

<論 文>

## 2 段階 應力下에서 U-노치를 갖는 構造用 炭素鋼材의 疲勞舉動(I)

宋 森 弘\*·元 時 太\*\*

(1982年 1月 7日 接受)

### Fatigue Behavior of the U-Notched Specimens of Structural Carbon Steel under the two Level Stressing(I)

Sam Hong Song and Si Tae Won

#### Abstract

In order to analyze and investigate in the fatigue behavior of the notched specimens under the two level stressing, the U-notched specimens of structural carbon steel which is generally used is prepared.

The obtained results are summarized as follows;

- (1) The fatigue limit of the U-notched specimens is lower than that of the unnotched.  
The fatigue notch factor ( $\beta$ ) of the U-notched specimens is 1.44 for mild steel and 1.52 for harden steel. The notch sensitivity ( $q$ ) is 0.68 for mild steel and 0.8 for harden steel.  
That is, these facts show that harden steel is more sensitive to the notch than mild steel.
- (2) The fatigue life time of the U-notched specimens under the overstressing is shorter than under the constant stressing, and the degree of fatigue life time decrease is different to each stress level; the degree for the high stress level is more than for the low stress level.
- (3) The fatigue life time of the U-notched specimens under the understressing is longer than under the constant stressing, and the degree of fatigue life time increase for the low stress level is more than for the high stress level.

#### 1. 序 論

임의의 部材에 作用하는 應力사이클이 正弦變化를 하는 反復應力은 應力사이클 中에서도 가장 간단한 種類이다. 그러나 機械 혹은 各種 構造물이 實際로 받는 應力은 振幅과 周期가 수시로 變化하는 경우가 많다.

이와같이 機械는 使用中에 가끔 變動應力을 받게 되고 따라서 이러한 應力이 그 部材에 미치는 強度上的 問題는 매우 重要하다.

變動應力下에서의 疲勞에 관한 研究는 一定應力振幅 下의 疲勞에 관한 研究와 병행하여 行하고 있고, 특히 一定應力振幅下에서 疲勞發生까지의 期間은 全壽命을 100%로 간주했을 때 平滑材의 경우 10~30%의 범위를 차지하고 나머지 70~90%는 크랙의 傳播過程이라고 보고되어 있다.” 따라서 疲勞破壞舉動 分析에는 크

\* 正會員, 高麗大學校 工科大學

\*\* 正會員, 高麗大學校 大學院

력傳播過程 및 破斷壽命에 對한 研究가 더욱 重要한 意味를 갖는다고 생각된다.

또한 불규칙한 應力狀態에 대한 疲勞破斷壽命을 검토하는데 가장 간단하고 보편적으로 사용되고 있는 被害理論은 Miner가 定立한 直線累積被害理論이고 이것은 被害程度를 단순히 사이클비  $n/N$ 으로 가정하여  $m$  단 應力이 作用하는 경우 다음과 같이 제안하였다.<sup>2)</sup>

$$D_f = \sum_{i=1}^m n_i/N_i \quad (1)$$

여기서

$D_f$ 는 총피해율,  $N_i$ 는 應力  $\sigma_i$ 에서 破斷까지의 壽命,  $n_i$ 는 應力  $\sigma_i$ 가 作用한 反復數이다.

이 理論은 1945년에 發表된 이래 현재까지 많은 연구에 응용되고 있다.

한편 變動應力에 대한 研究로서 中沢<sup>3)</sup>등은 환상노치를 갖는 S35C材에 대해 二段二重 重複應力에 의한 過大應力이 疲勞限度에 미치는 영향은 특히 예리한 노치제에서 過大應力の 被害現象이 소실한다고 하였고 中村宏<sup>4)</sup>등은 S35C材에 過小應力을 포함한 二段多重 및 多段多重荷重을 加한 結果 전체 반복수중 過小應力下的 反復數가 많아지면  $\sum(\frac{n_i}{N_i})$ 의 값이 1보다 현저히 작을때도 破斷한다고 하였다. Kommers<sup>5)</sup>는 平滑材와 四角노치를 갖는 ingot iron과 S.A.E. 1030 steel材料에 대하여 過大 및 過小應力の 영향을 조사한 結果 過大應力の 영향은 過大應力에 의한 反復數의 증가와 더불어 被害의 정도가 크고 過小應力の 영향은 coxing 효과가 첨가되어 약 25~30%의 疲勞限度의 증가를 나타낸다고 하였다. 또 Phillips<sup>6)</sup>는  $\alpha$ -Brass의 疲勞壽命에 미치는 prestress level의 효과에 대한 Miner의 直線累積被害理論을 적용한 結果 一般的으로 過大應力은 壽命의 감소원인이 됨을 알았다.

以上の 몇가지 연구결과에서 變動應力에 의한 疲勞破壞는 應力方式과 試驗片의 모양에 따라서 매우 다른 樣相을 나타낼 수 있음을 예상할 수 있고 특히 이러한 結果에 대해 정확히 해를 必要가 있다고 생각된다.

따라서 本 研究에서는 계통적인 실험연구의 일환으로 우선 U形 노치제에 대하여 크랙발생점이 그 材料의 破斷壽命의 10~30%라는 점에 착안하여 1차응력에 의해 충분한 크랙이 전파한 단계인 50%를 가한 후 1차응력보다 2차응력이 큰 경우(過大應力)와 2차응력이 작은 경우(過小應力)를 부하하였을 때 각각의 應力레벨에 따르는 S-N曲線의 특징과 破斷壽命을 기준으로 해서 Miner被害이론을 분석 검토하였다.

## 2. 實驗方法

### 2.1. 試驗片 및 試驗機

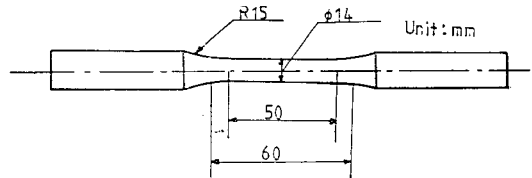
本 實驗에 使用한 試驗片은 國產 構造用 炭素鋼材로서 軟鋼(0.15C) 및 硬鋼(0.81C)이고 化學成分은 Table 1과 같다. 또한 Table 2는 Fig.1 (a)와 같은 인장시험편을(KSB 0801 4호 시험편) 사용하여 인장시험에 의해 얻은  $A_1, B_1$ 材의 機械的 性質이다.

Table 1 Chemical composition.

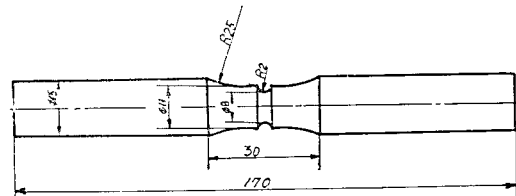
Test piece	Composition(%)				
	C	Si	Mn	P	S
Mild steel ( $A_1$ series)	0.15	0.18	0.64	0.017	0.014
Harden steel ( $B_1$ series)	0.81	0.16	—	0.013	0.012

Table 2 Mechanical properties by tensile test.

Test piece	Yield strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Reduction of area (%)
$A_1$ series	52	68	14	46
$B_1$ series	78	88	11	30



(a) Tensile test specimen



(b) fatigue test specimen

Fig. 1 Geometry of specimen.

疲勞試驗片은 Fig. 1(b)와 같이 試驗片의 平行部에 U形노치를 주어 가공하였다. 이 때 疲勞試驗片은 크랙의 관찰을 용이하게 하기 위해서 노치部分을 sand paper의 mesh 순서대로 #1200까지 연마한 후 산화 크롬을 利用하여 buffing 하였다. 또한 試驗片의 組織

을 관찰하기 위해 5% Nital 용액을 사용하여 etching 한 結果 Photo 1 과 같은 조직사진을 얻었다.

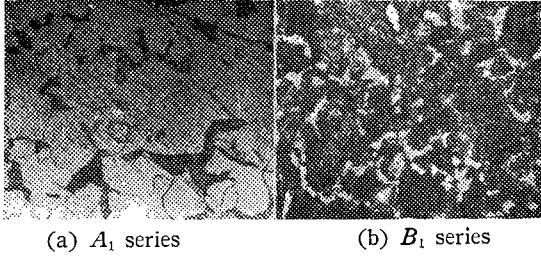


Photo 1 Micro structure by etching 400X.

本 實驗에 사용된 疲勞試驗片의 노치에 의한 應力集中係數( $\alpha$ )는 Neuber 理論에 기초로 하여 Peterson 의 의해 수학적으로 계산된 식<sup>7)</sup>을 利用하였다.

환상노치에 대해서는 다음과 같다.

$$\alpha = 1 + \frac{1}{\sqrt{A \frac{2r}{D-d} + B \frac{2r(1+2r/d)^2}{d}}} \quad (2)$$

여기서,

$D$ 는 시험편의 바깥지름이고,  $d$ 는 노치부의 지름,  $r$ 은 노치반경이다. 또한  $A, B$ 는 應力形式에 따른 係數이며 이 값은 回轉굽힘에서 환봉계의 경우  $A=0.25$   $B=1.80$  이고 이 때 Fig. 1(b)의 疲勞試驗片의 경우  $\alpha$  값은 1.65 이다.

本 實驗에 사용한 試驗機는 Ono's type rotary bending fatigue testing machine 이고 試驗機의 能力은 最大굽힘모우먼트 10kg-m, 每分回轉數 3000rpm 이다. 하중부하방식은 2점지지 1점수직 중추식 균일굽힘모우먼트형이다. 이 때 本 試驗機는 高速回轉굽힘 피로시험기이므로 시험편을 setting 할 때 高速回轉에 의한 진동의 영향을 무시할 수 없으므로 편심이 안되도록  $1\mu$  단위의 다이얼 게이지를 사용하여 주의깊게 정밀한 setting 을 하였다.

### 2.2. 2段階應力의 모델(Model)設定

序論에서 서술한 바와같이 變動荷重의 應力狀態는 매우 복잡하나. 振幅과 周期가 수시로 변화하는 應力狀態를 평활선이나 작은 應力단계의 집합으로 취급해도 실용상의 오차는 적다고 보아<sup>8)</sup> 研究하는데 편이를 위해 모델을 設定하여 실험하였다.

여기서 먼저 가하는 應力( $\sigma_1$ : 편의상 기준應力)보다 후에 가하는 應力( $\sigma_2$ )이 높은 경우를 過大應力[모델 (a)]이라 하고 후에 가하는 應力( $\sigma_2$ )이 낮은 경우를 過小應力[모델 (b)]으로 하였다. 本 實驗에 적용한 모델은 Fig. 2 와 같다.

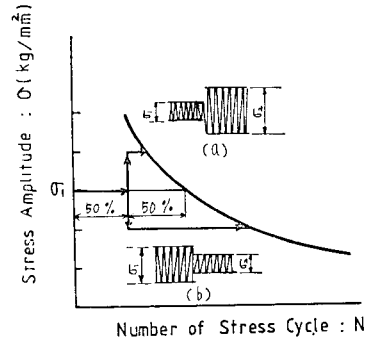


Fig. 2 The model of the two level stressing.

즉 한예를 들면 먼저 기준應力( $\sigma_1$ )을  $30\text{ kg/mm}^2$  으로 하였을 때 이 應力의 破斷壽命의 50%를 가한 후 過大應力(기준應力+ $10\text{ kg/mm}^2$ )인  $40\text{ kg/mm}^2$  을 가한 경우가 모델 (a)이고, 過小應力(기준應力- $10\text{ kg/mm}^2$ )인  $20\text{ kg/mm}^2$  을 가한 경우가 모델 (b) 이다. 이와같은 방법에 의해 각각의 應力에 대한 過大 및 過小應力을 가하여 실험하였다.

### 3. 實驗結果 및 考察

#### 3.1. 一定應力下에서의 疲勞舉動

본 절에서는 2段階應力 모델을 가하기 이전 우선 一定應力下의 疲勞試驗을 行하였다. Fig. 3 은 一定應力下의  $A_1, B_1$  材의 S-N 曲線을 이미 얻어진 平滑材의 것<sup>9)</sup>과 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 疲勞限度의 값<sup>10)</sup>은 Stair case method 에 의해 구하였고 이 때  $A_1$  材 및  $B_1$  材의 疲勞限度는 각각  $\sigma_{WA_1}=8.3\text{ kg/mm}^2$ ,  $\sigma_{WB_1}=10.5\text{ kg/mm}^2$  를 얻었다. 평활재의 경우 疲勞限度는 각각  $\sigma_{WA_1(\text{Unnotch})}=12\text{ kg/mm}^2$ ,  $\sigma_{WB_1(\text{Unnotch})}=16\text{ kg/mm}^2$  이다.

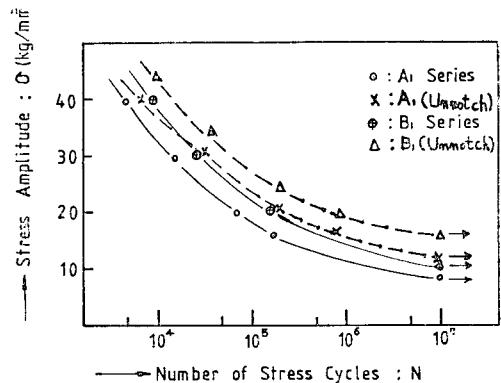


Fig. 3 S-N Curve.

그러나 이 때 사용한 應力은 공칭應力이고 실제로 노치가 있는 경우에는 노치저면에 應力集中이 있고 노치표면에서 시험편 内部로 향하는 應력구배를 고려하여 보면 노치재와 평활재를 비교하였을 때 노치저면에서의 應력은 平滑材보다 크고 내부에서의 應력은 平滑材보다 작은 상태를 나타낸다.<sup>11)12)</sup> 이와같은 현상은 突張作用(stützwirkung)이라고 한다.<sup>12)</sup>

이와같은 것을 고려하여 실제 노치저면에서 걸리는 疲勞限度  $\sigma_w^*$ 는 다음과 같다.

$$\sigma_w^* = \alpha \sigma_w \quad (3)$$

여기서  $\alpha$ 는 應力集中係數,  $\sigma_w$ 는 노치재의 공칭피로한도이다.

이 때 本試驗片의 경우 軟鋼은  $\sigma_{wA_1}^* = 13.69 \text{ kg/mm}^2$ , 硬鋼은  $\sigma_{wB_1}^* = 17.33 \text{ kg/mm}^2$ 이 되어 평활재의  $\sigma_{wA_1(\text{Unnotch})} = 12 \text{ kg/mm}^2$ ,  $\sigma_{wB_1(\text{Unnotch})} = 16 \text{ kg/mm}^2$ 보다 크다.

그러나 本實驗의 경우에는 노치에 의한 영향을 공칭피로한도만을 고려하여 구하는 노치계수<sup>12)</sup> 및 노치감도계수<sup>12)</sup>만을 비교 검토하였다. 노치계수 [평활재의 공칭 疲勞限度/노치材料의 공칭疲勞限度]  $\beta$ 는 노치에 의한 疲勞限度의 低下의 程度를 나타내며 노치감도계수 [(노치계수-1)/(應력집중계수-1)]  $q$ 는 노치에 민감한 程度를 나타내는 계수로서 1에 가까운 값일수록 노치에 민감한 材料가 된다. 實驗結果 노치계수  $\beta$ 는  $A_1$ 材,  $B_1$ 材 각각  $\beta_{A_1} = 1.44$ ,  $\beta_{B_1} = 1.52$ 이고 노치감도계수  $q$ 는  $A_1$ 材,  $B_1$ 材 각각  $q_{A_1} = 0.68$ ,  $q_{B_1} = 0.80$ 을 갖는다. 따라서 같은 모양의 노치를 갖는 경우에도 노치의 영향은 材質에 따라 다르며 硬度값 및 引張強度값이 작은 材料( $A_1$ 材)가 硬度값 및 引張強度값이 큰 材料( $B_1$ 材)보다 노치에 의한 영향이 적게 나타나고 있음을 알 수 있다.

### 3.2. 過大應力下에서의 疲勞舉動

本節에서는 우선 Fig. 2의 모델(a)에 따라 基準應力  $30 \text{ kg/mm}^2$ 를 이 應力の 破斷回轉數의 50%까지 가한 후 過大應力인  $40 \text{ kg/mm}^2$ 를 가하였다. 이 때 破斷壽命은  $A_1$ 材가  $N \approx 7.5 \times 10^3$ ,  $B_1$ 材가  $N \approx 2 \times 10^4$ 이고 이 값을 一定應力( $\sigma = 30 \text{ kg/mm}^2$ )하에서의 破斷壽命( $A_1$ 材가  $N \approx 1.2 \times 10^4$ ,  $B_1$ 材가  $N \approx 3 \times 10^4$ )과 비교하면 過大應力이 作用한 경우가 현저하게 빨리 최종과단이 일어남을 알았다.

따라서 各 應力레벨마다  $n/N_i$ 가 50%인 反復數를 가한 후에 各各의 應力에 대해  $10 \text{ kg/mm}^2$ 이 더 높은 過大應力을 作用시켰을 때의 S-N曲線을 Fig. 4에 나

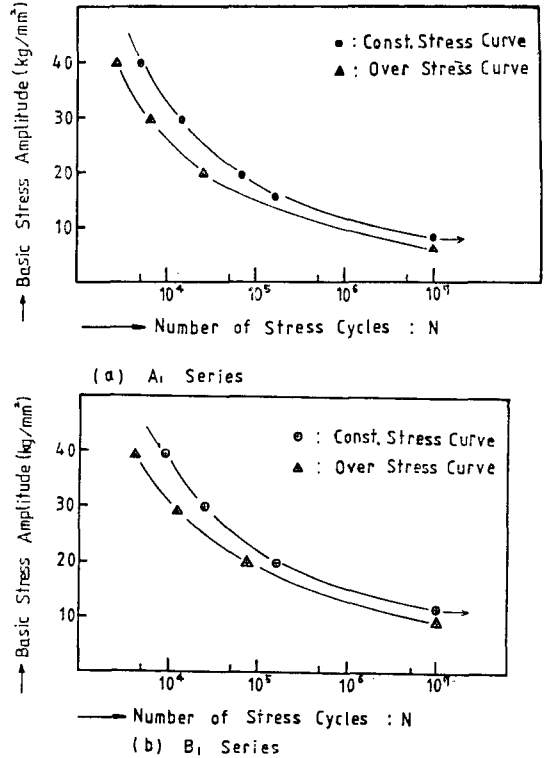


Fig. 4 S-N Curve under the over stress.

타낸다. 여기에서 過大應力の 영향은 基準應力이 疲勞限度보다 높아질수록(高應力레벨) 壽命의 감소는 현저해지고 疲勞限度에 가까울수록(低應力레벨) 過大應力の 영향이 점점 적어지는 현상을 볼 수 있다.

이상과 같이 過大應力이 미치는 영향을 개괄적으로 고찰하였으나 좀 더 구체적으로 Miner의 被害理論에 適用시켜 보았다.

먼저 Miner의 被害理論은  $\frac{n}{N} = 1$ 에서 破斷한다고 했으므로 이것을 다음과 같이 變形하여 表現하였다.

$$\frac{n + N}{N_i} < 1 \quad (\text{過大})$$

$$> 1 \quad (\text{過小})$$

여기서  $N_i$ : 基準應力에서의 破斷壽命

$n$ : 基準應力에서의 破斷壽命의 50%

$N$ : 基準應力을 가한 후 過大 및 過小應力에서의 破壞回轉數를 나타낸다.

이 때 Fig. 4의 結果를 式(4)에 의해 계산한 結果  $A_1$ 材,  $B_1$ 材 공히 0.6~0.8의 범위의 값을 갖고 이것은 被害理論에서 過大應力을 作用시켰을 경우 1이하의 값에서 破斷되었으므로 過大應力에 의한 被害라고 생각할 수 있다. 또한 高應力 레벨에서는 0.6의 값을

나타내고 低應力 레벨에서는 0.8의 값을 갖으며 이것은 應力레벨에 따라서도 過大應力の 영향이 다르게 나타남을 알 수 있다.

3.3. 過小應力에서의 疲勞舉動

過小應力下의 疲勞舉動을 檢討하기 위하여 우선 基準應力 30 kg/mm<sup>2</sup>의 破斷回轉數의 50%까지 應力을 가한 후 過小應力인 20 kg/mm<sup>2</sup>를 가하였다. 이 때 破斷壽命은 A<sub>1</sub>材가 N≒4×10<sup>4</sup>, B<sub>1</sub>材가 N≒6×10<sup>4</sup>이고 이 값을 一定應力(σ=30 kg/mm<sup>2</sup>)下에서의 破斷壽命(A<sub>1</sub>材가 N≒1.2×10<sup>5</sup>, B<sub>1</sub>材가 N≒3×10<sup>5</sup>)과 비교하면 過小應力이 作用한 경우의 破斷壽命이 현저히 증가함을 알 수 있다. 따라서 過小應力이 어떤 部材에 미치는 영향은 매우 크다고 할 수 있으며 이와 같은 관점에서 各 應力레벨에서의 過小應力은 어떠한 영향을 나타내는가를 조사 하였다.

Fig. 2의 모델(b)에 따라 各 應力레벨마다 n<sub>i</sub>/N<sub>i</sub>가 50%인 反復數를 가한 후 10 kg/mm<sup>2</sup>이 낮은 過小應力을 作用시킨 結果 Fig. 5와 같은 S-N曲線을 얻었다. 이 경우 過大應力의 경우와는 반대의 현상을 나타내며 상당한 壽命의 증가를 보이고 있고 특히 過小應

力이 一定應力下에서 얻어진 疲勞限度값보다 현저히 낮아지는 경우에는 10<sup>7</sup>에서도 破斷이 일어나지 않았다. 이것은 材料가 이미 크랙을 내포하고 있다하더라도 疲勞限度以下의 매우 낮은 應力이 가해지는 경우에는 이미 發生한 크랙은 정류하거나 쉽게 전파하지 않는 것으로 생각된다.

이와같이 過小應力이 노치材料에 미치는 영향을 식(4)에 의해 계산한 結果, 이 값은 거의 1.4~5의 범위의 값을 나타내고 이 값은 1보다 훨씬 큰 값이므로 過小應力의 作用에 의한 被害는 없고 특히 過小應力에 의한 壽命증가비는 基準應力이 疲勞限度값에 가까울수록 점점 증가하며 作用하는 應力레벨에 따라 현저한 차이를 나타낸다.

4. 結 論

2段階應力下에서 疲勞壽命을 分析 檢討하기 위하여 一般의으로 많이 사용되는 國產 構造用 炭素鋼材에 U形노치를 주고 各 應力레벨에 대하여 過大 및 過小應力下에서의 疲勞舉動을 조사하였다.

이 結果 얻어진 내용을 要約하면 다음과 같다.

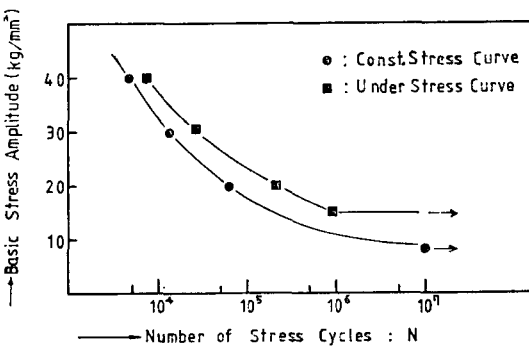
(1) U-노치에 의한 노치계수는 軟鋼이 β=1.44, 硬鋼이 β=1.52이고 노치감도계수는 軟鋼이 q=0.68, 硬鋼이 q=0.8을 나타내며 硬鋼이 軟鋼보다 노치에 의한 민감한 정도가 크다.

(2) 過大應力下에서 疲勞破斷壽命은 一定應力下의 疲勞破斷壽命보다 低下되며 이 값은 0.6~0.8이고 이 값의 저하정도는 應力레벨에 따라 차이가 있고 高應力레벨로 갈수록 더욱 크다.

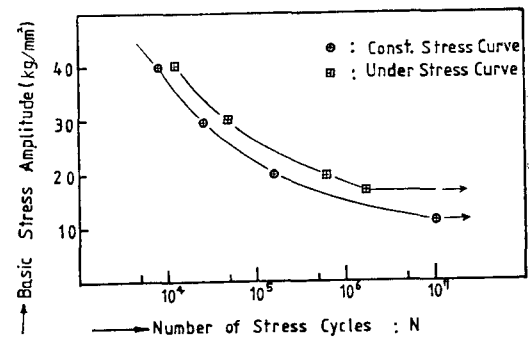
(3) 過小應力下에서 疲勞破斷壽命은 一定應力下의 疲勞破斷壽命보다 현저하게 증가하며 이 값은 1.4~5이고 이 값의 증가정도는 應力레벨에 따라 차이가 있고 低應力레벨로 갈수록 크다.

參 考 文 獻

- 1) H.O. Fuchs, Metal, fatigue in engineering, pp. 67~68, Wiley, 1980.
- 2) Angel. F. Madayg, Metal fatigue, pp.176~177. John Wiley & Sons, 1969.
- 3) Nakazawa et al, Fatigue crack and cumulative fatigue damage in notched specimens, J.S.M.E. Vol.37, No.301, pp.1645~1651, 1971.
- 4) 中村宏 外, 過小應力を含む疲右に關する研究,



(a) A<sub>1</sub> Series



(b) B<sub>1</sub> Series

Fig. 5 S-N Curve under the under stress.

- JSME, Vol. 39, No.318, pp.472~479. 1973.
- 5) J.B. Kammers, The effect of overstressing and understressing in fatigue, proc. ASTM 43 pp. 749~762, 1943.
  - 6) W. L. Phillips, Effect of prestress level on fatigue life of Alpha-Brass, ASM, Vol. 58, pp. 223~225, 1965.
  - 7) 西島敏, 舟久保熙康譯, 金屬の破れ, pp.291~292 丸善, 1973.
  - 8) 石橋正, 金屬の斷れと破壊防止, pp.112~113, 養賢堂, 1967.
  - 9) 宋森弘, 尹命辰, 變動荷重下에서의 疲勞舉動에 關한 研究, 大韓機械學會春季學術大會論文集, p. 82, 1978.
  - 10) Sors, Fatigue design of machine compoments, PARTI, p.16 Pergamon Press, 1971.
  - 11) 河本實外 共著, 金屬の疲れと設計, pp.173~174 コロナ社, 1974.
  - 12) 横堀武夫外 7 人, 金屬材料の 強度と破壊, pp. 323~336, 日本金屬學會 強度委員會編, 丸善, 1968