

- 유지보수 측면에서 본 - 전동차 인버터장치의 장애 대책 수행 및 고찰



| 최 용 운 |
서울도시철도공사
공학박사

철도시스템에서 수송 수단은 차량이다. 철도차량분야에 종사하는 사람의 경우 “차량고장을 어떻게 줄이느냐!” 또는 “동종 사고의 발생을 어떻게 막을 것이냐!”는 큰 과제로 부과된 사명이기도 하다.

운행 간격이 짧은 도시철도시스템의 경우는 출퇴근 혼잡 시간에 차량에 기인한 사고는 본선에서 모든 구간의 열차를 장시간 정지시킴으로써, 사회 전반에 시간적, 경제적인 손해를 발생시킨다.

시설 등의 많은 비용을 투입 하고 있다. 특히 서울도시철도공사의 5호선은 1기 지하철 노선을 보완하는 노선으로 심도가 깊고 곡선구간이 매우 많으며 분진 발생도 많은 노선이다.

본 투고문에서는 터널 등의 및 주행 환경과 관련된 5호선 전동차 인버터 장치 장애 원인을 분석하고, 개선하는 과정에서 확인된 지속적인 유지보수의 중요성과 이를 통한 차량 설계 및 사양 선정의 중요성을 논하고자 한다.

I. 서론

5호선 전동차가 영업운행을 시작한지 15년이 지났다. 1989. 12월 제2기 서울시 지하철 기본계획 확정 및 일부구간 착공에 따라 서울에 5, 6, 7, 8호선의 지하철 노선이 건설되었다. 서울도시철도공사의 운영 구간은 서울메트로(1~4호선)에 추가되는

노선으로써 심도가 깊고, 곡선이 많은 노선이다. 특히 터널구조가 기존노선은 자갈도상 이지만, 2기 지하철은 콘크리트 선로구조로 변경 시공한 노선으로 이는 분진억제나 유지보수 측면에서 매우 효율적인 방법으로 최근 건설되는 지하철에 적용되고 있다.

하지만 서울도시철도공사 터널의 높이가 기존 지하철에 비해 650mm(기존 5,950mm)가 낮게 시공되었다. 이러한 터널환경 변화는 서울메트로에 비해 소음과 분진의 영향에 더 크게 노출되게 되었다.

특히 5호선의 경우는 터널(선로)구조와 함께 인버터장치가 강제 냉각식(작동유체 : 터널공기) 구조로 되어 있어 곡선부 차륜마모에 따른 쇳가루의 영향이 차량 고장에 크게 영향을 미치게 되었다.

이에 도시철도공사는 인버터 장애를 개선하기 위한 총력을 기울였으며, 이에 대한 개선을 추진한 결과 양호한 결과를 얻었다. 노선의 특성과 관련된 5호선 인버터장치의 고장 방지 대책을 고찰하여 보기로 한다.

II. 현황

1. 5호선 인버터 시스템

철도차량에서 반도체의 주된 도입목적의 하나가 보수의 경감이다. 다이오드 소자류는 “열화는 없고

반영구적인 수명을 갖는다!” 라고 생각되어 왔다. 그러나 요즘과 같이 소자의 구조가 복잡하여 지면서 “수명은 존재한다”라는 사고가 점차 정착되어가고, 더구나 장치로서 초기고장뿐 아니라, 우발고장으로 볼 수 있는 고장이 있으면 유지보수가 경감이 될 수 없고, 도입취지가 충분히 살지 못하는 문제가 있다. 고장은 소자자체의 결함보다는 동작조건, 환경 등의 사용조건이나, 회로의 설계 등에서 기인되는 경우가 많으므로 설계 기술의 향상 및 개선이 필요하다고 판단된다.

2. 도입목적

1500V인 직류 전압을 교류 0~1,170V로 변환시켜 견인전동기를 구동시키는 전동차의 핵심장치인 전력변환 장치를 근래에 들어 차량용 인버터 장치라 부르며, 국내 도시철도 차량의 경우 대개(8량 기준) 1개편성당 4개가 설치되어 있다.

5호선 전동차가 제작되기 이전(1994년) 차량용 주전동기는 직류전동기가 주류를 이루고 있었으나, 대용량 고내압 전력소자의 개발 등과 함께, 마이크로 컴퓨터에 의한 고도의 제어기술의 진보 등에 따라 주전동기로서 3상 농형 유도전동기를 사용한 VVVF 인버터 제어 시스템이 실용화기에 들어섰고, 이런 인버터 제어 차량의 특징은 양호한 점착성능, 에너지(회생 기능)절약, 기기의 소형경량화, 주전동기의 유지보수 경감 등 몇 가지를 들 수 있다.

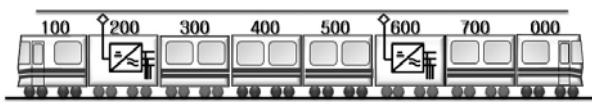


그림 1.5호선 전동차의 조성도

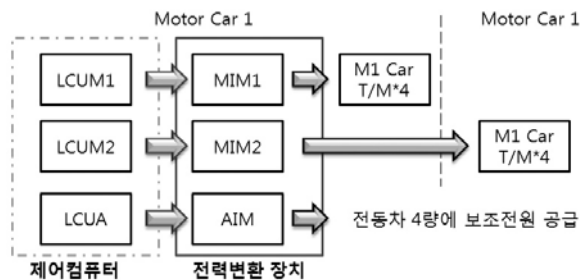


그림 2.5호선 전동차의 전력변환 시스템

표 1. 호선별 선로곡선 현황

구분	선로 (상하선)	곡선반경			
		계	R≤300	R≤301~400	R≤401~500
계	327km	64.9	20.7	24.7	19.5
5호선	113.7	29.4	10.0	10.3	9.1
6호선	71.5	12.5	2.9	5.5	4.1
7호선	99.7	18.4	4.4	8.2	5.8
8호선	42.1	4.6	3.4	0.7	0.5

3. 5호선 선로 특성

현재 5호선은 1995년 11월에 부분 개통되어 1996년 12월에 완전개통 되었으며, 영업거리 52.3km에 76개 편성 608량의 전동차가 운행되고 있다.

가. 선로 특성

5호선의 선로는 곡선반경 500m 이하인 구간이 선로연장 113.7km의 25.8%인 29.4km나 된다. 특히 곡선반경 300m 이하가 10.0km(8.8%)이고, 301~400R 이하가 10.3km, 401~500R 구간이 9.1km이다. 이는 서울도시철도 공사의 다른 운영호선과 비교하여 볼 때, 6호선은 17.5%, 7호선은 18.5%, 8호선은 11.3%로 25.8%인 5호선이 보다 다수 많음을 알 수 있다.

나. 선로 특성과 차륜레일의 마모

철도 차량은 곡선부 주행 중 절선력(Creep-force)라는 복잡한 힘의 크기에 따라 차륜 및 레일의 마모량이 결정되어 지는데, 5호선의 경우 급곡선부의 다수 존재로 인한 마모량이 타 호선에 비하여 상대적으로 많이 발생한다.

아래의 식과 그림은 철도차량용 전용 동역학 Vampire 매뉴얼에 있는 곡선반경과 차륜/레일의 마모와의 관계를 나타낸다.

○ 마모지수(Wear Index)

$$T\gamma < 160 \text{인 마모가 적은 경우} \\ = T\gamma \times 0.005,$$

$$T\gamma > 160 \text{인 마모가 심한 경우} \\ = T\gamma \times 0.025 - 3.2,$$

마모계수($T\gamma$) : 차륜과 레일의 접촉점에서 절선력(Creep-force)에 의한 에너지로, 종방향 및 횡방향의 Creep force와 Creepage(미세한 미끄러짐 정도)에 의해 얻어진다.

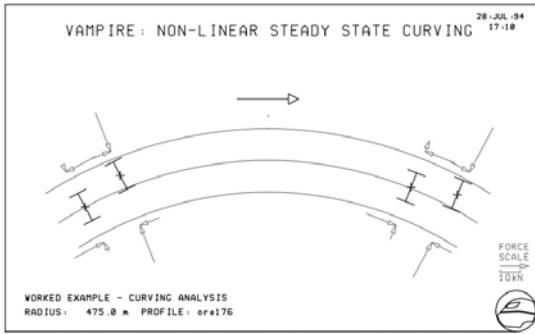


그림 3. 곡선 주행시 차륜/레일에 작용하는 힘

표 2. 곡선반경에 따른 마모지수의 변화

Radius(m)	275	325	375	425	475	525	575	650
Wear No.	132.3	96.81	74.72	56.89	39.14	26.63	18.01	9.017
Wear Index	0.661	0.484	0.374	0.284	0.196	0.133	0.09	0.045

표 3. 5호선별 차륜수명

구분	5호선	6호선	7호선	8호선
기간	5년 7개월	일부 미도래	5년 11월	8년 7월
거리(km)	585,765	-	664,631	900,206

○ 곡선 주행시 차륜/레일에 작용하는
 ○ 정상속도에서 1대차 좌측 차륜의 마모 지수와 마모수 사실 서울도시철도공사가 운영하는 구간 중 5호선의 차륜 수명이 짧다는 것이 이를 증명한다.

Ⅲ. 장애 발생 요인 검토

1. 환경적요인

5호선은 선로 구조가 곡선이 많아 곡선부에서 발생하는 차륜과 레일간의 마모에 의한 쇳가루가 많으며, 터널내부

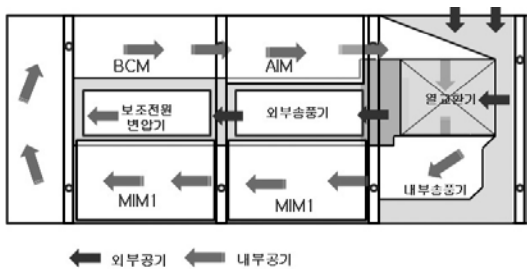


그림 4. 인버터 냉각시스템

에 섬유성 분진도 많았다.

가. 5호선 전동차 인버터 내 분진 성분 분석 결과

- 분석대상 : 고덕기지 입고차량 3개편성(502, 510, 515편성)
- 시료채취 : 3종(외부 필터측, 내부 필터측, 모듈측)
- 의뢰기관 : 한국화학시험연구원
- 분석결과(2g 당)

나. 결과

- 전체 분진 중 철성분이 평균 62.72% 차지
 - 원소별 구성비 순 : 철(Fe) > 규소(Si) > 칼슘(Ca) > 알루미늄(Al)
- 외부필터측에서 여과되지 않은채 인버터 내로 유입된 분진의 약 72%가 철 성분
- 내부필터측 철성분 높은 이유
 - 열 교환기내 자성에 의한 철 성분 부착으로 추정
- 성분별 유입 원인 분석
 - 철 성분: 전동차의 차륜마모, 레일 및 전차선 마모
 - 철(Fe), 크롬(Cr), 알루미늄(Al), 망간(Mn), 티타늄(Ti), 구리(Cu), 바륨(Ba) 등

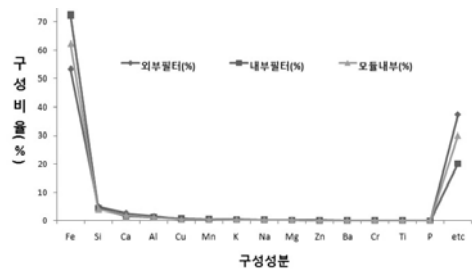


그림 5. 분석결과 1

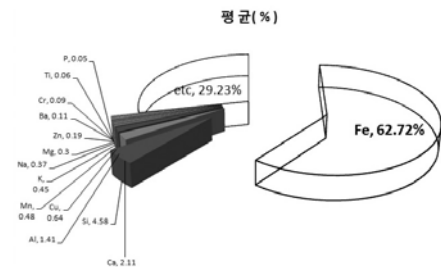


그림 6. 분석결과 2

- 토양성분 : 노반시멘트 열화에 따른 균열, 도로변 토양, 환기유입 등

- 나트륨(Na), 아연(Zn), 규소(Si), 인(P), 칼륨(Ca) 등
- 자동차 성분 : 모터카 사용 및 역사 출입구, 본선환기구 등 유입
- 알루미늄(Al), 칼륨(K), 마그네슘(Mg) 등
- 기타산화물 등 : 금속류와 화합물 결합 형태로 이루어진 물질
- 산화철(FeO), 산화규소(SiO₂), 산화칼슘(CaO), 산화알루미늄(Al₂O₃) 등의 성분

이로 인하여 인버터 단락 고장이 5호선 전동차 운영에 문제로 대두되었다.

2. 구조적 요인

5호선 인버터 장치는 강제 냉각방식으로 내·외부 송풍기를 구동시켜 주. 보조 전력변환 장치의 열을 냉각시키는 구조로 전동차 운행 시 발생하는 미세먼지의 유입으로 기기 내에서 단락 고장 등을 발생시켜 전동차 운행에 지장을 주는 사례가 많았다.

인버터함내 냉각을 위한 공기의 강제 순환 방식은 특성상 내·외부의 압력차 발생으로 차폐시스템(실링, 패킹 및 차폐 판넬)의 변형을 발생 시켰고, 철도차량의 진동이 배가되어 시간이 흐름에 따라 기능을 상실하여, 외부 유해먼지 흡입 및 금속성, 유분함유 분진에 의해 코로나 방전이 단락 고장의 원인으로 작용하였다.

6, 7, 8호선의 인버터(자연 냉각방식)에 비하여 부품간 전기적 절연도 취약하였다.

3. 운영적 요인

인버터함내 열교환기 변형에 의한 차폐 성능의 저하와 각종 패킹류, 필터관리가 미흡하였고, 운행 조건을 고려한

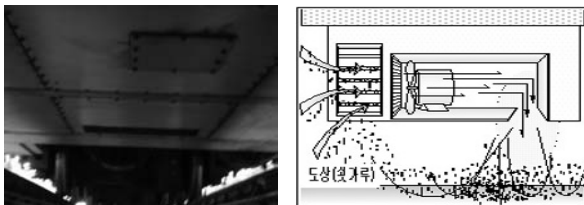


그림 7. 구조적 요인

열교환기 관리 및 청소 주기 반영이 미흡하였다. 또한 특정 차량기지 주변은 건축 폐자재 처리업체 등이 밀집되어 있어 분진 발생이 많아 기지내에 유치중인 차량에도 분진이 유입되었다.

이러한 요인에 의해 유입된 금속성 분진은 전력소자(GTO, DIODE) 및 부스바(Busbar)단자 취약부위에 절연과 피에 의한 아크발생이 집중되어 인버터 내부회로 단락고장으로 이어졌으며, 운행 중 도중 입고되는 결과로 이어졌다.

IV. 대책시행

1. 합동 대책반 운영

서울도시철도공사에서는 자체 전담팀 및 인버터장치 제작(BT, 구ABB)사 합동 원인조사를 시행하여 차량 및 선로에서의 대책을 추진하였다.

가. 목표 설정

나. 제작사 합동점검 및 회의

- 총 5회 14명
- 기간: '02. 11. 27 ~ 5. 25
- 참가 기관 B.T & ROTEM

다. 대책반 구성운영

- 1차: '01. 4. 4 ~ '02. 10. 21
- 2차: '02.10. 22 ~ '03. 11. 4
- 3차: '04. 4. 23 ~ '04. 5. 25

2. 차량에서의 대책 추진

가. 장치구조개선

- 내부압력 조절필터 개선 및 교체('04. 2 ~ '04. 7)

<p>차량의 구조 보완</p> <ul style="list-style-type: none"> • 열교환기 교체, 외부 클레이트 필터 보완 • 내부압력 조절필터 추가설치 • 토출 풍압 완화판 설치 	
<p>유지보수 방법개선</p> <ul style="list-style-type: none"> • 각종 패킹류 교환 및 교체주기 설정 • 열교환기, 인버터함 외부필터 청소주기 설정 • 인버터 모듈 청소주기 단축 	

그림 8. 목표 설정



선로 고압분사 청소 벽면 고압분사 청소 청소후 배수구 진공흡입

그림 13. 선로환경 개선



그림 14. 철분 감소 장치 운용

나. 열차풍을 이용한 마그네틱 철분 감소장치 개발 운행 ('10.06.03)

- 5호선 6개 편성 운행 중
- 설치위치 400대 차호 구체 하부
- 0.06g의 철분 흡수/km

전동차 열차풍으로 부상된 미세먼지가 원심분리기와 마그네틱을 통과하면서 집진되도록 하는 방식으로 선로부분의 철분을 제거 시행하고 있다.

다. 기계식 도유기의 디지털 교체

- 차륜 충격식 도유기를 차륜과 레일의 마모를 저감하기 위하여 2008년까지 교체하여 곡선부에서 발생되는 마모를 크게 감소 시켰다.

V. 대책 시행 결과

인버터 고장에 의한 운전장애가 가장 많이 발생한 2002년 대비 가장 적은 2007년에는 장애 예방 효과는 72%를 달했으며, 지속적인 장애 예방대책 추진결과라 판단할 수 있다.

VI. 맺음말

5호선 전동차 인버터장치의 고장원인과 대책을 검토하고 분석하였으며 향후 설계시 고려사항을 고찰해 보았다. 전동차의 설계 및 사양 결정은 Total Engineering 체계 하에서 복합적으로 이루어져야 함이 매우 중요함을 알 수 있다.

즉, 운행노선의 조건(기온, 곡선, 구배, 터널구조, 노반구조, 승객수, 운행시격 등)을 종합적으로 검토하여 설계를 결정하여야 한다. 차량의 수명을 40년으로 연장할 수 있는 있는 상황이므로 한번 결정된 사양은 최소 40년은 운영되므로, 운행 장애율이 지속됨에 따라 고장을 증가와 유지관리의 난이성 및 유지보수비용 증가 등이 뒤따르게 된다. 5호선은 곡선이 많은 노선으로 쇳가루 분진이 많아 강재 통풍식 인버터 냉각방식이 주요 고장요인으로 판단되며 지속적인 차량과 터널의 유지관리만이 장애를 줄여줄 수 있으므로 유지관리 비용이 많이 소요되고 있다. 안정적인 운영을 위해서는 5호선 인버터장치의 대체 개발이 필요한 것으로 판단된다.

그러므로 철도차량 설계시 안전성과 신뢰성을 우선으로 장애 발생의 최소화화와 장애 발생 시 파급 영향 최소화에 설계의 중점을 두어야 한다. ☺

♣ 참고 문헌

1. 서울지하철 5호선 기본설계 보고서
2. 전동차 정비 지침서 (5호선, 1994), 현대정공
3. Vampire(version 4, 30) User Manual 6.3 Part A : "Wheel-Rail Wear Prediction"[pp40~41], AEA Technology
4. Fundamentals of rail vehicle dynamisc, A. H.Wickens pp20~21
5. Vampire(version 4, 30) User Manual 6,3 Part F : "Curving And Wheel Wear Analysis"[pp34~36], AEA Technology
6. 5호선 전동차 먼지에 의한 인버터 장치의 영향 및 대책(2007. 4. 서울도시철도공사)
7. 도시철도 전동차 정비이론 및 개선방향연구 (최용운, 2007. 11. 한국철도학회)
8. 5호선 전동차 인버터장치 해외 제작사 기술지원 결과보고 (2004. 6. 서울도시철도공사)
9. 5호선 전동차 고장저감 대책 (2004. 10. 서울도시철도공사)