

한국형 틸팅열차의 임계속도에 관한 연구

A study on the Critical speed of Korean Tilting Train

김남포* 김정석** 박태원***
Kim, Nam-Po Kim, Jung-Seok Park, Tae-Won

ABSTRACT

The critical speed above which the vehicle become unstable should be fundamentally verified in the development of new train. In case of high speed tilting train, which require both higher critical speed and higher curving speed, the critical speed should be more carefully treated because the both requirements are conflicting each other in the conventional train design. This research has been performed to estimate the linear and non-linear critical speed of 200km/h Korean Tilting Train which has been developing. The newly developed self-steering mechanism was attached to the tilting train to secure critical speed under the lower yaw stiffness which was inevitable to secure higher curving performance. The simulation to predict critical speed was done by commercial vehicle dynamic S/W. Full scale roller rig test was carried out for the validation of numerical results and effectiveness of self-steering mechanism.

1. 서 론

틸팅(tilting)이란 곡선부에서 차체를 곡선 내측으로 기울여서 원심가속도를 중력가속도 성분으로 상쇄시켜 즉 승객이 느끼는 횡가속도를 저감시킴으로써, 곡선을 고속으로 주행하도록 하는 기술이다. 이러한 틸팅 기술의 도입은 하부구조의 큰 투자 없이 곡선부 주행속도 증가와 그에 따른 여행시간단축, 곡선 진출입 시의 감가속이 줄어들어 운전성 향상, 승차감향상 및 에너지 절감 등의 장점이 있다.[1-3] 이와 같은 장점으로 인해 유럽의 거의 전역 및 일본, 중국, 호주, 미국 등에서 틸팅 차량을 도입하여 성공적으로 운행 중이다. 국내에서도 고속철도 비 수혜지역의 고속 서비스 제공과 이를 통한 국토의 균형발전과 철도 전반의 효율 향상을 위해 기존노선에 틸팅차량을 적용할 계획으로 건설교통부와 한국철도기술연구원에서 200km/h 급 한국형 틸팅열차 (TTX)를 개발하여 시험운전 중에 있다. 주행 장치라고도 불리는 대차(bogie)는 차체를 지지하고, 차량이 궤도를 따라 안전하게 주행할 수 있도록 안내하며, 추진력과 제동력의 발생 및 전달 역할과 고속 주행안정성과 곡선추종성능, 승차감등의 동역학적 성능을 좌우하는 철도차량의 핵심구성요소이다. 본 연구개발 사업에서 개발하고 있는 틸팅 대차는 차체를 경사시키는 틸팅 기구장치와 틸팅 액츄에이터를 포함하는 구조이며, 곡선부 고속주행에 따른 횡압 저감을 위해 경량화, 유연한 요강성 적용, 유연 요강성에 따른 고속주행안정성(stability)저하를 극복하기 위한 자기 조향장치를 적용하는 국내 최초로 시도되는 모델이다. 이와 같이 200km/h급의 고속주행안정성과 일반차량 보다 약 30% 정도 높은 곡선 주행속도를 목표로 하는 틸팅차량의 개발에 있어서 차량 임계속도의 확보와 검증은 매우 중요하다고 할 수 있다. 본 논문에서는 TTX 차량의 임계속도에 대한 다물체 동역학 수치해석 결과 및 자기 조향장치의 임계속도 향상 효과에 대해 기술하고, Roller Rig 주행시험대 실험을 통한 결과에 대해 비교 분석한다.

* 책임연구원, 한국철도기술연구원, 기존철도기술개발사업단, 회원

E-mail : npkim@krrri.re.kr

TEL : (031)460-5665 FAX : (031)460-5699

** 선임연구원, 한국철도기술연구원, 기존철도기술개발사업단, 회원

*** 교수, 아주대학교, 회원

2. 철도차량의 임계속도

철도차량은 정해진 궤도를 잘 추종하게 하기위해 차륜 답면을 원추형으로 하는 데 이로 인해 차륜은 진행방향으로 S자 운동을 하게 된다. 이 현상을 뱀처럼 진행한다 하여 사행동(snake motion)이라하며 차륜의 궤적과 레일 궤적간의 상호작용에 의한 철도차량 고유의 성질이다. 이 성질은 차량이 저속으로 주행할 경우 복원력을 발생시켜 차량 안정성을 높이는 역할을 하나, 차량의 속도가 일정 수준 이상이 되면 이 횡방향 진폭이 급격히 증가되어 차륜 후랜지에 의해 억제되다가 심하면 탈선에 까지 이르게 된다. 이와 같이 일정 수준 이상의 속도가 되면 차량 시스템은 불안정하게 되며 차륜축을 전진시키는 에너지가 차륜과 접촉면에 작용하는 크리이프 력을 매개로 하여 진동에너지로 변하게 된다. 헌팅이란 특정한 주행속도에서 사행동이 심하게 나타나는 현상을 말하며, 이 헌팅이 발생하는 속도를 임계속도라고 한다. 헌팅은 궤도의 불규칙성이나 외란 등의 외부 가진에 기인한 것이 아니고 차량 내부 메카니즘에 의해 발생하는 것으로 최고 주행속도를 스스로 제한한다는 의미를 갖는다. 헌팅이 발생하면 플랜지 접촉까지 일어나서 승차감, 소음, 차륜/궤도의 마모, 궤도 하중과 궤도 변형, 탈선 위험성 등 많은 문제점이 제기되므로 대차 설계에 있어 임계속도가 목표 운행속도보다 상위에 있도록 유의하여야 한다.

예측되지 못한 차량의 헌팅 발생은 치명적인 결과를 야기할 수 있으므로 오래 전부터 임계속도를 정확히 예측하기 위한 연구들이 많이 진행되어왔다. 대부분의 연구들이 차량 모델을 선형화한 고유치 해석에 기반을 두고 있는 선형 임계속도에 대한 것이었다. 이는 사행동이 발생, 마감되는 속도를 하나로 예측하기 때문에 일정한 속도대역에서 불규칙적으로 발생하는 비선형적 임계속도를 정확하게 설명할 수 없었다. Hans True, Knudsen[4~5] 등은 제한된 분기해석을 통해 차량에 복수의 임계속도가 존재할 수 있음을 소개하였고 철도차량의 비예측적 사행동이 이것으로 설명될 수 있음을 보였다. 비선형 임계속도는 위에 언급한 분기이론에 의한 해석 방법이나, 차량의 비선형 특성을 반영한 비선형 모델에 비선형 시간적분 해석에 의해서도 예측할 수 있다. 실험적으로는 선형 임계속도는 궤도불규칙성이 없는 이상적 궤도조건에서 헌팅이 발생하는 속도를 말하며, 비선형 임계속도는 궤도 외란에 의한 가진 후에 가진 제거 시 횡진동의 수렴 여부를 보고 판단하게 되는 데, 궤도 가진 폭에 따라 임계속도가 달라질 수 있기 때문에 운행하게 될 선로의 궤도 왜란을 사용하는 것이 합리적인 방법이다.

3. 틸팅차량의 동역학 수치해석

3.1 차량의 수치해석 모델

TTX 차량을 동역학적 수치해석 모델로 변환하는 데 있어, 해석의 목적에 맞도록 단순화하고 가정을 하였다. 차량 간 구조적 특성 상 차량과 차량 간에는 상하, 좌우 및 롤 등의 동역학적 힘의 전달이 크지 않기 때문에, 1량만을 분리하여 모델링 하였다. 또한 차체의 탄성진동은 임계속도에의 영향이 미미하기 때문에 고려하지 않고, 차체를 포함한 모든 질량요소를 강체로 간주하였다. 차륜과 레일의 접촉 크리이프 이론은 선형 임계속도 예측 시에는 Kalker's linear creep law[6]를 적용하였고, 비선형 임계속도 예측에는 차륜/ 레일 형상의 비선형성을 고려하기 위해 Non-linear creep law를 적용하였다. 질량 요소는 차체 1개, 전·후위 대차 후레임 2개, 전·후위 틸팅 볼스타 2개, 조향 레버 4개, 윤축세트 4개로 총 13개로 잡았고, 각 질량 요소간을 적절한 현가장치 요소로서 모델링하였다. 그림 1은 TTX 차량의 다물체 동역학 모델을 보여주고 있고, 도표 1과 도표 2에 TTX 차량 편성 중 가장 무거운 Mcp 차량의 영차조건에 대한 질량요소와 현가요소의 특성치가 나타나 있다. 본 논문에서는 이 Mcp 차량의 영차조건 결과에 한정해서 기술된다.

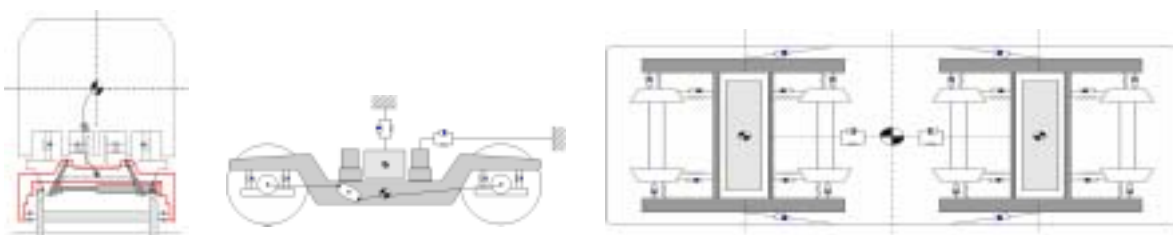


그림 1. TTX 차량의 다물체 동역학 모델

도표 1. 질량요소 특성치

구 분	항목	수치
차체	중량 (ton, Mg)	38.4
	롤 관성모멘트(Mg-m ²)	65
	피치 관성모멘트(Mg-m ²)	2220
	요 관성 모멘트(Mg-m ²)	2220
	무게중심고(m)	1.7
대차 후레임	중량 (ton, Mg)	4.317
	롤 관성모멘트(Mg-m ²)	1.8
	피치 관성모멘트(Mg-m ²)	3.8
	요 관성 모멘트(Mg-m ²)	4.2
	무게중심고(m)	0.55
틸팅 볼스타	중량 (ton, Mg)	1.343
	롤 관성모멘트(Mg-m ²)	0.42
	피치 관성모멘트(Mg-m ²)	0.03
	요 관성 모멘트(Mg-m ²)	0.43
	무게중심고(m)	0.6
윤축 세트	중량 (ton, Mg)	1.818
	롤 및 요 관성모멘트	1.3
	무게중심고	0.43

도표 2. 현가요소 특성치

구 분	항목	수치
주요 치수	대차간 거리 (m)	15.9
	고정축거 (m)	2.6
	차륜 반경 (m)	0.43
1차 현가 장치	Kx (MN/m)	2.18
	Ky (MN/m)	4.27
	Kz (MN/m)	1.2
	Cz (MN/m/s)	0.04
	조향 토션바 (MN-m/rad)	8.1
	설치 폭(횡방향) (m)	2.05
2차 현가 장치	공기스프링 Kx (MN/m)	0.19
	공기스프링 Ky (MN/m)	0.17
	공기스프링 Kz (MN/m)	0.47
	안티롤 바 (MN-m/rad)	1.26
	요댐퍼 Cyaw (MN/m/s)	0.17
	횡댐퍼 Cy (MN/m/s)	0.03
	공기스프링 설치 폭	1.75

3.2 선형 임계속도 예측

수치해석 모델에서 bump stop, 차륜/ 레일간 접촉의 비선형 요소를 선형화하여 Eigen value/ Eigen Vector 해석을 수행하였다. 속도를 변화시키며 해석을 수행하였는데, 대차와 차축 YAW(사행동) 만이 속도의 함수이고 나머지 고유진동 모드는 속도에 무관한 결과를 나타냈다. 선형 임계속도는 대차 또는 차축 YAW 모드의 감쇄가 음으로 변화하는 즉 시스템이 불안정해지는 속도로서 차륜/ 레일간의 유효구배(effective conicity)에 큰 영향을 받는다. 실제로 이 유효구배는 차량의 수명기간동안 차륜과 레일의 마모, 접촉점의 변화로 인해 변화되기 때문에 설계단계에서는 예측되는 범위 내에서 주행안정성을 평가해 보아야 한다.

해석 CASE는 Mcp 차량의 영차조건 중에서 정상인 조건과 자기 조향장치, 요 댐퍼와 같이 안정성에 영향을 주는 장치의 Fail Case를 가정하였다. 그림 2는 차량이 정상적인 조건의 유효담면 구배와 속도에 따른 least damping을 나타낸 것이다. 그림 3은 조향장치 Fail 시를 가정하여 자기조향장치를 모델에서 분리시킨 상태에서의 결과를 나타낸다. 그림 4는 요댐퍼 Fail 시를 가정하여 요댐퍼를 모델에서 분리시킨 상태에서의 결과를 나타낸다. 그림에서 보듯이 유효 담면구배가 증가 함에 따라 least damping이 음으로 변화하기 시작하는 임계속도가 급격히 저하됨을 알 수 있으며, 차량 정상상태, 유효담면구배 0.3일 경우 선형 임계속도는 약 240km/h로 예측되었고, 유효담면구배 0.3일 경우 자기 조향장치를 분리한 경우 대략 190 km/h, 좌우 양측의 요 댐퍼를 전부 분리한 경우 대략 160 km/h로 급격히 저하됨을 알 수 있었다. 매 경우 least damping이 발생하는 모드는 대차 후레임의 YAW 모드로 나타났으며, 속도를 증가시켜 가며 Eigen value 해석을 수행해본 결과 이 모드의 고유진동수가 속도에 선형적으로 비례하여 증가하다 약 6Hz 부근에서 감쇄치가 음으로 전환되는 것으로 나타났다.

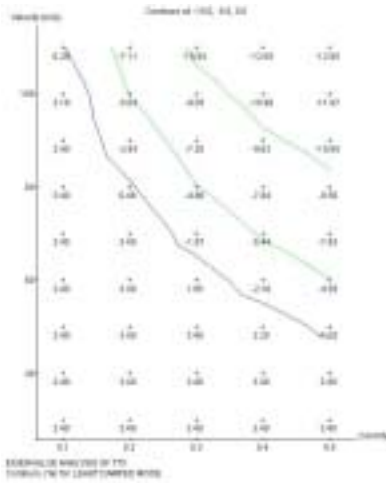


그림 2. 차량 정상조건 안정성

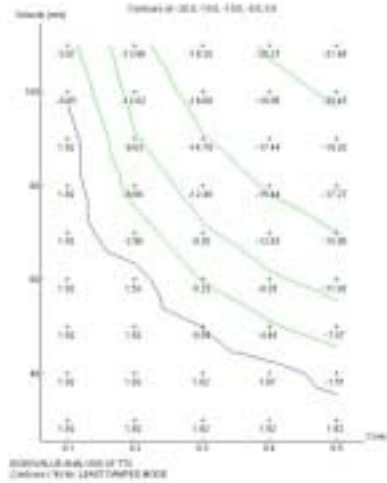


그림 3. 조향장치 미부착시 안정성

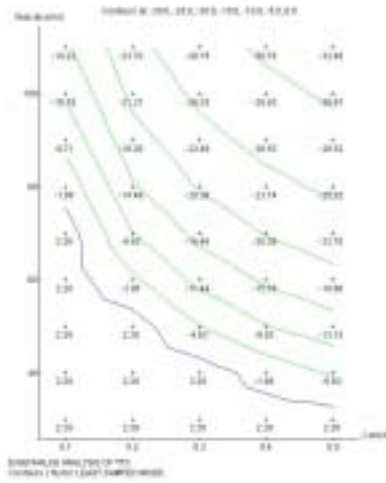


그림 4. 요댐퍼 미부착시 안정성

3.3 비선형 임계속도 예측

비선형성을 고려한 주행안정성을 평가하기 위해, 비선형을 고려한 차량 모델에 Non-linear creep law 와 시간적분법(time integration)에 의한 수치해석을 수행하였다. 차륜 및 레일은 그림 5와 같이 신조차륜과 신조레일의 profile을 사용하였다. 속도 단계별로 초기에 궤도 불규칙에 의한 외란을 주고, 이후 이상적 선로에서 차축의 횡진동이 수렴하는 지 여부를 보고 임계속도를 추정하였다. 그림 6은 정상적인 차량조건에서 결과로 임계속도는 대략 240 범위임을 알 수 있다. 그림 7은 요 댐퍼를 분리한 경우로 임계속도가 190 km/h 수준으로 나타났다. 이 방법에 의해 조향장치를 분리한 모델을 해석했을 경우에는 조향장치를 장착한 경우와 큰 차이를 보이지 않았다.

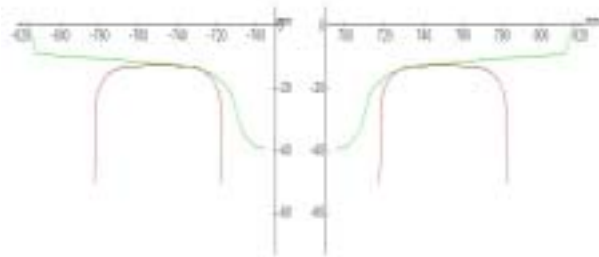


그림 5. 차륜/ 레일 형상

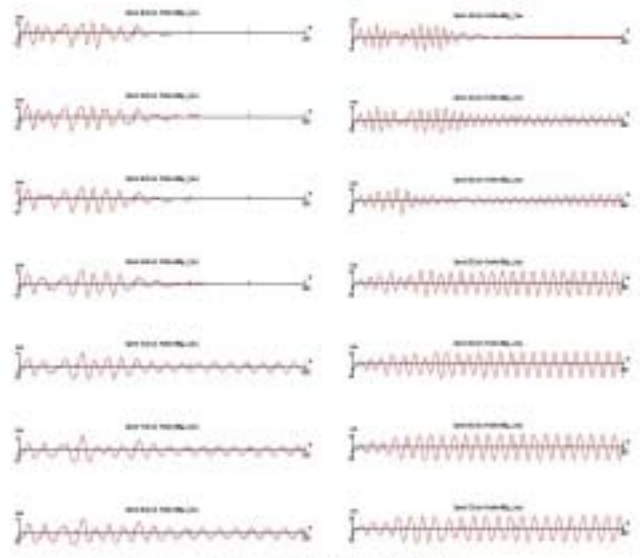


그림 6. 차량 정상조건

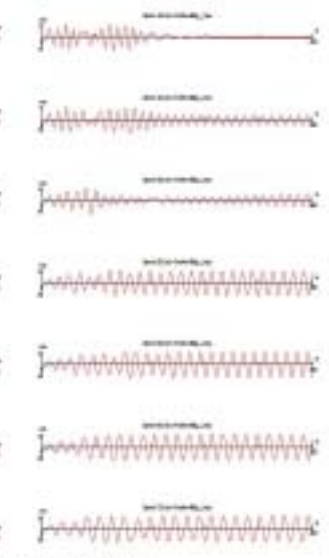


그림 7. 요 댐퍼 분리조건

4. 주행시험대(Roller Rig) 시험 결과

4.1 주행시험대(Roller rig) 시험 개요

주행시험대 시험은 궤도와 등가 시킨 궤조륜(Roller) 상에서 본선 시운전에서 안전측면에서 수행할 수 없는 임계속도를 확인하는 목적으로 수행되며 부가적으로 궤도틀림 가진에 의한 승차감, 주요 부품의 거동 특성 등을 간접적으로 측정할 있다. 본 연구에서는 Mcp용 구동 대차 시제품을 조기 제작하여, 중국 서남교통대의 시험설비를 활용하여 시험을 수행하였다. 그림 8은 시험전경을 나타내고, 그림 9는 주

행시험대 상에 안치된 피시험체인 틸팅 대차의 시제품을 보여주고 있다. 임계속도 확인을 위한 시험 CASE는 정상적인 차량 조건과 조향장치, 요댐퍼를 제거한 다양한 경우에 대하여 하중조건별, 선형 및 비선형 방법으로 수행하였다. 선형 임계속도 시험은 궤도 가진이 없는 이상적 궤도조건에서 속도를 선형적으로 증가시키며 저어널 박스의 횡변위를 측정하여 헌팅이 발생여부를 판단하는 방법으로 수행되었고, 비선형 임계속도는 매 속도단계별로 궤도 불규칙도를 초기 가진을 주어 가진 단락 후 차축의 횡진동 수렴여부를 판단하는 방법으로 수행되었다.



그림 8 Roller Rig 시험 전경



그림 9 틸팅 대차 시제품(Mcp 용)

4.2 선형 임계속도 결과

그림 10에서 그림 12에 틸팅 대차의 Mcp 영차조건에서의 각 CASE별 선형 임계속도 시험결과를 나타내었다. 시험결과 차량 정상조건에서는 240 km/h 이상 인 것으로, 조향장치 제거 시는 약 230 km/h으로 나타났다. 요 댐퍼 제거 시는 220 km/h에서 헌팅이 시작하였고, 속도를 210으로 저하시켰는데도 헌팅이 사라지지 않았고, 200km/h까지 저하시키자 헌팅 현상이 소멸되기 시작했다. 이는 분기이론에서 말하는 다수의 임계속도가 존재함을 입증한 결과가 되었다. 이 경우 선형 임계속도는 약 220 km/h, 비선형 임계속도는 대략 200 km/h인 것으로 판단된다.

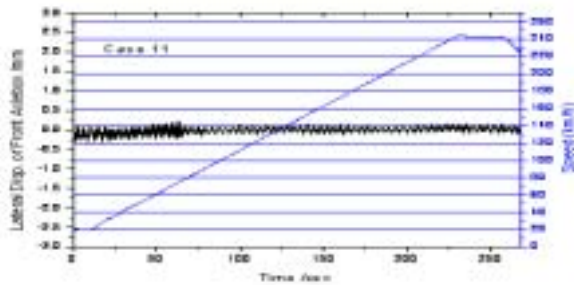


그림 10 Linear Vcr in normal case

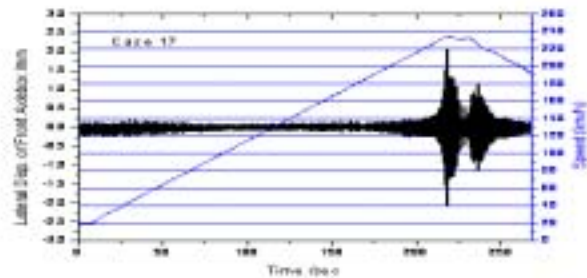


그림 11 Linear Vcr without steering mechanism

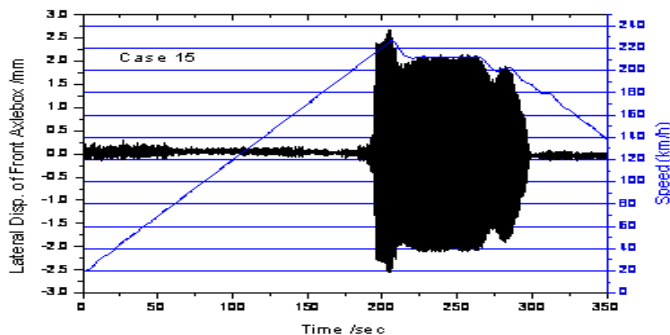


그림 12 Linear Vcr without yaw damper

4.3 비선형 임계속도 결과

그림 13에서 그림 15에 틸팅 대차의 Mcp 영차조건에서의 각 CASE별 비선형 임계속도 시험결과를 나타내었다. 차량의 가진 폭은 실제 운행선로에서 검측된 궤도 불규칙도로 하였으며, 시험결과 차량 정상조건은 약 240 km/h, 조향장치 제거 시는 약 220 km/h, 요 댐퍼 제거 시는 약 190 km/h 수준으로 나타났다.

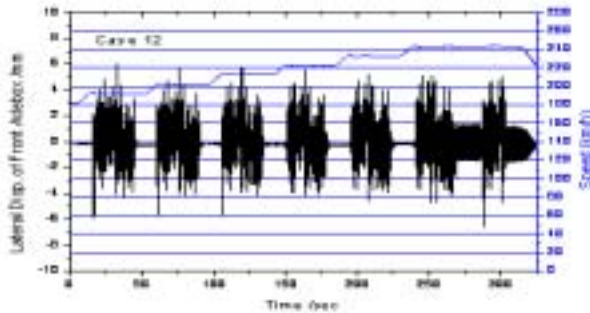


그림 13 Non-linear Vcr in normal case

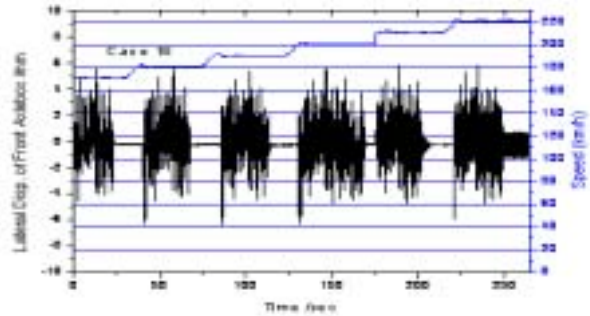


그림 14 Non-linear Vcr without steering mechanism

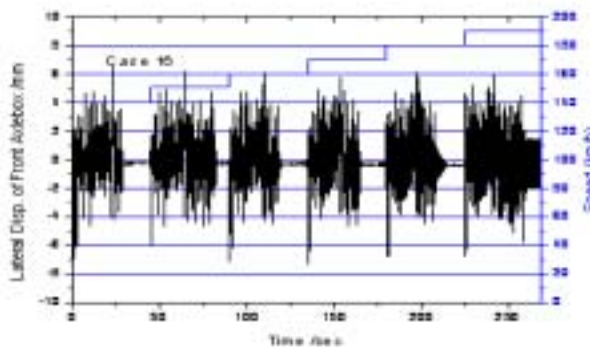


그림 15 Non-linear Vcr without yaw damper

5. 결론

TTX 차량의 고속 주행안정성의 척도인 임계속도를 파악하기 위해 수치해석과 실험적 방법을 병행하여 수행된 본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 임계속도의 수치 해석적 예측과 실험 결과는 정상적인 차량조건인 경우 대략 240 km/h 부근으로 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 정상적인 차량 조건일 경우 선형과 비선형 임계속도의 해석결과는 거의 동일한 것으로 나타났다.
- (2) 자기 조향장치의 적용으로 주행안정성이 향상됨을 확인할 수 있었고, 임계속도 향상효과가 약 20 km/h 수준이었다. 자기 조향장치의 적용으로 대차 YAW 모우드의 고유진동수가 감소되는 것으로 나타났다는데, 이는 기구장치에 의해 양 차축의 운동을 상호 구속함으로써 관성을 증가시킨 효과로 판단된다.
- (3) 수치해석 및 실험결과 모두 요 댐퍼의 민감도가 매우 큰 것으로 나타났다. 따라서 고속차량의 경우 요 댐퍼의 설치가 필수적이며, 고장이나 기능 저하도 고려하여 설계되어야 함을 확인 할 수 있었다.
- (4) 주행시험대 시험 결과 본 차량은 비선형 임계속도가 선형 임계속도보다 약 10~20km/h 정도 낮은 것으로 나타났다. 실제 주행 시 궤도의 외란을 받기 때문에 선형 임계속도보다 낮은 속도에서 불안정성이 발생할 수 있으므로 차량의 안정성은 비선형 임계속도로 판단하는 것이 적절하다.
- (5) 수치해석의 경우 조향장치와 요 댐퍼의 민감도가 매우 크게 나타났는데, 이는 요 댐퍼 감쇄력의 포화와 같은 비선형 특성이 고려되지 않았기 때문으로 판단된다.
- (6) 비선형 시간적분 해석에서 자기 조향장치의 주행안정성 향상 효과가 나타나지 않는 등 해석 결과와

실험결과가 차이를 보인 부분에 대해서는 세밀한 차량 모델과 실측 특성치를 토대로 한 후속연구가 더 진행되어야 할 것으로 판단된다. 또한 주행시험대의 실험 조건과 해석 조건, 실제 운행노선 조건과의 차이가 분명히 존재하는 데 이에 대한 편차를 규명하고 보정하는 후속 연구가 수반되어야 할 것이다.

참고문헌

1. A. Elia, "Fiat Pendolino : Development, Experiences and Perspective," Proc. Instn. Mech. Engrs, Vol. 212, Part F, pp. 7-17, 1998
2. B. H. Hubber, "The Bogie-Based Tilt Option- Simplicity and Flexibility," Proc. Instn. Mech. Engrs, Vol. 212, Part F, pp. 19-32, 1998
3. J. T. Pearson, R. M. Goodall and I. Pratt, "Control system Studies of an Active Anti-Roll Bar Tilt System for Railway Vehicles," Proc. Instn. Mech. Engrs, Vol. 212, Part F, pp. 43-60, 1998
4. Hans True, 1993, "Dynamics of a Rolling wheelset," Appl. Mech. Rev., Vol. 46, ASME, pp. 438 ~ 444
5. Carsten Knudsen, Rasmus Feldberg and Alfred Jaschinski, 1991, "Non-linear Dynamic Phenomena in the Behaviour of a Railway Wheelset Model," J. Nonlinear Dynamics, pp. 389 ~ 404
6. Kalker J. J., 1980, "Review of wheel/Rail Rolling Contact Treories", Applied Mechanics Division of ASME, Vol. 40, PP. 77-92