

研 究 論 文

大韓溶接學會誌
 第9卷第1號 1991年 3月
 Journal of the Korean
 Welding Society
 Vol. 9, No. 1, Mar., 1991

P 分布 블록荷重에 의한 용접부의 累積疲勞 損傷에 관한 연구

표동근* · 안태환** · 신광철***

A Study of Cumulative Damage of Carbon Steel(SM45C) Welded Joint by Block Load with p-Distribution

D.K. Pyo*, T.H. An**, K.C. Shin***

Key Words : Block Loading(블록荷重), Fatigue Life(疲勞壽命), Cumulative Fatigue
 Damage(累積疲勞손상), Cyclic Rate(反復속도비), p-Distribution(P分布).

Abstract

The most fatigue tests carried out under the either stress or strain control, but machines and structures had taken variable stress. This variable stress was treated as statistics based on p-type distributions.

In this paper, the cumulative fatigue damage of SM45C round bar specimens having a center hole resulting from block loading with p-distributions in rotating bending condition, is presentd. The value of p was changed in the range from 0.25 to 1; 0.25, 0.5, 0.75, 1.

The following conclusions were obtained through the constant stress amplitude experiments and the block loading experiments.

- (1) In constant loading test, fatigue life was affected by cyclic rate. From experimental data, $N_r(100\text{cpm})/N_r(3000\text{cpm})$ equal to 0.56.
- (2) In case of the cyclic rate 100cpm and 3000cpm, at the high stress amplitude level the crack propagation life N_p is longer than the low stress amplitude level.
- (3) Miner's hypothesis may be valid for $p=0.75$ and prediction of fatigue life by Haibach's method agree with experimental data well for the case $p=0.5$, while the modified Miner's method agree with experimental data well for the case $p=0.25$.

* 정회원, 홍익대학교 공과대학 기계공학과

** 정회원, 홍익대학교 대학원

*** 정회원, 현대자동차(주)

1. 序 論

機械나 構造物을 製作할때에 이음부분을 더욱 簡便하고 經濟的이며 強度가 높게 제작 하고져 함이 研究者 들의 소망이다. 이음의 方法에는 여러 종류가 있으나 이중 熔接法은 오래전 부터 使用 되어오던 金屬의 接合 技術이다. 그러나 이 熔接部는 強度上 脆弱한 部分이 생기게 마련이며 이 部分에 대한 疲勞強度를 研究함은 그 의의가 매우 크다고 하겠다.

이러한 熔接部의 疲勞強度에 對하여 從來에 行하여진 研究는 應力振幅이나 스트레인 振幅이 一定한 條件下에서 行하여진 것이 大部分이다. 그러나 實際로 機械나 構造物은 不規則하게 變動하는 랜덤(random) 荷重을 받고 있다.

이 랜덤 荷重이 作用할때의 疲勞強度를 研究하기 爲하여 一定 荷重에서의 疲勞試驗 結果를 利用, 頻度分布型의 블록荷重으로 代치하여 實動疲勞強度를 評價하고자 한다.

本 研究는 그 頻度分布型 블록荷重 中 p分布 블록荷重을 選擇하였다. p分布 블록荷重은 一定荷重 實驗에서 얻은 데이터(data)를 Miner¹⁾의 線型損傷法則을 適用하여 p=0에서 p=1 까지의 경우에서 疲勞壽命을 推定하는 것으로 ST37 鋼과 ST52 鋼을 使用한 Haibach²⁾, 熔接構造物鋼 SM41A를 使用한 Iida³⁾, SM45C 鋼을 使用한 表 등⁴⁾의 研究報告가 있다. 以上의 몇가지 研究 報告가 있으나 熔接 이음이 있는 試驗片에 對한 研究는 그다지 많지 않다.

本 研究에서는 熔接이음이 있는 構造物 鋼SM45C 환봉 試驗片을 使用하여 공기 中에서 Gassner type⁵⁾ 荷重 순서에 따른 8단 블록 荷重을 作用시켰다. 즉 一定應力振幅 疲勞試驗의 結果를 基礎로 하여 任意의 應力頻度分布 p에 反復급힘 疲勞試驗을 行하여 몇개의 提案된 疲勞壽命 推定法과 比較 하였으며, 또한 초기 크랙 發生壽命과 破斷壽命과의 關係, 反復速度의 變化에 따른 疲勞強度 特性 및 諸般因子들과의 關係에 對하여 研究하고자 한다.

2. 實 驗

2.1. p형 分布荷重

Gassner⁵⁾는 航空機나 構造物材의 實動疲勞強度를 精確하게 평가하기 위하여 實動荷重의 크기, 頻度 그

리고 發生 양식(pattern)등을 調査하고, 그 結果를 基礎로 하여 Gassner type이라고 불리는 블록荷重試驗法을 提案했다.

또한 Haibach²⁾가 중심이 되어 level crossing법을 利用하여 각종의 構造物에 作用하는 實動荷重의 分布를 調査하였다. 이 調査에 따라 얻은 荷重 spectrum을 L, B, F 표준분포(standard distribution)라고 命名 하였으며 이 L, B, F 표준분포(standard distribution)는 p형 分布曲線의 기초가 되었다.

그 후 Haibach는 크레인, 항공기, 선박등을 爲하여 일반 構造物의 部材에 作用하는 대표적인 應力分布曲線群을 명확히 하였고, 構造物의 實動강도를 p형 分布曲線을 利用한 疲勞해석에 따라 평가하는 方法을 제시하였다. Haibach가 제안한 p分布荷重들의 應力振幅比와 累積反復數의 關係는 일반적으로 Fig. 1과 같은 曲線이다.

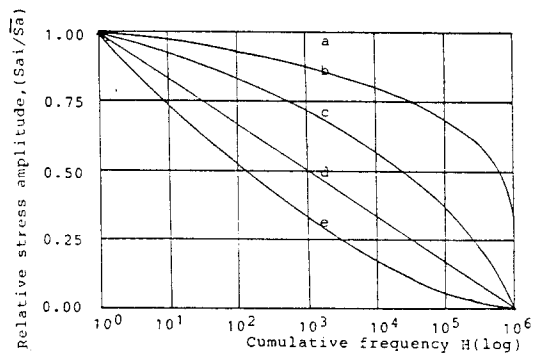


Fig. 1 Typical amplitude distributions

그림중의 曲線 a는 矩形分布, 曲線 c는 L, B, F에 依하여 얻어진 L, B, F 표준분포(standard distribution)이며 反復數가 應力振幅比에 대하여 가우스(Gauss) 分布를 하고 있다. 曲線 b는 應力振幅이 항상 어떤 레벨 $p\bar{S}_a$ 를 초과하며, 또한 그 超過量이 Gauss 分布를 나타낼 경우이며 p=1이면 矩形分布가 되고 p=0이면 (曲線c)의 가우스(Gauss) 分布가 된다. 여기서 p는 임의의 應力頻度分布에 있어서 最高應力振幅 \bar{S}_a 와 最低應力振幅 S_a 와의 比를 나타낸다. 한편, 曲線 d는 直線分布, 즉 對數正規分布를 하는 曲線이고, 曲線 e는 불규칙성이 강한 조건하에서 얻을 수 있는 曲線이며, 曲線 d, e는 장기간에 걸쳐 선박이 받는 파랑荷重 및 항공기가 받는 돌풍荷重의 頻度分布를 나타낸다.

Haibach에 의하여 밝혀진 이상과 같은 p형分布,

즉 $p=0$ (가우스 分布)에서 $p=1$ (一定應力分布)까지의 범위내에 걸쳐있는 應力分布曲線群은 일반 기계요소의 實動疲勞강도를 평가하는데 있어서 매우 유효하며 實動應力頻度分布를 상당히 정확하게 표현 한다고 말할 수 있다.

2.2. 試驗片

本 實驗에 사용된 試驗片의 材料는 기계구조용 탄소강인 SM45C강으로서 기계적 성질과 화학적 성분은 Table 1, 2와 같다.

Table 1 Mechanical properties of material

(kgf/mm ²)				
Material	σ_y	σ_u	ϕ	σ_y : Yield strength σ_u : Ultimate strength ϕ : Percent elongation
SM45C	34.2	66.8	17.0	

Table 2 Chemical composition of material

(Wt.%)							
Material	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni
SM45C	0.45	0.25	0.76	0.014	0.006	0.02	0.01

또한 試驗片의 길이방향이 材料의 압연 방향(rolling direction)과 일치되도록 가공한 후에 Fig. 2와 같은 용접부 형상과 Fig. 3의 용접순서로 MIG(metal inert gas) 용접을 하였다. 용접부의 기계적 성질과 화학적 성분은 Table 3, 4에, 용접조건은 Table 5에 나타내었다.

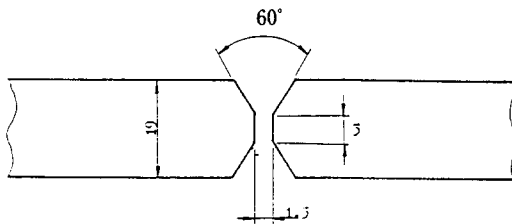


Fig. 2 Configuration of weld joint(unit : mm)

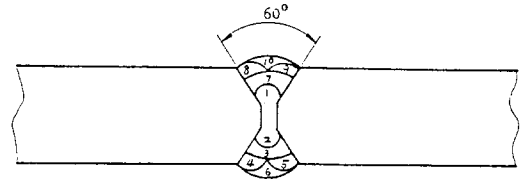


Fig. 3 Configuration of bead sequence

Table 3 Mechanical properties of welding wire

(kgf/mm ²)			
Tensile strength	Yielding point	Elongation	Impact Value
50.0	45.5	22.0	45.5

Table 4 Chemical composition of welding wire

(Wt.%)				
C	Si	Mn	P	S
0.15	0.02	0.92	0.01	0.01

Table 5 Welding condition

ϕ (mm)	Pass	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)	Remark
2.4	10	400	29	20	MIG-W

試驗片의 형상과 치수는 Fig. 4와 같으며, 實驗中 龜裂發生의 위치를 局限 시키며 龜裂의 발견을 용이하게 하기 위하여 試驗片을 관통시킨 靑공노치를 주었다. 이때 靑공에 의한 應力集中 계수 K_t 는 Peterson⁷⁾ 및 西田⁸⁾에 의하여 2.03을 얻었다.

2.3. 實驗裝置 및 方法

本 實驗에 사용한 疲勞試驗機는 Ono式 회전굽힘 疲勞試驗機이다. 試驗機의 최대굽힘 모우멘트는 10kgf-m이고 회전速度는 最低 100cpm에서 最高 3000cpm의 범위내에서 조정할 수 있으며 전자 감응 장치를 6

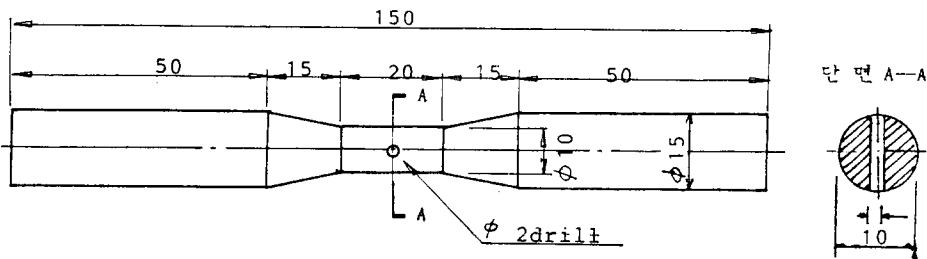


Fig. 4 Configuration of fatigue test specimen(unit, mm)

단 카운터에 연결하여 회전수를 測定할 수 있도록 하였다.

본 연구 에서는 임의의 應力頻度分布에서 疲勞壽命을 推定하는 제반 基本式이 되는 기본 S-N 선도를 구

하기 위하여 反復速度 100cpm 및 3000cpm에서 각각 일정 應力振幅 (Fig. 5, $p=1$ 일때) 疲勞試驗을 실시하였고, Fig. 6 및 Table 6에 표시된 것과 같은 荷重순서로 8단 블록荷重을 作用시켜 實驗을 행한 후 그 結

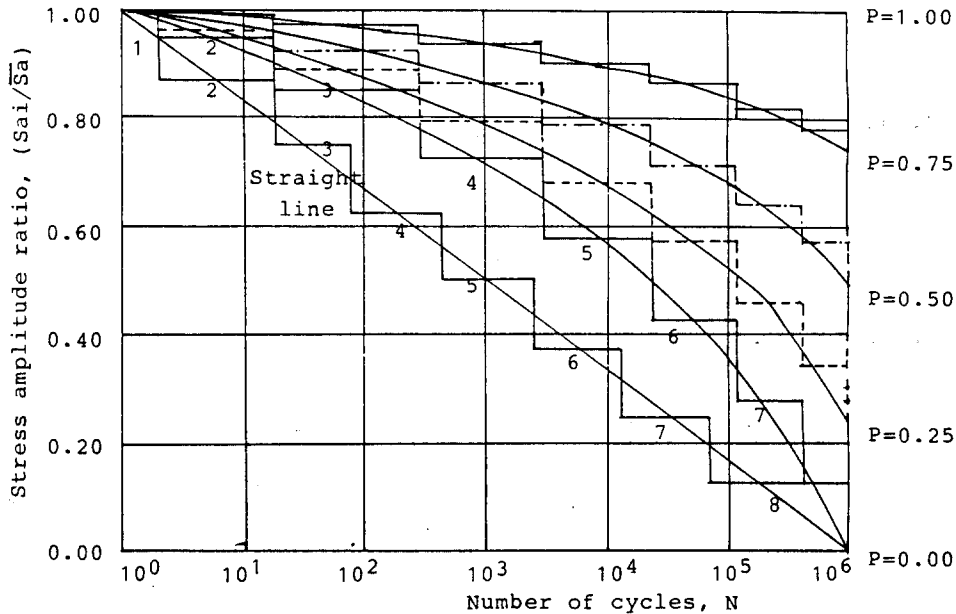


Fig. 5 p-type distributions and corresponding stepped distributions

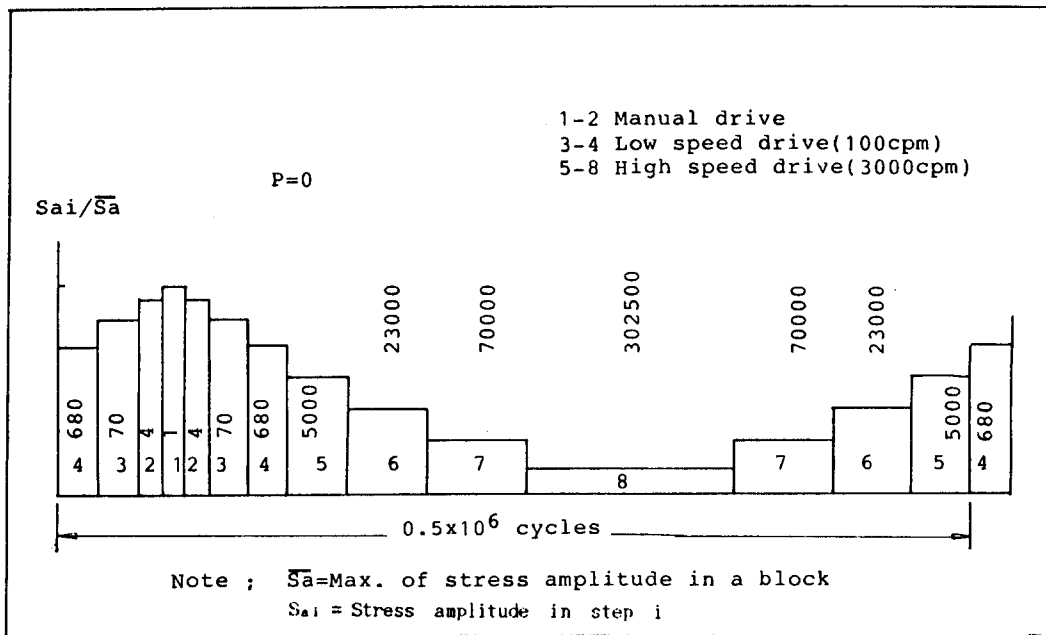


Fig. 6 Loading sequence used by E. Gassner

果에 의하여 여러가지의 壽命豫測 方法과 비교하고, 實驗中 적당한 間격으로 試驗機를 停止 시키고 0.05 mm까지 測定이 가능한 公구 현미경을 사용하여 龜裂 길이를 測定 하였다. 이와같이 하여 龜裂길이가 1.0 mm 정도가 될 때의 反復數를 龜裂 發生壽命 N_c 로 定義하였으며 수시로 龜裂의 進行상황을 기록하였고 試驗片이 완전히 破斷 되었을때의 反復數를 破斷壽命 N_f 로 하였다.

實驗에 있어서 停止효과, 初期應力(initial stress) 효과, 사용한 試驗機와 試驗片에 의한 고유차의 영향 등은 무시하였다.

Table 6 Block loading pattern

Step No.	Stress cycles imposed	p-type distributions				
		S_{ai}/S_a				
		p=1	p=0.75	p=0.5	p=0.25	p=0
1	1	1	1	1	1	1
2	4	1	0.988	0.975	0.963	0.950
3	70	1	0.963	0.925	0.888	0.850
4	680	1	0.932	0.863	0.794	0.725
5	5000	1	0.895	0.788	0.682	0.575
6	23000	1	0.857	0.713	0.568	0.425
7	70000	1	0.820	0.638	0.456	0.275
8	302500	1	0.782	0.563	0.344	0.125

3. 結果 및 考察

3. 1. 一定應力振幅 實驗

임의의 應力頻度分布에서 疲勞壽命을 推定하는 데 기초가 되는 기본 S-N 선도를 얻기 위하여 먼저 一定應力振幅疲勞試驗(Fig. 5, p=1)을 행하였다. 일반적으로 상온에서 반복속도비(cyclic rate)의 변화는 疲勞壽命에 영향을 끼친다고 알려져 있다. 즉, 高 반복속도비(cyclic rate)에서 低 반복속도비(cyclic rate)로 감에 따라 시간인자(1사이클의 荷重作用時間)의 영향을 많이 받아 疲勞壽命이 감소한다.

100cpm에서는 14개, 3000cpm에서는 18개의 試驗片에 대하여 均일應力하에 피로시험을 실시하여 Fig. 7에 그 관계선도를 나타내었다. 또한 最小自乘法에 의하여 Fig. 7의 應力振幅(S_a)와 破斷壽命(N_f)과의 관계를 回歸直線式으로 나타내면 다음과 같다.

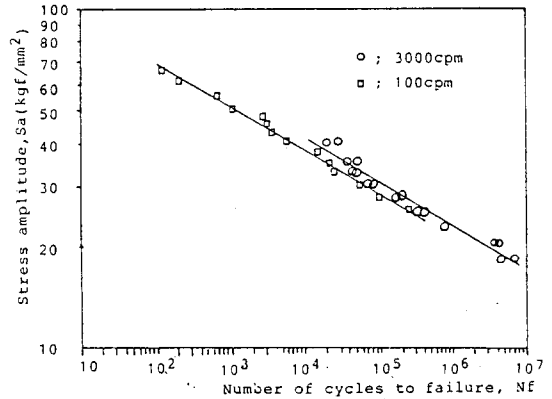


Fig. 7 Relationship between stress amplitude and number of cycles to failure(p=1)

$$(3000cpm) N_f = (3.133 \times 10^{16}) S_a^{-7.752} \quad (1)$$

$$(100cpm) N_f = (2.056 \times 10^{16}) S_a^{-7.813} \quad (2)$$

이 그림에서 直線의 기울기가 같으면 해석하기가 편리하며, 또한 블럭荷重試驗에 있어서 3000cpm에서 부하된 step의 손상이 비교적 지배적이라 생각되기 때문에 式(2)을 32.5kgf/mm²에서 같은 점을 지나고 式(1)과 같은 기울기를 갖는 直線으로 修正하면 다음과 같다.

$$(100cpm) N_f = (1.663 \times 10^{16}) S_a^{-7.752} \quad (3)$$

Fig. 8은 應力振幅(S_a)과 초기크랙發生壽命(N_c)과의 관계를 回歸直線式으로 나타낸 것으로 위와 같은 방법으로 정리하면 회전수에 따라 式(4)와 (5)가 된다.

$$(3000cpm) N_c = (1.432 \times 10^{18}) S_a^{-9.174} \quad (4)$$

$$(100cpm) N_c = (8.892 \times 10^{16}) S_a^{-8.476} \quad (5)$$

式(5)도 式(2)과 마찬가지로 32.5kgf/mm²에서 같은 점을 지나고 式(4)와 같은 기울기를 갖는 直線으로 修正하면 다음과 같다.

$$(100cpm) N_c = (1.013 \times 10^{18}) S_a^{-9.174} \quad (6)$$

따라서 式(1)과 式(3)은 임의의 應力頻度分布에서 破斷壽命 N_f 를 推定할 때에, 式(4)와 式(6)은 초기크랙發生壽命 N_c 를 推定할 때에 基本이 된다.

反復速度가 3000cpm일 경우와 100cpm일 경우의 실험데이터가 공존하는 영역에서 疲勞壽命比 $N(100cpm)/N(3000cpm)$ 는 N_f 를 기준으로 하였을 때 약 0.56이며 N_c 를 기준으로 하였을 때는

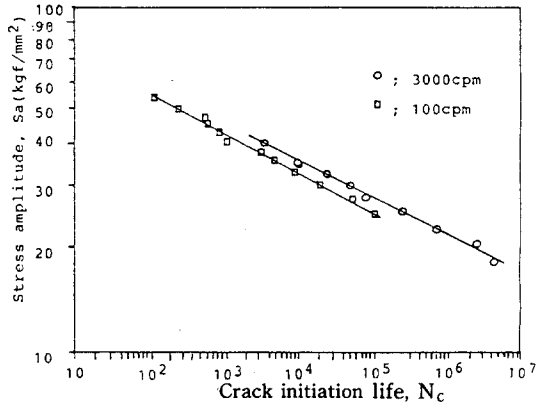


Fig. 8 Relationship between stress amplitude and crack initiation life(p=1)

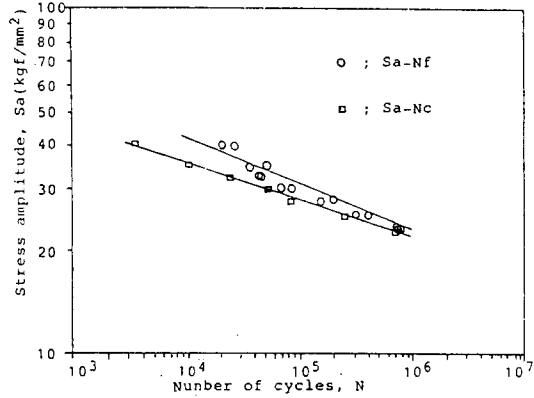


Fig. 10 Relationship between stress amplitude and number of cycles(3000cpm)

약 0.43이었다. 따라서 破斷疲勞壽命과 초기크랙發生壽命에 미치는 反復速度의 영향은 초기크랙發生壽命에 대한 쪽이 破斷壽命에 대한 쪽보다 더 현저함을 알 수 있다.

Fig. 9, 10은 破斷壽命(N_f)과 초기크랙發生壽命(N_c)을 S-N 曲線에 나타낸 것으로 反復速度가 100cpm일 경우 應力레벨이 55kgf/mm²에서는 壽命比 N_c/N_f 는 0.17이고, 25kgf/mm²에서는 0.43이며, 또한 反復速度가 3000cpm일 경우는 40kgf/mm²에서 壽命比 N_c/N_f 는 0.14 이었고 18kgf/mm²에서 0.79이었다.

이 結果 초기疲勞크랙의 發生은 高應力레벨에서 빠르게 나타나는 반면에 疲勞크랙 전파율은 低應力레벨에서 빠르게 진전됨을 알 수 있다. N_c 와 N_f 의 관계가 Fig. 11에 表示되어 있고 最小自乘法를 利用하여 양자의 관계를 구하면 다음과 같다.

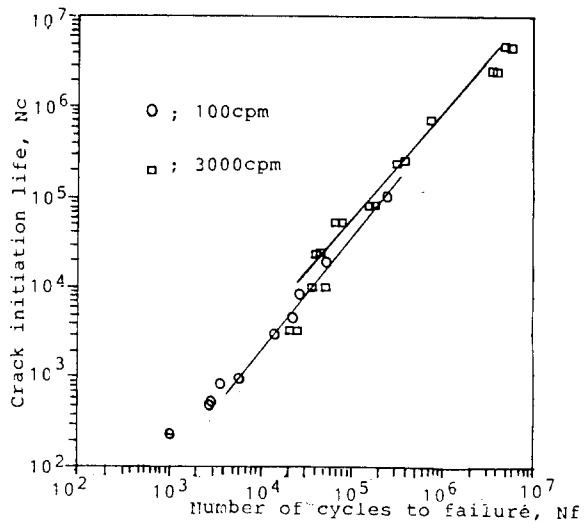


Fig. 11 Relationship between crack initiation life and number of cycles to failure

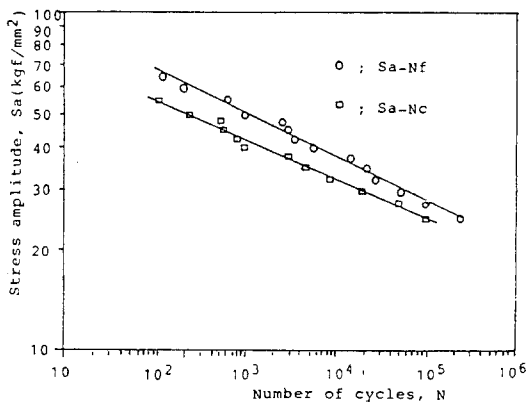


Fig. 9 Relationship between stress amplitude and number of cycles(100cpm)

$$(100cpm) N_c = 0.048 N_f^{1.1817}$$

$$(3000cpm) N_c = 0.074 N_f^{1.1824}$$

3.2. Miner 方法에 의한 考察

p=1일 때 反復速度 3000cpm에서의 破斷壽命(N_f)은 式(1)에 의하고, 反復速度가 100cpm에서는 式(3)에 의하여 破斷壽命(N_f)을 구할 수 있다. 한편 1블럭중(약 0.5×10^6 cycles)에서의 각 스텝의 反復數 n_i 를 구하고 각각의 n_i/N_f 를 계산하면 推定疲勞壽命은 式(7)에 의하여 구할 수 있다.

$$N_{f,cal} = \frac{\sum_{i=1}^8 n_i}{\sum_{i=1}^8 (n_i/N_{fi})} \quad (7)$$

Miner 方法¹⁾에 의한 疲勞壽命 曲線과 實驗結果의 비교를 Fig. 12에 표시하였다.

實驗結果 推定壽命과의 비(N_{exp}/N_{cal})는 그 평균값이 $p=0.75$ 일때 0.97, $p=0.5$ 일때 1.27, $p=0.25$ 일때 1.26이고 전체의 평균값은 1.17이었다.

3.3. 修正 Miner 방법에 의한 考察

應力이 作用할 때에 過小應力의 영향을 무시할 수 없기 때문에 기계나 構造物의 疲勞強度를 평가할 때에는 過小應力에 의한 부재의 손상을 고려해 주어야 한다. 疲勞限度 이하의 應力 영향을 고려하는 方法으로 기본 S-N선도를 疲勞限度 이하의 영역까지 연장하여 過小應力의 破斷 反復數를 가정하고 여기에 선형손상법칙을 적용하는 것이 修正 Miner의 方法이다.

즉 파단수명수 N_{fi} 는 반복속도 3000cpm에서는 式(1)로 반복속도 100cpm에서는 式(3)으로 구할 수 있으며 이 N_{fi} 를 사용하여 式(7)에서 疲勞壽命을 推定할 수 있다. 이와 같은 方法으로 구한 값들을 Fig. 13에 나타내었다. 결국, 修正 Miner方法에 의한 疲勞壽命 曲線은 기본 S-N 曲線에 평행한 直線이 되며, 最高 應力振幅이 疲勞限度 이하일때의 壽命은 有限 壽命이 된다.

實驗壽命과 修正 Miner方法에 의한 推定壽命과

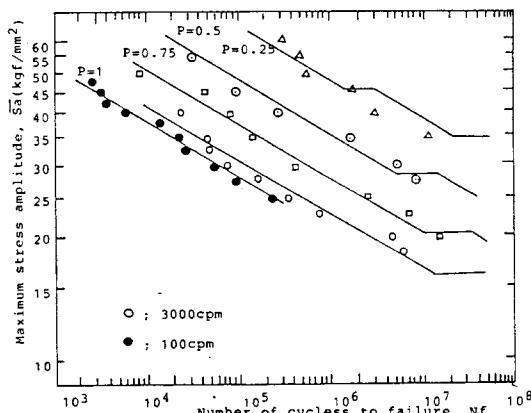


Fig. 12 Comparison of test results with fatigue life curves by Miner's rule

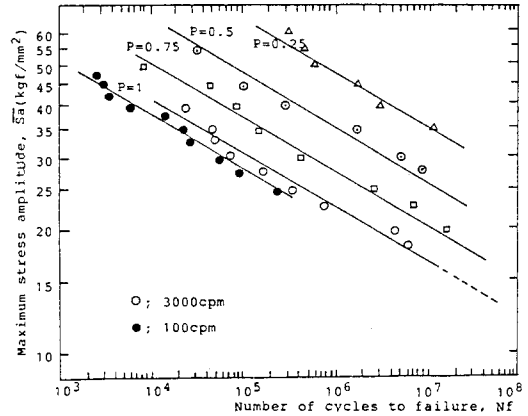


Fig. 13 Comparison of test results with fatigue life curves by modified Miner's rule

의 壽命比는 그 평균값이 $p=0.75$ 일 때 1.22, $p=0.5$ 일 때 1.18, $p=0.25$ 일 때 1.04이고 전체의 평균값은 1.15이었다.

3.4. Haibach 方法에 의한 考察

기본 S-N선도가 시간강도 영역으로부터 疲勞限度 영역으로 천이하는 점에서의 疲勞壽命을 N_A 라 하고 이때의 應力 振幅을 S_{D0} 라 할때, Haibach⁶⁾는 다음과 같은 式을 利用하여 疲勞限度 이하에서 過小應力의 영향을 평가하였다.

$$N_{f,fictive} = N_A (S_{ai}/S_{D0})^{-(2k-1)}$$

一定應力 振幅實驗을 통하여 疲勞限度 $S_{D0} = 15,875 \text{ kgf/mm}^2$ 이었다. 이때의 疲勞壽命 $N_{fA} = 1.5 \times 10^7$ 이고 기본 S-N 선도의 기울기 $k = 7.752$ 을 얻었다. 따라서, Haibach을 本實驗 結果에 적용하면 疲勞限度 이하 영역에서 가상 S-N선도 式은 反復速度 3000cpm일 때 式(8)과 같이 표시된다.

$$N_f = (9.833 \times 10^{25}) S^{-14.505} \quad (8)$$

각 스텝에서의 破斷壽命 N_f 는 式(1), (3) 및 式(8)에 의하여 구하며, 이 N_{fi} 를 사용하여 式(7)에 의하여 推定 疲勞壽命을 구한다.

Fig. 14에 Haibach方法에 의한 推定疲勞壽命 曲線을 나타내었다. 여기에서 推定疲勞壽命 曲線은 最高應力 振幅이 큰 영역에서는 기본 S-N선도에 평행 하게되나 最低 應力 스텝(스텝8)이 疲勞限度 이하가 되면 이 스텝의 N_{fi} 는 연속적으로 長壽命

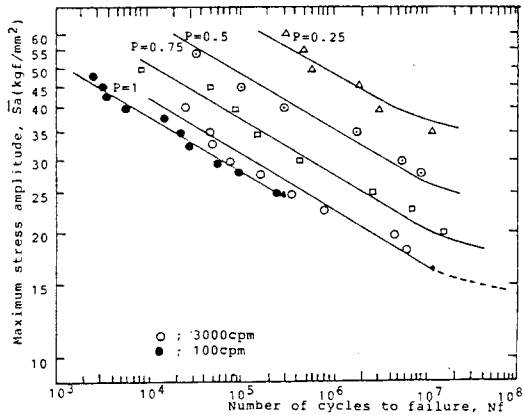


Fig. 14 Comparison of test results with fatigue life curves by Haibach's rule

側으로 이동하기 때문에 推定疲勞 壽命은 아래 부분이 완만한 曲線이 된다.

破斷壽命 N_f 를 기준으로 할때, Haibach方法에 의한 推定壽命과 實驗壽命을 비교하면 $p=0.75$ 일 때 1.06, $p=0.5$ 일 때 1.02, $p=0.25$ 일 때 1.08 이었고 전체의 평균 값은 1.05이었다.

4. 結 論

一定應力振幅 實驗 및 Gassner type 荷重순서에 의한 p分布 블록 荷重實驗을 통하여 얻은 結論은 다음과 같다.

1) 一定應力振幅 實驗에서 疲勞壽命은 反復速度 (cycle rate)의 영향을 받으며, 壽命比 $N_f(100 \text{ cpm})/N_f(3000 \text{ cpm})$ 은 약 0.56이었다.

2) 3000cpm과 100cpm의 각각의 反復速度에 대한 N_f 와 N_c 의 비교에서는 高應力側에서 초기 크랙發生壽命(N_c)이 빠르게 나타나고 반면에 疲勞 크랙전파율은 低應力에서 빠르게 진전되었다.

3) $p=0.75$ 인 應力頻度分布에서는 Miner 方法, $p=0.5$ 에서는 Haibach 方法, $p=0.25$ 에서는 修正 Miner 方法에 의한 疲勞壽命 推定이 비교적 양호한 일치를 나타냈다.

참고문헌

- 1) Miner, M.A : Cumulative damage in fatigue, J.of applied Mech., Vol.12, (1945), pp. 159-164.
- 2) Haibach, E : The allow stress under variable amplitude loading of welded joint, Proc. of the Conf. on Fatigue of Welded Structure, (1970), pp. 6-9.
- 3) Iida., K., Kaneko, A : A study of cumulative damage in fatigue by block loading with p-distribution, J. of Soc. of the Nav. Arch. of Japan, Vol.144, (1978), pp. 381-389.
- 4) 表東根, 高柱石 : p分布 블록荷重에 의한 人工海水中的 腐蝕疲勞強度 特性에 관한 研究, 韓國海洋工學會誌, 제3권 제1호, (1989), pp. 415~425.
- 5) E. Gassner, E. Haibach : Entragbare Spannungen und Lebensdauer einer Schweiß Verbindung aus Stahl St37 bei Verschiedenen Formen des Beanspruchungs Kollektives, Arch. fur Eisenhütten, (1964), pp. 35, 255.
- 6) 洪性祚 : 블록荷重による 累積疲勞被害度豫測法, 東京大學博士 學位論文, (1982), pp. 28-32.
- 7) Peterson, R.E. : Stress concentration design factor, Wiley Interscience Pub., (1973), pp. 235.
- 8) 西田正孝 : 應力集中, 森北出版株式會社, (1972), pp. 323-325.