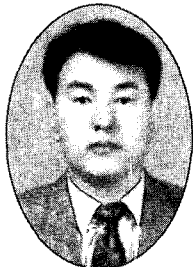


전기자동차용 대용량 리튬이차전지의 개발동향



형유엽
한국전기연구소
전지기술연구팀 선임연구원



문성인
한국전기연구소
전지기술연구팀장



윤문수
한국전기연구소
소장

1. 머리말

2001년은 새로운 millenium의 시작이다. 20세기의 눈부신 과학기술의 발달로 인류는 그 어느 때 보다도 풍요로운 시대를 맞이하였다. 그 대가로 인류는 지구의 자연환경으로부터 생존을 위협받고 있다. 21세기의 과학기술은 지난 세기의 물질문명의 중심에서 벗어나 지구환경을 지키고 옛 환경을 되찾기 위한 환경기술이 주 개발대상이 될 전망이다.

그림 1에서 나타낸 바와 같이 전 세계의 에너지 소비는 기하급수적으로 늘고 있으며 2020년까지는 화석연료의 사용도 계속 늘어날 것으로 전망된다¹⁾. 이미 많은 나라의 과학자들이 화석연료의 사용을 줄이고 신재생에너지를 개발·활용하기 위한 national program들을 진행중이다.

1998년부터 미국의 캘리포니아주에서는 대기보전법이 발효되어 zero emission vehicle의 일정 비율(2%) 판매 의무화를 계획한 바 있었으나 1995년 하반기에 2003년부터 10%의 판매를 의무화하는 것으로 수정하여 시행하기로 결정하였다. 그러나 현재까지 개발된 전기자동차(Electric Vehicle, EV)는 내연기관 자동차에 비해 전지의 단위 중량(혹은 체적)당의 에너지밀도가 낮아 일충전주행거리가 짧으며 (gasoline의 에너지밀도가 13,800Wh/kg인데 비하여 연축전지는 40Wh/kg), 가속성능, 등판성능 및 최고속도가 뒤떨어지고, 과도한 전지의 부피로 인해 적재량 및 객실 용량이 부족한 단점 등으로 인하여 실용화가 늦어지고 있다. 이들은 주로 탑재전지 자체의 성능에 관계되는 것으로 고성능 리튬전지의 개발로 이러한 문제점을 해결, 전기자동차의 실용화가 가능하다.

최근 전 세계적으로 환경의 보전과 심야의 잉여전력을 활용하기 위한 방안으로 전기자동차의 실용화를 위한 고성능 리튬전지의 개발이 활발하게 진행중이다. 미국의 USABC(United State Advanced Battery

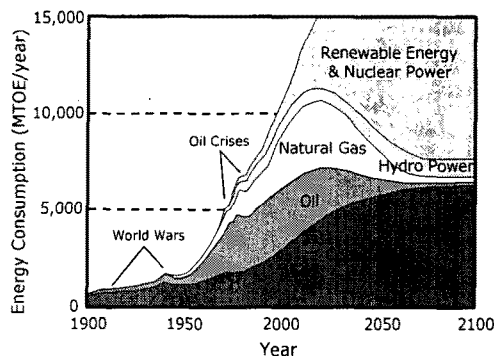


Fig. 1. Primary energy consumption of world.

Consortium), 일본의 LIBES(Lithium Battery Energy Storage System), 유럽의 JOULE(Joint Opportunities for Unconventional or Long-Term Energy Supply) program 및 한국의 G7(Next Generation Vehicles) 등이 그것이다.

전기자동차의 실용화를 위하여 가장 우선적으로 해결되어야 할 분야는 바로 전기자동차의 운행에 필요한 에너지를 저장하는 전지시스템이다. 지난 1995년 초 미국의 GM에서는 전기자동차의 개발을 위한 모든 기술은 전지를 제외하고는 충분히 갖추어진 상태로 판단하고 향후 전기자동차의 개발을 위한 투자는 전지에 집중할 것이라고 한 바 있다. 실제로 세계적으로 전기자동차의 개발을 위해 다양한 전지시스템을 고려하였으나 최근에는 실용화 가능성이 가장 높은 Ni-MH 전지와 리튬2차전지를 집중적으로 연구하고 있다.

2. 전기자동차 개발 역사

고성능 리튬2차전지를 이용하는 전기자동차의 개발은 전세계적으로 자동차의 급격한 증가에 따라 환경오염의 주원인인 NO_x, SO_x, PM(부유미립자), NMOG(비메탄유기화합물) 및 탄산가스 등의 증가로 인한 공해가 날로 심각하여 이에 대한 대책으로 고려되었다.

그러나 전기자동차는 최근에 개발된 것이 아니라 100년 이상의 오랜 개발 역사를 가지고 있다. 프랑스와 영국은 1800년대 후반에 전기자동차를 개발한 최초의 국가이다. 미국서는 1895년에 전기자동차를 개발하기 시작하였으며 1897년에 뉴욕시의 택시에 적용한 것이 최초의 상용

전기자동차라고 할 수 있다(그림 2).



Fig. 2. New York City electric taxis.

초기모델인 1902년 Wood's Phaeton은 18마일의 주행거리, 14mph의 최고속도로 \$2,000의 가격으로 판매되었다(그림 3).

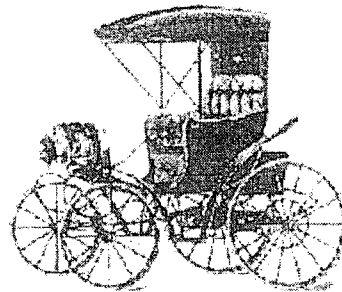


Fig. 3. 1902 Wood's Electric Phaeton.

그후 기술된 자동차의 등장과 주행성능에 밀려 전기자동차는 1990년대에 이르기 까지 지게차, 골프카, 우편배달차, 트럭, 전동 휠체어 등과 같이 소음과 공해가 문제가 되는 환경에서 특수한 용도로 사용되어져 왔다. 1990년대에 이르러 지구의 환경을 되찾기 위한 노력의 일환으로 전기자

차의 개발이 활발하게 진행되었다.

1995년 10월에 일본의 Sony와 Nissan자동차가 리튬이온전지를 탑재한 EV를 개발하였으며, 사용된 전지는 100Ah급 단전지 8개를 직렬접속한 모듈을 12개 직렬연결(총 96 cells)하였으며 100Wh/kg, 160Wh/l의 에너지밀도를 가지고 있으며, 1회충전에 200km를 주행할 수 있다. 이 전지시스템에 사용된 정극재료는 LiCoO₂를 기초로 하고 부극은 비흑연계 탄소재료를 사용하고 있다. 1996년말 일본의 Sony Energytec과 Nissan 자동차에서 그림 4의 리튬이온전지를 탑재한 양산모델 Playly Joy를 개발하였으며 1997년 이후 일본내에서 ¥350,000/month로 리스중에 있다.

또한 1997년에는 Sony Energytec이 개발한 EV용 고용량 리튬이온전지를 Nissan 자동차의 Altra EV에 탑재하여 1998년 현재 California에서 30대가 Fleet Test중에 있으며 1999년에 90대가 추가로 Fleet User에게 공급되며 2000년에 시판한다는 계획이다. Nissan에 의해 시도되고 있는 "Seamless Energy System"은 가정용 전력 사용과 자동차의 사용을 연결하여 전력요금과 에너지 소비를 최소화 하기 위한 것으로 평균적



FEV II(1995)

Playly Joy(1996)

ALTRA(1997)

Fig. 4. EVs powered by lithium ion technology by Nissan & Sony Energytec.

로 에너지 소비는 1/3을 줄일수 있으며 가정과 자동차의 복합된 에너지 소비는 1/6까지 줄일수 있어 연간 ¥185,000의 절약효과가 있는 것으로 보고하고 있다²⁾.

3. EV의 중점 R&D 분야

EV가 세계적으로 관심을 끌게 된 가장 큰 이유로 미국의 the California Air Resource Board에서 요구하는 ZEV(Zero Emission Vehicle)를 들 수 있으며 현재 USABC와 DOE(Department of Energy, US)에 의해서 EV의 개발이 활발하게 진행되고 있다는 것은 이미 잘 알려진 사실이다. 현재 USABC 및 PNGV에서 중점적으로 개발중인 기술들은 다음과 같다.

3.1. Recycling, Reuse, Recovery

현재의 기술수준으로 자동차의 75-80%가 재활용되고는 있지만 자원의 효율적인 활용을 위해 재활용기술은 지속적으로 연구되고 있다.

3.2. Batteries

자동차를 움직이기 위한 가솔린의 에너지는 거의 100년동안 개선과 발전을 하여왔음에도 불구하고 그 에너지의 15%정도 밖에 이용하지 못하기 때문에 자동차의 에너지효율을 향상시키기 위해 고성능, 신형전지의 연구가 가장 중요한 분야로 꼽히고 있다.

3.3. Lightweight Materials

기존의 재료보다 가볍고 신뢰성있으며 안전한 자동차의 개발에 의한 연료의 효율을 높이고 나아가 대기의 오염을 줄이기 위하여 자동차용 경량재료의 연구를 진행하고 있다.

3.4. Engines and Other Power Sources

현재의 자동차를 개선하기 위하여 많은 환경친화적인 기술들이 연구되고 있으며 이러한 기술로서 선택적인 동력원, 예로서 연료전지, hybrid electric propulsion system 및 gas turbine engines등이 있다.

3.5. Safety

탑승자의 안전을 향상시키기 위해 안전성의 확보 또한 중요한 기술분야이다.

3.6. Integrating Technologies

자동차의 생산, 시스템 분석, 전장기술, hybrid electric vehicles, supercomputing 및 standardization 등의 여러분야의 기술을 하나로 묶어서 더 높은 효율과 부가가치의 창출을 위한 복합화 기술을 연구하고 있다.

3.7. Making Technologies Affordable

연구의 성패는 결국에는 적당한 가격으로 실용적인 무공해 자동차를 생산할 수 있는지가 관건이 될 것이므로 생산기술을 배제한 R&D는 있을 수 없다.

3.8. Further Reducing Emissions

전기자동차 뿐만 아니라 assembly plants에서도 공해를 줄이기 위해서 많은 공동연구를 진행하고 있다.

그리고 한국에서는 G7 사업에 의해 저공해분야, 안전도 분야, 전기자동차 분야의 3개 중점분야로 연구를 진행하고 있다.

4. 국가별 R&D 동향

4.1. 미국

미국의 캘리포니아주에서는 대기보전법이 발효되어 1998년부터 전기자동차의 일정 비율(2%) 판매 의무화를 계획한 바 있었으나 전기자동차의 가장 중요한 동력원인 전지의 개발이 예상보다 늦어져 '95년 하반기에 수정안이 받아들여져 2003년에 10%의 판매를 의무화하는 것으로 변경되었다. 그러나 GM, Ford, Chrysler, Toyota, Nissan, Honda Matsuda 등의 7대 자동차 메이커는 1998년~2000년 동안 함께 3750대의 전기자동차를 판매하는 것으로 합의되어 졌다. 또한 Newyork주에서는 현재 관련법규를 제정중이지만 1998년 10월에는 2%의 ZEV 규제가 개시될 것으로 예정되어 있다. 이 때문에 신형전지를 탑재한 전기자동차의 개발 및 실용화가 활발하게 진행중이다. 미국에서는 U.S. DOE Storage R&D Program을 그림 5와 같은 체제로

- (1) Advanced Batteries for EVs (DOE-USABC Program)
 - (2) High Power Energy Storage Program
 - (3) Exploratory Technology Research
- 의 연구들이 진행중이다.

1991년에 DOE와 USABC는 1992년부터 5년간 1단계연구로서 전기자동차용 리튬 2차전지 기술 개발과제로서 5개 과제에 \$114.6 million을 지원하였으며 Big 3 자동차메이커와 EPRI와 정부는 가장유망한 전지시스템을 연구하고 전기자동차의 성능향상과 주행거리의 증가를 주 목적으로 하였으며, 세부내용으로는 Grace & Johnson Controls사에서 3년동안 \$24.5 million을 투입하여 thin-

film Li polymer bipolar battery의 개발을, SAFT America에서는 3년동안 \$24.6million을 투입하여 bipolar형의 Li(Al)-iron disulfide battery의 개발을, Valence Technology와 Delco Remy에서는 3년동안 \$145.5 million을 투입하여 single-phase solid-state flexible polymer electrolyte lithium battery의 개발을 하였으며, 전체 USABC지원 연구비 \$146.6million중 리튬 2차전지관련 연구가 78%이상을 차지하였다. USABC는 1997년 10월 24일에 the U.S. Department of Energy (DOE)와 함께 2단계 연구를 Advanced electric vehicle battery technologies의 연구개발에 \$106 million을 지원하기로 공식적으로 발표하였다. DOE는 \$48 million을 지원하고 나머지는 Ford, GM, Chrysler and EPRI가 지원하기로 하였다. 이러한 형태의 계약은 Clinton 행정부의 public-private partnership에 의한 것이다.

1단계의 연구를 통하여 USABC는 Ni-MH전지는 mid-term technology로는 가장 유망한 전지이며, lithium-based batteries는 EV의 long-term solution을 성공적으로 만족할 수 있을 것으로 판단하였으며 2단계 연구를 통하여 USABC는 mid-term EV 전지의 가격을 낮추고 long-term 목표를 달성하기 위하여 safety, life와 mid-term 및 long-term EV 전지의 양산기술을 개발하고 이의 feasibility 연구를 수행토록 하고 있다³⁾.

즉 2단계 연구에서는 NiMH전지의 실제사용환경에서 safety와 durability의 시험을 하는 한편 가격은 낮추고 성능은 향상시키도록 계획하고 있으며 long-term lithium-based technologies의

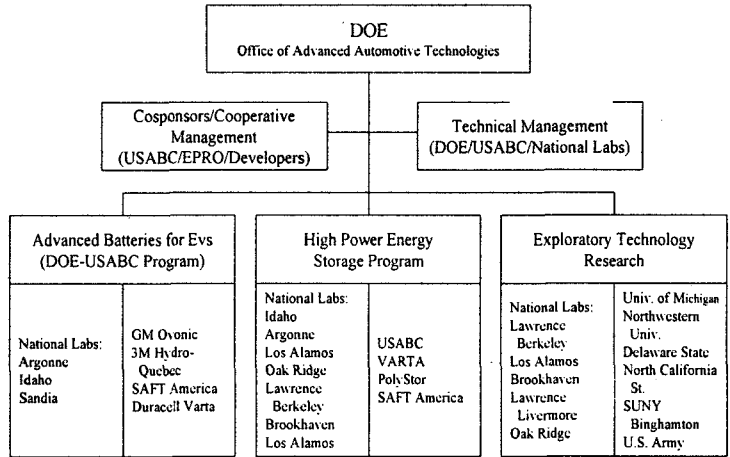


Fig. 5. DOE Energy Storage R&D program.

Table 1. Technical Targets of Long-Term Lithium-Polymer Battery Technology for Electric Vehicles

Characteristics	Units	Calendar Year	
		1998	2000
Power Density	W/l	365	450
Specific power	W/kg	250	300
Energy density	Wh/l	160	195
Specific Energy	Wh/kg	110	135
Life	Years	-	10
Cycle life (@80% DOD)	Cycles	750	1000
Power and capacity degradation	% allowed	20	20
Projected price ^a @20K/year	\$/kWh	-	150
Operating environment	°C	-40 to 65	-40 to 65
Recharge time	Hours	6	6
Continuous discharge in 1 hour(no failure)	75% of capacity	-	-
Self discharge	%	<15%@48hrs	<15%@48hrs
Efficiency ^b	%	>75	80
Thermal loss	W/kWh	<3.2	<3.2

^aCost to the original equipment manufacturers

^bRoundtrip charge / discharge efficiency

feasibility를 확인하는 것을 주요 쟁점으로 하는 등 USABC와 DOE가 매우 적극적인 입장을 취하고 있으며, 또한 DOE에서는 1998년에 high power energy storage program으로 기존의 NiMH외에 신규로 high power lithium ion battery for HEVs를

지원하기로 하였다.⁴⁾ 2단계를 통하여 개발될 long-term lithium-polymer battery의 개발목표를 표 1에 나타내었다.

미국의 Minnesota Mining and Manufacturing(3M)과 캐나다의 Hydro-Quebec (IREQ)에서는 ACEP(Accumulator Elec-

trolyte Poymer) project로 1979년부터 전기자동차용으로 리튬 2차전지 개발을 시작하여 2kWh급 LPB(Lithium Poymer Battery)를 개발 완료하고, 1998년 현재는 (2kWh)n 또는 40kWh급 전기 개발을 목표로 연구중에 있으며, 1999년 이후 상용화할 계획이다.

표 2에 USABC와 5년제의 R&D 계약에 의해 총 \$85million의 개발비를 투자하여 Hydro-Quebec(IREQ)과 Minnesota Mining and Manufacturing(3M)에 의해 개발된 EV용 Li-Polymer battery module의 성능을 나타내었다. 1998년 현재 LPB technology는 full-sized prototypes로 실제 사용환경에서 field-testing을 하고 있다.

Battery module로서는 2kWh의 크기이고 full-size pack은 8~32 kWh의 용량이다. 최초의 LPB packs은 1998년 말과 1999년 초에 USABC에 공급되어 bench testing, dynamometer testing 및 road track testing을 거치게 될 예정이다.⁵⁾ IREQ와 3M에 의하면 머지않아 시험을 위한 목적으로 full-sized EV batteries를 연간 50대 규모로 공급하는 것이 가능하다고 한다.

이 외에도 Eagle Pitcher사에서도 Li metal/sulfide 리튬 2차전지를 연구개발중인 것으로 알려져 있으며, NSWC(Naval Surface Warfare Center)에서는 30Ah급 시제품 전지를 개발하고 400Ah급을 목표로 연구하고 있다. 특히 NSWC는 대규모의 안전성 시험시설을 이용하여 리튬 전지의 안전성 평가에 관한 연구를 수행하고 있다.

이상과 같은 미국의 DOE-USABC의 EV용 전지의 개발방

Table 2. Specifications of Li-Polymer Battery Module for EVs

Specifications	Prismatic Cell	Module
Weight (kg)	1.48	15.7
Volume (L)	0.98	11.0
Capacity (Ah)	119	119
Energy (Wh)	303	2,425
Specific Energy (Wh/kg)	205	155
Volumetric Energy (Wh/l)	333	220
Power (W)	615	4,923
Specific Power (W/kg)	420	315
Average Voltage (V)	2.55	20.4
Cycle Life (@80% DOD)	600	600

*Voltage & capacity of LPB pack is 326V, 119Ah.

향과 함께 상용화를 위해 필요한 최소한의 성능을 mid-term 및 long-term 목표와 함께 표 3에 나타내었다.

4.2. 일본

MITI 주관하에 전액 정부지원으로 New Sunshine Project하에 LiBES Project로 11개 기관이 참여하여 1993년 1월 부터 10년간 140억엔을 투자하여 장수명 및 고에너지밀도형 상온형의 리튬 2차전지를 전력저장용 및 전기자동차용으로 개발을 추진하고 있으며, LiBES Project의 연구개발 체계, 개발목표 및 schedule은 그림 6, 표 4, 5와 같다⁶⁾.

이상과 같은 LiBES project의 내용으로 1998년 현재까지 개발된 4가지 리튬2차전지의 성능 및 cell의 규격을 비교해 보면 다음의 표 6과 같다.

이상과 같이 LiBES project를 통하여 일본정부로부터 지원 받

아 전력저장용 및 EV용 리튬이온전지를 개발중에 있지만 실제로 세계에서 가장 빠른 기술적 진전을 보이고 있는 것은 일본의 SONY Energytec이다.

1995년 10월 Sony Energytec Inc.에서는 Nissan 자동차사와 함께 일충전주행거리 200km의 리튬이온전지 탑재 전기자동차를 발표하였으며, 사용된 전지는 Sony에서 개발한 전기자동차용 원통형 전지로서 에너지밀도 100Wh/kg 및 출력밀도 300W/kg을 실현하였다고 발표한 바 있다. 사용된 단전지는 직경 67mm, 길이 410mm의 원통형이며, 부극으로는 hard carbon, 정극으로는 LiCoO₂를 사용하였으며, 두께 15 μ m의 동박을 부극집전체로, 20 μ m의 Al박을 정극집전체로 사용하였다. 격리막은 40 μ m두께의 polypropylene의 다공질막, 전해액으로는 LiBF₄ 전해질의 탄산에스테르용액을 사용하였다. 성능은 단전지당 100Ah의 방전용량이었으며, 방전전압 3.3V, 중량 및 체적에너지밀도는 110Wh/kg 및 250Wh/kg, cycle 수명 1200회 이상, 자기방전을 월10%이내로 발표하였다. Module 전지는 상기의 100Ah 단전지 8개를 직렬로 연결하여 제작하였으며, 중량 29kg, 체적에너지밀도는 160Wh/l이므로서 단전지의 65% 수준이었으며, 이는 Cell간의 dead space에 기인한 것이다. Cycle 수명 및 자기방전은 각각 1200회 이상 및 월10%이내로 발표하였다. 중량에너지밀도는 100Wh/kg이므로서 단전지의 약 90%수준으로 module packaging에 의해 감소하였다. 이 module을 12개 직렬연결하여 pack전지를 제작하였으며, Pack 전지의 용량은 35kWh, 중량 385kg, 70% 및 80% DOD에서 출력밀도 300

Table 3. Battery Commercialization Criteria Identified by USABC

Parameter	Mid-term Criteria	Commercialization Criteria	Long-term Criteria
Price	<\$150/kWh	<\$150/kWh (\$75 desired)	<\$100/kWh
Cycle Life	600 @ 80% DoD	1000 @ 80% DoD 1600 @ 50% DoD 2670 @ 30% DoD	1000 @ 80% DoD
Range @ Life (Urban Miles)	100,000	100,000	100,000
Calendar Life	5 years	10 years	10 years
Power Density	250 W/L	460 W/L	600 W/L
Energy Density	135 Wh/L	230 Wh/L	300 Wh/L
Specific Power	150 W/kg (200 Desired)	300 W/kg	400 W/kg
Specific Energy	80 Wh/kg (100 Desired)	150 Wh/kg	200 Wh/kg
Regenerative Specific Power	75 W/kg	150 W/kg	200 W/kg
End of Life (EOL)	20% of rated power and capacity specification	20% of rated power and capacity specification	20% of rated power and capacity specification
Operating Performance	-30°C to +65°C	20% Loss at extremes of -40°C to +50°C (10% desired)	-40°C to +85°C
Normal Charge	6 hrs, 20-100% SOC	6 hrs, 20-100% SOC (4 hrs desired)	3-6 hrs, 20-100% SOC
High Rate Charge	<15 min, 40-80% SOC	<30 min @ 150 W/kg, 20-70% SOC (<20 min @ 270 W/kg desired))	<15 min, 40-80% SOC
Efficiency at EOL	75%	80%	80%
Off-tether Pack Energy Loss	Thermal loss <3.2 W/kWh (<15% in 48 hours) Self discharge <15% / 48 hrs.	3 days:<15% with no performance loss 12 days: cumulative loss <25% with some performance loss @ extreme temperature limits	Thermal loss <3.2 W/kWh (<15% in 48 hours) Self discharge <15% / month

Table 4. R&D Target of LIBES Project

Item	EV Application Type	Stationary Type
Batteries	3kW class module	2kW class module
Specific Energy(Wh/kg)	150	120
Energy Density(Wh/l)	300	240
Power Density(W/kg)	400	
Cycle Life(cycles)	1,000	3,500
Energy Efficiency(%)	85	90
Others	Battery control and protection system for maintaining safety and cycle characteristics shall be developed and installed. Safety issues concerning the environment and recycling shall considered. Characteristics under EV application (temperature and vibration characteristics based on the driving mode, etc.) shall be satisfied.	Battery control and protection system for maintaining safety and cycle characteristics shall be developed and installed. Safety issues concerning the environment and recycling shall considered.

Wh/kg 및 200W/kg으로 전기자동차 1대분이며, 상기의 EV용 pack을 이용하여 제작한 시험용 1,700kg의 전기자동차는 일충전 주행거리가 200km이며, cycle 수명을 고려한 총주행가능거리는 20만km로 예상된다.

또한 그림 1.1에 보였던 리튬 이온전지를 탑재한 양산모델 Playly Joy는 97년 이후 일본내에서 ¥350,000/month로 리스중에 있다.

계속해서 1997년에는 Sony Energytec이 개발한 EV용 고용량 리튬이온전지를 Nissan 자동차의 Altra EV에 탑재하여 1998

Table 5. Original and Amended Working Schedule of LIBES Project

Schedule (FY)	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
The basic plan before amendment	Phase I Elementary Study			1st Intermediate Evaluation	Phase II Study for scale up		2nd Intermediate Evaluation	Phase III Improvement of Reliability		
Amended basic plan	Phase I			1st Intermediate Evaluation	Change of basic plan		Selection of Battery Systems	Phase II Pre-evaluation		
Development of High Performance Battery	R&D of high performance cell (10Wh class)					Scaling up(250 & 360Wh Fabrication of module Improvement of performance and safety				
Total System Study	Market entry scenario System design					Performance tests, Abuse tests Cost analysis, Recycling				

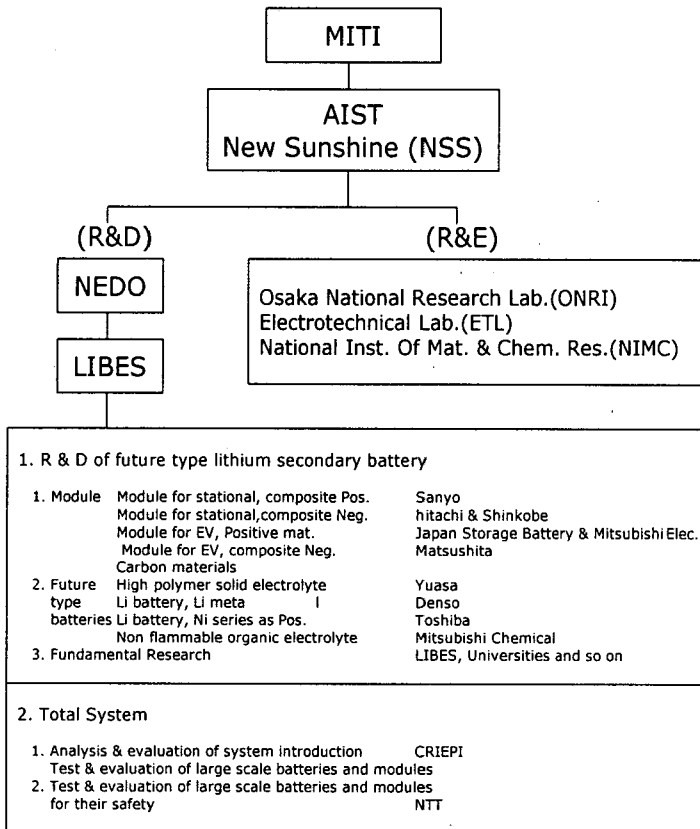
Final Evaluation

년 현재 California에서 30대가 Fleet Test중에 있으며 1999년에 90대가 추가로 Fleet User에게 공급되며 2000년에 시판할 계획이다.

4.3. 유럽

The European Union RTD program은 1985년부터 EVs와 components의 개발을 지원하기 위하여 JOULE program에 의해 진행되었으며, 현재는 CEU (Commission of European Union)에 의하여 1995년 1월부터 JOULE-II program이 이러한 RTD actions을 지원하기 위하여 EUCAR에 의한 6개의 task를 공동연구 project형태의 framework으로 구성되어 12개 유럽국가로부터 29개의 연구기관과 fleet users가 참여하여 30개월간 연구개발을 수행하였다.

이 6개의 task중 2번째는 EV fleet testing을 위하여 SMS (Simplified Monitoring System)을 개발하기 위한 것으로 EV fleet test procedure와 수집되어지는 실험데이터를 분석하기 위하여 EV fleet users와 연구기관들의 European Task Force를 구성하는 것이다.⁷⁾ 여기에는 AMOR(Austria), CRES(Greece), Daug and RWE(Germany), EA Technology(United Kingdom), EIGSI(France), ENEA(Italy), Iberdrola(Spain), Ingenieur-schule of Biel and Ingenieur-buro Muntwyler(Switzerland), KFB(Sweden), Moerdijk&Van Oosten, Technical University of Eindhoven and Institute of Automotive Technology of Apeldoorn(Netherlands), and VUB - Free University of Brussels(Belgium) 등이 partnership을 구성하고 있다.



AIST : Agency of Industrial Science and Technology
 MITI : Ministry of International Trade Industry
 NEDO : New Energy and Industrial Technology Development Organization

Fig. 6. R&D organization of dispersed type battery energy storage.

Table 6. Performance of Developed Prototype Cells of LIBES at 1998

Type	Discharge Capacity(Wh)	Specific Energy(Wh/kg)	Energy Density(Wh/l)	Cell Design
EV Type A	400	140	310	Elliptical cylinder LiCo _{0.99} Mg _{0.01} Ni _{0.01} O ₂ /LiPF ₆ in EC+DMC+DEC/graphite
EV Type B	370	117	275	Cylindrical LiMn ₂ O ₄ /LiPF ₆ in EC+DEC/graphite
Stationary Type A	270	120	240	Cylindrical LiCo _{0.3} Ni _{0.7} O ₂ /LiPF ₆ in EC+DEC/graphite-coke hybrid
Stationary Type B	258	105	239	Prismatic LiMn ₂ O ₄ /LiPF ₆ in EC+DMC/Ag-dispersed graphite

Table 7. VEDELIC Work Packages Description

Work Package	Description	Deliverables	Task Leader	Completed in
1	New electric power train development	3 Synchronous brushless permanent magnet motors and electronic control system	Moteurs Leroy-Somer (Sagem, Ensma)	11/1997
2	New Li-Ion battery system	3 Li-Ion battery system for lab. charac. and for vehicles	SAFT (Eigsi, Ensma)	04/1998
3	Vehicle development	3 Demonstrators 106 Peugeot based	Heuliez	07/1998
4	Vehicle electric development	Electric vehicles schematics	SAGEM	03/1998
5	Tests	Tests of battery systems, electric power train and vehicles	PSA (Eigsi)	03/1999
6	Thermal studies	Vehicle cooling system	ENSM A	07/1997
7	Laboratory development and building	New electric vehicle laboratory	EIGSI	04/1997
8	Vehicle maintainance		Heuliez	03/1999

유럽에서의 EV용 리튬이온전지의 개발을 위한 program으로는 1996년부터 1998년 까지 수행된 프랑스의 VEDELIC(Lithium Carbon DEmonstration VEhicle) project가 있다. VEDELIC project의 목적은 lithium ion batteries의 전기자동차 적용을

기술적으로 검토하고 실증하는데 있으며 the Poitou-Charentes Region, the French State 및 the European Union등이 지원하고 있으며 PSA-Peugeot-Citroën, SAFT, SAGEM, LEROY-SOMER, HEULIEZ, SEER-VOLTA, EIGSI, ENSMA 및

University of Poitiers 등의 연구기관들이 공동참여하고 있다⁸⁾. VEDELIC은 새로운 vehicle의 개발을 위한 project라기 보다는 기업들과 연구기관들의 협동 program을 통하여 LIB에 의한 EV의 실증을 위하여 각자의 기술수준을 교환 및 점검하기 위하여 첫 번째로 battery와 electric powertrain을, 그 후에는 demonstration vehicles를, 마지막으로 EV의 testing facility와 annex project를 끌어내기 위한 연구이다.

2년간의 cooperation을 통하여 정리된 VEDELIC⁹⁾의 기술적인 검토내용은 다음의 표 7과 같다.

Work package 2의 Li-ion battery system development는 VEDELIC program의 핵심기술로서 EV용 신형전지의 개발을 통하여 최종적으로 데모하게 될 EV의 성능향상을 위한 가장 중요한 기술로 꼽고 있다. 이 전자시스템의 성능목표는

1. Energy to weight ratio : 100 Wh/kg after 50 cycles, 75 Wh/kg after 800 cycles
 2. Energy to volume ratio : 170 Wh/l
 3. Power to weight ratio : 190 W/kg at 80% DOD
 4. Power during 5 min at 80% DOD : 38kW
 5. Cycle life according to CEN standards : 800 cycles
 6. Voltage : 220 V
 7. No preheating, fast charging capability (412 Wh/min restored up to 85% of charge)
 8. Maximum weight of the entire system : 280 kg
- 그리고 Tests의 work package에는 battery bench test로서

1. Setting up and launching of the whole system

2. Complete electric and thermal characterization of the battery system

3. Battery characterization in complete power train tests

4. Cycle life tests under standardized cycles

와 같이 4개의 phase로 구성 되어 있다.

프랑스의 SAFT와 미국의 SAFT America에서 공동으로 연구한 25 kWh급 lithium ion battery의 제조사양 및 성능을 표 8에 나타내었다. 42 Ah Li-ion cells를 6개 사용한 module을 12개 직렬접속하여 제조하였다.

표 8에 보인 EV용 LIB를 이용한 EV에 대한 road test결과를 표 9에 나타내었다.

2000년의 fleet testing을 위하여 표 9의 bench 와 road test의 결과를 기술적으로 활용하게 될 계획이다.

또한 LPB(Lithium Polymer Battery)의 개발을 위한 프랑스의 PREDIT(French Research Program on Transportation)가 있으며(표 10), Bollore Technologies와 EDF(Electric de France)는 1993년부터 금속리튬과 dry polymer electrolyte로 구성된 LPB를 연구하여 1997년에 1단계 연구(Research Phase)를 마치면서 좋은 성과를 거두었다¹⁰⁾고 발표하였다. 1단계 연구내용으로는 electrolytes와 cathodes의 연속생산 위한 extrusion process를 개발하였으며, EV용 cell을 제조하여 single cell로서 C/8로 충전하고 C/4로 방전하여 40Ah의 용량을 확인하였으며 ECE-15 cycles로서는 80% DOD로 7 full cycle(84 km range), 90% DOD

Table 8. 25 kWh Battery Performance Summary

Characteristic	Achieved
Volume	147 l
Weight	247 kg
Wh/kg	105(@ ECE), 94(@ Constant Current)
Wh/l	152(@ ECE), 136(@ Constant Current)
W/kg	270 @ 80% DOD
Charge Time	6 hrs
Energy Fading	5% / 50 cycles

Table 9. Road Test Batteries

Project	RVE 2000	VEDELIC
Car	Renault Megane Scenic	Peugot 106
Battery Size	30 modules	14 modules
	1 container	2 containers
Battery Weight	270 kg	130 kg
Energy	28.9 kWh(ECE15)	13.5 kWh(ECE)
Traveled Range	800 km as of May 1998	800 km as of May 1998

Table 10. Performance Target of 2nd Phase of PREDIT Project

Specifications	Cell	Module
Energy at C/2	150 Wh/kg	120 Wh/kg
Peak Power at 80% DOD	200 W/kg	160 W/kg
Cycling at 100% DOD	500 cycles	500 cycles
Cycling at 50% DOD	1000 cycles	1000 cycles
Others	- Pilot plant in operation - Module safe and recyclable - Industrial projected cost : 200 Euros/kWh	

로 9 full cycles(108 km range)의 dynamic test 결과를 보고하였으며 이것은 1150 kg 무게의 reference vehicle에 250 kg의 LPB pack을 탑재했을 때 270 km의 drive range를 가질 수 있는 것으로 해석된다. 또한 10Wh

의 cell로서 외부단락, 화염, 압피, 침침 등의 safety test 결과 안전한 것으로 보고하고 있다.

2단계 연구(1998-2000, Development Phase)는 thermal and electrical management와 recycle 을 포함하는 2kWh module의 개

발을 목표로 하고 있다.

2단계 연구에는 Bollore Technologies, EDF(Electric de France), Schneider Electric, CEA(Commissariat Energy Atomique) 및 CNRS(Centre National de la Recherche Scientifique) 등이 참여하고 있다. 2단계의 전자성능으로는 C/2 rate의 방전으로 cell로서 150 Wh/kg, module로서는 120 Wh/kg의 에너지밀도를, 100% DOD에서 500 cycles를 목표로 하고 있다. 2단계에서는 2개 연구기관과 기업들을 포함하는 유럽국가들로서 7개 partner로 공동연구를 진행중이다.

여기서 spent lithium battery materials의 recycling을 위한 process의 개발은 European Union Brite Euram Program에 의해서도 지원이 이루어 질 전망이다.

개발된 process의 최종 목표는

1. the recycling of 80% weight of lithium contained in the battery
2. the recycling of 80% weight of vanadium oxides contained in the battery
3. the recycling of 80% weight of lithium salt contained in the battery
4. no emission of toxic components and gas
5. the scale up and demonstration of 200 kg/month battery recycling device

이의 연구를 위하여 2개의 R&D center와 주요 기업들을 포함하는 7개 유럽국가에서 이 program을 수행할 예정이다.

2001년 이후의 3단계 연구(Industrial Phase)는 LPB의 양산화 연구로서 solvent-less와 양산화 기술의 개발의 개발로 200

Euros/kWh 이하의 가격과 300 km의 주행거리 및 5년간의 전지 수명을 목표로 하게 될 것이다. 이러한 양산화 연구는 크게 Automation, Quality control 및 Environmental regulations 등의 3개의 범주로 되어 있다.

독일의 Varta에서는 European Commission으로부터 연구비를, USABC로부터 주된 방향을 지원 받아 향후 2000년대의 전기자동차용 전지로 Li Swing System (LiMO₂/C)의 전지를 연구개발중에 있으며 1998년에 EV용 110 Wh 및 250 Wh Li-ion cells를 이용하여 2.5 kWh용량의 modules를 개발하였다¹¹⁾. 개발된 각형 60Ah cell의 성능은 다음 표 11과 같다.

덴마크는 자국내에 자동차메이커가 없는 관계로 EV용 전지의 개발이 그다지 활발하지는 못하지만 Inclusion A/S라는 필름 회사와 스웨덴의 AB라는 회사와 공동으로 리튬전지를 연구하고 있다.

프랑스는 그들의 자동차마켓을 지키기 위해 EV의 개발을 활발히 진행하고 있다. 1995년 기준 약 800대의 전기자동차를 사

용하고 있으며 1993년부터 La Rochelle시에서 EV를 보급하기 시작하였다. PSA Peugeot Citroen, Renault와 EdF, Saft France등에 의해 EV의 개발이 활발히 진행중이다.

독일의 경우 프랑스와 마찬가지로 독일의 경우도 EV의 개발을 위해 국가의 공식적인 지원에 의한 프로그램이 1992년 후반부부터 독일의 가장 큰 섬인 Reugen에서 1996년까지 진행되다 있다. 현재에는 ABB, BMW, GM Opel, AEG Volkswagen 등이 EV의 개발을 진행중이다. ZSW에서 EV용 전지의 안전성 평가를 위한 시험법의 개발을 진행중에 있다.

이태리의 경우 Fiat와 프랑스의 PSA Peugeot Citroen이 공동으로 1990년대 초반에 100대의 prototype vans을 생산한 바 있으며 EC Eureca Project에 의해 EV를 개발하기도 하였으며 최근 들어 국립연구소인 ENEA에서는 EV용 리튬전지의 특성평가를 연구하기 위한 초기단계에 있다.

4.4. 한국

국내의 경우 G7 project로

Table 11. Specifications of VARTA Li-Ion Cells for EVs

Specifications	Cells(ref. 9)	Modules(by '98 catalog)
Weight (kg)		28
Volume (L)		16
Capacity (Ah)	60	60
Energy (Wh)	250	2400
Specific Energy (Wh/kg)	115	90
Volumetric Energy (Wh/l)	270	160 @ C/5
Volumetric Power (W/l)	800	
Specific Power (W/kg)	340 @ 80% DOD	250
Average Voltage (V)	~4	40
Cycle Life (C/5, @80% DOD)	500 cycles	>800 cycles

1992년 말부터 EV용 전지 및 electric power train의 개발이 시작되었으며 EV용 전지의 경우 Na/S, Ni/Zn, NiMH 및 LIB의 4가지 전지의 개발로 시작하였으며 1단계연구종료시점에 실용 및 상용화가 가능하다고 판단되는 NiMH와 LIB만을 2단계 연구로 진행하였으며 3단계(1998년-2001년)연구에는 LPB의 개발이 추가되어 1998년 11월부터 NiMH, LIB 및 LPB의 세가지 전지의 개발을 지원하게 된다(표 12).

G7 2단계까지 연구결과를 요약하면, 미국의 Ovonic사의 NiMH전지 기술을 도입하여 (주)현대자동차와 (주)경원산업에서 pilot plant scale로 제조한 NiMH를 탑재한 엑센트 EV로 미국의 공인시험을 마치고 양산을 준비중이다.

한국전기연구소와 (주)서통에서는 1995년까지 각형 EV용 LIB cell 및 module의 개발을 끝내고 현재는 (주)서통에서 원통형 EV용 LIB cell, module 및 pack을 제조하고 있으며 1999년에는 fleet test를 실시할 계획이다.

G7 3단계 연구에서는 NiMH 전지의 경우 성능향상을, LIB의 경우 개발된 전지를 탑재하여 실차시험 및 실증을, LPB의 경우 에너지 밀도가 매우 높은 새로운 전지시스템의 개발 및 EV 적용을 위해 (주)삼성전판에서는 LPB system의 개발을 한국전기연구소에서 개발된 prototypes의 평가기술을 연구할 계획이다.

5. R&D 핵심기술단계

국내외의 EV용 리튬이온전지 기술개발 동향을 셀의 용량과 에너지밀도면에서, the California Air Resource Board에서 제시하는 각각의 핵심기술단계에 소요

Table 12. The Road Map of G7 EV Battery R&D Program

Schedule (FY)	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	
The R&D Phase of EV Batteries	Phase I			Phase II			Phase III				
Na/S	→			1st Intermediate Evaluation	→			2nd Intermediate Evaluation	→		Final Evaluation
Ni/Zn	→				→				→		
NiMH	→				→				→		
LIB	→				→				→		
LPB	→				→				→		

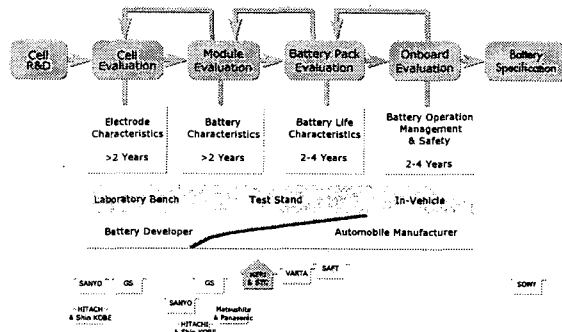


Fig. 7. EV battery evaluation : key stages, objectives, and lead roles

Table 13. Developed of Large Lithium Ion Batteries for EVs and Energy Storage

Characteristics	Sony	Stc/Keri	SAFT	Varta	GS	Manassis	Sanyo	Hitachi
Chemistry	• Anode • Cathode	H.C. LiCuO ₂	Graphite LiCoO ₂	Graphite LiNiO ₂ /Mn LiMn ₂ O ₄	Graphite LiMn ₂ O ₄ Cu,Mg,Ni	Graphite LiMn ₂ O ₄	Hybrid C. Cu,Ni	Composite A LiMn ₂ O ₄
Cell Configuration	'95-	'95-	'95-	'95-	'96-	'97-	'96-	'96-
• Design	Cylindrical	Cylindrical	Cylindrical	Prismatic	Ellipsoid	Cylindrical	Cylindrical	Prismatic
• Capacity(Ah)	100	115	44	60	110	100	70	72
• Weight(kg)	3.3	3.8	1.10	2.17	1.4	2.9	2.27	2.7
• Volume(l)	1.45	1.7	0.49	0.93	0.77	1.36	1.13	1.2
Module	'95-	'96-	'97-	'96-	'97-	'97-	'97-	'97-
• Energy(kWh)	2.9 (8 S)	3.9 (8S)	0.95 (382P)	2.4 (10S)	1.4 (453P)	3.0 (8S)	2.0 (8S)	1.4 (8S)
• Specific Energy(W/kg)	100	94	128	90	90	105	110	83
• Energy Density(W/h)	160	135	202	160	160	223	162	138
Battery Pack	'95-	'98-	'98-					
• Energy(kWh)	35	25*	25	40*	-	-	-	-
• Specific Energy(W/kg)	90	120*	94	102*	-	-	-	-
• Energy Density(W/h)	150	136	136	145*	-	-	-	-
• Specific Power(W/kg)	390	200*	270	205*	-	-	-	-

* projected performance based on 1996
* Stationary Type

되는 R&D 기간을 고려하여 도식화해서 나타내면 그림 7과 같다. 세계 최고의 기술을 보유하고 있는 SONY Energytec과 Nissan의 경우 1996년 Onboard Evaluation을 실시하고 1997년에 양산단계에 들어갔으며 1998년

현재 일본에서는 Playly Joy로 리스형태의 판매를 하고 있고 미국의 캘리포니아에서 30대의 ALTRA EV로 fleet test 중에 있으며, SAFT America, 독일의 Varta등은 fleet test를 막 실시한 상황이며, STC/KERI는 모듈

의 평가를 끝내고 prototype pack의 제조를 하여 fleet test를 실시하려고 하는 상태이다.

Hitachi & Shin Kobe Electric Co.의 경우 단전지의 prototype 을 제조하고 module의 prototype 제조를 하였다

그 외에 Stationary type으로 LIB의 개발에 참여하는 업체가 SANYO, GS Battery 등이 있다.

EV용 리튬전지에 있어서 가장 진보된 기술을 보유한 일본의 Sony와 SAFT america, VARTA 및 본연구(KERI/STC)의 전지와 모듈의 성능을 비교하면 표 14와 같다.

또한 미국의 3M과 캐나다의 Hydro-Québec's Research Institute(IREQ)에서도 전기자동차용의 리튬전지를 연구하고는 있지만 위의 표 14의 경우에 모두 리튬이온전지 타입을 연구하는 반면 3M과 IREQ에서는 리튬 금속을 부극으로하고 vanadium oxides를 정극으로하는 고체전해

질형 리튬전지이기 때문에 표기하지 않았다.

이상에서 나타낸 바와 같이 cell R&D이후에 cell evaluation, module evaluation, battery pack evaluation까지 6~8년이 소요되고, EV의 onboard evaluation에 추가로 2~4년이 소요된다는 점을 USABC에서는 전체 전지개발 연구비의 41.2%를 전지의 평가에 지원하고 있다.

지금까지 논의된 전세계의 대용량 리튬2차전지와 관련한 national project를 정리하면 다음의 표 14와 같다.

6. 맺음말

전기자동차용 리튬2차전지는 전력수급 불균형 해소를 위한 Load Conditioner 전원으로도 적용이 가능하기 때문에 심야잉여 전력을 이용한 전력부하의 평균화를 도모할 수 있으며, 또한, 잠수함, 어뢰, 무전기, 지뢰, 미사일, 레이더 등의 사용기간의 중

대 및 고신뢰성을 요구하는 방위 산업 부문 발전의 기폭제 역할이 기대된다.

Lead Acid 전지, Ni-Cd 전지 및 Gasoline 자동차는 Pb, Cd, 매연배출로 인하여 심각한 공해 문제를 유발시키고 있으나 리튬 2차전지는 무공해 전지이므로 전지나 자동차의 배기가스로 인한 환경오염을 방지할 수 있으며 골프카, 전동지게차, 대용량 UPS, 항공기 등의 내부 전원으로도 활용이 가능하다.

현재 일본에서는 New Sunshine Program의 LIBES Project로 10년의 연구기간 동안 고에너지밀도형의 전기자동차용과 장수명형의 전력저장용으로 구분하여 리튬2차전지를 개발하고 있으며, 미국에서는 USABC에서 전기자동차용 리튬2차전지 개발을 수행하고 있으며, 유럽에서는 독일, 프랑스, 덴마크에서 Joule program하에 전기자동차용 리튬2차전지 개발연구를 수행하는 등 선진 각국에서 전기자동차

Table 14. R&D Programs for Large Scale Lithium Rechargeable Batteries

Country	U.S.A.	EC		Japan		Korea	
Purpose	Electric Vehicles	Electric Vehicles		Home, EVs		Electric Vehicles	
Project	PNGV (Partnership for a New Generation of Vehicles)	JOULE (Joint Opportunities for Unconventional or Long-Term Energy Supply)		LIBES (Lithium Battery Energy Storage System)		G7 (Global Seven)	
Prime Organization	USABC (United State Advanced Battery Consortium)	CEC (Commission of the European Communities)		MITI / NEDO		MITI / MOST	
Prior Participant	3M, Hydro Quebec, ANL, Delco Remy, Valence	SAFT(fr), Harwell(uk), VARTA(de), Innovision(dk)		LIBES Association		KERI, STC, KAIST, HMC, Kyungwon Samsung Display	
Target	Cell System	$Li_xC/SPE/LiMnO_x$	$Li_xC/OE/Li_{1-x}Ni_yO_2$	$Li_xC/SPE/LiMnO_x$	$Li_xC/OE/Li_{1-x}M_yO_2$	$Li_xC/SPE/Li_{1-x}M_yO_2$	
	Pack Capacity	40kWh	20kWh	45kWh	20kWh	30kWh	25kWh
	Cell Capacity	300Wh	360Wh	100Wh	>250Wh	>360Wh	>360Wh
	Energy Density	200Wh/kg 300Wh/l	140Wh/kg 240Wh/l	150Wh/kg	120Wh/kg 240Wh/l	180Wh/kg 360Wh/l	120 & 150Wh/kg
	Energy Efficiency	75%	95%	95%	>90%	>85%	-
	Power Density	400W/kg	250W/kg	100W/kg	-	400W/kg	200->350W/kg
	Cycle Life	1000cycles(10years)	>1200cycle	>500cycle	3500cycle	1000cycle	1000cycles
Cost	<\$100/kWh	~1000F/kWh	150FCU	-	-	-	
Pre-production Year	21th century	2000	2000	2001	2001	2002	

용뿐만 아니라 전력저장용 및 우주항공 산업 분야에 활용하기 위한 연구를 수행 중에 있다.

또한 국내의 표준화 또는 규격제정 관련기관(IEC, ISO, SAE, JEVA, IEA, CEN, CENELEC)들은 최근 전기자동차의 표준화 작업을 진행중이며, 이 중 IEC의 Technical Committee 69(TC69)의 4개 소위원회 중 WG3가 전기자동차용 batteries를 담당하고 있으며, ISO의 TC22, WG1에서 차량의 안전 및 정의를, 유럽의 CENELEC의 TC69X, WG1, WG2는 충전설비를 WG3는 안전에 관한 내용을 검토중이다.

미국의 SAE에서는 USABC의 권고안에 따라 EV용 전지와 관련한 규격을 제정중에 있으며 그 중 J1797은 module의 packaging, J1798은 performance rating, J2288은 life cycle test에 관한 내용이다.

일본에서는 JEVA에서 JEVS D001(EV용 연축전지의 외형치수), JEVS D701(EV용 연축전지의 용량시험방법), JEVS D702(EV용 연축전지의 에너지 밀도시험방법), JEVS D703(EV용 연축전지의 출력밀도 시험방법) 및 전동기, 차량의 시험방법의 안을 제시하고 있다.

일본의 경우 리튬이온전지를 탑재한 시제품 EV를 개발하고 1997년에 리스형태로 시판중에 있다. 그러나, 리튬이온전지의 급속한 기술진전 및 상용화에도 불구하고, 전지의 신뢰성 평가의 적도인 abuse 시험법¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾은 아직까지 국가별 표준으로 제시되지 않고 있으며, 제조업체나 관련 협회에 의한 자체 규격이 제정되어 사용되고 있는 수준이다. 세계적으로, EV용 리튬2차전지의 표준규격은 아직까지 제정되어 있지 못하나, 기술 진척상황에 따라 이에 대한 연구가 필요하며, 한국전기연구소에서는

고성능 EV용 리튬2차전지의 평가 연구를 수행하고 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 한국의 대용량 리튬2차전지 기술은 세계적 수준과 그다지 차이를 보이고 있지는 않다고 판단된다.

참고문헌

1. S. Yoda, "The Advent of Battery-Based Societies and the Global Environment in the 21st Century", July 1998, IMLB-9, Edinburgh UK, 1-10
2. M. Teramoto, J. Kasai, "High Efficiency Energy Use System Utilizing EV Lithium-Ion Technology", EVS-15, 1998
3. the Winter 1997 USABC newsletter
4. R. A. Sutula, K. L. Heitner, S. A. Rogers, T. Q. Duong, P. G. Patil, S. R. Venkateswaran, "Electric and Hybrid Vehicle Energy Storage R&D Programs of the U. S. Department of Energy", EVS-15, 1-11, 1998
5. C. Letourneau, D. Geoffroy, P. St-Germain, "Progress in Lithium Polymer Battery System for Electric Vehicles", EVS-15, 1-10, 1998
6. N. Nakajima, T. Iwahori, H. Awata, I. Mitsubishi, H. Momose, Y. Ozaki, S. Taniguchi and S. Shiraga, "Progress of the Research and Development of Lithium Secondary Batteries for Electric Vehicle Application in the Japanese National Project", EVS-15, 1-7, 1998
7. M. Conte, "EV Fleet Testing Procedures and Equipment in Europe",

- EVS-13, Vol.2, 465-472, 1996
8. J. A. Videau, C. Ades, D. Blay, B. Bertrand, R. Buisset, "VEDELIC : A New Concept of Research / Industry Cooperation on Electric Vehicles in France", EVS-13, Vol.1, 661-664, 1996
9. J. A. Videau, C. Ades, D. Blay, B. Bertrand, R. Buisset, "VEDELIC : Research / Industry Cooperation Programme on EV in France(Part II). Technical Achievements after Two Years", EVS-14, 1-10, 1997
10. D. Marginedes, F. Huglo, S. Lascaud, "Achievement of the French Program on Lithium Polymer Battery", EVS-15, 1-5, 1998
11. T. Brohm, M. Maul, E. Meissner, "Advanced Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles", EVS-15, 1-8, 1998
12. 俊勝時正, 리튬電池의 안전성について, JMA Techno-Frontier Week 97, Japan, 4-1-1, 1997.
13. 葛島眞一, Li電池の安全性評價, JMA Techno-Frontier Week 97, Japan, 4-2-1, 1997.
14. C. James Dahn, Lithium, Battery Test Facility Preliminary Hazards Analysis, Minutes of the Twenty-Third Explosives Safety Seminar, Vol. I, 1085, Atlanta, U.S.A., Aug., 9-11, 1988.
15. Samuel C. Levy and Per Bro, "Battery Hazards and Accident Prevention", Plenum Press, New York, 1994.

< 김정식 위원 >