ISSN 2234-4438
융합정보논문지 제7권 제2호 pp. 37-42, 2017 DOI : https://doi.org/10.22156/CS4SMB.2017.7.2.037

확률분포를 이용한 다중 채프의 RCS 특성 분석

채규수*, 임중수, 김영호
백석대학교 정보통신학부

A RCS investigation of Multiple Chaff clouds using Probability Distribution Characteristics

Gyoo-Soo Chae*, Joong-Soo Lim, Young-Ho Kim
Division of Information & Communication Eng., Baekseok University

요 약 본 논문에서는 비행체나 함정 방어를 위해 사용되고 있는 채프의 RCS 예측을 위해 확률분포를 이용하는 방법을 제시하고 있다. 일반적으로 채프의 RCS는 레이다 사용주파수 대역에서 각각의 채프를 다이폴 안테나로 가정하고, 안테나의 산란특성 이용하여 RCS 값을 예측한다. 지금 까지 소개된 채프의 RCS 예측 연구 결과들은 주로 채프 한 발의 RCS를 이론적으로 계산하는 방법들이 제시되었다. 본 논문에서는 다중 채프의 RCS 예측 방법을 제시하였고, 특히 두 발 이상의 채프를 발사하였을 때 방위각에 따른 RCS 변화를 관찰 하였다. 채프 구름의 분포의 공간적 표현과 방향과 주파수에 따른 RCS 계산을 위해 Matlab이 사용되었다. 레이다 신호의 입사 방향에 따라 채프가 가려지는 경우 각 채프의 확률 분포를 고려하여 공간적으로 중첩되는 개수를 제외하여 실제 RCS를 예측하는 방법을 제시하였다.

키워드 : 다중 채프, 레이다 단면적, 확률분포, 다이폴 안테나, 산란 특성

Abstract In order to estimate chaff RCS, we suggest here a novel method using the probability distribution. Normally, a chaff is assumed that it is a thin dipole antenna and the RCS can be calculated by the scattering wave theory. Most of the theoretical methods presented were mainly focusing on a single chaff cloud. In this paper, the RCS calculation was done for two or more chaff clouds and the changes of RCS with azimuth angle were observed. Matlab was used for presenting the probability distribution of chaff clouds and RCS calculation. A more accurate RCS estimation method is suggested by estimating the number of chaffs except the blocked elements.

Key Words : Multi-chaff, RCS(Radar Cross Section), Probability distribution, Dipole antenna, Scattering characteristic

1. 서론

전자전 상황에서 미사일의 공격으로부터 항공기나 함정을 보호하기 위한 방법으로 채프가 널리 사용되고 있다. 채프는 일정한 길이의 도선, 알루미늄 호일(foil) 조각, 알루미늄을 입힌 유리, 은을 입힌 나일론 줄 등을 공중에 비산 시키는 것을 말한다. 채프가 효과적으로 전파를 반사시키도록 하기위해 레이다 주파수의 반 파장 길이로 만들어서 사용한다[1,2]. 지금까지의 연구 결과들을 살펴보면 개별 채프와 채프 구름의 RCS를 예측하기 위해 수

Received 2017-03-27 Revised 2017-04-08 Accepted 2017-04-10 Published 2017-04-30
*Corresponding author : Gyoo-Soo Chae (gschae@bu.ac.kr)

학적인 모델링과 안테나 이론, 해석적(analytic)인 방법들이 제시 되었다[3-6]. 공기 중에서 입자의 확산 모델이 채프 구름 속에 다이폴 안테나가 균일하게 분포하는 경우와 중심을 기준으로 표준편차를 가지는 정규분포를 가정한 연구들이 소개 되었다[7,8]. 이 두 경우 모두 채프 구름이 하나인 경우에 대해 레이다로부터 입사되는 신호의 반사 특성을 분석하는 결과들이 대부분이었다[9-13]. 일부 연구 결과에서 바람이나 낙하 속도 등을 고려하여 언급하고 있으나 중요한 고려 사항으로 취급되지는 않았다. 개별 채프들이 채프 구름 속에서의 속도, 밀도 그리고 점도 등에 의한 영향을 나타내는 레이놀즈계수(Reynolds number)의 영향을 무시할 수 있다. 본 연구에서도 레이놀즈계수는 무시하고 있으나 향후 좀 더 정밀한 반사 특성을 위해 고려할 필요가 있을 것으로 사료된다.

채프의 실제 낙하 형태나 밀도에 따라 산란되는 신호의 세기가 다양하게 나타나지만 다이폴 형태의 모델로 근사 화하고 채프의 개수만을 고려하여 RCS를 계산하는 방법이 널리 사용되고 있다[7,14]. 본 논문에서는 두 개 이상의 채프 구름에 대한 RCS를 전 방위각에 따라 예측하기 위해 각 채프를 다이폴 안테나로 규정하고 수치해석 모델을 사용하였다. 그리고 이론적인 계산 결과를 바탕으로 Matlab 시뮬레이션을 통해 RCS 계산 결과를 도출하였다. 기본적으로 두 개 이상의 채프 구름이 3차원 공간에 분포하는 형태에 따라서 각 방위에서 바라보는 RCS를 채프 구름의 확률 분포를 이용하여 구하였다. 레이다의 전파가 입사되는 방향에서 채프 구름이 겹치는 부분을 계산하고 확률적으로 그 넓이에 해당하는 공간에 분포하는 개수만큼 제외한 나머지 개수를 이용하여 전체 RCS를 예측하는 방법을 적용하였다.

2. 채프 구름의 모델링

2.1 채프의 RCS 계산

채프의 RCS를 계산하기 위하여 사용된 좌표계가 Fig. 1에 나타나있다.

Fig. 1에서 일반적으로 전자파 이론에서 입사되는 전파가 채프에 반사되어 레이다 수신기로 돌아오는 신호는 다음 식과 같이 표현할 수 있다[2].

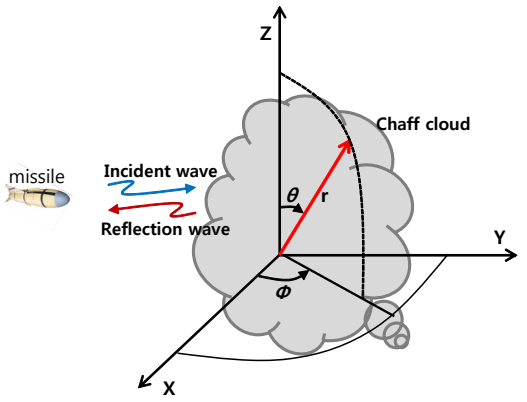

Fig. 1. Coordination System

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

여기서, P_r은 채프 구름에서 반사되어 레이다 수신기로 반사되는 전력, P_c는 채프 표면에 도달되는 전력, r은 수신기와 채프 사이의 거리, $\sigma(\theta, \phi)$ 는 채프의 RCS 이다. 하나의 채프 구름에 대한 RCS를 구하기 전에 먼저 개별 채프를 하나의 반 파장 다이폴 안테나로 모델링하여 그 표면에서 반사되는 전력을 다음 식으로 구 할 수 있다.

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

여기서, P_d는 다이폴 안테나로 표면에서 반사되어 재 방사되는 전력, G는 다이폴 안테나의 이득이다. 이때, 다이폴 안테나에서 재 방사되는 전력은

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

로 표현된다. 여기서, A_e는 안테나 유효 개구면적 이며 $\lambda^2 G/4\pi$이다. 개별 다이폴 안테나의 이득은

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

로 표현된다[2]. 식 (1)을 정리하여 채프의 RCS$\sigma(\theta, \phi)$를 구하는 식으로 정리하고 식 (2)-(4)를 대입하면

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

로 표현된다. 입사하는 레이다 송신파가 선형 편파이면서 수평 편파로 가정하면 다이폴의 이득은 $\theta = \pi/2$ 에서 최대가 되고 RCS는 $0.856\lambda^2$ 이 된다[2]. 식 (5)에서 구한 개별 채프에 대한 RCS 결과를 사용하여, N개의 채프로 구성된 채프구름의 RCS의 평균값을 구하면

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

로 표현 된다. 식 (6)을 해석적인 방법으로 근사화 하여 입사파가 선형 편파인 경우 N개의 다이폴로 구성된 채프 구름의 RCS를 다음과 같이 얻을 수 있다[2].

$$\overline{\sigma} \cong 0.15N\lambda^2 \quad (7)$$

채프 구름에서 반사되는 신호를 계산 할 때, 식 (8)과 같이 각 채프에서 반사되는 신호의 합으로 표현 할 수 있다[15].

$$S = Ae^{j\phi} = \sum_1^N A_k e^{j\psi_k} \quad (8)$$

이 식에서 A와 ϕ는 채프 구름에 대한 반사 신호의 크기와 위상이며, A_k와 ψ_k는 k번째 채프의 반사 신호 크기와 위상이다.

2.2 채프 구름 모델링

두 발 이상의 채프가 공중에 발사 될 때, 3차원 공간에서 방위각에 따른 RCS 값을 예측하기위해서는 먼저 채프가 공중에서 확산되는 정확한 모델이 제시되어야 한다. 실제로 채프가 공중에 투하될 때 각각의 채프가 x, y, z좌표계에서 식 (9)-(11)과 같이 가우시안분포를 가진다고 가정한다[4-5].

$$p(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}} \quad (9)$$

$$p(y) = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \quad (10)$$

$$p(z) = \frac{1}{\sigma_z \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}} \quad (11)$$

여기서, σ_x, σ_y, σ_z는 3차원 공간에서의 각 좌표축 방향의 표준편차(standard deviation)이다. 정확한 x, y, z축 상의 표준 편차 계산을 위해서는 채프의 초기 발사속도, 바람, 자유낙하 등이 고려되어야 한다. 또한 각 채프가 주어진 확률 분포에 따라 공간적으로 각 위치에서 있을 때 채프의 방향도 식 (12), (13)과 같이 θ와 ϕ의 확률분포로 표시된다.

$$p(\phi) = \frac{1}{2\pi} \quad (12)$$

$$p(\theta) = \frac{1}{2} sin\theta \quad (13)$$

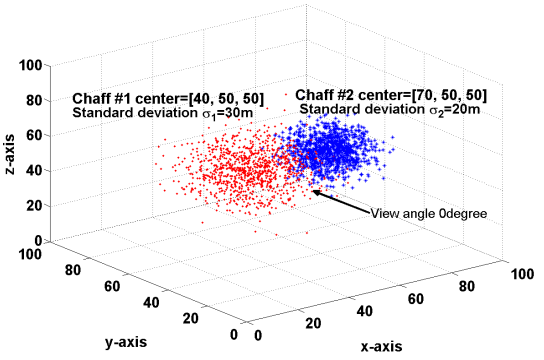

Fig. 2. Two chaff clouds for chaff#1(40, 50, 50) and chaff#2(70, 50, 50)(standard deviation σ_{1x}= σ_{1y}=σ_{1z}=30m, σ_{2x}=σ_{2y}=σ_{2z}=20m)

Fig. 2에서는 식 (10)-(12)를 이용하여 Matlab을 이용하여 표현한 두 개의 채프 구름이 공간상의 분포를 표시하고 있다. 각 채프의 중심좌표(chaff#1(40m, 50m, 50m), chaff#2(70m, 50m, 50m))를 기준으로 x, y, z축 방향의 표준편차(σ_1=30m, σ_2=20m)와 전체 채프개수(1,000개)로 주어 질 때 분포를 표시하였다. Fig. 3에서는 각 채프의 중심좌표(chaff#1(40m, 50m, 50m), chaff#2(70m, 50m, 90m))인 경우의 채프 구름의 분포를 표시하였다.

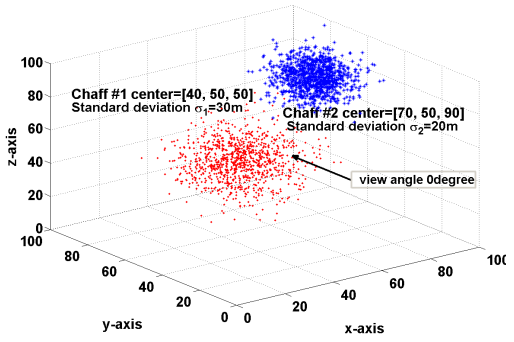

Fig. 3. Two chaff clouds for chaff#1(40, 50, 50) and chaff#2(70, 50, 90)(standard deviation σ_{1x}= σ_{1y}=σ_{1z}=30m, σ_{2x}=σ_{2y}=σ_{2z}=20m)

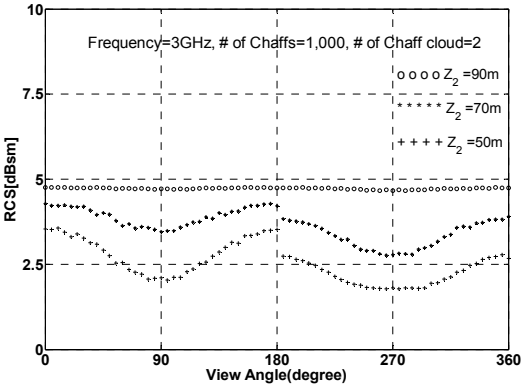

Fig. 4. The RCS for two chaff clouds(# of chaffs =1,000) with azimuth angle @3GHz(Z2=50m, 70m, 90m)

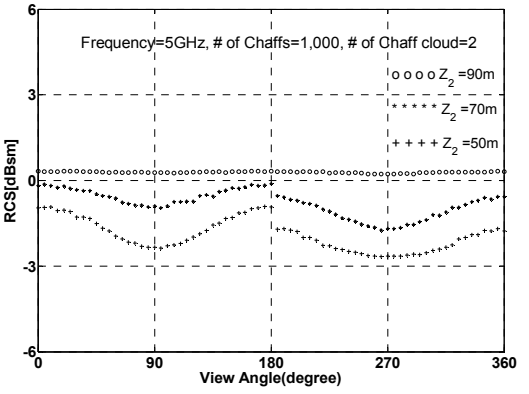

Fig. 5. The RCS for two chaff clouds(# of chaffs =1,000) with azimuth angle @5GHz(Z2=50m, 70m, 90m)

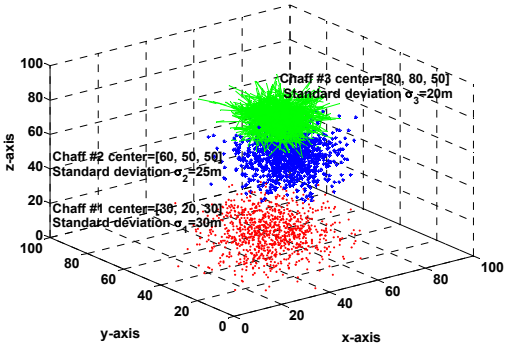

Fig. 6. Three chaff clouds for chaff #1(30, 20, 30), chaff #2(60, 50, 50) and chaff #3(80, 80, 50) (standard deviation σ_{1x}=σ_{1y}=σ_{1z}=30m, σ_{2x}=σ_{2y}=σ_{2z} =25m, σ_{3x}=σ_{3y}=σ_{3z}=20m)

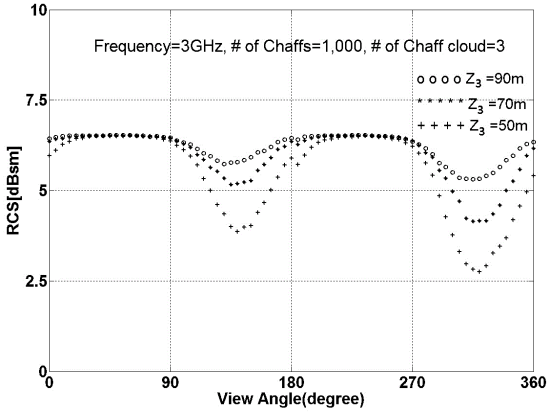

Fig. 7. The RCS for three chaff clouds(# of chaffs =1,000) with azimuth angle @3GHz(Z3=50m, 70m, 90m)

2.3 채프 구름 및 RCS 계산 결과 분석

시뮬레이션 결과의 예측을 위해 식 (8)을 이용하여 1,000개의 다이폴을 가정하고 주파수 3GHz(λ=0.10m), 5GHz(λ=0.06m)에서 RCS를 계산 하면 각각 -1.7dBsm과 -2.6dBsm이다. Fig. 4는 x축 쪽에서 채프를 바라보는 방향을 기준 view angle(0^o)로 하고 x-y 평면에서 반 시계 방향으로 azimuth angle을 변화 시키면서 채프 구름의 RCS를 계산하였다. 이때 입사각 기준으로 0^o-180^o 앞쪽과 반대편에서 보이는 채프를 기준으로 뒤에 가려지는 채프의 개수를 제외하는 방법으로 전체 채프의 개수를 구하였다. Fig. 4에서는 사용 주파수 3GHz인 경우에 두 번째 채프 z축 방향의 위치를 50m, 70m, 90m로 이동 할 때 방위각의 변화에 따른 RCS 결과를 보여주고 있다. 두

번째 채프 구름이 Z축 방향으로 이동(Z_2=50m, 70m, 90m) 할 때 두 채프 구름의 전체 RCS를 보여주고 있다. Z_2가 50m, 70m인 경우 두 채프는 겹치는 부분이 생기게 되고 이 결과 90°, 270° 방향에서 RCS가 각각 2.1dBsm, 1.9dBsm으로 감소하는 것을 볼 수 있다. Z_2가 90m인 경우 두 채프는 겹치는 부분이 없어지게 되어 360° 전 방향에서 RCS가 4.7dBsm 정도로 일정한 것을 볼 수 있다. Fig. 5에서는 사용 주파수 5GHz인 경우에 전반적으로 채프의 RCS가 4.4dBsm정도 감소하는 것을 볼 수 있고 전반적인 특성은 3GHz일 때와 유사한 특성을 보이고 있다. Fig. 6에서는 세 개의 채프 구름이 공간상에 분포하는 모양을 표시하고 있다. 각 채프의 중심좌표(chaff#1(30m, 20m, 30m), chaff#2(60m, 50m, 50m), chaff#3(80m, 80m, 50m))를 기준으로 x, y, z축 방향의 표준편차(σ_1=30m, σ_2=25m, σ_3=20m)와 각 채프의 개수는 1,000개일 때 분포를 표시하였다. 이 경우에 150°와 300°에서의 RCS가 대칭적으로 나타나지 않는 것은 상대적으로 다른 방향에서 뒤에 가려지는 채프 구름이 달라지기 때문이다. 그리고 세 번째 채프의 고도 변화에 따라 RCS가 일정하게 유지되는 결과가 없는 것은 두 번째 채프 구름이 첫 번째 채프구름과 일정 부분 겹치는 부분이 존재 하는 것을 의미한다. Fig. 7에서는 주파수 3GHz인 경우에 세 번째 채프 z축 방향의 위치를 50m, 70m, 90m로 이동 할 때 방위각의 변화에 따른 RCS 결과를 보여주고 있다. Z_3가 50m, 70m, 90m인 경우 채프가 겹치는 부분이 생기게 되고 130°, 300° 방향에서 RCS가 각각 감소하고 가려지는 채프의 위치가 달라져 비대칭적인 RCS를 보여주고 있다.

3. 결론

본 논문에서는 두 개 이상의 채프 구름의 RCS 예측을 위해 확률분포를 이용하는 방법을 제시하고 있다. 지금까지의 연구 결과들을 분석 결과 각 채프를 다이폴 안테나로 가정하고 다수의 채프가 구름 형태로 분포하고 전파가 입사 할 때 반사파의 크기를 구하는 방법들이 대부분 이었다. 주로 채프 한 발의 채프에 대해 3차원 대칭구조를 가정하고 RCS를 이론적으로 계산하는 방법들이 제시되었다. 본 논문에서는 다중 채프의 RCS 예측 방법이 다루어 졌으며, 특히 두 발 이상의 채프를 발사하였을 때 방위각에 따른 RCS 변화를 관찰 하였다. 레이다 신호가 특정 방향으로 입사 될 때 입사 방향에 따라 각 채프구름이 서로 가려지는 경우 각 채프의 확률 분포를 고려하여 공간적으로 중첩되는 개수를 계산하였다. 이 결과를 이용하여 해석적으로 채프의 RCS를 구하는 수식을 이용하여 보다 정확한 RCS 결과를 제시하였다. 각 채프 구름의 공간적인 위치에 따라 각 방위에서의 RCS 값이 예측 값과 일치함을 볼 수 있었다. 본 연구에서는 각 채프 구름의 운동 역학이 세부적으로 고려되지 않았으나 향후 연구에서는 바람과 레이놀즈계수를 고려하여 보다 정확한 RCS 예측 결과를 제시하고자 한다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 연구는 방위사업청에서 설립한 전자전특화센터(EWRC)에서 지원받았습니다.

REFERENCES

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

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

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

[4] J. Dan, Cha Hao and Z. Lei, "A Simulation study of Chaff Echo Signal Based on LFM," *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*, Vol. 9, No. 4, pp. 131-140, 2016. DOI: 10.14257/ijsip.2016.9.4.12

[5] J. Zhang, Z. Liu and H. Wang, "A Chaff Cloud Echo Modeling and Simulation Method based on Coherent Scattering Model," *Journal of Computational Information System*, Vol. 5, No. 5, pp. 1579-1586, 2015. DOI: 10.12733/jcis13221

[6] J. S. Lim, "Analysis of Induced Currents on the Dielectric Cube by the Fusion of MoM and PMCHW Integral Equation," *Journal of the Convergence Society*, Vol. 6, No. 5, pp. 9-14, 2015. DOI: 10.15207/JKCS.2015.6.5.009

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

[8] 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. DOI: 10.1109/8.34139

[9] J. S, Lim, M. N. Kim and G. S. Chae, "A study on the dipole chaff RCS for aircraft," *Journal of the korea academia-industrial cooperation society*, Vol. 9, No. 3, pp. 690-694, 2008. DOI: 10.5762/KAIS.2008.9.3.690

[10] S. W. Marcus, "Electromagnetic wave propagation through chaff clouds," *IEEE Trans. on Antennas and Propagations*, Vol. 55, No. 7, pp. 2032-2042, 2007. DOI: 10.1109/TAP.2007.900178

[11] 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. DOI: 10.1109/APS.2005.1552180

[12] 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. DOI: 10.1007/s00202-003-0158-6

[13] R. A. Hessemer, Jr., "Scatter Communications with Radar Chaff," *IRE Trans. on Antennas and Propagations*, Vol. 9, No. 5, pp. 211-217, Mar. 1961. DOI: 10.1109/TAP.1961.1144981

[14] N. Kruger, "Modeling the EM properties of dipole reflections with application to uniform chaff clouds," *Master's thesis, University of Stellenbosch, Matieland*, South Africa, December 2009.

[15] L. Qiang and L. Yi-an, "A Modeling and Simulation Method of Chaff Cloud Echo," *Journal of Modern Radar*, Vol. 28, No. 8, pp. 91-94, 2006.

저 자 소 개

채 규 수(Gyoo-Soo Chae) [종신회원]

- 2000년 12월 : Virginia Tech. 전기공학과(공학박사)
- 2001년 1월 ~ 2003년 2월 : Amphenol Mobile, RF manager
- 2003년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 정보통신학부 교수

<관심분야> : 안테나 설계, 초고주파 이론

임 중 수(Joong-Soo Lim) [정회원]

- 1987년 8월 : 충남대학교 전자공학과(공학석사)
- 1994년 3월 : Auburn University (공학박사)
- 1980년 8월~2003년 12월 : 국방과학연구소
- 2003년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 정보통신학부 교수

<관심분야> : 전자파 이론, 광대역 주파수 소자 설계, 레이다 및 전자전 장비 설계/분석

김 영 호(Young-Ho Kim) [정회원]

- 2015년 12월 : 홍익대학교 전자공학과 (이학박사)
- 2007년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 정보통신학부 강사

<관심분야> : 방향탐지 기법, 네트워크, 자바, 안드로이드