
Global Report

중국의 운송에너지 효율성 개선에 미치는 리바운드 효과_ CGE 분석

1. 개요
2. 방법론 및 데이터
3. 거시경제 영향에 대한 결과 및 토론
4. 결론

1. 개요

중국의 운송 산업은 화석연료 소비 부문에서 세 번째로 큰 비중을 차지하고 있다. 중국통계국에 따르면, 2000~2016년까지 운송 산업 부문의 에너지 소비량은 연평균 8.3%의 성장률을 보였다. 중국정부는 이러한 급속한 성장과 관련하여 잠재적인 문제를 인식하고 녹색교통시스템을 구축하기 위해 특히 도로운송 하위 부문(transportation sub sector)에서 에너지 효율성을 개선하기 위한 정책을 개발했다. 예를 들어, 승용차의 전국 FES(Fuel Economy Standard : 연비 표준)에 대한 기준이 보다 엄격해져 2020년까지 5L/100km로 제한이 강화된다[1]. 이러한 에너지효율성 개선을 통해 파생된 이론적인 에너지절약 수준은 여행자의 에너지비용 감소로 인해 추가 에너지소비에 의해 어느 정도 상쇄될 수 있다. 1865년 Jevons는 엔진에서 석탄사용 부문의 에너지효율을 개선하면 석탄소비가 줄어드는 것이 아니라 오히려 석탄소비가 증가한다는 이른바 제본스 역설(Jevons Paradox) 이라는 효과를 발견했다[2]. 이후 Daniel Khanaaom과 Leonard Brookes와 같은 에너지 경제학자들은 다음과 같은 세 가지 방법으로 생산되는 리바운드 효과(rebound effect, 반등효과)를 정의했다.

(1) 직접 리바운드 효과(Direct rebound effects)

- 2014년 Wang과 Lu가 제시한 것으로 운송 부문의 에너지효율 개선으로 인해 운송서비스의 에너지비용이 감소하여 소비자가 더 자주 여행할 수 있으며, 그 결과 연료 소비가 증가할 수 있다는 것이다[3].
- 몇몇 연구는 이러한 직접적인 리바운드 효력을 측정하는 데 집중했다. 거의 이상적인 수요시스템 모델, 오류보정 모델 및 동적패널 정량회귀모델과 같은 Econometric models은 다양한 시간 도메인에 걸쳐 서로 다른 운송모드가 갖는 직접적인 리바운드 효과를 추정하기 위해 널리 채택되었다 [3][4][5][6].

(2) 간접 리바운드 효과(Indirect rebound effects)

- 에너지효율성이 향상되면 소비자는 에너지소비가 많은 가전제품 생산이나 서비스에 비용을 지출하기 때문에 운송서비스 비용이 절감된다[6].
- 직접 및 간접 리바운드 효과 모두 소비자에 대한 소득 및 대체효과와, 생산자에 대한 출력효과를 나타낸다[7][8].

(3) 경제 전반의 리바운드 효과(Economy-wide rebound effects)

- 이는 거시경제의 가격 및 성장에 대한 에너지효율 개선의 영향을 나타낸다. 운송부문의 에너지 효율 충격이 경제전반에 걸쳐 가격과 수량의 조정에 미치는 영향을 반영하기 때문이다.
- 이러한 효과는 운송부문은 국가경제의 근본적인 서비스산업이며, 산업생산과 밀접한 관련이 있기 때문에 매우 중요하다.

2. 방법론 및 데이터

2.1 리바운드 효과의 개요

백분율로 제시된 리바운드효과는 에너지효율 개선으로 인해 소비자가 다른 상품 및 서비스에 대한 에너지를 대체할 때 에너지절감의 감소된 비율을 나타낸다. 2009년 Turner는 한 대상 섹터(i)에서 에너지효율이 개선될 때, 섹터(i)의 에너지사용에 대한 평형 피드백효과를 구현하는 섹터 리바운드 효과(Ri)를 (식 1)로 정의하였다:

$$R_i = \left[1 + \frac{\dot{E}_i}{\gamma} \right] \times 100\% \dots\dots\dots (\text{식 1})$$

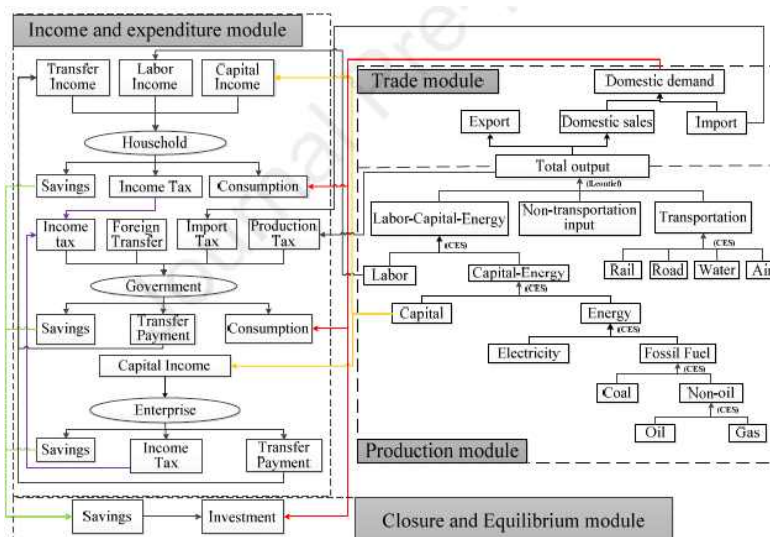
(식 1)에서 $\dot{E}_i$ 가 섹터 i의 에너지사용량 비례변화인 경우, 경제의 모든 에이전트가 섹터 i의 에너지효율 개선 γ (백분율로 부여)에 대응하여 정책을 조정할 수 있다. 여기에는 다음과 같은 5가지 가능한 리바운드 조건이 있다:

- (1) 제로 리바운드 효과(Zero rebound effects : $R_i=0$) : 섹터의 에너지효율 개선에서 파생된 실제 에너지절약이 예상수준을 달성한 경우
- (2) 부분 리바운드 효과(Partial rebound effects : $0 < R_i < 100\%$) : 섹터 i의 에너지사용 감소는 에너지효율 개선에서 파생된 이론적인 수준보다 적은 경우
- (3) 전체 리바운드 효과(Partial rebound effects : $R_i=100\%$) : 에너지효율 개선으로 인한 에너지절약이 완전히 상쇄되기 때문에 섹터i의 실제 에너지사용은 변하지 않는 경우
- (4) 역효과(Backfire effects : $R_i > 100\%$) : 섹터i의 에너지효율 개선효율이 실제 에너지절감보다 에너지절감을 증가키는 경우
- (5) 슈퍼 보존 효과(Super-conservation effects : $R_i < 0$) : 섹터 i의 실제 에너지절약이 에너지효율 개선에서 파생된 이론적으로 예상되는 수준 이상인 경우

이 연구에서 다른 에이전트에 대한 리바운드 효과를 조사한 결과, 2014년 Lecca 등과 2017년 Lu 등이 제시한 에너지 리바운드 효과와는 다른 수준으로 나타났다. 경제전반의 에너지사용은 생산(제조) 부문에 제공되는 에너지와 가계 소비, 투자 및 수출과 같은 최종 소비로 분류된다.

2.2 CGE 프레임워크

운송부문의 에너지효율 개선이 전체 경제에 미치는 영향을 조사하기 위해 우리는 리바운드 효과에 대한 이전 연구에서 널리 사용되어온 CGE(Computable General Equilibrium) 모델을 적용했다. 이 모델은 경제구조를 파라미터로 하여 경제에서 모든 에이전트 즉, 생산자와 가정 및 정부 간의 관계를 특성화 할 뿐만 아니라 기술적 변화에서 파생된 피드백 메커니즘을 잘 설명하고 있다[9]. 운송부문의 에너지효율이 경제의 모든 에이전트에 미치는 이러한 악영향을 탐구하기 위해 운송부문은 철도운송, 도로운송, 항만운송 및 항공운송과 같은 4가지 모드별 하위 부문으로 분리하였다. CGE 모델의 구조를 [그림 1]에 나타낸다. 이는 경제에서 각 부문의 다단계 중첩 생산구조를 나타낸 것이다.



- * 자료 : Huibin Du, Zhenni Chen, Zengkai Zhang, Frank Southworth, “The rebound effect on energy efficiency improvements in China’s transportation”, Journal of Management Science and Engineering, 2020.10, p.10.

[그림 1] CGE 모델의 구조

Leontief 생산 기능을 사용하여 중간 입력을 운송부문과 비 운송부문으로 나누었다. 운송부문은 도로/철도/항만/항공 모드가 포함된 복합운송이며, 비 운송부문은 노동/자본/에너지 등을 포함하는 국가생산구조의 최상위 계층을 포함한다. CES(Constant Elasticity of Substitution) 기능은 다른 모든 계층에 대해 채택되었다. 예를 들어, 운송을 위한 생산기능은 4가지 유형의 운송서비스를 위한 CES 기능이다. 이러한 서로 다른 운송서비스 수량은 (식 2)와 같이 설명될 수 있다.

$$QTRANS_j = \alpha_j^{trans} \cdot \left[\sum_i \delta_{ij}^{trans} \cdot TRA_{ij}^{\rho_j^{trans}} \right]^{\frac{1}{\rho_j^{trans}}} \dots\dots\dots (식 2)$$

(식 2)에서 QTRANS_j와 PTRANS_i는 각각 운송부문 복합물의 수량과 가격을 나타내며, TRA_{ij} 및 PQ_i는 철도/도로/항만/항공 운송서비스의 양과 가격을 나타낸다. α_j 트랜스섹터 j에서 스케일 파라미터 δ_{ij}, 트랜스계수 j, θ_j 트랜스에서 운송서비스 i의 공유 파라미터는 운송 믹스기능의 대체 파라미터이다.

3. 거시경제 영향에 대한 결과 및 토론

전체 운송 산업에서 10%의 에너지효율성을 개선하여 4개의 운송서비스 하위부문에서의 변화가 전체경제에 어떤 영향을 미치는지를 조사했다. 이에 대한 조사결과를 <표 1>에 나타낸다.

<표 1> 운송의 10% 에너지효율 개선으로 인한 운송서비스 하위부문에서의 거시경제적 영향

시뮬레이션 결과	철도운송 영향 (S1)	도로교통 영향 (S2)	항만운송 영향 (S3)	항공운송 영향 (S4)	모든 운송모드 영향 (S5)
GDP(%)	0.0078	0.0757	0.0145	0.0146	0.1124
투자(%)	0.0015	0.0169	0.0066	0.0063	0.0312
총 수입(%)	-0.0064	-0.0461	0.0139	-0.0096	-0.0481
총 수출(%)	-0.0052	-0.0381	0.0095	-0.0085	-0.0423
화석연료 사용(%)	-0.0383	-0.5754	-0.0894	-0.0735	-0.7747
탄소 배출(%)	-0.0156	-0.1520	-0.0251	-0.0316	-0.2235
SO ₂ 배출(%)	-0.0134	-0.1305	-0.0202	-0.0261	-0.1897
NO _x 배출(%)	-0.0571	-0.6950	-0.0918	-0.0726	-0.9145
미세먼지 배출(%)	-0.0126	-0.1795	-0.0262	-0.0296	-0.2472
복지(10억 위안)	2.27	18.95	3.52	4.34	29.04

- * 자료 : Huibin Du, Zhenni Chen, Zengkai Zhang, Frank Southworth, “The rebound effect on energy efficiency improvements in China’s transportation”, Journal of Management Science and Engineering, 2020.10, p.19.

시뮬레이션 결과, 경제와 환경 모두에 긍정적인 영향을 나타낼 수 있다. 특히 GDP, 투자 및 복지 부문의 거시적 차원에서 증가를 관찰할 수 있다. 반대로 국내 화석연료, 이산화탄소(CO₂) 배출량, 대기오염 배출(SO₂, NO_x, 미세먼지 등)에 대한 수요는 감소하고 있음을 알 수 있다. 특히 에너지효율성 개선을 통해 운송서비스 비용이 감소함으로써 다른 산업부문의 생산비용을 줄이는 지배적인 효과가 있음을 알 수 있다. 이는 생산량을 자극하고 전체 경제에서 고용과 GDP를 증가시키는 효과가 있다. 또한 GDP는 기준선대비 0.07% 이상 증가했다. 이처럼 도로운송 부문의 에너지효율성 개선은 국내 화석연료 수요를 0.57%, 거시경제수준 CO₂ 배출량은 0.15%, 대기오염 배출량은 벤치마크 시나리오대비 0.13%

감소했음을 알 수 있다. 항만운송 부문의 경우, 에너지효율성 향상으로 인한 서비스비용이 감소함으로써 그 결과, 총 수입과 수출이 증가하여 국제무역의 발전이 촉진됨을 확인할 수 있다.

4. 결론

운송부문은 중국의 산업화와 도시화 과정에서 매우 중요한 역할을 하고 있으나, 많은 에너지소비와 탄소를 배출한다. 에너지안보와 환경보호의 중요성을 감안할 때 에너지효율성을 개선하는 것은 에너지절감과 탄소감축을 모두 달성하기 위한 운송부문에서 중요한 척도이다. 이 연구는 CGE 모델을 사용하여 중국 운송부문의 에너지효율 개선 시뮬레이션에서 파생된 에너지 리바운드 효과를 조사하여 이와 관련된 피드백 메커니즘을 추적했다. 이러한 에너지 리바운드 효과에 대한 포괄적인 이해는 에너지, 환경 및 경제적 결과를 초래하는 정책에 중요한 영향을 미친다. 아울러 다양한 운송 하위부문에서 10%의 에너지효율 개선을 시뮬레이션 한 결과, 에너지효율성 개선은 에너지절약뿐만 아니라 경제발전을 촉진하기 위한 운송부문에 대한 유망한 척도임을 확인하였다. 즉, 에너지효율로 인한 리바운드 효과가 크게 나타나면서 에너지절감 수준을 눈에 띄게 감소시킨바 리바운드 효과를 무시할 수 없다. 이로써 운송에너지효율이 향상될 때 긍정적인 에너지 리바운드 효과가 있다는 것을 입증하였다. 그러나 이 리바운드 효과의 크기는 다양한 운송모드별로 각기 눈에 띄게 다르게 나타난다. 도로교통 하위 부문에서는 39.58%, 경제전반에서는 4.18%의 리바운드 효과가 있는 것으로 나타났다. 반면, 항공운송 부문은 모든 운송모드 중 가장 큰 리바운드효과를 보이며, 리바운드 효과는 74.6%로, 이로 인한 경제전반의 리바운드 효과는 30.07%로 나타났다. 이 같은 항공운송 부문에서의 에너지효율성 개선은 항공운송 서비스비용의 큰 감소를 유도하여 항공 운송서비스 수요의 급격한 증가 및 수출증가로 이어지는 시너지효과를 기대할 수 있다.

운송 산업 분야에서 에너지 사용효율성이 획기적으로 향상되고 있다. 이 연구에서는 CGE(Computable General Equilibrium) 모델링을 통해 중국의 운송부문에서 에너지효율성 10% 개선이 미치는 리바운드 효과를 분석하였다. 이 연구결과는 운송 분야에서 에너지 사용효율성 향상을 위한 정책에 벤치마킹 자료로 활용할 수 있을 것이다.

[참고문헌]

- [1] Zhao, F., Hao, H., Liu, Z., 2016. Technology strategy to meet China's 5L/100km fuel consumption target for passenger vehicles in 2020. *Clean Technol. Environ. Policy* 18, 7–15. <doi:10.1007/s10098-015-1019-5>
- [2] Jevons, W.S., 1866. *The Coal Question: An Inquiry Concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of our Coal Mines*, second ed. MacMillan, London.
- [3] Wang, Z., Lu, M., 2014. An empirical study of direct rebound effect for road freight transport in China. *Appl. Energy* 133, 274–281. <doi:10.1016/j.apenergy.2014.07.090>
- [4] Wang, H., Zhou, D.Q., Zhou, P., Zha, D.L., 2012a. Direct rebound effect for passenger transport : Empirical evidence from Hong Kong. *Appl. Energy* 92, 162–167. <doi:10.1016/j.apenergy.2011.10.027>
- [5] Wang, H., Zhou, P., Zhou, D.Q., 2012b. An empirical study of direct rebound effect for passenger transport in urban China. *Energy Econ.* 34, 452–460. <doi:10.1016/j.eneco.2011.09.010>
- [6] Zhang, Y., Peng, H., Liu, Z., Tan, W., 2015. Direct energy rebound effect for road passenger transport in China: A dynamic panel quantile regression approach. *Energy Policy* 87, 303–313.

<doi:10.1016/j.enpol.2015.09.022>

- [7] Gillingham, K., Rapson, D., Wagner, G., 2016. The Rebound Effect and Energy Efficiency Policy. *Rev. Environ. Econ. Policy* 10, 68–88.

<doi:10.1093/reep/rev017>

- [8] Li, J., Lin, B., 2017. Rebound effect by incorporating endogenous energy efficiency: A comparison between heavy industry and light industry. *Appl. Energy* 200, 347–357.

<doi:10.1016/j.apenergy.2017.05.087>

- [9] Yu, X., Moreno-cruz, J., Crittenden, J.C., 2015. Regional energy rebound effect: The impact of economy-wide and sector level energy efficiency improvement in Georgia , USA. *Energy Policy* 87, 250–259.

<doi:10.1016/j.enpol.2015.09.020>

<원문제목> The rebound effect on energy efficiency improvements in China's transportation sector: A CGE analysis

<원문출처> Journal of Management Science and Engineering