

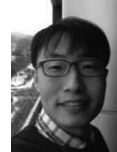
무가선트램용 60kHz 무선전력전송 시스템



이병송
한국철도기술연구원 책임연구원
T.031.460.5404
bslee@krii.re.kr



홍순만
한국철도기술연구원 원장
T.031.460.5100
theongs@krii.re.kr



김재희
한국철도기술연구원 선임연구원
T.031.460.5407
jaehee@krii.re.kr



박찬배
한국철도기술연구원 선임연구원
T.031.460.5427
cbpark@krii.re.kr



이수길
한국철도기술연구원 책임연구원
T.031.460.5678
sglee@krii.re.kr



이준호
한국철도기술연구원 선임연구원
T.031.460.5040
jhlee77@krii.re.kr

1. 서론

철도차량은 전차선과 판토타그래프를 이용하는 접촉식 전력공급시스템을 사용한다. 접촉식전력공급 시스템의 경우, 건설비 및 유지보수 비용이 높고, 신뢰성 및 안전성이 낮으며, 환경친화성이 떨어지는 문제점을 가지고 있다. 따라서 미래 교통 시스템에서는 신개념의 전력공급시스템 기술 개발이 필요한 상황이다. 그림 1 과 같은 비접촉 급전 시스템은 기존 접촉식 급전설비와 비교하여 집전장치 및 전차선의 유지보수가 거의 불필요하므로 경제적이고, 단선의 위험이 없는 등, 기존의 접촉식 급전 방식 보다 안전한 급전시스템이므로 기술적으로 필요성이 증대되고 있다. 비접촉 급전시스템 기술의 무가선트램 차량 적용 시장 점을 살펴보면, 가공 전차선 설비가 불필요하므로 고비용의 고가 구조물이 필요 없고 터널구간 공사 시 터널단면적을 줄일 수 있어 건설비 저감이 가능하며, 전차선 설비의 접촉에 의한 마모가 없어 유지보수 비용 절감이 가능하다. 뿐만 아니라 철도 궤도의 특성에 의한 효율적 급전이 가능한 설비구성으로 에너지 효율성이 높으며, 별도의 추가적 장치 없이 제동 시 발생하는 회생에너지 이용이 가능한 경제적인 시스템 구성 가능하다. 이러한 필요성에 의해 국내

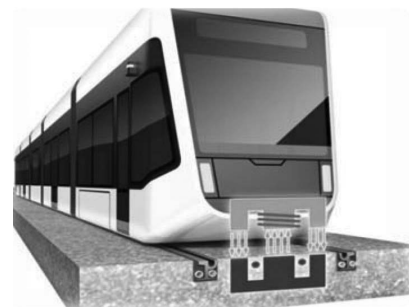


그림 1. 철도적용 무선급전도

비접촉 급전시스템 관련 기술력 확보가 시급하게 이루어져야 하며 이를 위하여 본 연구가 진행이 되었다.

2. 무선전력전송 기술동향

국내 대전력 무선전력전송은 KAIST 온라인 버스기술을 시작으로 크게 발전하고 있다. KAIST에서는 공진형 자기유도 기술을 적용하여 기존의 자동차를 개조 제작한 그림 2와 같은 온라인전기버스 실험모델을 개발하였으며 (2009년 7월), 서울대공원에서 자기유도기술을 적용한 온라인전기 열차를 개발하였다. 온라인 전기버스의 경우에



그림 2. 온라인 전기자동차급·집전시스템 개념도

는 공극간격 20cm 이상에서 효율 74% 이상으로 3m 세그먼트이션 기술이 구현 되어 있으며, 온라인전기 열차는 공극간격 12cm 이상에서 효율 90%이상으로 24m 세그먼트이션으로 구성되어 있다.

해외에서도 대전력 무선전력전송에 관한 움직임을 활발하며 독일, 프랑스, 영국 등을 포함하는 유럽연합에서는 2002년 도 부터 EVIAC (Electric Vehicle Inductive Automatic Charging)를 구성하여 전기자동차 및 경량전철에 활용할 수 있는 유도 급전기술을 공동 개발하고 있다. 유도 급전기술을 수송시스템에 적용한 사례로는 독일 Wamplfer사의 뉴질랜드 와카레와레 공원의 20kW급 순환용 자동차와 Italy의 Porto Antico의 60kW급 버스가 있고 뉴질랜드의 경우 오클랜드 대학에서 연구를 수행해 왔으며, 매입형 유도전력 급전장치와 차량 내 충전기를 최소화하는 구동시스템 개발 등이 완료되었으며, 환경 친화적인 도로전용 유도급전 소형자동차시험선을 구축하여 상용화 검증시험이 진행 중에 있다.

철도분야에서는 Bombardier를 제외하고는 아직 활발

하게 연구가 진행되고 있는 상황은 아니다. Bombardier의 PRIMOVE 시스템은 비접촉식 자기유도방식을 적용하여 연구개발을 추진하였으며, MIRAC Energy Saver(BMS) 적용으로 30%에너지 절약이 가능하고 급전선로는 16.2m 간격으로 세그먼트 되어 있으며, 공극간격 6.5cm 이다. 아우크스부르크 시험선은 총 800m 중 275m에 무선급전시스템설치 운영 중이며 20kHz, 200kW 용량을 가지며 최고속도는 50km/h 이다.

3. 60kHz급 대용량 무선급·집전시스템 개발

60kHz 공진주파수를 사용한 무선전력전송 기술은 지난 2011년 KAIST가 개발한 무선충전전기버스로 검증된 20kHz급 급집전 기술을 크게 발전시킨 것으로 3배에 가까운 전력전송 밀도를 향상시켰으며, 집전모듈의 크기와 무게 감소, 급전과 집전장치의 제작비 절감 등 경제성을 높여 무선급전시스템 상용화에 다가선 구조이다. 그동안 소규모의 전기를 사용하는 버스만을 움직일 수 있었던 무선전력전송기술은 60kHz급 대전력 무선전력전송기술의 확보로 대전력이 필요한 철도시스템, 항만과 공항 하역장비 등 물류이송시스템은 물론 전송효율 증대로 기존 무선급전 시장이었던 휴대폰, 노트북 등 휴대기기 및 가전제품, 로봇 분야, 레저분야 등에도 광범위하게 활용될 것으로 보인다. 그림 4는 무선전력전송기술을 철도에 적용할 경우 생기는

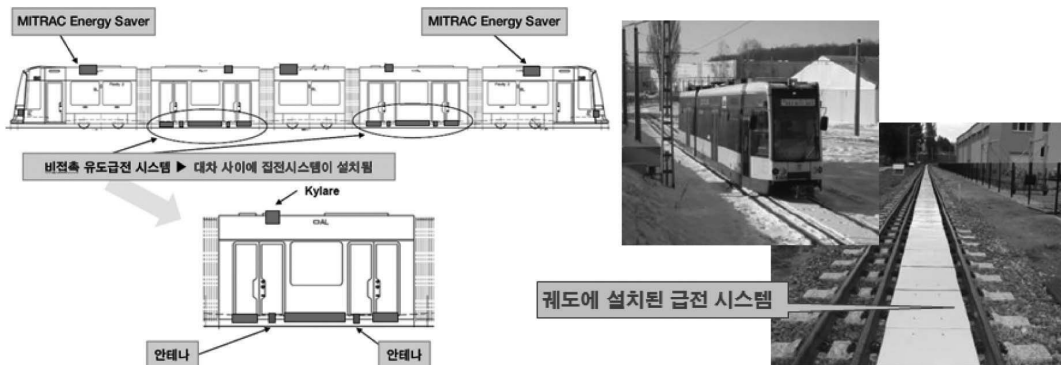


그림 3. Bombardier의 PRIMOVE 시스템 및 독일 Bautzen의 시험라인

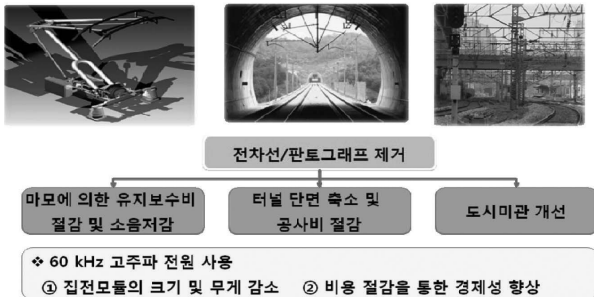


그림 4. 무선급전의 철도차량 적용을 통한 장점

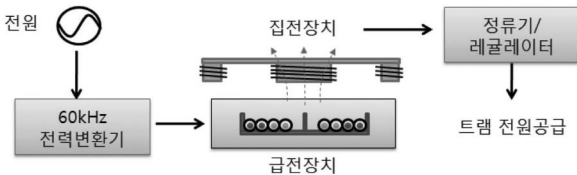


그림 5. 무선전력전송 장치 개념도

장점을 간략하게 도시한 것이다. 열차가 비접촉 방식으로 전력을 공급받기 때문에 급전장치의 마모가 없어 유지보수 비용이 절감되고 전신주 등 전차선 설비가 필요하지 않아 철도부지 소요면적이 줄어든다. 또한 터널단면적도 크게 축소돼 건설비를 낮출 수 있다. 높은 속도에서도 팬터그래프와 전차선 간의 이선 및 소음문제 등이 해결돼 레일형 초고속열차 개발도 가속화될 것으로 보인다.

무선전력전송을 위한 기술 개념도를 그림5에 도시하였다. 무선전력전송 시스템은 기존의 대전력을 공급할 수 있는 전원장치와 이를 60kHz의 고주파로 변화해 주는 인버터, 변환된 고주파 전력을 자기장의 형태로 변환해 주는 급전장치, 급전장치에서 나온 자기장을 다시 고주파의 전력으로 바꾸어주는 집전장치, 집전장치로부터 수집된 고주파 전력을 사용 가능한 DC 전력으로 만들어 주는 정류기 및 레귤레이터 등으로 구성이 된다.

전원장치는 기존의 무가선트램에 사용하는 전원장치 DC 790V 를 이용하였다. 변전실로부터 공급되는 DC 790V 전원을 고주파 인버터로 전송 하였으며, 인버터에서는 IGBT 스위칭 동기화 방식을 사용하여 60kHz의 최대 200kW급 전원을 만들게 된다. 생성된 60kHz 전원은 차상

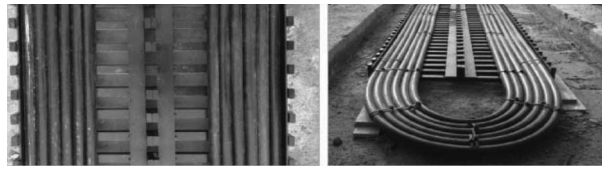


그림 6. 급전선로 구성

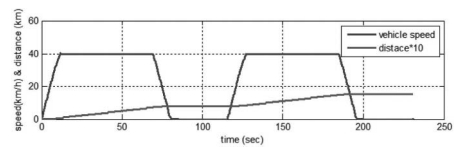


그림 7. 무가선트램의 시간에 따른 주행속도 및 이동거리(x10)

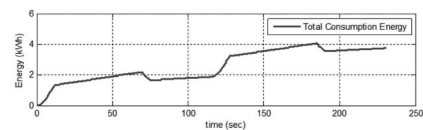


그림 8. 무가선트램의 필요한 에너지량

의 픽업장치로 효율적으로 전달하기 위하여 지상의 급전장치에 전달이 된다. 급전장치는 'E' 자 모양의 페라이트 코어와 이를 둘러싸고 있는 케이블 그리고 공진회로를 만들기 위한 커패시터 모듈로 구성이 된다. 60kHz에서 최적 설계된 급전선로는 그림 6과 같이 턴수가 6회이며, 급전정격전류는 66.6Arms이다. 픽업모듈은 집전장치와 정류기로 구성이 되며, 집전장치에서 60kHz급의 자기장을 픽업장치의 코일을 통하여 60kHz의 전류로 변환한다. 그리고 이 전류가 정류기를 통하여 DC 전원으로 동작을 하게 된다. 픽업장치 후단에는 레귤레이터를 설치하여 차량에 안정된 정전압을 공급하게 된다.

무가선트램은 전차선으로부터 DC 790V의 전원을 공급받아 차량내부의 배터리를 충전하고 충전된 배터리를 사용하여 운행을 한다. 현재 시험구간에 건설된 무가선트램의 정차장 사이의 거리는 770m 이며, 트램은 20분 충전에 25km이상의 주행이 가능하다. 배터리의 가용량은 약 130kWh이다. 최고속도 40km/h에 정차장 사이를 왕복했을 때 시간에 따른 속도 및 주행거리를 그림 7에 도시하였으며, 필요한 에너지는 그림8에 도시하였다. 시뮬레이션 결과 총 소비되는 에너지는 약 3.3kWh 이며 이를



그림 9. 무가선트램 적용을 위한 무선전력전송 급전선로 및 픽업 구성



그림 10. 무가선트램용 무선전력전송 효율측정

180kW급 집전장치로 충전한다고 가정하면 충전시간은 총 65초가 소비된다. 일반적으로 지하철이나 경전철이 정차장에 정차하는 시간은 약 30초 이므로 정차장 30초 충전과 주행 중 35초 충전을 하면 정차장 사이의 왕복하는 에너지를 충분히 얻을 수 있다. 35초의 주행 중 충전을 위해서는 급전거리가 약 30m 로 구성이 되어야 한다.

무가선트램 시험선의 일부 구간에 그림 9와 같이 무선급전 시스템을 설치하였다. 시험선로의 궤도 사이에 급전선로를 매설하였으며, 또한 트램에 부착 가능한 픽업구조와 지그 구조를 제작하였다. 단일 픽업 모듈은 최대 60kW의 전력을 수집할 수 있으며, 정류기가 포함되어 있어 DC 전력 출력이 가능하다. 3개의 픽업 모듈을 사용하여 총 180kW의 전력 출력이 가능하며 픽업끼리는 서로 병렬로 연결되어 있다. 본 실험에서는 인버터의 입력단과 픽업 모듈 후단의 DC 전력을 각각 측정하여 파워분석기를 통하여 효율을 계산하였다. 또한 차량의 주행 중 무선급전시스템의 효율 변화를 계측하기 위하여 각 픽업 모듈 지그를 연결하여 움직일 수 있도록 구성을 하였다.

실험 결과 정차중 지상 인버터로의 입력전력 211kW에 대해서 차상 정류기 출력전력이 178kW로 약 84%의 효율을 보

였으며 움직이는 지그를 2km/h로 이동시켰을 경우 83%~85%의 집전효율 변화를 보였다. 따라서 철도적용에 따른 정차와 주행 중 효율은 차이가 거의 없으며 향후 상용화에 대해서도 안정적인 전력공급이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 무선전력전송 기술을 철도차량인 무가선트램에 적용하였을 경우 얻을 수 있는 이점을 제시하였고, 실제 무선전력전송 모듈의 제작 및 측정을 통하여 상용화의 실현가능성을 제시하였다. 무선전력전송 기술을 철도에 적용할 경우 기존 전차선이 사라짐으로 인해 기존 전차선/판토그래프의 유지보수비 절감과 터널단면적 축소로 인한 공사비 절감이 가능해진다. 또한 전차선이 사라짐으로 인해 도시미관이 개선되는 장점을 가지게 된다. 60kHz 급 철도 전용 무선전력전송 모듈을 개발하여 집전효율을 측정하고 결과 정차중과 주행 중에 대해서 약 84%로 높은 효율을 가지는 것을 확인하였다. 향후 시스템의 추가적인 효율개선 노력과 차량에 적용하기 적합한 구조로 제작 시 충분히 상용화가 가능할 것으로 판단이 된다. ☺

♣ 참고 문헌

- [1] M. Budhia, G.A. Covic, J.T. Boys (2009) Design and optimization of magnetic structures for lumped inductive power transfer systems, ECCE2009, pp. 2081-2088.
- [2] B.S. Lee, H.W. Lee, C.B. Park (2010) Technology of inductive power transfer for railway vehicles, Auto Journal, Vol.32, No.3, pp. 36-40.
- [3] H. Choi (2007) Design consideration of half-bridge LLC resonant converter, Journal of Power Electronics, 7, pp. 13-20.
- [4] Bombardier Transportation (2010) PRIMOVE Contactless and Catenary-Free Operation, EcoActive Technologies.
- [5] H. Hasegawa, T. Kashiwagi, Y. Sakamoto, T. Sasakawa (2010) Study of magnet rotor type non-contact transformer, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol.33, No.1-2, pp. 135-144.
- [6] Kissin, M.L.G., Covic, G.A., Boys, J.T. (2011) Steady-State Flat-Pickup Loading Effects in Polyphase Inductive Power Transfer Systems, IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol.58, Issue 6, pp. 2274-2282.
- [7] Wu, H.H., Boys, J.T., Covic, G.A. (2010) An AC Processing Pickup for IPT Systems, IEEE Transaction on Power Electronics, Vol.25, Issue 5, pp. 1275-1284.