

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 46(1), 78-85(2018)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2018.46.1.78

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

가장자리 형상의 레이더 반사 면적 해석에서 물리광학기법의 적용 한계

백상민*

Allowable limit of physical optics in radar cross section analysis of edge shape

Sang-Min Baek*

Agency for Defense Development (ADD)*

ABSTRACT

As a numerical analysis technique to predict the radar cross section of an aircraft, a full wave method or an asymptotic method is mainly used. The full-wave method is expected to be relatively accurate compared with the asymptotic method. The asymptotic method is numerically efficient, and it is more widely used in the RCS analysis. However, the error that occurs when estimating the RCS using the asymptotic method is difficult to predict easily. In this paper, we analyze the allowable limits of physical optics by constructing a wedge-cylinder model and comparing the RCS prediction results between the method of moment and physical optics while changing the edge shape. Finally, this study proposes a criterion for allowable limit of physical optics in the RCS estimation.

초 록

항공기의 레이더 반사 면적을 예측하기 위한 수치해석 방법으로 전파기법(Full-wave method) 또는 점근기법(Asymptotic method)이 주로 이용된다. 전파기법은 점근기법에 비하여 상대적으로 정확한 해석결과를 기대할 수 있으나, 점근기법은 수치적으로 효율성이 높아 레이더 반사 면적 해석 시에는 점근 기법이 보다 널리 활용되고 있다. 그러나 점근기법을 이용하여 레이더 반사 면적을 예측할 때 발생하는 오차는 쉽게 예상하기 어렵다. 본 논문에서는 썩기-원통형 해석 모델을 구성하고, 가장자리 형상을 변화시키면서 모멘트법과 물리광학기법의 레이더 반사 면적 예측 결과를 비교하여 물리광학기법의 적용 한계를 분석한다. 마지막으로 레이더 반사 면적 예측 시 물리광학기법의 적용 한계에 대한 기준을 제시하고자 한다.

Key Words : Radar Cross Section(레이더 반사 면적), Method of Moments(모멘트법), Physical Optics(물리광학기법), Diffraction(회절)

† Received : September 11, 2017 Revised : November 29, 2017 Accepted : December 20, 2017

* Corresponding author, E-mail : smbak@add.re.kr

I. 서 론

항공 무기체계는 적으로 부터의 탐지 가능성을 감소시키기 위해, 형상 설계를 통해 반사파를 비위험지역으로 산란시켜 주요영역에서 목표치 이하의 레이더 반사 면적 (RCS, Radar Cross Section) 을 달성한다[1]. 대상물의 RCS 수준을 예측하고, 영향을 주는 주요 반사요소를 분석하기 위해서는 구조물을 직접 제작하여 실측하는 방법이 있으나, 항공기와 같은 대형구조물의 RCS 측정은 많은 비용과 시간을 필요로 한다. 이에 전자기 해석 기법들을 통해 수치적으로 RCS를 추산하는 여러 방법들이 제시되었다[2,3]. 구조물에서 발생하는 전자기 산란 현상 분석을 위해서 전파기법에 해당하는 유한요소법(FEM, Finite Element Method)과 모멘트법(MoM, Method of Moment)[4] 또는 고주파 근사 기법으로 불리는 점근 기법(Asymptotic method)에 해당하는 물리광학기법(PO, Physical Optics)[5], 기하광학기법(GO, Geometrical Optics)[6] 등의 수치 해석 기법들이 이용될 수 있다.

유한요소법, 모멘트법과 같은 전파기법의 경우 높은 해석 정확도에도 불구하고 높은 해석 비용 (Computational cost)이 발생하여 소형 구조물 또는 저주파영역의 해석에 적용하기에 유용한 방법이다. 반면에 물리광학기법, 기하광학기법과 같은 점근 기법은 상대적으로 적은 해석 자원이 소요되며 대형 구조물 및 고주파영역의 전자기 산란 해석에 널리 이용되고 있다[7-9]. 따라서 대형 구조물의 RCS 예측을 위해서는 전파기법 보다는 점근기법의 활용도가 높다. 그러나 점근 기법은 구조물 가장자리에서 발생하는 회절(Diffraction)을 표현할 수 없으므로 해석 대상물의 형상에 따라 해석 정확도가 크게 달라진다[10]. 점근 기법의 이러한 단점을 보완하기 위하여 PTD(Physical Theory of Diffraction)[11], GTD(Geometrical Theory of Diffraction)[12] 또는 전파기법과 점근 기법을 혼용하는 하이브리드 기법 (Hybrid Method)등이 방법이 개발되었다[13]. 그러나 새로운 해석 기법들의 개발에도 불구하고 기존의 물리광학기법 및 기하광학기법은 적은 해석 자원으로 상당한 수준의 해석 정확도를 기대할 수 있다. 단, 이미 언급한 바와 같이 가장자리에서의 회절에 의한 계산 오차는 항상 염두에 두어야 한다.

앞서 언급한 바와 같이 많은 연구자들에 의하여 기존의 점근기법의 정확도를 향상시키고자 하는 노력이 있었고 가장자리에서의 회절을 고려하지 않았을 경우 발생할 수 있는 오류에 대한 연구 결과가 발표되었다. 그러나 회절을 고려하지 않았을 때 정확한 해석 결과를 기대할 수 있는

정량적인 판단 기준은 보고된 바가 없다. 본 연구에서는 가장자리 형상을 가진 대상물의 RCS 를 해석함에 있어, 형상에 따른 점근기법의 한계를 파악하고 점근기법의 적용에 있어 회절을 고려하지 않고도 정확한 해석 결과를 도출할 수 있는 정량적인 판단 기준을 마련하고자 한다.

본 논문에서는 기존의 회절이론을 고려하지 않은 물리광학기법을 RCS 예측에 적용할 때 모멘트법만큼의 해석 정확도를 기대할 수 있는 적용 기준을 제시한다. 썬기-원통형의 해석 모델을 구성하고 곡면형, 절단형 등 다양한 가장자리 형상에 대하여 사례연구를 진행하여 정량적인 적용 기준을 제안한다. RCS해석을 위해 상용 전자기 해석 소프트웨어인 FEKO를 사용하였다[14].

II. 전자기파 해석 기법

RCS, σ 는 대상물과 레이더의 간의 거리 R이 무한대 일 때 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|\vec{E}_s|^2}{|\vec{E}_i|^2} \quad (1)$$

여기서, \vec{E}_i 및 \vec{E}_s 은 각각 산란체에 입사된 전기장과 산란체에 의해서 산란된 전기장이다. 따라서 RCS를 계산하기 위해서는 산란체에 의해서 산란된 전기장을 계산하여야 한다. 산란된 전기장은 입사 전기장에 의해 산란체에 유기된 표면전류를 통해 계산될 수 있다.

2.1 모멘트법을 이용한 표면전류 계산

산란체로 입사하는 전기장 \vec{E}_i 을 알고 있다면 다음의 식 (2)와 같이 산란체 표면에 유기되는 표면 전류(Surface Current) \vec{J}_s 와 입사 전기장의 접선방향 성분인 $\vec{E}_{i|\tan}$ 의 관계를 연산자 L 을 이용하여 표현할 수 있다[15].

$$\vec{E}_{i|\tan} = L(\vec{J}_s) \quad (2)$$

연산자 L 은 접선 방향 입사 전기장과 산란체 표면에 유기되는 표면전류 사이의 물리적 관계를 나타내는 것으로 전기기파가 전파되는 필드의 특성을 나타낸다. 즉, 전계적분방정식(EFIE, Electric Field Integral Equation)을 이용하여 두 물리량 사이의 관계를 표현할 수 있다. 모멘트 방법은 이러한 전계적분방정식의 해를 구하는 방법을 의미하며 Weighted Residual, Collocation, Subdomain, Galerkin Method 등 다양한 방법을 적용할 수 있

다. 이러한 수치적분방법을 이용할 경우 산란체 표면에 유기되는 전류는 식 (3)과 같이 각각 N 개로 이루어진 기저함수(Basis function) \vec{J}_n 와 계수 I_n 의 합으로 표현된다.

$$\vec{J}_s = \sum_{n=1}^N I_n \vec{J}_n \quad (3)$$

따라서, 식 (2)와 (3)을 이용하여 다음의 행렬 방정식을 구성할 수 있다.

$$\mathbf{V} = \mathbf{Z}\mathbf{I} \quad (4)$$

식 (4)에서 행렬 \mathbf{Z} 는 임피던스 행렬, \mathbf{V} 는 입력 전기장에 의한 벡터, 그리고 \mathbf{I} 는 계수 행렬을 의미한다. 이 행렬연산을 통하여 표면전류를 구한다.

2.2 물리광학기법을 이용한 표면전류 계산

물리광학기법은 모멘트법과 달리 고주파 경계조건을 이용하여 단순화된 방법을 통하여 산란체 표면의 전류 분포를 계산한다. 따라서 산란체 표면의 전류 분포를 계산하는데 있어서 맥스웰방정식을 직접적으로 계산하지 않으므로 모멘트법에 비하여 높은 계산효율성을 가지고 있는 방법이다. 이러한 장점으로 인해 비행체 개념설계 단계에서 주로 활용되고 있다[16,17]. 그러나 고주파 경계조건 즉, 큰 평판형 전도체 조건으로 인하여 가장자리부위에서의 회절을 고려할 수 없는 단점이 있다.

산란체에서 입사파에 노출된 표면에서의 표면전류는 아래의 식 (5)와 같이 산란체 표면의 법선벡터 \hat{n} 과 입사 전기장의 자기장 \vec{H}_i 와의 외적으로 계산할 수 있다.

$$\vec{J}_s \approx 2\hat{n} \times \vec{H}_i \quad (5)$$

그러나 만약에 산란체의 어떤면이 입사파에 의해서 노출되지 않는 경우에는 아래와 같이 정의된다.

$$\vec{J}_s = 0 \quad (6)$$

III. 해석 기법에 따른 RCS 변화

3.1 썩기-원통형 해석 모델

본 연구에서는 가장자리 형상의 변화에 따른 RCS 해석 결과를 적용된 해석기법별로 비교하였다. 항공기 구조에서 주로 볼 수 있는 날개 단면형상을 Fig. 1과 같이 썩기-원통형의 모델로 단순화하여 해석 모델을 구성하였다.

우선, 전자기파의 입사 방향에 따른 모노스태틱(Mono-static) RCS를 계산하였다. 해석 주파수는

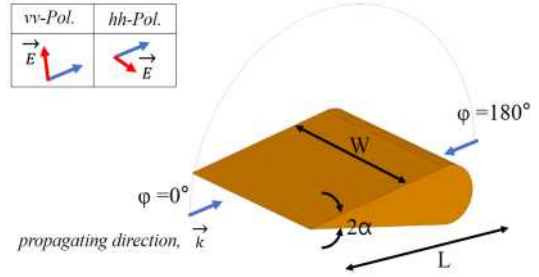


Fig. 1. RCS analysis set up for baseline model

10 GHz이며, 해석을 위한 요소의 평균 크기는 주파수 파장의 약 1/12(=2.5 mm) 수준으로 설정하였다. 해석 주파수를 고려하여 썩기-원통 모델의 총 길이(L) 및 너비(w)는 300 mm 로 설정하였으며[18] 썩기와 원통이 만나는 부분에서 전자기파 산란에 의한 효과를 최소화하기 위하여 썩기와 원통의 면이 서로 접하도록 부드럽게 연결하였다. 기본형상의 썩기의 각도(α)는 10° 이며, 이 때 오른쪽 가장자리의 반경 R은 44.39 mm이며 이다. 수직편파와 수평 편파의 방향은 Fig. 1과 같이 각각 설정하였다.

모멘트법, 물리광학기법을 이용하여 RCS를 추정 한 결과는 Fig. 2와 같다. 수직편파, 수평편파에 대한 해석 결과를 각각 비교하였으며 모멘트법과 물리광학기법을 통하여 얻어진 해석 결과가 약 60도 이하에서는 상당한 차이를 보였으며 그 이상의 고각에서는 거의 유사한 결과를 보였다. 이는 고각이 증가하게 되면 해석 모델 상면의 크고 평평한 반사면에 의하여 야기되는 전자파 반사에 비하여 가장자리의 전자파 회절에 의한 RCS에 대한 기여도가 상대적으로 떨어지기 때문으로 생각된다.

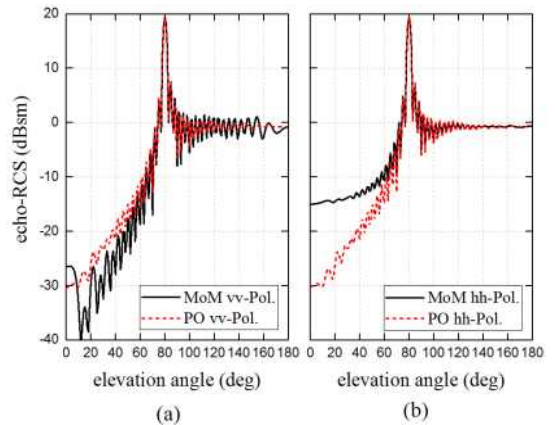


Fig. 2. RCS of baseline model; vv-Pol. (a), hh-Pol. (b)

따라서 본 논문의 목표는 전자파 회절이 RCS의 예측 결과에 얼마나 영향을 주고 전자파 회절을 고려하지 않고도 전파해석 기법과 유사한 정확도를 기대할 수 있는 점근기법의 적용 기준을 조사하는 것이므로 고각 60° 이하를 중심으로 썸머의 가장자리 형상 변화에 따른 RCS 변화를 관찰하였다.

다음으로 Fig. 3과 Fig. 4에서는 기본 형상에 대하여 모멘트법과 물리광학기법 각각에 대하여 제안된 모델의 상면의 중심선에 유기되는 전류 밀도를 분석하였다. Fig. 3과 Fig. 4에서 가로축은 해석 모델 상에서 형상적 주요 위치를 뜻한다. 날카로운 가장자리(Edge), 썸머-원통 연결부(Join), 후방 원통 부(Rear)로 표기하였다.

모멘트법은 식 (4)의 관계식을 이용하여 산란 현상에 관계되는 모든 파동 현상이 표면 전류 산출에 이용되므로 Fig. 3과 같이 위치에 따른 표면 전류가 요동하는 현상을 관찰할 수 있다. 따라서, 모멘트법으로 추출된 표면 전류는 끝단에서의 회절 효과와 해석 대상물의 표면으로 진행되는 표면파의 영향으로 볼 수 있다. 반면에 물리광학기법은 식 (7)과 같이 대상물의 법선벡터와 입사자기장의 외적을 이용하여 표면전류를 계산하게 되므로 Fig. 4와 같이 평평한 영역에서는 (Edge와 Join 사이) 표면 전류 값이 동일하게 적용됨을 알 수 있다. 결국, 예측된 표면전류의 차이로 인해서 최종적인 레이더 반사면적 값에 차이가 발생하게 된다.

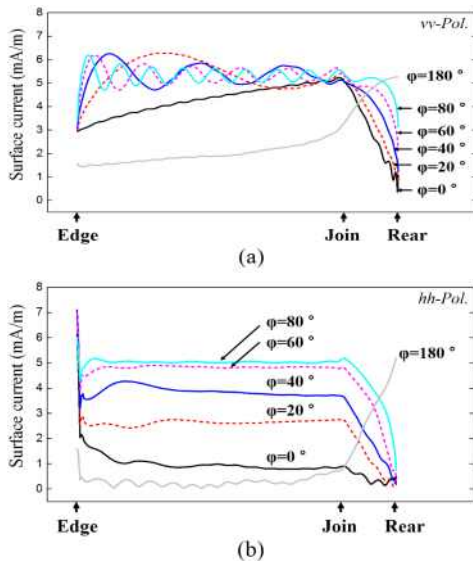


Fig. 3. Surface current distribution of baseline model using MoM; vv-Pol. (a), hh-Pol. (b)

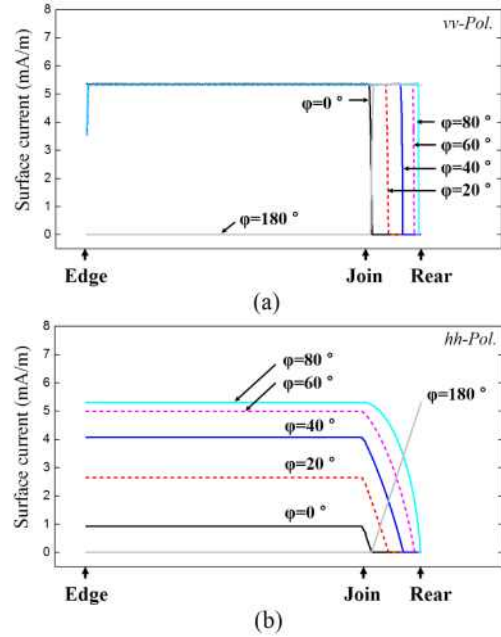


Fig. 4. Surface current distribution of baseline model using PC; vv-Pol. (a), hh-Pol. (b)

3.2 원형 가장자리 모델

본 절에서는 Fig. 5의 썸머-원통형 모델에 대한 RCS 예측 결과를 수록하였다. 가장 자리 형상의 영향성을 비교하기 위하여 형상의 왼쪽 가장자리를 반경 r의 원형으로 변경하였다. 앞서 언급한 바와 같이 RCS를 예측하기 위하여 모멘트법과 물리광학기법을 적용하였다.

Figure 6는 왼쪽 가장자리의 전방공률을 해석 주 파수 파장의 0.1배에서 0.3배까지 증가시켜가면서 RCS 변화를 도시한 그림이다. 모멘트법의 해석 결과는 실선으로 나타내었으며 점선은 물리광학기법으로 예측된 RCS를 나타낸다. Fig. 6에서 알

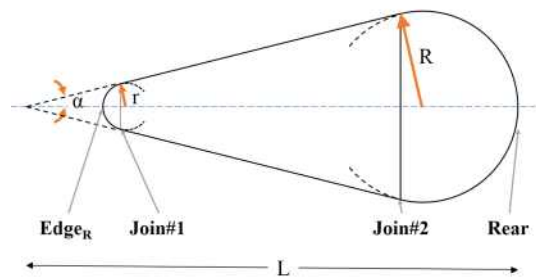


Fig. 5. Wedge-cylinder model with round nose

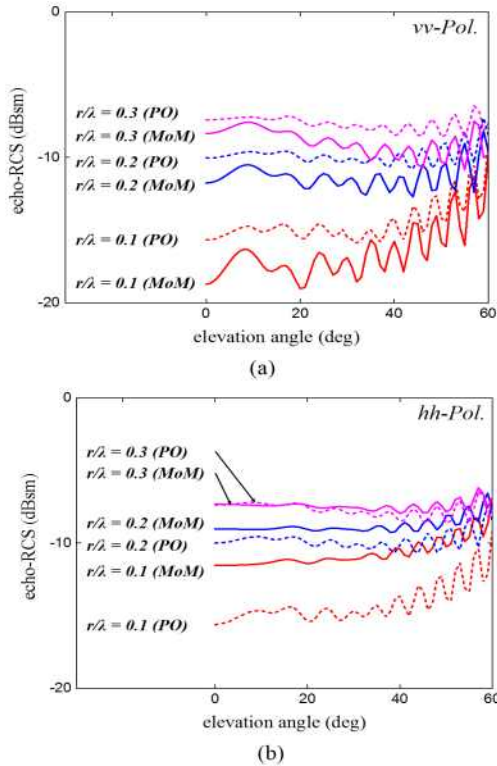


Fig. 6. RCS of round nose model; vv-Pol. (a), hh-Pol. (b)

수 있듯이 가장자리의 반경이 증가할수록 모멘트 법과 물리광학기법으로 예측한 RCS가 점차 근접함을 확인할 수 있다. 이것은 가장자리의 반경이 증가하면서 해석 대상물의 형상이 편평하다는 물리광학기법의 가정과 점점 근사해지기 때문으로 생각된다. 따라서 3차원 형상의 구조물이 이러한 근사가 타당한 형상을 가지고 있다면 많은 해석 자원을 요구하는 모멘트법을 이용하지 않고서도 충분한 해석정확도를 기대할 수 있다는 것을 의미한다. 또한, 모멘트법과 물리광학기법의 해석결과 차이는 전자파 회절에 의해서 발생하므로, 수평편파의 경우에 수직편파에 비하여 두 해석 방법에 의한 RCS 예측결과 차이가 상대적으로 미미함을 확인할 수 있다. 따라서 원형 가장자리의 경우에 해석 대상물의 가장자리가 일정 이상의 크기를 가지고 있다면 수직/수평 편파 모두 물리광학기법 만을 가지고도 전파해석 기법인 모멘트법에 근접하는 해석결과를 기대할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

보다 일반적인 결과를 도출하기 위하여 왼쪽 가장자리의 경사각(α)을 변화시키면서 모멘트법과 물리광학기법으로 각각 전방 RCS를 계산하였다. Fig. 7에

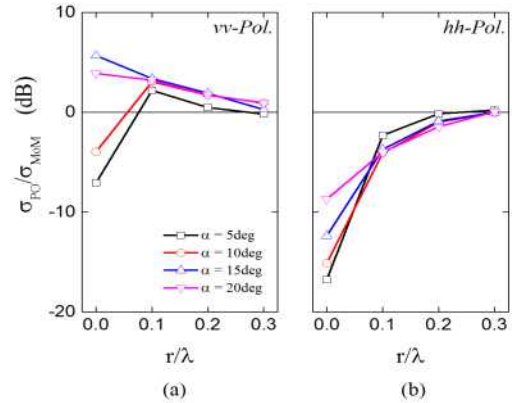


Fig. 7. Round nose contribution to RCS; vv-Pol. (a), hh-Pol. (b)

서 가장자리 곡률이 각 기법별 RCS 계산에 끼치는 영향을 살펴보았다. 가로축은 해석 주파수의 파장에 대한 가장자리 반경의 비를 의미하며, 세로축은 모멘트법으로 계산된 RCS에 대한 물리광학기법으로 계산된 RCS 비를 dB 값으로 나타내었다. 모멘트법으로 계산된 RCS를 기준으로 하여 물리광학기법이 RCS 계산 추세를 확인할 수 있다. 가장자리 경사각 5°에서 20°에 대해 해석을 수행하였다.

Figure 7에서 볼 수 있는 바와 같이 수직편파뿐만 아니라 수평편파에서도 왼쪽 가장자리의 반경이 파장의 0.3배에 근접할 경우에 모멘트법 및 물리광학기법으로 예측된 RCS가 거의 동일함으로 확인할 수 있었다. 다시 말하면, RCS를 해석할 때 원형가장자리의 반경이 해석 주파수 파장의 0.3배일 경우 전자기 회절을 고려하지 않고도 충분한 해석 정확도를 확보할 수 있으며 전자기 회절을 고려하기 위한 PT, GTD 등의 이론을 적용하지 않아도 될 것이라 판단된다.

원형 가장자리 반경이 해석 주파수 파장의 0.3배에 근접하였을 때, 제안된 모델 상면에 유기된 표면전류를 Fig. 8과 같이 나타내었다. 전방 곡률에 의해 수직반사면이 형성되어 각 편파별로 유사한 전류분포가 형성됨이 알 수 있다. 또한 수직반사영역에서 형성된 표면전류가 대상물의 RCS를 결정하는 주요한 인자가 됨을 확인할 수 있다.

3.3 절단 가장자리형 모델

앞서 원형 가장자리 모델에 대한 모멘트법과 물리광학기법의 RCS 해석 결과를 비교하였다. 본 절에서는 다루고자하는 절단형 가장자리는 원형 가장자리에 비하여 제작성 높은 편의성을 가지고 있으며 원형 가장자리와 더불어 실제 항공기의 가장자리 설계에 널리 적용되는 형상이다.

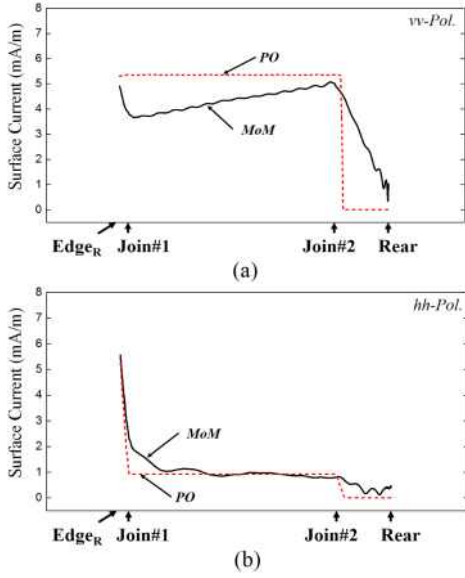


Fig. 8. Surface current distribution with $r/\lambda=0.3$; vv-Pol. (a), hh-Pol. (b)

아래의 Fig. 9는 절단형 가장자리 형상을 가진 썬기-원통형 모델을 도시하였으며, 가장 자리 형상의 영향성을 비교하기 위하여 가장자리 절단면의 높이 h 를 변경하였다. 절단형 가장자리를 적용할 경우 전자기 회절을 유발하는 형상은 제거되지 않고 오히려 회절 유발 요소가 하나 더 증가하는 모양이 된다.

Figure 10은 왼쪽 가장자리에서 절단면의 높이를 해석 주파수 파장의 0.1배에서 0.4배까지 증가시키며 RCS 변화를 도시한 그림이다. 앞선 경우와 마찬가지로 모멘트법의 해석결과는 실선으로, 물리광학기법은 점선으로 나타내었다. Fig. 10에서 볼 수 있듯이 절단면의 크기가 커질수록 모멘트법과 물리광학기법으로 예측한 RCS가 점차 근접해감을 확인할 수 있다. 이것은 일정 수준이상의 유의미한 수직반사면이 형성되면, 수직반사면에서의

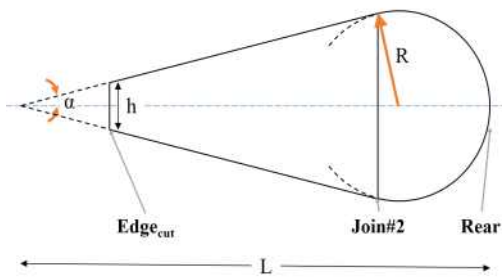


Fig. 9. Wedge-cylinder model with cutting nose

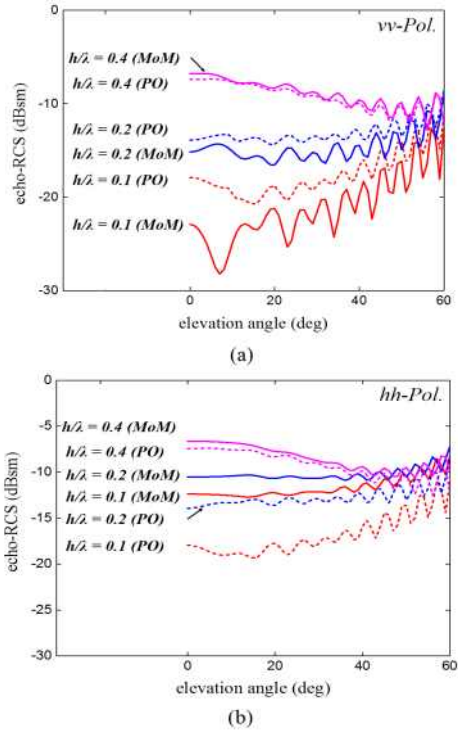


Fig. 10. RCS of cutting nose model; vv-Pol. (a), hh-Pol. (b)

전자파 반사가 RCS에 상당한 기여도를 차지하기 때문인 것으로 판단된다. 다시 말하자면 이 때 전자파 회절에 의한 산란효과의 기여도가 상대적으로 감소한다는 것을 의미한다. 따라서 3차원 형상이 이 같은 형상을 가지고 있을 때에는 물리광학기법으로도 충분히 의미 있는 해석결과를 도출할 수 있다는 것을 의미한다.

절단면의 크기에 따른 RCS 기여도를 Fig. 11과 같이 확인하였다. 절단면 높이를 해석 주파수의 파장으로 나눈 무차원화된 값에 대하여 해석 기법에 따른 RCS의 상대 값을 제안된 모델의 썬기 경사각을 변화시켜가면서 살펴보았다. 우선 수직편파 예서는 가장자리를 구성하는 경사각에 따라 특성의 차이는 있지만, 일정 절단구간 이상에서는 물리광학기법의 결과가 모멘트법의 결과보다 더 높게 형성되며 근접해감을 확인할 수 있다. 한편 수평편파의 경우 각도에 무관하게 모멘트법이 더 높은 RCS 값을 도출하며, 절단면의 높이가 커질수록 점차 수렴해 감을 확인할 수 있다. 양쪽편파에서 모두 절단면의 높이가 해석 주파수 파장의 0.4배에 근접할 경우, 모멘트법 및 물리광학기법으로 예측된 RCS가 거의 동일함을 확인할 수 있었다.

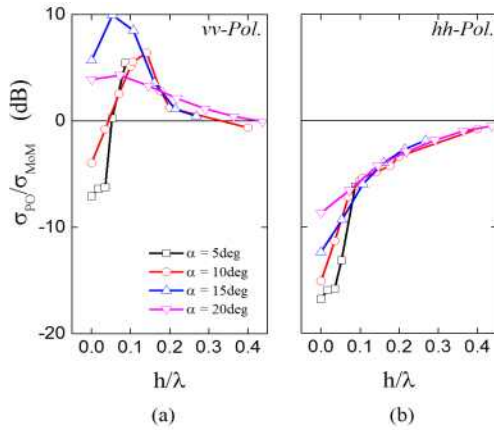


Fig. 11. Cutting nose contribution to RCS; vv-Pol. (a), hh-Pol. (b)

절단형 가장자리의 높이가 해석 주파수 파장의 0.4배에 근접하였을 때, 제안된 모델 상면에 유기된 표면전류를 Fig. 12와 같이 나타내었다. 절단 가장자리(Edge_{cut})의 앞 구간은 절단면에 유기된 표면전류 값을 의미한다. 절단면에 의해 수직반사면이 형성되어 각 편파별로 유사한 전류분포가 형성됨이 알 수 있다. 또한 수직반사영역에서 형성된 표면전류가 대상물의 RCS를 결정하는 주요한 인자가 됨을 확인할 수 있다.

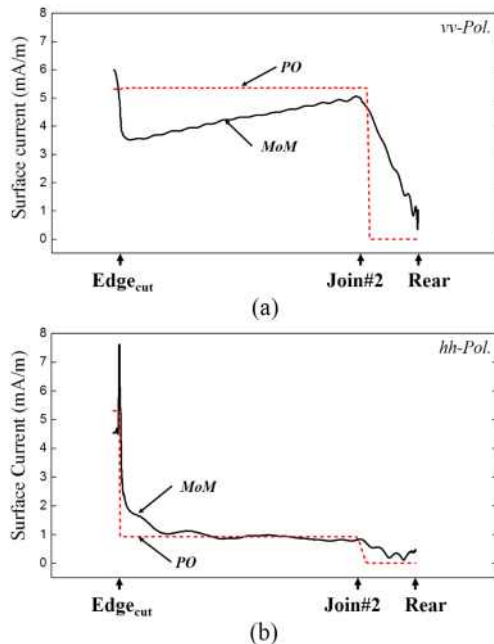


Fig. 12. Surface current distribution with $h/\lambda=0.4$; vv-Pol. (a), hh-Pol. (b)

IV. 결 론

본 연구에서는 가장자리 형상을 가진 구조물의 RCS 해석에서 물리광학기법의 적용 한계를 분석하였고, 모멘트법과 비교하여 정확한 해석 결과를 기대할 수 있는 적용 기준을 확인하였다.

날카로운 가장자리를 가진 물체에서 고주파 근사기법은 일정 고각영역까지 신뢰할 수 없는 결과를 도출함을 확인할 수 있었다. 곡률을 가진 가장자리에서 곡률 반경이 목표 주파수 파장의 0.3배 이상일 경우 의미 있는 수직반사영역이 생성되어 물리광학기법과 모멘트법이 유사 수준의 RCS 값을 도출하였다. 절단면을 가진 가장자리 형상의 경우 편파특성 및 경사각에 따라 세부적인 차이는 있지만, 양쪽 편파를 모두 고려하였을 때, 절단면의 높이가 목표 주파수 파장의 0.4 배에 근접하면, 수직 반사면의 기여도가 주변 회절 유발 요소보다 커져 두 해석 기법 간 유사 RCS 값을 얻을 수 있었다. 본 연구를 통해 형상적 특징에 따라 물리광학기법만으로도 모멘트법 만큼의 해석 정확도를 기대할 수 있음이 해석적으로 확인되었다. 다시 말하자면, 구성된 모델이 제시된 기준을 충족시킨다면 점근기법만으로도 RCS 해석이 충분히 수행 가능함을 의미한다.

제안된 모델에서 모멘트법과 물리광학기법의 전방 RCS 해석 결과를 비교해 볼 때, 경사각에 의한 차이는 일부 존재하지만, 대부분의 해석 구간에서, 수직편파에서는 물리광학기법의 RCS가 모멘트법보다 크게 계산되는 경향이 있으며, 수평편파에서는 그 반대의 경향이 나타남을 확인할 수 있었다. 본 연구결과는 항공기의 초기 설계 단계 및 구성품의 설계 개발 시 RCS 영향성을 해석적으로 평가할 때 모델링 지표가 될 것으로 생각한다. 즉, 본 연구에서 제안하는 가장자리 형상의 정량적인 형상 기준에 따라 RCS 해석에 적절한 기법들을 효율적으로 판단할 수 있다.

References

- 1) Ball, R. E., *The fundamentals of aircraft combat survivability analysis and design*, 2nd Edition, AIAA Education Series, 2003.
- 2) Sadiku, O., *Numerical techniques in electromagnetics with MATLAB*, CRC Press, 2011, pp317-320.
- 3) Rao S., Wilton D., and Glisson A., "Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary

shape”, *IEEE Transactions on antennas and propagation*, Vol. 30, No. 3, 1982, pp.409-418.

4) Harrington R. F., *Field Computation by Moment Methods*, Oxford University Press., 1996.

5) Kouyoumjian R. G., “Asymptotic high frequency methods,” *Proc. IEEE*. Vol. 53, NO. 8, 1965, pp864-876.

6) Ling H., Chou R. C., Lee S. W., “Shoting and Bouncing Rays: Calculating the RCS of an Arbitrarily Shaped Cavity,” *IEEE Transactions on antennas and propagation*, Vol. 37, No. 2, 1989.

7) Weinmann F., “Ray Tracing With PO/PTD for RCS Modeling of Large Complex Objects,” *IEEE Transactions on antennas and propagation*, Vol. 54, No. 6, 2006, pp.1797-1806.

8) Piennar C., Odendaal J. W., Joubert J., Smit J. C., and Cilliers J. E., “RCS Validation of Asymptotic Techniques Using Measured Data of an Electrically Large Complex Model Airframe,” *ACES Journal*, vol. 32, no.1, 2017, pp60-67.

9) Jang M. U., Myong R. S., Jang I. M., Lee D. H., “A Hybrid RCS Analysis Code Based on Physical Optics and Geometrical Optics,” *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 42, No. 11, 2014, pp.958-967.

10) Knott, E. F., “A progression of high-frequency RCS prediction techniques,” *Proceedings of IEEE*, Vol. 73, No. 2, 1985, pp.252-264.

11) Ufimtsev, P., *Theory of edge diffraction in electromagnetics*, The Institution of Engineering

and Technology, 2009.

12) Kouyoumjian, R. G., and Pathak, P. H., “A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface,” *Proceedings of the IEEE*, Vol. 62, No. 11, 1974, pp. 1448-1461.

13) Jakobus, U., and Landstorfer, F. M., “Improved PO-MM hybrid formulation for scattering from three-dimensional perfectly conducting bodies of arbitrary shape,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 43, No. 2, 1995, pp. 162-169.

14) Wang, X., Wang, C., and Liu, Y., “RCS computation and analysis of target using FEKO,” *Antennas and Propagation(APCAP), 3rd Asia-Pacific Conference on IEEE*, July 2014, pp. 822-825.

15) Jenn, D. C., *Radar and Laser Cross Section Engineering*, 2nd Ed., AIAA Education series, 2005,

16) Liangliang C., Kuizhi Y., CuiFang X., and Dazhao Y., “RCS numerical smulation of stealth modified three-surface aircraft,” *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 17, No. 1, 2016, pp.101~108.

17) Chen S., Yue K., Hu B., and Guo R., “Numerical simulation on the radar cross section of variable-sweep wing aircraft,” *Journal of Aerospace Technology and Management*, Vol. 7, No. 2, 2015, pp.170~178.

18) Knott, E. F., Shaeffer, J. F., and Tuley, M. T., *Radar Cross Secion*, Artech House, Inc., 1993.