2013 년도 한국철도학회 추계학술대회 논문집 KSR2013A299

2 플랜지 안내차륜 노면전철의 도로구조 적합성 기준검토

2 Flanged Guide Wheels Tram Review Compliance Criteria of the Road Structure

서광석*†, 이승일*, 송억영**

Kwang-Suk Seo*†, Seung-Il Lee*, Oak-Young Song**

Abstract Tram of the city public transport increased interest in the review of criteria for the installation of the tram is required. In particular, among the tram guide wheel of 2flanges in the case of using the existing road structure and compliance review is required. The reason to build a tram on the road, the road and tram operations can be performed efficiently. Thus, the tram guide wheel of 2 flanges guide the dynamic analysis of the vehicle through the road structure and road conditions, according to the structure of the service is the speed limit should be considered. In this regard, this study guide wheel of 2 flanges according to the characteristics of speed and vibration analysis through the single track road structure of driving conditions is intended to examine the suitability.

Keywords : Tram, the tram guide wheel of 2 flanges, Dynamic analysis, Road structure of driving conditions

초 록 도시 대중교통시설 가운데 노면전철에 대한 관심이 높아져 노면전철의 설치기준에 대한 검토가 요구된다. 특히 노면전철 가운데 2 플랜지 안내차륜을 이용한 경우에 기존 도로구조와 적합성을 검토가 필요하다. 이유는 도로에 노면전철을 건설할 경우, 도로와 노면전철의 운영을 효율적으로 수행할 수 있다. 따라서 2 플랜지 안내차륜 형식의 차량의 동적해석을 통하여 도로구조 조건에 따른 운행가능속도와 도로구조의 한계를 검토해야 한다. 본 연구는 이러한 점에서 2 플랜지 안내차륜의 특성에 따른 속도와 진동해석을 통하여 도로구조조건에 단일궤도주행의 적합성을 검토하는 것을 목적으로 한다.

주요어 : 트램, 2 플랜지 안내차륜, 동적해석, 도로구조

1. 서 론

트램 차량은 도로에 매설된 안내 및 주행용 궤도를 이용하여 도로 노면차량(노면전차 등)을 주행시켜 승객을 수송하는 도로 노면 교통수단이고, 노면전차는 2 개의 레일궤도를 도로표면의 밑에 부설하고, 가공전력선으로부터 전력을 공급받아 운행하는 도로 노면 교통수단이다[1]. 그러나 가공전력선은 도시경관을 저해와 고압전력의 위험이 있고, 철제주행 차륜으로 인한 소음과 진동 및 도로파손이 발생한다.

† 교신저자: 한국교통대학교 철도시설공학과(seoks@ut.ac.kr)
* 한국교통대학교 철도차량시스템공학과
** 신화E&E

기존 단일 레일궤도의 중앙안내방식 트램 차량 주행차륜은 고무타이어 차륜으로 되어 있어 소음과 진동 및 도로파손을 감소하였으나, 고압의 가공전력선이 가설되어 도시공간을 저해하고, 고압전력의 위험이 있고, 중앙안내용 레일이 특수 제작되어야 하며, 2개의 안내용 철제차륜이 경사지게 장착되어야 하므로 구조가 복잡한 실정이다.

본 연구에서는 소음과 진동 및 도로파손을 감소시키면서, 구조가 간단한 두 개의 플랜지 안내차륜을 이용한 중앙안내방식 노면 단일 레일궤도 운행차량의 도로구조의 적합성을 검토하였다.

2. 트램 차량시스템의 변화와 설치조건

2.1 개량형 노면전철

2.1.1 개량형 노면전철의 차량 변화

노면전철의 특성은 도로교통의 증가로 노면교통의 정체와 더불어 대부분 폐지되었다. 그러나 최근 기존의 노면전철이 가지고 있었던 단점인 최고속도, 가감속 등을 보완하고 개선하여 거의 새로운 시스템으로 부활시켰다. 도시 내에서 운행할 노면전철은 고령화하고 있는 시대적인 배경을 고려하여 저상식 차량을 개발하였다. 고령자, 신체장애자의 이용이 용이하고 휠체어 등의 탄채로 승하차뿐만 아니라 승하차 시 시간절감과 함께 표정속도의 증가, 승강장시설의 불필요 등으로 건설비용도 감소할 수 있다. 탄성차륜 철제차륜은 타이어부분과 중심부 사이에 고무로 된 완충재를 샌드위치 모양으로 끼워 넣은 차륜이다. 탄성차륜의 개발은 소음, 진동 감소 그리고 승차감 향상이 가능하고, 저상식 차량의 대차에 부족한 서스펜션을 대체 가능한 1 차 서스펜션으로 역할을 할 수 있다. 또 보기대차를 이용한 차량의 연결, 견인전동기의 각 차륜에 부착으로 급곡선, 급구배에서의 주행성능 향상이 가능하다. 도시경관과 관련한 문제도 기존의 가공전차선, 제 3 궤조 등을 설치하는 것이 어려웠으나 무가선 트램 등의 개발로 편리성을 높이고 있다[2, 3].

2.1.2 개량형 노면전철의 설치조건

주행공간은 도로의 가운데 설치하는 방식과 길 양측 또는 편측에 설치하는 방안이 있다. 도로 중앙에 설치할 경우 모든 승객이 도로 중앙으로 이동해야 하는 단점이 있으나 가장 일반적으로 설치되고 있다. 도로양측 또는 편측에 설치할 경우에서 다소 이용하는 승객의 이용은 편리하나 도시활동에는 장애가 될 수 있다.

3. 2 플랜지 안내차륜 해석모델

3.1 해석의 도구와 특성

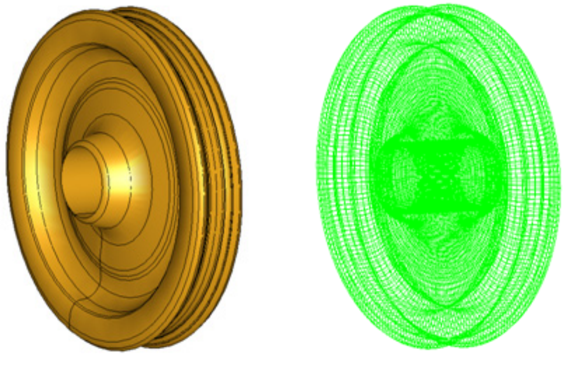
두 개의 플랜지 안내차륜 해석모델에 대하여 SAMSEF/Field로 정적해석을, UM(Universal Mechanism)으로 동적해석을 수행하였다.

정적해석에 사용된 SAMSEF/Field 는 Geometric modeler와 유한요소해석을 위한 pre/post 기능을 갖춘 프로그램으로 해석을 용이하게 하기위한 환경을 제공한다. SOLVER로는 SAMCEF, 혹은

NASTRAN 선택할 수 있고, 계산과정을 실시간 모니터링 할 수 있다. 결과 분석은 3-D animation 에 대한, rendering, shading, wireframe 기능, Cross Section 에 대한 결과 표시기능, 기타 정적 동적해석 결과 분석을 할 수 있는 다양한 기능들을 가지고 있고, 해석결과는 table format으로도 추출할 수 있으며, 해석에 필요한 데이터(물성, 하중, 경계조건 등)를 geometry data 에 직접 적용 혹은 FE Mesh data에 적용할 수 있고, 입력된 data 들은 symbolic 하게 display 되어 pre-visualization이 가능하다[4]. 동적해석에 사용된 UM(Universal Mechanism)은 기계 및 기구의 동역학 문제에 관여하는 모든 사람들을 위한 도구로 평면적 그리고 공간적 기계시스템의 운동학 및 동역학 시뮬레이션을 위해 제작되었다. 선형해석, 통계, 최적화 그리고 결과의 출력에 이르는 고급의 후처 기능을 갖는 다. UM은 복잡한 우주공간 구조물, 로봇, 철도, 자동차, 궤도차량 및 케이블 시스템 등 다양한 형태의 복합시스템과 다물체(multibody)를 컴퓨터를 이용하여 모델링할 수 있는 유용한 도구로 운동학, 동역학의 정역문제(forward, inverse)와 제어 문제를 해결하는 데 도움을 준다. UM은 기본구성인 UM Base와 UM Automotive, UM Loco, UM CAD interfaces, UM FEM, UM Optimization, UM Control 등의 추가 모듈을 포함한다. 이 중 UM Loco 모듈은 디젤과 전기기관차, 객차, 화물차, 전동차, 노면전차 등 40개 이상의 다양한 철도차량이 있으며, 사용자에 맞게 차량 모델을 만들 수 있게 한다. 기하학, 관성, 힘 매개변수는 지정될 수 있으며, 모델의 매개변수화로 동적 거동의 효율적인 분석 및 최적화를 가능하게 한다. 이 모듈은 사용자가 임계속도(critical speed)를 계산하도록 해주며, 불규칙적이거나 규칙적인 곡선선로 및 직선선로 상에서의 시간에 따른 차량 및 기차의 3D 동역학을 분석하게 해준다. 그리고 차륜과 레일 단면에 의한 차량 동역학 해석과 고유진동수 및 진동형태뿐만 아니라 근궤적도(root locus)까지 계산하며, 차량의 강탄성(rigid-elastic) 하이브리드 모델 개발 및 응력(stress)상태와 손상정도(damage sum)를 판단하게 한다[5].

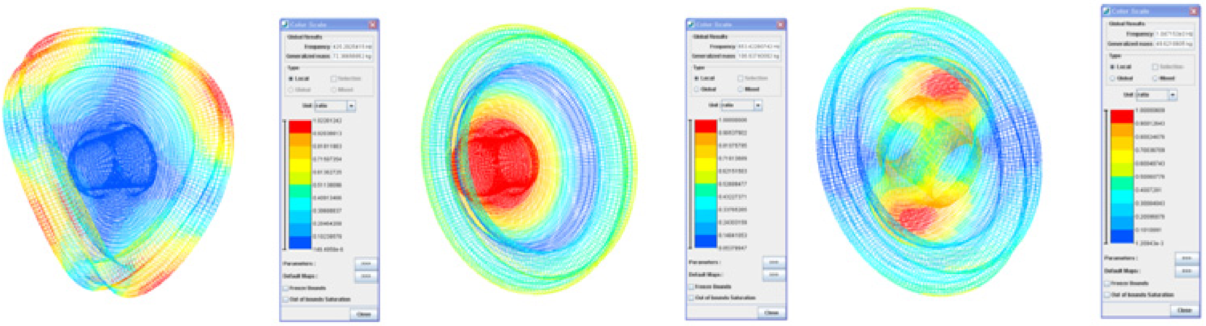
3.2 정적해석

자유단상태의 차륜 단품에 대한 해석에 사용된 두 개의 플랜지 안내차륜의 3D 모델과 mesh 모델을 Fig. 1에 나타내었고, 이에 대한 모드해석 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

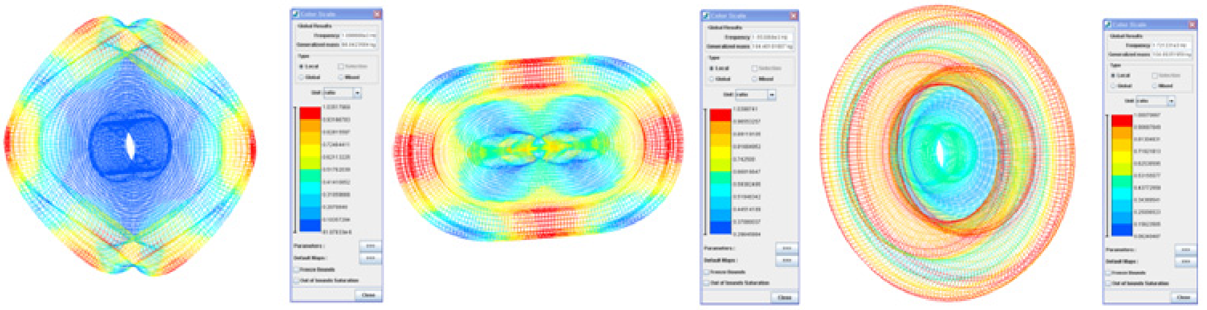


(a) Wheel model (b) Wheel mesh model

Fig. 1 Analysis model of two flange guide wheel



(a) 1st mode (b) 2nd mode (c) 3rd mode



(d) 4th mode (e) 5th mode (f) 6th mode

Fig. 2 Mode analysis of two flange guide wheel(free)

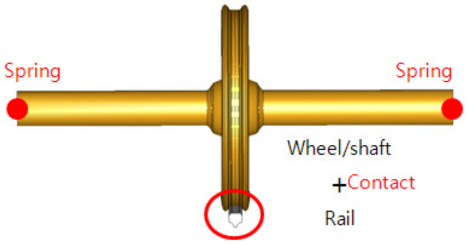
Table 1 Result mode analysis of wheel(free)

Mode no.	Frequency(Hz)
1	425
2	653
3	1,047
4	1,098
5	1,553
6	1,721

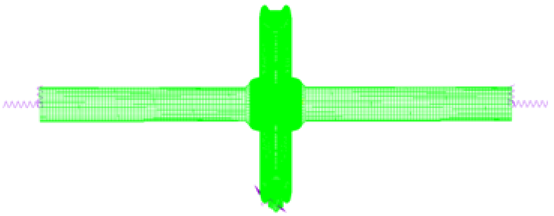
Fig. 2는 자유단 상태에서의 차륜 단품에 대한 모드해석의 결과로, Table 1에서와 같이 1차 모드에서 425 Hz, 2차 모드에서 653 Hz, 3차 모드에서 1047 Hz, 4차 모드에서 1098 Hz, 5차 모드에서 1553 Hz, 6차 모드에서 1721 Hz 등의 성분이 나타났다.

Fig. 3은 차축의 좌우끝단이 스프링으로 지지되고, 차륜과 레일이 접촉상태에서 두 개의 플랜지 안내차륜 윤축의 3D 모델과 mesh 모델을 나타내고 있고, 이에 대한 모드해석 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 차륜과 레일의 접촉은 Fig. 4에서와 같이 두 개 플랜지가 한 개의 레일을 감싸고 한쪽 부분에서 접촉하는 상태로 모델링하였다.

Table 2에서와 같이 1차 모드에서 75 Hz, 2차 모드에서 177 Hz, 3차 모드에서 247 Hz, 4차 모드에서 350 Hz, 5차 모드에서 355 Hz, 6차 모드에서 443 Hz 등의 성분이 나타났다. 이는 차륜과 레일의 접촉으로 인하여 진동수가 감소된 것이 판단된다.



(a) Wheel/rail contact model



(b) Wheel/rail contact mesh model

Fig.3 Analysis model of two flange guide wheelset(wheel/rail contact)

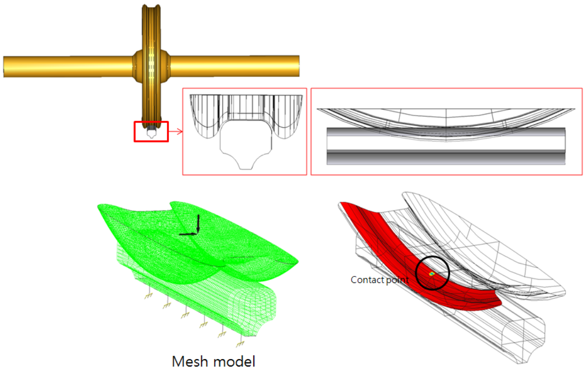
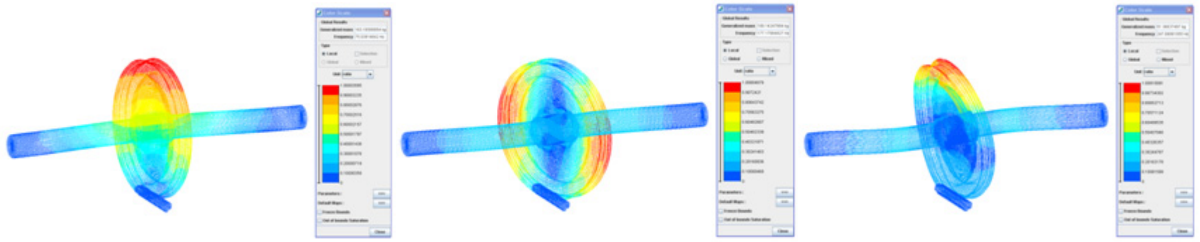
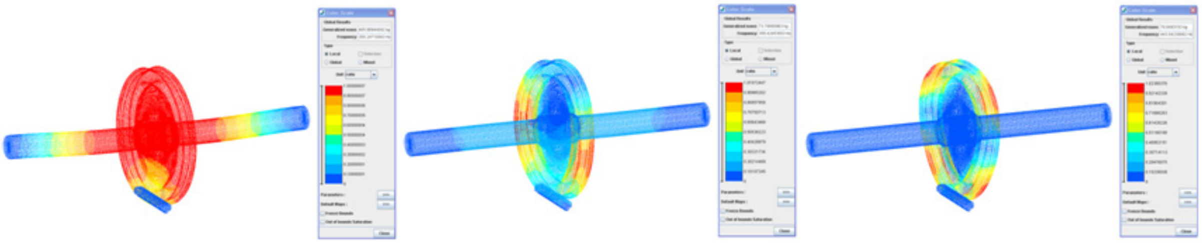


Fig. 4 Wheel/rail contact modeling



(a) 1st mode (b) 2nd mode (c) 3rd mode



(d) 4th mode (e) 5th mode (f) 6th mode

Fig. 5 Mode analysis of two flange guide wheelset(wheel/rail contact)

Table 2 Result mode analysis of wheelset(wheel/rail contact)

Mode no.	Frequency(Hz)
1	75
2	177
3	247
4	350
5	355
6	443

3.3 동적해석

동적해석에서는 해석의 편리 도모하기 위해 Fig. 6에서와 같이 두 개의 플랜지를 가진 한 개의 안내차륜을 두 개의 플랜지를 가진 두 개의 차륜으로 가정하여 동적해석을 수행하였다. Fig. 7은 동적해석 시 사용된 궤도와 윤축의 형상을 나타내고 있다. 동적해석에 필요한 궤도의 해석조건(곡선반경 R300, 완화곡선 길이 50 m)과 접촉력을 Fig. 8에 나타내었다.

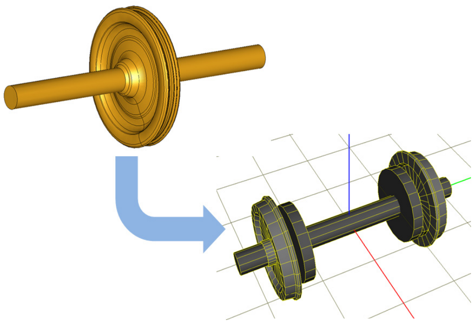


Fig. 6 Dynamic model

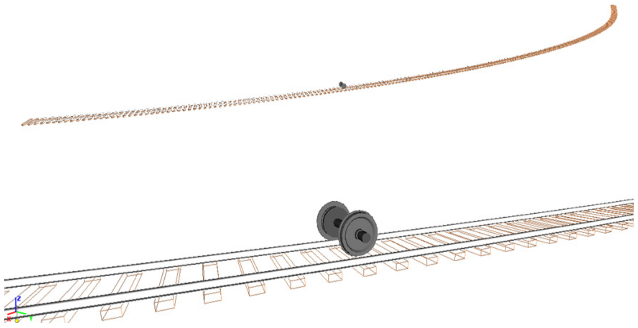


Fig. 7 Dynamic analysis

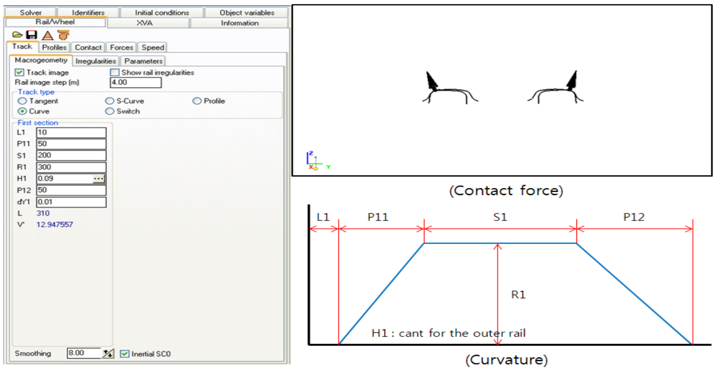


Fig. 8 Track condition and contact force

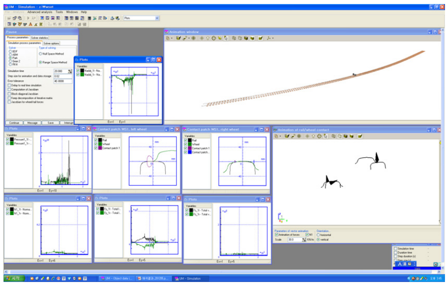


Fig. 9 Full window(V=18 km/h)

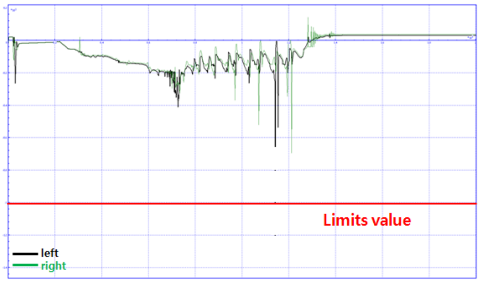


Fig. 10 Derailment coefficient(V=18 km/h)

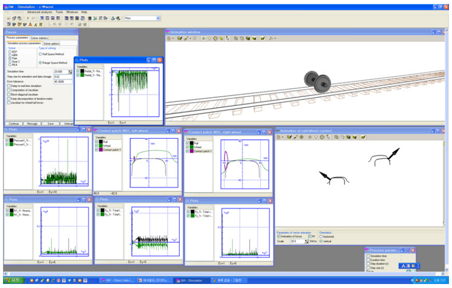


Fig. 11 Full window(V=36 km/h)

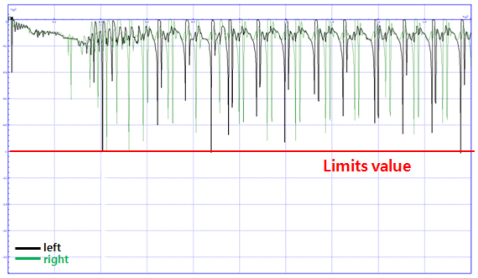


Fig. 12 Derailment coefficient(V=36 km/h)

윤축의 주행속도를 18 km/h와 36 km/h로 가정하여 동적해석을 수행하였고, 좌우 차륜의 탈선계수를 계산하였다. Fig. 9는 주행속도 18 km/h로 계산한 윤축의 전체화면을 나타내고 있다. Fig. 10은 윤축이 18 km/h로 주행하였을 때의 좌우 차륜의 탈선계수로 탈선 허용 한계값 0.8보다 적게 나와 안전함을 확인할 수 있었다.

Fig. 11는 주행속도 36 km/h로 계산한 윤축의 전체화면을 나타내고 있다. Fig. 12는 윤축이 36 km/h로 주행하였을 때의 탈선계수로 탈선 허용 한계값 0.8보다 크게 나와 주행안전성에 문제됨을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

기존 단일 레일궤도의 중앙안내방식 트램 차량 주행차륜은 고무타이어 차륜으로 되어 있어 소음과 진동 및 도로파손을 감소하였으나, 중앙안내용 레일이 특수 제작되어야 하고, 2 개의 안내용 철제차륜이 경사지게 장착되어야 하므로 구조가 복잡한 실정이다.

본 연구에서는 소음과 진동 및 도로파손을 감소시키면서, 구조가 간단한 두 개의 플랜지 안내차륜을 이용한 중앙안내방식 노면 단일 레일궤도 운행차량의 주행 적합성을 검토하였다. 그 결과는 다음과 같다.

두 개의 플랜지 안내차륜을 이용한 중앙안내방식 노면 단일 레일궤도 운행차량에 대한 윤축 정적해석에서 차축의 좌우끝단 스프링 지지와 차륜/레일 접촉상태의 윤축 진동모드는 1차 모드에서 75 Hz, 2차 모드에서 177 Hz, 3차 모드에서 247 Hz, 4차 모드에서 350 Hz, 5차 모드에서 355 Hz, 6차 모드에서 443 Hz 등의 성분이 나타났고, 자유단 상태의 단일 차륜과 윤축의 경우보다 모드 진동수가 감소되었다. 이는 차륜과 레일의 접촉으로 인한 현상으로 판단된다.

해석모델에 대한 동적해석은 곡선반경 R300, 완화곡선 길이 50 m의 궤도조건과 주행속도 18 km/h와 36 km/h의 차량조건으로 수행하였다. 해석결과, 주행속도 18 km/h에서는 주행안전성이 확보되었으나. 주행속도 36 km/h에서는 탈선 허용 한계값 0.8보다 크게 나와 주행안정성이 확보되지 않았다. 차후 이에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] 엄진기(2009), 신교통 바이모달 트램 개발에 따른 도입 전략 연구, 2009년 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp. 1805-1816.

[2] 이남진(2012), 저상 트램용 대차 설계 및 제작, 2012년 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp. 774-776.

[3] 서광석(2010), 중앙가이드 모노레일 트랙 트램카의 기술적 가능성 연구, 2010년 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp. 1996-2003.

[4] Samcef user's manual ver. 7.3(2010), SAMTECH.

[5] Universal Mechanism 5.0 document(2008), Universal Mechanism Software Lab.