

회전력과 수직력을 조합한 커넥터 체결용 로봇 그리퍼의 제어 전략

Control Strategy of a Robot Gripper for Connector Assembly Superimposing Rotational and Vertical Forces

강윤¹·박준민¹·정주노[†]
Yun Kang¹, Junmin Park¹, Joono Cheong[†]

Abstract: In robotic manufacturing, connector assembly poses challenges due to misalignment, jamming, insufficient insertion force, and potential damages of robot and connector. To overcome these issues, we propose a robot gripper that emulates human's connector assembly strategy where rotational force and linear force are superimposed. Utilizing a statics model, we adjust the parameters (rotation angles, cycle time, insertion forces, etc.) to optimize the assembly tasks that employ the proposed gripper. The developed gripper structure is capable of precise rotational control synchronized with adaptive impedance control of the manipulator in the direction of the assembly. Experiments demonstrate that our gripper reduces insertion time, decreases required force, and enhances stability, preventing jamming and wedging phenomena. This approach can improve efficiency and reliability in robotic connector assembly while minimizing damages to manipulators and connectors.

Keywords: Robot Gripper, Robot Manipulator, Connector Assembly, Impedance Control

1. 서론

최근 산업 자동화 및 로봇공학 분야에서 전자 및 기계 장치의 제조 공정 기술이 고도화됨에 따라 로봇의 효율적이고 안정적인 커넥터 체결 전략이 요구되고 있다^[1]. 현재 이러한 자동화 공정에서 주로 사용되는 로봇은 산업용 로봇 매니플레이터(manipulator)이며, 로봇은 차량 및 전자제품의 생산을 위해 FPC (Flexible Printed Circuit), 사각 커넥터 등과 같이 유연하거나 견고한 다종의 커넥터 체결 작업을 수행한다. 이 때 안정적인 체결 작업을 위해 로봇은 압/수 커넥터의 하우징(Housing) 및 핀(pin)을 고려한 적절한 체결 제어 전략이 필요하다^[2]. 이러

한 안정적인 체결을 위해 고려되어야 하는 사항들은 다음과 같다. 첫째, 로봇의 반복 오차(repeatability error)는 커넥터의 압/수 핀 간의 삽입 후 정렬 오차에 의한 재밍(jamming) 및 웨징(wedging)현상을 유발하여 로봇과 커넥터에 손상을 가할 수 있다. 둘째, 선형 힘의 인가가 제한적인 매니플레이터의 특성에 따라, 로봇의 허용 능력 이상의 체결력이 요구되는 커넥터는 체결이 불가능하다. 셋째, 커넥터는 진입 거리별 마찰력이 상이하기 때문에 마찰력의 급감 시, 과속에 의하여 로봇 및 커넥터에 손상을 유발할 수 있다. 넷째, FPC와 같이 매우 유연한 커넥터는 강성을 고려하지 못하면 좌굴(buckling) 등에 의한 압/수 커넥터간 위치/회전 오차 및 손상이 발생할 수 있다. 종합적으로 작업 효율을 향상시키고 동시에 장치의 손상을 최소화하는 체결 안정 및 신뢰성 확보가 필요하다^[3].

관련 연구들을 살펴보면 압/수 커넥터 간의 정렬을 위해 RGB, Depth 카메라와 마커를 사용하거나 이처럼 여러 대의 장치의 센서 융합(sensor fusion)을 통한 비전 시스템이 주로 사용된다^[4,5]. 최근에는 매니플레이터에 부착된 힘/토크 센서 데이터를 통해 강화 학습(reinforcement learning)을 사용하거나 KNN (K Nearest Neighbor), SVM (Support Vector Machine)

Received : Oct. 24, 2024; Revised : Nov. 14, 2024; Accepted : Nov. 26, 2024

※ This work was supported by the "Industrial Strategic Technology Development Program (RS-2024-00443339) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea)".

1. Graduate Student, Department of Control and Instrumentation Engineering, Korea University, Sejong, 30019, Korea (terry771, junmany12@korea.ac.kr)

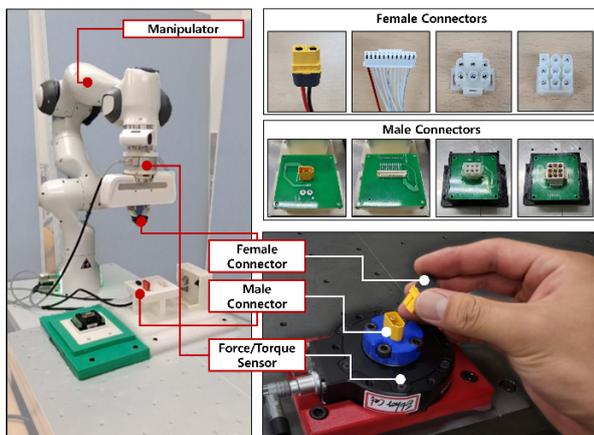
† Professor, Corresponding author: Department of Control and Instrumentation Engineering, Korea University, Sejong, 30019, Korea (jncheong@korea.ac.kr)

등의 기계학습(machine learning) 분야인 패턴인식과 같은 학습 모델을 사용하여 정렬 오차를 극복한다¹⁶⁻⁹⁾. 그러나 이러한 연구에서는 주로 체결 전 비접촉 상태에서의 압/수 커넥터 간의 정렬을 다루며 접촉 이후 체결 과정에서는 필요 체결력이 크게 요구되는 재밍이나 웨징 현상이나 마찰력이 강한 커넥터 체결 전략에 대한 고려가 많지 않았다. 이렇게 로봇 조립 공정에서의 힘 제어나 정밀 조립에 관한 많은 연구들이 진행되었지만, 이는 주로 매니플레이터가 허용 가능한 작은 힘 범위 내에서의 제어에 초점을 맞추고 있고, 큰 체결력이 필요한 커넥터 체결 작업에서는 로봇을 사용하기 어려운 형편이다.

이에 반해, 인간은 마찰력이 강한 커넥터 등 밀어 넣는 힘만으로 체결이 어려운 물체를 다룰 때, 본능적으로 좌우로 흔들거나 비틀면서 삽입하는 동작을 수행한다. 이는 회전력과 수직력을 조합한 체결 전략으로, 효율성과 안정성을 향상시키며 필요한 삽입력과 시간을 줄이고, 재밍(jamming)이나 웨징(wedging) 현상을 방지하는 데 도움이 된다. 이런 좌우로 흔들리는 동작은 커넥터 표면의 미세한 기하학적 불규칙성과 마찰, 그리고 불균일한 압력 분포로 인한 저항을 극복하여 원활한 체결을 가능하게 한다. 본 연구에서는 이러한 인간의 회전력과 수직력을 조합한 체결 전략이 높은 삽입력과 정렬오차로 인한 문제를 효과적으로 극복할 수 있음을 정역학적 모델링과 실험을 통해 검증한다. 또한 인간의 회전/수직 힘 조합 체결 전략을 모사할 수 있는 커넥터 체결용 로봇 그리퍼를 제안한다.

2. 인간의 커넥터 체결 동작 분석

본 장에서는 인간의 커넥터 체결 전략을 분석하고, 이 전략을 사용하지 않았을 때와 비교해본다. 실험은 [Fig. 1]의 실험 환경에서 진행되었으며, 힘/토크 센서를 통해 인간과 로봇의 체결 전략을 분석하였다. 인간은 마찰력이 강한 커넥터 등 체



[Fig. 1] Environmental setup for the analysis of a human and a manipulator's connector assembly task

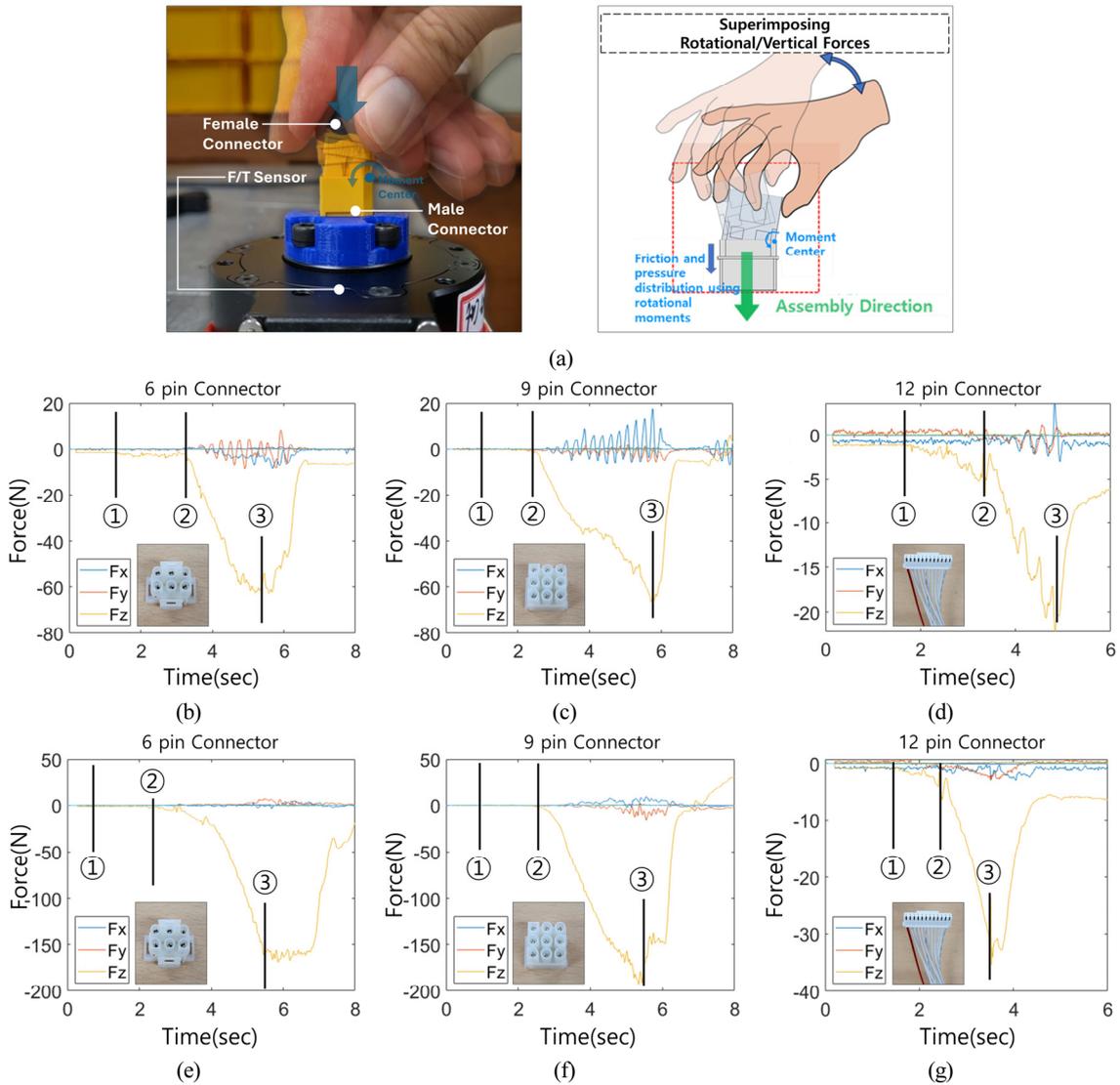
결이 어려운 물체의 정렬오차 및 반력의 극복을 위해 본능적으로 좌우로 흔들거나 비틀면서 삽입하는 동작을 [Fig. 2(a)]와 같이 수행한다. 이러한 인간의 회전력과 수직력을 조합한 체결 전략의 효과를 검증하기 위한 실험결과는 [Fig. 2(b)]-[Fig. 2(d)]와 같으며, 전략을 사용하지 않았을 때의 결과는 [Fig. 2(e)]-[Fig. 2(g)]와 같다. 실험에 사용된 커넥터는 실생활에서 흔히 접할 수 있지만 마찰력이 큰 6핀, 9핀, 12핀의 3종 커넥터로 선정되었다.

실험자는 [Fig. 2(a)]와 같이 압 커넥터를 손으로 권 상태에서 좌우로 흔들면서 삽입하는 동작을 수행한다. 바닥에 고정된 힘/토크 센서(AFT-200, Aidin Robotics, KR)를 두고, 그 상부에 수 커넥터를 두어 체결 시 사람의 체결 반력을 측정하도록 하였다. 본 실험은 위에서 언급한 3종의 커넥터에 대해 각각 3번씩 진행되었다. 체결 순서는 초기 압/수 커넥터 케이스의 접촉(①), 압/수 커넥터 핀 접촉(②), 체결 완료(③)의 순으로 구분되었다. [Fig. 2(b)]는 6핀 커넥터를 사람이 조립할 때 발생한 반력을 보여주고 있다. ①과 ② 사이에는 체결 저항이 거의 없으므로 반력이 낮은 수준에 머물러 있다. 본격적으로 체결이 진행되는 ② 이후, 즉 구간 ③에서는 최대 60 N의 수직 반력이 발생하며 좌우로 흔들면서 조립되므로 좌우 방향으로 진동하는 작은 수평 반력이 함께 발생된다. 이 커넥터를 체결할 때, 좌우로 흔들지 않고 수직력만을 가하여 체결하였을 경우, [Fig. 2(e)]에서와 같이 최대 약 165 N의 힘이 필요하였다. 동일한 실험을 9핀과 12핀 커넥터에 대해서도 수행하였더니 [Fig. 2(c)], [Fig. 2(d)]와 같이 6핀 커넥터의 경우와 유사한 결과를 얻었다. 좌우로 흔들면서 커넥터를 체결할 경우, 9핀 커넥터는 65 N의 최대 반력을 기록하였으며, 12핀 커넥터는 20 N의 최대 반력을 보였다. [Fig. 2(f)], [Fig. 2(g)]에서와 같이 수직력만을 가하여 체결하였을 경우, 9핀은 190 N, 12핀은 40 N의 최대 반력이 얻어졌다 ([Table 1]의 요약표 참조). 세 커넥터 모두 회전력과 수직력을 조합한 체결 전략을 사용할 경우, 회전력 미사용시의 체결 필요 힘보다 42% 이상 감소되었음을 확인할 수 있었다.

실험을 통해서 인간은 커넥터 체결 작업 시 큰 반력을 느끼는 경우, 회전력과 수직력을 조합한 체결 전략을 통해 문제를 효과적으로 극복할 수 있음을 확인하였다. 이러한 인간의 체결 전략을 본 연구에서는 로봇 그리퍼에 적용하였으며 자세한 내용은 다음의 3절에서 다룬다.

[Table 1] Comparative Analysis of Maximum Forces with and without Human-Inspired Strategies for Different Connectors

	6 pin Connector	9 pin Connector	12 pin Connector
Without rotational force	165 N	190 N	40 N
With rotational force	60 N	65 N	20 N

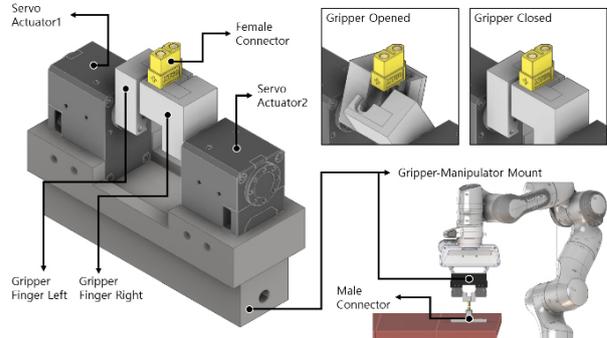


[Fig. 2] Experimental data comparing human assembly strategy (a) applied to 6-pin (b), 9-pin (c), and 12-pin (d) connectors, and non-strategy results for 6-pin (e), 9-pin (f), and 12-pin (g)

3. 커넥터 체결용 그리퍼 및 체결 역학

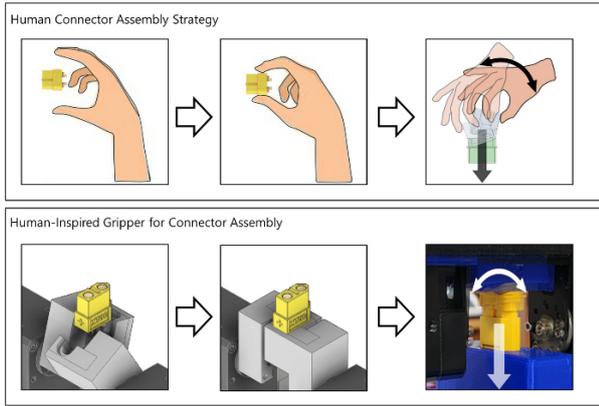
3.1 커넥터 체결 전용 로봇 그리퍼

위 2장의 실험 결과를 통해 알 수 있듯이 회전력과 수직력을 조합한 커넥터 체결 방법을 사용할 경우 반력이 상당폭 감소하였음을 확인하였다. 본 연구에서는 이를 모사하고자 커넥터 체결을 위한 인간 모방형 그리퍼를 제작하였다. 제안하는 그리퍼는 [Fig. 3]에서 보이는 바와 같이 두개의 서보 액추에이터 (XM430-W350-T, Robotis, KR)가 커넥터를 마주보고 있는 구조로 배치되어 있다. 각각의 서보 액추에이터 1과 2에는 핑거 (finger)가 부착되어 있으며, 동기화(synchronized)된 상태로 커넥터를 잡아준다.



[Fig. 3] Prototype mechanism and hardware structure of the proposed robot gripper with a schematic of a manipulator

[Fig. 4]에서 보이는 바와 같이 제안하는 장치는 인간과 유사하게 두 개의 그리퍼 핑거를 통해 커넥터를 움켜쥘다. 그 상태



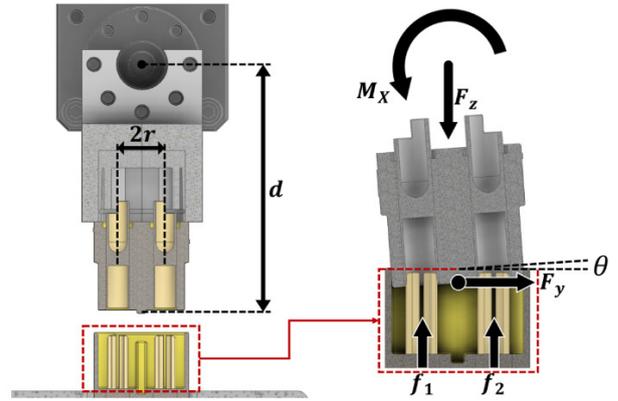
[Fig. 4] Assembly sequence of the robot gripper, inspired by human strategies, with a comparison to human assembly

에서 수 커넥터에 삽입 시, 강한 반력을 느끼는 경우, 반복적인 회전 및 수직 힘을 조합한 체결 전략을 수행한다. 매니플레이터와 종래의 jaw타입 그리퍼를 사용하여 이와 같은 체결전략을 구현하려면 상당히 높은 정밀도와 말단부 회전이 가능해야 하는데, 현실적으로 비용과 기술수준을 고려할 때, 이런 조건을 충족할만한 적합한 로봇 시스템을 구축하기가 거의 불가능하다. 이런 이유로 회전만을 담당해주는 개별적인 로봇 그리퍼를 제작하고 이를 매니플레이터에 부착하여 회전력과 수직력을 동시 제공하는 체결전략을 사용하는 것이 현실적인 대안이 될 것이다.

3.2 커넥터 체결 시 정역학 해석

본 절에서는 커넥터 체결 시 인간과 같은 회전을 구현하면서 밀어 넣는 체결동작의 정역학 적인 원리를 이해하고 이를 통해 원활한 로봇 제어를 구현하고자 한다(아래의 정역학적 해석은 본 연구자들이 기 출원한 특허에 제시된 유도식을 기반으로 한다^[10]).

먼저, [Fig. 5]는 제안하는 로봇 그리퍼가 암 커넥터를 쥐고 있는 상태에서 이를 바닥에 고정된 수 커넥터에 체결하는 모습과 단면도를 보여주고 있다. 여기서 다수의 핀을 갖는 커넥터를 좌우 2개의 핀 만을 갖는 2핀 커넥터로 단순화하고 있다. 단순화된 이 2핀 커넥터는 [Fig. 2]에서 보이는 첫 번째 커넥터인 모델(XT-60, AMAS, CN)과 동일하다. 여기서 M_x 는 모터가 커넥터에 인가하는 모멘트, r 은 두 핀 사이의 거리의 절반, d 는 모터 회전축에서 그리퍼에 고정된 커넥터 하단까지 수직 거리, F_y 는 회전에 의해 발생하는 좌/우측면의 반작용 힘과 핀과 하우징 사이의 접촉에 의한 y 축 방향의 유효 힘, F_z 는 매니플레이터에 의하여 체결 방향으로 인가되는 삽입력이다. 이 때 회전각 θ 가 작은 값이라고 가정하면, 삽입력 F_z 와 두 쌍의 암/수 핀 반작용력 f_1 과 f_2 는 다음과 같은 수직 평형 방정식 식 (1)을 만족한다.



[Fig. 5] Cross-section of the gripper grasping a female connector during mating with a male connector in a static state

$$F_z = f_1 + f_2 \quad (1)$$

모터 회전 축을 중심으로 모멘트 평형을 고려하면 다음의 방정식이 도출된다.

$$M_x - r \cdot f_1 + r \cdot f_2 + d \cdot F_y = 0 \quad (2)$$

위 방정식 식 (1)과 (2)를 조합하면 핀 반작용력을 다음의 두 식과 같이 얻을 수 있다.

$$f_1 = \frac{F_z}{2} + \frac{M_x + d \cdot F_y}{2r} \quad (3)$$

$$f_2 = \frac{F_z}{2} - \frac{M_x + d \cdot F_y}{2r} \quad (4)$$

이 때 추가적인 유효 힘 F_{eq} 를 ($F_{eq} = \frac{M_x + d \cdot F_y}{2r}$)로 정의하면, 반작용 힘은 다음과 같이 표현된다.

$$f_1 = \frac{F_z}{2} + F_{eq} \quad (5)$$

$$f_2 = \frac{F_z}{2} - F_{eq} \quad (6)$$

이러한 유도 결과는 인간의 회전 및 수직 힘 조합 체결 전략 동작으로 인한 모멘트 M_x 와 측면 힘 F_y 가 F_{eq} 를 통해 각 핀의 반작용 힘에 직접적인 영향을 준다는 것을 보여준다. F_{eq} 는 각 핀에 대칭적으로 적용되지만 방향은 반대인 추가적인 유효 힘이다. 회전 및 수직 힘 조합 체결 전략 동작으로 인해 F_z 를 일정하게 유지하는 상태에서 F_{eq} 가 증가하면, f_1 은 증가하고 f_2 는 감소한다. 마찰력은 일반적으로 $F_{friction} = \mu N$ 으로 표현되며 μ 는 정지 마찰 계수, N 은 표면의 수직 항력이다. 회전 및 수직

힘 조합 체결 전략 동작으로 인해 f_1 이 증가하여 $f_1 > \mu N$ 의 조건을 만족하고 f_2 가 반대로 감소하지만 $-\mu N < f_2 < \mu N$ 의 범위 내에 있으면, 왼쪽 핀이 마찰력을 극복하고 움직이고 오른쪽 핀은 마찰력에 의해 움직임이 제한된다(수직력 F_z 가 작용하지 않으면 왼쪽 핀 f_1 과 오른쪽 핀 f_2 는 서로 반대방향으로 작용하며 정지마찰을 이겨내지 못할 경우 멈춰 있거나 정지마찰 보다 커진다면 커플로 작용하여 순수한 회전만이 일어날 것이다.).

위의 정역학적 해석을 토대로, 회전력 M_x 와 수직력 F_z 를 적절히 조절하면 각 핀에 작용하는 반작용력 f_1 과 f_2 를 제어할 수 있다. 이를 통해 왼쪽 핀이 정지하고 오른쪽 핀이 마찰력을 극복하여 삽입되며, 모멘트의 방향을 반대로 전환하면 오른쪽 핀이 정지하고 왼쪽 핀이 삽입된다. 이러한 모멘트 방향의 지속적인 전환과 반복을 통해 좌우 핀이 순차적으로 전진하여 체결이 이루어진다. 따라서, 회전력과 수직력을 결합한 체결 전략은 핀들의 교대 운동을 유도하여 효율적인 체결 과정을 구현할 수 있음을 알 수 있다. 이처럼 각 핀이 교대하며 체결이 이루어질 때에는 정지하고 있던 핀의 마찰력 $F_{friction} = \mu N$ 에서 정지 마찰 계수 μ_s 가 동적 마찰 계수 μ_k 로 변환되는 과정이 연속적으로 발생하며 일반적으로 $\mu_k < \mu_s$ 이므로 모멘트의 방향을 변경함으로써 좌우 핀이 교대로 전진할 수 있다. 또한 회전 각도 θ 의 주기적인 변화는 커넥터의 각 압/수 핀과 하우징(케이스)이 다양한 각도로 접촉하게 되어, 최적의 삽입 경로를 찾을 수 있도록 도움을 주어 핀과 하우징 사이의 정렬 오차를 극복한다.

위의 해석에서 각 핀의 반력에 기여하는 주요한 두개의 파라미터는 F_z 와 모멘트 M_x 이다. 따라서 회전력과 수직력을 동시에 인가하는 방식으로 체결할 때는 이 두 파라미터를 적절히 조절하여 커넥터의 종류와 특성에 따라 최적의 체결 조건을 구현할 수 있다. 또한 이 해석에서 크게 고려하고 있지 않는 y축 방향의 유효 힘이나 회전각의 크기도 실제 체결 과정에서는 어느 정도 그 성질에 영향을 줄 것으로 판단되며 이들의 효과는 실험적으로 확인해 볼 수 있다. 본 절의 커넥터 체결 시 정역학 해석의 적용 및 실험은 다음의 4장에서 다룬다.

4. 적용 및 결과

본 절에서 다루는 실험은 [Fig. 6(a)]에서 보이는 바와 같이 제안하는 그리퍼를 7자유도를 가지는 협동 로봇 매니플레이터 (Franka Emika Panda, Franka Robotics, DE)에 장착하여 진행되었다. 제어는 가변 임피던스 제어를 사용하였으며 로봇 그리퍼 상부에 부착된 힘/토크 센서(RFT80-6A02, Robotous, KR)로부터 센서 데이터를 피드백을 받는 방식의 다음과 같은 임피던스 제어를 통해 진행되었다.

$$\tau = \mathcal{J}^T(k_P \mathbf{x}_{err} + k_D \dot{\mathbf{x}}_{err}) \quad (7)$$

여기서 τ 는 조인트 토크, \mathcal{J} 는 로봇 kinematic Jacobian 행렬, \mathbf{x}_{err} 는 작업공간 오차, 그리고 k_P 와 k_D 는 각각 위치오차와 속도 오차의 게인(gain)값이다.

실험에서 로봇은 암 커넥터를 그리퍼로 견고하게 쥘 상태에서 바닥에 고정되어 있는 수 커넥터에 체결을 수행한다. 체결의 순서는, 초기에는 빠르게 체결부로 접근하여 진입하고, 초기 진입 후 강성 조절을 통한 정렬을 수행한다. 정렬 후에는 반력에 대응하면서 수직방향으로 누르기만 하는 방식으로 체결을 진행하다가 그 과정에서 재밍 현상 또는 필요 체결 힘이 부족하게 되면 회전력과 수직력을 함께 가하는 방식으로 모드를 전환한다. 회전력과 수직력을 함께 가하는 단계에서는 체결 힘을 일정하게 유지하기 위해 반력의 크기에 따라 식 (7)의 k_P 값을 실시간으로 조절한다. 사용된 임피던스 제어에서는 각 축의 강성 계수를 독립적으로 조절하여 원하는 임피던스 특성을 구현하기 위해 k_P 는 3차원 공간의 각 축에 해당하는 요소로 구성된 대각행렬로 표현한다.

$$\mathbf{k}_P = \begin{bmatrix} k_{px} & 0 & 0 \\ 0 & k_{py} & 0 \\ 0 & 0 & k_{pz} \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서 k_{px} , k_{py} , k_{pz} 는 각각 x, y, z 축 방향의 강성 계수를 나타낸다. 이들은 커넥터의 종류별 특성을 고려하여 선정된 체결 반력 F_x , F_y , F_z 의 임계 값(threshold)이 유지되도록 조절된다. 조절은 1 kHz의 주기로 제어되며 각 축 상의 체결 반력이 임계 값보다 증가하게 되면 그에 대응하는 게인을 줄여주고 반력의 임계 값보다 감소하게 되면 그에 대응하는 게인을 감소시킨다. 예로 들어 [Fig. 7]에서 보이는 바와 같이 F_z 를 일정하게 유지(a)하기 위해 k_{pz} 를 조절(b)할 때에는 매 1 ms마다 실행되는 제어루프에서 만약 $F_z > F_z^{desired}$ 이면, k_{pz} 에 게인의 한 스텝(ΔK_{pz})을 아래의 수식과 같이 빼주고

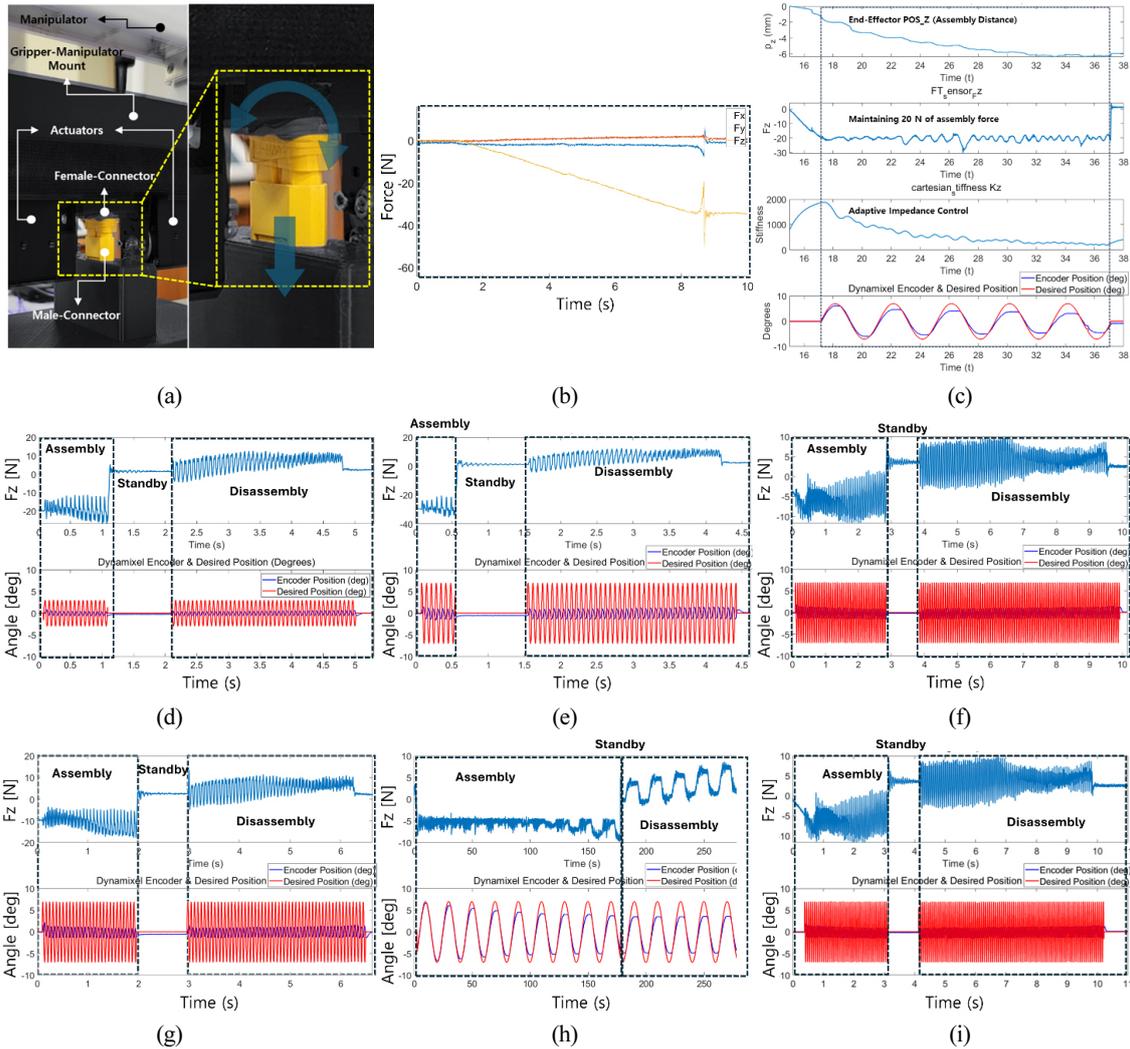
$$K_{pz} = K_{pz} - \Delta K_{pz} \quad (9)$$

만약 $F_z < F_z^{desired}$ 이면 k_{pz} 에 게인의 한 스텝(ΔK_{pz})을 아래의 수식과 같이 더해주며

$$K_{pz} = K_{pz} + \Delta K_{pz} \quad (10)$$

$F_z = F_z^{desired}$ 이면 $K_{pz} = K_{pz}$ 로 유지한다.

그리퍼가 인가하는 회전 모멘트 M_x 는 그리퍼에 장착된 서보 모터(XM430-W350-T, Robotis, KR)를 통해 생성된다. 모터



[Fig. 6] The required assembly force of the connector (a) and experimental data of human-inspired connector assembly strategy using suggested gripper with manipulator

는 회전 운동을 수행하며, 회전 각도와 속도를 제어하고 원하는 모멘트를 인가한다. 회전 각도 $\theta(t)$ 는 의도한 최대 회전 각도 θ_{max} 와 주파수 ω 에 따라 다음과 같이 제어된다.

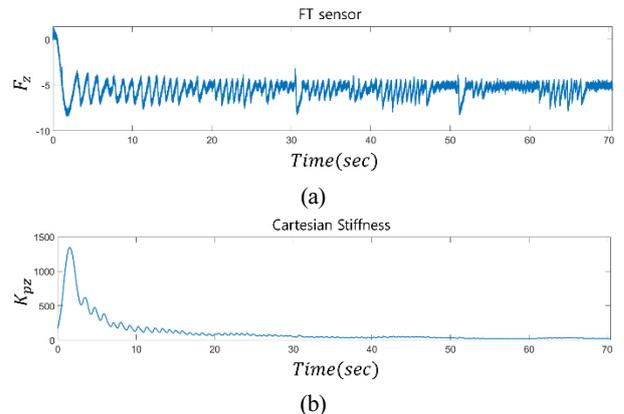
$$\theta(t) = \theta_{max} \cdot \sin(\omega t) \quad (11)$$

사용된 모터의 회전 모멘트 M_x 는 모터의 토크 상수 K_t 와 모터 전류 I_m 을 통해 계산되며 모터의 최대 연속 토크와 전류를 고려하여 M_x 가 제어된다.

$$M_x = K_t \cdot I_m \quad (12)$$

이 때 회전력/수직력 조합 체결 전략 동작은 위 3.2 절의 정역학 조건을 충족하게 설정된다.

본 실험은 3장의 정역학 해석에 사용한 2핀 커넥터인 모델 (XT-60, AMAS, CN)을 사용하였다.



[Fig. 7] Real-time adaptive impedance control for force regulation

제안하는 체결 전략과 그리퍼의 효과를 검증하기 위해 커넥터 조립을 위한 비교 실험을 진행하였다. 먼저, 회전을 사용하지 않고 직진력만으로 커넥터 체결을 시도한 경우, [Fig. 6(b)]

와 같이 체결을 위해 최대 35 N의 힘이 필요 하였다. 동일한 조건에서 회전력과 수직력을 함께 가하는 제안한 방식의 실험에서는 커넥터를 체결하는 도중에 20 N 이상의 반력이 들어오기 시작하면 그리퍼의 회전 각도 7도, 주파수 0.25 Hz의 회전 속도로 그리퍼를 반복운동을 하게 sine함수 입력을 주었으며 매니플레이터는 밀어주고 있던 힘을 일정하게 유지하도록 k_p 강성을 실시간으로 가변 해주었다. 그 결과 [Fig. 6(c)]와 같이 최대 수직힘이 20 N에 불과한 상태로 체결을 완료할 수 있었다. 이 결과는 2장의 인간의 체결 전략 분석에서 인간이 회전과 수직 힘의 조합으로 체결하였을 때에 3종의 커넥터 모두 체결 힘을 줄인 결과와 유사하게 체결 힘의 감소가 42% 이상으로 나타났다. 이 실험을 통해서 제안하는 그리퍼는 인간의 체결 방법과 유사하게 재밍 및 웨지 현상의 극복과 체결 힘의 42% 이상 감소가 가능함을 확인하였다.

다음은 3.2 절의 정역학 해석에서 각 핀의 반력에 기여하는 주요한 두개의 파라미터는 F_z 와 모멘트 M_x 의 효과를 간접적으로 확인하기 위하여 그리퍼의 회전 각도, 회전 속도, 밀어/당겨주는 힘의 변화에 따른 결과를 분석하였다. 데이터 확보를 위해 체결뿐만 아니라 해체도 함께 수행하였으며 체결과 해체 과정을 명확하게 분리하고자 체결 후 해체를 수행하기 전에 잠시 동작을 정지하는 구간을 1초간 부여하였다.

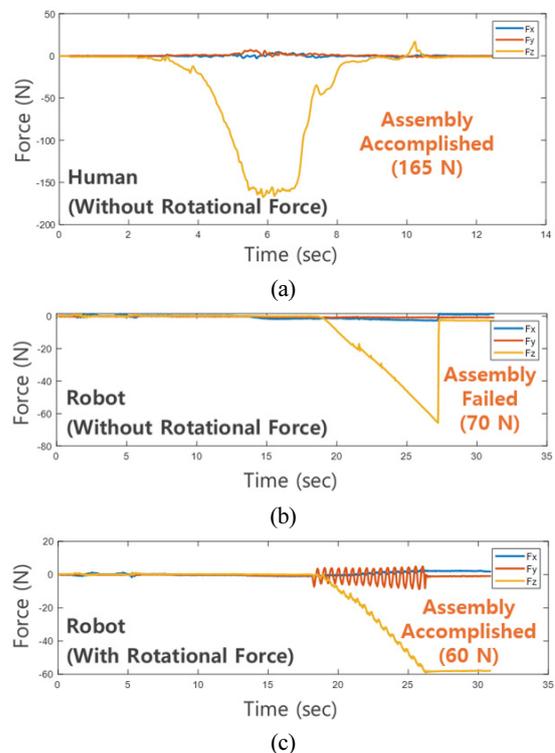
[Fig. 6(d)], [Fig. 6(e)]는 그리퍼의 회전 속도와 밀어/당겨주는 힘이 동일한 상황에서 회전 각도만을 다르게 한 상황이다 (회전속도: 15 Hz, 밀어주는 힘: 30 N). [Fig. 6(d)]는 입력 회전 각도가 3도인 상황 일 때 체결을 보여주는 결과로, 체결 및 해체 시간이 각각 약 1초와 3초가 소요되었다. 회전 각도 7도의 입력을 주었을 때에는, [Fig. 6(e)]에서 보여주는 바와 같이 체결 및 해체시간이 각각 약 0.5초와 3초가 소요되었다. 이를 통해 회전 각도의 증가는 체결 소요 시간을 줄여주는 것을 확인하였다. 이때 허용 가능한 회전 각도의 범위는 커넥터의 허용공차 이내에서 커넥터의 압/수 핀 및 하우징에 손상을 가하지 않는 범위에서 실험적으로 선정되었으며 회전각도의 증가는 간접적으로 회전 모멘트 M_x 의 증가를 의미하며 M_x 가 커질수록, 체결에 소요된 시간이 줄어들음을 알 수 있다.

[Fig. 6(f)], [Fig. 6(g)]는 그리퍼의 회전 속도와 회전 각도가 동일한 상황에서 밀어주는 힘만을 다르게 한 상황이다(회전속도: 15 Hz, 회전 각도: 7도). 실험 결과는 [Fig. 6(f)]는 수직힘이 5 N인 상황에서의 체결 결과로서 체결 시간이 약 2.7초가 소요 되었다. [Fig. 6(g)]에서는 밀어주는 힘이 [Fig. 6(f)]의 두 배인 10 N인 상황 일 때에 체결 시간이 약 1.8초이며 밀어주는 힘이 5 N인 상황에 비해 체결 시간이 약 33% 감소되었음을 알 수 있다. 이를 통해 밀어주는 힘의 증가 또한 체결 소요 시간을 줄여 주는 것을 확인하였다. 이는 3.2절의 커넥터 체결 시 정역학 해석에 따라 수직력 F_z 의 증가로 인해 각 핀에 가해지는 반작용

력 f_1 과 f_2 가 증가하고 식 (5), (6)에 따라 수직력의 증가는 반작용력을 증가시켜 마찰력을 극복하는 데 필요한 힘을 충분히 제공하므로, 체결 소요 시간이 줄어드는 효과가 나타났다.

[Fig. 6(h)], [Fig. 6(i)]는 그리퍼의 회전 각도와 밀어/당겨주는 힘이 동일한 상황에서 회전 속도만을 다르게 한 상황이다 (밀어/당겨주는 힘: 5 N, 회전 각도: 7도). 실험 결과는 위의 실험과 유사하게 [Fig. 6(h)]와 같이 회전 속도가 0.05 Hz로 느릴 때는 체결 및 해체 시간이 약 3분, 100초가 소요되었다. [Fig. 6(i)]와 같이 회전 속도가 15 Hz로 빠를 때에는 체결 및 해체 시간이 2.7초, 6초가 소요되었다. 이를 통해 회전 속도가 느리면 회전 각도가 크더라도 체결 시간의 감소에는 효과가 크지 않은 것으로 보이며, 회전 속도는 체결 소요 시간과 직접적으로 관련이 됨을 알 수 있었다.

제안하는 장치와 체결 전략의 효과를 추가 검증하고자 체결 반력이 매우 큰 6핀 커넥터([Fig. 2(c)]에서 보이는 6핀 커넥터와 동일 모델)를 사용하여 체결을 진행하였다. [Fig. 8(a)]에서 보이는 바와 같이 사람이 회전력을 사용하지 않았을 때는 165 N의 매우 큰 힘이 필요함을 알 수 있다(이는 곧 6핀 커넥터의 필요 체결 힘이다). [Fig. 8(b)]에서는 로봇이 그리퍼의 회전력을 사용하지 않은 경우, 로봇의 허용 가능 힘의 범위를 벗어나 체결에 실패하였음을 알 수 있다. 본 실험에서는 그리퍼의 회전력과 함께 체결 반력 F_z 의 임계 값을 60 N으로 하고 위에서 언급



[Fig. 8] Comparative analysis of assembly forces with and without human-inspired strategies with a manipulator

한 방식으로 식 (8)의 k_{ps} 계인을 실시간으로 조절하였다. 실험 결과, [Fig. 8(c)]에서 보이는 바와 같이 [Fig. 8(a)]에서 필요하였던 165 N의 63.6% 감소된 힘으로 체결이 가능하였으며 매니플레이터의 허용가능 범위 이상의 필요 체결 힘이 요구되는 커넥터의 체결이 가능하다는 것을 검증할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 제안하는 그리퍼와 이를 통한 인간 모방 체결 전략을 개발하였다. 정역학적 모델을 기반으로 회전 각도, 속도, 체결 힘 등의 파라미터들을 조절함으로써 도출한 결론은 다음과 같다. 먼저, 커넥터 체결 중 정렬 오차 및 마찰력에 의한 제밍 및 웨징 현상이 제안하는 전략에 의해 극복 가능하다. 또한, 로봇의 허용 가능 이상의 체결력이 요구되는 커넥터도 체결이 가능해질 수 있다. 따라서 제안하는 그리퍼와 이를 활용한 체결 전략은 향후 로봇 제조 공정의 각종 커넥터 체결 과정에서 발생 가능한 문제들을 해결하는 데 기여할 수 있을 것이다.

References

- [1] N. Ghodsian, K. Benfriha, A. Olabi, V. Gopinath, A. Arnou, C. El Zant, Q. Charrier, and M. El Helou, "Toward designing an integration architecture for a mobile manipulator in production systems: Industry 4.0," *Procedia CIRP*, vol. 109, pp. 443-448, Jun., 2022, DOI: 10.1016/j.procir.2022.05.276.
- [2] Y. Jiang, Z. Huang, B. Yang, and W. Yang, "A review of robotic assembly strategies for the full operation procedure: planning, execution and evaluation," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 78, Dec., 2022, DOI: 10.1016/j.rcim.2022.102366.
- [3] Y. Kang, J. Park, and J. Cheong, "Connector Assembly Based on Adaptive Impedance Control Emulating Human Hand Tactile Finesse," in *Institute of Control, Robotics and Systems*, Daejeon, Republic of Korea, pp. 63-64, 2024, [Online], <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE11908776>.
- [4] H.-C. Song, Y.-L. Kim, D.-H. Lee, and J.-B. Song, "Electric connector assembly based on vision and impedance control using cable connector-feeding system," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 31, pp. 5997-6003, Dec., 2017, DOI: 10.1007/s12206-017-1144-7.
- [5] H.-C. Cho, Y.-L. Kim, B.-S. Kim, and J.-B. Song, "A strategy for connector assembly using impedance control for industrial robots," in *2012 12th International Conference on Control, Automation and Systems*, Jeju, Republic of Korea, pp. 1433-1435, 2012, [Online], <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6393061>.
- [6] K. Guo, R. Liu, G. Duan, J. Liu, and P. Cao, "Research on dynamic decision-making for product assembly sequence based on Connector-Linked Model and deep reinforcement learning," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 71, pp. 451-473, Dec.,

2023, DOI: 10.1016/j.jmsy.2023.09.015.

- [7] J.-W. Yun, M. Na, Y. Hwang, and J.-B. Song, "Similar assembly state discriminator for reinforcement learning-based robotic connector assembly," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 91, Feb., 2025, DOI: 10.1016/j.rcim.2024.102842.
- [8] O. Abdelrahman and P. Keikosrokiani, "Assembly Line Anomaly Detection and Root Cause Analysis Using Machine Learning," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 189661-189672, 2020, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3029826.
- [9] S. Li, P. Zheng and L. Zheng, "An AR-Assisted Deep Learning-Based Approach for Automatic Inspection of Aviation Connectors," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 17, no. 3, pp. 1721-1731, Mar., 2021, DOI: 10.1109/TII.2020.3000870.
- [10] Korea University Research and Business Foundation, Sejong, "Gripper Apparatus for Connector Assembling," *KR Patent 10-2024-0147479*, Oct., 25, 2024, DOI: 10.8080/1020240147479.



강 윤

2023 고려대학교 전자·기계융합공학과 (공학사)

2023~현재 고려대학교 제어계측공학과 (석·박사 통합과정)

관심분야: Human-Robot Interaction, Robot Control



박 준 민

2019 고려대학교 전자·기계융합공학과 (공학사)

2019~현재 고려대학교 제어계측공학과 (석·박사 통합과정)

관심분야: Robot Manipulation, Control System



정 주 노

1995 포항공과대학교 기계공학과 졸업

1997 동 대학원 기계공학과 석사

2003 동 대학원 기계공학과 박사

2003~2005 MIT 전자 통신 연구소 박사후 연구원

2005~현재 고려대학교 전자·기계융합공학과 (대학원 제어계측공학과) 교수

관심분야: Robotic Manipulation, Grasping, Mechanical Systems Control