

다목적 강화학습 기반 최적 산업구조 탐색에 관한 연구

홍윤기^{1,2}, 이상철¹, 조한얼^{1,3}, Nabil Belacel⁴, 김찬수^{1,2,*}

1 한국과학기술연구원, 2 과학기술연합대학원대학교, 3 세종대학교, 4 Canada National Research Council

orange4381@kist.re.kr, *eau@ust.ac.kr

Searching for the Optimal Industrial Structure using Multi-Objective Reinforcement Learning

Yoongi Hong^{1,2}, Sangcheol Lee¹, Haneol Cho^{1,3}, Nabil Belacel⁴, Chansoo Kim^{1,2,*}

1 KIST (Korea Institute of Sci. and Tech.), 2 UST (Univ. of Sci. and Tech.), 3 Sejong University, 4 Canada National Research Council,

요 약

본 연구는 산업구조 조정만으로 경제성장과 온실가스(GHG, Greenhouse Gas) 감축을 동시에 달성하기 위한 최적 전략 도출을 위해, 시스템 다이내믹스(SD, System Dynamics) 시뮬레이션을 다목적 강화학습(MORL, Multi-Objective Reinforcement Learning)과 결합한 프레임워크를 제안한다. 에이전트의 행동은 최종연도(2050)의 산업구조(투입산출계수/산업비중)를 선택하는 것으로 정의하고, 중간연도(2021~2049)는 선형 보간으로 생성하여 현실 제약(기준년도 데이터 고정, 급격 변화 억제)과 고비용 시뮬레이션 문제를 동시에 완화한다. 벡터형 보상은 (i) GDP 누적 성장과 (ii) GHG 누적배출 감소량으로 구성되며, 파레토 관점에서 비지배 정책 집합을 학습한다.

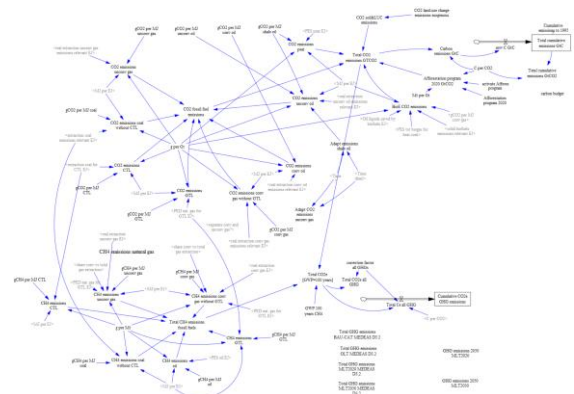
I. 서 론

경제성장과 GHG 감축은 전통적으로 상충 관계로 인식되어 왔으나, 산업 간 연계를 고려하면 구조적 재배치만으로도 양 목표를 동시에 개선할 여지가 존재한다. 이때 산업 간 상호의존과 과급효과를 정량화하는 분석틀로 투입산출분석(IO, Input-Output Analysis)과 레온티예프 역행렬이 표준적으로 활용된다 [5,6]. SD-IO 통합 접근의 정책·성장 시나리오 응용은 최근 연구에서도 확인된다 [1].

SD 관점에서 에너지-경제-환경을 통합적으로 모의하는 모델 프레임은 MEDEAS 계열 모델을 준거로 삼았고[2], 산업구조 데이터를 연결하기 위해 환경확장 다지역 투입산출(EE-MRIO) 데이터베이스의 구축·활용 연구를 참고했다 [3,4].

본 연구의 목적은 어떤 산업구조가 두 목표의 균형을 가장 잘 이룰지를 파레토 관점에서 탐색하여 그 결과를 현재 구조와 수치로 비교하며, 누적 배출 및 임계점 도달 시기를 함께 제시하는 데 있다. 다만 현실의 제약(초기년 고정, 급격 변화 불가, 계산비용)을 고려하면 전 기간의 산업구조를 자유롭게 탐색하기 어렵다. 본 저자는 목표연도 구조만 결정하고 중간 경로는 선형 보간으로 단순화하여, 학습효율과 현실성을 동시에 확보하는 실용적 설계를 채택한다.

II. 본론



2.1 시뮬레이션 환경 및 행동(액션)

환경은 경제-에너지-환경 모듈이 결합된 MEDEAS 모델을 사용하여 2020-2050 연도별 산업산출, 에너지사용, 온실가스 배출을 계산한다.

에이전트의 행동은 2050 년 산업구조(IO 계수/산업비중) 선택이다. 2021-2049 년 구조는 2020↔2050 선형 보간으로 자동 생성하여, ① 기준년도(실측/보정값) 고정, ② 급격 변화 억제, ③ 일관성 제약(비음수, 정규화 등)을 동시에 만족한다. IO 계수의 의미·해석, 산업 간 상호의존 관계에서의 제약과 전제는 고전·표준 참고문헌을 따른다 [5,6]. 데이터의 환경 확장은 EE-MRIO 구축·활용 문헌을 참고하여 구성했다 [3,4].

2.2 보상(다목적)과 파레토 학습
보상은 벡터형(R_1, R_2)으로 구성한다.

- R_1 : 2020-2050 GDP 누적 성장
- R_2 : 2020-2050 GHG 누적배출 감소량

가중합 스칼라화의 임의성/비볼록 프론트 미포착 문제를 피하기 위해, 파레토 지배·하이퍼볼륨 등 대표적 다목적 기준으로 비지배 정책 집합을 유지·갱신한다. 스칼라 단일 해가 아닌 파레토 최적 정책 집합의 근사를 목표로 탐색한다.

2.3 최적화 기준

탐색된 최적 산업구조 정책들은 파레토 프론트 형태로 제시된다. 그러나 실제 정책 결정 과정에서는 모든 파레토 해를 고려하기보다는, 사용자가 설정한 제약조건(예: 특정 GDP 성장률 이상, 특정 배출량 이하)에 따라 선택 범위를 좁힌다. 즉, 먼저 전체 최적 정책 집합을 도출한 뒤, 이러한 제한조건에 따라 선택된 범위의 파레토 바운더리만을 다시 추출하고, 그 안에서 정책 간 성과를 다음과 같은 지표로 비교한다.

- 구조 차이: IO/산업비중의 L_1/L_2 거리, 변화 상위 부문 Top-k, 부문별 배출집약도 변화
- 거시 성과: 2020-2050 누적 GDP, 2020-2050 GHG 누적 배출 감소량
- 임계점 시기: 선택된 파레토 해 각각에 대해 기후변화 임계온도 기준의 최초 도달 연도

이러한 방식으로 제약조건에 따라 좁혀진 파레토 바운더리를 비교함으로써, 사용자가 원하는 정책 우선순위에 부합하는 후보군 내에서 정책 간 상대적 장단점을 직관적으로 확인할 수 있다.

결과는 선택된 파레토 프론트의 부분집합 그래프, 누적배출-예산 곡선, 구조 차이 요약표로 시각화하여 정책 선택에 참고자료로 제공한다.

III. 결론

본 논문에서는 SD 와 MORL 을 결합하여 2050 년 최적 산업구조를 파레토 관점에서 탐색하고 현재 구조와 정량 비교하는 방법을 제안하였다. 시뮬레이션을 기반으로 누적 배출량과 기후 임계점 도달 시기까지 함께 제시함으로써, “어떤 산업구조가 언제까지 어떤 성과를 보장하는가”를 정책 논의에 활용 가능한 형태로 정리했다.

물론 정책 실현 가능성과 경로의 내생적 최적화는 심화할 연구주제이다. 이에 대한 개선으로, 연도별 산업구조 스텝을 직접 최적화하는 경로 기반 MORL 을 수행하고, 연간 변화율 상한·고용/투자 제약을 내재화하여 보다 현실적인 지표를 탐색한다.

ACKNOWLEDGMENT

This research was funded by the grant Nos. 2023-00262155; 2024-00339583; 2024-00460980; and 2025-02304717 (IITP) funded by the Korea government (the Ministry of Science and ICT).

참 고 문 헌

- [1] Perez- Montiel, J., Nieto, J., Carpintero, Ó., & Lobejón, L. F., “Is a Green Growth Strategy the Road to Energy Transition? An Energy- Constrained Supermultiplier Approach,” SSRN Working Paper, 2024.
- [2] Capellán- Pérez, I., de Blas, I., Nieto, J., de Castro, C., Miguel, L. J., Carpintero, Ó., et al., “MEDEAS: a new modeling framework integrating global biophysical and socioeconomic constraints,” Energy & Environmental Science, 13, 986-1017, 2020.
- [3] Stadler, K., Wood, R., Bulavskaya, T., Södersten, C.- J., Simas, M., Schmidt, S., et al., “EXIOBASE 3: Developing a Time Series of Detailed Environmentally Extended Multi- Regional Input-Output Tables,” Journal of Industrial Ecology, 2018.
- [4] Timmer, M. P., Dietzenbacher, E., Los, B., Stehrer, R., & de Vries, G. J., “An Illustrated User Guide to the World Input-Output Database: The Case of Global Automotive Production,” Review of International Economics, 23(3), 575-605, 2015.
- [5] Leontief, W., Input-Output Economics, 2nd ed., Oxford University Press, 1986.
- [6] Miller, R. E., & Blair, P. D., Input-Output Analysis: Foundations and Extensions, 2nd ed., Cambridge University Press, 2009.