

# Study on Influence Analysis of Radioactive Terror Scenarios by Weather Conditions

Tae Woo Kim,<sup>1</sup> Yeo Ryeong Jeon,<sup>1</sup> Sunyoung Chang,<sup>2</sup> Yongmin Kim<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Radiological Science, Catholic University of Daegu

<sup>2</sup>Center for Nuclear Strategy and Policy, Korea Institute of Nuclear Nonproliferation and Control

Received: October 11, 2018. Revised: November 26, 2018. Accepted: November 30, 2018

## ABSTRACT

After 9/11 attacks in the U.S, Terrorism has increased the number of unspecified casualties through multi-use facility terror attacks compared to the past. The subsequent London bombings and the self-destruction of Pakistan increased people's fear and social anxiety. As international events have been held in Korea recently, awareness and concern over radioactive terrorism and security management of radioactive materials are increasing. In this paper, we compared the results of different meteorological conditions using HotSpot Code. After creating a possible terror scenario in Korea, sources likely to be use in RDD and Dirty bomb were investigated. The meteorological condition was selected by comparing the Pasquill-Gifford stability class with the most stable condition F and the most unstable condition A. The result value of the A and F condition through simulation were shown not to cause citizens to die from acute effects due to radiological effects. The range of radioactivity is different according to the wind speed and the meteorological stability, and the degree of radioactivity dilution is different according to meteorological conditions. Analysis results are expected to be used for initial response in the event of a radioactive terrorist attack.

Keywords: Radioactive Terror, HotSpot Code, Dirty Bomb, TEDE, Atmospheric Stability

## I. INTRODUCTION

최근 국내에서 G20 정상회의, 아시아 태평양 경제 협력체 정상회의(APEC), 2018 평창 동계 올림픽 등 국제행사가 개최되고 있어, 방사능테러 위협에 대비한 방사성물질의 국가 안보 의식이 증대되고 있다. 9.11 테러 이전의 테러는 테러의 주체가 명확하며 피해규모가 상대적으로 소규모를 보였다면 이후 뉴테러리즘은 다중이용시설을 중심으로 불특정 다수를 대상으로 대규모 테러의 양상을 보이고 있다.<sup>[1]</sup> 방사성 물질의 경우 소량이더라도 불순한 의도를 가진 개인이나 테러 조직 수중으로 들어간다면 막대한 피해를 입힐 수 있다. 방사성물질과 다이내마이트를 사용하여 단순하게 제조가 가능한 더티밤(Dirty Bomb)의 경우 방사성 물질을 사용하

여 불특정 다수에게 살상의 목적이 아닌 대량 살포를 통한 확률적영향인 암을 발병 시켜 사회적으로 큰 혼란을 유발할 가능성이 있다.<sup>[2]</sup> 이러한 목적을 가진 테러리스트들은 방사성 물질을 강제로 탈취하거나 암시장에서 불법거래를 통하여 불법적으로 방사성물질을 획득한다. 해외의 경우 영국 캐머런 총리는 ISIL 등 테러리스트가 유럽 서구 주요 도시에 드론을 사용한 더티밤 공격을 계획하고 있다고 경고 발언한 바 있다.<sup>[3]</sup>

핵무기로 제조될 수 있는 우라늄, 플루토늄 등이 저장된 핵물질 및 원자력 시설의 경우 상업용 방사성물질의 보안 관리에 비해 시설에 대한 물리적 방호가 강화되어있다.<sup>[4,5]</sup> 이에 비해 상업용 방사성물질은 병원, 산업체, 연구기관 등 여러 분야에서 다양하게 사용되고 있으며, 많은 사용량에 따른 도난,

\* Corresponding Author: Yongmin Kim

E-mail: ymkim17@cu.ac.kr

Tel: +82-53-850-2522

분실 사건도 빈번하게 일어나고 있어 상대적으로 보안 관리가 취약하다. 상업용 방사성물질의 도난, 분실로 인한 마을 주민들의 방사능 피폭이 일어난 과거 고이아니아 방사능 유출사고는 인간의 사회적 무질서 원인이 될 수 있는 우려를 제기했다.<sup>[6]</sup> 앞선 우려와 같이 상업용 방사성물질의 도난 및 분실로 인한 방사능 테러 발생 시 인명의 구조 및 대피, 사회적 혼란 및 오염된 지역의 제염비용을 최소화하기 위하여 HotSpot Code를 사용하여 기상조건에 따른 테러 시 발생하는 영향을 분석하고자 한다.

## II. METHODS

### 1. HotSpot code

본 연구에서는 방사성물질과 관련된 테러를 평가하기 위하여 초기 분산 추정, 안전 분석을 위한 적합성이 수년 동안 테스트되고 검증된 HotSpot Code를 선택하였다. 이 코드는 방사능 테러 발생 시 초동 대응 팀의 초기 방사성물질 분산 비상상태를 평가한다. 또한 안전 분석 계획에 광범위하게 사용되는 가우시안 플룸 모델을 기반으로 한다. HotSpot Code에서 기체 또는 에어로졸의 대기농도를 결정하는 가우시안 플룸 모델은 다음과 같다.<sup>[7]</sup>

$$C(x,y,z,H) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_zu} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \times \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \times \exp\left[-\frac{\lambda x}{u}\right] \quad (1)$$

- C: 총 시간 대기농도(Ci · sec/m<sup>3</sup>)
- Q: 선원항(Ci), H: 유효방출높이(m)
- λ: 붕괴상수(/s)
- x: 풍하거리(m), y: 풍측거리(m), z: 수직높이(m)
- σ<sub>y</sub>: 풍측방향농도분포의 편차(m)
- u: 유효방출높이 H에서의 풍속(m/s)
- L: 역전층 높이

HotSpot Code를 사용하여 가상 선원항 폭발, 화

재로 인한 방출 및 사용자의 임의 입력 등을 하여 초기 3D 분포를 모델링을 한다. 방사능 테러 시나리오 평가를 위해 HotSpot Code는 ICRP 및 미국 환경보호국(EPA)의 FGR No. 11,12,13에서 권장하는 방사선 선량 측정법을 사용한다. 또한 짧은 계산 시간 및 최대 총 유효선량 평가 등을 평가하여 테러 예방에 널리 사용되고 있다.<sup>[8]</sup> 모델링 후 생성된 결과 값은 지상 침적 값, 외부피폭 값을 지도에 표시하고 시각화하여 결과를 보다 이해하기 쉽게 표시한다.

### 2. 선원항

방사능테러 시나리오에 적용할 선원을 선택하기 위하여 국내 방사성 동위원소 이용실태 자료를 이용하였다. 2015년 기준 국내에서 인허가를 받은 방사선원 이용기관은 7,026곳이며 200여 종이 넘는 핵종이 사용되고 있다.<sup>[9]</sup> Ni-63, Cs-137, Co-60, Am-241 등의 핵종들이 사용빈도가 높게 나타났으며, 핵종들은 산업체, 의료기관 및 연구기관 순으로 많이 사용되고 있다.<sup>[10]</sup> Table 1은 국내의 방사능분산장치(RDD) 활용 가능성과 관련하여 인허가량/사용 선원 수, 인허가량/사용 기관수에 대해 핵종별 D-value와의 비를 구한 결과 이다. D-value는 방사성동위원소의 인체 영향과 관련하여 결정적 영향을 초래할 잠재적 위험을 나타내는 지표이다. Table 1에 제시된 사업소당 인허가량/D-value 값은 보안 관리가 잘 되지 않았을 경우의 잠재적 위험 정도를 나타낸다. 표기된 값에서 Co-60, Cs-137이 타 핵종에 비해 큰 값이 나온 것을 확인할 수 있다.

방사능테러 발생 시 금속형, 분말형 등 방사성물질의 상태에 따라 확산성이 결정되므로 방사성물질의 상태 선택은 중요하다. 상기 제시된 두 가지 핵종의 경우 Co-60은 금속형으로 존재하며, 추가적인 공정을 거치지 않는 한 더티밤 폭발 시 대기 중으로 확산되기 힘들다고 판단하였다. Cs-137의 경우 적당히 반감기가 길어 오랜 시간 피해를 받을 수 있으며, Co-60과 달리 일반적으로 염화세슘(CsCl)은 분말 형태로 존재하며 대기 중에 빠르게 퍼졌을 때 빠른 환경적 이동성을 가진다. 따라서 본 연구에서는 대기 중으로 쉽게 분산될 가능성이 있는 Cs-137을 대상 선원으로 설정하였다. 또한

Cs-137은 국내 관련 보안규정에 따른 분류에서 지정된 위험도 등급이 2로서 화학적 독성 또한 높아 테러에 악용될 우려가 있다 판단하였다.

Table 1. Main Radioactive Nuclide Amount of License/Place of Business

Radioactive Nuclide	Amount of License [GBq]	Place of Business	D-value [GBq]
Ni-63	62,123	1,459	6.E+04
Cs-137	8,620,224	1,330	1.E+02
Co-60	140,108,341	1,089	3.E+01
Am-241	7,588	493	6.E+01
Ge-68	177,305	443	7.E+01

Radioactive Nuclide	Amount of License /Place of Business /D-value	Risk Class
Ni-63	0.0007	3
Cs-137	64.8	2
Co-60	4288.6	2
Am-241	0.3	1
Ge-68	5.7	-

### 3. 사고 시나리오

9.11 테러를 기점으로 테러리스트는 불특정 다수를 대상으로 공격하며 인구가 많은 위치를 선정하여 공포 환경을 조성하는 경향이 두드러졌다. 이에 따라 테러가 발생할 경우 다중이용시설이 밀집되어 있으며, 유동인구가 많아 큰 인명 피해를 초래할 수 있는 위치를 선정하였다. 통계청에서 제공한 2015년 인구 주택 총 조사를 토대로 기준 인구밀도(명/km<sup>2</sup>)가 전국 광역시·도 중 가장 높은 서울광역시를 대상으로 하였다. 서울광역시에서 유동인구가 가장 많은 지역을 선택하기 위해 지하철역별 이용객 수를 분석하였다. 서울광역시에서 지하철 승하차 수가 가장 많은 곳을 분석한 결과 2호선 강남역으로 나타났다. 강남역은 각종 주거시설 및 다중이용시설이 밀집되어 출퇴근 시간뿐만 아니라 평일 낮 시간에도 지하철 승하차 수가 가장 많았다. 이에 따라 테러 발생 장소는 2호선 강남역 인근 사거리를 선택하였다.<sup>[11]</sup>

테러 수단 및 폭발물의 양은 미국 국토안보부의

연방재난 관리청에서 제시한 테러 수단별 폭발 질량을 참고하였다. 테러 수단은 1 ton 이상의 폭약을 실을 수 있는 화물차를 선택하였다. 화물차에 실을 수 있는 최대 폭발물량(TNT equivalent)은 1,814 kg으로, 건물이 밀집한 다중이용시설 주변에서 1 ton 이상의 폭발물을 실은 화물차 폭발이 50 m의 반경의 건물은 붕괴되며, 반경 250 m의 건물에서 창문이 부서지는 것을 선행연구를 통해 확인할 수 있었다. 따라서 테러 시 충분히 넓은 지역에 큰 피해를 입힐 수 있을 것이라 판단하였다.<sup>[12]</sup>

### 4. 기상 조건(풍속 및 안정성 등급)

방사능테러 발생 시 기상조건에 따라 방사성물질의 분산 방향과 거리가 결정되므로 기상조건은 매우 중요한 인자이다. 1981년부터 2010년까지의 기상청 자료를 활용하여 서울광역시 강남구의 평균 풍속 및 풍향을 분석하여 적용하였다. 통계자료에 따르면 서울광역시 강남구의 평균 풍속은 3.1 m/s 이며, 주 풍향은 동풍으로 나타났다.

HotSpot Code에서 기상 조건은 Pasquill-Gifford 안정성 등급에 따라 나누고 있다. 안정성 등급은 구름의 양을 기준으로 하며 Table 2와 같이 A에서 F 등급으로 나타낼 수 있다.

A, B, C 등급은 불안정한 조건의 낮 시간을 순서대로 나타내고, D는 중성 조건의 흐린 날이나 밤 시간, E, F는 야간의 안정된 조건을 나타낸다. 본 연구에서는 서로 상반되는 가장 불안정한 조건의 A등급과 가장 안정한 조건 F등급을 선택하여 시뮬레이션 하였다. HotSpot Code에 입력한 각 인자는 Table 3에 정리하였다.

Table 2. Atmospheric stability Using in HotSpot Code<sup>[13]</sup>

Wind Speed (m/s)	Sun high in sky			Night time	
	Strong	Middle	Weak	Low Clouds	≤ 3/8 Cloud Cover
< 2	A	A-B	B	-	-
2 - 2.9	A-B	B	C	E	F
3 - 4.9	B	B-C	C	D	E
5 - 6.0	C	C-D	D	D	D
> 6.0	C	D	D	D	D

Table 3. Main parameters obtained for HotSpot Code

Parameter	Value
Model	General Explosion
Radionuclide	Cs-137(30.17y)
MAR(Material-at-Risk)	1.0 E+13
High Explosive	4,000 lb
Wind Speed	3.1 m/s
Wind Direction	Wind from the East
Stability Class	A F
Receptor Height	1.5 m
Breathing Rate	3.33 E-04 m <sup>3</sup> /s
Location	37.49752 N
	127.02646 E

### III. RESULT

본 연구에서는 다중이용시설이 밀집한 지역에 더티밤이 탑재된 화물차의 폭발 테러 영향을 평가하기 위하여 HotSpot Code를 사용하였다. 대기 분산 모델은 일반적인 폭발 모델(General Explosion)을 선택하여 시뮬레이션 하였다. 또한 서로 상반된 기상 조건에서 차이를 확인하기 위하여 기상 안정도는 각각 A, F 등급을 선택하였다. 기상 안정도에 따른 TEDE의 결과값은 Table 4와 같다.

결과 값은 1.5 m 높이의 피사체가 받는 선량으로 A, F 등급에서 최대 TEDE 값은 각각 0.354 mSv, 0.182 mSv로 나타났다. 두 값은 1년 동안 음식물, 우주로부터 받을 수 있는 자연 방사선량 보다 낮은 수치이며, 방사선 급성 영향의 최대 허용 선량인 250 mSv보다 낮다. 따라서 방사선학적 영향에 의해 시민들이 급성영향으로 사망하는 경우는 없다고 판단하였다. 하지만 방사성물질이 광범위한 영역으로 분산되므로 지역에 잔류하고 있는 시민들은 암과 같은 확률적인 영향을 무시할 수 없다.

Fig 1은 방사성물질의 대기 방출 시 발생할 수 있는 다양한 피폭경로를 나타낸다.<sup>[14]</sup> 직접적인 인명피해의 경우 다중이용시설이 밀집한 위치에서 1 ton 이상의 더티밤 폭발로 인한 물리적 영향으로 인근 50 m 이내의 건물에 상주하는 사람들에 대해 큰 피해가 발생할 것으로 예상된다.<sup>[12]</sup>

Fig 2는 거리에 따른 TEDE 값을 그래프로 도식화 한 것이다. 급격한 온도 기울기가 존재하는 불안정한 대기조건인 A 등급의 경우 500 m 이후부터 F 등급에 비해 급격히 낮아짐을 확인할 수 있다. 이는 기상학적 조건으로 인한 방사성물질의 희석

으로 판단된다. 기상 조건에 따른 방사성물질의 희석은 표층온도가 상층부 공기의 온도보다 높거나, 급격한 온도기울기가 존재하는 불안정한 대기조건, 강수 및 높은 풍속으로 인하여 빠르게 발생한다.<sup>[15]</sup>

폭발로 인한 방사성 물질의 분산으로 30분 샘플 시간 내의 방사성물질 도달 면적은 A, F 등급 각각 15 km<sup>2</sup>, 57 km<sup>2</sup>로 A 등급에 비해 F 등급이 약 5배 정도 차이가 발생한 것을 Fig. 3에서 확인할 수 있다. 기상 조건에 따른 방사성물질의 희석, 풍속에 따라 기상 조건이 안정한 경우가 불안정한 경우에 비해 피해가 더 큼을 판단할 수 있다.

Table 4. TEDE value according to Stability Class A, F

Distance (km)	A-TEDE (mSv)	F-TEDE (mSv)
0.010	0.354	0.182
0.100	0.12	0.046
0.200	0.057	0.037
0.300	0.040	0.034
0.400	0.033	0.031
0.500	0.030	0.030
0.600	0.027	0.028
0.700	0.024	0.026
0.800	0.022	0.025
0.900	0.020	0.024
1.000	0.018	0.023
2.000	0.0086	0.016
4.000	0.0031	0.010
6.000	0.0016	0.0074
8.000	0.0010	0.0059
10.000	0.00071	0.0050
20.000	0.00023	0.0026

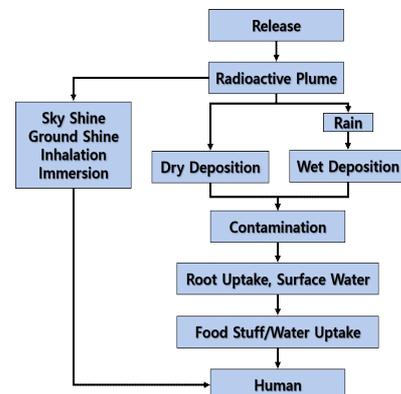


Fig. 1. Diverse Exposure Pathways of Release Radioactive Material into the Atmosphere.<sup>[14]</sup>

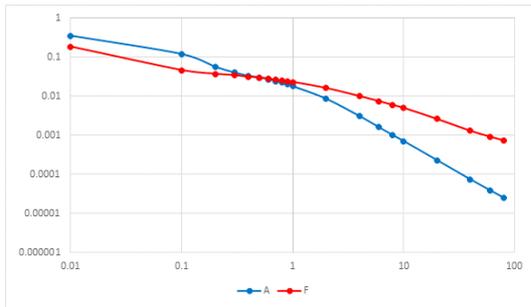
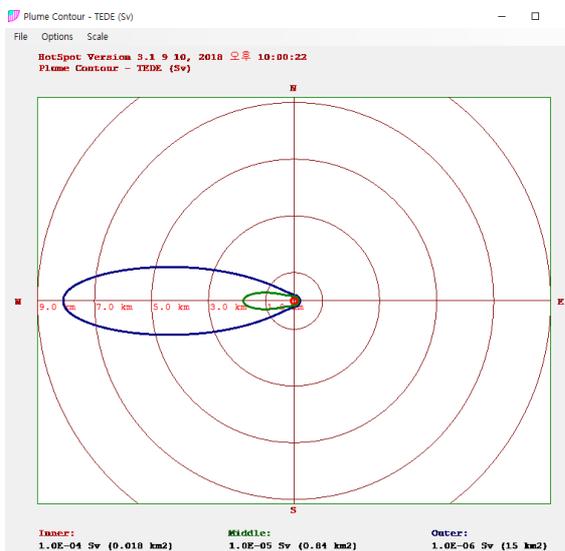
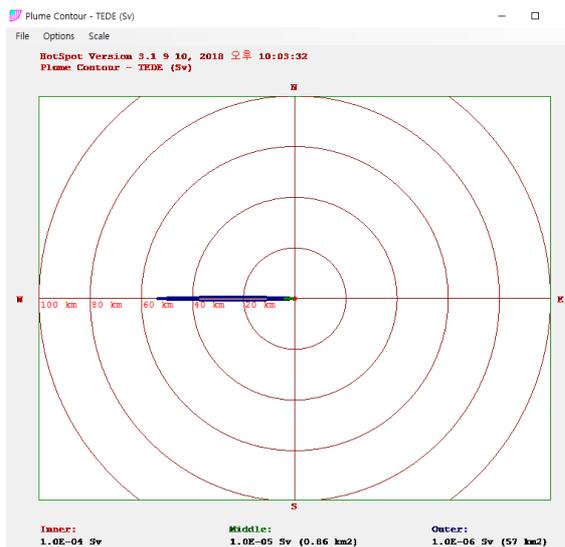


Fig. 2. TEDE Value According to Distance.



(a) Stability A Contour Plot



(b) Stability F Contour Plot

Fig. 3. Stability A, F Contour Plot.

#### IV. CONCLUSION

방사능 테러는 핵 사고에 비해 대량의 사상자가 발생하지는 않는다. 하지만 기상학적 효과에 의한 낙진 및 분산으로 인하여 민간인 집단은 자연 백그라운드 수준을 초과하는 방사선에 장기간 노출되며, 오염 위치에 대한 복원 및 제염 비용이 많이 발생한다. 이에 따른 테러는 국가의 경제적 손실과 시민들에 사회적 공포를 조성하며 전체적으로 사회에 큰 피해를 입힌다.

국내의 경우 매년 방사성 물질의 도난 및 분실 사건이 실제로 일어나고 있으며, 과거 간호사의 자동차 시트에 의사가 고의적으로 선원을 넣은 테러 사건 발생의 예를 통하여 알 수 있듯이 국내에서도 선원 관리의 중요성을 인식할 필요가 있다. 국외의 경우 구소련 독립국가 및 개발도상국에서는 방사성물질에 대한 규제가 약하여 사용하지 않는 방사선 발생 장치 및 방사성 동위원소 열 발전 방사기 (RTSs) 등이 적절한 절차로 폐기되지 않고 방치되어 있어 테러범에 의해 손쉽게 탈취 당할 수 있다. 이에 따라 방사성 물질을 사용 및 보관하고 있는 의료기관, 산업체, 연구소 등에서 방사성물질에 대한 보안을 철저하게 하는 방안을 마련하여 도난 및 분실로 인한 방사능 테러가 일어나지 않게 사전 예방할 필요가 있다.

다양한 시나리오에 대한 영향 평가를 실시하여, 시나리오에 대한 신뢰성, 효율성을 높인다면 방사능테러 발생 시 초동 대응에 사용할 수 있을 것으로 예상된다.

#### Reference

- [1] D. H. Kim, K. H. Ahn, "Counter-terrorism Safety Measures in Public Facilities," Korea Security Science Association, Vol. 22, No. 37, pp. 37-64, 2010.
- [2] J. H. Park, "A Study on Scenarios of Domestic Nuclear-terror Attacks and the Responses," Crisisonomy, Vol. 8, No.3, pp 163-186, 2012.
- [3] National Intelligence Service, [http://www.nis.go.kr/AF/1\\_6\\_2\\_4/list.do](http://www.nis.go.kr/AF/1_6_2_4/list.do)
- [4] Korea Institute of Nuclear Safety, "A Study on the Development of Technical Infrastructure for

- Preventing and Responding to Radiological Terror," KINS/GR-369, 2007.
- [5] H. D Jang, "Institutional Development of Anti-Terrorism Policy in Korea," Gachon University, 2013.
- [6] D. Di Giovanni, E. Luttazzi, F. Marchi, G. Latini, M. Carestia, A. Malizia, M. Gelfusa, R. Fiorito, F. D'amico, O. Cenciarelli, A. Gucciardino, C. Bellecci, P. Gaudio, "Scenarios for the intentional release of Cs-137 from stacks of cement production factory: event analysis using the HotSpot code," WSEAS TRANSACTIONS on ENVIRONMENT and DEVELOPMENT, pp. 106-122, 2014.
- [7] S. G Homann, F Aluzzi, "HotSpot Health Physics Code Version 3.0 User's Guide," Lawrence Livermore National Laboratory, 2014.
- [8] I. Cacciotti, P. Aspetti, O. Cenciarelli, M. Carestia, D. Di Giovanni, A. Malizia, et al. "Simulation of caesium-137 (137Cs) local diffusion as a consequence of the Chernobyl accident using hotspot," DEFENCE S & T TECHNICAL BULLETIN, Vol. 7, No. 1, pp. 18-26, 2014.
- [9] Korean Association for Radiation Application, "Survey on the Status of Radiation/RI Utilization in 2015," Ministry of Science, ICT and Future Planning, 2016.
- [10] H. S. Yoo, S. W. Kwak, S. S. Jang, J. H. Lee, "A Study on the Risk of Urban Radioactivity Terror," The Magazine of the Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 9, No. 3, pp. 41-45, 2009.
- [11] Statistics Korea,  
[http://kosis.kr/statisticsList/statisticsListIndex.do?menuId=M\\_01\\_01&vwcd=MT\\_ZTITLE&parmTabId=M\\_01\\_01](http://kosis.kr/statisticsList/statisticsListIndex.do?menuId=M_01_01&vwcd=MT_ZTITLE&parmTabId=M_01_01)
- [12] J. Y. Song, "Analysis on Terror Risk of Buildings in Korea by Rapid Visual Screening:Focused on Risk Evaluation for Explosion," Seoul National University of Science and Technology, 2012.
- [13] National Institute of Chemical Safety, "Technical Guidelines for Selection of Accident Scenario," 2014.
- [14] J. K. Lee, "Principles of Radiation Protection," Korean Association for Radiation Application, Vol. 2, No. 2, pp. 788-780, 2016.
- [15] D. Di Giovanni, E. Luttazzi, F. Marchi, G. Latini, M. Carestia, A. Malizia, M. Gelfusa, R. Fiorito, F. D'amico, O. Cenciarelli, A. Gucciardino, C. Bellecci, P. Gaudio, "Two Realistic Scenarios of Intentional Release of Radionuclides (Cs-137, Sr-90) - The Use of the HotSpot Code to Forecast Contamination Extent," WSEAS TRANSACTIONS on ENVIRONMENT and DEVELOPMENT, Vol. 10, pp. 123-126, 2014.

## 기상조건에 따른 방사능테러 시나리오 영향 분석

김태우,<sup>1</sup> 전여령,<sup>1</sup> 장선영,<sup>2</sup> 김용민<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>대구가톨릭대학교 방사선학과

<sup>2</sup>한국원자력통제기술원 정책연구센터

### 요 약

미국 9.11 사고 이후 테러는 과거에 비하여 다중이용시설 공격을 통한 불특정 다수의 공격이 증가하고 있다. 연이은 런던 폭탄테러, 파키스탄의 자폭 등은 사람들의 공포심 및 사회적 불안감을 증가시켰다. 최근 국내에서 다양한 국제행사가 개최되고 있어, 방사능테러 위협에 대비한 방사성물질의 국가 안보 의식이 증대되고 있다. 본 논문에서는 HotSpot Code를 사용하여 서로 상이한 기상조건에 따른 결과를 비교하였다. 국내에서 발생 가능한 테러 시나리오 작성 후, RDD(Radiological Dispersal Device) 및 더티밤에 사용될 가능성이 높은 선원을 조사하였다. 기상조건은 Pasquill-Gifford 안정도 등급에 따라 가장 안정된 조건의 F, 가장 불안정한 조건의 A를 선택하여 비교하였다. 시뮬레이션을 통한 A, F 등급 결괏값은 방사선학적 영향에 의해 시민들이 급성 영향으로 사망하는 경우는 없다고 판단하였다. 또한, 풍속 및 기상 안정도에 따라 방사능의 도달 정도가 서로 다르며, 기상 조건에 따라 방사능 희석정도가 서로 다름을 확인할 수 있다. 분석결과는 방사능테러 발생 시 초동 대응에 활용할 수 있을 것으로 예상된다.

중심단어: 방사능테러, HotSpot Code, 더티밤, TEDE, 기상 안정도

### 연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	김태우	대구가톨릭대학교 방사선학과	대학원생
(공동)	전여령	대구가톨릭대학교 방사선학과	대학원생
	장선영	한국원자력통제기술원 정책연구센터	연구원
(교신)	김용민	대구가톨릭대학교 방사선학과	교수