

# 우천 시 서울메트로 신형 VVVF 전동차(2,3호선)의 슬립현상에 관한 연구

## A Study on SLIP actual condition of rainy day at the time of Seoul Metro new style VVVF Inverter Rolling Stock (2,3 lines)

김재현+                  김주태\*                  남재호\*                  손영진\*\*  
Jae-hyun Kim          Ju-tae Kim          Jae-ho Nam          Young-jin son

---

### Abstract

Recently, the Seoul Metro has replaced the old series of Line No.2 and 3 to the new ones. In spite of the replacement, the new ones are more likely to be slippery compared to the old ones. Because the subway system has such short intervals, delayed subways influence the whole line systems, especially during the rush hours. And the slip causes the delay. Therefore we are willing to find out the reason why the new ones are more defective and we will try to mince it from the view of mechanical aspects and handling aspects of driving.

---

#### 1.서론

철도차량에 있어서 공전(SLIP)의 문제는 이제까지 지속적으로 제기돼왔고, 또한 철제차륜과 철로 된 레일위를 달리는 철도차량에 있어서는 피할 수 없는 문제이기도 하다. 최근 서울메트로에서는 2호선과 3호선에 내구연한이 다 된 초퍼차를 로템에서 제작한 신형 VVVF 전동차(이하 신형 전동차)로 교체하여 운영하고 있다. 서울메트로의 2호선은 일일 평균 이용객이 200만 명이 넘으며 특히 출퇴근 시간에는 그 혼잡도와 열차운행 간격이 2.5분이다. 그런데 새로 투입된 신형 전동차에서 우천 시에 기존의 초퍼차뿐 아니라 1호선 VVVF 차와 비교하여서도 공전 현상이 두드러지게 나타나고 있다. 우천 시에는 어느 차종이든지 어느

---

+ 김재현 서울산업대학교, 철도차량공학과 학생  
E-mail : 22-line@hanmail.net

TEL : (02)6110-      FAX : (02)6110-

\* 김주태, 서울산업대학교, 철도차량공학과, 학생

\* 남재호, 서울산업대학교, 철도차량공학과, 학생

\*\* 정희원 손영진 서울산업대학교 차동차공학과 교수

정도의 공전현상은 피할 수 없지만, 신형전동차 에서의 공전 현상은 그 정도가 심하여 열차 지연의 원인이 된다고 파악되고, 또한 공전 현상으로 인한 승객들의 승차감에도 상당한 영향이 있다고 판단된다. 따라서 이 연구에서는 현재 2호선과 3호선에 투입되고 있는 신형전동차가 기존의 초퍼차보다 공전현상이 왜 심하게 일어나는지 그 원인을 파악해보고, 공전현상을 줄이기 위한 대책을 세워보고자 한다.

## 2. 본론

### 2.1 신형전동차의 공전에 대한 설문조사

신형 전동차가 기존의 차들보다 공전이 심한가는 2호선(본선과 성수지선)을 직접 운전하는 기관사들 사이에서 어느 정도 공감이가 되고 있는가에 대해서 설문 조사를 실시하여 보았다. 설문조사는 서울메트로 회사내 웹메일을 통하여 이루어졌으며 총 226명에게 보냈다. 설문에 응한 인원은 41명이며 설문의 질의 내용은 다음과 같다.

1. 2호선 신형 VVVF 전동차가 우천 시나 강설시에 슬립(역행시 공전현상)이 기존의 초퍼차나 저항차와 비교하면 그 정도가 어떻다고 생각하십니까?

- ① 매우 심하다.
- ② 심하다
- ③ 차이없다.
- ④ 슬립이 덜 발생한다.
- ⑤ 전혀 발생하지 않는다.

2. 슬립현상이 기존차들과 비교하여 심하다고 생각하신다면, 그것이 열차지연의 한 원인이 될 수 있다고 생각하십니까?

- ① 예
- ② 아니오

3. 슬립현상이 발생했을 때 승객들의 승차감에 영향을 미쳐 불편민원이 발생할 수 있다고 생각하십니까?

- ① 예
- ② 아니오

도표1. 설문조사에 대한 결과

	①	②	③	④	⑤
질문 1	19	21	0	1	0
질문 2	33	8			
질문 3	38	3			

설문조사에 대한 결과에서 알 수 있듯이 전체 응답자의 98%가 신형전동차에서의 공전현상이 기존 차들에 대해서 심하다고 생각하고 있었으며 80%는 공전으로 인한 열차의 운전취급(단속노치 취급)으로 열차지연의 원인이 된다고 답하였으며, 92%는 슬립 발생시의 열차의 급격한 속도 변화로 인한 승차감에 의해 승객들의 불편민원이 발생할 우려가 있다고 표명하였다.

### 2.2 공전의 원인

공전의 원인을 살펴보고자 첫 번째로 신형전동차와 기존의 초퍼차 및 1호선 VVVF 차들과 전동기의 제원 및 차량의 중량을 비교하여 보았다.

도표 2.2 각 차량의 주요 제원 비교

	신형 전동차	2호선 초퍼 대우 GEC	1호선 VVVF(교직류전동차)
전동기 형식	KTM-ILS-210CA형 3상 4극 농형 유도전동기	직류 직권전동기	MB-5052-A 3상농형 유도전동기
전동기 출력	230KW(1시간정격) 210KW(연속정격)	162KW(1시간정격) 150KW(연속정격)	230KW(1시간정격) 200KW(연속정격)
전동기 RPM	2190(1시간정격) 2200(연속정격)	1900(1시간정격) 2043(연속정격)	1940(1시간정격) 1945(연속정격)
인버터 출력전압	3상 AC0~1100V		AC 0~1250V(AC구간) AC 0~1100V(DC구간)
M차 중량	M1-34.7ton M2-36.3ton	42ton	41.2 ton

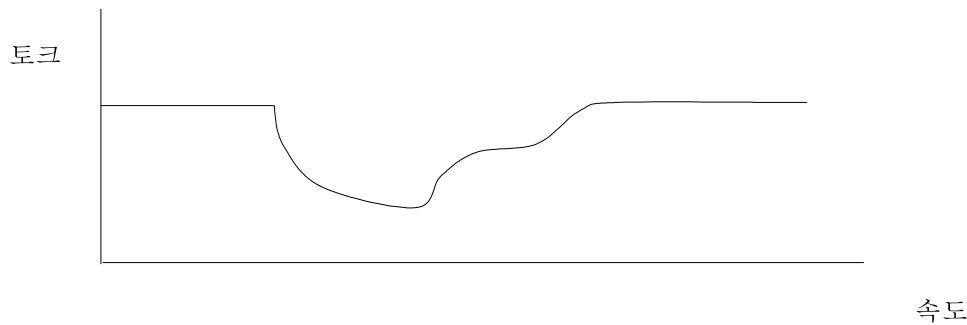
여기서 특히 비교되는 것은 1시간 정격 기준으로 봤을 때의 RPM과 M차의 중량이다. 보통 공전은 동륜주전인력이 점착전인력보다 컸을 때 일어난다. 주행 중 동륜과 레일의 관계를 역학적 관점에서 보면 차륜 답면 상에 작용하는 구동력 F와 답면이 레일과 접촉하는 점에 수직으로 가해지는 힘(이것은 축중이라 칭함)W. 답면과 레일과의 점착계수  $\mu$ 와의 관계는  $F \leq \mu W$ 의 식이 성립한다. 만약 F가  $\mu W$ 보다 크면 기동 시에 공전이 일어나게 된다. 그런데 W와 관계되는 것이 M차의 중량인데, 신형전동차는 기존의 1호선 VVVF나 2호선 cy퍼차와 비교했을 때 약 6ton 가량 가볍다.

F, 즉 점착력의 단위는 kg인데, M차의 중량을 kg으로 환산해 보면 약 6000kg 정도의 차이가 나고 점착계수는 건조하고 맑은 날의 경우 0.2~0.3정도가 된다. 전동차의 경우는 일반적으로 약 0.245로 본다. 비나 서리가 내릴 경우 점착계수는 약 1/2로 줄고 특히 기름류의 오물이 부착되면 1/3 가까이로 점착계수가 줄어든다.  $F \leq \mu W$ 를 이용하여 맑은 날 각 차량의 점착력을 구해보면 신형전동차(M1, M2의 평균 35.5ton으로 계산)는 점착력이 8697.5kg 2호선 초퍼차의 경우는 10290kg, 1호선 VVVF의 경우 10094kg 이 산출된다. 이는 신형전동차가 약 1500kg의 점착력이 부족하단 뜻이 된다. 우천시의 경우를 살펴보면 점착계수는 약 0.15로 줄게 되는데 이때 신형전동차의 점착력은 5325kg이 되고, 초퍼차는 6300kg 1호선 VVVF차의 경우는 6225kg이 된다. 우천 시 신형전동차의 점착력 5325kg의 경우에는 맑은 날 초퍼차의 점착력에 절반 수준에 밖에 못 미친다. 게다가 2호선 신형전동차 전동기의 RPM은 다른 2차종과 비교해 약 250정도 높는데 RPM이 높다는 것은 전동기의 회전수가 높다는 것이다. 이런 점 역시 공전이 더 발생할 수 있는 원인이 된다. 가벼운 중량에 높은 RPM이 공전의 주된 원인이 되는 것이다.

### 2.3 신형전동차의 승차감

신형전동차의 공전현상은 열차의 승차감에도 영향을 끼친다. 신형전동차는 슬립/슬라이드 감지 및 제어 기능이 있는데 이는 슬립/슬라이드 신호 검출시 기준토크를 줄여 슬립/슬라이드를 방지하기 위한 것이다. 이 기능은 슬립/슬라이드 속도 및 가속/감속의 차이를 모니터링하여 감지한다. 속도차이의 감지에 있어서, 직경이 상이한 휠 간의 회전주파수 차이에서 발생하는 오류에 의해 감지 성능이 저하되는 것을 방지하기 위해 속도에 따라 다양한 설

정값이 적용되도록 감지 수준 값을 설계하였다. 저속에서 고속범위까지 일정한 감지 성능을 제공한다. 가속/감속 차이 검지에 있어서도 감지 수준은 다양하다. 표준 가속/감속은 일정하게 산출되며, 그 결과는 최적의 감지 수준을 제공하기 위해 사용된다. 이 내용은 내리막 경사에서의 부정확한 슬립/슬라이드 그리고 오르막경사에서의 슬립/슬라이드 지연과 같은 문제를 감소시키는데 도움이 된다. 전류감소는 슬립 시 모터 토크에서 경사를 감소시키기 위해 슬립/슬라이드 정도에 따라 변경이 가능하다.



그러나 현재 신형 전동차의 이런 기능이 승차감의 영향을 끼친다. 슬립의 검지로 인하여 전류가 감소하게 되는데, 이 때 전류의 감소에 의하여 열차의 속도는 급격히 감소하게 되고 슬립을 방지하였다고 검출되면 다시 정상적인 역행을 시도하나 재차 슬립 검지를 하고, 재차 전류감소로 인한 속도 저하로 열차는 앞뒤로 진동하는 등의 불안정한 승차감을 준다. 물론 저크 제한(어떠한 경우에도 가/감속이  $0.8m/s^3$ 를 초과하지 못하도록 토크 값을 제어)이 있지만, 이는 비상제동이나 전원 공급에 손실이 있는 경우는 제외로 두기 때문에 공전으로 인한 속도의 급작스런 변화에는 영향을 주지 못 한다. 이런 기능으로 인하여 승객들은 쾌적한 승차감을 느끼지 못하고 고객 불만의 민원이 발생할 우려가 높다.

#### 2.4 신형전동차의 공전에 대한 대책

위에서 살펴본 바에 의하면 신형전동차의 공전의 원인은 가벼운 차량의 하중과 전동기의 높은 RPM이 그 원인이라고 할 수 있겠다. 이에 따라 공전을 줄이기 위한 대책을 세울 수 있는데 첫 번째로는 전동기의 성능 중 RPM을 낮추는 방안을 강구할 수 있겠다. 신형전동차가 벡터제어나 슬립/슬라이드 검지 기능을 통하여 공전에 대한 대비를 하였으나, 가벼운 중량과 높은 RPM으로 인한 공전은 피할 수 없으며, 슬립/슬라이드 검지 기능은 공전을 하였을 경우 사후 대책이지 예방책은 아니다. 또한 이 기능으로 승객들의 승차감에 불쾌함을 초래할 수 있음은 자명한 사실이다. 따라서 전동기의 RPM을 낮추는 것이 가장 효율적인 대책이다.

운전 취급 측면에서는 속도를 천천히 올리는 방법이 있다. 실제로 우천 시 서울메트로 2호선 운전실에 직접 승차해본 결과 대부분의 기관사들은 노치를 2노치이상 올리지 않았다. 더 이상의 노치를 올리면 공전이 발생하기 때문에 승객들의 승차감을 위해서 천천히 속도를 올리는 것이다. 이런 운전 취급은 기존의 모든 전동차 기관사들이 이미 쓰고 있는 방식이기도 하다.

결론적으로 운전 취급적인 면은 대부분의 전동차에서 똑같이 운용되고 있는 게 사실이다. 따라서 기존 초퍼차나 1호선의 VVVF 차량과는 달리 공전현상이 심하게 발생하는 신형전동차의 경우는 전동기의 성능을 다운그레이드 하는 것만이 다른 전동차들과 공전 발생 비율을

비슷하게 할 수 있는 방법이다.

#### **참고문헌**

1. 손영진 저, 철도차량공학
2. 서울메트로 교육문화본부 “철도관련법규 및 운전이론”
3. 주식회사 로템 “서울메트로 2호선 신조 280량 교육교재”
4. 이원식, “차륜/레일간의 점착 특성과 공진 활주제어”