

Global Report

압축 천연가스 연료를 이용한 최적화된 지역 운송산업 통합 모델링

1. 개요
2. 연료 공급사슬 모델
3. 운송연료의 수명주기비용 평가
4. 연료 공급체인의 위험 기반 수명주기 평가

1. 개요

EVs & PHEVs(Electric Vehicles & Plug-in Hybrid Electric Vehicles) 차량은 휘발유차 기반 운송수단의 현재 상황에서 실질적인 최적의 장기 이동 솔루션으로 관심이 집중되고 있다. 운송 산업에서 휘발유와 경유를 대신할 수 있는 대체 연료의 가용성을 증가시키는 것은 대기오염을 감소시켜 환경적 스트레스를 줄이는 데 크게 기여하고 있다. 나아가 국제사회의 기후변화 대응 및 에너지안보 위기대응 등에 안정을 추구할 수 있는 이슈이기도 하다. 이에 기존 연료공급 인프라의 성능을 최적화하여 화석연료의 의존도를 낮출 필요가 있다. EVs 및 PHEV 차량의 한계점을 보완하기 위해 CNGVs(Compressed Natural Gas vehicles : 압축천연가스 차량)이 개발되면서 하이브리드 교통시스템에 대한 실용적인 솔루션들이 상용화되어가고 있다[1] [2]. CNGVs(압축천연가스 차량)의 성능을 최적화하기 위해서는 다음과 같은 모든 운용 가능한 파라미터를 분석 하는 것이 매우 중요하다:

- 주유소 시설에 대한 파라미터
- 작업시간
- 차량의 누적 총 주행거리
- 연료운송 확장비용
- CO₂ 배출량에 따른 환경영향 비용 및 사회적 비용 등

이러한 다양한 파라미터들의 성능최적화에 대한 비교분석을 통해 차량의 연료소비행태에 대한 기초자료를 토대로 대체연료 차량의 기술수명주기(technical life cycle)를 분석하는 것이 매우 중요하다. 기존의 연구에서는 대체연료 차량의 기술수명주기를 10~12년 동안 200,000km를 주행하는 선행 라이프 사이클을 토대로 연료비용의 증가양상을 연구해왔다[3] [4].

2. 연료 공급사슬 모델

2.1. 천연가스 기반 운송

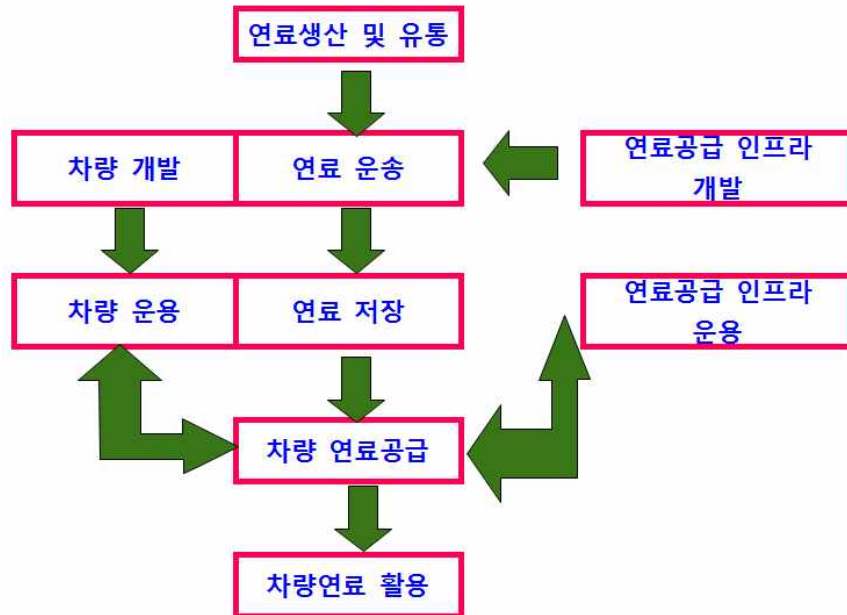
전기에너지(전력)를 기반으로 하는 전기자동차는 순수한 전기에너지만을 이용한 EVs(Electric Vehicles : 전기자동차)와, 전기와 화석연료(보통 휘발유)를 필요에 따라 혼용하는 PHEVs(Plug-in Hybrid Electric Vehicles : 하이브리드 차량)로 나눌 수 있다. 이러한 전기자동차는 휘발유(gasoline)/경유(diesel)/액화석유가스(liquefied petroleum gas)/천연가스(natural gas)/바이오가스(biogas) 차량과 구분할 수 있다[5].

근래 들어, 화석연료 차량과 전기자동차와 동시에 천연가스(natural gas) 차량의 보급이 대중교통 수단을 중심으로 확산되고 있다. 특히 미국, 캐나다 등의 국가에서 풍부한 천연가스 자원을 수송연료로 이용되는 기반이 확산되면서 전 세계적으로 관심이 모아지고 있다. 그러나 천연가스는 PHEV 차량에서 전력 충전 후 예비연료로 천연가스를 이용하는 과정에서 에너지 효율성과 연료밀도가 다소 저하되는 것으로 나타났다. 아울러 가스오염에 따른 연료의 경제성 및 운전자의 운전습관에 따른 엔진의 전원출력 등이 천연가스의 에너지 효율성을 저하시키는 것으로 나타났다. 이에 이러한 천연가스 차량의 문제점들을 극복할 수 있는 기술개발이 요구되고 있다[6] [7].

2.2. 운송 프로세스 모델링

운송 산업의 공급사슬 프로세스 모델을 결정하는 교통시스템의 통합 라이프 사이클은 1)차량, 2)연료, 3)인프라로

요약할 수 있다. 이는 운송효율성을 향상시킬 수 있는 자동차의 개발 및 운영(생산, 수송, 및 저장), 연료 공급망과 인프라 개발 및 운영을 통합한 개념이라고 볼 수 있다. 운송 산업의 공급사슬 프로세스 모델링을 [그림 1]에 나타낸다. 연료수송 성능을 강력하게 유지함으로써 연료 인프라 개발에 따른 효율성을 향상시킬 수 있다. 이는 곧 교통시스템의 통합 라이프 사이클이 차량 연료공급 및 활용을 위한 3단계 프로세스(연료, 차량, 인프라)의 성능을 최적화할 수 있다는 것을 알 수 있다.



* 자료 : Hossam A. Gabbar et al., "Integrated modeling for optimized regional transportation with compressed natural gas fuel", Alexandria Engineering Journal, 2015, p.535 / 재구성.

[그림 1] 운송 산업의 공급사슬 프로세스 모델링

3. 운송연료의 수명주기비용 평가

3.1. DBP 모델링

차량과 연료의 기술적인 조합은 DBP(Driving Behavior Profile)에 따라 평가할 수 있다. 즉, 주중과 주말 동안 다양한 주행목적지 및 운행비용(연료, 통행료, 주차료 등)을 포함하는 주행거리와 차량운행 빈도에 따라 결정되는 것이다. DBP는 또한 주간 및 야간 운전, 차량의 종류와 연료옵션 등에 대한 표준을 평가할 수 있는 지표가 될 수 있다. 운전자의 DBP에 따라 평균 연간 및 라이프 사이클에 따른 연료비용은 (식 1)과 같이 계산할 수 있다.

$$D_{\text{Annual}} = 52 \text{ weeks/year} \times \sum (D_n \times F_n) \dots\dots\dots (\text{식 1})$$

(식 1)에서 D_n 은 주행거리, F_n 은 주중/주말 동안 차량운행 빈도를 나타낸다.

3.2. 차량 모델링

차량 모델링 파라미터는 차량구입 가격 및 에너지 전환비용, 연료의 경제성, 에너지 사용량, 차량의 무게, 전기자

동차의 경우 주행거리 당 전기사용량 등에 대한 결정사항들이 될 수 있다. 이는 OEM 데이터를 이용하여 입력되고, 이 데이터는 차량 파라미터 데이터베이스에 저장된다. 특히 전기자동차의 경우 배터리 크기에 따른 전력손실량을 계산하는 데 이용되는 다양한 요인 중 하나는 L/100km 주행 시 평균 차량연료 사용량이 적용된다. 이는 (식 2)와 같이 계산할 수 있으며, DBP에 따른 도심과 고속도로 등에서의 연료경제성도 계산할 수 있어 매우 중요한 변수가 될 수 있다.

$$Econ_{F,Avg} = (D_C \times Econ_C) + (D_H \times Econ_H) \div D_C + D_H \dots\dots\dots (식 2)$$

(식 2)에서 $Econ_{F,Avg}$ 는 L/100km 주행 시 평균 연료사용량에 따른 연료경제성을 나타내는 지수, D_C 와 D_H 는 100km 주행에 따른 최대 및 최소 주행거리, $Econ_C$ 와 $Econ_H$ 는 D_C 와 D_H 별 최대/최소 에너지효율을 나타낸다.

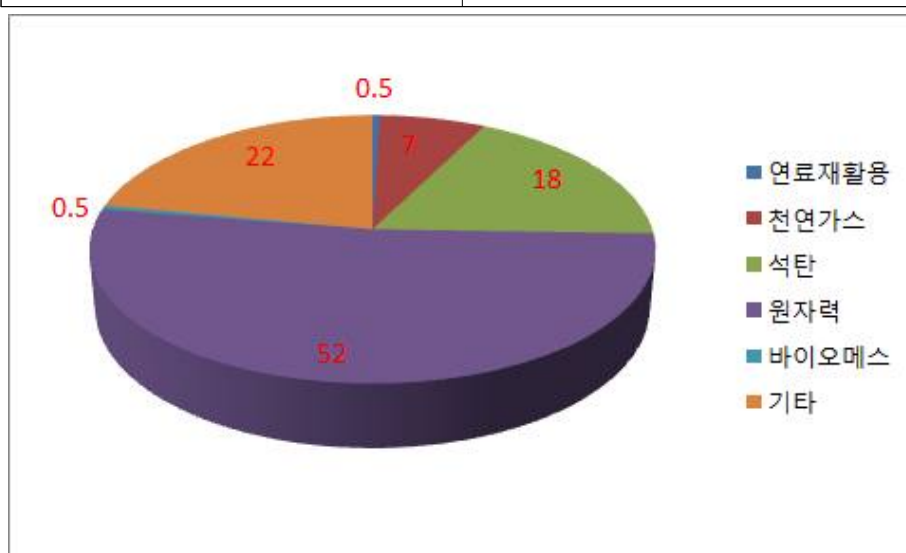
4. 연료 공급체인의 위험 기반 수명주기 평가

이 연구에 사용된 데이터는 차량의 연료 공급체인별로 안고 있는 위험요인을 기반으로 수명주기를 평가하기 위해 미국에너지부(U.S. Department of Energy)의 아르곤국립연구소(Argonne National Laboratory)의 GREET(Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation) 모델을 참조하였다. 또한 다음과 같은 3편의 관련 연구 자료를 토대로 한 것이다(원문 참조)

GREET 프로그램은 연료 소스에 대한 경로와 사용자를 지정할 수 있으며, 이러한 WTT(Well to Tank) 배출에 따른 효과를 통합시킨 것이다. 특히 북미지역에서 생산되는 천연가스는 타 지역의 천연가스보다 더 적은 오염물질을 방출하는 것으로 알려져 있으며, 보다 더 먼 거리에 수송되고 있다. 이러한 고려사항들은 석탄을 이용하여 생산된 전기나 다른 재생에너지보다 오염물질 배출에 큰 영향을 줄 수 있어 매우 중요한 의미가 있다. 이 연구에서는 캐나다 남부에 위치한 온타리오(Ontario)주의 각 에너지 소스별 이용률을 기반으로 차량의 연료 공급체인별 위험요인에 따른 수명주기를 평가하였다. 또한 평가결과의 최신성을 위해 최근 2010~2012년 동안의 각 에너지 이용률에 대해 평가하였다. 그결과 원자력이 52%로 가장 높았으며, 석탄 18%, 천연가스 7% 순으로 나타났다. 온타리오(Ontario)주의 에너지별 이용률을 <표 1>에 나타낸다.

〈표 1〉 Ontario주의 에너지 이용률

연료타입	연료별 이용률[%]
연료재활용	0.5
천연가스	7
석탄	18
원자력	52
바이오메스	0.5
기타	22
계	100



자료 : Hossam A. Gabbar et al., “Integrated modeling for optimized regional transportation with compressed natural gas fuel”, Alexandria Engineering Journal, 2015, p.541 / 재구성.

5. 결과검토 및 결론

제안된 모델은 12년의 라이프 사이클을 갖는 5개의 차량모델(2011 Ford Fusion, 2011 Ford Fusion HV, 2012 Civic Coupe LX, 2012 Ford Explorer V6 FWD, 2011 Toyota Camry SE)을 비교하였다. 각 차량별로 운전자의 DBP에 따른 평균 연간 및 라이프 사이클에 따른 연료비용을 (식 1)과 같이 계산하였다. 아울러 운전자별 DBP에 따른 도심과 고속도로에서의 연료경제성은 (식 2)와 같이 계산하였다. 이러한 계산식을 통해 각 모델별로 압축천연가스CNG(Compressed Natural Gas)로 에너지변환을 했을 때 총 수명주기 비용 및 각 차량에 대한 가능한 RoI(Return of Investment : 투자수익)를 추정할 수 있었다. 그 결과들을 요약하면 다음과 같다.

- CNG로의 에너지변환 비용은 평균 6,500 달러가 요구되었으며, 2011 Ford Fusion HV를 제외한 모든 형식에 대해서는 5,000 달러가 요구되는 것으로 추정할 수 있었다.
- 라이프 사이클 연료비용은 2011 Ford Fusion은 28,113 달러, 2011 Ford Fusion HV는 18,742 달러로 나타나 하이브리드 차량이 가솔린 차량보다 더 작게 나타났다.
- CNG 연료비용은 2011 Ford Fusion HV가 가장 낮게, 2011 Ford Fusion 모델이 가장 높게 나타났다.
- CNG로의 에너지변환에 따른 추가비용과 총 수명주기에 따른 비용은 2011 Ford Fusion이 41,217 달러로 가장 낮게 나타났으며, 2012 Civic Coupe LX가 31,138 달러, 2012 Ford Explorer V6 FWD가 48,290

달러, 2011 Toyota Camry SE가 43,040 달러로 나타났다.

결론적으로 연료 공급망을 분석하여 각 차량별 최적의 성능 및 시스템을 유지할 수 있는 데이터를 얻을 수 있었다. 연료기술에 비해 가능한 운송 프로세스 모델링을 통해 교통의 위험을 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다. 아울러 오염물질(이산화탄소 등) 방출은 모든 연료기술에 대한 적절한 비교와 수명주기에 따른 방출의 정확한 추정을 통해 추정할 수 있었다. 이 연구결과는 압축천연가스를 이용하는 차량의 운송위험 감소 및 전반적인 성능이 우수한 것을 보여주었다.