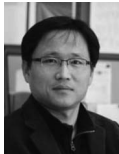


# 고무차륜 AGT 경량전철의 적용사례 분석을 통한 주행로 건설방식의 개선



**이 일 화**  
한국철도기술연구원  
책임연구원  
T.010.4506.1650  
iwlee@krii.re.kr



**이 안 호**  
한국철도기술연구원  
수석연구원  
T.010.3287.6168  
ahlee@krii.re.kr



**강 남 훈**  
화성철도기술연구소  
소장  
T.010.7140.6507  
charikang@hanmail.net



**윤 현 석**  
화성철도기술연구소  
부장  
T.010.2284.0482  
kingking0422@naver.com

## 1. 서론

고무차륜 AGT(Automated Guideway Transit)시스템은 전용선로를 사용하며, 기존 철도와는 달리 고무타이어를 주행륜으로 사용하는 무인운전방식의 경량전철 시스템이다. 고무차륜 적용으로 저소음/저진동의 환경친화적인 주행특성을 구현하였으며, 궤도 양쪽에 설치되는 철제빔에 안내륜이 구속되어 주행하는 구조적인 특성에 의해 탈선을 원천적으로 배제한 안전한 시스템이다. 특히 급구배, 급곡선에 대한 대응성이 우수하여 도심지 노선 또는 신도시 개발지역에 적합하다. 고무차륜 시스템은 현재 부산도시철도 4호선과 의정부 경전철 등에 적용되어 상업운영중

이며 낮은 건설비와 저소음진동특성으로 인하여 국내에서는 동북선, 신림선, 사상선, 초읍선 등 약 10개 노선이 건설 계획중이다.

고무차륜 AGT 시스템의 궤도구조 및 건설방식은 국내 적용사례가 없기 때문에 외국의 방식을 그대로 준용하여 사용하였다. 그러나 시스템 적용에 있어 건설환경이 바뀌게 됨에 따라 국외 건설방식을 준용함에 있어 한계성을 가지고 있기 때문에 이에 대한 개선이 필요하다. 이에 본 고(告)에서는 현재까지 국내에서 적용되었던 고무차륜 주행로의 설계 및 건설방식을 검토하고 제시된 문제점들을 고찰하여 향후 건설계획중인 고무차륜 시스템의 안정성을 향상시키고 주행로의 성능을 개선하기 위한 방안을 제시하고자 한다.



그림 1. 부산지하철 4호선



그림 2. 의정부 경전철

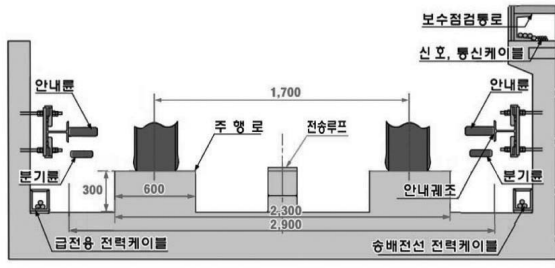


그림 3. 고무차륜 AGT 시스템의 궤도구조

## 2. 고무차륜 AGT 주행로의 구성 및 역할

고무차륜 시스템을 급구배나 급곡선 구간에 적용할 경우, 등판능력과 주행성이 향상되며, 소음 및 진동 요구조건을 충족하는 것에도 유리하다. 궤도의 구조는 그림 3과 같이 방향을 결정하는 안내궤조와 주행성을 확보하기 위한 주행로로 구성된다. 콘크리트 주행로는 고무차륜의 접촉지지체로서 차량의 주행성을 확보하는 기능을 한다. 안내궤조는 차량의 주행을 구속하여 안내하는 역할을 하는데 일반철도에서 레일의 기능 중 횡압에 저항하는 기능을 한다.

### 2.1 고무차륜 주행로의 형식

주행로의 형식으로는 구조적으로 분리형(차륜이 주행하는 부분만 높게 한 주행로)과 일체형(차륜이 주행하는 부분뿐만 아니라 좌우 주행로를 일체화한 주행로)으로 구

분하며 재료적으로는 RC구조, 강구조, RC와 강철의 합성구조 등이 있다. 국내에서 교량구간에서는 분리형을 적용하고 터널구간에서는 일체형을 주로 적용하고 있으며 재료적으로는 RC구조를 적용하고 있다.

### 2.2 고무차륜 AGT 주행로의 요구조건

고무차륜 궤도구조에서 주행로는 일반 철제차륜 궤도시스템과 동등한 요구조건을 충족하여야 한다. 콘크리트 주행로가 갖추어야 할 주요 요구조건은 다음과 같다.

#### ① 지지체의 기능

고무차륜 주행로는 열차운행시 궤도에 작용하는 수직력 및 축력에 저항할 수 있도록 설계, 시공되어야 하며 지지력 확보를 위하여 주행로 콘크리트 강도가 충분히 확보되어야 한다.

#### ② 선형성

고무차륜 주행로는 선형요소인 곡선의 설정, 궤도요소인 캔트와 같은 차량의 주행성을 확보하는 정밀한 선형성을 가져야 한다.

#### ③ 평탄성

주행로 표면에 요철이 있으면 승차감에 영향을 미칠 뿐 아니라 제3궤조의 집전장치에서 벗어나 집전에 지장을 초래하거나 차량의 손상을 가져올 염려가 있다. 고무차륜의 공기압은 일반자동차의 약 5배로 고압이기 때문에 주행면의 근소한 요철에도 영향을 받게 된다.

표 1. 고무차륜주행로 형식별 특징

구분	분리형	일체형
개요	• 주행로를 좌우로 분리하여 최소폭으로한 형식	• 좌우의 주행로를 1개의 판으로 만든 형식
단면		
특징	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 일체형보다 사하중이 저감</li> <li>• 배수성, 제설성 유리</li> <li>• 높기 설정에 4점의 높이가 필요하므로 정밀시공에 불리</li> <li>• 강성이 낮아 균열 우려가 있으며 유지 보수에 불리</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 큰 판형상이 되므로 강성이 높아 균열에 강하고 유지보수에 유리</li> <li>• 높이가 2점에서 정해지므로 높이의 정밀시공에 용이</li> <li>• 분리형에 비하여 사하중이 증가</li> <li>• 강우시 배수나 제설 불리</li> </ul>

④ 마찰성능

주행면의 마찰저항이 너무 크게 되면 고무타이어의 마모가 빨라 경제성이 떨어지게 된다. 반면에 마찰저항이 작아지면 고무타이어의 슬립이나 공전이 생길 우려가 있다. 자동운전으로 운행하는 차량은 차륜의 회전수로 거리계측을 실시하므로 이와 같은 현상은 역에서 정위치에 정착하지 못하는 문제를 일으키게 된다.

⑤ 내구성

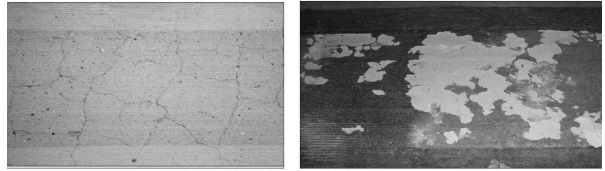
주행로 구체가 충분한 강도가 확보되지 않으면 차량의 주행으로 주행면에 균열이 발생하며 반복적인 통과시 마찰력으로 주행면이 박락하는 현상이 발생한다. 박락이 시작되면 차량이 통과할 때마다 박락의 면적이 지속적으로 증가하여 주행에 심각한 영향을 미친다.

3. 주행로 건설시의 문제점

국내에서 고무차륜 AGT 경량전철은 부산지하철 4호선, 이정부 경전철, 인천공항 경전철에 적용되었으며 그 동안의 건설 및 운영경험을 바탕으로 제시되는 문제점을 정리하면 다음과 같다.

3.1 설계분야

고무차륜 주행로 설계에는 연속철근 콘크리트 포장방식(CRCP, Continuously Reinforced Concrete Pavement)이 적용된다. CRCP는 JCP(Jointed Concrete Pavement)의 단점인 평탄성을 개선하기 위하여 콘크리트 줄눈을 없앤 공법으로 콘크리트 포장 내부에 종방향 연속철근을 삽입하여 균열(Controlled cracks)을 유도하는 방식이다. CRCP는 주로 도로 콘크리트포장에 적용되는 방식으로 저슬럼프의 된질기의 콘크리트를 사용해야 하지만 압송거리가 먼 지하 또는 고가구간에서는 저슬럼프의 콘크리트 품질을 유지하는 것이 어렵다. 균열을 유도하는 CRCP방식에서 재료의 품질관리가 안 될 경우에는 주행로 균열 및 박락을 촉진시키는 주요 원인이 될 수 있다.



(a) 주행면 균열 (b) 주행면 박락

그림 4. 재료의 품질관리부족으로 인한 문제점

3.2 재료분야

국내의 경우 고무차륜 AGT 시스템이 주로 지하 또는 고가구간에 적용됨에 따라 콘크리트 압송시 시방기준인 슬럼프 8cm를 유지하는 것이 어렵다. 특히 지하구간의 경우에는 압송거리가 길기 때문에 15cm 이상의 슬럼프를 갖는 재료를 사용할 수밖에 없는 실정이다. 고무차륜 주행로 건설시에는 재료의 품질확보가 가장 중요한 요소로서 관리가 부실할 경우 아래와 같은 문제를 발생시킨다.

- ① 콘크리트 블리딩
- ② 균열 및 주행로 박락
- ③ 콘크리트 재료분리
- ④ 콘크리트 흘러내림 현상이 발생하므로 주행로 평탄성 확보와 캔트설정의 어려움
- ⑤ 주행로 표면층 콘크리트 강도저하

3.3 시공분야

- ① 면고르기 작업
- 고무차륜 주행로는 고무차륜의 접촉지지체로 주행면의



그림 5. 인력작업에 의한 면고르기

평탄성과 횡단경사량 설정 등 선형성 확보가 중요하다. 이를 위한 면고르기작업은 인력에 의한 방법과 안내레일 상을 주행하는 장비에 의한 기계화 시공법이 있다. 저슬립프의 콘크리트를 사용하여 주행로 면고르기 작업을 실시하는 경우에는 성형이 용이하기 때문에 동일 주행로에 대해서는 횡수의 반복시공으로 평탄성과 횡단경사량 설정이 가능하다. 그러나 묽은 질기의 콘크리트를 사용하여 면고르기 작업을 할 경우에는 블리딩 발생의 주요 원인이 된다.

② 콘크리트 재료분리현상

타설중 다양한 원인에 의해서 콘크리트의 재료분리현상이 발생한다. 분리현상이 발생한 사례를 보면 주행로 표면의 강도분리층두께는 0.5~1cm 정도로 형성되고 표면의 압축강도는 21~25MPa 내외로 설계강도인 35MPa 보다 현저한 강도저하현상이 나타난다. 주행면에서 소정의 강도를 확보하지 못할 경우에는 균열 또는 파손 등에 취약해 진다.

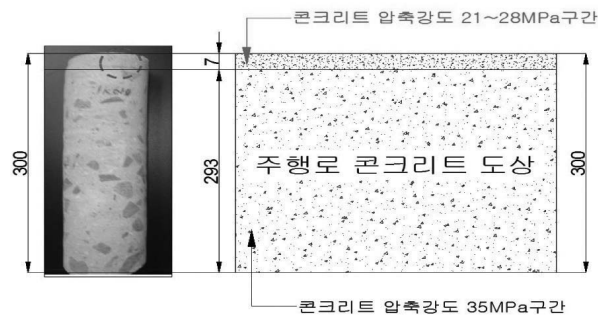


그림 6. 주행로 재료분리현상 (코어채취)

③ 급곡선부 시공시 주행면 변형

고무차륜 주행로의 횡단경사량은 최대 6%로 좌우의 선로 횡단경사량이 급하다. 따라서 급곡선부에 주행로를 부

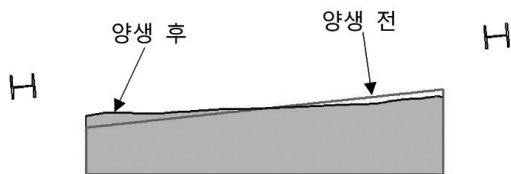


그림 7. 콘크리트 흘러내림에 의한 단면변형



그림 8. 연마차를 이용한 주행면 평삭

설할 경우 중력방향 거동에 저항하는 소정의 부착력과 강도가 발현되기 전까지 지속적인 표면변형이 일어난다. 이러한 주행로의 변형은 중단구간에서의 주행로의 평탄성 변형과 횡단구간에서의 횡단경사량의 변형을 초래한다.

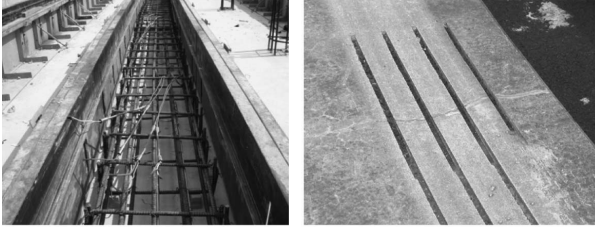
④ 주행면 평삭처리(연마)

노면 평삭처리는 마찰력 및 승차감을 확보하기 위해서 주행로에 바퀴가 닿는 부분을 깎아 내는 공정으로서 승차감(평탄성) 향상, 마찰력 확보, 소음 감소 등의 효과가 있다. 주행로 평삭처리는 박층처리보다 초기 시공비용이 비싸며 시공 정밀도에 따라 반복적인 평삭처리가 요구되는 구간이 많다. 또한 기준현을 3m를 적용하기 때문에 단과장에 틀림에 대한 관리는 용이하지만, 장과장의 경우에는 관리가 어렵다.

⑤ 열선 매입

주행로의 열선매입위치는 주행면에서 보통 50~70mm 사이에 매입된다. 열선매입방법은 주행로를 부설할 때 열선을 철근에 매달아 콘크리트 타설시 동시에 타설하는 방법과 주행로부설이 완료된 후 주행로 상부를 컷팅하여 열선을 매입하는 2가지 방법이 있다.

전자는 주행로 현장 타설시 철근의 정확한 피복두께의 확보가 어려워 열선의 매입위치가 깊어지거나 얇아지는 현상이 발생한다. 열선에 의한 콘크리트표면 온도는 5℃ 미만으로 관리되는 것으로 알려져 있지만, 열선의 최대 발열온도는 800℃로서 매입깊이가 얇아지게 되면 콘크리트 표면에 열변형이 발생할 수 있다. Eurocode에서 제시된 모



(a) 주철근에 열선을 연결하여 시공 (b) 주행면 컷팅후 열선매입

그림 9. 결빙방지를 위한 주행로 열선시공방법

텔에 따르면 실리카질 골재콘크리트의 경우에는 650℃까지, 석회암 골재 콘크리트의 경우에는 800℃까지 열변형율이 선형적으로 증가하는 것으로 보고되었다. 반면에 매입깊이가 깊어지게 되면 열선의 효과를 제대로 발휘할 수 없게 된다.

후자의 경우에는 주행로 표면에 컷팅을 시행함에 따라 주행로 표면 손상과 일정분의 강도감소가 일어나게 된다.

#### 4. 개선방안

3절에서 제시한 주행로의 건설 및 운영시에 발생하는 문제점은 작업조건이 열악한 환경하에서의 현장타설에 기인하는 것이 대부분으로 슬럼프 불량, 블리딩, 재료분리, 균열, 선형설정의 어려움 등이 있다. 이러한 문제점은 내구성을 저해하는 요소로서 유지보수가 증가하고 운행안정성에 영향을 미친다. 문제점을 개선하기 위해서는 현장시공시 철저한 품질관리와 시공관리가 수반되어야 하지만 현실적으로 어렵기 때문에 주행로의 설계개념부터 새롭게 접근

하는 것이 필요하다.

이에 대한 방안으로서 우리연구원과 (주)화성궤도에서 공동개발중인 프리캐스트형(3D-PST) 주행로건설방식을 제시한다. 이 방안은 프리캐스트 주행로를 공장에서 제작하여 현장 조립하는 방식으로서 현장타설에 의해서 발생하는 대부분의 문제점을 해소할 수 있다. 더불어 강도증진(45MPa) 및 정밀시공을 통하여 내구수명을 늘릴 수 있고 유지보수에 있어서도 매우 효과적이다. 그림 10은 프리캐



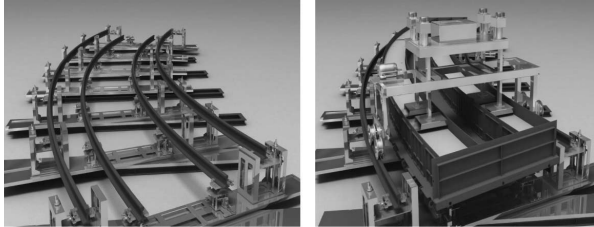
그림 10. 프리캐스트형으로 제작된 주행로 패널



그림 11. 곡선형 프리캐스트 패널의 시험부설 구간(경산시험선)

표 2. 주행로 제작방식별 적용기준

종 류	현장타설형 기준	프리캐스트형 기준
설계하중	18ton(최대), 축중 9ton	18ton(최대), 축중 9ton
콘크리트 설계강도	35MPa	45MPa
콘크리트 슬럼프	8~12cm	4~6cm
주행로 규격	200~300m×600mm×300(h)mm (연속철근방식)	5m×600mm×200~230(h)mm (단일 패널방식)
양생방식	습윤양생	증기양생



(a) 곡선반경 및 횡단경사량 설정 (b) 거무집 및 휘니싱 작업

그림 12. 곡선형상을 가지는 프리캐스트형(3D-PST) 주행로 제작 개념

스트 패널제작방식(3D-PST)을 이용하여 제작한 고무차륜 주행로 패널이며, 그림 11은 경산시험선에 부설된 곡선형 프리캐스트 고무차륜 주행로의 전경이다. 그림 10에서 슬래브의 단면에 3개의 관이 매설되어 있는 것을 확인할 수 있는데, 이는 열선매입을 위하여 열전도파이프를 미리 매설한 것으로서 균일한 열전달을 유도한다.

일반적으로 프리캐스트패널은 직선형 동일 형상을 사용하게 되는데, 고무차륜 주행로는 급곡선과 급구배 구간이 많기 때문에 직선형 패널은 적용에 제한이 있다. 이에 대한 방안으로서 중곡선 및 평면곡선의 형상과 캔트 설정이 가능한 곡선형 패널과 제작설비를 개발하였다. 그림 12의 (a)는 곡선형 패널제작이 가능한 패널조정장치의 개념도이며 (b)는 곡선형 패널조정장치를 이용한 패널생산작업의 개념을 나타내었다. 곡선형 패널을 이용한 주행로 건설의 핵심기술은 설계 및 현장좌표를 이용하여 중곡선 및 평면곡선의 선형과 캔트를 오차없이 구현하는 것이다.

## 5. 결론

고무차륜 AGT 주행로의 국내적용사례 분석을 통하여 주행로 건설의 문제점을 고찰하고 개선방안을 제시하고자 하였다. 주행로는 고무차륜 시스템의 건설 및 생애주기 전반에 큰 영향을 미치며 열차주행 안정성 확보에 필수적인 요소이므로 지속적인 관심과 개선이 필요하다. 주행로 건설시 현재까지 제시된 문제점은 기술적으로 충분히 극복할 수 있을 것으로 판단되며 그 방안으로서 곡선형상의 구현이 가능한 프리캐스트 주행로를 이용하는 건설방식을 제시하였다. 개발중인 주행로 건설방식은 세계 최초로 적용되는 방식으로 현재 시험부설을 완료하여 성능평가 중에 있다. 향후 세부적인 시공 및 품질관리방안이 마련된다면 주행로의 성능향상 및 품질확보에 기여할 것이며 고무차륜시스템의 확대적용에도 기여할 것으로 기대된다. ♪

### ♣ 참고 문헌

1. 저심도철도 핵심기술개발사업보고서, 한국철도기술연구원, 2012.
2. 부산지하철 4호선 궤도실시계획보고서, 부산교통공사, 2006.
3. 부산지하철 4호선 공사시방서(주행로공사), 부산교통공사, 2006.
4. 의정부 경전철 민간투자시설사업 궤도분야 보고서, 2008.
5. 의정부 경전철 민간투자시설사업 궤도공사 시방서, 2008.
6. Eurocode 2: Design of concrete structure-Part 1-2 : General rules-Structural fire design, European committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2004.