

4-RRPaRR구조의 Schönflies Motion Generator 기구학 특성 분석

Kinematic Characteristics of a 4-RRPaRR Type Schönflies Motion Generator

김 성 목¹, 이 병 주², 김 희 국[†]

Kim Sung-Mok¹, Yi Byung-Ju², Kim Whee-Kuk[†]

Abstract This article investigates kinematic characteristics of a Schönflies motion generator which represents a mechanism having translational three Degree-of-Freedom (DOF) and rotational one-DOF motion about a fixed axis. The mechanism consists of the base plate and the moving plate, and four identical limbs connecting them. Each limb employs two revolute joints (RR), one parallelogram (Pa), and two revolute joints (RR) from the base plate to the moving plate. The mechanism is driven by four actuators which are placed on the base plate to minimize dynamic loads. It is shown through simulations that the mechanism can be designed to secure large dexterous workspace and thus has very high potential for actual applications such as haptic devices and high-speed requiring tasks such as pick-and-place operations, riveting, screwing tasks, etc.

Keywords: Schönflies Motion Generator, Parallel Mechanism, Position Analysis, Kinematic Analysis, Optimal Design

1. 서론

십 여 년 전부터 4자유도 또는 5자유도를 가지는 저자유도(lower-mobility) 병렬 메커니즘의 활용을 확대하고자 스 크류이론 (Screw Theory)과 변위그룹이론 (Theory of Group of Displacement)에 근거하여 구조 합성에 관한 연구는 매우 활발히 진행되어 왔다. 그 연구결과로서 다양한 형태의 저 자유도 메커니즘 구조는 물론^{[1][6]} 조립 작업에 유용한 Schönflies Motion Generator (SMG: 즉, 3자유도 병진 운동과 고정된 축에 대한 1자유도 회전운동을 가지는 메커니즘)의 다양한 구조가 제시되었다.^{[7][8]} 하지만, 이러한 합성에 관한 대부분의 연구는 대칭구조를 가지는 병렬 메커니

즘의 구조 제시로 국한되어 있으므로 각 메커니즘들의 실용성을 확인하기 위해서는 보다 심도있는 설계 및 기구학 해석을 통한 검증이 요구된다 하겠다. 이러한 합성 연구와는 별도로 Claver^[9]에 의해 제시된 3 자유도 Delta 로봇의 개념을 확장하여 3RIT 4-DOF SCARA 로봇과 유사한 운동공간을 가지는 비대칭형 구조의 SMG들 중 일부는 우수한 동적 성능이 검증되어 이미 고속 작업용 자동화 로봇으로 실용화된 바 있다.^{[10][11]}

한편, 실용성 측면에서 작은 마찰력은 메커니즘의 성능 향상에 있어 매우 중요한 요소이며 간결한 구조 또한 haptic device와 같은 제한된 적은 설치공간이 요구되는 작업용 로봇에 고려되어야 할 중요한 요소이다. 그러나 기존에 구현된 대부분의 SMG는 상대적으로 큰 마찰력이 존재하는 미끄럼 관절을 사용하는 구조를 가지고 있거나, 간결성의 측면에서는 많은 개선이 요구된다.

따라서, 본 연구에서는 회전관절만을 활용하는 간결한 구조의 SMG로서 대칭구조를 가지고 있어 높은 실용 가능성이 예상되는 메커니즘에 대한 기구학 특성을 조사하였

Received : Sep.10.2010; Reviewed : Nov.24.2010; Accepted : Dec.09.2010

※ 이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 휴먼인지환경사업본부 신기술융합형 성장동력사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2010K001163).

※ 본 연구과제는 일부 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략인력양성사업 및 에너지자원인력양성사업으로 추진된 결과입니다.

¹ 고려대학교 대학원 제어계측공학과 박사과정

² 한양대학교 전자시스템공학과 정교수

[†] 교신저자 : 고려대학교 제어계측공학과 정교수

다. 본 논문은 아래와 같이 구성된다. 먼저 2장에서는 메커니즘의 구조 및 기구학 모델에 관하여 기술한다. 그리고 3장에서는 작업공간의 크기와 기구학 특성을 분석하고 이러한 분석으로부터의 최적 설계를 논한 후 4장에서는 결론을 맺는다.

2. 메커니즘의 구조 및 기구학 모델

2.1 메커니즘의 구조

그림 1의 메커니즘은 하판 (the base plate), 이동판 (the moving plate), 그리고 이를 연결하는 네 개의 부속체인 (4-RRPaRR)으로 구성된다. 각 부속체인은 하판으로부터 차례로 하판에 고정된 회전관절(θ_{i1}), 이와 평행한 회전관절(θ_{i2}), 그리고 이들을 연결하는 링크(l_{ij}), 평행사변형 4절 기구를 구성하는 네 개의 회전관절, 하판에 고정된 회전관절과 평행한 회전관절(θ_{i5}), 그리고 이동판에 수직으로 고정된 회전관절(θ_{i6})로 구성된다. 편이상 평행사변형 4절기

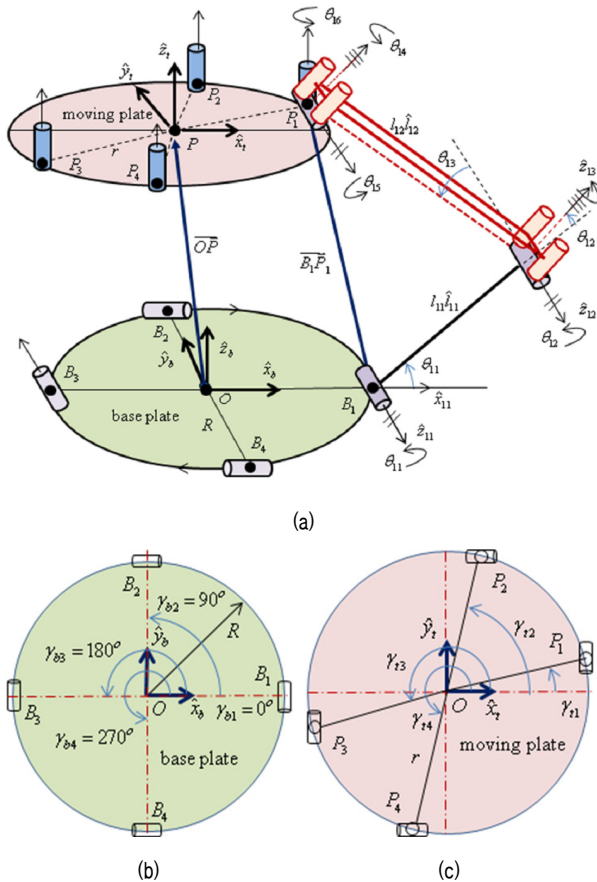


그림 1. (a) The 4-DOF mechanism, (b) offset angles of the base plate, (c) offset angles of the moving plate

구는 그림 2에서와 같이 하나의 링크(l_{i2})와 링크의 양쪽 끝에 부착된 두 개의 회전관절 (θ_{i3} 와 $\theta_{i4} (::\theta_{i4} = -\theta_{i3})$)로 대체되어 표현한다.

메커니즘의 자유도는 아래와 같이 병렬 메커니즘에 적합한 모빌리티 공식으로부터 구해질 수 있다.

$$M = \sum_i f_i - \sum_j d_j = 32 - (4 \times 3 + 6 + 5 + 5) = 4, \quad (1)$$

여기서 총 회전관절 수는 32개이며 각 페루프의 허용 관절 운동 공간(admissible joint motion space)은 대표 스�크류(Representative Screw)개념^[18]을 이용하여 평행 사변형 4절 기구는 3, 나머지 페루프들은 차례로 6, 5, 그리고 5로 구해진다. 여기서 각 페루프의 허용 관절 운동 공간은 페루프에 속한 관절 스�크류들의 랭크를 구함으로서 얻어지며 또한, 이러한 모빌리티 분석 과정에서 메커니즘이 SMG 즉, 병진형 3 자유도와 이동판에 수직인 축에 대한 1 자유도 회전운동을 가지는 것을 확인할 수 있다.

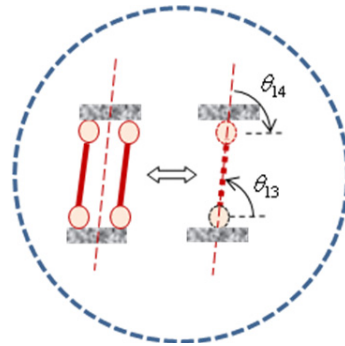


그림 2. Virtual model equivalent to the parallelogram

2.2 기구학 모델

기저 좌표계($\hat{x}_b, \hat{y}_b, \hat{z}_b$)와 출력 좌표계($\hat{x}_t, \hat{y}_t, \hat{z}_t$)는 각각 하판의 중앙과 이동판의 중앙에 위치한다. 각 부속체인(for $i=1,2,3,4$)의 첫 번째 관절은 하판의 중심에 위치한 반경 R 인 원상에 \hat{x}_b 축으로부터 γ_{bi} 인 각의 위치에 고정된다. 마찬가지로 이동판에 고정된 회전관절의 위치도 이동판의 중심에 위치한 반경 r 인 원상에 \hat{x}_t 축으로부터 γ_{ti} 인 각의 위치에 고정된다. 그리고 θ_{ij} 과 l_{ij} 에 있어 아래첨자는 각각 i 번째 부속체인의 j 번째 관절을 나타낸다. 메커니즘의 출력변수는 이동판 중앙의 위치(X, Y, Z)와 \hat{z}_t 축에 대한 이동판의 회전각(α)이며 입력관절은 하판에 고정된

각 부속체인의 회전관절($\theta_\alpha = (\theta_{11}, \theta_{21}, \theta_{31}, \theta_{41})^T$)이다. 이 동판의 출력변위벡터가 주어졌을 때 입력관절 각을 구하는 역위치 해석과 입력관절 각이 주어졌을 때 이동판의 출력변위벡터를 구하는 정위치 해석은 지면상 생략한다.^[19]

이동판의 출력변수 벡터와 각 부속체인의 구속 관계식은 아래와 같은 식으로 표현된다:

$$\overline{OP}_i = \overline{OP} + \overline{PP}_i = \overline{OB}_i + \overline{B_iP}_i, \quad \text{for } i=1,2,3,4, \quad (2)$$

여기서

$$\overline{OP} + \overline{PP}_i = \vec{P} + \vec{r}_i, \quad (3)$$

$$\overline{OB}_i + \overline{B_iP}_i = \vec{R}_i + l_{i1}\hat{l}_{i1} + l_{i2}\hat{l}_{i2}. \quad (4)$$

(2)를 시간에 관하여 미분하면 점 P_i (for $i=(1,2,3,4)$)에 대한 속도 관계식이 다음과 같이 얻어진다.

$$\dot{\vec{P}}_i = \dot{\vec{P}} + \vec{\omega} \times \vec{r}_i = \vec{\omega}_{i1} \times l_{i1}\hat{l}_{i1} + \vec{\omega}_{i3} \times l_{i2}\hat{l}_{i2}, \quad (5)$$

여기서

$$\vec{\omega}_{ik} = \sum_{j=1}^k \dot{\theta}_{ij} \hat{z}_{ij}, \quad \text{for } k=1,2,3, \quad (6)$$

그리고 $\{\hat{x}_{ij}, \hat{y}_{ij}, \hat{z}_{ij}\}$ 는 i 번째 부속체인의 j 번째 링크에 고정된 지역 좌표계를 나타낸다. (5)의 양변에 \hat{l}_{i2} 의 내적을 곱하여 정리하면 아래와 같다.

$$\hat{l}_{i2} \cdot \dot{\vec{P}} + \vec{r}_i \times \hat{l}_{i2} \cdot \vec{\omega} = l_{i1}\hat{l}_{i1} \times \hat{l}_{i2} \cdot \dot{\theta}_{i1}\hat{z}_{i1}, \quad \text{for } i=1,2,3,4. \quad (7)$$

(7)을 행렬식으로 정리하면

$$[A_u]\dot{\vec{u}}^* = [B_a]\dot{\theta} \quad (8)$$

이며 여기서

$$\vec{u}^* = (\dot{\vec{P}}^T, \vec{\omega}^T)^T \in R^{6 \times 1}, \quad (9)$$

$$[A_u] = \begin{bmatrix} \hat{l}_{12}^T & (\vec{r}_1 \times \hat{l}_{12})^T \\ \hat{l}_{22}^T & (\vec{r}_2 \times \hat{l}_{22})^T \\ \hat{l}_{32}^T & (\vec{r}_3 \times \hat{l}_{32})^T \\ \hat{l}_{42}^T & (\vec{r}_4 \times \hat{l}_{42})^T \end{bmatrix} \in R^{4 \times 6}, \quad (10)$$

그리고 행렬 $[B_a] \in R^{4 \times 4}$ 의 각 요소는 아래와 같이 표현된다.

$$B_{a_{ii}} = l_{i1}\hat{l}_{i1} \times \hat{l}_{i2} \cdot \hat{z}_{i1}, \\ B_{a_{ij}} = 0, \quad \text{for } i \neq j, \quad \text{for } i, j=1,2,3,4. \quad (11)$$

메커니즘의 이동판은 항상 \hat{x}_i 축과 \hat{y}_i 축에 대한 회전이 제한되므로(즉, $\omega_x = \omega_y = 0$) 행렬 $[A_u]$ 의 다섯 번째와 여섯 번째 행은 제거할 수 있으며 따라서 아래와 같은 입출력 속도 관계식이 얻어진다.

$$[A_{ur}]\dot{\vec{u}} = [B_a]\dot{\theta}, \quad (12)$$

여기서

$$[A_{ur}] = \begin{bmatrix} \hat{l}_{12}^T & (\vec{r}_1 \times \hat{l}_{12})_z^T \\ \hat{l}_{22}^T & (\vec{r}_2 \times \hat{l}_{22})_z^T \\ \hat{l}_{32}^T & (\vec{r}_3 \times \hat{l}_{32})_z^T \\ \hat{l}_{42}^T & (\vec{r}_4 \times \hat{l}_{42})_z^T \end{bmatrix} \in R^{4 \times 4}. \quad (13)$$

(12)에서 행렬 $[A_{ur}]$ 의 역행렬이 존재하면 메커니즘의 정속도 관계식은 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$\dot{\vec{u}} = [A_{ur}]^{-1}[B_a]\dot{\theta} = [G_\theta^u]\dot{\theta}. \quad (14)$$

마찬가지로, 메커니즘의 정속도 관계식은 아래와 같이 구해진다.

$$\dot{\theta} = [B_a]^{-1}[A_{ur}]\dot{\vec{u}} = [G_\theta^u]^{-1}\dot{\vec{u}} \quad (15)$$

3. 메커니즘의 기구학 특성 분석

3.1 설계 지수

SMG는 1자유도 회전운동과 3자유도 병진운동을 출력으로 가지므로 이 두 가지 다른 운동의 차원을 정규화하기

위해 다음의 정규화된 자코비안을 사용한다.

$$\dot{\mathbf{u}}^* = \begin{Bmatrix} \frac{v}{v_{max}} \\ \frac{\dot{\alpha}}{\dot{\alpha}_{max}} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [I]_{3 \times 3} & [0]_{3 \times 1} \\ v_{max} & 1 \\ [0]_{1 \times 3} & \dot{\alpha}_{max} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_a^u \\ 1 \end{bmatrix} \dot{\phi}_a = [G_a^{u*}] \dot{\phi}_a. \quad (16)$$

정규화 자코비안의 경우 이동판의 병진 운동으로 인한 최대 속도와 부속체인이 고정된 점(P_i)의 이동판의 순수 회전운동으로 인한 최대 병진 속도를 같도록 하는 가중치를 사용하였다. 즉, $v_{max} : \alpha_{max} = 1 : 1/r$.

한편, 메커니즘의 전체 작업공간은

$$W = \int_W dW \quad (17)$$

로 그리고 지역 기구학 등방성 지수(σ_1)는

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (18)$$

로 각각 정의된다. (18)에서 σ_{min} 와 σ_{max} 는 각각 정규화된 자코비안($[G_a^{u*}]$)의 최소 특이값과 최대 특이값을 나타낸다. 그리고 전역 등방성지수는 전체 작업공간내에서의 평균 지역 기구학 등방성 특성을 나타낸다.

$$\Sigma_1 = \frac{\int_W \sigma_1 dW}{W}. \quad (19)$$

3.2 기구학 특성 분석

그림 1에서와 같이 메커니즘의 설계인자는 γ_{bi} , γ_{ti} , R , r , l_i 그리고 l_2 (for $i = 1, 2, 3, 4$)로 요약된다. 이러한 설계인자들 전체에 대한 최적설계는 상당한 양의 전산하중은 물론 실용성 있는 최적 설계 결과를 도출하기 위해서는 특이형상의 형태 및 위치에 따른 작업공간의 효율성을 효과적으로 나타낼 수 있는 목적함수의 설정 등과 같은 난제들에 대한 선행 해석이 필요하다.

일반적으로 대칭구조를 가지는 병렬 메커니즘은 제작이 용이하며 상대적으로 우수한 기구학 특성을 나타낸다. 또한, 스트루트 병렬 메커니즘의 경우 이동판 및 하판의 오프셋 각은 구조적 특이형상의 유무 및 위치와 밀접한 관계

를 나타낸다.^[20] 따라서, 본 연구에서는 메커니즘의 설계인자를 가능한 대칭구조를 유지하도록 설정하였다. 즉, 메커니즘은 동일한 네 개의 부속체인으로 이루어지며($l_1 = l_i$, $l_2 = l_2$, $i = 1 \dots 4$) 하판의 오프셋 각은 각각 $\gamma_{b1} = 0^\circ$, $\gamma_{b2} = 90^\circ$, $\gamma_{b3} = 180^\circ$, $\gamma_{b4} = 270^\circ$ 로 대칭의 형태를 유지한다고 설정하였다. 또한, 하판과 이동판 각각에 각 부속체인이 연결된 위치는 각각 동일한 원주 상에 ($R = R_i$ 와 $r = r_i$, for $i = 1 \dots 4$) 위치한다고 설정하였다.

한편, 이동판의 오프셋 각은 특이형상의 위치와 매우 밀접한 관계를 가지며 특히 그림 1(b)와 같이 이동판의 오프셋 각이 $\gamma_{t1} = 0^\circ$, $\gamma_{t2} = 90^\circ$, $\gamma_{t3} = 180^\circ$, $\gamma_{t4} = 270^\circ$ 과 같이 주어지는 경우 그림 3에서와 같이 작업공간이 중앙부분에 특이형상 영역이 나타나게 되며 그림 1(c)와 유사한 배치로서 $\gamma_{t1} = 15^\circ$, $\gamma_{t2} = 75^\circ$, $\gamma_{t3} = 195^\circ$, $\gamma_{t4} = 255^\circ$ 일 때의 경우는 특이형상이 거의 없는 넓은 자유자재한 작업공간을 가지는 것으로 확인된 바 있다^[19]. 이러한 결과에 따라, 본 연구에서도 이동판의 오프셋 각은 편이상^[9]과 동일한 값으로 설정하였다.

이상과 같은 가정하에서 메커니즘은 네 개의 설계인자를 가지는 것으로 축약된다. R , r , l_1 그리고 l_2 . 한편, 메커니즘의 작업공간의 크기는 메커니즘의 크기와 밀접한 관계가 있으므로 편이상 부속체인이 최대로 펼쳐졌을 때의 길이가 하판의 반경의 두 배 또는 세 배가 되어야 한다는 추가의 구속조건을 부여하였다 (즉, 구속조건 A: $l_1 + l_2 = 2R$, 그리고 구속조건 B: $l_1 + l_2 = 3R$). 이러한 구속조건과 더불어 나머지 설계 인자들을 하판의 반경에 관하여 정규화하게 되면 최종 설계인자는 무차원화된 두 개의 인자로 줄어들게 된다. 즉, r/R 과 $l_1/R = 2 - l_2/R$, 또는 r/R 과 $l_1/R =$

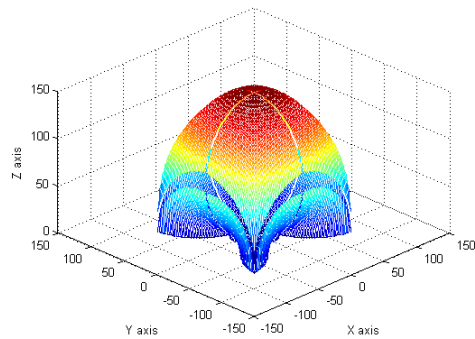
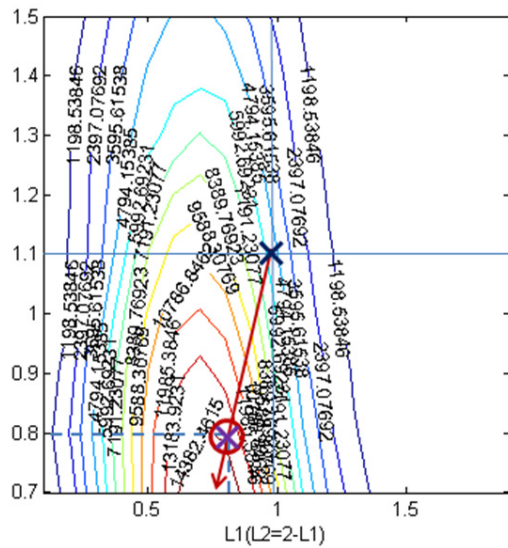


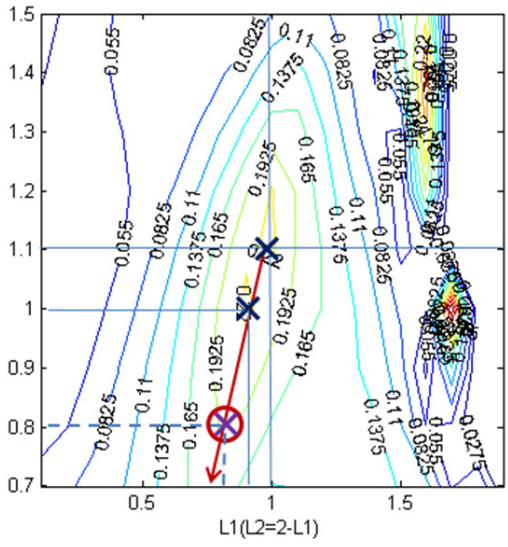
그림 3. 3-D workspace when $\gamma_{t1} = 0^\circ$, $\gamma_{t2} = 90^\circ$, $\gamma_{t3} = 180^\circ$, $\gamma_{t4} = 270^\circ$

3- l_2 / R

그림 4(a), 그림 4(b), 그림 5(a) 그리고 그림 5(b)는 이들 두 셀의 무차원화된 설계변수들에 대한 작업공간의 크기와 전역 등방성 지수의 등고선도를 나타낸다. 모의실험에서 설계인자들의 탐색범위는 각각 $0.5 \leq r/R \leq 1.5$ 와 $1 \leq l_1/R \leq 2$ 로 제한하였으며 출력 변수들에 대한 탐색 범위도 각각 $-5 \leq x, y \leq 5, 0 \leq z \leq 5$, 그리고 $-45^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ 로 제한하였다. 그리고 위치영역과 회전영역에서의 격자간격은

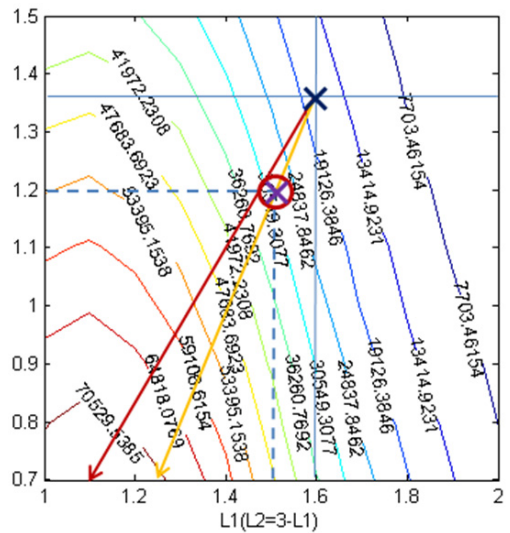


(a)

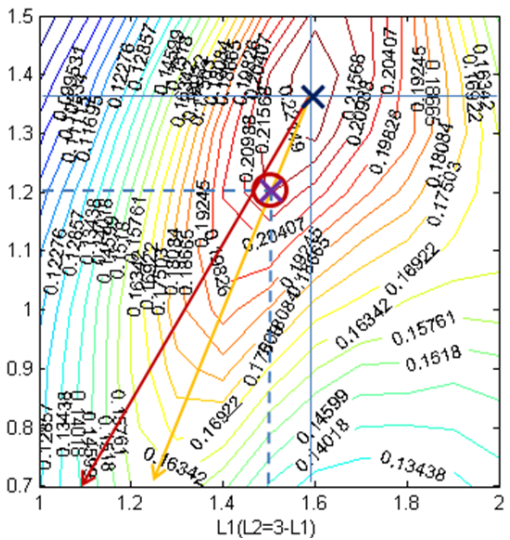


(b)

그림 4. 3-D Contour plots with respect to l_1 / R and r / R with $R = 1$ when constraints condition A is imposed. (a) workspace size (b) global isotropy index



(a)



(b)

그림 5. 3-D Contour plots with respect to l_1 / R and r / R with $R = 1$ when constraints condition B is imposed. (a) workspace size (b) global isotropy index

각각 0.2와 5°로 설정하였다. 유효한 작업공간의 크기는 등방성 지수 문턱 값(0.01)보다 큰 격자점들의 수를 합하여 산출하였다. 전역등방성 지수는 유사한 방식으로 유효작업 공간내에서의 격자점들의 평균값으로 산출하였다.

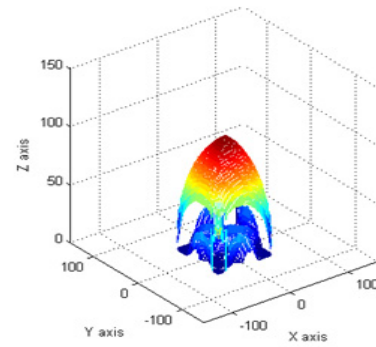
구속조건 A ($l_1 / R = 2 - l_2 / R$)의 경우, 그림 4(a)로부터 작업공간의 크기는 l_1 / R 와 r / R 가 그림상의 점 ($l_1 / R = 0.75, r / R = 0.7$)으로 접근함에 따라 증가되는 것을 확인할 수 있다. 그러나, 최대 전역 등방성 지수 값은 점 ($l_1 /$

$R = 0.9$, $r/R = 1.0$)와 점 ($l_1/R = 1$, $r/R = 1.1$)를 연결하는 선 상에 존재하지만, 그림 4(b)에서와 같이 점($l_1/R = 0.75$, $r/R = 1.0 = 0.7$)으로 가까이 감에 따라 감소함을 확인할 수 있다.

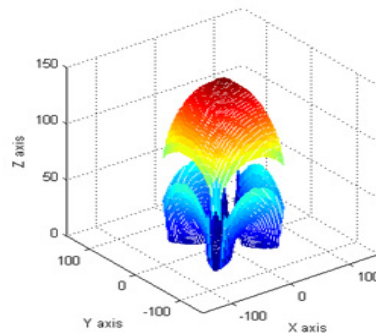
구속조건 B($l_1/R = 3 - l_2/R$)의 경우, 그림 5(a)로부터 작업공간의 크기는 점($l_1/R = 1.1$, $r/R = 0.7$)에서 최대가 된다는 것을 확인할 수 있다. 그러나, 전역 등방성지수 값은 그림 5(b)에서와 같이 점($l_1/R = 1.6$, $r/R = 1.35$)에서 최대가 되지만 점($l_1/R = 1.25$, $r/R = 0.7$)에서 최소가 됨을 확인할 수 있다.

이러한 등고선 그림은 설계자에게 작업공간의 크기와 등방성 지수 특성 사이에서 요구되는 작업조건에 적절한 최적 설계 인자 값을 선택할 수 있는 정보와 유연성을 제공한다. 예컨대, 특이형상이 없는 작업공간을 확보하기 위해서는 등방성 특성에 작업공간의 크기보다 더 큰 가중치가 주어지면 된다. 한 예로서, 그림 4와 그림 5에 있어 원 내 십자가 표식은 각각 본 연구에서 채택한 최적인자의 값으로서 그림 4와 그림 5의 경우, $R = 50\text{mm}$ 일 때, 최적 인자들의 실제 값은 각각 $l_1 = 40\text{mm}$ 와 $r = 40\text{mm}$, 그리고 $l_1 = 75\text{mm}$ 와 $r = 60\text{mm}$ 로 산출된다. 그림 6(a)과 그림 6(b)는 회전각 $\alpha = 0^\circ$ 일 때, 각각 이들 두 가지 최적 설계인자들에 대한 3-D 작업공간그림이다. 예상되는 바와 같이 구속조건 B ($l_1/R = 3 - l_2/R$)의 경우에 대한 작업공간의 크기가 구속조건 A ($l_1/R = 2 - l_2/R$)의 경우에 비하여 더 크다는 것을 확인할 수 있다.

그러면, 구속조건 B에 맞추어 최적 설계된 메커니즘의 기구학 특성을 기술한다. 그림 7은 z 값을 40mm , 80mm 그리고 120mm 로 고정한 각각의 경우에 나머지 출력 변수(x , y , α)들의 3-D 작업공간을 나타낸다. 그리고 그림 8은 $\alpha = 0^\circ$



(a)



(b)

그림 6. 3-D workspace plots for when $\alpha = 0^\circ$ (a) constraints condition A, (b) constraint condition B

로 고정하되 z 값은 그림 7과 마찬가지로 각각 40mm , 80mm 그리고 120mm 로 고정하였을 때 두 개의 출력변수(x , y)에 대한 3-D 기구학 등방성 지수 그림을 나타낸다. 이 그림들에서도 앞서서와 같이 작업공간의 경계는 등방성 지수의 문턱값 (0.01)을 사용하였다. 이러한 작업공간 그림과 기구학 등방성 특성으로부터 최적화된 메커니즘이 충분히 넓은 특이형상이 없는 우수한 기구학 특성을 가지는 작업공

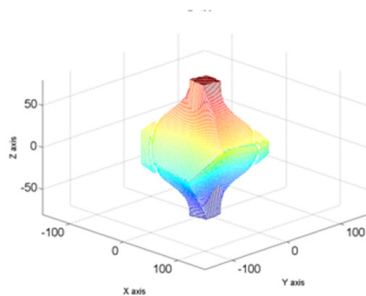
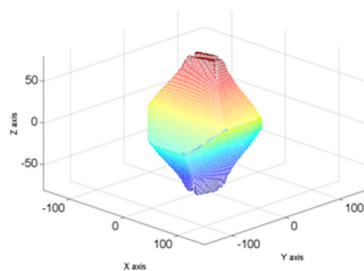
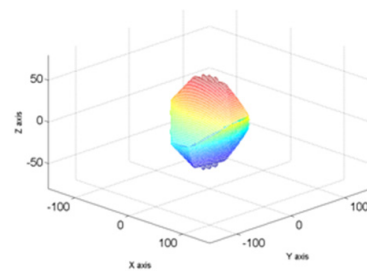
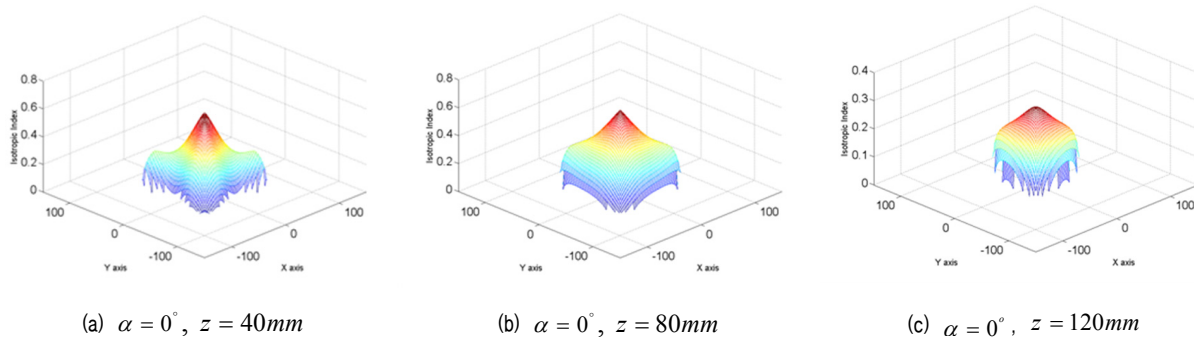
(a) $z = 40\text{mm}$ (b) $z = 80\text{mm}$ (c) $z = 120\text{mm}$

그림 7. Workspace in the x , y , α domain

그림 8. 3-D isotropy index plots in the $x-y$ plane

간을 확보하고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 본 연구에서 조사한 Schönflies Motion Generator는 실용적인 메커니즘으로의 개발에 높은 가능성을 가지고 있음을 확인케 한다.

4. 결론

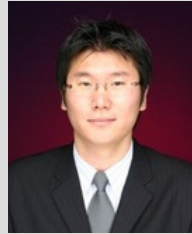
본 논문에서는 병진 3자유도와 고정된 회전축에 대한 1 자유도 회전운동을 가지는 4RRPaRR형 SMG에 대한 기구학 특성을 조사하였다. 구체적으로 전체 메커니즘의 크기에 따른 작업공간의 크기와 기구학 등방성 특성 분석을 통하여 메커니즘이 실용적으로 활용되기에 충분한 잠재력을 가지고 있음을 확인하였다. 특히, 메커니즘은 회전관절만을 사용하여 적은 마찰력의 이점과 적은 크기의 메커니즘의 구현이 가능하여 햅틱 기구로서 뿐 만 아니라 작업요구에 맞는 적절한 링크길이를 활용함으로써 SCARA로봇과 같은 고속 조립 작업이나 볼트 스크류 삽입작업에도 사용될 수 있는 자유도를 가지고 있어 그 실용 가능성이 매우 높다 하겠다.

향후 연구로는 본 메커니즘의 활용 가능성을 검증할 수 있도록 심도 있는 메커니즘의 특이형상 분석, 그리고 이를 반영한 메커니즘의 최적설계 및 제작을 통한 실용적인 성능 실험이 필요하다 하겠다.

참고문헌

- [1] R.S. Ball, A Treatise on the Theory of Screws, Cambridge University Press, Cambridge, 1900.
- [2] J.M. Herve, "The Mathematical Group Structure of the Set of Displacements," Mech. Mach. Theory, vol 29, No.1, pp.73-81, 1994.
- [3] Y. Fang and L.-W. Tsai, "Structure synthesis of a class of 4-DOF and 5-DOF parallel manipulators with identical limb structures," Int. J. Robot. Res., Vol.21, No.9, pp.799-810, Sep. 2002..
- [4] Z. Huang and Q.C. Li, "Type synthesis of symmetrical lower-mobility parallel mechanism using the constraint-synthesis method," Int. J. Robot. Res., Vol.22, No.1, pp.59-79, Jan. 2003..
- [5] X. Kong and C.M. Gosselin, "Type synthesis of 3T1R 4-DOF parallel manipulators based on screw theory," IEEE Trans. Robot. Auto., Vol.20, No.2, pp.181-190, April 2004..
- [6] Q. Li, Z. Huang, and J.M. Herve, "Type Synthesis of 3T2R 5-DOF Parallel Mechanisms Using the Lie Group of Displacements," IEEE Trans. Robot. Auto., vol 20, No.2, pp.173-180, 2004.
- [7] X. Kong and C. Gosselin, "Type synthesis of 4-DOF SP-equivalent parallel manipulators: A virtual chain approach," Mechanism and Machine Theory, Vol. 41, No.11, pp. 1306-1319, 2006.
- [8] O. Salgado, O. Altuzarra, V. Petuya, and A. Hernandez, "Synthesis and Design of a Novel 3T1R Fully-Parallel Manipulator," ASME Journal of Mechanical Design, Vol.130, No.3, pp.____, 2008.
- [9] R. Clavel, "Delta, a fast robot with parallel geometry," in 18th Int'l Symp. On Industrial Robots, Lausanne : IFS Publications, pp.91-100, 1988.
- [10] H.B. Choi, O. Company, F. Pierrot, A. Konno, T. Shibukawa, and M. Uchiyama, "Design and control of a novel 4-DOF parallel robot H4," in Proc.

- IEEE Int. Conf. Robot. Auto., pp.1185-1190, 2003.
- [11] S. Krut, O. Company, M. Benoit, H. Ota, and F. Pierrot, "I4 : New parallel mechanism for Scara motions," in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Auto, pp.1875-1880, 2003.
- [12] O. Company, F. Marquet, and F. Pierrot, "A new high-speed 4-DOF parallel robot synthesis and modeling issues," IEEE Trans. Robot. Auto., Vol.19, No.3, pp.411-420, June 2003.
- [13] S. Krut, V. Nabat, O. Company, and F. Pierrot, "A high-speed parallel robot for Scara motions," in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Auto, pp.4109-4115, 2004.
- [14] S. Krut and F. Pierrot, "Internal Singularity Analysis of a Class of Lower Mobility Parallel Manipulators With Articulated Traveling Plate," IEEE Transactions on Robotics, Vol.22, No.1, pp.1-11, Feb. 2006.
- [15] F. Pierrot, V. Nabat, O. Company, S. Krut, and P. Poignet, "Optimal design of a 4-DOF parallel manipulator: from academia to industry," IEEE Transactions on Robotics, Vol.25, No.2, pp.213-224, 2009.
- [16] A. Cammarata, J. Angeles, and R. Sinatra, "Kinetostatic and Inertial Conditioning of the McGill Schönflies-Motion Generator," Advances in Mechanical Engineering, Hindawi Publishing Corporation, Vol.2010, article No.ID. 186203.
- [17] P.L. Richard, C.M. Gosselin, and X. Kong, "Kinematic Analysis and Prototyping of a Partially Decoupled 4-DOF 3T1R Parallel Manipulator," ASME Journal of Mechanical Design, Vol.129, pp.611-616., 2007.
- [18] 김희국, 이승은, 이병주, "평면형 모바일 로봇의 모빌리티에 대한 분석," 제어.자동화.시스템 공학회 논문집, 제 8권 제 3호, 2002, pp.243-248.
- [19] S.M. Kim, W.K. Kim, and B.-J. Yi, "Kinematic Analysis and Optimal Design of a 3T1R Type Parallel Mechanism," in Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Kobe, Japan, pp.2199-2204, May 12-17, 2009.
- [20] O. Ma and J. Angeles, "Architecture singularities of parallel manipulators," IEEE Trans. on Robot. Auto., Vol.7, No.1, pp.23-29, 1992.



김성목

2007 고려대학교 제어계측공학과 학사

2011 고려대학교 대학원 공학석사

2011~현재 고려대학교 대학원 제어계측공학과 박사과정

관심분야: 로봇 메커니즘 설계, 로봇 기구학 모델링, 모바일 로봇

Email : K2potobox@korea.ac.kr



이병주

1991 텍사스 주립대학(오스틴 소재) 기계공학과 공학박사

1991~1992 동대학교 Post Doc.

1992~1995 한국기술교육대학교 제어기계공학과 조교수

1995~현재 한양대학교 전자시스템공학과 교수

관심분야: 로봇 기구학, 병렬 메커니즘, 수술로봇, 파이프라인 로봇, 생체모방 로봇 설계.

Email : bj@hanyang.ac.kr



김희국

1990 텍사스 주립대학(오스틴 소재) 기계공학과 공학박사

1990~1991 동대학교 Post Doc.

1991~현재 고려대학교 제어계측공학과 교수

관심분야: 로봇 메커니즘 설계, 로봇 기구학 및 동역학 모델링, 모바일 로봇, 의료 로봇

Email : wheekuk@korea.ac.kr