

공중물체의 자세제어 및 안정화를 위한 밸런스 빔 제어기(신건설장비) 구현

論 文

52D-1-6

An Implementation of Balance Beam Controller(New Construction Machinery) for an Attitude Control and Stabilization of an Unstructured Object

李 健 寧* · 金 鎮 吾**
(Keon Young Yi · Jin-Oh Kim)

Abstract - In this study, the balance beam control subsystem, new type of construction machinery using the mechanism of CMG (control moment gyro), for the attitude control of an unstructured object such as a beam carried by a tower crane, is designed and implemented.

The balance beam controller consists of a wheel spinning at high speed and an outer gimbal for controlling the attitude of the wheel. Two motors, one for the wheel and the other for the gimbal, are used. Applying force to the spin axis of the wheel, as an input of the system, leads the torque about the axis because of the gyro effects. This torque is used to control the attitude of the unstructured object in this study. For the stabilizer function, in addition, holding the load at the current position, the attitude of the wheel is freed by cutting the power applied to the gimbal motor of the balance beam controller, which result in the braking force to stop the load by gyro effect.

The works presented here include the mechanical system of the balance beam controller, the remote controller, the servo controller and the control software for the system. We also present experimental results to show that the system we proposed is useful as a new construction machinery which can control the attitude of the beam hanging from a tower crane.

Key Words : CMG, Gyro actuator, gyro effect, balance beam, construction machinery, PID control

1. 서 론

본 논문에서는 타워 크레인으로부터 공중에 매달린 빔의 자세제어를 할 수 있는 새로운 장치인 밸런스 빔을 개발하는데 목적을 둔다. 밸런스 빔은 작업자가 빔의 방향을 조정하거나 유지하기 위해 손으로 빔을 당길 필요가 없기 때문에 건설현장에서 위험한 빔 이동작업으로부터 작업자를 보호할 수 있다. 밸런스 빔은 공중 물체의 위치를 감지하기 위해 일반적으로 널리 사용되는 기계적 적분 자이로(FRIG)의 기본적인 역학관계로부터 고안되었다. 제시된 밸런스 빔은 크레인에 의해 이동되는 빔의 자세제어와 안정화기능을 제공한다. 즉, 수평면위에 임의의 목표 각을 가진 빔을 회전시키고 바람과 같은 외란에 관계없이 현재 위치에서 빔을 고정시킬 수 있다.

보통, FRIG는 고속의 휠 회전으로 구성되어 있고 공중에서 FRIG는 고정된 한 방향으로 회전축을 유지하는 경향을 가지고 있다. 또한, 회전축에 수직방향으로 힘을 가하면 그 축과 수직인 축을 기준으로 한 회전이 발생되는데, 이 회전

운동의 특성을 공중물체 자세제어를 위한 구동장치로 사용하는 것이 본 연구의 핵심 내용이다. 이 자이로 구동장치(이하 밸런스 빔)는 위치 제어기를 가진 외부 짐벌과 고속으로 회전하는 휠로 설계하였다. 부착된 모터의 위치를 제어하는 외부 짐벌의 자세변화는 밸런스 빔이 공중에 매달린 경우 수직 축에 대하여 토크를 발생시킨다. 이 특성은 곤돌라와 비행물체의 안정화와 같은 몇 가지 연구에서도 볼 수 있다. Hiroshi Kanki[1]의 경우 곤돌라의 자세안정화에 CMG(Control moment gyro)를 이용하여 바람에 의한 진동을 제거하는 연구를 수행하였으며, Ahmed[2]는 회전하는 물체에 불안정한 영향을 제거하는 자이로 진자에 대한 연구를 하였다. Li[3]는 비행물체가 회전하는 경우에 매달려 있는 부속물들의 자세 안정화에 대한 연구를 수행하였다. 이와 같은 모든 연구는 자세제어에 근거를 둔 것이 아니라 일정 자세를 유지하는 안정화에 국한된 연구이다.

본 연구서는 물체의 자세제어뿐만 아니라 앞서 수행한 연구[4][5]를 확장하여 실제 건설 현장에서 사용이 가능한 밸런스 빔을 설계 제작한다. 이전 연구에서는 실험실 규모의 밸런스 빔을 대상으로 제어기를 설계하여 짐벌 모터를 직접 구동하여 자세제어 및 안정화를 하였다. 그러나 실장 시스템의 경우에는 안정화를 위하여 휠과 짐벌 사이에 클러치를 설치하고 이를 연결(부하 회전을 위한 짐벌 자세 제어) 및 단절(부하 정지를 위한 안정화)하는 방식을 채택 하였다. 이는 공사현장에서 사용하기 위해 휠의 관성을 크게 하여야함

* 正 會 員 : 光云大學 電氣工學科 副教授 · 工博

** 正 會 員 : 光云大學 情報制御工學科 助教授 · 工博

接受日字 : 2002年 8月 27日

最終完了 : 2002年 11月 19日

에 기인한 것으로, 이 휠의 자세제어를 위한 짐벌 구동 모터의 용량이 제한되어 있기 때문에 모터 기어 비 또한 클 수밖에 없기 때문이다. 즉, 안정화 모드에서 짐벌 모터는 휠을 고정하는 짐벌의 움직임(부하에 의한 자이로 효과에 의한 반작용)에 빠르게 회전하여 휠의 자세를 자유롭게 하여야 한다. 이때 짐벌 모터에 연결된 기어 장치는 휠 자세에 방해가 되므로 짐벌 이동으로부터 분리되어야 한다. 만약 모터가 짐벌과 분리되지 않는다면 짐벌 이동에 의해 기어나 모터가 손상될 수 있다. 결론적으로 제안한 시스템에서는 짐벌 자세제어 및 안정화의 두 기능을 수행하는 기계구조 및 제어기를 제시하고 이를 구현해 보임으로서 건설 현장에서 유용한 신 개념의 건설 장비를 제시한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 다음 장에서는 제안한 밸런스 빔 시스템의 구조와 자이로 효과에 대해 설명하고, 제안한 밸런스 빔 시스템의 모델링 및 제어기에 대하여는 3장에서 설명한다. 부하 이동에 대한 실험 결과는 4장에서 설명하며, 마지막으로 5 장에는 이 연구의 결론을 내린다.

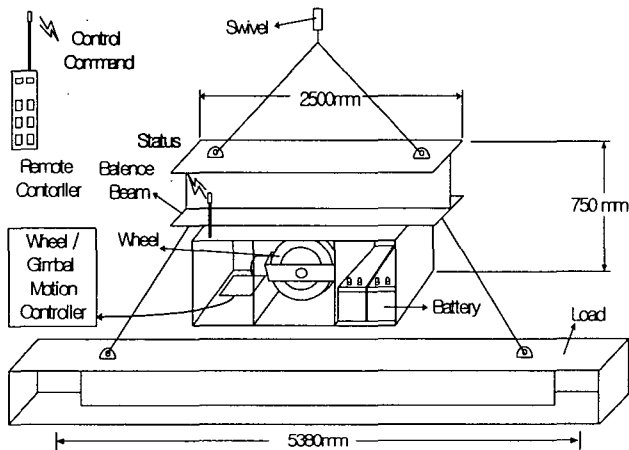


그림 1 밸런스 빔 시스템의 구성
Fig. 1 The structure of the balance beam system

2. 자이로 역학과 밸런스 빔

그림 1은 본 연구에서 개발한 시스템을 이용하여 공중에 매달린 빔의 자세제어의 예를 표시한 것이다. 시스템을 구성하는 주요 부분으로는, 밸런스 빔, 부하, 고정고리(Swivel) 그리고 무선 조정기를 포함하고 있다. 무선제어기는 제어명령(휠 기동, 짐벌 각 및 이동 속도 등)을 컨트롤러로 전송하는데 사용된다. 휠과 짐벌 모터의 상태 또한 제어기로부터의 무선통신을 이용하여 무선 조정기로 피드백되어 사용자가 제어기의 상태를 쉽게 알 수 있도록 하였다. 이 장에서는 고속으로 회전하는 휠의 자세 조정이 가능한 밸런스 빔이 공중물체의 자세제어가 가능한 원리와 밸런스 빔의 세부 구조를 설명한다.

2.1 자이로 역학

그림 2에서 L_x 는 x축 방향의 각 운동량, N_y 는 y축 방향의 토크, J_w 는 휠의 관성이다. 그림 2에서 x축 상의 임의의

점 p에 힘을 가하면 다음과 같이 표시되는 y축을 기준으로 하는 토크, N_y ,가 발생하며, 이때의 각운동량은 식(2)로 표시된다.[7]

$$\frac{dL_y}{dt} = N_y \quad (1)$$

$$L = L_x + dL_y \quad (2)$$

여기서, L은 변화된 후의 각 운동량이며, 각 운동량의 변화량 dL_y 는 L_x 에 비하여 작으므로 다음의 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$d\phi = \frac{dL_y}{L_x} \quad (3)$$

이는 다시 식(1)로부터 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{N_y}{L_x} \quad (4)$$

위의 결과로부터 y축을 회전시키는 토크가 z축을 중심으로 한 회전운동을 일으키는 자이로 효과(gyro effect)가 일어난다는 것을 알 수 있다.

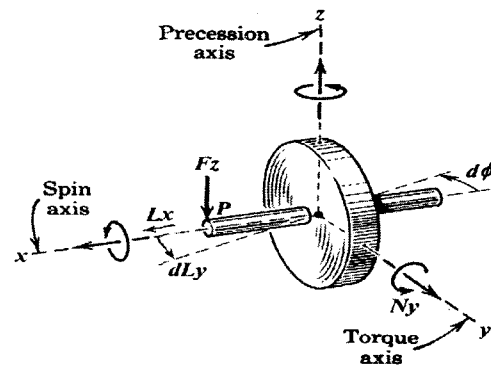


그림 2 자이로 역학
Fig. 2 Gyro dynamics

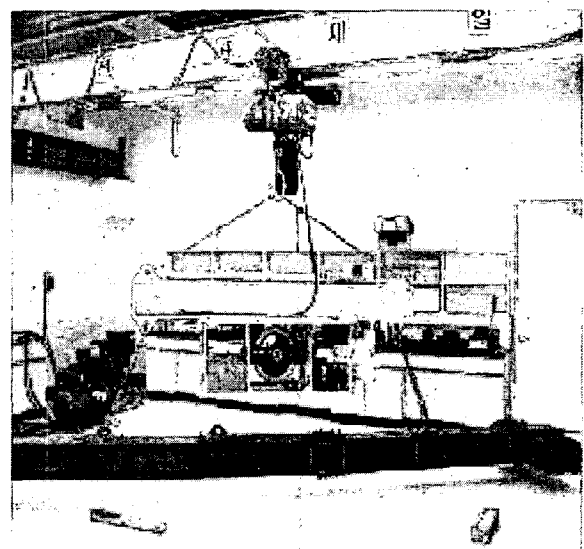


그림 3 밸런스 빔 시스템과 부하
Fig. 3 A balance beam system and load

2.2 밸런스 빔 시스템

그림 3은 개발된 밸런스 빔 시스템으로 모터에 의해 빠른 회전을 하는 휠, 휠과 휠 모터를 지지하는 내부 짐벌, 그리고 내부 짐벌과 짐벌 모터를 지지하는 외부 짐벌로 구성되어 있다. 휠의 속도와 짐벌의 자세 제어를 위한 두개의 제어기를 설치하였으며, 전원공급을 위한 충전지와 전원 공급용 인버터 및 센서 등을 설치하였다. 밸런스빔은 회전고리(swivel hook)로 크레인과 연결되며, 부하는 밸런스 빔의 지지대 좌우 고리에 쇠줄로 연결된다. 밸런스 빔의 내부 구조는 그림 4에 자세히 표시하였다.

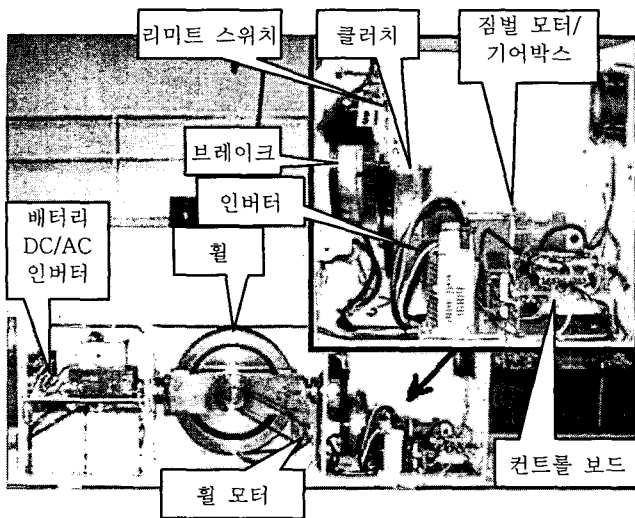


그림 4 짐벌의 구조
Fig. 4 The structure of gimbal

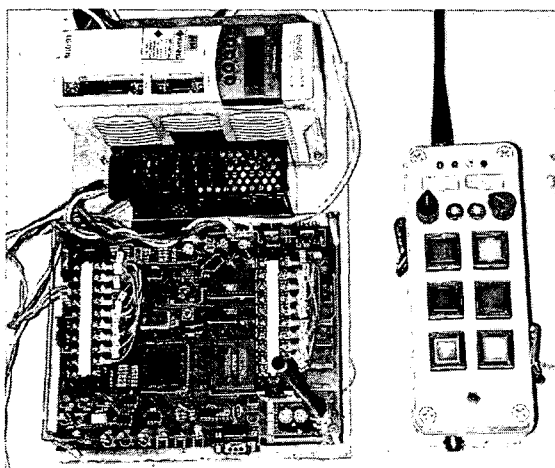


그림 5 CMG 시스템의 제어기
Fig. 5 The controller for CMG subsystem

그림에서 휠은 벨트를 통하여 모터에 연결되어 고속 회전한다. 그리고 그림 우측에 확대 표시한 휠 자세 제어를 위한 짐벌 구동부에는 모터가 기어박스 및 클러치를 통하여 내부 짐벌로 연결된다. 클러치는 이전에 설명한 안정화 모드를 위한 것이며, 휠의 절대위치를 인식하기 위한 전위경도

계 및 과도한 짐벌 이동으로부터 장치의 손상을 방지하기 위한 리미트 스위치를 내부짐벌 회전축 끝단 및 짐벌 이동의 양 끝에 설치하였다.

밸런스 빔의 부하 수용능력은 휠의 관성에 의하여 결정되는데, 위 시험 장치에서는 여기서 식(5)를 이용하여 휠의 관성을 근사적으로 계산하면 약 $0.0134 [kgm^2]$ 이 된다.

$$J_{wheel} = \frac{1}{2} mr^2 \quad (5)$$

부하관성은 부하의 형태가 6면체로 가정하여 식(6)으로부터 얻을 수 있다[6].

$$J_{load} = \frac{1}{12} m(a^2 + l^2) \quad (6)$$

여기서 a는 부하의 두께이며 l은 부하의 넓이로 나타낸다. 부하관성은 높이에 영향을 주지 않는다. 따라서 근사적 계산으로부터 밸런스 빔의 관성을 $163 [kgm^2]$, 부하의 관성을 $7804 [kgm^2]$ 로 구할 수 있다.

휠의 속도와 자세를 제어하기 위한 시스템을 그림 5에 표시하였다. 주제어 장치는 16비트 마이크로프로세서인 87C196CA로 설계한 것으로, 그림 우측에 표시한 무선조정기(87C196CA로 자체 제작함)와 무선 통신하는 기능과 하나의 직류모터를 구동하며, 아날로그 및 디지털 신호 입출력이 가능하다. 모터 구동은 전위경도계의 신호를 A/D 변환 한 후 제어입력을 계산하고, CPU의 EPA기능을 이용하여 20KHz의 PWM 신호를 발생 한 후 NS사의 LMD18200로 증폭하여 구동하였다. 디코더와 엔코더 카운터를 포함하는 대부분의 디지털 로직은 Altera MAX+plusII를 이용한 FPGA(EPM7128SLC84-15)로 만들어서 사용하였다.

무선제어기에는 브레이크, 클러치, 경보음, 램프 및 팬을 켜고 끌 수 있는 명령을 전송하는 누름단추가 있다. 또한 4개의 가변저항을 이용하여 짐벌의 이동 시간, 짐벌의 이동 각도, 휠 모터의 속도, 그리고 휠 모터의 가속 시간을 설정할 수 있으며, 컨트롤러보드의 상태를 받아 정보의 수신, 전송, 저장, 전원, 이동 각도, 그리고 휠의 속도를 LED로 표시하여 운전자의 편의를 도모하였다.

표 1 시스템 파라미터

Table 1 The parameter of the system

장 치 명	규 격
휠 모터	500W/220VAC, FMA-CN05-AB00 (LG)
짐벌 모터	60W/24VDC, D9N60E2R (SINMYUNG)
휠 중량 / 직경	31[kg]/400[mm]
밸런스빔 관성	163[kgm ²]
부하 관성	7804[kgm ²]
주제어기	87c196CA Control Board
무선 모듈	BIM-433-F (Radiometrix)

그림 5에서 컨트롤러보드의 가장 위쪽에 놓여진 AC 서보 드라이버(LG, FDA-5004)는 휠의 속도 제어에 사용하기 위해 AC 모터(FMA-CN05-AB00)와 연결되어 있다. 무선제어기에서 전송된 속도 명령은 주제어기에서 기준레적으로 재구성된 후 D/A 컨버터를 통하여 서보 드라이버로 전달되며,

실제 속도 제어는 서보 드라이버에서 담당한다. 주 제어기에서는 FPGA에서 엔코더 카운터를 사용하여 서보드라이버로부터의 휠 속도를 감시하며 적절한 기준 속도 궤적을 만든다. 시스템을 구성하는 주요 부분의 규격은 표 1과 같다.

3. 밸런스 빔 모델링과 제어기

본 장에서는 밸런스 빔의 휠이 정속도로 회전하고 있을 때, 휠을 지지하고 있는 내부 짐벌의 자세를 조정하기 위해 인가하는 짐벌 모터전압을 입력으로 하고, 짐벌 자세변화에 의한 부하의 회전을 출력으로 한 밸런스 빔을 모델링하고, 부착되는 부하를 적절히 회전시키기 위한 제어기 설계에 대하여 설명한다.

3.1 밸런스 빔의 모델링

짐벌이 휠보다 상당히 가볍고, 연결고리(swivel hook)와 베어링의 마찰계수는 매우 작으며, 모터의 회전자 인덕턴스는 무시가능하다는 가정을 하면, 짐벌 모터에 인가되는 전압과 내부 짐벌의 자세변화에 대한 전달 함수는 다음과 같이 구할 수 있다[8].

$$G_1(s) = \frac{\theta_c(s)}{v_a(s)} = \frac{k_m}{s(\tau_m s + 1)} \quad (7)$$

$$k_m = \frac{k_t}{(k_r k_b + f_m R_a)}, \quad \tau_m = \frac{(J_r + J_c) R_a}{(k_r k_b + f_m R_a)}$$

$$J_c = M_w \frac{r^2}{4} + M_w \frac{h^2}{12}$$

여기서, k_t 는 토크 상수, k_b 는 역기전력 상수, τ_m 은 시정수이며, R_a 는 권선저항, J_r 은 짐벌 모터의 회전자 관성, 그리고 J_c 는 휠의 직경방향 회전관성으로 휠의 반경 r 과 두께 h 로부터 구해진다.

다음으로, 밸런스 빔에 부하가 부착된 경우에 짐벌 자세 각 θ_c 와 부하로 전달되는 수직방향의 회전 ϕ 의 상관관계를 수식으로 표시하면 다음과 같다[9].

$$(J_r + J_c) \frac{d^2 \theta_c}{dt^2} + f_m \frac{d\theta_c}{dt} = J_w \omega_w \frac{d\phi}{dt} - J_L \frac{d^2 \phi}{dt^2} \quad (8)$$

$$J_w = M_w \frac{r^2}{2}, \quad J_L = M_L \frac{(a^2 + b^2)}{12}$$

여기서, J_r 은 모터 회전자의 관성, M_w 는 휠의 질량, M_L 은 부하의 질량, a , b 는 각각 부하의 가로, 세로길이이며, J_w 는 회전축 방향의 휠 관성, J_c 는 앞서 언급한 직경방향의 휠 관성이다. 따라서 ϕ 와 θ_c 사이의 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$G_2(s) = \frac{\phi(s)}{\theta_c(s)} = - \frac{(J_r + J_c)s + f_m}{J_L s - J_w \omega_w} \quad (9)$$

그러므로 인가되는 모터전압과 부하 회전 사이의 전체의 시스템 전달함수 $G(s)$ 는 식(7)와 (9)로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} G(s) &= -G_1(s)G_2(s) \\ &= \frac{1}{s} \frac{(J_r + J_c)k_m s + k_m f_m}{J_L \tau_m s^2 + (J_L - J_w \omega_w \tau_m)s - J_w \omega_w} \\ &= \frac{1}{s} \frac{b_1 s + b_0}{s^2 + a_1 s - a_0} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, 음의 부호는 식 표현의 편의상 추가한 것으로 모터전원을 반대극성으로 연결하면 되며, a_0 , b_0 , b_1 은 휠의 형상 및 회전속도, 그리고 짐벌 모터의 규격으로부터 결정되는 양의 상수이고, a_1 은 부하의 관성에 따라 양 또는 음의 상수가 된다. 즉, 위의 전달함수는 하나의 불안정한 극점을 갖는다.

3.2 제어기

밸런스 빔은 휠을 가속하여 일정 속도를 유지하게 하는 속도 제어기와 휠의 자세를 제어하기 위한 위치제어기, 그리고 부하의 자세 고정을 위한 안정화 장치로 구성된다. 휠 모터의 회전 속도는 D/A 포트를 통하여 상용 서보 컨트롤러에 전달되는데, 휠의 관성이 매우 크므로 제어기 앰프 및 모터의 용량을 고려하여 목표속도(3000[rpm])에 까지 지수형 기준 궤적속도를 설정하였다. 본 실험에서의 가속 시간은 10분으로 정하였다.

짐벌 위치제어는 PID 제어기로 하였다. 제어에 필요한 기준 궤적은 사용자가 무선 조정기의 가변저항을 조정하여 설정한 이동 각 및 이동 속도에 의하여 결정된다. 이 기준 궤적은 매 샘플 주기(2ms)마다의 위치명령으로 기동 및 정지를 원활히 하기 위하여 위치의 미분인 속도를 사다리꼴 형태로 하였다. 즉, 속도 곡선은 가속구간, 등속구간, 감속구간인 3부분으로 나누었다(그림 6 참조).

그림에서 보여주듯이 처음 10 스텝 동안에는 짐벌 모터가 등가속 되며, 마지막 10 스텝 동안은 등감속 되고, 나머지 구간은 등속운동을 한다. 따라서 사용자 명령에 따라 이동 속도인 전체 스텝 수(20+x)와 이동 각($x*y + 10*y$)이 주어지면 최고 속도인 등속구간의 속도(y)가 구해진다. 즉, 그림 6의 속도 함수가 구해지며, 이로부터 매 샘플 마다의 기준 위치가 정해진다.

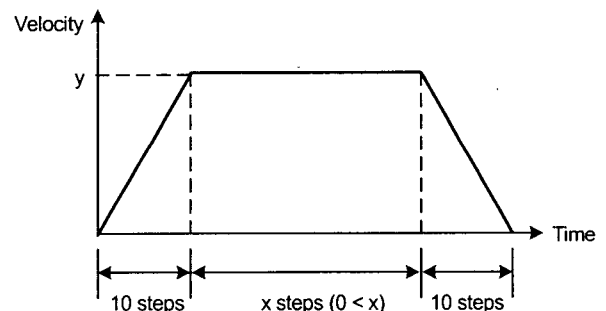


그림 6 기준 속도 궤적
Fig. 6 The reference velocity profile

가속 및 감속 스텝 수는 휠의 직경방향 관성 및 모터의 용량을 고려하여 실험적으로 구한 것이다.

자세 안정화 기능은 짐벌 이동에 따른 부하의 회전을 목

표지점에서 정지시키거나, 크레인 이동에 따른 외력 또는 바람 등의 외란에도 불구하고 부하의 자세를 유지시키는 것으로, 휠과 짐벌 사이에 설치된 클러치를 분리하여 실행된다. 즉, 내부 짐벌이 자유롭게 움직이는 경우에는 부하의 운동에 의한 회전력(식 (8)의 우변)이 내부 짐벌의 운동(식 (8)의 좌변)에 의하여 정지하게 된다. 이는 회전체가 회전축의 위치를 일정하게 유지하려는 자이로 효과[9]에 의한 복원력을 활용한 것이다. 물론 부하 움직임에 의한 외력이 너무 큰 경우에는 짐벌 움직임의 제약에 따라 안정화 한계를 벗어나게 되는데, 이는 휠 관성을 제어할 부하의 최대 관성을 감안하여 충분히 크게 하여야한다. 적절한 휠 관성과 부하와의 상관관계는 4장에서 자세히 설명한다.

4. 실험 및 검토

밸런스 빔 설계 시 부하 수용 능력은 휠의 형상과 회전속도 그리고 휠을 지지하고 있는 내부 짐벌의 자세변화에 의하여 정해진다. 따라서 본 장에서는 제시한 밸런스 빔으로 공중물체의 자세 제어가 됨을 보여주는 것 외에도, 몇 가지 실험을 통하여 앞서 언급한 파라미터들의 상호관계를 살펴 보아 개략적이거나 밸런스 빔 설계 기준을 제시한다.

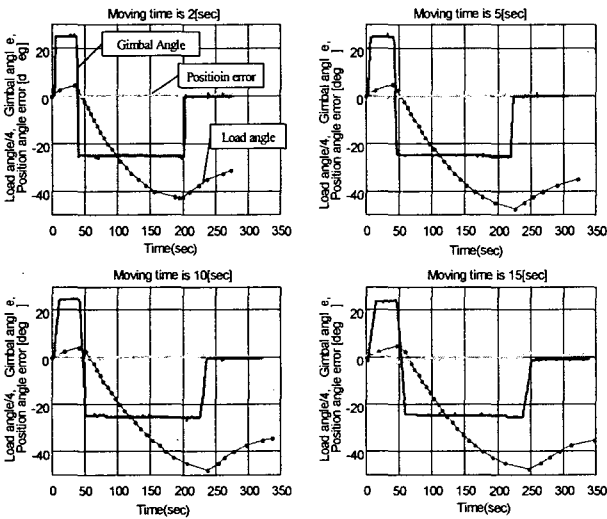


그림 7 부하와 짐벌 각 궤적
Fig. 7 The trajectory of load and gimbal angle

4.1 실험 1: 짐벌 이동시간과 부하의 회전

실험에 이용된 부하의 관성은 부하 빔과 빔 양쪽 끝에 140개의 철근을 합하여 $6,938 [kg \cdot m^2]$ 이다(그림 3 : 철근 1개의 무게는 2.93kg이다). 따라서 밸런스 빔과 부하의 총 관성은 $7.1 [ton \cdot m^2]$ 이다. 내부 짐벌 각은 0에서 25도, 25에서 -25도, -25에서 0도로 이동하게 하였고, 이동시간을 4가지(2, 5, 10, 15초)로 달리 하여 비교하였으며, 짐벌 이동 명령은 전 명령에 의한 부하 이동이 멈춘 직후(육안으로 확인) 실행하였다.

그림 7에서 실선은 짐벌각을 나타내며, 점과 함께 표시된 선은 부하각을 나타낸다. 부하각은 비교하기 편하도록 1/4로

축소하여 표시하였으며, 중앙의 흐린 실선은 짐벌각 제어 오차이다.

위 실험을 종합해보면, 짐벌의 첫 이동 구간(0도에서 25도)에서 부하는 짐벌 이동시간에 상관없이 20도로 회전하였다. 그러나 짐벌 이동범위가 큰(-25도에서 25도) 경우는 표 2에서 보여주는 것처럼 부하 이동이 다르게 나타났다. 이동시간이 2초보다 작은 경우는 짐벌 모터에 무리가 있어 배제하였으며, 15초 보다 큰 이동 시간은 부하의 움직임이 너무 느려 비교자료에서 배제하였다.

표 2 여러 가지 짐벌 이동시간에 대한 부하 이동
Table 2 Load motion for different gimbal moving time

이동시간	2[sec]	5[sec]	10[sec]	15[sec]
항목				
부하 이동 각도 [도]	192	208	210	208
부하이동시간 [초]	200	225	238	250
기울기(+25~-25도 구간)	-1.156	-1.08	-1.076	-1.028

표 2로부터 부하의 이동 각은 짐벌의 이동 시간에 관계 없이 거의 일정하다는 것을 알 수 있으나, 부하의 이동 시간에서는 차이를 보이고 있다. 즉 부하 이동 시간은 짐벌 이동 시간이 길어짐에 따라 길어짐을 알 수 있다. 특이한 것은 2초 이동시간의 경우에서 부하 회전 속도(기울기)가 다른 이동시간에 비해 크며, 부하 이동 각도가 비교적 적다는 것이다. 이는 급격한 짐벌자세 변화로 부하가 초기에 급가속이 되어 속도가 증가했으며, 큰 속도로 인하여 회전고리의 마찰에 의한 에너지 손실이 커졌음으로 해석된다.

이상을 종합하면, 부하 이동 시간을 고려하지 않고 일정 각도로 부하를 회전하는 경우 짐벌 이동 시간이 중요하지 않다는 결론을 내릴 수 있다. 그러나 짧은 시간에 부하를 회전시키기 위해서는 때문에 짧은 짐벌 이동 시간을 선택한다.

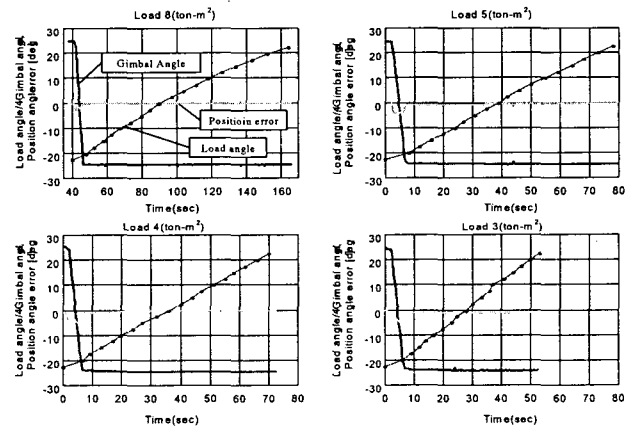


그림 8 부하와 짐벌 각의 궤적
Fig. 8 The trajectory of load and gimbal angle

4.2 실험 2: 부하 변화

같은 크기의 각과 이동시간으로 짐벌을 이동하는 경우 여

러 종류의 부하가 회전하는 특성 실험을 하였다. 짐벌의 이동 범위는 -25도에서 25도이며, 이동 시간은 5초로 하였다. 부하는 표 3과 같이 5종류로 하였으나 8 [ton·m²]의 경우 목표 회전각인 180도를 회전시키지 못하여 특성곡선은 생략하였다.

그림 8에서 실선은 짐벌각을 나타내며, 점과 함께 표시된 선은 부하각을 나타낸다. 부하각은 비교하기 편하도록 1/4로 축소하여 표시하였으며, 중앙의 흐린 실선은 짐벌각 제어 오차이다. 부하별 이동 속도와 180도 이동에 소요된 시간을 정리하면 표 3과 같다. 최대부하(8 [kg·m²])의 경우 부하가 목표각(180도)에 도달하지 못하고 140도에서 정지하여 정지할 때의 시간을 기록하였다.

표 3으로부터 부하의 속도는 부하관성과 반비례한다는 것을 알 수 있다.

표 3 몇 가지 다른 부하에 대한 부하 이동
Table 3 Load motion for different load values

부하	8	7	5	4	3
항목	[ton·m ²]	[ton·m ²]	[ton·m ²]	[ton·m ²]	[ton·m ²]
평균 각속도 (deg/sec)	1.09	1.54	2.30	2.57	3.40
180도 이동시간 (sec)	145(140°)	124	73	66	50

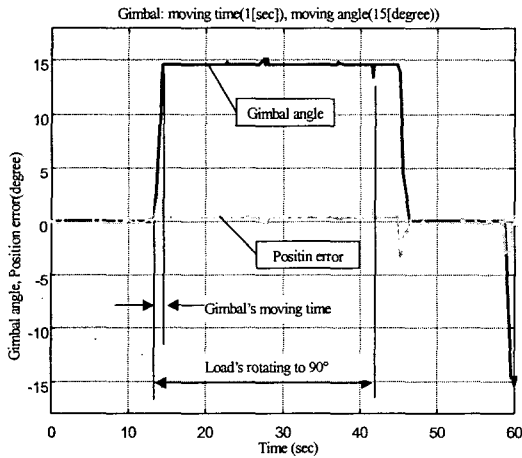


그림 9 부하를 90° 회전시키기 위한 짐벌 운전
Fig. 9 Gimbal motion to rotate load 90°

4.3 실험 3: 짐벌 이동시간과 각도

앞서의 두 실험에서는 짐벌 자세변화(짐벌각 크기와 이동 속도)에 따른 부하의 회전 특성을 알아본데 반하여, 여기서는 특정 부하를 효율적으로 회전시키기 위한 짐벌 구동 조건을 알아보고자 한다. 즉, 짐벌 이동 시간과 짐벌의 이동각도를 다양하게 변화시켜가며 부하 이동과 짐벌 자세변화 사이의 관계를 알아본다. 부하는 관성이 875 [kg·m²]인 빔으로 고정하였으며, 짐벌 이동 명령은 표 4에서와 같이 4가지 이동 시간(1, 5, 10, 15초)과 3가지 이동각도(5, 10, 15초)의

모든 조합의 명령에 대하여 부하가 90° 회전할 때까지의 시간을 기록하였다.

그림 9는 15도의 이동각과 1초의 이동시간 명령으로 부하를 회전시킬 때의 짐벌 궤적을 표시한 것이다. 그림에서 '14초 부근'에서 운전자가 짐벌 이동 명령을 보냄을 알 수 있으며, 부하가 90° 회전하면(41초 부근) 곧바로 클러치를 분리하여 휠의 움직임을 자유롭게 하여 자이로 효과(41초 부근의 짐벌 움직임)에 의해 부하가 정지되는 과정을 보여준다. 이어서 다음 동작을 위하여 짐벌을 원 위치로 돌려놓는 과정을 보여준다. 이와 같은 과정을 반복하여 표 4의 실험 결과를 얻게 되는데, 표에서 무한대 표시는 부하가 목표(90°)에 도달하지 못함을 의미하며 이때의 최종 회전각을 함께 기록한 것이다.

표의 내용을 종합해보면, 짐벌의 이동 각도가 증가됨에 따라(표의 열방향 해석) 부하의 이동시간은 단축 된다. 이에 반하여 짐벌의 이동 시간이 증가되면(표의 행방향) 목표지점까지의 부하 이동 시간은 길어지게 된다.

표 4 다양한 짐벌 자세변화에 대한 부하 이동
Table 4 Load motion for various gimbal moving time and angle

이동각도 \ 이동시간	1초	5초	10초	15초
5°	20°/∞	22°/∞	21°/∞	19°/∞
10°	90°/60초	85°/∞	80°/∞	67°/∞
15°	90°/27초	90°/33초	90°/36초	90°/42초

4.4 실험에 대한 검토

이상의 실험 결과를 종합해보면 부하가 많이 회전시키려면 짐벌각도 많이 이동시켜야하며, 부하를 신속하게 회전시키려면 짐벌각 이동시간도 짧게 해야함을 알 수 있다. 그러나 너무 큰 짐벌 이동각 및 이동시간은 부하를 지나치게 빨리 회전시키므로 목표지점에서 정지시키고자 클러치를 분리할 때 내부짐벌의 과도상태가 크게 발생한다. 따라서 짐벌 이동 명령은 부하에 따라 적절히 설정하여야 함을 알 수 있었다.

본 연구의 목표인 부하 관성(8 [kg·m²])은 '5초 동안 50도'의 짐벌 이동 명령을 실행하여 '145초 동안 140도'를 회전시킬 수 있었으며, 90° 회전시킬 경우 표 4에서와 같이 '5초 동안 15도' 이동 명령을 실행하여 부드러운 부하회전이 가능했다.

5. 결 론

본 연구는 타워 크레인으로부터 매달린 빔의 자세를 제어할 수 있는 밸런스 빔 시스템을 제안 했다. 제시된 시스템을 수학적으로 분석하여 동작원리를 상세히 기술하였으며, 제어 시스템을 구성하여 실제적으로 사용할 수 있게 하였고,

현장에서 사용하기 편리하도록 무선 조정기를 함께 개발하였다. 또한 실험을 통하여 제시한 시스템이 새로운 건설기계로 현장에서 사용하기에 충분함을 보여주었다. 현 시점에서 제시된 밸런스 빔을 효과적으로 사용 하려면 부하의 관성을 미리 알아서 앞선 실험 결과를 토대로 적절한 짐벌 동작 명령을 실행해야하는 번거로움이 있다. 따라서 이를 극복하기 위한 후속 연구로 회전 각속도 센서를 이용하여 자동적으로 부하관성을 측정하는 '지능형 밸런스 빔'을 개발 중이다.

감사의 글

이 논문은 2001년도 광운대학교 교내 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] Hiroshi Kanki, Yoshitsugu Nekomoto, Hiroyuki Monobe, Hironobu Ogura, Kiichi Kobayashi, "Development of CMG Active Vibration Control Device for Gondola," JSME Int. J. Series C, Vol. 37, No. 3, pp. 468-470, 1994.
- [2] Toro Jasim Ahmed, Robert H. Miller, Edward H. Hoop man, Vincent T. Coppola, Dennis S. Bernstein Tracie Andrusiak, David Action, "An Actively Controlled Control Moment Gyro/Gyro Pendulum Testbed," IEEE Int. Conf. on Control Applications, Vol. 1, pp. 250-252, 1997.
- [3] Feiyue Li, Peter M. Bainum, N. Glenn Creamer, Shalom Fisher, "Rapid Reorientation Maneuvers of Experimental Spacecraft with a Pendulum Appen-dage," J. of Guidance Control & Dynamics, V.21 N.1, pp. 164-171, 1998.
- [4] Keon Young Yi, Young Gu Chung, "An Im-plementation of a Gyro Actuator for the Attitude Control of an Unstructured Object," IEEE Int. Conf. Robotic and Automation, Vol. 2, pp. 1626-1631, 1999.
- [5] Keon Young Yi, Man Oh Kwon, "An attitude control and stabilizoiin of an unstructured object using CMG subsystem," Proceeding of the ISIM 2000, Oct. 4-7, pp. 311-316, 2000.
- [6] Vernon D. Barger, Martin G. Olsson, CLASSICAL MECHANICS, McGRAW-HILL, 1995.
- [7] J. L. Merian, L. G. Kraige, ENGINEERING MECHANICS, WILEY, 1993.
- [8] Chi-Tsong Chen, ANALYSIS AND SYNTHESIS OF LINEAR CONTROL SYSTEMS, Pond Woods Press, 1978.
- [9] Norman S. Nise, CONTROL SYSTEM ENGINEE-RING, Addison-Wesley, 1995.

저 자 소 개



이 건 영(李健寧)

1959년 8월 2일생.1982년 한양대 공대 전 기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공 학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 졸업 (공학). 현재 광운대 전기공학과 부교수
Tel : 02-940-5142
E-mail : keonyi@earth.kw.ac.kr



김진오(金鎭喆)

1959년 10월 27일 생. 1983년 서울대학교 공대 기계공학과 졸업. 1985년 동 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1992년 Carnegie Mellon University 졸업 (공학). 현재 광운대 정보제어공학과 조교수
Tel : 02-940-5158
E-mail : jokim@daisy.kw.ac.kr