

주행에너지 절약을 위한 철도차량의 효율적 열차주행 패턴

Efficient Driving Pattern of the Railway Vehicles for Driving Energy Saving

김 정 현* · 신 한 철** · 최 영 호*** · 한 수 희*** · 김 낙 교†

(Jung-Hyun Kim · Han-Chul Shin · Yung-Ho Choi · Soo-Hee Han · Lark-Kyo Kim)

Abstract - In this paper, we propose an efficient driving pattern which consumes less energy for driving from one station to next. Three driving patterns for four sections in the No. 5 subway line of Seoul Metropolitan Rapid Transit Corp. are compared for the energy consumption, the maximum speed, and the powering time. It turns out that the powering time and the maximum speed should be decreased as much as possible in order to achieve the efficient driving.

Key Words : Efficient driving patterns, Energy consumption, Driving energy saving

1. 서 론

지구온난화 등 환경문제가 글로벌 이슈로 부상하면서 녹색 성장을 위한 저탄소 교통체계 구축 및 친환경 SOC 이용 활성화에 관심이 고조되고 있다. 지구온난화 방지와 저탄소 녹색 성장을 위한 철도의 역할이 그 어느 때보다 크며, 각 철도관련 연구기관에서는 에너지 절약을 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 철도기술의 발전 이후 현재 도시철도 5, 6, 7, 8 호선에서는 고객의 요구와 경영효율화를 위해 1994년 창립이후 국내 처음으로 열차의 안전한 운행 제어를 위한 자동/무인 운전이 가능한 자동 열차 운행 장치(ATO : Automatic Train Operation)를 도입해 서울메트로의 2인 승무를 대신하여 1인 승무 자동운전을 원칙으로 보다 안정적인 정시 운행을 하고 있다[1]. 일반적으로 현재 ATO 자동운전은 열차의 안정성과 신뢰성을 바탕으로 PID제어기가 적용되어 제어기준 값(목표속도)과 피드백 값(실제속도)간의 오차에 의한 비례계수, 미분계수, 적분계수를 보상하여 열차에 필요한 역행(Powering)/ 제동(Braking) 명령 값을 계산한다[2]. PID 제어를 이용한 도시철도 차량의 자동/무인운전에서는 목표속도를 추종하기 위해 전동차량의 역행과 제동을 반복함으로 에너지 효율이 낮아 주행 소비에너지가 크다고 알려져 있다. 이에 열차의 운행 시 소비되는 에너지를 줄이기 위하여 PID제어, 최적제어, 퍼지 제어, 유전자 알고리즘 제어 등 다양한 제어기법을 열차제어에 적용하여 에너지를 줄이고자 하는 많은 연구가 진행되고 있다[3-8].

도시철도가 운영되기 위해서는 역사, 궤도, 전기, 통신 등의 기반설비 및 궤도 위를 달리는 차량이 필요하다. 도시철도 운영에 필요한 전기에너지는 전동차가 운행하는데 사용하는 전

차용과 일반시설물 및 차량기지 관리에 사용되는 고배(고압배전)용으로 분류된다. 서울시도시철도에서 사용되는 연간 사용전력량의 약 65% 정도는 전차용이고, 나머지 35% 정도는 고배용으로 사용되고 있다[9]. 역사의 조명, 에스컬레이터, 공조 및 냉난방시설 등으로 사용되는 고배용 전력은 이용승객의 서비스향상을 위해 전력절감에 한계가 있으며, 전기설비 증가(역사 스크린도어 설치 등), 온난화 영향으로 냉방전력 사용량의 증가 등 어쩔 수 없이 사용해야 하는 문제점이 있으므로 전력량 소비의 많은 비중을 차지하는 운행 중인 열차의 사용 전력량을 감소시키는 방법을 연구하는 것이 보다 효과적인 것이다. 도시철도 시스템 운영에 있어 에너지절약 방법에는 여러 가지가 있으며, 본 논문에서는 자동운행 제어에 사용되는 PID 제어기에 의해 고정된 역간 거리를 정해진 운전 시분내에 주행 에너지를 최소화하며 주행하는 열차의 특성을 직접 운전하고 분석하여 도시철도 차량의 주행에너지를 절약할 수 있는 최적 열차주행 패턴을 제안하고자 한다.

2. 도시철도 차량의 주행 특성

2.1 열차의 주행패턴

전동차는 선로의 여러 가지 조건, 차량의 특성, 운전시각의 단축을 위해 운행제어, 승차감 향상, 그리고 역간 주행에너지 소비의 감소 등 많은 것을 고려하면서 운전하게 된다. 선로의 조건이라 하면 역간의 거리, 구배, 곡선, 열차의 정지위치, 그리고 정차시간을 등을 말하며 차량의 조건은 열차의 주행저항, 견인력, 제동력, 그리고 차량자체의 성능을 말한다. 운전조건은 완전주행모드, 타행주행모드 그리고 선로의 제한속도 등을 말하는데 이러한 운전조건은 기관차뿐만 아니라 전동차를 포함한 모든 철도차량의 주행에 적용될 수 있다.

일반열차와 달리 도시철도 전동차는 역간거리가 짧고 정차역이 많아 역행과 제동을 빈번히 반복해야 하는 특성을 가지고 있다. 일반열차의 경우 일단 한번 가속하게 되면 최고속도로 계속 주행하여 역간의 평균속도가 대단히 높게 되는데 전동차의 경우 역간거리가 짧기 때문에 최대한 빨리 가속하고

* 정 회 원 : 서울도시철도공사

** 비 회 원 : 서울도시철도공사 과장

*** 정 회 원 : 건국대학교 전기공학과 교수

† 교신저자, 펠로우회원 : 건국대학교 전기공학과 교수

E-mail : lkkim@konkuk.ac.kr

접수일자 : 2012년 5월 3일

최종완료 : 2012년 7월 11일

최대한 빨리 감속해야만 역간 평균속도를 높리게 된다. 이러한 조건을 만족해 주행에너지를 최소화 하는 최적주행의 열차 운행패턴은 역행모드를 짧은 시간에 적용하면 주행에너지는 적게 소비되지만 운행속도가 낮아져 정해진 운전시분을 만족할 수 없게 되고 제동모드를 빨리 적용하면 정해진 거리를 만족할 수 없으므로 고정된 역간거리와 정해진 운전시분을 만족하는 타행모드의 시작점과 제동모드의 시작점을 찾는 것이 최적주행을 결정하는 주요한 변수가 된다.

지하철 전동차는 무엇보다 뛰어난 가·감속 성능을 가져야만 많은 승객을 최대한 빨리 수송할 수 있게 된다. 현재 도시철도의 주력 차종인 VVVF인버터제어 전동차는 1량당 최대 승객하중 20톤일 때 0 km/h에서 40km/h 까지 가속도 3.0 km/h/s를 일정하게 유지하며, 상용 만제동 시 감속도 3.5 km/h/s, 비상 제동 시 4.5 km/h/s의 제동 성능을 보유하고 있다.

도시철도 역간에서 전동차는 그림 1에서처럼 역행(powering)운전모드-타행(coasting)운전모드-제동(braking)운전모드의 단순한 운행 패턴을 적용하고 있고, 역간거리가 길 경우 상·하 구배에 따라 역행-타행-역행(제동)-타행-제동의 패턴으로도 운행되고 있다.

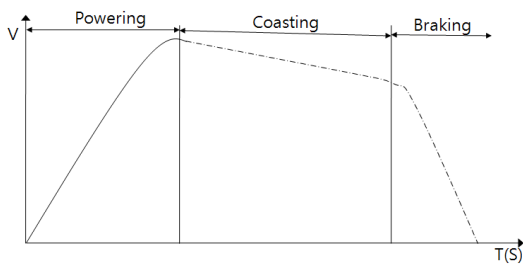


그림 1 열차의 주행 모드
Fig. 1 Driving mode of the train

그림 2는 가장 단순한 패턴인 역행-타행-제동을 1회씩 적용하여 운전하는 패턴을 보여주고 있는데 가·감속도를 달리 하여 운행하는 경우이다.

이렇게 가·감속도를 달리하는 여러 가지 주행패턴이 존재하기 위해서는 운전시분에 여유시분이 있어야 가능하며 운전시분이 촉박할 경우 다양한 주행패턴을 갖기는 어렵게 된다. 그 이유는 동일한 운전시분에 주행하더라도 실제로는 대부분의 구간에서 열차의 최고 속도가 제한되기 때문에 그림 2의 「1」과 같은 패턴은 현실적으로 존재하기 어렵고 「2」 패턴과 「3」 패턴 사이에서 결정되게 된다.

기본적으로 역행시간이 길어지면 최고속도가 높아지게 되고, 속도가 높아지면 역행시 에너지를 많이 소비하게 된다. 또한 역행시간이 길어지면 열차의 최고속도가 높아져 제동을 적용하는 시간도 동시에 길어지게 되는데 이것은 동일한 주행시간 내에서 타행시간이 짧다는 것을 의미하고, 최고속도가 높아져 제동 시 많은 에너지를 회생한다고 해도 회생 시 에너지가 역행 시에 소비한 에너지를 초과할 수는 없기 때문에 최고속도가 높으면 주행에너지를 많이 소비한다는 것을 예측할 수 있다.

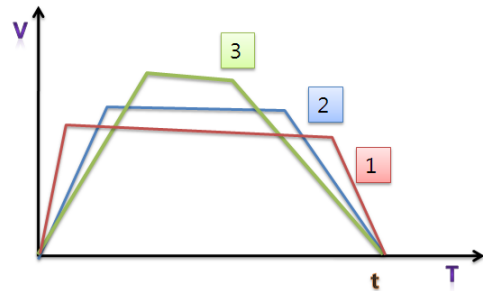


그림 2 단순 역행-타행-제동 운전 모드[10]
Fig. 2 Typical driving mode of Powering-Coasting-Braking

결국 동일한 시간에 주행을 한다면 역행과 제동이 짧고 타행시간이 길어야만 속도를 낮추게 되고 이것이 곧 주행에너지를 절감하는 전략이 된다.

그림 3의 1은 이상적인 주행패턴을 보여주고 있는데 가·감속도의 기울기가 수직이라고 하면 운행시의 속도를 최고로 많이 낮출 수 있게 되나 이것은 현실로는 불가능하며, 주행패턴 4는 실현 가능한 최대의 가·감속력으로 운전하는 경우를 말한다. 일반적으로 역행 시에는 기관사들이 가속도를 최대로 하여 운전하기 때문에 역행시의 가속도는 대부분 동일하게 되며, 제동시에는 기관사의 경험에 의해 서로 다른 감속도를 가지게 된다. 그러나 제동 감속도는 최대로 하는 것보다는 회생 제동력이 최대가 되는 5단 또는 6단 제동을 사용하는 것이 효율적이기 때문에 주행패턴 3과 같이 운전하는 것이 가장 효율적이라 할 수 있다.

주행패턴 2와 같이 제동 시 감속도를 더 낮추게 되면 동일한 시간 내에 주행하더라도 최고속도를 더욱 높여야 하므로 결국 주행에너지가 많게 된다. 최고속도를 낮추기 위해 가·감속도를 높인다는 것은 결국 타행시간이 늘어난다는 것을 의미하며 타행시간 t_4 에서 t_2 로 갈수록 최고속도를 낮추게 된다. 그러나 운전시분에 여유시분이 없게 되면 최대 가속도로 하여 최고속도까지 운행속도를 높여 운전하게 되며, 기관사 개인에 따른 제동 감속도만이 달라진다. VVVF인버터제어 전동차는 역행 시에 최대의 가속도로 역행하고, 제동 시에 회생제동 최대의 제동력으로 제동을 체결하여 열차의 최고속도를 낮추면 열차의 주행 시 소비되는 에너지를 절감할 수 있게 된다.

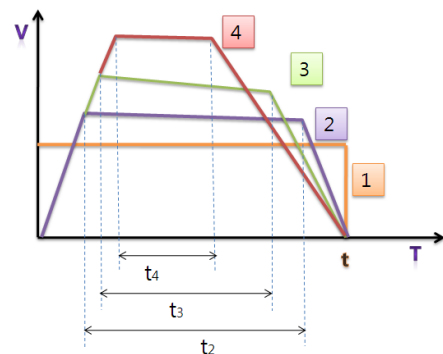


그림 3 실제의 역행-타행-제동 운전 모드[10]
Fig. 3 Actual driving mode of Powering-Coasting-Braking

그림 4는 역간거리가 길고 상구배가 존재할 경우 나타날 수 있는 역행-타행-역행-타행-제동의 운전패턴을 보여주고 있다. 그림에서 역행 시와 제동 시에 기울기가 같은 것은 동일한 가·감속도로 운행한 경우를 보여주고 있으며 최초 역행 시 최고속도를 더 높여 가속한 경우의 A'패턴과 낮은 속도에서 타행을 시작한 A패턴을 보여주고 있다. 또한 제 역행의 시점을 B로 할 수도 있고, B'로 할 수도 있어 그림 3과는 달리 다양한 패턴이 존재하게 된다.

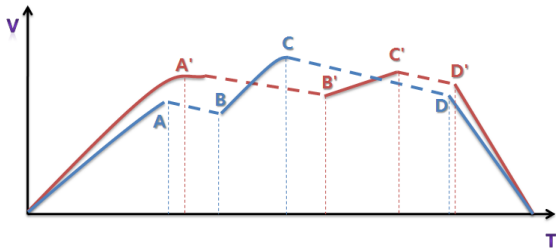


그림 4 역행-타행-역행-타행-제동의 운행패턴[10]
 Fig. 4 Driving Pattern of Powering-Coasting-Powering-Coasting-Braking

또한 시발역 출발 시에는 열차의 안전을 위하여 45km/h 이하에서 제동감도 시험을 하게 되고, 반대방향 선로로 건널선을 지나갈 경우 전철기의 속도제한으로 제동을 체결하거나, 열차의 뒷부분이 전철기를 모두 빠져 나올 때까지 저속으로 운행하기도 한다. 이와 같이 이론이 아닌 실제 주행의 경우 운행시간도 달라지고, 선형열차와의 간격 등에 의한 차내 신호 현상상태에 따라 역행과 제동이 반복되는 등 운행패턴에 다양한 변화를 보이게 됨에 따라 동일한 구간 내에서 운행하더라도 주행에너지는 많은 차이를 나타내게 된다.

2.2 열차의 최적주행

열차를 운전하는데 있어 최적주행이라 하면 에너지절감, 정시확보, 승차감 향상 및 안전성 향상 등 여러 가지 조건을 모두 만족하며 운전하는 주행이라 할 수 있다. 승차감은 선로의 불규칙성, 급출발 및 급제동 등으로부터 기인할 수 있으나 전동열차는 열차를 차장컴퓨터 시스템의 자동운전에 의해 제어하기 때문에 기관사의 수동운전에 의한 영향은 크지 않을 것으로 판단된다. 안전성은 분기부 등에서의 규정 속도 초과, 정지위치 실당 등 기관사가 열차를 운행하며 반드시 확인해야 할 사항이다.

정시확보는 승객과의 약속을 지키는 것은 물론 수송력 향상과 차량 운영효율 향상 등 운영측면에서도 대단히 중요한 의미를 지니게 된다. 그러나 차량의 속도가 빨라지면 운전시분은 단축되나 주행에너지는 전반적으로 커질 수밖에 없게 된다. 즉, 주행에너지를 절감하기 위해서는 기본적으로 운전시분을 늘려야 하나, 운전시분을 늘리면 수송효율이 저하되고, 차량 운영효율 또한 감소되어 오히려 비용이 증가하게 된다.

따라서 열차의 최적주행을 결정하기 위해서는 수송효율이나 차량 운영효율 등이 고려된 최적 운전시분이 결정되어야 하나 본 논문은 측정된 평균 운전시분을 고려하여 효율적인 주행패턴을 연구하였다.

3. 실험 및 고찰

3.1 측정방법

운전패턴에 따른 전력소비를 분석하기 위하여 5호선 실노선 4구간을 선정하여 이 구간에서의 실제로 전동차에 탑승하여 미리 준비해둔 수동운전 주행패턴대로 실시하였다. 모든 구간은 계획 운전시분 내에서 운전한 것으로 구간 선정은 직선구간/곡선구간/구배구간/시간 등을 고려하여 선정했으며 승객의 하중을 같게 하기 위해 미리 정해 놓은 구간 내 승객이 없는 비혼잡 시간 /같은 시각 3회에 걸쳐 열차주행 패턴을 다르게 하여 운전을 시행했다. 역간 소요시간은 기관사의 수동운전에 의해 측정되어 실질적으로는 오차범위가 존재한다. 운전 패턴에 따른 전력량을 비교하기 위해 A, B, C 세 가지 패턴을 제시해서 시행했으며 열차 내에 TCMS (Train Control Monitoring System) 컴퓨터 열차종합제어장치 내 로깅데이터의 가선전압과 전류값을 추출하여 데이터를 분석하였다. 표 1~4에 나타난 역행(Powering)시간은 초기 출발시점에서 타행시점까지의 시간을 표현한 것이다. 표 1~4에 나타난 표정속도는 정차역이 다수인 경우 출발점에서 도착역까지의 정차시간을 포함하여 주행거리를 시간으로 나눈 값을 의미하고 표정속도에서 정차시간은 모든 역 30초를 기준으로 계산하였으며 각 그림에서는 주행시간별 운행패턴을 나타내기 위해서 표정속도는 그래프로 표현하지 않았다.

3.2 도심구간 열차운행 유형분석

3.2.1 송정 - 마곡 구간

이 구간은 직선 구간으로 기준점은 선형 조건에 적합한 B와 같은 표정속도로 운행 시 17.8 Kwh를 현시하였고, 역행 (Powering)시간이 길수록 주행 최고 속도가 높을수록 소비전력량이 증가되었고 C패턴 시 운전시분에 맞추기 위해서 제동 시 급격한 감속도로 승차감이 떨어졌다.

표 1 송정-마곡 구간 열차주행속도에 따른 소요시간
 Table 1 Running time due to the driving speed for SongJeong-Magok

구분	A	B	C
구간	역간거리 1.1[km]-소요시간 100초		
주행최고속도	71	68	64
역행시간(s)	28	25	21
표정속도[Km/h]	33.5	33	31
소비전력량[Kwh]	22.1	17.8	15.3

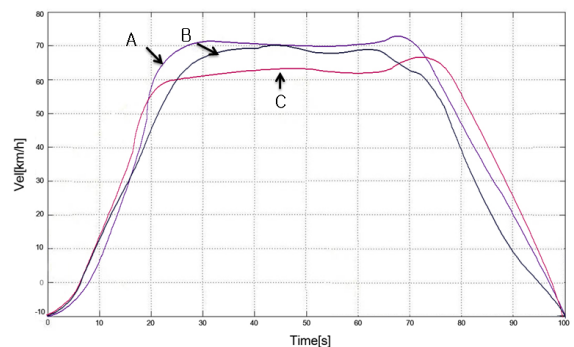


그림 5 송정-마곡 주행패턴
 Fig. 5 Driving pattern for SongJeong-Magok

3.2.2 을지로4가 - 동대문역사문화공원 구간

이 구간은 도심구간 중 승객이 많고 곡선이 심한 구간으로 기준점은 선형 조건에 적합한 B와 같은 표정속도로 운행시 14.6 Kwh 측정되었고 역행(Powering)시간이 길수록 주행 최고 속도가 높을수록 소비전력량이 증가되었다. 곡선구간은 곡선 저항 때문에 같은 거리, 같은 시간의 직선거리에 비해 소비전력량이 더 증가 될 것이다.

표 2 을지로4가 - 동대문역사문화공원 구간 열차주행속도에 따른 소요시간

Table 2 Running time due to the driving speed for Euljiro4ga-Dongdaemun history and culture park

구분	A	B	C
구간	역간거리 0.9[km]-소요시간 100초		
주행최고속도	50	45	40
역행시간(s)	22	20	18
표정속도[km/h]	33.5	33	31
소비전력량[kwh]	17.3	14.6	13.3

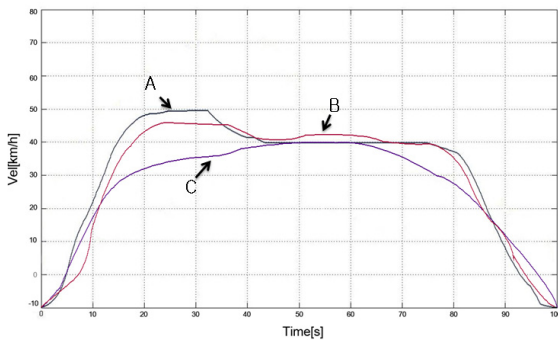


그림 6 을지로4가 - 동대문역사문화공원 주행패턴
Fig. 6 Driving Pattern for Euljiro4ga-Dongdaemun history and culture park

3.2.3 우장산 - 발산 구간

이 구간은 상구배가 있는 구간으로 기준점은 선형 조건에 적합한 B와 같은 표정속도로 운행 시 21.9 Kwh 측정되었고 이 구간 역시 역행(Powering)시간이 길수록 주행 최고 속도가 높을수록 소비전력량이 증가되는 것을 알 수 있다. 만약 열차가 역을 출발하면서 하구배로 접어들다면 주행에너지도 절감하고 운전시분도 상당히 줄어들 것으로 예측된다. 또한 역 진입 시에는 선로의 구배를 상구배로 되도록 건설하면 제동시 감속도가 높아져 제동시간이 짧아지므로 역행시의 속도를 낮출 수 있어 소비전력량 절감효과를 기대할 수 있을 것이다.

표 3 우장산 - 발산 구간 열차주행속도에 따른 소요시간

Table 3 Running time due to the driving speed for Ujangsan-Balsan

구분	A	B	C
구간	역간거리 1.8[km]-소요시간 200초		
주행최고속도	71	65	55
역행시간(s)	62	50	43
표정속도[km/h]	34	33	31
소비전력량[kwh]	27.4	21.9	17.1

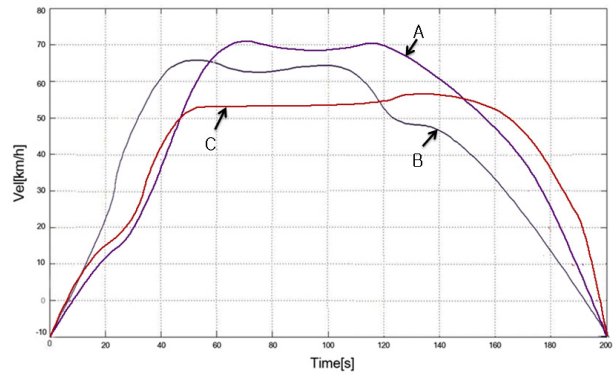


그림 7 우장산 - 발산 주행패턴
Fig. 7 Driving pattern for Ujangsan-Balsan

3.2.4 신금호 - 행당 구간

이 구간은 구간별 제한속도에 의해 역행(Powering)을 2번 해야 하는 구간으로 기준점은 선형조건에 적합한 B와 같은 표정속도로 운행시 18.7 Kwh 측정되었다. 이 구간 역시 역행(Powering)시간이 길수록 주행 최고 속도가 높을수록 소비전력량이 증가됨을 알 수 있다.

표 4 신금호 - 행당 구간 열차주행속도에 따른 소요시간

Table 4 Running time due to the driving speed for Sinkeumho-Haengdang

구분	A	B	C
구간	역간거리 1.6[km]-소요시간 200초		
주행최고속도	60	65	40
역행시간(s)	58	54	43
표정속도[km/h]	33.5	33	32
소비전력량[kwh]	23.1	18.7	15.7

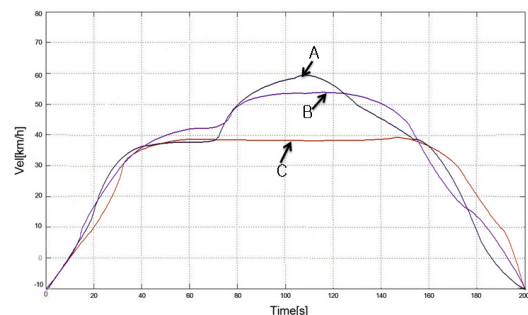


그림 8 신금호 - 행당 주행패턴
Fig. 8 Driving pattern for Sinkeumho-Haengdang

3.3 결과 고찰

5호선 실제 노선을 대상으로 4구간을 선정하고 열차의 주행패턴을 다르게 하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

표 5 열차주행 패턴별 소비전력 비교

Table 5 Comparison of power consumption of the train driving patterns

구분 \ 주행 패턴	A [kwh]	B [kwh]	C [kwh]	B 패턴과의 비교	
				A 패턴	C 패턴
송정-마곡	22.1	17.8	15.3	20% 증가	16% 감소
을지로4가-동대문역사	17.3	14.6	13.3	15% 증가	6% 감소
우장산-발산	27.4	21.9	17.1	21% 증가	28% 감소
신금호-행당	23.1	18.7	15.7	20% 증가	19% 감소

송정-마곡 구간은 역간거리 1.1 Km - 소요시간 100 초의 직선 구간으로 기준점은 선형 조건에 적합한 B와 같은 표정속도로 운행 시 소비전력은 17.8 Kwh로 측정됐으며 역행시간이 길수록 주행 최고 속도가 높을수록 소비전력량이 증가함을 알 수 있었다. B패턴을 기준으로 비교했을 때 A패턴은 소비전력이 22.1 Kwh로 20% 증가했고 C패턴은 15.3 Kwh로 16% 감소되는 것을 알 수 있었다.

을지로4가-동대문역사문화공원역은 역간거리 0.9Km - 소요시간 100초 구간으로 도심 구간 중 승객이 많고 곡선구간으로 제한 최고 속도가 50 Km/h 이하로 기준점은 선형 조건에 적합한 B와 같은 표정속도로 운행 시 14.6 Kwh로 측정됐으며 B패턴을 기준으로 비교했을 때 A패턴은 소비전력이 17.3 Kwh로 15% 증가했고 C패턴은 13.3 Kwh로 6% 감소되는 것을 알 수 있었다.

우장산-발산역은 역간거리 1.8 Km - 소요시간 200 초 상구배가 있는 구간으로 기준점은 선형 조건에 적합한 B와 같은 표정속도로 운행 시 소비전력은 21.9 Kwh로 측정됐으며 B패턴을 기준으로 비교했을 때 A패턴은 소비전력이 27.4 Kwh로 21% 증가했고 C패턴은 17.1 Kwh로 28% 감소되는 것을 알 수 있었다. 열차가 역을 출발 후 하구배일 경우는 역행시의 속도를 낮출 수 있어 주행에너지가 절감될 것이고 역 진입 시 선로가 상구배가 되도록 건설하면 제동시 감속도가 높아 제동시간이 짧아지므로 소비전력량 절감할 수 있을 것으로 기대된다.

신금호-행당은 역간거리 1.6 Km - 소요시간 200 초 구간별 제한속도에 의해 역행을 2번 해야 하는 구간으로 기준점은 선형 조건에 적합한 B와 같은 표정속도로 운행 시 소비전력은 18.7 Kwh 측정됐으며 B패턴을 기준으로 비교했을 때 A패턴은 소비전력이 23.1 Kwh로 20% 증가했고 C패턴은 15.7 Kwh로 19% 감소되는 것을 알 수 있었다. 이 구간 역시 역행시간이 길수록 소비 에너지가 증가 된다는 것을 알 수 있다. 표 4에서는 A패턴과 B패턴의 주행최고속도와 역행시간이 상대적인 값의 크기를 갖고 있는데 이 구간은 선로가 하구배 조건으로 회생전력에 의해 주행에너지와 주행최고속도는 구배에 의해 비례하지 않을 수도 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 5호선 전동차의 구간별 적정 운전시분 이내에서 실측 데이터 분석을 통해 선로조건(직선, 구배, 곡선 등)이 다른 구간을 선정하여 구간별 효율적 주행 패턴 4개를 제안했다.

B패턴과 비교했을 경우 A패턴은 평균 소비에너지 증가량이 19%였고 C패턴 감소량은 17%였다. 승차감 향상 및 주행 에너지를 절감 할 수 있는 최적의 주행패턴은 B패턴이다. C패턴은 주행에너지를 절약할 수 있지만 감속도가 커서 승차감이 저하되었고 에너지 효율측면에서 B패턴 보다 바람직하지만 표정속도가 낮아 열차 운행 고객서비스 측면이 저하되고 소요 차량 편성수에 영향을 미쳐 비용이 증가될 수 있다.

출발 후 역행 (Powering)시간이 길수록 주행에너지 소비가 증가되었고 운행 중 타행시점을 선정하는 것에 의해 주행에너지가 감소된다. 출발 후 선로의 구배조건에 따라 다를 수도 있지만 열차의 속도가 높아지면 제동시작시의 속도가 높아져 많은 에너지를 회생할 수 있으나 제동시 운동에너지가 전기에너지로 변환되어 전차선으로 환원되는 효율은 역행시에 전기에너지가 운동에너지로 변환된 효율보다 낮기 때문에 결국 열차의 속도를 높이면 주행에너지는 증가하게 된다.

향후 과제로는 열차의 선로조건 (구배, 곡선 등), 차량 조건 (열차저항, 견인력, 회생제동 등)을 적용한 최적화 제어기법 시뮬레이션을 통해 좀 더 정확한 비교 분석 필요하다.

표정속도가 낮은 주행패턴은 에너지 효율측면에서 보다는 최적화 기법 접근으로 해석하고 기관사의 기량 즉 인적요인은 개인별로 차이가 있기 때문에 우수 기관사로 하여금 여러 차례의 시험운행을 실시하여 최적의 운행패턴을 참고하고 최적화 제어 기법을 적용하여 향후 개발될 신조전동차의 자동 운전/무인운전 알고리즘에 적용한다면 열차의 안전과 주행에너지를 절감하는 효율적인 열차 주행패턴이 될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Chi Tae Kim, "Optimal operation for Minimizing Energy Consumption in Electric Multiple Unit," Graduate School of Railroad/ Seoul National University of Technology, MS Thesis, 2001
- [2] Jae Young Kim, "A study on ATO Pattern for minimizing Energy Consumption under Urban Rail System," Graduate School of Railroad/ Seoul National University of Technology, MS Thesis, 2003
- [3] 한성호, 안태기, 김원경, 조연욱, "에너지 최소화를 위한 열차 최적운전제어 기법," 대한전기학회 1998년도 하계 학술대회 논문집 A, p.365-367, 1998
- [4] 김영규, 박세영, 박영석, 정일봉, 한문섭, "도시철도 운전에너지 효율화를 위한 조사 분석 연구," 한국철도학회 2009년도 춘계학술대회 논문집, p.612-618, 2009
- [5] 박순기, "열차운전곡선을 위한 계산 프로그램," 충남대학교 대학원 석사 논문, 1995
- [6] 탁길훈, "최적제어를 이용한 도시철도 차량 자동주행 제어 연구," 서울산업대학교 철도대학원 석사논문, 2006

- [7] 최병운, "직류 전기철도 에너지 절감방안 연구," 서울산업대학교 철도대학원 석사논문, 2006
- [8] 정병현, "일본의 전기부분에서의 에너지절약을 위한 철도기술개발 동향," 철도저널 제12권 제2호 pp.30-34, 1229-1102, 2009
- [9] 5678서울도시철도 통계자료, (2009. 6)
- [10] 서울시도시철도공사 "표준운전선도", (2002)

저 자 소 개



김 정 현 (金 禎 鉉)

건국대학교 전기공학과 졸업(2005)
 건국대학교 전기공학과 석사(2011)
 서울시도시철도공사 재직



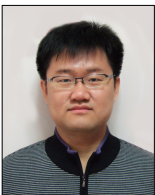
신 한 철 (申 韓 哲)

건국대학교 기계공학과 졸업(1991)
 연세대학교 기계공학과 석사(2001)
 한양대학교 기계공학과 박사수료(2005)
 도시철도공사 재직



최 영 호 (崔 榮 鎬)

1968년 9월 6일생. 1991년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업. 2001년 12월 University of Southern California 졸업 (공학). 2001년~2004년 인텔 선임 연구원. 2004년~현재 건국대학교 전기공학과 교수



한 수 희 (韓 水 熙)

98.02. 서울대학교 전기공학부 학사
 00.02. 서울대학교 전기공학부 석사
 03.08. 서울대학교 전기공학부 박사
 09.03.~건국대학교 전기공학과 조교수
 관심분야: 모델예측제어, CACSD



김 낙 교 (金 洛 敎)

73.02. 한양대학교 전기공학과 학사
 77.08. 연세대학교 전기공학과 석사
 85.08. 연세대학교 전기공학과 박사
 78.01.~80.08 한국원자력연구원 연구원
 80.09~ 건국대학교 전기공학과 교수
 관심분야: 최적제어, 적응제어, 퍼지제어