

고고도핵폭발 전자기펄스 피해 분석을 위한 전산모사 연구

가동하^{*,1)} · 심우섭¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제5기술연구본부

Simulation Study for Electromagnetic Pulse by High-Altitude Nuclear Explosion

Dong-Ha Kah^{*,1)} · Woosup Shim¹⁾

¹⁾ *The 5th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea*

(Received 1 July 2015 / Revised 24 October 2015 / Accepted 27 November 2015)

ABSTRACT

This paper describes computer simulation program of high-altitude electromagnetic pulse (HEMP). The HEMP is produced by the gamma rays from high-altitude nuclear explosion. The gamma rays generate a current of Compton electron that leads to the production of electromagnetic fields. In case of high altitude nuclear burst, the electrical fields at the earth's surface are strong enough to be damaged for electrical and electronic device over a very much larger area. Therefore, national infrastructure will be serious damage such as power grid and communication network. In this paper introduce simulation program for calculation of HEMP and present to simulation study results of high altitude nuclear explosion experiment from U.S. and U.S.S.R.

Key Words : EMP(전자기펄스), High-Altitude Nuclear Explosion(고고도핵폭발), HEMP(고고도전자기펄스)

1. 서론

핵폭탄이 폭발하면, 핵반응으로 즉발감마선이 생성된다. 그리고 중성자, 2차 감마선(지연감마선)등 방사성 물질들이 방출된다. 특히 초기 핵 사건에서 발생하는 즉발감마선이 대기의 공기 분자와 충돌(컴프턴 산란)하여 대기를 이온화시키고 이때 감마선으로부터 에너지를 전달받은 전자(컴프턴 전자)로 인해 전하층이 형

성된다. 이러한 전하층 사이에 전기장이 생성되고 전류(컴프턴 전류)가 흐르면서 전자기파(EMP : Electro-Magnetic Pulse)가 발생한다. EMP의 주요원인인 즉발감마선은 아주 짧은 시간에 최고값을 가지는 펄스 형태의 분포로 인하여 전자기파 역시 펄스형태로 지상에 도달하게 된다. EMP는 발생 원인에 따라서 3가지 종류로 구분할 수 있다. 즉발감마선으로 인한 EMP를 E1-EMP, 지연감마선과 중성자로 인해 발생하는 EMP를 E2-EMP 그리고 핵폭발로 인하여 지구자기장이 교란된 후 안정화 되면서 발생하는 E3-EMP이다. 그리고 핵폭발의 고도에 따라서 지구에 전파되는 EMP 영향력

* Corresponding author, E-mail: dhkah@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

이 다르다. Table 1은 폭발고도에 따라서 EMP 세기와 전파범위를 정리한 내용이다^[1]. 고고도에서 핵폭발이 발생하였을 때, 폭발지점의 희박한 대기밀도 때문에 감마선의 비행거리가 길어지므로 지구표면 아주 넓은 지역에 EMP 피해를 유도하게 된다. 콤프턴 전자는 지구자기장의 영향을 받아서 회전 운동을 하며, 지구자기장 방향과 콤프턴 전자의 운동 방향이 수직을 이룰 때 발생하는 결맞음 효과로 인하여 전자기파의 세기가 증폭되어 보다 강력한 전자기파가 만들어 진다. 특히, 고고도핵폭발 때 콤프턴전자의 비행거리가 길어져서 지구자기장의 영향을 더 많이 받아 강력한 EMP가 지구에 도달하게 된다. 즉, 고고도핵폭발은 EMP가 보다 넓은 지역에, 보다 강한 세기를 전파할 수 있는 조건이 된다. 이 때 EMP를 고고도EMP(HEMP : High-altitude EMP)라고 한다. 개발한 HEMP 계산 프로그램은 30 km 이상의 고고도 핵폭발 시 즉발감마선의 영향만 고려하여 계산 할 수 있게 제한 되어있지만, 핵폭발의 고도(>30 km)와 위력, 지점에 따라서 지상에 도달하는 전기장의 세기를 예측할 수 있어 전력망, 통신망과 같은 국가기간망의 EMP 피해를 대비하는데 효과적으로 이용할 수 있을 것이다.

Table 1. Characterizations of EMP by height of burst

폭발고도 (km)	세기 (kV/m)	지속 시간	전파범위 (km)
0 ~ 0.2	~10	1 μs ~ 0.1 s	3 ~ 5
2 ~ 20	~0.3	1 ~ 10 ns	~10
40 ~ 1000	~50	1 ~ 10 ns	~1000

2. HEMP 시뮬레이션 프로그램

2.1 HEMP 해석

핵폭발로 인하여 발생하는 즉발감마선 (N_γ)을 K 개의 에너지(E_j) 스펙트럼 구간으로 나누었을 때, 거리 r 에서 충돌을 경험하지 않은 감마선의 선속은 식 (1)과 같다^[2].

$$\Phi_\gamma(r,t) = f(t) \frac{\sum_{j=1}^K N_j(E_j) e^{-\sigma_c(E_j) \int_0^r n_a(r') dr'}}{4\pi r^2} = f(t) G(r). \quad (1)$$

$f(t)$, $G(r)$ 는 시간에 따라 방출되는 감마선 에너지의 양을 나타내는 감마선 시간과 공간의 함수로써 감마선속을 시간과 공간 변수가 분리된 형태로 기술할 수 있다. σ_c 는 콤프턴 산란 단면적, n_a 는 대기 밀도이다. 감마선과 콤프턴 산란을 통해 생성된 전자의 밀도 변화율은 고도 h 에서의 감쇠거리를 $\lambda_0 e^{h/s}$ 라 하면 식(2)와 같이 표현할 수 있다. (θ :감마선의 산란각도)

$$\frac{dn_c}{dt} = \sum_j \Phi_\gamma \sigma_j n_a = \sum_j \frac{\Phi_\gamma j}{\lambda_j} \equiv f(t)g(r), \quad (2)$$

$$g(r) = \frac{1}{4\pi r^2} \sum_{j=1}^K \frac{N_j(E_j) e^{-\frac{S}{\lambda_0 \cos\theta} e^{-\frac{H}{S}(e^{\cos\theta}-1)}}}{\lambda_j}. \quad (3)$$

이 때, 콤프턴 전자는 광속에 가깝게 운동하기 때문에 콤프턴 전자의 밀도를 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$n_c(r,t) \approx g(r) \int_0^{R_0/v_c} f(\tau - \tau'(1-\beta)) d\tau'. \quad (4)$$

최종적으로 식 (4)의 전류밀도와 맥스웰 방정식을 이용하여 관측 지점에서의 전기장 값 계산을 수행한다^[2].

$$\frac{\partial E_r}{\partial \tau} = -\frac{1}{\epsilon} (J_r + \sigma E_r), \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} r E_\theta = -\frac{cr}{2} \mu_0 (J_\theta + \sigma E_\theta), \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} r E_\phi = -\frac{cr}{2} \mu_0 (J_\phi + \sigma E_\phi). \quad (7)$$

2.2 HEMP 시뮬레이션 프로그램

HEMP 시뮬레이션 프로그램은 EMP의 발생 원리에 따라서 개발 하였다. 핵폭발로 인해 발생하는 즉발감마선에 의해서 생성되는 콤프턴 전자의 운동을 계산 후 콤프턴 전류를 구하고 맥스웰 방정식으로 풀어서 전자기파를 계산한다. 동시에 콤프턴 전류의 역방향으로 전자기파 세기에 감소 영향을 미치는 2차 전자 분포와 대기전도도를 감안하여 최종 전자기파 계산결과에 반영하다. Fig. 1은 HEMP 계산 수행을 표현한 순서도이다.

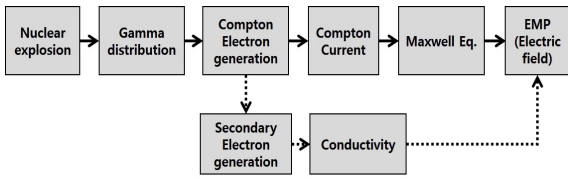


Fig. 1. Flow chart of calculation of HEMP

HEMP 계산 수행을 위하여 핵폭발 위력과 위치, 폭발고도와 계산 지점에서의 지구자기장의 크기, 편각과 복각 정보가 초기입력 값으로 필요하다. 그리고 즉발감마선 에너지 분포는 탄두의 형태와 재질 폭발 당시의 대기 환경 조건 등 많은 원인에 따라서 형태를 예측하기가 매우 어렵다.

Fig. 2는 핵폭발 후 즉발감마선의 에너지 방출 양상^[3]으로, 이 자료를 바탕으로 핵폭발 에너지의 0.1%를 즉발감마선의 에너지로 가정하고 즉발감마선의 에너지 분포는 탄두를 통과한 감마선의 에너지와 탈출 확률을 고려하여 2 MeV 중심으로 이중지수함수(double exponential) 형태를 가지도록 즉발감마선의 분포를 표현하였다.

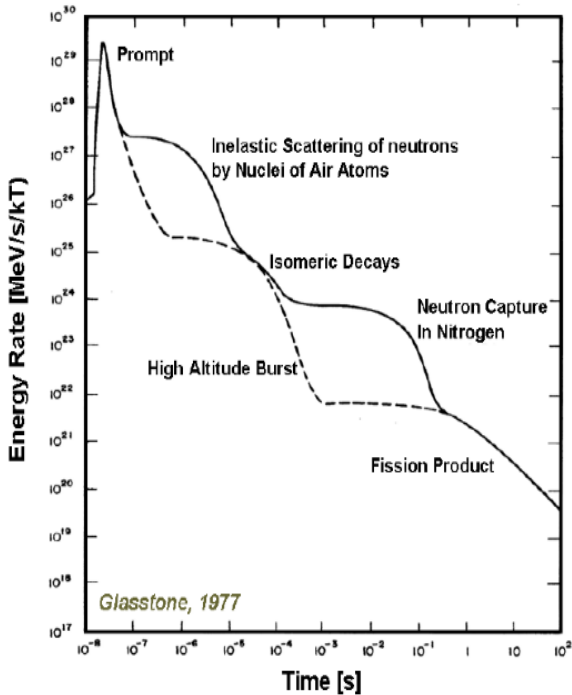


Fig. 2. Energy rate of prompt gamma as function of time^[3]

Fig. 3는 시뮬레이션 프로그램을 이용한 계산 수행 결과로 100 km 고도에서 핵폭발 시 지상의 한 지점에서 시간에 따른 전기장 변화 그래프이다. 이 결과에서 핵폭발 2.5 ns 후 약 3.6 kV/m의 최고값에 도달한다. 시간에 따른 전기장 분포에서 최고값을 찾아서 HEMP로 인하여 지상에 도달한 전기장(최고값) 분포를 Fig. 4을 통해서 볼 수 있다.

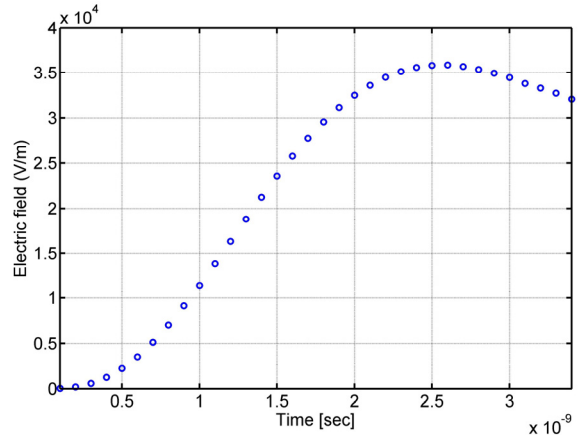


Fig. 3. Electric field distribution for HEMP

Fig. 4는 총 6000여개의 지점에서의 계산 값으로, 전자기펄스로 인해 전파된 등전기장분포도 이다. 가운데 지점이 폭발지점이고 지구자기장(북반구)의 영향에 따라서 전자의 운동방향과 지구자기장의 복각이 90°가 이루는 남쪽에 가장 큰 값이 존재하고, 복각이 거의 0°를 이루는 북쪽에 가장 작은 값이 분포하게 된다. 또한 지구자기장의 편각 영향으로 전기장의 최고-최저값의 축이 오른쪽으로 회전 이동한 것처럼 기울어져 있음을 알 수 있다.

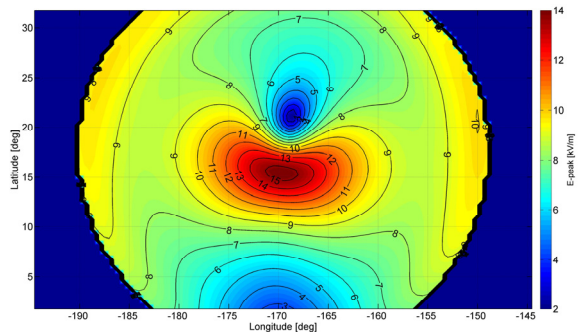


Fig. 4. HEMP contours

2.3 비교 검증

개발한 시뮬레이션 프로그램은 HEMP 발생 원리에 따라서 컴프턴 전류와 대기전도도의 분포를 미국에서 개발한 CHAP code^[4]와 결과를 비교하였다. CHAP code는 1971년 고고도핵폭발로 인한 전자기펄스를 계산하기 위해 개발한 코드로 미국 중심부의 고도 400 km에서의 핵폭발 조건으로 폭심에서 777 km 떨어진 지점에서 지상에서 20.6 km, 35.5 km 높이에서의 값을 비교하였다. Table 2에서 계산을 위한 입력값을 정리하였고, Fig. 5를 통하여 결과를 비교할 수 있다.

Table 2. Input values for calculation of EMP

구 분	입력값
폭발지점	N38°, W98°
폭발고도	400 km
폭발위력	3.3 MT
지구자기장 크기	0.56 gauss
지구자기장 편각	70°
지구자기장 복각	0°

Fig. 5의 (a)와 (c)는 참고문헌의 결과 값으로 각각 시간에 따른 컴프턴 전류(transverse방향)값과 대기전도도 분포이며 (b)와 (d)는 개발한 코드의 계산 결과이다. y축이 로그함수임을 감안했을 때 값이 상이한 부분이 있지만, 초기감마선의 에너지 분포가 알려지지 않은 상태이기 때문에 오차가 존재할 것으로 예측된다. 그러나 곡선의 형태가 유사함을 알 수 있고 다른 참고문헌의 결과를 비교하여 시뮬레이션 프로그램의 정확성을 검증하였다. 그리고 맥스웰 방정식을 통한 전기장 분포를 비교하여 개발한 코드를 Fig. 6과 같이 검증하였다.

Fig. 6은 앞서 비교한 핵폭발 조건과 동일조건으로 계산한 결과로, 폭발지점에서 시간에 따른 전기장 분포도 이다. 20 ns 이후 부분에서는 상이한 지점은 계산에 사용된 초기감마선의 에너지 분포가 알려지지 않았으며, 컴프턴 전자가 운동하면서 발생하는 자기장의 영향, 컴프턴 전자의 산란각을 표현하는 수식의 적용 유무와 표현식의 상이함 때문으로 생각할 수 있다. 그러나 초기에서 10 ns 까지 급격히 증가하는 전기장 값은 매우 유사한 형태를 가지고 있음을 보여준다.

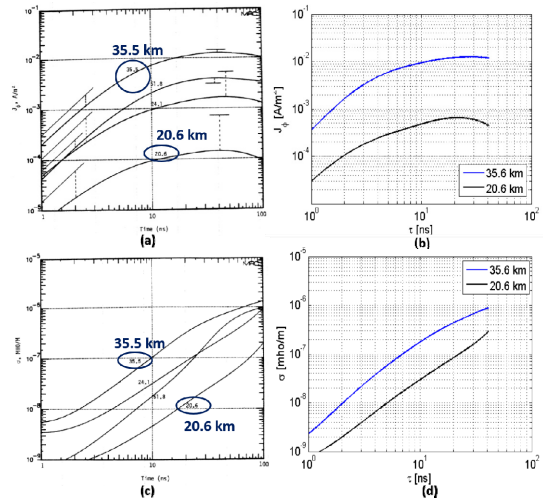


Fig. 5. Compton currents and air conductivity distributions by CHAP(a,c) and developed code(b,d)^[4]

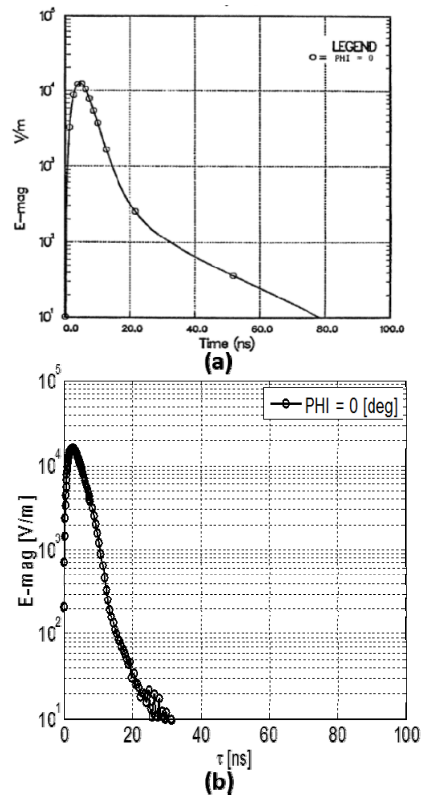


Fig. 6. Electric field distributions by CHAP(a)^[4] and developed code(b)

최종적으로, 폭심에서 남-북 방향(북반구기준)으로 거리에 따른 전자기펄스의 전기장 값을 기준에 발표된 문헌자료^[5]와 비교하였다. 핵폭발위력은 1 MT, 폭발고도는 100 km 일 때 결과를 Fig. 7과 같이 표현하였다. 비교한 문헌에 지구자기장 정보가 표시되지 않았기 때문에 여기서 오는 오차와 코드상의 차이를 감안해도 매우 유사한 결과를 보여주는 것으로 보아, 개발한 HEMP 시뮬레이션 프로그램은 합리적이라고 판단된다.

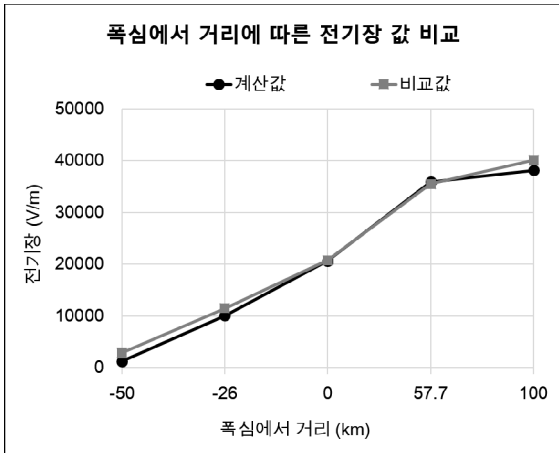


Fig. 7. Peak values of electric field^[5]

2.4 HEMP 결과 위성지도 연동

전자기펄스 결과를 가시화하여 핵폭발 시 전파되는 전기장의 세기와 전파범위를 위성 지도에서 확인할 수 있는 프로그램도 함께 개발 하였다. 핵 위력과 고도, 폭발지점에 따라서 다양한 핵폭발 상황에서 EMP 피해지역을 쉽게 파악할 수 있고, 피해지역에 존재하는 EMP 취약시설(변전소, 고압선로, 원자력발전소, 통신선로 등)에 대하여 EMP 방호를 위한 피해지수 산정에 사용될 수 있을 것이다.

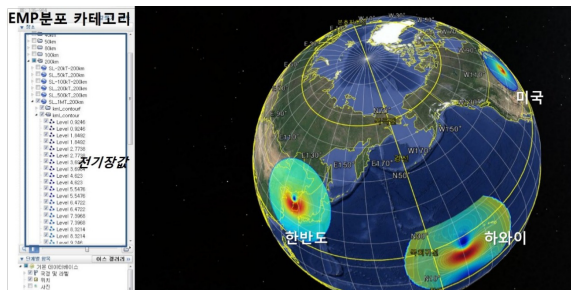


Fig. 8. HEMP on satellite image map

Fig. 8은 한반도, 하와이, 미국 중부에서 핵 사건에 따른 전자기펄스 분포를 위성지도 위에 가시화한 모습이다. 미리 핵사건에 따라 EMP 계산을 수행한 결과를 목록화 하여 위성지도에 입력하여 각 경우에 따라서 EMP의 피해 범위와 세기를 구체적으로 확인 할 수 있다.

3. 고고도 핵실험에서의 EMP 계산

고고도핵폭발로 인한 전자기파를 계산하기 위한 시뮬레이션 프로그램과 지상에 도달한 전기장분포를 위성 지도에 표출하는 프로그램을 이용하여 과거 미국과 소련의 대기권핵실험에서 HEMP로 인한 지상에 도달한 전기장분포도를 만들었다. 지구자기장 정보는 미국과 소련의 해당지역과 실험 연도에 맞추어 고려하였으나, 대기 환경의 차이는 고려하지 않았고 무기정보를 알 수 없어 동일한 즉발감마선 발생 함수를 사용하여 계산을 수행하였다. 그리고 당시 핵실험 후 피해 보고문헌을 비교하여 HEMP로 인한 피해 상황을 분석하였다.

3.1 미국의 핵실험

1962년 태평양 존스톤 섬에서 대기권 핵실험(Starfish Prime)으로 인해 1500 km 떨어진 하와이 호놀룰루에서 30여개로 연결된 가로등이 파괴되었고 가정의 방범장치들이 오작동 하는 등 전기기기 교란 사건이 관측되었다.^[6] 이 때 핵실험 정보(폭심 16.73°N, 169.53°W, 폭발고도 400 km, 위력 1.4 MT)를 이용하여 개발한 HEMP 시뮬레이션 프로그램으로 지상에 도달한 전기장 분포를 Fig. 9와 같이 지도 위에 표출하였다.

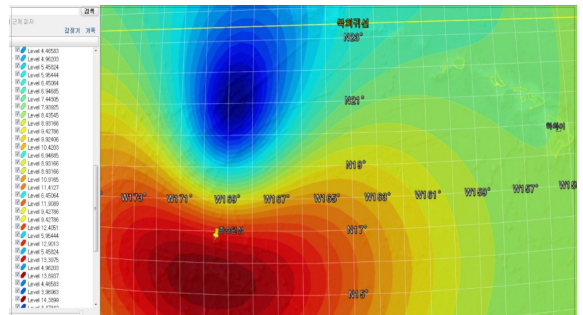


Fig. 9. EMP distribution by high-altitude nuclear explosion experiment in U.S.

이 핵실험을 통해서 가장 전기장이 큰 지역은 폭심에서 남쪽으로 100 km 떨어진 지점으로 약 15 kV/m의 전기장이 도달하였고, 폭심으로 부터 북쪽으로 약 500 km 북쪽으로 1 kV/m의 최저값을 확인 하였다. 태평양 상공에서의 시험으로 주변 도시 지역은 폭심에서 1500 km 떨어진 하와이 지역으로 대부분 영역에서 7~10 kV/m 전기장이 분포함을 알 수 있었다. 피해를 보고했던 문헌⁶⁾에서는 단일 전기기기에 피해보다는 가로등과 같이 다수가 연결된 기기에 피해 상황들이 보고되었는데, 지상으로 노출된 전선을 통하여 고전압과 대전류가 기기로 유도되어 피해를 입었을 것으로 예측된다.

3.2 소련의 핵실험

1962년 소비에트 연방인 카자흐스탄 상공에서도 대기권 핵실험이 진행되었었다. 당시 카자흐스탄의 경제 상황은 평균 수준으로, 공업화 및 전기시설이 잘 갖추어진 곳 이었다. 이곳에서 K project 라는 이름으로 핵 실험이 있었다. 이 때 정보를 바탕으로 지상에 도달한 전자기펄스에 대해서 계산하였다. Table 3에서 당시 고고도핵실험의 위력과 고도, 실험일자를 정리하였고, Fig. 10은 Test No. 187 시뮬레이션 결과로 전기장 분포를 지도 위에 표시하였다. 지상에 도달한 HEMP 전기장의 세기는 7~20 kV/m로 특히 소련의 탄도미사일 방어 체계가 있었던 Sary Shagan 지역에는 10 kV/m의 전기장이 도달하였음을 알 수 있었다.

일련의 핵실험을 통해 관련 문헌에서는 아래와 같이 주요 국가기간망의 피해를 조사하고 있다⁷⁾.

- 발전소 : 불에 탐(burned out)
- 지하 송전선 : fused
- 지중 송전선 : insulators burned out
- 장거리 통신망 : 파괴(shut down, spark gap devices break down)
- 전자기기 : 파괴(destroyed) damaged radio, knocked out radar system

당시 고고도 핵실험을 통하여 지상에서의 피해가 보고되었지만, 구체적인 EMP 수치에 대한 측정 정보는 알 수 없었다. 현재 개발한 프로그램을 통하여 당시 핵실험 정보(고도, 위력, 폭심)를 이용하여 지역별 전파된 전기장 값과 피해상황을 유추하여 HEMP 피해를 구체화할 수 있었고, 발전소가 있었던 지역과 통신망

및 전자기기가 파괴된 지역의 전기장 값을 이용하여 피해상황을 구체화 할 수 있었다.

Table 3. EMP distribution by high-altitude nuclear explosion experiment in U.S.

Altitude (km)	Yield (kT)	Test No.	Date
150	1.2	No. 128	1961-10-27
300	1.2	No. 127	1961-10-27
290	300	No. 184	1962-10-22
150	300	No. 187	1962-10-28

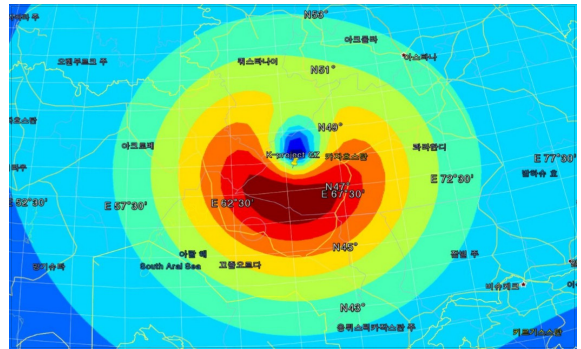


Fig. 10. EMP distribution from Test-187 at U.S.S.R.

4. 결론

핵폭발로 인해 발생하는 전자기펄스를 계산하기 위한 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 핵폭발 후 발생하는 즉발감마선의 분포함수를 바탕으로 컴프턴 전자의 운동을 지구자기장 효과와 2차 컴프턴 전자의 운동을 고려하고 맥스웰 방정식으로 풀어 지상에 도달하는 전자기파의 전기장 크기를 계산한다. 참고 문헌을 통하여 계산 결과를 비교 검증하였고, 핵사건 시 전자기펄스에 대한 취약 지역을 분석 할 수 있도록 계산 결과를 위성지도와 연동하여 전파범위와 세기를 지도 위에 표시한 하였다. 그리고 1970년대 미국과 소련의 대기권 핵실험 정보를 바탕으로 계산된 전자기파의 세기와 피해 정도를 비교하였다. 이 당시 대부분의 전자부품들이 진공소자를 사용했음에도 불구하고 고도 심각한 EMP 피해가 보고되었다는 것에 주

목적 필요가 있다⁸⁾. 현대 군무기 체계뿐만 아니라, 주요 국가기간 시설에는 진공관보다 더 전자기파에 민감한 전자기기들을 사용하고 있는 상황에서 전자기파의 피해는 더욱 심각할 것으로 예측된다.

References

- [1] E. Savage, J. Gilbert, W. Radasky, "The Early-Time (E1) High-Altitude Electromagnetic Pulse(HEMP) and Its Impact on the U.S. Power Grid(Meta-R-320)," ORNL, USA, Section 2, 2010.
- [2] Longmire, C. L., "On the Electromagnetic Pulse Produced by Nuclear Explosion," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 26, pp. 3-13, 1978.
- [3] S. Glasstone, P. J. Dolan, The effect of Nuclear Weapons, United State Department of Defense & Energy Research and Development Administration, p. 328, 514-515, 1997.
- [4] C. L. Longmire, R. M. Hamilton, J. M. Hahn, "A Nominal Set of high-Altitude EMP Environments," ORNL, USA, pp. 14-68, 1986.
- [5] C. Meng, "Numerical Simulation of the HEMP Environment," IEEE Transactions of Electromagnetic Compatibility, Vol. 55, No. 3, pp. 440-445, 2013.
- [6] C. N. Vittitoe, "Did High-Altitude EMP Cause the Hawaiian Streetlight Incident?," Sandia National Laboratories, Note 31, pp. 3-6, 1989
- [7] R. Pfeffe and D. L. Shaeffer, A Russian Assessment of Several U.S.S.R. and U.S. HEMP Tests. Combating WMD Journal. U.S. Army Nuclear and CWMD Agency. Issue 3. January, pp. 33-38, 2009.
- [8] William J. Broad, "Nuclear Pulse(II): Ensuring Delivery of the Doomsday Signal," Science, Vol. 212, No. 5, pp. 1116-1120, 1981.