

## 공리적 설계를 이용한 드럼 세탁기의 진동 해석 모델링

김승한\*(포항공대), 최덕현(포항공대), 황운봉(포항공대),  
김영수(LG전자), 정보선(LG전자), 강동우(LG전자)

Modeling for vibration analysis of a drum washing machine using axiomatic design

S. H. Kim( Postech ), D.H. Choi( Postech ), W .B. Hwang (Postech),  
Y.S. Kim(LG electronics), B.S. Jung(LG electronics) and D.W. Kang(LG electronics)

### ABSTRACT

The quality of a rotating body such as a washing machine depends on the vibration characteristics. So, the researches to reduce the vibration of a washing machine are actively performing, but it is very difficult to conduct these experiments because there are many design parameters affecting the vibration behavior. Accordingly, in this study it was complete to build a modeling of a drum washing machine to analyze and predict vibration behaviors. The design parameters which affect the vibration were found, and the method for the systematic analysis of the design parameters was suggested using axiomatic design. In the previous study, the effect of the gasket has not considered on vibration behaviors, but in this study it was considered. The simulation results showed good agreements with the experimental results in the vibration displacement and the vibration tendency of a drum washing machine.

**Key Words** : Axiomatic Design (공리적 설계), Recurdyn (리커다인), Gasket (게스켓)

### 1. 서론

최근 경제 수준 및 생활 수준 향상으로 인해 소비자들은 보다 안락하고 조용한 가전 제품들을 요구하고 있다. 이러한 소비자들의 요구에 부응하기 위해선 가전 제품들 각각의 사용목적에 대한 설계뿐만 아니라 저소음 및 저 진동을 고려한 설계가 필요하게 되었고 이것은 곧 제품의 품질을 좌우하는 중요한 요소 중 하나가 되었다. 가전 제품 중에서도 과거 세탁실이라는 공간에서 오로지 세탁만을 목적으로 사용해왔던 세탁기가 최근 프론트 로딩 방식인 드럼 세탁기의 수요가 높아지면서 점차 주거 공간과 가까운 위치에 설치하게 됨에 따라 소음 및 진동 문제에 대한 소비자의 불편은 훨씬 증가하게 되었다.

세탁기와 같은 회전기기의 진동을 유발하는 가장 큰 원인은 불 균일 질량이며, 세탁기에서는 빨래를 하기 위한 세탁물들이 불 균일 질량으로 작용하게 된다. 드럼 세탁기는 탑 로딩 방식인 펄 세이터형 세탁기에 비해 구조적으로 진동이 심하게 발생

하기 때문에 불 균일 질량의 영향을 더 크게 받는다. 또한 최근 탈수능력을 높이기 위해 탈수 시 세탁기의 회전속도가 높아짐에 따라 드럼 세탁기의 진동문제는 더욱 심각하게 되었고 진동 저감 효과를 높이기 위한 설계에 대한 연구가 필요하게 되었다. 이러한 세탁기의 진동 거동을 테스트 하기 위해 실제 제품에 대한 실험과 함께 전산모사 모델을 이용하여 진동 거동을 해석할 수 있다. 실험을 통한 진동 거동 해석에 비해 전산 모사 모델을 이용하면 제품을 생산하기 전에 문제점을 파악할 수 있게 되므로 생산 비용을 낮출 수 있을 뿐 아니라 제품 개발에 필요한 시간도 절약할 수 있다. 하지만 지금까지의 드럼 세탁기 전산모사 모델에서는 모델링의 변수 입력 방법에 대한 이해도가 불확실하여 불 균일 질량에 따른 모델링의 진동 거동 예측이 부정확 하였고, 특히 탈수초기의 과도상태에 대한 진동거동이 일치하지 않았다.

따라서 본 연구에서는 드럼 세탁기의 진동 거동을 예측하고 분석하기 위한 전산 모사 모델을 구축하고자 한다. 이를 위해 공리적 설계 이론을 이용하

여 드럼 세탁기의 진동거동에 영향을 미치는 인자들을 찾아내고 그에 따른 설계 변수들의 물성 입력에 대한 체계적인 고찰 방안을 제시한다. 또한 드럼 세탁기에서 게스켓이 진동 거동에 미치는 영향에 대한 연구를 통하여 기존 전산 모사 모델에서는 고려하지 못했던 게스켓의 유, 무에 따른 드럼세탁기의 진동거동 해석을 위한 모델링을 완성하고자 한다.

## 2. 공리적 설계 이론

공리적 설계는 설계의 기본원리인 설계공리를 제시함으로써 설계분야에 대한 논리적인 기초를 확립하여 창의적이며, 체계적인 설계과정을 제시하는 이론이다. 여기서 말하는 설계공리는 일반적인 설계 특성을 정리하여 여러 가지 설계 조건에서 적용할 수 있는 설계의 근본이 되는 내용으로 ‘독립의 공리’와 ‘정보의 공리’ 두 가지로 말할 수 있다. 이 두 가지 설계공리를 이용하면 제품의 기본구상에서 제품설계의 완성 단계까지의 여러 복잡한 과정들을 단순화하여 설계의 성공확률을 높일 수 있다. 또한, 공리적 설계는 새로운 제품의 초기 설계단계부터 적용할 수 있을 뿐만 아니라 이미 설계된 기존의 제품들에 대한 분석을 통해 보다 나은 설계를 위한 고찰도 가능하다.

공리 1 은 설계자가 파악한 제품의 특성에 부합하는 특수한 요구 사항들의 집합인 기능적 요구 조건(functional requirements: FRs)와 그러한 요구조건들을 수행하기 위한 수치적, 물리적 요소의 집합인 설계 변수 (design parameters: DPs)사이의 관계를 설명한다. 이것은 설계 과정 중 기능적 영역에서 물리적 영역으로 대응하는 과정에서 특정 설계 변수의 변화는 독립적으로 관련된 하나의 기능적 요구사항에만 영향을 주도록 정의해야 한다는 것을 의미한다. 또한, 공리 2 는 독립공리를 만족하는 여러 가지 설계 중에서 정보량이 최소인 설계가 최상의 설계라는 것이다.

공리적 설계에서 제시되는 기능적 요구 조건과 설계 변수는 둘 사이의 사상(mapping process)을 통해 정의 할 수 있으며 이 관계는 다음 식과 같이 수학적으로 표현할 수 있다.

$$\{FRs\} = [A]\{DPs\} \quad (1)$$

식(1)에서  $[A]$  는 설계행렬(design matrix)로 행렬의 각 원소는 FRs 의 성분과 DPs 의 성분을 연결시키며 그 형태는 식(2)와 같다.

식(2)와 같은 형태의 설계행렬은 다시 3 가지 형태로 나눌 수 있다. 첫 번째는 대각행렬의 형태를 갖는 비연성(uncoupled)행렬로 각각의 설계변수가 변

화하여도 기능적 요구조건들의 독립성이 보장된다.

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{m1} & A_{m2} & \cdots & A_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

두 번째는 삼각행렬 또는 역 삼각행렬의 형태를 갖는 비연성화(decoupled)행렬로 독립공리를 완전히 만족하지는 못하지만 설계변수를 특정한 순서로 맞춰가면 기능적 요구조건들의 독립성을 보장할 수 있다. 마지막으로 모든 원소가 영이 아닌 행렬일 경우는 연성(coupled)행렬로 기능적 요구조건들은 독립성을 유지할 수 없다. 따라서 공리적 설계의 제 1 공리인 독립공리를 만족하기 위해서는 설계행렬을 비연성 및 비연성화 행렬로 만들어야 한다.

공리적 설계에서 정의하는 설계는 일반적으로 기능적 요구조건들과 설계변수의 성분의 수가 같다. 그러나, 여러 가지 설계과정에서 FRs 의 성분이 DPs 의 그것보다 많은 경우와 그와 반대인 경우가 발생할 수 있다. 이중 DPs 의 성분이 FRs 의 성분보다 더 많은 경우를 과도설계(redundant design)라 한다. 특정하위 시스템의 높은 신뢰도를 얻기 위해 과도설계가 필요한 특별한 경우도 있지만, 일반적으로 독립공리를 만족할 수 있도록 과도설계된 시스템을 비연성화 하는 방법을 찾아야 한다.

## 3. 공리적 설계를 이용한 드럼세탁기 모델링

### 3.1 모델링 요소

동역학 해석 프로그램인 펑션베이(FunctionBay)사의 리커다인(Recurdyn)을 이용하여 전산해석을 하기 위한 모델링을 Fig. 1 과 같이 구축하였다. 전산 모사 모델의 모델링 요소는 총 9 개였다.

### 3.2 게스켓 모델링

프론트 로딩 방식인 드럼 세탁기의 구조상 세탁시 사용되는 물이 밖으로 쏟아져 나오는 것을 방지하기 위해 게스켓이 필요하다. 게스켓은 고무로 만들어진 복잡한 형상으로 전산 해석을 위한 모델링 과정에서 게스켓 요소에 대한 물성치를 정의하기가 난해하다. 기존 드럼세탁기 전산 모사 모델에서는 이러한 어려움 때문에 게스켓이 없는 상태에서의 진동해석만을 수행하였다. 하지만, 전산 모사 모델을 통하여 실제 드럼 세탁기의 진동변위와 유사한 거동에 대한 결과를 얻기 위해선 게스켓이 추가되어야 한다. 이에 본 연구에서는 실험을 통해 게스켓이 있을 때, 세탁기의 진동변위가 없을 때 보다 더 크다는 사실을 확인하였고, 원인 규명을 위한

고찰을 통해 알게 된 게스켓이 질량체로 작용함과 동시에 고무로 만들어져 있으므로 강성(stiffness)이 존재하기 때문이라는 사실을 전산 모사 모델에 적용하여 Fig. 2 와 같은 게스켓 모델링을 수행하였다. 게스켓에 질량을 부여하기 위해 하나의 질량체를 모델링 한 후 강성 적용을 위해 4 개의 스프링을 질량체에 고정시켰다. 게스켓의 질량과 강성은 실험을 통하여 측정하였다.

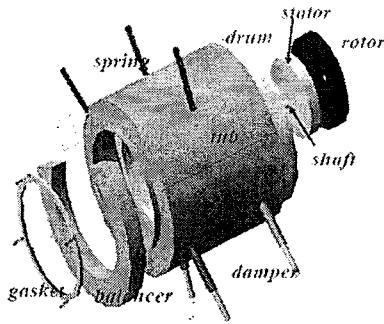


Fig. 1 Modeling parameters of drum washing machine

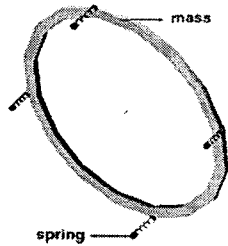


Fig. 2 Gasket Modeling

### 3.3 댐퍼 모델링

드럼 세탁기에 사용되는 댐퍼(damper)는 마찰 댐퍼로 일정한 힘 이상에서 움직이도록 만들어 졌다. 전산모사모델에서의 댐퍼 모델링을 위해서 모델링 시 필요한 설계 변수들을 찾아야 한다.

마찰 댐퍼 특성을 다르도록 하기 위하여 댐퍼의 운동에 따른 속도 변화에 의해 댐핑력이 제어될 수 있도록 댐퍼 사이의 속도를 설계변수로 두었다. 또한 댐퍼와 터브(tub)사이의 체결부위에 대한 고찰을 통하여 실제로는 핀조인트로 연결되어있지만 고무 패키징의 영향에 의해 볼 조인트의 자유도를 가지고 운동하는 것을 확인하였다. 이러한 거동을 따르는 모델링을 위하여 체결부위 고무패킹의 회전운동(rotational motion)에 대한 스프링상수 및 댐핑 상수를 설계변수로 두었다.

### 3.4 공리적 설계 이론에 따른 접근

Fig.1 에 나타나있는 9 개의 모델링 요소들 중 댐퍼를 제외한 나머지 요소들의 물성치는 실험과 이

론적인 계산을 통해 값을 정할 수 있다. 댐퍼 모델링을 위한 여러 설계변수들에 대한 값들은 이론적으로 정확히 계산하기 어려울 뿐만 아니라 실험을 통해 값을 찾아내기가 매우 어렵다. 그러므로, 댐퍼 모델링을 위한 설계변수의 값을 알아내기 위해 공리적 설계 이론에 따른 접근이 필요하다.

드럼 세탁기 전산모사모델의 진동 변위가 실험을 통한 결과와 유사해야 하므로 댐퍼 모델링을 위한 기능적 요구조건은 터브의 앞뒤, 상하, 좌우 진동변위가 되겠다. 또한 앞에서도 말했듯이 기능적 요구조건을 만족하기 위한 설계(해석)변수는 고무패킹의 3축방향의 회전애 대한 스프링상수와 댐핑상수( $k_x, k_y, k_z, c_x, c_y, c_z$ ) 및 댐퍼사이의 상대속도( $V$ )가 되겠다. 이러한 조건을 그대로 설계행렬에 적용하게 되면 과도설계가 된다. 공리적 설계 이론에 의해 독립공리를 만족시키기 위해서는 설계변수를 줄여서 비연성화 행렬로 만들어야 한다.본 연구에서는 실험을 통한 대부분의 진동변위가 1 cm 이상의 크기를 보이므로 각 변수의 변화에 따른 변위의 변화량이 1 mm 이하일 경우 영향이 없는 것으로 간주하였다. 이러한 과정을 통해 얻어낸 설계행렬은 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \text{상하} \\ \text{좌우} \\ \text{앞뒤} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a & a \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V \\ c_x \\ k_z \\ c_z \end{Bmatrix} \quad (3)$$

(3)식 역시 과도설계 상태 이지만, 설계 변수 중  $k_z$  는 고무의 병진운동(translational motion)에 대한 스프링상수를 실험으로 얻어낸 값과 다음과 같은 모멘트 밸런스(moment balance) 식을 통해 계산이 가능하므로 고정시킬 수 있다.

$$\sum M = R \times F = k \times \theta \quad (4)$$

비연성화를 위한 과정을 통해 얻어낸 최종 설계행렬은 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \text{상하} \\ \text{좌우} \\ \text{앞뒤} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & a & 0 \\ 0 & 0 & a \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V \\ c_x \\ c_z \end{Bmatrix} \quad (5)$$

(5)식은 공리적 설계 이론과 부합하는 결과로 본 연구에서는 각 변위를  $V, c_x, c_z$  로 제어한다.

## 4. 실험 및 해석 결과

실험을 위한 변위 측정 장비로 Polytec사의 Fiber

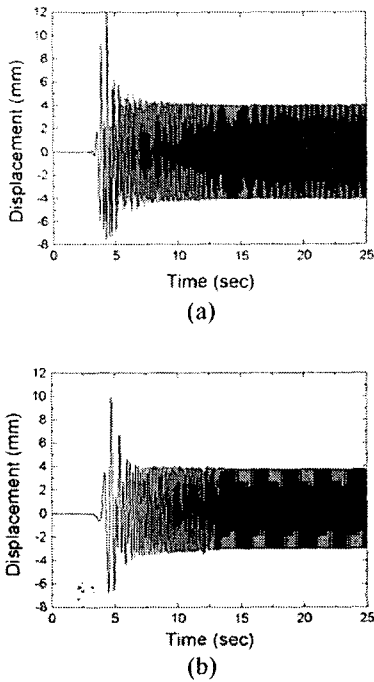


Fig. 3 The vibration displacement graph (a) Experimental result without gasket (b) Recurdyn simulation result without gasket

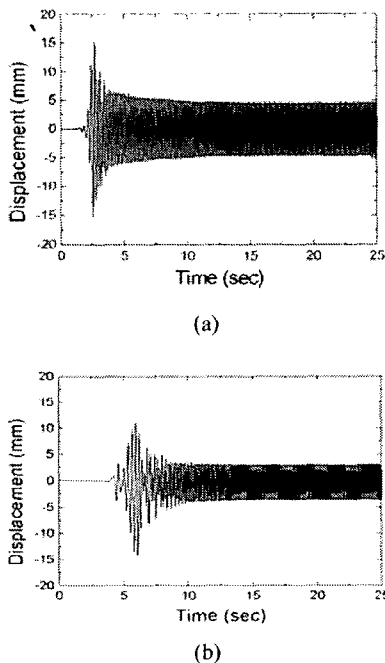


Fig. 4 The vibration displacement graph (a) Experimental result with gasket (b) Recurdyn simulation result with gasket

interferometer OFV511 와 Vibrometer conditioner OFV 3001 을 사용하였다. 구성된 실험장치로부터 앞뒤, 상하, 좌우진동변위를 측정하여 그 결과와 진산 모사 모델을 통하여 얻은 해석결과를 비교하였다.

실험 및 해석은 불균일질량의 위치, 진동변위측정 위치, 회전속도, 게스켓의 유무, 불균일질량의 무게를 조건으로 두고 수행하였다.

Fig. 3(a)와 (b)는 게스켓 없이 세탁물을 넣는 드럼 (drum)의 전면에 불균일 질량 600g 을 고정시킨 후 600rpm 의 속도로 회전 시 세탁물 투입구 기준 터브의 앞쪽에 대한 앞뒤진동변위를 측정된 것이다.

또한, Fig. 4(a)와 (b)는 게스켓이 있는 상태에서 위와 동일한 조건으로 실험 및 해석한 결과이다.

## 5. 결론

드럼 세탁기의 진동 인자 분석 및 특성을 이해하고 게스켓 유, 무에 따른 드럼 세탁기의 과도 상태 및 정상 상태 진동 특성 해석을 위한 모델링을 완성하였다. 드럼 세탁기의 모델링 시 체결 요소에 대한 물성 입력 방안의 체계적인 방법에 대한 고찰을 통하여 드럼 세탁기 내부 진동 모델링을 위한 요소 선정 및 위치 관계를 규명하였다.

또한, 공리적 설계 이론을 바탕으로 진동 변위에 영향을 주는 변수 분석 및 선정하여 모델링을 수행하였으며 진동변위에 대한 해석결과와 실험결과는 대체로 일치하였다.

## 후 기

본 연구는 LG 전자에서 지원하는 과제로 수행하였으며 이에 감사 드립니다.

## 참고문헌

1. Evangelos Papadopoulos, Iakovos Papadimitriou, Modeling, Design and Control of a Portable Washing Machine during the Spinning Cycle, IEEE/ASME International Conference, July, pp.899-904, 2001.
2. O.S.Türkay, I.T. Sümer, A.K. Tuğcu, B.Kiray, Modeling and Experimental Assessment of Suspension Dynamics of a Horizontal-Axis Washing Machine, Journal of Vibration and Acoustics, Vol.120, pp. 534-543, 1998.
3. N.P.Suh, "Axiomatic Design; Advances and Applications, Oxford, 2001
4. Kirk T. McDonald, Physics in the Laundromat, Am. J. Phys., Vol.66, No.3, pp.209-211, 1998.