

# 국가 기후재정의 온실가스 감축 효율성 분석: 온실가스감축인지 예산서 기반 자료포락분석

임형우\* · 조하현\*\* · 박상언\*\*\*†

\*한국환경연구원 기후대기연구본부 부연구위원, \*\*연세대학교 산학특임교수, \*\*\*연세대학교 상경대학 통계학과 교수

## A study on the greenhouse gas reduction efficiency of national climate budgets: Data envelopment analysis of greenhouse gas reduction cognitive budget statements

Lim, Hyung-Woo\* · Jo, Ha-Hyun\*\* and Park, Sangun\*\*\*†

\*Research Fellow, Division for Climate and Energy, Korea Environment Institute, Sejong, Korea

\*\*Distinguished University Professor, Yonsei University, Seoul, Korea

\*\*\*Professor, Department of Statistics and Data Science, Yonsei University, Seoul, Korea

### ABSTRACT

This study examines the efficiency of South Korea's national climate budget in reducing greenhouse gases (GHG), focusing on the GHG Reduction Cognitive Budget Statements from 2023 and 2024. The increasing importance of climate finance highlights the need for effective fiscal strategies to achieve carbon neutrality. Using Data Envelopment Analysis (DEA) and non-parametric tests, this research evaluates the efficiency of various fiscal programs, addressing the gap between allocated budgets and the financial requirements outlined in the national Carbon Neutrality Master Plan. The findings show that programs centered on technological innovation and private-sector participation, such as industrial GHG reduction projects and loan-based initiatives, exhibit the highest efficiency. Conversely, nature-based solutions like forest restoration and indirect mitigation projects demonstrate lower efficiency. Efficiency differences are significant across project types and funding methods, with agriculture, industry, and international reduction projects ranking highest and carbon sink projects showing the lowest efficiency. Loan-based and grant-supported programs outperform direct government-led initiatives. Despite some high-efficiency programs, the cumulative mitigation impact of these projects by 2050 represents only 1.19% of the 2030 Nationally Determined Contribution (NDC) target, emphasizing the need for improved fiscal prioritization. This study underscores the importance of integrating GHG reduction efficiency metrics into climate budget planning to maximize the impact of limited resources and advance South Korea's carbon neutrality goals.

*Key words : Greenhouse Gas Reduction Efficiency, Climate Budget, Data Envelopment Analysis (DEA), Non-Parametric Tests*

### 1. 서론

기후변화 대응을 위해 기후금융의 중요성 및 역할이 증대되고 있으며, 특히 공적기금을 통한 탄소중립 이행은 필수 요소로 주목받고 있다. IPCC (2018)에서는 정부의 재

정투자가 기술전환, 감축정책 이행, 민간 투자 촉진, 기후 리스크 관리 등 다양한 측면에서 1.5도 목표 달성에 기여할 수 있으며, 기후변화 방지를 위해 필수적인 전제조건임을 명시하고 있다. 기후금융은 에너지, 교통, 산업 등 대규모 전환이 필요한 분야에 투자되어 기술전환을 지원할 수

†Corresponding author : sangun@yonsei.ac.kr (50 Yonsei-ro Seodaemun-gu, Seoul, 03722, Korea. Tel. +82-2-2123-2544)

ORCID 임형우 0000-0002-7096-7845  
조하현 0000-0001-5346-6857

박상언 0000-0003-1948-9128

있다. 이러한 분야는 전환 초기 단계에 상당한 자본투자가 필요하며, 이는 정부의 재정투자로 보완이 가능하다.

우리나라의 경우 2022년 「탄소중립·녹색성장 기본법 (이하 기본법)」을 수립함에 따라 탄소중립 목표를 국가 목표로 명문화하였으며, 기본법 제10조에 의거 탄소중립 녹색성장 기본계획(이하 기본계획)을 수립하여 국가 차원의 탄소중립 비전과 목표 이행방안을 제시하도록 하였다. 기본계획에서는 부문별 감축정책뿐 아니라 이를 지원하기 위한 이행기반 강화 정책을 적용, 녹색성장, 정의로운 전환, 지역주도, 인력양성, 국제협력 등의 정책으로 제시하여 앞서 IPCC (2018)에서 제시한 정부 기후투자의 방향성을 전반적으로 반영할 수 있는 계획을 수립하였다.

특히 기본법 제10조2항10호를 통해 기본계획 내 탄소중립 및 녹색성장 추진을 위한 재원의 규모와 조달방안을 제시하도록 하여 규정하였다. 2023년 발표된 기본계획에서는 탄소중립 녹색성장 지원을 위해 2027년까지 89.9조원이 필요하다고 발표하였다(Joint Government Ministries, 2023). 또한, 2027년까지 연평균 11.5%의 재정증가가 점진적으로 필요함을 제시하였다.

그러나 실제 정부의 재정지출은 이에 미치지 못하는 모습을 보이고 있다. Fig. 1에서는 기본계획에서 밝히고 있는 연간 필요 예산액과 2024년의 기후재정을 비교했다. 기본계획 상 탄소중립을 위한 목표예산은 2024년 기준 약 17조 2,000억원이나, 실제 편성된 탄소예산은 13조 8,000억원으로 목표의 80% 수준에 불과하다. 이러한 현상은 향후 재정을 집행하고 기후 투자를 이행하는 데 있어 충분한 재정투자가 이루어지지 못하고 있음을 시사한다.

제한된 정부 재정하에서 온실가스 감축에 최대한 기여하기 위해서는 현재 사업들이 온실가스 감축에 얼마만큼 기여하는지를 확인하고, 특히 예산 대비 감축효율성이 높은 사업들을 중심으로 사업 포트폴리오를 재검토할 필요가 있다. 본 연구에서는 이러한 필요성에 기반하여 국내 온실가스 감축 예산의 효율성을 평가하고, 이를 통한 재정 저탄소 투자의 우선순위 및 정책 방향성을 제안하고자 하였다. 우선순위에 대한 평가는 일원화된 방법론이 존재하지 않으나, 본 연구에서는 자료포락분석(Data Envelopment Analysis, DEA) 방법론을 통한 예산 대비 감축효율성을 우선순위의 주 평가기준으로 활용하고자 한다. 이를 위해 본 연구에서는 2023년 및 2024년 국내 온실가스감축인지 예산서(GHG Reduction Cognitive Budget Statements) 자료를 바탕으로 온실가스 감축 재정사업에 대한 자료를 수집하여 2024년 사업명 기준으로 재정리하였으며, 이 중 정

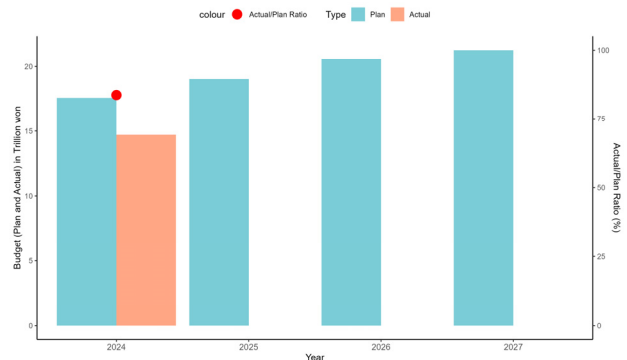


Fig. 1. Budget plans and allocated amounts for the 'carbon neutrality master plan' (unit: trillion KRW, %)

량화가 가능한 207개 내역사업에 대해 감축효율성을 추정하였다. 추정된 감축효율성을 기준으로 비모수적 검정을 적용하여 사업 분야, 사업 방식 및 연도 등에 따른 효율성 변화를 검정하였다.

자료포락분석을 통해 정책의 효율성을 비교분석한 선행연구는 다수 존재한다. Baciú and Botezat (2014)는 EU 회원국의 공공지출 효율성을 자료포락분석 방법론으로 비교분석하여 EU 가입 과정에서 공공 정책의 변화가 공공부문 효율성에 미친 영향을 분석하였다. Khan and Murova (2015)는 미국 50개주를 대상으로 자료포락분석 방식을 통해 공공지출의 생산효율성을 평가하였다. 교육, 교통, 보건, 공공 안전, 복지와 같은 주요 공공 지출 항목을 입력 변수로 사용하여 각 주의 총 주 생산(GSP)을 출력 변수로 설정하였다. 분석 결과, 연구기간 동안 전반적인 효율성 감소가 발견되었다. Park and Shin (2018) 연구의 경우 한국의 생명공학 분야 R&D 프로젝트의 기술적 효율성 분석을 위해 메타프론티어 자료포락분석 방법론을 이용하였다. 이를 통해 그룹별 프론티어의 차이를 도출하고, 기술간 비교 분석을 수행하였다. 분석 결과 R&D 투자규모 증가에도 불구하고 효율성 개선은 크지 않았다. 대학과 정부 출연 연구기관이 상대적으로 높은 효율성을 보인 반면, 기업의 효율성은 상대적으로 낮게 나타났다. Wang (2018) 연구는 중국 중부 6개 성을 대상으로 공공 환경지출의 효율성을 비교하였다. 또한, 그 효율성 결과를 토대로 Tobit 모형을 통해 효율성 결정요인을 분석하였다. 분석 결과, 1인당 GDP는 환경 지출 효율성에 긍정적인 영향을 미친 반면, 도시화와 산업화 수준은 효율성을 낮추는 요인으로 작동하였다.

국내에서도 정책 효과분석을 위해 자료포락분석이 활용

되고 있다. NABO (2007)는 부처의 정책성과 평가를 측정하는 방법론 12가지를 제시하였다. 정책 평가는 정책 대상과 비대상의 영향을 비교분석하는 실험방법론이 주로 활용되나, 투입 및 산출변수가 명확한 경우 자료포락분석 방법론을 이용하는 것이 가능함을 제시하였다. 사업간 효율성 비교에 자료포락분석 방법론을 사용한 사례는 국내에도 다수 존재한다. Kim and Lee (2019)는 강원도 지역의 행사 및 축제 사업의 경제적 효율성을 자료포락분석 기법을 통해 평가하고, 효율성에 영향을 미치는 요인을 분석하였다. Hyun and Shin (2023)은 경기도 기초자치단체의 지방재정 운용 효율성을 실증적으로 분석하고, 남부와 북부 지역 간의 차이를 비교하며, 재정운용 효율성에 영향을 미치는 요인을 파악하였다. Yu and Jeong (2024) 연구는 치안분야 국가 R&D 과제의 효율성을 자료포락분석 모형을 통해 분석하고, 그룹 간 효율성을 비교하여 개선점을 탐색하였다. 일부 연구에서는 지자체간 비교를 위해 자료포락분석 방법론을 적용하였다. Ha (2009) 연구에서는 지방자치단체의 예산투입액, 재정자립도를 투입지표로 활용하고 재정 여건 안정성을 산출지표로 활용하여 지자체간 상대적 재정효율성을 자료포락분석 기법을 사용하여 측정하였다.

본 연구는 앞선 선행연구들과 달리 온실가스 감축 예산에 초점을 맞추어 재정 사업의 감축효율성에 초점을 두었다는 점이 가장 큰 차별점이다. 전세계적으로 온실가스감

축인지예산제를 시행하고 있는 국가는 프랑스, 스페인, 노르웨이 등 소수에 불과하고, 재정사업의 온실가스 감축효과를 자료포락분석으로 분석한 연구는 본 연구가 최초로 판단된다.

향후 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 온실가스 감축인지 예산서에 대한 설명과 본 분석에서 사용한 데이터를 소개한다. 제 3장에서는 본 연구에서 활용한 분석방법론 및 이를 적용하여 재정사업의 효율성을 분석한 선행연구를 검토하여, 본 연구의 모형을 제시한다. 제 4장에서는 주요 실증분석 결과를 제시한다. 마지막으로 제5장에서는 주요 내용을 정리하여 정책적 시사점을 도출하였다.

## 2. 연구 자료 및 방법론

### 2.1. 온실가스감축인지 예산서

국내 탄소중립 기본계획 연계 예산은 2024년 기준 약 13.8조원 규모로 추산된다. 이는 탄소중립 녹색성장 기본계획 이행을 위해 필요한 예산으로 일종의 기후재정으로 분류된다. 하지만 이들 사업에 대해 별도의 프로그램이 존재하거나, 특정한 회계로 묶여있지 않기 때문에 정확한 사업내역을 식별하기 어렵다. Fig. 2는 국내 기후재정의 구조를 도식화한 그림이다. 기후재정은 일반회계, 특별회

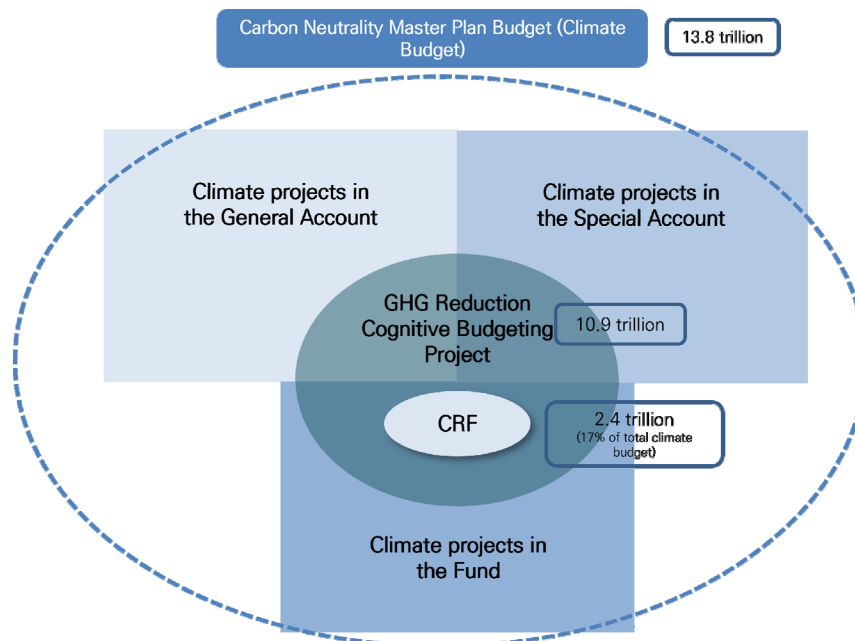


Fig. 2. Structure of the domestic climate budget (as of 2024)

Table 1. The number and budget amount of GHG reduction cognitive budget statements (2023 and 2024)

|                  |                                                                | 2023 | 2024  |
|------------------|----------------------------------------------------------------|------|-------|
| Total            | Number of total projects                                       | 451  | 481   |
|                  | Total budget for emission reduction projects (trillion KRW)    | 9.90 | 10.08 |
| In this analysis | Number of projects analyzed                                    | 102  | 105   |
|                  | Budget for analyzed emission reduction projects (trillion KRW) | 5.99 | 5.89  |

계, 기금 전체에 걸쳐 흩어져 있으며, 각 회계 중 기후와 연관된 사업을 묶어 국내에서는 기후재정이라는 표현으로 통칭하고 있다.

이 중 기본계획과 연관성이 크고, 온실가스 감축을 목표로 하는 기후재정의 경우 온실가스감축인지 예산서 작성사업을 기준으로 별도 분류가 가능하다. 우리나라의 경우 기본법 제24조에 의거하여 온실가스감축인지 예산제 시행이 의무화되었으며, 2021년 국가재정법 및 동법 시행령 개정을 통해 2023년 회계연도부터 온실가스감축인지 예산제가 시행되고 있다. 온실가스감축인지 예산서는 국가재정의 전체 사업을 감축 사업과 감축 이외 사업으로 크게 구분하여, 감축사업을 대상으로 예산서를 작성한다. 감축사업의 경우 온실가스 감축이 목적이거나, 부수적으로 온실가스 감축 효과가 예상되는 사업을 기준으로 판별한다. 감축사업에 대해서는 정량/정성/R&D 사업유형으로 구분하며, 특히 정량 사업에 대해서는 향후 10년간의 감축 예상량, 2030년까지의 누적 감축량 및 2040년, 2050년까지의 누적 감축량을 산정하여 예산서 내에 작성한다. 2024년 기준 예산서 작성사업은 약 10.9조원 수준으로, 이들 사업의 경우 예산 집행에 따라 국가 온실가스감축에 미치는 효과를 평가하고, 결과를 정부의 예산편성에 반영하도록 하고 있다.

특히 기후대응기금의 경우 “기후위기에 효과적으로 대응하고 탄소중립 사회로의 이행 및 녹색성장 촉진을 위한 재원”을 목적으로 설립된 별도의 기금으로, 2024년 기준 약 2.4조원이 기후대응기금으로 활용되고 있다.

본 연구에서 온실가스 감축 효율성 분석을 위해서는 사업내용 및 예산액, 온실가스 감축효과 등에 대한 식별이 필요하기 때문에 전체 기후예산이 아닌 온실가스감축인지

예산서 작성사업을 대상으로 한정하여 분석을 시행하였다. 이를 위해 2023년, 2024년 재정사업에 대한 예산서 및 기금운용계획안과 2023년, 2024년 온실가스감축인지 예산서를 통합<sup>1)</sup>하여 기후예산 분석을 위한 DB를 구축하였다.

## 2.2. 데이터

본 연구에서는 감축인지예산서가 작성된 2023년, 2024년 예산서 자료를 활용하여 분석을 수행하였다. Table 1과 같이 우리나라 24개 정부부처에서 2년 동안 작성된 감축인지 예산서는 총 932건이며, 19.98조원 수준이다. 다만 본 연구에서는 2030년, 2040년 및 2050년 정량화 가능한 온실가스감축량을 제시한 사업을 분석대상으로 하였다. 이에 따라 본 연구의 분석대상은 207건 11.88조원으로, 예산액 기준 전체 인지예산서의 약 60% 수준이다.

위에서 선정된 내역사업의 경우 다양한 회계에서 운영되고 있다. 대부분의 사업은 기후대응기금 내 사업이며 (91개), 이외에도 에너지 및 자원사업 특별회계(25개), 일반회계(23개), 농어촌구조개선 특별회계(16개), 환경개선 특별회계(14개) 등의 사업도 포함되었다.

본 연구에서는 투입요소로 내역사업별 예산액과, 연도별 효과를 검증하기 위해 연도 더미변수를 활용하였다. 이에 대응되는 산출변수로는 사업 시행에 따른 30년, 40년, 50년의 연평균 감축량을 활용하였다. 이때 연평균 감축량은 감축인지예산서 내 정량사업의 누적 온실가스감축량 자료를 연평균화하여 활용하였다.<sup>2)</sup> Fig. 3은 투입 예산과 연평균 온실가스 감축량 사이의 관계를 도식화한 그림이다. 여기서 X축은 투입 예산, Y축은 연평균 온실가스 감축량을 의미한다. 대체적으로 예산과 연평균 감축량 사이의 양의 관계가 나타났다. 예산과 연평균 감축량의 상

1) 2023년 예산서와 2024년 예산서 상에는 감축사업 유형 상의 차이 및 온실가스 감축량 산정시 문제가 존재하는 사업을 발견하였다. 본 연구에서는 통일성을 위해 2024년 기준 감축사업 유형으로 2023년 사업을 재구성하였으며, 감축량 산정이 잘못된 사업에 대해서는 누적 감축효과가 일관성을 가질 수 있도록 조정하였다.

2) 누적 감축량이 누락되거나, 잘못 기입된 내역사업의 경우 조정하여 DB를 구성하였다.

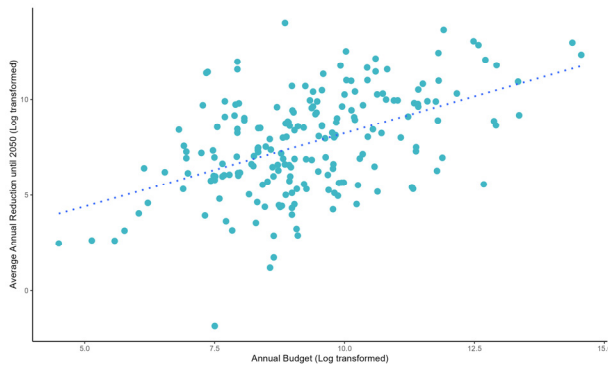


Fig. 3. Relationship between budget allocation and average annual reduction

관계수는 0.29이며, 통계적으로 유의하였다.

### 2.3. 분석 모형 및 검정 방법

일반적으로 자료포락분석에서의 비효율성은 최적 투입물-산출물 관계에서 벗어난 정도로 측정한다. 모형은 기본적으로, 동일한 투입(예산)을 활용하여 더 많은 산출(온실가스 감축량)이 발생할 경우 효율성이 높다고 가정하였다. 이를 수식으로 표현하면 다음 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} \max \phi + \epsilon & \left( \sum_{i=1}^m s_i^- + \sum_{r=1}^s s_r^+ \right) \\ \text{subject to} \quad & \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + s_i^- = x_{io}, i = 1, \dots, m \\ & \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} - \phi y_{ro} + s_r^+ = 0, r = 1, \dots, s \\ & \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \\ & \lambda_j \geq 0, s_i^- \geq 0, s_r^+ \geq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $\phi$ 는 각 사업이 주어진 투입을 바탕으로 산출을 얼마만큼 증가시킬 수 있는지를 나타내며,  $\phi$ 가 1일 때 효율적인 값으로 산정된다. 목적함수의 오른쪽 파트는 슬랙(slack) 변수( $s_i^-$ 와  $s_r^+$ )<sup>3)</sup> 및 이를 조정하기 위한  $\epsilon$ 을 의미하며, 산출의 부족분을 추산하여 각 사업별 비효율성 정도를 식별하는 용도로 활용된다. 제약식은 각각 투입제약(대

상 사업의 투입( $x_{io}$ )에 대한 제약)과 산출제약(대상 사업의 산출( $y_{ro}$ )에 대한 제약) 및 가변 수익제약을 의미한다.<sup>4)</sup>

본 연구에서 투입변수로는 내역사업별 예산액과 연도별 가변수를 이용하였으며, 산출변수로는 2030년, 2040년 및 2050년까지의 연평균 감축량을 사용하였다. 산출변수를 30년, 40년, 50년을 활용한 이유는 해당 사업의 단기적 감축효과(2030년 감축량)뿐 아니라 중장기적 감축효과(2040년, 2050년 감축량)가 높을 경우 기금 사업의 의미에 부합하는 효율적인 사업이라고 판단했기 때문이다. 즉, 본 분석에서는 단기뿐 아니라 중장기 감축효과가 함께 높을수록 효율성이 높다고 판단하였다.

이후 감축 효율성을 감축사업 유형, 사업지원형태 등에 따라 세부적으로 구분하여 분석을 수행하였다. 이때 본 연구의 표본 수가 적고, 자료포락분석에 따라 모집단에 대한 분포 가정을 하지 않았기에, 본 연구에서는 비모수적 검정(non-parametric test)방법인 Kruskal-Wallis H 검정(KW H검정)과 Mann-Whitney U 검정(MW U검정)을 수행하였다(Kruskal and Wallis, 1952; Mann and Whitney, 1947).

KW H검정의 경우 그룹간 효율성 차이를 검정하는 방법론이다. 전체 사업을 대상으로 효율성이 낮은 순서부터 순위를 부여하여 그룹 내 효율성의 중위값을 비교하는 방식을 취한다. 만약 표본이 동일한 모집단에서 추출되었다면 중위값 순위가 동일해야 하는 전제를 기반으로 검정이 이루어진다. 이를 통해 그룹 간 중앙값 순위가 유의미하게 다르게 나타나면, 그룹 간 차이가 존재함을 판별한다. 검정을 위한 H통계량은 식 (2)와 같다.

$$H = (N-1) \frac{\sum_{i=1}^g n_i (\bar{r}_i - \bar{r})^2}{\sum_{i=1}^g \sum_{j=1}^{n_i} (r_{ij} - \bar{r})^2} \sim \chi_{g-1}^2 \quad (i = 1, \dots, g) \quad (2)$$

(여기서, N: 총 관측치, g: 그룹 수,  $n_i$ : i 그룹 내 관측치 수,  $r_{ij}$ : i그룹 내 j관측치의 랭크,  $\bar{r}_i$ : i그룹 내 모든 관측치의 평균 랭크,  $\bar{r}$ :  $r_{ij}$ 의 평균)

3) 투입 슬랙( $s_i^-$ )과 산출 슬랙( $s_r^+$ )은 각각 제약조건 하에서 투입 및 산출의 여유분(잉여 또는 부족)을 나타낸다. 투입 슬랙은 특정 투입이 효율적 경계에 도달하기 위해 초과된 투입량을 의미하며, 산출 슬랙은 반대로 특정 산출이 효율적 경계에 도달하기 위해 부족한 산출량을 의미한다.

4) 세부적인 이론적 배경은 Charnes et al. (1978) 및 Banker et al. (1984)를 참고할 수 있다.

MW U 검정은 중앙값의 차이를 비교하여 검정한다는 측면에서 개념적인 방식은 동일하나, 두 그룹간의 차이를 검정한다는 점에서 차이가 존재한다. 두 그룹 간의 순위 합을 기반으로 중앙값 차이를 검정하는 방식을 통해 두 그룹의 모집단 분포가 상이한지를 검정한다. 그룹A, B에 대한 U통계량은 식 (3)과 같다.

$$U = \min(U_A, U_B) \sim Normal \quad (3)$$

$$U_A = \sum_{j=1}^{n_A} r_{Aj} - \frac{n_A(n_A + 1)}{2}$$

$$U_B = \sum_{j=1}^{n_B} r_{Bj} - \frac{n_B(n_B + 1)}{2}$$

(여기서,  $n_i$ : i 그룹 내 관측치 수,  $r_{ij}$ : i그룹 내 j관측치의 랭크)

### 3. 분석 결과

#### 3.1. 온실가스 감축 효율성 수준

위 모형을 통해 재정사업의 온실가스 감축효율성을 분석한 결과, 0.12에서 1까지의 감축 효율성 관찰되었으며, 중위값은 0.629, 평균은 0.635 수준으로 나타났다. 상대적 감축효율성이 가장 높게 나타났던 사업은 온실가스 감축 기반 구축 사업(산업분야 온실가스 감축 기반 구축), 철강분야 CO2 감축기술, 저탄소 농업 기술보급, 에너지절약시설 설치 및 전기자동차 보급 등의 사업으로 나타났다. 이들 사업은 공통적으로 온실가스 감축 기술에 대한 개발·보급에 중점을 두었으며, 다양한 분야에 파급효과가 발생할 수 있는 중장기적 감축사업 중심으로 나타났다. 이에 반해 감축효율성이 낮게 나타난 사업은 습지복원, 지하수 관리, 숲 조성, 공공시설 옥상녹화 등 간접적으로 온실가스 감축에 기여하거나, 직접적인 흡수원 확충과 관련된 사업이었다.

전체적으로 예산과 감축효율성은 0.31의 양의 상관관계를 보였으며, 통계적으로 유의하였다(Fig. 4). 다만, 연도별로 감축효율성이 개선되는 경향성은 발견되지 않았으며, 연도별 평균 감축효율성 역시 2023년 0.63, 2024년 0.64로 유사한 수준으로 나타났다.



Fig. 4. Comparison of budget and reduction efficiency

추가적으로 프로그램 단위로 감축효율성을 비교해보면 Fig. 5와 같다.) 가장 효율성이 높게 나타난 프로그램은 해운산업 선진화 관련 사업이었다. 이와 연관해 총 3개의 내역사업이 분석 표본 내에 포함되었는데, 친환경선박 신조를 위한 지원금 및 도로 운송화물을 연안 해운으로 전환하는 사업 등이 포함되었다. 이들 사업의 경우 저탄소 설비로의 전환을 지원하여 중장기적인 감축효율성이 높은 것으로 판단된다. 다음으로 효율성이 높은 프로그램은 탄소중립기반구축 프로그램이었다. 해당 프로그램 내에는 각종 저탄소 공정기술 개발, 온실가스 인프라 구축 및 온실가스 감축제도 운영 등의 사업이 포함되어 산업부문의 저탄소 설비전환 및 온실가스 감축을 지원하는 사업으로 구성되었다. 반면 효율성이 낮은 프로그램의 경우, 홍수관리, 관광산업 활성화 정책, 산림자원 확대 및 보전 등의 사업이 주를 이루었다.

프로그램 단위 분석 결과, 산업의 저탄소 전환, 인프라 관련 사업들의 감축효율성이 높게 나타났다. 이에 반해 간접적으로 감축효과가 존재하는 사업들(홍수관리, 관광산업 활성화) 및 흡수원 관련 정책들의 감축 효율성이 다소 낮게 나타났다. 이는 저탄소 인프라 구축 및 에너지전환 등 현재 온실가스 다배출 부문에 대한 지원정책이 상대적으로 예산 대비 중장기 감축효율성이 높을 수 있음을 시사한다.

감축효율성의 의미를 파악하기 위해 전통적인 비용효율성 지표인 예산액 대비 감축량과 본 연구의 감축효율성 간의 관계를 추가 비교하였다(Fig. 6). 예산액 대비 감축량 지표는 사업의 예산액 규모 차이가 크고, 감축량 역시 사업별로 차이가 크기 때문에 일관된 방식으로 평가하기 어

5) 프로그램은 동일한 정책목표를 달성하기 위해 정책적 독립성을 지닌 단위사업의 묶음을 의미한다. 사업 내용에 따른 차이를 전반적으로 비교하고자 프로그램 단위로 묶어서 분석을 수행하였다.

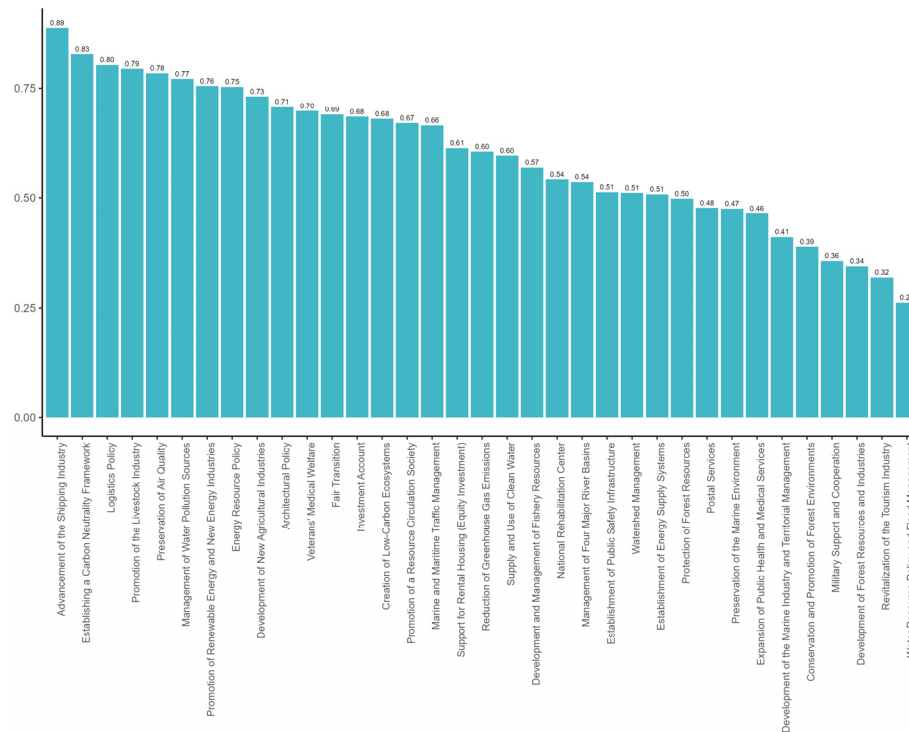
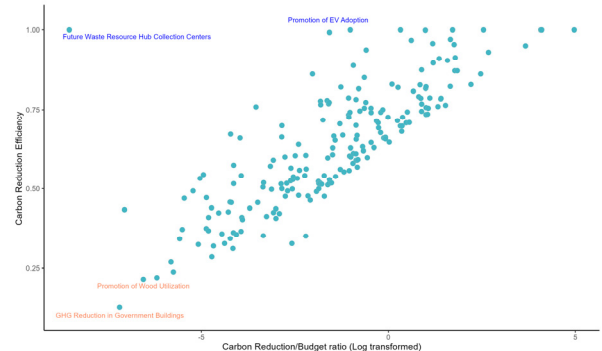


Fig. 5. Carbon reduction efficiency levels by program

렵다는 한계가 존재한다. 특히 예산액 대비 감축량 지표는 30년, 40년, 50년 각각의 감축효율성을 함께 분석하기 어렵기 때문에 단기 및 중장기적 감축효율성을 일관적으로 평가하기 어렵다.

본 연구의 감축효율성 지표와 비교할 때에도 전체적으로 양의 상관관계는 존재하나(상관계수 0.34), 일부 사업들의 경우 감축효율성 지표 상에서 효율성이 더 높게 나타났다. 예를 들어, 미래폐자원 거점수거센터 구축의 경우 단기적으로 예산투입 대비 감축효과는 크지 않으나, 감축효율성 측면에서는 매우 우수한 것으로 나타났다. 이는 장기적으로 수거센터를 통해 자원순환성을 높이고, 순환경제로의 이행을 지원하는 등 파급효과가 크기 때문으로 판단된다. 전기자동차 보급 역시 예산 대비 감축량은 사업 중 중간 수준이었으나, 감축효율성 측면에서는 가장 우수하게 나타났다. 이러한 차이는 자료포락분석 방식을 통해 도출한 감축효율성이 일반적인 비용효율성 지표와는 다른 정보를 제공하고 있음을 의미한다.

또한, 자료포락분석을 통해 도출된 슬랙을 통해 효율적인 상태와의 격차를 분석할 수 있다. Fig. 6의 ‘정부청사 온실가스저감사업’과 ‘목재이용 활성화사업’은 분석표본 중 감축효율성이 가장 낮게 나타난 사업들로, 슬랙을 기



Note: The carbon reduction amount relative to the budget (x-axis) was calculated using the annual average budget input and the annual average reduction amount until 2030. To account for differences in scale, a logarithmic transformation was applied.

Fig. 6. Comparison of traditional budget efficiency and carbon reduction efficiency

준으로 볼 때 각각 32%, 21%의 추가적인 온실가스 감축이 이루어져야 효율적인 프론티어에 도달할 수 있음을 확인할 수 있다.

### 3.2. 그룹별 감축효율성 수준 비교

#### 3.2.1. 감축사업유형별 차이

본 절에서는 감축사업 유형에 따른 효율성 차이를 비교하였다. 온실가스감축인지 예산제 내 감축사업 유형은 2030 NDC 및 탄소중립·녹색성장 기본계획에 의거하여 전환, 산업, 건물 등 10개 유형으로 구분된다.<sup>6)</sup> 평균적인 감축효율성은 농축수산업분야가 0.79로 가장 높았으며, 산업 0.76, 국제감축 0.76 순으로 높게 나타났다. 가장 감축효율성이 낮았던 분야는 흡수원으로 0.47 수준으로 나타났다(Fig. 7).

실제 감축사업 유형별 차이가 존재하는지를 검정하기 위해 제2장 3절에서 소개한 KW 검정 및 MW 검정을 수행하였다. KW 검정 결과 1% 통계적 유의수준 하에서 그룹 간 유의미한 차이가 발생하였다. 추가적으로 MW 검정을 통해 그룹간 모집단 차이를 분석한 결과 Fig. 7과 같은 세 그룹으로의 구분이 가능했다.<sup>7)</sup> 농축수산, 산업, 국제감축 분야는 감축효율성이 0.76을 넘는 상위그룹에 속하였으며, 수소, 수송, 폐기물, 건물 및 전환 부문은 0.61~0.66 수준의 감축효율성을 보이는 중위권 그룹에 속하였다. 다만 흡수원의 경우 감축효율성이 0.47 수준으로 타 분야에 비해 유의적으로 낮은 감축효율성을 보였다.

#### 3.2.2. 지원 방식별 차이

본 절에서는 지원 방식에 따른 차이도 검증하였다. 용자 사업의 감축효율성이 0.854 수준으로 가장 높았으며, 출연(0.79), 보조(0.70), 출자(0.58), 복합(0.57), 직접(0.53) 순으로 나타났다(Fig. 8).

KW 검정 결과 6개 그룹간 모집단 차이는 1% 유의수준에서 존재하였으며, MW 검정을 통해 그룹간 비교 결과 Fig. 8과 같이 4개 그룹으로 구분이 가능하였다.<sup>8)</sup> 가장 감축효율성이 높았던 용자 및 출연 사업의 경우 민간 및 자율성 중심의 사업이라는 공통점이 존재하였다.<sup>9)</sup> 이와 유사하게 민간에 지급하는 보조금 사업 역시 효율성이 높았다. 반면 정부의 개입이 상대적으로 많은 출자, 복합 및 직접 사업의 경우에는 상대적인 감축 효율성이 낮게 나타났다.

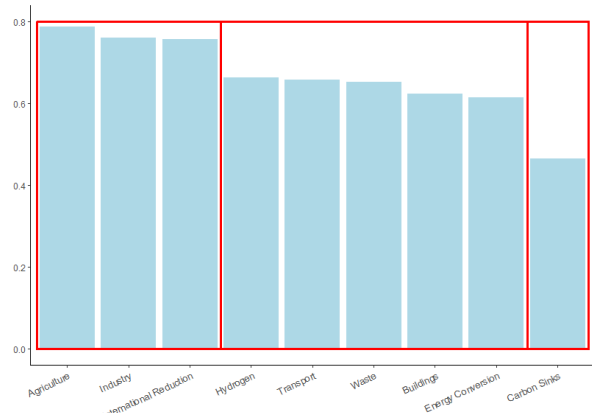


Fig. 7. Comparison of reduction efficiency by type of mitigation project

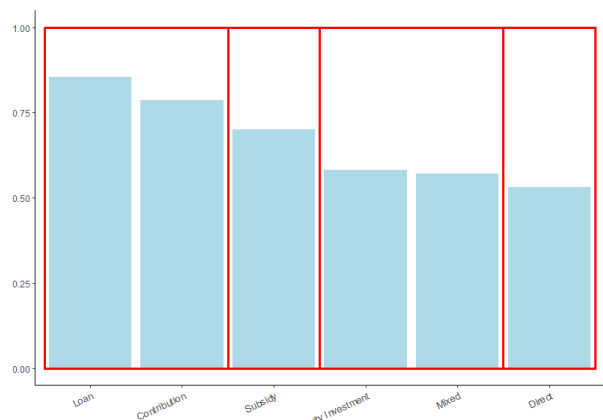


Fig. 8. Comparison of reduction efficiency by financial method

이러한 지원 방식별 차이는 사업 내용 차이를 고려하더라도 전반적으로 유지되는 모습이 나타났다. 본 연구에서는 감축부문별 지원방식의 영향을 살펴보기 위해 Table 2를 추가적으로 구성하여, 동일한 감축부문 내에서 지원방식에 따른 효율성 차이를 분석하였다.

분석 결과, 출연 및 출자 방식의 사업이 존재하는 산업, 전환 부문에서는 해당 방식의 효율성이 가장 높게 나타났다. 이외 다른 부문에서도 보조 등 민간부문 중심의 지원방식의 효율성이 높았다. 공통적으로 확인할 수 있는 부분은 직접 지원방식의 효율성이 대부분의 부문에서 가장

6) 분석 대상인 207개 내역사업 중 CCUS 분야 사업이 없었으므로, 본 연구에서는 이를 제외한 9개 유형을 대상으로 분석하였다.

7) 세부적인 검정 결과는 부록에 수록하였다.

8) 세부적인 검정 결과는 부록에 수록하였다.

9) 용자 사업의 경우 민간 사업 중 수익성이 크거나 장려 및 진흥이 필요한 사업에 대해 자금을 융통해주는 사업이며, 출연은 연구기관, 공단 등 출연 대상 주체의 목적 달성을 위해 포괄적으로 지원하는 예산사업을 의미한다.

Table 2. Comparison of reduction efficiency by type and financial method

|                         | Loan | Contribution | Subsidy | Mixed | Direct | Equity Investment |
|-------------------------|------|--------------|---------|-------|--------|-------------------|
| Industry                | 0.81 | 0.81         | 0.76    | 0.71  | 0.73   |                   |
| Energy Conversion       | 0.91 | 0.80         | 0.60    | 0.59  | 0.40   |                   |
| Buildings               |      | 0.46         | 0.63    | 0.71  | 0.53   | 0.58              |
| Agriculture             |      |              | 0.79    |       |        |                   |
| Carbon Sinks            |      |              | 0.55    | 0.43  | 0.53   |                   |
| Waste                   |      |              | 0.73    | 0.73  | 0.38   |                   |
| Transport               |      |              | 0.78    | 0.65  | 0.55   |                   |
| Hydrogen                |      |              | 0.69    | 0.58  |        |                   |
| International Reduction |      |              |         |       | 0.76   |                   |

낮게 나타났다는 점이다. 복합 지원 방식 역시 직접 지원을 중심으로 이루어진다는 점을 고려할 때, 감축부문 및 사업 내용과 무관하게 민간분야를 포함하는 방식의 지원 방식이 상대적으로 감축효율성이 높게 나타남을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론 및 정책 시사점

본 연구에서는 기후재정(온실가스 감축인지예산서 작성 예산) 중 약 60%에 해당하는 정량화 사업을 대상으로 DB화를 진행하여 예상 감축량 산정 및 감축효율성 분석을 실시하였다. 분석대상을 통해 산정한 2050년까지의 누적 감축효과는 약 7,300만톤 수준으로, 연평균화시 연간 약 3백만톤 수준으로 나타났다. 이는 2030년 NDC 감축목표의 1.19%에 불과한 수준이며, 현 기후예산에 대한 우선순위 부과 및 감축 효율성 개선이 필요함을 시사한다.

감축효율성 분석 결과, 감축사업 유형별, 사업 지원 방식별 유의미한 차이를 발견할 수 있었다. 공통적으로 타 산업으로의 파급효과가 높은 기술일수록, 민간의 참여도가 높을수록 감축 효율성이 높았다. 이는 산업부문의 감축영향을 강조한 선행연구 결과와 부합된다. de Pee et al. (2018)은 철강, 시멘트, 화학 산업 등의 기술 발전이 이들 산업에서 발생하는 직접적인 배출뿐만 아니라, 건설, 교통, 에너지 생산 부문에까지 긍정적인 영향을 미쳐 온실가스 배출 감축에 기여할 수 있다고 분석했다. Allwood et al. (2010)은 철강, 시멘트, 알루미늄, 종이와 같은 에너지 집약적 산업에서의 기술 혁신이 전 세계 산업에서 발생하는 온실가스 배출을 50%까지 줄일 수 있는 가능성을 제

시하였으며, 이러한 기술 혁신은 다른 부문에까지 파급효과를 미쳐, 건설 및 에너지 부문의 효율성 개선을 촉진할 수 있다고 분석하였다. 반대 측면에서 산림 복원과 같은 직접적인 흡수원 조성은 한계를 가질 수 있다. Bastin et al. (2019)는 전세계적 산림 복원 잠재량을 분석한 결과, 전 세계적으로 산림 복원 잠재량이 크다고 분석했지만, 이러한 잠재력이 현실적으로 실행되기 위해서는 상당한 자원과 시간이 필요하며, 복원된 산림이 장기적으로 온실가스를 안정적으로 흡수할 수 있는지에 대한 불확실성도 존재한다고 밝혔다.

민간 참여도 역시 사업 성과 측면에서 주요한 역할을 담당한다. Stiglitz and Weiss (1981) 연구는 대출시장 분석을 통해 대출 시장 내 정보의 비대칭성에도 불구하고, 자원의 효율적 배분에 주요한 역할을 하며, 정부의 직접 지원보다 금융시장을 활용한 접근이 자금 배분의 효율성을 높일 수 있음을 지적한 바 있다. OECD (2017)에서도 민간 부문의 자본을 활용해 환경 프로젝트를 추진하는 것이 정부가 직접 재정을 투입하는 방식보다 더 효율적일 수 있음을 강조했다. Taghizadeh-Hesary and Yoshino (2019) 연구는 아시아 지역 내 에너지 효율 개선 프로젝트를 분석한 결과, 용자 형태로 대출을 받은 기업들이 에너지 효율을 개선하는 과정에서 책임감을 가지고 자금을 더 효율적으로 운영함을 언급하였다.

탄소중립에 이르는 온실가스 감축을 위해서는 상당한 수준의 저탄소 투자가 필요하다. 정부의 기후재정은 신규 저탄소 투자를 유도하고, 확대하는 마중물로서 중요한 역할을 담당한다. 본 연구의 감축효율성 분석 결과, 인프라 및 저탄소 산업에 대한 지원과 민간 참여도를 높이는 방

식의 재정사업이 상대적으로 효율성이 높음을 확인할 수 있었다. 제한된 재정을 효과적으로 활용하기 위해 이러한 사업에 대한 사업 비중을 높이고 중점적인 지원이 고려되어야 한다. 특히 현재 기후사업 선정 및 예산 책정 과정에서 감축효율성이 고려되지 않고 있기 때문에, 환류 측면에서 온실가스 감축효율성에 대한 추가적인 고려가 필요하다. 더 나아가 직접 사업 중심의 집행방식에서 탈피하여 민간 참여도를 높이고 민간 투자를 유도하는 새로운 방식의 사업 지원체계가 마련될 경우, 보다 효과적으로 기후재정을 운용할 수 있을 것으로 기대한다.

다만, 본 연구는 여전히 전체 온실가스감축인자 예산액의 40%를 반영하지 못한다는 한계가 존재한다. 또한, 정량사업이 내포하고 있는 정성적인 감축효과에 대해서도 분석이 이루어지지 못하였다. 본 연구는 자료포락분석이라는 정량적 방법론에 기반하였기 때문에, 정성적으로 온실가스 감축에 기여하는 교육, 행정 및 각종 지원 사업을 고려하지 못하였으며, 정량화하기 어려운 온실가스 감축 효과에 대해서는 효율성 분석을 수행하지 못하였다는 구조적 한계가 존재한다. 이러한 연구의 특성을 고려할 때, 연구의 결론을 정책에 활용하는 데 주의가 필요하다. 본 연구는 감축사업 유형 및 지원 방식에 따라 보다 효과적인 방식이 존재함을 제시하였으나, 모든 사업이 이러한 방식으로 재편되어야 함을 주장하는 것은 아니다. 다만, 효과적·효율적으로 기후재정을 집행할 필요성이 있으며, 이 과정에서 온실가스 감축효율성이 함께 반영되어야 함을 종합적으로 제안한다.

## 사사

이 논문은 2021년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2021S1A5A2A03064733).

## Reference

- Allwood JM, Cullen JM, Milford RL. 2010. Options for achieving a 50% cut in industrial carbon emissions by 2050. *Environ Sci Technol* 44(6): 1888-1894. doi: 10.1021/es902909k
- Baciu L, Botezat A. 2014. A comparative analysis of the public spending efficiency of the new EU member states: A DEA approach. *Emerg Mark Finance Trade* 50(sup4): 31-46. doi: 10.2753/REE1540-496X5004S402
- Banker RD, Charnes A, Cooper WW. 1984. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Manag Sci* 30(9): 1078-1092. doi: 10.1287/mnsc.30.9.1078
- Bastin JF, Finegold Y, Garcia C, Mollicone D, Rezende M, Routh D, Crowther TW. 2019. The global tree restoration potential. *Science* 365(6448): 76-79. doi: 10.1126/science.aax0848
- Charnes A, Cooper WW, Rhodes E. 1978. Measuring the efficiency of decision making units. *Eur J Oper Res* 2(6): 429-444. doi: 10.1016/0377-2217(78)90138-8
- de Pee A, Pinner D, Roelofsen O, Somers K, Speelman E, Witteveen M. 2018. How industry can move toward a low-carbon future. Amsterdam, Netherlands: McKinsey & Company.
- Ha NS. 2009. Efficiency analysis and comparisons for Korean local governments' spending (in Korean with English abstract). *Korean Gov Account Rev* 7(2):59-87.
- Hyun S, Shin Y. 2023. Analysis of changes and influencing factors in local finance management efficiency in Gyeonggi-do Province -Focusing on the comparison of the Southern and Northern parts of Gyeonggi-do Province- (in Korean with English abstract). *J Korean Policy Stud* 23(4):1-23. doi: 10.46330/jkps.2023.12.23.4.1
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2018. Summary for policymakers. In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pörtner HO, Roberts D, Skea J, Shukla PR, Pirani A, Moufouma-Okia W, Péan C, Pidcock R, et al. (eds). *Global warming of 1.5°C*. Cambridge, UK and New York: Cambridge University Press. p. 3-24. doi: 10.1017/9781009157940.001
- Joint Government Ministries. 2023. National strategy for carbon neutrality and green growth and the 1st National Basic Plan.
- Khan A, Murova OI. 2015. Productive efficiency of public expenditures: A cross-state study. *State Local Gov Rev* 47(3): 170-180. doi: 10.1177/0160323X15610385

- Kim KS, Lee KH. 2019. An assessment of the efficiency of local events and festivals through Data Envelopment Analysis (DEA): The case of Gangwon Province in South Korea, 2012-2016 (in Korean with English abstract). *J Cult Policy* 33(1): 35-73. doi: 10.16937/jcp.2019.33.1.35
- Kruskal WH, Wallis WA. 1952. Use of ranks in one-criterion variance analysis. *J Am Stat Assoc* 47(260): 583-621.
- Mann HB, Whitney DR. 1947. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *Ann Math Stat* 18(1): 50-60.
- NABO (National Assembly Budget Office). 2007. Study on methods of project evaluation. Seoul, Korea: NABO.
- OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development). 2017. Investing in climate, investing in growth. Paris, France: OECD Publishing. doi: 10.1787/9789264273528-en
- Park JH, Shin K. 2018. Efficiency of government-sponsored R&D projects: A metafrontier DEA approach. *Sustainability* 10(7): 2316. doi: 10.3390/su10072316
- Stiglitz JE, Weiss A. 1981. Credit rationing in markets with imperfect information. *Am Econ Rev* 71(3): 393-410.
- Taghizadeh-Hesary F, Yoshino N. 2019. The way to induce private participation in green finance and investment. *Finance Res Lett* 31: 98-103. doi: 10.1016/j.frl.2019.04.016
- Wang P. 2018. Analysis of the efficiency of public environmental expenditure based on Data Envelopment Analysis (DEA)-Tobit model: Evidence from Central China. *Nat Environ Pollut Technol* 17(1): 43-48.
- Yu H, Jeong JS. 2024. A study on the efficiency analysis of national R&D projects in the field of policing science and technology - Focusing on the DEA model (in Korean with English abstract). *J Police Sci* 24(1): 185-214. doi: 10.22816/polsci.2024.24.1.185

## 부록

## KW검정 및 MW 검정 결과

## 1) KW 검정 결과

Appendix Table 1. Kruskal-Wallis H test result by type of mitigation

|                       | Obs | Rank sum | Rank average | p-value  |
|-----------------------|-----|----------|--------------|----------|
| Agriculture           | 13  | 1972     | 151.7        | 0.000*** |
| Industry              | 1   | 151      | 151          |          |
| Internation Reduction | 40  | 5765     | 144.1        |          |
| Hydrogen              | 8   | 914      | 114.3        |          |
| Transport             | 14  | 1596     | 114          |          |
| Waste                 | 29  | 3134     | 108.1        |          |
| Buildings             | 34  | 3452     | 101.5        |          |
| Energy Conversion     | 25  | 2425     | 97           |          |
| Carbon Sinks          | 43  | 2119     | 49.3         |          |

\*: p-value &lt; 0.10, \*\*: p-value &lt; 0.05, \*\*\*: p-value &lt; 0.01

Appendix Table 2. Kruskal-Wallis H test result by financial method

|                   | Obs | Rank sum | Rank average | p-value  |
|-------------------|-----|----------|--------------|----------|
| Loan              | 5   | 816      | 163.2        | 0.000*** |
| Contribution      | 15  | 2277     | 151.8        |          |
| Subsidy           | 78  | 9833     | 126.1        |          |
| Equity Investment | 1   | 86       | 86           |          |
| Mixed             | 70  | 5814     | 83.1         |          |
| Direct            | 38  | 2702     | 71.1         |          |

\*: p-value &lt; 0.10, \*\*: p-value &lt; 0.05, \*\*\*: p-value &lt; 0.01

## 2) MW 검정 결과

Appendix Table 3. Mann-Whitney U test result by type of mitigation

|                          | Agriculture | Industry | Internation<br>Reduction | Hydrogen | Transport | Waste | Buildings | Energy<br>Conversion | Carbon<br>Sinks |
|--------------------------|-------------|----------|--------------------------|----------|-----------|-------|-----------|----------------------|-----------------|
| Agriculture              |             | 0.682    | 0.124                    | 1.884*   | 2.001**   | 1.602 | 2.640***  | 2.662***             | 4.997***        |
| Industry                 |             |          | 0                        | 1.826*   | 2.237**   | 1.638 | 3.308***  | 3.155***             | 6.981***        |
| Internation<br>Reduction |             |          |                          | 1.162    | 0.52      | 0.926 | 0.792     | 0.733                | 1.693*          |
| Hydrogen                 |             |          |                          |          | 0.221     | 0.205 | 0.577     | 0.84                 | 3.522***        |
| Transport                |             |          |                          |          |           | 0.272 | 0.352     | 0.651                | 3.829***        |
| Waste                    |             |          |                          |          |           |       | 0.783     | 0.761                | 3.448***        |
| Buildings                |             |          |                          |          |           |       |           | 0.383                | 4.031***        |
| Energy<br>Conversion     |             |          |                          |          |           |       |           |                      | 3.301***        |

\*: p-value &lt; 0.10, \*\*: p-value &lt; 0.05, \*\*\*: p-value &lt; 0.01

Appendix Table 4. Mann-Whitney U test result by financial method

|                      | Loan | Contribution | Subsidy | Equity<br>Investment | Mixed    | Direct   |
|----------------------|------|--------------|---------|----------------------|----------|----------|
| Loan                 |      | 1.135        | 1.952*  | 0.878                | 2.421**  | 2.482**  |
| Contribution         |      |              | 2.037** | 1.193                | 3.781*** | 3.979*** |
| Subsidy              |      |              |         | 0.965                | 4.540*** | 4.789*** |
| Equity<br>Investment |      |              |         |                      | 0.195    | 0.622    |
| Mixed                |      |              |         |                      |          | 1.042    |

\*: p-value &lt; 0.10, \*\*: p-value &lt; 0.05, \*\*\*: p-value &lt; 0.01