THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2021 September.; 32(11), 1014～1022.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2021.32.11.1014
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

유동환경용 FSS 전극 유전체 장벽 방전 구조 플라즈마 발생기의 X-Band 내 RCS 감소 효과

RCS Reduction Effect of Dielectric Barrier Discharge Plasma Generators Based on FSS Electrode Structures in X-Bands

오태주 · 조창석 · 안욱현 · 육종관 · 이장재* · 유신재* ·
임진우** · 하정제** · 배지훈** · 유흥철** · 이용식

Taejoo Oh · Changseok Cho · Wookhyun Ahn · Jong-Gwan Yook · Jangjae Lee* · Shinjae You* ·
Jinwoo Yim** · Jungje Ha** · Gihun Bae** · Heung Cheol You** · Yongshik Lee

요 약

본 논문에서는 주파수 선택 표면(FSS: frequency selective surface)을 전극으로 활용한 유전체 장벽 방전 (DBD: dielectric barrier discharge) 플라즈마 발생기를 제안하고, 이를 기반으로 2차원 평면형 타겟의 레이다 단면적(RCS: radar cross section)을 감소시키는 것을 실험적으로 검증한다. 주파수 선택 표면의 통과대역이 레이다 신호의 대역과 일치하도록 설계함으로써 기존 평행판 커패시터형 DBD 발생기와 달리 발생기를 타겟에 부착하는 과정에서 발생하는 타겟의 RCS 왜곡과 레이다 신호의 편파에 따라 응답이 달라지는 현상을 최소화할 수 있다. 나아가서 유전체 테두리를 활용함으로써 전극과 4.572 mm의 간격을 두고 존재하는 접지면 사이의 공간을 완전 격리시켜 유동환경에서도 안정적인 플라즈마 방전이 가능하다는 것을 확인하였다. 제안된 플라즈마 발생기를 제작하여 플라즈마 최적 방전 및 RCS 측정 실험을 통해 X-band 에서 최대 2.9 dB의 RCS 감소 효과를 얻을 수 있음을 실험적으로 검증하였다.

Abstract

In this study, an frequency selective surface (FSS) electrode of a dielectric barrier discharge (DBD) plasma generator, with a two-dimensional planar target, for radar cross section (RCS) reduction is proposed and measured. The electrode of the proposed plasma generator is based on a cross FSS array conductor. Therefore, it is possible to minimize the amount of RCS change according to the efficient plasma discharge and polarization of the signal from the radar. In addition, a frame of FR-4 dielectric material is placed between the 4.572 mm gap of the ground surface and the electrode to reduce RCS owing to stable plasma discharge in a fluid environment in which the aircraft operates. The proposed plasma generator is fabricated to determine the optimal plasma discharge and RCS measurement. The measurement results showed a 2.9 dB RCS reduction in the X-band.

Key words: Dielectric-Barrier-Discharge, FSS, Plasma, Radar Cross Section, X-Band

---

「본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 항공 피탐지 감소기술 특화연구실 사업의 일환으로 수행되었습니다.」
연세대학교 전기전자공학과(Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University)
*충남대학교 물리학과(Deparment of Physics, Chungnam Natinal University)
**국방과학연구소(Agency for Defence Development)
· Manuscript received October 8, 2021 ; Revised October 18, 2021 ; Accepted November 2, 2021. (ID No. 20211008-088)
· Corresponding Author: Yong-Shik Lee (e-mail: yongshik.lee@yonsei.ac.kr)

 ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Ⅰ. 서 론

현대에 레이다 기술이 발전함에 따라 항공기의 생존성을 증가시킬 수 있는 저피탐 기술 또한 발전하고 있다. 다양한 저피탐 기술 중 RCS(radar cross section)를 감소시키는 전자기적 스텔스 기술은 최근 많이 연구되고 있다. RCS를 감소시키기 위한 방법으로 항공기의 구조를 변형하여 레이다로 부터 항공기에 입사된 전파가 난반사하여 레이다로 반사되는 신호를 줄이는 방법이 있다. 그와 다른 방법으로 RAM 혹은 RAS 같은 손실체를 이용하여 항공기에 입사하는 전자기파를 흡수하여 RCS를 감소시키는 방법이 있다[1],[2]. 하지만 이러한 방법들은 항공기의 본체 및 구조를 변형시켜 항공기의 동역학에 악영향을 주며, 항공기 운용시 손실체에 짧은 내구성으로 인해 지속적인 유지 보수에 많은 비용이 발생한다.

최근에 주목받는 스텔스 기술은 플라즈마를 이용하여 RCS를 감소시키는 방법이다. 플라즈마는 드루드 모델에 의해 플라즈마 주파수와 충돌주파수에 의해 플라즈마의 유전율이 모델링된다. 이때 플라즈마의 유전율 실수부는 1 이하이며, 허수부는 비교적 큰 값을 가져 다른 물질에 비하여 손실이 크다. 그러므로 플라즈마는 피탐지 기술에 사용하기 적합하여 많은 연구가 되고 있다[3]~[7].

항공기의 S자형 inlet에서 유도 결합 플라즈마 발생기를 적용하여 스텔스 효과를 확인한 연구가 있으며, 플라즈마 발생기에 인가하는 방전전력에 따른 RCS 감소를 측정을 통해 분석하였다[3]. 방전전력이 증가함에 따라 RCS 감소 효과가 증가하며, 500 W일 때 6 GHz에서 최대 25 dB가 감소한다. 하지만 유도 결합 플라즈마 발생기는 플라즈마 발생시 고온으로 인하여 안정적인 운용을 위해 별도의 냉각장치가 필요하다. 또한 플라즈마 발생면적 증가에 한계가 있어 그에 따라 부피와 무게가 늘어나 항공기에 적용하기 부적합하다.

유전체 장벽 방전 발생기는 두께가 얇고 별도의 냉각장치가 필요 없으며,, 플라즈마를 대면적에 발생시킬 수 있어 항공기 같은 대면적에 적용하기 용이하다. 평행 축전 평판 형태 유전체 장벽 방전 발생기를 설계하여 플라즈마의 구동주파수의 변화에 따른 플라즈마의 RCS 감소 효과를 분석한 연구가 있으며, 실험을 통하여 플라즈마 유무에 따른 RCS 감소는 최대 3.1 dB임을 실험을 통해 확인하였다[5].

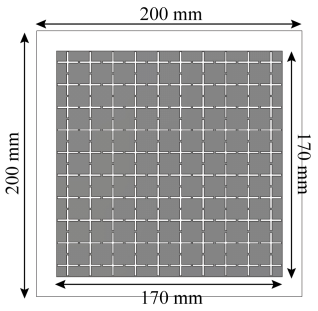
하지만 이러한 연구들은 플라즈마 발생기를 항공기에 적용할 경우, 유동 환경으로 인하여 안정적인 플라즈마 발생이 불가능하다. 따라서, 별도의 진공챔버가 필요 없이 작동 가능한 유동환경용 플라즈마 발생기에 대한 연구가 필요하다.

본 연구는 유동환경에 적합한 주파수 선택 표면(frequency selective surface: FSS) 전극 유전체 장벽 구조 플라즈마 발생기를 제안하였다. 10 GHz의 통과대역을 가지는 십자가 FSS 기반으로 전극을 설계하여 X-band의 신호와 플라즈마와의 접촉량을 늘렸다. 또한, 완전 대칭형 전극으로 편파에 따른 일정한 RCS 유지가 가능하다. 추가적으로 항공기가 운용 시 환경인 유동환경에서도 적용하기 위하여 플라즈마 발생공간 사이에 유전체 벽을 위치시켜 외부로부터 간섭을 억제하였다. 설계한 발생기는 제작 및 방전실험을 통해 유동환경용 플라즈마 발생기로 동작 가능성을 확인하였으며, RCS 측정을 통해 RCS 감소 효과를 증명하였다.

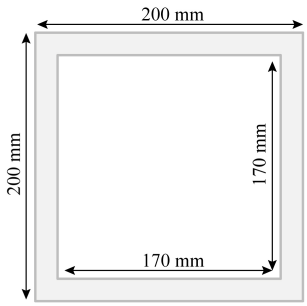
Ⅱ. FSS 전극 구조 유전체 장벽 방전 플라즈마 발생기

유전체 장벽 방전 플라즈마 발생기의 구조는 두 개의 전극 사이에 얇은 유전체가 포함된 형태이다. 얇은 유전체는 전기장이 가해질 경우 전하가 유전체에 쌓이며, 극이 바뀌는 순간 강한 힘을 가져 효율적으로 플라즈마 방전이 가능하다. 이러한 유전체 장벽 방전 플라즈마 발생기의 전극은 장벽 역할을 하는 얇은 유전체와 넓은 영역의 효율적인 방전을 위해 연결된 도체 형태여야 한다. 또한, 레이다의 신호와 플라즈마의 접촉 면적을 늘려야 하기에 특정 주파수가 통과 가능한 단일 레이어의 십자가 FSS가 RCS 감소를 위한 플라즈마 발생기 전극으로서 최적이다.

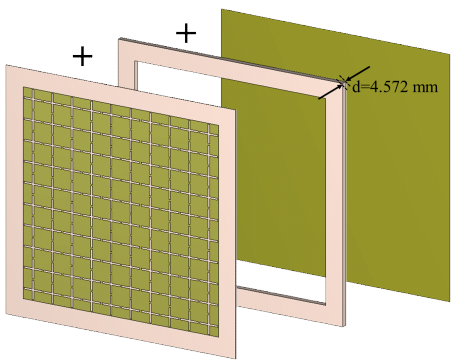
본 논문에서 제안한 플라즈마 발생기의 십자가 FSS 전극 구조를 그림 1(a)에 나타내었다. 레이다 신호 대역은 X-band를 가정하여 10 GHz 통과대역의 중심주파수가 되도록 FSS를 설계하였다[8]. 전극은 두께가 0.254 mm이고,



(a) FSS 전극
(a) FSS electrode



(b) 유전체 테두리
(b) Dielectric edge



(c) 3차원 레이어 구조
(c) 3d layer structure

그림 1. 제안한 유전체 장벽 방전 구조 플라즈마 발생기 구성 요소
Fig. 1. Proposed DBD plasma generator components.

유전율이 3.66인 Rogers 사의 RO4350B 기판에 구리를 프린팅하여 설계하였다. 설계한 전극과 접지 사이에 d= 4.572 mm 간격을 둠으로써 유전체 장벽 방전 방식으로 발생한 플라즈마를 비교적 넓은 영역에 분포시켜 레이다 신호가 통과하는 플라즈마 경로를 최대화함으로써 RCS 감소효과를 극대화 하였다. 특히 구리 전극이 존재하는 영역 상하좌우로 전극이 존재하지 않는 공간을 확보함으로써 발생기에 고전압이 인가되었을 경우, 전계효과에 의해 유전체를 거치지 않은 전계가 직접적으로 접지와 연결되어 아크 플라즈마가 발생하는 것을 방지한다. 또한 설계한 전극을 완벽한 대칭구조로 설계함으로써 레이다의 편파에 상관없이 일정한 RCS 감소가 가능하도록 하였다.

그림 1(b)는 유전체 테두리를 나타낸 것으로 FSS 전극층과 접지면으로 활용하는 도체 타겟 사이에 위치시켜 둘 사이에 일정 간격이 유지되도록 해준다. 여기서 유전체는 두께가 1.524 mm인 FR-4 기판 세 장을 적층시켜 구성함으로써 총 두께에 해당되는 4.572 mm의 간격이 전극층과 접지면 층 사이에 유지되도록 해준다. 특히 이 유전체 테두리를 부착시킴으로써 플라즈마 발생 영역을 격리시킴으로써 유동환경에서도 플라즈마 발생이 가능하다는 큰 장점이 있다. 제안한 발생기는 그림 1(c)와 같이 전극, 유전체, 타겟을 접착하여 제작한다.

그림 2는 제안한 FSS전극 구조 유전체 발생기의 최종 제작 모습이다. 기압이 0.3 atm인 상태에서 전극, 유전체 테두리, 접지면을 접착할 경우, 테두리 내부는 0.3 atm으로 유지되므로 유동환경 여부에 상관없이 플라즈마 발생이 가능하다. 접지면은 200×200 mm^2 구리평판으로 이루어져 있으며, RCS 측정시 접지면이 타겟으로 사용된다.

제작된 발생기를 이용한 플라즈마 발생 및 모노 스태틱 RCS 측정을 위한 실험 환경을 그림 3에 나타내었다. 본 연구에서는 일반적으로 항공기가 운항하는 고도인

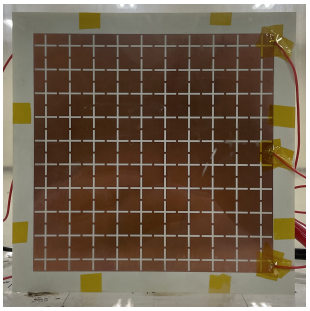


그림 2. 제작된 유전체 장벽 방전 구조 플라즈마 발생기
Fig. 2. Fabricated DBD plasma generator.

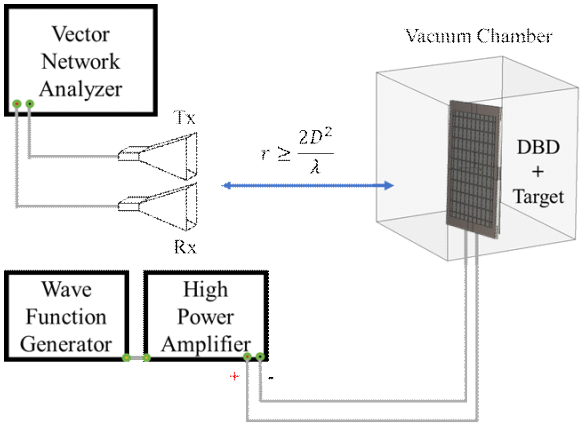


그림 3. 플라즈마 방전 및 모노스태틱 RCS 실험환경
Fig. 3. Experimental setup of plasma generation and mono-static RCS measurement.

30,000 피트에서의 운용하는 것을 가정하였다. 따라서 제작된 발생기를 부피가 400×300×400 mm^3인 아크릴 챔버 내에 위치시킨 뒤 진공 펌프를 이용하여 챔버 내 기압을 0.3 atm으로 조정한 상태에서 플라즈마를 발생시켜 실험을 진행한다. 본 연구에서는 Keysight 사의 3350B 함수발생기를 이용하여 신호를 발생하였으며, 발생한 신호는 Trek 사의 10/40A 고전압 증폭기를 이용하여 수 kV 전압으로 증폭하여 유전체 장벽 방전 발생기에 인가한다.

실험은 Anritsu 사의 MS4640B 벡터 네트워크 분석기와 두 개의 X-band에서 15~18 dBi의 이득을 가지는 혼 안테나를 연결하여 타겟으로부터 반사된 신호를 측정하는 방식으로 진행되는데, 이때 안테나와 타겟 간 거리는 원거리장 조건을 만족하는 5 m 내외의 거리를 유지한다. 측정된 신호는 타임 게이팅을 통하여 타겟의 반사신호만 선별하며, 후 처리 과정을 통해 RCS를 계산한다. 플라즈마 발생 전후 RCS의 차이를 비교함으로써 플라즈마에 의한 RCS 감소 정도를 얻을 수 있다.

플라즈마는 전극과 접지면 사이에 항복 전압 이상의 전압이 인가될 경우 발생한다. 식 (1)은 파셴 법칙으로 기체 종류와 기압 및 전극 등의 조건에 따라 플라즈마 항복 전압이 정해지며, 식 (1)에 나타나 있다[5],[7].

$$V_b = \frac{B \times pd}{C + \ln(pd)} \quad (1)$$

V_b는 항복 전압이며, p는 플라즈마를 발생시키는 기압, d는 전극 간의 간격을 의미한다. B, C는 상수로서 플라즈마가 방전되는 환경에 따라 정해진다. 본 연구에서는 0.3 기압에서 다른 기체없이 방전을 하였으며, 이때 B=365 V·1·Torr-1, C=1.18 그리고 p=0.3이다. 제안한 발생기는 전극간 간격은 4.572 mm로 식 (1)에 대입하면 대략 피크 투 피크 8 kV 전압에서 플라즈마가 발생한다. 따라서 이 이상의 전압을 인가할 경우, 플라즈마가 안정적으로 발생하게 된다.

Ⅲ. 실험 결과 및 분석

DBD 발생기로부터 발생된 플라즈마 특성은 주변 기체와 압력 뿐만 아니라, 바이어스 신호의 주파수와 전압에 따라 크게 달라는데[6], 본 연구에서는 바이어스 신호를 변화시켜가며 육안상 최적의 플라즈마가 발생하는 조건을 찾아서 실험을 진행하였다.

본 연구에서는 다양한 FSS 기반의 DBD 발생기를 설계, 제작하였고, 방전실험을 통해 최적화 하였다. 그중 하나는 예루살렘 십자가 패턴기반 전극이다. 하지만 플라즈마 발생기에 전압 인가시 전극의 각진 부분에 강한 전기장이 가해져 아크방전이 될 가능성이 증가하여 발생기의 수명이 감소한다. 그러므로 상대적으로 각진 모서리가 적은 십자가 패턴을 적용하여 아크방전 가능성을 낮추었다. 그림 4는 십자가 기반의 FSS를 전극으로 활용한 발생기에 최적의 플라즈마 발생 형태를 보여준다. 플라즈마의 전자밀도는 인가전압의 제곱근에 비례한다. 인가전압이 증가할수록 전자밀도 증가와 함께 손실이 증가한다. 실험결과, 피크 투 피크 8 kV에서 안정적인 플라즈마가 발생

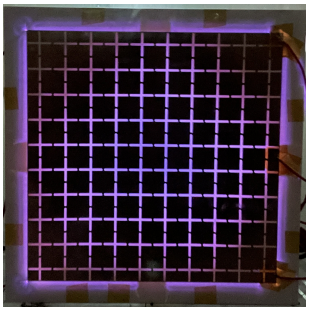


그림 4. 제작된 발생기의 플라즈마 발생 형태
Fig. 4. Generated plasma of fabricated plasma generator.

하지만, 보다 높은 전압을 인가할 경우 아크방전이 발생하여 플라즈마를 지속적으로 유지할 수 없음을 확인하여 제작된 발생기의 최적 인가조건을 찾아내었다.

플라즈마의 유전율 특성을 아래 드루드 모델로 가정하여 나타낼 수 있다.

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + j\omega\nu} \tag{2}$$

여기서 ε∞는 주파수가 무한일 때 유전율이며, ω는 각 주파수, ω_p는 플라즈마 주파수 그리고 ν는 충돌주파수 이다. 예를 들어 플라즈마가 발생하지 않는 상태에서는 진공이므로 ω_p=0이고, 유전율은 1이므로 식(2)는 ε∞=1로 단순화된다. 드루드모델은 플라즈마와 전자기파의 상호작용에 대한 이전 연구들로부터 검증되어 플라즈마를 모델링하기 적합하다[6],[9~12]. 플라즈마의 방전기압에 따라 충돌주파수가 정해지며, 0.3기압에서 충돌주파수는 684 GHz이다[13]. 인가전압에 따라 전자밀도와 플라즈마 주파수가 변화할 것이며, 그에 따른 제작된 발생기의 예상 RCS 감소 효과는 그림 5에 나타나 있다.

그림 6은 200×200 mm^2 구리 평판의 RCS를 FSS 기반 DBD 발생기 전극 부착 전과 후, 그리고 발생기 부착 후 플라즈마를 발생시켰을 때 측정한 결과를 나타내었다. 그래프의 얇은 선은 시뮬레이션 결과이며, 굵은선은 측정결과이다. 구리평판 RCS가 시뮬/측정과 잘 일치하여 캘리브레이션이 제대로 되었음으로 확인 가능하다. 구리평판에제안한 DBD 전극과 유전체를 부착한 발생기의 경우, 추가적인 구조로 인하여 안테나로부터 신호가 산란한다. 그러므로 DBD 발생기의 RCS는 구리평판에 비하여 감소한다. 구동주파수 1 kHz, 인가 전압은 피크 투 피크로 8 kV로 플라즈마가 발생한 경우 X-band에서 전체적인 RCS가 감소한다. DBD 발생기의 RCS는 실내 환경에서 time gating을 통하여 측정했음에도 불구하고, 시뮬레이션 결과와 유사한 결과를 보인다. 이때 시뮬레이션 결과는 684 GHz 충돌주파수에 플라즈마 주파수 220 Grad/s로 플라즈마를 모델링하였을 경우이며, CST 시뮬레이션 결과와 측정결과는 유사하여 플라즈마 주파수는 220 Grad/s를 가지는 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 추출된 플라즈마의 전자기 파라미터는 표 1에 정리되어있다. 실험 결과와 드루드 모델을 이용해서 모델링된 결과에 약간의 차이가 발생하는 이유는 실내 환경에서 타임 게이팅을 이용하여 결과를 얻는 과정에서 발생하는 실험 오차와 시뮬레이션에 정확히 반영되지 않은 아크릴 챔버와 DUT 사이의 다중 반사 현상 등이 원인인 것으로 예상된다.

그림 7은 플라즈마 발생에 따른 200×200 mm^2 구리 평판의 RCS 변화를 나타내고 있다. 레이다 신호 대역으로 가

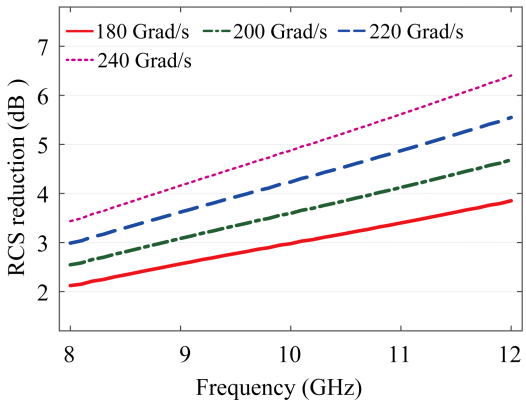


그림 5. 플라즈마 주파수에 따른 RCS 감소 시뮬레이션 결과

Fig. 5. Simulation results of RCS reduction according to plasma frequency.

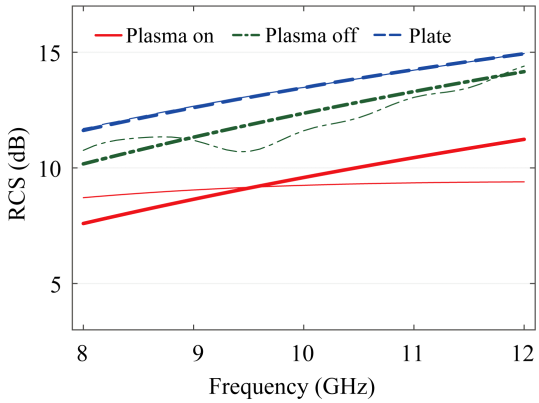


그림 6. 플라즈마 유무에 따른 플라즈마 발생기와 20×20 cm^2 구리평판의 RCS (굵은선: 측정결과, 얇은선: 시뮬레이션).

Fig. 6. RCS measurement results of with/without plasma and 200×200 mm^2 copper plate (thick line: measuerd, thin line: simulation).

표 1. 측정된 플라즈마의 전자기 파라미터
Table 1. Electromagnetic parameters of mesured plasma.

		8 GHz	10 GHz	12 GHz
Plasma parameters	ω_p	220 Grad/s		
	ν_p	684 GHz		
Epsilon and loss tangent	ε	0.9	0.9	0.9
	tan δ	1.57	1.24	1.03

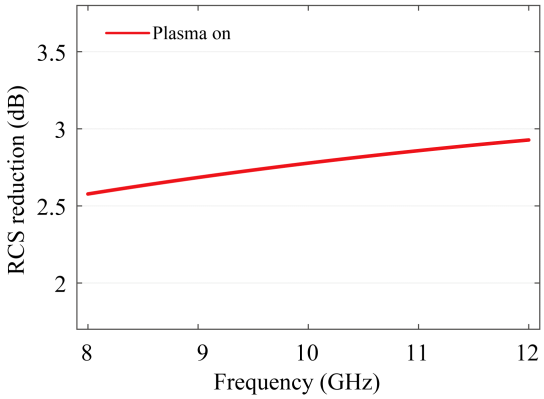
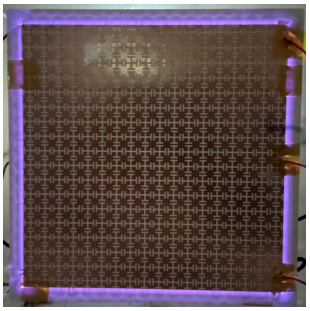


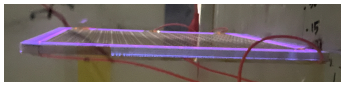
그림 7. 제작된 플라즈마 발생기의 플라즈마 유무에 따른 RCS 감소
Fig. 7. RCS reduction of fabricated generator and plasma.

정한 X-band 전반에 걸쳐서 RCS가 감소하고 있으며, 최대 2.9 dB까지 감소하는 것을 실험적으로 검증할 수 있었다.

앞서 언급한대로 본 연구에서는 다양한 FSS 기반의 DBD 발생기를 설계, 제작하였으며, 그림 8에는 그 중 하나인 예루살렘 십자가 기반의 FSS를 전극으로 활용한 발생기를 나타내었다. 이 발생기의 경우, 1 atm 조건에서 전극 층과 접지면 층, 그리고 유전체 테두리를 접착하여 제작한 뒤 이를 0.3 atm로 기압을 낮춘 아크릴 챔버 내에서 전압을 인가하여 플라즈마 발생을 시도한 결과를 보여준다. 그림 8에서 보듯이 플라즈마가 발생 예상 영역 외부에만 발생하고 있음을 알 수 있다. 이는 발생기를 대기압에서 제작하는 과정에서 전극과 접지면 사이의 영역이 유전체 테두리로 인해서 밀폐되어 내부 기압이 1 atm으로 유지되고 있으나, 0.3 atm 기압의 챔버내에서 발생 가능한, 상대적으로 낮은 바이어스 전압을 인가시켰기 때문이다.



(a) 정면
(a) Front view



(b) 측면
(b) Side view

그림 8. 유전체 테두리가 적용된 플라즈마 발생기의 플라즈마 발생 형태
Fig. 8. Generated plasma of plasma generator with dielectric edge.

이를 토대로 유전체 테두리를 활용할 경우, 플라즈마 발생 영역을 밀폐할 경우 우수한 격리 특성을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 즉, 전극 층과 접지면, 유전체 테두리를 0.3 atm의 저압에서 패키징할 경우, 유동환경용 플라즈마 발생기로 작동시킬 수 있는 가능성을 확인하였다.

다만 그림 6와 그림 7의 경우 발생기는 1 atm에서 제작하였으나, 유전체 테두리에 틈을 둠으로써 테두리에 의해서 발생 영역이 완전 격리되지는 않도록 하여 기압을 낮추더라도 내부에 플라즈마 방전이 가능하였다.

Ⅳ. 결 론

본 연구는 유동환경에 적용가능한 FSS 전극 유전체 장벽 방전 방식 플라즈마 발생기를 제안하였다. 제안한 플라즈마 발생기는 10 GHz 통과대역 FSS를 이용하여 전극을 설계하여 X-band 레이다의 신호가 전극을 통과하여 손실체인 플라즈마와 접촉하여 발생기의 RCS가 감소한다. 발생기 내부에는 유전체 테두리를 적용하여 플라즈마가 발생하는 영역과 외부를 격리를 통해 유동환경에서 플라즈마 발생이 가능하며, 실험을 통해 동작 가능성을

확인하였다. 플라즈마 발생 실험결과로 최적의 인가전압 조건을 찾았으며, 대면적에 균일한 플라즈마가 발생한다. 모노스태틱 RCS 측정결과, 최적 플라즈마 발생시 X-band 내에서 RCS가 최대 2.9 dB까지 감소한다. 플라즈마 주파수가 220 Grad/s로 드루드모델을 통한 시뮬레이션 결과와 측정 결과는 상당히 일치하여 제안한 플라즈마 발생기가 RCS 감소에 효과적임을 증명하였다. 향후 과제로 단순 2차원 면적이 아닌 3차원 구조에 적용할 수 있는 플라즈마 발생기의 최적화가 진행되어야 할 것이다.

References

[1] Y. C. Hou, W. J. Liao, C. C. Tsai, and S. H. Chen, "Planar multilayer structure for broadband broad-angle RCS reduction," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 5, pp. 1859-1867, May 2016.

[2] Y. Zhao, J. Liu, Z. Song, and X. Xi, "Microstructure design method for multineedle whisker radar absorbing material," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 1163-1166, Nov. 2016.

[3] D. L. Jaggard, "Investigation on application of closed cavity inductively coupled plasma in inlet stealth," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Sanya, vol. 751, no. 1, p. 012069, Dec. 2020.

[4] J. H. Lee, J. Kim, Y. Kim, S. Kim, D. S. Kim, and Y. Lee, et al., "Attenuation effects of plasma on Ka-band wave propagation in various gas and pressure environments," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 18, no. 1, pp. 63-69, Jan. 2018.

[5] J. Ha, W. Shin, J. H. Lee, Y. Kim, D. Kim, and Y. Lee, et al., "Effect of plasma area on frequency of monostatic radar cross section reduction," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 17, no. 3, pp. 153-158, Jul. 2017.

[6] S. Song, C. Cho, T. Oh, S. Kim, W. Ahn, and J. G. Yook, et al., "Effect of driving frequency on reduction of radar cross section due to dielectric-barrier-discharge plasma in ku-band," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 17, no. 3, pp. 153-158, Jul. 2017.

[7] T. Oh, C. Cho, W. Ahn, S. Kim, J. G. Yook, and J. Lee, et al., "Effects on RCS reduction by dielectric barrier discharge plasma generators based on face-to-face structures in X-bands," *Korea Institude of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 31, no. 12, pp. 1084-1091, Dec. 2020.

[8] T. R. SureshKumar, C. Venkatesh, P. Salil, and B. Subbarao, "Transmission line approach to calculate the shielding effectiveness of an enclosure with double-layer frequency selective surface," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 57, no. 6, pp. 1736-1739, Jul. 2015.

[9] D. W. Kim, S. J. You, J. H. Kim, H. Y. Chang, and W. Y. Oh, "Sheath width effect on the determination of plasma frequency in the cutoff probe," *Applied Physics Letters*, vol. 100, no. 24, p. 244107, Jun. 2012.

[10] H. A. Malhat, S. H. Zainud-Deen, and N. A. Shabayek, "RCS reduction from conformal surfaces using plasma-based AMC arrays," *Plasmonics*, vol. 15, no. 4, pp. 1025-1033, Jan. 2020.

[11] S. H. Zainud-Deen, H. A. E. A. Malhat, and N. A. Shabayek, "Reconfigurable RCS reduction from curved structures using plasma based FSS," *Plasmonics*, vol. 15, no. 2, pp. 341-350, 2020.

[12] Y. Wang, C. Yuan, Z. Zhou, L. Li, and Y. Du, "Propagation of Gaussian laser beam in cold plasma of drude model," *Physics of Plasmas*, vol. 18, no. 11, Nov. 2011.

[13] K. H. You et al., "Measurement and analysis of electron- neutral collision frequency in the calibrated cutoff probe", *Phys. Plasmas*, vol. 23, no. 3, Mar. 2016.

오 태 주 [연세대학교/석사과정]

https://orcid.org/0000-0003-3847-5557

2020년 2월: 광운대학교 전자융합공학과 (공학사)
2020년 3월～현재: 연세대학교 전기전자공학과 석사과정
[주 관심분야] RCS 해석, RF System

육 종 관 [연세대학교/교수]

https://orcid.org/0000-0001-6711-289X

1999년 3월～2000년 2월: 광주과학기술원 조교수(공학박사)
2000년 3월～현재: 연세대학교 전기전자공학과 교수
2012년～2013년: IEEE Distinguished Lecturer (EMC Society)
[주 관심분야] 수치해석, 마이크로파 구조 해석 및 설계, EMI/EMC, HEMP, RF, 바이오/가스 센서 등

조 창 석 [연세대학교/석・박사통합과정]

https://orcid.org/0000-0002-9616-8072

2020년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
2020년 3월～현재: 연세대학교 전기전자공학과 석・박사 통합과정
[주 관심분야] 플라즈마, RCS 해석

이 장 재 [충남대학교/석・박사 통합과정]

https://orcid.org/0000-0002-0298-5638

2015년 2월: 충남대학교 물리학과 (이학사)
2015 년 2월～현재: 충남대학교 물리학과 석・박사통합과정
[주 관심분야] 플라즈마 시뮬레이션, 플라즈마 소스 개발

안 욱 현 [연세대학교/석・박사 통합과정]

https://orcid.org/0000-0001-8728-9713

2018년 2월: 한국항공대학교 전자 및 항공전자공학과 (공학사)
2018년 2월～현재: 연세대학교 전기전자공학과 석・박사 통합과정
[주 관심분야] 수치해석, 플라즈마, FDTD, RCS 해석

유 신 재 [충남대학교/부교수]

https://orcid.org/0000-0002-8306-7643

2000년 2월: 충남대학교 물리학과 (이학사)
2005년 8월: 한국과학기술원 물리학과 (이학박사)
2006년 8월: 한국과학기술원 물리학과 Postdoctoral Fellow
2007년 6월: 포항공과대학교 전기공학부 Postdoctoral Fellow
2014년 8월: KRISS 선임연구원
2018 년 8월: 충남대학교 조교수
2018 년 9월～현재: 충남대학교 부교수
[주 관심분야] 플라즈마 소스 개발, 플라즈마 진단 및 시뮬레이션, 반도체 공정, 플라즈마 공정 이상 감지

임 진 우 [국방과학연구소/선임연구원]

https://orcid.org/0000-0002-0356-8502

2004년 2월: 홍익대학교 기계공학과(공학사)
2012년 2월: 서울대학교 항공공학과(공학박사)
2012년 4월～현재: 국방과학연구소 선임연구원
[주 관심분야] 저피탐 비행체, 공기역학, 스텔스(RCS, IR)

유 흥 철 [국방과학연구소/수석연구원]

https://orcid.org/0000-0003-3327-9944

1988년 2월: 한국항공대학교 항공기계공학과(공학사)
1990년 2월: 한국항공대학교 항공공학과(공학석사)
1990년 3월～현재: 국방과학연구소 수석연구원
[주 관심분야] 저피탐 비행체, 공기역학, 스텔스

하 정 제 [국방과학연구소/선임연구원]

https://orcid.org/0000-0001-8831-0633

2009년 2월: 연세대학교 전기전자공학부(공학사)
2011년 2월: 연세대학교 전기전자공학과(공학석사)
2017년 2월: 연세대학교 전기전자공학과(공학박사)
2017년 8월～현재: 국방과학연구소 선임연구원
[주 관심분야] 저피탐 비행체, 스텔스(RCS)

이 용 식 [연세대학교/교수]

https://orcid.org/0000-0003-2623-3569

1998년 2월: 연세대학교 전파공학과 (공학사)
2004년 4월: 미국 University of Michigan (공학박사)
2004년 10월: Purdue University, Post- doctorial Research Associate
2005년 7월: EMAG Technologies, Inc., Senior Research Engineering
2005년 9월～현재: 연세대학교 전기전자공학과 정교수
[주 관심분야] 초고주파 회로, Antenna, WPT

배 지 훈 [국방과학연구소/선임연구원]

https://orcid.org/0000-0003-1093-2656

2010년 1월: Purdue University Aeronautical and Astronautical Engineering(공학사)
2012년 5월: Purdue University Aeronautical and Astronautical Engineering(공학석사)
2012년 10월～현재: 국방과학연구소 선임연구원
[주 관심분야] 저피탐 비행체, 스텔스(RCS)