

철도차량의 공전 · 활주와 그 제어

(Slip-Slide and its Control of Railway Vehicles)

전문연구위원 송 희 국

1. 기술의 개요

- 철도차량의 점착(粘着)은 차량의 초기부터 문제가 되었다. 최초의 점착에 관한 문헌은 역행(力行)시의 공전(空轉)에 관한 것으로서, 1852년 Poiree의 주행(走行)시험 결과의 보고로 이미 점착계수는 주행속도와 축의 무게로 나타낸 식이 보고 되었다. 제동(Brake) 관계로는 1878년에 Galton의 보고에서 차량을 활주(滑走)시키는 것은 잘못으로 신속하게 정지하는 것이 필요하며, 제륜자(brake shoe)의 누르는 압력은 활주가 생기지 않는 범위에서 될 수 있는 한 높게 취해야 한다고 나타내고 있다. 또한, 1927년 Wichert & Michel의 논문을 시작으로 점착계수에 대한 주행시험(走行試驗)의 결과가 여러 가지로 발표되었다.

2. 기술의 내용

- 1944년 Curtius & Kniffler가 E19형 전기기관차(4동축 : driving axle, 4000kw, 교류정류자 전동기) 견인 객차 열차로 기관차의 1축의 주전동기에만 급전(給電)해서 50회 주행 중 261회의 공전(空轉)시험을 했다. 시험 속도에서 객차에 제동을 걸었을 때 주행속도가 떨어진다. 교류정류자 전동기는 직권 전동기이므로 같은 인가(印加)전압에서는 회전속도가 내려가면 전류와 토크는 증가한다. 따라서 이때 기관차의 운전 노치(변속장치)를 일정하게 해두면 인장력이 증가한다. 그렇게 해서 차축속도와 열차속도, 인장력의 변화에 대해 점착한계를 판단한다. 시험 중에 225회는 점착한계에 달하며 그 중 42회는 바로 공전을 일으켰다. 이들의 자료를 정리해서 점착한계의 인장력과 축 무게에서 점착계수를 구해서 도면화한 것으로 잘 알려졌다. 거기에서 레일 건조시, 습윤시(濕潤時)를 동시에 포함하는 점착계수의 실험식을 발표했다.

$$\mu_s = (7.5/V + 44) + 0.16$$

- 1944년 Pflanz는 Metzkow가 행한 디스크 브레이크(disk brake) 주행시험의 보고(1934년)에서 차량속도나 측정 차량의 연결(連結)면의 력측정(力測定) 차트를 상세히 분석해서 시시각각의 접선폭계수(점착력=전후방향 접선폭을 측무계로 나눈 것)를 구했다. Pflanz는 미끄럼 속도에 대한 접선폭 계수 특성을 아마도 처음으로 그래프화 하여 미끄럼 속도가 크게 되면 접선폭 계수는 낮아지는 것을 보였다. 일본에서는 D51 및 C58형 증기기관차(Steam Locomotive)를 사용해서 1943년에 주행시험을 실시하여 각종 식을 보고 했다. 접선폭 계수는 $\mu=0.232-0.0008V$ (레일습윤, 모래 살포 없음), $\mu=0.271-0.0008V$ (레일습윤, 모래 살포, 강모래)이다.
- 구주(Europe)에서의 점착계수의 실험식은 모두 평균치에 대해서 구한 것에 반해서 일본에서는 처음부터 하한치(下限値)에 착안했다. 1955년부터 1964년에 걸쳐 각종의 점착 성능실험이 실시되어 각종 차량에 대해서 점착계수의 실험식이 구해졌다. 일본의 신간선 전차에 대해서는 차륜(車輪)과 레조륜(rail wheel)을 사용한 모형 점착력 시험기에서 점착력 특성의 자료를 얻어서 여기에 그때까지 재래선(在來線)에 있어서의 점착계수의 실험식을 고려해서 다음과 같은 점착계수의 계획식(計劃式)이 도출되어 지금까지 사용 중이다. $\mu=27.2/(V+85)$ (레일 건조), $\mu=13.6/(V+85)$ (레일 습윤)
- 점착력의 향상 : 1969년의 ORE B44 위원회의 보고서에서 바람직한 모래의 특성은 석영 함유율 90% 이상, 점토 함유율 2% 이하, 입자직경 0.2~2.5mm로 적혀 있다. 또한 요사이 산사장치(散砂裝置) 대신 보다 간단한 세라믹 입자를 사용한 분사(噴射)장치도 실용화 하고 있다. 1950년대부터 차륜공전(空轉)시에 기관차의 차륜답면(踏面)에 주철제 브레이크 블록(brake block)을 가볍게 접촉시켜 공전 억지와 차륜 답면의 클리닝(cleaning) 작용으로 점착력을 개선하게 되었다. 신간선 전차에서는 일찌기 기계 브레이크 때에 블록(增點着 研磨子)을 차륜 답면에 대는 방식을 채용해 왔다.
- 측 무계 이동과 그 보상 : 인장력이나 브레이크력이 가해졌을 때 대차 내에 생기는 회전 모멘트나 기관차 전체에 생기는 회전 모멘트에 의해 차축하중이 변동하는 것을 측무계 이동이라 한다. 예를 들면 여기에는 1961년의 Gladigau의 보고가 있다. 차체와 대차를 링(ring)으로 연결해서 이것을 보상하는 기계적 측무계 보상이 제안되어 있다. 또한, 측무계 이동에 따른 인장

력이나 브레이크력을 변화시키는 전기적 축무게 보상도 실용화 되어 있다. 그러나 동특성(動特性)을 고려한 것은 아직 없다.

- 점착력의 특징 : 점착력의 발생은 차륜이 레일 상을 전동하고 있을 때 차륜과 레일 사이에 작용하는 전·후방향의 힘을 점착력 또는 접선력(接線力)이라 한다. 일반적으로 점착력도 미끄럼과 동시에 증가하여 어느 경우에 포화하고 다시 미끄럼이 커지면 점착력은 저하하는 경우가 많다. 접선력을 접촉하중 값으로 나눈 값을 접선력 계수라 하고, 접선력의 최대값을 접촉하중으로 나눈 값을 점착계수라고 부른다. 차륜과 레일은 롤링(rolling) 접촉하고 있고 접촉면 내에 전달되는 힘에 대응해서 미끄럼 영역과 고착 영역이 된다. 미끄럼이 적을 때는 거의 고착 영역으로 되는데 고착 영역에서는 차륜과 레일의 탄성변형으로 양자의 속도 차이가 흡수되고 힘은 정 마찰력으로서 전달된다.
- 미끄럼 영역에서 양자는 미끄러져서 힘은 동마찰력으로서 전달된다. 미끄럼이 영(0)에서 증가하면서 탄성 뒤틀림이 증가하여 점착력이 크게 되고 한편, 미끄럼의 증가와 함께 점착력은 포화한다. 고착 영역에 어떤 미소 미끄럼 영역에서는 차륜과 레일의 접선 방향의 탄성 변형이 미끄럼률에 대응되는 것으로 전달되는 힘과 미끄럼률의 관계를 이론적으로 되도록 했다. 미소 미끄럼 영역에서는 미끄럼률로 거동이 설명되지만 활주(滑走) 또는 공전(空轉) 상태에서는 차륜, 레일 접면(接面)이 모두 미끄럼 영역으로 되어 있고, 미끄럼 속도가 거동을 지배하고 있는 것으로 생각된다. 이제는 미끄럼률의 정의는 제동시에는 문헌에 의한 정의가 다르므로 주의를 요한다.
- 독일의 철도문헌에서는 자동차 공학 편람이 미끄럼비(比)와 같이 차륜 속도에 대한 차륜속도-주행속도의 비이다. 미끄럼률이 작을 때에는 차이가 작아 무시가 가능하지만 미끄럼률이 클 때에는 아무리해도 무시할 수 없다.
- 점착력과 속도는 회전 시험기에 의한 시험에서는 건조 상태에서는 고속도라도 점착계수의 저하는 알려지지 않는다. 반면에, 물이 있는 경우에는 속도의 상승과 함께 점착계수가 저하한다. 이러한 것은 차륜과 레일의 접촉 면에서 실제로 표면의 요철(凹凸) 때문에 실제로 금속끼리는 여기저기서 접촉되어 있지만 물의 끼어들음에 의해 속도의 상승과 함

게 참된 접촉면적은 적어진다고 생각된다. 실제의 주행에서는 미끄럼에 대한 점착력의 거동은 가지각색이다. 일반적으로 건조시에는 높은 점착력이 얻어지지만 미끄럼 속도에 대한 점착력의 저하는 크고, 습윤시에는 점착력이 건조시보다 낮지만 미끄럼 속도에 대한 점착력의 저하는 적다고 한다. 극단적인 예로, 차량담면이 거울면 같은 경우 습윤하에서 흡사 자동차의 타이어와 담면의 경우와 같이 큰 미끄럼으로 점착력은 최대로 된다고 보고되고 있다(독일의 고속열차 ICE 1 등).

- 공전·활주의 제어 : 유럽에서는 1970년에 인버터 제어 디젤 기관차 DE2500이 등장했다. 유도 전동기는 주어진 주파수에 대응하는 회전수 이상으로 되지 않기 때문에 일정한 제어 상태에서는 직류 전동기보다 급격한 토크의 속도 특성을 가지고 있어 점착을 높게 이용될 것으로 기대되었다. 당초의 인버터는 제어성능이 충분치 않아서 인버터의 발생 고주파, 인버터 입력 전압의 변동 억지, 회전계의 공진제어 등과 공전시의 제어를 양립시킬 필요가 있었다. 유럽에서 특히 주목되는 것은 독일에서의 연구로 대차 회전계(系)와 전기계(系)의 상태 방정식에서 회전계의 진동이 발산되지 않는 토크 제어 조건이나 공전제어 알고리즘을 보기 시작하고, 점착력이 최대로 되는 미끄럼을 유지하는 차륜 미끄럼 제어가 연구되었다.
- 차륜 미끄럼 제어 방식에서는 속도차를 기본으로 인장력의 저하가 일어나는 차륜미끄럼 제어로 점착력이 최대치 부근에서의 동작이 실현되고 있다. 습윤시 큰 미끄럼을 지속시키면 마찰열 등에 의해 물의 점도가 저하하기 때문인지 점착력이 향상하게 된다. 이와 같은 것으로 어느 정도까지 미끄럼을 허용해야 할지는 쉽사리 결론이 나지 않으나 미끄럽게 하면 손실이나 손모(損耗)가 발생한다.
- 일본에서는 초기의 인버터 제어 차량은 미끄럼 주파수 제어를 채용해서 저속범위에서의 토크 응답이 수백 ms로 늦어지는 등 전기 철도 차량으로서 공전제어나 필터, 콘덴서, 전압의 안정화 등으로 여러 가지 어려움이 있었다. 이제는 적어도 멀티 펄스(multi-pulse) 모터에 있어서는 각사(各社) 모두 벡터(vector) 제어를 채택하고 있다. 이 때문에 공전에 대한 주 전동기의 제어는 아주 쉬워졌다. 차량 속도의 고정밀도 검출에 의해 예를 들면 300km/h에서 1km/h의 적은 공전속도를 검출하는 일도 가능하게 되었다.
- 이와 같은 속도 검출을 하면 재 점착 제어는 공전 검지에서 인장력을 인하시

켜 재 점착 검지로 복귀시키는 것으로서, 인장력과 점착력과의 사이에 큰 차가 없을 때는 아주 잘 가고 있으나, 레일이 얼었을 경우 등 인장력과 발생된 점착력에 큰 차이가 있을 때는 점착력을 추정하지 않고 제어하면 모터 전류에 따라서 토크는 인하와 복귀를 반복해서 빗살모양으로 되어 버린다. 이것을 피하는 데는 점착력의 추정이 있어야 한다. 점착력의 최대값을 상시 탐색하는 제어를 직접하고 있는 것은 아직 나오지 않았다. 미끄럼에 대한 생각도 미끄럼 억지용 제어와 미끄럼 허용 제어가 함께 존재하고 있다. 큰 미끄럼을 허용하는 경우에는 (미끄럼속도 x 인장력 또는 제동력)의 손실이 발생하고 있어서 차륜이나 레일의 손모(損耗)나 온도의 영향을 염려할 필요가 있다. 제동에 있어서는 상용 브레이크를 모두 전기 브레이크로 갖춘 차량도 등장하고 있다. 전기 브레이크 만으로의 활주 재 점착 제어도 유럽에서 사용하기 시작했다.

3. 결론

- 점착의 메카니즘(mechanism)에 대해서도 최근에 와서 총합적인 시뮬레이션이 발표되었다. 차륜, 레일 접촉면의 3차원에서의 응력과 열 해석 등에 의한 주행시험으로 얻어진 점착력 특성곡선이 계산에 의해 재현될 수 있도록 되었다.
- 일본에서 신간선 전차의 초기 주행시험에서 연마된 레일에서는 점착계수가 두 배가 된다고 보고되었다. 이러한 것을 더욱 유효하게 이용하는 방법은 없을까? 접촉면의 거칠기를 이용하는 하나의 시도로서 세라믹 입자의 분사가 차츰 정착되고 있다. 레일에의 효과는 8열차의 통과까지 계속한다는 보고가 있다.
- 공전(空轉)이나 활주(滑走)시에도 차륜을 미끄럽게 하는 제어와 미끄럼 억지 제어의 어느 쪽이 좋은지 명확한 결론은 나오지 않았지만 여러 가지를 알려주는 내용이 나왔다. 차륜의 주행에 관한 여러 조건을 설정시험 결과를 고려하면 수 μm 의 거칠기가 차륜 또는 레일 표면에 확보되면 아직도 점착력의 향상이 시도될 가능성이 있다. 이 경우에는 미끄럼은 극히 적어서 좋을 것이다. 다시 주행속도와 함께 점착력이 저하하는 것은 수막의 개재와 바퀴무게(輪重) 변동 때문으로 언급된다. 레일 상을 차륜이 잘 미끄러지면서 전동되는 상태를 만들면 철차륜 철도의 속도한계는 전혀 별차원의 것으로 될 것이다.

◁ 전문가 제언 ▷

- 철도차량의 수송 분담율은 근년에 유류가 상승 등으로 증가일로에 있으며 서비스면에서 주택에서 주택까지 등 편리성 및 신속성에 착안을 하고 있다. 철도의 가장 큰 장점은 안전성과 수송비용 면에서 기타 수송 수단과 경쟁력이 있기 때문이다. 철도 당국은 안전운행에 최선을 다하기 위해 모든 운영은 규정에 따라서 하면서 차량 역시 정비, 점검기준에 따른 검사 및 정비를 하고 있다.
- 철도는 세계 어느 나라를 막론하고 대차에 대해서 새로운 시작품의 채택을 주저하고 있다. 반드시 차량에 부착하여 시험운행을 충분히 한 후에 채택 여부를 결정하고 있다. 우리나라의 경우 선진 각국에서 시작품 사용 예를 확인한 후 1970년대에 차축 베어링을 롤러 베어링으로 교체하기에 이르렀다.
- 철도차량 운행의 경제성으로 운전 편리성과 비용절약 면을 고려하여 마찰손실을 최소화하기 위해 선진국에서는 많은 연구원들이 100여년 상을 차륜과 레일간의 마찰계수의 실험식을 구하기에 이르렀다. 검토에서 언급된 바와 같이 각각 다른 환경조건에서 레일과 차륜간의 차량 운용시에 점착계수의 실험식들이 발표되었다. 이 식들은 서로 조건이 다르므로 약간 차이점이 있다. 우리나라에서도 한국 실정에 맞는 조건 하에서 기본 연구부터 시작하여 실험식이 도출되기를 바라며 여기에 근거하여 효율적인 운전 제어 조건이 확립되기를 바란다.