

## 항공기용 다이폴 채프의 RCS에 관한 연구

임중수<sup>1</sup>, 김민년<sup>1</sup>, 채규수<sup>1\*</sup>

### A Study on the Dipole Chaff RCS for Aircraft

Joong-Soo Lim<sup>1</sup>, Min-Nyun Kim<sup>1</sup> and Gyoo-Soo Chae<sup>1\*</sup>

**요약** 본 논문에서는 비행체 방어를 위해 널리 사용되고 있는 채프의 레이더 반사 단면적(RCS : Radar Cross Section) 계산 방법에 대해 다루었다. 채프의 RCS는 바람, 비행체의 속도, 대기확산 속도 등에 따라서 달라진다. 채프를 레이더 사용주파수 대역에서 다이폴 안테나로 가정하고, 다이폴 안테나의 산란특성 분석을 통하여 RCS 값을 예측하였다. 본 논문에서는 다이폴 모델을 이용한 이론적 계산 결과와 전산모사를 이용하여 계산한 RCS를 비교 하였으며 유사한 결과를 얻었다.

**Abstract** In this paper, the computation of electromagnetic wave scattering is presented for chaff clouds which is widely used to protect an aircraft. The RCS depends on the wind, the aircraft velocity, and the atmospheric diffusion. It is assumed that the RF chaff is a thin dipole antenna and the RCS is calculated based on the scattering wave theory. The theoretical estimation and the simulation results are compared and shown a good agreement.

**Key Words** : RCS, Chaff, Dipole, Simulation, Aircraft

## 1. 서론

레이더로부터 항공기를 보호하기 위한 방법으로 채프가 널리 사용되고 있다. 추적 레이더가 항공기 보다는 채프 쪽으로 추적하도록 항공기에서 일정한 길이로 자른 가는 도선(thin conducting wire), 긴 도선(long conducting wire), 알루미늄 호일(foil) 조각, 알루미늄을 입힌 유리, 은을 입힌 나일론 줄 등을 공중에 투하한다. 채프가 효과적으로 전파를 반사시키도록 하기위해 레이더 주파수의 반 파장 길이로 만들어서 사용한다. 이때 중요하게 고려해야 할 것은 적절한 채프의 투하량을 예상하는 것이다. 이를 위해 항공기와 채프의 RCS를 계산함으로써 적절한 양의 채프를 투하하게 된다.

기본적으로 채프에서 레이더로 반사되는 신호가 보호하려는 항공기에서 산란되는 신호 보다 커야한다. 효과적으로 항공기를 보호하기위한 채프의 RCS는 항공기의 2배 정도가 적절한 것으로 알려져 있다. 채프의 RCS를 계산하기위해 채프를 다이폴 안테나로 모델링해서 채프구

름의 RCS를 구하는 방법이 일반적으로 사용되고 있다. 채프의 실제 낙하 형태나 밀도에 따라 산란되는 신호의 세기가 다양하게 나타나지만 다이폴 형태의 모델로 근사화하고 채프의 개수를 고려하여 RCS를 계산하는 방법이 널리 사용되고 있다[1-2]. 본 논문에서는 채프의 RCS를 예측하기위해 다이폴 안테나에 대한 수치해석 모델을 적용하여 그 값을 구하고 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 검증하고자 한다. 각 다이폴간의 이격거리에 따른 RCS, 특정 길이로 고정된 다이폴에 대한 주파수 별 RCS 특성, 다이폴 안테나의 방향에 대한 RCS 특성을 살펴보고자 한다.

## 2. 채프의 RCS 특성 분석

### 가. 다이폴의 RCS 계산

일반적으로 송신된 전파가 채프에 반사되어 수신 안테나로 돌아오는 신호를 다음과 같이 표현할 수 있다[2].

$$P_r = \frac{P_c \sigma(\theta, \phi)}{4\pi r^2} \quad (1)$$

본 논문은 KHP 사업의 연구과제로 수행되었음.

<sup>1</sup>백석대학교 정보통신학부/RDRC KAIST

\*교신저자 : 채규수(gschae@bu.ac.kr)

여기서,  $P_r$ 은 채프에서 반사되어 수신기로 돌아오는 전력,  $P_c$ 는 채프 표면에 도달하는 전력,  $r$ 은 수신기와 채프 사이의 거리,  $\sigma(\theta, \phi)$ 는 채프의 RCS이다.

전체 채프 구름의 RCS를 구하기 위해 먼저 채프를 구성하는 하나의 반 파장 길이의 도선을 다이폴 안테나로 간주하여 반사되는 전력을 계산할 수 있다.

$$P_r = \frac{P_d G}{4\pi r^2} \quad (2)$$

여기서,  $P_d$ 는 다이폴 안테나로 입사하는 전파가 다이폴 표면에서 반사되어 재 방사되는 전력,  $G$ 는 수신기로 향하는 다이폴 안테나의 이득이다.

단락된(shorted-circuit) 공진기로서의 다이폴 안테나는 재 방사되는 전력을

$$P_d = 4A_e P_c \quad (3)$$

로 표현할 수 있다. 여기서,  $A_e = \lambda^2 G / 4\pi$ (안테나 유효 개구면적)이다. 다이폴 안테나의 이득은

$$G(\theta, \phi) = 1.64 \left( \frac{\cos(\pi/2 \sin(\theta))}{\cos(\theta)} \right)^2 \quad (4)$$

로 표현된다. 위의 식들을 정리하면 다이폴의 RCS는

$$\sigma(\theta, \phi) = \frac{\lambda^2 G^2(\theta, \phi)}{\pi} \quad (5)$$

이다. 채프구름속의 다이폴들은 지향하는 방향을 바꾸고 공기 중으로 확산하기 때문에 시간에 따라 RCS가 변하게 된다. 다이폴의 이득이 최대가 되는  $\theta = \pi/2$ 에서 RCS는  $\sigma = 0.856\lambda^2$ 이 됨을 알 수 있다.

하나의 다이폴 안테나에 대한 RCS 계산 결과를 활용하여, 채프구름을 N개의 다이폴이 불규칙하게 지향하는 다이폴 안테나로 근사한 식으로 전 방향에 대한 RCS의 평균값을 구하면

$$\bar{\sigma} = \frac{N\lambda^2}{A\pi} \int_0^\phi \int_0^\theta G^2(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi \quad (6)$$

이 된다. 적분을 해석적인 방법으로 풀면, 전체 N개의 다이폴로 구성된 채프구름의 RCS를 구할 수 있다[2-4].

$$\bar{\sigma} \cong 0.15N\lambda^2 \text{ (선형 편파)} \quad (7)$$

$$\bar{\sigma} \cong 0.10N\lambda^2 \text{ (원형 편파)} \quad (8)$$

그리고 공중에 투하되는 채프의 무게로도 RCS 값을 예측할 수 있다[4].

$$\bar{\sigma} \cong 22,000\lambda W_c \quad (9)$$

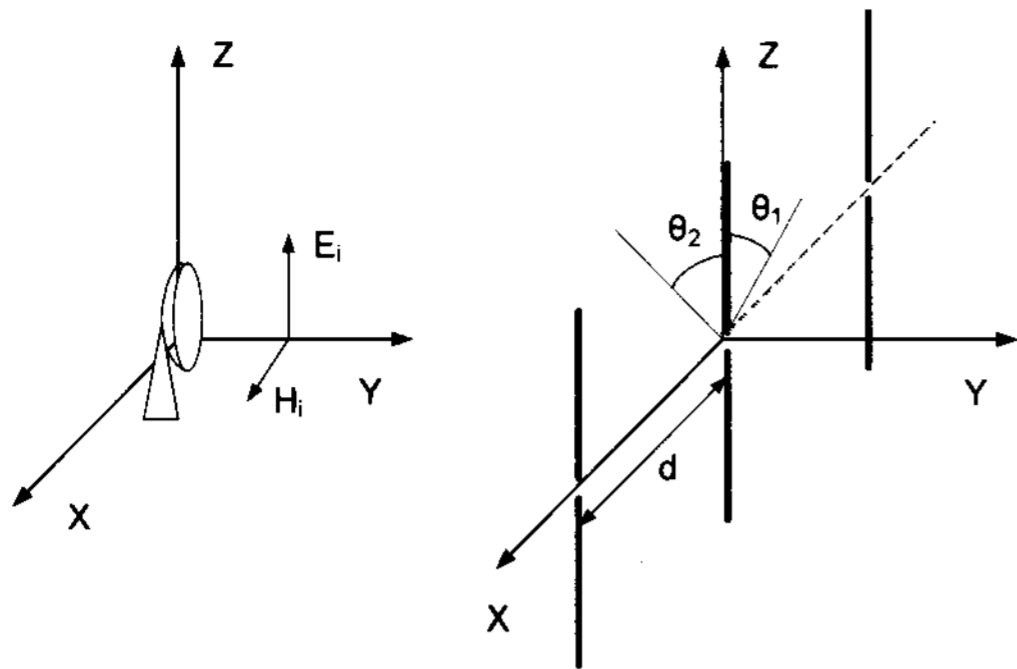
채프 다이폴은 사용주파수의 반 파장( $\lambda/2$ )일 때 가장 큰 RCS를 나타낸다. 또한, 사용주파수의 배수의 주파수( $\lambda, 2\lambda, 3\lambda \dots$ )에서도 상대적으로 큰 RCS 값을 가진다. 레이다에서 사용하는 주파수가 다양하기 때문에 넓은 주파수 대역에서 동시에 사용가능한 채프를 만들기 위해 길이가 다른 채프를 같이 사용하기도 한다. 이러한 채프 다이폴의 주파수 특성을 살펴보기 위한 수치해석을 수행하였다.

#### 나. RCS 계산 결과 및 분석

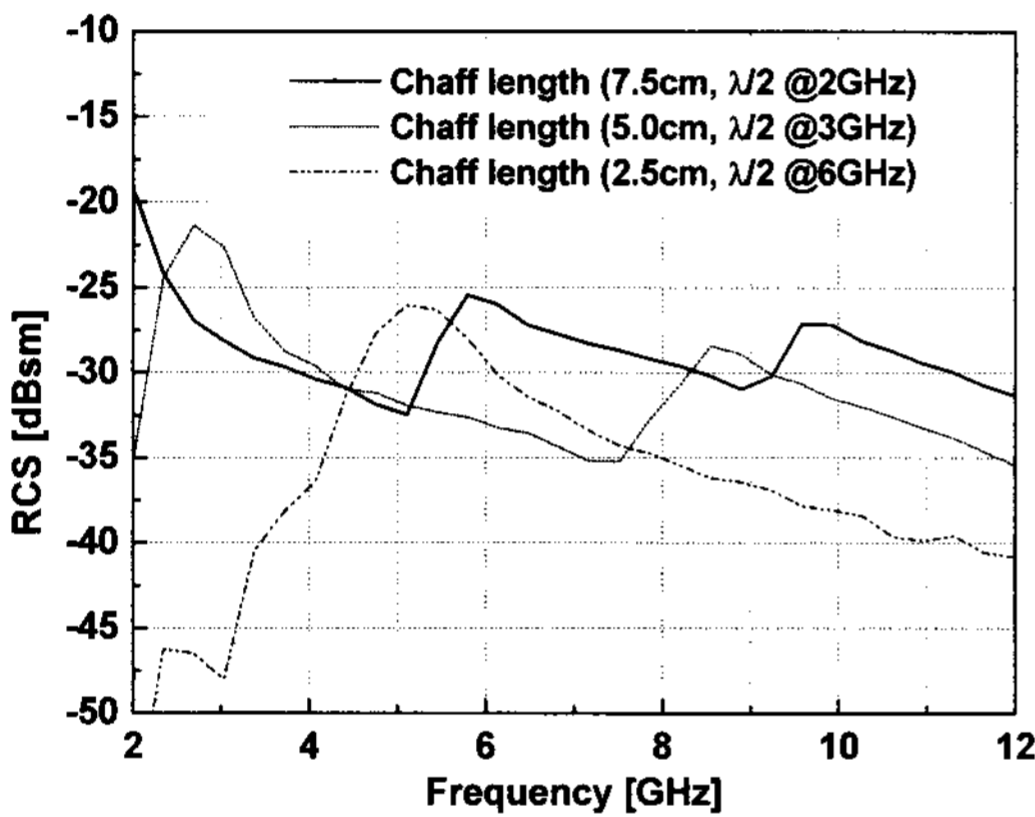
그림 1은 전산모사를 위한 채프 다이폴의 RCS 계산을 위한 좌표계이다. 채프로 입사되는 레이다 파는 선형 편파로 가정하였다.

그림 2에서는 세 가지 길이(7.5cm, 5.0cm, 2.5cm)를 갖는 다이폴을 주파수에 따라 RCS를 구하였다. 각 길이에 대하여 하나의 다이폴이 z축으로 향하고 있고 입사파도 수직 편파를 사용하였다. 기존 연구에서 잘 알려진 것과 같이 반 파장( $\lambda/2$ ) 길이에 해당하는 주파수 보다 약간 낮은 주파수에서 RCS 값이 크게 나옴을 볼 수 있다. 일반적으로 RCS의 최대값은 레이다 주파수의  $0.46\lambda \sim 0.48\lambda$ 에서 나오는 것으로 알려져 있다[6]. 그림 2의 결과를 보면, 이론적으로 예상된 값과 거의 일치함을 알 수 있다. 그리고 선형 편파인 경우 다이폴의 RCS가 약  $0.86\lambda^2$  정도로 알려져 있다. 다이폴이 5cm인 경우, 2.7GHz( $\lambda = 0.11m$ )에서 -21 dBsm 정도의 값을 얻었는데 이론적인 결과(-19.83dBsm)와 거의 일치함을 알 수 있다[2-3].

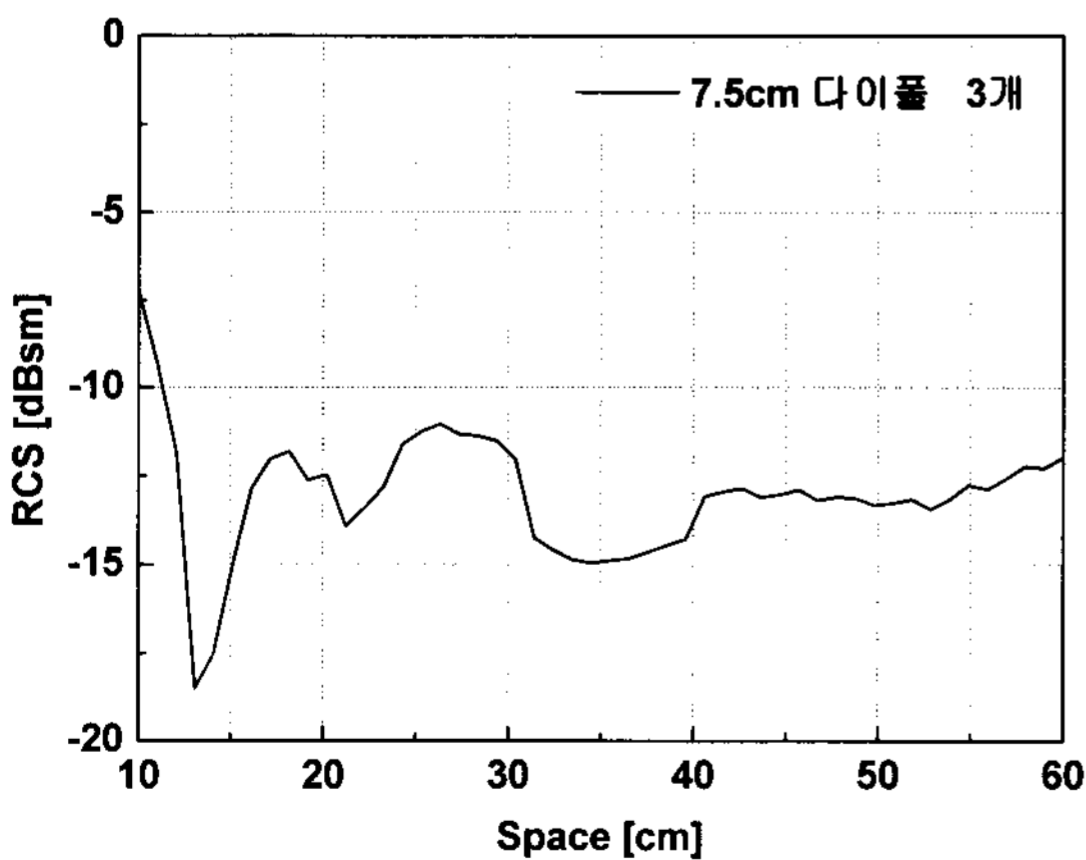
그림 3에서는 다이폴(7.5cm(2GHz의  $0.5\lambda$ ))의 이격 거리에 따른 RCS의 변화를 보여주고 있다. 일반적으로 채프는 투하된 후 각 채프사이의 이격거리가  $2\lambda \sim 3\lambda$ 일 때 RCS가 포화 상태로 되는 것으로 알려져 있다. 채프의 종류와 크기에 따라 차이는 있지만 채프의 RCS가 처음 디자인 할 때 계획한 값이 되기까지 약 30~100초 정도의 시간이 걸린다[4].



[그림 1] 채프 산란특성 해석을 위한 좌표계



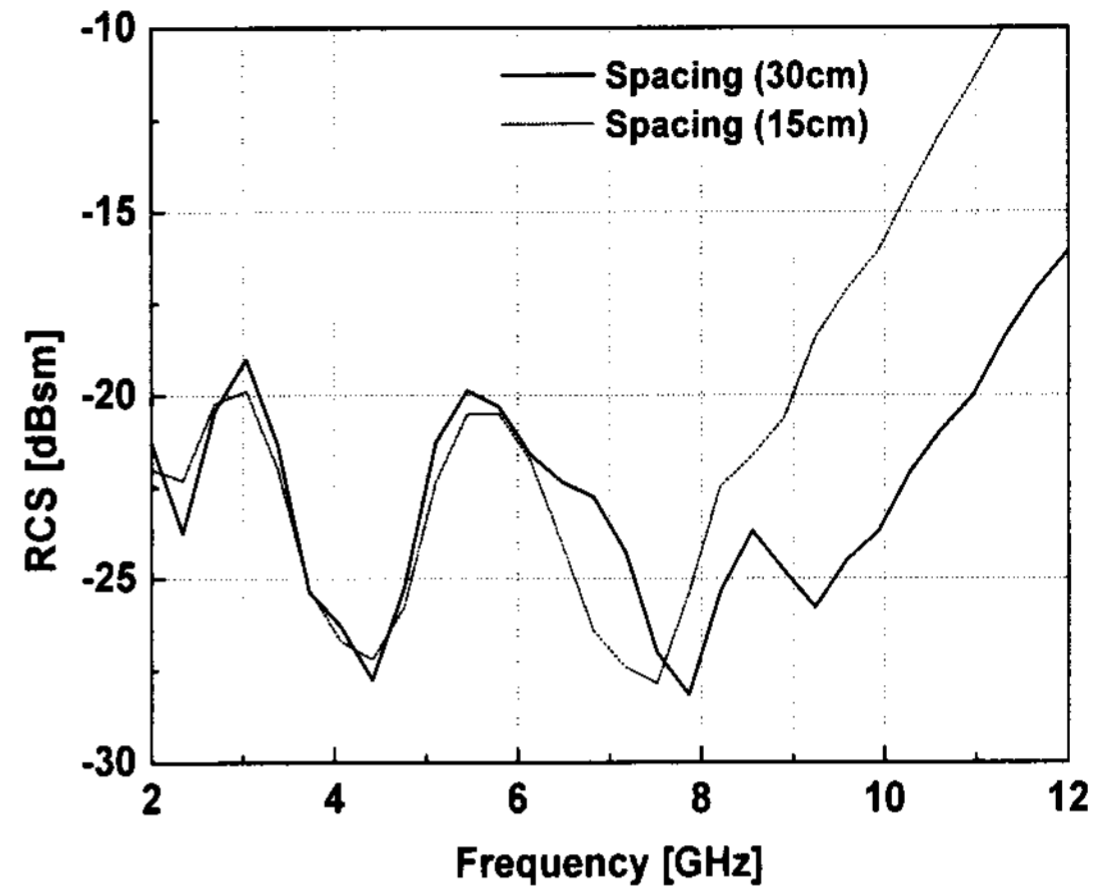
[그림 2] 길이가 다른 다이폴의 주파수에 따른 RCS 변화 (다이폴 길이 : 7.5cm, 5.0cm, 2.5cm, 직경 : 0.1mm)



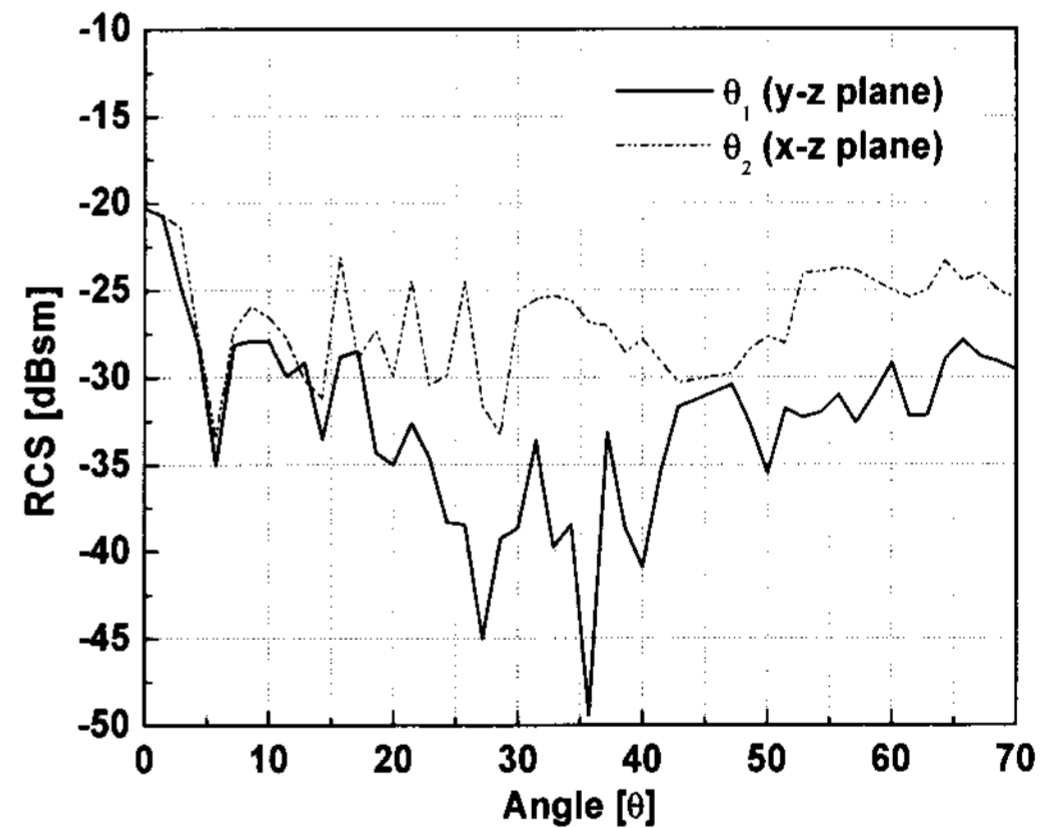
[그림 3] 다이폴의 이격거리(d)에 따른 RCS 변화(길이 : 7.5cm, 직경 : 0.1mm, 개수 : 3개)

그림 4에서는, 일반적으로 널리 사용되는 레이더의 주파수를 포함하는 대역, 광대역(S, C, X밴드(2~12GHz))

에서 채프의 RCS특성을 보여주고 있다. 세 개의 각각 다른 길이의 다이폴이 있을 때 주파수 변화에 따른 RCS의 특성을 보여 주고 있다.



[그림 4] 세 개의 다이폴의 주파수 변화에 따른 RCS 변화 (다이폴 길이 : 7.5cm, 5.0cm, 2.5cm, 직경 : 0.1mm, 이격거리 : 15cm, 30cm)



[그림 5] 다이폴의 기울어진 각도에 따른 RCS 변화(다이폴 길이 : 7.5cm, 직경 : 0.1mm)

앞의 그림에서 예상 하였듯이 각 길이에 해당하는 주파수(2GHz, 3GHz, 6GHz) 근처에서 RCS 값이 크게 나오는 것을 볼 수 있다. 그림 3에서 보여준, 각 길이에 해당하는 다이폴을 하나씩 사용하여 구한 RCS 값, 결과와 약간 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 이것은 세 개의 다이폴이 2~12GHz 주파수대역에서 받는 영향이 복합적으로 작용하기 때문이다[8].

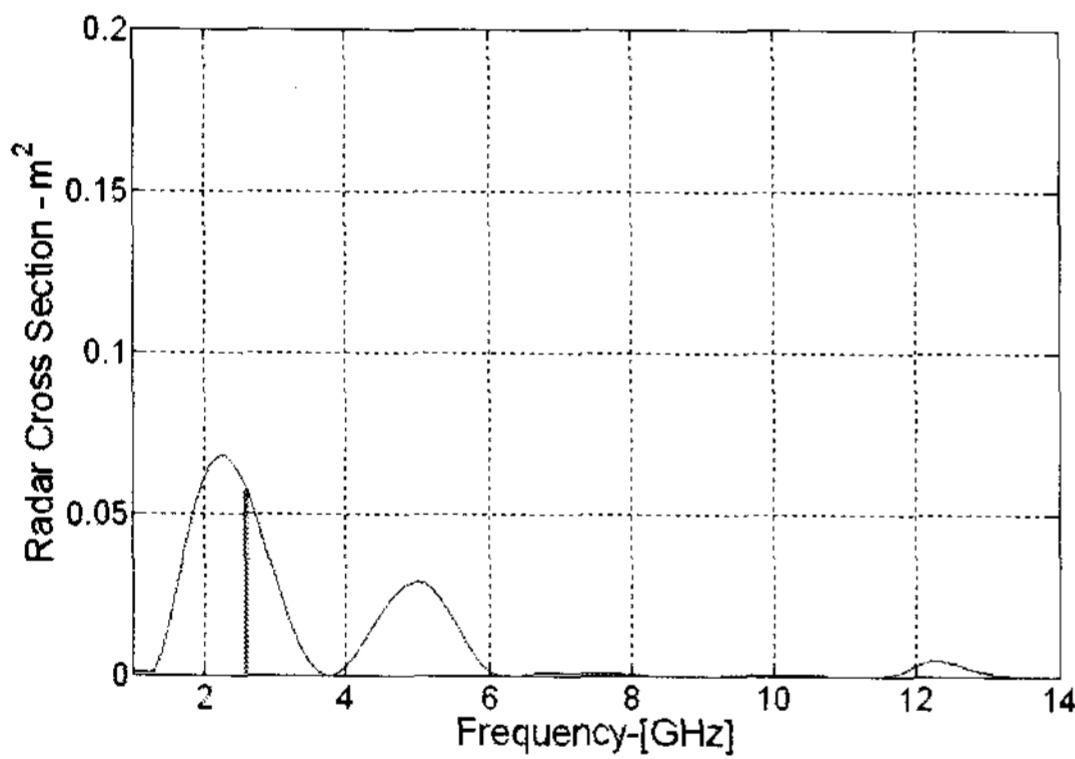
그림 5에서는 다이폴 안테나가 z축을 중심으로 전파가 입사하는 면과 입사방향과 수직인 단면으로 기울어진 정도에 따라 RCS 특성을 관찰 한 결과이다. 실제 채프가

공기 중으로 살포되어 낙하 할 때, 채프가 불규칙하게 움직이는 상황을 고려하기 위한 것이다. 결과에서 채프의 기울어진 각도( $\theta$ )가  $70^\circ$  이상인 경우 전산모사 결과가 정확하지 않아서 여기서는 표시하지 않았다. 향후 더 정확한 방법으로 얻은 결과를 제시 할 것이다. 그림 5에 나타난 결과는 기존에 소개된 얇은 도선의 산란특성과 유사한 특성을 보이고 있다[9]. 그림 6, 7에서는 단일밴드 (2.5GHz) 다이폴 채프의 RCS를 다이폴의 개수에 따라 계산한 결과이다. 공중에 불규칙하게 뿌려진 다이폴의 RCS는  $\sigma = 0.15N\lambda^2$ 로 구할 수 있다. 여기서 25개, 50개의 다이폴을 가정하고 주파수 2.5GHz( $\lambda=0.12m$ )에서 RCS를 계산 하면

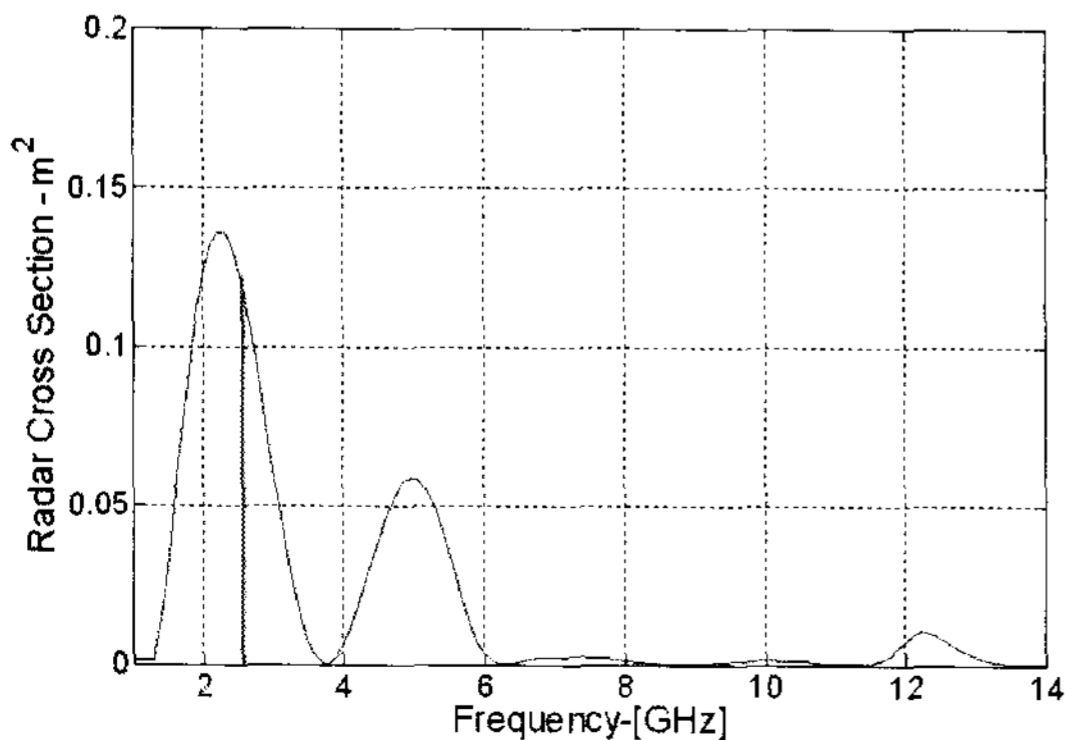
$$\sigma_{(N=25)} = 0.15 \times 25 \times (0.12)^2 = -12.67dBsm \quad (10)$$

$$\sigma_{(N=50)} = 0.15 \times 50 \times (0.12)^2 = -9.67dBsm \quad (11)$$

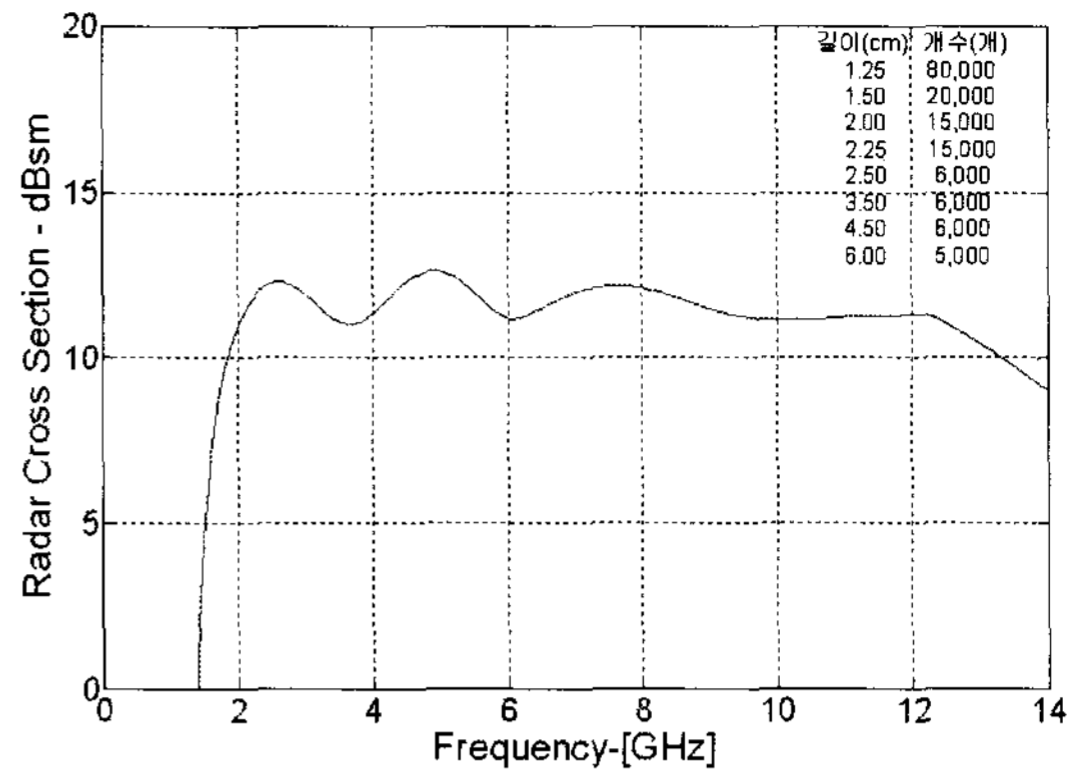
가 된다. 그림 6과 7의 결과와 유사한 특성을 보이고 있다. 실제 채프의 길이에 해당하는 주파수 보다 낮은 주파수( $\approx 2.2GHz$ )에서 RCS가 최대가 됨을 알 수 있다.



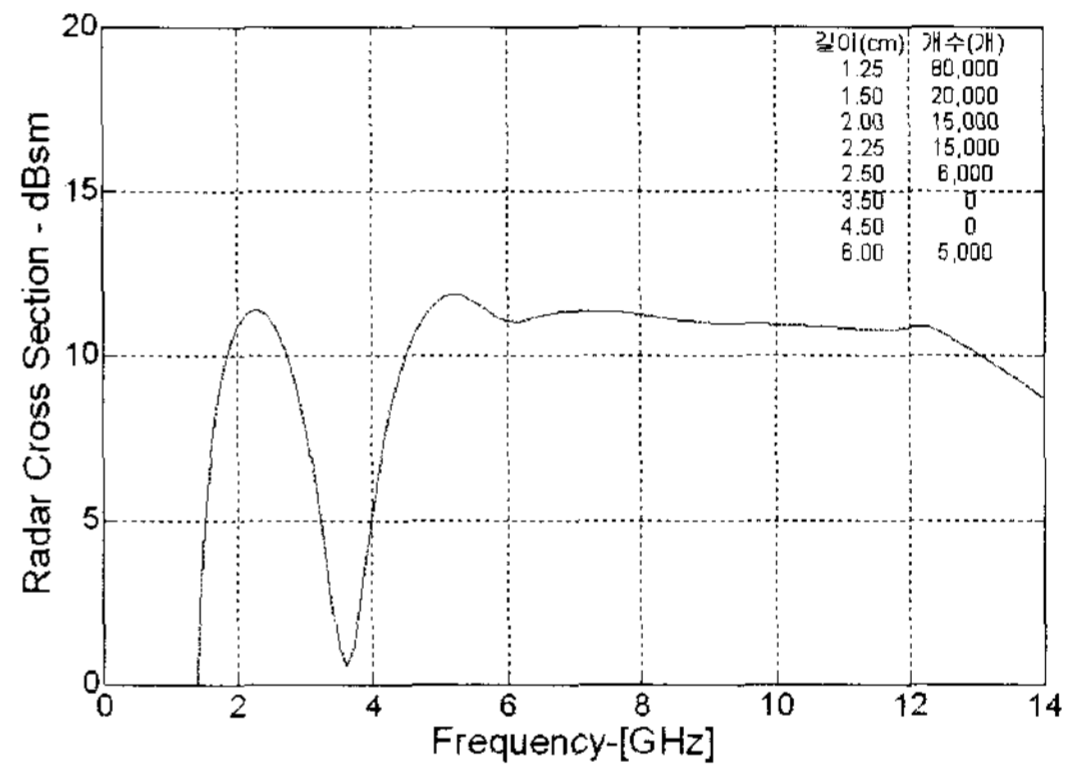
[그림 6] 단일밴드 다이폴 채프의 RCS  
(길이 : 7.5cm, 직경 : 0.1mm, 개수 : 25개)



[그림 7] 단일밴드 다이폴 채프의 RCS  
(길이 : 7.5cm, 직경 : 0.1mm, 개수 : 50개)



[그림 8] 다중밴드 다이폴 채프의 RCS  
(8 가지 길이의 다이폴이 있는 경우)



[그림 9] 다중밴드 다이폴 채프의 RCS  
(두 가지 길이의 다이폴이 빠진 경우)

그림 8은 여러 가지의 길이의 다이폴을 사용하여 2~12GHz 대역에서 10dBsm 이상의 RCS를 얻기 위한 채프의 구성을 보여주고 있다. 물론, 다양한 길이와 채프의 개수로 원하는 RCS를 얻을 수 있는 방법이 있으나 여기서는 8가지의 다른 다이폴 채프를 사용하였다. 그림 9에서는 소개된 RCS계산의 검증을 위해 두 가지 다이폴 (3.5cm(4.2GHz의  $\lambda/2$  길이), 4.5cm(3.3GHz의  $\lambda/2$  길이))이 빠진 경우에 그 주파수에 해당하는 대역에서 RCS가 나빠짐을 볼 수 있다. 여기서도 예상된 주파수 보다 약간 낮은 대역에서 RCS의 손실이 생기는 것을 볼 수 있다.

### 3. 결론

본 논문에서는 항공기용 다이폴 채프의 RCS를 계산하는 방법을 소개하였다. 채프를 다이폴 안테나로 간주하고 안테나의 산란특성을 이용하여 RCS를 구하였다. 채프 구

름의 RCS를 구하기 위해 다이폴 안테나의 산란특성에 대한 이론적인 결과들을 분석하고 전산모사를 통해 검증하였다. 기존에 소개된 수치해석적인 방법으로 계산한 결과와 전산모사에 의한 결과가 잘 일치함을 보였다. 실제 채프의 공기 중 확산 모델을 사용하여 RCS를 시간과 공간에 대하여 계산하는 방법은 향후 연구에서 수행 할 것이다.

### 참고문헌

[1] S. W. Marcus, "Electromagnetic wave propagation through chaff clouds," *IEEE Trans. on Antennas and Propagations*, Vol. 55, no. 7, pp. 2032-2042, 2007.

[2] R. A. Hessemer, Jr., "Scatter Communications with Radar Chaff," *IRE Trans. on Antennas and Propagations*, pp. 211-217, March 1961.

[3] G. T. Ruck, et al., *Radar cross section handbook*, Chapter 4, Plenum Press, 1970.

[4] Schleher, D. Curtis, *Introduction to electronic warfare*, Dedham: Artech House, 1986.

[5] P. Pouliguen, O. Béchu, and J. L. Pinchot, "Simulation of chaff cloud Radar Cross Section," *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005 IEEE*, Vol. 3A, pp. 80-83, 3-8 July 2005.

[6] Z. D. Zaharist, and J. N. Sahalos, "On the electromagnetic scattering of a chaff cloud," *Electrical Engineering*, Vol. 85, no. 3, pp. 129-135, 2003.

[7] F. Pasquill, *Atmospheric diffusion*, 1st Ed., Van Nostrand-reinhold, Princeton, New-Jersey, 1962.

[8] J. A. Boyd, *Electronic countermeasures*, Peninsula Publishing, LA, CA, 1965.

[9] H. T. Peters, A. K. Dominek, and L. Peter, Jr., "Electromagnetic scattering by a straight thin wire," *IEEE Trans. on Antennas and Propagations*, Vol. 37, no. 8, pp. 1019-1025, 1989.

### 임 중 수(Joong-Soo Lim)

[정회원]



- 1978년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학사)
- 1987년 8월 : 충남대학교 전자공학과 (공학석사)
- 1994년 3월 : Auburn University (공학박사)
- 1980년 8월~1989년 12월 : 국방과학연구소, 선임연구원
- 1998년 3월 ~ 2002년 8월 : 충남대학교 전파공학과 겸임교수
- 1994년 1월 ~ 2003년 12월 : 국방과학연구소, 전자탐지 탐장
- 2003년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 정보통신학부 교수

<관심분야>

전자파 이론, 광대역 주파수 소자 설계, 레이다 및 전자전 장비 설계/분석

### 김 민 년(Min-Nyun Kim)

[종신회원]



- 1993년 2월 : 홍익대학교 전자공학과 (공학사)
- 1995년 2월 : 홍익대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
- 1995년 대우전자 영상연구소
- 2003년 6월 : 홍익대학교 대학원 전자공학과(공학박사)
- 2002년 3월 : 백석대학교 정보통신학부 교수

<관심분야>

초고주파, 레이다, 전파산란, 광파

### 채 규 수(Gyoo-Soo Chae)

[종신회원]



- 1993년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학사)
- 1995년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2000년 12월 : Virginia Tech (공학박사)
- 2001년 1월~2003년 2월 : Amphenol Mobile (RF manager)
- 2003년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 정보통신학부 교수

<관심분야>

안테나 설계, 초고주파 이론