = 탄성변형률 준위(elastic strain amplitude)

$\Delta\epsilon_p$  = 소성변형률 준위(plastic strain amplitude)

$\sigma'_f$  = 피로강도계수(fatigue strength coefficient)

$\epsilon'_f$  = 피로연성계수(fatigue ductility coefficient)

$b$  = 피로강도지수(fatigue strength exponent)

$c$  = 피로연성지수(fatigue ductility exponent)

평균응력  $\sigma_m$ 을 고려하면 다음과 같다.

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{(\sigma'_f - \sigma_m)}{E} (2N)^b + \epsilon'_f (2N)^c \quad (4)$$

#### 2 단계 : 노치 응력해석

국부변형률 접근법에서는 노치와 같은 위험부위(critical location)에 작용하는 변형률을 계산하여 식(3)과 (4)로부터 부합하는 수명을 구한다. 국부변형률을 구하는 대표적인 방법에는 Neuber 해석법, 유한요소해석법 및 스트레인 게이지 측정법이 있다.

Neuber 해석법은 공칭응력( $S$ ) 및 공칭변형률( $e$ )로부터 노치선단의 국부응력( $\sigma$ ) 및 국부변형률( $\epsilon$ )을 개략적으로 구하는 방법으로, 먼저 노치선단의 이론적인 응력집중계수  $K_t$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$K_t = \sqrt{K_s K_e} \quad (5)$$

여기서

$$K_s = \text{실제응력집중계수} = \sigma / S \quad (6)$$

$$K_e = \text{실제변형률집중계수} = \epsilon / e \quad (7)$$

식(6)과 (7)을 식(5)에 대입하면 다음 식이 얻어진다.

$$K_s^2 S e = \sigma \epsilon \quad (8)$$

스트레인게이지를 이용한 측정법은 실험오차 때문에 보편화되지 못하고 있으며, 유한요소법을 이용하면 가장 정확한 결과를 얻을 수 있다.

3 단계 : 반복회수 계수

불규칙 하중이 작용하는 기계요소의 피로수명을 평가하기 위해서는 극대치 계수(peak counting), 낙수 계수(rainflow counting) 및 횡단수 계수(level crossing counting) 등의 방법을 사용하여 복잡한 하중이력을 일정진폭의 이력으로 정리하여야 한다. 극대치 계수법은 평균하중의 산(peak)만 계수하고 그 이하에 대해서는 골(valley)만 계수하는 방법이며, 낙수 계수법은 최대의 산이나 최대의 골로부터 하중이력이 시작할 수 있도록 재정리하여 계수하는 방법이다. 횡단수 계수법은 기준하중 이상에서는 미리 정해진 어떤 하중을 하중이력의 양(+ )의 기울기를 가지고 횡단할 때만 계수하고, 이하에서는 음(-)의 기울기를 가지고 횡단할 때만 계수하는 방법이다.

4 단계 : 누적 피로손상 해석

위험부위에 작용하는 극부응력(혹은 변형률)과 파형 수가 결정되면 불규칙한 하중을 받는 기계요소에 누적된 피로손상은 다음의 Miner 법칙<sup>5)</sup>으로 나타낼 수 있다.

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (9)$$

여기서

$n_i$  = 응력수준 S에서의 사이클수

$N_i$  = 응력수준 S에서의 피로수명

D = 누적손상

누적피로손상이론에서는 D값이 1에 도달할 때 파손이 일어난다고 가정한다.

2.2 FLEVA 프로그램

피로수명 평가를 효율적으로 수행하기 위하여 개발한 FLEVA(Fatigue Life EVALuation) 프로그램<sup>6)</sup>의 구조는 Fig.1에 나타난 바와 같으며 다음의 4부분으로 구성하였다.

1) 재료물성치부 : 단순응력-변형률 선도 및 반복응력-변형률 선도, 저주기피로 데이터등의 재료물성치를 저장하고 검색한다. 이 데이터는 그래프로 나타낼 수 있으며 재료상수는 곡선적합하여 구한다.

2) 하중이력부 : 기계요소에 작용하는 실제 변형률이력이나 실험실에서 얻은 변형률이력 등의 데이터를 저장 및 검색한다. 변형률-시간 선도를 화면에 출력시킬 수 있으며 이곳에서 변동하중하의 수명예측에 필요한 정확한 응력-변형률이력을 얻을 수 있다.

3) 반복회수 계수부 : 하중이력에 대하여 극대

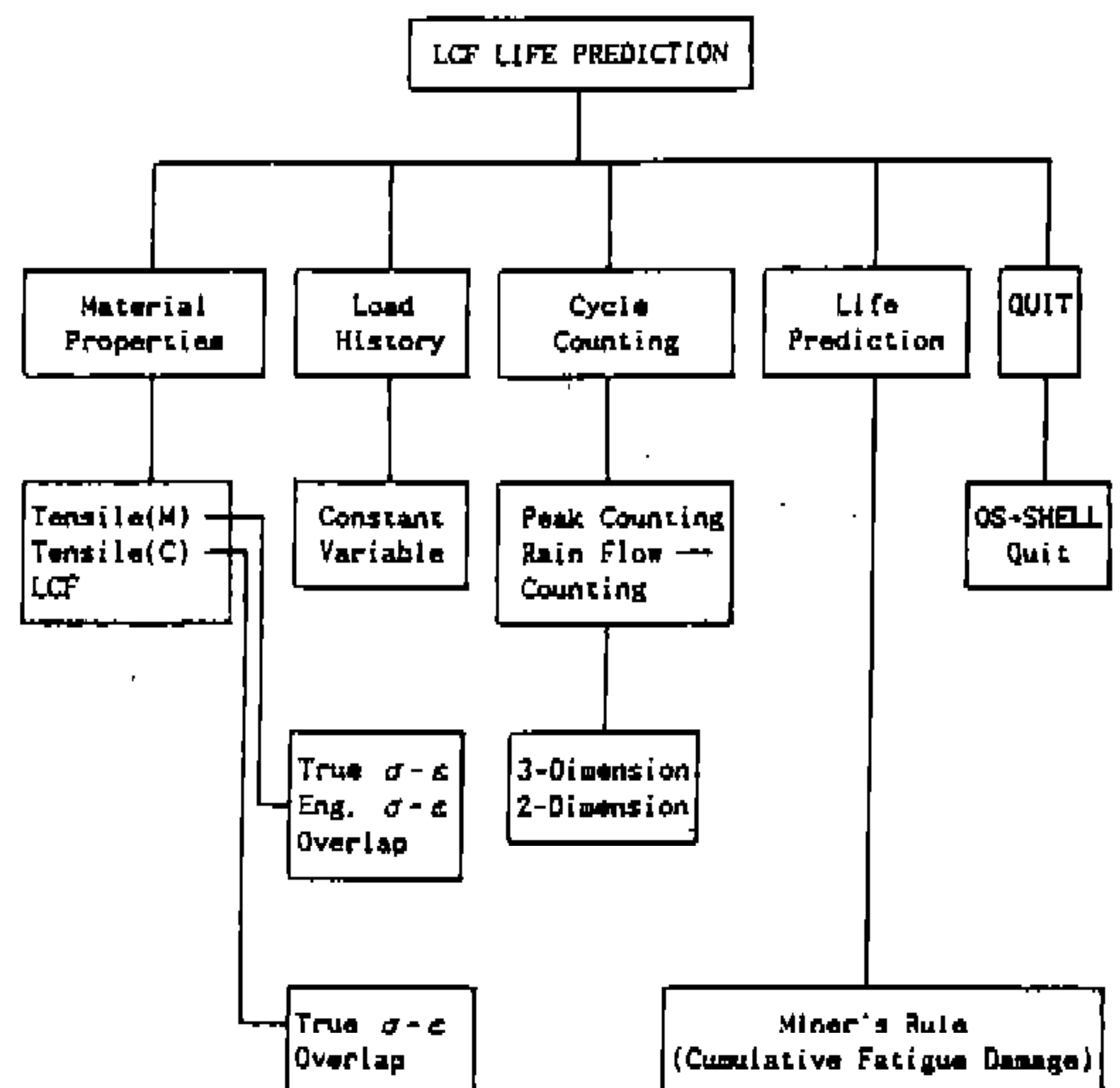


Fig.1 Structure of FLEVA program

치 계수법과 낙수 계수법에 의한 반복회수계수를 수행한다. 변형을 준위와 사이클 수를 표시하고 평균응력효과를 고려하여 3차원적으로 나타낼 수 있다.

4) 수명 예측부 : 기계요소의 재료물성치, 하중이력 및 반복회수 계수부에서 얻은 파형특성으로 부터 누적피로손상법칙을 사용하여 피로손상계수를 구함으로써 최종적으로 수명평가를 수행하는 부분이다. 사용된 수명과 잔여수명을 화면에 도시하여 수명을 평가한 후 설계목적에 부합되는지를 결정할 수 있도록 하였다.

FLEVA 프로그램은 C언어로 구성하였으며, 수명평가의 전체적인 흐름을 한눈에 알아볼 수 있도록 GUI(Graphic User Interface) 방식을 채택하여 프로그램의 환경을 설정하였다. 주프로그램의 환경은 Fig.2와 같이 전체 화면을 4part로 나누어 구성하였으며, 모든 정보들은 그래픽으로 처리하여 사용자에게 쉽고 빠르게 전달할 수 있

도록 하였다.

### 3. 서스펜션 너클의 피로해석

이 장에서는 서스펜션 너클의 피로수명 평가에 대한 사례연구를 설명하고자 한다. 서스펜션 너클은 자동차 전동축과 바퀴를 연결시켜 주는 부품중의 하나이다. 또한 핸들과 충격완화장치를 연결시켜주기도 한다. 도로상태와 운전조건에 따라 서스펜션 너클에 작용하는 실제 하중이력은 매우 복잡하나 본 사례연구에서는 자동차가 커브를 돌 때 작용하는 반복하중의 영향만을 고려하였다.

#### 3.1 재료시험

피로수명평가에 필요한 재료물성치를 구하기 위하여 서스펜션 너클의 소재인 FCD450강(2.5% C, 0.02% S)에 대한 단순인장시험, 반복인장시험

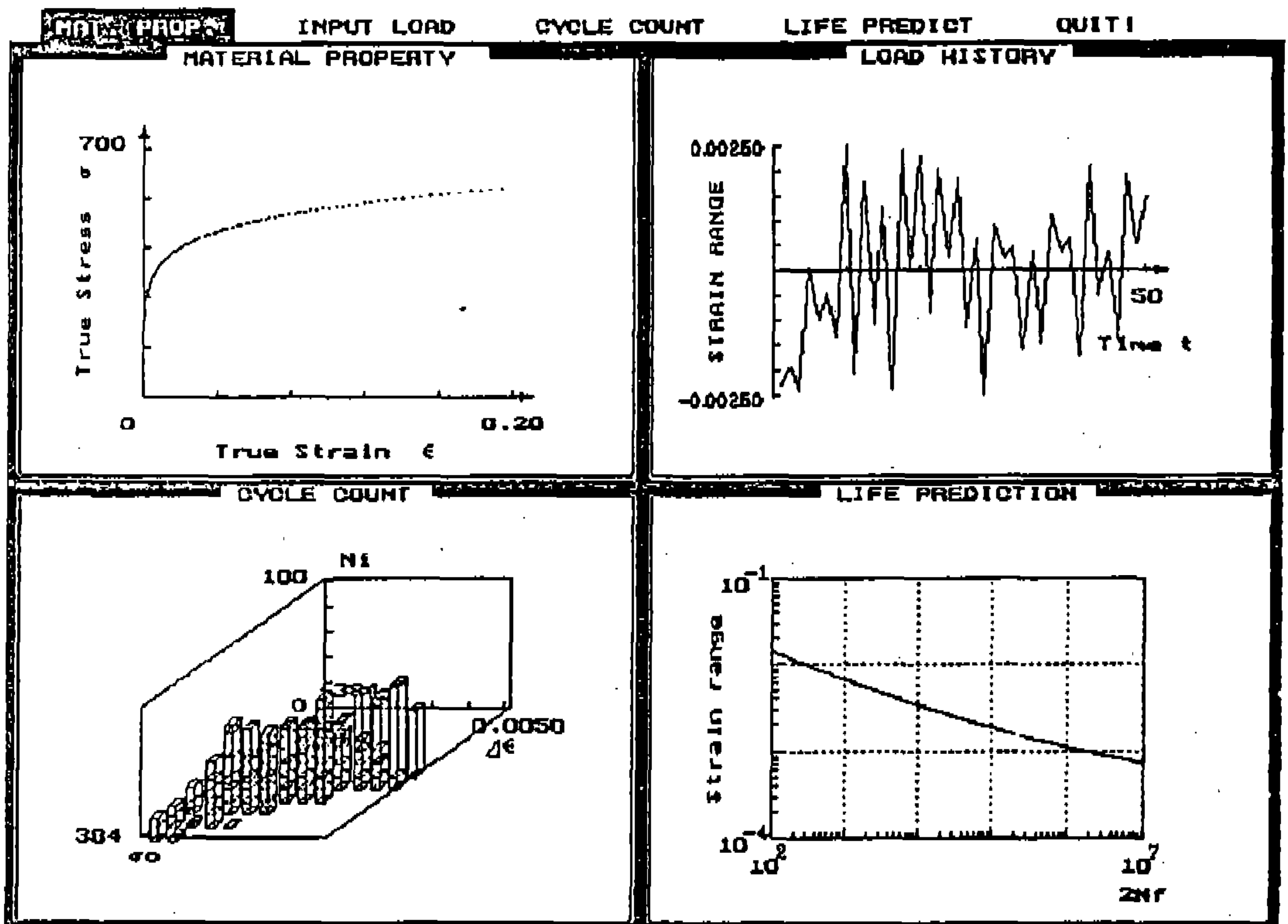


Fig.2 Main menu screen of FLEVA program

및 저주기 피로시험을 수행하였다.

단순인장시험은 ASTM E8(Standard Test Methods of Tension Testing of Metallic Material)에 따라 수행하였다. 시험에서 얻어진 하중-변위 선도에서 공칭응력-공칭변형률(nominal stress-nominal strain) 선도를 얻었다. 항복강도는 0.2% offset 법을 사용하여 결정하였으며, 인장강도는 최대하중을 원단면적으로 나누어 결정하였다. 또한 진응력-진변형률(true stress-true strain) 선도를 공칭응력과 진응력의 관계식을 이용하여 구하였다. Table 1은 실험결과를 정리한 것으로서 설계자료집<sup>7)</sup>보다 우수하였다.

반복인장시험은 증분단계법(incremental step test)과 다수시편법(companion specimen method)이 두가지 방법으로 수행하였다. 증분단계법 시험에서는 한개의 시편에 점진적으로 증가하였다가 감소하는 하중블럭(Fig.3)을 가하고 수개의 블럭이 지난 후의 hysteresis loop로부터 반복응력-변형률 선도를 구하였다. 다수시편법 시험에서는 일정변형률 시험을 수행하여 안정화된 hysteresis loop의 정점을 연결하여 반복응력-변형률 선도를 구하였다. 다수시편법에 의한 결과가 증

분단계법보다 약간 높았으며, 식(2)의 재료상수는 Table 2에 나타난 바와 같다.

변형률 제어하에서 변형률-수명 데이터를 얻기 위하여 ASTM E606(Standard Recommended Practices for Constant-Amplitude Low-Cycle Fatigue Testing)에 따라 저주기 피로시험을 수행하였다. 시험조건은 Table 3과 같다. 본 시험의 목적은 변형률 제어하에서 시험편에 양진 인장-압축 하중을 가하고 시편의 파단될 때의 사이클 수를 기록하여 변형률-수명선도를 구하는 것이다. 시편에 작용하는 하중이 최대작용하중의 75%로 떨어지면 시편이 파단된 것으로 간주하였다. 변형률 값은 0.3-0.8%의 6개 값을 사용하였으며 각각의 변형률에서 3회씩 시험을 수행하였다. 높은 변형률의 경우 시험도중 시편의 온도상승으로 인한 재질의 변화가 예상되므로 이를 방지하기 위하여 비교적 낮은 0.3Hz의 주파수를 사용하였다.

Fig.4는 저주기 피로시험 결과를 나타낸 것이다. 전변형률준위는 탄성변형률준위와 소성변형률준위로 나누어지며 피로수명과 각각 선형적인 관계이다. 식(3)의 계수는 Table 4에 나타난 바와 같다.

탄성성분 변형률과 소성성분 변형률이 일치하는 천이수명(transition life) $N_t$ 는 다음과 같이 구하였다.

Table 1 Static stress-strain test result for FCD 450 steel

	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
Experiment	313	484	15
Handbook <sup>7)</sup>	290	450	10

Table 2 Cyclic stress-strain test result for FCD 450 steel

K(MPa)	n'
821	0.11

Table 3 Experimental conditions for low cycle fatigue test

Temp.(°C)	Frequency(Hz)	Stain Ratio	Total Strain Range(%)
20	0.3	-1	0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8

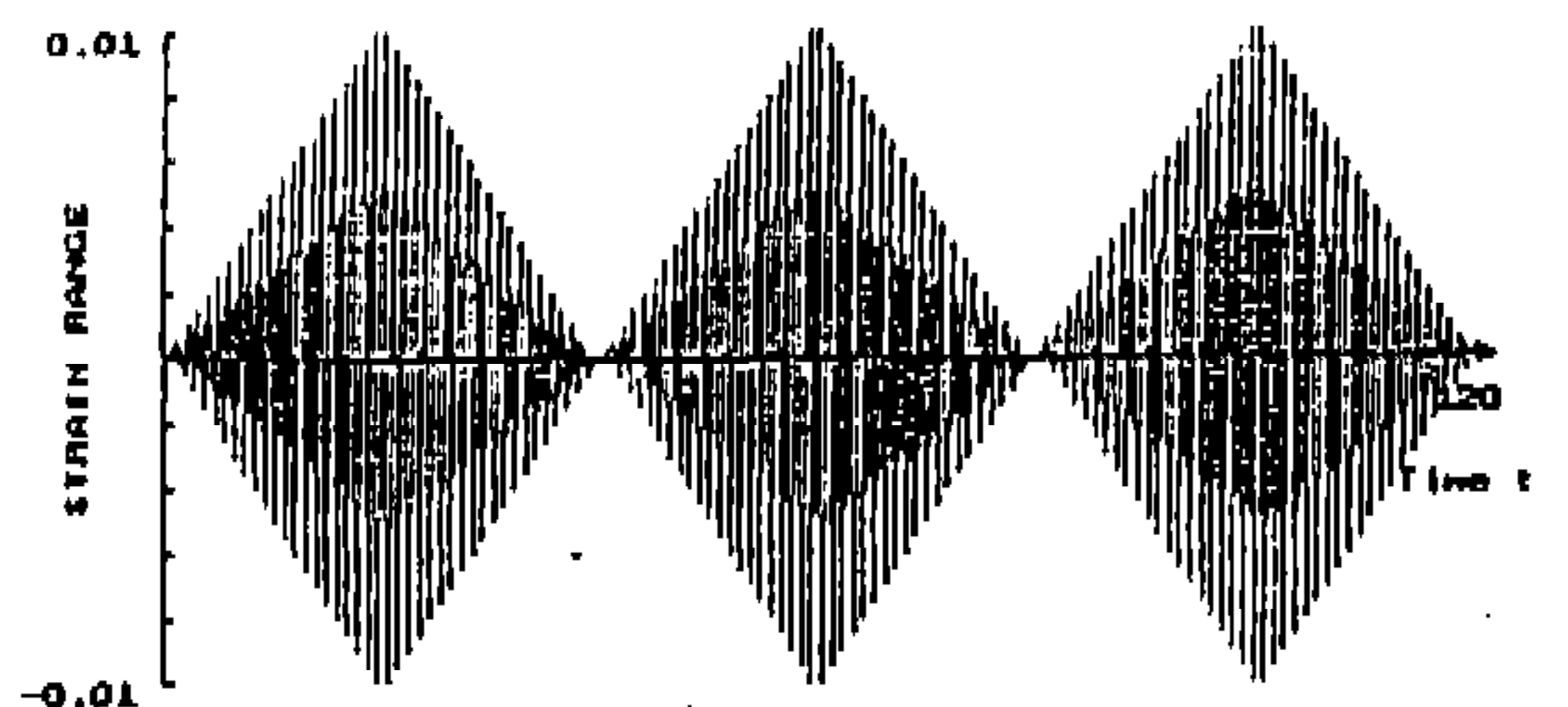


Fig.3 Incremental spectrum

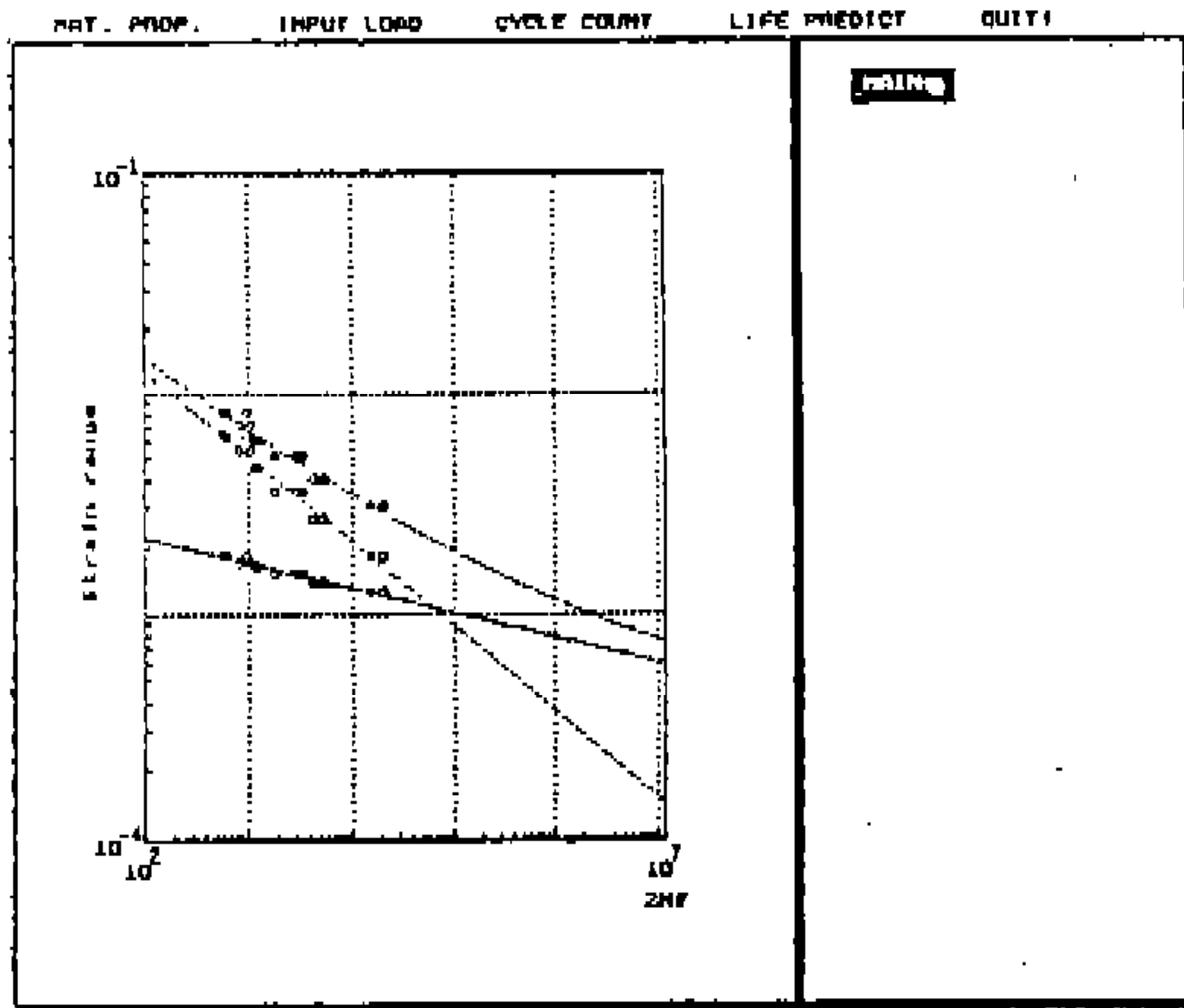


Fig.4 Strain-life curve for FCD450 steel

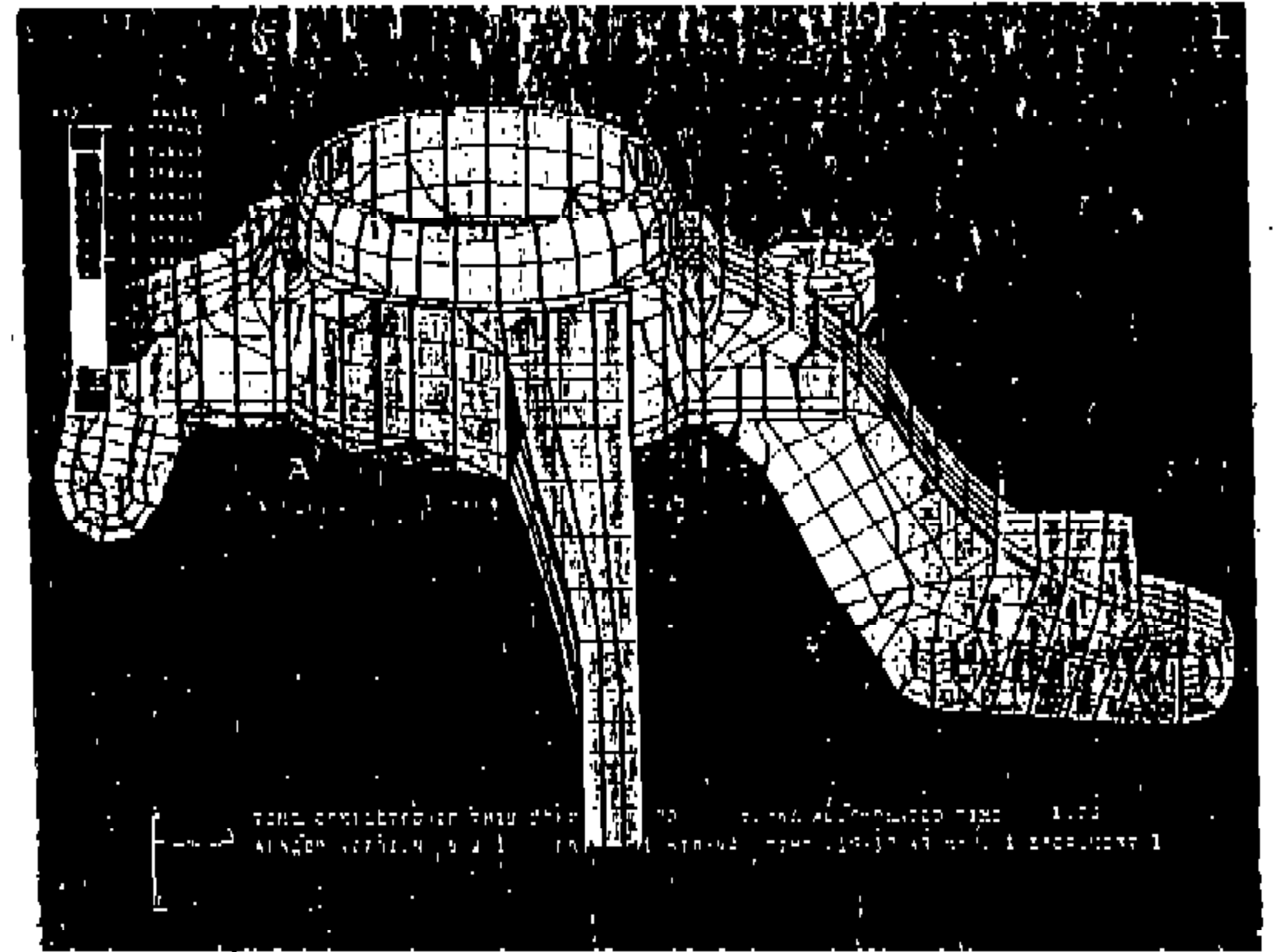


Fig.6 Contour plotting for  $\sigma_{33}$

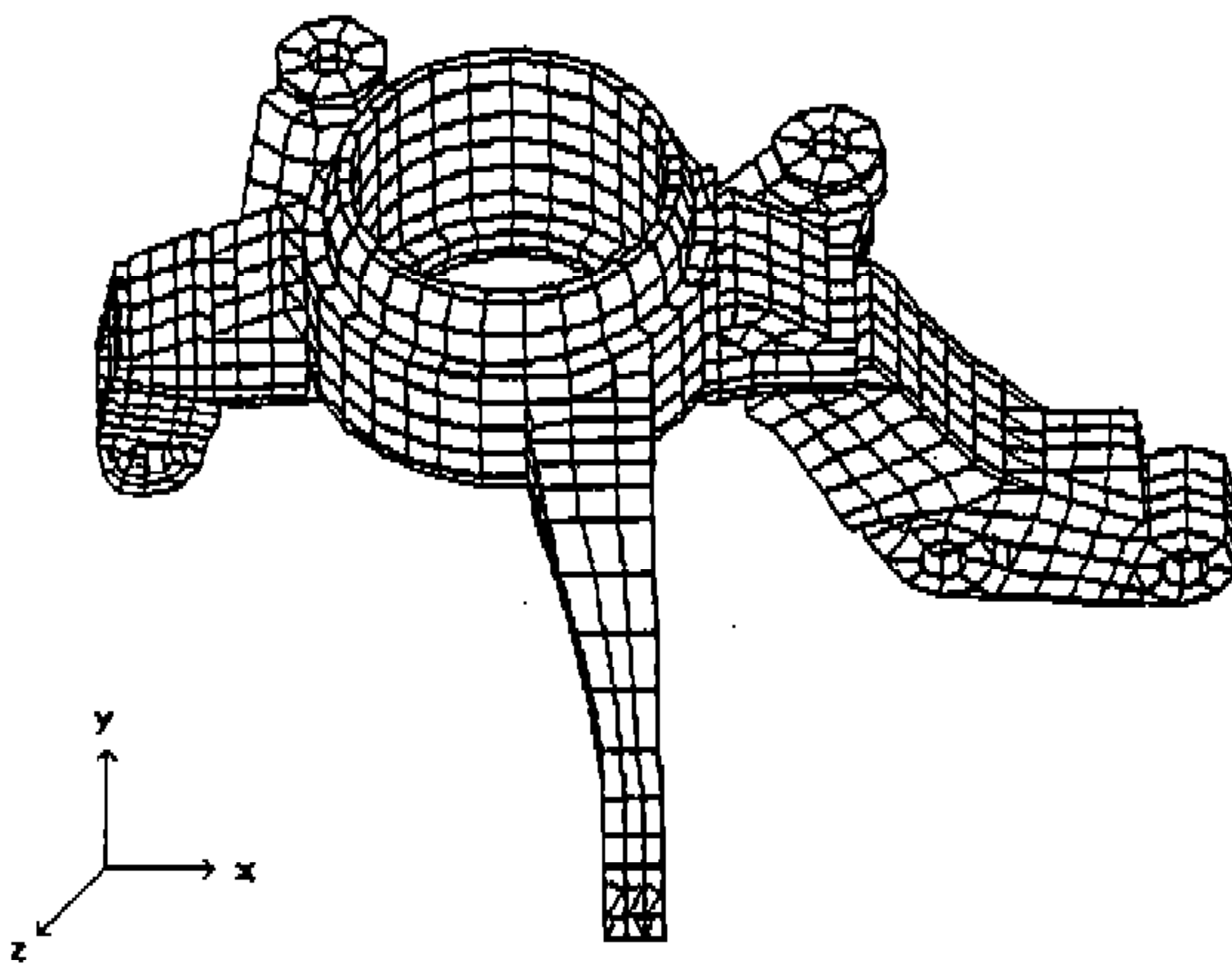


Fig.5 Finite element mesh of suspension knuckle

Table 4 Low cycle fatigue test result for FCD 450 steel

$\sigma'_f$ (MPa)	$\epsilon'_f$	b	c
934	0.017	-0.113	-0.385

$$N_f = \frac{1}{2} \left( \frac{\epsilon'_f E}{\sigma'_f} \right)^{\frac{1}{b-c}} = 28000 \text{cycles} \quad (10)$$

### 3.2 유한요소해석

서스펜션 너클 위험부위의 국부변형률을 계산하기 위하여 유한요소해석을 수행하였다. Fig5는

해석에 사용된 유한요소 모델로서 1473개의 linear brick 요소(8 node), 378개의 linear wedge 요소(6 node), 10개의 tetrahedron 요소(4 node)와 78개의 beam 요소를 사용하였다.

경계조건은 볼트구멍이 고정되어 있다고 가정하였다. 즉, 조향장치가 연결되는 부위는 자동차가 커브를 돌 때 핸들 조작에 의하여 발생하는 비틀림 모멘트의 영향을 받지만, 본 해석에서는 핸들 조작과는 무관한 상태에서 가해지는 불규칙한 하중의 영향만을 고려하기 때문에 조향장치 연결 부위는 고정되어 있다고 볼 수 있다. 또한 내구시험중에 볼트와 너트를 이용하여 너클을 고정할 때의 구속압력이 시험도중에 발생하는 너클의 회전을 방지하기에는 부족하므로 변형시 구속부위의  $\Phi_x$  방향 회전을 고려하는 것이 필요하다. 이를 위하여 너클의 서스펜션 연결부위에 볼트를 사용하여 구속하는 효과를 줄 수 있는 beam 요소를 사용하였다. 따라서 운전상태의 너클의 변위성분 U와 회전성분  $\Phi$ 에 대한 구속조건은 다음과 같다.

$$U_x = U_y = U_z = 0 \quad (11a)$$

$$\Phi_y = \Phi_z = 0 \quad (11b)$$

하중조건으로는 너클에 직접 하중을 가하기 위하여 너클 윗 부분에서 디스크 형태의 판을

이용하여 +X방향으로 가하는 하중을 사용하였다.

Fig.6은 해석결과로서  $\sigma_{33}$  응력분포를 도시한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 최대인장응력은 서스펜션 너클 연결부위의 하부(A 위치)에 발생하였으며, 최대압축응력은 상부에서 발생하였다. 따라서 A위치에서의 변형률 값을 서스펜션 너클의 피로수명 평가에 사용하였다.

### 3.3 FLEVA 해석

본 연구에서 개발한 FLEVA 프로그램에 너클의 재료물성치 및 응력해석 결과를 입력하여 피로 해석을 수행하였다. 실제 도로를 주행하는 자동차의 너클을 포함한 샤시부품의 피로수명해석을 위해서는 시스템 동적해석이 필요하다. 노면의 거칠기와 차량운전상태에 따라 대상부품에 작용하는 하중을 구한 후, 이를 본 해석의 모델에 적용하여 피로수명 예측에 필요한 변형률-시간 이력(strain-time history)을 구할 수 있다. Fig.7은 너클에 작용하는 변형률-시간이력 데이터로서 이에 대한 반복회수 계수를 수행하였다.

반복회수 계수에는 낙수계수법과 극대치계수법을 사용하였으며, 낙수계수법의 경우에는 평균응력이 피로수명에 미치는 영향도 함께 고려하였다. 평균응력의 효과를 고려하지 않은 낙수계수법을 이용한 반복회수 결과는 Fig.8에 나타난 바와 같다.

각 변형률 준위에 해당하는 피로수명은 식(3)을 이용하여 구하였는데 이때 이분법(bisection method)을 사용하였다. 여기서 구한 파단수명과 사용수명으로부터 식(9)의 누적피로손상법에 의한 해석결과는 Fig.9에 나타나 있으며 D값은 0.02397로 계산되었다. Fig.9에서 실선은 시편의 피로시험으로부터 구한 각 변형률준위에서의 파단수명을 곡선적합한 것이며, 원형심볼은 반복회수 계수를 통해 얻은 각 변형률준위에서의 사용회수를 나타낸다.

앞의 방법에서는 변형률준위만을 고려하였으며 평균응력의 효과는 무시하였다. 그러나 실제로는 동일한 변형률준위의 경우라도 높은 평균응력이 작용하게 되면 작용응력의 피크값이 인

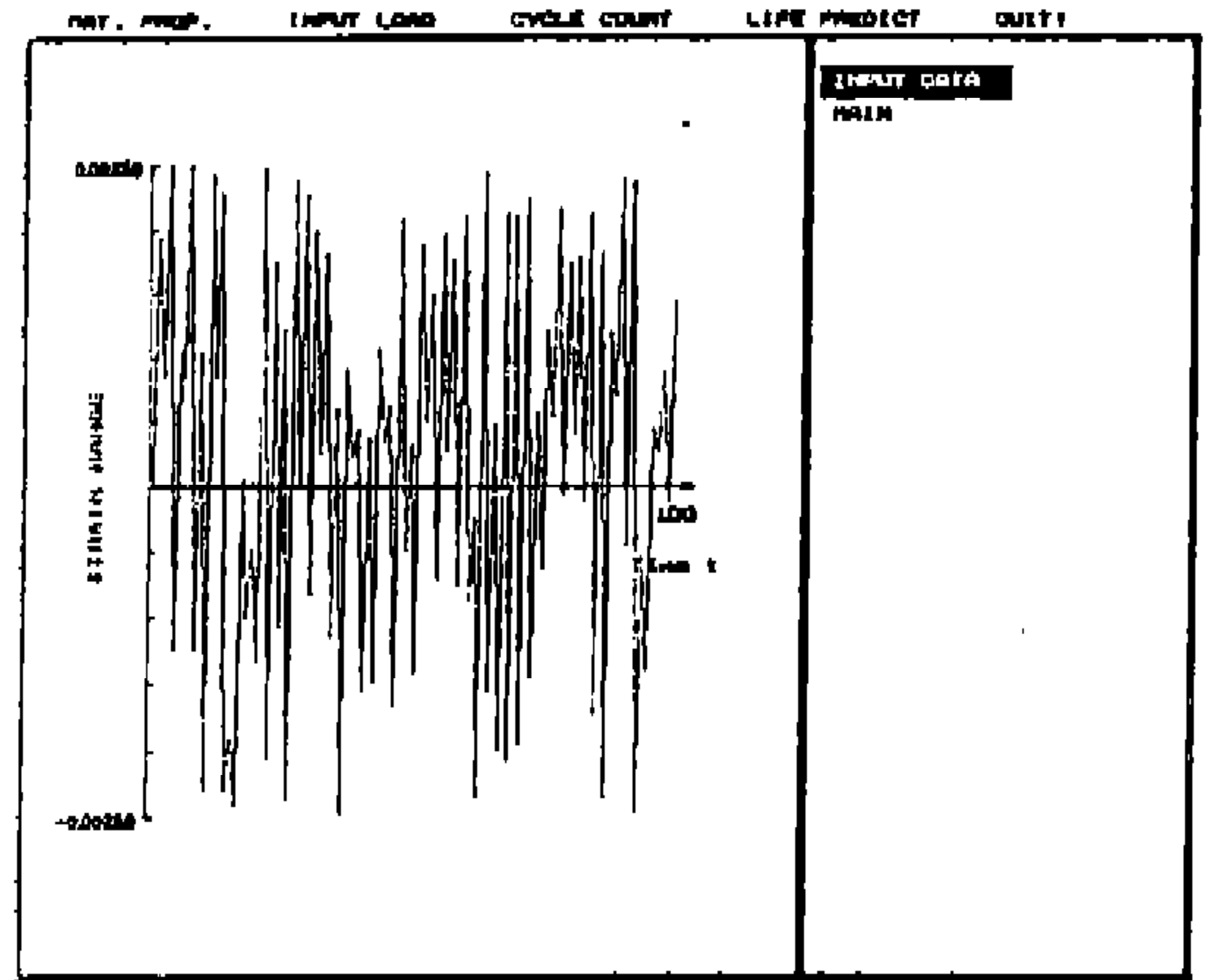


Fig.7 Strain history data for suspension

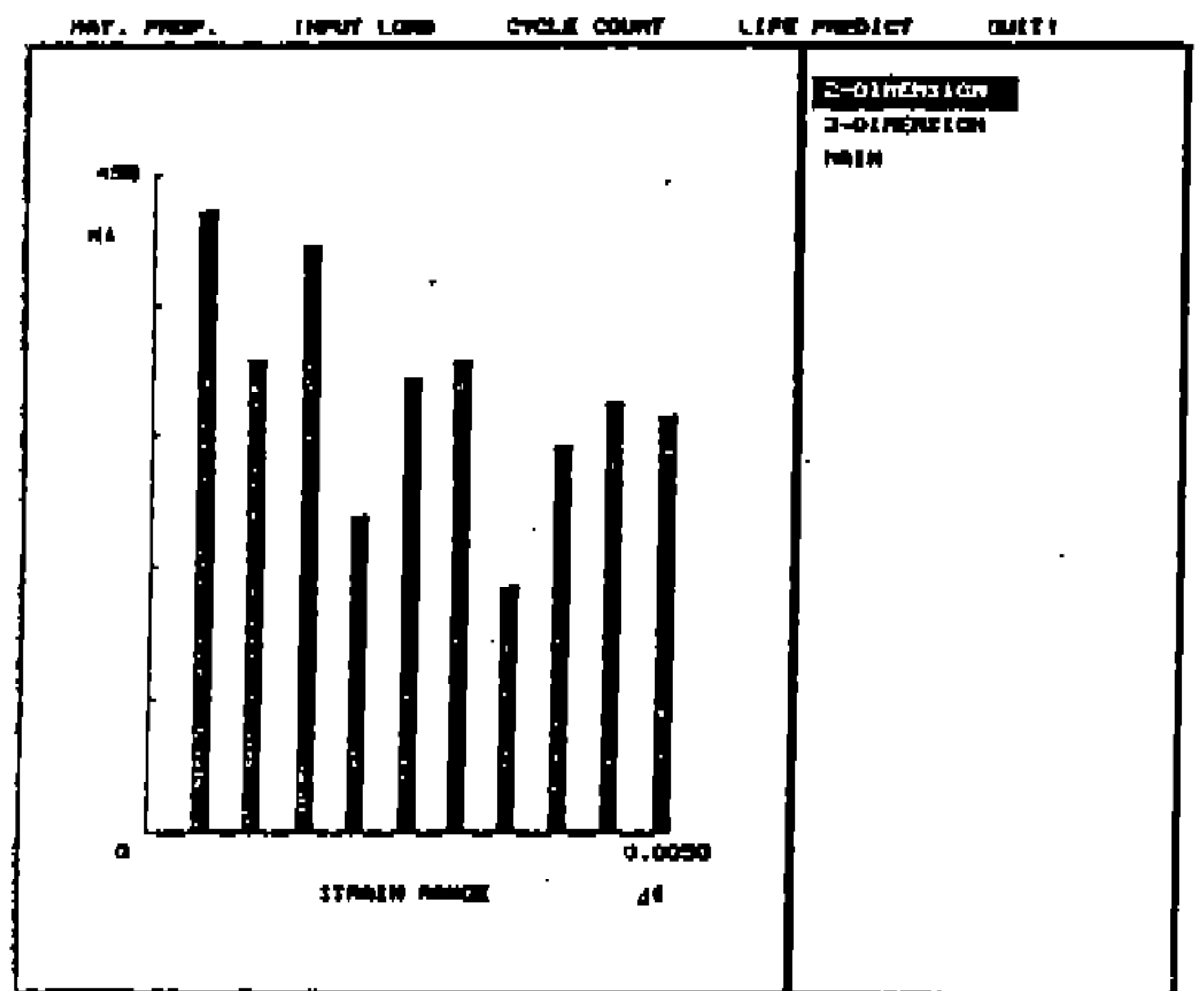


Fig.8 Plotting of strain-time data

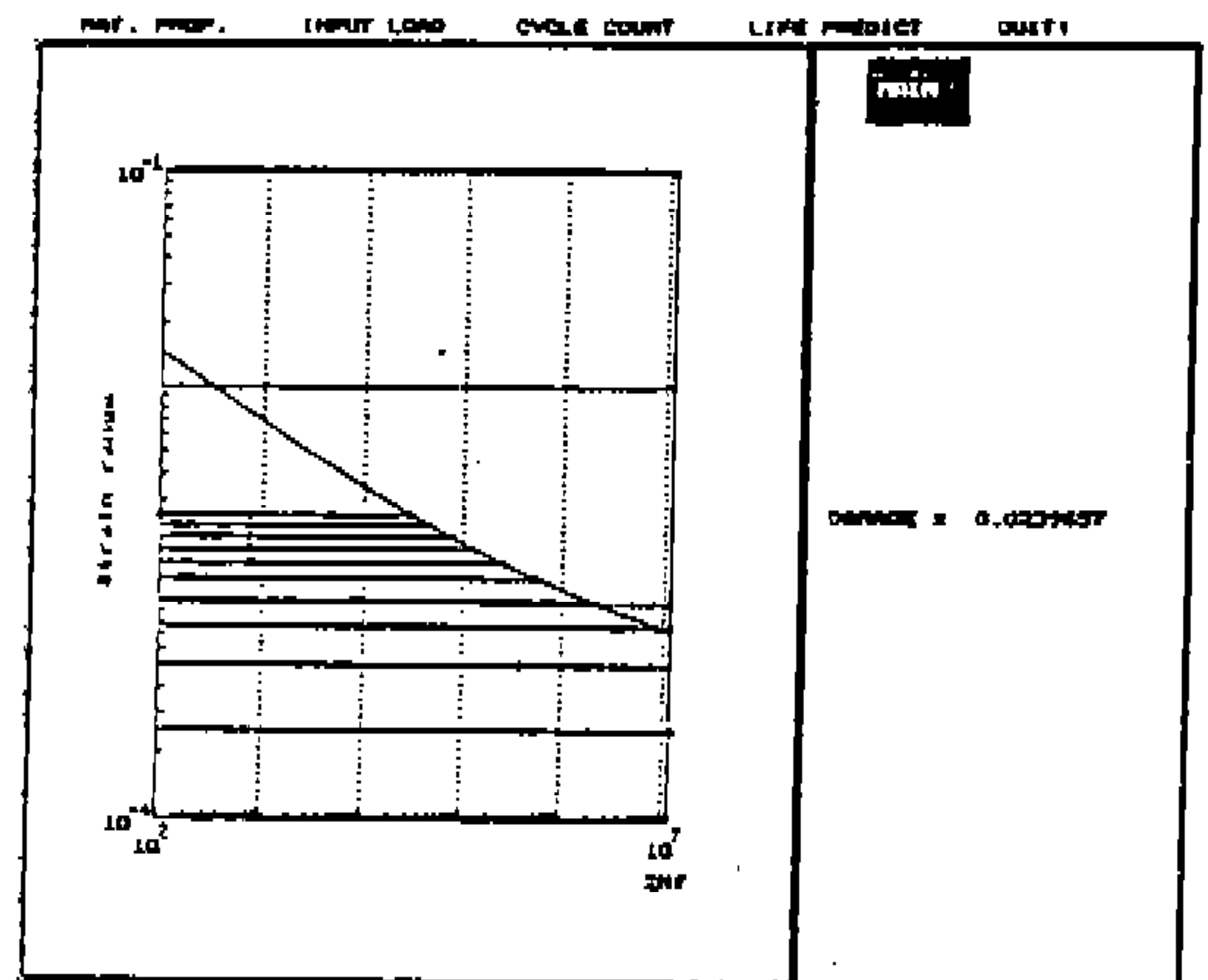


Fig.9 Cumulative fatigue damage analysis result without considering mean stress effect (rainflow method)

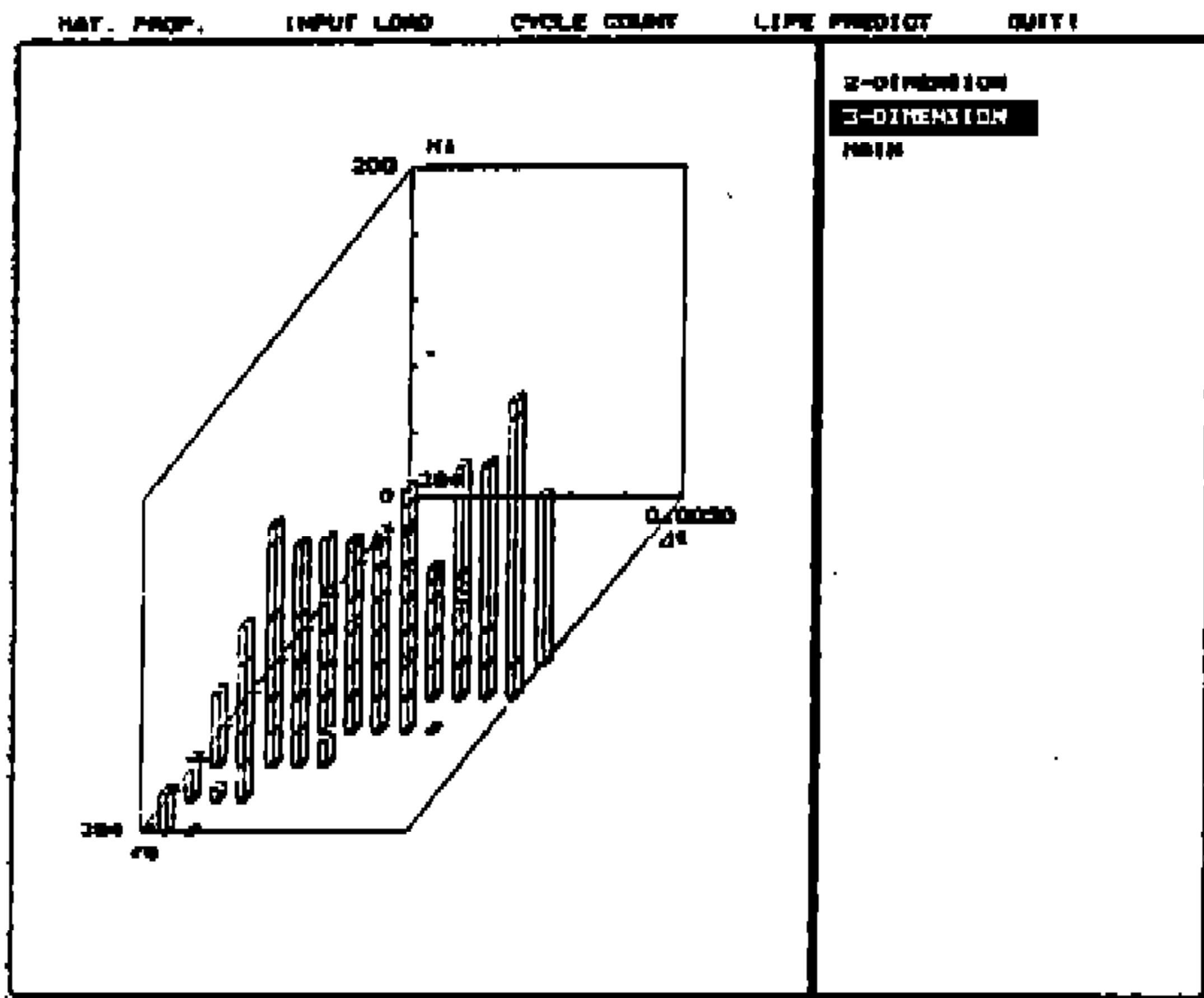


Fig.10 Three dimensional display of strain level, mean stress and elapsed cycle

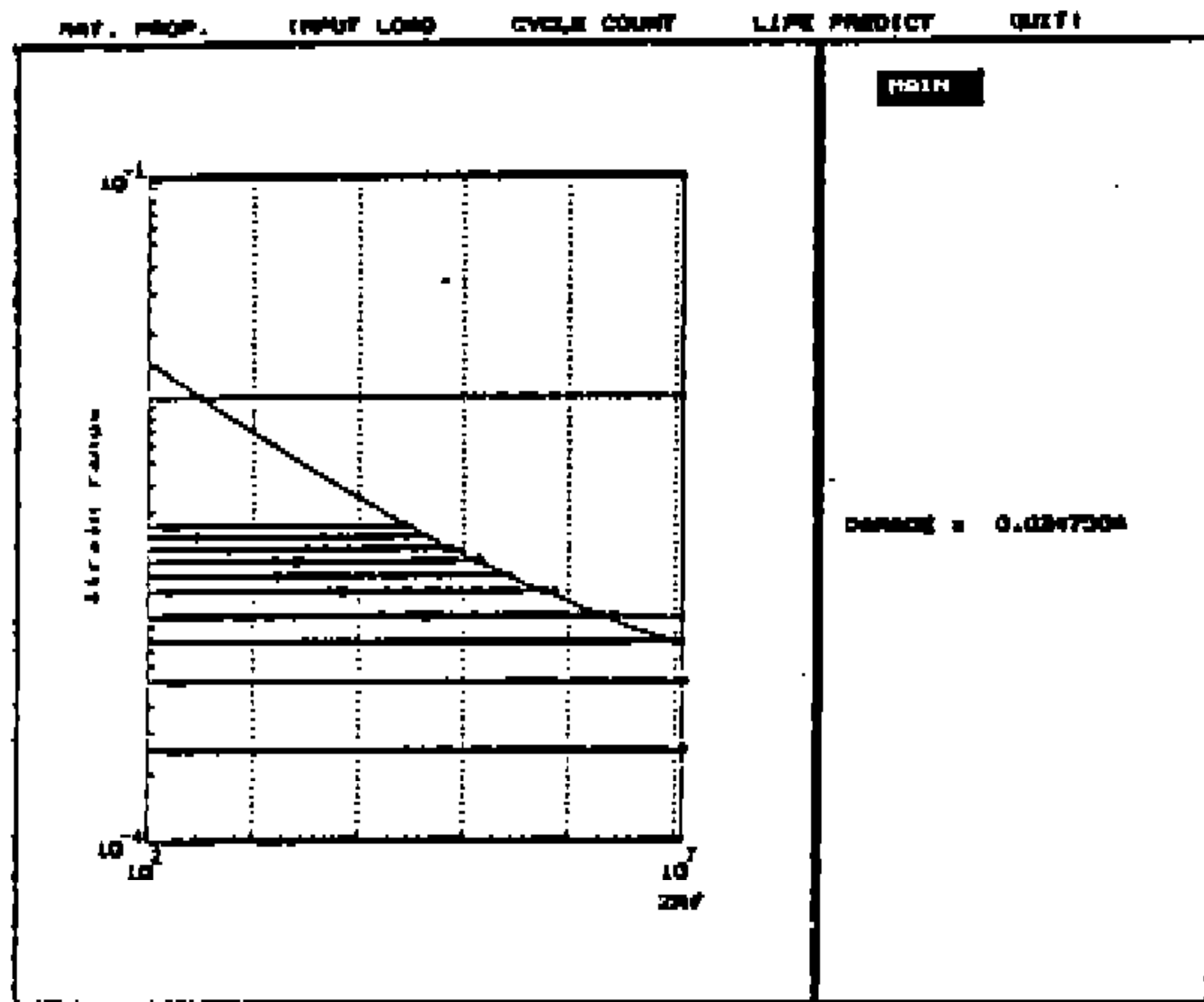


Fig.11 Cumulative fatigue damage analysis result with considering mean stress effect (rainflow method)

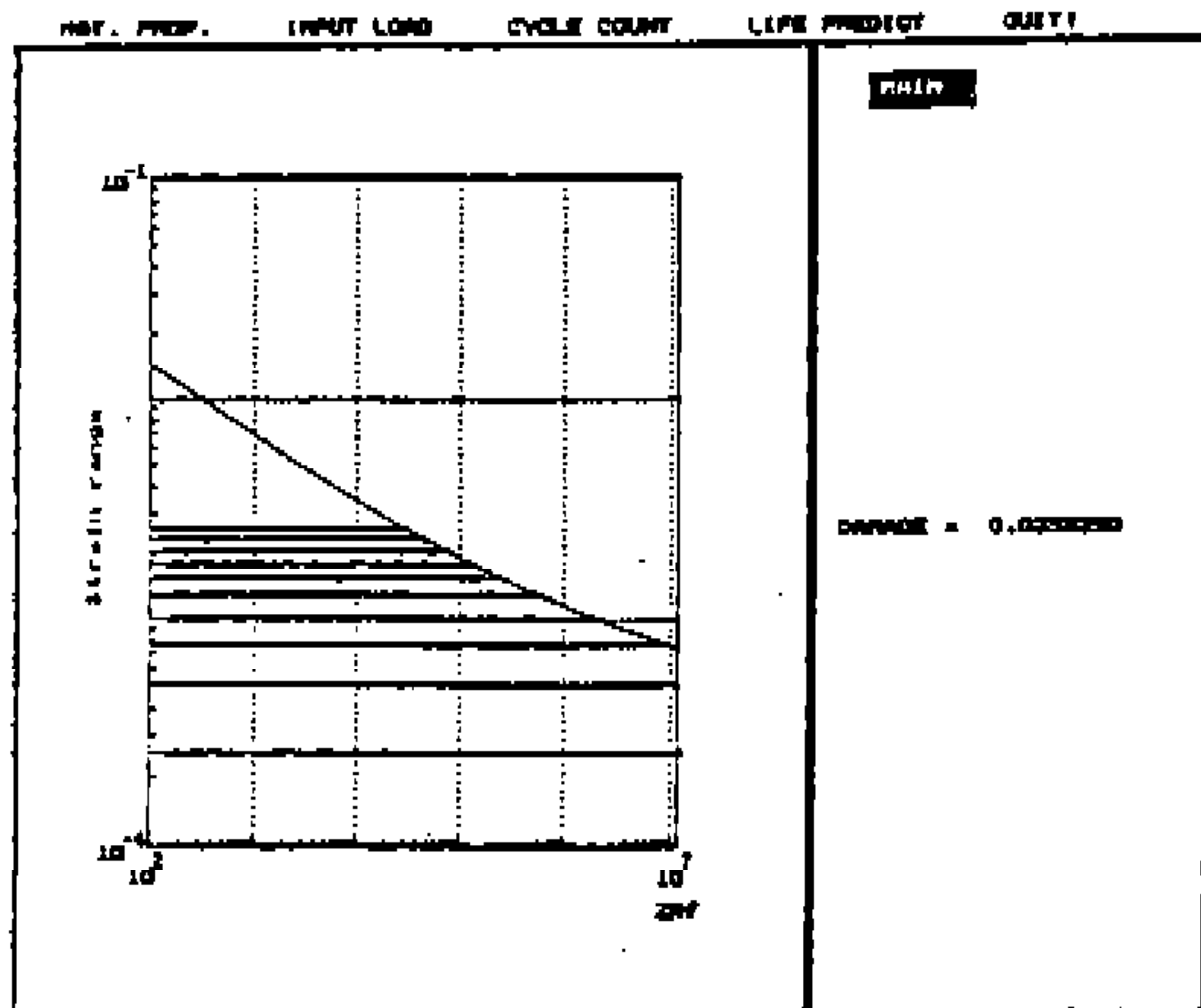


Fig.12 Cumulative fatigue damage analysis result(peak counting method)

장강도에 더 가까우므로 더 큰 손상을 입고 피로수명이 짧아질 것이라고 생각된다. 평균응력의 효과를 고려한 낙수계수법에 의한 반복회수 결과를 3차원적으로 나타내면 Fig.10과 같다. 여기서, X축은 변형률준위, Y축은 사용회수 그리고 Z축은 평균응력을 나타낸다.

얻어진 데이터로부터 누적피로손상해석 결과는 Fig.11에 나타나 있으며 D값은 0.02473으로 계산되었다. 이 그림에서 같은 변형률준위에서의 사용회수를 나타내는 원형심볼이 여러개 있는 이유는 같은 변형률준위를 나타내는 경우에도 평균응력이 달라질 수 있으므로 각 변형률준위에서 평균응력의 변화에 따른 사용회수를 나타내었기 때문이다. 여기서 구한 결과가 평균응력을 고려하지 않은 경우와 비슷한 이유는 일반적으로 인장평균응력이 피로수명에 나쁜 영향을 미치는 반면에 압축평균응력은 피로수명에 좋은 영향을 미치기 때문인 것으로 생각된다.

극대치계수법에 의한 해석결과는 Fig.12에 나타나 있으며 D값은 0.03553으로 계산되었다. 극대치계수법에 의한 누적피로손상값이 낙수계수법에 의한 값보다 큰 이유는 반복회수 계수 방법의 차이에 기인한다. 즉, 극대치계수법에서는 기준변형률 이상의 경우에는 극부최대변형률만을 계수하고 기준변형률 이하의 경우에는 극부최소변형률만을 계수하기 때문에 최대, 최소치 사이에 있는 반환점들은 무시된다. 이에 반해 낙수계수법에서는 극대치계수법에서 무시되었던 반환점들도 모두 포함시켜 계수한다.

### 3.4 너클 피로시험

제안된 피로수명 평가절차를 검증하기 위하여 서스펜션 너클의 피로시험을 수행하였다. 너클의 내구시험에 앞서 스트레인 게이지를 부착한 후 변형률 측정시험을 수행하여 최대인장과 압축이 발생하는 위치를 확인하였다.

너클의 내구시험은 압축-압축형 하중제어방식으로 피로시험을 수행하였다. Fig.13은 시험 조립도를 보여주고 있으며, 0-8ton, 0-10ton, 0-12ton, 0-14ton, 0-16ton의 5가지 하중진폭에 대하여 시험을 수행하였다. 파단시점은 균열이 약 10mm 진행된 시점으로 하였다.



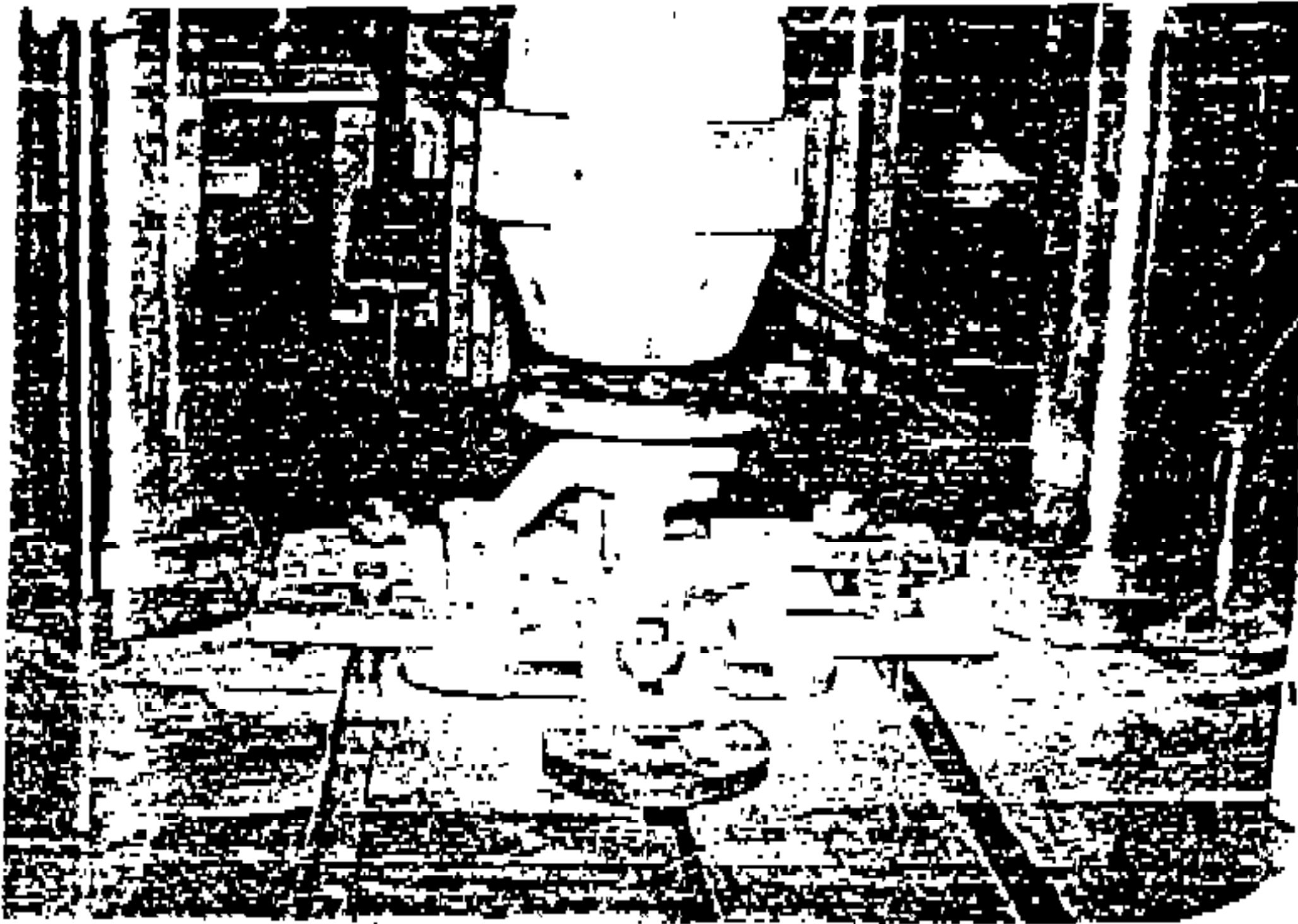


Fig.13 Assembly of knuckle fatigue test

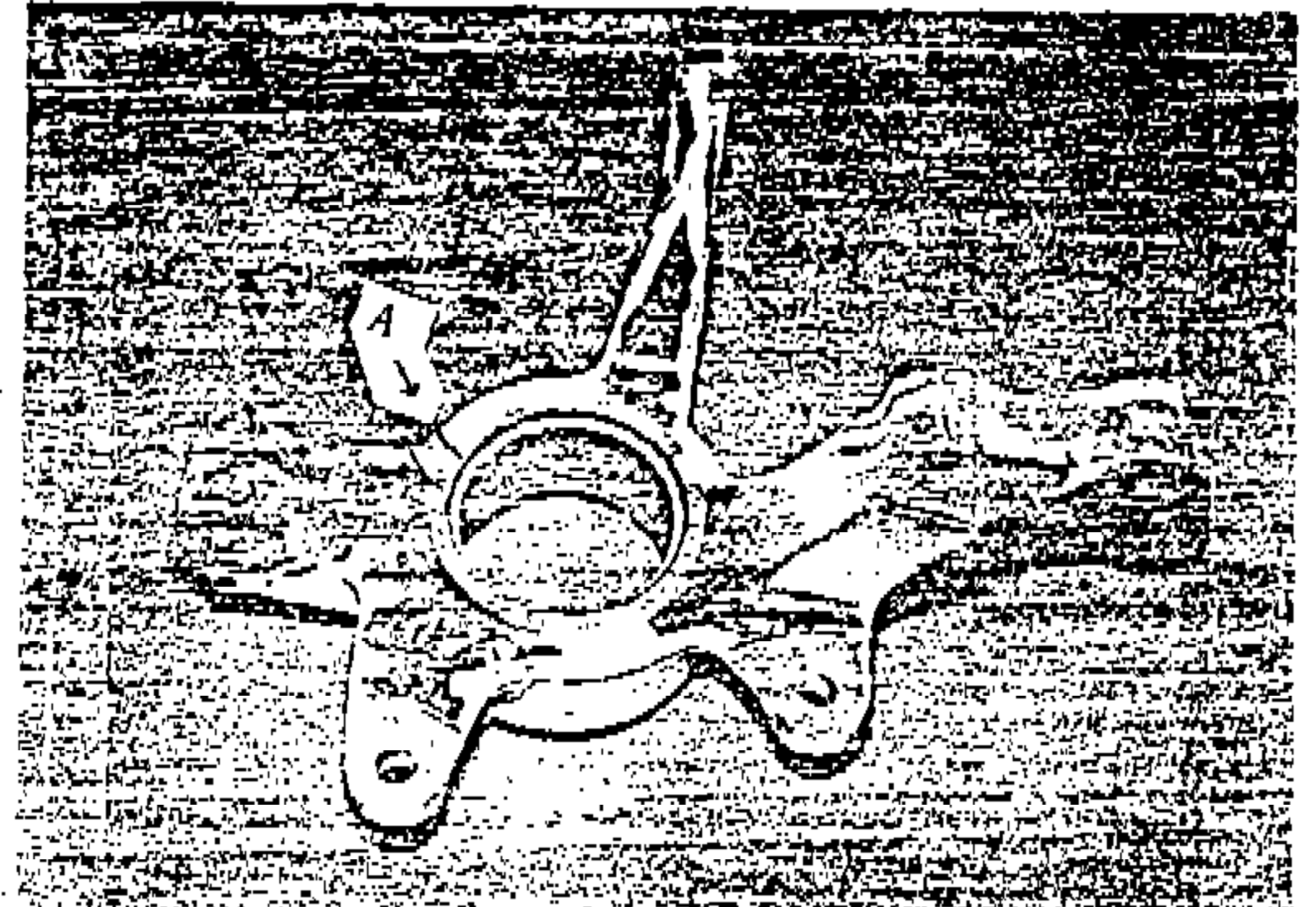


Fig.14 Knuckle photograph after the fatigue test

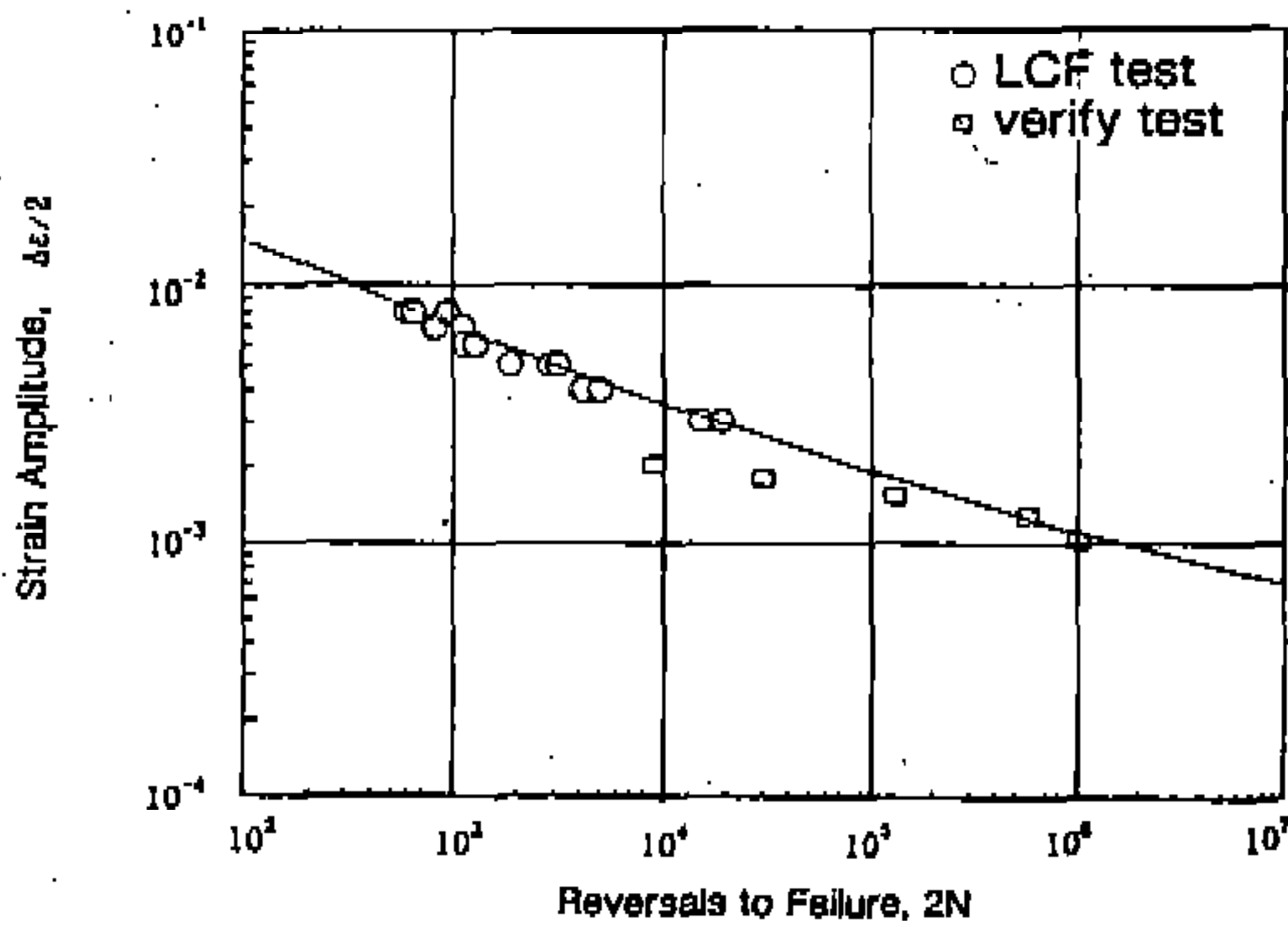


Fig.15 Comparison between specimen fatigue test and Knuckle fatigue test

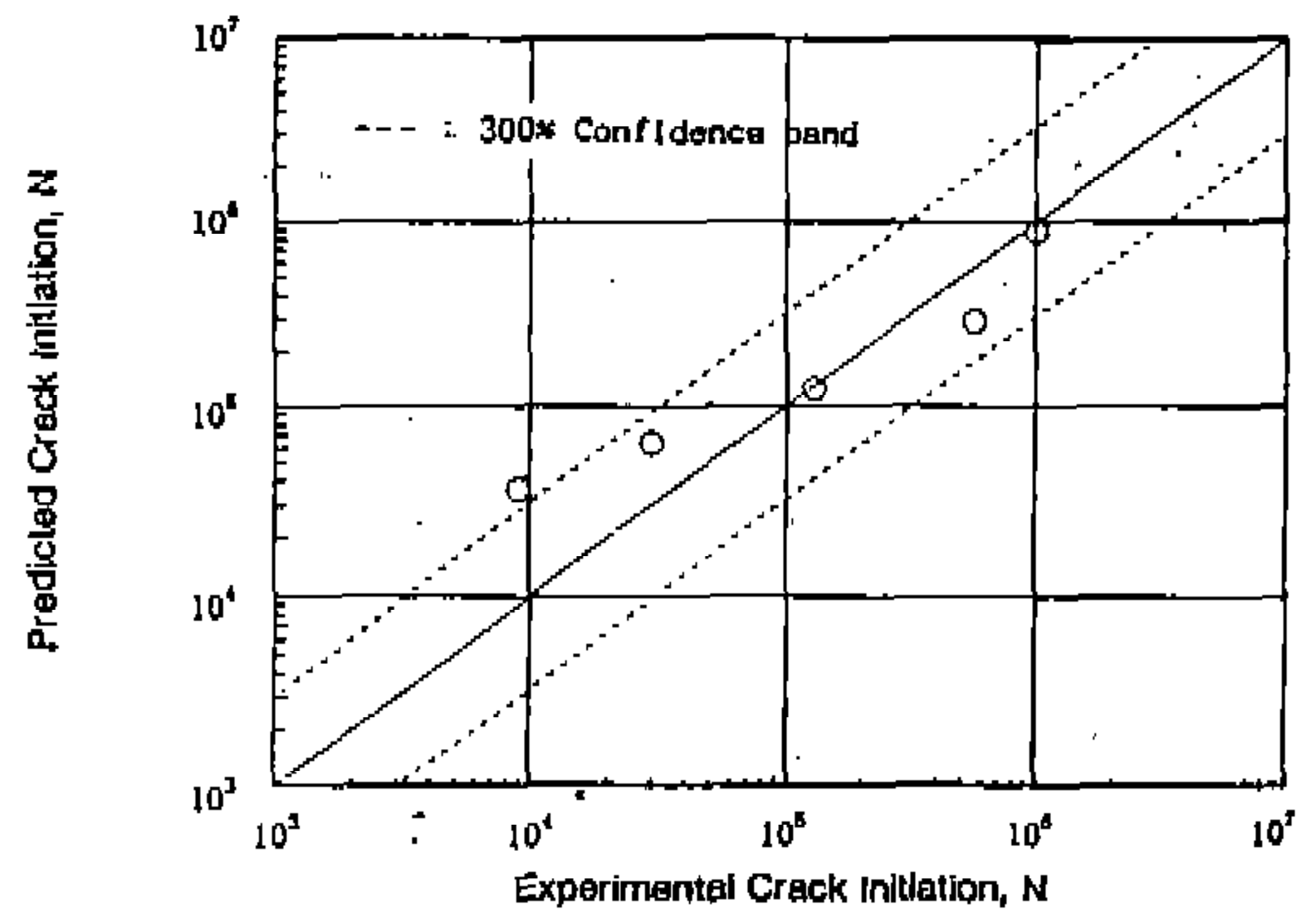


Fig.16 Comparison between predicted fatigue life and measured fatigue life

Fig.14는 내구시험이 종료된 후의 너클의 사진으로서 유한요소해석에서 확인한 최대인장응력 위치와 균열발생 위치가 일치하고 있다.

Fig.15는 시편피로시험 결과와 너클 피로시험 결과를 비교한 것이다. 2가지 피로시험결과 차이의 가장 큰 이유는 시험조건의 차이점에 기인한다고 생각된다. 시편의 피로시험에 가해진 하중은 인장-압축형태이었으며 평균응력은 0이었다. 이에 반해 너클의 피로시험에는 압축-압축 형태의 하중이 가해졌기 때문에 인장평균응력이 너클의 위험부위에 작용하게 된다. 일반적으로 인장평균응력은 구조물에 나쁜 영향을 미치며 피로파괴를 촉진시키는 것으로 알려져 있다. 이러한 이유때문에 시편의 피로시험보다 너클의 피로시험에는 파괴가 일찍 일어날 것으로 판단

된다.

Fig.16은 FLEVA 프로그램을 이용하여 예측한 너클의 피로수명과 실험으로 측정된 피로수명을 비교한 것이다. 실선은 실험을 통한 수명과 예측수명의 완전한 일치율을 나타내며 점선은 두값의 분포된 상태를 나타내는 3배의 편차폭을 의미한다. 여기서, 변형률준위가 작은 경우에는 FLEVA를 이용한 예측수명과 내구시험에 의한 수명이 잘 일치함을 알 수 있다. 그러나, 변형률준위가 커질수록 내구시험결과가 내구예측결과보다 작게 나타났다. 이는 시편 및 너클의 내구시험에 사용된 시편의 표면조건, 하중조건 및 과단기준 등의 상이함에 기인한 것으로 판단된다. 너클의 내구시험에서는 균열이 10mm 진전한 시점을 과단점으로 사용하였으나, 시편시험에서

는 재료의 강성이 25% 감소된 시점을 판단점으로 사용하였다. 따라서 항복강도보다 아주 낮은 변형률준위에서는 강성의 25% 감소와 균열의 10 mm 진전시점간의 차이가 별로 없으나, 항복강도 근처의 높은 변형률준위에서는 두 판단기준간에서는 큰 차이를 보였다. 그러나 예측수명이 시험수명의 3배내에 위치하는 비교적 정확한 수명 평가가 이루어졌다고 생각된다.

## 6. 결 론

- 1) 저주기피로시험, 유한요소해석법 및 국부 변형률 접근법 등을 총 망라한 체계적이고 종합적인 피로강도 설계절차를 수립하였다.
- 2) 피로강도 설계를 효율적으로 수행할 수 있는 피로수명평가 시스템인 FLEVA(Fatigue Life EVALuation)를 개발하였다.
- 3) 극대치계수법을 이용한 피로수명평가가 낙수계수법을 이용한 경우보다 보수적이었다.
- 4) 유한요소해석에서 최대인장응력이 발생한 지점과 내구시험에서 피로파괴가 발생한 지점은 잘 일치하였다.
- 5) 너클의 피로수명은 시편의 피로수명보다 짧았는데, 이는 시편의 표면조건, 하중조건 의 차이에 기인한다.

## 참 고 문 헌

1. H.O. Fuchs and R.L. Stephens, "Metal Fatigue in Engineering", Wiley-Interscience, New York, 1980.
2. J.A. Bannatine, J.J. Comer and J.L. Handrock, "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis", Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1990.
3. J.Morrow, "Fatigue Design Handbook", Advances in Engineering, Vol.4, Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pa., Sec.3.2, pp.21-29, 1968.
4. S.S. Manson, "Behavior of Materials under Conditions of Thermal Stress", Heat Transfer Symposium, University of Michigan Engineering Research Institute, pp.9-75, 1953.
5. M.A. Miner, "Cumulative Damage in Fatigue", J. Appl. Mech., Vol.12, Trans. ASME, Vol.67, pp.A159-A164, 1945.
6. 박종수, 김영진 외 2인, "재료물성치 측정 및 피로수명 평가 시스템의 개발", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp.52-55, 1993.
7. "Data Book on Fatigue Strength of Metallic Materials", The Society of Materials Science, Japan, Vol.1, p.1, 1982.