

서울 메트로 2·3호선 루프선 사용 전후의 전동차 차륜교환분석

Analysis about the new wheel changes of the rolling stocks after using the loop in Seoul Metro 2·3 lines .

김동민¹

안중곤²

Kim dong min.

Ahn jong kon

ABSTRACT

A contact patch between the wheel and the rail supports the train body and a traction power comes from it when rolling stocks run on the railroad. Friction force between the wheel and rail makes the train move on the rail. Whenever the train runs on the rail, the wheels and rails wear down by frictions inevitably. So it must be shaped by the lathe or changed for the safety train operation and the comfortable ride. Until now, many measures were carried out in order to prevent a wear and tear of the wheels. For example loop line railway in Kun Ja depot and Ji Chuk depot. This document reports the wheel changing data taken by maintenances department for the period before and after 1996 in the 1.2.3.4 lines in Seoul metro.

1. 서론

전동차를 지지하고, 전동차가 선로를 따라 운행할 수 있도록 발생하는 모든 힘은 차륜과 레일의 접촉면(contact patch)에서 출발한다. 전동차가 운행하면서 레일과 상호 접촉하면서 필연적으로 마찰이 발생하여 마모가 발생한다. 전동차의 승차감과 전동차의 안전한 운행을 위해서 차륜을 삭정하고 차륜을 신품으로 교체하여 운행을 한다. 74년 서울지하철이 개통이 된 후 수많은 차륜교환이 이루어졌다. 1.2.3.4호선은 제각기 다른 레일 곡선 비율 등으로 차륜교환이 각각 호선 별로 차이를 보여주고 있다. 본 논문에서는 80년 초반부터 운행되기 시작한 전동차로부터 최근에 도입된 전동차까지 각 노선 별로 각 전동차에 대한 차륜 교환에 대한 내용을 알아보았다. 특히 88년 서울올림픽을 기준으로 전동차의 기본편성이 6량에서 10량으로 편성되어 운행되기 시작하였다. 그 후 2·3호선의 전동차의 차륜이 수직마모가 급격히 발생되었다. 차륜과 선로의 접촉은 곡면과 곡면의 접촉으로 기하학적으로는 접촉점 형태로 나고 직선선로보다는 곡선의 접촉면에 작용하는 힘이 더욱 복잡한 각도로 나타난다. 그래서 직선노선이 많은 1호선보다는 곡선구간이 많은 2,3호선에서 운행하는 전동차의 차륜교환 빈도가 훨씬 많았다.

2,3호선 전동차차륜의 수직마모를 줄이기 하기 위한 일환으로 94년에 2호선기지에 방향전환선인 델타선(delta track)과 3호선 차량기지의 전동차 방향전환선로(loop)가 신설되었다. 그 후의 방향전환선 사용을 전후로 하여 호선 별로 차륜교환량을 비교하여 방향전환선을 이용한 후의 효과 분석과 2·3호

¹ 정희원. 서울 메트로 지축차량사무소

² 정희원. 서울 메트로 지축차량사무소

선의 차륜평균사용기간을 도출해 내는 데 목적이 있다.

연구방법은 전동차 이력부 및 관련자료 (차륜교환데이터)를 위주로 각 사무소에 보관되어있는 자료를 근거로 하였고 연구범위는 1980년 후반부터 2006년까지 2·3호선의 GEC 전동차로 한정하였다.

2. 관련이론

2.1. 철도차량의 동역학 개념

철도차량의 운동은 일반적으로 6 방향 성분으로 표현된다. 3방향은 직선 운동성분과 또 다른 3방향은 회전운동 성분으로 구성된다. 이때 X축(Longitudinal)은 철도차량의 진행 방향으로 정한다. 보통의 경우 단일 차량 또는 대차만을 대상으로 하여 직선운동 및 회전운동을 고려한다. 일반적으로 직선운동과 회전운동은 서로 분리하여 생각한다. 이와 같이 분리하였을 때 철도차량 동역학은 크게 직선궤도 주행 시 직선운동, 직선 궤도 주행 시 회전운동 및 주행 안정성, 곡선 주행시의 거동 등 3 종류로 분류한다. 철도차량의 동역학 3종류에 큰 영향을 미치는 인자는 궤도의 형태와 탄성, 차륜과 레일 간의 접촉력과 접촉 기하학, 현가장치 및 차량 각 연결부의 특성, 차량 각부의 질량 및 유연성 등이 있다. 직선 방향의 운동은 일반적인 스프링-질량-댐퍼 계의 진동 범주에 속하고, 이는 차륜과 레일간의 접촉력이나 접촉 기하학의 영향을 별로 받지 않는다. 반면 회전운동 및 곡선 주행 동역학 운동 성분은 차륜과 레일 사이에서 발생하는 철도차량 고유 현상인 크립력(Creep Force)이 큰 영향을 미친다. 그림 2-1 은 철도차량의 동역학적 자유도를 보여주고 있다.

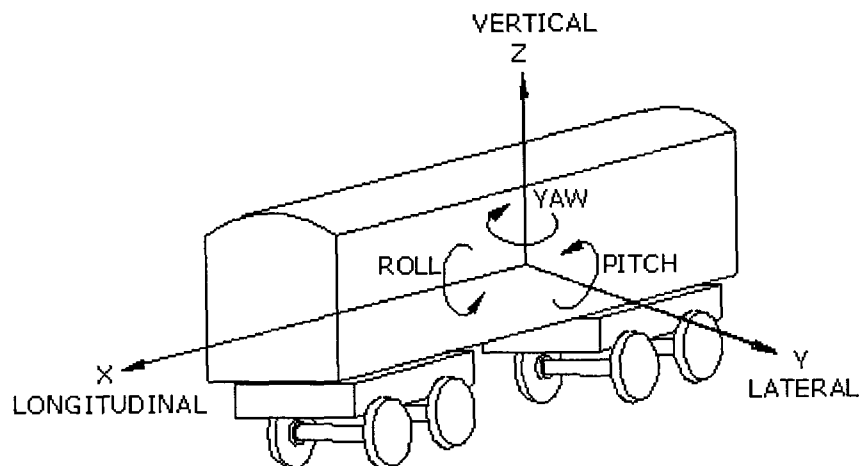


그림 2-1. 철도차량의 동역학도

2.2. 차륜과 레일의 상호작용

차륜과 레일의 상호 작용력은 접촉력, 크리이프, 마모특성에 의해 변한다. 따라서 이와 같은 상호 작용력을 이론적으로나 실험적으로 규명하기는 매우 힘이 드는 것으로 알려지고 있다. 현재 이론 해석에 적용하고 있는 상호작용력은 크게 주력탄성(gravitation stiffness)과 크리이프력(Creep Force)을 들 수 있다. 접촉력 중 접촉면에 수직인 성분은 중력 탄성의 효과를 발생시키며 접촉면의 접선 방향 성분은 크리이프 힘이 된다. 크리이프(creep)는 철도차량이 주행 중일 때 차체의 운동은 현수 장치를 통하여 차축에 외력으로 작용하게 되면, 차륜과 레일의 탄성으로 인하여 그 접촉면에서 순수 구름 운동에서 벗어난 미시적인 미끄럼이 발생하는 현상이다. 크리이프는 현수 장치를 통하여 차축에 전달되는 힘 때문에 발생하게 되며, 레일이 차륜에 작용하는 이 힘의 반력을 크리이프 힘(Creep Force)이라 한다. 크리이프지(creepage)는 차륜과 레일의 강성이 강하여 접촉면에서 변형률의 차이가 없을 때의 속도를 순수

구름 운동이라 하며 크라이프가 발생하면, 차륜과 레일 사이의 속도 차이가 발생하고, 이 상대속도를 순수 구름 속도로 나누어 무차원화 한 값이다.

2.3. 레일에 미치는 횡압(Lateral force)

차륜이 횡방향으로 힘을 받아 그 후렌지 분에서 레일과 접촉하여 타고 오르게 되는 상황을 그림으로 나타내면 그림 2-2와 같다. 이 경우 A점에서 차륜은 횡압 Q와 윤중 P를 레일에 가하며, 이 힘의 비(比) Q/P가 얼마일 때의 값을 탈선의 Q/P 한계치가 된다.

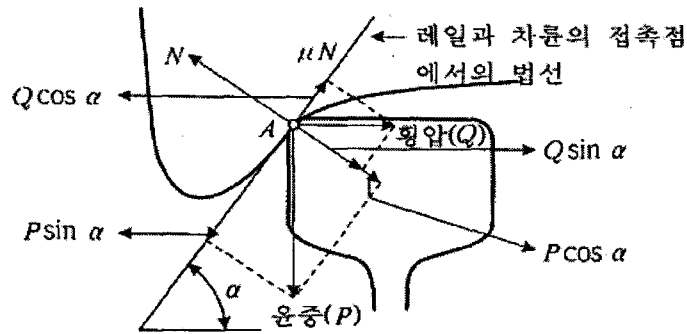


그림 2-2. 레일에 미치는 횡압

2.4. 사행동(Hunting)

차량이 레일 위를 부드럽게 달리기 위해 레일의 궤간과 차륜의 좌우 후렌지 외면거리와의 사이에 약간의 유격을 두고 있다. 또 곡선부에서는 주행을 원활하게 위해 차륜의 답면에는 1/40, 1/20 등 약간의 구배(Conicity)를 주고 있다. 이 때문에 직선 주행 시에 어떤 속도 이상이 되면 차륜이 좌우로 자러운동(自動運動)을 일으켜 소위 사행동(蛇行動, Hunting)이 생긴다.

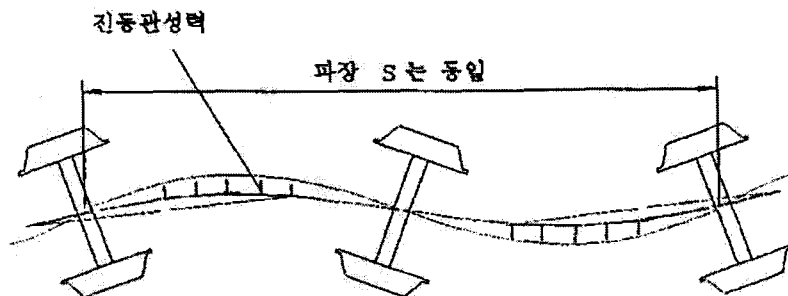


그림 2-3. 사행동에 대한 관성력의 영향

$$S = 2\pi \sqrt{\frac{br}{\gamma}}$$

여기서, S : 사행동 파장

b : 좌우 차륜이 레일과 접촉하는 점 사이의 직선거리의 1/2

r : 접촉점에서의 차륜의 반지름

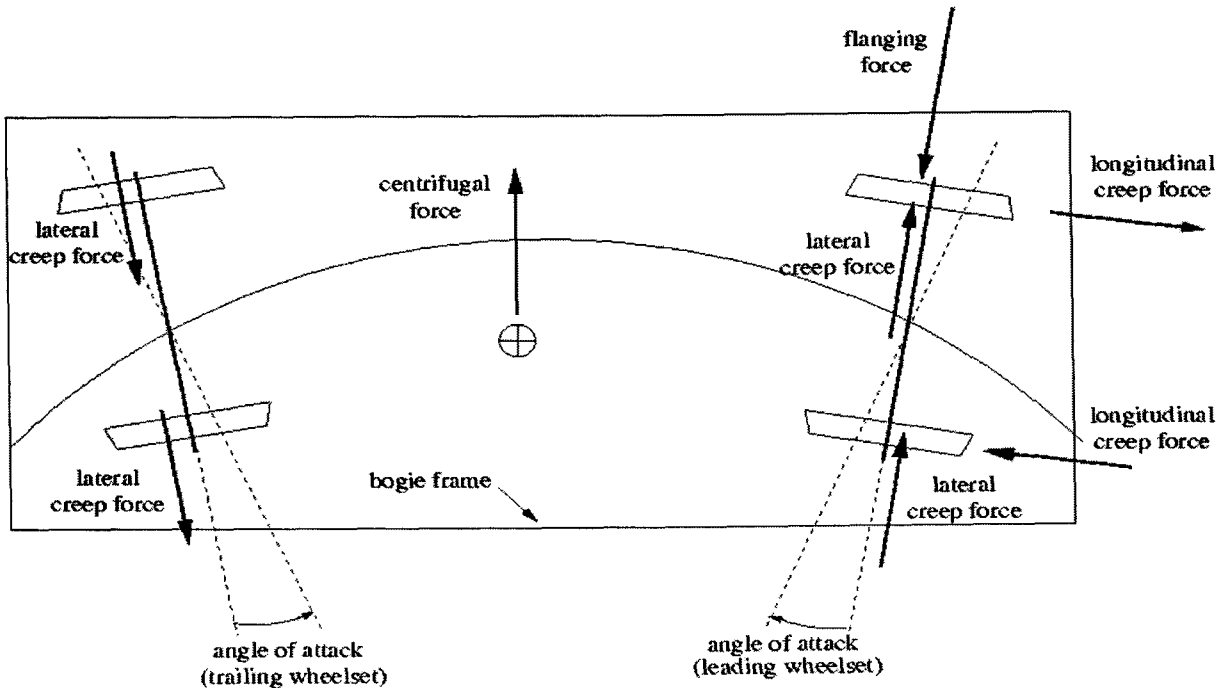
γ : 접촉점에서의 차륜답면의 구배

사행동은 위와 같이 기하학적으로 정해지고 속도와는 무관하지만 속도를 높이면 진동관성력의 작용에 의해 상기 그림과 더욱 악화된다. 사행동을 감소시키는 다른 방법은 대차가 윤축을 튼튼하게 지지토록 함은 물론 윤축 지지부에 적절한 스프링 및 댐퍼를 사용하여 공진하지 않도록 하는 방법이 있다.

2.5. 어택각(attack angle)

대차가 곡선을 통과할 때, 차륜과 대차는 1차 현가장치의 현가특성의 영향으로 선형차륜은 곡선선로 밖으로 향하는 공격각(attack angle)이 발생하고, 후행차륜은 곡선선로 안쪽으로 향하는 공격각이 발생한다. 선형차륜의 경우 외곽으로 향한 공격각으로 차륜과 선로의 접촉면 사이에 구심력방향의 크립력이 발생하고, 공격각에 의한 크립력에 대한 힘의 균형을 위해 바깥쪽 차륜에 큰 후렌지 접촉력이 요구된다. 그리고, 주행방향의 접촉력은 외측차륜의 후렌지 접촉을 가정하였을 때, 외측 차륜의 접촉반경(rolling radius)이 증가와 함께 내측 차륜의 접촉 반경은 감소하여, 두 반경차이로 강제 차륜(rigid wheelset)은 외측 차륜에는 주행방향의 크립력(longitudinal creep force)이 발생하고, 제동력 혹은 추진력이 없는 타행으로 가정하여 내측 차륜은 주행 방향과 같은 크기의, 반대방향의 크립력이 발생하며, 이것은 차륜의 요(yaw)모션을 유발, 차량 안전성을 불안하게 하는 요소로 발전할 수 있다. 후행차륜의 경우는 공격각이 곡선 내측을 향하고 있으며, 횡방향 크립력이 곡선 내측으로 향하고 있다. 따라서 후행차륜은 캔트 부족량에 의한 영향이 크지 않는 한 후렌지 접촉이 없다.

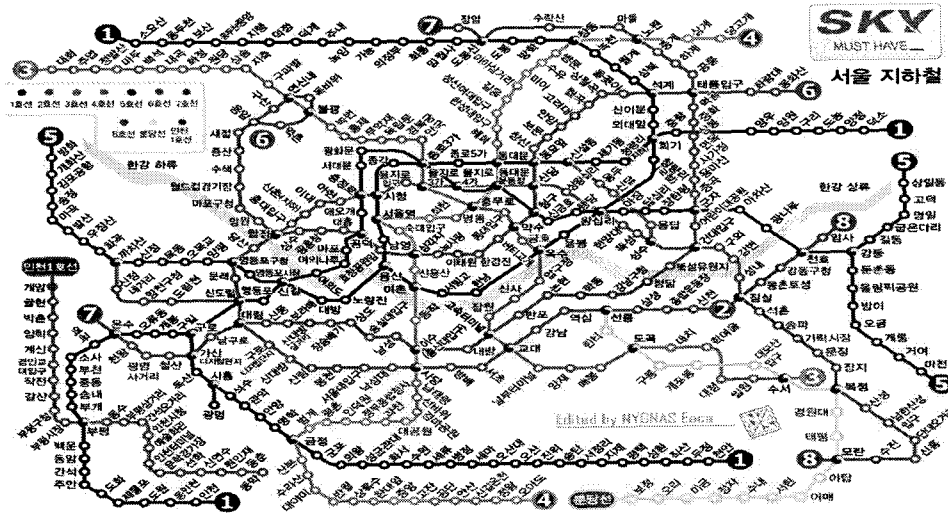
공격각은 차량과 선로의 여러 변수로 결정되며, 그 대략적인 경향으로 대차의 1차 현가장치 주행방향 강성이 클수록, 답면답면(conicity)가 작을 수록, 윤축간 거리가 멀수록 공격각은 커져 곡선주행 안정성을 떨어뜨린다. 하지만, 공격각이 큰 차량 시스템은 그만큼 직선주행에서 안정적으로 주행을 할 수 있다는 의미이며, 단순 치수설계로 직선주행과 곡선주행의 성능을 모두 만족시키는 데는 한계가 있다. 이러한 이유로 자기 조향대차, 혹은 강제 조향대차가 제안되고 있다.



3. 서울 메트로 노선구성

3.1. 2호선

이 장에서는 서울 메트로의 2·3호선의 구성에 관하여 간단히 살펴보고자 한다. 2호선은 일일 승객 수송량이 190 만 명이 넘는 서울에서 가장 바쁜 지하철이다. 이 노선은 강북의 중심지역과 강남의 도시 중심권을 연결하는 지하철이며 가장 바쁜 시간에는 운행시간 간격이 매 2.5 분으로 단축 된다. 한편 한가한 시간에는 운행간격이 5-6 분 사이로 유지된다. 2호선은 2 개의 주요 순환선과 2 개의 지선으로 구성 되어 있으며 외선은 시계반대방향으로 주행하고 내선은 시계방향으로 주행한다.



이 노선은 또한 3·4 호선과 상호 연결될 뿐만 아니라 5·6·7·8 호선의 도시철도와의도 연결되어 있다. 또한 곡선 간이 표 3-2 에서 보듯이 본선 내외선 합계가 49,182km 에 이른다. 게다가 500R 곡선부터 150R 곡선 까지가 25km 의 길이로서 차륜과 레일에 걸리는 곡선 횡압(橫壓, Lateral force)은 커질 수 밖에 없는 노선구조로 되어있다.

표 3-1. 호선별 최소 곡선반경^㉔

| 구분 | 1 호선 | 2 호선 | | | 3 호선 | 4 호선 |
|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 순환선 | 성수지선 | 신정지선 | | |
| 최소반경 | 136m | 200m | 150m | 246m | 199m | 180m |

표 3-2. 호선별 직/곡선 현황

| 구분 | 비율(%) | 계 | 1 호선 | 2 호선 | 3 호선 | 4 호선 |
|-----------|-------|---------|--------|---------|--------|--------|
| 계 | 100.0 | 276,950 | 18,580 | 122,466 | 71,549 | 64,355 |
| 직선 | 56.6 | 156,678 | 9,062 | 73,284 | 38,772 | 35,560 |
| R<150 | 0.2 | 625 | 625 | 0 | 0 | 0 |
| 150<R<299 | 9.3 | 25,738 | 0 | 10,532 | 7,048 | 8,158 |
| 300<R<399 | 5.6 | 15,601 | 206 | 5,016 | 5,543 | 4,836 |
| 400<R<499 | 7.4 | 20,399 | 2,146 | 9,945 | 4,514 | 3,794 |
| 500<R<599 | 4.0 | 11,139 | 698 | 4,552 | 4,072 | 1,817 |
| 600<R<699 | 3.4 | 9,345 | 862 | 3,083 | 2,976 | 2,424 |

| | | | | | | |
|-----------|------|-----------|---------|----------|----------|----------|
| 700<R<799 | 1.0 | 2,764 | 336 | 1,223 | 759 | 446 |
| 800<R< | 12.5 | 34,661 | 4,645 | 14,831 | 7,865 | 7,320 |
| 곡선계(km) | 43.4 | 120,272.0 | 9,518.0 | 49,182.0 | 32,777.0 | 28,795.0 |

3.2. 3호선 노선도

3호선은 일일 승객 수송량이 71만 명이 넘는 지하철노선이다. 이 노선은 최초로 수서-구파발간만 운행하다가 지금은 일산까지 확대되어 운행되는 노선으로 강남의 도시 중심권과 서울 서부지역을 연결하는 지하철이며 가장 바쁜 시간에는 운행시간 간격이 매 3-6분으로 단축된다. 한편 한가한 시간에는 운행간격이 5-10분 사이로 유지된다. 이 노선은 또한 1·2·4호선과 상호 연결될 뿐만 아니라 6·7도시철도, 분당선과도 연결되어 있다. 또한 곡선 구간이 표 3-2에서 보듯이 상하 합계가 32,377km에 이른다. 이 노선은 서울 메트로 운영지역에 해당하고 일산선을 제외한 노선의 길이를 나타낸 km를 표시한 것이다. 실제 운행하는 거리는 수서-대화간 운행 km는 편도 53.8km에 이른다. 2호선 곡선구간을 비교하면 500R 곡선부터 150R 곡선 길이의 합계가 17,165km의 길이로서 2호선 노선보다는 상대적으로 완만한 곡선이 많은 특징을 가지고 있다.

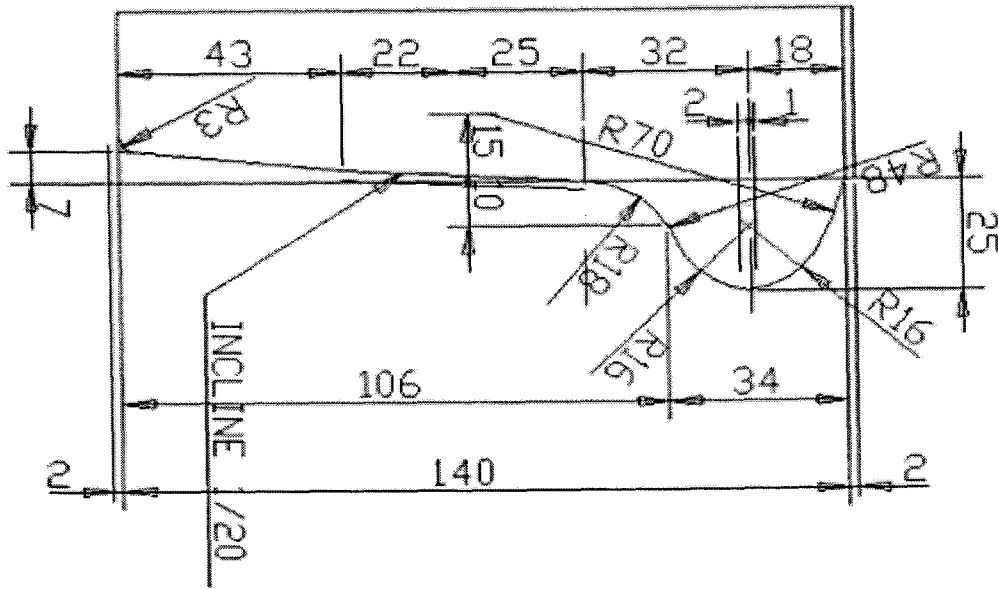
4. 2·3호선의 차륜교환 분석

84년 2·3호선 개통 시에는 전동차의 기본편성이 6량이었다. 그 후 88년 서울올림픽을 기준으로 전동차의 기본편성이 6량에서 10량으로 편성되어 운행되기 시작하였다. 급격한 곡선구간이 많은 노선에다가 전동차의 편성이 6량에서 10량으로 편성됨에 따라 전동차의 윤중(輪重, Wheel force or wheel load)이 40%이상 증가를 했고 더욱이 승객의 급증으로 레일과 전동차 차륜의 윤중은 급격히 증가하였다. 그 후 2·3호선의 곡선부 레일마모와 전동차의 차륜이 수직마모가 많이 발생되었다. 이에 전동차 차륜의 후렌지 두께(Flange width)를 보충하기 위하여 차륜 삭정을 많이 하게 되고 그 결과 차륜 교환량이 급증하게 되었다.

4.1. 곡선부 레일에서 전동차 차륜의 수직마모(垂直磨耗, Vertical wear)의 원인

1). 답변구배(踏面勾配, tread conicity)

전동차의 차륜은 레일에 접촉하는 차륜답면(車輪踏面, Wheel tread)이 좌우 같은 직경으로 된다고는 볼 수 없기 때문에 직선이라 하더라도 구르는 방향이 변하여 차륜은 우측에 또는 좌측에 일정한 진폭(振幅)으로 사행(蛇行, Hunting)한다. 사행의 파장은 답변구배(踏面勾配)가 크면 짧아진다. 윤축이 대차에 조립되어 어느 속도로 주행하면 윤축은 좌우로 진동하고 이에 관성력(慣性力)이나 축 스프링으로부터의 힘이 가해지기 때문에 진폭이 크게 되고 거기에다가 속도가 증가하면 차륜의 플랜지가 레일에 격렬하게 충돌하게 된다. 이렇게 되면 승차감이 나빠지고 레일에 큰 횡압(橫壓)을 받게 된다. 지하철운행 초기에는 2단 답변구배를 사용하였으나 90년 대 중반부터는 곡선구간 운행에 적당한 1/20 일단 답변구배 차륜을 사용하고 있다.



(1/20 구배담면 차륜형상도)

2). 공격각(攻擊角, attack angle)

이 사행동을 억제하기 위하여 담면구배를 적게 하고, 직선에서 윤축이 사행하지 않도록 대차에 견고하게 장착하도록 하고 있다. 대차도 차체에 대하여 견고하게 장착되어 있다. 그 결과 곡선 통과 성능은 희생이 되어 윤축은 접선(接線)방향으로 완전한 직각으로는 되지 않고 공격각(攻擊角, attack angle)을 갖고 곡선을 통과하게 된다. 공격각을 갖고 곡선을 통과하게 되면 레일과 후랜지(flange)가 접촉하여 횡압이 증가하여 레일/차륜 모두 마모하고 차륜의 후랜지가 현저하게 마모되면 이를 수직마모(垂直磨耗, Vertical wear)라고 한다. 이 때문에 급곡선에서는 공격각이 항상 있으며 당연히 레일에 대하여 횡압도 높고 레일과 차륜 후랜지 마모의 직접적인 원인이 된다. 또한 레일 코리게이션(Corrugation: 물결무늬)이나 삐걱거리는 소리의 원인이 되고 있다.

4.2. 수직마모 완화 책

1). 2·3호선의 방향전환선(loop) 설치

2·3호선 전동차가 10량 편성으로 구성되어 운행 후 수직마모가 급격히 진행되었다. 또한 한 방향으로만 운행이 되어 특히 2호선의 경우는 마모 속도가 더 빠르게 진행되었다. 수직마모의 감소방안으로 양쪽차륜의 마모를 분담하기 위해 2호선은 균자기지에 전동차의 방향을 전환시키기 위한 델타(Δ , delta)선을 신설하여 주기적으로 방향전환이 권고되었고, 3호선은 지축기지에 루프(loop)선을 신설하여 주기적으로 방향전환을 시행하여 차륜의 한 쪽 방향만 마모되는 것을 방지했다. 또한 레일에는 곡선부에 도유기를 설치하여 수직마모 감소를 유도하였다. 본 논문에서는 94년도에 양 기지에 설치된 루프선 사용을 전후로 차륜사용기간을 비교 분석하여 루프선의 효과를 검증했다.



그림4-1. 군자차량기지 벨타선

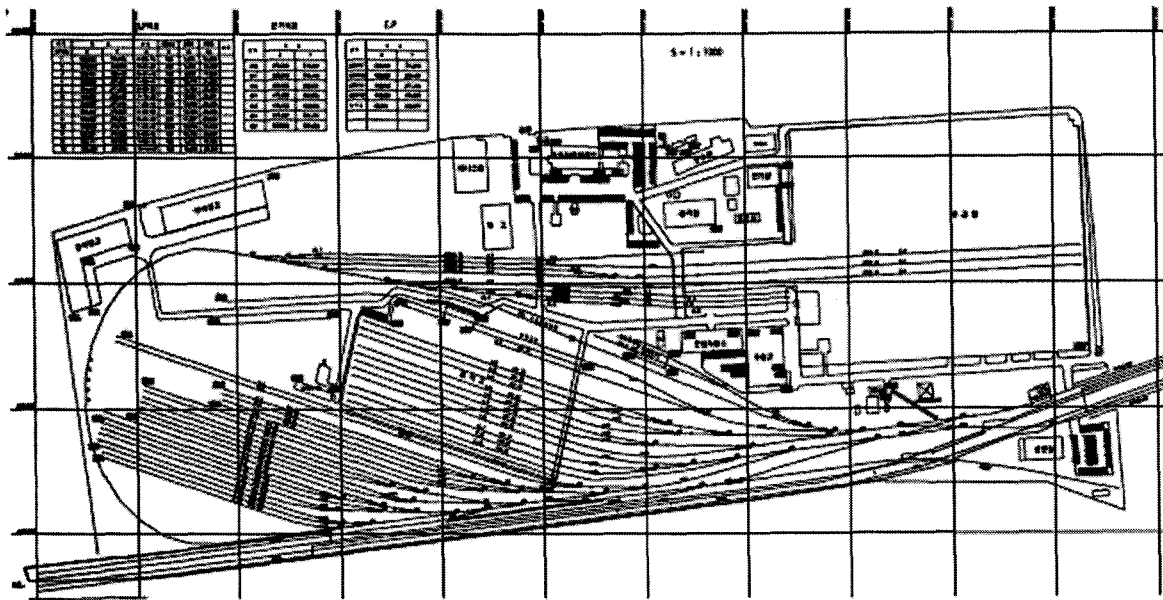


그림4-2. 지축차량기지루프선

4.3. 2호선 전동차 차륜교환

1). 전동차 차륜교환 기준

차륜교환검사는 차륜외경이 교환한도에 도달하였거나 또는 차륜이 균열/파손 등으로 차륜을 교환하기 위하여 시행하는 검사로 규정하고 있다. 구체적 차륜교환 기준은 다음과 같다. ①차륜의 후렌지의 높이가 25-35mm에 달하거나 ②후렌지가 두께가 34-23mm의 범위를 벗어나거나 ③차륜외경의 삭정 한도 780mm 또는 사용한도 774mm에 도달했을 때 차륜을 교환하여 전동차의 안전을 확보해야 한다(원형차륜 경 860mm).

2). 차륜교환 원인

차륜교환 경향으로서는 순수한 마모에 의한 것은 적고, 스키드(skid)등에 의한 담면 손상을 제거하기

위한 삭정(削正)하는 양이 많아져서 조기에 사용한도에 이르는 것이 많아지고 있다. 이 스키드(skid)는 접촉을 초월하는 제동력이 작용하기 때문에 발생하게 되고 차량, 레도, 운전조작 등이 관련되기 때문에 발생을 방지하기가 어렵다. 이 스키드(skid)에 의한 플랫(flat)은 소음 발생의 원인 첫 번째 원인이 되며 후렌지의 마모, 제륜자(brake shoe)에 의한 편마모(偏磨耗)도 현시점에서 삭정하여 제거하고 있다. 그러나 2·3호선의 경우는 상기와 같은 경우보다는 곡선구간에서 발생한 후렌지 수직마모를 보상하기 위한 삭정이 대부분의 이유에 속한다.

3). 2호선 차륜 교환 현황

(1) 루프선 사용 전후의 차륜교환내용

2호선을 본선을 운행하는 전동차는 총 790량으로 GEC 전동차 35편성 350량 현대 초파 전동차 34편성 340량이다. 본 논문에서는 GEC전동차 중에서9개 편성 90량을 임의로 선정하여 차륜교환 빈도를 조사하여 루프선 설치 사용 전후의 차륜 사용기간을 비교하였고, 차량편성 별로 나타난 특성을 분석했다.

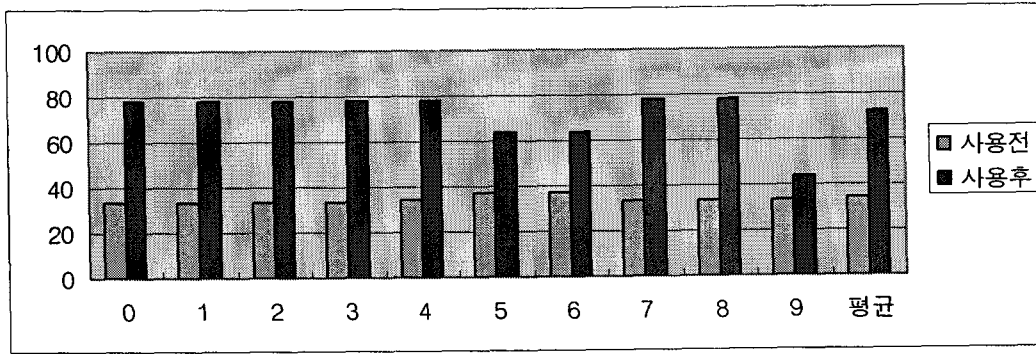
표 4-1. 2호선 차륜교환일자(예시)

| 편성 | 차호 | 영업개시 | 차륜교환일자 | | | | 평균 사용 기간 | 차륜교환일자 | | 평균 사용 기간 |
|--------------|----|----------|------------|------------|------------|------------|----------------|------------|------------|----------------|
| | | | 차륜교환일자 | 차륜교환일자 | 차륜교환일자 | 차륜교환일자 | | 차륜교환일자 | 차륜교환일자 | |
| 264 | 0 | 83.12.08 | 1987-08-01 | 1989-04-14 | 1992-04-02 | 1995-01-10 | 33 | | 2001-07-11 | 78 |
| | 1 | 83.12.08 | 1987-08-01 | 1989-04-14 | 1992-04-02 | 1995-01-10 | 33 | | 2001-07-11 | 78 |
| | 2 | 83.12.08 | 1987-08-01 | 1989-04-14 | 1992-04-02 | 1995-01-10 | 33 | | 2001-07-11 | 78 |
| | 3 | 83.12.08 | 1987-08-01 | 1989-04-15 | 1992-04-02 | 1995-01-10 | 33 | | 2001-07-11 | 78 |
| | 4 | 83.12.08 | 1987-08-01 | 1989-04-16 | 1992-04-02 | 1995-01-10 | 33 | | 2001-07-11 | 78 |
| | 5 | 93.02.12 | | | | 1996-03-08 | 37 | | 2001-07-11 | 64 |
| | 6 | 93.02.12 | | | | 1996-03-08 | 37 | | 2001-07-11 | 64 |
| | 7 | 83.12.08 | 1987-08-01 | 1989-04-14 | 1992-04-02 | 1995-03-14 | 33 | | 2001-07-11 | 78 |
| | 8 | 83.12.08 | 1987-08-01 | 1989-04-14 | 1992-04-02 | 1995-03-14 | 33 | | 2001-07-11 | 78 |
| | 9 | 83.12.08 | 1987-08-01 | 1989-04-14 | 1992-04-02 | 1994-03-31 | 33 | 1997-03-10 | 2001-07-11 | 44 |
| 96년전차륜평균사용기간 | | | | | | 34 | 97년이후차륜평균사용기간 | | 72 | |

표 4-1은 D 264편성을 예로 나타낸 표이다. 전동차 도입 년도부터 차륜 교환일자를 표시하였다. 각각 교환 월을 기준으로 차륜사용기간을 계산하였다. 루프선 사용 전의 96년까지의 차륜평균 사용기간은 38개월로 나타났고, 루프선 사용 후 97년 이후의 차륜평균 사용기간은 55개월로 나타났다. 루프선 사용 전에는 차량운행이 한 방향으로만 지속되어 차륜 한 쪽 방향만 마모되어 차륜사용기간이 34개월이었지만, 루프선을 이용하여 차량 방향을 전환하여 후렌지 양방향 마모를 균등하게 한 이후부터는 차륜 사용기간이 72개월로 대폭 늘어 난 것을 볼 수 있다.

표 4-2. D264 편성 루프선 사용 전후의 차륜사용기간

| 차호 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 평균 |
|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 사용전 | 33 | 33 | 33 | 33 | 34 | 37 | 37 | 33 | 33 | 33 | 34 |
| 사용후 | 78 | 78 | 78 | 78 | 78 | 64 | 64 | 78 | 78 | 44 | 72 |



다음 표는 앞에서 살펴 본 D264편성과 같은 방법으로 9개 편성에 대한 차륜교환일자를 기준으로 각 량의 차륜사용기간을 조사한 내용이다. 전동차 도입 후 운행 초기부터 루프선 이용효과가 나타나는 시 기인 96년을 기준하여 2006년도 까지 각각의 차량의 차륜교환일자를 조사하고 차륜사용기간을 계산하였 다.

표 4-3. 2호선 차륜평균 사용기간

| 편성 | 96년이전 차륜평균사용기간(월) | | | | | | | | | | 평균 | 97년이후 차륜평균사용기간(월) | | | | | | | | | | 평균 |
|-----|-------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
| | TC | M | M | M | M | T | T | M | M | TC | | TC | M | M | M | M | T | T | M | M | TC | |
| 264 | 33 | 33 | 33 | 33 | 33 | 37 | 37 | 33 | 33 | 33 | 34 | 78 | 78 | 78 | 78 | 78 | 64 | 64 | 78 | 78 | 44 | 72 |
| 266 | 30 | 30 | 30 | 37 | 37 | | | 32 | 32 | 30 | 32 | 46 | 50 | 50 | 66 | 66 | 62 | 50 | 53 | 53 | 50 | 55 |
| 270 | 49 | 61 | 61 | 61 | 61 | 29 | 29 | 64 | 64 | 57 | 54 | 48 | 68 | 68 | 68 | 68 | 44 | 68 | 60 | 60 | 64 | 62 |
| 273 | 25 | 25 | 25 | 25 | | | | 29 | 29 | 25 | 26 | 43 | 74 | 74 | 74 | 74 | 48 | 52 | 54 | 54 | 61 | 61 |
| 275 | 40 | 55 | 55 | 46 | 46 | 40 | 40 | 53 | 53 | 40 | 47 | 58 | 62 | 62 | 70 | 70 | 47 | 60 | 70 | 70 | 49 | 62 |
| 280 | 48 | 58 | 58 | 58 | 58 | 58 | 58 | 58 | 58 | 48 | 56 | 63 | 58 | 58 | 60 | 60 | 24 | 60 | 46 | 46 | 60 | 54 |
| 282 | 60 | 58 | 58 | | | 51 | 51 | | | 60 | 56 | 62 | 59 | 59 | 59 | 59 | 59 | 59 | 87 | 87 | 62 | 65 |
| 293 | | | | | | | | | | | | 61 | 62 | 62 | 61 | 61 | 61 | 61 | 61 | 61 | 61 | 61 |
| 295 | | | | | | | | | | | | 66 | 66 | 66 | 42 | 42 | 60 | 60 | 69 | 69 | 60 | 60 |
| | 41 | 46 | 46 | 43 | 47 | 43 | 43 | 45 | 45 | 42 | 44 | 58 | 64 | 64 | 64 | 64 | 52 | 59 | 64 | 64 | 57 | 61 |

(2). 루프선 사용 전후의 2호선 차륜교환의 비교 결과

운행 중인 2호선 전동차 중에서 임의로 9개 편성을 기준하여 차륜교환일자를 통하여 각 차량 당 각 편 성 당 차륜평균사용기간을 루프선 사용 전후를 구분하여 표시하였다. 표에서 보듯이 2호선의 차륜사용 기간은 3호선 86개월 4호선 136개월보다 훨씬 사용기간이 짧다. 그 이유는 상대적으로 곡선구간이 많아 차륜의 수직마모로 후렌지 두께를 보상하는 차륜삭정이 많기 때문이다.

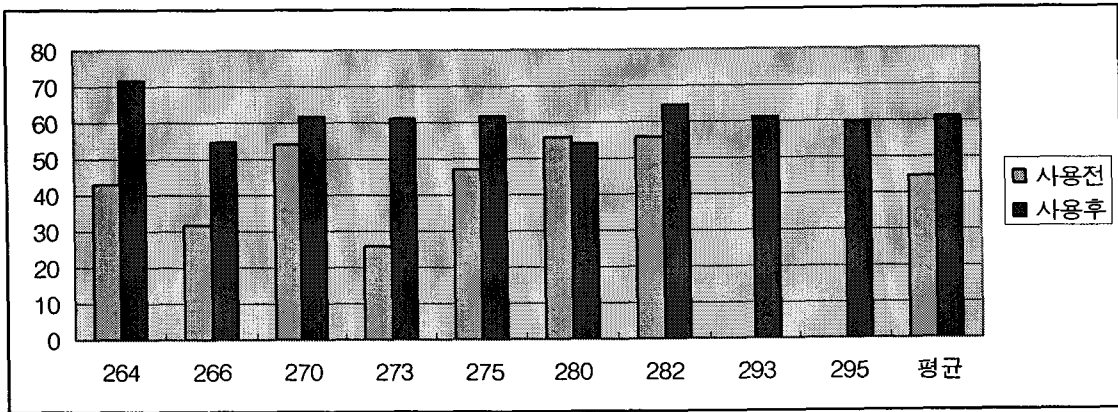
(3). 2호선의 루프선 사용 전후의 차륜 평균사용기간 비교

루프선 사용 전후 2호선의 차륜평균사용기간은 45개월에서 61개월로 루프선 사용 전 대비 35%까지 연 장되었다.

표 4-4. 2호선 루프선 사용 전후의 차륜평균사용기간 비교(월)

| 편성 | 264 | 266 | 270 | 273 | 275 | 280 | 282 | 293 | 295 | 평균 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| 사용전 | 43 | 32 | 54 | 26 | 47 | 56 | 56 | | | 45 |

| | | | | | | | | | | |
|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 사용후 | 72 | 55 | 62 | 61 | 62 | 54 | 65 | 61 | 60 | 61 |
|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|



(4). 차량사용기간이 각 차량마다 각 편성마다 편차가 심하다. 루프선 사용 후를 기준해서 보더라도 최소 사용 기간이 42개월에서 78개월까지 편차가 심한 특징을 나타내고 있다. 이것은 차량운행 시 운행 조건에 변수가 아주 많다는 것을 나타낸다.

(5). 각 편성마다 차량사용기간도 많은 편차를 나타내고 있다. 루프선 사용 후를 관찰해 봐도 평균 54개월에서부터 78개월까지의 사용기간의 차이가 심하게 나타났다.

(6). 선두차 호와 중간차의 비교

| | | | | | | | | | |
|----|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| TC | M | M | M | M | T | T | M | M | TC |
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |



그림4-1. 2·3호선 운행 GEC 전동차 배열도

표4-3에서 보듯이 선두차량인 0/9호가 중간차량보다 평균차량사용기간이 5,6개월 정도 짧은 것으로 나타났다.

4). 3호선 차량 교환 현황

(1) 루프선 사용 전후의 차량교환 내용

3호선을 본선을 운행하는 전동차는 GEC 전동차 48개 편성 480량 이다. 본 논문에서는 GEC전동차 9개 편성 90량을 임의로 선정하여 차량교환 빈도를 조사하여 루프선 설치 사용 전후의 차량 사용기간을 비교하였고, 편성 별로 나타난 특성은 무엇인지 분석했다.

표 4-5. 3 호선 차량교환일자(예시)

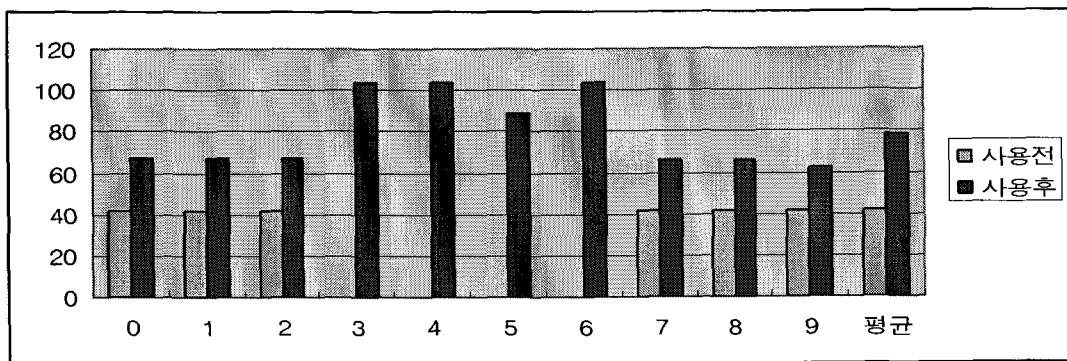
| 편성 | 차호 | 영업개시일 | 차량교환일 | 차량교환일 | 평균사용기간 | 차량교환일 | 차량교환일 | 차량교환일 | 평균사용기간 |
|-----|----|------------|------------|------------|--------|------------|------------|------------|--------|
| 301 | 0 | 1985-01-10 | 1989-01-05 | 1991-12-17 | 42 | 1997-07-29 | 2003-01-10 | | 67 |
| | 1 | 1985-01-10 | 1989-01-05 | 1991-12-17 | 42 | 1997-07-29 | 2001-01-08 | 2006-03-31 | 57 |
| | 2 | 1985-01-10 | 1989-01-05 | 1991-12-17 | 42 | 1997-07-29 | 2001-01-08 | 2006-03-31 | 57 |
| | 3 | 1992-05-20 | | | | | 2001-01-08 | | 104 |
| | 4 | 1992-05-20 | | | | | 2001-01-08 | | 104 |

| | | | | | | | | |
|-----------------|------------|------------|------------|----|-----------------|------------|------------|-----|
| 5 | 1992-05-20 | | | | | 2000-01-02 | 2006-03-31 | 89 |
| 6 | 1992-05-20 | | | | | 2001-01-08 | | 104 |
| 7 | 1985-01-10 | 1989-01-05 | 1991-12-17 | 42 | 1997-07-29 | 2003-01-10 | | 66 |
| 8 | 1985-01-10 | 1989-01-05 | 1991-12-17 | 42 | 1997-07-29 | 2003-01-10 | | 66 |
| 9 | 1985-01-10 | 1989-01-05 | 1991-12-17 | 42 | 1996-10-08 | 2000-01-02 | 2006-03-31 | 62 |
| 96년 이전 차륜평균사용기간 | | | | 42 | 97년 이후 차륜평균사용기간 | | | 78 |

표 4-4는 D301편성을 예로 나타낸 표이다. 전동차 도입 년도부터 차륜 교환일자를 표시하였다. 각각 교환 월을 기준으로 차륜사용기간을 계산하였다. 루프선 사용 전의 96년까지 차륜평균 사용기간은 42개월로 나타났고, 루프선 사용 후 97년 이후의 차륜평균 사용기간은 78개월로 나타났다. 루프선 사용 전에는 차륜 후렌지의 한 쪽 방향만 마모되어 차륜사용기간이 상당히 짧았지만 차륜 양방향 마모를 균등하게 한 이후부터는 차륜사용기간이 평균 42개월에서 78개월로 80% 이상 대폭 늘어 난 것을 볼 수 있다.

표4-6. D301편성 루프선 사용 전후의 차륜평균사용기간 비교

| 차호 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 평균 |
|-----|----|----|----|-----|-----|----|-----|----|----|----|----|
| 사용전 | 42 | 42 | 42 | | | | | 42 | 42 | 42 | 42 |
| 사용후 | 67 | 67 | 67 | 104 | 104 | 89 | 104 | 66 | 66 | 62 | 78 |



다음 표는 상기의 2호선과 같은 방법으로 9개 편성에 대한 차륜교환일자를 기준으로 각 량의 차륜사용기간을 조사한 내용이다.

표 4-7. 3호선 차륜평균사용 기간

| 편성 | 96년전 차륜평균사용기간(월) | | | | | | | | | | 평균 | 97년이후 차륜평균사용기간(월) | | | | | | | | | | 평균 |
|-----|------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-------------------|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
| | TC | M | M | M | M | T | T | M | M | TC | TC | M | M | M | M | T | T | M | M | TC | | |
| 301 | 42 | 42 | 42 | | | | | 42 | 42 | 42 | 42 | 67 | 57 | 57 | 104 | 104 | 89 | 104 | 66 | 66 | 62 | 78 |
| 302 | 45 | 45 | 45 | | | | | 45 | 45 | 45 | 45 | 84 | 104 | 104 | 92 | 92 | 92 | 92 | 104 | 104 | 96 | 96 |
| 305 | 50 | 50 | 50 | | | | | 50 | 50 | 50 | 50 | 94 | 94 | 94 | 93 | 93 | 76 | 76 | 80 | 80 | 80 | 86 |
| 310 | 36 | 36 | 36 | | | | | 36 | 36 | 36 | 36 | 86 | 91 | 86 | 91 | 91 | 85 | 91 | 86 | 86 | 91 | 88 |
| 315 | 44 | 44 | 44 | | | | | 44 | 44 | 44 | 44 | 69 | 69 | 62 | 69 | 95 | 95 | 95 | 69 | 69 | 69 | 76 |
| 320 | 40 | 40 | 40 | 77 | 77 | 77 | 77 | 40 | 40 | 40 | 55 | 73 | 73 | 73 | 75 | 75 | 75 | 75 | 66 | 66 | 64 | 71 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|
| 330 | 45 | 45 | 45 | | | | | 45 | 45 | 45 | 45 | 50 | 50 | 50 | 122 | 122 | 122 | 122 | 50 | 50 | 50 | 79 |
| 335 | | | | | | | | | | | | 85 | 85 | 85 | 85 | 85 | 85 | 85 | 85 | 85 | 85 | 85 |
| 345 | 69 | 69 | 69 | 77 | 77 | 77 | 77 | 69 | 69 | 69 | 72 | 82 | 124 | 124 | 74 | 74 | 74 | 74 | 82 | 82 | 82 | 87 |
| | 46 | 46 | 46 | 77 | 77 | 77 | 77 | 46 | 46 | 46 | 48 | 77 | 83 | 82 | 89 | 92 | 88 | 90 | 76 | 76 | 75 | 84 |

(2). 루프선 사용 전후의 3호선 차륜교환의 비교 결과

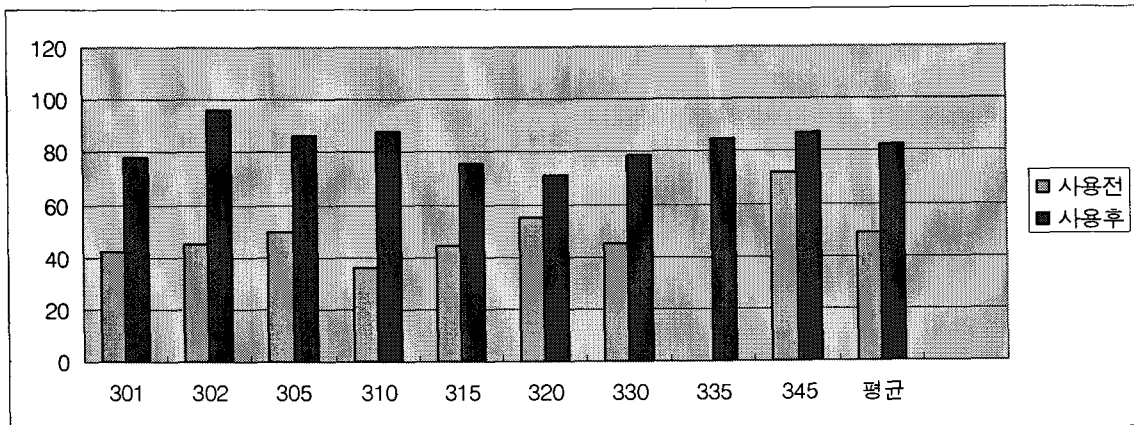
운행 중인 3호선 전동차 중에서 임의로 9개 편성을 기준하여 차륜교환일자를 통하여 각 차량 당 각 편성 당 차륜평균 사용기간을 루프선 사용 전후를 구분하여 표시하였다. 표에서 보듯이 3호선의 차륜사용기간은 84개월로 2호선 61개월보다는 길고 4호선 136개월보다 사용기간이 짧은 것으로 나타났다.

(3). 3호선의 루프선 사용 전후의 차륜 평균사용기간 비교

루프선 전후 차륜평균사용기간은 49개월에서 84개월까지 루프선 전 대비 80%이상 연장되어 사용되었다.

표 4-8. 3호선의 루프선 사용 전후의 차륜평균사용기간 비교(월)

| 편성 | 301 | 302 | 305 | 310 | 315 | 320 | 330 | 335 | 345 | 평균 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| 사용전 | 42 | 45 | 50 | 36 | 44 | 55 | 45 | | 72 | 49 |
| 사용후 | 78 | 96 | 86 | 88 | 76 | 71 | 79 | 85 | 87 | 84 |



(4). 차륜사용기간이 각 차량마다 각 편성마다 편차가 심하다. 루프선 사용 후를 기준해서 보더라도 최소 사용 기간이 57개월에서 122개월까지 편차가 심한 특징을 나타내고 있다. 이것은 차량운행 시 운행 조건에 변수가 아주 많다는 것을 알 수 있다. 또한 각 편성단위도 차륜사용기간이 많은 편차를 나타내고 있다. 루프선 사용 후에도 평균 78개월에서부터 106개월까지의 사용기간의 차이가 심하게 나타났다.

(5). 선두차와 중간차의 비교

표4-7에서 나타났듯이 선두 차량인 0/9호가 중간차량보다 평균차륜사용기간이 2,10개월 정도 짧게 사용되었다. 그 이유는 곡선부에서는 선두차가 차량을 선도하면서 곡선부에서 나타난 어택각(Attack angle)이 레일과의 마찰력이 커지는 반면 후행 차량은 선도차에 이끌려가는 형식이 되어 레일에 미치는 횡압이 연결기/차량 현가장치 등에 흡수된다. 따라서 레일에 미치는 횡압이 감소되어 후렌지 마모가 작은 것으로 판단된다.

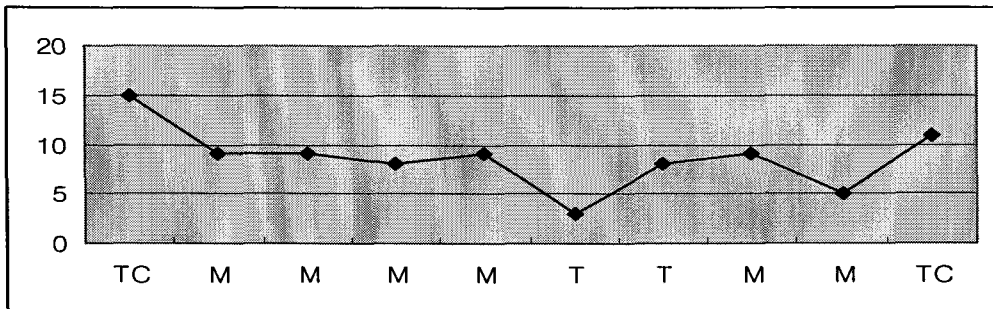
(6). 3호선 부분차륜교환 분석

부분차륜교환은 량 단위로 또는 편성단위로 차륜교환을 하는 것이 아니고 부분적으로 차륜이 마모되어 축 단위로 차륜을 교환하는 것을 말한다. 3호선 20개 편성을 선정하여 차륜 부분교환을 조사했다.

표 4-9. 3호선 부분차륜교환 횟수 (90년-2006년)

| 편성 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 편성 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 301 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | | 2 | | | 1 | 321 | 1 | | 1 | | | | | 1 | | 1 |
| 303 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | | 1 | 323 | 1 | 1 | | | | | | 1 | | 1 |
| 305 | 1 | 1 | | 1 | 2 | | | 2 | 2 | 2 | 325 | 1 | | | 1 | 1 | 1 | 1 | | | |
| 307 | 1 | | | 1 | | | 1 | | | 1 | 329 | 1 | | 1 | 1 | | | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 309 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | 0 | 331 | | | | | | 1 | | 1 | 1 | |
| 311 | | | 1 | | | | 1 | 1 | | | 341 | 1 | 1 | 1 | | 1 | | | 1 | 1 | 1 |
| 313 | 1 | | | | | | | | | | 342 | 1 | | | | | | | | | |
| 315 | | | | | | | | | | 1 | 343 | 1 | | | | | | | | | |
| 317 | | | | | 1 | | | | | 1 | 345 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | |
| 319 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | | | | 346 | 1 | | | | | | | | | |

| 차호 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| 회수 | 15 | 9 | 9 | 8 | 9 | 3 | 8 | 9 | 5 | 11 |



전동차의 선두차량이 중간 차보다 차륜마모가 심하다는 것이 일반적인 상식이다. 위 표에서도 선두차인 0/9(TC)호 차의 부분차륜교환 빈도가 상대적으로 많은 것이 실제 차륜교환 조사에서도 나타났다. 곡선부 레일이 많은 2·3호선은 앞 표에서 보는 것처럼 선두차의 차륜사용기간이 중간 차량보다 상대적으로 짧은 것으로 나타났다.

5. 결론 및 향후 연구과제

2호선 중 9개 편성 90량, 3호선 9개 편성 90량 차륜교환분석을 통해서 수직마모의 완화책으로 설치되었던 루프선을 10년 동안 규칙적으로 이용함으로써 다음과 같은 결과를 얻어냈다.

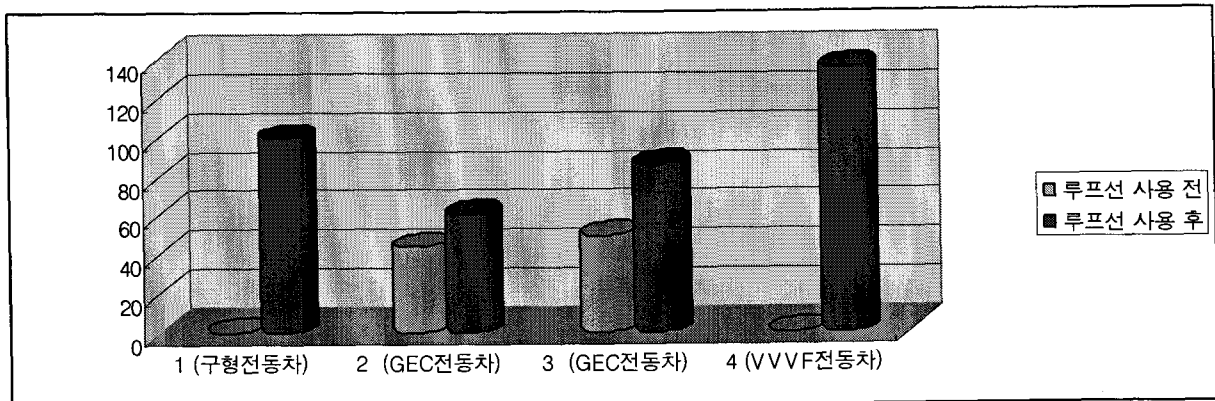
- (1). 2호선은 차륜평균사용량이 루프선 사용 전 45개월로 나타났으나 루프선 사용 후에는 61개월 (35%)로 16개월 연장되었다.
- (2). 3호선은 차륜평균사용량이 루프선 사용 전 49개월로 나타났으나 루프선 사용 후에는 84개월 (71%)로 35개월 연장되었다.

또 10년간의 장기간 차륜 교환량의 데이터를 활용하여 호선 별로 차륜평균사용기간을 도출해냈다. 이 자료를 근거로 매년 차륜의 수급예측에 필요한 자료로 활용될 수 있으며 전동차의 차륜교환예정일도 예측할 수 있어 전동차 예방정비의 정보로 활용할 수 있다.

- (1). 2호선의 선두차(TC)의 평균사용기간은 57개월, 중간 차들의 평균사용기간은 62개월 나타났고 전차량을 합계 평균하면 61개월로 나타났다.
- (2). 3호선의 선두차(TC)의 평균사용기간은 76,5개월, 중간 차들의 평균사용기간은 84,5개월로 나타났고 전 차량을 합계 평균하면 84개월로 나타났다.

표5-1. 호선별 차륜평균사용기간 비교(월)

| 호선 | 루프선 사용 전 | 루프선 사용 후 |
|------------|----------|----------|
| 1(구형전동차) | - | 100 |
| 2(GEC전동차) | 44 | 61 |
| 3(GEC전동차) | 49 | 84 |
| 4(VVVF전동차) | - | 136 |



(* 참고 1호선은 현재 운행 중인 신형전동차 VVVF 전동차와 폐차되지 않고 운행 중인 구형전동차 중에서 구형전동차를 기준으로 하였고 4호선은 현재 운행 중인 신형전동차 VVVF 전동차를 기준으로 하여 평균사용기간을 표시했다.)

또한 표 4-9 부분차륜교환 분석에 나타나 듯이 일반적으로 선두차량의 차륜 마모량이 중간차량보다 많다는 것이 일반적 상식이었다. 이러한 결과가 이번 조사에서도 실증적으로 증명이 되었다. 차륜과 레일의 마찰로 마모는 필연적 나타나는데 현재는 수직마모방지책으로 곡선 레일부 도유기에만 의존하고 있다. 일본 등 철도선진국에서는 곡선구간에 적당한 차륜담면형상 개발을 위해서 많은 노력을 하고 있다. 우리도 지하철 2호선처럼 곡선구간이 많은 레일에 적당한 차륜담면형상 개발을 위해 연구가 필요하다고 생각한다.

참고문헌

- [1] 임진수, “철도 차량의 동역학 - 헌팅과 주행 문제의 역사-”, 한국소음진동공학회지, 제9권 제3호, 425-430p, 1999
- [2] 김형덕 역, “철도 차량기술 요원을 위한 철도차량, 검수정보(하)”, (주) 에코마스터, 2003.
- [3] 서울지하철공사, “전동차정비지침서” .
- [4] 서울지하철공사, “전동차검수규정” .
- [5] 양철식, “도시철도 차량의 차륜마모에 따른 횡가속도 패턴 연구 ”, 석사학위논문, 서울산업대학교, 2006.
- [6] 김희대의 5명, “전기철도공학”, 태영문화사, 2007.
- [7] 백남욱외 3명, 철도차량총서”, 기전연구사, 1997.
- [8] 이남진·김정하·남학기, “곡선 선로에서의 차륜답면과 레일 접촉에 대한 개념적 연구”