서울 지하철 5호선 전동차 인버터장치의 장애 분석

A study on the analysis and counterplan of Line 5 EMU Inverter Failure

최용운+ 구정서*, 유원희**, 고효인***
Yong-woon Choi, Jeong-seo Koo, Won-hee You, Hyo-in Koh

ABSTRACT Rolling stock is the method of railway transportation. Especially, in the subway system which has short headways particularly during the rush hours, even one train's trouble on the main line might influence the whole line. Accordingly, to prevent a train trouble on the main line, high expense is used for the maintenance parts, workforce and facilities, etc. according to the preventive maintenance program.

Therefore, in designing a EMU, emphasis should be put on the minimization of trouble and its extending influence on the mainline with the priority of safety and reliability.

Seoul subway line 5 is the line that complements the first stage Seoul subway(lines 1,2,3 and 4) and is built deeply with many curved sections causing lots of dust.

Studies were made to find out the importance of car design, selection of specifications and continuous maintenance on the basis of the analysis and countermeasure of the line 5 EMU inverter trouble case.

요지 철도차량 수송 수단은 차량이다. 특히 운행 간격이 짧은 지하철의 경우는 출퇴근 혼잡 시간대에 차량 1개 편성의 장애라도 전체 노선으로 영향을 주게 된다.따라서 운행 중 고장 예방 을 위해 예방 정비 체계에 따라 정비용 부품, 인력과 시설 등의 많은 비용을 투입 하고 있다.

그러므로 , 차량 설계시 안전성과 신뢰성을 우선으로 장애 발생의 최소화와 장애 발생시 파급 영향 최소화에 설계의 중점을 두어야 한다.

5호선은 1기 지하철 노선을 보완 하는 노선으로 심도가 깊고 곡선구간이 매우 많으며 분진 발생도 많은 노선이다. 5호선 전동차 인버터 장치 장애 원인을 분석하고 대책을 통하여 차량 설계 및 사양 선정의 중요성을 고찰 해 보았으며 , 지속적인 유지관리의 중요성에 대하여 연구 하였다.

---

1. 서 론

1989. 12월 제2기 서울시 지하철 기본계획 확정 및 일부구간 착공에 따라 서울에 5.6.7.8호선의 지하철 노선이 건설되었다. 2기 지하철은 서울의 1기 지하철(1.2.3.4호선)에 추가되는 노선으로써 심도가 깊고, 곡선이 많은 노선이다. 특히 터널구조가 기존노선은 자갈도상 이지만, 2기 지하철은 콘크리트 궤도구조로 변경 시공한 노선으로 이는 분진억제나 유지보수 측면에서 매우 효율적인 방법으로 최근 건설되는 지하철에 적용되고 있다.

---

† 책임저자: * 최용운, 정회원, 서울도시철도공사(서울산업대학교 철도전문대학원 철도차량 시스템공학과 박사과정)
E-mail : choiyw@smrt.co.kr, TEL : (02)6311-3200 FAX : (02)6311-4321
* : 서울산업대학교 교수
** : 한국철도기술연구원
*** : 한국철도기술연구원

또한 2기 지하철은 터널의 높이가 기존 지하철에 비해 650㎜(기존5,950㎜)가 낮게 시공되었다. 이러한 궤도 구조의 변경은 소음과 분진의 영향에 더 크게 노출되게 되었다.

특히 5호선의 경우는 터널구조와 함께 인버터장치가 강제 통풍식 구조로 되어 있어 곡선부 차륜마모에 따른 쇳가루의 영향이 차량 고장에 크게 영향을 미치게 되었다. 이에 노선의 특성과 전동차의 특성 및 예방대책을 분석하였다.

2. 인버터장치 구성

인버터 장치란 직류 전압 1,500V를 교류 0~1,170V 전압으로 변환하여 견인전동기를 구동시키는 전동차의 핵심장치이며 전동차 1개편성당 2개가 설치되어 있다.

그러나 5호선 인버터 장치는 강제 통풍식 으로 가동 열을 내,외부송풍기를 구동시켜 열을 냉각 시키는 구조로 전동차 운행 시 발생되는 미세먼지의 유입으로 기기내에서 단락 고장등을 일으키어 전동차 운행에 지장을 주는 사례가 많았다.

인버터 냉각방식은 5호선은 강제 냉각방식으로 금속성 분진이 유입되며 부품간 과밀조립으로 전기적 절연에 취약하며, 6,7,8호선은 자연 냉각방식으로 공기유입이 없고 절연처리가 양호하다.

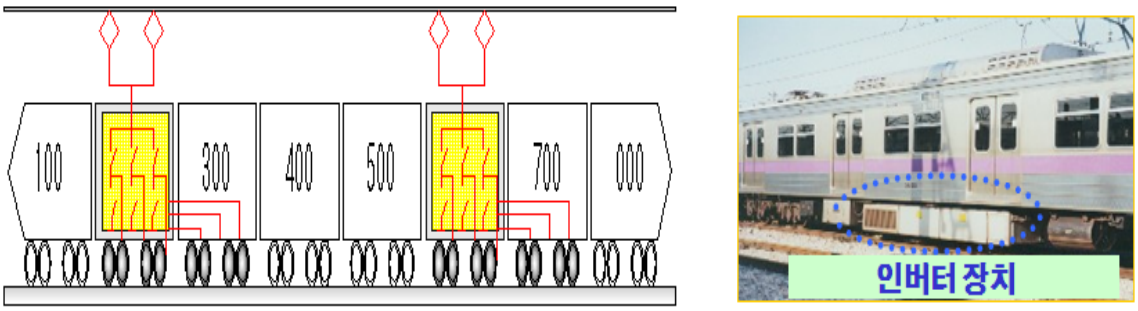

그림1. 인버터 장치 구성도

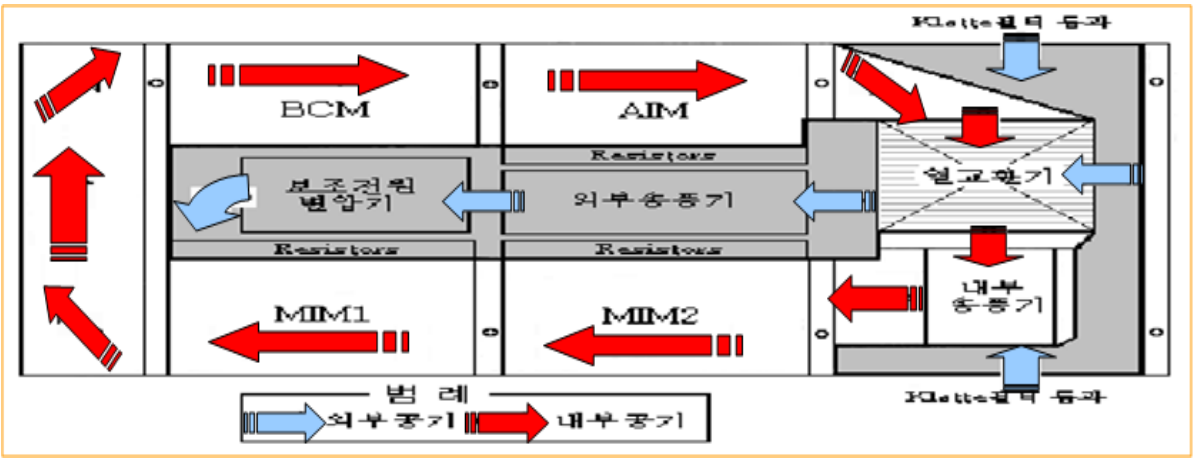

그림2. 인버터 내부 냉각도

3. 운행 노선 및 장애 발생의 정량적 분석

5호선은 1995년 11월에 부분 개통되어 1996년 12월에 완전개통 되었으며, 영업거리 52.3km에 76개편성 608량의 전동차가 운행되고 있다.
5호선의 선로는 곡선반경 500m 이하인 구간이 궤도연장 113.7km의 25.8%인 29.4km나 된다. 특히 곡선반경 300m 이하가 10.0km(8.8%)이고, 301~400R이하가 10.3km, 401~500R 구간이 9.1km이다.
이는 500R 이하구간이 5호선 25.8%으로 6호선 17.5%, 7호선 18.5%, 8호선 11.3% 보다 훨씬 많음을 알 수 있다.

표1. 노선별 곡선 연장

구분	궤도연장	곡선로 연장			
		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

이로 인하여 인버터 단락 고장이 2002년도에 230 건이 발생되어 5호선 전동차 운영에 심각한 문제로 대두되었다.

표2. 년도별 고장 건수

2000년	2001년	2002년	2003년	2004년	2005년	2006년	2007년
129	137	230	137	92	151	103	68

3.1 장애 발생 요인의 정성적 분석

3.1.1 환경적 요인

궤도구조가 곡선이 많아 곡선부에서 발생되는 차륜과 레일간의 마모에 의한 쇳가루가 많으며, 터널 내부에 섬유성 분진도 많았다.

3.1.2 구조적 요인

5호선 전동차의 인버터 장치의 냉각방식이 강제 통풍방식으로 외부 유해먼지 흡입 및 누적이 되는 구조이며 인버터 모듈함내 기기배치가 조밀하게 되어있어 금속성, 유분함유 분진에 의해 코로나 방전이 발생되었다.

3.1.3 운영적 요인

인버터장치 열교환기의 관리 소홀 및 변형등으로 기밀유지가 않되었으며 각종 패킹류, 필터관리가 미흡하였고 운행환경을 고려한 열교환기 관리 및 청소가 미흡하였다. 또한 방화차량기지 주변은 건축 폐자재 처리업체등이 밀집되어 있어 분진 발생이 많아 차량기지내에 유치중인 차량에도 분진이 유입되었다.

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

그림3. 인버터 내부 분진상태

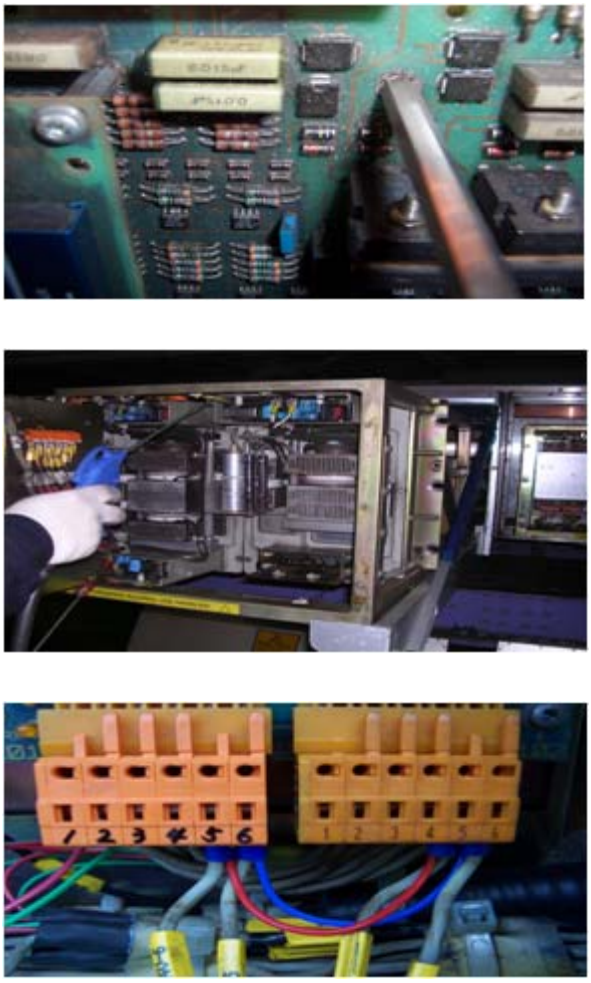

그림4. PCB 내부오염

3.2 장애 사례 분석 및 대책

3.2.1 합동 대책반 운영

서울도시철도공사에서는 자체 전담팀을 운영하였으며, (1차: '01.4.4~ '02.10.21,2차: '02.10.22~ '03.11.4, 3차: '04.4.23~ '04.5.25)인버터장치 해외 제작사와 합동조사를 4회에 걸쳐 시행하였다.('02.11.27~11.28, '03.4.28~4.30, '04.2.24~2.25, '04.4.27~5.25) 합동점검결과 차량에서의 대책과 선로에서의 대책이 마련되어 추진하게 되었다.

3.2.2 차량에서의 대책

차량에서의 대책은 열교환기를 전량 보완품 으로 신규교체, 내부 압력 조절용 필터 추가설치, 각종 패킹류 교환, 토출풍압 완화팬 설치와 인버터함 외부필터를 설치하고 청소주기를(월2회) 설정 시행하였으며, 인버터 모듈 내부 청소 주기를 3년에서 3개월 청소로 단축 시행(고장안정화 이후 1.5 년으로 조정)하였으며,

3.2.3 선로에서의 대책

선로에서는 도상에 물청소를 집중적,주기적으로 실시하여 노반에 침적되어있는 쇳가루를 제거하였다. 이를 위해서 고압살수차를 도입하여 바닥고압분사청소, 벽면고압분사청소, 청소후

배구수 진공흡입 등의 방법으로 노반청소 및 잔유물을 제거하였다.
노반청소주기는 기존 년1회 살수청소에서 년 4~5회 고압살수청소로 변경 시행하였다.
이러한 노력의 결과로 인버터 고장은 2002년도 고장 230건에서 2003년 137건으로 40% 감소되었고, 2004년 92건으로 대폭 감소되어 안정화 되었다.

3.2.4 차량의노후화에 대한 대책

그러나 부품 노후화에 따른 컨넥터류의 순간 접촉불량으로 2005년에는 컴퓨터 통신고장이 증가되었으며, 이에 대한 대책으로 각종 통신 컨넥터를 교환하였다.

3.2.5 분진 차단을 위한 필터의 평가

인버터 내부에 침투된 분진을 분석한 결과 철분 59.93 %,규소 4.58% , 기타 29.23 % 등으로 나타났다. 또한 필터의 공기 투과도는 기존 제품은 593 ㎤/㎠/s 이나 개선품은 178.5 ㎝으로 투과도를 낮추었다. 인버터 외부 필터는 외부 공기 순환용이므로 필터의 조밀도가 크게 중요하지 않지만 당초 에는 외부 필터가 없고 빗살 무늬의 가림막만 설치 되어 있었던 것을 간단한 구조의 필터를 설치하였다. 이것이 너무 조밀 하면 공기 흡입량이 저하 되어 외부공기량 부족으로 냉각 불량으로 연결 된다.

표3.분진 성분 분석표

《 5호선 전동차 인버터 내 분진 성분분석 결과 》

□ 분석대상 : 고덕기지 입고차량 3개편성(502, 510, 515편성)
□ 시료채취 : 3종(외부필터측, 내부필터측, 모듈측)
□ 의뢰기관 : 한국화학시험연구원(지식경제부 산하)
□ 분석방법 : 정성정량분석(2008.3.10~3.18)
□ 분석결과

명 칭 (원소기호)		평균 (%)	위치별 성분(%)		
			외 부 필터측	내 부 필터측	모듈측
철 (철성분)	Fe	59.93 (62.72)	50.30 (53.36)	69.60 (72.44)	59.90 (62.38)
규소	Si	4.58	5.05	4.50	4.18
칼슘	Ca	2.11	2.69	1.64	2.01
알루미늄	Al	1.41	1.69	1.29	1.26
구리	Cu	0.64	0.64	0.80	0.49
망간	Mn	0.48	0.43	0.54	0.46
칼륨	K	0.45	0.42	0.49	0.45

명 칭 (원소기호)		평균 (%)	위치별 성분(%)		
			외 부 필터측	내 부 필터측	모듈측
나트륨	Na	0.37	0.40	0.32	0.39
마그네슘	Mg	0.30	0.39	0.23	0.28
아연	Zn	0.19	0.28	0.10	0.20
바륨	Ba	0.11	0.13	0.07	0.13
크롬	Cr	0.09	0.11	0.07	0.08
티타늄	Ti	0.06	0.06	0.07	0.06
인	P	0.05	0.05	0.04	0.05
기타산화물		29.23	37.36	20.24	30.06

○ 전체 분진 중 철성분이 평균 62.72% 차지
- 원소별 구성비 순 : 철(Fe)〉 규소(Si)〉 칼슘(Ca)〉 알루미늄(Al)

○ 외부필터측에서 여과되지 않은 채 인버터 내로 유입된 분진의 약 72%가 철성분
○ 내부필터측 철성분 높은 이유 : 열 교환기내 자성에 의한 철성분 부착으로 추정
○ 성분별 분포
- 철성분 : 62.72%(전동차 바퀴, 레일 및 전차선 마모)
  ・철(Fe), 크롬(Cr), 알루미늄(Al), 망간(Mn), 티타늄(Ti), 구리(Cu), 바륨(Ba) 등
- 토양성분 : 7.30%(노반시멘트 열화에 따른 균열, 도로변 토양, 환기유입 등)

・나트륨(Na), 아연(Zn), 규소(Si), 인(P), 칼륨(Ca) 등

- 자동차 성분 : 0.75%(모터카 사용 및 역사 출입구, 본선환기구 등 유입)

・알루미늄(Al), 칼륨(K), 마그네슘(Mg) 등

- 기타산화물 등 : 29.23%(금속류와 화합물 결합 형태로 이루어진 물질)

・산화철(FeO), 산화규소(SiO_2), 산화칼슘(CaO), 산화알루미늄(Al_2O_3) 등의 산소(O) 성분

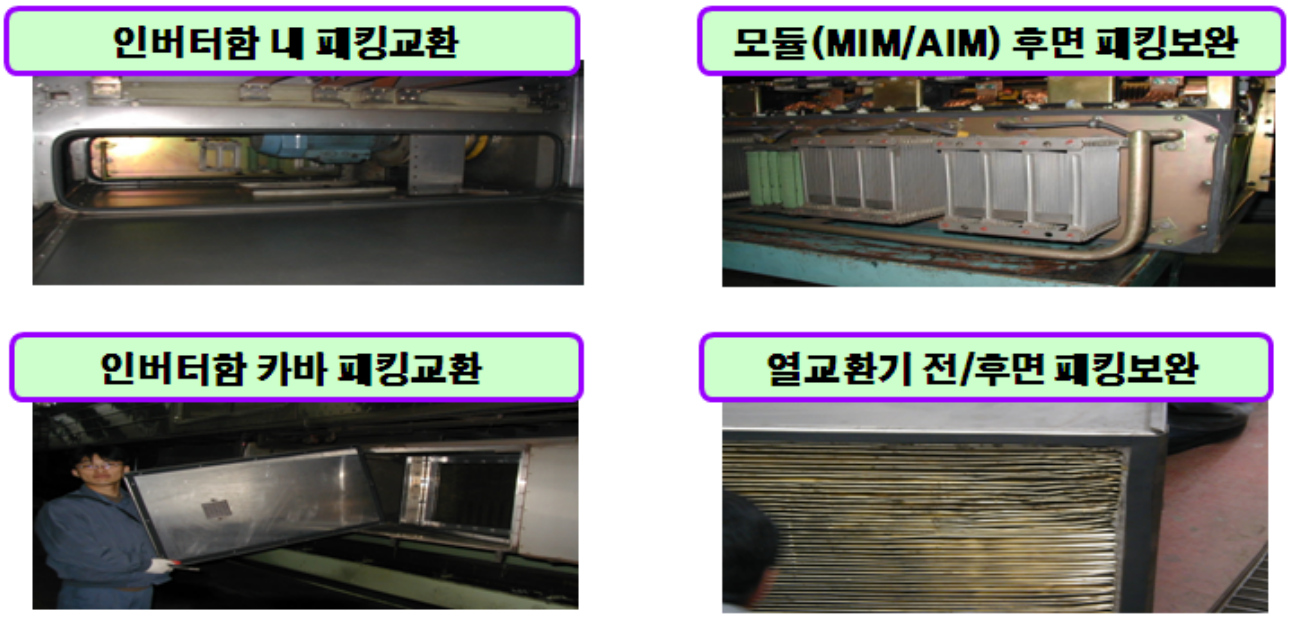

그림5. 인버터 밀폐 패킹류 교환

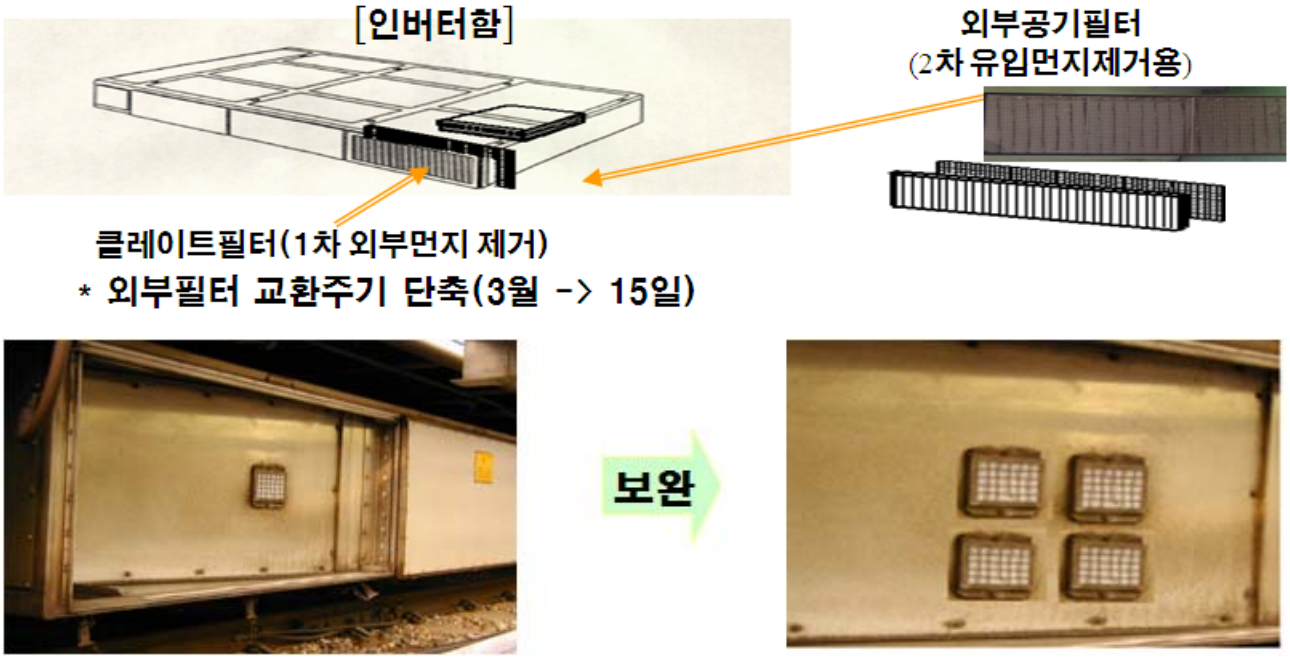

그림6. 필터 설치 및 보완

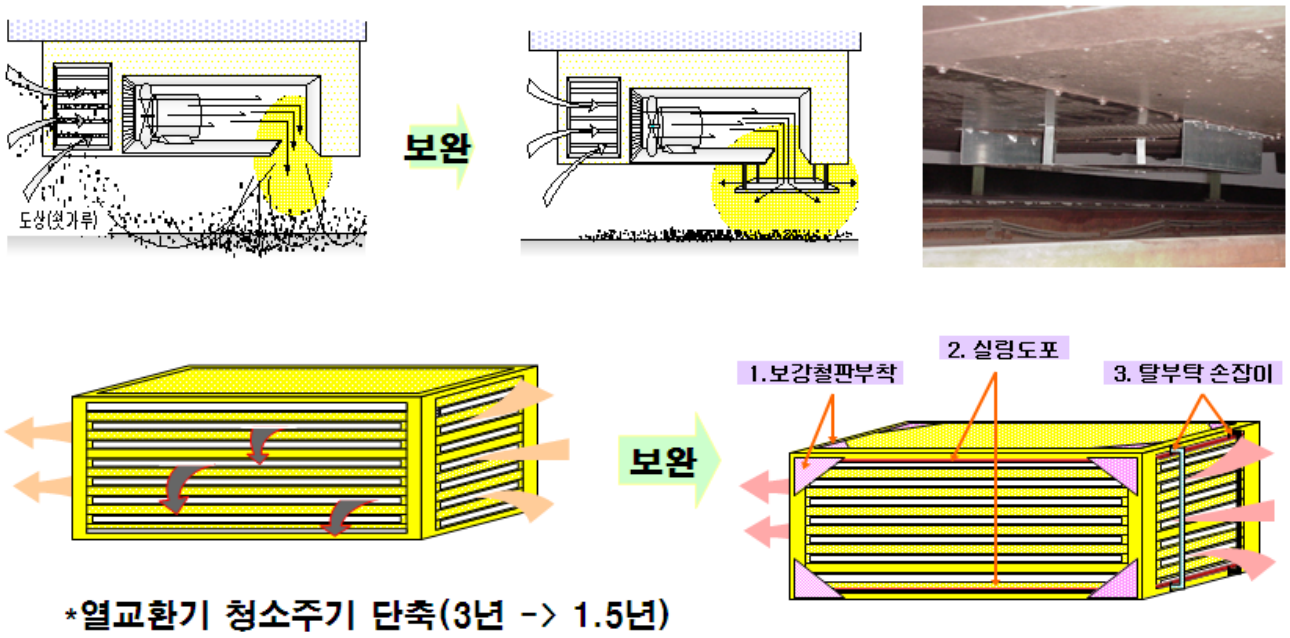

그림7. 열교환기 보완 및 토출구 변경

그림8. 절연강화

그림9. 커넥터류 교환

바닥 고압 분사청소

벽면 고압 분사청소

청소후 배수구 진공흡입

그림10. 선로 청소

4. 결 론

5호선 전동차 인버터장치의 고장원인과 대책을 검토하고 분석하였으며 향후 설계 시 고려사항을 고찰해 보았다. 전동차의 설계 및 사양 결점은 Total Engineering 체계하에서 복합적으로 이루어져야 함이 매우 중요함을 알 수 있다.

즉, 운행노선의 조건(기온,곡선,구매,터널구조,노반구조,승객수,운행시격 등)을 종합적으로 검토하여 설계를 결정하여야한다. 차량의 수명을 25년으로 정하고는 있으나 점차 수명연장론이 대두되고 있는 상황이므로 한번 결정된 사양은 최소 25년은 운영되므로, 운행장애율이 지속됨에 따라 고장율 증가와 유지관리의 난이성 및 유지보수비용 증가 등이 뒤따르게 된다. 5호선은 곡선이 많은 노선으로 쇳가루 분진이 많아 강제통풍식 인버터 냉각방식이 주요 고장요인으로 판단되며 지속적인 차량과 터널의 유지관리만이 장애를 줄여줄 수 있으므로 유지관리 비용이 많이 소요되고 있다.

안정적인 운행을 위해서는 5호선 인버터장치의 대체 개발이 필요한 것으로 판단된다. “끝”

참고문헌

1. 전동차 정비 지침서 (5호선)
2. 각 기관 전동차 정비 관련규정 - 서울도시철도. 한국철도공사. 서울메트로. 부산교통공단
3. 서울지하철 5호선 기본설계 보고서
4. 전동차 정비 및 관리이론. 최용운 : 서울도시철도공사(2004년)
5. 5호선 전동차 인버터장치 고장예방 추진실적복고(2003.12. 서울도시철도공사)
6. 5호성 전동차 인버터장치 해외 제작사 기술지원 결과보고(2004,6. 서울도시철도공사)
7. 5호선 전동차 고장저감 대책(2004,10.서울도시철도공사)
8. 5호선 전동차 먼지에 의한 인버터 장치의 영향 및 대책(2007,4.서울도시철도공사