스마트 키 인식 거리 예측을 위한 차량 LF 안테나의 Near-Field 분석

Near-Field Analysis of Vehicle LF Antennas for Estimating the Reading Range of a Smart Key

김희영 · 변강일 · 성재용 · 정한길 · 추호성

Heeyoung Kim · Gangil Byun · Jaeyong Seong · Hankil Jung · Hosung Choo

요 약

본 논문에서는 스마트 키의 정확한 인식 거리 예측을 위한 차량 LF 안테나의 근접 자체 분석 방법을 제안하였다. 모델링된 LF 안테나는 폴리에틸렌으로 절연 코팅이 된 전도성 도선이 페라이트 코어를 감고 있는 형상을 가지며, 상용 차량의 범퍼 프레임 내부에 장착되어 동작한다. 스마트 키의 최대 인식 거리는 범퍼에 장착된 LF 안테나의 근접 방사 패턴을 고려하여 총 9개의 방위각에서 측정하였으며, 각 방향에서 측정된 최대 인식 거리에서 스펙트럼 분석기를 이용하여 수신 파워를 측정하였다. 측정 결과, 차량에 장착된 LF 안테나를 기준으로 1.38 m부터 1.53 m 사이의 인식 거리를 가지며, 그때의 수신 파워는 -83.6 dBmW부터 -75.0 dBmW 사이의 레벨을 가진다. 측정과 동일한 조건으로 전자파 해석을 진행하여 예측된 근접 필드와 측정된 인식 거리 및 수신 전력을 분석하였으며, 그 결과 전자파 해석을 통해 스마트 키 인식 거리 예측 및 근접 필드 분석이 가능함을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we propose a method of near-field analysis for vehicle LF antennas in order to estimate the accurate reading range of a smart key. The LF antenna consists of a ferrite core and a conducting wire which is coated with polyethylene for insulation, and it is mounted at the rear bumper frame of a commercial vehicle. The reading range of a smart key is measured at nine azimuthal directions distributed around the rear bumper, and then, the received power at each maximum reading range is measured by using a spectrum analyzer. The measurement shows that the maximum reading range exists between 1.38 m and 1.53 m, and the radiated power is between -83.6 dBmW and -75.0 dBmW. We further conducted EM simulation to estimate the reading range and the received power under the same condition that we applied for the measurement. The results demonstrate that an accurate reading range and received power can be achieved by simulation.

Key words : Vehicle Antenna, LF Antenna Modeling, Near-Field

I. 서 론

최근 차량 무선통신기술의 발전과 더불어 차량 내, 외부에서 도어의 개폐, 엔진 제어, 내부 시스템

「본 연구는 (주)현대, 기아 자동차와 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 육성지원 사업의 연구 결과로 수행되었음(NIPA-2012-H0301-12-2007).」

홍익대학교 전자전기공학부(School of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University)

· Manuscript received February 22, 2013 ; Revised June 10, 2013 ; Accepted July 17, 2013. (ID No. 20130222-029)

· Corresponding Author : Hosung Choo (e-mail : hschoo@hongik.ac.kr)

을 무선으로 제어할 수 있는 스마트 키 시스템 기술이 많이 연구되고 있다. 이러한 스마트 키 시스템은 주로 125 kHz의 저주파 대역에서 동작하는 LF(Low-Frequency) 안테나를 사용하며, 동작 주파수 대역에서의 근접 전자계강도에 의해 인식가능 거리가 결정된다. 따라서 스마트 키 시스템의 인식 가능거리를 예측하기 위해서는 차량에 장착된 LF 안테나에서 복사되는 근접 전자계 강도에 대한 정확한 해석이 반드시 선행되어야 한다. 근접 전자계 강도는 차량 LF 안테나에서 주로 사용되는 페라이트 코어와 도선의 특성에 따라 세기와 형상이 달라지기 때문에, 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 예로서 페라이트 코어의 비투자율 변화에 따른 근접 전자계 강도 변화나, 도선의 길이 및 턴 수에 의한 인덕턴스 및 필드 변화에 관한 연구가 주로 수행되어 왔다^{[1]~[4]}. 하지만 기존 연구들은 주로 LF 안테나의 단품 성능에 집중하여 연구가 수행되었으며, 차량을 포함한 필드 해석 혹은 차량에 의한 필드 왜곡에 대한 심도 있는 연구는 아직 충분히 진행되지 않은 실정이다. 도전성 차량 표면에 근접하여 장착되는 LF 안테나의 경우에는 안테나 근처 구조물의 형상 및 곡률에 의해 성능의 변화가 크기 때문에, 차량을 포함한 전자계 필드 해석이 매우 중요하다.

본 논문에서는 스마트 키 인식 거리 예측을 위해 실제 상용차량의 형상을 포함한 LF 안테나의 근접 전자계 필드 해석을 수행하였다. 차량에 장착할 단품 LF 안테나의 정확한 성능 예측을 위해 동일 조건에서 EM 시뮬레이션과 측정을 진행하였으며, 이를 통해 페라이트 코어의 비투자율 및 투자 손실 탄젠트와 전도성 도선의 코팅 비유전율을 확인하였다. 이때 안테나의 시뮬레이션 성능 예측은 MoM 수치 해석 방식 기반의 상용 EM 시뮬레이터인 FEKO를 이용하였으며, 모델링된 단품 LF 안테나를 실제 상용차량에 장착하여 근접 전자계 필드와 전력 밀도를 예측하였다. 예측한 인식 거리 및 전력 밀도를 측정 결과와 비교하여 정확성을 검증하였고, 이를 통해 시뮬레이션을 이용하여 스마트 키 인식 거리의 예측이 가능함을 확인하였다.

II. 인식 거리 및 수신 파워 예측을 위한 시뮬레이션 및 측정 조건 설정

(a) LF 안테나 사진
(a) Photograph of the LF antenna

(b) LF 안테나의 전자파 모델링 변수
(b) EM modeling parameters of the LF antenna

그림 1. 상용 LF 안테나 형상
Fig. 1. Geometry of the LF antenna.

표 1. LF 안테나 설계 변수
Table 1. Design parameters of the LF antenna.

x_1 (mm)	x_2 (mm)	y_1 (mm)	h_1 (mm)	N (회)
90	15	7.5	3	65

2-1 LF 안테나 단품 모델링

그림 1(a)는 차량 LF 안테나의 단품 형상을 보여준다. 차량 LF 안테나는 비투자율이 높은 페라이트 코어를 사용하며, 절연 코팅이 된 전도성 도선이 코어를 감고 있는 형상을 가진다. 그림 1(b)는 LF 안테나의 구체적인 설계 변수를 보여주며, 각각의 변수는 실제 차량용 LF 안테나로 사용되는 안테나를 실측하여 표 1에 정리하였다.

모델링된 차량 LF 안테나의 페라이트 코어는 가로(x_1)가 90 mm이고, 세로(y_1)는 7.5 mm이며, 높이(h_1)는 3 mm이다. 전도성 도선은 코어 끝에서 15 mm 만큼 떨어진 위치에서부터 1 mm의 간격으로 65회 감겨 있으며, 도선의 직경은 약 0.4 mm이다.

LF 안테나의 근접 전자계 성능은 페라이트 코어의 비투자율과 선로를 감싸는 절연 코팅의 비유전율에 의하여 많은 영향을 받기 때문에^{[5]~[11]}, 이에 대한 정확한 특성 확인이 필요하다. 본 논문에서는 상용 LF 안테나의 정확한 비투자율과 비유전율 특성을 확인하기 위해 trial-and-error 방식을 이용하였으며, 그림 2(a)와 같이 두 개의 LF 안테나를 5 cm 간격을 두고 배치하여 측정된 S_{21} 값과 EM 시뮬레이션 값을 비교하였다. 이때 시뮬레이션의 유전율과 투자율을 변화시켜가며 측정값과 가장 유사한 물질의 특성을

그림 2. S_{21} 을 이용한 페라이트 투자율 검증
Fig. 2. Verification of a ferrite's permeability using S_{21} .

도출하였다. 그림 2(b)는 측정된 S_{21} 값과 도출된 시뮬레이션 결과의 비교를 보여준다. 측정 시뮬레이션된 페라이트 코어의 비투자율(μ_r)과 투자 손실탄젠트($\tan \delta_\mu$)가 각각 400과 0.002이고, 도선 코팅의 비유전율(ϵ_r)과 유전 손실탄젠트($\tan \delta$)가 각각 2.25와 0.004일 때 사용 주파수 대역(125 kHz)에서 측정 결과와 약 5 dB의 근소한 차이로 유사한 성능을 가짐을 확인하였다. 5 dB의 차이는 사용 주파수(125 kHz)가 매우 저주파일 뿐 아니라, S_{21} 레벨이 -40 dB 이하로 매우 낮기 때문에 측정 과정에서 환경 및 기타 요인에 따라 약간의 오차가 발생함을 확인하였다.

2-2 LF 안테나 차량 탑재성능 예측

정확한 LF 안테나 차량 탑재 성능 예측을 위해서는 단품 LF 안테나 모델링뿐만 아니라 차량 모델링 또한 중요하다. 본 논문에서는 차량의 내부와 외부 형상을 본뜬 CAD 파일을 FEKO EM 시뮬레이터에 적용하였으며, 차량 후방 범퍼의 하단 프레임에 LF 안테나를 장착하여 차량 탑재성능을 예측하였다. 차

(a) 인식 거리 측정 방향
(a) Measurement directions of a reading distance

(b) 인식 거리 측정 높이
(b) Measurement height of a reading distance

그림 3. 인식 거리 측정 환경
Fig. 3. Environmental setup for measurement of a reading distance.

량의 형상은 PEC로 가정하였으며, 해석 정확도를 위해 한 변의 길이가 약 7 cm인 26,000개 정도의 삼각 mesh로 분할하였다. LF 안테나의 도선 및 차량 형상은 MoM 방식을 이용하여 해석하였으며, 투자율을 가지는 페라이트 코어는 FEM 방식을 이용하여 해석하였다. 그림 3은 실제 차량에서의 LF 안테나 장착 위치 및 인식 거리 측정 환경을 보여준다. 모델링된 LF 안테나는 차량 범퍼의 하단 중앙에 x 축 방향으로 위치되어 있으며, 지면으로부터 60 cm 위에 탑재된다. LF 안테나의 근접 자계 시뮬레이션은 안테나의 위치를 원점이라고 가정했을 때, x 축 방향으로 -2.0

m부터 2.0 m까지, y축 방향으로 0 m부터 2.0 m까지의 필드를 15 cm 간격으로 해석하였다. 인식 거리($P_1 \sim P_9$)는 차량 후방 범퍼 내부 프레임 하단에 장착된 LF 안테나를 중심으로 22.5°씩 9개 방향에서 측정하였다. 측정방법은 각 방향에서 스마트 키의 위치를 변화시켜가며 LF 안테나가 스마트 키를 인식하는 최대 인식 거리를 측정하였으며, 스마트 키의 높이는 0.6 m, 0.9 m, 1.2 m로 가정하였다.

III. LF 안테나 인식 거리 및 수신전력 분석

3-1 LF 안테나 인식 거리 분석

차량에 탑재된 LF 안테나 인식 거리 분석을 위해 $z=0.6$ m, $z=0.9$ m, $z=1.2$ m 높이에서 xy -plane에 대한 전자계 필드를 해석하였다. 시뮬레이션된 전자계 필드는 식 (1)^[12]을 이용하여 각 지점에서 전력 밀도로 변환되고, 이를 측정된 최대 인식 거리와 비교하였다.

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} [\bar{E} \times \bar{H}^*] \quad (1)$$

그림 4(a), 그림 4(b), 그림 4(c)는 지면으로부터 0.6 m, 0.9 m, 1.2 m의 높이에서 범퍼 하단 쪽 LF 안테나에 의한 차량의 전력 밀도 시뮬레이션과 측정 결과를 보여주며, 해당 수치를 각각 표 2~4에 나타내었다. 분석 결과, 본 논문에서 사용된 차량 및 안테나의 경우 -105 dBmW/m^2 의 전력 밀도 레벨에서 측정된 최대인식 거리 결과와 유사함을 확인할 수 있으며, 최대 인식 거리는 방향에 따라 최소 1.38 m부터 최대 1.53 m까지 분포함을 확인하였다.

표 2. $z=0.6$ m에서의 측정 인식 거리 결과
Table 2. Measured reading distances at $z=0.6$ m.

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9
$\phi(^{\circ})$	0	22.5	45.0	67.5	90.0	112.5	135.0	157.5	180.0
$r_N(\text{m})$	1.45	1.47	1.45	1.41	1.39	1.38	1.41	1.46	1.48

표 3. $z=0.9$ m에서의 측정 인식 거리 결과
Table 3. Measured reading distances at $z=0.9$ m.

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9
$\phi(^{\circ})$	0	22.5	45.0	67.5	90.0	112.5	135.0	157.5	180.0
$r_N(\text{m})$	1.51	1.46	1.47	1.39	1.40	1.38	1.41	1.42	1.51

(a) 전력 밀도 시뮬레이션과 측정 인식 거리 비교($z=0.6$ m)
(a) Comparison between a simulated power density and a measured reading distance($z=0.6$ m)

(b) 전력 밀도 시뮬레이션과 측정 인식 거리 비교($z=0.9$ m)
(b) Comparison between a simulated power density and a measured reading distance($z=0.9$ m)

(c) 전력 밀도 시뮬레이션과 측정 인식 거리 비교($z=1.2$ m)
(c) Comparison between a simulated power density and a measured reading distance($z=1.2$ m)

그림 4. 높이에 따른 전력 밀도 시뮬레이션과 측정 인식 거리 비교

Fig. 4. Comparison between a simulated power density and a measured reading distance according to measurement heights.

(a) 수신 전력의 시뮬레이션과 측정 결과 비교($z=0.6$ m)
(a) Comparison between simulated and measured received powers($z=0.6$ m)

(b) 수신 전력의 시뮬레이션과 측정 결과 비교($z=0.9$ m)
(b) Comparison between simulated and measured received powers($z=0.9$ m)

(c) 수신 전력의 시뮬레이션과 측정 결과 비교($z=1.2$ m)
(c) Comparison between simulated and measured received powers($z=1.2$ m)

그림 5. 높이에 따른 수신 전력의 시뮬레이션과 측정 결과 비교

Fig. 5. Comparison between simulated and measured received powers according to measurement heights.

표 4. $z=1.2$ m에서의 측정 인식 거리 결과

Table 4. Measured reading distances at $z=1.2$ m.

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9
$\phi(^{\circ})$	0	22.5	45.0	67.5	90.0	112.5	135.0	157.5	180.0
$r_N(m)$	1.53	1.47	1.46	1.43	1.41	1.39	1.40	1.42	1.43

3-2 테스트 LF 안테나에 유기된 수신전력

유기된 수신 전력을 확인하기 위해, 테스트용 LF 안테나를 최대인식 거리($P_1 \sim P_9$)에 위치시킨 후 스펙트럼 분석기를 이용하여 측정하였다. 범퍼에 장착된 송신용 LF 안테나에는 1 W의 전력을 인가하였으며, 이 때, 테스트용 수신 LF 안테나 입력 단에서의 출력된 전력을 측정하였다. 동일한 측정환경을 전자파 해석으로 재현하였으며, 송신 안테나와 수신안테나 간의 S_{21} 값을 식 (2)에 대입하여 수신전력 값을 예측하였다.

$$P_{received} = P_{transmit} \times |S_{21}|^2 \quad (2)$$

그림 5(a)~(c)는 지면으로부터 0.6 m, 0.9 m, 1.2 m에서 테스트용 수신 LF 안테나에 유기된 수신 전력의 시뮬레이션과 측정 결과를 보여준다. 측정된 수신 전력은 평균 -81.1 dBmW이고, 시뮬레이션 수신 전력은 평균 -83.6 dBmW으로, 측정 결과가 해석 결과와 유사함을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 차량 무선 통신에 사용되는 스마트 키 LF 안테나를 모델링 한 후, 실제 차량에 탑재하여 근접 전자계 필드를 분석하였다. 모델링된 LF 안테나는 400의 비투자율을 가지는 페라이트 코어에 폴리에틸렌으로 절연 코팅이 된 전도성 도선이 감겨 있는 루프 형태의 안테나이며, 125 kHz에서 동작한다. 모델링된 안테나는 차량 범퍼 하단에 지면으로부터 약 0.6 m의 높이에 장착되어 근접 전자계를 형성한다. 전자파 해석 시뮬레이션 및 측정 데이터 분석 결과, 장착된 LF 안테나는 최소 1.38 m부터 최대 1.53 m까지 인식 거리를 가지며, 이는 -105 dBmW/m²의 전자파 해석에 의한 전력 밀도 라인과 유사한 분포를 가진다. 또한, 최대 인식 거리에서 EM 해석으로 얻은 수신 전력과 스펙트럼 분석기를

이용해 측정된 수신전력 이 유사한 레벨 분포를 가지고 있음을 확인하였다. 본 논문을 통해 실제 측정이 아닌 전자파 해석을 이용하여 정확한 인식 거리 및 근접 필드 예측이 가능함을 확인하였으며, 이는 차량 스마트 키 시스템에 사용되는 LF 안테나 성능 예측에 효율적으로 사용될 것으로 기대된다.

References

- [1] M. Heddebaut, V. Deniau, and K. Adouane, "In-vehicle WLAN radio frequency communication characterization", *IEEE Trans. Intel. Transport. Syst.*, vol. 5, no. 2, pp. 114-121, Jun. 2004.
- [2] A. Takacs, M. Huard, S. Kessler, G. Chakam, and E. Lardjane, "Estimation of low frequency coverage inside car for passive access system entry", *Electron. Letter*, vol. 45, no. 12, pp. 596-597, Jun. 2009.
- [3] P. T. Theilman, P. M. Asbeck, "An analytical model for inductively coupled implantable biomedical device with ferrite rod", *IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.*, vol. 3, no. 1, pp. 43-52, Feb. 2009.
- [4] M. Albach, A. Steadler, and M. Spang, "The influence of ferrite characteristics on the inductance of coils with ferrite rod cores", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 43, no. 6, pp. 2618-2120, Jun. 2007.
- [5] D. Zhang, C. F. Foo, "Effect of high permeability on the accurate determination of permittivity for Mn-Zn ferrite cores", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 40, no. 6, pp. 3518-3526, Apr. 2004.
- [6] E. Newman, P. Tulyathan, "Wire antennas in the presence of a dielectric/ferrite inhomogeneity", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 26, no. 4, pp. 587-593, Jul. 1978.
- [7] T. Simpson, Y. Zhu, "The electrically small multi-turn loop antenna with a spheroidal core", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 48, no. 5, pp. 54-66, Oct. 2006.
- [8] R. Devore, P. Bohley, "The electrically small magnetically loaded multi-turn loop antenna", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 25, no. 4, pp. 496-505, Jul. 1977.
- [9] O. Chadebec, L. Rouve, and J. Colomb, "New methods for a fast and easy computation of stray fields created by wound rods", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 38, no. 2, pp. 517-520, Mar. 2002.
- [10] 구본철, 유재성, 김미자, 김윤명, "100 kHz 대역의 자계 환경내에서의 페라이트 코어의 계(界) 해석", *한국전자과학회논문지*, 18(8), pp. 977-983, 2007년 8월.
- [11] M. Brzeska, G. A. Chakham, "Modelling of the coverage range for modern vehicle access systems at low frequency", *Microwave Conf.*, pp. 771-774, Oct. 2007.
- [12] C. A. Balanis, *Antenna Theory : Analysis and Design*, 3rd Ed., New York: Wiley, 2005.

김 희 영

2011년 8월: 홍익대학교 전자전기 공학과 (공학사)
2011년 9월~현재: 홍익대학교 전자 전기공학부 석사과정
[주 관심분야] 차량 안테나, GPS 안테나

변 강 일

2010년 2월: 홍익대학교 전자전기 공학과 (공학사)
2012년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학석사)
2012년 9월~현재: 한양대학교 전자 컴퓨터통신공학과 박사과정
[주 관심분야] 안테나설계 및 위치 최적화, 차량 및 항공기용 안테나, 방향 탐지 및 항재밍 배열 안테나

성 재 용

2002년 2월: 경희대학교 전자전산
전파공학부 (공학사)
2005년 2월: 경희대학교 전자공학
과 반도체 (공학석사)
2006년 1월~현재: 현대자동차 연
구개발본부 전자기술센터 책임연
구원

[주 관심분야] 자동차 전지, RF 집적회로기술, RF 안테나

추 호 성

1998년 2월: 한양대학교 전파공학
과 (공학사)
2000년 8월: 미국 Univ. of Texas at
Austin 전자전기공학부 (공학석사)
2003년 5월: 미국 Univ. of Texas at
Austin 전자전기공학부 (공학박사)
2003년 6월~2003년 8월: 미국 Uni-
versity of Texas at Austin 전자전기공학부 (Post Doctor)

2003년 8월~현재: 홍익대학교 전자전기공학부 부교수
[주 관심분야] 초소형 안테나, 최적화 알고리즘을 이용한
안테나 설계, RFID용 태그 및 리더 안테나

정 한 길

1996년 2월: 서울산업대학교 제어계
측공학 (공학사)
1995년 8월~1998년 8월: (주)제이
스테크 기술연구소 연구원
1998년~현재: (주)모아소프트 신뢰
성기술연구소 부장

[주 관심분야] 안테나, EMC, 레이

다, RCS, 레이돔