

일본의 전기부분에서의 에너지절약을 위한 철도기술개발 동향



| 정병현 |
우송대학교
운송물류학과 교수

2007년 8월 미국에서의 서브프라임모기지 에 의한 부동산 폭락으로 인해 시작된 경제위기는 단순히 미국내에서 끝난것이 아니라 유럽을 비롯한 우리나라를 포함한 아시아 국가들에게도 경제적 위기를 초래하기 있다. 물론 일본에서도 다른 나라들과 마찬가지로 이러한 경제적 위기를 겪고 있다. 이러한 경제적 위기속에서 에너지 소비량을 줄이기 위한 다양한 노력들이 추진되고 있는데, 일본철도종합기술연구소(이하, RTRI라 함)에서는 에너지 절약을 위하여 연료전지·배터리 하이브리드 시험차, 모터의 효율성 향상, 전력공급설비의 고도화, 재래선 차량의 공기저항저감 방안, 초전도를 이용한 에너지 저장, 인터모달 화물 수송 등 다양한 분야에서 기술개발이 이루어 지고 있다. 본 고에서는 철도와 관련하여 일본 RTRI에서 수행되고 있는 에너지 절약형 기술개발중 전기부분과 관련한 동향에 대하여 살펴보고자 한다.

1. 연료전지·배터리 하이브리드 시험 전동차

RTRI에서는 비전철화구간을 주행하는 디젤차량의 대체차량으로 그리고 장래에 전기차량의 대체로서 완전히 새로운 구동원인 연료전지를 적용한 철도차량의 개발을 수행하고 있다. 연료전지는 수소 연료를 이용한 것으로 전기에너지와 물을 생성하는 매우 깨끗한 전력원으로서 개발이 주목되고 있다. 철도에 대한 적용은 개발초기에는 1kW급 연료전지

를 사용한 기초적 특성의 취득과 승용모형차량의 구동원으로서 모터구동에 대한 응답성 등의 확인이 행하여 졌다. 계속해서 2001년부터 연구테마로 “연료전지의 철도차량 구동용 전원으로서의 적용에 관한 기초연구”가 시행되었으며, 30kW급 연료전지에 의한 실험차의 구동시험을 실시하였다. 수소공급 제어, 수소리사이클기능의 필요성, 생수수 처리 등의 과제가 확인되었으나 이러한 과제의 해결과 대출력화한 연료전지를 도입하여 실제 철도차량을 주행시키는 단계로 이행되었다. 2006년 4월에는 100kW급 연료전지를 탑재한 “쿠아R291”의 주행시험을 시작하였으며, 2008년 12월에는 시험차량 “쿠모아R290”에 배터리와 충방전장치를 탑재한 2량으로 “연료전지·배터리 하이브리드 시험전동차”의 구성이 완성되었다. 지금까지의 100kW급 연료전지만에 의한 주행은 철도차량 1량만 겨우 주행시킬수 있었으며, 또한 공조 등의 부가전원용 전력은 가선으로부터 집전할 필요가 있었다. 이번의 배터리 하이브리드화에 의한 출력증대와 함께 2량편성으로 주행 및 부가전력도 연료전지와 배터리로 충당하는 것이 가능하게 되었다. 또한, 브레이크 구동시에 발생하는 회생전력을 저장하는 것이 가능하게 되었으며 높은 효율성과 연비향상을 기대할 수 있다. 연료전지만을 주행용 전원으로서하는 주행시험결과와 연료전지·배터리 하이브리로 구성한 경우와의 예상되는 효과는 다음<표2>와 같다.



표 1. 연료전지·배터리 하이브리드 시험 전동차의 주요사양

최고설계속도	100km/h
전원방식	연료전지·배터리 하이브리드 : 직류 155V
연료전지	고체고분자형 120kW
연료전지 Chopper장치	승압직류전력변환장치 800 → 1500V 600kVA
하이브리드용 배터리 장치	리튬이온배터리 36kWh, 360kW
배터리 충방전장치	생방향 직류전력변환 장치 600V-1500V 360kW
주전동기	3상유도전동기 95kW × 2대
수소탱크	TYPE III · 35MPa · 약 720 L

표 2. 하이브리드화에 의한 예상 효과

사양	하이브리드화 전	하이브리드화 후
차량수	1량	2량
편성출력	최대 120 kW	최대 480 kW
회생전력 유효이용	불가	최대 360 kW까지 가능
에너지 효율	약 50%	약 65 %
보조 전력	가선으로부터 받음	연료전지·배터리 이용
연비	1량 편성시 7km/kg	2량 편성시 5km/kg

* 에너지 효율은 (연료전지 출력 에너지 + 회생에너지) / 수소에너지로 함

이번에 연구하고 있는 연료전지와 배터리의 하이브리드 화에서 새롭게 제작된 장치는 배터리 장치와 배터리 충방전 장치이다. 배터리 장치는 최근 들어 개발이 진전되어 성능 향상이 현저한 리튬이온 배터리를 채택하였다. 이 리튬이온 배터리는 용량에 비해 가볍고 출력밀도가 높으며, 내부 저항이 적기 때문에 충방전효율이 높은 것이 특징이다. 그러나 용량에 대하여 비용이 높은것이 문제점이지만 향후 수요의 증가와 함께 대량생산에 의해 비용이 낮아질 것으로 기대하고 있다. 배터리 탑재량은 최대회생전력을 흡수 가

능하도록 360kW, 36kWh의 사양으로 하고 있다. 배터리 충방전장치는 배터리의 전압을 DC1500V로 변환하여 인버터 장치에 공급하는 장치로서 배터리에서 인버터 장치·SIV 장치로 전력을 공급하는 기능과 연료전지 chopper와 회생전력의 DC1500V에서 배터리를 충전하는 기능을 가진다. 또한 배터리와의 통신을 통하여 잔존 에너지 정보 등을 참고로 하여 배터리 충전제어를 수행하는 기능도 가진다. 이번 개발에서는 지상설치 실적이 있는 것을 기본설계로 하고 차상탑재를 위해 일부 변경을 수행하였다.

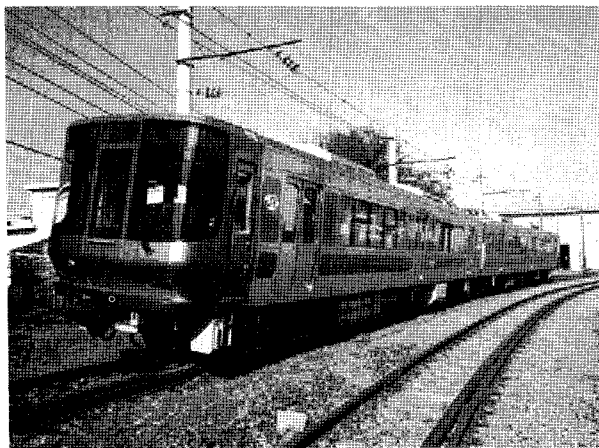


그림 1. R291계 연료전지·배터리 하이브리드 시험 전동차

2. 배터리 탑재형 전동차에 의한 에너지 절약

철도는 다른 교통수단과 비교해 볼 때 에너지 소비량이 매우 적은 교통수단으로서 단위거리를 1인 수송하는데 필요한 에너지량(에너지 소비원단위)은 187 kJ/인·km로서 승용차 2,289 kJ/인·km의 약 1/10이하이다.¹⁾

에너지 소비가 작은 이유중에 하나는 주행저항이 작아 에너지 손실이 작기 때문이며, 두 번째 이유는 “제동시의 전력 회생” 기술이다. 이것은 약 10년전에 하이브리드 자동차의 등장에 의해 사회 전반에 걸쳐 인지도가 높아졌지만 철도에서는 자동차보다 앞서 전철화구간에서는 약 30년 이전부터 폭넓게 실용화되고 있었다. 철도에서 전력회생이 빠르게 실용화된 요인은 전기차가 가선을 매개로 다른 전기차와 전

표 3. 축전매체의 특징과 철도차량에의 차량탑재 응용상황

방식	플라이휠	2차전지	전기2중충 용량
특징	- 전동기 기술 사용 가능	- 가동부 없음	- 가동부 없음
	- 고효전화로 고에너지화 가능	- 에너지 밀도 큼	- 파워 밀도가 큼
	- 전압과 전류를 유연하게 설계가능	- 전압변동폭 작음	- 제로전압까지 사용가
	- 배어링을 이하는 수명이 길	- 에너지 보존특성이 높음	- 2차전지보다도 수명이 길
개발 과제	- 장기간 사용가능한 배어링	- 파워 밀도 증대	- 에너지 밀도 증대
	- 손실(風損) 저감	- 수명증대	- 전압변동 대책
	- 코리올리힘 제어 지지	- 셀간 밸런스 제어	- 셀간 밸런스 제어
내구성	- 약 2만~5만h	- 10만~30만 사이클 (방전밀도 = 10%) - 약 6년	- 10~100만 사이클 → 사용법, 환경에 따라 5~15년
	개발 동향	[독일철도] - 디젤하이브리드 : LIREX 본선 2000년~	[JR동일본] - 리튬이온배터리 디젤하이브리드: 본선 2003년 4월~ 디젤HB영업 : 07년8월~(키하 E200) 연료전지하이브리드 : 본선 06년~
		[RTR] 리튬이온배터리 무가선트램:구내 03년 8월~(모 3301), 가선하이브리드화: 구내 2005년 2월~(모3301) 무가선(하이브리드)LRV : 본선 07년 11월~08년 3월(LH02 "Hi-tram") 연료전지 하이브리드: 구내08년~(R291)	[JR동해] 영업 08년 6월~(주오선 313계의 1편성)
[유럽 ULEV-TAP (Ultra Low Emission Vehicle Transport using Advanced Propulsion:97~01년, II:02~05년)] - 디젤하이브리드 : 본선 2005년~		[지방철도] 리튬이온 배터리 무가선트램: 본선 04년 12월~(모3303) 무가선 전차 : 본선 06년~(600형 etc) [가와사키중공업] 니켈수소 배터리 무가선LRV: 본선 07년 12월~(SWIMO-X) [프랑스 리즈교통국] 니켈수소배터리무가선LRV:영업 07년 11월~(LRV)	[유럽ULEV-TAP]가선하이브리드 LRV:본선



력을 융통할 수 있었기 때문이다. 전기에너지는 본질적으로 저장하기가 힘들고 발생과 사용이 동시에 이루어지는 성질을 가지고 있다. 자차의 주행용 에너지를 자기 탑재할 필요가 없기 때문에 경량화가 가능하고, 가선으로부터 필요할 때에 소요전력을 받을 수 있는 것이 전기차의 최대 강점인 것이다. 그러나 회생제동에 의한 전기에너지 회수에도 회생실효 등의 과제가 있으며, 또한 현재의 차량과 기전계는 주행하는 열차의 운동에너지 전부를 흡수·재이용하도록 설계되어 있지는 않다. 최근의 고성능 배터리 등의 에너지 축적매체의 기술진전이 눈부시게 발전하여 자동차업계에서는 EV(전기자동차) 개발 붐도 일어나고 있다. 이러한 배경으로 하여 철도에서도 회생에너지의 유효 이용책으로서 가선밀을 달리는 전차에도 축전장치를 탑재하는 기술개발이 수행되고 있다. 이러한 예로서 축전장치의 철도차량 탑재 사례를 살펴보고자 한다.

<표 3>은 축전매체의 특징과 함께 각국의 철도차량 개발 현황을 비교하여 나타낸 것이다. 주에너지원으로 가선, 엔진, 연료전지를, 부에너지원으로 축전장치를 사용하고 있으며, 에너지를 하이브리드화한 차량들이다. 또한, 여기에서 정의하는 하이브리드는 예를 들어 가감속에 필요한 소



그림 2. 가선 배터리 하이브리드 노면전차



그림 3. 가선배터리하이브리드 LRV "Hi-tram"

요전력을 100%로 할 때, 어느 순간에서 주 에너지원로부터 60%, 부에너지원으로부터 40% 제공 또는 회생하는 등 동시협조동작이 가능한 것을 칭한다. 엔진과 배터리를 탑재하더라도 교환 사용하지 않는 것은 하이브리드라고 칭하지 않고 듀얼모드라고 칭한다.

<그림 2>는 2003년 8월에 리튬이온 이차전지를 탑재한 무가선·배터리 트램으로 RTRI에서 공개한 시험전차로 2005년 2월에는 가선과 배터리의 하이브리드 전차로 재공개되었다. 가선구간에서는 회생실효방지 기능에 의해 회생 에너지량 증대로 에너지 절약형 주행을 수행하고 무가선구간에서는 배터리 주행에 의해 경관중시지구에서의 주행이 가능하다. <그림 3>은 이전 기술을 발전시켜 직류 1500V와 직류 600V의 복전압가선에도 응용가능하도록 한 영업선 주행이 가능한 가선·배터리 하이브리드 LRV(Light Rail Vehicle)로서 2007년 10월에 RTRI에서 공개된 것이다.

그리고 다른 여러 국가에서는 훨씬 이전부터 플라이휠 축전장치를 중심으로 하이브리드화 개발이 발전되어왔다. 2005년에는 캐나다에서 디젤 엔진과 연축전지의 하이브리드 기관차가 영업운영되었다. 또한 프랑스의 도시 리즈에서는 2007년 11월에 LRT노선이 개업하였는데, 가선과 니켈수소축전지의 듀얼모드 LRV에 의해 운행이 시작되었다. 2009년에는 독일 뮌헨에서 같은 사양의 부분 무가선 LRT가 운행될 예정이다. 이러한 기술들에 의해 에너지 절약뿐만 아니라 새로운 운행형태와 유지보수형태가 폭넓게 넓혀지고 있음을 알 수 있다.

이밖에도 전기를 이용한 에너지 절약형 연구모터의 효율을 향상시키기 위해 고정부의 손실감소 방안, 회전부의

손실감소 방안, 공기의 손실감소 방안 등에 대한 연구가 수행되고 있으며, 실제로 전기의 소비에너지를 계산하는 방법의 개발 등을 통하여 에너지 절약형 기기의 도입에 대한 연구가 진행되고 있다. 그밖에도 전력공급설비의 고도화에 의한 에너지 절약기술로 직류전기철도에서는 회생브레이크 사용시의 전력 유효활성에 관한 기술, 교류전기철도에

서는 정지형 무효전력장치 및 루프·델타결선 변압기에 의한 에너지 절약기술에 대한 연구도 진행되고 있다. S

◆ 참고 문헌

Railway Research Review, 2009년 4월호