

동향분석ITS 무선통신을 위한 EBG 구조를 적용한 자동차용 WAVE 안테나 시스템 성능향상연구

A Study on Improving Performance of the Vehicular WAVE Antenna System using the EBG structure for ITS wireless communications

연규봉* · 이두호** · 황진규*** · 양태훈****

* 주저자 및 교신저자 : 자동차부품연구원 스마트운전제어연구센터 센터장
** 공저자 : 자동차부품연구원 스마트운전제어연구센터 연구원
*** 공저자 : 인팩일렉스 통합연구소 이사
**** 공저자 : 인팩일렉스 통합연구소 책임연구원

KyuBong Yeon* · DuHo Lee** · JinKyu Hwang*** · TaeHoon Yang****

* Korea Automotive Technology Institute
** Korea Automotive Technology Institute
*** INFAC Elecs
**** INFAC Elecs

† Corresponding author : KyuBong Yeon, kbyeon@katech.re.kr

Vol.16 No.1(2017)
February, 2017
pp.176~185

ISSN 1738-0774(Print)
ISSN 2384-1729(On-line)
<https://doi.org/10.12815/kits.2017.16.1.176>

Received 24 May 2016
Revised 20 June 2016
Accepted 29 September 2016

© 2017. The Korea Institute of
Intelligent Transport Systems. All
rights reserved.

요 약

본 논문은 지능형교통시스템(ITS: Intelligent Transport System)을 위한 V2X 간의 무선통신 시스템에 적용되는 WAVE(Wireless Access in Vehicle Environments) 안테나 시스템에 대한 연구이다. 5.825~5.9GHz 주파수대역의 WAVE 통신은 차량이 주행하면서 도로 인프라에 설치되어 있는 기지국과 다른 차량에 장착되어 있는 단말기간의 무선통신에 사용할 수 있도록 하는 표준화된 프로토콜이다.

최근의 WAVE 통신시스템 연구에서는 통신거리에 따른 통신성능을 향상시키기 위해서 기지국과 차량 단말기 기술개발 위주로 연구되고 있으나, 본 논문에서는 시스템 성능 개선 가능성을 검토하고자 차량 루프에 장착가능한 자동차용 안테나 시스템의 설계구조 개선에 대한 연구를 진행하였다. WAVE 안테나 베이스 구조에 EBG(Electro Band-Gap) 구조를 적용하여 비교시뮬레이션을 통해 반사손실이 저감되어 성능이 향상되는 것을 확인하였다.

핵심어 : 자동차, 안테나, 지능형교통체계, 웨이브, 전자밴드갭

ABSTRACT

This paper describes a design of the WAVE antenna system in V2X wireless communication systems for Intelligent Transport Systems. The WAVE standard protocols defined 5.825~5.9GHz frequency range for wireless communications with V2X.

In a recent, A study of WAVE communication system it has been studied mainly the base station and the OBU technology in order to improve the communication performance of the communication distance. In this paper, the proposed vehicular WAVE antenna using the EBG structure is to improve performance. The proposed WAVE antenna with EBG shows improvement of return loss and radiation beam pattern. The performance of WAVE communication systems for intelligent transport systems is dependent on the performance of antenna. The proposed vehicular antenna for WAVE communication systems shows improvement of return loss for performance.

Key words : Automotive, Antenna, ITS, WAVE, EBG

I. 서 론

최근 들어 교통정보 제공과 고안전 관련 정보를 긴급하게 제공하기 위한 무선통신 기술 적용이 활발하게 진행되고 있다. 특히 WAVE 통신 프로토콜의 경우 IEEE 802.11p 표준을 근간으로 한 ITS 응용 분야를 지원하기 위한 근거리 통신 표준으로서 5.850~5.925 GHz 주파수 대역을 사용한다(Varum et al., 2012).

ITS용 WAVE 안테나 시스템은 차량에서의 통신 성능을 극대화시키기 위하여 철재 소재로 되어있는 차량의 루프를 활용하여 미러 효과와 그라운드 효과를 적절히 이용할 수 있는 위치에 장착되어 있다. 현재의 WAVE 안테나 시스템의 경우에도 차량의 루프에 장착되어 가능한 먼 거리에서 통신이 가능하도록 최적화하여 장착되고 있다(Sergio and Mario, 2012).

기존의 WAVE 안테나 시스템은 차량 루프에 장착될 경우 거리에 따른 전계강도가 증가는 하지만, 반면에 장착 위치와 루프의 형태에 따라 표면파에 의한 전파간섭 요인이 발생되어 성능 저하를 일으킬 수 있는 문제점이 있다. 또한 차량에서의 안테나 시스템은 한정된 작은 크기에 GPS(Global Position System), AM/FM, 스마트키, TPMS(Tire Pressure Monitoring System), DMB/DAB, CDMA/LTE(긴급구난메시지 송신용) 등의 옥타 밴드 다중 안테나가 요구되고 있어 밀집도가 증가됨에 따라 안테나 상호간의 간섭 현상이 심화되고 있다.

이에 대한 간섭현상을 저감시키기 위해서 인공적으로 합성되어 자연계에서 흔히 볼 수 없는 특수한 전자기적 성질을 나타내는 물질인 메타물질 응용에 대한 연구가 전세계적으로 활발히 진행되고 있다. 이러한 메타물질에는 광학 밴드 갭(PBG, Photonic Bandgap) 혹은 전자기 밴드 갭(EBG, Electromagnetic Bandgap) 구조, 인공 자기 도체(AMC, Artificial Magnetic Conductor) 구조, 단일/이중 음의 유전율/투자율(Single/Double Negative Permittivity/Permeability) 물질, 음의 굴절률(NRI, Negative Refractive Index) 물질, Left-handed(LH) 물질 등이 있으며, 관심있는 물질의 특성에 따라 다르게 명명되어 불려지고 있다.

이 중에서 전자파(Electromagnetic Wave)의 전파(Propagation)를 효율적으로 제어할 수 있는 EBG 구조를 마이크로파 소자 및 시스템에 응용하는 연구가 마이크로파 및 안테나 공학 분야에서 활발히 연구되고 있다(Maagt et al., 2003). EBG 구조는 광학분야에서 오래전부터 연구되어 오던 Photonic Crystal 혹은 PBG 구조에서 유래되었으며, 이러한 구조를 마이크로파나 밀리미터파 대역에 적용하면서 EBG 구조라고 부르고 있다. EBG 구조는 특정한 모양을 가지는 단위 셀(Unit Cell) 구조가 주기적으로 반복되는 구조로서 특정 주파수 대역의 전자파의 전파가 허용되지 않는 주파수 차단(Band Stop) 특성을 갖는다. 이러한 EBG 구조를 안테나에 적용할 경우 안테나의 기판(Substrate)이나 다층 구조로 사용될 수 있다.

안테나의 기판으로 사용될 경우 고유전율(High Permittivity)의 기판을 사용할 때 발생하는 표면파(Surface Wave)를 감소시켜 안테나의 방사특성 개선 및 이득을 향상시킬 수 있다(Yang and Rahmat-Samii, 1956). 또한 여러 안테나가 배열되어있을 경우 안테나 사이에 적용될 경우 안테나 간의 상호 결합(Mutual Coupling)을 줄여주는 역할도 할 수 있다.

안테나의 다층 구조로 사용될 경우 안테나의 지향성(Directivity)을 향상시킬 수 있으며 배열 안테나(Array Antenna)에서 필요로 하는 복잡한 급전 구조가 필요없게 된다. 이러한 개념은 결국 고 지향성의 얇은 빔(narrow beam)을 만들기 위해서는 동위상을 가지는 큰 등가 개구면(Aperture)을 가지는 방사체가 필요하다는 것을 의미하며, 패치 안테나와 같은 방사원(Radiation Source)을 이용하여 간단하게 만들 수 있다(Jackson and Oliner, 1988).

다층 구조로 사용할 수 있는 구조에서는 다층 유전체층(Multiple Dielectric Layer), 유전체 봉(Dielectric Rod)을 이용한 전자기 밴드 갭(EBG) 구조, Woodpile 형태의 전자기 밴드 갭 구조 그리고 주기적인 금속 물질을 이용한 주파수 선택적 표면(FSS, frequency selective surface) 구조 등이 있다. 또한, 유전율이 0과 1사이인

ENZ(Epsilon Near Zero) 물질도 사용될 수 있다(Jackson and Oliner, 1993).

이러한 EBG 공진기 안테나 설계에 대해서 크게 두가지 접근 방법이 연구되어왔다.

첫번째 방법은 전체 안테나를 누설파(Leaky Wave) 안테나로 설계하는 것으로서 Jackson 등은 패치 안테나 위에 한층 혹은 다층 유전체 층을 놓아 패치 안테나의 지향성이 향상됨을 보였고, 이를 누설파 이론을 이용하여 설명하였으며 유전층의 두께와 유전상수를 적절히 조절하여 지향성 향상이 나타나는 주파수를 조절할 수 있음을 보였다. Zhao 등은 이것을 금속 패치(Metallic Patch)나 금속 평면에 슬롯(Slot)으로 이루어진 2차원 주기 구조로 확장하였다(Zhao et al., 2005).

두 번째 방법은 안테나의 다층 구조체에서 상위 레이어를 반사 표면 (PRS, Partially Reflecting Surface)으로 간주하여 전체 안테나를 Fabry-Perot Cavity 형태의 안테나로 설계한다. 이 경우 부분 반사 표면과 접지면 (Ground plane)에 의해 이루어지는 Fabry-Perot Cavity에서 두 표면사이의 거리가 주파수의 반파장이 될 때 발생하는 공진기 개념을 이용하여 지향성 향상시키도록 설계하는 방법이다.

Trentini 논문에서는(Trentini, 1956) 접지면이 있는 도파관 앞에 부분 반사 표면을 두고 접지면과 부분 반사 표면 사이를 금속 벽으로 둘러싸이므로 지향성 향상이 가능함을 소개하였다.

Alexopoulos 논문(Yang and Alexopoulos, 1987) 등에서는 패치 안테나 위에 단일 혹은 다중 유전체층을 놓아 패치 안테나의 지향성을 향상을 시킬 수 있음을 보였으며, 이때 공진조건은 파선 이론(Ray Theory)과 Fabry-Perot Interferometer를 이용하고, 방사패턴은 가역정리(Reciprocity)와 전송선 이론(Transmission Line Theory)을 이용하여 유도하였다.

Feresidis 등은 Jackson 등이 제안한 이론(Feresidis and Vardaxoglou, 2001)을 바탕으로 부분 반사 표면의 반사계수(Reflection Coefficient)의 크기와 위상을 이용하여 Bore-sight 이득과 대역폭을 구할 수 있는 식을 유도하고 넓은 주파수 대역에서 동작할 수 있는 최적화된 부분 반사 표면을 이용한 고이득 안테나를 설계하였다.

패치 안테나의 접지면으로 완전 전기 도체(PEC, Perfect Electric Conductor) 대신에 인공 자기 도체(AMC)를 사용하여 스트립 다이폴 형태의 EBG로 구성된 부분 반사 표면과 접지면사이에 필요한 거리인 공진 길이 (Resonant length)의 절반인 파장의 1/4로 줄일 수 있음을 보였다(Feresidis et al., 2005).

Cheyne 등은 유전체 봉(Dielectric Rod)으로 구성된 EBG 구조를 덮개층으로 사용하여 밴드갭 대역 내에 결함 모드(Defect Mode)를 만들어서 패치 안테나의 지향성을 향상시킬 수 있는 방법을 제안하였다(Cheyne et al., 2002).

Lee et al.(2005)은 같은 구조에서 두가지 결합 모드를 발생할 수 있는 방법을 소개하고 이들 모드를 조절할 수 있는 단위 셀 시뮬레이션 방법을 제시하고, 이를 이용하여 이중 대역 안테나, 이중 대역 이중 편파 그리고 광대역 안테나 등과 같은 여러 종류의 고 지향성 EBG 공진기 안테나를 제안하였다(Lee et al., 2005).

또한, Lee et al.(2004)은 단위 셀 시뮬레이션을 이용하여 스트립 다이폴 형태의 주파수 선택 표면을 덮개층으로 구성된 고지향성 안테나의 지향성을 구하는 방법을 제안하였고(Lee et al., 2004), 이중 대역에서 지향성을 향상시킬 수 있는 두 층의 주파수 선택적 표면으로 구성된 덮개층을 제안하였다(Lee et al., 2007).

최근에 Pirhadi 등은 단일 층(Single layer)의 EBG 표면과 접지면으로 인공 자기 도체(AMC)를 사용한 이중 대역 EBG 공진기 안테나를 연구하였다(Pirhadi et al., 2007). 이중 대역 지향성 향상을 위해서 두 층의 주파수 선택적 표면을 사용하지 않고 단일 층으로 이중 대역에서 공진하도록 두 개의 루프 (Double Loop Element)를 사용하였으며, 두 번째 공진 대역의 경우 전기장이 접지면에서 최대인 홀수 모드(Odd Mode)를 사용하기 위해서 완전 전기 도체 (PEC) 대신에 인공 자기 도체(AMC)를 사용하였다. 이렇게 함으로써 이중 대역의 경우 주파수 간격을 더 좁힐 수 있다.

Gardelli et al.(2006)은 EBG 공진기 안테나의 방사원으로 배열 안테나를 사용할 경우 배열 안테나의 간격

을 일반 배열 안테나의 경우 보다 훨씬 좁힐 수 있으며, 배열 안테나와 소자 사이에서의 상호 결합도 줄일 수 있어 배열 안테나 소자의 수도 줄일 수 있도록 설계하였다(Gardelli et al., 2006).

대부분의 논문에서 발표된 EBG 공진기 안테나의 경우 안테나 구조와는 별개로 공진 주파수 파장이상의 거리를 두고 있는 EBG 구조를 다루고 있다. 때문에 소형화된 차량용 안테나 구조 등에는 적용하기가 어려운 구조이다.

본 논문에서는 스트립라인 형태의 주파수 선택적 표면을 이용하여 WAVE 대역(5.850~5.925 GHz)의 자동차용 안테나로 사용될 수 있는 EBG 공진기 안테나를 제안하였다. WAVE대역의 자동차용 안테나에서 요구되는 3dB이상의 안테나 이득과 75MHz의 대역폭을 가지는 EBG 공진기 안테나를 설계하기 위하여 공진기의 부분 반사 표면층 주기 구조의 단위 셀 시뮬레이션을 이용한 다양한 설계파라미터의 변화에 따른 공진주파수 및 대역폭의 특성을 분석하였다. 단위 셀 시뮬레이션 결과를 이용하여 WAVE대역을 만족하는 평면구조의 EBG 공진기 안테나를 설계하였으며, 평면 구조의 EBG 공진기 안테나를 이용하여 특정 방사패턴을 갖는 EBG 공진기 안테나를 설계하였다.

II. WAVE 안테나 설계

자동차용 WAVE 안테나에서의 기존 시스템의 성능향상을 위하여 제안된 EBG 구조와 적용 설계 방법에 대하여 1.에서는 EBG 기본 구조와 2.에서는 EBG WAVE 안테나 구조의 설계방법에 대한 내용으로 구성하였다.

1. EBG 구조

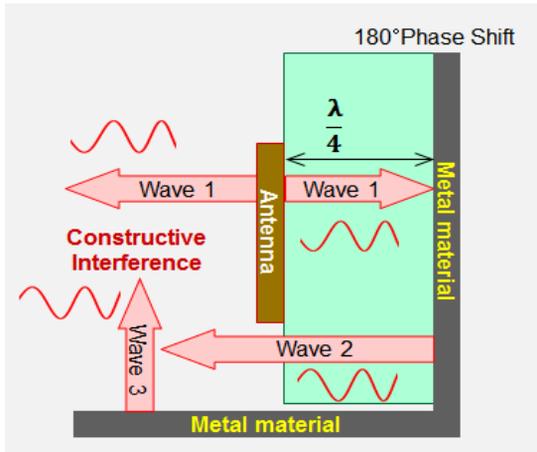
EBG (Electro Band-Gap) 구조는 유전상수가 서로 다른 두 물질을 일정한 주기로 반복적으로 배열할 때 파동 임피던스의 주기적인 변화에 의해 주파수 선택 특성이 나오도록 한 구조로서, EBG 구조는 주기상수에 의해 주파수 대역이 결정되며 안테나의 성능향상 및 빔패턴 개선을 위하여 사용된다.

본 논문에서 제안된 EBG 구조의 일종인 고 임피던스 표면(high Impedance Surface)을 가지는 구조는 세부 셀의 주기가 매우 작으며, 특정 주파수 대역에서 표면파의 전파가 이루어지지 않는 차단대역 또는 금지 대역 특성을 보인다. 이 특성은 특히 자동차용 안테나와 같이 철재로 구성된 차량 구조물에 장착할 경우 많은 장점을 가진다.

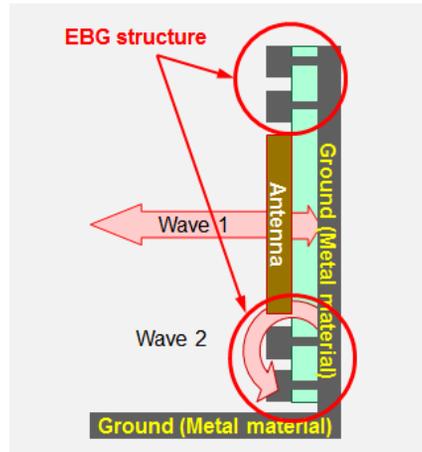
제안된 EBG 구조는 안테나와 주변 물체와의 간섭을 줄일 수 있는 특성으로 인해 특히 자동차용 안테나의 성능과 빔패턴 개선과 직접적으로 관련된 차량 루프에 의한 간섭을 효과적으로 줄일 수 있는 구조이다.

기존의 EBG가 적용되어 있지 않은 WAVE 안테나 구조에서는 <Fig. 1>에서와 같이 안테나 하부의 metal material로 구성된 차량 루프와 그라운드로 사용되고 있는 metal material에 의해 간섭파에 의한 null 이 발생할 수 있어 성능 저하가 발생할 수 있다.

<Fig. 2>와 같은 제안된 EBG 구조가 적용된 WAVE 안테나의 구조는 metal material으로 부터 연결된 EBG 구조로 인해 표면파가 흡수됨에 따라 간섭을 줄일 수 있는 구조로 구성되어 있다. 이와 같은 구조는 반사손실을 줄이며 빔의 사이드 로브를 저감시킴으로서 안테나 지향성을 향상되어 접속거리 관련 성능 개선이 가능하다.



〈Fig. 1〉 Conventional Antenna Structure without EBG



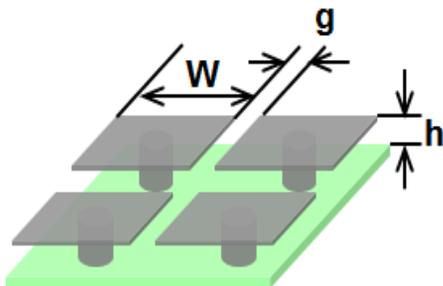
〈Fig. 2〉 The Proposed Antenna Structure with EBG

제안된 EBG 구조 모델은 <Fig. 3>과 <Fig. 4>와 같이 WAVE의 공진주파수를 기반으로 아래와 같은 수식을 사용하여 설계할 수 있는 구조로 구성된다.

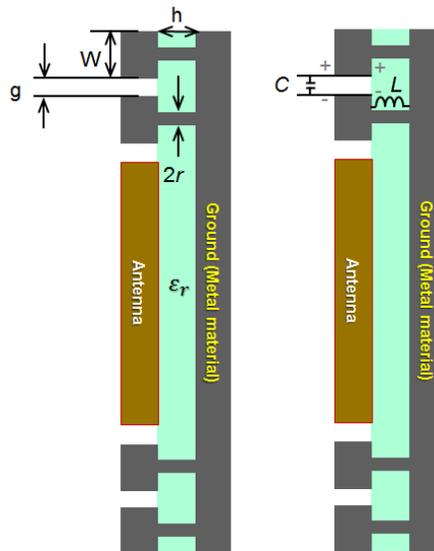
$$\omega_0 = 1 / \sqrt{LC} \tag{1}$$

$$L = \mu_0 h \tag{2}$$

$$C = W \epsilon_0 (1 + \epsilon_r) / \pi \cosh^{-1}[(W + g) / g] \tag{3}$$



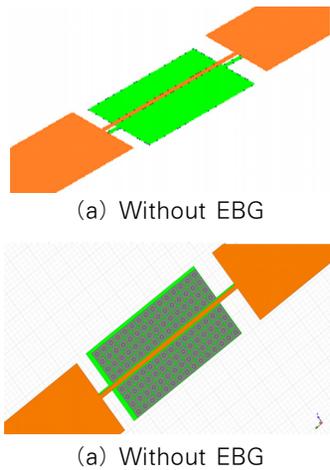
〈Fig. 3〉 The EBG Cell structure



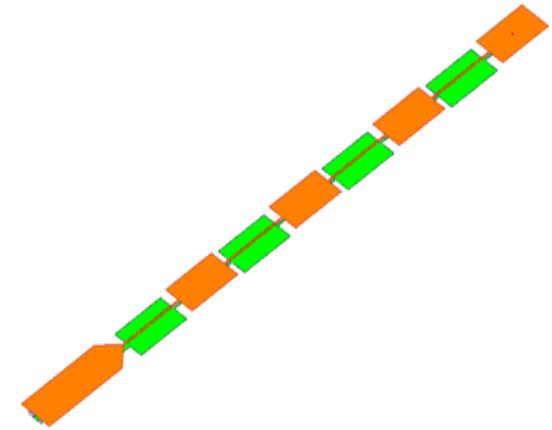
〈Fig. 4〉 The EBG structure of Proposed Antenna

2. EBG WAVE 안테나 설계

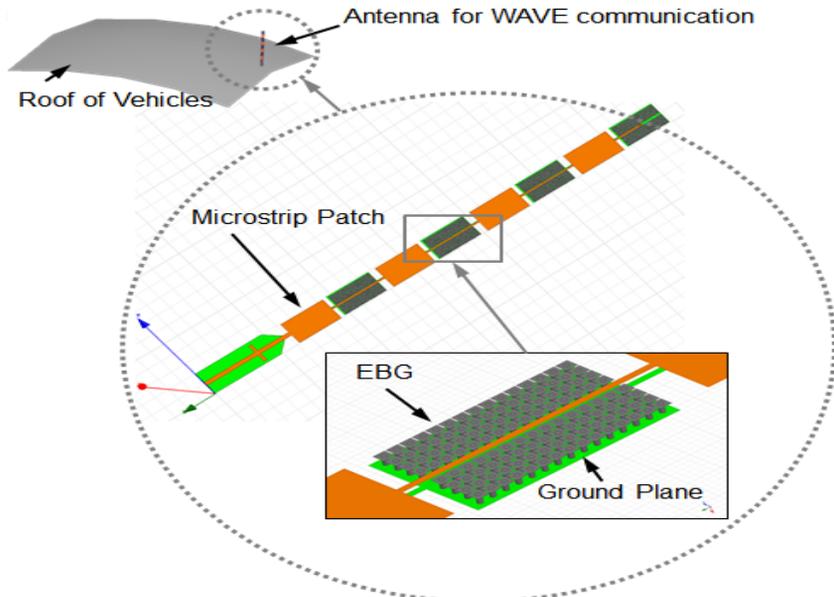
제안된 WAVE 안테나 구조는 <Fig. 6>와 같은 기존의 Conventional 안테나 구조에 <Fig. 7>와 같이 제안된 EBG 구조를 추가하여 간섭을 줄일 수 있는 구조로 모델링하였다. 특히, 제안된 구조는 기존의 WAVE 안테나의 구조를 변경하지 않거나 전체적인 크기의 변화 없이 마이크로 스트립 패치 사이의 gap에 EBG를 추가할 수 있는 구조로 제안하여 개발과 매칭 시간을 줄일 수 있는 장점이 있다.



<Fig. 5> Compare the antenna structure of without EBG and with EBG



<Fig. 6> Conventional WAVE Antenna without EBG



<Fig. 7> The proposed WAVE antenna with EBG on the mounted of vehicle roof

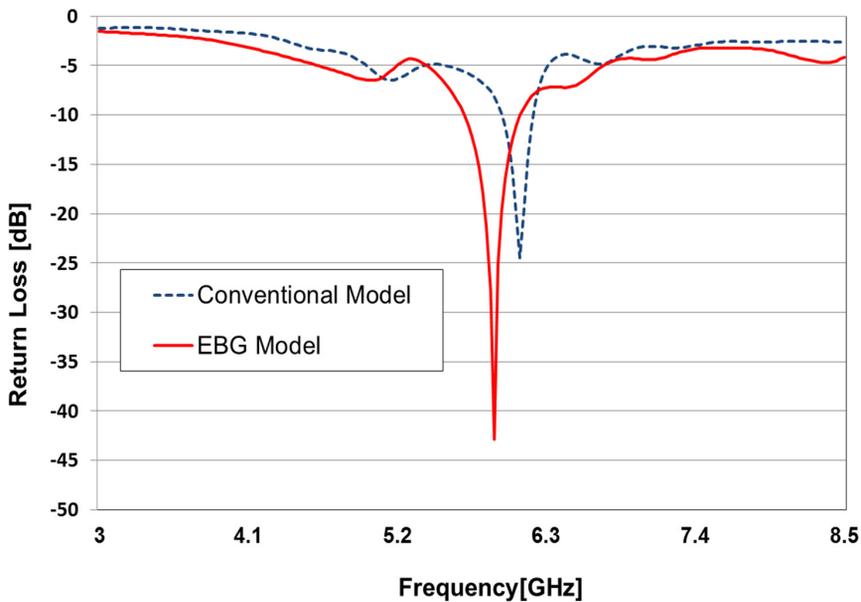
Ⅲ. 시뮬레이션 결과

이 장에서는 제안된 EBG 구조를 적용한 자동차용 WAVE 안테나와 기존의 Conventional WAVE 안테나에 대하여 반사손실(Return Loss)과 방사패턴을 비교 시뮬레이션을 수행하였다. 이에 따라 시뮬레이션 결과를 통한 성능비교를 수행한다.

1. 반사손실 시뮬레이션

제안된 EBG 구조가 적용된 WAVE 안테나와 기존의 Conventional 안테나의 반사손실을 시뮬레이션을 통해 <Fig. 8>과 같이 비교하였다.

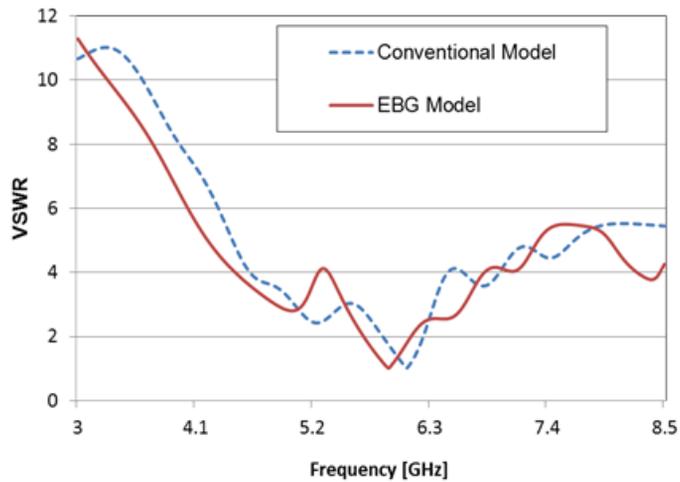
반사손실에 대한 비교결과 기존 Conventional 모델의 경우 -25 dB의 결과 값을 보였고 EBG 모델은 -43 dB의 결과값을 보여 약 18 dB의 반사손실을 저감시킬 수 있었다.



<Fig. 8> Simulation result of return loss of Conventional Model and the Proposed EBG Model

2. 정재파비 시뮬레이션

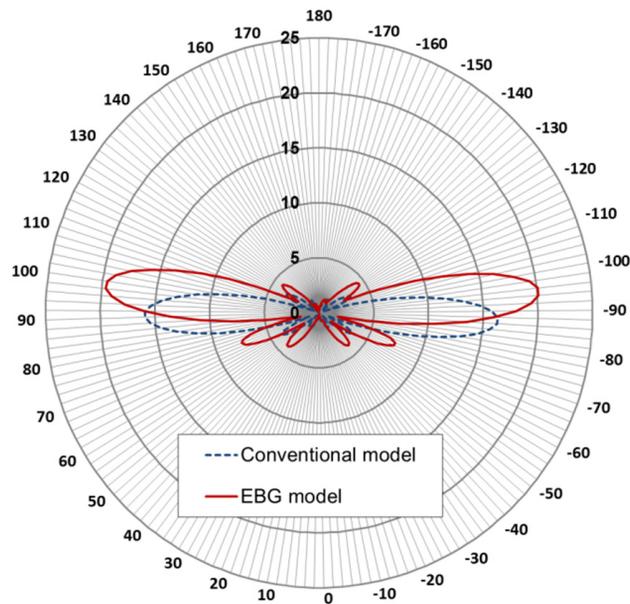
제안된 EBG 구조가 적용된 WAVE 안테나와 기존의 Conventional 안테나의 VSWR(Voltage Standing Wave Ratio)을 시뮬레이션을 통해 <Fig. 9>과 같이 비교하였다. 정재파비의 차이는 확인할 수 없었으나 요구사항 2 이하인 1.18의 결과 값을 보여 만족할 수 있는 결과 값을 얻을 수 있었다.



〈Fig. 9〉 Simulation result of VSWR

3. 방사패턴 시뮬레이션

제안된 EBG 구조가 적용된 WAVE 안테나와 기존의 Conventional 안테나의 방사패턴을 시뮬레이션을 통해 <Fig. 10>와 같이 비교하였다. 비교결과 기존 Conventional 모델의 경우 최대 FoV (Field of View)에서 17 dB의 결과 값을 보였고 EBG 모델은 최대 FoV 20 dB의 결과 값을 보여 약 3 dB의 방사패턴 전계강도를 향상시킬 수 있었다.



〈Fig. 10〉 Simulation result of radiation beam pattern

V. 결 론

본 논문에서는 기존의 Conventional WAVE 안테나에 제안된 EBG 구조를 적용하여 안테나의 차량환경에서의 전파 간섭을 줄이고 지향성을 향상시켜 성능을 개선시킬 수 있도록 하였다.

고주파수 구조 시뮬레이션을 통해 18 dB의 반사손실 저감과 최대 FoV에서 3 dB 방사패턴 전계강도 향상을 확인할 수 있었다.

향후 ITS용 차량 WAVE 통신 시스템의 성능향상을 위한 MIMO (Multi-Input Multi-Output) 지원이 가능한 어레이 안테나에서의 EBG 구조를 연구하고자 한다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 2016년 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원으로 수행하였습니다(중소기업청-중소중견기업지원사업-WC300 R&D-S2343331).

REFERENCES

- Alka V.(2012), "EBG structure and its recent advances in microwave antenna," *International journal of scientific research engineering and technology*, vol. 1, pp.084-090.
- A-sa S., Krachodnok P. and Wongsan R.(2012), "A Highly Directive Antenna using EBG materials as superstrate," *Electrical Engineering/ Electronics, computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-COM)*.
- Cheype C., Serier C., Thevenot M., Monediere T., Reineix A. and Jecko B.(2002), "An Electromagnetic BandGap resonator antenna," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 50, no. 9, pp.1285-1290.
- Feresidis A. P. and Vardaxoglou J. C.(2001), "High gain planar antenna using optimised partially reflective surfaces," *IEEE Proceedings-Microwave, Antennas and Propagation*, vol. 148, no. 6, pp.345-350.
- Feresidis A. P., Goussetis G., Wang S. and Vardaxoglou J. C.(2005), "Artificial magnetic conductor surfaces and their application to low-profile high-gain planar antennas," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 53, no. 1, pp.209-215.
- Gardelli R., Albani M. and Capolino F.(2006), "Array thinning by using antennas in a Fabry-Perot cavity for gain enhancement," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 54, no. 7, pp.1979-1990.
- Jackosn D. R. and Oliner A. A.(1988), "A leaky-wave analysis of the high-gain printed antenna configuration," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 36, no. 7, pp.905-910.
- Jackosn D. R., Oliner A. A. and Ip A.(1993), "Leaky-wave propagation and radiation for a narrow-beam multiple-layer dielectric structure," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 41, no. 3, pp.344-348.

- Lee D. H., Lee Y. J., Yeo J., Mittra R. and Park W. S.(2007), "Design of Novel Thin Frequency Selective Surface (FSS) Superstrates for Dual-band Directivity Enhancement," *IET Proceedings Special Issue on Metamaterials (RF/Microwave and Millimetre-wave Applications)*, vol. 1, No. 1, pp.248-254.
- Lee Y. J., Yeo J., Mittra R. and Park W. S.(2004), "Design of a High-Directivity Electromagnetic Band Gap (EBG) Resonator Antenna Using a Frequency Selective Surface (FSS) Superstrate," *Microwave & Optical Technology Letters*, vol. 44, no. 6, pp.462-467.
- Lee Y. J., Yeo J., Mittra R. and Park W. S.(2005), "Application of Electromagnetic Bandgap(EBG) Superstrates with Controllable Defects for a Class of Patch Antennas as Spatial Angular Filters," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 53, no. 1, Part 1, pp.224-235.
- Maagt P. de., Gonzalo R., Vardaxoglou Y. C. and Baracco J. -M.(2003), "Electromagnetic bandgap antennas and components for microwave and (sub)millimeter wave applications," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 51, no. 10, pp.2667-2677.
- Pirhadi A., Hakkak M., Keshmiri F. and Bae R. K.(2007), "Design of Compact Dual Band HighDirective Electromagnetic Bandgap (EBG) Resonator Antenna Using Artificial Magnetic Conductor," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 6, pp.1682-1690.
- Sergio A. and Mario O.(2012), "Design of Multi-Frequency Compact Antennas for Automotive Communications," *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 12.
- Trentini G. V.(1956), "Partially reflecting sheet arrays," *IRE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 4, pp.666-670.
- Varum T., Matos J. N. and Oliveira A.(2012), "Printed antenna for DSRC systems with omnidirectional circular polarization," International IEEE conference on Intelligent Transportation Systems.
- Yang F. and Rahmat-Samii Y.(1956), "Microstrip antennas integrated with Electromagnetic Band-Gap (EBG) structures: a low mutual coupling design for array applications," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 51, no. 4, pp.2936-2946.
- Yang H. Y. and Alexopoulos N. G.(1987), "Gain enhancement methods for printed circuit antennas through multiple superstrates," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 35, no. 7, pp.860-863.
- Zhao T., Jackson D. R., Williams J. T., Yang H. Y. and Oliner A. A.(2005), "2-D periodic leaky-wave antennas-part I: metal patch design," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 53, no. 11, pp.3505-3514.