

## 저심도 3D PST 궤도패널 설계 적용성에 대한 연구

## A Study on the Design Application of 3D PST Precast Concrete Panel on Tunnel

박성현<sup>†</sup>, 장지부\*, 이창진\*\*, 이일화\*\*\*Sung-Hyun Park<sup>†</sup>, Ji-Bu Jang\*, Chang- Jin Lee \*\*, Il-Wha Lee\*\*\*

**Abstract** Recently, the light rail transit(LRT) system to connect existing metropolitan area transportation network is being actively promoted in accordance with the new city development. The route of the light rail system is planned tunnel structure through the lower most of the city. Track material input, construction equipment effectiveness, constructability and minimize maintenance track system is required in a narrow tunnel workspace. In this paper, it is proposed separate pre-production type precast concrete panels(3D PST) for driving safety on AGT rubber wheels, based on the performance and specification of the vehicle at a minimum curve radius of 30m, a longitudinal section line 58% slope conditions. In addition, through finite element analysis(FEM), stability of the AGT track system was verified in tunnel.

**Keywords** : LRT track system, AGT with rubber wheels, Separated type concrete panels, Pre-positioning

**초 록** 최근 신도시 및 지역개발에 따른 기존 수도권 교통망을 연결하는 경량전철시스템(LRT, Light Rail Transit) 도입이 활발하게 진행되고 있다. 경량전철시스템의 선구특성은 대부분 도심지 하부를 통과하는 터널구조물이 계획되며, 이에 따른 터널내 제한된 공사현장 조건에서 궤도자재 투입, 시공장비 효율성, 시공성 및 유지보수 최소화가 가능한 경량전철형 궤도구조 최적화 방안이 요구된다.

따라서 본 논문은 차량의 성능 및 제원을 근간으로 최소곡선반경 30m, 기울기 58% 선로조건에서 AGT 차량의 주행안정성 확보와 궤도공사 시공성 및 품질확보가 가능한 분리형 사전제작형 프리캐스트(3D PST) 궤도패널단면을 제안하고, 유한요소해석(FEM)을 통한 터널구간 궤도패널의 구조적 안정성에 대하여 검토하였다.

**주요어** : 경전철 궤도시스템, AGT고무차륜, 분리형 프리캐스트 궤도패널, 프리포지셔닝

## 1. 서 론

고무차륜 AGT(Automated Guideway Transit)는 평면궤도 주행로 상부를 고무타이어로 운행하는 시스템으로 차량의 소형화, 궤도시스템의 최적화를 통하여 터널 및 구조물 설치 등의 건설비용 절감이 가능하다. 하지만 터널내 현장조건에서 궤도재료 투입, 시공장비 운영 등 궤도공사 시 많은 제약사항이 발생된다. 따라서, 경량전철시스템의 궤도구조 최적화 구현이 가능한 궤도건설방식이 필요하며, 본 연구는 현장타설식 콘크리트 도상의 문제점 해결방안으로 평면곡선 및 종곡선을 추종할 수 있는 사전제작형 궤도패널 단면을 제안하고자 한다.

† 교신저자: (주)서현기술단 궤도사업부 상무 박성현([psh@seohyuneng.co.kr](mailto:psh@seohyuneng.co.kr))

\* (주)서현기술단 부장, \*\* (주)서현기술단 과장, \*\*\* 한국철도기술연구원 첨단인프라연구팀 책임연구원

## 2. 터널구간 고무차륜 AGT 궤도시스템 설계

### 2.1 차량제원 및 성능

국내 상용화된 고무차륜 AGT(Automated Guideway Transit)의 차량성능 및 제원은 Table 1과 Table 2와 같으며, 본 연구에서는 최소곡선반경 40m, 최급기울기 58% 선형조건에서 차량의 주행안정성 확보가 가능한 궤도패널 설계를 수행하였다.

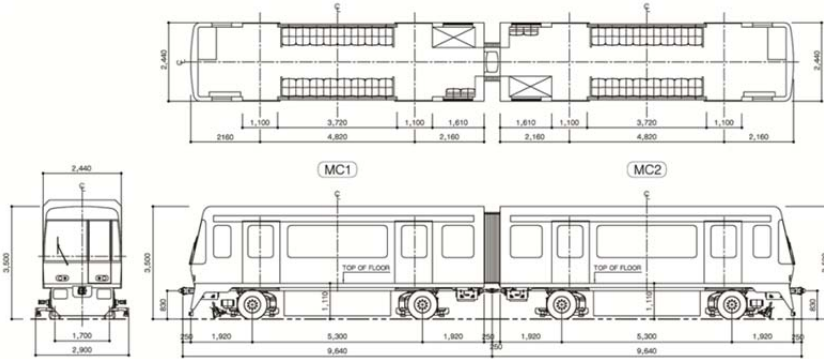


Fig. 1 Specifications of LRT with Rubber Wheels

차량의 제원은 궤간 1,700mm, 축간거리 5,300mm 축중 90kN으로 만차 시 180kN, 공차 시 115kN으로 주행로 궤도패널 설계를 수행하였다. 차량의 성능은 Table 2에 보이는 것 같이 설계속도 70km/h, 최소곡선반경 40m, 비상시 가·감속도 4.5km/h/s를 기준으로 분리형 주행로 궤도패널에 발생하는 하중을 산정하여 검토하였다.

Table 1 Principal Dimensions

Classification	Specifications
Gauge	1,700mm
Wheelbase	5,300mm
Maximum Axial Load	90kN
Curb weight	E:115kN, F:180kN

Table 2 Key System Parameters

Classification	Performance
Max Grade	Main line 58%
Minimum Radius of Curve	Main line 40m, Siding 30m
Max Speed	70km/h over
Maximal retardation	N:3.5km/h/s, E:4.5 km/h/s

### 2.2 주행로 표준단면 선정

#### 2.2.1 주행로 도상 두께 검토

고무차륜 AGT 주행로는 차량의 승차감 및 주행 안정성을 확보하는 중요인자로 차량과 토목 분야 인터페이스사항에 대한 검토가 요구된다. 차량분야 인터페이스 사항으로 주행로 폭원은 고무차륜 AGT의 접지면 250mm에 곡선부 주행에 따른 좌·우 여유폭 175mm를 고려하여 600mm로 적용하였다. 주행로의 높이는 철근피복두께, 철근 순간격 제한 등 구조설계기준의 프리캐스트 콘크리트기준을 반영하여 160mm로 검토하였다. 토목분야 인터페이스 사항으로 횡단 배수관  $\Phi 40$ , 종단면 기울기 선형을 고려하여 충전제 높이는 40mm로 적용하였다.

Fig 2는 터널구간 고무차륜 AGT 주행로 표준단면으로 프리캐스트 패널 160mm, 충전제 40mm를 포함하여 주행로 높이 200mm로 설계하였다. 상부피복 두께 30mm는 주행로 표면연삭 5mm 이하를 고려하여 최종 피복 두께 30mm로 계획하였다.

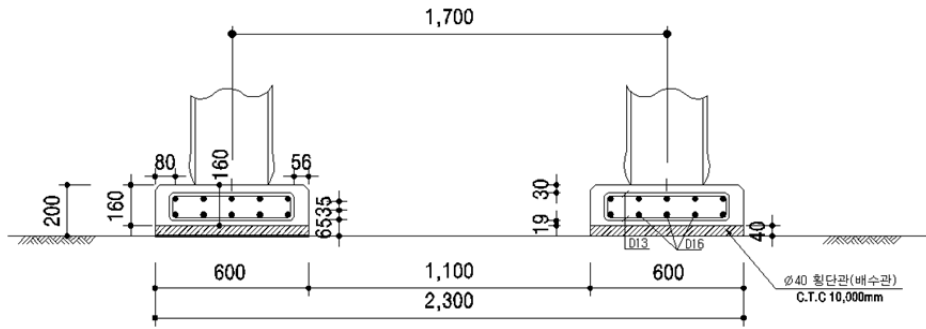


Fig. 2 Standard cross section of LRT with Rubber Wheels

Fig 3은 주행로 도상두께 200mm일 경우 궤간 1,700mm를 중심으로 열차속도(V), 차량중량(W), 노면경사각( $\alpha$ ), 노면편구배(i), 곡선반경(R), 차량바퀴와 패널의 마찰계수(f)를 고려하여 횡단 경사량을 검토하였다.

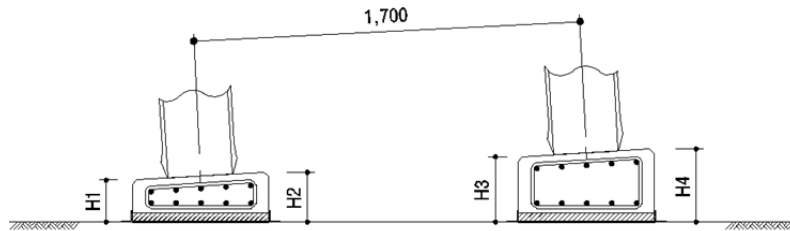


Fig. 3 Transverse tilt amount of LRT with Rubber Wheels

횡단경사량 검토결과 경사도 6%가 넘지 않으며, 패널높이 및 충전제 높이를 포함하여 Table 3과 같이 산정되었다. 횡단경사의 체감은 완화곡선 전 연장으로 하고, 완화곡선이 없는 경우 원곡선 끝에서 직선상으로 일정길이 체감이 필요하다

Table 3 Roadbed thickness of 200mm (gradient 6%)

Tilt amount	H1(mm)	H2(mm)	H3(mm)	H4(mm)
I=0%	200	200	200	200
I=1%	197	203	214	220
I=2%	194	206	228	240
I=3%	192	208	243	259
I=4%	189	211	257	279
I=5%	186	214	271	299
I=6%	183	217	285	319

### 2.2.2 주행로 패널길이 및 운반성 검토

패널길이는 Fig 4에 보이는 것과 같이 경전철 노선특성 및 현장여건을 고려하여 패널길이 3.6m를 적용하였다. 기존 경전철 시공사례 검토결과 궤도자재 투입구 크기는 Table 4와 같이 3m×4m를 적용하고 있다.



Fig. 4 Method input the panel of LRT

Table 4 Cases of Input panel construction

Classification	A Case	B Case
In Size	2m × 4m	3m × 4m
Panel Length	3.65m	3.8
Method Input	Portrait orientation	Portrait orientation
Equipment	Crane	Crane

경전철 특성에 따른 도심지 공사를 위한 궤도패널 운반성 검토결과 Table 5와 Table 6에 보이는 것과 같이 분석되었으며, 현장진입로 조건 및 운반차량의 회전반경, 적재용량을 고려한 결과 15t 덤프 트럭에 패널길이 3.6m를 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

Table 5 Weight of the panel length

longitudinal length	Weight(1EA)	NOTE
3.0m	0.7t	A:0.0955 m <sup>2</sup> I=6%
3.6m	0.9t	
5.0m	1.2t	
7.5m	1.8t	

Table 6 performance of the truck carrying panel

Truck	Capacity	Load capacity	Turning Radius
5t	5t	6.2m × 2.1m	6.4m
8t	8t	7.2m × 2.3m	7.1m
11t	11t	8.0m × 2.3m	7.5m
15t	15t	8.0m × 2.3m	7.8m

### 2.2.3 주행로 전단앵커 설계

주행로의 전단앵커 설계를 위한 발생하중 검토결과 Table 7과 같이 검토되었으며, 발생하중에 대한 하중조합은 터널구간의 지하구조물 조건을 반영하여 콘크리트설계기준 하중조합을 적용하였다.

Table 7 Load Calculation of LRT(Rubber Wheels)

Classification	Load	Note
Axial	90 kN	Vehicle Specifications
Traction/braking load	11.3kN	Maximal retardation 4.5 km/h/s
Slope of Load	5.62 kN	S: 60%
Centrifugal load	97.4 kN	R=40m, Wheelbase 5.3m

주행로의 전단앵커설계를 위한 하중산정은 시·제동하중의 경우 차량의 비상시 감속도 4.5km/h/s를 적용하였으며, 기울기하중은 축중 90kN, 충격계수 1.3, 종단경사 60%, 패널길이 3.6m를 적용하였다. 원심하중의 경우 최소곡선반경 40m, 운행속도 60km/h, 축간거리 5.3m, 패널길이 3.6m를 적용하였다. 전단앵커 검토결과 Table 8과 같으며, 궤도패널 3.6m에 H25(4EA) 적용 시 필요철근 955mm<sup>2</sup> 사용철근 2,027mm<sup>2</sup> 산정되었으며, 안전율(F.S) 2이상 검토되었다.

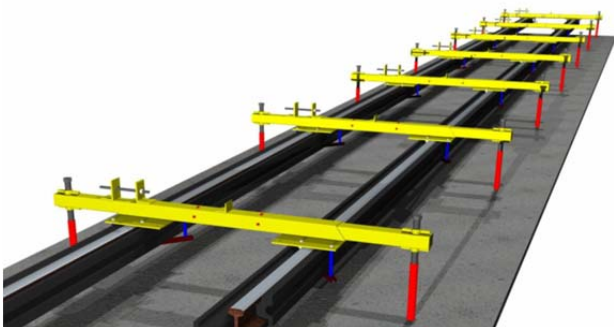
**Table 8 Load Calculation of LRT(Rubber Wheels)**

Classification		Value
Formula	$V_u \leq \Phi V_n$	
Shearing Force	$V_u$	181kN
Shear resistance( $V_n$ )	$\Phi V_c$	9kN
	$\Phi V_s$	171.8kN

### 2.3 주행로 궤도패널 시공성 검토

#### 2.3.1 궤도패널 정정 및 시공방안

터널내 현장타설형 주행로를 계획할 경우 연속철근 콘크리트(CRCP)방식을 적용함에 따른 균열제어가 어려우며, 열악한 시공조건으로 인한 주행면 흘러내림, 콘크리트재료분리 등 품질관리 등의 많은 문제점이 발생한다. 또한 슬럼프확보 불가에 따른 재료의 내구성 저하 및 과도한 양생시간이 요구된다. 일반적으로 레일 및 패널의 거치대 적용은 Fig 5에 보이는 것과 같이 별도의 지지대가 필요로 하고 있다. 하지만 Fig 6에 보이는 것과 같이 주행로 타설을 위한 강제 거푸집 설치 등을 고려할 경우 협소한 터널 내에서는 적용하기에 많은 어려움이 발생된다.



**Fig. 5** Position adjustment of panel by Lifting



**Fig. 6** Install formwork of Filling

Fig 7은 터널내 협소한 작업공간에서 패널의 위치정정을 위한 스핀들 기능과 주행로에 발생 되는 횡·종방향 발생하중에 대한 전단앵커로 활용할 수 있는 패널정정이 가능한 전단앵커를 적용하였다. 이는 패널과 터널 인버트에 수직조절너트(Pipe 25A)를 적용하여 토목의 시공오차를 고려하여 최대 50mm의 수직조절이 가능하게 하였다.

전단앵커 설치시 앵커 설치간격 330mm를 기준으로 Fig 7에 보이는 것과 같이 전단앵커의 시공성을 고려하여 케미컬 앵커(Chemical Anchor)를 적용하였으며, 천공  $\Phi 28\text{mm}$ , 앵커 정착깊이는 직선 표준단면기준으로 160mm이상 확보하였다.

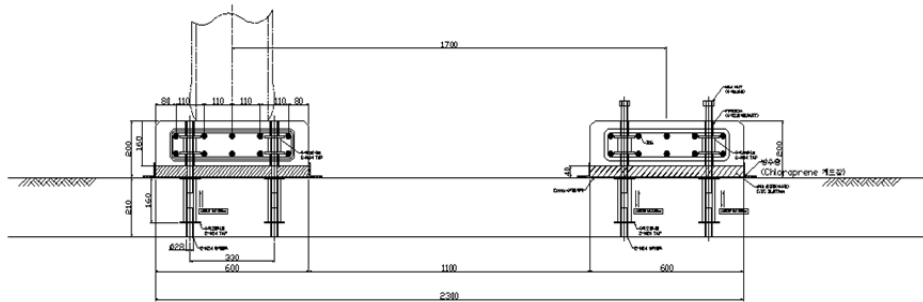


Fig. 7 Position adjustment using the spindle and Shear Anchor

### 2.3.2 궤도패널 설치간격 및 신축이음부 시공방안

터널내 발생하는 프리캐스트 콘크리트 패널의 신축량은 Table 9에 보이는 것과 같이 패널길이 3.6m에 대하여 패널 신축량 약 0.6mm, 패널길이 5.0m에 대하여 발생 신축량은 1.0mm 미만 발생함을 알 수 있다.

Table 9 Load Calculation of LRT(Rubber Wheels)

Longitudinal length	Expansion Length	Note
3.6m	0.54mm	·Coefficient of expansion: $1 \times 10^{-5}$
5.0m	0.75mm	·Change at temperature: $-15 \sim +15$
7.5m	1.125mm	·Disregard friction

이는 콘크리트 열팽창계수와 터널내 온도변화를 고려하여 산정하였으며, 패널과 충전체에 발생하는 마찰력은 무시하였다. 여기서 주행로 패널의 설치간격은 시공성을 고려하여 약 10mm 반영하였으며, 패널상부에 Fig 8과 같이 실링처리를 반영하였다.



Fig. 8 Application method the filler between the panel and the panel

패널과 터널 인버트층 사이에 시공되는 충전제는 약 40mm의 품질확보가 필요하며, 거푸집 양쪽 측면에서 충전이 가능하도록 30mm 확보하였으며, 거푸집 사이에 2mm 이상의 공기배출구를 계획하였다. Table 9는 충전제층 타설전 궤도선형의 허용기준을 나타내고 있으며, 충전제의 무수축모르타르 설계강도는 45Mpa를 적용하였다.

**Table 10 Acceptable design standards of Pouring fillings**

Classification	Level	Gauge	Elevation	Direction	Torsion
Measuring point	All point	All point	Spacing 10m	Spacing 10m	Spacing 10m
Allowance	±2	±2	±3	±3	±3

터널신축이음은 일반적으로 30m기준으로 설치되며, 이는 궤도패널 배치 시 터널의 신축이음과 경합발생이 우려된다. 신축이음(30m)과 패널설치(3.6m) 경합에 따른 궤도패널의 균열을 유발시킨다. 이처럼 터널의 신축개소에 대하여 터널 바닥부에 PE-Sheet를 설치하여 터널 신축거동에 따른 균열을 방지를 계획하였다.

### 3. 고무차륜 AGT 궤도시스템 안정성 검토

#### 3.1 주행로 안정성 검토

터널구간 고무차륜 AGT 궤도패널의 단면력 검토 및 구조특성 분석은 고무차륜 차량의 발생되는 하중조건을 고려하여 2차원 Beam 해석과 3차원 유한요소해석(FEM)을 통한 궤도패널 주행로에 발생하는 응력 및 변형특성을 분석하였다.

#### 3.2 해석조건

궤도패널의 3차원 선형탄성해석(Static, General)을 위하여 해석물성치 및 하중/경계조건은 Table 11과 Table 12와 같이 적용하였다. 주행로 궤도패널에 작용하는 하중조건(Load Condition)은 고무차륜 접지면적(600mm×250mm)을 고려하여 만차시 하중 180kN을 재하 하였다.

궤도패널의 단면력 검토를 위하여 2차원 Beam Element를 적용하였으며, 패널과, 충전제, 터널의 인버트의 형상제원을 입력하였다. 궤도재료의 연결은 Elastic Link로 연결하였으며, 지반은 반력계수를 산정하여 스프링으로 모델링 하였다.

**Table 11** Properties of materials

Materials	Panel / Invert
Density	2,450[kg/cm <sup>3</sup> ]
Modulus of Elasticity	31.0/ [GPa]
Poisson's Ratio	0.2[MPa]
Yield Strength	-

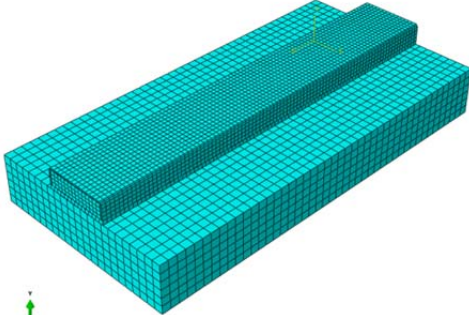
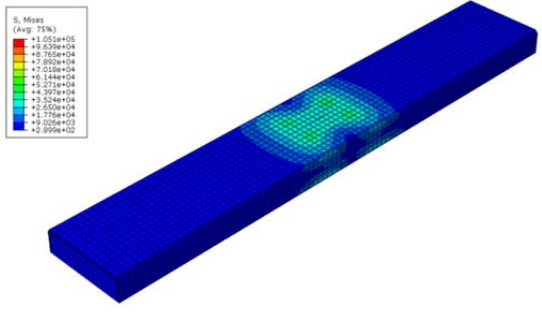
**Table 12** Boundary/Load Condition

Boundary Condition	Load Condition
Invert : All Fix	Uniform load 180kN/m (Wheel contact area : 600mm×250mm)
Panel : y Fix	
Filler : y Fix	
Contact : Non Friction	

### 3.3 해석모델링 및 결과

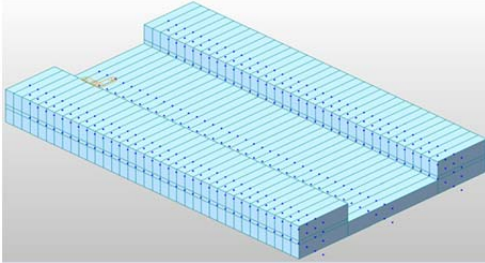
터널구간 고무차륜 AGT 궤도패널의 주행로 해석모델은 Table 13과 같이 3차원 선형탄성모델 (Solid Homogeneous)을 적용하였으며, 주행로, 충전제, 인버트에서는 마찰(Friction)이 없는 것으로 해석을 수행하였다. 해석결과 발생응력은 0.6MPa로 콘크리트의 허용압축/인장을 모두 만족하였으며, 발생변위는 0.01mm 이하로 미소하게 발생하였다.

**Table 13 Detail analysis of rubber wheels runway**

Modeling	Analysis of Results
	

주행로의 단면력 해석모델링은 Table 14와 같이 수행하였으며, 해석조건으로 궤도패널 및 충전제의 설계강도 45MPa 적용하였으며, 해석결과 전단력, 사용성, 균열폭 검토결과 모두 만족하는 것으로 검토되었다.

**Table 14 Analysis of design member force**

Modeling	Analysis of Results
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mu = 56.3 kN·m, Vu=121.5 kN</li> <li>- Design Condition : Fck=45MPa, Fy=400MPa, Dc=30mm</li> <li>- Panel : Width(600mm), Height(160mm)</li> <li>∴ Satisfaction of shear force, cracks and serviceability</li> </ul>

## 4. 결론

본 논문은 현장타설식 콘크리트 도상의 문제점 해결방안으로 최소곡선반경 30m, 기울기 58% 선로 조건에서 평면곡선 및 종곡선을 구현할 수 있는 사전제작형 궤도패널 단면을 제안하고자 한다.

- 1) 고무차륜 AGT 주행로 요구조건은 지지체의 구조적 특징으로 수직력과 축력에 저항할 수 있도록 강도와 내구성이 충분해야 하며, 곡선구간에 대한 캔트설정 등에 대하여 정밀한 선형시공이 가능해야 한다.



- 2) 하지만, 현장타설식 주행로 경우 작업공간의 협소, 재료반입의 어려움, 시공장비 제한에 따른 블리딩, 레이턴스, 표면강도 저항 등의 재료내구성 확보가 어려우며, 이로 인한 주행면 흘러내림, 콘크리트재료분리 등의 품질관리가 어렵다.
- 3) 따라서 본 연구는 현장타설식 콘크리트 도상의 문제점 해결방안으로 곡선부 적용이 용이한 프리캐스트 궤도패널단면을 제시하였으며, 궤도패널 안정성 검토결과 허용치를 모두 만족하는 것으로 검토되었다.

## 후 기

본 논문은 “저심도 철도시스템 핵심기술개발” 과제의 일환으로 수행되었으며, 본 연구에 도움을 주신 한국철도기술연구원 연구진에 감사 드립니다.

## 참고문헌

- [1] 동북선 경전철 민간투자사업 실시설계보고서(2010), 서울특별시
- [2] 부산지하철 3호선 반송선 실시설계보고서(2006), 부산교통공사
- [3] 이일화, 이호용, 류상환, 조봉관, 민경찬(2013), 3D-PST방식을 적용한 고무차륜 AGT 주행로의 차량주행성능 평가, 한국철도학회, 춘계학술대회 논문집(2013.5 1153-1161)
- [4] 이일화, 이안호, 강남훈, 윤현석(2013), 고무차륜 AGT 경량전철의 적용사례 분석을 통한 주행로 건설방식의 개선, 철도저널 제 16권 제1호, 2013.2, page 21-26
- [5] 박정근, 김순철, 한종문, “매립형철도궤도 시스템 성능평가”, 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp. 1649-1658, 2008.
- [6] Transit Cooperative Reserach Program, "Report 57, Track Design Handbook for Light Rail Transit", National Academy Press, 2000.