

< 논 문 >

# 펄세이터형 세탁 시스템의 진동 해석

## Vibration Analysis of a Pulsator Type Washing System

이신영\* · 강주석\*\* · 윤중락\*\* · 이장무\*\*\* · 윤구영\*\*\*\* · 김남권\*\*\*\*\*

S. Y. Lee, J. S. Kang, J. R. Yun, J. M. Lee, K. Y. Yun and N. K. Kim

(1996년 11월 11일 접수 ; 1997년 3월 19일 심사완료)

### ABSTRACT

Recently washing machines are to be in lower vibration and lower sound because of better environment. Vibration problems in washing machines occur in both washing mode and spinning mode, but vibration in spinning mode becomes main problem because of its high rotating speed and continuity. Vibration while spinning is mainly due to rigid body motion of total washing system which includes suspending rods, washing bath, spinning bath, and gear sets. In this study, some researches were done in order to analyze the rigid body motion of washing system and flexible vibration of spinning bath. A basic mathematical model was established, and the effect of position of salt water and shape change of salt water case were considered. And the effect of lengths of suspending rods, attaching angles, vertical and horizontal position, stiffness of spring on the change of vibration were also considered. To identify the effect of salt water on vibration, some measurements were done. When salt water was positioned at upper part, the effect was most and this coincides with the tendency of simulation.

### 1. 서 론

최근 들어 소비 문화의 고급화와 안락한 환경의 추구로 인하여 가전제품의 저진동/저소음화가 필연적으로 대두되고 있다. 세탁기에 있어서도 우수한 세탁력과 세탁물 엉킴의 완화, 사용의 편이성 등 기존 세탁 시스템의 기본 성능 외에 저진동/저소음의 성능이 중요성을 더해 가고 있다. 이와 같은 가정용 세탁기의 국내외적인 상품의 경쟁력을 제고하기 위해서는 세탁 시스템의 진동 및 소음의 원인을 규명하고 분석할 필요가 있다. 세탁기의 진동 문제는 세탁과 탈수시 모두 발생하지만 탈수시의 진동이 구동

회전수가 높고 연속적이기 때문에 주로 탈수시의 진동이 주된 문제가 된다.

국내에서 많이 사용되고 있는 펄세이터형(pulsator type) 세탁기에 있어서 현가봉은 세탁조 및 탈수조 등 전체 세탁 시스템을 세탁기의 외상과 연결하여 지지한다. 전체 세탁 시스템은 현가봉에 매달려 3차원 강체 운동을 하며 현가봉에 의해 운동의 변위와 각도가 구속되어 있는 것으로 볼 수 있다. 이 때 설계시 존재하는 모터와 기계부 등의 불평형량과 세탁물의 불평형 상태가 탈수운동의 회전에 의해 가진원으로 작용한다. 이러한 가진원의 가진 주파수는 진동 시스템의 고유진동수에 비해 매우 높기 때문에 현가봉의 강성과 감쇠의 조정으로는 한계가 있다. 이를 해결하기 위하여 세탁조의 상단부에 염수통을 부착하여 동적 발란서(balancer) 역할을 하도록 한다. 그러므로 이와 같은 진동 시스템의 분석과 염수의 효과 분석이 세탁기의 진동저감 대책을 위해서 필수적인 과정이다.

본 논문에서는 펄세이터형 세탁 시스템의 강체 운

\*정회원, 군산대학교 공과대학 기계공학부

\*\*서울대학교 대학원 기계설계학과

\*\*\*정회원, 서울대학교 공과대학 기계설계학과

\*\*\*\*정회원, 홍익대학교 공과대학 기계설계학과

\*\*\*\*\*대우전자(주) 회전기연구소

동을 분석하기 위하여 수학적인 모델링을 이용한 해석적인 방법과 실험을 수행하였다. 강체 운동에서 진동저감 효과가 지배적인 것으로 추정되는 염수에 대해서 동적 발란서 역할을 수학적으로 모델링 하였다. 세탁 시스템의 강체 운동을 해석적으로 분석하기 위하여 현가봉의 길이, 부착 각도, 스프링의 강성과 부착부의 감쇠 및 세탁 시스템의 관성 등을 설계 변수로 가지는 운동방정식을 유도하였다. 유도된 운동방정식은 수치해석을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션이 가능하게 하여 설계시 진동 형상을 미리 예측할 수 있게 하였다. 염수에 의한 진동저감 효과를 실험을 통해서 알아보기 위해 염수를 제거한 상태와, 염수의 위치를 세탁조의 하단부와 중간 위치, 상단부로 위치를 이동해 가면서 진동 형상을 측정하였다.

## 2. 세탁 시스템의 강체모드 진동 해석

### 2.1 염수의 모델링

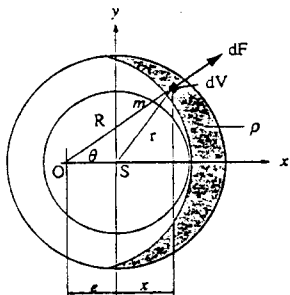
세탁조가 정상 상태로 회전할 때 염수에 의하여 작용하는 원심력은 다음과 같이 계산할 수 있다<sup>(1)</sup>. Fig. 1은 염수의 모델링을 나타낸다. O점에서 미소 부분 dV까지의 거리를 R이라고 하면 회전각속도 ω에 대해 미소 부분 dV의 원심력 dF는 식 (1)과 같이 계산될 수 있다.

$$dF = \rho R \omega^2 dV \quad (1)$$

x방향의 힘은

$$\begin{aligned} F &= \int dF \cos \theta = \int \rho R \omega^2 \cos \theta dV \\ &= \int \rho \omega^2 (e+x) dV \\ (\because R \cos \theta &= e+x) \\ &= \rho \omega^2 e \int dV + \rho \omega^2 \int x dV \end{aligned} \quad (2)$$

여기에서, 세탁조 중심으로부터 염수의 x방향



e : Eccentricity                      O : Center of rotation  
rho : Density of salt-water      S : Center of washing bath

Fig. 1 Modelling of salt-water

(centroid)까지의 거리를 c라고 하면,  $c = (\int x dV) / (\int dV)$ 임으로, 염수의 질량을 m이라고 하면,  $m = \rho \int dV$ 이고

$$F = \rho \omega^2 (e+c) \int dV = m \omega^2 (e+c) \quad (3)$$

식 (3)에서 진동변위 e에 의한 원심력을 제외한 염수 자체의 원심력은 도심 c에 의한 것이 된다. 따라서 염수를 밸런서 질량으로 모델링 하기 위해서는 도심 c를 구하여 질량이 부착된 것으로 보면 된다. 염수의 안쪽 표면은 회전 중심으로부터 항상 일정한 거리에 있으며, 정상 상태 회전시 염수에 작용하는 원심력이 매우 크므로 염수의 표면은 수직에 가깝게 된다. 이때 편심 e가 작은 경우와 아주 큰 경우에 대하여 각각 염수의 도심을 구할 수 있다. 염수통의 단면이 사각형일 경우 다음과 같은 방법으로 도심의 위치를 계산할 수 있다.

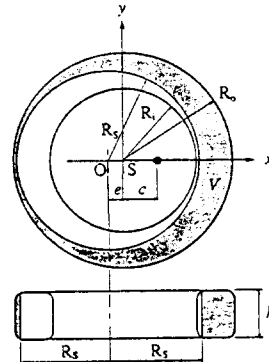
(a) 편심이 작은 경우는 Fig. 2와 같이 작도된다. 염수량이 염수통 체적의 50%라고 하면,

$$V = \frac{\pi}{2} (R_o^2 - R_i^2) h = \pi (R_o^2 - R_i^2) h \quad (4)$$

으로부터

$$\therefore R_s = \sqrt{\frac{R_o^2 + R_i^2}{2}}, \quad (\text{단, } e+R \leq R_o) \quad (5)$$

도심 거리 c는 다음 식과 같이 주어진다.



O : Center of rotation  
S : Center of washing bath  
R<sub>o</sub> : Outer radius of salt-water tube  
R<sub>i</sub> : Inner radius of salt-water tube  
R<sub>s</sub> : Distance from center of rotation to salt-water surface  
c : Centroid of salt-water from center of washing bath  
V : Volume of salt-water  
h : Height of salt-water

Fig. 2 Case with a small eccentricity

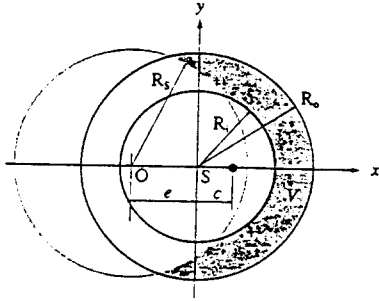


Fig. 3 Case with a big eccentricity

$$c = \frac{R_s^2 e}{R_o^2 - R_s^2} = \left( \frac{R_o^2 + R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} \right) e, \quad e \leq \bar{e} \quad (6)$$

여기에서  $\bar{e} = R_o - R_s = R_o - \sqrt{\frac{R_o^2 + R_i^2}{2}}$

(b) 편심이 큰 경우 ( $e \gg \bar{e}$ )는 Fig. 3과 같이 염수는 바깥쪽으로 완전히 몰리게 된다. 이 경우는 염수 전체가 바깥쪽 절반으로 이동한 것과 근사하므로 다음과 같이 도심을 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} c &= \frac{\int x dS}{\int dS} = \frac{2/3(R_o^3 - R_i^3)}{\pi/2(R_o^2 - R_i^2)} \\ &= \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{R_o^2 + R_o R_i + R_i^2}{R_o + R_i} = \bar{c} \quad (7) \end{aligned}$$

(a), (b)를 종합하면 다음과 같이 요약할 수 있다.

$$\begin{aligned} c &= ke, \quad e < \bar{e} \\ c &= \bar{c}, \quad e \gg \bar{e} \quad (8) \end{aligned}$$

즉, 일정한 편심 범위 내에서는 도심 거리는 편심  $e$ 의 일차함수가 되며, 편심이 커지면 도심 거리는 일정한 값을 갖게 된다. 이를 그래프로 나타내면 Fig. 4와 같이 된다. 편심에 대한 도심 거리의 기울기  $k$ 는 염수통의 설계 변경 즉 형상 변경에 의하여 변화시킬 수 있다.

## 2.2 세탁 시스템의 강제 운동에 대한 운동방정식 유도

Fig. 5의 세탁기 모델에 대하여 Lagrange의 운동방정식<sup>(2)</sup>을 사용하여 운동방정식을 유도한다. 우선 운동에너지는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} m_0 (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 \\ &+ \frac{1}{2} \{ (\dot{x} + l_1 \dot{\theta} + \dot{x}_1)^2 + (\dot{y} + \dot{x}_1 \theta + \dot{x}_1 \dot{\theta})^2 \} \quad (9) \end{aligned}$$

여기에서 불평형 질량의 위치  $x_1$ 은  $x_1 = r \sin \omega t$ 과 같다. 이 때,  $x$ 방향에 대한 Lagrange 운동방정식의

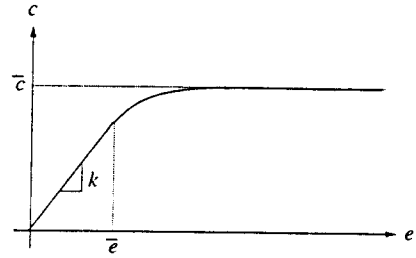


Fig. 4 Variation of centroid due to eccentricity

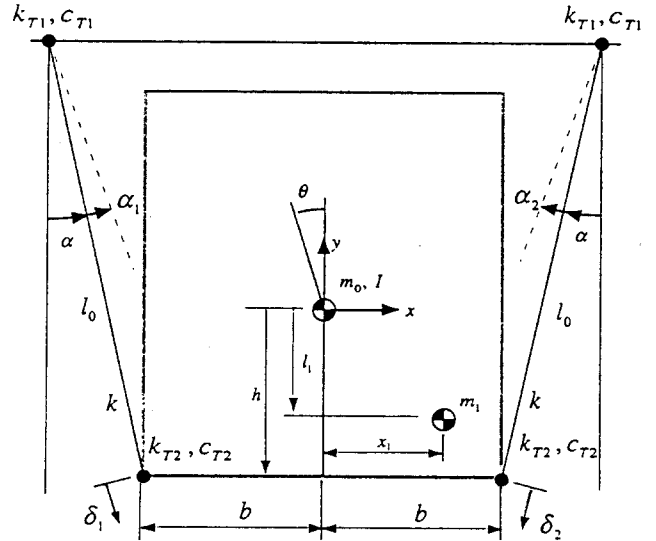


Fig. 5 Dynamic model of a washing machine

운동에너지에 관련된 항들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) &= (m_0 + m_1) \ddot{x} + m_1 l_1 \ddot{\theta} - m_1 r \omega^2 \sin \omega t \\ \frac{\partial T}{\partial x} &= 0 \quad (10) \end{aligned}$$

$y$ 방향에 대해서는 다음 식과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{y}} \right) &= (m_0 + m_1) \ddot{y} + (m_1 r \sin \omega t) \ddot{\theta} \\ &+ (2m_1 r \omega \cos \omega t) \dot{\theta} - m_1 r \omega^2 \theta \sin \omega t \\ \frac{\partial T}{\partial y} &= 0 \quad (11) \end{aligned}$$

$\theta$  방향에 대해서는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta} &= m_1 l_1 \ddot{x} + (m_1 r \sin \omega t) \ddot{y} \\ &+ (I + m_1 l_1^2 + m_1 r^2 \sin^2 \omega t) \ddot{\theta} \\ &+ (2m_1 r^2 \omega \sin \omega t \cos \omega t) \dot{\theta} \\ &+ (-m_1 r^2 \omega^2 \sin^2 \omega t) \theta \\ &- m_1 l_1 r \omega^2 \sin \omega t \quad (12) \end{aligned}$$

세탁기의 동력학 모델에서 위치 에너지는 중력에 의한 위치 에너지와 스프링에 의한 위치 에너지의 합으로 계산할 수 있다. 각각의 에너지를 정리하면 다음 식과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
 V &= V_g + V_k + V_{kT} \\
 V_g &= mgy + m_1gx_1\theta, \text{ where } m = m_0 + m_1 \quad (13) \\
 V_k &= \frac{1}{2}k(\delta_1 + \Delta)^2 + \frac{1}{2}k(\delta_2 + \Delta)^2 \\
 &\quad + \frac{1}{2}(2k)(\Delta - \cos \alpha \cdot y)^2 \\
 V_{kT} &= \frac{1}{2}k_{T1}(\alpha_1^2 + \alpha_2^2) \\
 &\quad + \frac{1}{2}k_{T2}\{(\alpha_1 - \theta)^2 + (\alpha_2 + \theta)^2\}
 \end{aligned}$$

여기에서 변위와 각변위에 관련된 계수들은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{static deflection } \Delta &= \frac{mg}{4k\cos \alpha} \\
 \delta_1 &= (\sin \alpha)x + (-\cos \alpha)y + (h \sin \alpha + b \cos \alpha)\theta \\
 \delta_2 &= (-\sin \alpha)x + (-\cos \alpha)y + (-h \sin \alpha - b \cos \alpha)\theta \\
 \alpha_1 &= \frac{1}{l_0}[(\cos \alpha)x + (\sin \alpha)y + (h \cos \alpha - b \sin \alpha)\theta] \\
 \alpha_2 &= \frac{1}{l_0}[(-\cos \alpha)x + (\sin \alpha)y + (-h \cos \alpha + b \sin \alpha)\theta] \quad (14)
 \end{aligned}$$

x 방향에 대한 Lagrange의 운동방정식의 항은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial V_g}{\partial x} &= 0 \\
 \frac{\partial V_k}{\partial x} &= (2k\sin^2 \alpha)x + 2k\sin \alpha(h \sin \alpha + b \cos \alpha)\theta \\
 \frac{\partial V_{kT}}{\partial x} &= \left\{ \frac{2(k_{T1} + k_{T2})\cos^2 \alpha}{l_0^2} \right\} x \\
 &\quad + \left\{ \frac{2(k_{T1} + k_{T2})\cos \alpha(h \cos \alpha - b \sin \alpha)}{l_0^2} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{2k_{T2}\cos \alpha}{l_0} \right\} \theta \quad (15)
 \end{aligned}$$

y 방향에 대한 Lagrange의 운동방정식의 항은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial V_g}{\partial y} &= mg \\
 \frac{\partial V_k}{\partial y} &= (4k\cos^2 \alpha)y - mg \\
 \frac{\partial V_{kT}}{\partial y} &= \left\{ \frac{2(k_{T1} + k_{T2})\sin^2 \alpha}{l_0^2} \right\} y
 \end{aligned} \quad (16)$$

θ 방향에 대한 Lagrange의 운동방정식의 항은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial V_g}{\partial \theta} &= m_1gr \sin \omega t \\
 \frac{\partial V_k}{\partial \theta} &= 2k\sin \alpha(h \sin \alpha + b \cos \alpha)x \\
 &\quad + 2k(h \sin \alpha + b \cos \alpha)^2 \theta \\
 \frac{\partial V_{kT}}{\partial \theta} &= \left\{ \frac{2(k_{T1} + k_{T2})\cos \alpha(h \cos \alpha - b \sin \alpha)}{l_0^2} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{2k_{T2}\cos \alpha}{l_0} \right\} x \\
 &\quad + \left\{ \frac{2(k_{T1} + k_{T2})(h \cos \alpha - b \sin \alpha)^2}{l_0^2} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{4k_{T2}(h \cos \alpha - b \sin \alpha)}{l_0} + 2k_{T2} \right\} \theta
 \end{aligned} \quad (17)$$

과 같이 계산된다.

세탁기의 동력학 모델에서 회전 감쇠(Rotational damping)를 고려하기 위하여 Rayleigh의 소산함수를 구한다.

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{1}{2}c_{T1}(\dot{\alpha}_1^2 + \dot{\alpha}_2^2) + \frac{1}{2}c_{T2}\{(\dot{\alpha}_1 - \dot{\theta})^2 + (\dot{\alpha}_2 + \dot{\theta})^2\} \\
 &= \frac{1}{2}\{c_{Txx}\dot{x}^2 + c_{Tyy}\dot{y}^2 + c_{T\theta\theta}\dot{\theta}^2 + 2c_{Txy}\dot{x}\dot{y} \\
 &\quad + 2c_{Tx\theta}\dot{x}\dot{\theta} + 2c_{Ty\theta}\dot{y}\dot{\theta}\} \quad (18)
 \end{aligned}$$

이것들로부터 감쇠 계수들은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 c_{Txx} &= \frac{2(c_{T1} + c_{T2})\cos^2 \alpha}{l_0^2} \\
 c_{Tyy} &= \frac{2(c_{T1} + c_{T2})\sin^2 \alpha}{l_0^2} \\
 c_{T\theta\theta} &= \frac{2(c_{T1} + c_{T2})(h \cos \alpha - b \sin \alpha)^2}{l_0^2} \\
 &\quad - \frac{4c_{T2}(h \cos \alpha - b \sin \alpha)}{l_0} + 2c_{T2} \\
 c_{Txy} &= c_{Ty\theta} = 0 \\
 c_{Tx\theta} &= \frac{2(c_{T1} + c_{T2})\cos \alpha(h \cos \alpha - b \sin \alpha)}{l_0^2} \\
 &\quad - \frac{2c_{T2}\cos \alpha}{l_0} \quad (19)
 \end{aligned}$$

위의 과정들을 종합하여 세탁기의 동력학 모델의 운동방정식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$M\ddot{X} + C_T\dot{X} + (K + K_T)X = F \quad (20)$$

여기에서 각 행렬들은 다음과 같다.

$$X = \{x \ y \ \theta\}^T \quad (21)$$

$$M = \begin{bmatrix} (m_0 + m_1) & 0 & m_1 l_1 \\ 0 & (m_0 + m_1) & m_1 r \sin \omega t \\ m_1 l_1 & m_1 r \sin \omega t & (I + m_1 l_1^2 + m_1 r^2 \sin^2 \omega t) \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$C_T = \begin{bmatrix} c_{11} & 0 & c_{13} \\ 0 & c_{22} & 0 \\ c_{13} & 0 & c_{33} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$c_{11} = \frac{2(c_{T1} + c_{T2}) \cos^2 \alpha}{l_0^2}$$

$$c_{13} = \frac{2(c_{T1} + c_{T2}) \cos \alpha (h \cos \alpha - b \sin \alpha)}{l_0^2}$$

$$- \frac{2c_{T2} \cos \alpha}{l_0}$$

$$c_{22} = \frac{2(c_{T1} + c_{T2}) \sin^2 \alpha}{l_0^2}$$

$$c_{33} = \frac{2(c_{T1} + c_{T2}) (h \cos \alpha - b \sin \alpha)^2}{l_0^2}$$

$$- \frac{4c_{T2} (h \cos \alpha - b \sin \alpha)}{l_0} + 2c_{T2}$$

$$K = \begin{bmatrix} (2k \sin^2 \alpha) & 0 \\ 0 & 4k \cos^2 \alpha \\ 2k \sin \alpha (h \sin \alpha + b \cos \alpha) & 0 \\ 2k \sin \alpha (h \sin \alpha + b \cos \alpha) & 0 \\ 0 & 2k (h \sin \alpha + b \cos \alpha)^2 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$K_T = \begin{bmatrix} k_{11} & 0 & k_{13} \\ 0 & k_{22} & 0 \\ k_{13} & 0 & k_{33} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$k_{11} = \frac{2(k_{T1} + k_{T2}) \cos^2 \alpha}{l_0^2}$$

$$k_{13} = \frac{2(k_{T1} + k_{T2}) \cos \alpha (h \cos \alpha - b \sin \alpha)}{l_0^2}$$

$$- \frac{2k_{T2} \cos \alpha}{l_0}$$

$$k_{22} = \frac{2(k_{T1} + k_{T2}) \sin^2 \alpha}{l_0^2}$$

$$k_{33} = \frac{2(k_{T1} + k_{T2}) (h \cos \alpha - b \sin \alpha)^2}{l_0^2}$$

$$- \frac{4k_{T2} (h \cos \alpha - b \sin \alpha)}{l_0} + 2k_{T2}$$

$$F =$$

$$m_1 r \omega^2 \sin \omega t$$

$$\left\{ \begin{array}{l} m_1 r \omega^2 \theta \sin \omega t - (2m_1 r \omega \cos \omega t) \dot{\theta} \\ m_1 l_1 r \omega^2 \sin \omega t - (2m_1 r^2 \omega \sin \omega t \cos \omega t) \dot{\theta} \\ + (m_1 r^2 \omega^2 \sin^2 \omega t) \theta - m_1 g r \sin \omega t \end{array} \right\} \quad (26)$$

### 2.3 세탁시스템에서의 염수모델링

Fig. 6을 통하여 앞에서 유도한 운동방정식에 염수의 효과를 적용할 수 있다. 염수통 중심의 x방향 변위인  $x_2$ 는 다음 식과 같다.

$$x_2 = e - x - l_2 \theta \quad (27)$$

염수통 중심으로부터 염수의 도심까지의 변위인  $c$ 는

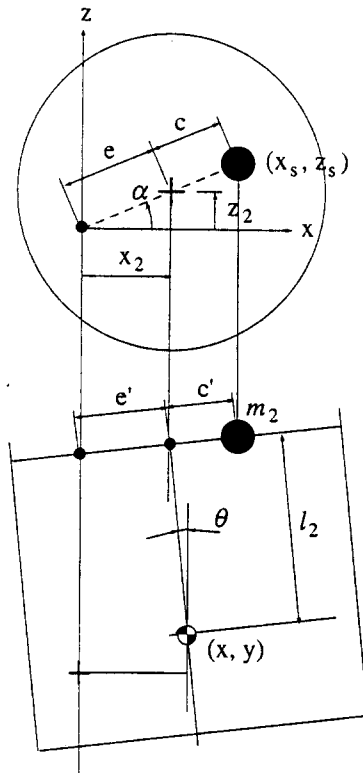


Fig. 6 Application of the effect of salt water

$c = f(e)$ 와 같이 편심  $e$ 의 함수이다. 염수가  $x$ 축으로부터  $\alpha$  만큼 회전한 위치에 있을 때  $x$ 방향으로의 영향을 계산하기 위하여  $x$ 방향의 정사영을 구하면 다음과 같다.

$$e' = e \cos \alpha, \quad c' = c \cos \alpha \quad (28)$$

그러므로  $c'$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$c' = c \cos \alpha = f\left(\frac{e'}{\cos \alpha}\right) \cos \alpha \quad (29)$$

식 (8)에 의하여  $c'$ 는 다음 식과 같이 계산된다.

$$c' = f(e') = \begin{cases} ke' & \left(\frac{e'}{\cos \alpha} < \bar{e}\right) \\ \bar{c} \cos \alpha & \left(\frac{e'}{\cos \alpha} \gg \bar{e}\right) \end{cases} \quad (30)$$

염수를 집중 질량  $m_2$ 로 나타내면, 미소 변위를 가정 한  $x, y, \theta$  방향의 변위는 각각 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x : m_2 (e' + c') &= m_2 (1 + k) x - m_2 (1 + k) l_2 \theta \\ y : m_2 y & \\ \theta : -m_2 (e + c') l + 2 &= -m_2 (1 + k) l_2 x \\ &+ m_2 (1 + k) l_2^2 \theta \end{aligned} \quad (31)$$

이것으로부터 식 (20)의 운동방정식에 다음 항을 추가함으로써 염수에 의한 관성의 영향을 고려할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} m_2(1+k) & 0 & -m_2(1+k)l_2 \\ 0 & m_2 & 0 \\ -m_2(1+k)l_2 & 0 & m_2(1+k)l_2^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} \quad (32)$$

2.4 시뮬레이션 결과

앞에서 유도한 운동방정식으로부터 수치해석을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 수치 적분은 Runge-Kutta 4차식을 이용하였다. 시뮬레이션 조건은 불평형 질량  $m_1=0.5 \text{ kg}$ 이 반경  $r=0.25 \text{ m}$ 에 위치한다고 가정하였다. 이 때 탈수 회전 각속도는 2초까지 회전수가 선형으로 증가하여 960 rpm으로 되고, 그 후에는 960 rpm으로 일정하게 유지된다고 가정하였다. Table 1은 시뮬레이션을 수행하기 위한 기본 데이터의 값과 각 데이터에 대한 설명을 보여주고 있다<sup>(3)</sup>. 기호들은 Fig. 2, Fig. 5, Fig. 6에 나타나 있다. 실제로 정상 상태로 회전되기 전까지의 세탁기의 구동 각속도는 그림과 다르지만 염수의 모델링이 정상 상태를 가정하였으므로 초기 구동 형

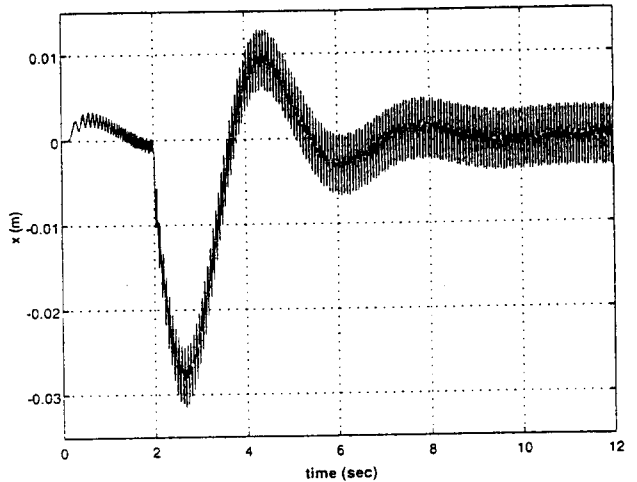


Fig. 7 Displacement in x direction

태는 큰 의미가 없다고 볼 수 있다.

Fig. 7은 x방향 변위를 12초 동안 시뮬레이션한 결과이다. 이것은 염수가 상단에 위치한 상태에서의 결과이다. 약 8초까지는 과도 상태로서, 자유 진동 모드의 영향이 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 y방향 변위를 12초 동안 시뮬레이션한

Table 1 Basic data for numerical simulation

| Parameter | Value   | Description                |
|-----------|---------|----------------------------|
| $m_0$     | 20.525  | 불평형질량과 염수질량을 제외한 세탁기 전체 질량 |
| $m_1$     | 0.5     | 불평형질량                      |
| $l_1$     | -0.249  | 세탁기 전체 질량에서 불평형질량까지의 수직 거리 |
| $I$       | 0.52716 | 세탁기 전체 질량의 관성              |
| $r$       | 0.25    | 불평형질량의 회전 반경               |
| $h$       | -0.149  | 현가봉 부착점에서 세탁기 전체질량까지의 수직거리 |
| $b$       | 0.3217  | 세탁기 중심에서 현가봉 부착점까지의 수평거리   |
| $\alpha$  | 0.13418 | 현가봉 부착 각도                  |
| $k$       | 2600.0  | 현가봉 스프링 계수                 |
| $c$       | 204.0   | 현가봉 감쇠 계수                  |
| $l_0$     | 0.555   | 현가봉 길이                     |
| $c_{t1}$  | 5.05    | 현가봉과 외상 사이의 회전감쇠비          |
| $c_{t2}$  | 2.12    | 현가봉과 저수조 사이의 회전감쇠비         |
| $k_{t1}$  | 7.071   | 현가봉과 외상 사이의 회전 강성          |
| $k_{t2}$  | 14.14   | 현가봉과 저수조 사이의 회전 강성         |
| $R_o$     | 0.32    | 염수통의 외측 반경                 |
| $R_i$     | 0.28    | 염수통의 내측 반경                 |

결과를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이  $x$ 축 방향의 변위와 비교할 때 그 운동을 무시할 수 있을 정도로 작게 나타났다. 이것으로부터 강체 진동 모델에서  $y$ 축 방향은 가진이 크게 되지 않음을 알 수 있다. 따라서 간단한 모델링에서는  $y$ 축 변위를 무시해도 될 것으로 보인다. Fig. 9는 회전 변위  $\theta$ 의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 과도 상태에서 약 0.9도까지 운동이 일어나는 것을 볼 수 있다. Fig. 10은 저수조 상단에서의  $x$ 축 방향의 변위를 나타낸다. 다음에 염수의 위치를 옮기면서 저수조 상단의 변위의 크기를 비교하여 보았다. 또한 염수통의 형상 변화가 진동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 각 경우에 대해서 저수조 상단 변위의 크기를 비교하여 보았다.

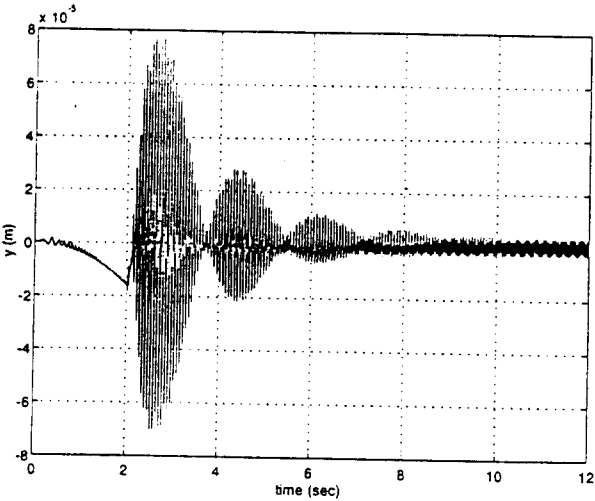


Fig. 8 Displacements in  $y$  direction

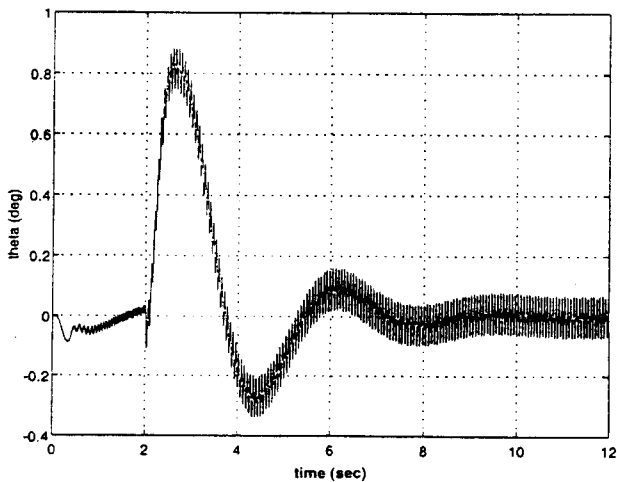


Fig. 9 Rotational displacements in  $\theta$  direction

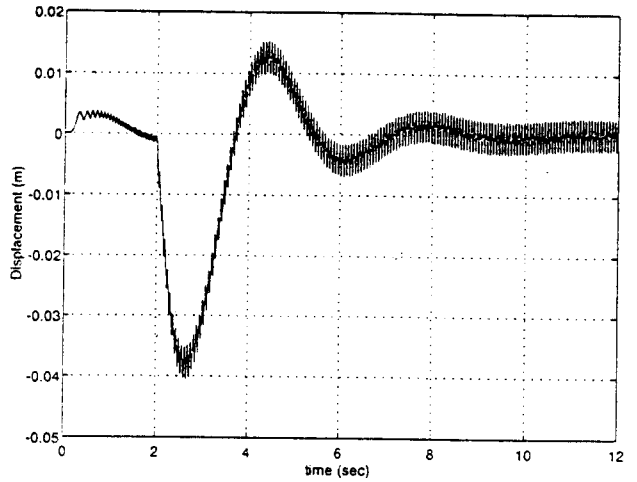


Fig. 10 Displacement in  $x$  direction at bath top

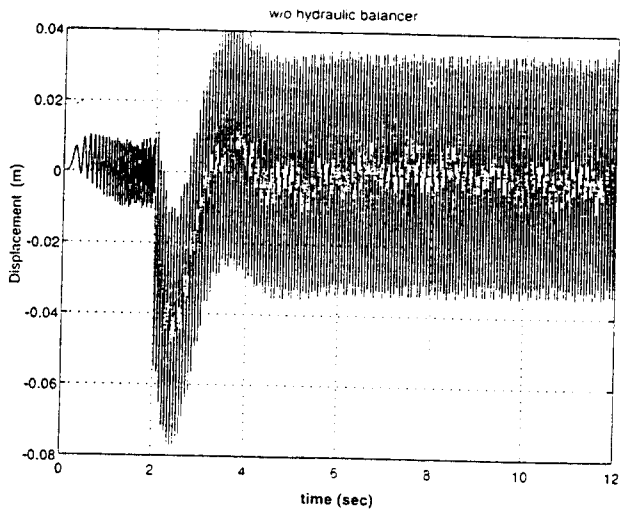


Fig. 11 Displacements of top without salt water

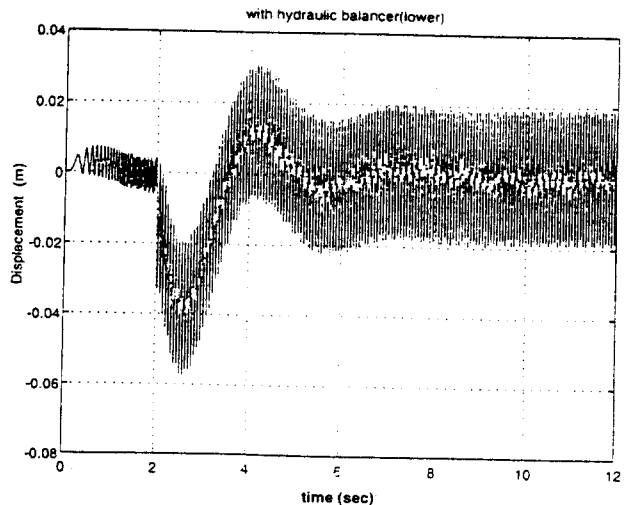


Fig. 12 Displacements of top with salt water positioned at bottom

(1) 염수의 위치 변화에 의한 시뮬레이션 결과 비교  
 염수의 위치에 따른 진동 형상의 차이를 비교하기 위하여 염수가 없을 때와, 염수의 위치가 현가봉이 저수조에 부착되는 위치인 하단부와, 원래의 위치인 상단부와, 중간 부분의 위치에서의 결과를 각각 비교하였다. Fig. 11은 염수가 존재하지 않을 때의 저수조 상단부의 변위를 보여준다. 염수가 없으므로 전체적인 관성이 줄어들어 감쇠 효과가 커져 정상 상태에 빨리 도달하는 것을 볼 수 있다. Fig. 12는 염수가 저수조 하단부에 위치할 때의 저수조 상단부의 변위를 나타낸다. 염수가 없을 때보다 진동의 크기가 줄어들음을 알 수 있다. Fig. 13은 염수가 중간 위치에 있을 때의 진동 형상을 나타낸다. Fig. 14는

원래의 염수 위치인 저수조 상단부에 염수가 위치할 때의 변위를 보여준다. Fig. 11~Fig. 14를 비교할 때 염수의 위치가 높아질수록 염수가 각변위에 미치는 영향이 크기 때문인 것으로 생각된다.

(2) 염수통의 형상 변화에 의한 시뮬레이션 결과 비교  
 앞에서 시뮬레이션한 데이터에서는 염수통은 내경 ( $R_i$ )과 외경 ( $R_o$ )이 각각 다음의 값일 때의 결과들

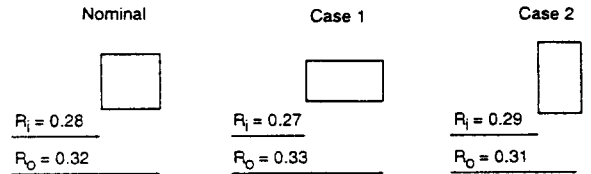


Fig. 15 Shape change of salt water tube

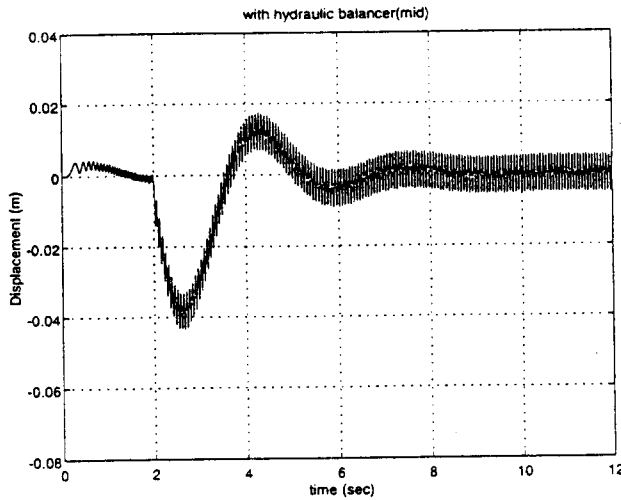


Fig. 13 Displacements of top with salt water positioned at middle

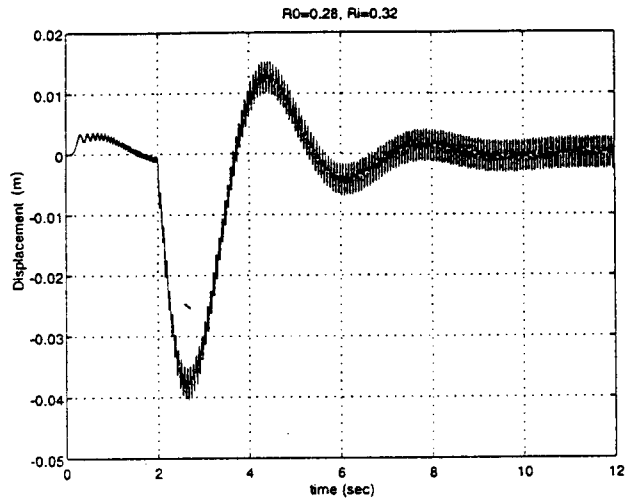


Fig. 16 Analysis result of current salt-water tube

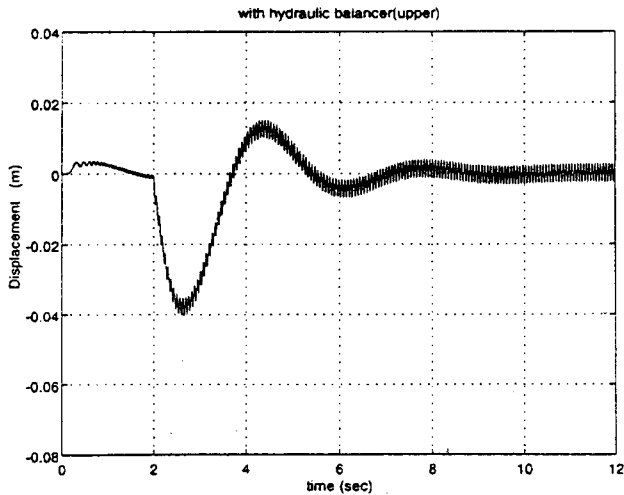


Fig. 14 Displacements of top with salt water positioned at top

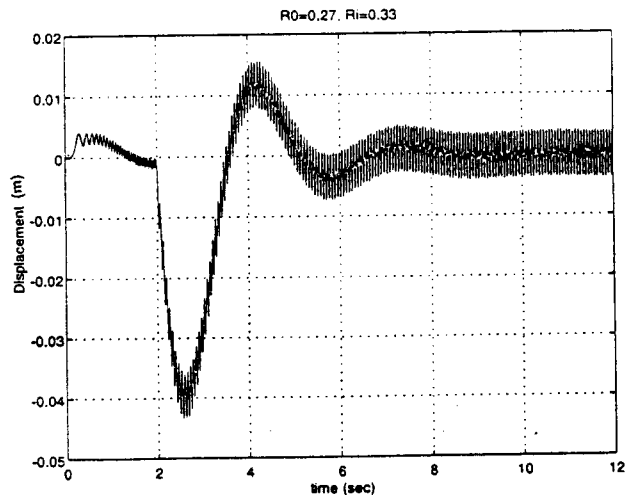


Fig. 17 Analysis result of case 1



이다.

$$R_i=0.28(m), R_o=0.32(m)$$

염수통의 형상 변화에 대한 효과를 고찰하기 위하여 염수통의 형상을 Fig. 15와 같이 변경했을 경우에 대하여 시뮬레이션하였다. 염수의 효과는 염수의 도심에 의하여 결정되므로<sup>(1)</sup> 모델링에서는 질량  $m$ 과 염수통의 내경( $R_i$ )과 외경( $R_o$ )만으로 표현된다. 따라서 질량  $m$ 이 일정한 경우 염수통의 높이에 관계없이 염수통이 사각일 경우 내경( $R_i$ )과 외경( $R_o$ )만이 파라미터로 표현된다.

Fig. 16은 현재 상태의 염수통에 대한 해석 결과를 나타낸다. Fig. 17은 Fig. 15에서의 Case 1에 대한 해석 결과를 나타낸다. Fig. 18은 Fig. 15에서의 Case 2에 대한 해석 결과를 나타낸다. Fig. 16~Fig. 18을 비교하여 보면, 염수통의 모양이 위로 길쭉할수록 진동저감 효과가 큰 것을 알 수 있다. 이것은 염수의 이동량이 염수통의 모양이 길쭉할수록 크기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 강제 진동의 2차원 모델링에서는 해석에 한계가 있기 때문에 식 (30)의 첫 번째 식처럼 편심이 적은 경우에만 염수의 효과를 고려할 수 있다. 따라서 편심량이 클 경우에는 해석의 결과가 실제와 다를 수 있다.

### 3. 세탁 시스템 강제 운동의 진동 실험

Fig. 19는 본 논문에서 사용된 실험 장치를 개략적으로 나타낸다. 염수의 진동저감 효과를 실험하기

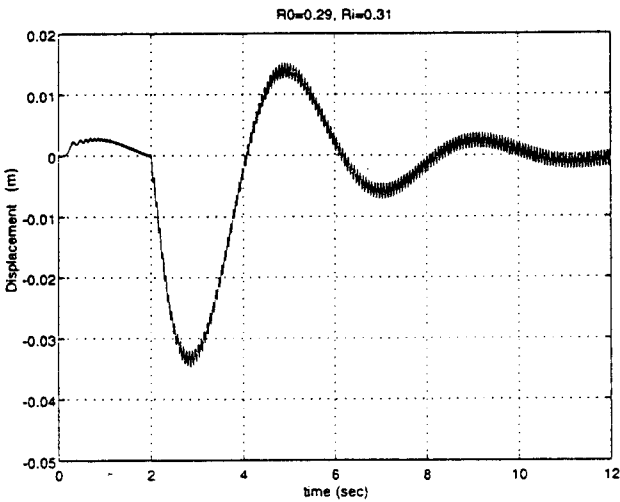


Fig. 18 Analysis result of case 2

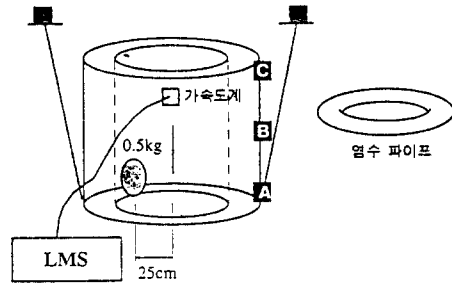


Fig. 19 Experimental apparatus for effects of salt water

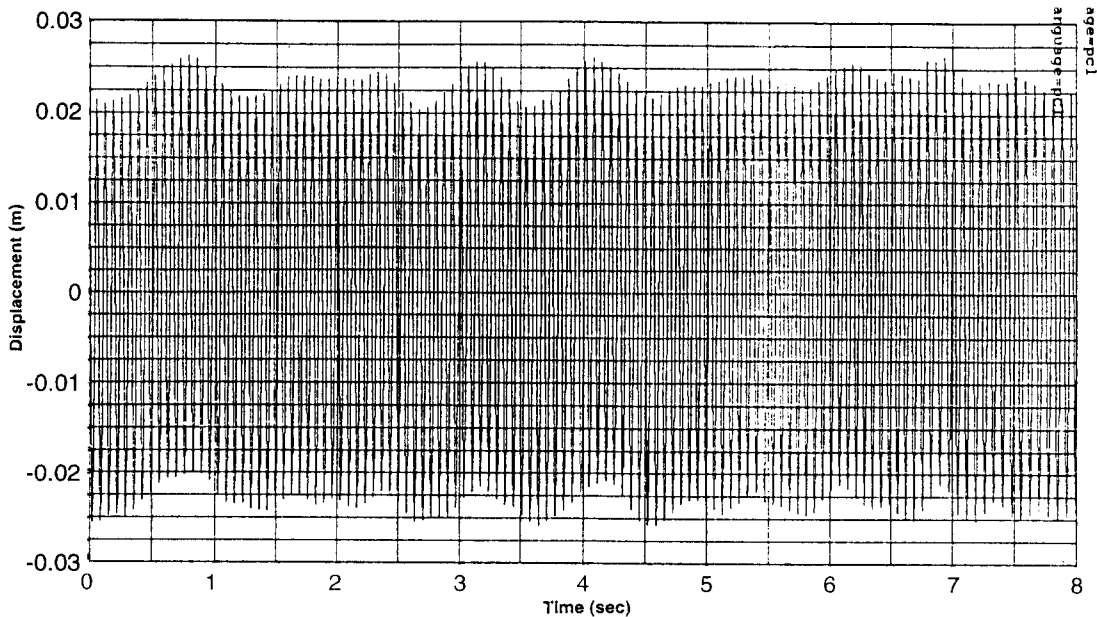


Fig. 20 Vibration without salt water

위하여 세탁조 상단의 염수통에서 염수를 제거하고, 파이프에 염수를 채운 염수 파이프를 만들었다. 염수 파이프는 파이프에 염수를 절반 넣고 테이프로 마감 처리하였다. 실험은 반경 25 cm의 위치에서 약 0.5 kg의 불평형질량을 위치시키고 탈수조 상단에 가속도계를 설치하여 변위를 측정하였다. 측정 데이터는 증폭기를 거쳐서 LMS 사의 Cada-X 상에서 기록하였다. 실험용 염수통에서 염수를 제거한 상태에

서와 염수 파이프를 세탁조 하단 A위치와 중간 B위치 및 상단 C위치로 옮겨가면서 탈수조 상단의 정상 상태 변위를 측정하였다.

Fig. 20은 염수를 제거한 상태에서의 정상 상태 진동의 변위를 보여주고 있다. Fig. 21은 염수 파이프의 위치가 A(하단)일 때의 진동변위이며, Fig. 22와 Fig. 23은 각각 염수 파이프의 위치가 B(가운데), C(상단)에 해당하는 진동변위를 나타낸다. Fig. 24는

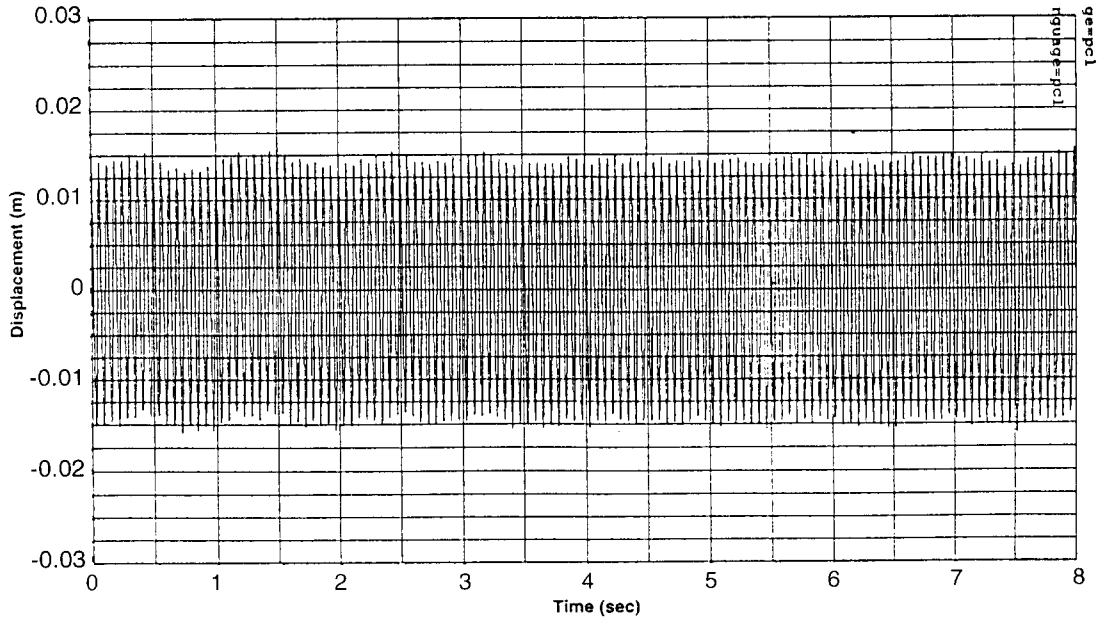


Fig. 21 Vibration with salt water positioned at bottom

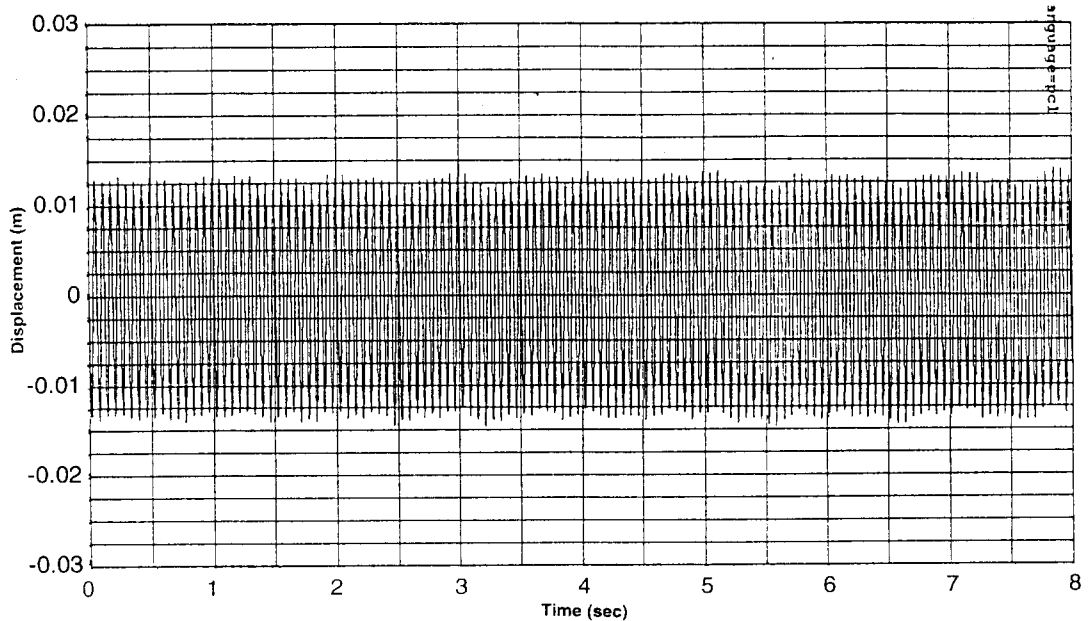


Fig. 22 Vibration with salt water positioned at medium

각각의 경우에 대한 최대 변위를 나타낸 그림이다. 그림에서 염수가 상단에 위치할 때 변위가 가장 적음을 알 수 있다. 이것은 변위가 가장 큰 부분이 상단이므로 염수의 도심이 가장 효과적으로 이동하여 밸런싱 효과가 가장 크게 되기 때문이라고 생각된다.

Fig. 25는 동력학 모델로부터 유도한 운동방정식에 의한 시뮬레이션의 결과와 염수 파이프를 사용한 실험 결과를 비교한 것이다. 시뮬레이션에서 실제의 데이터를 완전히 고려하지 못하였기 때문에 절대값의 비교가 불가능하므로, 염수를 제거하였을 경우의

변위를 최대 변위 1로 했을 때의 상대적인 값을 비교하였다. 염수의 부착 위치가 상단으로 올라갈수록 진동변위가 작아지는 경향은 시뮬레이션의 결과와 실험의 결과가 일치하고 있다. 그러나, 염수가 가운데(B)와 상단(A)에 부착된 경우 시뮬레이션에서의 진동변위가 실험에서의 진동변위보다 아주 작은 것을 볼 수 있다. 이것은 실험에 사용된 실제 염수 파이프의 단면이 원형이기 때문에 염수의 효과에 제한을 받기 때문인 것으로 사료된다.

시뮬레이션에서는 실제 세탁기와 같은 사각형의 단면을 사용하였다. 실험용으로 제작한 염수 파이프

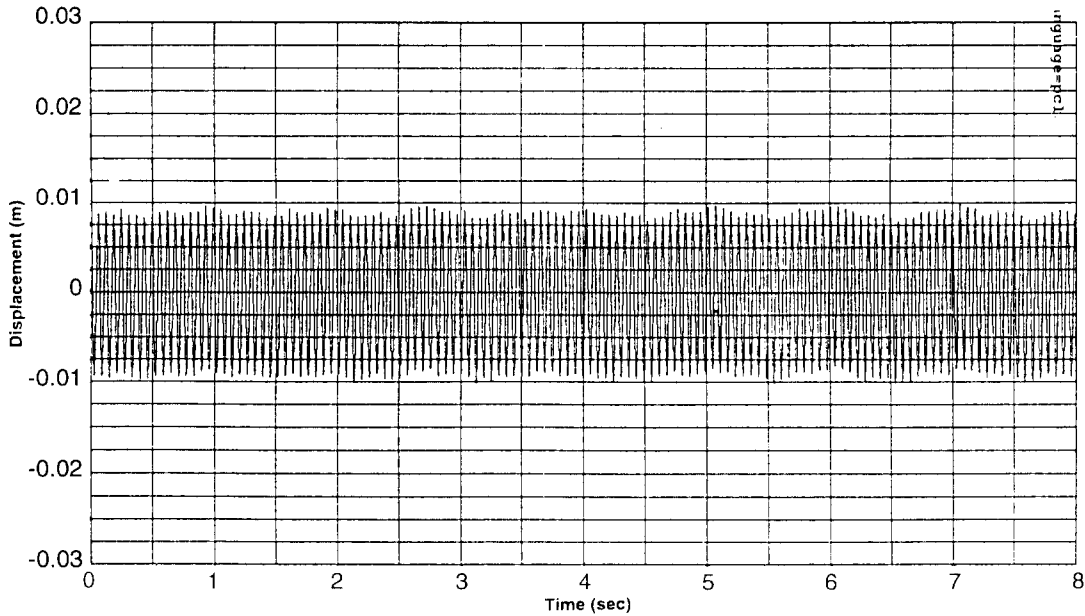


Fig. 23 Vibration with salt water positioned at top

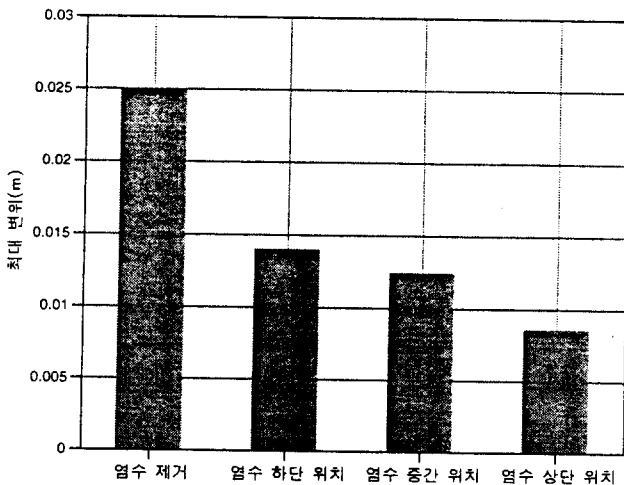


Fig. 24 Comparing vibration with respect to salt water position

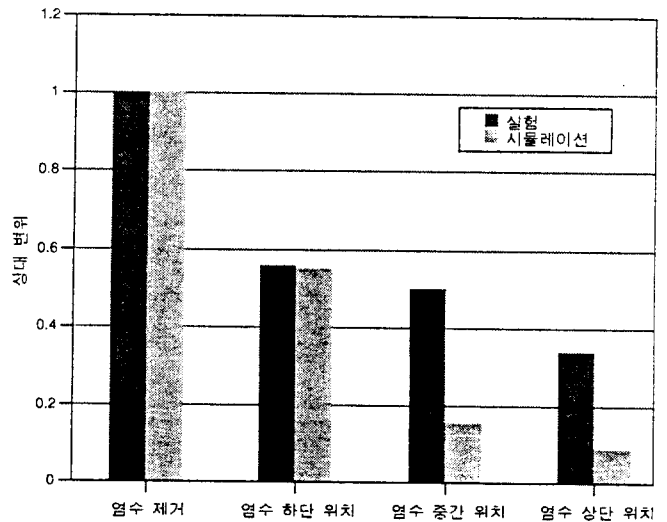


Fig. 25 Comparing test results with simulation result

의 단면을 사각형으로 한다면, 실험 결과와 시뮬레이션 결과의 차이를 줄일 수 있을 것으로 생각된다. 상대적인 크기의 차이는 있지만, 실험과 시뮬레이션은 공통적인 경향을 보이므로 그 결과로부터 염수를 상단에 부착하는 것이 가장 이상적임을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 세탁기의 진동 해석 및 진동저감을 위해 진동의 원인과 현상을 해석 및 실험을 통하여 규명하고자 하였다. 주요 연구 내용은 다음과 같다.

(1) 염수의 원심력 계산을 통하여 염수가 초기 불평형량을 능동적으로 줄이는 효과를 갖고 있음을 보였으며, 사각 단면을 갖는 염수통에 대하여 동적 밸런서로서의 염수의 역할을 수학적으로 모델링 하였다.

(2) 세탁 시스템의 운동방정식에 염수의 수학적 모델링으로 유도한 식을 적용하여 염수 효과를 고려한 세탁 시스템의 강체 진동을 실제 현상과 가깝게 해석하였다. 유도된 식에 대하여 수치 적분을 통해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 강체의 수직 방향 변위는 정적 상태에서 미소한 양으로 나타났다. 지배적인 변위는 힘방향과 회전 방향 변위임이 확인되었다.

(3) 염수의 위치 변화에 의한 진동저감 효과를 비

교하기 위하여 염수가 없을 때와, 염수가 저수조 하단부와 중간 위치, 상단부에 위치할 때에 대하여 각각의 변위를 살펴보았다. 염수가 상단부에 위치할수록 효과가 큼을 알 수 있었다.

(4) 염수통의 형상 변화에 따른 진동변위를 비교할 경우 세로가 길수록 염수의 진동저감 효과가 큼을 확인하였다. 이는 염수의 이동량이 크기 때문이다. 염수통의 형상과 부착 위치가 진동저감에 중요함을 알 수 있다.

(5) 염수의 진동저감 효과를 실험적으로 확인하기 위하여 염수를 제거했을 때와, 염수를 저수조 하단부, 중앙, 상단부에 부착했을 때의 진동변위를 측정하였다. 염수의 위치가 상단부에 있을 때 효과가 가장 컸으며 이것은 시뮬레이션의 경향과 일치하는 결과이다.

#### 참 고 문 헌

- (1) 이장무, 1995, 기계진동학, 문운당, 서울.
- (2) D. T. Greenwood, 1977, Classical Dynamics, Prentice-Hall, Inc.
- (3) 대우전자, 전자동 세탁기, Models AW-2810 & AW-2850.