

## 케미컬 커플러 체결을 위한 순응장치를 이용한 위치/힘 동시제어

### Position/force Control using 6-axis Compliance Device for Chemical Coupler Assembly

박시백<sup>1</sup>, 김한성<sup>2\*</sup>

Shi-Baek Park<sup>1</sup>, Han-Sung Kim<sup>2\*</sup>

#### 〈Abstract〉

In this paper, a robot automation technology for chemical tank lorry unloading is presented. Handling chemical coupler between tank lorry and ACQC system may be hazardous or toxic to human operators, therefore robot automation is essential. Due to tight tolerance between couplers, even small pose error may result in very large internal force. In order to resolve the problem, compliance between male and female couplers should be introduced with 6-axis compliance device with F/T sensing. The proposed robot automation system consists of a collaborative robot, 6-axis compliance device with F/T sensing, linear gripper, and robot vision. The position/force control algorithm and experimental results for assembling chemical couplers are presented.

*Keywords : Chemical Tank Lorry Unloading, Chemical Coupler Assembly, Position/force Control, Collaborative Robot, 6-axis Compliance Device, Strain Gauge*

---

1 삼성전자 GCS팀, 자동화기술파트 파트장, 공학박사  
E-mail: shibaek.park@samsung.com

2\* 정회원, 교신저자, 경남대학교 기계공학부, 교수,  
공학박사  
E-mail: hkim@kyungnam.ac.kr

1 Samsung Electronics, GCS Team, Head of Automation  
Technology Part  
E-mail: shibaek.park@samsung.com

2\* Corresponding author, Dept. of Mechanical Engineering,  
Kyungnam University, Professor  
E-mail: hkim@kyungnam.ac.kr

### 1. 서론

최근 반도체 산업에서는 세정, 식각, 스트리퍼, 전기도금 등의 목적으로 100여종 이상의 화학물질이 화학물질 중앙 공급 시스템(CCSS, Central Chemical Supply System)을 통해 공급된다. 세정, 포토(photo), 화학적 기상증착(CVD, Chemical Vapor Deposition), 금속배선 공정 등의 반도체 공정에서 탱크로리와 드럼을 이용한 충전 방식을 사용하여 이러한 CCSS에 화학물질을 공급한다. 탱크로리를 통한 화학물질 충전은 화학물질 보호 장비를 갖춘 작업자가 암수 커플러를 직접 체결한다. 이 작업은 작업자가 화학물질과 흠(hume)에 직접 노출될 수 있으므로 매우 위험한 작업이다 [1]. 이러한 위험성 때문에 화학물질 충전 수작업이 자동화되기 시작하였다[2,3]. 특히, 인체에 직접적으로 유해한 화학물질이나 원자력을 사용하는 산업에서 유해 작업의 자동화가 큰 주목을 받고 있다[4~6].

본 연구에서 화학물질 취급시 위험요소를 근본적으로 제거하기 위하여 협동로봇을 이용한 탱크로리와 ACQC (Automatic Clean Quick Coupler) 시스템 사이의 케미컬 커플러 체결 로봇자동화 기술을 개발하고자 한다. 암수 커플러 사이의 매우 작은 공차로 인해 로봇의 작은 위치오차도 매우 큰 내부 힘을 발생할 수 있다. 이 문제를 해결하려면 F/T (Force/Torque) 측정기능이 있는 6축 순응장치를 로봇 엔드이펙터와 수 커플러 사이에 도입하고자 한다.

본 논문에서는 순응장치를 이용하는 위치/힘 동시제어 알고리즘을 커플러 체결에 적용하고자 한다[7]. 단순 외팔보에 스트레인이지를 장착한 6축 순응장치 설계방법과 로봇자동화시스템 설계 결과를 제시한다. 케미컬 커플러 어셈블리(4DOC-2DOF)에 대한 위치/힘 제어 실험 결과를 제시한

다. 여기서 DOC 및 DOF는 각각 힘 및 위치 제어 방향의 수를 의미한다.

### 2. 위치/힘 동시제어 알고리즘

Fig. 1과 같이 위치/힘 동시제어는 로봇끝단에 부착된 순응장치를 이용하여 로봇의 공구(수 커플러)와 작업물(암 커플러) 사이의 위치와 힘을 동시 제어하는 방법이다. 이 방법은 로봇끝단과 공구 사이에 위치 및 힘/토크 측정기능을 갖는 비교적 순응성이 큰 장치를 사용함으로써 기존 힘/토크 센서에 비하여 힘제어시 안정성을 높일 수 있다는 장점을 갖는다.

위치/힘 동시제어 알고리즘의 개요는 다음과 같다. 본 논문에서는 위치제어 방향을 자유 트위스트(twists of freedom),  $\delta D_f$ 로 정의한다. 한편, 힘 제어 방향을 구속 렌치(wrenches of constraint),  $\delta w_c$ 로 정의한다. 자유 트위스트와 구속 렌치 사이에는 다음과 같은 역관계(reciprocal relation)가 성립한다.

$$\delta D_f^T \delta w_c = 0 \tag{1}$$

여기서,  $\delta p$ 와  $\delta \theta$ 를 각각 미소 직선 및 회전 변위

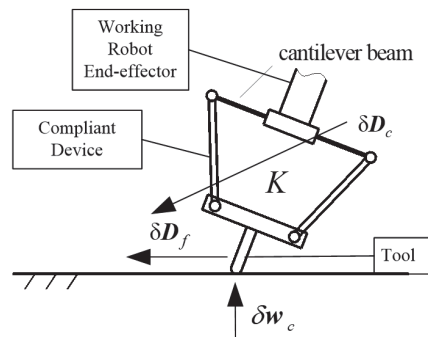


Fig. 1 Position/force control algorithm

벡터라 할 때,  $\delta D = [\delta p^T, \delta \theta^T]^T$ 는 트위스트를 나타낸다. 한편,  $f$ 와  $n$ 을 각각 힘과 모멘트 벡터라 할 때,  $w = [f^T, n^T]^T$ 는 렌치를 나타낸다[7,8].

주어진 작업에서 작업물에 작용하는 렌치는 로봇 끝단의 모션에 의하여 제어될 수 있고, 이를 순응 트위스트(twists of compliance),  $\delta D_c$ 로 정의한다. 이는 다음과 같이 강성행렬로 구할 수 있다.

$$\delta D_c = -K^{-1} \delta w_c \quad (2)$$

식 (1), (2)로부터 역관계를 다음과 같이 표현할 수 있고, 위치/힘 동시제어는 작업로봇의 모션을 직교강성행렬( $K$ )에 대하여  $\delta D_f$ 와  $\delta D_c$ 로 분해하는 것이라 할 수 있다[7,8].

$$\delta D_f^T K \delta D_c = 0 \quad (3)$$

제안하는 위치/힘 동시제어 알고리즘은 Fig. 2와 같이 6축 순응장치를 위치제어 기반의 6자유도 로봇 끝단에 부착하여 구현이 가능하다. Fig. 2

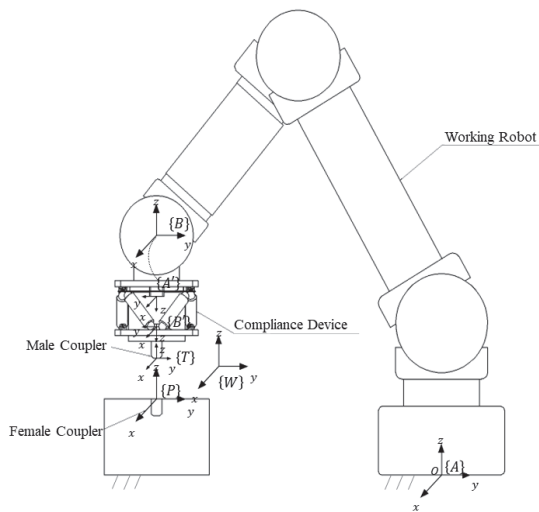


Fig. 2 Frame definitions of the robot system with compliance device

는 작업로봇, 순응장치, 수 커플러 및 암 커플러를 도시적으로 나타내고 수식 유도를 위하여 좌표계를 정의한다. {A}와 {B}는 각각 작업로봇의 고정 및 이동좌표계를 나타내고, {C}의 원점은 점 P에 위치하고 좌표축은 {A}의 좌표축과 평행하게 정의된 작업로봇의 제어를 위한 순간이동좌표계이다. {A'}와 {B'}는 각각 순응장치의 고정 및 이동좌표계를 나타낸다. {W}는 고정된 부품좌표계 {P}에 대하여 표현된 작업좌표계를 나타내고 {T}는 {B}에 대하여 표현된 공구좌표계로 정의한다. 이 위치/힘 동시제어에서 위치제어의 목표는 공구좌표계 {T}가 작업좌표계 {W}를 추종하는데 있다. 따라서 위치와 힘의 목표값 및 실제값을 모두 작업좌표계 {W}에서 표현하고 계산된 위치와 힘오차 벡터를 순간이동좌표계 {C}로 변환하여 계산된 총 보상오차로 작업로봇의 위치제어를 수행한다. 제어알고리즘 상세 유도과정은 참고문헌[8]을 참조한다.

로봇 엔드이펙터의 전체보상 트위스트(total twists of compensation)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$${}^c\delta D_t = G_f {}^c\delta D_f + G_c {}^c\delta D_c \quad (4)$$

여기서  $G_f$ 와  $G_c$ 는 무차원 상수로 각각 위치 및 힘 제어 계인으로 정의한다. Fig. 3과 같이  ${}^c\delta D_t$ 를 작업로봇의 위치제어기에 입력하여 위치/힘 동시제어를 수행할 수 있다.

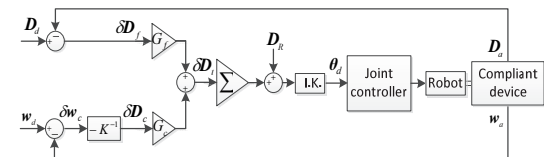


Fig. 3 Block diagram of the position/force control

### 3. 순응장치 설계

6-PSS (Prismatic-Spherical-Spherical) 병렬기구를 Fig. 4와 같이 순응장치 메커니즘으로 제한한다. 여기서 직선조인트(P)는 스트레인게이지(strain gauge)가 장착된 외팔보로 구성되어 소형화 설계를 용이하게 하고 오염물질에 강건한 측정방법을 사용한다[9].

Fig. 4(a)는 6-PSS 병렬기구의 기구학적 구조를 나타낸다.  $O-xyz$ 와  $P-uvw$ 는 각각 고정 및 이동 좌표계를 나타낸다.  $\delta d_i \mathbf{u}_i$ 와  $l_i \mathbf{s}_i$ 는 각각 외팔보의 미소변위와 S-S 다리 벡터를 나타낸다. 여기서  $\mathbf{u}_i$ 와  $\mathbf{s}_i$ 는 해당되는 단위벡터를 나타내고  $\mathbf{r}_i = \overrightarrow{PB_i}$ 이다.

기구학적 관계에서 6-PSS 병렬기구의 자코비안 행렬(Jacobian matrix)은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$J_x^T \delta \mathbf{D} = J_q \delta \mathbf{q} \text{ or} \quad (5)$$

$$\delta \mathbf{q} = (J_x J_q^{-1})^T \delta \mathbf{D} = J^T \delta \mathbf{D}$$

여기서  $\delta \mathbf{q} = [\delta d_1, \delta d_2, \dots, \delta d_6]^T$ 이고 자코비안 부분행렬(submatrix)은 다음과 같다.

$$J_x = \begin{bmatrix} \mathbf{s}_1 & \dots & \mathbf{s}_6 \\ \mathbf{r}_1 \times \mathbf{s}_1 & \dots & \mathbf{r}_6 \times \mathbf{s}_6 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$J_q = \text{diag}(\mathbf{s}_1^T \mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{s}_6^T \mathbf{u}_6)$$

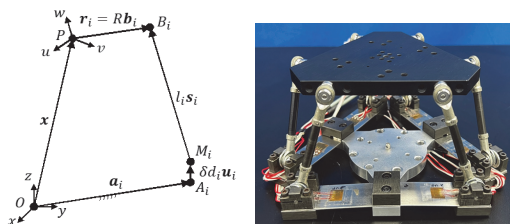


Fig. 4 Vector-loop diagram and prototype of a 6-PSS compliance device

가상일의 원리를 이용하여 정역학 관계는 다음과 같이 유도된다.

$$\mathbf{w} = (J_x J_q^{-1}) \boldsymbol{\tau} = J \boldsymbol{\tau} \quad (7)$$

외팔보의 강성관계( $\tau_i = k_i \delta d_i$ )를 포함하면 순응장치의 직교강성행렬( $K$ )은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{w} = [J_x (J_q^{-1} [k] J_q^{-T}) J_x^T] \delta \mathbf{D} = K \delta \mathbf{D} \quad (8)$$

여기서 조인트 강성행렬  $[k] = \text{diag}(k_1, k_2, \dots, k_6)$ 이다.

제안하는 제어방법은 순응장치가 순응중심 또는 대각화된 강성행렬을 필요로 하지 않는 일반적인 위치/힘 동시제어 방법이다. 그러나 직선 및 회전 축간의 연성효과를 감소하기 위하여 대각화된 강성행렬을 갖도록 순응장치를 설계하는 것이 바람직하다. Fig. 5와 같이 인접하는 2개 다리를 수직평면 상에 배치하면 다리의 연장선이 만나는 Q점에서 강성행렬을 대각화할 수 있다[9]. Q점에서 대각화된 직교강성행렬을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K = k \times \text{diag}(3\cot^2\theta, 3\cot^2\theta, 6; 3r_b^2 \cos^2\phi_b, 3r_b^2 \cos^2\phi_b, 6r_b^2 \cos^2\phi_b \cot^2\theta)$$

여기서  $k \equiv k_1 = \dots = k_6$ 는 다리의 스프링 상수이다.

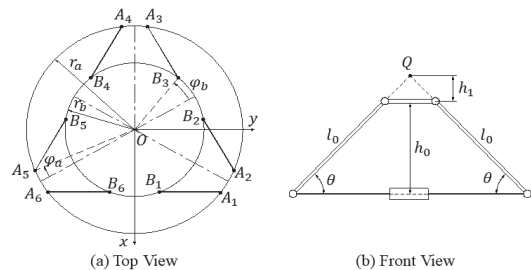


Fig. 5 Geometry of a 6-PSS compliance device

Table 1. Design parameters of the 6-axis compliance device

Kinematic Parameters	Value
Radius of the fixed platform ( $r_a$ )	84.59mm
Radius of the moving platform ( $r_b$ )	68.23mm
Initial height of the moving platform ( $h_0$ )	70.18mm
Inclined angle of a leg ( $\theta$ )	70.4°
Initial leg length ( $l_0$ )	74.50mm
Half angle at the fixed platform ( $\phi_a$ )	12.37°
Half angle at the moving platform ( $\phi_b$ )	33.34°
Height of the moving plate to center ( $h_1$ )	105.27mm

본 연구에서는 압수 커플러의 용이한 체결을 위하여  $\theta = 70.4^\circ$  를 증가시켜 커플러 축방향에 직각 방향으로 순응성을 높일 수 있도록 설계하였다. 즉,  $\theta$ 를 증가시켜 x, y축 방향으로 직선강성을 감소시켰다.

Fig. 4(b)는 Table 1의 치수로 설계된 6축 순응 장치의 시작품을 나타낸다. 다음과 같은 외팔보 치수(폭:  $b=25\text{mm}$ , 두께:  $h=2\text{mm}$ , 길이:  $l=52.5\text{mm}$ , 탄성계수:  $E=193\text{GPa}$  (SUS303))에 대하여 외팔보의 강성은 다음과 같다.

$$k = \frac{3EI}{l^3} = \frac{Ebh^3}{4l^3} = 66.68 \text{ [N/mm]}$$

직교강성행렬의 대각원소값은 다음과 같다.

$$K = \text{diag}(25, 25, 400 \text{ [N/mm]}; 650, 650, 165 \text{ [Nm]})$$

#### 4. 로봇자동화 시스템 구성

탱크로리와 ACQC 시스템 사이의 케미컬 커플러 체결 로봇자동화시스템은 6자유도 협동로봇,

Table 2. Specifications of a 6-axis collaborative robot

Specifications	Value
No. of axes	6
Payload	16kg
Reach	1,300mm
Repeatability	0.11mm

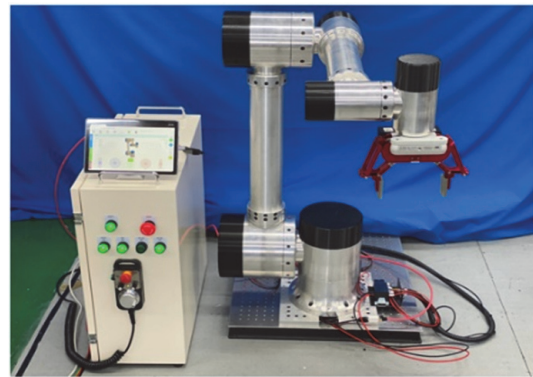


Fig. 6 6-axis collaborative robot with offset wrist

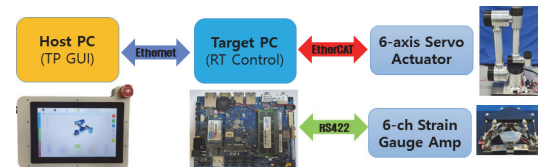


Fig. 7 Control system configuration

F/T측정 기능을 갖는 순응장치, 직선그리퍼와 로봇비전으로 구성된다. 수 커플러(50A)와 로봇틀의 중량과 체결력 등을 고려하여 가반하중 16kg 협동로봇을 Fig. 6과 같이 개발하였다. 개발된 협동로봇은 비교적 좁은 ACQC 작업환경에서 주변환경과 로봇암의 충돌을 감지할 수 있는 기능을 갖고 다른 협동로봇 구조에 비하여 보다 높은 가반하중과 특이점 회피가 용이한 offset wrist로 구성되었다. 개발된 offset wrist 협동로봇의 주요 규격을 Table 2에 나타내었다.

Fig. 7은 커플러 체결 로봇제어시스템을 나타낸

다. 이는 작업교시를 할 수 있는 Host PC인 TP (Teach Pendant), 실시간제어를 담당하는 Target PC, EtherCAT 통신기능을 포함한 6축 서보드라이브와 6채널 스트레인지지 증폭기로 구성된다.

### 5. 위치/힘 동시제어 실험

Fig. 8은 20A(27.2mm)와 50A(60.5mm) 커플러로 구성된 ACQC 데모장치를 나타낸다. 20A 커플러는 화학물질 주입을 위한 질소를 공급하고 50A 커플러는 화학물질을 충전한다. 암 커플러에는 5bar의 압력을 유지하기 위한 O링이 설치되어 화학물질 및 기체의 누설을 방지하고, 이는 체결력 증가 원인이 되기도 한다. 암수 커플러 체결과정은 다음과 같이 4DOC-2DOF 힘과 위치제어로 구성된다. 즉, x, y축에 대하여 힘과 모멘트를 최소화 하면서  $p_z = 0 \sim 150 \text{ mm}$ ,  $\theta_z = 0^\circ$  로 위치제어를 한다.

Desired wrench:  ${}^W\mathbf{w}_d = [0, 0, *; 0, 0, *]^T \text{ [N;Nm]}$

Desired twist:  ${}^P\mathbf{D}_d = [* , * , 150; * , * , 0]^T \text{ [mm;rad]}$

여기서 \* 기호는 해당되는 위치 또는 힘 방향으로

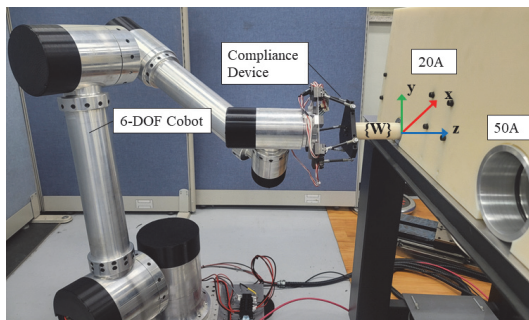
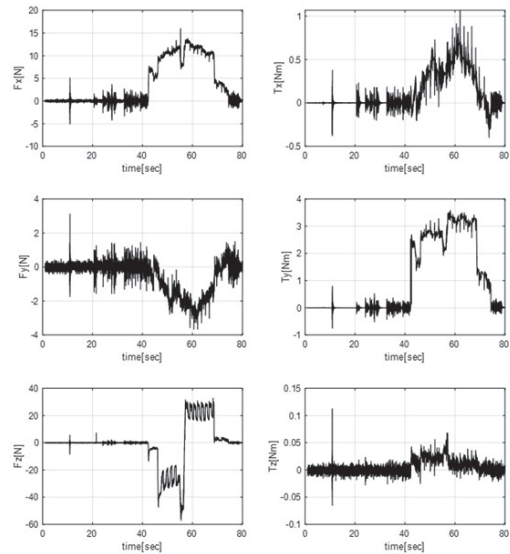


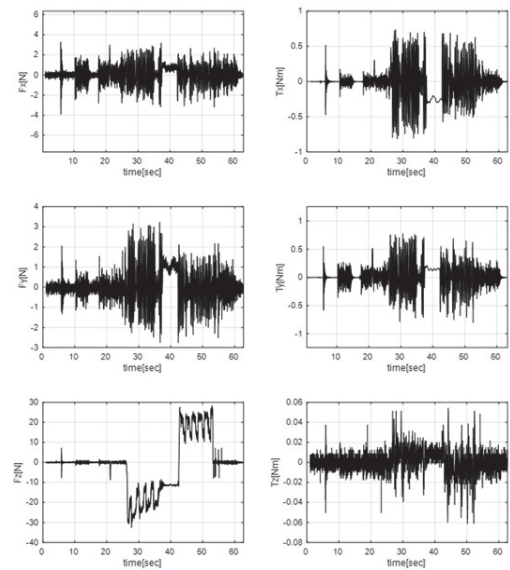
Fig. 8 Experimental testbed for assembling chemical couplers(20A)

제어를 하지 않음을 의미한다.

Fig. 9(a), (b)는 20A 커플러에 대하여 수동 체결 및 힘제어 체결 실험결과를 각각 나타낸다. 힘제어시 x, y축에 대한 힘과 모멘트의 최대값이



(a) In manual assembly



(b) In position/force control

Fig. 9 Force/torque results in chemical coupler assembly(20A)

$|f_{x,y}| < 4\text{N}$ ,  $|n_{x,y}| < 0.75\text{Nm}$  로 유지됨을 알 수 있다. 특히, 수동 체결에 비하여 힘제어 체결시 최대 체결력이  $|f_z| < 57.2\text{N}$ 에서  $32.7\text{N}$ 으로 감소되었다. 추가로  $z$ 축에 대한 모멘트는  $|n_z| < 0.06\text{Nm}$ 로 유지됨을 알 수 있다.

향후 연구로 수 커플러를 파지할 수 있는 직선 그리퍼와 로봇비전을 순응장치에 장착하여 수 커플러 파지와 힘제어 체결시험을 수행하고자 한다.

## 감사의 글

본 논문은 삼성전자의 산학연구과제에서 지원하여 개발된 성과이고 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] S-B. Park, et al., "Development of Chemical Drum Auto-connection Module," Proc. Kor. Soc. Prec. Eng. pp. 238-238, (2020).
- [2] S. Micheler, et al., "A Transformation of Human Operation Approach to Inform System Design for Automation," J. Int. Manu. vol. 32, pp. 201-220, (2021).
- [3] R. Verbiest, et al., "Automation and Robotics in the Cultivation of Pome Fruit: Where do we stand today?," J. Field Robotics. pp. 1-19, (2020).
- [4] J. Y. Pan, "Engineering Chemistry Innovation," ACS Med. Chem. Lett. vol. 10, pp. 703-707, (2019).
- [5] M. Starý, et al., "Sampling Robot for Primary Circuit Pipelines of Decommissioned Nuclear Facilities," Auto. Cons. vol. 119, 103303, (2020).
- [6] C. Ducros, et al., "RICA: A Tracked Robot for Sampling and Radiological Characterization in the Nuclear Field," J. Field Robotics. vol. 34, pp. 583-599, (2017).
- [7] M. Griffis, and J. Duffy, "Kinestatic Control: A Novel Theory for Simultaneously Regulating Force and Displacement," Trans. ASME Journal of Mechanical Design. vol. 113, no. 4, pp. 508-515, (1991).
- [8] H. S. Kim, "Kinestatic Control using Six-axis Parallel-type Compliant Device," KSMTE, vol. 23, pp. 421-427, (2014).
- [9] H. S. Kim, "Design of a 6-axis Compliance Device with F/T Sensing for Position/Force Control," Journal of the Korean Society of Industry Convergence, vol. 21, no. 2, pp. 63-70, (2018).
- [10] G. S. Kim, and H. S. Kim, "Inverse Kinematic Analysis of a 6-DOF Collaborative Robot with Offset Wrist," Journal of the Korean Society of Industry Convergence, vol. 24, no. 6, pp. 963-959, (2021).

(접수: 2022.09.16. 수정: 2022.09.29. 게재확장: 2022.09.30.)