

# PRT 주행선로 최적평면선형 설계에 관한 연구

엄주환, 김백현, 정락교, 변윤섭, 강석원  
한국철도기술연구원 신교통연구본부

## A Study on Optimal Horizontal Alignment Design for PRT Vehicle

Ju-Hwan Um, Baek-Hyun Kim, Rag-Gyo Jeong, Seok-Won Kang, Yeun-Sub Byun  
New Transportation Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute

**요약** PRT(Personal Rapid Transit) 시스템은 자동차를 대체할 수 있는 지속 가능한 친환경 미래교통 수단으로 최근 국내외적으로 활발한 연구가 진행 중이다. 이러한 PRT 시스템의 중요한 특징 중 하나는 저비용으로 건설·운영될 수 있다는 것이다. 본 연구에서는 PRT 주행선로에 대해 차량의 주행안정성을 고려한 최적 평면 선형에 대한 기초 연구를 수행하였다. 설계 최고속도로 주행 시 곡선반경, 완화곡선 길이, 캔트(편경사)와 같은 주요 매개변수들에 대해 차량동역학 해석을 수행하였으며 최적선형 설계(안)를 제시하였다. 해석결과, 이론값을 만족함을 알 수 있었으며 기준 완화의 가능성도 확인할 수 있었다.

**주제어** : 미래교통, 소형 무인 궤도운행차량, PRT 주행선로, 곡선반경, 완화곡선

**Abstract** Personal rapid transit(PRT) systems have been highlighted in future transportation developments as a result of their potential as sustainable and eco-friendly transport solutions that provide demand-responsive mobility services. One of the most important characteristics of the personal rapid transit system(PRT) is that it can be constructed and operated at a low cost. A fundamental study on the alignment of the PRT guideway considering running stability was conducted in the present study. In addition, a parameter analysis of the major alignment design variables such as curve radius, transition curve length and cant was performed by vehicle dynamic analysis and optimum guideway alignments were proposed. The analysis results suggested that the theoretical values were satisfied and also confirmed the possibility of reducing the standard.

**Key Words** : Future Transportation, Personal rapid transit(PRT), Guideway, Curve Radius, Transition curve

### 1. 서론

최근 국제적 이슈가 되고 있는 환경 변화에 대응하기 위한 ‘지속 가능한 교통수단’ 으로서 환경 친화적이고 에너지 효율이 우수한 교통수단 개발에 대한 경쟁이 가속화 되고 있는 가운데 접근성과 이용 편의성이 우수한 미

래형 교통수단으로 수요응답형 순환교통시스템(PRT : Personal Rapid Transit)이 재조명 되고 있다.

PRT 시스템은 4~6인이 승차할 수 있는 소형 차량이 다수의 루프를 포함하는 네트워크 노선을 통하여 출발지에서 목적지까지 무정차 무인 운영을 하며, 일반적으로 총 연장 거리가 1~10km, 시간 당·방향 당 3,000~10,000

\* 본 논문은 한국철도기술연구원 “수요응답형 순환교통시스템(PRT) 핵심기술개발”과제로 수행되었음

Received 29 July 2014, Revised 11 September 2014

Accepted 20 October 2014

Corresponding Author: Ju-Hwan Um  
(Korea Railroad Research Institute)

Email: jhum@krri.re.kr

ISSN: 1738-1916

© The Society of Digital Policy & Management. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

명 정도를 수송할 수 있는 미래형 신교통 수단으로 정의할 수 있다.[1,2]

영국 ULTra사는 2011년 세계 최초로 PRT시스템을 영국 런던 히드로 공항에 도입하여 시범 운행하고 있으며, 아랍에미리트(UAE)의 마스다르에서도 내부 교통수단으로서 PRT를 계획하고 현재 시범운행 중에 있는 등 현재 세계적으로 PRT에 대한 연구개발 및 시범사업이 활발히 이루어지고 있는 실정이다.[3,4,5]

국내에서도 PRT 시스템의 적용성에 대한 정책적 연구, 운행제어 알고리즘 개발, 새로운 방식의 입체 수송 방안[6,7,8] 등 다양한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

이러한 PRT 시스템은 기존 도심 공간의 활용을 극대화 할 수 있어 교통 혼잡이 극심한 도심 구간에도 적용 가능 할 뿐 아니라, 새로이 건설되는 신도시에 설계 시부터 반영하여 저비용으로 건설·운영 될 수 있는 시스템이다.

PRT 선로시스템은 고가형태, 노면형태, 지하형태 구조물로 구분될 수 있으며, 도로교통 등 타 교통수단과 독립적인 노선을 확보하고 단방향 혹은 양방향 네트워크 선로로 구성할 수 있다. PRT 주행선로는 차량의 제원 및 성능과 밀접한 관련이 있으며, 한번 결정된 선형은 변경하기가 매우 어렵다. 또한 PRT 주행노선 건설 시 적정 곡선선형의 결정은 건설비에 직접적으로 영향을 미치는 중요한 요소이다.

본 연구에서는 PRT 주행선로에 대해 차량의 주행안정성을 고려한 적정 곡선선형에 대한 기초연구를 수행하였다. 개발 PRT 차량의 특성을 고려하여 최고 설계속도 및 운행속도로 주행 시 주행선로의 곡선반경, 완화곡선길이, 캔트(편경사)와 같은 주요 선형 변수들의 다양한 조건에 따른 차량의 동적거동 해석을 수행하여 최적 곡선선형 조건을 제시하고자 한다.

## 2. PRT 주행노선 설계

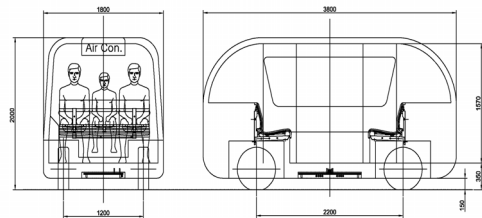
### 2.1 기본 방향

현재 철도설계 관련 규정 및 도로설계 관련 규정은 간선 및 도시철도와 같은 대형 교통시스템 설계를 위한 요구사항으로 PRT 주행선로의 설계 기준으로 활용하기에는 어려움이 있다. 따라서 여기서는 PRT 차량의 전용 노

선 건설을 위해 개발 차량의 특성을 고려한 전용 노선의 주요 선형설계(안)을 제시하고자 한다.

PRT 주행노선의 설계는 차량의 특성 및 제원에 의해 크게 영향을 받는다. PRT 시스템의 주행 궤도는 차량의 주행 방식에 따라 크게 두 가지 방식으로 나눌 수 있다. 즉, 철도와 같이 차량을 가이드 하는 레일방식과 가이드 레일이 없는 노면방식으로 나눌 수 있다. 본 연구에서 개발하고자 하는 PRT 차량은 일반 도로면에 자석을 매립하고 이를 기준으로 무인 자율주행 하는 PRT 시스템이다. 따라서 여기서는 기본적으로 노면방식에 대한 평면선형 설계조건을 검토하고자 한다.

개발하고자 하는 PRT 차량은 [Fig. 1] 에서와 같이 차량 크기 및 차륜 형태가 도로차량과 유사하다. 따라서 차량과 인터페이스 되는 선로 조건은 도로설계기준과 유사하다고 할 수 있으므로, 여기서는 기본적으로 도로설계 기준을 바탕으로 선형 검토를 수행하였다. 또한 도로기준에 따라 계산된 각 선형변수별 이론 치들에 대해 PRT 차량/선로선형 상호작용 동적해석을 통해 비교 분석하고 적정 선형조건을 제시 하였다.



[Fig. 1] Dimensions of Korean PRT Vehicle[6]

### 2.2 최소 곡선반경

곡선반경은 차량의 주행안정성을 확보할 수 있도록 설계속도 등을 고려하여 정하여야 한다. 도로에서 곡선반경은 철도와 달리 횡방향 미끄럼 마찰계수와 편경사의 값으로 설계속도에 따라 산정하여 안전하고 쾌적한 주행이 가능하도록 횡방향 미끄럼 마찰계수와 편경사의 값을 결정하게 되므로 두 요소는 차량의 주행안전과 승차감에 가장 큰 영향을 미치는 요소라 할 수 있다. PRT 주행노선의 경우에도 도로차량과 유사하기 때문에 이를 적용하여 설계하고자 하며, 그 값은 AASHTO(American Association of State Highway and Transportation

Officials)의 기준을 참고하여 다음 <Table 1> 과 같이 산정하였다.

<Table 1> Lateral sliding friction coefficient

Vehicle speed(km/h)	20	30	40	50
Friction coefficient	0.16	0.16	0.16	0.16

곡선 부를 주행할 때 작용하는 원심력에 저항하는 힘은 횡 방향 마찰력과 설치된 편경사에 의하여 포장 면에 수직으로 작용하는 분력으로서, 승객에게 불쾌감을 주는 횡 방향력을 낮추기 위해서는 가능한 한 편경사를 크게 하여야 하지만 편경사가 너무 클 경우 저속으로 주행할 때 횡 방향으로 미끄러질 우려가 있고, 노면이 결빙되었을 때 차량의 정지 및 출발 시 횡 방향으로 미끄러질 우려가 있어 최대 편경사를 제한하고 있다. 도로설계 기준에는 일반적으로 최대 편경사를 6~8%로 제한하고 있으며, 여기서는 “도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙(2012)”에 따라 도시지역 기준인 6%를 적용 하였다. 도로에서 최소 평면곡선 반지름은 다음 식 (1)로 산정할 수 있으며, 속도별 산정결과는 <Table 2> 에서와 같다.

$$R = V^2 / 127 (i+f) \tag{1}$$

여기서,

V: 속도, i: 편경사, f: 횡 방향 미끄럼 마찰계수

<Table 2> Minimum curve radius by vehicle speed

Vehicle speed (km/h)	Friction coefficient	Minimum curve radius(m)
50	0.16	90
40	0.16	60
30	0.16	30
20	0.16	15
10	0.16	4

도로기준을 적용한 이론적 최소 곡선반경 산정결과, 개발하고자 하는 PRT 차량의 설계속도는 50km/h로 최소 곡선반경은 90m이다. 그리고 차량 제작 사양에 따른 최소 회전반경 6m 적용 시 속도는 13km/h로 나타났다. 그러나 본선에 곡선반경 6m를 적용하는 것은 저속 운전(13km/h)에 따른 표정속도 및 안전성이 저하될 수 있으므로 차량기지 운행 등 부득이한 경우를 제외하고 본선

에 적용하는 것은 바람직하지 않을 것으로 판단된다.

### 2.3 완화곡선 길이

원곡선의 전후 직선과 만나는 접속구간에서는 갑작스런 곡률의 변화로 인해 차량의 주행안정성에 나쁜 영향을 미치는데, 이에 대한 보상으로 완화곡선을 설치하여 차량의 주행을 원활하게 할 필요가 있다. 일반적으로 설계속도 60km/h 미만의 도로에서 완화곡선을 설치하지 않을 경우, 원곡선과 직선을 직접 연결하고 완화구간을 설치하도록 하고 있다. 완화곡선 및 완화구간의 길이는 차량의 핸들조작에 곤란을 느끼지 않을 주행 시간을 2초로 정의하여 다음 식 (2)와 같이 산정하고 있다. 속도별 길이 산정결과는 <Table 3> 에서와 같다.

$$L > T_n \frac{V_{max}}{3.6} \tag{2}$$

여기서,

$V_{max}$ : 최대 운행속도(km/h),  $T_n$ : 진동주기(sec)

L: 완화곡선 또는 완화구간 길이

<Table 3> Length of transition curve or section by speed

Vehicle speed (km/h)	Transition curve/part length(m)
50	30
40	25
30	20
20	10

하지만 PRT차량은 완전무인운전시스템으로 실질적으로 핸들조작과는 관련이 없다. 따라서 PRT와 같은 무인운전의 경우 차량의 주행안정성 및 승객의 승차감을 고려하여 결정하는 것이 바람직 할 것으로 판단되며, 본 연구에서는 선형조건별 차량의 동적거동을 분석하여 최적 선형조건을 제시하고자 한다.

## 3. PRT 차량/선형 상호작용 해석

### 3.1 해석 조건

차량/선로선형 상호작용해석을 통한 주행안정성 평가

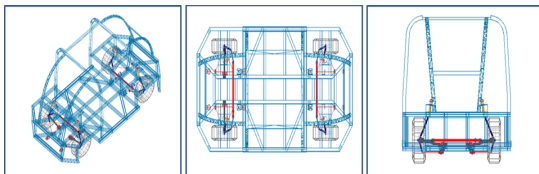
를 위해 범용 차량동역학 해석프로그램인 ADAMS/CAR를 사용하였다. 평가기준은 <Table 4> 에서와 같이 ASCE-APM Standards 기준을 적용하였다. 여기서는 도시 연계교통 수단으로서 최고 운행속도 40km/h 이하의 저속운행과 곡선주행이 많은 PRT 운영 특성을 고려하여 곡선주행시의 승차감을 목적함수로 평가하였다. 또한 PRT 특성상 입석이 없으므로 좌석일 경우만을 고려하였으며, 승차감에 가장 큰 영향을 미치는 횡 방향 가속도에 대해서 평가를 수행하였다. 해석에 사용된 차량 제원은 <Table 5> 에 나타내었으며, [Fig. 2] 에서는 PRT 차량 해석모델을 보여주고 있다.

<Table 4> ASCE-APM standards[10]

Items	Standing	Seated
Lateral acceleration	0.10g	0.25g
Vertical acceleration	0.25g	0.25g
Longitudinal acceleration(normal)	0.16g	0.35g
Longitudinal acceleration(emergency)	0.32g	0.60g

<Table 5> Specification of the Korean PRT vehicle

Items	Specifications
Wheel base	2300mm
Wheel track	1200mm
Suspension	Macpherson strut type
Steering	Four wheel steering
Tire	155/70R13
Vehicle weight(Empty)	900kg
Vehicle weight(Full)	1,300kg



[Fig. 2] Model of PRT vehicle by Adams/car

해석변수는 도로기준을 바탕으로 한 곡선반경과 완화곡선 길이에 대한 이론적 최대값을 기준으로 PRT 차량의 만족 여부를 평가 하였다.

<Table 2> 와 <Table 3> 에서와 같이 PRT 차량의 설계속도 50km/h를 적용하여 산정된 최소 곡선반경 및 완화곡선 길이는 각각 90m, 30m이다. 이를 기준으로

PRT전용 노선에 대한 선형기준의 완화 가능성을 검토하기 위해 추가적으로 불리한 선형조건을 변수로 설정하였다. 곡선반경은 5m씩 감소시켜 80m까지 설정하였으며, 완화곡선 길이는 10m씩 감소시켜 최소 10m까지 설정하였다. 또한 완화곡선이 없는 구간에 대해서도 해석을 수행하였다. 다음 <Table 6> 에서는 해석변수를 보여주고 있다.

<Table 6> Parameter in dynamic analysis

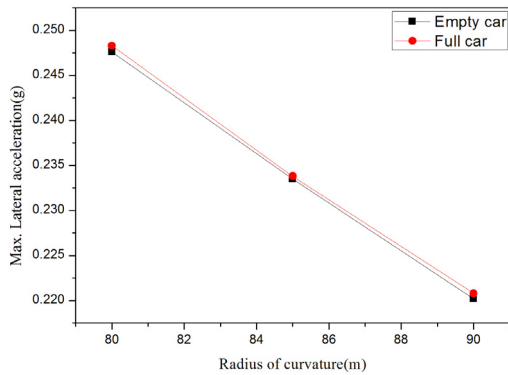
Case	Transition curve/part(m)	Curve Radius(m)	Superelevation (%)
Case 1	30	90/85/80	6
Case 2	20		
Case 3	10		
Case 4	Transition part		

### 3.2 해석 결과

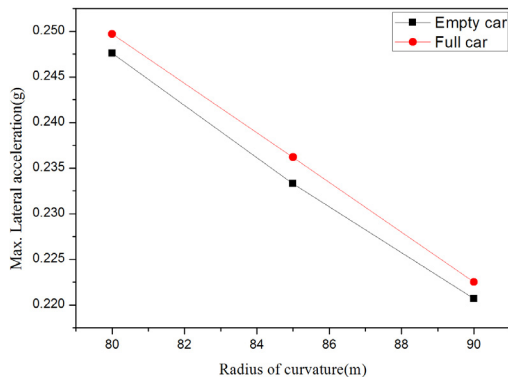
PRT 전용 주행선로에 대해 승차감 차원에서 최적 평면선형 조건을 구하고자 차량/선로선형 동적 상호작용 해석을 수행하였다. [Fig. 3]~[Fig. 8] 은 PRT 주행선로의 평면곡선 반경별 차량의 횡가속도 해석 결과를 보여주고 있다. 여기서 횡가속도 결과는 <Table 6> 의 해석 조건에 따라 PRT 차량이 공차와 만차일 때, 그리고 완화곡선 길이별로 비교 분석을 하였다. 해석결과, [Fig. 3]~[Fig. 6] 에서 알 수 있듯이 대부분 선형조건에서 만차인 경우가 공차일 때 보다 횡가속도가 크게 나타남을 알 수 있으며, 곡선반경이 클수록 횡가속도가 작은 것으로 나타났다. 완화곡선 길이 및 형태별로는 [Fig. 7]~[Fig. 8] 에서 알 수 있듯이 완화곡선 길이가 길수록 횡가속도가 낮게 나타났으며, 완화구간의 경우가 가장 높은 값을 나타내었다. 즉 만차와 공차 모든 조건에서 곡선반경이 가장 작은 80m일 때 완화구간(case4)의 경우 횡가속도가 각각 0.257g, 0.251g로 기준에 비해 다소 높은 것으로 나타났다.

변수별 해석결과를 ASCE-APM Standards기준과 비교하면 완화곡선 길이 20m까지는 모든 곡선반경에서 0.25g를 만족하였으며, 완화구간 및 완화곡선 길이 10m에서는 곡선반경 80m에서 다소 초과하는 경향을 나타내었다. 이러한 결과로부터 개발 PRT 차량에 대한 전용 노선은 도로기준에 따른 완화곡선이 부설될 경우 최소 곡선반경이 80m, 그리고 최소 완화곡선 길이 20m까지 줄

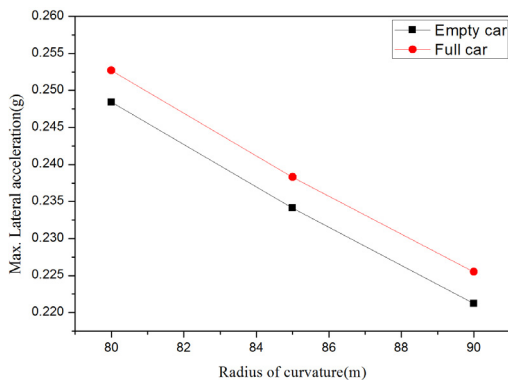
일 수 있음을 알 수 있었으며, 가장 불리한 조건인 완화 구간에서도 곡선반경 85m 이상에서는 횡가속도 기준을 만족하여 최소 곡선반경 또한 줄일 수 있음을 알 수 있었다.



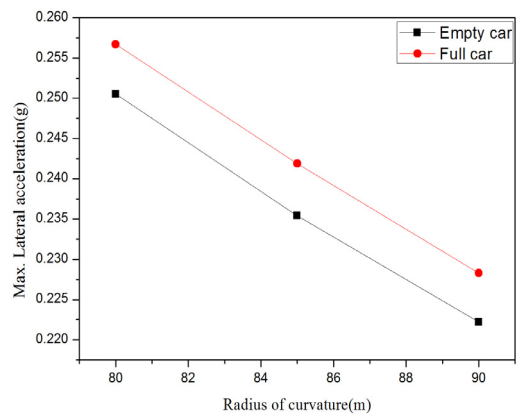
[Fig. 3] Maximum Lateral acceleration of Case 1



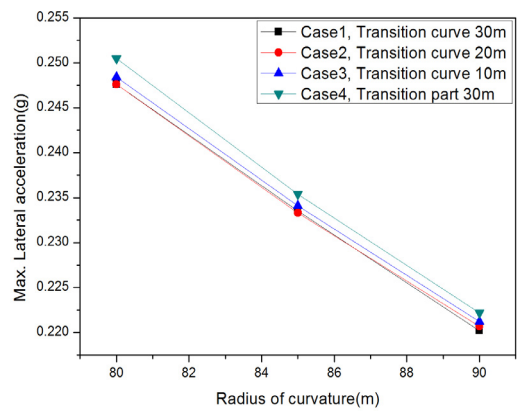
[Fig. 4] Maximum Lateral acceleration of Case 2



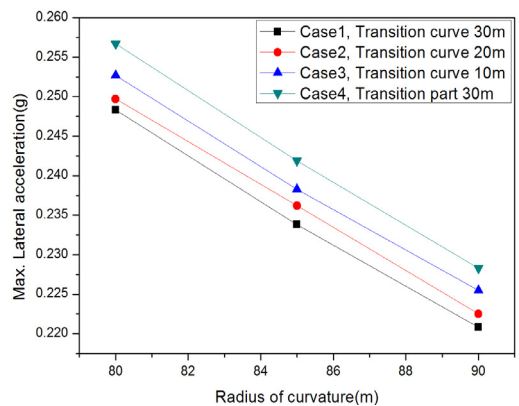
[Fig. 5] Maximum Lateral acceleration of Case 3



[Fig. 6] Maximum Lateral acceleration of Case 4



[Fig. 7] Maximum Lateral acceleration by transition curve type(Empty)



[Fig. 8] Maximum Lateral acceleration by transition curve type(Full)

## 4. 결 론

본 연구에서는 PRT 전용 주행 선로에 대해 차량의 주행안정성을 고려한 최적 평면선형 조건에 대한 해석적 연구를 수행하였다. PRT 차량이 최고 설계속도로 주행 시 곡선반경, 완화곡선 길이, 캔트(편경사)와 같은 주요 평면 선형 변수들에 대해 승차감 측면에서의 최적 평면 선형조건을 제안하였다.

해석결과, 가장 불리한 조건인 완화곡선이 없는 완화구간에서 설계속도 50km/h 주행 시 최소 곡선반경은 기준에 비해 5m정도 낮은 R=85m까지 횡가속도를 만족하는 것으로 나타났다. 그리고 완화곡선이 정상적으로 부설되었을 경우에는 기준(30m)에 비해 10m 낮은 20m에서 횡가속도를 만족하였으며, 이때 최소 곡선반경은 80m 까지 가능한 것으로 나타났다.

이상의 결과로부터 PRT 전용 주행노선의 경우 평면 선형 기준을 좀 더 완화할 수 있을 것으로 예상되며, 이는 향후 PRT 노선건설 및 설계기준 수립 시 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by a grant from R&D program funded by the Ministry of Science, ICT, and Future Planning of the Korean government.

## REFERENCES

- [1] Jin-Sun Lee, Kyoung-Tae Kim, "A Study on the Possibilities of PRT Applications," Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 12, No. 4, pp. 526-534, 2009.
- [2] Min-Woo Kim, Hee-Young Lee, "Status of PRT Technology Development and Guide-Way R&D," DAEWOO Engineering Company Report, pp. 83-103, 2009.
- [3] Martin Lowson, "The ULTra PRT System", Proceedings of the ASCE 8th International Conference on Automated People Movers San Francisco, 2011.
- [4] Jörgen Gustafsson, Svante Lennartsson, "VECTUS PRT Concept and Test Track Experience", ASCE Automated People Movers, 2009.
- [5] Ju-Hwan Um, Rag-Gyo Jeong, Yu-Bong Kim, "Status of PRT Technology Development and Operation Cases", Magazine of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol. 17, No. 4, 2013.1
- [6] Seok-Won Kang, Ju-Hwan Um, Rag-Gyo Jeong, Jong-Suk Kim, "A Development of the Apparatus for Vertical Transfer of a PRT Vehicle Operation on a Road Network", Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 14, No. 6, 2013
- [7] Jin-Sun Lee, Kyoung-Tae Kim, "PRT Application Study Using Corridor Analysis: Focused on Nan-Gok Area," Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 14, No. 2, pp. 188-193, 2011.
- [8] Rag-Gyo Jeong, Beak-Hyun Kim, Hyeon-Chyeol Hwang, "Development of the Operation Simulator for the PRT System," Journal of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 60, No. 11, pp. 2056-2063, 2011.
- [9] Baek-Hyun Kim, Rag-Gyo Jeong, Sang-Ki Chung and Seok-Won Kang, "A Development of the Electric Power Supply System for PRT Vehicle," Journal of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 62, No.2, pp. 196-200, 2013.
- [10] Jeonggil Cho, Junwoo Kim, Hyuntae Kim, Jeongseo Koo, Seokwon Kang and Raggyo Jeong, "A Study on the Durability and Running Stability Evaluation of the Korean PRT", Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 22, No. 5, 2014.

**엄 주 환(Um, Ju-Hwan)**



- 2010년 2월 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원 (공학박사)
- 1996년 8월 ~ 1997년 12월 : 한국고속철도건설공단 주임연구원
- 1997년 12월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원
- 관심분야 : 철도, 궤도토목
- E-Mail : jhum@krii.re.kr

**강 석 원(Kang, Seok-Won)**



- 2012년 5월 : 미국 Texas A&M University at College Station 기계공학과 (공학박사)
- 2007년 1월 ~ 2008년 7월 : 르노삼성자동차 중앙연구소 사원
- 2012년 5월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원
- 관심분야 : N/MEMS, 마이크로 열전달
- E-Mail : swkang@krii.re.kr

**김 백 현(Kim, Baek-Hyun)**



- 2003년 2월 : 인하대학교 전자공학과 (공학박사)
- 2003년 3월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원
- 관심분야 : 전자통신
- E-Mail : bhkim@krii.re.kr

**정 락 교(Jeong, Rag-Gyo)**



- 2005년 2월 : 인하대학교 전기공학과 (공학박사)
- 1990년 12월 ~ 1994년 12월 : 한진중공업 사원
- 1995년 1월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원
- 관심분야 : 전기전자, 열차제어
- E-Mail : rgjeong@krii.re.kr

**변 윤 섭(Byun, Yeun-Sub)**



- 2012년 2월 : 충북대학교 전자공학과 (공학박사)
- 1996년 12월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원
- 관심분야 : 전기전자
- E-Mail : ysbun@krii.re.kr