

## 효과적인 채프 구름의 RCS 예측 방법 비교 분석 연구

# Comparative Analysis of Effective RCS Prediction Methods for Chaff Clouds

김민 · 이명준 · 이성현 · 박성호\* · 공영주\* · 우선걸\* · 김홍락\* · 김경태

Min Kim · Myung-Jun Lee · Seong-Hyeon Lee · Sung-ho Park\* · Young-Joo Kong\* ·  
Seon-Keol Woo\* · Hong-Rak Kim\* · Kyung-Tae Kim

### 요 약

레이다를 사용한 미사일 표적의 정확한 탐지 및 추적을 위해서는 채프 구름의 레이다 반사 단면적(Radar Cross Section: RCS)에 대한 분석이 반드시 필요하다. 따라서 본 논문에서는 다양한 환경에서 보다 효과적인 채프 구름의 RCS 분석을 위해 채프 구름 내 채프들을 개별적으로 계산하여 합하는 RCS 예측 방법과 공기역학 모델 기반의 확률밀도분포 모델을 사용한 RCS 예측 방법을 비교 및 분석하였다. 여기서, 상기 두 기법을 보다 더 정밀하게 비교 및 분석하기 위해 본 논문에서는 상용 전자기 수치해석 소프트웨어인 FEKO 7.0을 활용하여 반 파장 다이폴 형태의 단일 채프 CAD 모델의 RCS 값을 획득하여 채프 구름의 RCS를 모사하였다. 분석 결과, 확률 밀도 분포 모델을 사용한 경우 보다 효율적으로 채프 구름의 RCS 값을 예측할 수 있음을 확인하였다.

### Abstract

Radar cross section (RCS) analysis of chaff clouds is essential for the accurate detection and tracking of missile targets using radar. For this purpose, we compare the performance of two existing methods of predicting RCS of chaff clouds. One method involves summing up the RCS values of individual chaffs in a cloud, while the other method predicts the RCS values using aerodynamic models based on the probability density function. In order to compare and analyze the two techniques more precisely, the RCS of a single chaff computer-aided design model consisting of a half wavelength dipole was calculated using the commercial electromagnetic numerical analysis software, FEKO 7.0, to estimate the RCS values of chaff clouds via simulation. Thus, we verified that our method using the probability density distribution model is capable of analyzing the RCS of chaff clouds more efficiently.

Key words: Chaff Cloud, Radar Cross Section, Aerodynamic Model, High Resolution Range Profile

## I. 서 론

레이다를 이용하여 표적의 탐지 및 추적을 수행하는 현대전의 특성상 채프는 빠질 수 없는 주요 대응수단이

다. 이때 추적 레이다가 표적이 아닌 채프를 추적하도록 유도하기 위해 표적은 가능한 낮은 레이다 반사 단면적(radar cross section, RCS)을 형성<sup>[1]</sup>하여야 하며, 채프는 보다 큰 RCS를 형성하여야 한다. 이와 같은 이유로 채프

「이 연구는 LIG 넥스원 연구비의 지원으로 연구되었음.」

포항공과대학교 전자전기공학과(Department of Electronic Engineering, Pohang University of Science and Technology)

\*LIG넥스원(LIGnex1)

· Manuscript received February 28, 2018 ; Revised March 20, 2018 ; Accepted March 22, 2018. (ID No. 20180228-026)

· Corresponding Author: Kyung-Tae Kim (e-mail: kkt@postech.ac.kr)

RCS를 극대화시키기 위하여 레이더 운용 주파수의 반 파장에 해당하는 길이를 갖는 전도체로 코딩된 가는 섬유 형태를 갖는다<sup>[2]</sup>. 특히, 항공기나 함정과 같이 RCS가 큰 표적을 기만하는 경우에는 보다 큰 RCS를 형성하기 위하여 수만에서 수천만 개의 채프들로 이루어진 채프 구름(chaff cloud)을 사용한다. 따라서 채프를 피해 표적을 정확히 탐지해야 하는 레이더 입장에서는 채프의 수 및 시간 등의 다양한 변수들에 따른 채프 구름의 RCS 변화 특성을 분석할 필요가 있다.

채프 구름의 RCS를 예측하는 방법은 채프의 고각 및 방위각에 따른 RCS를 수치해석 기법 또는 수학적 모델을 통해 결정한 후, 채프 구름 내 채프의 수를 고려하여 계산하는 것이 일반적이다<sup>[2],[3]</sup>. 하지만 보통 채프 구름은 수십에서 수천만 개의 채프로 이루어져 있으며, 분포 및 방향이 시간에 따라 변하기 때문에 시간에 따른 채프 구름의 RCS 예측은 매우 많은 계산을 필요로 한다. 이와 같은 이유로 참고문헌 [4]에서는 공기역학 모델을 통해 채프의 방향 및 위치의 확률 밀도 분포(probability density distribution)를 결정함으로써 채프 구름의 RCS를 시간과 위치의 함수로써 예측하는 기법을 제안하였다. 따라서 적절한 채프 구름 RCS 예측 기법을 통해 다양한 환경에서 효율적으로 채프 구름의 RCS를 분석하기 위하여 본 논문에서는 채프 구름 내 채프들을 개별적으로 계산하여 합하는 방법<sup>[2],[3]</sup> 및 확률 밀도 분포모델을 적용하여 계산하는 방법<sup>[4]</sup>을 비교분석하였으며 앞으로 상기 각각의 예측 방법을 방법 1 및 방법 2라고 정의한다. 여기서 방위각 및 고각에 따른 단일 채프의 RCS는 상용 전자기 수치해석 소프트웨어인 FEKO 7.0(EM Software & Systems)를 이용하여 계산하였다.

## II. 채프 구름의 RCS 예측방법

### 2-1 방법 1

방법 1을 통한 채프 구름의 RCS 예측은 레이더의 거리 분해능 및 빔 폭으로 정의되는 공간 내 존재하는 채프의 수  $N$ 를 계산하여 결정되며 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>[3]</sup>.

$$\sigma_{tot} = \sum_{n=1}^{N_{tot}} a \sigma_n(\phi, \psi) \quad (1)$$

식 (1)에서  $a$ 는 레이더 운용주파수에 해당하는 파장 및 채프들의 평균 간격의 비에 따라 결정되는 상수이며,  $\sigma_n(\phi, \psi)$ 은  $\phi, \psi$ 에 따라 결정되는 채프 구름 내  $n$ 번째 채프의 RCS를 의미한다. 여기서  $\phi, \psi$ 는 레이더에서 관측된  $n$ 번째 채프의 방위각 및 고각을 의미하며 이들은 레이더가 시선(line of sight) 및 채프의 이동방향, 기울기 등을 통해서 계산될 수 있다<sup>[5]</sup>.

### 2-2 방법 2

참고문헌 [4]에서 제안한 채프 구름의 RCS 예측은 크게 2단계로 수행된다. 먼저 1단계에서는 수직 및 수평방향의 확률밀도분포를 공기역학모델을 통해 결정한 뒤, 이를 이용하여 채프 구름의 정규화 된 RCS 밀도를 계산한다. 다음으로 2단계에서 채프 구름의 RCS는 앞서 계산된 정규화 된 RCS 밀도를 레이더 성능에 의해 결정되는 채프 구름 내 채프에 따라 적분함으로써 계산된다.

#### 2-2-1 수직 및 수평방향의 확률 밀도 분포

RCS 예측을 위한 1단계에서 사용되는 채프는 그림 1과 같이 특정 주파수에서 공진을 일으키는 반파장 다이폴 형태로 형성된다. 공기역학 모델링을 위하여 채프의 길이를  $l$ , 반경을  $c$ 라고 할 때, 반경에 비해 길이가 매우 큰 경우( $c/l \ll 1$ ) 채프의 하강속도가 느려지기 때문에 흐름 모델(flow model)이 선형 스톡스 방정식(linear Stokes equation)으로 근사화 된다<sup>[6]</sup>. 선형 스톡스 흐름 모델의 경우 대칭적인 원통형 구조를 갖는 물체는 하강하는 동안 한번 정해진 기울기가 일정하게 유지되는 특성을 갖는다. 상기 구조를 갖는 채프 또한 하강하는 동안 기울기가 일

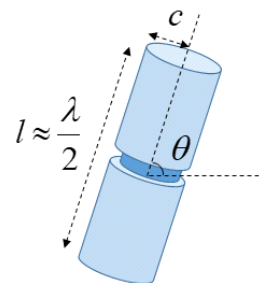


그림 1. 다이폴 형태의 채프  
Fig. 1. The dipole chaff.

정하게 유지되며, 이러한 특성을 이용하여 채프의 수직 및 수평속도를 다음과 같이 해석적인 해를 갖는 형태로 나타낼 수 있다<sup>[6]</sup>.

$$v = \frac{\tilde{v}(\theta)}{\mu(z)}$$

$$\tilde{v}(\theta) = \frac{g\Delta\rho c^2}{6} \left\{ \left[ \ln\left(\frac{l}{c}\right) - \frac{3}{2} \right] \sin^2\theta + \left[ \ln\left(\frac{l}{c}\right) + \frac{1}{2} \right] \right\} \quad (2)$$

$$u = \frac{g\Delta\rho c^2}{6\mu(z)} \sin\theta \cos\theta \left[ \frac{3}{2} - \ln\left(\frac{l}{c}\right) \right] \quad (3)$$

여기서  $\theta$ 는 채프의 기울어진 각도를 의미하며  $0^\circ$ 일 때 지면과 수평하다.  $\mu$ 는 대기 점성(atmospheric viscosity),  $z$ 는 높이,  $g$ 는 중력가속도를 의미하며  $\Delta\rho = \rho_{body} - \rho_{air}$ 는 채프와 공기의 밀도차이다.

수직방향의 속도는 채프의 기울기  $\theta$ 에 관한 함수임을 식 (2)에서 확인할 수 있다. 이와 같은 관계를 이용하여  $\theta$ 에 대한 분포를 통해 시각  $t$ 에서 수직높이  $z_a$ 보다 높이 있는 채프에 대한 확률을 정의할 수 있으며, 이를 이용하여  $z_a$ 에서의 확률 밀도 분포 또한 정의할 수 있다.

$$P[z_{fiber} > z_a] = P[|\theta| < \theta_a] = \int_0^{\theta_a} W_\theta(\theta) d\theta \quad (4)$$

$$W_\theta(\theta) = \frac{2}{\theta_e} \left( 1 - \frac{\theta}{\theta_e} \right), \quad 0 \leq \theta \leq \theta_e \quad (5)$$

$$W_z(z_a) = -\frac{\partial P[z > z_a]}{\partial z_a} = -\frac{\partial \theta_a(z_a)}{\partial z_a} W_\theta(\theta_a(z_a))$$

$$= \frac{W_\theta(\theta_a(z_a))}{2tu(z_a)} \quad (6)$$

식 (5)에서  $\theta \geq \theta_e$ 일 때  $W_\theta$ 는 0이며, 선형 스톡스 흐름 모델에서  $\theta_e \approx 40^\circ$ 이다<sup>[7]</sup>.

채프 구름의 수평방향 분포에 일반적인 분포 모델을 적용시킬 경우 일정시간 경과 후 실제 관측된 채프 구름보다 더 큰 반경의 채프 구름을 형성한다. 이와 같은 오차를 보완하기 위하여 그림 2와 같은 나선 운동 모델(helical motion model)을 이용한다<sup>[8]</sup>. 바람의 영향이 없을 경우 채프의 분포는 반경  $r$ 에 대해 방위적으로 대칭이며, 동일한

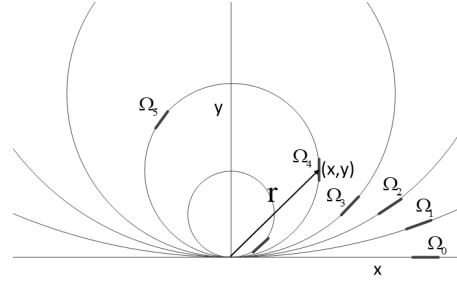


그림 2. 나선 운동 모델

Fig. 2. Helical motion model.

높이에 있는 채프들의 수평 속도  $u$ 는 동일하지만 서로 다른 각속도  $\Omega_i$ 를 가지므로 시각  $t$ 에서 채프들의 수평 거리는 서로 상이하며 다음과 같다.

$$r = 2 \frac{u}{\Omega_i} \left| \sin \frac{\Omega_i t}{2} \right| \quad (7)$$

또한 동일한 높이의 채프들 중 수평 방향 반경  $r$ 이  $r_0$ 보다 작을 확률은 다음과 같다.

$$P[r < r_0] = P \left[ 2 \frac{u}{\Omega} \left| \sin \frac{\Omega t}{2} \right| < r_0 \right] = P[f(\Phi) < \Gamma]$$

$$f(\Phi) = \frac{|\sin \Phi|}{\Phi} \leq 1, \Gamma = \frac{r_0}{ut}, \Phi = \frac{\Omega t}{2} \quad (8)$$

$\Gamma \geq 1$ 일 경우  $r_0$ 가 항상 채프 구름의 최대 반경  $ut$ 보다 크거나 같기 때문에 확률  $P[r < r_0]$ 는 항상 1이다.

이와 같은 이유로  $r_0$ 에서 확률 밀도 분포는  $\Gamma < 1$ 의 경우에서 유의미하며 다음과 같다<sup>[6]</sup>.

$$W_r(r_0) = \frac{\partial P_{\Gamma < 1}[r < r_0]}{\partial r_0} \quad (9)$$

## 2-2-2 채프 구름의 RCS 계산

상기 정의된 수직, 수평방향 채프의 확률 밀도 분포를 통한 시각  $t$ 에서의 정규화 된 RCS 밀도 계산을 위하여 먼저  $N_f$ 개의 채프를 이용한 평균 RCS를 다음과 같이 계산한다.

$$\sigma_{avg}(r, \varphi) = \frac{\sum_{n=1}^{N_f} \sigma_n(r, \varphi, \phi, \psi)}{N_f} \quad (10)$$

식 (10)에서  $x = r \cos \varphi$ ,  $y = r \sin \varphi$ 이며,  $\phi, \psi$ 는 각각 레이더에서 관측된 채프의 방위각 및 고각을 의미한다<sup>[5]</sup>. 이때 확률밀도분포 모델을 통한 채프 구름의 RCS 계산방법의 계산량은  $N_f$ 에 의해 결정된다.  $N_f$ 가 클수록 비교적 정확한 채프구름의 RCS를 분석할 수 있지만, 동시에 계산량이 매우 증가한다. 따라서 보다 효율적인 RCS 분석을 위해서는 실제 채프 구름을 구성하는 총 채프 개수 중 적절한  $N_f$ 를 결정해야 한다<sup>[4]</sup>. 최적의  $N_f$ 를 결정할 경우, 정규화 된 RCS 밀도는 앞서 계산된 평균 RCS를 이용하여 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\eta(r, \varphi, z) = \sigma_{avg}(r, \varphi) \frac{W_r(r)}{2\pi r} W_z(z) \quad (11)$$

최종적으로 채프 구름의 RCS는 정규화 된 RCS 밀도를

이용하여 레이더의 빔폭 및 거리 해상도에 따른 유한 체적에 대한 적분을 통해 계산될 수 있다.

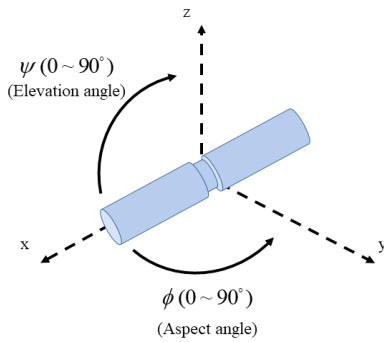
$$\sigma_{tot}(r, \varphi, z) = N_{tot} (P[z < z_f] - P[z < z_i]) \iint \sigma_{avg}(r, \varphi) \frac{W_r(r)}{2\pi r} r dr d\varphi \quad (12)$$

위 식에서  $N$ 는 채프 구름 내 존재하는 전체 채프의 수를 의미한다.

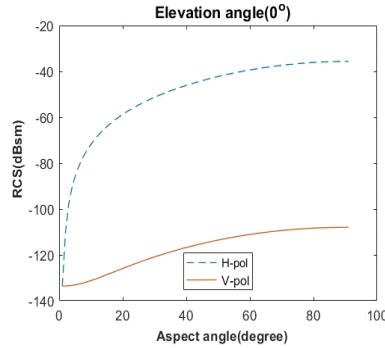
### III. 시뮬레이션 결과

#### 3-1 수치해석 기법을 이용한 단일 채프 RCS 계산

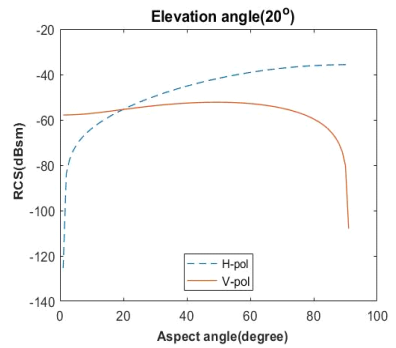
먼저 단일 채프의 RCS을 분석을 위하여 그림 3(a)와 같은 채프 computer aided design(CAD) 모델 및 전자기 수치해석 소프트웨어 FEKO 7.0을 사용하였다. 계산에 사용된



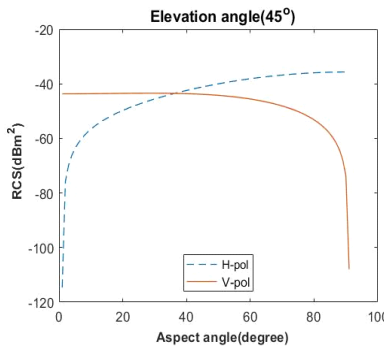
(a) RCS 계산을 위한 기하구조  
(a) Geometry for RCS estimation



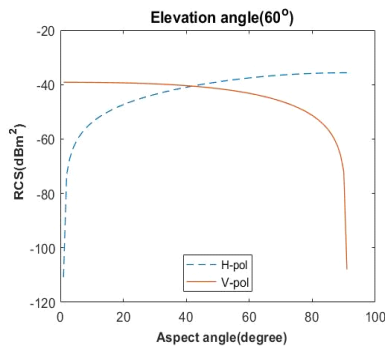
(b) 고각이 0°일 때 RCS  
(b) RCS at a certain elevation angle(0°)



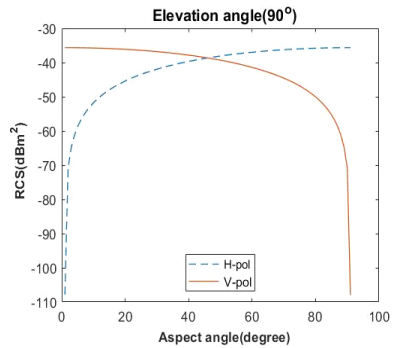
(c) 고각이 20°일 때 RCS  
(c) RCS at a certain elevation angle(20°)



(d) 고각이 45°일 때 RCS  
(d) RCS at a certain elevation angle(45°)



(e) 고각이 60°일 때 RCS  
(e) RCS at a certain elevation angle(60°)



(f) 고각이 90°일 때 RCS  
(f) RCS at a certain elevation angle(90°)

그림 3. 채프 RCS 계산을 위한 기하구조 및 특정 고각(0°, 20°, 45°, 60°, 90°)에서 방위각에 따른 RCS 계산 결과

Fig. 3. Geometry for chaff RCS computation and Chaff RCS according to azimuth angle at a certain elevation angle(0°, 20°, 45°, 60°, 90°).

채프의 길이,  $l$  및 반경,  $c$ 는 각각 운용주파수 16.4 GHz에 해당하는 파장 및 적절한 하강속도를 갖도록 고려하여  $l=0.009$  m 및  $c=15$   $\mu$ m로 설정되었다<sup>[2]</sup>. 이때 채프의 RCS는 방위각 및 고각 방향으로 각각  $1^\circ$  간격으로  $0^\circ \sim 90^\circ$  범위에서 계산되었으며, 수 만개의 채프들로 이루어진 채프 구름의 RCS 계산시간을 단축시키기 위하여 계산된 RCS 결과를 순람표(look-up table)로 구성하였다.

그림 3(b)~그림 3(f)는 16.4 GHz의 주파수에서 고각이  $0^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  일 때, 방위각에 따른 채프의 RCS 계산 결과들이다. 고각이  $45^\circ$  이하일 때, 대부분의 방위각 영역에서 채프의 RCS는 VV 편파보다 HH 편파에서 큰 값이 계산되었으며, 이는 반파장 다이폴 형태의 채프가 선형 스톱스 흐름 모델에서 대부분 지면과 평행한 방향의 기울기( $0^\circ \leq \theta \leq 40^\circ$ )로 하강하기 때문이다.

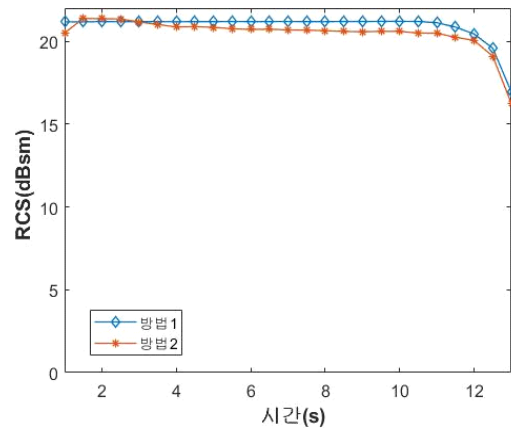
### 3-2 채프 구름 RCS 계산 및 분석

채프 구름의 RCS 예측 시뮬레이션에서 보다 효율적인 계산을 위하여 앞서 계산된 채프 RCS 순람표를 사용하였다. 시뮬레이션 수행환경은 i7-7700K CPU @ 3.5 GHz, 16 GB RAM로 구성된 Desktop과 MATLAB R2017b버전의 소프트웨어로 구성된다.

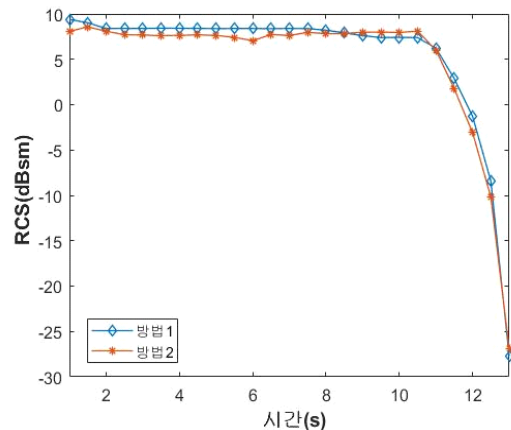
먼저 채프 구름의 RCS 예측은 채프 구름 내 각각의 채프 RCS를 순람표로부터 불러와 합 연산을 하는 방법(방법 1) 및 확률밀도분포 모델을 적용하여 계산하는 방법(방법 2)로 각각 수행되었다. 이때 두 가지 방법을 통한 채프 구름의 RCS 계산 결과에 대한 비교 및 분석은  $N_f$  및 시간에 따른 채프 구름의 RCS 예측 결과를 통해 수행된다. 채프 구름의 RCS 예측 실험은 16.4 GHz의 주파수에서 수행 되었으며, 상기 주파수에 해당하는 비교적 짧은 파장에 기인하여 식 (1)의 상수  $a$ 는 1로 설정하였다. 또한 채프의 고각 및 방위각은 채프와 레이다사이의 수평 및 수직거리를 각각 1 km 및 30 m로 가정하여 계산되었으며, 채프의 수직거리가 0 m 이하가 되면 해당하는 채프의 RCS를 0으로 하였다. 채프 구름 내 채프의 기울기 및 위치 등은 정확한 예측이 불가능한 확률모형이므로 100 번의 몬테카를로 시뮬레이션(Monte-Carlo simulation)을 통해 결과를 추출하였다.

시간에 따른 채프 구름의 RCS 예측 시뮬레이션은  $N=$

1,000,000일 경우를 가정하여 수행하였다. 시뮬레이션은 13초 동안 0.5초 간격으로 수행되었으며, 이때 방법 2의  $N_f$ 는 10,000개로 설정하여 수행되었다. 방법 1 및 방법 2로 수행한 시간에 따른 채프 구름의 RCS 예측결과는 그림 4에서 확인할 수 있다. 두 가지 방법으로 예측한 채프 구름의 RCS 결과가 매우 유사한 반면, 방법 1 및 방법 2 수행에 소요된 계산시간은 평균 32.1998초 및 0.2755초로 매우 큰 차이를 보였다.  $N_f$ 가 방법 2의 정확도 및 계산시간에 끼치는 영향을 분석하기 위하여  $N=1,000,000$ 일 때, 방법 2의  $N_f$  변화에 따른 두 가지 방법의 채프 구름 RCS 오



(a) 시간에 따른 채프 구름의 RCS(HH 편파)  
(a) RCS of chaff cloud over time(HH)



(b) 시간에 따른 채프 구름의 RCS(VV 편파)  
(b) RCS of chaff cloud over time(VV)

그림 4. 시간에 따른 채프 구름의 RCS

Fig. 4. RCS of chaff cloud over time.

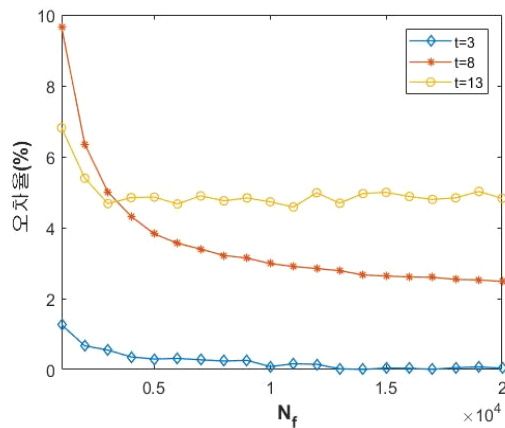
차 및 계산시간을 분석하였다.

먼저 HH 편파를 가정할 때, 방법 1 및 방법 2를 통해 계산된 채프 구름 RCS 오차는 다음과 같이 계산하였다.

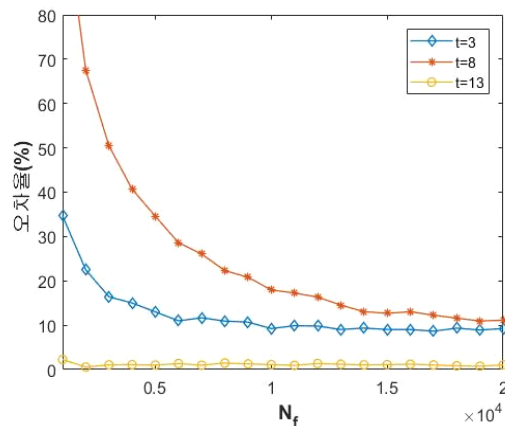
$$\text{error}(\%) = \frac{|RCS_1 - RCS_2|}{RCS_1} \times 100 \quad (13)$$

위 식에서  $RCS_1$  및  $RCS_2$ 는 각각 방법 1, 2를 통하여 계산된 채프 구름의 RCS(dBsm)이다.

그림 5(a)는 각각  $t=3$ ,  $t=8$ ,  $t=13$ 에서  $N_f=1,000$ 부터 1,000개 간격으로  $N_f=20,000$ 까지 시뮬레이션을 수행한 결



(a) 방법 2의  $N_f$  변화에 따른 채프 구름의 RCS 오차(HH)  
(a) RCS error of chaff cloud according to  $N_f$ (HH)



(b) 방법 2의  $N_f$  변화에 따른 채프 구름의 RCS 오차(VV)  
(b) RCS error of chaff cloud according to  $N_f$  (VV)

그림 5. 방법 2의  $N_f$  변화에 따른 채프 구름의 RCS 오차  
Fig. 5. RCS error of chaff cloud according to  $N_f$ .

과를 나타낸다.  $N_f=1,000$ 일 때 각 시각에 따라서 1.26 %, 9.66 % 및 6.82 %로 가장 높은 오차를 보였으며,  $N_f=10,000$  이상일 때 모든 시각에서 5% 이하의 오차를 보였다. 방법 1 및  $N_f$ 별 방법 2의 실험결과에 대한 채프구름의 RCS 및 소요시간은 표 1에서 확인할 수 있다.

그림 5(b)는 VV 편파일 때 방법 2의  $N_f$  변화에 따른 채프 구름 RCS 오차를 나타내며 표 2에서 채프 구름의 RCS 및 계산시간을 확인할 수 있다. HH 편파의 경우와 비교하여 10 % 내외의 비교적 큰 오차는 VV 편파에서 채프의 고각에 따른 채프의 큰 RCS 변화 및 10 dB 이상 작은 채프 구름의 RCS에 기인한다.

상기 결과들을 통하여 방법 2의 경우 방법 1과 비교하여 효율적으로 채프 구름의 RCS 예측을 수행하였음을 확인할 수 있었다.

## IV. 결 론

본 논문에서는 다양한 환경에서 효과적인 채프 구름의 RCS 분석을 위하여 기존의 채프 구름 RCS 예측 방법<sup>[2]~[4]</sup>에서 제안한 채프의 확률밀도분포 모델을 사용한 채프 구름 RCS 예측 방법의 분석 및 성능 검증을 수행하였다.

표 1. 실험결과(HH 편파)

Table 1. Simulation result(HH).

$t$	3s	8s	13s
방법 1 RCS	21.19 dBsm	21.18 dBsm	16.96 dBsm
방법 2 RCS ( $N_f=1,000$ )	20.92 dBsm	19.14dBsm	15.8 dBsm
방법 2 RCS ( $N_f=10,000$ )	21.17 dBsm	20.55 dBsm	15.16 dBsm
방법 2 RCS ( $N_f=17,000$ )	21.19 dBsm	20.64 dBsm	16.15 dBsm
방법 1 소요시간	32.1998s		
방법 2 소요시간 ( $N_f=1,000$ )	0.2507s		
방법 2 소요시간 ( $N_f=10,000$ )	0.2755s		
방법 2 소요시간 ( $N_f=17,000$ )	0.3171s		



표 2. 실험결과(VV 편파)

Table 2. Simulation result(VV).

$t$	3s	8s	13s
방법 1 RCS	8.42 dBsm	8.23 dBsm	-27.7 dBsm
방법 2 RCS ( $N_f=1,000$ )	5.5 dBsm	-0.57 dBsm	-28.3 dBsm
방법 2 RCS ( $N_f=10,000$ )	7.64 dBsm	6.75 dBsm	-27.4 dBsm
방법 2 RCS ( $N_f=17,000$ )	7.69 dBsm	7.22 dBsm	-27.4 dBsm
방법 1 소요시간	32.6769s		
방법 2 소요시간 ( $N_f=1,000$ )	0.2507s		
방법 2 소요시간 ( $N_f=10,000$ )	0.2761s		
방법 2 소요시간 ( $N_f=17,000$ )	0.3160s		

전자기 수치해석 기법을 바탕으로 실험을 수행한 결과, 기존의 채프 구름 RCS 예측 방법은 정확한 분석을 위하여 100만 개의 채프에 대한 계산을 모두 수행해야 하지만, 확률 분포 모델을 적용하여 RCS 예측을 수행한 방법은 1만개의 채프만을 사용하여도 100만 개의 채프 구름과 유사한 결과를 획득할 수 있었다. 그 결과, HH 편파에서 5%이하의 오차로 100배 정도 빠르게 계산시간을 단축할 수 있었다. 따라서 참고문헌 [4]에서 제안된 기법을 사용할 경우, 향후 레이더 전자전 분야에서 채프 구름의 영향을 보다 효율적이고 정확하게 분석할 수 있을 것이다.

김 민



2015년 2월: 부경대학교 전자공학과 (공학사)  
 2017년 2월: 부경대학교 전자공학과 (공학석사)  
 2017년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전 기공학과 연구원  
 [주 관심분야] 레이더 표적인식, 레이더 신호처리, 전력발전단지 EMI/EMC 분석

이 명 준



2014년 8월: 한동대학교 전산전자공학부 (공학사)  
 2017년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)  
 2017년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정  
 [주 관심분야] 레이더 영상, 레이더 신호처리, 이동 표적 탐지

## References

- [1] 신호근, 이석곤, 박동민, 신진우, 정명수, 박상현, 박용배, "함정용 통합 마스트의 레이더 단면적 분석," 한국전자과학회지논문지, 28(7), pp. 584-587, 2017년 7월.
- [2] N. Kruger, "Modeling the EM properties of dipole reflections with application to uniform chaff clouds," Master's thesis, University of Stellenbosch, Matieland, South Africa, Dec. 2009.
- [3] G. W. Stimson, *Introduction to Airborne Radar(Aerospace & Radar Systems)*, 3rd ed. SciTech Publishing, 2014.
- [4] S. W. Marcus, "Dynamics and radar cross section density of chaff clouds," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 40, no. 1, pp. 93-102, Jan. 2004.
- [5] S. J. Lee, S. J. Jeong, B. S. Kang, H. Kim, S. M. Chon, and H. G. Na, et al., "Classification of shell-shaped targets using RCS and fuzzy classifier," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 4, pp. 1434-1443, Apr. 2016.
- [6] J. Happel, H. Brenner, *Low Reynolds Number Hydrodynamics: With Special Applications to Particulate Media*. Leyden, Netherlands: Noordhoff, 1973.
- [7] B. C. F. Butters, "Chaff," in *Communications, Radar and Signal Processing*, in *IEE Proceedings F*, Jun. 1982, vol. 129, no. 3, pp. 197-201.
- [8] J. Brunk, D. Mihora, and P. Jaffe, *Chaff Aerodynamics*, Report AFAL-TR-75-81, Nov. 1975.

## 이 성 현



2013년 2월: 중앙대학교 전자전기공학부 (공학사)  
 2015년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)  
 2015년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정  
 [주 관심분야] 레이더 신호처리 및 영상, 모노펄스 신호처리, 스펙트럼 추정

## 우 선 결



2001년 2월: 광운대학교 전자공학부 (공학사)  
 2003년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)  
 2007년 7월: 광운대학교 전파공학과 (공학박사)  
 2007년 8월~현재: LIG넥스원(주) 수석연구원  
 [주 관심분야] 레이더 신호처리, 마이크로파 탐색기 등

## 박 성 호



2006년 3월: 경상대학교 제어계측공학과 (공학사)  
 2008년 8월: 광주과학기술원 정보통신공학과 (공학석사)  
 2008년 9월~현재: LIG넥스원 선임연구원  
 [주 관심분야] 레이더 신호처리, 레이더 시스템 M&S, 레이더 표적식별 기법 등

## 김 홍 락



1995년 2월: 대구대학교 전자전기컴퓨터공학부(공학사)  
 1997년 8월: 대구대학교 전자공학과 (공학석사)  
 1997년 7월~현재: LIG넥스원(주) 수석연구원  
 [주 관심분야] 초고주파 회로 설계, 마이크로파 신호처리 등

## 공 영 주



2009년 2월: 성균관대학교 정보통신공학부 (공학사)  
 2009년 1월~현재: LIG넥스원 선임연구원  
 [주 관심분야] 레이더 신호처리, 마이크로파 탐색기 등

## 김 경 태



1994년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)  
 1996년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)  
 1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)  
 2002년 3월~2011년 2월: 영남대학교 전자공학과 교수  
 2011년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 교수  
 2012년 9월~현재: 레이더/IR 표적식별 특화연구실 실장  
 [주 관심분야] 레이더 신호 처리 및 영상, 레이더 표적인식 및 패턴인식, 전자기수치해석 및 RCS 추정