

〈論 文〉

액체밸런서를 고려한 세탁기의 과도응답 특성에 관한 연구

이동익* · 오재응**

(1994년 6월 23일 접수)

A Study on the Transient Motion Analysis for the Liquid Balanced Washing Machine

Dong-Ick Lee and Jae-Eung, Oh

Key Words : Washing Machine(세탁기), Spin-Basket(세탁통), Liquid Balancer(액체밸런서), Suspension System(현가장치), Fluid Statics(유체 정역학), Unbalanced Mass(불평형 질량), Dehydration(탈수작업)

Abstract

In order to investigate the effect of liquid balancer in washing machine, we identify the vibration characteristics of suspension system of washing machine and formulate the 4 D. O. F. system dynamic equations. As the washing machine rotates higher speed, it is emphasized to reduce the eccentric force due to unbalanced mass. Nowadays, the most effective canceling method of eccentric force is known as the usage of liquid balancer. To determine the liquid distribution in liquid balancer, the fluid statics is considered. The system dynamic equations are solved by Runge-Kutta method and represent the good characteristics of real washing machine in X-Y plane. The accuracy of the numerical solution was examined by experiments. The simulation results show that the unbalanced mass has so much influence on vibration magnitude and the rotating shape of spin-basket. But the effect of mass reduction due to the dehydration of the spin-basket has little influence on transient vibration.

기 호 설 명

<p>Z : 현가장치의 고정면 중심과 스프링 고정면 중심과의 높이</p> <p>H_t : 스프링 고정면과 세탁통 질량중심과의 높이</p> <p>H_u : 스프링 고정면과 불평형 질량중심과의 높이</p> <p>H_b : 스프링 고정면과 액체밸런서와의 높이</p> <p>R_t : 세탁통 중심(Z)축과 세탁통 질량중심과의 반경</p> <p>R_u : 세탁통 중심(Z)축과 불평형 질량중</p>	<p>R_o : 액체밸런서의 최소 반경</p> <p>θ_o : 현가장치의 지지봉의 초기 기울기</p> <p>M_t : 세탁통의 질량</p> <p>M_u : 불평형 질량</p> <p>M_w : 세탁수 질량</p> <p>$\sum M_i (=M_b)$: 액체밸런서 내의 액체질량</p> <p>M_{eff} : 액체밸런서 내의 액체 상당 집중질량</p> <p>I_{x0} : X축의 질량 관성모멘트</p> <p>I_{y0} : Y축의 질량 관성모멘트</p> <p>K_1, K_2, K_3, K_4 : 스너버 스프링의 탄성계수</p> <p>C_1, C_2, C_3, C_4 : 스너버의 감쇠계수</p> <p>C_x, C_y : 현가장치의 회전 감쇠계수</p>
---	--

*한양대학교 대학원 정밀기계공학과

**정회원, 한양대학교 자동차공학과

g : 중력 가속도

1. 서 론

최근의 기계 구조물의 진동 문제가 중요시되면서 진동의 발생원인 분석 및 그 저감 대책에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 오늘날 기계 구조물의 진동은 기계의 성능뿐 아니라 품질의 척도로 인식되고 있으며, 따라서 고품질의 경쟁력있는 기계 구조물을 만들기 위한 저 진동기술은 필수적인 것이 되었다. 가정용 기계 구조물인 세탁기의 일반적 구조는 액체밸런서가 장착된 세탁통이 현가장치에 의해 지지되어 있으며, 이 세탁통을 중심으로 아래에 클러치와 구동모터가 설치되어 있다. 세탁기의 작동원리는 회전운동을 이용하는 것이므로 불평형 질량이 있는 경우에 진동의 발생은 필연적이며, 특히 대응량화 추세에 따라 진동 문제는 더욱 심각해지고 있다.

세탁기 진동현상에 대한 연구는 1950년대의 여러 형태의 밸런서가 연구되기 시작하여⁽¹⁾ 1980년대 세탁기의 대형화에 따른 진동 대책으로 액체밸런서가 고안되고 이에 대한 해석이 시도되었다.⁽²⁾ 최근 국내 연구로서 세탁기의 진동 해석을 상업용 S/W를 이용한 사례가 발표되었다.⁽³⁾ 이 연구는 액체밸런서의 효과를 외력으로 변환하여 현가장치의 특성을 해석하여, 고정대에 전달되는 힘과 토크를 구하여 설계에 유용한 자료를 제시하였다. 그러나 이러한 해석은 액체밸런서의 영향과 공진주파수를 지나는 과도상태의 진동을 좀더 정확히 묘사할 수 없는 단점을 갖게 된다. 본 연구에서는 액체밸런서를 포함한 세탁통의 운동을 고유주파수를 지나는 과도 상태에 대하여 해석하고 세탁통의 진동을 마이크로 컴퓨터로 시뮬레이션하였다. 세탁통의 수직 방향 운동과 Z축 비틀림운동은 세탁기의 크기와 관계가 적으므로, 계산의 신속성과 마이크로 컴퓨터의 메모리를 고려하여 세탁기 현가장치의 모델링은 4 자유도계로 하였다. 세탁통의 운동 특성을 해석하기 위하여 Lagrange 운동방정식을 이용하고 Runge-Kutta법으로 해를 구하였다. 현가장치의 동특성은 현가장치의 지지봉 길이, 스프링상수, 감쇠계수, 세탁통 질량, 세탁통의 관성모멘트, 액체밸런서의 위치 등을 해석 변수로 하였다. 해석은 세탁기의 다단계 회전수 증가가 아닌, 초기에 사인함수 형태

로 증가되어 정점에서 일정 회전수로 유지되는 것으로 가정하고 구하였다. 해석결과는 실험 결과와의 비교를 통하여 세워진 운동방정식의 타당함을 입증하였고 실제 현장에서 마이크로 컴퓨터를 이용하여 설계 제작에 유용한 도구로 사용할 수 있게 하였다. 그리고 액체밸런서의 효과를 판단하는 기준으로 지지봉이 세탁통과 고정된 면의 세탁통 하부의 진동과 액체밸런서 설치면의 세탁통 최상부 진동의 진폭비를 사용할 것을 제안하였다.

2. 이론 해석

2.1 시스템 모델링

세탁통의 운동방정식은 액체밸런서 내의 액체가 가해지는 가속도의 상대적 크기에 의해 결정되는 액체 분포와 강체로 가정한 세탁통의 운동 상태를 나타내는 것이다. 세탁통 운동의 전체 6자유도 운동중 Z축에 대한 병진운동과 비틀림운동은 그 벡터 성분이 X-Y 평면의 진동과 관계가 적으므로 이를 무시하고 X축과 Y축에 대하여 현가장치의 회전운동과 세탁통의 스프링 지지면에 대한 회전운동의 합으로 된 4자유도계로 모델링하고 해석하였다. 이때에 현가장치의 회전운동의 크기가 작으면 X축과 Y축에 대한 병진 운동과 같게 된다. 세탁기 시스템과 세탁통에 대한 현가장치의 구성을 Fig. 1(a)의 Y-Z 평면 단면도와 Fig. 1(b)의 액체밸런서를 좌표계와 함께 표시하였다.

현가장치 중심의 수직 방향을 Z축으로 정하고 X축은 Z축에 수직하며 Z축으로부터 현가장치의 고정점 1을 지나는 방향으로 설정하고 Y축은 Z축을 중심으로 현가장치 고정점 2를 지나는 방향으로 설정하였다. 세탁통의 운동은 하단에 스프링이 달린 지지봉의 진자운동과 스프링 지지면을 기준으로 한

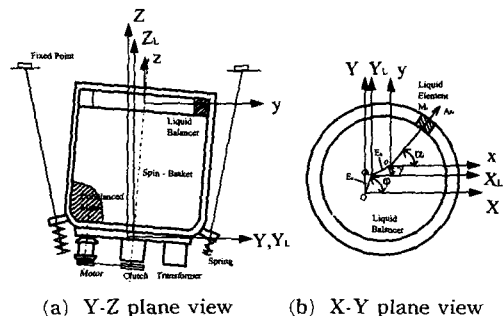


Fig. 1 Suspension system of washing machine

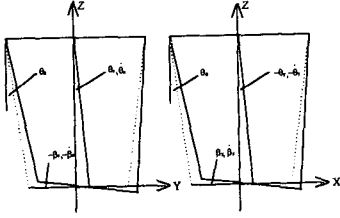


Fig. 2 Notations of angular displacements and angular velocity

세탁통의 회전운동의 조합으로 가정하였다. 한편 지지봉의 진자운동은 스프링 지지면의 병진운동과 스프링 지지면의 회전운동으로 나누어 생각 할 수 있다. 따라서 세탁통의 운동은 진자운동에 의한 병진운동 성분과 원추운동에 의한 회전운동과 스프링 지지면 자체의 회전운동의 합으로 묘사된다. 이 경우 변위와 속도 성분을 Fig. 2에 나타내었다.

액체밸런서 내의 액체는 많은 수의 질량체의 집합으로 가정하여 실제의 연속적 분포와 같도록 하여 운동방정식을 수립하였다. 이때 운동방정식은 세탁통의 속도와 변위를 변수로 한 운동에너지와 위치에너지를 구하고 감쇠에 대해 Rayleigh 이산함수를 이용하여 Lagrange 운동방정식을 구한다. 미소 액체의 위치는 세탁통을 위에서 본 X-Y 평면에 나타내었다. 세탁통의 운동은 질량중심점에 대해 병진운동과 회전운동의 합으로 나타낼 수 있으며 그 속도 성분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_{xt} &= -(1 + H_t \tan(\theta_0) / R_o) Z \dot{\theta}_y - H_t \dot{\beta}_y \\ V_{yt} &= -(1 + H_t \tan(\theta_0) / R_o) Z \dot{\theta}_x + H_t \dot{\beta}_x \quad (1) \\ \Omega_{xt} &= Z (\tan(\theta_0) / R_o) \dot{\theta}_x + \dot{\beta}_x \\ \Omega_{yt} &= Z (\tan(\theta_0) / R_o) \dot{\theta}_y - \dot{\beta}_y \quad (2) \end{aligned}$$

여기서,

- V_{xt} : 세탁통 질량중심점의 X방향 병진운동 속도
- V_{yt} : 세탁통 질량중심점의 Y방향 병진운동 속도
- Ω_{xt} : 세탁통 질량중심점의 X축 회전운동 속도
- Ω_{yt} : 세탁통 질량중심점의 Y축 회전운동 속도
- R_o : 세탁통 중심 Z축과 스프링 고정점까지의 반경

불평형 질량(M_u)의 임의 위치(φ)에서의 속도 성분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_{xu} &= -(1 + H_t \tan(\theta_0) / R_o) Z \dot{\theta}_y \\ &\quad - H_u \dot{\beta}_y - R_u \dot{\varphi} \sin(\varphi) \\ V_{yu} &= (1 + H_t \tan(\theta_0) / R_o) Z \dot{\theta}_x + H_u \dot{\beta}_x \\ &\quad - R_u \dot{\varphi} \cos(\varphi) \quad (3) \end{aligned}$$

여기서,

- V_{xu} : 불평형 질량의 X방향 병진운동 속도
- V_{yu} : 불평형 질량의 Y방향 병진운동 속도
- φ : 세탁통의 X축에 대한 회전각도 미소액체 질량(M_i)의 임의위치 ($\varphi + \alpha_i$)에서의 속도 성분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_{xi} &= -(1 + H_t \tan(\theta_0) / R_o) Z \dot{\theta}_y \\ &\quad - H_b \dot{\beta}_y - R_i \dot{\varphi} \sin(\varphi + \alpha_i) \\ V_{yi} &= -(1 + H_t \tan(\theta_0) / R_o) Z \dot{\theta}_x - H_b \dot{\beta}_x \\ &\quad - R_i \dot{\varphi} \cos(\varphi + \alpha_i) \quad (4) \end{aligned}$$

여기서,

- V_{xi} : 미소액체 질량의 X방향 병진운동 속도
 - V_{yi} : 미소액체 질량의 Y방향 병진운동 속도
- 따라서 전체 운동에너지의 합($T_{K.E}$)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T_{K.E} &= \frac{1}{2} M (V_{xt}^2 + V_{yt}^2) + \frac{1}{2} I_{yo} \Omega_{yt}^2 \\ &\quad + \frac{1}{2} M_u (V_{xu}^2 + V_{yu}^2) + \frac{1}{2} \sum M_i (V_{xi}^2 + V_{yi}^2) \quad (5) \end{aligned}$$

세탁기 현가장치에서 진자운동은 각 질점의 중력장에 대한 위치에너지 변화와 스프링 지지면의 회전운동은 지지면에서 세탁통을 받치고 있는 스프링의 길이의 변화에 의한 위치에너지의 변화를 가져온다. 진자운동에 의한 각 질점의 높이 변화는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta H_i &= Z (1 - \cos(\theta_x)) (1 - \cos(\theta_y)) \\ &\quad - H_t (1 - \cos((Z \tan(\theta_0) / R_o) \theta_x)) \\ &\quad (1 - \cos((Z \tan(\theta_0) / R_o) \theta_y)) \\ &\quad \cong Z \left(1 - \frac{1}{2} \theta_x^2\right) \left(1 - \frac{1}{2} \theta_y^2\right) \\ &\quad - H_t (1 - (Z \tan(\theta_0) / R_o)^2 \theta_x^2) \\ &\quad (1 - (Z \tan(\theta_0) / R_o)^2 \theta_y^2) \quad (6) \\ \Delta H_u &= Z (1 - \cos(\theta_x)) (1 - \cos(\theta_y)) \\ &\quad - H_u (1 - \cos((Z \tan(\theta_0) / R_o) \theta_x)) \\ &\quad (1 - \cos((Z \tan(\theta_0) / R_o) \theta_y)) \\ &\quad \cong Z \left(1 - \frac{1}{2} \theta_x^2\right) \left(1 - \frac{1}{2} \theta_y^2\right) \\ &\quad - H_u (1 - (Z \tan(\theta_0) / R_o)^2 \theta_x^2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (1 - (Z \tan(\theta_o) / R_o)^2 \theta_x^2) \quad (7) \\
\Delta H_i &= Z(1 - \cos(\theta_x))(1 - \cos(\theta_y)) \\
& - H_i(1 - \cos((Z \tan(\theta_o) / R_o) \theta_x)) \\
& (1 - \cos((Z \tan(\theta_o) / R_o) \theta_y)) \\
& \cong Z \left(1 - \frac{1}{2} \theta_x^2\right) \left(1 - \frac{1}{2} \theta_y^2\right) \\
& - H_i(1 - (Z \tan(\theta_o) / R_o)^2 \theta_x^2) \\
& (1 - (Z \tan(\theta_o) / R_o)^2 \theta_y^2) \quad (8)
\end{aligned}$$

지지면 하단의 스프링의 길이의 변화는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
\Delta L_1 &= -(R_o \cos(\theta_o)) \sin(\beta_y) \cong -R_o \cos(\theta_o) \beta_y \\
\Delta L_2 &= (R_o \cos(\theta_o)) \sin(\beta_x) \cong R_o \cos(\theta_o) \beta_x \\
\Delta L_3 &= (R_o \cos(\theta_o)) \sin(\beta_y) \cong R_o \cos(\theta_o) \beta_y \\
\Delta L_4 &= -(R_o \cos(\theta_o)) \sin(\beta_x) \cong -R_o \cos(\theta_o) \beta_x \quad (9)
\end{aligned}$$

따라서 전체 위치에너지의 합($V_{P,E}$)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
V_{P,E} &= \frac{1}{2} (K_1 \Delta L_1^2 + K_2 \Delta L_2^2 + K_3 \Delta L_3^2 + K_4 \Delta L_4^2 \\
& + M_i g \Delta H_i + M_u g \Delta H_u + \sum M_i g \Delta H_i) \quad (10)
\end{aligned}$$

감쇠는 2곳에서 발생하는데, 현가장치의 진자운동의 힌지점에서 회전 각속도에 비례하여 발생하는 곳과 스프링이 함께 설치된 스너버 부분이다. 스프링과 스너버는 같은 지지봉에 의해 연결되어 있으므로 스프링과 스너버의 길이변화 속도는 같고, 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
\dot{L}_1 &= -(R_o \cos(\theta_o)) \dot{\beta}_y \cos(\beta_y) \cong -R_o \cos(\theta_o) \dot{\beta}_y \\
\dot{L}_2 &= (R_o \cos(\theta_o)) \dot{\beta}_x \cos(\beta_x) \cong R_o \cos(\theta_o) \dot{\beta}_x \\
\dot{L}_3 &= (R_o \cos(\theta_o)) \dot{\beta}_y \cos(\beta_y) \cong R_o \cos(\theta_o) \dot{\beta}_y \\
\dot{L}_4 &= -(R_o \cos(\theta_o)) \dot{\beta}_x \cos(\beta_x) \cong -R_o \cos(\theta_o) \dot{\beta}_x \quad (11)
\end{aligned}$$

이때 Rayleigh 이산함수(F)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
F &= \frac{1}{2} (C_1 \dot{L}_1^2 + C_2 \dot{L}_2^2 + C_3 \dot{L}_3^2 + C_4 \dot{L}_4^2) \\
& + \frac{1}{2} C_x \dot{\theta}_x^2 + \frac{1}{2} C_y \dot{\theta}_y^2 \quad (12)
\end{aligned}$$

Lagrange 운동방정식은 식(5), (10), (12)를 이용하여 다음의 식(13)과 같이 정의된다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial q_j} \right) + \left(\frac{\partial F}{\partial \dot{q}_j} \right) = 0 \quad (13)$$

여기서, $L = T_{K,E} - V_{P,E}$

q_i 는 $\theta_x, \beta_x, \theta_y, \beta_y$

q_i 는 $\theta_x, \beta_x, \theta_y, \beta_y$ 이다.

세탁통 질량(M_t)은 세탁통 자체의 질량(M_o)와 세탁수 질량(M_w)의 합이며, 탈수시 매초당 dM 의 비율로 질량이 감소한다고 가정하고 식(13)을 정리하면 다음의 2차 미분 연립방정식의 행렬형태로 나타낼 수 있다.

$$[M]\{X(\dot{t})\} + [C]\{C(\dot{t})\} + [K]\{X(t)\} = \{f(t)\} \quad (14)$$

여기서, $[M]$ 은 등가질량행렬로서 각 요소는 다음과 같다.

$$[M] = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
M_{11} &= M_t (1 + H_t \tan(\theta_o) / R_o)^2 Z^2 \\
& + M_u (1 + H_u \tan(\theta_o) / R_o)^2 Z^2 \\
& + \sum M_i (1 + H_i \tan(\theta_o) / R_o)^2 Z^2 \\
& + I_{x_o} (\tan(\theta_o) / R_o)^2 Z^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_{12} &= M_{21} \\
& = M_t (1 + H_t \tan(\theta_o) / R_o) Z H_t \\
& + M_u (1 + H_u \tan(\theta_o) / R_o)^2 Z H_u \\
& + \sum M_i (1 + H_i \tan(\theta_o) / R_o) Z H_i \\
& + I_{x_o} (\tan(\theta_o) / R_o) Z
\end{aligned}$$

$$M_{22} = M_t H_t^2 + M_u H_u^2 + \sum M_i H_i^2 + I_{x_o}$$

$$\begin{aligned}
M_{33} &= M_t (1 + H_t \tan(\theta_o) / R_o)^2 Z^2 \\
& + M_u (1 + H_u \tan(\theta_o) / R_o)^2 Z^2 \\
& + \sum M_i (1 + H_i \tan(\theta_o) / R_o)^2 Z^2 \\
& + I_{y_o} (\tan(\theta_o) / R_o)^2 Z^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_{34} &= M_{43} \\
& = M_t (1 + H_t \tan(\theta_o) / R_o) Z H_t \\
& + M_u (1 + H_u \tan(\theta_o) / R_o)^2 Z H_u \\
& + \sum M_i (1 + H_i \tan(\theta_o) / R_o) Z H_i \\
& + I_{x_o} (\tan(\theta_o) / R_o) Z
\end{aligned}$$

$$M_{44} = M_t H_t^2 + M_u H_u^2 + \sum M_i H_i^2 + I_{y_o}$$

$$M_{13} = M_{14} = M_{23} = M_{21} = M_{31} = M_{34} = M_{41} = M_{42} = 0$$

$[C]$ 는 등가감쇠행렬로서 각 요소는 다음과 같다.

$$[C] = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{aligned}
 C_{11} &= C_x + dM(1 + H_t \tan(\theta_o) / R_o)^2 \\
 C_{12} &= dM(1 + H_t \tan(\theta_o) / R_o) H_t \\
 C_{21} &= C_{12} \\
 C_{22} &= C_2(R_o \cos(\theta_o))^2 + C_4(R_o \cos(\theta_o))^2 + dMH_t^2 \\
 C_{33} &= C_y + dM(1 + H_t \tan(\theta_o) / R_o)^2 \\
 C_{34} &= dM(1 + H_t \tan(\theta_o) / R_o) H_t \\
 C_{43} &= C_{34} \\
 C_{44} &= C_1(R_o \cos(\theta_o))^2 + C_3(R_o \cos(\theta_o))^2 + dMH_t^2 \\
 C_{13} &= C_{14} = C_{23} = C_{24} = C_{31} = C_{32} = C_{41} = C_{42} = 0
 \end{aligned}$$

[K]는 등가강성행렬로서 각 요소는 다음과 같다.

$$[K] = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{aligned}
 K_{11} &= K_{33} \\
 &= (M_t + M_u + \sum M_i) gZ + (M_t H_t + M_u H_u \\
 &\quad + \sum M_i H_i) g(\tan(\theta_o) / R_o)^2 \\
 K_{22} &= K_2(R_o \cos(\theta_o))^2 + K_4(R_o \cos(\theta_o))^2 \\
 K_{44} &= K_1(R_o \cos(\theta_o))^2 + K_3(R_o \cos(\theta_o))^2 \\
 K_{12} &= K_{13} = K_{14} = K_{21} = K_{23} = K_{24} = 0 \\
 K_{31} &= K_{32} = K_{34} = K_{41} = K_{42} = K_{43} = 0
 \end{aligned}$$

{f}는 외력항으로 간주되는 행렬로서 각 요소는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \{f\} &= \{f_1, f_2, f_3, f_4\}^T \quad (18) \\
 f_1 &= M_u(1 + H_u \tan(\theta_o) / R_o) ZR_u \ddot{\varphi}^2 \sin(\varphi) \\
 &\quad - M_u(1 + H_u \tan(\theta_o) / R_o) ZR_u \ddot{\varphi} \cos(\varphi) \\
 &\quad + \sum M_i(1 + H_i \tan(\theta_o) / R_o) ZR_i \ddot{\varphi}^2 \sin(\varphi + \alpha_i) \\
 &\quad - \sum M_i(1 + H_i \tan(\theta_o) / R_o) ZR_i \ddot{\varphi} \cos(\varphi + \alpha_i) \\
 f_2 &= M_u H_u R_u \ddot{\varphi}^2 \sin(\varphi) - M_u H_u R_u \ddot{\varphi} \cos(\varphi) \\
 &\quad + \sum M_i H_i R_i \ddot{\varphi}^2 \sin(\varphi) - \sum M_i H_i R_i \ddot{\varphi} \cos(\varphi) \\
 f_3 &= -M_u(1 + H_u \tan(\theta_o) / R_o) ZR_u \ddot{\varphi}^2 \cos(\varphi) \\
 &\quad - M_u(1 + H_u \tan(\theta_o) / R_o) ZR_u \ddot{\varphi} \sin(\varphi) \\
 &\quad - \sum M_i(1 + H_i \tan(\theta_o) / R_o) ZR_i \ddot{\varphi}^2 \cos(\varphi + \alpha_i) \\
 &\quad - \sum M_i(1 + H_i \tan(\theta_o) / R_o) ZR_i \ddot{\varphi} \sin(\varphi + \alpha_i) \\
 f_4 &= -M_u H_u R_u \ddot{\varphi}^2 \cos(\varphi) - M_u H_u R_u \ddot{\varphi} \sin(\varphi) \\
 &\quad + \sum M_i H_i R_i \ddot{\varphi}^2 \cos(\varphi + \alpha_i) \\
 &\quad - \sum M_i H_i R_i \ddot{\varphi} \sin(\varphi + \alpha_i)
 \end{aligned}$$

식(18)의 M_i 값을 구하기 위하여 액체밸런서 내의 액체 분포를 구하여야 한다. 액체밸런서 내에는 비중 1.2의 소금물이 액체밸런서 내부 체적의 50% 채워져 있다고 가정하였다. 액체밸런서 내의 유동은 액체에 가해지는 가속도에 대해 순간적으로 힘

의 균형이 유지되는 형태로 되고, 액체밸런서의 회전과 상대속도의 차이가 없이 회전하고 있다고 가정한다. 즉 액체밸런서 내의 액체는 점성을 무시한 비점성 유체로 가정하고 Fig. 2에 X-Y 평면에서 미소 액체 질량(M_i)에 가해지는 가속도(A_{Ri})를 적용하여 유체 정역학적으로 액체의 분포를 구한다. 이 경우 액체밸런서 내의 액체 분포는 액체의 질량은 항상 일정하다는 조건을 이용하여 쉽게 구할 수 있다.

액체밸런서 액체의 등압력면은 다음의 식을 만족하여야 한다.

• R방향

$$\begin{aligned}
 \frac{dP}{dR} &= \rho A_{Ri} \\
 &= \rho(R_i \dot{\varphi}^2 + E_z \omega_z^2 \cos(\varphi - \alpha_i) E_h \omega_h^2 \cos(\alpha_i - \gamma)) \quad (19)
 \end{aligned}$$

여기서, $E_z = Z(\theta_x^2 + \theta_y^2)^{1/2}$

$$E_h = H_b(\beta_x^2 + \beta_y^2)^{1/2}$$

$$\omega_z, \omega_h = \text{회전 각속도}$$

• Z방향

$$\frac{dP}{dZ} = \rho g \quad (20)$$

따라서 등압력면의 압력(P)은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
 P &= \rho \int A_{Ri} dR + \rho \int g dZ + C \\
 &= \rho \int A_{Ri} dR + \rho g Z + C \quad (21)
 \end{aligned}$$

여기서, 계수 C는 다음의 식을 만족시키는 상수이다.

$$\sum M_i = \int_0^{2\pi} \int_0^H \int_{R_i}^{R_o} \rho P R dR dZ d\varphi \quad (22)$$

2.2 액체밸런서 내의 액체량 결정

정상상태의 세탁통의 운동은 불평형 질량에 의한 원심력과 액체밸런서에 의한 보정력이 서로 평형을 이루고, 이에 대응하여 세탁통 하단의 스프링 지지면을 중심으로 회전모멘트도 평형을 이루면서 회전하고 있는 것이다. 이때 외부에서 관측되는 세탁통의 진폭은 일정하게 관측되고, 그 운동 형태는 Fig. 3과 같이 세탁통의 회전 중심축이 세탁기 중심을 향하는 경우와 외부를 향하는 경우이다. 이러한 운동형태의 차이는 액체밸런서의 액체량에 따라

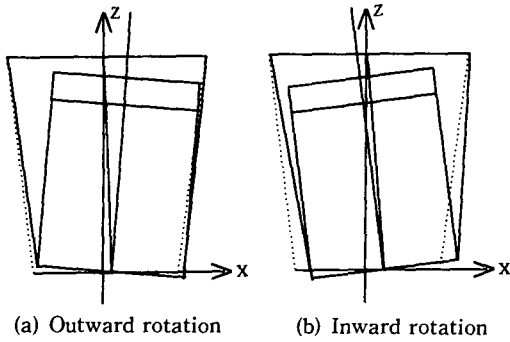


Fig. 3 Steady state rotation shapes of washing tube

보정력의 한계가 있기 때문이다.

세탁통 하단의 스프링 지지면의 모멘트 평형은 불평형 질량에 의한 모멘트와 액체밸런서 편심 액체량에 의한 모멘트와 세탁통 하부의 스프링에 의해 세탁통의 기울어진 각도에 비례하는 모멘트의 합으로 이루어진다. 액체밸런서 내의 액체의 편심에 의한 질량(M_i)의 분포를 X-Z 평면에 놓인 상당 집중 질량(M_{eff})으로 가정하고 스프링 상수(K)를 가정하고 모멘트와 힘의 평형식을 구한다.

(1) 내부지향 회전운동 ($\beta_x > 0$)

$$\begin{aligned} M_u R_u \varphi_s^2 H_u + 2K(\beta_x + \frac{H_t}{R_o} \tan(\theta_o) \theta_x) R_o^2 \\ = M_{eff} R_b \varphi_s^2 H_b \end{aligned} \quad (23)$$

$R_u \cong R_o$ 이므로,

$$\beta_x = (M_{eff} H_b - M_u H_u) \frac{R_u \varphi_s^2}{2KR_o^2} - \frac{H_t}{R_o} \tan(\theta_o) \theta_x \quad (24)$$

$$\begin{aligned} M_u R_u \varphi_s^2 - M_{eff} R_b \varphi_s^2 = M_u R_u \varphi_s^2 \left(1 - \frac{H_u}{H_b}\right) \\ - 2 \frac{K}{H_b} (R_o^2 \beta_x + R_o H_t \tan(\theta_o) \theta_x) \end{aligned} \quad (25)$$

(2) 외부지향 회전운동 ($\beta_x < 0$)

$$\begin{aligned} M_u R_u \varphi_s^2 H_u = 2K(\beta_x - \frac{H_t}{R_o} \tan(\theta_o) \theta_x) R_o^2 \\ + M_{eff} R_b \varphi_s^2 H_b \end{aligned} \quad (26)$$

$R_u \cong R_o$ 이므로,

$$\beta_x = (M_u H_u - M_{eff} H_b) \frac{R_u \varphi_s^2}{2KR_o^2} + \frac{H_t}{R_o} \tan(\theta_o) \theta_x \quad (27)$$

$$M_u R_u \varphi_s^2 - M_b R_b \varphi_s^2 = M_u R_u \varphi_s^2 \left(1 - \frac{H_u}{H_b}\right)$$

$$- 2 \frac{K}{H_b} (-R_o^2 \beta_x + R_o H_t \tan(\theta_o) \theta_x) \quad (28)$$

세탁통의 회전이 정상상태에 도달되기 이전에는 현가장치의 진자운동은 불평형 질량에 의한 원심력과 액체밸런서에 의한 보정력의 차이에 의해 가진 되고, 세탁통의 회전운동은 불평형 질량에 의한 원심력의 모멘트와 액체밸런서에 의한 보정력의 모멘트와 세탁통 하단의 스프링에 의한 모멘트에 의해 가진 된다.

반경 R_b 위치에 집중 상당 질량(M_{eff})이 초기의 X축으로부터 각도 θ_b 에 있다고 가정하면 앞절의 M_i 와의 관계는 다음과 같다.

$$0 = \sum M_i \sin(\theta + \theta_b) \quad (29)$$

$$M_{eff} = \sum M_i \cos(\theta + \theta_b) \quad (30)$$

정상상태의 경우는 액체밸런서의 중심을 지나는 가상선에 대하여 대칭이므로 식(29)를 만족하는 θ_b 를 손쉽게 계산할 수 있다. 한편 식(30)에서 상당 집중 질량을 구할 수 있다. 그러나 과도 상태의 경우는 좌우 대칭이 아니므로 수치계산을 하여야 한다.

3. 컴퓨터 시뮬레이션

본 연구에서는 세탁기의 크기를 결정하는 중요한 설계 자료인 세탁통 진폭 등의 크기를 예측하기 위하여 실험으로 구한 Table 1의 표준조건을 이용하여 세탁기 운동현상을 시뮬레이션하였다. Table 1의 조건중 스너버 스프링의 스프링상수는 하중을 가하여 변형량을 구하여 결정하였고 스너버의 감쇠계수는 스너버 한쪽 끝을 고정하고 다른 끝을 4 mm/sec의 속도로 당기면서 걸리는 힘을 구하여 결정하였다. 세탁기의 진폭은 세탁통 하단의 스프링 지지면의 최대진폭과 그 위에 놓여진 세탁통의 회전을 고려한 액체밸런서 최상면의 최대진폭을 구하였다.

3.1 고유진동수 해석

Table 2은 앞장에서 유도한 운동방정식에서 구한 고유진동수와 ANSYS를 이용하여 세탁기 현가장치를 모델링하여 구한 공진주파수를 정리하였고 Fig. 4에 고유모드를 나타내었다. ANSYS에서 구한 고유진동수와 고유모드가 잘 일치하므로 세탁통

Table 1 Main parameters

Main parameters	Physical amount
Z	0.59 m
H _t	0 m
H _u	0.1 m
H _b	0.51 m
R _t	0 m
R _u	0.24 m
R _b	0.24 m
R _o	0.288 m
θ _o	6.2 deg.
M _t	28 kg
M _u	0.2 kg
∑M _i	1.4 kg
I _{xo}	1.874 kgm ²
I _{yo}	1.834 kgm ²
K ₁ ,K ₂ ,K ₃ ,K ₄	2646 N/m
C ₁ ,C ₂ ,C ₃ ,C ₄	54 N sec/m

Table 2 Natural frequency of washing machine

Natural modes	Analytic solutions	Ansys solutions
1st Mode	0.6500 Hz	0.6256 Hz
2nd Mode	0.6501 Hz	0.6276 Hz
3rd Mode	2.2259 Hz	2.2387 Hz
4th Mode	2.2454 Hz	2.2501 Hz

에 대한 운동방정식이 실제 세탁통의 거동을 잘 나타내고 있다고 판단할 수 있다. 1차와 2차 고유진동수가 서로 다른 것은 X축과 Y축의 관성모멘트 값이 다르기 때문이다. 3차와 4차 고유진동수도 같은 이유로 약간의 차이가 있다. 그러나 ANSYS를 이용하는 경우는 질량이나 액체벨런서 보정력의 시간적 변화를 고려한 해석이 곤란하므로 시간에 대하여 질량 및 감쇠 값이 일정한 경우에 비교하였다.

그러나 실제의 세탁통의 운동을 해석하기 위해서

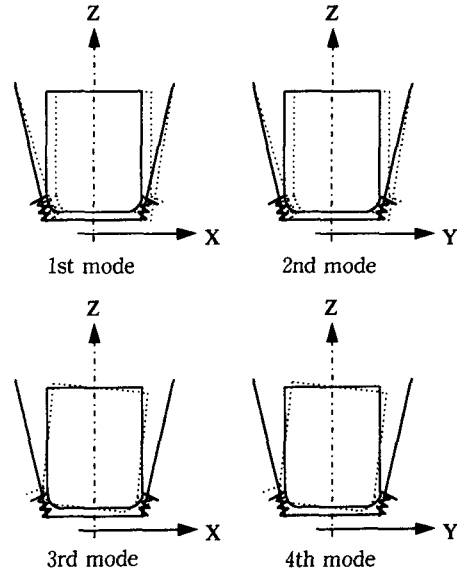


Fig. 4 Vibration modes of washing machine

는 질량 변화에 따른 등가질량행렬 또는 등가감쇠행렬의 각 요소 값이 시간에 따라 변하는 경우를 고려할 수 있는 시뮬레이션방법이 제시되어야 한다.

3.2 과도응답 시뮬레이션

세탁통의 회전운동은 정지된 상태에서 회전하기 시작하여 과도응답 상태를 거쳐 정상상태로 된다. 실제의 세탁기는 정지상태에서 역회전, 다단계의 가속 등의 저 진동을 위한 운전을 하며 정상상태에 도달되도록 되어 있다. 본 연구에서는 세탁통의 동특성을 파악하기 위해 세탁통의 회전속도를 근사적으로 다음의 식(31)로 가정하였다. 식(31)는 6.5초 이후에는 이미 정상상태의 회전수의 90%에 근접되는 초기의 회전가속도는 크나, 점차 회전가속도가 없어지는 운동형태가 된다.

$$\begin{aligned} \dot{\varphi} &= \dot{\varphi}_s \sin\left(\left(\frac{\pi}{2T_s}\right)t\right) & t < 9\text{초} \\ &= \dot{\varphi}_s & t \geq 9\text{초} \end{aligned} \quad (31)$$

여기서, $\dot{\varphi}_s = 670 \text{ RPM}$

$$T_s = 9\text{초}$$

3.2.1 불평형 질량의 영향

세탁통의 질량 변화가 없는 경우의 불평형 질량의 변화에 따른 과도 응답특성의 변화를 시뮬레이

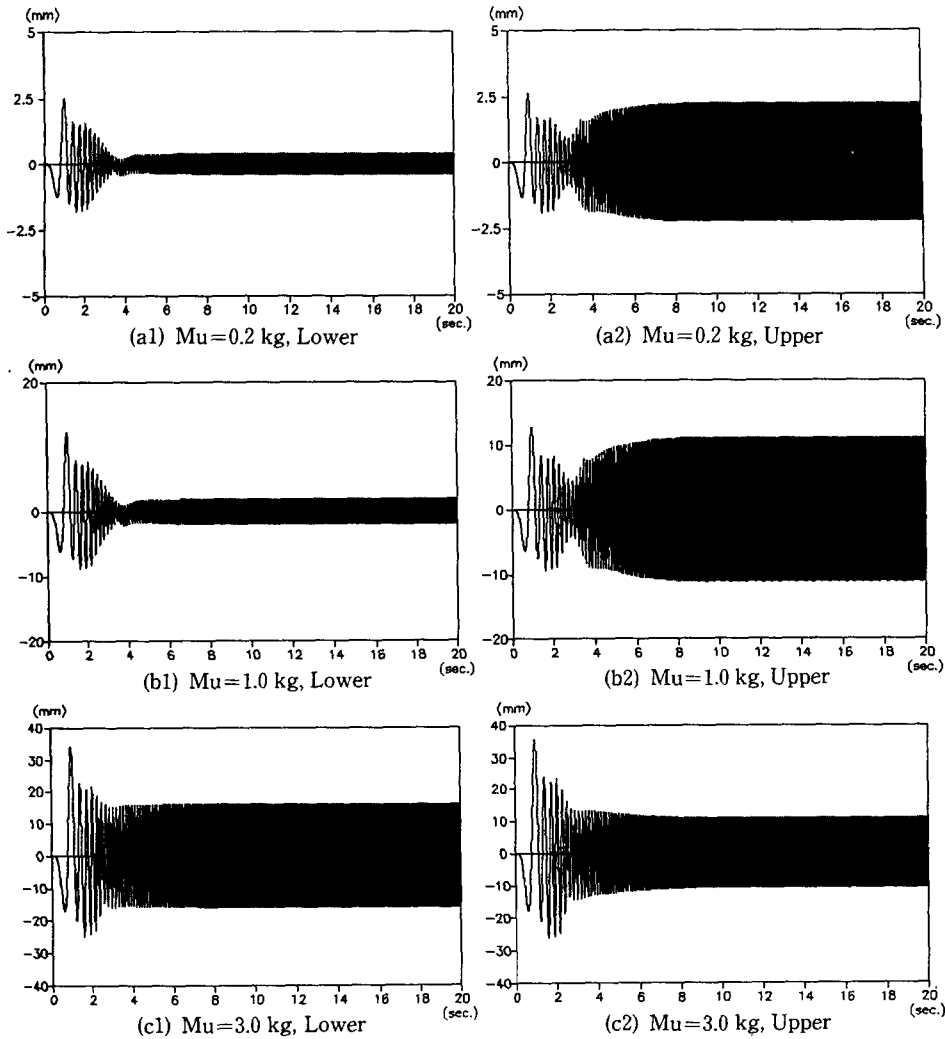


Fig. 5 Transient response of washing machine in Y-Z plane

선하여 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5의 각 경우는 불평형 질량이 증가함에 따라 스프링 지지면과 액체밸런서 설치 최상면의 최대진폭이 커짐을 보여주고 있다. 이는 식(18)에 주어진 바와 같이 외력이 불평형 질량이 커짐에 따라 커지기 때문이다. Fig. 5(a)는 표준상태의 과도응답 특성으로 공진주파수를 지날 때 최대의 진폭을 가지며 액체밸런서 면의 최대진폭이 스프링 지지면의 최대진폭보다 크다. 이는 식(29)의 외부지향 회전 운동의 경우이다. Fig. 5(b)는 Fig. 5(a)와 비교하여 진폭의 크기를 제외하고 나머지 특성은 매우 비슷하다. Fig. 5(c)의 경우는 앞의 두 경우와 다른 특성을 나타내고 있다. 이러한 특성은 액체밸런서의 보정

능력을 넘는 불평형 질량이 가해진 경우로서, 내부지향의 회전운동을 하고 있다. 이러한 차이점은 X-Y평면에서의 세탁통의 중심 궤적을 나타낸 Fig. 6(a), (b)와 (c)를 비교하면 세탁통의 진동 특성을 쉽게 구별할 수 있다. 이러한 차이는 불평형 질량의 크기에 따라 정상상태에서 Fig. 3의 중심축 기울기에 영향을 주는 것이다.

불평형 질량이 커짐에 따라 세탁통의 운동이 진폭이 커짐과 동시에 외부지향에서 내부지향 회전운동으로 변화됨을 알 수 있다. 이는 액체밸런서의 보정 한계를 넘은 것을 의미한다. Fig. 7은 정상상태에서 액체량 변화에 따른 액체밸런서 면의 최대진폭과 스프링 지지면의 최대진폭 비를 불평형 질

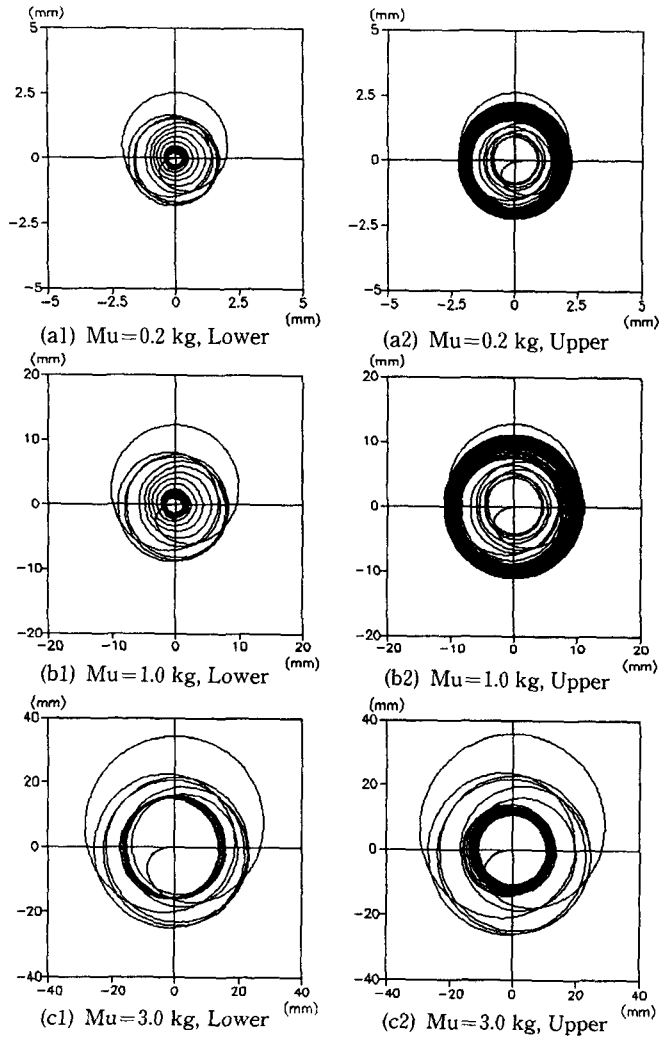


Fig. 6 Transient response of washing machine in X-Y plane

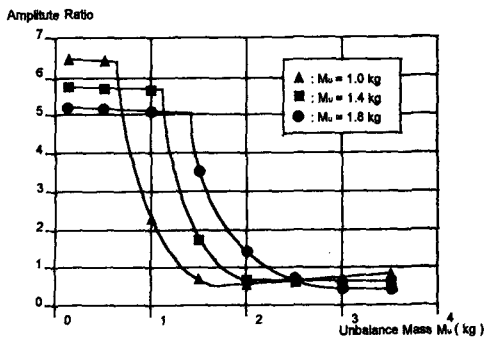


Fig. 7 Amplitude ratio (upper amplitude/lower amplitude) in steady state

량 크기에 따라 나타낸 것이다. 당연히 액체량이 클수록 큰 불평형 질량을 보정할 수 있음을 나타내고 있으며, 액체밸런서의 보정 범위를 나타내는 지표로 사용할 수 있다.

3.2.2 액체밸런서의 영향

세탁통의 액체밸런서가 없는 강제만의 운동을 편심 질량 0.2 kg으로 가정하고 Fig. 8에 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

이 경우에 진동 특성은 액체밸런서에 관계없이 공진주파수 부분을 지날 때 진폭이 크게 나타났으나, 액체밸런서가 없는 경우는 100 RPM 이상의

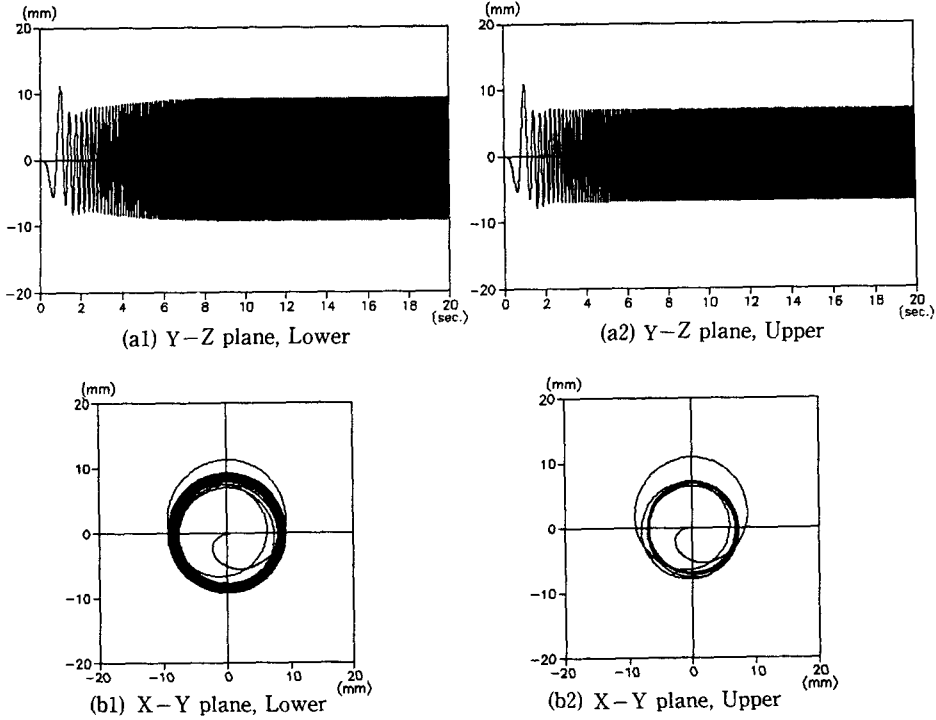


Fig. 8 Transient response without liquid balancer

세탁통 회전 시 편심 질량에 의한 원심력을 보정 시키지 못하므로 진폭이 커지게 된다. 이는 액체밸런서의 역할이 100 RPM 이상에서 작용하고 있음을 나타낸다. 이 경우 세탁통 상단의 진동이 하단의 진폭보다 큰 내부 지향 회전운동 형태가 되며, 이는 Fig. 6(c)와 Fig. 8(b)를 비교하여 보면 세탁통 중심의 궤적이 유사함을 알 수 있다. 이상의 결과는 액체밸런서가 내부 지향 회전운동과 외부 지향 회전운동을 결정하는 역할을 함을 알 수 있다. 액체밸런서가 불평형 질량과 동일 평면에 있는 경우는 세탁통에 모멘트 발생없이 불균형력을 상쇄시킬 수 있다.⁽¹⁾ 그러나 실제의 경우 불평형 질량의 위치가 일정하지 않으므로 항상 액체밸런서와 동일 위치에 놓는 것은 불가능하다.

3.2.3 감쇠계수의 영향

감쇠계수 값에 따라 세탁통의 진동특성 변화를 불평형 질량의 값을 1kg으로 가정하고 표준조건의 감쇠계수와 비교하여 Fig. 9에 나타내었다.

일반적으로 감쇠계수가 커지면 진폭이 작아지나, Fig. 9(b)의 액체밸런서 최상면의 경우는 감쇠계수

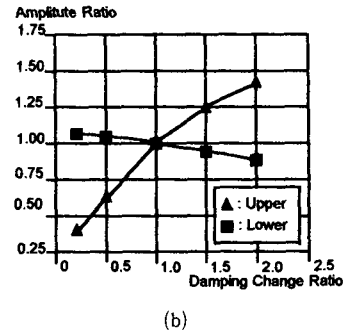
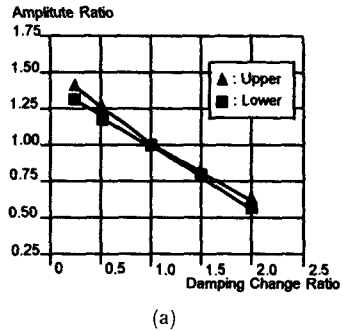


Fig. 9 The variation of amplitude ratio due to damping changes

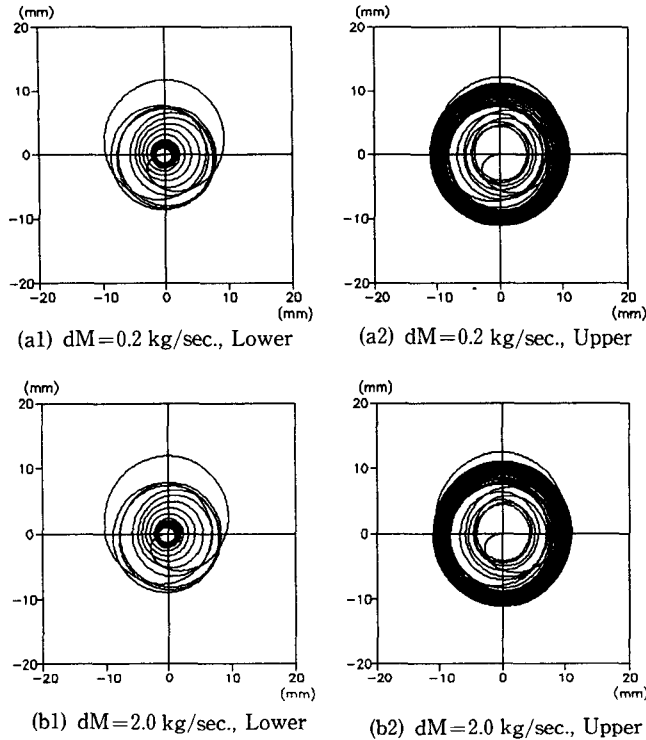


Fig. 10 Transient response with dehydration

가 커지면 진폭이 커지는 것을 나타내고 있다. 감쇠가 커지면 진자운동의 진폭도 작아지고 세탁통 하단의 스프링 지지면을 중심으로 한 회전운동의 진폭도 작아진다. 그러나 외부지향 회전운동의 경우 현가장치의 진자운동 폭이 상대적으로 더 많이 줄어들어서 결과적으로 액체밸런서의 최상면의 진폭은 커진다. 즉 Fig. 3 (b)에서 Z축과 스프링 지지면 중과의 거리는 가까워지고, Z축과 액체밸런서 중심과의 거리는 좀더 멀어지는 것이다.

3.2.4 탈수의 영향

탈수의 경우 세탁통 질량이 감소하며 세탁통이 회전하므로 질량감소에 의한 등가 질량행렬과 등가감쇠행렬을 구하여 과도응답을 구하여야 한다. 세탁통의 총 질량(M_t)은 세탁통 자체 질량(M_t)과 세탁수 질량(M_w)의 합에서 단위 시간당 탈수 질량(dM)과 시간의 곱을 뺀 값이며 그 관계는 식(32)로 표시된다.

$$M_t = M_o + M_w - dMt \quad (0 < t < M_w/dM)$$

$$= M_o \quad (0 > = M_w/dM) \quad (32)$$

시뮬레이션 조건은 $M_o=28$ kg, $M_w=2$ kg로 하

고 $dM=0, 2$ kg/sec., 2 kg/sec.의 2 경우를 가정하여 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

세탁통의 질량이 감소하는 경우 식(5)의 M_t 값이 시간에 따라 변하므로 식(13)의 Lagrange 운동방정식에 대입하고 정리하면 식(16)의 등가감쇠행렬 $[C]$ 값이 변하게 된다. 물론 등가질량행렬 $[M]$ 값도 변하는 비선형 운동이 된다.

4. 세탁기 진동실험

4.1 실험장치 및 방법

시뮬레이션 결과의 유용성을 살펴보기 위하여 세탁통의 진동측정을 수행하였다. 세탁통의 진동 측정을 쉽게하기 위해 Fig. 11과 같이 세탁기의 케이스를 제거하고 현가장치를 철 구조물에 설치하였다.

현가장치의 고유진동수를 실험적으로 구하기 위하여 세탁통의 회전을 정지상태에서 점차 높여가면서 세탁통의 진폭을 측정하여 공진주파수를 구하였다. 이때 사인함수와 같이 연속적으로 회전속도를 높이는 경우에는 3차와 4차 진동 모드의 공진

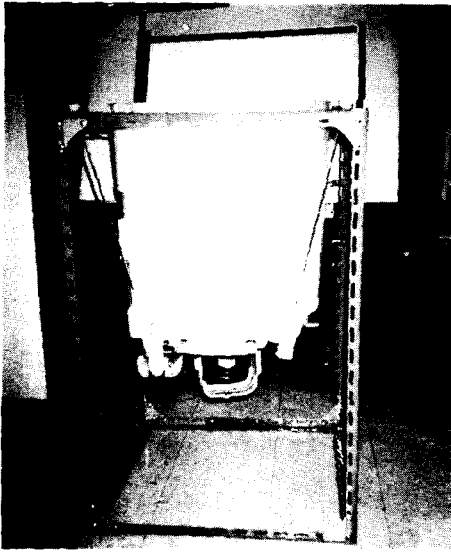


Fig. 11 Suspension system of washing machine for experiment

주파수가 구별되지 않아 임의의 회전수에서 정상상태에 도달하게 한 후 진폭을 측정 기록하였다. 액체밸런서의 효과를 파악하기 위한 실험으로 0.2 kg의 불평형 질량을 세탁통 내의 스프링 지지면 10 cm 높이에 붙이고 세탁통을 운전하여 정상상태까지의 과도응답 특성을 기록하였다.

4.2 측정계 및 데이터 처리

Fig. 12은 본 연구의 측정 장치 구성도이다.

세탁통의 회전을 쉽게 조정하기 위해 인버터 위상제어기를 사용하였다. 플라스틱 재질의 세탁통의 진동을 측정하기 위하여 세탁통 표면에 금속판을 붙이고, 비교적 큰 변위를 직접 측정할 수 있는 비접촉식 갭센서를 이용하였다. 기록은 갭센서의 출력을 직접 기록기에 나타내거나, AD변환기를 이용하여 PC에 저장하였다. 측정된 데이터는 세탁통이 정지상태에서 정상상태에 도달하기까지의 과도상태의 진동 기록이므로 단순한 푸리에 변환을 이용한 해석은 행하지 않고 시간영역에서의 진폭만을 기록하였다.

4.3 실험결과 및 고찰

4.3.1 세탁기 현가장치의 고유진동수

Fig. 13에 불평형 질량이 0.2 kg인 경우의 진폭의 변화를 기록하였다.

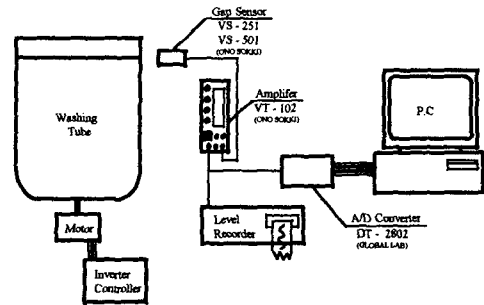


Fig. 12 Experiment setup

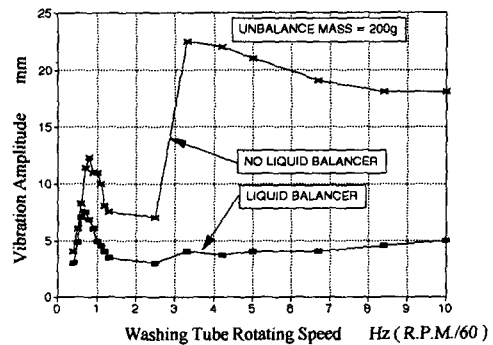
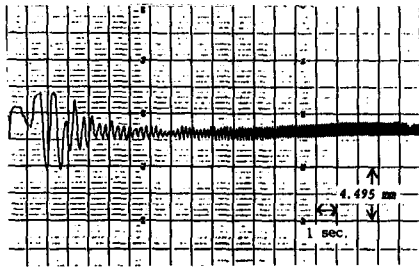
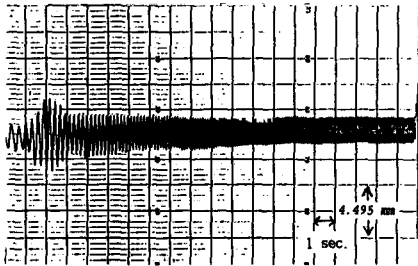


Fig. 13 Vibration amplitude by sine sweep test

Table 2의 해석결과와 실험결과가 1, 2차 모드는 비교적 잘 일치하고 있으나 3, 4차 모드는 약간의 차이가 있다. 액체밸런서가 부착된 경우는 진폭이 세탁통 회전속도에 따라 증가되어 0.6 Hz 근처에서 최대치를 기록하고 그 크기가 줄어들어 특별한 최대 점을 찾을 수 없다. 그러나 액체밸런서가 미부착된 경우는 0.7 Hz 근처에서 최대점이 나타나고 다시 2.5 Hz 이후에 다시 최대점이 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 액체밸런서가 작동되기 이전의 공진주파수는 뚜렷이 나타나지만, 액체밸런서가 작동되어 불평형 질량에 의한 원심력과 공진에 의한 진동 변위의 증가도 함께 보정을 하는 경우 공진이 없는 것같이 판단된다. 액체밸런서가 없는 경우 고유진동수가 해석결과보다 다소 높은 것은 실험장치에 따른 실험 값의 오차와 해석 모델의 자유도수에 따른 모델의 정확도와 액체밸런서 자체의 댐핑 역할 등이 원인으로 생각된다. 좀더 정밀한 실험을 위하여서는 3 Hz미만의 저 주파수를 0.1 Hz 이하의 분해능을 갖는 실험장치와 액체밸런서 자체의 감쇠효과를 측정할 수 있는 실험장치가 필요하다. 한편 실험에서 2개의 고유진동수만 나타난



(a) Measuring point : lower part of spin-basket



(b) Measuring point : upper part of spin-basket

Fig. 14 Transient response by experiment

것은 일반적으로 X축과 Y축의 물성치가 서로 비슷하여 1,2차 고유진동수의 3,4차 고유진동수의 차이가 거의 없기 때문이다.

4.3.2 과도응답 특성

Fig. 14는 연속 운전시 세탁통의 진폭을 측정함으로써 Table 1의 조건으로 시뮬레이션한 경우와 그 경향이 잘 일치하고 있다.

실험결과에서 진동이 매우 낮은 주파수의 성분 값 위에 세탁통 진동이 합쳐진 형태로 나타나고 있다. 여기서 매우 낮은 상태의 주파수는 측정을 위해 구성된 철구조물과 관계된 것으로 추정된다. 그러나 스프링 지지면의 진동의 과도상태의 최대진폭과 정상상태의 진폭비가 잘 시뮬레이션의 경우와 일치하고 있다. 액체밸런서 최상면의 진폭은 시뮬레이션과 같이 과도상태에서 공진점을 지나며 최대진폭이 생겼다가 줄어들어 다른 최대점이 없이 정상상태에 도달된다. 그러나 최대진폭을 지난 다음의 진폭이 줄어드는 형태가 시뮬레이션과 차이가 있는 것은 주어진 스너버의 감쇠계수가 빠르게 움직이는 운전상태에서의 감쇠계수와 다른 것으로 추정된다.

5. 결 론

세탁기의 진동 시뮬레이션과 실제 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 세탁기 현가장치의 4자유도계 모델링이 X-Y 평면에서 세탁통의 진동해석에 유용함을 보였다.
- (2) 과도상태에서의 액체밸런서 내의 액체 분포를 유체 정역학 문제로 가정한 세탁통의 진동해석이 유용함을 보였다.
- (3) 스프링 지지면의 최대진폭이 액체밸런서 최상면 최대진폭보다 큰 경우는 액체밸런서의 효과가 더 이상 없는 것으로 액체밸런서의 성능 평가의 기준으로 사용 가능하다.
- (4) 액체밸런서의 보정 한계를 넘는 불평형 질량이 있는 경우, 세탁기의 현가장치의 감쇠계수를 높이면 액체밸런서 최상면의 최대진폭이 증가된다.
- (5) 세탁통의 질량변화에 의한 진동특성의 변화는 무시할 수 있다.

참고문헌

- (1) Ernest, Thearle. 1950, "Automatic Dynamic Balancers, Part 2," *Machine Design*, Oct., pp. 103.
- (2) 巽尙生, 1985, "전자동 세탁기용 신 액체밸런서," *東芝 Review*, 제40권, 제9호, 東芝株式會社, pp. 755
- (3) 정경렬, 임무생, 1993, "세탁기용 강제 현가 시스템의 동특성 해석을 위한 전산 시뮬레이션," *한국소음진동공학회지*, 제3권, 제1호, pp. 65.
- (4) Peng, Zuoxin. 1991, "A Study of the Vibration of a Fully Automatic Washer and the Optimizing of the Structure Parameters," *Proceedings of 42nd Annual International Appliance Technical Conference*, pp. 545
- (5) 이주형, 1993, "편심회전체의 동역학적 모델링에 관한 연구," *한양대학교 대학원 석사학위논문*
- (6) Cyril, M. Harris. 1961, *Third Edition Shock And Vibration Handbook*, McGRAW-Hill Book Company, pp. 30~26.
- (7) 박관용, 류재철, 1993, *세탁기 진동 연구보고서*, (주)금성사 생활시스템연구소