

CAE를 활용한 드럼세탁기 Spider의 피로수명 평가기법 개발에 관한 연구

김지설*(경남대 대학원), 광동현(경남대 대학원), 조상봉(경남대), 김영수, 정성해, 강동우,
정연수, 정보선(LG전자)

A Study on Development of Fatigue Life Estimation Method for the Spider of a Drum Washing Machine with CAE

Jiseol Kim, Sangbong Cho, Donghyun Kwak

ABSTRACT

Recently drum washing machines are required to improve not only functions, but also endurance security. The spider is one of the major parts in a drum washing machine as a power transmission device. It is needed estimating for fatigue life because it rotates at high velocity when the drum washing machine works.

In this study, we tried to estimate fatigue life of the Spider with CAE and verified the accuracy by comparing the CAE results with the experimental results. The estimation method of fatigue life for the spider with CAE will be applied to raise the efficiency of time and money in the design process of a new drum washing machine.

Key Words : Endurance (내구성), Power transmission device (동력전달장치), Fatigue life (피로수명)

1. 서론

Spider는 모터의 동력을 드럼으로 전달하는 드럼세탁기의 동력전달장치이다.

연구자 중의 일부가 이미 드럼 세탁기의 행궁과 탈수과정에 대한 가속피로 시험을 통하여 spider의 응력이력 측정과 피로수명의 평가에 관한 연구를 하였다.¹ 본 연구에서는 설계 단계에서 CAE를 활용한 드럼 세탁기의 피로수명 평가기법 개발을 하고자 한다. 즉, 피로 수명 평가에 유한요소해석 결과를 응용하여 설계단계에서 피로 수명 예측이 가능한 설계 개념을 제시하고자 한다.

2. 가속 피로시험

드럼 세탁기의 행궁과 탈수과정에 대한 spider의 편심에 의한 가속 피로시험을 하기 위하여 질량 A_g , B_g , C_g 인 고무판을 드럼 안쪽 전면부에 부착하였다.¹ 고무판과 스트레인 게이지의 부착 위치 관계는 Fig. 1과 같다. 이는 spider 팔에 응력이 가장 크게 발생하도록 하기 위한 조건이다. A_g 의 고무판이 부착된 경우에 가장 응력이 크게 측정된 spider 팔의 내

표적인 응력측정 결과에 대한 예가 Fig. 2와 같다.

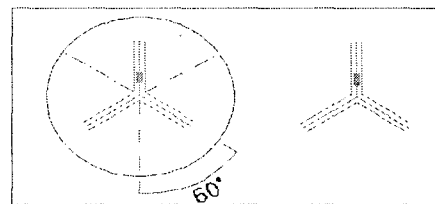


Fig. 1 Position of the strain gage and rubber plate.

Fig. 2에서 1구간이 행궁에 해당하며 2구간에서 탈수를 시작하여 본격적인 탈수는 3구간에서 이루어진다. 우선 Fig. 2에서 보면 공진 현상은 없는 것을 알 수 있고, 3구간의 응력이 크게 발생하는 것은 편심질량(고무판)에 의한 원심력으로 spider 팔의 굽힘 응력이 커지기 때문이다.

먼저 3구간에 대해 FFT(Fast Fourier Transform) 분석²을 하였다. 저 주파수 대역에서 고유 주파수 대역이 3개 정도로 나타나는데 대략 16Hz 정도의 주파수 대역은 드럼의 회전수를 나타내고 이보다 큰 2개

의 고주파 대역은 드럼 주변에 부착된 부품과 댄퍼 및 스프링 등에 의한 진동으로 발생하는 고유 진동수로 생각할 수 있다.

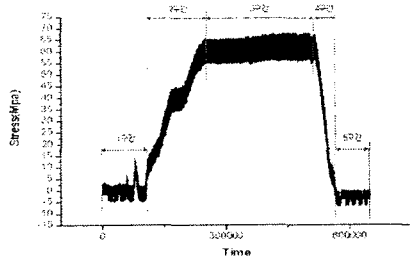


Fig. 2 An example of the stress results.

Fig. 3은 3구간의 탈수과정 일부를 확대하여 나타낸 것이고, 일정한 간격으로 주기가 반복되는 것을 확인할 수 있다. 이 주기는 FFT 분석결과에서 볼 수 있는 대략 1000 rpm(16 Hz) 근처의 주기이다. Fig. 3의 한 주기는 세탁기의 드럼이 한 바퀴 회전하는 것을 나타내는 것으로 상 정점의 응력과 하 정점의 응력은 원심력에 의해 발생하는 응력과 중력 및 모터의 가진력에 의한 동적응력의 합으로 생각되어진다. 즉, Fig. 2와 3에서 보는 바와 같이 응력진폭이 발생하는 원인은 중력 및 모터의 가진력에 의한 진동 영향이라 할 수 있다.

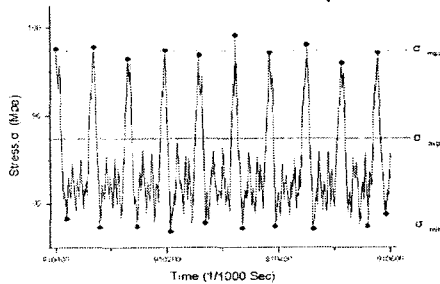


Fig. 3 A part of the stress period 3.

3. 유한요소 해석

3.1 유한요소 모델링

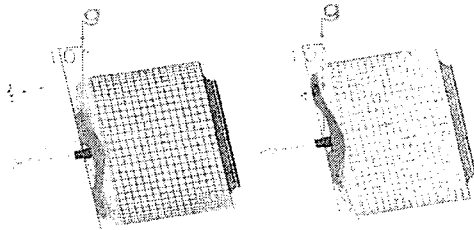
Fig. 2와 3의 응력진동이 발생하는 원인은 중력 및 모터의 가진력에 의한 동적 영향이지만, 원심력과 정적 중력에 의한 영향으로만 보아 유한요소해석을 하고자 한다.

3.2 해석 조건 및 결과

Fig. 3에서 보는 바와 같이 세탁기의 드럼이 한 바퀴 회전할 때의 응력진동에서 상 정점의 응력과 하 정점의 응력은 원심력에 의해 발생하는 응력과

정적 중력에 의한 응력의 합으로 생각하여 유한요소 해석하고자 한다. Fig. 4 (a)의 경우는 응력진동에서 상 정점의 응력으로, Fig. 4 (b)의 경우는 하 정점의 응력에 해당하는 것으로 보아 실험결과와 비교하고자 한다. 스트레인 게이지에서 측정된 응력과 유한요소 해석에서 얻은 응력의 성분이 일치하도록 국부 좌표계를 만들어 응력 성분을 분해하였다.

유한요소해석을 실험의 조건과 같이 하기 위해서 Table 1에서 보는 바와 같이 FFT 분석으로 구한 회전수(rpm)를 해석과정에 적용하였다. 정적 유한요소 해석으로 구한 최대, 최소응력은 일정하지만 Fig. 3에서 보는 바와 같이 실험 결과는 일정하지 않으므로 상 정점과 하 정점의 응력은 평균하여 Table 1에 표시하였다.



(a) 최대응력 발생 (b) 최소응력 발생
Fig. 4 Positions of Gravity

Table 1의 결과에서 보던 응력으로 최대 14% 정도의 편차율을 나타내고 있다. 편차율이 생기는 가장 큰 원인은 정적 유한요소해석에 의한 결과이기 때문으로 판단된다. 편차율에 영향을 미치는 다른 원인으로는 무선 응력측정 송수신 장치의 신호 잡음과 실제와 모델링 상의 중량 차이 및 경계조건의 차이로 판단된다. 정적 유한요소해석결과는 실험결과보다 과소평가되어지므로 피로수명 평가에서 이 점을 반드시 고려하도록 해야 할 것이다.

Table 1 Comparison of experimental and FEM

교무편 질량	No.	rpm	시험평균		유한요소해석		편차율(%)	
			최대 응력 (MPa)	최소 응력 (MPa)	최대 응력 (MPa)	최소 응력 (MPa)	최대 응력	최소 응력
A #	1	971.4	63.02	53.48	59.02	56.23	6.35	-5.15
	2	972.6	66.54	56.02	59.16	56.37	11.09	0.97
	3	966	66.07	56.61	58.38	55.59	11.64	2.15
B #	1	941.5	98.18	90.39	89.35	86.34	8.98	4.49
	2	942.6	94.91	86.69	89.56	86.51	5.63	0.17
	3	943.2	98.59	90.62	89.68	86.66	9.04	4.36
C #	1	891	100.25	93.21	92.34	89.23	7.89	4.27
	2	904.8	103.75	95.98	96.16	92.16	8.29	4.09
	3	927.6	110.44	100.80	99.03	96.82	9.52	3.95

$$\text{편차율} = \frac{(\text{시험평균 응력} - \text{유한요소해석 응력})}{\text{시험평균 응력}} \times 100$$

4. 한 점에 대한 피로수명 평가

4.1 측정된 응력이력에 대한 피로수명

드럼 세탁기의 spider에 부착한 스트레인 게이지로부터 측정된 응력이력과 상용 피로수명평가 프로그램인 MSC. Fatigue를 이용하여 S-N방법으로 피로수명 평가를 하고자 한다.³ 또한, 연구자의 일부에 의해 이전 연구에서 개발한 수명평가 프로그램¹으로 평가한 결과와도 비교 검토하고자 한다.

단축 스트레인 게이지로 측정된 응력은 단순인장 혹은 압축을 받는 한 점의 응력에 해당한다. MSC. Fatigue로 피로 수명평가를 하려면 유한요소 해석 결과가 필요하며 한 점의 응력상태를 표현하기 위해 단위 응력이 발생하도록 간단한 유한요소 해석을 하였다. 피로 해석을 위한 응력이력은 Fig. 2와 같은 가속 피로시험을 통해 얻은 응력 데이터를 사용한다. 피로수명평가 방법은 Goodman 법과 Gerber 법을 사용하기로 한다.⁴ 피로 사이클을 헤아리는 방법으로는 rainflow counting 법을 사용하고, 누적 수명손상은 Miner 법을 이용하여 계산한다.⁵

Table 2는 고무판의 질량에 따라 각 3번의 실험 응력이력에 대한 피로수명 평가를 실시한 결과이고 이전의 연구에서 개발한 프로그램으로 계산한 결과도 동시에 비교하였다. Table 2의 결과에서 알 수 있듯이 MSC. Fatigue와 자체 개발한 프로그램에 의한 수명평가 결과의 편차가 대체로 2% 이내로 잘 일치하고 있다. Table 2에서 1 repeat은 Fig. 2의 행균, 탈수의 한 과정이며 본 연구에서 피로수명 단위로 사용하기로 한다.

Table 2 Fatigue life

고무판 질량	Gerber			Goodman		
	Fortran (repeats)	MSC.Fatigue (repeats)	오차율 (%)	Fortran (repeats)	MSC.Fatigue (repeats)	편차율 (%)
A g	2.476E+06	2.484E+06	-0.34	1.206E+06	1.283E+06	0.83
	2.805E+06	2.824E+06	-0.67	1.477E+06	1.485E+06	-0.56
	2.738E+06	2.755E+06	-0.60	1.512E+06	1.519E+06	-0.46
B g	3.015E+05	3.029E+05	-0.47	1.223E+05	1.211E+05	0.94
	2.727E+05	2.755E+05	-1.01	1.169E+05	1.179E+05	-0.84
	2.962E+05	2.974E+05	-0.38	1.200E+05	1.185E+05	1.23
C g	2.698E+05	2.736E+05	-1.42	1.076E+05	1.094E+05	-1.69
	2.282E+05	2.312E+05	-1.31	8.843E+04	8.969E+04	-1.33
	1.611E+05	1.619E+05	0.49	5.870E+04	5.838E+04	0.55

$$\text{편차율}(\%) = \frac{\text{Fortran 결과} - \text{MSC.Fatigue 결과}}{\text{MSC.Fatigue 결과}} \times 100$$

4.2 응력이력의 단순화 및 피로수명

Fig. 2에서 보는 바와 같은 실험에 의해 측정된 응력이력은 설계단계에서 구할 수 없다. 진동해석을 하면 이론적으로 구할 수 있을 것으로 생각되지만 간단히 응력이력을 얻기는 힘들 것이다.

Fig. 3처럼 응력진동은 원심력과 중력가속도에 의해 발생하는 것으로 보아 응력이력을 간단히 만들 수 있다. Fig. 2와 같이 응력이력을 5구간으로 나누고 1, 3, 5구간에 대한 FFT 분석을 하여 회전수를 각각 구하였다. 2, 4 구간은 회전수가 변동하는 구간이기 때문에 1, 3 구간에 대한 평균 회전수를 2구간으로 3, 5구간에 대한 평균값을 5구간의 회전수로 하였다. 고무판 B_g가 적용된 모델에 Fig. 4 (a), (b)와 같이 중력만 고려한 응력해석과 FFT 분석에서 구한 회전수만을 고려한 응력해석을 각각 하였다. 중첩의 원리가 성립되므로 각 구간별 중력 및 회전에 대한 응력을 합성하여 응력이력을 만들 수 있다. Fig. 5는 고무판 질량 B_g의 조건에서 측정된 응력이력을 토대로 단순화된 응력이력의 몇 가지 모델을 만든 것이다.

모델 4는 응력진동이 없는 원심력만 작용하는 경우이며 최소응력과 최대응력은 모델 1, 2, 3과 같다. Table 3은 각 모델에 대한 피로수명을 결과를 나타낸 것이며, 모델 1~3의 피로수명은 거의 같고 모델 4의 경우와는 약 3% 정도의 차이가 있다. 즉, 응력진동에 의한 피로수명은 영향이 크지 않다는 것을 의미하고 있다. 따라서 최소응력과 최대응력만 같은 단순한 3각형 모델 즉, 원심력만 작용하는 모델을 이용하여 수명평가를 하는 것이 효과적일 수 있다.

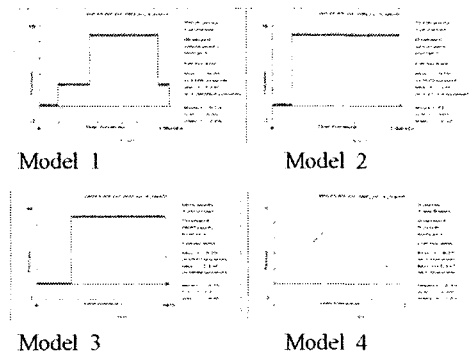


Table 3 Comparison of fatigue life for simplified models of stress history

	Model 1 (repeats)	Model 2 (repeats)	Model 3 (repeats)	Model 4 (repeats)
Goodman	2.775E+05	2.774E+05	2.775E+05	2.869E+05

앞에서 언급한 바와 같이 Table 2의 응력 편차율이 최대 14 %에 해당하는 값은 고무판의 질량에 관계없이 응력이력의 최대값에 16 Mpa 더하여 단순화된 응력이력을 만들기로 한다.

또한 드럼 세탁기를 설계할 때에 회전수에 대한 이력이 주어지면 피로수명 평가를 할 수 있어야 하므로 동일한 응력이력 효과가 되도록 설계 시에 초당 최고 회전수(rps)를 고려한 이력으로 이상화된 이력을 만들 수 있다. 최종적으로 이상화된 하중이력(회전수, rps) 모델은 Fig. 6과 같다.

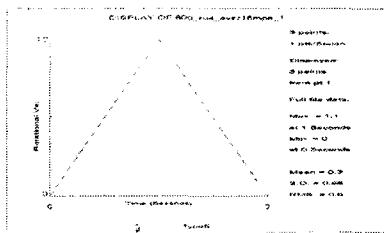


Fig. 6 Idealized model of load history

Table 4의 결과에서 보는 바와 같이 최대응력에 16 Mpa를 더하여 이상화된 응력이력으로 수명 평가한 결과가 실제로 실험에 의한 측정된 응력이력으로 수명 평가한 결과보다 다소 보수적인 평가(안전 설계)가 되고 있다. 이런 개념을 적용하면 설계단계 시 피로수명 예측이 가능할 것이다.

Table 4 Fatigue life

고무판 질량	No.	측정된 응력이력에 의한 피로수명 (repeats)	이상화된 응력이력에 의한 피로수명 (repeats)	편차율(%)
A g	1	1.285E+06	1.133E+06	-13.42
	2	1.4854E+06	1.297E+06	-14.49
	3	1.519E+06	1.200E+06	-26.55
B g	1	1.211E+05	1.141E+05	-6.13
	2	1.179E+05	1.141E+05	-3.33
	3	1.185E+05	1.141E+05	-3.86
C g	1	1.094E+05	9.342E+04	-17.11
	2	8.90E+04	8.644E+04	-3.66
	3	5.838E+04	5.888E+04	0.85

5. 전체 모델에 대한 피로수명 평가

드럼 세탁기의 드럼과 spider를 Fig. 5와 같이 모델링하여 원심력만 작용하는 경우에 대한 유한요소 해석을 수행하였고 해석결과를 MSC. Fatigue에 불러들여 이상화된 하중이력(회전수, rps)을 이용하여 spider 모델 전체에 대한 피로수명 평가를 할 수 있다. 모델 전체에 대한 피로수명 해석은 해석 시간이 많이 소요되므로 Fig. 7과 같이 위험부위가 포함된

일부 영역에 대한 피로수명 평가를 하도록 한다. Fig. 7은 고무판 A_g에 대한 수명 평가 예이다.

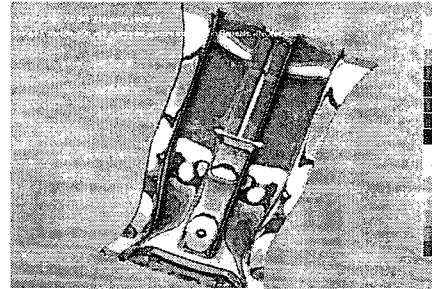


Fig. 7 Fatigue life of spider

Table 5는 질량 A_g, B_g, C_g의 고무판을 부착하여 가속 피로시험에서 실험된 최대 회전수를 고려한 이상화된 모델로 평가한 spider의 피로수명 평가결과이다. 고무판 A_g의 경우는 spider의 바깥쪽 부분에서 피로수명이 가장 짧았지만 고무판 B_g, C_g의 경우는 spider의 안쪽 스트레인 게이지가 부착된 주변에서 수명이 가장 짧게 나왔다. 그 이유는 spider의 유한요소 응력해석 결과에서 고무판의 질량과 회전수에 따라 다른 위치에서 압축응력이 인장응력에 비해 상당히 크게 발생하여 압축응력에 대한 수명이 더 짧아지기 때문이다.

Table 5 Fatigue life results on the most damaged node

고무판 질량	No.	최대위험 부위 Node	피로수명 (repeats)
A g	1	40532	5.72E+05
	2		6.26E+05
	3		6.13E+05
B g	1	10220	8.12E+04
	2		8.12E+04
	3		8.12E+04
C g	1	10220	6.35E+04
	2		5.45E+04
	3		4.30E+01

6. 결론

가속 피로시험 결과를 토대로 드럼 세탁기의 spider를 설계단계에서 피로수명 평가하고자 하였다. 설계단계에서 세탁, 행균, 발수 과정에 대한 하중이력(회전수 이력)이 정해지면 이상화된 하중이력과 원심력만 고려한 유한요소해석 결과로 spider 전체의 모델에 대한 피로수명 평가를 할 수 있게 하였다.

참고문헌

지면 관계상 생략