

# 온라인 전기 자동차의 전자장 설계 및 측정

안승영 · 송대건 · 이희재 ·  
변정건 · 강덕수 · 최철승 ·  
박준서 · 김정호

한국과학기술원

## I. 서 론

최근 몇 년간 전 세계적으로 논의되는 가장 큰 이슈들 중 하나는 환경과 자원의 문제이다. 세계 각국은 오염된 환경이 더욱 악화되지 않도록 하며, 동시에 원유의 수입을 줄임으로써 경제적인 효과도 얻을 수 있는 녹색 기술을 개발하기 위한 노력을 경쟁적으로 하고 있다. 이러한 환경 문제와 자원 문제는 전기 자동차를 사용함으로써 크게 문제를 줄일 수 있을 것으로 예상해 왔고, 오랜 연구 개발의 결과로 전기 자동차와 하이브리드 자동차가 개발되었으며, 현재 많은 자동차 업체에 의해 성공적으로 상용화가 되고 있다.

그러나 지금까지 개발된 전기 자동차는 모든 동력원을 배터리로부터 공급받는다. 이로 인해 배터리 크기와 전력, 무게, 충전 시간, 충전소의 설립 및 가용성 등 다양한 문제를 가지고 있다. 또한 전기 자동차의 배터리 제조의 근본이 되는 리튬 등 매장량이 한정된 자원은 사용에 따라 가격이 상승하고, 이는 전기 자동차 가격을 높이는 효과를 가져올 것으로 예상되며, 결국 전기 자동차의 상용화를 방해하는 요인으로 작용하게 될 것이다.

이러한 문제점을 개선하기 위해 온라인 전기 자동차(On-Line Electric Vehicle: OLEV)라는 새로운 개념의 전기 자동차가 개발되었다. 온라인 전기 자동차는 도로의 표면 아래에 설치된 선로에 전류를 흘려

자기장을 발생시키고, 그 자기장을 차량의 집전 장치로 받아들여 동력원으로 사용하는 형태로 에너지의 전달이 이루어진다. 전력을 순수하게 배터리로부터 얻어내는 것이 아니고, 지하에 매설된 급전 선로로부터 전력을 공급받아 모터 구동의 공급원으로 사용하며, 동시에 차량에 탑재된 배터리의 충전도 가능할 만큼의 충분한 전력을 공급 받을 수 있기 때문에, 비상시에만 사용하게 될 배터리만 탑재하면 된다. 현재 온라인 전기 자동차의 배터리 크기는 순수하게 배터리만을 사용하는 전기 자동차에 비해 1/5 수준으로 감소될 수 있다.

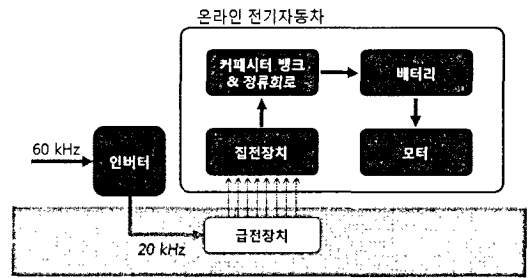
온라인 전기 자동차의 전원 공급 시스템은 차량 구동과 충전에 필요한 전력을 전달하기 위해 많은 양의 자속을 생성한다. [그림 1]의 급전 선로는 20 kHz 주파수 전류를 통해 자속을 생성하고, 차량 하부에 장착된 집전 장치는 그 자속으로부터 생성된 유도 기전력을 직류로 정류하여 전원으로 사용하게 된다.

그러나, 수십 kW 이상의 고전력을 무선으로 전송해야 하기 때문에 누설 자속이 차량 주위로 퍼져 나가게 되면 자기장 규격을 위반할 수 있다는 우려가 있다. 전파법 47조 2의 1항은 전자파 인체 보호 기준에 대해 정의하고 있으며, 방통통신위원회 고시에 규정된 20 kHz 대역의 62.5 mG를 자기장 규제에 적용하고 있다. 저주파 대역의 자기장은 파장이 길고 차폐 재료 적용이 쉽지 않은 것으로 알려져 있으나, 수동 차

본 연구는 KAIST의 온라인전기 자동차원천기술개발사업과 지식경제부 및 한국산업기술평가관리원의 산업원천기술개발사업 [KI002134, 웨이퍼레벨 3차원 IC 설계 및 집적기술]의 일환으로 수행하였음.



[그림 1] 온라인 전기 자동차와 급/집전 장치 개념도



[그림 2] 온라인 전기 자동차의 전력 전달 시스템

폐와 능동 차폐를 통해 이와 관련한 많은 연구 사례를 확인해 볼 수 있다.

이 논문에서는 온라인 전기 자동차에서 사용되는 비접촉 전력 전달 메커니즘을 소개하고, 급전 선로와 차량에 장착된 집전 장치에서 발생하는 전자장의 감소를 위한 몇 가지 기법을 제안한다. 제안한 금속 차폐판과 금속 브러시를 이용한 차폐 방법에 대해서 논하였고, 온라인 전기 자동차에 적용된 기술에 대해 시뮬레이션과 측정을 통해 그 타당성과 효율성을 검증하였다.

## II. 전력 전달 시스템

온라인 전기 자동차의 동력 전달 시스템은 [그림 2]와 같이 인버터에서 발생한 전류가 급전 장치로 공급되고, 급전 장치의 전선을 통해 흐르는 전류가 자기장을 발생시키게 된다. 집전 장치는 그 자기장으로부터 발생된 유도 전류를 정류하여 배터리로 전달하고, 이 전력을 동력원으로 사용하여 차량이 운행될 수 있게 해 준다. 다른 전기 자동차와 크게 다른 점은, 이 온라인 전기 자동차의 시스템을 일종의 변압기와 유사한 형태의 급전 장치와 집전 장치로 볼 수 있는데, 둘 사이의 자기장을 통한 전력 전달은 온라인 전기 자동차의 핵심 기술이다. 일반 자동차나 배터리만을 사용하는 전기 자동차에 비해 효율이 떨어지지 않도록 하기 위해, 급전 장치와 집전 장치 사이

의 간격, 자기장 경로 설계 등 자기장의 효율적인 전달경로 설계가 매우 중요한 요인이다. 특히, 자동차 운행에 필요한 수십 kW에 달하는 전력 전달로 인해 발생하는 자기장은 그 크기가 매우 크기 때문에, 자기장이 전력 전달 장치 밖으로 나오지 않도록 설계하고, 일부 누설된 자기장을 차폐해야 한다.

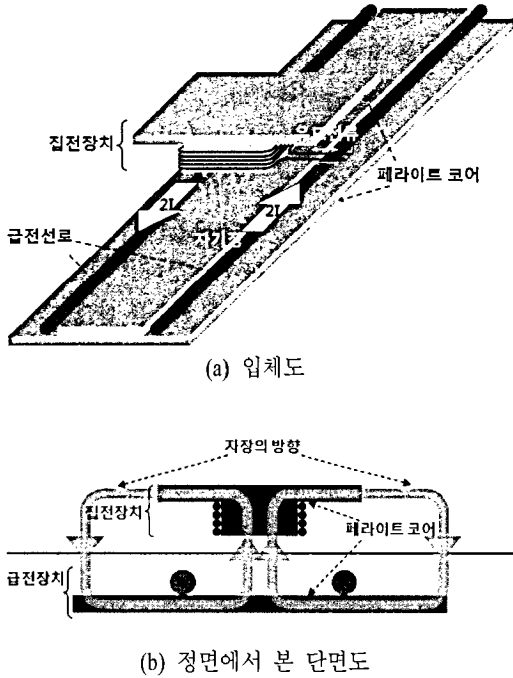
이러한 주요 사항들을 고려하여 지금까지 제안된 방법은 아래와 같이 수평 자속 급/집전 장치와 수직 자속 급/집전 장치로 나누어 볼 수 있고, 그 용도에 따라 적절한 방법을 적용할 수 있다.

### 2-1 수직 자속 급/집전 장치

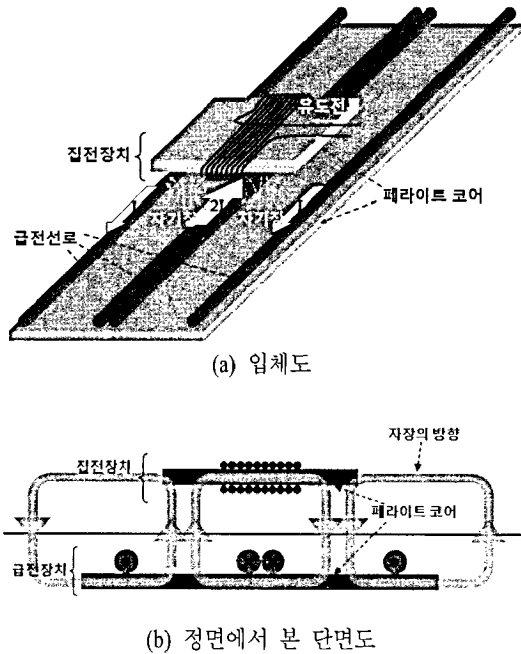
[그림 3]은 수직 자속 급/집전 장치의 입체도와 정면에서 본 단면도이다. 도로 아래에 반대 방향으로 전류가 흐르는 두 개의 전선이 있고, 이 전선들에 의해 발생하는 자기장은 도로 중심에서는 더해지게 되며, 그 방향은 지면에 수직인 방향이다. 이 자기장은 집전 장치의 페라이트 코어에 감겨 있는 코일에 전압을 유기하게 되고, 그 코일이 정류되어 부하에서 에너지를 소모하게 된다. 페라이트 코어는 자속을 증가시켜서 최대 전력 전달에 도움을 준다.

### 2-2 수평 자속 급/집전 장치

[그림 4]는 수평 자속 급/집전 장치를 보여준다. 도로 아래 지하에 매설된 급전 선로에는 수직 자속 급/집전 장치와 달리 총 4 개의 전선이 있고, 각각의



[그림 3] 수직 자속 급/집전 장치



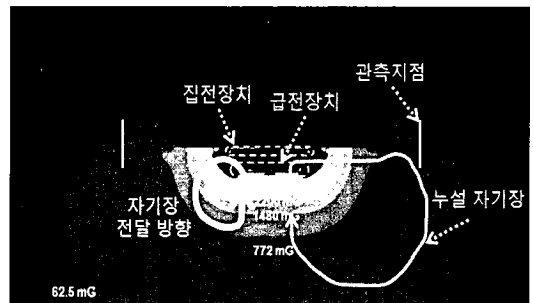
[그림 4] 수평 자속 급/집전 장치

전선에 흐르는 전류는 [그림 4]와 같이 중앙 2 개와 바깥쪽 2 개가 방향이 반대이다. 단면도에서 보듯이, 급전 장치에 의해 발생된 자기장이 집전 장치의 코일을 지면과 수평 방향으로 통과할 때 코일에 유기된 전압을 이용하여 전력을 정류기로 전달한다.

급/집전 장치에서 전력 전달을 위한 자속 이외에 양 옆으로 퍼져 나가는 자속이 존재할 수밖에 없는데, 이 자속이 차량에 탑승한 승객 위치나 차량 주변에서 자기장으로 측정이 될 수 있다. [그림 5]는 차폐가 적용되지 않은 수직 자속 급/집전 장치에서 발생한 자속밀도의 분포도이다. 그림과 같이 최외곽 경계지점이 62.5 mG이므로, 측정 위치인 차량 좌우에서 전파법 규격을 넘어서게 된다.

### Ⅲ. 수동 차폐

누설 자기장 감소를 위한 방법은 오랜 시간 동안 많은 사람들에 의해 연구되어 왔다<sup>6)</sup>. 전자장 차폐에 사용되는 가장 일반적인 방법은 금속 차폐판을 이용한 수동 차폐로서, 소형 실리콘 칩의 전자장 차폐에서부터 대형 구조물의 차폐까지 널리 이용되고 있다. 온라인 전기 자동차의 급/집전 장치와 같은 저주파 신호의 차폐에도 금속 판 또는 그물 형태의 금속을 이용한 차폐가 적용될 수 있다<sup>7)~9)</sup>.

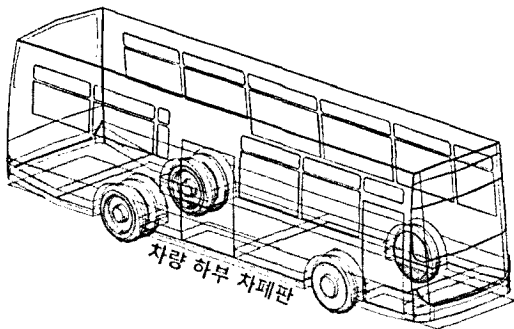


[그림 5] 차폐가 적용되지 않은 수직 자속 급/집전 장치에서 발생한 자속밀도의 분포도

### 3.1 차량 측면 수직 금속판 차폐판 적용

집전 장치가 차량 하부에 설치되기 때문에, 집전 장치의 윗부분인 차량 하부에는 반드시 [그림 6]과 같이 차량의 폭만큼 금속판으로 차폐가 되어 있어야 한다. 여기서는 차량 바닥면의 금속판 끝에 추가로 수직 방향의 금속판을 설치하는 방법의 효용성을 고려한다. 온라인 전기 자동차는 도로 위를 이동하면서 충전할 수 있도록 설계되어 있기 때문에, 차량 이동에 필요한 차량 하부와 지면 사이의 간격이 유지되어야 한다. 따라서 주행 중에는 이 간격 사이에 고정된 기구물로 인한 차량 운행 방해가 있어서는 안 된다. 일반적으로 20 cm 정도의 간격이 필요하나, 여기서는 특수 차량을 대상으로 설계하는 것이므로 간격을 13 cm로 하였다.

차량 측면 수직 금속판 차폐판의 효과를 검증하기 위해 [그림 7]과 같은 시뮬레이션을 진행하였고, 차폐판의 차폐 특성을 확인하기 위해 차량 하부와 지면 사이의 간격을 침범하여 차폐판을 설치하였을 때 변화되는 자기장의 세기를 확인하였다. [그림 7]과 같이 차량 끝 부분에서 아래로 내려오는 차폐판이 있을 때 그 길이에 따른 자기장의 분포가 변화한다. 이는 차폐판에 수직으로 입사하는 자기장이 차폐판에 발생하는 에디 전류로 인해 상쇄되기 때문에 감소 효과가 나타나는 것으로 분석된다. 차폐판의 길

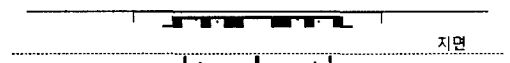


[그림 6] 차량의 하부 차폐판 설치 구조

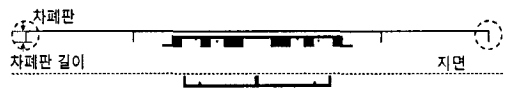
이가 길어질수록 그 효과가 커지게 되고, 차폐판을 차량 하부와 지면 사이의 간격을 무시하고 지면까지 내릴 경우, 지면 높이에서의 자기장은 128 mG에서 97 mG로 감소하는 효과를 나타낸다.

또한 차폐판의 두께도 중요한 요소이다. 급/집전 장치에서 발생하는 자기장은 차폐판에 수직으로 입사하는 성분 이외에도 차폐판에 평행하게 존재하는 부분도 있다. 이 성분은 차폐판에 전류를 만드는데, 차폐판의 두께가 매우 얇은 경우, 차폐판의 반대쪽 면에 큰 전류가 흐르게 되어 차폐의 효과가 크게 감소한다. 차폐판에 흐르는 전류는 표피 효과에 의해 전류가 차폐판 내부로 침투할 수 있는 깊이가 제한되고, 깊이 들어갈수록 전류의 양이 급격하게 감소하게 되는데, 전류의 침투량이 약 0.37배로 감소되는 표면 깊이(skin depth)는 다음과 같이 계산된다.

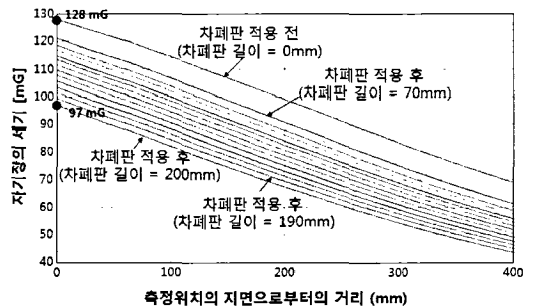
온라인 전기 자동차의 전력 전달에 사용하는 20 kHz



(a) 적용 전 단면 구조



(b) 적용 후 단면 구조



(c) 측정위치의 높이에 따른 자기장 세기

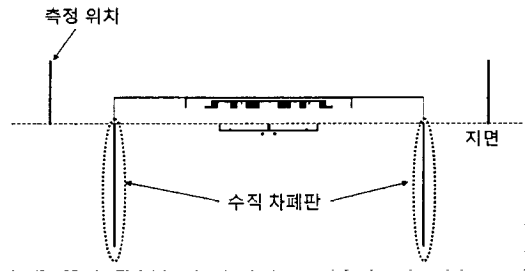
[그림 7] 차량 측면 수직 차폐판을 이용한 자기장 감소

주파수에서 알루미늄 차폐판 적용 시 표면 깊이는 약 0.56 mm이고, 실제로 적용한 2 mm 두께의 차폐판을 침투하여 반대편까지 전달되는 전류의 양은 약 1/35 정도로 감소하기 때문에, 2 mm 두께의 알루미늄 판은 차폐에 충분한 두께를 가진다고 볼 수 있다.

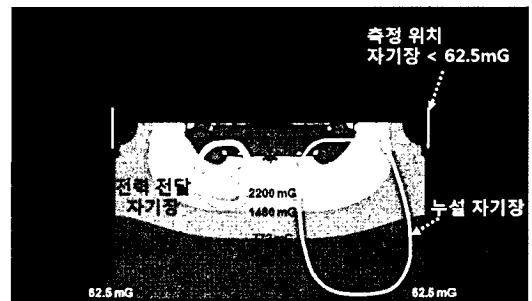
### 3-2 지하 수직 차폐판과 금속 브러시를 이용한 차폐

차폐 효과를 극대화하기 위하여, [그림 8]과 같이 지면에 수직인 차폐판을 지하에 매설하여 차폐하는 방법을 고려했다. 앞에서 보여준 차량 측면 수직 차폐판을 지면까지 내린 후, 지하의 수직 차폐판에 연결하였다. 이로써 차량 하부 차폐판, 차량 측면 수직 차폐판, 그리고 지하의 수직 차폐판으로 연결되는 완전한 차폐 구조를 만들게 된다. 결국 전체적으로 급/집전 장치를 중심으로 하나의 폐 루프 구조를 형성토록 함으로써 급/집전부에서 발생하는 누설 자기장이 일정한 거리 공간에서 벗어나지 못하도록 하는 구조를 형성하게 된다. 즉, 차량 측면과 도로 급전부의 차폐용 금속판이 맞닿아 누설 자기장은 이 구조 속에 갇히게 하는 원리이다. [그림 8]과 같이 누설되는 자기장이 0.5 mG 이하로 줄어들게 된다.

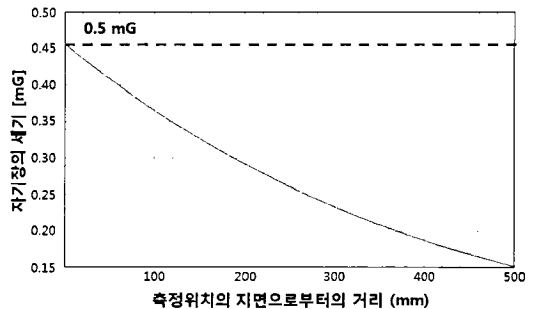
그러나 이러한 구조를 실제 차량에 적용하게 되면 차량의 측면이 지하에 매설된 수직 금속판과 고정되어 있기 때문에 차량의 운행이 불가능하다. 따라서, 이 구조와 유사한 차폐 효과를 가지면서 차량 운행은 가능한 구조를 제안하였다. 차량 측면 수직 차폐판과 지하 수직 차폐판과의 연결을 금속판으로 구현하지 않고, 여러 개의 가는 금속선을 묶어 브러시 형태로 만들고, 이 금속 브러시는 차량 측면 수직 차폐판에 연결하여, 지면에 노출된 지하 수직 차폐판의 윗부분과 접촉할 수 있게 하였다. 이 금속 브러시는 차량 진행 방향으로 일정 간격을 두고 지하의 수직 차폐판에 접촉되므로 차폐 효과는 높고 차량의 운행은 가능하도록 하였다.



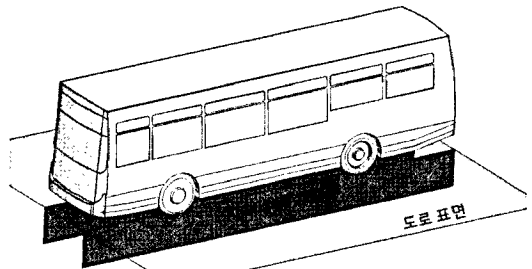
(a) 적용 후 단면 구조



(b) 적용 후 자기장 세기 분포



(c) 측정위치의 높이에 따른 자기장 세기

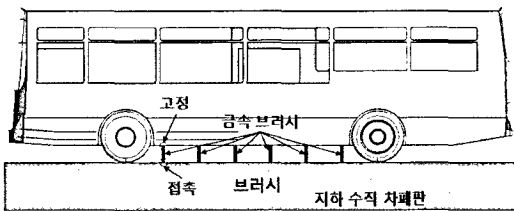


(d) 지하 수직 차폐판 설치 구조

[그림 8] 지하 수직 차폐판과 금속 브러시 연결을 이용한 자기장 감소

#### IV. 측정 검증

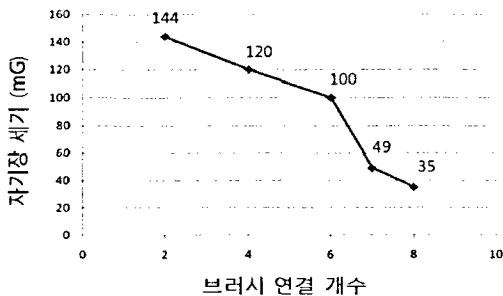
실제 차량에 적용 전에 [그림 9]의 차폐판을 이용한 자기장 감소 방안에 대해서 테스트 차량의 측정을 통해 사전 검증을 진행하였다. [그림 10]은 제안한 브러시를 이용한 차폐 기술이 적용된 실제 구조물이다. [그림 10] (a)는 지하 수직 차폐판과 금속 브



[그림 9] 차량 측면 차폐판과 지하 차폐판을 연결을 통한 자기장 차폐 적용 후 측면 구조



(a) 사전 측정 검증을 위해 테스트 차량에 적용된 금속 브러시



(b) 브러시 연결 개수에 따른 자기장 감소 측정 결과

[그림 10] 금속 브러시 접촉에 의한 자기장 차폐

러시를 이용한 차폐 기구물이 테스트 차량에 적용된 모습이다. 여기서는 차량 운행보다는 차폐 성능 확인을 위해 금속 브러시와 지하 수직 차폐판 사이의 연결을 접촉이 아닌 고정 방식으로 적용하였다. 그리고 가능성을 확인하는 단계에서는 지하 수직 차폐판 대신 지하 수평 차폐망을 적용하였다. 측정에는 Narda EFA300 자기장 측정기를 이용하였고, X, Y, Z 세 축 방향으로 다양하게 측정하여 가장 큰 값을 취하였다.

자기장 측정 결과, 금속 브러시 연결에 의한 자기장 감소가 확연히 나타났다. 브러시의 연결 개수가 늘어날수록 자기장은 감소하였고, 35 mG까지 자기장이 감소할 수 있음을 보여주었다. 급/집전 장치로부터 일부의 자기장이 차량 주변으로 누설되기 위해서는 브러시 연결에 의해 생성된 루프를 통과하여야 한다. 그러나 차량 측면 차폐판과 지하 수평 차폐판, 그리고 브러시에 의한 완전한 도전성 루프에 의해 누설 자기장의 주 성분인 루프에 수직 성분이 루프에 역 기전력을 만들고, 이로 인한 역 자기장에 의해 누설 자기장의 상당 부분을 상쇄시키는 것으로 볼 수 있다.

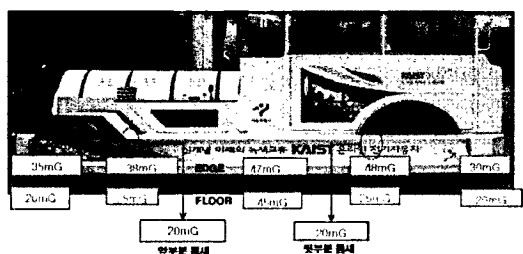
사전 측정 결과를 근거로, 금속 브러시를 이용한 온라인 자동차 자기장 차폐 기술은 55 kW의 고전력을 소모하는 서울대공원 코끼리 열차의 기관차에 적용되었다. [그림 11](a)에서 보듯이, 차량 하부에 연결된 금속 브러시들이 지하 수직 차폐판의 지면으로 드러난 부분에 접촉하고, 차량의 좌우 이동을 고려하여 8개의 브러시가 사용되었다. 최종적으로, 완성된 코끼리 열차의 각 위치 별 자기장은 [그림 11](b)와 같이 48 mG 이하로 측정되었고, 지난 3월 서울시와 함께 성공적으로 시범 운영을 하였다.

#### V. 결론

본 논문에서는, 온라인 전기 자동차와 비접촉식



(a) 금속 브러시를 이용한 자기장 차폐 적용 모습



(b) 각 위치 별 자기장 세기 측정 결과

[그림 11] 자기장 차폐 기술이 적용된 서울대공원 코끼리 열차

전력 전달 원리를 소개하였고, 급전 장치와 집전 장치에서 발생하는 누설 자기장을 최소화 하는 방법을 제안하였다. 금속 브러시를 이용한 자기장 차폐 방법은 자기장 시뮬레이션 해석과 테스트 차량의 측정으로 검증하였고, 서울대공원 코끼리 열차에 적용하여 누설 자기장을 48 mG 이하로 낮추어 전파법의 자기장 규격을 만족시키는 데 성공하였다.

### 참 고 문 헌

[1] Howard R. Ross, "Roadway for supplying power to vehicles and method of using the same", U.S. Patent no. 4 007 817, Feb. 1977.  
 [2] Joseph D. Brunett, Valdis V. Liepa, "Simulation and measurement of low frequency open surface magnetic field shielding", *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 1-4, Aug. 2008.

[3] Lennart Hasselgren, Jorma Luomi, "Geometrical aspects of magnetic shielding at extremely low frequencies", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 37, no. 3, pp. 409-420, Aug. 1995.  
 [4] William M. Frix, George G. Karady, "A circuitual approach to estimate the magnetic field reduction of nonferrous metal shields", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 39, no. 1, pp. 24-32, Feb. 1997.  
 [5] Notification no. 2008-37, Korea Communications Commission, May 2008.  
 [6] Henry W. Ott, *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems*, 2nd ed. Wiley Interscience, 1988.  
 [7] Richard B. Schulz, "ELF and VLF shielding effectiveness of high-permeability materials", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. EMC-10, no. 1, pp. 95-100, Mar. 1968.  
 [8] D. A. Miller, J. E. Bridges, "Geometrical effects on shielding effectiveness at low frequencies", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. MEC-8, no. 4, pp. 174-186, Dec. 1966.  
 [9] Clayborne D. Taylor, Charles W. Harrison, Jr., and Nicolas H. Younan, "On predicting the effectiveness of magnetic shields at low frequencies", *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 176-178, Aug. 1993.  
 [10] Seungyoung Ahn, Junso Pak, Taigon Song, Heejae Lee, Jung-Gun Byun, Deogsoo Kang, Cheol-Seung Choi, Eunjung Kim, Jiyun Ryu, Mijoo Kim, Yumin Cha, Yangbae Chun, ChunTaek Rim, Jae-Ha Yim, Dong-Ho Cho, and Joungho Kim, "Low frequency electromagnetic field reduction techniques for the

on-Line electric vehicle (OLEV)", *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*,

Accepted, 2010.

≡ 필자소개 ≡

안 승 영



1998년: 한국과학기술원 (공학사)  
2000년: 한국과학기술원 (공학석사)  
2005년: 한국과학기술원 (공학박사)  
2001년~2002년: Singapore SIMTech Associate Research Fellow  
2005년~2009년: 삼성전자 책임연구원  
2009년~2010년: 한국과학기술원 OLEV

사업단 선임연구원

2010년~현재: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 연구교수  
[주 관심분야] 온라인 전기 자동차 설계, 고속 패키지 및 보드 설계, EMC 대책 설계

송 대 건



2007년: 연세대학교 전기전자공학부 (공학사)  
2009년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)  
2010년~현재: 한국과학기술원 OLEV 사업단 연구원

[주 관심분야] EMI/EMC, TSV, Interposer,

DC/DC Converter

이 희 재



1988년: 부산대학교 (공학사)  
1996년: 일본 동북대학교 (공학석사)  
1999년: 일본 동북대학교 (공학박사)  
2000년~2005년: 삼성전자 책임연구원  
2006년~2010년: 한국과학기술원 OLEV 사업단 선임연구원  
2010년~현재: 한국과학기술원 전기 및

전자공학과 연구교수

[주 관심분야] 전기 자동차 자기장 설계, 고속 디지털 시스템 설계

변 정 건



1987년: 부산대학교 (공학사)  
1987년~2005년: 삼성전자 책임연구원  
2006년~현재: 한국과학기술원 전기 및 전자공학 김정호 교수 연구실 수석팀장

[주 관심분야] 전기 자동차 시스템 설계, 고속 디지털 시스템 설계



강 덕 수



1995년: 삼성전자 사내기술대학 전자과 졸업  
1984년~2005년: 삼성전자 책임연구원  
2006년~현재: 한국과학기술원 전기 및 전자공학 김정호교수 연구실 설계팀장  
[주 관심분야] Chip-Package-PCB 설계환경, DFM 검증환경, 자동차 대책기술

박 준 서



1998년: 한양대학교 (공학사)  
2005년: 한국과학기술원 (공학석사)  
2005년: 한국과학기술원 (공학박사)  
2005년~2007년: 일본 AIST Research Fellow  
2007년~현재: 한국과학기술원 연구교수  
[주 관심분야] TSV, 3D-IC Multi-chip Packaging, 시스템 전자기장 설계

최 철 승



1986년: 한국항공대학교 (공학사)  
1990년~1998년: 포스데이터 주임연구원  
1996년~2005년: 삼성전자 책임연구원  
2006년~현재: 한국과학기술원 전기 및 전자공학 김정호교수 연구실 설계팀장  
[주 관심분야] 고속 디지털 시스템 설계, 전기 자동차 자기장 설계

김 정 호



1984년: 서울대학교 (공학사)  
1986년: 서울대학교 (공학석사)  
1993년: University of Michigan (공학박사)  
1993년~1994년: Picometrix Inc. Research Engineer  
1994년~1996년: 삼성전자 수석연구원  
1996년~1999년: 한국과학기술원 조교수  
1999년~2007년: 한국과학기술원 부교수  
2001년~2002년: Silicon Image Inc. Staff Engineer  
2008년~현재: 한국과학기술원 정교수  
[주 관심분야] 온라인 전기 자동차 설계, 고속 디지털 시스템 Chip-Package-Board Level 설계, 3-Dimensional IC 설계