

도시철도용 무선 급집전 시스템 주변의 전자기장 측정 방법 및 안전성 평가 방법 연구

EMF Measurement and Safety Assessment Method for Wireless Power Transfer System for Urban Railroad

김 윤 명 · 김 준 희* · 주 영 준*

Yoon-Myoung Gimm · Jun-Hee Kim* · Young-Jun Ju*

요 약

국내에서 개발되고 있는 도시철도용 무선 전달 공급 시스템은 60 kHz 자기장을 이용하여 객차에 전력을 공급한다. 무선 전력 전송 시 발생하는 전자기장에 인체가 노출될 때, 전자기장 세기는 인체 안전성 기준을 만족해야 한다. 하지만 도시철도용 무선 급집전 시스템에서 발생하는 전자기장에 대한 측정 방법과 인체 안전성 평가 방법이 아직 확립되지 않았다. 본 논문에서는 도시철도용 무선 급집전 시스템에서 발생하는 전자기장 측정 방법 및 인체 안전성 평가 방법을 제안하였다. 제안된 측정 방법에 따라 무선 급집전 시스템 시험선로에서 발생하는 전자기장을 측정하고, 전자기장 인체 보호기준치와 비교하였다.

Abstract

A wireless power transfer (WPT) system for an urban railroad is currently under development in S. Korea. This system supplies power to railroad cars using 60 kHz magnetic fields. The electromagnetic fields (EMFs) generated by the WPT system should satisfy established safety requirements for exposure of the human body to these fields. However, EMF measurements and the safety assessment methods for fields generated by the WPT system have not yet been established. As such, a measurement and safety assessment method for EMF generated by a WPT system for an urban railroad is proposed in this report. The EMF generated by this WPT system on a test railroad was measured and compared to the reference level set by the human safety standard for EMF exposure.

Key words: Wireless Power Transfer, EMF Safety Assessment, Urban Railroad, EMF Measurement

I. 서 론

무선전력전송 기술은 휴대폰, 가전, 전기자동차, 전기철도 등 다양한 분야에서 개발되고 있다. 국내에서는 도시

철도용 전기철도에 무선전력전송을 적용하기 위한 연구가 진행되고 있으며^[1], 60 kHz 주파수가 도시철도용 전기철도의 무선전력전송에 사용된다. 연구가 진행됨에 따라 무선전력전송 시 발생하는 전자기장에 대한 인체 안전성

「본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원(17RTRP-B130586-03)에 의해 수행되었습니다.」

단국대학교 전자전기공학부(School of Electronics and Electrical Engineering, Dankook University)

*(주)이엠에프세이프티 기업부설연구소(Research Laboratory, EMF Safety Inc.)

· Manuscript received January 11, 2018 ; Revised February 21, 2018 ; Accepted December 12, 2018. (ID No. 20180111-006)

· Corresponding Author: Young-Jun Ju (e-mail: dkkusa@gmail.com)

의 확보가 필수적이므로 전자기장에 인체노출에 대한 안전성 평가가 필요하다. 하지만 전기철도용 무선 전력전달 시스템에 대한 전자기장 측정 방법 및 평가 방법이 아직 존재하지 않는다.

본 논문에서는 도시철도용 무선급전 시스템에서 발생하는 전자기장 측정 방법 및 평가 방법을 제안하였고, 제안한 측정 방법에 따라서 도시철도형 무선급전 시험선로에서 전자기장 세기를 측정하여 전자기장 인체보호기준치와 비교하였다.

II. 도시철도용 무선 급전 시스템

도시철도용 무선 급전 시스템은 그림 1과 같이 교류 자기장을 발생시켜 전차 선로 사이에 설치한 급전 장치에서 객차 하부에 위치한 집전장치로 무선(자기장) 전력을 공급하는 시스템이다.

III. 전자기장 인체보호기준

3-1 국내 기준

국내의 전자기장 인체보호기준은 과학기술정보통신부 고시 제2017-7호로 고시되어 있으며, 표 1 및 표 2와 같이 일반인과 직업인 기준으로 나뉘어 있다. 국내 기준은 국제비전리복사방호위원회(ICNIRP, International Commission of Non-ionizing Radiation Protection)에서 1998년도에 권고

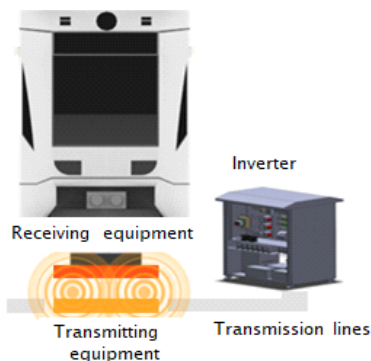


그림 1. 도시철도용 무선 급전 시스템 개념도
Fig. 1. Conceptual design of wireless power transfer system for urban railroad.

표 1. 일반인에 대한 전자기장인체보호기준

Table 1. Reference levels of electric, magnetic and electro-magnetic fields for general public exposure.

Frequency ranges	E-field [V/m]	H-field [A/m]	B-field [μ T]	Power density [W/m^2]
1 Hz	-	3.2×10^4	4×10^4	
1 ~ 8 Hz	10,000	$3.2 \times 10^4 / f^2$	$4 \times 10^4 / f^2$	
8 ~ 25 Hz	10,000	$4,000 / f$	$5,000 / f$	
0.025 ~ 0.8 kHz	$250 / f$	$4 / f$	$5 / f$	
0.8 ~ 3 kHz	$250 / f$	5	6.25	
3 ~ 150 kHz	87	5	6.25	
0.15 ~ 1 MHz	87	$0.73 / f$	$0.92 / f$	
1 ~ 10 MHz	$87 / f^{1/2}$	$0.73 / f$	$0.92 / f$	2
10 ~ 400 MHz	28	0.073	0.092	
400 ~ 2,000 MHz	$1.375 f^{1/2}$	$0.0037 f^{1/2}$	$0.0046 f^{1/2}$	
2 ~ 300 GHz	61	0.16	0.20	10

표 2. 직업인에 대한 전자기장 인체보호기준

Table 2. Reference levels of electric, magnetic and electro-magnetic fields for occupational exposure.

Frequency ranges	E-field [V/m]	H-field [A/m]	B-field [μ T]	Power density [W/m^2]
1 Hz	-	1.63×10^5	2×10^5	
1 ~ 8 Hz	20,000	$1.63 \times 10^5 / f^2$	$2 \times 10^5 / f^2$	
8 ~ 25 Hz	20,000	$2 \times 10^4 / f$	$25 \times 10^4 / f$	
0.025 ~ 0.82 kHz	$500 / f$	$20 / f$	$25 / f$	
0.82 ~ 65 kHz	610	24.4	30.7	
0.065 ~ 1 MHz	610	$1.6 / f$	$2.0 / f$	
1 ~ 10 MHz	$610 / f$	$1.6 / f$	$2.0 / f$	
10 ~ 400 MHz	61	0.16	0.2	10
400 ~ 2,000 MHz	$3 f^{1/2}$	$0.008 f^{1/2}$	$0.01 f^{1/2}$	$f / 40$
2 ~ 300 GHz	137	0.36	0.45	50

한 가이드를 사용하고 있다^{[2],[3]}.

3-2 국외 기준

국외의 대표적인 전자기장 인체보호기준은 ICNIRP

1998 Guidelines과 ICNIRP 2010 Guidelines 그리고 IEEE C95.1이 있다^{[3]~[5]}. ICNIRP에서는 2010년도에 저주파수 대역(0~100 kHz)에 대한 전자기장 인체보호기준을 개정하였다. 인체내의 의학적 영향을 결정하는 물리량을 인체 내부 유도전류밀도에서 인체 내부 유도 전기장 세기로 개정되었고, 인체 내 조직마다 전기전도도의 불확실성을 고려한 수치해석 결과가 반영되었다. 표 3에 ICNIRP 1998 Guidelines과 2010 Guidelines의 차이점을 요약하였다.

표 4는 60 kHz 주파수 대역에서의 ICNIRP 1998 Guidelines과 2010 ICNIRP Guidelines 그리고 IEEE C95.1의 인체보호기준치를 나타낸 것이다.

표 3. ICNIRP 1998 Guidelines과 2010 Guidelines의 주요 차이점

Table 3. Major differences between ICNIRP Guidelines of 1998 and 2010.

Item	Guide lines	Main differences
Basic restrictions	1998	- Induced current density in the body
	2010	- Induced electric field strength in the body
Considered effects of the body	1998	- Prevent effects on nervous system functions. - Threshold for induced current density in central nervous system(It is not considered phosphene.).
	2010	- Used the threshold of phosphene for basic limiting exposure. - Included with effects on the central and the peripheral nervous tissues. - Internal electric fields were derived the conductivity of each tissue by anatomical models.
Reference levels	1998	- Used dosimetry quantities based on simple geometry models.
	2010	- Used dosimetry quantities based on anatomically specific body models.
Contact currents	1998	Avoid shock and burn hazards. - Reference levels for public is half of that for occupational(Considered threshold contact currents that elicit biological responses in children are one-half of that for adult men.). - Object is to prevent from painful shock.
	2010	- Equal guide lines 1998's.

표 4. 60 kHz에서 일반인에 대한 국제 전자기장 인체 노출 기준 레벨

Table 4. Reference levels of EMF in the international guidelines at 60 kHz for general public.

	Reference level		
	B-field [μ T]	H-field [A/m]	E-field [V/m]
1998 ICNIRP Guidelines	6.25	5	87
2010 ICNIRP Guidelines	27	21	83
IEEE C95.1	205		1,842

IV. 국내외 전자기장 강도 측정 및 평가 방법

도시철도용 무선 급집전 시스템의 전자기장 안전성 평가를 위한 전자기장 측정 방법 및 평가 방법을 도출하기 위하여 국·내외 기준 분석 및 수치해석을 수행하였다.

4-1 국내 기준

국립전파연구원에서는 전자파강도 측정기준에 관한 고시가 있으며^[6], 측정기기에 대한 성능 기준 및 측정에 대한 일반적인 기준을 제시하고 있다. 측정 지점에 대해서는 작업자가 주로 작업하는 곳 또는 주민이 주로 생활하는 곳에서 측정하고, 전기·전자기기 등에서 발생하는 전자기장은 통상 기기를 사용하는 거리에서 측정한다. 이때, 측정된 지점에서 측정된 전자기장의 세기는 전자기장 인체보호기준치를 초과하지 않아야 한다.

4-2 국외의 전자기장 강도 측정 기준 및 평가 방법

무선급집전 시스템의 전자기장 측정 방법과 유사한 국외의 기준으로는 IEC 62110, IEC 623597, IEC 61980-1, IEC TC 106 WG9 Technical Report 등이 있다^{[7]~[11]}.

4-2-1 IEC 62110

IEC 62110은 전력설비로부터 노출되는 자기장 측정 및 안전성 평가 방법을 규정하고 있다. 본 규격에서 균일 자기장에 대한 측정은 단일 지점 측정으로, 측정 지점은 지면으로부터 1 m 높이에서 측정하도록 하고 있다. 비균일 전자기장에 대한 측정은 그림 2와 같이 3점 측정 방법으

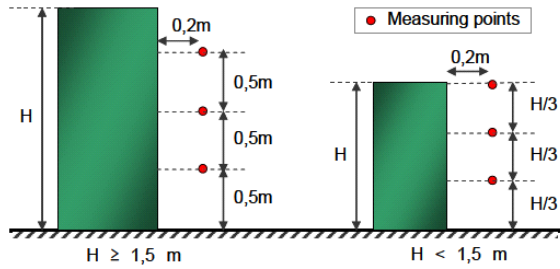


그림 2. 비균일 전자기장에 대한 3점 측정 방법
Fig. 2. 3 points measurement method for non-uniform electromagnetic fields.

로 정의하고 있으며, 인체 안전성 평가는 3점 측정법으로 측정된 값을 산술 평균하여 인체보호기준치와 비교 평가하고 있다. 이때 단일지점 측정 높이인 1 m에서의 자기장 세기는 인체 노출 평균값으로 인식되며, 3점 평균 노출 수준으로 인체노출을 평가하고 있다.

4-2-2 IEC 62597

IEC 62597은 전기철도 차량, 철도에 설치된 전력설비 및 지상에 고정된 전력설비에서 발생하는 전자기장에 대한 측정 방법을 정의하고 있으며, 적용 주파수 범위는 DC에서 20 kHz까지이다. 표 5는 철도시설에 대한 전자기장 측정 시, 움직이는 차량과 정지 상태의 고정설비에 대한 측정 조건이다. 전기철도 차량에 대한 전자기장 측정은 표면 측정 방법과 공간 측정 방법으로 분류되며, 그림 3은 표면 측정 위치를 나타내었다. 표면 측정은 전자기장을 발생시키는 기기와 가장 근접하고 측정이 가능한 표면에서 측정하는 것을 말하고, 공간 측정 방법은 작업자 또는 일반인이 접근할 수 있는 가장 가까운 거리에서 측정하는 방법을 의미한다. 표 6은 전기철도 차량에 대한 전자기장 측정 시 차량 내부 및 외부에서 표면 측정 방법 및 공간 측정 방법에 따른 측정 위치를 나타낸 것이다.

4-2-3 IEC 61980-1 & IEC TC 106 WG9 Technical Report

IEC 61980-1 & IEC TC 106 WG9 Technical Report는 무선충전 전기자동차에 대한 측정 방법을 정의하고 있다. 그림 4는 무선충전 전기자동차의 전자기장 측정 위치를 표시하였다. 측정 위치는 차량 내부와 외부로 나누어 정

표 5. 철도시설에 대한 전자기장 측정 조건

Table 5. EMF measurement conditions of the railroad system.

		Measurement conditions
Rolling stock	Standstill condition	<ul style="list-style-type: none"> - The traction circuits shall be under voltage but not operating. - The auxiliary circuits shall operate and all the relevant appliances shall be active(eg. air conditioning/heating, lights, window heater, electric generators).
	Dynamic condition	<ul style="list-style-type: none"> - The traction circuits shall be under voltage and operating. - The auxiliary circuits shall operate and the load shall be active. - The rolling stock starts from the standstill with maximum acceleration to maximum speed, coasting and maximum electrical brake to stop. - The maximum value of the field strength shall be recorded together with the line current.
Fixed installation	Open railway route and platform	<ul style="list-style-type: none"> - The actual line current of the open railway route/platform as the significant source of emission shall be noted during emission tests. - Maximum emission shall be calculated based on the measurement results and monitored line current using an appropriate method.
	Fixed power supply installation	<ul style="list-style-type: none"> - The actual loading of the fixed power supply installation shall be noted during emission tests. - Maximum emission shall be calculated based on the measurement results and monitored line current using an appropriate method.

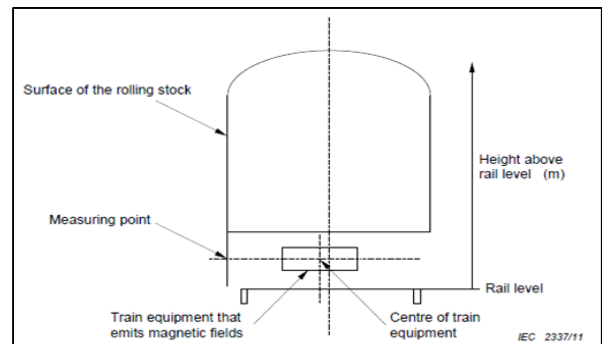


그림 3. 철도시설의 표면 측정 위치

Fig. 3. Surface measurement point of the railroad.

표 6. 철도의 전자기장 측정 위치 및 측정 방법

Table 6. EMF of the railroad measurement positions and measurement methods.

Measurement point		Measurement method	
Inside rolling stock	Accessible areas for workers	Surface	<ul style="list-style-type: none"> - Measure at a minimum distance - Measure on the floor surface above emission source at 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m.
		Volume	<ul style="list-style-type: none"> - Measure at typical places where workers can be located. - Measurement heights above the floor shall be 1.0 m, 1.5 m. The horizontal measuring distance to the walls is 0.3 m.
	Public areas	Surface	- Same accessible areas for workers' method.
		Volume	<ul style="list-style-type: none"> - Measure at places where public can be located. - Measurement heights above the floor shall be 0.3 m, 1.0 m, 1.5 m. The horizontal measuring distance to the walls is 0.3 m.
Outside rolling stock	Accessible areas for public and workers	Surface	- Measure at minimum distance and at an agreed number of measuring points.
		Volume	<ul style="list-style-type: none"> - Measure at place where public and workers can be located. - Measure at distances of 0.3 m to the train surface taking into account the sources of emission of the rolling stock at 0.5 m, 1.5 m, 2.5 m height from the top of the running rails.

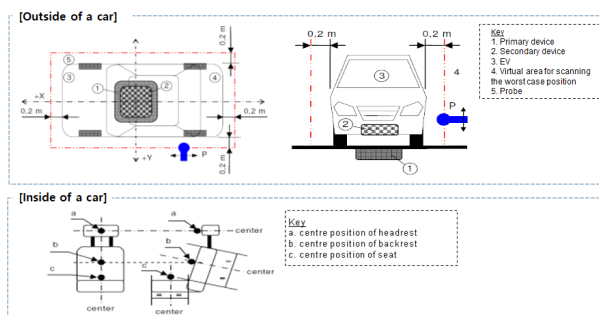


그림 4. 무선 충전 전기자동차의 전자기장 측정 위치

Fig. 4. Electromagnetic fields measurement positions of electric vehicle of wireless charging.

의하고 있고, 차량 내부에 대한 측정 방법은 운전자나 승객이 의자에 앉았을 때 다리, 가슴, 머리 위치에서 측정하도록 하였고, 차량 외부의 경우 차량 표면에서 0.2 m 떨어져서 측정하도록 하고 있다.

표 7은 위에서 검토한 각 기준의 장단점을 나타낸 것이다.

V. 무선급전 시스템의 수치해석

일반적으로 전자기장의 인체 안전성 평가는 사람이 접

표 7. 국내외 기준에서 정한 전자기장 측정 방법의 장단점 비교

Table 7. Comparison of merits and demerits of EMF measurement method in domestic and international guidelines.

Standards	Merit	Demerit
Measurement standards for electromagnetic field strength (National notification)		- Measurement method is not detailed.
IEC 62110	<ul style="list-style-type: none"> - Described averaged 3 points measurement method based on the body (0.5, 1.0, 1.5 m above the ground). - 3 points averaged value is assessment of averaged exposure for the body. - Measure at 0.2 m away from surface of the DUT. 	- A measurement point is 1 m of height away from the ground. It is applied for AC power systems.
IEC 62597	<ul style="list-style-type: none"> - Described measurement method for electric railroad. - Measure at 0.3 m away from surface of rolling stock in volume measurement. 	<ul style="list-style-type: none"> - Applied frequency up to 20 kHz. - The value by 3 points measurement method considered height of power cable of the train (0.5, 1.5, 2.5 m)
IEC61980-1 & IEC TC 106 WG9 TR	- Measuring inside the electric vehicle where the body is located	- It is the standards for wireless power transfer of electric vehicle.

근 가능한 곳에서 전자기장을 측정하여 인체보호기준치와 비교하여 평가한다. 그러나 IEC 62110처럼 비균일 전자기장이 발생하는 전력설비의 경우 3점 측정에 의한 산술 평균값을 통해 안전성 평가방법을 하고 있다. 이 방법을 도시철도형 무선 급전 시스템에 적용했을 경우, 그 타당성을 확인하기 위해 수치해석을 이용하여 차량 외부, 플랫폼, 차량 내부의 무선 전력전달(WPT) 시스템에서 발생하는 자기장을 분석하였다.

5-1 무선 전력전달(WPT) 시스템 모델링

무선 전력전달 시스템에서 발생하는 전자기장을 수치 해석하기 위하여 그림 5와 같이 급전전부를 모델링하였다. 그림 5에서 플랫폼은 해석지점을 나타내기 위하여 표시한 것으로 모델링에서 제외한다. 그림 5에서 A와 B는 차량 표면(한국형도시철도 차량의 폭: 2.4 m)에서 0.2 m 이격된 곳으로 A는 급전선로 위에 집전선로가 함께 위치한 지점에서 이격된 해석지점이고, B는 급전선로만 있는 지점에서 이격된 해석지점이다. 해석지점 C와 D는 플랫폼 엣지에서 0.2 m 떨어진 지점이다. 플랫폼의 높이는 선로보다 1.1 m 높은 곳에 위치한다. E와 F는 열차의 출입문을 고려한 열차 내부의 해석지점으로 차량 바닥으로부터 0.5 m 떨어진 높이이고, 출입문 안쪽으로 0.2 m 떨어진 지점이다. 이 때, 차량의 바닥은 플랫폼의 높이(1.1 m)와 동일하다. 해석지점 G와 H는 차량의 중심지점으로 측정 지점 E, F와 같이 선로에서 1.6 m 높이인 지점이다. 해석에 사용한 입력 파라미터는 표 8에 나타내었다. 집전 출력 전력이 1 MW일 때 입력전류는 500 [A]이다.

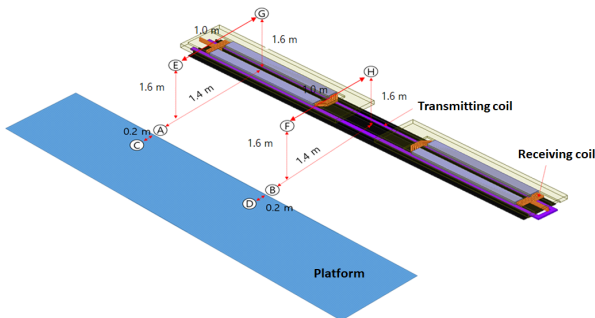


그림 5. 수치해석을 위한 무선 전력전달 시스템 모델링
Fig. 5. Modelling of the WPT system for numerical analysis.

표 8. 수치해석을 위한 입력 파라미터

Table 8. Input parameters for numerical analysis.

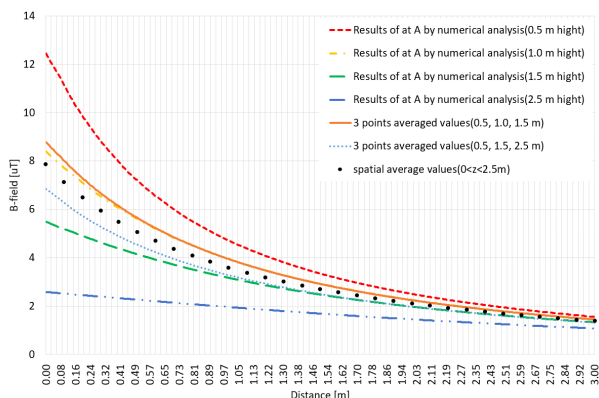
Parameters	Specifications
Operation frequency	60 kHz
Input current at transmitting coil	500 [A]
Output current at receiving coil	420 [A]

5-2 열차 외부에 대한 수치해석 결과

그림 6은 그림 5의 A, B 두 지점으로부터 플랫폼 방향으로 3 m 떨어진 지점까지의 자기장 세기를 수치해석한 것으로 선로가 위치한 지면으로부터 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m, 2.5 m 떨어진 높이의 자기장 세기, 0 m에서 2.5 m까지($0 \leq z \leq 2.5$ m)의 공간 평균된 자기장 세기, 0.5 m와 1.0 m 그리고 1.5 m 3점의 평균 자기장 세기, 0.5 m와 1.5 m 그리고 2.5 m 3점의 평균 자기장 세기를 그래프로 나타내었다.

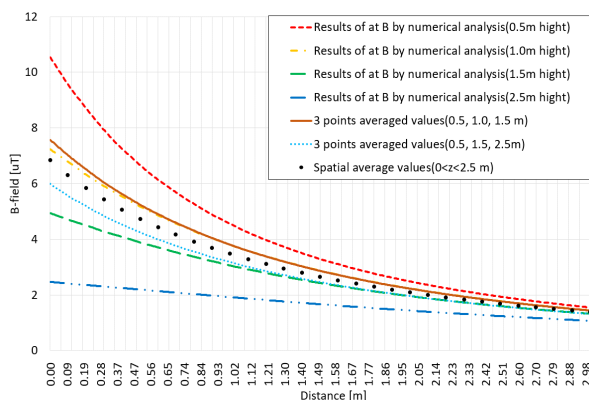
그림 6을 통해 공간 평균된 자기장 세기가 선로가 위치한 지면으로부터 0.5 m, 1.5 m, 2.5 m 높이의 3점 평균 자기장 세기보다 크지만 지면으로부터 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m 높이의 3점 평균 자기장 세기보다 작아 지면으로부터 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m 높이의 3점 평균 자기장 세기로 인체 안전을 평가하는 것이 더 보수적인 방법임을 알 수 있다. 그리고 차체의 표면으로부터 0.2 m 떨어진 지점의 자기장 세기가 0.3 m 떨어진 지점의 자기장 세기보다 높으므로 차체로부터 0.2 m 떨어진 지점에서 자기장 세기를 평가하는 것이 보다 더 엄격한 인체보호기준 평가가 될 것이다.

열차 외부에 대한 수치해석 결과를 통해 0.5 m 높이에 서의 자기장 세기가 표 1의 일반인 기준치($6.25 \mu\text{T}$)보다 높지만, 표 2의 직업인 기준치($30.7 \mu\text{T}$) 보다는 낮은 것을 알 수 있다. 하지만 열차 외부에 있는 열차 선로에 대한 전자기장의 노출량 평가의 경우, 일반인이 열차 선로에 접근하는 것이 거의 불가능하므로 직업인의 자기장 노출량을 평가하는 것이 바람직하다. 이 조건을 적용하여 그림 6의 수치 해석된 자기장의 세기를 직업인에 대한 자기장의 인체안전 기준치와 비교하면 열차 외부의 자기장에 대한 인체 노출량이 직업인의 기준치를 만족하므로 열차 외부에 대한 자기장 인체 노출량은 직업인에 대하여 안전하다고 할 수 있다.



(a) A 지점의 수치 해석된 자기장 세기

(a) Magnetic field strengths by numerical analysis at point A.



(b) B 지점의 수치 해석된 자기장 세기

(b) Magnetic field strengths by numerical analysis at point B.

그림 6. 측정 높이와 객차로부터 떨어진 이격 거리에 따른 무선 전력전달 시스템의 수치 해석된 자기장 세기

Fig. 6. Magnetic field strengths of the WPT system by numerical analysis for measurement height and distance away from the railroad car.

5-3 플랫폼에 대한 수치해석 결과

그림 7은 그림 5의 C와 D 지점(플랫폼 엣지에서 0.2 m 떨어진 위치)에서 플랫폼 바닥으로부터 0.5 m 높이를 기점으로 2.0 m 높이까지의 자기장 세기를 수치 해석한 것을 그래프로 나타낸 것이다. 그림 7에서 확인할 수 있듯이 C, D 지점의 자기장 세기는 표 1의 일반인 기준치($6.25 \mu\text{T}$)보다 낮은 것을 확인할 수 있다. 차량과 플랫폼의 모델링을 제외하고 수치해석을 하였기 때문에 실제로 플랫폼과 전력전달 지점 위에 차량이 존재한다면 알루미늄으

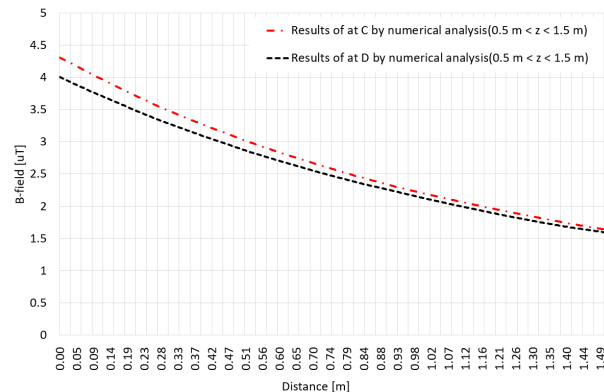


그림 7. 플랫폼에 위치한 C, D 지점에서의 수치 해석된 자기장 세기

Fig. 7. Magnetic field strengths by numerical analysis at analysis point C and D in the platform.

로 이루어진 객차로 인해 플랫폼에서 측정되는 자기장 세기는 더 낮을 것으로 예상된다.

5-4 객차 내부에 대한 수치해석 결과

그림 8은 객차 내부에 대한 수치해석 결과이다. 그림 9에서 확인할 수 있듯이 차량 내부에서의 자기장 세기는 표 1의 일반인 기준치보다 낮다. 객차 내부에 대한 수치해석에서 객차와 플랫폼을 제외하고 진행하였기 때문에 실제 차량이 있는 경우에는 자기장 세기가 더욱 낮아질 것으로 예상된다.

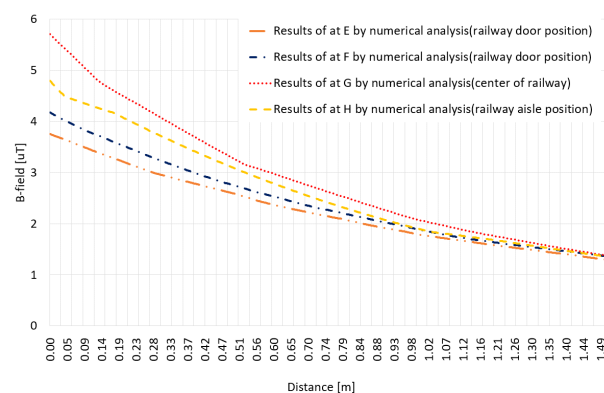
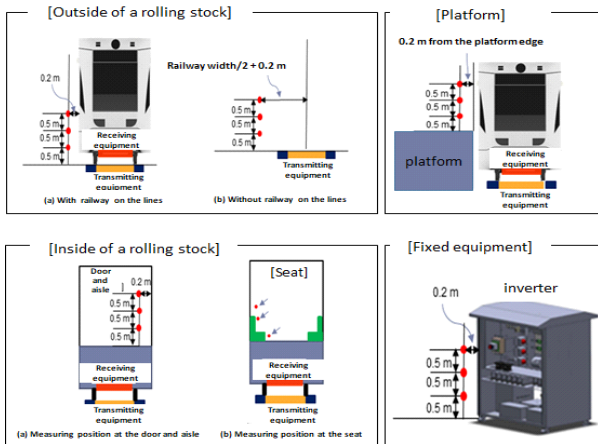
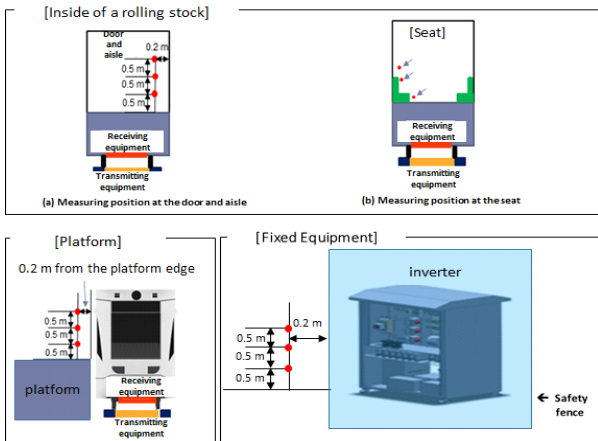


그림 8. 객차 내부의 수치 해석된 자기장 세기

Fig. 8. Magnetic field strengths by numerical analysis at the inner railroad car.



(a) 직업인 노출에 대한 전자기장 측정 위치
(a) EMF measurement positions for occupational exposure



(b) 일반인 노출에 대한 전자기장 측정 위치
(b) EMF measurement positions for general public exposure

그림 9. 무선 급전 시스템의 전자기장 측정위치
Fig. 9. EMF measurement positions of the WPT system.

VI. 도시철도형 무선 급전 시스템의 전자기장 측정 방법 및 평가 방법

4-1과 4-2에서 소개한 국·내외 전자기장강도 측정 방법을 분석한 결과, 도시철도용 무선 급전 시스템의 전자기장 측정 방법은 IEC 62110에 명시된 3점 측정 방법으로 측정하는 것이 IEC 62597의 3점 측정이 보다 엄격한 측정 방법이라 판단된다. 그리고 일반적으로 자기장 측정은 지상 1 m 높이에서 측정한다. 그리고 이 값은 인체에 노출되는 평균값으로 인식된다. 따라서 사람의 키를 생각

하여 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m 높이에서 측정된 3점 측정 평균 값을 노출량 평가에 사용하는 것이 합리적으로 판단된다. 도시철도형용 무선 급전 시스템의 전자기장의 측정 위치는 그림 9와 같이 일반인과 직업인으로 나누어 정의하였다. 도시철도형 무선 급전 시스템의 일반인에 대한 전자기장 노출평가 방법으로 플랫폼과 열차 내부 그리고 고정설비에서의 측정 위치를 도출하였으며, 일반인이 접근하기 불가능한 선로에 대한 측정 방법은 직업인에게만 적용하는 것을 제안하였다.

VII. 무선 급전 시스템에 대한 자기장 측정

6절에서 제안한 무선 급전 시스템의 전자기장 측정 방법을 검증하기 위하여 경산시험소에서 무선 급전 시스템에 대한 측정을 수행하였다. 그림 10은 경산 시험소에 설치된 무선 전력전송 시스템이다.

무선 급전 시스템의 자기장 세기는 그림 11의 A~M 지점에서 선로가 위치한 지면 또는 플랫폼 바닥으로부터 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m 높이에서 측정되었다. 객차 외부 측정 지점(A~C)은 그림 12에 보이는 바와 같이 한국형 도시철도형 경전철 객차의 본체 외부로부터 0.2 m 떨어진 지점이고, 측정지점(D~F)는 객차의 최외각로부터 0.2 m 떨어진 지점에서 측정하였다. 차량 내부의 측정은 실제 차량이 설치되지 않아 그림 11의 J, K 지점을 출입문과 객차 연결통로의 위치로 가정하고, 플랫폼의 높이(선로가 위치한 지면으로부터 1.1 m의 높이)를 객차의 바닥면으로 설정하여 객차 바닥으로부터 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m 높이에서 측정하였다.

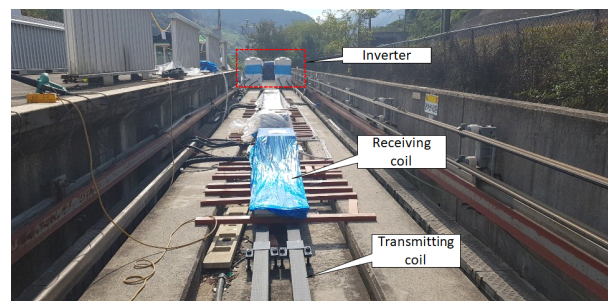


그림 10. 무선 전력전송 시스템의 시험선로 모습
Fig. 10. The picture of test railroad in the WPT system.

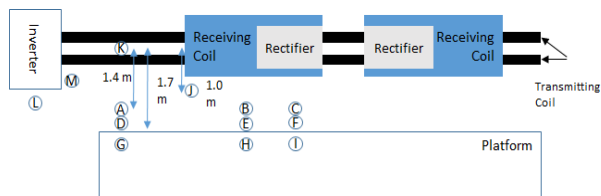


그림 11. 무선 급전 시스템의 전자기장 측정 지점
Fig. 11. EMF measurement positions of the WPT system.

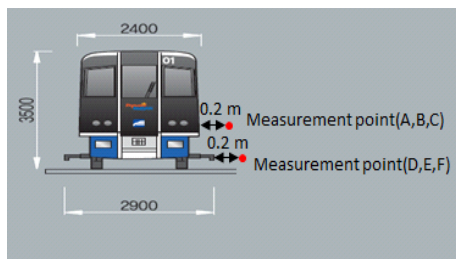


그림 12. 객차 외부 측정 지점
Fig. 12. EMF measurement points of the outside of a rolling stock.

무선 급전 시스템의 자기장 측정시 급전 코일에 흐르는 전류는 500 [A]이고, 출력 부하는 1 MW이다. 자기장 측정은 Narda Inc.의 EHP-50F를 이용하여 측정하였다. 그림 13은 자기장 세기를 측정하는 모습이다.

표 9는 각 측정 위치에서의 측정된 자기장 세기와 수치 해석을 통해 도출된 자기장 세기 및 각 측정 지점에서의 3점 평균된 자기장 세기를 나타내었다. 표 9에서 일반인의 접근이 힘든 지역인 열차 외부의 측정 지점(A~F)에서 측정된 자기장 세기는 일반인 기준치($6.25 \mu\text{T}$)를 초과하지만, 직업인 기준($30.7 \mu\text{T}$)은 초과하지 않는 것을 확인하였다. 하지만 플랫폼과 열차내부 출입문, 열차 연결통로,



그림 13. 자기장 세기 측정 사진
Fig. 13. The pictures of magnetic field strength measurement.

표 9. 무선 급전 시스템의 자기장 세기 측정 및 해석결과
Table 9. Magnetic fields of the WPT system by measurement and by numerical analysis.

Measurement point		Magnetic field strength [μT]			
		Measurement height			3 points averaged value
		0.5 m	1.0 m	1.5 m	
A	Measured value	7.186	5.212	3.019	5.139
	Analysis value	10.540	7.238	4.937	7.57
B	Measured value	12.593	9.361	4.736	8.897
	Analysis value	15.969	8.390	5.488	9.95
C	Measured value	11.915	9.599	5.058	8.857
D	Measured value	5.670	4.206	2.371	4.083
	Analysis value	7.915	5.904	4.271	6.03
E	Measured value	11.681	9.095	3.144	7.973
	Analysis value	8.816	6.529	4.628	6.66
F	Measured value	10.302	9.301	3.738	7.780
G	Measured value	1.911	1.492	1.142	1.515
	Analysis value	4.006	2.891	2.130	3.01
H	Measured value	3.216	2.433	1.036	2.228
	Analysis value	4.307	3.044	2.204	3.19
I	Measured value	2.724	1.997	1.537	2.086
J	Measured value	5.871	3.171	2.006	3.683
	Analysis value	4.172	2.738	1.883	2.93
K	Measured value	4.555	2.206	1.402	2.721
L	Analysis value	4.791	3.075	1.895	3.25
	Measured value	2.695	2.729	3.087	2.840
M	Measured value	3.551	2.272	1.679	8.967

인버터 주변에서의 자기장 세기는 일반인 기준치보다 낮게 측정되었다. 실제로 차량이 있는 상태에서 플랫폼과 객차 내부에서 자기장 세기를 측정하면 더 낮은 수치를 보일 것으로 예상된다.

VIII. 결 과

도시철도용 무선 급전 시스템의 인체 안전성 평가를 위하여 국·내외 인체보호기준, 전자기장 측정 방법 및 안전성 평가 방법에 대한 기준을 분석하여 도시철도용 무선 급전 시스템에 대한 전자기장 측정 방법(안) 및

안전성 평가 방법을 제안하였다. 무선 급집전 시스템 시험선에서 제안된 측정방법으로 자기장을 실측하고 전자기장 인체 안전성을 평가한 결과, 차량 외부측정에서는 일반인 기준치를 초과하였으나 직업인 기준은 만족하였다. 본 논문에서 제안한 전자기장 측정 및 인체 안전성 평가 방법을 도시철도용 무선 급집전 시스템에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] 박찬배, 이병송, 이수길, "철도차량용 대용량 무선전력전송 기술 개발 동향 분석," 전기의 세계, 63(9), pp. 35-42, 2014년.
- [2] 전자파인체보호기준, 과학기술정보통신부고시 제2017-7호, 2017년.
- [3] A. Ahlbom, U. Bergqvist, J. H. Bernhardt, J. P. Cesarini, L. A. Court, and M. Grandolfo, et al., "Guideline for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields(up to 300 GHz)," *Health Physics*, vol. 74, no. 4, pp. 494-521, 1998.
- [4] J. Lin, R. Saunders, K. Schulmeister, P. Soderberg, A. Swerdlow, and M. Taki, et al., "ICNIRP Guideline for limiting exposure to time-varying electric, magnetic fields (1 Hz~100 kHz)," *Health Physics*, vol. 99, pp. 818-836, 2010.
- [5] *IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz*, IEEE C95.1, 2005.
- [6] 전자파강도측정기준, 국립전파연구원 고시 2014-2호, 2014년 7월.
- [7] *Measurement Procedures for Electric and Magnetic Field Levels Generated by AC Power System with Regard to Human Exposure*, IEC 62110, 2008.
- [8] *Electric Vehicle Wireless Power Transfer(WPT) System - Part 1: General Requirements*, IEC 61980-1, 2015.
- [9] *The Technical Report of Exposure Assessment Methods for Wireless Power Transfer Systems*, IEC TC106 WG9 TDR, 2017.
- [10] *Measurement Procedures of Magnetic Field Levels Generated by Electronic and Electrical Apparatus in the Railway Environment with Respect to Human Exposure*, IEC TR 62597, 2011.
- [11] 최동근, 류충상, 백정기, "전자파 인체노출량 평가 표준화 동향," 한국전자과학회 전자파기술, 22(5), pp. 3-10, 2011년 10월.

김 윤 명 [(주)EMF Safety 대표이사]



1975년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1978년 2월: 한국과학원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 1990년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
 1980년 3월~2018년 2월: 단국대학교 전

자전기공학부 교수

2018년 3월~현재: (주)EMF Safety 대표이사

[주 관심분야] 고주파 공학, 전자파 인체영향 측정

김 준 희 [(주)EMF Safety 연구원]



2014년 2월: 단국대학교 전자전기공학부 (공학사)
 2015년 8월: 단국대학교 전자전기공학과 (공학석사)
 2017년 6월~현재: EMF Safety 연구원
 [주 관심분야] RF, RF Power Amplifier, EMC 등

주 영 준 [(주)EMF Safety 책임연구원]



2002년 2월: 단국대학교 전자공학과 (공학사)

2004년 2월: 단국대학교 전자컴퓨터공학과 (공학석사)

2012년 8월: 단국대학교 전자컴퓨터공학과 (공학박사)

2017년 6월~현재: EMF Safety 책임연구원

[주 관심분야] 전자파 인체영향, 무선전력전송, EMC 등