

Wheel/rail의 점착현상의 물리적 이해

전 규 찬* · 황 동 환* · 김 대 은**

* 연세대학교 기계공학과 대학원

** 연세대학교 기계공학과

On the Physical Mechanism of Wheel/Rail Adhesion
Gyu-Chan Jun · Dong-Hwan Hwang · Dae-Eun Kim

1. 서론

현재 교통인구 비중에 큰 비중을 차지하고 있는 철도 차량은 기술의 발전으로 인한 고속화에 성공하여 300km/h대의 속도를 달성하기에 이르렀다. 열차가 고속화됨으로 인하여 열차 주행시 운동에너지가 더욱 커졌고 이를 소산하기 위한 제동 역시 더욱 중요하게 되었다. 열차의 제동시 중요한 점은 wheel의 skidding을 방지함으로 wheel의 편마멸을 줄이는 것이며 이를 위해선 제동장치의 설계시 wheel과 rail간의 점착현상의 이해가 필수적이다. 제동력이 점착력보다 클 경우는 skidding이 발생하며 제동력이 점착력보다 작은 경우는 충분한 제동을 하지 못한다는 것을 의미한다. 그러므로 열차의 제동장치를 설계함에 있어서 점착계수는 필수적인 요소가 되었으며 미국, 일본, 독일 등의 선진 각국에서는 점착계수를 측정하여 그 특성을 파악하려는 실험이 실험실 및 실차 차원에서 많이 행하여졌다[1-4]. 각각 다른 접촉조건, 속도 등에 따른 실험이 진행되어 왔으나 각 연구의 결과는 조금씩 다른 경향을 나타내었고, 점착현상에 관한 물리적인 설명은 못하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 wheel과 rail의 접촉인 경우에 있어 점착현상의 변화를 속도, 하중, 접촉조건에 따른다고 보고 점착현상의 특성을 각각 sliding, pure rolling 실험을 통해 파악하고 기타 참고문헌에서 발표된 점착계수와 비교하여 물리적으로 이해하고자 하였다.

2. 본론

2.1 점착계수의 의미

마찰현상을 크게 두가지 관점에서 보면 sliding과 rolling으로 나누어 생각할 수 있다. Sliding시 수직항력에 대한 마찰력의 비를 마찰계수라 하고, rolling시에는 수직항력에 대한 접촉면 접선방향의 힘의 비를 rolling resistance라 한다. 점착력이라하면 rolling 현상 중의 하나인 wheel이 구를 때 rail과 wheel사이의 접촉면의 접선방향으로 구름운동을 반대하는 방향으로 생기는 힘을 말하며 수직하중에 대한 점착력의 비를 점착계수라 한다 [4].

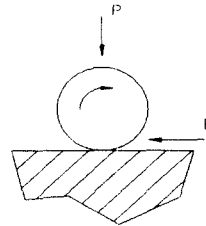


Fig. 1 점착계수의 정의
F:점착력 P:수직하중
점착계수 = F/P

점착계수는 속도, 접촉조건, wheel크기, 접촉하중등에 영향을 받으며 제동시 혹은 주행시에도 다른 값을 나타낸다. 점착현상을 이해하기에 앞서 wheel과 rail간의 접촉상태를 이상화하여 보면 Fig 2와 같다 [5].

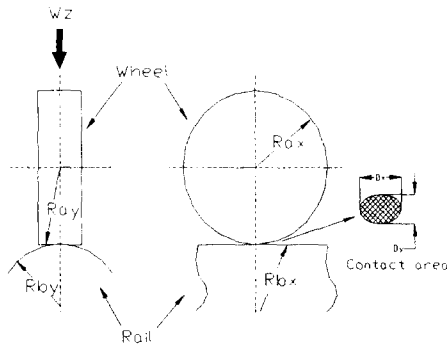


Fig. 2 Wheel/rail간의 접촉

여기서 다음과 같은 조건하에서 wheel과 rail 간의 Hertzian 접촉의 특성을 계산한다.

$$\begin{aligned}
 w_2(\text{wheel 하나에 받는 수직하중}) &: 10^5 \text{ N} \\
 \text{wheel과 rail의 탄성계수(Pa)} &: 2.07 \cdot 10^{11} \\
 \text{프와송비} &: 0.3 \\
 R_{ax} = 0.5\text{m} & \quad R_{ay} = \infty \\
 R_{bx} = \infty & \quad R_{by} = 0.3\text{m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D_1(\text{접촉면의 단축지름}) &= 9.59 \text{ mm} \\
 D_2(\text{접촉면의 장축지름}) &= 13.27 \text{ mm} \\
 \delta(\text{변형량}) &= 0.163 \text{ mm} \\
 P_{\max}(\text{최고 접촉압력}) &= 1.5 \text{ GPa}
 \end{aligned}$$

또한 위의 접촉조건에 물이나 윤활유가 있을 경우를 살펴보면 위의 δ , P_{\max} 값으로 볼 때, 그 윤활상태는 elastohydrodynamic lubrication 이 되며 속도에 따른 최소유막두께변화를 계산해 보면 Fig. 3, 4과 같이 된다 [5].

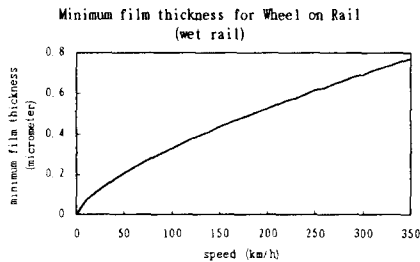


Fig. 3 최소막두께 (Wet)

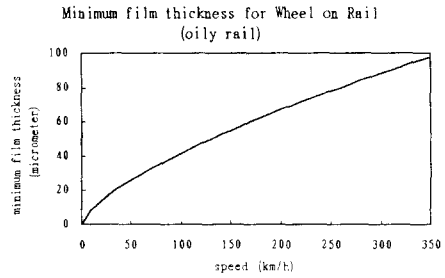


Fig 4 최소막두께(Oily)

즉 속도가 증가할수록 윤활막의 두께가 증가하는 경향을 나타내고 점도가 높은(0.1 Pa·s) oil의 경우가 100배가량 더 두꺼운 막을 가지게 된다. 한편 접촉면의 모양은 타원형이며 제동시는 Fig. 5와 같은 성분을 가진다 [6].

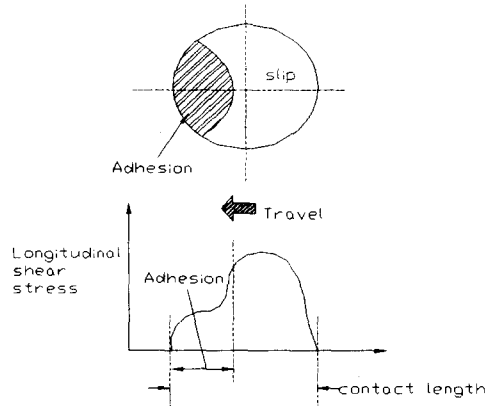


Fig. 5 접촉면의 전단응력

이 때 접촉면의 adhesion-slip비가 점착력에 영향을 주며 adhesion-slip비는 속도, 하중, 접촉상태에 의해 영향을 받는다. 따라서 점착계수를 다음과 같이 가정해 본다.

$$\mu_f = A_{adhesion} \cdot \mu_{adhesion} + A_{slip} \cdot \mu_{slip}$$

μ_f : 점착계수

$\mu_{adhesion}$: adhesion에 의한 마찰계수

μ_{slip} : slip에 의한 마찰계수

$A_{adhesion}$: adhesion부의 면적비

A_{slip} : slip부의 면적비

즉, 점착현상은 접촉면내의 adhesion부와 slip 부의 마찰계수 및 면적비로 결정된다고 할 수 있다. 이 때 adhesion부는 pure rolling에 나타나는 현상이며 slip은 pure sliding에 나타나는 현상이라 가정하고 이러한 점착현상의 이해를 도모하기 위해서는 각각의 경우에 대하여 독립적으로 고찰하도록 한다.

2.2 실차 및 실험장치로 측정된 점착계수

서론에서 제시하였듯이 점착계수는 여러 관점(접촉조건, 속도, slip ratio, 수직하중등)에 대하여 실차 및 실험장치로 측정된 바 있다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

2.2.1 접촉조건에 따른 점착계수

Wheel과 rail의 점착계수는 접촉부의 상태에 대하여 민감하게 반응한다. 같은 rail이라 할지라도 이전에 오일이 묻었던 것과 그렇지 않은 것에 따라 점착계수는 큰 차이를 보일 수 있다. 건조한 상태, 비가 온 후의 wet상태, 그리고 열차에서 나온 oil이나 횡단보도부근의 자동차에서 나온 oil류에 의해 오염된 상태일 경우에 대하여 점착계수변화가 측정되었다. 실험실차원의 rolling tester를 이용하여 측정된 점착계수를 살펴보면 다음과 같다.

Table 1 접촉조건에 따른 점착계수 [2]
(수직하중 110kN)

접촉 조건	Slip ratio(%)	점착계수
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 2 역시 rolling tester로 측정된 결과이며 Table 1의 실험결과와 비교해 볼 때 점착계수값은 다르지만 같은 경향을 나타낸다.

Table 2 접촉조건에 따른 점착계수 [7]

접촉 조건	Slip ratio(%)	점착계수
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

그러나 실차실험에서는 같은 트랙을 반복적으로 rolling하는 rolling tester와는 달리 마멸입자의 영향이 적으므로 Table 3과 같이 dry조건에서 더 작은 점착계수값을 갖는다.

Table 3 접촉조건에 따른 점착계수(실차) [6]

접촉 조건	점착계수
Dry rail	$0.25 \leq f_o \leq 0.30$
Wet rail	$0.18 \leq f_o \leq 0.20$
Light snow on rail	0.10
Wet leaves on rail	0.07

2.2.2 속도에 따른 점착계수

일반적으로 마찰에 있어 속도증가는 온도, strain rate의 증가, 또는 히스테리시스로 인한 에너지 손실의 감소 등으로 해석 될 수 있다. 열차가 고속화되면서 속도에 대한 점착계수변화가 더욱 중요하여 여러 실험에 의해 산출된 실험식이 있는데 속도가 증가할수록 점착계수는 감소하는 경향을 가지고 있고 정리하면 Fig. 6과 같다.

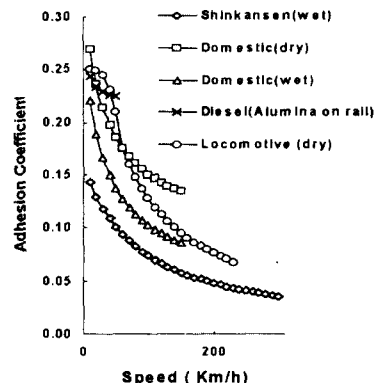


Fig. 6 속도와 점착계수 관계[3,4,6,7,8]

2.2.3 Slip ratio에 따른 점착계수

Slip ratio라하면 매크로한 관점에서 rolling에 있어 slip이 차지하는 비를 말한다. 순수구름운동보다는 적당한 slip을 갖는 운동이 더 큰 점착계수를 보였다.

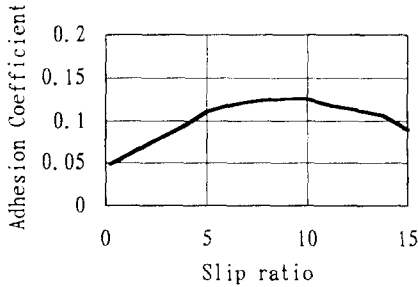


Fig. 7 Slip ratio와 점착계수의 관계 [9]

2.2.4 수직하중과 점착계수의 관계

Fig. 8과 같이 수직하중에 대한 점착계수의 변화는 없다고 볼 수 있다.

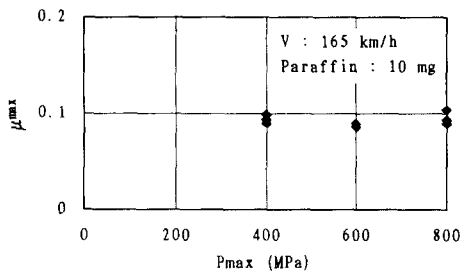


Fig. 8 수직하중과 점착계수의 관계 [3]

2.3 실험을 통한 점착현상의 물리적 이해

Sliding시와 매크로관점에서의 pure rolling시의 마찰현상을 파악하기 위하여 다음과 같은 실험을 하였다. sliding실험에 사용된 rail 시편은 Table 4의 성분과 같고 실험장치는 pin-on-disk tribotester(Fig. 9)를 이용하였으며 pure rolling실험은 Fig. 10과 같은 구름대를 사용하였다.

Table 4 실험된 60 Kg 레일시편 화학성분

C	Si	Mn	P	S
0.63	0.15	0.70	0.030	0.025
~0.75	~0.30	~1.10	이하	이하

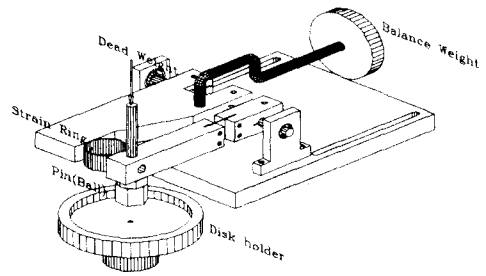


Fig. 9 Pin-On-Disk Tribotester

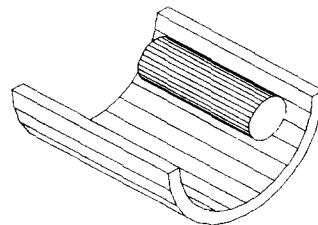


Fig. 10 구름대

구름대실험의 원리는 일정한 위치에너지가 rolling으로 인하여 감소되는 정도를 파악하여 점착현상을 이해하기 위한 것으로 Fig. 10과 같은 곡면의 steel plate 위에 cylinder모양의 시편을 일정한 높이에서(slip이 발생치 않는 적당한 높이) 굴러 정지할 때까지의 시간을 측정한다.

2.3.1 접촉조건과 점착계수의 관계

각 조건(Dry, Wet, Lubricated)에 대하여 sliding과 pure rolling 마찰 실험을 하였다.

① Sliding 실험

실험에 적용된 실험조건은 다음과 같다.

- 시편 : 60kg 레일 (경도 : 약 HB 240)
- 수직하중 : 500 g
(하나의 Wheel이 받는 하중 : 8000 kg)
- 접촉응력 : 약 3500 Pa
(일반전철의 경우 : 약 600~700 MPa)
- 속도 : 0.08m/s
(고속전철의 경우 : 300 km/h ≒ 80 m/s)
- 온도 : 24℃ 습도 : 46 %
- 접촉조건 : Dry, Wet, Lubricated
(범용 윤활유)

Pin-on-disk 실험장치를 이용하여 마찰계수를 측정한 결과는 다음과 같다.

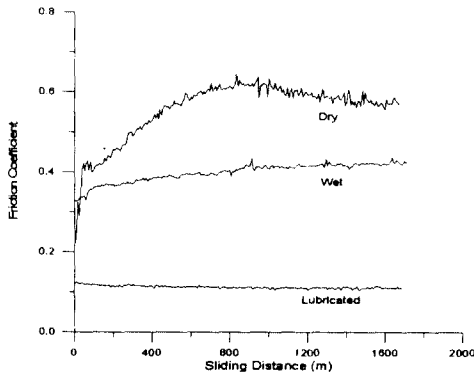


Fig. 11 접촉조건에 따른 마찰계수 (Dry, Wet, Lubricated)

Sliding에 있어서는 wet, lubricated의 상태로 갈수록 마찰계수가 작아지는데 이는 윤활막이 형성되어 기계적 간섭량이 줄어들고 고체간의 직접적 접촉이 감소함으로써 고체간의 plowing 및 adhesion을 감소시키기 때문이라 생각된다. 점도와 pressure - viscosity coefficient가 높은 윤활제일수록 압력에 대한 저항이 커져 윤활막이 더 두꺼워지므로 간섭을 더 줄일 수 있을 것으로 생각된다. 특히 Dry의 경우 마찰계수가 큰 것은 기계적 마찰로 인한 마멸입자가 마찰력을 증폭시키기 때문이다.

② Rolling 실험

실험에 적용된 실험조건은 다음과 같다. Steel로 된 시편에 대해 각각 dry, wet, lubricated등으로 접촉조건을 변화시켜가면서 무게가 서로 다른 실린더(2.8kg, 15.7kg)가 정지하는 시간을 측정된 결과는 Fig. 12와 같다.

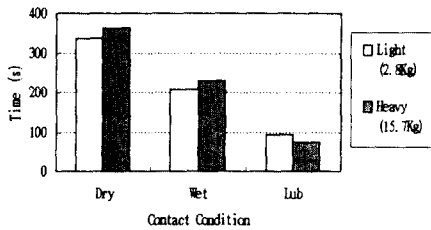


Fig. 12 접촉조건에 따른 정지시간

Rolling에 있어서는 wet, lubricated의 상태로

갈수록 정지시간이 짧아지는데 이는 에너지손실이 크다는 것을 의미한다. 이것은 윤활제의 damping 및 표면장력에 의한 에너지손실과 마이크로관점에서의 slip 증가로 인한 에너지손실의 증가때문이라고 생각된다. 무게가 5배정도 증가시킨 시편의 경우 역시 wet, lubricated상태로 갈수록 정지시간이 짧아졌다.

2.3.2 속도 및 온도와 점착계수의 관계

속도에 대한 sliding 실험은 각 접촉조건(dry, wet, lubricated)에 대하여 속도를 0.08m/s, 0.4m/s, 0.6m/s, 0.8m/s로 변화시켜 행하였고 또한 온도가 증가할 경우에 대하여 sliding 실험 및 pure rolling 실험을 행했다.

① Sliding 실험결과

▪ 속도변화

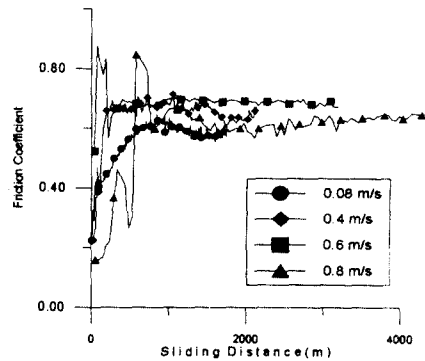


Fig. 13 속도변화에 따른 마찰계수 (Dry)

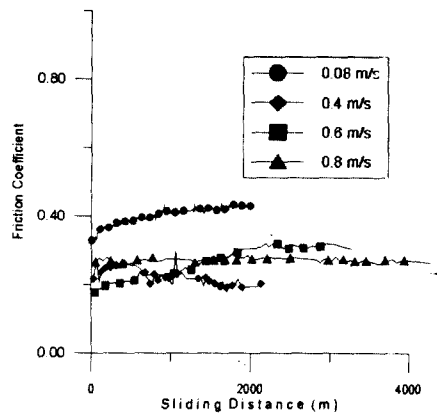


Fig. 14 속도변화에 따른 마찰계수 (Wet)

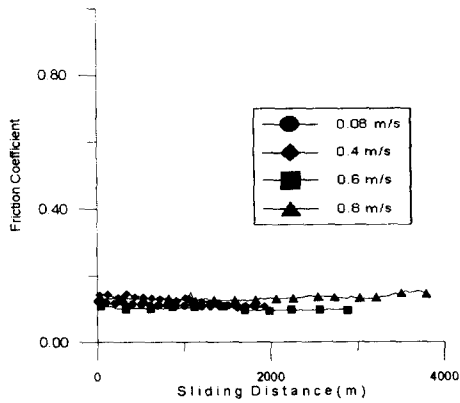


Fig. 15 속도변화에 따른 마찰계수 (Lubricated)

· 온도변화

Rail시편을 약 400℃까지 가열한 후 공기중에 냉각하면서 실험하였다. 가열된 시편은 냉각하면서 표면에 산화막을 형성하는데 이 산화막의 영향을 측정하기 위해 실험실온도에서 마찰계수를 측정하였다.

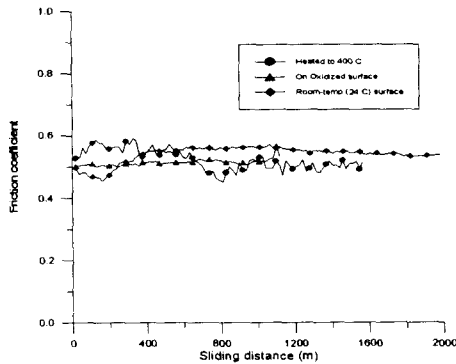


Fig. 16 온도변화에 따른 마찰계수

결과에 의하면 sliding에 있어서 0.08m/s에서 0.8m/s로의 10배의 속도변화와 24℃에서 400℃의 온도변화는 마찰계수에 큰 영향을 주지 못하는 것으로 보인다. Room temperature의 경우 대기온도는 24℃라 하더라도 접촉하는 asperity의 온도는 높을 것이므로 온도의 변화는 크게 영향을 주지 못한 것으로 생각된다. 산화막도 마찰특성에 영향을 끼치지 못했다.

② Pure Rolling(24℃와 80℃) 실험

실온(24℃)에서 rolling실험을 한 후, 구름판을 80℃로 유지하면서 다시 rolling실험을 하였다.

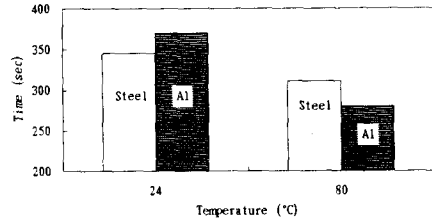


Fig. 17 온도변화에 따른 정지시간

Rolling에 있어서는 온도가 24℃에서 80℃로 올라감에 따라 정지시간이 감소한다. 즉 온도가 높을수록 rolling 중 에너지가 더 많이 손실됨을 의미한다. 온도가 증가하면 재료가 연화되어 slip보다는 adhesion이 발생할 가능성이 높아지는데 온도증가로 인한 분자들의 활성화로 높은 adhesion값을 나타내어 전체적으로는 에너지손실이 커지게 된 것으로 생각된다. 온도상승으로 인한 정지시간 감소가 Al의 경우가 더 큰데 그 이유에 대해서는 추가연구가 필요하다. 그러나 실제 열차의 경우에 있어서는 속도증가로 인한 온도증가가 adhesion을 충분히 증가시킬 만큼 크지 않을 것으로 사료되며 오히려 빠른 속도로 지나감에 의해 wheel과 rail이 충분히 변형하지 못하여 히스테리시스에 의한 에너지손실이 감소하여 더 작은 점착계수값을 갖는 것으로 생각된다 [10].

3. 고찰

참고문헌에 실린 rolling tester로 측정된 점착계수와 sliding실험을 통해 얻은 마찰계수를 비교하면 다음과 같다.

조건	점착계수 (참고문헌)	마찰계수 (실험)
Dry	0.49-0.52	0.58
Wet	0.25부근	0.43
Lubricated	0.17 (grease) 0.04 (oil)	0.11(윤활유)

전반적으로 sliding의 마찰계수와 wheel/rail간의 점착계수는 비슷한 값을 나타낸다. Slip과 stick이 같이 일어나는 wheel/rail 접촉에 있어서 slip의 영향이 큰 것으로 생각되며 경향적인 측면에서는 sliding실험으로도 wheel/rail의 점착특성을 예측할 수 있으리라 사료된다.

4. 결론

1) 접촉조건이 dry, wet, lubricated로 변화할 때 점착계수의 변화 : Rolling의 측면에서 보면 유막과 실린더간의 damping과 표면장력에 의해 점착력이 증가될 수 있으나 sliding측면에서는 기계적 간섭이 줄어들어 더 작은 점착력을 가지게 된다. Wheel/rail에 있어서는 점착력이 줄어들므로 slip이 접촉메커니즘의 중요한 인자로 생각된다. 참고적으로 윤활이 된 경우에 slip의 발생가능성이 더 높아지므로 점착력은 크지 않더라도 에너지는 손실될 수 있다.

2) 속도에 따른 점착계수의 변화 : sliding시 속도의 상승으로 인한 온도의 상승은 점착력에 큰 영향을 끼치지 못하는 것으로 보이며, rolling시는 분자의 활성화로 인한 adhesion증가가 있을 수 있다.

5. 후기

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

6. 참고문헌

1. Seizo Shirai, "Adhesion Phenomena at high speed range and performance of an improved slip-detector", Quarterly Reports, Vol. 18, No. 4, pp. 189-190, 1977.
2. I. P. Isaev, "Improving experimental research into adhesion of locomotive wheel with the rail", Rail International, pp 3-10, 1989.
3. Tadao Ohyama, "Some basic studies on the influence of surface contamination on adhesion force between wheel and rail at high speed", QR of RTRI, Vol. 30, No. 3, pp. 127-135, 1989.6. Desmond F. Moore, Principles and Applications of Tribology, Pergamon Press, pp. 302-326, 1975.
4. 김길창, 홍용기, "철도차량의 점착력에 관한 고찰"
5. Bernard J. Hamrock, Fundamental of Fluid Lubrication, McGraw-Hill Inc., pp.1-11, 598-604, 1994.
7. S. Kumar, "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.
8. 大野薫, "車輪・レール 表面の汚染と粘着", 潤滑, 第31卷, 第7號, pp. 455-460, 1986.
9. Kazuhiko Nagase, "Adhesion between the rail and running wheels on mainlines", QR of RTRI, Vol. 30, No. 2, pp. 97-105, 1989.
10. A. D. Sarkar, Friction and Wear, Academic Press, pp. 160-190, 1980.