

협소 공간 작업을 위한 6축 다관절 로봇의 기구학 및 구조해석

정성엽, 최두순*
한국교통대학교 기계공학과

Kinematic and Structural Analysis of a 6-DOF Manipulator for Narrow-space Work

Seong Youb Chung, Du-Soon Choi*

Department of Mechanical Engineering, Korea National University of Transportation

요약 본 연구팀은 프레스 성형 공정에서 베텀 새시 (bottom chassis)에 펌너트 (pem nut)를 고정하는 것과 같은 협소 공간 작업을 위한 6축 다관절 로봇을 개발하고 있다. 본 논문에서는 6축 다관절 로봇의 위치 제어를 위한 기구학 해석과 가반하중에 따른 위치 정밀도 파악을 위한 구조해석을 수행하였다. 먼저, 로봇의 Denavit-Hartenberg 파라미터를 정의하고, 정기구학과 역기구학 모델을 제시하였다. 기구학 모델은 Coppelia Robotics 사의 virtual robot experimentation platform (V-REP)을 이용하여 시각적인 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 위치 정밀도 분석은 완전 펠침 상태와 완전 접힘 상태에서 자중에 의한 처짐량과 가반하중에 의한 처짐량에 대한 구조해석을 통해 수행하였다. 해석 결과, 최대 변형량은 완전 펠침 상태에서 자체 하중만 있는 경우 0.339 mm로 나타났으며, 5kgf의 하중이 장착된 경우에는 0.667 mm로 나타났고, 설계 조건 1 mm 내에 있음을 확인하였다. 또한, 최대 발생 응력은 축 2와 3을 연결하는 링크에서 22.05 MPa로 나타났고, 부품 재질을 고려할 때 이 값은 구조적으로 안전함을 확인하였다.

Abstract Our research team is developing a 6-DOF manipulator for narrow workspaces in press forming processes, such as placing PEM nuts on the bottom of a chassis. In this paper, kinematic analysis was performed for the position control of the manipulator, along with structural analyses for position accuracy with different payloads. First, the Denavit-Hartenberg (DH) parameters are defined, and then the forward and backward kinematic equations are presented using the DH parameters. The kinematic model was verified by visual simulation using Coppelia Robotics' virtual robot experimentation platform (V-REP). Position accuracy analysis was performed through structural analyses of deflection due to self-weight and deflection under full payload (5 kgf) in fully opened and fully folded states. The maximum generated stress was 22.05 MPa in the link connecting axes 2 and 3, which was confirmed to be structurally safe when considering the materials of the parts.

Keywords : Kinematic Analysis, Structural Analysis, 6-DOF Manipulator, Narrow-space Work, Press Forming Process

1. 서론

최근 디스플레이 제품은 경량화 및 슬림화되고 있다. 펌너트 (pem nut)는 디스플레이 기구를 및 구동 회로를 고정하기 위한 부품으로, 베텀 새시(bottom chassis)라고

하는 얇은 평판에 프레스 공정을 통해 고정된다. 펌너트를 베텀 새시에 고정하기 위해서는 우선 베텀 새시가 프레스에 위치하게 되면, 다수의 작업자가 수작업으로 다수의 펌너트를 베텀 새시 위에 위치시키고 프레스를 작동하게 된다. 이 작업을 펌너트 코킹이라고 하는데, 전체

본 논문은 2016년도 산업통산자원부 지역주력산업 육성사업 [R0004308, 대형 곡면 디스플레이 chassis 제조 공정 개선을 위한 협소한 공간에서 다중 및 협업 작업이 가능한 유연한 자동화 시스템 개발] 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

*Corresponding Author : Du-Soon Choi(Korea National University of Transportation)

Tel: +82-43-841-5128 email: dschoi@ut.ac.kr

Received November 11, 2016

Revised (1st December 5, 2016, 2nd December 7, 2016)

Accepted March 10, 2017

Published March 31, 2017

공정 중 가장 오랜 시간이 소요되어 병목 공정이 되고 있다. 또한 펌너트 투입 작업은 프레스 내부에서 이루어지기 때문에 작업자의 안전사고가 큰 문제가 되고 있다. 따라서, 프레스를 이용한 디스플레이 샐시 제조공정 개선을 위해서 높이 50 cm의 협소한 프레스 금형 공간 내에서 체결용 부품 공급, 금형 검사 및 청소 작업 등 다양한 작업이 가능하고 효율적이고 안전한 자동화 시스템의 개발이 필요하다. 특히 협소한 공간에서 대면적 작업을 고속으로 수행하기 위해서는 일반적인 산업용 로봇과 달리 슬림한 형상과 경량의 조건을 만족시키는 새로운 형태의 로봇 개발이 필요하다[1]. 최근에는 KUKA 사의 Light Weight Robot, Universal Robots 사의 UR 시리즈 로봇처럼 자체 개발된 통합구동모듈에 기반한 경량의 고성능 로봇이 다양한 산업현장에서도 각광받고 있다[2,3]. 하지만 프레스 작업과 같이 협소한 공간에서 대면적 작업을 하기에는 상기 언급된 로봇의 형상과 성능이 적합하지 않아, 프레스 내부 작업에 최적화된 로봇의 개발이 필요하다. 또한 펌너트 코킹 작업에서 로봇 털의 위치에 1mm 이상 오차가 발생하면 펌너트를 벼텀 샐시에 안착 시킬 때 펌너트가 넘어질 수 있다. 따라서 로봇은 1 mm 이하의 정확도를 가지도록 설계가 되어야 한다. 이를 위해 경량 고효율의 통합구동모듈을 개발하였으며, 고안된 통합구동모듈에 기반하여 협소한 공간에서 고속으로 대면적 작업을 수행할 수 있는 로봇을 개발하였다. 개발된 로봇이 실제 작업에 사용되기 위해서는 정기구학 및 역기구학 모델이 필요하며, 자중 및 가반하중을 다룰 때의 구조적 안정성 및 쳐짐에 의한 오차가 설계 목표 이하가 되도록 설계되어야 한다[4].

이를 위해 본 연구에서는 개발된 6축 다관절 로봇의 정기구학과 역기구학 모델을 제시하고, 프레스 내부 작업 중 검사 작업에 대한 시뮬레이션을 통하여 기구학을 검증하였으며, 가반하중 영향에 대한 구조 해석을 통하여 개발된 로봇의 쳐짐에 의한 오차가 설계 목표 내에 있음을 확인하였다.

2. 6축 다관절 로봇의 기구학 해석

2.1 6축 다관절 로봇의 DH 파라미터

본 연구에서 개발된 협소 공간에서의 작업을 위한 6축 다관절 로봇은 Fig. 1과 같으며, 기구학 해석을 위해

정의한 좌표계와 DH 파라미터는 Fig. 2와 Table 1과 같다. 여기서, a_i 는 링크의 길이를, α_i 는 링크의 비틀림각을, d_i 는 링크의 오프셋을, θ_i 는 조인트각을 나타낸다. Fig. 1의 로봇은 조인트 각도가 90도이며, 나머지 조인트 각도가 0도일 때의 자세이다.



Fig. 1. 6-DOF manipulator for work in narrow space

Table 1. DH parameters of the 6-DOF manipulator

i	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	90	74	θ_1
2	400	0	0	θ_2
3	411	0	0	θ_3
4	0	90	164	θ_4
5	0	-90	120	θ_5
6	0	0	70	θ_6

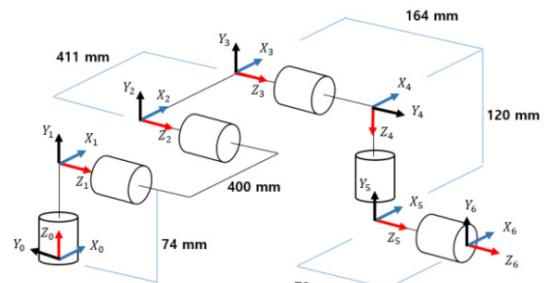


Fig. 2. Schematic drawing of the 6-DOF manipulator and definition of coordinate system

2.2 6축 다관절 로봇의 정기구학

Fig. 2의 기구학 모델은 Denavit-Hartenberg[5] 규약에 기반하여 정의하였다. 따라서 링크 좌표계에서 좌표계까지의 상태 이동과 회전을 나타내는 동차행렬변환은 식 (1)과 같다[6]. 식 (1)에서 $c\theta_i$ 와 $s\theta_i$ 는 각각 $\cos(\theta_i)$ 와 $\sin(\theta_i)$ 을 의미하며, $c\alpha_i$ 와 $s\alpha_i$ 는 각각 $\cos(\alpha_i)$ 와 $\sin(\alpha_i)$ 를 의미한다.

$${}_{i^{-1}}^i T = \begin{bmatrix} c\theta_i - s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -c\theta_i s\alpha_i a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

위 식을 이용하여 로봇 기저(base)에서 말단 (end-effector)까지 전체 변환 행렬 $({}^0_6 T)$ 을 식 (2)와 같이 1번 축에서 6번 축까지 행렬변환식을 곱하여 계산하면, 식 (3)과 같이 정리할 수 있다.

$${}^0_6 T = {}^0_1 T (\theta_1) {}^1_2 T (\theta_2) {}^2_3 T (\theta_3) {}^3_4 T (\theta_4) {}^4_5 T (\theta_5) {}^5_6 T (\theta_6) \quad (2)$$

$${}^0_6 T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

이 때,

$$r_{11} = c_1 c_{234} c_5 c_6 + s_1 s_5 c_6 - c_1 s_{234} s_6,$$

$$r_{12} = -c_1 c_{234} c_5 s_6 - s_1 s_5 s_6 - c_1 s_{234} c_6,$$

$$r_{13} = s_{234} c_5 c_6 + c_{234} s_6,$$

$$r_{21} = s_1 c_{234} c_5 c_6 - c_1 s_5 c_6 - s_1 s_{234} s_6,$$

$$r_{22} = -s_1 c_{234} c_5 s_6 + c_1 s_5 s_6 - s_1 s_{234} c_6,$$

$$r_{23} = -s_{234} c_5 s_6 + c_{234} c_6,$$

$$r_{31} = -c_1 c_{234} s_5 + s_1 c_5,$$

$$r_{32} = -s_1 c_{234} s_5 - c_1 c_5,$$

$$r_{33} = -s_{234} s_5,$$

$$p_x = 400c_1c_2 + 411c_1c_{23} + 164s_1 + 120c_1s_{234} + 70(-c_1c_{234}s_5 + s_1c_5),$$

$$p_y = 400s_1c_2 + 411s_1c_{23} - 164c_1 + 120s_1s_{234} + 70(-s_1c_{234}s_5 + c_1c_5),$$

$$p_z = 74 + 400s_2 + 411s_{23} - 120c_{234} - 70s_{234}s_5.$$

여기서, r_{ij} 는 로봇 기저에 대한 말단 좌표계의 회전행렬의 (i, j) 요소를 나타내며, p_x , p_y , p_z 는 로봇 기저에 대한 말단 좌표계 원점의 x , y , z 좌표를 의미한다. 또한 c_{23} , c_{234} , s_{23} , s_{234} 은 각각 $\cos(\theta_2 + \theta_3)$, $\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$, $\sin(\theta_2 + \theta_3)$, $\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$ 를 줄여서 나타낸 것이다.

2.3 6축 다관절 로봇의 역기구학

6축 다관절 로봇의 역기구학은 식 (3)와 같이 로봇 기

저를 기준으로 말단의 변환행렬 $({}^0_6 T)$ 이 주어져 있을 때, 식 (4)과 같이 각 조인트의 각도 θ_i 를 구하는 문제이다.

$${}^0_1 T (\theta_1) {}^1_2 T (\theta_2) {}^2_3 T (\theta_3) {}^3_4 T (\theta_4) {}^4_5 T (\theta_5) {}^5_6 T (\theta_6) = {}^0_6 T \quad (4)$$

본 연구에서 개발된 6축 다관절 로봇은 UR 로봇과 유사한 구조를 가진다. 따라서, UR 로봇의 역기구학을 계산하는 과정[7]과 비슷한 과정을 이용하여 역기구학을 구하면 식 (5)~(14)와 같다. 식 (5)에서 θ_1 을 구하면, ${}^0_1 T$ 을 계산할 수 있다. 식 (4)에 ${}^0_1 T$ 의 역행렬을 식 (6)과 같이 양변에 곱해주면 우변은 ${}^1_6 T$ 가 된다. ${}^1_6 T$ 는 1번 좌표계를 기준으로한 6번 좌표계의 변환행렬로 4번째 열의 값을 이용하면 1번 좌표계를 기준으로한 6번 좌표계의 원점 ${}^1 \mathbf{P}_6$ 을 구할 수 있다. ${}^1 \mathbf{P}_6$ 의 z 좌표 $({}^1 \mathbf{P}_6)_z$ 값을 이용하면 식 (7)을 통해 θ_5 를 구할 수 있다.

$$\theta_1 = \text{atan}2(({}^0 \mathbf{P}_5)_y, ({}^0 \mathbf{P}_5)_x) \pm \text{acos}\left(\frac{164}{\|({}^0 \mathbf{P}_5)_{xy}\|}\right) \quad (5)$$

$${}^2_2 T {}^3_3 T {}^4_4 T {}^5_5 T = {}^0_1 T^{-1} {}^1_6 T = {}^1_6 T \quad (6)$$

$$\theta_5 = \pm \text{acos}\left(\frac{({}^1 \mathbf{P}_6)_z - 164}{70}\right) \quad (7)$$

θ_5 가 구해지면, 식 (8)을 이용하여 θ_6 를 구할 수 있다. 여기서 ${}^6 \mathbf{z}_1$ 는 1번 좌표계의 z 축 벡터를 6번 좌표계에서 나타낸 것으로 ${}^6_6 T$ 의 역행렬의 3번째 열을 이용해 구한다.

$$\theta_6 = \text{atan}2\left(\frac{-({}^6 \mathbf{z}_1)_z}{\sin(\theta_5)}, \frac{-({}^6 \mathbf{z}_1)_x}{\sin(\theta_5)}\right) \quad (8)$$

θ_6 가 구해지면, 식 (9)와 같이 ${}^4_4 T$ 를 구할 수 있으며, 식 (10)을 이용하면 1번 좌표계를 기준으로 3번 좌표계의 원점 ${}^1 \mathbf{P}_3$ 을 구할 수 있다. 이 값을 이용하면 식 (11) 및 식 (12)와 같이 θ_3 와 θ_2 를 구할 수 있다.

$${}^1_2 T {}^2_3 T {}^3_4 T = {}^6_6 T ({}^4_5 T {}^5_6 T)^{-1} = {}^4_4 T \quad (9)$$

$${}^1 \mathbf{P}_3 = {}^4_4 T [0 \ -d_4 \ 0 \ 1]^T \quad (10)$$

$$\theta_3 = \pm \left(\pi - \text{acos}\left(\frac{\|{}^1 \mathbf{P}_3\|^2 - 400^2 - 411^2}{2 \times 400 \times 411}\right) \right) \quad (11)$$

$$\theta_2 = \text{atan}2((^1\mathbf{P}_3)_y, (^1\mathbf{P}_3)_x) + \text{asin}\left(\frac{411\sin(\theta_3)}{\| ^1\mathbf{P}_3 \|}\right) \quad (12)$$

마지막으로 식 (13)을 이용하여 3T 를 구하고, 3T 의 첫 번째 열을 이용하여 3번 좌표계를 기준으로 한 4번 좌표계의 x 축 벡터 ${}^3\mathbf{x}_4$ 를 구한다. 이 값을 이용하여 θ_4 를 식 (14)와 같이 구할 수 있다.

$${}^3T = ({}^2T {}^3T)^{-1} {}^1T \quad (13)$$

$$\theta_4 = \text{atan}2(({}^3\mathbf{x}_4)_y, {}^3\mathbf{x}_4)_x \quad (14)$$

식 (5), (7) 및 (11)을 살펴보면, θ_1 , θ_5 및 θ_3 는 각각 2개의 해를 가질 수 있다. 따라서 역기구학의 해는 총 8 개가 존재함을 알 수 있다.

2.4 시뮬레이션을 통한 검증

본 연구에서는 6자유도 로봇의 기구학을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 3은 개발된 로봇을 사용하게 될 하나의 예를 나타낸 것으로 프레스 내에서 Fig. 4와 같은 위치에 있는 부품들을 카메라로 검사하는 과정을 시뮬레이션 한 것이다. Fig. 4의 부품은 로봇 기저 좌표계에서 x , z 평면상에 있으며, 원점의 좌표는 (588, -300, 667)이다. 시뮬레이션에서 홈 위치의 각도는 Fig. 5에서 보는것과 같이 θ_1 에서 θ_6 까지 각각 (0, 90, 0, 90, 0, 0)이며, 역기구학에서 다중해가 나오는 것을 방지하기 위해 θ_1 은 0도로 고정 값을 이용하였으며, θ_5 와 θ_3 의 경우는 식 (5)와 (6)에서 각각 +값을 사용하였다. 시뮬레이션에서 보듯이 역기구학의 결과로 구한 조인트 각도가 로봇의 끝단을 부품에 잘 위치시키는 것을 확인할 수 있었다.

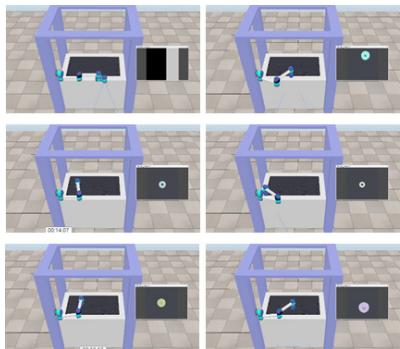


Fig. 3. Simulation of inverse kinematics

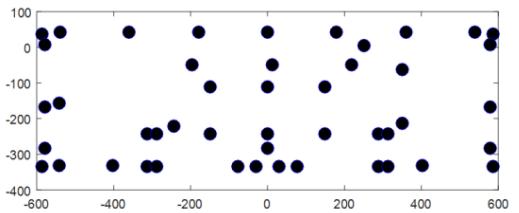


Fig. 4. Coordinates of pem nuts

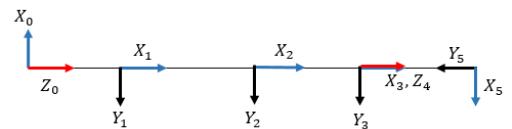


Fig. 5. Top view of the robot at home position

3. 구조해석 및 설계검증

3.1 로봇의 기본 구조

Fig. 6에 개발 로봇의 전체 구조를 나타내었다. 이 때, 1축 모터부의 바닥면이 전체 로봇의 고정부이고, 6축 모터부가 끝단부이다. 고정부에 가까울수록 큰 토크가 요구되며, 끝단부에 가까울수록 경량화가 요구된다. 따라서 Table 2과 같이 각 모터가 배치되도록 6축 로봇을 설계하였다.

구동부에는 경량 고출력의 프레임이 없는 모터 모듈을 사용하였고, 무게와 크기를 최소화하기 위하여 컴포넌트 형태의 하모닉드라이브 형변을 선택하고, 이를 통합구동모듈에 맞도록 Fig. 7와 같이 사용자화 설계를 수행하였다.

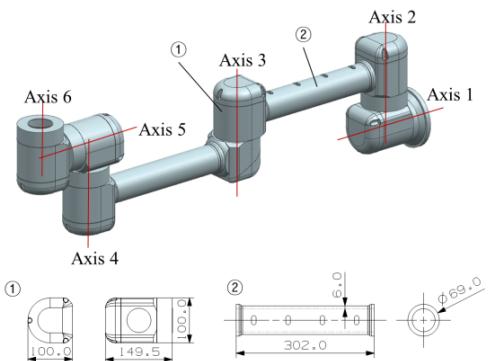
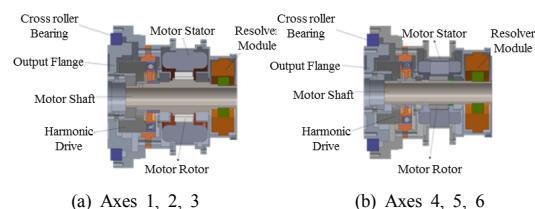
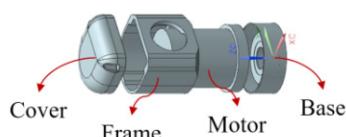


Fig. 6. Geometry of developed robot

Table 2. Specifications of integrated drive module

Axis	Gear Ratio	Motor power	Maximum Torque	Weight
1	1:100	200 W	186 N·m	1.15 kgf
2	1:160	200 W	297 N·m	1.15 kgf
3	1:100	200 W	186 N·m	1.15 kgf
4	1:100	200 W	66 N·m	0.72 kgf
5	1:100	200 W	66 N·m	0.72 kgf
6	1:100	200 W	66 N·m	0.72 kgf

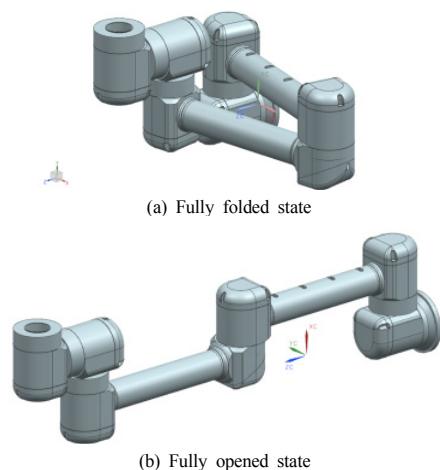
**Fig. 7.** Cross-section of developed motor**Fig. 8.** Assembly of motor module

각 구동부는 Fig. 8과 같이 모터와 하우징 부품들이 결합되는데, 이 때, 모터 하단부와 Base 부품, 모터 상단부와 Frame 부품이 각각 결합되어 모터의 회전에 따라 Base 와 Frame 이 상대 회전 운동을 하도록 설계되었다. 또한, Cover 는 Frame에 결합된다.

3.2 구조해석을 통한 위치정밀도 검증

하중에 의한 변형으로 인한 로봇의 위치정밀도를 검증하기 위하여 구조해석을 수행하였다. 위치정밀도란 기준점에 대한 특정 지점에서의 정밀도이다. 본 연구에서는 하중에 의한 변형이 최소화되는 Fig. 9 (a)의 로봇의 팔이 완전 접힘 상태를 기준점으로 선정하고, 변형이 최대화되는 Fig. 9 (b)의 상태에서의 변형량 차이를 구조해석을 통하여 분석하였다.

먼저 자체 하중으로 인한 두 위치에서의 변형량을 분석하였다. 로봇은 알루미늄 6061로 제작되었으며, 관련 물성값은 Table 3에 정리하였다. 본 해석의 목적이 구조재의 변형으로 인한 위치정밀도 검증이므로, 모터를 구성하는 각 부품의 공차로 인한 변형량은 무시하였고, 또

**Fig. 9.** 2-states of robot arms**Table 3.** Mechanical properties of Aluminum 6061

Property	Value
Modulus of Elasticity	68.9 GPa
Poisson's ratio	0.33
Tensile yield strength	276 MPa
Density	2770 kg/m ³

Table 4. Mechanical properties of simplified motor

Property	Value
Modulus of Elasticity	200 GPa
Poisson's ratio	0.30
Tensile yield strength	250 MPa

한 적용된 모터는 하모닉 기어를 사용하고 있기 때문에 백래쉬에 의한 오차는 무시하였다. 따라서 모터를 강재로 이루어진 하나의 부품으로 단순화하여 해석에 적용하였다.

이때, 적용된 관련 물성값은 Table 4에 나타내었고, 자체 하중은 Table 2의 값을 적용하였다. 해석에 사용된 경계조건은 Fig. 10에서와 같이 1축 모터부의 바닥면을 고정하고, 가변하중은 로봇 팔 끝부분 결합면에, 자체 하중은 전체 영역에 체적력으로 적용하였다. 로봇의 작업이 동작이 끝난 시점에서 이루어지기 때문에 동작으로 인한 관성하중은 고려하지 않았다. 해석은 상용해석소프트웨어인 ANSYS를 이용하여 수행하였다. 두 위치에서의 중력방향 변형량 결과를 Fig. 11에 나타내었다.

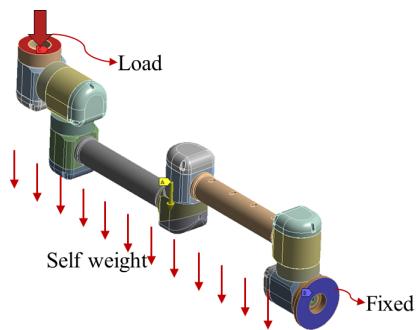


Fig. 10. Boundary conditions applied in numerical Analysis

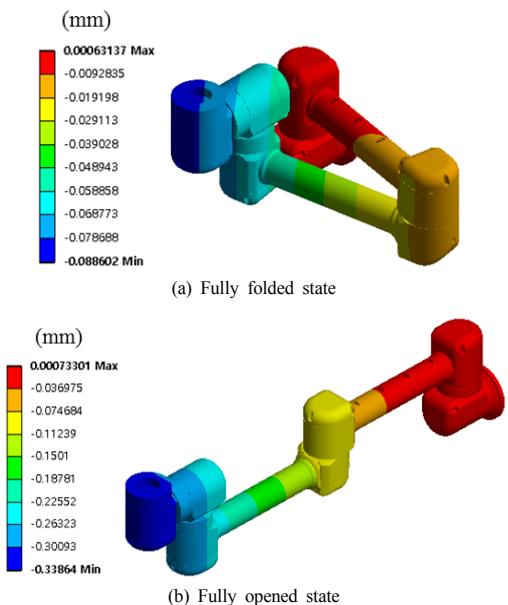
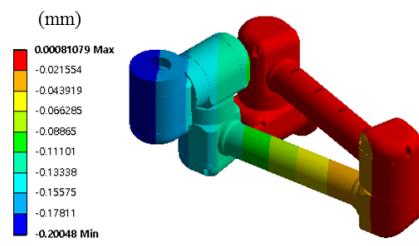


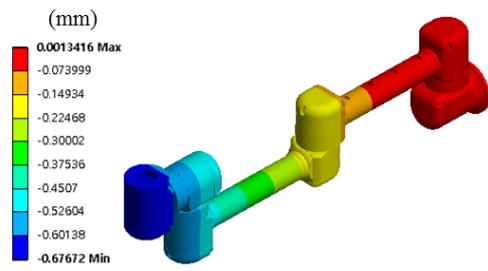
Fig. 11. Deformation results of robot arms under their self-weight

본 연구팀이 개발 중인 패너트 코킹 툴의 무게가 최대 5 kgf가 될 수 있다. 따라서, 로봇 팔 끝부분 (6)축에 5 kgf의 물체가 장착된 경우의 변형량을 해석하고, 결과를 Fig. 12에 나타내었다.

두 경우의 해석에서 끝단부의 최대 처짐량을 Table 5에 정리하였다. 최대 변형량은 완전 펼침 상태에서 자체 하중만 있는 경우 0.339 mm로 나타났으며, 5kgf의 하중이 장착된 경우에는 0.677 mm로 나타났고, 설계 조건 1 mm 내에 있음을 확인하였다.



(a) Fully folded state



(b) Fully opened state

Fig. 12. Deformation results of robot arms under 5kgf load

Table 5. Deformation results of robot arms

State	Deformation (mm)	
	Self-weight	5kgf load
Fully folded	0.089	0.200
Fully opened	0.339	0.677

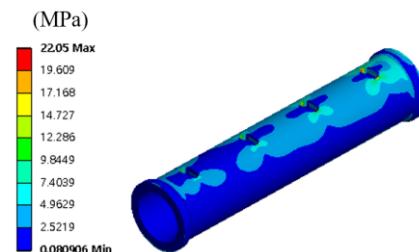


Fig. 13. Equivalent stress results of the link between axis 2 and 3

발생 응력의 경우 완전 펼침 상태의 5 kgf의 하중 하에서도 대부분의 부품이 5 MPa 이하의 응력발생분포를 나타내어 파손이 발생하지 않음을 확인하였다. 가장 큰 응력을 나타낸 지점은 축 사이를 연결하는 링크 부품이며, 특히 축 2와 3을 연결하는 링크에서 최대응력 22.05 MPa를 나타내었고, Fig. 13에 나타내었다. Table 3의 소재 항복강도가 276 MPa이므로, 안전계수 12.5 이상의 높은 안정성을 나타낸을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 협소공간의 작업을 위한 6축 다관절 로봇의 개발을 위하여 기구학 및 구조해석을 수행하였다. 이러한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 6축 다관절 로봇의 기구학 해석을 위한 정기구학과 역기구학 모델을 제시하였다.
- 2) 부품 검사 시뮬레이션을 통해 제시한 기구학 모델을 검증하였다.
- 3) 5 kgf의 가반하중이 로봇 끝단에 가해졌을 때, 완전 접힘 상태와 완전 펼침 상태에서의 변형량을 구조 해석을 통해 예측하고, 변형에 의한 오차가 설계 오차 범위 내에 있는 것을 확인하였다.
- 4) 본 연구에서 얻어진 결과는 향후 개발 로봇의 최종 설계에 활용될 예정이며, 로봇 개발 이후에 해석 결과는 실험을 통해 검증할 계획이다.

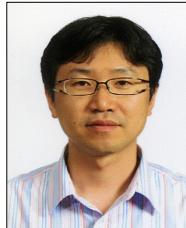
References

- [1] J. H. Lee and T. J. Lho, "A study on design and structural strength analysis of positioner in robot overlay welding system of ball for ball-valve", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 16, no. 3, pp. 1639-1644, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.3.1639>
- [2] V. Bargsten., P. Zometa and R. Findeisen, "Modeling, parameter identification and model-based control of a lightweight robotic manipulator", *IEEE International Conference on Control Applications*, pp. 134-139, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/CCA.2013.6662756>
- [3] M. Naumann. and M. Fechter., "Robots as enablers for changeability in assembly applications", *15th Internationales Stuttgarter Symposium: Springer Fachmedien Wiesbaden*, pp. 1155-1171, 2015.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-658-08844-6_80
- [4] S. W. Kim and H. J. Kim, "A Study on Implementation of Special-Purpose Manipulator for Home Service Robot. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 12, no. 11, pp. 5219-5226, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.11.5219>
- [5] J. Denavit. and R. S. Hartenberg., "A Kinematic Notation for Lower Pair Mechanisms Based on Matrices", *ASME J. of Applied Mechanics*, vol. 22, pp. 215-221, 1955.
- [6] L. Sciavicco and B. Siciliano, *Modelling and control of robot manipulators*, Springer Science & Business Media, pp. 41-46, 2012.
- [7] K. P. Hawkins., "Analytic inverse kinematics for the

universal robots UR-5/UR-10 arms", Available From: <https://smartech.gatech.edu/handle/1853/50782>. (accessed Sept., 5, 2016)

정 성 엽(Seong Youb Chung)

[정회원]



- 1994년 2월 : 연세대학교 기계공학과 (공학박사)
- 1996년 2월 : KAIST 정밀공학과 (공학석사)
- 2005년 2월 : KAIST 기계공학과 (공학박사)
- 2005년 4월 ~ 2007년 3월 : 삼성 중공업 메카트로닉스센터 책임연구원
- 2007년 4월 ~ 현재 : 한국교통대학교(舊 충주대학교) 기계공학과 교수

<관심분야>

양팔 로봇 시스템, 머신 비전, 지능로봇 소프트웨어

최 두 순(Du-Soon Choi)

[정회원]



- 1999년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (기계공학석사)
- 2005년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (기계공학박사)
- 2005년 5월 ~ 2008년 2월 : LG화학 Tech Center 과장
- 2008년 3월 ~ 2013년 9월 : 인하공업전문대학 기계설계 교수
- 2013년 10월 ~ 현재 : 한국교통대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

소성가공, 사출성형, CAE해석