

원뿔형 비구면 레이돔에 대한 전자파 해석 기법 개발

Development of an Electromagnetic Analysis Methodology for the Aspheric Ogival Radome

서 승 희 · 조 지 현

Seung-Hee Seo · Ji-Hyun Cho

요 약

본 논문에서는 가역 정리에 기초한 반응 이론을 이용하여 유도탄 및 항공기 등에 적용되는 원뿔형 비구면 레이돔에 대한 전자파 성능 해석 방법을 제안하였으며, 제작된 레이돔에 대한 전자파 성능 측정 결과를 해석 결과와 비교함으로써 제안한 해석 방법의 타당성을 검증하였다. 안테나는 "X" 형태의 2축 모노펄스 구조를 갖는 도파관 슬롯 배열 안테나로 가정하였다. 레이돔 형상은 본 갈만 형태로 가정하였으며, 레이돔 길이 대 직경비를 2:1로 가정하였다. 실제 제작된 레이돔에 대한 전자파적 특성은 레이돔 전용 측정 장비를 이용하여 측정하였으며, 레이돔 측정 결과가 본 논문에서 제시한 해석 기법을 이용하여 해석한 결과와 잘 일치하는 것을 확인하였다. 본 논문에서 개발한 해석 기법은 유도탄이나 항공기용 레이돔 개발에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract

In this paper, an electromagnetic analysis methodology using reaction theorem based on reciprocity theorem is presented for the aspheric ogival radome applied to a missile and/or airborne radar. The presented analysis methodology is verified using actual measured data. The type of antenna assumed to develop the methodology is a waveguide slot array antenna, and has the structure of 2 axes monopulse of "X" type. The shape of radome is assumed as Von Karman and the ratio of length to base diameter(L/D) is assumed to be 2:1. The electrical characteristics of the radome are measured using radome measurement system and the results are compared to the values estimated using the presented analysis methodology. It is found that the comparison shows good agreement. It is expected that the presented methodology can be applied for the development of missile and airborne radome.

Key words : Von Karman, Radome, Slot Array Antenna, Boresight Error, Reaction Theorem

I. 서 론

레이돔은 레이더(radar)와 돔(dome)의 합성어로서 염분, 습기 및 공기 저항과 같은 외부 환경으로부터 초고주파 센서를 보호하는 유전체 덮개를 말한다. 초음속 유도탄이나 항공기 등에 적용하는 레이돔은 고속으로 대기 중을 이동하기 때문에 공기 저항을 줄이기 위하여 일반적으로 레이더에 적용되는 레이돔과 달리 원뿔 형태의 비구면으로 설계하여야 한다.

이러한 레이돔 형상은 안테나로부터 방사되거나 안테나로 수신되는 전자파를 반사, 굴절, 산란시킴으로써 유도탄이나 항공기 등에 탑재된 초고주파 센서(항공기 레이더, 탐색기 등)의 성능에 좋지 않은 영향을 미치게 된다.

레이돔에 의한 초고주파 센서 성능 저하는 일반적으로 투과 손실, 안테나 복사 패턴의 왜곡, 보어사이트 오차(boresight error) 및 보어사이트 오차 변화율(boresight error slope) 등으로 나타난다. 보어사이트

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· 논문 번호 : 20090423-041

· 수정완료일자 : 2009년 6월 24일

오차는 레이돔에 의해 송/수신 전자파가 굴절된 각도로 정의되는데, 이 굴절된 각도만큼 초고주파 센서가 표적의 위치를 추적하는데 각도 오차를 유발시키기 때문에 매우 중요한 요인으로 작용한다. 특히 유도탄의 경우 안테나 회전 각도에 대한 레이돔 보어사이트 오차의 변화율은 상당히 작은 값으로도 유도탄의 유도 조정 안정화 성능에 영향을 미쳐 유도탄의 정밀 타격 성능에 심각한 영향을 줄 수 있는 것으로 알려져 있다^[1].

레이돔의 전자파적 성능을 해석할 수 있는 방법은 여러 방법^{[2]~[7]}이 있으며, 안테나 및 레이돔의 크기, 계산 시간, 해석의 정확도 등을 고려하여 해석 방법을 결정해야 한다.

본 논문에서는 레이돔 성능 해석 방법으로서 가역 정리(reciprocity theorem)^{[4],[7]}를 이용한 레이돔 해석 방법을 적용하였다. 본 방법은 레이돔 내부 표면에 대해 안테나로부터 방사된 전자계와 안테나로 입사하는 전자계를 가역정리를 이용하여 수치적분하여 레이돔의 성능을 해석한다. 기존 논문에서는 대부분 보어사이트 오차 관점에서 레이돔 성능 해석을 수행하였으나, 본 논문에서는 이를 포함하여 투과 손실 뿐만 아니라 전자파가 레이돔 내벽을 통해 반사하여 나타나는 안테나 원부엽(far-sidelobe)의 일종인 이미지 부엽(image lobe) 특성에 대해서도 성능 해석을 수행하였다.

초고주파 센서에 사용된 안테나는 "X" 형태의 2축 모노펄스 슬롯 배열 안테나로 가정하였다. 레이돔은 단층(single layer)으로 가정하였으며, 형상은 본 칼만(Von Karman) 형태로 가정하였다. 본 논문에서 제안한 해석 방법의 검증은 위하여 실제 레이돔을 제작하였으며, 해석 결과와 측정 결과를 비교하여 제안된 방법의 기술적 타당성을 검증하였다.

II. 접근 방법

가역 정리는 로렌츠 적분(Lorentz integral)으로부터 안테나 합 전압과 차 전압을 구하고, 이로부터 안테나 복사 패턴 및 레이돔 보어사이트 오차 등을 계산하는 방법이다. 먼저 그림 1에서 보는 바와 같이 두축 모노펄스 구조를 갖는 도파관 슬롯 배열 안테나가 레이돔에 의해 덮여 있고, 안테나가 레이돔 내에

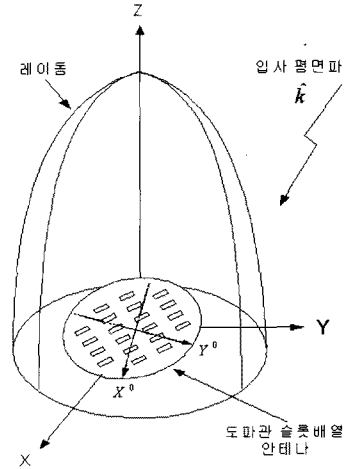


그림 1. 레이돔/안테나 구조

Fig. 1. Radome and antenna structure.

서 안테나 회전축을 중심으로 임의의 각도만큼 회전하면서 전자파를 송수신한다고 가정하면 안테나 단자 전압은 로렌츠 적분으로부터 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_a = \frac{1}{I_i} \int_S (E_a \times H_i - E_i \times H_a) \cdot \hat{n} dS \quad (1)$$

여기서 E_a 와 H_a 는 초고주파 센서용 안테나로부터 방사된 전계 및 자계, E_i, H_i 는 표적으로부터 반사되어 안테나로 입사하는 평면파, \hat{n} 은 적분 구간의 임의의 지점에서의 단위 수직 벡터를 나타낸다. 전류상수 I_i 는 표적 반사 신호의 크기와 관련이 있는 것으로서 임의의 상수로 놓을 수 있다. 적분 구간 S 는 안테나와 레이돔 사이의 임의의 폐곡면으로 정의할 수 있다.

초고주파 센서용 안테나가 4분면으로 나누어진 모노펄스 안테나라고 가정하면, 식 (1)과 안테나 구조로부터 안테나 합과 차 전압을 구할 수 있고, 이로부터 안테나 합(sum)과 차(difference) 패턴을 계산할 수 있다. 보어사이트 오차의 경우에는 안테나 합과 차 전압의 비의 관계식으로 정의되므로 식 (2), (3)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$BSE_x = \text{Im} \left\{ \frac{\Delta_x}{\Sigma} / K_x \right\} \quad (2)$$

$$BSE_y = \text{Im} \left\{ \frac{\Delta_y}{\Sigma} / K_y \right\} \quad (3)$$

식 (2), (3)에서 $BSE_{x^{\circ}}$, $BSE_{y^{\circ}}$ 는 45도로 기울어진 "X" 형태의 각 모노펄스 축에 대한 보어사이트 오차를 나타내는데, Σ 는 안테나 보어사이트 방향에서의 안테나 합 전압, $\Delta_{x^{\circ}}$, $\Delta_{y^{\circ}}$ 는 각 모노펄스 축 X° , Y° 방향에서의 차 전압을 나타내며, $K_{x^{\circ}}$, $K_{y^{\circ}}$ 는 각 모노펄스 축에 대한 모노펄스 기울기 상수로서 레이돔이 없을 경우의 안테나 자체 Δ/Σ 곡선에 대한 기울기를 나타낸다.

III. 해석절차

가역정리를 이용하여 레이돔을 해석하기 위해서는 먼저 식 (1)에서의 적분 구간 S 를 결정한 후, 안테나가 안테나 회전축을 중심으로 회전할 경우의 안테나 각 슬롯으로부터 방사되는 전자파 성분에 의한 적분 구간 내에서의 전자계(electromagnetic fields)를 구하고, 다음으로 입사 평면파에 의해 투과된 전자파 성분에 의한 적분 구간 내에서의 전자계를 구한 후 레이돔 표면에 대한 표면 적분(surface integration)을 수행하여 안테나 패턴 및 보어사이트 오차를 계산할 수 있다.

먼저 안테나가 그림 2에서 보는 바와 같이 Azimuth over elevation 형태로 구동된다고 가정하면 안테나가 방위각 및 고각 방향으로 회전할 경우 안테나 면에 위치한 임의의 슬롯에 대한 좌표 변환식은 식 (4)와 같다⁸⁾. 식 (4)에서 AZ, EL은 각각 방위각 및 고각 방향으로의 안테나 회전각을 의미하고, (x' , y')은 회전각이 0도일 때의 안테나 면의 임의의 슬롯 중심에서의 x, y 좌표를, z_g 는 레이돔 기저면에서 안테나 회전 중심까지의 거리, Δa , Δb 는 안테나 회전 중심에서 방위각 및 고각 회전면까지의 편심된(offset) 값을 의미한다.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos AZ & 0 & \sin AZ \\ -\sin EL \sin AZ & \cos EL & \sin EL \cos AZ \\ -\cos EL \sin AZ & -\sin EL & \cos EL \cos AZ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ \Delta b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta a \sin EL \\ \Delta a \cos EL \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ z_g \end{bmatrix} \quad (4)$$

다음으로 적분 구간 S 는 계산의 편리성을 고려하여 결정하면 되는데, 본 논문에서는 그림 3에서 보는 바와 같이 레이돔 내벽과 안테나 면을 에워싸는 폐곡면을 적분 구간으로 결정하였다. 적분 구간 내에

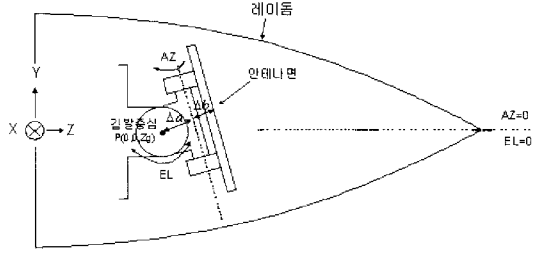


그림 2. Azimuth over elevation gimbal 구성도
Fig. 2. Azimuth over elevation gimbal configuration.

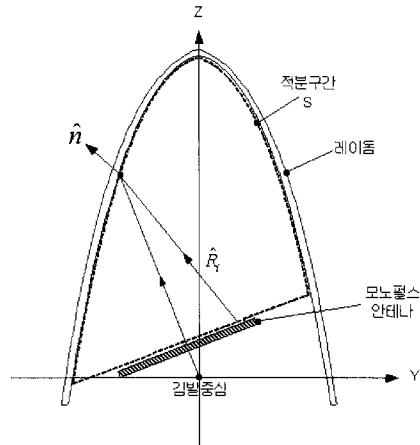


그림 3. 안테나가 회전한 경우의 적분 구간 S
Fig. 3. Integral surface S relative to antenna rotation.

서의 적분은 적분 구간을 레이돔의 길이 방향과 원주(ϕ)방향에 대해 $M \times N$ 개의 미소 단위(grid)로 나누고, 각 미소 단위의 중심점으로 안테나로부터 방사되는 전자파나 표적 반사파가 입사한다고 가정하였다.

M, N 의 개수는 해석의 정확도 및 계산 시간 등을 감안하여 결정하여야 하는데, 본 논문에서는 M, N 의 개수를 적은 양에서 증가시키면서 해석 결과가 수렴하도록 결정하였는데, M, N 의 개수에 해당하는 길이를 과장으로 환산하면 약 0.3λ 이하이다. 이때, 각 미소 단위의 미소 면적은 가우시안 쿼드러처(Gaussian Quadrature) 수치 적분 방법을 이용하여 구하였다.

다음으로 적분 구간 내에서 안테나 방사 필드에 의한 레이돔 내벽에서의 전자계 성분은 안테나가 임의의 방향으로 회전했을 경우에 대해 안테나 슬롯의 위치 변화를 고려하여 레이돔 내벽에서의 전자계 성분을 구하면 된다. 레이돔 해석에 사용된 안테나는

도파관 슬롯 배열(waveguide slot array) 안테나로서 안테나 슬롯으로부터 방사되는 전자계는 슬롯의 크기가 안테나 및 레이돔에 비해 상대적으로 작으므로 미소 다이폴로 가정하면 그림 3의 구조에 대해 식 (5), (6)과 같이 나타낼 수 있다⁹⁾.

$$E_a = \frac{jk}{4\pi} \sum_{i=1}^N \left(\frac{j}{kR_i} - 1 \right) (\widehat{M}_i \times \widehat{R}_i) \frac{e^{-jkR_i}}{R_i} C_i f(\widehat{R}_i(\theta, \phi)) \quad (5)$$

$$H_a = \frac{jk}{4\pi\eta} \sum_{i=1}^N \left[\left(1 - \frac{j3}{kR_i} - \frac{3}{(kR_i)^2} \right) (\widehat{M}_i \cdot \widehat{R}_i) \widehat{R}_i - \left(1 - \frac{j}{kR_i} - \frac{1}{(kR_i)^2} \right) \widehat{M}_i \right] e^{-jkR_i} C_i f(\widehat{R}_i(\theta, \phi)) \quad (6)$$

여기서

$$f(\widehat{R}_i(\theta, \phi)) = \frac{\sin\left(k \frac{sw}{2} \cos\phi \sin\theta\right) \cos\left(k \frac{sl}{2} \cos\theta\right) - \cos\left(k \frac{sl}{2}\right)}{k \frac{sw}{2} \cos\phi \sin\theta \sin\theta} \quad (7)$$

식 (5), (6)에서 N 은 안테나 슬롯의 총 개수를 나타내며, k 는 자유 공간파수, η 는 자유 공간에서의 파동 임피던스이다. \widehat{M}_i 는 슬롯의 편파를 정의하기 위한 자기 전류 방향에 대한 단위 벡터이고, R_i 와 \widehat{R}_i 는 그림 3에서 보는 바와 같이 슬롯에서 레이돔 내벽 임의의 점까지의 크기 성분과 단위 벡터 성분을, C_i 는 i 번째 슬롯에 대한 안테나 가중치(weighting value), $f(\widehat{R}_i(\theta, \phi))$ 는 슬롯의 중심에서 레이돔 내벽으로 향하는 벡터인 \widehat{R}_i 방향에서의 슬롯의 원거리 복사 패턴으로서 sw 는 슬롯의 폭, sl 은 슬롯의 길이를 나타낸다¹⁰⁾.

일반적으로 레이돔 보어사이트 오차만을 해석하기 위해서는 그림 3과 같이 안테나로부터 레이돔 내벽으로 직접 입사하는 전자계 성분만을 이용하여 구할 수 있으나, 이미지 부엽 특성을 해석하기 위해서는 이러한 직접 입사 전자계뿐만 아니라 레이돔 내벽에서 반사되어 반대 방향의 레이돔 내벽으로 재입사되는 전자계 성분도 고려해 주어야 한다. 본 논문에서는 레이돔 내벽에서의 반사 전자계 성분을 고려함으로써 기존 논문들에서 제시하지 않았던 레이돔에 의한 이미지 부엽 특성도 해석할 수 있도록 하였다. 레이돔 내벽으로부터 반사된 전자계의 진행 방향은 레이돔의 기하학적 구조로부터 계산될 수 있고,

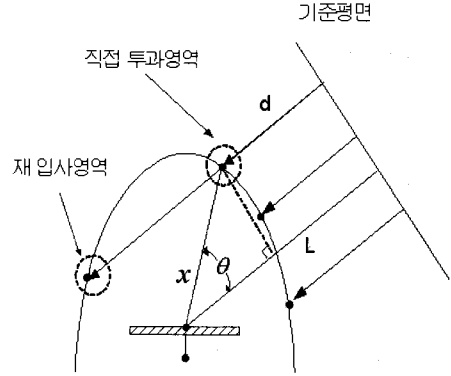


그림 4. 레이돔 내벽에서의 직접 투과 영역과 재 입사 영역
Fig. 4. Direct incident region and re-incident region in radome inner surface.

반사파가 레이돔 내벽과 만나는 지점은 ray-tracing을 통해 구할 수 있으므로 이 지점에서의 전자계 성분을 구할 수 있다. 이때, 반사파가 레이돔 내벽과 교차되는 위치가 $M \times N$ 개의 미소 단위 중 어느 영역에 위치하는가를 알아야 하는데, 본 논문에서는 레이돔의 모든 미소 단위에 대해 검색을 통해 교차점이 어느 미소 단위에 해당하는지를 구하도록 하였다. 이러한 과정을 통해 레이돔의 모든 미소 단위에 대해 직접 입사 전자계와 반사 전자계 성분을 합성하여 각 미소 단위의 총 전자계 성분을 구하도록 하였다.

다음으로 식 (1)에서 E_i, H_i 는 표적 반사 신호로서 그림 4와 같이 임의의 기준 평면으로부터 평면파 E, H 가 레이돔을 향해 입사한다고 가정하면 이 입사 평면파는 레이돔 벽을 통과하여 적분 구간인 레이돔 내벽으로 직접 투과한 경우(직접 투과 영역)와 투과된 전자파가 다른 레이돔 측벽으로 다시 입사한 경우(재 입사 영역)로 나누어 생각할 수 있다. 먼저 직접 투과 영역에서의 입사 전자계 성분에 대한 투과 계수 및 반사 계수는 레이돔 외벽을 국부적으로 평판이라고 가정하면 식 (8), (9)와 같이 구할 수 있다.

$$T = \frac{(1-r^2)e^{-j\beta d}}{1-r^2e^{-2\beta d}} \quad (8)$$

$$R = \frac{r(1-e^{-2\beta d})}{1-r^2e^{-2\beta d}} \quad (9)$$

여기서 $\beta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon(1-j\tan\delta) - \sin^2\theta}$

식 (8), (9)에서 r_{\perp} 은 표면 반사계수로서 수직 편파(perpendicular polarization) 및 수평 편파(parallel polarization)에 대해 식 (10), (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_{\perp} = \frac{\cos \theta - \sqrt{\epsilon(1 - j \tan \delta) - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\epsilon(1 - j \tan \delta) - \sin^2 \theta}} \quad (10)$$

$$r_{\parallel} = \frac{\epsilon(1 - j \tan \delta) \cos \theta - \sqrt{\epsilon(1 - j \tan \delta) - \sin^2 \theta}}{\epsilon(1 - j \tan \delta) \cos \theta + \sqrt{\epsilon(1 - j \tan \delta) - \sin^2 \theta}} \quad (11)$$

식 (10), (11)에서 ϵ 은 유전 상수, $\tan \delta$ 는 유전손실, θ 는 입사각을 나타낸다.

직접 투과 영역에서의 전자계 성분은 입사 전자계를 성분 분해하여 수직 편파 성분 및 수평 편파 성분으로 분리한 후 각 성분에 해당하는 투과 계수를 곱하여 계산하면 되므로 식 (12), (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_i = [(\hat{a} \cdot E) \hat{a}] T_{\perp} + [(\hat{g} \cdot E) \hat{g}] T_{\parallel} \quad (12)$$

$$H_i = [(\hat{a} \cdot H) \hat{a}] T_{\parallel} + [(\hat{g} \cdot H) \hat{g}] T_{\perp} \quad (13)$$

여기서 T_{\perp} 는 수직 편파에 대한 투과 계수, T_{\parallel} 는 수평 편파에 대한 투과 계수, \hat{a} , \hat{g} 는 입사 평면에 수직, 수평 성분의 단위 벡터를 나타낸다.

식 (12), (13)에서 입사 전자계 E , H 는 그림 4에서 보는 바와 같이 레이돔의 어느 지점으로 입사하느냐에 따라 레이돔 내벽에서의 전자파의 위상이 달라지므로 기준 평면으로부터 레이돔 내벽까지의 입사 거리 d 를 계산하여 각 입사 평면과의 상대 위상을 계산해 주어야 한다. 그림 4에서 안테나 중심에서 기준 평면까지의 거리 L 은 임의의 값으로 놓을 수 있고, 또한 안테나 중심에서 레이돔 임의의 점까지의 거리 x 도 구할 수 있으므로 기준 평면에서 레이돔까지의 입사거리 d 는 식 (14)와 같이 구할 수 있다.

$$d = L - x \cdot \cos(\theta) \quad (14)$$

재 입사 영역에서의 전자계 성분은 직접 투과 영역을 통과해 재 입사 영역의 임의의 레이돔 내벽으로 입사하는 전자파를 ray로 가정 한 후, ray-tracing을 통해 ray와 레이돔 내벽과의 교차점을 계산할 수 있으므로 식 (12), (13)으로부터 계산된 직접 투과 영역에서의 전자계 성분이 레이돔 내부를 통과한 거리

만큼에 해당하는 재 입사 영역에서의 전자계 성분을 계산할 수 있다.

IV. 해석 결과 및 측정 결과 비교

해석 및 제작에 사용된 레이돔 형상은 본 칼만(Von Karman) 형태이며, 레이돔의 길이는 사용 주파수의 파장으로 환산하여 29.0λ , 레이돔 직경은 14.5λ 이다. 레이돔 기저에서 안테나 회전중심 축까지의 거리는 8.1λ , 안테나 회전중심 축에서 안테나 면까지의 거리는 약 1.4λ 이다.

사용된 안테나는 Ku-band 대역의 2축 모노펄스 구조의 광벽 도파관 슬롯 배열 안테나로서 모노펄스 축은 일반적인 “+” 형태가 아닌 “X” 형태를 취하고 있다. 안테나의 직경은 약 11λ 이다.

먼저 레이돔 성능 해석 프로그램의 적합성을 검증하기 위하여 레이돔 소재의 특성을 $\epsilon=1.0$, $\tan \delta=0.0$ 으로 가정하고 안테나 패턴을 시뮬레이션한 결과와 이론적인 안테나 패턴을 그림 5, 6과 같이 비교해 보았다. 그림 5는 안테나 회전각 0도에 대해 레이돔이 안테나를 덮고 있다고 가정한 경우, 안테나 모노펄스 축인 45도 방향의 합 패턴을, 그림 6은 그림 5의 합 패턴의 첨두치로 정규화한 45도 차 패턴을 나타낸다. 그림에서 파란색은 이론적인 패턴, 적색은 레이돔의 상대 유전율을 1.0으로 가정한 경우의 안테나 패턴을 나타낸다. 합 패턴의 경우 대부분 이론적인 패턴과 상당히 유사하며, 부엽 준위가 낮은 60도 이상의 각도에서만 일부 편차가 발생함을 알 수 있고, 차 패턴의 경우도 부엽 준위가 상당히 낮은 각도

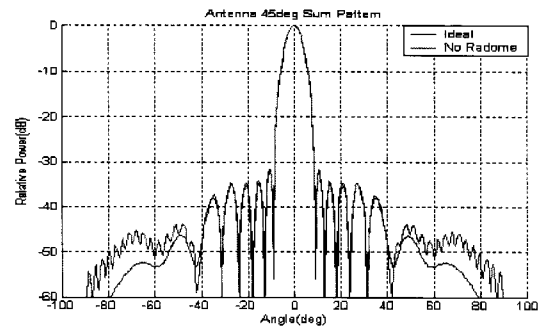


그림 5. 모노펄스 축에서의 합 패턴 비교
Fig. 5. Comparison of sum patterns for ideal case and no radome case at monopulse axis.

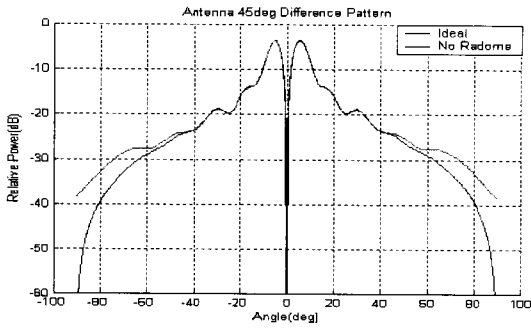


그림 6. 모노펄스 축에서의 차 패턴 비교
 Fig. 6. Comparison of difference patterns for ideal case and no radome case at monopulse axis.

를 제외하면 이론적인 패턴과 상당히 유사함을 알 수 있다.

본 논문에서 제시한 해석 방법에 대한 검증을 위해 레이돔을 제작하고 해석 결과와 실제 제작된 레이돔에 대한 성능 측정 결과와 비교하였다.

레이돔 재질은 MC 나일론으로 제작하였으며, 사용된 레이돔 재질에 대해 실제 측정된 유전 상수는 약 3.05, 유전손실은 약 0.01이다. 레이돔의 두께는 약 0.336λ 정도로 제작되었으며, 해석 결과와의 정확한 비교를 위하여 제작된 레이돔에 대해 3차원 측정 장비를 이용하여 레이돔 내/외부의 3차원 형상을 측정함으로써 레이돔 길이 방향에 대한 레이돔의 두께를 계산하였으며(그림 7 참조), 레이돔 두께 측정 데이터를 레이돔 성능 해석 프로그램에 입력함으로써 레이돔 가공 시의 가공 오차에 의한 레이돔 성능 해석의 차이를 최대한 줄이도록 하였다.

그림 8은 제작된 레이돔을 레이돔 측정 장비에 장착한 모습을 나타낸다. 그림 위 부분의 검은색 뿔췌한 형상이 제작된 레이돔을 나타내고, 이 레이돔 내부에 초고주파 센서용 안테나가 장착되어 있다. 측정 장비 밑 부분의 회전 테이블이 회전하면서 레이돔도 같은 방향으로 회전하지만, 안테나는 항상 전면을 지향하도록 구성되어 안테나는 임의의 레이돔 면을 바라보면서 이때의 보어사이트 오차 및 투과 손실을 측정한다. 안테나 패턴 측정의 경우에는 측정 장비의 회전 테이블이 회전하면 안테나 및 레이돔도 회전 테이블과 같은 방향으로 회전하면서 안테나 각 채널의 수신 전력을 측정하도록 구성되어 있다.

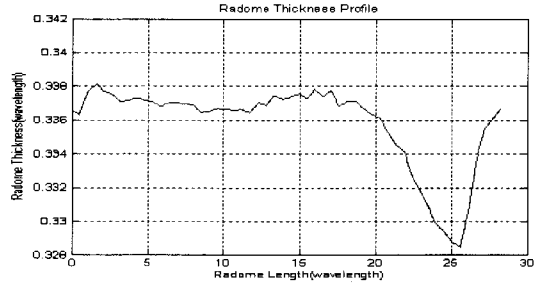


그림 7. 측정된 레이돔 두께 프로파일
 Fig. 7. Measured radome thickness profile.



그림 8. 제작된 레이돔 및 레이돔 측정 장비 사진
 Fig. 8. Photo of radome measurement system.

본 레이돔 측정 장비는 방위각 방향으로만 레이돔을 회전시킬 수 있기 때문에 안테나가 임의의 방향으로 회전하는 것을 모사하기 위해서는 안테나 롤(roll) 포지셔너를 회전시켜 안테나의 편파를 바꾸어 주어야 한다. 본 측정 장비에서 초고주파 센서용 안테나는 수신 안테나로 동작하고 송신 안테나는 혼 안테나로서 수신 안테나의 맞은편에 위치하도록 한다.

그림 9, 10은 안테나 회전각 23도 및 43도에 대해 안테나 자체 패턴과 레이돔이 안테나를 덮고 있는 경우의 방위각(H-plane) 패턴에 대한 측정 결과 및 예측 결과에 대한 비교를 나타낸다. 그림 9에서는 -50도 부근, 그림 10에서는 -70도 부근의 큰 부엽이 이미지 부엽으로서 레이돔의 내벽에 의해 반사된 전자파 성분에 의해 발생된다. 그림 9에서 이미지 부엽 준위에 대한 측정 결과와 예측 결과의 차이는 약 2 dB 정도이며, 그림 10에서는 거의 유사함을 알 수 있다.

그림 11은 사용 안테나의 운용 중심주파수에 대해 H-plane 방향과 E-plane 방향에 대한 주 보어사이트

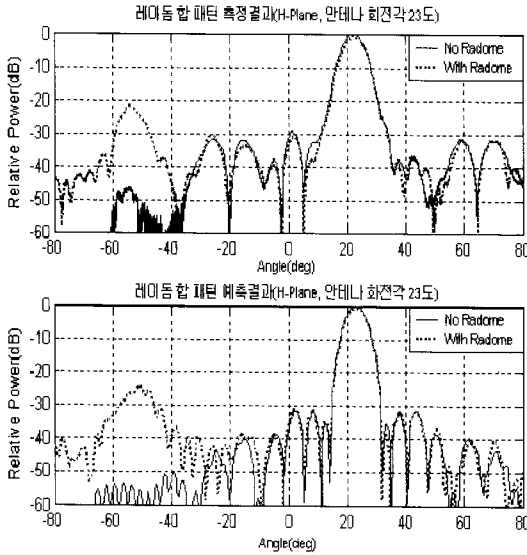


그림 9. 안테나 회전각 23도에서의 레이돔 합 패턴 측정 결과 및 예측 결과(H-plane)
 Fig. 9. Measured result and estimated result of radome sum pattern at 23 degrees(H-plane).

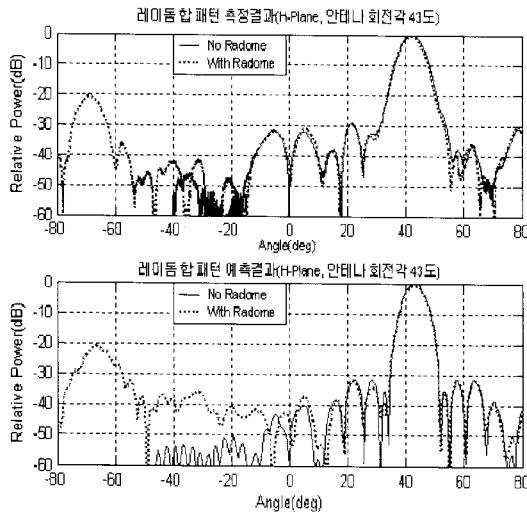


그림 10. 안테나 회전각 43도에서의 레이돔 합 패턴 측정 결과 및 예측 결과(H-plane)
 Fig. 10. Measured result and estimated result of radome sum pattern at 43 degrees(H-plane).

오차(main boresight error)의 측정 결과 및 예측 결과를, 그림 12는 투과 손실 측정 결과 및 예측 결과를 나타낸다. 두 경우 모두 일부 오차가 발생하는 것을 제외하면 측정 결과와 예측 결과의 경향 및 크기가 상당히 일치하는 것을 알 수 있다.

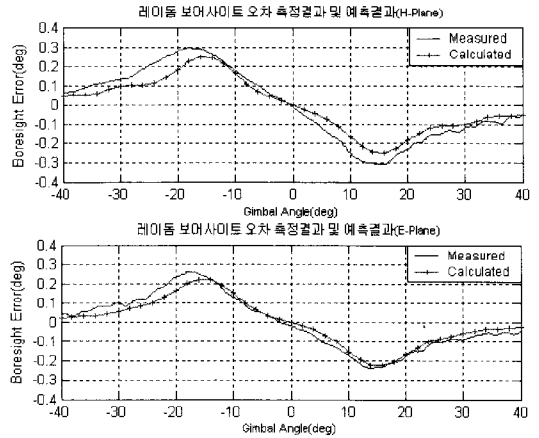


그림 11. 보어사이드 오차 측정 결과 및 예측 결과
 Fig. 11. Measured results and estimated results of radome boresight error.

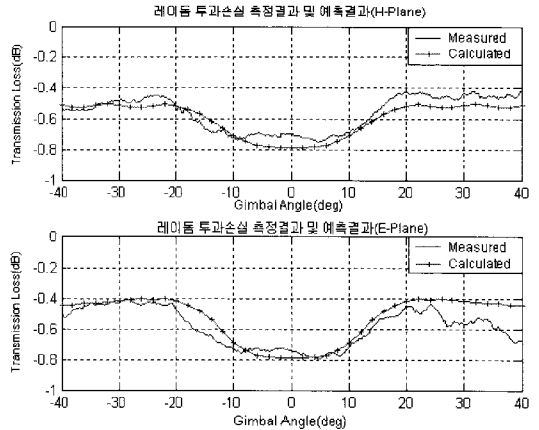


그림 12. 레이돔 투과 손실 측정 결과 및 예측 결과
 Fig. 12. Measured results and estimated results of radome transmission loss.

그림 9~12에서 일부 오차가 발생하는 원인은 첫째로는 레이돔을 국부적으로 평판으로 가정해서 발생하는 해석상의 오차 성분에 의해 발생하며, 둘째로는 레이돔 성능 분석 프로그램에 레이돔 측정 두께를 입력하였다고는 하나, 측정된 두께가 레이돔의 모든 면에 대해 수행된 것이 아니고 특정 방향에 대해서만 수행하였기 때문에 프로그램에 입력된 레이돔 두께 프로파일이 레이돔의 모든 면을 대표할 수 없기 때문에 실제 제작된 두께와 프로그램에 입력한 두께의 오차에 의해 발생하는 것으로 판단되며, 세 번째로는 제작된 안테나 특성이 이론적인 안테나 특성과 일부 다르기 때문으로 판단된다.

해석 프로그램은 Visual Fortran을 사용하여 작성하였고, 계산 시간은 보어사이트 오차 한 각도에 대해 안테나 슬롯의 개수가 150개인 경우 Pentium IV 3.4 GHz CPU로 약 110초가 소요되었다.

V. 결 론

본 논문에서는 2축 모노펄스 도파관 슬롯 배열 안테나를 이용하여 초고주파 센서용 레이돔의 전자파 특성을 해석할 수 있는 방법을 제안하였으며, 측정 결과와도 비교해 보았다. 본 논문에서 제안한 레이돔 해석 방법은 가역 정리에 기초한 반응 이론으로서 레이돔을 국부적으로 평판으로 가정하고 레이돔 내벽에서의 전자계 성분으로부터 안테나 단자 전압을 계산함으로써 레이돔의 전기적 성능을 예측하였다. 해석 결과의 타당성을 검증하기 위해 실제 레이돔을 제작하여 확인한 결과, 보어사이트 오차와 투과 손실은 예측 결과와 상당히 유사하였다. 안테나 패턴의 경우에는 실제 제작된 안테나의 패턴 특성이 이론적인 패턴 특성과 일부 달라 정확한 비교가 쉽지는 않으나 이미지 부엽 준위의 경우 유사한 경향이 있는 것을 확인하였다. 본 논문에서 제안한 해석 방법은 모든 레이돔의 형상에 대해 해석이 가능하므로 유도탄용 레이돔뿐만 아니라 항공기용 레이돔의 설계에도 적용이 가능할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

[1] D. A. James, *Radar Homing Guidance for Tactical Missiles*, Macmillan, 1986.
 [2] D. G. Burks, "A high-frequency analysis of ra-

dome-induced radar pointing error", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-30, pp. 947-955, 1982.
 [3] D. T. Paris, "Computer-aided radome analysis", *IEEE Trans. Antennas Propogat.*, vol. AP-16, pp. 262-264, Mar. 1968.
 [4] K. Siwiak, T. B. Dowling, and L. R. Lewis, "Boresight errors induced by missile radomes", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-27, pp. 832-841, Nov. 1979.
 [5] D. C. F. Wu, R. C. Rudduck, "Plane wave spectrum-surface integration technique for radome analysis", *IEEE Trans. Antennas Propogat.*, vol. AP-22, pp. 497-500, May 1974.
 [6] G. Tricoles, E. L. Rope, and R. A. Hayward, "Analysis of radomes by the method of moments method", *Proc. 17th Symp. on Electromagnetic Windows, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA*, pp. 1-8, 1984.
 [7] G. K. Huddleston, H. L. Bassett, and J. M. Newton, "Parametric investigation of radome analysis methods", in *Proc. 14th Symp. Electromagnetic Windows, Georgia Institute of Technology, Atlanta GA*, Jun. 1978.
 [8] Dennis J. Kozakoff, *Analysis of Radome-Enclosed Antennas*, Artech House, 1997.
 [9] W. L. Stutzman. *Antenna Theory and Design*, John Wiley & Sons, 1981.
 [10] R. F. Harrington, *Time-Harmonic Electro-Magnetic Fields*, New York: McGraw-Hill, 1961.

서 승 희



1992년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)
 1996년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)
 1996년 2월~현재: 국방과학연구소 연구원

[주 관심분야] 안테나, 레이돔 설계 및 수치해석

조 지 현



1996년 2월: 한국과학기술원 기계공학과 (공학사)
 1998년 2월: 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)
 2006년 2월: 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
 2006년 1월~현재: 국방과학연구소 연구원

[주 관심분야] 기계구조 설계 및 해석, 레이돔 구조설계