creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

석사학위논문

ICT 기업의 환경경영 효율성 비교: RE100 이니셔티브 가입 여부 및 재생에너지 조달 수준을 중심으로

2026년

한 성 대 학 교 대 학 원

경 영 학 과

서비스운영관리전공

김 수 현

HANSUNG
UNIVERSITY

석사학위논문
지도교수 신재호

ICT 기업의 환경경영 효율성 비교: RE100 이니셔티브 가입 여부 및 재생에너지 조달 수준을 중심으로

A Comparative Analysis of Eco-Efficiency among ICT Firms: Evidence from RE100 Membership and Renewable Energy Procurement Levels

2026년 6월 일

한 성 대 학 교 대 학 원

경 영 학 과

서비스운영관리전공

김 수 현

석사학위논문
지도교수 신재호

ICT 기업의 환경경영 효율성 비교: RE100 이니셔티브 가입 여부 및 재생에너지 조달 수준을 중심으로

A Comparative Analysis of Eco-Efficiency among ICT Firms: Evidence from RE100 Membership and Renewable Energy Procurement Levels

위 논문을 경영학 석사학위 논문으로 제출함

2026년 6월 일

한 성 대 학 교 대 학 원

경 영 학 과

서비스운영관리전공

김 수 현

김수현의 경영학 석사학위 논문을 인준함

2026년 6월 일

HANSUNG UNIVERSITY

심 사 위 원 최강화 (인)

심 사 위 원 김영준 (인)

심 사 위 원 신재호 (인)

국 문 초 록

ICT 기업의 환경경영 효율성 비교: RE100 이니셔티브 가입 여부 및 재생에너지 조달 수준을 중심으로

한 성 대 학 교 대 학 원
경 영 학 과
서 비 스 운 영 관 리 전 공
김 수 현

최근 기후변화 대응과 탄소 중립 요구가 강화되면서 RE100 이니셔티브 가입은 기업이 재생에너지 전환 의지를 대외적으로 표명하는 대표적인 수단으로 활용되고 있다. 그러나 RE100 가입이라는 제도적 선언이 곧바로 실제 재생에너지 조달 확대로 이어지는 것은 아니며, 선언과 실행 사이에는 시차와 수준 차이가 존재할 수 있다. 이에 본 연구는 Nasdaq-100에 포함된 ICT 기업을 대상으로 RE100 이니셔티브 가입 여부와 실제 재생에너지 조달 수준을 구분하여, 각각의 요인이 기업의 환경경영 효율성과 어떠한 관련성을 가지는지를 비교·분석하였다.

ICT 산업은 인공지능(AI), 클라우드 컴퓨팅, 데이터센터, 통신 네트워크, 반도체 제조 등의 확장과 함께 현대 디지털 경제의 핵심 인프라로 자리매김

하고 있다. 그러나 이러한 산업적 성장은 대규모 전력 소비와 온실가스 배출을 수반하며, 특히 구매 전력 사용에 따른 Scope 2 배출 관리는 ICT 기업의 지속가능경영에서 중요한 과제로 부상하고 있다. ICT 기업의 실질적 지속가능성을 평가하려면, 환경성과와 경제 성과를 분리하기보다, 에너지 사용과 탄소배출이라는 환경적 투입 요소를 얼마나 효율적으로 관리하면서 경제적 산출을 달성하는지를 함께 검토할 필요가 있다.

이를 위해 본 연구는 2024년 기준 Nasdaq-100 ICT 기업 중 분석 변수에 부합하는 환경보고서 및 재무 자료를 확보할 수 있는 27개 기업을 분석 대상으로 선정하였다. 총에너지 사용량, Scope 1 직접 배출량, 시장 기준 Scope 2 간접 배출량을 투입 변수로, 매출액을 산출 변수로 설정하고, 투입지향 자료포락분석(DEA: Data Envelopment Analysis) 방법을 이용하여 기업별 환경경제 효율성 점수를 산출하였다. 이후 산출된 효율성 점수를 기준으로 RE100 가입 여부에 따른 두 집단 간 차이와 재생에너지 조달 수준(RE 비율)에 따른 두 집단 간 차이를 각각 Mann-Whitney U 검정으로 분석하였다.

분석 결과, RE100 가입 기업은 비가입 기업보다 통계적으로 유의하게 높은 환경경영 효율성을 보였다. 그러나 이러한 차이를 RE100 가입이라는 제도적 지위 자체의 효과로 단정하기는 어려우며, 가입 여부와 무관하게 실제로 재생에너지 조달을 통해 시장 기준 Scope 2 배출량을 얼마나 감축했는지가 반영된 결과로 해석할 필요가 있다. 실제로 재생에너지 조달 수준에 따른 집단 간 차이는 RE100 가입 여부에 따른 차이보다 더 뚜렷하게 나타났으며, 재생에너지를 100% 조달한 기업 집단은 부분적으로만 조달한 기업 집단보다 유의하게 높은 효율성을 보였고 그 효과 크기 역시 RE100 가입 여부 기준보다 컸다.

이러한 결과는 ICT 기업의 환경경영 효율성이 RE100이라는 제도적 참여보다 실제 재생에너지 조달이라는 실행 수준과 더 강하게 연결되어 있음을 보여준다. 이는 기업의 환경성과와 함께 경영 성과를 평가하는 데 공식적인 제도의 참여 여부뿐 아니라 실제 운영 과정에서 이루어지는 재생에너지 전환 수준을 함께 고려할 필요가 있음을 시사한다. 본 연구는 기업의 에너지 사용량과 Scope 1·Scope 2 배출량을 투입 요소로 반영한 DEA 모형을 통해 ICT

기업 수준에서 환경경영 효율성을 측정하고, 재생에너지 전환의 선언과 실행 간 차이를 실증적으로 분석하였다는 점에서 의의가 있다.

주요어: RE100, 재생에너지, 자료포락분석(DEA), Scope 2, 환경경영 효율성, ICT 기업, Nasdaq-100

HANSUNG UNIVERSITY

목 차

I. 서론 ····· 1

1.1 연구배경 ····· 1
1.2 연구 목적과 연구 문제 ····· 3

II. 이론적 배경 ····· 7

2.1 ICT 산업의 에너지 집약성과 환경관리 ····· 7
2.2 환경전략과 기업역량 ····· 10
2.3 환경경영 효율성과 기업성과 ····· 12
2.4 재생에너지 조달과 RE100 이니셔티브 ····· 15

III. 연구 방법 ····· 19

3.1 연구설계 ····· 19
3.2 DEA 분석 방법 ····· 21
3.2.1 DEA의 개념과 이론적 기초 ····· 21
3.2.2 투입지향 모형과 산출지향 모형 ····· 22
3.2.3 CCR 모형과 BCC 모형 ····· 23

3.3 연구 대상 및 자료 수집 ····· 25
3.3.1 연구 대상 ····· 25
3.3.2 자료 수집 및 전처리 ····· 27

3.4 변수의 정의 및 측정 ····· 27
3.4.1 투입 변수 ····· 29

3.4.2 산출 변수 ····· 30
3.4.3 집단 구분 변수 ····· 30
3.5 비모수 검정 방법 ····· 32
3.5.1 RE100 가입 여부에 따른 차이 검정 ····· 32
3.5.2 비율 집단 간 차이 검정 ····· 34

IV. 실증 분석 결과 ····· 35

4.1 기술통계 및 DEA 결과 ····· 35
4.2 RE100 가입 여부 분석 ····· 38
4.3 RE 비율 집단 분석 ····· 39

V. 결 론 ····· 44

5.1 연구 결과 요약 ····· 44
5.2 연구의 시사점 ····· 45
5.2.1 학술적 시사점 ····· 45
5.2.1.1. 기업 단위의 분석 ····· 45
5.2.1.2. RE100 가입 여부와 실제 재생에너지 조달 수준 ····· 46
5.2.2 실무적 시사점 ····· 47
5.2.3 정책적 시사점 ····· 49
5.3 연구의 한계 ····· 52
5.3.1 단일 연도 횡단면 분석 연구설계 ····· 52
5.3.2 DEA 효율성의 성격 ····· 52
5.4 향후 연구 방향 ····· 53
5.4.1 패널분석을 통한 분석 확장 ····· 53
5.4.2 연구 표본과 범위의 확장 ····· 53
5.4.3 재생에너지 조달 방식의 차이에 대한 추가 분석 ····· 54
5.4.4 산출 변수의 다양화 ····· 55

HANSUNG UNIVERSITY

참 고 문 헌 ····· 56

부 록 ····· 65

ABSTRACT ····· 66

HANSUNG UNIVERSITY

표 목 차

[표 3-1] RE100 가입 여부 및 RE 비율 집단별 표본 ····· 26
[표 3-2] 선행연구의 DEA 투입·산출 변수 활용 사례 ····· 28
[표 3-3] 변수 설계 요약 ····· 31
[표 4-1] DEA 투입·산출 및 집단 구분 변수 기술 통계량 ····· 35
[표 4-2] RE100 가입 여부에 따른 Mann-Whitney U 검정 결과 ····· 37
[표 4-3] RE 비율 집단별 Mann-Whitney U 검정 결과 ····· 38

HANSUNG UNIVERSITY

그 림 목 차

[그림 3-1] 연구 모형 ····· 20
[그림 4-1] RE100 가입 여부에 따른 DEA 효율성 점수 분포 ····· 39
[그림 4-2] RE 비율 집단별 DEA 효율성 점수 분포 ····· 41

HANSUNG UNIVERSITY

Ⅰ. 서론

1.1 연구배경

기후변화는 인류가 직면한 심각한 문제 중 하나이며, 코펜하겐에서 개최된 유엔 기후변화 회의에서는 저탄소 경제 발전을 강조했다. 저탄소 경제라는 개념은 영국 에너지 백서(DTI, 2003)에서 처음 제시했다. 국제에너지기구(IEA) 세계 에너지 전망(2017)에 따르면, 환경을 위한 에너지 소비 감축 정책이 추진되고 있음에도 불구하고 이러한 수요는 2040년까지 지속해서 증가할 것으로 예상된다. 2015년 파리협정 이후 전 세계적으로 기후변화 대응과 탄소중립 실현을 위한 정책적 노력이 강화되면서, 주요 국가들은 장기적인 온실가스 감축 목표를 수립하고 이를 국가 전략 및 법적 체계에 반영하고 있다(IPCC, 2022; IEA, 2021).

2018년 UN 기후회담에 모인 190개 국가 대표는 화석연료에 의한 이산화탄소 배출이 다시 증가하고 있다는 현실에 직면하였다(Figueres et al., 2017). 국제에너지기구(IEA)는 2030년까지 전 세계 재생에너지 설비용량을 현재의 세 배 수준으로 확대하는 것이 탄소중립 달성을 위한 주요 경로라고 제안시하였다(IEA, 2024). 국제사회의 적극적 실행 의지와 노력, 공감대 증가하고 있음에도 불구하고, 전 세계 대부분의 기업은 온실가스 배출량을 의미 있는 수준으로 줄이지 못하고 있으며, 이러한 문제는 많은 국가에서의 배출 규제의 제도적 미비로 인해 더욱 악화되고 있다. 기업의 지속적인 배출량 감축에 대한 소극적 태도는 파리협정의 목표 달성을 저해하고 있다(Kuramochi et al., 2020).

이러한 흐름에서 기업도 마찬가지로 탄소배출 감축과 재생에너지 조달을 통해 규제 대응과 공급망 요구, ESG 평가 등에 동시에 대응해야 하는 상황에 놓여 있다. 기업의 기후변화 대응은 단순한 환경 규제 준수를 넘어 탈탄소화 전략 수립과 조직 운영 방식의 조정, 장기적인 경쟁력 확보까지 함께 요구하는 경영 과제로 다루어지고 있다(Eccles et al., 2014; Atasu et al., 2020).

기업이 지속가능성을 선언하고 실제 탄소배출 감축 성과로 이어지기 위해

서는 이를 뒷받침하는 기업의 정책과 경영 행동이 함께 수반되어야 한다. 탄소 감축 목표에 부합하는 기업과 그렇지 못한 기업의 차이가 이니셔티브의 참여 여부가 아니라, 기업의 혁신과 협력 활동에 대한 투자와 같은 구체적인 경영 행동에서 비롯된다(Cenci et al., 2023). Haney(2017)는 기후변화라는 위협이 기업 혁신의 기회가 될 수 있다고 보았다. 경영학에서는 기업이 변화라는 거대한 외부 환경 변화를 마주했을 때, 이를 위협으로 보느냐, 아니면 새로운 기회로 보느냐에 따라 행동이 달라진다고 분석한다. 변화를 마주한 기업이 환경적 과제를 위협이 아닌 기회로 해석하는 것이 선제적이고 혁신적인 대응으로 이어질 가능성이 더 높다(Haney, 2017).

최근 급속도로 변화하는 ICT 시장의 흐름과 규모의 확장으로 ICT 산업은 디지털 경제의 핵심이 되었지만, 그 이면에는 막대한 전력 수요와 이로 인한 탄소배출 증가라는 문제가 함께 한다. ICT 산업의 탄소 배출량은 전 세계 온실가스 배출에서 상당한 비중을 차지하는 것으로 보고되고 있다(Freitag et al., 2021), ICT 산업은 오랫동안 청정하고 친환경적인 산업으로 인식됐지만, 최근에는 데이터센터와 네트워크 인프라를 중심으로 상당한 전력 소비와 탄소배출을 유발하는 산업으로 재조명되고 있다. ICT 기업의 에너지 사용과 탄소배출 관리는 단순한 환경 규제 대응을 넘어, 소비자와 투자자, 공급망 전반에서 민감하게 바라보는 환경적 책임의 문제이자 기업 경쟁력과 직결되는 경영 과제로 인식되고 있다. 높은 전력 의존 구조를 가진 ICT 산업의 특성상 에너지 효율성과 탄소배출 관리 수준은 단순한 환경성과를 넘어 운영비용뿐 아니라 규제 대응 역량이나 공급망 경쟁력 및 ESG 평가 등 기업 경영 전반에 영향을 미친다. 재생에너지 조달은 단순히 Scope 2 배출량을 감소시키기 위한 환경 대응 수단을 넘어, 제한된 에너지 자원을 효율적으로 활용하고 지속 가능한 운영 구조를 구축하기 위한 전략적 경영 활동으로 접근할 필요가 있다(IEA, 2022; KPMG Asia Pacific, 2022). 이러한 전환의 흐름은 RE100이라는 대표적인 글로벌 이니셔티브를 통해 구체화하고 있다.

RE100은 기업의 재생에너지 전환 의지를 보여주는 대표적인 글로벌 이니셔티브인 RE100은 기업이 사업 운영에 필요한 전력을 100% 재생에너지로 조달하겠다는 목표를 자발적으로 공표하고, 그 이행 현황을 지속해서 관리하

고 보고하도록 하는 제도이다. RE100 이니셔티브는 기업의 에너지 전환 방향과 실행 의지를 대외적으로 보여주는 대표적인 지표다. RE100 참여 기업은 사업 운영에 필요한 전력의 100%를 재생에너지로 조달하겠다는 목표를 공개적으로 제시하며, 이는 기업의 환경 대응 수준을 보여주는 중요한 신호로 활용되고 있다(RE100, 2023).

그러나 자발적 환경 이니셔티브 참여가 반드시 실질적인 환경성과 개선으로 이어지는 것은 아니며, 기업의 선언적 참여와 실제 실행 수준 간에는 차이가 발생할 수 있음이 지적됐다(Bromley & Powell, 2012). 실제로 Rekker et al.(2022)은 엄격한 과학 기반 기준을 적용해 호주 전력 기업 10개 사와 글로벌 시멘트 기업 10개 사의 파리협정 부합 여부를 평가한 결과, 단 1개 기업을 제외한 전부가 자사가 표방한 탈탄소화 경로에서 이탈해 있음을 보였다. 기업의 공식적 선언과 실제 이행 성과 사이의 틈새가 실제로 존재함을 실증적으로 보여주는 연구 결과이다.

RE100 가입 여부와 실제 재생에너지 조달 수준은 서로 다른 차원에서 검토될 필요가 있으며, 기업의 재생에너지 전환 성과를 평가하기 위해서는 제도적 참여와 실제 이행 수준을 구분하여 분석할 필요가 있다. 국제에너지기구(IEA, 2023)는 국가 에너지 시스템 관점에서 재생에너지 확대와 탄소중립 달성 경로를 분석하였으며, 재생에너지 전환 과정에서 전력 공급 구조와 산업별 에너지 수요 변화가 중요한 원인임을 밝혔다. 그러나 이러한 거시적 접근은 개별 기업이 재생에너지를 어떻게 조달하고 이를 환경경영 성과로 연결하는지는 충분히 설명하지 못한다. 이에 본 연구는 자료포락분석(DEA)을 활용하여 기업(firm-level) 단위에서 RE100 가입 여부와 재생에너지 조달 비율에 따른 효율성 차이를 분석함으로써, 기존의 거시적 에너지 전환 논의를 기업 운영 수준의 효율성 관점으로 확장하고자 한다.

1.2 연구 목적과 연구 문제

최근 기후변화 대응과 탄소중립 요구가 강화되면서 에너지 사용과 온실가스 배출 관리는 기업 경영의 중요한 과제로 부상하고 있다. 특히 전력 사용 비중이 높은 ICT 기업의 경우, 구매 전력에서 발생하는 Scope 2 배출을 어떻

게 관리하고 재생에너지를 어느 수준까지 조달하는지가 지속가능경영의 핵심 쟁점이 되고 있다(Guo et al., 2011). 기존 선행연구들이 주로 에너지 효율성에 치중해 온 반면, 탄소배출 효율성에 관한 다각적 연구는 상대적으로 미진한 실정이다. 전 세계적인 에너지 수요 급증과 이로 인한 탄소 배출에 대한 세계적 우려와 관심이 높아지고 있는 현시점에서 탄소 효율성에 더욱 집중할 필요가 있다.

이에 본 연구는 탄소배출과 경영 효율성을 분석하고, 그 결과를 바탕으로 함의를 도출하고자 한다. 분석 대상인 ICT 기업은 급속화된 규모 성장으로 인해 향후 탄소배출 잠재력이 매우 크며, 현재 에너지 전환기를 거치고 있다는 점에서 학술적으로나 정책적 연구 대상으로서 가치를 지닌다. 그러나 상당수의 연구는 주로 국가나 지역, 산업 수준에서의 에너지 소비 및 탄소배출 수준 평가, 또는 기업의 재생에너지 전환과 재무성과 간의 관계에 초점을 두어 왔다(Bang et al., 2019; Moon & Min, 2015). 일부 기업 단위 연구에서는 에너지 사용량과 온실가스 배출량을 활용하여 환경 효율성을 분석하였으나(Bang et al., 2019; 문하나·민대기, 2015), ICT 기업의 전력 조달 특성과 시장 기준 Scope 2 배출량, 그리고 재생에너지 조달 수준을 함께 고려한 분석은 충분히 이루어지지 않았다.

Herrala and Goel(2012)은 170개국을 대상으로 전 세계 이산화탄소 배출 효율을 연구했으나, GDP와 인구 중심의 비용에 중점을 두어 탄소 배출의 직접적 원인인 에너지 소비 변수를 모형에서 배제하였다. 현재까지 지속적으로 에너지, 탄소배출에 관한 연구들이 진행됐지만, 에너지와 탄소라는 환경적 투입 구조와 경제적 산출이 결합하여 기업 수준의 효율성을 어떻게 형성하는지에 대한 분석은 여전히 제한적으로 이루어지고 있다(Mardani et al., 2017).

Sueyoshi와 Goto(2011)는 일본 화석연료 발전기업을 대상으로 DEA를 적용하여 운영 효율성과 환경 효율성을 동시에 반영하는 통합 효율성(unified efficiency) 측정 방법을 제안하였다. 이들은 바람직한 산출물(전력)과 비바람직한 산출물(CO_2)을 함께 고려하는 기업 단위의 DEA 모형을 구축함으로써, 개별 에너지 기업의 탄소배출 효율성을 평가하는 방법론적 틀을 제시하였으며, 이후 기업 수준 환경 효율성 연구에서 폭넓게 인용되는 기초 연구로 자

리 잡았다. 이 선행연구는 탄소배출을 비바람직한 산출물로 처리하는 DEA 기반 통합 효율성 분석이 개별 기업의 환경성과를 평가하는 데 적합한 도구임을 보여준다(Sueyoshi & Goto, 2011).

Moon & Min(2020)는 한국의 에너지 집약 기업을 대상으로 순수 에너지 효율성(pure-energy efficiency)과 경제 효율성(economy efficiency)을 기업 단위로 구분하며 측정했다. 이 연구는 기업별 산업의 특성에 따라 효율성 변화 폭이 서로 다르다는 점과 에너지 효율성과 재무성과 간의 유의미한 관계를 실증한 연구로 구가나 지역 단위 분석만으로는 정책적 시사점에 한계가 있음을 주장한다. 이러한 선행연구들을 근거로 하여 기업 단위에서 정량적으로 분석하는 연구가 필요하다고 보아, ICT 기업 간 RE100 이행 수준 차이를 분석한다.

Jalalov & BAE(2025)는 27개국 677개 기업을 대상으로 한 대규모 패널 분석을 통해 RE100 참여가 운영 효율성을 매개로 기업 수익성에 긍정적 영향을 미친다는 것을 실증하였다. 이 연구는 RE100 참여 여부를 중심으로 분석하였기 때문에, 실제 조달 수준에 따른 효율성 차이를 구체적으로 검토하지 못하였다는 한계가 있다. 즉, RE100 가입이라는 선언적 참여와 실제 재생에너지 조달 수준을 구분하여 기업의 환경경제 효율성과 연결한 연구는 여전히 제한적이다. RE100 가입은 기업의 재생에너지 전환 의지를 보여주는 선언적 지표로 볼 수 있지만, 실제 조달 수준은 기업별 전력 조달 구조와 Scope 2 관리 성과에 따라 다르게 나타날 수 있다. 특히 전력 조달에 따른 Scope 2 간접 배출량이 절대적인 비중을 차지하는 ICT 기업의 고유한 에너지 및 탄소배출을 반영한 효율성 연구는 매우 미진한 실정이다,

이에 본 연구는 RE100 가입 여부와 재생에너지 조달 수준을 별도의 집단 구분 기준으로 설정하고, 각 집단 간 환경경영 효율성 차이를 실증적으로 검증하는 것을 목적으로 한다. 이를 통해 본 연구는 RE100이라는 선언적 참여 여부와 실제 재생에너지 조달 수준이 ICT 기업의 환경경영 효율성 차이와 어떻게 연결되는지를 비교한다는 점에서 기존 연구와 차별성을 가진다. 본 연구는 글로벌 디지털 경제를 선도하는 Nasdaq-100 ICT 기업 27개 사를 대상으로 이러한 연구 공백을 해소하고자 한다. 환경경영 효율성을 분석하고 재생에

너지 조달 수준 및 RE100 가입 여부와 효율성 간의 관계를 파악하는 것을 목적으로 한다.

연구 목적은 다음과 같다.

첫째, 기업의 총에너지 사용량과 온실가스 배출량(Scope 1, Scope 2)을 경제적 산출물인 매출액과 연계하여 ICT 기업의 환경경제 효율성을 측정한다.

둘째, RE100 이니셔티브 가입 여부에 따라 효율성에 유의미한 차이가 존재하는지 검증한다. 이를 통해 기업의 자발적 환경이니셔티브 참여와 환경경제 효율성 간의 차이를 검토하고자 한다.

셋째, RE100 가입 기업 내에서 실제 재생에너지 조달 수준(RE 비율)에 따라 효율성의 차이가 존재하는지 분석한다. 이를 통해 단순한 선언을 넘어 실제 재생에너지 전환의 실행 성과가 효율성에 미치는 효과를 확인하고자 한다.

본 연구는 위에서 제시한 연구 목적에 따라 다음과 같은 연구 문제를 설정한다.

RQ1. RE100 이니셔티브 가입 여부에 따라 기업의 환경경영 효율성에 차이가 존재하는가?

RQ2. 재생에너지 조달 수준(RE 비율)에 따라 기업의 환경경영 효율성 차이가 존재하는가?

이를 검토하기 위해 본 연구는 총에너지 사용량, Scope 1 배출량, 시장기준 Scope 2 배출량을 환경적 투입 변수로, 매출액을 경제적 산출 변수로 설정하여 기업별 DEA 효율성 점수를 산출한다. 이후 RE100 가입 여부와 재생에너지 조달 수준에 따라 구분된 집단 간 효율성 점수의 차이를 비모수 검정을 통해 비교한다.

Ⅱ. 이론적 배경

2.1 ICT 산업의 에너지 집약성과 환경관리.

ICT 산업은 오랫동안 다른 산업의 효율성을 높이는 데 기여하는 산업으로 여겨졌으며, 중공업과 같은 직접적인 환경오염 산업으로는 거의 인식되지 않았다. 이러한 인식은 ICT 부문 자체의 환경 부담을 줄이는 Green IT와 ICT를 활용해 다른 산업의 환경 생산성을 높이는 IT for Green을 구분한 논의(Faucheux & Nicolai, 2011)와도 맞닿아 있다.

그러나 최근 인공지능, 클라우드 서비스, 데이터센터, 통신 네트워크 등 디지털 기반 시설이 급속히 확대되면서, ICT 산업 역시 상당한 전력 소비와 탄소배출을 유발하는 산업으로 다시 문제시되고 있다. 특히 데이터센터와 네트워크 인프라가 확대될수록 ICT 기업의 에너지 사용 구조와 탄소배출 부담도 함께 커지기 때문에, 재생에너지 조달과 에너지 효율 개선은 ICT 기업의 환경경영에서 중요한 과제로 자리 잡고 있다(Malmodin et al., 2024). Freitag et al.(2021)은 ICT 부문이 전 세계 온실가스 배출량의 약 1.8~2.8%를 차지하며, 공급망 단계에서 빠질 수 있는 배출량까지 고려하면 그 비중이 2.1~3.9%까지 높아질 수 있다고 분석하였다. Malmodin et al.(2010)은 ICT 부문의 생애주기 관점에서 온실가스 배출 구조를 분석하고, 2007년 기준 ICT 산업이 전 세계 온실가스 배출량의 약 1.3%를 차지한다고 제시하였다. 또한 ICT 산업의 환경 부담은 제조 단계뿐 아니라 운영 과정에서 발생하는 전력 소비와 밀접하게 연결되어 있음을 강조하였다.

이러한 연구들은 ICT 산업이 전통적인 제조업과 같은 방식으로 오염 물질을 대량 배출하는 산업은 아니지만, 전력 소비를 매개로 환경 부담을 발생시키는 산업임을 보여준다. 또한 ICT 부문의 온실가스 배출 규모는 항공산업 수준에 필적하는 것으로 평가되며(World Bank & ITU, 2024), 의도적 개입 없이는 ICT 부문의 탄소배출 감소를 기대하기 어렵다는 점에서 적극적 관리의 필요성이 제기된다(Freitag et al., 2021). 특히, 최근 두드러지고 있는 데이터센터의 확장과 통신 네트워크의 확대로 ICT 산업 특유의 에너지 사용량

은 급속도로 높아질 것으로 전망된다. ICT 산업의 연간 전력 소비 성장률은 전 세계 전력 소비 성장률을 모두 웃도는 것으로 나타났으며, ICT 전력 소비의 상대적 비중도 2007년 약 3.9%에서 2012년 약 4.6%로 증가하였다(Van Heddeghem et al., 2014). Andrae & Edler(2015)는 ICT 전력 소비의 중심이 소비자 기기에서 네트워크와 데이터센터로 이동하고 있다고 보았다. 결국 ICT 산업의 환경문제는 개별 기기를 얼마나 많이 생산하느냐의 문제를 넘어, 디지털 인프라를 유지하기 위해 얼마나 많은 전력이 사용되는가의 문제로 연결된다. 최근에는 인공지능(AI)의 확산으로 전력 소비에 대한 문제가 더 중요한 이슈로 주목받고 있다. AI 서비스는 대규모 연산과 데이터 처리가 필요하며, 이는 데이터센터 전력 수요 증가로 이어진다.

IEA(2025)는 전 세계 데이터센터 전력 소비량이 2024년 약 415TWh에서 2030년 약 945TWh로 두 배 이상 증가할 것으로 전망하였다. 이는 같은 기간 전체 전력 소비 증가율을 크게 웃도는 수준이다. Belkhir & Elmeligi(2018)는 특히 데이터센터가 ICT 전체 배출에서 차지하는 비중은 2010년 33%에서 2020년 45%로 확대되었으며, ICT 기반 시설 전체, 즉 데이터센터와 통신망이 ICT 산업 환경 부담의 주요 원인이라 보았다. 현재 추세가 지속되면 ICT 부문의 온실가스 기여율이 2040년에는 전 세계 배출량의 14%를 초과할 수 있다고 경고하였다. 이러한 변화는 ICT 기업의 지속가능성을 평가할 때 기술 혁신이나 매출 성장만을 볼 수 없게 만든다. ICT 산업의 에너지 수요와 탄소배출 관리가 앞으로는 더욱 중요한 경영 과제로 부상하고 있음을 보여준다.

ICT 산업은 높은 전력 소비로 인해 다량의 탄소배출을 발생시키는 원인인 동시에, 앞선 디지털 기술을 활용하여 에너지 관리 효율성을 높이고 다른 산업의 환경성과 개선을 지원할 수 있는 산업이라는 이중적 특성을 가지기도 한다. Cecere et al.(2014)도 Green ICT를 ICT 장비와 소프트웨어의 환경영향을 줄이거나 다른 부문의 환경영향 완화에 기여하는 기술로 설명하였다. ICT 산업이 전력 소비와 탄소배출의 원인인 동시에, 스마트시티, 전력망 최적화, 효율적 데이터 처리 시스템 등을 통해 에너지 사용 구조를 개선하고 탄소배출을 줄이는 데 기여할 수 있음을 보여준다.

그러나 기술 도입만으로 ICT의 긍정적 환경효과가 항상 자동으로 실현되는 것은 아니다. Anon Higon et al.(2017)은 ICT 발전과 CO_2 배출 간에 역 U형 관계가 나타날 수 있다고 하였다, ICT 확산 초기에는 장비 생산, 에너지 소비, 전자폐기물 증가 등으로 인해 배출이 증가할 수 있지만, 일정 수준을 넘어서면 ICT for Green 효과를 통해 배출 감소가 가능해지며 효율성 개선 효과가 나타날 수 있다는 것이다. 한편 Usman et al.(2021)은 ICT의 탄소 감소 효과가 국가 발전 수준과 에너지 조달 구조에 따라 달라질 수 있다고 보았다. ICT 산업에 사용하는 에너지원 자체가 청정하지 않다면 탄소배출을 낮추기가 어렵다는 점도 지적된다고 주장했다. ICT 기술을 운용하는 전력이 화석연료에 의존한다면 기술 수준이 높아지더라도 실질적인 탄소 감소 효과가 떨어질 수 있다, 이는 ICT 산업의 환경성과가 기술 확산 자체뿐 아니라 전력 조달 구조와 밀접하게 연결됨을 의미한다.

이러한 이유로 ICT 산업의 지속가능성을 논의할 때는 Green ICT 기술 개발뿐 아니라 ICT 기업이 사용하는 전력의 조달 방식도 함께 검토해야 한다. 미국 ICT 기업들의 재생에너지 전력 사용량은 2007년 0.5 million MWh에서 2014년 7.7 million MWh로 심하게 증가하였으며, 동일한 ICT 산업 내에서도 전력의 100% 이상을 재생에너지로 조달하는 기업과 재생에너지를 전혀 사용하지 않는 기업이 공존하는 것으로 나타났다(Miller et al., 2015). 이는 재생에너지 조달이 산업 차원의 공통된 흐름 속에서도 기업별 전략과 조달 역량에 따라 다르게 나타나는 의사결정임을 보여준다.

일부 기업은 최소한의 규제 대응에 머무르지만, 일부 기업은 다양한 이해관계자들의 요구를 반영하여 보다 적극적인 환경전략을 추구하는 것으로 나타났다(Buysse & Verbeke, 2003). 또한 기업의 환경 책임 활동은 동일한 외부 압력 아래에서도 조직의 전략이나 이것을 실행으로 옮길 기업의 역량, 내부의 의사결정 구조에 따라 다르게 나타날 수 있다(Crilly et al., 2012; Hardcopf et al., 2019). 같은 산업에 속한 ICT 기업들은 비슷한 규제, 투자자 요구, ESG 공시 압력, 탄소 감축 요구, 기술 변화 속에 놓여 있더라도, 기업별 전략과 실행 역량에 따라 환경경영 실천 수준과 재생에너지 조달 확대 노력에서 차이를 보이는 것으로 나타났다(Kim et al., 2024). 이러한 논의는

ICT 기업의 재생에너지 전환 수준이 산업 전체의 일반적 추세만으로 설명되기 어렵고, 기업별 전략과 조달 역량에 따라 다르게 나타날 수 있음을 보여준다.

기존의 ICT 및 에너지 효율성 관련 연구들은 주로 국가, 지역 또는 산업 단위에서 에너지 소비와 탄소배출 부담을 분석해 왔다. ICT 분야에서는 국가 단위의 거시 패널분석이나 생애주기평가(Life Cycle Assessment, LCA)를 활용하여 ICT 기반 시설의 탄소 영향을 추정한 연구들이 이루어져 왔다. 생애주기 평가는 제품이나 서비스의 원료 조달부터 생산, 사용, 폐기 단계에 이르는 전 과정에서 발생하는 환경영향을 평가하는 방법으로, ICT 산업 차원의 에너지 소비와 탄소배출 부담을 이해하는 데 중요한 기초를 제공한다. ICT 분야뿐 아니라 에너지 효율성 및 환경 효율성 연구 전반에서도 국가, 지역 또는 산업 단위 분석이 상당한 비중을 차지해 왔다. Filippini와 Hunt (2011) , Zhou et al. (2012), 그리고 Hu와 Honma (2014)는 OECD 국가들을 분석 대상으로 하였으며 Marin과 Palma(2017) 는 EU 국가들의 에너지 효율을 분석했다. Guo et al.(2011)은 환경 DEA(environmental DEA)를 활용하여 중국 29개 성(省)의 탄소배출 감축에 관한 잠재력을 평가하였다.

기존 연구들은 국가, 지역 또는 산업 수준에서 에너지 소비와 탄소배출을 분석함으로써 ICT 산업의 환경영향을 이해하는 데 중요한 기초가 된다. 그러나 각각 다른 에너지 사용 구조와 탄소배출 관리 방식을 가지고 있고, 재생에너지 조달 수준도 모두 다른 기업 간 차이를 ICT 산업이라는 업종 고유의 특성만으로 설명하기는 한계가 있다. 같은 요구 상황에 놓여 있더라도 기업의 대응에는 기업마다 차이가 있다. 다음 절에서는 이러한 기업 간 차이를 환경전략과 기업역량의 관점에서 살펴본다.

2.2 환경전략과 기업역량

환경경영 효율성은 기업이 보유한 자원과 역량을 활용하여 에너지 사용과 탄소배출 부담을 줄이면서 경제적 성과를 창출한다는 점에서 자원 기반 관점(Resource-Based View, RBV)으로 설명할 수 있다. RBV 관점에서 재생에너지 조달 역량, 에너지 관리 역량, 탄소배출 관리 역량은 기업의 차별적 성과

를 설명하는 내부 역량으로 볼 수 있다. RBV는 기업의 지속 가능한 경쟁우위가 외부 시장 구조보다 기업 내부의 가치 있고(valuable), 희소하며(rare), 모방하기 어렵고(inimitable), 대체하기 어려운(non-substitutable) 자원과 역량에서 비롯된다고 본다. Hart(1995)는 이를 환경경영에 적용한 자연 자원 기반 관점(Natural-Resource-Based View)을 제시하며, 오염 예방·제품 책임 관리·지속가능한개발 역량이 미래 경쟁우위의 원천이 될 수 있다고 주장하였다. 이 관점에서 환경전략은 규제 준수 활동이 아니라 내부 운영 역량과 자원 배분 능력을 결합한 전략적 행위로 볼 수 있다. 규제 압력이 실제 준수 성과로 전환되기 위해서는 기업 내부의 의사결정 구조와 관리체계가 뒷받침되어야 하며(Dhanorkar et al., 2018), 동일한 규제 환경에 놓인 기업이라도 내부 실행 역량에 따라 환경성과는 다르게 나타날 수 있다.

이 점에서 조직자본(Organizational Capital, OC)은 기업 간 환경성과 차이를 설명하는 핵심 변수로 주목된다. 조직자본은 기업 고유의 지식·비즈니스 프로세스·시스템·조직문화를 포괄하는 전략적 자원으로, 외부 환경변화와 기후위험에 대한 대응 방식에도 영향을 미친다. Zheng and Sun(2025)은 미국 상장기업 3,622개 사를 분석한 결과, 조직자본이 높은 기업일수록 기후변화 노출도가 유의하게 낮으며, 조직자본이 1 표준편차 증가할 때 기후변화 노출도가 약 7.80% 감소한다고 보고하였다. 조직 내 축적된 지식, 프로세스, 관리 시스템은 환경변화에 대응하고 새로운 전략을 실행하는 기반이 되며, 동일한 외부 환경에 직면한 기업 간 환경성과 차이를 설명하는 요인이 될수있다(Zheng & Sun, 2025). 이러한 역량은 단기간에 모방하기 어렵다는 점에서 RBV가 말하는 지속 가능한 경쟁우위의 원천에 해당한다. Kim et al.(2024)은 선제적 기후 전략이 기업 고유의 자원 조합을 통해 수익성을 훼손하지 않고도 환경성과를 달성할 수 있는 차별적 역량을 형성한다고 보았다. 기업이 환경 유해 부산물을 줄이기 위해 축적하는 자원과 프로세스는 경쟁자가 쉽게 모방하기 어렵다는 점에서 장기적 경쟁우위의 원천이 된다. 반면 환경 측면으로 무책임한 기업은 평판 손실과 부정적 시장 반응에 직면할 수 있다.

Konar & Cohen (2001)은 미국 기업의 객관적 환경성과와 시장가치의 관계를 분석했다. 이들은 환경오염이 심한 기업의 시장가치는 그만큼 낮아진다고

보고했다. 환경성과가 나쁜 기업일수록 무형자산 가치(intangible asset value)가 낮다고 밝혔다. 따라서 ICT 기업의 재생에너지 조달 역량은 이미지 관리나 규제 대응의 차원을 넘어 장기적 경쟁력인 전략적 자원으로 위치 지을 수 있다.

환경적 책임은 기업이 환경에 미치는 악영향을 완화함으로써 기업가치를 창출하는 경영 활동으로 논의됐다(Wang et al., 2016). 환경성과는 자본시장 및 제도적 압력과도 연결된다. 환경 유해 행동에 대한 주식시장의 부정적 반응은 1980년대 평균 -0.42%에서 2000년대 -1.12%로 심화하였으며(Flammer, 2013), 이는 투자자들이 기업의 환경 책임을 기업가치 판단의 중요한 정보로 인식하고 있음을 보여준다.

환경경영은 제도적 정당성(institutional legitimacy)을 확보하여 규제기관의 제재와 지역사회의 반발을 낮추는 한편, 제품 차별화와 가격 프리미엄 형성에도 이바지할 수 있다(Berrone et al., 2013; Baron, 2009). 결국 환경경영 효율성은 내부 운영 성과의 문제에 그치지 않고, 자본시장과 소비자, 규제기관, 지역사회 등 다양한 이해관계자와의 관계 속에서 기업가치에 영향을 미친다. 기업의 재생에너지 조달 수준의 차이는 조달 비율의 단순한 양적 차이뿐 아니라 기업 내부 역량 수준의 차이를 반영하고 이 환경전략을 운영 체계 안에서 얼마나 실행할 수 있는지, 그리고 그 실행 역량이 어느 정도 축적되어 있는지를 반영하는 지표가 될 수 있다. 재생에너지 전환은 단순한 외부 압력에 대한 대응이 아니라, 기업 내부 역량과 조직자본이 결합하여 나타나는 전략적 결과로 볼 수 있다.

2.3 환경경영 효율성과 기업성과

Eco-efficiency는 기업이 경제적 가치 창출 과정에서 발생하는 환경 부담을 함께 반영하기 위해 발전한 개념으로, 본 연구에서 주장하는 환경경영 효율성(environmental management efficiency)의 이론적 기반이 된다.

Schaltegger and Sturm(1990)은 경제적 성과와 환경적 영향을 동시에 다루는 생태효율성(ecological efficiency)의 개념을 제시하였다. 이는 환경성과를 단순한 비용이나 환경규제에 대한 대응 요소가 아니라 기업성과와 연결되는 경영

의 전략적 요소로 바라보는 관점이다. Schmidheiny(1992)는 이러한 논의를 확장하여 생태효율성이 환경 보호를 넘어 장기적인 경쟁력 확보와 지속 가능한 경영 전략의 핵심 요소가 될 수 있음을 강조하였다. 이후 세계지속가능발전기업협의회(WBCSD, 2000)에 의해 체계화되었으며, 생태효율성은 기업이 더 적은 환경 자원을 소비하고 더 낮은 환경 부담을 발생시키면서 더 높은 경제적 가치를 창출하는 능력으로 정의되었다. eco-efficiency는 단순히 오염을 줄이거나 비용을 절감하는 개념이 아니라, 일정 수준의 경제적 산출을 유지하면서 환경적 투입 요소를 얼마나 효율적으로 관리하는지를 보여주는 통합적 성과 지표이다.

전통적인 기업성과 평가는 매출액, 수익성, 시장가치와 같은 경제적 산출에 주로 초점을 두어 왔으나, 기후변화 대응과 탄소중립 요구가 강화되면서 기업의 성과는 경제적 산출뿐 아니라 산출을 달성하기 위해 사용된 환경 자원의 수준까지 함께 포착하는 방향으로 확장되고 있다. 이러한 논의는 이후 기업 수준에서 환경성과와 경제성과 간의 관계를 검증하는 실증 연구로 확장되었다. Guenster et al.(2011)은 eco-efficiency를 환경 자원 투입을 줄이면서 경제적 가치를 창출하는 기업의 능력으로 정의하고, 사후적 오염 처리(end-of-pipe)보다 생산 공정에서 환경 위험을 사전에 줄이는 예방적 접근(proactive pollution prevention)이 효율성 개선에 더 효과적이라 주장한다. 장기간의 기업 패널 데이터를 활용하여 생태효율성과 재무성과 간의 관계를 분석한 결과, eco-efficiency가 영업성과 및 시장가치 모두 유의한 양(+)의 관계를 보여, 높은 생태효율성을 보이는 기업일수록 영업성과와 시장가치 측면에서 우수한 성과를 나타내는 것으로 확인되었다. 이는 환경성과 개선이 비용 증가 요인에 그치는 것이 아니라, 자원을 효율적으로 활용하고, 위험 관리 역량이라는 기업 경쟁력으로 연결될 수 있음을 보여준다. Trinks et al.(2020)은 탄소 효율성이 개선될수록 기업의 수익성이 증가하고 체계적 위험(beta)이 감소하는 것을 확인하였다. 탄소 효율성이 0.1단위 향상되면 기업의 수익성은 약 1.0%P 증가하고, 시장 위험은 약 0.6%P 감소하는 것으로 나타났다. 이는 탄소와 연관된 효율성이 단순히 비용 절감이나 환경 규제 대응을 위한 요소가 아니라, 미래 탄소 가격 상승과 환경 규제 강화에 따른 불확실성을 완화하

는 경영 자산이 될 수 있음을 의미한다.

그러나 이러한 긍정적 관계가 시장가격에 곧바로, 충분히 반영되는지는 별개의 문제이다. Carney(2015)는 "지평의 비극(tragedy of the horizon)" 개념을 통해, 기후변화의 가장 파괴적인 영향은 현재 의사결정을 내리는 투자자, 경영진, 정치인들의 임기나 투자회수기간이 끝난 뒤에야 본격적으로 나타나기 때문에, 시장과 정책이 그 위험을 과소평가하게 된다고 주장한다. 앞서 논의한 평가기관 간 점수 불일치 문제와는 별개로, Carney의 개념은 시장이 애초에 장기적 기후위험 자체를 과소평가하도록 설계되어 있다는 더 근본적인 차원을 설명한다. 이는 탄소 효율성이 높은 기업의 진정한 가치가 단기적으로는 기업 평가나 시장가격에 온전히 반영되지 못할 수 있음을 뒷받침한다.

지속 가능 운영관리(Sustainable Operations Management, SOM) 관점에서도 기업의 환경전략은 중요한 연구 대상으로 확장되고 있다. 기존의 지속가능 운영관리 연구가 결과물 뒤처리에 집중하는 방식의 폐쇄형 재활용(closed-loop recycling)이나 사후적 자원순환에 초점을 두었다면, 최근 연구들은 기업의 에너지원 전환과 같이 더 근본적인 운영상의 변화로까지 연구 범위를 확장할 필요성을 제기하고 있다(Atasu et al., 2020). 이는 재생에너지 조달을 단순한 환경정책 변수가 아니라 기업 운영시스템의 전략적 전환으로 해석할 수 있음을 보여준다. 이 문제는 전력 소비가 막대하고 구매 전력에서 발생하는 간접 배출, 즉 Scope 2 배출의 관리가 중요한 ICT 산업에서 특히 두드러진다. 따라서 ICT 기업의 eco-efficiency를 평가하기 위해서는 총에너지 사용량뿐 아니라, 운영 과정에서 발생하는 탄소배출과 전력 조달 구조 자체도 함께 검토할 필요가 있다.

ICT 산업의 에너지 문제는 단순히 에너지 사용을 줄이고, 탄소배출량을 낮추는 것만으로 충분히 설명하기 어렵다. 에너지 효율 개선은 단위 서비스당 전력 소비를 감소시킬 수 있지만, 디지털 서비스 확대, Ai의 등장, 데이터 처리 수요 증가로 인해 전체 전력 수요가 오히려 증가하는 현상이 나타날 수 있다. 효율이 좋아져서 서비스 운영비용이 낮아지면, 기업은 서비스를 더 확장할 것이다. 스트리밍·클라우드를 더 많이 쓰게 되고, 동영상 해상도가 더 올라가며, AI 모델이 더 커지고, 데이터센터 수가 더 늘어나는 등 이러한 확

장은 다시 데이터센터를 늘려야만 하는 결과를 불러올 것이다.

Freitag et al.(2021)은 이러한 현상을 제번스 역설(Jevons paradox)의 관점에서 설명하며, 기술적 효율성 향상만으로는 ICT 산업의 에너지 소비와 탄소 배출 문제를 근본적으로 해결하기 어렵다고 지적하였다. 즉, ICT 산업의 지속가능성을 확보하기 위해서는 단순한 에너지 효율 개선뿐 아니라 전력 조달 구조의 변화와 재생에너지 전환을 포함한 종합적인 탈탄소화 전략이 필요하다. 생태효율성과 탄소 효율성에 관한 선행연구를 통해 기업이 경제적 산출을 창출하는 과정에서 에너지 사용과 탄소배출을 중요한 요소로 보아야 함을 알 수 있다. 이러한 이론적 논의를 바탕으로, ICT 기업의 환경경영 효율성 차이를 설명할 수 있는 구체적 전략 변수로서 재생에너지 조달과 RE100 이니셔티브를 살펴보고자 한다.

2.4 재생에너지 조달과 RE100 이니셔티브

기업의 탈탄소화가 글로벌 경영 의제로 부상하면서 재생에너지 전력 조달은 단순한 환경 활동을 넘어 Scope 2 관리, 전력 비용 안정화, 공급망 대응, 장기 운영 효율성과 연결되는 전략적 과제로 인식되고 있다(IEA, 2022; KPMG Asia Pacific, 2022). RE100(Renewable Energy 100%)은 영향력 있는 기업들이 사용 전력의 100%를 재생에너지로 조달하기로 자발적으로 약속하는 글로벌 재생에너지 이니셔티브로(Climate Group & CDP, 2024; 진태영 외, 2023), 기업의 지속가능경영과 탄소중립 이행을 촉진하는 수단으로 활용되고 있다.

2024년 기준 RE100 회원사 424개 중, 보고에 응답한 405개 기업의 연간 전력 소비량은 545TWh로 전 세계 전력 생산량의 약 2%를 차지하는 것으로 보고되었다(Climate Group & CDP, 2025). 재생에너지 조달은 기업의 Scope 2 배출량 관리와 직접적으로 연결된다. 온실가스 프로토콜(GHG Protocol)은 기업의 간접 배출량인 Scope 2를 위치 기준(location-based) 방식과 시장 기준(market-based) 방식으로 산정하도록 제시한다. 위치 기준 방식은 기업이 위치한 지역의 평균 전력망 배출계수를 적용하는 방식이다. 반면 시장 기준 방식은 기업이 체결한 재생에너지 인증서(REC), 전력구매계약

(PPA), 녹색요금제 등 계약 기반 조달 수단을 반영한다(WRI, 2015). 따라서 시장 기준 Scope 2는 기업의 재생에너지 조달 노력이 간접 배출량 산정에 반영될 수 있다는 점에서, 재생에너지 전략의 이행 수준을 파악하는 중요한 기준이 된다.

다만 모든 재생에너지 조달 방식이 동일한 의미를 갖는 것은 아니다. PPA는 기업이 재생에너지 발전사업자와 장기 계약을 체결하여 전력을 구매하는 방식으로, 신규 재생에너지 발전 설비 확대와 연결될 가능성이 상대적으로 크다. 반면 전력 거래와 분리된 REC 구매는 재생에너지의 환경적 속성을 인증서 형태로 구매하는 방식이므로, 반드시 추가적인 발전 설비 건설로 이어진다고 보기는 어렵다. 이러한 차이는 기업의 자체 보고 조달 비율과 공식 인정 비율 간 차이를 설명한다.(Climate Group & CDP, 2025).

글로벌 공급망에서 탄소중립 요구가 강화되는 상황에서 RE100 가입은 다양한 이해관계자에게 환경 책임에 대한 기업의 이행 의지를 전달하는 전략적 수단이 된다. 환경적 사회 성과는 제품 차별화와 가격 프리미엄 형성에 기여하며(Baron, 2009), 기업의 환경 책임에 대한 자본시장의 인식도 시간이 지남에 따라 강화됐다(Flammer, 2013). 또한 기업이 환경 규범에 적극적으로 나서므로서 확보하는 제도적 정당성은 규제기관이나 지역사회의 제재를 낮출 수 있다(Berrone et al., 2013). 따라서 RE100 가입은 단순한 환경 선언이라기보다, 기업이 외부 이해관계자에게 환경 책임 이행 의지와 관리 역량을 전달하는 신호로 볼 수 있다.

자원 기반 관점(Resource-Based View, RBV)에서 RE100 가입과 재생에너지 조달 확대는 기업의 복합적 역량과 연결된다. 완전한 재생에너지 조달을 달성하고 유지하기 위해서는 장기 전력구매계약(PPA) 체결 역량, 재생에너지 인증서(REC) 조달 및 검증 역량, 국가별 전력시장 대응 능력, 공시 체계 구축 역량, 재무적 투자 여력 등이 필요된다. 이러한 기업의 역량은 단기간에 쉽게 형성되거나 모방하기 어렵다. 따라서 RE100 가입 여부는 단순한 선언을 넘어, 기업이 재생에너지 전환을 추진할 수 있는 조직적 준비 수준과 환경 관리 역량의 차이를 보여주는 하나의 지표가 된다.

그러나 RE100 가입 여부가 곧바로 실제 재생에너지 조달 수준이나 환경경

제 효율성의 우위를 의미한다고 단정하기는 어렵다. 기업들은 재생에너지 조달 과정에서 물리적 전력 구매, PPA, REC 등 서로 다른 조달 방식을 활용하며, 같은 RE100 가입 기업이라도 실제 조달 방식과 이행 수준에는 차이가 존재할 수 있다(Miller et al., 2015). 따라서 RE100 가입 여부는 기업의 재생에너지 전환 의지와 제도적 약속을 보여주는 변수로 볼 수 있으나, 실제 환경성과와 효율성 차이를 판단하기 위해서는 별도의 실증 검토가 필요하다.

RE100과 기업성과의 관계에 대한 실증 연구도 최근 확대되고 있다.
이상의 논의를 종합하면, RE100 가입 여부는 기업의 재생에너지 전환 의지와 제도적 약속이지만, 가입 여부만으로 실제 재생에너지 조달 수준이나 환경경제 효율 성과의 관계는 별도의 실증적 검토가 필요하다. 따라서 본 연구는 RE100 가입 여부에 따라 ICT 기업의 환경경영 효율성에 유의한 차이가 존재하는지를 검토하기 위해 다음과 같은 가설을 설정한다.

H1. RE100 이니셔티브 가입 여부에 따라 기업의 환경경영 효율성에는 유의한 차이가 있을 것이다.

한편 기업의 재생에너지 조달은 RE100 가입 여부라는 이분법적 구분만으로 설명되기 어렵다. RE100에 가입한 기업이라도 실제 재생에너지 조달 비율은 다를 수 있으며, 반대로 RE100에 가입하지 않은 기업 중에서도 높은 수준의 재생에너지 조달을 달성한 기업이 존재할 수 있다. 따라서 재생에너지 조달의 실질적 이행 수준을 파악하기 위해서는 RE100 가입 여부뿐 아니라 실제 RE 비율을 함께 검토할 필요가 있다. 재생에너지 조달 수준과 방식은 기업별로 다르게 나타난다. 동일한 ICT 산업 내에서도 전력의 100% 이상을 재생에너지로 조달하는 기업과 재생에너지를 전혀 사용하지 않는 기업이 공존하며, 일부 기업은 초기에는 REC 구매를 활용하다가 조달 경험과 전문성이 축적되면서 PPA 등 보다 직접적인 조달 방식에 관심을 두는 것으로 나타났다(Miller et al., 2015). 이는 RE100 가입 여부뿐 아니라 실제 RE 비율과 조달 방식의 차이를 함께 검토할 필요가 있음을 보여준다.

RE 비율은 기업이 사용하는 전력 가운데 재생에너지로 조달한 비중을 의미하며, 기업의 실제 전력 조달구조를 반영하는 변수이다. 특히 시장 기준 Scope 2 방식에서는 기업의 재생에너지 조달 수단이 간접 배출량 산정에 반

영되므로, RE 비율은 기업의 Scope 2 관리 성과와 밀접하게 연결된다. 다만 RE 비율이 높아질수록 환경경영 효율성이 모든 구간에서 동일한 방식으로 개선된다고 단정하기는 어렵다. 부분 조달 기업과 완전 조달 기업은 조달 방식, 계약 역량, 공시 체계, 전력시장 접근성 등에서 차이를 보일 수 있기 때문이다. 실제 재생에너지 조달 수준은 RE100 가입 여부와 구분되는 실질적 이행 수준을 반영하며, ICT 기업의 전력 조달구조와 Scope 2 관리 성과를 이해하는 데 중요한 기준이 된다.

Jalalov & Bae(2025)는 27개국 677개 기업을 대상으로 RE100 참여가 운영 효율성을 매개로 순이익률이 관련될 수 있음을 제시하였다. 그러나 이 연구는 운영 효율성을 단일 매개변수로 처리하여 효율성 차이가 어떤 에너지·탄소 투입 구조에서 발생하는지 구체적으로 설명하지 못하였다. 본 연구는 이러한 한계를 보완하고자, RE100 가입 여부(H1)와 실제 재생에너지 조달 비율(H2)을 별도의 집단 구분 변수로 설정하여 조달 수준에 따른 효율성 차이를 함께 검토한다. 따라서 본 연구는 RE 비율에 따라 구분된 기업 집단 간 환경경영 효율성에 차이가 존재하는지를 검토하고자 다음과 같이 가설을 설정한다.

H2. 재생에너지 조달 수준, 즉 RE 비율에 따라 구분된 집단 간 기업의 환경경제 효율성에는 유의한 차이가 있을 것이다.

Ⅲ. 연구 방법

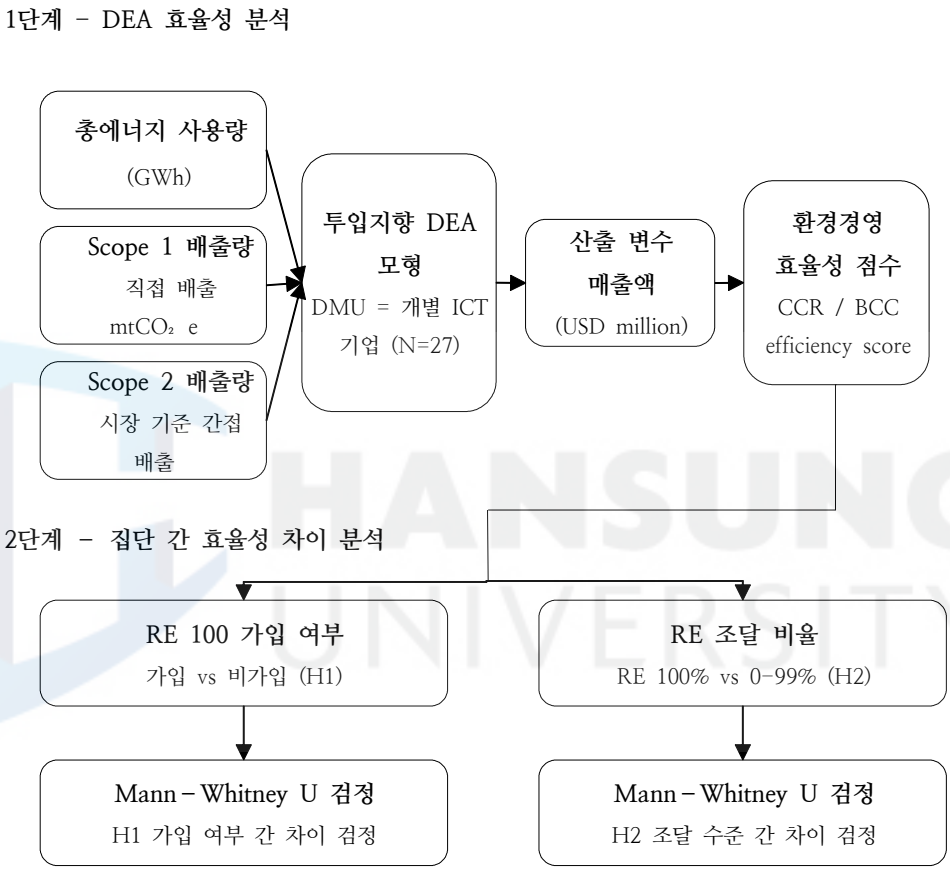
3.1 연구설계

본 연구는 Nasdaq-100에 포함된 ICT 기업을 대상으로 재생에너지 조달 수준 및 RE100 이니셔티브 가입 여부에 따라 환경경제 효율성에 차이가 존재하는지를 분석한다.

이를 위해 먼저 자료 포락 분석(DEA:Data Envelopment Analysis)을 활용하여 기업별 환경경제 효율성 점수를 산출하고, 이후 산출된 효율성 점수를 기준으로 집단 간 차이를 검정한다. 동일한 ICT 산업 내 기업들이 에너지와 탄소라는 환경적 투입 요소를 얼마나 효율적으로 관리하면서 경제적 산출을 달성하고 있는지를 비교하는 데 초점을 둔다. 이에 따라 분석 단위는 개별 기업으로 설정하였으며, DEA 모형에서는 각 기업을 의사 결정 단위(Decision Making Unit, DMU)로 하였다.

연구의 분석은 두 단계로 구성된다. 첫째, 기업별 총에너지 사용량, Scope 1 직접 배출량, 시장 기준 Scope 2 간접 배출량을 환경적 투입 변수로 설정하고, 매출액을 경제적 산출 변수로 설정하여 DEA 효율성 점수를 산출한다. 둘째, 산출된 효율성 점수를 RE100 가입 여부와 재생에너지 조달 수준에 따라 구분한 뒤, 비모수 통계검정을 통해 집단 간 차이를 확인한다. 이 방법은 복수의 환경적 투입 변수와 하나의 경제적 산출 변수를 동시에 분석할 수 있다는 점에서 본 연구에 적합하다. 아울러 RE100 가입 여부와 재생에너지 조달 비율에 따라 구분된 기업 집단 간 효율성 점수의 차이를 비교하는 데에도 적합하다.

[그림 3-1] DEA 연구 설계 모형



3.2 DEA 분석 방법

3.2.1 DEA의 개념과 이론적 기초

자료 포락 분석(Data Envelopment Analysis, DEA)은 복수의 투입 변수와 산출 변수를 동시에 내재화하여 개별 의사결정단위(DMU)의 상대적 효율성을 평가하는 대표적인 비모수적(Non-parametric) 선형계획법 기반 분석 방법이다.(Charnes et al., 1978). DEA는 사전에 특정한 생산함수(Production Function)의 형태를 통계적으로 가정하지 않고, 실제 관측된 실증 데이터를 바탕으로 가장 우수한 성과를 나타내는 기업들을 연결하여 효율성 프론티어(Efficiency Frontier)를 선형으로 도출한다. 개별 DMU의 효율성은 이 프론티어로부터 떨어진 상대적 거리(Distance) 측정을 통해 계량화된다. 자료포락분석(DEA: Data Envelopment Analysis)은 복수의 투입 요소와 산출 요소를 동시에 고려하여 의사결정단위(DMU: Decision Making Unit)의 상대적 효율성을 평가하는 비모수적 분석 방법이다.(Charnes et al., 1978).

DEA에서 분석 대상이 되는 단위는 의사결정 단위라고 하며, 본 연구에서 DMU는 개별 ICT 기업이다. 각 기업은 에너지와 탄소라는 환경적 투입을 사용하여 매출액이라는 경제적 산출을 달성한다. 환경경영 효율성은 단순한 환경오염 저감 수준이 아니라 경제적 성과와 환경적 부담 간의 관계를 고려하여 평가할 필요가 있다. 환경성과 측정 연구에서는 기업의 다양한 환경 부담과 경제적 성과를 동시에 다루기 위한 방법론으로 DEA가 활용됐다. DEA 접근은 환경성과 평가에서 단일 지표로는 설명하기 어려운 복합적인 환경성과를, 다수의 투입과 산출을 동시에 고려하여 상대적 효율성으로 평가할 수 있다는 점에서 환경성과 측정의 유용한 도구로 활용되어 왔다(Färe et al., 1989; Zaim & Taskin, 2000; Zhou et al., 2008). DEA를 활용하여 환경효율성을 경제적 성과와 환경적 피해 간의 관계로 정의하고, 여러 환경 부담 요소를 하나의 효율성 지표로 통합하여 평가할 수 있다(Kuosmanen and Kortelainen, 2005). 환경성과 측정 연구에서는 기업의 환경 부담과 경제적 성과를 동시에 평가하기 위한 방법론으로 DEA가 활용되어 왔다(Tyteca,

1996; Zhou et al., 2008). 특히 DEA는 다수의 투입 요소와 바람직하지 않은 산출요소를 함께 반영하여 기업 수준의 환경경영 효율성을 비교·평가하는데 유용하다(Färe et al., 1989; Chung et al., 1997).

DEA 효율성 점수는 일반적으로 0과 1 사이의 값을 가지며, 1에 가까울수록 상대적으로 효율적인 기업으로 해석된다. 효율성 점수 1은 해당 기업이 표본 내에서 효율성 프런티어에 위치한다는 것을 의미한다. 반대로 1보다 낮은 효율성 점수는 동일한 산출을 달성하기 위해 상대적으로 더 많은 투입을 사용하고 있음을 의미한다.

에너지·환경 분야에서는 에너지 사용량, 온실가스 배출량, 경제적 산출 등 서로 성격이 다른 복수의 변수를 함께 고려해야 하는 경우가 많다. DEA는 다수의 투입 요소와 산출 요소 간 관계를 반영하면서, 생산함수에 대한 사전적 형태 가정 없이 상대적 효율성을 측정할 수 있다는 장점으로 인해 에너지 및 환경 효율성 분석 분야에서 폭넓게 활용되어 왔다(Mardani et al., 2017).

3.2.2 투입지향 모형과 산출지향 모형

DEA 모형은 분석 관점에 따라 투입지향(input-oriented)과 산출지향(output-oriented) 으로 구분된다. 투입지향 모형은 주어진 산출 수준을 유지하면서 투입 요소를 얼마나 감소시킬 수 있는지를 평가하는 반면, 산출지향 모형은 동일한 투입 수준에서 산출을 얼마나 확대할 수 있는지를 평가한다. 투입지향 모형은 현재의 매출 수준을 유지한다고 가정할 때, 에너지 사용량이나 탄소 배출량과 같은 환경적 부담 요소를 얼마나 줄일 수 있는지를 평가하는 방식이다. 반면 산출지향 모형은 현재 수준의 에너지 사용과 환경 부담을 유지하면서 매출과 같은 경제적 성과를 얼마나 더 높일 수 있는지를 평가한다. DEA 모형의 방향 설정은 본 연구에서 환경경영 효율성을 어떠한 기준과 관점에서 해석할 것인가와 관련이 있다.

환경 효율성 연구에서는 경영 활동 과정에서 발생하는 에너지 사용과 오염 물질, 탄소 배출량 등을 환경 부담으로 고려한 분석을 위해 DEA 모형이 확장됐다. Färe et al.(1989)은 환경 DEA 분석에서 비 바람직한 산출물(undesirable output)을 변수로 활용하는 접근을 제시하였다. 이후 연구에서도 에너지 소비량, 온실가스 배출량 등 환경 부담 요소를 투입 요소, 또는 비 바

람직한 산출물로 반영하는 다양한 방식이 활용되어 왔다(Zhou et al., 2008; Mardani et al., 2017). 경제적 성과와 환경적 부담을 동시에 다루기 위한 이러한 선행연구들은 단순한 생산성 평가를 넘어 환경경영 효율성을 분석할 수 있음을 보여준다.

본 연구는 ICT 기업의 환경경영 효율성을 분석하기 위해 투입지향 DEA 모형을 적용하였다. 본 연구의 관심이 동일한 경제적 성과를 창출하는 과정에서 기업이 사용하는 에너지와 탄소배출 관련 투입 요소를 얼마나 효율적으로 관리하고 있는지에 있기 때문이다. 특히 ICT 산업은 데이터센터, 클라우드 서비스, 네트워크 인프라 등 전력 의존적 운영 구조로 되어 있어 유사한 경제적 산출을 달성하더라도, 기업마다 환경적 부담 수준은 다르게 나타날 수 있다. 이 연구에서는 ICT 기업이 에너지와 탄소를 투입하여 매출을 얼마나 더 확대할 수 있는지를 분석하는 데 초점을 두지 않는다. 기업의 매출 확대 가능성보다는 동일한 경제적 성과를 달성하는 과정에서 환경적 부담 요소를 얼마나 효율적으로 관리하는지를 평가하는 것이 연구 목적에 적합하다고 판단하였다.

기업 단위의 에너지·환경 효율성 연구에서는 에너지 사용량과 온실가스 배출량을 투입 변수로, 매출액 등 경제적 성과를 산출 변수로 설정하여 투입지향 DEA를 적용한 선례가 있다(Bang et al., 2019; 문하나·민대기, 2015). 이러한 선행연구를 기반으로 ICT 기업의 전력 조달 특성과 재생에너지 전략을 반영하기 위해 시장 기준 Scope 2 배출량을 투입 변수로 포함하였다는 점에서 기존 연구와는 차별점이 있다.

본 연구의 변수 구성은 총에너지 사용량, Scope 1 배출량, 시장 기준 Scope 2 배출량을 투입 변수로 설정하고, 매출액을 경제적 산출 변수로 설정하였다. 특히 시장 기준 Scope 2 배출량은 기업이 구매 전력 과정에서 발생시키는 간접 배출 수준을 반영한다는 점에서 재생에너지 조달 전략과 밀접하게 관련된 환경 지표이다(GHG Protocol, 2015). 따라서 투입지향 DEA 모형이 ICT 기업이 동일한 경제적 산출을 달성하는 과정에서 환경적 투입을 얼마나 효율적으로 관리하는지를 비교하려는 본 연구의 목적에 적합하다.

3.2.3. CCR 모형과 BCC 모형

DEA 모형은 규모수익에 대한 가정에 따라 CCR 모형과 BCC 모형으로

구분된다. CCR 모형은 Charnes, Cooper, Rhodes(1978)가 제안한 기본 DEA 모형으로, 규모수익불변(CRS: Constant Returns to Scale)을 가정한다. CCR 모형은 포괄형(envelopment form)에서 DMU_0의 효율성 θ_0는 다음 선형계획 문제의 최적해로 정의된다.

$$\text{Min} \quad \theta_0$$

제약조건(subject to):

$$\Sigma(j=1 \rightarrow n) \ \lambda_j x_{ij} \leq \theta_0 x_{i0} \quad (i = 1, \cdots, m)$$

$$\Sigma(j=1 \rightarrow n) \ \lambda_j y_{rj} \geq y_{r0} \quad (r = 1, \cdots, s)$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad (j = 1, \cdots, n)$$

이는 투입이 일정 비율로 증가할 때 산출도 같은 비율로 증가한다는 전제에 기반한다. CCR 모형은 모든 의사결정 단위가 최적 규모에서 운영된다는 전제하에 전체 기술효율성(overall technical efficiency)을 측정한다.

반면 BCC 모형은 Banker, Charnes, Cooper(1984)가 제안한 모형으로, 가변 규모수익(VRS: Variable Returns to Scale)을 가정한다.

이 모형은 기업 규모의 차이가 효율성 점수에 영향을 줄 수 있다는 규모 효과를 배제하고 순수 기술효율성(pure technical efficiency)을 측정하는 데 활용된다. 즉, CCR 모형이 규모 효율성과 순수 기술효율성이 결합한 전체 효율성을 보여준다면, BCC 모형은 규모의 영향을 구분하여 기업의 운영상 효율성을 평가한다. BCC 모형은 기업 규모의 차이가 큰 표본에서 효율성을 보다 세분화하여 해석하는 데 유용하다.

BCC 모형 (가변규모수익)은 CCR 모형에 다음의 볼록성(convexity) 제약을 추가하여, 규모 효과를 제거한 순수 기술효율성을 측정한다.

$$\Sigma_{j=1}^{n} \lambda_j = 1$$

규모 효율성 (Scale Efficiency)

$$SE_0 = \theta_0^{CCR} / \theta_0^{BCC}$$

$SE_0 = 1$이면 해당 기업이 최적 규모에서 운영되고 있음을 의미하며, $SE_0 < 1$이면 규모 비효율이 존재함을 의미한다.

Chang et al. (2020)의 연구는 중국 재생에너지 기업의 패널 데이터를 활용하여 BCC-DEA 모델로 순수 기술효율성(PTE), 규모 효율성(SE), 총투자 효율성(TIE)을 기업 단위로 측정했다. 녹색 재정정책이 기업의 재생에너지 투자 효율성에 미치는 영향을 실증하며 기업 수준의 재생에너지 효율성 측정에 DEA가 적합한 도구임을 보여준다.

본 연구의 분석 대상인 Nasdaq-100 ICT 기업들은 모두 글로벌 기업이라는 공통점을 가지지만, 세부 사업모형과 운영 규모에는 차이가 크다. 소프트웨어 중심 기업, 클라우드 및 플랫폼 기업, 반도체 제조 기업, 네트워크 장비 기업은 매출 구조와 에너지 사용 방식, 설비 의존도에서 서로 다른 특성을 보인다는 표본 특성을 고려할 때, 규모수익불변을 가정하는 CCR 모형만으로는 기업 간 효율성 차이를 충분히 설명하기 어렵다.

이에, 본 연구는 CCR 모형과 BCC 모형을 함께 적용하였다. CCR 모형을 통해 전체 기술효율성을 확인하고, BCC 모형을 통해 규모 차이를 고려한 순수 기술효율성을 함께 살펴보았다. 이를 통해 ICT 기업의 환경경영 효율성이 규모의 차이에서 비롯되는지, 아니면 에너지 사용량과 탄소 배출량의 관리 차이에서 비롯되는지를 더욱 구체적으로 검토할 수 있다.

3.3 연구 대상 및 자료 수집

3.3.1 연구 대상

본 연구는 2024년 기준 Nasdaq-100에 포함된 기업 중 ICT 산업에 속하는 기업을 분석 대상으로 선정했다. 본 연구에서 ICT 기업은 소프트웨어, 반도체, 클라우드 컴퓨팅, 데이터센터, 통신 네트워크, 디지털 플랫폼 등 정보통신기술을 핵심 사업으로 수행하는 기업으로 정의한다. 다만 전자상거래, 물류, 오프라인 유통 등 비 ICT 사업 비중이 큰 복합 플랫폼 기업은 표본의 산업적 동질성을 유지하기 위해 제외하였다.

ICT 기업을 분석 대상으로 설정한 것은, 앞서 살펴본 바와 같이 ICT 산업의 전력 소비와 탄소배출 비중은 빠르게 확대되고 있으며(Van Heddeghem et al., 2014; Belkhir & Elmeligi, 2018), 탄소배출 관리의 중요성이 커지고

있는 분야이기 때문이다. 동시에, 동일 산업 내에서도 기업별 재생에너지 조달 수준의 차이가 뚜렷하게 나타나는 분야이기 때문이다. 선행연구에서도 ICT 부문의 환경 부담이 데이터센터와 통신망의 운영 전력 사용과 밀접하게 관련되며, 동일한 ICT 산업 안에서도 기업별 환경 전략과 재생에너지 조달 수준의 차이가 있다고 주장한다(Miller et al., 2015; Kim et al., 2024).

분석 대상 기업은 2024 회계연도를 기준으로 지속가능성 보고서, ESG 보고서, 환경보고서, 연차 보고서 또는 기업 공식 공시자료를 통해 본 연구의 주요 변수인 총에너지 사용량, Scope 1 배출량, 시장 기준 Scope 2 배출량, 매출액, RE100 가입 여부 및 재생에너지 조달 비율을 확인할 수 있는 기업으로 한정하였다. 초기 후보군은 Nasdaq-100에 포함된 ICT 관련 기업은 35개였으며, 이 중 투입 변수 또는 산출 변수 중 하나 이상에서 결측값이 확인된 8개 기업을 목록 삭제(listwise deletion) 방식으로 제외하였다. 이에 따라 최종 분석 표본은 27개(DMU)로 확정되었다. 최종 표본 수 27개는 3 투입 1 산출 DEA 모형을 적용하기에 최소한의 분석 가능 범위를 충족한다는 점에서 실증 분석의 타당성을 확보한다.

DEA 관련 선행연구에서는 평가대상 DMU 수가 투입 요소와 산출 요소 수의 합의 최소 3배 이상이어야 한다고 제시하고 있으며(Banker et al., 1984), DMU 수가 $\max\{m\times s, 3(m+s)\}$ 이상일 때 모형의 변별력이 확보될 수 있다고 보고한다. 여기서 m은 투입 요소 수, s는 산출 요소 수 이다, 본 연구의 경우 m=3, s=1이므로 요구되는 최소 DMU 수는 12개이며, 실제 분석에 사용된 27개 DMU는 이러한 기준을 충분히 웃돈다.

[표 3-1] RE100 가입 여부 및 재생에너지 조달 수준에 따른 표본 구성

구분	RE 0-99%	RE 100%	합계
RE100 비가입 기업	15	3	18
RE100 가입 기업	1	8	9
합계	16	11	27

본 연구의 표본 구성은 RE100 가입 여부와 실제 재생에너지 조달 수준이

반드시 일치하지 않음을 보여준다. RE100에 가입하지 않은 기업 중에서도 RE 비율 100%를 달성한 기업이 존재하며, RE100에 가입한 기업 중에서도 100%에 도달하지 않은 기업이 존재한다. 따라서 본 연구에서는 RE100 가입 여부를 기업의 제도적 참여 및 환경전략 의지를 나타내는 변수로, RE 비율을 실제 재생에너지 조달 실행 수준을 나타내는 변수로 구분하여 각각 독립적인 집단 구분 기준으로 활용하였다.

3.3.2 자료 수집 및 전처리

본 연구의 환경자료는 각 기업의 2024년 지속가능성 보고서, ESG 보고서, 환경보고서, CDP 응답 자료 및 기업 공식 홈페이지의 공개자료를 통해 수집하였다. 재무 자료인 매출액은 기업의 공식 재무 공시자료를 기준으로 수집하였다. 기업의 보고 연도는 2024년 기준으로 처리하였다. 또한 기업 간 비교 가능성을 확보하기 위해 매출액은 미국 달러 기준 백만 달러(USD million) 단위로 통일하였다. 에너지 사용량은 기업별 보고 단위가 다를 수 있으므로 GWh 단위로 통일하였다. MWh 단위로 보고된 자료는 1,000으로 나누어 GWh로 환산하였다. 온실가스 배출량은 이산화탄소 환산 메트릭톤($mtCO_2e$) 단위로 정리하였다. 여기서 CO_2e의 'e'는 equivalent를 의미하며, 이는 CO_2 뿐 아니라 여러 온실가스를 지구온난화지수에 따라 이산화탄소 기준으로 환산한 값을 뜻한다. Scope 2 배출량은 기업의 재생에너지 조달 수단이 반영되는 시장 기준(market-based) 배출량을 사용하였다.

재생에너지 조달 비율은 기업이 보고한 전체 전력 또는 에너지 사용량 대비 재생에너지 조달 비중을 기준으로 정리하였다. RE100 가입 여부는 2024년 기준 RE100 이니셔티브 공식 회원 여부에 따라 구분하였다. 수집된 자료는 기업별 단위와 기준연도를 통일한 뒤 DEA 분석과 비모수 통계검정에 활용하였다. 결측값은 해당 변수가 기업의 2024 지속가능성 공시 또는 관련 공식자료에서 확인되지 않은 경우를 의미한다. 투입 변수 또는 산출 변수 중 하나라도 결측인 기업은 목록 삭제 방식으로 제외하였다.

3.4 변수의 정의 및 측정

본 연구의 변수는 DEA 모형에 사용되는 투입 변수와 산출 변수, 그리고 DEA

효율성 점수 산출 이후 집단 간 차이를 검정하기 위한 집단 구분 변수로 구분된다. 투입 변수는 기업의 환경적 부담을 나타내며, 산출 변수는 기업의 경제적 성과를 나타낸다. 집단 구분 변수는 효율성 점수 산출 이후 RE100 가입 여부 및 재생에너지 조달 수준에 따른 차이를 검정하기 위한 기준으로 사용된다.

[표 3-2] 선행연구의 DEA 투입·산출 변수 활용 사례

연구	분석 단위	투입 변수	산출 변수	주요 시사점
Hu & Wang (2006)	중국 29개 성	에너지, 자본, 노동력, 경지면적	실질 GDP	에너지를 투입 변수로 활용 총소요 에너지 효율성(TFEE) 개념 제시
Wang et al. (2013)	중국	에너지, 자본, 노동	실질 GDP, CO_2 ,SO_2 → 비바람직한 산출물로 반영	배출량을 효율성 분석에 독립적으로 반영
Bang et al. (2019)	119개 기업	에너지 비용, CO_2 비용	비용 효율성	기업 단위 DEA 분석 에너지·탄소 관련 변수를 투입 측에 반영 선례
Trinks et al.(2020)	글로벌 상장기업	에너지, 자본, 노동, Scope 1+2	재무성과, 수익성	탄소배출을 투입 변수로 처리, DEA 접근을 기업 수준에서 제시; 본 연구의 3 투입 구조(에너지·Scope1·Scope2)와 방법론적으로 유사 선례
문하나·민대기 (2015)	국내 63개 기업	온실가스 배출량, 에너지, 종업원 수, 자본	매출액	기업 단위 환경 효율성 분석 및 비모수 검정 적용 선례
본 연구		**총에너지 사용**	**매출액**	**시장 기준**

연구	분석 단위	투입 변수	산출 변수	주요 시사점
	Nasdaq-100 ICT 27개사	량, Scope 1, Scope 2 (market-based)		(Market-based) Scope 2를 독립 투입 변수로 포함하고, RE Ratio는 집단 구분 변수로 활용

3.4.1 투입 변수

본 연구의 투입 변수는 총에너지 사용량, Scope 1 직접 배출량, 시장 기준(market-based) Scope 2 간접 배출량이다.

첫째, 총에너지 사용량은 기업이 사업 운영 과정에서 사용한 전체 에너지 소비량을 의미한다. ICT 기업의 활동은 전력 사용 비중이 높은 디지털 인프라와 운영 설비를 기반으로 한다. 이에 따라 총에너지 사용량은 기업의 환경적 자원 투입 수준을 파악하는 기본 변수로 볼 수 있다. ICT 산업의 전력 소비 집약성은 선행연구에서 지속해서 확인되어 왔으며(Malmodin et al., 2010; Van Heddeghem et al., 2014; Andrae & Edler, 2015). 또한 DEA 기반 환경 효율성 연구에서도 에너지 사용량, 온실가스 배출량, 이산화탄소 배출량 등이 환경적 투입 변수로 활용됐다(Hu & Wang, 2006; Wang et al., 2013; Bang et al., 2019; 문하나·민대기, 2015). 이러한 선행연구를 근거로 하여 본 연구는 총에너지 사용량을 ICT 기업의 자원 투입 규모를 나타내는 기본 투입 변수로 설정하였다.

둘째, Scope 1 배출량은 기업이 직접 소유하거나 통제하는 배출원에서 발생하는 직접 온실가스 배출량을 의미한다. 기존 환경 효율성 연구에서는 탄소 배출량 또는 온실가스 배출량을 투입 측 비바람직한 산출물로 처리하거나 환경 부담 변수로 활용해 왔다(Wang et al., 2013; Bang et al., 2019; 문하나·민대기, 2015). 이는 기업의 사업장, 연료 사용, 제조 및 운영 과정에서 직접 발생하는 탄소 부담을 나타낸다. Scope 1 배출량은 재생에너지 인증서나 전력구매계약과 같은 전력 조달 전략만으로 직접적으로 대체되기 어려운 운영 배출이라는 점에서 독립적인 환경 투입 변수로 설정한다.

셋째, Scope 2 배출량은 기업이 구매한 전력, 열, 스팀 등의 사용으로 인해 발생하는 간접 온실가스 배출량을 의미한다. 본 연구에서는 시장 기준(market-based)Scope 2 배출량을 사용하였다. 시장 기준 Scope 2는 기업이 체결한 재생에너지 인증서(REC), 전력구매계약(PPA), 녹색요금제 등 계약 기반 조달 수단을 반영하므로, 기업의 전력 조달구조와 탄소 관리 수준을 나타내는 지표로 활용될 수 있다(WRI, 2015).

이에 본 연구는 ICT 기업의 전력 조달 특성과 재생에너지 조달 수준을 반영하기 위해 Scope 2 (market-based)를 Scope 1과 구분되는 독립적인 투입변수로 포함하였다.

3.4.2 산출 변수

본 연구에서는 ICT 기업의 환경경영 효율성을 측정하기 위해 매출액을 산출 변수로 설정하였다. 총에너지 사용량, Scope 1 배출량, 시장 기준 Scope 2 배출량과 같은 환경적 투입을 바탕으로 기업이 어느 정도의 경제적 성과를 창출하고 있는지를 비교하기 위한 것이다. 매출액은 기업이 일정 기간 창출한 경제적 산출을 나타내는 대표적인 재무성과 지표이다. 본 연구의 목적은 기업이 에너지와 탄소라는 환경적 투입을 얼마나 효율적으로 관리하면서 경제적 산출을 달성하는지를 비교하는 데 있으므로, 매출액은 환경경제 효율성의 경제적 산출 변수로 적합하다.

산출 변수인 매출액은 기업의 연간 총매출을 의미하며, 본 연구에서는 기업 간 비교 가능성을 확보하기 위해 미국 달러 기준 백만 달러(USD million) 단위로 정리하였다. Nasdaq-100 ICT 기업들은 기업 규모와 세부 사업구조가 서로 다르므로, 매출액을 산출 변수로 사용함으로써 기업이 창출한 경제적 성과를 공통 기준으로 비교할 수 있다.

3.4.3 집단 구분 변수

본 연구의 집단 구분 변수는 RE100 가입 여부와 재생에너지 조달 수준이다.

첫째, RE100 가입 여부는 2024년 기준 RE100 이니셔티브 공식 가입 여부에 따라 가입 기업과 비가입 기업으로 구분한다. RE100 가입은 기업의 공식적 선언과 제도적 참여를 의미하지만, 실제 재생에너지 조달 수준과는 구분될 필요가 있다(The Climate Group & CDP, 2024). 이 변수는 DEA 모형의

투입 변수나 산출 변수가 아니며, 산출된 DEA 효율성 점수를 기준으로 집단 간 차이를 검정하기 위한 분류 기준이다.

둘째, 재생에너지 조달 100%를 달성한 완전 조달 기업과 0-99%로 미달성 기업 두 집단으로 분류하여 RE 비율을 구분한다. 이와 같은 구분은 RE100 가입 여부와 실제 재생에너지 조달 수준이 반드시 일치하지 않을 수 있다는 점을 고려한 것이다. 실제로 Miller et al.(2015)는 동일한 ICT 산업 내에서 100% 이상 재생에너지 조달 기업과 재생에너지를 전혀 사용하지 않는 기업이 공존한다고 보고하였다.

[표 3-3] 변수 설계 요약

역할	변수명	단위	설명
투입	Total Energy 총에너지 사용량	GWh	연간 전체 사업장 총에너지 소비량
투입	Scope 1 직접 배출량	$mtCO_2e$	소유·통제 사업장의 직접 온실가스 배출량
투입	Scope 2 (market-based) 시장 기준 간접 배출량	$mtCO_2e$	구매 전력의 간접 온실가스 배출량; 시장 기준 방식 적용
산출	Revenue 매출액	USD million	연간 총매출액; 기업 산출의 경제적 가치
집단 구분	RE100 Membership 가입 여부	0/1	RE100 이니셔티브 가입 여부. 가입 기업은 1, 비가입 기업은 0으로 구분
집단 구분	RE Ratio 재생에너지 조달 비율	%	총에너지 중 재생에너지 비율; DEA 변수 아님, 집단 구분에만 활용

Scope 2 배출량은 GHG 프로토콜 Scope 2 지침(WRI, 2015)에 따라 시장 기준 방식으로 통일. 주. Total Energy, Scope 1, Scope 2는 DEA 모형의 투입 변수이며, Revenue는 산출 변수이다. RE100 Membership과 RE Ratio는 DEA 투입·산출 변수가 아니라, DEA 효율성 점수 산출 이후 집단 간 차이를 검정하기 위한 집단 구분 변수로 활용하였다. RE100 Membership은 2024년 기준 RE100 구상 공식 가입 여부에 따라 가입 기업=1, 비가입 기업=0으로 구분하였다. RE Ratio는 기업이 보고한 재생에너지 조달 비율을 기준으로 하며, 본 연구에서는 0-99%, 100%의 두 집단으로 구분하였다.

3.5 비모수 검정 방법

본 연구는 DEA 분석을 통해 산출된 환경경영 효율성 점수를 바탕으로, 기업의 재생에너지 대응 수준에 따라 효율성 차이가 존재하는지를 검정하고자 한다. RE100 가입 여부에 따라 기업을 가입 기업과 비가입 기업으로 구분하고, 두 집단 간 효율성 점수에 차이가 있는지를 분석한다. 또한 재생에너지 조달 수준을 나타내는 RE 비율을 기준으로 기업을 두 집단으로 구분하여, 재생에너지 조달 수준에 따른 효율성 차이를 추가로 검토한다.

DEA를 통해 산출되는 효율성 점수는 일반적인 연속형 변수와 달리 0과 1 사이의 제한된 범위를 가지며, 다수의 기업이 1에 가까운 값을 가질 수 있는 특성이 있다. 이러한 특성으로 인해 DEA 효율성 점수는 정규분포를 따른다고 보기 어렵고, 특히 표본 수가 충분하지 않으면 평균 차이에 기반한 모수적 검정을 적용하는 데 한계가 있을 수 있다. 본 연구의 최종 분석 표본 역시 27개 기업으로 구성되어 있어, 집단 간 차이를 검정할 때 정규성 가정에 의존하는 방법보다는 자료의 분포 특성을 더욱 유연하게 반영할 수 있는 검정 방법이 필요하다.

이에 본 연구는 DEA 효율성 점수의 분포적 특성과 표본 규모를 고려하여 비모수 통계검정을 적용하였다. 비모수 검정은 자료가 정규분포를 따른다는 가정을 엄격하게 요구하지 않으며, 상대적으로 작은 표본에서도 집단 간 차이를 검토하는 데 활용될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 RE100 가입 여부에 따른 두 집단 간 차이 검정과 RE 비율에 따른 세 집단 간 차이 검정을 각각

비모수 검정 방식으로 수행하였다.

3.5.1 RE100 가입 여부에 따른 차이 검정

RE100은 기업이 사용 전력의 100%를 재생에너지로 조달하겠다는 자발적 이니셔티브로, 기업의 재생에너지 전환에 대한 공식적·제도적 참여 수준을 나타내는 대표적 기준으로 활용된다. 본 연구에서는 RE100 가입 여부를 기준으로 분석 대상 기업을 가입 기업과 비가입 기업으로 구분하고, 두 집단 간 환경경영 효율성 점수에 차이가 존재하는지를 검정하였다.

RE100 가입 여부에 따른 비교는 두 개의 독립집단 간 차이를 분석하는 것이므로, Mann-Whitney U 검정은 두 집단의 평균을 직접 비교하는 대신 관측값의 순위에 기초하여 집단 간 분포 차이를 검토하는 비모수 검정 방법이다. DEA 효율성 점수는 0과 1 사이로 제한된 범위를 가지며, 효율적 프런티어에 위치한 DMU가 점수 1.0에 집중되는 경향이 있어 정규분포 가정을 충족하기 어렵다는 한계가 있다.

본 연구에서는 Mann-Whitney U 검정을 적용하였다. 비교적 작고 정규분포를 가정하기 어려운 DEA 효율성 점수의 집단 간 차이를 분석하는 데 Mann-Whitney U 검정은 적합한 방법이다. 본 검정을 통해 RE100 가입 기업과 비가입 기업 간 환경경영 효율성 점수의 차이가 통계적으로 유의한지를 확인하였다. 이는 RE100 가입이라는 제도적 참여가 기업의 환경경영 효율성 수준이 관련되는지를 검토하기 위한 것이다.

이 분석은 H1을 검정하기 위한 것이다. H1은 RE100 이니셔티브 가입 여부에 따라 기업의 환경경영 효율성에 유의한 차이가 존재할 것이라는 가설이다. 검정 결과 p 값이 유의수준. 05보다 작을 경우, RE100 가입 여부에 따라 효율성 점수의 분포가 통계적으로 유의하게 다르다고 해석한다. 본 연구의 모든 검정에서 유의수준은 α = .05로 설정하였으며, 유의한 결과가 확인된 경우 순위 이연 상관($r = Z/\sqrt{N}$)을 이용하여 효과 크기를 함께 산출하였다. 다만 RE100 가입은 공식적인 선언과 제도적 참여를 의미하는 것으로, 실제 재생에너지 조달 수준과 반드시 일치하지 않을 수 있다(The Climate Group & CDP, 2024). 이에 본 연구는 RE100 가입 여부에 따른 분석과 함께, 실질적인 재생에너지 조달 비율(RE 비율)에 따른 집단 간 차이 분석을 별도로 수행

하였다.

3.5.2 비율 집단 간 차이 검정

RE 비율은 기업이 사용한 전력 중 재생에너지로 조달한 비중을 의미한다. 본 연구에서는 RE100 이니셔티브의 최종 목표가 사용 전력의 100%를 재생에너지로 조달하는 데 있다는 점을 고려하여, 분석 대상 기업을 RE 0–99% 집단과 RE 100% 집단으로 구분하였다. RE 100% 집단은 사용 전력 전부를 재생에너지로 조달한 기업을 의미하며, RE 0–99% 집단은 재생에너지 조달을 일부 수행하였거나 아직 완전 조달 수준에 도달하지 못한 기업을 포함한다. 집단 구분 기준은 선행연구의 관행(Miller et al., 2015)과 RE100 이니셔티브의 목표 기준을 참고하여 설정하였으며, 100% 완전 조달 집단을 별도로 구분한 것은 해당 수준이 RE100의 공식 목표치에 해당하고, 재생에너지 조달 수준에 따른 효율성 차이가 집단별로 구체적으로 나타나는지를 확인하는 데 분석적으로 유의미하기 때문이다.

HANSUNG UNIVERSITY

Ⅳ. 실증 분석 결과

4.1 기술통계 및 DEA 결과

본 장에서는 Nasdaq-100 ICT 기업 27개 사를 대상으로 투입지향 DEA 모형을 적용하여 산출한 환경경영 효율성 분석 결과를 제시한다. 먼저 분석 대상 기업의 자료 특성을 파악하기 위해[표 4-1]에 투입 변수, 산출 변수 및 집단 구분 변수에 관한 기술 통계량을 정리하였다. 이후 DEA 모형별 효율성 점수를 제시하고, RE100 가입 여부 및 RE 비율 집단에 따른 효율성 차이를 검토한다.

[표 4-1] DEA 투입·산출 변수 기술 통계량

Variable	N	Mean	SD	Min	Max
Input and Output Variables 투입 산출 변수					
Total Energy (GWh) 총에너지 사용량	27	3,743.9	8,771.7	15.5	32,727.8
Scope 1 ($mtCO_2$ e) 직접 배출량	27	92,450.7	202,425.5	360.0	1,010,000.0
Scope 2 ($mtCO_2$ e) 시장 기준 간접 배출량	27	215,129.8	605,593.0	0.0	3,059,100.0
Revenue ($M) 매출액	27	57,324.8	104,954.2	2,207.1	391,035.0
DEA Efficiency Scores					
CCR — 3-input	27	.286	.323	.007	1.000
BCC — 3-input	27	.499	.364	.011	1.000

[표 4-1]은 본 연구의 DEA 분석에 활용된 최종 분석 대상 27개 DMU의 투입 및 산출 변수에 대한 기초 통계 현황을 제시한다. 투입 변수는 기업의 환경적 부담을 나타내는 에너지 사용과 온실가스 배출 관련 지표로 구성하였으며, 산출 변수는 기업의 경제적 성과를 반영하는 매출액으로 설정하였다. 본 연구는 이러한 변수를 기반으로 기업별 환경경영 효율성을 측정하고, 재생에너지 조달 수준 및 RE100 가입 여부에 따른 효율성 차이를 비교·분석하였다.

연간 매출액 단위는 백만 달러로 통일하였고. RE Ratio(%)는 재생에너지 조

달 비율로, DEA 투입·산출 변수에는 포함하지 않고 집단 구분 변수로만 사용하였다. CCR/BCC는 총에너지 사용량, Scope 1, Scope 2를 투입 변수로 사용한 3 투입 DEA 모형의 효율성 점수이다. 효율성 점수는 0과 1 사이의 값을 가지며, 1에 가까울수록 표본 내에서 상대적으로 효율적인 기업으로 해석된다.

[표 4-1]에서 총에너지 사용량은 평균 3,743.9GWh로 나타났으나, 최솟값 15.5GWh에서 최댓값 32,727.8GWh까지 큰 차이를 보였다. Scope 1 배출량과 시장 기준 Scope 2 배출량 역시 기업 간 편차가 크게 나타났다. 이는 Nasdaq-100 ICT 기업들이 동일한 ICT 산업군에 속하더라도 세부 사업모형, 설비 의존도, 에너지 사용 구조에서 상당한 이질성을 가지고 있음을 보여준다.

DEA 효율성 점수의 경우, CCR 점수는 .007에서 1.000까지 분포하였으며 평균은 .286으로 나타났다. BCC 점수는 .011에서 1.000까지 분포하였고 평균은 .499로, CCR 점수보다 전반적으로 높게 나타났다. 이는 일부 기업의 비효율성이 순수한 투입 관리 문제 뿐 아니라 규모 효율성의 영향과도 관련될 수 있음을 시사한다. 표본 내 DMU4와 DMU10과 같이 에너지 사용량과 배출량 규모가 다른 기업에 비해 현저하게 큰 극단치가 존해하며 이러한 대규모 기업이 극단치가 프런티어를 왜곡하는, 효율성 점수의 편향을 유발하는지 검토 할 필요가 있다. 기술통계에서 일부 기업의 Scope 2 배출량이 다른 기업에 비해 상대적으로 크게 나타났으나, 이는 해당 기업의 사업구조와 전력 사용 특성에서 비롯된 차이로 볼 수 있다. 해당 기업의 CCR 점수는 .194로 낮게 나타난 반면, BCC 점수는 .675로 표본 평균 .499보다 높게 나타났다. 이는 해당 기업의 비효율성이 투입 관리 자체의 문제라기보다 규모 비효율성에서 주로 기인함을 보여주는 사례로 해석할 수 있다. 해당 기업은 대규모 데이터센터 및 클라우드 인프라를 운영하는 사업 특성을 가진 것으로 파악되며, 이러한 특성이 절대적인 에너지 사용량 및 시장 기준 Scope 2 배출량 규모에 반영된 것으로 볼 수 있다.

따라서 이 값은 표본 내 투입 변수의 분포를 확대하는 요인으로 작용할 수는 있으나, 이는 해당 기업의 사업구조와 전력 사용 특성에서 비롯된 차이로

볼 수 있다. DMU4는 CCR .708로 프런티어에 미달하며, DMU10 역시, 효율적 프런티어를 직접 형성하여 다른 기업의 효율성 점수를 왜곡하는 요인으로 보기는 어렵다. 이는 본 연구가 규모가 큰 기업에 유리하게 작동하는 구조적 편향을 갖지 않으며, 산출된 효율성 점수가 투입 규모 자체가 아니라 투입 대비 산출의 상대적 효율성을 반영하고 있음을 뒷받침한다. CCR 효율성 점수를 기준으로 한 DMU의 환경변수와 효율성 점수 현황은 부록에 제시하였다.

[표 4-2] RE100 가입 여부 및 RE 비율 집단 기술 통계량

Variable	N	%
RE100 가입 여부		
가입	9	33.3
비가입	18	66.7
RE 비율 집단		
RE 100%	11	40.7
RE 0-99%	16	59.3

[표 4-2]는 분석 대상 27개 ICT 기업의 RE100 가입 여부 및 RE 비율 집단 구성을 보여준다. RE100 가입 여부를 기준으로 보면 가입 기업은 9개 사(33.3%), 비가입 기업은 18개 사(66.7%)로 나타났다. RE 비율 집단을 기준으로 보면 RE 100% 집단은 11개 사(40.7%), RE 0-99% 집단은 16개 사(59.3%)로 나타났다.

RE100 가입 여부와 재생에너지 조달 수준을 기준으로 한 집단 구성을 비교한 결과, RE100 가입 기업은 9개 사인, 반면 실제 재생에너지 조달 비율(RE 비율)이 100%에 도달한 기업은 11개 사로 나타나 두 가지 기준에 따른 집단의 구성이 일부는 일치하지는 않는 것으로 나타났다. 이는 RE100 가입 여부가 기업의 재생에너지 전환에 대한 제도적 참여와 의지를 나타내는 것이라면, 반면, 실제 재생에너지 조달 수준은 기업이 전력 조달구조를 변화시키고 전환 목표를 실행한 결과를 반영하는 서로 다른 지표라는 것을 의미한다. RE100 가입 여부는 기업의 제도적 참여와 재생에너지 전환에 대한 공식적 의지를 나타내지만, RE 비율은 실제 운영 과정에서 재생에너지가 어느 수준

으로 활용되고 있는지를 보여준다. 기업의 재생에너지 전략과 환경경영 성과를 평가하기 위해서는 선언적 참여와 실질적 이행을 구분하여 살펴볼 필요가 있으며, 본 연구는 이러한 차이를 반영하여 두 기준에 따른 환경경영 효율성의 차이를 비교·분석하였다는 점에서 의미가 있다. 이에, RE100 가입 여부와 실제 재생에너지 조달 수준을 각각 독립적인 집단 구분 기준으로 설정하고 제도적 참여와 실질적 이행 수준에 따른 환경경영 효율성 차이를 비교 분석하였다.

4.2 RE100 가입 여부 분석

RE100 가입 여부에 따른 DEA 효율성 점수의 차이를 검정하기 위해 Mann-Whitney U 검정을 시행하였다. 본 연구의 표본은 RE100 비가입 기업 18개와 가입 기업 9개로 구성되며, CCR 모형은 규모수익불변을, BCC 모형은 가변규모수익을 가정한 DEA 효율성 점수를 의미한다.

[표 4-3] RE100 가입 여부에 따른 Mann-Whitney U 검정 결과

모형	N	Mdn (비가입, n=18)	Mdn (가입, n=9)	평균순위 (비가입)	평균순위 (가입)	U	Z	p
3 투입 모형 (총에너지, scope 1, scope 2)								
CCR	27	.090	.429	11.61	18.78	124.000	2.213	.027*
BCC	27	.331	.678	11.61	18.78	124.000	2.218	.027*

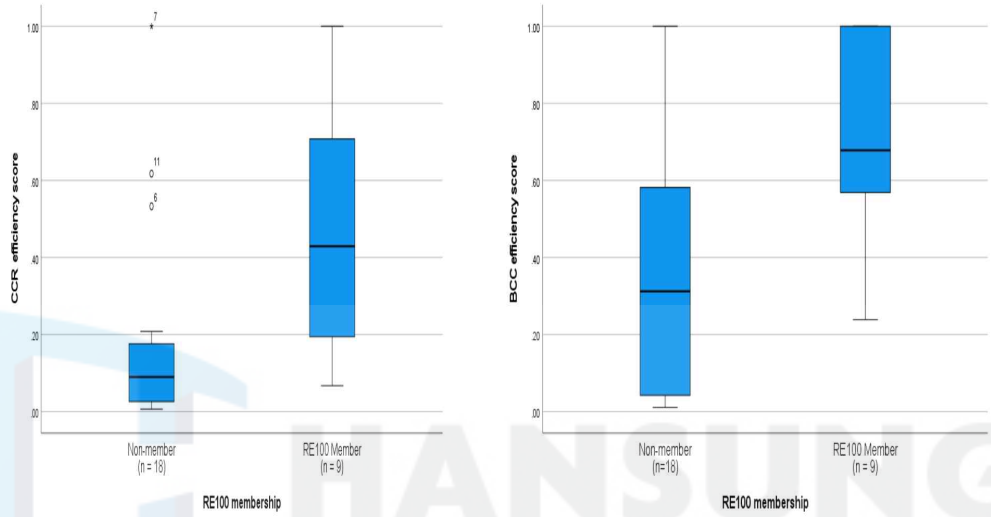
주. *p < .05.

[표 4-3]에 제시된 바와 같이, RE100 가입 기업과 비가입 기업 간에는 CCR 및 BCC 효율성 모두에서 통계적으로 유의한 차이가 확인되었다. CCR 효율성의 중앙값은 RE100 가입 기업이 .429, 비가입 기업이 .090으로 나타났으며, 두 집단 간 차이는 통계적으로 유의하였다($U = 124.00$, $Z = 2.213$, $p = .027$). BCC 효율성에서도 가입 기업의 중앙값은 .678, 비가입 기업의 중앙값은 .331로 나타났고, 집단 간 차이 역시 통계적으로 유의하였다($U = 124.00$, $Z = 2.218$, $p = .027$).

가입 기업의 효율성 점수는 상위 범위에 집중된 반면(CCR IQR = .398-854; BCC IQR = .627-1.000), 비가입 기업은 0에 가까운 값에 집중

되어 있다(CCR IQR = .023–.123; BCC IQR = .038–.439). 이 결과는 H1을 지지한다. 효과 크기는 순위 이연 상관으로 추정하였으며, CCR 및 BCC 모형 모두 r ≈ .426 및 .427로 중간–대 효과(Cohen, 1988)에 해당한다.

[그림 4-1] RE100 가입 여부에 따른 DEA 효율성 점수 분포



그림에서도 RE100 가입 기업의 효율성 점수는 비가입 기업보다 전반적으로 높은 구간에 분포하고 있으며, 이는 [표 4-3]의 Mann–Whitney U 검정 결과와 같은 방향을 보인다. 따라서 RE100 가입 여부에 따라 ICT 기업의 환경경제 효율성에 차이가 존재한다는 H1은 지지가 되었다.

다만 본 결과를 RE100 가입 지위 자체의 효과로 단정하기는 어렵다. 본 연구의 표본에서는 RE100에 가입하지 않았더라도 Intuit, Zscaler, Fortinet과 같이 재생에너지 조달 비율 100%를 달성하고 시장 기준 Scope 2 배출량을 0으로 보고한 기업들이 확인되었다. 이들 기업은 공식 RE100 가입 기업과 유사하거나 더 높은 DEA 효율성을 보였다. 따라서 RE100 가입 여부에 따른 효율성 차이는 제도적 가입 여부만의 결과라기보다, 실제 재생에너지 조달 수준 및 Scope 2 배출 관리 성과와 함께 해석할 필요가 있다.

4.3 RE 비율 집단 분석

재생에너지 조달 수준에 따른 환경경영 효율성 차이를 확인하기 위해 분석

대상 27개 기업을 RE 0–99% 집단(n=16)과 RE 100% 집단(n=11)으로 구분하고 Mann–Whitney U 검정을 하였다. 본 분석에서는 총에너지 사용량, Scope 1 배출량, 시장 기준 Scope 2 배출량을 투입 변수로 한 3 투입 DEA 모형의 CCR 및 BCC 효율성 점수를 비교하였다.

[표 4-3] 재생에너지 조달 여부에 따른 Mann-Whitney U 검정 결과

모형	N	Mdn (RE −99%, n=16)	Mdn (RE100%, n=11)	평균순위 (RE0−99%)	평균순위 (RE100%)	U	Z	p
3 투입 모형 (총에너지, scope 1, scope 2)								
CCR	27	.070	.533	9.06	21.18	167.000	3.901	<.001***
BCC	27	.261	.961	9.63	20.36	158.000	3.465	<.001***

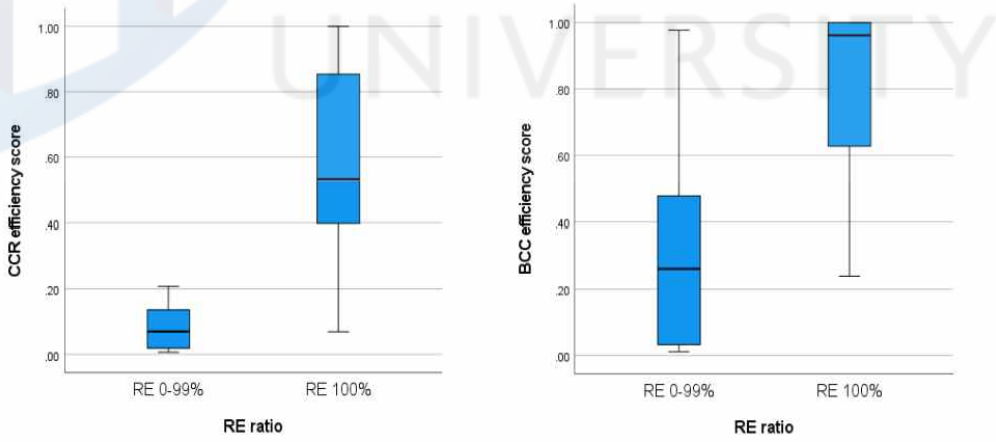
분석 결과, CCR 효율성 점수에서는 RE 100% 집단의 중앙값이 .533으로 나타나 RE 0–99% 집단의 중앙값 .070보다 높았다. 평균 순위에서도 RE 100% 집단은 21.18로, RE 0–99% 집단의 9.06보다 높은 값을 보였다. Mann–Whitney U 검정 결과, 두 집단 간 CCR 효율성 점수 분포의 차이는 통계적으로 유의하였다($U=167.000$, $Z=3.901$, $p<.001$). 이는 RE 100% 집단이 CCR 기준의 환경경영 효율성 분포에서 RE 0–99% 집단보다 상대적으로 높은 위치에 있음을 보여준다.

BCC 효율성 점수에서도 같은 방향의 결과가 확인되었다. RE 100% 집단의 중앙값은 .961로 RE 0–99% 집단의 중앙값 .261보다 높게 나타났으며, 평균 순위 역시 RE 100% 집단이 20.36으로 RE 0–99% 집단의 9.63보다 높았다. Mann–Whitney U 검정 결과, BCC 효율성 점수에서도 두 집단 간 분포 차이는 통계적으로 유의하였다($U=158.000$, $Z=3.465$, $p<.001$). 특히 BCC 모형에서는 RE 100% 집단의 중앙값이 .961로 1.0에 매우 근접하여, 규모 효과를 제거한 순수 기술효율성 측면에서 해당 집단 대부분의 기업이 효율적 프런티어에 가깝게 위치함을 시사한다. 반면 RE 0–99% 집단은 중앙값이 .261로 낮을 뿐 아니라 분포의 폭도 넓어(최소 .01~최대 .98 수준), 기업 간 이질성이 상대적으로 크게 나타났다. 두 모형의 효과크기($r=|Z|/\sqrt{N}$)를 나란히 놓고 보면 CCR(.75)이 BCC(.67)보다 근소하게 높게 나타난다. 두

값 모두(Cohen, 1988)의 기준에서 '큰 효과'에 해당하므로 CCR과 BCC 간 효과 크기의 차이는 크지 않은 것으로 확인되었다. 다만 이 결과는 한 가지 점에서 시사하는 바가 있다. 중앙값 차이만 놓고 보면 BCC(.70)가 CCR(.46)보다 훨씬 큰 격차를 보이지만, 이는 BCC 모형에서 규모 효과가 제거된 상태에서 상위 수준으로 집중되는 DEA 효율성 점수의 분포 특성이 반영된 결과일 가능성이 있다. 즉 점수상의 격차 확대를 RE 100% 집단의 우위가 순수 기술효율성 측면에서 더 강하게 작동한다는 근거로 해석하는 것은 성급하며, 오히려 효과 크기 기준으로 보면 두 모형에서 집단 간 분리의 강도는 통계적으로 거의 동등하다고 보는 것이 더 타당하다.

즉, RE 100% 집단의 효율성은 규모 효과를 포함한 CCR 모형과 이를 제거한 BCC 모형 양쪽에서 동등한 강도로 확인된다. 이는 효율성의 크기가 외형적 규모나 자산 크기로 나타나는 현상이 아니라는 것을 보여주며, 재생에너지 조달 수준과 환경경영 효율성이 모형 설정에 따라 변하지 않는 견고함을 보여준다.

[그림 4-2] RE 비율 집단별 DEA 효율성 점수 분포



[그림 4-2]는 는 재생에너지(RE) 조달 비율에 따른 집단별 CCR 및 BCC 효율성 점수가 어떻게 분포되어 있는지 보여준다. RE 0-99% 집단은 CCR 효율성 점수가 전반적으로 낮은 수준에 집중되어 있으며, 중앙값(median)은 약 0.08로 나타났다. 대부분 기업이 약 0.05~0.15 범위에 분포하고 있으며,

일부 높은 값도 최대 약 0.30 수준으로 제한되어 있다. 이는 재생에너지 조달 비율이 100%에 도달하지 않은 기업들의 경우 환경 투입 대비 경제적 산출 측면에서 상대적으로 낮은 효율성을 보이는 경향이 있음을 의미한다.

반면 RE 100% 집단은 CCR 효율성 점수가 상대적으로 높은 수준에 분포하고 있다. 중앙값은 약 0.52이며, 대부분의 값이 약 0.40~0.85 범위에 있고, 일부 기업은 효율성 최댓값인 1.00에 도달하는 것으로 나타났다. 이는 재생에너지를 100% 조달하는 기업들이 에너지 사용과 탄소배출이라는 환경적 투입 요소를 고려할 때, 상대적으로 높은 경제적 산출 효율성을 달성하고 있음을 보여준다.

두 집단 간 분포를 비교하면 RE 0-99% 집단과 RE 100% 집단 사이에는 거의 중첩되지 않는 뚜렷한 차이가 존재한다. 즉, 재생에너지 조달 수준이 높은 기업일수록 CCR 효율성이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 집단 간 효율성 차이를 검정하는 비모수 검정(Mann-Whitney U 검정 등)에서도 통계적으로 유의한 차이가 나타난 것과 같이, 재생에너지 조달을 100% 달성한 집단이 미 달성 집단보다 높은 환경경영 효율성을 가짐을 보여주는 결과이다.

RE 0-99% 집단은 BCC 효율성 점수가 상대적으로 낮은 수준에 분포하고 있으며, 중앙값(median)은 약 0.25로 나타났다. 효율성 점수는 약 0.05~0.48 범위에 집중되어 있으며, 일부 기업에서는 높은 효율성 값이 관찰되어 상위 약 1.00 수준까지 도달하는 사례도 존재한다. 이는 재생에너지 조달 수준이 100%에 도달하지 않은 기업들에서도 일부 기업은 규모와 관계없이 상대적으로 효율적인 환경 투입 관리가 이루어지고 있음을 의미한다.

반면 RE 100% 집단은 BCC 효율성 점수가 매우 높은 수준에 분포하고 있다. 중앙값은 약 0.98이며, 대부분 기업이 약 0.65~1.00 범위에 위치하는 것으로 나타났다. 이는 재생에너지 조달을 100% 달성한 기업들이 규모 효율성의 영향을 제외하더라도 에너지 사용량과 탄소배출 관리 측면에서 상대적으로 높은 순수 기술효율성을 보이고 있음을 의미한다.

두 집단의 차이는 재생에너지를 100% 조달한 기업이 상대적으로 효율적인 방식으로 운영되고 있음을 보여준다. 다만 RE 100% 집단에서도 일부 낮은

효율성 값이 관찰되어 두 집단 간 분포가 완전히 구분되지는 않았다. CCR 모형 결과와 비교할 때 BCC 모형에서는 집단 간 효율성 차이가 상대적으로 감소한 양상이 나타나는 것을 보아, 규모 효율성의 영향을 제외하면 기업별 운영 구조와 환경관리 방식에 따른 차이가 있음을 확인하였다.

HANSUNG UNIVERSITY

Ⅴ. 결론

5.1 연구 결과 요약

본 연구는 Nasdaq-100 ICT 기업 27개 사를 대상으로 DEA 모형을 활용하여 기업별 환경경영 효율성을 측정하고, RE100 가입 여부와 실제 재생에너지 조달 수준에 따른 효율성 차이를 비교·분석하였다. 이를 통해 동일한 ICT 산업 내에서도 개별 기업의 에너지 사용 구조, 탄소배출 관리 방식, 재생에너지 전환 수준에 따라 환경경영 효율성이 다르게 나타나는지 검토하였다.

DEA 분석 결과, ICT 기업 간 환경 투입과 경제적 산출 구조에는 상당한 차이가 존재함을 확인할 수 있었고, 이에 따라 기업 간의 환경경영 효율성 수준 역시 차이를 보였다. 기업의 환경경영 효율성이 단순한 투입 관리뿐 아니라 기업 규모와 운영 구조의 영향을 함께 받을 수 있음을 CCR과 BCC 효율성 간 차이의 결과로 확인할 수 있었다. 이는 동일 산업에 속한 기업이라도 에너지 사용 특성과 사업구조에 따라 환경성과 창출 방식이 다를 수 있음을 의미한다.

기업 수준의 DEA 분석을 통해 동일 산업 내에서도 기업마다 환경전략과 실행 역량에 따라 효율성 차이가 발생할 수 있음을 제시하였다. 재생에너지 전환과 환경경영 효율성 간 관계를 좀 더 깊이 이해하기 위해서는 산업의 평균적 접근을 넘어 기업 수준의 실행 역량과 운영 특성을 함께 반영해야 한다.

RE100 이니셔티브 가입 여부에 따른 비교 결과에서는 가입 기업이 비가입 기업보다 높은 환경경영 효율성을 보였으며, 두 집단 간 차이는 통계적으로 유의하게 나타났다. 그러나 RE100 미가입 기업 중에서도 높은 재생에너지 조달 수준을 달성한 기업이 존재한다는 점에서, 제도적 가입 여부만으로 기업의 환경경영에 대한 수준을 완전히 설명하기에는 한계가 있음을 확인하였다.

반면 실제 재생에너지 조달 수준을 기준으로 집단을 구분한 분석에서는 RE 100% 조달 기업 집단이 미 달성 집단보다 일관되게 높은 효율성을 보여

집단 간 차이가 뚜렷하게 나타났다. 이는 실제 재생에너지 조달 수준이 기업의 전력 조달 구조 변화와 탄소배출 관리 성과를 반영하는 지표로서 환경경영 효율성 차이를 설명하는 데 보다 직접적인 관련성이 있음을 보여준다.

연구 결과, RE100 가입이라는 제도적 참여는 효율적인 환경경영을 향하는 시발점이 된다는 것을 확인하였다. 더 나아가, ICT기업의 환경경영 효율성이 단순한 RE100 가입이라는 제도적 참여보다 실제 재생에너지 전환 수준과 밀접하게 연결됨을 검증하였다.

5.2 연구의 시사점

5.2.1 학술적 시사점

5.2.1.1 기업 단위 분석

본 연구의 의의는 ICT 산업의 환경문제를 단순히 산업 전체의 전력 사용량이나 탄소배출 규모의 관점에서 설명하는 데 그치지 않고, Scope 1 배출량 및 시장 기준 Scope 2 배출량을 환경적 투입 요소로 설정하고 경제적 산출을 얼마나 효율적으로 창출하는지 비교, 분석했다는 점에 있다.

기존 연구들이 ICT 산업의 에너지 사용과 탄소배출 부담을 주로 산업 또는 거시적 수준에서 설명해 왔다. RE100 참여는 기업의 환경전략과 조직 특성에 의해 결정되는 측면이 있으며(Hardcopf et al., 2019; Kim et al., 2024), 따라서 재생에너지 조달과 환경경영 효율성의 관계를 분석하기 위해서는 기업 수준 접근이 필요하다.

ICT 산업은 디지털 전환 확대와 함께 에너지 소비 및 탄소배출 규모가 지속해서 커지고 있으나, 기존 연구는 주로 국가 또는 산업 수준에서 그 영향을 분석하는 데 그쳐왔다. ICT 기업은 비에너지 집약 산업으로 분류됨에도 불구하고 재생에너지 전환의 필요성이 커지고 있는데, 이에 비해 기업 단위의 효율성 분석은 상대적으로 제한적이었다(Cecere et al., 2014; Seck et al., 2016). 본 연구는 이러한 연구 공백을 보완하여 ICT 기업을 대상으로 에너지 사용, 탄소배출 및 재생에너지 조달 수준을 고려한 환경경영 효율성을 분석하였다는 점에서 의의가 있다.

Goto and Sueyoshi(2023)가 정리한 선행연구 검토에서, 생산성·효율성을

분석한 연구는 주로 국가나 산업 단위 분석에 집중됐음과 기업 단위 분석이 상대적으로 부족하다는 것을 밝혔다. 개별 기업 수준의 분석에서도 Sueyoshi and Goto(2012b)는 에너지 기업을 대상으로 실증 분석을 수행하기에, 충분한 표본을 확보하기 어려웠다는 한계를 지적하였으며, 이는 기업 단위 DEA 연구가 기업을 세분된 집단으로 구분하여 분석하는 연구들은 부족했음을 보여준다. 따라서 본 연구는 기업을 분석 단위로 설정하여 기존의 국가 및 산업 수준 중심의 연구에서 충분히 포착하지 못했던 기업 간 환경경영 효율성의 차이를 분석하고, 환경적 투입과 경제적 산출 간 효율성을 기업 수준에서 평가한다는 점에서 기존 연구의 분석 범위를 확장한다는 점에서 의의가 있다.

5.2.1.2 RE100 가입 여부와 실제 재생에너지 조달 수준

본 연구는 RE100 가입 여부와 실제 재생에너지 조달 수준을 구분하여 분석하였다는 점에서 기존 논의와 차별성을 가진다. 본 연구는 환경경영 효율 관계를 DEA로 분석한 선행연구(Stiakakis & Fouliras, 2009)의 흐름을 ICT 산업과 재생에너지 조달 수준이라는 맥락으로 확장하였다는 점에서 의의가 있다. 기업의 재생에너지 전략을 선언적 참여와 실질적 이행이라는 두 요소를 구분하여 분석함으로써 두 가지를 유사한 의미로 해석한 기존 연구를 넘어 그 차이를 확인할 수 있었다.

많은 선행 연구(Bromley & Powell, 2012 등)와 시장의 시선은 기업들이 글로벌 이니셔티브(RE100 등)를 단지 대외 홍보용 수단으로만 활용하고, 실질적 성과와는 단절되는 '수단-목표 디커플링'에 빠질 것을 우려해 왔다. 본 연구에서 RE100 가입 여부와 재생에너지 조달 수준을 구분하여 분석한 결과, 주목할 만한 발견은, RE100 참여 기업들이 비참여 기업에 비해 통계적으로 유의미하게 높은 환경경영 효율성을 달성했음을 DEA 모형을 통해 실증했다. 본 연구의 DEA 실증 분석 결과는 이러한 우려를 정면으로 반박한다. 이는 기업들의 RE100 참여가 상징적인 선언에 그치는 디커플링(Decoupling) 현상(Meyer & Rowan, 1977; Bromley & Powell, 2012)이 아니라, 수단인 RE100 이행과 목표인 효율성 향상 및 탄소 저감이라는 두 요소가 이미 성공적으로 연결된 (Tight Coupling) 모델임을 입증한다.

RE100 참여가 단순한 대외적 이미지 제고나 상징적 활동에 머무르는 것이

아니라, 실제 재생에너지 조달 확대와 에너지 관리 체계 개선으로 이어질 때 기업의 환경 부담을 줄이는 동시에 경제적 성과 창출과 연결될 수 있는 전략적 활동임을 시사한다(Porter & van der Linde, 1995; Eccles et al., 2014). 따라서 본 연구는 ICT 기업별 에너지 사용량, 탄소 배출량, 재생에너지 조달 수준을 동시에 고려하여 환경경영 효율성을 평가함으로써, 기업 단위에서 나타나는 환경경영 성과 차이를 구체적으로 분석했다는 점에서 학술적 의의가 있다.

5.2.2 실무적 시사점

첫째, 기업 의사결정자의 관점에서 보면 환경경영 효율성 개선은 단순한 비용 증가 요인이 아니라 장기적인 기업가치와 경쟁력 확보를 위한 전략적 투자로 인식할 필요가 있다. 기존 연구에서도 지속가능경영을 장기간 유지한 기업들이 일반 기업에 비해 우수한 회계 성과와 시장성과를 나타낼 수 있음을 제시하였다(Eccles et al., 2014). 본 연구는 경제적 성과와 환경 부담을 동시에 고려하는 효율성 관점에서, RE100 가입 및 이행 기업들의 효율성 양상을 분석하였다. 이는 경제적 성과와 환경적 성과를 동시에 고려하는 생태효율성 관점에서 환경경영 활동이 기업 효율성과 연결될 수 있음을 제시한 기존 연구(Korhonen & Luptacik, 2004)와 맥을 같이한다.

분석 결과, 재생에너지 조달 수준이 높고 환경 정보 공시에 적극적인 기업 집단에서 상대적으로 높은 환경경영 효율성이 관찰되었다. 이러한 결과는 환경 대응 활동이 기업의 본원적 경쟁력과 양립할 수 있다는 Porter and van der Linde(1995)의 전통적 논의를 지지하는 지표로 해석될 수 있다. 이러한 결과는 기업의 환경경영 투자가 단순한 규제 대응이나 사회적 책임 활동을 넘어 장기적 가치 창출을 위한 전략적 의사결정이 될 수 있음을 의미한다. 본 연구의 결과 역시 재생에너지 조달 수준이 높은 기업 집단에서 상대적으로 높은 환경경영 효율성이 나타났다는 점에서, 기업이 재생에너지 전환을 비용 관점이 아닌 운영 효율성과 지속 가능 경쟁력 확보의 관점에서 접근할 필요가 있음을 시사한다. 환경적 책임이 단순한 환경 규제 대응을 넘어 기업 운영 효율성 및 장기적 가치 창출과 연결된다는 기존 논의(Flammer, 2013; Wang & Li, 2016)와 같이, RE 100% 집단이 CCR·BCC 모형 모두에서 높은 효율

성을 나타냈다는 본 연구의 결과는, 환경성과를 단순한 탄소 배출량 수준이 아니라 운영 효율성 관점에서 평가하는 접근이 실증적으로도 의미가 있음을 뒷받침할 뿐 아니라, 재생에너지 전환에 대한 적극적인 대응이 기업의 운영 효율성과 함께 장기적인 경쟁력 강화로 이어질 수 있음을 보여준다.

또한 대규모 기업은 규모 문제를 별도로 관리할 필요가 있다. CCR은 낮지만, BCC는 상대적으로 높게 나타난 기업의 사례에서 볼 수 있듯이, 대규모 기업은 순수 기술효율성에서는 양호한 모습을 보이면서도 규모 비효율성으로 인해 전체 효율성이 낮아질 수 있다.

이러한 기업에는 단순히 투입을 줄이라는 권고보다, 데이터센터 통합이나 전력 사용 최적화와 같은 규모 중심의 운영 전략이 더 효과적일 수 있다. 즉 기업은 획일적인 접근방식을 적용하기보다, 자사의 규모와 운영 특성을 반영한 효율성 개선 전략을 설계해야 한다.

자본시장 및 ESG 평가 측면에서는 기업의 환경성과를 평가하는 기준의 객관성과 일관성이 중요한 과제로 제기되고 있다. ESG 평가기관들이 서로 다른 기준으로 기업을 평가하면서, 투자자들이 어떤 지표를 믿어야 할지 모르는 '합산 혼란(Aggregate Confusion)'이라는 문제가 발생하고 있다(Berg et al., 2022). 또한 Christensen et al.(2022)은 기업의 ESG 관련 정보 공개가 확대되더라도 평가기관 간 평가 결과의 불일치가 반드시 감소하지는 않음을 제시하였다. 이러한 평가 기준의 불확실성은 기업의 지속가능성과 환경성과에 대한 시장의 해석 차이를 확대하고, 결과적으로 기업의 자본조달 환경에도 영향을 미칠 수 있다(Gibson Brandon et al., 2021).

따라서 본 연구는 기업의 환경경영 성과를 평가하는 데 공식적 참여 여부와 실제 실행 수준을 구분할 필요가 있음을 DEA 환경경영 효율성 분석을 통해 확인하고 기업들이 단순히 선언적 신호만 보내는 것이 아니라 실질적인 경영 및 생태효율성 개선을 이뤄내고 있음을 유효하게 검증했다.

RE100 가입 기업과 실제 재생에너지 100% 조달 기업 간 차이가 존재하였으며, 효율성 차이는 가입 여부보다 실제 재생에너지 조달 비율(RE ratio)을 기준으로 구분한 집단에서 더욱 명확하게 나타났다. 이는 기업의 환경 전

환 수준을 평가할 때 제도적 참여 여부만으로는 실제 환경경영 성과를 충분히 반영하기 어렵다는 것을 의미한다. ESG 평가가 단일 지표나 형식적 참여 여부에 의존하면 실질적 성과를 놓칠 수 있다는 점과도 연결된다. 투자자와 ESG 평가기관은 RE100 가입 여부와 같은 선언적 지표뿐 아니라 재생에너지 조달 비율, 에너지 사용 구조, 탄소배출 관리 수준 등 실제 실행 성과를 함께 반영하는 평가 체계를 구축하여 기업의 약속과 이행을 구분하고, 실질적인 에너지 전환을 추진하는 기업을 보다 정확히 평가할 필요가 있다 (Bromley & Powell, 2012; Berg et al., 2022).

5.2.3 정책적 시사점

정책 당국은 기업의 재생에너지 조달 비율과 그 산정 근거가 함께 검증될 수 있는 공시, 검증 체계를 마련할 필요가 있다. 외형적 선언과 실질적 운영 효율성 사이에 괴리가 발생하는 현상은, 기업들이 이해관계자의 압력에 대응할 때 실질적인 체질 개선 없이 표면적인 형태만 모방하는, 이른바 '위장 행위(Decoupling)' 메커니즘을 규명한 Crilly 등(2012)의 논의와 맥락을 같이한다.

가입 선언이라는 상징적 조치가 실질적인 환경경영 효율성 개선으로 당연하게 이어지는 것은 아님을 본 연구의 결과로 확인하였다. 나아가 이는 현재 글로벌 자본시장이 직면한 환경경영 평가의 한계를 명확히 지적한다. 주관적이고 비정량적인 기준들로 인해 ESG 평가기관 간의 평가 기준의 불일치가 심화함에 따라 투자자들이 신뢰할 수 있는 지표 확보에 어려움을 겪는 현상을 Berg 등(2022)과 Christensen 등(2022)은 '합산 혼란(Aggregate Confusion)'으로 정의한 바 있다.

본 연구가 제시한 투입 대 산출 기반의 DEA 환경경영 효율성 평가 체계와 같이, 기업이 한정된 자원과 탄소배출을 실질적으로 어떻게 통제하며 경영 성과로 연결하고 있는지 검증할 수 있는 투명하고 정량적인 평가 인프라를 구축해야 한다. 제도적 기반이 제대로 뒷받침 될 때 시장은 기업의 환경경영 역량을 보다 정확하게 평가할 수 있으며, 지속 가능한 기업으로의 자본 배분 또한 더욱 효율적으로 이루어질 것이다. 따라서 정책적으로는 RE 100 가입

여부와 같은 선언적 지표뿐 아니라, 재생에너지 조달 비율, 시장 기준 Scope 2 배출량, 조달 방식(PPA, REC, 녹색요금제 등) 과 같은 실행 정보를 함께 공시하고 비교할 수 있는 기준이 필요하다. 이러한 제도적 기준은 기업의 환경 활동을 감시하기 위한 규제라기보다, 시장 참여자가 기업의 실제 전환 성과를 더욱 정확하게 평가할 수 있도록 하는 정보 기반이 될수있다(Berg et al., 2022; Christensen et al., 2022).

다음으로, 산업별 운영 특성과 기업 규모에 맞는 다양한 조달 경로의 접근성을 함께 높이는 방향으로 설계되어야 한다. 본 연구의 표본에서도 확인되었듯이([표 4-1]), 동일한 ICT 산업 내에서도 기업별 전력 사용 규모와 배출 구조의 차이가 매우 크게 나타났다. CCR은 규모수익불변(CRS)을 가정하므로, 투입 관리와 규모 적정성을 합쳐서 보여주는 전체 효율성이고, BCC는 가변 규모수익(VR)을 가정해서 규모 효과를 제거한 순수 기술효율성이다. 즉, 기업의 규모 안에서 투입을 얼마나 잘 관리하고 있는가 만 보여준다. 두 점수의 차이 CCR/BCC 비율, 일반적으로 규모 효율성 SE=CCR/BCC는 곧 이 기업의 비효율이 규모 때문인지, 운영관리 때문인지를 분리해서 보여주는 진단 값이 된다.

CCR 낮고 BCC 높은 규모형 비효율 기업은 투입을 잘못 쓰고 있는 게 아니라, 애초에 운영 규모 자체가 효율적 범위에서 벗어나 있는 것으로 본 연구 부록의 DMU10(CCR=.194, BCC=.675)이 정확히 이 사례이다. 본 연구 4.1에서도 밝혔듯이, 대규모 데이터센터와 클라우드 인프라 등이 높은 BCC의 원인이다. 이런 규모형 비효율 기업은 이미 기업 규모 내에서 잘 관리되고 있으므로 에너지관리시스템 보조금이나 모니터링 기술지원과 같은 에너지 효율은 관리하기 위한 정책지원은 거의 효과가 없을 수 있다. 대신 신규 데이터센터 확장 대신 기존 시설 통합 유도 정책, 또는 이미 너무 방대하고 큰 사업 규모에서 발생하는 대량 전력 수요를 감당할 수 있는 대규모 PPA나 전용 재생에너지 발전 설비 연계와 같은 규모에 맞는 조달 인프라를 지원하는 방향이 더 효과적이다.

규모와 무관하게 CCR과 BCC가 모두 낮은 에너지와 탄소 관리 자체가 비효율적인 운영형 비효율 기업의 경우, 규모의 문제가 아닌 에너지와 탄소 관

리체계 자체의 미성숙이 원인일 가능성이 크다. 이런 기업의 경우는 대규모 PPA와 같은 조달 인프라를 활용할 계약관리나 검증, 공시 체계 같은 내부 역량이 부족하다는 것이 본 연구 2.4절의 RBV 논의와 일치한다. 이런 경우는 조달 인프라 지원보다 에너지 관리 시스템(EMS) 도입 지원, 탄소 회계 역량 강화, 운영 프로세스 진단 컨설팅 같은 역량 형성형 지원이 더 현실적이다. 부록의 DMU26(BCC=.016), DMU27(BCC=.016)이 대표적 사례로, 매출 규모는 크지 않으면서 Scope 1·2 배출이 매우 높다.

지금까지 일반적인 정책 제안은 대기업=PPA, 중소기업=REC, 기업 규모는 매출, 종업원 수라는 외형적 기준으로 지원을 나누어왔다. 그러나, 연구의 DEA 결과를 보면, 외형적 규모와 규모형 비효율은 반드시 같지는 않다. 외형은 작아도 운영형 비효율 에너지 관리 미성숙을 겪는 기업이 있을 수 있고, 외형은 커도 이미 BCC가 높아서 운영은 잘하고 있는, 추가 지원이 불필요한 기업도 있을 수 있다. 즉, 기업 규모라는 사전적(ex-ante) 분류 기준 대신, CCR/BCC 점수의 조합이라는 사후적(epost) 실증 진단 기준으로 정책 대상을 선별하자는 것이 이 포인트의 핵심이다. 이렇게 하면 정책 자원이 이미 효율적인데 규모만 큰 기업에 잘못 투입되는 비효율도 줄일 수 있고, 작아 보이지만 실제로는 관리 역량이 부족한 기업을 놓치는 것도 막을 수 있다. 이처럼 기업 규모와 운영 구조에 따라 적합한 조달 수단이 다르다는 점은, 정책이 완전 조달까지의 경로를 단일하게 설계해서는 안 된다는 점과도 직결된다.

본 연구의 분석 결과, 재생에너지를 100% 조달한 기업 집단은 그렇지 못한 기업 집단보다 환경경영 효율성에서 뚜렷하고 일관된 우위를 보였다. 이는 부분적인 조달 확대만으로는 충분하지 않으며, 완전 조달 수준에 실제로 도달하는 것이 효율성 개선과 더 강하게 연결될 수 있음을 시사한다. 따라서 정책의 초점은 기업의 조달 비율을 일정 수준 끌어올리는 데 머물기보다, 기업이 완전 조달까지 실제로 도달할 수 있도록 실행 경로를 마련하는 데 있어야 한다. 이를 위해서는 장기 전력구매계약(PPA) 제도의 접근성 확대, 재생에너지 인증서 거래의 투명성 제고, 녹색요금제 선택권 확대 등 기업이 단계적으로 완전 조달에 이를 수 있는 여러 경로를 함께 정비할 필요가 있다.

5.3 연구의 한계

5.3.1 단일 연도 횡단면 분석 연구설계

본 연구는 ICT 기업의 재생에너지 조달 수준과 환경경제 효율성의 관계를 기업 수준에서 실증적으로 검토하였다는 의의가 있지만, 다음과 같은 한계를 지닌다. 첫째, 본 연구는 2024년 단일 연도 자료를 활용한 횡단면 분석에 기반하고 있으므로, 재생에너지 조달 수준과 환경경제 효율성 간의 관계를 엄밀한 인과관계로 해석하기 어렵다. 본 연구에서 확인된 효율성 차이는 재생에너지 조달 외에도 기업의 규모, 사업모형, 자본집약도, 제품 포트폴리오, 지역별 전력시장 조건, 기존의 에너지 관리 역량 등 관찰되지 않은 기업의 특성, 또는 외부 조건이나 환경에 의해 영향을 받았을 가능성도 배제하기 어렵다.

인과관계를 논의하기 위해서는 단일 시점 분석만으로는 이를 검토할 수 없고 원인과 결과의 시간적 선후관계를 확인해야 한다. 따라서 본 연구의 결과는 특정 시점에서의 상대적 효율성 차이를 보여주는 실증적 증거로 이해할 필요가 있다.

5.3.2 DEA 효율성의 성격

둘째, DEA 결과를 해석할 때 유의해야 할 중요한 특성은 DEA 효율성 점수가 절대적 성과가 아니라는 점이다. 표본 내 상대 비교를 통해 도출되므로, 표본 구성과 극단치의 존재에 따라 효율성 프런티어가 달라질 수 있다. 각 기업의 효율성 점수는 해당 프런티어로부터의 상대적 거리로 산출된다. 따라서 효율성 점수 1.000을 받은 기업, 즉 프런티어 기업으로 분류된 기업은 동일 표본 내에서 다른 기업보다 더 우수한 투입 대비 산출 비율을 보였다는 의미이지, 객관적으로 최적의 환경경영 효율성 수준에 도달했다는 의미는 아니다.

본 연구에서 산출된 DEA 효율성 점수를 다른 표본, 다른 시점, 또는 다른 변수 구성을 사용한 선행연구의 효율성 점수와 직접 비교하는 것은 적절하지 않다. 본 연구의 최종 표본은 27개 기업으로, 소프트웨어·클라우드·반도체·네트워크 장비 등 세부 산업 특성이 이질적인 기업들을 포괄하고 있다. 이에 따라 효율성 점수에 산업 내 구조적 차이가 일부 반영되었을 가능성을 배제하기 어렵다. 따라서 본 연구의 결과는 27개 Nasdaq-100 ICT 기업 표본 내부에서 관찰된 상대적 환경경영 효율성 분포로 이해해야 하며, 모든 기업의 환

경관리 성과를 평가하는 보편적 기준으로 해석해서는 안 된다. 본 연구에서는 CCR·BCC 모형 병행과 보조 분석을 통해 결과의 강건성을 확인하였으나, 이러한 절차가 표본 규모와 구성상의 제약을 완전히 해소하지는 못한다.

5.4 향후 연구 방향

5.4.1 패널분석을 통한 분석 확장

향후 연구에서는 다년간의 패널 데이터를 통하여 시간의 흐름에 따른 재생에너지 조달 수준과 효율성의 관계를 확인할 필요가 있다. 본연구와 같은 단일 시점의 분석은 기업 간의 단순 효율성 차이를 확인하기에는 유용하지만 재생에너지 조달 확대가 이후의 효율성 변화로 이어지는지를 설명하는 데에는 한계가 있다. 또한 본 연구에서 관찰된 효율성 차이가 재생에너지 조달의 결과인지, 아니면 본래 효율성이 높은 기업들이 재생에너지 조달에도 더 적극적으로 대응한 결과인지를 구분하기 어렵다. 패널 데이터를 통한 분석은 재생에너지 조달 수준의 변화가 효율성 점수의 변화와 어떤 방향으로 연결되는지 보다 구체적으로 검토할 수 있다. 패널 데이터를 활용하면 다년간의 동일 기업의 변화를 관찰할 수 있으므로 기업 고유의 사업구조나 운영 특성의 영향을 일정 부분 통제할 수 있다. 이를 통해 재생에너지 조달 수준의 변화와 환경경영 효율성 변화 간의 관계를 더 정교하게 분석할 수 있다.

5.4.2 연구 표본과 범위의 확장

본 연구는 Nasdaq-100 지수에 포함된 ICT 기업 중 본 연구에서 사용될 투입산출 변수의 데이터 확보가 가능한 기업을 대상으로 정하였다. 보다 정확한 효율성 측정을 위해 보수적으로 선정한 표본이기에 규모 제약에 따른 한계가 존재한다. 향후 연구에서 더 광범위한 양질의 데이터 확보로 표본을 확장한다면 높은 신뢰도와 타당성을 갖추는 연구를 추진할 수 있을 것이다. 먼저, 본 연구의 연장선에서 Nasdaq-100 전체 기업으로 확장할 수 있다. 본연구와 동일한 산업군의 좀 더 깊고 폭넓은 연구로 나아간다면, S&P 500, MSCI World Information Technology Index 등 더 넓은 지수에 포함된 ICT 기업으로의 확장도 본 연구 맥락에서 더 유의미한 시사점 도출을 기대할 수 있을 것이다. 본 연구를 시작하면서 검토한바, 기존의 연구가 선진국을 대

상으로 주로 하여 이루어진 점을 염두에 둔다면, 지리적 범위의 확장도 필요하다. 주로 기존 연구가 이루어져 온 선진국들과, OECD 국가, 신흥 국가 등 지역과 각 국가의 경제 수준 등에 따라서 에너지 접근성, 시장 구조, 에너지 조달 차이, 정책적 규제 등 은 차이가 있기에 연구로서 가치가 있다. 이러한 지역의 ICT 기업을 함께 분석하면, RE100 가입 여부와 재생에너지 조달 수준이 환경경제 효율성과 맺는 관계가 국가별 제도 환경에 따라 달라지는지를 검토할 수 있다. 예를 들어 탄소 가격제, 전력망 배출계수, 기후공시 규제 수준과 같은 국가 단위 요인은 기업의 재생에너지 조달 여건과 환경성과에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 표본을 다양한 국가와 시장으로 확장하는 연구는 기업의 환경전략과 성과를 개별 기업의 내부 역량뿐 아니라 외부 제도 환경과 함께 이해하는 데 도움이 될 것이다.

5.4.3 재생에너지 조달 방식의 차이에 대한 추가 분석

앞서 연구의 한계에서 언급한 바와 같이, 본 연구에서 사용한 RE 비율은 재생에너지 조달 수준을 하나의 비율로 파악한 지표이다. 따라서 기업이 재생에너지를 어떤 방식으로 조달했는지, 즉 PPA, REC, 자가발전, 녹색요금제 등 조달 수단의 차이까지는 충분히 반영하지 못하였다. 향후 연구에서는 재생에너지 조달을 수단별로 구분하여, 각 조달 방식이 환경경제 효율성과 어떠한 관련성을 가지는지 검토할 필요가 있다.

PPA는 일반적으로 재생에너지 발전사업자와의 장기 계약을 전제로 하므로, 기업 내부의 조달 전문성, 위험 관리 능력, 장기적인 전력 구매 전략을 요구한다. 이러한 점에서 재생에너지 조달은 단순한 전력 구매가 아니라 기업의 조직역량과 환경관리 역량이 결합한 활동으로 이해할 수 있다(Hart, 1995). 반면 REC 구매는 상대적으로 접근이 쉽지만, PPA와 같은 수준의 조직적 관여나 장기적 전략을 반드시 수반한다고 보기는 어렵다. 자가발전과 녹색요금제 역시 기업이 전력 공급에 관여하는 방식과 내부 운영 체계에서 차이가 있다. 본 연구는 재생에너지 조달 수준을 RE 비율이라는 단일 지표로 측정하였으나, 동일한 조달 비율이라도 PPA와 REC는 신규 발전 설비 확충에 대한 기여도에서 차이를 가질 수 있다(Miller et al., 2015).

따라서 동일한 RE 비율을 달성한 기업이라도 조달 수단의 구성에 따라 재생

에너지 전략의 의미는 달라질 수 있다. 환경경영 효율성 차이가 단순한 재생에너지 사용 비중뿐 아니라 조달 전략을 실행하는 과정에서 축적된 조직역량이 관련된다면, 조달 수단별 분석은 그 차이를 설명하는 데 중요한 단서가 될 수 있다. 향후 연구에서는 지속가능성 보고서나 CDP 자료를 활용하여 재생에너지 조달의 양적 수준뿐 아니라 조달 방식의 차이까지 함께 고려할 필요가 있다.

5.4.4 산출 변수의 다양화

향후 연구에서는 DEA 모형의 산출 변수를 보다 다양화하여, ICT 기업이 환경적 투입을 통해 창출하는 성과를 다차원적으로 검토할 필요가 있다. 본 연구는 매출액을 단일 산출 변수로 사용하였다. 매출액은 기업의 경제적 산출 규모를 비교적 일관되게 측정할 수 있다는 점에서 본 연구의 목적에 부합하지만한다. 매출액만으로는 ICT 기업의 성과를 구성하는 여러 측면을 충분히 반영하기 어렵다. 영업이익이나 EBITDA와 같은 수익성 지표를 함께 분석에 적용한다면, 매출 규모는 크지만, 수익성이 낮은 기업이 상대적으로 효율적으로 평가될 가능성을 줄일 수 있다. 또한 ICT 산업에서는 지식재산의 확보와 기술 역량의 축적이 기업의 경쟁력과 성과에 큰 영향을 미치므로, 특허출원수, 특허등록 수, 혁신성과 지표와 같은 변수를 보완적 산출 지표로 검토할 수 있다. 고용 규모는 기업이 창출하는 사회적 가치의 한 측면을 보여줄 수 있다는 점에서, 적합하다. 이처럼 복수의 산출 변수를 포함하면 환경적 투입을 통해 기업이 창출하는 성과를 매출액에만 한정하지 않고 보다 넓게 해석할 수 있으며, 복합적인 기업성과를 하나의 산출 지표로만 대표할 때 발생할 수 있는 모형 설정상의 한계도 완화할 수 있다.

참 고 문 헌

국내문헌

문하나, 민대기. (2015). DEA를 이용한 국내 기업의 에너지 효율성 분석. 『한국경영과학회지』, 32(3), 37-54.

진태영, 김종우, 김도원. (2023). RE100의 탄소중립 기여도 분석: 전력 프로파일 분석을 중심으로. 『환경정책』, 31(3), 1-28.

국외문헌

Añón Higón, D., Gholami, R., & Shirazi, F. (2017). ICT and environmental sustainability: A global perspective. *Telematics and Informatics*, 34(1), 85-95.

Andrae, A. S. G., & Edler, T. (2015). On global electricity usage of communication technology: Trends to 2030. *Challenges*, 6(1), 117-157.

Atasu, A., Corbett, C. J., Huang, X., & Toktay, L. B. (2020). Sustainable operations management through the perspective of manufacturing and service operations management. *Manufacturing & Service Operations Management*, 22(1), 146-157.

Bang, Y.-Y., Lee, D. S., & Lim, S.-R. (2019). Analysis of corporate CO_2 and energy cost efficiency: The role of performance indicators and effective environmental reporting. *Energy Policy*, 133, 110897.

Banker, R. D., Charnes, A., & Cooper, W. W. (1984). Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management Science*, 30(9), 1078-1092.

Baron, D. P. (2009). A positive theory of moral management, social pressure, and corporate social performance. *Journal of Economics & Management Strategy*, 18(1), 7-43.

Belkhir, L., & Elmeligi, A. (2018). Assessing ICT global emissions

footprint: Trends to 2040 & recommendations. *Journal of Cleaner Production*, 177, 448-463.

Berg, F., Kölbel, J. F., & Rigobon, R. (2022). Aggregate confusion: The divergence of ESG ratings. *Review of Finance*, 26(6), 1315-1344.

Berrone, P., Fosfuri, A., Gelabert, L., & Gomez-Mejia, L. R. (2013). Necessity as the mother of 'green' inventions: Institutional pressures and environmental innovations. *Strategic Management Journal*, 34(8), 891-909.

Bromley, P., & Powell, W. W. (2012). From smoke and mirrors to walking the talk: Decoupling in the contemporary world. *Academy of Management Annals*, 6(1), 483-530.

Buysse, K., & Verbeke, A. (2003). Proactive environmental strategies: A stakeholder management perspective. *Strategic Management Journal*, 24(5), 453-470.

Carney, M. (2015). *Breaking the tragedy of the horizon - climate change and financial stability* [Speech given at Lloyd's of London]. London: Bank of England.

Cecere, G., Corrocher, N., Gossart, C., & Ozman, M. (2014). Technological pervasiveness and variety of innovators in Green ICT: A patent-based analysis. *Research Policy*, 43(10), 1827-1839.

Cenci, S., Burato, M., Rei, M., & Zollo, M. (2023). The alignment of companies' sustainability behavior and emissions with global climate targets. *Nature Communications*, 14, 7831.

Chang, K., Wan, Q., Lou, Q., Chen, Y., & Wang, W. (2020). Green fiscal policy and firms' investment efficiency: New insights into firm-level panel data from the renewable energy industry in China. *Renewable Energy*, 151, 589-597.

Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, 2(6), 429-444.

Christensen, D. M., Serafeim, G., & Sikochi, A. (2022). Why is corporate virtue in the eye of the beholder? The case of ESG ratings. *The Accounting Review*, 97(1), 147–175.

Chung, Y. H., Färe, R., & Grosskopf, S. (1997). Productivity and undesirable outputs: A directional distance function approach. *Journal of Environmental Management*, 51(3), 229–240.

Climate Group & CDP. (2025). *RE100 Annual Disclosure Report 2024*. Climate Group.

Climate Group & CDP. (2025). *RE100 Annual Disclosure Report 2024.* Climate Group.

Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

Crilly, D., Zollo, M., & Hansen, M. T. (2012). Faking it or muddling through? Understanding decoupling in response to stakeholder pressures. *Academy of Management Journal*, 55(6), 1429–1448.

Department of Trade and Industry (DTI), UK. (2003). *Energy white paper: Our energy future – creating a low carbon economy*. London: The Stationery Office.

Dhanorkar, S. S., Siemsen, E., & Linderman, K. W. (2018). Promoting change from the outside: Directing managerial attention in the implementation of environmental improvements. *Management Science*, 64(6), 2535–2556.

Eccles, R. G., Ioannou, I., & Serafeim, G. (2014). The impact of corporate sustainability on organizational processes and performance. *Management Science*, 60(11), 2835–2857.

Färe, R., Grosskopf, S., Lovell, C. A. K., & Pasurka, C. (1989). Multilateral productivity comparisons when some outputs are undesirable: A nonparametric approach. *The Review of Economics and Statistics*, 71(1), 90–98.

Faucheux, S., & Nicolai, I. (2011). IT for green and green IT: A proposed typology of eco-innovation. *Ecological Economics*, 70(11), 2020-2027.

Figueres, C., Schellnhuber, H. J., Whiteman, G., Rockström, J., Hobley, A., & Rahmstorf, S. (2017). Three years to safeguard our climate. *Nature*, 546(7660), 593-595.

Filippini, M., & Hunt, L. C. (2011). Energy demand and energy efficiency in the OECD countries: A stochastic demand frontier approach. *The Energy Journal*, 32(2), 59-80.

Flammer, C. (2013). Corporate social responsibility and shareholder reaction: The environmental awareness of investors. *Academy of Management Journal*, 56(3), 758-781.

Freitag, C., Berners-Lee, M., Widdicks, K., Knowles, B., Blair, G. S., & Friday, A. (2021). The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations. *Patterns*, 2(9), 100340.

Gibson Brandon, R., Krueger, P., & Schmidt, P. S. (2021). ESG rating disagreement and stock returns. *Financial Analysts Journal*, 77(4), 104-127.

Goto, M., & Sueyoshi, T. (2023). Sustainable development and convergence under energy sector transition in industrial nations: An application of DEA environmental assessment. *Socio-Economic Planning Sciences*, 87, 101316.

Guenster, N., Bauer, R., Derwall, J., & Koedijk, K. (2011). The economic value of corporate eco-efficiency. *European Financial Management*, 17(4), 679-704.

Guo, X. D., Zhu, L., Fan, Y., & Xie, B. C. (2011). Evaluation of potential reductions in carbon emissions in Chinese provinces based on environmental DEA. *Energy Policy*, 39(5), 2352-2360.

Haney, A. B. (2017). Threat interpretation and innovation in the context

of climate change: An ethical perspective. *Journal of Business Ethics*, 143(2), 261-276.

Hardcopf, R., Shah, R., & Mukherjee, U. (2019). Explaining heterogeneity in environmental management practice adoption across firms. Production and Operations Management, 28(11), 2898-2918.

Hart, S. L. (1995). A natural-resource-based view of the firm. *Academy of Management Review*, 20(4), 986-1014.

Herrala, R., & Goel, R. K. (2012). Global CO2 efficiency: Country-wise estimates using a stochastic cost frontier. *Energy Policy*, 45, 762-770.

Hu, J. L., & Honma, S. (2014). A comparative study of energy efficiency of OECD countries: An application of the stochastic frontier analysis. *Energy Procedia*, 61, 2280-2283.

Hu, J.-L., & Wang, S.-C. (2006). Total-factor energy efficiency of regions in China. *Energy Policy*, 34(17), 3206-3217.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

International Energy Agency (IEA). (2017). *World Energy Outlook 2017*. Paris: IEA.

International Energy Agency (IEA). (2021). *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*. Paris: IEA.

International Energy Agency (IEA). (2022). *Advancing Decarbonisation Through Clean Electricity Procurement*. Paris: IEA.

International Energy Agency (IEA). (2023). *Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5° C Goal in Reach*. Paris: IEA.

International Energy Agency (IEA). (2025). *Energy and AI*. Paris: IEA.

Jin, T., & Kim, J. (2019). A comparative study of energy and carbon efficiency for emerging countries using panel stochastic frontier analysis.

Scientific Reports, 9, 6647.

Jalalov, M., & Bae, J. H. (2025). Exploring the motivations behind corporate participation in the RE100 initiative and its impact on financial performance. *Energy Policy*, 198, 114503.

Kim, H., Jung, H. J., & Lee, C. H. (2024). Carbon emissions and the search for renewable energy technology: ICT firms' environmental responsibility. *Production and Operations Management*, 33(5), 1155-1175.

Konar, S., & Cohen, M. A. (2001). Does the market value environmental performance? *The Review of Economics and Statistics*, 83(2), 281-289.

Korhonen, P., & Luptacik, M. (2004). Eco-efficiency analysis of power plants: An extension of data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 154(2), 437-446.

KPMG Asia Pacific. (2022). *Decarbonization through renewable energy: Understanding Asia Pacific's Corporate Power Purchase Agreement landscape*. KPMG International.

Kuosmanen, T., & Kortelainen, M. (2005). Measuring eco-efficiency of production with data envelopment analysis. *Journal of Industrial Ecology*, 9(4), 59-72.

Kuramochi, T., Roelfsema, M., Hsu, A., Lui, S., Weinfurter, A., Chan, S., Hale, T., Clapper, A., Chang, A., & Höhne, N. (2020). Beyond national climate action: The impact of region, city, and business commitments on global greenhouse gas emissions. *Climate Policy*, 20(3), 275-291.

Malmodin, J., Moberg, A., Lunden, D., Finnveden, G., & Lovehagen, N. (2010). Greenhouse gas emissions and operational electricity use in the ICT and entertainment & media sectors. *Journal of Industrial Ecology*, 14(5), 770-790.

Malmodin, J., Lövehagen, N., Bergmark, P., & Lundén, D. (2024). ICT sector electricity consumption and greenhouse gas emissions – 2020 outcome. *Telecommunications Policy*, 48(3), Article 102701.

Mardani, A., Zavadskas, E. K., Streimikiene, D., Jusoh, A., & Khoshnoudi, M. (2017). A comprehensive review of data envelopment analysis (DEA) approach in energy efficiency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1298-1322.

Marin, G., & Palma, A. (2017). Technology invention and adoption in residential energy consumption: A stochastic frontier approach. *Energy Economics*, 66, 85-98.

Meyer, J. W., & Rowan, B. (1977). Institutionalized organizations: Formal structure as myth and ceremony. *American Journal of Sociology,* 83(2), 340-363.

Miller, J., Bird, L., Heeter, J., & Gorham, B. (2015). *Renewable electricity use by the U.S. information and communication technology (ICT) industry* (Technical Report No. NREL/TP-6A20-64011). Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.

Moon, H., & Min, D. (2020). A DEA approach for evaluating the relationship between energy efficiency and financial performance for energy-intensive firms in Korea. *Journal of Cleaner Production*, 255, 120283.

Porter, M. E., & van der Linde, C. (1995). Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship. *Journal of Economic Perspectives*, 9(4), 97-118.

Rekker, S., Ives, M. C., Wade, B., Webb, L., & Greig, C. (2022). Measuring corporate Paris Compliance using a strict science-based approach. *Nature Communications*, 13, 4441.

Schaltegger, S., & Sturm, A. (1990). Ökologische Rationalität: Ansatzpunkte zur Ausgestaltung von ökologieorientierten Managementinstrumenten. *Die Unternehmung*, 44(4), 273-290.

Schmidheiny, S. (1992). *Changing course: A global business perspective on development and the environment*. Cambridge, MA: MIT Press.

Seck, A. (2016). Efficiency and productivity growth in the ICT sector: A firm-level analysis. *Telecommunications Policy*, 40(8), 791-803.

Stiakakis, E., & Fouliras, P. (2009). The impact of environmental practices on firms' efficiency: The case of ICT-producing sectors. *Operational Research*, 9(3), 311-328.

Sueyoshi, T., & Goto, M. (2011). DEA approach for unified efficiency measurement: Assessment of Japanese fossil fuel power generation. *Energy Economics*, 33(2), 292-303.

Sueyoshi, T., & Goto, M. (2012a). Data envelopment analysis for environmental assessment: Comparison between public and private utilities in US electric power industry. *Energy Economics*, 34(1), 325-334.

Sueyoshi, T., & Goto, M. (2012b). Efficiency-based rank assessment for electric power industry: A combined use of Data Envelopment Analysis (DEA) and DEA-Discriminant Analysis (DA). *Energy Economics,* 34(3), 634-644.

Trinks, A., Mulder, M., & Scholtens, B. (2020). An efficiency perspective on carbon emissions and financial performance. *Ecological Economics*, 175, 106632.

Tyteca, D. (1996). On the measurement of the environmental performance of firms: A literature review and a productive efficiency perspective. *Journal of Environmental Management*, 46(3), 281-308.

Usman, A., Ozturk, I., Ullah, S., & Hassan, A. (2021). Does ICT have symmetric or asymmetric effects on CO_2 emissions? Evidence from selected Asian economies. *Technology in Society*, 67, 101692.

Van Heddeghem, W., Lambert, S., Lannoo, B., Colle, D., Pickavet, M., & Demeester, P. (2014). Trends in worldwide ICT electricity consumption from 2007 to 2012. *Computer Communications*, 50, 64-76.

Wang, Q., Zhou, P., & Zhou, D. (2013). Efficiency decomposition in a joint production framework with undesirable outputs. *Energy Economics*,

36, 520-529.

Wang, R., & Li, F. (2016). Does corporate environmental responsibility matter to firm value? An empirical study on Chinese listed companies. *Sustainability*, 8(11), 1146.

World Bank & International Telecommunication Union (ITU). (2024). *Measuring the emissions and energy footprint of the ICT sector: Implications for climate action*. World Bank & ITU.

World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). (2000). *Eco-efficiency: Creating more value with less impact*. Geneva: WBCSD.

World Resources Institute (WRI). (2015). *GHG Protocol Scope 2 Guidance: An amendment to the GHG Protocol Corporate Standard*. Washington, DC: World Resources Institute.

Climate Group. (2023). *RE100 Annual Disclosure Report 2023*. London: Climate Group in partnership with CDP.

Zaim, O., & Taskin, F. (2000). A Kuznets curve in environmental efficiency: An application on OECD countries. *Environmental and Resource Economics*, 17(1), 21-36.

Zheng, C., & Sun, Z. (2025). Organisation capital: A key asset for mitigating firm-level climate change exposure. *Journal of Contemporary Accounting & Economics*, 21, 100477.

Zhou, P., Ang, B. W., & Poh, K. L. (2008). A survey of data envelopment analysis in energy and environmental studies. *European Journal of Operational Research*, 189(1), 1-18.

Zhou, P., Ang, B. W., & Zhou, D. Q. (2012). Measuring economy-wide energy efficiency performance: A parametric frontier approach. *Applied Energy*, 90(1), 196-200.

부 록

[부록 1] ICT 기업 DMU의 변수 및 DEA 효율성 점수

DMU	RE100	RE 비율 (%)	총에너지 (GWh)	간접 배출량Scope 1 ($mtCO_2$ e)	시장 기준 간접 배출량Scope 2 ($mtCO_2$ e)	매출액 ($M)	CCR	BCC
RE 비율 100% (n = 11)								
1	가입	100%	15.5	360	319	8,868	1.000	1.000
2	비가입	100%	68.7	3,802	0	16,285	1.000	1.000
3	가입	100%	24.4	487	0	4,359	1.000	1.000
4	가입	100%	4,386.9	55,200	3,300	391,035	.708	1.000
5	비가입	100%	80.8	439	0	2,427	.618	1.000
6	비가입	100%	58.6	1,606	0	5,960	.533	.580
7	가입	100%	60.5	555	372	5,497	.476	.678
8	가입	100%	59.7	842	0	3,233	.429	.569
9	가입	100%	18,643.3	47,468	1,358	164,501	.366	.961
10	가입	100%	32,727.8	73,100	3,059,100	350,018	.194	.675
11	가입	100%	30,207.0	143,510	259,090	245,122	.069	.239
RE 비율 0-99% (n = 16)								
12	비가입	76%	598.3	11,896	40,555	61,046	.208	.977
13	비가입	46%	195.2	8,639	59,536	19,736	.176	.556
14	비가입	74%	228.7	7,218	19,602	21,505	.164	.582
15	비가입	79%	582.2	23,500	9,300	30,524	.105	.400
16	비가입	68%	251.6	6,523	35,419	10,850	.075	.138
17	비가입	73%	660.7	50,775	67,681	27,200	.072	.294
18	가입	96%	1,573.0	32,652	28,418	53,803	.068	.319
19	비가입	59%	724.0	99,000	117,000	11,020	.027	.043
20	비가입	57%	1,566.6	274,114	259,664	9,100	.010	.011
21	비가입	50%	264.0	12,419	31,771	25,785	.170	.675
22	비가입	46%	164.6	2,273	25,254	6,100	.109	.158
23	비가입	68%	997.5	84,465	111,157	38,969	.068	.331
24	비가입	40%	67.8	2,197	21,926	2,207	.057	.228
25	비가입	44%	1,848.0	254,936	462,051	12,578	.012	.023
26	비가입	20%	987.3	288,193	195,632	4,402	.008	.016
27	비가입	25%	4,042.6	1,010,000	1,000,000	15,640	.007	.016

ABSTRACT

A Comparative Analysis of Eco-Efficiency among ICT Firms: Evidence from RE100 Membership and Renewable Energy Procurement Levels

Kim, Su-Hyeon

Major in Service Operations Management

Dept. of Business Administration

The Graduate School

Hansung University

This study examines whether eco-efficiency differs among ICT firms listed in the Nasdaq-100 according to their renewable energy procurement levels and RE100 membership. The ICT industry has grown rapidly with the expansion of artificial intelligence, cloud computing, data centers, telecommunications networks, and semiconductor manufacturing. This growth has also increased electricity use and greenhouse gas emissions, making Scope 2 emissions from purchased electricity an important issue for ICT firms. For this reason, evaluating ICT firms' sustainability requires attention to both economic performance and the efficiency with which firms manage energy use and carbon emissions.

For the empirical analysis, this study used 2024 environmental and financial data from 27 ICT firms in the Nasdaq-100. Total energy consumption, Scope 1 direct emissions, and market-based Scope 2 indirect emissions were used as input variables, and revenue was used as the output variable. Firm-level eco-efficiency was estimated using an input-oriented data envelopment analysis (DEA) model. The Mann-Whitney U test was applied to compare RE100 member and non-member firms and separately between firms with full (100%) renewable energy procurement and those with partial (0-99%) procurement.

Although RE100 member firms exhibited significantly higher eco-efficiency than non-member firms, the relationship was stronger for actual renewable energy procurement than for formal RE100 membership. Firms that achieved 100% renewable electricity procurement demonstrated substantially higher eco-efficiency than those with partial procurement, with a considerably larger effect size than that associated with RE100 membership. These findings indicate that eco-efficiency is more closely related to the actual implementation of renewable energy procurement than to formal participation in the RE100 initiative.

Taken together, these findings underscore the importance of distinguishing formal RE100 participation from actual renewable energy procurement at the firm level. By separating symbolic commitment from substantive implementation, this study extends the existing literature beyond national- and industry-level analyses and demonstrates that corporate renewable energy strategies are more closely associated with actual procurement performance than with formal RE100 membership.

Keywords: renewable energy, RE100, Data Envelopment Analysis, DEA,

market-based Scope 2 emissions, eco-efficiency, ICT firms, Nasdaq-100

HANSUNG UNIVERSITY