

다점 가속도 계측을 이용한 드럼 세탁기 터브의 거동 예측

Estimation of the Dynamic Behavior of a Drum Washing Machine Tub using Multipoint Acceleration Measurements

박 준 민* · 안 세 진† · 백 승 훈††
 Jun-Min Park*, Se-Jin Ahn† and Seunghun Baek††

(Received March 10, 2026 ; Revised April 11, 2026 ; Accepted April 15, 2026)

Key Words : Drum Washing Machine(드럼 세탁기), Unbalanced Mass(불평형 질량), 6-DoF Behavior(6자유도 거동), Conical Motion(원추형 운동)

ABSTRACT

This study was aimed at predicting the three-dimensional dynamic behavior of the tub in a front-loading (FL) washing machine during the spin-drying process under various unbalanced mass conditions. In FL washing machines, unbalanced mass can induce severe vibration and complex spatial motion. Conventional displacement-based measurement methods suffer from spatial constraints that limit their ability to capture the full tub motion. An experimental approach based on multiple accelerometers mounted on the tub was employed to estimate its rigid-body motion. The estimated displacements were validated against direct measurements obtained from a wire displacement sensor installed on a commercial 25-kg FL washing machine at three unbalanced mass positions (front, center, and rear). The comparison showed that the relative error between the estimated and measured displacements ranged from 3.1 % to 9.3 %, demonstrating high prediction accuracy. Furthermore, the analysis of acceleration signals revealed that as the unbalanced mass becomes more biased toward one side, the spatial motion of the tub exhibits pronounced conical motion characteristics. These results confirmed that the proposed acceleration-based method can reliably estimate the tub's dynamic behavior while overcoming the spatial limitations of conventional displacement sensor-based techniques to improve both experimental convenience and accuracy.

1. 서 론

1.1 연구 배경

현대 사회에서 전면도어형(front-loading, FL) 드럼

세탁기는 에너지 효율성과 세척 성능 측면에서 우수한 평가를 받으며 필수 가전으로 자리 잡았다. FL 세탁기는 드럼이 수평축으로 회전하는 구조를 가지며, 중력과 원심력을 활용하여 옷감을 효과적으로 세척하고 탈수한다. 그러나 이러한 구조적 특성으로 인해

† Corresponding Author ; Member, Division of Energy & Electrical Engineering, Uiduk University, Professor
 E-mail : sjahn@uu.ac.kr

†† Corresponding Author ; Member, Pusan National University School of Mechanical Engineering, Professor
 E-mail : baeksh@pusan.ac.kr

* Eco Energy Research Institute, Researcher & School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Student

‡ Recommended by Editor Seon Jun Jang
 © The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

고속 탈수 과정에서 발생하는 진동과 소음은 제품의 완성도를 결정짓는 핵심 지표가 되고 있다. 특히 탈수 사이클 중 드럼 내부 세탁물의 불균형 분포로 발생하는 불평형 하중(unbalanced mass, UB)은 터브(tub)의 과도한 운동을 유발하는 주원인이다. 이는 기계적 소음과 구조적 피로를 유발할 뿐만 아니라, 심한 경우 세탁기가 위치를 이탈하는 ‘워킹(walking)’ 현상을 초래하여 제품의 신뢰성을 저하시킨다. 최근 소비자들의 정숙성에 대한 요구가 높아짐에 따라, 진동 저감을 위한 설계 최적화와 정확한 거동 예측의 중요성이 대두되고 있다.

1.2 연구 동향 및 연구 목적

세탁기의 대용량화와 고속화에 따라 소음 및 진동 저감 문제가 주요한 연구 과제가 되고 있다. 특히 FL 세탁기는 구조적 특성상 고속 탈수 과정에서 불평형 하중이 발생하여 터브 및 드럼의 진동, 그리고 이에 따른 방사소음이 크게 증가한다.

첫째, 소음 분야에서는 세탁기에서 발생하는 소음원을 규명하기 위한 연구가 활발히 이루어졌다. Kim et al.은 구조기인 소음과 유체기인 소음을 분리하여 주요 원인을 분석하였으며, 특히 탈수 행정 중 드럼과 터브의 거동에 의해 발생하는 구조기인 소음이 지배적임이 보고되었다⁽¹⁾. 또한, Kim et al.은 위상 기준 스펙트럼을 활용한 가진력 규명 기법이 제안되어 방사소음을 정밀하게 예측하는 기법을 제안하였다⁽²⁾.

둘째, 동역학 및 MBD 해석 분야에서는 Lim et al.이 드럼세탁기의 6자유도 동적 모델을 제안하고, 수학적 모델과 실험을 통해 그 타당성을 입증하였다⁽³⁾. 이러한 모델링은 드럼과 터브의 연성 거동을 해석할 수 있으며, 설계 변수 변화에 따른 동특성 분석에도 유용하다. Lim et al.은 구성 요소 실험과 수학 모델을 통합하여 평균 오차 20 % 내외의 진동 예측 정확도를 달성한 MBD 프레임워크를 발표하였다⁽³⁾. Hashemian은 9개 설계변수를 포함한 동적 모델과 베이지안 최적화를 통해 최대 터브 변위를 최소화하는 설계 조건을 도출하였다⁽⁴⁾.

셋째, 댐핑 및 제어 분야에서는 top-loading 세탁기에서의 과도진동 억제제를 위해 quad horizontal damper 시스템이 제안되었으며⁽⁵⁾, 실험을 통해 기존 방식 대비 약 35 % ~ 45 %의 진동 저감 효과가 확인되었다. 이외에도 새로운 댐퍼 기술(비뉴턴 유체, 자기 가변

댐퍼 등) 방면에서 다양한 혁신적 접근이 제안되고 있다. Song et al.은 고주파 진동 억제를 위해 비뉴턴 유체 댐퍼를 제안하여 가속도와 소음을 크게 저감하였다⁽⁶⁾. Li et al.은 MR 기반 가변 강성 댐핑 베이스를 통해 저주파 공진 문제를 능동적으로 제어할 수 있음을 입증하였다⁽⁷⁾.

하지만 이러한 기존 MBD 기반 연구들은 서스펜션의 마찰 댐퍼나 가스켓이 갖는 복잡한 비선형 히스테리시스 특성 및 경계 조건의 불확실성으로 인해 실제 거동과 시뮬레이션 결과 간에 오차가 발생하며, 특히 과도 응답 구간이나 공진 대역에서의 예측 정밀도가 저하되는 문제가 있다. 또한, 와이어 센서를 이용한 기존의 직접 계측 방식은 특정 지점의 1차원적 변위 정보만을 제공하므로, 터브의 피칭(pitching) 및 요잉(yawing)이 결합된 복합적인 3차원 운동을 전방위적으로 파악하기 어렵다.

따라서 이 연구에서는 실험을 통해 얻어진 다점 가속도 데이터 기반의 터브 변위 예측 기법을 제안하고, 와이어 변위 센서를 통하여 실험적으로 검증한다. 최종적으로는 UB 위치에 따른 3차원 복합 운동 특성을 분석함으로써 세탁기 저진동 설계 지표를 제시하고자 한다.

1.3 연구 범위 및 연구 방법

이 연구의 범위는 상용 FL 세탁기(드럼 직경 580 mm) 터브의 동역학적 거동 분석이다. 분석 대상은 탈수 최고 속도(750 r/min)의 정상 상태 구간으로 한정하며, 과도 응답 구간은 분석 범위에서 제외한다. 분석 조건은 UB 질량을 250 g으로 고정하고, 부착 위치(전방, 중앙, 후방)에 따라 세 가지 조건을 비교 분석한다.

이 연구에서는 4개의 계측 지점에서 취득한 3축 가속도 데이터를 신호 처리하여 터브 위 임의의 지점의 변위 운동을 예측한다. 특히, 제안하는 변위 예측 기법의 타당성을 확보하기 위해 임의의 지점에 설치된 와이어 변위 센서의 실측 데이터와의 상대 오차를 비교한다.

2. 이론적 배경

2.1 세탁기 드럼의 진동 발생

가정용 드럼 세탁기의 진동 거동은 크게 세 가지 물리적 요인의 결합으로 발생한다. 첫째는 드럼 내부

세탁물의 UB로 인해 발생하는 원심력이며, 둘째는 터브와 캐비닛을 연결하는 서스펜션 시스템의 비선형 동특성이다. 그리고 마지막으로 회전체 구조물의 고유진동수와 회전 주파수의 상호작용으로 나타나는 공진 및 궤도 운동(orbital motion)이다. 이러한 요인들은 개별적 또는 복합적으로 작용하여, 세탁기의 전 구동 구간에서 다양한 형태의 진동 및 소음을 유발한다.

가장 지배적인 진동 원인인 원심력 F_c 는 드럼의 회전 각속도 ω 에 대해 식 (1)과 같이 정의된다⁽⁸⁾.

$$F_c = m_{UB}e\omega^2 \quad (1)$$

여기서, m_{UB} 는 UB의 질량, e 는 회전 중심으로부터의 편심 거리를 의미한다. 원심력은 회전 속도의 제곱에 비례하여 증가하므로, 고속 탈수 구간에서 터브의 변위를 급격히 증가시킨다. 이러한 터브의 운동은 서스펜션 시스템을 통해 캐비닛으로 전달되며, 특히 마찰 댐퍼의 비선형 감쇠 특성에 의해 고차 조화 성분을 유발할 수 있다. 또한, UB와 시스템의 비대칭성이 결합될 경우 질량 중심이 타원형 궤적을 그리며 이동하는 궤도 운동이 발생하며, 이는 단순한 병진 운동으로 기술하기 힘든 복합 거동을 야기한다.

2.2 다점 가속도 신호 전처리 알고리즘

터브 표면의 4개 지점에서 측정한 3축 가속도 신호 ($a_{i,x}$, $a_{i,y}$, $a_{i,z}$)는 6자유도 변위 도출을 위한 데이터로 사용된다. 이 연구에서는 시간 영역 적분 시 발생하는 저주파 누적 드리프트(drift) 제거를 위해 주파수 영역 적분법을 적용하여 가속도 신호를 변위 신호로 변환한다⁽⁸⁾.

측정된 가속도 신호 $a(t)$ 를 푸리에 변환하여 얻은 주파수 영역의 성분을 $A(\omega)$ 라고 할 때, 변위 성분 $D(\omega)$ 와의 관계는 식 (2)와 같다.

$$D(\omega) = \frac{A(\omega)}{(j\omega)^2} = -\frac{1}{\omega^2}A(\omega) \quad (2)$$

이후 0.6 Hz ~ 1000 Hz 대역의 대역통과필터(band-pass filter, BPF)를 적용하였다. 하위 차단 주파수 0.6 Hz는 가속도 센서의 유효 측정 대역(0.5 Hz 이상)이자 정상 상태 탈수 주파수(12.5 Hz)의 5% 수준으로 저주파 드리프트 제거를 고려하여 선정하였다. 1000 Hz 이상 고주파 영역은 식 (2)의 특성상 결과에 미치는

영향이 미미하므로, 연산 속도 및 데이터 처리 효율성을 위해 제거하였다. 필터링된 주파수 영역 변위 신호를 역푸리에 변환(inverse Fourier transform)하여 시간 영역의 변위 데이터 $d(t)$ 를 산출하였다. 이 과정은 각 계측 지점의 가속도 성분을 독립적인 12개의 변위 성분으로 변환함으로써 2.3절 변위 예측 방법의 입력값으로 활용된다.

2.3 강체 거동 기반 임의점 변위 예측 방법

이 연구에서 제안하는 다점 가속도 계측을 이용한 변위 예측 방법은 2.2절을 따라 전처리된 시간 영역 변위 신호를 기반으로 한다. 강체의 6자유도(3병진, 3회전) 변위와 전처리된 다점 변위 신호 사이의 관계식은 식 (3)과 같은 순수 기하학적 선형 결합으로 단순화할 수 있다.

$$\mathbf{d}_i = \mathbf{d}_O + \boldsymbol{\theta} \times \mathbf{r}_i \quad (3)$$

여기서, $\mathbf{d}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ 는 3축 가속도계 신호를 주파수 영역에서 이중 적분하여 얻어진 3축 변위 신호이며, $\mathbf{d}_O = [x_O, y_O, z_O]^T$ 는 강체의 중심 O점의 병진 변위 벡터, $\boldsymbol{\theta} = [\theta_x, \theta_y, \theta_z]^T$ 는 강체의 회전 변위 벡터, $\mathbf{r}_i$ 는 중심점 O로부터 계측 점 i 까지의 위치 벡터이다. 이를 N 개의 계측 점에 대하여 행렬 방정식으로 식 (4)와 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{d}_1 \\ \mathbf{d}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{d}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & \mathbf{R}_1 \\ \mathbf{I}_3 & \mathbf{R}_2 \\ \vdots & \vdots \\ \mathbf{I}_3 & \mathbf{R}_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{d}_O \\ \boldsymbol{\theta} \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서, $\mathbf{I}_3$ 는 3×3 단위 행렬이며, $\mathbf{R}_i$ 는 벡터 외적을 위한 스큐 대칭 행렬(Skew-symmetric matrix)이다. 이 연구에서는 12개의 변위 성분을 입력하며, 이는 결정해야 할 6개의 미지수보다 많은 과결정 시스템을 구성한다. 따라서, 식 (5)처럼 최소제곱법(least squares method)을 적용함으로써 개별 센서에서 발생할 수 있는 국부적 측정 오차와 터브의 미세한 탄성 변형에 의한 오차를 효과적으로 저감함으로써 강건한 강체 거동을 산출할 수 있다⁽⁹⁾.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{d}_O \\ \boldsymbol{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & \mathbf{R}_1 \\ \mathbf{I}_3 & \mathbf{R}_2 \\ \vdots & \vdots \\ \mathbf{I}_3 & \mathbf{R}_N \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} \mathbf{d}_1 \\ \mathbf{d}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{d}_N \end{bmatrix} \quad (5)$$

도출된 강체의 6자유도 변위 신호를 기반으로 식 (6) 과 P 점의 위치 벡터 $\mathbf{r}_P$ 를 이용하여 강체 위 임의의 P 점의 변위 $\mathbf{d}_P$ 를 예측할 수 있다.

$$\mathbf{d}_P = \mathbf{d}_O + \boldsymbol{\theta} \times \mathbf{r}_P \quad (6)$$

결과적으로 제안하는 기법을 적용함으로써 특정 계측 지점에 국한되지 않고, 강체 전역의 변위 거동 예측으로 분석 범위를 확장할 수 있다.

3. 실험 방법

3.1 실험 시료 및 작동 조건

이 연구의 실험 시료는 가정용 FL 세탁기로, 드럼 직경 580 mm, 정격 용량 25 kg, 인버터 제어 방식의 BLDC(brushless direct current) 모터 구동 사양을 가진다. 서스펜션 시스템은 상부 좌우에 위치한 두 개의 인장 스프링과 하부에 배치된 마찰식 댐퍼 4개로 구성되어 있다. Table 1은 세탁기의 주요 제원이다.

실험 시료의 드럼 내부에 250 g의 UB를 고정 부착하였다. 250 g은 실험 세탁기 알고리즘에서 불평형에러 없이 탈수에 진입 가능한 최대 질량으로, 시스템의 동적 거동을 효과적으로 유도하기 위하여 설정하였다. UB 위치는 전방(front), 중앙(center), 후방(rear) 세 곳으로, Fig. 1에 도시하였다. 탈수 운전시에 UB는 터브의 피칭(pitching) 및 요잉(yawing)에 영향을 미친다. 따라서 이 연구에서는 이러한 영향을 명확히 비교하기 위해 대표적인 세 지점을 선정하였다.

Fig. 2는 실험에 사용된 세탁기의 시간에 따른 탈수 속도 프로파일을 나타낸다. 이 연구에서는 과도 및 가·감속 및 과도 구간을 제외하고 최고 운전 속도 (750 r/min)를 유지하는 정상 상태(steady-state) 구간의 터브 거동을 예측한다.

Table 1 Specifications of FL washing machine

Parameter	Specifications
Capacity	25 kg
Weight	95 kg
Drum diameter	580 mm
Drum depth	520 mm
Tub weight	50 kg

3.2 측정 센서 설치

데이터 수집에는 동기식 데이터 수집 장치 siemens simcenter SCADAS 데이터 수집 장비와 simcenter testlab 소프트웨어를 사용하였으며, 샘플링 주파수 $F_s = 5120$ Hz를 적용하였다.

가속도 신호는 PCB Piezotronics사의 3축 가속도계 356A45 4개를 통해 계측하였다. 센서는 터브 외부의 4지점에 설치하였으며, 터브의 회전 운동을 고려하여 터브 중심점으로부터 충분히 이격된 지점으로 선정하였다. Table 2에는 센서의 배치 위치를 나타냈

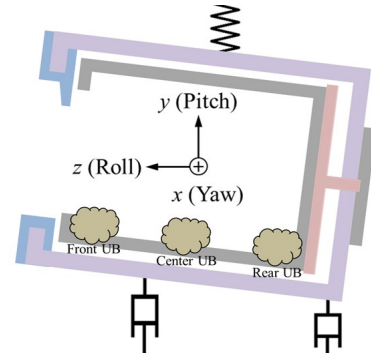


Fig. 1 Schematic of coordinate system and UB positions in the washing machine tub

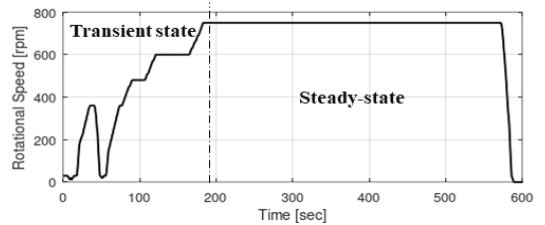


Fig. 2 Rotational speed profile of the spin-dry cycle

Table 2 Spatial coordinates of 4 accelerometers and a wire sensor on the tub surface

[Unit: mm]

Sensor	x-dir.	y-dir.	z-dir.
Acc. 1	0	362	235
Acc. 2	155	285	-35
Acc. 3	0	-208	-262
Acc. 4	-157	-54	-29
Wire sensor	-240	226	-230

다. 이때, 좌표계는 터브 중심을 원점으로 하고, 그로부터 세탁기 우측 방향을 x 축(+), 수직 상방을 y 축(+), 도어 방향을 z 축(+)으로 하는 직교좌표계를 기준한다.

변위 예측 기법의 타당성을 검증하기 위하여 터브에서 상단 캐비닛 사이의 거리의 변화를 계측하였다. 변위 계측에 사용된 와이어 변위 센서는 Micro-Epsilon사의 WDS-40-MT19-P 모델을 사용하였다. Fig. 3에는 사용된 가속도 및 변위 센서의 사진을 수록하였다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 변위 예측 및 검증

이 절에서는 2.2절을 따라 전처리된 변위 신호를 입력하여 와이어 센서 부착 위치에서의 변위를 예측하였다. 그리고 그 타당성을 검증하기 위해 와이어 센서로 실측한 변위와 비교해보았다.

먼저, 4개의 계측 위치에 대한 스큐 대칭 행렬 $\mathbf{R}_1$, $\mathbf{R}_2$, $\mathbf{R}_3$, $\mathbf{R}_4$ 과 전처리된 4지점의 3축 변위 신호 $[\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \mathbf{d}_3, \mathbf{d}_4]^T$ 를 2.3절의 식(5)에 대입하여 터브 중

심점의 6자유도 변위를 도출하였다. Table 3에는 터브 중심점의 3병진 변위와 3회전 변위에 대하여 방향별 RMS(root mean square) 값과 크기를 나타내었다. 터브 중심점의 병진 운동은 UB가 전방으로 치우칠수록 증폭되는 경향이 관찰되었다. 회전 운동은 UB가 터브 중심을 벗어나는 경우에 증폭되었다. 이러한 결과는 기존 연구 Lim et al.의 12자유도 모델을 실험적으로 확장한 것으로, UB의 위치가 터브의 복합 거동에 미치는 영향을 나타내는 것으로 보여진다⁽³⁾.

다음으로, 터브 중심점에서 도출한 6자유도 변위 신호 $[\mathbf{d}_o, \boldsymbol{\theta}]^T$ 를 식(6)에 대입하여 와이어 센서 부착 위치에서의 변위를 예측하였다. 그 중 수직(y 축) 변위를 와이어 센서로 실측한 변위와 함께 Fig. 4에 도시하였다. 예측 변위(solid line)와 실측 변위(dashed line)는 세 가지 UB 위치 조건에서 높은 일치도를 보임을 알 수 있다. 예측 변위와 실측 변위를 정량적으로 비교하기 위하여 UB의 위치 조건에 따른 RMS 값과 그 상대 오차를 계산하여 Table 4에 표시하였다. 상대 오차는 식(7)과 같이 산출하였다.

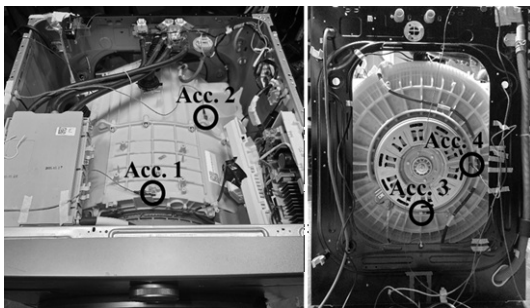
$$\frac{|y_{\text{est.RMS}} - y_{\text{meas.RMS}}|}{y_{\text{meas.RMS}}} \quad (7)$$

여기서, $y_{\text{est.RMS}}$ 는 예측한 수직(y 축) 변위의 RMS 값이며, $y_{\text{meas.RMS}}$ 는 실측한 수직 변위의 RMS 값이다. Front UB 조건에서 와이어 센서 실측 변위 대비 3.1%의 오차를 보였으며, center UB 조건에서는 4.2%, 그리고 rear UB 조건에서는 9.3%로 다소 큰 오차를 보였다.

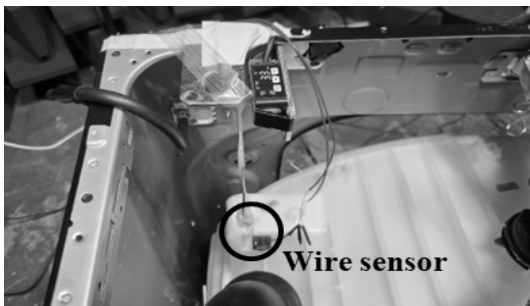
4.2 터브의 3D 거동 분석

이 연구에서 제안하는 다점 가속도계 기반 변위 예측 기법을 사용하면 터브 위 임의 지점에 대한 3차원 거동 정보를 예측할 수 있다. 이는 일반적인 변위 센서가 설치된 지점의 단일 방향 변위 측정만 가능한 한계를 극복하는 효과적인 방법이 된다.

이 연구에서는 UB의 위치에 따른 터브의 거동 특성을 도식적으로 분석하기 위하여, 터브 중심점의 6자유도 변위 신호로부터 예측한 터브 전·후방 중심점의 변위 Fig. 5에 3차원 궤적으로 시각화하여 나타내었다. Center UB 조건에서는 터브 전·후방 중심점이 거의 동일한 반경의 원형 궤적을 형성한다. 반면 UB가 front 또는 rear에 위치하는 경우에는 UB가 위



(a) Accelerometer 1-4 placements

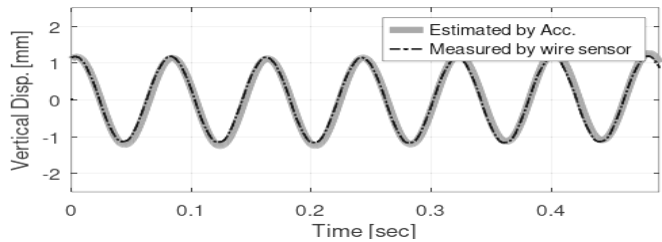


(b) Wire sensor placement

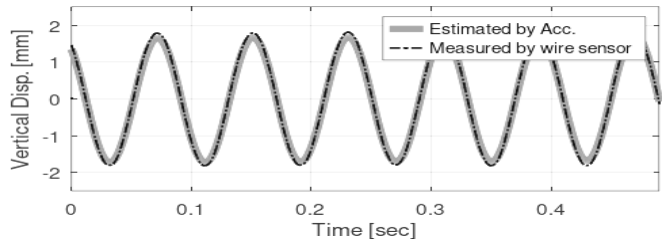
Fig. 3 Sensor setup for tub behavior measurement

Table 3 6-DoF rigid behavior at the center of the tub

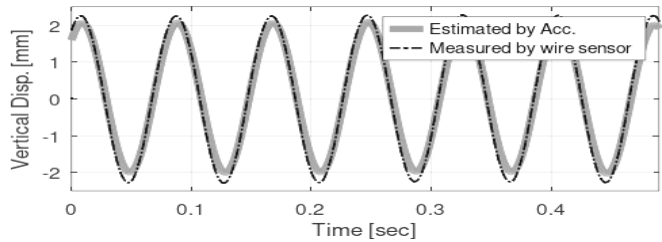
UB location	Component	x-dir. or θ_x	y-dir. or θ_y	z-dir. or θ_z	Mag.
Front	Trans. [mm]	1.38	1.43	0.14	1.99
	Rot. [deg.]	0.217	0.165	0.182	0.327
Center	Trans. [mm]	0.99	1.10	0.08	1.48
	Rot. [deg.]	0.034	0.135	0.192	0.238
Rear	Trans. [mm]	0.65	0.87	0.16	1.10
	Rot. [deg.]	0.152	0.266	0.200	0.365



(a) Front UB



(b) Center UB



(c) Rear UB

Fig. 4 Comparison of estimated (solid) and measured (dashed) vertical (y-dir.) displacements at the wire sensor point

Table 4 Comparison of estimated and measured vertical (y-dir.) displacements (RMS) with relative error

UB location	Estimated [mm]	Measured [mm]	Relative error [%]
Front	0.85	0.82	3.1
Center	1.23	1.28	4.2
Rear	1.46	1.61	9.3

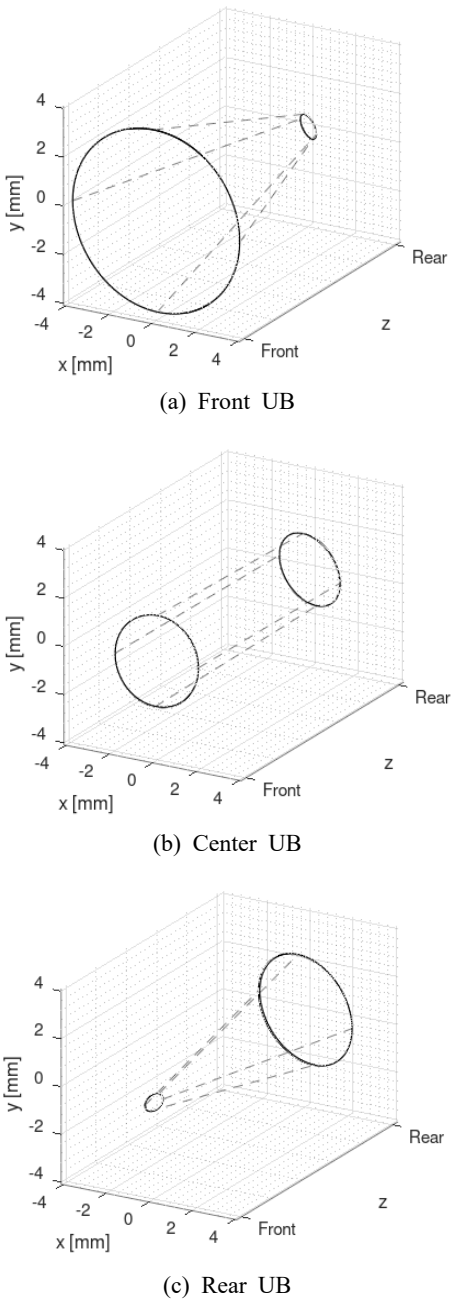


Fig. 5 3D trajectories of the tub center

치한 방향의 중심점 변위가 반대편보다 크게 나타나며, 이에 따라 중심축이 기울어진 형태의 원추형 운동(conical motion)이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 예측한 전·후방 중심점의 운동 반경을 RMS 값으로 비교하여 Table 5에 나타내었다. UB 위치별 전·후

Table 5 Estimated radius of the tub center (RMS) [Unit: mm]

UB \ Tub	Front	Rear
Front	3.82	0.44
Center	1.91	1.43
Rear	0.49	2.21

방 중심점의 운동 반경을 상호 비교함으로써 UB의 위치에 따른 원추형 운동을 정량적으로 분석하였다. 전·후방 중심점의 운동은 center UB 조건에서 각각 1.91 mm, 1.43 mm의 유사한 회전 반경의 원통형에 가까운 궤적을 형성하는 반면, front UB 조건에서는 3.82 mm, 0.44 mm로, rear UB 조건에서는 0.49 mm, 2.21 mm로 원추형 운동 경향이 두드러지게 나타났다. 향후 이러한 분석 결과를 MBD 해석 모델과 비교함으로써 터브의 실제 운동 특성을 보다 정밀하게 파악할 수 있다. 편중된 UB로 인해 발생하는 원추형 운동(conical motion)은 터브와 캐비닛의 물리적 간섭을 유발하거나 나아가 세탁기 전체가 움직이는 ‘워킹(walking)’ 현상의 핵심 원인이 된다. 따라서 이 기법을 통해 도출된 3D 거동의 정량적 지표는 향후 서스펜션 배치 최적화 등 세탁기의 진동 저감 설계 및 동적 성능 개선에 실효성 있는 기준으로 활용될 것으로 기대된다.

5. 결 론

이 연구에서는 다점 가속도 신호를 활용하여 드럼 세탁기 터브의 임의 위치에서의 변위 거동을 예측하는 기법을 제안하고, 와이어 변위 센서를 통해 측정된 실측 데이터와 비교함으로써 제안된 기법의 타당성을 검증하였다. 또한, 대표적으로 터브 전·후방 중심점의 변위 궤적을 예측함으로써 터브에서 발생하는 원추형 운동을 확인하고 정량적으로 분석하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

- (1) 최소제곱법과 강체 동역학 방정식에 기반하여 임의 점의 변위를 예측한 결과, 와이어 변위 센서로 측정된 실측 변위와 비교하여 평균 약 3.1 %~9.3 % 수준의 오차 범위를 나타내어 제안된 예측 기법이 높은 추종 정밀도를 확보하였음을 입증하였다.
- (2) 터브 중심축의 3차원 궤적을 시각화 및 정량화

하여 분석한 결과, UB가 전·후방 방향으로 편중될 경우 터브의 운동이 원추형 궤적으로 나타남을 확인하였다. 이를 통해 불평형 조건에 따른 터브의 동적 거동 특성을 직관적으로 규명하였다.

(3) 제안된 기법은 기존 변위 센서 기반 측정 방식의 공간적 제약을 극복하면서, 터브의 3차원 복합 운동을 전방위적으로 분석할 수 있는 장점을 갖는다. 이 연구에서는 집중 질량을 고정 부착한 채, 정상 상태 구간에 한정하여 분석을 수행하였으나, 향후 실제 세탁물을 적용한 실증 및 과도 응답 구간으로 분석 범위를 확장함으로써 거동 예측의 신뢰성을 확보하고자 한다. 이를 바탕으로, 드럼 세탁기의 진동 저감 설계, 동적 거동 분석 및 신뢰성 평가를 위한 정량적 분석 도구로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- (1) Kim, J. M., Jung, B. K., Heo, S. J., Ahn, S. J. and Jeong, W. B., 2014, Analysis of Sources and Contribution for the Radiated Noise of Drum-type Washing Machine, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 24, No. 8, pp. 628~635.
- (2) Kim, T. H., Jung, B. K., Heo, S. J. and Jeong, W. B., 2013, Estimation of Excitation Force and Noise of Drum Washing Machine at Dehydration Condition using Phase Reference Spectrum, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 23, No. 7, pp. 617~623.
- (3) Lim, H. T., Jeong, W. B. and Kim, K. J., 2010, Dynamic Modeling and Analysis of Drum-type Washing Machine, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 11, pp. 407~417.
- (4) Hashemian, F., Yang, H., Wang, Y., Deng, X., Kim, S. et al., 2024, Parametric Dynamic Simulation and Bayesian Design Optimization of a Front-loading Washing Machine, Journal of Vibration Engineering & Technologies, Vol. 12 (Suppl 1), pp. 41~62.
- (5) Kim, Y. J., Kim, D. C. and Jeong, W. B., 2019, Dynamic Modeling and Analysis of a Quad Horizontal Damper System for Transient Vibration Reduction in Top Loading Washing Machine, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 33, pp. 1123~1130.
- (6) Song, Y., Zhuang, Z., Wang, X., Fang, Q., Cheng, Z. et al., 2024, Vibration Damping and Noise Reduction of a New Non-newtonian Fluid Damper in a Washing Machine, Actuators, Vol. 13, No. 1, 9.
- (7) Li, Y., Guan, X., Sang, J., Liu, H. and Liao, G., 2022, Active Control of Low-frequency Resonance Using MR-based Variable Stiffness Damping Base, Smart Materials and Structures, Vol. 31, No. 4, 045012.
- (8) Rao, S. S., 2017, Mechanical Vibrations, 6th Edition, Pearson Education, NY, United States, pp. 254~310.
- (9) Ginsberg, J. H., 2008, Engineering Dynamics, Cambridge University Press, NY, United States, pp. 45~120.