

소형궤도차(PRT) 주요 기술특성의 비교 분석

Analysis of Major Technical Features of PRT System

송달호* 김남호** 김종현***
Song, Dahl Ho Kim, Nam Ho Kim, Jong Hyoun

ABSTRACT

교통 시스템의 문제를 해결하기 위하여 새로 도입되는 신교통 시스템은 지금까지의 지하철과 버스와는 다른 형태이면서 다양한 조건이 요구된다. 본 논문에서는 신교통수단으로 개발을 본격화하려는 PRT 시스템에 대한 요구조건 몇 가지를 검토하였다. 검토된 요구조건 항목은 차량 당 승차인원, 차량구조, 추진시스템, 제동장치 및 분기장치이다. 각 항목에 대해서 채택할 수 있는 방식들을 분류하고, 이들의 장단점을 분석하였다.

차량 당 승차인원은 3~4인이 적절하지만, 이는 가이드웨이의 경량화에 의한 건설비 절감 및 요금정책 등에 지배를 받으므로 좀 더 면밀한 검토가 필요함을 알았다. 차량의 구조는 I형이 장기적인 관점에서 유리하다. 추진장치로는 선형전동기가 적절하며, 선형전동기는 가이드웨이에 설치하지 말고 차량에 탑재되어야 한다. 제동장치는 전기제동을 주 제동장치로 하고 다중시스템으로 Fail-Safe 기능을 갖도록 설계되어야 한다. 분기장치는 차량에 탑재된 기계식이 적절함을 알 수 있었다. 앞으로 개발할 PRT의 사양을 결정함에 있어서 이러한 방식들에 대한 검토결과를 바탕으로 사양이 선정되어야 한다.

Keywords : 소형궤도차(PRT), 기술특성(Technical Features), 승차인원(Vehicle Capacity), 차량구조(Chassis), 추진시스템(Propulsion System), 제동장치(Braking System), 분기장치(Turnout)

1. 서론

국민들의 소득 신장과 높아진 생활수준으로 이제는 승용차가 생활필수품이 되었다. 차량은 하루가 다르게 기하급수적으로 늘어나 이제 도심지역은 어디를 가나 밀려드는 차량으로 교통이 항상 정체되어 이에 따른 경제적 손실이 2002년 기준 22조 1000억원으로 추정되고 있다. 게다가 서울시의 경우 미세먼지와 이산화질소 등의 오염물질은 매월 기준치를 초과하여 대기를 오염시키고 있다. 이러한 이유로 교통문제와 대기오염 문제의 해결이 시급한 과제로 대두되면서 기존 교통문제 해결을 위한 대안으로서 신교통 시스템의 도입이 검토되고 있다.

신교통 시스템의 요구사항은 지금까지의 교통 시스템의 문제를 해결하기 위하여 다양한 조건이 요구된다. 지하철과 버스와는 다른 형태이면서 시스템에 따라 교통수요 처리능력이 다양하여야 한다. 교통 시스템의 역할로써는 기존의 교통수단의 보조 역할을 할 수 있는 지선 역할로서 수송효율이 높아야 한다. 이를 위하여 신교통 시스템은 기존 도로변이나 도로위에 지상이나 고가로 건설할 수 있어야 한다. 차량회전반경이 작고, 등판능력이 좋으며, 가·감속 및 차량운행 간격 등의 제어에서 성능이 뛰어나야 한다. 접근성이 좋아야 하며 소음 및 대기오염이 작아야 한다. 건설 및 운영이 효율적이어야 한다.

* 우송대학교, 교수, 정회원

** (주)스카이카, 대표이사, 정회원

*** (주)스카이카, 선임연구원, 정회원

소형궤도차(PRT; personal rapid transit) 시스템은 이러한 조건을 만족시킬 수 있는 대안으로 제안되고 있으며, 현재 개발에 본격적으로 착수하는 시점이다. 본 논문에서는 위와 같은 신교통 시스템으로써의 PRT 시스템의 요구조건을 비교·분석하고자 한다. 검토된 시스템의 요구조건 항목은 승차인원, 차량구조(chassis), 추진시스템(propulsion system), 제동장치(braking system) 및 분기장치(turnouts)이다.

2. PRT 차량의 탑승인원

현재까지 개발된 여러 가지 PRT 시스템의 탑승인원은 2~6명으로 다양하다. 차량의 탑승인원을 2명으로 하는 것은 적절치 않아 보인다. 우선 장애인을 위하여 휠체어를 사용하는 경우에 휠체어를 보조하는 사람이 동승하는 경우를 생각하여 탑승인원은 장애인과 보조인의 2명이 될 것이다. 이때 휠체어가 차지하는 면적 및 중량을 고려하면 일반인의 경우라면 탑승인원은 3명이 된다. 3명이 PRT 차량의 차량당 탑승 최소인원이라고 할 수 있다. 또한 5인 이상도 적절치 않아 보인다. 여행그룹이 5명 이상인 경우가 1% 이하로 알려져 있다. 따라서 보편적으로 생각되고 있는 차량당 승차인원은 3명 또는 4명이다. 승차인원을 결정하는 문제는 여러 가지 사항을 면밀히 고려하여야 한다.

우선 차량의 경량화와 소요되는 에너지 비용이다. 승차인원 1인의 체중은 70 kg이고, 휴대하는 화물은 20 kg으로 가정하는 것이 일반적이라면, 3인 탑승의 경우에는 270 kg, 4인 탑승의 경우에는 360 kg이 탑재하중이 된다. 이 차이는 90 kg은 대부분의 PRT 차량의 중량이 1 ton 내외인 점을 고려할 때 거의 10%에 해당한다. 또한 차량의 중량이 4인용에 비해서 3인용에서 차량의 무게를 10% 이상 줄일 수 있다면, 가이드웨이의 경량화에도 도움을 줄 것이다. 경량화된 차량은 운영비는 물론 유지보수적 측면에서도 또한 이득을 가져다 줄 것이다.

둘째는 요금정책이다. 요금정책은 탑승인원에 대해서 부과하는 방식과 여행그룹이 사용하는 차량당 부과하는 두 가지 방식을 고려할 수 있다. 전자의 방식은 후자의 방식을 채택한 택시를 제외한 대부분의 대중교통수단에서 채용하고 있는 방식이다. PRT 시스템은 여행그룹이 여행그룹끼리 사용하는, 모르는 타인과의 동승하지 않는다는, 점을 이점으로 내세우고 있으므로 이러한 이점을 최대한 살린다는 관점에서 택시와 같은 후자의 요금정책이 바람직하다 하겠다. 여행그룹의 구성원이 4인인 경우가 5% 이하이고, 평균 구성원의 수가 1.5인 점을 고려한다면, 굳이 5%의 경우를 위하여 4인 탑승인원으로 하는 것이 좋을 지에 대해서는 면밀히 검토하여야 한다. 특히, 가임여성의 평균출산율이 1.2 이하인 점을 고려한다면, 더욱 더 4명의 탑승인원은 낭비적인 요소가 있는 것이 아니냐 생각한다.

이러한 점을 고려할 때에 PRT 차량의 차량당 탑승인원은 PRT 시스템을 운영하는 기업의 관점에서 결정되어야 한다. 현재에 대부분의 경량전철 시스템이 경제적 타당성을 입증하기 어려운 현실임을 감안할 때에 건설비를 축소하고, 최대한의 요금을 회수할 수 있는 요금 정책을 고려하여 결정하여야 한다. 따라서 3인용 4인용에 대해서 간략히 설계한 후에 중량을 고려하고, 여행그룹에 대해서도 정확한 조사를 병행하여 탑승인원이 결정되어야 한다.

3. 새시

새시는 차량의 기본이 되는 뼈대로 승객이 탑승하는 케빈이 장착되고 많은 장비 및 의장이 장착된다. 새시는 많은 장비와 승객이 탑승하고 운행할 수 있도록 충분한 강성을 갖추어준다. PRT의 특성인 소형 경량화를 위해 새시는 충분한 강성을 갖추면서 경량이어야 한다. 모든 구조물이 그렇듯 새시도 경량화와 강성의 타협점을 찾아야 한다. 새시는 무게와 강성뿐만 아니라 형상도 중요하다.

새시의 형상과 가이드웨이의 형상은 서로 깊은 관계가 있다. 새시의 형태에 따라 가이드웨이의 형상이 개방형과 차단형으로 나뉠 수 있기 때문이다. 새시는 크게 박스형과 I형으로 나눌 수 있다. 특징은

표 1과 같다.

표 1. 새시의 형태에 따른 장단점

새시 형태	박스형	I형
무게	가볍다.	무겁다.
강성	강하다.	약하다.
가이드웨이 형상	개방형	폐쇄형
유지보수	불리	유리

박스형은 경량이고, 강성이 좋다는 장점이 있다. 반면 I형은 박스형과 같은 강성을 지니기 위해서 무게가 증가한다는 단점이 있다. 하지만 I형은 가이드웨이를 폐쇄형으로 제작할 수 있어 장기적 안목으로 봤을 경우 차량의 유지보수면에서 유리하다.

4. 추진장치

PRT 차량의 추진장치는 몇 가지 조건을 만족해야 한다. 우선 에너지효율이 높아야 하고, 유해 배기 가스 배출이 없어야 한다. 에너지 공급을 위한 정차가 없어야 한다. 진동 및 소음이 없어야 한다. 0.25g 정도의 가속과 감속 능력을 갖추면서 설계속도는 80 km/h, 최고운전속도는 45~60km/h이어야 한다. 이러한 조건을 만족시키기 위해서는 내연기관은 적합하지 않으며, 축전지에 의한 추진도 적절치 않다. 축전지를 차량에 탑재하면 차량의 중량이 증가하고, 이는 가이드웨이의 경량화에 역행하게 된다. 따라서 추진장치로 전동기를 채택하는 것은 당연하다. 급속충전시스템을 사용하는 것도 고려할 수 있으나, 차량에 축전지를 탑재하는 문제와 대용량의 전기 에너지를 단시간에 충전하는 문제가 걸림돌로 남는 한 축전지를 사용한 급속충전시스템의 채용은 경제적 타당성이 없다.

4.1 회전형 전동기와 선형 전동기

전동기의 방식에는 회전형과 선형 전동기의 두 종류가 전부 대중교통수단에서 사용되고 있다. 선형 전동기는 LIM(Linear Induction Motor) Car로 알려진 경량전철에서 사용되고 있다. 뱅쿠버의 Sky Train, 디트로이트의 DPM(Detroit People Mover), 동경의 도에이(都營) 12호선 등이 LIM Car이다. 이들 전동기의 방식들의 특징은 표 2와 같다.

표 2. 회전형 전동기와 선형 전동기의 특징

종 류	회전형	선 형
전동기 효율	높다	낮다
시스템 효율	50~90%	50%
등판력	낮다	높다
가 격	낮다	높다
무 게	높다	낮다
구동방법	차륜을 통한 구동	모터의 자체 구동
차량제어	어렵다	쉽다
기후의 영향	영향을 많이 받는다	영향이 매우 적다

지금까지 PRT 시스템에 사용되어진 회전형 전동기의 이러한 특징을 보면 전동기의 효율이나 가격적인 면에서 선형전동기보다 유리하다. 그러나 차륜을 통해서 차량을 구동 및 제동해야 함으로 차륜과 바닥면사이의 일정한 마찰력을 유지해야 하는 큰 문제점이 있다. 또한 전동기의 무게가 무거워 차량의 무게가 높아지고 부피가 커서 차량의 무게중심이 높아지는 단점이 있다.

선형 전동기는 회전형 전동기가 갖는 최대의 취약점인 노면과의 마찰력 문제를 해결할 수 있다는 점이 가장 주목받고 있다. 선형 전동기는 회전형 전동기가 갖는 최대의 취약점인 노면과의 마찰력 문제로부터 자유롭기 때문이다. PRT 시스템은 60 km/h 내외에서 약 0.5초의 시격으로 운행이 가능하다. 이런 운행이 가능하기 위해서는 가감속의 제어가 쉬워야 한다. 가감속의 제어를 쉽게 하기 위해서는 노면과의 마찰력에 의존하지 않고 제어가 가능해야 한다. 선형 전동기는 이러한 조건을 만족시킨다. 선형 전동기는 이외에도 부수적인 동력전달장치가 필요치 않아 효율저하가 없으며, 부피가 작기 때문에 차량에 장착하였을 경우 롤 센터 증가에 큰 영향을 주지 않는다는 장점이 있다.

선형전동기의 종류에는 직류 선형 펄스 전동기, 직류 유도 전동기, 선형 유도 전동기 등이 있다. 선형전동기모터의 속도는 모터에 인가된 전류의 주파수에 직접적으로 비례한다(슬립이 없을 때). 따라서 선형전동기모터의 가속은 모터에 공급되는 교류 전력의 주파수를 서서히 증가시킴으로써 구현된다.

4.2 선형 전동기의 장착 위치

선형 전동기를 사용하는 경우 장착 위치는 차량과 가이드웨이 이다. 이 두 가지 방법은 각각의 특징이 있다.

우선 차량에 전동기를 장착하는 경우이다. 전동기의 회전자(rotor) 부분을 차량에 탑재하고 고정자(stator) 부분을 궤도에 부설하므로, 상대적으로 초기투자비가 저렴하다. 차량에 장착된 회전자가 즉 선형전동기가 차량의 가감속을 세밀하게 제어할 수 있어서, 승차감이 좋고 유사시에 용이하게 대처할 수 있다. 기본적으로 궤도에 고정자로서 알루미늄 반력판(Aluminium reaction plate)을 설치하므로, 크레인이 활동하지 못하는 환경에서도 구난차량을 이용해 구난 및 인명구조를 실시할 수 있다. 즉 차량이 고장 나더라도 구난차량의 회전자와 궤도의 고정자가 정상이므로 고장차량만 견인하여 차량정비고에서 정비하면 되며, 따라서 전체 교통에 미치는 영향이 가이드웨이 내에 설치하는 방식에 비해 상대적으로 적다. 그동안 연구해 온 오랜 연구기관이나 회사들이 공통적으로 인정하고 추진하는 방식이다. 네트워크를 통해 제어할 노드(node)의 수는 분기점과 역사에 한정되므로, 제어 알고리즘이 상대적으로 간단하여, 전체적인 제어가 용이하다. 물론 차량의 LIM을 구동하는 데에 필요한 전력을 공급할 전력 공급선(power line)은 일반적으로 제3궤조 방식으로 궤도에 따로 설치하여야 한다.

선형 전동기를 가이드웨이에 장착하는 경우 차량에 구동 전력을 공급하기 위한 별도의 전력 공급선을 궤도에 따로 설치하지 않아도 된다는 장점이 있다. 그러나 다음과 같은 단점으로 인하여 가이드웨이에 전동기를 장착하는 방법은 선호되지 못하고 있다. 선형전동기의 회전자를 궤도의 전 선로에 걸쳐서 부설하는 방식은 초기에 막대한 건설비가 필요하다. 또한, 일정 길이의 회전자를 일정 수효만 궤도에 부설하는 경우에도 필수적으로 필요한 회전자의 수가 차량에 장착하는 방식에 비해 6.5배에 달하여 초기 투자비가 상대적으로 막대해진다. 이 문제를 해결하기 위해 전동기간의 거리를 크게 하는 방법은 곡률 반경의 제약에 따른 차량의 길이 제약이 문제가 되어 한계가 있으며, 그 거리는 최대 2~3m이다. 전동기 세트의 숫자가 많고 유사시에 접근이 어려워 유지 및 보수에 어려움이 많다. 차량의 동력원인 궤도의 전동기 자체가 고장 날 경우, 차량으로 가까이 접근하기가 어렵다. 가이드웨이에 전동기를 설치하는 방식은 본선의 전동기가 고장 날 경우, 궤도상의 차량이 아닌 지상의 크레인 차량을 반드시 사용해야 하는 한계가 있어, 신속한 조치가 어렵고 이에 따라 노선 전체의 승객 수송량을 줄이는 문제가 발생한다. 특히 출퇴근 시간의 경우 그 문제의 심각성은 더욱더 커진다. 지역 특성상 대형 크레인이 활동할 수

없는 경우에는 문제의 심각성이 더하다. 네트워크에 의해 제어할 노드의 수가 궤도에 설치된 회전자와 수와 같으므로 차량에 전동기가 설치되는 방식에 비해 제어대상이 많아 소프트웨어의 크기가 커지고 복잡해져 제어가 어려워지는 문제점이 있다. 또는 분기점이나 역사가 없는 단순 주행구간에서는 다른 방식의 제어가 가능하나, 여전히 차량에 회전자가 설치되는 방식에 비해 상대적으로 복잡하다.

5. 제동장치

제동장치는 Fail-Safe 개념으로 전기제동과 기계제동이 조합되어 작동되도록 한다. 제동 시스템 구성은 상용제동, 비상제동 및 주차제동의 기능을 갖춰야 한다.

상용제동은 회생제동과 기계제동으로 구분되며, 신속한 반응으로 신뢰성 있고, 내구성 있는 제품이어야 한다. 선형전동기를 사용하는 PRT 시스템에서는 상용제동에서 일반적으로 회생제동이 주 제동으로 사용되며, 2.5g 이상의 제동력이 필요하다. 회생제동이 부족한 경우에 한하여 기계제동이 작동되고, 기계제동에는 유압이나 공압이 사용된다.

비상제동은 전기제동과 기계제동을 같이 사용하여 최대의 제동력을 이끌어내도록 한다. PRT 시스템의 주 제동이 대부분 전동기에 의존하는 전기적 제동이라는 점은 이미 설명하였다. 하지만 이런 전기적 제동장치들이 작동하지 않을 경우도 가정해 볼 수 있다. 전기공급이 중단되거나 전기 제동장치의 고장 시에 여러 가지 안전장치들이 적용되지만 이러한 모든 것들이 작동하지 못할 경우를 상정하여야 한다. 그리고 전동기에 의한 전기적 제동력은 기계적 장치에 의한 만큼의 제동력을 발휘하지 못한다. 이러한 문제를 방지하거나 완화하기 위하여 기계적 제동장치가 필요하다. 기계제동의 최대 감속도는 7g 이상이어야 한다.

제동장치는 안전성의 측면에서 추진장치보다 더 중요한 장치라 할 수 있다. 추진장치가 아무리 성능이 좋아도 제동이 정상적이 아니라면 사고로 연결될 수 있으며, 운행 중의 제동장치의 고장은 인명사고를 유발할 수 있기 때문이다. 따라서, 제동장치는 일부 제동장치의 고장에도 작동이 가능하도록 2중으로 설계되어야 한다.

주차제동은 기계제동으로 작동되어야 한다. 회생제동의 사용이 불가능한 상태로 차량이 정지하거나 차량의 출입문이 열려있는 경우 등에 사용된다.

6. 분기장치

PRT 시스템의 특성상 분기장치는 운행 중 빠른 분기가 가능해야 하며 전원 공급이 중단되어도 분기에 영향이 없어야 한다. 또한 분기장치의 고장 발생 시 시스템에 미치는 영향이 작아야 하고 분기장치의 고장에 따른 차량의 사고가 없어야 한다.

차량을 분기시키는 방법은 분기장치를 설치하는 장소에 따라 주행선로에 설치하는 방법과 차량에 설치하는 방식으로 나눌 수 있다. 각 방식의 특징은 표 3과 같다.

표 3. 분기장치의 설치 장소에 따른 장단점

설치위치	가이드웨이 설치	차량 설치
장점	- 분기장치가 적게 필요하다. - 차량 무게증가가 없다.	- 빠른 분기가 가능하다. - 분기장치 고장시 시스템에 미치는 영향이 작다.
단점	- 빠른 분기가 불가능하다. - 분기장치 고장시 시스템에 큰 영향을 미친다.	- 분기장치가 많이(차량마다) 필요하다. - 차량의 무게가 증가한다.

PRT 시스템은 짧은 시격이 요구되므로 빠른 분기가 요구된다. 그리고 네트워크 시스템의 특성상 분기 장치의 고장은 일부 네트워크의 정지를 발생시킨다. 이러한 문제를 막기 위해 분기장치를 주행선로에 설치하는 것은 바람직하지 않다.

기계적인 방법에서 주행선로에 분기장치를 설치하는 경우는 차량에 분기장치를 설치하는 경우보다 분기속도가 느리다. 전기적인 방법에서 주행선로에 분기장치를 설치하는 것은 기계적인 방법보다는 분기가 빠르나 분기장치의 고장에 의한 일부 네트워크 정지는 막을 수 없다. 주행선로 분기장치의 고장이 발생하는 경우 고장이 발생한 분기점을 지나는 모든 차량들이 정체될 수밖에 없기 때문이다.

작동방법에 따라 PRT 시스템의 분기장치는 전기적 방법과 기계적 방법으로 분류 할 수 있다. 특징은 표 4와 같다. 전기적인 방법은 분기장치에 고장이 발생하였을 경우 차량을 구속시켜줄 수 없기에 대형 사고를 유발 할 수 있다. 이러한 사고를 막기 위해 기계적인 장치가 부수적으로 필요하고 이것은 차량의 무게 증가를 가져온다. 기계적인 방법은 전기적인 방법과 달리 분기장치의 고장에도 차량이 탈선하거나 하는 문제가 발생하지 않는다. 그리고 분기장치를 이중으로 설치할 필요가 없어 경제적이다.

표 4. 분기장치의 작동방법에 따른 장단점

설치위치	전기적 방법	기계적 방법
장점	- 기계적인 구동부위가 없어 마모가 없다.	- 분기장치 고장시 차량의 안전성이 높다. - 분기장치 고장에 대한 안전장치가 불필요하다.
단점	- 분기장치 고장 시 대형사고를 유발 할 수 있다. - 분기장치 고장에 대비한 기계적 안전장치가 필요하다. - 차량의 무게가 증가한다.	- 장치 마모에 따른 유지보수가 필요하다.

3. 결론

본 논문에서는 신교통 수단으로 도입이 검토되고 있는 PRT 시스템의 차량 부분에 대해 기술적인 검토를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 차량 당 탑승인원은 3명 또는 4명이 적절하나, 이는 차량의 경량화에 따른 가이드웨이 건설비의 절감과 승객에 대한 요금정책과 밀접한 관계가 있다. 따라서 운영회사의 입장에서 면밀하고 정확한 검토에 의해서 결정되어야 한다.
- (2) 새시 형태는 I형으로 한다. I형 새시를 사용하는 경우 가이드웨이에 커버를 만들어 내부를 보호할 수 있다.
- (3) 구동장치는 선형 전동기를 사용한다. 선형 전동기는 노면과의 마찰에서 미끄럼(slip)에 대해서 우려할 필요가 없기 때문에 제어를 정확히 할 수 있다. 따라서 운행시격을 줄일 수 있다. 설치하는 가이드웨이에 하는 것은 적절치 않으며, 차량에 설치하는 방식이어야 한다.
- (4) 제동장치는 전동기를 이용한 회생제동을 기본으로 하고 비상제동장치와 주차제동장치를 둔다. 비상제동장치는 기계적 제동장치로 하여 전기 공급 이상 등에 효과적으로 대처할 수 있게 한다.
- (5) 분기장치는 기계식 분기장치로 차량에 장착한다. 기계식 분기장치는 분기장치 고장시 대형 사고를 막을 수 있다. 그리고 분기장치를 차량에 장착하는 경우 분기장치의 고장시 PRT 네트워크 시스템에 가장 적은 영향을 미친다.