

## 현대자동차 연료전지버스 실증 운영 결과

박정규<sup>†</sup> · 이승윤 · 김동훈 · 진영빈 · 박종진 · 김세훈  
현대자동차 연구개발총괄본부

### Demonstration Results of Fuel Cell Buses of Hyundai Motor Company

JEONGKYU PARK<sup>†</sup>, SEUNGYOON LEE, DONGHOON KIM, YOUNGPIN JIN,  
JONGJIN PARK, SAEHOON KIM

Hyundai Motor Company, Mabuk-ro 240beon-gil, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, 446-716, Korea

**Abstract** >> Fuel cell technology is the most representative area of alternative energy field on vehicle industry according to the limitation of petroleum resources. In recent years, the technology of fuel cell vehicles has made rapid progress, Hyundai Motor Company (HMC) reached to mass production of the Tucson ix hydrogen fuel cell vehicles first in the world. In addition, HMC is accelerating the development of hydrogen fuel cell buses, which have a number of advantages for hydrogen infrastructure and mass transport personnel. In this study, we examined potential of the commercialization through the demonstration of hydrogen fuel cell buses. As a result, we identified that the mass-production possibility of FCB has high potential and HMC's technology will lead to fuel cell bus industry.

**Key words** : Fuel cell bus(연료전지버스), Demonstration(실증), Availability(운행률), Fuel economy(연비)

#### Subscripts

ACT : Alameda Contra-Costa Transit District  
AFCB : American Fuel Cell Bus  
APS : Air Processing System  
AT : advanced technology  
CTT : Connecticut Transit  
DOE : U.S. Department of Energy  
FPS : Fuel Processing System  
FTA : Federal Transit Administration  
HV\_J/box : High voltage Junction box

kph : kilometers per hour  
LDC : Low-voltage DC-DC  
LMFC : LM(tucson ix) fuel cell  
MCU : Motor control Unit  
MEA : Membrane Electrode Assembly  
NREL : National Renewable Energy Laboratory  
PCD : Power Coupling Device  
S/cap : Supercapacitor  
SL : Sun Line  
TMS : Thermal Management System  
UTC : United Technologies Corporation  
ZEBA : Zero Emission Bay Area

<sup>†</sup>Corresponding author : jkpark@hyundai.com

[ 접수일 : 2014.5.20 수정일 : 2014.6.24 게재확정일 : 2014.6.30 ]

Copyright © 2014 KHNES

# 1. 서론

최근 몇 년 동안 연료전지 차량은 비약적인 발전을 이루었으며, 대표적으로 현대자동차는 연료전지 차량을 세계 최초로 양산하였다. 차량을 양산하기 위해서는 차량의 경제성 및 내구성, 연비, 안정성, 생산성 등 많은 조건을 일정한 수준까지 끌어올려야 한다는 점을 고려 할 때, 이는 전 세계 연료전지 차량 개발에 있어서 매우 고무적인 일이라고 볼 수 있다. 연료전지 차량의 양산에 있어서 실도로 운행 및 모니터링 과정은 가장 중요한 밑바탕으로 볼 수 있으며, 실도로 운행을 하는 과정에서 설계 단계에서는 예상치 못한 여러 가지 문제점들이 발생하게 된다. 이러한 문제점들을 개선하고 보다 안정적이고 높은 주행성능을 가진 차량을 개발하기 위하여 실도로 운행을 통한 데이터베이스 확보는 매우 중요한 개발 과정 중에 하나로 꼽힌다. 본 연구에서 다루는 연료전지버스는 투싼ix 연료전지 차량과 마찬가지로 실도로 모니터링 운행을 마쳤으며, 현재는 실도로 실증 운영을 진행 중에 있다. 실도로 실증 운영의 대표적인 목적은 4가지 정도로 정리 할 수 있는데, 첫째 주행거리 확보를 통한 차량 내구성과 신뢰성을 확인하고, 둘째 실증 운영에서 나타난 문제점이나 이벤트를 개선하며, 셋째 실차에 적용 가능한 테스트를 진행하여 부품 및 제어로직을 개선하고 마지막으로 차량에 탑승하는 고객들의 니즈를 반영하여 새로운 연료전지 버스개발의 가이드라인을 제시하는 것이다. 실증 운영을 통한 내구성 및 신뢰성 확보는 차량개발 단계에서 마지막 부분에 위치해 있으며 National Renewable

Energy Laboratory (NREL)에서 가이드 라인<sup>1)</sup>으로 제시한 상업화 프로세스와 기술 성숙도 수준의 기준에서 보았을 때, 연료전지버스의 기술은 현재 7단계에 접어들었고, 이는 기술시현과 시운전을 통해 상업화를 목표로 연구 중에 있음을 보여준다. 현대자동차는 세계 최초로 투싼ix 연료전지 차량의 양산을 발표한 데 이어 연료전지버스 역시 세계 최초 양산을 목표로 지속적으로 연구 중이다.

# 2. 연료전지버스 소개

## 2.1 연료전지버스 시스템

연료전지버스는 크게 연료전지시스템과 차량시스템으로 구분할 수 있다. 먼저 연료전지시스템은 수소

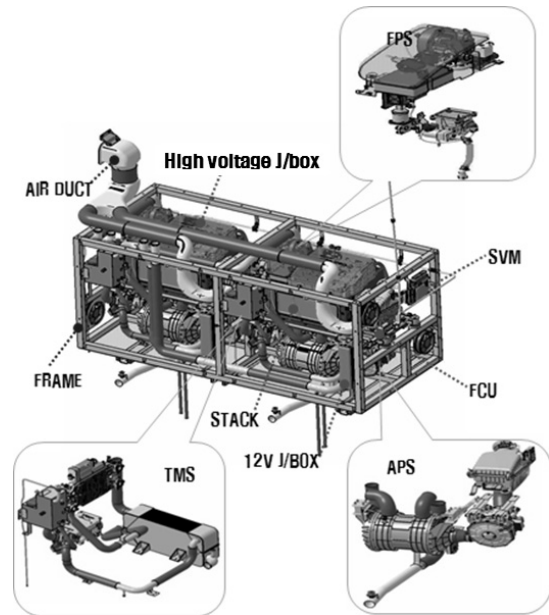


Fig. 2 Configuration of a fuel cell system

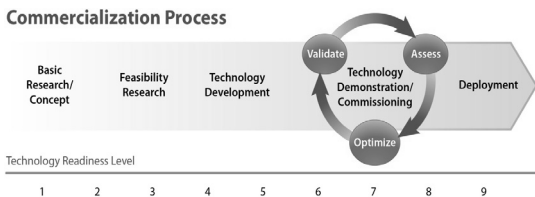


Fig. 1 Graphic representation of the commercialization process



Fig. 3 Appearance and chassis of Hyundai fuel cell bus

**Table 1** Specification of fuel cell buses

	Location	Length (m)	Stack Power (kW)	Fuel Cell System	Manufacturer	Energy Storage	Hydrogen cylinders (EA)	Hydrogen capacity (kg)	Hydrogen storage pressure (bar)
HMC-FCB	Metrolitan area	11.95	200	HMC	HMC	S/cap 0.7kWh	8	40	350
ACT ZEBA	San Francisco Bay Area, CA	12.19	120	UTC Power	Van Hool	Li-ion 21kWh	8	40	350
CTT Nutmeg	Hartford, CT; Flint, MI	12.19	120	UTC Power	Van Hool	Li-ion 21kWh	8	40	350
SL AT	Thousand Palms, CA	12.19	150	Ballard	New Flyer	Li-ion 47kWh	6	43	350
SL AFCB	Thousand Palms, CA	12.19	150	Ballard	ElDorado National	Li-ion 11kWh	8	50	350

와 산소가 만나 전기를 발생시키는 스택을 중심으로 공기공급시스템(APS)과 수소공급시스템(FPS), 열관리시스템(TMS), 각종 제어부품으로 나누어진다. 그리고 차량시스템은 전기동력시스템(모터, MCU, PCD, LDC, HV\_J/Box)과 수소저장시스템, 에너지저장시스템(S/cap), 인버터, 냉각시스템 등으로 나눌 수 있다.

연료전지버스는 투싼ix 연료전지 차량의 파워플랜트 2개와 모터 3개를 탑재하였다. 모두 버스 후면에 위치하고 있고, 대부분의 제어기와 인버터 등 연료전지시스템은 후면에 위치하고, 수소탱크는 전면 상부에 위치시켜 무게 중심을 맞추었다.

차체는 탑승객들로 하여금 편안한 승차와 차량의 고급스러움을 보여주기 위해 초저상 버스로 제작하였다. 초저상 버스는 해외 대부분의 버스 회사들이 채택하고 있는 차종이다.

## 2.2 연료전지버스 제원 및 성능

연료전지버스는 초저상 버스 차체를 이용하였으나 총 길이는 1m가 더 긴 12m 버스이다. 이는 연료전지시스템과 각종 구성품을 탑재하기 위해 길이가 증대되었으며, 해외에서 실증 운영하고 있는 타사의 연료전지버스와 동등한 사이즈이다. Fig. 4는 미국에서 운행하고 있는 연료전지버스 사진<sup>1)</sup>이다.



**Fig. 4** FC BUS: AC Transit ZEBA (top left), CTTTRANSIT Nutmeg (top right), SunLine AFCB (bottom left), SunLine AT (bottom right). Excerpt from reference 1

연료전지 스택은 200kW 스택이 장착되었으며, 2차 에너지원은 동특성이 우수한 S/cap을 장착하여 초기 발진 성능 등 동력성능을 확보하였다. 수소탱크는 Dynetek사의 저장압력 350바, 부피 205리터 용량의 8기를 탑재하였고, 총 수소저장량은 40kg이다. 현대자동차는 차량 제작 뿐만 아니라 Fuel Cell System도 독자적인 기술을 확보하고 있어 단독 제품화가 가능하지만 해외에서 운행 중인 연료전지 버스 차량들은 대부분 버스 제조사와 스택 전문 회사와의 합작으로 만들어지고 있다.

## 3. 연료전지버스 실증 운행

현대자동차 1세대 연료전지버스는 2006년 최초 개발되어 4대 운행 되었으며, 현재는 2세대 연료전지 버스가 총 5대 제작되어 운행되고 있다. 2세대 연료

**Table 2** Difference in the generation of Hyundai fuel cell bus

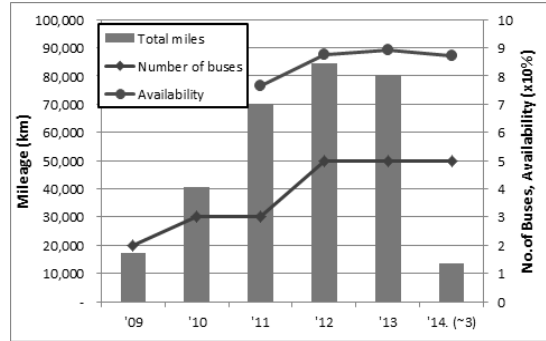
Item	First generation	Second generation
Stack	160kW / 900V serial	200kW / 450V parallel
Motor	1 x 240kW / Induction motor	3 x 100kW / Permanent magnet motor
Reducer	Planetary gear	Helical gear
Motor controller	1 x 240kW	3 x 100kW
Energy storage	S/cap, 900V, 240kW	S/cap, 450V, 400kW
Hydrogen cylinders	8EA x 350bar	8EA x 350bar
LDC	duplex 1ea	one way 3ea

전지버스는 1세대에 나타난 여러 문제점들을 개선한 부품이 적용되었으며, 시스템적으로도 많은 변경이 이루어졌다. Table 2에서와 같이 가장 핵심인 스택의 출력이 25% 증대된 200kW 스택이 적용되었으며, 직렬 구성의 동력계를 병렬형으로 변경하면서 시스템이 안정적으로 운행될 수 있게 만들었다.

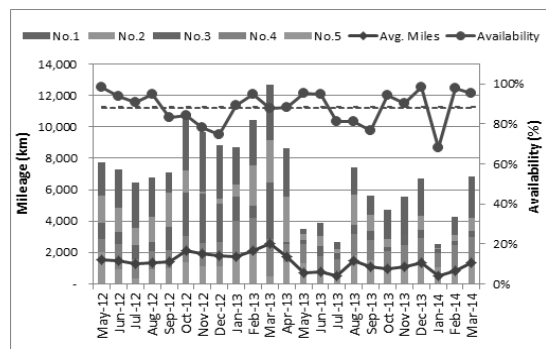
2세대 연료전지버스 중 3대는 현대자동차가 직접 투자하여 차량 제작, 운영(수소충전, A/S, 시험 등)되고 있으며, 나머지 2대는 현대자동차가 주관하고 한국가스공사와 인천국제공항공사가 참여하는 정부과제의 일환으로 제작되어 운행되고 있다. 각 차량은 시험, 서울에너지드림센터 에코투어, 인천국제공항 셔틀(2대)용으로 사용되고 있으며, 차기 양산 가능한 연료전지버스를 제작하기 위한 기초 시험 운영을 하고 있는 것이다.

**3.1 연료전지버스 실증 운영 결과**

2세대 현대 연료전지버스는 2009년 4월 최초로 2대 운영을 시작하여 2010년 2월에 추가로 1대 더 제작되었고, 2012년 4월에 정부과제의 일환으로 2대가 추가 제작되어 총 5대를 운행한 결과, 2014년 3월까지 총 292,308km 주행을 하였다. 2012년 4월에는 차량 2대를 추가 제작하면서 기존 3대의 파워플랜트를



**Fig. 5** Number of buses, driving period, total miles, availability for 2<sup>nd</sup> generation Hyundai FCBUS (Availability is the percentage of days that buses are planned for operation compared to the percentage of days the buses are actually available)



**Fig. 6** Monthly mileage and availability for Hyundai FCBUS

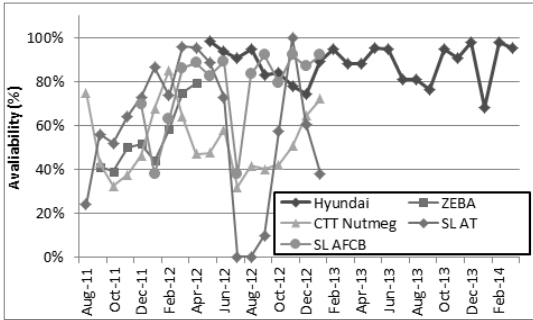
투싼ix 연료전지 차량에 적용되는 양산용 스택이 탑재된 파워플랜트로 변경하였다. 파워플랜트 외 구동계 시스템이나 냉각계 시스템 등은 그대로 가져갔다.

Fig. 5는 연료전지버스의 연간 운행거리와 운행률을 나타내고 있다. 2011년 이후 차량 운행률을 기록한 결과 2011년에는 76.4%였던 운행률이 2012년에는 87.4%까지 개선되었으며 2013년에는 89.3%까지 기록하였다. 차량 주행거리도 꾸준히 증가하다가 2013년 기점으로 차량 안정화를 확인한 후, 서울을 운행하는 차량을 제외하고 나머지 차량은 Fleet 운행 보다는 각 단품의 세심한 캘리브레이션 시험에 집중하였기 때문에 주행거리가 더 증가하지는 못했다.

Fig. 6은 월별 주행거리와 운행률을 나타낸 그래프이며, 2013년 5월에서 7월까지의 하절기 냉각계 시

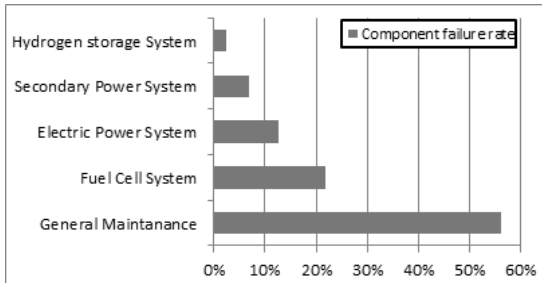
**Table 3** Number of buses, driving period, total miles, availability

	Period	Months	Number of Buses	Mileage (km)	Avg. Speed (kph)	Avg. Monthly Mileage / 1bus (km)	Availability (%)
Hyundai	'12.5 ~ '14.3	23	5	158,539	21.4	1,379	88.1
ACT ZEBA	'11.9 ~ '12.4	9	12	236,685	13.4	2,192	56
CTT Nutmeg	'11.8 ~ '12.7	12	4	91,755	22.5	1,912	53
SL AT	'11.8 ~ '12.7	12	1	33,014	19.1	2,751	67
SL AFCB	'11.12 ~ '12.7	8	1	38,114	25.2	4,764	71



※ 2013 DOE Annual Merit Review Data

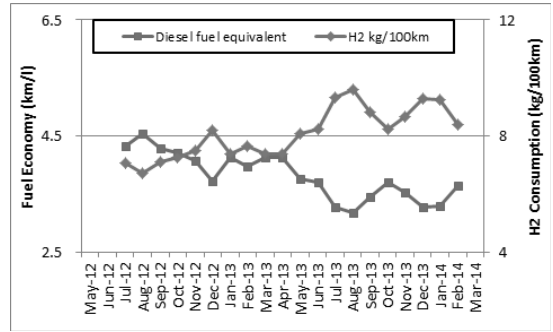
**Fig. 7** Availability of FCBUS (Hyundai vs NREL)



**Fig. 8** Component failure rate of Hyundai FCBUS

험 및 차량번호판 발급 등의 행정적 문제로 인해 주행거리가 다른 달보다 많이 작았다. 2012년 4월 양산용 파워플랜트를 탑재한 이후 평균 운행률은 88.3%로써, 해외에서 운행하고 있는 타사의 연료전지버스보다 월등히 우수한 수준이다.

Fig. 7은 NREL에서 2012년에 발표한 Fuel Cell Buses in U.S. Transit Fleets 보고서의 차량 운행률이며, 이 보고서에 따르면 4개 지역 평균 운행률이 60.6%에 불과하다. 가장 운행률이 높은 SL AFCB도 평균 77.2%



**Fig. 9** Fuel economy for Hyundai FCBUS

밖에 되지 않는다. 차량 1대당 월 평균 주행거리가 많은 것을 반영하더라도 차량 운행률에서는 큰 차이가 나는 것이다.

Fig. 8에서는 각 부품별 고장 비율을 나타내고 있으며, 운행률이 100%에 도달하지 못한 원인으로 단품별 고장 비율을 보면 일반 상용 부품의 비율이 56.3%로 절반 이상을 차지한다. 이는 해외에서 운영하고 있는 차량에서 발생하는 문제점 비율과 유사(47.7%)하다. 그 다음 원인으로는 연료전지 시스템의 고장 비율이 21.8%를 차지하는데, 이는 투싼ix 양산용 부품을 공용화하여 사용하면 고장 비율이 많이 떨어질 수 있을 것으로 보인다.

차량 운행 시, 실도로 연비도 중요한 요소로 꼽히는데, 수소 차량은 기체의 연료를 사용하기 때문에 가솔린이나 디젤을 사용하는 차량과는 별도의 연비 계산법이 사용된다. 수소 사용량은 kg 단위로 계산이 되고, 이 때 주행한 총 주행거리를 이용하여 연비를 계산한다. 기존 차량의 연비와 비교하기 위해서는 수

소와 디젤의 에너지 발열량으로 디젤등가연비로도 표현이 가능하다.

Fig. 9의 연비 그래프와 같이 초기 대비 시간이 경과함에 따라 연비가 다소 낮아지는 경향을 보인다. 이에 대한 가장 큰 원인으로 스택의 열화를 들 수 있다. 스택이 열화되면서 스택 효율도 같이 낮아지고,

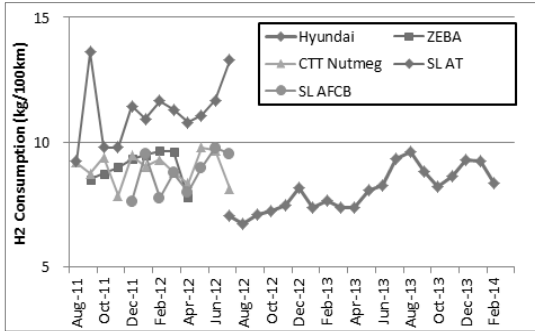


Fig. 10 Compare of FCBUS fuel economy (Hyundai vs NREL data)

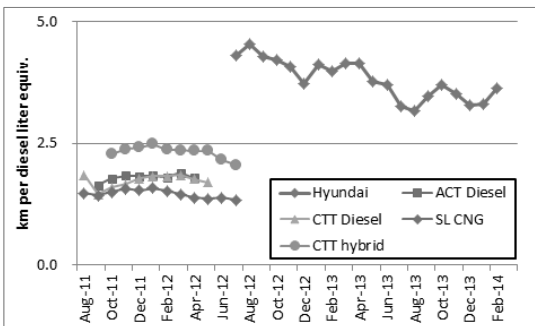


Fig. 11 Compare of Fuel economy (Diesel, CNG, Hybrid, Fuel cell)

MEA에 작은 pinhole이 증가하여 이로 인해 수소의 crossover가 많이 일어나기 때문이다. 실도로 조건과 운전패턴 등 여러 변수들이 있어 직접적인 비교는 어렵지만, Fig. 10과 같이 현대자동차 연료전지버스의 연비는 해외에서 운영하고 있는 연료전지버스 중 연비가 가장 우수한 차량과 유사한 수준이다.

Fig. 11을 통하여 보았을 때, 디젤 버스와 CNG 버스, 하이브리드 버스의 연비에 비해서 현대자동차 연료전지버스의 연비가 약 2배 정도 우수한 수준으로 나타나고 있다. 이는 친환경적이면서 연비도 우수한 연료전지버스를 양산하지 않을 수 없는 이유일 것이다.

### 3.2 연료전지버스 운행 목표

지금까지 연료전지버스는 모니터링 운행과 실증 운영을 해왔지만 최종 목표는 정식 번호판을 달고 누구나 운전할 수 있는 양산 판매이다. DOE/FTA 목표와 현대자동차의 목표를 보면 미래의 연료전지버스의 대략적인 스펙을 확인 할 수 있다. 현재 현대자동차의 연료전지버스 기술 수준은 타사의 기술 수준과 유사하거나 우위를 점하고 있다 라고 말할 수 있으며, 가장 큰 장점은 가격 측면이다. 해외 연료전지버스 1대당 가격이 20억원 수준인 반면 현대자동차 연료전지버스는 15억원 수준으로 25% 정도 저렴하다. 또는 차량 운행률에 있어서도 현대자동차는 이미 양산목표 수준까지 도달한 상태인 것이다. 연료전지

Table 3 Performance, Cost and Durability Targets for FCBUS

	Units	Hyundai 2010 status	Hyundai 2017	2012 Status	2016 Target	Ultimate Target
BUS lifetime	years / miles	5 / 67,115 (ongoing)	-	5 / 100,000	12 / 500,000	12 / 500,000
Power plant lifetime	hours	1,100~1,670 (ongoing)	5,000 (warranty)	12,000	18,000	25,000
BUS availability	%	89	95	60	85	90
BUS cost	₩ / \$	₩ 1,500,000,000	₩ 800,000,000	2,000,000	1,000,000	600,000
Power plant cost	₩ / \$	₩ 600,000,000	₩ 350,000,000	700,000	450,000	200,000
Hydrogen storage cost	₩ / \$	₩ 100,000,000	₩ 70,000,000	100,000	75,000	50,000
Range	miles	215~352	350	270	300	300
Fuel economy	mpg(diesel)	6.2~10.2	10	7	8	8



**Fig. 12** Photos of Hyundai FCBUS. Incheon International Airport shuttle service (top left), Seoul Motor show (top right), Yeosu EXPO shuttle service (bottom left), Seoul World Cup Park Eco tours (bottom right)

의 내구성이 뒷받침되고 단품의 신뢰성이 좀 더 개선되며 차량 가격을 추가적으로 절감할 수 있다면 바로 양산에 돌입할 수 있을 것으로 보인다.

### 3.3 연료전지버스 홍보

연료전지버스 실증 운영을 하면서 일반인들을 대상으로 친환경적인 차량 이미지와 상용화 가능성을 심어줄 수 있도록 많은 홍보를 수행하였다. 인천공항 셔틀 운행 및 월드컵공원 에코투어, 여수엑스포 셔틀 운행, SBS 지상파 방송, 서울 모터쇼, GCF (녹색기후기금) 유치를 위한 셔틀 운행, 프로배구단 셔틀 운행, 자동차전문기자단 시승 등 많은 행사에 참가하여 방송, 신문, 블로그 등에 홍보되어졌으며, 이는 더 이상 먼 미래의 자동차가 아닌 누구나 탈 수 있는 현실 가능한 차량이라는 것을 보여준 것이다.

## 4. 결론

현대자동차의 연료전지 차량 기술은 세계의 기술을 선도하고 있다. 투싼ix 연료전지 차량의 세계 최초 양산은 그 기술력을 세계에 알린 사실이며, 이를 바탕으로 연료전지버스도 세계 최초 양산을 목표로 삼고 있다. 이를 뒷받침해 주는 사실들이 실증 운영

을 하면서 데이터로 나타나고 있고, 해외에서 운행하고 있는 연료전지버스 업체에 비하여 우월한 성능을 보여주고 있다. 즉, 차량 안정성 측면에서 우수한 결과를 보여주고 있으며, 차량 가격 측면에서 절반 가까이 저렴한 것이다. 하지만 현대자동차 연료전지버스가 해외 다른 연료전지버스 업체에 비해서는 우위를 점하고 있지만, 기존 디젤 버스와 비교하면 다소 발전해야 할 부분이 남아 있다. 타사 연료전지버스 보다는 저렴하지만 디젤 차량에 비하면 아직까지 가격이 비싸고 내구 수명도 부족한 상황이다. 다만 친환경적인 차량이며, 연비도 우수한 사실은 부정할 수 없는 사실이기 때문에 세계적인 추세인 CO<sub>2</sub> 규제 등 환경적인 측면을 내세워 더욱 더 발전시켜 나가야 할 것이다.

## 후 기

본 논문 이후에도 현대자동차 연료전지버스의 실증 운영은 계속 진행될 것이며, 이를 바탕으로 양산용 연료전지버스 개발이 이루어질 것이다.

## References

1. Leslie Eudy, Kevin Chandler and Christina Gikakis, Fuel Cell Buses in U.S. Transit Fleets : Current Status 2012, National Renewable Energy Laboratory, 2012.
2. Leslie Eudy, Technology Validation : Fuel Cell Bus Evaluations, National Renewable Energy Laboratory, 2013.
3. Fabio Coelho Barbosa, Hydrogen Fuel Cell Transit Bus Technology into a Technical-Economical Perspective, SAE BRASIL, 2013.
4. T. Hofman, M. Steinbuch, R. Druten, A. Serrarens, International Journal of Electric and Hybrid Vehicles 1, 2007.
5. G. Paganelli, Y.M. Huerra, S. Delprat, Y. Guezennec, G. Rizzoni, Optimal Control Theory Applied to Hybrid Fuel Cell Powered Vehicle, 2002.