
Global Report

웨이블렛 분석 기반 미국의 교통-환경산업과의 상호작용 분석

1. 개요
2. 문헌 연구
3. 추정전략 및 데이터수집_웨이블렛 일관성
4. 경험적 결과
5. 결론

1. 개요

지난 수십 년 동안 급속한 글로벌 경제성장과 빠른 도시화로 인해 자동차가 증가하면서 화석에너지 수요가 크게 증가했다. 아울러 인간 활동의 공간 범위가 도로, 철도, 운하 및 항공 등 매우 광범위해지면서 보다 개선된 교통시스템 필요성이 증가하였다. [1][2].

- 1999년 Grubler는 모든 경제 분야에 운송시스템이 매우 중요한 영향을 미치고 있어 선진국은 물론 개발도상국의 대기환경에 부정적인 영향을 미친다고 주장한바 있다.
- 2013년 Rodrigue 등은 보다 선진화된 운송시스템을 사용하여 더 빠르고 저렴하게 사람과 화물의 이동성을 보장하고 있다는 것을 증명한바 있다.

이처럼 교통시스템은 경제발전을 위한 중요한 성장엔진으로 경제성장에 크게 기여하고 있다. 그러나 화석연료 소비와 온실가스 배출로 인해 지구대기 환경에 커다란 악영향을 미치고 있어 운송산업에 대한 투자에 매우 부정적인 영향을 주고 있다. 경제발전에서 운송 부문의 중요성이 높아짐에 따라 많은 연구자들은 사회의 탈탄소화를 주장하는바 경제학자, 환경운동가 및 정책입안자들의 특별한 관심을 필요로 한다. 이들은 운송 산업에 의해 소비되는 거대 에너지소비가 저탄소 경제로의 변화를 지연시키고 있다고 주장하고 있다. (2013년 Chandran, Fooni; 2014년 Saboori, Song; 2015년 Ayadi, Hammami; 2017년 Nevez, Shahiduzzaman, Layton) 이처럼 2013~2017년 동안 저탄소 경제로의 변화가 지연되는 이유에 대해 2018년 Benjamin와 Leibowicz는 재생가능 에너지와 비 재생에너지(경유/휘발유/바이오/수소 연료 등)와 전기를 소비하는 도로운송 산업에 비해 철도운송 산업은 전기에너지를 소비하기 때문에 재생가능 에너지나 화석연료에 대한 의존도가 낮아 온실가스(GHG : Green House Gas) 배출을 최소화할 수 있다고 주장하였다. 2011년 세계에너지위원회(WEC : World Energy Council)는 전 세계 에너지의 19%가 운송시스템에 의해 소비되며, 석유소비는 96%라고 지적하였다[3]. 실제로 두 번째로 큰 비중을 차지하는 화석에너지 소비부문인 운송시스템은 전 세계 CO₂ 배출량의 23%를 차지하는 것으로 나타났다. 이는 기후변화에 가장 큰 비중을 차지하는 온실가스(GHG) 배출량이 다른 에너지 부문보다 빠르게 증가하고 있음을 입증하고 있다고 많은 연구자들은 강조한다. (2009년 Lutsey, Sperting; 2010년 Morrow 등; 2015년 Yang 등; 2020년 Li) 2017년 환경보호국(EPA : Environmental Protection Agency)에 따르면 미국은 2010년 전 세계 온실가스 배출량의 14%를, 2015년에는 27%를 차지한 것으로 나타났다.

2. 문헌 연구

급속한 세계화(Globalization)와 신기술 및 동력 운송시스템을 통해 사람과 화물은 전 세계 어디나 더 멀리 더 쉽게 운송할 수 있게 되었다. 이를 통해 국제무역 산업이 빠르게 발전하면서 주로 화물운송 시스템을 중심으로 에너지소비를 크게 증가시키고 있다. 이러한 증가는 석유에너지를 이용하는 내연기관이 압도적으로 현대 교통수단에 이용되고 있기 때문이다. 이에 대한 그간 많은 연구자들의 연구사례를 요약하면 다음과 같다.

- 운송에너지 소비가 대기환경 저하와 경제성장 사이의 상호작용에 대해 주목하고 있다. (2010년 Ozturk, Payne; 2014년 Omri; 2016년 Brown-Steiner 등; 2017년 Tiba, Omri; 2018년 He, Saidi 등; 2019년 Nugraha, Osman, Gorus, Aydin) 이들은 운송 산업 관련 에너지소비와 환경 저하의 인과관계뿐만 아니라 경제성장이 환경에 미치는 영향에 대해 논의하였다.
- 여행 산업이 점진적으로 성장하면서 에너지사용 및 석유수입 등으로 인한 운송 산업부문에서 생성된 주요 온실가스인 CO₂ 배출을 입증하였다. 이에 대해 사용제한이나 효율적인 대책이 없다면 운송에너지 사용과 온실가스 배출량이 환경 저하를 가속화할 것이라고 주장한다. (2010년 Gurney

등; 2015년 Ayadi, Hammami; 2016년 Saidi, Ben Mbarek; 2018년 Nasreen 등; 2020년 Georgatzi 등)

- 2020년 Nasreen 등은 구조적 휴식과 단면의존 문제를 고려하여 1980~2017년 동안 18개 아시아 국가의 데이터를 이용하여 운송에너지 소비가 환경 악화 및 경제성장 간의 인과관계에 대한 조사 결과를 제시한바 있다. 18개 아시아 국가에서 운송에너지 소비, 이산화탄소 배출 및 경제발전 사이에는 장기적인 관점에서 볼 때 양방향성 인과관계가 존재한다고 결론지었다. 실제로 운송에너지 사용과 경제성장이 각각 1 %씩 증가하면, 환경 악화는 0.57%와 0.46% 증가한다고 주장하였다.

3. 추정전략 및 데이터수집_웨이블릿 일관성

미국의 운송 산업에서 이산화탄소 배출과 운송부문 지표 간의 연관성을 결정짓는 웨이블릿 일관성(wavelet coherence)은 일정 규모와 특정 시간에 효과적으로 정량화할 수 있었다. 이러한 웨이블릿 일관성과 위상차 방법을 이용하여 두 타임시리즈(time series) 사이의 종속성과 시간/주파수 도메인에서 일관성을 얻을 수 있었다. 이 두 가지 수학적 도구를 이용하여 타임시리즈에 대한 서로 다른 주파수와 시간관계를 보여줌으로써 특정 시간에 대한 주파수 의존성을 확인할 수 있었다. 이러한 접근방식은 time series에 발생할 수 있는 갑작스러운 구조적 변화를 반영할 수 있는 이점이 있다. 또한 웨이블릿 일관성을 이용하여 두 타임 시리즈 간의 교차 상관관계를 시간과 주파수의 함수로 측정할 수 있었다. X, Y 두 타임시리즈를 감안할 때 복잡한 웨이블릿 일관성($Q_n^2(s)$)은 식 (1)과 같다:

$$Q_n^2(s) = \frac{S(s^{-1}W_n^{XY}(s))}{S(s^{-1}|W_n^X(s)|^2) \cdot S(s^{-1}|W_n^Y(s)|^2)} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 S는 연산자이며, 식 (1)은 식 (2)와 같은 방정식으로 공식화할 수 있다:

$$Q_n^2(s) = |Q_n^2(s)|e^{i\phi_{xy}} \dots\dots\dots (2)$$

X와 Y의 복잡한 웨이블릿 일관성의 절대값은 웨이블릿 일관성($R_n^2(s)$)이라고 불리며, 식 (3)과 같이 정의할 수 있다:

$$R_n^2(s) = \frac{|S(s^{-1}W_n^{XY}(s))|^2}{S(s^{-1}|W_n^X(s)|^2) \cdot S(s^{-1}|W_n^Y(s)|^2)} \dots\dots\dots (3)$$

Monte Carlo procedures를 이용하여 웨이블릿 일관성에 대한 통계적 정도를 경험적으로 계산하였다. 이는 두 신호 간의 위상차에서 나타나는 신뢰도차를 계산하기 위한 것이다. 2011년 Aguiar-Contraria와 Soares 등은 식 (2)를 이용하여 계산된 각도($\Theta_{xy} = \Theta_x - \Theta_y$)에 대한 명확한 위상차는 단계적 관계에 따라 영향을 받지 않는다는 것을 제시한바 있다. 이는 식 (4)와 같이 계산할 수 있다:

$$\phi_{XY} = \tan^{-1} \frac{I\{W_n^{XY}\}}{R\{W_n^{XY}\}}, \phi_{XY} \in [-\pi, \pi] \quad \dots\dots\dots (4)$$

여기서, I 및 R 은 각각 전력스펙트럼의 가상 및 실제 구성요소를 나타내며, 주어진 타임시리즈와 서로 다른 위상차는 경로차이로 인해 나타난 것으로 볼 수 있다. 위상차가 0이면, 두 타임시리즈가 지정된 주파수를 공동으로 이용하여 이동하는 것을 고려할 수 있다. 두 시계열 값($\Theta_{XY} \in [0, \pi/2]$)은 Y 값에 의해 X 값이 유도될 때 다음 위상으로 변하게 된다. 위상차(phase-difference : π 또는 $-\pi$)는 $\Theta_{XY} \in [-\pi, -\pi/2]$ 인 조건에서 $\Theta_{XY} \in [-\pi/2, \pi] \cup [-\pi, \pi/2]$ 일 때 Y 값에 의해 X 값이 유도될 때 다음 위상으로 변하게 된다. 이 연구에서 이용한 데이터는 2000년 1월~2017년 12월 기간 동안 미국에너지정보국에서 수집한 월별 운송 산업에서 탄소배출 및 에너지소비와 관련된 주파수 데이터를 사용하였다.

(<https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-377-gas-emissions>)

(https://www.eia.gov/energyexplained/?page=us_energy_transportation)

4. 경험적 결과

이 연구에서는 세 가지 운송부문(FTSI, PTSI 및 TSI) 지표에 중점을 두어 미국의 교통상황(여건)과 환경 산업과의 상호작용과 관련된 그간의 경험적 연구결과를 제시하였다. 이를 위해 CO₂-FTSI, CO₂-PTSI 및 CO₂-TSI와 같이 이산화탄소 배출과 쌍을 이루는(대응적인) 웨이블릿 일관성(Wavelet coherency)에 대한 추정치(위상차)를 대상으로 일관된 구조를 분석하였다. 이를 통해 미국의 운송 산업에서 이산화탄소 배출과 운송부문지표 사이의 일관성이 대한 유사한 패턴을 갖고 있음을 알 수 있었다. 이산화탄소 배출량과 운송부문 지표 간의 공동 이동도가 높은 경우(1.5년 주기 미만), CO₂-FTSI 및 CO₂-TSI 쌍에 대한 기간 동안 많은 이슈를 발견할 수 있었다. 특히 2008~2011년 동안 중 2~4년 주기에서는 CO₂-FTSI 쌍이, 2006~2009년 동안 중 2~4년 주기에서는 CO₂-PTSI 쌍이, 2007~2010년과 2006~2010년 동안에는 CO₂-TSI 쌍의 경우에서 많은 이슈를 발견할 수 있었다. 즉, 더 높은 웨이블릿 일관성이 있음을 확인하였다.

5. 결론

결론적으로 이 연구는 다음과 같이 요약할 수 있다:

- 658개의 웨이블릿 일관성 분석과 운송 산업에서 이산화탄소 배출 및 운송부문 지표(FTSI, PSTI 및 TSI) 간에 나타난 미국의 운송 산업과 환경오염과 교통인프라 간에는 연관성이 있음을 확인하였다. 특히 2006~2010년 동안 단기 및 중간 실행에서 다른 운송부문 변수에 비해 이산화탄소 배출량이 높은 것을 확인하였다. 이는 수송부문에서 이산화탄소 배출 및 운송지표가 대부분의 경우 8~10년 주파수대역에서 이산화탄소 배출량과 위상과의 관계가 주목받는 이유이다.
- 부분적인 웨이블릿 일관성과 TE-IN-EP계수를 제거한 후, 이산화탄소 배출과 운송지표는 다른 쌍에 대한 인과관계 및 상호의존성이 높은 것을 확인하였다. 이는 웨이블릿 기술에 비해 TE-IN-EP 요소의 효과를 제거한 부분적인 웨이블릿 일관성이 많은 이점을 있다는 것을 시사하고 있다.
- 이기종 진보-지연 넥서스(Heterogeneous lead-lag nexus)의 경우에는 TE-IN-EP 계수의 영향을 제거한 후 수송부문에서 이산화탄소 배출 및 운송지표는 연구기간 내내 양방향 인과효과를 갖는 것을 확인하였다.

이 연구에서는 미국의 운송 산업과 이산화탄소 배출량 사이의 인과관계를 분석하였다. 분석결과, 미국의 교통정책과 환경오염과 교통인프라 사이에 약간의 연관성이 있는 것을 확인하였다. 이 연구결과는 국내 친환경 운송산업을 위한 정책에 벤치마킹 자료로 활용할 수 있을 것이다.

[참고문헌]

- [1] Grubler, A., Nakicenovic, N., Victor, D.G., 1999. Dynamics of energy technologies and global change. Energy Policy. 27, 247-280.
- [2] Rodrigue, J., Comtois, C., Slack, B., 2013. The Geography of Transport Systems. London: Routledge.
- [3] World Energy Council, 2011. World Energy Scenarios: Global Transport Scenarios 2050, p.76. ISBN: 978-0-946121-14-4.

<원문제목> Transportation and environmental degradation interplays in US: New insights based on wavelet analysis
--

<원문출처> Environmental and Sustainability Indicators
--