

GCAM을 활용한 국내 수송부문 모델링과 친환경차 시나리오 분석

전승호¹⁾

요 약

본 연구에서는 국내 친환경차 도입이 도로 수송부문의 여객서비스수요와 이산화탄소 배출량에 어떤 영향을 주는지 분석하고자 한다. 이 과정은 베이스라인과 시나리오 설정으로 구분할 수 있다. 우선 본 연구의 분석도구인 통합모형 GCAM (Global Change Assessment Model) 4.0의 기존 국내수송부문 입력 값을 국내실정에 맞게 재구성하는 베이스라인 설정작업 과정이 진행되어야 한다. 한편, 시나리오 설정은 Battery Electric Vehicle (BEV), Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV), Hybrid Electric Vehicle (HEV), Natural Gas Vehicle (NGV) 등을 친환경차로 분류하고, 이에 대한 도로 수송부문 정보를 재구성하는 과정을 포함한다. 본 연구에서 재구성한 국내수송부문의 베이스라인 분석결과는 기준년도에서의 수송부문 서비스수요를 국가교통DB센터에서 발간하는 국가교통통계의 값과 정확히 일치시킴으로써, 과거로부터의 추세가 이후 기간의 시뮬레이션 결과 값과 자연스럽게 이어지는 결과로 나타났다. 이는 GCAM 4.0의 결과와 확연한 차이를 보여주고 있어 GCAM 활용시, 국내실정과 맞도록 모형재구성작업이 얼마나 중요한지를 반증하고 있다.

시나리오 분석결과는 2040년 이후 친환경차가 기존 유류차량 서비스수요의 70% 이상을 차지하게 될 만큼 빠른 성장속도를 보였다. 2030년까지 FCEV, HEV, BEV 그리고 NGV는 각각 평균 57%, 45%, 24%, 20%의 성장률을 보이며, 현 정책처럼 BEV 구입에 대한 보조금과 관련 인프라구축에 많은 지원이 지속된다면, 본 연구결과보다 훨씬 큰 잠재력이 있을 수 있음을 의미한다. 탄소 배출저감 측면에서는, 2030년에 베이스라인 대비 71%로 줄어들지만, 전기 혹은 수소 생산을 위해 발전부문이 배출하는 탄소량을 감안하면 베이스라인 대비 76%로, 그 효과가 감소하는 것으로 나타났다.

1) 아주대학교 에너지시스템학부 박사과정, sidus44@naver.com

서론

2014년 국내 최종에너지 소비량은 213.87 MTOE이며, 그 중 수송부문이 차지하는 비중은 18% 정도이다 (KEEI, 2016). 1990년부터 살펴보면, 최종에너지 소비부문에서 산업부문의 비중은 지속적인 증가추세를 보이고, 가정상업부문의 비중은 지속적인 하락세를 보이는 반면, 수송부문은 1990년에도 국내 최종에너지 소비의 19%를 차지하고 있었을 만큼, 최종에너지 소비부문에서의 꾸준한 수요처이다. 각 최종소비부문별로 석유제품이 차지하는 비중을 살펴보면, 산업부문은 1990년에 55%, 2014년에 45%, 가정상업부문은 1990년에 40%, 2014년에 13%, 공공부문은 1990년에 81%, 2014년에 28%인데 반해, 수송부문은 1990년에 99%, 2014년에 95%를 기록하였다 (KEEI, 2016). 다시 말해, 수송부문은 지난 14년 동안 석유제품사용의 비중을 불과 4%포인트 밖에 줄이지 못하였다. 여객과 화물의 용도구분을 차지하고, 수송부문은 육상, 철도, 수상, 항공 부문으로 나눌 수 있다. 특히 수송부문에서 석유제품을 제외한 에너지원은 철도부문에서의 전기, 육상부문에서의 CNG와 신재생에너지가 전부이며, 이 에너지원들이 수송부문 에너지사용의 5%를 차지하고 있다. 이처럼 석유제품에 대한 의존이 심한 수송부문은 최근 온실가스 감축방안의 일환으로서, 친환경차에 관한 관심을 불러왔다. 2014년에 육상부문이 전체 수송부문 에너지 사용의 82%를 차지하는 만큼, 수송부문에서 육상부문은 매우 큰 영향을 가진다. 이러한 사실을 감안하면, 친환경차가 수송부문에 미치는 영향력은 상당할 것이라 판단할 수 있다. 즉 친환경차의 도입으로 인해, 수송부문의 에너지원 다각화, 수송부문의 에너지효율 향상, 온실가스 감축 효과를 기대할 수 있다.

친환경차에 대한 관심은 우리나라 뿐 아니라 전 세계적인데, 다른 나라와 친환경차의 시장을 비교해보면, 2013년 신차 판매 대수 중 친환경차의 비율은 일본이 22%, 미국이 7%, 유럽이 5%이며, 우리나라의 경우 3% 이내 수준으로 아직 다른 나라와 비교해볼 때 낮은 수준이다 (ME, 2015). 이에 우리 정부에서도 친환경차 보급을 위해, 보조금 정책을 시행하고 있다. 2016년 환경부 발표에 따르면, 친환경차 보급규모는 총 4만 1,471대, 총예산은 2,014억이다. 차종별로 총 보급지원 대수 및 차량 1대당 보조금은 승용형 전기차가 7,900대, 1,200만원, 버스형 전기차가 100대, 1억원, 하이브리드차가 30,400대, 100만원, 플러그인 하이브리드차가 3,000대, 500만원, 수소연료 전지차가 71대, 2,750만원 이다. 보조금을 지원받는 차량의 대수는 하이브리드가 가장 많지만, 차량 1대당 지원 금액으로는 버스차종을 제외하면 수소 연료전지차가 2,750만원으로 가장 많고, 총 지원 금액을 고려하면 전기차에 대한 보조금 지원이 가장 많은 것으로 나타났다 (ME, 2016).

국외에는 본 연구에서 사용한 GCAM (Global Change Assessment Model)을 활용한 연구사례가 적지 않다. Kyle and Kim (2011)은 전 세계를 대상으로 light-duty vehicle을 분석하였다. 연구의 목적은 친환경차와 같은 대체기술의 도입에 따른 서비스수요, 에너지사용량, 온실가스 감축량에 대한 효과를 보고자함이었으며, 기후변화에

다른 제약이 있는지에 따라 시나리오를 설정하였다. 분석결과, 수소차와 전기차가 온실가스 감축에 비교적 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. Yin et al. (2015)은 중국의 수송부문을 기후변화정책의 유/무에 따라 시나리오를 설정하여 분석하였다. 분석결과는 기후변화에 따른 제약이 있을 경우, 온실가스 감축에 도움은 되지만 장기적으로 화석연료사용이 줄지 않는 것이 부담이 될 수 있다고 보고하고 있다. Chaturvedi et al. (2015)은 수송부문에서 철도의 점유율을 증가시킴으로써, 화석연료의 사용을 줄이고, 전기사용을 늘리는 방안에 대한 효과분석을 하였다. 분석결과, 단순히 온실가스배출에 제약을 주는 경우, 유류자동차가 친환경차로 대체되는 데 그친다. 하지만 온실가스배출에 제약을 주는데 더해, 철도의 점유율을 늘리는 시나리오의 경우, 친환경차의 도입이 증가함과 동시에 철도 사용량이 증가하여, 단순 온실가스배출제약을 주는 것보다 에너지사용량 감소, 온실가스 감축 측면 모두에서 큰 효과를 보였다.

국내에는 통합모형을 분석 도구로 한 연구사례가 많지 않다. 국내연구사례로써, 이정우, 양훈철 (2010)은 통합모형인 MARKAL이 국내수송부문 분석에 어떤 방향으로 활용될 수 있는지에 관해 서술한 바 있으나, 실제 시뮬레이션 결과를 제시하고 있지는 않다. 개괄적인 MARKAL에 대한 설명과 함께, 추후에 수송부문 연구에 참고자료가 될 수 있는 내용들이 담겨 있다. Hu et al. (2015)은 수원지역을 대상으로 토지이용-교통 통합모형을 활용하여 도시환경을 분석하였다. 분석에는 토지이용모형인 DELTA모형과 교통모형인 OmniTRANS의 조합을 활용하되, DELTA모형 내부에는 교통모형이 따로 포함되어 있지 않아, 다른 모형과 연결, 활용할 수 있다. 최종적으로 분석결과는 GIS를 기반으로 온실가스 정보를 지도형태로 보고하고 있다. Han et al. (2015)는 친환경차의 보조금 지원정책이 친환경차의 점유율 변화와 온실가스 감축에 어떠한 영향을 주는 지 분석하였다. 정부의 친환경차 보급계획에 추가적인 보급계획이 생기는 것에 따라 여러 시나리오를 가정하였으며, 분석도구는 계량분석모형의 하나인 다항로짓모형을 활용하였다. 온실가스 감축효과의 분석 결과, 가장 소극적인 친환경차 보급지원 시나리오의 경우, 2015년부터 2020년까지 722,584 톤·CO₂·eq의 온실가스 감축효과가 있으며, 가장 적극적인 친환경차 보급지원 시나리오는 3,562,749 톤·CO₂·eq의 온실가스 감축효과가 예상되는 것으로 나타났다. 평균적으로 차량 1대당 온실가스 감축효과는 모든 시나리오에서 EV, PHEV, HEV의 순으로 높게 나타났다. Eom and Shipper (2010)는 ASIF²⁾ 방법론을 활용하여, 국내 여객수송부문 에너지사용의 트렌드를 분석한 바 있다. 분석결과 중 하나로, 1997년 금융위기 전까지는 대중교통보다는 자가용이 선호되었지만, 1997년 이후로 버스가 점점 자가용을 대체하는 트렌드를 보였다. 이처럼 대중교통의 선호는 수송부문의 에너지효율을 높이지만, 같은 기간 자가용부문에서 서비스수요에 비해, 에너지사용이 비효율적으로 이루어지면서, 대중교통의 선호가 온실가스 감축에 가져오는 긍정적인 효과는 다소 사라진 것으로 보고한 바 있다. Geem (2011)은 국내 수송부문의 에너지수요량을 다중선형회귀모형과 인공신경망 모형으로 예측, 비교분석한 결과, 인공신경망 모형이 과거 국내수송부문의 에너지사용량 추이를 잘 설명한다고 판단, 인공신경망 모형을 연구의 방법론으로 채택하였다. 인공신경망 모형을 통해 국내

2) ASIF란 GHG = A·S·I·F를 의미하며, 여기서 A: Activity, S: Share of mode in activity, I: energy Intensity, F: emission rate of Fuel을 의미한다. Shipper et al. (2000) 참조.

수송부문 에너지수요를 예측한 결과, 2025년 국내 수송부문의 에너지수요량은 최소 36.858 MTOE, 최대 37.095 MTOE 이 될 것으로 나타났다.

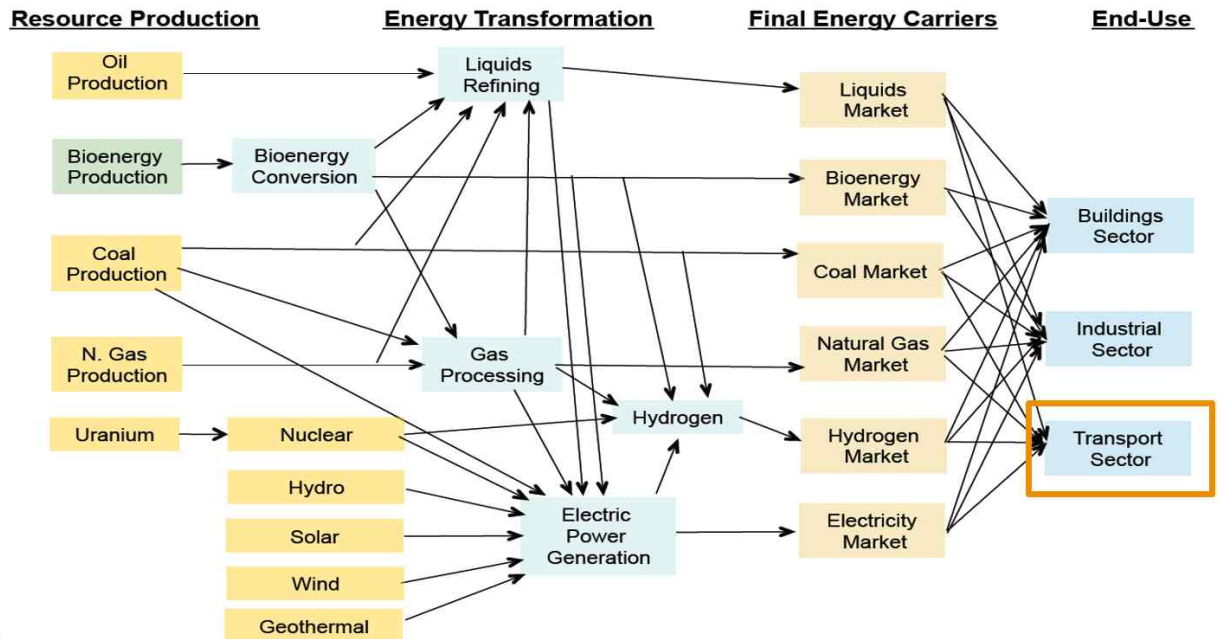
상기의 연구사례 분석에서 살펴보았듯이, 국내에는 통합모형을 기반으로 국내 수송 부문을 분석한 연구사례가 거의 없다. 따라서 우선적으로 국내 수송부문의 모형을 정립시키는 작업이 필요하다고 판단하였고, 본 연구는 GCAM의 국내 수송부문 모형을 국내 실정에 맞게 재구축 하고자 하였다. 모형의 베이스라인을 현실성 있게 설정하는 것 자체가 우선적으로 중요할 뿐만 아니라, 시나리오분석 또한 제대로 구축되어진 베이스라인을 통해서야만, 그 의미를 명확히 할 수 있기 때문이다. 더 나아가, 최근 이슈가 되고 있는 친환경차에 관한 분석을 시도하였다. 친환경차에 대한 많은 보조금이 지급되고 있는 현실과 달리, 본 연구에서는 어떠한 보조금 설정도 하지 않았으며, 온실가스 배출의 제약설정도 하지 않았다. 이는 현실과 다른 상황이지만, 본 연구의 분석결과는 친환경차가 기술개발 및 효율개선 등을 통해 순수하게 가질 수 있는 시장경쟁력을 의미한다고 볼 수 있다.

방법론 및 데이터

1. GCAM의 개요 및 수송부문 모형

GCAM은 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)의 5차보고서를 위해 사용된 4가지 모형 중 하나이다. GCAM은 경제, 에너지시스템, 토지이용, 기후변화를 연결시킨 통합모형이다. 그림 1은 에너지시스템의 경우, 좌측의 1차 에너지로부터 우측의 건물, 산업, 수송부문의 최종에너지서비스 수요까지의 Reference Energy System (RES)을 GCAM이 이를 어떻게 구성하고 있는지를 도식화한 것이다. 2010년을 기준년도로 하여 5년 단위로 2100년까지 시뮬레이션이 가능하며, 전 세계를 32개의 지역으로 구분하고 있고, 우리나라는 32개 지역들 중 하나의 단일지역으로 구분되어 있다. GCAM의 단기간의 기술평가 보다는 장기간의 기술평가를 목적으로 하고 있으며, 시나리오분석을 통한 정책적 함의를 도출하기 위해 활용되고 있다.³⁾

3) 관련 상세내용은 JGCRI/GCAM (<http://www.globalchange.umd.edu/archived-models/gcam>) 참조



<그림 1> GCAM의 에너지시스템 구조

출처 : Calvin et al. 2014

본 연구에서 GCAM이라는 통합모형을 사용하는 큰 이유 중 하나는 서로 다른 기술 간의 경쟁이 모형 내에서 명시적으로 고려되고 있기 때문이다. 기술경쟁을 모사하는 구체적인 내용은 본문에서 다루겠지만, 간략히 설명하면, 각각의 기술이 해당 부문에서 차지하는 점유율과 이를 결정하는 기술의 비용 및 효율에 관한 정보, 에너지 사용량 및 각 에너지원의 탄소함유량 등이 기술경쟁에 영향을 미치게 된다. 여타 선형모형들과 달리, GCAM에서는 조건부 로짓함수를 활용하여 기술경쟁을 모사하고 있기 때문에, 모형이 기술선택을 함에 있어, 극단적인 선택이 이루어지지 않는다는 장점이 있다.⁴⁾

GCAM의 수송부문 모형은 여객부문과 화물부문으로 이루어져 있다. 여객과 화물의 모형은 공통적으로 수송서비스수요를 소득과 가격의 함수로 가정한다. 차이점은 여객부문은 1인당 소득을 사용한다는 것과 인구수를 반영하는 반면, 화물부문은 국내총소득을 사용하되 인구수는 고려하지 않는다. 또 여객부문에서는 화물부문에서는 고려하지 않는 시간의 기회비용을 반영하고 있다.⁵⁾

여객부문과 화물부문의 서비스수요는 각각 다음과 같이 계산된다.

여객부문의 서비스수요:

$$D_t^p = \sigma(Y_t)^\alpha (P_t)^\beta (N_t) \quad (1)$$

4) Keepin 외 (Nature, 1984) 참조

5) GCAM 수송부문의 자세한 설명은 Mishra et al. (2013) 참조

화물부문의 서비스수요:

$$D_t^f = \sigma' (GDP_t)^{\alpha'} (P_t)^\beta \quad (2)$$

여기서,

- t : 해당 년도 (기준년도 : 2010년)
- D^k : k 유형의 서비스수요, 단 $k \in \{p, f\}$, p : 여객, f : 화물
- Y : 1인당 소득
- GDP : 국내 총 생산
- P : 수송서비스 가격
- N : 인구 수
- σ, σ' : 각각 기준년도의 여객, 화물 서비스수요 캘리브레이션 파라미터
- α, α' : 각각 여객, 화물 서비스수요의 소득탄력성
- β, β' : 각각 여객, 화물 서비스수요의 가격탄력성

식 (1)과 (2) 에서 가격변수를 제외한 소득과 인구변수는 모형이 설정하는 전제에 따라 외생적으로 주어진다. 다시 말해, 가격변수 만이 모형에서 내생적으로 결정되는 변수이다. 특히 이 가격변수는 기술을 평가함에 있어 가장 중요한 변수로 작용하므로, 자세히 살펴 볼 필요가 있다. t 시점의 수송서비스 가격은 다음과 같은 방식으로 계산된다.

$$\begin{aligned} P_t &= \sum_i (S_{i,t})(P_{i,t}) \\ P_{i,t} &= \sum_s (S_{s,i,t})(P_{s,i,t}) \\ P_{s,i,t} &= \sum_j (S_{j,s,i,t})(P_{j,s,i,t}) \\ P_{j,s,i,t} &= \frac{(FP_{j,s,i,t})(EI_{j,s,i,t}) + NFP_{j,s,i,t}}{LF_{j,s,i,t}} + \frac{W_{j,s,i,t}}{SP_{j,s,i,t}} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,

- i : 수송모드의 종류
- s : 수송모드의 크기
- j : 수송모드의 기술
- FP : 수송서비스의 연료가격 (\$/MJ)

NFP : 수송서비스의 비연료가격 (\$/VKT)
 EI : 수송모드의 energy intensity (MJ/VKT)
 LF : 수송모드의 load factor (PKM/VKM or TKM/VKM)
 W : 시간당 임금 (\$/hour)
 SP : 수송모드의 속도 (KM/hour)
 S : 수송모드의 기술점유율

식 (3)에서 수송모드의 기술점유율인 S_j 가 GCAM에서 모사하는 사실상 기술경쟁의 결과 값으로, 매우 중요한 변수이다. 이는 다음과 같이 로짓모형을 통해 계산 된다.

$$S_{j,s,i,t} = \frac{(SW_{j,s,i,t})(P_{j,s,i,t})^{\lambda_j}}{\sum_j (SW_{j,s,i,t})(P_{j,s,i,t})^{\lambda_j}} \quad (4)$$

여기서,

S : 수송모드의 기술 점유율
 SW : 수송모드의 share weight
 λ : 로짓 지수 (logit exponent)

앞서 설명한 GCAM 수송부문 모형은 서비스수요를 시뮬레이션 하는 과정이다. 식 (1)과 (2)로부터 구한 서비스수요를 에너지소비 및 관련 특성치들과 연계시키는 과정은 서비스수요 항등식을 통해 이루어지며, 다음과 같다.⁶⁾

$$\begin{aligned}
 D &\equiv PKM(TKM) \\
 &\equiv EJ \times \frac{VKM}{EJ} \times \frac{PKM(TKM)}{VKM} \\
 &\equiv E \times M \times L
 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,

E : 에너지사용량 (calorific value)
 M : 연비 (VKM/calorific value)
 L : load factor (PKM/VKM or TKM/VKM)

식 (5)는 수송부문에 적용했을 뿐, 그 방법에 있어 Kaya 항등식과 같은 방법론이다. Kaya 항등식은 하나의 변수를 여러 가지 요인으로 분해하여 설명할 수 있다는 장점을

6) 편의상 위, 아래첨자 제외함.

가지고 있다. 하지만 이미 많은 선행연구⁷⁾에서 언급한 것처럼, rebound effect 문제가 발생할 수 있다. 대표적인 예로서, 특정 수송모드의 에너지효율향상은 직접적인 효과로, 그 수송모드의 에너지사용량을 감소시키지만, 간접적으로는 에너지효율의 향상으로 인한 가격하락은 소비자로 하여금 그 수송모드의 사용을 증가시킬 여지가 있다. 이처럼 식 (5)는 rebound effect 가 있다는 단점에도 불구하고, 변수를 간단하게 요인분해할 수 있다는 장점이 있다. 특히 식 (5)에서 M 과 L 은 수송모드의 에너지효율을 나타낸다.

2. 데이터 및 GCAM의 재구성

본 연구에서 쓰인 수송부문의 데이터는 식 (5)에서 알 수 있듯이, 서비스수요 (PKM 혹은 TKM), 총주행거리(VKM), 에너지사용량(EJ) 이다. 서비스수요와 총주행거리 정보는 국가교통DB센터에서 매년 발간하는 국가교통통계 (KTDB, 2015)를 활용하였다. 국가교통통계는 유관기관의 교통관련 통계 중 주요 항목들을 발췌하여 수록한 통계집이다. 국가교통통계는 서비스수요와 총 주행거리 정보 뿐 아니라 교통과 관련된 여러 정보들을 제공하곤 있다. 에너지사용량은 IEA (International Energy Agency)의 에너지밸런스 표를 기본으로 하되, 에너지경제연구원에서 4년마다 발행하는 에너지총조사 보고서를 함께 참조하였다.

본 연구의 목적은 GCAM 수송부문을 국내 실정에 맞게 재구성하는 것이다. 앞서 언급한 바와 같이, 이는 식 (5)를 통해 이루어진다. 다시 말해, 국가통계에 의해 주어진 서비스수요를 정확히 충족시키는 각 수송모드별 에너지사용량, 연비, load factor의 조합을 찾는 것임과 동시에 수송모드를 최대한으로 세분화하는 것을 의미한다. Appendix의 <표 6>부터 <표 11>까지 본 연구의 수송부문 모드분류는 에너지총조사 보고서의 분류가 결정한다. 이는 식 4에서 에너지사용량인 EJ 가 수송모드별로 가장 세분화된 데이터라는 말과 같다. 그 다음 필요한 변수는 각 수송모드의 총 주행거리인 VKM 인데 이는 도로부문을 제외하면 통계적으로 주어지지 않다. 도로부문의 경우, VKM 데이터가 존재하므로, PKM 을 모드별로 세분화하는 작업이 필요하다. 이는 식 (5)에서 마지막 변수인 L 을 모드별로 적절한 가정을 함으로써 항등식을 정확히 맞춰 낼 수 있다. 반면 VKM 이 통계적으로 주어지지 않는 부문, 즉 도로부문을 제외한 나머지 철도, 선박, 항공부문의 경우에는 조금 더 많은 가정이 필요하다. 즉, 각 모드별로 주어진 E 를 바탕으로, 세분화되지 않은 서비스수요 D 를 충족시키는, 각 모드별 M 과 L 을 동시에 적절한 값으로 가정해야 한다. 이는 <표 6>부터 <표 11>에서 도로부문보다 철도, 선박, 항공 부문의 입력 값이 수정되어야 할 여지가 많은 것을 의미하기도 하다. 특히 선박의 경우 L 값을 추산하기 위해 국내, 국제별, 여객, 화물별 선박의 입출항횟수와 여객 수, 화물 톤수를 사용하였다⁸⁾. 또한 항공의 경우⁹⁾, 여객서비스와

7) Wang et al.(2012), Sorrell et al.(2009) 참조

8) 관련 상세내용은 SP-IDC (해운항만물류정보센터) (www.spidc.go.kr) 참조

9) 관련 상세내용은 공공데이터포털 (www.data.go.kr) 참조 (search: 항공수송실적-항공통계)

(IEA-EB)¹⁴)를 토대로 에너지사용량을 입력 하는데, 이에 따라 본 연구에서도 IEA의 에너지 밸런스 표의 에너지사용량 정보를 사용한다. 다만 IEA의 에너지 밸런스 표에 있는 수송부문의 하위분류는 도로, 철도, 선박, 항공, 국제 선박, 국제 항공으로만 나뉘어져 있어, 세부적인 분류를 위해 에너지총조사 보고서(KEEI, 2012)를 활용한다. 특히 수송부문에서 가스는 시내버스를 제외한 다른 모드에서도 많이 사용되고 있지만, 에너지총조사 보고서에 따르면 수송부문의 가스는 오직 시내버스에서만 사용되어지는 것으로 보고된다. 이와 같이 에너지총조사 보고서는 표본조사가 가지는 태생적인 문제를 안고 있기는 하나, 수송부문의 모드별 세분화가 잘 구축되어 있다는 점에서 유용하게 활용될 수 있다.

<표 1> 기관 및 보고서별 수송부문 에너지사용량 비교

(Unit : 1000TOE)

	KEEI-ECS	KEEI-EB	IEA-EB
Road	34,995	29,821	28,439
Rail	381	383	373
Ship	4,653	8,518	9,766
Air	6,029	5,786	4,352
Total	46,057	44,508	42,930

주: KEEI-ECS, KEEI-EB, IEA-EB는 각각 KEEI 에너지총조사보고서, KEEI 에너지밸런스표, 그리고 IEA의 에너지 밸런스표를 나타냄.

GCAM 재구성 결과

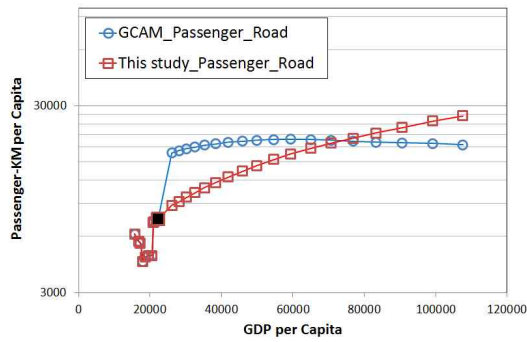
Appendix에 있는 <표 6>부터 <표 11>까지는 전장에서 설명한 내용을 바탕으로, 식 (5)의 M (fuel efficiency)과 L (load factor)을 재구성한 결과이자, <그림 2>부터 <그림 11>에 활용된 입력 값이다. <그림 2>부터 <그림 11>은 국제수송과 함께, 국내 수송부문을 여객, 화물 그리고 도로, 철도, 선박, 항공부문으로 나누어 GCAM 4.0과 본 연구에서 재구성한 국내 수송부문의 시뮬레이션결과를 비교한 그림이다. 그림은 기본적으로 일인당 GDP수준과 해당 시점의 수송서비스수요를 표시한 것이다.

철도부문을 제외한 모든 부문에서 GCAM의 시뮬레이션과 큰 차이를 보이고 있다. 특히 여객도로부문에서 GCAM의 시뮬레이션 값은 과거 통계추세와도 일관성이 없을 뿐더러, 미래의 추세 또한 많이 다르다. 서비스 수요 뿐 아니라, 에너지사용 측면에서도 도로부문은 국내수송부문에서 매우 큰 비중을 차지하고 있다. 그러한 사실을 감안하면, 국내실정에 맞게 모형을 재구성하지 않고, GCAM 시뮬레이션 결과를 그대로 사용한다면 현실과 동떨어진 결론을 얻게 될 수 있음을 의미한다. 유일하게 국제 화물선박 (International_Freight_Ship) 부문은 서비스수요의 과거통계치가 없다.¹⁵⁾ 따라서

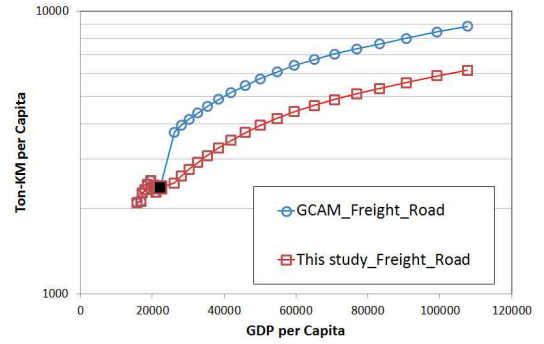
14) (<http://dx.doi.org/10.1787/data-00512-en>) 참조. (유료자료)

15) <그림 11>, 해당그림의 서비스수요는 로그 값으로 표시된 결과이므로 그 차이의 크기가 그림으로 나타나는 것보다 매우 큰 차이임을 주의할 필요가 있음.

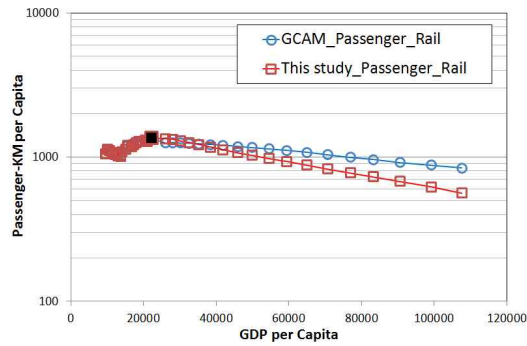
2010년까지의 과거 추세 선은 없으며, 2010년부터 본 연구에서 가정한 값들로 시뮬레이션 값만 존재한다. GCAM에서는 국내 여객선박 부문, 국내 화물항공 부문, 국제 여객선박, 국제 화물항공 부문을 모델링 하지 않은 것을 볼 수 있다.



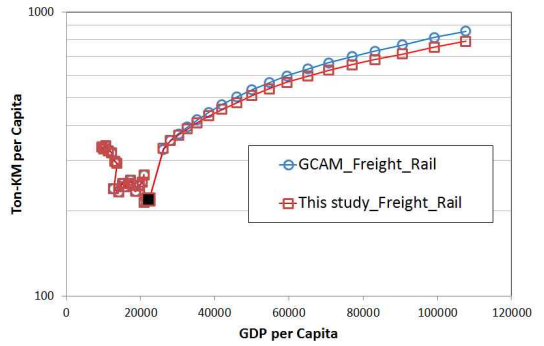
<그림 2> 여객 도로부문



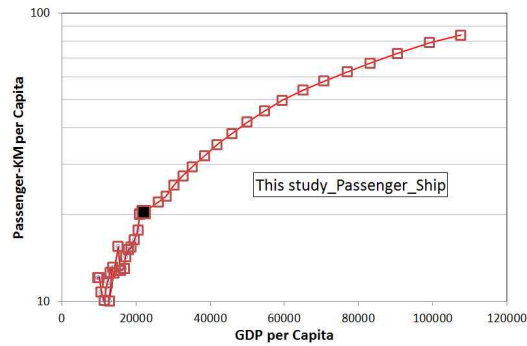
<그림 3> 화물 도로부문



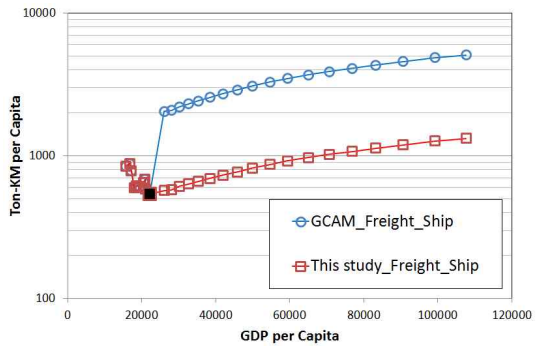
<그림 4> 여객 철도부문



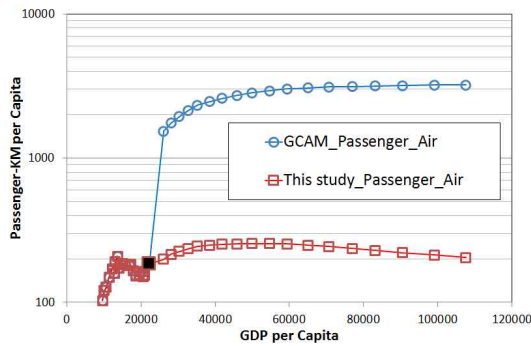
<그림 5> 화물 철도부문



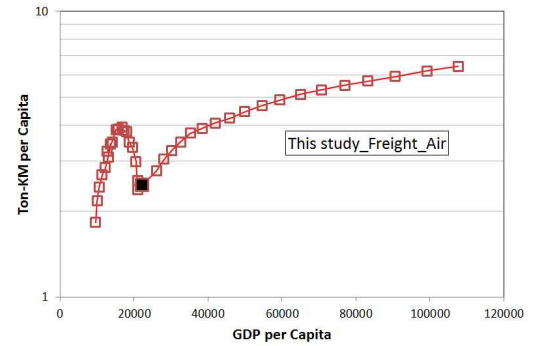
<그림 6> 국내 여객 선박부문



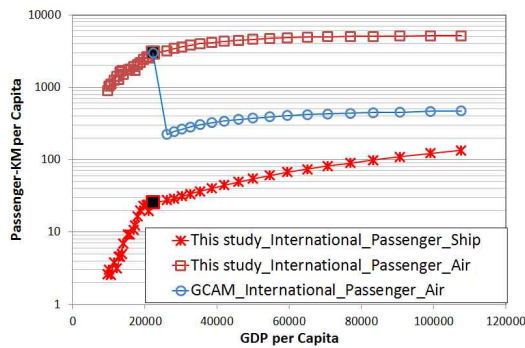
<그림 7> 국내 화물 선박부문



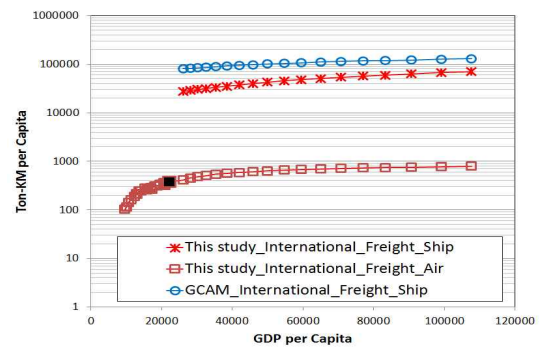
<그림 8> 국내 여객 항공부문



<그림 9> 국내 화물 항공부문



<그림 10> 국제 여객부문



<그림 11> 국제 화물부문

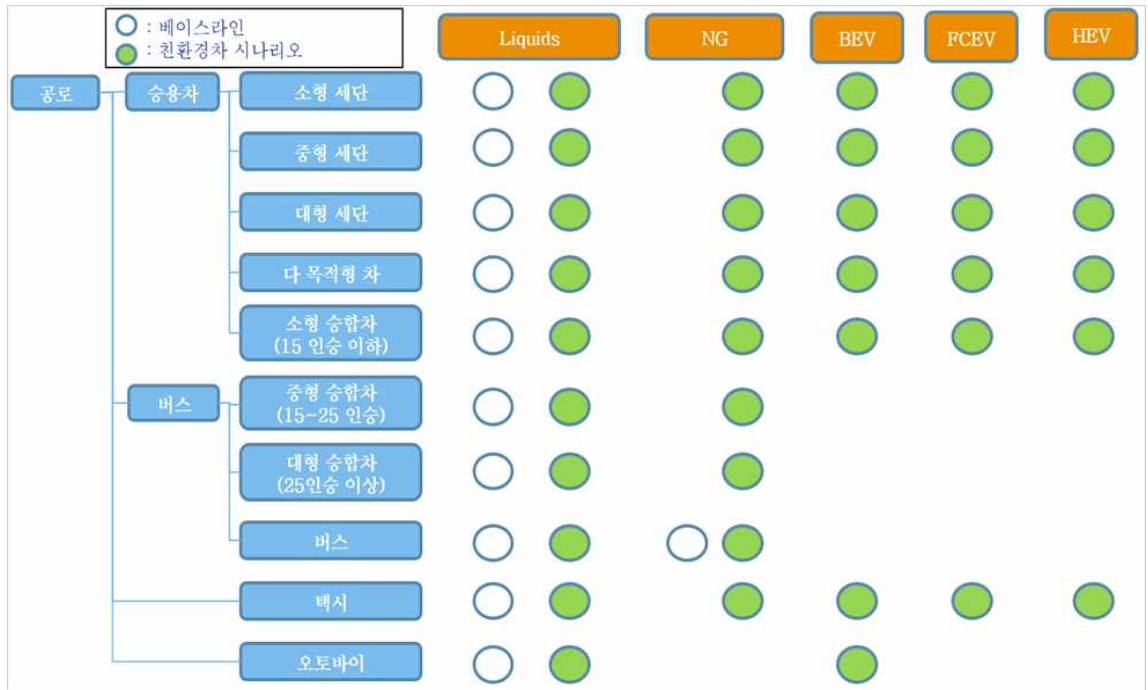
※ 각 그림에서 검은색 점은 GCAM 기준년도(2010년)의 서비스수요 값을 의미한다. 즉 검은색 점의 왼쪽에 찍힌 점들은 과거 통계치이고, 오른쪽에 찍힌 점들은 2015년부터 5년 단위로 2100년까지의 시뮬레이션 결과이다. (x축: level scale, y축: log scale)

베이스라인 및 시나리오 설정

본 연구에서는 베이스라인과 함께 친환경차 시나리오 (이하 시나리오)를 설정하였다. <그림 12>는 베이스라인과 시나리오의 개요를 보여주고 있다. 본 연구에서 친환경차는 전기배터리로만 구동이 되는 BEV (Battery Electric Vehicle), 수소연료전지로만 구동이 되는 FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle), 차량 내부에서 내연기관과 전기배터리가 함께 구동이 되는 HEV (Hybrid Electric Vehicle), 천연가스를 연료로 사용하는 NGV (Natural Gas Vehicle)를 의미 한다. 친환경차의 적용범위는 여객도로부문에 한하므로, 시나리오 분석의 연구범위 또한 여객도로부문으로 한정한다.

베이스라인에서는 NG 버스를 제외한 모든 수송모드들이 2100년까지 유류차량임을 가정하고 있다. 반면 시나리오에서는 기존 수송모드들이 채택하고 있던 기술을 그대로 채택할 수 있다고 가정하되, 추가적인 기술채택에서, 승용차와 택시의 경우 BEV, FCEV, HEV, NGV 기술, 오토바이 BEV 기술채택만 가능하다고 가정하였다. FCEV와 NGV를 제외한 모든 친환경차량은 2015년에 시장진입이 가능하며, FCEV, NGV는

2020년에 시장진입이 가능하다고 가정하였다.



<그림 12> 베이스라인 및 시나리오 구조

<표 8>과 <표 9>는 본 연구에서 가정한 유류차량과 친환경차량의 연비와 비용정보이다. 친환경차의 연비 정보는 현재 기술수준을 반영하였고¹⁶⁾, 연비개선율과 비용정보는 GCAM에서 기본적으로 가정하고 있는 값을 사용하였다. 입력 값으로 사용된 비용정보는 <표 3>에 제시되어 있다.

<표 2> 연비 가정 (해당 연료의 모드별 평균 값)

Fuel Efficiency	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Liquid (km/liter)	9.51	10.19	10.89	11.62	11.76	11.90	12.04	12.18	12.25
BEV (km/kwh)	4.91	4.94	4.98	5.01	5.02	5.03	5.04	5.05	5.06
FCEV (km/kg)	7.04	7.29	7.54	7.80	7.82	7.84	7.86	7.88	7.89
HEV (km/liter)	15.77	16.58	17.42	18.28	18.44	18.61	18.78	18.95	19.03
NGV (km/m ³)	15.57	16.64	17.74	18.87	19.09	19.31	19.53	19.75	19.86

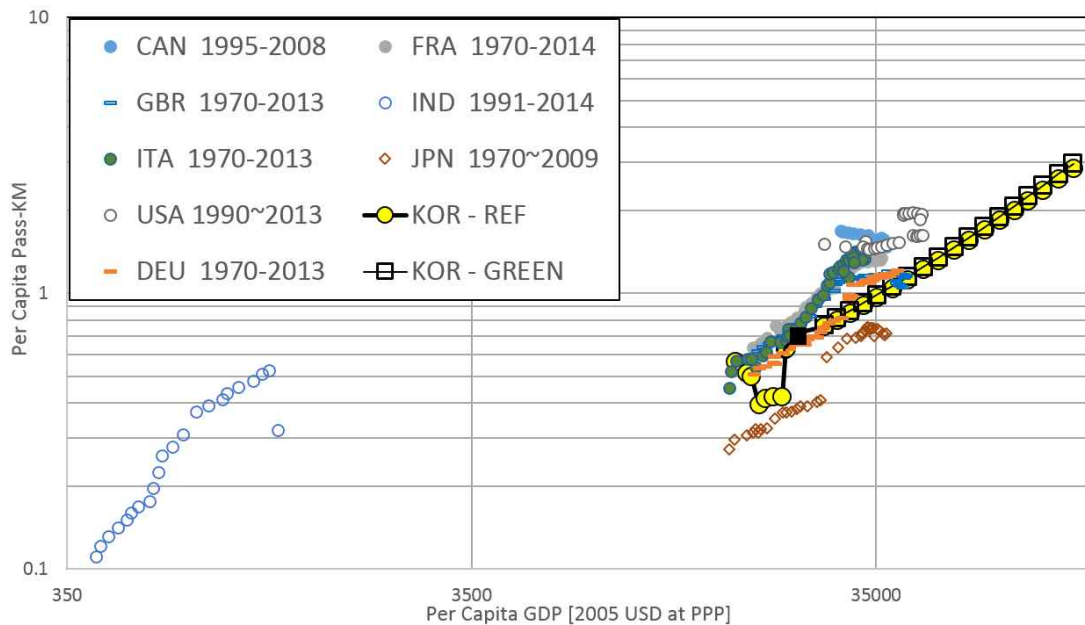
16) <https://www.fueleconomy.gov/> 에서 전 세계 각종차량들의 연비정보를 포함한 기본재원을 확인할 수 있다.

<표 3> 비용 가정 (해당 연료의 모드별 평균 값)

Input Cost	(Unit: 1990\$/PKM)								
	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Liquid	0.259	0.259	0.259	0.259	0.259	0.259	0.259	0.259	0.259
BEV	0.376	0.365	0.354	0.343	0.332	0.321	0.310	0.299	0.294
FCEV	0.360	0.356	0.351	0.345	0.341	0.336	0.332	0.328	0.326
HEV	0.277	0.272	0.269	0.269	0.268	0.268	0.268	0.268	0.267
NGV	0.284	0.284	0.284	0.284	0.284	0.284	0.284	0.284	0.284

시뮬레이션 결과

<그림 13>에서는 베이스라인과 시나리오의 여객도로부문 시뮬레이션 결과를 다른 국가들의 과거 통계와 비교하였다. 그림은 x, y축의 값을 동시에 log 값으로 표시함으로써 해당 표시지점의 원점으로부터의 기울기가, 일인당 소득의 변화에 따른 여객수송수요 탄력성을 나타냄을 주목할 필요가 있다. 개발도상국인 인도를 제외한 나머지 국가들은 소득수준이 증가하면서 서비스수요가 특정한 값에 몰려 조밀한 분포를 이룸에 따라 해당 탄력성의 변화가 크지 않음을 보여주고 있다. 반면 아직 1인당 GDP가 5000달러가 안 되는 인도가 1인당 GDP인 3~4만 달러까지 경제성장을 이룬다면, 현재 여타국가의 사례를 통해서 살펴볼 수 있듯이 매우 큰 규모의 여객서비스수요로 나타날 것임은 쉽게 예상할 수 있다. 또한 서비스수요 데이터를 얻지 못하였지만, 중국까지 감안한다면, 인도와 함께 이들 국가가 전 세계의 수송부문에서 차지하는 비중이 매우 크게 나타날 것임을 쉽게 알 수 있다. 여객도로부문에 대한 우리나라의 경우, 베이스라인에서 2100년까지 1인당 소득이 증가하면서, 다른 나라들과 비슷한 추세로 서비스수요가 성장하는 것을 볼 수 있다. 한편 시나리오의 경우에서도, 선택할 수 있는 기술의 폭이 많아졌음에도 불구하고, 베이스라인과의 서비스수요 합이 거의 일치하는 것으로 나타났다.

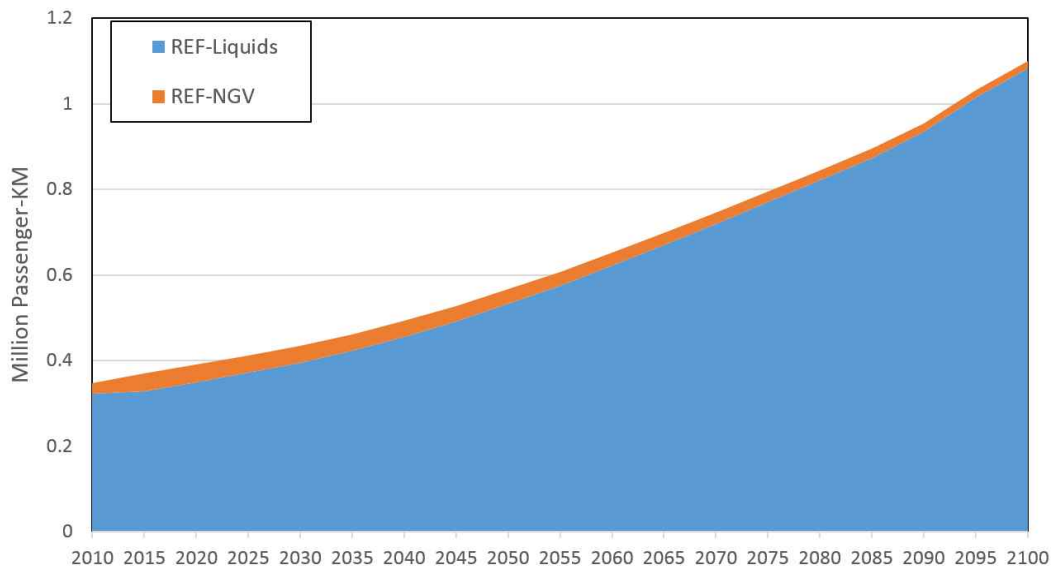


<그림 13> 주요 국가별 여객도로부문 서비스수요 (한국의 경우, 2010년부터는 시뮬레이션 결과 값임)

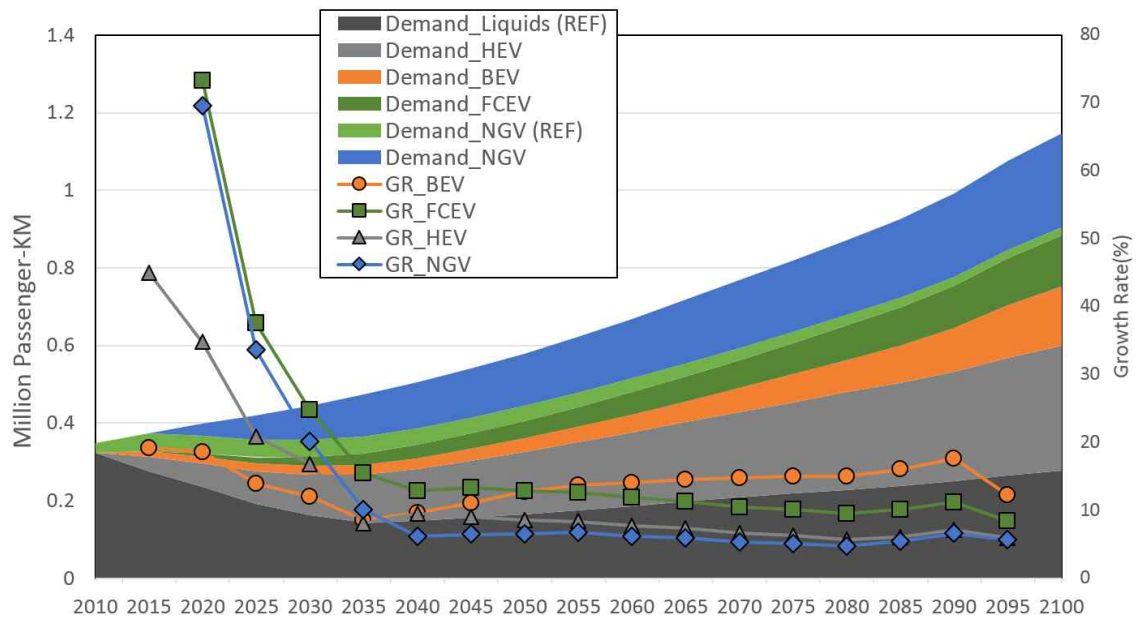
* 그림에서 검은색 점은 GCAM 기준년도(2010년)의 서비스수요 값을 의미한다. 즉 검은색 점의 왼쪽에 찍힌 점들은 과거 통계치이고, 오른쪽에 찍힌 점들은 2015년부터 5년 단위로 2100년까지의 시뮬레이션 결과이다. (x축: level scale, y축: log scale)

<그림 14>와 <그림 15>는 베이스라인과 시나리오 여객도로부문에서의 기술별 서비스 수요를 보여주고 있다. 베이스라인의 경우, 모든 차량의 모드가 liquid와 NG 2종류의 연료 밖에 없을뿐만 아니라, 2100년까지 지속적으로 유류차량의 점유율이 지배적인 것을 볼 수 있다. 반면 시나리오의 경우, 2040년 이후 친환경차가 기존 유류차량 서비스 수요의 70% 이상을 대체하게 될 수 있을 것으로 나타났다. 누적그래프의 최하위 및 차하위 부분은 HEV를 포함한 유류차량의 수요인데, 유류차량의 수요는 HEV 때문에 2030년까지는 정체되지만, 이후 다시 성장하는 것을 볼 수 있다. 성장률 측면에서 보면, 2030년까지 FCEV는 평균 55%, NGV는 52%, HEV는 34%, BEV는 18%, 의 성장률을 보인다.

이 결과는 아무런 보조금이나 세제혜택이 없이 기술개발에 따른 효율향상 등만 가정하여 얻은 결과이므로, 현재와 같이 지속적으로 보조금이 지급 될 경우, 친환경차가 갖는 잠재력은 본 연구의 결과보다 훨씬 크게 나타날 수 있음을 의미한다. 이처럼 친환경차가 비교적 단기간에 기존의 유류차량을 대체하는 것으로 나타나는 이유는 <표 3>에 제시된, 입력 값으로 사용된 비용에 대한 가정과 관련이 있다. 유류차량의 비용은 2010년도부터 2100년까지 전 기간에 걸쳐 차이가 없는 반면, 친환경차들의 비용은 기술개발에 따라 하락한다는 가정에 의거한다. 즉 점차 가격 경쟁력이 생기는 친환경차에 비해, 가격 경쟁력의 향상이 없는 유류차량은 상대적으로 기술선택이 이루어지기 힘든 것으로 나타난 결과이다.



<그림 14> 베이스라인의 서비스수요 시뮬레이션 결과



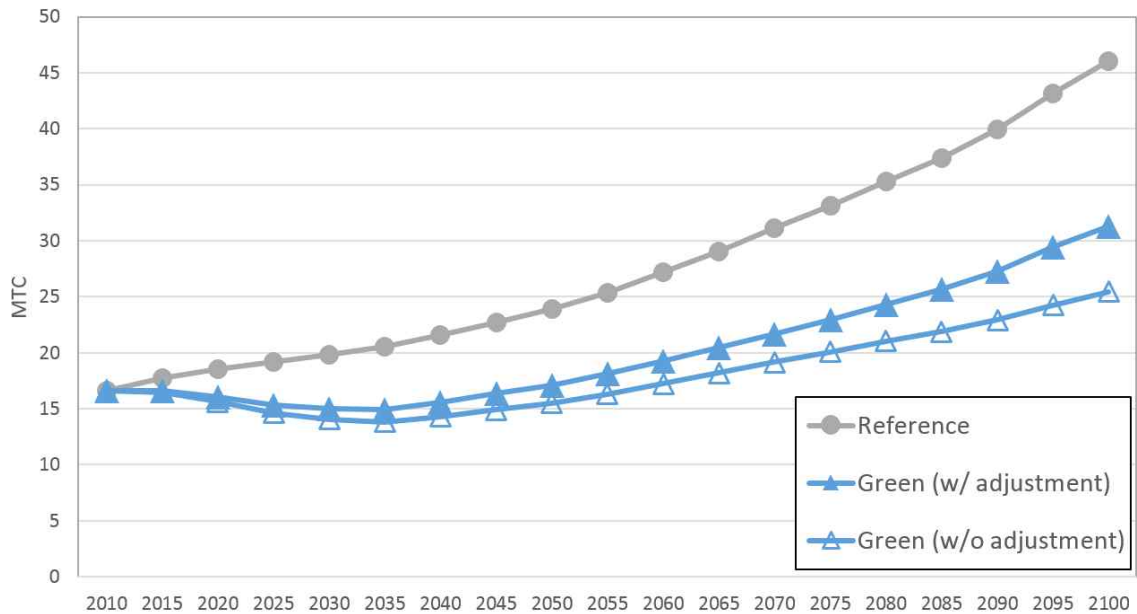
<그림 15> 시나리오의 서비스수요 시뮬레이션 결과 및 서비스수요 성장률

<그림 16>은 베이스라인과 시나리오 여객도로부문의 탄소배출량을 보여주고 있다. <그림 15>에서 봤듯이 시나리오의 결과로 유류차량의 수요가 현저히 줄어들고, 차체에서 직접적으로 탄소 배출이 발생하지 않는 BEV와 FCEV의 수요가 늘어난다. 따라서 <그림 16>의 가장 아랫부분에 위치한 'w/o adjustment' 그래프까지 탄소배출이 감소하게 된다. 하지만 BEV와 FCEV가 직접적인 탄소배출을 발생시키지 않는다 하더라도, 전기 생산 혹은 수소 생산을 위해 발전기를 사용하기 때문에, 궁극적으로는 전기차와

수소차도 탄소를 배출을 한다. 이러한 사실을 감안한 결과가 <그림 16>의 ‘w/ adjustment’ 그래프 이다. BEV와 FCEV의 경우, 전기 혹은 수소 생산을 위한 발전부문의 탄소배출량은 다음 <표 10>을 이용하여 계산한다. 즉, BEV와 FCEV의 에너지사용량에 아래 표의 배출계수값을 곱하여, BEV와 FCEV의 사용을 위해 발전부문에서 간접배출한 탄소배출량을 구하였다.

<표 4> 전력부문에서의 전기 및 수소의 배출계수

	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Electricity	33.8	30.9	27.4	24.7	23.1	21.9	22.1	23.2	24.7
Hydrogen	25.0	25.1	25.1	25.2	24.3	23.2	23.0	22.7	22.6



<그림 16> 베이스라인과 시나리오의 탄소배출량 비교

<표 5>는 시나리오가 베이스라인 대비 온실가스를 얼마나 감축했는지를 ‘w/ adjustment’와 ‘w/o adjustment’ 별로 비교하고 있다. 세 번째 줄은 ‘w/o adjustment’와 ‘w/ adjustment’의 차이를 보여준다. 이는 <표 4>에서 알 수 있듯이, 발전부문의 탄소배출계수는 시간이 경과함에 따라 감소함에도 불구하고, ‘w/ adjustment’와 ‘w/o adjustment’의 탄소배출량의 차이가 시간이 지날수록 늘어나는 것을 볼 수 있는데, 이는 BEV와 FCEV의 에너지수요가 그만큼 많이 늘어나는 것을 의미한다.

<표 5> 베이스라인대비 탄소배출 감축량

	Unit: MtC				
	2020	2040	2060	2080	2100
REF - Green(w/ adj)	2.5	5.9	7.9	10.9	14.6
REF - Green(w/o adj)	2.9	7.2	9.9	14.2	20.5
Green(w/o adj) - Green(w/ adj)	0.4	1.3	2.0	3.3	5.8

결론

본 연구의 첫 번째 목적은 국내 수송부문모형을 GCAM을 활용해 재구성 하는 것이고, 두 번째 목적은 재구성한 모형을 베이스라인으로 삼아 친환경차 도입이 국내 수송 부문의 서비스수요 및 이산화탄소 감축에 미치는 영향을 분석 하는 것이다. 국내실정에 맞게 재구성한 입력 값을 토대로 시뮬레이션 한 결과, 기존의 GCAM 결과와는 많은 차이가 남을 확인하였다. 국내 서비스수요의 과거통계와 기준년도 통계가 일치하기 때문에, 재구성한 시뮬레이션 결과도 과거 통계와도 일관성을 갖는 서비스수요의 추세로 나타나고 있음을 보여주고 있다.

앞서 언급한 베이스라인을 바탕으로, 여객도로부문에서 BEV와 HEV는 2015년에, FCEV와 NGV는 2020년에 시장에 진입하는 시나리오를 분석해보았다. 친환경차의 시장 진입은 2040년 이후 기존 유류차량 서비스수요의 70% 이상을 대체하게 될 만큼 빠른 속도를 보였다. 2030년까지 평균성장률을 보면, FCEV는 55%, NGV는 52%, HEV는 34%, BEV는 18%의 성장률을 보이는 것으로 나타났다. 이산화탄소 감축량 측면에서 보면, 친환경차의 도입으로 인해, 2030년에는 베이스라인 대비 71%로 줄어들지만, 전기 혹은 수소 생산을 위해 발전부문이 배출하는 이산화탄소량을 감안하면, 76%로 효과가 감소하는 것으로 나타났다.

추후에 보완되어야 할 부분으로는, 모형의 입력 값으로 활용되는 GCAM의 비용정보를 국내 실정에 맞는 자료로 세분화하여 update할 필요가 있다. 또한 친환경차 분석을 위해, 친환경차 구매 보조금 및 이산화탄소배출 제약 등의 다양한 시나리오를 설정해 볼 필요가 있다.

알림: 본 논문은 석사학위 논문의 내용을 수정·보완하여 작성된 것입니다.

참고문헌

- Calvin, K., Clarke, L., Kyle, P., Wise, M. (2014), Introduction to the Global Change Assessment Model (GCAM), Joint Global Change Research Institute, Joint GCAM Community Modeling Meeting and GTSP Technical Workshop
- Chaturvedi, V. and Kim, S. H. (2015), Long term energy and emission implications of a global shift to electricity-based public rail transportation system. *Energy Policy*, 81, 176–185
- Eom, J., Schipper, L. (2010), Trends in Passenger Transport Energy Use in South Korea, *Energy Policy* 38, 3598–3607
- Geem, Z. W. (2011), Transport energy demand modeling of South Korea using artificial neural network. *Energy policy*, 39(8), 4644–4650
- GIR. (2015), National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea, Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea
- Han, J.S, Gong, S.Y, Park, J.E, Song, H.H. (2015), The Effects of Green Vehicle Incentives on Greenhouse Gas Reduction, Korea Environmental Institute
- Hu, H., Yang, C., Yoon, C., Kim, I., Sung, J. (2015), Developing a Method for Estimating Urban Environmental Impact Using an Integrated Land Use–Transport Model, *Journal of Korean Society of Transportation* vol.33, No.3, pp. 294–303
- IEA. (2016), Key world energy statistics, International Energy Agency
- KEEL. (2012), 2011 Energy Consumption Survey (2011년도 에너지총조사 보고서), Korea Energy Economics Institute
- KEEL. (2016), Yearbook of Energy Statistics, Korea Energy Economics Institute
- Keepin, B. and Brian Wynne, Technical analysis of IIASA energy scenarios, *Nature* 312, 691–695 (20 December 1984)
- Kim, Hyeong Jin, and Sung Byung Jun, *Journal of the Korean Society of Automotive Engineers* 35(2), 2013.2, 18–23
- KTDB. (2015), 2014 Korea Transportation Statistics (2014 국가교통통계), Korea Transport Data Base
- Kyle, P., Kim, S.H. (2011), Long–Term Implications of Alternative Light–Duty Vehicle Technologies for Global Greenhouse Emissions and Primary Energy Demands, *Energy Policy* 39, 3012–3024
- Lee, J., Yang, H. (2010), Evaluation of Green–car Technology Effect on GHG Mitigation using MARKAL, *Journal of the Korean Society of Automotive Engineers* 32(2), 88–93
- ME. (2015), Large Extension of Green car subsidy (친환경자동차 구매지원 대폭 확대), 2015. 02. 05., available: <http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?menuId=286&boardMasterId=1&boardCategoryId=39&boardId=483180>, accessed September 2, 2016, Ministry of Environment
- ME. (2016), 2016 Extension of Green car subsidy (2016년 친환경차 보조금 규모확대), 2016. 01. 28., available: <http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?menuId=284&boardMasterId=108&boardId=602330>, accessed September 2, 2016, Ministry of Environment
- Mishra, G.S., Kyle, P., Teter, J., Morrison, G.M., Yeh, S., and Kim, S. (2013), Transportation Module of Global Change Assessment Model (GCAM) : Model Documentation Version 1.0, Institute of Transportation Studies, University of California at Davis; and Pacific Northwest National Laboratory. Report UCD–ITS–RR–13–05
- Schipper, L., Marie–Lilliu, C., and Gorham, R. (2000). Flexing the Link between Transport and Greenhouse Gas Emissions–A Path for the World Bank.
- Sims, R., R. Schaeffer, F. Creutzig, X. Cruz–Núñez, M. D’Agosto, D. Dimitriu, M. J. Figueroa Meza, L. Fulton, S. Kobayashi, O. Lah, A. McKinnon, P. Newman, M. Ouyang, J. J. Schauer, D. Sperling, and G. Tiwari, 2014: Transport. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O., R. Pichs–Madrugá, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge

University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

Sorrell, S., Dimitropoulos, J. and Sommerville, M. (2009). Empirical estimates of the direct rebound effect: A review. *Energy policy*, 37(4), 1356–1371

TS (Korea Transportation Safety Authority). (2011), 2010 Automobile Mileage Analysis (2010년도 자동차 주행 거리 실태분석 연구),

<http://www.ts2020.kr/tsk/rck/InqDetPTRTrafficSafety.do?bbsSn=4280&bbsCd=110&ctgCd=-1>

Wang, H., Zhou, P., and Zhou, D. Q. (2012), An empirical study of direct rebound effect for passenger transport in urban China. *Energy Economics*, 34(2), 452–460

부 록

<표 6> GCAM과 본 연구의 연비 비교 - 국내 여객부문

Fuel Efficiency				
GCAM			본 연구	
Motorcycle	25	(G)	19.5	오토바이
Subcompact Car	13.45	(G)	11.9	소형세단 (1,500cc 미만)
Compact Car	12.62	(G)	9.4	중형세단 (1,500-2,000cc)
Large Car	9.78	(G)	6.5	대형세단 (2,000cc 이상)
Light Truck and SUV	9.62	(D)	9.9	다 목적형 차
		(B)	8.2	택시
		(D)	6.7	소형 승합차 (15인승 이하)
		(D)	4.4	중형 승합차 (16-25인승)
Bus	7.16	(D)	2.9	대형 승합차 (26인승 이상)
Bus	7.59	(D)	1.7	버스
		(N)	1.0	버스
-	-	(E)	0.1	지하철
Passenger Rail	0.36	(D)	0.5	여객열차
Passenger Rail	0.20	(E)	0.3	여객열차
HSR	0.09	(E)	0.09	고속열차 (KTX)
-	-	(B-C)	0.04	국내 여객 선박
Domestic Passenger Aviation	0.1	(J)	0.1	국내 여객 항공

Fuel efficiency is expressed based on (fuel type): (G): gasoline, (D): diesel, (N): natural gas, (B) : butane, (E): electricity, (J): jet fuel a-1, (B-C): bunker-c oil

<표 7> GCAM과 본 연구의 load factor 비교 - 국내 여객부문

GCAM		Load Factor		본 연구
Motorcycle	1.1	1		오토바이
Subcompact Car	1.4	1.2		소형세단 (1,500cc 미만)
Compact Car	1.4	1.2		중형세단 (1,500-2,000cc)
Large Car	1.4	1.2		대형세단 (2,000cc 이상)
Light Truck and SUV	1.4	1.2		다 목적형 차
		0.6		택시
-	-	4.8		소형 승합차 (15인승 이하)
-	-	10		중형 승합차 (16-25인승)
-	-	15		대형 승합차 (26인승 이상)
Bus	9.0	21		버스
-	-	213		지하철
Passenger Rail	320.7	321		여객열차
HSR	155.6	150		HSR
-	-	117		국내 여객 선박
Domestic Passenger Aviation	125.4	200		국내 여객 항공

<표 8> GCAM과 본 연구의 연비 비교 - 국내 화물부문

GCAM		Fuel Efficiency		본 연구
Truck	25.22	(D)	6.4	(0-1톤) 사업용 트럭
		(D)	5.4	(1-3톤) 사업용 트럭
		(D)	4.1	(3-5톤) 사업용 트럭
		(D)	3.4	(5-8톤) 사업용 트럭
		(D)	2.6	(8-10톤) 사업용 트럭
		(D)	2.4	(10-12톤) 사업용 트럭
		(D)	2.2	(12-15톤) 사업용 트럭
		(D)	2.1	(15-20톤) 사업용 트럭
		(D)	2.0	(20-톤) 사업용 트럭
		(D)	8.5	(0-1) 비사업용 트럭
		(D)	6.9	(1-3) 비사업용 트럭
		(D)	4.8	(3-5) 비사업용 트럭
		(D)	3.9	(5-8) 비사업용 트럭
		(D)	2.8	(8-12) 비사업용 트럭
		(D)	2.1	(12-) 비사업용 트럭
Freight Rail	0.15	(D)	0.16	화물 열차
Freight Rail	0.10	(E)	0.06	화물 열차
Domestic Freight Ship	0.12	(B-C)	0.1	국내 화물 선박
-	-	(J)	0.1	국내 화물 항공

Fuel efficiency is expressed based on (fuel type): (G): gasoline, (D): diesel, (N): natural gas, (B) : butane, (E): electricity, (J): jet fuel a-1, (B-C): bunker-c oil

<표 9> GCAM과 본 연구의 load factor 비교 - 국내 화물부문

GCAM		Load Factor		본 연구
Truck	0.69	0.7		(0-1톤) 사업용 트럭
		1		(1-3톤) 사업용 트럭
		2		(3-5톤) 사업용 트럭
		3		(5-8톤) 사업용 트럭
		6		(8-10톤) 사업용 트럭
		8		(10-12톤) 사업용 트럭
		10		(12-15톤) 사업용 트럭
		13		(15-20톤) 사업용 트럭
		18		(20-톤) 사업용 트럭
		0.5		(0-1) 비사업용 트럭
		1		(1-3) 비사업용 트럭
		2		(3-5) 비사업용 트럭
		3		(5-8) 비사업용 트럭
		6		(8-12) 비사업용 트럭
		10		(12-) 비사업용 트럭
Freight Rail	274.75	300		화물 열차
Domestic Freight Ship	1000	400		국내 화물 선박
-	-	6.2		국내 화물 항공

<표 10> GCAM과 본 연구의 연비 비교 - 국제 부문

GCAM	Fuel Efficiency			본 연구
-	-	(B-C)	0.01	국제 여객 선박
Intl. Passenger Aviation	0.09	(J)	0.18	국제 여객 항공
Intl Freight Ship	0.02	(B-C)	0.008	국제 화물 선박
-	-	(J)	0.18	국제 화물 항공

Fuel efficiency is expressed based on (fuel type): (G): gasoline, (D): diesel, (N): natural gas, (B) : butane, (E): electricity, (J): jet fuel a-1, (B-C): bunker-c oil

<표 11> GCAM과 본 연구의 load factor 비교 - 국제 부문

GCAM	Load Factor		본 연구
-	-	242	국제 여객 선박
Intl. Passenger Aviation	229.75	253	국제 여객 항공
Intl Freight Ship	20000	16489	국제 화물 선박
-	-	48	국제 화물 항공