



대량맞춤화를 실현하는 인공지능 기반 인간-로봇 협업

김 송 이*

Abstract

대량맞춤화 전략은 처음 그 개념의 등장 이후, 기존에 전세계를 지배했던 생산 패러다임인 대량생산을 대체할 전략으로 기대되며 학계에서 활발한 논의가 이루어졌다. 하지만 아직 산업계에서는 대량맞춤화 전략을 채택해 성공적으로 수행하는 기업이 많지 않다. 대량맞춤화 전략의 제품 다양화로 인해 발생하는 복잡한 데이터를 처리하고 변화하는 환경에서 신속히 의사결정을 내릴 수 있는 역량을 갖추기가 까다롭기 때문이다. 하지만 인공지능 기술의 발달로 대량맞춤화는 기업의 성공적인 전략으로의 실현을 앞두고 있다. 본 고에서는 대량맞춤화 전략을 소개하고 이를 실현하는 기술 중 하나로 인간-로봇 협업에 초점을 맞추어, 인공지능이 이를 어떻게 고도화하고 궁극적으로 기업이 대량맞춤화 목표를 달성하는 데 기여할 수 있을지 살펴보고자 한다.

I. 서론

대량맞춤화(mass customization) 전략은 1980년대 후반, 이전까지 시장에 쏟아져나온 동종의 제품에 대해 소비자들이 진부함을 느끼기 시작하면서 등장했다. 하지만 이전까지 소품종의 제품을 대량으로 생산하던 대량생산(mass production) 기업들은 아직 시장에서 원하는 다양한 제품을 생산할 역량을 갖추지 못하고 있었다. 따라서 대량맞춤화에 관한 논의는 그 개념이 처음 등장하고 2000년대 초반까지 대량맞춤화의 전략, 마케팅적 관점에서 주로 이루어졌으며, 2010년대 후반에 들어서 관련 기술의 발전에 힘입어 구체적이고 실현

* 인하대학교 물류전문대학원, BK21 디지털 전환 시대 사회적 격차 해소 물류 교육연구단 박사후연구원,
songi.mon.kim@gmail.com

가능한 운영 및 적용방안에 관한 논의가 이루어지고 있다(Kim & Lee 2023).

대량맞춤화 전략에서는 기업이 다루어야 하는 제품의 종류가 다양해질수록 그것을 효율적으로 관리하기 위해 고려해야 할 요인들이 기하급수적으로 증가하여 관리자의 복잡도를 증가시키는 문제가 발생한다. 예를 들어, 이상적인 대량맞춤화 환경에서는 기업이 생산하는 제품의 종류가 늘어나더라도 유연한 생산시스템이 이를 뒷받침하여 비용에 큰 타격을 주지 않고(혹은 효율을 무너뜨리지 않고) 다양한 제품 종류를 다룰 수 있어야 한다. 하지만 지금까지의 생산기술들은 여전히 다품종의 제품을 생산할수록 비효율성이 급격히 증가시키는 수준에 머물러 있어서, 기업은 대량맞춤화 전략의 두 가지 목표인 '낮은 비용'과 '유연성' 중에서 '낮은 비용'을 택하는 것이 훨씬 유리한 상황이다. 따라서 학계에서 대량맞춤화에 대한 논의가 시작된지 약 40년이 다 되어감에도 불구하고 현실적으로 기업들은 대부분 여전히 기존의 대량생산체제를 유지하고 있다.

한편, 복잡한 데이터를 처리하고 의사결정을 내리는 데 도움을 주는 인공지능 기술이 급격히 발전함에 따라, 대량맞춤화 연구자들은 인공지능 기술을 통해 성공적인 대량맞춤화 패러다임으로의 전환이 앞당겨질 것으로 다시금 기대하고 있다. 특히 기계학습, 빅데이터 처리기술, 지식그래프(knowledge graph)와 같은 기술들은 대량맞춤화 환경에서 생산기업이 마주하는 다양한 맞춤주문과 제품 정보를 처리하고 이를 토대로 단기간에 효율적인 의사결정을 내릴 수 있도록 지원할 수 있어서 대량맞춤화를 실현하는 주요한 기술 중 하나로 주목받고 있다(Kim & Lee, 2023).

인공지능 기술은 다양한 분야에서 대량맞춤화 기업을 지원할 수 있다. 고객의 여러 가지 상황을 고려한 수요예측, 개별 고객의 요구사항을 반영한 맞춤화 제품 설계, 맞춤화 제품 생산, 맞춤 배송전략, 판매 후 고객서비스 등 다양한 분야에서 업무를 효율화함으로써 복잡한 데이터로부터 빠른 의사결정을 내릴 수 있게 돕는 것이다.

그 중에서도 본 원고는 인간-로봇 협업(Human-robot collaboration)에서 인공지능의 역할에 초점을 맞추고자 한다. 인간-로봇 협업은 대량맞춤화의 본질에 해당하는, 다양한 제품을 생산하는 과정에서 대량맞춤화의 두 가지 목표인 유연성과 효율성을 모두 달성할 수 있게 하는 핵심 기술로 꼽히기 때문이다.

본 원고에서는 먼저 독자들의 이해를 돕기 위해 전세계적인 생산 패러다임으로서의 대량맞춤화 개념의 등장과 대량맞춤화 전략의 목표를 소개하고자 한다(II장). 그 다음으로 대량맞춤화를 실현할 핵심 기술로 꼽히는 인간-로봇 협업 분야와, 이를 고도화할 수 있는 인공지능 기술에 관한 연구를 소개(III)하고, 여전히 남아있는 한계를 언급하고자 한다.

II. 대량맞춤화의 실현

1. 대량맞춤화 개념의 등장

대량맞춤화의 개념은 19세기 이후 전세계적으로 가장 보편화된 생산전략인 대량생산을 위한 기술의 성장속도가 정점을 이룬 1980년대 후반에 등장했다. 대량생산 전략은 제품의 종류를 소품종으로 한정하여 대량으로 생산함으로써 규모의 경제(economy of scale)를 통해 각종 효율을 높이고 제품 1단위를 생산하는 데 드는 비용(단위비용, unit cost)을 최소화하여 순수익을 남기는 전략을 말한다. 즉, 기업이 제품 한 품종을(시장수요가 받아들이는 한) 더 많이 생산할수록 제품 하나를 만드는 데 드는 비용(unit cost)은 대체로 낮아지기 때문에, 기업은 대량으로 제품을 생산한 다음 적극적으로 마케팅을 펼쳐 시장에 판매하는 방식으로 수요를 확보했다.

대량생산 전략의 출현 후 약 2세기가 지난 1990년대 말까지도 시장의 소비자들은 ‘다른 사람이 가지고 있는 제품을 나도 갖고 싶어하는’ 심리가 지배적이었다(Pine 1993a). 이렇게 비슷한 수요로 구성된 동종의(homogeneous) 시장은 생산기업의 관점에서 다소 안정적인 수요로 받아들여졌기 때문에, 기업은 수요를 예측하고 이에 맞게 제품을 생산할 계획을 세울 수 있었다. 간혹 시장의 대세와 다른 특이한 수요(niche market)가 있다 하더라도 그 비율은 극히 낮았으므로 대량생산 기업은 이를 외면하고 주력제품을 생산하는데 초점을 맞추는 것만으로도 수익을 내기에 충분했다.

이처럼 수요가 안정적인 상황에서는 신제품이 출시되고 시장이 포화되기까지 지금보다 더 오랜 시간이 걸렸기 때문에 자연스럽게 일반적인 제품의 수명주기¹⁾는 지금에 비해 상대적으로 길었고, 기업은 신제품 개발에 서두를 필요가 없었다. 대신, 기업은 제품의 긴 수명주기동안 더 효율적으로 제품을 생산할 수 있는 방법을 찾는 데에 집중했다.

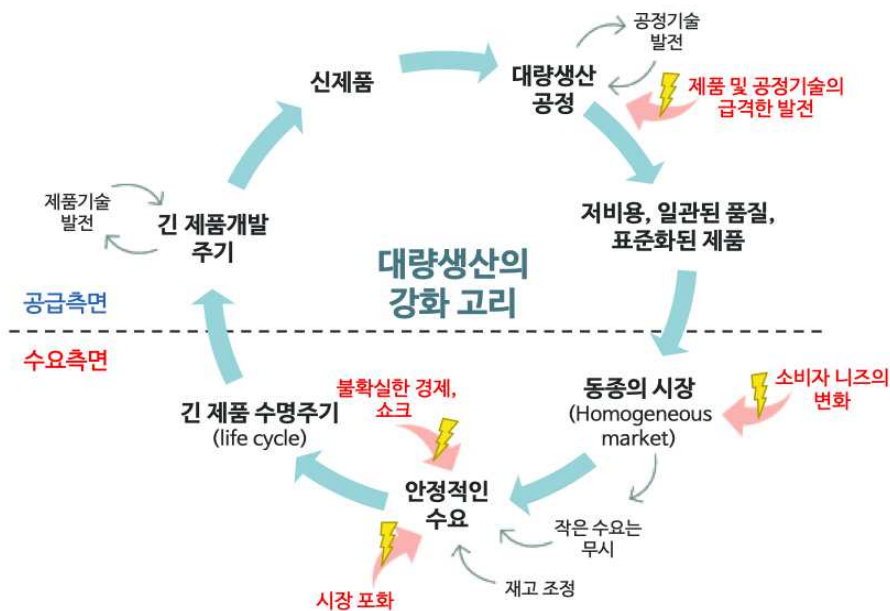
당시 대량생산 기업들의 생산시스템과 공정은 대개 한정적인 종류의 제품을 대량으로 생산하는 데에 적합하도록 설계되었다. 모든 작업을 규격화하고, 불필요한 작업을 제거하며, 가능한 작업을 자동화할수록 해당 제품을 생산하는 효율은 더욱 높아져서 기업은 빠른 시간 안에, 낮은 비용으로 더 많은 제품을 생산할 수 있게 되었다. 그 결과 기업은 규모의 경제에 따라 제품 1단위를 만드는 데 드는 비용이 낮아지는 것은 물론, 제품의 품질을 일정한 수준으로 유지할 수 있었다. 제품의 단위 생산비용이 낮아짐에 따라 기업은 제품의 판

1) 제품이 시장에 도입되고 성장하며 성숙된 다음 쇠퇴에 이르는 과정

매 가격을 낮춰도 마진을 유지할 수 있었기 때문에, 대량생산 기업은 제품 가격을 낮춰 더 많은 고객을 확보하기 위해 노력했다.

소비자 측면에서도 품질은 비슷하면서 가격이 낮은 제품은 인기가 많았다. 이러한 제품은 동종의 니즈를 가진 시장에서 다시금 크고 안정적인 수요를 확보할 수 있었다. 이로써 대량생산 전략은 동종의 시장 특성으로부터 시작해 안정적인 수요, 긴 제품 수명주기와 제품 개발주기, 대량생산에 적합한 공정, 낮은 가격과 일관된 품질의 제품, 그리고 다시 동종의 시장을 바탕으로 하는 안정적인 수요로 이어짐으로써 대량생산 전략을 지속적으로 강화하는 강화고리가 완성되었다. [그림 1]의 가운데 원형 고리는 대량생산의 강화 고리를 나타낸 것이며, 이는 지난 2세기 동안 동종의 니즈를 가진 시장과 안정적인 수요를 바탕으로 유지되었다.

그림 1 대량생산의 강화고리와 이를 붕괴시키는 요인들



자료: Pine(1993a)을 재구성

하지만 시간이 지나 시장은 점차 다변화되어 대량생산의 강화 고리에 틈이 벌어지기 시작한다. 이는 [그림 1]의 붉은 글씨로 표시된 외부 요인들로 나타나 있다. 먼저 수요의 측면에서, 지난 2세기 동안 대량생산 방식으로 시장에 쏟아져나온 소품종의 제품들로 시장은 포화상태가 되었다. 또한 다양한 산업의 발달로 사람들의 직업은 갈수록 세분화된 영역으로 나뉘며 개인의 생활양식은 몇 가지로 한정할 수 없을 만큼 다양해졌다. 이에 따라 소비

자는 더 이상 ‘다른 사람이 가지고 있는 제품을 나도 갖고 싶어하는’ 공통의 니즈를 가진 존재가 아니라, ‘남다른 제품을 갖고 싶어하는’ 니즈를 가진 존재가 되었다. 따라서 시장은 점차 색다른 것을 원하는 소비자의 비율이 높아졌다.

갈수록 다변화되는 수요에 발맞춰, 기업은 생산기술의 급격한 발전을 바탕으로 생산하는 제품의 종류를 점차 늘리면서도 기존의 대량생산 방식에서 달성했던 높은 생산효율을 어느 정도 유지하는 것이 가능해졌다. 특히 정보통신기술의 발전으로 생산공장에서 여러 제품을 생산할 때 고려해야 하는 정보들을 수집하고 처리하는 과정이 단축되었다. 이에 따라 생산 환경은 하나의 제품을 만드는 데 최적화된 기계가 아니라 여러 작업을 유연하게 처리할 수 있는 로봇으로 대체되기 시작했고, 그 결과 대량생산기업은 규모의 경제에 더하여 범위의 경제(economy of scope)²⁾를 실현하는 ‘대량맞춤화’ 기업으로 발돋움하게 된다.

2. 대량맞춤화의 목표

대량맞춤화의 개념이 등장한 이래로, 많은 학자들은 대량맞춤화가 19세기 이후 가장 지배적인 생산전략이었던 대량생산을 대체할 잠재력을 가지고 있는지 파악하고자 대량맞춤화에 대한 정의를 내리고 이를 달성하기 위한 경영전략을 제안하였다. 대량맞춤화 개념을 소개할 때 가장 많이 인용되는 문헌 중 하나에서는 대량맞춤화 전략을 저비용생산으로 높은 다양성, 심지어 개인에게 맞춤화된 상품과 서비스를 제공하는 것이라고 말한다(Pine, 1993). 그 외에도 [표 1]은 대량맞춤화에 대한 다양한 정의를 요약해 보여주고 있는데, 대량맞춤화를 특징짓는 요소로 ‘제품다양성’, ‘유연성’, 그리고 ‘비용효과(cost-efficiency)’를 공통적으로 언급하고 있다.

표 1 대량맞춤화 개념의 정의

저자(연도)	정의
Pine(1989)	낮은 가격에 다양한, 심지어는 개인별로 맞춤화된 제품과 서비스를 생산하는 것
Hart(1995)	고객에게 그들이 원하는 것을 원하는 때에, 원하는 곳에서, 원하는 방식으로 수익성 있게 제공할 수 있는 능력
Da Silveira, et al.(2001)	유연한 프로세스를 통해 대량의 맞춤화 제품과 서비스를 합리적인 비용으로 제공할 수 있는 능력

자료: 저자 구성

2) 범위의 경제는 기업이 여러 재화나 서비스를 함께 생산할 때 발생하는 총 비용이 별도의 기업이 생산했을 때의 총비용보다 작아지는 경우를 뜻한다.

즉, 대량맞춤화 전략은 기존의 대량생산 전략에서 그랬던 것처럼 효율을 높여 비용을 낮추는 것에, 유연성(flexibility)과 빠른 대응(quick responsiveness)능력을 더하여 제품 다양화(혹은 맞춤화)를 구현하는 것이다. 즉, 대량맞춤화 기업들은 대량생산의 목표에서처럼 제품의 설계, 개발, 생산, 조립, 포장 및 배송에 이르는 전단계에서 효율을 높이고자 노력함과 동시에, 다양한 제품을 다루어야 하기 때문에 변화하는 상황에 유연하고 기민하게 대응할 수 있도록 해야 한다.

표 2 대량생산 전략과 대량맞춤화 전략의 비교

구분	대량생산	대량맞춤화
핵심	안정성과 통제를 통해 효율 증대	유연성과 빠른 대응을 통해 제품다양성과 맞춤화 제공
목표	제품과 서비스의 개발, 생산, 마케팅, 배송을 충분히 낮은 가격에 제공함으로써 가능한 많은 사람이 구입하도록 함	제품과 서비스의 개발, 생산, 마케팅, 배송을 적당한 가격에 제공하고, 충분한 다양성과 맞춤화를 제공함으로써 가능한 많은 사람이 자신이 원하는 것을 찾을 수 있도록 함
특징	<ul style="list-style-type: none"> • 수요가 안정적임 • 거대한 동종의(homogeneous) 시장 • 저비용, 일정한 품질, 표준화된 제품과 서비스 • 제품개발 주기가 김 • 제품의 수명주기가 김 	<ul style="list-style-type: none"> • 수요가 파편화됨 • 이종의(heterogeneous) 틈새 시장 • 저비용, 고품질의 맞춤화된 제품과 서비스 • 제품개발 주기가 짧음 • 제품의 수명주기가 짧음
제품	표준화된 제품	표준화된 모듈을 고객의 수요에 맞게 조립해서 제품 완성

자료: Pine et al.(1993), Pine(1993), Kotha(1995)의 자료를 재구성

물론 모든 대량맞춤화 기업이 고도로 맞춤화된 제품을 판매하는 것은 아니다. 기존의 표준화된 제품을 대량생산해서 분배(판매)하는 과정에서 약간의 맞춤화를 하기도 하고, 표준화된 부품을 조립하는 과정에서 차이를 두어 서로 다른 완제품들을 만들기도 한다. 좀 더 나아가면 부품을 만드는 단계에서 일부 부품을 맞춤제작해 재단된(tailored) 맞춤화를 하기도 하고, 가장 고도화된 맞춤 서비스를 제공하는 기업은 제품의 설계 단계에서부터 고객의 니즈를 반영한 순수 맞춤화 제품을 설계해 만든다. 반드시 고도의 맞춤화된 제품을 제공하는 것이 아니라, 기업이 해당 제품에 대한 시장의 다양화, 혹은 맞춤화에 대한 수요가 얼마인지 먼저 파악한 것을 토대로 맞춤화 수준을 결정하는 것이다.

만약 시장에서 다양화, 혹은 맞춤화에 대한 수요가 있고, 시장이 이를 받아들일 준비가 되어있다면 기업은 제품 다양성을 더 높이는 것을 고려할 수 있다. 이를 위해서는 기업이 설정한 맞춤화 수준에 맞게 가치사슬을 설계해야하며, 제품 자체도 맞춤화가 가능하도록

설계되어야 한다. 그리고 이를 실현하기 위해서는 반드시 생산시스템이 유연하고 기민하게 움직일 수 있어야 하며, 다양한 정보가 빠르게 공유되어야 한다(Silveira et al. 2001). 바로 이러한 측면에서 대량맞춤화 기업은 인간-로봇 협업을 통해 생산의 유연성을 높이고, 인공지능 기술을 통해 다양한 정보를 빠르게 공유하고 처리함으로써 대량맞춤화를 실현할 수 있다.

Ⅲ. 인공지능을 통한 인간-로봇 협업 고도화

1. 인간-로봇 협업과 대량맞춤화

생산시스템에 협력형 로봇의 개념이 처음 등장(Colgate et al. 1996)하기 전까지 대부분의 대량생산 공장은 하나의 제품을 효율적으로(대량으로) 생산하기 위해 해당 제품을 만드는 데 공정과 장비를 최적화하고 자동화하여 운영하는 것이 중요했다. 특히 초기의 자동화 컨베이어벨트 생산라인에서는 하나의 제품을 생산하는 데 가장 효율적인 방법으로 공정이 짜여졌고, 각 작업단계에서는 작업자 혹은 기계가 해당 작업을 가장 효율적으로 수행할 수 있는 형태로 작업방식이 고정되었다. 이러한 형태는 단일 품종을(가급적) 끊임없이 대량으로 생산하기에는 적합했지만, 만약 생산하고자 하는 제품의 종류를 바꾸기 위해서는 생산라인 전체를 새로운 제품에 맞게 변경하고 각종 기계의 설정을 바꾸는 기간이 필요하다. 따라서 기존의 대량생산 전략에서는 생산하는 제품의 품목을 바꾸는 것을 가급적 최소화하는, 비유연한 형태로 운영하는 것이 일반적이었다.

이후 생산시스템에 로봇이 도입되고 인간-로봇 협업 방식이 채택되기 시작하면서 기업은 좀더 다양한 제품을 유연하게 생산할 수 있는 대처능력이 높아졌다. 인간-로봇 협업의 개념은 목적에 맞게 설계된 로봇 시스템과 작업자가 협력 작업장에서 동시에 작업을 수행하는 것을 말한다(Wang, et al. 2019). 즉, 두 구성원(인간과 로봇)의 장점을 결합함으로써 기존 대량생산에서는 서로 상충되는 목표로 여겨졌던 효율성과 유연성을 동시에 높일 수 있다는 것이다.

로봇의 장점은 인간 작업자에 비해 반복작업에 능하며, 인내력이 있고, 강하며, 위험한 환경에서도 작업이 가능하다는 것이다. 따라서 로봇을 사용하면 작업 효율을 높이고 품질 관리를 용이하게 할 수 있다. 한편 인간 작업자는 인간의 인지능력과 경험을 통해 변화하는 환경에서 빠르게 상황과약을 하고 의사결정을 내리는 등 변화에 대한 대처능력이 높다

는 특징이 있다. 따라서 인간 작업자는 만약 생산해야 할 제품의 종류가 바뀌더라도 짧은 시간 내에 적응하여 생산품목과 작업조건을 바꾸는 것이 가능하다. 한 예로, Krüger et al.(2009)의 연구에서는 부품을 조립해 제품을 만드는 단계에서 인간-로봇 협력을 하는 것이 작업자가 없는 완전 자동화 조립라인에 비해 작업내용이 바뀌는 상황에 더 잘 적응하는 것으로 나타났다.

초기의 인간-로봇 협력 관계에서는 인간 작업자가 보조도구로서 로봇을 사용하는, 상호 협조적인 관계에 머물렀다. 작업환경(또는 조건)이 바뀌면 작업자는 이를 인지하고 그에 맞게 로봇의 작업설정을 변경한 다음 작업을 이어나갔다.

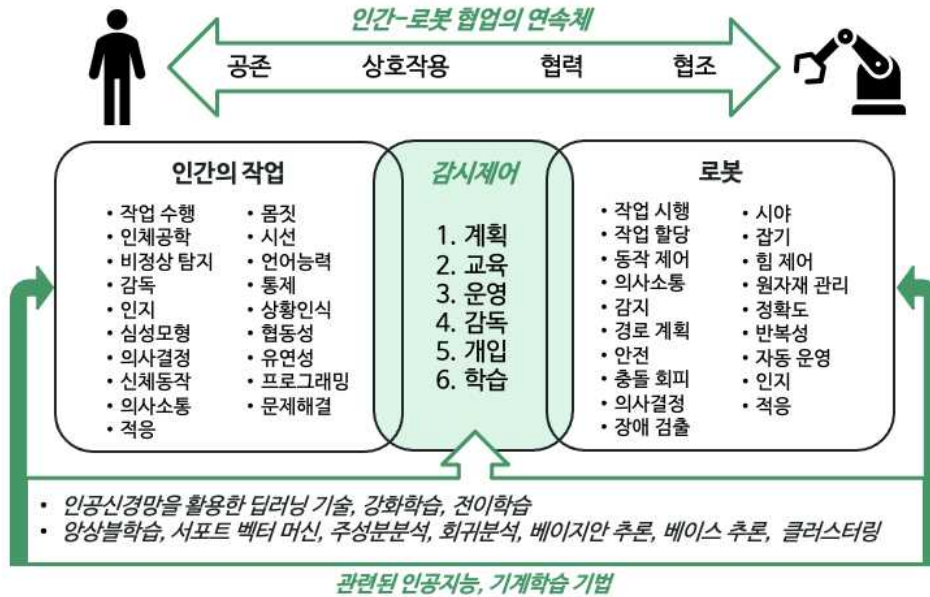
하지만 최근에는 로봇 기술의 발달로 협력형 로봇이 더욱 작업자 친화적인 형태로 개발됨에 따라 간단한 조작만으로도 로봇이 다양한 작업을 수행하도록 할 수 있게 되었다. 그에 따라 인간-로봇 협업은 대량맞춤화의 관점에서 필수적인 '다양한 제품을 효율적이면서 유연하게 생산 할 수 있는 핵심 기술' 중 하나로 더욱 주목받고 있다. 인간-로봇 협업은 비단 제품의 조립 단계 뿐만아니라 부품의 생산, 제품의 포장, 배송준비 등 전 단계에 적용 가능한 기술이기 때문에, 그 효과가 무궁무진할 것으로 기대되고 있다.

2. 인간-로봇 협업을 고도화하는 인공지능 기술

이러한 인간-로봇 협업 관계는 인공지능을 도입을 앞두고 한차례 더 높은 성장을 앞두고 있다. 인공지능은 인간과 로봇 각각의 장점을 극대화함과 동시에 두 구성원이 더욱 긴밀하고 효율적으로 협업할 수 있도록 돕는 가교 역할을 한다([그림 2]). 협업에 필요한 각종 소통과 의사결정을 원활히 하게 됨으로써

인공신경망을 활용한 딥러닝 기술, 강화학습, 그 외의 다양한 인공지능 기술들은 인간과 로봇이 함께 적절한 계획을 수립하고, 새로운 상황을 교육하고, 수립된 계획대로 시스템을 운영·감독하고, 변수가 생겼을 때 개입하며, 변화하는 환경과 그에 대한 시행 결과를 학습하도록 돕는다. 이로써 인간과 로봇은 초기 인간-로봇 협업에서 보았던 단순한 협조 관계를 넘어서서 인공지능을 통해 함께 생산시스템을 감시, 제어하며 작업하는 공존 관계를 실현할 수 있게 된다.

그림 2 인간-로봇 협업을 고도화하는 인공지능의 역할



자료: Arinez et al.(2020)의 자료를 재구성

인공지능 기술을 바탕으로 한 긴밀한 인간-로봇 협업 관계는 특히 대량맞춤화를 위한 기업의 생산환경에서 필수적인 요소가 될 것으로 보인다. 앞서 II장에서 설명한 것처럼 대량맞춤화 환경에서는 제품의 종류가 그저 몇 가지로 늘어나는 것에 그치지 않고, 다양한 맞춤화 요구사항으로 인해 제품의 종류는 급격히 다양해질 수 있다. 제품의 종류가 다양해질수록 생산시스템을 관리하고 운영하기 위해 고려해야 할 요인들은 기하급수적으로 늘어나서 관리를 복잡하게 만든다.

이처럼 극도로 다양한 제품들을 생산하기 위해서는 매우 유연하고도 효율적인 생산시스템이 필요하다. 인공지능은 이처럼 끊임없이 변화하는 생산환경에서도 적절한 계획, 교육, 운영, 감독, 개입, 학습과 같은 감시제어 지원이 가능하다. 다음은 대량맞춤화 환경에서 인간-로봇 협업을 고도화하는 인공지능의 역할과 가능성을 [그림 2]의 감시제어 영역 구분에 따라 살펴보고자 한다.

□ 계획과 교육

먼저 대량맞춤화 환경에서 인공지능은 작업자가 별도로 로봇의 작동계획을 설정하지 않더라도 로봇이 필요한 계획을 적절히 수립하고 이를 교육함으로써 효율을 높일 수 있다. 한 예로, Huang & Mutlu(2016)가 개발한 예측통제(anticipatory control) 기법은 인간-로봇 협업에서 인간 작업자가 작업을 수행하는 동안 작업자의 시선 패턴을 분석하여 작업자

의 의도를 예측하고, 이를 토대로 로봇의 행동 계획을 수립하도록 한다. 즉, 작업자가 로봇에게 별도의 명령을 입력하지 않아도 로봇이 작업자의 의도에 맞게 반응하여 다음 작업을 수행하는 것이다. 이러한 기술은 다양한 제품을 생산하는 환경에서 작업 순서나 조건이 달라지더라도 흐름에 끊김 없이 작업을 이어나갈 수 있게 한다. 예를 들어, 작업자가 기존에 부품 A에 작은 부품 1과 2를 순서대로 결합하다가, 작업대상이 바뀌어 부품 A가 아니라 B에 작은 부품 2와 1을 순서대로 결합해야 하는 순간이 왔다고 가정하자. 이러한 상황에서 인공지능 기술은 작업자가 작은 부품 2와 1을 순차적으로 응시하는 것 만으로도 로봇이 해당 부품들을 그 순서에 맞게 가져다 결합하는 계획을 세우도록 지원하는 것이다.

또한 Doltsinis et al.(2020)의 사례와 같이 머신러닝 기법을 활용해 성공적으로 부품을 조립하여 제품을 완성하는 작업방법을 찾고 이를 로봇에 전송하여 로봇을 교육할 수도 있다. 이 기술은 특히 단순히 눈으로는 부품이 온전히 결합되었는지 판단하기 어려운 조립작업을 대상으로 하고 있다. 로봇은 시각적으로 결합 성공여부를 알 수 없지만 인간 작업자는 결합 과정에서 발생하는 미세한 힘의 차이나 작은 소리를 바탕으로 잘 결합되었는지 알 수 있다. 이러한 기술을 활용하면 대량맞춤화 환경에서 작업자가 다루어야 하는 제품의 종류가 다양해지더라도 인간이 직접 복잡한 작업방법을 계산하지 않아도 되는 것은 물론 상황에 따라 로봇은 이전에 학습한 내용을 바탕으로 자동으로 작동계획을 바꿈으로써 작업 흐름에 대한 방해를 낮추고 높은 생산효율을 유지할 수 있다.

□ 운영과 감독, 개입

이렇게 인공지능을 통해 대량맞춤화 환경에 적합한 계획을 수립하고 인간과 로봇에게 교육한 다음에는 실제 생산과정을 운영하는 단계가 진행된다. 이 단계에서 인공지능은 앞서 수립한 계획(혹은 실시간으로 수립되는 계획)에 맞게 생산시스템이 운영되는 것을 보조하고, 그 과정을 감독하는 것을 도우며, 이상상황이 발생했을 때 인간-로봇이 빠르게 시스템에 개입하여 상황을 바로잡을 수 있도록 지원한다.

한 예로 Károly et al.(2018)은 비지도학습(unsupervised learning) 기법 중 하나인 원-클래스 서포트 벡터 머신(one-class support vector machine)을 사용해 실시간 작업자의 장력, 토크 데이터를 자동으로 분류함으로써, 현재 인간 작업자의 작업시간 변동 폭이 얼마나 되는지 실시간으로 파악할 수 있도록 하였다. 이는 인간-로봇 협력에서 로봇이 어느 정도의 자율성을 가지고 움직이는 경우가 있어서, 작업에 대한 동작분석을 하기 위한 데이터를 수집하기가 까다로워졌다는 문제에서 출발했다. 연구자들은 이 기술을 통해 작업시간 변동 폭을 파악할 수 있을 뿐만 아니라 생산계획, 통제, 품질관리 측면에서도 인간-로봇

협력 동작 데이터를 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

또한 Reimann & Sziebig(2019)는 보다 높은 차원에서 인간-로봇의 층위를 상위 단계의 글로벌 공장의 역할과 연계하는 프레임워크를 제시하였다. 또한 지도학습 알고리즘을 통해 인간-로봇 협업 작업단위에서 수집되는 데이터를 바탕으로 아직 알려지지 않았던(계획하지 않은) 운영 시나리오를 사전에 탐지할 수 있도록 하였다. 이 프레임워크는 인간-로봇 협력을 토대로 고도로 자동화된 시스템인 디지털 공장과 같은 환경을 염두에두고 설계된 것이다. 아직 그 개념을 소개하는 초기 단계의 연구이지만 향후 이를 토대로 쓰여진 후속 연구들에서는 대량맞춤화 환경의 효과적인 의사결정 지원도구로서의 기능들이 더욱 구체화 될 것으로 기대한다.

이처럼 인간-로봇 협업 시스템에서 인공지능은 기존에 인간 작업자가 자신의 경험을 토대로 복잡하고 모호한 상황을 인지하고 해결책을 제시하던 것에서 나아가, 인공지능의 실시간 데이터 처리 역량을 통해 보다 쉽고 빠르게 의사결정을 내릴 수 있게 돕는다. 이러한 인공지능의 역량은 매우 다양한 작업들을 처리해야하는 대량맞춤화 환경에서 빠르게 새로운 상황을 파악하고 이상상황을 탐지함으로써 복잡한 생산계획(조건)들을 원만하게 실행하는 데에 필수적인 역할을 할 것으로 보인다.

□ 학습

마지막으로 인공지능은 인간-로봇이 협력하는 과정 그 자체를 학습하는 데 도움을 줄 수 있다. 예를 들어 Nikolaidis et al.(2013)는 마코브 의사결정 프로세스(Markov decision process)를 활용해 인간 작업자의 행위의 바탕인 멘탈모델(mental model)과 로봇의 학습역량인 협동모델(teaming model)을 결합함으로써 인간과 로봇이 협력에 필요한 요소들을 쌍방향으로 학습할 수 있게 하였다. 해당 연구에서는 실험을 통해 작업자가 로봇을 사용하는 동안 수행전략을 바꾼 36번의 시도 중 6번을 분석하고, 작업자가 수행전략을 바꾸는 것이 로봇에게 불확실성 판단결과를 증가시키는 결과로 이어지는 것을 발견했다. 이러한 연구는 인간-로봇 협력에서 로봇이 작업자의 수행내용이 바뀌는 것을 위협으로 인식하도록 하는 모델을 개발한 것에서 의의가 있다. 즉, 작업자가 이전까지 하던 것과 다른 작업을 진행하는 것을 로봇이 불확실성 증가 또는 위협요소로 판단하도록 하는 것이다.

또한 Zhang et al.(2020)은 순환 신경망(Recurrent Neural Network; RNN)을 활용하여 인간의 움직임 궤적을 예측하고 몬테카를로 탈락 방법(Monte-Carlo dropout)으로 예측의 불확실성을 고려하여 로봇이 인간의 동작을 학습하고 다음 움직임을 예측하는 기법을 개발했다. 해당 연구는 실험을 통해 작업자가 테이블에서 스크류 드라이버를 집어 들고, 반대쪽

에 있는 로봇에게 건네주는 동작을 하고, 로봇이 인간의 움직임 궤적을 예측해서 로봇팔을 뺀어 작업자가 건네주는 드라이버를 받아 옆의 통에 담는 과정 등을 테스트했다. 이러한 기술도 마찬가지로 로봇이 학습을 통해 별도의 명령 없이 작업자의 동작에 맞게 움직이도록 함으로써, 로봇과 더욱 간편하게 협력할 수 있게 한다.

Wang et al.(2018)은 보다 넓은 시각에서 인간이 자연어를 사용해 로봇에게 지시를 내린 다음, 로봇이 강화학습(reinforce learning)을 통해 인간 작업자의 조립과정을 학습하는 교육-학습-협력(teaching-learning-collaboration; TLC) 모델을 개발했다. 이는 앞서 소개한 연구들에서 별도의 명령 없이 로봇이 작업자의 동작을 분석하고 판단하여 작동했던 것과 달리, 작업자가 음성으로 지시를 내린다는 점에서 차이가 있다. 물론 이 경우에는 작업자가 로봇에게 지시를 내리는 시간이 추가로 소요되지만, 작업자가 명확하게 지시를 내림으로써 로봇이 움직임 결과는 오차가 줄어들 수 있다. 또한 작업자는 음성 지시를 통해 로봇의 다음동작에 대해 안심하고 작업을 이어나갈 수 있다는 장점이 있을 것이다.

그 외에도 다양한 인공지능 기술들이 인간과 로봇의 협력에서 서로의 특성과 작업에 필요한 내용을 보다 효율적으로 학습하도록 지원함으로써 대량맞춤화 환경의 다변화하는 상황에 더욱 빠르게 대응하도록 지원할 것으로 보인다.

IV. 결론

대량맞춤화 전략은 시장의 수요가 점차 다양해지는 상황에서 매력적인 전략임에도 불구하고, 여전히 효율과 유연성을 함께 높일 수 있는 생산기술이 부족하여 잘 실현되지 못하고 있다. 하지만 다양한 제품을 다룸으로써 발생하는 복잡한 문제들, 특히 제품 생산 과정의 문제들은 인공지능 기술을 기반으로 한 인간-로봇 협업의 발전과 함께 상당부분 해결될 것으로 보인다.

물론 본 원고에서 소개한 연구 뿐만아니라 최근에는 인공지능 기반의 인간-로봇 협업이 다수 다루어지고 있다는 점에서는 고무적이거나, 아직 이를 대량맞춤화 환경을 직접 가정하고 접근한 연구는 드물다는 점에서 아쉬움이 있다. 또한 이처럼 이론적으로는 인간-로봇 협력 고도화 기술이 대량맞춤화 생산효율을 크게 개선할 수 있을 것으로 보임에도, 아직 대부분의 연구는 실험실 중심의 테스트에 한정된 수준에 머물러 있어서 실제 기업에서 이를 적용하기에 이르다는 한계가 있다.

한 예로, 영국의 전기자동차 스타트업인 어라이벌(Arrival)사는 기존의 자동차생산회사들이 그랬던 것 처럼 생산공장에 컨베이어벨트를 놓지 않고, 고객에게 가까운 여러 거점지역에 소규모 자동화 공장인 마이크로팩토리를 지어 로봇 기반의 셀형 생산³⁾을 구현함으로써 고객의 니즈에 맞는 다양한 종류의 차를 생산하고자 했다(Boudette 2021). 어라이벌 사의 이러한 혁신적인 전략은 전기자동차 생산 방식에 혁신을 일으킬 것으로 기대되었고, 우리나라 현대자동차 사 뿐만아니라 미국 물류업체 UPS사의 투자를 받는 등 한때 기업가치가 약 130억 달러 이상으로 추정되기도 했다.

하지만 이후 마이크로팩토리는 실재하지 않았던 것으로 밝혀져 2024년 1월 나스닥 상장에서 상장 폐지 되었으며 최근 본사가 있는 영국에서 사업을 철수하고 미국으로 옮기게 되었다(AutoView 2024). 이처럼 인간-로봇 협력을 통해 다양한 제품을 생산하기 위해서는 철저한 운영계획을 수립함과 동시에, 먼저 복잡한 데이터 처리와 의사결정을 지원할 수 있는 인공지능 기술이 현실에 적용가능한 수준으로 안정화되어야 할 것으로 보인다.

참고문헌

AutoView(2024. 1. 31), “현대차가 투자한 스타트업 어라이벌(Arrival), 나스닥 상장 폐지”.

<https://www.autoview.co.kr/news/articleView.html?idxno=90284>

Arinez, J. F., Chang, Q., Gao, R. X., Xu, C., & Zhang, J.(2020). Artificial intelligence in advanced manufacturing: current status and future outlook, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 142, 110804.

Boudette, N. E.(2021). An E.V. Start-Up Backed by UPS Does Away with the Assembly Line. *The New York Times*, April 21.

<https://www.nytimes.com/2021/04/21/business/arrival-electric-vehicles.html>

Colgate, J. E., Peshkin, M. A., & Wannasuphprasit, W.(1996). Cobots: Robots For Collaboration With Human Operators. In *1996 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*(Vol. 15281, pp. 433-439). American Society of Mechanical Engineers.

Da Silveira, G., Borenstein, D., & Fogliatto, F. S.(2001). Mass customization: Literature review and research directions. *International Journal of Production Economics*, 72(1),

3) 셀형 생산(cellular manufacturing)은 한 부품군을 생산하기 위하여 특성화되어 있는 기계들로 셀(cell)을 구성하여 생산하는 것을 말한다. 이때 부품군이란 부품 간 설계가 유사하거나 공통적인 제조 특징을 가진 부품들을 한데 묶은 것으로, 부품군 기반의 셀형 생산을 할 경우 하나의 셀 안에서 제조 속성이 거의 유사한 몇 종류의 부품을 큰 작업변경 없이 생산해낼 수 있다는 장점이 있다.

1-13.

- Doltsinis, S., Krestenitis, M., & Dougeri, Z.(2019). A machine learning framework for real-time identification of successful snap-fit assemblies. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 17(1), 513-523.
- Ferguson, S. M., Olewnik, A. T., & Cormier, P.(2014). A review of mass customization across marketing, engineering and distribution domains toward development of a process framework. *Research in Engineering Design*, 25, 11-30.
- Hart, E. W. L.(1995). Mass customization: conceptual underpinnings, opportunities and limits. *International Journal of Service Industry Management*, 6(2), 36-45.
- Huang, C. M., & Mutlu, B.(2016, March). Anticipatory robot control for efficient human-robot collaboration. In *2016 11th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction(HRI)*(pp. 83-90). IEEE.
- Károly, A. I., Kuti, J., & Galambos, P.(2018, February). Unsupervised real-time classification of cycle stages in collaborative robot applications. In *2018 IEEE 16th World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics(SAMI)*(pp. 000097-000102). IEEE.
- Kim, S. & Lee, K.(2023). The paradigm shift of mass customisation research, *International Journal of Production Research*, 61(10), 3350-3376.
- Kotha, S.(1995). Mass customization - implementing the emerging paradigm for competitive advantage. *Strategic Management Journal*, 16, 21-42.
- Krüger, J., Lien, T. K., & Verl, A.(2009). Cooperation of human and machines in assembly lines. *CIRP annals*, 58(2), 628-646.
- Nikolaïdis, S., Lasota, P., Rossano, G., Martinez, C., Fuhlbrigge, T., & Shah, J.(2013, October). Human-robot collaboration in manufacturing: Quantitative evaluation of predictable, convergent joint action. In *IEEE ISR 2013*(pp. 1-6). IEEE.
- Pine, B. J.(1993a), *Mass customization: the new frontier in business competition*, Harvard Business School Press, Boston, Massachusetts.
- Pine, B. J.(1993b). Mass customizing products and services. *Planning Review*, 21(4), 6-55.
- Pine, B. J., Pictor, B., & Boynton, A. C.(1993). Making mass customization work. *Harvard Business Review*, 71(5), 108-119.
- Reimann, J., & Sziebig, G.(2019). The intelligent factory space-a concept for observing, learning and communicating in the digitalized factory. *IEEE Access*, 7, 70891-70900.
- Scholer, M., & Müller, I. R.(2017). Modular configuration and control concept for the

- implementation of human-robot-cooperation in the automotive assembly line. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 5694-5699.
- Stigler, G. J.(1958). The economies of scale. *The Journal of Law and Economics*, 1, 54-71.
- Suzić, N., Forza, C., Trentin, A., & Anišić, Z.(2018). Implementation guidelines for mass customization: current characteristics and suggestions for improvement. *Production Planning & Control*, 29(10), 856-871.
- Teece, D. J.(1980). Economies of scope and the scope of the enterprise. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 1(3), 223-247.
- Wan, J., Li, X., Dai, H., Kusizk, A., Martí nez-Garc í a,M., & Li, D.(2021) Artificial-Intelligence-Driven Customized Manufacturing Factory: key technologies, applications, and challenges, *Proceedings of the IEEE*, 109(4), 377-398.
- Wang, L., Gao, R., Vá nca, J., Krü ger, J., Wang, X. V., Makris, S., & Chryssolouris, G. (2019). Symbiotic human-robot collaborative assembly. *CIRP Annals*, 68(2), 701-726.
- Wang, W., Li, R., Chen, Y., Diekel, Z. M., & Jia, Y.(2018). Facilitating human-robot collaborative tasks by teaching-learning-collaboration from human demonstrations. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 16(2), 640-653.
- Zhang, J., Liu, H., Chang, Q., Wang, L., & Gao, R. X.(2020). Recurrent neural network for motion trajectory prediction in human-robot collaborative assembly. *CIRP annals*, 69(1), 9-12.