

고속전철차량 현가장치의 동적해석 및 설계기술

목 차

1. 머릿말
2. 고속전철 현가장치의 주요기능
 - 2.1. 견인력과 제동력
 - 2.2. 동적안정성
 - 2.3. 안내기능
 - 2.4. 차량지지 기능
 - 2.5. 진동절연 기능
3. 현가장치의 동적설계 기술
 - 3.1. 축중 경감을 위한 설계기술
 - 3.2. 현가하질량 경감을 위한 설계기술
 - 3.3. 안정성과 안내기능의 최적화 설계 기술
 - 3.4. 안내 및 안전도 향상을 위한 차륜 담판 설계기술
 - 3.5. 대차-현가장치 설계방법
4. 맺음말

최 영 휴	(한국기계연구소, 수송기계시스템실장, 공학박사)
허 승 진	(생산기술연구원, 기술개발본부 조교수, 공학박사)
구 동 회	(대우중공업(주), 철도차량연구소, 선임연구원)
서 영 태	(해군사관학교, 기계공학과, 공학박사)
이 장 무	(서울대학교, 기계설계학과 교수, 공학박사)

1. 머릿말

지난 30여년간 고속전철 차량기술의 연구개발을 위한 노력이 프랑스, 일본, 독일, 영국 등을 비롯한 세계 각국에서 활발하게 이루어졌다. 이러한 고속전철차량기술 연구의 목적은 “보다 많은 승객을”, “보다 경제적으로”, “보다 빠르고”, “보다 안전하며”, “보다 안락하게” 수송할 수 있는 철도차량을 개발하는 것이다. 그동안 세계의 철도 선진국에서 추진한 고속전철 차량기술 연구의 접근방법을 개괄하면 표 1)에서 보는 바와 같이 크게 다음의 4가지로 요약할 수 있다.

첫째, 기존의 차량과 선로 및 시설이 갖는 제한조건을 그대로 수용하면서 점진적이고도 부분적인 성능향상을 도모하는 방법이다. 세계각국의 재래선 속도향상을 위한 연구개발이 이러한 접근방법의 예라고 할 수 있다.

둘째, 기존의 선로 및 시설이 갖는 제한조건을 가능한한 수용하거나 최소한으로 수정하되, 차량의 동적성능을 최대한으로 개선하여 속도향상을 꾀하는 방법이다. 즉, 기존선로를 소폭으로 개선하고 차량설계를 최대한으로 개선하여 속도 및 운행효율을 극대화하려는 방법이다. 영국, 캐나다, 스웨덴, 이태리 등에서 1970년대의 유류파동에 대처하기 위하여 능동현가장치인 banking system 등을 사용한 철도고속화를 추진하였을 때의 접근방법과 국내의 경우 과학기술처의 특정연구사업으로 추진되었던 over speed train용 tilting bogie system 개발[1] 등이 그 예이다.

셋째, 기존의 차량과 선로 및 시설이 갖는 설계개념이나 근본적인 제한조건들은 수용하되 선

표 1) 철도고속화 기술개발의 접근방법

구분 \ 방법	방법 1	방법 2	방법 3	방법 4
	재래선 속도 향상기술개발	기존선로 개선 차량성능 향상	신선로 건설 차량성능향상	새로운 개념의 차량기술개발
접근방법의 주요 특징	기존선로, 시설 및 차량의 제한 조건을 그대로 수용하면서 점진적인 성능 개선	기존선로 및 시설을 소폭으로 개선하고 차량의 동적성능을 주로 개선하여 속도 개선 시도	가능한 한 직선에 가까운 신선로를 건설하고 차량도 신기술 개발을 통하여 속도향상을 도모함	선로, 시설, 차량의 기존 개념을 전면 부정하고, 전혀 새로운 방식의 선로, 차량(건인 및 제동)시스템 개발을 추구함.
장 점	연구개발 및 시설 투자 비용 극소	적은 시설투자 비용	대폭의 속도 향상가능 300km/h이상의 고속주행 안전도가 입증된 방법임.	초고속 주행 가능 환경공해 극소화
단 점	속도향상 정도 소폭	Banking System 신뢰도(안전도) 낮음, 240Km/h이상의 고속화 사례 없음	막대한 시설 투자비 소요	기존시스템과의 호환성 결여, 시스템의 안전도 및 신뢰도 입증에 장기간 소요 막대한 시설비
운행최고속도 (시험최고속도)	130-160km/h	180-200km/h	240-350km/h (515.3km/h)	(무인517km/h) (유인413km/h)
연구개발 사례	일본재래선 고속화 한국새마을 속도향상	APT : 영국 LRC : 캐나다 X-2 : 스웨덴 ET403 : 이태리	TGV : 프랑스 신간선 : 일본 ICE : 독일	TRANSTRAPID : 독일 MLU : 일본 PEOPLEMOVER : 영국

로와 시설이 갖는 제한조건을 대폭 수정하고 차량의 성능을 최적화 할 수 있도록 설계를 개선하는 접근방법이다. 프랑스 일본, 독일 등이 곡선과 구배가 완만한 새로운 선로를 건설하고 각종 첨단설계기술을 동원하여 개발한 TGV, 신간선, ICE등의 고속전철 개발연구가 이러한 접근방법의 보기이다.

넷째, 기존의 선로 및 시설과 차량시스템을 근본

개념에서 부터 부정하고 전혀 새로운 개념의 견인, 안내, 지지 및 제동방식 등을 시도하는 방법이다. 이러한 접근방법의 예는 초전도 및 상전도 방식의 자기부상열차 기술개발이나 로켓열차(rocket train), 지하비행열차(geoplane) 구상 등을 들수 있다.

위에 열거한 4가지 접근방법은 선로, 시설의 건설 또는 개선과 차량개발에 대한 투자 비용과

기술적 파급효과, 사회경제적인 효과 및 환경공해의 정도 등에 따라 각각 장단점이 있다. 그러나 기술적인 측면에서 보면 시속 210km/h 이상의 고속전철 실용화에 성공적으로 적용된 방법은 세번째 접근방법인, 기존의 철도차량 방식은 고수하되 선로 및 시설을 대폭으로 개조하거나 신설하고 차량의 성능도 크게 향상시켜 고속화를 시도한 방법이다. 두번째 접근방법인 기존선로를 소폭으로 개선하고 차량의 동적성능 개선을 통하여 속도향상을 꾀하는 방법은 거의 전적으로 차량동역학적 연구를 바탕으로 하였는데, 이 방법을 채택하였던 영국, 캐나다, 스웨덴, 이태리의 경우 소폭의 속도향상에 그쳤지만, 이러한 연구의 결과는 세번째 접근방법의 차량기술 연구개발에 밑거름이 되었다. 네번째 접근방법인 전혀 새로운 선로와 견인, 안내, 지지 및 제동 방식을 사용하는 방법의 대표적인 예인 자기부상열차 기술개발은 지난 20여년간 많은 연구성과가 있었으나, 안전성, 신뢰성, 호환성 등 여러 측면에서 실용화에 이르기까지는 해결되어야 할 문제점이 많이 남아 있으며, 일본, 독일 등에서 이에 대한 지속적인 연구가 진행되고 있다.

이러한 배경에서 본란에서는 철도차량기술의 주요 연구분야인 차량동역학적 측면에서 견인 및 제동문제와 현가장치의 동적해석 및 설계기술을 중심으로 연구개발 및 기술현황을 소개하고자 한다.

2. 고속전철 현가장치의 주요기능

차량동역학적 측면에서 속도향상의 요체는 차륜, 차축을 포함한 대차 현가장치의 동적해석 및 설계기술이므로 여기에서는 주로 대차 및 현가장치의 동적해석 및 설계기술을 중심으로 살펴보기로 한다.

고속 철도차량의 현가장치란 차륜과 차축을 대차구조물에 연결·지지시켜주는 1차 현가장치 요소와 대차구조물을 차체와 연결시켜 주는 2차 현가장치요소를 통틀어서 일컫는 용어이다. 또한 광범위하게는 차체를 레일 위에 지지 및 안내하는데 필요한 모든 장치 및 기계요소로서 차륜,

차축 및 대차구조물과 그 연결기구로 이루어진 조립체를 말한다. 고속주행을 위하여 현가장치가 확보해야 하는 주요기능은 다음과 같다.

- ① 광범위한 주행속도 영역에서 견인과 제동을 위한 충분한 접착력
- ② 고속주행시의 동적안정성
- ③ 고속주행시의 적절한 안내기능
- ④ 광범위한 속도영역과 궤도 상황에 걸쳐서 적절한 차량지지 기능
- ⑤ 궤도 불규칙도에 의한 차량진동의 효과적인 절연기능

2.1. 견인력과 제동력

고속전철은 근본적으로 차륜과 레일의 구름 접촉력(rolling contact force)에 의하여 견인되고 차륜의 담면경사 및 플랜지와 레일의 상호작용력에 의해 안내(guide)되면서 주행한다. 견인력과 제동력은 차륜과 레일의 접촉력으로서 엄밀하게 말하면 레일에서 차륜에 작용하는 법선방향 접촉력을 말한다. 견인과 제동은 속도의 관점에서 보면 동전의 앞뒷면과 같아서 고속주행이 가능하기 위해서는 충분한 견인력을 확보해야 되고, 반대로 고속주행중에 급제동을 해야하는 경우에는 규정된 감가속도한계 내에서 가능한 한 최단거리에서 정차할 수 있도록 충분한 제동력을 확보해야 된다.

견인력과 제동력은 모두 차륜과 레일의 접촉면에 작용하는 법선방향 하중(포괄적으로는 윤중 또는 축중)과 접촉면의 마찰계수, 차륜담면과 레일담면의 기하학적 형상 등의 함수이다. 뿐만 아니라 차량의 동적거동도 차륜과 레일의 접촉면에 동적 부가하중을 발생시키므로 차량의 수직 및 횡방향 진동 등에 의하여 견인 및 제동력이 변한다. 그런데 현가장치의 동적설계는 차량의 동적거동에 매우 큰 영향을 미치므로 결국 현가장치 동적설계도 견인 및 제동력에 직접적인 영향을 미친다. 특히 곡선구간에서의 차량 동적거동은 차량의 안내력을 발생시키게 되는데 차륜과 레일의 전체 접촉력 중에서 안내력의 증가는 상대적으로 견인 및 제동력의 감소를 초래하게 된다. 그러므로 차

량의 진동이 최소화 될 수 있도록 현가장치를 설계하는 것은 충분한 점착 및 견인력을 확보한다는 측면에서도 매우 중요하다. 차륜과 레일간의 상대속도가 증가되면 차륜과 레일의 접촉면의 마찰계수는 근사적으로 $\mu=13.6/(V+85)$ 의 식에 따라 감소하게 되며[2], 특정 속도에 다다르면 마찰력이 포화상태(saturation)에 도달하게 되므로 견인 또는 제동력이 증가되지 않고 오히려 감소하게 된다. 이때에 차륜은 순간적으로 활주상태에 이르게 된다. 이러한 stick-slip 현상은 궤도와 차륜에 편마모를 일으키고 차량의 진동을 유발하는 등 매우 나쁜 영향을 미친다. 이를 방지하기 위하여 일본 신간선의 경우는 차량의 활주상태를 감지하여 차륜 슬립(slip)이 발생되면 점착계수를 높이기 위한 특수 연마제를 사용하기도 한다. 뿐만 아니라 독일의 고속전철인 ICE는 활주 상태의 방지와 차륜 및 레일의 마모를 방지하면서 제동 효과를 극대화 하기 위하여 기존의 담면브레이크 및 디스크 브레이크와 함께 전자기력을 이용한 제동력 증강 장치를 채택하고 있다. 차륜과 레일 담면의 마찰 및 제동력 특성에 관련된 실험적 연구는 주로 독일과 일본에서 대차 모의주행시험장치(roller rig test)를 이용하여 수행하고 있다. 독일은 시속 400Km/h의 고속주행 영역까지 시험하고 있으며, 일본 국철의 철도기술종합연구소의 경우 신간선 개발당시 250Km/h 속도영역까지 시험하였으나 1980년대 말경에는 신간선 300계의 개발을 목적으로 350Km/h까지 시험 가능한 대차 모의주행시험장치를 건설하여 초고속에서의 차륜/레일 마찰력 특성을 연구하고 있다.

2.2. 동적안정성

고속주행시의 동적안정성은 직선궤도와 곡선궤도를 막론하고 반드시 확보되어야 하는 차량의 기능이다. 흔히 차량의 동적안정성의 척도로서는 차량이 불안정 상태에 도달하는 한계속도인 임계속도, V_c 를 사용한다. 임계속도는 차축, 대차, 객차의 공진속도로부터 각각 차축의 임계속도, 대차의 임계속도, 객차의 임계속도로 구분되는데 객차의 임계속도는 대개 운행속도보다 매우 낮은

속도영역에 있고, 이 때의 객차의 과도한 운동은 현가장치의 감쇠력에 의하여 충분히 감쇠시킬 수 있으므로 고속주행에 있어서는 문제가 되지 않는다. 차축의 공진영역은 대개 운행속도보다 월등히 높은 속도영역이므로 임계속도에 도달하는 경우가 실제로는 거의 없다고 볼 수 있다. 그러나 대차의 공진영역은 고속영역이기는 하나 운행속도와 근접한 상태에 있고, 현가장치의 감쇠력에 의해 충분히 억제되기 어렵다. 그러므로 고속전철 차량의 임계속도는 흔히 대차의 임계 속도를 일컫는다. 대차의 임계속도, V_c 는 다음식과 같이 표시된다.

$$V_c = c \cdot \left[\frac{ar}{\lambda} \cdot \frac{a^2 + b^2}{a^2} \right]^{1/2} \cdot \omega$$

- 여기서 c =비례상수
- a =궤간/2
- b =축간거리/2
- r =차륜반경
- λ =차륜담면경사각
- ω =대차의 고유진동수

위의 관계식을 대차-현가장치의 동적설계 관점에서 고찰해 보면, 임계속도는 대차의 축간거리(wheelbase)가 길고, 차륜의 담면경사각이 작으며, 대차의 고유진동수가 클수록 증가한다. 다시 말해서 고속전철의 동적안정성을 최대한으로 확보 하면서 속도를 향상시키려고 한다면 대차의 윤거를 가능한 한 길게 하고, 현가장치 강성을 될수 있는대로 크게 하며 대차의 중량을 최대한 경량화시켜 설계해야 한다. 아울러서 차륜의 담면경사도 작게하는 것이 유리하다. 그러나 동적안정성 향상을 위한 이러한 설계조건들은 대부분 안내기능 향상을 위한 설계조건들과 상충되는 점이 많으므로 실제 차량설계시에는 종합적인 성능향상을 위한 설계방법이 필요하다.

2.3. 안내기능

안내기능은 직선궤도의 경우 주로 차륜담면경사도, λ 에 관계되며 차륜이 궤도 중앙으로 신속

하게 복귀할 수 있도록 하기 위해서는 차륜담면 경사도는 가능한 한 커져야 한다. 그러므로 직선 궤도에서의 주행안정성 확보와 임계속도 향상을 위한 차륜 담면경사도의 설계 요구조건은 직선 궤도에서의 안내기능 확보를 위한 설계요구조건과 서로 상충된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 오늘날의 고속전철은 차륜담면의 부위에 따라 담면 경사도가 1/20-1/40로 변화되게 하는 소위 프로파일 담면(profiled wheel tread) 차륜을 도입하고 있다. 이러한 프로파일 담면의 접촉력 특성에 관하여는 아직까지 이론적인 연구결과가 보고된 바가 없고, 일본 국철의 철도기술총합연구소, 독일 국철의 차량시험소, 프랑스의 INRET[3] 등에서 실험적인 연구를 다년간 수행하여 왔으나 대외적으로 발표된 연구결과는 매우 적은 실정이다.

곡선구간에서의 안내기능은 주로 플랜지 접촉력에 의하여 이루어진다. 그러나 차량이 고속화 되면 플랜지 접촉은 차륜과 레일에 큰 횡압을 발생시키고 곡선통과성능을 저하시키며 마모와 소음 등 여러가지 부작용을 유발하게 된다. 그러므로 곡선구간에서의 안내기능을 원활히 하기 위해서는 플랜지 접촉의 가능성을 가능한 한 줄이는 대신 차륜 담면경사에 의한 차륜과 레일의 크리이프 접촉력(creep forces)에 의하여 안내기능이 유지될 수 있도록 하여야 한다. 차륜과 레일의 접촉력 해석은 Kalker[4, 5, 6]와 Johnson[7, 8] 등의 연구가 대표적인데 Kalker는 spin creep까지 고려한 선형 및 비선형 접촉력 해석이론을 개발하였다. 그러나 Kalker의 이론은 수치적분 과정이 매우 복잡하고 컴퓨터 계산시간이 막대하게 소요되므로 전체적인 차량모델의 운동자유도가 많은 경우의 동적해석과 동적설계에 적용하기에는 불리한 점이 많다. 그리하여 일본의 Matsudaira는 대차 모의주행시험 장치를 이용한 차륜/레일 접촉력의 근사해석 모델을 제시하기도 하였다. 영국 국철이 실제 운행되는 차량의 크리이프 계수(creep coefficient)를 측정할 결과에 의하면 실제 차량의 크리이프 계수가 Kalker의 이론적 예측치보다 최소 0.5배 작은 범위까지 변할 수 있다. 그러므로 실제 차량설계를 위한 동역학 해석용 차량모델에 접촉력을 작용시키는 경우에는, 차륜의 마모상태나

레일담면의 마모상태 등에 따라 크리이프 계수를 광범위하게 변화시켜 보아야 한다.

2.4. 차량지지 기능

고속주행시의 안내기능이 주로 현가장치의 횡방향 동특성 설계와 관계가 있는데 비하여, 차량의 지지기능은 대차-현가장치 시스템의 수직방향 동특성 해석 및 설계와 밀접한 관계가 있다. 양호한 차량지지 기능을 확보한다는 것은 고속 주행시에 차량의 수직방향 운동으로 인하여 차륜과 레일의 접촉면이나 차량의 각 부품들 상호간에 작용하는 동하중을 최소화하는 것이다. 차량의 수직방향하중은 차량의 자중이 차륜과 레일의 접촉면을 통하여 궤도와 노반에 전달되는 정적하중과, 차량의 수직방향 운동에 의하여 발생하는 관성력인 동하중이 있다. 양호한 차량지지 기능을 확보하기 위해서는 차량의 정하중과 동하중이 대차의 각 부분과 차륜 및 레일의 접촉점을 통하여 궤도 노반에 균등하게 분산되어 전달될 수 있도록 현가장치를 설계해야 된다. 이를 위해서는 차량의 설계단계에서 단순히 차량의 자중 배분 뿐만 아니라 동하중 해석을 위한 차량동역학적 관점에서의 접근이 필요하다. 차량지지 성능의 척도로서는 흔히 탈선계수를 사용한다. 탈선계수는 수직하중, V 대한 횡방향 하중, L 의 비율(L/V)로 나타낸다. 탈선계수의 측정이나 예측을 위하여 기존의 철도차량 동역학 해석이나 설계에서는 대부분 정하중 측정결과를 많이 사용하여 왔다. 그러나 고속주행에서는 동하중이 무시할 수 없는 크기가 되므로 근래에는 동하중의 해석이나 측정을 위한 연구에 관심이 고조 되었다. 그럼에도 불구하고 동하중을 이론적으로 해석하기 위하여는 차량의 모델링과 운동방정식이 매우 복잡해지고, 필요한 입력 데이터를 구하는 데에도 많은 어려움이 따르므로 실제로 발표된 연구실적은 많지 않다. E.H. Law[9]가 비선형 차축 모델의 동하중에 미치는 여러가지 설계변수의 영향을 고찰한 바 있고, 일본의 철도차량 동역학 권위인 Matsudaira [10]는 New Tokaido선의 탈선계수 측정결과를 보고하였다. 또한 Birman[11]은 독일 국철의 차량

탈선계수와 궤도의 L/V값을 측정하여 보고한 바 있다. 고속주행시의 차량의 각 부품간에 작용하는 동하중 해석을 위해서는 차륜과 레일간의 접촉력 해석과 궤도 노반의 동적특성 등을 먼저 해석해야 한다. R.W. Radford[12]는 영국국철에서 개발된 방법을 사용하여 고속주행시의 차륜과 레일의 접촉력인 P1, P2 힘에 미치는 현가하질량의 영향을 해석하였다.

2.5. 진동절연기능

고속주행시 승객이 느끼는 승차감을 향상시키고 화물의 손상을 방지하며, 차량 부품의 마모와 손상을 최소화하기 위해서는 궤도 불규칙도로 인한 진동가진력을 효과적으로 차단할 수 있도록 현가장치를 설계해야 된다. 고속주행을 위해서는 차체나 대차의 구조물을 경량화시켜야 하기 때문에 고속전철의 차량구조물은 진동에 대하여 한층 취약한 구조를 갖게 되므로 진동절연을 위한 설계기술의 개발은 필수적이다. 승차감의 측면에서 보면 1차 현가장치 및 현가하질량의 고유진동수를 2차 현가장치 및 차체 고유진동수와 가능한 한 격리될 수 있도록 현가장치 동특성을 설계하는 것이 바람직하다. 진동절연이나 진동감쇠를 위하여 감쇠기를 사용해야 되는 경우에는 고유진동수와 감쇠율의 관계를 고려하여 과도감쇠(over damped)나 지나친 과소감쇠(under damped) 현상이 나타나지 않도록 감쇠계수를 스프링 강성계수와 연계하여 조정해야 된다. 차량의 진동은 흔히 승차감을 나타내는 척도로 사용되는데, 승차감을 해석적인 방법으로 구하기 위해서는 랜덤 궤도 불규칙도(random rail irregularities)에 의한 차체의 불규칙운동을 시뮬레이션해야 한다. 그러기 위해서는 실제 궤도의 불규칙도를 측정하는 일이 선행되어야 한다[13].

3. 현가장치의 동적설계 기술

앞에서 고속전철용 대차 및 현가장치의 주요 기능을 살펴보았다. 차량의 승차감과 견인, 제동, 안내, 차량지지 및 동적안정성 등으로 대표되는

이들 기능은 여러가지 현가장치 설계변수와 상관관계를 갖고 있으며, 서로 상충되는 면이 있기 때문에 이들 기능을 모두 완벽하게 만족시키기는 불가능하다. 따라서 종래의 철도차량 현가장치 설계에서는 안정성 요구조건을 설계제한 조건으로 하고 그 한계내에서 다른 성능 요구조건을 최대한 충족시키도록 설계하는 방법을 사용하였다. 그리고 1970년대 이후 영국, 일본, 프랑스, 독일 등을 중심으로한 철도차량 동역학 연구의 획기적인 진전과 컴퓨터의 발달로 대차 및 현가장치 설계에 있어서 컴퓨터를 이용한 해석 및 설계 시뮬레이션 방법이 활발하게 도입되었다. 뿐만아니라 고속화에 따른 차량의 안정성과 곡선 통과성능을 동시에 향상시키기 위하여 차량동역학 및 시스템설계 측면에서 다양한 형식의 대차 및 현가장치 설계 방안이 제안되었다. 현가장치 동적설계에 있어서 기술적인 주요 관심사를 요약하면 다음과 같다.

- ① 축중 경감을 위한 설계기술
- ② 현가하질량 경감을 위한 설계기술
- ③ 안정성과 안내기능의 최적화를 위한 현가장치 설계기술
- ④ 안내 및 안전도 향상을 위한 차륜담면 설계기술
- ⑤ 보다 간편하고 경제적인 대차-현가장치 설계방법

3.1. 축중 경감을 위한 설계 기술

세계각국의 고속전철 개발에 있어서 축중의 경감문제는 비단 대차-현가장치 설계에 국한된 문제라기 보다는 전체적인 차량개발 계획의 핵심적인 문제였다. 왜냐하면 축중의 제한은 곧바로 기관차, 객차, 동력대차, 비동력대차 등의 설계조건을 제한하는 요소가 되기 때문이다. 축중에 가장 큰 영향을 미치는 것은 객차가 관절형 대차로 연결, 지지되어 있느냐, 아니면 전통적인 방법대로 객차의 양단이 2대의 대차에 의하여 지지되어 있느냐 하는 점이다. 이 두가지 방법은 오늘날 실제로 고속전철에 모두 응용되고 있다. 관절형 대차는 축중이 증가하는 반면, 열차 편성당 총중량이 감소되는 잇점이 있다. 물론 관절형 대차나 전통적인

방식대로 2대의 2축 대차를 사용하여 하나의 객차를 지지할 것이냐의 문제는 차량편성의 유연성과 호환성, 보수유지의 편의성, 차량 제작비용, 등 시스템설계 측면에서의 종합적인 검토가 병행되어야 한다. 차체의 경량화 설계기술과 경량 고강력소재 기술도 축중의 경감에 필수적인 기술이다. 프랑스 TGV의 경우 차량의 경량화를 위하여 차체의 단면적 크기를 기존 차량에 비하여 작게 설계하고, 경량 고강력 소재의 사용을 늘렸으며 모노코크 설계를 통하여 차체경량화를 실현함으로써 관철형 대차와 동력집중식 차량형식임에도 불구하고 축중을 17톤이하로 줄일 수 있었다. 시스템 설계 측면에서 차량의 구동동력 공급방식을 집중식으로 할 것이냐 아니면 분산형으로 할 것이냐 하는 것도 축중 경감 문제와 밀접한 관계가 있다. 일본의 신간선은 차량 시스템의 설계를 동력분산형으로 함으로써 차량의 단면과 수송용량이 크고 비교적 경량소재의 사용이 적은 편인데도 축중 18톤 이하의 설계제한 조건을 만족시켰다.

3.2. 현가하질량 경감을 위한 설계기술

현가하질량은 앞서 언급한 동하중을 유발하는 가장 주된 요인이다. 동하중이란 열차가 주행중에 현가하질량의 진동에 의하여 차륜과 궤도의 접촉면에 작용되는 동적 부가하중이다. 결국 동하중은 현가하질량과 그 운동가속도의 곱이다. 궤도가 전혀 불규칙하지 않고 차륜에 아무런 불안정 요인이 없다면 주행진동은 일어나지 않고 따라서 동하중도 발생되지 않을 것이다. 그러나 실제 궤도는 교량, 터널, 분기기, 역구내, 레일 이음매 단차, 노반 강성의 불균일, 레일의 휨, 차륜과 레일 담면의 불균일 마모 등 여러가지 불안정 요인을 갖고 있어서 이로 말미암아 차량의 진동이 발생되게 마련이다. 이러한 차량의 진동은 곧 궤도와 레일의 진동을 유발하고 이러한 차량과 궤도의 연성운동은 차륜과 레일의 접촉면에서 변동하중을 일으키게 된다. 궤도나 차륜의 불규칙도는 일정하더라도 차량의 주행속도가 빨라져서 임계속도에 가까워 질수록 차량의 진동은 급격하게 증가하

므로 동하중 역시 속도증가에 따라 급격히 증가하게 된다. 특히 대차의 고유진동수와 공진 가능성이 큰 250Km/h 이상의 고속주행을 목표로 하는 고속전철의 경우에는 현가하질량의 진동에 따른 변동하중의 영향을 설계단계에서 반드시 검토하여야 한다. 프랑스 국철(S.N.C.F.)의 Chambron[14]은 이와 같은 차륜과 레일 접촉면의 변동하중은, 레일 이음매를 포함한 궤도의 손상, 주행기어(running gear)의 불규칙 작동, 차체 및 대차의 롤링(rolling), 피칭(pitching), 갈롭핑(galloping) 등의 과도진동, 그리고 견인 및 제동력의 변동 등과 같은 여러가지 부작용을 초래한다는 연구결과를 보고하였다. D.R. Ahlbeck[15] 등은 현가하질량이 차량의 동적성능에 미치는 영향에 대하여 다음과 같은 조사결과를 보고한 바 있다.

- 차량의 동적성능 관점에서 볼때 현가하질량의 증가로 말미암아 향상될 수 있는 동적성능은 거의 없다.
- 현가하질량의 감소로 인하여 가장 현저하게 향상될 수 있는 동적성능은 헌팅 안정성(hunting stability)이다.
- 현가하질량의 증가는 차륜과 궤도의 불규칙 충격접촉력인 P_1, P_2 힘을 증가시키므로 궤도의 마모를 증가시키며, 이로 인하여 보수유지비의 증가를 초래한다.

고속철도차량 설계에 있어서 현가하질량과 축중이 동시에 큰 값을 가지도록 해서는 안된다. 특히 동력대차의 경우에 현가하질량 경감이 필요한데, 현가하질량을 줄이는 방법은 크게 두가지로 나눌 수 있다.

첫째는 차축에 장착된 견인전동기를 차체나 대차 구조물에 옮겨서 장착하는 방법이다. 이 방법은 현가하질량이 줄어드는 대신 트랜스미션과 감속기어를 대차 구조물에 설치해야 되는 등 부가적인 장치가 필요하고 차체의 무게가 늘어나는 단점이 있다. 실제로 TGV와 ICE 등이 차체에 견인전동기를 장착하고, 신간선 300계는 대차 구조물에 장착하는 방식을 채택하고 있다. 견인전동기의 형식과 제동장치의 종류 및 차륜의 크기 등도 현가하질량의 증감에 관계가 있다. 예를 들어 신간선과 ICE는 디스크 브레이크와 와전류 제동을

병용함으로써 현가하질량을 경감시키고 있으며, TGV는 다른 고속전철에 비하여 차륜의 반경이 작다. 그러나 차륜의 크기나 회전반경은 견인전동기의 구동마력과 상관성이 있다.

둘째는 차축이나 견인모터 자체의 무게를 경량화하는 방법이다. 차축의 무게를 줄이기 위해서는 증공차축(hollowed axles)을 사용하거나 경량소재 차축을 사용한다. 첫번째 방법과 두번째 방법이 차량의 임계속도 변화에 미치는 영향은 서로 큰 차이가 없다. 지금까지 흔히 사용되어온 현가하질량 경감설계 방법은 첫번째 방법인 차축에 장착된 견인전동기를 대차와 차체구조물에 옮겨 장착시키는 방법이다. 두번째 방법은 현가하질량 뿐만아니라 차량전체의 중량과 축중도 함께 줄어드는 장점이 있으나, 정적 강도설계, 피로설계 등 여러가지 기술적인 문제가 복합적으로 검토되고 안전성이 입증되어야 하는 어려움이 따른다.

3.3. 안정성과 안내기능의 최적화 설계 기술

대차현가장치의 동적설계에 있어서 대표적으로 상충되는 두가지 요구조건은 안정성과 안내기능이다. 안정성과 안내기능에 직접적이고도 큰 영향을 미치는 현가장치의 설계변수는 1차현가장치의 종방향강성과 횡방향강성 및 요우잉강성이다. 그리고 차축간 거리와 차륜의 담면 경사도 매우 큰 영향을 미친다. 예를 들어서 현가장치의 종강성을 크게 하면 임계속도, 즉 차량의 안정성을 높일 수 있으나 곡선구간 통과 성능은 나빠지게 된다. 이러한 상충되는 성질은 근원적인 문제이므로 완전한 해결방법을 찾기보다는 두가지의 성능 요구조건을 서로 절충할 수 밖에 없다.

Newland[16]와 Boocock[17] 등의 연구결과에 의하면 크리이프 집축력에 의하여 안내기능이 이루어지도록 하기 위해서는 차축의 요잉운동(yaw motion)이 어느정도 가능하도록 대차 현가장치를 유연하게(flexible) 설계하고, 축거를 짧게하며, 차륜담면경사도를 가능한 한 크게 하는 것이 유리하다. 그러나 이러한 설계요구조건은 횡방향 안

정성 확보를 위한 설계 요구조건과 전적으로 배치된다. 그러므로 고속주행용 대차의 현가장치 동적설계 기술의 핵심은 주행안정성과 안내기능의 서로 상충되는 설계 요구조건을 적절히 절충하여 최상의 곡선 통과성을 확보하면서 고속 주행 안정성을 높이는데 있다. 이러한 설계절충은 근본적으로는 선택의 문제이나 대개의 경우 안정성을 확보할 수 있는 한계내에서 안내기능을 극대화하는 방법을 취한다. 프랑스 TGV의 경우 관절형 대차를 사용하고 있고 대차의 축거가 큰 것이 특징인데, 이는 곡선통과 성능보다는 고속 주행 안정성, 즉 최고속도의 향상에 초점을 맞춘 현가장치의 설계라고 볼 수 있다. 따라서 TGV의 경우 안내기능은 다소 나빠질 수 밖에 없고 선로의 곡률반경도 다른 고속전철에 비하여 상대적으로 클 수 밖에 없다.

최근의 동향을 보면 안내기능은 선로조건을 직선화하여 해결하고, 1차현가장치의 종강성을 크게하며 가능한 한 안정성, 즉 임계속도를 향상시키는 설계방법을 채택하는 경향이 많다. 현가하질량을 가능한 한 줄이고, 축간거리를 크게하며, 차륜반경을 작게하고, 차륜의 담면경사도 작게하는 것도 안내기능 보다는 안정성을 우선하는 설계이다. 이러한 설계경향의 배경에는 1970년대에 영국, 캐나다, 스웨덴, 이태리 등이 래디알 조향대차(radial steering bogie)와 능동형 현가장치(active tilting suspensions)를 사용하여 곡선구간에서의 안내기능 향상을 우선적으로 고려하였던 고속전철 설계방법이 사실상 실패로 끝난 반면, 프랑스는 궤도를 직선화하고 차량의 안정성 향상 위주로 한 설계방법을 채택하여 TGV 고속전철 개발에 성공한 것이 크게 영향을 미치고 있다.

3.4. 안내 및 안전도 향상을 위한 차륜 담면 설계기술

차륜과 레일의 상호작용은 철도 차량의 동적 성능에 결정적인 영향을 미칠 수 있다.

그중에서도 특히 차륜과 레일 담면 형상은 차량의 횡방향 진동 현상인 헨팅운동의 주파수와 안정성, 그리고 곡선통과 성능 등에 크게 영향을

미친다. 차륜과 레일의 답면은 차량의 운행과 더불어 시간이 흐를수록 마모에 의하여 그 형상이 변화되고, 그로 인하여 차륜과 레일의 상호작용이 불안정해져서 차량의 동적성능을 저하시키는 원인이 된다. 뿐만아니라 차량의 동적 성능이 저하되면 차륜과 레일의 과도한 진동이 발생되어 차륜과 레일의 마모를 더욱 가속화 시키는 악순환이 반복되고 결국은 안전운행이 불가능한 상태에 까지 이르게 된다. 차륜의 답면형상은 일반적으로 플랜지 부분, 플랜지 목부분(flange throat), 답면 부분(tread)으로 되어 있고, 답면부분은 다시 경사진 부분(taping line)과 직선부분(linear segment)로 구분된다. 차륜답면형상 설계기술이란 차륜과 레일 답면의 마모를 최소화 하면서 차량의 안정성과 안내기능을 최대한 좋게 설계하는 기술이라고 할 수 있다. 그러므로 차륜답면 형상과 마모, 안정성, 안내기능의 상관관계를 파악하는 것이 차륜답면형상 설계기술의 핵심이다.

먼저 차륜의 마모 특성을 살펴보면, 답면형상 뿐만아니라 현가장치의 동특성설계, 현가장치의 운동자유도, 선로의 특성(곡선구간의 빈도 및 곡률반경 등), 운행속도, 제동장치의 종류 등 많은 요인과 관계가 있다. 차륜답면 형상과 마모특성과의 관계를 보면, 원추형 차륜(conical wheel)이 원통형(cylindrical profiles)이나 프로파일 차륜(profiled wheel)에 비하여 월등히 마모율이 높다. 그 이유는 원추형 차륜은 원통형이나 프로파일 차륜에 비하여 볼록한 곡면형상(crowned profile)인 레일 답면과의 접촉 면적이 작아서 차륜과 레일의 접촉면에서 훨씬 큰 접촉응력(contact stress)을 받기 때문이다. 접촉응력의 크기는 축중과 직결되므로 축중이 클수록 마모가 커지며, 축중 경감은 차륜마모방지를 위해서도 필요하다. 그렇지만 고속전철 차륜의 마모는 축중의 증가에 따른 것보다는 차륜의 활주(slipping of the wheels on the rails)에 기인되는 경우가 더 많다. 그러므로 차륜의 활주방지를 위하여 디스크브레이크와 와전류형 브레이크, 전자기력을 이용한 제동방식 등을 병용하고 활주방지 연마제를 사용하는 방법 등이 고속전철 시스템에서 채택되고 있다. 또한 제동시의 발열로 인하여 차륜이 마모되는 것을 방지

하기 위하여 답면 브레이크(tread brakes) 작동시의 차륜 및 브레이크의 효과적인 방열(heat dissipation)을 위한 차륜과 답면 브레이크의 최적설계에 관한 연구도 시도되고 있다.

다음으로 차륜답면 형상과 안정성의 관계를 보면, 횡방향 안정성의 척도인 임계속도는 차륜의 유효답면경사도(effective conicity), λ 와 밀접한 관계가 있다. 이론적 해석에 따르면 강체대차(1차 현가장치가 대차 구조물에 강체결합으로 연결된 대차)의 경우 임계속도는 근사적으로 차륜의 유효답면경사도에 반비례한다. 그러므로 차륜답면의 경사도를 작게 하면 임계속도를 무한히 높일 수도 있다. 그리고 원통형 답면 차륜을 사용하거나, 좌우 독립회전식 차륜(independently rotating wheels)을 사용하면 임계속도를 정의할 수 없다. 왜냐하면 차륜 답면경사에 의한 자체 회귀운동(self centering), 즉 안내유도(guidance or steering)가 이루어지지 않고 플랜지 접촉에 의해서만 안내가 가능하기 때문이다. 그러나 플랜지 접촉에 의하여 안내 기능이 이루어지면 차륜 플랜지와 레일 답면에 과도한 마모를 초래하게 되므로 실제로는 적용 불가능한 방법이다. 그러므로 오늘날의 고속전철에서는 프로파일 차륜(profiled wheels)을 사용하여 임계속도를 높이면서 안내기능도 어느 정도 차륜 답면경사에 의하여 이루어질 수 있도록 한다. 즉 프로파일 차륜은 차륜 답면의 단면이 일정한 원추형 답면과 달리 답면 단면의 기울기가 곡선으로 되어 있어서 차륜의 유효답면 경사, λ 가 일정하지 않고 차축의 횡방향 변위의 함수가 된다. 차량의 곡선통과 성능도 차륜의 답면경사와 깊은 관계가 있다. 답면경사가 크면 안정성은 저하되지만 곡선구간 통과성능은 향상된다. 그러므로 안정성과 곡선구간 통과성능을 함께 만족시킬수 있는 차륜 답면경사 설계절충 방법이 필요하다. 원추형이 아닌 프로파일 답면의 차륜은 바로 이러한 설계절충방법의 산물로서 위에 언급한 두 가지 서로 상충되는 동적성능을 충족시키기 위한 차륜설계이다. 즉, 차축의 횡방향 변위가 작고 차륜과 레일이 접촉하는 부분인 답면 부분에서는 답면경사도를 매우 낮게하고, 차축의 횡방향 변위(tracking error)가 큰 영역인 플랜지에 가까운 답면

부분은 답면경사도를 비교적 크게 설계하면 곡선 통과성능과 안정성을 동시에 충족시킬 수 있다. 그러나 프로파일 답면 차륜은 답면 형상이 복잡하므로 마모된 차륜의 재삭정이나 마모상태의 점검 작업 등이 원추형 답면에 비하여 어려움이 따른다.

3.5. 대차-현가장치 설계 방법

차량동역학적 관점에서 철도차량 고속화의 핵심기술은 대차-현가장치의 설계기술이다.

그러므로 프랑스, 일본, 독일 등 250km/h급 이상의 고속전철 보유국은 고속 대차-현가장치의 설계기술 연구개발에 많은 노력을 기울였다. 그러나 대차의 기본적인 사양을 제외한 설계기술의 노하우에 대하여는 공개하지 않고 있는 실정이다. 철도차량 동역학 기술분야의 선진국이라고 할 수 있는 영국, 일본, 프랑스, 독일, 미국 등에서 단편적으로 발표된 문헌 들을 종합해 보면 1970년대 이후 고속대차-현가장치설계의 주된 관심사는 안정성과 곡선통과 성능을 어떻게 적절하게 절충하여 설계할 것인가 하는 것과 현가하중량을 어떻게 경감할 것인가 하는 점이었다. 후자에 대하여는 앞서 언급하였으므로 여기서는 안정성과 곡선통과 성능의 절충설계 방법에 대하여 논하기로 하겠다. 현가장치의 동적설계를 위해서는 먼저 차량 동적성능에 대한 설계변수들의 민감도 분석이 선행되어야 한다. 그러나 지금까지는 현가장치 주요 설계변수들의 차량동적성능에 대한 영향은 경험적 지식에 주로 의존하였으며, 해석적인 방법의 민감도 분석은 매우 희소하다[18, 19]. 대차-현가장치계의 횡방향안정성과 관련하여 E. H. Law[20], N.K. Cooperider[21, 22], Matsudaira[23] 등은 2축대차의 선형임계속도는 현가장치의 강성이 증가됨에 따라 커진다는 것을 밝혔다. 특히 N.K. Cooperider는 대차의 1차 현가장치 강성이 2차 현가장치 강성보다 임계속도에 미치는 영향이 더 크다는 것을 알아냈다. 그러나 Wickens[20, 21, 22]의 연구결과에 의하면 2축대차의 경우 어떤 속도영역 이하에서는 현가장치의 강성이 증가됨에 따라 임계속도도 증가하지만 특정한 속도이상의

고속영역에서는 현가장치 강성이 증가될수록 임계속도는 감소하게 된다는 점을 유의하여야 한다. 대차의 안정성에 크게 영향을 미치는 설계변수로는 차륜답면경사, 1차현가장치의 강성, 대차의 기하학적 형상 및 무게중심의 위치 등이 있으며 현가장치의 감쇠특성은 큰 영향을 미치지 않는다. 곡선통과성능의 경우 주로 차륜답면경사도와 1차현가장치의 요우잉강성(yaw stiffness)에 크게 영향을 받는다. 요우잉강성이 증가함에 따라 차축의 횡방향 변위(wheelset excursion)와 크리이프 힘(creep force)이 급격하게 증가하며 특정한 값 이상으로 요우잉강성을 증가시키면 차축의 횡변위와 크리이프 힘은 강제 대차의 경우의 값으로 수렴한다. 그러므로 최근의 고속전철용 대차는 곡선통과 성능을 높이기 위하여 요우잉강성이 낮은 소위 래디알 스티어링(radial steering) 설계 개념을 도입한다. 대차설계 변수와 관련된 또다른 동적성능으로는 진동승차감이 있다.

이는 주로 2차현가장치의 강성과 감쇠계수설계와 관련된다. 오늘날의 고속전철 객차용 대차의 경우 승차감 향상을 위하여 2차현가장치로서 공기스프링(air bag spring)을 사용하고 있다. 대차설계를 위한 동적설계 방법론으로서 D. Wormley, K. Hedrick, D. Horak, C. Bell[18] 등이 고안한 객차용 대차설계방법론이 있고, 종합적인 대차설계 및 시험에 관련된 연구로는 H.M. Burngarder, F.E. Dean[26, 27] 등이 수행한 LTV/SIG 대차 설계 및 시험 보고서가 있다. D. Wormley[18] 등의 설계방법을 개괄적으로 소개하는 것이 대차 현가장치 설계에 다소 도움이 될 것이다. 그들의 방법에서는 차량의 동적성능 지수로서 다음의 세가지를 선정하였다.

- 1) 객차의 수직 및 횡가속도로 표시되는 승차감
 - 2) 차축의 횡방향 변위와 통과가능한 곡률반경으로 표시되는 곡선통과성능
 - 3) 임계속도로 표시되는 안정성
- 대차설계 구속조건으로서는 다음의 다섯가지를 선정하였다.
- ① 노변 구조물 허용간격(wayside clearance)
 - ② 최대 허용 윤증 또는 축중

참고문헌

③ 현가장치 행정한계

④ 차축 횡변위 허용한계

⑤ 탈선계수 허용치

자유설계변수로서는 대차의 1차 및 2차 현가장치 강성과 감쇠에 관련된 9개의 설계 변수와 차륜 담면경사를 선정하였다. 그 밖에 10여개의 종속 설계변수(dependent parameters)와 50여개의 고정 변수(fixed parameters)를 선정하여 차량의 모델링, 해석 및 설계 시뮬레이션을 수행하였다. 자유설계변수의 결정방법은 상충되는 성능지수들간의 절충(trade-off) 및 성능지수와 관계된 구속조건들간의 절충방법을 이용하였으며, 23단계의 설계절차를 거쳐 최종적으로 10개의 자유설계 변수값을 결정하게 되어 있다. 최근의 동향을 보면 1980년대 후반부터 다물체 동역학해석 소프트웨어인 MED-YNA, ADAMS, DADS 등을 이용한 차량의 동역학적 모델링과 해석 및 동적거동 시뮬레이션에 관한 연구가 활발하다[28, 29, 30].

4. 맺음말

고속전철용 대차현가장치의 동적해석 및 설계 기술과 관련하여 주로 차량동역학적 관점에서 지난 30여년간 고속전철 기술보유국을 중심으로 이루어진 연구개발 노력을 개괄하려고 하였다. 그러나 제한된 자료와 지면때문에 주로 기본적인 해석 및 설계개념이나 동향의 소개에 주안점을 두었으므로 부족한 점이 많으리라 생각된다.

국내에서도 차량동역학적 해석 및 대차설계에 관하여 다년간 많은 연구개발이 이루어진 것으로 알고 있으나 여기서는 언급하지 않았다. 국내의 연구개발 사례는 각종 학술활동이나 연구보고서 등을 통하여 먼저 공개되어야 한다고 생각하기 때문이다.

국가적인 대역사로 관심의 초점이 되고 있는 경부고속전철 건설이 우리의 고속전철 기술력을 획기적으로 도약시킬 수 있는 계기가 되기를 기대하면서, 미약하나마 이러한 지면이 고속전철 차량동역학 및 대차 현가장치 설계기술 연구개발에 보탬이 되고, 앞으로 이 분야의 연구에 관심을 제고시키는 계기가 되었으면 한다.

- [1] 김호연, 최영휴, 김도중, 박주혁, 노창수, 한규환, "Overspeed Train용 Tilting Bogie System 개발-I, II, III", 한국기계연구소, 과학기술처 특정연구보고서, 1984, 1985, 1988.
- [2] A. Mochizuki, "Technical Characteristics of High Speed Rail System," 한국고속철도 국제 Symposium 강연자료, Oct. 1989.
- [3] H. Chollet, J.B. Ayasse, J.P. Pascal, "Measurement of the Transversal Creep Force in a Wheel-Rail Contact Area", Proc. of 11th IAVSD Symposium on the Dynamics of Vehicles on Roads and on Tracks, Ontario, Canada, Aug. 1989, pp. 97-107.
- [4] J.J. Kalker, "Simplified Theory of Rolling Contact", Delft, Progr. Rep., Series C : Mechanical and Aeronautical Engineering and Shipbuilding, Vol. 1, 1973, pp. 1-10.
- [5] J.G. Goree, E.H. Law, "User's Manual for Kalker's Simplified Nonlinear Creep Theory", Report No. FRA/ORD-78/06, Dec. 1977.
- [6] J.G. Goree, E.H. Law, "User's Manual for Kalker's Exact Nonlinear Creep Theory", Report No. FRA/ORD-78/50, Aug. 1978.
- [7] K.L. Johnson, "The Effect of a Tangential Contact Force Upon the Rolling Motion of an Elastic Sphere on a Plane", J. of Applied Mechanics, Vol. 80, Dec. 1958, pp. 339-346.
- [8] P.J. Vermeulen, K.L. Johnson, "Contact of Nonspherical Elastic Bodies Transmitting Tangential Forces", J. of Applied Mechanics, Vol. 31, Trans. ASME, Vol. 86, Series E, No. 2, Jun. 1964, pp. 338-340.
- [9] E.H. Law, "Nonlinear Wheelset Dynamic Response to Random Lateral Rail Irregularities", ASME Paper No. 73-WA/RT-3, Nov. 1973, pp. 808-816.
- [10] T. Matsudaira, "Dynamics of High Speed Rolling Stock", JNR, RTRI, Quarterly Report, Special Issue, 1963.
- [11] F. Birman, "Track Parameters, Static and Dynamic", Interaction Between Vehicle and Track,

- Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, London, Vol. 180, Part 3F, 1966, pp. 73-85.
- [12] R.W. Radford, "Wheel/Rail Vertical Forces in High Speed Railway Operation", J. of Engineering for Industry, Nov. 1977, p. 849-858.
- [13] H. Helms, W. Strothmann, "Lateral Rail Irregularities—Measurement and Application", Proc. of 5th VSD-2nd IUTAM Symposium on the Dynamics of Vehicles on Roads and on Tracks", Sept. 1977, Vienna, Austria, pp. 430-449.
- [14] Chambron, "Engineering Structures on the New Line-Bridges and Tunnels", Division of Bridges and Tunnels, Way and Work Department of S.N.C. F.
- [15] D.R. Ahlbeck, G.R. Doyle, J.A. Hadden, J.C. Kennedy, "Review of Influence of Unsprung Mass on Rail Vehicle/Track Performance", Jan. 1980.
- [16] D.E. Newland, "Steering a Flexible Railway Truck on Curved Track", J. of Engineering for Industry, Trans. ASME, Series B, Vol. 91, No. 3, Aug. 1969, pp. 908-918
- [17] D. Boocock, "Steady State Motion of Railway Vehicles on Curved Tracks", J. of Mech. Engg. Sci., Vol. 11, No. 6, 1969, pp. 556-566.
- [18] D. Wormley, K. Hedrick, D. Horak, C. Bell, "Rail Passenger Vehicle Truck Design Methodology", Report No. FRA/ORD-81/11, Jan. 1981, NTIS PB81-165383.
- [19] J.W. Clark, E.H. Law, "Investigation of the Truck Hunting Stability Problem of High Speed Trains", ASME Paper No.67-Tran-17.
- [20] N.K. Cooperider, "High Speed Dynamics of Conventional Railway Trucks", PhD Thesis, 1968, Dept. of Mechanical Engineering, Stanford University, Stanford, Calif.
- [21] N.K. Cooperider, "The Hunting Behavior of Conventional Railway Trucks", J. of Engg. for Industry, Trans. ASME, Series B, Vol. 94, No. 2, May 1972, pp. 752-762.
- [22] T. Matsudaira, "Hunting Problem of High-Speed Railway Vehicles with Special Reference to Bogie Design for the New Tokaido Line", Interaction Between Vehicle and Track, Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, London, Vol. 180, Part 3F, 1966, pp. 58-66.
- [23] A.H. Wickens, "The Dynamic Stability of Railway Vehicle Wheelsets Having Profiled and Coned Wheels", International J. of Solids and Structures, Vol. 1, 1965, pp. 319-341.
- [24] A.H. Wickens, "The Dynamic Stability of a Simplified Four-Wheeled Railway Vehicle Having Profiled Wheels", International J. of Solids and Structures, Vol. 1, 1965, pp. 385-406.
- [25] A.H. Wickens, "The Dynamics of Railway Vehicle on Straight Track: Fundamental Considerations of Lateral Stability", Interaction Between Vehicle and Track, Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, London, Vol. 180, Part 3F, 1966, pp. 29-33.
- [26] H.M. Bumgardner, Jr., F.E. Dean, "LTV/SIG Metroliner Truck-Final Design Report", Aug. 1975, NTIS PB265136.
- [27] N.H. Sandlin, H.M. Bumgardner, Jr., "LTV/SIG Metroliner Truck Test", Aug. 1975.
- [28] W. Duffek, A. Jaschinski, M. Jochim, "Curving Performance and Transient Track Behaviour of the German High Speed Train", Proc. of 11th IAVSD Symposium on the Dynamics of Vehicle on Roads and on Tracks, Ontario, Canada, Aug. 1989, pp. 166-178.
- [29] O. Wallrapp, "MEDYNA an Interactive Analysis and Design Program for Flexible Multibody Vehicle Systems", Proc. of 3rd ICTS Seminar on Advanced Vehicle System Dynamics, Amalfi, Italy, May 1986, pp. 167-188.
- [30] A. Jaschinski, "Application of MEDYNA in Vehicle Technology", Proc. of 3rd ICTS Seminar on Advanced Vehicle System Dynamics, Amalfi, Italy, May 1986, pp. 189-214.