Transactions of the KSNVE, 24(2) : 117~122, 2014
http://dx.doi.org/10.5050/KSNVE.2013.24.2.117
한국소음진동공학회논문집 제24권 제2호, pp. 117~122, 2014
ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

자이로스코프 시스템을 이용한 드럼 세탁기의 진동 저감 연구

A Study on Reducing Vibration of Washing Machine Using Gyroscope System

나 규 성*·박 영 진†·박 윤 식*
Gyusung Na, Youngjin Park and Youn-sik Park

(Received November 21, 2013 ; Revised November 21, 2013 ; Accepted December 31, 2013)

Key Words : Gyroscope System(자이로스코프 시스템), Transient Vibration(과도 진동), Active Vibration Control (능동진동제어), Multibody Dynamics(다물체 동역학)

ABSTRACT

A novel method to reduce the vibration of drum type washing machine is proposed. Recently, as the capacity of the drum-type washing machine gets expanded and its washing performance is improved, its market share is increasing in the whole world. But, the capacity of washing machine is limited because of door size and built-in washing machine size. The vibration of washing machine is caused by unbalanced cloths in high spining drum, and the displacement of tub is maximized at transient range about 3 Hz(180 rpm). Previous researches were concerned about steady-state vibration in spinning. In this study, concerned about transient vibration and the displacement of tub is decreased by using gyroscope system. Mutibody dynamic model of washing machine include gyroscope is designed and the vibration of tub have been reduced by 44.7 % over original.

Nomenclature

I : 회전축의 inertia(kg·m^2)
θ : 자이로스코프의 수직각(°)
ψ : Rotor의 회전각(°)
$\dot{\psi}$: Rotor의 회전 속도(rad/s)
ϕ : Gimbal의 회전각(°)
$\dot{\phi}$: Gimbal의 회전 속도(rad/s)

† Corresponding Author ; Member, Department of Mechanical Engineering
E-mail : yjpark@kaist.ac.kr
Tel : +82-42-350-3060, Fax : +82-42-350-8220
* KAIST, Department of Mechanical Engineering

1. 서 론

세탁기의 경우 크게 두 가지의 종류로 분류 할 수 있는데 세탁물을 넣는 방식에 따라 전자동 세탁기(top loading)와 드럼 세탁기(front loading)로 나눌 수 있다. 전자동 세탁기의 경우 세부적으로 세탁봉이 있는 세탁봉(agitator)식과 봉이 없고 회전판이 있는 회전판(pulsator)식으로 분류 된다. 전자동 세탁기의 경우 세탁봉(agitator) 또는 회전판(pulsator)를 회전하여 세탁하므로 교반기 및 세탁물의 마찰에 의해 빨래를 하며, 세척력은 우수한 장점이 있다.

A part of this paper was presented and selected as one of best papers at the KSNVE 2013 Annual Spring Conference
‡ Recommended by Editor SungSoo Na

반면, 소음과 진동이 크며 물 사용량이 많고 옷감 손상이 많이 발생하게 된다. 과거 주로 미주 지역에서 많이 사용해 왔다. 드럼 세탁기의 경우 세탁기 내부의 리프터(lifter)가 있어 저속으로 빨래를 올렸다 떨어지는 충격으로 세탁을 하게 되고 세탁물이 정점에서 낙하하며 세탁이 이루어진다. 드럼 세탁기의 경우 물 사용량이 적고 옷감 손상이 적은 장점을 가지고 있다. 반면 웨이트 발란서(weight balancer)를 사용하여 무게가 무겁고 가격이 비싸며, 소비자 입장에서 빨래 넣는 사용성 측면의 단점을 가지고 있다. 전자동 세탁기의 경우 미국에서 많이 사용하고 있으며, 유럽에서는 물이 경수라 세탁시 어려움이 있어 물 사용량이 적은 드럼 세탁기를 많이 사용하고 있다. 최근 드럼 세탁기의 경우 용량이 크고 가격이 비싼 세탁기의 수요가 많아지고 있다.

드럼 세탁기는 세탁물의 편심에 의한 언발란스가 고속 탈수 회전시 진동의 주요 원인이며, 내부 세탁조(tub) 및 드럼(drum)의 진동이 외부 프레임(frame)에 전달된다. 그러나 세탁기의 프레임은 운송시 도어 크기 및 빌트인 세탁기의 크기 제한으로 키우는데 한계가 있게 되고, 또한 내부 용량 키우는데 제한이 생기게 된다.

과거 세탁기의 진동 저감을 위해 많은 연구가 되어 왔다. 드럼 내부의 볼발란서를 채용하여 진동을 저감[1]하고자 했으며, 염수를 포함한 액체 발란서를 이용한 염수에 대한 모델을 기하학적으로 유도하고 동역학 해석[2]에 적용하였다. 다른 분야에서는 자이로스코프를 이용한 위성체, 자전거, 건축물[3] 등의 능동진동제어(active vibration control)에 관한 연구가 되어왔다. 과거에는 세탁기의 정상상태 진동에 관심이 많았었다.

이 연구에서는 드럼 세탁기의 탈수시 진동으로 변위가 가장 큰 과도 진동에 대해 연구하고자 한다. 또한 드럼세탁기 내부의 터브에 자이로스코프를 이용하여 탈수시 과도 진동을 줄이고, 이는 용량증대의 효과를 가져오게 된다. 자이로스코프를 이용한 동역학 모델을 구축하고 시뮬레이션을 통한 검증을 수행하였다.

2. 시스템의 동역학 모델

2.1 자이로스코프 시스템

자이로스코프 시스템(Gyroscope system)은 질량(mass)의 관성(inertia)이 회전하는 로터(rotor)와 이를 지지하는 짐벌(gimbal), 짐벌(gimbal)를 지지하는 자이로스코프 프레임(gyroscope frame)으로 구성 되어 있다.

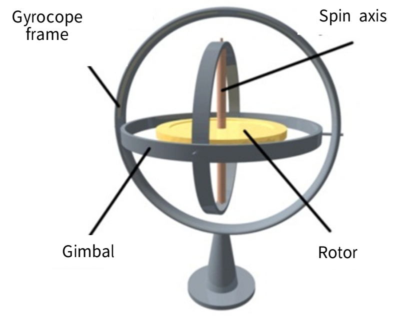

Fig. 1 Gyroscope model

자이로스코프는 Fig. 1과 같이 고속으로 회전할 수 있는 회전체가 그 자체의 회전축인 로터축(rotor axis)과 그 로터축과 직교되는 수평축 및 수직축을 각각 축으로 하여 3축의 주위를 자유롭게 회전할 수 있도록 만들어진 장치이다. 특히 회전체의 로터축을 축으로 하여 고속으로 회전하고 있는 자이로스코프에서 나머지 2축이 마찰을 무시하고 평형상태가 정확하게 유지될 수 있다면 로터축은 어떤 방향이라도 자유롭게 가리킬 수 있으며, 이러한 상태의 자이로스코프를 프리 자이로스코프(free gyroscope)라고 한다.

자이로스코프의 응용 사례(application)로는 항공우주의 위성체에서 자세 제어계로 많이 사용된다. 자세 제어계는 제어 모멘트 자이로(control moment gyroscope, CMG), 반작용 휠(reaction wheel) 또는 모멘텀 휠(momentum wheel), 자기토커, 추력기 등이 있다. 여기서 제어 모멘트 자이로는 토크 증폭, 고효율성, 적은 소모전력으로 큰 토크 출력을 낼 수 있는 장점을 가지고 있으며, 단점으로는 구조가 복잡하고, 가격이 고가, 특이점(singularity)가 발생하는 경우가 있다. 응용 사례로는 대형 위성, 소형 위성, 우주 및 수중 로보틱스, 선박, MEMS 등이 있다[4].

제어 모멘트 자이로(CMG)는 물리학의 자이로스코프 원리를 이용한 토크 발생 구동기로서, 플라이휠(flywheel), 스핀 모터(spin motor), 짐벌 모터(gimbal motor)로 구성 되어 있다. 플라이휠은 스핀모터 회전축에 장착되고 짐벌모터 회전축은 스핀모터

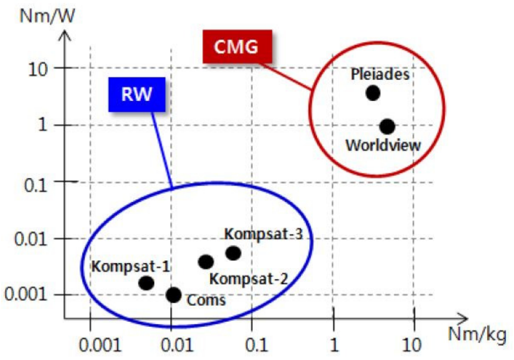

Fig. 2 Torque vs mass and power consumption(4)

회전축에 수직이 되도록 배치된다. 이 때 스핀 모터가 플라이휠을 구동시키면 모멘텀이 발생하여, 짐벌 모터의 구동에 의해서 스핀모터 회전축이 짐벌축 중심으로 회전하면 두 축에 수직인 축에 토크가 발생한다.

Fig. 2와 같이 제어 모멘트 자이로(CMG)는 반작용 휠(RW)에 비해서 작은 질량 및 적은 소비전력으로 큰 토크를 발생할 수 있는 장점을 가지고 있다.

2.2 동역학 모델

이 연구에서는 드럼 세탁기의 세탁조(tub) 진동을 줄이기 위하여 자이로스코프를 이용하였다. 자이로스코프의 동역학 모델을 수식화하여 설계 변수를 구할 수 있다. Fig. 3과 같이 로터(rotor)의 회전축을 C'-C로 설정하고, 짐벌(gimbal)의 회전축을 B'-B로 설정하였다. 자이로스코프 프레임(gyroscope frame)의 회전축을 A'-A로 설정하였다. 절대 좌표계의 축을 X, Y, Z으로 정의 하고, 이 때의 회전각도를 θ,ϕ,ψ 로 정의 하였다(3).

이 때, 자이로스코프의 각속도(ω)는 식 (1)과 같다.

$$\omega = -\dot{\phi}\sin\theta i + \dot{\theta} j + (\dot{\psi} + \dot{\phi}\cos\theta)k \quad (1)$$

또한, θ,ϕ,ψ 이 일정(constant)하게 되면 자이로스코프의 모멘트(moment)는 식 (2)와 같다.

$$\sum M_o = \{-I'\dot{\phi}\cos\theta + I(\dot{\psi} + \dot{\phi}\cos\theta)\}\dot{\phi}\sin\theta j \quad (2)$$

여기서 $\theta = 90^\circ$ 일 경우 식 (3)이 된다.

$$\sum M_o = I\dot{\psi}\dot{\phi} j \quad (3)$$

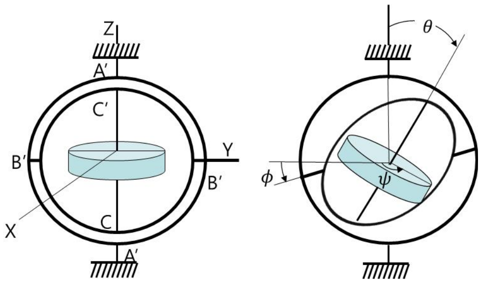

Fig. 3 Gyroscope model

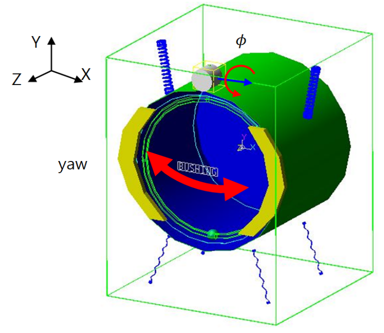

Fig. 4 Dynamic model of washing machine

이에 발생하는 토크(torque)를 이용하여 세탁기 세탁조(tub)의 요 운동(yaw motion)을 저감하고자 한다. 식 (3)과 같이 자이로스코프의 발생 토크는 I (회전축의 관성), $\dot{\psi}$ (로터의 회전 속도), $\dot{\phi}$ (짐벌의 회전 속도)로 나타낼 수 있으며, 이 때 발생 토크는 짐벌(gimbal)의 회전 속도 방향과 수직한 방향으로 발생 하게 된다.

2.3 다물체 동역학 모델

드럼 세탁기의 경우, 세탁조(tub), 드럼(drum), 모터(motor), 축계(shaft), 프레임(frame), 발란서(weight balancer) 및 2개의 스프링(spring)에 의해 매달려 있으며, 4개의 댐퍼(damper)로 진동을 저감하는 구조로 되어 있다. 다물체 동역학 해석프로그램인 RecurDyn을 이용하여 Fig. 4와 같이 드럼세탁기를 모델링 하였다.

세탁기의 일반적인 진동 시험의 경우 추부하 전면(front) 500 g에서 시험을 시행하며, 이는 세탁물 탈수시 최대 편심질량이 되며, 진동 변위가 가장 크게 된다.

Fig. 5는 자이로스코프의 발생 토크 대비 세탁조

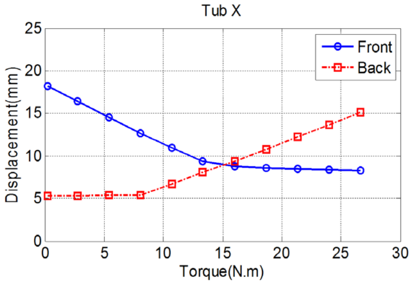

Fig. 5 Tub X vibration vs gyroscope torque

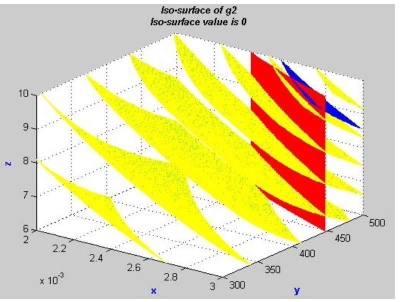

Fig. 6 Graphical solution

(tub) X방향 진동 변화를 보여 주고 있다. 12.8 N·m 이상 17.5 N·m이하의 토크일 경우 세탁조(tub) 전면 진동이 10 mm 이하로 저감됨을 알 수 있다. 이는 향후 세탁조 진동이 10 mm이하로 최적설계시 요구 모멘트가 되게 된다.

3. 자이로스코프 설계

3.1 시스템 최적 설계

설계 변수는 $x_1 = I, x_2 = \dot{\psi}, x_3 = \phi$ 와 같이 정의 하였다. 목적함수 $f(X)$ 는 자이로스코프의 운동에너지(kinetic energy)를 최소화하도록 설계 변수를 구하였다[6].

$$\begin{aligned} & f(X): K.E. \\ & g_1(X): x_1 x_2 x_3 - 12.8 \geq 0 \\ & x_1 \geq 0; x_2 \geq 0; 0 \leq x_3 \leq 9.86 \end{aligned} \tag{4}$$

식 (4)와 같이 정의하였는데 구속조건으로 g_1(x)는 요구 모멘트로 12.8 N·m 이상이 되도록 설계하였다. 추가 제약(side constraint)으로 사용자 안전을 위한 운동에너지는 300 J를 넘지 않도록 하였다. Fig. 6은 Matlab을 통하여 구한 설계값을 보여주며, 이때 최적설계값으로 x_1=0.002839 kg·m^2, x_2=459.08 rad/s, x_3=9.9 rad/s값을 얻었다[7].

3.2 모의 실험 결과

Table 1은 최적 설계값과 모의 실험 결과값을 보여 주고 있다. 최적 설계값을 살펴보면 운동 에너지(kinetic energy)를 9435 J에서 299 J로 97 % 줄였으며, 세탁기는 소비자가 직접 사용하는 제품으로 문제시 안전한 수준으로 저감 하였다.

이 때의 진동 또한 Fig. 7 대비 Fig. 8과 같이 설계

Table 1 Comparing of simulation results

	Origin	Initial design parameter[5]	Optimal design parameter
Inertia (kg·mm^2)		1404	2839
Rotor speed (rad/s)		3665	459
Gimbal speed (rad/s)		2.5	9.8
Kinetic energy (J)		9435	299
Tub X (mm)	17.9	10.5	9.9

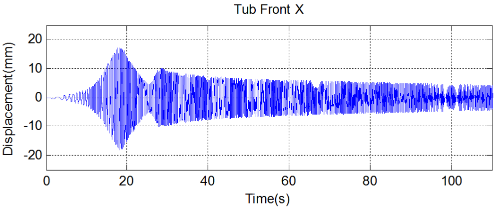

Fig. 7 Original tub vibration

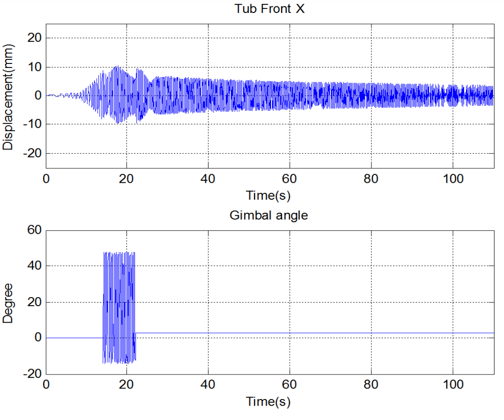

Fig. 8 Simulation results

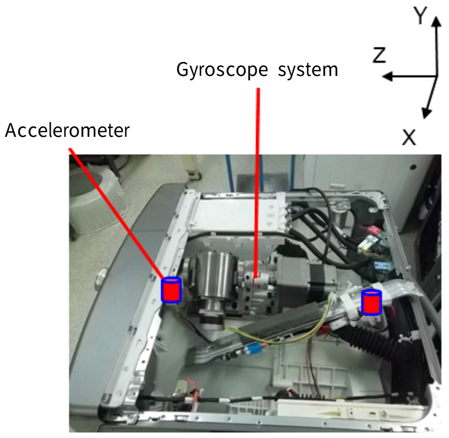

Fig. 9 Configuration of experimental setup

목표인 10 mm 이하로 저감됨을 볼 수 있다. 자이로스코프는 Fig. 8의 하단과 같이 과도 구간에서만 작동하여 주고, 정상상태에서는 드럼의 관성력에 의한 진동 변위가 작기 때문에 작동하지 않게 된다.

4. 성능 실험

Fig. 9와 같이 타당성 검증 실험(feasibility test)을 위하여 자이로스코프 시스템을 제작하였다. 드럼 세탁기의 상부 전면에 장착하였으며, 가속도 센서를 이용하여 전, 후면의 세탁조(tub) 진동을 측정 하였다.

세탁물의 언발란스 질량은 전면 500 g으로 고정하였고, 개루프 제어(open loop)를 통하여 탈수 가동후 일정 시간 후 짐벌(gimbal)을 작동하였다. 짐벌의 작동은 드럼 전면 X방향의 진동 변위와 180° 위상이 되도록 작동 하였다.

Fig. 10은 드럼 전면의 진동을 나타내며, 과도 진동 변위와 짐벌(gimbal)의 위상차를 나타내며, 이 때의 진동 변위를 보여 준다. 위상차(phase delay)가 -90°일 경우 진동이 가장 적음을 알 수 있으며, 이는 과도전의 -180°위상차를 갖고 있다가 공진점을 통과하면서 -90°의 위상차를 가짐을 알 수 있다.

Fig. 11은 드럼 후면의 진동으로 전면의 진동 저감을 목표로 제어하여 후면 진동에 영향이 없음을 보여 주고 있다.

이는 상대적으로 세탁기 내부의 여유(gap)가 부족한 좌우방향(X-axis)의 진동을 줄여줌으로써 내부 공간의 확대에 기여 할 수 있을 것이다.

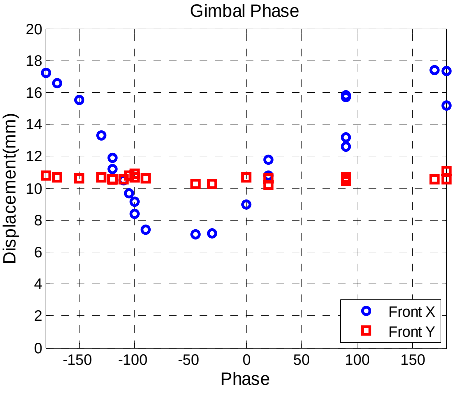

Fig. 10 Test results of front vibration

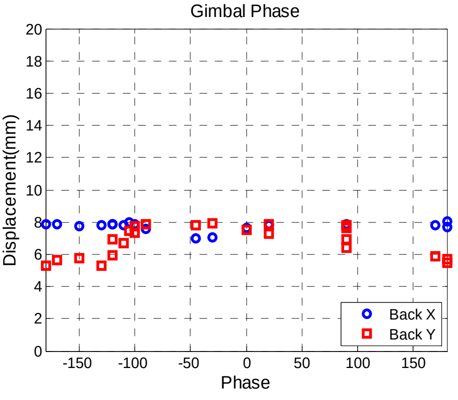

Fig. 11 Test results of back vibration

5. 결 론

드럼 세탁기의 경우 옷감 손상이 적고, 물 사용량이 적어 에너지 사용량이 적게 드는 장점을 가지고 있다. 에너지(Energy)와 물 사용량(water consumption)이 세탁기 구매 지표 중 가장 중요하여 드럼 세탁기의 수요가 늘고 있다. 드럼 세탁기 중에서 고가용 세탁기 수요와 용량이 큰 세탁기의 수요가 많아지고 있다. 그러나 도어 크기와 빌트인 세탁기의 크기 한계로 세탁 용량을 증가하는데 한계가 있어, 이 연구에서는 드럼 세탁기에 자이로스코프를 적용하여 내부의 진동을 저감하는 시스템을 제안하였다.

자이로스코프의 설계 변수는 최적 설계를 통하여 구하였으며, (회전축의 inertia) = 2839 kg·mm^2, (rotor의 회전 속도) = 459 rad/s, (gimbal의 회전 속도) = 9.9 rad/s의 값을 정하였다.

자이로스코프를 세탁기에 적용시 초기값대비 97 %의 운동에너지(kinetic energy)를 저감 하였다. 또한 기존 세탁조(tub)의 X방향 진동을 17.9 mm 에서 9.9 mm로 44.7 %의 진동을 저감 하였다.

제작한 자이로스코프를 세탁기에 장착하여 타당성 검증 실험(feasibility test)결과 기존 13.4 mm에서 7.4 mm로 44.7 %의 개선 효과가 있음을 확인하였고 모의 실험결과와 비슷한 양상을 보였다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2010-0028680).

References

(1) Lee, J., Jo, S., Kim, T. and Park, Y., 1998, Modeling and Dynamic Analysis of a Front Loaded Washing Machine with Ball Type Automatic Balancer, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 8, No. 4, pp. 670~682.

(2) Bae, S., Lee, J. M., Kang, Y. J. and Kang, J. S., 2002, Dynamic Analysis of an Automatic Washing Machine with a Hydraulic Balancer, Journal of Sound and Vibration, Vol. 257, No. 1, pp. 3~18.

(3) Moon, Y. J., 2005, Active Vibration Control System using Gyroscope for Structures, Ph.D. Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, Republic of Korea, pp. 12~15.

(4) Lee, S. H., 2012, Technology of Control Moment Gyroscope and its Industrial Trend, Proceedings of KSAS, Vol. 40, No. 1, pp. 86~92.

(5) Na, G. S., Park, Y. J., Park, Y. S. and Kang, J. H., 2013, Washing Machine Vibration Analysis using Gyroscope System, Proceedings of the KSME Annual Spring Conference, pp. 35~36.

(6) Venkataraman, P., 2009, Applied Optimization with MATLAB Programming, John Wiley & Sons, New Jersey.

(7) Na, G. S., Park, Y. J. and Park, Y. S., 2013, Washing Machine Vibration Analysis using Gyroscope System, Proceedings of the KSNVE Annual fall Conference, pp. 35~36.

Gyusung Na, B.S. in SungKyun Kwan University, Mechanical Eng., 2002, M.S. in KAIST, 2012~Present, in Structural Dynamics and Applied Control Lab. Research interests are active vibration control, vibration analysis and control.

Youngjin Park, B.S. in Seoul National University, Mechanical Eng., 1980, M.S. in Seoul National University, Mechanical Eng., 1982, Ph. D. in University of Michigan, 1987, University of Michigan Research Fellow, 1987~1988, New Jersey Institute of Technology Assistant Professor, 1988~1990, KAIST Mechanical Eng. Professor, 1990~Present, in Structural Dynamics and Applied Control Lab. Research interests are automatic control, active and passive noise control, 3D sound technology, vehicle stability control, fault diagnosis, robust control and system identification.