

산업용 협동 로봇과 작업자연구 트렌드 쟁점 연구

최정호*, 김낙일**¹, 김원현**², 윤승정***

Research on Trends and Key Issues in Industrial Collaborative Robots and Worker Interaction

Jeongho Choi*, Nakil Kim**¹, Wonhyun Kim**², and SeongJeong Yoon***

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신산업진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임
(D0747-23-1001, 메타버스 기반 자동차 제조혁신 플랫폼 구축 및 실증, 22-23년)

요약

최근 산업용 로봇을 넘어 협동 로봇 도입이 필수적인 요인으로 공인하고 있다. 산업용 로봇은 작업자와 협업할 수 있는 것이 아니다. 그러나 협동 로봇은 작업자와 협업하는 로봇을 의미한다. 작업자와 로봇 간의 협업이 중요한 이유는 작업자의 작업 효율성뿐만 아니라 안전과 밀접한 관련이 있다. 협동 로봇에는 ISO/TS 15066과 같은 안전준수 사항과 EN ISO 10218이 공표되어 있다. 그러나 최근 이러한 안전문제에 대하여 여전히 해결되지 않는 부분에 있어 연구가 진행 중이다. 그 예로 협동 로봇의 로봇과 작업자 간의 충돌 모델링, 안전제어 알고리즘 연구 등이 있으며, 작업자의 신체부위별 고통을 느낄 수 있는 한계치와 관계한 연구도 진행하고 있다. 기존 연구의 고찰을 통하여 향후 협동 로봇이 해결해야 할 주요 이슈와 작업자의 어떤 부분을 고려할지 연구 쟁점을 제시하고자 한다. 전문가인터뷰 및 기존연구 분석을 통하여 객관성을 확보하여 제시하고자 한다. 이를 통하여 협동 로봇 개발사의 역량 제고뿐만 아니라 전반적인 산업생태계에 협동 로봇을 통한 제조업의 질적 향상을 제공하고자 한다.

Abstract

Cooperative robots have become an essential factor in addition to industrial robots, as they are capable of collaborating with human workers. Unlike industrial robots, cooperative robots refer to robots that collaborate with human workers. The collaboration between workers and robots is important not only for improving work efficiency but also for safety-related reasons. Safety compliance requirements, such as ISO/TS 15066 and EN ISO 10218, have been established for cooperative robots. However, there are still unresolved issues regarding safety that are currently being researched. Research on cooperative robots includes collision modeling between robots and workers, as well as the development of safety control algorithms. Studies are also being conducted to determine the limits of pain that workers may experience in different parts of their bodies. By examining previous research, this study aims to identify the key issues that cooperative robots need to address and propose research focal points considering various aspects of workers. The objective is to present these points with objectivity through expert interview and a review of existing studies. Through these efforts, it is hoped that not only the capabilities of cooperative robot developers will improve but also that there will be overall qualitative advancements in the manufacturing industry ecosystem through the use of cooperative robots.

Keywords

cooperative robots, ISO/TS 15066, EN ISO 10218, technology trends, safety, pain limits

* 현대모티스그룹 자동차기술부 부서장

- ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9639-0327>

** 슈타겐 대표

- ORCID¹: <https://orcid.org/0000-0002-3852-1608>

- ORCID²: <https://orcid.org/0009-0006-8803-2796>

*** 슈타겐 수석컨설턴트, 중앙대학교 경영경제대학교 강사(교신저자)

- ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5188-801X>

· Received: Aug. 01, 2023, Revised: Aug. 16, 2023, Accepted: Aug. 19, 2023

· Corresponding Author: SeongJeong Yoon

Dept. of #C-708, 40, Dongcheon 1-gil, Jung-gu, Ulsan, Korea

Tel.: +82-52-294-2524, Email: sjyoon@shutagen.com

1. 서 론

최근 산업현장에서는 산업로봇과 함께 협동 로봇을 시급히 도입하여, 안전성 및 생산성 제고와 품질 향상 확보에 집중하고 있는 기업들이 늘고 있다[1]. 현행 운영되고 있는 산업로봇은 작업자와 분리되어 안전망을 설치한 작업환경에서 작동하는 것이다. 그러나 협동 로봇은 국제 안전 규정인 ISO/TS 15066 과 같은 안전장치들이 기능이 포함된 것이며 작업자와 함께 일할 수 있는 것이다[2]. 산업로봇은 작업에 필요한 설정값을 미리 값을 설정하여 정해진 작업만을 일정하게 수행하지만, 협동 로봇은 작업자 사전에 설정한 값에 의하여 동작하거나 작업환경을 인지·판단·제어하고 작업의 패턴을 지능화하여 동작하는 것을 말한다.

구체적으로 협동 로봇 도입 시 장단점을 정리하면 다음과 같다[3]. 우선 협동 로봇을 도입하면 첫째, 작업자와 같이 일하는 협업 구조이기 때문에 유연한 작업을 할 수 있다. 즉, 산업로봇처럼 처음부터 설정한 작업 이외에 유연성 없이 작업하는 것이 아니라, 작업자가 판단하여 로봇을 유연하게 활용하게 된다는 것이다. 둘째, 중소기업과 같은 작은 규모에서 협동 로봇은 안전기능까지 포함하고 있어 별도의 안전펜스를 별도로 설치할 필요가 없다. 셋째, 협동 로봇은 유연 생산이 가능하다. 즉, 소품종 대량생산이 아니라 다품종 소량생산에 적합한 로봇이다. 만약 제품 생산 다각화로 인한 대응이 필요하다면 협동 로봇은 필수적이라 할 수 있다. 정해져 있는 생산체계가 아닌 다양한 제품에 대하여 로봇과 작업자 간의 유연성을 제공한다는 것을 말한다.

협동 로봇 도입의 단점에 대하여 정리하면 다음과 같다[4]. 첫째, 작업자의 경험에 의하면 협동 로봇은 산업로봇보다 동작/처리가 느리다고 한다. 그 이유는 협동 로봇은 산업로봇에 안전기능이 포함되어 있기 때문이다. 둘째, 비용이 산업로봇에 비해 비싸다. 이는 운영 및 유지보수에 필요한 비용도 포함된다. 셋째, 협동 로봇이 안전기능이 포함되어 있다고는 하지만 사실 해결하지 못하는 부분이 많이 있다. 여전히 협동 로봇을 사용하면서 작업자의 행태를 인식하지 못하여 사고가 발생하는

일이 나타난다.

본 연구에서는 단순히 이러한 협동 로봇의 장단점만을 분석하고자 하는 것이 아니다. 최근 3년간 협동 로봇에 관한 연구의 주요 쟁점이 무엇인지 구체적으로 연구 문헌을 통해 고찰하고자 한다. 이를 통하여 협동 로봇을 고도화하거나 지능화하면 설정해야 할 방향성과 해결해야 할 선결과제를 도출하고자 한다. 또한, 협동 로봇이라고 하지만 주요 주체는 로봇이 아닌 작업자라는 것을 간과해서는 안 된다. 특히, 협동 로봇의 진화나 지능화의 최종 목표가 아닌 작업의 안전과 생산의 효율성 제고에 작업자에게 도움을 줄 수 있는 협동 로봇의 작업자행태 인지 동작을 제시하는 것이 매우 중요하다. 따라서, 작업자에게 필요한 도움의 주요 핵심 요인이 무엇인지 제시하고자 하는 것이다. 사실, 현행 연구에서는 협동 로봇에 관한 기계, 알고리즘, 물리적 동작(역학) 등에 관한 연구가 대부분이다. 이는 작업자의 행태를 연구하지 않은 상태에서 협동 로봇이 단지 스마트화 또는 지능화를 목표로 하고 있다는 것을 의미한다.

따라서, 본 연구를 통하여 주요 쟁점을 다음과 같이 도출하고자 한다. 국내외 최근 3년간 논문 또는 정책기관에서 발행한 보고서를 참고하여 산업현장의 협동 로봇에 관한 이슈를 도출하고자 한다. 논문의 시사점 및 결과에 대한 콘텐츠 분석과 키워드 분석을 수행하여 질적 분석과 빈도분석을 수행할 것이다. 또한, 검토 문헌 안에 있는 작업자와 관련한 연구 결과 및 이슈를 정리하고자 한다. 이를 분석한 후 현장 근로자 및 전문가들과 관련 전문가의 인터뷰를 통하여 협동 로봇의 주요 쟁점과 작업자의 주요 쟁점에 대하여 현장 상황과 비추어 보았을 때 연구 쟁점이 제대로 도출되었는지 재확인하고자 한다. 이는, 본 연구의 방향 제시와 주요 쟁점 개선을 통하여 현장의 격차를 줄이고자 하는 것이다. 따라서, 본 연구를 통하여 단기간에 해결해야 할 주요 쟁점과 장기간 단계적으로 해결할 쟁점을 나누어 전략적으로 연구 방향을 제시하고자 한다. 협동 로봇을 넘어 지능화된 협동 로봇을 현실적으로 실체화하려면 본 연구는 필수적이라 할 수 있다.

II. 관련 연구

2.1 산업/협동 로봇 연구

최근 산업현장에서는 생산효율 향상 및 일관성 있는 품질확보를 위해 산업로봇을 넘어 협동 로봇의 도입에 대한 필요성을 절감하고 있다. 산업로봇은 생산공정에서는 작업자와 완전히 분리된 방식으로 울타리(이하, 안전망)를 설치하여 운영하는 방식이다. 그러나 협동 로봇은 이러한 물리적 안전장치를 설치 없이 로봇-작업자가 협업할 수 있는 운영 방식으로 동작하는 것을 말한다. 우선, 산업용 로봇을 동작시키기 위해서는 미리 작업할 영역을 설정하고 데이터를 설정하고 프로그래밍한 대로 움직인다. 이는 앞서 서론에서도 언급한 바와 같이 정해진 생산공정 안에서 유연 생산은 불가능하다. 그러나 협동 로봇은 생산공정이 인지·판단·제어를 자동화하여 생산공정의 유연성을 제공하게 된다. 아래는 표 1은 산업용 로봇과 협동 로봇의 차이점을 제시한 것이다[5]. 이러한 장점을 산업현장에서는 인식하고 있어 협동 로봇의 도입 당위성은 더 설명할 필요가 없다. 구체적으로 협동 로봇의 도입 사례를 살펴보면, 우선 독일의 자동차 제조업체 폭스바겐(Volkswagen)은 살지터(Salzgitter) 공장(6천여 명 근

무)에서 370여 종의 가솔린 디젤엔진을 생산한다[6]. 이렇게 다양한 종을 생산할 수 있었던 것은 2013년 UR5(부하 중량 5kg, 총중량 18kg)라는 6축 탁상형 로봇이 안전펜스 없이 실린더헤드 조립공정에 협동 로봇을 설치하여 운영했기 때문이다. 이후 BMW, 벤츠와 콘티넨털 등 협동 로봇을 생산라인에 도입하는 사례가 많아졌다. 그러나 이러한 성공적인 도입 사례에도 불구하고 협동 로봇을 도입하기 위해서는 표 2와 같이 안전성, 공존 성, 협동성 등의 세 가지 특징요소를 충족해야 한다[7].

표 2. 협동 로봇 안전 규정
Table 2. Collaborative safety regulations

Elements	Concepts	International standards
Safety	Ability to avoid collisions (Detection, avoidance, response)	ISO10218/-1/-2, ISO12100
Coexistence	Capability to share workspace with humans or other objects	
Collaboration	Communication and interaction with humans and others using various modalities in robot-human interactions	

표 1. 산업용 로봇과 협동 로봇의 차이점
Table 1. Industrial robots vs. collaborative robots

Classification	Industrial robot	Collaborative robot
Safety	Significant accidents occur when the robot collides	Safe operations through impact-detection sensors
Path planning	Complex training required for robot experts	User-friendly training for everyone
Robot manipulation	Various buttons, intricate pendant controls	Simple touch-based tablet interface
Turning radius	Limited to 180 degrees	360-degree rotation on all axes
Average setup time	More than 1 hour	Less than 10 minutes setup time
Size and structure	Categorized as industrial, medium-sized, and small-sized, with robust structure	Mainly medium/small-sized, with flexible structure
Top performance metrics	Emphasis on repetitive precision and speed	Emphasis on safety performance
Layout	Fixed installation method	Flexible repositioning capability
Task type	Primarily focused on repetitive tasks	Tasks that change frequently
Work environments	On/offline programming	Online/Offline programming and various interaction methods adopted
Human interaction	Almost non-existent	Frequent human interaction
Presence of fences	Yes	No
Utilized processes	Mass production processes	Mix of high-volume and low-volume flexible production processes

2.2 작업자연구

그림 1에서 좌측은 산업용 로봇을 사용하는 예시이며, 우측은 작업자와 로봇이 협업하는 협동 로봇을 볼 수 있다[8]. 산업용 로봇은 위의 그림과 같이 안전펜스를 설치하여 작업자와 완전히 분리된 상태에서 생산공정을 운영한다. 이때는 작업자와 분리되어 있어 작업자가 사전에 설정한 공정에 예외적인 개입이 없다면 안전하다. 그러나 우측에 있는 작업자와 로봇이 함께 협업하는 구조에서는 협동 로봇이 작업해야 하는 사물뿐만 아니라 작업자의 행태를 인지·판단·제어할 수 있어야 한다. 협동 로봇을 사용한 경험이 있는 작업자들은 우선 ‘산업용 로봇보다는 속도가 매우 느리며, 예외적인 상황에 대해서도 비교적 안전하게 작업자를 보호하고 있다고 느낀다’고 한다.’ 그러나 협동 로봇에 대한 실시간 안전한 동작 생성에 대해서는 해결해야 할 과제가 여전하다고 기존연구에서 지적하고 있다. 박영훈 외의 연구(2018)를 살펴보면 다음과 같다[9]. 협동 로봇이 작업자를 향해 동작할 때 로봇 속도가 줄어야 하는데 그렇지 못하다고 지적한다. 이러한 이슈에 관한 연구로 ‘작업자로부터 로봇 방향으로 가상의 미치는 힘을 생성하여 로봇의 작업자를 향하여 움직이는 동안 근접하는 속도를 줄이고, 작업의 효율을 위해 안전한 방향으로의 속도를 증가시키는 알고리즘’을 제시하였다. 알고리즘의 제시 기준은 국제표준화 기구(ISO)는 ISO/TS 15066을 준수하는 것을 목표로 하고 있다. 기준을 살펴보면 다음과 같다.

‘로봇이 정지 명령을 받은 후부터 정지할 때까지 걸리는 시간 동안 움직이는 것을 보호 떨어진 거리(Sp)라 하고, 로봇의 자동운전 동안 로봇시스템의

위험 부품은 절대로 작업자와 보호 떨어진 거리보다 가까워져서는 안 된다고 요구한다.’

김을희, 김진오(2020)의 연구에서는 작업안전 시나리오 설계방법론을 연구하여 표 3과 같이 그 결과를 발표하였다. 우선 HRI(Human Robot Interaction)의 위험 관련 규격을 ISO/TS 15066 기준으로 “협동 로봇의 위험 원”, “협동로봇 시스템 위험 원”, “협업작업 적용 시 위험 원”과 이러한 위험을 식별해야 한다고 표 3과 같이 제시하고 있다.

표 3. 협동 로봇의 위험 원

Table 3. Risks factors of cooperative robots

Hazard sources	Factors
Collaborative robot	Load, speed, force, momentum, torque, etc.
	* Identification of quasi-static contact in collaborative robots based on static contact * Identification of operator positions when working in proximity with collaborative robots
Collaborative robot system	End effector, workbench
	* Task actions/positions based on the part's location * Orientation/structures of walls/building pillars or structures, positioning of fixtures * Placement of fixed structures or clamps * Derivation and arrangement of hand-guiding devices * Distance from hazardous devices like laser cutters
Application of cooperative tasks	Collaborative operation of work-collaborative robots
	* Safety-rated monitoring for detection during operator approach * Compliance with ISO 10218-2 hand guiding requirements * Control of speed and separation distance * Limitation of force and power

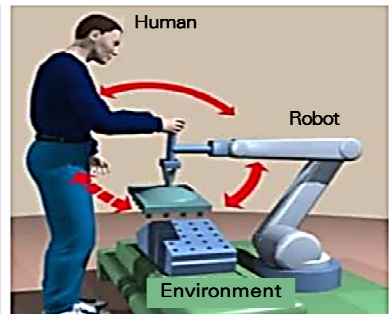
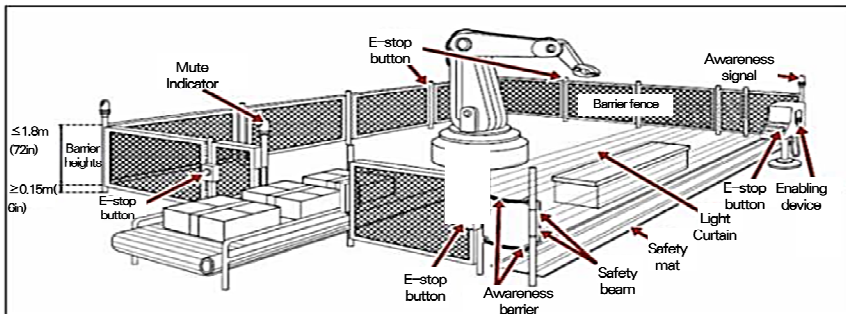


그림 1. (좌) 산업용 로봇, (우) 협동 로봇
Fig. 1. (Left) Industrial robots, (Right) collaborative robots

또한, 작업자의 행태를 분류하면 그림 2와 같이 작업자의 행동은 크게 의도성과 비 의도성을 기준으로 나뉜다. 비의도적인 행동의 경우 미끄러짐, 놓침, 실수로 나뉘고 미끄러짐은 주의력 부족, 놓침은 기억실패, 실수는 규칙, 지식의 부재 및 준수유료 실수하는 것을 포함한다. 행동에 의도성이 개입되는 경우 주로 올바른 사용으로 좋은 관행을 따르게 되는 것을 알 수 있다. 다만, 의도적인 행동에도 불구하고 비정상적인 사용으로 나타날 수 있다. 기존연구에서는 이러한 실수로 인해 작업자의 고통 정도를 ISO/TS 15066의 바이오 메케니컬 고통 지수를 표 4와 같이 제시하고 있다[10].

표 4. ISO/TS15066 바이오 메케니컬 고통 지수
Table 4. ISO/TS15066 bio-mechanical pain limits

Body parts	Static permissible pressure [N/cm ²]	Static permissible force [N]	Dynamic permissible pressure [N/cm ²]	Dynamic permissible force [N]
Forehead	130	130	-	-
Back of the neck	140	150	280	300
Chest	120	140	240	280
Forearm	180	180	360	360

전완(Forearm)은 팔의 손목과 팔꿈치 사이에 있는 부분을 말한다. 신현섭 외(2017)의 연구에서는 로봇-인간의 충돌을 모델링 해 동작에 따른 충돌 힘/압력을 계산하여 안전제어 알고리즘을 제시하여 시뮬레이션하였다.

연구 결과 동적 허용 압력이 360[N/Cm2]이 넘지 않으려면 로봇의 움직이는 속도가 얼마가 되어야 하는지 산정한 것이다. 그 결과 22초대에서는 586[N/Cm2]이 넘었으나 로봇의 이동시간이 32초일 경우 360[N/Cm2]을 넘지 않았다.

이처럼 그림 2와 같이 작업자의 행동을 분류하여 어떻게 안전을 확보할 것인지 시나리오 방식으로 로봇이 작업을 인식하고 위험을 식별하며, 협업 설정을 통해 시나리오를 제시하였다. 표 4에서는 구체적으로 작업자의 신체부위별 고통 한계지수를 제시하여 로봇과 충돌 시 어느 정도의 속도로 움직여야 하는지 ISO/TS 15066의 안전기준을 가지고 로봇-작업자 간의 충돌 모델과 시뮬레이션 결과를 제시하였다. 이처럼, 이미 기존연구에서는 작업자의 안전을 확보하기 위하여 로봇의 이동속도와 행동에 대한 카테고리를 제시하고 이를 시나리오 방식으로 해결하려는 연구를 진행하고 있다. 이러한 협동 로봇의 주요 이슈 추세 분석의 객관성을 확보하기 위하여 최근 3년간의 국내외 논문 및 보고서를 좀 더 구체적으로 분석하고자 한다.

본 연구를 통하여 결과적으로 도출한 협동 로봇 활용의 사용 가치 도출과 작업자의 안전확보를 위해 향후 어떤 영역을 중점 연구해야 할지 제시하고자 한다. 현장 적용 가능성을 높이기 위해서 도출한 결과를 해당 기업의 관리자와 작업자를 인터뷰하여 현장의 실질적인 효율성을 높이는 전략을 제시하고자 한다.

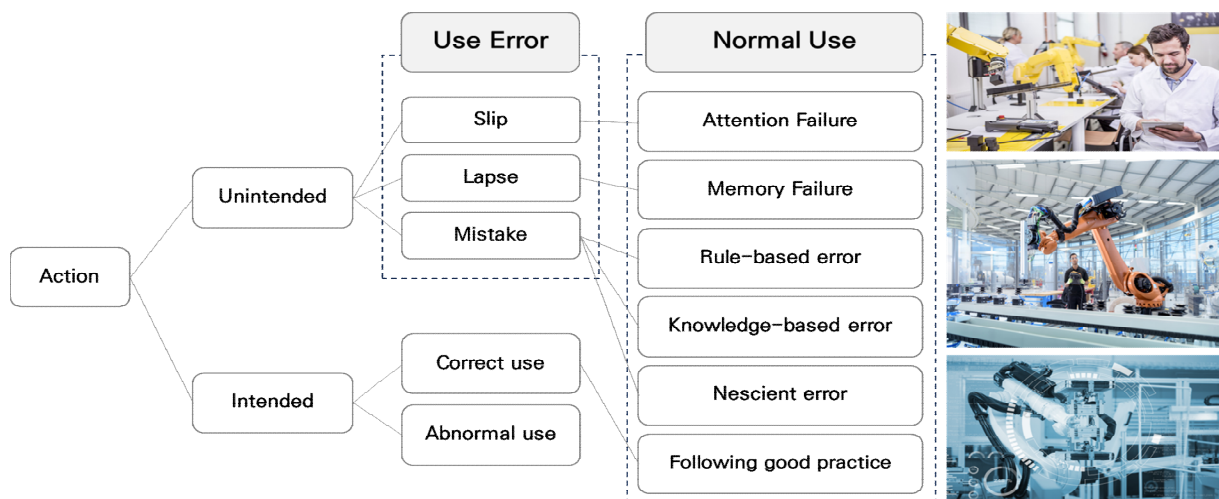


그림 2. 작업자의 행동 카테고리[7]
Fig. 2. Categories of worker behavior[7]

III. 연구방법론

3.1 연구대상 및 수집방법

본 연구는 협동 로봇을 도입(예정)할 기업에 제공할 가치를 극대화하고자 한다. 따라서, 현재 연구하고 있는 국내외 연구를 중점 분석하여 향후 연구자 및 협동 로봇을 기획/제작하는 기업에 연구 및 개발 중점영역과 방향성을 제시하고자 한다. 특히, 산업용 협동 로봇과 작업자의 협업 효율성 제고를 위하여 연구 추세를 분석하고자 한다. 또한, 현장 적용 가능성(Feasibility) 확보를 위해 산업현장 관리자/작업자에게 인터뷰하여 연구 결과의 객관성을 확보자 한다. 이를 위해 최근 3년간 연구논문 및 보고서의 주요 연구키워드를 분석하여 중점 연구영역을 도출하고자 한다.

3.2 분석방법

첫 번째, 우선 협동 로봇의 사용현황과 수준을 확인하기 위해서 국내 H사를 비롯한 자동차 선도생산기업의 협동 로봇 현황을 조사하여 사용 가치를 도출하고자 한다. 두 번째, 협동 로봇의 사용가치에 대해서는 문헌 분석을 통하여 진행하고자 한다. 또한, 협동 로봇과 협업하는 작업자의 안전확보를 위한 연구 추세를 주요 이슈 관점에서 키워드를 분석하고자 한다. 질적 분석으로 주요 이슈 키워드 및 영역을 발굴하여 협동 로봇과 작업자의 향후 중점 연구영역의 방향성을 제시하고자 한다. 분석한 결과를 바탕으로 협동 로봇-작업자의 안전확보를 위한 향후 연구자들에게 연구 중점영역을 제시할 뿐만 아니라 기술, 생산성, 품질, 생산공정의 작업환경 개선 효과가 무엇인지 도출하고자 한다. 마지막으로 협동 로봇과 작업자의 안전확보를 위하여 작업자들을 대상으로 생산공정 현장에서 인식하고 있는 위험도를 설문하고자 한다. 설문의 항목은 표 4에서 제시하는 기준으로 설문항목을 제시하고자 한다.

IV. 분석 및 결과

4.1 협동 로봇 도입 사례 및 가치 분석

최근 H사 로보틱스에서는 고전압 PTC 히터 조립 설비에 협동 로봇 ‘YL012’와 산업용 로봇 HH020, HH7을 도입하여 현장에 적용 중이다. 해당 공정에 적용한 산업용 로봇과 협동 로봇으로 인해 작업자의 손상(Human damage)을 배제할 수 있는 생산공정을 구현하여 작업자의 안전을 확보하고 시간당 생산량 증가와 공정불량률 감소와 같은 경쟁요소를 갖추고 있다. PTC 히터 조립 자동화 라인은 아래와 같은 가치를 작업자와 기업에 제공하고 있다. 표5는 PTC 히터 조립 자동화 라인의 주요 목표이자 제공 가치를 정리한 것이다[11].

표 5. H사 PCT 히터 조립 자동화 라인 제공가치
Table 5. Value proposition of PCT heater assembly automation line

Key value propositions	Keywords
Prevention of human damage in high voltage/high current operations	Safety
Prevention of contamination and foreign object inclusion through unmanned automation of critical processes	Automation, quality improvement
Efficient space utilization by deploying collaborative robots in human workflows	Workspace efficiency
24/7 automation with robots leading to reduced labor costs and decreased defect rates compared to traditional human labor utilization	Labor cost reduction, quality enhancement

D사 로보틱스의 자동차 공정 솔루션의 수단으로 협동 로봇을 도입한 사례를 통해 살펴보면 표 6과 같은 가치를 볼 수 있다[12].

표 6. D사 도어트림 흡음재 초음파 용착, 디버링 작업
Table 6. Ultrasonic welding and deburring operations for D company's door trim soundproofing materials

Key value propositions	Keywords
Door trim soundproofing material ultrasonic welding	Quality improvement
Dashboard embedded area burr removal	Enhanced productivity

협동 로봇의 업계 선두 기업은 글로벌 시장보고서에 의하면 덴마크의 유니버설로봇(Universal Robots)으로 나타났으며, 일본의 화낙(FANUC), 대만 테크맨(Techman), 독일 리싱크로보틱스(Rethink Robotics)와 경쟁하고 있다. 국내에서는 현대로보틱스, 두산 로보틱스, 한화 정밀기계 같은 대기업들이

있으며 레인보우 로보틱스, 뉴로 메카 등 다양한 기업들이 협동 로봇을 개발하고 공급 중이다. 주요 이슈에서는 협동 로봇에 탑재하는 핵심부품 중 감속기 관련 자체 기술력 부족으로 국산제품 가격 경쟁력이 떨어져 가격이 비싸다. 주요기업의 제공가치를 정리하면 표 7과 같이 제시할 수 있다[13][14]. 국내외 협동 로봇의 주요 트렌드는 기반 하중을 더 높이고 있으며 구체적으로 뉴로 메카 같은 경우 24kg

의 향상된 기반 하중을 출시하고 있다고 발표하였다. 또한, 공통으로 작업반경과 자유도를 확장하고 있으며, 대만의 경우 테크로봇(TechMan Robot)은 1,100mm까지 확장하고, 다관절을 구현하여 자유도를 7~8 자유도까지 확장하고 있다. 기술향상의 지속성을 위해 연구용 플랫폼으로 개발한 것은 미국의 Rethink Robotics와 국내 뉴로 메카가 선도하고 있다.

표 7. 국내외 협동 로봇 제공가치(기술현황)

Table 7. Value proposition of providing international/ domestic collaborative robots(Technology trends)

Collaborative robot name(Country)		Value proposition	Keywords
Overseas	Universal robots (Denmark)	UR3, UR5, UR10, and UR16 models released with payload capacities of 3kg, 5kg, 10kg, and 16kg respectively. Additionally, the e-series, which includes UR3e, UR5e, UR10e, and UR16e models equipped with force/torque sensors on the robot's end-effector, is also introduced. Payload capacity refers to the maximum weight that a machine can safely support or carry during operation.	Safety, operational efficiency, productivity
	KUKA (Germany)	The LBR iiwa series of 7-degree-of-freedom collaborative robots has been introduced with payload capacities of 7kg and 14kg. Equipped with joint torque sensors on all joints, these robots are highly sensitive to collision detection, ensuring a high level of system safety. However, they are considered high-cost and are used for specialized purposes only, facing limitations in widespread adoption.	Safety
	Rethink robotics (USA)	Introduced the dual-arm robot named Baxter, equipped with two 7-degree-of-freedom robotic arms. While the precision of industrial robots was compromised, there were advantages in utilizing compliance in certain applications at each joint. It was more suitable as a research platform rather than for production environments.	Suitable for research platform
	ABB (Korea)	Introduced Yumi, a dual-arm collaborative robot featuring its own camera and gripper. Developed for assembly of small components, it's commonly used for collaborative tasks right alongside workers. Yumi was acquired by the German company Gomtec in 2015	Collaboration productivity
	TechMan robot (Taiwan)	TM5-700: Payload 6kg, Working Radius 700mm TM5-900: Payload 4kg, Working Radius 900mm TM12: Payload 12kg, Working Radius 1,300mm TM14: Payload 14kg, Working Radius 1,100mm, 6 degrees of freedom In addition to existing collaborative robots, these models are equipped with an integrated intelligent vision system, enabling various functions.	Production flexibility
	FANUC (Japan)	Building on the technology from existing industrial robots, the CR series was introduced, including models like CR-4iA, CR-7iA, CR-14iA, CR-15iA, and CR-35iA: CR-35iA boasts a payload capacity of 35kg and a working radius of 1,813mm. While relatively larger compared to other collaborative robots in the market, it has a substantial self-weight of 990kg.	Production flexibility
Domestic	Doosan robotics	In 2017, four models of collaborative robots with payload capacities of 6kg, 10kg, and 15kg were released: M0609, M0617, M1013, and M1509. Unlike other products, they featured built-in joint torque sensors for highly sensitive collision detection. They were capable of performing various tasks and had a maximum capacity of 20,000 units per year. In 2021, the H series with payload capacities of 20kg and 25kg was launched, featuring built-in gravity compensation devices.	Production flexibility
	Hanwha/machinery	In 2017, the HCR-5 collaborative robot was introduced, featuring a payload capacity of 5kg, a working radius of 915mm, and a repeatability of 0.1mm. This robot had 6 degrees of freedom and a vertical single-joint design. It was characterized by a user-friendly design, easy programming, direct teaching capabilities, and intuitive operation.	Ease of use
	Neuro mecha	In 2016, the research platform Indy-RP was introduced. In 2017, Indy 3, Indy 5, and Indy 10 were announced. In September of the same year, the independent platform Indy 7 with a payload capacity of 7kg and a weight of 24kg was unveiled. This contributed to the active growth of the mid-low-cost collaborative robot market.	Safety
	Rainbow robotics	Founded on humanoid robot technology, the company initiated its venture. Starting in 2019, the RB series of collaborative robots (RB3, RB5, RB10) were launched, with payload capacities of 3kg, 5kg, and 10kg. The RB series incorporated integrated motors, encoders, and brakes	Safety
	Robotics blue technology	"An enterprise specializing in financial and operational automation, introduced the Symphony-15 in 2021, a 6-degree-of-freedom collaborative robot with a high payload of 15kg and a working radius of 1,300mm. The robot featured built-in joints.	Safety

4.2 협동 로봇-작업자의 연구 트렌드

국내의 연구에서는 협동 로봇과 작업자 간의 안전성, 생산 효율성 제고를 최종목표로 하고 있다. 표 8-1 및 표 8-2에서 해외 연구 트렌드를 살펴보면 학습, 상호작용, 보정, 행동/협력 제어, 경로 변화 인식 및 운반제어 등 다양한 연구를 수행하고 있다.

협동 로봇 측면에서 보면 작업자가 작업내용에 대하여 교시하지 않아도 작업자의 행동을 머신러닝이나 딥 강화학습을 통하여 실현할 방안을 연구하고 있다. 작업자 측면에서는 감정-행동, 인간-로봇의 경로 변화 모델링, 상호작용에 대하여 집중하고 있다고 할 수 있다.

표 8-1. 해외: 키워드 중심 협동 로봇-작업자 연구 트렌드 분석

Table 8-1. Keyword-centric collaborative robots-worker research trend ana

Google scholar : Thesis title and source(Within the past 3 years : 2021~2023)		Research field	Keywords
COACH: cooperative robot teaching(conference on robot learning, PMLR)[15]	23.04	Machine Learning, Learning	Markov game, teaching-learning
Table-balancing cooperative robot based on deep reinforcement learning[16]	23.05	Deep Reinforcement Learning	Adaptive cooperative Robots
Decentralized social navigation with non-cooperative robots via bi-level optimization[17]	23.06	Non-Cooperative Robots, Decentralization	Minimum Deviation Collision, Path Planning
Non-convex distributed feedback optimization for aggregative cooperative robotics[18]	23.02	Non-Blockchain Distributed Feedback Optimization	Multi-Robot Surveillance Scenario
Inter-subjective dynamics in cooperative robots[19]	23.05	Mutual Interaction Dynamics	Multi-Agent (Robot System)
Vision-based localization for cooperative robot-CNC hybrid manufacturing[20]	23.02	Computer Numerical Control	CNC, Layered Cell, Wire and Arc
Teams of robots in additive manufacturing: a review[21]	23.04	Additive Manufacturing	Material Handling System Robot Arm
Multi-robot systems and cooperative object transport: communications, platforms, and challenges[22]	23.01	Multi-Robot Systems	Communication, Coordination, Task Allocation, Experimental Platform
New short scale to measure workers' attitudes toward the implementation of cooperative robots in industrial work settings: instrument development and exploration of attitude structure[23]	23.04	Worker Sentiment and Behavior After Introducing Cooperative Robots	Self-efficacy, Supportive Atmosphere, Job Characteristics
Calibration of multi-robot cooperative systems using deep neural networks[24]	23.04	Robot Calibration	Artificial Neural Network, Master-Slave Cooperative Robot
Intelligent control of the gripping force of an object by two computer controlled cooperative robots[25]	23.03	Robot Manipulator Dynamic Analysis	Neuro-Fuzzy Inference System
Deep reinforcement learning for cooperative robots based on adaptive sentiment feedback[26]	23.06	Deep Reinforcement Learning through Human-Robot Interaction	Deep Q-Network, Emotional Feedback
Research on gesture guidance and teaching of cooperative robot based on nine-axis air-mouse[27]	23.04	Human-Robot Interaction	9-DOF Air Mouse-Based Cooperative Robot, Collaborative Education
Adaptive control of cooperative robots in the presence of disturbances and uncertainties: a bernstein - chlodowsky approach[28]	23.05	Cooperative Robot Adaptive Control	Uncertainty, Irregularity
Carrying the uncarriable: a deformation-agnostic and human-cooperative framework for unwieldy objects using multiple robots[29]	23.04	Multi-Robot Transportation Research	Shape-agnostic Cooperative System
It takes two: learning to plan for human-robot cooperative carrying[30]	23.07	Modeling Path Changes of Human-Robot	Time, Path Changes, Behavior Distribution
RLSS: real-time, decentralized, cooperative, networkless multi-robot trajectory planning using linear spatial separations[31][32]	23.05	Real-Time Linear Spatial Separation	Real-Time Distributed Trajectory Planning Algorithm
Sustainability of human-robot cooperative configurations: findings from a case study[33]	23.08	Cooperative sustainability study	Sustainability, Economic/Environmental/Social
A dual-arm robot cooperation framework based on a nonlinear model predictive cooperative control[34][35]	23.04	Nonlinear Model Predictive Cooperative Control	Dual-Arm Collaboration Framework

표 8-2. 해외: 키워드 중심 협동 로봇-작업자 연구 트렌드 분석(계속)

Table 8-2. Analysis of overseas research trends in keyword-centric collaborative robot-worker studies

Google scholar : Thesis title and source(Within the past 3 years : 2021~2023)		Research field	Keywords
The expanding role of artificial intelligence in collaborative robots for industrial applications : a systematic review of recent works[36]	23.01	Applicability of artificial intelligence from 2018 to 2022	Future research AI
Control system design and methods for collaborative robots: review[37]	22.12	Control system design and methodology for collaborative robots	Control model and method
Collaborative and cooperative robotics applications using visual perception[38]	23.03	Operation in unstructured environments	Environmental changes, sensor, algorithms
Optimized cooperative control of error port-controlled hamiltonian and adaptive back stepping sliding mode for a multi-joint industrial robot[39]	23.03	Optimal control of multi-articulated industrial robots	Synchronous motor, optimization, port control
An integrated design method of robot intelligent joints based on artificial intelligence[40]	23.05	AI-based integrated joint design	Modular joint, modeling, HW design, accuracy
Human-robot interactions in manufacturing: a survey of human behavior modeling[41]	22.12	Human behavior representation	Production system, additive manufacturing, agent behavior, human cognition, cloud robotics, collaborative markov decision making
Designing human-robot collaboration(HRC) workspaces in industrial settings: A systematic literature review[42]	22.01	Human-robot workspace design	Task complexity, interaction
A high-fidelity simulation platform for industrial manufacturing by incorporating robotic dynamics into an industrial simulation tool[43]	22.07	Robot kinematics simulation platform	Simulation, behavior pattern
Multi-robot multi-station cooperative spot welding task allocation based on stepwise optimization: an industrial case study[44]	22.01	Multi-robot multi-station collaborative spot welding task allocation	Multi-station, multi-robot, task allocation
Structural rigidity theory applied to the scaffold-free (dis)-assembly of space frames using cooperative robotics[45]	22.09	Robot assembly and disassembly fixtures	Triangular spatial frame structure
Development of an integrated virtual reality system with wearable sensors for ergonomic evaluation of human - robot cooperative workplaces[46]	22.03	Real-time muscle activity analysis with wearable sensors and immersive virtual worlds	Biomechanics, muscle analysis, immersive virtual environment
Industrial collaborative robot digital twin integration and control using robot operating system[47]	22.02	Standardized universal solution, interconnection between machines	Advanced extended reality (XR) interface
Human-robot collaboration in industrial environments: A literature review on non-destructive disassembly[48]	22.02	Decomposition of human-robot collaboration in robot control strategies	Human-robot interface, collaborative disassembly tasks
Design of warehouse cooperative robot system based on ZigBee[49]	21.11	ZigBee warehouse cooperative robot system design	STM32 microcontroller
Cooperative robotics and machine learning for smart manufacturing: platform design and trends within the context of industrial internet of things[50]	21.07	Definition of collaborative robotics and machine learning technologies	ML, algorithm, architecture, network
A support-design framework for cooperative robots systems in labor-intensive manufacturing processes[51]	21.10	Labor-intensive process support framework	Exoskeleton, biomechanical, simulation
Human-robot perception in industrial environments: a survey[52]	21.02	Human position and intention perception	Sensor, perception, stationary/mobile manipulator
An overview of calibration technology of Industrial robots[53]	21.08	Robot parameter identification	Parameter calibration, accuracy enhancement

표 9의 국내 연구 동향을 살펴보면 주로 로봇 관절의 제어, 구동, 자유도, 케이블 유압 등에 관한 연구가 대부분이다. 협동 로봇의 인지 영역에서는 센서, 카메라 등의 비전 가이드 시스템의 HW 연구와 센서 없는 직접 교시(Teaching) 시스템, 기계학습, 디지

털트윈, 학습모델 평가 등의 SW 연구가 주를 이룬다. 작업자의 행태/행동에 관한 연구가 거의 없으며, 현장 실증 연구, 경제성평가, 신기술 융합연구 등은 찾아보기 어렵다.

표 9. 국내 : 협동 로봇-작업자 연구 트렌드 분석

Table 9. Domestic collaborative robots-worker research trend analysis


KCI thesis title and source(Within the past 5 years : 2019~2023)		Research field	Keywords
Mixed reality based contact-free collaborative robot manipulation system (JKIICE, Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering)	23.06	Non-contact manipulation mixed reality manipulation	
Analysis of emotional computing technology for human-cobot collaboration and interaction in industrial sites (Journal of Korea multimedia society)	23.02	Analysis of affective computing technologies	Collaboration, interaction
Application of digital twin technology to introduce the innovative manufacturing process for SMEs: collaborative robot case (Korean journal of computational design and engineering)	22.12	Digital twin collaborative robots	Manufacturing process innovation, applicability
Medium to improve worker safety and work convenience using image processing and machine learning-based hand signal recognition (JPEE, Journal of Practical Engineering Education)	22.12	Image processing, ML-based signal recognition	Control education medium, inverse kinematics
Performance evaluation technique of learning model based on feature cluster in sensing data of collaborative robots (JOK, Journal of KIISE)	22.10	Sensing model, learning model evaluation	Data analysis
Globalization of SMEs through the establishment of a business ecosystem: Focusing on the universal robots case (Korean academy of international business management)	22.09	Business ecosystem, globalization	Global value chaing
A study of product liability act on application for industrial AI robot (Journal of Korea infomation law)	22.04	Product liability law	Defect, smart factory
Inverse kinematic analysis of a 6-DOF collaborative robot with offset wrist (Journal of the korean society of industry convergence)	21.12	Joint degrees of freedom	Offset, realtime
Comparative analysis of machine learning algorithms for healthy management of collaborative robots (KSMS, Journal of Korea Safety Management & Science)	21.12	Integrity management	Machine learning algorithms
Evaluation of materials related to gender-preferences for the application of cooperative robot skin (Journal of appropriate technology)	21.06	Robot skin application	Gender preference, deformation, contact angle
Friction model of a robot joint considering torque and moment loads (Transactions of the KSME, A)	21.01	Robot joint friction model	Torque and moment load
Parameter estimation of PMSM for collaborative robot manipulator control (Journal of institute of control, robotics and systems (J. inst. contr. robot syst.))	20.12	Joint drive control	Control variables
DMP accuracy improvement to facilitate learning from demonstration for industrial cooperative robots (Journal of institute of control, robotics and systems (J. inst. contr. robot syst.))	20.12	Direct teaching DMP control precision	Direct teaching
Modular link fastening mechanism for various robot arm joint configurations (Transactions of the KSME, A)	20.11	Robot arm(joint)	Linkage mechanism
A design methodology of task safety scenario for the application of collaborative robots (The journal of korea robotics society (J. Korea robot. soc.))	20.08	Workplace safety scenario	Scenario
Improvement for the safety on the automobile-parts assembly process using collaborative robot through risk assessment : Disk snap ring assembly process mainly (JKAIS, Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society)	20.08	Assembly process stability, snap ring assembly process	Emerging technology risk, risk assessment, automated components
The technique of human tracking using ultrasonic sensor for human tracking of cooperation robot based mobile platform (Journal of IKEEE)	20.06	User behavior tracking	Target trajectory, ultrasonic transducer
A study on the development of differentiated collaborative robot shape design (Focusing on the applicability of morphological analysis) (The journal of korea robotics society (J. Korea robot. soc.))	20.05	Behavioral design development	Behavioral analysis
A research on the convergence characteristics of collaborative robot design - focused on formative elements -(KSAF, The Korean Society of Science & Art)	20.03	Design convergence	Aesthetic features, robot/convergence design
Design and implementation of OPC UA-based collaborative robot guard system using sensor and camera vision (The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (JIIBC))	19.12	Sensor/ camera vision guard system	Guard system CNN, OPC, UA
Orthogonal space direct teaching for intuitive programming of sensorless collaborative robots (The journal of Korea robotics society (J. Korea robot. soc.))	19.11	Sensorless direct teaching	Impedance control, human-robot interaction
Development of risk assessment method for cobot workplace and regulation response (The journal of korea robotics society (J. Korea robot. soc.))	19.11	Development of risk assessment methods/ regulatory compliance	Collaborative robot workspace, risk assessment, safety
Design and Implementation of 3DoF Manipulator with Cable-Hydraulic Driven Actuation for Cooperative Robot with High Output and Low Inertia (The journal of Korea robotics society (J. Korea robot. soc.))	19.08	Cable-hydraulic driven manipulator design	Collaborative robot, cable-hydraulic driven, accommodation, workspace

4.3 국내외 연구 트렌드 분석 결과

기존 연구를 종합하면 표 10과 같이 협동 로봇의 HW, SW 연구 및 가상화, 관련 법규, 작업자 행태(동) 연구 및 현장 적용 연구(실증) 및 도입 효과에 대한 생산성/경제성의 연구영역을 기준으로 연구내용을 분석하여 개선점을 도출하였다. 또한, 협동 로봇의 주변기기 연구 및 신기술 융합연구에 연구 추세를 종합하였다. 그 결과 하드웨어적인 기술적인

요소를 개선하려는 수치적 해석, 측정, 제어, 인지, 판단의 연구에 집중하고 있다. 그러나, 소프트웨어적인 측면에서 현장 적용의 사례 및 작업자의 행태(동) 연구와 도입 효과 분석에 관한 연구는 거의 없다. 또한, 협동 로봇의 주변기기는 이미 출시된 부품을 조립하는 형태로 구매하여 사용하는 방식을 취하고 있다. 가상화 및 신(新)기술 융합 및 관련 법규에 관한 대응연구는 거의 없다. 표 10은 이를 정리한 것이다.

표 10. 연구 트렌드 분석 결과종합
Table 10. Summary of research trends

Domain		Main research keywords	
Collaborative robots		Keywords in previous studies	Cognition Human-robot path variation, direct teaching, user behavior tracking
			Judgments Machine learning, deep reinforcement learning, safety, accessibility, flexibility
			Control Robot calibration, joint actuation, multi-station collaboration
	Areas for improvement	In the cognitive and control domains of collaborative robots, there is a considerable amount of research focused on numerical analysis and technical solutions. However, there is a lack of comprehensive studies that collect, transform, and utilize data for artificial intelligence elements through learning processes	
Virtualization	Simulation, digital twin	Keywords in previous studies	Robot kinematics simulation platform for collaborative robots aimed at manufacturing innovation with digital twin
	Areas for improvement	While there is a substantial amount of research on the mechanical dynamics, control, degrees of freedom, and payload capacity of domestic and international collaborative robots, studies on virtualization are notably scarce.	
Relevant regulations	A Study on ensuring safety between workers and collaborative robots	Keywords in previous studies	Work safety scenarios, product liability law
	Areas for improvement	In december 2021, the ministry of industry, trade, and resources established collision prevention standards that allow for the use of collaborative robots without safety fences (barriers). Ongoing efforts are being made to continuously improve the relevant regulations, with the aim of implementing them on-site in the future.	
Worker behavior dynamics	Study on work behavior and behavior	Keywords in pPrevious studies	Human-robot interaction, actions or behaviors within the workspace, perception of worker's position/Intent
	Areas for improvement	Unlike research focused on classifying worker behaviors (actions) based on the classification similar to Figure 2, this study prioritizes safety regulations. It does not emphasize supporting worker behaviors	
On-site application studies (Validation)	Cases applied in production processes	Keywords in previous studies	Case studies of applying digital twins in smart factories and small and medium enterprises (SMEs)
	Areas for improvement	There is a lack of research on success and failure cases of applying collaborative robots, as well as studies on guidelines necessary for their implementation.	
Productivity and economic studies	Study on the effects before and after the introduction of collaborative robots	Keywords in Previous Studies	There is no study available, (however, the introduction of collaborative robots is not yet at a stage where outcomes can be measured in the field).
	Areas for improvement	There is a lack of research on the economic impact through increased efficiency in tasks and production after the implementation of collaborative robots.	
Collaborative robot peripheral device	Camera, sensor, cable, joint body, system	Keywords in previous studies	"Vision, components and systems, image processing systems
	Areas for improvement	There is a lack of research on applying diverse and high-quality new products due to the dependency of peripheral devices for collaborative robots on specific manufacturers.	
Innovative technology integration research	Convergence research on novel technologies in SW and HW of collaborative robots	Keywords in previous studies	There is no research available, (however, the focus is more on hardware aspects such as perception, judgment, and control rather than software).
	Areas for improvement	In addition to hardware technology development research, there is a need for research in software, operation, management platforms, artificial intelligence, big data, and digital twin development.	

V. 결론 및 향후 과제

본 연구는 협동 로봇과 작업자의 생산공정에서 발생할 수 있는 쟁점을 도출하여 향후 어떤 영역에서 연구를 집중해야 할지 제시하는 것이 목적이다. 이에 국내외 연구논문을 모두 조사하고 주요 키워드를 도출하여 향후 연구 방향인 개선점을 제시하였다. 이를 정리하면 다음과 같다.

첫째, 협동 로봇에 대한 인지/제어/판단 영역에서 수치해석 및 기술적 해결연구가 많으나 데이터를 수집, 변환, 적재하여 피드백으로 제공되는 연구가 필요하다.

둘째, 가상화 영역에서는 협동 로봇의 기계적 역학, 제어 및 자유도 확보와 가반하중 해결에 대한 테스트를 다양하게 실행할 수 있는 디지털트윈 연구가 시급하다.

셋째, 관련 법규에서는 이미 협동 로봇이라는 기준을 충족하려면 안전 사항들이 모두 구현되어 있어야 현장에서 사용할 수 있어 이 부분은 필수적인 요소로 협동 로봇 기술변화에 따른 지속적인 법안 연구가 이루어져야 한다.

넷째, 작업자의 행태/행동 연구가 무엇보다도 선행되어야 한다. 현재 기존 연구에서는 대부분 작업자가 누구든 제조환경을 인지, 판단할 수 있어야 한다는 전제를 두고 있으나 현재 수준에서는 불가능하다. 현장에서 실제로 기반 하중 관련하여 작업자의 키 높이에 따라 부품 조립의 위치가 정확하게 맞지 않아 일부는 작업자의 힘을 가하여 미세 조정한다고 한다.

다섯째, 협동 로봇을 제조하는 기업들은 다양한 좋은 기능들을 개념적으로 제시하고 있어 마케팅할 때도 현장에 적용하기 어려운 부분이 있다. 따라서, 협동 로봇의 산업 종별 제조환경의 적용사례를 정책적으로 수집하여 단순히 지침만을 제시하는 것이 아니라 우수사례 제공할 수 있는 연구가 필요하다.

여섯째, 협동 로봇을 도입에 있어 기업들은 생산성과 경제성을 고려하지 않을 수 없다. 기존연구에서는 기술적인 연구에 집중해 있어 협동 로봇의 기술 진화를 믿고 도입할 수밖에 없는 상황이다. 실제로 협동 로봇을 도입하여 경제적 성과 연구한 사례

가 있어야 하고 이를 데이터를 관리할 필요도 있다.

일곱째, 협동 로봇에 투입되는 부품 및 주변기기는 대부분 다양한 경쟁사들이 출시한 제품 또는 반제품을 구매하여 사용한다. 만약 경쟁사들이 출시할 상황이 안되는 경우 대체할 수가 없다. 따라서 향후 연구에서는 협동 로봇을 개발하는 기업들은 주변기기까지도 연구가 필요하다.

마지막으로 신기술 융합에 있어서 인공지능, 빅데이터, 디지털트윈, 다관절 역학, 나노섬유 등 협동 로봇의 안전성 이외에 데이터 기반으로 지능화되어 작동될 수 있는 신기술의 융합 연구가 필요하다. 나노섬유 같은 경우 협동 로봇이 부품을 잡을 때 로봇의 손가락에 부착할 수 있는 소재 개발을 말한다.

또한, 현장에서 작업자와 관리자를 대상으로 설문과 인터뷰를 진행한 결과를 요약하면 다음과 같다. 첫째, 작업자들은 협동 로봇이 안전성을 기반으로 구현되어있어 충돌 등과 같은 실수는 거의 없다고 한다. 그리고 협동 로봇은 기존 연구에서 기반 하중이나 작업영역을 더 넓혀 작업자를 돕는 범위 및 무게를 점차 확대해 나아가고 있다. 그러나 협동 로봇이 부품을 이동할 때 높이 조절은 여전히 연구가 필요한 상황이다. 앞서 작업자의 키 높이에 따라 팔 길이에 따라 협동 로봇이 미세하게 높이를 맞추어 줄 수 없는 경우 작업자는 힘을 사용할 수밖에 없게 된다.

두 번째 협동 로봇을 사용하기 이전에 가장 많이 실수하는 것은 미끄러짐, 농침, 사용의 어려움으로 인한 것이 아니다. 생산공정에서 준수해야 할 지식에 대하여 작업자가 여전히 암기하고 있다가 작업을 진행해야 한다. 그러나 작업자에 따라 암기한 지식수준에 따라 협동 로봇이 반응하게 되는 경우 효과가 떨어진다. 따라서 작업자에게 준수사항에 대한 지식암기를 요구할 것이 아니라 협동 로봇이 데이터를 학습하여 작동해야 할 것이다. 이처럼 협동 로봇이 학습해야 할 데이터 연구가 필요하다.

셋째, 협동 로봇을 도입함으로써 작업자가 가장 기대하고 있는 것은 사전에 세팅하는 시간을 현저히 줄이고 작업자에 의한 교시가 아니라 협동 로봇이 직접 교시할 수 있는 알고리즘을 개발하는 것이 필요하다.

관리자의 관점에서는 가장 시급하고 중요하게 연구되어야 할 부분이 신기술 융합과 가상화, 작업자의 행태 연구이다. 여기서 신기술의 융합이란 인공지능, 빅데이터, 디지털 쌍둥이와 같은 영역을 말하는데 특히, 가상화할 수 없는 협동 로봇은 물리적 모사 환경을 구현해야 하는 엄청난 비용이 소요되기 때문에 관리자들이 제1순위로 요구하는 것이다. 특히, 다품종 소량 생산에 있어 가상화 시뮬레이션은 필수적인 요소이다. 왜냐하면, 다품종을 물리적 모사 환경으로 구현하는 경우 비용, 시간, 개발 유연성을 확보할 수 없게 된다.

두 번째, 작업자의 행태 연구를 관리자들이 요청하는 것은 작업자의 신체적 다양성뿐 아니라 습관, 실수, 반복적 행동을 데이터로 수집하고, 학습하지 않은 상태에서는 협동 로봇이 작업자를 돕는 데 한계가 발생한다. 이에 관한 연구를 최근 IBO(Internet of Behavior)라는 영역으로 연구 진행 중이다.

세 번째, 실증현장 적용 우수사례와 경제성 분석 연구를 관리자들은 요구하고 있다. 협동 로봇의 최종 도입 목적은 생산성 향상과 경제성을 확보하는 것이다. 기술적인 연구만으로는 현장에 어떻게 적용할 수 있을지 모른다고 한다. 여기 말하는 것은 단순히 지침이 아니다. 생산성과 경제성이 높은 산업 공정별 우수사례에 관한 연구를 말한다.

넷째, 법과 주변기기 연구는 장기간에 연구할 과제이며 시장 논리를 침해해서는 안 된다는 인식이 강하다. 그러나 주변기기의 경쟁사의 제품을 완전히 의존하여 대체할 수 없는 상황이 있어서는 안 된다.

본 연구를 최종적인 결론을 제시하면 다음과 같다. 협동 로봇과 작업자는 데이터 기반의 인식과 판단 제어가 일어날 수 있어야 하며, 가상 세계를 통하여 협동 로봇의 물리적 모사 환경에서 벗어나 다품종 소량 생산을 실현할 수 있는 개발의 유연성 및 생산성 향상 확보 연구가 필요하다. 협동 로봇은 분명 산업용 로봇처럼 세팅 값에 의하여 반복적으로 생산공정을 담당하는 기계가 아니다. 협동 로봇은 작업자 간 협업이 가능해야 하고 제조환경에 대하여 자율적으로 인지, 판단, 제어될 수 있어야 한다.

본 연구의 한계점을 제시함과 동시에 향후 과제에 대하여 제시하면 다음과 같다. 한계점은 첫째, 국내외 협동 로봇과 작업자에 관한 연구에 있어 양

적으로 매우 부족하다. 특히 국내 논문은 2019년부터 23년까지 최근 5년간 산업 분야의 협동 로봇을 KCI에서 검색해 본 결과 24개에 불과하였다. 해외 연구에서도 마찬가지로 38개의 논문이 검색되었다. 협동 로봇에 대한 기계적, 물리적, 기술적, 수치학적 접근 이외에 작업자의 행태, 기술적 성과, 생산적/경제적 효과, 신기술과의 융합에 관한 연구는 없다. 좀 더 현실을 반영한 한계점을 제시한다면 현장에서 사용할 만한 사례조차도 공유하기 힘든 것이 사실이다.

둘째, 생산공정에 참여한 관리자, 작업자에게 설문하고 인터뷰하는데 많은 시간과 참여율에 한계가 많았다. 설문 및 인터뷰에 있어 현장에서 정해진 시간 내 근무 이외에 별도의 시간을 할애할 수밖에 없었다. 참여자들의 의견을 조금이라도 정리하여 현재 연구하고 있는 키워드 간의 연관성을 찾으려 하였으나, 현장에서 활용/적용되어 작업환경이 개선될 수 있다는 신뢰성을 찾아보기 매우 어렵다.

셋째, 본 연구의 가치는 향후 협동 로봇의 지능화, 데이터 기반 화, 가상화, 작업자 행태기반 협업과 같은 향후 연구영역을 최종적으로 제시하는 데 있다. 제시하는 영역뿐만 아니라

넷째, 향후 연구에서는 협동 로봇 자체의 기계적, 물리-역학적 연구를 포함한 협동 로봇 도입 시에 사람의 행태, 비즈니스, 경제성, 생산 효율성, 스마트 제조공정 개선 등에 관한 다양한 연구가 필요하다. 특히, 국가 주력 산업인 자동차 분야에서 미래에 필수 불가결하게 사용될 협동 로봇의 기술적, 비기술적 요인을 동시에 향상할 수 있는 연구가 매우 시기적절하게 필요한 것이 현실이다.

References

- [1] S. M. Jeon, "Collaborative Robots Working with Humans", The Science Times, Oct. 2019. <https://www.sciencetimes.co.kr/news/%EC%82%AC%EB%9E%8C%EA%B3%BC-%ED%95%A8%EA%BB%98-%EC%9D%BC%ED%95%98%EB%8A%94-%ED%98%91%EB%8F%99-%EB%A1%9C%EB%B4%87/> [accessed: Jun. 18, 2023]

- [2] ISO, ISO/TS 15066:2016(en) Robots and robotic devices-Collaborative robots, <https://www.iso.org/standard/62996.html> [accessed: Jul. 10, 2023]
- [3] J. B. Song, C. S. Han, and D. B. Shin, "Technological Trends of Collaborative Robots", KIST Convergence Research Policy Center, Vol. 8, No. 6, Jun. 2022.
- [4] S. S. Lim, "Emergence of Collaborative Industrial Robots", Korea Robotics Society Review, Vol. 13, No. 3, pp. 26-31, Jul. 2016.
- [5] S. H. Lee, "Key Element Leading the Smart Factory: 'Collaborative Robots'", Technology & Innovation, Vol. 429, pp. 35-39, May 2019.
- [6] G. S. Jang, "Volkswagen Introduces Human-Robot Collaboration System", Robotnews, Apr. 2016. <http://www.irobotnews.com/news/articleView.html?idxno=7425> [accessed: Jul. 28, 2023]
- [7] Y. L. Kim and J. O. Kim, "A Design Methodology of Task Safety Scenario for the Application of Collaborative Robots", The Journal of Korea Robotics Society, Vol. 15, No. 3, pp. 256-268, Sep. 2020.
- [8] Korea Institute For Robot Industry Advancement, "Certification of Safety for Collaborative Robot Installation Workspace", <http://www.korearobot.or.kr/wp/wp-content/uploads/2019/05/190523-%EB%B0%9C%ED%91%9C%EC%9E%90%EB%A3%8C-2-%EC%A7%84%ED%9D%A5%EC%9B%90%ED%98%91%EB%8F%99%EB%A1%9C%EB%B4%87-%EC%84%A4%EC%B9%98-%EC%95%88%EC%A0%84%EC%9D%B8%EC%A6%9D-%EC%A0%9C%EB%8F%84-%EC%95%88%EB%82%B4.pdf> [accessed: Jun. 28, 2023]
- [9] Y. Park, H. Shin, and S. Rhim, "Real-time Safe Motion Generation Algorithm for Collaborative Robot Using Virtual Force Considering Moving Workers", Spring Conference of the Korean Society of Mechanical Engineers(KSME18-WellC005), pp. 1468-1473, Dec. 2018.
- [10] H. Shin, S. Kwang, J. Choi, and S. Rhim, "Development of Physical Safety Control Algorithm for Robot-Human Interaction", Conference of the Korean Society of Mechanical Engineers(KSME17-We07C003), pp. 835-839, Nov. 2017.
- [11] Marosol, "Collaborative Robot X Industrial Robot Assembly of Electric Car PTC Heaters by Hyundai Robotics, Marosol", <https://www.myrobotsolution.com/solution/139> [accessed: Jun. 30, 2023]
- [12] Marosol, "Utilization of Doosan Collaborative Robot for Automotive Door Trim Polyurethane Bonding", <https://www.myrobotsolution.com/solution/55>, [accessed: Jul. 02, 2023]
- [13] Innopolis, "Collaborative Robot Market: Global Market Trends Report, Aug. 2021.
- [14] H. J. Yoo and H. B. Kim, "Collaborative Robots for Manufacturing", in KISTEP Technology Trend Brief, Sep. 2020.
- [15] C. Yu, Y. Xu, L. Li, and D. Hsu, "COACH: Cooperative Robot Teaching", Conference on Robot Learning, PMLR, Vol. 205, pp. 1092-1103, 2023.
- [16] Y. Kim, D.-W. Kim, and B.-Y. Kang, "Table-Balancing Cooperative Robot Based on Deep Reinforcement Learning", Sensors, Vol. 23, No. 11, May 2023. <https://doi.org/10.3390/s23115235>.
- [17] R. Chandra, et al., "Decentralized Social Navigation with Non-Cooperative Robots via Bi-Level Optimization", arXiv preprint arXiv:2306.08815, Jun. 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.08815>.
- [18] G. Carnevale, N. Mimmo, and G. Notarstefano, "Nonconvex Distributed Feedback Optimization for Aggregative Cooperative Robotics", arXiv preprint arXiv:2302.01892, Feb. 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.01892>.
- [19] L. Romagnoli, "Intersubjective Dynamics in Cooperative Robots", International Workshop IFToMM for Sustainable Development Goals, Proceedings of I4SDG Workshop, Vol. 134, pp.

- 375-381, May 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32439-0_43.
- [20] J. Goodwin and C. Saldaña, "Vision-based localization for cooperative robot-CNC hybrid manufacturing", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 126, pp. 241-258, Feb. 2023. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11009-9>.
- [21] A. Alhijaily, Z. M. Kilic, and A. N. P. Bartolo, "Teams of robots in additive manufacturing: A review", *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 18, No. 1, Jan. 2023. <https://doi.org/10.1080/17452759.2022.2162929>.
- [22] X. An, et al., "Multi-Robot Systems and Cooperative Object Transport: Communications, Platforms, and Challenges", *IEEE Open Journal of the Computer Society*, Vol. 4, pp. 23-36, Jan. 2023. <https://doi.org/10.1109/OJCS.2023.3238324>.
- [23] B. Leichtmann, et al., "New short scale to measure workers' attitudes toward the implementation of cooperative robots in industrial work settings: Instrument development and exploration of attitude structure", *SpringerLink, International Journal of Social Robotics*, Vol. 15, pp. 909-930, Apr. 2023. <https://doi.org/10.1007/s12369-023-00996-0>.
- [24] A. Maghami, et al., "Calibration of Multi-Robot Cooperative Systems Using Deep Neural Networks", *SpringerLink, Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 107, No. 55, Apr. 2023. <https://doi.org/10.1007/s10846-023-01867-6>.
- [25] A. Bahani, et al., "Intelligent Controlling the Gripping Force of an Object by two Computer-controlled Cooperative Robots", *Journal of Applied Sciences*, Vol. 19, No. 1, pp. 133-151, Mar. 2023. <http://dx.doi.org/10.35784/acs-2023-09>.
- [26] H. Jeon, D.-W. Kim, and B.-Y. Kang. "Deep Reinforcement Learning for Cooperative Robots Based on Adaptive Sentiment Feedback", *SSRN*, Jun. 2023. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4471793>.
- [27] W. Chu, et al., "Research on Gesture Guidance and Teaching of Cooperative Robot Based on Nine-axis AirMouse", 2023 9th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering (ICMRE), Shenzhen, China, Feb. 2023. <https://doi.org/10.1109/ICMRE56789.2023.10106524>.
- [28] A. Izadbakhsh, N. Nikdel, and A. Deylami, "Adaptive control of cooperative robots in the presence of disturbances and uncertainties: A Bernstein-Chlodowsky approach", *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, Vol. 46, No. 14, pp. 14922-14946, May 2023. <https://doi.org/10.1002/mma.9354>.
- [29] D. Sirintuna, I. Ozdamar, and A. Ajoudani, "Carrying the uncarriable: a deformation-agnostic and human-cooperative framework for unwieldy objects using multiple robots", 2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), London, United Kingdom, Jun. 2023. <https://doi.org/10.1109/ICRA48891.2023.10160677>.
- [30] E. Ng, Z. Liu, and M. Kennedy, "It Takes Two: Learning to Plan for Human-Robot Cooperative Carrying", 2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), London, United Kingdom, Jun. 2023. <https://doi.org/10.1109/ICRA48891.2023.10161386>.
- [31] B. Şenbaşlar, W. Hönig, and N. Ayanian, "RLSS: real-time, decentralized, cooperative, networkless multi-robot trajectory planning using linear spatial separations", *SpringerLink, Autonomous Robots*, May 2023. <https://doi.org/10.1007/s10514-023-10104-w>.
- [32] H. Hanai, et al., "Advanced Musical Saw Manipulation by an Industrial Cooperative Humanoid Robot with Passive Sound Feedback", *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 35, No. 3, pp. 711-722, Jun. 2023. <https://doi.org/10.20965/jrm.2023.p0711>.
- [34] M. Rinaldi, M. Caterino, and M. Fera,

- "Sustainability of Human-Robot cooperative configurations: findings from a case study", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 182, Aug. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109383>.
- [35] X. Zhao, et al., "A Dual-Arm Robot Cooperation Framework Based on a Nonlinear Model Predictive Cooperative Control", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, pp. 1-13, Apr. 2023. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2023.3263357>.
- [36] A. Borboni, et al., "The Expanding Role of Artificial Intelligence in Collaborative Robots for Industrial Applications: A Systematic Review of Recent Works", *Machines*, Vol. 11, No. 1, Jan. 2023. <https://doi.org/10.3390/machines11010111>.
- [37] M. Sileo, "Collaborative and Cooperative Robotics Applications using Visual Perception", *IRIS*, 8.1 Tesi di dottorato, Mar. 2023.
- [38] A. Hameed, et al., "Control System Design and Methods for Collaborative Robots", *Applied Sciences*, Vol. 13, No. 1, Jan. 2023. <https://doi.org/10.3390/app13010675>.
- [39] X. Yang and H. Yu, "Optimized Cooperative Control of Error Port-Controlled Hamiltonian and Adaptive Backstepping Sliding Mode for a Multi-Joint Industrial Robot", *Mathematics*, Vol. 11, No. 6, Mar. 2023. <https://doi.org/10.3390/math11061542>.
- [40] L. Guo, "An integrated design method of robot intelligent joints based on artificial intelligence", *International Conference on Computer Graphics, Artificial Intelligence, and Data Processing (ICCAID 2022)*, Vol. 12604, May 2023. <https://doi.org/10.1117/12.2674672>.
- [41] J. Roohollah, S. Masoud, J. Rickli, and A. Djuric, "Human-robot interactions in manufacturing: A survey of human behavior modeling", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 78, Dec. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102404>.
- [42] A. C. Simões, et al., "Designing human-robot collaboration (HRC) workspaces in industrial settings: A systematic literature review", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 62, pp. 28-43, Jan. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.11.007>.
- [43] Z. Zhang, et al., "A high-fidelity simulation platform for industrial manufacturing by incorporating robotic dynamics into an industrial simulation tool", *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 7, No. 4, pp. 9123-9128, Oct. 2022. <https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3190096>.
- [44] B. Zhou, et al., "Multi-robot multi-station cooperative spot welding task allocation based on stepwise optimization: An industrial case study", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 73, Feb. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102197>.
- [45] E. P. G. Bruun, S. Adriaenssens, and S. Parascho, "Structural rigidity theory applied to the scaffold-free (dis) assembly of space frames using cooperative robotics", *Automation in Construction*, Vol. 141, Sep. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104405>.
- [46] T. Caporaso, S. Grazioso, and G. D. Gironimo, "Development of an integrated virtual reality system with wearable sensors for ergonomic evaluation of human-robot cooperative workplaces", *Sensors*, Vol. 22, No. 6, Mar. 2022. <https://doi.org/10.3390/s22062413>.
- [47] D. Diachenko, et al., "Industrial collaborative robot Digital Twin integration and control using Robot Operating System", *Journal of Machine Engineering*, pp. 57-67, Feb. 2022. <https://doi.org/10.36897/jme/148110>.
- [48] S. Hjorth and D. Chrysostomou, "Human-robot collaboration in industrial environments: A literature review on non-destructive disassembly", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 73, Feb. 2022.
- [49] Liu, Linlin, et al. "Design of Warehouse Cooperative Robot System Based on ZigBee."

Proceedings of the 11th International Conference on Computer Engineering and Networks. Springer Singapore, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102208>.

- [50] R. G. Lins and S. N. Givigi, "Cooperative robotics and machine learning for smart manufacturing: Platform design and trends within the context of industrial internet of things", IEEE Access, Vol. 9, pp. 95444-95455, Jul. 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3094374>.
- [51] M. Ronzoni, et al., "A support-design framework for Cooperative Robots systems in labor-intensive manufacturing processes", Journal of Manufacturing Systems, Vol. 61, pp. 646-657, Oct. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.008>.
- [52] A. Bonci, et al., "Human-robot perception in industrial environments: A survey", Sensors, Vol. 21, No. 5, Feb. 2021. <https://doi.org/10.3390/s21051571>.
- [53] Z. Li, S. Li, and X. Luo, "An overview of calibration technology of industrial robots", IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, Vol. 8, No. 1, pp. 23-36, Jan. 2021. <https://doi.org/10.1109/JAS.2020.1003381>.

저자소개

최 정 호 (Jeongho Choi)



2003년 : 부산대학교 기계공학부 (학사)
 2015년 : 부산대학교 기계설계시스템 (석사)
 2020년 : 울산광역시장상 3D프린팅 소프트웨어 개발 공헌
 2015년 ~ 2022년 :

자동화설비설계팀 설비제작과장, 로봇기술과장
 2023년 ~ 현재 : 현대모터스그룹 자동화기술부 부서장
 관심분야 : 스마트공장, 생산공장 자동화, 제조형 메타버스 소프트웨어개발, 생산공정최적화, 디지털트윈, 빅데이터, 지능화, 생산효율성, 작업효율화

김 낙 일 (Nakil Kim)



2010년 : 건국대학교 컴퓨터공학 (석사)
 2016년 : 건국대학교 경영공학 (박사)
 2023년 ~ 현재 : 슈타겐 대표 아키텍트
 관심분야 : 스마트공장, 디지털전환, 소프트웨어공학, 디지털트윈, 인공지능, 산업공학

김 원 현 (Wonhyun Kim)



2003년 : 한양대학교 도시학(석사)
 2007년 : 독일 하펜시티 함부르크 대학교(박사과정)
 2012년 : 국토연구원 책임연구원
 2023년 ~ 현재 : 슈타겐 대표이사
 관심분야 : 디지털전환, 산업형 메타버스, 디지털트윈, 스마트공장

윤 승 정 (SeongJeong Yoon)



2010년 : 건국대학교 정보통신대학원 정보시스템관리전공(공학석사)
 2014년 : 경희대학교 경영대학 경영정보시스템 전공 경영학 (박사)
 2014년 ~ 2022년 :

기술/경영/정책전략 컨설팅 수행
 2023년 : 슈타겐 수석컨설턴트, 중앙대학교 경영경제대학교 강사
 관심분야 : 클라우드 서비스, 빅데이터, 협동로봇, 인공지능, 산업공학, 데이터시각화, 네트워크 분석, 프로파일링(특성 및 트렌드) 분석, 스마트시티