
Global Report

100% 재생에너지를 이용한 운송시스템

1. 개요
2. 재료 및 방법_
도시 및 도시 간 교통의 전기자동차화
3. 결과_경량 차량, 중대형 화물트럭
4. 검토 및 결론

1. 개요

현재 세계경제가 직면하고 있는 주요과제 중 하나는 에너지안보, 지속가능성, 오염 및 기후변화 영향일 것이다. 일부 연구자들은 이를 해결하기 위해서는 궁극적이고 지속적인 구현방법으로 100% 재생경제로의 전환이 필요하다고 주장하고 있으며, 이러한 어려움에 대한 해결책을 제시하였다[1][2][3]. 이러한 선택은 재생가능 에너지가 이미 입증된 기술로서 급속한 발전을 지속하고 있으며, 탄소발자국이 전혀 없다는 사실에 기반을 두고 있다는 점이다. 특히 국제사회가 직면한 가장 시급한 과제인 기후변화에 대처하는 데 최적일 것이다[1][2][3]. 중기적으로 재생에너지 전환은 화석연료, 특히 간헐적인 재생가능 에너지를 보완할 수 있는 저탄소 공급원인 천연가스를 지능적으로 사용함으로써 구현할 수 있을 것이다[4]. 특히 장기적으로 볼 때 우리경제는 앞서 언급한 연구와 같이 완전한 재생경제로 전환되어야 한다. 여기에는 인프라의 대대적인 구조조정과 40~50년 사이에 취해질 국제적으로 조정된 정책적 조치가 포함된다. 이러한 전환은 치명적인 기후변화를 피하기 위해 시급히 필요하지만, 정부는 아직 이러한 조정된 정책 이니셔티브를 지원하지 않고 있다[5]. García-Olivares와 Ballabrera는 글로벌 재생가능 전환의 개시날짜를 2020~2036년 사이에 예상되는 모든 화석연료 생산의 절정이 될 수 있다고 가정한다[6]. 50년의 기간은 기술혁신이 역사적으로 경제 전반에 걸쳐 확장되던 시기과도 호환될 것이다. 이러한 전환에서, 현재의 전송시스템의 변환은 가장 어려운 측면 중 하나일 것으로 보인다. 현재, 글로벌 운송시스템은 여전히 화석연료에 크게 의존하고 있으며, 이는 수십 년에 걸쳐 서서히 감소할 것으로 예상된다. 또한, 전 세계 교통은 수도권의 온실가스, 오염의 상당 부분을 점유하고 있으며, 매년 수백만 건의 교통사고의 원천이기도 하다.

이 연구에서는 자동차(선박/항공/화물/도시운송 등에 대한 100% 재생 가능한 운송시스템 시나리오에 대한 고정자본 및 에너지비용은 <표 1> 참조) 중심 운송시스템의 일반적인 i)온보드 배터리로 인한 전기, ii)전기 그리드, iii)수소 또는 메탄을 이용한 연료전지 또는 ICE(Internal Combustion Engines : 내연기관)의 중장비 차량 및 선박에 전력공급 등의 구조에 대해 설명한다. 이를 토대로 에너지효율성, 주요자원의 가용성 및 가능한 측면에서 이러한 소스에 대한 현재 및 관점비용을 평가하여 결정을 최소화할 수 있는 기술혁신을 이루고자 한다.

2. 재료 및 방법_도시 및 도시 간 교통의 전기자동차화

IEA(International Energy Agency : 국제에너지기구)에 따르면 2015년 약 1억1,700만 대의 LDV(Light Duty Vehicles : 경차 차량)와 6억6,900만 대의 2~3륜 자동차가 유통되고 있다고 한다[7]. 중대형 화물트럭의 수는 2015년 2,400만 대였다. 연료전지를 사용하는 상용차의 수는 장거리 화물을 운송하는 열차에 주로 적용되고 있다. Pt(백금) 매장량의 59%가 연료전지를 사용해야하기 때문에 이 수치는 경사용 차량 및 트럭 수의 10%에 불과하다고 가정할 수 있다. 연료전지의 주요소재인 백금에 대한 글로벌 수요는 최근 수십 년 동안 공급을 능가하고 있으며, 이는 수소연료전지가 이 분야에서 가장 진보되고 활용되고 있음을 나타내는 것이다. 특히 촉매로 백금을 필요로 하기 때문에 연료전지 차량의 증가로 인해 공급이 더욱 악화될 것으로 예상된다. 메탄과 같은 다른 연료의 직접 사용은 연구 중이지만 경제적인 연료가 있는지는 확실하지 않은 상황이다. 현재 대부분의 메탄 연료전지 모터에는 메탄에서 수소를 추출한 다음 수소연료 지를 사용하는 것이 주를 이루고 있다[8].

소량(약 5%)의 백금과 혼합된 팔라듐(Palladium)은 연료전지 촉매로서 순수 백금에 비해 유사한 성능을 가지고 있다고 주장하고 있으며, 특히 CO(일산화탄소) 중독의 위험이 훨씬 적어 매우 유리하다는 것이다. 팔라듐은 백금보다 자원이 약 50배 더 풍부하며, 가격도 저렴한 편이다. 다른 많은 대체 비 백금 촉매 기술이 현재 연구 중이며, 향후 10년 이내에 백금에 대한 대안을 제시할 수 있을 것으로 전망하고 있다. 리튬 이온 배터리(Lithium-ion batteries)는 에너지밀도가 가장 크고, 이러한 이유로 오늘날 전기

자동차에서 가장 널리 사용되고 있다. 이러한 종류의 차량에 대한 일반적인 배터리용량과 전력을 취하고 각 모터에 사용되는 금속밀도를 사용하면 해당 차량에 필요한 Li(리튬)의 양은 9.1Mt. 또는 니켈 Na-NiCl₂(Zebra) 배터리가 기술적으로 실현가능하다. 이 배터리를 전 세계 대형무역선에 적용하기 위해서는 75Mt의 니켈이 필요하다. 이 수치는 Li(리튬)의 현재 매장량의 65%, Ni(니켈)의 현재 매장량의 96%에 해당되는 양이다. Li(리튬) 배터리와 Ni(니켈) 배터리를 각각 50%를 사용하는 경우, 현재 Li와 Ni 매장량의 33%와 48%를 각각 사용하게 될 것이다. 결론적으로 전기자동차는 필요하지만, 소요자원의 매장량을 무기한으로 확장할 수 없다는 점을 감안할 때, 미래의 탄소 이후 사회가 유지할 수 있는 차량의 수는 현재와 거의 비슷한 수준일 것으로 예상된다. 숫자가 증가할수록 다른 경제적 요구사항에 대한 Li 및 Ni의 가용성이 어려워질 수 있다.

3. 결과_경량 차량, 중대형 화물트럭

저탄소 육상 차량시스템으로의 전환비용은 특히 도시 및 도시 간 교통에서 이동성 및 선적 모델에 따라 달라질 수 있다. 이 연구에서는 현재의 차량 전체가 배터리 구동 및 연료전지 차량으로 완전히 대체될 것이라고 가정한다. 현재 전 세계적으로 약 6억6,900만 대의 2~3륜 오토바이가 유통되고 있으며, 이 중 약 5천만대가 매년 전 세계적으로 판매되고 있다. 2015년 전기 중형 및 대형 이륜차의 예상 판매량은 약 430만 대였다. 따라서 성공적인 전환을 위해서는 수십 년 내에 매년 10배 더 많은 판매가 이루어져야 한다. IRENA(International Renewable Energy Agency : 국제재생에너지기구)에서는 오토바이의 에너지 소비량은 0.1MJ/여객-km이며, 관련 비용은 50~150유로/여객-km 전도로 추산하고 있다. 이는 기존의 도시 교통수단에 대한 단거리 운송용도의 에너지 요구사항을 낮추고 대중교통 확신을 위한 정책으로 활용할 수 있는 옵션으로 지적되고 있다. 그러나 이 전송모드에는 도보(걷기) 옵션과 함께 조정되고 계획된 전용 인프라가 필요하다[9][10].

자본투자를 절약하는 또 다른 방법은 자동차를 대체하여 도시 및 도시 간 버스를 늘리는 것이다. 현재 시내버스의 글로벌 에너지 소비량은 0.32~0.91MJ/여객-Km이며, 관련 인프라비용은 200~500유로/여객-km인 것으로 나타났다. 장거리 버스의 에너지소비는 0.24MJ/승객-km이며, 인프라 비용은 500~600 Eur/여객-Km로 나타났다[9][10]. 버스는 시간당 평균 9,000명(도시)에서 17,000명(도로) 승객을 운송할 수 있다. 이 연구에서는 이러한 절감에 대한 가능성을 고려하여 오토바이, 경차 및 대형 차량을 제외한 대형무역선에는 적용하지 않는다. 여기에는 배터리 구동 모터로 작동하는 1억1,700만 대의 경량자동차, 6억6,900만 대의 전기오토바이, 3,200만 대의 중형 화물트럭 및 연료전지 또는 배터리가 장착된 2,400만 대의 대형 화물트럭이 포진되어 있다. 일반적으로 다른 국가에서 경량 및 대형 차량 간의 한계를 정의하는 최대질량의 제한범위는 3.5~7톤 사이이다. 이는 경량/중형 상용차의 10%가 연료전지 모터를 사용할 것으로 가정한 각 클래스의 일반적인 가격을 표시하는 지수가 되는 것이다.

4. 검토 및 결론

이 연구에서는 현재 화석연료 기반 운송모드를 재생에너지 모드로 대체하기 위한 가능성을 진단하였다. 관련 비용은 미래에 우선할 수 있는 전송모델에 매우 민감하다. 도시시스템을 대대적으로 전기자전거와 전기자동차로 대체하여 구현할 경우, 이러한 운송비용은 훨씬 낮아질 것이다. 미래의 시나리오가 불확실하다는 점을 감안할 때, 우리는 동일한 수의 전기운송 장치와 전기철도에 대한 현재의 차량, 보트 및 철도의 전체 교체비용을 계산하였다. 교체할 항공기의 수는 현재 항공기의 50%로 가정하였다. 본질적으로 전기차량은 충전시스템이 필요하며, 이를 수용하기 위해서는 i)도시의 주요 거리에 전기충전소의 설치, ii)전 세계의 모든 도로에 TEV 시스템 설치 등 두 가지 시나리오를 고려하였다. 이러한 시나리오는 일반적으로 세계와 미국의 대도시를 중심으로 이동성이 있는 도시에서 블록당 1.2~3.6개의 충전 스테이션이 있는 것을 가정한 것이다. 도시설계 방식에서 이렇게 많은 수의 충전소를 수용하는 것은 정말

어려운 일이다. 그러나 이 시스템은 TEV시스템보다 2~3배 더 경제적이며, 7.9×10^{10} USD와 3.3×10^{16} J 대 5.3×10^{13} USD 및 TEV 시스템의 경우 2.2×10^{19} J의 효율성을 지니고 있다. 100% 재생 가능한 운송시스템 시나리오에 대한 고정자본 및 에너지비용을 <표 1>에 나타낸다. 차량/선박/전기열차/항공기의 총 자본비용은 3.9×10^{13} USD로 88%의 차량에 구축할 수 있는 것으로 나타났다. 아울러 8%의 항공기 및 대형무역선에 대해서는 2.8%, 철도는 1.2%로 나타났다 전기 인프라를 이용한 충전소와 가스 운송 인프라가 추가된다면 이러한 결과는 눈에 띄게 향상될 수 있을 것이다.

<표 1> 100% 재생 가능한 운송시스템 시나리오에 대한 고정자본 및 에너지비용

구분	고정자본[USD]	소요 에너지[PJ]
경량 차량	2.3×10^{13}	9642
중형 및 고관세 트럭	0.9×10^{13}	3930
2~3륜 차량	0.3×10^{13}	1444
계	3.6×10^{13}	15,016
철도	4.6×10^{11}	188
기관차	0.3×10^{11}	14
계	4.9×10^{11}	202
벌크 캐리어 선박	5.0×10^{11}	220
일반 화물선	1.0×10^{11}	46
컨테이너 화물선	2.6×10^{11}	119
화학 유조선	0.9×10^{11}	40
여객선	1.5×10^{11}	66
계	1.1×10^{12}	477
항공기	1.6×10^{12} a	397a
충전소/TEV 시스템	7.9×10^{10} / 5.3×10^{13}	33 / 21,796
메탄 인프라	7.9×10^{10}	290
총계	3.9×10^{13} / 9.8×10^{13}	16,415 / 38,178
어선	1.8×10^{12}	772

* 자료 : Antonio García-Olivares et al., “Transportation in a 100% renewable energy system”, Energy Conversion and Management 158 (2018) 266–285, p.276.

이 연구에서는 이러한 위험을 예측하는 일련의 조치가 필요하며, 정부와 시민사회가 지원하고 이를 육성하는 데 주력해야 한다는 다음과 같은 정책을 제시한다.

- 화물 및 승객을 위한 전기열차를 트럭과 개인승용차를 기반으로 현재 도시 간 육상운송의 대부분을 대체할 수 있는 정책이 필요하다.
- 대중교통에 대한 대안 없이 도시 간 단거리 교통에만 전기를 사용하는 것은 지양해야 한다.
- 전기의 제한된 사용은 도시의 교통 혼잡 문제를 해결하지 못하고, Ni 및 Li와 같은 주요금속의 가격을 상승시킬 수 있다. 따라서 전기를 이용한 대중교통에 우선순위를 부여할 필요가 있다.
- 차량의 자율성 및 전력 요구사항에 맞는 연료전지의 사용이 필요하다.

100% 재생가능 경제는 기후변화 및 에너지로 인해 제기된 문제에 대한 지속적인 해결책을 제시할 수 있을 것이다. 아울러 보안, 지속가능성 및 환경오염을 예방하는 데에도 크게 기여할 수 있을 것이다. 이 연구는 화석연료 기반 운송시스템의 대안으로 주목받고 있는 재생에너지를 이용한 운송시스템에 대해 검토하였다. 이 연구결과는 국내 친환경 운송시스템 관련 정책에 벤치마킹 자료로 활용할 수 있을 것이다.

[참고문헌]

- [1] Jacobson MZ, Delucchi MA. Providing all global energy with wind, water, and solar power, part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials. *Energy Policy* 2011;39:1154–69.
- [2] Lehmann H, Nowakowski M. Archetypes of a 100% renewable energies power supply. *Energy Procedia* 2014;57:1077–85.
<<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.093>>
- [3] Sgouridis S, Csala D, Bardi U. The sower's way: quantifying the narrowing netenergy pathways to a global energy transition. *Environ Res Lett* 2016;11:9.
<<http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/11/9/094009>>
- [4] Lee A, Zinaman O, Logan J, Bazilian M, Arent D, Newmark RL. Interactions, complementarities and tensions at the nexus of natural gas and renewable energy. *Electr J* 2012;25:38–48.
- [5] Sgouridis S, Csala D, Bardi U. The sower's way: quantifying the narrowing netenergy pathways to a global energy transition. *Environ Res Lett* 2016;11:9.
<<http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/11/9/094009>>
- [6] García-Olivares A, Ballabrera. Energy and mineral peaks, and a future steady state economy. *Technol Forecast Soc Change* 2015;90:587–98.
- [7] IEA. Energy technology perspectives 2016. Paris: International Energy Agency, OECD/IEA; 2016.
- [8] Borman S. Direct methane fuel cell revived. *Chem Eng News* 2015;93(43):6.
<<http://dx.doi.org/10.1021/cen-09343-notw2>>
- [9] IRENA. The renewable route to sustainable transport: a working paper based on REmap. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi; 2016.
<www.irena.org/remap>
- [10] IRENA. Renewable capacity statistics 2016. International renewable energy agency; 2016.
<<http://www.irena.org/menu/index.aspx?mnu=Subcat&PriMenuID=36&CatID=141&SubcatID=1719>>

<원문제목> Transportation in a 100% renewable energy system

<원문출처> Energy Conversion and Management 158 (2018) 266–285