

철도 차량 속도에 따른 레일 마모 현상에 관한 연구

하관용, 김희식
서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부

A Study of Rail Wear by Change of Train Velocity

Kwanyong Ha, Heisik Kim
Dept. Electrical and computer Engineering University of Seoul

Abstract - In this paper, slip wear phenomenon of train was studied by traction force of acceleration and braking force of deceleration. First, the slip wear phenomenon on train operation mode was analyzed when powering, coasting and braking each and then rail wear was analyzed from the slip wear data. Especially, the data proved correlation between slip wear and deceleration rather than acceleration. Second, If velocity of a train is constant, even though the velocity is high, ATO logging data and measurement data proved that the rail wear is not serious. It will help for efficient braking force operation providing fundamental data to braking step control.

1. 서 론

도시철도차량에는 열차운행자동제어장치가 도입되어 무인 및 자동운전이 가능하다. 열차운행자동제어장치에는 PID제어기법이 적용되어 목표속도가 주어지고 목표속도와 실제속도간의 오차에 비례, 미분, 적분계수를 보상하여 열차에 필요한 역행, 타행, 제동모드로 제어를 한다. 열차자동운전시 차량과 레일간 접촉면에서의 여러가지 메카니즘에 의해 복합적으로 레일마모가 발생한다. 그 중에서 미끄럼과 구름에 의한 레일마모가 주요 요인으로 작용되고 있다.[4] 특히, 레일 미끄럼마모는 승강장과 곡선부에서 많이 발생되며, 승강장은 열차의 제동력으로 인한 미끄럼마모가 발생되며, 곡선 구간에서는 차량에 걸리는 하중이 증가하여 상대적으로 접촉면에 발생하는 미끄럼 속도와 내, 외측, 레일간의 거리 차로 인한 요인으로 볼 수 있다. 열차는 여러 가지 선로의 조건, 차량의 특성, 운전시각의 단축을 위한 속도제어, 승차감 향상 등 많은 것을 고려하면서 자동운전을 한다. 이러한 여러 가지 조건을 만족하면서 열차의 운전모드가 결정되는데 열차 제동시 제동력에 의해 차량과 레일간의 미끄럼 발생정도가 심하게 발생되고, 역행시에는 견인력으로 인해 미끄럼이 발생된다. 즉, 열차자동운전제어장치에 의해 PID제어기법이 적용되면서 선로에 나타나는 레일마모 현상은 역행시 가속도 성분과 제동시 감속도성분이 미끄럼 마모에 주요 요인으로 알려져 왔다.

따라서, 본 논문에서는 고정 역간거리를 열차 자동운전으로 운행하고 있는 선로구간을 역행, 타행, 제동 운전모드에 따라 실제 ATO 로깅데이터를 구간별로 미끄럼마모가 발생하는 정도를 열차운행 모드에 따라 분석하였다.

2. 차량 레일간의 미끄럼마모 해석

도시철도 전동열차는 자동운전을 위해 열차의 주행 속도에 대한 유연한 가감속제어, 목표속도에 대한 정 주행, 승강장 내 정차 지점에서의 정밀 정위치 정차 등으로 역간 자동운전을 하고 있다. 전동열차의 자동운행곡선을 나타낸 것이며, 주행패턴 구간을 Powering, Coasting, Braking 구간으로 분류할 수가 있다. 열차가 고정된 역간거리에 자동운전을 계속적으로 반복 운행한다면 레일에 물리적인 힘이 미치는 요인으로는 열차의 가속속도, 열차의 하중, 열차저항, 차량과 레일간 마찰계수 등 이다. 레일두부면에 차량과 레일간에 발생하는 마모의 주요 원인은 저속에서는 미끄럼 마모에 관련된 옹착마모, 연삭마모이며, 고속에서는 표면 피로와 충격 등에 의한 마모 현상이 큰 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 역행모드와 제동모드시 저속 영역에서 주로 영향을 미치는 마모는 미끄럼마모이다. 이 때 양쪽 표면에 있는 원자들이 서로 가까이 접촉하게 될 때 형성되는 강력한 응착력이 기인하는 것으로 알려져 있다. 1946년에 Holm은 마모 부피를 식(4)과 같이 수식화 하였다.

$$V = \frac{kM\ell}{H} \quad (4)$$

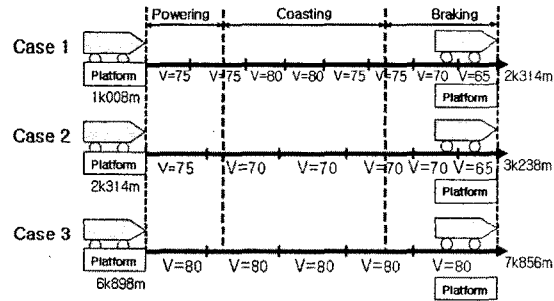
M, ℓ , H, k는 열차의 하중, 미끄럼 거리, 경도, 접촉면의 청정 정도이다. 이 식에 대한 실험적인 검증은 Rabinowicz와 Tabor(1951)에 의한 옹착 마모입자 형성에 대한 실험과 Burwell과 Strang (1952)에 의해 접촉면이 윤활

되지 않은 상태에서에서의 마모현상 연구로 증명하였다.[1-4]

3. 실험구간의 제원 및 검측 방법

3.1 궤도 및 차량의 제원

Fig 1은 8호선 하선 암사기점 1km부터 8km까지 레일연마 작업을 시행한 후에 검측한 데이터로서 대부분 평균값이 0.01mm이하가 되는 구간이다. 이 조건에 만족하는 선로위치는 1k008m~2k341m, 2k314m~3k238m, 6k898m~7k856m구간이며, 자동운전을 같은 운행조건으로 반복 운행한 선로를 분기별로 레일마모 상태를 검측한 구간이다.



<Fig 1> ATC Speed Code between Two Sections

3.2 열차운행 ATO 로깅데이터 및 레일 마모 검측 방법

열차운행곡선 데이터는 열차가 자동운전을 정상적으로 운행한 ATO Logging 데이터이며, 정시 운행한 열차에서 데이터를 수집하였고, 데이터의 항목은 ATO속도, ATO거리, 실제동/역행, PSM 검지위치 데이터를 적용하였다. 레일마모 검측은 테크노감마사의 검측장치로 레이저를 비춘 상태에서 카메라로 촬영한 원시데이터를 공정처리하여 파장길이에 따라 단파, 중파, 장파로 분류한 rms값과 Peak to Peak값으로 데이터가 저장된다.

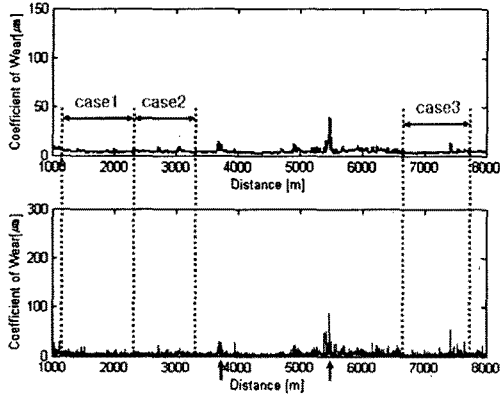
$$rms(x, L) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{(n-1)}} \quad (1)$$

4. 열차의 운전모드에 의한 레일마모 결과 분석

4.1 역간 거리에 따른 레일마모 분석

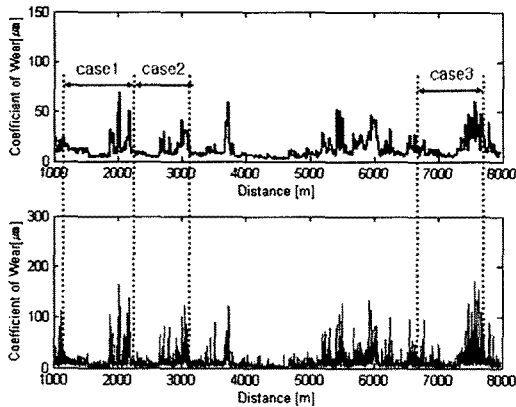
Fig 2은 2006년 11월 궤도검측 데이터를 역간 거리에 따른 레일 마모도 8호선 하선 암사기점 1km부터 8km구간중 좌측 레일의 측정 데이터를 그래프화 한 것이다. 하단 그래프는 1m마다 검측한 검측데이터를 나타낸 것이고 상단 그래프는 10m마다 평균값을 그래프로 나타내었다.

Fig 2의 상단 그래프에 적용된 10m마다 평균값을 수치로 나타냈고 최대값(max), 최소값(min), 평균값(avr)으로 산출하였다. 여기에서 최대값이 0.015mm 미만, 평균값이 0.01mm 미만인 구간만을 분석구간으로 선정하였고 Fig 3에서 화살표를 표시한 3k800m와 5k600m지점은 최대값이 0.015mm 이상, 평균값이 0.01mm 이상으로 이 구간은 분석구간에서 제외하였다.



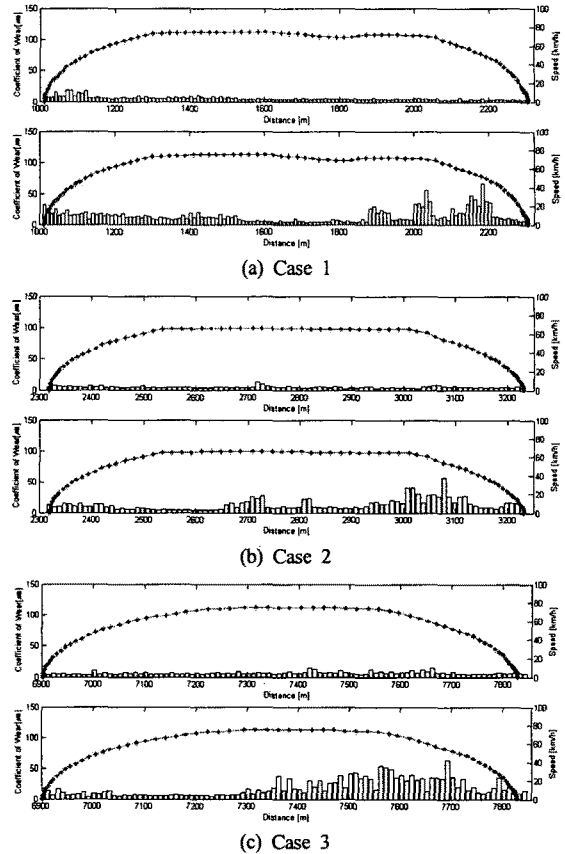
<Fig 2> Rail Wear Data (November 2006 Down)

Fig 3 그래프는 3개월후에 검측한 검측데이터의 결과로서 2007년 2월에 측정된 값을 그래프로 나타낸 것이다. 분석구간을 Case1, Case2, Case3 세 구간을 점선으로 구분 표시하였다. 이 점선 구간을 보면 좌측보다 우측이 미끄럼 마모가 증가했음을 알 수 있다. 좌측은 열차의 운행모드가 역행모드 구간이고 우측은 제동모드 구간이며, 특히, 승강장 정차시 제동거리 구간인 2k114m~2k314m, 3k038m~3k238m, 7k656m~7k856m 부근에서 미끄럼 마모가 다른 곳보다 많이 증가 했음을 알 수 있었다



<Fig 3> Rail Wear Data (February 2007 Down)

Fig 4의 선형곡선은 열차의 실제운행한 속도이며 막대그래프는 레일마모 검측데이터를 표시한 것이다. Fig 4의 Case1, Case2, Case3의 공통점을 분석해 보면 역행구간에서는 견인력으로 인해 시점 부근에서 미끄럼 마모가 나타났으나 전체적으로는 안정적이었고 제동구간에서는 제동력으로 인한 미끄럼마모 발생정도가 전체적으로 심하게 나타났다. 즉, 차륜과 레일간의 미끄럼마모는 견인력보다 제동력이 미끄럼마모의 주 원인을 알 수가 있었다. 제동구간에서 속도에 따른 레일마모량의 차이는 고속영역의 마모량이 저속영역에 비하여 상대적으로 급격히 커지게 됨을 관찰할 수 있었다. 그리고 타행모드구간에서는 고속주행이라도 등가속도(=0)인 영역에서는 마모량이 안정하게 나타났다. 그리고 Fig 4(b)(c)의 타행구간에서 미끄럼마모는 곡선과 구배의 영향으로 발생됨을 확인하였다.



<Fig 4> Relationship between Rail Wear and Train Operating Mode

3. 결 론

본 논문에서는 열차 운전모드에 의해 나타나는 레일 미끄럼마모 현상을 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다. 첫 번째는 열차의 운전모드에 의한 레일 미끄럼마모는 역행운전, 타행운전, 제동운전으로 분류하여 분석한 결과 역행구간보다 제동구간에서 레일 마모량이 급격히 발생됨을 확인할 수 있었고, 두 번째는 전동열차 속도가 고속주행이라도 타행구간에서는 레일마모량의 차이가 크지 않음을 실제 ATO운행곡선데이터와 검측데이터를 통해 입증하였다. 향후 검측데이터와 열차의 운전모드에 상관관계 분석데이터를 열차 운전제어에 적용하여 레일 마모 및 유지보수 비용의 절감 등을 기대할 수 있는 것으로 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Gilbert Strang, "Linear Algebra and Its Applications, Third edition", p153-162
- [2] Archard J. F., (1953), "Contact and rubbing of flat surfaces", Journal of Applied Physics, Vol.24, pp981-986.
- [3] Bolton P. J., Clayton P.,(1984), "Rolling Sliding wear damage in rail and tire steel", Wear, Vol. 93, pp. 145-160.
- [4] 최정흠, 문태선, 김기환, 한동철(2004) "고속철도 차량의 차륜과 레일 간의 마모 예측, 철도학회 논문집
- [5] A. C. Fischer-Cripps, 1999, "The Hertzian contact surface", Journal of Material science 34, pp.130-135
- [6] Rail corrugation, Rail profile Measurement system. Manual, TECNOGAMMA CO.