

# 도시철도 운전에너지 효율화를 위한 조사 분석 연구

## Investigation, analysis and study for urban transit's driving energy efficiency

김 영 규\*      박 세 영\*\*      박 영 석\*\*\*      정 일 봉\*\*\*\*      한 문 섭\*\*\*\*\*  
Kim, Young-kyu    Park, Se-Young,    Park, Young-Seok,    Chung, Il-Bong,    Han, Moon-Seob

### ABSTRACT

Recently the roles of railways about the prevention of global warming caused by greenhouse gases and for low carbon green growth are larger than ever. And the railroad-related research institutions have been active in researching for energy conservation. Especially the urban railroad has been emerged as the best means of transportation compared to the general public transportation systems in punctuality, stability, ecology and etc. In operating the urban railroad system there are various ways for energy savings. In the larger category, One is the hardware aspect according to the structure of the vehicle and the development of control systems. The other is the software aspect which efficient train operation can be made through control of driving patterns and driving diagram. In this paper, there is sense to analyze the result in verifying expectation relation with variable and the use of electric power on this after selecting main variables that can influence to the energy of the train operation in the software aspect. First, after collecting the basic data related to operation(train speed, operating hours, power consumption, the position of stopping station, electrical power system etc.) and according to this, investigating the consumption of the energy of the operation, in the side of energy consumption deducing and analyzing problem, this will be found solutions.

### 1. 서 론

최근 온실가스로 인한 지구온난화 방지와 저탄소 녹색성장을 위한 철도의 역할이 그 어느 때보다 크며, 각 철도관련 연구기관에서는 에너지 절약을 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히 도시철도 분야는 정시성, 안전성, 친환경성 등에서 일반 대중교통 시스템에 비하여 최적의 교통수단으로 부각되어 지고 있다. 도시철도 시스템 운영에 있어 에너지절약 방법에는 여러 가지가 있으며, 크게 분류하면 차량의 구조와 제어시스템 발달에 따른 하드웨어 측면과 운전패턴 및 운전다이어 조절 등을 이용해 효율적인 열차운용이 가능한 소프트웨어 측면이 있다.

본 논문에서는 소프트웨어적 측면에서 열차 운전에너지에 영향을 줄 수 있는 주요 변수들을 선정한 뒤 이에 대한 전력사용량과 변수와의 예상관계를 검증하여 그 결과를 분석해 보는데 의의가 있다. 먼저 운행관련 기초자료(열차속도, 운전시간, 전력소비, 정차역 위치, 전력시스템 등)를 수집하고 이에 따른 열차 운전에너지 소비량을 조사 후 에너지 소비 측면에서 문제점을 도출 분석하여 해결방안을 모색해 보고자 한다.

\* 김 영 규 : 정회원, Seoul Metro 기술연구소  
E-mail : pocari257@seoulmetro.co.kr  
TEL : (02)6110-5897 FAX : (02)6110-5338  
\*\* 박 세 영 : 비회원, Seoul Metro 기술연구소  
\*\*\* 박 영 석 : 비회원, Seoul Metro 기술연구소  
\*\*\*\* 정 일 봉 : 정회원, Seoul Metro 운전팀  
\*\*\*\*\* 한 문 섭 : 정회원, 한국철도기술연구원

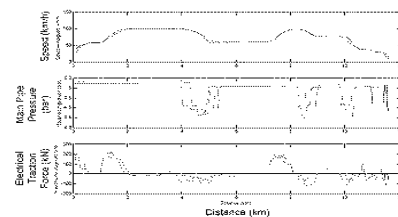
## 2. 연구관련 이론 및 배경

### 2.1 국내 · 외 기술동향

에너지 문제가 부각됨에 따라 최근 들어 국외에서는 열차의 Eco-driving에 대한 관심과 함께 연구수행 및 실용화가 되고 있다. ALSTOM Transport-System에서는 열차의 실시간 운행제어에 따른 에너지 효율성 개선을 위한 연구개발 사례(SOTRELE : Real Time Power and Energy Optimization)를 가지고 있다. 또한 독일 DB에서 시행한 Energy-Efficient Driving 프로그램의 결과 장거리 구간에서 5%의 견인 전류를 감소시켜 102,000MWH의 에너지 절약을 달성하고, 단거리 구간에서는 전기동차 및 디젤동차의 에너지 3% 감축효과를 얻었다. 체코에서 연구한 BBD(Energy Efficient driving) 프로그램의 경우 열차의 구간 운행시간의 증가 없이 에너지를 절감하기 위한 연구를 진행하여 최적화 문제를 정식화하였으며 그 결과 상당한 에너지를 절감할 수 있는 계산결과를 얻었다. 이에 반해 국내에서는 안전과 운행시간을 위한 패턴 연구만 수행되었을 뿐 에너지 이용 효율화를 고려한 연구는 미비한 것이 현실이다.



그림1. Energy Efficient Train Control



Driving Style	Energy Consumption	Trip Time	Braking Factor
Green	73kWh	605s	10%
Red	114kWh	577s	16%

그림2. Eco-driving의 효과 검증 결과

### 2.2 서울메트로의 전력사용량 분석

서울메트로의 연간 전력사용량은 최근 5년('04~'08년)간 864백만KWH으로 2호선 저항전동차량 등 내구연한이 도래된 구형차량의 대체로 회생제동 효율이 향상된 VVVF제어방식의 신조 전동차량의 도입, 고효율 전기설비 교체, 기관의 에너지 절약 정책 수립 등으로 인해 그림3과 같이 2006년을 기점으로 전력사용량은 다소 감소 추세에 있으나, 고객서비스 향상을 위한 전기설비 증가, 기후 온난화 현상으로 인한 냉방 공급 등의 전력사용량의 증가요인으로 인해 새로운 에너지 절약 시스템이 도입되지 않는다면 사용에너지를 절감하는데는 한계가 있을 것이다.

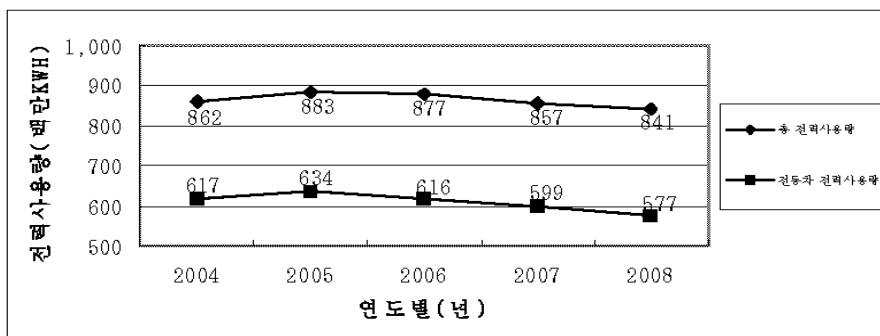


그림3. 연간 전력사용량 현황(서울메트로)

도시철도가 운영되기 위해서는 역사, 궤도, 전기, 통신 등의 기반설비 및 궤도 위를 달리는 차량이 필요하다. 도시철도 운영 시 필요한 전기에너지는 전동차가 운행하는데 사용하는 전차용과 일반시설물 및 차량기지 관리에 사용되는 고배용으로 분류된다. 그림4와 같이 서울메트로의 2008년 사용전력량을 기준으로 보았을 때 전체 전력사용량의 약 68.7% 정도는 전차용이고, 나머지 31.3%정도는 고배용으로 사용

되고 있다.

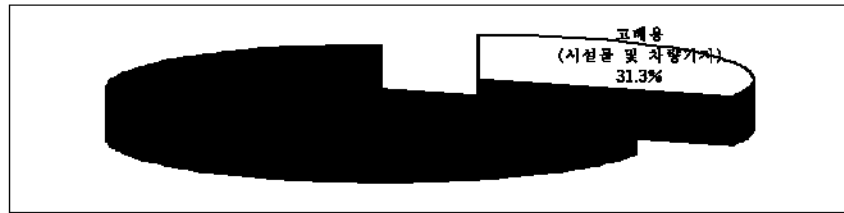


그림4. 용도별 전력사용량 비율(서울메트로 2008년 기준)

역사의 조명, 에스컬레이터, 공조 및 냉난방시설 등으로 사용되는 고배용 전력은 이용승객의 서비스 향상을 위해 전력절감에 한계가 있으며, 전기설비 증가(역사 스크린도어 설치 및 온·냉방화 공사 등), 온난화 영향으로 냉방전력 사용량의 증가 등 여러 가지 문제점이 나타나므로 전력량 소비의 많은 비중을 차지하는 운행 중인 열차의 사용 전력량을 감소시키는 방법을 연구하는 것이 보다 효과적일 것이다.

### 2.3 운전에너지 효율화를 위한 주요 변수 선정

열차 운전에너지에 영향을 줄 수 있는 요인에 대해서 소프트웨어 측면에서 조사해본 결과 그림5.에서 나타나듯이 크게 운영시스템측면, 시설·환경적 측면, 인력(승무원)측면으로 나눌 수 있다. 운영시스템 측면에서는 운전시간 여유율 부족, 수송력 과잉공급 등이 있고, 시설, 환경 측면은 열차지연, 인력(승무원)측면에서는 전력절감 인식부족, 운행 중 가다서다 반복, 운전취급기량 부족, 출입문 재개폐 등 세부적으로 총 18가지 변수가 있었다.

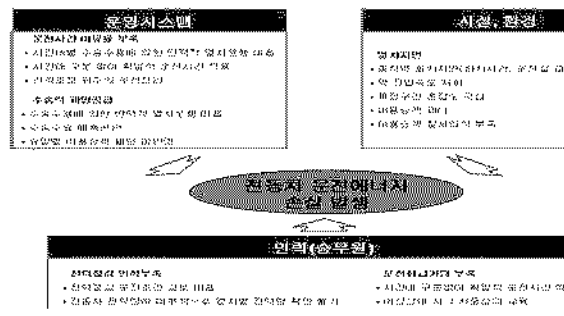


그림5. 열차운전에너지에 영향을 줄 수 있는 세부 요인

총 18가지 변수를 전동차 전체 전력소비량을 10이라 가정했을 때 영향을 미치는 정도를 전력소비량으로 나타내었을 때를 비교한 결과 열차운전에너지에 영향을 줄 수 있는 우선순위의 변수는 표1.과 같이 나타났다.

표1. 연구 우선순위 변수

연번	주요 변수	전력사용량과 변수와의 예상 관계	DATA	분석 TOOL
1	시간대별 수송수요에 의한 탄력적 열차운행 미흡 요일별 이용승객 패턴반영 미흡 (과다한 수송력 제공)	수송수요에 의한 열차운행의 탄력성에 따라 전력사용량이 달라진다.	연속형 DATA	산점도 분석 상관분석
2	시간대 구분 없이 획일적 운전시간 적용 (운전시간 여유율 부족)	운행소요시간 여유율에 따라 전력 사용량이 달라진다.	연속형 DATA 대안분석 (운전이론)	T 검정 (2 Sample T-test) 및 정성적 분석
3	전력절감 운전조건 검토미흡 (정시운행 목적의 운전취급법)	승무원의 운전취급 방법에 따라 전력사용량이 달라진다.	대안분석 (논리검증)	정성적 분석
4	역 진입속도	역 진입 계동취급 시 진입속도에 따라 회생제동에 의한 발전량에 차이가 있다.	대안분석 (전기이론인용 논리검증)	정성적 분석

5	중좌역 회차지연	중좌역에서의 회차지연으로 전력 사용량이 증가한다.	연속형 DATA	T 검정 (1 Sample T-test)
---	----------	-----------------------------	----------	------------------------

### 3. 주요 변수들의 검증 및 분석

열차운전에너지에 영향을 줄 수 있는 주요 변수를 선정한 뒤 이에 대한 전력사용량과 변수와의 예상관계를 설정한 후 검증 및 분석을 실시하였다.

첫 번째, ‘시간대별 수송수요에 의한 탄력적 열차운행 미흡’ 과 ‘요일별 이용승객 패턴 반영 미흡’ 이란 변수에 대해 ‘수송수요에 의한 열차운행 탄력성에 따라 전력사용량이 달라진다.’라는 예상관계를 설정한 후 서울메트로 2호선 운행자료를 이용하여 상관관계에 대하여 분석하였다. 분석결과 회귀방정식은 ‘전력사용량=10565+845.4×운행횟수’로 나타났다. Pearson 상관계수 r=0.658로 상관관계가 존재하며 P값은 0.000으로 수송수요에 의한 열차운행 탄력성에 따라 전력사용량이 달라진다는 것을 입증했다. [5]

두 번째, ‘시간대 구분 없이 획일적 운전 시간 적용’이란 변수에 대해 ‘운행소요시간 여유율에 따라 전력사용량이 달라진다.’라는 예상관계를 설정 후 검증하기 위하여 두개의 선행 연구자료를 이용한 T-test와 운전이론을 분석하였다. T-test를 위한 선행 연구 자료로 두개의 석사논문을 이용하였다.

표2. 계획운전에 따른 시뮬레이션 결과

구분	조건1	조건2	조건3	조건4	조건5	조건6	조건7	조건8
역간거리(m)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
운전시간(sec)	95	85	95	85	100	90	100	90
최고속도(kph)	52.2	66.7	50.9	61.2	50.0	59.4	47.3	54.4
동력운전시간(sec)	18.9	27.8	18.1	23.3	18.1	22.9	17.0	20.3
소비전력량(kwh)	12.3	25.8	10.9	18.1	10.9	15.7	10.4	13.8
제동스텝	4	4	5	5	-	-	-	-
제동시작속도(kph)	43.5	56.6	40.3	51.8	40.3	51.3	36.6	45.8
회생제동(kwh)	6.1	15.8	4.8	9.5	4.8	8.2	3.6	6.1
총 소비전력(kwh)	6.3	10.0	6.2	8.6	6.2	7.6	6.7	7.8

\* 시뮬레이션 1~4 출처 : 박성태, 석사학위 논문, 2003년

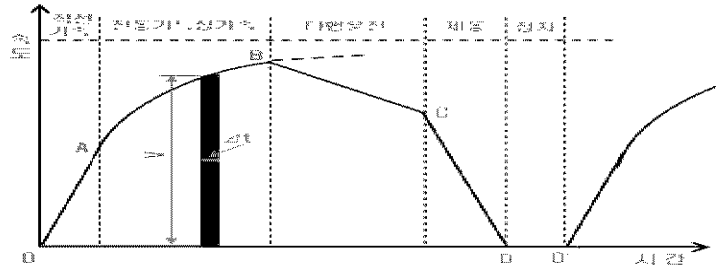
\* 시뮬레이션 5~8 출처 : 김치태, 석사학위 논문, 2002년

위의 선행 연구 자료는 Matlab을 이용한 열차의 주행 시뮬레이션을 통한 계획운전에 따른 결과값을 나타낸 것이다. 두개의 선행 검증을 이용, T-test 결과(표준운전시간 대 여유운전시간 반영)를 보면 표준운전시간(4개 sample)의 경우 평균 8.50, 표준편차 1.09, SE평균 0.54이며, 여유운전시간(4개 sample)의 경우는 평균 6.35, 표준편차 0.238, SE평균 0.12다. 또한 T값은 3.86, P값은 0.031 여유도는 3이다. P값이 0.031이므로 ‘운행소요시간 여유율에 따라 전력사용량이 달라진다’가 성립됨을 알 수 있다. [5]

세 번째, ‘전력절감 운전조건 검토미흡(정시운행 목적의 운전취급법)’이란 변수에 대해 ‘승무원의 운전취급 방법에 따라 전력사용량이 달라진다.’란 예상 결과를 세웠으며, 운전이론을 이용해 운전방법이 전력소비량에 미치는 영향을 분석하였다.

그림6. 속도-시간 선도

차량의 역간 운행 패턴을 보면 그림6.은 운전시간에 대한 속도의 변화를 나타내는 곡선으로 O~A구간은 직선가속으로 기동하여 전류량을 일정하게 유지시키면 직선으로 속도가 증가하며, A~B구간은 곡선가속으



로 전동기 특성에 따라 속도가 증가한다. B~C구간은 타행운전으로 전류를 차단하면 열차저항으로 속도가 저하되며, C~D구간은 제동취급으로 감속하여 정차한다.

다음으로 차량의 운행 패턴이 그림6.과 같을 때 운전취급법이 전력소비량에 미치는 영향을 살펴보았다.

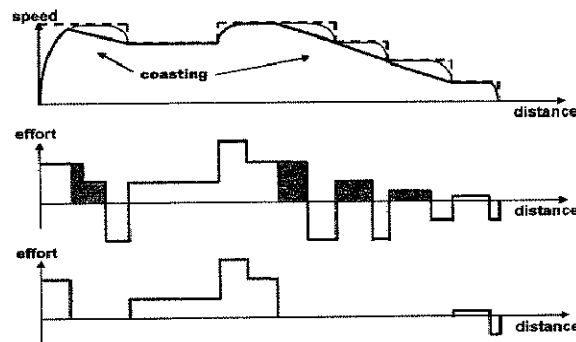


그림 7. 기관사의 운전취급법이 전력소비량에 미치는 영향

그림7.에서 첫 번째는 거리-속도 선도로 점선은 동력운전과 제동을 빈번하게 취급한 경우이며 실선은 운전시간 여유부여로 타행운전을 최대한 활용했을 때를 나타낸다. 두 번째는 거리-전력소비량 선도로 음영은 타행운전으로 전력절감 영역을 나타내며, 세 번째 최적화된 거리-전력소비량 선도를 통해 경제주행으로 전력절감을 최대화할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 전동차의 전력소비량은 불필요한 동력운전 및 제동취급 최소화, 회생제동의 활용 등 기관사의 운전취급 방법에 의해 큰 차이가 있으며, 전력소비량을 절감하기 위하여 정시운행 목적의 운전취급법을 전력절감형의 운전취급법으로 재검토해야 할 것이다.

네 번째, '역진입 속도'란 변수에 대한 '역 진입제동취급 시 진입속도에 따라 회생제동에 의한 발전량에 차이가 있다.'란 예상 관계를 세우고 전기이론을 이용하여 검증해 보았다. 회생제동은 운행 중인 전동차의 주전동기 회로를 변환시킬 경우 발생하게 되는 전동기의 회전방향과 반대방향의 회전력을 제동력으로 활용하는 방법으로 부수적으로 발생된 회생전력은 다시 가선으로 되보내어 후속차량이 사용하게 된다.

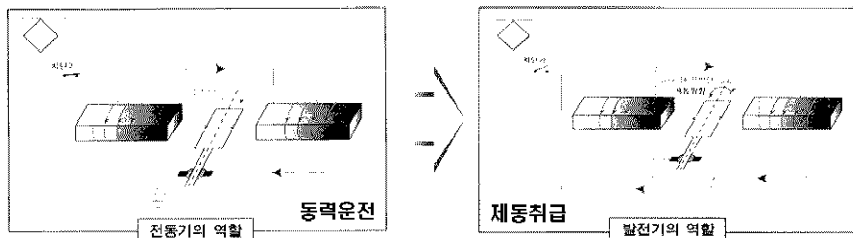


그림8. 회생제동의 원리

$$E_C = \frac{P \times \Phi \times N \times Z}{60 \times a} = K_1 \times \Phi \times N \quad (1)$$

식(1)은 발전량 산출 공식으로  $E_c = \text{기전력}(V)$ ,  $P = \text{자극수}$ ,  $\Phi = \text{자속수}$ ,  $Z = \text{전기자 유효 도체수}$ ,  $N = \text{전기자 회전수}(rpm)$ ,  $a = \text{전기자 코일내 병렬도체수}$ ,  $K = \text{전동기 특성에 따른 상수를 나타내며 이 공식을 통해 제동취급 시 회생전력량은 전동기의 전기자 회전수에 비례함을 알 수 있다. 따라서 전동차의 제동취급 시의 발전량은 전동기의 전기자 회전수(전동차의 속도)에 비례하므로 역 진입속도와 상관관계가 있으며, 제동취급 시 발전량을 증가시키기 위해서는 역 진입속도를 높여야 할 것이다.$

마지막으로 ‘중착역 회차지연’ 변수에 대한 ‘중착역에서의 회차지연으로 전력사용량이 증가된다’의 예상 관계를 T검정을 이용하여 검증하였다. 자료는 서울메트로 4호선 운행시간(2005.07.11, 07:30~10:30)으로 이촌역과 사당역의 하행선 지연운행 시간을 비교, 사당역 회차지연으로 추가지연이 발생되었는지 분석하였다.

표3. 4호선(하행선) 열차지연 시간(2005.07.11, 07:30~10:30)

열차 번호	지연시간		열차 번호	지연시간		열차 번호	지연시간		열차 번호	지연시간		열차 번호	지연시간		열차 번호	지연시간	
	사당	이촌		사당	이촌		사당	이촌		사당	이촌		사당	이촌		사당	이촌
4017	3:50	1:50	4027	6:00	3:25	4033	7:40	6:20	4043	10:05	8:50	4051	12:25	10:55	8335	9:25	8:55
8527	3:20	2:14	4025	6:50	1:55	4035	4:40	3:45	3041	9:55	7:55	8549	11:00	9:10	4059	9:00	8:05
8529	4:50	2:35	4029	5:30	2:55	8319	4:05	3:15	8545	10:30	9:50	8331	9:15	8:25	8557	8:40	7:30
4021	5:15	3:30	2701	4:35	3:10	4037	6:00	4:35	3045	10:25	9:10	8551	8:00	7:45	4061	11:25	9:05
4019	5:30	1:10	6533	5:55	3:30	4895	5:40	4:15	8327	9:55	9:40	4053	7:30	7:20	6559	9:45	8:10
5311	5:10	2:30	8315	2:25	0:20	8541	6:25	4:40	4047	11:40	11:05	8333	6:55	6:45	8337	8:40	8:35
4023	4:30	2:30	4031	5:40	2:40	8543	10:20	8:10	8547	12:00	11:25	8553	8:00	8:00	6561	20:05	19:55
8531	4:30	2:15	8537	6:10	2:45	4039	11:05	9:45	2049	11:40	11:20	8555	10:50	9:25	5339	18:20	18:05
5313	6:05	1:00	6539	6:20	4:15	5325	10:00	7:30	8329	12:15	11:35	4057	10:15	8:20	4703	17:45	16:50

T-test 결과(사당역 회차지연으로 인한 추가 지연시간)를 보면 평균 90.49, 표준편차 62.89, SE평균 8.64이며, T값은 7.00, P값은 0.000이다. P값이 0.000이므로 ‘중착역에서의 회차지연으로 전력사용량이 증가된다’가 성립되며, 중착역 회차지연으로 후속열차가 가다서다를 반복하게 되어 전력사용량이 증가되므로 중착역 회차지연을 해소하면 전력사용량이 절감될 수 있을 것이다.

#### 4. 운전에너지 효율화 향상방안 도출

주요 변수들의 검증 및 분석에 따라 전동차 전력사용량을 절감할 수 있는 개선방법을 도출하였다.

첫 번째, 이용승객(시간대별, 요일별 수요)에 따른 열차운행의 탄력성 미흡과 시간대 구분 없이 획일적 운전시간 적용을 개선하기 위해서는 비 혼잡시간대에 운전시간 여유율 반영 및 수송수용에 탄력성을 증대시켜야 한다. 기관사가 동력운전을 최소화하고 무동력운전을 최대한 활용할 수 있도록 운전소요시간에 여유율을 반영하여야 하며, 혼잡시간대에는 현행 수준의 운행시격을 유지시켜 최대 수송력을 유지하고 비혼잡시간대에는 운전시간에 적정 여유율을 반영하여 경제적인 운전취급을 유도하여야 한다. 또한 수송수요에 따른 열차운행 탄력성을 증대하기 위하여 시간대별, 요일별, 구간별 혼잡도를 고려한 운행시격을 재조정해야 한다. 이를 위해 혼잡시간대에는 현행 수준의 운행시격을 유지하여 최대 수송력을 유지하고 비혼잡시간대에는 운행시격을 증대하여 수송력 과다공급을 해소해야 한다.

두 번째 전력절감 운전조건 미흡(정시운행 목적의 운전취급법)에 대해 승무원의 마인드와 표준운전 취급법을 전력 절감형으로 재정립해야 한다. 각 호선별로 운전취급법을 재검토하여 동력운전과 제동의 빈번한 반복취급 최소화로 무동력운전을 최대한 활용할 수 있는 표준 운전취급법을 작성하여야 하며, 전 승무원이 숙지할 수 있도록 전과교육도 실시하여야 한다. 또한 운전소요시간에 여유율을 반영하여 기관사가 동력운전을 최소화하고 무동력운전을 최대한 활용하도록 한다. 혼잡시간대에는 현행 운전시간을 적용

하여 최대 수송력을 유지하고 비혼잡시간대에는 운전시간에 적정 여유율을 반영하여 경제적인 운전취급이 이루어지도록 유도해야 할 것이다.

세번째 전동차 전력소비량을 절감하기 위해서는 회생전력을 최대한 활용해야하며, 제동취급 시 회생전력량을 증가시키기 위해 역 진입속도를 높여야 한다. 다만 역 진입속도의 상승 시 이용승객의 안전이 저해될 우려가 있으므로, 역사 PSD 설치와 연계되어 실시되어야 할 것이다.

마지막으로 종착역 회차지연을 방지하기 위해 효율적인 입환승무원의 운영방안이 검토되어야 한다. 회차지연에 대한 분석을 통하여 입환승무원 운영시간 및 근무방법의 재설정이 요구되며, 승무원 근무표에 설정되지 않은 시간대에도 열차지연 해소를 위해 필요시에는 운전사령조치에 의거 입환승무원을 운영하도록 해야 할 것이다.

## 5. 결 론

본 논문은 도시철도 열차운전에너지 효율화에 영향을 줄 수 있는 소프트웨어적인 측면에서 변수들을 찾아보고 이들 중 우선순위를 정해 검증 및 분석을 하였다. 열차운전에너지를 효율적으로 사용하기 위해서는 비 혼잡시간대에 운전시간 여유율 반영 및 수송수요에 탄력성을 증대시켜야 하며, 현행의 정시운행 목적의 운전취급법을 전력절감형 표준운전취급법으로 재정립해야 할 것이다.

비혼잡시간대의 운전시간 여유율 반영으로 인한 열차시격 재조정으로 열차운행간격이 지나치게 길어질 수 있으므로 적정 여유율의 산정 및 반영이 필요할 것이다. 또한 승객안전을 위한 역사 PSD 설치와 관련하여 열차 제동 시 회생전력을 최대한 활용하기 위해 역 진입속도를 높여야 한다.

마지막으로 종착역 회차지연으로 인한 후속열차의 전력소비량 증가를 방지하기 위하여 효율적인 입환승무원의 운영방안이 검토되어야 할 것이다.

향후 전동차 운행관련 자료의 수집과 분석을 통해 운전시간의 적정 여유율, 운행간격이 고려된 운전다이어 및 전력절감형 표준운전취급법을 연구·개발하여 현차에 시험·적용단계가 필요할 것이다.

## 참고문헌

1. 김의일 (1999), "운전이론", 한국철도운전기술협회
2. 박정식 (2002), "현대통계학(제4판)", 다산출판사
2. 김치태 (2002), "전동열차의 주행에너지 소비를 최소화하는 최적운전, 석사학위논문
3. 박성태 (2003), "전동열차의 운전에너지 소비를 최소화 하는 경제적 운전패턴에 관한 연구", 석사학위논문
4. 김재영 (2004), "도시철도차량 운행에 있어서 에너지 절감을 위한 자동운전 패턴에 관한 연구", 석사학위논문
5. 정일봉, 박정수, 김후규 (2007), "열차의 효율적 운영을 통한 동력비 절감방안에 관한 연구, 한국철도학회 2007년도 추계학술논문집, pp. 788~796
6. 서울메트로 (2008.6), "통계자료".
7. P.G. Howlett and P.J. Pudney (1995), "Energy-Efficient Train Control", Springer
8. P. Firpo and S. Savio(1994), "optimal control strategies for energy Management in metrorail transit system", Computers in Railway IV-Vol. 2, Railway Operations
9. H.S. Hwang (1994), "Control Strategy for Optimal Compromise between Trip time and Energy Consumption in a High Speed Railway", IEEE Trans. on System Man and Cybernetics, Part A System and Humans Vol. 23, Issue 6