

드럼 세탁기 Spider의 피로수명 신뢰성 평가에 대한 연구

이성민(경남대 대학원), 조상봉(경남대), 조성진, 김영수, 강동우, 정연수, 정보선(LG전자)

A Study on Reliability Estimation for Fatigue Life of the Spider from a Drum Washing Machine

Seongmin Lee, Sangbong Cho, Seongjin Jo, Youngsoo Kim, Dongwoo Kang, Younsu Jung, Bosun Chung,

ABSTRACT

The spider of a drum washing machine receives the repeated fatigue loadings during laundering. Although the spider is designed statically safely, it often happens fatigue failure. Therefore it requires the safe design for fatigue and needs the prediction of quantitative fatigue life. The S-N diagram for a spider material is developed by fatigue test and statistical analysis. The stresses are measured directly from strain gages on the spider. To predict the fatigue life of spider, the rainflow counting method and Miner's rule are used. The data for fatigue life are analyzed statistically. From these data, reliability estimation for fatigue life can be done and also, equivalent fatigue life can be obtained. It will be applied to make and improve to a short period for design and prototype test.

Key Words : Fatigue failure (피로파손), Fatigue load (피로하중), Tensile test (인장시험), Fatigue test (피로시험), Equivalent life (등가수명)

1. 서론

세탁기는 전동기를 주동력으로 하며, 세제와 물의 작용을 이용하여 의복에 묻어 있는 오염을 떼어 내도록 세탁과 행굼, 탈수의 과정을 진행하게 된다.

드럼 세탁기에서 Spider란 부품은 세탁기의 전동 모터 축에 연결되어 있고 드럼통을 지지해주는 부품이다. 드럼 세탁기의 Spider는 세탁 및 탈수시의 반복 피로하중을 받게 되고 Spider를 정적으로 안전하게 설계하여도 종종 피로파손이 일어난다. 그러므로 피로파손에 대한 안전한 설계가 요구되며 정량적인 피로수명 예측이 필요하다.¹

본 연구에서는 피로수명 신뢰성 평가법을 제시하고, 인장시험과 피로시험을 통하여 통계적으로 분석한 Spider 재료의 기계적 특성과 드럼 세탁기의 Spider에서 직접 측정된 응력을 이용하여 Spider의 피로수명에 신뢰성 평가하고자 한다. 또한, 피로수명 평가 결과를 통계적으로 분석하고 등가하중 및 등가수명 등을 규명하여 드럼 세탁기 개발시에 개발기간 단축 및 성능 개선에 기여하고자 한다.

2. 재료시험 및 S-N선도

Spider의 재료인 Al_{DC}-2종의 표준시편(Fig. 1)을 이용하여 만능시험기(Instron사)로 정적 인장시험과 양진 피로시험을 하였다. 시험 조건은 다음과 같다.

- 1) Instron 10 ton
- 2) Cross head speed : 2.0mm/min
- 3) 파형: Sine wave
- 4) 주파수: 10Hz, 20Hz

정적 인장시험을 통해 인장강도, 항복강도, 탄성계수를 통계적으로 구하고 Table 1에 나타내었다. 가속 양진피로시험을 통해 얻어진 결과를 통계프로그램인 Minitab을 이용하여 대수정규(Lognormal) 분포로 가속수명 분석하였다.² Fig.2는 구해진 S-N선도를 Log 좌표계로 B₅₀, B₁을 표시한 것이다. 또한, 최소자승법으로 구해진 기울기와도 비교하여 나타내었다.

본 연구에서는 재료 Al_{DC}-2의 피로수명 S-N선도를 Fig. 2의 B₁인 $S=10^{2.50185}N^{-1.3341}$ 으로 잡는다.



Fig. 1 Configuration of specimen

Table 1 Mechanical properties of Al_{DC}-2

Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Young's modulus (GPa)
256	159	72

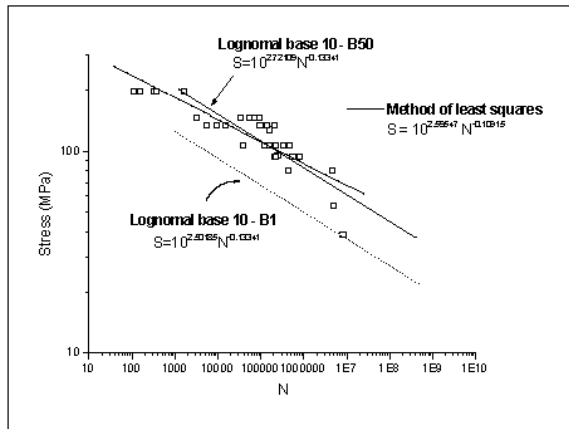


Fig. 2 S-N curve for Al_{DC}-2

3. 응력측정 방법 및 결과

3.1 응력측정 방법

행금과 탈수과정에 대한 Spider의 피로시험으로 실제 세탁물(타월+시험포)과 일정한 무게와 위치에 부착한 고무판으로 시험을 수행하고 응력을 측정하였다. 고무판의 무게는 A g_r, B g_r, C g_r로, 세탁물(타월+시험포)의 하중은 D kg_f, E kg_f, F kg_r로 각각 3종류에 대한 시험을 하였다. 고무판 A g_r, B g_r, C g_r를 Fig. 3과 같이 드럼을 6등분하여 ①, ③, ⑤ 축과 축의 중앙 ②, ④, ⑥ 위치의 드럼 전면부에 부착하였다.

스트레인 게이지는 단축 게이지를 Spider의 중심 축방향으로 부착하고, Fig. 3과 같이 스트레인 게이지 번호 1, 2, 3을 부여하였다. 실제 부착된 예를 Photo. 1에서 볼 수 있다

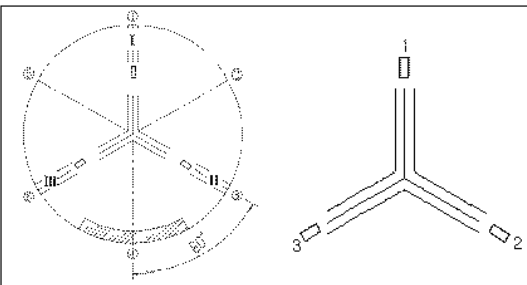
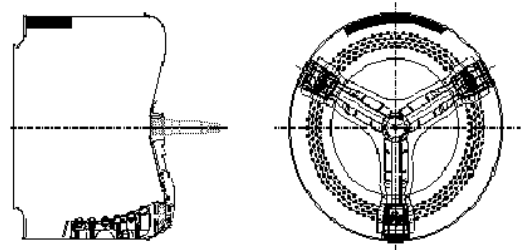


Fig. 3 Position of strain gage and rubber plate

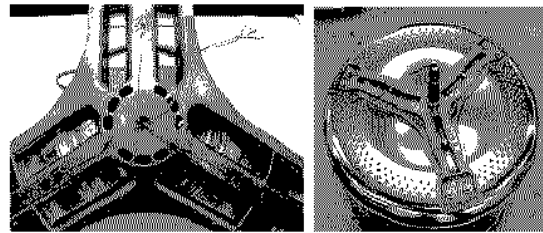


Photo. 1 Strain gage on the spider

응력측정에 사용된 장비는 Telemetry로 Photo. 2에서 보는 바와 같다. Telemetry는 측정부품에 송신기를 부착하고 수신부에서 센서의 측정값을 무선으로 수신하여 PC에서 측정 데이터를 기록하며 분석할 수 있다. 즉 케이블을 직접 연결할 수 없는 회전체 또는 원거리의 물체에서 측정된 데이터를 무선으로 처리하여 분석할 수 있는 장비이다.

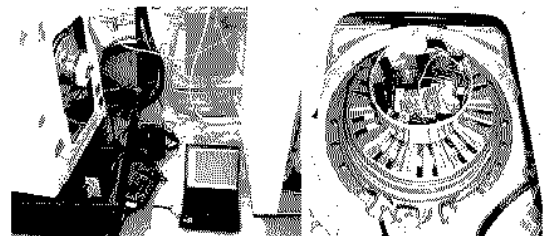


Photo. 2 Telemetry system

3.2 응력측정 결과

먼저, 고무판 부착 실험으로 드럼 전면부의 각 위치별로 고무판을 부착하고 탈수과정에 대한 Spider의 변형률측정 실험을 하였다. 고무판 A g.f에 대한 실험은 60회 하였으며, 같은 방법으로 고무판 B g.f과 고무판 C g.f는 각각 53회, 19회를 측정하였다. Fig. 4의 윗부분에 표시한 3종류는 고무판 A g.f, B g.f, C g.f 탈수과정에 대한 실험결과의 예이다.

다음으로 세탁물(타월+시험포)에 대한 행금 및 탈수과정의 Spider의 변형률측정 실험을 하였다. D kg.f (타월+시험포)에 대한 실험회수는 54회, E kg.f은 50회, F kg.f은 20회 측정하였다. 참고로 세탁과정은 D kg.f(타월+시험포)실물을 이용하여 총 3회 측정하였다. Fig. 4의 아래 부분에 표시한 3종류는 D kg.f 세탁과정, 세탁물 D kg.f, E kg.f 행금 및 탈수과정에 대한 실험결과의 예이다.

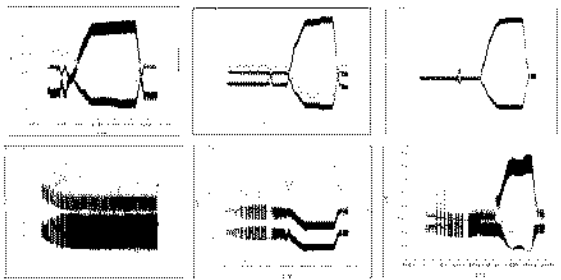


Fig. 4 Sample data

4. Spider의 피로수명 평가

4.1 피로수명 평가 방법 및 과정

피로수명 평가방법으로 여러 가지 방법이 있으나 세탁기는 고사이클 피로를 받는 회전하는 기계이므로 응력-수명(S-N) 방법을 통해 피로수명 평가한다. 응력-수명 평가법은 고사이클 피로, 10^3 사이클보다 많은 사이클에서 피로 파손되는 즉, 탄성 범위 내의 응력이 주기적으로 가해지는 경우에 사용 적합한 방법이다.

본 연구에서 평균응력과 응력진폭의 조합을 받고 있을 때의 파손판정에 일반적으로 사용되는 Goodman법을 이용하였다.

$$\frac{\sigma}{S_n} + \frac{\sigma_m}{S_m} = 1 : \text{Goodman}$$

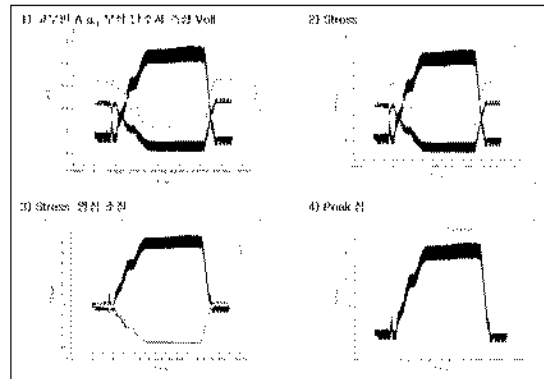


Fig. 5 Data treatment process

피로 사이클을 집계과정은 여러 가지 방법이 있지만, 그 중 가장 많이 사용되는 방법인 rainflow counting법³을 사용하였고, 총 손상수명(Life damage)은 Miner 법칙⁴을 이용하였으며 다음 식과 같다.

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i}$$

Fig. 5는 Fortran 프로그램을 이용한 데이터 처리 과정을 나타내었다.

4.2 Spider의 피로손상수명

고무판 A g.f, B g.f, C g.f 탈수과정1회에 대한 Spider의 ①, ③, ⑤ 축방향으로 측정한 결과로부터 피로손상수명을 구한 후에 통계프로그램인 Minitab을 이용하여 평균값에 대한 95% 신뢰구간을 구하였다. 같은 방법으로 세탁물 D kg.f, E kg.f, F kg.f 타월과 시험포의 행금과 탈수과정 1회에 대한 Spider의 피로손상수명의 데이터를 통계 처리하였다. Table 2는 그 결과를 보여준다.

스트레인 게이지에서 측정된 응력이 게이지를 부착한 위치보다 다른 곳에서 더 큰 응력이 발생할 수 있고, 결함이 있다면 응력집중이 발생할 수 있기 때문에 응력을 보정할 필요가 있다. 또한, 응력의 보정 요인으로는 반복 실험을 하면서 열응력이 발생할 수도 있다. 세탁물(타월+시험포)의 실험은 행금과 탈수과정만의 실험으로 세탁과정의 손상수명은 들어있지 않는 상태이다. 따라서 이러한 이유로 응력보정계수, 응력집중 보정계수, 온도 보정계수, 세탁과정 보정계수 등을 고려해야 한다. 전체 보정계수를 K=1.5로 가정하여 다음의 식에 의해 보정된 피로손상수명을 계산하면 Table 3 과 같다.

$$S = \frac{1}{K} 10^{2.501847} N^{-0.1334063}$$

Table 2 Fatigue life damage

	Life damage		Stress(MPa)	Life(cycle)
A g.f rubber	95% lower	1.96E-7	40.46	5,102,041
	95% upper	2.68E-7	42.18	3,731,343
B g.f rubber	95% lower	7.83E-6	66.17	127,714
	95% upper	1.10E-5	69.24	90,909
C g.f rubber	95% lower	1.37E-5	71.29	72,993
	95% upper	2.04E-5	75.18	49,020
D kg.f washable	95% lower	5.55E-9	25.15	180,180,180
	95% upper	3.36E-8	31.98	29,761,905
E kg.f washable	95% lower	5.20E-8	33.89	19,230,769
	95% upper	2.99E-7	42.80	3,344,482
F kg.f washable	95% lower	2.72E-7	42.26	3,676,471
	95% upper	3.47E-6	59.36	288,184

Table 3 Modified fatigue life damage

	Life damage		Stress(MPa)	Life(cycle)
A g.f rubber	95% lower	4.09E-6	60.69	244,220
	95% upper	5.60E-6	63.27	178,609
B g.f rubber	95% lower	1.64E-4	99.27	6,113
	95% upper	2.30E-4	103.86	4,352
C g.f rubber	95% lower	2.86E-4	106.94	3,494
	95% upper	4.26E-4	112.78	2,346
D kg.f washable	95% lower	1.16E-7	37.72	8,624,718
	95% upper	7.02E-7	47.96	1,424,619
E kg.f washable	95% lower	1.09E-6	50.84	920,523
	95% upper	6.25E-6	64.20	160,091
F kg.f washable	95% lower	5.68E-6	63.40	175,982
	95% upper	7.25E-5	89.04	13,795

5. 가속시험의 피로수명 등가횟수

세탁물(타월+시험포) 하중 D kg.f, E kg.f, F kg.f의 헹굼+탈수 과정을 3000회로 가정했을 때 가속시험인 고무판(A g.f, B g.f, C g.f)의 등가횟수는 다음과 같은 관계로 구할 수 있다.

$$D_e n_e = D_r n_r$$

여기서, D_e 는 가속시험(고무판 A g.f, B g.f, C g.f) 탈수 1회에 대한 피로손상수명이며, n_e 는 가속시험 등가실험 횟수 이다. D_r 은 세탁물(타월+시험포) 하중(D kg.f, E kg.f, F kg.f)에 대한 헹굼 및 탈수 1회에 대한 피로손상수명이며, n_r 은 실제세탁물에 대한 세탁횟수(3000회)이다.

세탁물(타월+시험포) 하중 D kg.f, E kg.f, F kg.f의 평균 손상수명의 upper 95%값과 고무판 (A g.f, B g.f, C g.f) 1회에 대한 평균 손상수명의 lower 95%값을 앞의 식에 대입하여 구한 가속시험(고무판)의 등가 시험 실험횟수는 Table 4와 같다.

Table 4 Equivalent fatigue life for accelerated test

Washing (Towel+test fabric) 3000(cycle)	Equivalent fatigue life for accelerated test(cycle)		
	A g.f	B g.f	C g.f
D kg.f	515	13	8
E kg.f	4,576	115	66
F kg.f	12,307	309	177

6. 결론

드럼 세탁기의 Spider에 대한 피로수명 신뢰성 평가에 관한 연구로서 다음과 같은 결론을 얻었다.

Spider에 사용되는 재료 Al₂O₃-2에 대한 정적 인장 시험 및 피로시험을 수행하여 통계 분석을 통하여 S-N선도를 얻었다. 피로수명 평가법을 제시하였고, 프로그래밍하여 Spider의 피로 손상수명을 계산하였다. 가속시험으로 고무판 A g.f, B g.f, C g.f - 탈수과정과 세탁물(타월+시험포) D kg.f, E kg.f, F kg.f - 헹굼+탈수과정에 대한 피로수명손상을 신뢰성 평가하였고, 수정 피로수명 계산법을 보였다. 세탁물(타월+시험포) D kg.f, E kg.f, F kg.f - 헹굼+탈수과정의 3000 회에 대한 고무판 A g.f B g.f, C g.f-탈수과정의 등가 시험횟수를 구하였다.

참고문헌

지면 관계상 생략