THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2023 June.; 34(6), 435～443.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2023.34.6.435
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

다기능 장거리 차량 레이다의 레이돔 최적설계

Optimum Radome Design of Automotive Radar for Multi-Function and Long Range

강 윤 수

Yunsu Kang

요 약

차량용 레이다는 전자파를 복사한 뒤, 도로 위 표적에서 반사되어 돌아오는 신호를 통해 표적의 거리 속도 각도 등을 알아낼 수 있다. 이때, 레이다에서 안테나는 전자파를 공기 중으로 직접 복사하는데, 안테나를 외부환경요소로부터 보호하는 레이돔은 레이다 구성에 필수적이다. 레이돔 장착 시, 레이돔에 의한 안테나 빔 왜곡분석은 레이다를 개발하는 과정에서 매우 중요하다. 하지만 대부분 업계에서는 단순하게 법선 방향에서 다중 반사되는 전자파만을 고려하여, 레이돔 설계를 진행한다. 본 논문에서는 다기능 장거리 레이돔 두께 및 간격을 설계 변수로 정한 뒤, 기존 설계파라미터 중심으로 두께 및 간격을 변경한 레이다 플랫폼 시뮬레이션을 진행했다. 이를 통해 개발되는 다기능 장거리 레이다의 레이돔 최적설계값을 알아낼 수 있었으며, 빔 왜곡특성 관련된 데이터베이스를 구축하였다. 이러한 빔 왜곡 해석결과들을 이용하여, 기존에 제작된 레이다의 레이돔 설계 변수 역설계 및 빠른 수정품 개발방법을 제안했다.

Abstract

Automotive radar can detect the distance, speed, and angle of a target from electromagnetic waves that are reflected back from a target on the road. During this time, the antenna radiates electromagnetic waves directly into the air. A radome, which physically protects the antenna from external environmental circumstances, is an essential part of the radar. Beam distortion analysis from the radome is very important during the radar development process when it is mounted on the radome. However, tier 1 suppliers mainly proceed with radome design by considering only the impedance of electromagnetic waves that are multiple-reflected in the normal direction. In this study, after modeling the thickness and spacing of the radome as design parameters, a radar platform simulation using a full-wave EM was performed with the thickness and spacing changed around the conventional design parameters. Therefore, the optimal design value of the radome for the multifunctional long-range radar under development can be obtained, and a database related to beam distortion characteristics has been constructed. Using these beam distortion analysis results, we proposed a method for the inverse design of the radome design parameters of the manufactured radar and an improved radar development method with a fast paces.

Key words: Automotive Radar, Radome Design, Optimization Design, Multiple Relfections within Dielectric Material

AD Sensor HW 에이치엘클레무브(HL Klemove)

· Manuscript received November 30, 2022 ; Revised January 19, 2023 ; Accepted June 19, 2023. (ID No. 20221130-018S)

· Corresponding Author: Yunsu Kang (e-mail: yunsu.kang@hlcompany.com)

ⓒ 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. 연구배경

최근 운전자 보조 시스템 기능 구현을 위해 차량용 레이다 센서가 시장에서 많이 활용되고 있다. 레이다 개발 시에는 안테나를 외부 환경으로부터 물리적으로 보호하기 위해, 레이돔 설계가 필수적이다. 일반적인 레이다 레이돔의 형태는 안테나 주변에 반구 혹은 평판 형태로 사용되지만, 차량용 레이다 레이돔은 차량 디자인에 방해되지 않으면서 구조적으로 안정적이고, 대량생산에 유리한 평판 형태를 주로 사용한다.

레이돔은 안테나를 외부 환경으로부터 보호하는 역할을 하지만, 동시에 안테나 성능에 영향을 미친다. 레이돔을 통과한 전자기파는 임피던스가 다른 유전체와 상호작용하여 반사파와 투과파가 발생한다. 이러한 반사파와 투과파는 안테나 패턴의 왜곡을 일으키며, 보어사이트 이득 감소로 인해 탐지거리 감소, 빔폭 감소로 인한 레이다 동작 FOV(field of view) 감소, 내부 안테나 간 isolation 악화 등으로 레이다 타겟 오감지율이 증가하고 레이다 성능이 저하된다.

레이돔에 의한 빔 왜곡 현상이 레이다 성능에 큰 영향을 주기 때문에, 레이돔의 전자파해석 및 레이돔 자체에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 참고문헌 [1]은 가역정리 이론에 기반하여 레이돔에 의한 보어 사이트 오차와 투과 손실량을 검증하였고, 참고문헌 [2]는 광학 기반의 ray tracing 기법과 PO 기법을 이용하여 안테나 소스원과 레이돔 사이의 상호작용을 해석한 사례를 찾아볼 수 있다. 이러한 전기적으로 큰 구조체를 점근적으로 해석한 사례와 달리, 레이돔이 포함된 차량용 레이다에서는 정확도가 높은 FEM(finite element method) 기반의 풀 웨이브 전자파해석이 가능하다. 따라서, 레이돔 초기 설계 값 주변 설계파라미터들을 모두 분석하여 차량용 레이다 개발 및 양산에 적합한 레이돔 최적설계가 가능하다.

차량용 레이다의 평판 레이돔 설계 시, 대부분 안테나의 법선 방향으로 복사하는 전자파의 임피던스를 기준으로 레이돔의 두께 및 간격을 설계한다. 하지만 이러한 방식은 레이다 동작하는 빔패턴에 최적화된 설계가 아니다. 본 논문에서는 평판 레이돔의 두께 및 안테나와의 간격을 두 가지 설계파라미터로 단순하게 모델링 하였다. 추가적인 장치 없이 레이돔에 의한 빔 왜곡특성을 최소화하며, 레이다가 동작하는 빔 영역에 최적화된 레이돔 설계를 진행하였다.

Ⅱ. 평판레이돔 설계

일반적으로 다기능 장거리 차량 레이다는 MMIC(monolithic microwave integrated circuits)와 안테나가 PCB(printed circuit board) 위 같은 층에 제작된다. 넓은 방위각을 감지하기 위해, 팬 빔을 복사하는 송신하는 안테나가 설계된다. MMIC 칩에서 안테나로 신호가 전달되며, 안테나에서 복사되는 전자파는 공기, 레이돔(유전체) 그리고 공기 순으로 전달된다. 법선 방향으로 복사하는 전자파는 매질의 임피던스에 의한 등가모델로 단순화가 가능하다. 그림 1에서는 레이돔의 두께, 간격 및 유전상수를 이용하여, 임피던스에 기반한 등가모델로 변환한 그림이 나타나 있다[3],[4].

이때 레이돔에서 다중으로 반사되는 반사파들의 합과 투과 파들의 합은 그림 2에 간략한 그래프로 표기되어 있으며, 자세한 식은 식 (1) 및 식 (2)로 표현되었다. 그림 2는 레이돔 두께 변화에 따라 간소화된 반사파 및 투과파를 크기 변화를 이론적으로 나타낸다. 반사파의 특성이 최소, 투과 파의 특성이 최대가 되는 두께가 주기적으로 나타난다. 레이돔 유전체 두께가 유전체 내부 유효파장의

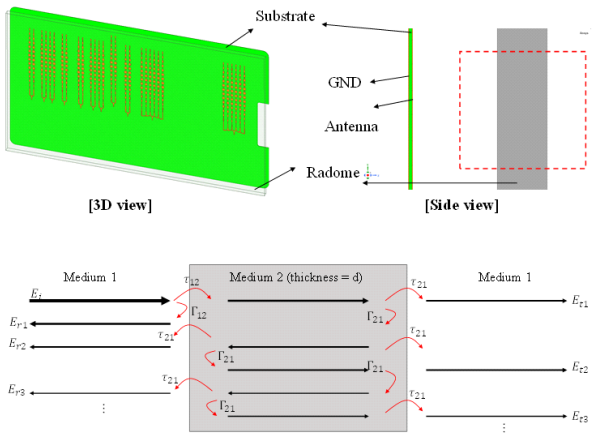


그림 1. 차량용 레이다와 레이돔 다중반사 등가모델
Fig. 1. Automotive radar and equivalent model with multiple reflections from radome.

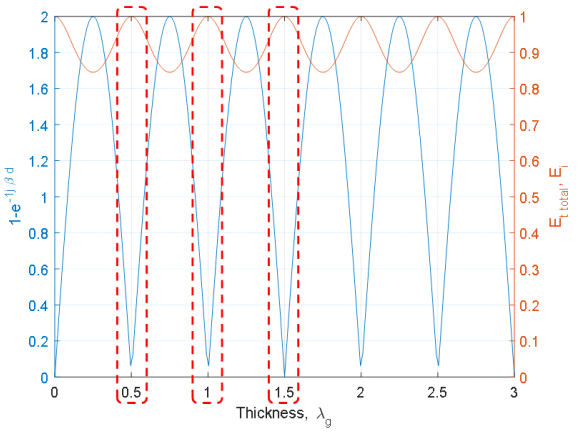


그림 2. 레이돔 두께 변화에 따라 수식적으로 구해진 반사파 및 투과파 합산 결과

Fig. 2. Analytic results of the summation of reflected and transmitted wave changing thickness of radome.

0.5의 배수일 때, 반사파의 합이 최소이며 투과파의 합이 최대 특성이 주기적으로 나타난다.

그림 1 및 그림 2에 나타난 등가모델을 이용하여 레이돔과 안테나 사이의 최적설계 간격도 같은 원리로 알아낼 수 있다. 레이돔과 안테나 사이의 간격은 공기로 채워져 있으며, 공기 중의 반 파장의 주기배로 손쉽게 구할 수 있다[3]. 반사파의 합과 투과파의 합은 식으로 식 (1) 및 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{t,total} = E_i\Gamma_{12} = \frac{1-e^{-2j\beta d}}{1-\Gamma_{12}^2 e^{-2j\beta d}} \tag{1}$$

$$E_{t,total} = E_i\frac{(1-\Gamma_{12}^2)e^{-2j\beta d}}{1-\Gamma_{12}^2 e^{-2j\beta d}} \tag{2}$$

식 (1) 및 식 (2)를 통해 레이돔 관내 반 파장의 주기배의 두께를 가지게 되면, 반사파는 최소, 투과파는 최댓값을 가지게 된다. 최적 간격 또한 위 식과 같은 방법으로 레이돔과 안테나간 최적 간격을 구하게 되면, 간격 또한 반 파장의 배수가 최적 간격으로 계산된다.

$$\frac{\lambda_0}{2}\times n = Optimal\ Distance \tag{3}$$

$$\frac{\lambda_g}{2}\times n = Optimal\ Thickness \tag{4}$$

λ_0 = wavelength of air, λ_g = wavelength of radome

식 (3) 및 식 (4)는 텍스트 인스투르먼트 및 인피니온 테크놀로지 등의 차량용 레이다 칩을 개발하는 회사들이 제안하는 평판 레이돔의 일반적인 설계 방식이다. 이러한 식들은 텍스트 인스투르먼트 및 인피니온 테크놀로지 등의 차량용 레이다 칩을 개발하는 회사들이 제안하는 평판 레이돔의 일반적인 설계 방식이다. 그러나 이 수치들은 실제 개발되는 차량 레이다에 따라 최적으로 설계된 값이 아니며, 바로 실제품 레이다에 적용하기에는 무리가 있다.

본 논문에서는 사용하고자 하는 레이돔 시편을 20 cm×20 cm 시편을 제작하였으며, 자유공간측정을 사용하여 복소유전율을 측정했다. 추정된 유전상수 DK(dielectric constant)는 3.3이며, DF(dissipation factor)는 0.0083 @ 76.5 GHz이다. 그림 3은 제작된 레이돔 시편의 복소 유전상수를 추정하는 실험 세팅을 나타낸다.

측정된 복소유전율을 상용 소프트웨어인 ANSYS HFSS의 Floquet ports 와 Unit-cell 구조를 이용한 시뮬레이션 기법을 적용했다. Floquet Port는 TE mode 모드로 인가되며, 76.5 GHz 주파수에서 해석했다. 시뮬레이션 모델에 사용된 PCB 기판은 Rogser 3003이며 0.127 mm 두께를 가진다. GND는 Copper로 모델링했다. 그림 4(a)은 레이돔 두께 변화에 따라, 레이돔 투과파가 크기가 최대가 되는 두께를 구할 수 있다. 그림 4(b)는 그림 4(a)에서 구해진 레

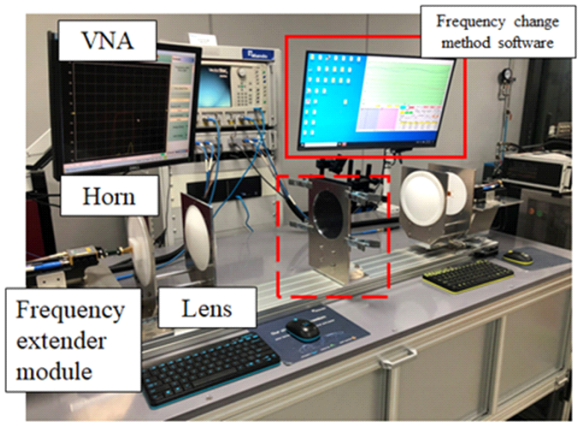
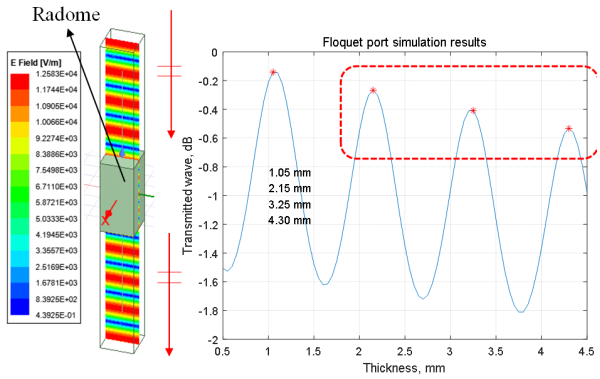
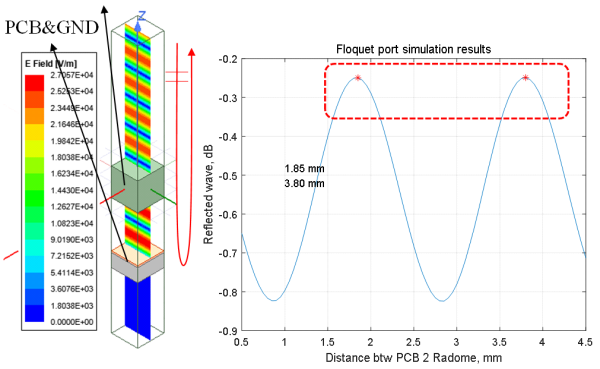


그림 3. 임의의 레이돔의 복소유전율 측정환경

Fig. 3. Measurement setup of measuring the complex permitivity.



(a) 레이돔 두께 변화에 의한 법선방향의 시뮬레이션 결과
(a) Simulation results due to radome thickness variation



(b) 레이돔 간격 변화에 의한 법선방향의 시뮬레이션 결과
(b) Simulation results due to radome distance variation

그림 4. 측정된 유전체 레이돔의 Floquet ports 시뮬레이션 결과
Fig. 4. Floquet port simulation and results.

이돔의 최적두께를 적용한 뒤, 레이돔과 안테나 간 간격 변화에 따라, 반사파 변화를 시뮬레이션했다. 레이돔 간격이 변화되는 시뮬레이션에서 외부에서 인가되는 평면파가 최댓값이 되는 레이돔 간격은 PCB 기판 위 제작되는 안테나에서 복사되는 전자파와 레이돔에 의한 내부 반사 신호의 합과 같은 시뮬레이션 결과를 가진다.

법선 방향의 임피던스를 통해 최적두께를 계산하는 식 (3) 및 식(4) 이용하여, 최적 두께는 1.07 mm의 배수, 최적 간격은 1.96 mm의 배수로 표현이 가능하다. Flqouet port 시뮬레이션을 통해 구해진 최적 두께는 1.05 mm, 2.15 mm, 3.25 mm 등으로 구해지며, 최적 간격은 1.85 mm, 3.80 mm로 구해질 수 있다. 수식으로 구해진 두께와 시뮬레이션 결과는 크게 차이가 없으나, 간격은 0.2 mm 정도가 발생된다. 이는 관내 파장의 대략 9.3 % 정도가 발생된다. 이는 0도 즉 법선 방향의 임피던스 특성만 고려된 수치이며, 일반적인 차량용 레이다가 동작하는 방위각 FOV는 고려되지 않은 설계 수치이다.

Ⅲ. 차량용 레이돔 최적설계

최근 장거리 차량 레이다는 높은 수평 각도 해상도를 가지며, 필요한 채널은 효율적으로 구성할 수 있는 MIMO (multi-input multi-output) 신호처리기법이 사용되며, 송신과 수신 안테나가 구분된 bistatic-radar로 설계된다. 이러한 레이다에서 사용되는 안테나 빔 패턴은 one-way 빔 패턴을 사용하는 것이 아니라, 송수신 안테나 특성이 모두 반영된 two-way 패턴을 사용하게 된다. 그림 5에 나타난 개발 중인 레이다는 다기능 장거리 레이다 프로토 설계품이며, 본 논문에서는 넓은 FOV를 감지해야 하는 short 송수신 패턴에 집중하여 레이돔 최적 설계를 진행했다.

3-1 장거리 차량용 레이다

그림 5는 개발 중인 다기능 장거리 차량 레이다의 한 예로, 본 논문에서는 Rx port는 8개로 구성되어 있으며, TX port는 3개로 2개의 long TX는 좁은 FOV에서 동작하며, 멀리 있는 타겟을 주로 감지한다. 나머지 short TX는 근접한 타겟을 주로 감지하며, 넓은 수평 FOV가 요구된다. 본 논문에서는 레이돔에 큰 영향을 받은 short TX-RX의

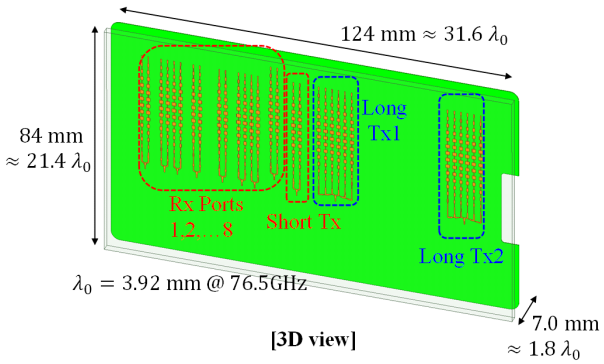


그림 5. 다기능 장거리 차량 레이다 모델링
Fig. 5. Example radar of multi-function and long range radar.

two-way 패턴에 집중하여, 최적 레이돔 설계를 진행했다.

3-2 레이돔 최적설계

현업에서는 대량생산 시 큰 이점이 있는 평판 레이돔을 레이다에 사용하고 있다. 레이돔에 의한 빔 왜곡을 최소화하며, 레이다 성능을 보장하는 레이돔의 두께와 레이돔 간격에 대한 설계치를 찾아내는 것이 중요하다. 레이돔이 최적으로 설계되지 않으면, 송수신 안테나 빔에 왜곡이 생겨 원하지 않는 부엽이 발생하고, 방위각 방향의 FOV가 줄어들며, 보어 사이트 이득이 감소하여 탐지거리가 줄어드는 현상이 나타난다.

본 논문에서는 레이돔의 두께 및 간격을 설계 변수로 정하고, 레이돔에 의한 열화 현상을 최소화하는 최적설계 수치를 도출하고자 한다. 레이돔의 두께는 1.5 mm에서 2.3 mm까지 0.1 mm 간격으로 변화시켰고, 레이돔과 안테나 간의 간격은 3.5 mm에서 4.5 mm까지 0.1 mm 간격으로 변화시켰다. 관련 설명은 그림 6에 나타나 있다. 설정된 레이돔 설계 변수에 따라 99개의 시뮬레이션 분석이 필요하다. 정확한 해석을 위해, 풀 웨이브 수치해석 툴인 ANSYS사의 HFSS를 이용했다. 하나의 설계 변수에 일반 워크스테이션에서 600 GB RAM과 96코어를 사용하면 약 10.1시간의 해석이 요구되어, 대략 빔 왜곡 데이터베이스 구성에 1,000시간이 필요하다. 본 연구소가 보유한 해석용 고성능 컴퓨터 자원은 8 TB에 400코어로 구성되어 있으며, MPI(message passing interface)를 이용한 시뮬레이션 병렬 풀 웨이브 해석프로그램 및 해석결과 도출 자동화 프로그램이 개발되어 있다. 모든 설계 변수에 대한 분석 시간은 1,000시간에서 130시간으로 줄어들어, 전자파 해석 및 데이터 분석에 1주일 이내의 기간이 소요된다. 이로써 87 % 정도 빠르게 해석할 수 있으며, 풀 웨이브 FEM 해석에 필요한 RAM 자원이 늘어날수록 더욱 빨라질 수 있다.

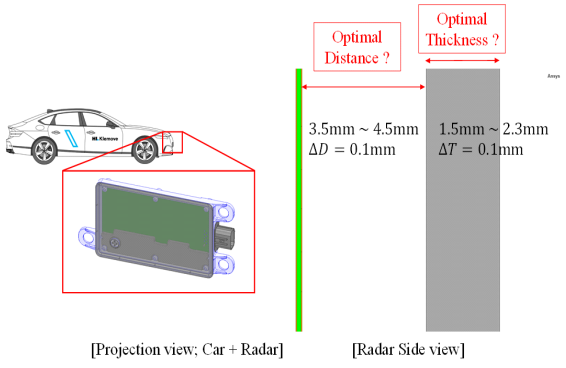


그림 6. 레이돔 최적설계를 위한 설계파라미터
Fig. 6. Design parameters for optimal radome design.

3-3 설계판단 조건 및 수치적 분석결과

레이돔 두께 및 간격 변화에 따른 빔 패턴의 왜곡 현상을 세 가지 설계판단 조건을 통해 영향성을 수치적으로 분석하였다. 설계된 레이다의 short TX와 RX의 8개 채널의 two-way 패턴들을 분석하였다. 세 가지 설계판단 조건은 레이돔 유무에 따라 다음과 같다. 1) 채널의 이득 감소(boresight beam error), 2) 채널의 −20 dB 빔폭 감소량(−20 dB beamwidth difference), 3) FOV(± 40도) 내에서 레이돔 유무에 따른 빔 왜곡 RMSE(root mean squre error) 값들이 수치적으로 분석되며, 식 (5)~식 (7)로 나타난다.

$$\Delta P_{error} = P_{w.o.radome} - P_{w.radome} \tag{5}$$

$$\Delta BW_{-20dB} = BW_{w.o.radome} - BW_{w.radome} \tag{6}$$

$$\mathrm{RMSE}_{\mathrm{FOV}\pm 40^\circ} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\left| P_{w.o.Radome}(\boldsymbol{\Phi}_{ii}) \right|^2 - \left| P_{w.Radome}(\boldsymbol{\Phi}_{ii}) \right|^2 \right)}, \quad \boldsymbol{\Phi}_{ii} \in [-40^\circ, 40^\circ] \tag{7}$$

관련된 설계조건들은 그림 7로 시각적으로 표시되어 있으며, 본 논문에서는 레이돔이 없을 때가 최적이라 판판단한다. 이에 따라 boresight beam error는 0 dB에 가까울

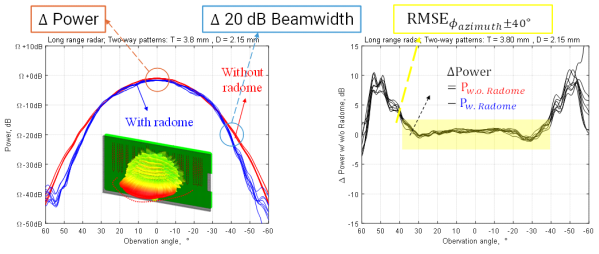
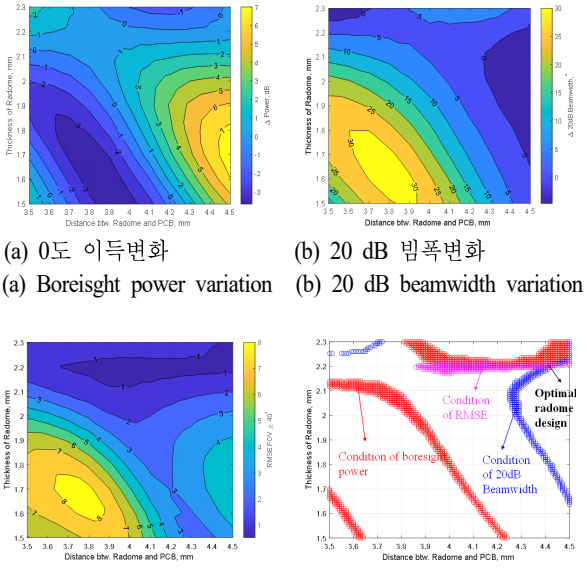


그림 7. 레이돔 왜곡에 의한 세 가지 설계조건지표
Fig. 7. Three design condition factor of beam distortion with radome.

수록, −20 dB beamwidth difference도 0도에 가까울수록, RMSE값 또한 0에 가까울수록 최적 설계라고 할 수 있다.

레이돔의 두께 및 간격 설계 변수의 변화에 따라, 세 가지 레이돔 빔 왜곡 설계판단 수치들이 그림 8에 나타나 있다. 가로축은 레이돔 간격, 세로축은 레이돔 두께이며, 그림 8(a)는 레이돔 유무에 따른 0도 이득 변화, 그림 8(b)는 −20 dB 빔폭 변화, 그림 8(c)는 FOV 내에서 RMSE값을 나타낸다. 그림 8(d)는 다음 설정된 설계조건들을 만족할 경우, 레이돔에 의한 빔 왜곡현상 최소화된 레이돔 두께 및 간격 설계 수치를 도출할 수 있다. 1) 0도에서 왜곡되는 빔 이득은 0.3 dB 이내, 2) −20 dB 빔폭 변화는 0.3도 이내, 3) 이득변화 RMSE는 0.7 이하로 설정되어야 한다. 그림 8(d)에서 이러한 조건들이 시각적으로 잘 표시되어 있다.

레이돔의 두께가 얇아지고 간격이 좁아질수록 레이다의 수평 빔은 중앙으로 집중되는 형태를 보이게 된다. 이는 보어사이트의 이득이 증가하지만 빔폭이 크게 줄어들어 레이다의 유효 FOV가 감소하는 결과를 가져온다. 반면, 레이돔의 두께가 두꺼워지고 간격이 멀어질수록 보어사이트 부근의 이득이 감소하며 평평한 패턴이 생성된다.



(a) 0도 이득변화 (b) 20 dB 빔폭변화
(a) Boreisght power variation (b) 20 dB beamwidth variation

(c) FOV 내 RMSE (d) 최적설계치
(c) RMSE in azimuth FOV (d) Optimal design value

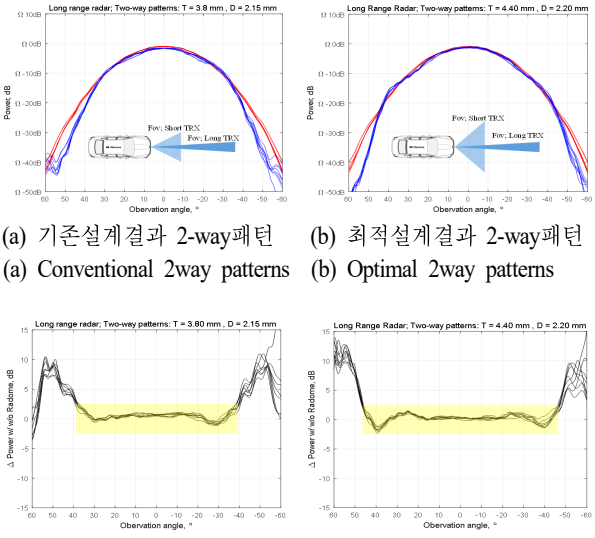
그림 8. 설계 변수에 따른 빔 왜곡판단 특성치와 세 가지 설계판단조건에 따른 레이돔 최적설계
Fig. 8. Results of three design condition factor and optimal design value.

Ⅳ. 최적설계 레이돔 효과 및 검증

4-1 최적설계 레이돔 효과

법선 방향의 Floquet 시뮬레이션으로 도출된 레이돔 설계치와 모든 파라미터를 분석한 후 나타나는 빔 왜곡 현상을 통해 도출된 최적 설계 레이돔 수치는 다소 차이가 있다. 레이돔 간격의 경우, 3.80 mm에서 4.42 mm로 변화하며, 레이돔 두께는 2.15 mm에서 2.20 mm로 결정된다. 개발 중인 차량용 레이다에서는 76.5 GHz의 중심주파수를 사용하기 때문에, 대략 3.92 mm 파장을 이용한다. 따라서, 최적설계로 구해진 레이돔 간격값은 이론치를 바탕으로 설계된 간격 수치보다 전기적으로 매우 큰 변화로 볼 수 있으며, 대략 15 % 정도 증가한 수치로 구해진다.

그림 9(a)는 일반적인 설계 방식인 Floquet으로 도출된 설계파라미터를 사용했을 때, 레이돔 유무에 따른 8채널의 수평 two-way 패턴들을 나타낸다. 그림 9(c)는 이때 각



(a) 기존설계결과 2-way패턴 (b) 최적설계결과 2-way패턴
(a) Conventional 2way patterns (b) Optimal 2way patterns

(c) 기존설계 FOV 내 차이 (d) 최적설계 FOV 내 차이
(c) Conv. 2way distortion (d) Opti. 2way distortion

그림 9. 기존과 최적설계된 방위각 패턴의 및 빔 왜곡 현상 비교
Fig. 9. Comparison of two-way radiation patterns with conventional design and optimal design.

채널의 레이돔 유무에 따른 패턴 차이를 보인다. 그림에 노란색으로 표기된 부분은 일정한 패턴값 차이를 통해, 유효한 수평 FOV를 시각적으로 나타냈다. 그림 9(b)와 그림 9(d)는 파라미터 분석을 통한 최적설계 파라미터를 사용했을 때, 레이돔 유무에 따른 수평 two-way 패턴들과 패턴 차이 결과들을 나타낸다. 최적설계 시에는, 40도 이내의 방위각 빔 왜곡 현상이 감소하여, 레이다가 동작하는 유효한 수평 FOV가 증가함을 확인했다.

레이돔 최적설계를 진행할 때, 보어 사이트 이득변화가 일반적인 설계에 비해 0.54 dB에서 0.26 dB로 감소한다. 일반설계 시에는 레이돔에 의해 −20 dB 빔폭이 약 6도 감소하지만, 최적설계 시에는 0.1도만 정도만 감소한다. 레이돔 최적설계를 통해 기존에 사용되던 평면 레이돔에 다른 추가적인 기계나 전자장치 없이, 레이돔 설계 변수를 최적화하여 레이다가 동작하는 수평 FOV를 확장된다.

4-2 레이돔 왜곡현상 검증

레이돔 두께 및 간격 변화에 따른 빔 왜곡현상을 개발품 설계파라미터 추적을 위한 데이터베이스로 구성할 수 있다. 구성된 빔왜곡 현상 데이터베이스를 이용하여, 완제품으로 제작된 레이다의 빔 왜곡특성을 실제로 측정하고, 제작된 레이다의 레이돔 설계파라미터를 역추적할 수 있으며, 신속한 수정품 제작이 가능하다. 그림 10은 제작된 레이다의 송수신 패턴을 측정하는 환경과 차량용 레이다 조립도를 나타낸다. 안테나와 레이돔 사이의 간격은 레이다를 구성하는 하우징, 커넥터, 레이돔의 제작 및 조립 등의 기구적인 공차로 인해 필연적으로 발생한다. 이러한 요인으로 인해, 실제 레이돔 설계치와 제작된 레이돔이 달라 레이다 정상동작 수율을 크게 낮추는 문제들이 발생한다. 불량으로 판정되는 레이다의 원인분석을 위해, 레이돔과 안테나 사이의 거리를 측정하는 비파괴 검사인 X-ray를 사용하여 레이돔 두께 및 간격을 추적하게 되면, 비용 및 시간이 상당히 필요하게 되어 수정품 개발에 시간과 비용이 많이 소요된다.

제작된 레이다의 two-way 빔 패턴을 측정할 수 있는데, 측정된 패턴을 빔 왜곡 시뮬레이션 결과와 비교하여, X-ray 방식보다 빠르고 효율적으로 레이돔 두께와 간격 설계파라미터를 역추적할 수 있다. 역추적 과정에서는 레이돔 설계된 두께와 간격에 근접한 설계 변수들에 대해 모두 시뮬레이션 작업을 수행한다. 수행된 빔 왜곡 현상을 데이터베이스로 구현한 후, 실제로 제작된 레이다의 패턴을 측정한다. 레이돔이 없는 레이다 샘플도 동시에 제작하여 측정한다. 이를 통해, 제작된 레이다의 레이돔에 의한 빔 왜곡특성을 실제로 측정할 수 있다. 그 이후, 방위각 FOV의 빔 왜곡되는 특성을 실측과 시뮬레이션 차이를 계산하고, 차이를 RMSE error로 수치적으로 분석한다. RMSE가 최소가 되는 설계파라미터를 측정된 레이다의 레이돔 두께와 간격 파라미터로 도출한다. 이를 통

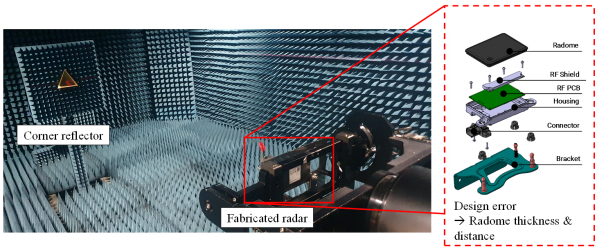
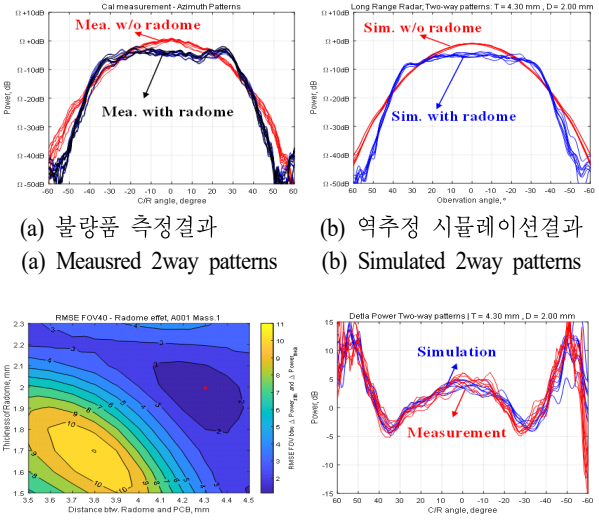


그림 10. 레이다 패턴 측정환경 및 레이다 조립도
Fig. 10. Measurement environment of fabricated radar and assembly view.



(a) 불량품 측정결과
(a) Meausred 2way patterns

(b) 역추정 시뮬레이션결과
(b) Simulated 2way patterns

(c) 측정 및 시뮬레이션 비교
(c) Comparing mea. and sim.

(d) 측정 및 역추적 빔 왜곡
(d) Inverse design results

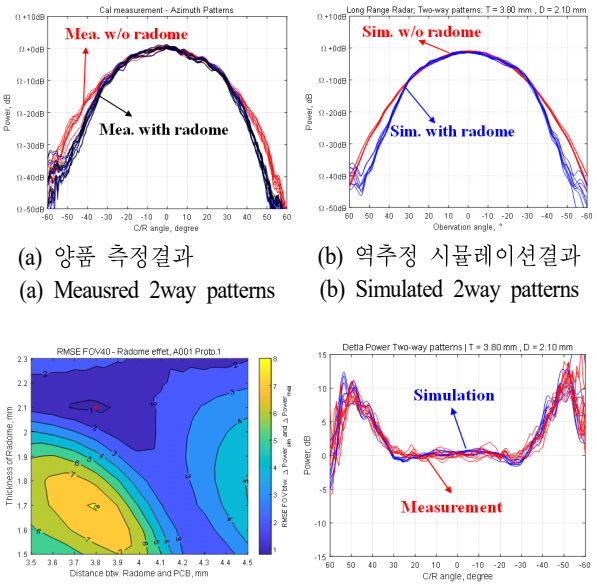
그림 11. 불량품 표본의 레이돔 설계 변수 역추적과정
Fig. 11. Inverse design of the radome design parameters of the poorly fabricated radar.

해 제작된 레이다의 레이돔 두께와 간격 설계 파라미터를 역추적할 수 있다.

그림 11은 고품 레이다의 레이돔 두께와 간격을 역추적하는 과정 및 결과를 나타낸다. 그림 11(a)는 불량품의 빔 왜곡특성 실측, 그림 11(b)는 시뮬레이션 된 빔 왜곡특성 결과이며, 그림 11(c)는 빔 왜곡현상에 대해 실측과 시뮬레이션을 RMSE로 계산하여, 레이돔 설계파라미터 역추정한 것이고, 그림 11(d)는 실측된 빔 왜곡특성과 시뮬레이션으로 도출된 빔 왜곡특성 비교한 것이다. 실제로 레이다의 제작된 레이돔은 제작상에 한쪽으로 얇게 제작되거나, 휘어지는 현상이 발생하기 때문에, 좌우 패턴 현상이 대칭적이지 않는다. 하지만 레이돔 유무에 따라, 빔 왜곡특성 자체를 시뮬레이션과 매우 유사한 경향을 그림 11(d)에서 보인다.

그림 12는 양품의 설계된 레이돔 설계파라미터를 역추적하는 과정을 나타내며, 그림 11과 같은 역추적 과정을 진행했다. 이를 통해, 양품 레이다의 레이돔 설계 변수를 구할 수 있다.

그림 11과 그림 12를 통해 고품 혹은 양품의 레이다 레



(a) 양품 측정결과
(a) Meausred 2way patterns

(b) 역추정 시뮬레이션결과
(b) Simulated 2way patterns

(c) 측정 및 시뮬레이션 비교
(c) Comparing mea. and sim

(d) 측정 및 역추적 빔 왜곡
(d) Inverse design results

그림 12. 양품 표본의 레이돔 설계 변수 역추적과정
Fig. 12. Inverse design of the radome design parameters of the properly fabricated radar.

이돔 설계 변수를 역추적할 수 있다. 대부분의 제작된 레이다 표본들은 균일한 공차로 제작되며 일정한 패턴을 보인다. 문제는 레이돔의 형상이나 조립 과정에서 발생하는 오차로 인해 레이돔 간격이 설계치에 부합하지 않는 경우다. 이럴 때 빔 왜곡이 발생하며, 고품으로 수율 저하에 큰 요인이 된다. 그림 11과 그림 12의 설계 변수분석을 통해, 임의의 샘플 레이다의 빔 패턴을 측정할 수 있다면, 레이돔 간격과 두께를 역으로 추정할 수 있다. 이를 통해 양산에 적합한 빔 형태를 보이는 개선품 설계를 신속하게 도출할 수 있다.

그림 13은 레이돔 설계 간격 4.0 mm와 두께 2.1 mm로 설정된 레이다 표본들의 빔 왜곡특성을 측정한 후, 이전에 빔왜곡 데이터베이스를 활용해 레이돔 설계 변수들을 역추적한 결과를 보여주는 산점도 그래프이다. 연구소에서 개발되는 프로토타입 샘플들은 간격이 좁아지는 경향을 보이고, 반면에 공장에서 양산되는 샘플들은 설계 간격보다 실제 간격이 넓어지는 현상이 관찰된다. 초기 설계치와 약간의 차이가 있지만, 연구소에서 제작된 샘플이나 공장에서 양산되는 샘플들은 역추적된 파라미터들에서 유사한 반복성을 보인다. 이러한 경향성을 바탕으로 레이돔 설계수치에 적용오차를 적용해, 레이돔의 설계조건을 수정하면 빠른 개선된 레이다 설계가 가능하다.

Ⅴ. 결 론

기존에 사용되던 레이돔 설계 방식은 보어사이트 기준

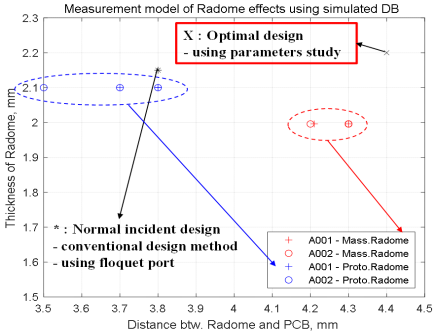


그림 13. 레이돔 왜곡 데이터베이스를 기반으로 표본들의 역 설계된 설계 변수 결과들
Fig. 13. Results of inversely design variables from samples based on database of radome distortion.

으로 입사하는 전자기파의 임피던스 차이를 기반으로 반사파를 최소화하고 투과파를 최대화하는 설계파라미터 이용하는 방식이다. 본 연구에서는 레이돔의 유전체 특성을 수식과 Floquet 시뮬레이션 모델링을 통해 초기 두께와 간격을 설계했다. 이후, 설계파라미터 분석을 통해 빔 왜곡특성이 최소화되고 유효 FOV가 확장되는 최적 레이돔의 두께와 간격을 도출했다. 그 결과, 레이돔에 의한 이득변화가 감소하고 20 dB 빔폭이 크게 늘어나, 레이다가 동작하는 유효 방위각 FOV가 78도에서 92도로 크게 증가했다.

설계 변수 분석을 통해 도출된 빔왜곡 현상 데이터베이스는 고품이나 양품 레이다 표본의 레이돔 설계파라미터를 비파괴 방식으로 역추적이 가능하다. 이를 통해 불량품 발생 시 원인분석이 빠르게 가능하고, 설계치 조건에 맞추어 원하는 수정품을 빠르게 디버깅 및 개발할 수 있다. 이 연구를 통해, 장거리 차량 레이다의 빔왜곡 현상이 최소화된 레이돔 최적설계가 가능하며, 레이다의 성능 향상과 높은 품질 수율 보장에 기여할 것으로 기대된다.

References

[1] S. H. Seo, J. H. Cho, "Development of an electromagnetic analysis methodology for the aspheric ogival radome," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 20, no. 7, pp. 617-624, Jul. 2009.

[2] J. Kim, S. C. Song, H. Shin, and Y. B. Park, "Radiation from a millimeter-wave rectangular waveguide slot array antenna enclosed by a Von Karman fadome," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 18, no. 3, pp. 154-159, Jul. 2018.

[3] C. Kumar, H. U. R. Mohammed, and G. Peake, "Application report: mmWave radar radome design guide," 2021. Available: https://www.ti.com/lit/an/swra705/swra705.pdf

[4] Infineon, "Radar wave propagation through materials: Walls and radomes," 2020. Available: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Radar_wave_propagation_through_materials-Whitepaper-01_00-EN.pdf?fileId=5546d462766cbe8601768a120c6d36cf&da=t

[5] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, New York, NY, John Wiley & Sons, 2015.

[6] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, New York, NY, John Wiley & Sons, 2011.

강 윤 수 [에이치엘클레무브/책임연구원]

https://orcid.org/0000-0002-3547-0913

2011년 9월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)

2013월 9월: 광주과학기술원 기전공학부 (공학석사)

2020월 2월: 광주과학기술원 기전공학부 (공학박사)

2020년 1월～2021년 9월: 만도 전자설계1팀 책임연구원

2021년 9월～2021년 12월: 만도모빌리티솔루션 전자설계1팀 책임연구원

2021년 12월～현재: 에이치엘클레무브 AD Sensor HW 책임연구원

[주 관심분야] Automotive Radar, Antenna Array, Beam Synthesis, Ray Tracing Method, NF-FF Transformation and Measurement, Ultra-Wide Band Antenna.