

디지털 전환의 기후효과: 현황과 전망*

오 형 나** · 홍 종 호***

논문 초록

디지털 전환과 그린 전환이 메가 트렌드로 자리잡으면서 디지털 전환이 기후변화에 미치는 영향에 대한 관심이 커지고 있다. ICT 기술을 통해 에너지 수요를 대체하거나 효율적으로 사용함으로써 기후변화를 완화할 수 있을 것이라는 기대가 있는 반면, ICT 제품과 서비스가 제조, 사용 또는 폐기 과정에서 다량의 에너지, 특히 전기를 소비하며 그 결과 온실가스 배출과 e-폐기물량이 증가할 것이라는 우려 또한 존재한다. 이 논문은 2013-2019년 「기업활동조사」와 「에너지총조사」 자료를 사용하여 한국의 제조업 부문을 중심으로 ICT 기술이 제조업 부문에서 전력을 포함한 에너지 소비와 온실가스 배출량에 어떤 영향을 미치는지에 대한 실증분석을 시도했다. 분석 결과 다른 조건이 동일한 경우 제조업 부문에서 ICT 기술이 활용된다면 전력 소비가 증가할 수 있지만 다른 에너지 소비가 줄어들면서 결과적으로는 총에너지 소비를 줄이는 긍정적 효과가 이미 나타나고 있다는 점을 발견했다. 그러나 ICT 활용으로 온실가스 배출량이 감소하지는 않는 것으로 분석되었는데, 이는 현재 전력의 탄소집약도가 전체 에너지의 탄소집약도 보다 높기 때문이다. 이러한 분석 결과는 발전 부문의 탈탄소화가 이루어지지 않은 가운데 디지털 전환이 추진된다면 디지털 전환은 그린 전환을 방해할 수 있다는 점을 시사한다.

핵심 주제어: 디지털 뉴딜, 디지털 전환, 기후변화, 데이터 센터

경제학문헌목록 주제분류: Q3, O3

투고 일자: 2021. 10. 6. 심사 및 수정 일자: 2021. 12. 3. 게재 확정 일자: 2021. 12. 23.

* 이 연구는 한국정보통신정책연구원의 '디지털 대전환 메가트렌드' 연구비 지원을 받았다.

** 제1저자, 경희대학교 국제대학 교수, e-mail: h.oh@khu.ac.kr

*** 교신저자, 서울대학교 환경대학원 교수, 환경계획연구소 및 지속가능발전연구소 겸무연구원, e-mail: jonghohong@snu.ac.kr

I. 서 론

디지털 기술과 이를 활용한 기기 및 장치와 서비스는 업무, 소통방식, 여행과 여가 생활 등 우리 삶 전반에 커다란 변화를 가져왔다. 10년 전만 해도 드물었던 로봇 청소기, 스마트 폰, 스마트 बैं킹, 소셜미디어, 전자 상거래, 원격 근무와 화상 회의가 일상화되었으며 이를 서비스로 지원하기 위한 데이터 센터가 세계 곳곳에 설치되고 있다. 전 세계 스마트 폰 이용자 수는 2016년 25억에서 2021년 38억으로 증가했으며 이들은 스마트 폰을 통해 업무를 보고 소통하며 네트워크를 통해 알게 된 사람들과 함께 각자의 공간에서 여가를 즐긴다(Internet Trends, 2021).²⁾ 이렇다 보니 1997년 60 PB에 불과했던 인터넷 통신량은 2021년 1.1 ZB로 거의 2만 배 늘어났다(UNEP and DTU, 2020). 기업 역시 로봇을 이용한 공장자동화, 3D 프린터를 활용한 생산 공정 전환, 생산 최적화, 인벤토리 관리, 빅데이터를 활용한 마케팅 등 디지털 기술을 생산과 고객관리에 활용한다. 또한 스마트그리드, 드론을 활용한 산림이나 해양 모니터링, e-정부 서비스처럼 사적 영역이 아닌 공적 영역에서도 디지털 기술은 널리 활용되고 있다. 디지털 산업은 자체 시장만 급성장하는 것이 아니라 다른 산업과 결합하며 지금과는 질적으로 다른 산업생태계를 만들어내고 있다. 즉, 우리의 생산과 소비를 포함한 생활 전반에 디지털화(digitalisation) 또는 디지털 전환(digital transformation)이 이루어지고 있다.

그러나 디지털화가 인류에게 주는 영향이 모두 긍정적인 것은 아니다. 디지털화와 관련된 우려 중 하나는 디지털화가 에너지 소비, 특히 전력 소비와 온실가스 배출량을 늘려 기후변화를 촉진할 뿐만 아니라 수명을 다한 디지털 제품의 폐기 및 처리와 관련된 환경문제를 일으킬 수 있다는 것이다. 만약 디지털 산업 또는 디지털 전환 자체가 ‘그린화’되지 못한다면, 디지털 전환의 결과 에너지소비량과 폐기물량이 급증하며 기후변화와 환경오염을 악화시키는 요인이 될 것이다.

디지털 기술이나 디지털 전환이 가진 이러한 양면성은 2019년부터 본격화된 기후 변화 완화를 위해 ‘2050 탄소 중립’과 ‘2030 국가 감축목표 상향 조정’ 요구에 직면한 정부에게 기대와 우려를 불러일으킨다. 코로나19 이후 그린(green) 전환과 함께 메가 트렌드로 자리 잡은 디지털 전환에 뒤처지면 디지털 시장에서뿐만 아니라 디지털 기술이 적용되는 대부분의 산업에서 국제경쟁력을 잃게 될 것이기 때문에 경제의 지

2) <https://www.vpnmentor.com/blog/vital-internet-trends/> (2021. 11. 30. 일 검색).

속가능성을 달성하기 어렵게 된다. 국제경쟁에 뒤처지지 않기 위해서는 정부로서는 사회 전반의 디지털 전환을 촉진하고 관련 산업을 지원하는 산업 정책은 물론, 디지털경제를 위한 인재 양성을 위해 교육정책과 노동정책을 재정비해야 하며 필요한 경우 대규모 R&D 정책도 시행해야 한다. 현재 우리나라는 물론 EU, 미국, 중국, 일본 정부가 디지털화(digitalisation), 디지털 전환(digital transformation), 디지털 뉴딜 등의 이름으로 디지털 산업을 집중 지원하는 이유다.

그런데 만약 디지털 기술이나 디지털 전환이 에너지 집약적이고 탄소 집약적이라면, 또 디지털 관련 기기나 장치가 대규모 e-폐기물이 되어 온실가스 배출과 환경과 괴를 일으킨다면 디지털 전환은 그린 전환(green transformation)이 목적으로 하는 탄소 중립 달성과 생태계 복원을 어렵게 만드는 요인으로 작용할 수 있다. 특히 ‘탄소 국경조정세’처럼 환경이 무역규제로 작용하면 지속 가능한 경제 성장에도 부정적 영향을 미칠 수 있다.

이러한 딜레마에 대한 해결책으로 EU 정부는 2020년에는 산업 정책에 디지털화 또는 디지털 전환 전략을 포함했으며, 2021년에는 그린 딜(European Green deal)과 같은 수준의 ‘디지털 뉴딜’을 선언하고 쌍둥이(twin) 전환 간의 시너지 효과를 모색하고 있다. 우리나라는 2020년 한국판 뉴딜의 추진을 선언하며 그린 뉴딜과 함께 디지털 뉴딜을 COVID-19 이후 경제전략의 중심축으로 제시한 바 있다. 2020년에는 그린 뉴딜에 디지털화가 반영된 ‘스마트’ 그리드, 빌딩, 도시, 산단 등의 세부 전략이 포함되었으나 디지털 뉴딜이 기후변화에 미칠 수 있는 부정적 영향에 대한 언급은 상대적으로 적었다. 그러나 2021년에는 디지털 전환 관련 에너지 소비증가에 대한 우려의 목소리가 높아지며 디지털 뉴딜이 ‘저탄소’를 지향하는 것으로 방향이 잡혔다. ‘2050 탄소 중립’을 선언한 미국과 중국, 일본 역시 EU나 우리나라와 유사한 쌍둥이 전환 정책이 추진되고 있다.

두 전환 간의 상호관계가 정책 도메인에서는 상당한 비중을 가지고 다루어지고 있는데 반해 관련 학술 연구는 이제 시작하는 단계에 불과하다. 이 논문에서 우리는 디지털화와 공장자동화가 세계 최고 수준이라는 평가를 받는 한국의 제조업 부문을 중심으로 디지털 기술이 제조업 부문 에너지 소비나, 전력 소비, 더 나아가 온실가스 배출에 어떤 영향을 미치고 있는지에 대한 실증분석을 진행하고자 한다. 실증분석에 사용된 데이터는 2013년부터 2019년까지의 「기업활동 조사」와 「에너지 총조사」로 한국판 뉴딜이 시작되기 이전 시점 즉, 쌍둥이 전환간 상호작용에 대한 고려가 없던 시기를 다루고 있다.

서론 이후 이 논문의 구성은 다음과 같다. 제Ⅱ장에서는 디지털화의 핵심기술인 ICT가 활용된 ICT 산업을 데이터 센터를 예로 들어 간략하게 서술한다. 제Ⅲ장에서는 우리나라 기업의 ICT 활용 수준을 살펴본 후 제Ⅳ장에서 제조업 부문 ICT 활용 수준과 에너지소비량 및 온실가스 배출량 간의 상관관계를 분석한다. 끝으로 제Ⅴ장에서 이 연구를 요약한 후 결론을 제시하고자 한다.

Ⅱ. ICT 산업의 개요, 에너지 소비 및 탄소배출 기여도

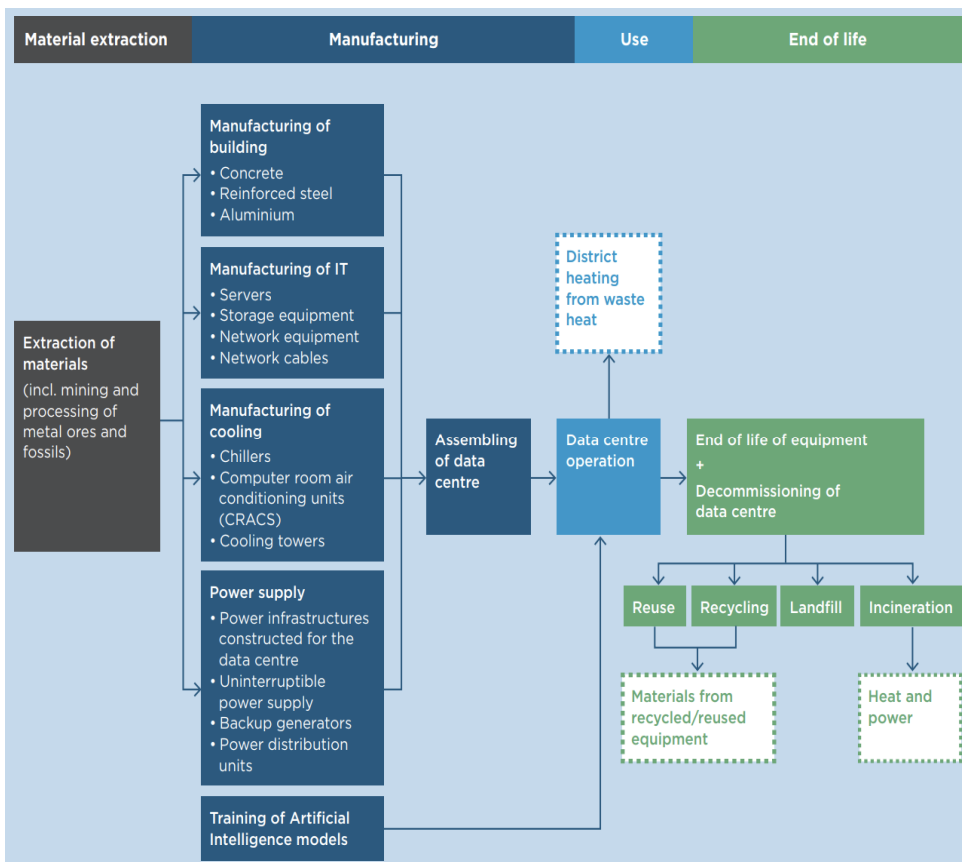
디지털 기술은 IT(information technology)나 ICT(Information and communication technology)를 포함한 다양한 기술을 포괄하는 개념으로 사용된다(ADB, 2021). ICT는 IT보다 커뮤니케이션 관련 기술이 강조된 개념이나 IT를 포괄하는 만큼 이하에서는 IT를 포괄하는 개념으로 ICT를 사용하고자 한다. ADB(2021)는 디지털 경제를 데이터와 정보 생성, 가공, 저장에 관여하는 제품과 시스템, 그리고 이들 제품에 사용되는 자원으로 정의했다. 타 경제 부문에 비해 데이터 자체와 데이터를 경제적 가치를 가진 자원으로 전환시키는 가공과 저장 과정이 포함되었다는 점이 특징적이다. 데이터 경제의 정의와 범주는 디지털 기술의 발전과 함께 변화하고 있다. 1940년대 마이크로 전자공학의 등장, 1960년대 컴퓨터의 탄생, 1990년대 인터넷의 도입, 그리고 최근 블록체인이나 인공지능, 로봇에 이르기까지 ICT 기술이 빠른 속도로 발전해왔고 그 결과 전자 상거래, 핀테크, 무인 자율주행 자동차 등 발전하는 기술을 기반으로 새로운 부문이 디지털경제에 새로이 합류하고 있다. 이렇다 보니 디지털 부문을 정의하기는 쉽지 않다는 것이 Zhang and Chen(2019)의 설명이다. 2019년 시점에서 Zhang and Chen(2019)이 정의한 협의의 디지털경제는 ICT 부문과 유사하다. 통신, 인터넷, 정보기술 서비스, 하드웨어 및 소프트웨어가 협의의 디지털경제를 구성한다. 여기에 디지털 기술이 융합된 일부 전통 부문이 더해지면 광의의 디지털경제가 된다.

UNEP and DTU(2020a)에 따르면, ICT 산업부문은 크게 ICT 기기와 장치, 네트워크, 그리고 데이터 센터로 구성된다. 기업의 데이터 센터가 있는 공간은 ICT 산업의 3가지 구성 요소가 밀도 있게 배치된 공간의 대표적 예다.³⁾ 데이터 센터는 데이터

3) UNEP and DTU(2020a)가 묘사한 바에 따르면, 네트워크와 ICT 디바이스는 인체로 치면 뼈와 손, 데이터 센터는 두뇌에 해당한다. 데이터 센터가 데이터의 저장, 보호, 처리의 기능을 담당하기 때문이다.

의 저장과 처리, 상용화를 목적으로 만들어진 빌딩이나 방을 말한다. <그림 1>는 UNEP and DTU (2020a) 가 데이터 센터가 기후변화나 환경에 미치는 영향을 보여주기 위해 데이터 센터의 라이프 사이클을 정리한 것이다. 이 공간은 대개 컴퓨터(서버)나 데이터 저장 장치(하드디스크 드라이브, tape drives)와 같은 IT 하드웨어, 데이터 통신을 위한 모든 종류의 네트워크 장비(라우터, 스위치, 모뎀 등), 냉난방 인프라인 프라고 가득 차 있다.

<그림 1> 데이터 센터의 라이프 사이클 개요



주: 점선으로 표시된 것은 사용된 물질이나 에너지의 회수가 가능하다는 것을 표시한다.

출처: UNEP and DTU (2020a). Environmental sustainability of data centres: A need for a multi-impact and life cycle approach.

이러한 데이터 센터는 안정적인 데이터 처리, 보안 시스템과 건물 제어가 가능하도록 고품질의 전력 시스템에 연결되어 있어야 한다. 세금 신고나 처리, 금융거래, 상

품거래, 인터넷 검색, 스마트 폰 사용 등 우리의 일상생활은 다량의 데이터를 생성하며 이렇게 생성된 데이터는 데이터 센터에 저장되어 처리·가공 과정을 거쳐 다시 유용한 데이터 상품으로 전환되는 것이다. 기존 처리되던 데이터가 시간이 지남에 따라 증가하는 데다가 새롭게 데이터로 처리되는 정보 범위가 늘어나고 있으며 인공지능(AI), 사물인터넷(internet-of-things, IoT), 블록체인 등 ICT 진보에 따른 새로운 상품과 서비스가 보편화되면서 데이터 센터에 대한 수요도 급증할 것으로 예상된다(UNEP and DTU, 2020b).

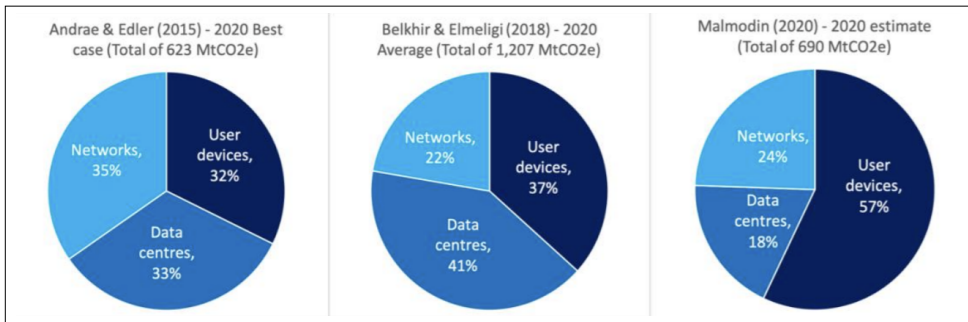
데이터 센터는 라이프 사이클 각 단계마다 다량의 에너지, 특히 전력을 사용한다. UNEP and DTU(2020b)에 따르면, 데이터 센터가 사용하는 에너지는 동일 면적의 상업용 빌딩이 사용하는 에너지량의 10~100배에 달한다. 2018년 현재 데이터 센터가 소비하는 전력량은 전 세계 전력수요의 1%에 해당하는 연간 200 TWh 규모이며 2030년이 되면 전체 전력수요의 20% 이상을 차지할 것으로 추정된다(UNEP and DTU, 2020b). 데이터 센터는 최근 문제가 되고 있는 e-폐기물의 배출처이기도 하다. 제품 연한을 다한 데이터 센터나 데이터 센터를 구성하는 기기는 e-폐기물이 되어 일부는 재활용되지만 나머지는 소각 또는 매립되는데 그 과정에서 온실가스를 포함한 다양한 대기오염 물질이 배출된다.

점증하는 우려에 비해 디지털 기술이 글로벌 에너지 소비나 온실가스 배출에 미치는 영향을 정량적으로 분석한 논문은 소수에 불과하다. 데이터 센터 관련 에너지 소비나 온실가스 배출에 관한 연구가 몇 개 존재하는 수준이다(Koomey, 2011; Andrae and Edler, 2015; Belkhir and Elmeligi, 2018; Andrae, 2017). Belkhir and Elmeligi(2018)는 전체 ICT 부문 온실가스 배출량 중에서 각 기기나 시설이 차지하는 비중을 계산했다. 이들의 연구에 따르면, 배출량 비중이 가장 큰 시설은 데이터 센터로 2010년 ICT 부문 전체 배출량의 33.3%를 배출했으며 2020년에는 그 비중이 41%로 증가했다. 데이터 센터의 확장 추이를 고려할 때 이 배출 비중은 더욱 커질 것으로 예상된다. 그 다음은 통신 네트워크로 2010년 28%, 2020년 22%를 차지한다. 이들의 연구에서 스마트 폰의 기여도는 2010년 4% 수준이었으나 개발도상국에서 유선전화기보다 빠르게 보급되며 2020년에는 11%로 증가한 것을 알 수 있다. 반면 Desktop 컴퓨터의 비중은 2010년 18%에서 2020년 7%로 감소했다. 그 외 기기(노트북, 디스플레이, 태블릿 PC)의 기여도는 10% 이내로 2010년이나 2020년간 큰 차이를 보이지 않을 것으로 추정되었다.⁴⁾

Belkhir and Elmeligi(2018)가 추정한 ICT 부문 온실가스 배출량이 1,207 MtCO_{2e}

였는데 비해 Andrae and Edler (2015) 나 Malmodin (2020) 의 추정값은 각각 623 MtCo2e와 690 MtCO2e로 연구자 간 차이가 상당하다. ICT 부문 총배출량뿐만 아니라 데이터 센터와 네트워크의 기여도 면에서도 Andrae and Edler는 각각 33%와 35%, Malmodin (2020) 은 18%와 24%로 Belkhir and Elmeligi (2018) 의 41%와 22%와 상당한 차이를 보이는 것을 알 수 있다(〈그림 2〉 참조).

〈그림 2〉 ICT 부문 탄소발자국에서 구성 요소별 비중



출처: Freitag et al. (2020).

이처럼 ICT 부문 전체의 온실가스 배출량은 연구자에 따라 상당한 차이를 보이지만 2020년 기준 글로벌 온실가스 배출량의 약 2%~6% 사이로 추정되고 있으며 2030년에는 적게는 7%, 많게는 20% 이상을 차지할 정도로 급증한 후 점차 감소할 것으로 추정되고 있다(〈표 1〉 참조).

〈표 1〉 기존 연구의 ICT 부문 글로벌 온실가스 배출 비중 추정

	2007	2015	2020	2030	2040
Malmodin et al. (2010)	1.3-3.0%				
Belkhir & Elmeligi (2018)	1.0-1.6%		3.0-3.5%		6.0-14%
Andrae & Elder (2015)		2.8-4.2%	3.0-6.1%	7.0-23.0%	
Malmodin & Lundén (2018)			2.0-3.2%		
추정 범위	1.0-3.0%	1.4-4.2%	2.0-6.1%	7.0-23.0%	6.0-14.0%

출처: UNEP and ETU (2020c). Greenhouse gas emissions in the ICT sector Trends and methodologies 에서 재인용.

4) 노트북: 8% → 7%, 디스플레이: 9% → 7%, 태블릿 PC: 0% → 0%.

이러한 ICT 부문의 탄소발자국 추정값에 대해서는 과다 추정되었다는 의견과 과소 추정되었다는 의견이 공존하는 상황이다. Masanet et al. (2020)은 기존 연구에서 ICT 부문, 특히, 데이터 센터 관련 에너지사용량이 과다추정되었다는 근거를 제시한 바 있다. 저자들은 2010년 이후 데이터 센터에 대한 수요가 급증했고 그 결과 스토리지 용량, IP 트래픽양, 데이터 센터 처리량을 증가했지만, 처리량 대비 서버의 숫자나 서버의 에너지집약도, 작업당 사용되는 서버의 숫자 등이 감소하며 데이터 센터의 에너지사용량이 데이터 센터 시장 규모만큼 증가하지 않았다는 점을 강조했다. 에너지사용량이 과다 추정되었으면 온실가스 배출량 역시 과다 추정될 가능성이 크다. 이와는 반대로 Freitag et al. (2020)은 ICT 부문의 탄소 배출량이 직접 배출량인 Scope 1 배출량만을 계산했으나 ICT 기기 가치사슬 전반이나 제품의 라이프 싸이클 전반의 온실가스 배출량을 고려하면 ICT 부문의 온실가스 배출량은 더욱 커질 것이라고 주장했다.

ICT 부문이 타 부문과 결합해 온실가스 저감의 주요 수단이 될 것이라는 주장도 제기되고 있다. Malmmodin and Bergmark(2015)는 ICT 기술이 온실가스 배출량을 저감 시키는 방식과 수치를 정리한 바 있다. 그들의 연구 결과에 따르면, 첫 번째 범주는 스마트그리드로 ICT 기술이 그리드가 재생 에너지원에 의해 생산된 전력을 활용하는 방식, 수요관리, 그리드 최적화 등에 기여할 수 있을 것으로 예상된다. 두 번째 범주는 스마트 빌딩으로 냉난방 및 환기 자율조정 시스템(HVAC, heating, ventilation and air conditioning systems), 인공지능을 활용한 조명과 빌딩 관리, 볼티지 최적화, 인접한 재생 에너지원의 활용 등을 포함한다. 세 번째 범주는 수송부문과 여행(smart transport와 smart travel)으로 경로 최적화, 차량 관리, 그리고 비디오 콘퍼런스나 재택근무를 통해 물리적인 출근이나 출장을 대체하는 데 따른 온실가스 감축 효과를 들 수 있다. 이중 비디오 콘퍼런스나 재택근무는 ‘스마트 근무(smart work)’에 해당한다. 네 번째 범주는 스마트서비스로 온라인쇼핑이나 온라인 banking, e-government 서비스가 대표적인 경우에 해당한다. 다섯 번째 범주는 농축산업과 토지이용과 관련된 것으로 ICT 기술은 토양 모니터링, 기후 예측, 스마트 급수, 축산 관리 등을 통해 1차 산업부문의 온실가스 감축과 환경보전에 기여할 수 있다. 저자들은 ICT 기술을 활용한 저감 수단이 글로벌 온실가스 배출량 감소에 어느 정도 기여하는지를 알아보기 위해 2030년을 기준 시점으로 하여, 각 저감 수단에 의한 온실가스 감축량(잠재량)이 글로벌 온실가스 배출량(추정값)에서 차지하는 비중(저감수단에 의한 온실가스 감축 추정량/추정된 온실가스 배출량)을 구해 제시했다. 그 결과가

〈표 2〉에 정리되어 있다. 효과 면에서 기여도가 가장 큰 것은 전력 부문과 서비스 부문에 ICT 기술이 활용된 것으로 스마트 미터링, AI나 빅데이터를 활용한 전력망 최적화나 재생에너지 이용률 제고나 e-commerce, e-government 등이 해당한다. 이를 모두 합한 경우, 高저감잠재력 시나리오(High Reduction Potential Scenario, 이하 HRS)는 ICT에 의해 약 8기가톤의 CO₂eq가 저감될 수 있으며 이러한 감축 잠재량은 2030년 예상 배출량 63.5 기가 톤CO₂e의 12.4%에 해당한다. 농업 부문을 추가하면 감축 잠재량은 약 10기가톤으로 커지며 2030년 예상 배출량에서 차지하는 비중 역시 15.3%로 높아진다. 이 감축 잠재량은 건물과 교통부문의 인프라 개선을 전제로 한다. 만약 인프라 개선이 없다면 ICT가 저감에 기여하는 정도(농업 제외)는 HRS의 경우 10.7%, 中저감잠재력 시나리오(Medium Reduction Potential Scenario, 이하 MRS)의 경우 5.3%로 줄어든다.

〈표 2〉 IPCC 시나리오(HRS, MRS)별 ICT를 활용한 2030년 온실가스 저감 잠재력

ICT를 활용한 저감 방식	적용 부문	HRS	MRS
스마트그리드:		3.9%	1.6%
스마트 미터링: 주택(건물 부문 에너지 수요의 57%)			
전력망 최적화: 송배전 손실(전력의 8%, 온실가스 배출량의 2%)			
재생에너지 활용: 전력생산(글로벌 배출량의 25%)			
스마트 빌딩:		1.4%	0.9%
가정, 사무실, 가게, 호텔, 학교(건물 에너지 소비의 31%)			
의료기관, 식료품 가게와 서비스(건물 에너지 소비의 9%)			
스마트 수송		1.1%	0.6%
루트 최적화: 도로교통의 58%			
ICT 기술을 활용한 교통 수단선택 최적화: 항공에서 기차나 선박으로 교통수단 변경			
스마트 워크:		1.9%	0.9%
원격회의: 항공 여행(총 여행수요의 7%), 도로를 이용한 교통(총 여행수요의 12%),			
미팅용 호텔(빌딩의 1.6%)			
ICT로 인한 사무실 공간의 축소: 오피스 건물은 전체 빌딩의 7%			
원격 근무: 재택근무(개인 자동차 이동량의 25%, 전체 여행수요의 17.5%)			
스마트 여행:		1.9%	0.9%
스마트 대중교통: 개인차량을 이용한 교통(전체 여행수요의 35%)			
차량 관리: 상업용 차량(전체 여행수요의 12%)			
루트 최적화: 모든 교통(전체 여행수요의 82%)			
스마트서비스:		3.2%	1.6%
e-commerce: 산업과 수송부문 전체			
스마트 농업(토지이용 포함)		2.9%	1.3%

출처: Malmodin and Bergmark (2015).

Ⅲ. 제조업 부문 에너지 소비와 온실가스 배출량에 대한 ICT 활용 효과

디지털 시대 성장회계의 가장 중요한 특징은 자본과 노동만 투입제로 간주하던 산업 시대와 달리 데이터가 새로운 생산요소로 고려되었다는 점이다(Zhang and Chen, 2019). 식 (2)는 데이터(D)가 총요소 생산성을 제고시킨다는 점에서 여타 생산요소와 구별된다는 점을 보여준다.

$$\text{산업 시대 생산함수 또는 성장회계: } Y = f(A, K, L) \quad (1)$$

$$\text{디지털 시대 생산함수 또는 성장회계: } Y = f(A, D, K, L) = f(A(D), K, L) \quad (2)$$

Zhang and Chen(2019)은 디지털화가 총요소 생산성을 향상시키는 경로를 몇 가지 소개했다. 첫 번째 경로는 거래비용을 절감하는 것으로 금융기관을 직접 방문해야 했던 거래가 휴대전화기를 이용해 몇 초 안에 해결되는 것이 이에 해당한다. 두 번째 경로는 디지털 기술을 활용한 자원 소비 절감으로 디지털화가 정보의 비대칭성을 줄이고 공급 균형을 원활하게 함으로써 필요 이상의 자원 낭비를 줄이는데 기여한다는 것이다. 세 번째 경로는 디지털 기술을 활용한 생산효율 제고로 주로 제조업 부문에서 자동화를 통해 이루어진다. 자동화는 장비를 정확히 제어함으로써 생산라인의 생산성을 극대화하며, 장비의 생산 데이터와 품질 데이터를 실시간으로 확보해 제조 시간과 제품 결함률을 감소시키며 무인 자동화를 통해 생산비용을 절감하고 장비가 비효율적으로 무작동하는 시간을 줄이는 것을 통해 가능하다. 이들의 실증분석에 따르면, 경제의 디지털화가 1%p 증가하면 GDP는 0.3%p 증가하지만 이러한 성장 효과가 나타나는 데 약 2년이 소요된다.

ScienceSoft의 기술전문가인 Shiklo⁵⁾는 제조업 부문에 디지털 기술이 적용되면 일터 변화에 관해 설명했다. 예를 들어 사물인터넷(IoT)은 센서 네트워크를 사용하여 중요한 생산 데이터를 수집하고, 수집된 데이터는 클라우드(Cloud)를 통해 Big Data로 모인 후 인공지능(AI) 기반 모델링을 통해 가공되고 분석됨으로써 생산 효율성 제고에 도움이 되는 데이터나 정보로 전환된다. 이처럼 디지털 기술이 제조업에 접목될 때 최적화된 자산과 재고관리가 가능해지며 기계의 다운타임이 감소하고 에너지 효율성이 제고될 수 있을 것이다. 또, 소비자의 요구에 맞춘 제품을 생산하되 이

5) 출처: www.scnsoft.com/blog/iot-in-manufacturing.

러한 소비자의 범위가 넓어질 수 있으며(mass customization), 제품차별화에도 불구하고 생산 효율성은 떨어지지 않을 수 있다.

아래의 식 (3)은 에너지가 중요한 생산요소이며, 식 (4)는 ICT 기술이 에너지사용량과 에너지의 온실가스 배출계수에 영향을 미쳐 결과적으로 산업부문의 에너지사용량과 온실가스 배출량을 변화시킬 수 있음을 표시한 것이다. Zhang and Chen (2019)과 Shiklo (2021)의 가설을 확장하면, 제조업 부문에 ICT 기술이 활용될 경우 산업의 매출액이 증가해도 에너지사용량은 ICT 기술을 활용하지 않은 경우에 비해 덜 증가하고 그 결과 에너지집약도는 물론, 온실가스 배출량과 탄소집약도가 감소한다는 추론이 가능하다. 본 연구의 제IV장에서는 제조업을 포함한 업종별 ICT 활용 수준을 살펴보고, 제V장에서는 이 가설에 대한 정량적 검증을 시행한다.

디지털 시대 생산함수 또는 성장회계: $Y=f(D,K,L,E)=f(K,L,E(D))$ (3)

디지털 시대 에너지 수요와 온실가스 배출량:

$$\begin{aligned} E &= f^{-1}(Y,D) \\ CO_2 &= \psi(D) \times E(D) \end{aligned} \quad (4)$$

IV. 국내 기업의 ICT 활용 수준

〈표 3〉은 2019년 「기업활동 조사」에서 ICT 전반 또는 개별 기술별 활용 여부를 조사한 결과를 정리한 것이다. 부문별로 보면 ICT를 활용하고 있다는 응답은 ‘정보통신업(44.2%)’에서 가장 높았으며, 금융보험업(21.1%), 전기를 포함한 에너지산업(16.4%), 교육서비스업(15.7%), 전문·과학 및 기술서비스업(12.5%), 제조업(10.8%) 순으로 높았다. 개별 기술로 보면, 업종에 상관없이 클라우드(Cloud), 빅데이터(Big data), 사물인터넷(IOT)의 활용도가 상대적으로 높았다. 한편, 모바일, 인공지능(AI), 블록체인(BC), 3D 프린터(3DP), 로봇(Robot)은 저조한 활용도를 보였다.

〈표 3〉 부문별 ICT 기술 활용 기업 비중(2019년, %)

부문	관측치 갯수	ICT	IOT	Cloud	Big Data	Mobile	AI	BC	3DP	Robot
농업, 임업 및 어업	31	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
광업	10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
제조업	6,330	10.8	3.5	3.4	2.6	1.7	1.8	0.2	2.3	2.5
전기, 가스, 증기 공급업	67	19.4	16.4	13.4	11.9	6.0	7.5	1.5	6.0	3.0
수도·하수·폐기물 처리, 원료재생업	146	1.4	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7
건설업	578	7.8	3.8	3.8	2.8	1.9	2.5	0.2	1.0	1.0
도매 및 소매업	1,480	10.2	3.0	5.0	4.1	2.2	1.7	0.6	1.1	0.7
운수 및 창고업	747	4.3	0.8	2.8	1.7	0.9	0.7	0.0	0.0	0.5
숙박 및 음식점업	346	4.9	1.4	2.3	1.7	2.0	0.0	0.0	0.0	0.6
정보통신업	1,124	44.2	13.3	24.7	20.8	10.9	15.3	6.8	1.2	1.5
금융 및 보험업	370	21.1	2.2	11.6	14.9	5.4	10.3	6.2	0.0	2.7
부동산업	270	4.1	1.5	2.2	0.0	1.1	0.0	0.0	0.0	0.4
전문, 과학 및 기술서비스업	586	12.5	2.6	5.3	5.8	1.9	3.4	0.3	1.4	0.7
사업시설 관리, 임대서비스업	630	7.8	1.9	3.5	3.2	2.1	1.1	0.0	0.0	0.5
교육서비스업	89	15.7	3.4	7.9	6.7	5.6	6.7	1.1	2.2	1.1
보건업·사회복지 서비스업	33	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
예술·스포츠·여가 서비스업	320	5.9	0.6	2.5	0.9	3.1	0.0	0.3	0.3	0.0
협회·단체, 수리·기타 개인서비스업	98	3.1	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

〈표 4〉는 〈표 3〉과 같은 데이터를 사용하여 부문별로 2019년 현재 ICT 기술을 도입한 기업의 매출액이 「기업활동 조사」에 응한 동종 업종 기업의 총매출액에서 차지하는 비중(이하 ICT 매출액 비중)을 정리한 것이다. 〈표 1〉과 비교해보면, ICT 매출액 비중이 부문 내 기업 중 ICT 기술을 활용한 기업 비중(이하 ICT 기업 비중)보다 훨씬 큰 것을 알 수 있다. 이는 ICT 기술을 활용한 기업이 그렇지 않은 기업에 비해 매출액이 크다는 것을 의미한다. 특히 제조업과 전기·가스·증기 공급업(에너지 공급업)에서 둘 간 차이가 큰 것을 확인할 수 있다. 특히, 이들 두 업종에서 Big Data, Mobile, AI 기술의 'ICT 매출액 비중'이 'ICT 기업 비중'이 타 기술보다 훨씬 큰 차이를 보여 해당 기술을 활용하는 기업이 대기업에 국한되어 있을 가능성을 시사했다.

〈표 4〉 ICT 기술활용 기업 매출액이 부문 총매출에서 차지하는 비중(2019년, %)

부문	ICT	IOT	Cloud	Big Data	Mobile	AI	BC	3DP	Robot
농업, 임업 및 어업	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
광업	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
제조업	50.5	26.4	29.2	33.1	25.0	30.7	0.6	9.4	24.9
전기, 가스, 증기 공급업	63.8	62.5	43.0	47.9	27.1	31.6	8.7	41.1	24.2
수도·하수·폐기물 처리, 원료재생업	5.4	0.0	3.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7
건설업	47.3	42.2	37.8	38.1	5.5	35.2	11.0	21.5	25.6
도매 및 소매업	22.9	4.8	9.8	17.0	3.8	5.3	2.7	1.1	1.6
운수 및 창고업	34.9	20.3	17.6	23.7	16.9	27.0	0.0	0.0	7.2
숙박 및 음식점업	16.2	2.6	9.2	14.9	12.5	0.0	0.0	0.0	8.2
정보통신업	78.4	51.0	54.1	64.0	40.7	62.2	37.7	0.6	7.1
금융 및 보험업	48.0	9.7	31.4	42.3	9.5	33.6	13.6	0.0	9.5
부동산업	8.1	3.0	4.2	0.0	2.6	0.0	0.0	0.0	0.1
전문, 과학 및 기술서비스업	35.7	24.8	24.5	30.0	4.1	20.8	0.1	3.0	0.6
사업시설 관리, 임대서비스업	26.7	17.7	11.4	7.5	8.8	2.4	0.0	0.0	1.5
교육서비스업	31.6	2.8	17.0	12.9	6.6	15.4	2.0	2.4	2.0
보건업·사회복지 서비스업	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
예술·스포츠·여가 서비스업	4.6	0.4	1.3	0.3	2.4	0.0	0.6	0.0	0.0
협회·단체, 수리·기타 개인서비스업	1.9	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

앞서 EU가 그린 딜을 추진하며 산업부문에 대해 저탄소화와 함께 현대화(modernization)를 추진하며 현대화의 구체적인 내용은 디지털 전환(digital transformation)이라고 언급한 바 있다. 〈표 5〉는 국내 제조업 부문에서의 ICT 기술 활용 정도를 2019년 기준 ICT 매출액 비중(=산업에서 ICT 기술을 활용한 기업의 매출액/해당 산업의 총매출액)을 이용하여 정리한 것이다. 제조업 중 ICT 기술의 활용도가 높은 산업은 통신기기가 포함된 ‘전자부품 및 통신(C26)’, 철강이 포함된 ‘1차 금속(C25)’, 코크스·연탄 및 석유정제품이나 일반 화학제품이 포함된 ‘석유화학(C19-C22)’과 ‘자동차(C30)’와 조선이 포함된 ‘기타 운송장비(C31)’로 대부분 장치산업에 해당한다.

탄소집약 업종 중에서는 1차금속(철강)과 석유화학 산업에 속한 기업이 ICT 기술, 특히 빅데이터와 클라우드를 적극적으로 활용하고 있지만, 시멘트가 포함된 ‘비금속

광물 제품(C23)'이나 '금속 가공제품(C25)' 기업의 경우 ICT 활용 정도가 전반적으로 낮았다.

〈표 5〉 제조업 부문 ICT 매출액 비중(2019년, %)

산업	관측치 갯수	ICT	IOT	Cloud	Big Data	Mobile	AI	BC	3DP	Robot
1차 금속	368	55.4	41.2	48.6	45.9	31.0	26.6	0.0	0.2	2.6
석유화학	1,145	48.9	5.6	23.0	33.8	8.4	15.1	1.2	1.8	12.9
비금속 광물제품	183	5.3	0.5	1.6	3.2	0.5	0.1	0.0	1.0	1.7
금속 가공제품	434	11.8	3.3	4.0	2.3	0.4	2.0	0.0	4.0	2.8
전기·전자	386	14.5	10.8	6.0	6.9	3.2	4.7	3.1	4.0	7.6
전자부품·통신	674	76.9	57.6	56.8	57.5	63.5	67.0	0.1	2.7	50.9
자동차	746	58.7	28.2	20.7	21.4	18.0	41.6	0.0	43.1	42.4
기타 운송장비	120	50.5	30.7	12.5	45.0	45.0	38.2	0.0	19.2	49.9
산업용 기계	15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
의료·정밀·광학 기기	262	39.9	19.9	16.9	18.4	0.6	21.9	8.6	8.7	16.0
기타 기계	788	25.1	12.8	9.8	12.0	7.1	8.2	0.0	10.5	8.7
음식료·담배	482	23.1	8.9	12.4	12.2	1.9	0.1	0.0	0.0	2.7
목재·종이제	283	33.8	18.5	16.2	22.7	10.0	3.1	0.0	19.2	49.9
섬유·의류·가죽제품	381	6.5	0.7	4.8	5.0	4.0	0.1	0.0	0.0	0.0
제조업 평균	6,330	50.5	26.4	29.2	33.1	25.0	30.7	0.5	9.4	24.9

V. ICT 활용 수준과 에너지 소비 및 온실가스 배출량과의 상관관계

앞서 우리는 기후변화와 관련하여 디지털화가 가진 양면성에 대해 살펴본 바 있다. 제 V 장에서는 「기업활동 조사」와 「에너지 총조사」를 활용하여 한국 표준산업 중분류(KSIC2)를 기준으로 지역별·연도별(2013년~2019년) 에너지사용량(toe), 전력사용량(toe), 온실가스 배출량(CO₂eq)과 매출액,⁶⁾ 산업별 ICT 활용기업의 매출액을 포함한 데이터를 구축했다.⁷⁾

본 연구는 산업부문의 ICT 활용이 에너지사용량과 CO₂ 배출에 미치는 영향을 추

6) 매출액은 한국은행이 제공하는 GDP 디플레이터(2015=100)를 이용해 실질가격 화했다.

7) 「에너지 총조사」에 비해 「기업활동 조사」는 상용근로자 50인 이상인면서 자본금이 3억 원 이상인 기업을 조사 대상으로 하기 때문에 중소기업의 대표성이 약한 문제를 가지고 있다.

정하기 위해 식 (6)과 같은 관계식을 설정했다. 식 (6)에서 y_{jt} 는 종속변수로 t 년도 산업 j 의 에너지사용량(toe), 전력사용량(toe), 온실가스 배출총량(CO₂eq), 전력사용에 따른 온실가스 배출량(CO₂eq), 에너지집약도(toe/매출액), 탄소집약도(CO₂eq/sales) 또는 각 값의 로그 전환 값을 의미한다. 이하에서는 설명의 단순화를 위해 필수적인 경우가 아니면 첨자 t 나 j 를 삭제했다.

$$y_{jt} = \alpha_j + \beta_1 s_{jt} + \beta_2 ICT_{jt} + \beta_3 P_{jt} + \beta_4 t + \epsilon_{jt} \quad (6)$$

설명변수 중 s_{jt} 는 2015년 실질가격으로 전환된 t 년도 산업 j 의 매출액 또는 그 로그값이다. 모델에 따라 해당 산업에서 ICT 기술을 활용하지 않은 매출액(nonICTsales) 또는 그 로그값이 대신 사용되기도 한다. ICT_{jt} 는 t 년도 산업 j 의 ICT 기술 활용정도를 나타내는 변수로, 해당 산업에서 ICT 기술을 활용했다고 응답한 기업의 매출액(ICTsales) 또는 그 로그값이나, 산업 전체 매출액 중 ICT 기술을 활용했다고 응답한 기업의 매출액 비중($ICTsales_r = ICTsales/sales$)이 사용되었다. 본 연구에서는 산업 내 혁신 활동을 나타낼 대리변수로 산업 내 특허 건수(nPatent) 또는 그 로그값을 사용했다. 특허 건수는 「기업활동 조사」에서 확보 가능하다. 또, 시간 경과에 따른 요소 생산성 제고 효과를 통제하기 위해 추세변수(trend variable), t 를 추가했다. α_j 와 β 는 추정계수 벡터로, 특히 α_j 는 산업 j 의 상수항(intercept)으로 산업 y_{jt} 의 평균이 높을수록 큰 값을 가지게 된다. 끝으로 ϵ_{jt} 는 잔차항으로 본 연구에서는 ϵ_{jt} 가 표준정규분포를 따른다고 가정했다.

Wu-hauseman 테스트 결과 산업 특성을 고려하지 않으면 통계적으로 유의미한 편이가 발생하는 것으로 판명되어 산업 고정효과(industry fixed effect) 패널모델(Fixed effect Panel model 또는 LSDV 모델)이 사용되었다. 다양한 조합의 추정결과는 <부표 1>에 정리되어 있다. 5장에서는 제조업 부문 ICT 기술도입이 에너지사용총량(Panel A), 전력사용량(Panel B), 그리고 온실가스 배출량(Panel 3)에 미치는 영향을 추정한 모델 중 각 종속 변수(variable of interest)에 대해 가장 큰 설명력을 보인 더블 로그 모델(log-log model)에 기반하여 ICT 기술도입이 기후변화에 미치는 대략적인 영향을 설명해 보고자 한다. <표 6>은 <부표 1> 중 더블 로그 모델의 결과만 추린 것이다. 이에 기반하여 추정 결과를 정리하면 다음과 같다.

〈표 6〉 산업 고정효과 모델 추정 결과: ICT 활용 효과

Panel A: 종속변수로 에너지사용량 또는 그 로그값을 사용한 경우

종속변수→	ln(에너지사용량)		에너지집약도	
ln(Sales)	0.474***		-0.00004	
ICTsales_r	-1.302***		-0.0004	
ln(nonICTsales)		0.431***		-0.00003
ln(ICTsales)		0.017		-8.92e-6
F-value	32.21***	33.79***	2.04	0.94
종속변수→	ln(에너지사용량)		에너지집약도	
ln(Sales)	0.817***		0.00016**	
ICTsales_r	-1.148***		-0.00032	
ln(nonICTsales)		0.736***		0.00014**
ln(ICTsales)		0.045***		6.15e-6
ln(nPatent)	-0.365***	-0.389***	-0.0002***	-0.0002***
F-value	30.57***	34.48***	4.58***	4.45***

Panel B: 종속변수로 전력사용량 또는 그 로그값을 사용한 경우

종속변수→	ln(전력사용량)		전력집약도	
ln(Sales)	0.458***		-0.00002***	
ICTsales_r	-1.161***		-0.00002	
ln(nonICTsales)		0.418***		-0.00002***
ln(ICTsales)		0.016		-6.50e-7
F-value	45.75***	48.37***	23.71***	20.01***
종속변수→	ln(전력사용량)		전력집약도	
ln(Sales)	0.686***		-0.00001**	
ICTsales_r	-1.059***		-0.00001	
ln(nonICTsales)		0.631***		-8.84e-6**
ln(ICTsales)		0.036***		1.04e-7
ln(nPatent)	-0.243***	-0.272***	-5.89e-6	-0.00001***
F-value	38.83***	43.43***	18.34***	17.16***

Panel C: 종속변수로 온실가스 배출량 또는 그 로그값을 사용한 경우

종속변수→	ln(온실가스배출량)		탄소집약도	
ln(Sales)	0.492***		-0.0002*	
ICTsales_r	-1.470***		-0.0010	
ln(nonICTsales)		0.460***		-0.0001
ln(ICTsales)		0.012		-0.00002
F-value	38.86***	40.03***	2.45*	1.35
종속변수→	ln(온실가스배출량)		탄소집약도	
ln(Sales)	0.781***		0.0003	
ICTsales_r	-1.354***		-0.0008	
ln(nonICTsales)		0.734***		0.0003
ln(ICTsales)		0.037***		0.00001
ln(특허건수)	-0.306***	-0.348***	-0.0005***	-0.0006***
F-value	34.17***	38.17***	3.88***	3.91***

주: *, **, ***은 각각 10%, 5%, 1% 유의수준에서 통계적으로 유의함을 의미.

각 Panel의 첫 번째 칸에 정리된 추정 결과에 따르면, 산업내 매출이 증가하면 에너지사용량(Panel A)과 전력사용량(Panel B)이 증가하고 그 결과 온실가스 배출량(Panel C)이 증가한다. 산업 내 ICT 기술을 활용한 매출액 비중(ICTsales_r)이 증가하면 이러한 산업 내 에너지사용량(전력 포함)과 온실가스 배출량 증가세를 낮출 수 있다. ICT 매출액 비중이 1%p 증가하면 에너지사용량과 전력사용량은 약 1.1%~1.3% 감소하며 온실가스 배출량은 약 1.4%~1.5% 감소하는 것으로 추정되었다. 이는 산업 내 ICT 매출액이 증가하면 에너지사용량 증가율, 전력사용량 증가율, 해당 산업에서의 온실가스 배출량 증가율이 낮아진다는 것으로 디지털 뉴딜과 그린 뉴딜의 시너지효과가 존재할 수 있음을 시사한다.

ICT 기술을 활용한 매출액 비중이 높아지면 에너지사용량이나 온실가스 배출량 증가율이 낮아지기는 하지만 ICT 기술을 활용한 매출액(ICTsales의 로그값)이 증가할 때 에너지사용이나 온실가스 배출이 감소하거나 변화가 없는 것은 아니다. 이러한 사실은 각 Panel의 두 번째 칸에 표시된 $\ln(\text{ICTsales})$ 의 추정계수가 통계적으로 0보다 크거나 같지만, 음의 값은 아닌 것을 통해 확인할 수 있다. 산업 내 혁신 활동을 통제하면 ICT 기술을 활용한 매출액이 1% 증가하면 에너지사용량은 0.045%, 전력사용량은 0.036%, 온실가스 배출량은 0.037% 증가하는 것을 알 수 있다.

에너지집약도, 전력집약도, 탄소집약도는 산업의 매출액 한 단위를 증가시키는데 추가되는 에너지(toe), 전력(toe), 온실가스 배출량(tCO₂eq)을 표시하기 때문에 에너지 효율성 또는 탄소 효율성 지표로 활용된다. 각 Panel의 마지막 두 칸은 ICT 기술을 활용한 매출액의 비중 또는 매출액이 증가할 때 세 가지 효율 변수에 어떤 변화가 일어나는지를 보여준다. 산업 내 혁신 활동을 통제한 후 추정한 결과(Panel A의 하단)를 보면, 에너지집약도는 산업의 매출액이 1% 증가하면 0.00016 만큼 증가한다. ICTsales_r의 추정계수는 ICT 기술을 활용한 매출액 비중이 증가하면 에너지집약도가 약간 감소할 가능성이 있으나 통계적 유의성은 없다는 것을 나타낸다. ICT 기술을 활용한 매출액의 로그값을 사용한 경우에도 결과는 유사하나 ICT 기술을 활용하지 않은 매출액이 증가할 때와는 다른 효과를 발견할 수 있다. ICT 기술을 활용하지 않은 매출액이 1% 증가하면 에너지집약도가 증가하지만, ICT 기술을 활용한 매출액 증가는 에너지집약도를 증가시키는 효과가 없기 때문이다.

전력집약도의 경우는 반대의 패턴을 발견할 수 있다. 산업의 매출액이 1% 증가하면 전력집약도는 0.00002 만큼 개선된다. ICT 기술을 활용하지 않은 매출액이 1% 증가해도 유사한 개선 효과를 기대할 수 있다. 반면, ICT 기술을 활용한 매출액이 증

가하거나 그 비중이 증가한다고 해서 이러한 전력집약도 개선 효과는 발생하지 않는다. 이러한 인과관계는 ICTsales_r과 $\ln(\text{ICTsales})$ 의 추정계수가 통계적으로 0과 다르지 않다는 것이 이러한 것을 통해 알 수 있다. 이러한 추정 결과는 UNEP를 포함한 기존 연구에서 ICT 기술이 에너지효율 전반을 제고시키지만 적어도 10년 내에는 전력사용량을 증가시킬 것이라는 전망에 부합한다. ICT 기술활용의 두 효과(전체적인 에너지사용량은 감소시키지만, 탄소집약도가 타 에너지에 비해 높은 전력사용량을 증가시키는 효과)가 서로를 상쇄한 결과 ICT 기술이 확대되는 데 따른 온실가스를 줄이는 효과 또는 감축 효과는 통계적으로 유의미하지 않은 것으로 드러났다. 이는 Panel C의 추정 결과를 통해 확인할 수 있다.

주목할 만한 점은 산업 내 혁신 활동(특히 건수를 대리변수로 사용)의 효과다. 각 Panel에서 $\ln(\text{특히 건수})$ 의 추정계수는 0보다 작고 대체로 통계적으로 유의미하다. 이는 산업 내 혁신 활동이 활발해지면 에너지사용량, 전력사용량, 온실가스 배출량이 줄어들고, 에너지집약도, 전력집약도, 탄소집약도가 개선될 수 있다는 것을 의미한다.

V. 요약과 결론

정보통신기술과 관련 산업(통신 네트워크, 컴퓨터, 데이터 센터 등)이 급속도로 성장하면서 ICT 부문이 얼마나 많은 에너지를 사용할지, 그 결과 온실가스 배출량을 얼마나 증가시킬지에 대한 우려가 제기되고 있다. 동시에 ICT를 활용해 에너지 수요를 대체하거나 에너지를 효율적으로 사용하고, 환경감시와 관련 정보를 실시간으로 공유함으로써 순환 경제를 활성화할 수 있다는 기대 또한 커지고 있다. 뿐만 아니라 ICT와 디지털 기술로 인해 적은 비용으로 환경 정보가 빅데이터로 생성되고 처리되어 시민에게 전달되고 시민이 직접 참여할 수 있는 채널도 열릴 것으로 기대된다.

이처럼 ICT와 기후와의 관계는 다음의 3가지로 정리된다.⁸⁾ 첫 번째는 흔히 ICT의 탄소발자국이라 불리는 것으로 ICT 제품과 서비스의 제조, 사용 또는 폐기와 관련된 온실가스 배출이다(직접 효과). 첫 번째 효과는 기후변화를 일으킨다는 점에서 부정적이며 앞서 언급한 우려와 관련이 있다. 두 번째는 ICT로 인해 재택근무가 가능해지

8) <https://www.ericsson.com/en/blog/2020/2/climate-impact-of-digital-technology> (2021. 09. 24. 검색).

며 통근으로 인한 온실가스 배출량이 감소한 것처럼 다른 부문이 ICT 기술이나 제품을 사용함으로써 온실가스 배출량이 변하는 경우다(간접 효과). 이로 인해 ICT는 탈탄소나 순환 경제를 구현할 수 있는 경제의 와일드카드로 인식되기도 한다. 만약 첫 번째 효과가 두 번째 효과보다 강하거나 두 번째 효과를 상쇄할 만큼의 반등 효과가 일어난다면 ICT나 디지털 전환은 기후변화에 부정적 요인으로 작용할 것이다. 세 번째는 인류가 ICT를 활용하면서 우리의 행동이나 선호가 바뀌는 데 따른 온실가스 배출량의 변화이다. 앞서 언급한 ICT로 인한 정보의 양, 감시체계, 참여 및 의사결정 방식의 변화 등이 세 번째에 해당한다. 이 세 가지 효과를 보면, 결국 ICT 활용 또는 디지털화가 기후변화에 어떤 영향을 줄 것인가는 우리가 ICT 기술을 어떻게 활용하느냐에 달려 있다는 것임을 알 수 있다.

이 논문의 실증분석 결과는 다른 조건이 동일한 경우 제조업 부문에서 ICT 기술이 활용된다면 전력 소비는 증가할 수 있지만 다른 에너지 소비가 줄어들면서 결과적으로는 총에너지 소비를 줄이는 긍정적 효과가 이미 나타나고 있다는 것을 보여준다. 그러나 ICT 활용으로 온실가스 배출량이 감소하지는 않는 것으로 분석되었는데, 이는 현재 전력의 탄소집약도가 전체 에너지의 탄소집약도보다 높기 때문으로 추측된다.

이러한 추정 결과를 근거로 두 가지 정책적 시사점을 도출할 수 있다. 첫째는 디지털 전환에 의한 전력수요 급증이 예상되는 만큼, 발전 부문의 탈탄소화가 이루어지지 않은 가운데 디지털 전환을 추진하면 국가 온실가스 배출량이 급증하면서 디지털 전환이 그린 전환을 방해하게 될 것이라는 점이다. 두 번째는 ICT 산업 자체의 에너지 효율 제고나 데이터 센터의 넷제로 또는 네거티브 빌딩화 노력이 필요하다는 점이다. 다행인 것은 ICT의 탄소발자국이 탈탄소화가 가능한 전기소비량에 의해 크게 좌우된다는 것이다. ICT 부문에서 사용되는 에너지가 전량 재생 전력으로 대체되면 ICT 부문 탄소배출량을 최대 80%까지 줄일 수 있다. 그간 ICT 기술이 발전해 오며 이 부문 에너지효율이 개선됐다는 점 또한 낙관적인 전망을 가능하게 한다. 과거 2G 네트워크(개발도상국에서 흔히 볼 수 있는)는 12GB의 데이터를 전송하기 위해 연간 400kWh 이상의 전기를 필요로 하지만, 3G 네트워크는 그 10분의 1인 35kWh 미만을 소비하며, 4G 네트워크는 7kWh의 전기만을 사용한다. 이러한 기술 진보는 계속 되겠지만 필요 데이터 볼륨이 빠른 속도로 커지고 있기 때문에 기술 진보에 따른 에너지 소비나 온실가스 감축 효과는 대부분 상쇄될 것으로 예상된다.⁹⁾ 특히 글로벌 가치사슬로 엮인 바이어의 'RE100' 요구로 인해 발전 부문이 탈탄소화하기 전에 기업

들은 ICT 탄소발자국을 줄여야만 한다. 탄소발자국을 줄이는 방법은 많지 않다. 데이터 센터를 넷제로 공간으로 디자인하고, 타 기업과 공유하여 저감 차원에서 규모의 경제를 시도하는 것, ICT 장치를 폐기하기 전에 장치를 최대한 오래 사용하거나 재활용하는 정도다. 세 번째 방법이 사용되기 위해서는 ICT 기기의 표준화가 필요하다.

본 연구는 제조업 부문을 대상으로 ICT 전환과 그린 전환의 상호보완 또는 상충관계를 살펴봤다는 점에서 의미를 가질 수 있으나 많은 한계를 가지고 있다. 첫째, 디지털경제의 핵심이자 관련된 에너지 소비 급증이 예상되는 정보통신 산업을 분석하지 못했다. 통계분석이 가능한 에너지사용량과 온실가스 배출데이터를 확보할 수 없었기 때문이다. 제조업 부문도 KSIC2 단위에서 통합한 데이터를 사용한 연구로 ICT 기술활용에 따른 에너지 소비 및 온실가스를 줄이는 효과를 개별기업 단위에서 분석할 수 없었다. 이는 분석에 사용된 「기업활동 조사」와 「에너지 총조사」 DB가 각각 미시 차원에서 조사된 데이터임에도 불구하고 기업 수준 통합이 가능하지 않았기 때문이다. 향후 미시 데이터의 공개 범위가 넓어지면 DB의 정보를 기업이나 사업체 수준에서 통합하면 의미 있는 설명변수를 활용한 보다 심도 있는 실증분석이 가능할 것이다.

■ 참 고 문 헌

1. Andrae, Anders, "Total Consumer Power Consumption Forecast," 2017.
https://www.researchgate.net/publication/320225452_Total_Consumer_Power_Consumption_Forecast
 2. Andrae, A. S., and T. Edler, "On Global Electricity Usage Of Communication Technology: Trends To 2030," *Challenges*, Vol. 6, No. 1, 2015, pp.117-157.
 3. Asian Development Bank, "Digital Technologies: For Climate Action, Disaster Resilience, and Environmental Sustainability," 2021.
<https://www.adb.org/sites/default/files/publication/700396/digital-technologies-climate-action.pdf>
 4. Belkhir, L., and A. Elmeligi, "Assessing ICT Global Emissions Footprint: Trends to 2040 & Recommendations," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 177, No. 10, 2018, pp.448-463.
 5. EU Commission, "Digital Solutions for Zero Pollution," 2021.
 6. Freitag, C., and M. Berners-Lee, "The Climate Impact of ICT: A Review of Estimates,
-
- 9) EU Commission (2021). Digital Solutions for Zero Pollution.
(https://ec.europa.eu/environment/pdf/zero-pollution-action-plan/swd-digital-solutions_en.pdf)

- Trends and Regulations,” Working Paper, Lancaster University, 2020.
7. Malmmodin, J., Å. Moberg, D. Lundén, G. Finnveden, and N. Lövehagen, “Greenhouse Gas Emissions and Operational Electricity Use in the ICT and Entertainment & Media Sectors. *J. Ind. Ecol.* 2010,” Vol. 14, 2010, pp.770-790.
 8. Malmmodin J., and D. Lundén, “The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010-2015,” *Sustainability*, Vol. 10, No. 9, 2018, 3027.
 9. Masanet, E., A. Shehabi, N. Lei, S. Smith, and J. Koomey, “Recalibrating Global Data Center Energy-Use Estimates,” *Science* 367, No. 64812020, pp.984-986.
 10. UNEP and DTU, “Environmental Sustainability of Data Centres: A Need for a Multi-impact and Life Cycle Approach,” 2020a.
 11. _____, “Data Centres: Digitalisation Powerhouse and Energy Efficiency Potential,” 2020b.
 12. Zhang, L., and S. Chen, “China’s Digital Economy: Opportunities and Risks,” IMF Working Paper, 2019.

〈부표 1〉 ICT 활용 효과 Industry Fixed Effect 모델 추정결과

Panel A: 종속변수로 에너지사용량 또는 그 로그값을 사용한 경우

종속변수→	에너지사용량		ln(에너지사용량)		에너지집약도	
Sales	-2.3e-6		1.37e-9		-1.95e-12	
ICTsales_r	238.4		-0.122		-0.0004	
nonICTsales		-0.00003*		-1.51e-9		-1.09e-11
ICTsales		0.00001		2.36e-9		9.91e-13
F-value	0.08	1.15	0.09	0.08	1.97	1.56
종속변수→	에너지사용량		ln(에너지사용량)		에너지집약도	
ln(Sales)	197.0**		0.474***		-0.00004	
ICTsales_r	-365.4		-1.302***		-0.0004	
ln(nonICTsales)		169.4		0.431***		-0.00003
ln(ICTsales)		7.437		0.017		-8.92e-6
F-value	1.47	1.37	32.21***	33.79***	2.04	0.94
종속변수→	에너지사용량		ln(에너지사용량)		에너지집약도	
ln(Sales)	850.4***		0.817***		0.00016**	
ICTsales_r	-101.0		-1.148***		-0.00032	
ln(nonICTsales)		616.5***		0.736***		0.00014**
ln(ICTsales)		408.4*		0.045***		6.15e-6
ln(특히건수)	-699.0***	-568.4***	-0.365***	-0.389***	-0.0002***	-0.0002***
F-value	6.23***	5.08***	30.57***	34.48***	4.58***	4.45***

Panel B: 종속변수로 전력사용량 또는 그 로그값을 사용한 경우

종속변수→	전력사용량		ln(전력사용량)		전력집약도	
Sales	3.53e-6***		2.88e-19		-3.88e-13***	
ICTsales_r	-36.5		-0.0942		-0.00004**	
nonICTsales		-4.85e-6***		4.71e-9		-1.81e-12***
ICTsales		7.75e-6***		1.53e-9		1.71e-13
F-value	25.23***	39.56***	0.54	0.53	7.42***	8.20***
종속변수→	전력사용량		ln(전력사용량)		전력집약도	
ln(Sales)	64.36***		0.458***		-0.00002***	
ICTsales_r	-34.63		-1.161***		-0.00002	
ln(nonICTsales)		58.09***		0.418***		-0.00002***
ln(ICTsales)		2.257		0.016		-6.50e-7
F-value	24.27***	22.37***	45.75***	48.37***	23.71***	20.01***
종속변수→	전력사용량		ln(전력사용량)		전력집약도	
ln(Sales)	102.8***		0.686***		-0.00001***	
ICTsales_r	-19.26		-1.059***		-0.00001	
ln(nonICTsales)		75.70***		0.631***		-8.84e-6**
ln(ICTsales)		3.870***		0.036***		1.04e-7
ln(특히건수)	-40.64***	-22.37***	-0.243***	-0.272***	-5.89e-6	-0.00001***
F-value	20.93***	17.72***	38.83***	43.43***	18.34***	17.16***

Panel C: 종속변수로 온실가스 배출량 또는 그 로그값을 사용한 경우

종속변수 →	온실가스배출량		ln(온실가스배출량)		탄소집약도	
Sales	0.00001		3.38e-9		-4.34e-12	
ICTsales_r	-564.8		-0.387		-0.0013*	
nonICTsales		-0.00007*		6.00e-10		-4.34e-12
ICTsales		0.00005***		3.21e-9		-0.001*
F-value	0.60	2.45*	0.67	0.29	1.67	1.67
종속변수 →	온실가스배출량		ln(온실가스배출량)		탄소집약도	
ln(Sales)	540.2***		0.492***		-0.0002*	
ICTsales_r	-1286.8		-1.470***		-0.0010	
ln(nonICTsales)		452.7**		0.460***		-0.0001
ln(ICTsales)		29.46		0.012		-0.00002
F-value	2.68**	2.67**	38.86***	40.03***	2.45*	1.35
종속변수 →	온실가스배출량		ln(온실가스배출량)		탄소집약도	
ln(Sales)	1587.8***		0.781***		0.0003	
ICTsales_r	-868.1		-1.354***		-0.0008	
ln(nonICTsales)		1215.5***		0.734***		0.0003
ln(ICTsales)		99.40*		0.037***		0.00001
ln(특허건수)	-1107.2***	-969.6***	-0.306***	-0.348***	-0.0005***	-0.0006***
F-value	5.13***	4.88***	34.17***	38.17***	3.88***	3.91***

주: *, **, ***은 각각 10%, 5%, 1% 유의수준에서 통계적으로 유의함을 의미.

The Impact of Digitalization on GHG Emissions in the Manufacturing Sector

Hyungna Oh* · Jong Ho Hong**

Abstract

The digital transition has been transforming the nature of energy and resource use in the production process. Existing literature have presented different views on the digital transition's impact on greenhouse gas (GHG) emissions. Some have welcomed the wave of digitalization with the expectation that ICT technologies will contribute to climate mitigation by improving the efficiency of energy and resource use in the production sector. Others, on the contrary, have shown concern that the resulting surge in electricity consumption, water use and e-waste generation in digital sectors will do more bad than good in regards to GHG emissions. With the present study, we investigate how ICT technologies affect energy consumption and GHG emissions in the manufacturing sector. Two datasets, *the Survey of Business Activities (2013-2019)* and *the National Energy Total Information System (2013-2019)* are employed in the empirical exercise of this study. Estimation outcomes suggest that utilizing ICT technologies in the manufacturing sector will help reduce overall energy consumption and energy intensity, implying that the twin deals (Digital New Deal and Green New Deal) are complementary. However, this positive synergy effect of digitalization in green transformation was not found within electricity consumption, the dominant fuel of digital technologies, as its carbon intensity is higher than that of most other fuels. As a result, the digital transition will show an exigent need to green electricity production.

Key Words: digital new deal, digitalization, climate change, data center

JEL Classification: Q3, O3

Received: Oct. 6, 2021. Revised: Dec. 3, 2021. Accepted: Dec. 23, 2021.

* First Author, Professor, College of International Studies, Kyung Hee University, 1732 Deogyong-daero, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17104, Korea, Phone: +82-31-201-2160, e-mail: h.oh@khu.ac.kr

** Corresponding Author, Professor, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea, Phone: +82-2-880-9518, e-mail: jonghohong@snu.ac.kr