

# 기구학적 전이를 이용한 케이싱 오실레이터의 순기구학 해석

배형섭\*, 백재호\*, 박명관#

## The Forward Kinematics Solution for Casing Oscillator Using the Kinematic Inversion

Hyung Sub Bae\* , Jae Ho Baik\* , Myeong Kwan Park #

### ABSTRACT

The Casing Oscillator is a bore file Equipment for the all-casing process. All-casing process is a method of foundation work in construction yard to oscillate steel Casing in the ground. The existing Casing Oscillator has some problem like not boring horizontally with disturbance and not driving Casing other angle except horizon. To solve problem, the new structure Casing Oscillator is presented and studied. The performance of Casing Oscillator is improved by kinematics analysis. The Casing Oscillator is similar to the parallel manipulator in structure. So we obtain Inverse kinematics solution of Casing Oscillator easily. But it is difficult to solve forward kinematics of Casing Oscillator. This paper presents a novel pose description corresponding to the structure characteristics of parallel manipulators. Through analysis on geometry theory, we obtain a new method of the closed-form solution to the forward kinematics using Kinematic Inversion. The closed-form solution contains two different meanings-analytical and real-time. So we reach the goal of practical application and control. Closed-form forward kinematics solution is verified by an inverse kinematics analysis. It shows that the method has a practical value for real-time control and inverse kinematics servo control.

**Key Words** : Parallel Manipulator (병렬형 매니퓰레이터), Forward Kinematics (순기구학), Kinematic Inversion (기구학적 전이), real-time control(실시간 제어), inverse kinematics servo control(역기구학 서보 제어)

### 1. 서론

토목공사 현장에서 지반을 강화하거나 다리건설의 기초를 만들기 위해 행하는 작업인 대구경 타설 공사에 이용되는 건설 기계인 케이싱 오실레이터는 강철제 케이싱을 유압 실린더로 오실레이팅(Oscillating) 시킴으로써 지반 깊이 관입하는 작업을 하는 기계이다. 현재 사용되는 케이싱 오실레이터는 균일하지 않은 지반의 상태와 기계자체의 동특성에 의해 케이싱을 수직으로 삽입하는데 어려움이 많다. 그래서 케이싱 오실레이터의 수직

이터는 강철제 케이싱을 유압 실린더로 오실레이팅(Oscillating) 시킴으로써 지반 깊이 관입하는 작업을 하는 기계이다. 현재 사용되는 케이싱 오실레이터는 균일하지 않은 지반의 상태와 기계자체의 동특성에 의해 케이싱을 수직으로 삽입하는데 어려움이 많다. 그래서 케이싱 오실레이터의 수직

접수일: 2003년 11월 28일; 게재승인일: 2004년 8월 13일

\* 부산대 대학원

# 교신저자: 부산대학교 기계공학부

E-mail [mkpark@pusan.ac.kr](mailto:mkpark@pusan.ac.kr) Tel. (051) 510-2464

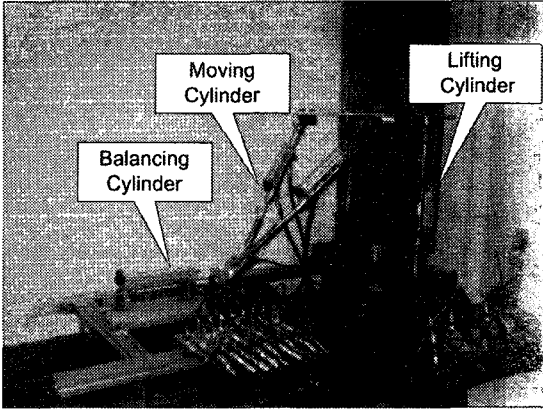


Fig. 1 Shape of New Casing Oscillator

을 자동으로 할 수 있는 오토 밸런싱(Auto-balancing)기능을 가진 케이싱 오실레이터에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다.<sup>1</sup> 케이싱 오실레이터의 오토 밸런싱에 관한 연구는 그 구조가 4 자유도의 병렬형 매니플레이터와 동일하며 기구학 해석이 선행되어야 한다. 일반적으로 병렬형 매니플레이터는 높은 강성도, 높은 하중 수용능력, 빠른 동력학응답과 좋은 위치 정확성을 가지나 구조적으로 직렬 로봇에 비하여 간단하지가 않다.<sup>2</sup> 말단부의 자세에서 각 작동기의 변위를 구하는 역기구학 문제는 몇 개의 직렬 로봇의 기구학적 연쇄로 이루어져 있으므로 벡터 해석에 의해 비교적 쉽게 해를 구할 수 있다. 그러나 작동기의 길이가 주어 졌을 때 말단부의 자세를 결정하는 순기구학 해를 구하기 위해서는 말단부의 운동이 모든 작동기의 운동의 영향을 받으므로 해석하기가 어렵다. 일반적으로 순기구학 해를 푸는 방식은 두 가지가 있다. 하나는 수치해석 방법으로 얻을 수 있는 반복되는 방법에 의한 것이고 다른 하나는 닫힌해 해석을 통해 얻을 수 있는 대수적인 방법이다. “닫힌 형태”는 정확성과 실시간 해석이라는 두 가지 의미를 가진다. 닫힌 형태의 해는 수치해석 방법에 비해 높은 정확성과 빠른 응답성을 가진다. 수치해석 방법으로 문제를 해결할 경우 오차의 누적은 실제 위치와 먼 결과를 도출하게 되고 복잡한 수식을 풀기 위해 전산부하가 크므로 실시간 해석도 곤란하다. 그러나 그 구조의 복잡성 때문에 닫힌 형태의 순기구학 해를 구하기는 어려우며 일반적인 경우의 닫힌 형태의 해는 존재하지 않고 몇몇 경우에만

존재한다.<sup>3,4,5,6</sup>

따라서 본 연구에서는 기구학적 전이를 이용하여 새로운 위치 서술방법을 제시여 순기구학 닫힌 해를 해석하고 이를 역기구학 해와 비교 함으로서 구한 순기구학 해를 검증한다. 순기구학 닫힌해를 구함으로서 본 논문에서 제안된 케이싱 오실레이터는 센서 없이도 실시간으로 말단부의 운동 정보를 정확하게 얻을 수 있으므로 역기구학 서보 제어(servo control)가 가능해 지고 오토 밸런싱 성능을 향상 시킬 수 있다. 또한 기구학적으로 순기구학 해석과 역기구학 해석이 모두 가능한 형태의 병렬형 매니플레이터가 되므로 동력학 해석과 제어적 측면에서도 유용하다.

## 2. 역기구학 해석

### 2.1 케이싱 오실레이터의 구조

본 연구에서 사용된 케이싱 오실레이터는 병렬형 매니플레이터의 구조를 가지며 Fig. 1 과 같다.상판의 두 모서리에 연결된 두 개의 무빙 실린더의 끝 부분을 하판에 접촉하여 평행하게 움직이는 밸런싱 실린더의 한 끝에 원활한 동작이 가능한 유니버설 조인트(Universal Joint)로 연결하여 상판의 기울기를 빠르게 조절하고 작업영역을 확장 시킬 수 있는 기능을 가지도록 하였다. 케이싱 오실레이터는 유압으로 구동되고 상판과 하판을 연결하는 작동기(Actuator)는 모두 볼 조인트로 구속 되어 있다.

케이싱 오실레이터의 기구학적 모델은 Fig. 2 에서 보는 바와 같다. 전체적으로 5 개의 작동기로 구성되어 있으며, 하판은 바닥에 고정되어 있고 상판은 직선운동만을 수행하는 5 개의 작동기에 의해 움직인다. 케이싱 오실레이터의 자유도는 공간운동을 하는 기구의 자유도판별식에 의해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 F &= \lambda(l - j - 1) + \sum_1^l f_i - f_p \\
 &= 6(12 - 15 - 1) + 30 - 2 = 4
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서 F는 기구의 자유도, λ은 기구부가 작동하는 공간의 자유도, l은 하판을 포함한 링크들의 수, j는 관절들의 수, f<sub>i</sub>는 i 번째 관절의 자유도이고,

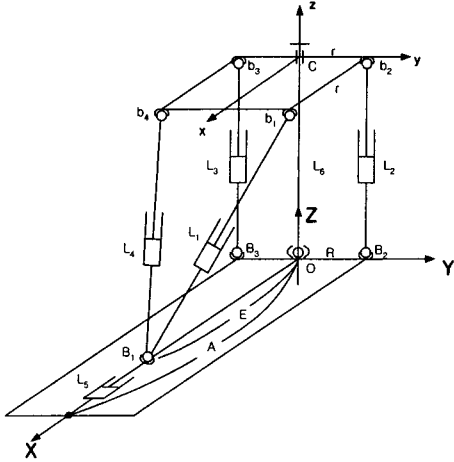


Fig. 2 Kinematics Model of the Casing Oscillator

$f_p$  는 여유 자유도의 수 이다. 따라서 본 논문 에 사용된 케이싱 오실레이터는 4 자유도를 가진 다.

2.2 케이싱 오실레이터의 역기구학 해석

케이싱 오실레이터의 역기구학 해석은 주어진 상판의 위치와 자세로부터 작동기의 길이를 결정 하는 문제이다. 이는 벡터 해석에 의해 다음과 같 이 표현 된다.

$$L_1 = \overline{B_1b_1} = \overline{OC} + \overline{Cb_1} - \overline{OB_1} \tag{2}$$

$$L_2 = \overline{B_2b_2} = \overline{OC} + \overline{Cb_2} - \overline{OB_2} \tag{3}$$

$$L_3 = \overline{B_3b_3} = \overline{OC} + \overline{Cb_3} - \overline{OB_3} \tag{4}$$

$$L_4 = \overline{B_1b_4} = \overline{OC} + \overline{Cb_4} - \overline{OB_1} \tag{5}$$

$$L_5 = \overline{B_1A} = \overline{OA} - \overline{OB_1} \tag{6}$$

$$L_6 = \overline{OC_1} \tag{7}$$

하판에 대한 상판의 운동을 완전히 기술하기 위해서는 6 개의 독립된 좌표가 필요하다. 즉 병진운동의 3 개 성분과 회전운동의 3 개 성분이 필 요하게 된다.

두 좌표계간의 병진운동은  $\{x_c, y_c, z_c\}$  로 표 현하고 두 좌표계간의 회전을 기술하기 위해서

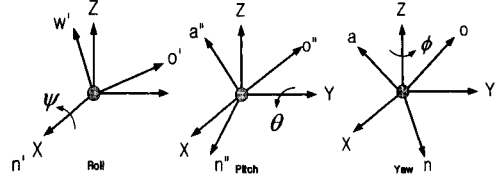


Fig. 3 Representation of Roll, Pitch and Yaw Angles

Fig. 3 와 같이 표현되는 롤, 피치, 요 각을 도 입하 기로 한다. 상판의 자세를 Fig. 3 과 같이 요, 롤, 피치 각을 도입하여 표현하면 회전 행렬 R 은 다음과 같다

$$R(\psi, \theta, \phi) = R(Z, \psi) \cdot R(Y, \theta) \cdot R(X, \phi) =$$

$$\begin{bmatrix} C\phi C\theta & C\phi S\theta S\psi - S\phi C\psi & C\phi S\theta C\psi + S\phi S\psi \\ S\phi C\theta & S\phi S\theta S\psi + C\phi C\psi & S\phi S\theta C\psi - C\phi S\psi \\ -S\phi & C\theta S\psi & C\theta C\psi \end{bmatrix}$$

(8)

식(8)의 회전행렬과 병진 좌표  $\{x_c, y_c, z_c\}$  를 이 용하여 작동기의 길이를 구하면

$$\overline{L_1} = \overline{OC} + \overline{Cb_1} - \overline{OB_1}$$

$$= [x_c, y_c, z_c]^T + R[E, r, r]^T - [E, 0, 0]^T$$

(9)

식(9)를 풀고 놈(norm)을 취하고 나머지 작동기의 길이를 고려하면 다음과 같다

$$\begin{aligned} L_1^2 &= [x_c + rC\phi C\theta + r(C\phi S\theta S\psi - S\phi C\psi) - E]^2 \\ &+ [y_c + rS\phi C\theta + r(S\phi S\theta S\psi + C\phi C\psi)]^2 \\ &+ [z_c - rS\theta + C\theta S\psi]^2 \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned} L_2^2 &= [x_c + r(C\phi S\theta S\psi - S\phi C\phi)]^2 \\ &+ [y_c + r(S\phi S\theta S\psi + C\phi C\psi) - R]^2 \\ &+ [z_c + r(C\theta S\psi)]^2 \end{aligned} \tag{11}$$

$$L_3^2 = [x_c - r(C\phi S\theta S\psi - S\phi C\phi)]^2 + [y_c + r(S\phi S\theta S\psi + C\phi C\psi) + R]^2 + [z_c - r(C\theta S\psi)]^2 \quad (12)$$

$$L_4^2 = [x_c + rC\phi C\theta - r(C\phi S\theta S\psi - S\phi C\phi) - E]^2 + [y_c + rS\phi C\theta - r(S\phi S\theta S\psi + C\phi C\psi)]^2 + [z_c - rS\theta - rC\theta S\psi]^2 \quad (13)$$

$$L_5^2 = (A - E)^2 \quad (14)$$

$$L_6^2 = x_c^2 + y_c^2 + z_c^2 \quad (15)$$

여기서 병진운동과 회전운동의 6 개의 성분으로 케이싱 오실레이터의 역기구학 동차 행렬을 구할 수 있다. 역기구학 동차 행렬을  $H_I$  라 하면 아래와 같이 표현 한다.

$$H_I = \begin{bmatrix} C\phi C\theta & C\phi S\theta S\psi - S\phi C\psi & C\phi S\theta C\psi + S\phi S\psi & x_c \\ S\phi C\theta & S\phi S\theta S\psi + C\phi C\psi & S\phi S\theta C\psi - C\phi S\psi & y_c \\ -S\theta & C\theta S\psi & C\theta C\psi & z_c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

### 3. 순기구학 해석

#### 3.1 기구학적 전이를 이용한 새로운 좌표계

기구학적 연쇄는 그 자체 내에 어떠한 한정된 절대 변위를 가정하지 않는다. 정지되어 있다고 가정한 주위 공간에 대하여 기구학적 연쇄의 한 링크를 고정시켜야 한다. 이렇게 하면 링크들의 상대 변위는 절대적이 된다. 한 링크를 고정시킨 닫힌 기구학적 연쇄를 기구(mechanism)라 한다. 고정된 링크를 프레임(frame) 이나 기준 프레임(reference frame)이라 하고 기준 프레임을 바꾸는 것을 기구학적 전이(kinematic inversion)라고 한다. 한 쌍의 링크 사이의 상대 변위는 기준 프레임의 선택에 무관하다.<sup>7</sup>

Fig. 2 의 기구학 모델은 2 장에서와 같이 역기구학 해석에는 무리 없이 사용될 수 있으나 순기구학 해석에 사용되기에는 각 작동기의 복잡한 영향

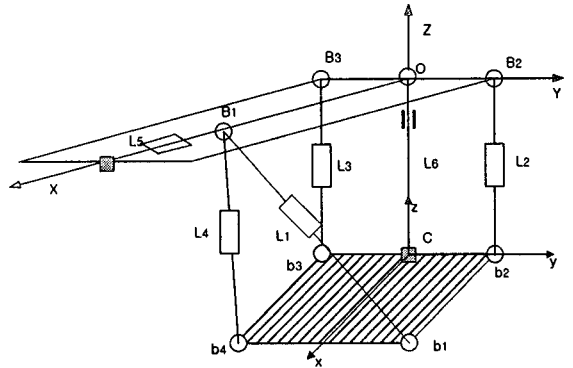


Fig. 4 Kinematic Model using in kinematic invention

으로 닫힌 형태의 해로 표현하기 어렵다. 즉 베이스에 작동기가 붙어있어 작업영역을 변화시키므로 해석이 더욱 더 복잡해진다. 그러므로 본 논문에서는 작동기가 붙어있어 비선형 요소를 발생하는 하판을 플랫폼으로 보고 형태가 변하지 않는 상판을 베이스로 보는 기구학적 전이(Kinematic Inversion)를 이용해 순기구학 해석을 실시하였다.

Fig. 2 에서 제시한 기구학 모델은 하판의 XYZ 좌표계 {O}를 중심으로 상판의 좌표계 xyz 좌표계인 {C}가 회전한 각도를 나타내게 된다. 그러나 순기구학 해석을 위해 Fig. 4 에서 제시된 모델은 {C} 좌표계를 회전 운동과 병진 운동을 시켜 {O} 좌표계를 얻은 것으로 표현할 수가 있다. 우리가 케이싱 오실레이터의 순기구학을 해석하기 위해 도출해야 하는 회전 행렬은 요, 롤, 피치 각을 이용한 고정 좌표계를 이용하면 Fig. 5 의 {C} 좌표계를 회전 운동과 병진 운동을 시켜 {O} 좌표계

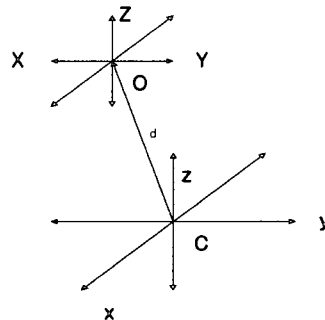


Fig. 5 Coordinates System of Rotation Matrix

를 얻은 것으로 표현할 수가 있으며 식(17)과 같이 정의 된다.

$$\begin{aligned} \{O\} &= R_O^C \cdot \{C\} \\ \{C\} &= [R_O^C]^{-1} \cdot \{O\} \\ \{C\} &= R_C^O \cdot \{O\} \end{aligned} \quad (17)$$

여기서 회전행렬은 정규 직교 좌표(Orthogonal)이므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[R_O^C]^{-1} = [R_C^O]^T \quad (18)$$

그러므로 요, 롤, 피치 각을 이용한 순기구학 회전행렬은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R(\psi, \theta, \phi) &= R(z, \psi) \cdot R(y, \theta) \cdot R(z, \phi) = \\ &\begin{bmatrix} C\phi C\theta & S\phi C\theta & -S\theta \\ C\phi S\theta S\psi - S\phi C\psi & S\phi S\theta S\psi + C\phi C\psi & C\theta S\psi \\ C\phi S\theta C\psi + S\phi S\psi & S\phi S\theta C\psi - C\phi S\psi & C\theta C\psi \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (19)$$

### 3.2 순기구학 닫힌 해 해석과 동차 행렬

케이싱 오실레이터는 구조적으로 몇가지 구속 조건이 존재하기 때문에 순기구학 닫힌해를 구하기가 용이해진다. 먼저 Fig. 6 과 같이  $L_6$  는 항상 상판과 직각을 유지하고  $L_2, L_3$  와 같은 거리(r) 만큼 떨어져 있으므로  $L_6$  의 길이는  $L_2$  와  $L_3$  의 평균값이 되고  $L_2, L_3, L_6$  각각의 방향은 같아진다. 이는 플랫폼의 회전 중 롤(Roll) 회전인  $\Psi$  값을 결정하게 되고 다음 식 (20)과 같이 나타난다. 또한  $L_2$  와  $L_3$  의 움직임이  $L_6$  의 운동을 결정하게 되고  $L_6$  의 운동을 표현 함으로써  $L_2$  와  $L_3$  가 상판에 미치는 영향을 다 나타낼 수 있다. 또한  $L_5$  의 움직임에 따라 E 의 변위가 변하므로 E 를 하나의 작동기로 둘 수 있다.

그러므로 Fig. 4 의 전이 모델을 Fig. 7 과 같이 더욱 간단히 표현할 수 있다.

여기서 Fig. 7 의 플랫폼은  $B_1O$  로 단순화 되고 이때  $B_1$  과  $O$  의 두 점을 알 수 있으면 플랫폼(platform)의 Y 축과 Z 축에 대한 회전 피치( $\theta$ )와 요( $\phi$ )각 을 알 수 있게 되고 식(20)에 의해 플랫폼의 X 축에 대한 회전 롤( $\Psi$ )각 을 알 수 있으며

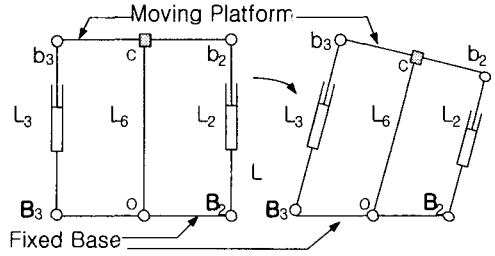


Fig.6 Relation  $L_2, L_3$  to  $L_6$

$$\tan^{-1} \left( \frac{L_2 - L_3}{b_2 + b_3} \right) = \psi \quad (20)$$

로 구한 요, 롤, 피치 각을 순기구학 회전 행렬에 대입하면 케이싱 오실레이터의 전체 시스템의 회전을 알 수 있다.

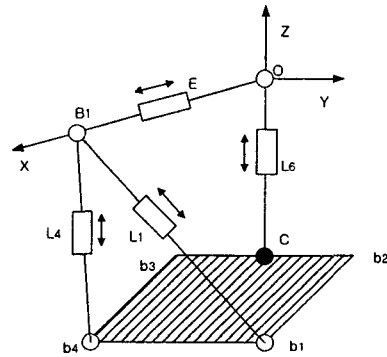


Fig. 7 Simple Form of Model using in kinematic inversion

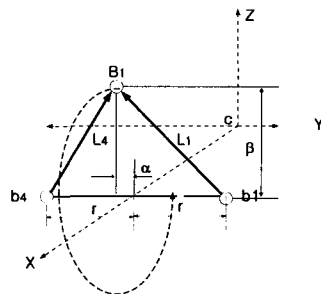


Fig. 8 Location and Description of  $B_1$  connected  $L_1$  and  $L_4$

여기서 Fig. 8 과 같이  $B_1$  은  $L_1$  과  $L_4$  의 길이의 변화에 따라서 중심이  $(r, \alpha, 0)$ ,  $Y = \alpha$  이고 반지름이  $\beta$  인 원의 궤적을 따라 움직이게 된다. 이 원의 식을 구하기 위해서는 아래 Fig. 8 과 같은 좌표계에서  $\alpha$  와  $\beta$  를 구하면 다음과 같다

$$(r - \alpha)^2 + \beta^2 = L_1^2 \quad (21)$$

$$(r + \alpha)^2 + \beta^2 = L_4^2 \quad (22)$$

식(21),식(22)에서  $\alpha$  를 구한다.

$$\alpha = \frac{L_4^2 - L_1^2}{4r} \quad (23)$$

식(23)을 식(21)에 대입하여  $\beta$  를 구한다.

$$\beta = [L_1^2 - (r - \frac{L_4^2 - L_1^2}{4r})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (24)$$

그러므로  $B_1$  의 궤적은 아래와 같다.

$$(x - r)^2 + (y - a)^2 + z^2 = \beta^2$$

$$y = \alpha \quad (25)$$

또 Fig. 7 에서  $B_1$  은  $L_6$  과  $E$  에 의해서 이루어지는 또 다른 궤적을 구할 수가 있다. 이 궤적은 상판과  $L_6$  이 항상 수직을 이룬다는 구속조건에 의해  $L_6$  의 길이가  $c$  일 때 중심이  $(0,0,c)$

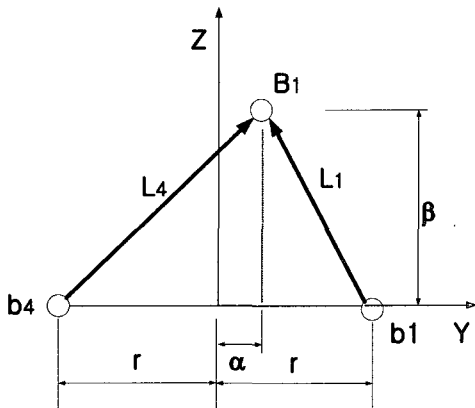


Fig. 9 Position of  $B_1$  connected  $L_1$  and  $L_4$

이고 반지름이  $E$  인 구로 나타난다. 이는 아래 식(26)과 같이 나타난다.

$$x^2 + y^2 + (z - c)^2 = E^2 \quad (26)$$

식(25)와 식(26)을 만족하는  $x, y, z$  의 값을 구하면 식(27)과 같다.

$$x = \frac{-[t(\frac{r}{c} - r)] \pm \sqrt{[t(\frac{r}{c} - r)]^2 - [1 + (\frac{r}{c})^2](r^2 + t^2 - \beta^2)}}{1 + (\frac{r}{c})^2}$$

$$y = \alpha$$

$$z = \frac{(\alpha^2 + \beta^2 + c^2 - r^2 - E^2 + 2rx)}{2c} \quad (27)$$

또  $O$  는 공간좌표에서  $(0,0,c)$  이므로  $\overline{OB_1}$  가 기준 좌표계  $\{C\}$  와 이루는 두 각 요( $\phi$ )와 피치각( $\theta$ )을 구할 수 있고 롤( $\psi$ ) 값은 앞의 식(20)에 의해 구해진다. 위의 내용을 정리하여 순기구학 모델의 회전각을 구하면 아래와 같이 정리되어진다.

$$\phi = \tan^{-1}(\frac{y}{x})$$

$$\theta = \tan^{-1}(\frac{c - z}{\sqrt{x^2 + y^2}})$$

$$\psi = \tan^{-1}(\frac{L_2 - L_3}{2r}) \quad (28)$$

위의 내용을 바탕으로 케이싱 오실레이터의 순기구학 동차 행렬( $H_F$ )을 구하면 다음과 같다.

$$H_F = \begin{bmatrix} C\phi C\theta & C\phi S\theta S\psi - S\phi C\psi & C\phi S\theta C\psi + S\phi S\psi & x_c \\ -S\phi C\theta & -S\phi S\theta S\psi + C\phi C\psi & S\phi S\theta C\psi + C\phi S\psi & y_c \\ S\theta & -C\theta S\psi & C\theta C\psi & z_c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

여기서  $L_6$  를  $(x_c, y_c, z_c)$  로 두고 회전 행렬은 식(19)에서 유도한 순기구학 전이 모델의 회전 행렬을 이용하였다.

### 3.3 순기구학식에 의한 작업공간 해석

케이싱 오실레이터의 각 작동기의 길이의 범위는 아래의 Table 1 과 같다. 여기서 각 작동기의 길이 변화를 3.2 절의 식(27)에 대입하여  $B_1$ 의 좌표를 구하고 그 좌표를 다시 식(28)에 대입하여 케이싱 오실레이터 상판의 요, 롤, 피치각의 변화를 구할 수 있다.

구해진 요, 롤, 피치각과 케이싱 오실레이터 상판의 중심 C의 좌표를 식(29)의 동차 행렬에 대입하면 그림 Fig.10 과 같이 각 작동기의 변화에 따른 케이싱 오실레이터 상판의 중심 C의 작업공간을 해석할 수 있다. 케이싱 오실레이터에서의 상판의 중심 C의 의미는 케이싱 오실레이터에서 강철제 케이싱이 부착되는 지점으로 상판의 중심 C의 작업 영역은 결국 케이싱 오실레이터가 케이싱을 동작시킬 수 있는 작업 영역을 의미한다.

Table 1 Limits of Actuator

Actuator	Limits of Actuator (mm)
$L_1$	$673.3 \leq L_1 \leq 773.3$
$L_2$	$417.5 \leq L_2 \leq 542.5$
$L_3$	$417.5 \leq L_3 \leq 542.5$
$L_4$	$673.3 \leq L_4 \leq 773.3$
$L_5$	$417.5 \leq L_5 \leq 542.5$
E	$1280 - L_5$

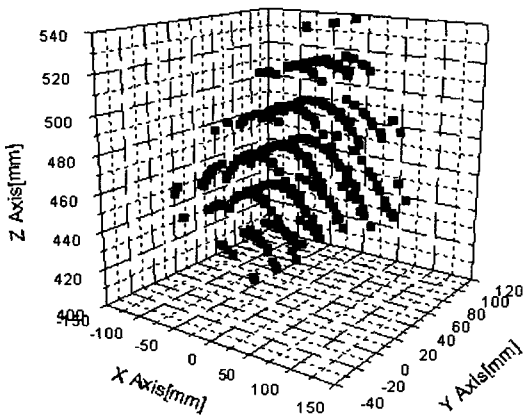


Fig. 10 Working Space of Casing Oscillator

### 4. 순기구학 검증

#### 4.1 실험장치

본 연구에서는 유도한 케이싱 오실레이터의 역기구학 해를 구하고 순기구학 닫힌 형태의 해를 구함으로써 역기구학 서보 제어 뿐만 아니라 수치해석에 의존하지 않고 위치 제어에 있어 전산 부하를 감소시킴으로써 순기구학 실시간 제어도 가능한 모델을 제시하였다. 위에서 유도한 두 기구학 식을 검증하기 위하여 실제 시스템을 구동하여 각 작동기의 변위를 선형 포텐쇼 메타(linear potentiometer)를 이용해 측정하고 상판의 회전운동은 자이로센서(Gyro-Sensor)를 부착하여 롤, 피치 그리고 요 각을 측정하였다.

Fig. 11 은 케이싱 오실레이터의 실험을 위한 시스템 구성을 나타내고 있다.

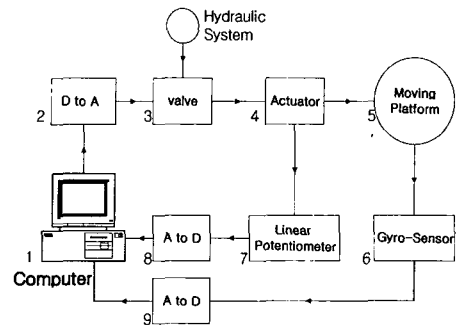


Fig. 11 layout of system

구성은 1. 컴퓨터 (Computer), 2. D/A 변환기, 3. 작동기 제어밸브(On-Off Valve), 4. 작동기 (Hydraulic Cylinder), 5. 무빙 플랫폼, 6. 자이로 센서(Gyro-Sensor), 7. Linear Potentiometer, 8-9. A/D 변환기로 이루어진다.

시스템의 구성을 좀더 자세히 표현하면 실린더 변위와 3 개의 자이로 센서의 출력을 A/D 변환하고 C 로 Programing 된 제어입력을 D/O 하게 된다. 5V 의 신호로 24V 에서 구동되는 솔레노이드 밸브를 구동하기 위한 구동회로를 통해서 각 액츄에이터를 구동하게 된다. A/D 변환시 sampling time 은 1msec 로 설정하였다.

### 4.2 실험 방법

본 실험에서는 각 구성요소의 구속조건과 운동에 따른 기구학 해석을 검증하고자 한다. 케이싱 오실레이터의 기본 동작을 구동하여 각 작동기의 변위와 상판의 각도를 직접 측정하고 이를 순기구학 식과 역기구학 식에 대입하여 기구학 해석이 타당함을 보이고자 한다.

역기구학식 검증을 위하여 기본 동작을 구현한 후 얻어지는 요, 롤, 피치 각도 정보를 역기구학식에 대입하여 얻어지는 작동기의 길이 정보를 직접 측정한 작동기의 길이 정보와 비교하여 타당함을 보였다.

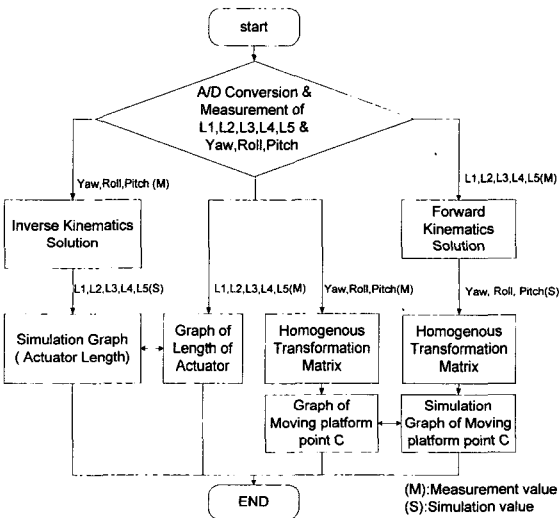


Fig. 12 Inverse & Forward Kinematics Verification Flowchart

순기구학식 검증은 앞에서 검증된 역기구학 동작 행렬을 이용해 케이싱 오실레이터 상판의 중심점 C의 운동과 작동기의 변위에 의해 얻어지는 순기구학 동작 행렬을 이용해 얻어지는 C 점의 운동을 비교 함으로서 검증하였다.

### 4.3 실험 결과

케이싱 오실레이터의 가장 기본 동작은 케이싱을 오실레이팅 시키는 요동작이다. 상판이 요 운동만을 가지도록 구현하기 위해서는 각 작동기가 상호 보완적으로 움직여야 하므로 정확한 제어기가 설계되지 않는 실제 시스템에서는 완전한 요 운동은 구현하기가 힘들다, 그러나  $L_1$  과  $L_4$  가

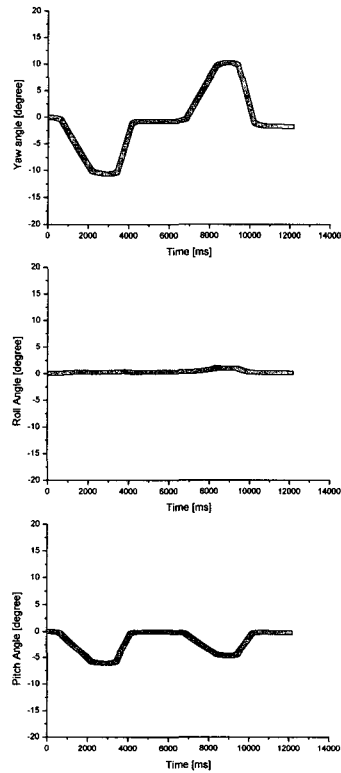


Fig.13 Yaw Roll Pitch angle from Yaw Motion in experiment

순차적으로 동작함으로써 간단하게 요 동작을 얻을 수가 있다. 요 동작의 결과 자이로 센서로 얻은 상판의 요, 롤, 피치각은 Fig. 13 과 같고 .

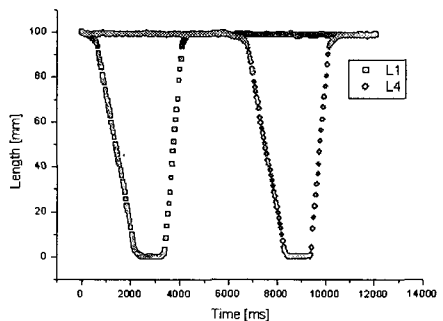


Fig. 14 Length of  $L_1$  and  $L_4$  from Yaw Motion in experiment



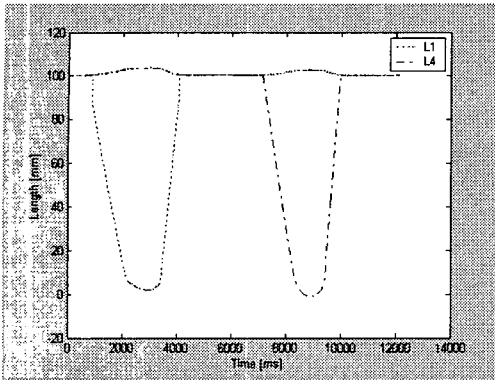


Fig. 15 Length of  $L_1$  and  $L_4$  from Yaw Motion in Inverse Kinematics Simulation

동작에 따른 작동기의 변위는 포텐쇼 메타로 측정하여 Fig. 14 에 나타내었고 이와 비교하여 측정된 요, 롤, 피치각을 역기구학 식에 대입하여 구해진 작동기의 변위를 Fig. 15 에 나타내었다.

요 운동 중에 리니어 포텐쇼메타를 이용하여 측정된 각 작동기의 길이 변화를 순기구학 식에 대입하여 구한 요, 롤, 피치각과 역기구학식에 사용된 자이로 센서로 측정된 요, 롤, 피치각은 기준 좌표가 다르므로 단순히 비교하는 것은 의미가 없다.

그러므로 자이로 센서로 측정된 요, 롤, 피치각을 앞에서 검증된 역기구학식의 동차 행렬 식 (16)에 대입하여 무빙 플랫폼의 기준점 C 의 운동을 예측하고 각 작동기의 길이변화를 순기구학 식에 대입하여 얻은 요, 롤, 피치각을 식 (29)의 순기구학 동차행렬에 대입하여 케이싱 오실레이터의 상판의 기준점 C 의 운동을 예측하여 두 개의 동차 행렬이 같은 동작을 움직임을 나타낸다면 본 논문의 순기구학식은 앞에서 검증된 역기구학식과 동일한 운동을 해석하는 것으로 케이싱 오실레이터의 운동을 올바르게 해석하고 있음을 검증할 수 있다.

Fig. 16 에서 Fig. 18 까지 그래프의 좌측의 Experiment Data 는 측정된 요, 롤, 피치각을 역기구학 동차 행렬에 대입하여 예상되는 점 C 의 운동을 우측의 Forward Simulations Data 는 측정된 각 작동기의 길이변화를 순기구학 식에 대입하여 구한 요, 롤, 피치각을 순기구학 동차행렬에 대입하여 점 C 의 운동을 베이스의 기준 좌표계 O 의 x 축 y 축 z 축의 변화를 샘플링 타임 1[ms]마다 나

타내고 있으며 두 개의 그래프가 거의 일치함을 알 수 있고 이로써 본 논문에서 사용된 순기구학 식이 케이싱 오실레이터의 운동을 바르게 표현하고 있음을 확인할 수 있다.

여기서 Experiment Data 의 그래프 중 조금씩 발생하는 노이즈는 사용한 자이로 센서가 피에조 타입이므로 작동기가 양 끝단에 충돌함으로써 충격에 의해 노이즈가 발생하는 것으로 생각되며 이는 노이즈가 발생하는 시점이 작동기가 양 끝단에 충돌하는 시점과 일치함으로써 확인할 수 있다.

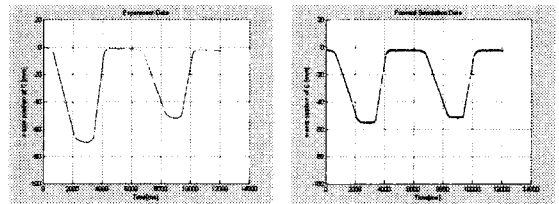


Fig. 16 x-axis position of C from Yaw Motion Experiment and Forward Kinematics Simulation

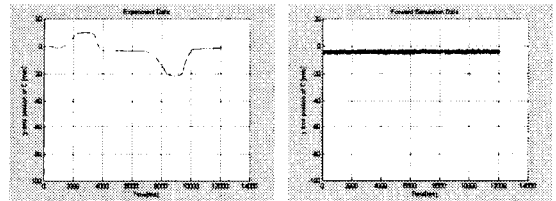


Fig. 17 y-axis position of C from Yaw Motion Experiment and Forward Kinematics Simulation

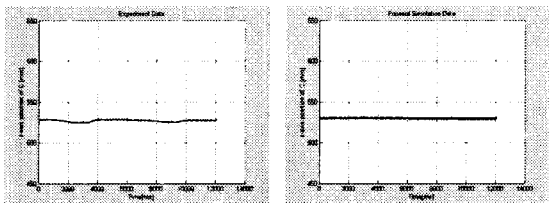


Fig. 18 z-axis position of C from Yaw Motion Experiment and Forward Kinematics Simulation

## 5.결론

본 연구에서는 토목 공사 현장에서 강철제 케이싱을 지반에 관입하는 건설 기계인 케이싱 오실레이터에 오토 밸런싱 기능을 부여한 새로운 형태의 케이싱 오실레이터에 대한 기구학 해석을 수행

하였다.

제안된 케이싱 오실레이터의 오토 밸런싱 기능을 가지기 위해서는 케이싱을 오실레이팅 시키는 상판의 운동정보를 실시간으로 측정하여야 하나 그 구조가 병렬형 매니플레이터의 구조를 가짐으로 각 작동기의 변위에서 상판의 운동정보를 구하는 닫힌 형태의 순기구학식의 부재로 인해 센서를 사용하거나 실시간 해석에 어려움이 있는 수치해석적 방법에 의해서 상판의 운동 정보를 추정해야 했다.

그러나 본 연구에서 기구학적 전이와 기구학적 구속 조건을 이용하여 순기구학 해가 닫힌형태의 실시간 해석해를 구함으로써 구동부의 변위로부터 첨단부의 위치가 실시간으로 얻어지는 메커니즘을 구현하였다.

또 실제 시스템을 구동하여 구동부의 변위와 케이싱 오실레이터 상판의 자세를 계측하여 본 연구에서 해석한 역기구학해와 실시간 순기구학해가 옳음을 검증하였다.

일반적으로 닫힌 형태의 실시간 순기구학 해석해를 가지는 병렬형 매니플레이터는 수치해석에 의존하지 않으므로 제어에 있어 전산하중의 감소뿐만 아니라 실제 병렬형 매니플레이터의 구현 시 요구되는 보정에 있어서도 매우 유용하게 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

따라서 첨단부의 위치/자세가 실시간으로 얻어짐으로 본 연구의 케이싱 오실레이터는 각 작동기 변위 정보를 입력으로 역기구학 서보 제어가 가능하게 된다.

또 제안된 케이싱 오실레이터는 실시간 순기구학 해가 얻어지는 4 자유도의 병렬형 매니플레이터로써 각종 시뮬레이터나 공작기계 건설기계 등 고하중 고동력학적 효율을 요하면서 정밀 작업을 필요로 하는 여러 분야에서 응용 가능할 것이다.

### 참고문헌

1. Rhee, E. J., Bae, J. M., Park, M. K., "A Study on the Inverse Kinematic Analysis of a Casing Oscillator," J. of KSPE, Vol. 17, No 12, pp. 47-53, 2000.
2. Stewart, D., "A platform with 6 degrees of freedom," Proc. of the institution of mechanical engineers, 180(Part 1,15) pp.371-386, 1965.
3. Behi, F., "Kinematic Analysis for a Six-Degree of Freedom 3-PRPS Parallel Mechanism," IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 4, No. 5, pp.324-331, 1988.
4. Kohli, D. and Lee, S. H., "Manipulator Configurations Based on Rotary-Linear [R-L] Actuators and Their Direct and Inverse Kinematics," Journal of Mech., Transmission and Automation in design, Vol. 110, pp.397-404, 1988.
5. Check, J. and Tesar, D., "Analysis of Fully-Parallel Six-Degree of Freedom Micromanipulator," in Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automaton, Vol. 2, pp.814-820, 1991.
6. Alizade, R. I. and Tagiyev, N. R., "A Forward and Reverse Displacement Analysis of a In-Parallel Manipulator," Mechanism and Machine Theory, Vol. 29, No. 1, pp.115-124, 1994.
7. Duffy, J., Statics and Kinematics with applications to Robotics, Cambridge Univ. Press, 1996.
8. Bing, Zhou, Hao, Fang, Lu, Ren and Zuren, Feng, "A Closed-Form Direct Position Kinematics Solution For A 3-RSR Platform Manipulator," in Proc. World Congress on Intelligent Control and Automation, Vol. 2, pp.1289-1296, 2000.
9. Ambrose, R. O. and Diftler, M. A., "The Minimum Form of Strength in Serial, Parallel and Bifurcated Manipulators," In Proc. IEEE Conferance on Robotics and Automation, pp.1334-1339, 1998.
10. Wang, S., Zong, G., BI, S. and Zhao, W., "dynamics Analysis of a 6-DOF Serial-Parallel Micromanipulator," International sym. on Micro - mechatronics and Human Science, pp.191-197, 1997.
11. Merlet, J. P., "Direct Kinematics and Assembly Modes of Parallel Manipulators," Journal of Robotics Research, Vol. 11, No. 2, pp.150-162, 1992.
12. Shi, X. and Fenton, R. G., "Solution to the Forward Instantaneous Kinematic for a General 6-DOF Stewart Platform," Robotics and Autonomous Systems, Vol. 7, pp.236-242, 1993.
13. Lee, H. Y. and Ruth, B., "A Closed-Form Solution of the Forward Displacement Analysis of a class of In-Parallel Mechanism," in Proc. IEEE Robotics and Automation, Vol. 2, pp.720-724. 1993.