

# 그린 철도운행을 위한 에너지 재활용 효율 분석 Analysis of the energy recycling efficiency for railway operation

김 동 회\* · 이 철 규\*

## Abstract

Recently, by the whole world paradigm shift to “Low Carbon Green Growth”, it is required to renovate National Transportation and Logistics System. Transportation accounts for 21% of the total energy consumption and 20% of the total CO<sub>2</sub> emission, and also places its main reliance on fossil fuels. From green point of view, electric railway system is superior to the other transportation alternatives, but also required to develop the innovative technologies for high efficiency and low energy consumption.

In this paper, the concept of railway green operation system by regenerative synchronized driving is presented, including the numerical example and the estimated effect.

## 1. 서 론

최근 들어 에너지 및 환경 위기에 따라 전 세계적으로 저탄소 녹색성장 시스템으로의 전환에 대한 중요성이 지속적으로 강조되고 있고, 교통물류 분야에서도 탄소배출량 저감 목표량이 설정되는 등 국가적으로 혁신이 요구되고 있다. 국내의 경우 교통물류 분야는 국가 전체 에너지소비의 21%, CO<sub>2</sub> 배출량의 20%를 차지하고 있으며, 에너지 대부분을 화석연료에 의존해오면서 에너지/기후변화에 적절히 대비해오지 못한 실정이다. 최근 이를 위한 종합대책을 담은 지속가능 교통물류발전법이 시행되어 녹색교통 활성화 방안이 추진되고 있다.

---

\* 한국철도기술연구원, 용복합연구단

녹색교통 관점에서 전철화 기반의 철도시스템은 화석연료 기반인 타 교통수단에 비해 단편적으로는 우월하다고 할 수 있으나 접근성, 연계성 등의 전통적 단점과 국민의 이동성 보장을 위한 서비스제공이라는 특성을 가지고 있다. 따라서 향후 지속가능 교통시스템으로서 그 역할과 기능을 확대해 나가야하는 필연성을 가지고 있고 이를 위해서는 보다 획기적인 고효율 저에너지 체계로의 기술개발이 필요하다. 전세계적으로 철도시스템의 고효율화를 위해 최근 들어 많은 하드웨어적 기술개발이 수행되거나 성과를 보이고 있으나, 운영계획 및 운행단계에서의 고효율화 관련 연구는 많지 않은 실정이다.

본 논문에서는 철도운영 계획 및 운행단계에서 전철화 기반 철도시스템의 특징인 회생에너지를 최적으로 활용함으로써 소요에너지를 최소화할 수 있는 철도녹색운행시스템의 개념과 효과를 수치사례와 함께 분석·제시하고자 한다.

## 2. 철도녹색운행 기술동향

1987년 UN환경개발위원회 보고서에서는 지속가능한 발전의 개념을 “미래세대의 역량으로 그들의 필요를 충족시키는 것을 저해하지 않으면서 현재의 필요를 충족시키는 개발”로 정의하였으며, 지속가능한 교통물류체계는 “환경의 질을 저해함이 없이 경제 성장과 사회발전을 이루면서 사람, 장소, 물건, 서비스에 대한 접근성과 이동성을 증진시켜 국가경쟁력을 강화할 수 있는 교통체계”로 해석되고 있다. UN에서는 2010년 까지 SOx65%, NOx43%, VOCs40%, 암모니아17% 감축 협약을 함에 따라 온실가스 배출감축 책임량을 규정하여 할당을 하였으며, 세계 각국은 전 산업분야에 걸쳐 이의 이행을 위한 제도와 기술개발을 추진 혹은 계획을 수립하고 있다.

핀란드의 Leena(2006)(Leena Vihermaa, Michael Lettenmeier, Arto Saari(2006), “Natural resource consumption in rail transport:A note analysing two Finnish railway lines”, Transportation Research Part D 11.) 등은 철도수송의 에코효율을 MIPS(Material Input Per Service-unit) 지표를 활용하여 계산하였다. 연구결과 무생물학적 자원 소모에서는 철도 인프라가 가장 주요했고, 철도차량은 물과 공기 소모에서 높은 결과를 도출하였다. JR-East(2008)(East Japan Railway Company(2008), “Tokyo and Osaka Stations on Eco-Friendly Drive”, JR Railway Newsletter, No.18)는 2010년 가동을 목표로 도쿄역 도카이도신간선 플랫폼의 지붕에 태양광 패널을 설치했다. 생성된 에너지는 역사내 조명과 공조시스템에 사용될 예정이다. 에너지 생성량은 390KW로 추정되며, 연간 이산화탄소 배출을 25,700톤(0.3%) 줄일 것으로 기대된다. JR-East는 장기적으로 2017년에 32%, 2030년에 50%의 탄소배출을 감축할 계획이다.

스웨덴의 Green Train 프로그램(KTH Railway Group(2009), “Green Train energy consumption”, Swedish research and development program ‘the Green Train’)은 2005년 부터 2011년까지의 연구개발 프로젝트로서, 기존 열차 대비 환경성/에너지효율 뿐만 아니라 수송시간/속도를 높이는 목적을 가지고 있다. 추정결과로서 대부분의 경우 승객/키로 관점에서 30-40%의 에너지소모를 줄일 수 있는 결과를 보여주고 있다.

분석을 위해 ERTSim 이라는 시뮬레이션 프로그램을 개발하였고, 추진에너지/부수장치/안전장치/서비스편의시설/운송스케줄 외 시간/에너지손실/회생에너지사용을 전제로 분석하였다.

국내에서도 08년 저탄소녹색성장을 국정목표로 발표하였으며, 교통물류 분야에서도 이의 실현을 위해 많은 정책과제와 기술개발 아이템들이 논의되고 있다. 특히 철도분야에서도 녹색성장 시대의 철도수송분담율 증대를 위해 정책과제들과 기술개발이 진행 혹은 계획되고 있다. 국내 대표적 철도운영기관인 철도공사는 'Green Network 녹색경영 비전'을 선포하고, 이를 위한 세부추진계획을 수립하였다. 철도공사 보도자료(KORAIL 보도자료(2008), "친환경 철도로 저탄소, 녹색성장 견인", <http://www.korail.com>)에서 철도의 수송분담율과 타 교통수단 대비 에너지소비량 및 CO2 배출량을 분석하고 분담율 향상 시나리오별 에너지 및 CO2 절감효과를 제시하였다. 현재의 여객과 화물의 철도 수송 분담율을 각각 선진국 수준인 35%로 높일 경우, 에너지 비용과 이산화탄소배출 비용을 연간 약 14조 원 가량 절감되는 것으로 추정하였다. 이한민 등(2007)(이한민, 김길동, 이장무(2007), "도시철도시스템용 에너지저장시스템 용량설계에 관한 연구", 2007년 한국신재생에너지학회 추계학술대회 논문집)의 연구에서는 도시철도 변전소에서 회생에너지를 측정된 후 이에 적합한 에너지저장장치의 용량을 계산하여 에너지저장장치를 설계하는 내용을 다루고 있다. 인접한 3개 변전소에서 회생전력량 및 회생전류품질을 측정하였고, 차량소비전력의 20% 내외 회생전력이 발생되며 회생시간보다 소비시간이 1.5-2배 가량 길게 나타남을 확인하였다. 이를 기반으로 슈퍼캐패시터의 저장용량을 설계하였다. 또 다른 연구(이한민, 김길동, 이장무(2007), "도시철도시스템용 에너지저장시스템 용량설계에 관한 연구", 2007년 한국신재생에너지학회 추계학술대회 논문집)에서는 에너지저장장치를 개발하여 어디에 설치하는 것이 효율적인가를 연구하였다. 가능한 설치위치는 차상, 변전소, 역간구간이 있으며, 최적의 저장/활용방안이 유럽, 일본을 중심으로 활발하게 연구중이나 해외의 경우 경전철시스템을 대상으로 한 연구들이 대부분임을 언급하였다. 조홍식 등(2008)(조홍식, 류상환, 황현철, 이안호, 김길동, 이한민(2008), "경량전철 시험선에서의 에너지저장시스템 연구", 2008년 대한전기학회 추계학술대회 논문집)은 경전철시험선의 안정적 전력공급을 위하여 에너지저장시스템을 도입하여 회생에너지저장시스템을 구축하고 활용측면에서의 시험분석 및 결과를 제시하였다. 통상 전철시스템에서는 차량가속을 위한 투입에너지의 45-47% 정도 회생에너지가 발생되며, 약 20%정도는 타 전동차에서 활용하고 20-27% 정도는 손실되고 있다. 시험결과 회생저장장치를 가동하였을 경우 만차기준 20.64%, 공차기준 13.66%의 에너지 절감효과를 볼 수 있었다.

현재 전국 도시철도의 연간 전력소요는 대략 1,000억원, 특히 서울 측정 단일노선의 경우 280억원이 소요되는 것으로 추정하고 있다. 임의의 1구간 운행시 전력소요를 100%으로 보았을 때 상대적으로 40 내지 45%의 회생전력이 발생되며, 아직은 별도의 체계적 지원시스템이 있지 않기 때문에 발생차량에서 자체활용은 하지 못하고 인근 열차 중 우연히 소요가 맞는 열차가 있다면 재활용은 되고 있는 실정이다. 이러한 재활용의 경우 기존 연구문헌들에서 제시한 추정사례를 보면 15 내지 20%에 해당된다고

한다. 통상적으로 회생전력 발생 위치에서 멀어질수록 손실이 발생되며, 3km 가 넘으면 의미가 없다. 인근에서 소모되지 않는 발생전력은 저항기로 태우고 저항기 용량을 넘는 것은 발생자체를 중단하는 회생시료를 하고 있는 실정이다.

최근들어 이러한 회생전력을 유효하게 활용함으로써 전력소요 피크를 낮추고 나아가 총 전력사용량을 줄이기 위한 기술개발이 진행 중이다. 대표적인 것이 회생전력 저장장치이다. 회생전력 저장장치는 크게 전력망 단의 정지용(stationary)과 차상 탑재용(on-board)으로 구분된다. 이러한 저장장치를 도입함으로써 전력소모 효율화 뿐만 아니라 가선전압의 안정화를 통한 전장품 유지보수비 절감과 같은 부수적 효과도 얻을 있게 된다. 전자의 경우 주로 단위전력망 변전소의 정지용으로서, 공급전력망 단에 저장장치를 두어 저장하고 있다가 주로 피크 소요 상승시 억제하는 용도로 활용된다. 이는 야간 전력을 저장해두었다가 피크시 활용되는 개념으로도 이용된다. 후자의 경우 차상에 설치되며 차량편성 단위의 피크 전력소요 상승을 억제하는 용도로 활용된다. 그러나 아직까지는 정지용과 탑재용을 혼용한 사례는 없으며, 혼용 효과는 단일 유형만 사용한 경우보다 더욱 효과가 클 것이고, 특히 피크상승 억제 뿐만 아니라 총 소모 전력량을 저감시킬수 있을 것으로 기대할 수 있다. 그러나 혼용시스템의 경우 실제 노선 특성과 운영조건, 그리고 다수 열차간의 실시간 운행상황에 따라 그 효과가 달라질 것이다. 다음 장에서 운행단계를 고려하여 회생에너지 활용을 극대화할 수 있는 방안을 제시한다.

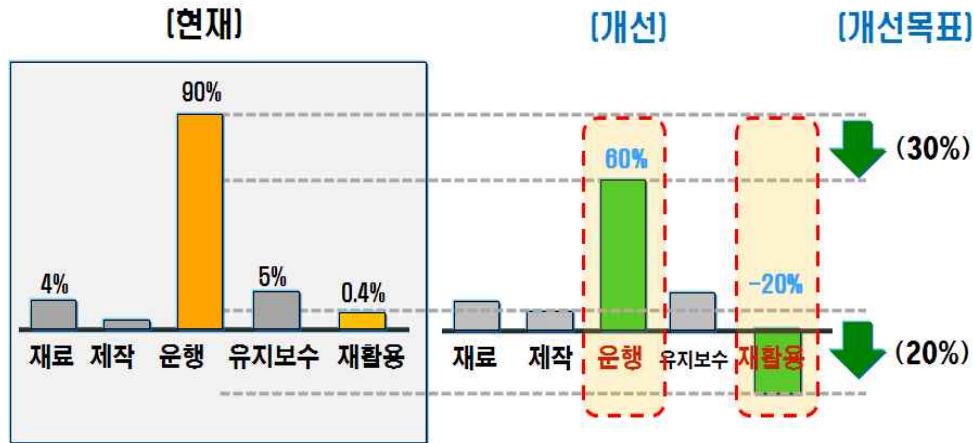
### 3. 철도시스템(차량) 전과정에서의 에너지 개선 분석

본 절에서는 철도시스템(차량)의 재료에서 제작, 운행, 유지보수 그리고 폐기까지의 전과정 단계별로 에너지 소모와 지구온난화 파급효과 분석결과를 제시한다.

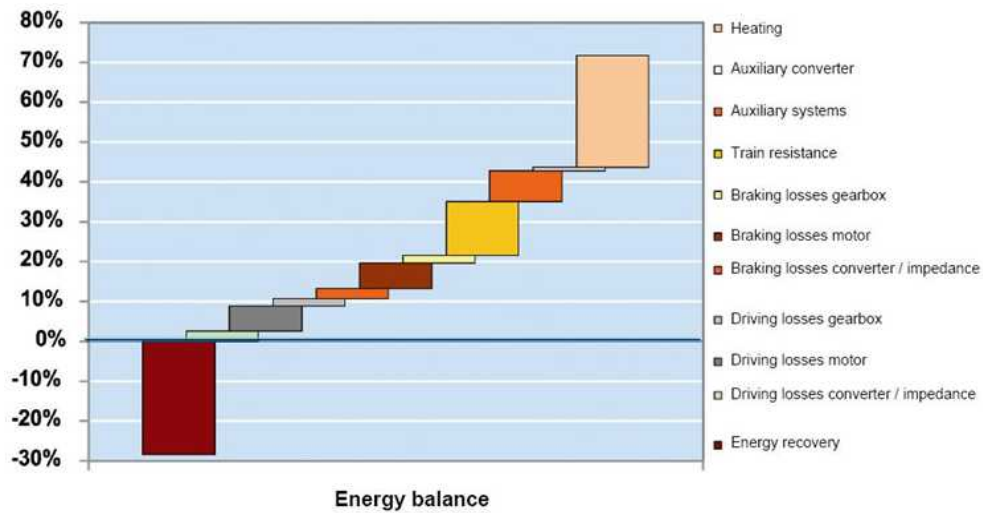
철도는 현재 그 운행단계만을 고려하여 교통수단으로서의 친환경성을 인정받고 있으나 패러다임의 급격한 변화를 가져오고 있는 환경규제 및 환경적 가이드라인하에서 교통부문에서 철도의 환경성은 위협을 받을 것으로 예상된다. 심각해진 지구온난화 문제와 석유자원 고갈로 기존 사용단계의 친환경성만 고려해 온 환경관리 개념에서 더욱 확대하여 제품의 재료에 까지 친환경성을 확대한 전과정적인 관리를 요구하고 있다. 이러한 개념에서 전과정평가의 활용범위가 커지고 있으며 유럽 등 철도선진국에서는 환경정책 및 환경기술개발에 있어 전과정평가기법 적용을 위한 기반구축이 활발히 진행되고 있으며, 그 결과를 정책에 반영하고자 하는 활동이 두드러지고 있다. UIC 및 UNIFE의 기술 및 정책보고서에서 유럽 철도산업의 온실가스 감축목표를 56 %로 설정하고 있음을 알 수 있으며 이를 달성하기 위한 기술개발 항목 도출을 전과정평가기법 적용을 통하여 개선기술별로 온실가스 감축가능량을 체계적으로 산출하여 파급효과와 우선순위에 의하여 추진하고 있음을 확인할 수 있다.

철도차량의 전과정을 재료, 제작, 운행, 유지보수, 폐기/재활용 단계로 나누어 보았을 때, 각 단계별 현재 에너지 소모량을 비율로 살펴보면 [그림 1]과 같다. 차량운행 단계의 에너지 소모량이 약 90% 정도로 대부분 에너지 소모를 하고 있으며, 회생에너지를

활용한 에코드라이빙 제어기술과 철도차량 재료 재활용기술 적용을 통해 운행단계에서 약 30%, 폐기/재활용단계에서 약 20%의 에너지소모 절감이 가능한 것으로 분석되었다.



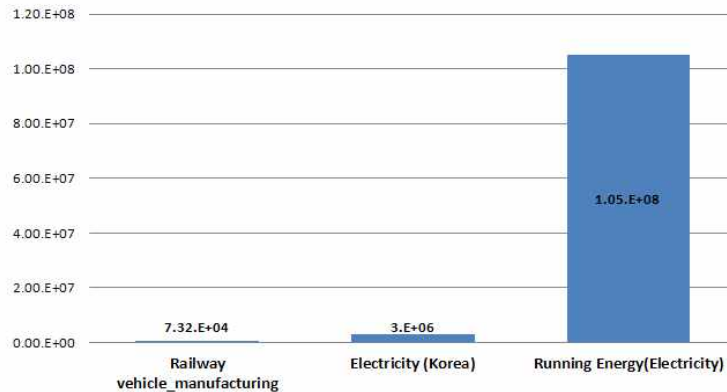
[그림 1] 철도시스템(차량) 전과정 단계별 에너지 소모 및 절감



[그림 2] 운행단계 에너지기여율 분석결과(Siemens, 2006)

[그림 2]는 철도차량 운행에너지를 구성품별로 분석한 것으로 국내에서는 분석한 사례가 없는 연구결과이다. 철도차량 생애주기 운행전력 중 가장 높은 에너지를 사용하는 것으로 조사된 항목은 흥미롭게도 냉난방기로 소비된 전력이며 그 양은 회생에너지와 거의 동일한 양으로 분석되었다. 또한, [그림 3]에서와 같이 운행전력의 기여도가 전체 지구온난화 기여도의 97.02%를 차지하는 것으로 나타났다. 이 결과는 다소 높은 수치를 나타내며 문헌을 바탕으로 운행전력정보를 사용하였기 때문에 실제 운행전력

과는 차이가 있겠지만, 전과정 단계별 기여도의 개략적인 동향으로서는 사용 될 수 있을 것이다. 따라서 차량의 제조공정보다 운행 시 발생하는 지구온난화가스로 인한 지구온난화 기여도가 크므로 제조공정의 개선뿐만 아니라 운행에너지의 개선 또한 중요하다 하는 것을 알 수 있다.



[그림 3] 전과정 단계별 지구온난화(GW) 기여도 (unit: kg CO<sub>2</sub>-eq)

#### 4. 동기화운전을 통한 철도녹색운행 방안

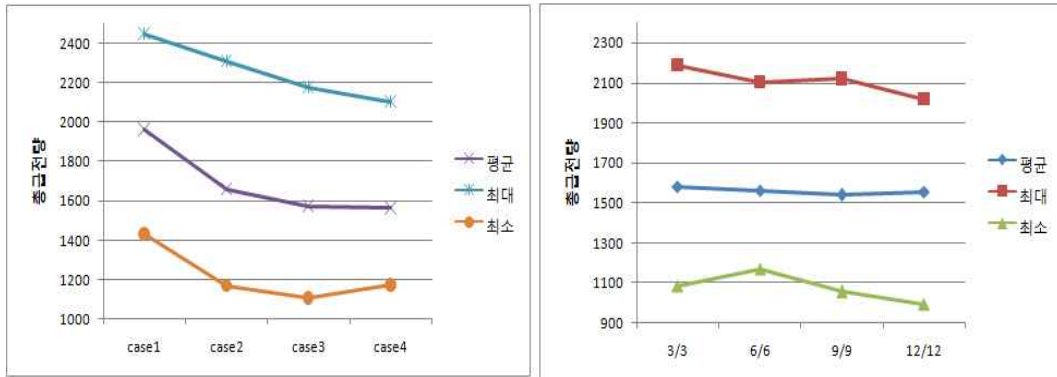
본 절에서는 앞에서 강조된 바와 같이 철도차량 전과정 단계 중에서 절대적 에너지 소모량이 가장 크고 에너지 절감효과 또한 가장 큰 철도차량 운행단계에서의 에너지 절감을 위해 회생에너지 저장장치를 활용할 경우 실제 운행환경에서의 에너지절감 효과를 분석·제시한다.

여기에서는 기술개발 중인 정치용 및 탑재용 저장장치를 활용할 경우 다수 열차의 실제 운행상황에서 에너지 효율성을 실험적 방법으로 추정·제시한다. 먼저 지금까지 실제 운행상황을 정확히 반영한 저장장치 도입의 효과를 분석한 사례가 없으므로 분석조건과 데이터를 최대한 단순화하여 저장장치 도입 사례별 에너지 효율특성을 시뮬레이션하여 결과를 제시한다. 우선 에너지 효율성의 실험적 추정을 위하여 다음의 사항을 가정하여 탑재/정치용 장치 모두 부재(Case1), 탑재장치만 존재(Case2), 정치장치만 존재(Case3), 탑재/정치용 장치 모두 존재(Case4)하는 4가지 경우에 대해 다음의 가정 하에 실험하였다.

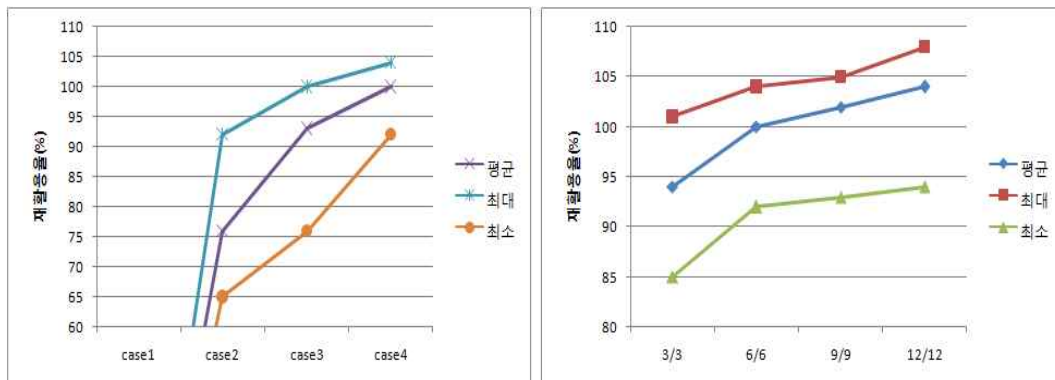
##### [기본가정]

- 임의의 구간을 운행하는 3대의 열차가 있고, 각 열차의 주행패턴은 선후 패턴간 가중치를 고려하여 랜덤하게 작성한다.
- 주행패턴은 가속, 등속, 타행, 감속을 고려하였으며, 열차당 각각 10, 4, 1, -4의 단위 에너지가 소요된다.

- 탐재용 장치와 정치용 장치의 한계용량이 존재하며, 실험 초기용량은 한계용량의 50% 이다.
- 저장장치의 용량 및 열차별 운행패턴 조합에 따라 총 급전소요량 및 재활용 효율성을 달라지며, 이의 추정을 위해 저장장치 용량별로 열차운행패턴 조합을 255개씩 랜덤하게 실험 수행한다.



[그림 4] 저장장치 도입 시나리오별 총급전량 효과



[그림 5] 저장장치 도입 시나리오별 재활용률 효과

실험결과로 부터 다음과 같은 특성을 도출할 수 있었다. 우선 지상정치용 저장장치의 도입효과가 두드러지게 나타나며, 지상정치용과 차상탐재용을 혼용할 경우 효과가 가장 큼을 알 수 있다. 또한 저장장치 용량(capacity)이 커지면 외부로부터의 총 급전량은 줄어드나 수렴하는 경향을 나타내며, 총 급전량의 편차가 다수열차 열차주행패턴의 혼합조합에 따라 일정수준 이상 존재한다. 회생에너지의 재활용률은 정치용과 탐재용을 혼용할수록 효과가 두드러지게 나타나며, 열차주행패턴의 혼합조합에 따른 재활용률의 편차는 정치/탐재용을 혼용할수록 수렴된다.

결론적으로 에너지 저장장치를 도입할 경우 정치용과 탐재용을 혼용하는 것이 에너

지 효율 및 재활용 측면에서는 바람직하다. 그러나 장치의 도입만으로는 평균적으로 에너지효율 수준을 올릴 수 있겠지만 그 효과를 극대화한다고 보기는 어려우며, 열차 주행패턴의 조합에 따라 에너지효율이 차이가 나므로 운행노선 및 차량 특성에 맞게 저장장치의 용량, 위치를 최적으로 구성하고 효율 극대화를 위해 다수 열차의 계획 및 운영을 에너지 관점에서 제어할 필요가 있다.

## 5. 결 론

최근 녹색철도 구현에 있어서 시스템 대안 중 하나인 회생저장장치의 도입이 추진되고 있다. 그러나 운행단계에서의 특성을 고려하지 않고 하드웨어적 특성과 성능만을 가지고 시스템 전체 효과를 과잉 기대하는 경향이 있는 실정이다. 실제로 철도시스템(차량)의 전과정 단계별로 에너지 저감 효율분석 결과를 보면 운행단계에서의 에너지 저감효과가 가장 큰 것으로 나타났다. 본 논문에서는 운행단계의 특성을 고려하여 회생저장장치의 도입효과를 수치사례와 함께 추정제시 하였으며, 에너지 효율화 극대화를 위해 하드웨어시스템 도입과 함께 설치계획 및 운행최적화 운영이 병행 추진되어야 함을 제시하였다. 이들 개념이 향후 녹색철도 추진에 있어 설계 단계에서부터 운행 전단계에 걸쳐 활용되기를 기대하는 바이다.

## 6. 참 고 문 헌

- [1] KORAIL보도자료(2008), "친환경 철도로 저탄소, 녹색성장 견인", <http://www.korail.com>.
- [2] Leena Vihermaa, Michael Lettenmeier, Arto Saari(2006), "Natural resource consumption in rail transport:A note analysing two Finnish railway lines", Transportation Research Part D 11.
- [3] East Japan Railway Company(2008), "Tokyo and Osaka Stations on Eco-Friendly Drive", JR Railway Newsletter, No.18.
- [4] KTH Railway Group(2009), "Green Train energy consumption", Swedish research and development program 'the Green Train'.
- [5] 이한민, 김길동, 이장무(2007), "도시철도시스템용 에너지저장시스템 용량설계에 관한 연구", 2007년 한국신재생에너지학회 추계학술대회 논문집.
- [6] 이한민, 김길동, 이장무(2007), "에너지저장장치의 설치위치에 관한 연구", 2007년 대한전기학회 춘계학술대회 논문집.
- [7] 조홍식, 류상환, 황현철, 이안호, 김길동, 이한민(2008), "경량전철 시험선에서의 에너지저장시스템 연구", 2008년 대한전기학회 추계학술대회 논문집.