

# 열차의 효율적 운영을 통한 동력비 절감방안에 관한 연구

- 서울메트로를 중심으로 -

## Studies on Power Cost Reduction through Efficient Operation of Railway Vehicles Based on Seoul Metro

정일봉\* 박정수\*\* 김후규\*\*\*

Chung, Il-Bong Park, Jeong-Soo Kim, Hoo-Kyu

### ABSTRACT

The annual power cost for Seoul metro operations is about 65.5 billion won, of which rail motors account for 60% among total power consumptions. It is expected that the power consumption would increase because of global warming, future high electric equipments demands, etc. To reduce these consumptions, it is necessary to analyze the transportation demands of passengers, arrange the power-saving driving environments, respond flexible vehicles service, and improve how to drive vehicles. These method to reduce power consumption for rail motors can lead to improve the Seoul metro management. In this research, the improvement plan is derived by collecting and analyzing the data for total 33 power consumptions factors, screening top 10 factors by priority and impact, establishing each hypothesis to execute correlation and recursion analyses. As a result of 4 items research among top 10 affected factors, the power consumption for rail motors in 2006 is effectively reduced; the power usage is down with 13,870 kwh, from 531,539 kwh to 517,669 kwh, and the cost is down with 1,026 million won, from 39,334 million won to 38,308 million won.

### 1. 서론

#### 1.1 연구의 배경

서울메트로 연간 전력사용량은 655억원(운수수입의 9.2%수준)이며 전기설비증가, 온난화의 영향으로 전력사용량 증가가 예상되며 이러한 전력사용량이 전체 소비전력량 중 전동차용이 60% 이상이 된다.

이러한 전동차 사용의 60% 이상인 소비전력을 줄이기 위해서는 승객의 수송수요를 정밀분석하고, 전력절감형 운전취급 여건을 마련하며, 열차운행 탄력성 증대, 운전여유율 적용, 운전취급 개선을 통해 전동차용 전력소비량을 절감할 수 있으며, 이러한 연구를 통해 서울메트로 경영개선을 도모하여야 할 것이다.

연간 전력사용량 및 요금현황을 살펴보면 그림1 과 같다.

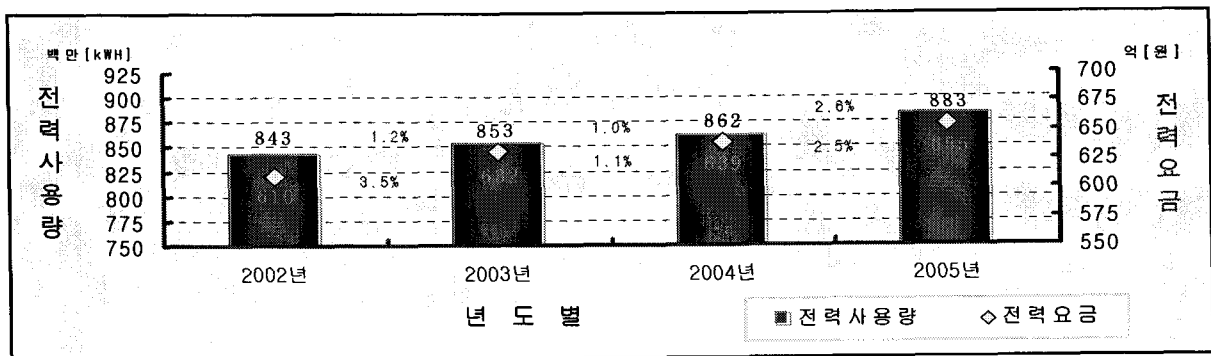


그림1. 연간 전력사용량 및 요금현황

전력비 증가는 2002년 843백만kwh(612억원)에서 2005년 883백만kwh(655억원)으로 40백만kwh(45억 원)증가하였고 운수수입 및 전기설비, 온난화 등의 영향으로 2005년에는 2.6%나 증가하였다.

\* 비회원, 서울메트로(구 서울지하철공사) 승무본부, 차장, E-mail: chung4977@paran.com, TEL: (02) 520 - 5591

\*\* 정회원, 동양대학교 철도경영학과 교수 E-mail: pajs65@empal.com, TEL: (054) 630 - 1098. 016-765 - 3169

\*\*\* 비회원, 서울메트로(구 서울지하철공사) 승무본부, 운전팀장, TEL: (02) 520 - 5569

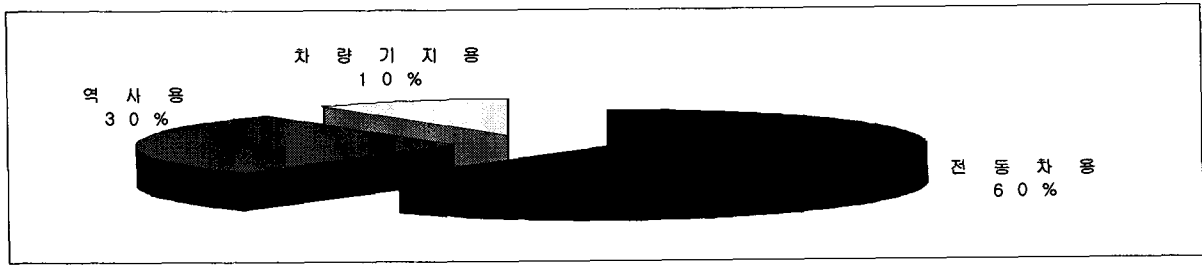


그림2. 용도별 전력사용량 비율(2005년)

전동차 소비전력이 전체 소비량의 60%를 차지하는 용도별 전력사용량 비율(2005년)을 살펴보면 그림2와 같다. 이렇게 전동차 소비전력이 전체 소비량의 60%를 차지하게 되면 역사용, 차량기지용 전력 절약만으로는 절감효과에 한계와 조명, 환기시설, 에스컬레이터 등 승객서비스를 위해 전력절감 한계 및 전기설비 증가, 온난화 영향 등으로 전력사용량 증가 등 여러 문제점이 나타나게 된다.

### 1.2 연구의 범위 및 방법

한국전력(S), 승객수송수요 영업운행시간(I), 전동차운행(P), 열차운행실적 적산전력량 전력요금고지서(O), 서울시민 지하철이용고객(C)라고 할 때, 전동차운행(P)에 대한 상세내용은 열차운행계획 수립을 수립한 후 운행준비를 거쳐 전동차가 운행되고, 운행되어진 전동차는 기지에 입고되어진 후, 전동차 정비를 받는것까지의 단계가 전동차 운행(P)의 상세내용이다.

여기서의 실질적으로 전동차 운행(P)의 전력사용은 열차운행계획수립, 운행준비, 열차운행이라는 이 세 가지 단계에서 전동차 운행(P)시 실질적으로 전력이 사용된다.

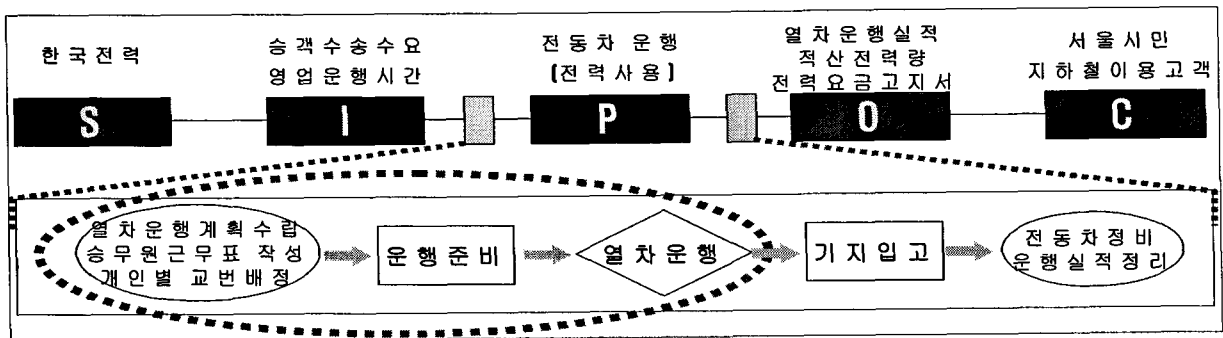


그림3. 연구범위

열차운행계획수립에서 비혼잡시간대 운행계획변경(운행 여유율 개선 등) 즉, 열차지연 방지대책, 토요일 열차운행계획변경, 표준운전법을 개선하는 방법과 열차운행에서는 변경된 계획에 의한 열차운행 즉, 열차지연 방지대책 시행, 변경된 운전취급 방법을 적용함으로써 전력을 절감할 수 있다.

여기서 핵심 문제는 수송수요, 운전시간, 피크(Peak)전력으로 이 세 가지 문제를 해결할 수 있는 전략이 중요하며 그림4와 같다.

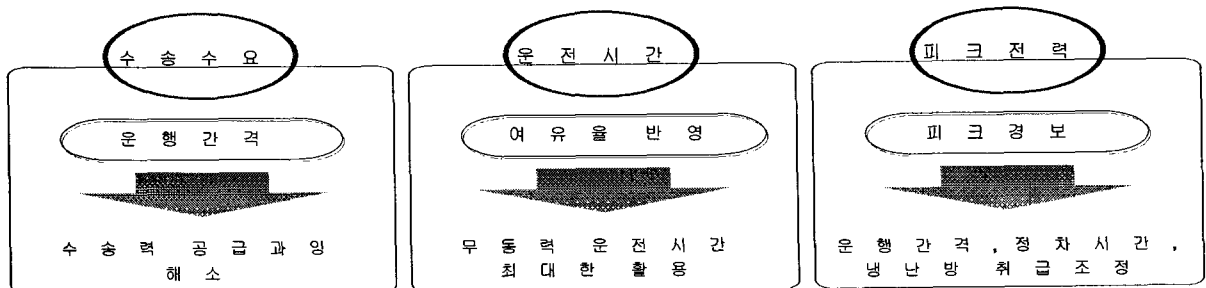


그림4. 핵심 문제 기술

본 연구에서 수행한 연구의 방법은 그림5와 같다.

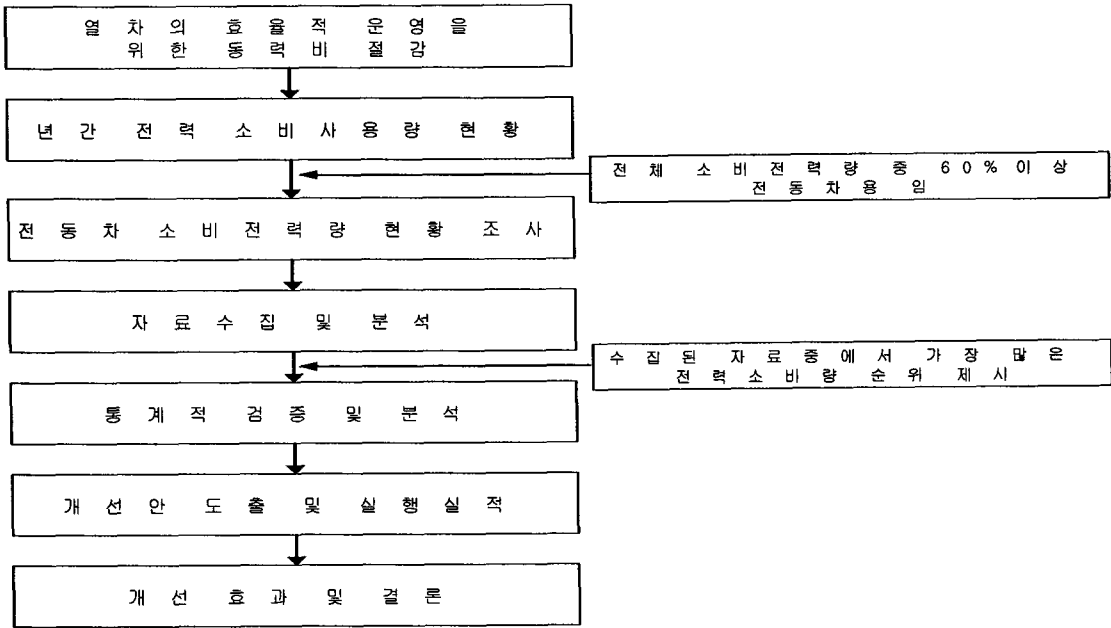


그림5. 연구 수행과정도

## 2. 본론

### 2.1 자료수집

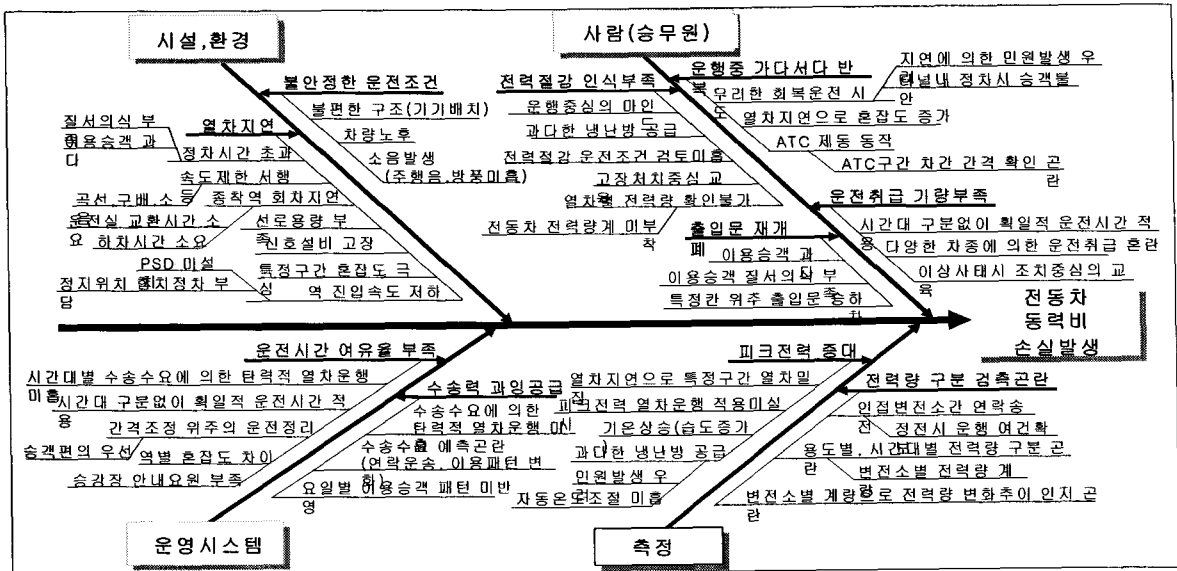


그림6. Cause & Effect Diagram

전동차 동력비 손실발생이 나타나는 것에 대해서 조사해본 결과 그림6에서 나타나는 것처럼 크게 시설, 환경적 측면, 사람(승무원)측면, 운영시스템측면, 측정측면으로 시설, 환경적 측면에서 가장 영향을 미치는 것은 불안정한 운전조건인데 이런 불안정한 운전조건이 발생하는 원인은 차량의 노후, 소음발생(주행음, 방풍미흡)등이 있고, 열차지연이 발생하는 원인은 정차시간 초과 등이 발생하여 시설, 환경적측면의 영향이 발생한다. 나머지 발생 원인들은 그림6을 참조하면 된다

총 33가지의 전동차 동력비 손실발생의 원인에 대해서 자료 수집 및 분석을 하였고, 이 중에서 전동차 동력비 손실에 영향을 크게 주는 원인을 순서대로 분류하였다.

전동차 전체 전력소비량을 10이라고 가정하였을 경우 표1에서 나타나듯이 전동차 동력비 발생원인으로 운영시스템의 크게 두 가지 원인인 운전시간 여유율부족과 수송력 과잉공급에서 시간대별 수송

수요에 의한 탄력적 열차운행 미흡이 전동차 전체 전력소비량을 10이라고 가정하였을 때 전동차 전력 소비량이 9로 나타났으며, 두 번째는 같은 운영시스템에서 시간대별 구분 없이 획일적 운전시간 적용의 원인 또한 전동차 전력소비량이 9로 나타났다. 세 번째는 운영시스템의 수송력 과잉공급의 원인 중에서 요일별 이용승객 패턴 반영 미흡이 전동차 전력 소비량 9로 나타났다. 네 번째는 측정측면에 영향을 주는 원인 중에서 피크전력(최대부하)열차운행 미적용이라는 원인이 전동차 전력소비량 9로 나타났다.

이렇게 표1에서 나타나듯이 총 33가지 인자 중에서 우선순위 10개를 선정할 수 있었던 것은 그림7에서처럼 33가지 원인 중 10개의 원인으로 인한 누적이 70%나 되었기 때문이다.

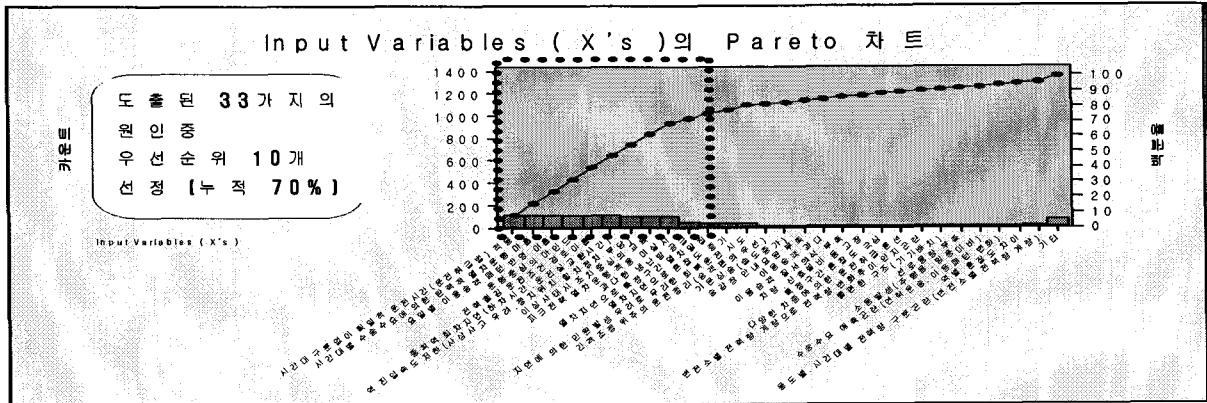


그림7. 우선순위 10개 선정

표1. 우선순위 10개 선정표

Input Variables ( X's )			전동차 전력소비량	서비스 품질	RANK	% RANK
			Output Variables (Y's)			
			Output Ranking			
1	운전시간 여유율 부족 수송력 과잉공급	시간대별 수요수요에 의한 탄력적 열차운행 미흡	9	9	108	7.94
2	운전시간 여유율 부족 운전취급 기량부족	시간대 구분없이 획일적 운전시간 적용	9	9	108	7.94
3	운전시간 여유율 부족	간격조정 위주의 운전정리(승객편의 우선)	1	3	16	1.18
4	운전시간 여유율 부족	역별 혼잡도 차이	1	1	12	0.88
5	운전시간 여유율 부족	승강장 안내요원 부족	1	3	16	1.18
6	불안정한 운전조건	불편한 구조(기기치)	1	1	12	0.88
7	불안정한 운전조건	차량노후(구형전동차)	1	1	12	0.88
8	불안정한 운전조건	소음발생(주행음, 방풍미비)	1	1	12	0.88
9	수송력 과잉공급	요일별 이용승객 패턴 반영 미흡	9	9	108	7.94
10	수송력 과잉공급	수송수요 예측편란(연락운송, 이용패턴 변화)	1	1	12	0.88
33	피크전력 증가	피크전력(최대부하) 열차운행 미적용	9	3	96	7.06

## 2.2 통계적 검증 및 분석

표1.에서 나타나듯이 33가지의 요인 중에서 크게 4가지 요인이 전동차 소비전력에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 이에 각각의 가설을 설정하여 상관관계 및 회귀분석을 실시하였다. 표2를 보면 우선순위 10개중에서 1에 해당되는 수송수요에 따른 열차운행의 탄력성 미흡에 대한 가설설정에는 '수송수

표2. 가설검증계획 및 분석 TOOL

주요 인자	분석내용(대립가설)	DATA	분석 TOOL
시간대별 수송수요에 의한 탄력적 열차운행 미흡	수송수요에 의한 열차운행 탄력성에 따라 전력사용량이 달라진다	연속형 DATA	산점도 분석 상관 분석
요일별 이용승객 패턴 반영 미흡			
시간대 구분없이 획일적 운전시간 적용	운행소요시간에 여유율에 따라 전력사용량이 달라진다	연속형 DATA 대안분석 (운전이론)	t 검증(2 Sample t-Test)
피크전력 열차운행 적용 미실시	피크전력의 열차운행 적용여부에 따라 전력요금이 달라진다	대안 분석	정성적 분석

에 의한 열차운행 탄력성에 따라 전력 사용량이 달라진다. 즉 귀무가설(H0)차이가 없다(달라지지 않는다), 대립가설(H1)은 차이가 있다(달라진다). 이에 분석된 자료는 2호선(2005.4.16~18)으로 운행 횟수와 전력사용량간 상관관계 및 회귀분석을 실시하였다.

검정결과 Pearson 계수  $r = 0.658$ 로 상관관계가 있고  $P = 0.000$ 으로 대립가설을 채택하였으며, 회귀방정식(전력량)은  $y = 10565 + 845.4$  운행횟수이다. 이러한 통계적 수치를 볼 때 수송수요를 분석하여 열차운행의 탄력성을 증대시키면 전력사용량이 절감되는 것으로 나타났다.

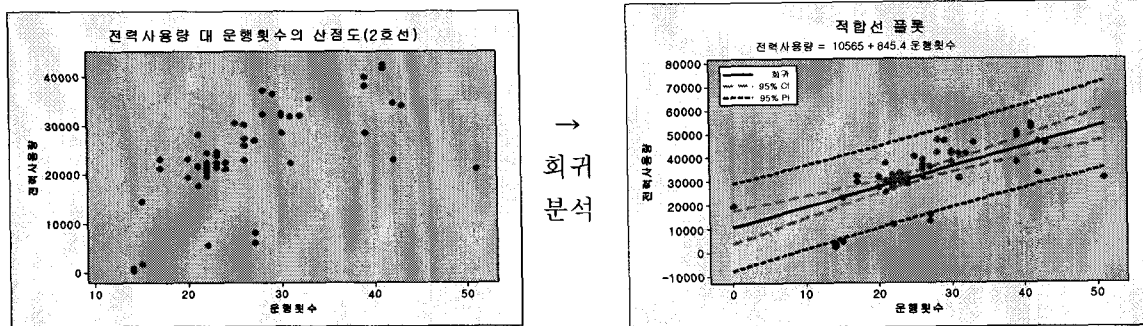


그림8. 적합선 플롯

우선순위 2도 1과 마찬가지로 시간대 구분 없이 획일적 운전시간 적용에 대한 대립가설을 설정하였다. 설정한 가설은 ‘운행소요시간 여유율에 따라 전력사용량이 달라진다.’이며, 귀무가설(H0)은 관계가 없다(달라지지 않는다)이고, 대립가설(H1)은 관계가 있다(달라진다). 통계적 검증 방법은 2 Sample T-test, 선행 연구자료로 하였다. 이에 대한 선행연구인 박성태(2003)는 역간 운전시간을 85초에서 95초로하여 분석하였다.

표3. 역간운전시간 85초~95초

구분	조건1	조건2	조건3	조건4
역간거리(km)	1000	1000	1000	1000
운전시간(sec)	95	85	95	85
최고속도(km/h)	52.2	66.7	50.9	61.2
동력운전시간(sec)	18.9	27.8	18.1	23.3
소비전력량(kwh)	12.3	25.8	10.9	18.1
제동스텝	4	4	5	5
제동시작속도(sec)	43.5	56.6	40.3	51.8
회생제동(kwh)	6.1	15.8	4.8	9.5
총비전력(kwh)	6.3	10.0	6.2	8.6

주 : 제동취급 : 조건 1,2는 4스텝, 조건 3,4는 5스텝

자료 : 박성태, 석사학위 논문, 2003

여기에서 역간운전시간을 90초에서 100초로 조건에 따라 역간거리를 조정하여 분석하였다.

표4. 분석1 역간운전시간 90초~100초

구분	조건1	조건2	조건3	조건4
역간거리(km)	1000	1000	931	931
운전시간(sec)	100.0	90.0	100.0	90.0
최고속도(km/h)	50.0	59.4	47.3	54.4
동력운전시간(sec)	18.1	22.9	17.0	20.3
동력운전거리(m)	135.1	209.3	119.4	167.2
소비전력량(kwh)	10.9	15.7	10.4	13.8
제동시작시간(sec)	78.8	63.3	80.8	66.9
제동시작속도(sec)	40.3	51.5	36.6	45.8
제동시간(sec)	21.2	26.7	19.2	23.1
제동시작거리(m)	893.2	829.6	844.6	804.1
제동거리(m)	106.8	170.4	86.4	126.9
회생제동(kwh)	4.8	8.2	3.6	6.1
총비전력(kwh)	6.2	7.6	6.7	7.8

2 Sample t-Test 분석한 분석1, 분석1-1의 검증결과 그림9와 그림10에서 나타나듯이, 두 표본의

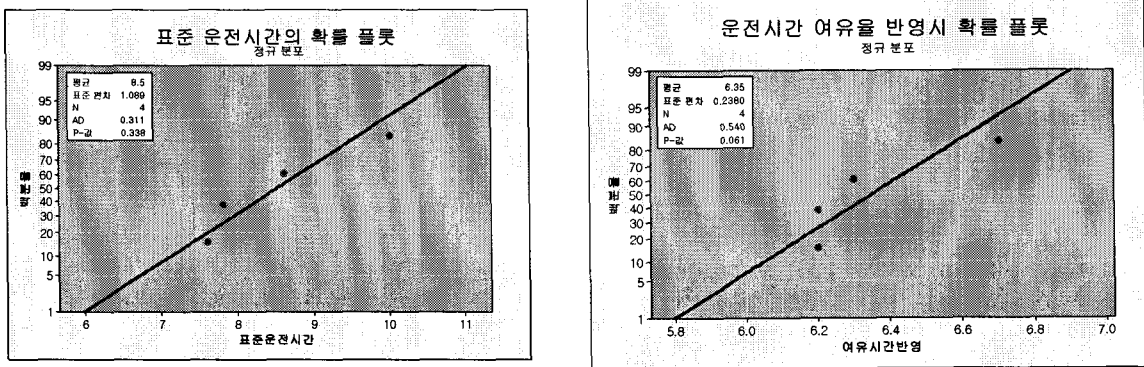


그림9. 정규성 검증

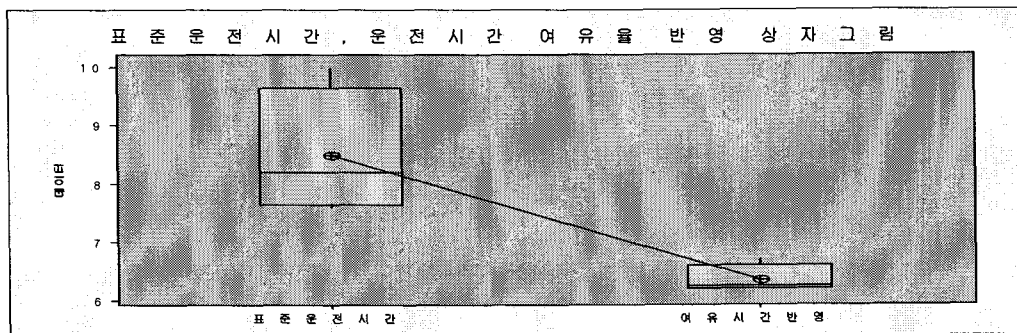


그림10. t-test 검증

t-test의 결과값은 표준운전시간의 경우 평균 8.50, 표준편차 1.09, SE평균 0.54로 나타났다. 여유 운전시간반영의 t-test의 결과값 평균 6.350, 표준편차 0.238, SE평균 0.12이다. t-값은 3.86, P계수는 0.031, 자유도 DF는 3이고, 샘플수는 둘다 4이다.

P계수가 0.031으로 귀무가설을 기각(대립가설을 채택)하였다.

그림9에서는 운전분석도 분석을 실시하였다. 운전시간에 합리적인 여유율 반영시 동력운전 시간이 감소되어 전동차소비가 절감될 수 있다.

운전시간과 전력소비량과의 관계는 그림 9를 보면 알 수 있는데, 운전취급1은 t1의 운전시간 적용한 현 여건의 운전취급법이고, 운전취급 2는 t2 운전시간을 적용한 운전취급, 운전취급 3은 t3 운전시간을 적용한 운전취급이다. 운전취급 2는 운전취급 1에 비해 t2-t1만큼의 운전여유시간을 부여함으로써 타행운전 시간이 E1" 에서 D" 만큼 빨라지므로 D'D"E1"E1"의 면적에 상당하는 전력소비량을 절

감할 수 있다. 운전취급 3은 운전취급 1에 비해  $t_3-t_1$ 만큼의 운전여유시간을 부여함으로써 타행운전 시간이  $E_1''-C''$ 만큼 빨라지므로  $C''C''E_1''E_1''$ 의 면적에 상당하는 전력소비량을 절감할 수 있다.

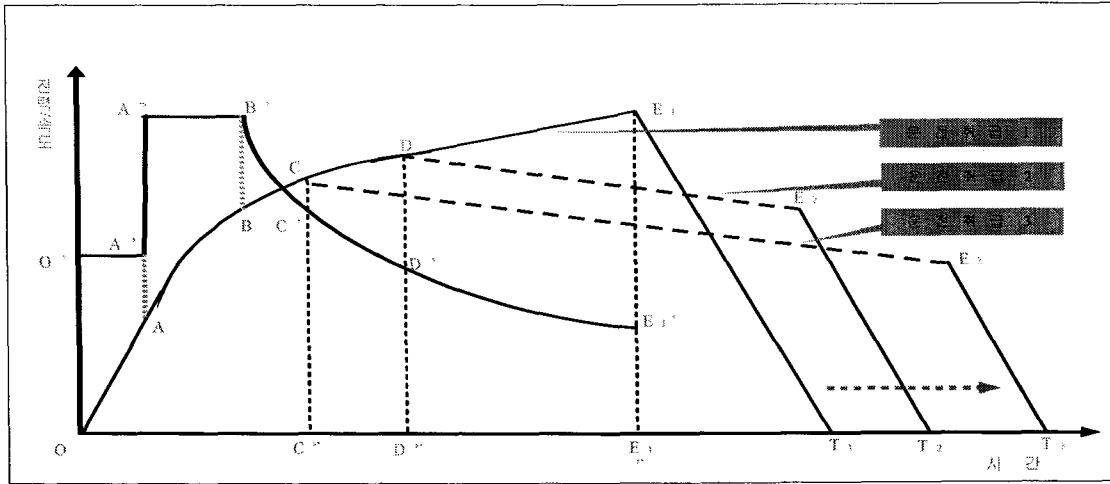


그림9. 운전선도 분석

검증결과 동력운전을 최소화, 무동력(타행)운전을 최대한 활용할 수 있는 운행여건 조성이 필요하고, 별도의 추가비용 없이 전동차 전력소비량을 최소화하기 위해서는 운전시간에 여유율을 반영하여야 한다. 그리고 운전시간 여유율 반영시 전력소비 절감량은 운전시간 여유율의 3~3.8배 수준이다.

마지막으로 피크전력(최대수요전력) 열차운행 미적용 실시에 관한 통계적 대립가설 설정은 '피크전력의 열차운행 적용여부에 따라 전력요금에 달라진다. 즉, 귀무가설(H0) 관계가 없다(달라지지 않는다). 대립가설(H1)은 관계가 있다(달라진다)라는 가설을 설정하였다. 분석방법은 전력요금 산정방법 분석을 이용하였다.

표 5 지하철 전력요금 산정방법

전력요금	기본요금 + 사용량요금 + 부가세 + 전력산업발전기금
기본요금	피크전력 × 역률보상 × 기본요금단가
사용량요금	사용전력량 × 계절별 단가
피크전력	호선별 변전소 최대전력의 합 (15분 단위)
사용전력량	호선별 변전소 검침량의 합
부가세	(기본요금 + 사용량요금) × 10%
전력산업 발전기금	(기본요금 + 사용량요금) × 0.4569%

전기공급 약관세칙 제49조 제8항의 내용을 살펴보면 '전기철도 사업고객의 요금적용 전력은 아래와 같이 적용한다(2002.8.23)' 검침당월을 포함한 직전 12개월 중 7월, 8월, 9월 및 검침당월중의 최대 수요전력을 요금적용 전력으로 하며(이하생략), 최대수요전력은 각 수급지점의 전철변전소별로 시험된 최대수요전력으로 한다. 결과적으로 피크전력에 의해 기본요금이 결정되므로 전동차용 전력료를 절감하기 위해서는 피크전력을 관리하고 열차운행에 적용하여야 한다는 결과가 도출된다.

### 2.3 개선안 도출 및 실행실적

앞서 분석한 수송수에 따른 열차운행의 탄력성 미흡과 시간대 구분 없이 동일한 운전시간적용은 두 가지다 운전시간 여유율 부족에서 나타난 문제점이다. 이러한 두 문제점을 개선하기 위해서는 비혼잡 시간대 운전시간 여유율 반영 및 수송수요에 탄력성을 증대시키는 방법으로 해결할 수 있으며, 수송 수요에 따른 열차운행 탄력성 증대는 시간대별, 요일별 혼잡도 고려, 운행시각 재조정 및 최대혼잡 시간대 현행 시격유지(최대 수송력 유지), 비혼잡시간대 운행시각 증대(수송력 과다공급 해소)로 해결할 수 있다.

운전소요시간 적정 여유율 반영은 기관사가 동력운전을 최소화하고 무동력 운전을 최대한 활용하도록

특 운전소요시간에 여유율을 반영하고 혼잡시간대 운전시간에 약 5% 여유율을 반영하고 비혼잡시간대 현행 운전시간을 적용으로 해결할 수 있다.

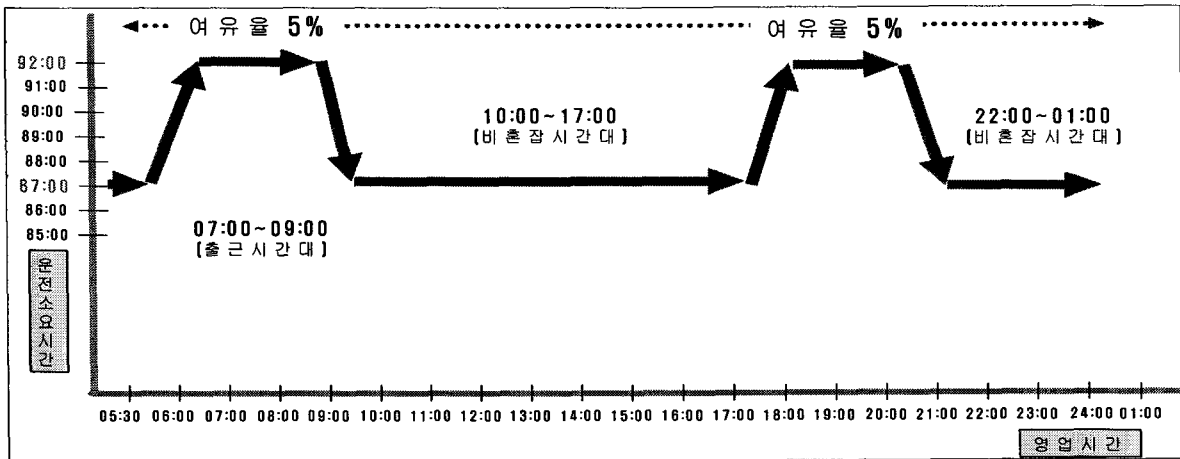


그림10. 시간대별 운전소요시간 적용

표6. 시행결과

시행항목	시행시기	특기사항
열차운행시격 재조정 (비혼잡 시간대 수송력 과다공급해소)	열차운행계획 변경 시행시 1호선 : 05.12.16부터 2호선 : 06.1.21부터 3,4호선 : 06.8.1부터	수송수요에 따라 운행시격을 정 하되, 이용승객이 매우 적은 심 야시간대는 승차대기 시간이 지 나치게 길어지지 않도록 운전시 격 유지(최대운행시격 15분이 내)
운전시간 여유율 반영 (비혼잡시간대의 운전 소요시간에 약 5%의 여유율 반영)	미 시 행	열차 지연 방지 기기취급 감소로 승차감 향상 및 차량고장 감소 사회적 약자에 대한 배려 가능 (출입문 사고 방지)

1,3,4호선 운행변경은 직통 운행하는 한국철도공사와 협의 실시

요일별 이용승객 패턴반영 미흡(정시운행 목적의 운전취급법)에 대한 개선방법은 승무원의 마인드와 표준운전 취급법을 전력 절감형으로 재정립하여야 한다.

표준운전 취급법 재작성 시행시 전력절감형 운전취급 재검토 및 표준운전취급법 작성은 동력운전과 제동의 빈번한 반복취급을 최소화하여야하고, 이러한 표준운전취급법 준수에 따른 효과는 전동차 운전용 전력사용량 감소, 승차감 향상 및 승무원의 피로와 차량고장 감소, 신규기관사의 운전기관 조기 숙달, 특이상황 발생시에도 당황하지 않고 안정적 조치가 가능하다.

### 3. 기대 효과

전동차 소비전력에 우선순위 10가지 중 가장 전동차 소비전력에 영향을 주는 4가지 요인들을 분석한 결과 2006년도 전동차용 전력사용 절감실적은 전력사용량 531,539천kwh에서 517,669kwh로 13,870kwh가 감소하였고, 전력요금은 39,334백만원에서 38,308백만원으로 1,026백만 원을 절감하는 효과가 나타났다.



#### 4. 결 론 및 향후연구 과제

열차운행시격 재조정에 대한 잠재적 문제는 비혼잡 시간대에 열차운행시격이 지나치게 길어진다는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 수송수요에 따라 운행시격을 정하되, 이용승객이 매우 적은 심야 시간대에는 승차대기시간이 지나치게 길어지지 않도록 적절한 운전시격을 적용하여야 한다.

운전소요시간 여유율 반영에 대한 잠재적 문제는 열차운행계획 수립에 현행보다 장기간이 소요된다는 문제점이 있으며, 이런 문제점은 열차운행계획 변경일정을 고려하여 충분한 기간 전부터 열차다이어 변경을 준비하고 실시하여야 한다.

#### 참 고 문 헌

1. 김치태 2002 “전동열차의 주행에너지 소비를 최소화 하는 최적운전”, 석사학위논문
2. 박성태 2003 “전동열차의 운전에너지 소비를 최소화 하는 경제적 운전패턴에 관한 연구” 석사학위논문
3. 김재영 2004 “도시철도차량 운행에 있어서 에너지 절감을 위한 자동운전 패턴에 관한 연구”, 석사학위논문
4. 서울메트로 2006 내부자료
5. 운전이론 1999 한국철도운전기술협회 김의일
6. 현대통계학 1999 박영사 유지성의 1인