

Claims problem을 활용한 부문별 온실가스 감축목표 분석[†]

허윤지*

요약 : 우리나라는 2015년 국가 온실가스 감축목표(Nationally Determined Contribution, 이하 NDC)를 수립한 이래, 2019년 한 차례 수정 후 지난해 말 상향안을 발표하였다. 전환, 산업, 건물 등 각 부문별 탄소배출량은 NDC 목표 달성을 위해 설정된다. 본 연구는 협조적 게임이론의 claims problem 또는 파산문제(bankruptcy problem)를 활용하여 부문별 온실가스 감축목표를 분석한다. Claims problem에서 다루는 대표적인 5개의 분배규칙을 정의하고 각 규칙의 특성을 공리적으로 확인하였다. 또한, NDC 목표 달성을 위한 부문별 탄소배출량 분배문제에 각 분배 규칙을 적용하고 그 결과를 정부목표와 비교분석하였다. 전환 부문에 책정된 정부목표는 5개 분배규칙에서 할당하는 배출량보다 낮은 반면, 산업 부문의 정부목표 배출량은 5개 분배규칙의 결과보다 높은 것으로 확인되었다. 그 외 부문은 정부목표가 클레임 수준에 비례하여 배출량을 할당하는 분배규칙의 결과와 유사한 것으로 나타났다.

주제어 : NDC, Claims problem, 부문별 감축목표, 탄소배출량 분배문제

JEL 분류 : D7, H4, H8, Q58

접수일(2022년 11월 8일), 수정일(2022년 11월 26일), 게재확정일(2022년 12월 9일)

[†] 본 논문의 개선을 위해 유익한 논평을 해주신 두 분의 익명 심사자들에게 감사드립니다.

* 에너지경제연구원 부연구위원, 교신저자(e-mail: yunji.her23@gmail.com)

Allocating CO₂ Emission by Sector: A Claims Problem Approach[†]

Yunji Her*

ABSTRACT : Korean government established the Nationally Determined Contribution (NDC) in 2015. After revising in 2019, the government updated an enhanced target at the end of last year. When the NDC is addressed, the emission targets of each sector, such as power generation, industry, and buildings, are also set. This paper analyzes the emission target of each sector by applying a claims problem or bankruptcy problem developed from cooperative game theory. The five allocation rules from a claims problem are introduced and the properties of each rule are considered axiomatically. This study applies the five rules on allocating carbon emission by sector under the NDC target and compares the results with the announced government target. For the power generation sector, the government target is set lower than the emissions allocated by the five rules. On the other hand, the government target for the industry sector is higher than the results of the five rules. In other sectors, the government's targets are similar to the results of the rule that allocates emissions in proportion to each claim.

Keywords : NDC, Claims problem, Sectoral emission target, Carbon emission target allocation

Received: November 8, 2022, Revised: November 26, 2022, Accepted: December 9, 2022.

[†]I am grateful to the two anonymous reviewers for helpful comments and suggestions.

* Associate Research Fellow, Korea Energy Economics Institute, Corresponding author (e-mail: yunji.her23@gmail.com)

1. 서론

파리협정은 온실가스 감축을 위한 국제사회의 노력 중 하나로 참여 국가들은 자발적 감축목표(Nationally Determined Contribution, 이하 NDC)를 설정한다. 2015년 6월 우리나라는 2030년까지 BAU 시나리오 대비 37%를 감축하는 NDC 목표를 수립하였다(관계부처 합동, 2021). 온실가스 감축 의지를 보다 명확하게 하고자 2019년에는 NDC 목표를 임의 변동 가능성이 있는 BAU 방식에서 절대치 방식으로 수정하였다. 수정 NDC는 2030년 목표를 2018년 대비 26.3% 감축으로 변경하였고, 이는 2020년 12월 유엔기후변화협약(UNFCCC)에 제출되었다. 이후 국제사회에서 탄소중립 선언과 함께 NDC 상향계획이 발표되었고, 우리나라 역시 2020년 10월 2050 탄소중립을 선언 후, 2021년 12월 NDC 상향안을 UNFCCC에 제출하였다. NDC 상향안은 2030년까지 2018년 대비 40.0% 감축을 목표로 한다. 정부는 새로운 NDC 목표를 달성하기 위한 국내 부문별 탄소배출량을 재조정하여 확정하였다. 윤석열 정부는 국정과제에서 과학적인 탄소중립 이행을 위하여 NDC 상향안 목표는 준수하되, 부문별 목표에 현실적 감축 수단을 반영하여 2023년 3월까지 수정할 의사를 밝혔다(대한민국 정부, 2022).

2030년 NDC 목표를 달성하기 위해서는 전환, 산업, 건물, 수송 등 각 부문에서의 탄소 배출 감축이 필요하다. 이때, 2030년까지 전체 온실가스 배출량을 2018년보다 40.0% 감축할 때, 부문별로는 얼마나 감축해야 하는지는 질문이 등장한다. 모든 부문이 동일하게 40.0%를 감축하거나 배출량에 비례해서 감축량을 설정하는 등 다양한 방식이 있을 수 있다. 협조적 게임이론 중 claims problem 또는 파산문제(Bankruptcy problem)는 바로 이러한 상황을 다룬다. 구체적으로 참여자들이 각자 분배받기를 요구하는 클레임(claim)이 있는 상황에서, 분배해야 하는 부존량(endowment) 또는 예산(budget)이 전체 클레임의 합보다 작은 상황을 가정한다. 2030년에 목표로 하는 온실가스 배출량, 즉 부존량은 2018년 배출량보다 40.0%가 작다. 각 부문의 클레임을 2018년 배출량으로 설정하면, 클레임의 합이 부존량보다 작아 claims problem에서 가정하는 상황이 된다.

Claims problem에서 가정하는 이러한 상황은 유산상속문제, 파산기업의 자산 배분 문제 등 사회 다양한 부문에서 발생한다. 분배방식에 대한 논의는 탈무드에서 다루어질 정도로 오랜 역사를 지니기도 한다(김호중·전영섭, 2001). 협조적 게임이론을 응용한 체

계적인 분석은 O'Neill(1982) 이후 본격적으로 시작되었으며, 이후 분배규칙을 정의하고 각 규칙의 특징을 공리적으로(axiomatic) 분석하거나 실제 사례에 적용하는 연구들이 진행되었다.

온실가스 감축목표 할당 문제에서도 claims problem을 적용한 연구들이 진행되었다(Giménez-Gómez et al., 2016; Duro et al., 2020). 파리협정은 당사국들이 자국의 감축목표(NDC)를 자발적으로 설정하는 상향식 체제이기에,¹⁾ 교토의정서에서 각국에 온실가스 감축목표를 할당하는 하향식 체제와는 정반대이다. 이러한 상향식 체제는 보다 많은 국가들이 자발적으로 참여하고, 국가별 상황을 반영한다는 점에서 의의가 있다. 그러나 각국이 NDC를 이행하더라도 전 세계 배출량의 합이 하향식 탄소배출 허용량보다 훨씬 크다는 문제가 있다(UNEP, 2021). 즉, NDC 목표를 각국이 요구하는 클레임으로 정의하고, 지구의 적정 온실가스 배출량을 부존량 또는 탄소예산이라고 한다면, 전체 클레임의 합이 부존량보다 큰 상황이다. 이에 전 세계 지역별, 또는 국가별 적정 탄소배출량 배분 문제에 claims problem이 활용되었다.

Giménez-Gómez et al.(2016)은 전 세계를 OECD, 아시아, 아프리카 및 라틴 아메리카, 동유럽 등 4개 지역으로 분류하여 지역별 감축목표 할당 문제를 분석하였다. Claims problem의 대표적인 분배규칙인 proportional rule, constrained equal award rule, constrained equal loss rule, Talmud rule을 적용하고 그 결과를 비교분석하였다. 또한, 분배규칙이 지니는 특성을 공리적으로 서술하고 각 규칙이 특성을 준수하는지 여부를 확인하였다. Duro et al.(2020)도 유사한 연구를 진행하였다. 저자들은 Giménez-Gómez et al.(2016)에서 다룬 것 이상의 분배규칙과 특성을 추가로 살피고 각 규칙과 특성 간의 관계를 정리하였다. OECD, 아시아, 중동 및 아프리카, 라틴 아메리카, 동유럽 등 5개 지역에 대해 각 분배규칙을 적용하고, 형평성과 안정성의 측면에서 결과를 비교하였다.

Claims problem을 활용하여 온실가스 감축목표 할당 문제에 접근하면서 동시에 경제적 파급효과까지 살펴본 연구들도 있다. 박선영·김동구(2011)는 국내 산업별 초기 탄소배출권 배분이 경제성장에 미치는 영향을 분석하였다. 총 28개 산업에 대하여 claims problem의 분배규칙을 적용하고 녹색성장회계를 활용하여 각 분배규칙의 결과를 바탕으로 연평균 경제성장률을 추계하였다. Heo and Lee(2022)는 claims problem을 동적 개

1) 외교부, “파리협정(Paris Agreement) 의의 및 특징”(검색일: 2022.10.5.)

념으로 확장하여 감축목표를 할당하고 경제적 파급효과를 분석하였다. 동적 claims problem의 작동원리는 다음과 같다. 먼저 최초 클레임을 바탕으로 분배규칙을 통해 감축목표를 할당한다. 할당받은 감축목표 달성을 전제로 경제활동을 하고 그에 따른 배출 결과가 다음 기의 새로운 클레임이 된다. 다음 기에는 이 새로운 클레임을 바탕으로 동일한 분배규칙으로 감축목표를 할당한다. 이를 반복함으로써 저자들은 전 세계 6개 지역을 대상으로 각 분배규칙별 감축목표 할당량과 이에 따른 1인당 GDP의 추세를 추정하였다.

상기 연구들이 claims problem의 대표적 분배규칙과 원칙 하에서 온실가스 감축목표 할당 문제를 다루었다면, 임정민·김동구(2020)와 Ju et al.(2021) 등은 온실가스 감축목표 할당에 초점을 맞추어 고려가 필요한 원칙을 살피고, 이에 상응하는 분배규칙을 정의하였다. 임정민·김동구(2020)는 주권, 평등, 배출효율성이라는 세 가지 원칙에 기반을 둔 분배규칙을 활용하여 아시아 지역 내 탄소예산을 국가별로 할당하는 연구를 진행하였다. 이때 주권은 배출비중, 평등은 동일 1인당 배출량, 배출효율성은 동일 배출집약도를 기준으로 하며, 저자들은 단일 원칙에 입각한 분배규칙과 2개 이상의 원칙을 복합 적용한 방식을 모두 고려하여 배분 결과를 비교분석하였다. Ju et al.(2021)도 온실가스 감축목표 할당 시 고려해야 하는 원칙을 근거로 분배규칙을 정의하였다. 이에 더하여 각 원칙이 지니는 특징을 공리적으로 분석하고, 세계 주요 지역 및 국가에 적용하여 그 결과를 확인하였다.

본 연구는 국내 부문별 온실가스 감축목표 할당에 claims problem의 여러 분배규칙을 적용하고 그 결과를 비교분석한다. 감축목표가 없는 경우 부문별 배출량의 총합이 감축목표 하의 총배출량보다 클 가능성이 있기에 claims problem을 적용해 볼 여지가 있다. 국내 온실가스 감축목표 할당에 claims problem을 적용한 박선영·김동구(2011)가 국내 28개 산업에 대하여 분석하였다면, 본 연구는 「2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상황안」에서 다루는 온실가스 배출 부문에 대하여 분석을 시도한다. 구체적으로 claims problem의 분배규칙을 도입하여 각 규칙의 공리적 특성을 살피고, 분배 결과를 목표치와 비교분석하였다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 II 장에서는 기본 모형을 정의하고 claims problem의 대표적인 분배규칙 5개를 정의한다. 이에 더하여 Giménez-Gómez et al.(2016)과

Duro et al.(2020) 등을 참고하여 탄소배출권 할당 시 고려해야 할 분배규칙의 특성을 살피고 5개 분배규칙과의 관계를 확인한다. III 장에서는 실제 우리나라 2030년 온실가스 감축목표와 5개 분배규칙을 적용해 도출한 할당량을 비교분석한다. 이후 IV 장 결론에서는 논의를 정리하고 향후 필요한 연구에 대해 논한다.

II. 분석 모형

1. 기본 모형 및 분배규칙

Claims problem은 참여자가 분배받기를 요구하는 클레임(claim)과 분배해야 하는 부존량(endowment)으로 정의되며, 자명한(trivial) 결과를 제외하기 위해 부존량이 전체 클레임의 합보다 작은 상황을 가정한다. 본 연구에서 참여자는 전환, 산업, 건물, 수송, 농축수산, 폐기물, 기타 등 7개 부문이고,²⁾ 클레임은 2018년도 기준 각 부문의 탄소배출량이다.³⁾ 부존량은 NDC에서 제시한 목표 배출량으로 2020년 제출한 수정 NDC(이하 기존 NDC)와 2021년 제출한 NDC 상향안(이하 상향 NDC)을 각각 살폈다. 2018년 7개 부문의 총배출량은 727.6백만 톤이었으나, 기존 NDC와 상향 NDC에서 목표로 제시한 해당 부문의 총배출량은 각각 584.6백만 톤, 499.5백만 톤이다.⁴⁾ 2018년 총배출량 대비 2개 NDC 목표에서 나타난 총배출량이 적기에, 즉 클레임의 총합보다 부존량이 작아졌기에 claims problem을 적용해 볼 수 있다.

이상을 수식으로 나타내면 다음과 같다. 참여자인 부문의 집합은 $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 이며, 이때 $n = 7$ 이다. 각 부문 $i \in N$ 은 클레임 $c_i \geq 0$ 을 가지며, 전체 클레임의 벡터는 $c = (c_i)_{i \in N}$ 로 정의한다. 분배해야 하는 부존량은 $E \in R_+$ 로 정의한다. Claims problem은 $(c, E) \in R_+^n \times R_+$ 로 정의되고, 이때 $\sum c_i > E$ 로 가정한다. 모든 claims problem의

2) 수소는 NDC 상향안에 포함되었으나 2018년 배출량과 현 NDC 목표 배출량 정보가 포함되지 않아, 본 연구에서는 제외하였다.

3) 기본적으로 기준연도인 2018년도 배출량을 클레임으로 정의하되, 부존량을 상향 NDC 목표로 설정한 경우 추가적으로 기존 NDC의 정부목표를 두 번째 클레임으로 고려하였다.

4) 수소 배출량과 흡수 및 제거를 통한 감소량을 포함하면 현 NDC(기존 NDC)와 NDC 상향안(상향 NDC)의 목표 배출량은 각각 536.1백만 톤, 436.6백만 톤이다. 본 연구에서는 수소 배출량과 흡수 및 제거 관련 배출량 및 감소량은 고정값으로 가정하고, 전환, 산업, 건물, 수송, 농축수산, 폐기물, 기타 7개 부문의 배출량에 대해서만 고려한다(<표 2> 참고).

집합을 $(c, E) \in C$ 라 정의한다. Claims problem의 해를 구하기 위한 분배규칙(rule)은 $\varphi : C \rightarrow R^n$ 로 정의하는데, 모든 $i \in N$ 에 대하여 $0 \leq \varphi_i \leq c_i$ 와 $\sum \varphi_i(c, E) = E$ 를 만족하는 것을 조건으로 한다. 첫 번째 조건은 분배받은 결과가 음수가 아니면서(non-negativity), 자신의 클레임을 초과하면 안 된다는(claim-boundedness) 조건이며, 두 번째 조건은 효율성(efficiency) 조건이다. 본 연구에서는 claims problem의 가장 대표적인 규칙 5가지를 고려한다.

첫 번째 규칙은 비례법, proportional rule(φ^{PROP})이다. 이는 각 부문의 클레임에 비례하여 배출량을 분배하는 방식이다.

(정의 1) Proportional rule(φ^{PROP}): 각각의 $(c, E) \in C, i \in N$ 에 대하여

$$\varphi_i^{PROP}(c, E) = \lambda c_i \text{이며, 이 때 } \lambda = E / \sum c_i.$$

두 번째와 세 번째 분배규칙은 공통적으로 균등하게 분배한다는 시각에서 출발한다. 먼저 constrained equal award rule(φ^{CEA})은 균등 이익에 초점을 맞춘다. 각 참여자가 제시한 클레임을 고려하여 균등 분배한다. 반면, constrained equal loss rule(φ^{CEL})은 클레임이 아닌 분배받지 못하는 손실에 방점을 둔다. 균등 손실의 측면에서 분배하기에, 클레임이 큰 경우 이 분배규칙에서 더 많은 배출량을 할당받을 수 있다.

(정의 2) Constrained equal award rule(φ^{CEA}): 각각의 $(c, E) \in C, i \in N$ 에 대하여

$$\varphi_i^{CEA}(c, E) = \min\{c_i, \mu\} \text{이며, 이 때 } \sum \min\{c_i, \mu\} = E.$$

(정의 3) Constrained equal loss rule(φ^{CEL}): 각각의 $(c, E) \in C, i \in N$ 에 대하여

$$\varphi_i^{CEL}(c, E) = \max\{0, c_i - \mu\} \text{이며, 이 때 } \sum \max\{0, c_i - \mu\} = E.$$

네 번째 규칙인 Talmud rule(φ^T)은 앞서 constrained equal award rule과 constrained equal loss rule를 결합한 규칙이다. claim 총합의 절반이 부존량보다 작거나 같은 경우, 절반의 claim에 대하여 constrained equal award rule을 적용하고, 그 반대의 경우 절반의 claim에 대하여 constrained equal loss rule을 적용한다.

(정의 4) Talmud rule(φ^T): 각각의 $(c, E) \in C, i \in N$ 에 대하여

$$\begin{aligned} \varphi_i^T(c, E) &\equiv \varphi_i^{CEA}(c/2, E) \text{ if } E \leq \sum c_i/2; \text{ 또는} \\ \varphi_i^T(c, E) &\equiv c_i/2 + \varphi_i^{CEL}(c/2, E - \sum c_i/2), \text{ otherwise.} \end{aligned}$$

마지막 규칙 random arrival rule(φ^{RA})은 순서를 정하여 부존량이 모두 소진될 때까지 각 부분의 클레임이 순서에 따라 완전히 인정되는 경우를 가정한다. 이때 선착순에 따라 발생할 수 있는 불공정성을 없애기 위해 모든 가능한 순서에서 나오는 결과의 평균을 할당한다.

(정의 5) Random arrival rule(φ^{RA}): 각각의 $(c, E) \in C, i \in N$ 에 대하여

$$\varphi_i^{RA}(c, E) = \frac{1}{n!} \sum_{\langle \cdot \rangle \in R^n} \min \left\{ c_i, \max \left\{ E - \sum_{j \in N, j < i} c_j, 0 \right\} \right\}.$$

아래 예시 1은 이상에서 정의한 5개 규칙을 참여자가 3명인 상황에서 적용한 결과이다. 각 참여자의 클레임은 참여자 1이 5, 참여자 2가 15, 참여자 3이 30이며, 부존량은 30이라고 가정한다.

(예시 1) $N = \{1, 2, 3\}, c_1 = 5, c_2 = 15, c_3 = 30, E = 30$ 의 경우

| | c_i | φ_i^{PROP} | φ_i^{CEA} | φ_i^{CEL} | φ_i^T | φ_i^{RA} |
|-------|-------|--------------------|-------------------|-------------------|---------------|------------------|
| 참여자 1 | 5 | 3 | 5 | 0 | 2.5 | 2.5 |
| 참여자 2 | 15 | 9 | 12.5 | 7.5 | 7.5 | 7.5 |
| 참여자 3 | 30 | 18 | 12.5 | 22.5 | 20 | 20 |

먼저 proportional rule은 참여자의 클레임에 비례하여 순서대로 3, 9, 18을 할당한다. Constrained equal award rule은 우선 클레임이 가장 작은 참여자 1의 클레임인 5만큼 3명에게 모두 할당한다. 그리고 남은 부존량 15에 대해서 참여자 2와 참여자 3의 남은 클레임을 바탕으로 분배하는데, 최대 참여자 2의 클레임만큼 균등 분배한다. 그 결과 참여자 1은 5를, 참여자 2와 참여자 3은 각각 12.5를 할당받는다. Constrained equal loss rule

은 클레임이 가장 큰 참여자 3의 클레임인 30을 기준으로 모든 참여자가 균등하게 손실을 입도록 할당량을 계산한다. 결과적으로 참여자 2와 참여자 3은 각각의 클레임에서 7.5씩 제한 7.5와 22.5를 할당받게 된다. 이때, 클레임이 5인 참여자 1에게는 음의 할당량이 아닌 0을 할당한다. Talmud rule은 부존량과 클레임을 절반으로 나누어 constrained equal award rule과 constrained equal loss rule을 적용하여 참여자들 각자에게 2.5, 7.5, 20만큼씩 할당한다. 마지막으로 random arrival rule은 3명의 참여자를 순서대로 나열하는 6개의 순열을 가정하고 각각의 순열에서 남은 부존량 중 최대 자신의 클레임만큼 할당한다. 예를 들어 순열 (1,2,3)에서는 참여자 1이 5만큼을 먼저 할당받고 그 다음 참여자 2가 15를 할당받으며 참여자 3이 남은 10을 할당받는다. 분배결과는 총 6개 순열에서의 할당량을 평균한 값이다. 이 예시에서는 Talmud rule과 동일한 결과로 나타났다.

2. 공리(Axiom)와 각 규칙의 특성

Claims problem는 분배규칙의 특성을 공리(axiom)를 이용하여 설명한다. 공리는 각 규칙의 특성으로 사회적으로 수용될 수 있는 기본적 공리부터 각 규칙의 특성을 설명하기 위한 공리까지 다양하게 정의된다. 공리적 접근은 각 규칙이 어떤 특성을 지니는지, 그리고 특정 공리들의 조합을 만족하는 유일한 규칙은 무엇인지 확인할 수 있게 해준다. 본 절에서는 일반적으로 활용되는 공리를 정의하고(Giménez-Gómez et al., 2016; Duro et al., 2020; Thomson, 2019) 앞서 살핀 5개 규칙과의 관계를 정리한다.

먼저 가장 기본적인 세 가지 공리를 정의한다. Equal treatment of equals은 두 개 부문이 같은 클레임을 가졌다면 할당량도 동일해야 한다는 공리다. 수식으로는 각각의 $(c, E) \in C$, $\{i, j\} \subseteq N$ 에 대하여 $c_i = c_j$ 이면 $\varphi_i(c, E) = \varphi_j(c, E)$ 로 정의된다. Anonymity는 배출량 할당에는 클레임만 영향을 준다는 조건으로 각각의 $(c, E) \in C$, $\pi \in \Pi^N$, $i \in N$ 에 대하여 $\varphi_{\pi(i)}((c_{\pi(i)})_{i \in N}, E) = \varphi_i(c, E)$ 로 정의할 수 있다. 여기서 Π^N 는 N 에 대한 permutation이다. 클레임이 더 큰 경우 할당량과 감축량이 더 많아야 한다는 공리인 order preservation은 각각의 $(c, E) \in C$, $i, j \in N$ 에 대하여 $c_i \geq c_j$ 인 경우 $\varphi_i(c, E) \geq \varphi_j(c, E)$ 이며 $c_i - \varphi_i(c, E) \geq c_j - \varphi_j(c, E)$ 일 때 만족한다.

Giménez-Gómez et al.(2016)은 탄소배출권 할당 문제에서 고려할 수 있는 공리로 다

음 세 가치를 추가로 고려하였다. Self-duality는 클레임 중 할당받은 양과 할당받지 못한 양을 고려하는데, 각각의 $(c, E) \in C, i \in N$ 에 대하여 $\varphi_i(c, E) = c_i - \varphi_i(c, \sum c_i - E)$ 로 정의된다. 예시 1로 다시 돌아가면 proportional rule은 참여자 1에게 3을 할당하는데 ($\varphi_1^{PROP}(c, E) = 3$), 이는 참여자 1이 보유한 클레임($c_1 = 5$)에서 할당받지 못하는 양 ($\varphi_1(c, \sum c_i - E) = 2$)을 제한 값과 같다. Claims truncation invariance는 각 참여자의 클레임에 부존량을 상한선으로 두더라도 같은 분배 결과가 나온다는 공리이다. 즉, 각각의 $(c, E) \in C, i \in N$ 에 대하여 $\varphi_i(c, E) = \varphi_i(\min\{c_i, E\}, E)$ 일 때 만족한다. Minimal rights first는 참여자에게 최소한 각자의 minimal right만큼은 할당해야 한다는 공리이다. 이때, 참여자 i 의 minimal right는 전체 부존량에서 i 를 제외한 모든 참여자의 클레임만큼을 제한 값이다. 만약 이 값이 음수라면 참여자 i 의 minimal right는 0이 된다. 위 예시 1에서 minimal rights는 참여자 1과 참여자 2는 0, 참여자 3은 10이다. Minimal rights를 $m_i(c, E) = \max\left\{E - \sum_{N \setminus i} c_j, 0\right\}$ 로 정의하고, $m(c, E) = (m_i(c, E))_{i \in N}$ 라 하자. 해당 공리는 각각의 $(c, E) \in C, i \in N$ 에 대하여 $\varphi_i(c, E) = m_i(c, E) + \varphi_i(c - m(c, E), E - \sum m_i(c, E))$ 일 때 만족한다.

위 공리들은 부존량(E)에 변화가 없을 때를 다루지만 국가의 탄소배출 목표 변화에 따라 부존량이 변할 수 있다($E' \neq E$). 다음 4개 공리들은 부존량이 변하는 경우를 고려한다. Resource monotonicity는 부존량이 커진 경우 큰 부존량 하에서 할당받은 양은 이전 부존량에서의 할당량 이상이어야 한다는 공리이다. 따라서 이 공리를 만족하려면 각각의 $(c, E) \in C, E' \in R_+$ 에서 $\sum c_i > E' > E$ 라면, 모든 $i \in N$ 에 대하여 $\varphi_i(c, E') \geq \varphi_i(c, E)$ 가 성립해야 한다. 본 연구에서 고려할 부존량은 2개로 기존 NDC보다 상향 NDC에서 할당 가능한 배출량, 즉 부존량이 줄어든다. 이는 각 부문이 상향 NDC 목표에 따라서 할당받는 배출량은 기존 NDC에서 할당받는 배출량보다는 클 수 없는 것으로 해석할 수 있다. Super-modularity는 클레임이 크면 부존량 증가에 따른 할당량 증가분도 커야 한다는 공리이다. 각각의 $(c, E) \in C, E' \in R_+, i, j \in N$ 에 대하여 $\sum c_i > E' > E$ 이고 $c_i \geq c_j$ 인 경우, $\varphi_i(c, E') - \varphi_i(c, E) \geq \varphi_j(c, E') - \varphi_j(c, E)$ 로 표현된다. Composition down은 부존량이 감소할 때, 클레임으로 분배하는 경우와 최초 부존량 하에서의

할당량을 클레임으로 대체하여 분배하는 경우의 결과가 동일하면 만족한다. 반대로, composition up은 부존량이 증가하는 경우, 클레임을 바탕으로 증가한 부존량에서 할당 한 값은 기존 부존량에서 클레임으로 할당받은 양과 부존량 및 클레임의 변화분으로 할당받은 양의 차이와 같을 때 만족한다. 수식으로 composition down은 각각의 $(c, E) \in C, i \in N, 0 \leq E' \leq E$ 에 대하여 $\varphi_i(c, E') = \varphi_i(\varphi(c, E), E')$ 이고, composition up은 각각의 $(c, E) \in C, i \in N, 0 \leq E \leq E' \leq \sum c_i$ 에 대하여 $\varphi_i(c, E') = \varphi_i(c, E) + \varphi_i(c - \varphi(c, E), E' - E)$ 이다.

〈표 1〉 분배규칙과 공리 간 관계

| 공리 / 규칙 | φ^{PROP} | φ^{CEA} | φ^{CEL} | φ^T | φ^{RA} |
|------------------------------|------------------|-----------------|-----------------|-------------|----------------|
| Equal treatment of equals | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Anonymity | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Order preservation | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Self-duality | ○ | × | × | ○ | ○ |
| Claims truncation invariance | × | ○ | × | ○ | ○ |
| Minimal rights first | × | × | ○ | ○ | ○ |
| Resource monotonicity | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Super-modularity | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Composition down | ○ | ○ | ○ | × | × |
| Composition up | ○ | ○ | ○ | × | × |

출처: Giménez-Gómez et al.(2016), Duro et al.(2020), Thomson(2019).

〈표 1〉은 5개 분배규칙이 이상에서 정의한 10개의 공리를 만족하는지 여부를 정리한 것이다. 기본적인 공리인 첫 3개의 공리는 5개 분배규칙이 모두 만족한다. 다음 3개의 공리에 대해서도 Talmud rule과 random arrival rule은 모두 만족한다. 하지만 그 외 3개 분배규칙 중 proportional rule은 self-duality만, constrained equal award rule은 claims truncation invariance만, constrained equal loss rule은 minimal rights first만 만족한다. 이러한 차이는 각 규칙의 특성을 보여주기도 한다. 마지막 4개의 공리는 부존량이 변하는 경우를 살폈는데 5개 분배규칙은 모두 resource monotonicity와 super-modularity를

만족하나, composition down과 composition up은 Talmud rule과 random arrival rule을 제외한 3개 규칙이 만족한다. 이러한 공리적 접근을 통하여 각 분배규칙의 특성을 확인할 수 있다.

III. 분석 결과

Claims problem 분배규칙의 결과와 비교하기 위해 먼저 우리나라 국가 온실가스 감축목표를 살펴본다. <표 2>은 우리나라의 기존 NDC 목표와 작년 말 UNFCCC에 제출한 상향 NDC 목표를 보여준다. 2개의 NDC 목표는 2018년도를 기준으로 수립되었으며, 기존 NDC의 2030년 국가 온실가스 감축목표는 기준연도 대비 26.3% 감축, 상향 NDC 목표는 40.0% 감축이다. 기존 NDC의 2030년 목표 배출량은 총배출량 기준 584.6백만 톤, 순배출량 기준 536.0백만 톤이고, 상향 NDC는 총배출량 기준 499.5백만 톤, 순배출량 기준 436.6백만 톤이다.

배출은 전환, 산업, 건물, 수송, 농축수산, 폐기물, 수소, 기타(탈루 등) 8개 부문으로 분류된다. 그중 전환 부문은 2018년 기준 배출량이 269.6백만 톤으로 가장 많으면서 목표 감축량이 가장 큰 부문이기도 하다. 2030년 배출목표는 기존 NDC에서 192.7백만 톤, 상향 NDC에서 149.9백만 톤인데 2018년 대비 감축률은 각각 28.5%, 44.4%로 전체 국가 온실가스 감축목표인 26.3%, 40.0%보다도 크다. 한편, 산업 부문의 2018년 배출량은 260.5백만 톤으로 전환 부문에 이어 두 번째로 온실가스 배출량이 많다. 2030년 목표 배출량은 기존 NDC 기준 243.8백만 톤, 상향 NDC 기준 222.6백만 톤으로 2개 NDC 모두에서 가장 목표 배출량이 크다. 상향 NDC 기준으로 건물 부문의 배출목표는 2018년 배출량 52.1백만 톤에서 32.8% 감소한 35.0백만 톤이고, 수송 부문은 98.1백만 톤에서 37.8% 감소한 61.0백만 톤이다. 농축수산, 폐기물, 탈루 등 기타 부문도 상향 NDC 기준으로 2018년 대비 27.1~46.8% 감축하는 것으로 목표가 설정되었다.

부문별 온실가스 배출목표를 claims problem의 분배규칙을 적용한 결과와 비교하기 위하여, <표 2>의 8개 배출 부문 중 수소를 제외한 7개 부문을 고려하였다. 수소를 제외한 이유는 기준연도인 2018년의 수소 부문 배출량이 없어 수소의 클레임을 설정할 수 없기 때문이다. 부존량은 흡수 및 제거 수단을 고려하지 않은 7개 배출 부문의 총배출량으

로 정의한다. 이에 따라 기존 NDC의 부존량은 584.6백만 톤, 상향 NDC의 부존량은 499.5백만 톤이다. Claims problem은 7개 부문의 총 배출목표 내에서 부문별 배출량을 각 분배규칙의 정의에 따라 할당한다. 부문별 클레임은 기존 NDC 부존량에는 2018년 배출량을, 상향 NDC 부존량에는 2018년 배출량과 기존 NDC 할당량을 고려한다. 다음 3개의 그래프는 각각의 경우에 claims problem 분배규칙의 적용 결과를 보여주고 있다.5) 자세한 수치 결과는 부록에 제시하였다.

〈표 2〉 우리나라 국가 온실가스 감축목표

(단위: 백만CO₂eq.톤, %)

| | 기준연도 (2018) | 기존 NDC (2020) | | 상향 NDC (2021) | | |
|---------------|----------------|------------------|-------|------------------|-------|-------|
| | | 배출량 | 배출목표 | 감축률 | 배출목표 | 감축률 |
| 배출량/배출목표 | 727.6 | 536.1 | 26.3% | 436.6 | 40.0% | |
| 배출 | 전환 | 269.6 | 192.7 | 28.5% | 149.9 | 44.4% |
| | 산업 | 260.5 | 243.8 | 6.4% | 222.6 | 14.5% |
| | 건물 | 52.1 | 41.9 | 19.5% | 35.0 | 32.8% |
| | 수송 | 98.1 | 70.6 | 28.1% | 61.0 | 37.8% |
| | 농축수산 | 24.7 | 19.4 | 21.6% | 18.0 | 27.1% |
| | 폐기물 | 17.1 | 11.0 | 35.6% | 9.1 | 46.8% |
| | 수소 | | | | 7.6 | |
| | 기타(탈루 등) | 5.6 | 5.2 | 7.1% | 3.9 | 30.4% |
| | 총배출량(수소 포함) | 727.7 | 584.6 | | 507.1 | |
| | 총배출량(수소 제외) | 727.7 | 584.6 | | 499.5 | |
| 흡수 및 제거 | 흡수원 | -41.3 | -22.1 | | -26.7 | |
| | CCUS | | -10.3 | | -10.3 | |
| | 국외감축 | | -16.2 | | -33.5 | |
| | 합계 | -41.3 | -48.6 | | -70.5 | |
| 순배출량 | 686.4 | 536.0 | | 436.6 | | |

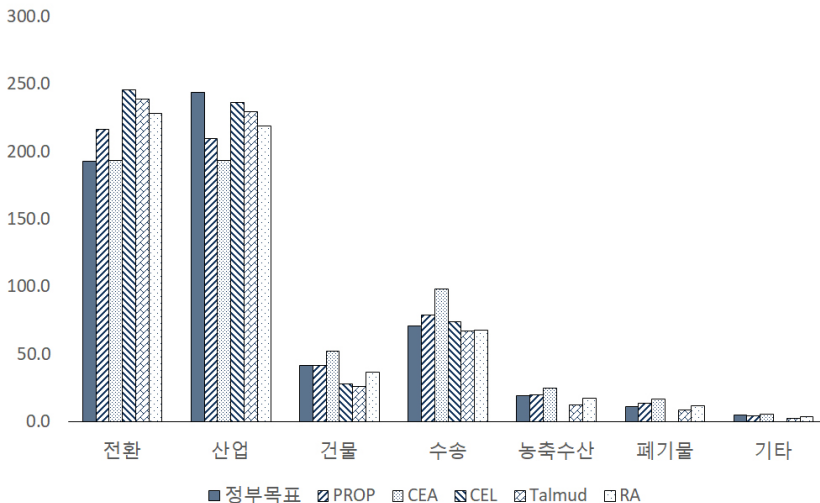
주: 기준연도(2018) 배출량은 총배출량, 2030년 배출목표는 순배출량(총배출량 - (흡수 및 제거량))이다. 소수점 계산으로 인하여 1행의 배출량/배출목표와 10~11행의 총배출량, 마지막 행의 순배출량 간 오차가 발생하였다.

출처: 관계부처 합동(2021.10.18.) p.11 참고하되 저자 일부 수정.

5) 데이터 분석에는 R 프로그램의 패키지를 활용하였다(Cano-Berlanga et al., 2015).

<그림 1>은 2018년 배출량을 클레임으로 설정하고 기존 NDC 배출목표인 584.6백만 톤을 분배한 결과이다. 그래프는 부문별로 기존 NDC에 제시된 목표와 proportional(PROP) rule, constrained equal award(CEA) rule, constrained equal loss(CEL) rule, Talmud rule, random arrival(RA) rule의 결과를 차례대로 보여준다. 먼저 5개 분배규칙의 결과를 살펴보면, 상대적으로 클레임이 큰 전환 부문과 산업 부문은 CEL rule에서 가장 많은 양을 분배받았다. 이어서 Talmud rule, RA rule, PROP rule, CEL rule 순으로 배출량을 할당받았다. 반대로 그 외 5개 부문은 CEA rule을 적용하였을 때 가장 많은 양을 분배받았다. 이때 CEA rule은 5개 부문 각각에 분배받을 수 있는 상한선인 클레임만큼을 할당하는 것으로 나타났다. 즉, CEA rule에 따르는 경우 전환과 산업 부문을 제외한 부문들은 2018년 배출량과 동일한 양을 목표 배출량으로 할당받는다. 클레임이 세 번째로 큰 수송 부문은 CEA rule에 이어 PROP rule, CEL rule, RA rule, Talmud rule 순으로 배출량을 분배받는다. 건물 부문은 수송 부문과 유사하되 RA rule에서 CEL rule보다 더 많은 배출량을 할당받는다라는 점이 다르다. 농축수산, 폐기물, 기타 부문은 동일하게 CEA rule에 이어 PROP rule, RA rule, Talmud rule, CEL rule 순으로 배출량을 할당받는다. 특히 CEL rule은 할당하지 않거나 매우 소량 할당한다.

<그림 1> 기존 NDC 목표 기준 분배결과



이상에서 살핀 5개 분배규칙 결과를 기존NDC의 부문별 목표와 비교해보자. 먼저 전환 부문은 목표 배출량이 5개 분배규칙보다 더 적다. CEA rule에서 할당하는 배출량이 193.5백만 톤으로 5개 분배규칙 중 가장 작은데 정부목표는 이보다 작은 192.7백만 톤을 할당한다. 반대로 산업 부문은 5개 분배규칙보다 목표 배출량이 더 크다. 산업 부문의 목표 배출량은 243.8백만 톤으로 분배규칙 중 최대 배출량을 할당하는 CEL rule의 236.4백만 톤보다도 많다. 수송 부문과 폐기물 부문의 목표 배출량은 5개 분배규칙 중 할당량 기준으로 상위 3개 규칙보다는 적지만 하위 2개 규칙보다는 많으며, RA rule의 결과가 가장 근접한 것으로 나타났다. 건물 부문과 기타 부문의 목표 배출량은 각각 CEA rule을 제외한 4개 분배규칙에서 할당하는 배출량보다 많다. 마지막으로, 농축수산의 목표 배출량은 5개 분배규칙 중 2번째로 많은 양을 할당하는 PROP rule보다 소폭 작다.

<그림 2>는 분배할 수 있는 온실가스 배출량, 즉 부존량이 상향NDC 목표인 499.5백만 톤으로 감소한 상황에서 클레임으로 기준연도인 2018년의 배출량을 설정한 경우와 기존NDC의 목표 배출량을 설정한 경우 각각의 결과를 보여준다.

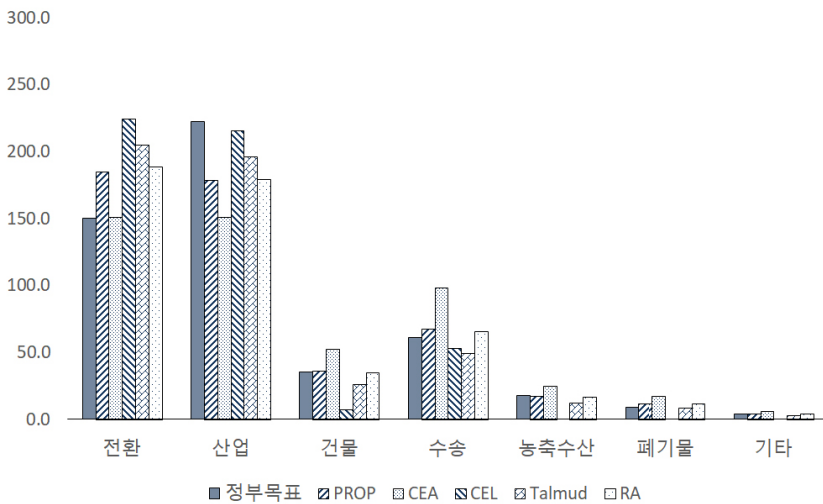
먼저 클레임을 2018년 배출량 기준으로 설정한 경우를 살펴보자(<그림 2-①>). 앞서 부존량이 기존NDC 목표일 때와 마찬가지로 클레임이 큰 전환 부문과 산업 부문은 5개 분배규칙 중 CEL rule에서 가장 할당량이 크고, 그 외 부문은 CEA rule에서 최대 할당량인 각자의 클레임까지 분배받는다. 분배규칙에 따른 할당량을 크기순으로 정렬하였을 때도 수송 부문과 건물 부문을 제외한 그 외 부문은 기존NDC를 기준으로 했을 때와 같은 결과가 나타난다. 전환 부문과 산업 부문은 CEL rule에 이어 Talmud rule, RA rule, PROP rule, CEA rule 순이고, 농축수산, 폐기물, 기타 부문은 CEA rule, PROP rule, RA rule, Talmud rule, CEL rule 순으로 <그림 1>의 기존NDC 경우와 동일하다. 한편, 수송 부문은 CEA rule에 이어 PROP rule, RA rule, CEL rule, Talmud rule 순으로 배출량을 할당받는다. 건물 부문은 수송 부문과 유사하나, Talmud rule보다 CEL rule에서 더 많은 양을 할당받는다.

목표 배출량과 비교하면 상향NDC에서도 기존NDC와 마찬가지로 전환 부문의 목표 배출량은 적게, 산업 부문의 목표 배출량은 크게 설정되었음을 확인할 수 있다. 전환 부문의 목표 배출량인 149.9백만 톤은 5개 분배규칙에서 할당하는 배출량보다 작다. 목표 배출량에 근접한 할당량은 CEA rule을 적용하였을 때의 151.0백만 톤이다. 산업 부문의

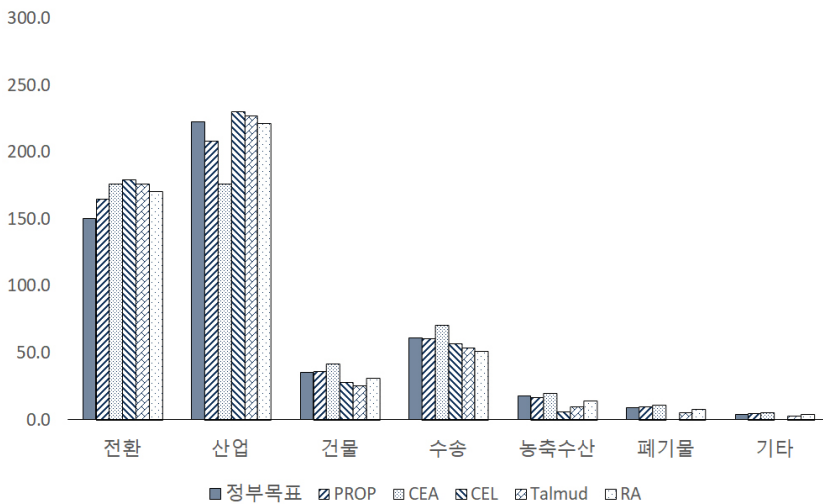
목표 배출량도 여전히 5개 분배규칙에서 할당하는 양보다 더 많으며, 따라서 215.3백만 톤의 CEL rule이 가장 유사한 할당량을 제시한다. 그 외 부문의 목표 배출량은 대체로 PROP rule 또는 RA rule에서 할당하는 배출량과 유사한 결과로 나타났다.

〈그림 2〉 상향 NDC 목표 기준 분배결과

① 클레임이 2018년도 배출량 기준인 경우



② 클레임이 기존 NDC의 목표 배출량인 경우



다음으로 상향NDC에서 목표로 하는 온실가스 배출량을 부존량으로 하고, 부문별 클레임에는 기존 NDC의 부문별 감축목표를 설정한 분배 결과를 살펴본다(<그림 2-②>). 기존 NDC의 목표 배출량은 부문별 향후 감축가능성 등을 고려한 값이기에, 이를 클레임으로 설정한 분배결과는 2018년도 배출량을 클레임으로 설정한 경우보다 합리적이라 할 수 있다. 클레임을 2018년 배출량으로 설정한 경우와 가장 큰 차이는 5개 분배규칙이 할당하는 배출량 간 차이가 줄어들었다는 점이다. 전환 부문의 목표 배출량은 여전히 5개 분배규칙에서 제시하는 할당량보다 적고, 이 경우에는 PROP rule이 가장 근접한 배출량을 할당한다. 가장 큰 클레임을 보유하고 된 산업 부문의 목표 배출량은 PROP rule, CEA rule, RA rule에서 할당하는 배출량보다 많지만, 다른 2개 분배규칙보다는 적은 것으로 나타났다. 목표 배출량이 222.6백만 톤인 산업 부문에 대하여 CEL rule은 230.0백만 톤, Talmud rule은 227.0백만 톤을 할당한다. 그 외 부문에서는 CEA rule이 여전히 분배 가능한 최대치인 각자의 클레임까지 할당한다. 또한, 기타 부문의 목표 배출량은 RA rule이 가장 근접한 결과를 제시하였고, 그 외 4개 부문은 PROP rule을 적용하였을 때 도출되는 할당량이 각 부문의 목표 배출량과 가장 유사한 것으로 확인되었다.⁶⁾

한편, 클레임을 2018년 배출량 기준으로 한 경우(<그림 2-①>)와 기존 NDC 목표 배출량으로 한 경우(<그림 2-②>)를 비교하면 클레임 변화에 따른 분배 결과를 확인할 수 있다. 모든 부문에서 2018년 배출량에 비해 기존 NDC 목표 배출량이 감소하였으나 부문별 클레임 감소량이 상이함에 따라 분배 결과에도 변화가 나타났다. 클레임 감소량이 가장 큰 전환 부문은 CEA rule을 제외한 4개 분배규칙에서 할당량이 감소하였다. CEA rule의 할당량이 증가한 이유는 전환과 산업 부문을 제외한 5개 부문의 클레임 감소와 연관된다. CEA rule은 5개 부문의 클레임만큼을 할당 후 남은 부존량을 전환과 산업 부문에 균등 분배하는데, 5개 부문에 할당할 수 있는 최대치가 감소하여 전환 및 산업 부문이 더 많은 양을 분배받을 수 있게 되었다. 한편, 산업 부문은 클레임 규모 순으로 2018년 배출량 기준 2위에서 기존 NDC 목표 배출량 기준 1위로 올라섰는데, 이에 따라 기존 NDC 목표 배출량을 클레임으로 할 때 모든 배분규칙에서 더 많은 배출량을 분배받는다. 수송

6) 정부목표와 분배규칙 간 배출량 분배 결과의 유사도를 확인하기 위해 유클리드 거리(Euclidean distance)를 계산한 결과, PROP rule이 정부목표와 가장 유사한 것으로 나타났다. 정부목표와 각 분배규칙 간 유클리드 거리는 부표에 포함하였다.

부문은 전환 부문 다음으로 클레임 감소 폭이 큰 부문으로 PROP rule, CEA rule, RA rule에서 더 적은 배출량을 분배받았다. CEL rule의 할당량이 증가한 것은 클레임이 크게 감소한 전환 부문의 할당량이 줄어든 것에 영향을 받았다. 이와 유사하게 건물과 농축수산 부문에서도 CEL rule의 할당량이 증가하였다.

IV. 결론

우리나라는 2030년까지 2018년 배출량 대비 40.0% 감축한다는 국가 온실가스 감축 목표를 발표하고, 이에 따라 전환, 산업, 수송, 건물 등 부문별 감축목표를 설정하였다. 국가 온실가스 감축목표를 달성하기 위해서는 각 부문이 기존에 배출하던 만큼, 즉 클레임만큼 배출할 수 없다. 즉, 참여자들이 요구하는 클레임의 총합이 분배할 수 있는 부존량보다 작은 경우에서 분배방식을 다루는 claims problem에서 가정하는 상황이다. 본 연구는 협조적 게임이론의 claims problem을 활용하여 부문별 온실가스 배출량 분배문제를 분석하였다. Claims problem의 대표적인 5개 분배규칙을 정의하고 각 규칙의 특징을 공리로 확인하였다. 또한, 5개 분배규칙을 활용하여 NDC 목표를 기준으로 부문별로 할당하고, 그 결과를 정부가 발표한 부문별 목표 배출량과 비교분석하였다.

국가 온실가스 감축목표는 수정 NDC(기존 NDC)와 NDC 상향안(상향 NDC)에서 제시한 목표를 활용하였고, 각 부문의 클레임은 NDC에서 기준연도로 설정한 2018년 배출량으로 정의하였다. 추가로 상향 NDC 분석 시에는 기존 NDC에서 정부가 발표한 부문별 감축목표를 두 번째 클레임으로 고려하였다. 세 가지 경우에서 공통적으로 확인된 결과는 다음과 같다. 먼저 클레임이 큰 전환 및 산업 부문의 분배 결과를 정부목표와 비교하면, 전환 부문에 책정된 정부목표는 5개 분배규칙에서 할당한 배출량보다 낮다. 즉, 5개 분배규칙 중 클레임이 큰 부문에게 불리한 CEA rule의 결과보다도 낮게 책정되었다. 반면, 산업 부문의 정부목표 배출량은 클레임이 큰 부문에게 유리한 CEL rule의 할당량보다도 크거나 유사하며, 따라서 5개 분배규칙의 결과 대비 배출량을 많이 할당하였음을 확인하였다. 한편, 그 외 5개 부문은 대체로 proportional rule의 결과가 정부목표와 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

이처럼 claims problem의 분배규칙을 적용한 결과는 합리적인 배출량 분배 방식을 다

루었다는 점에서 의의를 갖는다. 또한, 2장에서 살핀 것처럼 분배 시 고려가 필요한 사항들을 공리적으로 접근해봄으로써 각 분배규칙이 지니는 특성도 확인 가능하다. 다만, 현실에서 부문별 목표 배출량 설정할 때에는 배출량뿐만 아니라 감축 가능성을 감안하는데, 이를 포함하여 고려하지 못했다는 점이 본 연구의 한계로 남는다. 예컨대, 전환부문은 재생에너지 발전 확대, 무탄소전원 추가 등 기술 발전에 힘입어 감축 가능성이 큰 부문으로 평가받는다. Claims problem을 활용한 분배결과와 정부목표 간 비교분석도 감축 가능성에 대한 추가적인 분석을 포함하였을 때, 보다 현실을 반영한 정책적 시사점을 제공할 수 있을 것이다.

이를 고려한 부문별 온실가스 감축목표 배분문제를 분석하기 위해서는 감축여력 등을 가중치로 적용한 규칙을 통하여 감축목표를 재설계하는 방안을 고려해볼 수 있다. Bergantiños and Moreno-Ternero(2019) 등은 문제 상황에 따라 claims problem의 분배 규칙들에 특정 가중치를 부여하는 등 변형하여 적용하기도 하였다. 한편, 분배의 형평성 측면에서 지니계수, 1인당 배출량 등을 지표로 형평성을 다룬 선행연구들도 있다(임정민·김동구, 2020; Duro et al., 2020; Ju et al., 2021). 각기 성격이 상이한 부문별 감축목표 분배에 이러한 지표를 적용할 가능성은 낮을 수 있으나, 산업 내 업종별 할당량 배분 시에는 고려할 수 있을 것이다. 이러한 논의는 추후 연구로 남겨둔다.

[References]

- 관계부처 합동, “2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향안”, 2021.10.18.
- 김호중·전영섭, “게임理論的 接近法에 의한 費用配分問題”, 「경제논집」, 제40권 제1호, 서울대학교 경제연구소, 2001, pp. 1~15.
- 대한민국 정부, “윤석열 정부 120대 국정과제”, 2022.7.
- 박선영·김동구, “Analysis of the Impact of Initial Carbon Emission Permits Allocation on Economic Growth”, 「자원·환경경제연구」, 제20권 제2호, 2011, pp. 167~198.
- 외교부, “파리협정(Paris Agreement) 의의 및 특징”, Accessed 2022.10.5.
- 임정민·김동구, “하향식 배출 허용량 관점에 따른 우리나라의 온실가스 감축 부담 분담에 관

- 한 연구”, 수시연구보고서 20-04, 에너지경제연구원, 2020.
- Bergantiños, G. and J. D. Moreno-Ternero, “Sharing the Revenues from Broadcasting Sport Events,” *Management Science*, Vol. 66, 2019, pp. 2417~2431.
- Cano-Berlanga, S., J. Giménez-Gómez, and C. Vilella, “Enjoying cooperative games: The R package GameTheory,” Working Paper No. 06, CREIP, Spain, 2015.
- Duro, J. A., J. Giménez-Gómez, and C. Vilella, “The allocation of CO₂ emissions as a claims problem,” *Energy Econ*, Vol. 86, 2020, 104652.
- Giménez-Gómez, J., J. Teixedó-Figueras, and C. Vilella, “The global carbon budget: a conflicting claims problem,” *Clim Change*, Vol. 136, 2016, pp. 693~703.
- Heo, E. J., and J. Lee, “Allocating CO₂ emissions: a dynamic claims problem,” *Rev Econ Design*, 2022.
- Ju, B. G., M. Kim, S. Kim, and J. D. Moreno-Ternero, “Fair international protocols for the abatement of GHG emissions,” *Energy Econ*, Vol. 94, 2021, 105091.
- O’Neill, B., “A Problem of Rights Arbitration in the Talmud,” *Math Soc Sci*, Vol. 2, 1982, pp. 345~371.
- Thomson, W., *How to divide when there isn’t enough*, vol 62. Cambridge University Press, Cambridge, 2019.
- UNEP, *Emission Gap Report 2021*, 2021.

[부록]

〈부록 표 1〉 부문별 온실가스 감축목표 분배 결과

| | 클레임 | 정부 목표 | PROP | CEA | CEL | Talmud | RA |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| 기존 NDC 기준(클레임: 2018년 배출량) | | | | | | | |
| 전환 | 269.6 | 192.7 | 216.6 | 193.5 | 245.5 | 238.5 | 228.0 |
| 산업 | 260.5 | 243.8 | 209.3 | 193.5 | 236.4 | 229.4 | 218.9 |
| 건물 | 52.1 | 41.9 | 41.9 | 52.1 | 28.0 | 26.1 | 36.9 |
| 수송 | 98.1 | 70.6 | 78.8 | 98.1 | 74.0 | 67.0 | 67.6 |
| 농축수산 | 24.7 | 19.4 | 19.8 | 24.7 | 0.6 | 12.4 | 17.3 |
| 폐기물 | 17.1 | 11.0 | 13.7 | 17.1 | 0.0 | 8.6 | 12.0 |
| 기타 | 5.6 | 5.2 | 4.5 | 5.6 | 0.0 | 2.8 | 3.9 |
| 유사도* | | | 42.9 | 58.8 | 59.6 | 51.3 | 43.7 |
| 상향 NDC 기준(클레임: 2018년 배출량) | | | | | | | |
| 전환 | 269.6 | 149.9 | 185.1 | 151.0 | 224.4 | 204.9 | 188.4 |
| 산업 | 260.5 | 222.6 | 178.8 | 151.0 | 215.3 | 195.8 | 179.3 |
| 건물 | 52.1 | 35.0 | 35.8 | 52.1 | 6.9 | 26.1 | 34.7 |
| 수송 | 98.1 | 61.0 | 67.3 | 98.1 | 52.9 | 49.1 | 65.4 |
| 농축수산 | 24.7 | 18.0 | 17.0 | 24.7 | 0.0 | 12.4 | 16.5 |
| 폐기물 | 17.1 | 9.1 | 11.7 | 17.1 | 0.0 | 8.6 | 11.4 |
| 기타 | 5.6 | 3.9 | 3.8 | 5.6 | 0.0 | 2.8 | 3.7 |
| 유사도* | | | 56.6 | 83.2 | 83.0 | 63.2 | 58.2 |
| 상향 NDC 기준(클레임: 기존 NDC의 목표 배출량) | | | | | | | |
| 전환 | 192.7 | 149.9 | 164.7 | 175.7 | 178.9 | 175.9 | 170.3 |
| 산업 | 243.8 | 222.6 | 208.3 | 175.7 | 230.0 | 227.0 | 221.4 |
| 건물 | 41.9 | 35.0 | 35.8 | 41.9 | 28.1 | 25.1 | 31.0 |
| 수송 | 70.6 | 61.0 | 60.3 | 70.6 | 56.8 | 53.8 | 51.1 |
| 농축수산 | 19.4 | 18.0 | 16.6 | 19.4 | 5.6 | 9.7 | 14.1 |
| 폐기물 | 11.0 | 9.1 | 9.4 | 11.0 | 0.0 | 5.5 | 7.9 |
| 기타 | 5.2 | 3.9 | 4.4 | 5.2 | 0.0 | 2.6 | 3.7 |
| 유사도* | | | 20.6 | 54.9 | 34.8 | 30.5 | 23.5 |

*유사도는 정부목표와 각 분배규칙의 결과 간 유클리드 거리(Euclidean distance)임.