

위치 피드백 제어를 이용한 케이싱 오실레이터의 실시간 오토밸런싱에 관한 연구

이은준* · 김주영** · 백재호** · 박명관†
(2002년 4월 9일 접수, 2003년 3월 19일 심사완료)

A Study on the Real Time Auto-Balancing of a Casing Oscillator Using Posture Feedback Control

Eun-Jun Rhee, Joo-Young Kim, Jae-Ho Baik and Myeong-Kwan Park

Key Words: Casing Oscillator(케이싱 오실레이터), Kinematic Analysis(기구학 해석), Work Space
(작업공간), Auto-Balancing(오토밸런싱)

Abstract

The casing oscillator used for basic construction of buildings, factories and bridges is a construction machine, which rotates and rolls the casing to insert it into the ground. It is very important that the casing is positioned perpendicular to the sea level regardless of the slope of the ground. In this paper, we present a new casing oscillator that doesn't need additional work to level the ground for the casing insertion. The kinematic analysis for work space of a casing oscillator is presented and carried out with auto-balancing of the casing oscillator using posture feedback control.

1. 서론

로봇은 가정, 오락, 건설, 의료, 우주항공, 해양 구조물, 핵폐기물 관련 시설 등 다방면에서 그 수요가 폭발적으로 늘어나고 있다. 특히, 건설 분야의 경우 인건비 상승, 만성적인 노동력 부족 현상, 열악한 작업환경 등의 문제를 해결하기 위해 기존의 건설장비의 자동화가 본격적으로 추진되고 있으며 이로 인해 노동조건 개선과 생산

성의 향상 등의 성과를 거두고 있다.^(1,2)

케이싱 오실레이터는 건물의 기초, 도로교, 철도교, 철탑 등의 기초 작업시 큰 하중이나 모멘트가 요구되는 케이싱(Casing)의 지면압입을 목적으로 사용되는 약 30톤 가량의 건설용 중장비이다.

기초작업을 위해, 먼저 케이싱 오실레이터를 이용하여 케이싱(Casing)을 삽입한 뒤 그 내부를 굴착 및 배토하여 소정의 깊이까지 굴착 완료한다. 그 후 내부의 흙을 제거하고 철근이나 H빔 등의 응력재를 삽입한 뒤 콘크리트를 타설하고 다시 케이싱 오실레이터를 이용하여 케이싱을 인발하는 과정을 거쳐 기초 작업이 이루어진다. 이때, 지름이 약 3-5m 정도에 이르는 케이싱을 삽입하거나 인발하기 위해서는 매우 큰 힘이 요구

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부 및
기계기술연구소

E-mail : mkpark1@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2464 FAX : (051)514-0685

* 회원, 부산대학교 기계기술연구소

** 부산대학교 대학원

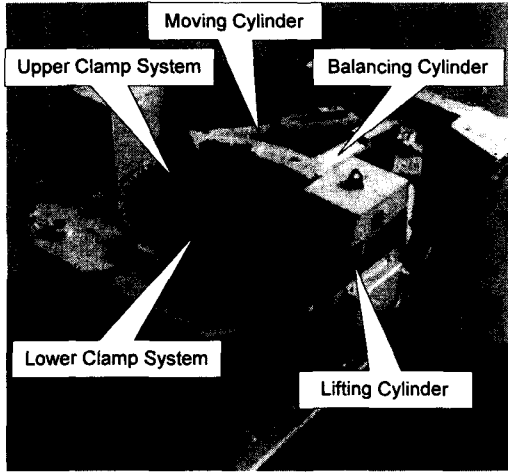


Fig. 1 Casing Oscillator

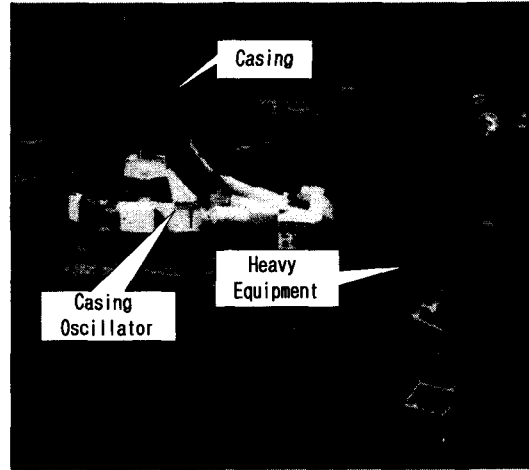


Fig. 2 Operation of Casing Oscillator

되므로 케이싱 오실레이터는 유압식으로 구동된다. 케이싱을 원하는 깊이와 직경으로 압입하기 위해서는 지면과 수직으로 압입하는 것이 중요하다. 그러나 균일하지 않은 지면의 조건에 의해 케이싱을 수직 압입하기 위해서는 지면의 평탄화가 선행되어야 하고 압입 작업 중에도 수시로 케이싱의 수직 압입 여부를 확인해야 한다. 케이싱 수직 압입 여부 확인은 수직계를 이용하여 수직 여부를 측정하는 또 다른 작업자에 의해 이루어진다. 작업도중 케이싱의 기울어짐이 발생하는 경우는 압입작업을 중지한 채 기중기나 크레인 등의 중장비를 사용하여 수직을 보정하기 위한 작업을 수행하고 있다. 이러한 방법으로는 수직 압입의 정확도가 떨어질 뿐만 아니라 보정작업에 많은 시간이 소요되게 된다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 기존의 케이싱 오실레이터 구조와는 다른 구조의 케이싱 오실레이터를 제시하였다. 수직 압입 작업을 위한 밸런싱 장치를 구현하기 위해서 케이싱 오실레이터와 유사한 구조를 가진 병렬형 매니플레이터의 연구를 응용하여 자유도 계산 및 기구학 해석을 수행하였다.^(3~6)

또한, 기구학 해석을 바탕으로 케이싱 오실레이터의 작업공간을 해석하여 최적의 작업 구역을 제시하고 위치 피드백 제어(Posture Feedback Control)를 이용하여 케이싱 오실레이터의 상판이 항상 수평을 유지하도록 자세제어를 시도하여 오토밸런싱 작업을 구현하였다.

2. 기구학 해석

2.1 케이싱 오실레이터의 구조 및 동작

Fig. 1에서 보는 바와 같이, 현재 건설현장에서 사용중인 케이싱 오실레이터는 상판과 하판 그리고 5개의 작동기로 구성되어 있다. 하판은 바닥에 고정되어 있고 상판은 직선 운동만을 수행하는 5개의 작동기에 의해 움직이며 이때 각각의 작동기와 하판은 볼 조인트로 연결되어 있다. 케이싱의 압입 작업을 용이하게 하기 위해 무빙 실린더(Moving Cylinder)를 이용하여 요잉(Yawing) 동작을 계속하게 되는데 이렇게 케이싱의 삽입을 위해 케이싱을 계속 요동시키는 작업의 모습으로 인해 케이싱 오실레이터라고 불린다.

요잉(Yawing)동작에 의해 지면과 케이싱의 마찰이 어느 정도 감소하면 밸런싱 실린더(Balancing Cylinder)로 피칭(Pitching) 동작을 수행하여 케이싱이 지면에 대해 수직이 되게 한 후 리프팅 실린더(Lifting Cylinder)로 케이싱을 압입한다. 이때 케이싱 오실레이터 구조의 특성상 요잉 동작과 피칭 동작을 동시에 수행할 수 없으며 피칭 동작에 의한 수직 보정 작업은 한계를 가지게 되므로 심한 각도로 케이싱이 기울어 진 경우는 Fig. 2과 같이 크레인이나 기중기 등의 다른 중장비를 사용하여 보정 작업을 수행하여야만 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 Fig. 3과 같이 무빙 실린더와 밸런싱 실린더가 분리되어 독립적인 운동이 가능한 새로운 구조의 케이싱 오실레이터를 제안

하였다. 두 개의 무빙 실린더의 끝 부분은 밸런싱 실린더에 연결하여 연결부를 수평으로 움직여 상판의 기울기를 조절하도록 하였으며 무빙 실린더의 동작에 간섭을 받지 않도록 하였다. 무빙 실린더와 밸런싱 실린더 사이의 원활한 동작을 위하여 3 자유도를 가지는 조인트로 구축을 시켰다. 기울어진 각도에서도 수직작업이 가능하도록 리프팅 실린더와 하판의 구축은 볼 조인트로 설계하여 기존의 구조보다 더욱 넓은 작업영역을 확보하도록 하였다.

Fig. 4는 시제품의 기구학적 해석을 위해 간략하게 도식화한 것이다. 케이싱 오실레이터의 자유도는 공간운동을 하는 기구의 자유도판별식에 의해 다음과 같이 구할 수 있다.^(7,8)

$$\begin{aligned}
 F &= \lambda(n-j-1) + \sum_i f_i - f_p \\
 &= 6(12-15-1) + 30 - 2 \\
 &= 4
 \end{aligned}$$

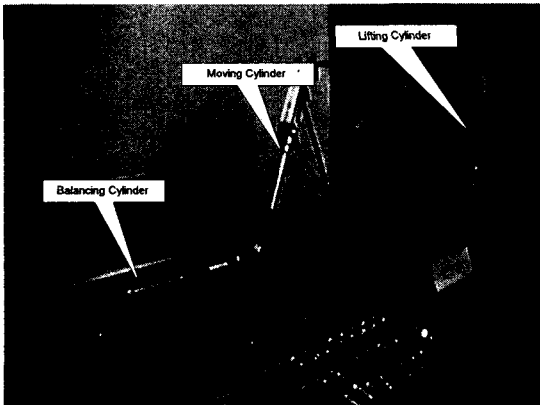


Fig. 3 Shape of New Casing Oscillator

여기서, F 는 기구의 자유도, λ 는 기구부가 작동하는 공간의 자유도, n 은 하판을 포함한 링크들의 수, j 는 관절들의 수, f_i 는 i 번째 관절의 자유도, f_p 는 여유 자유도의 수이다. 이때 케이싱 오실레이터의 4자유도 동작은 Fig. 5와 같이 나타난다.

2.2 좌표계 설정

케이싱 오실레이터의 하판에 대한 상판의 운동을 기술하기 위해 좌표계를 설정하고 설정된 좌표계들 사이의 변화를 기술한다. 먼저 하판에 고정된 좌표계를 {O}로 표시하며 이것은 항상 고정된 좌표계로서 기준 좌표계가 된다. 상판에도 또 하나의 좌표계를 설정하고 이것을 {C}로 나타

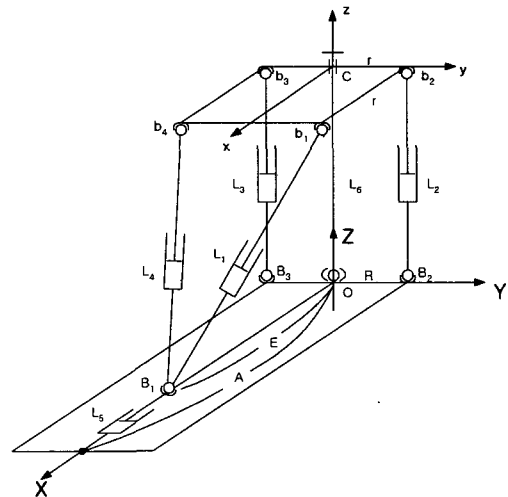


Fig. 4 A Kinematic Model of Casing Oscillator

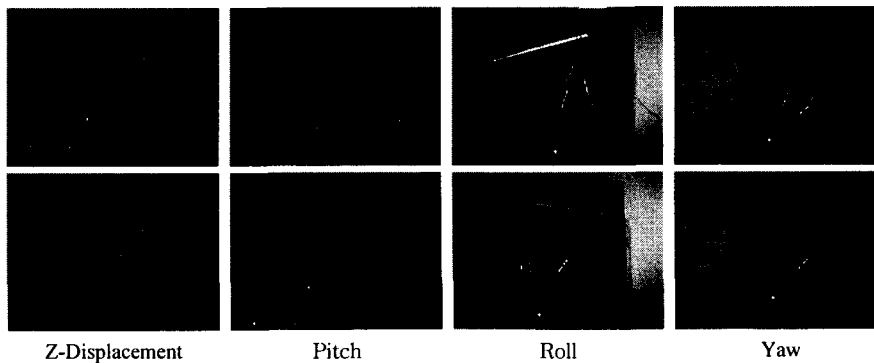
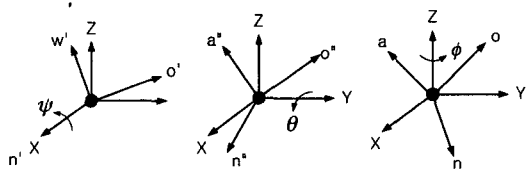


Fig. 5 Motion of Casing Oscillator



(a) Roll angle (b) Pitch angle (c) Yaw angle

Fig. 6 Representation of Roll, Pitch and Yaw Angles ψ , θ , ϕ

낸다. 이 좌표계는 상판이 움직일 때 같이 움직이는 좌표계가 되며 케이싱 오실레이터의 기구학은 기준 좌표계에 대해 움직이는 좌표계를 완전히 기술하는 문제로 귀결된다. 기준 좌표계는 대문자 XYZ로 표시하며 움직이는 좌표계는 소문자 xyz로 표시한다. 좌표계 XYZ의 Z는 하판에 수직으로 향하며, X축은 볼 조인트 연결부 B_1 을 향하고 Y축은 볼 조인트 연결부 B_2 를 향하고 있다. 하판의 경우와 유사하게, 상판의 좌표계 xyz는 상판에 놓여져 있으며, z축은 상판에 수직이고 x축은 볼 조인트 연결부 b_1 과 b_4 사이의 중심으로 향하고 y축은 볼 조인트 연결부 b_2 를 향한다. 하판 상의 볼 조인트 B_1, B_2, B_3 와 상판의 볼 조인트 b_1, b_2, b_3, b_4 를 연결하는 링크를 L_1, L_2, L_3, L_4 로 표시하며 하판 상의 고정 A에서 볼 조인트 B_1 까지 연결하는 링크를 B_1 라 한다. 좌표계 XYZ에 대한 볼 조인트의 위치는 다음과 같다.

$$B_1 = [E, 0, 0]^T \quad (1)$$

$$B_2 = [0, R, 0]^T \quad (2)$$

$$B_3 = [0, -R, 0]^T \quad (3)$$

상판에서의 xyz좌표에 대한 볼 조인트의 위치는 다음과 같다.

$$b_1 = [r, r, 0]^T \quad (4)$$

$$b_2 = [0, r, 0]^T \quad (5)$$

$$b_3 = [0, -r, 0]^T \quad (6)$$

$$b_4 = [r, -r, 0]^T \quad (7)$$

하판에 대한 상판의 운동을 완전히 기술하기 위해서는 6개의 독립된 좌표가 필요하다. 즉 병진운동의 3개 성분과 회전운동의 3개 성분이 필요하게 된다. 병진변위를 나타내기 위해서는 두 좌

표계간의 원점을 연결한 벡터 3개 성분을 찾아내면 된다. 회전운동을 기술하기 위해서 Fig. 6과 같이 표현되는 롤, 피치, 요각을 도입하기로 한다. 롤-피치-요각을 이용한 하판에 대한 상판의 회전을 기술하는 회전행렬(Rotation matrix)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R(\phi, \theta, \psi) = R(z, \phi)R(y, \theta)R(x, \psi) = \begin{bmatrix} C\phi C\theta & C\phi S\theta S\psi - S\phi C\psi & C\phi S\theta C\psi + S\phi S\psi \\ S\phi C\theta & S\phi S\theta S\psi + C\phi C\psi & S\phi S\theta C\psi - C\phi S\psi \\ -S\theta & C\theta S\psi & C\theta C\psi \end{bmatrix} \quad (8)$$

2.3 역기구학 해석

역기구학 문제는 주어진 상판의 위치와 방향으로부터 구동기의 길이를 구하는 문제이다. 즉, 좌표계 {O}에 대해서 {C}의 병진변위와 회전변위가 주어졌을 때 그때의 각 구동기의 길이를 구하는 문제이다. 케이싱 오실레이터에서는 조인트의 구속조건과 함께 작업영역을 결정하는데 필요한 연구이다. 각 링크의 길이를 벡터형식으로 나타내면 다음과 같다.

$$L_1 = \overline{B_1 b_1} = \overline{OC} + \overline{Cb_1} - \overline{OB_1} \quad (9)$$

$$L_2 = \overline{B_2 b_2} = \overline{OC} + \overline{Cb_2} - \overline{OB_2} \quad (10)$$

$$L_3 = \overline{B_3 b_3} = \overline{OC} + \overline{Cb_3} - \overline{OB_3} \quad (11)$$

$$L_4 = \overline{B_1 b_4} = \overline{OC} + \overline{Cb_4} - \overline{OB_1} \quad (12)$$

$$L_5 = \overline{B_1 A} = \overline{OA} - \overline{OB_1} \quad (13)$$

$$L_6 = \overline{OC} \quad (14)$$

식 (8)을 사용하여 식 (9)-(14)를 다시 쓰면

$$L_1 = \overline{OC} + \overline{Cb_1} - \overline{OB_1} = [x_c, y_c, z_c]^T + Rb_1 - [E, 0, 0]^T = \begin{bmatrix} x_c + rC\phi C\theta + r(C\phi S\theta S\psi - S\phi C\psi) - E \\ y_c + rS\phi C\theta + r(S\phi S\theta S\psi + C\phi C\psi) \\ z_c - rS\theta + rC\theta S\psi \end{bmatrix} \quad (15)$$

식 (15)의 양변에 놈(norm)을 취하면,

$$\|L_1\|^2 = \|\overline{OC} + \overline{Cb_1} - \overline{OB_1}\|^2 = [x_c + rC\phi C\theta + r(C\phi S\theta S\psi - S\phi C\psi) - E]^2 + [y_c + rS\phi C\theta + r(S\phi S\theta S\psi + C\phi C\psi)]^2 + [z_c - rS\theta + rC\theta S\psi]^2 \quad (16)$$

같은 방법으로 각각의 링크길이 L_2, L_3, L_4, L_5, L_6 을 구하면 다음과 같다.

$$L_2^2 = [x_c + r(C\phi S\theta S\psi - S\phi C\phi)]^2 + [y_c + r(S\phi S\theta S\psi + C\phi C\phi) - R]^2 + [z_c + r(C\theta S\phi)]^2 \quad (17)$$

$$L_3^2 = [x_c - r(C\phi S\theta S\psi - S\phi C\phi)]^2 + [y_c - r(S\phi S\theta S\psi + C\phi C\phi) + R]^2 + [z_c - r(C\theta S\phi)]^2 \quad (18)$$

$$L_4^2 = [x_c + r(C\phi C\theta) - r(C\phi S\theta S\psi - S\phi C\phi) - E]^2 + [y_c + r(S\phi C\theta) - r(S\phi S\theta S\psi + C\phi C\phi)]^2 + [z_c - rS\theta - r(C\theta S\phi)]^2 \quad (19)$$

$$L_5^2 = (A - E)^2 \quad (20)$$

$$L_6^2 = x_c^2 + y_c^2 + z_c^2 \quad (21)$$

3. 작업공간 해석

케이싱 오실레이터는 케이싱을 효과적으로 땅속에 압입하기 위해서 요잉, 피칭, 롤링, 그리고 z 방향의 병진 운동 등 4 가지의 운동을 수행한다. 그런데 실린더 L_5 는 피칭운동(θ 각 운동)을 발생시키지만 실린더 L_1 과 L_4 는 요잉(ϕ 각 운동)과 피칭(θ 각 운동)등의 2 가지 운동을 수행할 수 있다. 실린더 L_1 과 L_4 를 같은 방향으로 동시에 운동(L_1 & L_4 축소 혹은 L_1 & L_4 인장)하면 피칭 운동이 일어나고 실린더 L_1 과 L_4 를 서로 다른 방향으로 운동(L_1 축소& L_4 인장, L_1 인장& L_4 축소)하면 요잉 동작이 일어나는데 케이싱을 효율적으로 땅속에 삽입하기 위해선 요잉 동작과 피칭 동작이 동시에 일어나야 하므로 실린더 L_1 와 L_4 는 케이싱의 요잉 운동을 실린더 L_5 는 케이싱의 피칭운동만을 일으키게 한다. 실험장치에 사용되어진 장치의 물리적인 한계 값들과 기준 값들은 Table 1과 같다.

식 (16)-(21)의 해들을 이용하면 작업공간을 구할 수 있으며 그 결과는 Fig. 7과 같다. 작업공간은 각 실린더의 최초 작업위치에 따라 작업영역의 범위와 위치가 변하게 된다. 작업 공간이 가장 크게 나타나는 부분은 케이싱 오실레이터의 하판 클램프 중심에서부터 상판 클램프까지의 거리가 480[mm]인 부분으로서, 각 실린더의 위치가 총 작동거리의 중간 지점에 위치하는 경우이고, 케이싱 오실레이터의 최초 작업위치가 중간위치에서 상승하거나 하강할 경우, 각 링크 및 조인

Table 1 Kinematic Constraints of Casing Oscillator

Actuator	Limited Value	Initial Condition
L_1	$-50 < d < 50$	0
L_2	$-62.5 < d < 62.5$	0
L_3	$-62.5 < d < 62.5$	0
L_4	$-50 < d < 50$	0
L_5	$-62.5 < d < 62.5$	0
b_1, b_2, b_3, b_4	$\pm 15^\circ$	0°
B_1, B_2, B_3, O	$\pm 15^\circ$	0°

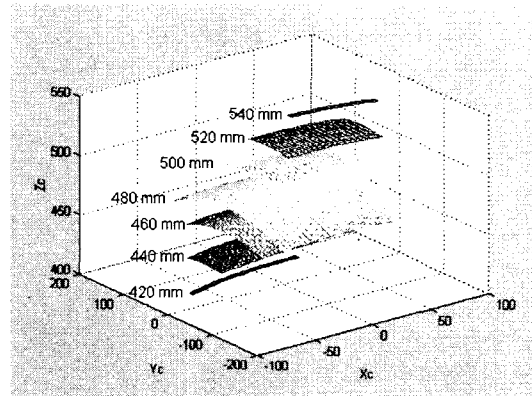


Fig. 7 Work Space of Casing Oscillator ($L_6 = 540, 520, 500, 480, 460, 440, 420$ [mm])

트들이 가지는 기구적인 한계에 의해 작업영역이 좁아지거나 수직작업이 어려워짐을 알 수 있다. 따라서 수직작업이 아닌 경사 작업, 예를 들면 바닥이 수평이 아닌 경우나 케이싱을 특정 각도로 삽입하는 경우, 작업자는 사용중인 케이싱 오실레이터의 이와 같은 작업영역 특성을 고려하여 작업을 수행해야만 한다. 또한 각 실린더의 중립 위치에서 작업을 수행할 경우 가장 넓은 작업영역과 삽입각도로 인해 작업이 용이해지므로 이 위치를 작업자가 인지하면 작업의 효율성을 높일 수 있게 된다.

케이싱 오실레이터 역기구학 해석의 타당성을 검증하기 위해 롤 동작과 피치 동작을 나타내는 $[Yc Zc]$ 와 $[Xc Zc]$ 평면을 설정하고 케이싱의 길이 L_6 를 중립위치인 480mm에서 좌우 방향으로 조금씩 움직여 그 결과를 수치 시뮬레이션 결과

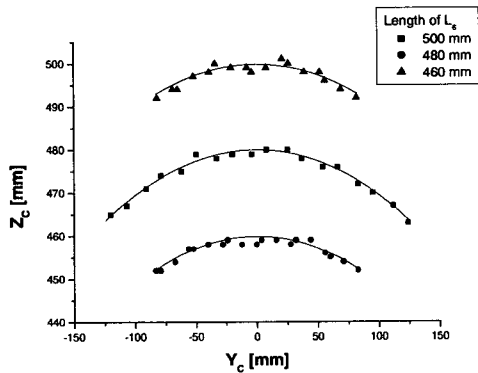


Fig. 8 Comparison between Experiment and Simulation for Rolling

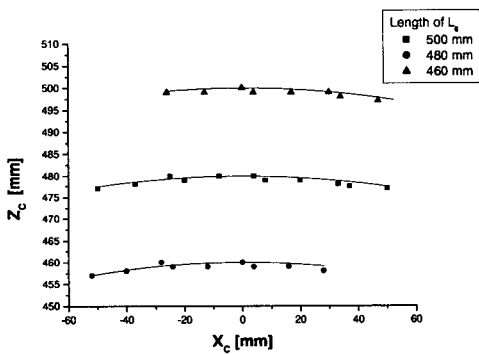


Fig. 9 Comparison between Experiment and Simulation for Pitching

와 비교하였다. Fig. 8에서 나타낸 바와 같이, 평면 $[Y_c Z_c]$ 에서의 궤적은 케이싱 오실레이터의 롤 동작을 나타낸다. 이때 케이싱 오실레이터의 구동 실린더는 각각 L_2 과 L_3 이며, 실린더 L_1, L_4, L_5 , 그리고 L_6 의 길이는 변하지 않기 때문에 X_c 축 방향으로의 위치 변화는 일어나지 않는다.

Fig. 9는 케이싱 오실레이터의 피칭 동작을 나타내며 이 때 케이싱 오실레이터의 궤적은 $[X_c Z_c]$ 평면 상에서 나타나게 된다. 이 때 케이싱 오실레이터의 구동 실린더는 L_5 이며 실린더 L_1, L_2, L_3, L_4 그리고 L_6 의 길이는 변하지 않는다. 전반적으로 역기구학 해석에 의한 수치 시뮬레이션 결과와 실험결과가 잘 일치함을 보아 기구학 해석의 타당성을 입증할 수 있다.

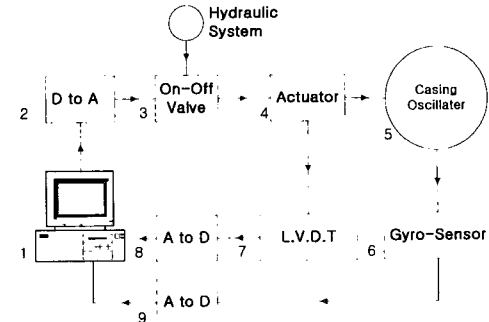


Fig. 10 Layout of Feedback Control System

4. 오토 밸런싱 시스템

건설 작업은 공장 내의 자동화 장비의 작업과는 수행 특성이 달라서 수 μm 단위의 정밀한 반복 작업이 요구되기보다는 수 mm 단위의 일회성 작업이 많으므로 정밀도는 낮더라도 실시간으로 항상 변위를 계측하며 자세를 제어하는 것이 필요하다. 따라서 본 논문에서는, 다른 종류의 밸브에 비해 정밀도는 다소 떨어지나 가격이 저렴하고 작동유의 오염에 비교적 강한 특성을 가지고 있어 취약한 건설현장에서 적합한 온-오프 (On-Off) 밸브를 사용하였다.

Fig. 10은 케이싱 오실레이터의 오토 밸런싱을 위한 피드백 제어계를 나타내고 있으며 그 구성은 1. 컴퓨터(Computer), 2. DA 변환기, 3. 온-오프 밸브, 4. 유압 실린더, 5. 케이싱 오실레이터, 6. 자이로 센서(Gyro-Sensor), 7. LVDT, 8-9. AD 변환기 등으로 이루어진다.

케이싱 오실레이터가 요잉동작을 하는 동안 상판의 위치를 항상 수평으로 유지하기 위해, 자이로 센서로 측정된 상판의 롤각과 피치 각이 0° 가 되도록 실린더의 위치 제어를 수행하였다. 실린더의 위치는 실린더에 부착된 LVDT에 의해 측정되어지며 역기구학에 의해 계산된 값과 비교되어 온-오프 밸브에 의해 유압 실린더의 변위를 수정함으로써 제어된다.

케이싱 오실레이터의 위치제어를 위한 전체 제어 작업의 흐름도는 Fig. 11과 같다.

5. 실험 및 결과

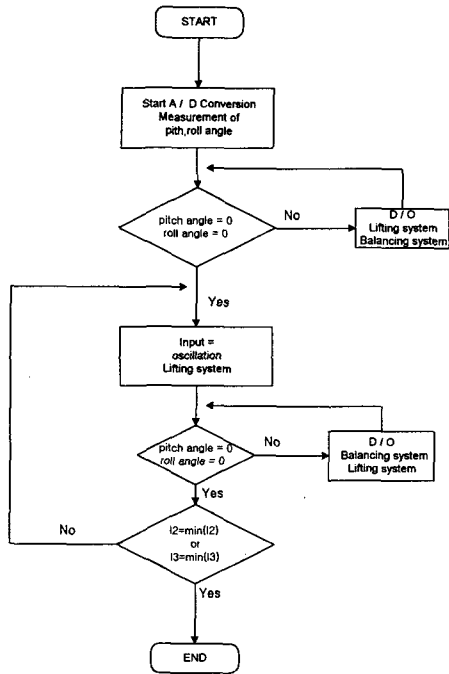


Fig. 11 Flow Chart of Feed-back Control for Auto-Balancing

5.1 실험방법

케이싱 오실레이터의 오토밸런싱을 구현하기 위해서는 상판의 운동 성분 중 2개의 회전 성분 즉 롤 각과 피치 각에 대한 제어를 실행하면 된다. 케이싱 오실레이터의 오토밸런싱은 상판이 수평을 유지하는데 목적이 있으므로 이를 위해서 실린더 L_1 과 L_4 에 의해 요잉 동작의 입력이 주어질 때 롤 각 및 피치 각을 0° 로 유지하기 위한 제어입력이 주어지게 되는데, 롤 각의 제어를 위해서는 실린더 L_2, L_3 를 구동하고 피치 각의 제어를 위해서는 실린더 L_5 를 구동한다. 케이싱 오실레이터의 수평 유지를 위한 실험을 위해, 상판이 최초 수평인 상태에서 작업입력으로 Fig. 12과 같이 0.2Hz의 정현파의 입력을 $\pi/2$ 위상으로 실린더 L_1 과 L_4 에 가하여 상판이 요잉 동작을 구현함으로써 케이싱에 회전력을 주게된다. 두 실린더에 입력이 주어지게 되면 상판은 롤, 피치, 요 운동이 발생하게 되고 이때 케이싱의 주 동작인 요잉 동작에 영향을 미치지 않으면서 롤과 피치 운동이 없어야 케이싱 오실레이터의 오토밸런싱이 수행된다. 본 실험에서는 케이싱 오실레

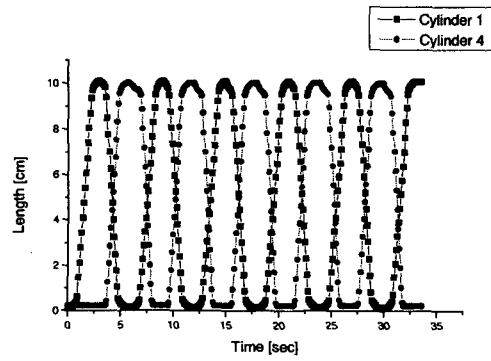
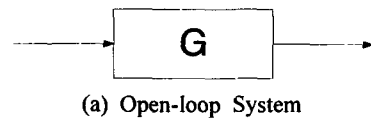
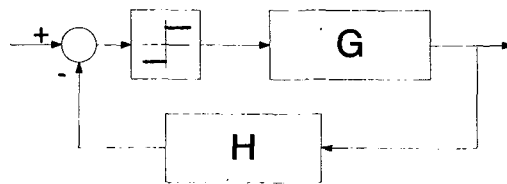


Fig. 12 Input Motions of Casing Oscillator



(a) Open-loop System



(b) Closed-loop System

Fig. 13 Control Loop Layout for Experiment

이터가 최대 작업영역을 가지는 L_6 의 길이에서 실험을 수행하였다. Fig. 13과 같이 위치 피드백 제어를 수행하지 않은 개루프 시스템과 피드백 제어를 수행한 폐루프 시스템의 두 가지 경우에 대해 롤 각과 피치 각을 측정하여 비교함으로써, 위치 피드백에 인한 온오프 제어로 케이싱 오실레이터의 오토밸런싱 구현 가능성을 나타내었다.

5.2 실험결과

케이싱 오실레이터의 실린더 L_1 과 L_4 의 변화에 의해 요잉 동작의 입력이 주어졌을 때 피드백 제어를 하지 않은 케이싱 오실레이터인 개루프 시스템의 경우와 피드백 제어를 실행한 케이싱 오실레이터인 폐루프 시스템의 경우의 요각 변화는 Fig. 14와 같이 $-13^\circ \sim +13^\circ$ 로 같게 나타났다.

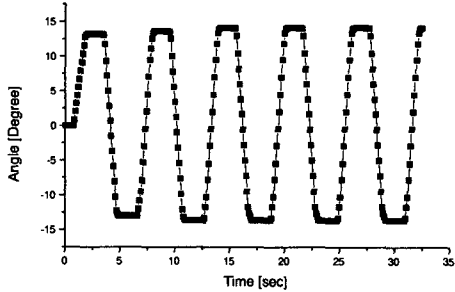


Fig. 14 Yawing Motion for Open-Loop System

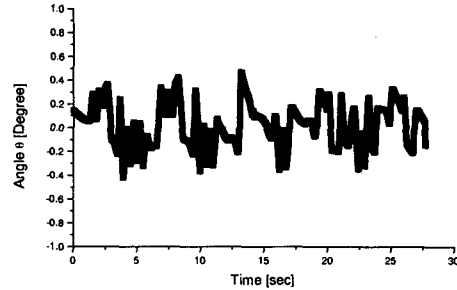


Fig. 17 Rolling Motion for Closed-Loop System

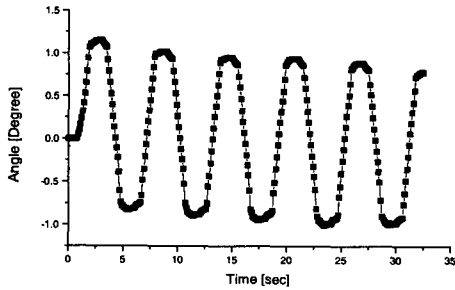


Fig. 15 Rolling Motion for Open-Loop System

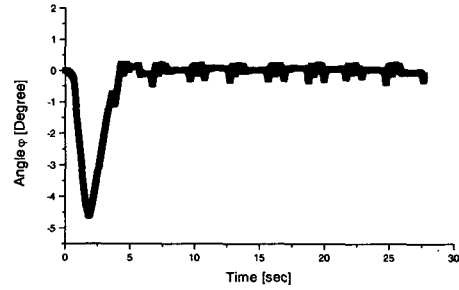


Fig. 18 Pitching Motion for Closed-Loop System

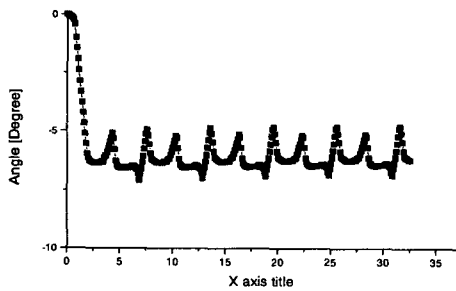


Fig. 16 Pitch Angle for Open-Loop System

피드백 제어를 하지 않은 케이싱 오실레이터의 롤각 변화는 Fig. 15에서와 같이 약 $-1^{\circ} \sim +1^{\circ}$ 의 각 변화가 발생하고 피치각 변화는 Fig. 16과 같이 $-6.4^{\circ} \sim -5^{\circ}$ 의 각 변화가 발생한다. 그러나 위치 피드백 제어를 실행한 케이싱 오실레이터의 경우는 Fig. 17과 같은 롤각의 변화에 의해 오차가 $0.4^{\circ} \sim -0.4^{\circ}$ 정도 발생하게 된다.

Fig. 18은 위치 피드백 제어가 수행된 피치 각을 나타낸다. 실린더 L_1 , L_4 에 의한 요잉 동작

에 의해 5° 의 오차가 약 5초 동안 발생하지만 그 이후 정상상태에 도달하여 $0.5^{\circ} \sim -0.5^{\circ}$ 정도의 오차를 발생시킨다. 따라서 케이싱 오실레이터의 오토밸런싱 요구 성능에 충족되는 것을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 현재 건설현장에서 사용 중인 케이싱 오실레이터의 오토밸런싱(Auto-Balancing) 작업을 위해 새로운 구조의 케이싱 오실레이터를 제시하였으며 기구학 해석을 수행하였다. 기구학 해석에 의한 작업공간 해석을 통해 작업 수행 특성을 파악하고 최대 작업영역을 가지는 위치를 구하였다. 케이싱 오실레이터에 자이로 센서와 LVDT를 부착하여 자세를 측정하고 피드백 제어를 통해 수평유지를 위한 오토밸런싱을 수행함으로써 건설용 장비인 케이싱 오실레이터의 자동화의 가능성을 제시하고 타당성을 검증하였다. 또한 케이싱 오실레이터의 오토밸런싱 (Auto-Balancing)에 관한 기능의 구현으로 기존의 번거

로웠던 지면 평탄화 작업이 생략될 수 있으며, 기존에는 어려운 작업이었던 경사삽입도 가능하게 되었다.

본 연구에서 제안된 케이싱 오실레이터는 4자유도를 가진 간단한 구조의 병렬형 매니퓰레이터이므로 각종 시뮬레이터나 산업기기, 건설용 중장비 등 여러 분야에서 응용 가능할 것이다.

참고문헌

- (1) Lee, H. G., 2000, "Construction Service Robots-Development of a Vertical Steel Column Welding Robot-," *Journal of the KSPE*, Vol. 17, No. 9, pp. 32~38.
- (2) Han, S. J., Park, S. H., and Lee, J. K., "1996, "A Study on Performance Improvement of Position Control System in Hydraulic Cylinder for Heavy Construction Machinery," *Proc. of the 11 KACC*, pp. 1450~1454.
- (3) Lee, M. K., Choi, B. H., Lee, S. H., and Park, K. W., 1998, "Workspace Analysis of Double Parallel Manipulator," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 22, No. 12, pp. 2247~2256.
- (4) Byun, Y. K., and Cho, H. S., 1996, "Kinematic Analysis of a New Class of 6-DOF Parallel Manipulator," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 20, No. 2, pp. 414~430.
- (5) Portman, V. T., Sandler, B.-Z., and Zahavi, E., 2000, "Rigid 6×6 Parallel Platform for Precision 3-D Micro manipulation : Theory and Design Application," *IEEE Transaction on Robotics and Automation*. Vol. 16, No. 6, pp. 629~643.
- (6) Lee, M. K., and Park, K. W., 2000, "Workspace and Singularity Analysis of a Double Parallel Manipulator," *IEEE/ASME Transaction on Mechatronics*, Vol. 5, No. 4, pp. 367~375.
- (7) Hunt, K. H., 1978, *Kinematic Geometry of Mechanism*, Oxford Univ. Press.
- (8) Tsai, L.-W., 1999, *Robot Analysis*, John Wiley & Sons, pp. 9~15.