

<논문> SAE NO. 933743

## 주조 알루미늄합금 A356의 저주기 피로특성 및 피로수명 모델

### Low Cycle Fatigue Characteristics of A356 Cast Aluminum Alloy and Fatigue Life Models

고 승 기\*  
S. K. Koh,

#### ABSTRACT

Low cycle fatigue characteristics of cast aluminum alloy A356 with a yield strength and ultimate strength of 229 and 283 MPa respectively was evaluated using smooth axial specimen under strain controlled condition. Reversals to failure ranged from 16 to  $10^7$ . The cast aluminum alloy exhibited cyclically strain-hardening behavior. The results of low cycle fatigue tests indicated that the conventional low cycle fatigue life model was not a satisfactory representation of the data. This occurred because the elastic strain-life curve was not log-log linear and this phenomena caused a nonconservative and unsafe fatigue life prediction at both extremes of long and short lives. A linear log-log total strain-life model and a bilinear log-log elastic strain-life model were proposed in order to improve the representation of data compared to the conventional low cycle fatigue life model.

Both proposed fatigue life models were statistically analyzed using F tests and successfully satisfied. However, the low cycle fatigue life model generated by the bilinear log-log elastic strain-life equation yielded a discontinuous curve with nonconservatism in the region of discontinuity. Among the models examined, the linear log-log total strain-life model provided the best representation of the low cycle fatigue data. Low cycle fatigue life prediction method based on the local strain approach could conveniently incorporated both proposed fatigue life models.

주요기술용어 : Low Cycle Fatigue(저주기 피로), Local Strain Approach(국부변형률법), Cyclic Stress-Strain Behavior(주기 응력-변형률 거동), Fatigue Strain-Life Model(피로 변형률-수명 모델), F distribution(F 분포), Bilinearity(이선형성)

#### 1. 서 론

노치를 지닌 기계 및 구조물이 외부로부터 주기적인 하중을 받을 때, 그 노치 선단은 응력

집중에 의하여 국부적인 소성변형이 발생하게 되며 주위의 탄성영역에 둘러 싸여 있는 노치 선단의 국부적인 소성영역은 변형률 제어의 상태에 있다고 간주된다.<sup>1)</sup> 따라서 재료의 노치 선

\* 정회원, 군산대학교 생산기계공학과

단에서 발생하는 피로손상은 동일한 응력과 변형률이 노치가 없는 매끈한 시험편에 가하여 졌을 때의 시험편이 받은 피로손상과 동등하다는 가정을 할 수 있다. 이는 국부변형률법(Local strain approach)을 이용한 저주기 피로수명 예측법의 기본 개념으로서 지난 이십여년동안 국부변형률 방법을 이용한 피로수명 예측방법에 대한 많은 연구가 활발히 진행되어 오고 있다.<sup>2,3)</sup> 피로수명 예측방법은 은 변형률 제어에 의한 일축시험을 사용한 재료의 피로실험으로부터 얻어지는 저주기 피로특성을 이용한다.<sup>4,5)</sup> 재질의 저주기 피로강도는 일반적으로 변형률-수명 곡선식으로 표현되어 왔으며, 이 수명식은 실험실에서 매끈한 시험편의 저주기 피로실험을 통하여 결정되어 진다.<sup>6)</sup>

본 논문에서는 차량 및 비행기 등의 운송기계에 널리 사용되고 있는 주조알루미늄 합금 A365의 저주기 피로실험을 통하여 피로특성을 파악하여, 기존의 선형화된 탄성변형률-수명, 소성변형률-수명의 관계식으로부터 총변형-수명 관계식을 구한다. 또한 통계적 해석을 이용하여 개선된 선형 로그-로그 총변형률-수명식 및 이선형(Bi-linear) 로그-로그 탄성변형률-수명식을 제시하고, 이 개선된 피로수명식을 피로실험으로부터 얻어진 데이터와 비교하고자 한다.

## 2. 주조 알루미늄 합금 A365의 저주기 피로특성

### 2.1 주기응력-변형률 거동

주조 알루미늄합금 A365의 주주기 피로실험은 Fig.1과 같은 일축시험편을 이용하여 ASTM E606의 절차에 준하여 수행되었다.<sup>7)</sup> 저주기 피로실험에 사용된 주조 알루미늄합금 A365의 기계적 성질 및 화학적 성질은 Table 1~2에 표시되어 있다. 시험편은 시험편과 거의 유사한 형상의 주조품을 선반가공과 연삭을 한 후 polishing하였다. 피로 실험에는 89kN 용량의 전기유압식 피로실험기를 사용하였으며 스트레인 게이지를 붙인 시험편 및 다이알 게이지를 이용하여 로드셀, 그립 등의 정렬(alignment)을 하였다. 저주기 피로실험은

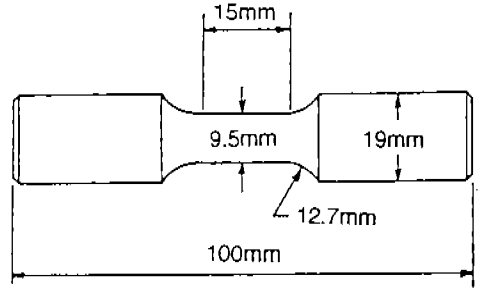


Fig.1 Low cycle fatigue test specimen

Table 1 Mechanical properties of A365 cast aluminum alloy

E(GPa)	70
0.2% offset $\sigma_{ys}$ (GPa)	229
$\sigma_u$ (GPa)	283
$\sigma_r$	274
%Elongation	3.5
%Reduction in Area	5.7
n	0.083
K(MPa)	388

Table 2 Chemical composition of A365 cast aluminum alloy(%weight)

Cu	Fe	Mn	Si	Mg	Zn	Ti	Al
0.01	0.01	0.01	7.25	0.36	0.01	0.02	Base

변형률 제어모드로 수행되었으며 1~25Hz의 변형률 파형이 사용되었다. 저주기 피로수명은 시험편이 파단되거나 25퍼센트의 최대인장하중 강도가 발생하였을 때 까지의 반전수(Number of reversal)로 정의하였으며 변형률 진폭(Strain amplitude),  $\Delta\epsilon/2$ 이 각각 0.01, 0.007, 0.005, 0.004, 0.003, 0.002, 0.0015, 0.001에서 총 51개의 시험편이 사용되었다.

일반적으로 정하중을 받는 기계 및 구조물의 설계에 단순 인장 응력-변형률 곡선이 사용되는 것처럼, 반복되는 하중을 받을 때의 기계 및 구조물의 강도, 내구성을 파악하기 위해서는 주기 응력-변형률 곡선(Cyclic stress-strain curve)이

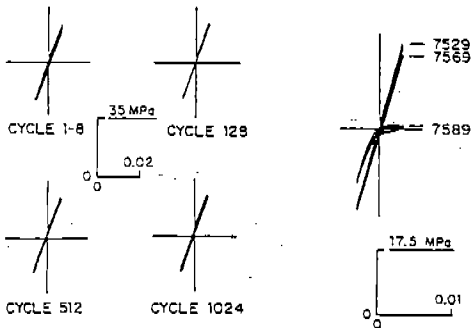


Fig.2 Hysteresis loops for  $\Delta\epsilon/2=0.003$

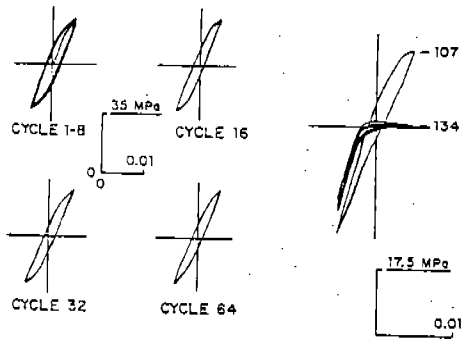


Fig.3 Hysteresis loops for  $\Delta\epsilon/2=0.005$

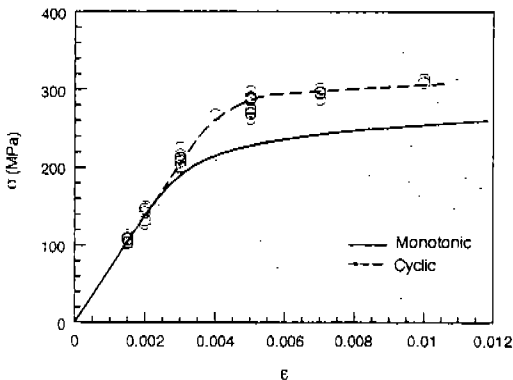


Fig.4 Monotonic and cyclic stress-strain curves

Table 3 Cyclic stress-strain properties

$n'$	0.0429
$K'$ (MPa)	379
$\sigma_y'$ (MPa)	291

유용하다. 주기적 하중에 대한 재료의 응답은 히스테리시스 루프(Hysteresis loop)의 형태로 나타나며, Fig.2와 Fig.3은  $\Delta\epsilon/2$ 이 0.003과 0.005에서의 대표적인 히스테리시스 루프를 보여주고 있다. 변형을 진폭  $\Delta\epsilon/2=0.003$ 의 히스테리시스 루프에서 주기응력과 주기변형률은 직선적인 관계를 보여주고 있으며, 실험이 진행되는 동안 파단이 일어나기 전까지 인장응력 강하는 발생하지 않았다. 변형을 진폭  $\Delta\epsilon/2=0.005$ 의 경우에는 Fig.3에서 관찰되듯이 히스테리시스 루프에서 소성변형을 진폭성분이 발생하였고, 최대 압축응력이 최대인장응력에 비하여 약 1×10퍼센트 정도 컸으며 이는 주조 알루미늄 합금 A365의 압축항복응력이 인장항복응력에 비하여 약 10퍼센트가 큰 이유에 기인한다.

주기응력-변형을 거동은 각 저주기 피로실험의 반수명(Half-life)에서의 히스테리시스 루프 꼭지점, 즉 최대인장응력을 연결함으로써 얻어지는 주기응력-변형을 곡선으로서 파악될 수 있다. Fig.4에서 주기 응력-변형을 곡선을 단순인장 실험으로부터 얻어진 응력-변형을 강화(Cyclic strain-hardening)거동을 알 수 있다. 이는 주기적인 피로응력을 받을 때 A356 주조 알루미늄합금의 응답거동을 나타내며, 단순 인장거동과는 달리 변형을 강화현상을 보여주고 있다. 위의 주기 응력-변형을 곡선은 다음의 식으로 표현된다.<sup>1)</sup>

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\Delta\epsilon_c}{2} + \frac{\Delta\epsilon_p}{2} \quad (1)$$

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

계수  $K'$ 과 지수  $n'$ 은 선형회귀해석(Linear regression analysis)으로 부터 얻어지며 Table 3에 표시되어 있다.

### 2.2 저주기 피로파괴 거동

변형률제어하에서의 총변형률 진폭은 탄성변형률 진폭과 소성변형률 진폭으로 구분되어지며 응력범위를  $\Delta\sigma$ 라 할 때 다음의 식으로 표시되어

질 수 있다.<sup>8)</sup>

$$\frac{\Delta \epsilon_r}{2} = \frac{\Delta \sigma}{2E} \quad (3)$$

$$\frac{\Delta \epsilon_s}{2} = \frac{\Delta \epsilon}{2} - \frac{\Delta \epsilon_r}{2} \quad (4)$$

또한 탄성변형률-수명( $\Delta \epsilon_r/2-2N_f$ ), 소성변형률-수명( $\Delta \epsilon_s/2-2N_f$ )은 피로수명 데이터의 로그-로그 선형식(Log-log linear regression line)으로부터 다음의 로그-고르 선형 저주기 피로수명 모델(Log-log linear low cycle fatigue model)이 얻어진다.<sup>9,10)</sup>

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\Delta \epsilon_r}{2} + \frac{\Delta \epsilon_s}{2} \quad (1)$$

$$= \frac{\sigma_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f (2N_f)^c \quad (5)$$

$\sigma_f$ ,  $b$ ,  $\epsilon_f$ ,  $c$ 는 탄성변형률-수명 및 소성변형률-수명 데이터의 저주기 피로 특성으로서  $\sigma_f$ 는 피로강성계수(Fatigue strength coefficient),  $b$ 는 피로강성지수(Fatigue strength exponent),  $\epsilon_f$ 는 피로연성계수(Fatigue ductility coefficient),  $c$ 는 피로연성지수(Fatigue ductility exponent)이다.

실험으로부터 얻어진 주조 알루미늄합금 A356의 파단수명, 즉 파단까지의 반전수  $2N_f$ (Reversals to failure), 총변형률 진폭, 탄성변형률 진폭, 소성변형률 진폭, 응력진폭 등은 Table 4와 같으며, 저주기 피로실험 데이터는 Fig.5에 나타나어 있다. 식(1), (5)를 이용한 선형회귀 해석으로부터 저주기 피로특성치가 계산되었으며 그 값은 Table 5와 같다. Fig. 5(b)로부터  $\Delta \epsilon_r/2$ 와  $2N_f$ 의 관

Table 4 Low cycle fatigue data

$2N_f$	$Ds/2$ (MPa)	$\Delta \sigma_r/2$	$\Delta \epsilon_r/2$	$\Delta \epsilon_s/2$
16	308.36	.00439	.00561	.010
38	313.53	.00442	.00558	.010
74	296.44	.00410	.00290	.007
112	300.92	.00416	.00284	.007

46	295.06	.00408	.00292	.007
54	287.48	.00400	.00300	.007
68	295.27	.00416	.00284	.007
974	290.51	.00432	.00068	.005
786	295.35	.00433	.00067	.005
268	269.16	.00418	.00082	.005
414	275.00	.00392	.00108	.005
482	275.00	.00396	.00104	.005
134	263.00	.00367	.00133	.005
908	288.65	.00411	.00089	.005
1200	287.13	.00398	.00102	.005
250	269.55	.00383	.00117	.005
686	286.79	.00404	.00096	.005
272	275.55	.00391	.00109	.005
890	287.41	.00401	.00099	.005
2308	267.76	.00398	.0	.004
15178	216.60	.00282	.00018	.003
12188	201.87	.00297	.0	.003
9966	200.00	.00288	.00012	.003
7700	200.00	.00288	.00012	.003
15670	212.88	.00291	.00009	.003
18000	213.02	.00300	.0	.003
9358	208.88	.00300	.0	.003
7320	207.50	.00300	.0	.003
10476	211.92	.00300	.0	.003
14494	211.71	.00300	.0	.003
12044	209.02	.00300	.0	.003
6500	225.36	.00300	.0	.003
154886	128.02	.00199	.0	.002
182580	131.99	.00190	.00010	.002
257060	131.99	.00190	.00010	.002
234746	146.63	.00200	.0	.002
140000	142.70	.00200	.0	.002
116180	149.73	.00200	.0	.002
337448	101.28	.00147	.0	.0015
1345680	104.00	.00150	.0	.0015
626780	104.00	.00150	.0	.0015
853954	112.44	.00150	.0	.0015
698000	106.85	.00150	.0	.0015
552200	107.54	.00150	.0	.0015
610280	108.30	.00150	.0	.0015
781510	103.34	.00150	.0	.0015
1236000	109.54	.00150	.0	.0015
200000	106.99	.00150	.0	.0015
>2.9x10 <sup>7</sup>	72.0	.00100	.0	.0010
>3.2x10 <sup>7</sup>	72.1	.00100	.0	.0010
>4.6x10 <sup>7</sup>	69.4	.00100	.0	.0010

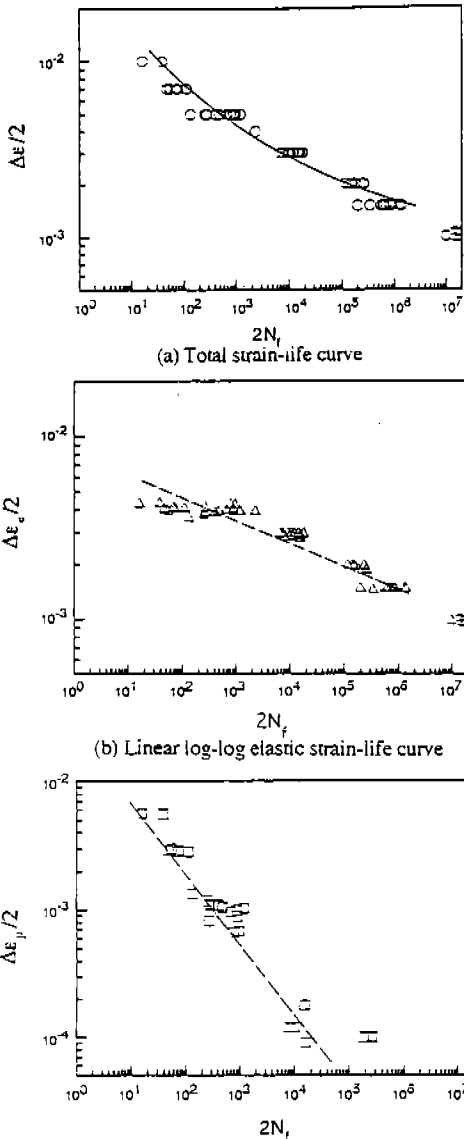


Fig.5 Conventional low cycle fatigue strain-life curves

Table 5 Conventional low cycle fatigue properties

b	-0.124
$\sigma_f$ (MPa)	594
c	-0.530
$\epsilon_f'$	0.0269

계를 나타내는 기존의 선형 로그-로그 탄성변형률 수명식은 피로실험 데이터를 충분히 만족시키지 못하고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상으로 말미암아 식 (5)를 사용하여 만들어지는 피로수명식은 상당히 짧은 수명 구간에서와 긴 수명의 구간에서 실제의 피로수명이 피로수명식에 의해 예측된 피로수명보다 짧아서 저주기 피로수명 예측 및 평가에 상당한 오차가 수반되어 위의 피로수명식을 사용할 경우 안전하지 못한 설계를 초래하게 되므로 탄성변형률-수명의 비선형성(Nonlinearity)에 대한 개선이 요구된다.

### 3. 선형 로그-로그 총변형률 수명 모델

저주기 총변형률-수명 관계는 일반적으로 선형회귀해석을 이용하여 결정되어지는  $\sigma_f, b, \epsilon_f, c$ 를 대입하여 얻어지는 식(5)로 표시되어지며, 이 피로 수명식은 Fig5(a)로 부터 알 수 있듯이  $2N_f=10^2$  reversal 부근의 짧은 수명 구역과  $2N_f=5 \times 10^5$  reversal 부근의 긴 수명 구역에서의 실제 피로수명이 계산된 수명식(5)로 부터 얻어지는 피로수명보다 작게 된다. 이는 피로 수명을 고려한 기계 및 구조물의 설계시 비보수적(Nonconservative)이고 불안전한(Unsafe) 문제가 발생하게 된다. 따라서 저주기 피로수명 데이터를 충분히 표현할 수 있는 피로수명 모델(Fatigue life model)이 요구되어 진다.

본 연구에서 제안한 총변형률 진폭(Total strain amplitude,  $\Delta\epsilon/2$ )과 피로수명(Reversals to failure,  $2N_f$ )의 선형 로그-로그 모델(Linear log-log model)은 다음과 같다.

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = C(2N_f)^m \tag{6}$$

$$\log\left(\frac{\Delta\epsilon}{2}\right) = \log C + m\log(2N_f) \tag{7}$$

위에서  $m$ 은 직선의 기울기이며,  $C$ 는  $2N_f$ 가 1이 될 때의 총변형률이다. 변형률 제어 저주기 피로 실험에서는  $\log(\Delta\epsilon/2)$ 가 독립변수가 되며,  $\log(2N_f)$ 가 종속변수가 되어 이를 각각 X, Y라 하면

다음과 같은 식이 얻어진다.

$$\log(2N_f) = \frac{1}{m} \log C + \frac{1}{m} \log \left( \frac{\Delta \epsilon}{2} \right) \quad (8)$$

$$Y = A + BX \quad (9)$$

저주기 피로테이타가 로그-로그 선형모델식 (8)으로 표현되어 질 수 있는지의 타당성은 식(8)의 선형성(Linearity)을 통계적인 방법을 통하여 검토하여야 한다.<sup>11)</sup> 선형성에 대한 통계적 시험은 F 분포(F distribution)에 기초를 두고 이루어진다.<sup>12,13)</sup>  $l$ 개의 서로 다른  $X_i$ 에서  $m_i$ 개의 반복실험(Replicate test)으로  $Y_i$ (피로수명)가 얻어졌다면, 선형성에 대한 가정은 다음의 계산된 값이 자유도  $n_1=l-2, n_2=k-l$ 인 F 분포값을 초과하면 성립될 수 없다.<sup>11)</sup>

$$F = \frac{\sum_{i=1}^l m_i (\bar{Y}_i - \bar{Y})^2 / (l-2)}{\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{m_i} (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2 / (k-l)}$$

위에서  $k$ 는 총시편수이고  $Y$ 는 추정량(Estimator),  $\bar{Y}_i$ 는  $Y_i$ 의 평균,  $Y_{ij}$ 는  $i$ 번째 수준의 변형률 진폭( $X$ )에서의  $j$ 번째 반복된 피로수명( $Y$ )을 의미한다.

식(9)에서 A, B 값, 즉 식(6)에서의 기울기  $m$ 과 절편 C 값을 선형회귀법으로 구하고 식(10)에서의 F 값은 Table 6와 같으며, 두 재질의 경우 계산된 F 값이 95% 신뢰도 구간에서의 F 값, 2.45를 초과하지 않으므로 총변형률-수명 관계는 선형 로그-로그식으로 모델링할 수 있으며 각 재질의 선형화된 수명식(6)은 Fig.6에 표시되어 있다.

Table 6 Low cycle fatigue properties of linear log-log total strain-life model and calculated F value

C	0.0148
m	-0.171
F-value	2.156

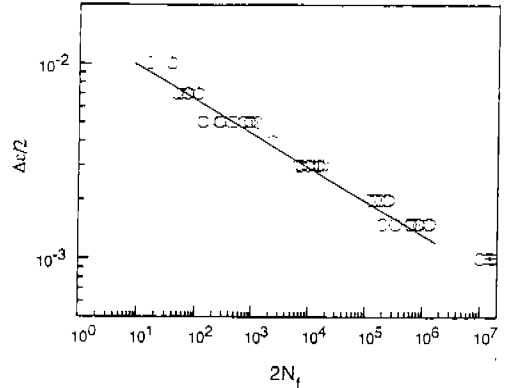


Fig.6 Linear log-log total strain-life model

선형 총변형률-수명식의 F 시험(F test)에 의한 F 값을 계산하기 위하여 사용된 피로실험 데이터는 Table 4와 같으며 시편수( $k$ )는 48, 변형률 수준( $l$ )은 7이었다. Fig.6에서 알 수 있듯이 총변형률 선형모델은 저주기 피로실험 데이터를 잘 표현하고 있다. 피로수명  $2N_f \geq 10^7$  reversal인 피로실험 데이터는 수명식(6)의 계산에 포함되지 않는다.

#### 4. 이선형 로그-로그 탄성변형률 수명 모델

Fig.5(a)에 표시된 저주기 피로수명곡선의 짧은 수명 영역( $2N_f \leq 5 \times 10^2$ )과 긴수명 영역( $2N_f \geq 2 \times 10^5$ )에서의 비보수적인(Nonconservative) 현상은 Fig.5(b)로 부터 관찰되듯이 식(1), (5)로 표시되는 탄성변형률 수명곡선  $\Delta \epsilon_s/2 - 2N_f$ 의 비선형성에 기인한다. 탄성변형률-수명식의 비선형성은 Fig.2의 주기응력-변형률 곡선(Cyclic stress-strain curve)이 보여주듯이  $\epsilon \geq 0.004$ 에서 주기변형률(Cyclic strain),  $\Delta \epsilon/2$ 의 증가에도 불구하고 주기응력(Cyclic stress),  $\Delta \sigma/2$ 의 값이 거의 일정함으로 부터 발생한다. 따라서 저주기 피로수명 데이터를 정확히 표현하는 수명식은 탄성변형률 수명식의 개선으로서 가능함을 알 수 있다.

Table 4에 있는 탄성변형률 진폭( $\Delta \epsilon_s/2$ ) 데이터와 수명 데이터( $2N_f$ )와의 선형 로그-로그관계를 만족하는 구간을 찾기 위하여  $\Delta \epsilon/2 \leq 0.01$ ,

$\Delta\epsilon/2 \leq 0.005$ ,  $\Delta\epsilon/2 \leq 0.004$ , 구간의 탄성변형을 진폭( $\Delta\epsilon_e/2$ )과 수명을 입력하여 F시험을 수행한 결과는 Table 7에 표시된 것과 같으며, 오직  $\Delta\epsilon/2 \leq 0.004$  구간에서 탄성변형을-수명이 선형성을 갖고 있음을 알 수 있다. 이 결과는 Fig.5(b)로부터 관찰되었듯이  $2N_f = 5 \times 10^3$  reversal을 경계로 하여 탄성변형을 수명 데이터가  $2N_f \leq 5 \times 10^3$ ,  $2N_f > 5 \times 10^3$ 의 구간에서 각각 선형성을 가지고 있으므로 각 구간에서 선형 로그-로그 탄성변형을 수명식을 선형회귀법을 이용하여 구하면 다음과 같다.

$$\frac{\Delta\epsilon_e}{2} = \frac{428}{E} (2N_f)^{-0.073} \quad \text{for } \Delta\epsilon/2 > 0.004 \quad (11)$$

$$\frac{1010}{E} (2N_f)^{-0.163} \quad \text{for } \Delta\epsilon/2 \leq 0.004$$

따라서 각 구간에서의 피로 강도계수,  $\sigma_f$ 와 피로 강도지수,  $b$ 는 Table 8과 같다.  $\Delta\epsilon/2 \leq 0.004$  이 구간에서 탄성변형을 수명의 선형성은 Table 7 으로부터 F 시험을 만족하였으며,  $\epsilon/2 > 0.004$  의 구간에서는 Table 4에서 보듯이  $\Delta\epsilon_e/2$  값이 거의 유사하여 F시험을 적용할 수 없었으나 선형회귀해석에서 0.97의 상관계수가 얻어졌다. 식 (11)의 이선형 로그-로그 탄성변형을 수명식은 Fig.7에 표시되어 있으며 식(11)의 수명식은 Fig.5

Table 7 F test bilinear elastic strain-life model

Strain amplitude $\Delta\epsilon/2$	$k$	$l$	Calculated F value	F-distribution value
$\leq 0.01$	48	7	26.01	2.45
$\leq 0.005$	41	5	10.08	2.87
$\leq 0.004$	29	4	1.02	3.38

\* $k$ : Total number of specimen

$l$ : Total number of strain level

Table 8 Bilinear log-log elastic low cycle fatigue properties

	$\Delta\epsilon/2 > 0.004$	$\Delta\epsilon/2 \leq 0.004$
$\sigma_f$ (MPa)	428	1010
$b$	-0.073	-0.163

(b)에서의 기존 수명식보다 더 정확하게 데이터에 일치하고 있다. 총변형을수명( $\Delta\epsilon/2 - 2N_f$ )는 탄성변형을 수명과 소성변형을 수명의 합으로 표현되므로, 저주기 피로 수명식(11)은 Table 5로부터 다음과 같이 제안될 수 있으며 총변형을 수명 곡선은 Fig.8과 같다.

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{428}{E} (2N_f)^{-0.073} + 0.0269 (2N_f)^{-0.530} \quad \text{for } \Delta\epsilon/2 > 0.004 \quad (12)$$

$$= \frac{1010}{E} (2N_f)^{-0.163} + 0.0269 (2N_f)^{-0.530} \quad \text{for } \Delta\epsilon/2 \leq 0.004$$

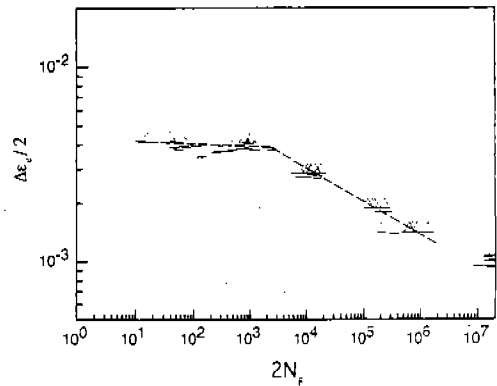


Fig.7 Bilinear log-log elastic strain-life model

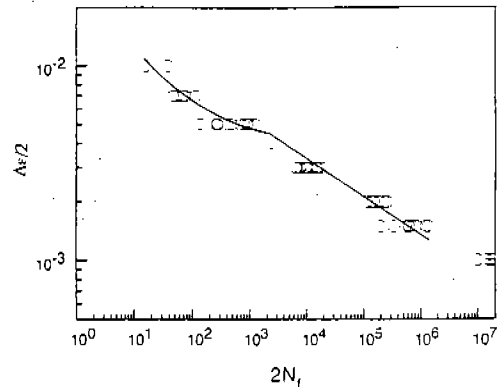


Fig.8 Total strain-life curve from bilinear log-log elastic strain-life model and linear log-log plastic strain-life model

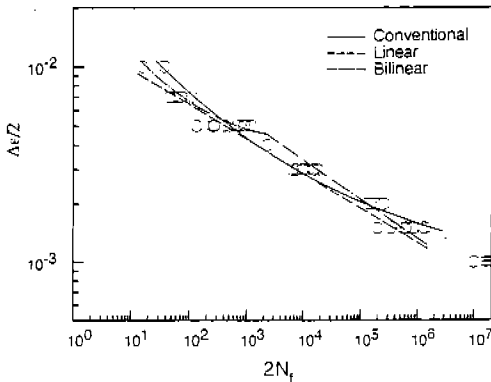


Fig.9 Comparisons low cycle fatigue strain-life models

기존의 총변형률-수명식(5)과 선형 로그-로그 총변형률-수명모델(6), 이선형 로그-로그 총변형률-수명모델(12)이 Fig.9에 중첩되어 표시되어 있다. 제안된 새로운 피로수명 모델(6), (12)식 들은 짧은 구간과 긴 수명구간에서 기존의 피로수명 모델(5)을 사용하여 예측된 피로수명 값의 불안정한 문제를 개선할 수 있음을 Fig.9에서 보여주고 있다.

그러나 이선형 피로수명 모델은 불연속점을 지니고 있으며, 그 불연속구간 부근에서 새로운 불안정한 문제를 나타내고 있다. 저주기 피로수명식으로 다음과 같은 선형 피로수명 모델식(6)은

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = C(2N_f)^m$$

전체적인 피로수명 구간,  $10^1 \leq 2N_f \leq 2 \times 10^6$ 에서 가장 적합한 피로수명 모델로 간주된다. 따라서 앞에서 언급되었듯이 위 식 (6)은 국부변형률 방법을 이용한 피로수명 예측 프로그램의 수명 예측식으로 유용하게 사용될 수 있다고 판단된다.

### 5. 결 론

저주기 피로실험을 주조 알루미늄 합금 A356을 사용하여 수행하였으며, 그의 피로수명 데이터를 통계적인 방법으로 해석하여 개선된 저주기 피

로수명식을 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 주기적 하중을 받을 때 주조 알루미늄 합금 A356의 주기응력과 주기변형률의 관계는 단순 인장응력-변형률의 응답과 비교하였을 때 변형률 강화현상을 나타내었다.
- 2) 현재에 보편적으로 사용되고 있는 기존의 저주기 피로수명식은 탄성변형률 수명데이터의 비선형성으로 말미암아 비보수적이며, 불안정한 수명모델을 보여 주고 있으며 이는 큰 변형률 범위에서의 주기응력-변형률곡선이 평편한 현상에 기인한다.
- 3) 기존의 저주기 피로수명식의 비보수성과 불안정성에 대한 문제점은 제안된 선형 로그-로그 총변형률-피로수명 모델과 이선형 로그-로그 탄성변형률-피로수명 모델에 의하여 개선되었으며, 각 모델의 선형성은 통계학적인 F시험을 통하여 입증되었다.
- 4) 개선된 저주기 피로수명식은 국부변형률 방법을 이용한 피로수명예측에 유용하게 사용되어 질 수 있으며, 특히 선형 로그-로그 총변형률-피로수명식의 유용성이 클 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

1. Sandor, B.L, *Fundamentals of Cyclic Stress and Strain*, The University of Wisconsin Press, Madison, WI, 1972.
2. Socie, D.F., "Fatigue Life Prediction Using Local Stress-Strain Concepts", *Experimental Mechanics*, Vol 17, No. 2, February 1977, pp.50-56.
3. Wetzel, R.M., "Smooth Specimen Simulation of Fatigue Behavior of Notches", *Journal of Materials*, Vol. 3, No. 3, September 1968, pp.646-657.
4. Rice, R.C., Ed., *Fatigue Design Handbook*, AE-10, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA., 1988.
5. Wetzel, R.M., Ed., *Fatigue Under Complex Loading: Analysis and Experiments*, Advances in



- Engineering, Vol. 6, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, 1977.
6. Bannantine, J.A., Comer, J.J., and Handrock, J. L., *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*, Prentice Hall New Jersey, 1990.
  7. American Society for Testing and Materials, ASTM Standard E606, *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM, Philadelphia 1992.
  8. Fuchs, H.O., and Stephens, R.L., *Metal Fatigue in Engineering*, John Wiley & Sons, New York, 1980.
  9. Basquin, O.H., "Experimental Law of Endurance Tests", *Proc. ASTM, Vol. 10, Part II*, 1910, pp.625-630.
  10. Coffin, L.F., Jr., "A Study of the Effects of Cyclic Thermal Stresses on a Ductile Metal", *Trans. ASME*, Vol. 76, 1954, pp.931-950.
  11. American Society for Testing and Materials, ASTM Standard E739, *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM, Philadelphia 1992.
  12. Kapur, K.C., and Lamberson, L.R., *Reliability in Engineering Design*, John Wiley & Sons, New York, 1977.
  13. Hogg, R.V., and Tanis, E.A., *Probability and Statistical Inference, 2nd Ed.*, Macmillan Publishing Co., New York, 1983.