

# 병렬로봇의 설계 공차가 궤적 정밀도에 미치는 영향 분석

## The Analysis of Trajectory Tracking Error Caused by the Tolerance of the Design Parameters of a Parallel Kinematic Manipulator

박 찬 훈<sup>+</sup>, 박 동 일<sup>1</sup>, 김 두 형<sup>1</sup>

Chanhun Park<sup>+</sup>, DongIl Park<sup>1</sup>, Doohyung Kim<sup>2</sup>

**Abstract** Machining error makes the uncertainty of dimensional accuracy of the kinematic structure of a parallel robot system, which makes the uncertainty of kinematic accuracy of the end-effector of the parallel robot system. In this paper, the tendency of trajectory tracking error caused by the tolerance of design parameters of the parallel robot is analyzed. For this purpose, all the position errors are analyzed as the manipulator is moved on the target trajectory. X, Y, Z components of the trajectory errors are analyzed respectively, as well as resultant errors, which give the designer of the manipulator the intuitive and deep understanding on the effects of each design parameter to the trajectory tracking errors caused by the uncertainty of dimensional accuracy. The research results shows which design parameters are critically sensitive to the trajectory tracking error and the tendency of the trajectory tracking error caused by them.

**Keywords** parallel kinematic robot, design parameter, tracking error, positioning accuracy

### 1. 서 론

일반적인 직렬기구의 오차는 각 관절들이 직렬로 연결되므로 공차에 의한 오차 또한 누적되는 경향을 가지는 것이 자명하다. 그러나 병렬기구는 각 관절이 병렬로 연결되므로 오차가 누적되지 않고 평활화되는 경향이 있어 단편적으로 예측하기 어렵다. 이러한 문제를 분석하기 위한 관련된 연구로 델타로봇 오차 모델링에 관한 연구<sup>[1]</sup>가 있다. 연구<sup>[1]</sup>에서 로봇의 오차를 계통오차와 우연오차 요인으로 크게 두가지 종류로 구분하고 있다. 계통오차는 주로 제작시 발생하

는 가공 오차, 조립오차 등과 같은 기구학적으로 모델링이 가능한 오차를 말하고, 우연오차는 주로 작업시 발생하는 외란, 변형, 백래시 등과 같이 모델링이 불가능한 오차를 말한다.

본 저자들은 선행연구를 통해 문헌<sup>[2]</sup>에서 우연오차가 병렬로봇의 위치정밀도에 미치는 영향은 배제하고 계통오차에 의해 발생하는 기구적 오차를 분석한바 있다. 이를 통해 작업공간상의 특정 개수의 점들에서의 오차를 분석하는 알고리즘을 개발하고 적용하여 그 경향성 분석을 진행하여 최종 위치정밀도에 영향을 민감하게 주는 설계 파라미터와 둔감한 파라미터를 구분할 수 있었다.

본 논문에서는 각 포인트에서의 에러를 분석하는 연구를 더욱 발전시켜 목표궤적을 추종하는 경우에 경로를 따라 발생하는 실제 에러의 경향성을 면밀히 분석함으로써 설계자가 설계단계에서 각각의 설계 파라미터가 로봇 말단의

Received : Oct. 28. 2016; Revised : Nov. 4. 2016; Accepted : Nov. 11. 2016

<sup>+</sup>Corresponding author: Department of Robotics and Mechatronics, Korea Institute of Machinery & Materials, Gajeongbukro 156, Yuseong-gu, Daejeon (chpark@kimm.re.kr)

<sup>1</sup>Department of Robotics and Mechatronics, Korea Institute of Machinery & Materials (chpark@kimm.re.kr, parkstar@kimm.re.kr, kdh649@kimm.re.kr)

오차에 어떤 영향을 미치는지에 관한 더욱 풍부한 정보를 제공하고자 한다. 설계자는 자신이 설계한 로봇이 주로 사용되는 모션(궤적)에서 어떠한 경향성을 가지고 에러를 발생시키는지를 한눈에 파악할 수 있으므로 설계단계에서 기구적 부정확성이 최종 제작되는 병렬로봇의 궤적정밀도에 어떠한 영향을 미치는지를 이해하고 대책을 마련하는데 효과적으로 활용될 수 있을 것이다.

### 2. 3자유도 병렬로봇의 기구학 및 설계 파라미터 정의

최근에 점차 병렬로봇이 고속화, 정밀화 되고 있으며 이와 같은 이유로 델타로봇<sup>[3,4,5]</sup>에 대한 수요가 급속히 증가하고 있다. 따라서 본 연구에서는 델타로봇을 대상으로 궤적 정밀도를 분석하였다.

직렬로봇의 경우 정기구학(Forward Kinematics)이 쉽고 역기구학(Inverse Kinematics)이 어려우나 병렬로봇인 델타로봇<sup>[5]</sup>의 경우 쌍대성 원리<sup>[6]</sup>에 의해 역기구학(Inverse kinematics)은 쉬우나 정기구학(Forward kinematics)은 어렵다<sup>[8,9]</sup>. 따라서 정기구학은 수치해석적인 방법을 통해 해를 구한다. 역방향기구학은 끝단의 위치(Pc)가 주어질 때, 능동 조인트, 즉, 모터의 회전각을 계산하는 것이고 정기구학은 반대로 모터의 회전각이 주어질 때, 끝단의 위치를 계산하는 것이다<sup>[7]</sup>.

기구적 요인에 의해서 발생하는 궤적에러를 분석하기 위하여 주요 설계 파라미터를 정의하는 것이 필요한데, 본 논문에서는 문헌<sup>[2]</sup>에서 정의된 좌표계(Fig. 1), 델타 로봇 암의 기구학적 단순화 모델(Fig. 2), 그리고 해석파라미터(Fig. 3)를 동일하게 적용한다. 로봇의 베이스 플랫폼의 중

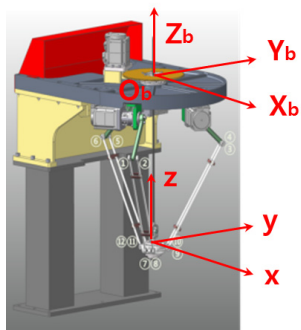


Fig. 1. Definition of Coordinates of parallel kinematic robot

앙에 원점을 가지는 좌표계 {b}를, Traveling plate 중앙에 좌표계 {p}를 정의한다. 좌표계 {b}의 축 방향에 첫 번째 암이 설치되고 반 시계 방향 120° 간격으로 각각 두 번째, 세 번째 암이 설치된다. Fig. 2의 단순화 모델을 통해서 각 암의 운동 구속식을 식 (1)과 같이 표현할 수 있고, 이를 통해 로봇 끝단의 위치를 구할 수 있다.

$$\| P_c P_b \|_2^2 - l_B^2 = 0 \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

본 연구에서 해석하고자 하는 설계 파라미터는 Fig. 3과 같이 정의 된다. 또한 본 연구에서는 중앙 회전축에 의한 회전 각도는 모터에 의한 직접적인 회전으로 간주하여 오차가 발생하지 않는 것으로 무시하고 해석한다.

Table 1은 Fig. 3에 표시된 해석 파라미터(설계의 기구적 변수)의 명칭과 기호 그리고 대응되는 공차의 명칭을 요약하고 있다. 이들 공차의 변동에 의하여 델타로봇 말단이 원형궤적을 그릴 때 발생하는 오차를 계산함으로써 해석 파라미터가 궤적오차에 미치는 영향을 분석한다.

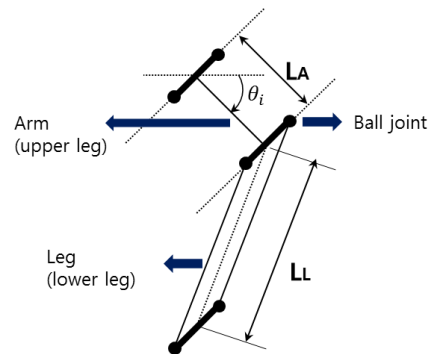


Fig. 2. Simple model of the parallel kinematic robot of Fig. 1

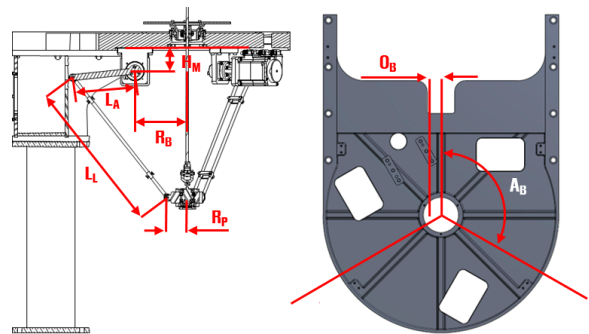


Fig. 3. Definition of kinematic parameter for analysis

### 3. 궤적추종오차 해석 방법 정의

본 연구에서는 궤적오차의 분석을 위하여 측정한 반경을 가지는 원을 그렸을 때 주어진 공차에 의하여 나타나는 궤적에러를 분석하였다. 이를 위하여 아래의 단계를 거치는 해석 절차를 구현하였다.

- 1) 원형 궤적의 원점 정의: P1(0,0,-250)을 원점으로 하는 반지름 200인 원을 5도 간격으로 72등분하는 위치를  $\vec{P}_c$ 로 정의 한다.
- 2) 공차의 정의 : Fig. 3과 Table 1에 정의된 비와 같이 공차를 정의한다(d는 하한공차, u는 상한공차를 의미한다).
- 3) 모든 파라미터에 공차가 없을 경우에 해석위치( $\vec{P}_c$ )에 대한 능동 조인트 각도  $\vec{\theta}_n$ 를 역기구학 해석(Inv\_Kin)을 통해 구한다( $\vec{P}_{ck}$  위치에서 능동조인트의 각도  $\vec{\theta}_k$ ).
- 4) 기구학 파라미터에 공차가 있을 경우의 로봇의 말단의 위치를 구한다.
- 5) 기구학 파라미터에 공차가 없을 경우의 로봇의 말단의 위치와 기구학 파라미터에 상한 공차가 있을 경우의 로봇의 말단 위치와의 오차의 RMS(Root Mean Square)를 연산한다. 각각의 오차에 대한 에러를  $\vec{e}_n^u(1), \vec{e}_n^u(2), \dots, \vec{e}_n^u(8)$ 로 표시한다. 여기서

$$\begin{aligned} \vec{e}_n^u(1) &= [e_n^u(1), e_n^u(1), \dots, e_n^u(1)] \\ \vec{e}_n^u(2) &= [e_n^u(2), e_n^u(2), \dots, e_n^u(2)] \\ \vec{e}_n^u(3) &= [e_n^u(3), e_n^u(3), \dots, e_n^u(3)] \\ &\vdots \\ \vec{e}_n^u(8) &= [e_n^u(8), e_n^u(8), \dots, e_n^u(8)] \end{aligned}$$

이다.

Table1. Definition of design parameter

	Reference value	Tolerance	Real value
Base Joint Offset	$O_B$	$\delta_1$	$O'_B = O_B + \delta_1$
Base Joint angle	$A_B$	$\delta_2$	$A'_B = A_B + \delta_2$
Base Radius	$R_B$	$\delta_3$	$R'_B = R_B + \delta_3$
Platform Radius	$R_P$	$\delta_4$	$R'_P = R_P + \delta_5$
Motor Installation Height	$H_M$	$\delta_5$	$H'_M = H_M + \delta_6$
Arm Length	$L_A$	$\delta_6$	$L'_A = L_A + \delta_7$
Leg Length	$L_L$	$\delta_7$	$L'_L = L_L + \delta_8$

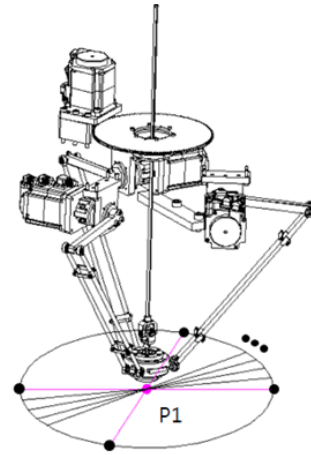


Fig. 4. Definition of a circle trajectory for the analysis of trajectory tracking errors

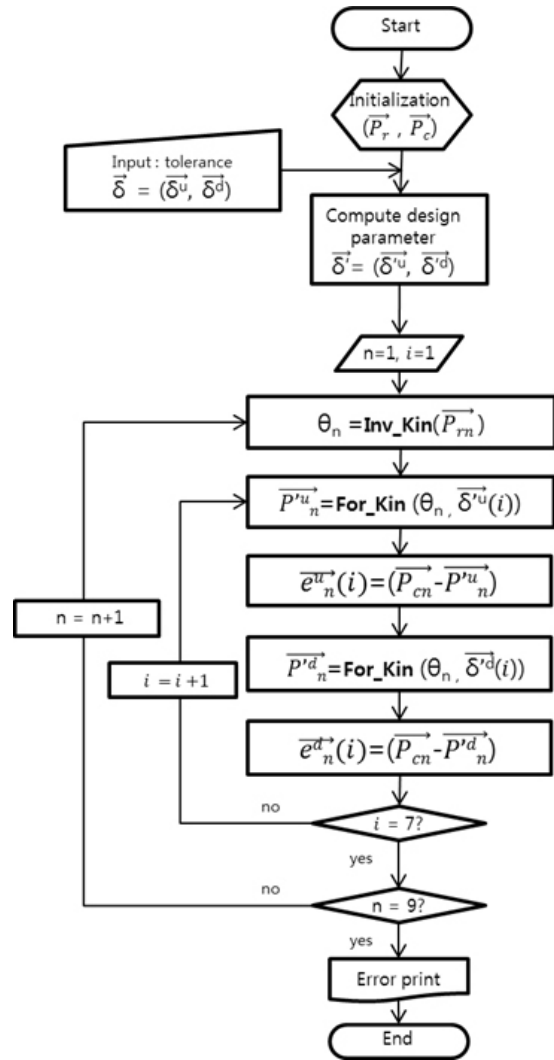


Fig. 5. Flow chart of error analysis of trajectory tracking error

기구학 파라미터에 공차가 없을 경우의 로봇의 말단의 위치와 기구학 파라미터에 하한 공차가 있을 경우의 로봇의 말단 위치와의 오차의 RMS (Root Mean Square)를 연산한다. 각각의 오차에 대한 에러를 로 표시한다. 여기서

$$\begin{aligned} \vec{e}_n^d(1) &= [e_n^d(1), e_n^d(1), \dots, e_n^d(1)] \\ \vec{e}_n^d(2) &= [e_n^d(2), e_n^d(2), \dots, e_n^d(2)] \\ \vec{e}_n^d(3) &= [e_n^d(3), e_n^d(3), \dots, e_n^d(3)] \\ &\vdots \\ \vec{e}_n^d(8) &= [e_n^d(8), e_n^d(8), \dots, e_n^d(8)] \end{aligned}$$

이다.

개발된 오차 해석 알고리즘을 시각화하여 간단히 정리 하면 Fig. 5와 같다. 위치자  $u$ 는 공차의 상한을  $d$ 는 하한을 나타낸다.  $P_{r1}, P_{r2}, \dots, P_{rn}$ 은 해석을 진행하는 로봇의 말단 위치를 의미하며  $\theta_n$ 은  $P_{rn}$ 에 도달하기 위해 역기구학을 풀어서 계산된 조인트 각도를 의미한다.

#### 4. 오차 해석 결과 및 분석 순서

3장에서 요약된 해석 절차를 통하여 7종류의 설계 파라미터의 공차 수준에 의해 발생하는 로봇 말단의 궤적오차를 분석하였다. 우선 이러한 분석을 자동화 하여 수행할 수 있도록 궤적오차 해석 프로그램을 개발하였다. Fig. 6은 개발된 해석 프로그램의 실행화면을 보여준다. 본 장에서는 해석결과를 시각적으로 보이기 위하여 개발된 프로그램의 결과 화면을 캡처하여 첨부한다.

아래의 결과 분석을 위한 그림들은 설계 공차의 상한과 하한이 적용되었을 때 원형 경로를 추정하는 과정에서 발생하는 오차로 표현된다. Fig. 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21에서  $x, y, z$ 축은 각각 수직, 수평방향을 의미하며  $x, y$  축의 단위는 mm이다. Fig. 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22에서 가로축은  $x$ 축을 기준으로 원형궤적 상에서의 위치를 표시하기 위한 각도이고,  $y$ 축은 궤적 상에서의 위치오차를 나타낸다.

1) 베이스 조인트 옵셋( $O_B$ )에 상/하한 0.02 mm 공차가 있을 경우: 베이스 조인트 옵셋의 상한이 적용되었을 때

로봇 말단의 위치를  $xy$ 평면,  $xz$ 평면,  $yz$ 평면에서 관찰하면 Fig. 7과 같다. 로봇의 목표궤적은  $xy$ 평면과 평행한 궤적이지만 베이스 조인트 옵셋이 존재할 때  $z$ 방향으로 최대 약 30um정도 추가적인 움직임이 있음을 알 수 있다. 이러한 상하방향 위치오차는 로봇의 전후 방향( $x$ )에 대해서는 비대칭적이고, 좌우 방향( $y$ )에 대해서는 대칭적임도 알 수 있다.

Fig. 8로부터 원형 경로를 추정하는 과정에서 발생하는 오차는  $x, y, z$ 방향으로 매우 다른 특성을 보임을 알 수 있다.  $x$ 와  $z$ 방향으로는 오차의 상한과 하한에 대해 회전궤적을 추종하는 과정에서 회전 각도별로 주기적인 특성을 보일 뿐만 아니라 최대 궤적오차도 기구적 공차이상으로

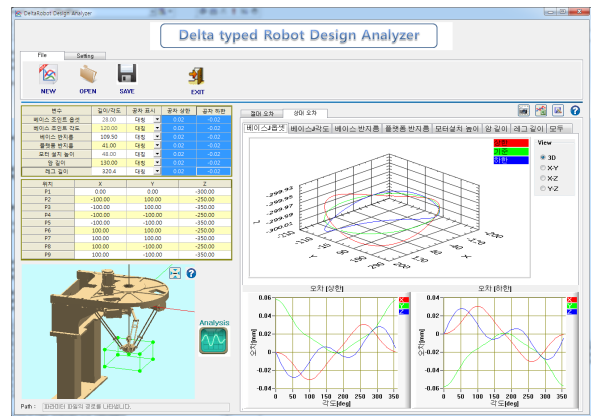


Fig. 6. The developed program to analyze trajectory tracking error

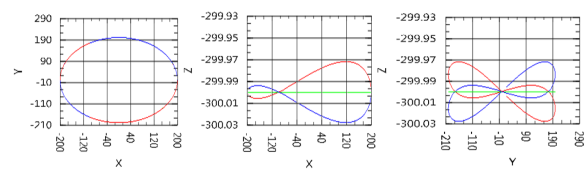


Fig. 7. Trajectory simulation with no tolerance of “base joint offset ( $O_B$ )” (Green), with upper limit tolerance (Red) and with lower limit tolerance (Blue). Unit of  $x, y$  and  $z$  is millimeter

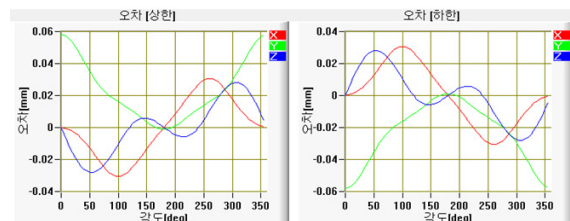


Fig. 8 Trajectory errors caused by “base joint offset ( $O_B$ )” (Red:  $x$  directional error, Green:  $y$  directional error, Blue:  $z$  directional error)

증폭되지 않고 나타난다. 그러나 y방향 오차는 가공공차의 최대 3배가 증폭되어 나타남을 확인 할 수 있다.

**2) 베이스 조인트 각도( $A_s$ )에  $\pm 0.02^\circ$  공차가 있을 경우:**

로봇의 목표궤적은 xy평면과 평행한 궤적이지만 베이스 조인트 각도( $A_s$ )가 존재할 때의 실제 궤적은 z방향으로 최대 약 2 um정도의 추가적인 움직임이 있음을 알 수 있다(Fig. 9).

원형 경로를 추정하는 과정에서 발생하는 오차는 x, y, 방향은 유사한 특성을 보이지만 z방향으로 매우 다른 특성을 보임을 알 수 있다(Fig. 10). x와 y방향으로는 오차의 상한과 하한에 대해 회전궤적을 추종하는 과정에서 회전 각도 별로 주기적인 특성을 보인다. 그러나 z방향 오차는 거의 나타나지 않는 반면 x, y 방향의 오차는 z방향오차의 50배 이상으로 큰 것을 알 수 있다. 따라서 베이스 조인트 각도에 서 발생하는 공차는 지면에서 수평한 방향의 기계적 정밀도

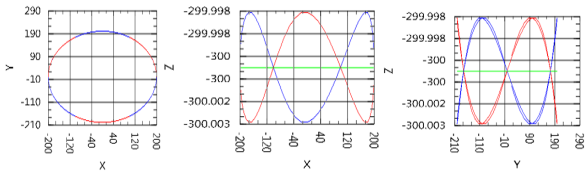


Fig. 9. Trajectory simulation with no tolerance of “base joint angle ( $A_s$ )” (Green), with upper limit tolerance (Red) and with lower limit tolerance (Blue). Unit of x, y and z is millimeter

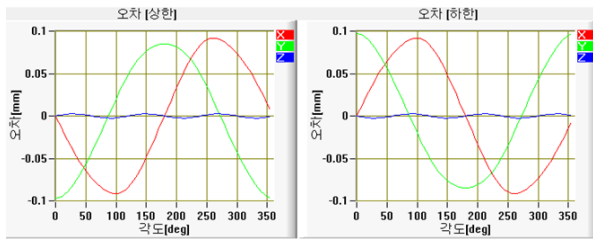


Fig. 10. Trajectory error caused by “base joint angle ( $A_s$ )” (Red: x directional error, Green: y directional error, Blue: z directional error)

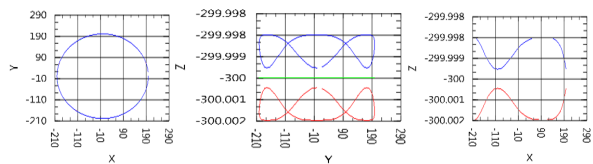


Fig. 11. Trajectory simulation with no tolerance of “base radius ( $R_B$ )” (Green), with upper limit tolerance (Red) and with lower limit tolerance (Blue). Unit of x, y and z is millimeter.

에 매우 큰 영향을 보이므로 반드시 정밀하게 관리되어야 할 대상임을 확인할 수 있다.

**3) 베이스 반지름( $R_B$ )에  $\pm 0.02$  mm 공차가 있을 경우:**

로봇의 목표궤적은 xy평면과 평행한 궤적이지만 베이스 반지름( $R_B$ )이 존재할 때의 실제 궤적은 z방향으로 최대 약 2um 정도의 추가적인 움직임이 있음을 알 수 있다(Fig. 11).

Fig. 12를 살펴보면 원형 경로를 추정하는 과정에서 발생하는 오차는 베이스 조인트 각도에 공차가 있는 경우(Fig. 10)와 주기적 특성을 가진다는 점에서 유사하다는 것을 알 수 있다. 즉, x, y, 방향 에러는 주기적인 특성을 보이고 그 최대 크기는 공차의 크기(20 um)이지만 z방향으로의 에러는 거의 나타나지 않는다. 따라서 베이스 조인트 각도와 달리 베이스 반지름의 공차는 궤적에러에 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

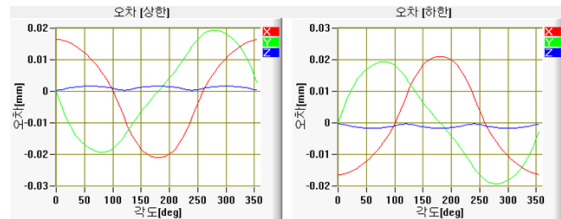


Fig. 12. Trajectory error caused by “base radius ( $R_B$ )” (Red: x directional error, Green: y directional error, Blue: z directional error)

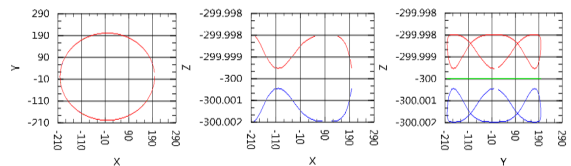


Fig. 13. Trajectory simulation with no tolerance of “platform radius ( $R_p$ )” (Green), with upper limit tolerance (Red) and with lower limit tolerance (Blue). Unit of x, y and z is millimeter.

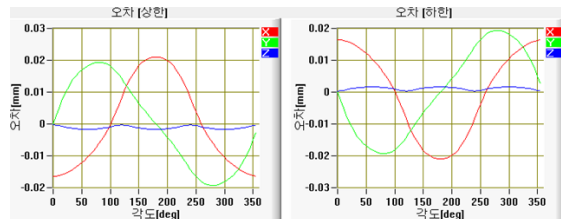


Fig. 14. Trajectory error caused by “platform radius ( $R_p$ )” (Red: x directional error, Green: y directional error, Blue: z directional error)



**4) 플랫폼 반지름( $R_p$ )에  $\pm 0.02$  mm 공차가 있을 경우:**

로봇의 목표궤적은 xy평면과 평행한 궤적이지만 플랫폼 반지름의 상한이 적용되었을 때 실제 궤적은 z방향으로 최대 약 2  $\mu\text{m}$ 정도(공차와 동일) 추가적인 움직임이 있음을 알 수 있다(Fig. 13). 이러한 상하방향 위치오차는 로봇의 전후 방향(x)과 좌우방향(y)에 대해 모두 대칭적임을 알 수 있다. 또한 베이스 반지름에 공차와 있는 경우와 정확히 대칭의 결과가 얻어짐을 알 수 있다.

원형 경로를 추정하는 과정에서 발생하는 오차는 베이스 반지름에 공차가 있는 경우(Fig. 12)와 거의 대칭이 되는 유사한 특성을 가진다(Fig. 14). z방향의 궤적 추정오차는 거의 나타나지 않고 x, y 방향의 궤적 추정 오차는 공차가 증폭되지 않고 나타남을 알 수 있다(20  $\mu\text{m}$ ). 따라서 베이스 반지름과 마찬가지로 플랫폼 반지름의 공차는 궤적에러에 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

**5) 모터 설치 높이( $H_M$ )에  $\pm 0.02$  mm 공차가 있을 경우:**

로봇의 목표궤적은 xy평면과 평행한 궤적이지만 모터 설치 높이에 공차가 있을 때 로봇의 실제 궤적은 z방향으로 최대 약 30  $\mu\text{m}$ 정도(공차의 1.5배) 추가적인 움직임이 있음을 알 수 있다(Fig. 13). Fig. 15에 보이는 바와 같이 xz 평면,

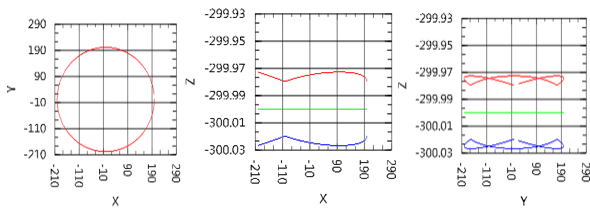


Fig. 15. Trajectory simulation with no tolerance of “motor installation height ( $H_M$ )” (Green), with upper limit tolerance (Red) and with lower limit tolerance (Blue)

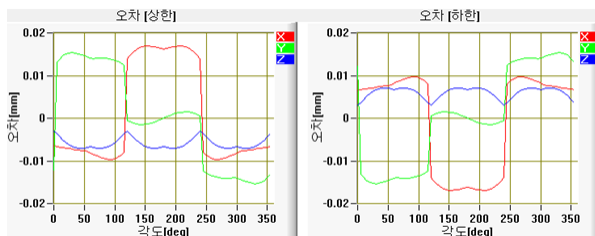


Fig. 16. Trajectory error caused by “motor installation height ( $H_M$ )” (Red: x directional error, Green: y directional error, Blue: z directional error)

yz 평면에서의 실제 궤적의 형상은 베이스 반지름과 플랫폼 반지름에 공차가 있는 경우의 궤적 형상과 거의 유사한 경향을 가진다.

원형 경로를 추정하는 과정에서 발생하는 오차는 모터 설치 높이에 공차가 있는 경우 궤적위치에 따라 주기적인 특성을 보이며 x, y, z성분별 최대 추종오차가 공차범위(20  $\mu\text{m}$ )를 넘어서지 않는다(Fig. 15, 16).

**6) 암 길이( $L_A$ )에  $\pm 0.02$  mm 공차가 있을 경우:**

로봇의 목표궤적은 xy평면과 평행한 궤적이지만 암 길이( $L_A$ )의 상한/하한이 적용되었을 때 실제 궤적은 z방향으로 최대 약 8  $\mu\text{m}$ 정도(공차의 1/3)의 추가적인 움직임이 있음을 알 수 있다(Fig. 17).

원형 경로를 추정하는 과정에서 발생하는 오차는 모터 설치 높이( $H_M$ ) 공차가 있는 경우(Fig. 16)와 거의 동일한 결과가 얻어진다(Fig. 18). z방향의 궤적 추정오차는 거의 나타나지 않고 x, y 방향의 궤적 추정 오차는 공차가 증폭되지 않고 나타남을 알 수 있다(20  $\mu\text{m}$ ). 따라서 베이스 반지름 및 플랫폼 반지름과 마찬가지로 암 길이의 공차는 궤적에러에 가공공차 이상의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

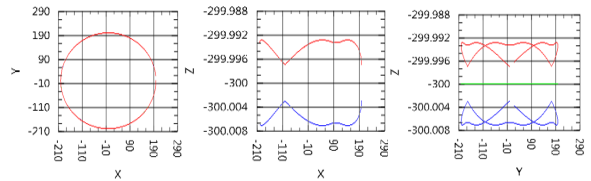


Fig. 17. Trajectory simulation with no tolerance of “arm length ( $L_A$ )” (Green), with upper limit tolerance (Red) and with lower limit tolerance (Blue). Unit of x, y and z is millimeter

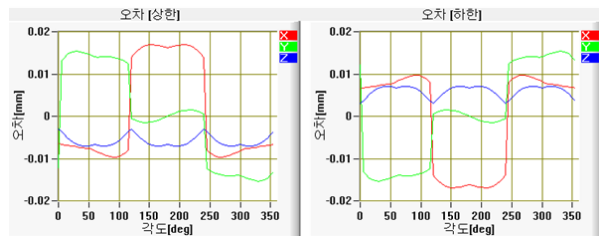


Fig. 18. Trajectory error caused by  $L_A$  “arm length ( $L_A$ )” (Red: x directional error, Green: y directional error, Blue: z directional error)

**7) 레그 길이( $L_L$ )에  $\pm 0.02$  mm 공차가 있을 경우:** 로봇의 목표궤적은 xy평면과 평행한 궤적이지만 레그 길이( $L_L$ )의 상한/하한이 적용되었을 때 실제 궤적은 z방향으로 최대 약 40  $\mu\text{m}$  정도(공차의 2배)의 추가적인 움직임이 있음을 알 수 있다(Fig. 17). 또한 궤적의 형태는 베이스 반지름(Fig. 11), 플랫폼 반지름(Fig. 13) 암 길이(Fig. 17)에 공차가 있는 경우와 매우 유사함을 알 수 있다.

레그 길이 공차가 있는 경우 원형 경로를 추정하는 과정에서 발생하는 오차는 Fig. 20과 같다. 베이스 반지름(Fig. 12), 플랫폼 반지름(Fig. 14) 암 길이(Fig. 17)에 공차가 있는 경우에는 x, y 방향의 오차가 주로 나타났으나, 레그 길이 공차가 있는 경우는 z 방향 궤적 추종 오차가 가공 공차의 2배 정도로 x, y 방향의 오차와 비슷하다(Fig. 20). 따라서 레그 길이 공차가 있는 경우에는 지면에 수직인 방향으로 발생하는 궤적 추종 오차(z 방향 오차)를 무시할 수 없다.

**8) 모든 파라미터에 상/하한 0.02 mm와  $\pm 0.02^\circ$ 의 공차가 주어진 경우:** 로봇의 목표궤적은 xy평면과 평행한 궤적이지만 모든 파라미터에 상한/하한 공차가 적용되었을 때 실제 궤적은 z방향으로 최대 약 110  $\mu\text{m}$  정도의 추가적인 움직임이 있음을 알 수 있다(Fig. 21). 각각의 공차는 최대

20  $\mu\text{m}$ 이지만 총합으로 나타나는 z방향 에러는 약 110  $\mu\text{m}$  이므로 약 5.5배의 오차가 발생함을 알 수 있다.

모든 파라미터에 상한/하한 공차가 적용되었을 때 원형 경로를 추정하는 과정에서 발생하는 오차는 Fig. 22과 같다. 각각의 공차는 최대 20  $\mu\text{m}$ 이지만 총합으로 나타나는 x, y 방향 에러는 약 150  $\mu\text{m}$ 이므로 약 7.5배의 오차가 발생함을 알 수 있다. 수직 방향으로도 과도한 오차가 발생하지만 수평방향으로 더 큰 궤적 추종오차가 발생함을 알 수 있다.

해석 결과를 간략히 요약하면 다음과 같다. 가장 심각하게 로봇의 궤적추종오차를 발생시키는 설계 파라미터는 베이스 조인트 각도, 베이스 조인트 옵셋, 레그 길이의 순이다. 나머지 파라미터들은 오차 기여도가 상대적으로 낮으며 공차의 범위와 같은 수준에서 오차를 발생시킨다. 또한 각각의 파라미터의 공차는 x, y, z 각각의 방향으로 발생하는 공차의 경향이 매우 다름을 확인하였다. 베이스 조인트 각도, 베이스 반지름, 플랫폼 반지름, 모터설치 높이는 z방향으로는 거의 무시할 정도의 오차를 야기 시키는 반면, x, y 방향으로는 설계공차가 고스란히 말단의 오차로 반영된다. 레그 길이는 x, y 방향의 오차와 z 방향의 오차가 모두 공차의 2배 수준에서 결정되었다. 베이스 조인트 옵셋은 x, y 방향의 공차는 설계 공차 수준이나 z방향의 공차는 설계공차의 3배 수준으로 증폭되어 나타난다. 베이스 조인

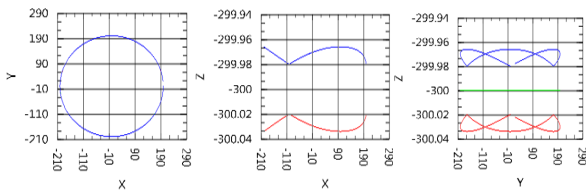


Fig. 19. Trajectory simulation with no tolerance of “leg length ( $L_L$ )” (Green), with upper limit tolerance (Red) and with lower limit tolerance (Blue). Unit of x, y and z is millimeter.

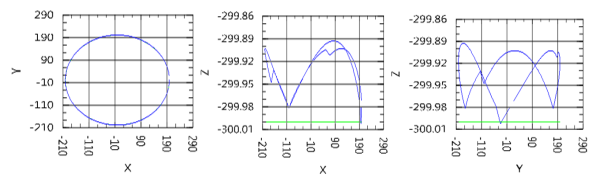


Fig. 21. Trajectory simulation with no tolerance of all parameters (Green), with upper or lower tolerance(Blue). Unit of x, y and z is millimeter.

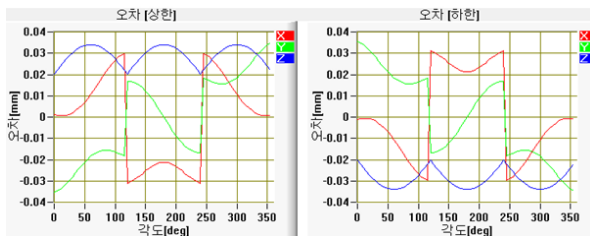


Fig. 20. Trajectory error caused by “leg length ( $L_L$ )” (Red: x directional error, Green: y directional error, Blue: z directional error)

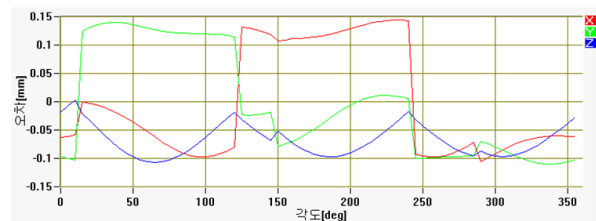


Fig. 22. Trajectory error caused by all parameters (Red: x directional error, Green: y directional error, Blue: z directional error)

트 각도는 z방향 오차는 거의 무시할 만한 수준이나, z방향 오차는 설계 공차의 5배로 나타난다.

### 5. 결 론

본 논문은 작업공간상의 임의의 포인트에서의 로봇 말단의 에러를 분석하는 연구를 더욱 발전시켜 목표궤적을 추종하는 경우에 경로를 따라 발생하는 실제 에러의 경향성을 면밀히 분석함으로써 설계자가 설계단계에서 각각의 설계 파라미터가 로봇 발단의 오차에 어떤 영향을 미치는지에 관한 더욱 풍부한 정보를 제공한다. 설계자는 자신이 설계한 로봇이 주로 사용되는 모션(궤적)에서 어떠한 경향성을 가지고 에러를 발생시키는지를 한눈에 파악할 수 있으므로 설계단계에서 기구적 부정확성이 최종 제작되는 병렬로봇의 궤적정밀도에 어떠한 영향을 미치는지를 이해하고 대책을 마련하는데 효과적으로 활용될 수 있을 것이다.

### References

[1] W.J. Shin and N.G. Cho, "A study on the error compensation of three-DOF translational parallel manipulator," Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineering, vol.13, no.3, pp.44-52, Jun. 2004.

[2] C.H. Park, "The effects of design parameters on the mechanical precision of an end effector on a parallel kinematic robot," Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol.22, no.10, pp.847-852, October, 2016

[3] R. Clavel, "Conception d'un robot parallèle rapide à 4 degrés de liberté," Ph.D. Thesis, EPFL, Lausanne, Switzerland, 1991.

[4] R. Clavel, "Device for the movement and positioning of an element in space," US Patent No.4,976,582, Dec. 1990

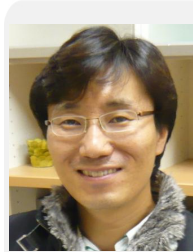
[5] J.-P. Merlet, Parallel Robots, Kluwer Academic Publishers, 2000.

[6] K. Miller, "Modeling of dynamics and model-based control of DELTA direct-drive parallel robot," Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.17, no.4, pp.344-352, 1995.

[7] S.H. Lee, "Dynamic modeling of a novel ATC mechanism based on 4-bar linkage," Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, vol.22, no.4, pp.307-314, 2016.

[8] P. J., "Vibration analysis of planar cable-driver parallel robot configurations," Journal of Korea Robotics Society, Vol.11, no.2, pp.73-82, 2016.

[9] J.H. Park, "Analysis on Kinematic Characteristics of the Revolute joint-based Translational 3-DOF Parallel Mechanisms," Journal of Korea Robotics Society, Vol.10, no.2, pp.119-132, 2015.



#### 박 찬 훈

1994 영남대 기계공학과(공학사)  
 1996 POSTECH 기계공학과(공학석사)  
 2010 KAIST 기계공학과(공학박사)  
 1996~현재 한국기계연구원 로봇메카트로닉스연구실

관심분야: 산업용 로봇, 로봇 설계 및 제어



#### 박 동 일

2000 KAIST 기계공학과(공학사)  
 2002 KAIST 기계공학과(공학석사)  
 2006 KAIST 기계공학과(공학박사)  
 2006~현재 한국기계연구원 로봇메카트로닉스연구실

관심분야: 로봇 해석 및 설계, 로봇 머니플레이터



#### 김 두 형

1997 서울대 전기공학부(공학사)  
 1999 서울대 전기공학부(공학석사)  
 2004 서울대 전기컴퓨터공학부(공학박사)  
 1982~현재 한국기계연구원 로봇메카트로닉스연구실

관심분야: 산업용 로봇 제어, 로봇 안전기술