2021년도 연구용역보고서

생산자동화가 경제성장에 미치는 영향과 시사점

-2021. 12-

이 연구는 국회예산정책처의 연구용역사업으로 수행된 것으로서, 보고서의 내용은 연구용역사업을 수행한 연구자의 개인 의견이며, 국회예산정책처의 공식 견해가 아님을 알려드립니다.

연구책임자

고려대학교 세종캠퍼스 경제통계학부

부교수 신종국

생산자동화가 경제성장에 미치는 영향과 시사점

2021. 12

연구책임자 신종국 (고려대학교 세종캠퍼스 경제통계학부 부교수)
공동연구원 정용훈 (고려대학교 세종캠퍼스 경제통계학부 부교수)

이 연구는 국회예산정책처의 연구용역사업으로 수행된 것으로서, 보고서의 내용은 연구용역사업을 수행한 연구자의 개인 의견이며, 국회예산정책처의 공식 견해가 아님을 알려드립니다.

제 출 문

국회예산정책처장 귀하

본 보고서를 귀 국회예산정책처의 연구과제
「 생산자동화가 경제성장에 미치는 영향과 시사점 」 의
최종 보고서로 제출합니다.

2021. 12

고려대학교 세종캠퍼스 경제통계학부 부교수 신종국

<목 차>

목 차 ····· ii
표 목 차 ····· iv
그림목차 ····· iv

제 1 장 서론 ····· 1

1.1 연구 배경과 목적 ····· 1
1.2 연구 방법 및 개요 ····· 3

제 2 장 생산자동화(automation) 현황과 기존문헌 분석 ····· 6

2.1 생산자동화 현황 ····· 6
2.1.1 생산자동화의 정의와 추세 ····· 6
2.1.2 생산자동화 현황과 지원정책 ····· 8
2.2 생산자동화가 경제에 미치는 영향에 대한 기존문헌분석 ····· 24
2.2.1 생산자동화가 노동에 미치는 효과 ····· 24
2.2.2 생산자동화가 경제성장에 미치는 효과 ····· 27

제 3장 이론 모형 ····· 30
3.1 정태 모형 ····· 30
3.1.1 최종재 생산자 ····· 30
3.1.2 업무 생산자 ····· 31
3.1.3 노동자 ····· 34
3.1.4 혁신가 (innovator) ····· 34
3.2 시장참여자의 최적화 ····· 36
3.2.1 최종재의 최적생산 ····· 36
3.2.2 세부업무(subtask)의 최적생산 ····· 37

3.2.3 업무(task) 생산자의 비용 최소화 ····· 39
3.2.4 업무생산자의 이윤 극대화 ····· 44
3.2.5 혁신가의 최적 의사결정 ····· 45
3.3 시장 균형 ····· 48
3.3.1 자본시장 균형 ····· 48
3.3.2 세부업무시장 균형 ····· 49
3.3.3 업무시장 균형 ····· 49
3.3.4 노동시장 균형 ····· 50
3.3.5 최종재시장 균형 ····· 51
3.4 비교 정태 분석 ····· 52
3.4.1 혁신가의 최적화 조건에 대한 비교정태 분석 ····· 52
3.4.2 업무생산자의 최적화 조건에 대한 비교정태 분석 ····· 54
3.4.3 노동시장에 대한 비교정태 분석 ····· 58
3.5 동태 모형 및 경제 성장의 함의 ····· 60

제 4 장 캘리브레이션 및 수치분석 ····· 62

제 5 장 결론 및 정책적 시사점 ····· 67
5.1 요약 및 결론 ····· 67
5.2 정책적 시사점 ····· 68

참고문헌 ····· 71
부록 ····· 73

표 목 차

표 2.1 세계 로봇시장의 시장 매출액 ····· 9
표 2.2 우리나라 로봇시장 매출액 ····· 14
표 2.3 우리나라 산업용 로봇 도입 현황 ····· 18
표 2.4 제 3차 지능형 로봇 기본 계획 주요 내용 ····· 20
표 3.1 시뮬레이션 분석을 위해 사용된 모수값 ····· 63

그 림 목 차

그림 2.1 생산 공정의 변화 ····· 7
그림 2.2 현재 활용중인 전세계 산업용 로봇 ····· 10
그림 2.3 연도별 전세계 산업용 로봇 설치 ····· 10
그림 2.4 산업용 로봇 연도별 설치 전망 ····· 11
그림 2.5 산업별 산업용 로봇 연도별 설치 ····· 12
그림 2.6 활용별 산업용 로봇 연도별 설치 ····· 12
그림 2.7 전통로봇과 협력로봇의 비교 ····· 13
그림 2.8 대륙 및 연도별 산업용 로봇 설치 현황 및 전망 ····· 14
그림 2.9 산업용 로봇 설치 상위 15개 주요국과 로봇 밀집도 ····· 15
그림 2.10 주요국 제조업부문 산업용 로봇 보유 현황 ····· 16
그림 2.11 우리나라 산업용 로봇의 연도별 설치 ····· 17
그림 2.12 우리나라 산업별 산업용 로봇의 연도별 설치 ····· 17
그림 2.13 우리나라 주요 제조업 업종별 로봇 도입 추이 ····· 19
그림 2.14 AI 중소 벤처 제조 플랫폼 구조도 ····· 22
그림 3.1 생산업무 자동화 기술 도입에 따른 세부업무 생산 기술 ····· 34
그림 3.2 비용 최소화 하의 세부 업무 생산 ····· 39

그림 3.3 혁신가의 세부업무에 대한 자동화 기술 개발 ····· 45
그림 3.4 생산자동화 기술 개발로 인한 자동화 프론티어 확장 ····· 62
그림 3.5 노동생산성과 임금 생산자동화 비율의 관계 ····· 64
그림 3.6 자동화 비율 증가에 따른 업무(직업)간 임금 분포의 변화 ····· 67

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경과 목적

❑ 인공지능에 의한 생산자동화의 배경

○ 현재 디지털 정보의 혁신적인 발전인 <디지털 혁명>을 경험하고 있음

- 디지털 혁명은 과거 증기기관과 전기와 같은 범용기술(General Purpose Technology: GPT)로 고려됨 (David and Wright 1999, Jovanovic & Rousseau 2005, Mühleisen, 2018 등)

○ 디지털 혁명으로 야기된 4차 산업혁명의 핵심 기술이 인공지능(AI)라는 것에는 이견이 없음

- 1956년 맥카시(John McCarthy)가 '인공지능 ' 이라는 단어를 처음 창안.
- 2004년 연구에서 매카시는 인공지능에 대해 '지능이 있는 기계, 특히 지능을 가진 컴퓨터 프로그램을 만드는 과학/공학이며, 지능을 필요로 하는 작업을 수행할 수 있는 컴퓨터 시스템의 이론 및 응용과 개발' 이라고 정의함.

○ 최근 들어 인공지능은 인공 신경망 (deep neural network), 딥러닝(deep learning)등을 포함한 머신 러닝(machine learning)을 적용한 다양한 기술 및 관련 생산자동화(automation)의 확산 등으로 나타나고 있음.

- 이미 반도체 디자인 (Mirhoseini et al. 2021), 생화학 물질 합성 및 신약 개발, 새로운 화학 물질 개발 등에 쓰이고 있으며 이는 해당 분야의 생산성 증대에 기여하고 있음.
- 기술적 특이점 (singularity)과 함께 도래할 초지능기계 (super-intelligent machine, 가장 지적으로 뛰어난 인간을 넘어서는 지능을 가진 기계)와 그 함의에 대한 논의로 이어지고 있음.

○ 특히, 자동화는 인공지능 그 자체는 아니지만 인공지능으로 대변되는 디지털 혁명의 범용기술이 확산되는 과정에서 나타나는 프로세스임.

○ 인공지능이라는 것은 인류가 오랜 기간 지속적으로 추구해온 생산자동화의 가장 최근의 모습임.

- 인공지능에 의한 자동화는 과거의 자동화와 달리 모든 영역에 적용되어 인간노동을 광범위하게 대체할 위험을 가지고 있음.

❑ 인공지능에 의한 생산자동화가 중요한 이유

○ 과거 기술혁신의 가장 큰 차이점: 인공지능 발전에 의한 생산 자동화는 (1) 인간 노동의 모든 분야에 적용이 가능하다는 것과 (2) 인간 노동을 대체하는 속도가 매우 빠르다는 것임.

- 따라서, 인공지능에 의한 생산 자동화가 과거의 기술혁신과는 매우 다른 모습으로 경제에 영향을 미칠 것으로 예상되기 때문에, 현재 그 결과에 대한 예측이 매우 불확실함.
- 많은 경제학자들이 인공지능에 의한 생산 자동화가 산업, 노동, 경제성장 및 불평등에 많은 영향을 미칠 것이라는 점에는 동의하나, 각 분야별로 어떠한 결과가 나타날지에 대해서는 다양한 의견들이 존재함.

○ 인공지능에 의한 생산 자동화가 경제에 미치는 예상 결과에 대한 다양한 의견들을 장/단기로 구분하여 설명하면 다음과 같음:

- 장기적으로 생산 자동화는 지속적인 경제성장과 새로운 일자리의 창출을 통해 사회를 보다 부유하고 풍요롭게 만들 것이라는 것에는 크게 이견이 없음.
- 하지만, 단기적으로 생산 자동화가 인간 노동을 급격히 대체할 경우 노동시장 혼란이 불가피하며, 소득분배불평등을 심화할 수 있다는 우려가 제시되고 있음.

○ 장기적으로 생산 자동화를 통한 생산성 향상과 정부정책에 의한 소득 불평등 완화로 수렴되는 경제는 매우 이상적이라고 할 수 있으나, 단기적으로 생산 자동화라는 기술충격으로 나타나는 새로운 균형점이 시사하는 바에 대한 면밀한 연구가 요구됨.

- 생산 자동화에 의한 변화의 방향에 대한 예측을 통해, 단기/중기적으로 발생할 것으로 예상되는 사회/경제적 혼란을 최적의 정책을 통해 최소화하고 장기적으로 풍요로운 사회에 도달할 수 있음.

○ 본 연구는 기존문헌의 한계 제시와 생산 자동화에 의한 단기적 변화를 보다 정확히 예측함으로써 생산 자동화가 우리 사회에 미치는 영향에 대한 새로운 메커니즘 제시함.

❑ 기존문헌의 한계와 본 연구의 기여

○ 기존문헌에서 고려하고 있는 인공지능에 의한 생산 자동화가 경제에 영향을 미치는 기본적인 메커니즘은 <생산 자동화는 생산 과정을 재구성해 노동시장에 충격을 주고, 이러한 충격은 기업, 산업, 그리고 특정 국가의 경제에 영향을 미치며, 소득불평등에 변화를 야기하고, 경제성장에 > 하는 것임

- Acemoglu et al. (2014), Acemoglu and Restrepo (2018a), Acemoglu and Restrepo (2018b), Acemoglu and Restrepo (2019), Acemoglu and Restrepo (2020), Aghion et al. (2019), Aghion et al. (2020), Aghion et al. (2021) 를 참조

○ 생산 자동화가 경제에 미치는 영향에서 가장 중요한 과정은 생산 자동화가 노동시장에 어떠한 방식으로 충격을 제공하는 가이며, 대부분의 기존문헌은 생산 자동화가 외생적으로 주어지고 노동시장에 영향을 미치는 것으로 가정하고 있음

- 생산 자동화에 의해 노동시장이 받는 영향의 모습에 따라 기업, 산업, 그리고 국가에 미치는 영향을 달라질 것이기 때문임

○ 하지만, 인공지능에 의한 생산 자동화는 외생적으로 주어진다기 보다는 혁신가(Innovator or Entrepreneur)의 활동에 의해 결정된다고 보는 것이 보다 현실적이며, 혁신가의 결정은 <생산 자동화의 순서와 범위(Order and Scope)>에 관한 것임

○ 본 연구에서는 혁신가의 결정이 모델 내에서 이루어지도록 설계하였으며, 이러한 생산 자동화의 내생화가 노동시장에 미치는 새로운 영향을 제시하고, 나아가 전반적인 경제에 미치는 영향과 풍요로운 미래를 위한 정책적 시사점을 도출할 것임.

1.2 연구 방법 및 개요

❑ 본 연구의 초점은 경제 전체에 광범위하게 진행되는 생산 자동화의 중장기일반균형 분석에 있음

○ 기존의 자동화: 제조업 및 비숙련 노동의 자본재로의 대체

○ 현재 진행되는 자동화: 인공 지능, 딥 러닝 등 4차 산업 관련 연구가 진행됨에 따라 기존의 로봇에 의한 제조업 부문의 생산 자동화를 넘어서 지식 산업, 전문가의 노동 등을 대체할 것으로 예상됨. (McKinsey Global Institute 2018)

❑ 본 연구는 경제 전방위에 걸친 생산 자동화의 방향을 예측하고 정책적 함의를

도출하기 새로운 이론 모형을 구축함.

- ○ 현재 활발하게 진행되고 있는 자동화 관련 학계 프론티어 연구를 기반 연구로 사용하여, 이를 확장.
- ○ 생산자동화를 혁신가의 연구 활동에 의해 진행되는 내생적인 프로세스로 보고, 이들의 행동을 설명/예측할 수 있는 모형을 통해 경제 전체에 다가오고 있는 자동화의 방향에 대한 예측을 도모.
- ○ 이를 통하여 중장기 경제 정책 수립을 위한 분석틀을 제공하고자 함.

❑ 기존의 생산 자동화 문헌들은 대부분 생산 자동화 기술이 외생적인 프로세스로 인해 주어진 것으로 놓고 분석을 진행함.

- ○ 그러나 생산 자동화 기술은 점진적으로 개발되며, 이는 인간의 의도적인 연구/개발 활동에 기인하는 것임.

❑ 본 연구에서는 생산 자동화를 혁신가의 의식적인 연구활동에 기인하는 것으로 보고, 생산자동화의 방향을 모형 내부에서 도출/분석함.

- ○ 특히 업무(산업)별 자동화의 방향에 대한 연구에 중점을 두어 자동화의 속도가 어떻게 다른지에 대한 연구
- ○ 기술개발이 혁신가(innovators)의 이윤추구 활동을 위한 연구/투자 활동의 결과라는 슘페터의 경제이론을 차용.
- ○ 최근 생산자동화 관련 문헌에서 사용되는 Zeira (1998)의 업무기반 생산 함수 차용 (task-based production function)
- ○ 노동의 이질성 (heterogeneity)을 가정: 업무의 전문화/세분화로 인해 노동자 별로 수행할 수 있는 업무가 제한적임.
- ○ 비슷한 작업을 수행하는 업무(task)일지라도 세부업무 (subtask)별로 다른 생산 자동화 기술 적용이 필요.

❑ 본 연구는 다음과 같은 정책적 시사점을 제공

- ○ 세금 감면, 지원금 등을 통한 한정된 재원을 통한 지원이 목적이라면 다음과 같은 사항을 고려함으로 경제성장에 대한 정책 효과를 극대화할 수 있음.

- 단위 생산자동화기술의 경제 성장에 대한 효과는, 노동생산성이 높을수록, 해당 업무의 고용이 많을수록, 그리고 해당 업무가 경제에서 차지하는 비중 또는 생산량이 많을수록 큼.
- 그러나 다른 조건이 일정할 경우, 넓은 분야에 자동화 기술이 골고루 개발되는 것이 일정부문에 집중되는 것보다 경제성장에 높은 효과가 있음

○ 혁신가의 자동화 기술 개발은 경제성장의 원동력이라는 관점에서, 이에 대한 직접적인 과세는 최소화하는 것이 바람직함.

○ 생산자의 자동화에 대한 과세 (로봇세, robot tax)는 자동화 이익의 감소를 가져와 자동화의 속도 조절을 할 수 있는 도구로 사용될 수 있음.

- 로봇세와 함께, 혁신가의 "협상력" 을 향상시킬 수 있는 정책으로 로봇세의 기술혁신에 대한 부정적 영향을 최소화할 수 있을 것으로 보임
- 혁신가의 "협상력" 을 향상시킬 수 있는 정책으로는 지적자산보호, 기타 법률제도 보완, 연구개발에 대한 세제 지원 등이 있음

❑ 노동시장 관련 정책:

○ 자동화가 진행되고 있는 상황에서는 임금 분포가 넓어지고 임금 불균등이 악화될 수 있음.

- 생산자동화의 진행은 저생산성 노동자의 임금을 감소시키고, 고생산성 노동자의 임금을 증가시키는 방향으로 작동할 수 있음.
- 이는 현재 전세계적으로 진행되고 있는 임금 양극화에 대한 대안적 설명으로 정책입안자의 관심이 요구됨.

○ 자동화의 진행으로 고생산성 노동이 불균등하게 혜택을 본다면, 현재 거론되고 있는 로봇세 (robot tax)를 저생산성 노동자의 임금 보존 및 교육 투자등을 통해 생산성이 향상될 수 있도록 우선적으로 사용하는 것을 고려.

❑ 장기적으로 생산자동화에만 의지하는 경제성장에는 한계가 있을 것으로 예측

○ 생산자동화가 추가적 경제성장 요인이나, 기존에 논의되고 있는 총요소 생산성 $\gamma(i)$의 향상에 의한 경제성장, 인적자본 투자 및 새로운 업무 개발 (Romer 타입의 새로운 중간재 개발을 통한 경제성장) 등의 요인에도 지속적인 관심이 요구.

○ 정책입안자는 새롭게 생겨날 경제적 불평등에 대한 고려도 할 필요가 있으며, 이는 앞으로의 연구주제로 삼기에 적합함.

제 2 장 생산자동화(automation) 현황과 기존문헌 분석

❑ ‘생산자동화’는 혁신을 통한 생산성 증가의 가장 중요한 요인으로 간주되고 있으며, 우리나라 및 세계 각국은 생산자동화에 많은 관심을 나타냄

○ 자동화 또는 자동제어는 제어 시스템과 다른 정보기술을 조화롭게 사용하여 산업 기계류와 공정을 제어, 사람이 관여할 필요를 줄이는 것을 의미

○ 특히, 로봇[1] 산업은 생산자동화(automation)의 핵심으로 가장 중요한 산업임

- 최근 로봇의 역할은 과거 단순히 노동력을 대체하거나 생산성 향상 및 물리적인 노동만을 의미하였으나, 최근에는 노동자와 협업, 인간 삶의 질 향상 또는 인간과 교감하는 역할로 확대되고 있음

❑ 자동화는 보완적이었던 기계와 사람의 관계를 기계가 사람을 대체하는 관계로 전환할 수 있기 때문에 노동시장에 매우 큰 영향을 미칠 것으로 예상하며, 노동과 경제성장에 미치는 파급효과 및 메커니즘에 대한 많은 연구가 존재

○ 자동화는 1차적으로 노동시장에 영향을 미치겠지만, 노동시장에 대한 충격은 2차적으로 전체 경제에도 영향을 미칠 것이기 때문에 궁극적으로 새로운 경제성장의 패턴이 나타날 것으로 예측됨

○ 또한, 자동화 자체는 효율성 및 생산성의 증대를 의미하기 때문에 새로운 시장의 출현 등과 같은 예상치 못한 사회의 변화를 야기할 수 있음

2.1 생산자동화 (automation) 현황

2.1.1 생산자동화의 정의와 추세

❑ ‘생산자동화’는 생산공정 상에서 기존에 근로자가 수행하던 업무(task)가 기술진보를 통한 자동화로 기계로 대체되고 그 범위가 확대되는 것을 의미

○ 공장은 제조[2] 과정에서의 생산을 담당하는 곳으로 19세기 이후 2, 3차 산업혁명[3]

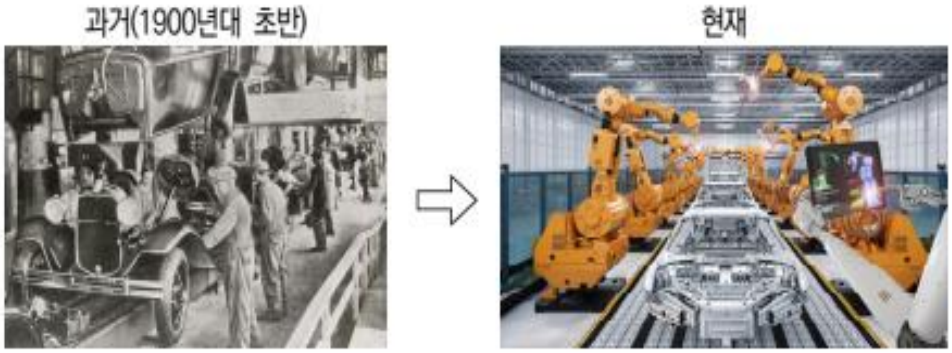
---

[1] 로봇은 스스로 인식(sense)하고 제어(control)하여 자율적으로 작동(act)하는 기계장치로 정의될 수 있음
[2] 제조는 하나의 제품이 기획되어서 설계/생산/유통을 거쳐 소비자에게 전달되는 일련의 과정을 통칭
[3] 2차는 내연기관 혁명을, 3차는 정보통신(ICT) 혁명을 의미

을 거치면서 대량생산과 생산자동화를 통해 생산성을 극대화하는 방향으로 발전하였으며, 공급자 주도의 시장을 형성

○ 자동화 초기의 대표적인 예로써 1910년대 포드사의 제조 컨베이어 도입이 있으며, 이를 통해 자동화 및 연결성이 강화되었으며, 4차 산업혁명과 디지털 전환으로 산업구조가 재편되는 과정에서 생산공정의 자동화는 핵심기반이 됨

<그림 2.1> 생산공정의 변화



자료: 이미지코리아(좌, http://www.imagekorea.co.kr), 게티이미지뱅크(우, https://www.gettyimagesbank.com).

○ 하지만, 제조 패러다임은 대량생산과 대량맞춤 생산 시대를 거쳐 개인화된 제품을 생산하는 시대로 변화될 것으로 전망되고 이러한 다품종 소량생산의 시장은 현재 진행 중

- 미래 소비자는 제품의 콘셉트 설계에서부터 생산 과정에 직접 개입하고, 공장은 이러한 소비자 니즈를 반영하여 개별화된 제품을 효율적으로 생산할 수 있는 체계로 전환

○ 생산자동화가 완벽하게 이루어진 '자율공장' 은 유연 생산 기술의 궁극적인 형태로 인공지능을 갖춘 제조설비 및 로봇들이 협력하여 조립, 운반, 포장, 검사 등 제품생산과 관련된 작업을 자율적으로 수행하고, 필요할 때 인간과 함께 일을 할 수 있는 인공지능 기반의 미래 생산환경으로 정의

- 자율공장은 3단계로 구성될 수 있으며, 1단계는 AI협업로봇으로 사람의 개입 없이 로봇과 로봇이 협력하여 제품을 조립, 가공하는 기술을 말하며, 2단계는 AI작업공간으로 학습된 모델이 다른 작업 현장에 전이되어도 스스로 최적화

해가는 기술, 3단계는 자율공장으로 생산 전 주기를 포괄하는 최적의 생산 프로세스를 자율적으로 제어하는 기술을 의미

- 자율공장 실현을 위해 무선통신, 사물인터넷, 빅데이터, 인공지능, CPS (Cyber Physical System) 등의 첨단 ICT 기술이 필요하며, 특히 제조에 AI가 적용되기 위해 가장 중요한 기반은 **데이터**임

○ 공장 내 제품생산공정을 대상으로 3가지의 중요한 기술적 이슈가 존재하는데 첫째, 제조 작업환경 인지기술[4], 둘째, 협업작업 자율계획 기술[5], 마지막으로 유연생산 분산협업 실행제어 기술[6] 임

❑ 생산자동화를 제조공정 내 인간의 개입 없이 프로그램화된 시스템하에서 특정 업무를 수행하는 것으로 정의한다면 많은 산업에서 활용하고 있는 **로봇**은 자동화의 대표적인 모습

○ 로봇은 4차 산업혁명의 핵심 신산업으로 인공지능(AI) 융합을 통해 로봇-인간 공존 사회로 진화 중이며, 로봇 제조사를 중심으로 후방산업인 소재/부품, S/W 분야와 전방산업인 시스템통합 및 제조 · 서비스 수요처로 구성됨

- 최근, 4차 산업혁명 신기술(AI, 5G 등)이 로봇에 접목되면서 로봇의 스마트화가 비약적으로 진전되고 활용 분야도 급속도로 확대되고 있으며, 5G 기반 클라우드 로봇, 실외 배송로봇 등 다양한 형태의 로봇들이 등장

- 특히, 물류, 의료, 돌봄 분야 서비스 현장의 스마트화가 가능하며, AI 융합으로 분야별 파급효과가 확대되고 있음

○ 전세계적으로 로봇산업에 투자, M&A 등이 확대되는 등 유례없는 로봇 붐이 형성되고 있음

2.1.2 생산자동화 현황과 지원정책

2.1.2.1 생산자동화 현황

---

[4] 비전을 포함한 다양한 센서를 이용하여 고정되지 않은 비정형 환경 및 상황을 인지하고 나아가 함께 작업을 수행하는 작업자의 의도를 인지하고 파악하기 위한 기술이며, Google Cloud Robotics Core, Amazon Robomaker, 벨기에의 PickIt, 일본의 MUJIN 등 다수가 연구 중

[5] 스스로 자신이 해야 할 작업을 인지하고 작업을 어떻게 수행해야 할 지를 계획하며, Google의 자율주행 SW, Cartographer를 공개하였고, 다양한 대학 및 연구소에서 연구진행

[6] 다른 로봇 또는 제조설비들과 협력하여 조립, 이송, 포장, 검사 등의 여러 가지 복잡한 작업을 자율적으로 수행하며, Google APE-X, DeepMind IMPALA, TF-Replicator, UC Berkeley Rllib를 개발 중

❑ 생산자동화의 대표적인 대리변수로 로봇을 고려할 수 있으며, 로봇은 크게 산업용 로봇과 서비스용 로봇으로 구분할 수 있음[7]

○ 본 연구에서는 국제로봇연맹(International Federation of Robotics, IFR)에서 제공하는 자료를 활용하여 글로벌과 국내시장 현황을 분석함

○ 또한, 생산자동화를 서비스용과 산업용 로봇으로 구분하는 것이 어렵지만, 산업용 로봇의 통계를 중심으로 현황과 추세를 설명할 것임

❑ **(글로벌 동향)** 세계 로봇시장 규모는 연평균 약 13%의 속도로 지속적으로 확대되고 있으며, 2019년에는 전년대비 3% 성장한 305억불(약 35조원)로 서비스용 로봇이 성장을 주도하였음

○ 산업용 로봇을 중심으로 성장한 로봇산업은 서비스용 로봇 중심으로 전환되고 있으며, 이는 로봇이 전산업에서 활발히 활용되고, 모든 업무가 자동화되고 있음을 보여줌

- 산업용 로봇은 전기/전자, 자동차, 식음료 등 주요 수요분야의 설비투자 축소로 전년대비 17% 감소한 137억불이며, 서비스용 로봇은 의료, 가정, 물류, 국방, 엔터테인먼트에서의 수요가 대폭적으로 증가하여 전년대비 28% 성장한 168억불을 기록함

<표 2.1> 세계 로봇시장 매출액(단위: 백만달러)

구분	2014년	2015년	2016년	2017년	2018년	2019년	연평균성장률
전체	16,371	17,988	19,476	26,474	29,666	30,533	13.3%
산업용	10,196	11,162	13,125	16,302	16,502	13,712	6.1%
서비스용	6,175	6,826	6,351	10,168	13,164	16,821	22.2%

자료: IFR 2020, WR Industrial Robots (2019말 누적기준)

○ 현재 활용 중[8]이거나 새롭게 매년 설치된 산업용 로봇의 수를 나타내는 아래 <그림 2.2>와 <그림 2.3>을 통해 산업용 로봇을 통한 생산자동화는 최근 10년 사

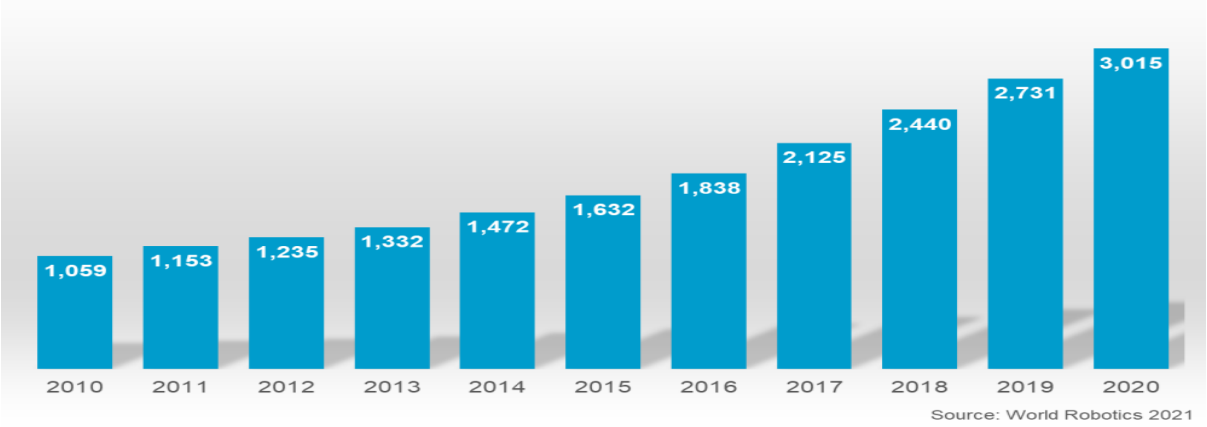
[7] 산업용 로봇은 3개 이상의 축(axes)을 가지고 있으며, 산업 자동화를 목적으로 특정 업무를 수행하기 위해 특정 장소에 설치된 상태에서 작동되거나 혹은 자유로운 이동이 가능하지만, 인간의 개입없이 자동제어 및 재프로그래밍이 가능한 장치로 정의될 수 있음

[8] 전 세계에서 활용 중인 산업용 로봇의 수는 매년 지속적으로 축적된 로봇의 수를 의미

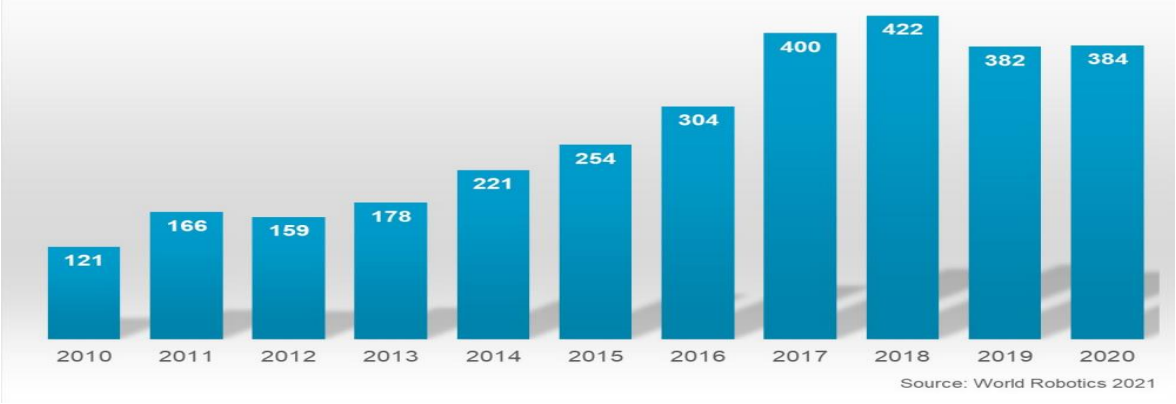
이의 세계적인 큰 흐름이며 향후 더욱 확대될 것으로 예상[9]

- <그림 2.2>에서 현재 활용 중인 산업용 로봇은 2010년 약 100만 대에서 2020년 300만 대로 10년 사이에 3배로 급속히 증가
- <그림 2.3>에서 새롭게 설치된 산업용 로봇은 2019년과 2020년에 산업용 로봇 설치가 다소 감소하였으나, 2010년부터 지속된 산업용 로봇 설치의 증가 추세[10]가 다소 둔화하는 수준으로 판단됨[11]

<그림 2.2> 현재 활용 중인 전세계 산업용 로봇 (단위: 천대)



<그림 2.3> 연도별 전세계 산업용 로봇 설치 (단위: 천대)



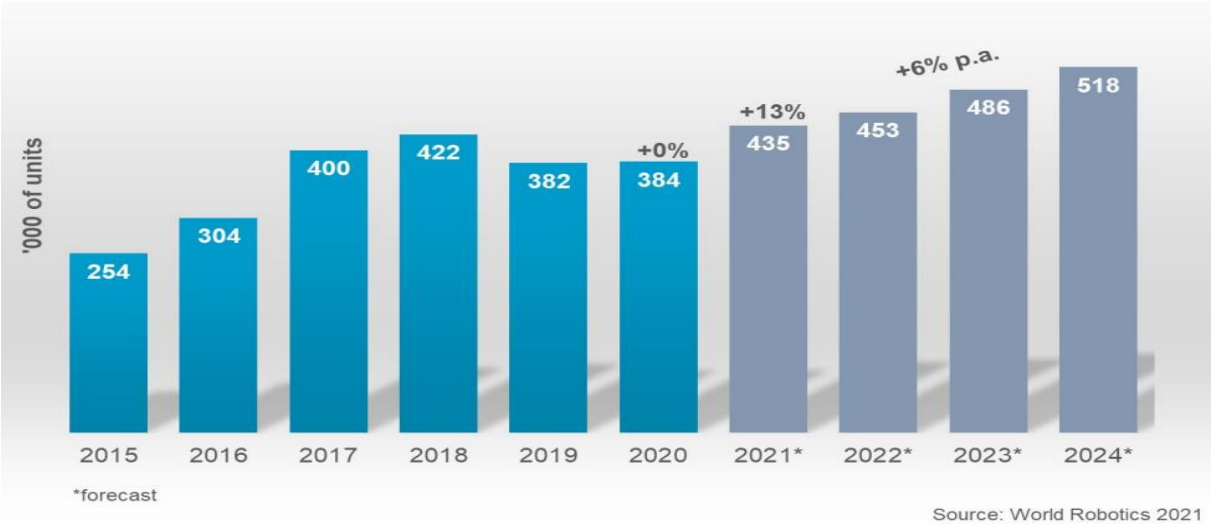
[9] 서비스용 로봇을 포함할 경우 로봇에 의한 자동화(Automation)는 급격히 지속적으로 확대되고 있음

[10] 2010년 12만대의 산업용 로봇 설치는 지속적으로 증가하여 2018년 42만대에 이르렀으며, 산업용 로봇을 통한 생산 자동화의 급속한 추세는 유지되고 있음

[11] 통계를 확인하지는 못하였으나, 서비스용 로봇의 활용대수와 매년 설치대수는 매우 증가하였을 것으로 추정

○ 향후 산업용 로봇에 의한 생산자동화 전망을 살펴보면, 2019년과 2020년에 산업용 로봇 설치가 다소 감소하였으나, 2021년부터 2024년까지 산업용 로봇 설치는 52만대까지 증가하는 것으로 예상되어, 전세계적인 생산자동화 추세는 매우 뚜렷함.

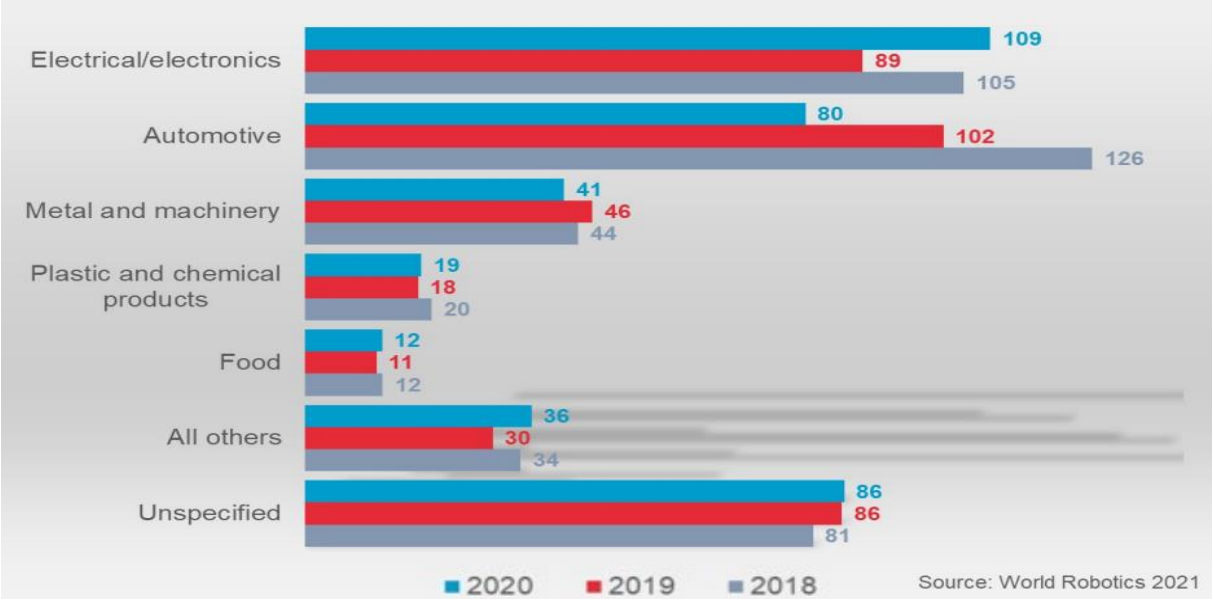
<그림 2.4> 산업용 로봇 연도별 설치 전망 (단위: 천대)



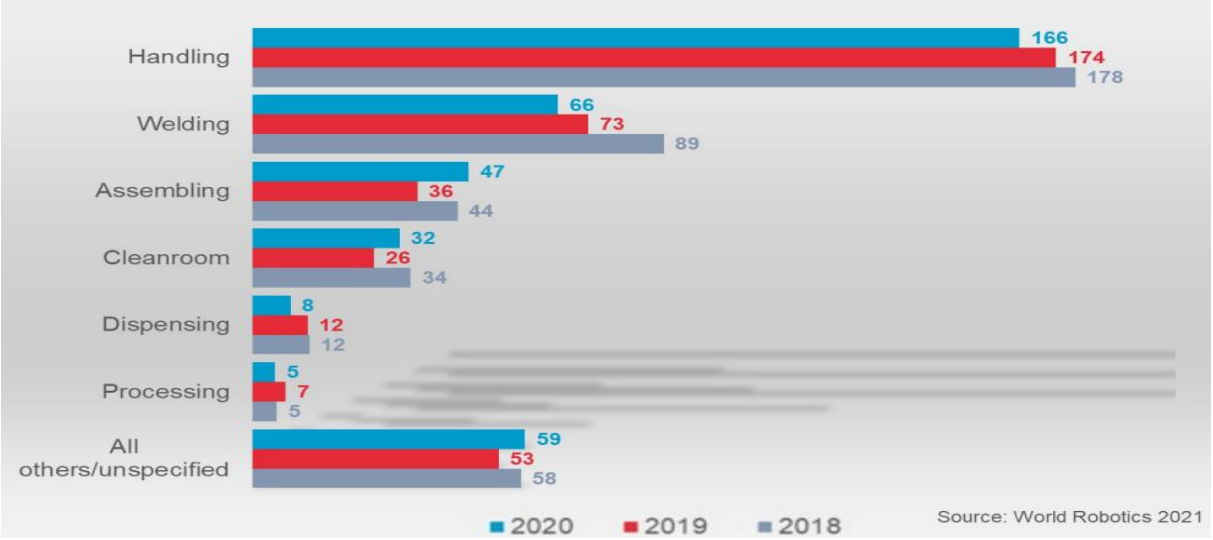
○ 산업용 로봇 설치를 산업별로 살펴보면, 전기/전자산업과 자동차 산업에서 많이 이루어졌으나, 자동차 산업의 경우 산업용 로봇 설치가 많이 감소하고, 전기/전자와 자동차 중심의 생산자동화에서 점차 다른 산업으로 산업용 로봇의 활용이 확산되고 있음을 알 수 있음

○ 산업용 로봇의 활용방법에 있어서 아래 <그림 2.6>을 통해 과거 용접이나 운반에 운용되던 로봇이 청소와 조립 등 과거와는 다른 업무 또는 다양한 업무로 활용됨을 알 수 있음

<그림 2.5> 산업별 산업용 로봇 연도별 설치 (단위: 천대)



<그림 2.6> 활용별 산업용 로봇 연도별 설치 (단위: 천대)

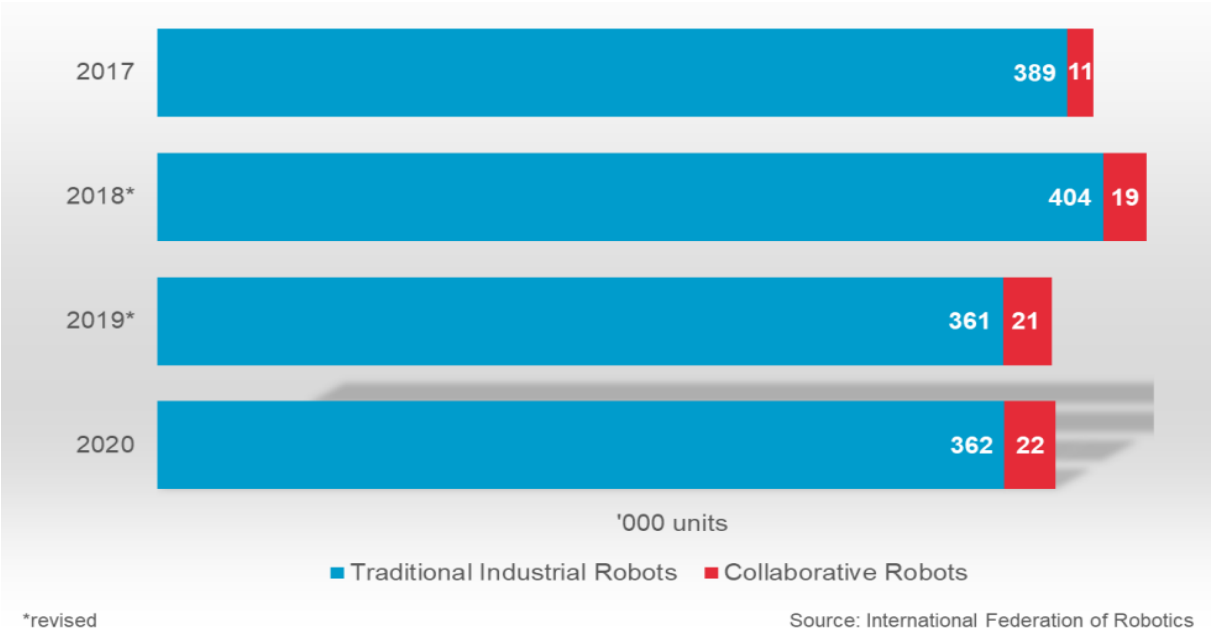


○<그림 2.7>은 산업용 로봇이 과거에 단순한 작업에 활용되는 수준에서 상호 협력할 수 있는 로봇으로 변화되고 있으며, 협력이 가능한 로봇이 많지는 않지만, 2017년 1만대에서 2020년 2배 이상 증가한 2만2천대로 협동로봇 비중이 점차 증가.

❑ **(대륙 및 국가별 동향)** 대륙 및 연도별 산업용 로봇 설치를 살펴보면 전 세계적인 산업용 로봇 설치의 증가를 재확인할 수 있으며, 특히, 아시아의 산업용 로봇 설치가 급증한 반면 유럽과 아메리카의 산업용 로봇 증가는 매우 점진적임

○ 또한, 산업용 로봇에 대한 전망에서도 2024년도까지 아시아에서 크게 증가하고 유럽과 아메리카는 점진적으로 증가할 것으로 예상

<그림 2.7> 전통로봇과 협력로봇의 비교 (단위: 천대)



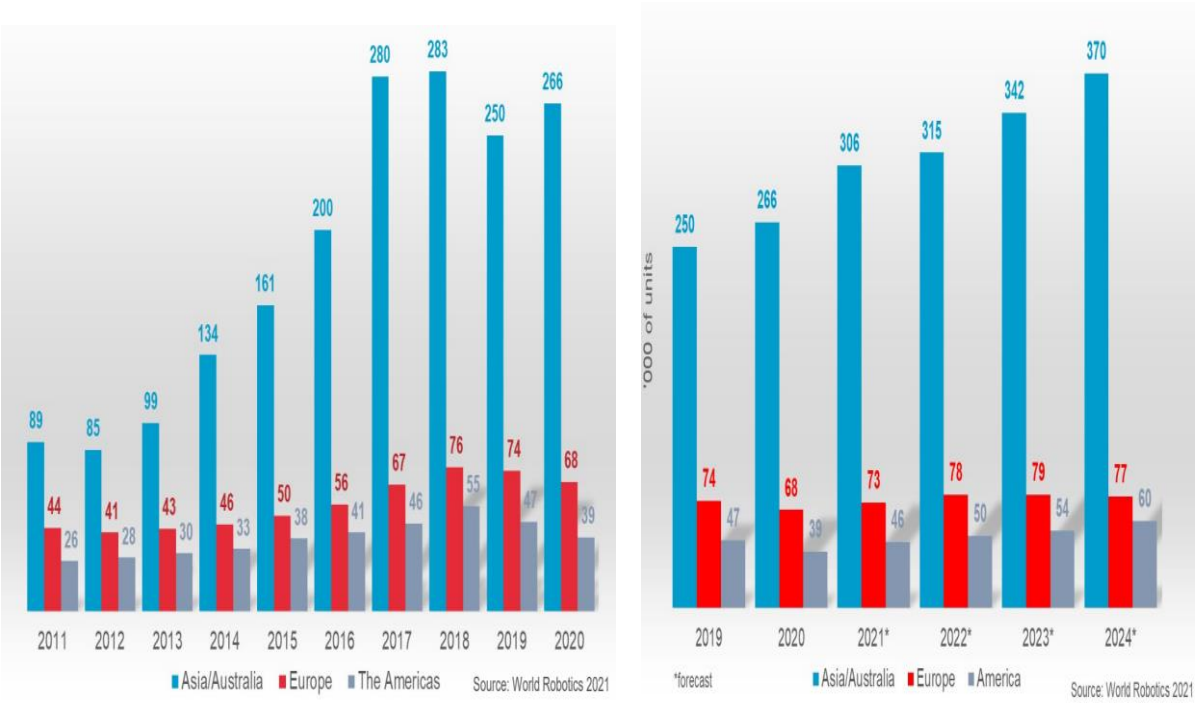
❑ **(우리나라 동향)** 우리나라의 로봇을 통한 생산자동화 현황을 살펴보면, 2019년 기준 국내 로봇 시장은 5.3조원으로 연평균 13.3%의 추세이나, 전년대비 8.0% 감소하여 다소 위축됨

○ 산업용 로봇의 매출은 주요 수요산업인 자동차와 반도체의 신규 설비투자 감소 및 중미 무역분쟁으로 인한 글로벌 경기침체 등의 요인으로 성장세가 둔화되었으며, 서비스 로봇의 매출은 개인서비스 시장은 축소된 반면 웨어러블, 의료 등 전문서비스 시장 매출은 증가하여 전년대비 4.4% 감소한 0.6조원임

○ 2019년 로봇부품 시장은 대일 수출규제로 일본 의존도가 높은 로봇용 핵심 부

품의 국산품 대체로 매출이 소폭 상승하여 전년대비 2.2% 증가한 1.8조원으로 3년간 연평균 9.0% 성장함

<그림 2.8> 대륙 및 연도별 산업용 로봇 설치 현황 및 전망 (단위: 천대)



<표 2.2> 우리나라 로봇시장 매출액 (단위: 억원)

구분	2014년	2015년	2016년	2017년	2018년	2019년	연평균성장률
전체	28,540	42,169	45,972	55,255	58,019	53,351	13.3%
산업용	21,013	25,831	27,009	34,017	34,202	29,443	7.0%
서비스용	3,565	6,277	7,464	6,459	6,650	6,358	12.3%
로봇부품	3,962	10,061	11,499	14,779	17,167	17,550	34.7%

자료: 2019 로봇산업실태조사 (2021년 1월, 한국로봇산업진흥원)

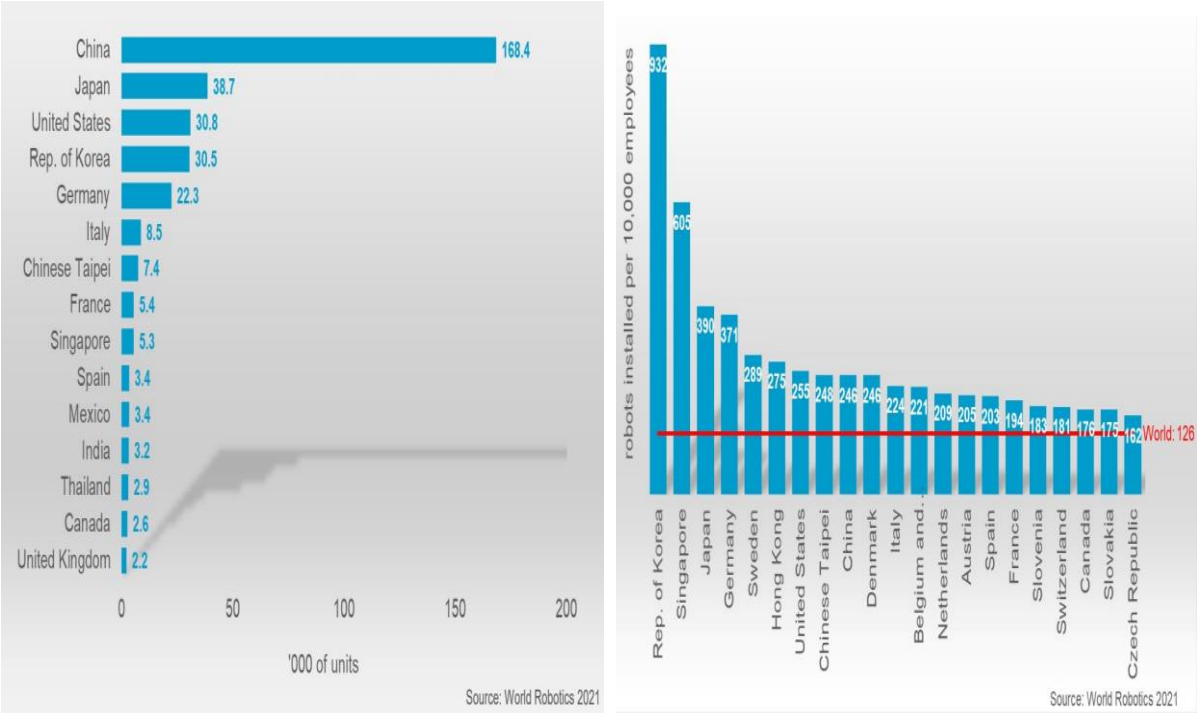
○ <그림 2.9>는 산업용 로봇이 설치된 상위 15개 주요국을 나타내는데, 중국이 160만대로 가장 높은 수준을 나타내고 있으며, 다음으로 일본, 미국 그리고 우

리나라가 4번째에 위치함으로써 우리나라는 산업용 로봇 설치 수준에서 전 세계적으로 매우 높은 수준임을 알 수 있음

- 특히, 국가의 경제수준과 규모를 고려했을 때 우리나라의 생산자동화 수준은 거의 최고 수준으로 추정됨

○ 특히, 노동자 만 명당 로봇의 수를 나타내는 로봇 밀집도를 보면, 우리나라가 만 명당 932대의 로봇을 보유함으로써 전세계에서 가장 높은 로봇 밀집도를 보이고 있음.

<그림 2.9> 산업용 로봇 설치 상위 15개 주요국과 로봇 밀집도 (단위: 천대)

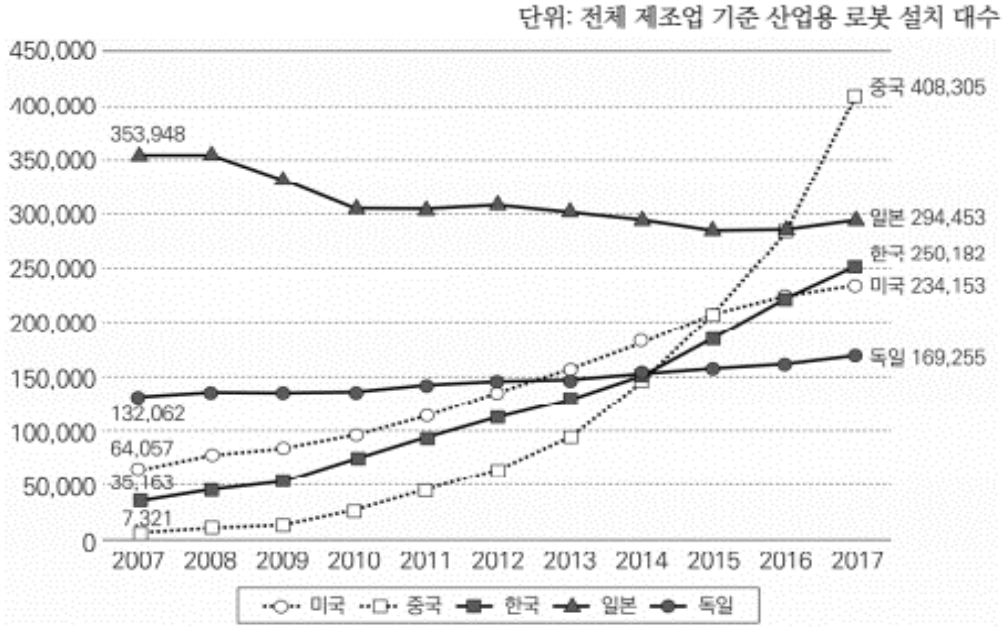


○ 2007년의 경우 일본을 제외한 다른 국가들의 로봇 활용 수준이 저조하였으나, 2017년 기준 중국, 한국, 미국의 산업용 로봇 보유가 매우 빠르게 증가하였으며, 특히, 중국의 증가속도는 타 국가에 비해 매우 높은 수준.

○ 우리나라의 산업용 로봇 설치 현황을 살펴보면, 2010년 이후 지속적으로 증가하고 있으며, 전기/전자 산업과 운송기기 산업에서 산업용 로봇 설치가 많이 이루어지고 있음

- 생산시설의 현대화 및 자동화 등으로 인해 글로벌 로봇 수요가 급증하고 있으며, 로봇 기술의 발전과 ICT 기술, 센서, 머신러닝 등의 융합으로 산업로봇이 활용되는 범위가 확대되는 추세
- 완전 무인화 로봇으로 전환하는 과정에서 인간지능과 결합한 지능형 로봇에 대한 수요는 지속적으로 증가할 것으로 전망

<그림 2.10> 주요국 제조업 부문 산업용 로봇 보유 현황



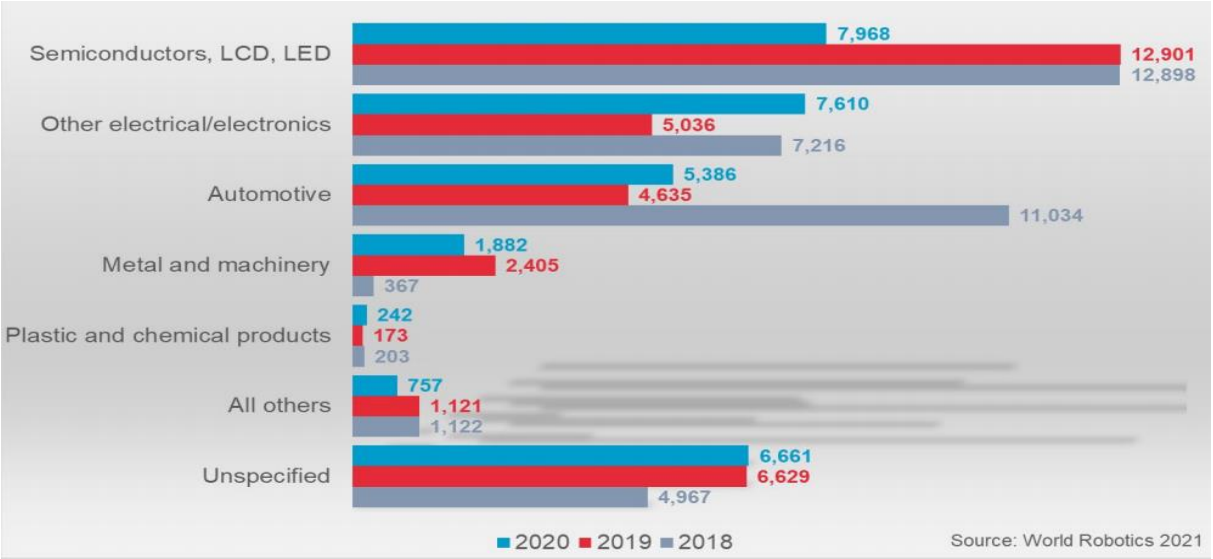
자료: IFR World Robotics Statistics, industrial robots, 각 연도.

❑ 우리나라 산업별 설치 및 활용추이를 자세히 살펴보면, 전기 및 전자기기 제조업, 운송장비 제조업을 중심으로 급속하게 성장하고 있으며, 두 분야가 전체 로봇의 약 80% 이상 사용

○ 우리나라의 경우 전기 및 전자기기 분야에서의 로봇 비중이 절반 이상을 차지하고 있지만, 상대적으로 제조업 내 다양한 산업에서의 로봇 활용은 저조한 상황

<그림 2.11> 우리나라의 산업용 로봇의 연도별 설치 (단위: 천대)

<그림 2.12> 우리나라 산업별 산업용 로봇의 연도별 설치 (단위: 천대)



<표 2.3> 우리나라 산업용 로봇 도입 현황 (단위: 대)

구분	자동차	전기 전자	금속	플라스틱 화학	식음료	섬유 · 목재 · 종이	기타 제조업	기타	합계
대수	95,961	172,488	9,029	9,053	1,557	105	3,432	32,824	324,049
비중	29.5%	53.2%	2.8%	2.8%	0.5%	0.03%	1.1%	10.1%	100%

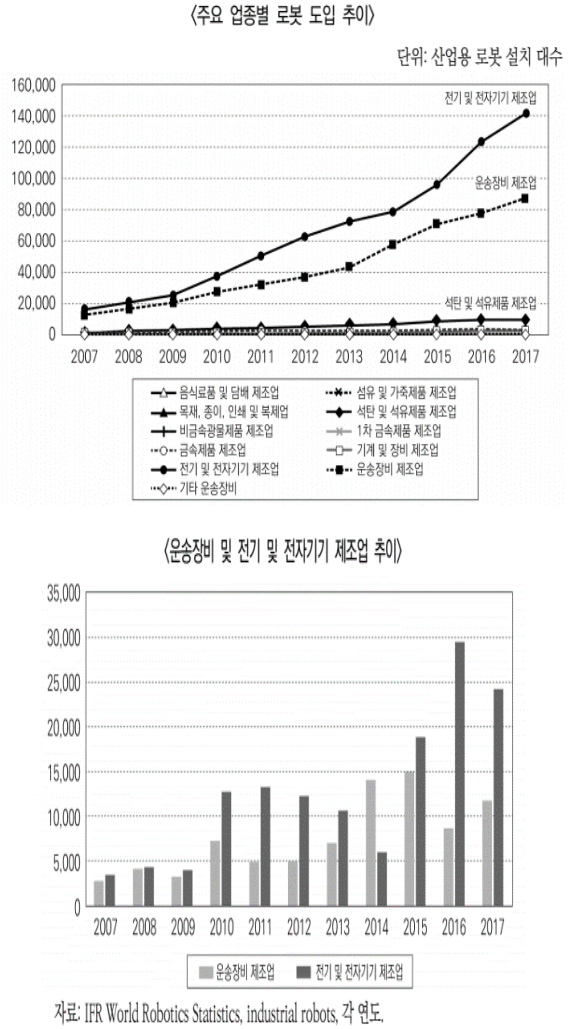
자료: IFR 2020, WR Industrial Robots (2019말 누적기준)

○ 전기 및 전자기기 제조업의 경우 2016년 2만 9300대, 2017년에는 2만 4000여 대의 로봇을 구입하면서 전체 로봇 공급량의 60% 이상을 차지함

- 전기 및 전자기기 제조업의 로봇 활용 비중이 높은 이유는 운송장비 제조업보다 상대적으로 빠른 제품의 라이프 사이클과 높은 품질개선에 대한 고객들의 요구수준 및 이직률을 보이고 있는 산업적 특성이 산업용 로봇의 도입을 촉진
- 전기 및 전자기기 분야는 소형 및 경량 제품 생산을 위한 반도체, 배터리, 칩 등의 작은 부품을 다루기 때문에 이에 용이한 협동 로봇 및 소형 산업용 로봇 등 더욱 높은 수준의 첨단기술과 융합된 형태의 로봇 활용이 필요

○ 운송장비 제조업의 경우 2016년도 8500대의 로봇을 구입하였고, 2017년은 37% 증가한 1만 1700대의 로봇이 도입되었으며 이는 현대와 기아 자동차의 국내 생산현장 투자에 기인함.

<그림 2.13> 국내 주요 제조업 업종별 로봇 도입 추이



자료: IFR World Robotics Statistics, industrial robots, 각 연도.

2.1.2.2 생산자동화 지원정책 - 로봇을 중심으로

❑ **(우리나라)** 2008년 체계적이고 일관성 있는 로봇산업 지원기반 마련을 위해 「지능형 로봇 개발 및 보급 촉진법[12]」을 제정함[13]

○ 지능형 로봇법 제5조[14]는 로봇산업 진흥을 위해 5년마다 기본계획을 수립하도록

---

[12] 지능형 로봇의 정의, 지능형 로봇 기본계획 수립, 지능형 로봇의 보급 촉진, 로봇산업진흥원 설립 등

[13] 2000년대 초반부터 산업자원부, 정보통신부, 과학기술부 등에서 로봇 R&D 등 정부 지원이 본격화되었으며, 2008년 로봇법 제정 및 지능형 로봇법 10년 연장을 통해 국가 차원의 일관성 있는 로봇 발전체계 지원 기반이 마련됨

[14] ① 정부는 지능형 로봇의 개발 및 보급에 관한 이 법의 목적을 효율적으로 달성하기 위하여 5년마다 기본

하고 매년 실행계획을 마련하도록 규정함

○ 이에 따라 제조로봇 확대보급, 4대 서비스 로봇 육성, 생태계 강화를 위해 제3차 기본계획(2019년 ~ 2023년)을 수립하고 매년 실행계획을 작성

<표 2.4> 제3차 지능형 로봇 기본계획 주요 내용

비전	로봇산업 글로벌 4대강국 도약	
목표	♦ 로봇산업 시장규모 확대(2023년까지 15조원) ♦ 1천억 이상 로봇전문기업 수 확대(2023년까지 20개사) ♦ 제조로봇 보급 대수 확대(2023년까지 누적 70만대)	
주요과제	① 3대 제조업 중심 산업용 로봇 확대 보급	업종별 · 공정별 108개 로봇활용 모델 개발 표준모델당 10개 기업 컨설팅 및 실증보급 제조로봇 도입 기업 중심 재직자 교육 렌탈/리스 지원 및 민간중심 융자모델 전환
	② 4대 서비스 로봇분야 집중 육성	유망 4대 서비스 로봇 기술개발 4대 서비스 로봇 보급 · 실증 및 민간 확산 규제개선, 해외진출 등 지원해 국내외 시장 창출
	③ 로봇산업 생태계 기초체력 강화	차세대 핵심부품 · SW 기술개발 국산부품 실증 · 보급 추진 타산업에 로봇 융합기술을 확산해 신시장 진출

자료: 관계부처 합동회의(2021) 참조

❑ **(우리나라)** 2022년까지 2만개 스마트공장[15]을 보급 및 확산하겠다는 과제를 마련하였으며, 이를 위한 3개의 대안을 마련함과 동시에 AI 중소벤처 제조 플랫폼을 구축하고자 함

○ 첫째, 스마트공장 확산을 정부주도에서 민간 및 지역 중심으로 전환하며, 대기업이 중소기업과 협력하면 정부가 후원하는 상생형 모델을 제안

계획을 수립하여야 한다. ② 관계 중앙행정기관의 장은 기본계획에 따라 매년 소관별로 지능형 로봇의 개발 및 보급과 그 기반조성에 관한 실행계획을 수립 및 실행하여야 한다.

[15] 스마트공장은 불량률 감소, 납기단축 등 기업의 성과를 향상시키며 최저임금 인상 및 근로시간 단축 등 변화하는 노동환경에 대응하여 중소기업 일자리의 질을 높일 수 있는 훌륭한 대안이며, 제조현장의 스마트화를 통해 안전한 작업환경을 구축하고 산업재해율을 낮춰 청년 및 여성층의 중소기업 취업 기피현상 완화 가능

- 대 · 중견기업 및 공공기관이 중소기업의 혁신 활동을 지원하거나 지자체-지방중기청-TP 등이 유관기관 협의체를 구성하여 현장수요를 발굴함으로써 스마트공장 구축 우수기업에 R&D와 자금 등 정책수단을 연계
- 지역별로 스마트공장 지원센터를 설치하고 6개 국가산업단지를 확산거점으로 지정 및 운영

○ 둘째, 스마트공장 고도화를 위해 센서 · 로봇 · 솔루션 등 요소기술 및 AI · VR 등 고도화기술 확보를 위한 R&D 지원을 강화

- 업종 및 지역별 시범공장과 대표공장을 확대하여 중소 · 중견기업이 벤치마킹을 하도록 하고 기존 구축기업의 수준 업그레이드[16]를 위한 전용사업을 신설
- 공급기업 육성 및 해외진출을 위해 대 · 중견 · 중소기업간 'Smart Factory Alliance'를 구축하여 선단형 해외진출, 공동 R&D 또는 표준화 등을 추진

○ 셋째, 스마트공장을 안정적으로 운영하고, 스마트화 수준을 제고하기 위해 전문인력을 양성하고자 함

- 기존 생산인력을 스마트공장 운영인력으로 활용하는 재직자 직무전환 교육을 강화하고, 스마트공장 기반기술 개발 및 운영설계 고도화를 위한 석 · 박사 교육과정을 확대

○ 스마트공장에서 생성되는 데이터를 저장 · 분석 · 활용하여 중소기업의 AI 스마트공장화를 지원하고자 함

- 제조혁신 선도사례 확산, 스마트제조 공급기업 육성과 제조혁신 거버넌스 확립

❑ **(글로벌)** 전세계 주요국의 생산자동화를 대표하는 로봇산업의 정책동향을 살펴보면 미 · 중 · 일 주요국은 자국 경쟁력 강화의 핵심으로 로봇을 선정하고 로봇산업 지원정책을 강화하고 있음

○ **미국**은 제조업 부흥을 위한 '첨단제조 파트너십'의 일환으로 국가 로봇계획을 추진중에 있음

- 하드웨어 제작기업(ABB, KUKA, Rethink Robotics 등) 중심의 시장에서 IT업

[16] 기초-중간1-중간2로 구성되며, 기초는 생산정보 디지털화 및 제품의 생산이력 관리, 중간1은 생산정보 실시간 수집과 분석, 중간2는 시스템을 통한 생산공정 제어를 의미

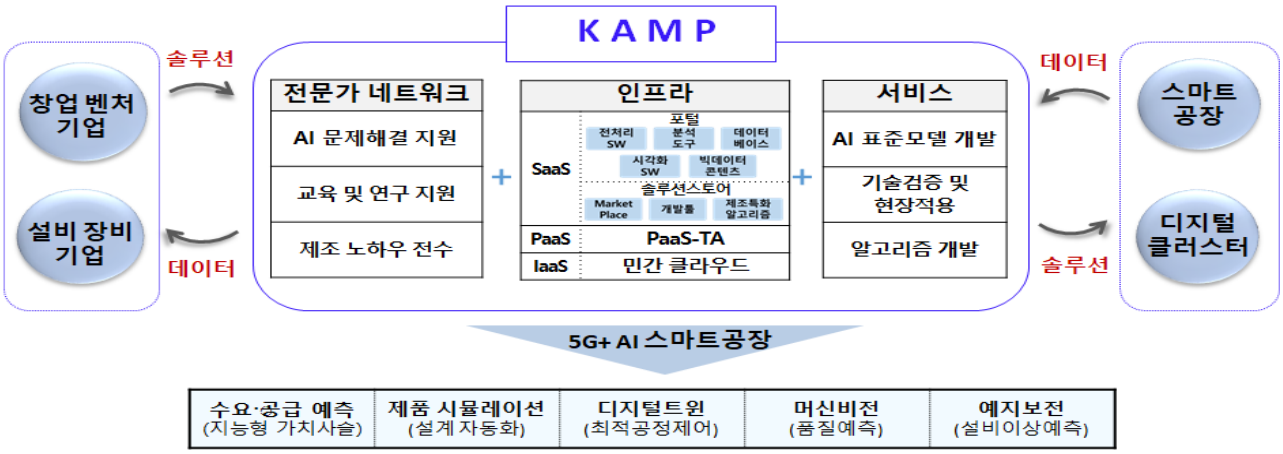
체(구글, 아마존, 애플)의 신규진입으로 서비스로봇 시장 중심으로 개편되고 있음

- 개인배달장치법(Personal Delivery Device Act)을 각 주별로 제정하여 지상이동 배달로봇 확산에 대응함

○ **일본**은 아베노믹스 성장전략의 핵심정책으로 2015년 범정부차원의 '로봇신전략'을 발표함

- 로봇보급 확산 및 활용 확대를 위한 규제완화와 우리나라의 '시장창출형 로봇보급사업'을 벤치마킹한 '로봇도입실증사업' 추진중
- 'Society 5.0' 실현을 위해 5대 신성장 전략 분야 (핀테크, AI, IoT, 스마트 시티, 개인정보 등)에 규제 샌드박스 도입을 추진하고 있음

<그림 2.14> AI 중소벤처 제조 플랫폼 구조도



자료: 중소벤처기업부 보도자료 (2020.7) 참조

○ **유럽연합**은 'Horizon 2020[17]'의 로봇 분야 실행을 위해 공공과 민간의 파트너십으로 민간 로봇 투자 프로그램인 SPARC을 개시하여 7년 동안 7~28억 유로를 지원

- 독일은 인공지능연구센터를 통한 '스마트공장시스템' 개발 등 하이테크 전략을 추진하고, 프랑스는 250개 중소기업에 로봇 설비투자의 10%를 지원 또

[17] EU가 주력산업의 글로벌 경쟁력 확보와 지속가능한 성장을 위해 7년('14~'20)동안 800억 유로의 자금을 투입하는 연구 및 혁신 프로그램

는 2020년 세계 5대 로봇국가를 목표로 1억 유로 투자

- 영국은 2014년 국가로봇전략를 수립하고 2025년까지 세계 로봇시장의 10% 점유를 목표로 하며, 네덜란드는 2014년 경제부, 경제인연합, 상공회의소, 응용과학연구소가 공동으로 Smart Industry를 발표함

○ **중국**은 중국 10대 산업육성 계획의 핵심 산업분야로 로봇을 선정하고 주요 제조 공정의 스마트화와 로봇 활용 확대를 통해 스마트팩토리를 구축하는 Smart Manufacturing 프로젝트를 추진

- 공업신식화, 국가발전개혁위원회, 재정부 공동으로 2016년에 로봇산업 발전 계획을 발표

2.1.2.3 자동화 현황 및 정책에 대한 <소결론>

❑ **자동화(automation)**는 우리나라를 포함하여 전세계 국가들이 생산성 향상 및 지속적인 경제성장을 위해 가장 중요한 목표로 판단

○ 자동화(automation)를 위해 전세계 국가들이 추진하는 정책들은 ① 자국의 로봇 산업 확대와 ② 스마트팩토리 보급 확산에 주력

○ 2000년대 초반에는 로봇과 스마트팩토리를 통한 자동화(automation)가 미진하였으나, 2020년대의 최근 자동화(automation)에 대한 관심과 확산이 급속히 이루어지고 있음

○ 로봇산업은 초창기 산업용 로봇 중심으로 발전하였으나, 최근에는 서비스용 로봇 위주로 빠르게 개편되고 있어서 가까운 시기에 전산업으로의 로봇화가 진행될 것으로 예상

❑ 우리나라의 로봇산업과 스마트팩토리는 세계 주요국과 견주어 전혀 손색이 없으나, 다양한 최신기술들의 고도화된 융합이 요구되는 최근 추세를 반영하기 위해 우리나라의 <노동정책, 교육정책, 경쟁정책>에 대한 새로운 정비가 필요

2.2 생산자동화가 경제에 미치는 영향에 대한 기존문헌 분석

❑ 생산자동화가 경제에 미치는 영향은 크게 노동시장과 경제성장에 미치는 이론 및 실증 분석으로 구분될 수 있음

○ 따라서 본 연구에서는 생산자동화가 ① 노동에 미치는 효과와 ② 경제성장에 미치는 효과로 구분하여 이론과 실증분석 결과들을 설명

2.2.1 생산자동화가 노동에 미치는 효과

❑ 첫째, <국가 및 산업> 수준에서 생산자동화가 노동시장에 미치는 영향은 크게 2가지로 구분할 수 있음

○ 첫째, 생산자동화를 통해 일자리를 사라지게 하는 부정적인 직접효과가 있으며, 둘째, 생산성 향상과 시장규모의 확대를 통한 노동수요과 고용에 영향을 미치는 긍정적인 효과로 구분할 수 있음

- 생산자동화가 고용에 미치는 긍정적인 효과가 부정적인 효과보다 크게 하기 위해서는 적절한 노동정책과 교육정책이 필수적임

○ 기존문헌에서는 생산자동화의 효과를 측정하기 위해서는 생산자동화를 추정하는 것이 매우 중요한데, ① 최근 국제로봇연합에서 국가 및 산업별로 제공하는 로봇의 수를 생산자동화의 수준으로 측정하여 분석하기도 하고 ② 생산자동화와 관련된 특허를 통해 생산자동화 수준을 측정하기도 함

- 국제로봇연합에서 제공하는 통계를 활용하여 실증분석을 수행한 연구로는 Autor & Dorn(2013), Acemoglu & Restrepo (2020), Cheng et al. (2019), Dauth et al.(2021), Graetz & Michaels (2018)가 있으며, Mann and Puttmann (2017)과 Webb (2020)은 특허를 활용함

○ 국제로봇연합이 제공하는 집계통계를 활용한 연구에서 Acemoglu & Restrepo (2020)는 노동자 1000명 당 1개의 로봇 증가는 전체 인구 중 노동자의 비중을 0.2% 포인트, 임금 증가율은 0.42% 감소시키는 반면, 생산성은 증가하고 노동소득분배율이 감소함을 발견

- 생산자동화에 의한 일자리의 파괴가 우위에 있다고 제안하고 있으며, 미국에 설치된 로봇 1개당 6명의 노동자를 대체한다고 주장

- Acemoglu & Restrepo (2020)의 방법론을 활용하여 미국 이외의 다른 몇몇 국가에도 적용

- Chiacchio et al. (2018)는 유럽 국가들에서 로봇 1개당 3~4명의 노동자를 대체하지만, 임금 증가율에서는 유의한 결과를 찾지 못했고, Aghion et al. (2019)는 프랑스 행정부 통계를 활용하여 로봇 1개당 10명의 노동자를 대체한다고 주장
- 반면, 독일 통계를 사용한 Dauth et al. (2021)은 고용합계에서는 로봇을 활용해도 아무런 효과가 없다고 보고하고 있으며, 저숙련 노동자의 임금은 낮아지는 반면, 산업용 로봇의 사용이 해당 산업 전체 수준에서 고용의 비중 감소에 기여한다고 주장

○ 생산자동화의 다른 측정방법, 즉 특허를 사용하는 다른 연구는 매우 혼재된 결과를 제공하고 있음

○ 특허를 활용하여 생산자동화를 측정한 Webb (2020)는 생산자동화 기술에 많이 노출된 직업은 임금과 고용이 감소하는 발견한 반면, 같은 방법론을 활용한 Mann and Puttmann (2017)는 생산자동화가 고용에 긍정적인 효과가 있다고 주장

○ 그 밖에 연구들 (Dauth et. Al (2021), Mann and Puttmann (2017), Gregory et al. (2016))은 생산자동화로 균형임금이 감소함에 따라 산업들이 노동수요를 증가시킨다는 결과를 제공

- 이러한 결과는 로봇을 활용하면서 기업들이 보완적인 업무에 대한 노동수요가 증가하는 것을 의미하고, 생산자동화에 의한 제조업 고용의 감소는 서비스부문의 다른 지역산업으로의 긍정적인 고용 파급효과에 의해 상쇄됨

○ 생산자동화가 일자리 파괴 (job destruction)를 야기한다는 의견은 고용과 임금의 하락, 그리고 노동비중의 감소를 포함.

○ 하지만, Graetz & Michaels (2018)은 국제로봇협회의 17개 선진국에 대한 로봇 통계를 활용하여 생산자동화가 저숙련 노동자의 비중은 감소하지만 총노동에는 영향이 없으며, 로봇 밀집도 (robot densification)가 총요소생산성과 임금이 상승하고 최종재화의 가격하락과 관련이 있다고 주장함

- 같은 통계 출처에서 14개의 유럽 국가들에 대한 분석에서 Klenert et al. (2020)는 로봇의 사용이 총노동의 증가와 관련이 있다는 것을 확인

○ 전반적으로 생산자동화와 고용에 대한 국가 및 산업 수준에서의 연구들은 일자리 파괴에 옹호하면서도 혼재된 실증분석들을 제공하고 있음

❑ 둘째, <기업과 사업체> 수준에서 생산자동화와 고용에 대한 많은 실증분석 연

구들은 생산자동화가 고용에 직접적으로 긍정적인 효과를 미친다는 가설을 뒷받침하고 있음

○ Acemoglu et al. (2020)와 Aghion et al. (2020)는 프랑스에서, Bessen et al. (2019)는 미국, Chandler and Webb (2020)는 영국, Dixon et al.(2019)는 캐나다, Humlum (2019)는 덴마크, Koch et al. (2021)는 스페인에서 생산자동화가 균형임금과 노동비중의 감소에 대한 근거를 찾지 못함

○ 이러한 긍정적인 효과는 생산자동화에 의한 일자리의 순창출 또는 생산자동화에 의한 기업들간의 연계가 강화되는 것을 반영

○ 전반적으로 위의 연구들은 생산자동화가 노동생산성을 향상시키고, 소비자에 대한 재화의 질을 고려한 가격하락을 야기하고, 순일자리 성장을 야기하는 기업의 시장규모와 재화의 수요를 증가시키는 관점을 지지

- 하지만, 생산자동화에 의한 기업의 생산성 향상은 생산자동화를 수행하지 않은 기업이 고용과 부가가치의 감소를 통해 시장퇴출을 야기할 수 있음 (Acemoglu et al. (2020); Aghion et al. (2020); Koch et al. (2021))

○ 또한 Aghion et al. (2020)은 산업 수준에서도 국내고용 측면에서 생산자동화에 의한 간접적인 일자리 파괴는 직접적인 일자리 창출에 비해 매우 작으며, 비즈니즈 탈취는 부분적으로 타국의 희생으로 발생함을 주장

- Babina et al. (2020)는 AI 기술에 대한 투자기업들은 비록 단기적으로 생산성에 특별한 효과가 없으나, 기업과 산업수준에서 고용과 매출의 매우 빠른 성장을 경험함을 확인함

- AI 기술에 투자한 기업의 생산성이 단기적으로 아무런 효과가 없는 것은 AI 기술이 노동자들에게 충분히 습득되지 않아서 일 것으로 추정

❑ 다양한 생산자동화의 측정방법과 국가, 산업 및 기업들, 그리고 다른 시기들에 대한 미시분석들은 기업들 간의 잠재적인 일자리 파괴효과와 자동화 기업의 긍정적인 고용효과를 통해 생산성 효과의 중요성을 언급하고 있음

○ 기업 수준에서 생산자동화는 시장규모 효과에 의해 고용에 대한 긍정적인 효과가 있으며, 즉, 자동화 기업은 생산성 향상으로 높은 수준의 고용을 창출함

❑ 생산자동화가 소득재분배에 미치는 효과도 매우 큰 관심 주제임

○ 1990년대에 기술편향적인 발전은 높은 기술수준의 노동자와 기술이 서로 보완관계를 가짐으로써 낮은 임금과 높은 임금 수준의 직업은 중간 임금 수준의 노

동자에 비해 빠른 임금상승을 경험함 (Acemoglu & Autor (2011))

○ 2000년대에 Card & DiNardo (2002)와 Autor et al. (2003)는 반복적인 업무에 대해 생산자동화가 노동을 대체한다고 주장하며, 반복적이지 않은 업무는 더 많은 수요가 발생한다고 주장

- Autor et al. (2003), Jaimovich & Siu (2012), Autor & Dorn (2013), Charnoz & Orand (2017), Blanas et al. (2019)를 참조

○ 기업수준의 연구에서는 직업들 간의 노동 재분배를 강조함(Bessen (2019); Bonfiglioli et al. (2020); Humlum (2019); Acemoglu et al. (2020) 참조)

- Humlum (2019)는 덴마크에서 생산직 노동자가 기술자, 엔지니어, 또는 연구자로의 노동수요 변화를 보고하고 있으며, Bonfiglioli et al. (2020)는 프랑스 기업들의 로봇 수입은 높은 수준의 기술을 가지고 있는 노동자의 생산성과 고용비율을 증가시킨다는 것을 보여줌

- Bessen (2019)는 생산자동화가 임금이 높은 노동자의 성장을 유도하고 낮은 임금의 일자리를 감소시키는 것을 보여주고 있으며, 캐나다 통계를 통해 Dixon et al. (2019)는 높고 낮은 기술수준의 노동자들의 고용은 증가하지만, 중간 기술수준의 노동자에 대한 고용은 위축된다는 것을 보여줌

- 마지막으로 기업 수준에서, 낮은 기술수준의 노동자가 높은 기술수준을 가진 노동자로의 전환을 통해 생산성 향상에 기여함 (Humlum (2019); Acemoglu et al. (2020))

○ 하지만, 몇몇 연구들은 생산자동화에 의한 직업 또는 업무들 간의 재분배 효과를 전혀 찾지 못하는 경우도 존재 (Domini et al. (2019); Aghion et al. (2020))

- Acemoglu and Autor (2011)는 생산자동화에 의한 직업 및 업무의 재분배가 전체 회사에서 발생하는 것이 아니라, 특정 업무에서 발생하기 때문일 수 있으며, Brynjolfsson & McAfee (2011)는 특정 인간의 기술은 생산자동화 보다 훨씬 가치가 있을 수 있고, 마지막으로 Aghion et al. (2020)는 생산자동화가 노동자 스스로의 재구조조정을 유도하기 때문일 수도 있다고 주장

2.2.2 생산자동화가 경제성장에 미치는 효과

❑ 인공지능(AI)은 인간의 행동을 모방하는 기계의 능력으로 정의되며, 인공지능(AI)은 생산자동화의 가장 최신 형태

○ 인류가 겪어온 4차례의 혁명을 고려하면, 첫째, 18세기의 증기기관 혁명, 둘째, 20세기 초 내연기관 혁명, 셋째, 1970~1980년대의 반도체와 IT 혁명 다음으로 넷째, 가장 최근의 자동화(automation) 혁명을 언급할 수 있음

○ 많은 연구들이 인공지능과 자동화가 경제성장에 미치는 효과를 분석 (Zeira (1998), Hemous & Olsen (2014), Acemoglu & Restrepo (2016), 그리고 Aghion et al. (2017)를 참조)

- 인공지능과 자동화는 유한한 공급인 노동이 무한한 공급이 가능한 자본에 의해 대체됨으로써 아이디어의 생산과 재화와 서비스의 생산을 통해 경제성장을 가속할 수 있음
- 하지만, 이러한 인공지능과 자동화에 의한 경제성장이 촉진은 부적절한 경쟁정책에 의해 제한될 수 있음

○ Zeira (1998)는 기본적으로 자본이 노동을 대체함으로써 경제성장을 가속한다고 이론적으로 제안하였으며, 경제성장의 가속으로 인해 자본의 비중이 항상 안정적이라는 Kaldor fact를 반박하며 자본비중의 증가를 예상

○ Acemoglu & Restrepo (2016)는 Zeira (1998)의 확장모형으로써 안정적이고 유일한 균형성장경로가 존재한다고 주장하였으며, Aghion et al. (2017)의 이론모델은 자동화가 장기적 경제성장에 영향을 미치는 메커니즘에 Baumol의 비용효과를 강조하여 설명하고 있음

- Baumol (1967)에 따르면 특정 산업부문에 기계화 및 자동화가 진행됨에 따라 노동생산성과 임금 수준이 상승하는 경우, 상대적으로 노동집약적이고 기계화 및 자동화가 어려운 여타 산업부문의 임금 수준이 상승하게 됨
- 따라서, 자동화 부문에서 생산된 재화의 수요 가격탄력성이 낮다면 국내총생산 대비 자동화 부문 생산물의 부가가치 비중과 자본소득분배율이 감소하게 됨

○ Aghion et al. (2017)는 재화와 서비스의 생산이 오직 노동에 의해서만 이루어지고, 자동화는 오직 지식 또는 기술의 생산에만 영향을 미치는 극단적인 경우를 고려할 때, 인공지능이 급속하게 자기 개선되어 유한 시간에 무제한의 기계지능을 통해 무한한 경제성장을 가능케하는 '특이점 (singularities)'으로 이어진다고 주장

○ 자동화와 경제성장과 관련한 이론모형들을 통해 자동화가 경제성장에 긍정적인 효과를 가지며, 균형성장경로도 존재할 뿐만 아니라, 무한한 경제성장을 의미하

는 특이점의 가능성도 제기됨

❑ 하지만, 최근 10여년 동안 미국과 같은 주요선진국에서 인공지능과 자동화의 비중이 증가했음에도 불구하고 놀랄만한 경제성장이 발생하고 있지 않는지에 대한 의문을 제기

○ 한가지 설명은 생산과 연구에 대한 중요한 투입요소들이 자동화될 수 없기 때문이며, 특히, Baumol's cost disease effect가 경제성장을 저해하기 때문으로 설명하지만, 지난 10여년 동안 생산성 증가가 감소하는 사실을 설명하기에는 부족

○ 위의 현상에 대해 Aghion et al. (2019)은 두 기업의 생산물의 질 (product quality)의 차이를 통해 설명하는데, 경쟁우위를 가지고 있는 기업은 조직 자본 organizational capital, 네트워크의 발달, 또는 조세회피 능력 등을 통해 다른 기업에 비해 효율성 이익을 즐기고 있으며, 높은 이윤율 mark-up을 유지하기 때문으로 설명.

- 경쟁우위를 가지고 있는 기업은 타기업에 비해 높은 이윤을 가지고 있기 때문에 타기업과의 경쟁을 통한 성장을 하지 않을 것이며, 타기업도 적극적인 혁신에 대한 유인이 존재하지 않음
- 따라서, 전반적인 혁신과 생산성 증가가 낮아질 것이며, 이러한 설명은 1995년부터 2005년까지 ICT 혁명으로 급속한 경제성장 이후 2005년 이후 미국의 생산성 증가가 지속적으로 하락하고, 미국의 평균 markup이 놀랄 만큼 증가하는 현상을 잘 설명하고 있음
- 높은 markup을 가지고 있는 기업들의 비중은 증가하였지만, 기업들 간의 markup이 상승하는 트렌드를 보이지는 않음

○ 인공지능과 자동화의 도입에도 불구하고 최근 미국의 생산성이 하락하는 것은 기술혁명이 존재하더라도 제도와 정책이 적절하지 않으면 역효과가 있다는 것을 보여줌

- ICT와 AI는 플랫폼/네트워크 또는 사회적 자본을 경쟁우위 기업들이 발전시키도록 함으로써 타기업들(non-superstars)의 혁신과 시장진입의 장벽이 되기도 함
- 따라서, ICT와 AI 혁명이 경제성장을 야기할 수 있도록 적절한 경쟁정책에 대해서도 다시 고려해야 함

제 3 장 이론 모형

3.1 정태 모형

3.1.1. 최종재 생산자

❑ 최종재 생산 기술 (final good production technology)

○ 경제에 업무는 $i \in [0,1]$ 사이에 연속적으로 존재

○ 최종재 생산자는 경제에 공급되는 업무/직무 (task) $y(i)$를 조합하여 고정대체탄력 (constant elasticity of substitution, CES) 기술을 사용하여 최종재 Y를 생산함 (Zeira, 1998 JPE)

$$Y = \left(\int_0^1 y(i)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} di \right)^{\frac{\sigma}{\sigma-1}} \tag{1}$$

$\sigma \in (1, \infty)$: 최종재 생산을 위한 업무간 대체탄력도 elasticity of substitution.

❑ 생산함수:

○ 위 식 (1)에서 개별 업무 $y(i)$는 기존 경제학 모형에서 사용된 중간재라고 생각할 수 있음.

○ 전통적인 접근 방법은 자본과 노동을 조합하여 최종재를 생산하는 것임.

○ 다음 장에서 개별 업무의 생산에 대해 보다 자세한 서술이 있을 예정이며, 이를 통하여 자본과 노동의 비중이 자동화 기술에 의해 내생적으로 결정되는 모형을 분석.

❑ 편의상 업무 인덱스 i는 "노동에 내재한 기술 (skill)", 도구적 기술 (technology)" 및 수행에 필요한 지식 (knowledge) 및 내재 역량 (ability)[18] 등에 비례한다고 가정함.

○ $y(0)$: 가장 단순한 반복 업무

[18] O*NET 직업별 요구 역량 요소에 기반.

○ $y(1)$: 가장 복잡한 지적 능력/높은 교육 수준/내재 역량/기술이 요구되는 업무

❑ 최종재는 완전 경쟁시장에서 생산됨.

❑ 최종재의 가격은 정태모형에서 1로 표준화 (numeraire)

❑ 소비자의 효용함수가 최종재에 대해 정의됨.

3.1.2. 업무 생산자

❑ 업무/직무는 직업에서 요구되는 필요역량들을 의미

○ 미국에서는 O*NET (Occupational Information Network: 직업정보 네트워크)에서 표준직업분류체계와 연관하여 이를 체계적으로 정리

○ 한국에서는 워크넷의 직업정보가 비슷한 역할을 하지만, 이는 한국 표준직업분류체계와 연계되지 않아 사용에 한계점이 존재.

❑ 직업에 따른 세부 업무/직무: 예) 택시운전기사 (O*NET, 53-3054.00 - Taxi Drivers)
- 자동차를 운전하여 미터기 등을 사용하여 요금을 받고 미리 계획되지 않은 고객을 수송하는 직업으로 다음의 세부 업무를 수

○ 고객으로부터 요금 또는 바우처 수령, 잔돈 지급, 영수증 발급

○ 본부와 무선/전화로 연락하거나 컴퓨터로 정보를 교환하여 고객 서비스 요청을 받기

○ 사고 발생시 사고 보고 완수

○ 택시 요금기를 사용하여 거리/시간/요금제 등에 따라 적절한 요금을 적용하고 이를 고객에 공지

○ 택시 또는 자신의 차량을 운전하여 고객을 운송

○ 차량 운송시 요구되는 안전 규정 및 국가법을 준수하고 고객이 안전 규정을 준수하게 함

○ 회사 수리공에게 차량의 문제점을 공지.

○ 차량의 사소한 문제를 수리하거나 문제 발생시 차량을 수리공에게 인도.

○ 정기 유지 보수: 타이어 압 유지, 연료/엔진오일/냉각수 등 보충 등…

❑ 본 연구에서 업무 $y(i)$는 개별 직업에서 요구되는 세부 업무의 공통된 특성을 모은 세부 업무의 추상화된 상위 개념임

- ○ 업무/직무는 노동자의 기술, 수행 능력 등에 대응하는 개념.
- ○ 본 연구에서 업무는 좁게 정의된 직무로서 같은 종류의 업무i에는 특정 기술/능력이 요구되며, 따라서 해당 기술을 소유한 노동자는 같은 종류의 업무에 속하는 세부 업무를 동일한 생산성으로 즉시 수행 가능.
- ○ 세부 업무는 업무가 수행되는 문맥에 따라 달라지며, 이 때문에 세무 업무 생산을 자동화하는 기술은 개별적으로 개발될 필요가 있음.

❑ 업무와 세부업무 구분의 예:

- ○ 예: 업무=차량 운전, 세부업무 = 장거리 컨테이너 트럭 운전, 택시 운전, 임원 차량 운전, 군사 트럭 운전, 택배 차량 운전, 자가용 운전, 등
- ○ 예: 업무=용접, 세부 업무=철문 용접, 자동차 생산 용접, 선박 용접, 비행기 용접
- ○ 예: 업무= 경제 자료 분석, 세부 업무= 증권사 이코노미스트의 경기 분석, 경제학자의 학술 연구를 위한 경제 자료 분석, 정책 연구를 위한 거시 변수 예측
- ○ 예: 업무= 법률지식 적용한 연구, 세부 업무 = 고객 법률 변호를 위한 연구, 검찰의 기소를 위한 연구, 판사의 판결을 위한 연구, 법률 관련 전문 칼럼니스트의 칼럼작성을 위한 법률 연구, 법률 AI 서비스 개발을 위한 연구

❑ 본 모형에서는 각각의 업무 i 마다 하나의 업무 생산자가 존재함을 가정.

- ○ 업무 생산자는 자신의 업무에 대해 독점적 경쟁 공급자임
- ○ 분석 편의를 위해 업무 생산자는 세부업무를 노동과 자본재 그리고 생산 자동화 기술을 도입하여 스스로 생산한다고 가정.
- ○ 업무 생산자는 특정 업무를 외주 생산하여 공급하는 전문 기업이라고 볼 수 있음.

❑ 업무 i의 생산자는 아래의 CES 생산 기술을 사용하여 업무 $y(i)$를 생산:

$$y(i) = \left(\int_0^1 x(i,j)^{\frac{\rho-1}{\rho}} dj \right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} \tag{2}$$

○ $x(i,j)$: 업무 i를 생산하기 위한 투입한 세부업무 $j \in [0,1]$

○ $\rho \in (1,\infty)$: 업무 생산을 위한 세부업무간 대체 탄력도 elasticity of substitution

❑ 세부업무의 생산:

○ 자동화 기술의 진전과 상관없이 기술수준 i의 세부업무는 업무 i에 요구되는 기술 수준을 가진 노동에 의해 생산 가능.

○ 세부업무에 투입된 기술 수준 i의 노동 1단위당 총요소생산성 $\gamma(i) > 0$ 만큼의 세부업무를 생산함.

○ 각각의 업무 i마다, 자동화가 쉬운 세부 업무에 낮은 번호를 어려운 것에 높은 숫자를 부여.

- $x(i,0)$: i 업무중 자동화가 가장 쉬운 세부업무의 생산량
- $x(i,1)$: i 업무중 자동화가 가장 힘든 세부업무의 생산량

○ 만약 업무자동화 기술 수준이 $a_i \in [0,1]$라고하면,

- 업무 i에 속하는 0부터 a_i 사이의 모든 세부 업무 ($j \in [0, a_i]$)가 자본재의 투입만으로 생산 가능함을 의미
- 특히 업무자동화는 자본재 1단위가 적용된 분야의 노동을 1단위 대체할 수 있는 기술을 의미
- $j \in (a_i, 1]$ 사이에 존재하는 업무 i의 세부업무들은 생산자동화기술이 존재하지 않으며, 노동을 사용해서 생산.

❑ 이를 요약하면 아래와 같은 세부업무 생산함수를 도출할 수 있음

$$x(i,j) = \begin{cases} \gamma(i) \cdot L(i,j) & \textit{노동만 이용} \\ \gamma(i) \cdot K(i,j) & \textit{자본만 이용}, j \le a_i \\ \gamma(i) \cdot [L(i,j) + K(i,j)] & \textit{노동과 자본 모두 이용}, j \le a_i \end{cases} \tag{3}$$

○ $x(i,j)$: 업무 i에 속하는 세부업무 j 생산량

○ $L(i,j)$: 업무 i에 속하는 세부업무 j 생산에 투입한 기술수준 i의 노동

○ $K(i,j)$: 업무 i에 속하는 세부업무 j 생산에 투입한 자본재

그림 3.1. 생산업무 자동화기술 도입에 따른 세부업무 생산 기술

3.1.3 노동자

❑ 노동자들 간에 이질성이 존재.

○ 매기 (每期) 시작에 각각 노동자는 한 개의 기술을 가지고 있음.

○ 기술 i는 업무 i에 일대일 대응함.

○ 다시 말해, 세부 업무 생산함수를 나타내는 식 (3)에 의해, 기술 i를 가지고 있는 노동자들은 업무 i에 속하는 모든 세부 업무 j에 대해 $\gamma(i)$의 생산성을 가짐.

○ 노동자들은 노동을 비탄력적으로 공급함.

○ 단기적으로 노동자들은 자신의 기술수준에 상응하는 노동시장에서 이동하지 않음.

❑ 기술 수준 i를 가진 노동자의 총공급은 $L^s(i) > 0$ 임.

3.1.4 혁신가 (innovator)

❑ 경제에는 대표적 혁신가 (representative innovator)가 한 명 존재.

○ 생산자동화 기술을 업무생산자에게 공급함.

○ 생산자동화기술 $a_i \in [0,1]$ 는 업무 i를 생산하기 위한 세부 업무 j중에서 $[0, a_i]$ 사이의 업무를 자본재를 사용해 생산 가능하게 허용. (그림 3.1. 참조)

- 특히 자동화는 자본 1단위가 노동자 1명을 대체할 수 있게 함 (normalization).

❑ 다시 말해, 생산자동화기술 a_i는 업무 i 내에서 생산자동화가 이루어진 비율임.

○ a_i를 업무 i의 "생산자동화 비율"이라 칭할 수 있음.

❑ 혁신가의 자동화 기술 개발

○ 혁신가의 생산자동화기술 개발은 혁신가의 노동이 주 생산요소임.

○ 혁신가는 H만큼의 시간을 가지고 있으며 이를 전부 생산자동화기술 개발에 사용.

○ 자동화 기술 개발은 현재 자동화기술 수준 $a_i^0 \geq 0$를 바탕으로 이루어짐.

○ 혁신가가 보유한 자동화 기술 생산함수는 아래의 형태임:

$$a_i = a_i^0 + g(\eta_i) \tag{4}$$

○ 식 (4)에서 η_i는 업무 i를 자동화하는데 사용된 혁신가의 시간임.

○ 식 (4)에서 다음을 가정함: for $z \geq 0$ (시간 투입은 양수),

- $g(z) \geq 0$: 혁신가의 시간투입이 양수이면, 새로운 자동화기술이 개발되며 자동화비율 a_i가 증가
- $g(0) = 0$: 혁신가의 연구 시간 투입이 0이면 해당 업무의 생산자동화 기술 진전 또한 없음
- $g' > 0$: 혁신가 시간의 한계 생산성은 양수
- $g'' < 0$: 혁신가 시간의 한계 생산성은 체감

○ 식 (4)의 역함수를 취하면, 자동화 기술에 들어가는 시간을 아래와 같이 구할 수 있음.

$$\eta_i = \eta(a_i - a_i^0) \tag{5}$$

- 식 (5)의 함수 $\eta(\cdot)$는 식 (4)에서 g의 역함수임. 다시 말해,

$$\eta(\cdot) = g^{-1}(\cdot)$$

- 따라서, $\eta(z)$는 $z \geq 0$에 대해 정의됨 (다시 말해, 업무 i의 자동화 기술을 파괴하여 시간을 만들어 내고, 이를 사용하여 다른 업무 j의 자동화 기술을 만들어 내는 것 등이 불가능함을 의미)

○ 함수 g의 성질에 따라, $z \geq 0$ 에 대하여 정의된 η는 아래의 성질을 가짐

- $\eta(z) \geq 0$: 생산 자동화 기술의 진전에 대한 연구에 필요한 시간은 양수
- $\eta(0) = 0$: 기술 개발에 시간을 투입하지 않으면 생산자동화 기술의 진보도 없음.
- $\eta' > 0$: 생산자동화 연구의 진전에는 연구 개발 시간이 필요함
- $\eta''(z) > 0$: 생산자동화 기술의 진보에 필요한 시간은 기술진보의 정도 $z = a_i - a_i^0 \geq 0$ 에 체증함. 연구 시간의 한계 생산 체감을 반영하는 것임.

  예: $\eta(z) = \delta_0 z^{\delta_1}$, $\delta_0 > 0$, $\delta_1 > 1$

3.2 시장 참여자의 최적화

3.2.1 최종재의 최적 생산

❑ 최종재 생산은 식 (1)에서 주어진 규모불변(constant returns to scale)인 고정대체탄력 (CES) 생산함수 사용함.

○ 최종재는 완전경쟁 시장에서 생산됨.

○ 최종재 생산을 위해 투입되는 업무(중간재)는 독점적 경쟁적 생산자에 의해 공급됨.

○ 최종재 생산자는 비용최소화를 통해 최적 생산을 결정함.

○ 대표적인 최종재 생산자는, 생산량 $\bar{Y}$를 주어진 것으로 놓고, 다음의 비용 최소화 문제에 대해 의사 결정을 함.

$$\min_{\{y(i)\}} \int_i P(i)y(i)di \tag{6}$$

subject to

$$\bar{Y} \leq \left(\int_0^1 y(i)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} di \right)^{\frac{\sigma}{\sigma-1}}$$

○ 이를 풀면, 업무 i에 대한 수요함수를 아래와 같이 구할 수 있음

$$y(i) = (P(i)/P)^{-\sigma} \cdot Y \tag{7}$$

- 위 식의 자세한 도출은 부록 A.1 참조.

○ 식 (7)의 역함수를 취하면 업무에 대한 역수요함수(inverse demand function)를 아래와 같이 구할 수 있음.

$$P(i) = \left[\frac{y(i)}{Y} \right]^{-\frac{1}{\sigma}} \tag{8}$$

- 식 (8)에서 정규화 (normalization)조건으로 $P = 1$을 적용하였음.

3.2.2 세부업무 (subtask)의 최적 생산

❑ 세부업무의 생산

○ 세부업무 (subtask)는 업무(task) 생산의 투입재임.

○ 세부 업무는 관련 생산함수인 식 (3)에 의해 생산됨.

○ 세부 업무 (i, j)의 생산자는 주어진 현재 사용가능한 자동화 기술수준 a_i하에서 식 (3)에 따라 노동 $L(i, j)$, 자본재 $K(i, j)$를 선택하여 생산.

○ 세부 업무는 비용최소화를 통해서 생산이 결정.

○ 세부업무 생산을 비용을 커버해주는 조건으로, 업무 생산자가 생산 기술을 제공하고 외주를 준 것이라고 해석할 수도 있음.

❑ 자본재의 (렌탈) 가격은 R임.

- ○ 한국과 같은 소규모 개방경제의 경우 자본재의 가격은 외생적으로 주어진 것으로 보는 것이 적절하겠음.
- ○ 따라서 일단 자본재는 현 가격 하에서 해외에서 얼마든지 공급될 수 있음.

❑ 세부업무 생산을 위해 사용된 임금률:

- ○ 각 세부업무 (i,j)는 업무 i의 투입요소임.
- ○ 업무는 그 수행에 필요한 노동기술(skills)/도구적기술(technologies)/지식(knowledge)/내재역량(ability) 등에 의해 정의됨을 위에서 가정하였음.
- ○ 각각의 업무는 충분히 좁게 정의되어 있어, 같은 업무 i와 관련된 모든 세부 업무 j는 같은 "기술"이 요구되는 것을 가정함.
- ○ 다시 말해, 업무 인덱스 i 하의 다양한 세부 업무 j를 수행하는 노동은 완벽한 대체재임을 가정하는 것임.
- ○ 또한, 같은 업무를 수행하는 세부업무 사이의 이동은 마찰없이 즉각적으로 이루어짐을 가정.
- ○ 따라서, 업무 i와 관련된 노동시장은 단일 시장이며, 이는 완전 경쟁에 의해 가격(임금률)이 결정됨.
- ○ 이러한 시장 구조하에, 업무 i의 생산에 사용된 노동의 균형 시장 임금률은 $w(i)$로 세부업무와 관련없이 동일.
- ○ 업무 i에 속하는 세부업무 간에 임금이 다르면, 세부업무 간에 임금이 균등화 될 때까지 임금이 높은 쪽 세부 업무로 노동자의 이동이 발생 (arbitrage).
- ○ 임금 수준은 추후에 분석되는 시장 균형에 의해 내생적으로 결정

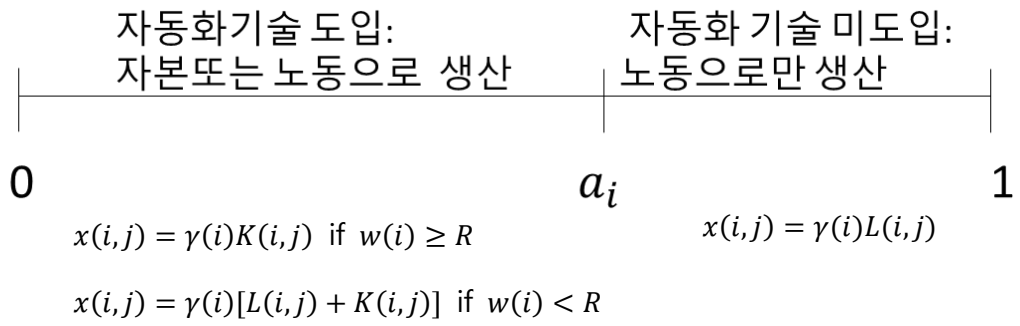
❑ 세부 업무의 생산을 위한 비용최소화는 다음의 세부업무 최적생산을 의미함:

$$x(i,j) = \begin{cases} \gamma(i) \cdot L(i,j) & j > a_i \\ \gamma(i) \cdot K(i,j) & j \le a_i,\ \ w_i \ge R \\ \gamma(i) \cdot \{L(i,j) + K(i,j)\} & j \le a_i,\ \ w_i < R \end{cases} \tag{9}$$

- ○ 식 (9)의 해석:

- 세부업무의 수요 $x(i,j)$의 생산량을 맞추기 위해 식 (3)에 주어진 세부업무 생산함수를 사용하는 비용최소화를 이루는 자본과 노동의 조합.
- 첫 줄: 생산자동화 기술이 존재하지 않는 세부업무 $j > a_i$는 노동에 의해 생산하는 것이 비용 최소화임, $L(i,j) > 0$
- 둘째 줄: 생산자동화 기술이 존재하는 세부 업무 $j \leq a_i$인 상황의 첫번째 경우. 만약 업무 i를 생산하는 투입될 수 있는 노동의 임금률이 자본의 (렌탈) 가격보다 높은 경우, 생산자동화기술을 사용하여 자본재만을 투입하여 세부업무를 생산하는 것이 비용최소화임. 따라서, $K(i,j) > 0$, $L(i,j) = 0$.
- 마지막 줄: 생산자동화 기술이 존재하는 세부업무 $j \leq a_i$인 상황의 두번째 경우. 만약 임금이 자본의 (렌탈)가격 보다 낮은 경우, 우선적으로 노동을 투입함. 만약, 세부업무 생산자에게 고용가능한 해당 기술을 가진 노동의 공급이 더 이상 없을 경우 자본을 투입하여 나머지 생산량을 맞춤. 따라서 $L(i,j) > 0, K(i,j) \geq 0$.

그림 3.2. 비용최소화 하의 세부업무 생산.



3.2.3 업무 (task) 생산자의 비용 최소화

❑ 업무 생산자는 자신의 업무에 대한 유일한 공급자이며, 다른 업무에 대해 최종재 생산과정에서 경쟁. 따라서, 독점적 경쟁 공급자임.

❑ 업무 생산자는 생산결정시점에서 자신의 업무에 대한 (역)수요함수인 식 (8) 및 자동화기술 a_i를주어진 것으로 놓고, 이익극대화를 통해 의사 결정을 함.

○ 자동화기술 a_i에 대한 결정은 혁신가의 최적의사결정에 관한 다음장에서 자세히 논의

❑ 업무에 대한 독점적 공급자의 이익극대화 결정을 위해서 우선 업무 생산에 대한 비용함수를 도출할 필요가 있음.

○ 업무생산자의 비용함수는 아래의 비용 최소화 문제에 의해 결정됨.

❑ 업무생산자의 비용 최소화 및 비용함수

○ 업무생산자의 비용 최소화 문제는 다음과 같이 세울 수 있음.

$$\min_{\{x(i,j)\}_j} \int P(i,j)x(i,j)\,dj \tag{10}$$

subject to (9) and

$$\bar{y}(i) \leq \left(\int_0^1 x(i,j)^{\frac{\rho-1}{\rho}}\,dj\right)^{\frac{\rho}{\rho-1}}$$

○ 위의 최소화 문제를 푸는 것은 세부업무 $\{x(i,j)\}$를 0과 1사이의 무한한 숫자의 j에 대해 최적화해야 하기 때문에 쉽지 않음.

○ 이를 해결하기 위해 문제를 아래와 같이 다시 구성하여 문제를 간략화함.

❑ 간략화된 업무 생산함수 도출

○ 업무 i의 생산을 위해 사용된 총노동수요는 아래와 같이 정의됨.

$$L(i) = \int L(i,j)dj \tag{11}$$

○ 업무 i의 생산을 위해 사용된 총자본수요는 아래와 같이 정의됨.

$$K(i) = \int K(i,j)dj \tag{12}$$

○ 업무 $y(i)$는 식 (2)의 기술을 사용하여 세부업무 $x(i,j)$를 조합하여 생산됨.

○ 세부업무 최적 생산조건인 식 (9)에 의하면,

- 자동화 기술이 아직 존재하지 않는 세부업무 $j > a_i$ 에 대해서 $x(i,j) = \gamma(i) \cdot L(i,j)$로 생산됨.
- 자동화 기술이 이미 존재하는 세부업무 ($j \leq a_i$)에 대해서, 자본 투입 비용이 노동 투입 비용보다 낮은 경우 ($R \leq w_i$) 경우 $x(i,j) = \gamma(i) \cdot K(i,j)$로 생산하는 것이 최적이며, 이 케이스가 노동 시장 균형에서 유일하게 일어날 수 있는 경우임.

○ 다시 말해 시장 균형에서 노동과 자본 모두를 사용해서 세부업무를 생산하는, 식 (9)에서 마지막 경우인 $\gamma(i) \cdot \{L(i,j) + K(i,j)\}$, $K(i,j) \geq 0$인 경우는 존재할 수 없음.

- 식 (9)의 마지막 경우는 임금률이 자본수익률보다 낮은 경우 ($w(i) < R$)임.
- 그러나 요소 시장이 경쟁적이고, 모든 세부 업무 생산자들이 식 (3)에서 주어진 동일한 기술을 갖고 있기 때문에, 만약 $w(i) < R$이라면 생산자동화 기술이 존재할지라도 ($j < a_i$), 임금을 w_i 을 조금 더 제공하고 노동만을 사용하는 것이 개별 세부업무 생산자에게 최적임.
- 노동의 공급은 단기적으로 제한되어 있으며, 같은 기술을 가진 다른 세부업무 생산자의 존재로 인해, 높은 임금의 제공은 고용을 늘리는 것이 아니라 초과수요가 사라질 때까지 임금을 상승시킬 것임.
- 초과 수요에 의해 $w(i) \geq R$인 경우까지 임금이 계속 상승하며, 이는 식 (9)에서 두번째 경우로 환원됨.
- 요약하자면, 세부업무 비용최소화를 보여주는 식 (9)에서, 시장 균형을 고려하면, 맨처음의 두개의 조건만 유효하며 마지막 조건은 상관이 없음.

○ 이러한 논의를 고려하면, 세부업무의 최적생산을 표현하는 식 (9)는 (노동) 시장 균형에서 다음의 조건을 충족할 수밖에 없음.

$$x(i,j) = \begin{cases} \gamma(i) \cdot L(i,j) & j > a_i \\ \gamma(i) \cdot K(i,j) & j \leq a_i \end{cases} \tag{13}$$

○ 이러한 결과를 이용해 업무 생산함수 (2)를 간략화해보면 아래와 같은 자본과 노동에 대한 일반적인 CES 함수로 표현할 수 있음.

$$y(i) = \left(\Gamma_K(i)[K(i)]^{\frac{\rho-1}{\rho}} + \Gamma_L(i)[L(i)]^{\frac{\rho-1}{\rho}} \right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} \tag{14}$$

○ 위 식에서 $\Gamma_K(i)$ 및 $\Gamma_L(i)$는 아래와 같이 정의됨.

$$\Gamma_K(i) = \gamma(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}} a_i^{\frac{1}{\rho}} \tag{15}$$

$$\Gamma_L(i) = \gamma(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}} (1 - a_i)^{\frac{1}{\rho}} \tag{16}$$

○ $\Gamma_K(i)$ 및 $\Gamma_L(i)$은 CES 생산 함수 (14)에서 자본 및 노동에 대한 비중으로 해석할 수 있음.

○ ρ는 업무내 (세부업무간) 대체탄력도이며, 노동-자본의 대체단력도이기도함.

○ CES 생산 함수 (14)의 자세한 도출은 부록 A.2를 참조.

❑ 업무 생산자의 간략화된 비용최소화 문제

○ 원래의 비용최소화문제 (10)는 식 (14)의 결과 및 본 장의 결과를 사용하여 다음과 같이 간략하게 표현해볼 수 있음.

$$\min_{\{L(i),K(i)\}} c(i) = w(i)L(i) + RK(i) \tag{17}$$

subject to $\bar{y}(i) \leq \left(\Gamma_{K(i)} K(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}} + \Gamma_{L(i)} L(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}} \right)^{\frac{\rho}{\rho-1}}$

○ 식 (17)에 대한 최적화에 대한 필요 일계조건을 사용하면 다음과 같은 조건을 구할 수 있음.

$$\frac{w(i)}{R} = \frac{\Gamma_{L(i)}}{\Gamma_{K(i)}}\left[\frac{L(i)}{K(i)}\right]^{-\frac{1}{\rho}} \tag{18}$$

❑ 업무 생산의 비용 최소화 조건 (18)을 식 (17)에 적용하면 아래의 비용함수를 구할 수 있음.

$$c_i\big(y(i)\big) = \kappa(i)y(i) \tag{19}$$

where

$$\kappa(i) = \frac{w(i)\kappa_1(i) + R}{\kappa_2(i)} \tag{20}$$

$$\kappa_1(i) = \left[\frac{w(i)}{R}\frac{\Gamma_{K(i)}}{\Gamma_{L(i)}}\right]^{-\rho} \tag{21}$$

$$\kappa_2(i) = \left[\Gamma_{K(i)} + \Gamma_{L(i)}\kappa_1(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}}\right]^{\frac{\rho}{\rho-1}} \tag{22}$$

- ○ 식 (20)에서 $\kappa(i)$는 업무(=중간재) 생산의 한계 비용임.
- ○ 식 (21)의 $\kappa_1(i)$ 는 업무 i 생산에 대한 자본-노동비율 (capital-labor ratio, $K(i)/L(i)$)의 역수임.
- ○ $\kappa_2(i)$ 는 업무 i 생산에 대한 산출물-자본 비율 (output-capital ratio, $y(i)/L(i)$)임.
- ○ 따라서, $\kappa_2(i)/\kappa_1(i)$는 노동생산성 (output-labor ratio)임
- ○ 자세한 도출과정은 부록 A.3 참조.

❑ 식 (19)과 연계되는 요소 수요함수는 아래와 같음

$$K^*(i) = \frac{1}{\kappa_2(i)}y(i) \tag{23}$$

$$L^*(i) = \frac{\kappa_1(i)}{\kappa_2(i)} y(i) \tag{24}$$

3.2.4 업무 생산자의 이윤 극대화

❑ 업무 생산자가 마주하고 있는 역수요함수 (8) 및 비용 함수 (19)을 사용해서 업무 생산자의 이윤 극대화 문제를 아래와 같이 세울 수 있음.

$$\max_{y(i)} \pi(i) = \underbrace{\left[\frac{y(i)}{Y}\right]^{-\frac{1}{\sigma}}}_{P(i)} y(i) - \kappa(i)y(i) \tag{25}$$

❑ 식 (25)에서 주어진 이윤극대화 문제의 일계조건을 정리하면, 독점적 경쟁시장에서의 업무 생산자의 이윤 극대화를 위한 최적생산량 $y^*(i)$을 아래와 같이 구할 수 있음.

$$y^*(i) = \left(\mu\kappa(i)\right)^{-\sigma} Y \tag{26}$$

❑ 또한, 최적생산량 (26)과 역수요함수 (8)을 이용하면 최적 가격 $P^*(i)$을 아래와 같이 구할 수 있음.

$$P^*(i) = \mu\kappa(i) \tag{27}$$

○ 여기서 $\mu = \frac{\sigma}{\sigma-1} > 0$ 로 한계생산비용 $\kappa(i)$에 대한 총이윤 (gross markup)을 의미

3.2.5 혁신가의 최적 의사결정

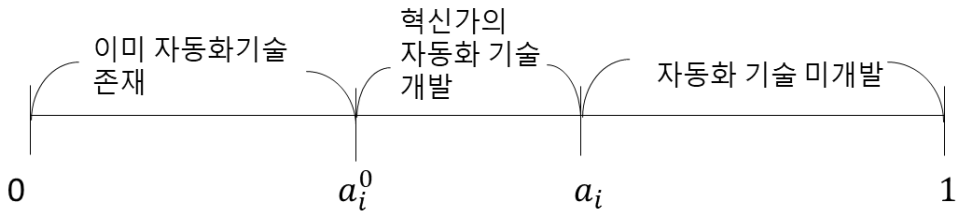
❑ 대표적 혁신가 (innovator)는 모든 업무 $i \in [0,1]$에 대한 생산자동화 기술을 개발/공급함.

❑ a_i^0: 혁신가가 자동화 기술을 공급하기 전에 생산자들에게 사용가능한 생산자동화기술수준 (이전의 생산자동화비율).

- ○ 개별 업무 i 중에서 자본의 투입을 통한 생산자동화로 생산 가능한 비율을 의미함 (automation penetration rate)

❑ 혁신가의 기술개발 후 자동화비율 a_i는 $a_i - a_i^0$ 의 새로운 세부업무를 자동화할 수 있게 해주는 것임. (그림 3.3 참조)

그림 3.3. 혁신가의 세부 업무에 대한 자동화 기술 개발



❑ 혁신가는 생산자동화 기술 개발 결정은 이윤극대화에 의해 결정된다고 가정함.

❑ 생산자동화 기술 개발에 필요한 요소는 H로 표현된 혁신가에게 주어진 한정된 시간임.

❑ 혁신가는 업무 i를 생산하는데 요구되는 세부업무의 한 단위를 자동화할 수 있는 혁신기술의 단위 가격 $q(i)$를 주어진 것으로 놓고, 한정된 시간 H를 각각의 업무자동화 기술에 배분하여 이익 극대화함.

❑ 생산자동화기술의 가격 $q(i)$를 결정하기 위해 추가적인 생산자동화 기술의 도입이 업무 생산자에게 가져올 편익에 대해 고려할 필요가 있음.

○ 현재 자동화 기술 수준 a_i^0을 가지고 있는 업무생산자 i에게 추가적인 자동화 기술 $\mathrm{d}a_i = a_i - a_i^0$의 도입이 가져오는 편익인 비용절감임.

○ 생산을 노동에서 자본으로 대체함으로 얻는 비용 절감을 통한 총 편익은 아래와 같이 표현해 볼 수 있음.

$$v(i) = \int_{a_i^0}^{a_i} \frac{w(i) - R}{\gamma(i)} x(i, a_i^0)\, ds = \frac{w(i) - R}{\gamma(i)} x(i, a_i^0)(a_i - a_i^0) \tag{28}$$

○ $\mathrm{d}a_i = a_i - a_i^0 \geq 0$: 생산자동화기술이 추가적으로 공급되는 세부업무의 개수(비율)

- $a_i > 0$: 혁신가에 의해 새로 공급될 생산자동화기술. a_i기술이 도입될 경우, $[0, a_i]$사이의 모든 세부업무가 자본에 의해 생산 가능함.
- $a_i^0 > 0$: 기존에 도입된 생산자동화 기술. a_i기술이 도입하지 않고, a_i^0기술을 그대로 사용할 경우, $[0, a_i^0]$ 사이의 세부업무 생산에 자본을 사용하여 가능.

○ $\frac{w(i)-R}{\gamma(i)}$: 생산자동화기술 도입으로 인해 세부업무생산을 노동에서 자본의 투입으로 대체할 경우, 세부업무 생산 한 단위 마다 절감되는 비용.

- $w(i) - R$: 노동 한 단위를 자본 한 단위로 대체할 때의 비용 절감.
- 세부업무 생산 함수 (3)에 의해 세부업무 한 단위 생산에는 노동 또는 자본 $1/\gamma(i)$ 단위가 요구됨.

❑ 생산자동화기술의 총편익을 표현한 식 (28)에 의하면, 새로운 생산자동화기술의 한계 편익은 아래와 같이 표현됨.

$$V(i) = \frac{w(i) - R}{\gamma(i)} x(i, a_i^0) \tag{29}$$

❑ 혁신가가 새로운 자동화 기술의 공급으로부터 얻을 수 있는 가격 (생산자동화의 가격)은 총한계편익 $V(i)$의 일부이며 이는 총편익에서 혁신가의 몫 $B(i) \in$

(0,1]에 따라 아래와 같이 결정됨.

$$q(i) = B(i)V(i) = B(i)\frac{w(i) - R}{\gamma(i)}x(i, a_i^0) \tag{30}$$

○ $B(i)$는 혁신가의 협상력 (bargaining power)를 의미하며, 이는 법적 제도, 관습, 세금 및 기타 정부지원을 포함할 수 있음.

❑ 각각 업무에 적용되는 최적의 생산자동화율을 구하기 위해 혁신가는 다음의 이윤극대화를 위한 최적화 문제의 해를 구함:

$$\max_{\{a_i\}} \int_0^1 q(i)\,(a_i - a_i^0)di \tag{31}$$

subject to $\mathrm{H} = \int_0^1 \eta(a_i - a_i^0)\,di$ and $a_i - a_i^0 \geq 0$.

❑ 혁신가의 최적 결정에 대한 필요일계조건은 다음과 같음.

$$q(i) = \lambda_I \eta'(a_i - a_i^0), for\ all\ i \in (0,1) \tag{32}$$

○ 여기서 λ_I는 혁신가의 이윤극대화문제에 대한 시간 제약에 대한 라그랑지 승수임.

- λ_I는 혁신가의 시간 제약을 한 단위 늘리는 데 대한 그림자 가격임.

○ 혁신가의 이윤 최적화조건 (32)을 대표적인 세부업무 l 및 k에 대해 표현한 후, 그 비율을 취하면 라그랑지 승수를 제거한 표현을 아래와 같이 구할 수 있음.

$$\frac{q(l)}{q(k)} = \frac{B(l)}{B(k)}\frac{w(l) - R}{w(k) - R}\frac{\gamma(k)}{\gamma(l)}\frac{x(l, a_i^0)}{x(k, a_i^0)} = \frac{\eta_l'}{\eta_k'} \tag{33}$$

where $\eta'_x = \frac{\mathrm{d}\eta(a_x - a_x^0)}{\mathrm{d}a_x}$, $x = l, k$.

- ○ 식 (33)의 좌측은 업무 l과 업무 k와 관련된 생산자동화 기술의 상대 가격을 의미.
- ○ 식 (33)의 우측은 업무 l과 업무 k를 자동화할 수 있는 기술 개발을 위해 필요한 한계 시간 비용의 상대적 비율을 의미 (MRTS)

❑ 식 (33)에 표현된 일계조건은 또한 다음과 같이 표현할 수 있음.

$$\frac{q(l)da_l}{q(k)da_k} = \frac{d\eta_l}{d\eta_k} \tag{34}$$

- ○ 좌측의 식은 $\mathrm{d}a_l$ 만큼의 자동화 기술을 추가 개발했을 때 얻을 수 있는 한계생산물의 상대가격 (value of marginal products)을 의미함.
- ○ 우측의 식은 시간으로 표현된 한계 비용의 상대 비율을 의미함.
- ○ 본 식에 의하면 이윤 극대화는 모든 업무에 대해 상대적으로 한계생산물(자동화 기술)의 상대가격을 연관된 생산 시간의 한계적 증분과 일치시키는 것임.
- ○ 따라서 만약 어떤 자동화 기술의 가격이 0이라면 해당 자동화 기술은 시간 투입을 하지 않는 것이 이윤극대화를 이루는 방법임.

3.3 시장 균형

❑ 본 모형에서 최종재 시장, 업무 시장, 세부업무 시장, 노동 시장, 자본 시장 및 생산자동화기술 시장 등 6개의 시장이 존재함.

- ○ Wallace law에 따라 5개의 시장이 균형일 경우, 나머지 한 개의 시장은 자동적으로 균형임.

3.3.1 자본 시장 균형:

❑ 본 경제는 소규모 개방경제로 자본 유출입이 자유로움.

❑ 자본의 가격은 국제 자본시장에서의 R로 고정되어 있으며, 현 가격 하에서 무한하게 공급될 수 있음.

❑ 따라서 자본 시장은 항상 균형 상태에 있음.

3.3.2 세부업무 시장 균형:

❑ 세부업무 시장의 균형은 완전경쟁 시장 구조하에서 업무 생산자가 세부업무를 한계비용을 지불하면서 구입하기 때문에 균형 성립 (한계비용=가격).

❑ 시장 균형에서, 세부업무 최적생산식 (13)에 의하면, 세부업무 $x(i,j)$의 가격은 아래와 같이 표현됨.

$$p(i,j) = \begin{cases} \dfrac{w(i)}{\gamma(i)} & if\ j > a(i) \\ \dfrac{R}{\gamma(i)} & otherwise \end{cases} \tag{35}$$

○ 세부업무 (i,j) 한 단위 생산에 $1/\gamma(i)$ 단위의 노동 또는 자본이 필요하고, 식 (13)에 의해, 투입요소는 $j > a(i)$일 경우 노동이며, $j \leq a(i)$일 경우 투입요소는 자본이기 때문임.

❑ 식 (35)에서 알 수 있는 것은, $j > a_i$인 경우 (자동화되지 않는 세부업무가 남아 있는 경우) 노동시장 균형조건에 의해 결정된 임금 $w(i)$ 에 의해 세부업무시장의 균형가격이 영향을 받는 다는 것임.

3.3.3 업무 시장 균형:

❑ 업무 시장은 독점적 경쟁 시장으로 그 산출량과 가격은 각각 식 (26) 및 (27)에 의해 결정됨.

❑ 식 (26) 및 (27)에 의하면, 업무 시장의 균형 가격 및 생산량은 최종재 생산량

Y에 비례함.

3.3.4 노동 시장 균형

❑ 본 모형에서 노동자들은 노동을 비탄력적으로 공급함.

❑ 또한 단기적으로 노동자들은 자신의 기술 (skills, technologies, abilities 등)에 대응되는 노동 시장에서 다른 기술 수준의 노동 시장으로 이동할 수 없음.

❑ 이미 언급했듯, 모든 개별 업무 i는 노동자들의 특정 기술 수준에 대응되는 것으로 같은 문자 i를 사용하여 인덱스함.

❑ 이러한 가정하에 노동시장의 균형은 아래의 조건에 의해 성립됨.

$$L^s(i) = L^*(i) \tag{36}$$

○ 좌변의 $L^s(i)$는 업무 i를 생산할 수 있는 기술 수준에 대응하는 노동 공급.

○ 우변의 $L^*(i)$는 업무 i를 생산하는데 요구된 (최적) 노동 수요.

❑ 식 (36)은 업무 생산자의 노동 수요 함수 (24) 및 최적 업무 생산량을 표현하는 식 (26)에 의해 아래와 같이 기술될 수 있음.

$$\begin{aligned} L^s(i) &= L^d(i) \\ &= \frac{1}{\frac{\kappa_2(i)}{\kappa_1(i)}} \left(\mu\kappa(i)\right)^{-\sigma} Y \end{aligned} \tag{37}$$

❑ $\kappa(i), \kappa_1(i)$ 및 $\kappa_2(i)$는 식 (15)-(16) 및 (20)-(22)에서 확인할 수 있든, 임금률 $w(i)$ 및 생산자동화비율 $a(i)$의 함수임.

○ 따라서 노동시장 균형 조건 (37)은 모든 업무 i에 대해, 주어진 노동 공급 $L^s(i)$가 있을 때, 자동화 기술 $a(i)$에 대응하는 시장 균형 임금 $w(i)$를 어떻게 구할 수 있는지 나타내고 있음.

3.3.5 최종재 시장 균형

❑ 최종재는 소비자 측면에서 소비 또는 자본재 구매에 사용됨.

❑ 생산자 측면에서 자본과 노동에 대한 대가로 지불됨 (constant returns to scale 생산함수).

❑ 생산비용에 추가로 업무 생산자들은 생산비용에 이윤 (gross markup) μ를 부과함.

○ 가계가 업무 생산자의 소유권을 가지고 있다고 가정하면, 순이윤 $(\mu - 1)$의 부분이 업무생산자로부터의 배당이며, 이는 가계의 수입으로 잡힘.

❑ 따라서 최종재의 수요는 다음 조건을 만족함.

$$Y = \mu\left[\int w(i)L(i)di + R\int K(i)di\right] \tag{38}$$

❑ 위의 최종재 시장 균형 조건은 자본 및 노동의 수요함수 (23) 및 (24)을 적용하여 아래와 같이 적을 수 있음.

$$\begin{aligned} Y^d &= \mu\left[\int w(i)\frac{\kappa_1(i)}{\kappa_2(i)}y(i)di + R\int \frac{1}{\kappa_2(i)}y(i)di\right] \\ &= \mu\int \kappa(i)y(i)di \end{aligned} \tag{39}$$

❑ 공급 측면에서, 총 산출물 (GDP)은 시장 균형 하에서 아래와 같이 표현될 수 있음.

$$Y^s = \left[\int y(i)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}}di\right]^{\frac{\sigma}{\sigma-1}}$$

$$= \left[\int \left\{ \frac{\kappa_2(i)}{\kappa_1(i)} L^s(i) \right\}^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} di \right]^{\frac{\sigma}{\sigma-1}} \tag{40}$$

❑ 따라서 최종재 시장 균형에서 아래의 조건을 만족함.

$$\mu \int \kappa(i) y(i) di = \left[\int \left\{ \frac{\kappa_2(i)}{\kappa_1(i)} L^s(i) \right\}^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} di \right]^{\frac{\sigma}{\sigma-1}} \tag{41}$$

3.4 비교 정태 분석

3.4.1 혁신가의 최적화 조건에 대한 비교 정태 분석:

$$q(i) = \lambda_I \eta'(a_i - a_i^0) \text{ for all } i \in (0,1)$$

❑ 위 식은 혁신가의 일계조건식 (32)임.

- ○ 좌변은 세부업무 1단위의 생산자동화 기술에 대한 가격 $q(i)$임.
- ○ 우변은 혁신가의 시간으로 측정된 한계 비용의 비율임.

❑ 전미분을 사용한 비교 정태분석을 통하면 아래와 같은 관계를 얻을 수 있음.

$$\frac{d(a_i - a_i^0)}{dq(i)} = \frac{1}{\lambda_I \eta_i''} > 0 \tag{42}$$

- ○ 비교 정태분석 결과 (42)에 의하면, 업무 i에 대한 새로운 노동대체 생산자동화 기술의 공급량 (추가적인 생산자동화 비율, $a_i - a_i^0$)은 생산자동화기술의 가격과 양의 상관관계를 가짐.
- ○ 이 결과는 한계 시간비용 η는 convex하고 따라서 $\eta_i'' > 0$ 이기 때문임 (한계 비용이 체증함).

❑ 생산자동화기술의 가격은 식 (30)에서 아래와 같이 주어졌음.

$$q(i) = B(i)\frac{w(i) - R}{\gamma(i)}x(i, a_i^0)$$

❑ 따라서 자동화기술의 가격 및 자동화기술개발은 아래의 요인에 비례함.

○ $B(i)$: 개발편익에서, 혁신가의 몫.

- 업무생산자에 대한 "협상력"
- 지적 재산권 보호에 대한 법률
- 관습, 제도
- 정부 지원/세금 등에 의해 영향을 받음.

○ $w(i) - R$: 자본의 가격 (렌탈수익률) R 대비 업무 i를 생산할 수 있는 기술을 가진 노동의 임금률.

- 대체하고자 하는 노동의 임금률이 높을 수록 자동화기술 개발에 대한 인센티브 증가.
- 만약 임금이 충분이 낮은 업무(산업)에서는 $w(i) - R < 0$ 일 수 있으며, 이 경우 생산자동화기술이 가져올 이익이 없기 때문에 생산자동화 기술이 개발되지 않을 것임.
- 외생적 요인으로 자본재의 가격이 감소할 경우, 생산자동화기술 개발 인센티브 증가.

○ $1/\gamma(i)$: 업무 i 관련 총요소생산성의 역수

- 업무 i 생산에 필요한 세부업무의 완수에 대한 요소생산성이 작으면 작을수록 생산자동화 기술개발 인센티브 증가
- 요소의 단위생산성이 낮을수록, 생산물 대비 지불되는 상대적 임금수준은 높은 것임을 반영하는 것임.

○ $x(i, a_i^0)$: 대체하고자 하는 노동이 생산하고 있는 세부업무의 양.

- 자동화하고자 하는 세부업무의 생산량이 크면 클수록 생산자동화기술의 편익이 커지고 따라서 생산자동화 기술 개발에 대한 인센티브 증가.

3.4.2 업무생산자의 최적화 조건에 대한 비교 정태 분석

❑ 업무생산자의 비용최소화 조건에서 아래의 비용함수를 구함 (식 (19)-(20))

$$c_i\big(y(i)\big) = \kappa(i)y(i) \text{ and } \kappa(i) = \frac{w(i)\kappa_1(i) + R}{\kappa_2(i)}$$

❑ 한계비용 $\kappa(i)$에 대한 비교 정태 분석을 위해 우선 업무(중간재)별 노동-자본비율 ($\kappa_1(i)$) 및 산출물-자본비율 ($\kappa_2(i)$)에 대한 비교 정태 분석이 필요.

❑ $\kappa_1(i)$: 업무 i 생산에 들어가는 노동-자본비율 $\kappa_1(i) = L(i)/K(i)$은 식 (21)에 의하면 아래와 같음. 단, $\rho > 1$임.

$$\kappa_1(i) = \left[\frac{R}{w(i)}\frac{\Gamma_{L(i)}}{\Gamma_{K(i)}}\right]^{\rho}$$

○ 따라서 노동자본비율은 다른 조건이 일정할 경우,

- $w(i)$ 임금률에 반비례하고,
- R 자본 가격 (이자율)에 비례하고,
- $\Gamma_K(i)$: 생산함수 (14)에서 "자본의 비중" $\Gamma_K(i)$에 반비례하고,
- $\Gamma_L(i)$: 생산함수 (14)에서 "노동의 비중" $\Gamma_L(i)$에 비례함,

○ 단, 식 (15)-(16)에서 자본 및 노동의 비중은 내생적으로 아래와 같음.

$$\Gamma_K(i) = \gamma(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}} a_i^{\frac{1}{\rho}}, \quad \Gamma_L(i) = \gamma(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}} (1 - a_i)^{\frac{1}{\rho}}$$

- 따라서, $\Gamma_K(i)$는 생산자동화비율 a_i에 비례해 증가하고
- $\Gamma_L(i)$는 생산자동화비율 a_i에 반비례함.

이를 종합하면, 노동자본비율 $\kappa_1(i)$은 생산자동화비율 a_i에 반비례함

$$\frac{\partial \kappa_1(i)}{\partial a_i} < 0 \tag{43}$$

- 생산자동화가 진행되면, 노동은 자본대비 감소할 수밖에 없음.

❑ $\kappa_2(i)$: 업무 i 생산에 대한 산출물-자본비율 (노동생산성) $\kappa_2(i) = y(i)/K(i)$은 식 (22)에 의하면 아래와 같음. 단, $\rho > 1$임.

$$\kappa_2(i) = \left[\Gamma_{K(i)} + \Gamma_{L(i)}\kappa_1(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}}\right]^{\frac{\rho}{\rho-1}}$$

○ 따라서, 업무 i 생산에 대한 산출물 자본비율은 다른 조건이 일정할 경우:

○ $\kappa_1(i)$ (노동자본비율)에 따라 증가함.

$$\frac{\partial \kappa_2(i)}{\partial \kappa_1(i)} > 0 \tag{44}$$

- 자본대비산출물은 노동이 많이 쓰일수록 큼.

○ 자본비중 $\Gamma_{K(i)}$ 및 노동비중 $\Gamma_{L(i)}$는 최종적으로 생산자동화 자동화비율 a_i의 내생적 함수이며, 또한 위에서 볼 수 있듯 $\kappa_1(i)$의 결정 요인이기도 함.

- 따라서 a_i에 대한 비교 정태 분석이 필요함.

○ 이를 위해, $\kappa_2(i)$를 식 (15), (16) 및 (21)을 사용하여 아래와 같이 표현할 수 있음.

$$\kappa_2(i) \quad = \left[\gamma(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}} a_i^{\frac{1}{\rho}}\left[1 + \left(\frac{1-a_i}{a_i}\right)^{\frac{1}{\rho}}\left(\frac{R}{w(i)}\right)^{\rho-1}\right]\right]^{\frac{\rho}{\rho-1}} \tag{45}$$

- 따라서, 산출물-자본비율 $\kappa_2(i)$는 생산성 $\gamma(i)$에 비례함.

$$\frac{\partial \kappa_2(i)}{\partial \gamma(i)} > 0 \tag{46}$$

○ 산출물-자본비율에 대한 생산자동화비율은 아래와 같이 반비례함을 알 수 있음. (부록의 A.4.2 참조)

$$\frac{\partial\ \kappa_2(i)}{\partial\ a_i} < 0 \tag{47}$$

- 자동화가 진행됨에 따라 자본의 투입이 증가하고, 따라서 산출물-자본비율이 감소함.

○ 산출물-자본비율$\kappa_2(i)$에 대한 노동대비자본의 상대가격 $(R/w(i))$의 영향을 알기 위해서, 우선 생산자동화비율이 자본과 노동의 함수임을 감안하면, 우선 $\kappa_2(i)$에 대한, 생산자동화기술의 변화가 0임을 가정할 때, 생산요소의 상대가격의 영향을 아래와 같이 정리할 필요가 있음. (부록 A.4.2 참조)

$$\left.\frac{\partial\ \kappa_2(i)}{\partial\ \left(\frac{R}{w(i)}\right)}\right|_{da_i=0} > 0$$

○ 혁신가의 일계조건에 대한 비교 정태 분석 결과인 식 (42) 및 자동화기술 $q(i)$의 식 (30)을 고려하면, 자본의 노동 대비 상대가격 $R/w(i)$는 생산자동화 비율 a_i에 대해 아래와 감소함을 알 수 있음.

$$\frac{da_i}{d\left(\frac{R}{w(i)}\right)} < 0$$

○ 이를 종합하면, 산출물-자본비율 $\kappa_2(i)$는 요소상대가격 $R/w(i)$에대해 아래와 같이 양의 상관관계임을 알 수 있음.

$$\frac{d\,\kappa_2(i)}{d\left(\frac{R}{w(i)}\right)} = \left.\frac{d\,\kappa_2(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}}}{d\left(\frac{R}{w(i)}\right)}\right|_{da_i=0} + \frac{d\,\kappa_2(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}}}{d\,(a_i)}\frac{da_i}{d\left(\frac{R}{w(i)}\right)} > 0 \tag{48}$$

❑ 한계비용 $\kappa(i)$: 한계비용을 나타내는 식 (20) 및 (15)-(16)를 사용하면 다음 관계를 구할 수 있음.

○ 만약 $\left(\frac{R}{w(i)}\right) < 1$ 이라면 (노동이 자본보다 비싼 경우), $1-\left(\frac{R}{w(i)}\right)^{\rho-1} > 0$ 이며, 따라서,

$$\frac{d\kappa(i)}{da_i} < 0 \tag{49}$$

○ 만약 $\left(\frac{R}{w(i)}\right) \geq 1$ 이라면 (노동이 자본보다 저렴한 경우), $\left(1-\left(\frac{R}{w(i)}\right)^{\rho-1}\right) \leq 0$ 이며, 따라서,

$$\frac{d\kappa(i)}{da_i} = 0$$

- 왜냐하면, 자본이 노동보다 비싼 경우, 신기술이 개발되더라도 생산자들이 사들이지 않을 것이고, 적용되지 않기 때문임.
- 따라서 $\left(\frac{R}{w(i)}\right) \geq 1$인 경우는 균형에서 기술 수준 변화가 없을 것이기 때문에 기술 수준 변화에 대해 논의하지 않을 것임.
- 앞으로 기술수준의 변화에 대해 논의할 때는 $\left(\frac{R}{w(i)}\right) < 1$을 가정하겠음.

○ 자세한 도출 과정은 부록을 참조.

❑ 또한, 식 (20)에서, 아래와 같은 관계가 도출됨

$$\frac{\partial \kappa(i)}{\partial\left(\frac{R}{w(i)}\right)} < 0 \tag{50}$$

○ 기술변화를 고려하지 않은 경우, 자본의 상대가격 증가는 한계비용의 감소를 가져옴.

- 자본의 가격을 고정한 채, 자본의 상대가격이 올라가는 것으로, 노동의 상대가격이 하락하며, 따라서 한계비용이 감소함.

❑ 생산요소가격의 외생적 변화의 한계비용에 대한 영향은 아래와 같이 모호함.

$$\frac{d\kappa(i)}{d\left(\frac{R}{w(i)}\right)} = \frac{\partial \kappa(i)}{\partial(a_i)}\frac{\partial a_i}{\partial\left(\frac{R}{w(i)}\right)} + \frac{\partial \kappa(i)}{\partial\left(\frac{R}{w(i)}\right)} <> 0$$

○ 첫번째 부분 $\frac{\partial \kappa(i)}{\partial(a_i)}\frac{\partial a_i}{\partial\left(\frac{R}{w(i)}\right)}$의 부호는 $\left(\frac{R}{w(i)}\right) < 1$의 경우, 양수임.

- 이는 한계비용이 기술 개발에 대해 감소하나, 기술 개발은 자본의 상대 가격이 상승하면 감소하는 것을 반영.

○ 두번째 부분 $\left.\frac{\partial \kappa(i)}{\partial\left(\frac{R}{w(i)}\right)}\right|_{da_i=0}$ 이 음수임.

❑ 업무의 최적 생산량 $y^*(i)$는 $\sigma > 1$ 임을 감안하면, 한계 생산 비용 $\kappa(i)$ 및 이윤율 μ에 반비례함을 알 수 있음.

3.4.3 노동시장에 대한 비교 정태 분석

❑ 노동 수요는 식 (24)로부터 아래와 같이 주어짐.

$$L^d(i) = L^*(i) = \frac{1}{\frac{\kappa_2(i)}{\kappa_1(i)}} \left(\mu\kappa(i)\right)^{-\sigma} Y$$

❑ 따라서,

- ○ $\kappa_2(i)/\kappa_1(i)$ 노동생산성(output-labor ratio, average labor product)이 클수록 노동수요는 작아지며,
- ○ $\kappa(i)$ 한계비용이 커질수록, 노동수요는 작아지고,
- ○ μ 총이윤율 (gross markup)이 클수록, 노동수요가 작아지며,
- ○ Y 총생산 (GDP)이 커지면, 노동수요는 증가함.

❑ 노동생산성은 (21)-(22)을 정리하면 아래와 같이 표현할 수 있음.

$$\frac{\kappa_2(i)}{\kappa_1(i)} = \gamma(i) \quad a_i^{\frac{1}{\rho-1}} \left[\left(\frac{w(i)}{R}\right)^{\rho-1} \left(\frac{a_i}{1-a_i}\right)^{\frac{(\rho-1)}{\rho}} + \left(\frac{a_i}{1-a_i}\right)^{-\frac{1}{\rho}} \right]^{\frac{\rho}{\rho-1}} \tag{51}$$

- ○ 식 (51)에서, 아래에서 정리된 바와 같이, 다른 조건이 일정할 때 (특히 자동화 기술수준), 임금과 노동생산성은 양의 상관관계가 있음.

$$\frac{\partial\left(\frac{\kappa_2(i)}{\kappa_1(i)}\right)}{\partial w(i)} > 0$$

- ○ 또한, 식 (50)을 고려하면, 다른 조건이 일정할 때, 아래와 같이 임금과 한계비용 역시 양의 상관관계가 있음.

$$\frac{\partial \kappa(i)}{\partial w(i)} > 0$$

❑ 따라서 노동수요함수 $L^*(i)$는 임금과 음의 상관관계가 있음

$$\frac{\partial L^*(i)}{\partial w(i)} < 0$$

○ 노동수요함수는 일반적인 케이스와 마찬가지로 임금에 대해 우하향하는 모습을 나타냄.

❑ 또한 노동생산성은 총요소생산성 $\gamma(i)$에 증가함을 알 수 있음.

3.5 동태모형 및 경제 성장의 함의

❑ 완벽한 동태모형의 개발은 본 연구의 범위를 벗어나는 것임. 본 장에서는 생산자동화가 경제성장에 미치는 영향을 살펴봄으로 본 모형의 동태적 함의에 대해 분석해 보고자 함.

❑ 자동화로 인한 노동생산성 향상의 성장 정책 함의 1

○ 최종재의 생산은 노동시장 균형에서 식 (40)에서와 같이 아래의 관계에 의해 주어짐.

$$Y = \left[\int \left\{ \frac{\kappa_2(i)}{\kappa_1(i)} L^s(i) \right\}^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} di \right]^{\frac{\sigma}{\sigma-1}}$$

○ 생산자동화가 노동생산성 $\frac{\kappa_2(i)}{\kappa_1(i)}$을 증가시킴 (식 (54)).

○ 만약 자동화의 결과로 모든 업무 i의 노동생산성 $(\kappa_2(i)/\kappa_i(i))$ 1% 상승하면, 위의 식 에 따라 최종재 (GDP) 생산도 1% 증가함.

○ 만약 생산자동화의 결과로, 업무별 노동 생산성이 $\frac{\kappa_2(i)}{\kappa_1(i)}$에서 $(1+g(i))\frac{\kappa_2(i)}{\kappa_1(i)}$로 $g(i)$만큼 증가하였다면, GDP는 아래와 같이 주어짐.

$$Y' = \left[\int \left\{ \left(1 + g(i)\right) \frac{\kappa_2(i)}{\kappa_1(i)} L^s(i) \right\}^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} di \right]^{\frac{\sigma}{\sigma-1}} \tag{52}$$

○ 다시 말해, GDP는 각 업무의 노동생산성과 노동 공급이 업무별 노동생산성 성장률 $1 + g(i)$에 의한 가중 평균임을 알 수 있음.

○ 자동화로 인한 노동생산성 향상 $g(i)$의 영향은 노동 생산성의 수준 $\frac{\kappa_2(i)}{\kappa_1(i)}$이 높을수록, 그리고 일하고 있는 노동자가 많을 경우, 업무 i의 자동화가 GDP에 높은 영향을 줄 것임.

❑ 자동화로 인한 노동생산성 향상의 성장 정책 함의 2

○ 최종재 생산함수는 규모불변의 함수이나, concave 변환 ($\frac{\sigma-1}{\sigma} < 1$) 이후에 convex 변환 ($\frac{\sigma}{\sigma-1} > 1$)을 통한 것임.

○ 따라서 다른 조건이 일정할 경우 불균등한 자동화보다는 모든 산업/업무에 걸친 자동화가 더 경제성장에 효율적임. 이를 알아보기 위해 아래의 분석을 참조할 수 있음:

- 잠재적으로 불균등한 생산자동화 기술개발의 후생적 효과를 알기 위해, $\frac{\kappa_2(i)}{\kappa_1(i)} L^s(i)$가 모든 업무 i 별로 아래와 같이 일정하다고 가정해 봄.

$$z = \frac{\kappa_2(i)}{\kappa_1(i)} L^s(i)$$

  또한 $1 + g(i) = 1 + g + e(i)$이며 $e(i) \sim (0, \sigma_e^2)$에 따라 분포되는 랜덤변수라고 가정함.

- 이 경우 총생산은 아래와 같이 표현될 수 있음.

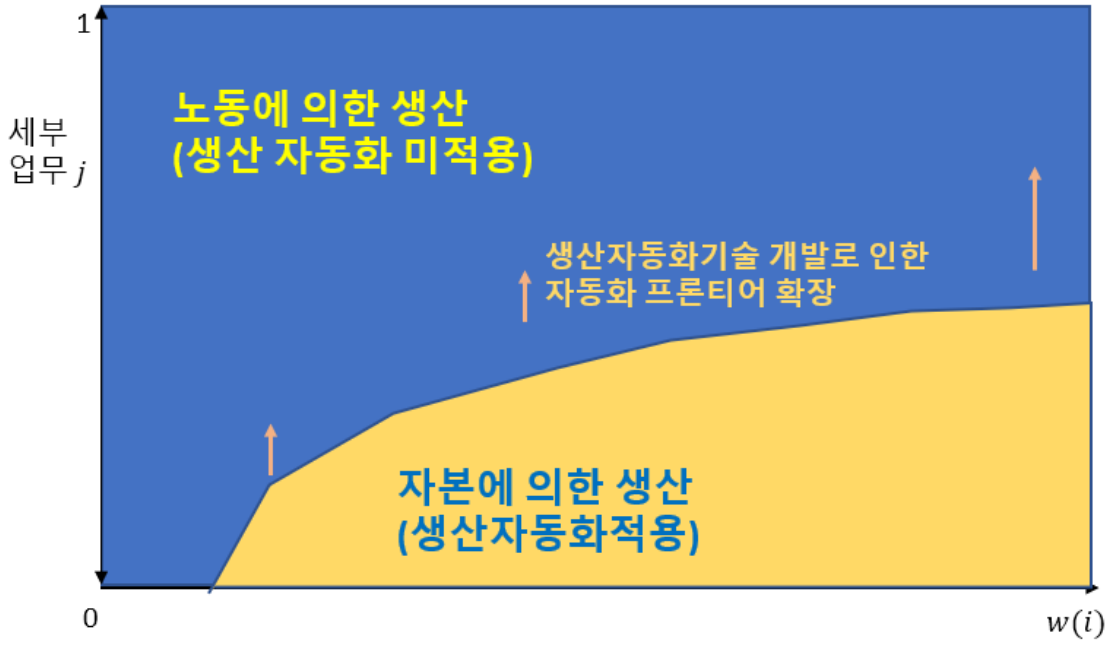
$$Y'^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} = z \left[\int \{1 + g + e(i)\}^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} di \right]$$

- 그러나, $\frac{\sigma-1}{\sigma} < 1$이기 때문에, Jensen's inequality에 의해 아래와 같은 관계가 성립.

$$\int \{1+g\}^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} di \geq \int \{1+g+e(i)\}^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} di$$

- 따라서 다른 조건이 일정할 경우 생산자동화기술은 모든 섹터에 균등하게 진행되는 것이 불균등한 것 보다 경제 성장에 도움이 됨

그림 3.4. 생산자동화 기술 개발로 인한 자동화 프론티어 확장



제 4 장 캘리브레이션 및 수치 분석

❑ 현재까지 분석은 해석적 분석 방법론을 사용해 모형의 함의를 도출한 것으로 모수의 값에 상관없이 항상 성립하는 결론임.

❑ 그러나 노동시장의 시장 균형에서의 영향에 대한 분석은 해석적으로 풀기에는 모호하거나 과도하게 복잡한 부분이 있기 때문에 수치분석 및 시뮬레이션을 사용하여 이를 분석하고자 함.

❑ 노동 생산성 $y(i)/L(i) = \kappa_2(i)/\kappa_1(i)$과 자동화 기술 진보.

○ 노동생산성 $\kappa_2(i)/\kappa_1(i)$은 자동화 기술진보에 두가지 영향을 받음.

- 생산자동화는 노동-자본비율 $\kappa_1(i)$을 감소시킴 (식 (53))
- 생산자동화는 동시에 산출물-자본비율을 감소시킴 (식(54)).
- 산출물자본비율과 노동-자본비율의 비인 노동생산성 $\kappa_2(i)/\kappa_1(i)$에 대해 두 영향이 상충하여, 해석적으로는 부호를 결정지을 수 없었음.
- 상대적 효과를 알아보기 위해 수치분석을 시도하였으며 결과는 그림 3.5에 요약보고됨.
- 본 수치분석에는 아래와 같은 파라메터를 사용하였음.
- 업무내 대체탄력도 (ρ)는 2로 설정하였음. 본 모형에서 ρ는 노동과 자본의 대체탄력도를 나타내는 것으로 볼 수 있음. 기존 문헌에서 기업별/산업별 생산함수 추정에서 노동과 자본의 대체 탄력도가 대체적으로 1에 근접하는 것으로 추정되었음을 감안하였으나, 모형의 구성상 대체탄력도가 1보다 커야된다는 것을 감안.
- 업무간 대체 탄력도(σ)는 5로 설정하였으며 이는 총이윤률 $\mu = \sigma/(\sigma - 1)$ 25%에 해당함.
- 본 모형, 특히 업무별 및 세부업무관련 생산함수에 대한 모수를 체계적으로 추정한 연구가 없기에 일정부분 자의적인 면이 있으나, 다른 파라메터를 시도했을 시에도 그림 3.5에 제시된 결과는 큰 차이점이 없는 것으로 나타남.

표 3.1: 시뮬레이션 분석을 위해 사용된 모수값

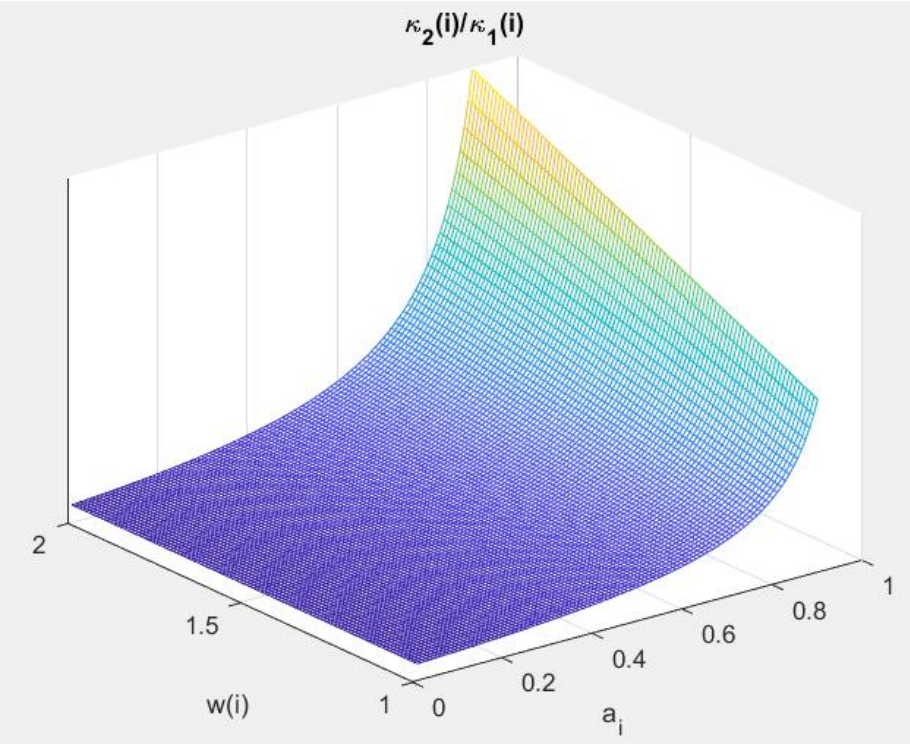
파라메터	사용값	비고
$\gamma(i)$	1	"Hick-neutral" 업무별 총요소 생산성
ρ	2	업무내 대체탄력도
σ	5	업무간 대체탄력도
R	1	자본재 (렌탈) 가격, 정규화

○ 수치분석결과 넓은 파라메터 값에서 노동생산성은 자동화 기술 대비 증가하는 것으로 나타났으며 (그림 3.5), 이는 직관적으로 이해하기 쉬움.

- 노동으로 생산되던 세부업무가 자본으로 대체되면서, 노동은 자동화되지 않은 비교 우위에 있는 업무에 집중할 수 있으며, 따라서 자동화는 산출물 노동비율을 증가시킴.
- 본 결과를 바탕으로 아래와 같은 결과가 현실적인 모든 파라메터에서 성립한다고 가정하고 논의를 전개함.

$$\frac{d\left(\frac{\kappa_2(i)}{\kappa_1(i)}\right)}{da_i} > 0 \tag{55}$$

그림 3.5. 노동 생산성($\kappa_2(i)/\kappa_1(i)$)과 임금($w(i)$), 생산자동화비율(a_i)의 관계



❑ 생산자동화의 노동수요 및 임금에 대한 영향:

○ 업무 i에 대한 임금 $w(i)$는 아래의 노동시장 균형조건 음함수(implicit function)를 만족시키는 값임. (식 (37)을 가져옴)

$$L^s(i) = L^d(i) = \frac{1}{\frac{\kappa_2(i)}{\kappa_1(i)}} \left(\mu\kappa(i)\right)^{-\sigma} Y$$

○ 생산자동화의 임금 및 노동수요에 대한 영향을 이해하기 위해서는 생산자동화가 노동생산성 $\frac{\kappa_2(i)}{\kappa_1(i)}$ 및 한계비용 $\kappa(i)$에 미치는 영향을 알 필요가 있으며, 이는 이미 분석된 내용임.

- $\frac{d\kappa(i)}{da_i} < 0$ (식 (49)) 및 $\frac{d\left(\frac{\kappa_2(i)}{\kappa_1(i)}\right)}{da_i} > 0$ (식 (55))
- 따라서, 생산자동화기술의 진보는 노동수요함수에 두가지 채널을 통해 상반되는 영향을 줌.

○ 생산자동화는 생산의 한계비용 $\kappa(i)$을 감소시키고, 이는 가격 하락 및 수요의 증대를 가져와 노동수요를 증가시킴. (**수요효과**)

○ 생산자동화는 노동생산성 $(\kappa_2(i)/\kappa_1(i))$을 증가시켜, 수요를 고정으로 놓았을 때, 노동수요를 감소시킴. (**생산성효과**)

○ 식의 좌측 노동 공급은 단기적으로 고정된 것으로 가정함.

○ 따라서, 생산자동화 기술의 진보는 임금 및 노동수요에 다음과 같은 상충되는 영향을 가져올 것으로 예상할 수 있음.

- (수요효과를 고정하고) 생산성효과만을 감안한 경우, 노동수요를 감소시키고 이는 임금의 하락을 가져옴.
- (생산성효과를 고정하고) 수요효과만을 감안하면, 노동수요를 증가시키며 이는 임금 상승을 가져옴.

○ 종합적으로 생산자동화기술의 임금에 대한 총효과는 모호함.

○ 자동화의 시장균형에서의 영향을 보다 자세히 이해하기 위해 업무별 총요소생산성 $\gamma(i)$를 상/중/하 $(\gamma(H) = 3, \gamma(M) = 3, \gamma(L) = 1)$로 놓고 자동화의 임금에 대한 영향을 수치분석을 통해 살펴보았으며 결과는 그림 3.6에 보고됨.

- 본 분석을 위해, 다른 언급이 없는 한 모수의 값은 표 3.1에 제시된 수치를 사용함.

- 노동 공급은 모든 업무 i에 대해 $L^s(i) = 1$로 가정하였음.
- 논의의 편의상 총요소생산성이 높은 업무를 고숙련(높은 기술), 낮은 업무를 저숙련(낮은 기술)로 칭함.

○ 생산자동화 비율이 증가함에 따라 궁극적으로는 모든 기술수준 임금이 하락함.

○ 저숙련 노동 (low productivity jobs)의 경우 생산자동화 비율 a_i가 증가함에 따라 해당 임금이 지속적으로 감소함.

○ 중간 또는 고숙련 (intermediate or high productivity jobs)의 경우 생산자동화비율 a_i에 대해 비선형적인 관계가 나타남.

- 낮은 생산자동화 비율의 경우, 생산자동화기술의 확장은 노동 수요를 증가시켜 해당 기술 노동의 임금을 증가시킴 (수요효과가 생산성 효과를 압도함)
- 이미 생산자동화 비율이 높은 경우, 생산자동화 기술의 확장은 노동수요의 감소와 임금의 하락을 가져옴 (생산성효과가 수요효과를 압도함).

○ 임금 $(w(i))$ 이 결국 자본의 (렌탈)가격 R 수준으로 하락하고, 이 경우 생산자동화 기술의 진보는 멈춤.

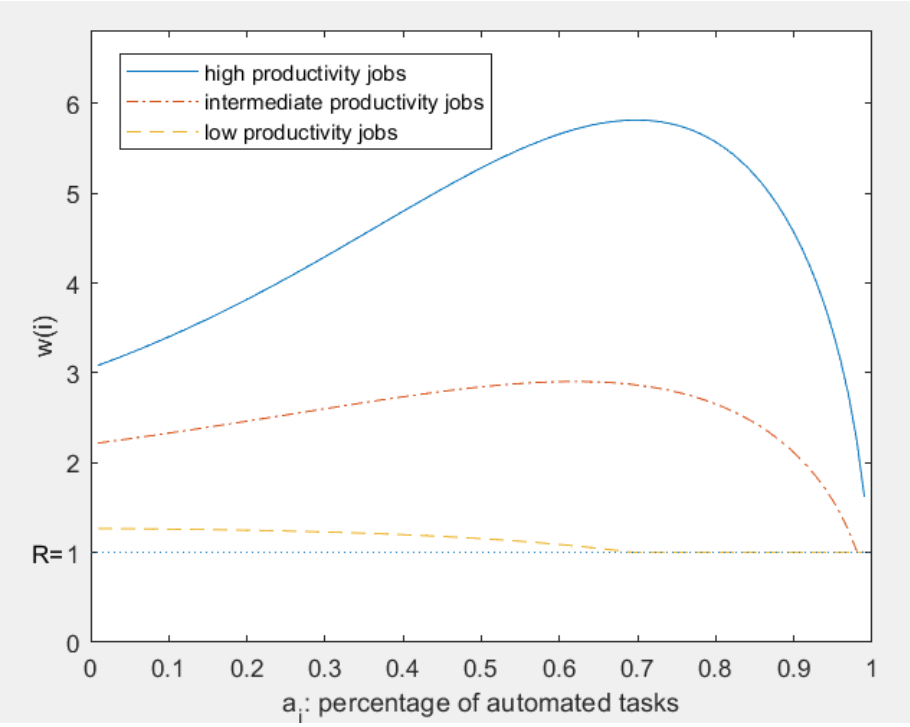
- 본 시뮬레이션의 결과 '저숙련' 노동은 생산자동화가 약 70% 수준에서 멈추었으며, '중숙련' 노동은 95%이상에서, 그리고 '고숙련' 노동의 경우 자동화비율이 99%에서도 해당 임금이 자본가격보다 높아서 계속 자동화 기술이 개발됨을 알 수 있음.

○ 본 시뮬레이션의 결과는 다음과 같은 시나리오를 예측함

- 생산자동화의 초창기에는 임금 분포가 넓어지고, 임금 불균등이 커짐
- 결국에는 자동화가 임금 불균등을 해소하는 요인으로 작용할 수 있음.
- 그러나 이러한 불균등은 자동화가 상당이 진행되어도 사라지지 않을 수 있음을 시사.

○ 따라서 자동화가 장기적으로 임금 불균형을 해소하는 요인으로 작용할 수 있으나, 단기적으로 임금 불균형을 강조시킬 수 있는 요인으로 작동할 수 있으며, 이는 정책입안자의 관심이 요구됨.

그림 3.6 자동화 비율 증가에 따른 업무(직업)간 임금 분포의 변화



제 5 장 결론 및 정책적 시사점

5.1. 요약 및 결론

❑ 자동화 기술은 생산과정에서 노동을 자본으로 대체함으로, 노동의 미래에 (future of work) 대한 위기감을 가져오고 있음.

❑ 본 연구에서는 생산자동화 문헌에서 자주 볼 수 있는 task 중심의 생산함수를 확장하여 세부업무를 도입하였고, 이러한 세부업무가 혁신가의 기술개발에 의해 자동화되고 이러한 세부업무에서 노동이 자본으로 대체되고, 남은 업무에 노동이 고용되는 모형을 통해, 생산자동화가 경제성장 및 노동시장에 미치는 함의를 살

펴봄.

❑ 본 연구는 아래와 같은 정책적 함의를 제공함.

❑ 생산자동화 기술은 자본에 의한 노동의 대체로, 기존의 노동 생산성을 증가시키며, 이러한 채널을 통해 경제성장을 가져옴.

- ○ 생산자동화 기술의 노동수요 및 임금에 대한 영향은 모호함.
  - 생산성효과를 통해 노동수요 및 임금이 감소
  - 수요효과를 통해 노동수요 및 임금 증가.

❑ 생산자동화 기술의 공급은 혁신가의 이윤추구를 통해 공급됨. 생산자동화 기술의 공급은:

- ○ 임금이 자본재 가격(렌탈수익률, 실질 이자율)에 비해 높을수록. (그림 3.4, 3.6)
- ○ 해당기술이 적용되어 생산되는 세부 업무가 클수록,
- ○ 생산력이 $(\gamma(i))$ 낮을수록
- ○ 혁신가의 "협상력"이 클수록 증가.

5.2. 정책적 시사점

❑ 경제 성장 관련 정책 1:

- ○ 새로운 생산자동화 기술이 경제 성장에 미치는 영향은
  - 해당 생산자동화 기술이 적용되는 세부업무를 통해 생산하는 업무의 노동생산성이 $\frac{\kappa_2(i)}{\kappa_1(i)}$ 높을수록
  - 해당 생산자동화 기술이 적용되는 세부업무를 통해 생산하는 업무가 많은 노동을 고용할수록, $(L(i))$ 높음.
- ○ 다른 조건이 일정할 경우, 자동화기술은 경제전체에 걸쳐 균등하게 개발되는 것이 집중되어 개발되는 것보다 경제성장에 유리함.
- ○ 본 모형에서 경제성장을 가져오는 유일한 요소는 생산자동화를 통한 노동생산성의 향상임.
- ○ 생산자동화 기술은 혁신가의 기술개발에 의해 이루어짐.

○ 정부는 혁신가의 협상력을 증가시키는 다양한 정책을 통해 자동화 기술개발의 유인을 증대시킬 수 있음.

○ 세금 감면, 지원금 등 한정된 재원을 사용한 지원은 다음과 같은 사항을 고려함으로 정책의 경제성장에 대한 효과를 극대화 할 수 있음.

- 단위 생산자동화기술의 경제성장에 대한 효과는, 노동생산성 $\kappa_2(i)/\kappa_i(i)$ 이 높을수록, 해당 업무의 고용이 높을수록, 그리고 해당 업무가 경제에서 차지하는 비중 또는 생산량 $y(i)=\frac{\kappa_2(i)}{\kappa_i(i)}L(i)$이 높을수록 큼.
- 그러나 다른 조건이 일정할 경우, 넓은 분야에 자동화 기술이 골고루 개발되는 것이 일정부문에 집중되는 것보다 경제성장에 높은 효과가 있음

○ 자동화(automation)에 의한 산업 또는 기업의 생산성 향상은 수출증가로 이어질 수 있으며 이는 경제성장으로 연결될 것임 (자기선택가설, self-selection hypothesis)

- 수출은 우리나라의 지속적이고 빠른 경제성장의 핵심요소이기 때문에 수출을 촉진할 수 있는 자동화에 대한 정부의 정책적 지원은 매우 중요한 무역정책이 될 수 있음

❑ 경제 성장 관련 정책 2:

○ 장기적으로는 자동화가 진행됨에 따라 모든 섹터에서 임금 소득이 감소할 것으로 예상되며, 잉여생산물은 생산자와 혁신가가 “협상력” 에 따라 분배할 것으로 예상됨.

○ 혁신가의 자동화 기술 개발은 경제성장의 원동력이라는 관점에서, 이에 대한 직접적인 과세는 최소화하는 것이 바람직함.

○ 생산자에 대한 자동화에 대한 과세 (로봇세, robot tax)는 자동화 이익의 감소를 가져와 자동화의 속도 조절을 할 수 있는 도구로 사용될 수 있음.

- 로봇세는 생산자동화 기술의 도입에 대한 가격을 상승시킨다는 측면에서 자본재의 가격(이자율)을 올리는 것과 비슷한 영향을 가져올 수 있으며, 이는 자동화 기술의 가치를 낮추어 간접적으로 자동화 기술의 개발 속도를 늦추는 요인으로 작동할 수 있음.
- 이러한 측면에서 단순한 로봇세 역시 혁신가에 대한 과세와 비슷하게 작동한다고 볼 수 있음.

- 그러나 로봇세는 혁신가와 생산자가 협상력에 따라 나누어서 지불하는 것이고, 혁신가에 대한 세금은 100% 혁신가가 지불하는 것임. 만약 로봇세와 함께, 혁신가의 "협상력"을 향상시킬 수 있는 정책으로 로봇세의 기술혁신에 대한 부정적 영향을 최소화할 수 있을 것으로 보임
- 혁신가의 "협상력"을 향상시킬 수 있는 정책으로는 지적자산보호, 기타 법률제도 보완, 연구개발에 대한 세제 지원 등이 있음

❑ 노동시장 관련 정책:

○ 생산자동화는 임금분포에 영향을 줌. (그림 3.6)

○ 자동화가 모든 업무에서 높은 수준으로 진행된 장기 정상상태에서는 업무간의 임금 분포가 자본가격으로 수렴하며, 이는 자동화가 장기적으로 임금 불균형을 해소할 수 있는 요인으로 작용할 수 있음을 보여줌.

○ 그러나 장기 정상상태로 수렴하는 이행기 (transition)에는 자동화의 진행으로 인해 임금 분포가 넓어지고 임금 불균등이 악화될 수 있음.

○ 생산자동화는 낮은 수준에서도 저임금(저생산성) 노동의 임금을 감소시킴.

○ 고임금(고생산성) 노동의 경우, 생산자동화 초기에는 노동 수요가 증가하고 임금이 증가하는 모습을 나타냄.

- 내생적으로 자동화의 진행으로 고생산성 노동이 자본에 대해 보완성 (complementary)이 증가되는 모습을 보여주는 것임.
- 이는 현재 전세계적으로 진행되고 있는 임금 양극화에 대한 대안적 설명으로 정책입안자의 관심이 요구됨.

○ 자동화의 진행으로 고생산성 노동이 불균등하게 혜택을 본다면, 현재 거론되고 있는 로봇세 (robot tax)를 저생산성 노동자의 임금 보존 및 교육 등으로 인한 생산성 향상 등에 우선적으로 사용하는 것을 고려해볼 수 있을 것임.

❑ 장기적으로 생산자동화에만 의지하는 경제성장에는 한계가 있을 것으로 예측됨.

○ 생산자동화가 모든 기술수준에 대한 임금을 자본의 렌탈수익률로 수렴시킬 가능성이 존재하나 그 이후 생산자동화만으로 경제성장에는 한계가 있음

- 생산자동화가 임금을 낮출 수 있으나, 임금률이 자본의 렌탈수익률 (실질이자율)과 동등해지는 순간 더 이상 진행되지 않음

○ 기존에 논의되고 있는 총요소 생산성 $\gamma(i)$의 향상에 의한 경제성장, 인적자본 투자, 및 새로운 업무 개발 (Romer 타입의 새로운 중간재 개발을 통한 경제성장) 등의 요인에도 지속적인 관심이 요구.

❑ 한계점

○ 본 연구에서 로봇세 등에 대해서는 본연구의 결론을 바탕으로 그 정책함의에 대해 간략하게 논의하였으나, 보다 진지한 연구가 필요함.

○ 본 모형에서는 분석 편의상 노동공급이 고정된 것으로 가정하였으며, 생산성 증가, 새로운 업무의 발명 등의 다른 경제성장 채널은 없는 것으로 가정.

○ 정책입안자는 새롭게 생겨날 경제적 불평등에 대한 고려도 할 필요가 있으며, 이는 앞으로의 연구주제로 삼기에 적합함.

참 고 문 헌

Acemoglu, D. & Autor, D. (2011). Skills, Tasks and Technologies: Implications for Employment and Earnings. In: O. Ashenfelter and D. Card (Eds.), Handbook of Labor Economics, Vol. 4, Elsevier, June 2011, chapter 12, 1043–1171.

Acemoglu, D. & Restrepo, P. (2016). The Race between Man and Machine: Implications of Technology for Growth, Factor Shares and Employment. NBER Working Paper N° 22252

Acemoglu, D. & Restrepo, P. (2020). Robots and Jobs: Evidence from US Labor Markets. Journal of Political Economy, 128(6), 2188-2244

Aghion, P., Jones, B. & Jones, C. (2017). Artificial Intelligence and Economic Growth. NBER Working Paper N° 23928.

Aghion, P., Antonin, C. & Bunel, S. (2019). Artificial Intelligence, Growth and Employment: The Role of Policy. Economie et Statistique / Economics and Statistics, 510-511-512, 149–164.

Aghion, P., Antonin, C., Bunel, S. & Jaravel, X. (2020). What are the Labor and Product Market Effects of Automation? New Evidence from France. CEPR Discussion Paper, 14443.

Autor, D., Levy, F. & Murnane, R. J., (2003). The skill content of recent technological change: an empirical exploration. Quarterly Journal of Economics, 118(4), 1279-1333.

Autor, D. H., Dorn, D. & Hanson, G. H. (2013). The China Syndrome: Local Labor Market Effects of Import Competition in the United States. American Economic Review, 103(6), 2121–68.

Babina, T., Fedyk, A., He, A., & Hodson, J. (2020). Artificial Intelligence, Firm Growth, and Industry Concentration, Working Paper

Baumol, W. (1967). Macroeconomics of unbalanced Growth: The Anatomy of Urban Crisis. American Economic Review, 57(3), 415–426.

Bessen, J. (2019). Automation and jobs: when technology boosts employment, Economic Policy, 34(100), October 2019, 589–626.

Blanas, S., Gancia, G. & Lee, S. Y. (2019). Who is Afraid of Machines? CEPR Discussion Paper, 13802.
Bonfiglioli, A., Crinò, R., Fadinger, H. & Gancia, G. (2020). Robot Imports and Firm-Level Outcomes, CEPR Discussion Paper, 14593.
Brynjolfsson, E. & McAfee, A. (2011). Race against the machine: how the digital revolution is accelerating innovation, driving productivity, and irreversibly transforming employment and the economy. Digital Frontier Press, Lexington, MA.
Card, D. & DiNardo, J. E. (2002). Skill biased technical change and rising wage inequality: some problems and puzzles. Journal of Labor Economics, 20, 733-783.
Chandler, D. & Webb, M. (2019). How Does Automation Destroy Jobs? The ' Mother Machine' in British Manufacturing, 2000-2015, Working Paper.
Charnoz, P. & Orand, M. (2017). Technical change and automation of routine tasks: Evidence from local labour markets in France, 1999-2011. Économie et Statistique, 497, 103-122.
Cheng, H., Jia, R., Li, D., & Li, H. (2019). The Rise of Robots in China. Journal of Economic Perspectives, 33(2), 71-88.
Chiacchio, F., Petropoulos, G. & Pichler, D. (2018). The impact of industrial robots on EU employment and wages: A local labor market approach. Bruegel Working paper, 2.
Dauth, W., Findeisen, S., Südekum, J. & Wößner, N. (2021). The Adjustment of Labor Markets to Robots. Journal of the European Economic Association, forthcoming.
Dixon, J., Hong, B. & Wu, L. (2019). The Employment Consequences of Robots: Firm Level Evidence, Working Paper.
Domini, G., Grazzi, M., Moschella, D., Treibich, T. (2019). Threats and opportunities in the digital era: Automation spikes and employment dynamics, LEM Working Paper Series, 2019/22.
Graetz, G. & Michaels, G. (2018). Robots at work. Review of Economics and Statistics, 100(5), 753-767.
Gregory, T., Salomons, A. & Zierahn, U. (2016). Racing with or Against the Machine? Evidence from Europe. ZEW Discussion Paper, 16-053.
Hémous, D. & Olsen, M. (2014). The Rise of the Machines: Automation, Horizontal Innovation and Income Inequality. CEPR Discussion Paper N° 10244.
Humlum, A. (2019). Robot Adoption and Labor Market Dynamics. Working Paper, 2019.
IFR World Robotics Statistics, Industrial Robots, http://ifr.org/ (Date: 2021.12.11.)
Jaimovich, N. & Siu, H.E. (2012). The trend is the cycle: job polarization and jobless recoveries. NBER Working Paper, 18334, National Bureau of Economic Research.
Klenert, D., Fernández-Macías, E. & Antón-Pérez, J. I. (2020). Do robots really destroy jobs? Evidence from Europe. JRC Working Papers on Labour, Education and Technology, 2020/01.
Koch, M., Manuylov, I., Smolka, M. (2021). Robots and Firms, The Economic Journal, forthcoming.
Mann, K. & Püttmann, L. (2017). Benign Effects of Automation: New Evidence from Patent Texts. Unpublished manuscript.
Webb, M. (2020).The Impact of Artifical Intelligence on the Labor Market. Working Paper.
Zeira, J. (1998). Workers, Machines, and Economic Growth. Quarterly Journal of Economics, 113, 1091-1117.

산업통상자원부(2021), 「2021 지능형 로봇 실행 계획」 및 「2021 로봇산업 선제적 규제혁신 로드맵 실행계획」, 보도자료(2021.4)
중소벤처기업부(2020), 「AI · 데이터 기반 중소기업 제조혁신 고도화 전략」 수립 · 발표, 보도자료(2020.7)
한국로봇산업진흥원(2021), 2019 로봇산업실태조사

A. 부록:

A.1 최종재 생산

❑ 최종재 생산자는 아래의 비용 최소화 문제를 해결함.

$$\min \int_{i\in(0,1)} P(i)y(i)di \qquad (A.1.1)$$

subject to

$$\bar{Y} \leq \left(\int_0^1 y(i)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} di\right)^{\frac{\sigma}{\sigma-1}} \qquad (A.1.2)$$

○ (A.1.1)-(A.1.2)와 연동된 라그랑지안은 아래와 같음.

$$L = \int_i P(i)y(i)di + \lambda\left[\bar{\bar{Y}} - \left(\int_0^1 y(i)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} di\right)^{\frac{\sigma}{\sigma-1}}\right] \qquad (A.1.3)$$

- 식 (A.1.3)에서 λ는 최종재 생산물 Y 에 대한 그림자 가격을 (shadow price) 의미하는 라그랑지 승수임.

○ 위 라그랑지안 (A.1.3)은 비용최소화의 내부해 (interor solution)에서 다음의 일계 필요 조건을 만족함

$$P(i) = \lambda y(i)^{-\frac{1}{\sigma}} \quad \text{for all } i \qquad (A.1.4)$$

$$\bar{Y} = \left(\int_0^1 y(i)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} di\right)^{\frac{\sigma}{\sigma-1}} \qquad (A.1.5)$$

○ (A.1.5)는 $y(i)$의 가격 $P(i)$가 (균형에서) 양의 가격을 가지기 때문에 등호로 성립.

○ (A.1.4)를 i와 j에 대해서 표현한 후, 나누면 아래와 같이 라그랑지 승수가 제거

된 표현을 구할 수 있음.

$$\left[\frac{P(i)}{P(j)}\right]^{-\sigma} = \frac{y(i)}{y(j)} \qquad (A.1.6)$$

○ 식 (A.1.6)의 양 변을 $\frac{\sigma-1}{\sigma}$의 계승을 취하면,

$$y(i)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} = \left[\frac{P(i)}{P(j)}\right]^{1-\sigma} y(j)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \qquad (A.1.7)$$

○ 식 (A.1.7)을 (A.1.5)에 넣고 적분을 취하면, 아래와 같은

$$\bar{Y}^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} = \int y(i)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} di = \int \left[\frac{P(i)}{P(j)}\right]^{1-\sigma} y(j)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} di = y(j)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} P(j)^{\sigma-1} \int [P(i)]^{1-\sigma}\, di \qquad (A.1.8)$$

○ (A.1.8)을 정리하면, 아래의 식을 구할 수 있음.

$$y(j) = \left[\frac{P(j)}{\left(\int P(i)^{1-\sigma} di\right)^{\frac{1}{1-\sigma}}}\right]^{-\sigma} \bar{Y} \qquad (A.1.9)$$

○ 최종재 생산자는 constant returns to scale 생산함수를 사용해 경쟁적 시장에서 생산을 함. 따라서, 최종재 생산자의 경제적 이윤은 0이며, 아래의 식을 만족해야함.

$$\int P(i)y(i)di = P\bar{Y} \qquad (A.1.10)$$

- (A.1.10)에서 좌변 $\int P(i)y(i)di$ 은 $\bar{Y}$를 생산하는데 들어간 비용을 뜻하며, 우변은 최종재 생산자가 이를 판매해 얻을 수 있는 수입을 의미함. P는 최종재의 가격임.

○ 식 (A.1.9)-(A.1.10)을 연립방정식으로 풀면, 아래와 같은 관계를 구할 수 있음.

$$P = \left(\int P(i)^{1-\sigma} di\right)^{\frac{1}{1-\sigma}} \qquad (A.1.11)$$

○ (A.1.9) 와 (A.1.11)을 사용하면, 업무 i에 대한 수요함수를 아래와 같이 구할 수 있음.

$$y(i) = (P(i)/P)^{-\sigma} \cdot Y \qquad (A.1.12)$$

A.2 업무생산함수 (14)의 도출

❑ 완전경쟁 및 식 (3)의 규모에 대한 수확불변(constant returns to scale)의 기술에 의해 세부업무의 가격은 그 생산비와 동일함.

❑ 세부업무 생산의 시장 균형에서의 생산 조건인 식 (13)에 의해

- ○ 생산자동화가 이루어진 모든 세부업무 $j \leq a_i$에 대해 그 가격은 $R/\gamma(i)$로 동일함.
- ○ 생산자동화 기술이 존재하지 않는 모든 세부업무 $j > a_i$에 대해서 그 가격은 $w(i)/\gamma(i)$로 동일함.

❑ 업무 생산함수 (2)를 보면, 업무 $y(i)$의 생산을 위해 투입되는 세부업무 $x(i, j_1)$과 $x(i, j_2)$는 대칭적으로 업무생산에 들어감을 알 수 있음.

- ○ 따라서 생산자동화 기술이 존재하는 세부 업무 $j \leq a_i$의 경우 그 투입량이 $x_A(i)$서로 동일할 것이며, 생산자동화 기술이 존재하지 않는 세부 업무 $j > a_i$의 경우에도 그 투입량이 $x_{NA}(i)$로 서로 동일할 것임.

❑ 업무 i의 생산을 위해 사용된 전체 노동 및 자본의 양을 $L(i)$ 및 $K(i)$라 부르자.

- ○ 생산자동화기술이 존재하는 경우 자본으로만 세부업무가 생산될 것이며, 생산자동화 기술이 적용되는 세부업무의 비율 (개수) 는 a_i임. 따라서,

$$K(i, j) = \frac{K(i)}{a_i} \qquad (A.2.1)$$

- ○ 생산자동화기술이 존재하지 않는 경우 노동으로만 생산될 것이며, 생산자동화 기술이 적용되지 않는 세부업무의 비율(개수)는 $1 - a_i$임. 따라서,

$$L(i, j) = \frac{L(i)}{1 - a_i} \qquad (A.2.2)$$

❑ 식 (A.2.1)-(A.2.2)와 세부 업무 생산함수 식 (13)을 사용하면,

○ 생산자동화 기술이 존재하는 모든 세부업무의 경우, 그 투입량이 아래와 같음.

$$x(i,j) = x_A(i) = \gamma(i)K(i,j) = \gamma(i)\frac{K(i)}{a_i} \text{ for } \ j \in (0, a_i] \qquad (A.2.3)$$

○ 생산자동화 기술이 존재하지 않는 모든 세부업무 $j > a_i$의 경우, 그 투입량이 아래와 같음.

$$x(i,j) = x_{NA}(i) = \gamma(i)L(i,j) = \gamma(i)\frac{L(i)}{1-a_i} \text{ for } j \in (a_i, 1) \qquad (A.2.4)$$

❑ 식 (A.2.3)-(A.2.4)를 업무 생산함수 (2)에 적용하면,

$$y(i) = \left(\int_0^1 x(i,j)^{\frac{\rho-1}{\rho}} dj\right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} = \left(a_i[x_A(i)]^{\frac{\rho-1}{\rho}} + (1-a_i)[x_{NA}(i)]^{\frac{\rho-1}{\rho}}\right)^{\frac{\rho}{\rho-1}}$$

$$= \left(\boldsymbol{a_i\left[\gamma(i)\frac{K(i)}{a_i}\right]^{\frac{\rho-1}{\rho}} + (1-a_i)\left[\gamma(i)\frac{L(i)}{1-a_i}\right]^{\frac{\rho-1}{\rho}}}\right)^{\frac{\rho}{\rho-1}}$$

$$= \left(\boldsymbol{\gamma(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}} a_i^{1-\frac{\rho-1}{\rho}}[K(i)]^{\frac{\rho-1}{\rho}} + \gamma(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}}(1-a_i)^{1-\frac{\rho-1}{\rho}}[L(i)]^{\frac{\rho-1}{\rho}}}\right)^{\frac{\rho}{\rho-1}}$$

$$= \left(\boldsymbol{\gamma(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}} a_i^{\frac{1}{\rho}}[K(i)]^{\frac{\rho-1}{\rho}} + \gamma(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}}(1-a_i)^{\frac{1}{\rho}}[L(i)]^{\frac{\rho-1}{\rho}}}\right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} \qquad (\boldsymbol{A.2.5})$$

❑ $\Gamma_K(i) = \gamma(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}} a_i^{\frac{1}{\rho}}$, $\Gamma_L(i) = \gamma(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}}(1-a_i)^{\frac{1}{\rho}}$로 정의하면, 식 (A.2.5)를 아래와 같이 표현할 수 있으며 이는 본문에서 업무 생산함수 (14)임.

$$y(i) = \left(\Gamma_K(i)[K(i)]^{\frac{\rho-1}{\rho}} + \Gamma_L(i)[L(i)]^{\frac{\rho-1}{\rho}}\right)^{\frac{\rho}{\rho-1}}$$

A.3 업무 생산의 비용함수 (19) 도출

❑ 업무 생산을 위한 비용최소화는 본문의 식 (17)에 의해 주어져 있음. 식 (17)에 대한 라그랑지안은 다음과 같이 표현할 수 있음.

$$L = w(i)L(i) + RK(i) + \lambda\left[\bar{y}(i) - \left(\Gamma_{K(i)}K(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}} + \Gamma_{L(i)}L(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}}\right)^{\frac{\rho}{\rho-1}}\right] \qquad (A.3.1)$$

❑ 식 (A.3.1)에 대한 필요 일계조건은 다음과 같음.

$$w(i) = \lambda X L(i)^{-\frac{1}{\rho}} \qquad (A.3.2)$$

$$R = \lambda X K(i)^{-\frac{1}{\rho}} \qquad (A.3.3)$$

$$\bar{y}(i) = \left(\Gamma_{K(i)}K(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}} + \Gamma_{L(i)}L(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}}\right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} \qquad (A.3.4)$$

○ 위에서 $X = \left(\Gamma_{K(i)}K(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}} + \Gamma_{L(i)}L(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}}\right)^{\frac{1}{\rho-1}}$

❑ 식 (A.3.2)-(A.3.3)을 활용하면 아래의 조건을 구할 수 있으며, 이는 본문의 식임.

$$\frac{w(i)}{R} = \frac{\Gamma_{L(i)}}{\Gamma_{K(i)}}\left[\frac{L(i)}{K(i)}\right]^{-\frac{1}{\rho}} \qquad (A.3.5)$$

❑ 식 (A.3.5)를 $L(i)$에 대해 풀면, 아래와 같음.

$$L(i) = \kappa_1(i)K(i) \qquad (A.3.6)$$

○ 여기서 $\kappa_1(i) = \left[\frac{w(i)}{R}\frac{\Gamma_{K(i)}}{\Gamma_{L(i)}}\right]^{-\rho}$로 자본-노동비율 (capital-labor ratio, $K(i)/L(i)$)의 역수임

❑ 식 (A.3.6)을 식 (A.3.4)에 대입하면, 아래와 같음.

$$c(i) = w(i)L(i) + RK(i) = w(i)\kappa_1(i)K(i) + RK(i)$$
$$= [w(i)\kappa_1(i) + R]K(i) \qquad (A.3.6)$$

❑ 한편, 식 (A.3.4)에 (A.3.6)을 적용하면 아래와 같이 표현할 수 있음.

$$y(i) = \left(\Gamma_{K(i)}K(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}} + \Gamma_{L(i)}[\kappa_1(i)K(i)]^{\frac{\rho-1}{\rho}}\right)^{\frac{\rho}{\rho-1}}$$

$$= \kappa_2(i)K(i) \qquad (A.3.7)$$

○ 여기서 $\kappa_2(i) = \left[\Gamma_{K(i)} + \Gamma_{L(i)}\kappa_1(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}}\right]^{\frac{\rho}{\rho-1}}$이며 이는 생산물-자본비율 (output-capital ratio, $y(i)/K(i)$) 임.

○ 따라서 $K(i) \ = \frac{y(i)}{\kappa_2(i)}$ 이며 이는 업무 생산자 i 의 자본에 대한 요소 수요함수이며 이는 본문의 식 (23)임.

○ 위의 관계를 식 (A.3.6)에 대입하면 $L(i) = \frac{\kappa_1(i)}{\kappa_2(i)}y(i)$이며 이는 업무생산자 i의 노동에 대한 요소수요함수이며, 본문의 식 (24)임.

❑ 식 (A.3.6)에 (A.3.7)을 대입하면, 아래의 결과를 얻을 수 있으며 이는 본문에서 식 (19)임.

$$c(i) = [w(i)\kappa_1(i) + R]K(i)$$

$$= \kappa(i)y(i) \qquad (A.3.8)$$

○ 여기서 $\kappa(i) = \frac{w(i)\kappa_1(i)+R}{\kappa_2(i)}$임.

A.4 비교정태분석

A.4.1 혁신가의 일계조건 분석

❑ 혁신가의 일계조건 (32)이 아래와 같이 주어졌음.

$$q(i) = \lambda_I\eta'(a(i) - a^0(i)), \text{for all } i \in (0,1)$$

❑ 비교 정태분석을 위해 위 식의 양변을 전미분하면 아래와 같은 관계를 얻음.

$$dq(i) = \eta_i' d\lambda_I + \lambda_I \eta''(d[a(i) - a^0(i)]) \qquad (A.4.1.1)$$

❑ 따라서 아래와 같은 비교정태 분석 관계를 구할 수 있음.

$$\frac{d[a(i) - a^0(i)]}{dq(i)} = \frac{1}{\lambda_I \eta_i''} > 0 \qquad (A.4.1.2)$$

$$\frac{d[a(i) - a^0(i)]}{d\lambda_I} = -\frac{\eta_i}{\lambda_I \eta_i''} < 0 \qquad (A.4.1.3)$$

○ 식 (A.4.1.2): 다른 조건이 일정할 때, 생산자동화기술의 가격이 높을수록 자동화 기술 개발이 더 많이 진행됨.

○ 식 (A.4.1.3): 다른 조건이 일정할 대, 연구 시간에 대한 그림자 가격이 증가할 경우 기술 개발이 덜 진행됨.

A.4.2 업무생산자의 일계조건 분석

❑ $\kappa_2(i)$ 를 식 (15),(16) 및 (21)을 사용하여 아래와 같이 표현할 수 있음.

$$\kappa_2(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}} = \gamma(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}} a_i^{\frac{1}{\rho}} \left[1 + \left(\frac{1-a_i}{a_i}\right)^{\frac{1}{\rho}} \left(\frac{R}{w(i)}\right)^{\rho-1}\right] \qquad (A.4.2.1)$$

❑ 식 (A.4.2.1)의 양쪽을 a_i에 대해 미분하면, 다른 조건이 일정할 경우,

$$\frac{d\,\kappa_2(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}}}{da_i} = \frac{1}{\rho}\gamma(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}} a_i^{\frac{1}{\rho}-1} \left[1 + \left(\frac{1-a_i}{a_i}\right)^{\frac{1}{\rho}} \left(\frac{R}{w(i)}\right)^{\rho-1}\right]$$

$$- \frac{1}{\rho}\gamma(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}} a_i^{\frac{1}{\rho}} \left[\left(\frac{1-a_i}{a_i}\right)^{\frac{1}{\rho}} \left(\frac{R}{w(i)}\right)^{\rho-1}\right] \left[\frac{1}{1-a_i} + \frac{1}{a_i}\right]$$

$$= \frac{1}{\rho}\frac{1}{a_i}\kappa_2(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}} - \frac{1}{\rho}\frac{1}{1-a_i}\kappa_2(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}} - \frac{1}{\rho}\frac{1}{a_i}\kappa_2(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}} - \frac{2}{\rho}\gamma(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}} a_i^{\frac{1}{\rho}-1}$$

$$= -\frac{1}{\rho}\frac{1}{1-a_i}\kappa_2(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}} - \frac{2}{\rho}\gamma(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}} a_i^{\frac{1}{\rho}-1} < 0 \qquad (A.4.2.2)$$

❑ 식 (A.4.2.1)의 양쪽을 $R/w(i)$ 에 대해 미분하면, 다른 조건이 일정할 경우,

$$\left.\frac{d\,\kappa_2(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}}}{d\left(\frac{R}{w(i)}\right)}\right|_{da_i=0} = \gamma(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}} a_i^{\frac{1}{\rho}}(\rho-1)\left(\frac{1-a_i}{a_i}\right)^{\frac{1}{\rho}}\left(\frac{R}{w(i)}\right)^{\rho-2} > 0 \qquad (A.4.2.3)$$

○ 대체탄력도 $\rho > 1$ 이며 따라서 기술 수준을 고정하였을 때, 자본과 노동의 상대가격 $R/w(i)$이 증가하면 산출물-자본 비율도 증가함.

○ 자본이 노동대비 상대적으로 비싸지면, 자동화 기술의 변화를 고려하지 않을 때 자본의

❑ 식 (A.4.2.1)의 양쪽을 $R/w(i)$ 에 대해 미분하면,

$$\frac{d\,\kappa_2(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}}}{d\left(\frac{R}{w(i)}\right)} = \left.\frac{d\,\kappa_2(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}}}{d\left(\frac{R}{w(i)}\right)}\right|_{da_i=0} + \frac{d\,\kappa_2(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}}}{d\,(a_i)}\frac{da_i}{d\left(\frac{R}{w(i)}\right)} > 0 \qquad (A.4.2.4)$$

○ 왜냐하면 $\frac{da_i}{d(R)} < 0$, $\frac{da_i}{dw(i)} > 0$이고 따라서 $\frac{da_i}{d\left(\frac{R}{w(i)}\right)} < 0$. 그리고, 위의 (A.4.2.2)에서 $\frac{d\,\kappa_2(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}}}{d\,(a_i)} < 0$. 마지막으로 (A.2.4.3)에서 $\left.\frac{d\,\kappa_2(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}}}{d\left(\frac{R}{w(i)}\right)}\right|_{da_i=0} > 0$.

❑ 식 (21) 및 (15)-(16)을 사용하면, 노동자본비율 $\kappa_1(i)$를 아래와 같이 표현할 수 있음.

$$\kappa_1(i) = \left[\frac{w(i)}{R}\frac{\Gamma_{K(i)}}{\Gamma_{L(i)}}\right]^{-\rho} = \left[\frac{R}{w(i)}\right]^{\rho}\frac{(1-a_i)}{a_i} \qquad (A.4.2.5)$$

○ 따라서,

$$\frac{\partial\kappa_1(i)}{\partial\left(\frac{R}{w(i)}\right)} > 0 \qquad (A.4.2.6)$$

$$\frac{\partial\kappa_1(i)}{\partial a_i} < 0 \qquad (A.4.2.7)$$

❑ 노동생산성 $\kappa_2(i)/\kappa_1(i)$:

○ 식 (21)-(22)을 사용하면, 노동생산성 $\kappa_2(i)/\kappa_1(i)$을 아래와 같이 표현 가능함.

$$\frac{\kappa_2(i)}{\kappa_1(i)} = \frac{\left[\Gamma_K(i) + \Gamma_L(i)\kappa_1(i)^{\frac{\rho-1}{\rho}}\right]^{\frac{\rho}{\rho-1}}}{\kappa_1(i)}$$

$$= \left[\Gamma_K(i)\kappa_1(i)^{\frac{1-\rho}{\rho}} + \Gamma_L(i)\right]^{\frac{\rho}{\rho-1}}$$

$$= \Gamma_K(i)^{\frac{\rho}{\rho-1}} \left[\left(\frac{w(i)}{R}\right)^{\rho-1} \left(\frac{\Gamma_K(i)}{\Gamma_L(i)}\right)^{\rho-1} + \left(\frac{\Gamma_K(i)}{\Gamma_L(i)}\right)^{-1}\right]^{\frac{\rho}{\rho-1}}$$

$$= \gamma(i) \quad a_i^{\frac{1}{\rho-1}} \left[\left(\frac{w(i)}{R}\right)^{\rho-1} \left(\frac{a_i}{1-a_i}\right)^{\frac{(\rho-1)}{\rho}} + \left(\frac{a_i}{1-a_i}\right)^{-\frac{1}{\rho}}\right]^{\frac{\rho}{\rho-1}} \qquad (A.4.2.8)$$

○ 식 (A.4.2.8)에서 알 수 있듯,

$$\frac{\partial\left(\frac{\kappa_2(i)}{\kappa_1(i)}\right)}{\partial\left(\frac{R}{w(i)}\right)} < 0$$

❑ 한계비용 $\kappa(i)$:

$$\kappa(i) = R\,\frac{\frac{w(i)}{R}\kappa_1(i) + 1}{\kappa_2(i)}$$

○ 한계비용 표현에서 알 수 있듯,

$$\frac{\partial\kappa(i)}{\partial\kappa_1(i)} > 0 \qquad (A.4.2.9)$$

$$\frac{\partial\kappa(i)}{\partial\kappa_2(i)} < 0 \qquad (A.4.2.10)$$

❑ 또한, 한계비용 $\kappa(i)$는 (20)-(22) 및 (15)-(16)을 사용하여 아래와 같은 과정으

로 정리할 수 있음.

$$\kappa(i) = \frac{R\left[\frac{w(i)}{R}\kappa_1(i) + 1\right]}{\kappa_2(i)}$$

$$= \frac{R\left[\left(\frac{w(i)}{R}\right)^{1-\rho}\left(\frac{\Gamma_K(i)}{\Gamma_L(i)}\right)^{-\rho} + 1\right]}{\left[\Gamma_K(i)\left[\left[\left(\frac{w(i)}{R}\right)^{1-\rho}\left(\frac{\Gamma_K(i)}{\Gamma_L(i)}\right)^{-\rho} + 1\right]\right]\right]^{\frac{\rho}{\rho-1}}}$$

$$= \frac{R}{\gamma(i)\left[a_i\left(1 - \left(\frac{R}{w(i)}\right)^{\rho-1}\right) + \left(\frac{R}{w(i)}\right)^{\rho-1}\right]^{\frac{1}{\rho-1}}}$$

$$= \frac{R}{\gamma(i)}X^{\frac{1}{1-\rho}} \qquad (A.4.2.11)$$

where

$$X = a_i\left(1 - \left(\frac{R}{w(i)}\right)^{\rho-1}\right) + \left(\frac{R}{w(i)}\right)^{\rho-1} \qquad (A.4.2.12)$$

○ 만약 $\left(\frac{R}{w(i)}\right) < 1$ 이라면 (노동이 자본보다 비싼경우), $1 - \left(\frac{R}{w(i)}\right)^{\rho-1} > 0$ 이며, 따라서,

$$\frac{d\kappa(i)}{da_i} < 0$$

○ 만약 $\left(\frac{R}{w(i)}\right) > 1$ 이라면 (노동이 자본보다 싼 경우), $\left(1 - \left(\frac{R}{w(i)}\right)^{\rho-1}\right) < 0$ 이며, 따라서,

$$\frac{d\kappa(i)}{da_i} > 0$$

그러나 이 경우, 노동에서 자본으로 대체가 일어나지 않을 것이기 때문에,

$$\frac{d\kappa(i)}{da_i} = 0$$

○ 만약 $\frac{R}{w(i)} = 1$ 이라면, $\left(1 - \left(\frac{R}{w(i)}\right)^{\rho-1}\right) = 0$ 이며, 따라서,

$$\frac{d\kappa(i)}{da_i} = 0$$

❑ 식 (A.4.2.11) -(A.4.2.12)을 고려하면,

$$\left.\frac{\partial\kappa(i)}{\partial\left(\frac{R}{w(i)}\right)}\right|_{da_i=0} < 0$$

❑ 따라서

$$\frac{d\kappa(i)}{d\left(\frac{R}{w(i)}\right)} = \frac{\partial\kappa(i)}{\partial(a_i)}\frac{\partial a_i}{\partial\left(\frac{R}{w(i)}\right)} + \left.\frac{\partial\kappa(i)}{\partial\left(\frac{R}{w(i)}\right)}\right|_{da_i=0}$$

○ 첫번째 부분 $\frac{\partial\kappa(i)}{\partial(a_i)}\frac{\partial a_i}{\partial\left(\frac{R}{w(i)}\right)}$의 부호는 $\left(\frac{R}{w(i)}\right) < 1$의 경우, 양수임.

- 이는 한계비용이 기술 개발에 대해 감소하나, 기술 개발은 자본의 상대 가격이 상승하면 감소하는 것을 반영.

○ 두번째 부분 $\left.\frac{\partial\kappa(i)}{\partial\left(\frac{R}{w(i)}\right)}\right|_{da_i=0}$ 이 음수임.

- 자본의 가격을 고정한 채, 자본의 상대가격이 올라 가는 것으로, 노동의 가격이 하락하는 것임. 따라서 한계비용이 감소함.

○ 전체적으로 자본의 상대가격 상승의 영향은 한계비용에 대해 모호한 영향을 줌.