

變動荷重을 받는 용접構造材의 疲勞壽命 豫測

Fatigue Life Prediction of Welded Structural Material under Variable Loading

김민건* 김동열**
Kim, Min-Gun Kim, Dong-Yul

ABSTRACT

In this study, about the fatigue life of welded structure material under fluctuation loading, the prediction life which is produced by using the Histogram Recorder System was compared with the experimental life which is produced by execution of fatigue test of welding test material in fixed amplitude load which is produced by the RMC model which is imported by conception of equivalent stress. In this result, this is represented few difference by comparing prediction life which is produced by damage analysis depended on Miner's rule, by using the Histogram Recorder System, with experimental life which is produced by the RMC load model which is imported by conception of equivalent stress, therefore fatigue life is easily predicted by using Histogram Recorder System, and result of prediction has equivalent accuracy with other method which is more complex than the Histogram Recorder System. Besides the damage which is produced by stress which is high thirty percentage rank in the stress range of damage inducing, is nearly equal to the damage which is induced the rest of seventy percentage, there fore we can see that damage accumulation which is induced few time overload which is effected welded structure material is great.

키워드 : 피로, 피로수명, 용접구조재, 변동하중,

Keywords : Fatigue, Fatigue Life, Welded Structural Material, Variable Loading

1. 序 論

鋼構造物에 있어서 기본적으로 요구되는 사항은 共用중에 損傷을 입지 않고 健全함과 安全性을 확보하여 유지하는 것이다. 그러나 構造用 鋼材는 제 2의 상(hard phase), 潛在 龜裂, 微視的인 熔接 缺陷 등과 같은 否定的인 요인의 혼합이 불가피하며, 작용하는 실동하중(service load)에 의해 이들 요인으로 부터 疲勞龜裂이 發生하고 進展되어 구조물의 破壞舉動을 지배하게 된다. 실제의 機械 및 構造物은 變動荷重을 받고 있는 것이 일반적이어서, 이러한 기계, 구조물의 設計

및 健全性 평가에 있어서는 변동하중하의 疲勞壽命에 대한 豫測이 매우 중요하게 된다.

따라서 본 연구에서는 變動荷重을 받는 熔接構造材 모델에서의 疲勞壽命을 Histogram Recorder System을 사용하여 疲勞破壞의 가능성이 많은 熔接 이음부에 대한 피로수명을 豫測하고, 여기에 等價應力 개념을 도입한 RMC모델에 의한 일정진폭 하중하에서 疲勞試驗을 실시하여 이로부터 얻은 결과를 豫測 疲勞壽命과 비교 분석함으로써 피로수명 예측에 대한 基礎 資料를 提示하고자 한다.

2. 變動荷重下에서의 疲勞壽命 예측방법

2. 1 일반적인 疲勞龜裂 成長解析

일반적인 鋼構造物에 작용하는 實動荷重은 그 振幅과 週期가 不規則的인 不規則荷重(random loads)

* 강원대학교 기계공학과 교수

** 강원대학교 기계공학과 박사과정

이므로 構造物의 각 요소에는 이에 따르는 變動荷重이 작용하는 경우가 많다.

변동하중이 작용하는 경우 疲勞龜裂成長 豫測方法으로는 크게 다음과 같이 나눌 수 있다.

1) 荷重變化에 따르는 相互影響(interaction effect)을 고려하지 않는 경우

2) 龜裂先端의 殘留應力을 기초로 하여 相互影響을 고려하는 경우

3) 等價應力擴大係數(equivalent k-concept)를 이용하는 경우

4) 特性應力擴大係數(characteristic k-concept)를 이용하는 경우

2. 2 等價應力 개념에 의한 解析

많은 연구에 따르면 一定振幅荷重을 도입함으로써 불규칙한 變動荷重 Spectrum은 疲勞壽命을 나타낼 수 있다고 보고하였다.[K. Yamada(1976), C.G. Schilling(1978)]

等價應力理論으로 mean, model, median, RMS, RMC 등 여러모델이 제안되었으며 RMS, RMC Model은 다음과 같이 理論的으로 정리될 수 있다.

線形彈性 破壞力學의 관계식으로부터 適用荷重 범위에 따른 피로수명 S-N의 관계식은 다음과 같다.

$$\log N = B_1 + B_2 \log \sigma_r \quad (1)$$

여기서 B_1, B_2 는 材料에 따른 회귀상수이다. 윗식에서 log를 消去하면

$$N = 10^{B_1} \cdot \sigma_r^{B_2} \quad (2)$$

이 되며 식(2)을 Palmgren-Miner의 선형손상법칙에 의한 식

$$\sum_{i=1}^S \frac{n_i}{N_i} = 1.0$$

에 代入하면

$$\sum_{i=1}^S \frac{n_i}{10^{\frac{B_1}{B_2}} \sigma_{ri}^{B_2}} = 1.0 \quad (3)$$

으로 된다. 한편 S-N의 관계식으로부터 等價應力 범위 $\sigma_{r, equiv}$ 에 의한 피로수명은 식(2)에 의해

$$N = 10^{B_1} \sigma_{r, equiv}^{B_2} \quad (4)$$

$$\frac{N \sigma_{r, equiv}^{-B_2}}{10^{B_1}} = 1.0 \quad (5)$$

으로 된다. 식(3)와 식(5)을 等値하면

$$\frac{N \sigma_{r, equiv}^{-B_2}}{10^{B_1}} = \frac{1}{10^{B_1}} \sum_{i=1}^S n_i \sigma_{ri}^{-B_2}$$

$$\sigma_{r, equiv} = \left(\sum_{i=1}^S \frac{n_i \sigma_{ri}^{-B_2}}{N} \right)^{-1/B_2} \quad (6)$$

이다. 식(6)로 부터 $m = -B_2 = 2$ 일때의 等價應力 범위

$$\sigma_{r, RMS} = \sigma_{r, equiv} = \left(\sum_{i=1}^S \frac{n_i \sigma_{ri}^2}{N} \right)^{1/2} \quad (7)$$

은 Root-Mean-Square (RMS) 應力幅이 된다. [C. G. Schilling (1978)] 또한 $m = -B_2 = 3$ 일때의 等價應力 범위(구조용 강재)

$$\sigma_{r, RMC} = \sigma_{r, equiv} = \left(\sum_{i=1}^S \frac{n_i \sigma_{ri}^3}{N} \right)^{1/3} \quad (8)$$

은 Root-Mean-Cube (RMC) 應力幅이 된다. [Yamada (1976)]

2. 3 변동하중하의 피로균열 발생수명 평가법

Miner의 가설 또는 Palmgren-Miner의 선형누적 가설이라 하는 것은, 피로파괴는 피로하중에 의한 일(work)이 재료가 흡수할 수 있는 일의 總量(限界量)에 도달했을 때 일어나며, 피로손상은 최대응력이 疲勞限度응력보다 큰 경우에만 일어난다는 가정 아래 유도된 것으로, 응력 S_1, S_2, \dots, S_n 에 대한 일정 진폭하중하의 수명을 각각 N_1, N_2, \dots, N_n , 변동하중하의 각 응력에 대한 되풀이數를 n_1, n_2, \dots, n_n 이라 할 때, 피로파괴는 다음 조건을 만족할 때 일어난다는 것이다.

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_n}{N_n} = 1 \quad (9)$$

$$\therefore \sum_i \frac{n_i}{N_i} = 1$$

여기서 $\frac{n_i}{N_i}$ 를 되풀이數 比(cycle ratio)라 하며,

이 되풀이數 比의 합, $\sum_i \frac{n_i}{N_i} = D$ 가 누적피로손상(cumulative fatigue damage)을 나타내게 된다. 피로한도 以上の 응력이 대부분인 경우 비교적 좋은 평가방법으로, Miner의 Alclad 24 S-T에 대한 실험결과 는 $D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} = 1.49 \sim 0.8$ 이 되고 있다⁽¹⁾.

다음과 같이 (i) 하중변동에 따른 應力間의 간섭 효과(stress interaction effect)와, (ii) 변동하중하의 피로한도 以下の 응력이 피로손상에 미치는 영향을 무시하는 문제점이 있다. 일반적인 변동하중에 대해서는 위험쪽(non-conservative)의 예상이 되는 경우

가 많다. 이러한 결점에도 불구하고, 그 간편함 때문에 Miner의 가설은 실제로 가장 많이 사용되고 있다.

3. 實驗方法

3. 1 試驗片의 材料

본 실험에서 사용된 시험편의 소재는 기계부품용 및 구조용에 널리 사용되고 있는 SM20C 탄소강으로, 그 화학성분은 Table 1에, 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition (wt. %)

C	Si	Mn	P	S
0.20	0.23	0.41	0.02	0.006

Table 2 Mechanical properties

Yield strength (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Hardness (H _B)
30.1	48.5	61.4	125

3. 2 試驗片의 熔接

용접 피로시험편을 얻기 위하여 환봉강을 선반가공하여, Fig.1와 같이 루우트 간격 3mm를 주고 Table 3과 같은 용접조건으로, 1층은 TIG용접법으로, 2층은 교류 아크 용접법을 이용하여 용접을 하였다. 용접봉은 軟鋼用으로 사용되고 있는 國產 TIG용접봉 $\phi 2.4\text{mm}$ (AWS ER 70S)와 저수소계 피복 아크용접봉 $\phi 2.6\text{mm}$ (KS E4316, AWS E7016)를 사용하였다. TIG용접의 Shield gas는 아르곤(Ar)가스를 사용하였고, 피복 아크용접봉은 피복제의 吸濕에 따른 작업성과 용접성의 영향을 고려하여 용접하기 전에 용접봉 건조로에서 $300\sim 350^\circ$ 로 60분 동안 乾燥시켜서 사용하였다.

용접 缺陷의 發生原因을 가급적 피할 목적으로 1층 TIG용접에서는 Table 3과 같이 펄스전류와 크레이터 모드를 사용하였고, 2층 교류 아크 용접에서는 용접지그를 製作하여 사용하였다.

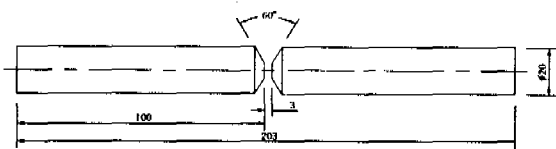


Fig.1 Mechanical welding type

Table 3 Welding conditions

구분	용접 전류	펄스 전류	초기 전류	크레이터 전류	업슬로 프시간	다운슬로 프시간	DC펄스 주파수	Ar가스 유량
TIG 용접	140A	160A	10A	10A	0.3초	0.5초	50Hz	8~9 l/min
AC Arc 용접	90A

3. 3 試驗片 가공 및 형상

피로 시험편은 Fig.2와 같이 실험부의 直徑을 $\phi 9\text{mm}$, R25의 거의 평활 재료로 간주할 수 있는 형상으로 용접부가 중앙에 위치하도록 CNC선반을 사용하여 1차 가공하고, 가공한 시험편을 Sand-paper #200, #400, #600, #800, #1000, #1200을 사용하여 순차적으로 연마하였다.

현장성과 용접 구조재 모델과 동일한 조건을 고려하여 용접부의 잔류응력 제거를 위한 시험편의 열처리하는 하지 않았다.

3. 4 疲勞試驗

피로시험은 상온의 대기 중에서 모터 출력 0.4kw, 회전수 3500rpm인 전기 모터식 회전 굽힘 피로시험기를 사용하였다. 본 실험에서는 應力比 $R=-1$ 인 완전 역전 응력 사이클로, 추 무게를 이용한 굽힘 응력

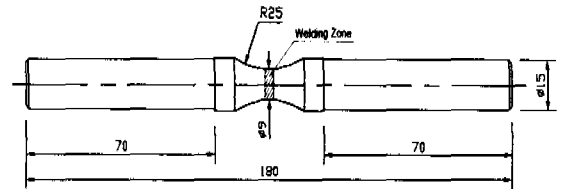


Fig.2 Fatigue specimen

값을 제어하여 실험을 하였고, 작용 응력은 降伏強度를 기준으로 $1\text{kgf/mm}^2\sim 5\text{kgf/mm}^2$ 씩 적의 증감하여 조정하였다. 시험편은 실험하여 1×10^7 cycle 이후에도 破斷되지 않는 응력을 피로한도로 채택하였다.

3. 5 熔接構造材 실험 모델 製作

실험 모델의 素材는 판두께가 4.5mm와 9mm인 KSD 3503 규격의 일반 구조용 압연 강판(SS400)을 사용하고, 각 部材간의 용접은 저수소계 피복아크용접봉(KS E4316) $\phi 3.2\text{mm}$ 를 사용하여 교류 Arc용접으로 양쪽 펄렛용접을 하여 Fig.3과 같은 형상으로

제작하였다.

용접 연결부에 스트레인 게이지를 부착하기 위하여 필렛 용접부를 엔드밀 $\phi 12\text{mm}$ 를 사용하여 밀링 가공한 후 Sand-paper #120으로 연마하고, 전용 접착제를 사용하여 용접형 스트레인 게이지를 Fig.4와 같이 용접부와 母材 사이의 경계부에 부착하였다.

3. 6 實驗 모델의 應力分布 측정

실험모델에 부착된 Strain gauge를 Histogram Recorder에 연결하고, 측정시간을 1,200초, 해석시 Full scale을 $70\text{kg}/\text{mm}^2$, Counting program은 Rain flow법으로 설정하고, 실험모델의 板 끝을 고무해머로 인장과 압축응력이 가해지도록 반복 타격하여 용접 연결부에 변동 하중이 가해지도록 하고, 이 때의 응력을 측정하였다.

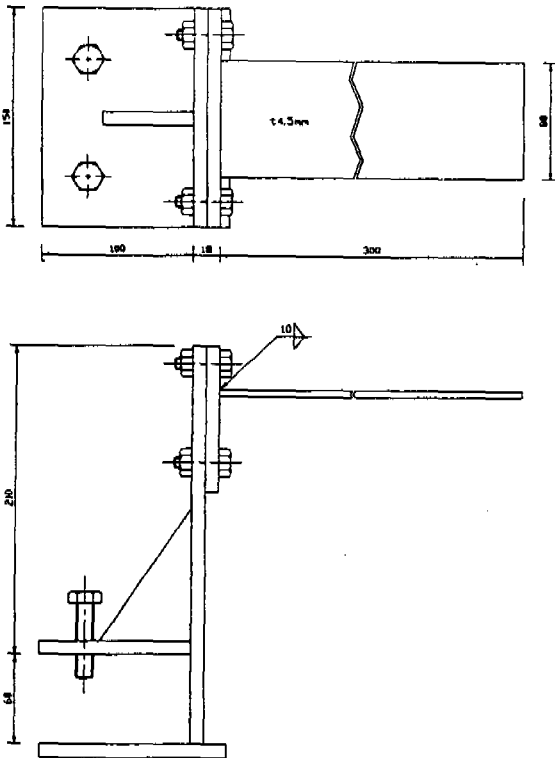


Fig.3 Experiment model of welded structure material

응력범위빈도 측정에는 응력범위빈도 측정기 (histogram recorder)를 이용하였고, Fig.5는 측정과정을 나타내었다.

4. 實驗結果 및 考察

4. 1 피로시험 結果

Fig.6은 SM20C의 용접부위에 대한 S-N curve를 나타낸 것으로, 용접시편의 疲勞限度는 $26\text{kgf}/\text{mm}^2$ 로 나

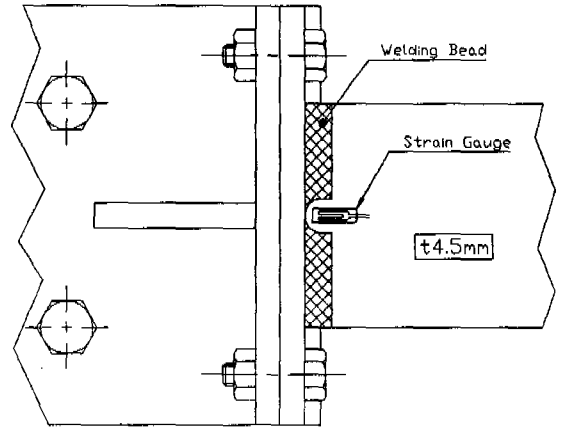


Fig.4 Sticking position of strain gauge

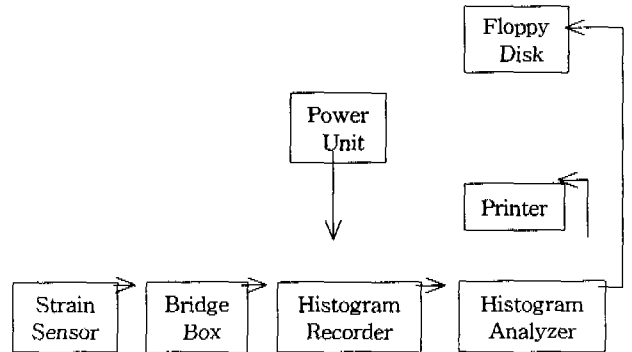


Fig.5 Measuring process of stress range frequency

타났다. 이 S-N 곡선은 Histogram Recorder에 입력되어 Damage를 계산하는 內藏 S/W의 입력자료로 활용된다.

4. 2 熔接構造材 모델의 應力分布 測定結果

1,200초 동안 용접구조체에 變動荷重을 주면서 Rain flow법으로 측정한 응력분포는 Table 4과 같다.

Table 4에서 응력의 範圍 VS. 作用回數와의 관계를 따로 분리하여 頻度分布圖을 작성 한 것을 Fig.7에 보였다.

측정결과 1200초 동안 10,329회의 변동하중이 가해졌으며, 최대응력은 $45.93\text{kgf}/\text{mm}^2$ 이고 최소응력은 $2.18\text{kgf}/\text{mm}^2$ 로 나타났다.

Miner법칙에서 疲勞損傷은 疲勞限度 應力보다 큰

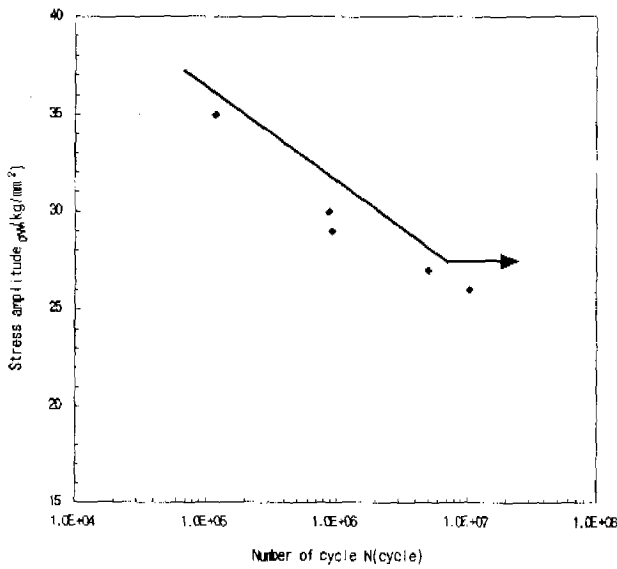


Fig.6 S-N curve

경우에만 일어난다는 假定 아래 피로한도(26kgf/mm²) 이상의 응력이 가해진 변동하중의 횟수는 309회로 전체 Count 수의 3%에 해당한다.

Fig.7에서 보는 바와 같이 應力分布는 실제 구조물에서 나타날 수 있는 분포와 類似한 것으로 判斷되며, 47.03kgf/mm² 이상의 Count 수가 모두 "0"인 것으로 보아 Full scale(70kgf/mm²) 설정도 適當한 것으로 판단된다

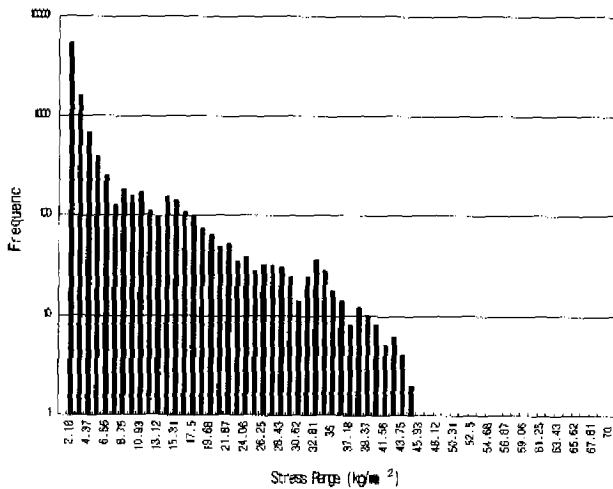


Fig.7 Stress frequency distribution chart

4. 3 Damage 解析에 의한 疲勞壽命 豫測

4. 3. 1 Damage 計算

Miner의 가설에 의하면 피로파괴는 피로하중에 의한 일(work)이 재료가 흡수할 수 있는 일의 總量(한계량)에 도달했을 때 일어나며, 피로손상은 최대 응력이 피로한도 응력보다 큰 경우에만 일어난다는

假定 아래 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_n}{N_n} = 1$$

$$\therefore \sum_i \frac{n_i}{N_i} = 1$$

즉, $\frac{n}{N}$ 의 합이 "1"일 때 파괴가 일어나는 것이다.

따라서 $\sum_i \frac{n_i}{N_i} = D$ 가 累積疲勞損傷(cumulative fatigue damage)을 나타내게 된다.

이 식에서 n_i, N_i 는 둘다 응력의 1cycle를 1회로 보고 있다. Rain flow법에서는 응력 진폭의 진행, 되돌아옴을 각각 1회로 Count하므로 Rain flow법에 의해 얻어진 Count수를 2로 나눈 값을 위식에 적용하여 Damage를 구한다. 그러나 사용하게 될 Histogram Recorder System에서는 內藏된 S/W에 의해서 자동적으로 Count수를 2로 나눈 값을 적용한다.

Table 4는 용접구조재 모델로 부터 얻어진 Count-Stress range 표에서 Histogram Recorder System에 의해 Damage를 구한 것으로 Damage total은 9.733E-04이다.

Fig.8는 Damage와 Stress 관계를 그래프로 나타낸 것이다.

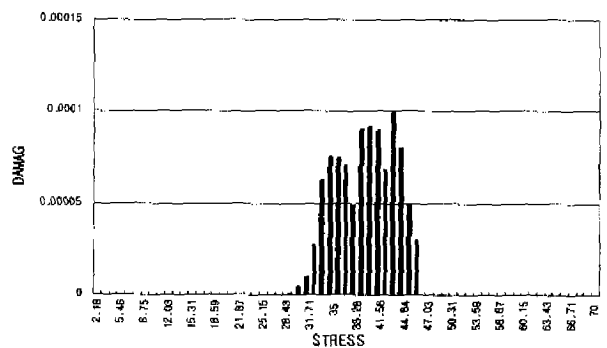


Fig.8 Stress damage distribution chart of damage induction range

4. 3. 2 疲勞壽命 豫測

損傷의 合(damage total)의 逆數는 파괴가 일어날 때까지의 주어진 하중 이력이 가해질 수 있는 사이클 수, 즉 壽命이 된다.

따라서 용접구조재 모델의 수명은

$$\text{수명} = \frac{1}{\text{Damage Total}} = \frac{1}{0.0009733} \approx 1,027 \text{이다.}$$

Table 4 Measuring result of Count-Stress range

NO	COUNT	STRESS	COUNT/K	COUNT%	DAMAGE	N(S/N)
64	0	70.00	0	0	0	2.209E+2
63	0	68.90	0	0	0	2.689E+2
중			략			
42	1	45.93	0.5	0.0097	2.983E-05	1.676E+4
41	2	44.84	1	0.0194	4.900E-05	2.041E+4
40	4	43.75	2	0.0387	8.048E-05	2.485E+4
39	6	42.65	3	0.0581	9.914E-05	3.026E+4
38	5	41.56	2.5	0.0484	6.786E-05	3.684E+4
37	8	40.46	4	0.0775	8.919E-05	4.485E+4
36	10	39.37	5	0.0968	9.156E-05	5.461E+4
35	12	38.28	6	0.1162	9.024E-05	6.649E+4
34	8	37.18	4	0.0775	4.941E-05	8.095E+4
33	14	36.09	7	0.1355	7.102E-05	9.856E+4
32	18	35.00	9	0.1743	7.500E-05	1.200E+5
31	28	33.90	14	0.2711	7.547E-05	1.855E+5
30	36	32.81	18	0.3485	6.274E-05	2.869E+5
29	24	31.71	12	0.2324	2.705E-05	4.436E+5
28	14	30.62	7	0.1355	1.021E-05	6.859E+5
27	24	29.53	12	0.2324	4.566E-06	2.628E+6
26	30	28.43	15	0.2904	4.440E-07	3.378E+7
25	32	27.34	16	0.3098	3.686E-08	4.341E+8
24	33	26.25	16.5	0.3195	2.958E-09	5.578E+9
23	28	25.15	14	0.2711	0	****E**
중			략			
2	5402	2.18	2701	52.2994	0	****E**
1	0	1.09	0	0	0	****E**
Total	10329		5164.5		9.733E-04	

Damage 해석에 의해 구해진 용접구조재의 모델의 수명은 1,027회 정도로 예측되며, 이를 Rain flow 법으로 換算한 Count 수는 2,054회 정도로 예측 된다.

4. 4 等價應力 概念을 導入한 RMC 하중모델을 이용한 實驗壽命

등가응력 이론으로 RMS, RMC 등 여러 모델이 제안 되었으며, 構造用 鋼材에 대한 회귀지수 m값이 대부분 3보다 다소 큰 값을 가지므로 이론적으로 RMC가 RMS보다 응력범위의 頻度分布를 變動荷重에 더 가깝게 나타내기 때문에, m>3인 경우 RMC 모델에 의한 해석이 바람직하다.

等價一定振幅應力 S_{re} 는 다음 식으로 주어진다.

$$S_{re} = \left(\sum r_i S_{r_i}^3 \right)^{\frac{1}{3}}$$

여기서 r_i 는 i 번째 응력범위의 頻度 百分率이고, S_{r_i} 는 i 번째 응력 범위(range)이다.

따라서 용접구조재 모델의 Count-Stress range의 표로부터 S_{re} 를 Root mean cube(RMC)법에 따라 구하면 $S_{re}=55.6\text{kgf}/\text{mm}^2$ 이다.

구해진 $S_{re}=55.6\text{kgf}/\text{mm}^2$ 를 피로시험편에 負荷하여 시편이 破斷될 때까지의 피로수명을 구하여 앞절에서 구한 잔여수명과 비교하고자 한다.

4. 5 Damage 해석에 의해 구해진 疲勞壽命과 實驗壽命과의 比較

回轉급힘 피로시험기를 사용하여 공시재에 $S_{re}=55.6\text{kgf}/\text{mm}^2$ 의 응력을 반복 負荷한 結果, $N=2,900$ 회 정도에서 파단하였다. 이 수명은 시험기에 부착된 計數器로는 수명이 너무 적어 計數될 수가 없어서 시간을 측정하여 얻어진 값이다. 즉, 시험기가 기동하여 49.7초후에 破斷하였는데, 시험기의 정격 rpm이 3,500이므로 여기에 準하여 계산된 값이다.

Miner 가설에 의해 Damage 해석으로 구해진 잔여 수명은 1,027회 정도로 예측되었고, 등가응력개념을 도입한 RMC 하중모델을 이용한 실험(실제)수명은 2,900회 정도로 實驗壽命과 豫測壽命과의 차이는 1,873회 정도의 차이를 보이고 있다. 이는 사용한 피로시험기가 3,500rpm인 점을 考慮하면 실험수명에서 3×10^3 이하의 수명은 시험기가 회전하여 1분 이내에 시편이 파단되는 것으로, 모타가 起動하여 1분 이내에 規定 rpm인 3,500rpm에 到達하지 못하므로 실험수명은 더욱 적게 평가되어야 한다. 따라서, 실험수명과 예측수명과의 差異는 더욱 적을 것으로 判斷 된다.

이상의 사실로부터 Histogram Recorder System을 사용하여 殘餘壽命을 손쉽게 예측할 수 있으며, 예측 결과는 훨씬 복잡한 다른 방법에 의한 결과 만큼이나 正確性을 가진다고 할 수 있다. 특히 피로한도 이상의 응력이 대부분인 경우는 더욱더 좋은 평가방법이 될 것으로 判斷된다. Histogram Recorder에 사용된 Miner법칙의 문제점으로는 N의 物理的의미가 模糊하다는 점이다. N은 시험편으로부터 구하여지는데, 시험편에 龜裂이 생기면 강성(stiffness)이 급격히 低下하면서 곧 파단에 이른다. 실제 구조물에서는 작은 균열이 생겨도 구조물 전체의 剛性이 시험편에서와 같이 빠른 속도로 저하하지는 않는다는 것을 고려하면 이 법칙을 이용한 Histogram Recorder System의 改良을 위한 새로운 學術的 研究의 뒷받침이 따라야 할 것으로 思料된다.

4. 6 과하중이 구조재에 미치는 영향

Damage 誘發 應力區間의 상위 30%에 드는 응력에 의한 Damage를 合算하여 총 Damage와의 比를 求하여 보면, 상위 30% 이상의 응력으로, Table 4로부터 Damage 誘發 應力區間이 45.93~26.25이므로 39.37kgf/mm² 이상을 잡으면 그 Damage의 총합은 5.0706×10⁻⁴이다.

따라서 총 Damage와의 比는

$$\frac{5.0706 \times 10^{-4}}{9.733 \times 10^{-4}} = 0.52 \rightarrow 52\%$$

이 사실로부터 상위 30%(count수의 12%)에 드는 응력에 의한 損傷이 나머지 70%가 미치는 損傷과 거의 같다고 볼 수 있어서, 構造材에 작용하는 少數回의 過荷重(overload)에 의한 Damage 累積 이 크다는 사실을 알 수 있다.

5. 結 論

本 研究에서는 變動荷重을 받는 熔接構造材 모델에서의 疲勞壽命을 Histogram Recorder System을 사용하여 얻은 豫測壽命과, 여기에 等價應力 개념을 도입한 RMC 모델에 의한 一定震幅 荷重下에서 熔接試片의 피로시험을 실시하여 얻은 實驗壽命을 比較한 결과 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. Histogram Recorder System을 사용하여 Miner법칙에 의한 Damage 解析으로 구해진 豫測壽命과 等價應力 개념을 導入한 RMC 하중모델을 이용한 實驗壽命과는 僅少한 差異를 보이므로, 이는 Histogram Recorder System을 사용하면 疲勞壽命을 손쉽게 豫測할 수 있고, 豫測한 結果는 훨씬 複雜한 다른 방법에 의한 결과만큼이나 正確性을 가진다고 할 수 있다.

2. Damage 誘發 應力區間의 上位 30%(count수의 12%)에 드는 응력에 의한 損傷이 나머지 70%가 미치는 損傷과 거의 같다고 볼 수 있어서, 구조재에 작용하는 少數回의 過荷重(overload)에 의한 Damage 累積 이 크다는 사실을 알 수 있다.

3. 그러나 Histogram Recorder System에 사용된 Miner법칙에서 N의 物理的 의미가 模糊하다는 점으로 N은 試驗片으로부터 구해지는데, 試驗片에 龜裂이 생기면 剛性이 급격히 低下하면서 곧 破斷에 이르나, 실제 構造物에서는 작은 龜裂이 생기도 構造物 전체의 剛性이 試驗片에서와 같이 빠른 속도로 低下하지는 않는다는 것을 考慮하면, 이 法則을 이용한 Histogram Recorder System의 改良을 위한 새로운 學術的 研究의 뒷받침이 따라야 할 것으로 思料된다.

參 考 文 獻

1. Miner, M.A., 1945, "Cumulative Damage in Fatigue", *Journal of Applied Mechanics*, Trans. ASME, E., Vol. 12, September, pp.a159~A164
2. ASTM Designation: E1049-85, 1985, Standard Practice for Cycle Counting in Fatigue Analysis.
3. 計測技術研究所, "構造物의 計測技術 理論과 疲勞應力 度測定요령", 세양컨설팅, 1997, pp.49~88
4. 송지호, "變動 荷重下의 疲勞破壞", *大韓機械學會誌*, 제30권, 제2호, 1990.
5. 장동일, 박종현, 박용걸, "變動荷重을 받는 剛構造部材의 疲勞舉動 解析", *大韓土木學會論文集*, 제8권, 제2호, 1988.