

철도 차량의 동역학

- 헌팅과 커브 주행 문제의 역사 -

임진수

(아주대학교 기계 및 산업공학부)

1830년 영국의 리버풀과 맨체스터 간 45 km 구간에서 스티븐슨의 로켓호가 처음으로 상업 운행을 시작한 이래 철도 수송은 생산 공장과 대도시 소비자에게 대량의 화물을 신속하게 수송함으로써 산업 혁명의 기폭제 역할을 하였다. 열강의 수탈 의도에 의한 것이기는 하지만 우리 나라에서도 1899년 노량진과 제물포간 33 km 구간의 영업을 시작한 이래 일제 식민지 정책, 6.25 전쟁 수행 및 이후의 부흥책, 그리고 5.16 이후의 경제 개발의 한 중심에서 그 역할을 해 왔었다. 철도 수송이 이러한 역할을 할 수 있는 것은 타 교통 수단에 비해 대용량, 정시성(定時性), 안전성, 신속성을 갖추고 있기 때문이며, 기술적인 측면에서 본다면 이러한 우월성은 철제 차륜이 철제 레일과 접촉을 하면서 안내를 받아 굴러가는 철도 차량의 가장 기본적인 특징에 기인한다.

목재 궤도 위로 목재 차륜이 장착된 수레를 사람이나 말이 끌고 다니는 형식은 16 세기부터 광산에서 사용되었다는 기록이 있으며, 증기 기관차의 탄생 시기에 철제 레일이 등장하였다. 이 당시에는 그림 1과 같이 다양한 형태의 레일들이 시도되었으며 그림 2의 우측과 같이 레일에 플랜지가 달려있는 형태도 사용되었으나 오래지 않아 현재와 같

은 형상의 레일 (그림 1의 1831년 및 1835년) 과 차륜으로 (그림 2의 좌측) 통일되기 시작했다. 당시의 엔지니어들은 체계적인 교육을 받지 못한 상태에서 경험과 공학적 센스에 의거하여 설계를 하였을 것으로 짐작되나, 레일 밑면을 넓게 함으로서 단면의 관성 모멘트가 증대되어 차량의 수직 하중을 지탱하고 동시에 기관차의 견인력을 지지는 레일과 지면의 마찰을 최대로 하고, 또 레일 상부를 등글게 하여 차륜/레일의 마모를 줄이고 플랜지 접촉도 국부적으로만 발생되도록 고심한 점을 느낄 수 있다. 현재의 차륜은 그 단면이 1/20 내지 1/40으로 경사져 있다. 이러한 경사가 언제부터 사용되어 왔는지는 확실치 않으나 차륜을 주조하려면 이러한 단면 경사가 필요하였을 것이며 차륜 플랜지와 레일이 맞부비어지는 것을 방지하는 효과를 기대하였을 것으로 짐작된다. 또 차륜 바깥쪽이 아닌 안쪽에 플랜지를 설치하면 커브 주행 시 최전방 바깥쪽 차륜에 플랜지 횡압이

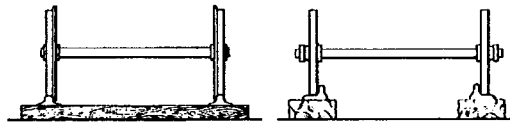


그림 2 플랜지 배치 방법

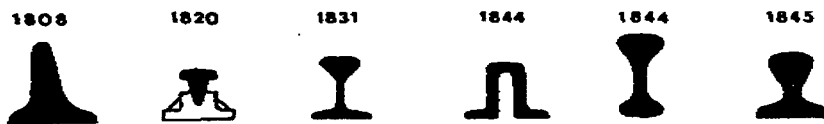


그림 1 초기의 레일 현상

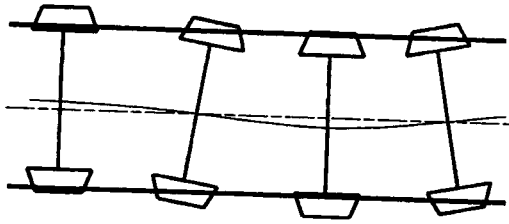


그림 3 차축의 기하학적 모드

작용하나 다행히도 이 차륜에 작용하는 수직 하중이 안쪽 차륜보다 더 크니 결과적으로 탈선 위험성이 줄어든다는 점을 초기의 엔지니어들은 알고 있었을까? 어쨌든 위와 같은 역사를 거쳐 확정된 철제 레일, 역시 철제로 된 좌/우측 차륜이 일체화된 차축, 차륜 안쪽의 플랜지는 현재까지 이어져 오면서 커브 주행 및 헌팅이라는 철차 동역학의 두 마리 토끼와도 같은 문제들을 엔지니어에게 던져 주었으며, 이 문제는 고속화를 추진하는 오늘날에도 지속되고 있다.

그림 3에 표시된 것처럼 답면이 경사진 차축이 레일 중립 위치에서 조금 벗어난 상태에서 굴러가면 양 차륜 굴름 반경의 차이에 의하여 차축 중심은 궤도 중심으로 이동하고 다시 반대쪽으로 이동하게 된다. 이러한 과정에 의하여 차축 중심점은 궤도 중심선을 기준으로 하여 정현파 운동을 하게 되며 이

를 차축의 기하학적 모드라 한다. 차축 기하학적 모드의 파장은 차륜 반경의 제곱근에 비례하고 답면 경사도의 제곱근에 반비례한다. 차축과 대차 (2축 차량의 경우 차체) 연결이 강체 구조인 강체 대차 역시 이에 유사한 대차 기하학적 모드가 발생되며 그 파장은 차축 모드 보다 크고, 축간 간격이 커질수록 더욱 커진다. 차량 주행속도를 이 파장으로 나누어주면 기하학적 모드의 진동 주파수가 되고, 이는 주행속도와 답면 경사도의 제곱근의 곱에 비례하게 된다. 1883년 독일의 Klingel에 의하여 수식화된 차축 기하학적 모드는 차축의 질량을 무시한 순수한 기하학적인 해석 결과이며, 당시로서는 실제 차량에 대하여는 더 이상의 아무런 결과를 유추할 수 없었다. 오늘날의 동역학 관점에서 본다면 실제 차량에서는 차축이 기하학적 모드로 운동하려는 성향과 차량의 동역학적 특성 사이에 연성이 일어나고 기하학적 모드의 주파수가 커지면 (즉 답면 경사도가 커지거나 축간 거리가 감소하면) 이러한 연성은 증가하여 차량의 운동이 불안정해 지고 궁극적으로는 좌우측 플랜지가 교대로 접촉하는 헌팅 현상, 더 나아가서는 탈선 위험성에까지 이르게 된다. 이 불안정 문제는 1950년대 일본의 철도 엔지니어 마쯔다이라(Matsudaira, 松平)에 의하여 해결된다. 탄생기의 기관차 및 객차들

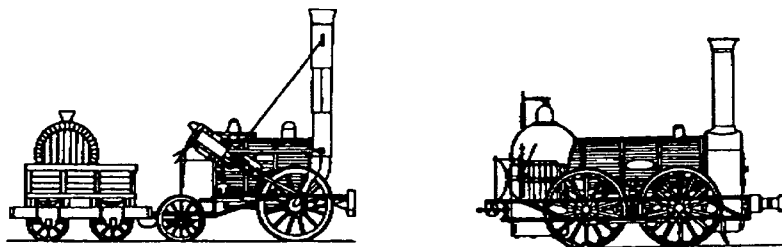


그림 4 초기의 증기 기관차
(좌측은 1829년 스티븐슨의 로켓호, 우측은 1830년)

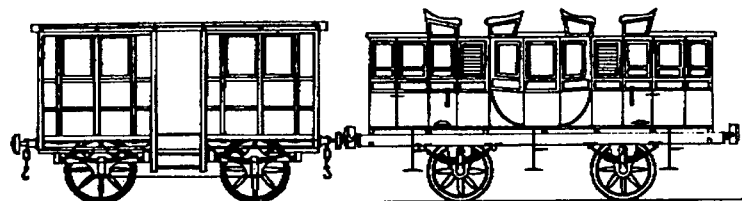


그림 5 초기의 객차(1830년대 후반 불란서)

은 마차의 구조를 이어 받아 차축과 차체 연결은 그림 4 및 5와 같은 강체 구조를 취하였다. 이는 위 언급된 강체 대차와 동일한 구조이면서 그 축간 거리도 짧아 그 운동은 불안정하였다. 실제로 리버풀 - 맨체스터 간에 운행된 차량은 주행 속도에 관계없이 헌팅이 심한 것으로 악명이 높았으며, 차간 연결을 단단히 하여 이러한 진동이 적어지도록 조치하였다. 철차 초기에는 항상 출력 부족이 문제였기에 궤도의 구배를 최소로 하다 보니 곡률이 심한 구간이 많았다. 그림 4 나 5와 같이 강체 구조로 연결된 2축 차량은 이러한 커브에서의 주행 성능이 좋을 수가 없었다. 이에 오늘날과 같은 형식의 2축 대차가 제안되었고 이는 태평양을 건너 미국에서 실용화되기 시작하였다. 객차보다 길이가 길어 커브 주행이 더욱 불리한 기관차에 대차가 먼저 사용되었으며 그림 6과 같이 기관차의 전방에 회전이 자유로운 대차를 설치하였으나 피스톤과 연결되어 견인을 담당하는 후방 차축들은 보일러와 일체를 이루고 있는 차체에 직접 연결하는 것이 일반적이었다. 이 전방 대차는 자유롭게 회전할 수 있으면서도 축간 거리가 짧아 위에 언급된 강체 대차의 특성이 불안정성이 높았다. 이에 따라 그림 7과 같이 점차적으로 축간 거리를 길게 함으로서 안정화시킬 수 있었고, 이 후 이러한 형식의 기관차는 미국의 표준형이 되다시피 하였다. 대차가 등장한 이후 기관차 형식을 차축 집합들의 수로 표시하기 시작하였으며, 그림 6의 기관차들은 4-4-0 형식으로 불리었다. 기관차에 이어 그림 7과 같이 객차에도 대차가 적용되기 시작하였으며, 대차 사용으로 커브 주행 문제가 어느 정도 해결되었기에 객차의 길이도 이전에 비하여 훨씬 더 길어졌다. 또 1841년 Davenport가 제안한 사이드 비어러

- 스윙잉 볼스터 형식은 대차와 차체사이 마찰 판을 설치하여 커브 주행 시에는 마찰 판의 상대 변위에 의하여 대차는 궤도에 접선 방향을 유지하고 직선 주행 시에는 마찰 판의 상대 변위가 거의 없으므로 안정성을 향상시키는 우수한 구조로서 최근까지도 사용되고 있다. 한편 객차에 대차를 사용함으로써 커브주행 성능, 안정성 외에도 현가 장치에 의한 진동 절연 효과도 얻을 수 있었다. 조금은 다른 이야기이지만, 이 증기 기관차 시대의 경험에 의하면 주행중인 기관차 보일러 - 엔진 시스템의 성능은 정차 중일 때와 많이 달랐다고 한다. 이는 열차의 주행에 따라 연소 공기 공급, 기관차 진동에 의한 보일러 내에서의 열전달 및 석탄의 연소가 영향을 받고 이는 다시 열차의 주행에 영향을 미치는 복합 시스템이기 때문이 아닌가 한다. 만일 오늘날에도 이러한 증기 기관차가 사용된다면 연소 공학, 열동력, 열전달, 차량 동역학 엔지니어들이 팀을 이루어 분석해 볼만한 많은 문제들이 제기될 지도 한데, 이 모든 것들이 증기 기관차와 함께 역사 속에 묻혀 버린 것 같은 아쉬움도 있다.

커브를 주행하는 열차 차륜에는 접선력 (더 구체적으로는 크리프 힘)이 작용하고, 이는 차축의 변위를 유발시켜 그림 8과 같이 차축 표면의 접촉 원은 커브 중심을 꼭지점으로 하는 원추상의 원이 되어 순수 굴림 운동을 하려고 하는 경향이 있다. 차축이 아무

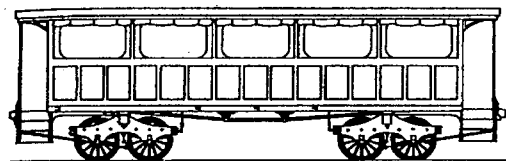


그림 7 대차장착 객차, 1940년대 후반 유럽

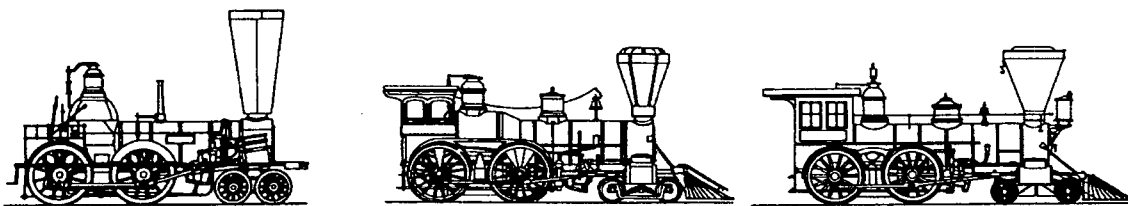


그림 6 대차장착 증기관차 : 1840년대, 1857년, 1857년 미국

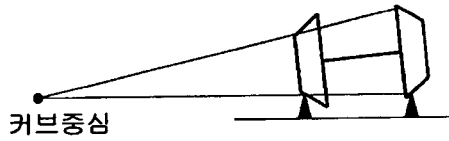


그림 8 차축의 순수 굴림

런 구속 없이 자유롭게 회전할 수 있다면 이와 같이 완벽한 커브 주행이 이루어지지만, 위에서 지적된 바 이 경우 차축의 운동은 모든 속도에서 불안정하다. 반면 차축 회전 및 횡변위를 억제하는 탄성이 과다하거나 커브의 곡률이 심하면 이러한 차축의 적응이 불가능해져서 차축은 직진하려는 성향을 나타내고 차륜 트레드와 레일 사이에 건마찰이 발생된다. 이 현상이 심해지면 플랜지 접촉에 이어 탈선까지 발생된다. 마찬가지로 차륜 담면 경사도를 크게 하면 곡선 적응력은 향상되나 위에서 언급한 것처럼 운동이 불안정해진다. 이처럼 커브 주행과 안정성이란 서로 두개의 모순되는 성능을 해결하려 한 것이 철차 동역학 연구의 큰 줄기였다. 초기의 엔지니어들은 탈선이란 차량의 원심력에 의하여 발생하는 것으로 이해하였다. 그러나 차체에 강체 구조로 연결된 3축 증기 기관차가 심한 곡률의 커브 위를 서행하던 중 탈선한 사고를 계기로 원심력때문이란 관점을 재검토하였으며, 1855년 영국의 Mackenzie가 이 탈선은 강체 연결된 차축의 직진 성향 때문이었다는 사실을 파악하였다. 이 분석은 이론에 근거하기보다는 직관적이고 정성적이었으나, 독일에서 이 관점에다 이론적인 분석을 추가하여 강체 대차 또는 강체 차체의 커브 주행 거동을 본격적으로 연구하였으며, 그 결과 1910년대에 마찰 중심법이란 해석 도구를 탄생시켰다. 이는 커브를 주행하는 강체 차량 각 차륜의 미끄럼 (더 정확하게는 크리프), 평형을 이루기 위한 플랜지 접촉력 등을 산정하는 기하학적인 방법이며 이 후 오랫동안 커브 주행 해석의 표준 방법으로 자리잡았다. 1980년대 초 국내의 차량 제작업체의 고참 엔지니어가 본 방법을 사용하는 것을 필자도 본 적이 있다. 철도 탄생 이후 1910년대까지 철도 기술은 영국 주도로 발달되었으나 이는 주로 경험에 의한 시행 착오 과정과 소수의 재능 있는 엔지니어들이 제안한 아이디어에

의하여 주도되어 왔으며 이론적이고 체계적인 발전 형태는 아니었다. 반면 독일에서는 1800년대 말부터 정규 공과대학에서 실기와 병행한 이론 교육을 실시하였으며, 위 커브 이론들도 동 공과대학의 주도로 개발되었다. 또 이 공과대학 출신의 엔지니어들이 다음 세기 독일 공업 발달의 원동력이 되었다 한다. 철학에서의 경험론과 관념론의 전통을 이어 받은 것인가, 아니면 독일인들의 미래에 대한 지혜로운 대비였던가, 오늘날 우리의 입장은 어떠한가 까지 생각나게 하는 대목이기도 하다.

부의 상징처럼 인식되기도 했던 검은 연기를 내뿜으며 달리던 증기 기관차는 일차대전을 전후하여 디젤 기관차에게 철도의 주인 자리를 양보하기 시작한다. 전기 기관차도 등장하였으나 차량 운행이 빈번한 구간에서만 제한적으로 사용되었을 뿐 디젤 기관차가 유럽과 미국 대륙의 장거리 구간을 주행하게 된다. 디젤 엔진은 증기 기관에 비해 2~3배나 높은 열효율을 나타내지만 차량에 탑재되기까지는 많은 문제들이 해결되어야 했다. 정속 운전되는 엔진의 동력을 다양한 속도로 회전하는 차축에 전달하려면 자동차 변속기와 같은 장치를 생각할 수 있으나 철제 차륜/레일의 충격 흡수 능력이 거의 없으므로 디젤엔진-DC 발전기-DC 모터 형식을 취하였고 (유압식 동력 전달도 일부 사용되고 있다) 차축에 부착되는 DC 모터, 차상 탑재 발전기의 개발이 진행되었다. 디젤 엔진의 큰 중량도 문제가 되었으나 일차대전 중 독일 잠수함에 적용된 디젤 엔진의 경량화 기술이 큰 역할을 하였다. 한편 1차 대전 이후 유럽 국가들은 철도 수송이 전쟁 수행에 중요한 중의 하나라는 것을 인식하고, 이전까지 기업들이 운영하던 사유 철도를 모두 국유화하고 철도 수송 능력 증대를 추진한 점도 디젤 시대를 앞당기게 되었으니, 비극적이긴 하지만 그 일차대전이 디젤 기관차에 큰 공헌을 하였다고 할 수 있을 것이다. 근대 철도차량 동역학 이론의 시조라고도 할 수 있는 카터 (Carter)도 이 디젤 기관차 시대와 같이 등장한다.

차륜이 레일 위를 굴러가면 차륜과 레일의 각 점들은 접촉 시작 - 접촉 지속 - 접촉 해

지의 과정을 거치게 된다. 만일 이 차륜에 접선 방향 힘 (접촉 평면 내의 힘 벡터)이 작용하면 차륜과 레일의 각 점들 인근 부위의 변형은 영에서 최대 다시 영으로 변한다. 이 과정에서 차륜과 레일 각 접촉점의 상대 변위는 없더라도 접촉부 변형의 변화율은 차이를 나타내게 되고 이는 거시적으로 차륜과 레일의 상대 변위로 나타나게 된다. 차륜에 작용하는 힘이 커지면 접촉면 일부에서 미끄럼이 발생되며, 이 미끄럼이 접촉면 전체로 확장되면 우리가 잘 알고 있는 미끄럼이 된다. 이와 같이 차륜/레일 사이에서 상대 운동이 없는 접촉과 완전한 미끄럼의 중간 단계에 해당되는 상대 운동을 크리프 속도라고 한다. 또 크리프 속도를 발생시키는 접선방향 힘을 크리프 힘이라 하며 그 방향은 상대 운동에 의한 건마찰력의 방향과 거의 동일하다. 다만 경사가 있는 자유 차축의 운동은 기하학적 모드가 됨을 위에서 언급하였으나, 이 차축에 현가 장치가 부착되어 있으면 현가 장치가 작용하는 힘, 크리프 힘의 합력이 차축을 가속시킨다. 그림 3의 좌측 차축과 같이 횡변위가 발생된 차축을 직진 시키려 하면 굴름 반경이 큰 좌측 차륜에는 전방으로 향하는 크리프 힘이, 굴름 반경이 작은 우측 차륜에는 후방으로 향하는 크리프 힘이 작용되고, 이 힘에 의한 모멘트는 차축의 요오변위를 발생시킨다. 이 요오변위는 차축이 굴름 운동을 함에 따라 차축 중심을 궤도 중심 쪽으로 이동시킨다. 즉 횡변위 → 굴름 반경 차이 → 양 차륜에 작용하는 방향이 반대인 길이 방향 크리프 힘 → 요오 모멘트 → 요오 각변위 → 차축 굴름 기하학에 의한 차축의 중심 방향 횡변위 과정에 이르는 차축 횡변위와 요오 변위의 연성 및 횡변위의 피드백 루프가 형성된다. 이 피드백의 계인에 해당되는 차륜의 답면 경사도가 커지면 차축의 운동은 불안정해 질 수 있다. 벨트와 풀리에서 크리프 현상이 발생 된 것은 1700년대 말에 이미 알려져 있었으며, 1916년 카터에 의하여 최초로 크리프 힘이 철도 차량 동역학 해석에 도입되었다. 수학을 전공하였고 전기 견인 전동차 개발에 따라 영국 철도에서 전기공학 엔지니어로 활동하던 카터는 자신의 수학적 배경을 십분 활용하였다. Hertz의 접

촉 응력 이론을 활용하여 크리프 계수를 예측하였을 뿐 아니라 1900년대에 발달하기 시작한 항공기의 안정성문제, 또 교류 전동기의 안정성 문제 등에 적용된 Routh의 안정성 판별법(1877년)을 활용하였다. 당시로서는 기계공학자들에게는 생소하기만 하였던 안정성 문제를 철도 차량에 적용하여 전기구동 강제 대차, 증기 기관차 등 다양한 종류 차량들의 안정성을 판별하였다. 그러나 모든 것을 수계산에만 의존하다 보니 해석 대상 차량의 자유도는 제한될 수 밖에 없었고, 더욱이 다양한 매개변수들을 시도해보는 오늘날의 시뮬레이션은 생각하기 힘들었던 시대이니 만큼 설계 개선 방향은 제안하지 못하였으나 카터는 이전의 엔지니어들이 비싼 비용을 치르고서 경험에 의해서만 알 수 있었던 사실들을 이론 해석을 통하여 파악 함으로서 공학 발생 이래 넓기만 하였던 이론과 실무 사이의 간격을 매워 주기 시작한 선구자적인 엔지니어라 하겠다.

카터 이후 철차 안정성 연구는 지속되었으나 계산 능력의 부족으로 인하여 안정성 판정 다음 단계인 실질적인 설계 개선 방안을 제한하지는 못하였다. 그러나 1952년 일본의 철도 엔지니어인 마쓰다이라가 철차 안정성 관점에서 기본 설계 방향을 제안하게 되고, 이는 오늘날에도 가장 기본적인 방침으로 사용되고 있다. 원래 항공 엔지니어이었던 마쓰다이라는 2차대전 이후 일본 철도연구소에서 근무하게 된다. 항공기의 안정성 문제를 익히 알고 있던 그는 공탄성 문제에서 사용되는 기법을 사용하여 철도 차량의 안정성 문제를 취급하였다. 그 결과 차축의 관성이 철차를 운동을 불안정하게 하는 가장 큰 요인이라는 것을 파악하였으며, 이 관성 효과를 상쇄시키려면 위상인 반대인 힘을 발생시키는 요소 즉 스프링을 추가해주면 된다는 점에 착안한다. 즉 차축과 대차사이에 수평 방향 스프링을 설치함으로써 제한된 범위의 주행속도 이내에서 철차의 운동을 안정화 할 수 있게 된다. 이후 롤러 리그 실험에서 마쓰다이라는 이 사실을 확인하였다. 스티븐슨 이래 관습에 따라 강제 부착된 차축의 불안정, 커브 주행 성능만을 감안하여 자유롭게 회전할 수 있도록 설치된 대차의 불안정, 이

두 상황의 중간 즉 차축과 대차를 스프링으로 연결하면 철차의 안정성을 도모할 수 있다는 사실이 철차 탄생 이후 백여년이 지나서 실현된 것이다. 한편 유럽에서는 철차 운동 안정화 방안을 계속 모색하던 중 UIC (유럽 철도연합) 산하 연구소인 ORE (현재의 ERRI)에서 1954년 안정화 방안을 공모하게 된다. 마즈다이라는 이 공모에 논문을 제출하였으나 유럽인들이 1, 2위를 차지하고 그는 단지 3등에 그친다. 무엇이 부족하였던가 궁금해지기도 한다. 어쨌든 이를 계기로 그의 연구가 서방 철차 업계에도 알려지고 차축-대차간의 스프링 연결은 철차 안정화의 기본적인 방법으로 사용된다. 마즈다이라 역시 자신의 방법을 적용하면서 일본 신간선 열차 고속화에 연구에서 중요한 역할을 수행하게 된다.

이 후 역시 항공 엔지니어 출신인 Wickens가 영국 철도 연구소에 합류하면서 1960년대 전반에 걸쳐 철차 현탕 및 커브 주행 문제를 체계화하였고, 네델란드의 Kalker는 카터 이후 Johnson, Vermeulene 등으로 이어져 오던 크리프 이론을 정리하여 1967년 학위 논문으로 발표함으로써 현대 철차 동역학 이론의 기초를 완성하였다. 또 1969년 영국의 Newland와 Boocock이 각각 크리프 힘을 감안한 커브 주행 해석을 수행한 이후 크리프 힘은 커브 주행, 현탕 해석 모두에 적용되

기 시작하였다. 또 1960년대부터 컴퓨터를 이용한 수치 계산이 보편화되기 시작한 이래 오늘날에는 비선형 삼차원 크리프 힘, 마모되어 곡선이 된 차륜 단면과 플랜지 접촉까지 고려하는 비선형 기하학, 차량 각 구성요소들의 비선형 특성들까지를 망라하는 각종 시뮬레이션 결과들이 설계에 적용되고 연구 논문으로도 발표되고 있으며, 한국형 고속전철 사업과 더불어 국내에서도 이러한 연구 개발들이 활발하게 진행되고 있다.

주요 참고 문헌

- (1) Jean Alias, 1987, Le Rail, Eyrolles.
- (2) John Westwood, 1979, The Complete Books of Trains and Railways, Octopus Books Ltd..
- (3) ASME, 1979, Railway Mechanical Engineering: Car and Locomotive Design A Century of Progress.
- (4) Wickens, A. H., 1998, The Dynamics of Railway Vehicles - from Stephenson to Carter, Proc. Instn. Mech Engrs., Vol. 212, Part F.
- (5) Gilchrist, A. O., 1998, The Long Road to Solution of the Railway Hunting and Curving Problems, Proc. Instn. Mech Engrs., Vol. 212, Part F.