



고출력 전자파(HPPEM) 기술을 적용한 군집 드론 무력화 방안

정 영 경

목 차

1

고출력 전자파 개요

2

고출력 전자파 신호 특성

3

고출력 전자파 발생장치 개발 현황

4

고출력 전자파 적용 군집 드론 무력화 방안

고출력 전자파 개요

고출력 전자파 개요

고출력 전자파 (HPEM)

전계강도 기준 100V/m를 초과하는 전자파 (IEC61000-4-36)

(정보기기에 대한 EMC 기준 : 합체의 전자파 복사 내성 기준 80MHz~1GHz 에 대해 3V/m 내성을 가지도록 규정)

고출력 전자파(HPEM)

자연적 발생

낙뢰

Lightning
(L-EMP)



인위적 발생

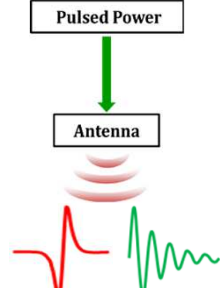
핵 EMP

고 고도에서 핵 폭발시 발생
(N-EMP, HEMP)



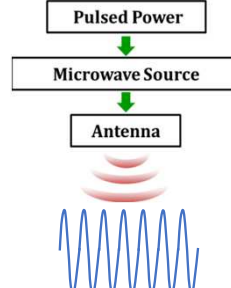
비핵 EMP

펄스파워 기술 적용 발생
(NN-EMP, IEMI)



HPM

펄스파워 기술 적용 발생
(IEMI)



EMP 발생기술 활용분야

방호 분야(핵 EMP)

방호시설 구축 및 전자장비 내성강화



EMP 방호 성능검증용 규격 시험장비



공격 분야(비핵 EMP)

악의적인 전자장비 무력화



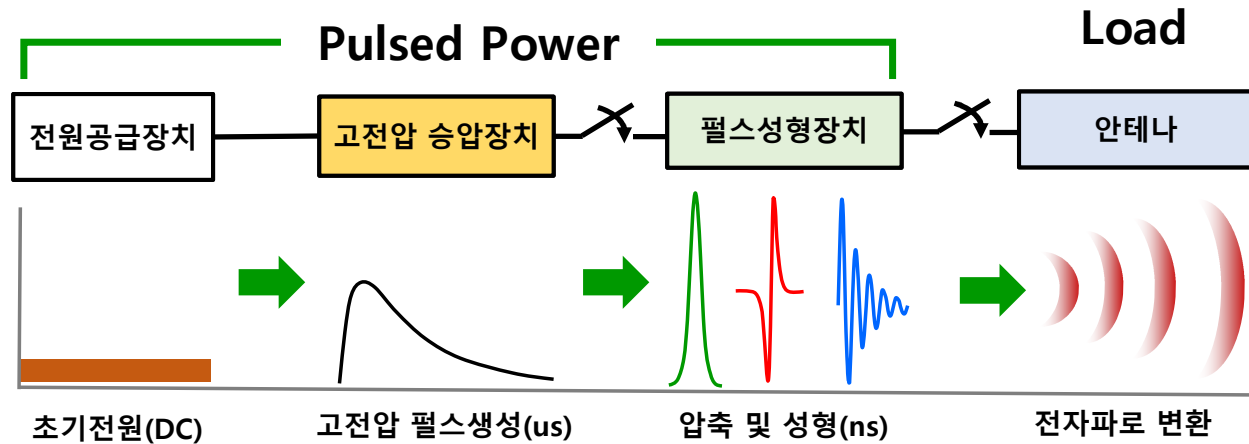
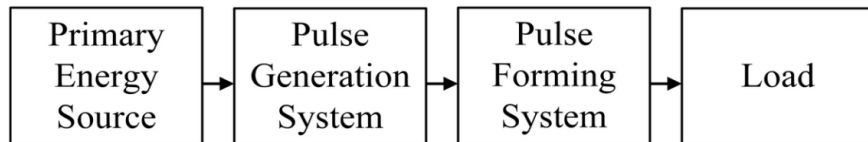
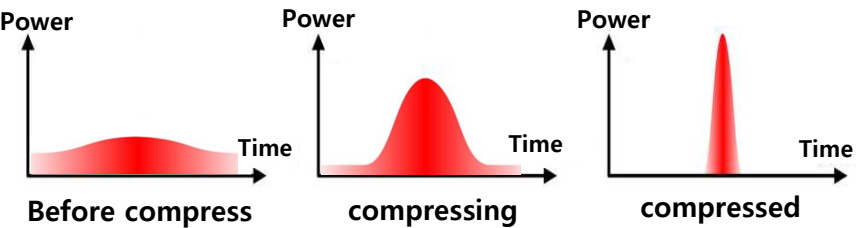
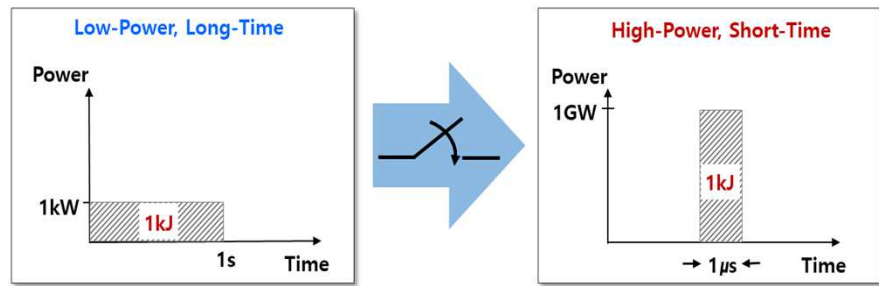
전자장비 무력화용 EMP 응용제품



비핵 EMP 발생원리

펄스 파워 기술 적용, 펄스성형 최적화를 통한 임펄스 발생

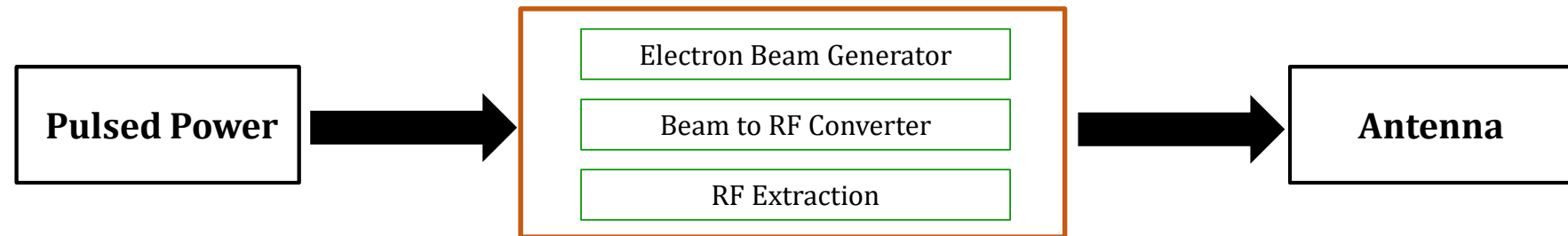
Pulsed Power



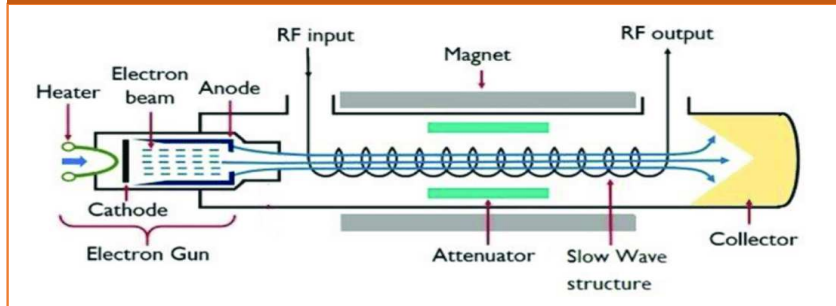
HPM 발생원리

펄스 파워 기술 적용, 전자빔의 운동에너지를 전자파에너지로 변환하여 발생

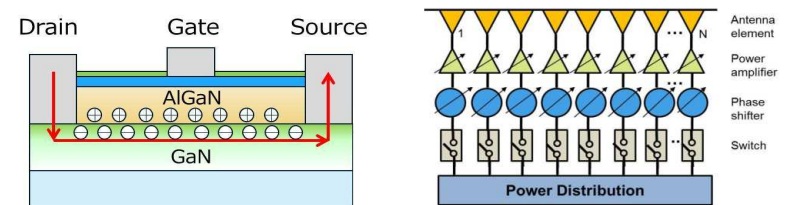
Microwave Source



진공관 기술 사용 (Klystron, Magnetron, TWT)



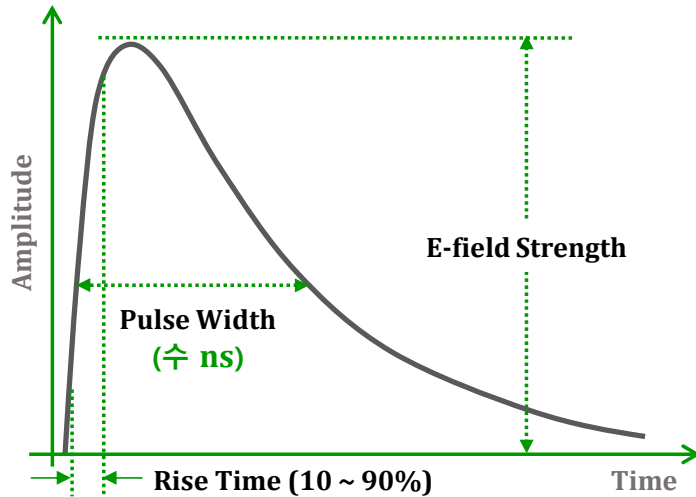
반도체 전력 증폭기 사용 (Si-LDMOS, GaAs-HEMT, GaN-HEMT)



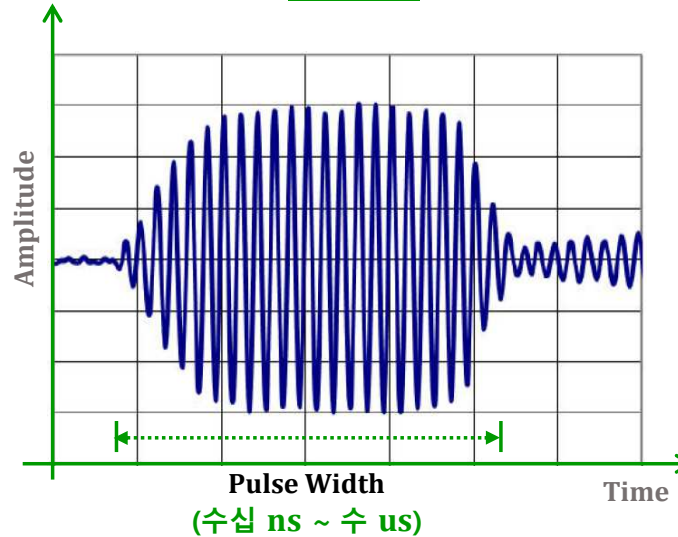
고출력 전자파 신호 특성

고출력 전자파 신호 파라미터(1/3)

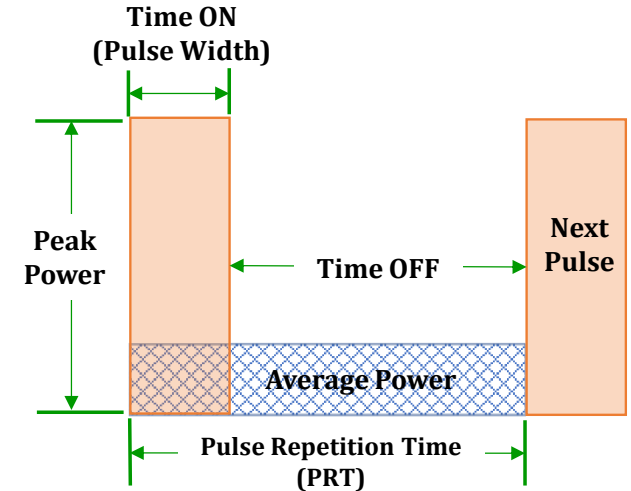
EMP



HPM



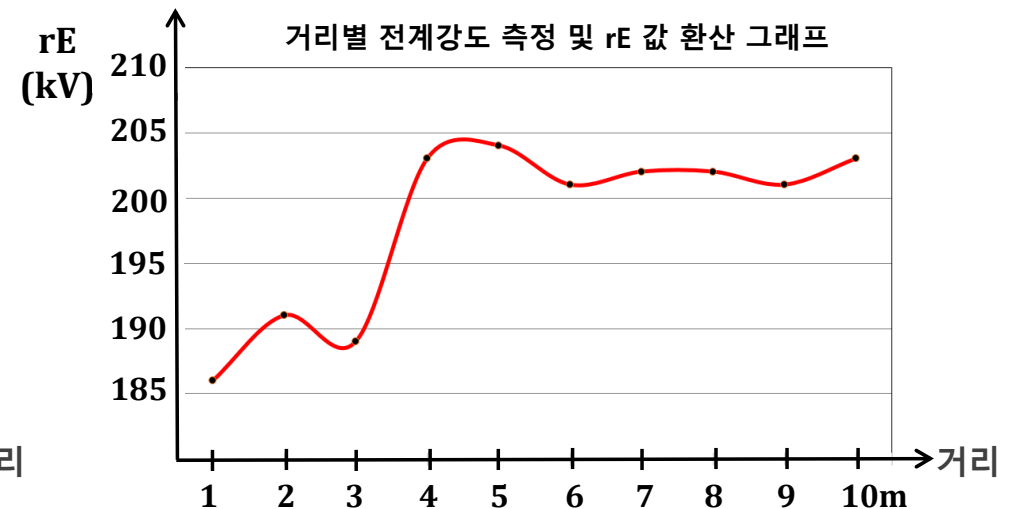
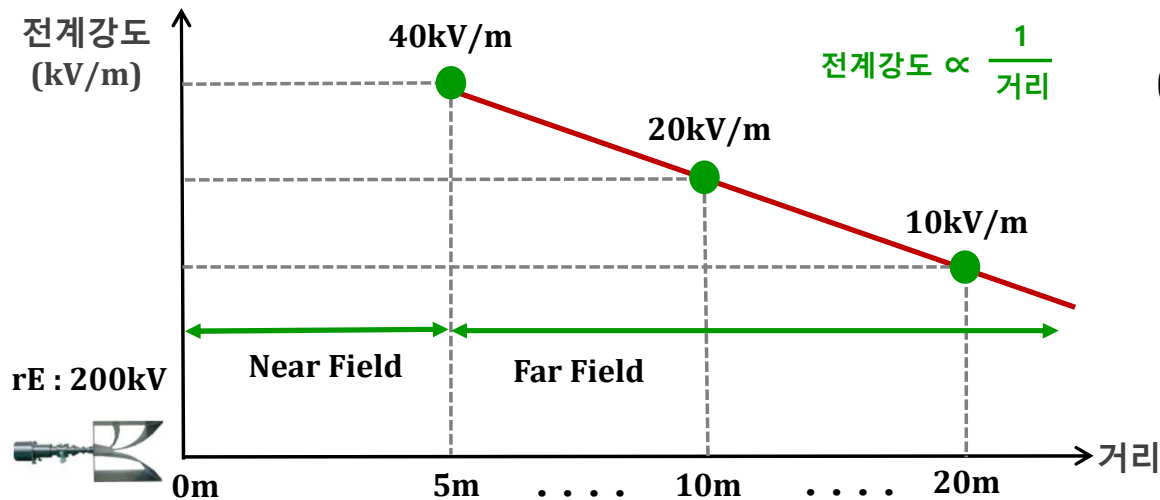
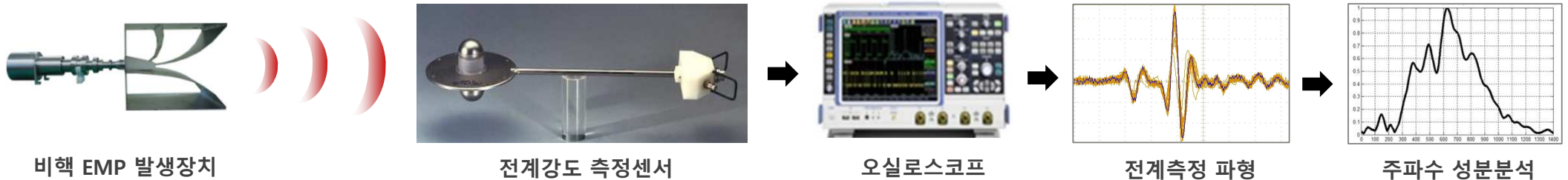
POWER



Parameter	Descriptions	Power Calculation
Rise Time	방사 전자파의 주파수 성분(대역) 결정, 상승시간이 빠를수록 주파수 대역폭 증가	$P_{\text{peak}} = \frac{(\text{Max. E - field Strength})^2}{377}$ $P_{\text{avg}} = P_{\text{peak}} \times \frac{\text{Pulse Width}}{\text{PRT}}$
Pulse Width	방사 전자파의 에너지량 결정, 펄스폭이 길수록 에너지량이 증가	
E-field Strength	방사 전자파의 전기장 세기(전계 강도)	
PRF	단위 시간당 방사 수 (PRF : Pulse Repetition Frequency, 펄스반복율) $PRF = 1/\text{PRT}$	

고출력 전자파 신호 파라미터(2/3)

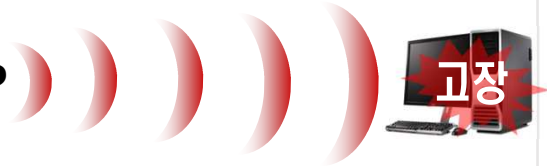
비핵 EMP 발생장치 성능 지수(Far Voltage, rE , V_{far}) : 거리(r) x 전계강도(E)



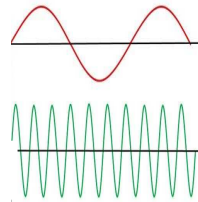
고출력 전자파 신호 파라미터(3/3)

유효 사거리(효과 거리)는
얼마인가?

EMP



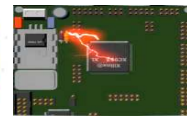
모든 전자장비를 무력화 할 수
있는가?



?

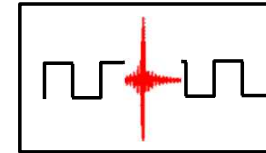


전자장비 내부



영구적인 손상을 발생시킬 수
있는가?

일시적 기능정지



영구적인 손상



타깃 제품군에 따라
최적화 필요

전계강도



주파수



에너지량



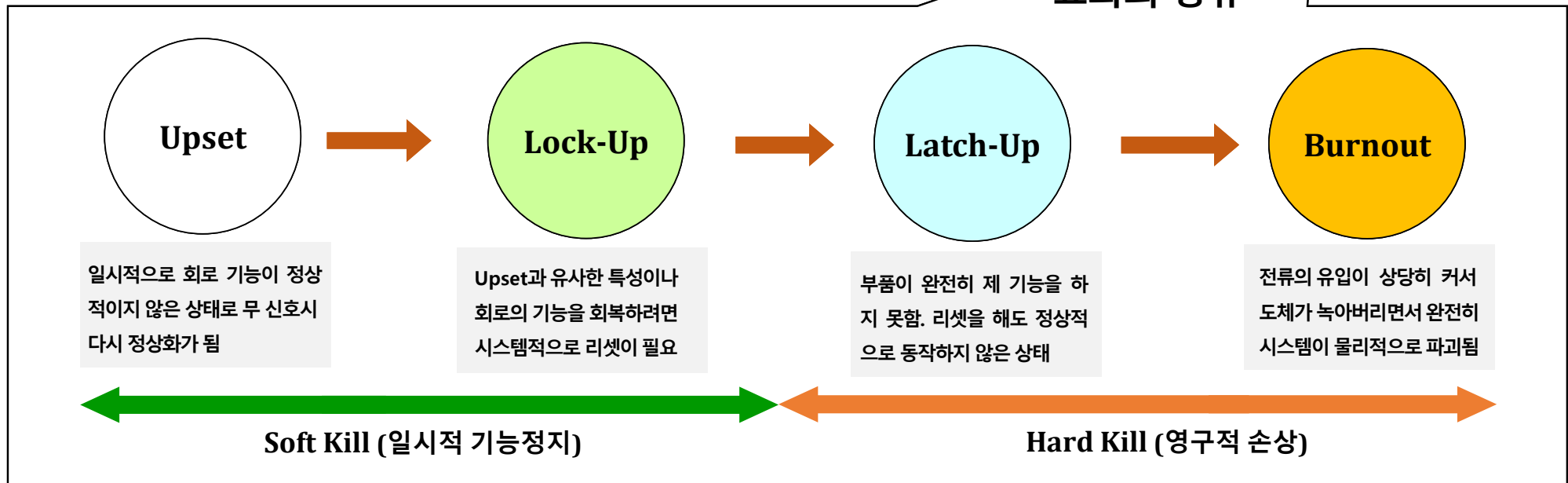
전계강도 \approx 효과 거리
주파수 \approx 제품 종류
에너지량 \approx 효과 정도

고출력 전자파에 대한 전자장비 효과의 종류



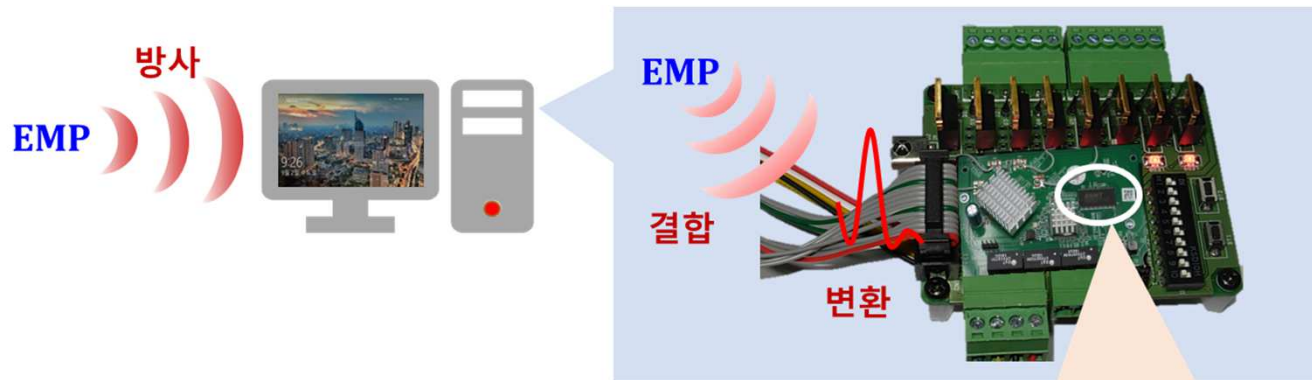
전자장비의 고장을 발생시키는
최소 전계강도(임계수준)와 rE 값으로 유효 사거리 산출 가능

효과의 종류

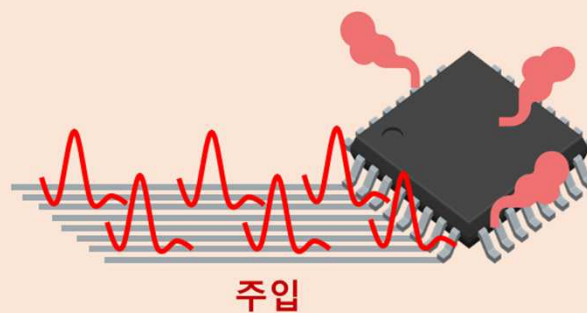


고출력 전자파에 대한 전자장비 효과 발생 메커니즘

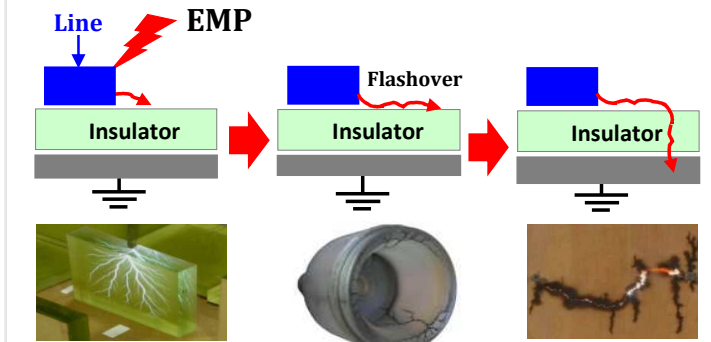
정격 레벨 초과(Over Rated Level)



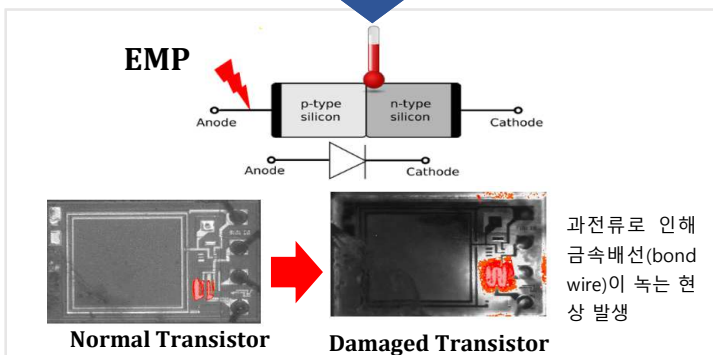
효과



절연 파괴(Insulation Breakdown)



열적 효과(Thermal Effect)



비핵 EMP에 대한 전자장비 효과 시험 분석

효과는 1~2초 이내 발생하며, 가장 빈번히 발생하는 효과는 Lock-Up





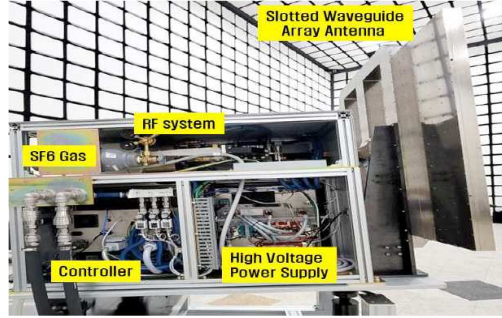
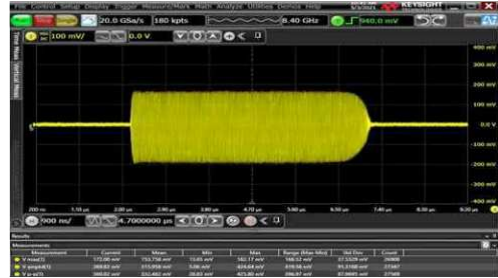
제품명	제품사진	임계수준	제품명	제품사진	임계수준	제품명	제품사진	임계수준
데스크탑 PC		5~20kV/m	메가폰		20~25kV/m	디지털 금고		20~25kV/m
노트북		5~10kV/m	발전기		30~50kV/m	디지털 도어락		20~22kV/m
GPS 수신기		5~10kV/m	선박		25~50kV/m	이더넷 허브		13~17kV/m
드론		5~15kV/m	자동차		50~100kV/m	디지털 전력량계		15~22kV/m (47~52kV/m)
디지털 스피커		10~15kV/m	전기 자전거		25~30kV/m	RTU (SCADA)		10~15kV/m

※ 전자제품의 임계수준은 제품의 크기, 제조사, 모델 등에 따라 차이가 발생할 수 있음. (임계 수준 : DS/UWB 비핵 EMP 발생장치를 사용하여 시험한 결과로 산출)

고출력 전자파 발생장치 개발 현황

HPM 발생장치 개발 현황(1/2)

진공관 (Vacuum Tube) 기술 적용

Ranets E (Russia)	THOR (USA)	e2v (England)	KERI (Korea)
 <ul style="list-style-type: none"> - 2001년 Rosoboronexport 사에서 공개 - Source 출력 전력 : 500MW급 - X-band(펄스 , 10~20ns) - PRF : 500Hz - 평균 출력 전력 : 2.5~5kW - 안테나 이득 : 45~50dB - rE : 48MV - 총 중량 : 5톤 	 <ul style="list-style-type: none"> - 2018년 AFRL은 BAE Systems, Leidos ,Verus와 협력하여 THOR 개발 시작 - 동시에 50기의 드론 무력화 - 드론 무력화 거리 : 약 650m(0.4mile) - 2022년 공군 시설 여러 곳에서 THOR 운용 - 2026년 육군용 THOR 버전 실전배치 예정 - S-band Source 적용 - 크기 : 20 피트 컨테이너(6 x 2.5 x 2.5m) - 가격 : 약 200억원 추정 - AFRL은 차세대 THOR(Mjolnir)개발을 위해 2022년 2월 Leidos와 계약 체결 	 <ul style="list-style-type: none"> - Source 출력 전력(S-band Magnetron) : 5MW - 드론 무력화 거리 : 400m(1x1m 안테나 적용) 	 <ul style="list-style-type: none"> - Source 출력 전력 : 3MW - S-band(3GHz, 5us) - Slotted Waveguide Array Antenna 적용 

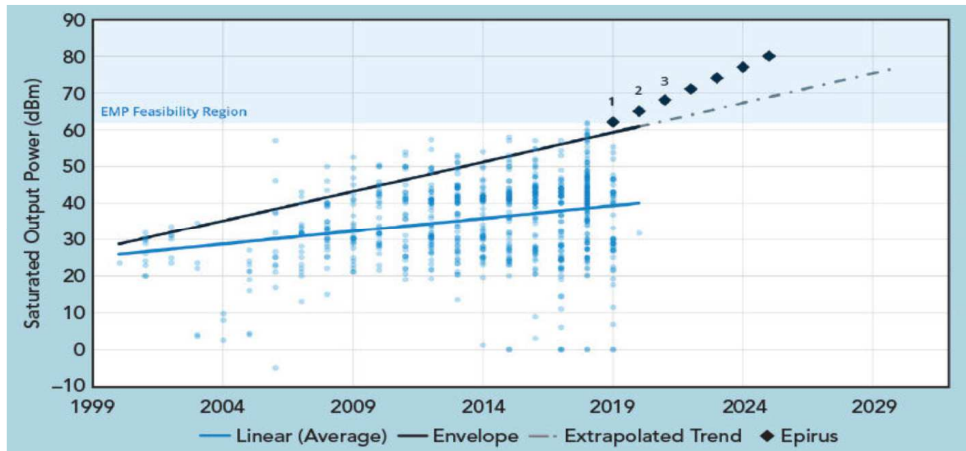
THOR , Reference : <https://news.clearancejobs.com/2022/08/29/u-s-military-deploys-drone-busting-microwave-weaponry/>

HPM 발생장치 개발 현황(2/2)

능동 위상 배열 안테나 및 반도체 전력 증폭기 기술 적용


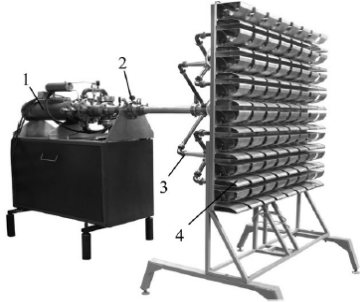
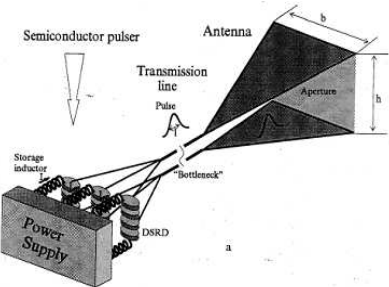
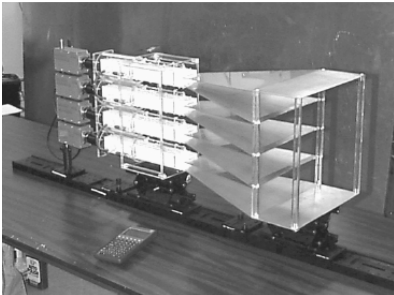
Epirus (USA)

- 2018년 설립, 2020년 드론 무력화 시스템 LEONIDAS 공개
- 질화갈륨(GaN) 기반 반도체 전력 증폭기 기술 적용
- 2023년 미 육군과 HPM 프로그램 일환으로 6610만 달러 규모 계약
- 제품 가격 : 약 220억원 추정
- 전력 증폭기 출력 전력 약 1kW(2019), 2025년 약 100kW 개선 예정
- 능동 위상 배열안테나 적용 : 빔폭(-3dB) 6도







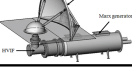




비핵 EMP 발생장치 개발현황(1/3)

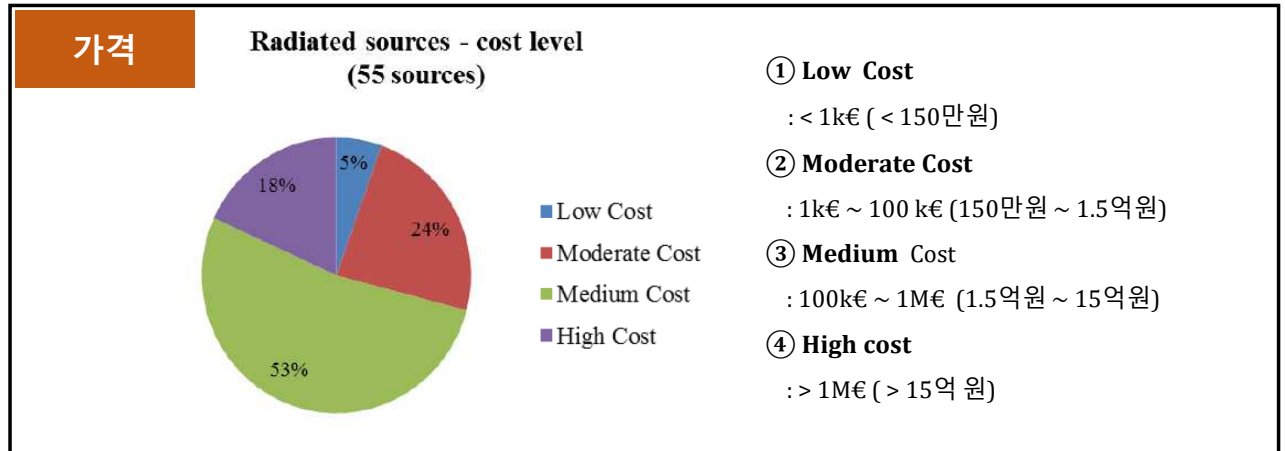
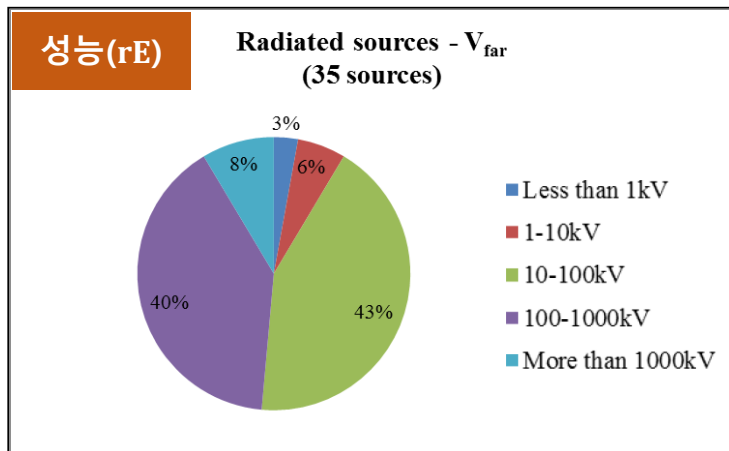
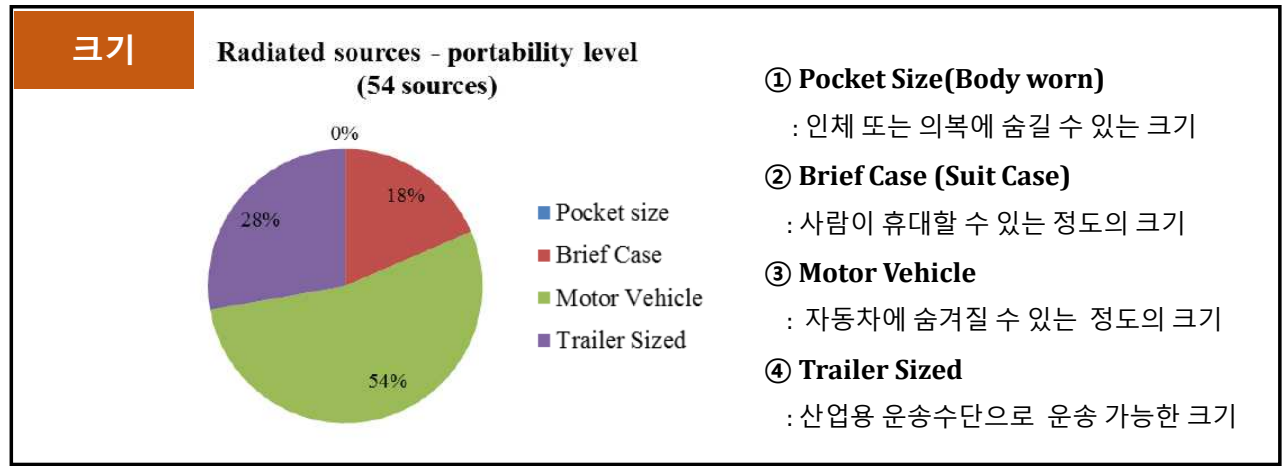
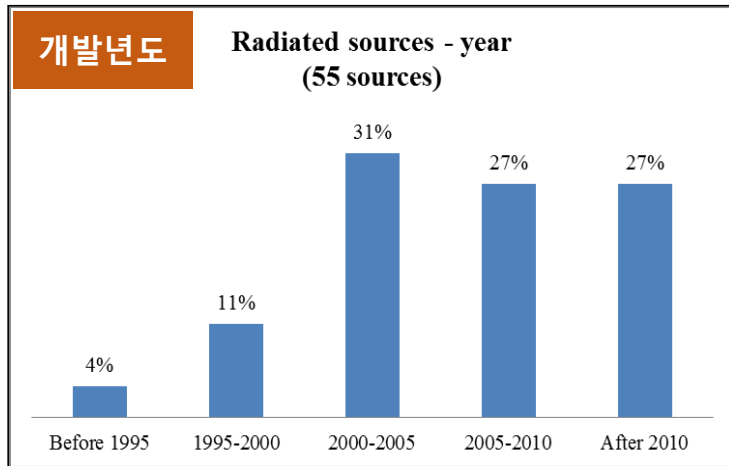
발생장치 형태

One-Source , One-Antenna	One-Source , Multi-Antenna
	
Multi-Source , One-Antenna	Multi-Source , Multi-Antenna
	

국가별 주요 발생장치 사양 요약


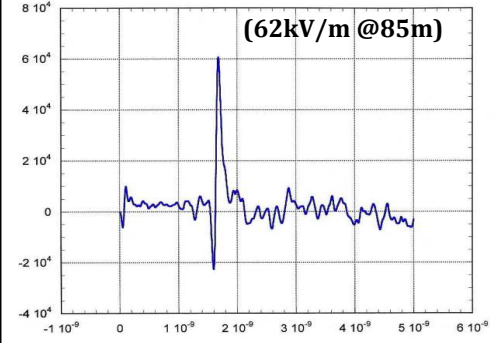
국 가	사진	고전압 승압방식	안테나	Far Voltage (rE)	비고
미국		Tesla Transformer (1,000kV)	HIRA	5,300kV	AFRL (JOLT)
		Marx Generator (300kV)	Fat Dipole	100kV	APELC
러시아		Tesla Transformer (±200kV)	Combine (64-Array)	4,300kV	IHCE (SINUS-160 Series)
		Tesla Transformer (±135kV)	TEM Horn	910kV	IEP (RADAN SEF-303B)
독일		Marx Generator (300kV)	Fat Dipole	135kV	DIEHL (HPEMcase)
프랑스		Marx Generator (±125kV)	Half-TEM Horn	450kV	ISL (GIMLI)
우크라이나		Marx Generator (500kV)	HIRA	1,200kV	KIPT
영국		Tesla Transformer (1,200kV)	Dipole	124kV	Loughborough University
대한민국		Marx Generator (500kV)	Fat Dipole + Reflector	-	ADD


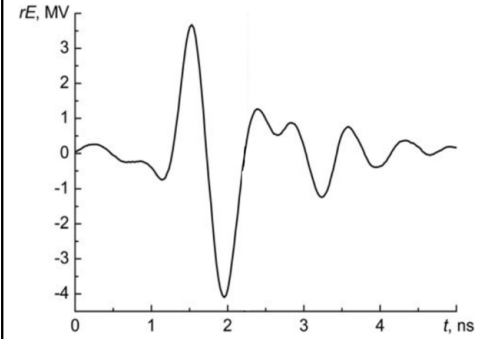
비핵 EMP 발생장치 개발현황(2/3)



Reference : Study and classification of potential IEMI source (2014)

비핵 EMP 발생장치 개발현황(3/3)

Product Name	Item	Specifications	Picture	Waveform
JOLT (USA) rE : 5.3MV (1997 Published)	Output Voltage	1,000kV@ 85Ω , 770kV@50Ω		
	Pulse Width	100ps , Monopole		
	HV Generator	Pulse Transformer		
	Antenna	Single , HIRA(diameter : 3.05m)		
	Beam Width	1.17°(Horizontal) , 3.6° (Vertical)		
	PRF	600Hz		
	Weight & Size	~100kg , 3.05 x 2.13 x 2.13m (W x H x D)		
	Far Voltage(rE)	5.3MV		

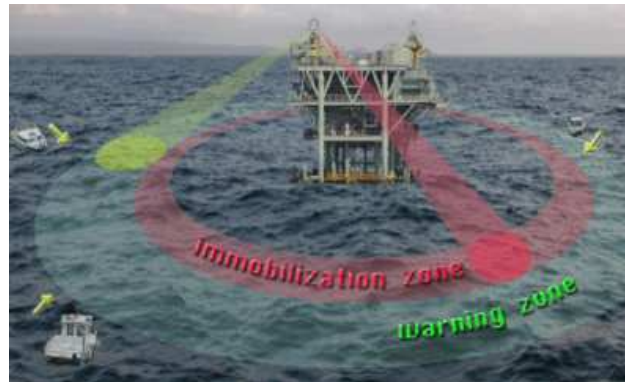
Product Name	Item	Specifications	Picture	Waveform
SINUS (Russia) rE : 4.3MV (2014 Published)	Output Voltage	+205kV/-180kV @12.5Ω, 770kV@50Ω		
	Pulse Width	1ns , Bipolar		
	HV Generator	Tesla Transformer		
	Antenna	64 Array, Combine Ant.(1.41 x 1.41m)		
	Beam Width	10°(Horizontal) , 10° (Vertical)		
	PRF	100Hz		
	Weight & Size	~500kg , 3 x 1.41 x 1.41m (W x H x D)		
	Far Voltage(rE)	4.3MV		

비핵 EMP 발생장치 활용분야

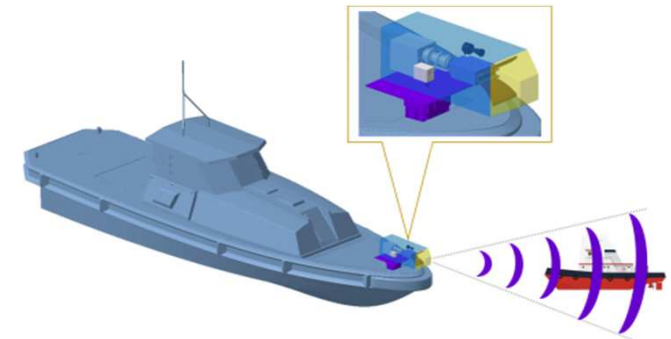
드론 방어(Anti-Drone) 시스템



고가 자산 경계 보호



불법어업 선박 엔진 정지



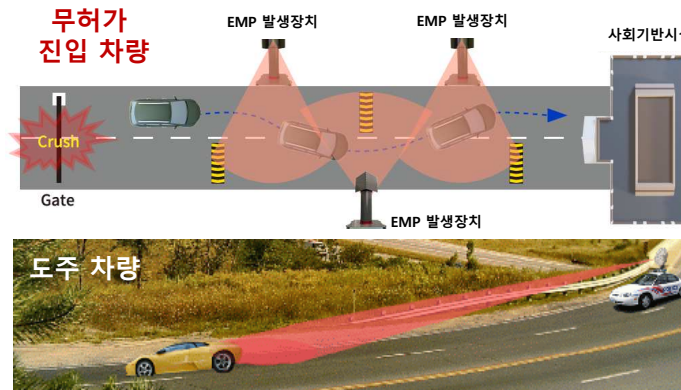
사제 폭탄(IED) 공격 차단



IED 제어장치 예

- Mobile Phone
- 2-Way Radio
- RC Toy Car
- Wireless Door Bell
- Car Alarm
- Digital Timer

무허가 진입 / 도주 차량 엔진 정지



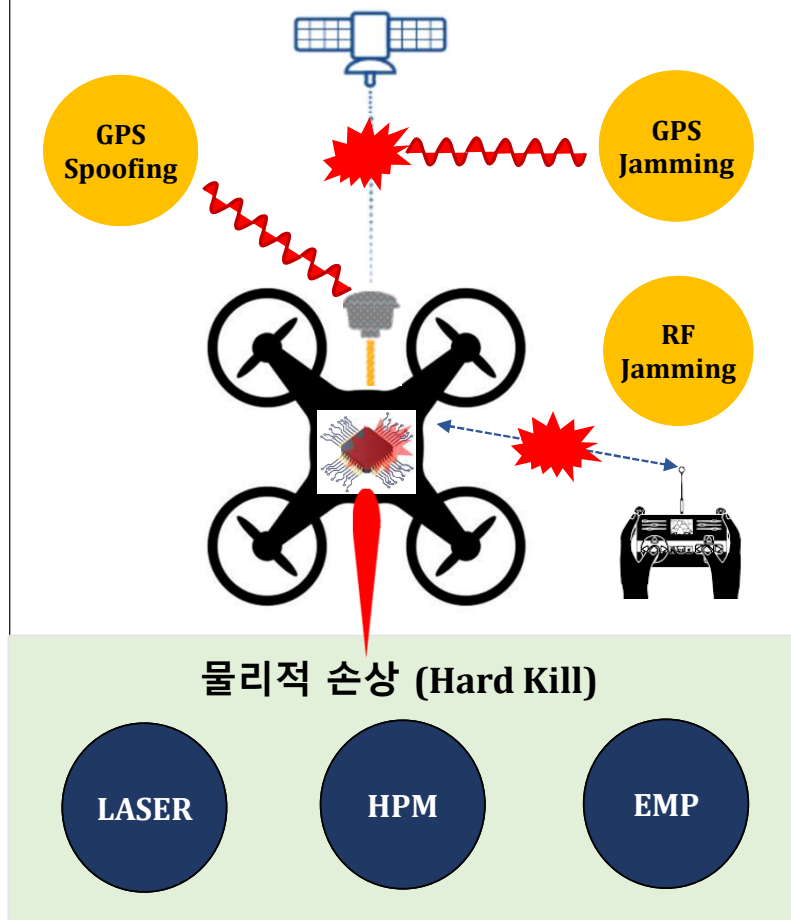
몰래 카메라, 도청기 동작 정지



고출력 전자파 기술 적용 군집 드론 무력화 방안

드론 무력화 기술 비교

전파 방해 (Soft Kill)



효과 거리 비교



드론 무력화 기술 비교

Soft Kill

드론이 사용하는 RF주파수나 항법 주파수를 재밍하여 드론의 오동작 유도

항재밍, 자율비행 알고리즘 등을 사용하는 드론에는 효과 미비

+

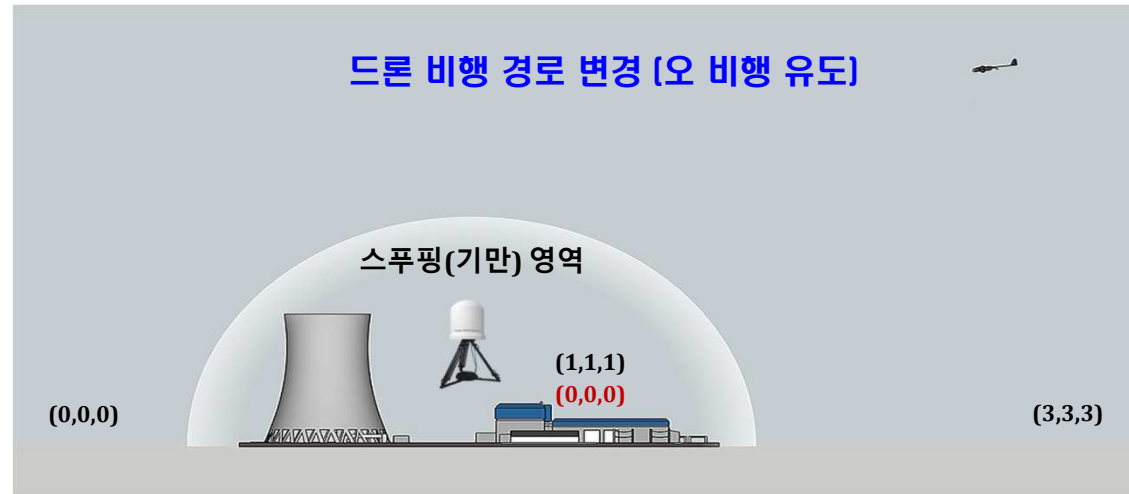
Hard Kill

드론 내부의 전자부품에 직접영향을 주어 드론의 물리적 손상 유발 (추락, 기능 정지 등)




Soft Kill 방식 대비 효과 거리가 짧음

드론 무력화 기술 : GPS Spoofer

GPS Spoofer : 특정 위치의 GPS/GLONASS 위성 항법 신호를 실시간으로 모사



Hard Kill 방식 드론 무력화 기술 비교(1/2)

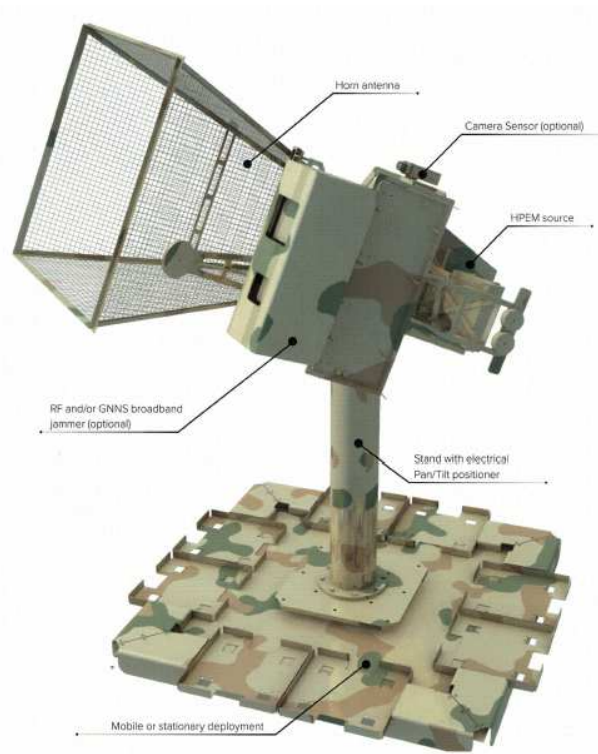
구분	제품사진(예)	특징	비고
LASER		<ul style="list-style-type: none"> • 목표물을 수 초간 정밀타격이 필요해 다수의 드론을 동시에 무력화는 어려움. • 레이저 특성상 대기환경에 따라 성능이 저하 될 수 있음 • 레이저 반사 특성을 역이용 시 공격 회피 가능 • 이동중인 드론에 대한 정밀 조준 기술이 필요함 	<div> <div> LASER <p>Aperture : 0.5m Wavelength : 1um Divergence Angle : 0.0002 °</p> </div> <div> HPM/EMP <p>Aperture : 2m Wavelength : 30cm Divergence Angle : 1~10°</p> </div> </div> <div> <p>2km</p> <p>Target</p> <p>7mm</p> <p>30 ~ 300m</p> <p>Area of Effect at Target</p> </div>
HPM		<ul style="list-style-type: none"> • 드론의 내부 소자 소손 또는 파괴 등 영구적인 손상 발생 확률이 높음 • 고출력 마이크로파 방사로 인체 유해함. • EMP 대비 대전력 전원공급장치가 별도로 필요해서 대형 크기, 장비 고가 • 협대역 신호 방사로 인해 특정 드론에만 효과 발생 가능성 있음 • 다중 주파수 대역 사용으로 성능 개선 가능 	
EMP		<ul style="list-style-type: none"> • 고출력 펄스파 방사로 인해 인체에 무해함. • 소비전력이 낮아 배터리 전원 구동 가능. • 초광대역 주파수 특성으로 인해 드론의 종류, 형태에 무관하게 무력화 가능 • 넓은 방사각도로 인해 정밀 조준 없이 다수의 드론을 동시에 무력화 가능. • HPM 방식 대비 유효 거리가 짧음. 	

Hard Kill 방식 드론 무력화 기술 비교(2/2)

구분		발생 원리	파형	주파수 성분	에너지량	인체영향	대역폭
HPM	정현파 (CW)			<p>단일주파수 (2~5GHz)</p>	High	High	Narrow
	감쇠 정현파 (DS)			<p>80MHz 500MHz</p>			
EMP	펄스파 (Pulse)			<p>200MHz 2GHz</p>	Low	Low	Wide

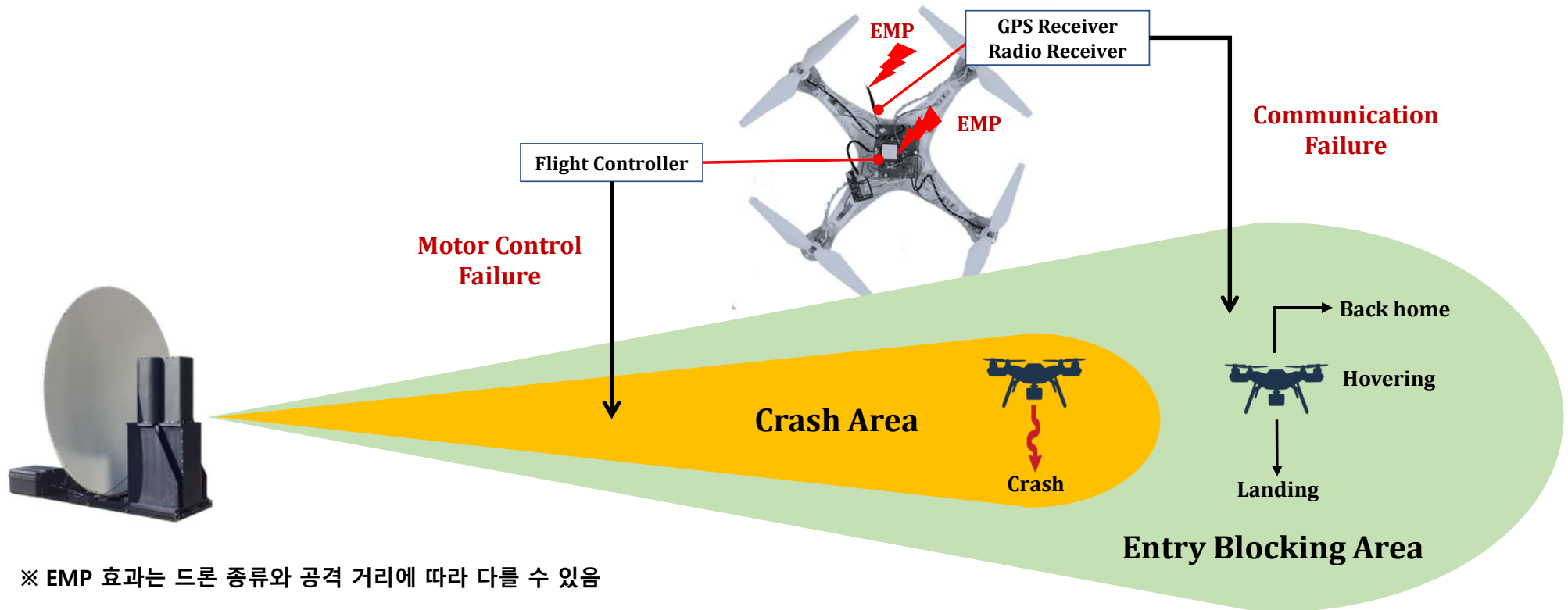
* 감쇠정현파(DS) 주파수 대역은 IEC61000-4-36 Mesoband 시험규격을 기준으로 산정함 . * 초광대역 펄스파 주파수 대역은 'JOLT' 시스템의 90% Energy Bandwidth 를 기준으로 산정함.

드론 무력화용 비핵 EMP 발생장치 개발현황

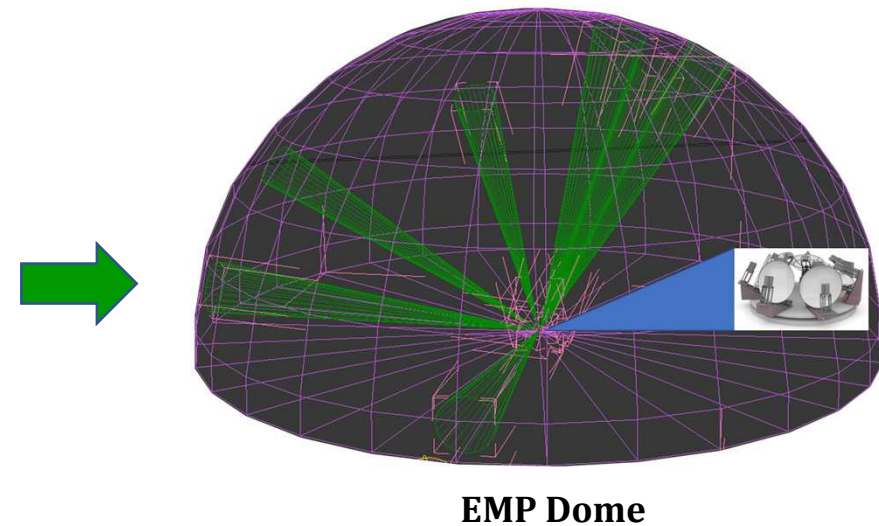
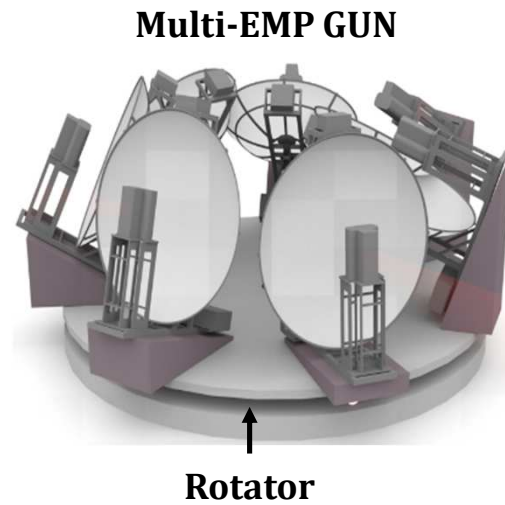
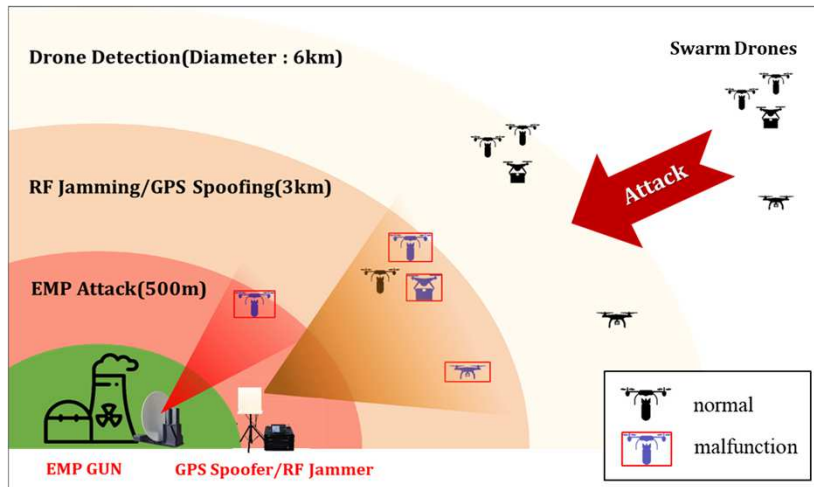


비행 EMP에 대한 드론 효과 분석

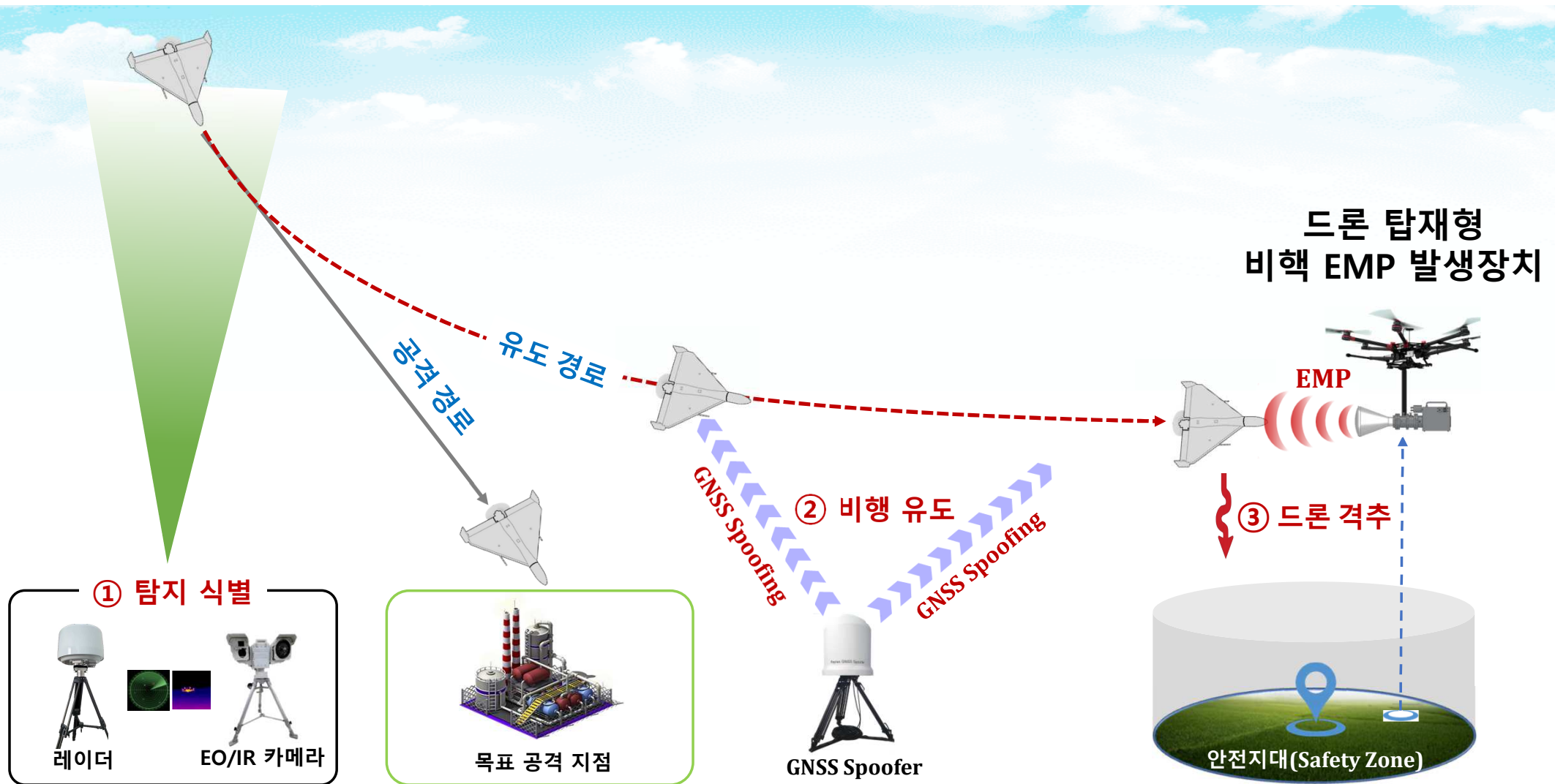
- 레이저 대비 넓은 방사각도로 인해 정확한 조준 없이 다수의 드론을 동시에 무력화 가능
- 드론 내부의 비행 제어기 등 반도체 소자의 고장 또는 기능 정지 유발 → 1~3초 이내 드론 추락 효과 발생
- 드론 비행을 위한 GPS 수신기 또는 제어용 통신 모듈 고장 유발 → 고장 시 안전 모드로 동작하여 드론 진입 차단 효과 발생
- 드론 진입 차단 영역 → GPS 수신기 또는 통신 모듈 Lock-Up 발생(정상 동작을 위해서는 재 부팅이 필요)



군집 드론 무력화 방안(1/2)



군집 드론 무력화 방안(2/2)



감사합니다

EMP에 대한 전자파 인체보호기준

