

지향성 에너지 무기체계와 고출력 마이크로파 무기 효과도 분석

Directed Energy Weapon System and Analysis on Effectiveness HPM Weapon

김 일 규 · 김 문 섭

Ilkyu Kim · Moon-sup Kim

요 약

지향성 에너지 무기는 순간적으로 집중된 에너지를 특정한 방향으로 방사하여 적 전자장비를 교란하거나 과부하를 초래하는 무기체계이다. 이러한 지향성 에너지 무기체계의 성능을 결정하고, 설계를 수행함에 있어 표적에 대한 효과 분석은 중요한 고려 요소 중 하나이다. 본 논문에서는 대표적인 지향성 에너지 무기체계인 공중방어체계에 대한 효과도를 분석하였다. 이를 위하여 고출력 원형편파 피드혼을 적용한 반사판 안테나를 설계하고, 거리 별 유효면적에 인가되는 출력밀도를 시뮬레이션 통과 프리스 공식을 활용하여 분석하였다. 이를 통하여 안테나 시스템 설계에 대한 유효성을 검증하고, 표적에 대한 지향성 에너지 무기의 효과를 확인하였다.

Abstract

Directed energy weapon enables to radiate the concentrated energy so as to result in distraction and overload of the target electronics. Analysis on effectiveness of weapon system can be important consideration in order to determine performance and design weapon system. In this paper, air defense weapon system, which is one of directed energy weapon system is studied. In order to analyze the effectiveness, the reflector antenna with high power circularly polarized horn antenna is designed, and power density in axial effective area is simulated and calculated using Friis formula. Through the study, the validity of antenna system is verified, and the effectiveness of directed energy weapon system on the target is evaluated.

Key words: Effectiveness Analysis, Directed Energy Weapon, High Power Microwaves, High Power Feed Horn, Circular Polarization

I. 서 론

지향성 에너지 무기는 지향성을 갖는 전자기 펄스 (electro-magnetic microwave pulse)를 사용하여 적 장비, 시설, 인명에 타격을 주는 체계를 뜻한다^{[1]-[3]}. 지향성 에너지 무기의 중요한 구성요소인 전자기 펄스는 전자기 스펙트럼을 사용하며, 순간적으로 집중된 에너지를 특정한 방향으로 방사하여 적 전자장비를 교란하거나, 과부하를 초래한다. 전자기 펄스는 연속적인 출력으로 수 메가와트

이상의 전자파를 발생하는 것은 어려우므로, 나노초 또는 마이크로초의 짧은 주기에 수 메가와트 이상의 전자파를 순간적인 펄스 형태로 발생한다. 지향성 에너지 무기는 표적의 안테나, 송수신기를 거치는 정상적인 통신 경로 (front-door) 이외에 기구 틈새, 케이블 등 차폐되어야 하는 경로(back-door)를 통하여 표적의 내부 전자장비에 영향을 주게 된다. 전자전 무기는 통신 경로(front-door) 교란을 위하여 표적 센서(안테나)에 대한 정보가 필요하지만, 지향성 에너지 무기는 표적에 대한 상세 제원 없이 전

국방기술품질원 유도감시팀(C4I & SRR Team, Defense Agency for Technology and Quality)

· Manuscript received August 18, 2016 ; Revised October 5, 2016 ; Accepted October 18, 2016. (ID No. 20160818-079)

· Corresponding Author: Ilkyu Kim(e-mail: ilkyukim@gmail.com)

자장비를 사용하는 광범위한 표적에 대한 타격이 가능한 것이 장점이다. 경제적인 측면에서도 지향성 에너지 무기는 발사체에 의존하는 유도 무기체계와 달리 전자기 펄스를 활용하므로 전투비용을 절감할 수 있다. 특히 전자 장비에 의존하는 지향성 에너지 무기체계는 정비·수리 등 운용유지비용을 절감할 수 있으며, 반복적인 임무수행이 가능한 장점이 있다. 마지막으로 지향성 에너지 무기는 목표 표적에 대한 억지 또는 무력화를 목표로 하므로, 목표 표적에 대한 불필요한 피해를 줄일 수 있다. 근래 들어 재래식 무기의 공격으로 인하여 표적 외 시설 및 인명에 대한 피해가 발생하여 문제가 되고 있다. 고지향성 에너지 무기는 이러한 부수적인 피해의 최소화가 가능하여 작전수행에 대한 부담을 줄일 수 있다. 이러한 지향성 에너지 무기는 위와 같은 장점을 활용하여 적에 대한 효과적인 공격수단뿐만 아니라, 적의 공격시도를 억지하는 능동적인 방어수단으로 발전하고 있다.

본 논문에서는 크게 지향성 에너지 무기체계의 주요 체계 구성, 개발 동향 및 효과도 분석에 대하여 소개하는 내용을 다루었다. 우선 지향성 에너지 무기체계 구성에 대하여 소개하고, 지향성 에너지 무기체계의 국외 개발동향에 대하여 간단히 소개하였다. 또한, 지향성 에너지 무기체계의 하나의 사례는 지향성 에너지 공중방어체계의 표적에 대한 효과도를 분석하였다. 이를 위해 고출력 원형 편파 피드혼을 적용한 반사판 안테나를 설계하고, 표적에 인가되는 전자기 분포를 간단한 계산을 통해 예측하고, 전자기 시뮬레이션 툴을 활용하여 검증하였다. 이러한 효과도 분석은 고출력 무기의 체계 성능 결정 및 설계를 수행함에 있어 기초자료로 활용될 수 있다.

II. 지향성에너지 무기 소개

2-1 지향성에너지 무기의 체계 구성

지향성에너지 무기는 그림 1과 같이 전자장비의 반도체 소자에 과도 전압 및 전류를 인가하여 일시적인 비정상적 상태를 유발하거나, 아크방전, 스파크 발생을 통하여 반도체 소자의 영구적 손상을 초래하여 표적(미사일 위협 등)을 무력화할 수 있다. 지향성 에너지무기에 의한 효과는 표 1과 같이 4가지로 구분하여 정의할 수 있다

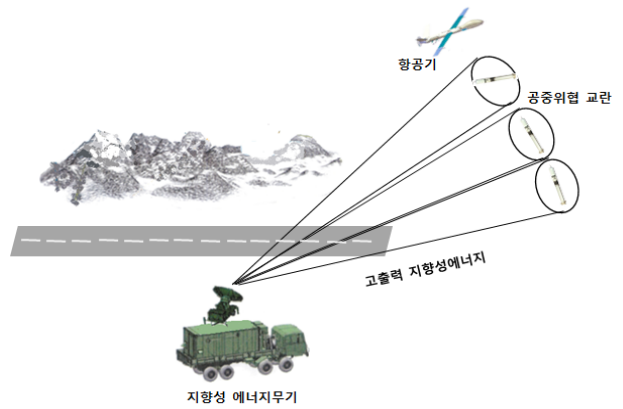


그림 1. 지향성 에너지 무기 개념도
Fig. 1. Operation of directed energy weapons.

표 1. 전자파 무기효과도 분류
Table 1. Classificaion of HPM effectiveness.

구 분	손 상 효 과
UPSET	· 일시적 비정상 상태 · 원인제거 시 정상상태 복귀
LOCKUP	· 일시적 비정상 상태 · 원인제거 시 전기적 리셋 이후 정상상태 복귀
LATCHUP	· 전기적 결함에 의한 영구적 손상상태
BURNOUT	· 물리적 결함에 의한 영구적 손상상태

[1]~[4]. 이러한 지향성 에너지무기는 효과를 얻기 위하여 표적에 일정 수준 이상의 전자기파가 전달되어야 하는데, 표적에 인가되는 출력밀도는 평균 수 mW/cm^2 (수십 W/m^2) 이상이 필요한 것으로 알려져 있다. 지향성 에너지 무기의 효과도 달성을 위해서 무기체계 구성요소별 요구 성능의 도출이 필요하며, 지향성 에너지 무기체계는 그림 2와 같이 구성될 수 있다. 주전원은 상대적으로 낮은 에너지를 갖는 긴 펄스 형태의 입력을 형성한다. 펄스전원은 주전원에서 공급받은 전자빔에너지를 수백 ns 안의 짧은 펄스 형태로 발생시키며, 일반적으로 다수의 펄스전원을 직렬로 연결하는 방식으로 펄스를 압축하여 높은 최대출력을 생성한다. 발생된 전자빔에너지는 마이크로웨이브 전원(마이크로웨이브 증폭기)를 거치며, 마이크로파 대역의 전자기파로 변환된다. 전자기파는 도파관을 진행하면서 안테나가 방사할 수 있는 모드로 변환되어 안테나에 전달되고, 안테나의 운용주파수, 최대출력, 안테나 이득 및

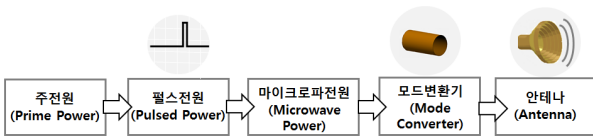


그림 2. 지향성 에너지 무기 체계 구성
Fig. 2. Sub-system of directed energy weapon.

편파에 따라 표적에 전달되는 출력밀도가 결정된다^{[1],[2]}. 본 논문에서는 최대 출력, 안테나 이득 등 구성요소의 요구성능을 최적화하고, 이에 따라 표적에 인가되는 출력밀도를 통하여 효과도를 분석하고자 한다.

2-2 지향성 무기체계 현황

대표적인 지향성에너지 무기로 인공 비살상 무기인 능동 접근 억지 무기체계(ADS)와 휴대용 방공무기(MAN-PADS)로부터 항공기를 보호하기 위한 지향성 에너지 공중방어체계^[6] 등이 존재한다. 언급된 지향성 무기체계 중 본 논문에서는 지향성 에너지 공중방어체계에 대한 효과도 분석을 수행하였다. 지향성 에너지 공중방어체계는 공중에서 이·착륙하는 항공기를 조준하여 미사일이 발사되면 공중 근처에 배치된 적외선 센서가 이를 탐지/추적하고, 지향성 에너지 무기는 높은 출력의 전자파를 미사일에 조사하여 미사일 탐색기의 유도능력을 저하시킨다. Vigilant Eagle은 항공기 보호를 위한 대표적인 지향성 에너지 무기체계이다. 미 레이시온사에서 개발한 Vigilant Eagle은 약 10 km 반경의 항공기 이착륙구역 내 발사되는 미사일에 대하여 높은 평균출력의 마이크로파를 지속적으로 조사가 가능하다. 다음 장에서는 이러한 지향성 에너지 공중방어체계와 유사한 사례분석을 통하여 실제 무기체계의 유효성을 검증하였다.

III. 지향성 에너지 무기의 표적 도달 출력밀도 분석

본 논문에서는 높은 출력의 전자기파를 방사를 위하여 원형 편파 전방급전 파라볼릭 반사판(Prime Focus Parabolic Reflector) 안테나를 사용하였으며, 거리별 표적에 도달하는 출력밀도를 통하여 고출력무기의 효과도를 분석하였다. 원형 편파의 사용은 표적 센서의 편파에 의한 영

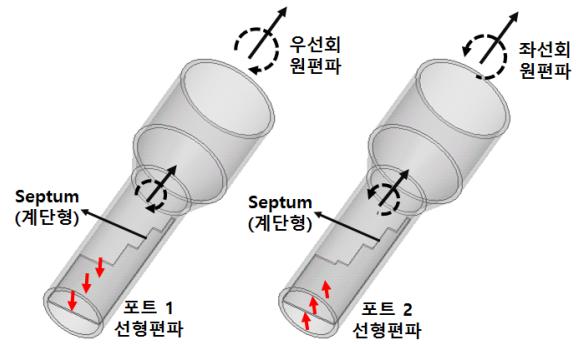


그림 3. Septum 구조를 갖는 고출력 원형편파 피드혼
Fig. 3. High power circularly polarized feed horn with septum structure.

향을 줄일 수 있으며, 표적에 대한 일정 이상 효과도를 얻을 수 있는 장점이 있다.

3-1 고출력 원형편파 피드혼 안테나

반사판 안테나의 피드혼으로는 참고문헌 [5]에서 연구된 septum 구조가 삽입된 원추 혼(conical horn) 안테나가 사용되었다. 그림 3과 같이 septum 구조는 도파관에 위치하며, 마이크로파 전원에서 발생된 TM_{01} 모드를 90도 위상차이를 갖는 TE_{11} 모드와 TM_{11} 모드로 변환하는 모드 변환기 역할을 수행한다. 즉, 급전된 선형편파를 원형편파로 변환시키고, Port 1 또는 Port 2를 급전함에 따라 좌선회 원편파 또는 우선회 원편파를 결정할 수 있다. Septum 구조는 일반적으로 넓은 주파수 대역의 임피던스 정합을 위해 계단식 구조가 사용되었으나, 모서리에 인가되는 높은 전기장, 전류밀도에 의한 브레이크다운이 발생할 수 있다. 그림 4는 hard-polarized 및 soft-polarized 입사파에 의하여 반평면(half-plane)에 인가되는 전기장 및 전류밀도 분포를 보여준다. 각각의 입사파에 의하여 모서리에 형성되는 강한 전기장 또는 전류밀도 분포를 관찰할 수 있다. 이러한 전기장과 전류밀도는 계단형 septum 코너에서 더 집중될 가능성이 있으므로 이를 분산하기 위해 그림 5와 같이 Sigmoid 함수 형태로 완만하게 변환되는 septum을 설계하였다. Septum의 최적화된 디자인을 찾기 위하여 Particle Swarm Optimization(PSO)을 활용하였으며, 임피던스 정합($VSWR < 1.5$ 이하)과 원형편파 축비($AR < 2$ 이하)를 최적화하는 septum 디자인을 도출하였다.

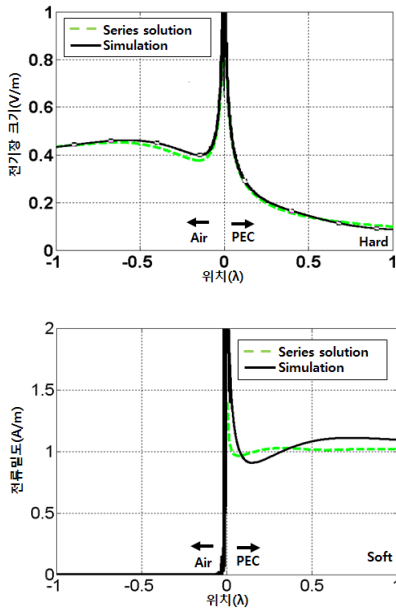


그림 4. 입사파에 따른 반평면 인가 전기장 크기 및 전류 밀도 (위) Hard polarized, (아래) Soft polarized
 Fig. 4. E-field intensity and current density on half-plane due to the plane-wave incident field.

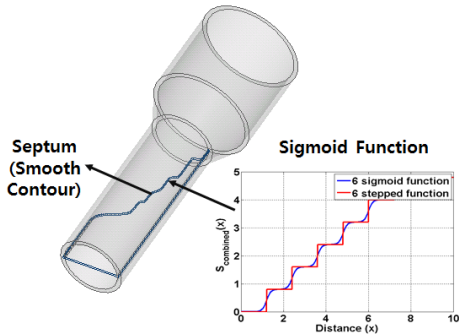


그림 5. 고출력 입력을 위한 Septum 디자인(중심주파수: 5.8 GHz)
 Fig. 5. Septum design with smooth profile($f=5.8$ GHz).

피드혼이 전송 가능한 최대 출력은 1 W 입력시 발생되는 브레이크다운 전기장($E_{br}=3 \times 10^6$ V/m)의 관계를 통하여 산출하였으며, 피드혼 내부에 형성된 최대 전기장을 통하여 약 211.3 KW의 최대출력을 인가할 수 있는 것으로 나타났다. 약 30 KW의 최대출력을 인가할 수 있는 계단형 septum 구조의 혼안테나에 비하여 약 7배 높은 최대출력이다.

3-2 체계성능 분석 및 파라볼릭 반사판 안테나 설계

파라볼릭 반사판 안테나는 기계적으로 표적을 따라 움직이며, 3 dB 빔폭은 약 1° 정도로 8 km 거리에서 약 140 m 반경 안에 위치한 표적을 조사하도록 설계하였다. 상대적으로 좁은 빔폭을 갖는 안테나는 표적에 유효한 출력밀도를 확보하고, 표적에 대한 정확한 조준을 통하여 항공기에 대한 전자파 방사를 방지하는데 유리하다. 표적에 조사되는 출력밀도를 간단한 프리스 공식에 의해 산출하였으며, 최대 출력 211.3 KW 입력 시 8 km 거리에서 1 mW/cm^2 이상으로 표적에 대하여 유효(UPSET 이상 효과)한 것으로 나타났다. 파라볼릭 반사판 안테나는 요구되는 성능을 만족시키기 위해 66λ 의 직경을 가지며, 10 dB edge taper를 고려하여 초점거리(F)는 32.54λ 로 그림 6과 같이 설계하였다. 그림 3의 포트 1을 인가 시 파라볼릭 반사판 안테나의 좌선회 원편파(LHCP) 방사패턴을 시뮬레이션 툴을 이용하여 구한 결과를 보여준다. 반사판

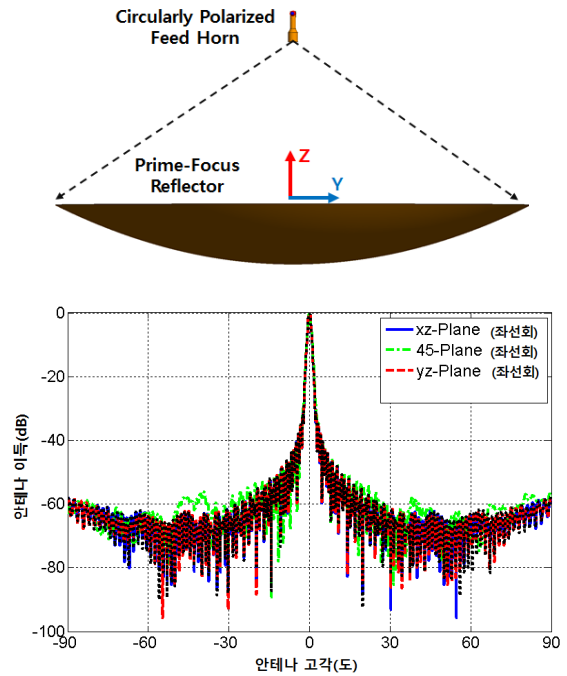


그림 6. (위) 원형편파 피드혼 반사판 안테나, (아래) 원전계 패턴
 Fig. 6. Parabolic reflector with CP feed horn and far-field pattern at 5.8 GHz.

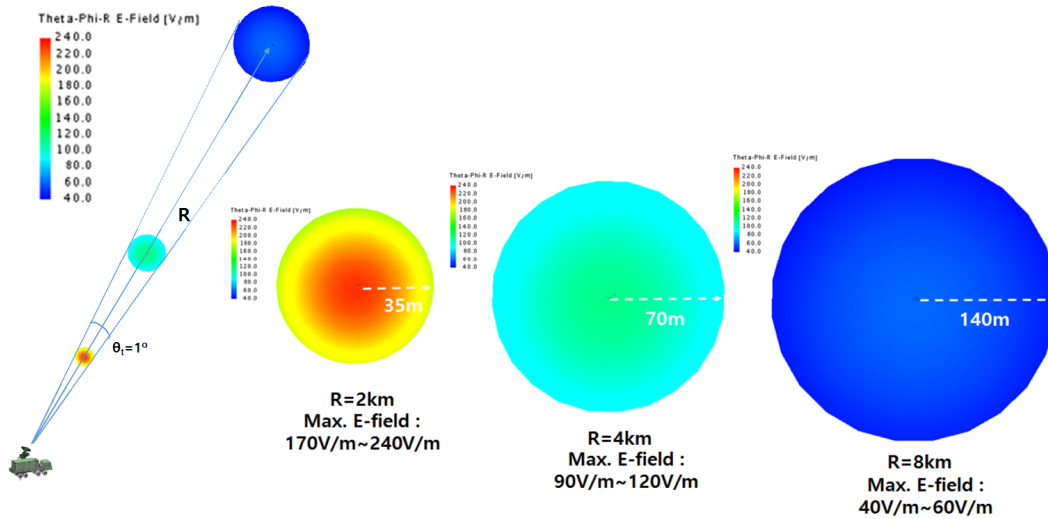


그림 7. 거리(2 km, 4 km, 8 km)별 유효면적에 인가되는 전자기 크기(주파수: 5.8 GHz)
 Fig. 7. Power density in axial effective area at the distance of 2 km, 4 km, and 8 km($f=5.8$ GHz).

안테나의 방사패턴 최대이득은 45.8 dB, 사이드 로브는 최대이득에 비해 약 35 dB 가량 낮은 것으로 구해졌다.

3-3 표적 도달 출력밀도 분석

고출력 반사판 안테나에 대한 FEKO 시뮬레이션 툴을 통하여 1) 거리에 따른 유효반경에 대한 전력밀도를 구하고, 2) 실제 유효반경에 위치한 미사일에 인가되는 전력밀도를 구하여 효과도를 분석하였다. 전력밀도 시뮬레이션은 septem 구조에 인가할 수 있는 최대전력(211.3 KW)을 인가한 후 빔폭 1°에 대한 유효반경 내 전력밀도를 다양한 거리(2 km, 4 km, 8 km)에 따라 구하는 과정을 통해 수행하였다. 최대/최소 전력밀도는 유효반경 중앙/가장자리에 생성되며, 최대 및 최소간 차이는 3 dB 정도로 안테나 방사패턴의 3 dB 빔폭과 일치한다. 그림 7은 파라볼릭 반사판 안테나의 방사에 따른 전력밀도 시뮬레이션 결과를 보여준다. 거리별 최대 전력밀도를 표 2와 같이 정리하였다. 예상한 바와 같이 전력밀도는 약 1~15 mW/cm²로 표적에 유효한 것으로 나타났다. 시뮬레이션으로 구해진 전기장 크기(E_t)를 통하여 출력밀도(S)를 아래의 관계식을 통하여 구하였다.

$$S = \frac{E_t^2}{\eta_0} \quad (\text{W/m}^2) \quad (1)$$

표 2. 출력밀도 결과 비교(시뮬레이션, 프리스 공식)

Table 2. Comparison of simulated and calculated power density.

거리	출력밀도(시뮬레이션)		출력밀도(프리스 공식)	
	최소	최대	최소	최대
2 km	76.86 W/m ² (7.69 mW/cm ²)	153.23 W/m ² (15.3 mW/cm ²)	79.74 W/m ² (7.97 mW/cm ²)	159.49 W/m ² (15.95 mW/cm ²)
4 km	21.49 W/m ² (2.15 mW/cm ²)	38.20 W/m ² (3.82 mW/cm ²)	19.93 W/m ² (1.99 mW/cm ²)	39.87 W/m ² (3.99 mW/cm ²)
8 km	4.24 W/m ² (0.42 mW/cm ²)	9.54 W/m ² (0.95 mW/cm ²)	4.98 W/m ² (0.50 mW/cm ²)	9.96 W/m ² (1.00 mW/cm ²)

η_0 는 자유공간 전파임피던스로 약 377 Ω으로 계산되었다. 시뮬레이션 결과와 프리스 공식 결과를 비교한 결과, 약 15% 오차범위 내외에서 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 다음으로 미사일에 인가되는 전력밀도를 시뮬레이션을 통하여 구하여 효과도를 분석하였다. 시뮬레이션 수행을 위하여 FEKO사에서 제공하는 미사일 모델을 사용하였다. 미사일 길이는 약 1.5 m이며, 안테나로부터 각각 400 m, 800 m 거리에서 전력밀도를 시뮬레이션 하였다. 안테나 방사패턴을 활용하여 미사일 본체 및 날개에 전파를 입사하고 인가되는 전력밀도를 구하였다. 그림 8은 고출력 안테나의 송신출력에 의하여 미사일 외부에 인가되는 전력밀도를 보여준다. 시뮬레이션 결과, 평균

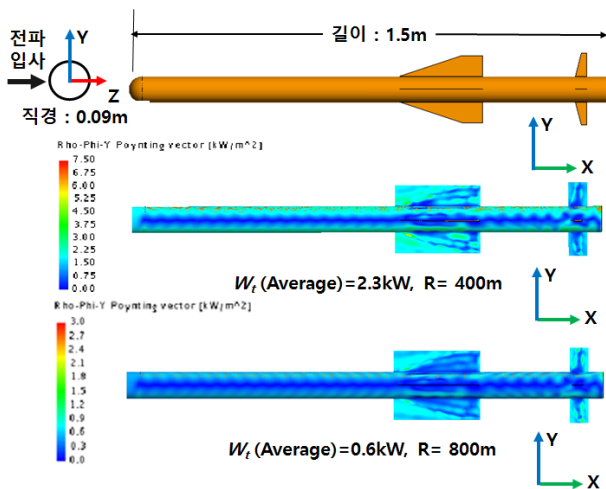


그림 8. 미사일 인가 평균전력밀도 시뮬레이션 결과(주파수: 5.8 GHz)

Fig. 8. Simulated power-density induced on missile model ($f=5.8$ GHz).

전력밀도는 약 2.3 kW($R=400$ m), 약 0.6 kW($R=800$ m)로 구해졌다. 프리스 공식에 의해 전력밀도를 구한 결과, 시뮬레이션과 비슷한 값을 얻을 수 있었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 최대출력 및 안테나 이득 등을 최적화한 고출력 반사판 안테나를 설계하고, 표적에 인가되는 전력밀도를 분석하였다. 유효면적에 인가되는 전력밀도는 표적에 대한 교란 또는 무력화에 적합한 것으로 분석

김 일 규



2003년: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
 2006년: University of Southern California 대학교 전기공학과 (공학석사)
 2006년~2008년: 삼성종합기술원 선임연구원
 2008년~2012년: University of California at

Los Angeles 대학교 전기공학과 (공학박사)

2013년~현재: 국방기술품질원 선임연구원

[주 관심분야] 레이더 시스템, 전자기/간섭 분석, 피드혼 설계

되었으며, 약 8 km 이내에 위치한 표적에 대하여 효과가 있는 것으로 확인되었다. 더 나아가 지향성 에너지 무기의 유효거리 안에 위치한 실제 미사일 표적에 인가되는 전력밀도를 분석하여 효과도를 검증하였다. 본 논문에 제시된 효과도 분석 결과는 높은 출력을 방사하는 레이더 무기체계에도 적용이 가능하며, 고출력 무기체계 설계를 위한 기초자료로 활용 가능하다.

References

- [1] J. Benford, J. A. Swegle, and E. Schamiloğlu, *High Power Microwaves*, Taylor and Francis, pp. 17-35, 2007.
- [2] D. Curtis Schleher, *Electronic Warfare in the Information Age*, Boston Artech House, 1999.
- [3] 정연춘, "고출력 전자기파 방호 제도 도입에 관한 연구", 한국전자과학회논문지, 24(8), pp. 781-790, 2013년 8월.
- [4] 양진호, 남상욱, "해군 함정에서의 EMP 영향 및 대책", 한국전자과학회논문지, 24(8), pp. 426-433, 2014년 4월
- [5] I. Kim, J. Kovitz, and Y. Rahmat-Samii, "Enhancing the power capabilities of the stepped septum using an optimized smooth sigmoid profile", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 56, no. 5, pp. 16-42, Sep. 2014.
- [6] B. Samueli, "Directed energy weapon: Vigilant eagle", *IHS Jane's 360*, Apr. 2005.

김 문 섭



2003년~현재: 국방기술품질원 선임연구원

[주 관심분야] 고출력 마이크로웨이브, 레이저 시스템