

도시철도차량의 시스템 경량화 기술에 관한 연구

A Study for the System Light-Weighting Technology of Urban Railway Vehicle

박광복† 정현승* 김종운**
Kwang-Bok Park Hyun-Seung Jung Jong-Woon Kim

ABSTRACT

The 21th century is carried out a rearing activity of green industries as a part of friendly echo policy for preservation of earth environment. Korean government is spreaded on a whole country to setting up a goal to a sustainable growth power of national for low carbon green growth.

The recently rolling stock is received the footlights as a best friendly echo transportation of transport system of automobile, airplane, ship etc., also that is playing a big role to reduction of CO₂ greenhouse gas and a discharge of air pollution.

This study was carried out the investigation and analysis for technology trend of the system light-weighting of a recently urban railway vehicle on commercial operating in domestic and foreign countries. As the results are proposed a short-term development technology and a long-term development technology of the system light-weighting to be developed for reduction weight of urban railway vehicle.

1. 서론

21세기는 각국에서 지구환경을 보존하기 위하여 친환경정책의 일환으로 녹색산업의 육성 활동을 활발히 추진하고 있다. 우리나라 정부에서도 저탄소녹색정장을 국가의 지속성장 동력으로 목표를 설정하고 사회 전체로 확산시키고 있다.

최근 철도차량은 자동차, 항공기, 선박 등의 교통기관 중에서 가장 친환경교통수단으로 각광을 받고 있으며, 또한 CO₂ 온실가스와 대기오염물질 배출 감축에 큰 역할을 하고 있다.

도시철도차량의 경량화는 추진동력 절감, 진동·소음 저감, 궤도 유지보수비 절감, 재료비 절감 등의 효과가 있는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 국내·외에서 상업운영 중에 있는 최신 도시철도차량의 시스템 경량화 기술 동향에 대하여 조사·분석하여, 차량의 차체, 실내의장설비, 대차시스템, 제동장치, 추진제어시스템, 보조전원장치, 판토틀레프 등의 시스템 신기술에 대하여 우선적으로 개발이 필요한 “경량화 개발기술”과 중장기적으로 추진되어야 할 “미래 개발기술”에 대하여 제시하였다.

† 교신저자, (주) 이산, 철도사업본부
E-mail : sampark@dreamwiz.com

* 한국철도기술연구원, 신교통연구본부

** 한국철도기술연구원, 시스템 안전연구실

2. 본론

2.1 국내외 도시철도차량 경량화 기술동향

2.1.1 우리나라의 도시철도차량 경량화 기술 현황

우리나라 도시철도차량의 경량화는 대부분은 차량 및 부품 제작사에서 제품의 원가를 낮추는 목적으로 추진되었다. 그로 인하여 도시철도차량의 경량화 기술은 선진국보다 발전 속도가 더디고 뒤처지게 되었다.

1994년에 과천시 전동차는 STS 301L 저탄소 고장력 스테인리스 강(Low Carbon High Tensile Stainless Steel)을 채용하여, 차체를 기술개발 하였다. STS 301L HT는 일반구조강재(SS400)보다 약 6배 정도 인장강도가 높으며, 차체 재료로 사용하여 강재차체보다 약 15~20% 정도 경량화 되었다. 이 기술은 인천공항철도, 서울메트로, 서울도시철도공사, 부산교통공사, 대구지하철공사 등의 지하철 전동차에 사용되었다.

표 1에 나타나 있는 것 같이 2001년도에 기술개발 된 표준전동차의 주요 경량화 기술내용은 다음과 같다. 이 차량은 알루미늄 합금 차체를 개발하여 약 20% 정도의 중량절감을 달성하였다. 이 알루미늄 합금 차체기술은 광주지하철, 대전지하철, 서울메트로 9호선 등의 지하철 전동차에 사용되었다.

의장설비의 경량화는 의자와 난방기 설치 구조를 단순화시켰고, 의자 커버는 모켓트를 사용하였으며, 내장판은 난연성 FRP를 일체 성형으로 제작하여 경량화 하였다.

대차는 볼스터레스 대차를 사용하였으며, 현가장치는 1차 고무스프링과 2차 공기스프링을 채용하여 주행성능을 향상시키고, 중량을 감소시켜 경량화 하였다.

열차추진제어는 1C4M 방식을 사용하여, 한 개의 인버터가 4개의 견인전동기를 일괄제어함으로써 제어회로를 단순화하여 중량을 감소시켰다. 주전력변환장치의 인버터는 VVVF-IGBT 제어방식을 사용하였다. 냉각방식은 히트 파이프(Heat Pipe) 자연냉각방식을 채용하여 경량화 하였다.

표 1 우리나라 주요 전동차 기술현황

항목	표준전동차	서울지하철 6호선	인천공항철도	서울메트로 9호선	대전지하철
개통년도	2001	2001	2007	2009	2006
편성구성	4량(2M2T)	8량(4M4T)	6량(3M3T)	4량(2M2T)	4량(2M2T)
차체크기 (m)	L19.5xW3.12 xH3.6	L19.5xW3.12 xH3.6	L19.5xW3.12 xH3.6	L19.5xW3.12 xH3.6	L17.5xW2.75 xH3.6
차량속도	100Km/h	100Km/h	120Km/h	100Km/h	100Km/h
차체재질	알루미늄 합금	스테인리스 강	알루미늄 합금	스테인리스 강	알루미늄 합금
승객정원	616명	1,576명	912명	606명	474명
추진제어	VVVF, IGBT				
총출력	1,600kw	3,360kw	3,360kw	1,800kw	1,680kw
전동기	유도전동기	유도전동기	유도전동기	유도전동기	유도전동기
집전장치	교차형	교차형	교차형	교차형	교차형
대차	볼스터레스	볼스터레스	볼스터레스	볼스터레스	볼스터레스
열차중량	128.7톤	262.4톤	194.4톤	139.8톤	120톤
평균중량	32.18톤	32.8톤	33.4톤	34.95톤	30톤

유도전동기는 추진과 회생제동을 제어할 수 있도록 회로를 구성하고, 유도전동기의 냉각 방식은 자기통풍방식을 사용하였다.

보조전원장치의 인버터는 VVVF 제어 시스템과 IGBT 전력소자를 채용하였고, 냉각방식은 자연냉각방식을 적용하였다.

변압기의 냉각방식은 건식자연냉각식을 사용하였다. 판토품레프는 크로스 암형(Cross Arm Type)이고, 습판체는 동계소결합금을 사용하였다.



그림 1 한국형표준전동차



그림 2 서울메트로 9호선 전동차



그림 3 대전 지하철 전동차



그림 4 JR 동경급행철도 E233계 전차

2.1.2 외국 도시철도차량 경량화 기술동향

(1) 일본 JR 동경급행철도 기술현황

일본의 동경근교철도네트워크는 근거리 교외구간을 연결하는 급행철도로서, JR 도시철도 및 사철메트로와 함께 도시철도교통으로써 중요한 역할을 담당하고 있다.

JR 동경급행철도 초유선은 도쿄에서 오즈기까지 노선으로 2006년부터 최신 차량인 E233계 전차를 운행하고 있다. 이 차량은 스테인레스 강 차체로 제작하였고, 알루미늄 합금 선반, 행선지 현시판, 현대식 실내디자인 등으로 개선하여 상업운영 하고 있다. 차량의 중량은 Tc: 32.4톤, M: 32.2톤, T: 29톤으로 기존의 E201계 및 E205계보다 경량화 하였다.

JR 동경급행철도 요코하마선은 오프나에서 하시모토까지 노선으로 2004년 2월에 개통하여, Y500계 전차를 운행하고 있다. Y500계 차량은 E201계를 모델로 개발한 차량으로 스테인레스 강 차체로 제작 하였고, 전두부 형상이 개선되었으며, 전기기기의 효율화, 집중화 및 경량화한 표준차량이다. 차량의 중량은 Tc: 26톤, M: 32톤, T: 24.5톤으로 경량화 하였다.

JR 동경급행철도 메쿠로선은 메쿠로에서 일길까지 노선으로 5000계 전차를 운행하고 있다. 이 차량은 E231계를 모델로 개발한 차량으로 2003년 3월에 동경급행철도 전원도시선을 시작으로 7개 노선에서 운행되고 있다. 이 차량은 전장품의 고성능화, 집약화, 유지보수비 절감 및 경량화로 전력비의 40%를 감축시켰다. 차체는 스테인레스 강이고, 차체의 폭은 2,800mm이다. 차량의 중량은 Tc: 25.8톤, M: 31.8톤, T: 24.3톤으로 경량화 하였다.

(2) 그 외 국가의 도시철도차량 기술현황

(가) 홍콩 지하철

홍콩국제공항에서 홍콩역까지 운행하는 MTR은 차체를 스테인리스 강으로 제작하였으며, 열차는 8량 편성으로 구동차 6량과 트레일러 2량으로 구성되어 있다. 열차의 최고속도는 140km/h이고, 승객정원은 1,600명이다. 대차는 공기스프링 볼스터레스 대차를 사용하였으며,

차체길이는 22m이며, 차폭은 3.118m이다. 차량의 평균중량은 38.7톤이다.



그림 5 홍콩 지하철 MTR

그림 6 아테네 지하철

그림 7 터키 지하철

(나) 그리스 아테네 지하철

그리스 아테네 지하철은 차체를 스테인리스 강으로 제작하였으며, 열차는 6량 편성으로 구동차 4량과 트레일러 2량으로 구성되어 있다. 열차의 최고속도는 120km/h이고, 대차는 공기스프링 볼스터레스 대차를 사용하고 있다. 차체길이는 17m이고, 차폭은 2.8m이다.

(다) 터키 지하철

터기 TCDD 지하철의 차체는 스테인리스 강을 사용해 제작하였고, 열차는 3량 편성이다. 최고속도는 140km/h이고, 차체길이는 22.77m이며, 차폭은 2.95m이다.

(라) 프랑스 파리 메트로

프랑스 파리 메트로에는 각 노선마다 다양한 차량이 운영되고 있으나, 파리 메트로 14호선은 파리 동남부의 올림피아드역에서 서북부의 세인트 라자르 역간 총전장 9km의 노선이다. 열차는 6량 편성으로 구성되어 있다. 열차의 최고속도는 80km/h이고, 차체의 폭은 2.45m이다. 승객정원은 727명이다. 열차의 신호시스템은 지멘스 CBTC 기반의 자동운전시스템이 설비되어 있다. 차량은 자동무인운전으로 운영되고 있고, 역사도 무인운영 되고 있다.

표 2 외국의 도시철도차량 기술 현황

항목	동경급행 231계	동경급행 E233계	횡병고속철도 Y500계	홍콩 지하철	파리 메트로
개통년도	2002. 9	2010. 3	2004. 2	1979	1998
편성구성	10량(5M5T)	10량(6M4T)	8량(4M4T)	8량(6M2T)	6량(4M2T)
차체크기(m)	L19.7xW2.8xH4.05	L19.5xW2.95xH3.62	L19.8xW2.8xH4.05	L22xW3.118xH3.698	W2.45
차량속도	120Km/h	120Km/h	120Km/h	140Km/h	80Km/h
차체재질	스테인리스	스테인리스 강	스테인리스 강	스테인리스 강	-
승객정원	1,498명	1,564명	1,240명	1,240명	474명
추진제어	VVVF, IGBT	VVVF, IGBT	VVVF, IGBT	VVVF, IGBT	VVVF, IGBT
총출력	3,800kw	3,360kw	3,040kw	-	-
전동기	유도전동기	유도전동기	유도전동기	유도전동기	유도전동기
집전장치	싱글압형	싱글압형	싱글압형	교차형	교차형
대차	볼스터레스	볼스터레스	볼스터레스	볼스터레스	경전철 대차
열차중량	284.1톤	317.9톤	206.5톤	310톤	-
평균중량	28.4톤/량	31.8톤/량	25.8톤/량	38.7톤/량	-

2.2 주요 시스템의 경량화 기술동향

2.2.1 차체의 경량화 기술

- 강재 차체

1974년에 개통한 서울메트로의 1호선과 그 이후 운행한 서울메트로 2, 3, 4호선, 부산교

통공사 지하철 1호선 등의 전동차는 일반구조용강(SS400)으로 차체를 제작되었다.

- 스테인레스 강 차체

1994년에 개통한 코레일 과천선은 저탄소 고장력 스테인리스 강(Low Carbon High Tensile Stainless Steel) 차체를 도입하였다. 그 이후 서울도시철도공사 지하철 5, 6, 7, 8호선, 부산지하철 1, 2, 3호선, 대구지하철 1, 2호선, 인천지하철 1호선, 서울메트로 9호선 등에 적용되었다.

STS 301L 저탄소 고장력 스테인리스 강 차체는 기존의 차체 부재별로 요구되는 강도 및 특성에 적합하게 STS 301L LT, DLT, MT 및 HT로 분류하여 적용함으로써 약 20% 정도의 경량화 하였다.

- 알루미늄 합금 차체

2001년에 개발 된 한국형표준전동차의 차체는 알루미늄 합금 압출재로 개발하였다. 이 차체는 광주지하철, 대전지하철 1, 2호선, 인천공항철도 등에 사용되었다. 알루미늄 합금 차체는 저탄소 고장력 스테인리스 강 차체에 비해 약 15~25% 정도 경량화 되었다.

1990년도 중반에 알루미늄 합금 압출재 가공기술이 도입되어, 차체 측골조의 상·하판 두께는 3mm로, 격판의 두께는 3mm로 제작하였다. 최근에는 알루미늄 합금 압출재 가공기술이 향상되어, KTX II 산천호는 G7 객차의 마루골조의 상하판 두께를 3mm에서 2.8mm로 개선하였다.

일본은 알루미늄 합금 중공압출재의 가공기술이 발달되어, 차체의 마루골조의 상하판 두께는 2.5mm, 격판은 2.2mm까지 얇게 제작하고 있다.

- 복합소재 차체

독일 봄바르디아사, 프랑스 알스톰사 등에서는 경전철의 차체를 복합소재로 제작하여 상업운행을 하고 있고, 스위스, 이탈리아, 프랑스 등은 객차를 개발하여 운행하고 있다. 우리나라는 2007년에 TTX 틸팅차량의 차체를 복합소재로 개발하여 실용화하였다.

복합소재 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Polymer, 탄소강화플라스틱)의 차체는 알루미늄 합금 차체보다 약 30% 정도 가볍게 제작할 수 있고, 성형성이 우수하다. 또한 차체의 용접공정이 없어 제작공수를 절감할 수 있고, 차체 손상 시 보수가 쉬운 장점을 갖고 있다. 한편 차량 충돌 시 쉽게 파손하거나, 중량물 설비품의 설치구조 및 일체의 복합소재 차체 제작이 어렵다.

따라서 복합소재 차체의 변형 개선, 처짐 방지, 요구되는 강도의 확보, 중량물 설치 구조 개선, 기밀문제 등 제작기술에 대하여 연구개발이 필요한 상태이다.

2.2.2 대차 경량화 기술

그림 8의 좌측은 볼스터 대차 이고, 우측은 볼스터레스 대차이다. 볼스터 대차는 상·하부 볼스터를 연결하는 스윙행가장치가 설비되어 있다. 반면에 볼스터레스 대차는 양측의 사이드 프레임에 서로 용접으로 연결하여 일체화시킴으로써 상부 볼스터, 스윙행가 등을 제거하여 경량화 하였다.

그림 9는 1차 고무스프링 현가장치이다. 기존에 1차 현가장치는 코일스프링 방식을 사용하여 구조가 복잡하고 무거웠다. 하지만 그림 9와 같이 1차 현가장치에 고무스프링을 사용

함으로써 구조가 간단하고, 전후, 좌우, 상하 방향의 진동감쇠가 가능하여 주행안정성이 향상되었다.

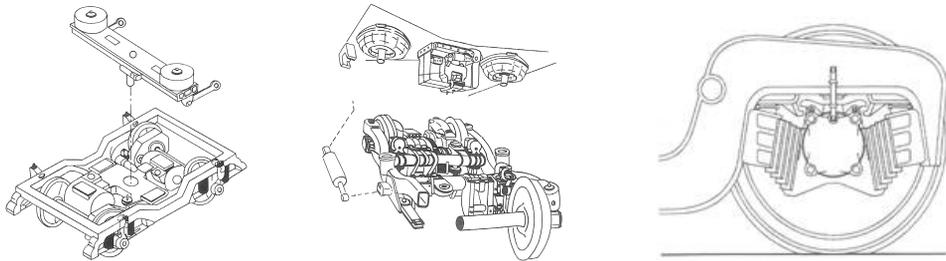


그림 8 볼스터 대차(좌측) 및 볼스터레스 대차(우측) 그림 9 1차 고무스프링 현가장치 대차의 경량화를 위하여 알루미늄 합금 차축장치, DDM 차축직접구동장치, 차륜디스크, 신터드 라이닝, 중공축, 알루미늄 합금 디스크 등은 기술개발을 계획하고 있거나, 개발 중에 있어 실용화가 가능할 것으로 보인다.

알루미늄 합금 대차 프레임, 복합소재 대차 프레임, 신소재 대차 프레임, 관절대차, 싱글 축 대차 등은 장기간 연구개발과 많은 개발비가 투자되어야 확보가 가능한 기술이 된다.

2.2.3 견인전동기 경량화 기술

도시철도차량에 사용되고 있는 견인전동기(Traction Motor)는 대부분 교류유도전동기를 사용되고 있다. 교류전동기(AC Traction Motor)는 직류전동기에 비하여 브러쉬(Brush)가 없어 무접점으로 회전방향을 전환할 수 있고, 경량화, 고출력 및 고속회전이 용이하다. 또한 이 전동기는 유지보수비가 적게 드는 장점이 있다.

최근 신기술로 개발되고 있는 견인전동기는 회전자의 전자석 대신에 영구자석을 채용하고 있다. 이 견인전동기는 프랑스, 일본 등에서 개발하여 상용화 중에 있다. 표 3에 나타나 있는 바와 같이 영구자석을 이용한 견인전동기는 에너지 효율 향상, 출력증대, 중량감소, 유지보수비 절감, 저소음 등의 장점이 있는 것으로 알려져 있다.

표 3 전자석 및 영구자석과 전동기 비교

구분	전자석전동기	영구자석전동기
출력	160Kw	270kw
중량	785Kg	610Kg
회전수	1,585rpm	2,960rpm
효율	90~91%	96%
소음, dB(A)	92(4,000rpm) 96(5,000rpm)	76(4,000rpm) 79(5,000rpm)

2.2.4 주전력변환장치 경량화 기술

주전력변환장치의 냉각방식은 열교환기(Heat Exchanger)의 히트 파이프(Heat Pipe)에 의한 강제냉각방식과 자연냉각방식이 사용되고 있다. 코레일의 분당선, 과천선 등은 히트 파이프에 의한 강제냉각방식을 사용하고 있고, 광주지하철, 대전지하철, 인천공항철도, 서울메트로 9호선 등은 히트 파이프에 의한 자연냉각방식을 사용하고 있다.

일본의 신간선 및 도시철도차량 주전력변환장치의 냉각은 통풍냉각(Draft Cooling)방식을 사용하고 있다. 이는 인버터를 통풍냉각 함으로써 냉각송풍기(Cooling Blower)를 삭제시켜 경량화 되었다. 따라서 주전력변환장치 냉각방식은 선진국에서 기술개발 되어 상용화 중에 있는 드래프트 냉각(Draft Cooling)방식의 기술개발이 필요하다.

최근 추진제어시스템은 VVVF-IGBT 제어방식을 사용하고 있다. 이 기술은 현재는 광주 지하철, 대전지하철, 인천공항철도, 서울메트로 9호선 등에 사용 중에 있다.

일본은 도시철도차량에 IGBT 실리콘 다이오드 제어소자를 사용하지만, 경량화를 위하여 SiC 실리콘 카바이드(Silicon Carbide) 소자의 도입을 위하여 연구개발 중에 있다. SiC 실리콘 카바이드 소자의 실용화를 위하여 관련 전력반도체 연구기관과 공동연구를 통해 기술개발이 필요하며, SiC 제어소자의 개선에 따른 중량 감소 효과는 큰 것으로 알려져 있다.

2.2.5 집전장치 경량화 기술

도시철도차량에 사용하고 있는 판토품은 교차형이다. 열차에 전원공급을 위한 전차선의 형식으로는 지상구간은 심플카테너리방식을 지하구간은 강체 전차선을 사용하고 있다. 일본 동경급행철도에서 운영 중인 JR 동일본 E231계, E233계 및 Y500계 전차는 고속전철에서 사용하고 있는 싱글 암 판토품을 개발하여 사용함으로써 경량화 하였다. 따라서 최근 국내외 판토품의 기술 동향을 조사하여, 싱글 암식 판토품 또는 새로운 경량 판토품에 대하여 기술개발을 통해 경량화가 이뤄져야 한다.

2.2.6 실내설비 경량화 기술

실내 내장재 경량화를 위해서는 하니콤 등의 내장재를 단순 모듈디자인을 구현하여, 도시철도차량 안전기준에 만족하고, 불연성을 확보하면서 차량의 경량화를 실현하여야 한다. 축출입문은 경량화를 위해서는 도아엔진을 전기모터로 개선하고, 광폭의 알루미늄 합금 도아를 설비하여 경량화를 하여야 한다. 차량단부에 연결통로문은 승객의 이동 편의성을 위하여 통로문을 삭제하거나 폭을 크게 하고, 도아에 유리를 설비하여 경량화 하여야 한다.

광주지하철, 대전지하철, 인천공항철도, 서울메트로 9호선 등은 차량단부에 연결통로 문을 없애고, 넓게 개방함으로써 승객이 편리하게 차량 간을 이동할 수 있도록 하였으며, 객실과 객실 간에 개방감을 주어 안락하고, 편리하도록 개선하였다.

실내 의자의 경량화를 위해서는 복합소재 또는 경량 신소재를 발굴하여 의자의 경량화를 추진하여야 한다. 혁신적인 경량화를 위하여 의자의 길이 또는 수량을 축소하고, 혼잡한 시간대의 승객이 보다 쾌적하게 승차할 수 있도록 실내 입석공간의 확대 등을 개선하는 연구를 수행하여 경량화를 실현하여야 한다.

2.3 경량화를 위한 개발기술 및 미래기술

최근에 상업운영 중에 있는 서울메트로 9호선, 인천공항철도, 코레일 천안선 및 춘천선, 광주/대전 지하철 등의 도시철도차량의 경량화 기술내용과 일본의 JR 동일본 동경급행철도 E231계, E233계 및 Y500계 전차에 적용된 경량화 기술을 조사하여, 표 4와 같이 현재기술, 경량화 개발기술 및 미래기술로 구분하여 정리하였다.

현재기술은 도시철도 운영기관에서 상업운영 중에 있는 기술수준이다. 경량화 개발기술은 최근에 개발된 신기술, 선진국에서 실용화 되었거나, 기술개발 중인 기술 및 경량화를 위하여 집중적으로 기술개발이 필요한 기술이다.

미래기술은 요소기술의 개발기간이 중장기로 소요되거나, 차량에 기술을 활용되기 위해서는 관련 산업에서 신기술개발이 이뤄져야 하는 핵심요소기술이다.

표 4 도시철도차량의 경량화를 위한 개발기술 및 미래기술

시스템 별	현재기술	경량화 개발기술	미래기술
차체	- AI 대형 압출재	- AI 압출재 성형기술 향상 - 부위별로 압출재 형상 개선	- 복합소재 또는 신소재 차체 기술
내장판	- 페놀 내장재+ AI판 내장재	- AI 하니콤 내장재+ AI 내장재 - 고강도 복합소재	
의자	- 강재 프레임, 우레탄 폼 커버지	- AI 프레임 및 모켓트 커버지 - 경량 신소재	
냉방장치	- 강재 프레임	- 고강도 프레임 및 컴팩트화 - 소형 냉난방 시스템	- 냉난방 통합 유닛 기술
도아	- 공압식 도아엔진	- 전기식 도아엔진 - 초경량도아	
제동장치	- 제어장치 개발 설치	- 제어장치(BOU+ SOU 등)통합-대차 단위제어	- 전기제동 100% 적용 기술
대차	- 주장저널, 중실축, 주장 제동디스크, 카르단식 구동, 용접 대차프레임	- AI 저널, 중공축, AI 제동디스크, 경량 DDM 구동장치, 고강도 대차 프레임	- 관절대차 - AI 대차 프레임 - 세라믹 대차 프레임
추진/보조전원장치	- 전자식전동기 - VVVF-IGBT 제어소자 - Heat 수냉각 - Ni-Cd 축전지	- 영구자석 전동기 - IGBT-Si-Diode 제어소자 - Draft Cooling - AI 프레임	- Si-Carbide 제어소자 - 공진형 PWM 스위칭 - Li-ion 축전지
판토타그래프	- 교차형 판토타그래프	- 싱글형 판토타그래프	- 무선전원/бат테리 동력
제어시스템	- 시리얼 제어	- 광통신 네트워크 제어	- 무선통신 제어시스템

3. 결론

21세기는 인류가 지구환경보존을 위하여 많은 노력을 해야 한다. 현재 세계 각국은 친환경 정책을 수립하고 적극적으로 추진하고 있다.

도시철도차량은 도시의 대중교통기관으로써 역할을 담당하고 있으며, 친환경교통기관으로써 버스, 택시, 승용차 등의 이용객의 전환수요가 늘어나고 있다. 도시철도차량이 경량화 되면 동력비 및 소음·진동의 감소, 유지보수비 절감, 신기술개발 등의 많은 이점을 있다.

본 고찰에서는 최근에 기술개발 되어 상업운영 중에 있는 우리나라의 도시철도차량과 일본의 동경급행철도의 경량화 기술 및 신기술 도입 현황을 조사하여 분석하였다. 또한 외국의 차량 관련 업체에서 기술개발 중인 신기술 및 경량화 활동 내용 등을 조사하여, 도시철도차량의 경량화를 위한 개발기술과 미래기술을 표 4와 같이 제안하고자 한다.

참고문헌

1. 도시철도차량 경량화 요건분석 연구보고서, 한국철도기술연구원, 2010. 10
2. 표준전동차 기본설계, 건설교통부, 1997
3. 철도픽토레일(The Railway Pictorail), 41쪽~58쪽, 2003 및 12쪽, 44쪽, 2010, 8
4. 한국철도공사, 서울도시철도공사, 대전지하철, 광주지하철, 인천공항철도공사, 서울메트로 9호선, Rotem 등의 홈페이지