

▣ 응용논문

SHAFT 어셈블리 신뢰성 보증을 위한
가속시험의 설계

- Design of Accelerated Test
for Reliability Assurance of SHAFT Assembly -

김 준 홍*

Kim, Jun Hong

오 근 태*

Oh, Geun Tae

김 명 수*

Kim, Myung Soo

Abstract

This paper proposes a procedure for designing an accelerated test using SMAT(Stress, (failure) Mechanism and Test) model describing the relation among stress, failure mode/mechanism and test method. In SMAT model the stresses to be applied are derived from the environmental factor analysis, the relative importance of those stresses can be estimated using AHP(Alytic Hierarchy Process) and failure mode/mechanism and test method are derived from the fields failure information and FMEA(Failure Mode and Effect Analysis). By applying the procedure we can make a selection of major factors to cause the failure of assembly and design the accelerated test using DOE(Design of Experiments). The procedure is illustrated with an qualification test case study of washing machine shaft assembly in "A" electric appliance company.

1. 서론

품질의 중요한 요소 중 하나인 신뢰성은 시간이 오래 경과해야 확인되는 것이 특징이다. 신뢰성은 설계단계에서 결정되는 품질특성으로 신뢰성을 평가하고 확보하는데 많은 시간과 노력이 필요하다. 최근의 제품 개발기간이 단축됨에 따라 신뢰성을 평가를 위한 시간이 점점 줄어들어 따라 제한된 시간 내에 제품의 신뢰성에 관한 정보를 빨리 얻기 위한 가속시험에 대한 요구와 필요성이 더욱 증가하고 있다.

가속시험은 대상, 목적 및 방법에 따라 가속수명시험(ALT: Accelerated Life Test)과 가속 스트레스 시험(AST: Accelerated Stress Test)으로 구분할 수 있다. 가속수명시험은 주로 부품에 적용되며, 실제 사용 조건보다 높은 스트레스 수준에서 관측된 수명 데이터들을 수명분포(대수정규 분포, 와이블 분포 등)와 수명-스트레스 관계(아레니우스, 역거듭제곱, 아이링 등)를 이용하여 분석하고, 이로부터 사용조건에서의 수명을 추정한다. 가속 스트레스 시험은 어셈블리 수준의 제품에 적용되며, 사용조건보다 가혹한

* 수원대학교 산업공학과

수준의 스트레스를 인가하여 설계상의 결함을 확인하기 위하여 주로 사용된다. 최근 많은 관심을 끌고 있는 가속스트레스 시험인 HALT(Highly Accelerated Life Testing)에서는 온도와 진동 및 이들의 복합 스트레스를 계단형으로 적용하고 있다.[3]

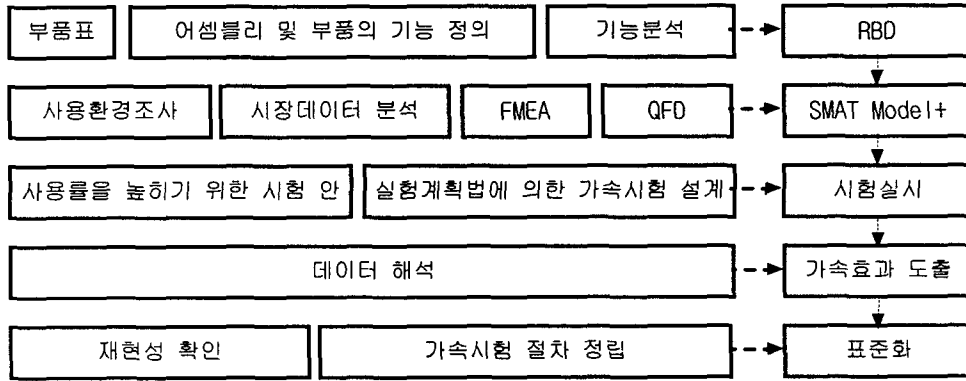
가속시험을 통하여 설계 및 양산검증을 위한 신뢰성 시험기간을 줄이면 제품을 빨리 출하할 수 있고, 시장선점 및 경쟁력을 확보하는 효과를 얻을 수 있다. 그러나, 설계 또는 제조상의 결함을 완벽하게 검증하지 못할 가능성도 함께 존재한다. 따라서 가속시험은 기존에 적용되고 있는 신뢰성 시험과 비교하여 적어도 동일한 판별력을 가지면서 시험기간을 단축할 수 있어야 하며, 이러한 가속시험을 개발할 수 있는 표준화된 절차 개발은 매우 필요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 사용/환경조건 조사와 FMEA(Failure Mode and Effect Analysis)를 통하여 스트레스, 고장 모드/메커니즘 및 시험방법의 관계를 나타낼 수 있는 분석용 모델을 포함하는 가속시험 설계 절차를 제안하여 좀 더 빠른 시간에 신뢰성 평가를 할 수 있는 가속시험법을 개발하고자 하며, 이를 가진 A사에서 생산하고 있는 세탁기의 SHAFT 어셈블리(Assembly)의 인정시험(Qualification Test)에 적용하였다.

2. 가속시험 설계 절차

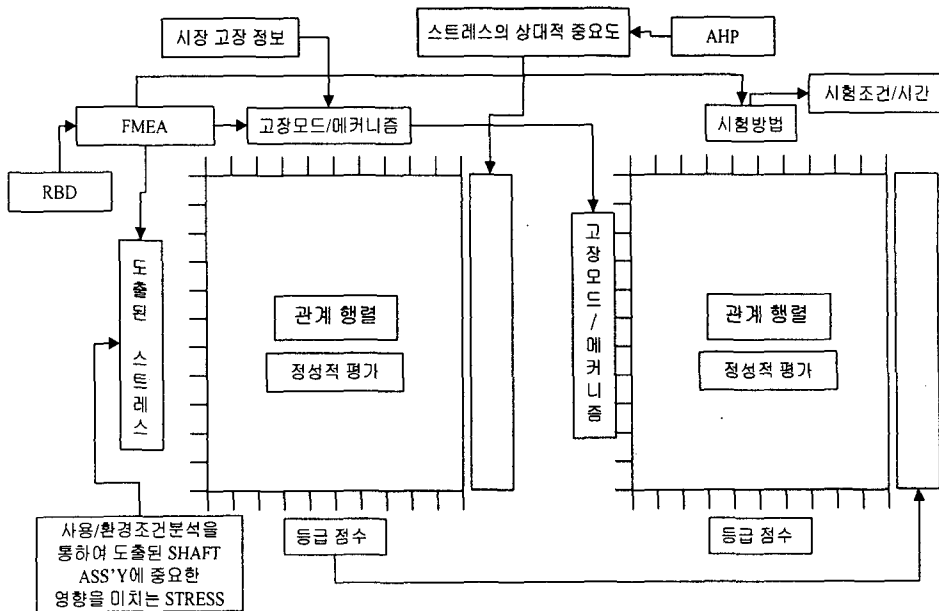
가속시험 설계를 위해서는 제품에서 발생할 수 있는 고장모드와 메커니즘을 추론하고 이를 가속시킬 수 있는 시험조건(스트레스와 수준)에서 시험한 결과를 분석하여 가속성을 평가하는 과정이 필요하다. 가속시험 설계를 위한 표준화된 방법론이 있는 것은 아니나 선진국의 경우에 나름대로 합리적인 방법을 개발하여 적용하고 있다. 일본 기업 마쯔시타에서는 신제품 개발과 시장고장 재현을 위한 가속시험 설계를 위한 절차를 표준화하여 적용하고 있으며, 미국 NASA에서는 시험방법 결정에 고장물리(physics of failure)와 QFD를 적용하고 있다. 그러나 이들을 현장에서 적용하는 데는 시험설계에 필요한 자료의 활용, 고장모드/메커니즘을 추론하는 과정, 시험조건을 합리적으로 정하는 방법 등 여러 가지 어려움이 있다. 본 연구에서는 가속시험을 체계적으로 설계할 수 있는 절차를 다음과 같이 제안하며, <그림 1>에 요약되어 있다.

- ① 어셈블리를 구성하고 있는 부품(parts)과 그들의 기능 정의 및 기능 흐름 분석을 통하여 신뢰성 블록 다이어그램(RBD, Reliability Block Diagram)을 작성한다. RBD는 어셈블리의 고장모드의 정의와 FMEA에서 각 부품의 고장모드와 원인 및 영향을 분석하기 위한 기초 자료로 활용된다.
- ② 사용/환경조건 조사와 FMEA 및 고장모드와 스트레스의 관계 분석을 통하여 스트레스, 고장모드/메커니즘 및 시험방법의 관계를 나타내는 SMAT 모델을 QFD를 2 단계로 적용하여 개발한다. 1 단계 QFD는 스트레스와 고장모드/메커니즘의 관계를 평가하여 중요한 고장모드/메커니즘을 평가하기 위한 것으로, 여기서 사용/환경조건 조사는 고장에 영향을 주는 스트레스, FMEA는 고장모드/메커니즘을 추정하기 위해 사용된다. 한편, 스트레스의 상대적 중요도는 AHP를 적용하여 평가할 수 있다. 2 단계 QFD는 고장모드/메커니즘과 관련이 있는 시험방법을 조사하기 위하여 사용된다. <그림 2>는 SMAT 모델의 논리적 구조를 나타낸 것이다.
- ③ 사용률을 높일 수 있는 시험 방법과 과부하에 의한 시험 방법을 조사한다. 이때, 과부하 시험은 SMAT 모델의 결과를 활용하여 어셈블리의 고장 또는 성능 열화를 촉진할 수 있는 인자들을 선정하고, 실험계획을 적용하여 여러 시험조건에서 시험을 실시한다.
- ④ 시험 데이터를 해석하여 적합한 가속시험 조건을 도출하고, 이를 기존의 시험 데이터와 비교/분석하여 시험의 가속성 성립 여부 및 가속 효과를 평가한다.
- ⑤ 재현실험을 통하여 가속시험의 적합성과 효과를 검증하고 이를 표준화한다



+ SMAT : Stress, (Failure) Mechanism, and Test

<그림 1> SHAFT 어셈블리 가속시험 설계를 위한 절차



<그림 2> RBD, 사용/환경조건 조사, FMEA 및 QFD를 이용한 SMAT 모델의 구조

3. 가속시험 설계 절차의 적용

3.1 A사의 현황 및 대상과제

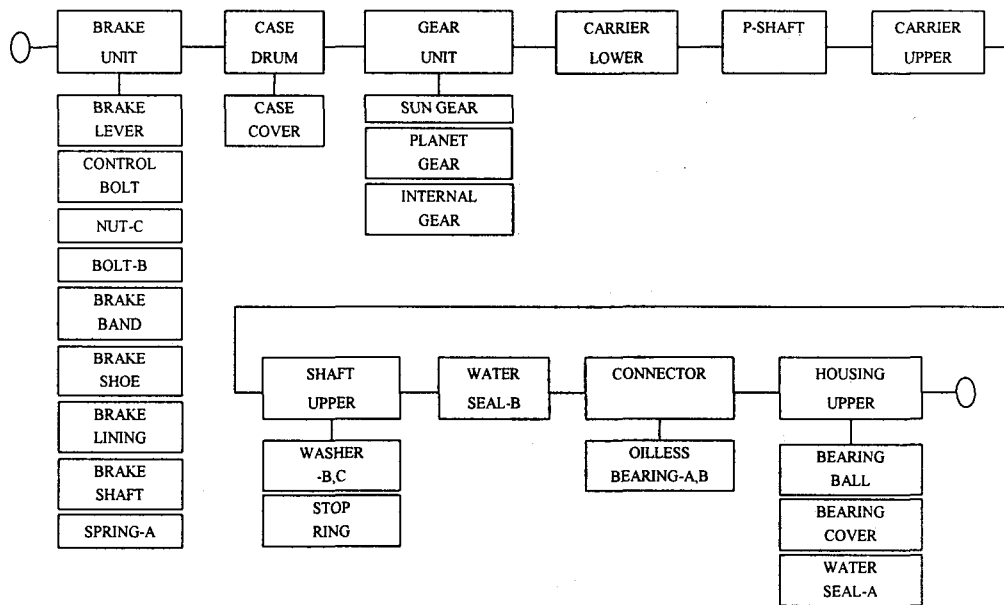
현재 A사의 세탁기 SHAFT 신뢰성 시험은 제품에 장착된 상태에서 표준 퍼지(Fuzzy) 모드로 연속적으로 가동시키는 방법으로 실시되는데 이 표준 퍼지 모드 과정 1 주기(Cycle)를 한번 완전히 수행하는데 약 80분이 소요된다. 10년 보증을 위해서는 연속적으로 150일, 2년 보증을 위해서는 60일의 시험기간이 소요되고 있어 전체 제품 개발 기간이 길어지고 출하가 지연되는 원인이 되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 SHAFT의 설계 완성도 및 양산 제품의 신뢰성을 빠른 시간 내에 평가하고 보증할 수 있는 새로운 가속시험 방법을 개발하는 것을 목표로 한다.

3.2 SMAT 모델의 적용

3.2.1 SHAFT 어셈블리의 RBD

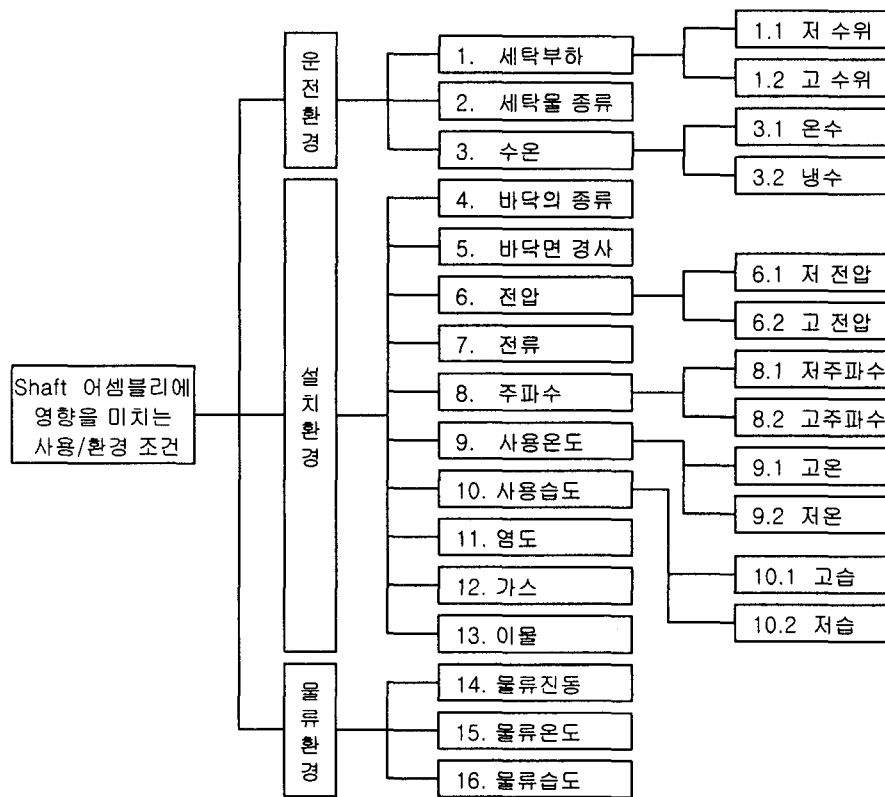
RBD는 신뢰성 설계 및 분석을 위한 가장 기본이 되는 모형으로 신뢰도 배분/예측, FMEA, FTA 등에 활용될 수 있다. SHAFT 어셈블리의 부품 표(Part List), 부품의 기능 정의 및 기능 분석을 통하여 <그림 3>과 같은 RBD를 작성하였다.



<그림 3> SHAFT 어셈블리의 RBD

3.2.2 사용/환경조건 조사

세탁기의 신뢰성에 영향을 미칠 수 있는 사용/환경조건을 운전, 설치 및 물류환경으로 구분하여 브레인 스토밍을 통하여 조사하였다. 운전환경에는 세탁부하, 세탁물 종류 및 수온이 포함될 수 있고, 설치환경에는 설치위치(바닥의 종류와 경사)와 전원(전압, 전류 등) 및 환경 요인(온도, 습도, 염도, 가스, 이물 등)들이 포함될 수 있다. 그리고 물류환경에는 이송시 발생할 수 있는 진동과 온도 및 습도가 있다. <그림 4>는 세탁기의 신뢰성에 영향을 미칠 수 있는 환경조건과 스트레스를 요약한 것이다.



<그림 4> SHAFT 어셈블리에 영향을 미치는 사용/환경조건

3.2.3 FMEA 실시 결과

<표 1>은 SHAFT 어셈블리에 대한 FMEA를 실시한 결과의 일부이다. 신뢰성 시험에 많은 시간이 필요하여 상세한 분석보다는 가속시험 설계에 필요한 주요 고장모드, 원인 및 영향에 초점을 맞추어 분석을 실시하였고, 중요도(RPN, Risk Priority Number) 평가와 대책은 생략하였다.

<표 1> SHAFT 어셈블리에 대한 FMEA

| 부품명 | 기능 | 고장모드 | 원인/메커니즘 | 영향 | RPN평가 | | | | 대책 | 시험방법 |
|--------------------------------|--|------------|--|--|-------|---|---|-----|----|------|
| | | | | | S | O | D | RPN | | |
| 드럼 어셈블리 (드럼 & 브레이크 밴드) | 드럼 외경면이 브레이크 밴드와 접촉, 밴드에 의해 동력전달 | 라이닝의 열화 | <ul style="list-style-type: none"> • 연속운전 • 온도, 습도 • 라이닝변경 • 온/오프 단속조건 | <ul style="list-style-type: none"> • 세탁 및 탈수시 브레이크 밴드 마찰소음 | | | | | | |
| | | 라이닝 불량 | <ul style="list-style-type: none"> • 외주입체 제조불량 | | | | | | | |
| | | 드럼 밴드의 편마모 | <ul style="list-style-type: none"> • 연속운전 • 진동 • 라이닝 재질변경 • 온/오프 단속조건 • 편접촉 • 드럼 표면의 오일 또는 그리스 | <ul style="list-style-type: none"> • 탈수 장치 시간 초과 • 반전각도 초과 | | | | | | |
| 기어 유니트 어셈블리 (기어 유니트 & Shaft B) | Shaft L과 결합, 세탁시 감속, Shaft U에 동력전달, 기어 케이스 위치 고정 | 캐리어 파손 | <ul style="list-style-type: none"> • 연속운전 • 진동 • 부하 • 온도 | <ul style="list-style-type: none"> • 세탁불량 | | | | | | |
| | | 캐리어 U 핀 파손 | <ul style="list-style-type: none"> • 연속운전 • 부하 상승 • 스트레스에 의하여 핀이 파손→기어 마모 또는 캐리어 파손 | | | | | | | |

3.2.4 고장모드들의 상대적 중요도 평가

사용/환경조건들의 중요도를 고려하여 고장모드의 상대적 중요도를 AHP(Analytic Hierarchy Process)를 이용하여 「① 사용/환경조건 간의 상대적 중요도 비교, ② 사용/환경조건 비교 데이터의 정규화(Normalization), ③ 사용/환경조건 간의 중요도 순위, ④ 사용/환경조건들을 고려한 고장모드들의 중요도, ⑤ 고장모드간의 중요도 순위」의 5단계 순서로 진행하였다.

<표 2>에 사용/환경조건들의 상대적 중요도 자료가 주어지고, 이 자료를 기반으로 AHP 기법을 이용하여 구한 사용/환경조건들의 상대적 중요도와 이를 고려한 고장모드의 중요도가 <표 3>에 주어지고 있다. 사용/환경조건들의 상대적 중요도는 오른쪽 끝 열에, 고장모드들의 중요도는 마지막 행에 도출되어 있다. 사용/환경조건들의 상대적 중요도는 “세탁부하 고”가 가장 영향이 크고, 다음으로 “수온 냉”, “사용온도 저”, . . . , “세탁부하 저”의 순으로 나타났으며, 고장모드들의 중요도는 “드럼 라이닝 열화”가 가장 높고, 다음에 “기어 캐리어 파손”, . . . , “커넥터 분해 불가”의 순서로 나타났음을 알 수 있다.

<표 2> 사용/환경조건들의 상대적 중요도 자료

| | | 세탁부하 | | 세탁물종류 | 수온 | | 바닥 | | 전압 | | 전류 | 주파수 | | 사용온도 | | 사용습도 | | 염도 | 가스 | 이물 | 물류 | | |
|------|----|------|-----|-------|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|---|------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | 고 | 저 | | 온 | 냉 | 종류 | 경사 | 고 | 저 | | 고 | 저 | 고 | 저 | 고 | 저 | | | | 진동 | 온도 | 습도 |
| 세탁부하 | 고 | 1 | 3 | 3 | 1 | 2 | 4 | 2 | 2 | 3 | 5 | 5 | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 | 5 | 5 | 2 | 2 | 2 |
| | 저 | 1/3 | 1 | 1 | 1/2 | 1 | 2 | 1/2 | 1/2 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1/4 | 1/2 | 1/4 | 1 | 3 | 3 | 3 | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| 세탁물 | 종류 | 1/3 | 1 | 1 | 1/2 | 1 | 2 | 1/2 | 1/2 | 1 | 3 | 1/2 | 1 | 1/3 | 1/2 | 1/3 | 1/2 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 |
| 수온 | 온 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1/2 | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 1 | 2 | 1 | 2 | 5 | 5 | 5 | 2 | 3 | 3 |
| | 냉 | 1/2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1/2 | 1/2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1/2 | 1 | 1/2 | 1 | 5 | 5 | 4 | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| 바닥 | 종류 | 1/4 | 1/2 | 1/2 | 1 | 1/2 | 1 | 1/3 | 1/2 | 1 | 1 | 1/2 | 1 | 1/3 | 1/2 | 1/3 | 1/2 | 1 | 1 | 1 | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| | 경사 | 1/2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1/2 | 1 | 1/2 | 1 | 5 | 5 | 3 | 2 | 2 | 2 |
| 전압 | 고 | 1/2 | 2 | 2 | 1/2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1/2 | 2 | 1 | 2 | 1/2 | 1 | 1/2 | 1 | 5 | 5 | 3 | 1 | 1 | 1 |
| | 저 | 1/3 | 1 | 1 | 1/3 | 1 | 1 | 1/2 | 2 | 1 | 1 | 1/2 | 1 | 1/3 | 1 | 1/3 | 1 | 4 | 4 | 3 | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| 전류 | | 1/5 | 1/3 | 1/3 | 1/4 | 1/2 | 1 | 1/2 | 1/2 | 1 | 1 | 1/2 | 1 | 1/3 | 1 | 1/3 | 1 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| 주파수 | 고 | 1/5 | 1 | 2 | 1/2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1/2 | 1 | 1/2 | 1 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 |
| | 저 | 1/5 | 1 | 1 | 1/3 | 1/2 | 1 | 1/2 | 1/2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1/3 | 1 | 1/3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| 사용온도 | 고 | 1 | 4 | 3 | 1 | 2 | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 2 | 3 | 1 | 1/2 | 1 | 1/2 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 |
| | 저 | 1 | 2 | 2 | 1/2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1/2 | 1 | 1/2 | 1/2 | 1/2 | 1 | 1 | 1 |
| 사용습도 | 고 | 1 | 4 | 3 | 1 | 2 | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 2 | 3 | 1 | 2 | 1 | 1/2 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 |
| | 저 | 1 | 1 | 2 | 1/2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| 염도 | | 1/5 | 1/3 | 1/3 | 1/5 | 1/5 | 1 | 1/5 | 1/5 | 1/4 | 2 | 1/3 | 1 | 1/3 | 2 | 1/3 | 1/2 | 1 | 1 | 1 | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| 가스 | | 1/5 | 1/3 | 1/3 | 1/5 | 1/5 | 1 | 1/5 | 1/5 | 1/4 | 2 | 1/3 | 1 | 1/3 | 2 | 1/3 | 1/2 | 1 | 1 | 1 | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| 이물 | | 1/5 | 1/3 | 1/3 | 1/5 | 1/4 | 1 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 2 | 1/3 | 1 | 1/3 | 2 | 1/3 | 1/2 | 1 | 1 | 1 | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| 물류 | 진동 | 1/2 | 2 | 1 | 1/2 | 2 | 2 | 1/2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| | 온도 | 1/2 | 2 | 1 | 1/3 | 2 | 2 | 1/2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| | 습도 | 1/2 | 2 | 1 | 1/3 | 2 | 2 | 1/2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 |

<표 3> 사용/환경조건들의 상대적 중요도와 이를 고려한 고장모드의 중요도

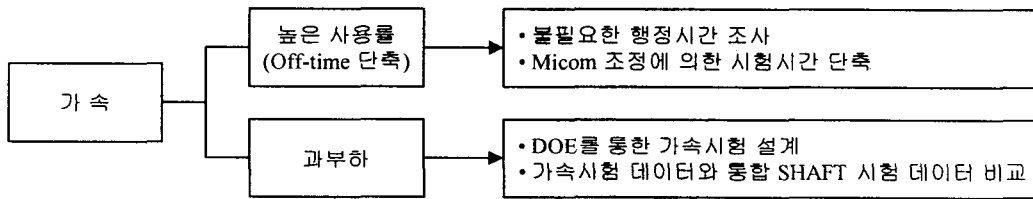
| ASSY | | DRUM | GEAR UNIT ASS'Y | | SLEEVE ASS'Y | | GEAR CASE | SHAFT PULLEY | CONNECTOR | | SHAFT A | CUP | 상대적 중요도 | |
|------------|--------|-----------|-----------------|-----------------|--------------|--------|------------|--------------|-----------|--------|---------|--------|---------|---------|
| 고장모드 | | LINING 열화 | CARRIER 파손 | CARRIER Upin 파손 | 소음 | 구속 | BEARING 고장 | 소음 | CRACK | 분해 불가 | 파손 | 파손 | | |
| 사용 / 환경 조건 | 운전 환경 | 1.1 세탁부하 | 5 | 5 | 5 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 0 | 3 | 3 | 0.0918 |
| | | 1.2 자수위 | 4 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0.0306 |
| | | 2 세탁물 종류 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0.0357 |
| | 3 수온 | 3.1 온수 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0.0427 |
| | | 3.2 냉수 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0.0725 |
| | 4 바닥 | 4.1 종류 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 4 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 0.0317 |
| | | 4.2 경사 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 4 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 0.0544 |
| | 5 전압 | 5.1 고전압 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 | 0.0524 |
| | | 5.2 저전압 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0407 |
| | 6 전류 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0343 |
| | 7 주파수 | 7.1 고주파수 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 2 | 0 | 2 | 1 | 0.0333 |
| | | 7.2 저주파수 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0342 |
| | 8 사용온도 | 8.1 고온 | 4 | 2 | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0 | 3 | 0.0527 |
| | | 8.2 저온 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0.0546 |
| | 9 사용습도 | 9.1 고습 | 4 | 2 | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0 | 3 | 0.0433 |
| 9.2 저습 | | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0.0534 | |
| 10 염도 | | 2 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 3 | 0.0306 | |
| 11 가스 | | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0.0306 | |
| 12 습도 | | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0.0316 | |
| 물류 | 13 진동 | | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0.0326 | |
| | 14 온도 | | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 2 | 0.0427 | |
| | 15 습도 | | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 2 | 0.0427 | |
| 고장모드의 가중치 | | | 2.6147 | 1.6305 | 1.6305 | 1.5164 | 1.4281 | 1.5332 | 1.3543 | 1.2820 | 0.6313 | 0.8784 | 1.5539 | 16.1183 |
| 고장모드의 중요도 | | | 0.1622 | 0.1012 | 0.1012 | 0.0941 | 0.0886 | 0.0964 | 0.0841 | 0.0795 | 0.0423 | 0.0545 | 0.0970 | 1.0000 |

3.3 가속시험의 설계

가속시험에서 시험시간을 단축할 수 있는 대표적인 방법으로 ① 사용률을 높여서 시험하는 것과 ② 사용조건보다 과부하를 가하여 고장 또는 특성 값의 열화를 촉진시키는 방법이 있다. 세탁기를 포함한 전자 제품과 기구부품의 신뢰성 시험은 사용조건과 유사한 시험조건에서 비가동 시간(Off-time)을 단축하여 연속시험을 실시하는 것이 일반적이다. 한편, 제품의 사용조건보다 가혹하게 스트레스를 가하여 고장 또는 특성 열화를 가속시킬 수도 있으며 주로 전자 부품의 경우 수명과 스트레스의 관계를 이용한 가속수명시험이 이에 해당한다.

본 연구에서는 두 가지 가속방법을 동시에 적용하여 SHAFT 신뢰성을 평가할 수 있는 시험방법을 설계하였다.

- ① 사용률을 높여 시험시간을 단축하기 위하여, SHAFT 기능 수행에 불필요한 행정시간을 조사하고 이들이 시험에 포함되지 않도록 Micom 시험 모드 변경 안을 제시함으로써 SHAFT 사용률을 높일 수 있도록 하였다.
- ② SHAFT의 고장모드에 영향을 미치는 사용/환경조건의 영향 평가와 고장모드와 가속시험 방법의 관계 분석을 통하여 가속시험에 영향을 주는 인자들을 도출하였다. 그리고, 이로부터 실험계획을 수립하여 유의한 인자와 수준을 추정하고, 가속시험 데이터와 기존 시험 데이터를 비교/분석하여 시험시간의 가속성을 평가하였다.



<그림 5> 두 가지 시험시간 가속방법

3.3.1 높은 사용률에 의한 가속시험 설계

현재 SHAFT 신뢰성 시험은 제품에 장착된 상태에서 표준 퍼지 모드로 실시되고 있다. 연속 주기 시험의 경우 80분이 소요되며, 이 중 SHAFT의 기능수행과 무관한 불필요한 시간이 포함되어 있다. 따라서 시험 모드의 주기 연속시간을 효율화할 수 있도록 표준 행정 중 SHAFT 신뢰성과 무관하다고 판단되는 다음과 같은 시간들을 줄임으로써 시험시간을 단축할 수 있었다.

- ① 시험 모드에서 포랑 감지를 없애고 고수위 판정 (약 20초 단축)
- ② 저 수위부터 시간 적용 세탁시간 절감 (약 6분 단축)
- ③ 간헐탈수 횟수 조정 (약 3분 단축)
- ④ 최종탈수 후 헹굼 시 1분 30초 비가동 시간 단축 (약 4분 30초 단축)
- ⑤ 급수밸브를 변경으로 급수시간 단축

따라서, <표 4>와 같이 기존 80분이 소요되던 연속 주기 시험 1 주기를 68분으로 줄임으로써 시험시간을 15% 절감할 수 있다.

<표 4> 표준행정시간과 단축행정시간

| | | | | | | | | | | |
|----|------|---------|-----|----|-------|----|-------|----|-------|----|
| 행정 | 포랑감지 | 급수(고수위) | 세탁 | 배수 | 간탈 | 정탈 | 정지 | 급수 | 헹굼1 | 배수 |
| 표준 | 20" | 5' | 18' | 5' | 1'30" | 6' | 1'30" | 5' | 2'30" | 5' |
| 단축 | 0 | 3' | 18' | 5' | 30" | 6' | 0 | 3' | 2'30" | 5' |

| | | | | | | | | | | |
|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|-----|
| 행정 | 간탈 | 정탈 | 정지 | 급수 | 헹굼2 | 배수 | 간탈 | 정탈 | 정지 | 총시간 |
| 표준 | 1'30" | 6' | 1'30" | 5' | 2'30" | 5' | 1'30" | 6' | 1'30" | 80' |
| 단축 | 30" | 6' | 0 | 3' | 2'30" | 5' | 30" | 6' | 1'30" | 68' |

3.3.2 과부하에 의한 가속 시험 설계

SMAT 모델로부터 SHAFT의 고장모드/메커니즘에 영향을 미치는 주요 인자들 중에서 시험 장비의 가용여부와 제어 가능성을 고려하여 부하, 온도, RPM을 인자로 선정하였다. 또한, 시험에 필요한 시료 확보와 Room Chamber의 가용 면적을 고려하여 각 인자의 수준은 2 수준으로 정하고, 엔지니어의 기술적 판단에 의하여 다음과 같이 수준의 값을 결정하였다.

- ① 인자 A(부하) ② 인자 B(온도) ③ 인자 C(RPM)
- A0: BALANCE - B0: 고온(40℃) - C0: 700
- A1: UNBALANCE - B1: 온도 주기 (-1→40℃) - C1: 850

이때, 기존의 기본 시험조건(고수위, 고부하, 상온/상습(20±2℃/RH50), 정격전압, 정격주파수, 바닥경사 1도(고정), 정상 RPM, 단속조건) 중에서 3개 인자를 제외한 나머지 조건들은 그대로 적용하기로 하였으며, 시험진행 시 검토 항목으로 브레이크 토크(Brake Torque), 정지시간, 반전각도, 오일리스(Oilless) 베어링 마모, 그리스 누유, 밴드소음, 이상소음 등을 선정하였다.

다음은 앞에서 결정된 3개의 인자들을 L₄(2³)형 직교배열표에 배치한 결과이다. 시료 20대를 각 시험조건에 5대씩 배분하고, 1,000 주기 동안 시험하였다. 그리고 각 시험조건에서 얻어진 시험 데이터를 분석하여 부하, 온도 및 RPM의 영향을 조사하기로 하였다.

<표 5> 실험배치표

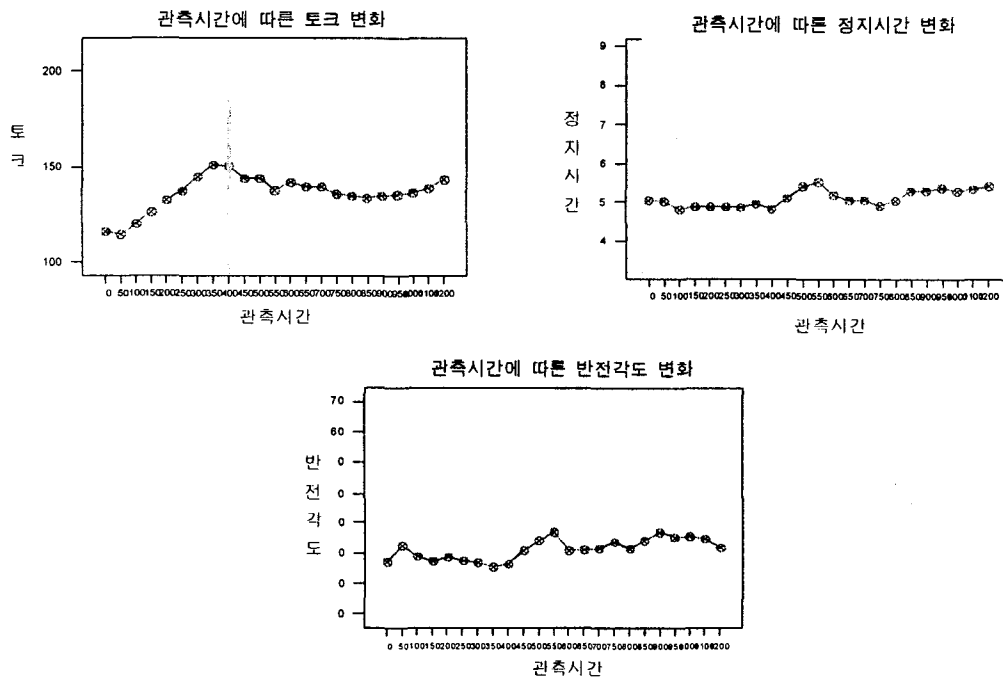
| 실험 | 열번호 | | | 실험조건 |
|----|-----|---|---|-----------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | |
| 1 | 0 | 0 | 0 | A0 B0 C0 : B + 고온 + 700 |
| 2 | 0 | 1 | 1 | A0 B1 C1 : B + 온도 주기 + 850 |
| 3 | 1 | 0 | 1 | A1 B0 C1 : UB + 고온 + 850 |
| 4 | 1 | 1 | 0 | A1 B1 C0 : UB + 온도 주기 + 700 |
| 배치 | A | B | C | |

4. 시험 데이터 분석

가속시험의 각 조건에서 1000 주기까지 고장이 발생하지 않았다. 일반적으로 고장 데이터가 없는 상황에서 가속성의 성립 여부, 가속계수 및 평균수명의 예측이 불가능하나 4가지 시험조건에서 측정된 토크, 정지시간 및 반전각도 데이터와 A사에서 실시한 기존 SHAFT 시험 데이터를 비교하여 가속 효과를 분석하였다.

4.1 기존 SHAFT 시험 데이터 분석

기존 SHAFT 시험 데이터의 시간에 따른 추이를 분석한 결과는 <그림 6>과 같다. 토크는 시험시간에 따라 350~400 주기까지 증가하다가 안정화되는 경향이 있으며, 정지시간 및 반전각도는 시간에 따른 추이가 보이지 않는다. 기존 SHAFT 시험 데이터(토크, 정지시간 및 반전각도)와 시험시간의 관계를 회귀분석을 이용하여 분석하였다. 먼저 토크는 시험시간 400 주기를 기준으로 하여 구간별로 회귀분석을 하여 ① 400 주기 이전: $\text{토크} = 112 + 0.103 \times (\text{관측시간})$ ② 400 주기 이후: $\text{토크} = 143 - (0.00571) \times (\text{관측시간})$, 정지시간은 $4.87 + 0.000423 \times (\text{관측시간})$, 그리고 반전각도는 $17.4 + 0.00716 \times (\text{관측시간})$ 의 회귀식을 구할 수 있었다. 결론적으로, 400 주기 이전에 토크만이 시간에 따른 관계가 존재함을 알 수 있고, 400 주기 이후의 토크와 정지시간 및 반전각도는 시험시간에 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. 그러나, 400 주기 이전 토크 값이 시간에 따라 선형관계가 잘 성립한다고 할 수는 없으며, 이는 R^2 의 값이 37.6%로 매우 낮은 것으로부터 알 수가 있다. 즉, 선형관계는 존재하지만 통제할 수 없는 오차의 영향이 매우 크게 작용하고 있으며 이는 세탁기의 특성상 불가피할 것으로 여겨진다. 한편, 여러 전자동 SHAFT 모델들의 시험 데이터와 경험에 따르면 토크가 증가하는 400 주기 이전에 SHAFT의 신뢰성 결함이 대부분 나타나며, 따라서 토크의 값이 증가하다가 안정화되는 변경 시점을 가속시킬 수 있는 시험법의 개발이 중요하다고 할 수 있다.



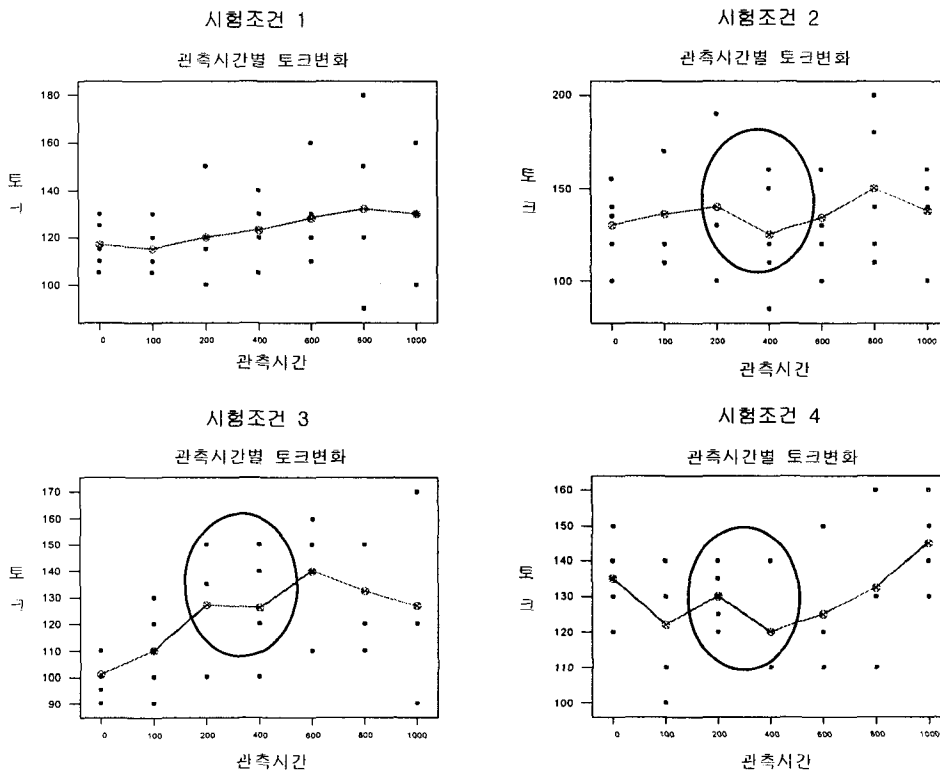
<그림 6> 기존 SHAFT 시험 데이터의 시간에 따른 추이 분석결과

4.2 가속시험 데이터의 조건별 분석

가속시험은 기존 SHAFT 연속 주기 시험과 동일한 고장모드/메커니즘을 갖으며, 가속시험 조건에서 측정된 토크, 정지시간 및 반전각도의 시간에 따른 형태가 기존 SHAFT 연속 주기 시험과 가능한 유사해야 한다고 가정하였다. 또한, 측정값의 변동이 잡음의 영향에 둔감하고 토크 값의 변경은 가속시험 조건에서 빨리 가속되도록 설계되어야 한다고 가정하였다.

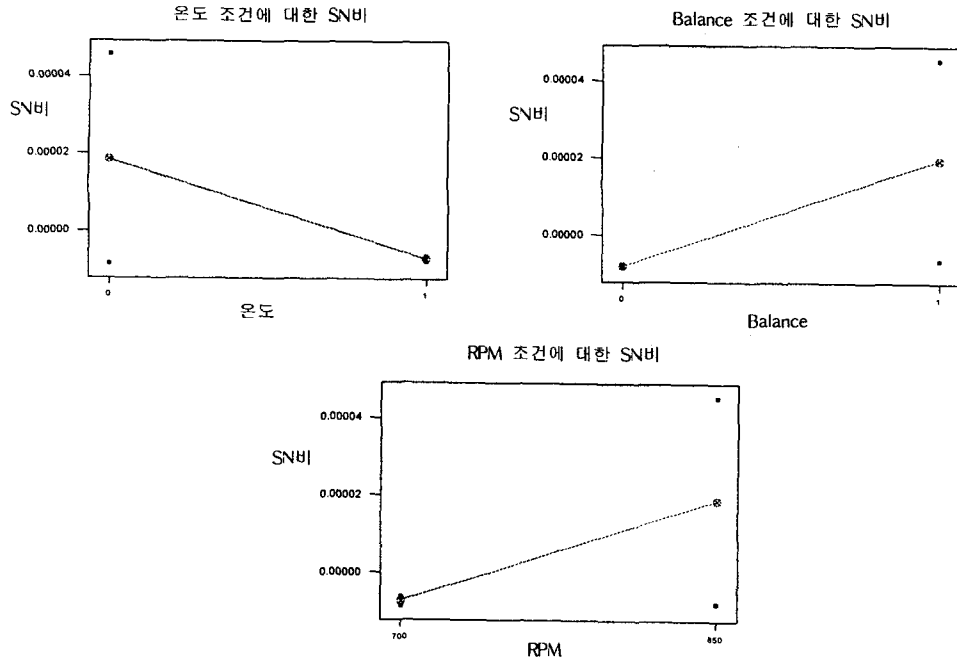
이러한 전제하에서 각 시험조건에서 측정된 토크, 정지시간 및 반전각도의 시간에 따른 추이를 분석하였고, 각 시험조건에서 SN 비(Signal to Noise Ratio) 분석을 통하여 토크, 정지시간 및 반전각도의 값들이 잡음에 둔감하도록 인자 수준을 선정하였다. 토크는 추이 분석에서 추정된 변경 시점을 기준으로 하여 두 구간으로 나누어 토크의 값이 증가하는 구간에서는 동 특성으로, 일정하게 유지되는 구간은 망목특성으로 구분하여 분석하였다. 또한, 정지시간 및 반전각도는 망목특성으로 가정하고 분석을 실시하였다. 여기에서는 <그림 7>에 토크에 대한 분석결과만을 제시한다.

시험조건 2, 3, 4에서 토크의 값이 200~400 주기 부근에서 증가하다 감소하는 변경점이 존재하는 것으로 예측된다. 그러나 4가지 시험조건의 데이터들이 기존 SHAFT 시험과 다른 형태를 보이며, 이는 시료의 크기(각 시험조건에 5개)가 작고, 시험조건을 가혹하게 설정한데서 기인하는 현상으로 생각된다. 일단, 토크 변경 시점을 200 주기로 추정하고, 추후 재현시험을 거쳐 이를 확인하기로 결정하였다.



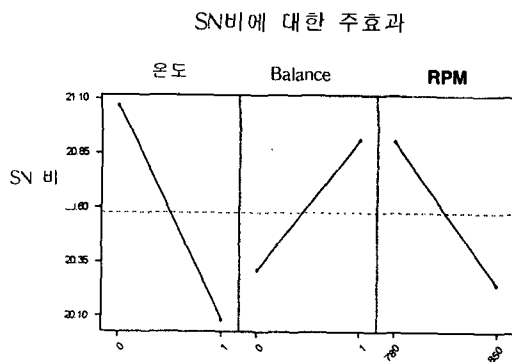
<그림 7> 각 시험조건에서의 토크 추이

다음으로 200 주기 이전의 토크 측정 데이터를 이용하여 각 시험조건의 SN 비를 계산하였으며, 토크 값이 잡음에 둔감한 인자들의 수준을 조사하였다. 200 주기 이전의 토크는 시간에 따라 선형관계가 존재하므로 동특성으로 가정하고 분석을 하였으며, 각 시험조건에서 SN 비를 계산하였다. 아래 <그림 8>은 온도, Balance, RPM에 따른 토크의 SN 비를 Plot한 것으로서 온도는 고온(40℃), Balance는 Unbalance로 하고, RPM은 850이 200 주기 이전의 토크에 가장 적합한 시험조건으로 여겨진다.

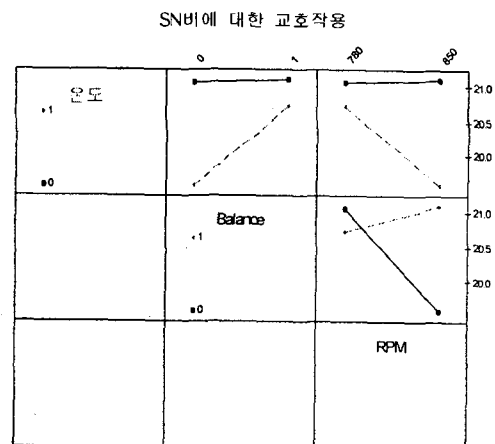


<그림 8> Log를 취하지 않은 온도, Balance, RPM의 SN 비

세 번째로 400 주기 이후의 토크 측정 데이터로부터 각 시험조건별 SN 비를 계산하여 잡음에 둔감한 인자수준을 조사하였다. 400 주기 이후의 토크는 망목특성으로 가정하였다. <그림 9>로부터 SN 비를 크게 하기 위한 수준은 온도는 고온(40℃), Balance는 Unbalance, RPM은 700이 됨을 알 수 있다. SN 비에 대한 인자들의 교호작용으로 Balance와 RPM의 영향이 가장 큰 것으로 나타났다 <그림 10>.



<그림 9> 400 주기 이후의 각 시험조건별 SN 비



<그림 10> 400 주기 이후의 SN 비에 대한 인자들의 교호작용 효과

4.3 가속시험 데이터의 조건별 분석 결과

가속시험 설계를 위한 시험결과를 요약하면 아래와 같다.

- ① 토크의 경우, 고온 40℃, Unbalance, RPM은 200 주기 이전에는 850, 200 주기 이후에는 RPM 700에서 시험하고,
- ② 정지시간과 반전각도는 온도 주기, Unbalance, 700 RPM이 적합한 것으로 나타났다.

분석 결과 토크와 정지시간 및 반전각도의 특성별로 가속시험 조건에 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 그러나, 토크가 정지시간과 반전각도보다 신뢰성 평가를 위하여 더 중요한 특성이 고, 특히 토크의 기울기 변경 시점을 전후하여 결함이 있는 제품을 찾을 수 있다는 엔지니어의 경험에 근거하여 “고온 40℃, Unbalance 조건으로 시험하되 200 주기까지는 850 RPM으로 시험하고, 200 주기 이후에 700 RPM으로 시험하는 방법”을 가속시험법으로 제안하였다.

<표 6> 특성치와 인자와의 관계(◎는 의미 있음을 표시)

| 특성치 | | 인자 | | Balance | | RPM | |
|------|-------------|---------|------|---------|-----------|-----|-----|
| | | 고온(40℃) | 온도주기 | Balance | Unbalance | 700 | 850 |
| 토크 | 200주기 이내 | ◎ | | | ◎ | | ◎ |
| | 200주기 이후 | ◎ | | | ◎ | ◎ | |
| 정지시간 | | | ◎ | | ◎ | ◎ | |
| 반전각도 | | | ◎ | | ◎ | ◎ | |

5. 결론 및 기대효과

본 연구에서는 제품의 고장모드/메커니즘, 스트레스 및 시험방법의 관계를 나타낼 수 있는 정성적 모델과 가속시험 설계 절차를 제안하였다. 그리고, 이를 가전 A사의 세탁기 SHAFT 어셈블리에 적용하여 표준 행정시간 단축 및 과부하 시험을 통하여 1,000 주기 시험 중 200 주기 이상 시험시간을 단축할 수 있었다. 본 연구의 결과는 유사 제품뿐만 아니라 SHAFT 어셈블리의 규격변경 시 변경 재료, 부품, 구조 등을 중심으로 고장 모드/메커니즘을 추론하고, 이를 관련 스트레스와의 관계 분석, 고장모드/메커니즘과 시험법을 연계하여 효과적인 시험조건을 설정하는데 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

- [1] 박성현, 품질공학, 민영사, 1993.
- [2] Elsayed, E. A., Reliability Engineering, Addison Wesley, 1996.
- [3] MIL-HDBK-338-B, Electronic Reliability Design Handbook, Department of Defence, 1998.
- [4] Nelson, W., Accelerated Testing - Statistical Models, Test Plans, and Data Analyses, Wiley, New York, 1990.
- [5] Peace, G. S., Taguchi Methods, Addison Wesley, 1995.