

<논 문>

편심이 변하는 CD/DVD시스템의 자동 볼 평형장치 설계 지침

Design Guidelines for the Automatic Ball Balancer in CD/DVD Systems with Varying Eccentricity

김 보 현* · 류 제 하**

Bo-Hyun Kim and Jeha Ryu

(1999년 1월 4일 접수 ; 1999년 3월 18일 심사완료)

Key Words : CD/DVD(Compact Disc/Digital Versatile Disc), Automatic Ball Balancer(자동 볼 평형 장치), Design Guideline(설계 지침), Eccentricity(편심), Viscosity(점성), Friction(마찰)

ABSTRACT

This paper presents design guidelines for the automatic ball balancer in CD/DVD systems with varying eccentricity. In these systems, the size of balancing balls should be limited by the restricted race space so that determination of the number and mass of balls should consider the radii of the race and the balls. In addition, the effects of viscosity and friction also should be taken into account for sufficient balancing. Based on the static equilibrium conditions, the number and mass of balls corresponding to the range of varying eccentricity have been determined. Dynamic simulation with viscosity and friction shows sufficient viscosity must exist to ensure stability and friction between balls and race must be minimized to guarantee accurate balancing.

기 호 설 명

- c : 회전축의 감쇠 계수
- C : 회전체의 기하학적 중심
- D_i, D : 오일의 점성계수
- G : 회전체의 무게중심
- h : 레이스의 두께
- k : 회전축의 강성 계수
- m_{ij}, m : i 번째 레이스의 j 번째 볼의 질량, 볼의 질량
- M : 회전체의 질량

- p : 레이스의 개수
- q_i : i 번째 레이스에 들어 있는 볼의 개수
- r, \vec{r}_{Bij} : 볼의 반경, 볼의 위치 벡터
- R_i, R : i 번째 레이스의 반경, 레이스의 반경
- α : 볼의 반경과 레이스의 반경이 이루는 각
- β : 점성 변수, $\beta = \frac{D}{mR^2}$
- θ : X 축에 대한 무게중심 G 의 회전각
- μ : 볼과 레이스 사이의 마찰계수
- ρ : 볼의 밀도
- ϕ_{ij}, ϕ : i 번째 레이스에서 j 번째 볼의 무게중심 G 에 대한 회전각, 볼의 회전각

* 광주과학기술원 기전공학과

** 정회원, 광주과학기술원 기전공학과

ω, ω_n : 회전체의 각속도, 회전체의 고유진동수
 sign : 부호 함수
 $O-xy$: 고정 좌표계

1. 서 론

자동 볼 평형장치는 복잡한 밸런싱 기법을 사용하지 않고도 임계속도 이상으로 회전하는 회전체의 불균형을 자동으로 줄여주는 장치로 일반적으로 원형 레이스와 원형 레이스를 따라 움직이는 볼, 그리고 원형 레이스를 채우고 있는 오일로 구성되어 있다. 자동 볼 평형장치의 동적특성과 안정성 해석에 관한 주목할 만한 연구들이 일본, 러시아, 미국 등에서 수행되었으며^(1~5) 최근에 자동 볼 평형장치에 관한 연구가 국내에서 활발해지고 자동 볼 평형장치를 적용한 32배속CD/DVD 시스템, 드럼식 세탁기 등이 개발 생산되고 있다^(6~10).

그러나, 이러한 연구들은 편심이 변하는 회전 시스템의 특성에 맞게 자동 볼 평형장치를 설계 제작하는 관점에서 볼 때 볼의 질량 및 개수의 결정, 오일의 선택, 마찰효과 등에 대한 자세한 기준 제시가 미흡하다. 특히, CD/DVD시스템과 같은 소형 회전체에서는 자동 볼 평형장치의 레이스 반경이 작아 여러 볼을 사용할 경우 평형위치에서의 볼의 크기를 무시할 수 없으며 따라서 예상 편심의 변화량 범위에 대응하는 효과적인 밸런싱을 위해서는 이러한 기하학적 구속 조건을 자세히 고려해야 한다. 본 논문에서는 볼과 레이스의 기하학적 관계 및 정적 평형해를 이용하여 볼의 질량 및 개수를 결정하고 시뮬레이션을 통해 오일의 점성 및 볼과 레이스 사이의 접촉 마찰이 자동 볼 평형장치의 밸런싱에 미치는 효과를 검토하여 자동 볼 평형장치의 설계 방향을 제시하였다.

2. 운동 방정식

Fig. 1과 같이 다중 레이스로 구성되어 있으며 각 레이스마다 여러 개의 볼이 들어가 있는 자동 볼 평형장치에 대한 운동방정식을 유도하기 위해 다음과 같은 가정을 한다.

- (1) 회전체는 xy 평면에서 회전축의 횡방향으로만 진동하며 z 축 방향으로 중력이 작용한다.
- (2) 회전체가 회전하기 전에는 축 중심 O 와 회전체의 기하학적 중심 C 가 일치한다.
- (3) 축의 강성계수와 감쇠계수는 x, y 방향으로 같

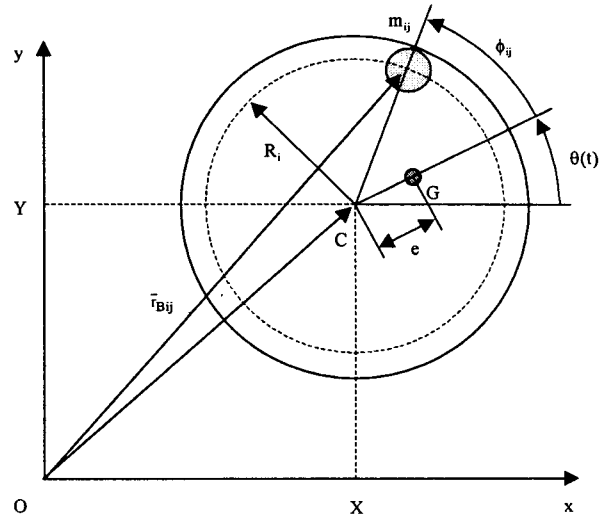


Fig. 1 Simple model of an automatic ball balancer with multi races and balls

은 값을 가지며(isotropic bearing), 선형적인 특성을 갖는다.

(4) 평형해를 찾기까지의 볼과 볼의 충돌효과는 무시하며 볼은 구르지 않고 미끄러진다.

위와 같은 가정을 바탕으로 유도된 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\left(M + \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{q_i} m_{ij} \right) \ddot{X} + c\dot{X} + kX = Me(\ddot{\theta} \sin \theta + \dot{\theta}^2 \cos \theta) + \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{q_i} m_{ij} R_i [(\ddot{\theta} + \ddot{\phi}_{ij}) \sin(\theta + \phi_{ij}) + (\dot{\theta} + \dot{\phi}_{ij})^2 \cos(\theta + \phi_{ij})] \quad (1)$$

$$\left(M + \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{q_i} m_{ij} \right) \ddot{Y} + c\dot{Y} + kY = Me(-\ddot{\theta} \cos \theta + \dot{\theta}^2 \sin \theta) - \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{q_i} m_{ij} R_i [(\ddot{\theta} + \ddot{\phi}_{ij}) \cos(\theta + \phi_{ij}) - (\dot{\theta} + \dot{\phi}_{ij})^2 \sin(\theta + \phi_{ij})] \quad (2)$$

$$m_{ij} R_i^2 (\ddot{\theta} + \ddot{\phi}_{ij}) + D_i \dot{\phi}_{ij} + \mu R_i m_{ij} [R_i (\dot{\theta} + \dot{\phi}_{ij})^2 - \dot{X} \cos(\theta + \phi_{ij}) - \dot{Y} \sin(\theta + \phi_{ij})] \text{sign}(\dot{\phi}_{ij}) = m_{ij} R_i [\ddot{X} \sin(\theta + \phi_{ij}) - \ddot{Y} \cos(\theta + \phi_{ij})] \quad (3)$$

유도된 운동 방정식에서 회전체의 진동변위를 완전히 소거 시키는 볼의 위치를 구한다. 즉, 회전체의 회전속도가 식 (4)와 같이 일정하고 볼이 레이스의 한 지점에 도달하여 멈춰있는 상태를 가정하면 식

(5)와 같이 정적평형 조건을 나타낼 수 있다.

$$\theta = \omega t, \dot{\theta} = \omega, \ddot{\theta} = 0 \quad (4)$$

$$X = \dot{X} = \ddot{X} = 0, Y = \dot{Y} = \ddot{Y} = 0, \phi_{ij} = \dot{\phi}_{ij} = 0 \quad (5)$$

위 식들을 운동 방정식에 대입해 정리하면 다음과 같이 불의 위치를 결정하는 2개의 정적 평형식을 구할 수 있다.

$$\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{q_i} m_{ij} R_j \sin \phi_{ij} = 0 \quad (6)$$

$$Me + \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{q_i} m_{ij} R_j \cos \phi_{ij} = 0 \quad (7)$$

3. 설계 지침

3.1 불의 질량 및 개수

본 논문에서는 레이스가 하나이고 질량이 같은 불(들)을 사용했을 때, 불의 개수에 따른 정적 평형해를 유도하고 이로부터 식 (8)과 같이 주어지는 편심의 변화 범위 내에서 항상 밸런싱을 유지하는 불의 최소 질량을 결정한다.

$$e_{\min} \leq e \leq e_{\max} \quad (8)$$

먼저, 사용할 수 있는 불의 최대 질량은 레이스의 기하학적 크기에 제약을 받는다. 즉, 회전체의 구조에 따라 자동 불 평형장치의 레이스 반경 및 두께가 결정되면 레이스 두께 (h)는 불의 크기를 제한하여 다음과 같이 불 한 개의 최대질량을 결정하는 기준으로 사용된다.

$$m_{\max} = \frac{4\rho\pi}{3} \left(\frac{h}{2}\right)^3 \quad (9)$$

(CASE 1) 불이 1개인 경우에는 식 (6)과 (7)에서 다음 식 (10)이 유도된다.

$$m = \frac{M}{R} e, \phi = \pi \quad (10)$$

밸런싱을 위해서는 편심이 변함에 따라 불의 질량도 따라 변해야 하나, 식 (10)을 만족하는 불의 질량이 바뀌는 것은 불가능하므로 불을 한 개만 사용하는 자동평형장치는 편심이 변하는 회전체에 적용될 수 없다.

(CASE 2) 불이 2개인 경우에는 식 (6)과 (7)로부터 다음 식 (11)과 같이 정적 평형해를 만족하는

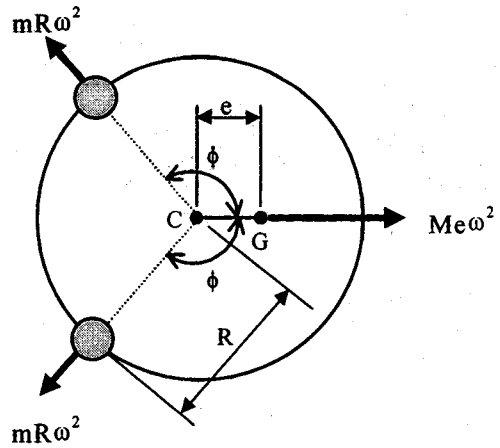


Fig. 2 Angular position of two balls satisfying static equilibrium equations (6) and (7)

불의 질량을 계산할 수 있으며 이에 해당하는 불의 위치를 Fig. 2에서 보여준다.

$$m = -\frac{Me}{2R \cos \phi} \quad (11)$$

식 (11)에서 편심의 크기가 점차 커지면 불은 편심의 반대쪽 180°로 이동하며 편심이 어느 이상 커지면 불은 서로 겹치게 된다. 그러나, 실제로는 불이 서로 겹칠 수 없으므로 Fig. 3과 같이 불의 기하학적 크기를 고려하면 식 (12)와 같이 밸런싱을 위해 필요한 불의 최소질량을 구할 수 있다.

$$m_{\min} = \frac{Me_{\max}}{2R \cos \alpha} = \frac{Me_{\max}}{2\sqrt{R^2 - r^2}} \quad (12)$$

즉, 편심이 변하는 회전체의 경우에 불을 2개 사용하면 항상 편심을 제거할 수 있다. 그러나, 레이스의 두께에 의해 불의 최대질량이 제한되어 있으므로

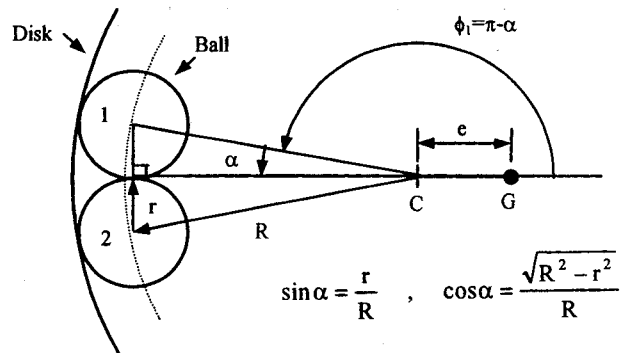


Fig. 3 Angular position of two balls determining the minimum mass of ball for balancing

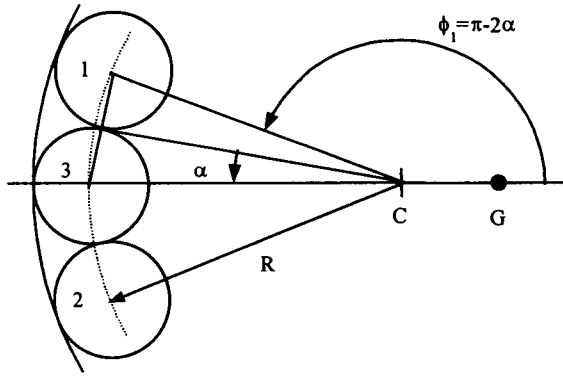


Fig. 4 Angular position of three balls determining the minimum mass of ball for balancing

식 (12)에서 구한 볼의 최소 질량이 볼의 최대 질량보다 큰 경우에는 3개 이상의 볼을 사용하여야 한다.

참고로, 반경이 다른 레이스가 2 개이고 볼이 각 레이스에 하나씩 들어있는 경우에는^(4,7) 볼의 충돌 효과를 고려하지 않아도 된다는 해석상의 이점은 있으나 m_1, m_2, R_1, R_2 의 선택에 따라 정적 평형해의 존재 유무가 결정되어 볼의 질량을 결정하기가 더 복잡한 반면 밸런싱 효과에는 단수 레이스에 볼이 2 개인 경우와 차이가 없다.

(CASE 3) 볼이 3개인 경우에는 Fig. 4와 같이 볼의 크기와 위치를 고려하면 볼의 최소질량을 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다. 참고로 볼이 세 개 이상이면 초기 조건에 따라 수많은 정적 평형해가 존재하게 된다.

$$m_{\min} = \frac{Me_{\max}}{R(1 + 2 \cos 2\alpha)} = \frac{Me_{\max}}{R \left(3 - \left(\frac{2r}{R} \right)^2 \right)} \quad (13)$$

(CASE 4) 볼이 n 개인 경우에는 볼이 홀수 개일 때와 짝수 개일 때로 나누어 생각하여 다음과 같다.

(I) 볼이 홀수 개일 때 :

$$m_{\min} = \frac{Me_{\max}}{R \left[2 \sum_{k=0}^{n-1} \cos(2k\alpha) - 1 \right]} \quad (14)$$

(II) 볼이 짝수 개일 때 :

$$m_{\min} = \frac{Me_{\max}}{2R \sum_{k=1}^n \cos\{(2k-1)\alpha\}} \quad (15)$$

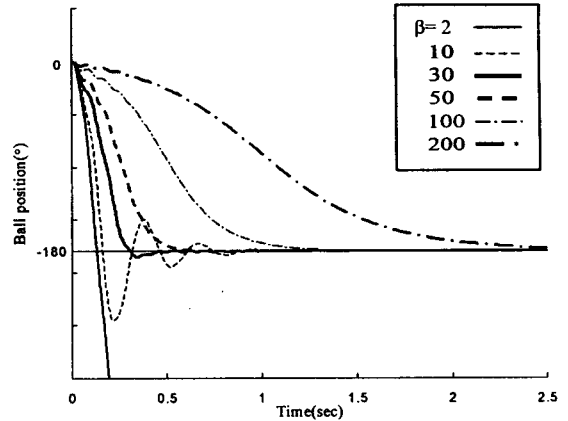


Fig. 5 Variation of ball positions with respect to β

따라서, 볼의 질량은 위에서 제시한 대로 볼의 크기 및 개수, 레이스 반경 등을 고려한 최대 질량과 최소 질량 사이에서 결정될 수 있다. 또한, 앞에서 제시한 바와 같이 볼의 질량을 결정하기 위해서는 대상 회전체가 가질 수 있는 편심량의 변화 범위를 알고 있어야 함이 기본 전제가 된다.

3.2 오일의 선택 : 점성 효과

오일은 정적 평형해의 안정성을 높여주며⁽⁵⁾ 볼과 레이스 사이의 접촉마찰력을 줄여주는 역할을 한다. 오일의 역할을 살펴보기 위해 자동 볼 평형장치의 비선형 운동 방정식(식 (1)~(3))에 대한 동적 거동 시뮬레이션을 수행하여 볼의 동적 거동을 살펴보았다. 해석을 단순하게 하기 위해 마찰력을 무시하고 볼을 한 개 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

임계속도 이상 ($\omega/\omega_n = 1.5$)일 때 볼의 궤적을 Fig. 5에 나타내었다. 점성 변수가 너무 작으면 ($\beta = 2$), 볼이 정적 평형해 위치인 180° 에 도달하지 못하고 발산하고 있으며 점성 변수가 어떤 값 이상으로 커지면 ($\beta > 10$), 볼이 2차계처럼 감쇠 진동하며 정적 평형해 위치에 도달함을 알 수 있다. $\beta = 10$ 일 때는 볼이 180° 에 바로 도달하지 못하고 진동하며 β 가 100이상이면 볼이 진동하는 현상은 줄어들거나 반대로 볼이 정적 평형해에 도달하는 시간이 길어진다. 따라서, 볼을 정적 평형해에 빠르게 정착시키기 위해서는 안정 영역 내에서 가능한 작은 β 를 갖는 오일을 선택하되 볼이 정적 평형해로 이동하는 과정에서 발생하는 과도진동을 줄이기 위해서는 적절히 큰 β 를 갖는 오일을 선택한다.

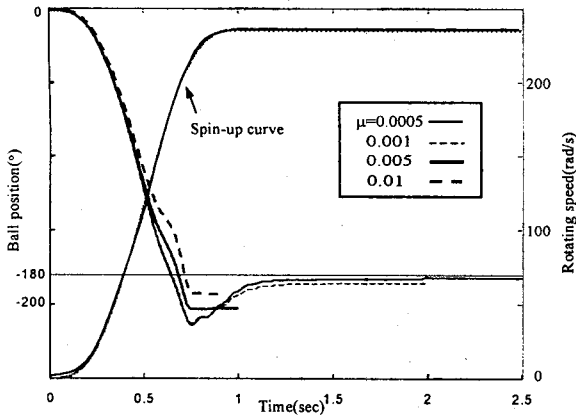


Fig. 6 Variation of ball positions with respect to friction

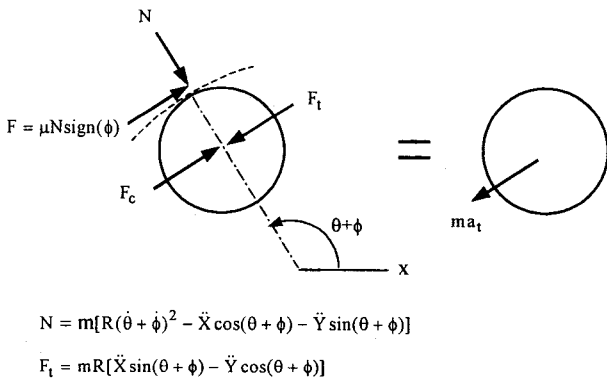


Fig. 7 Tangential forces on ball

3.3 마찰 효과

Fig. 6은 회전체의 회전속도를 스핀업 곡선모양으로 증가시킬 때 불과 레이스 사이의 마찰계수의 변화에 따른 불의 거동을 보여준다. 저 마찰 계수일 때 ($\mu = 0.0005, 0.001$ 일 때)는 불이 정적 평형해 (180°)에 도달하지 못하고 각각 $1.66^\circ, 5.23^\circ$ 앞선 위치에서 정착함을 알 수 있다. 한편, 고 마찰 계수일 때 ($\mu = 0.005, 0.01$ 일 때)는 저 마찰 계수일 때보다 상대적으로 큰 마찰력이 발생하여 축 회전속도가 일정한 값에 도달하기도 전에 불이 정지하는 현상을 보이고 있다. 이것은 Fig. 7에서 보듯이 마찰력은 회전속도가 커짐에 따라 증가하는 반면, 불이 정적 평형해로 움직이도록 불에 작용하는 접선 방향력 (F_t)은 불이 정적 평형해에 도달함에 따라 급격히 감소하여 마찰력을 극복하지 못하기 때문에 발생하는 것이다. 물론, 불이 마지막 순간에는 미끄러지지 않고 구를 수도 있으나 역시 구름저항(rolling

resistance)에 의해 정확한 평형 위치에 도달하지 못한다. 즉, 마찰력이 크면 불이 정적 평형해에 정확히 도달하는 것을 방해하여 자동평형장치의 밸런싱 효과를 저해할 수 있음을 나타낸다. 따라서, 밸런싱 효과를 극대화 하기 위해서는 오일의 선택과 아울러 불과 레이스 사이의 접촉 마찰력도 최소화해야 한다.

4. 결 론

자동평형장치를 적용하여 밸런싱 효과를 극대화 하기 위해서는 설계 단계에서 자동평형장치를 구성하고 있는 각각의 요소에 대해 신중하게 검토할 필요가 있다. 지금까지의 연구결과를 토대로 자동평형장치의 설계를 효과적으로 하기 위한 한가지 순서를 제시하면 다음과 같다.

(1) 불의 질량 및 개수를 결정하기 위해서는 편심 범위 ($e_{min} \leq e \leq e_{max}$)를 알고 있어야 하며 앞에서 제시한 대로 불의 크기 및 개수, 레이스 반경 등을 고려한 최대 질량과 최소 질량 사이에서 불의 질량 및 개수를 정할 수 있다.

(2) 자동평형장치의 안정성 측면에서는 점성계수가 높은 오일을 선택하여야 하나, 점성계수가 너무 높으면 불이 정적 평형해에 도달하는 시간이 길어지므로 회전체가 요구하는 정착시간을 고려하여 오일을 선택한다. 현재까지는 시행착오에 의한 오일의 선택이 불가피하다.

(3) 자동평형장치에 사용된 불의 가공형상과 레이스 가공면의 거칠기 등이 마찰력의 원인이 된다. 또한, 제작된 레이스의 곡률반경이 일정치 않으면 불의 운동을 방해할 수도 있다. 따라서, 마찰력을 줄이기 위한 방법으로 정밀한 가공이 요구된다. 마찰력은 오일의 선택과도 무관치 않으며 점성계수가 낮을 수록 접촉마찰력을 줄일 수 있다.

참 고 문 헌

- (1) 井上順吉 外, 1979, "自動平衡裝置-その基礎的な 特性," 日本機械學會論文集, Vol. 45, pp. 646~652.
- (2) Yasusuke Jinnouchi, 1993, "Automatic Balancer-Static Balancing and Transient Response of a Multiball Ballancer," 日本機械學會論文集, Vol. 59, pp. 79~84.
- (3) Yu. V. Agafonov and Yu. V. Bazykin, 1985, "Study of Stability of Ball-Type Automatic

- Balancer of Rotor System on Anisotropic Flexible Supports," Mashinovedenie, Vol. 5, pp. 110~112.
- (4) Kravchenko, V. I., 1983, "Stability Analysis of a Row-Type Ball Counterbalance," Mashinovedenie, Vol. 1, pp. 25~27.
- (5) Lee, Jongkil, 1993, "Theoretical and Experimental Analysis of Self-Compensating Dynamic Balancer in a Rotating Mechanism," Ph.D. Dissertation, University of Utah, Salt Lake City.
- (6) 김동원 외, 1998, "마찰접촉을 고려한 DVD 볼 밸런서의 동적해석 및 설계에 관한 연구," 제 4 회 TAE SUNG DADS & EASY5 User's Conference, Vol. 2, pp. 127~135.
- (7) 이동진 외, 1998, "이중레이스를 갖는 자동평형 장치의 진동해석," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 A, pp. 450~456.
- (8) 박정수 외, 1996, "볼 밸런서를 이용한 강체로터의 자동 밸런싱," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 738~745.
- (9) 박정수 외, 1997, "세탁기의 진동저감을 위한 밸런서 개발," 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 602~607.
- (10) 이준영 외, 1998, "볼 자동균형장치를 채용한 드럼세탁기의 모델링 및 동적 거동 해석," 한국소음진동공학회지, 제 8 권, 제 4 호, pp. 670~682.