

LBVH 순회를 이용한 거대 도체 구조의 레이다 단면적 분석

Radar Cross Section Analysis of Large PEC Structures Using LBVH Traversal

윤대영^{1*} · 이해승^{2*} · 이소영^{3*} · 박용배^{4*,**}Daeyeong Yoon^{1*} · Haeseung Lee^{2*} · Soyeong Lee^{3*} · Yong Bae Park^{4*,**}

요 약

본 논문에서는 광선추적기법의 대표적인 가속화 알고리즘인 LBVH(linear bounding volume hierarchy) 기법을 이용해 거대 구조의 레이다 단면적(RCS, radar cross section)을 분석한다. 거대 구조의 전자기 특성 해석을 위해 고주파 기법중 하나인 광선추적기법을 이용하였고, 교차 검색 시간을 감소시키기 위해 이진 트리 구조인 BVH를 적용하였다. 임의의 산란체를 여러 개의 삼각형으로 분할하여 계산 속도 향상을 정량적으로 분석하였다. 계산 결과는 상용 소프트웨어 FEKO의 MLFMM 및 RL-GO와 비교하여 정확도를 검증하였다. 제안한 기법은 거대 구조의 효율적인 RCS 계산에 활용될 수 있다.

Abstract

In this study, the radar cross-section (RCS) of a large structure is analyzed using the linear bounding volume hierarchy (LBVH), which is a representative acceleration algorithm of the ray-tracing technique. A ray-tracing technique, which is a high-frequency method, is used to analyze the electromagnetic properties of large structures, and bounding volume hierarchy (BVH), a binary tree structure, is applied to reduce the intersection search time. The improvement in the calculation speed is quantitatively analyzed by dividing an arbitrary scatterer into several triangles. The calculation results are compared with those of multilevel fast multipole method (MLFMM) and ray-launching geometrical optics (RL-GO) using the Feko commercial software to verify the accuracy. The proposed technique can be utilized for the efficient RCS calculations of large structures.

Key words: Ray-Tracing, Acceleration, Radar Cross Section, Bounding Volume Hierarchy

1. 서 론

레이다 단면적(radar cross section, RCS)은 레이다의 타겟 식별을 위한 핵심적인 지표 중 하나로, 이를 정확하고 효율적으로 분석할 방법이 필요하다. 임의의 산란체의 RCS를 계산하기 위해서는 여러 수치해석 방법이 적용될 수 있다. 그러나 전기적으로 매우 큰 대형 구조물의 경우, SBR(shooting and bouncing ray) 기법^[1]과 같은 고주파 해석 기법을 이용하는 것이 효율적이다.

SBR 기법은 전자기장의 진행 방향을 광선으로, 산란

전자기장은 물리 광학법(physical optics, PO)을 적용한다. 즉, 광선추적기법과 물리광학법이 결합된 형태로 이는 컴퓨터 그래픽스 분야의 렌더링 과정과 일치한다. 렌더링하고자 하는 파일을 입력하는 과정은 우리가 해석하고자 하는 산란체로, 조명을 위치시켜 빛이 방사하는 것은 평면파의 입사 방향, 그리고 카메라의 위치는 관측점의 위치, 마지막으로 계산되는 이미지의 색상은 산란 전자기장으로 매핑될 수 있다. 공통적으로 물체와 광선과의 가장 가까운 교점을 찾는 문제로 귀결된다.

최근 컴퓨터 그래픽스 분야의 급속한 발전으로 인해

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

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

**아주대학교 전자공학과(Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University)

1: 석 · 박사통합과정(<https://orcid.org/0000-0002-4811-4969>), 2: 석사과정(<https://orcid.org/0000-0002-9404-6602>),

3: 석 · 박사통합과정(<https://orcid.org/0000-0002-4850-6268>), 4: 교수(<https://orcid.org/0000-0002-7095-4614>)

· Manuscript received August 26, 2022 ; Revised September 13, 2022 ; Accepted September 23, 2022. (ID No. 20220826-065)

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

새로운 가속화 알고리즘들이 많이 제시되고 있다. 특히 LBVH(linear bounding volume hierarchy)는 각 삼각형에 해당하는 Morton code를 생성해 데이터를 나열하여 계층을 구성하는 방법이다. 이는 기존 BVH(bounding volume hierarchy)에 비해 균일한 품질을 기대할 수 있으며, 병렬화에 유리하다^[2]. 이전 BVH 또는 K-D(K-Dimensional) tree, octree와 같은 기법을 활용한 레이더 단면적 연구는 일부 수행되었으나^{[3]~[6]}, LBVH 기법을 이용하여 레이더 단면적 계산에 활용한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 광선추적기법의 대표적인 가속화 알고리즘인 LBVH 기법을 이용해 거대 구조의 RCS를 계산한다. II 장에서는 LBVH 기법 구현에 대한 간단한 소개와 계산에 사용된 수식에 관해 서술하였다. III 장에서는 mesh의 정밀도에 따라 RCS의 값의 차이에 관해 서술하였고, 그 결과는 상용 소프트웨어 Feko^[7]의 full-wave 기법의 하나인 MLFMM(multilevel fast multipole method) 솔버와 고주파 기법인 RL-GO(ray-launching geometrical optics) 솔버를 이용하여 비교하였다. 제안한 기법은 상용 소프트웨어와 비교하였을 때, 개선된 계산 속도를 보이며, 이를 통해 제안한 기법은 대형 구조물의 RCS 계산에 효율적으로 사용될 수 있다.

II. RCS 해석 방법

2-1 Linear Bounding Volume Hierarchy

LBVH는 광선추적법의 교차 검사 수를 감소시키는 가속화 기법의 하나다. 먼저 그림 1과 같이 입력된 삼각형을 임의의 bounding box로 설정하여 노드를 생성한다. 생성된 노드와 인접한 노드끼리 또 다른 bounding box를 생성하는 과정을 계속 진행하여 물체 전부를 포함하는 커다란 bounding box를 구성한다. 결과적으로 이는 이진 트리 구조로 표현된다. 이어 ray와 box 간의 충돌 검사를 진행하고, 교차하는 경우, 하위 노드로 이동해 충돌 검사를 진행한다. 그리고 충돌하지 않는 box의 경우, 하위 노드를 방문하지 않으므로 검색 횟수를 줄일 수 있다.

인접한 노드로 판단하기 위한 데이터를 정렬하는 방법으로 Morton code(또는 Z-order curve)를 이용한다. 이는 다차원의 데이터 정렬에 유용하게 사용할 수 있는 방법으로, 데이터의 입력 범위를 0과 1 사이로 조정하여 크기

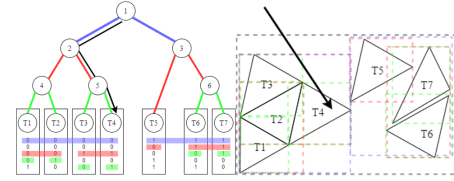


그림 1. LBVH 트리 구조와 광선의 접근 경로

Fig. 1. LBVH tree structure and ray access path.

비교를 진행한다. 상세한 과정은 참고문헌 [8]에 서술되어 있다. Morton code를 이용하여 삼각형의 데이터를 정렬한 이후에는 code의 접두비트가 달라지는 지점에서 계층을 분할한다.

2-2 Physical Optics

광선 추적기법을 이용해 광선이 도달한 지점을 조명 영역(lit region), 도달하지 못한 지점을 미조명영역(non-lit region)으로 구분한 이후, PO 기법을 이용하여 PEC에 여기되는 표면 전류를 식 (1)과 같이 정의^[9]할 수 있다.

$$\vec{J}_{PO} = \begin{cases} 2\hat{n} \times \vec{H}_i & \text{lit region} \\ 0 & \text{non-lit region} \end{cases} \quad (1)$$

여기서 \hat{n} 은 조명 영역의 표면 법선 벡터, 그리고 \vec{H}_i 는 조명 영역에 도달한 광선의 자기장이다. 이어 산란파는 위 표면 전류를 이용해 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$\vec{E}_s \approx -\frac{j}{2\lambda_0} \frac{e^{-j\beta_0 r}}{r} \int_s (\hat{r} \times \eta_0 \vec{J}_{PO} \times \vec{r}) e^{j\beta_0 \hat{r} \cdot \vec{r}'} ds \quad (2)$$

여기서 λ_0 는 자유공간에서의 파장, β_0 는 자유공간에서의 전파상수, η_0 는 자유공간에서의 고유임피던스를 나타낸다. 이어 \vec{r}' 은 조명 영역의 위치를 나타내며, \vec{r} 은 산란파 관측 지점, \hat{r} 은 관측 지점에 대한 방향 벡터, r 은 관측 지점까지의 거리이다. 이어 산란파와 입사파의 비율을 이용해 레이더 단면적을 계산할 수 있다.

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} \quad (3)$$

III. 시뮬레이션 결과 및 분석

계산에 사용된 대형 구조물 모델은 그림 2와 같다. 그림 2(a)는 폭과 높이가 2 m, 깊이가 9 m인 단순 선박 모델이며, 그림 2(b)는 폭이 14 m, 깊이가 19 m, 그리고 높이

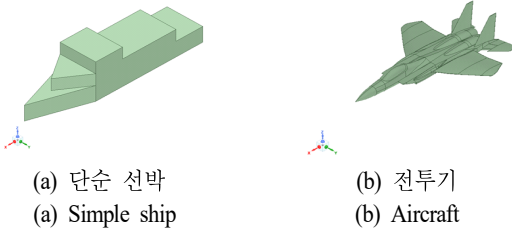


그림 2. 계산에 사용된 모델
Fig. 2. Model used in calculations.

가 4m의 복잡한 형상을 가진 전투기 모델이다.

3-1 삼각형 개수에 따른 계산 속도 및 RCS 분석

삼각형 개수에 따른 계산 속도 및 모노스태틱 RCS의 변화를 분석하기 위해 그림 2의 같은 형상으로 삼각형의 개수를 늘려가며 계산시간과 RCS를 분석하였다. 그림 3은 삼각형 개수에 따른 계산시간의 변화를 보여준다. 범례의 LBVH는 제안한 알고리즘을 적용(LBVH traversal)한 결과이며, triangle은 LBVH 알고리즘을 적용하지 않고 탐색을 진행(triangle traversal)한 결과이다. 분석을 진행한 주파수는 10 GHz, 편파는 V-pol, 수직입사를 가정하였고, 약 1,100만 개의 광선이 생성되었다. 삼각형 개수가 44개인 경우, LBVH의 계산시간은 10 s, triangle의 계산시간은 4.3 s로 알고리즘을 적용하지 않은 경우가 더 빠른 결과를 보이나, 삼각형 개수가 200개를 넘어가는 경우 격차가 벌어지기 시작한다. 일례로 삼각형 개수가 3,670개인 경우, LBVH의 계산시간은 84.8 s이며, triangle의 경우 382.3 s로 약 4배 이상의 속도 차이를 보인다. 이어 전투기 모델은 약 7,300만 개의 광선이 발사되었다. 전투기 모델의 삼

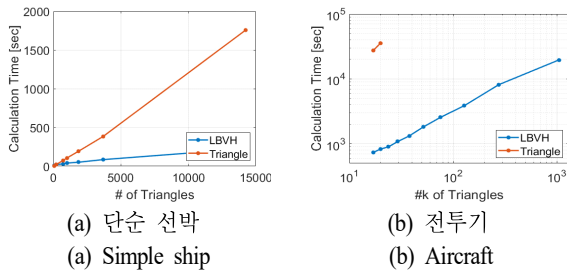


그림 3. 삼각형 개수에 따른 계산시간 변화(single core)
Fig. 3. Calculation time change according to the number of triangles (single core).

각형이 약 17,000개 가량으로 분할된 경우 LBVH는 731.3 s, 그리고 triangle은 27,173.3 s(9시간)로 37배 이상의 계산 속도 차이를 보인다. 그리고 그 이상의 mesh가 발생하는 경우, LBVH 알고리즘을 적용하지 않으면 계산할 수 없을 정도의 시간이 필요하다.

이어 그림 4에서는 삼각형 개수에 따른 모노스태틱 RCS의 변화에 대해 분석하였다. 단순 선박의 경우, 형상이 매우 단순하여 삼각형 분할 정도에 따라 RCS의 변화가 없음을 확인할 수 있다. 하지만 곡면 형상이 많아 모델이 비교적 복잡한 전투기의 경우, 삼각형 개수가 많아짐에 따라 RCS가 최대 1.5 dB가 변화한다.

3-2 상용 소프트웨어와의 비교 및 검증

제안한 구조의 정확성을 검증하기 위해 상용 소프트웨어 Feko의 MLFMM과 RL-GO를 바탕으로 그림 5와 같이 결과를 비교하였다. 주파수는 10 GHz, 편파는 V-pol, 그리고 입사각은 고도각 θ 가 0도에서 180도로 변한다고 가정하였다. 두 기법 간의 정량적인 오차를 분석하기 위해 표준 편차를 식 (4)와 같이 가정하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |\sigma_n^{our} - \sigma_n^{feko}|^2} \quad (4)$$

여기서 N 은 RCS 데이터 배열의 크기이다. 그리고 RCS의 단위는 dBsm이므로 RMSE 단위는 dB이다.

단순 선박의 경우, MLFMM과 비교를 수행하였고, 5.63 dB의 차이를 보인다. 우리가 제안한 기법은 회절을 고려하지 않았기에 이와 같은 차이를 보이는 것으로 파악된다. 다만 다중 반사로 인해 RCS가 큰 지역($\theta \in [0^\circ, 90^\circ]$)에서는 상용 소프트웨어가 비교적 작은 오차(0.31 dB)를

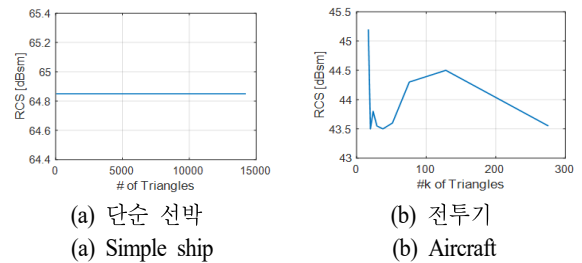


그림 4. 삼각형 개수에 따른 RCS 변화
Fig. 4. RCS change according to the number of triangles.

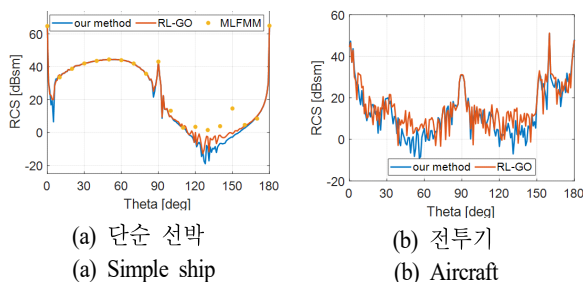


그림 5. 상용 소프트웨어와의 비교

Fig. 5. Comparison with commercial software.

보여준다. 반면 전투기 모델의 경우, 각기 상이한 모델링으로 인해 오차가 발생하나, 이 역시 RCS가 큰 영역($\theta \in 0^\circ, 90^\circ, 160^\circ, 180^\circ$)에서는 작은 오차를 갖는다. 전투기 모델의 경우, RL-GO와의 비교만 수행하였고, 약 5.37 dB의 RMSE를 보인다. 단, 이 모델의 경우, MLFMM 솔버로는 분석할 수 없어 결과에 대한 검증은 수행하지 못하였다.

이어 표 1과 같이 Feko의 RL-GO와 제안한 방법 간의 계산 속도를 비교하였다. 코드는 CPU 병렬 연산을 이용하여 구현하였고, 두 프로그램 모두 같은 환경(CPU - Ryzen9 5950X, 16core, 3.4 GHz, RAM - 128 GB)하에서 구동되었다. 또한 비슷한 삼각형 수를 갖도록 설정하였다. 비교 결과, 제안한 방법을 이용하였을 때 Feko의 RL-GO와 비교 시 빠른 연산 속도를 보인다. 따라서, 제안한 방법을 이용하여 대형 구조물의 RCS 계산의 연산 속도를 개선할 수 있음을 보인다.

IV. 결 론

본 논문에서는 광선 추적 가속화 기법의 하나인 LBVH를 적용하여 RCS를 계산하였다. LBVH 기법을 적용하여 광선추적법의 교차 횟수를 획기적으로 줄여 계산시간을 확보할 수 있음을 보여주었다. 복잡한 형상의 경우, 삼각

표 1. 상용 소프트웨어와의 RCS 계산 비교

Table 1. Comparison of calculation time with commercial software (multi core).

	Simple ship		Aircraft	
	Computing time [s]	Number of triangles	Computing time [s]	Number of triangles
FEKO RL-GO	462.2	44	50,029.7	21,461
Our method	192.2	44	6,191.9	21,206

형의 정밀도에 따라 RCS의 값이 달라짐을 확인할 수 있다. 또한, 제안한 기법은 상용 소프트웨어와 비교하였을 때, 개선된 계산 속도를 보이며, 이를 통해 제안한 기법은 대형 구조물의 RCS 계산에 효율적으로 사용될 수 있다.

References

- [1] O. Tuglar, K. Durgut, and A. A. Ergin, "A simple and efficient SBR implementation for RCS calculation using target scaling," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 5, pp. 3680-3687, May 2022.
- [2] C. Lauterbach, M. Garland, S. Sengupta, D. Luebke, and D. Manocha, "Fast BVH construction on GPUs," *Computer Graphics Forum*, vol. 28, no. 2, pp. 375-384, Apr. 2009.
- [3] S. Suk, T. I. Seo, H. S. Park, and H. T. Kim, "Multi-resolution grid algorithm in the SBR and its application to the RCS calculation," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 29, no. 6, pp. 394-397, Jun. 2001.
- [4] Y. B. Tao, H. Lin, and H. Bao, "Kd-tree based fast ray tracing for RCS prediction," *Progress in Electromagnetics Research*, vol. 81, pp. 329-341, Feb. 2008.
- [5] A. Breglia, A. Capozzoli, C. Curcio, A. Liseno, and J. Piccinotti, "GPU implementation of hybrid GO/PO BVH-based algorithm for RCS predictions," in *2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, Vancouver, BC, Jul. 2015, pp. 1500-1501.
- [6] F. Dikmen, A. A. Ergin, A. L. Sevgili, and B. Terzi, "Implementation of an efficient shooting and bouncing rays scheme," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 52, no. 11, pp. 2409-2413, Nov. 2010.
- [7] ALTAIR, "Altair® Feko®: Solving connectivity, compatibility, and radar challenges." Available: <https://www.altair.com/feko>
- [8] T. Park, "Analysis of morton code conversion for 32 bit IEEE 754 floating point variables," *Journal of Digital Contents Society*, vol. 17, no. 3, pp. 165-172, Jun. 2016.
- [9] H. Shin, S. Lee, D. Park, J. Shin, M. Chung, and S. Park, et al., "Analysis of radar cross section of the integrated mast module for battleship," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 28, no. 7, pp. 584-587, Jul. 2017.