Check for updates

Journal of Climate Change Research 2024, Vol. 15, No. 6, pp. 1159~1166
DOI: https://doi.org/10.15531/KSCCR.2024.15.6.1159

2031 ~ 2049년 온실가스 최적 배출 경로 도출: 최적제어이론 관점에서

이시형* · 이지웅**†
*대한상공회의소 탄소중립실 과장, **국립부경대학교 경제학과 부교수

Optimal greenhouse gas emission pathways for South Korea from 2031 to 2049: An optimal control theory perspective

Lee, Seehyung* and Lee, Jiwoong**†
*Manager, Carbon Neutrality Office, Korea Chamber of Commerce and Industry, Seoul, Korea
**Associate Professor, Department of Economics, Pukyong National University, Busan, Korea

ABSTRACT

On August 29, 2024, the Constitutional Court of Korea issued a decision of nonconformity regarding Article 8, Paragraph 1 of the Carbon Neutrality Act, mandating a quantitative specification of the emissions pathway between the 2030 Nationally Determined Contribution and the 2050 net-zero target. This ruling is expected to stimulate extensive academic and policy discussions on the necessary pathway. While the exact shape of the emissions pathway may vary according to philosophical approach, three primary forms can be considered: concave, linear, and convex. This study employs optimal control theory to clarify the form and characteristics of an optimal emissions pathway. Cost minimization is the preferred criterion, acknowledging that the optimal pathway may differ depending on the selected criterion. The resulting emissions pathway is convex and downward-sloping, indicating that greenhouse gas reductions should be implemented as early as feasible. The pace of reduction is dependent on the relative magnitude of the social cost of carbon and mitigation costs: a larger social cost of carbon results in a more pronounced convex emissions pathway. Determining the exact shape of the optimal emissions path requires knowledge of the values of both the social cost of carbon and mitigation costs, which are still subjects of ongoing debate. Consequently, this study suggests that the government should establish a plausible range for these two costs, rather than seeking scientifically exact values, to determine the emissions path for the period 2031 ~ 2049.

Key words : Climate Policy, Constitutional Court Ruling, Optimal Emissions Pathway, 2050 Net Zero, Optimal Control

1. 서론

2024년 8월 29일 헌법재판소는 청소년·시민단체·영유아 등이 제기한 헌법소원 4건에 대해 재판관 전원일치 의견으로 '기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법'(이하 탄소중립기본법) 8조 1항에 헌법불합치 결정을 내렸다(Constitutional Court of Korea, 2024). 해당 조항은 국가가 2018년 대비 2030년까지 온실가스 배출량을 35% 이상 감축하도록 규정하고 있으며, 정부는 동법 시행령 제3조 1항을 통해 2030 국가 온실가스 감축 목표를 2018년 대비 40% 감축(목표 배출량 436.6 백만톤)으로 설정하여 기후변화 정책을 수립해왔다. 하지만, 헌법재판소는 탄소중립기본법 제8조 제1항은 2031년부터 2049년까지의 감축목표에 관하여 그 정량적 수준을 어떤 형태로도 제시하지 않았다는 점에서 국민의 환경권 등을 보호하기 위해 최소한의 조치를 취해야 한다는 '과소보호금지원칙'에 위반했다고 판단했다.

다만, 헌법재판소는 즉시 효력을 잃는 위헌 선고가 아니

†**Corresponding author :** j.lee@pknu.ac.kr (Pukyong National University, Yongso-ro 45, Nam-gu, Busan 48513, Korea. Tel. +82-51-629-5321) **ORCID** 이시형 0009-0009-7714-5447 이지웅 0000-0003-2592-9492

Received: November 11, 2024 / Revised: November 26, 2024 1st, December 6, 2024 2nd / Accepted: December 18, 2024

라, ‘전문적·기술적인 자료를 활용할 수 있는 제도적 기반, 기후위기의 긴급성에 비추어 온실가스의 급속한 감축을 위해 노력하고 관련 정책의 방향을 늦지 않게 제시할 필요성, 입법자가 2031년부터 2049년까지의 정량적인 온실가스 감축목표의 대강에 관한 사회적 합의를 도출하는 데에 필요한 시간 등을 종합적으로 고려하여’(Constitutional Court of Korea, 2024, p. 60), 개선입법이 있을 때까지 2026년 2월 28일까지 한시적으로 적용되는 헌법불합치결정을 선고하였다. 따라서 정부와 국회는 개정 시한인 2026년 2월 28일까지 탄소중립기본법 제8조 1항을 개정하고, 2031년부터 2049년까지의 보다 구체적인 온실가스 감축목표를 수립해야 하는 과제를 안게 되었다.

기후변화 정책 측면에서, 이번 헌법재판소의 판결은 2030년 감축목표와 2050년 탄소중립 목표 사이의 감축경로를 정량적으로 명시하라는 것으로 요약할 수 있다. 즉, 2030년 목표 배출량 436.6백만톤과 2050년 탄소중립 간의 두 점을 잇는, 이론적으로는 무한 가짓수의 가능한 경로 중 주어진 기준을 만족하는 경로를 찾는 것이다. 앞으로 이를 둘러싼 논의가 본격화될 것으로 전망되며, 각 이해관계자가 선호하는 경로는 각자의 철학과 신념에 따라 다를 것이기 때문에 정치적 합의에 이르기 위해서는 사회적 공론장에서 다양한 관점이 활발히 논의되어야 할 것이다.

이러한 배경하에서, 본 연구는 수리적인 관점에서 하나의 의견을 제시한다. 수학적으로 해당 문제는 주어진 두 점을 잇는 여러 경로 중 특정한 기준을 만족하는 경로를 찾는 것인데, 이는 최적제어이론(optimal control theory)으로 모형화할 수 있다.[1)]

해당 방법론을 적용할 때 가장 중요한 요소는 어떤 기준이 바람직한지, 즉 무엇이 ‘최적’인지에 대한 명확한 정량적 기준(criterion)이 있어야 한다는 것이다. 이에 본 연구는 ‘비용 최소화’를 바람직한 기준으로 삼고 최적경로를 도출한다. 도출된 최적 배출경로는 가능한 한 빨리 온실가스를 줄이는, 감소하는 볼록(decreasing and convex) 형태를 가지게 되는데, 볼록한 정도, 즉 얼마나 빨리 줄일 것인지는 온실가스 피해 비용과 감축비용의 상대적 크기에 따라 결정된다. 만약 온실가스 피해 비용, 즉 탄소의 사회적 비용이 크다면 경로는 더 볼록해지며, 이는 가능한 한 일찍 줄이는 경로가 바람직함을 의미한다.

단, 비용 최소화라는 기준이 가장 바람직하다고 주장하는 것은 아니며, 적절한 기준이 무엇인지는 이해관계자가 참여하는 사회적 합의를 통해 결정되어야 할 것이다. 그보다, 본 연구는 수리적인 관점에서 2030년 감축목표와 2050년 탄소중립이라는 제약조건이 주어졌을 때 두 시점 간 최적경로가 무엇인지 알아낼 수 있는 하나의 방법론을 제시하는 데 그 목적이 있다. 저자가 파악하기로, 두 시점 간 배출 목표가 주어졌을 때 해당 기간 사이 배출경로를 어떻게 정하는 것이 바람직한지에 관한 학술 연구는 아직 없는바 이에 대한 학술·정책적 논의를 더욱 풍성히 하는 데 기여할 수 있으리라 사료된다.

본 연구는 다음과 같이 구성된다. 제2장은 이번 헌법재판소 판결의 경과를 요약한다. 그리고 제3장에서는 감축비용 최소화의 관점에서 2050년까지의 최적 감축경로를 최적제어이론을 통하여 도출하고 시사점을 제시한다. 제4장에서는 본 연구의 한계를 서술하고 결론짓는다.

2. 헌법재판소 판결 경과[2)]

헌법소원은 2020년 청소년 기후활동가 19명의 청구로 시작했으며, 이후 2021 ~ 2023년 영유아 62명이 낸 헌법소원을 포함해 3건의 헌법소원이 추가로 접수됐다. 이에 헌법재판소는 이들 사건을 2024년 2월 병합하였다.

청구인들은 ① 탄소중립기본법 제8조 제1항이 2030년 국가온실가스 감축목표를 2018년 배출량의 35% 이상의 범위에서 대통령령으로 정하는 비율만큼 감축하도록 설정하고 같은 법 시행령 제3조 제1항이 그 비율을 40%로 정한 것(2030년까지의 감축목표 설정), ② 탄소중립기본법 제8조 제1항이 2031년 이후 2050년까지의 온실가스 감축목표를 정하지 아니한 것(2031년부터 2049년까지의 감축목표 미설정)은 국가의 최소한의 보호의무를 다하지 못한 것으로서 과소보호금지원칙 등에 위반되므로 헌법 위반이라고 주장하였다.

이에 대하여 헌법재판소는 2024년 8월 29일 다음과 같이 판단하였다.

2.1. 과소보호금지원칙에 대한 판단

헌법재판소는 2030년 감축목표 수치는 2050년 탄소중

1) 최적제어이론은 주어진 기간 동안 목적함수를 최적화할 수 있는 동적 시스템(dynamic system)에 대한 제어방식을 찾는 방법론을 다루는 수학의 한 분야이다. 이에 대한 엄밀한 수학적 배경에 대해서는 Clarke (2013)을 참조하기 바란다.

2) 본 장에서 헌법재판소의 판결에 관한 내용은 Constitutional Court of Korea (2024)와 Shin and Kim (2024)을 발췌하였다.

립의 목표 시점에 이를 때까지 점진적이고 지속적인 감축을 전제로 한 중간 목표에 해당하고, 구체적으로 수치를 설정하는 과정에서 여러 고려 요소와 변수가 영향을 미치므로, 수치 자체는 미래에 과중한 부담을 이전하는 것이라고 단정할 수 없으며 기후위기라는 위험상황에 상응하는 보호조치로서 요구되는 성격을 갖추지 못한 것으로 볼 수 없으므로 과소보호금지의 원칙을 위반하지 않은 것으로 판시하였다.

반면, 2031년부터 2049년까지의 감축목표 미설정에 대해서는 다르게 판단하였다. 구체적으로, 헌법재판소는 탄소중립기본법 제8조 제1항이 2030년까지의 감축목표만 규정할 뿐, 2031년부터 2049년까지의 감축목표에 대하여는 어떠한 정량적 기준도 없으며, 관련 법령에서도 2050년 탄소중립에 이르기까지 점진적이고 지속적인 감축을 실효적으로 보장할 수 있는 장치가 없다고 지적하였다. 그리고 이는 미래에 과중한 부담을 이전하는 방식으로 감축목표를 규율한 것이므로, 기후위기라는 위험상황에 상응하는 보호조치로서 필요한 최소한의 성격을 갖추지 못하여 과소보호금지 원칙에 위반된다고 판단하였다.

특히 '진전의 원칙'을 적용하더라도 그 속도는 느려질 수 있으므로, 2031년 이후의 감축목표에 관한 정량적인 기준을 법률에 규정하지 않고 정부의 재량에만 맡겨 두면 정부가 온실가스 다배출 업종이 많은 우리나라 산업 특성을 고려하여 단기적 감축 부담을 완화하고자 하는 유인이 높을 것이고, 결국에는 2050년 탄소중립 목표 달성이 어려울 가능성이 크다고 지적하였다.

2.2. 법률유보원칙에 대한 판단

탄소중립기본법 제8조 제1항은 2030년까지의 감축목표의 정량적 수치의 하한을 정하고 대통령령으로 구체적 수치를 정하도록 위임하고 있는데, 헌법재판소는 온실가스 감축목표의 수치와 경로를 정하는 것은 전문적이고 기술적이므로 법률에서 이를 상세하게 정하는 것은 한계가 있고, 그 구체적인 내용을 정하는 데에는 정부의 외교적 권한도 존중되어야 한다는 점에서 법률유보원칙을 위반하지 않았다고 판시하였다.

한편, 2031년부터 2049년까지의 감축목표 미설정에 대해서는 헌법재판소는 탄소중립기본법 제8조 제1항에서 2031년부터 2049년까지의 감축목표에 관하여 대략의 정량적 수준도 규정하지 않은 것은 법률유보원칙에도 위반된다고 판시하였다. 특히 온실가스 감축목표 설정은 다양한 이해관계자의 합의가 전제되어야 하므로, 2031년 이후 기간의 감축목표 역시 그 대강의 내용은 헌법 외 가장 높은 수준의 사회적 합의를 반영하는 규범인 '법률'에 규정되어야 한다고 보았다. 나아가, 헌법재판소는 미래세대는 기후위기 영향에 더 크게 노출될 것임에도 현시점의 정치과정에 참여하지 못하므로, 중장기적인 온실가스 감축계획에 대하여 입법자에게는 보다 구체적인 입법의 의무와 책임이 있다고 강조하였다.

2.3. 헌법불합치 결정

헌법재판소는 2031년부터 2049년까지의 감축목표에 대해 대략적인 수준에서라도 정량적 기준을 다루고 있지 않은 현행 탄소중립기본법 제8조 제1항은 과소보호금지원칙 및 법률유보원칙에 위배되어 청구인들의 환경권을 침해한다고 판단하였다.

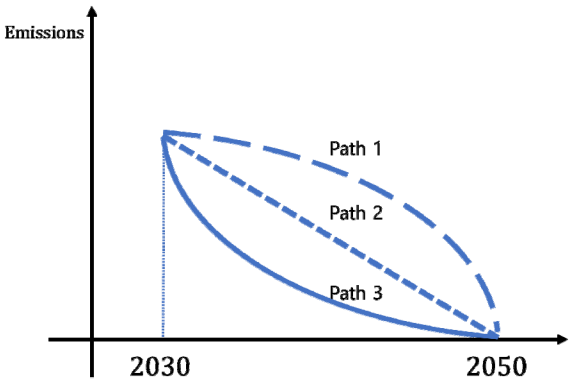
다만, 2030년까지의 중장기 감축목표 수치 자체는 과소보호금지원칙 또는 법률유보원칙 위반이라고 하기에는 어렵고, 위 조항의 효력을 상실시킨다면 그나마 존재하는 중간 목표마저 사라지게 되는, 오히려 위헌적인 상황이 발생하게 된다는 점 등을 고려하여 헌법불합치 결정을 하였으며 2026년 2월 28일을 시한으로 개정될 때까지 적용되는 것으로 판시하였다.

3. 온실가스 최적 배출 경로 도출

3.1. 제약조건과 목적식

최적제어이론을 적용하기 위해서는 제약조건과 목적식이 무엇인지 명확히 해야 한다. 먼저 제약조건을 살펴보면, 2030년 목표 배출량 436.6 백만톤과 2050년 탄소중립 또는 배출량 영(0)의 경계조건(boundary conditions)이 있다. 이는 시작 시점 및 종료 시점의 배출량이라고 할 수 있는데, 정식화하기 전에 이 두 조건이 법적으로 변경될 수 없는 확정적인 것인지 검토할 필요가 있다.

첫째, 시작 시점 배출량, 즉 2030년 목표 배출량 436.6 백만톤 목표를 느슨하게 변경하는 것은 어려울 것으로 판단된다. 헌법재판소는 2030년 감축목표 수치 자체는 과소보호금지 원칙을 위반하지 않는 것으로 판단하긴 했지만, 이를 '2050년 탄소중립의 목표 시점에 이를 때까지 점진적이고 지속적인 감축을 전제로 한 중간 목표'에 불과한 것으로 판단하였기 때문이다. 따라서 2050년 탄소중립 목



Source: Self-created

Fig. 1. Possible emissions pathways from 2030 to 2050

표가 주어진 상황에서 2030년 목표를 느슨하게 재설정하는 것은 헌법재판소의 주문에 어긋난다.

둘째, 2050년 탄소중립 목표 역시 변경 불가한 것으로 보인다. 헌법재판소는 이번 판결에서 '2050년 탄소중립의 목표 시점에 이르기까지 점진적이고 지속적인 감축을 실효적으로 담보할 수 있는 장치가 없다'고 지적하였다. 또한 탄소중립기본법 제7조 제1항은 '정부는 2050년까지 탄소중립을 목표로 하여 탄소중립 사회로 이행하고 환경과 경제의 조화로운 발전을 도모하는 것을 국가비전'으로 명시하고 있다. 즉, 2050년 탄소중립 목표는 탄소중립기본법에서도 규정되어 있을뿐더러, 헌법재판소 판결에서도 이를 당연한 것으로 전제하고 있다. 결론적으로, '2030년 배출량 436.6백만톤'과 '2050년 탄소중립'의 두 제약을 바꾸는 것은 불가능하다.

추가적으로, 배출경로는 강단조 감소(strictly monotone increasing), 즉, 미래 배출량은 과거 배출량보다 작아야 할 것이다. 예를 들면, 2049년까지 배출량이 일정 또는 증가하다가 2050년에 영(0)으로 급격히 감소하는 형태의 경로는 고려하지 않는다.

Fig. 1은 위의 논의를 종합하여 고려할 수 있는 배출경로 형태를 보여준다. Path 1은 강오목(strict concave) 형태로서 시간이 지남에 따라 감축량을 증가시키는 것이며, Path 2는 감축량이 매년 일정한 직선(linear) 형태, Path 3은 초기에 감축을 집중하는 강볼록(strict convex) 형태이다. 배출경로의 볼록 또는 오목 여부는 단순한 수학적 성질을 넘어 감축이 초기에 집중되어야 하는지, 아니면 뒤로 미루는 것인지 국가 감축 정책의 장기 방향을 결정하는 것임에 주목할 필요가 있다. 물론, 이러한 세 가지 형태 이외에도 경제 상황이나 전년도 배출량에 따라 달라지는 조건부 형태의 복잡한 경로도 가능할 것이다. 하지만 다양한 이해관계자 간 사회적 합의를 통하여 법률에 명문화되어야 한다는 점을 고려하면 기술적으로 이해하기 어려운 형태보다는 개략적으로는 Path 1-3 중 하나의 형태를 갖춰야 할 것으로 판단된다.

3.2. 모형

표기의 단순화를 위하여 시작점 2030년을 $t=0$, 종료점 2050년을 $t=1$이라고 하고, 시작점에서의 목표 배출량을 $e_0>0$, 종료점에서의 목표 배출량을 0이라고 하자. 배출경로는 함수 $f:[0,1]\to R_+$으로 나타낼 수 있으며, 3.1의 논의에 따라 배출경로에 대한 제약조건은 다음과 같이 주어진다.

$$f(0)=e_0,\ f(1)=0 \tag{1a}$$

$$\text{함수 } f\text{는 구간 } T:=[0,1]\text{에서 강단조 감소} \tag{1b}$$

한편, 본 연구에서 최적 경로는 구간 T에 걸친 총 누적비용을 최소화하는 것으로 정의한다. 여기서 각 시점 t에서 발생하는 비용은 누적 배출량으로 인한 피해와 함께 온실가스 감축에 따른 비용으로 구성되며, 따라서 시점 t, 시점 t까지의 누적 배출량, 시점 t에서의 배출량의 함수 $C:[0,1]\times R_+\times R_+\to R_+$로 주어진다. 이때, 배출경로가 f일 때, 구간 T에 걸친 총 누적비용 $J(f)$은 다음과 같다.

$$J(f):=\int_0^1 C(t,x(t),e_0-f(t))dt \tag{2}$$

여기서 $x(t)$은 시점 t에서의 누적 배출량으로, $x(t)$의

변화량은 자연 감소분 및 해당 시점의 배출량의 합과 같기 때문에 다음과 같은 상태방정식을 주어진다.[3)]

$$\dot{x}(t) = -\delta x(t) + f(t),\ x(0) = x_0 \tag{3}$$

여기서 $x_0 > 0$는 시점 0까지의 누적배출량, $\delta > 0$은 자연 감가상각율(depreciation rate)을 나타낸다.

최적 배출경로 f는 다음의 최적화 문제의 해가 된다.

$$\min_f J(f) \quad s.t. \quad (1a), (1b), (3) \tag{*}$$

이제 문제 (*)의 해가 가진 형태를 도출하기 위해서는 비용함수 C를 보다 구체적으로 명시해야 한다. 이를 위하여 비용함수 C가 갖추어야 할 성질을 검토한다.

비용함수 $C(t,x,a)$는 누적 배출량으로 인한 피해 및 감축으로 발생하는 비용이므로, 누적 배출량과 감축량에 대한 증가함수, 즉, $C_2 > 0, C_3 > 0$이다. 또한, 기후변화 정책에 관한 선행 연구의 표준적 가정을 따라 누적 배출량으로 인한 피해(damage function)는 볼록함수로(e.g., Dietz and Stern, 2015; Nordhaus, 1993), 한계 감축비용(marginal abatement cost)은 증가하는 것으로 가정한다(e.g., Larry and Christian, 2023). 따라서, $C_{22} > 0, C_{33} > 0$이 성립한다.

이러한 성질을 만족하는 가장 간단한 형태의 비용함수는 다음과 같다.

$$C(t,x,a) = e^{-rt}\left(c_1 x^2 + c_2 a^2\right) \tag{4}$$

여기서, $r \geq 0$은 할인율, $c_1, c_2 > 0$이다.

본 연구에서는 세대간 형평성(intergenerational equity)을 반영하기 위하여 할인율 $r = 0$으로. 즉, 미래에 발생하는 비용을 할인하지 않는다. 세대간 형평성 이외에도, 본 연구에서 고려하는 시간 범위는 20년(2030 ~ 2050년)으로 기후변화 맥락에서는 짧은 기간이기 때문에 할인율이 분석 결과에 주는 영향은 크지 않다. 결론적으로. 여기서 고려하는 비용함수는 다음과 같다.

$$C(t,x,a) = c_1 x^2 + c_2 a^2 \tag{5}$$

3.3. 최적 감축경로

문제 (*)의 해는 최적제어이론의 표준적인 방법론을 이용하며 도출할 수 있다. 표기의 단순화를 위하여 배출경로 $f(t)$ 대신 감축경로 $a(t) := e_0 - f(t)$를 제어변수(control variable)로 사용하면, 문제 (*)는 다음과 같이 문제(**)로 바꿔쓸 수 있다.[4)]

$$\min_{a(.)} \int_0^1 (c_1 x(t)^2 + c_2 a(t)^2) dt \tag{**}$$

$$s.t.$$
$$a(0) = 0, a(1) = e_0 \qquad (1a')$$
$$a(.)\text{는 강단조감소} \qquad (1b')$$
$$\dot{x}(t) = -\delta x(t) + e_0 - a(t) \qquad (3)$$

문제 (**)을 풀기 위하여 최대화 원리(maximum principle)를 적용하면 다음과 같다.[5)]

해밀토니언을 $H = c_1 x^2 + c_2 a^2 + \lambda(-\delta x + e_0 - a)$이라고 하면, 일계조건은 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{x} = \frac{\partial H}{\partial \lambda} = -\delta x + e_0 - a, \qquad x(0) = x_0 \tag{6}$$

$$-\dot{\lambda} = \frac{\partial H}{\partial x} = 2c_1 x - \delta\lambda, \tag{7}$$

$$0 = \frac{\partial H}{\partial a} = 2c_2 a - \lambda, \tag{8}$$

식 (6), (7), (8)을 이용하면 λ에 관한 이계 선형 미분방정식 $\ddot{\lambda} - (\delta^2 + c_1/c_2)\lambda + 2c_1 e_0 = 0$을 얻게 되고, 제약조건 (1a‘), (1b’)을 이용하면 다음과 같은 최적 감축경로 $a(.)$를 얻는다.

$$a(t) = A\left(1 - e^{-Bt}\right) \tag{9}$$

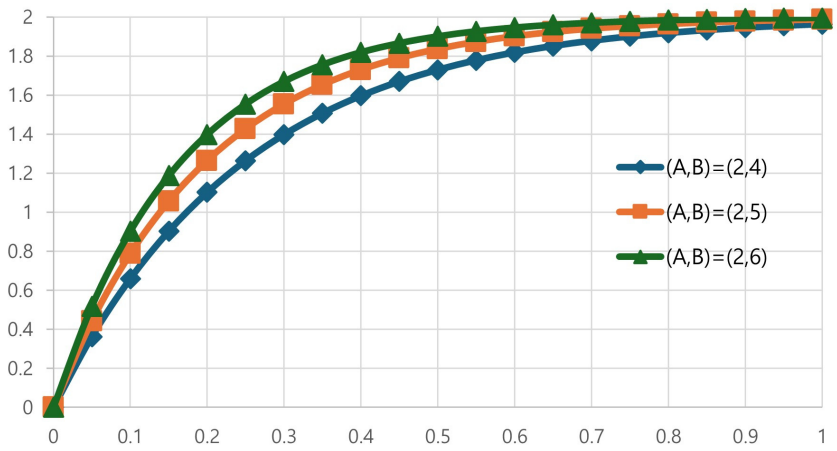
(단, $A := \dfrac{e_0}{(1 + \delta^2 c_2/c_1)}, B := \sqrt{\delta^2 + c_1/c_2}$)

감축경로 (9)는 증가하고 오목한 형태를 가진다

3) 누적 배출량을 결정하기 위해서는 다른 국가의 총 배출량도 물론 고려해야 해야 하며, 외생적으로 주어지는 다른 국가의 총 배출량이 M으로 일정하다고 가정하면 해당 식은 $\dot{x}(t) = -\delta x(t) + M + f(t)$로 쓸 수 있다. 본 연구에서의 관심은 우리나라의 배출경로이므로 표기의 단순화를 위하여 $M = 0$으로 표준화한다. 실제 해외 배출량을 0으로 가정하는 것은 결코 아님을 유의하기 바란다.

4) 도출한 문제 (**)의 해가 (1a)와 (1b)를 만족한다면 해당 해는 원래 문제(*)의 해가 된다.

5) 최적제어이론의 최대화 원리에 대해서는 Kamien and Schwartz (1991) 및 Liberzon (2012)을 참조하기 바란다.



Source: Self-created

Fig. 2. Illustration of abatement pathways $a(t)$ when $A=2, B=4,5,6$

$(a'>0, a''<0)$. 여기서 감축경로의 형태를 결정하는 핵심 계수는 B인데, 크기가 클수록 오목한 정도가 커진다. Fig. 2는 $A=2$이고 $B=4,5,6$일 때 감축경로 $a(t)$를 보여준다.

3.4. 시사점

최적 감축경로 $a(t)$는 식 (9)에서처럼 증가하는 오목함수의 형태를 가지며, 따라서 이에 상응하는 배출경로 $f(t)=e_0-a(t)$는 감소하는 볼록함수 형태를 가지게 된다. 이는 초기에 감축을 집중하는 Fig. 1의 Path 3이 적절함을 시사하는데. 이와 같은 형태가 나오는 이유는 누적 배출량으로 인한 한계 손실이 점차 증가하는 것으로 가정했기 때문이다. 즉, 배출량이 증가할수록 사회적 손실이 증가하므로, 현재 배출량이 클수록 미래에 배출하는 1단위가 초래하는 손실이 커지기 때문에 가능한 배출을 일찍 줄이는 것이 바람직하다.

초기에 얼마나 빨리 감축할 것인가는 계수 $B=\sqrt{\delta^2+c_1/c_2}$의 크기에 따라 달라진다. 여기서 온실가스 연간 소산율(dissipation rate) δ은 0.0025-0.0050으로 (Pindyck, 2022, p. 26) $\delta^2\approx 0$이 성립하므로, B의 크기는 누적 배출량의 피해를 나타내는 계수 c_1과 감축비용을 나타내는 계수 c_2의 비율 c_1/c_2가 사실상 결정하게 된다. 가령, 온실가스 피해 비용이 감축비용보다 상당이 크다면 $(c_1 \gg c_2)$, 최적경로는 가능한 빨리 온실가스를 줄이는 형태를 가지게 된다. 반면 감축비용이 피해 비용보다 크다면$(c_1 < c_2)$, 감축경로는 직선, 즉 매년 동일한 양을 감축하는 것이 최적이 된다.

더 구체적인 형태를 특정하기 위해서는 계수 A와 B의 값을 알아야 하며, 이를 위해서는 온실가스 피해 비용과 감축비용을 알아야 한다. 하지만, 두 비용을 추정하는 것은 매우 어려운 작업이다. 우선 우리나라 거시경제 차원의 감축비용에 대한 연구는 충분하지 않다. 반면, 온실가스 피해 비용 즉, 탄소의 사회적 비용(social cost of carbon)에 대한 추정치에 관한 연구는 매우 방대하다. 탄소의 사회적 비용의 추정치 범위는 매우 큰데(Tol, 2019, p. 102), 신뢰할만한 최신 연구에서도 톤당 185달러(Rennert et al., 2022)에서 1,065달러(Bilal and Känzig, 2024)에 이르는 등 여전히 연구자에 따라 상이하다. 적어도 단기적으로는 이들 비용에 대한 학계의 합의는 이루어지기는 어려울 것으로 예상되며, 기후변화 정책 관련 의사 결정에 필수적인 이들 두 비용의 수준에 대해서는 정부의 정책적 판단이 필요할 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구는 2030년과 2050년 감축목표가 주어져 있을 때 중간 기간의 최적 배출경로가 어떠한 형태를 갖추어야 하는지 최적제어이론을 통하여 간략히 살펴보았다. 필자들이 아는 한, 본 연구가 이를 다룬 최초의 것이라는 점에

서 의의가 있을 것으로 판단된다. 다만, 본 연구는 불확실성을 다루지 않았다는 점에서 한계가 있다. 또한 본 연구에서는 비용 최소화를 목적함수로 설정하였지만, 목적함수가 무엇이 되어야 하는지에 대해서도 향후 폭넓은 논의가 필요할 것이다.

또한 본 연구는 해외의 배출량이 일정할 것으로 가정하고 국내로 국한하여 논의를 전개하였다. 이에 대한 한계를 인정하며, 본 연구에서 이러한 가정을 채택한 이유는 다음과 같다.

첫째, 헌법재판소에서 요구한 것은 2030년과 2050년 사이의 목표 배출경로를 명문화하라는 것으로, 이를 해외의 미래 배출량에 따라 조건부로 명시하는 것은 입법상 어렵기 때문이다. 2030년과 2050년 목표가 달성 가능성에 상관없이 다른 국가의 배출상황과 무관하게 법률에 규정되었음을 고려할 때, 법률 또는 시행령으로 명문화될 국가 목표 배출경로를 해외의 배출량, 정책 또는 탄소 누출 정도 등에 따라 변경가능한 것으로 설정하는 것은 헌법재판소의 판결에 부합하지 않을 것으로 판단된다. 무임승차 등 향후 예상되는 다른 국가의 전략적 행위까지 모두 고려하는 것이 더 정확한 감축경로일 것이지만, 이러한 경로는 특정 숫자가 아닌 미래의 상황에 달린 조건부 형태를 가지게 된다.

둘째, 해외의 배출량이 외생적인 확률과정을 따르는 것으로 모형화하는 것이 가능한데, 이 경우 우리나라의 최적 배출경로는 시점 t와 해외 배출량에 의존하는 폐회로(closed-loop) 해를 가지게 된다. 이해가 나타내는 조건부 경로가 시점 t에 대하여 볼록함수가 되는 성질은 그대로 유지되며, 따라서 초기에 가능한 많이 감축해야 한다는 정책적 시사점은 유효하다.

2024년 8월 헌법재판소의 판결은 우리나라 기후변화 정책에 중대한 영향을 미칠 것으로 예상된다. 헌재가 제시한 입법기간을 고려할 때 2031 ~ 2049년 배출경로에 관한 학술적, 정책적 공론의 장이 신속히 마련될 필요가 있다. 본 연구를 포함, 심화된 후속 연구가 합리적 근거를 제공함으로써 사회적 합의를 이끌어내고 나아가 관련 법안이 헌법재판소가 제시한 기한 내에 입법화되는데 기여할 수 있기를 기대한다.

사사

이 논문은 2022년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 인문사회분야 신진연구자지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2022S1A5A8051133). 익명의 두 심사자께 감사드린다.

Reference

Bilal A, Känzig DR. 2024. The macroeconomic impact of climate change: Global vs. local temperature. Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research. Working Paper 32450. doi: 10.3386/w32450

Clarke F. 2013. Functional analysis, calculus of variations and optimal control. London: Springer. doi: 10.1007/978-1-4471-4820-3

Constitutional Court of Korea. 2024 Aug 29. Decision on 29 August 2024, Case No. 2020Hun-Ma389, Constitutional Nonconformity.

Dietz S, Stern N. 2015. Endogenous growth, convexity of damage and climate risk: How Nordhaus' framework supports deep cuts in carbon emissions. Econ J 125(583): 574-620. doi: 10.1111/ecoj.12188

Kamien MI, Schwartz NL. 1991. Dynamic optimization: The calculus of variations and optimal control in economics and management, 2nd edn. Mineola, NY: Dover Publications.

Larry SK, Christian PT. 2023. Dynamic environmental and resource economics. [accessed 2024 Dec 1]. https://traeger.eu/pdf/KarpTraegerDraft.pdf

Liberzon D. 2012. Calculus of variations and optimal control theory: A concise introduction. Princeton, NJ: Princeton University Press.

Nordhaus WD. 1993. Optimal greenhouse-gas reductions and tax policy in the "DICE" model. Am Econ Rev 83(2): 313-317.

Pindyck RS. 2022. Climate future: Averting and adapting to climate change. Oxford, UK: Oxford University Press. doi: 10.1093/oso/9780197647349.001.0001

Rennert K, Errickson F, Prest BC, Rennels L, Newell RG, Pizer W, Kingdon C, Wingenroth J, Cooke R, Parthum B, et al. 2022. Comprehensive evidence implies a higher social cost of CO2. Nature 610(7933): 687-692. doi: 10.1038/s41586-022-05224-9

Shin & Kim. 2024 Sep 13. Korean carbon neutrality act ruled unconstitutional. Newsletter 2561. https://www.shinkim.com/eng/media/newsletter/2561

Tol RSJ. 2019. Climate economics: Economic analysis of climate, climate change and climate policy, 2nd edn. Cheltenham, UK: Edward Elgar.