

On-Line Electric Vehicle의 EMF 저감을 위한 FCCL 차폐효과 분석

An Analysis of FCCL Shielding Effect for EMF Attenuation to On-Line Electric Vehicle

심형욱* · 김종우* · 조동호*
(Hyung-Wook Shim · Jong-Woo Kim · Dong-Ho Cho)

Abstract - According to ICNIRP guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields up to 300GHz, magnetic flux density which range from 3Hz to 150kHz are regulated to lower than 6.25 μ T. In order to comply with its standard, OLEV(On-Line Electric Vehicle) have been designed considering EMF(Electro-Magnetic Field) reduction. However, if a current flowing in power line would be bigger for increasing power transfer efficiency, the established shield system no longer acts their role properly. In this paper, therefore, FCCL(Flexible Copper Clad Laminate) is applied to power line and pick-up devices to solve the problems. Though, the FCCL is normally utilized to insulator on circuit board, because of its high heat resistance characteristic, flexibility and thin properties, it makes effectiveness in the shielding device as well. 4 types of FCCL shielding structure are introduced to power line and pick-up devices. From the results, the FCCL which are placed in proposed positions shows maximum EMF reduction compared to the established shielding structure. Henceforth, if OLEV is applied FCCL shielding structure in practice, it will not only be more safe but also step forward to commercialization near future.

Key Words : FCCL, EMF, OLEV

1. 서론

카이스트에서 2009년도부터 운행 중인 OLEV(On-Line Electric Vehicle)는 전기를 무선으로 공급받아 운행하는 비접촉 충전 방식의 전기 자동차이다. 급전선로부터 발생하는 유도 자기장을 픽업 장치에서 받아 기전력을 발생, 배터리를 충전하는 방식으로 구성된다. OLEV는 무선충전에 따른 주행거리, 배터리 용량 개선 등 기존 전기자동차의 단점을 해결하였지만 급전 및 집전시스템 전력전달 특성에 따라 EMF(Electro-Magnetic Field)에 대한 안전성 문제가 존재한다. 따라서 OLEV의 전자파 인체유해성 평가는 일반 플러그 충전방식의 전기자동차와 달리 차량 전기안전성 평가에 있어 가장 핵심적인 부분이며 시스템 설계 시, 가장 우선적으로 고려되는 항목이다. EMF 억제를 위해 OLEV에 적용되는 기존 차폐구조는 픽업하부의 프로텍터, 급전선로의 구리 망 등이 사용되어왔다. 그러나 기존의 차폐장치는 급·집전 시스템 구조의 변형을 필요로 하고, 유도가열에 따른 부식, 파손이 발생되어 급격한 성능저하에 따른 유지관리에 많은 어려움이 있었다. 그러므로 OLEV의 안전성 제고, 효과적인 EMF 억제를 위한 대책 마련이 시급하며 OLEV 상용화를 위한 최적 모델 설계, 차폐 구조와 관련된 지속적인

연구개발이 필요하다.

2. 본론

2.1 FCCL의 개요

FCCL의 구조는 그림 1과 같다. 일반적으로 Adhesiveless, Adhesive의 2가지 종류가 있으며 폴리마이드 필름에 구리호일을 접착시켜 2층 또는 3층 구조를 갖는다. FCCL의 특성은 표 1과 같이 열내성이 높고 치수 안정성이 높으며 제조 방식에 따라 투명성, 연성이 다르다[1].

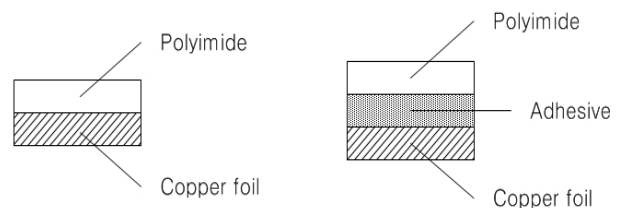


그림 1 FCCL 구조
Fig. 1 FCCL Structure

OLEV 버스의 경우 일반적인 전기 승용차의 5배 정도의 배터리 용량이 필요하고 이에 더해 2C-ratio 이상으로 급속 충전되기 때문에 충전 시 고온의 열이 발생된다. 또한 차량 이동시 충격에 의해 페라이트 코어에 균열이 생길 수 있으므로 상시 픽업 표면의 관찰이 가능해야 한다. 따라서 본 논문에서는 열 내성이 강하고 투명성이 있는 Adhesiveless 2 Layer FCCL를 적용한다[2].

* Korea Advanced Institute of Science and Technology, Korea

† Corresponding Author : Dept. of System Engineering, Wireless Power Transfer Technology Research Center, Korea

E-mail : shw85@kaist.ac.kr

Received : November 15, 2013; Accepted : May 20, 2014

표 1 FCCL 특성

Table 1 Properties of FCCL

항목	2 Layer		3 Layer
Mfg. Processing	Casting	Metalizing	Laminating
Heat resistance	High	High	Low
Dimensional stability	Good	Good	Poor
Transparency	Medium	Good	Poor
Bending fatigue	Good	Poor	Depend on types
Harmony with coverlay	Not settled yet		Good
Handling	Difficult		Easy
Cost	Expensive		Cheap

2.2 FCCL을 이용한 차폐장치

FCCL을 이용한 차폐장치는 OLEV 차량의 급전선로와 집전장치의 픽업에 부착된다. FCCL의 경우 두께가 10 μ m이하로 유연한 특성을 갖고 있기 때문에 기존의 급·집전 구조의 변형없이 오직 FCCL의 성형만을 통해 부착이 가능하다. 기존 차폐장치로 사용되는 알루미늄 판의 경우, 1cm 이상의 두께와 이에 따른 무게로 도로 매설 및 차량 부착 시, 어려움이 있었지만 FCCL을 적용하여 이를 해결할 수 있다.

2.2.1 OLEV 구조

OLEV는 그림 2와 같이 급전인버터, 급전선로로 구성되어 있는 급전시스템과 픽업, 정류기, 레귤레이터로 이루어진 집전장치로 구성되어 있다. 급전시스템의 급전선로는 지중선로의 직매식으로 도로 하부 약 10~20cm에 매설되어 있으며 정격 1000A이상의 케이블을 사용한다.

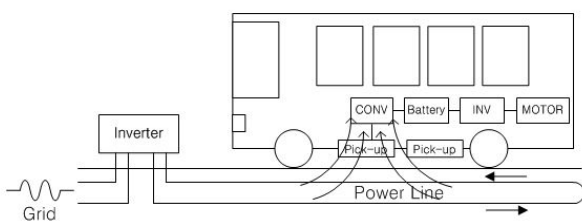


그림 2 OLEV 구성도
Fig. 2 OLEV Configuration

급전 인버터는 전력계통에서 공급되는 3상 380V, 60Hz의 전력을 200A, 10~20kHz의 공진주파수 성분으로 변환하고 전류 크기를 제어하여 충전 속도를 결정한다. 충전 속도는 배터리 용량을 기준으로 1시간 내에 급속충전이 가능하도록 C-ratio를 설정 한다. 집전시스템의 픽업은 차량 하부에 부착되어 있으며 최대의 기전력을 발생 시킬 수 있도록 특수한 구조로 되어 있다. 또한 차량의 경우 충전 시 차량과 급전선로사이의 위치에 따른 충전속도 변화가 크기 때문에 이를 고려한 다중구조의 픽업을 사용한다. 픽업에서 유도된

기전력은 정류기에서 직류성분으로 변환되고, 레귤레이터를 이용하여 각 픽업에서 발생된 유도 기전력의 크기를 전기적 사양에 맞게 변환, 배터리로 공급한다.

OLEV의 충전속도는 차량 및 급전선로의 위치에 매우 민감하다. 따라서 그림 3과 같은 SMFIR, 자기장 형상화 기술을 사용한다. SMFIR 기술을 이용하여 차량의 위치에 관계없이 급·집전 구조에 맞는 최적화된 자기장 형성이 가능하며 부가적으로 외부로 회절되는 자기장 또한 감소되어 승객에게 노출되는 전자파 영향이 적다[3-5].

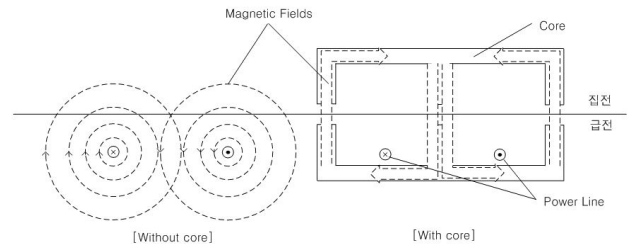


그림 3 자기장 형상화 기술
Fig. 3 SMFIR

2.2.2 OLEV 구조

급전선로 차폐는 그림 4와 같이 E형 급전 코어 좌우 가장자리에 FCCL을 부착하는 Type 1, 그림 5와 같이 급전선로 위를 덮는 Type 2, 2가지 방식을 적용한다. Type 1의 경우 FCCL로 인하여 E형 급전코어에서 외부로 향하는 자기력선을 흡수, 지상에서의 EMF를 억제한다. 이 방식은 E형 코어 외부로 발산되는 EMF는 감소되지만 코어 중심부에서 발생하는 EMF에는 영향을 미치지 못한다. Type 2의 경우 급전 코어 상단부에 FCCL을 덮어 전체적인 EMF의 감소가 가능하지만 유도 전류에 따른 열화현상으로 전력전송 효율이 감소되는 단점이 있다.

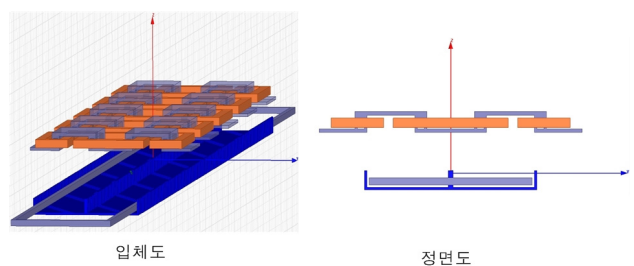


그림 4 급·집전 구조
Fig. 4 Feeder and collector structure

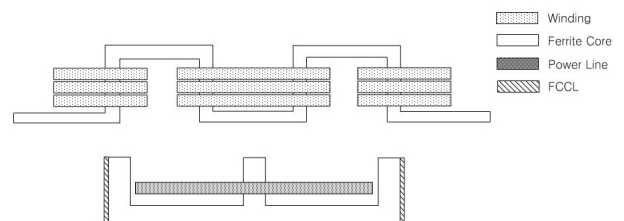


그림 5 급전코어 외곽에 부착된 FCCL(Type 1)
Fig. 5 FCCL attached outside of the feeder's core(Type 1)

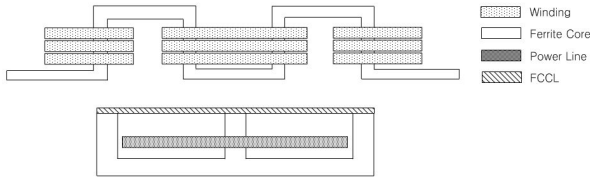


그림 6 급전코어 상부에 덮힌 FCCL(Type 2)
Fig. 6 FCCL covering on the feeder's core(Type 2)

집전 시스템의 경우 그림 7과 같이 픽업 코어에 부착하는 Type 3 방식과 그림 8의 픽업 장치에 씌우는 Type 4, 2가지 방식을 적용한다. Type 3은 코어에만 부착하기 때문에 설치가 간편하며 전력전송 효율의 감소가 없다. 그러나 픽업 권선에서 차량 좌측과 우측으로 나오는 EMF만을 감소시키고 밑으로 회절되어 나오는 EMF의 감소효과는 적다는 단점이 있다. Type 4는 권선에서 나오는 EMF의 전체적인 감소효과는 크지만 픽업이 차량에 설치되기 전 FCCL 부착 작업을 하여야 하고 FCCL이 감싸고 있기 때문에 급전선로에서 발생하는 자기장이 픽업에 유도되지 못하고 일부 열에너지로 손실되는 단점이 있다. 그러므로 차폐 장치는 EMF 억제에 효과적이고 손실 에너지를 최소화하기 위해 급전 및 집전 시스템의 특성에 따라 적절한 차폐방식을 선정하여야 한다.

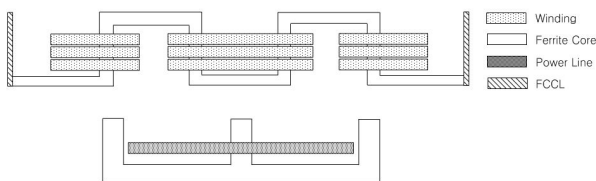


그림 7 픽업 양쪽에 부착된 FCCL(Type 3)
Fig. 7 FCCL attached to both sides of pick up(Type 3)

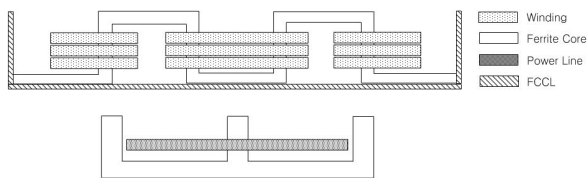


그림 8 픽업 전체를 덮은 FCCL(Type 4)
Fig. 8 FCCL covering entire pick-up(Type 4)

2.3 시뮬레이션

2.3.1 시뮬레이션 조건

OLEV에 적용되는 FCCL 차폐구조의 적합성 및 효과를 분석하기 위해 2013년도부터 구미시에서 시범사업으로 적용된 OLEV 버스의 실제적인 급·집전 구조를 MAXWELL 툴을 이용하여 모델링하였다. 충전 시, 급전선로에는 400A, 20kHz의 전류가 흐르며 SMFIR을 위한 E형 코어가 적용되었다. 선로의 총 길이는 8m이며 이중 5m 길이의 선로에만 페라이트 코어가 설치되었다. 급전 인버터의 용량은 총 100kW이다. 집전장치의 픽업은 버스 당 5대가 설치되어 있으며 각 20kW의 용량으로 총 100kW의 용량을 갖는다. 각

픽업의 turn수는 좌, 우측 편차를 고려하여 32회로 동일하며 급전 코어와 같이 E형 구조의 코어가 설치되어있다. 차폐 방식은 차폐 구조물의 위치에 따라 표 2와 같이 구분하였다.

표 2 차폐 방식의 분류

Table 2 Distribution of shield methods

방식	적용위치	비고
Type 1	급전/코어말단	E형 코어의 좌우측 돌출부
Type 2	급전/상부	도로 10cm 깊이
Type 3	집전/프로텍터	E형 코어의 좌우측 돌출부
Type 4	집전/픽업	픽업 전체

시뮬레이션을 위한 조건은 표 3과 같으며 차폐 방식에 따라서 급전전류와 집전전류를 달리하였다. 차폐를 위해 적용된 FCCL 구조물은 은 2 layer이며 10 μ m이하의 두께를 갖는다.

표 3 차폐 방식의 분류

Table 3 Distribution of shield methods

Type	항목	조건	항목	조건
1	급전 전류	400A	집전 전류	30A
		300A		20A
	급전 전류	400A		30A
		300A		20A
2	급전 전류	400A	집전 전류	30A
		300A		20A
	급전 전류	400A		30A
		300A		20A
3	급전 전류	400A	집전 전류	30A
		300A		20A
	급전 전류	400A		30A
		300A		20A
4	급전 전류	400A	집전 전류	30A
		300A		20A
	급전 전류	400A		30A
		300A		20A

전자파 인체보호기준은 표 4의 ICNIRP 규격을 적용한 전파법 제 47조의 2, 제1항을 기준으로 한다.

측정 위치는 그림 9와 같이 IEC 62110에 따라 차체에서

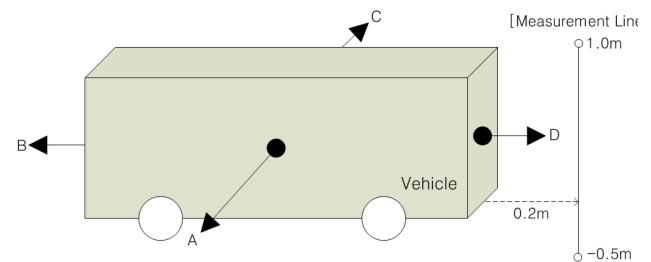


그림 9 EMF 측정 위치
Fig. 9 EMF measurement positions

20cm, 높이 0.5, 1.0, 1.5m 세 지점으로 한다. 본 논문에서는 급전선로의 위치와 차량 구조의 특성을 고려하여 EMF 발생이 상대적으로 큰 차량 측면의 A 면을 측정 위치로 선정하였다[6-7].

2.3.2 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 MAXWELL의 Transient type과 Eddy current type을 사용하였고 각 물체마다 10mm 이하의 Mesh를 주었다. Time Step은 1μs로 총 40μs동안의 결과를 보았다. 모델링한 급·집전 구조에 발생하는 자기장 벡터는 그림 10과 같이 형성되어 급전에서 집전으로 전력전송이 이루어진다.

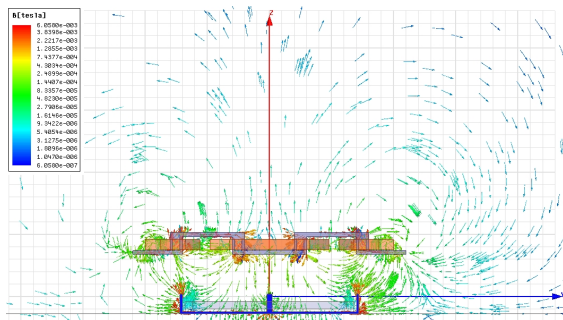


그림 10 자기장 벡터
Fig. 10 Magnetic field vectors

차폐 장치가 없는 경우의 급·집전 시스템의 EMF는 표 5와 같다. 급전전류가 300A(2C-ratio)일 경우 ICNIRP 규격인 6.25μT를 만족하지만 400A일 경우 약 7.5μT이상의 EMF가 관측이 되어 규격을 만족하지 못한다.

Type별 EMF 측정값은 표 6과 같다. Type 3을 제외한 모든 Type에서 ICNIRP의 규격을 만족하였고 평균 2μT의 감소를 보였다. EMF 감소가 가장 많은 Type은 Type 4로 평균 4.1μT의 EMF를 보였다.

그림 11-14는 Type 4의 Case 1~4의 결과 그래프이다.

표 4 ICNIRP의 시변 전자기장 노출 규격(Public)
Table 4 ICNIRP Standard of time-variance EMF(Public)

Frequency range	E-field strength(Vm ⁻¹)	H-field strength(Am ⁻¹)	B-field(μT)
up to 1Hz	-	3.2X10 ⁴	4X10 ⁴
1-8Hz	10000	3.2X10 ⁴ /f ²	4X10 ⁴ /f ²
8-25Hz	10000	4000/f	5000/f
0.025-0.8kHz	250/f	4/f	5/f
0.8-3kHz	250/f	5	6.25
3-150kHz	87	5	6.25
0.15-1MHz	87	0.73/f	0.92/f
1-10MHz	87/f ^{1/2}	0.73/f	0.92/f
10-400MHz	28	0.073	0.092
400-2,000MHz	1.375f ^{1/2}	0.0037f ^{1/2}	0.0046f ^{1/2}
2-300GHz	61	0.16	0.20

표 5 차폐장치가 없는 경우의 EMF
Table 5 EMF value in case of non-shield structure

항목 (급전/집전)	50cm (μT)	100cm (μT)	150cm (μT)	평균 (μT)
400A/30A	12.3	7.3	3.0	7.5
400A/20A	12.1	7.2	2.9	7.4
300A/30A	9.4	5.6	2.3	6.0
300A/20A	9.2	5.4	2.2	5.6

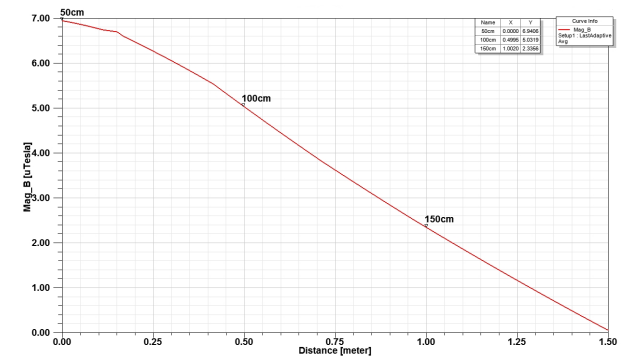


그림 11 Type 4, case 1의 결과
Fig. 11 Result at type 4, case 1

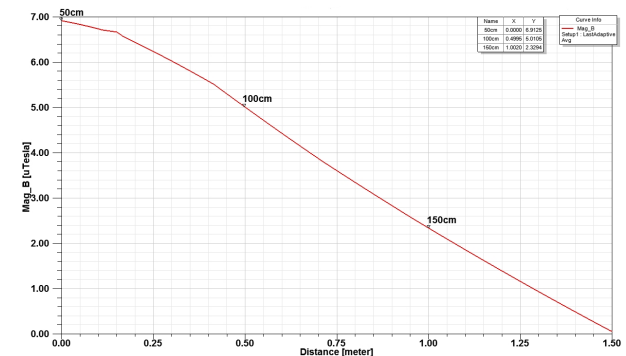


그림 12 Type 4, case 2의 결과
Fig. 12 Result at type 4, case 2

표 6 ICNIRP의 시변 전자기장 노출 규격(Public)
Table 6 ICNIRP Standard of time-variance EMF(Public)

Type	Case	50cm	100cm	150cm	평균	변동 치 (차폐장치가 없는 경우와 비교)	ICNIRP 합격여부
1	1	8.6	5.3	2.1	5.3	↓2.2	O
	2	9.1	5.5	2.2	5.6	↓1.8	O
	3	6.7	4.2	1.7	4.2	↓1.8	O
	4	6.4	3.9	1.6	4.0	↓1.6	O
2	1	8.4	5.3	2.2	5.3	↓2.2	O
	2	8.0	4.9	2.0	5.0	↓2.4	O
	3	6.5	4.2	1.7	4.1	↓1.9	O
	4	6.1	3.8	1.6	3.8	↓1.8	O
3	1	13.1	7.9	3.2	8.1	↑0.6	X
	2	12.9	7.8	3.1	7.9	↑0.5	X
	3	9.9	6.0	2.4	6.1	↑0.1	O
	4	9.8	5.9	2.4	6.0	↑0.4	O
4	1	6.9	5.0	2.3	4.7	↓2.8	O
	2	6.9	5.0	2.3	4.7	↓2.7	O
	3	5.2	3.8	1.8	3.6	↓2.4	O
	4	5.2	3.8	1.7	3.6	↓2.0	O

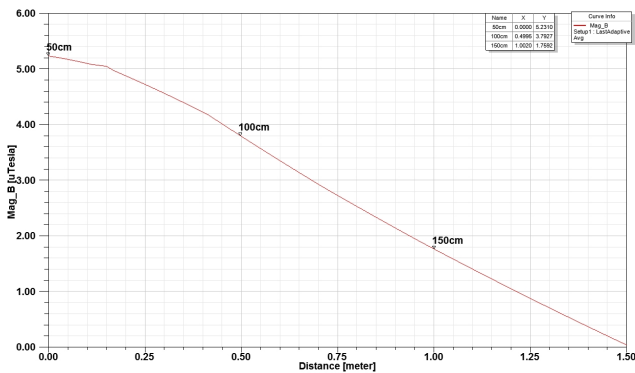


그림 13 Type 4, case 3의 결과
Fig. 13 Result at type 4, case 3

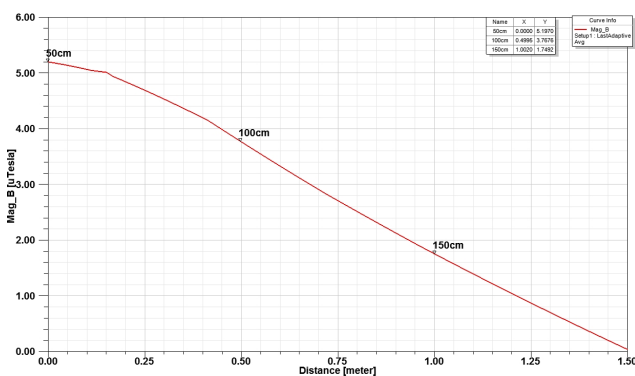


그림 14 Type 4, case 4의 결과
Fig. 14 Result at type 4, case 4

시뮬레이션 결과로부터 Type 4의 EMF 저감 효과가 가장 큰 것을 확인하였다. 그러나 차폐장치에 따른 에너지 손실이 크다면 EMF 감소를 위한 차폐 장치의 도입은 실효성이 없다. 따라서 집전장치의 픽업에 유도되는 전압을 비교

하여 차폐 장치에 따른 손실량을 확인하였다. 그림 15는 차폐장치가 없을 때 픽업에 유도되는 전압이다. 급전선로에 400A를 흘렸을 경우 약 1.145kV가 발생되는 것을 확인할 수 있다. 그림 16은 그림 15와 마찬가지로 Type 4에 차폐 장치를 설치하였을 때 픽업에서 발생하는 유도전압이다. 차폐장치가 없을 때와 비교하여 약 2.5% 정도 감소되었지만 집전장치의 출력이 100kW인 것과 권선의 전류정격이 200A 이상인 점을 고려하면 시스템 설계상 야기되는 문제점은 없다.

전력 전송 효율은 인버터 입력 전력과 픽업의 레귤레이터 출력 전력의 비로 산출된다. 그러나 무선전력전송 특성상 실험에 따른 전송효율의 경향만을 파악할 뿐, 실질적인 효율을 예측하여 계산하기는 어렵다. 운용중인 OLEV를 고려하면 평균 85% 즉, 급전 선로에 120kW의 전력을 공급할 때 픽업 당 21kW의 출력을 얻을 수 있다. 픽업 당 유도전압은 급전선로의 전류에 따라 변하며 일반적인 100kW급 OLEV의 경우 300A, 20kHz를 공급하였을 때 픽업당 약 680V,

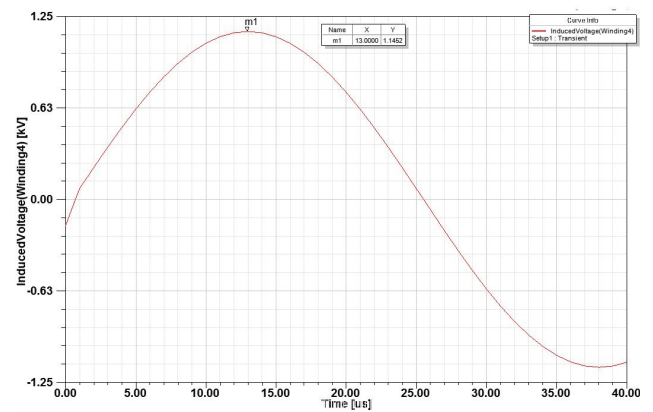


그림 15 차폐장치가 없는 경우 픽업에서의 유도전압
Fig. 15 Induced voltage on pick-up with non-shield structure

17.5A가 발생된다. 예를들어 Type 4 300A를 흘렸을 경우 2.5%의 유도전압이 감소하게 된다면 전력전송 효율은 약 1% 정도 감소된다.

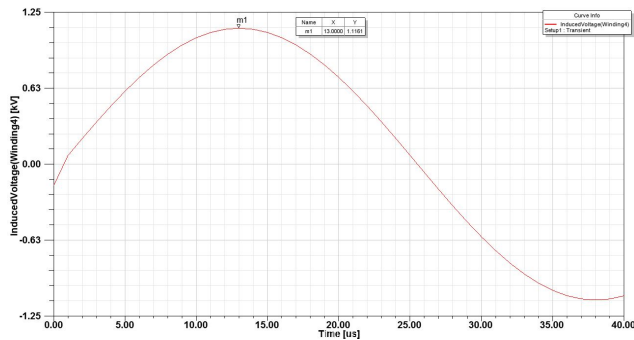


그림 16 차폐장치가 없는 경우 픽업에서의 유도전압
Fig. 16 Induced voltage on pick-up with non-shield structure

3. 결 론

내열성이 높고 투명하며 유연한 특성을 갖는 FCCL을 OLEV 차폐재로 적용하여 EMF 저감 효과를 분석하였다. 현재 운행 중인 구미시 OLEV 차량의 급·집전 시스템을 MAXWELL 톨을 이용하여 모델링하였고 급전 차폐와 집전 차폐, 총 4가지 Type의 차폐 구조를 적용하여 ICNIRP 규격의 만족여부를 도출하였다. 결과로부터 집전 시스템 차폐의 경우, 급전 시스템 차폐보다 EMF 억제가 더욱 효과적 이었다. 또한 Type 4 집전 차폐의 경우 픽업 크기가 기준과 동일한 조건이기 때문에 전체 자속밀도 중 2.5% 만이 외부로 회절, 에너지 손실이 적어 OLEV 차폐 구조로써 가장 적합하다. 또한 구미시에서 운용 중인 알루미늄 차폐가 되어있는 OLEV 차량과 비교하여도 FCCL 차폐재가 30% 이상 개선된 EMF 억제 효과를 보인다. 추후 본 연구 결과를 바탕으로 무선충전식 전기 자동차의 EMF 억제를 위한 FCCL 차폐 구조를 도입한다면 안전성뿐만 아니라 시스템 경량화에 따른 경제성 효과도 얻을 수 있을 것이라 사료된다.

References

[1] Jianwen Yuan, Jimin Chen, Chao He, "Research of micro removing copper foil of FCCL assisted with laser", International Conference on Mechatronics and Automation, pp 749-754, 2011

[2] Jaegue Shin, Seungyong Shin, Yangsu kim, Seungyoung Ahn, Seokhwan Lee, Guho Jung, Seung Jeub Jeon, Dongho Cho, "Design and implementation of shaped magnetic-resonance-based wireless power transfer system for roadway-powered moving electric vehicle", IEEE Transactions on Industrial electronics, Vol 61, pp 1179-1192, 2013

[3] Boyune Song, Jaegue Shin Seokhwan Lee, Seungyong Shin, Yangsu Kim, Sungjeub Jeon, Guho Jung, "Design of a high power transfer pickup for on-line electric vehicle", IEEE international Electric

vehicle conference, pp 1-4, 2012

[4] Yangbae Chun, Seungwook Park, Jiseong Kim, Hongseok Kim, Kiwon Hwang, Joungho Kim, Seungyoung Ahn, "System and electromagnetic compatibility of resonance coupling wireless power transfer in on-line electric vehicle", International Antennas and Propagation, pp 158-161, 2012

[5] Suh Insoo, "Intelligent wireless EV fast charging with SMFIR technology", Journal of integrated design & process science, vol 15, no 3, pp 7-28, 2012

[6] ICNIRP GUIDELINES, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields(up to 300GHz)", pp 494-522, 1998

저 자 소 개



심형욱 (沈亨潤)

1985년 3월 25일 생, 2009년 성균관대학교 전기전자과 졸업, 2011년 동대학원 태양광시스템협동과정 졸업(석사), 2013년-현재 KAIST 무선전력전송기술 연구센터 연구원

E-mail : shw85@kaist.ac.kr



김종우 (金鍾雨)

1965년 1월 14일 생, 1987년 경북대학교 전자과 졸업(학사), 1992년 경북대학교 전자공학과 졸업(석사), 2005년 한남대학교 정보통신공학과 졸업(박사), 1995년~ 2006년 한국항공우주연구원 선임연구원, 2006년~2009년 한밭대학교 연구교수, 2009년-현재 KAIST 무선전력전송기술 연구센터 연구교수

E-mail : galamwhi@kaist.ac.kr



조 동 호

1985년 KAIST 전기공학과 졸업(박사), 1987년-1997년 경희대학교 컴퓨터공학과 교수, 1998년-현재 KAIST 전기공학과 교수

E-mail : dhcho@kaist.ac.kr