

무선전력전송 철도시스템의 기술 현황 및 전기자기적합성(EMC) 국제 표준화 동향

전강희 · 최도민 · 정민주 · 김남

충북대학교

I. 서 론

무선전력전송(Wireless Power Transfer: WPT) 기술은 전기에너지를 전선을 사용하지 않고 무선전송이 가능한 전자기파로 변환시켜서 전달하는 전력전송시스템으로 새로운 개념의 전기 공급 및 이용기술이다. 무선충전방식은 대부분 전자유도방법에 의한 무선충전방식으로 비방사(non beam) 무선전력전송기술을 이용하여 전송거리가 수 cm에 불과하였으나, 주파수를 20~60 kHz까지 증가시켜 전송거리가 10 cm까지 개선되었다. 최근 WPT에 대한 연구는 휴대폰과 같은 소형전자장치뿐만 아니라, 의료기기 및 전기자동차(Electcal Vehicle: EV)와 같은 고전력, 대용량 장치까지 그 범위가 확대되고 있다^{[1][2]}. 국내에서는 삼성전자와 LG전자를 중심으로 다수의 기업이 소출력 무선전력전송 제품을 출시하고 있으며, KAIST에서는 대출력 무선충전 전기버스 시범서비스를 시행한 바가 있다. 또한, 해외에서도 소출력 무선전력전송 제품을 많이 선보이고 있고, 다양한 무선충전 전기자동차와 무선충전버스를 개발했다. 대용량 무선전력 전송기술로는 독일의 봄바디어(Bombardier)사의 프리모베(Primove)열차가 있다.

현재 한국철도기술연구원(이하 철도연)에서도 무선전력전송 기술을 사용하여 경전철 및 철도에 전력을 공급하는 장치를 개발하고 있다. 개발 중인 철도용 무선급전장치는 1 MW급 인버터에서 전력을 공급받아 60 kHz의 고주파 자기장을 다시 전력으로 변환하여 전원을 공급하는 방식으로 차량을 움직인다. 고속철도에 무선으로 1 MW급의 대전력을 공급할 수 있는 시스템은 철도연에서 연구 개발한 것이 세계최초이다. 하지만 개발 시스템의 상용화를 위해서는 1 MW급의 매우 높은 전력을 사용하기 때문에, 차량 및 시설물에 대한 안전을 유지할 수 있도록 EMI(Electro Magnetic

Interference: 전자기 간섭), EMC(Electro Magnetic Compatibility: 전자기 적합성)관련 규격을 적용하여 전파장해 인증 시험을 진행해야 한다.

전자장치의 개발에 있어 필수적인 요소인 EMI/EMC 표준은 국제 표준화기구인 국제전기표준회의(International Electrotechnical Commission) IEC에서 국제표준화를 담당하고 있고, 현재까지 약 2,000개의 IEC 국제 규격을 제정하였다. 많은 전자장치 개발로 인하여 새로운 시험규격 제정이 늘어나고 있다. 마찬가지로 새로 개발된 무선전력전송 철도의 EMI/EMC 표준은 현재 없는 상태이다. 따라서 새로운 전파장해 시험기준을 제정해야 하므로, 기존의 고속철도시스템의 국내 표준을 기본표준으로 고려하고 있다.

고속철도시스템의 EMC(Electro Magnetic Compatibility: 전자기 적합성) 관련 국제표준은 IEC 62236 시리즈(철도용 전자파 적합성)가 있으며, 현재 국내 철도에 적용하고 있다^[4]. IEC 62236 시리즈 표준에서는 일반사항과 전체 철도 시스템에서 외부로 나가는 방사, 열차 및 공차, 철도 차량-장치, 신호처리 및 통신장치의 방사 및 내성, 고정 전력공급 설비와 장치의 방사 및 내성에 대한 EMC 표준을 제공하고 있다^[5].

하지만 이러한 기존 규격을 무선전력전송 철도에 그대로 적용하는 것은 전력공급 형태나 전자파 노출량, 사용 주파수 등의 차이가 있어 적합하지 않기 때문에, 앞으로 국제무선장해특별위원회(IEC/CISRR) 국제표준화회의에 적극 참여하여 각국의 국가표준화 동향 등 정보교류를 통해, 국내 기술의 무선전력전송 철도에 대한 EMI/EMC 시험표준을 마련해야 한다. 따라서 본 논문에서는 무선전력전송 철도의 전기자기적합성 표준마련을 위해 살펴봐야할 고속철도시스템의 EMI/EMC 규격과 무선전력전송 기술의 표준화 동향에 대해 검토하고 기술하고자 한다.

본 연구는 국토교통부 철도기술연구개발사업의 연구비 지원(과제번호 17RTRP-B118749-03)에 의해 수행되었습니다.

II. 고속철도시스템의 EMI/EMC 시험 기준

IEC 62236 문서는 고속철도시스템에 대한 전반적인 내용을 다룬다. 표준에서는 철도 제품 및 철도 설비에 대한 전자파 방사 및 내성 요구 사항을 규정하고 있다. 문서에서 제외된 현상은 핵전자파 펄스, 비정상 동작 조건, 직접적인 낙뢰의 유도효과이며, 철도 경계에서 방사 한계값은 철도 경계 내의 의도성 송신기에 적용하지 않고 있다. <표 1>은 IEC 62236 문서의 전체 구성을 보여준다⁶⁾.

IEC 62236-2에서는 도심지에서 이용하는 도시 차량 등 전체 철도 시스템에서 발생하는 방사 한계값과 측정 방법에 대해 다루고 있다. 전자파 방사측정은 철도 궤도의 중심으로부터 10 m 떨어진 지점과 변전소의 경계 울타리에서 10 m 떨어진 지점에서 측정한다. 열차와 변전소에서 측정할 경우 한계값은 준피크값을 사용하며, 주파수 별 대역폭 및 측정안테나는 <표 2>에 정리하였다⁷⁾.

IEC 62236-3에서는 열차 및 공차, 철도 차량-장치에 대한 EMI 방출과 전도방해의 한계값을 다루고 있으며, IEC 62236-4에서는 150 kHz~30 MHz 대역에서의 전도방해 한계값과 30~1,000 MHz 대역에서의 EMI 방출 한계값을 다

<표 1> 고속철도시스템의 EMI/EMC 표준

IEC 표준	표준 내용
IEC 62236-1	일반사항
IEC 62236-2	전체 철도 시스템에서 외부로 나가는 방사
IEC 62236-3-1	열차 및 공차
IEC 62236-3-2	철도 차량-장치
IEC 62236-4	신호처리 및 통신장치의 방사 및 내성
IEC 62236-5	고정 전력공급 설비와 장치의 방사 및 내성

<표 2> 주파수 범위별 대역폭과 측정안테나

주파수 범위	대역폭	측정 안테나
9~150 kHz	200 Hz	루프안테나 (Loop Antenna)
0.15~30 MHz	9 kHz	
30~300 MHz	120 kHz	쌍뿔 다이폴 안테나 (Biconical Dipole Antenna)
300 MHz~1 GHz	120 kHz	대수주기 안테나 (Log Periodic Antenna)

루고 있다. 마지막으로 IEC 62236-5에서는 철도차량에 사용되는 고정 전력공급 설비와 장치의 EMI 방출 한계값을 다룬다. 각 표준에 대한 시험 주파수 대역과 기본표준을 <표 3>에 정리하였다^{7),8)}.

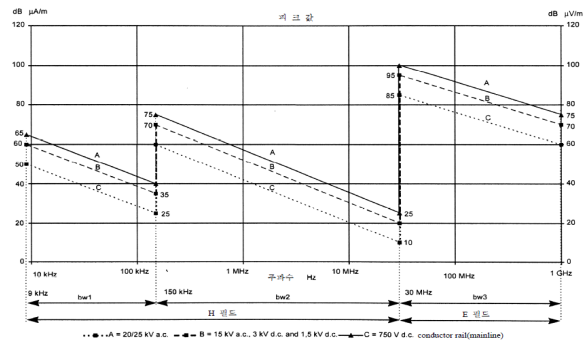
2-1 방사 한계값

도시에서 운행하는 차량의 경우, 750 V DC의 제3레일에 대해 [그림 1]에서 보여주는 방사 한계값을 초과하지 않아야 한다.

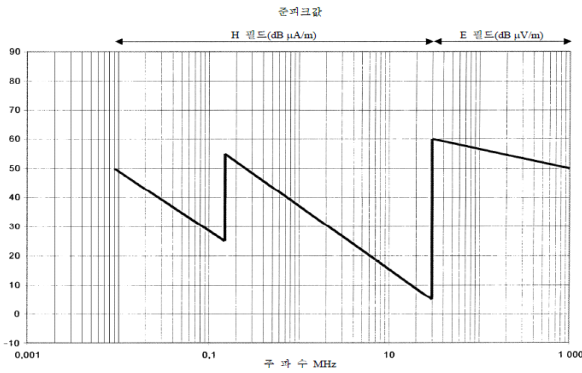
고속철도에 전원을 공급하기 위해서는 변전소가 필요하며, 변전소에서 외부환경으로 나가는 무선 주파수 잡음 방사는 [그림 2]의 한계값을 만족해야 한다^{7),8)}.

<표 3> EMI 시험규격

IEC 표준	시험 항목	기본표준
IEC 62236-2	Radiated Emissions (9 kHz~1,000 MHz)	EN 50121-2
IEC 62236-3-1	Radiated Emissions (9 kHz~1,000 MHz)	EN 50121-2
IEC 62236-3-2	Conducted Emissions (150 kHz~30 MHz)	CISPR 11
	Radiated Emissions (30 MHz~1,000 MHz)	
IEC 62236-4	Conducted Emissions (150 kHz~30 MHz)	IEC 61000-6-4
	Radiated Emissions (30 MHz~1,000 MHz)	
IEC 62236-5	Radiated Emissions (9 kHz~1,000 MHz)	IEC 62236-2



[그림 1] 고속운행 철도에서 발생하는 방사 한계값



[그림 2] 변전소의 방사 한계값

2-2 측정 방법

선로에서 운행 중인 철도 차량에서 발생한 전자기장은 주파수에 적합한 계측기를 사용하여 측정해야 한다. 궤도로부터 발생하는 전기장 및 자기장의 수평 또는 수직 성분을 측정한다. 측정은 전체 측정 시간동안의 최댓값을 측정하고, 선택한 특정주파수에서 측정시간은 최소 50 ms이며, -6 dB에서 측정에 사용되는 주파수 대역과 대역폭은 앞의 <표 2>를 참고한다. 차량이 움직이는 궤도의 중심에서부터 측정 안테나까지의 표준 거리는 10 m이다. 대수주기 안테나의 경우, 안테나의 중심까지를 10 m로 한다.

만약 안테나가 궤도 중심에서 10 m 떨어지지 않은 경우를 제외하고, 표준을 충족하는 모든 현장에서 시험하는 경우 결과는 다음의 공식을 이용하여 10 m에 해당하는 값으로 변환할 수 있다. 식에서 n값은 <표 4>의 주파수별 n의 계수를 참고한다. 10 m 거리에서 측정한 값은 [그림 1]의 한계 값을 초과하지 않아야 한다.

$$E_{10} = E_x + n \log_{10}(D/10)$$

여기에서 E_{10} : 10 m에서의 값

E_x : D m에서 측정한 값

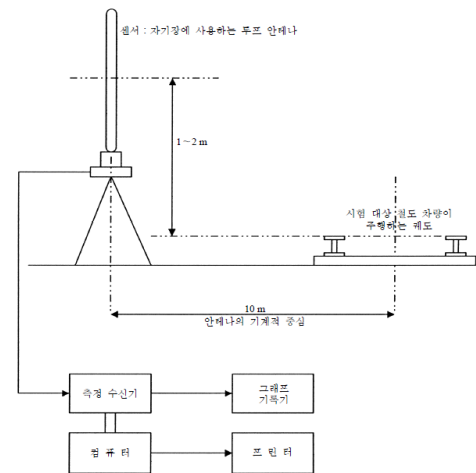
n : <표 3> 에서 선택한 계수

주파수 대역별로 측정하는 안테나는 상이하므로 안테나 중심의 레일면 위의 높이는 루프 안테나의 경우, 1~2 m 이내, 다이폴 또는 대수주기 안테나의 경우, 2.5~3.5 m 이내의 범위에 있어야 한다. 측정 시 9 kHz~30 MHz 범위는 루

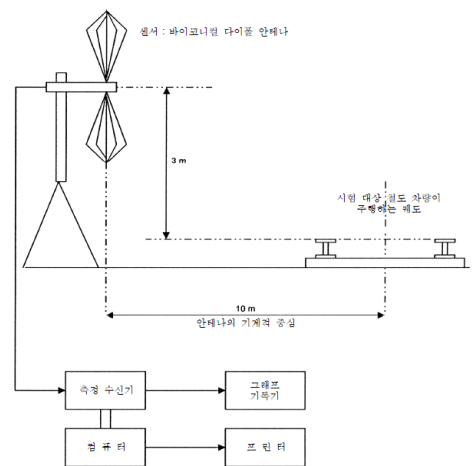
<표 4> 계산식에서 사용한 n의 계수

주파수 범위	n
0.15~0.4 MHz	1.8
0.4~1.6 MHz	1.65
1.6~110 MHz	1.2
110~1,000 MHz	1.0

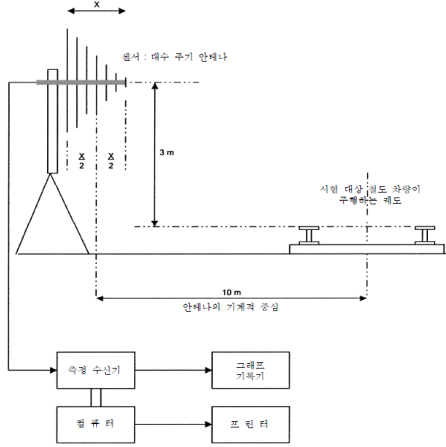
프 안테나를 사용하여 자기장을 측정하며, 30 MHz 이상의 주파수는 바이코니컬 또는 대수주기 안테나를 사용하여 전기장을 측정한다. [그림 3]~[그림 5]는 안테나의 위치와 수직 정렬을 나타낸다.



[그림 3] 9 kHz~30 MHz의 경우



[그림 4] 30~300 MHz의 경우



[그림 5] 300~1,000 MHz의 경우

변전소에서 방사하는 전자파를 측정하는 방법은 철도와 접하는 면이 가장 가까운 철도 궤도의 중심에서 30 m 이상 떨어져 있지 않다면 해당 면을 제외한 나머지 3면의 중간점에서 변전소 바깥쪽 울타리의 10 m 거리에서 측정한다. 이 경우에 4면을 모두 측정해야 하고, 각 측정 위치에서 측정하는 방법은 다음과 같다^{[6]~[8]}.

- ① 1 MHz 부근의 주파수: 루프안테나를 사용하며, 변전소의 부하는 정격 부하의 최소 30 %, 루프안테나의 기저부는 지표면 위 1~1.5 m 사이
- ② 9 kHz~30 MHz 주파수 범위: 최대 방향에서 루프 안테나로 측정하고, 변전소의 부하는 정격 부하의 최소 30 %
- ③ 30~300 MHz 주파수 범위: 수직 다이폴 또는 수직 바이코니컬 안테나로 무선 방사를 측정하고, 변전소의 부하는 정격 부하의 최소 15 %, 안테나의 중심은 지표면에서 3 m 위에 위치
- ④ 350 MHz 부근의 주파수: 수직 편파 대수주기 안테나로 최대 방사를 측정하고, 변전소의 부하는 정격 부하의 최소 15 %, 안테나의 중심은 지표면에서 3 m 위에 위치
- ⑤ 300~1,000 MHz 주파수 범위: 앞서 언급한 최대 방향 위치에서 대수주기 안테나로 무선 방사를 측정하고, 변전소의 부하는 정격 부하의 최소 15 %, 안테나의 중심은 지표면에서 3 m 위에 위치

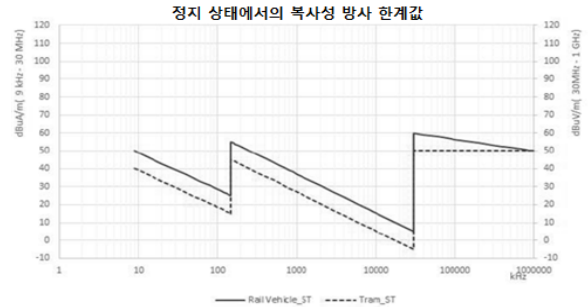
III. 저속운행 철도차량의 방사 한계값 및 측정방법

저속으로 운행하는 철도 차량에 대한 방사 및 내성의 요구 사항은 IEC 62236-3에서 다루고 있다. 측정대상은 동력 전차 및 도로에서 운행하는 노면차량 등을 포함한다. 주파수 범위는 DC부터 400 GHz이며, 적용 범위는 각 에너지의 입·출력 및 차량 인터페이스이다^{[8]~[10]}.

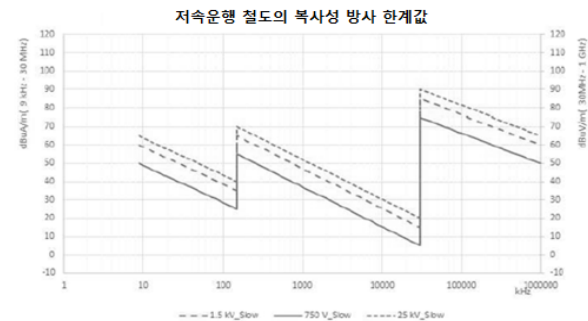
3-1 방사 한계값

저속으로 운행하거나 정차되어 있는 철도 차량의 방사 시험 및 한계값은 차량 주변의 일반 설비에 장애를 발생시키지 않아야 한다. 시험 중인 철도 시스템과 차량의 영향을 완전히 분리하는 것은 불가능하기 때문에, 운영자 및 설계자는 통신 시스템과의 호환성 및 통신 선로 간섭에 대한 시험 조건을 규정해야 한다.

[그림 6]은 정지 상태와 방사 한계값을 나타내며, [그림 7]은 저속 운행 상태에서의 방사 한계값을 나타낸다. 이 값은 준피크값으로 정의된다. 측정거리는 고속운행과 동일한 10



[그림 6] 정지 상태에서의 복사성 방사 한계값



[그림 7] 저속운행 철도의 복사성 방사 한계값

m이며, 도시 차량의 경우, 한계값은 아직 미적용 중이다. 따라서 [그림 6]과 [그림 7]의 한계값을 따르며, 디젤 전기 기관차 및 전동차는 [그림 6] 및 [그림 7]의 750 V의 한계값을 적용한다^[8].

3-2 측정 방법

시험은 방사성 장애를 생성할 수 있는 모든 철도 시스템의 동작에 적용되며, 정지 상태 및 저속 이동 속도에서 시험해야 한다. 또한, 정지상태의 경우, 보조 변환기는 작동되고 견인 변환기는 전압은 공급되지만 미작동 되어야 한다. 방사 측정 시 시험 현장의 외부 환경과 철도 차량은 <표 5>의 거리 기준을 만족해야 한다.

저속 운행 시험의 경우, 속도는 측선 접점의 아킹(Arching)이나 바운싱(Bouncing) 현상을 피하기 위해서는 충분히 느려야 하며, 전기적 제동은 빨라야 한다. 측정 시 권장 속도 범위는 도시 차량의 경우에는 (20±5) km/h이고, 간선 차량의 경우에는 (50±10) km/h이다. 정지 시험시 안테나를 통과할 때, 이 차량은 주어진 속도 범위 내에서 최대 견인력의 1/3 수준에서 차량을 운행하여 대체할 수 있다. 저속 시험의 견인력을 이용한 정지 시험으로 대체한 경우, 저속 운행의 한계값을 적용해야 한다. 측정 시 주파수별 대역폭 및 측정 안테나는 <표 2>를 따른다^{[7],[8]}.

IV. 무선전력전송 기술개발 및 표준화 현황

해외 무선전력전송 기술개발은 소출력 분야에서 자기유도 방식의 필립스의 전동칫솔, 와이즈파워 등의 휴대폰 무선충전 제품이 있다. 대출력 분야에서는 2014년 일본 자동차 회사인 도요타와 함께 WiTricity에서 자기공명방식의 전기자동차 무선충전기술을 개발하였다. 캐나다에 본사를 둔 봄바디어(Bombardier)에서는 자기유도 방식으로 전기자동차,

전기버스, 도시철도에 무선충전기술을 개발하여 2013년 독일의 브라운슈바이크에서 시범 서비스를 시행하였고, 전력은 800 kW급이며, 주파수는 20 kHz, 최고 속도는 50 km/h 정도이다.

국내 무선전력전송 기술개발은 소출력 분야에서 삼성전자, LG전자 등 대기업과 동양이엔피, 코마테크 등의 업체에서 자기유도방식의 제품을 개발하고 있다. 대출력 분야에서는 2009년부터 KAIST가 전기자동차 무선충전 기술을 개발하고 있으며, 2013년에 구미시에서 전기버스 시범서비스를 실시하였고, 현재 일부 구간에서 운행하고 있다. 또한, 한국철도기술연구원에서는 KAIST와 함께 2015년도부터 무선전력전송기술을 경전철 등 도시철도에 도입하기 위한 실용화를 준비하였다. 고속철도의 경우, 이보다 좀 더 연구가 필요하여 약 2018년도 이후가 될 것으로 전망하고 있다.

무선전력 전송기술을 철도에 적용할 경우, 열차가 접촉하지 않고 전력을 공급받을 수 있기 때문에, 급전장치의 마모가 적을뿐만 아니라, 전신주 등 전차선 설비가 필요 없고, 터널의 단면적도 줄일 수 있어 건설비용을 낮출 수 있다. 또한 높은 속도에서 팬터그래프(열차 지붕 위 집전장치)와 전차선 간 충돌이나 소음 등의 문제도 해결할 수 있어 외관과 기능적으로도 많은 장점이 있는 대용량 고주파 무선전력전송 원천기술이다.

현재 국제적으로 새로운 전자장치 기술개발로 인하여 전파장애 시험규격 제정이 늘어나고 있다. 국외 무선충전 전기자동차 표준화 동향은 IEC의 경우, 유럽과 일본이 무선충전 설비에 대해 표준개발을 주력하고 있으며, 미국의 경우, 퀄컴을 중심으로 무선충전을 위한 통신모듈 개발에 주력하고 있다. 현재 진행 상태로는 유럽의 기술과 일본의 기술이 치열하게 경쟁 중에 있으며, 유럽과 한국은 20 kHz 및 60 kHz를 중심으로 기술 개발이 진행되고, 일본과 미국 퀄컴은 85 kHz를 중심으로 기술 개발이 전개되고 있다. 또한, 한국 및 유럽은 일본과 함께 무선충전 방식, 주파수에 대한 표준개발을 강력하게 추진하고 있다. 우리나라의 경우, 많은 기술개발로 인해 국제표준화 참여 또한 늘어나, 전기자기장해 국내규격이 국제표준으로 채택되어 제정된 바가 다수 있으며, 향후 우리 기술의 국제표준 채택은 더욱 늘어날 전망이다^[13].

<표 5> 측정 시 외부 환경과 철도 차량의 거리

구분	도시 차량	간선 차량
나무, 벽, 터널, 교량	10 m	30 m
가공선/제3레일	500 m	3 km
다른 철도 차량	2 km	20 km

V. 결 론

본 논문에서는 현행 국내 철도의 IEC 62236 시리즈의 일반사항, 전체 철도시스템, 열차 및 공차, 철도 차량-장치, 고정 전력공급 설비에 대한 한계값과 그 측정방법을 중심으로 검토하여 기술하고, 무선전력전송 분야의 국내외 기술개발 현황과 표준화 동향을 살펴보았다. 국제적으로 무선전력전송기술의 많은 개발이 진행되고 있고, 그에 맞는 표준화도 진행 중에 있다. 국내에서도 우리 기술의 무선전력전송 철도의 실용화를 위해 새로운 전기자기적합성 시험기준이 필요하다.

현재 국제무선장에특별위원회인 IEC와 CISPR에서는 새로운 무선전력전송기술에 대한 전파장해 한도설정과 측정방법을 개발하고 있다. 현재 CISPR/B/ADH5 in-situ Test가 2017년 10월에 새롭게 승인되었고, 여기에서는 대출력 무선충전시스템에 대한 EMI/EMC 규격을 새롭게 개발하게 될 것이다. 우리나라 또한 위원회 회의에 지속적으로 참여하여 국제적 합의를 통해 철도연에서 개발하고 있는 무선전력전송 철도의 실용화 진행을 위해서 전기자기적합성 기준을 제정해 나갈 예정이며, 우리나라에서 본 위원회의 의장을 맡기로 결정되었다. 앞으로 기존 고속철도의 전파장해 시험기준 분석을 통해 철도차량에 맞는 시험기준을 연구하고, 새로운 무선전력전송 주파수, 사용전력, 전자파 노출환경 등의 변화를 고려하여 무선전력전송 전철의 타당한 전기자기적합성 규격개발과 연구를 진행해야 한다.

참 고 문 헌

- [1] 박찬배, 이병송, 이수길, "철도차량용 대용량 무선전력 전송 기술 개발 동향 분석", 전기의 세계, 63(9), pp. 35-42, 2014년 9월.
- [2] 민병덕, "전기철도용 무선전력전송 기술동향 및 경제성 분석", 전력전자학회, 전력전자학회지 18(4), pp. 52-57, 2013년 08월.
- [3] 임태윤, 오창섭, 박석준, "무선전력전송에 대한 기술 개발 동향", 에너지공학, 24(2), pp. 174-178, 2015년 06월.
- [4] 명성호, 이재복, "고속철도의 EMC 표준동향", 한국전자과학기술회, 전자과학기술 14(1), pp.15-27, 2003년 1월.
- [5] 김윤명, 주영준, "고속전철 시스템의 EMI 측정", 한국철도학회 학술발표대회논문집, pp.1157-1162, 2008년 11월.
- [6] IEC 62236-1, "철도용 전기자기적합성 - 제1부: 일반사항", 2016년 12월.
- [7] IEC 62236-2, "철도용 전기자기적합성 - 제2부: 전체 철도 시스템에서 외부로 나가는 방사", 2016년 12월.
- [8] KN50, "전기철도기기류의 장해방지 시험방법", 2010년 12월.
- [9] IEC 62236-3-1, "철도용 전기자기적합성 - 제3-1부: 철도 차량 - 열차 및 공차", 2016년 12월.
- [10] IEC 62236-3-2, "철도용 전기자기적합성 - 제3-2부: 철도 차량 — 장치", 2016년 12월.
- [11] IEC 62236-4, "철도용 전기자기적합성 - 제4부: 신호처리 및 통신장치의 방사 및 내성", 2016년 12월.
- [12] IEC 62236-5, "철도용 전기자기적합성 - 제5부: 고정 전력공급 설비와 장치의 방사 및 내성", 2016년 12월.
- [13] 정진수, 한운기, "무선충전 전기자동차의 국내·외 표준 및 기술 동향 분석", 전기의 세계, 64(4), pp. 18-23 2015년 04월.

[1] 박찬배, 이병송, 이수길, "철도차량용 대용량 무선전력

≡ 필자소개 ≡

전 강 희



2015년 2월: 충북대학교 정보통신공학부 (공학사)
2015년 3월~현재: 충북대학교 정보통신공학전공 석사과정
[주 관심분야] 안테나 설계, 전자파 해석, EMC

최 도 민



2015년 2월: 충북대학교 정보통신공학부 (공학사)
2015년 3월~현재: 충북대학교 정보통신공학전공 석사과정
[주 관심분야] 안테나 설계, 전자파 해석, EMC

정 민 주



2013년 2월: 조선대학교 전자공학과 (공학사)
2015년 3월: 부경대학교 LED 융합공학전공 (공학석사)
2016년 10월~현재: 홀로그래프융합기술센터 연구원, 충북대학교
[주 관심분야] 안테나 설계, 전자파 해석, EMC

김 남



1981년: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1983년: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
1988년: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)
2011년~현재: 한국무선전력전송포럼 운영위원회 위원장
2013년~현재: 미래창조과학부 통신정책자문위원회 위원

2014년~현재: BEMS 부회장, 회장

1989년~현재: 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부 교수

[주 관심분야] 이동통신 및 전파전파, 마이크로파 전송선로해석, EMC 및 전자파 인체보호 표준