

# 급곡선 급경사 운행 산악트램의 대차 및 차체 연결 구조 개발

서승일<sup>1\*</sup>, 문형석<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국철도기술연구원 차세대철도차량본부, <sup>2</sup>한국철도기술연구원 신교통혁신연구소

## Development of a Interface Structure of Bogie and Carbody in Mountain Tram running on sharp Curves

Sung-il Seo<sup>1\*</sup>, Hyung-Suk Mun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Advanced Railroad Vehicle Division, Korea Railroad Research Institute

<sup>2</sup>New Transportation Innovative Research Center, Korea Railroad Research Institute

**요약** 산악트램은 기존 산악 도로에 매립형 궤도를 설치하여 무가선으로 주행할 수 있는 친환경 교통 시스템으로서, 결빙 시에도 운행할 수 있는 장점이 있으나, 산악 도로의 급곡선과 급경사 구간을 주행해야 하는 어려움이 따르게 된다. 본 연구에서는 산악트램이 도로에 설치된 급곡선 급경사 궤도를 주행할 때의 기술적인 문제를 정의하고, 이 문제를 해결하기 위한 대차와 차체 연결 구조의 설계 방안을 제시하였으며, 시제품 제작 및 성능 시험을 통해 설계 방안의 효용성을 입증하였다. 급곡선 구간에서 내외 레일의 주행거리 차이가 심하게 발생하여 주행이 곤란해질 수 있으므로 좌우 차륜이 별개의 속도로 회전하는 독립구동 차륜을 개발하여 적용하였다. 기존 2대차-1차체 차량에서 발생할 수 있는 곡선구간에서의 공격각 및 횡압 증가에 따른 탈선을 방지하기 위해 1대차-1차체 차량을 설계하여 실제 적용하였다. 독립 구동차륜과 1대차-1차체 구조의 시험 차량 시제품을 제작하였고, 소형 궤도에서 시험 운영을 실시하여 성능을 검증하였다. 산악트램이 곡선과 경사를 통과할 시에 차체 간에 발생하는 3방향 회전 대변형을 흡수하기 위해 연결기를 설계하여 축소 시제품을 제작하였으며, 작동 시험을 실시하여 성능을 검증하였다.

**Abstract** Mountain trams are an environmental-friendly transportation system that run wirelessly on an embedded track constructed on previous mountain roads, and can run despite the frozen road. On the other hand, there is some difficulty on sharp and steep tracks. In this study, after possible technical problems were defined in mountain trams running on a sharp and steep track, the design solutions for the interface structure of bogie and carbody were proposed. In addition, a prototype was made and its performance was tested to verify the solutions. Because the difference in the distance of the inner and outer rails on a sharp curve is severe enough to interrupt running, independent rotating wheels with different angular speeds were developed and applied. To prevent derailment due to the large attack angle and lateral force caused by the previous vehicle of 2bogie-and-1carbody on the sharp curve, a vehicle with 1bogie-and-1carbody was designed and applied. A prototype vehicle of 1bogie-and-1carbody with independent rotating wheels was made to improve the performance during the test running on a small track. A coupler was designed to absorb the large rotations of 3 degrees-of-freedom between the carbodies of a mountain tram running on the steep curved track. After a small scale prototype was made, the performance was verified by a function test.

**Keywords** : Bogie, Carbody, Coupler, Independent Rotating Wheel, Interface Structure, Large Rotation, Mountain Tram, Sharp Curve, Steep Gradient

본 연구는 본 연구는 국토교통부 R&D사업 “급구배 추진시스템 핵심기술 개발” 과제로 수행된 것입니다. 연구 수행을 위해 협력 해 주신 참여연구진께 감사드립니다.

\*Corresponding Author : Sung-il Seo(Korea Railroad Research Institute)

Tel: +82-31-460-5623 email: siseo@krii.re.kr

Received April 17, 2018

Accepted May 31, 2018

Accepted July 6, 2018

Published July 31, 2018

## 1. 서론

자연경관이 좋은 우리나라 산악지역에는 많은 관광객들의 발길이 이어지고 있으며, 특히 경관이 빼어난 지역에는 유명 관광단지가 개발되어 관광객들로 붐비고 있다. 관광단지와 연결되는 교통망은 도로위주로 구축되어 있고, 관광단지 내에서 이동수단도 자동차가 주류를 이룬다. 산악지역에 발달된 도로망에는 터널을 뚫지 않는 한 급경사와 급곡선 구간이 불가피하게 존재하게 된다. 그런데, 자동차 주행 도로 위주의 산악 교통망은 온실가스 배출에 의한 대기오염과 로드킬(road kill)에 의한 생태계 위협 등 환경파괴의 요인들을 내포하고 있다. 또한, 급곡선과 급경사 도로는 겨울철 폭설과 결빙 시에 자동차의 운행을 곤란하게 하므로, 교통 기능이 중단된다. 따라서 겨울철 관광객들의 발길도 뜸해지고, 지역 경제는 침체되며, 주민들은 도로 폐쇄에 따른 불편을 겪게 된다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 산악지역 도로에서 운행할 수 있는 산악트램이 필요하게 된다.



Fig. 1. Mountain tram

산악트램은 Fig. 1에서 보듯이 산악지역에서 대규모 궤도 공사 없이 기존 도로를 활용하여 주행할 수 있는 유용한 교통 수단이다. 기존 산악 도로에 매립형 궤도를 설치하여 주행하는 교통시스템이므로 자연환경 훼손이 없으며, 결빙시에도 운행할 수 있는 장점이 있으나, 급곡선과 급경사를 주행해야하는 기술적인 어려움이 따르게 된다. 산악지역 급경사 도로를 주행하기 위해서 과거부터 적용하였던 톱니바퀴와 궤도(rack&pinion)기술[1]을 이용하면 1차 문제는 해소될 수 있다. 그러나 급곡선을 주행하기 위해서는 해결해야할 기술적인 난제가 추가적으로 발생한다. 특히 산악도로는 곡선 반경이 10m밖에 되지 않는 곳도 있어서, 기존 산악철도의 곡선 한계(보통

반경 30m)를 초과하고 있으며, 급곡선과 급경사가 병합되는 구간도 있으므로, 기존기술의 한계를 극복해야할 필요가 있다.

해외 유명 산악 관광 지역에서는 도로와 겸용은 아니지만 산악철도가 운영되고 있고[2], 도심지역 도로에서는 Fig. 2와 같이 트램이 운영됨으로[3], 교통난과 환경문제를 동시에 해결하고 있다. 국내에서는 무가선 저상 트램이 개발되어[4], 여러 지자체에서 도입을 추진하고 있다. 독일 스투트가르트(Stuttgart)시에서는 도시의 고지대 지역주민의 교통편의를 위해 일부 급경사 지역에는 톱니궤도를 설치하여 트램을 운행하고 있다[5].

본 연구에서는 기존의 산악철도나 도시형 트램과는 달리 산악지역 도로에서 운행할 수 있는 산악트램을 개발하기 위해 핵심기술인 대차 및 차체 연결구조를 개발하였다. 급경사와 급곡선 궤도 주행에 따르는 문제점을 고찰하고 해결책을 제시 하였으며, 성능 시험을 통해 그 효과를 확인하였다.



Fig. 2. Tram in Oslo, Norway

## 2. 본론

### 2.1 급곡선 급경사 주행의 문제

산악지역의 도로는 Fig. 3과 같이 반경이 10m인 곡선 구간도 다수 존재한다. 산악트램이 급곡선 도로에서 설치된 궤도를 주행할 때 발생하는 첫 번째 문제는 궤도의 내측 레일과 외측 레일의 곡선 구간의 거리 차이로 발생하는 슬립과 이로 인한 주행 장애이다.



Fig. 3. Steep and sharp curves in mountain roads

내외측 레일의 거리 차이가 크지 않을 경우에는 차륜 답면의 기울기에 의해 형성된 차륜 접촉점에서 내외 차륜 직경의 차이로 극복할 수 있다. Fig. 4를 참고로 하면, 내측 차륜의 회전수가 다음 식(1)과 같이 될 때, 외측 차륜은 답면 기울기에 따라 회전 직경이 조금 증가하여 동일한 회전수로 회전하더라도, 대차는 원활하게 진행할 수 있다.

$$n_i = \frac{R_i}{D_i} \quad (1)$$

여기서,  $n_i$  = 반원을 회전하는 경우 내측 차륜의 회전수  
 $R_i$  = 내측 레일의 곡선 반경  
 $D_i$  = 접촉면에서 내측 차륜의 직경

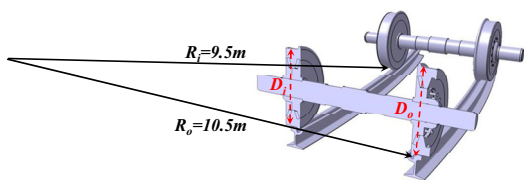


Fig. 4. Difference of track length in curve

기존의 산악철도 대차 차륜의 경우( $D_o = 611\text{mm}$ ,  $D_i = 607\text{mm}$ , 답면기울기=1/40), 최소반경이 10m이고 협궤(궤간 1,000mm)인 궤도를 180°돌아 방향을 바꾼다고 가정하면, 식(1)에 따라, 가장 양호한 상태라 하더라도 내측 차륜의 회전수는  $n_i = 15.65$ 회이고, 외측 차륜의 회전수는  $n_o = 17.18$ 회가 된다. 내외측 레일의 회전수가 1.53회 정도의 차이가 발생하게 되므로, 차륜의 슬립이 지속적으로 발생하거나 플랜지와 궤도가 밀착되어

차륜의 회전이 장애를 받게 된다.

두 번째 문제는 탈선의 위험이다. 급곡선 구간에서 기존의 차량을 놓으면 Fig. 5와 같은 형태가 된다. 차체와 대차가 동일한 방향으로 진행할 때, 궤도는 곡선이므로 차륜과 레일은 공격각을 이루게 된다. 기존 산악열차 차체(대차 중심간 거리 7.4m, 2대차-1차체 구조)가 최소 곡선반경이 10m인 궤도에 놓고 도면을 기초로 한 시뮬레이션을 하면 공격각이 0.4 rad(=22.8°)이 된다. 이 경우 차륜은 Fig. 6과 같이 궤도에 끼이게 되어 회전이 곤란하고, 대차의 추진은 불가능하게 된다. 공격각이 클 때에 차륜이 레일에서 원활히 회전하기 위해서는 차륜이 조향되거나 차체가 유연하여 곡선을 흡수할 수 있어야 한다. 이것이 불가능할 경우 차륜은 횡압과 회전 저항을 받게 되고, 저항을 이기기 위해 회전력이 더 가해지면 차륜 플랜지가 레일을 타고 넘어 올라타기 탈선이 발생할 수 있다.

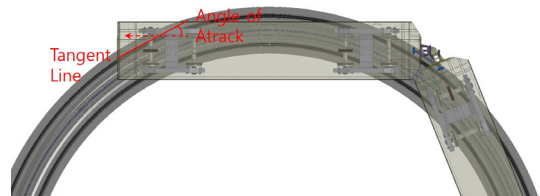


Fig. 5. Conventional vehicles on the sharp curve

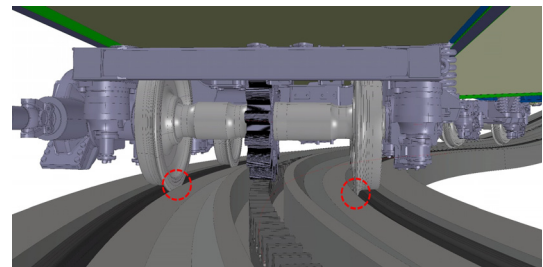


Fig. 6. Contact of wheel flange with track

급곡선 급경사 주행에 따르는 세 번째 문제는 차체간의 과도한 상대 변위이다. Fig. 7과 같이 산악트램이 곡선을 통과하는 경우, 차체는 강체와 같이 직선을 유지하므로 대차의 방향 전환에 따라 연결부에서 횡굴절(lateral rotation)이 발생하게 된다. 또한, 곡선 경사 구간에서는 Fig. 8과 같이 궤도의 캔트로 인해 연결부에서는 비틀림(twisting)이 유발하게 되며, 종경사 구간에서는

Fig. 9와 같이 종굴절(longitudinal rotation)이 발생하여 차체 지붕에서 간섭이 발생할 수도 있다. 따라서 차체간에 발생하는 횡굴절과 비틀림, 종굴절에 따른 3축 회전 대변형을 흡수할 수 있는 연결기가 필요하다.

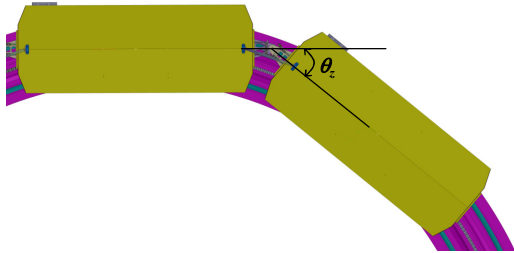


Fig. 7. Lateral rotation of coupler

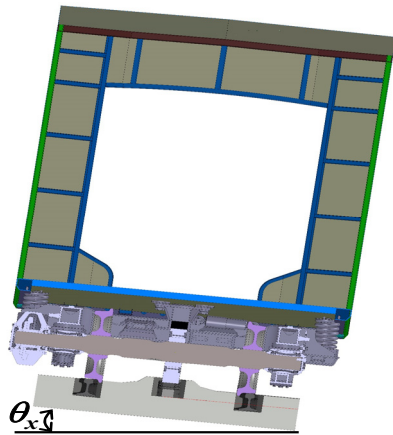


Fig. 8. Twisting of coupler

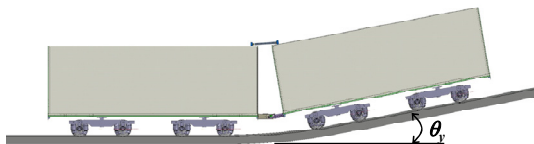


Fig. 9. Longitudinal rotation of coupler

## 2.2 대차 및 차체 연결구조 개발

산악트램이 산악지역 도로에 매립된 급경사 급곡선 궤도를 주행할 때 발생하는 문제를 해결하기 위해 다음

과 같이 핵심기술을 개발하였다.

### 2.2.1 독립구동 차륜과 톱니바퀴

좌우 차륜이 독립적으로 구동하면 차륜의 회전수가 달라질 수 있어 내외측 레일의 주행거리 차이를 극복할 수 있다. 기존 도시형 저상트램(low floor tram)에서도 급곡선 주행을 위해 Fig. 10과 같이 독립구동 차륜을 적용하였으나[4] 차축이 없이 대차프레임에 차륜이 연결된 방식을 적용하고 있다. 그러나 차축이 없게 되면 산악트램에서 경사를 오르기 위해 필수적인 중앙의 톱니바퀴를 설치할 수 없게 되므로 기능 수행 상에 심각한 문제가 초래된다.

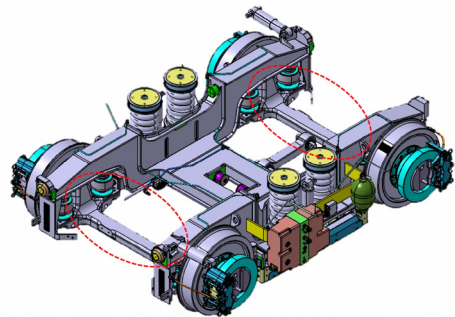


Fig. 10. Bogie for Low floor tram

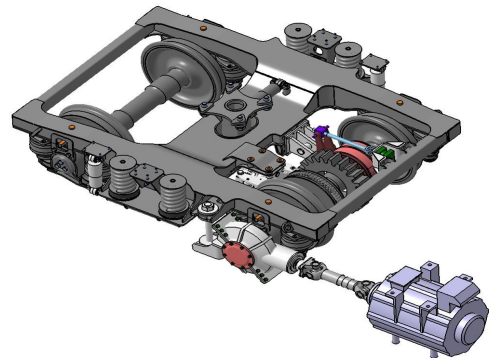


Fig. 11. Bogie for mountain tram

급경사 상승을 위해서는 Fig. 11과 같이 차축 중앙에 톱니바퀴가 있는 대차가 필요하다[6]. 본 연구에서는 차축 중앙에 톱니바퀴를 고정하고 차륜과 차축 사이에는 베어링을 삽입하여 차륜의 독립구동이 가능하게 하는 기술을 개발하여 적용하였다. Fig. 12는 차축의 3차원 형상이고 Fig 13은 단면도로서 베어링이 삽입된 부분을 보여준다.



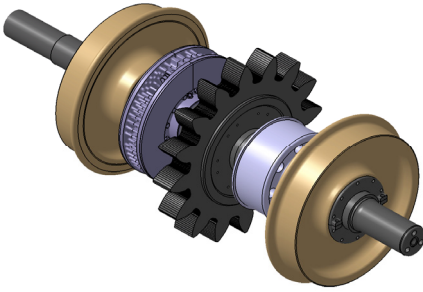


Fig. 12. Independent rotating wheel and axle

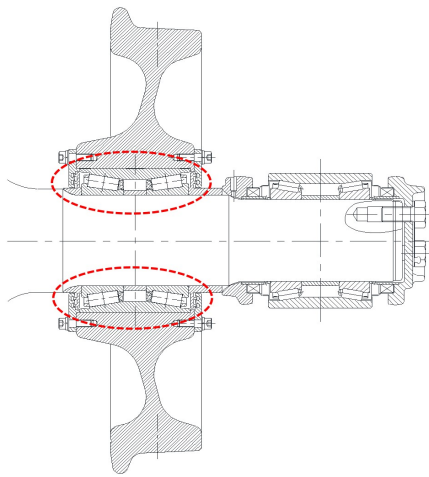


Fig. 13. Section of independent rotating wheel

### 2.2.2 1대차-1차체의 편성

차체 하부에 대차 2대가 지지하는 일반적인 차량에서는 열차 편성에서는 곡선에서 대차의 운동이 구속되어 공격각과 횡압이 증가하는 문제가 있다. 이에 대한 해결책으로 대차가 자유롭게 운동할 수 있도록 Fig. 14와 같이 대차 1대가 차체 1량을 지지하는 방식으로 차량 연결 구조를 변경하였다.

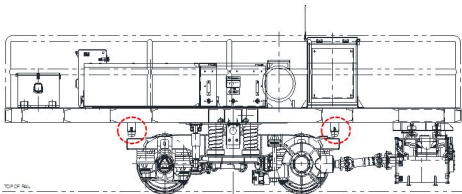


Fig. 14. Side view of 1-bogie-and-1-carbody

1대차-1차체의 연결구조가 되면 Fig. 15와 같이 차량이 곡선을 원활하게 주행할 수 있다. 1대차-1차체 구조는 중앙에 지지점이 있으므로 전후단에서 진동 변위가 많이 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위해 Fig. 14와 같이 차체에 브라켓(bracket)과 완충고무를 설치하여 변위를 제한하였다.

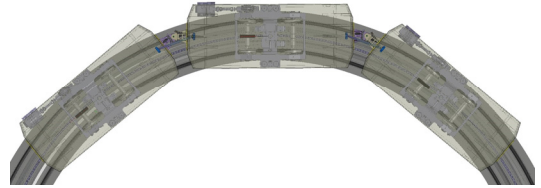


Fig. 15. Tram of 1-bogie-and-1-carbody on the sharp curve

### 2.2.3 3축 회전이 가능한 연결기

곡선과 경사 구간에서 발생하는 차량의 횡굴절과 비틀림, 종굴절을 흡수하기 위해 연결기를 개발하였다. 기존의 평지에서 주행하는 트램은 곡선에서 차체의 굴절을 위해 Fig. 16과 같은 관절형 연결기를 적용하였다. 그러나 이러한 종류의 연결기는 횡굴절에는 유효하나 1축 평면 회전만 허용 가능하므로 차체간 종굴절과 비틀림이 발생하였을 때 회전 변형을 흡수할 수 없는 문제가 발생하게 된다.



Fig. 16. Articulation in a tram

기존 연결기의 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 Fig. 17과 같은 연결기를 개발하였다. 개발된 연결기는 3축으로 회전할 수 있으므로 차체간 발생하는 종횡 굴절과 비틀림을 효과적으로 흡수할 수 있다. 연결기는 Fig. 17과 같이 상대 회전 대변형을 흡수할 수 있도록 내부에 구면 조인트가 있다.

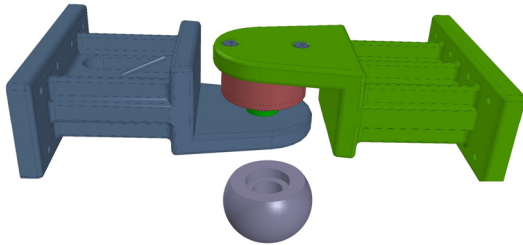


Fig. 17. Coupler rotating in 3-degree-of-freedom

### 2.3 시작품의 성능 시험을 통한 검증

#### 2.3.1 대차 및 차체의 주행시험

대차-차체 연결구조의 급곡선·급경사 주행성능을 확인하기 위해 시작품을 제작하여 시험을 실시하였다. Fig. 18은 Fig. 12와 Fig. 13에 따라서 제작된 독립 구동 차축이다. 1대차-1차체 구조의 주행 시험을 위해 실물과 동일한 대차와 차체 1량을 제작하고, 산악트램용 40m 매립형 툽니 궤도를 건설하였다.



Fig. 18. Wheel and axle for fabrication

Fig. 19 및 Fig. 20은 최소 곡선반경이 10m 이고 경사는 100%인 시험궤도 도면이고, Fig. 21는 건설 완료된 시험궤도이다.

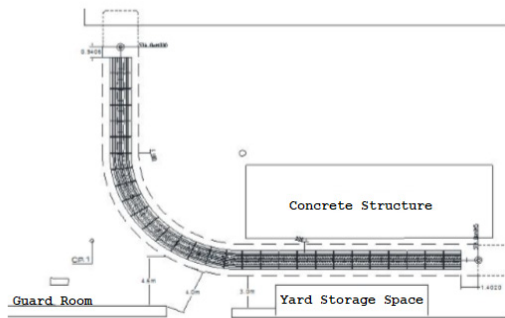


Fig. 19. Plan of test track

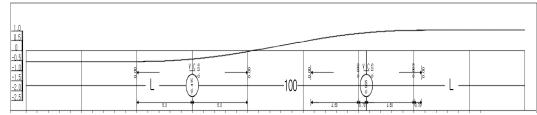


Fig. 20. Elevation of test track

Fig. 21은 1대차-1차체로 연결된 시제 차량이 시험궤도의 곡선 10m 구간을 원활하게 주행하는 장면도 보여준다. Fig. 22는 곡선 구간을 통과할 때 차륜과 툽니바퀴가 레일과 접촉하는 장면을 보여준다. 독립적으로 구동되는 내외측 차륜이 회전수를 달리하면서 곡선 궤도를 무리 없이 주행하고 있다.



Fig. 21. Test vehicle of 1-bogie-and-1-carbody on the test track



Fig. 22. Interface between bogie and track

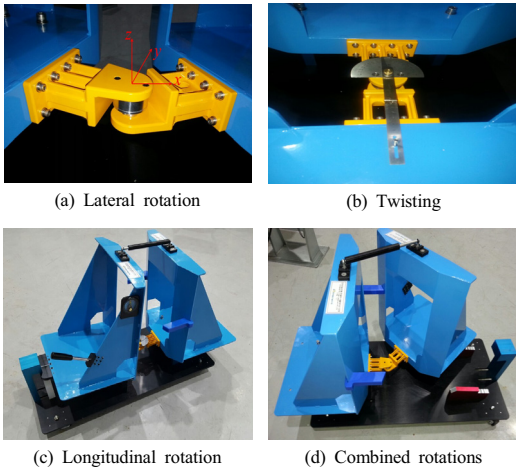
#### 2.3.2 연결기의 성능 시험

차량에서 발생하는 중횡 굴절 및 비틀림을 차체간 연결부에서 흡수할 수 있는지 확인하기 위해 설계도에 따라 1/5로 축소한 연결기와 차체 부분 구조를 제작하고, 작동 시험을 실시하였다. Fig. 23은 연결기의 형상과 함께, 연결기의 3축 회전 대변형을 보여주고 있다. 차량의 횡굴절은 연결기의 수직축(z-axis) 주위의 회전 변형으

로, 종굴절은 연결기의 수평축(y-axis) 주위의 회전 변형으로, 차량 비틀림은 연결기의 전후축(x-axis) 주위 회전 변형으로 흡수하고 있는 모습을 보여준다. 차체 간 회전 대변형이 유발될 때 발생하는 진동이 계속되지 않도록 차체간 연결 댐퍼도 설치하였다. Table 1은 축소 연결기에서 측정한 최대 회전 각도를 정리한 결과이다. 요구되는 각도는 설계 차량이 최대 조건인 반경 10m 급곡선, 구배 180‰, 캔트 80‰의 도로에서 주행할 때에 연결기에서 요구되는 회전 각도이다. Table 1을 보면 연결기는 요구되는 각도 이상을 회전할 수 있음을 알 수 있다.

**Table 1.** Required angles of rotation for a coupler

Direction	Measured Angle	Required Angle	Remarks
Lateral Rotation	51°	42°	Curve radius 10m, Length of carbody 6.64m, Width of car body 2.3m
Longitudinal Rotation	11°	10.3°	Maximum gradient 180‰
Twisting	8°	4.6°	Maximum cant in road, 80‰



**Fig. 23.** Function test of prototype coupler

### 3. 결론

본 연구에서는 산악트램이 산악지역의 급경사 급곡선

도로에 매립된 궤도를 주행하기 위하여 필요한 대차 및 차체 연결구조를 개발하여 그 성능을 입증하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 기존 일체형 차륜-차축은 급곡선에서 내외측 레일의 거리 차이가 심한 경우 주행이 곤란하므로 좌우 차륜이 별개의 속도로 회전하는 독립 구동 차륜이 필요하다.
- (2) 곡선에서 대차가 차체와 동일한 방향으로 진행하려고 할 때, 공격각과 횡압의 증가로 차량 탈선의 위험이 있으므로 차체와 대차 연결구조의 변경이 필요하다.
- (3) 산악트램이 곡선과 경사를 통과할 시에 중형 굴절 및 비틀림이 발생하므로 이를 차체 간 연결기의 3축 회전 대변형으로 흡수할 필요가 있다.
- (4) 제안된 문제점의 대안으로 톱니바퀴가 있는 독립 구동 차륜-차축과 1대차-1차체 구조를 설계하고 시작품을 제작하여, 급곡선 급경사 시험궤도에서 주행시험을 실시하였으며, 곡선 구간의 원활한 주행 성능을 확인하였다.
- (5) 차량의 중형 굴절 및 비틀림을 흡수할 수 있도록 3축 회전 대변형이 가능한 연결기를 설계하고, 축소 연결기 시작품 및 차체 부분구조를 제작하여 작동 시험을 실시하였으며, 성능을 확인하였다.

### References

- [1] N. P. Christos, Railway Transportation Systems, Design, Construction, Operation, pp. 237-250, CRC Press, 2016.
- [2] S. I. Seo et al., "State-of-arts of technologies on mountain railway and proposal of concept design of mountain tram", Railway Jour. of The Korean Society for Railway, vol. 15, no. 6, pp. 53-58, 2012.
- [3] Wikipedia, Trams in Oslo, [https://en.wikipedia.org/wiki/Trams\\_in\\_Oslo](https://en.wikipedia.org/wiki/Trams_in_Oslo) (accessed March, 10, 2018).
- [4] S. H. Lee et-al, "Development of Wireless Tram and Embedded Rail Track System in Korea", KSCE Magazine, vol. 60, no. 6, pp. 57-61, June, 2012.
- [5] Wikipedia, Stuttgart Rack Railway, [https://en.wikipedia.org/wiki/Stuttgart\\_Rack\\_Railway](https://en.wikipedia.org/wiki/Stuttgart_Rack_Railway) (accessed March, 10, 2018).
- [6] S. I. Seo, H. S. Mun, M. E. Suk, J. H. Moon, "Development and Performance Evaluation of Traction System for Steep Gradient and Sharp Curve Track", Jour. of Rail & Rapid Transit, vol. 232, no. 4, pp. 1121-1134, 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409717709108>

**서 승 일(Sung-il Seo)**

[정회원]



- 1984년 2월 : 서울대학교 조선공학과 (공학사)
- 1994년 2월 : 서울대학교 대학원 조선해양공학과 (공학박사)
- 1986년 2월 ~ 2002년 3월 : 한진중공업기술연구소 수석연구원
- 2002년 4월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 수석연구원

<관심분야>

철도차량시스템, 용접구조 강도, 시스템 신뢰성 평가

---

**문 형 석(Hyung-suk Mun)**

[정회원]



- 1994년 2월 : 조지워싱턴 대학교 (공학석사)
- 2008년 8월 : 서울대학교 대학원 조선해양공학과 (공학박사)
- 1998년 1월 ~ : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

철도차량다물체 동특성 해석, 용접변형, 차량설계, 신교통 시스템 개발