

FCEV용 전력변환장치와 FCEV의 기술동향

최옥돈, 민병덕, 이종찬, 김종철, 이종필
현대중공업 기계전기연구소

Power Conversion System and Technical Trend of Fuel Cell Electric Vehicles

U.D. Choi, B.D. Min, J.C. Lee, J.C. Kim, J.P. Lee
Hyundai Heavy Industries Co., Ltd. Machine Electric Research Institute

ABSTRACT

The power conversion system for Fuel Cell Electric Vehicle(FCEV), technical trend, and a various type of Fuel Cell and its characteristics are presented. Especially, this paper is focused on the control methods of power conversion devices applied for the Fuel Cell Electric Vehicle, configuration of power system and operation mode of the bidirectional DC/DC converter. The prevalent topology for the power conversion systems, simulation results and development a tendency of FCEV and it's market investigations are introduced.

1. 서 론

세계적으로 환경친화형 자동차의 필요성이 대두되면서부터 지금까지 무공해자동차로 순수전지에 의한 전기자동차가 개발되어왔고, 실용화도 시도하였으나, 현재에는 LSV(Low Speed Vehicle)와 같은 분야를 제외하고는 널리 상용화되지 못하고 있는 실정이다. 이는 전지기술의 한계로 인한 성능과 수명, 출력밀도, 주행거리, 경제성 측면에서 목표에 도달하지 못하게 됨에 따라 최근에는 선진 자동차 제작사를 중심으로 연료전지를 이용한 전기자동차에 관해 많은 연구가 이루어지고 있으며, 특히 무공해 자동차의 최종 솔루션을 연료전지차량으로 결론짓고 일부 차량 메이커에서는 수년 이내에 연료전지자동차의 양산을 계획하고 있다. 본 논문에서는 연료전지의 종류와 특성, FCEV의 기술동향, 시장전망 그리고 FCEV에 적용되는 여러 가지 전력변환시스템의 구성과 전력변환장치의 제어방식에 대해 알아보았으며, 또한 FCEV용 전력변환시스템으로 가장 많이 사용되는 양방향컨버터에 대한 모드별 동작원리와 시뮬레이션 결과를 제시하였다.

2. 본 론

2.1 연료전지의 종류

연료전지는 작동 온도와 연료의 형태에 따라 알칼리(AFC), 인산염(PAFC), 용융탄산염(MCFC), 고체 전해질(SOFC), 고분자전해질(PEMFC)등으로 분류되며 저온연료전지인 AFC, PAFC, PEMFC등은 성능향상을 위한 고가의 금속전해질 촉매를 사용하고 동적 반응이 빠르며 시동시간이 짧고 순수 수소를 연료로 사용한다. 반면에 고온연료전지인 MCFC와 SOFC의 특징은 동작온도가 높고 저가의 전해질 촉매 사용이 가능하고 시동시간이 길며 열과 과도에 민감하다. 고온내력이 큰 재료와 동작온도에 따른 신뢰성과 내구성을 고려해야 한다. 현재 FCEV는 작동온도와 효율 등에서 우수한 고체고분자전해질형 연료전지가 주로 사용되고있다.

표 1 연료전지의 종류

Table 1 The type of Fuel Cell

종류	전해질	전하 전달자	작동온도	발전효율	연료	전극 (촉매)	산소전극 생성물	연료전극 생성물
알칼리형 (AFC)	KOH Soln (in matrix)	OH ⁻	90~100℃	~60%	순수소	다공성 Ni		H ₂ O
인산염 (PAFC)	인산 (H ₂ PO ₄)	H ⁺	200℃	40~45%	조제수소	다공성 Ni, Graphite (백금촉매)	H ₂ O	H ⁺
용융탄산염 (MCFC)	용융탄산염 (Li ₂ CO ₃ +K ₂ CO ₃)	CO ₃ ²⁻	600~700℃	45~60%	조제수소	다공성 Ni	CO ₃ ²⁻	H ₂ O, CO ₂
고체산화물형 (SOFC)	YSZ (ZrO ₂ +Y ₂ O ₃)	O ²⁻	900~1000℃	50~60%	조제수소	산화 Ni (불필요)	O ²⁻	H ₂ O
고체고분자 전해질형 (PEMFC)	고분자 전해질막 (Nafion 등)	H ⁺	80℃	~60%	조제수소	PTFE (백금촉매)	H ₂ O	H ⁺

2.2 연료전지의 특징

연료전지의 특징은 오염물질의 배출이 적고, 전기적 효율성이 뛰어나며 복합 사이클 설비의 경우 효율이 60%정도이며, 가스터빈과 혼합 운영할 경우 70%까지도 가능하며, 모듈식 설비가 가능하여

설치 유지가 용이하고 신뢰성이 높고 부하변화에 대한 응답이 빠르고 다양한 연료의 선택이 가능한 장점이 있는 반면, 단점으로는 아직까지 높은 자본 및 운용비용과 연료의 보급과 저장에 대한 안전과 기반시설이 확충이 현실적으로 해결해나가야 할 과제이다. Daimler-Benz, Ford, Ballard는 2004년부터 전기자동차와의 경쟁을 위하여 연료전지를 연간 40,000대 규모의 양산을 목표로 연구개발을 진행 중에 있다.

2.3 연료전지전기자동차의 개발동향

연료전지전기자동차 (Fuel Cell Electric Vehicle) 는 무공해자동차로 전기자동차(EV)의 문제점을 해결할 수 있어 최종적인 차세대 동력시스템으로 평가되고 있다. 최근 선진국의 주요 자동차 제작사와 부품회사들이 연료전지 자동차의 상용화 개발을 서두르고 있다. 자동차 제작사들은 2004년 상용화를 위한 시범 자동차 출시를 공식적으로 발표한 바 있다. 미국, 일본, 유럽의 FCEV의 개발동향을 살펴보면 다음과 같다.

표2 포드의 FCEV 사양
Table 2 Spec. of Ford-FCEV

Model	Focus FC5	Focus FCEV	P2000
Platform	2000 Model	2000 Model	Scratched AI
Body Style	4 Door Sedan	4 Door Sedan	1 Door Sedan
Fuel	Methanol	Compressed Hydrogen	Compressed Hydrogen
FC Type	PEMFC With Reformer	PEMFC	PEMFC
FC Stack	Ballard Mark 901	Ballard Mark 900	Ballard Mark 700
Max. Speed	128km/h	128km/h	128km/h
Driving Range	-	160km	160km
Motor	AC Induction	AC Induction	AC Induction
Motor Peak Power	65kW	67kW	67kW
Inverter	3ΦAC Ecostar Traction	3ΦBridge	3ΦBridge
Min./Max. Voltage	200/440V	250/420V	200/385V
Nominal Voltage	325V	315V	255V

미국 포드사의 개발사양은 표 2와 같고 GM은 2000년 액화수소를 직접 공급하는 방식의 FCEV인 "Hydrogen1"을 개발하였으며, 55kW 전동기와 200개의 Cell로 구성된 연료전지의 탑재로 차량중량이 1,575kg으로 기존 차량보다 125kg이 무겁고 최고시속140km, 100km까지의 가속 시간 16초, 일회 충전주행거리 400km이다. 이밖에 260[Vdc]~340[Vdc]/100kW용량의 연료전지로 800km까지 주행이 가능한 "Precept"를 개발하였다. 일본은 Toyota와 Mazda가 FCEV개발에 있어서 선두 업체이고 도요다는 96년 수소흡장합금형 FCEV의 시작모델을 발표하고, 97년 메탄올을 사용한 연료전지를 개발하였다. 표3 과 표4 는 각각 Toyota와 Honda의 FCEV사양이다. 이 밖에도 Mazda의 경우 직류전압 200[V]~440[V]출력의 메탄올 방식의 PEMFC인 Ballard사의 Mark901 연료

표 3 Toyota-FCEV의 사양
Table 3 Spec. of Toyota-FCEV

Model	FCHV-3	FCHV-4	FCHV-BUS1
Platform	Kluger V	Kluger V	Hino Low-Floor City Bus
Fuel	Pure Hydrogen	Pure hydrogen	Pure hydrogen
연료저장방법	고압수소저장탱크	고압수소저장탱크	고압수소저장탱크
FC Type	PEM	PEM	PEM
Stack Output	90kW	90kW	90kW
Max. Speed	150km/h	Over 150km/h	Over 80km/h
주행거리	More than 300km	Over 250km	Over 300km
Motor Type	Synchronized PM	PM	PM
모터피크출력	80kW	80kW	80kW × 2
Secondary Battery	Ni-MH	Ni-MH	Ni-MH

전지를 탑재한 최고속도 124km/h인 FCEV "Premacy"를 개발하였으며, Nissan은 Prototype FCEV "Xterra-FCV"를 개발하였고 Mitsubishi는 2003년까지 FCEV의 실용화를 목표로 개발 중이다. 국내에서는 현대자동차가 FCEV를 개발하고 있으며, 국내에서 개발한 FCEV의 사양은 표5 와 같고 75kW급 연료전지와 72리터의 연료탱크를 갖고있어 한번의 수소 충전으로 160km 주행이 가능하고, 최고시속 124km, 정지상태에서 시속 100km까지 가속시간은 18초이다. 유럽은 프랑스의 Ecole des Mine, Air Liquide, 이태리 De Nora, Ansaldo 및 스웨덴의 Volvo사가 공동으로 개발에 참여하고 있고 특히 IRISBUS(이태리), Scania(스웨덴), Airliquide(프랑스), Nuvera(이태리), SAR(덴마크), Genova Univ.(이태리)등에서 승객수송용 연료전지 버스를 개발하고 있다. 이들 FCEV 버스는 미국 UTC사의 60kW연료전지 스택을 사용하고 있다.

표 4 Honda-FCEV의 사양
Table 4 Spec. of Honda-FCEV

Model	FCX-V3	FCX-V4
Fuel	Pure Hydrogen	Pure Hydrogen
연료저장방법	고압수소저장탱크	고압수소저장탱크
FC Type	Polymer PEFC	Polymer PEFC
Stack Output	70kW	78kW
Max. Speed	130km/h	Over 150km/h
Driving Range	More than 180km	Over 250km
Motor Type	Synchronized PM	Synchronized PM
모터피크출력	60kW	60kW
차량 중량	1750kg	1740kg

표 5. HMC-FCEV의 사양
Table 5 Spec. of HMC-FCEV

Hyundai Santa Fe FCEV Specifications	
Weight	1,620kg
Fuel Cell Power	75kW
motor	3Phase AC / 65kW
Max. Speed	124km/h
Mileage	Gasoline Equivalent of 50 to 60 mpg
Fuel	Compressed Hydrogen
Fuel Tank	72 Liters
Emissions	Water Vapor
Operation Pressure	Ambient
Voltage	DC 160 ~ 270V

2.4 연료전지전기자동차의 시장전망

현재 전세계의 자동차수는 6억대에서 2015년과 2020년 사이에는 10억대 정도로 증가할 것으로 예상되고 있고, 특히 수소연료 대신 메탄올을 사용하는 FCEV가 현실로 다가올 것이다. DOE(The Department Of Energy)는 2010년에 새 자동차 시장의 1.3퍼센트를 FCEV가 차지할 것으로 예상했으며 JIEE(Japanese Institute of Energy Economics)는 일본 내의 FCEV 차량의 비율이 2010년 0.1퍼센트에서 2020년에는 33.5퍼센트로 급속히 증가할 것으로 예상하고 있다.

2.5 연료전지전기자동차의 시스템구성

연료전지자동차의 전력시스템은 크게 나누어 전지를 사용하지 않고 순수연료전지만을 사용하는 방식과 전지와 연료전지를 같이 사용하는 방식으로 구분할 수 있다. 차량에서 고출력이 필요한 가속 시에는 전지로부터 전력을 공급하고 비교적 적은 출력이 필요할 때는 연료전지에서 전력을 공급하며, 경부하 때는 연료전지가 전지를 충전하게 된다.

FCEV에서 전지를 병용할 경우 연료전지의 빠른 기동과 기동 시 전지의 역 전환에 대한 보호가 가능하며, 첨두부하를 담당하고 에너지의 재충전 및 부하변동에 따른 차량의 응답시간을 빠르게 한다. 연료전지시스템에서 전지를 병용할 경우 장점은 첫째, 차량이 연료전지의 예비가열 없이 출발할 수 있으며, 둘째, 연료전지시스템이 정상 출력전압 도달시간까지 순수전기자동차로 운행할 수 있으며, 셋째, 부하변동에 따른 응답이 순수전기차량보다 빠르다는 점이며, 단점은 차량의 가격 상승과 무게 및 부피가 커진다는 점이다. 이러한 FCEV의 전원 시스템의 구성은 다음의 4가지로 나눌 수 있다.

2.5.1 전지와 DC/DC컨버터가 있는 경우

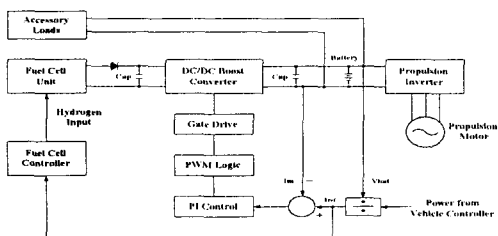


그림 1. 전지와 컨버터로 구성된 시스템

Figure 1 System configuration with Battery and Converter

FCEV의 시스템 구성으로 그림 1은 연료전지와 전지 및 DC/DC컨버터로 구성된 시스템을 나타내고 있다.

2.5.2 전지가 없는 경우

그림 2는 연료전지와 DC/DC컨버터로 구성된 시스템이다.

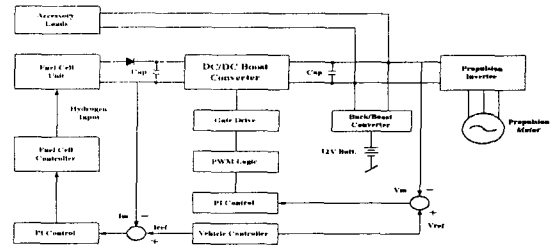


그림 2. 전지가 없는 시스템

Figure 2 System configuration without Battery

2.5.3 컨버터가 없는 경우

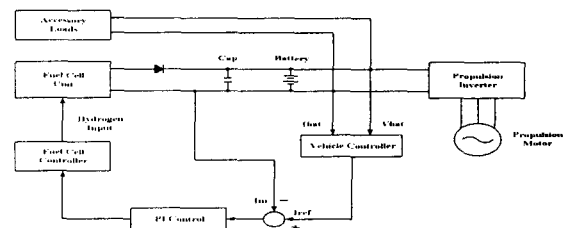


그림 3. 컨버터가 없는 시스템

Figure 3 System configuration without converter

2.5.4 연료전지만으로 구성된 시스템

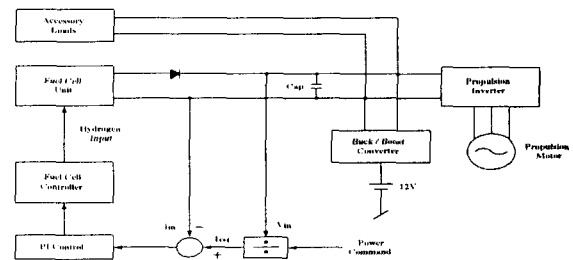


그림 4. 연료전지만 사용하는 시스템

Figure 4 System of using Fuel Cell only

2.6 양방향 컨버터

양방향 컨버터는 FCEV의 기동 시 보조전지를 이용해 300Vdc의 DC전압을 승압하고 연료전지 발생기의 기동용 고속압축기의 기동과 동시에 차량 구동용 전압을 공급하며, 기동 후에는 연료전지의 전원으로부터 보조전지를 충전하게되므로 전류의 흐름이 양방향성을 띠게된다. 양방향 컨버터는 초기 기동 시 승압모드(Boost Mode)로 동작하여 고압 DC버스단의 충전, 과도상태에서 고압 DC버스단을 안정화하고 기동 후에는 연료전지로부터 보조전지를 충전하는(Buck Mode)모드로 동작한다.

FCEV용 양방향 컨버터는 충전과 방전모드에서 고효율을 얻기 위해서 저전압 모드에서는 전류형이, 고전압 모드에서는 전압형이 사용된다. 현재까지 개발된 연료전지자동차용 양방향 컨버터는 전지의 방전모드에서 최대 94%정도, 충전모드에서는 최대 95%의 효율을 나타내고

있다. FCEV에 필요한 양방향 컨버터의 용량은 방전 모드에서 연속동작 정격이 약 1.6kW정도이고 충전 모드에서는 5kW 정도이다.

2.6.1 양방향 컨버터의 초기 기동모드

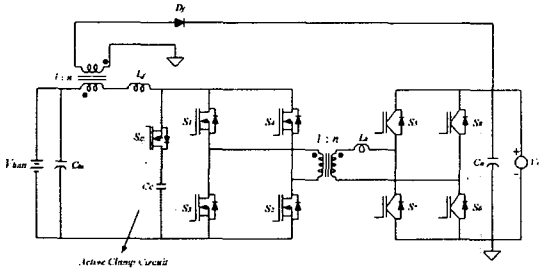


그림 6. 양방향 컨버터의 Start-up Mode
Figure 6 Start-up Mode of Bidirectional Converter

그림 6은 기동 시 양방향 컨버터의 회로이고 그림 7과 8은 각각 초기 기동시의 이론 파형과 시뮬레이션 파형을 나타낸 것이다.

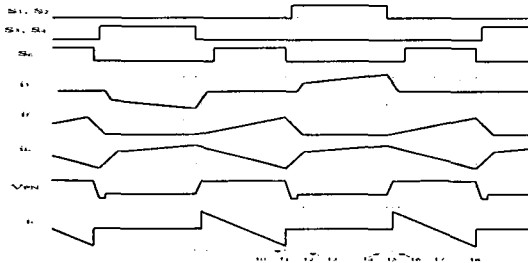


그림 7. 양방향 컨버터의 기동 모드 파형
Fig.7 Waveform of Start-up Mode of Bidirectional Converter

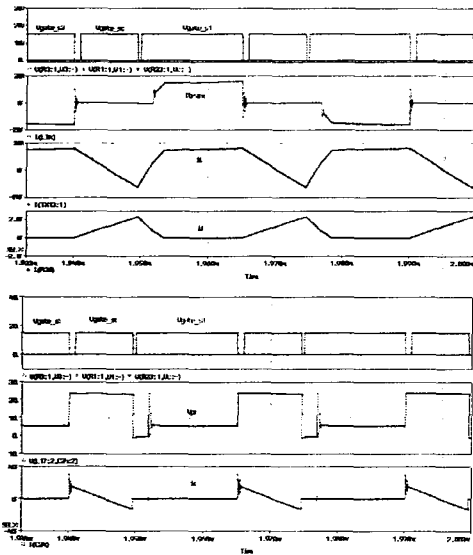


그림 8. Start-up Mode의 시뮬레이션 파형
Figure 8 Simulation waveform of Start-up Mode

2.6.2 양방향 컨버터의 승압모드

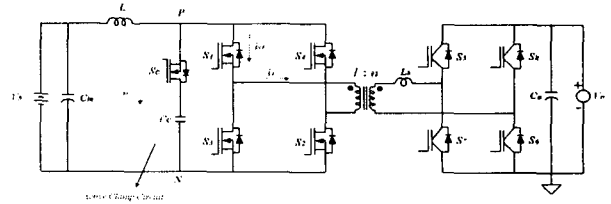


Fig. 9 양방향 컨버터 Boost Mode 회로

Boost 컨버터의 Mode별 동작원리는 다음과 같다.

- ① t_0 이전 : S_c 와 S_1 & S_2 스위치가 켜져 있고 S_3 과 S_4 는 Off되어 있다. 컨버터는 Powering mode로 동작하고 있으며 Boost inductor와 Clamp capacitor 전류는 부하 쪽으로 흐르고 있다.
- ② $t_0 \sim t_1$: t_0 시점에 S_c 가 Off된다. 이때 Clamp capacitor의 전류는 0이 되고 순간 변압기의 전류가 Choke 전류보다 크므로 V_{pn} 의 기생커패시터는 방전하기 시작하여 t_1 시점에서 0이 된다.
- ③ $t_1 \sim t_2$: S_3 와 S_4 의 병렬다이오드가 도통되고 이때 스위치는 ZVS Turn on 된다.
- ④ $t_2 \sim t_4$: 모든 스위치가 Turn on 되어 있는 상태 즉 Boost mode로 동작된다. t_3 시점에서 변압기의 전류는 0이 된다.
- ⑤ $t_4 \sim t_5$: t_4 에서 S_1 과 S_2 스위치 Turn off가 된다. 이때 변압기 전류는 Clamp Capacitor전압까지 선형적으로 상승한다.
- ⑥ $t_5 \sim t_7$: V_{cc} 와 V_{pn} 의 전압차이 때문에 t_6 를 경계로 Clamp capacitor에 흐르는 전류의 방향이 바뀐다.

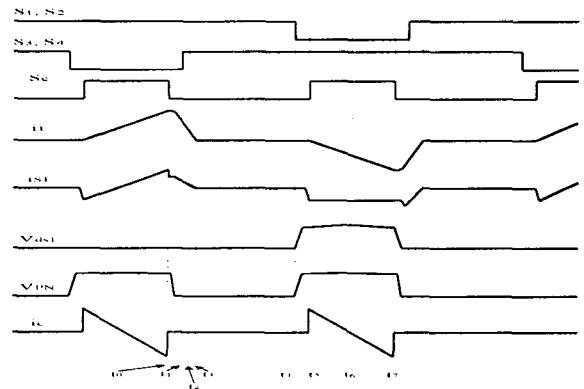


그림 10. Boost Mode의 이론 파형
Figure 10 Theoretical Operation waveform of Boost Mode

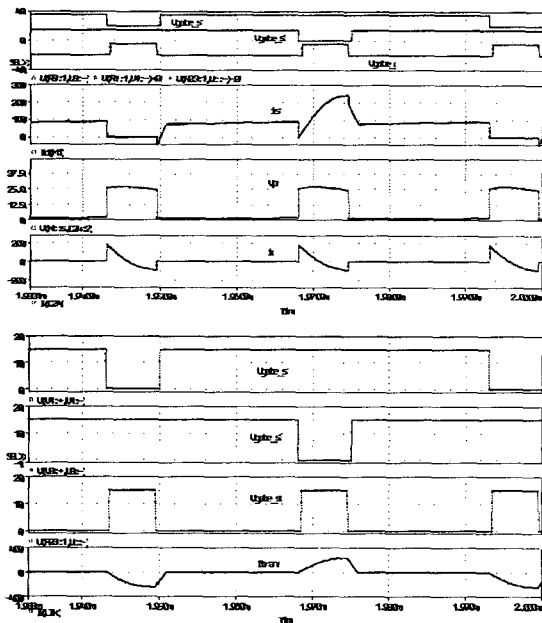


그림 11. Boost Mode의 시뮬레이션 파형
Figure 11 Simulation waveform of Boost Mode

3. 결 론

본 논문에서는 FCEV용으로 사용되는 연료전지의 종류와 특징 및 FCEV의 개발동향에 대해 알아보고 개발 중인 연료전지전기자동차의 재원을 비교 분석하고, FCEV용 전력변환시스템의 구성, 전력변환시스템의 제어 방식, 그리고 FCEV의 시장전망 등을 소개하였다. 특히 FCEV용 전력변환시스템에 적용되고 있는 양방향 DC/DC컨버터의 모드별 동작원리와 시뮬레이션을 통해 동작원리를 분석하였다. 양방향 DC/DC컨버터의 경우 최근에는 전압이나 전류제어형 전용 PWM 소자를 이용한 아날로그 방식 대신 DSP를 이용한 디지털 방식의 채택으로 전력소자의 고속 스위칭이 가능하고, 주변장치와의 인터페이스와 자기진단 및 데이터 감시를 위해 CAN, RS232C, 인터넷 등을 사용하고 있는 추세이며, 시스템 구성에 따라 프로그램 업그레이드가 가능한 제품을 개발하고 있는 것으로 나타났다. 현재 무공해자동차(ZEV)는 순수 전기자동차에서 FCEV로 전환되고 있으며, FCEV에 적용되는 전력변환시스템 구성과 기술동향, FCEV의 시장전망 등 전반적인 내용을 소개하였다.

참 고 문 헌

[1] Hugh M. M. Anderson, James P. Lo Gerfo, CFA., "Energy Technology Industries overview", June 2000.
[2] Robert K. Winters, "The world's Power and Transportation Industries", April 2000.
[3] E. Peled, T. Duvdevani, A. Aharon, and A. Melman, "New Fuels as Alternatives to Methanol for Direct

Oxidation Fuel Cell", February 2001.
[4] N Brandon and D Hart, "An Introduction to Fuel Cell Technology and Economics", July 1999.
[5] Fuel Cell world, "Fuel Cell Information and Trends", Jan. 2000.
[6] "Hydrogen Activities in the European Union and Germany", H2NET Symposium, June 2001.
[7] Fuel Cell world, "Fuel Cell Information and Trends", Jan. 2000.
[8] Future Wheels, "Interviews with 44 Global Experts On the Future of Fuel Cells for Transportation and Fuel Cell Infrastructure and A Fuel Cell Primer", Published Northeast Advanced Vehicle Consortium, November 2000.
[8] Stephen Gurski, Mike Ogburn, "Greenhouse Gas Impact of a Fuel Cell Hybrid Electric SUV", June. 2000.
[10] "Transportation Fuel Cell Power System 2000 Annual Progress Report", Published U.S.D.O.E., Office of Advanced Automotive Technologies, Oct. 2000.
[11] Chris Liston, "Reforming technologies for fuel cells in transport applications", Jan.2001.
[12] "Transportation Fuel Cell Power System 2000 Annual Progress Report", Published U.S.D.O.E., Office of Advanced Automotive Technologies, Oct. 2000.
[13] Future Wheels, "Interviews with 44 Global Experts On the Future of Fuel Cells for Transportation and Fuel Cell Infrastructure and A Fuel Cell Primer", Published Northeast Advanced Vehicle Consortium, Nov. 2000.
[14] Daimler Chrysler Fuel Cell Vehicle관련 자료