

# 철도차량의 제동성능 향상을 위한 점착현상에 관한 연구

전규찬 · 황동환 · 김대은\*

연세대학교 기계공학과 대학원  
\*연세대학교 기계공학과

## Wheel/Rail Adhesion for Improvement of Braking Performance

Gyu-Chan Jun, Dong-Hwan Hwang and Dae-Eun Kim\*

Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Yonsei University

\*Department of Mechanical Engineering, Yonsei University

**Abstract**—The adhesion between wheel and rail plays an important role in the braking performance of trains. Though there have been numerous studies on the characteristics of adhesion phenomenon, a general understanding from the physical point of view is still lacking. In this work, the adhesion mechanism between wheel and rail was investigated by studying the mechanisms of pure rolling and sliding experiments. Tests were performed under various conditions to determine the physical phenomenon responsible for adhesion between wheel and rail. The results of this study is expected to aid in improving the braking performance of trains.

**Key words**—wheel/rail adhesion, stick, slip, friction coefficient, adhesion coefficient.

### 1. 서 론

현재 교통수단에 큰 비중을 차지하고 있는 철도 차량은 기술의 발전으로 인한 고속화에 성공하여 300 km/h 대의 속도를 달성하기에 이르렀다. 열차가 고속화됨으로 인하여 열차 주행시 운동에너지가 더욱 커졌고 이를 소산하기 위한 제동 역시 더욱 중요하게 되었다. 특히 열차는 자동차와는 달리 많은 승객을 운송하므로 신뢰성 있는 제동이 매우 중요하다. 그러므로 열차의 제동시 기후변화에 따른 접촉변화에 대하여 차량의 활주없이 예측 가능한 제동거리로 안전하게 제동하는 것이 필수적이다. 차량의 활주가 발생하면 제동거리가 길어질 뿐만 아니라, 차량이 편마멸되어 진동이나 소음이 유발되어 승차감이 크게 저하된다. 또한 비상제동시에는 차량과 레일간의 점착력을 잘 활용하여 최단거리로 제동할 수 있게 하는 것이 필요하다. 이를 위해선 제동장치의 설계시 차량과 레일간의 점착현상의 이해가 필수적이다. 점착력이라 하면

제동이나 주행시에 차량과 레일간에 접선방향으로 발생하는 힘으로, 제동토크가 점착력으로 인한 모멘트보다 클 경우는 활주가 발생하며, 제동토크가 점착력으로 인한 모멘트보다 작은 경우는 충분한 제동을 하지 못한다는 것을 의미한다. 그러므로 열차의 제동장치 설계를 위해서 점착계수는 필수적인 요소가 되었으며 미국, 일본, 독일 등의 선진 각국에서는 점착계수를 측정하여 그 특성을 파악하려는 실험이 실험실 및 실차 차원에서 많이 행하여졌다[1-3]. 그러나 이들 연구에서는 각각 다른 접촉조건에 따른 실험이 진행되어 왔으며, 각 연구의 결과는 조금씩 다른 경향을 나타내었고, 점착현상에 관한 물리적인 설명은 아직 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 차량과 레일간에 발생하는 점착현상을 파악하기 위해 순수 미끄럼, 순수 구름 실험을 하여 이를 바탕으로 접촉조건에 따른 점착현상의 메커니즘을 제시함으로써 점착계수의 물리적 이해를 확립하여 제동성능향상을 위한 기반을 구축하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2-1. 점착계수의 의미

마찰현상을 크게 두가지 관점에서 보면 미끄럼마찰과 구름마찰로 나누어 생각할 수 있다. 미끄럼시 수직항력에 대한 마찰력의 비를 미끄럼 마찰계수라하고, 구름시에는 수직항력에 대한 접촉면 접선방향의 힘을 구름저항이라하며 그 비를 구름저항계수라 한다. 일반적으로 구름저항계수는 미끄럼 마찰계수에 비해 10분의 1배 이하의 값을 가지게 된다. 그러나 자동차나 열차의 바퀴에 제동을 부과할 경우에는 추가적인 구름저항이 발생하여 미끄럼 마찰계수와 비슷한 값을 가지게 된다. 이 경우의 구름저항계수를 Fig. 1 에서와 같이 점착계수라 하며 구름저항은 점착력이라 한다. 이 점착계수는 차륜과 레일간의 접촉하중, 접촉조건, 차륜크기, 차륜재질, 속도 등에 의하여 결정되며 제동력의 한계를 결정한다.

점착력이 작용하는 차륜과 레일간 접촉면의 특성을 보면 Fig. 2와 같다[5].

Fig. 2와 같이 접촉면의 형상은 타원형이며 stick부와 slip부로 나뉘어져, 앞부분에는 stick부가 생성되고 뒷부분에는 slip부가 생성된다. 점착력에 의한 전단응력은 slip부가 stick부 보다 큰 값을 갖는다. 미세한 요철의 접촉면 내에 존재하는 이러한 slip을 micro-slip이라 하며 통상적인 미끄럼 운동에서의 slip과 구별된다. 이러한 micro-slip은 제동력이 커질수록 그 slip부가 점점 증가하여 제동력이 점착력과 같아질때 접촉면은 전부 slip부가 되어 미끄럼이 발생한다. 100% slip이 발생하기 전까지의 점착계수는 접촉면의 stick-slip의 면적비와 각 부에서의 마찰계수로부터 결정되

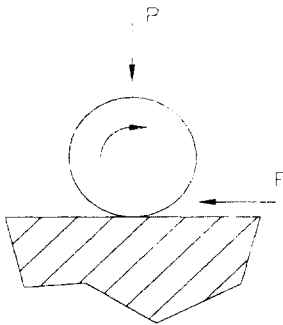


Fig. 1. Definition of adhesion coefficient (F: Adhesion force, P: Normal load, Adhesion coefficient=F/P [4]).

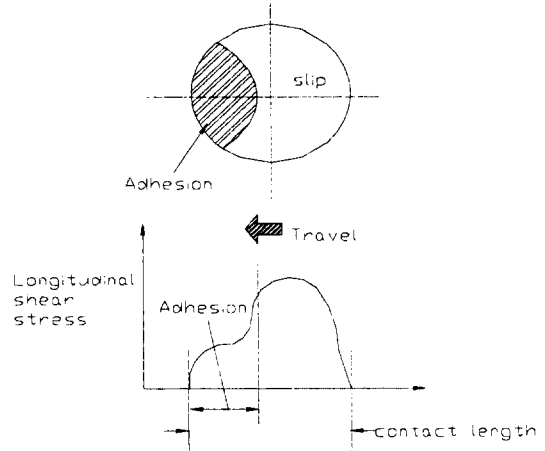


Fig. 2. Shear stress in contact area [5].

며, stick-slip의 면적비와 각 부에서의 마찰계수는 제동력 뿐만 아니라 접촉상태등 외부 조건에 의해 결정된다. 그러므로 점착계수를 다음의 식 (1)과 같이 정리해 볼 수 있다.

$$\mu_a = \frac{A_{stick}}{A_{total}} \times \mu_{stick} + \frac{A_{slip}}{A_{total}} \times \mu_{slip} \quad (1)$$

$\mu_a$  : 점착계수

$\mu_{stick}$  : stick에 의한 마찰계수

$\mu_{slip}$  : slip에 의한 마찰계수 (미끄럼 마찰계수값)

$A_{total}$  : 접촉면의 전체면적

$A_{stick}$  : stick부의 면적

$A_{slip}$  : slip부의 면적

즉, 점착현상은 접촉면내의 stick부와 slip부의 마찰계수 및 면적비로 결정된다고 할 수 있다. 이때 stick부는 순수 구름에 의해 나타나는 현상이며, slip은 순수 미끄럼에 의해 나타나는 현상이라 가정하고 이러한 점착현상의 이해를 도모하기 위해서 여러 접촉조건, 속도, 하중의 경우에 대하여 순수 미끄럼 및 순수 구름경우의 마찰 실험을 통해 독립적으로 고찰하고자 한다. 또한 여러 조건에 따른 기존의 점착계수값을 파악하여 그 경향을 보고자 한다.

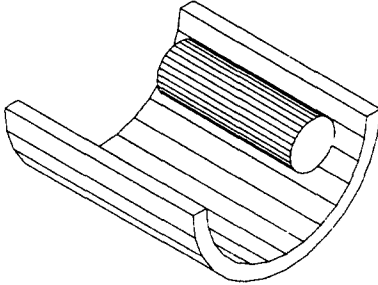
### 2-2. 실험을 통한 점착현상의 물리적 이해

#### 2-2-1. 실험기구 및 방법

순수 미끄럼의 경우와 순수 구름의 경우의 접촉조건(건식, 습식, 오일)에 따른 마찰현상을 파악하기 위

**Table 1. Chemical composition of 60 kg rail specimen**

C	Si	Mn	P	S
0.63~0.75	0.15~0.30	0.70~1.10	~0.03	0.025

**Fig. 3. Rolling plate.**

하여 다음과 같은 실험을 하였다. 순수 미끄럼 실험에 사용된 레일 시편은 Table 1의 성분과 같고 실험기구는 pin-on-disk tribotester를 이용하였으며, 순수 구름 실험은 Fig. 3과 같은 구름대를 사용하였다.

구름대실험의 원리는 일정한 위치에너지가 구름으로 인하여 감소되는 정도를 파악하여 접촉현상을 이해하기 위한 것으로 Fig. 3과 같은 곡면의 강판 위에 원통모양의 시편을 일정한 높이에서(slip이 발생하지 않는 적당한 높이) 굴러 정지할 때까지의 시간을 측정한다. 이 시간은 구름시의 구름저항과 직접적인 관계가 있으므로 정지시간으로 구름저항특성을 상대평가할 수 있다.

## 2-2-2. 실험조건 및 결과

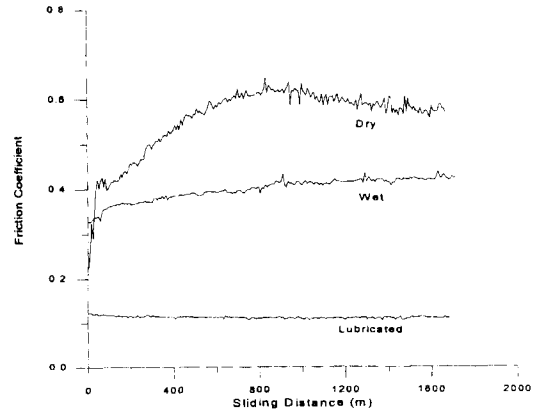
### ① 순수 미끄럼 실험

실험에 적용된 실험조건은 다음과 같다.

- 시편 : 60 kg 레일(경도 : HV 약 240)
- 수직하중 : 500 g
- 접촉응력 : 약 3500 Pa
- 속도 : 0.08 m/s
- 온도 : 24°C 습도 : 46%
- 접촉조건 : 건식, 습식(수분), 오일상태(범용 윤활유)

Pin-on-disk 실험장치를 이용하여 마찰계수를 측정 한 결과는 Fig. 4와 같다. 실험결과는 3번의 실험을 평균처리한 것이다.

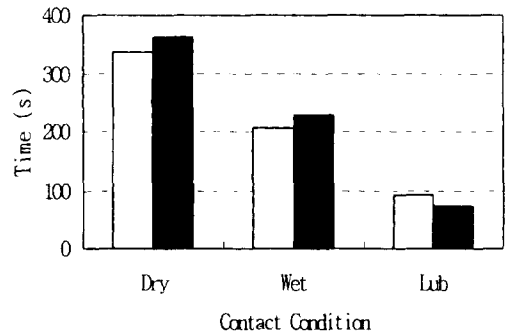
미끄럼 접촉에 있어서는 건식의 경우 마찰계수가 최대 0.62, 정상상태에서는 약 0.55정도를 나타내며, 습식, 오일상태의 순으로 마찰계수가 0.40, 0.12정도

**Fig. 4. Friction coefficient with respect to the contact conditions (Dry, Wet, Lubricated).**

로 작아지는데, 이는 습식과 오일이 존재할 경우 접촉면이 경계유희상태로 변하면서 기계적 간섭량이 줄어들어 요철간의 plowing 및 흠착을 감소시키기 때문이라 생각된다. 점도와 압력-점성계수가 높은 윤활제일 수록 압력에 대한 저항이 증가하여 유희효과가 더 커지고, 따라서 이로인한 요철간의 간섭을 더 줄일 수 있을 것으로 생각된다. 특히 건식의 경우 마찰계수가 큰 것은 기계적 마찰로 인해 발생한 마멸입자가 접촉면사이에 삽입되어 마찰력을 증폭시키기 때문인 것으로 사료된다.

### ② 순수 구름 실험

Steel (SM45C)시편에 대해 각각 건식, 습식, 오일상태(위의 순수 미끄럼 접촉 실험과 동일)로 접촉조건을 변화시켜가면서 무게가 서로 다른 실린더(2.8 kg, 15.7 kg)가 정지하는 시간을 측정한 결과를 Fig. 5에 나타

**Fig. 5. Comparison of elapsed time to stop with respect to the contact conditions. □: Light (2.8 kg), ■: Heavy (15.7 kg).**

내고 있다. 각 실험결과는 5번의 실험결과를 평균한 것이다.

구름대 실험의 경우, 건식, 습식, 오일상태로 갈수록 정지시간이 짧아지는데, 이와 같이 정지 시간이 단축된다는 것은 에너지의 소산이 더욱 빨리 이루어진다는 것을 의미하며, 이러한 에너지 소산의 증가는 구름저항의 증가와 관계가 있다. 이때 구름저항의 증가요인은 윤활제의 점성에 의한 감쇠효과 및 표면장력을 들 수 있고, 또한 마이크로 관점에서의 slip 증가로 인한 구름저항의 증가를 생각해 볼 수 있다. 이와 같은 경향은 무게를 5배정도 증가시킨 시편의 경우(15.7 kg) 역시 습식, 오일상태로 갈수록 정지시간이 짧아지는 것으로 확인할 수 있다. 무게가 다를 경우 구름대를 구르는 시편의 관성력이 서로 차별화되어 정지시 까지의 시간에 영향을 줄 것으로 예상되었으나 결과에서 보듯이 시편의 질량에 관계없이 비슷한 시간에 정지하는 것을 알 수 있다. 따라서 구름접촉에서 발생하는 구름저항은 질량의 증가에 따라 그 저항력도 일정비율로 함께 증가하며 이때의 비율이 구름저항계수 또는 접촉계수로 표현될 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

**2-3. 실차 및 실험장치로 측정된 접촉계수**

서론에서 제시하였듯이 접촉계수는 접촉조건에 대하여 여러 연구기관에서 실차 및 실험장치로 측정된 바 있다. 그 결과를 앞서 한 순수 미끄럼 및 구름 실험들과 연관시켜 다음과 같이 분석할 수 있다.

차륜과 레일의 접촉계수는 접촉부의 상태에 대하여 민감하게 반응한다. 같은 레일이라 할지라도 이전에 오일이 묻었던 것과 그렇지 않은 것에 따라 접촉계수는 큰 차이를 보일 수 있다. 건조한 상태, 비가 온 후의 습식상태, 그리고 열차에서 나온 오일이나 횡단보도부근의 자동차에서 나온 오일류에 의해 오염된 상태일 경우에 대하여 접촉계수변화가 측정되었다. Isaev와 Golubenko [2]가 실시한 실험실차원의 rolling tester를 이용하여 측정된 접촉계수를 살펴보면 Table 2와 같다.

Table 3은 Kumar [6]가 rolling tester로 실험한 측정 결과이며, Table 2의 실험결과와 비교해 볼 때 접촉계수값은 다르지만 같은 경향을 나타낸다는 것을 알 수 있다.

그러나 Moore [5]가 발표한 실차실험에서는 같은 트랙을 반복적으로 구르는 rolling tester와는 달리 마

**Table 2. Adhesion coefficients with respect to the contact conditions [2] (Normal load 110 kN)**

Contact condition	Slip ratio (%)	Adhesion coefficient
Clean dry rail with sand sprayed	2.9	0.62
Dry rail cleaned of oil	3	0.52
Dry and clean rail	3	0.49
Wet rail with sand	2	0.45
Rail with water	4	0.25
Rail with thin film of grease	1.5	0.17

**Table 3. Adhesion coefficient respect to the contact conditions [6]**

Contact condition	Slip ratio (%)	Adhesion coefficient
Sanding on oily surface	1.4	0.56
Water	0.3	0.25
Oil on sanded surface	0.2	0.17
Diesel Fuel	1.5	0.06
Oil	3.5	0.04

**Table 4. Adhesion coefficient respect to the contact conditions [5] (experiment conducted on railway train)**

Contact condition	Adhesion coefficient
Dry rail	$0.25 \leq f_s \leq 0.30$
Wet rail	$0.18 \leq f_s \leq 0.20$
Light snow on rail	0.10
Wet leaves on rail	0.07

멸입자의 영향이 작으므로 Table 4와 같이 건식조건에서는 더 작은 접촉계수값을 갖는다.

건식, 습식, 오일 순으로 접촉계수가 작아지는 경향은 본 연구에서 실시한 순수 미끄럼 실험결과와 같고, 순수 구름운동결과와는 반대의 경향이다. 따라서 차륜과 레일의 접촉현상의 지배 인자는 slip이라 생각되며, 접촉계수가 건식, 습식, 오일 순으로 감소하는 이유는 식 (1)  $\mu_a = \frac{A_{stick}}{A_{total}} \times \mu_{stick} + \frac{A_{slip}}{A_{total}} \times \mu_{slip}$  에서  $\mu_{slip}$  이 작아지기 때문이라 볼 수 있다. 즉 두 물체 사이에 물이나 오일이 첨가되어 막이 생성되면 Fig. 6에서와 같이 요철간의 간섭량이 줄어들어  $\mu_{slip}$  이 작아질 것이다. 또한,  $\mu_{stick}$  은 두 물체의 분리로 인하여 작아질 수도 있고, 순수 구름 실험에서와 같이 점성으로 인하여 증가 할 수도 있지만, 그 영향이  $\mu_{slip}$  의 감소에 비해 무시할 정도라고 생각된다. 접촉조건에 따른 stick/

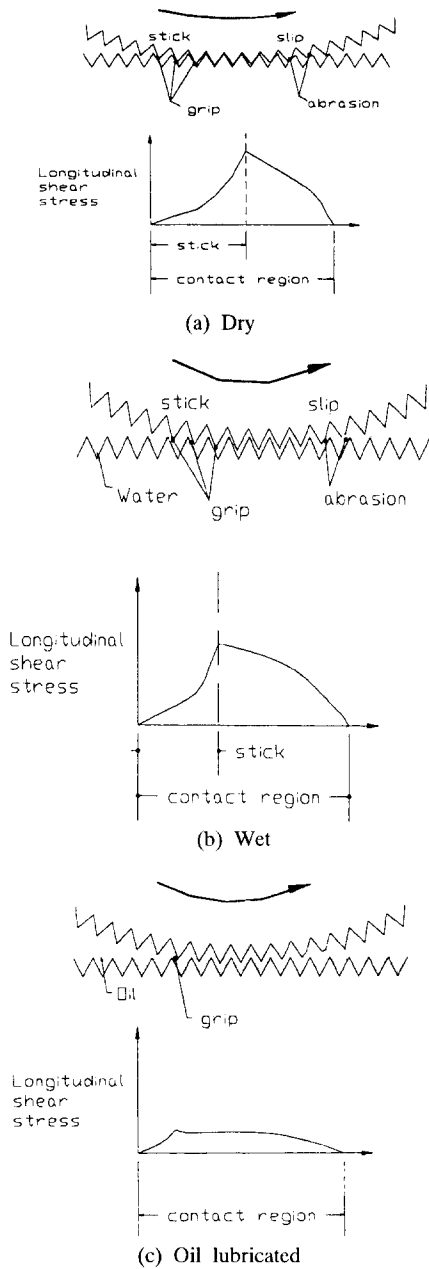


Fig. 6. Possible contact mechanism and shear stress according to the contact conditions.

slip의 면적비는 Fig. 6과 같이 건식, 습식, 오일의 순으로 slip이 발생할 가능성이 커져 slip부의 면적이 점점 증가하는 것으로 생각되며, 이와는 반대로 순수 미끄럼 실험결과와 같이 건식, 습식, 오일순으로 slip부

Table 5. Comparison of adhesion coefficient with friction coefficient

Contact condition	Adhesion coefficient (ref [2,6])	Friction coefficient (experiment)
Dry	0.49-0.52	0.58
Wet	about 0.25	0.43
Oil lubricated	0.17 (grease) 0.04 (oil)	0.11 (lubricant)

의 마찰계수가 감소하여 궁극적으로는  $\mu_a$ 가 감소하는 것으로 사료된다. 점착력은 Fig. 6의 접선방향응력의 적분값에 비례하는데 건식, 습식, 오일의 순으로 그 적분값이 작아진다.

### 3. 고찰

참고문헌에서 제시된 rolling tester로 측정된 점착계수와 순수 미끄럼실험을 통해 얻은 마찰계수를 비교하면 Table 5와 같다.

전반적으로 미끄럼 마찰계수와 차륜/레일간의 점착계수는 비슷한 값을 나타낸다. 그러므로 slip과 stick이 같이 일어나는 차륜/레일 접촉에 있어서 slip의 영향이 큰 것으로 생각되며 경향적인 측면에서는 미끄럼실험으로도 차륜/레일의 점착특성을 예측할 수 있으리라 사료된다.

### 4. 결론

접촉조건이 건식, 습식, 오일상태로 변화할 때 점착계수는 건식, 습식, 오일의 순으로 점착계수( $\mu_a$ )가 감소한다. 그 이유는 습식, 오일속에서의 접촉에서는 표면간의 기계적 간섭의 감소로 점착현상의 지배적인 요소인  $\mu_{stick}$ 이 감소하는데 그 원인이 있다고 생각된다. 그러므로 각 접촉조건에 따른 점착계수 한계치를 파악한 뒤 그 한계치내의 제동력을 설정하여 차륜의 고착을 방지하고 점착력을 최대한 이용함으로써 제동 성능을 향상시킬 수 있다.

### 후기

본 연구는 한국기계연구원에서 주관하는 고속전철 사업의 위탁과제의 일환으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

1. Shirai, S., "Adhesion Phenomena at High-Speed Range and Performance of an Improved Slip-detector," Quarterly Reports, Railway Technical Research Institute, Vol. 18, No. 4, pp. 189-190, 1977.
2. Isaev, I. P. and Golubenko, A. L., "Improving Experimental Research into Adhesion of the Locomotive Wheel with the Rail," Rail International, pp. 3-10, August/September 1989.
3. Ohyama, T., "Some basic studies on the influence of surface contamination on adhesion force between wheel and rail at high speed," Quarterly Report, Railway Technical Research Institute, Vol. 30, No. 3, pp. 127-135, 1989.
4. 김의일 편집, 운전이론, 철도전문대학, pp. 136-160, 1995.
5. Moore, D. F., Principles and Applications of Tribology, PERGAMON PRESS, pp. 302-330, 1975.
6. Kumar, S., "Wheel-rail wear and adhesion with and without sand for a north american locomotive," J. of Engineering for Industry, Vol. 105, pp. 141-147, 1986.