

# 가상 발산 계수를 이용한 Open Cavity 구조 레이다 단면적 해석

## RCS Analysis of Open Cavity Structures Using Virtual Divergence Factor

이 해 승<sup>1\*</sup> · 박 용 배<sup>2\*,\*\*</sup>

Haeseung Lee<sup>1\*</sup> · Yong Bae Park<sup>2\*,\*\*</sup>

### 요 약

본 논문에서는 곡면 공동 구조의 레이다 단면적을 정확하게 해석하기 위한 개선된 SBR 기법을 제안한다. 기존 평면 메시 기반 SBR 기법은 불연속적인 법선 벡터로 인한 반사 방향 오차와 곡률 정보 부재로 파면 변화를 추적할 수 없다는 한계를 가진다. 본 연구에서는 surface fitting으로 국부 곡률을 추정하여 연속적인 법선 벡터를 계산하고, 가상 발산 계수로 곡면 반사 시 에너지 수렴 및 발산 효과를 보정하였다. 수치 실험 결과 제안 기법은 상용 소프트웨어 대비 20 % 이상의 NRMSE 개선을 달성하였다. 제안 기법은 곡면 공동 구조의 레이다 단면적 해석에 효과적으로 활용될 수 있다.

### Abstract

This study proposes an improved shooting and bouncing rays (SBR) technique for accurate radar cross-section (RCS) analysis of curved cavity structures. Conventional flat-mesh-based SBR methods suffer from reflection direction errors because of discontinuous normal vectors and cannot track wavefront changes owing to the absence of curvature information. We employ surface fitting to estimate the local curvature, calculate continuous normal vectors, and apply a virtual divergence factor to compensate for energy convergence and divergence effects. Numerical experiments demonstrate that the proposed method achieves an NRMSE improvement of over 20 % compared to commercial software. The proposed technique can be effectively utilized for the RCS analysis of curved cavity structures.

Key words: Radar Cross Section, SBR, Open Cavity, Virtual Divergence Factor, Surface Fitting

### I. 서 론

스텔스 성능의 핵심인 레이다 단면적(RCS, radar cross section) 저감 기술은 항공기나 함정의 생존성과 직결된다. 특히, 기체 표면의 엔진 흡입구와 같은 열린 공동(cavity) 구조는 복잡한 다중 반사를 유발하여 전체 레이다 단면적

을 급격히 증가시키는 주요 원인이 된다. 따라서 설계 단계에서 공동 구조의 레이다 단면적을 정확하고 빠르게 예측하는 수치 해석 기술이 필수적이다.

열린 공동 구조의 레이다 단면적 해석에는 주로 고주파 근사기법인 SBR(shooting and bouncing rays)이 사용된다<sup>[1]</sup>. SBR 기법은 기하광학(GO, geometrical optics)과 물리광학

「본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 스텔스 대형 플랫폼 전파해석 특화연구실 사업의 일환으로 수행되었습니다 (UD200047JD).」

\*아주대학교 AI융합네트워크학과(Department of AI Network Convergence, Ajou University)

\*\*아주대학교 전자공학과(Department of Computer Science & Engineering, Ajou University)

1: 석 · 박사통합과정(<https://orcid.org/0000-0002-9404-6602>), 2: 교수(<https://orcid.org/0000-0002-7095-4614>)

· Manuscript received January 7, 2026 ; Revised January 22, 2026 ; Accepted February 15, 2026. (ID No. 20260107-12S)

· Corresponding Author: Yong Bae Park (e-mail: [yong@ajou.ac.kr](mailto:yong@ajou.ac.kr))

(PO, physical optics)을 결합하여 복잡한 형상에서의 다중 반사 현상을 효율적으로 계산할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 기존 SBR 방식은 평면 삼각형 메시를 기반으로 하기 때문에 오차가 발생하게 된다. 곡면을 평면 삼각형의 조합으로 근사하는 과정에서 인접한 면 사이의 법선 벡터가 불연속적으로 변화하며, 이는 반사 방향 계산의 부정확성으로 이어진다.

또한, 기존 SBR 기법은 광선의 파면(wavefront)에 곡면이 미치는 영향을 계산하기 위해 발산 계수(DF, divergence factor)를 도입하였으나, 곡률 정보를 알지 못하는 평면 메시 기반 곡면에서는 적용할 수 없다는 문제점을 가진다<sup>[1]</sup>. 발산 계수는 곡면 반사 시 광선 튜브의 수렴 또는 발산을 표현하는 중요한 물리량으로, 이를 고려하지 않으면 정확도가 저하된다. 특히 오목한 곡면에서는 광선이 수렴하고, 볼록한 곡면에서는 광선이 발산하는데, 이러한 효과를 제대로 반영하지 못하면 실제 레이다 단면적과 큰 차이를 보이게 된다.

이러한 한계를 극복하기 위해, 본 논문에서는 곡률 근사 기법과 가상 발산 계수(VDF, virtual divergence factor)를 결합한 기법을 제안한다. 곡률 근사 기법은 컴퓨터를 이용해 곡선과 곡면을 다루는 CAGD(omputer aided geometric design) 분야에서 연구되는 기법으로, 광선으로 모델링된 전자기장의 경로를 더 정확하게 추적할 수 있다<sup>[2]</sup>. 가상 발산 계수는 광선 튜브로 모델링된 전자기장의 단면적 변화를 이용하여 곡면의 영향을 계산하는 기법으로, 곡률이 주어지지 않은 곡면에서도 계산할 수 있다<sup>[3]</sup>. 두 기법은 산란과 계산의 정확도 향상을 위해 도입되었으나, 두 기법을 결합한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 그림 1과 같이 곡률 근사 기법과 가상 발산 계수를 결합하여 법선 벡터 연속성과 파면 변화를 모두 고려함으로써 정확도를 향상시킨 SBR 기법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 제안하는 곡률 근사 기법과 가상 발산 계수를 결합한 개선된 SBR 기법의 이론적 배경과 구현 방법을 제시한다. III장에서는 다양한 형상의 열린 공동 구조에 대한 수치 실험 결과를 제시하고, 제안 기법의 정확도를 검증한다. 마지막으로 IV장에서는 연구 결과를 요약하고 향후 연구 방향을 제시한다.

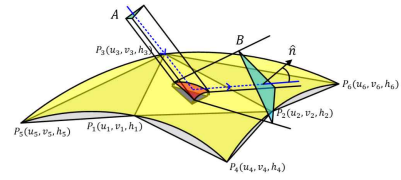


그림 1. 곡률 근사와 가상 발산 계수의 결합 개요도  
Fig. 1. Schematic diagram of the coupling between surface fitting and VDF.

## II. 해석 방법

### 2-1 Surface Fitting

곡면이 포함된 공동 구조의 레이다 단면적을 정확히 계산하기 위해서는 곡면을 올바르게 처리하는 것이 필수적이다. 평면 삼각형으로 곡면을 근사할 경우, 부정확한 법선 벡터로 인해 광선의 반사 방향을 정확하게 계산할 수 없다. 이러한 문제를 해결하기 위해 참고문헌 [4]에서는 surface fitting 기법의 도입을 제안하였다.

Surface fitting 기법은 평면 메시로 인해 불연속적으로 표현되는 표면을 수학적으로 연속적인 3차원 곡면으로 재구성하는 기법이다. 이 기법은 하나의 삼각형 및 그와 변을 공유하는 메시들의 꼭짓점 정보를 활용하여 국부적인 곡률을 추정한다. 곡면  $\vec{r}(u, v) = (u, v, h(u, v))$ 로 표현되며,  $h(u, v)$ 는 다음과 같은 2차 다항식 형태로 표현된다.

$$h(u, v) = c_{2,0}u^2 + c_{1,1}uv + c_{0,2}v^2 + c_{1,0}u + c_{0,1}v + c_{0,0} \quad (1)$$

여기서  $u, v$ 는 국부 좌표계의 U 좌표와 V 좌표이다. 계수  $c_{m,n}$ 는 대상 삼각형 및 이웃 삼각형들의 꼭짓점 좌표로부터 최소자승법을 통해 결정된다. 이렇게 추정된 곡면으로부터 곡률이 반영된 교차점  $\vec{P}(u, v)$ 를 계산할 수 있다.

$$\vec{P}(u, v) = \vec{P}_0 + u\hat{t}_1 + v\hat{t}_2 + h(u, v)\hat{n}_0 \quad (2)$$

여기서  $\vec{P}_0$ 은 기존 교차점,  $\hat{t}_1, \hat{t}_2$ 는 국부 좌표계의 기저 벡터,  $\hat{n}_0$ 는 기존 삼각형의 법선 벡터이다. 이렇게 얻은 수정된 교차점을 원점으로 하는 새로운 국부 좌표계와 기저 벡터  $\vec{p}_u, \vec{p}_v$ 를 정의할 수 있으며, 이를 이용하여 두 벡터와 수직하는 수정된 법선 벡터  $\hat{n}(u, v)$ 를 계산할 수 있다.

$$\hat{n}(u,v) = \frac{\vec{p}_u \times \vec{p}_v}{|\vec{p}_u \times \vec{p}_v|} \quad (3)$$

### 2-2 가상 발산 계수(Virtual Divergence Factor)

기존 SBR 기법에서는 곡면의 영향을 계산하기 위해 발산 계수를 도입하였다. 그러나 발산 계수는 교차점에서의 주곡률을 이용하기 때문에 곡률이 주어지지 않은 경우에는 파면의 변화를 계산할 수 없다. 가상 발산 계수는 이러한 발산 계수의 한계를 해결하기 위해 고안된 기법이다<sup>4)</sup>. 이 기법은 본래 곡률을 통해 얻어야 할 광선의 발산 (divergence) 또는 수렴(convergence)을 면적비와 각도만으로 모사한다. 에너지 보존의 관점에서, 반사 전후의 메시에 걸쳐 전력(전력밀도×면적)이 동일해야 한다. 가상 발산 계수는 이러한 원리를 바탕으로 반사 전후의 광선 튜브 단면적을 이용해 필드 세기를 보정한다.

$$VDF = \sqrt{\frac{\Sigma A}{\Sigma B \cos \alpha}} \quad (4)$$

여기서  $\Sigma A$ 는 입사 광선 튜브의 단면적,  $\Sigma B$ 는 교차 후 반사된 광선 튜브가 다음 교차점에 투영된 면적,  $\alpha$ 는 다음 교차점의 법선 벡터와 다음 교차점에 입사한 광선의 사이 각이다. 가상 발산 계수는 광선 튜브가 반사될 때마다 계산되며, 광선 튜브가 가지는 필드는 식 (5)와 같이 계산된다.

$$\vec{E}_{i+1} = VDF_i \times \Gamma_i \times \vec{E}_i \times e^{-j(\text{phase})} \quad (5)$$

여기서  $\vec{E}_{i+1}$ 은  $i+1$ 번째 교차점에서의 입사파,  $\Gamma_i$ 는  $i$ 번째 교차점에서의 반사 계수,  $\vec{E}_i$ 는  $i$ 번째 교차점에서의 입사파이다.

### III. 수치해석 결과

제안한 기법의 정확도를 검증하기 위해 서로 다른 형태의 공동에서 모노스테틱 RCS를 계산한다. 제안한 기법은 C++과 NVIDIA RTX 5070Ti를 활용한 NVIDIA OPTIX 환경에서 in-house 코드로 구현되었다. 제안한 기법을 이용하여 서로 다른 형태의 공동의 레이더 단면적을 계산하고, CST사의 microwave studio가 제공하는 MLFMM(multi-level fast multipole method) 기반의 integral equation solver와 SBR

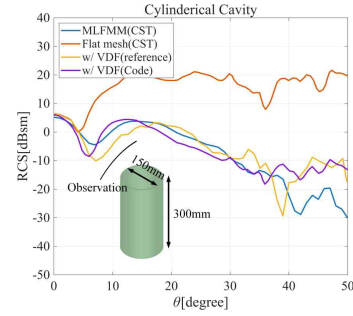


그림 2. 원통형 공동 모델에서의 레이더 단면적  
Fig. 2. RCS of cylindrical cavity model.

기반의 asymptotic solver와 비교하여 검증한다. 시뮬레이션은 X-band 레이더 주파수 대역인 10 GHz에서 진행되었고, 편파는 VV-pol이며, 모든 모델의 매질은 PEC로 설정하였다.

먼저 참고논문 [2]이 제시하였던 결과와 비교 및 검증하기 위해 단순 원통형 공동에서 모노스테틱 RCS를 계산하였다. 계산 결과는 그림 2와 같이 참고문헌 [2]와 유사한 결과를 보여 가상 발산 계수 구현이 정상적으로 이루어졌음을 확인하였다.

두 번째로 타원형 공동의 모노스테틱 RCS를 계산하였다. 상용 소프트웨어가 제공하는 곡면 고려 기법인 curved mesh 기법과 제안한 기법의 정확도를 비교하기 위해 NRMSE를 계산하였다.

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\Sigma(x - x_i)^2}{N}} / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (6)$$

여기서  $x$ 는 MLFMM의 계산값,  $x_{\max, \min}$ 은 MLFMM 계산값의 최대 및 최소값,  $x_i$ 는 비교군의 계산값이고,  $N$ 은 샘플의 개수이다. 계산 결과는 그림 3와 표 1에서 보이는 바와 같이 제안한 기법이 상용 소프트웨어보다 더 높은 정확도를 보였다. 이는 상용 소프트웨어의 curved mesh 기법은 CAD 파일에서 직접 법선 벡터와 교차점을 얻는 기법으로, 곡면에 의한 파면의 변화는 고려하지 않기 때문이다.

마지막으로 공동 내부에서 곡률이 변화하는 형태 COBRA cavity의 레이더 단면적을 계산하였다. COBRA cavity는 참고문헌 [5]에서 제안한 형태를 사용하였다. 계산 결과는 그림 4와 표 1에서 보이는 바와 같이 제안한 기법이 상용 소프트웨어보다 더 높은 정확도를 보였다. 따라서, 공동 내부에서 곡률이 변화하는 경우 또한 제안한 기

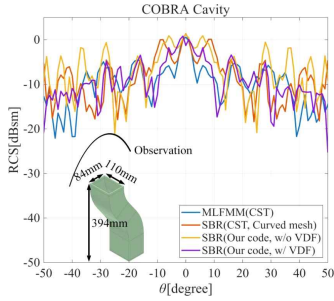


그림 3. 타원형 공동 모델에서의 레이더 단면적  
Fig. 3. RCS of elliptical cavity model.

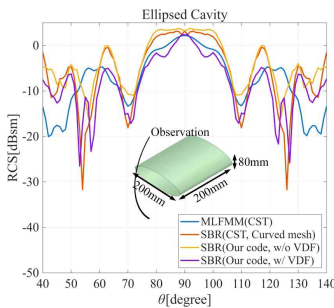


그림 4. COBRA cavity 모델에서의 레이더 단면적  
Fig. 4. RCS of COBRA cavity model

법이 상용 소프트웨어보다 높은 정확도를 제공하는 것을 보였다.

표 2에서는 제안한 기법을 SBR에 적용하였을 경우와 적용하지 않았을 경우의 계산 속도를 비교하였다. 표 1의 NRMSE 계산 결과와 비교하였을 때, 두 경우 모두 2초 이하의 계산 시간 증가로 30 % 이상 정확도가 향상되었음을 알 수 있다.

표 1. NRMSE 비교

Table 1. Comparison of NRMSE.

Model	Elliptical cavity	COBRA cavity
Curved mesh (CST)	0.2391	0.1943
SBR (in-house)	0.2691	0.2352
SBR+purposed method	0.1566	0.1539

표 2. 계산 속도 비교

Table 2. Comparison of calculating time.

Model	Elliptical cavity	COBRA cavity
SBR (in-house)	15.982	49.026
SBR+purposed method	17.688	50.304

#### IV. 결 론

본 논문에서는 곡면 표면을 가지는 open cavity 구조의 RCS를 정확하게 계산하기 위한 기법을 제안하였다. 곡률 근사 기법을 활용하여 평면 삼각 메시로 모델링된 곡면 모델에서 곡률을 계산하고, 이를 통해 법선 벡터와 교차점을 보정할 수 있다. 보정된 법선 벡터를 통해 가상 발산 계수를 계산하여 곡면의 영향을 산란파에 반영할 수 있다. 계산 결과는 CST 사의 full-wave 해석 기법과 고주파 근사 기법을 통해 검증하였으며, CST 사의 고주파 근사 기법 대비 20 % 이상의 NRMSE 개선을 보였다. 이는 제안한 기법이 법선 벡터 연속성만 보장하는 상용 소프트웨어와 달리 파면의 변화 또한 고려하기 때문이다. 따라서, 본 논문이 제안한 기법은 곡면을 가진 공동 형상의 RCS 계산에 유용하게 사용될 수 있다.

#### References

- [1] H. Ling, R. C. Chou, and S. W. Lee, "Shooting and bouncing rays: Calculating the RCS of an arbitrarily shaped cavity," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 37, no. 2, pp. 194-205, Feb. 1989.
- [2] G. Farin, J. Hoschek, and M. S. Kim, "Preface," in *Handbook of Computer Aided Geometric Design*, Amsterdam, Elsevier, pp. 213-249, 2002.
- [3] W. F. Huang, Z. Zhao, R. Zhao, J. Y. Wang, Z. Nie, and Q. H. Liu, "GO/PO and PTD with virtual divergence factor for fast analysis of scattering from concave complex targets," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 5, pp. 2170-2179, Feb. 2015.
- [4] F. Weinmann, "Curvature interpolation of faceted surfaces for high-frequency RCS simulations," in *2008 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, San Diego, CA, Jul. 2008.
- [5] J. M. Jin, J. Liu, Z. Lou, and C. S. T. Liang, "A fully high-order finite-element simulation of scattering by deep cavities," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 51, no. 9, pp. 2420-2429, Sep. 2003.