

전자파가 착화기에 미치는 영향 예측 및 대책

최창선
국방과학연구소

요 약

전자파가 착화기에 미치는 영향을 간단한 안테나 이론을 바탕으로 예측하였다. 구룡을 중심으로 위험 정도를 예측하였으며 주변 전자파 강도는 MIL-STD-461에 RS전계를 적용하였다. 'Worst case'에서 구룡 무기체계는 특정 주파수 대역에서 '위험'이 있음이 예측되었으며 그에 따른 개선 방향을 제시하였다.

1. 서론

전자파가 무기체계에 미치는 영향을 예측하는 것은 간단치 않은 일이다. 그러나 추진기관이나 탄두에 사용되는 Electroexplosive device (EED)가 전자파에 의하여 오폭이 될 때의 위험을 생각한다면 전자파에 대한 위험 요소 예측은 어떤 식으로든 반드시 점검하고 넘어가야 할 문제이다. 선진 각국에서도 각 무기체계의 중요 부품 및 장비 뿐 아니라 전체 System도 전자파에 따른 영향을 관련 규격에 의하여 시험하도록 규정되어 있다.[1] 전자파는 시간과 장소에 따라 그 특성과 크기가 달라진다. 때로는 주변 장비, 건물이나 땅에서 반사된 전자파가 중첩(Superimpose)되어 초기 발생한 전자파보다도 위력이 증대되는 경우도 배제할 수는 없다.

전자파 환경이 정확히 규정되었다 하더라도 무기체계 자체가 많은 변수를 포함하고 있기 때문에 이에 따른 영향을 정확히 규명하기는 힘들다. EED에 대한 전자파의 영향을 예측하기 위해서는 EED의 전자파에 대한 감도(Sensitivity)를 알아야 한다. 전자파 위험요소를 이론적으로 예측하는 방법은 전자파 시험을 하는 것보다 비용과 시간이 절약되며 가장 전자파로부터 취약한 상태 (Worst Case)를 가정하기 때문에 'Safe' 측면에서 믿을 만하다. 그러나 이론적 예측의 결과가 'Hazard'인 경우에도 실제의 경우에는 가정한 'Worst Case'가 일어날 가능성이 희박하기 때문에 반드시 실제 상황에서 'Fire'가 되는 위험한 상황이 발생한다고 해석하기보다는 단지 가능성도 있다고 이해하여야 할 것이다.

2. 계산 모델

2.1 일반 사항

이장에서는 전자파 위험 분석에 필요한 간단한 수학적 모델을 제시한다. 이 모델을 사용하여 계산할 때에는 무엇보다도 무기체계가 겪는 각종 상황에 대하여 고려해 주어야 한다. 즉, EED를 처음 사용하고자 할 때는 흔히 Shorting Cap등으로 Short되어 있고 점점이나 장착할 때는 Shorting Cap을 뺀 후에 탄체 안에 Install하게 되므로

각각의 경우에 모두 위험 요소를 따로 계산하여야 한다. 또한 만약 EED에 연결되어 있는 Firing Cable에 다른 케이블이 연결되어 있다면 두 케이블 사이의 Coupling도 고려하여야 한다.

전자기파는 전장과 자장이 서로 상호 작용을 하며 빛의 속도로 전진한다. 어떤 전자기파 발생기가 있을 때 발생기와 가까운 곳의 전자파 (Near field)는 상당히 복잡한 형태로 운동하며 약간 떨어진 곳 (Far field)에서는 안정된 운동을 하여 수학적으로도 간단히 표시된다. Far field에서는 전자파는 TEM파 이며 이때, Power density P는 다음과 같이 표시된다.[2]

$$P = |\vec{E}| |\vec{H}| = \frac{|\vec{E}|^2}{Z_0} = |\vec{H}|^2 Z_0 \quad (1)$$

여기서 P는 Power Density 또는 Poynting Vector의 크기, E는 Electric Field, H는 Magnetic Field, Z_0 는 자유 공간에서의 Impedance로 377 ohms이다.

전자파가 안테나에 입사되었을 때의 입사되는 Power는 (2)식과 같이 정의되는 Effective Aperture (A_e)로 계산될 수 있다.[3]

$$A_e = \frac{W}{P} \quad (2)$$

여기서 W는 안테나에 잡혀지는 일률로 단위는 Watt이다. 안테나가 전자파를 받아들이는 것을 회로적으로 표시하면 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

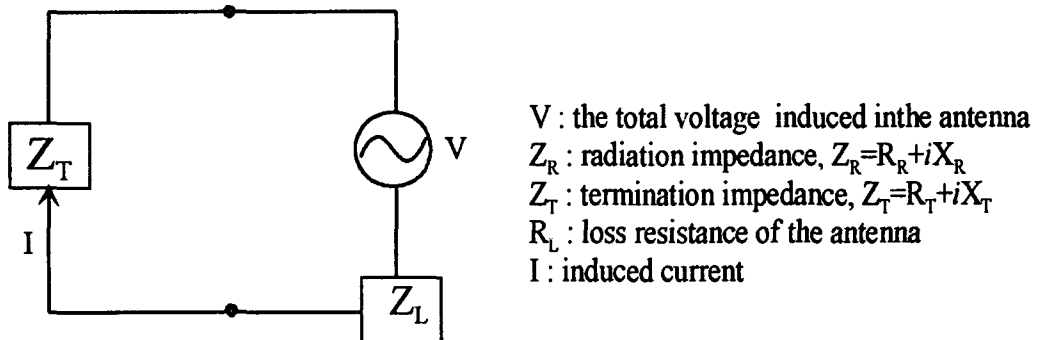


Fig. 1 Equivalent circuit of the terminated receiving antenna

전류는 $I = V / (Z_R + Z_T)$ 가 되며 여기에 Impedance를 대입하고 복소수를 계산하면 Effective Aperture의 일반적인 표현, 식 (3),을 얻을 수 있다.

$$A_e = \frac{V^2 R_T}{P [(R_R + R_L + R_T)^2 + (X_R + X_T)^2]} \quad (3)$$

EED에 대한 전자파의 위험을 예측하는 경우에는 가장 위험한 'Worst Case'를 고려

하므로 이 경우는 Termination reactance과 Radiation reactance가 Out-of-Phase인 경우, 즉 $X_R = -X_T$ 이며 안테나의 Loss가 없는 경우 즉, $R_L = 0$ 일 때이다. 'Worst Case'로 계산된 Effective Aperture 값에 주변 전자파의 Power Density를 곱하면 그 주파수에서 주어진 조건에서 EED에 유기되는 전류를 예측할 수 있고 이 전류 값을 EED의 RF Sensitivity와 비교하여 위험 여부를 알 수 있다.

2.2 연결되지 않은 EED

EED자체를 손으로 취급시 발생하는 전자파 위험을 예측하기 위하여서는 EED의 외부 형상 및 재질에 대한 분석을 하는 것이 중요하다. 특별히 EED의 Connector 종류에 따라 EED가 전자파를 받아드리는 크기나 양상이 달라지므로 Connector 형상에 따라 유사한 안테나 형상을 가정하여야만 바른 결과를 예측할 수 있다.

2.2.1 Unshorted Wire Lead 형 (Pin-to-Pin) [4], [5]

Connector가 Pin Type이 아닌 경우에는 통상 EED는 Lead Wire Type으로 되어 있고 취급 시에는 Lead Wire 양단이 단락(Short)되어 있고 Check 시에나 또는 연결 시에는 단락을 풀고 작업을 하게 된다.

안테나에 의하여 전자파가 송출될 때에, 이상적으로는 전체 공간에 균일하게 전파된다고 볼 수 있지만 실제로는 전파가 일정 지역으로 집중되는 특성을 갖게 되는데 이 특성을 'Directivity, D'로 나타내며 Directivity는 안테나의 효율과는 상관 없이 방사된 전자파의 형상(Pattern)에만 의존한다. 그러나 Gain은 안테나의 효율까지 고려한 양으로 Lossless이고 Isotropic 안테나인 경우에는 안테나의 Gain, G는 Directivity, D와 같게 되어 Effect Aperture는 다음과 같이된다.

$$A_{em} = \frac{G\lambda^2}{4\pi} = \frac{D\lambda^2}{4\pi} \quad (4)$$

한편 Radiation Intensity U는 Power density (또는 radial component of Poynting vector)에 거리 제곱을 곱한 것과 같으므로 $U_{max} = r^2 P_{r,max}$ 와 같이된다. 안테나가 lossless인 경우에는 안테나에 의하여 방사된 Power는 안테나 terminal에 출력되는 평균 에너지와 같다. 안테나에서의 평균 전류를 I_0 이라고 하면 terminal에 출력되는 평균 에너지는 $I_0^2 R_R$ 이 된다. 따라서

$$A_{em} = \frac{\lambda^2 r^2 E_r^2}{Z_0 I^2 R_R} \quad (5)$$

을 얻는다. 한편 식(3)에서 'worst case'인 경우, 즉 $X_R = -X_T$ 이며 $R_L = 0$ 인 경우의 Aperture는

$$A_e = A_{em} = \frac{V^2}{4PR_R} \quad (6)$$

가 된다. 식(5)와 식(6)에서

$$V^2 = \frac{4P\lambda^2 r^2 E_r^2}{Z_0 I^2} \quad (7)$$

를 얻을 수 있으며 식(7)을 식(3)에 대입하면 Maximum possible aperture를 구할 수 있게 된다.

$$A_e = \frac{4\lambda^2 r^2 R_T E_r^2}{Z_0 I^2 [(R_R + R_L + R_T)^2 + (X_R + X_T)^2]} \quad (8)$$

여기에 다시 'worst case', 즉 $X_R = -X_T$, $R_L = 0$, $R_R = 0$ 인 경우를 생각하면

$$A_e = \frac{4\lambda^2 r^2 E_r^2}{Z_0 I^2 R_T} \quad (9)$$

이 되어 Electric Field의 radial component E_r 만을 알면 Aperture를 계산할 수 있다. EED의 open된 pin은 충분히 먼 거리에서는 Dipole로 취급할 수 있으며 EED의 각 핀에는 전류가 각각 +I, -I가 흐른다고 가정할 수 있다. 계산의 편의를 위하여 핀1은 XY면 상에 원점에 위치한다고 가정하고 핀2는 핀1과 평행하며 d만큼 떨어져 있다고 가정한다. θ 는 임의의 점 P가 z축과 이루는 각, φ 는 점P까지의 거리 Vector를 XY평면 상에 투영한 직선과 X축이 만나는 각, ψ 는 핀1에서의 전류 방향과 점P까지의 거리 Vector가 이루는 각을 나타낸다. 이때 Total electric field E_r

$$E_r = \frac{Z_0 I l}{\lambda r} (1 - \sin^2 \varphi \sin^2 \theta) \sin\left(\frac{k_0 d \cos \theta}{2}\right) \quad (10)$$

가 되는데 θ 가 0일 때 최대값을 갖는다. [6]

$$E_r = \frac{Z_0 I l}{\lambda r} \sin\left(\frac{k_0 d}{2}\right) \quad (11)$$

식(10)를 식(9)에 대입하고 $d \ll l$ 일 경우를 가정하면

$$A_e = \frac{4\pi^2 Z_0 l^2 d^2}{R_T \lambda^2} \quad (12)$$

이 되어 Aperture를 계산할 수 있다.

2.2.2 Shorted Wire Lead 형 (Pin-to-Pin)

Wire가 short되었을 때에는 wire는 일종의 Loop antenna로 볼 수 있으며 계산의 편의상 small circular loop로 취급하는 것이 편하다. Loop의 반경이 거리에 비하여 상당히 작을 때에 Radiation intensity는 다음과 같이된다.[7]

$$U = \frac{Z_0}{32} (k_0 a)^4 I^2 \sin^2 \theta \quad (13)$$

또한 총방사 Power, W,는

$$W = \int \int_{4\pi} U(\theta, \varphi) d\Omega = \frac{\pi Z_0}{12} (k_0 a)^4 I^2 \quad (14)$$

앞에서 'worst case'일 때의 W의 다른 표현은

$$W = P A_e = \frac{V^2}{4 R_R} \quad (15)$$

와 같으며 식(4)에서 $A_e = D \lambda^2 / 4 \pi$ 인데 small loop antenna인 경우의 Directivity는 1.5이다. 따라서

$$V^2 = \frac{1.48 \times 10^4 P A^2}{\lambda^2} \quad (16)$$

을 얻을 수 있다. 식(16)를 식(3)에 대입하고 다시 'worst case' 조건을 대입하면

$$A_e = \frac{1.48 \times 10^4 A^2}{\lambda^2 R_T} \quad (17)$$

이 된다

2.2.3 Wire Lead 형 (High Frequency Calculations)

앞에서는 전자파의 파장이 EED Wire에 비하여 상당히 긴 경우, 즉 Far field approximation을 사용하여 유기되는 전압을 계산하였다. 그러나 이러한 가정은 주파수가 높아질 때는 더 이상 성립되지 않는다. 파장이 EED Wire의 크기가 비슷하거나 작다면 전자파의 전기장의 세기가 EED의 각 위치마다 달라지게 되므로 앞에서의 계산은 틀린 결과를 유도하게 된다. Unshorted wire의 경우에는 전자파의 파장이 Wire의 20배 정도일 때까지, Shorted wire의 경우에는 파장이 전체 Shorted loop 길이의 2배 정도까지 앞에서의 계산이 유효하다고 알려져 있다. [3], [7]

파장이 짧은 경우, 즉 주파수가 높은 경우에도 Lossless antenna를 가정한다면 식(4)은 여전히 사용되어질 수 있다. 여기서 D는 Directivity로 주파수가 높은 경우에는 상수가 아니고 주파수의 함수이나 이들의 정확한 관계는 알 수 없으나 알려져 있는 안테나의 Directivity를 사용하여 대강 추정할 수는 있다.

3. 계산 적용

3.1 적용 전자파 강도

현재 사용 중인 착화기의 고주파에서의 Impedance를 측정된 자료가 없기 때문에 Pin-to-Case Mode에서의 위험 요소는 계산할 수 없으며 여기서는 Pin-to-Pin Mode에서의 위험 요소만이 계산될 것이다. Table 1은 MIL-STD-461D에 규정하고 있는 시험 조건을 나타내고 있다.

Table 1. RS rest specifications from MIL-STD-461D

Platform Freq.		Limit Level (volt/meter)							
		Aircraft (External or Safety Critical)	Aircraft (Internal)	All Ships (Above Decks)	Ships (Metallic) (Below Decks)	Ships (Non-Me- tallic) (Bellow Decks)	Sub- marines	Ground	Space
10 kHz to 2 MHz	A	200	200	10	10	10	5	20	20
	N	200	20	10	10	10	5	10	20
	AF	200	20	-	-	-	-	10	20
2 MHz to 30 MHz	A	200	200	200	10	50	5	50	20
	N	200	200	200	10	50	5	10	20
	AF	200	20	-	-	-	-	10	20
30 MHz to 1 GHz	A	200	200	200	10	10	5	50	20
	N	200	200	200	10	10	5	10	20
	AF	200	20	-	-	-	-	10	20
1 GHz to 10 GHz	A	200	200	200	10	10	5	50	20
	N	200	200	200	10	10	5	50	20
	AF	200	60	-	-	-	-	50	20
10 GHz to 40 GHz	A	200	200	200	10	10	5	50	20
	N	200	60	200	10	10	5	50	20
	AF	200	60	-	-	-	-	50	20

KEY : A = ARMY, N = NAVY, AF = AIR FORCE

3.2 일반 사항

구룡 II 점화장치는 K2 착화기 2개가 병렬로 연결되어 있으며 점화선은 Shield되어 있지 않다. 모타케이스는 알루미늄 7075로 두께가 3mm이며 노즐목 부위에 두께가 약 0.3mm의 알루미늄 방습판이 있으며 방습판 가운데에 점화선이 지나가는 직경

18.6mm의 Hole이 있다. 점화선은 전체가 약 245 cm 정도이다. 착화기는 국산 개발품인 K2착화기 2개가 병렬로 연결되어 있으며 병렬로 연결되기 전의 착화기 케이블은 약 30cm이고 여기에 방습판에 연결되어 있는 케이블은 약 195cm이며 이중 약 14 cm를 제외한 부분은 꼬여 있다. 방습판 이후에 약 30cm의 케이블이 있고 케이블 끝은 Shorting Plug로 되어 있다. 구룡 II 발사기로부터 발사대의 분전반은 약 100m 떨어져 있고 케이블은 Braid로 Shield되어 있으며 분전반에서 로켓 모타까지는 Steel Pipe를 통하여 케이블이 지나가므로 Shield되어 있다고 볼 수 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 전자파에 대한 위험 예측 시에는 모타 케이스에 의한 감쇠 효과는 무시하고 계산하나 여기에서는 무시할 때와 고려할 때 두가지 경우에 대한 계산을 수행하겠다. 전자파 강도는 MIL-STD-461D의 육상 장비에 적용되는 50V/M를 적용한다.

3.3 Hand Held Mode

착화기가 System에 연결되지 않은 경우에는 High Frequency의 영역에서는 식 (4)를 Low Frequency인 경우에는 식 (17)을 사용하여 계산할 수 있다. Fig. 2는 계산 결과를 나타내고 있다. 계산 결과 최악의 경우에도 약 2GHz일 때 0.2 watt 정도만 유기되므로 통상적인 전자파 환경 내에서는 No-fire 전류가 약 1.8amp 정도(즉 1.8watt)인 K2 착화기가 오폭할 우려는 없으나 고출력의 송신 안테나 근처에서는 오폭의 우려가 있으므로 관련 규격에서 정하는 안전 거리를 준수하여야 한다.

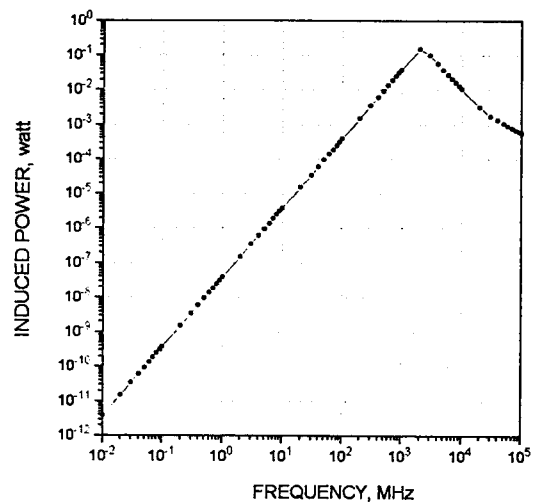


Fig. 2 Induced power at K2 initiator from electric field of 50V/m in hand held mode

3.4 Installation Mode (탄체 Skin Effect 무시)

구룡 II의 경우에는 Shield되지 않고 꼬여 있지도 않은 케이블이 약 215 cm 정도 되며 꼬여져 있는 케이블은 45 cm 정도이다. 꼬여져 있는 케이블의 경우에는 꼬여져 있는 부분 하나 하나가 Loop를 형성하여 제각기 유기전류가 발생하여 전체 유기되는 전류는 이 전류들의 Vector합으로 표시된다. 'Worst Case'의 경우를 고려할 때에는 모든 전류가 모두 'In Phase'라고 가정하여 단순한 합으로 계산할 수 있지만 각각의 꼬여진 부분의 면적을 어떻게 잡을 것인가 하는 것은 지극히 주관적일 수밖에 없다. 여기서는 위험 요소를 예측하는 관점에서 충분히 큰 치수를 가정하였다. Fig. 3은 계산 결과를 보여 주고 있는데 약 300 MHz 부터 3 GHz 까지에서 1watt 이상이 유기된다. 물론 이것은 탄체로 인한 감쇠를 무시하고 Impedance가 완전히 Match된다는 비현실적인 가정을 바탕으로 계산된 것이지만 최악의 경우에 오폭될 가능성이 있다고 말할 수 있다. 이런 위험을 감소시키기 위해서는 케이블을 Shield Cable로 교체하는

방안, RF 필터의 삽입, 착화기의 변경 등을 고려할 수 있겠다.

3.4 Installation Mode (탄체 Skin Effect 고려)

완전히 밀폐된 금속 탄체 케이스는 초저주파를 제외하고는 상당한 전자파 차폐 효과를 보여 준다. 또한 일부 투과한 저주파는 케이블의 길이 등의 제한으로 유도 전류가 상당히 작으므로 탄체에 의한 감쇠는 거의 충분하다고 볼 수 있으며 전자파의 침투 경로는 방습판을 투과하는 경로만이 남게 된다. 방습판은 중앙의 점화선 마개를 제외하면 0.3mm의 알루미늄으로 되어 있어 1MHz 이상에서는 최소 30 dB 이상의 감쇠를 보이므로 전자파는 단지 점화선 마개를 통해서만이 가능하다고 생각할 수 있다.[8] 전자기학적 계산에 따르면 Impedance Mismatch로 도체 중에 구멍이 나있더라도 전자파가 자유롭게 투과하지는 못하지만 여기서는 'Worst Case'로 점화선마개를 통하여 전자파가 전부 투과할 수 있으며 투과된 전자파가 전부 케이블에 유기된다고 가정하고 앞에서 Multipin Connector Type에서와 같이 식(4)를 적용하여 계산한다.

Fig. 4는 계산 결과를 보여 주고 있으며 최대의 경우에도 약 0.01 Watt 정도밖에 유기되지 않음을 알 수 있다. 그러나 마개를 통하여 투과되는 전자파 이외에도 탄체 외부에 나와 있는 케이블에 의하여 유기되는 전자파까지 고려하여야 하며 이 케이블의 길이를 약 25cm라 할 때 두 경로에 의하여 유기된 전류가 'In-Phase'라는 가정하에 계산하였을 때의 결과를 Fig. 4에 같이 나타내었다.

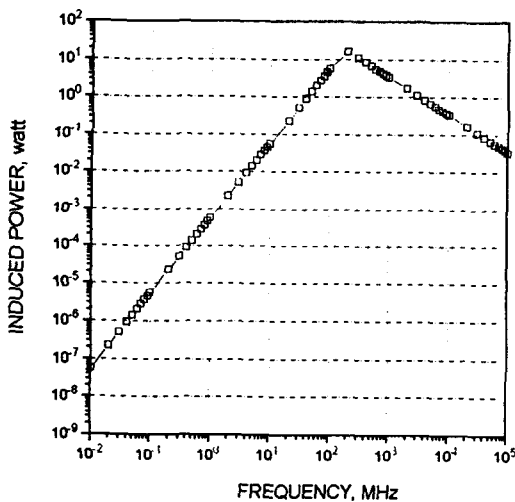


Fig. 3 Induced power at installed K2 initiator from electric field of 50V/m with ignorance of skin effect

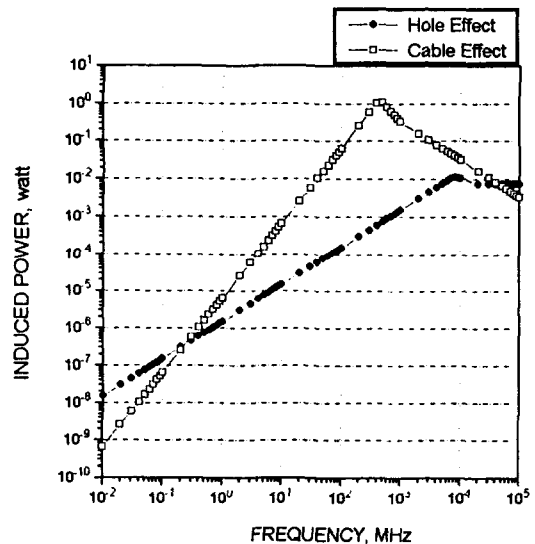


Fig. 4 Induced power at installed K2 initiator from electric field of 50V/m with skin effect

이 경우에 마개를 통하여 침투하는 전자파의 영향은 미미하며 대부분의 전자파는 마개 외부의 케이블에 의하여 유기된다. 그러므로 전자파에 대한 보호책으로 외부 케이블을 Shield 케이블로 교체하는 것이 시급하다고 판단된다. 케이블 교체 후의 유기되는 Electric Power는 Fig. 4에서 Hole에 의하여 유기되는 Power와 거의 같게 되나 이것은 단지 탄체가 완전히 전자파를 Shield한다고 가정한 결과임에 유의하여야 한다.

4. 결론

주변 전자파가 착화기에 미치는 영향을 'worst case'를 가정하여 예측하였다. 본 논문에서 기술한 'worst case'는 가능한 모든 경우에서 최악의 조건을 가정하여 계산하는 것으로 이것의 계산 결과는 단지 위험성이 얼마나 내포되었는가 하는 것에 대한 참고 자료로 사용하는 것이 바람직하다. 실지로 모든 것이 최악의 조건으로 구비될 수 있는 확률은 거의 '0'에 가깝다고 말할 수 있기 때문이다. 그러나 위험성이 존재하는 것을 인지하고 그것에 대한 대비를 하는 것과 위험성 자체를 고려하지 않는 것과는 많은 차이가 있을 것이다.

앞장에서의 계산 결과에 의하면 현재의 착화기와 케이블 사용으로는 위험 요소가 내재되어 있음을 알 수 있다. 우선 외부에 노출되어 있는 점화선을 Shield Cable로 교체하는 것이 가장 간편하고 시급한 개선 방안이라고 생각된다. 더욱 바람직하기로는 탄체 내부의 케이블도 모두 Shield Cable로 교체하는 것이 전자파에 대한 안전 측면에서는 바람직하기는 하나 탄체 내부 및 노즐목의 크기가 작아서 모타 연소 시에 케이블이 노즐목을 막게 될 위험성을 내포하고 있기 때문에 당장 교체하는 것은 곤란하다. 외부에 노출된 케이블만 Shield Cable로 교체하여도 통상의 전자파 강도에서는 약 20 dB의 Safety Margin을 가진다.

구룡체계의 주변 전장을 RS-103시험 방법에 따라 주파수에 상관없이 50 V/m를 적용하였으나 MIL-STD-1512에 따르면 주변 환경을 정확히 모를 경우에는 195 V/m를 적용하도록 되어 있으며 EMRH Deployment Criteria for Army Systems에서도 200 V/m로 규정하고 있으므로 이 정도의 전자파 강도를 적용하는 것도 타당한 근거가 있다고 판단되며 이 경우에는 앞에서 예측한 값의 4배의 값이 예상된다. 구룡의 경우에는 점화선 전체를 Shield Cable로 교체하는 것이 가능할 것으로 판단되며 Cable 교체와 함께 RF Filter 삽입 후에는 약 20 dB 정도의 감쇠율을 추가로 확보할 수 있을 것이다.

그러나 이와 병행하여 착화기 자체를 전자파에 안전한 신착화기로 교체하는 것이 더욱 바람직하다. 현재 가능한 착화기로는 착화기에 아예 Pin이 없이 전자기 유도 방식으로 착화시키는 RFAC (Radio Frequency Attenuating Coupler), 전자파의 영향을 전혀 받지 않는 Optical Fiber 및 레이저에 의하여 착화되는 LIS(Laser Initiator Squib), 반도체를 응용하여 보다 안전하고 착화 속도를 늘릴 수 있는 SCB (Semi-Conduct Bridge)등을 들 수 있으며 이런 '신착화기'는 당실의 연구 결과로 빠른 시일 내에 개발 완료될 수 있을 것이다.

현대의 미사일이나 로켓 체계는 점차 금속 연소관에서 복합재 연소관으로 바뀌어 가는 추세이다. 경량화에 따른 성능 향상이 기대되기 때문이다. 그러나 복합재 연소관이 이런 장점이 있는 반면 전자파 감쇠율이 금속과는 비교되지 않을 정도로 작다는 것을 염두에 두어야 할 것이다. 즉 동일한 전자파 환경에서 금속 연소관보다 오작동 확률이 높을 수 있으므로 복합재 선정시에서부터 전자파 감쇠를 높일 수 있는 방안이 함께 연구, 고려되어야 한다.

참고 문헌

1. Edited by E. J. Eichblatt Jr., "Test and Evaluation of the Tactical Missile", Vol 119, Progress in Astronautics and Aeronautics, 1989.
2. J. R. Reitz and F. J. Milford, "Foundations of Electromagnetic Theory", 2nd Ed. 1967, Addison-Wesley.
3. Kraus and Carber, "Electromagnetic", end Ed., 1973, McGraw-Hill.
4. P. F. Mohrbach and R. H. Thomson, "RF Sensitivity of Electroexplosive Devices used in the Agenda D Nose Fairing", June 1964, F-B2209, Franklin Institute.
5. P. F. Mohrbach, R. H. Thomson, R. F. Wood and D. J. Mullen, "Monograph of Computation of RF Hazard", July 1968, M-C2210-1, Franklin Institute.
6. Plonsey and Collins, "Principles and Applications of Electronics", 1961, McGraw-Hill.
7. S. Ramo, J. R. Whinney and T. van Duzer, "Fields and Waves in Communication Electronics", 1965, John Willey & Sons.
8. Engineering Design Handbook, Hardening Weapon Systems against RF Energy", AMCP 706-235, Feb. 1972, US Army Material Command.