

An Intercomparison of Model Predictions for an Urban Contamination Resulting from the Explosion of a Radiological Dispersal Device

도심에서 방사능분산장치의 폭발로 인한 피폭선량 예측결과의 상호비교

Won Tae Hwang¹⁾, Hyo Jun Jeong, Eun Han Kim and Moon Hee Han
Korea Atomic Energy Research Institute, 1045 Daedeokdaero, Yuseong-gu, Daejeon

황원태¹⁾, 정효준, 김은한, 한문희
한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045

(Received July 14, 2008 / Revised July 24, 2008 / Approved September 02, 2008)

Abstract

The METRO-K is a model for a radiological dose assessment due to a radioactive contamination in the Korean urban environment. The model has been taken part in the Urban Remediation Working Group within the IAEA's (International Atomic Energy Agency) EMRAS (Environmental Modeling for Radiation Safety) program. The Working Group designed for the intercomparison of radioactive contamination to be resulted from the explosion of a radiological dispersal device in a hypothetical city. This paper dealt intensively with a part among a lot of predictive results which had been performed in the EMRAS program. The predictive results of three different models (METRO-K, RESRAD-RDD, CPHR) were submitted to the Working Group. The gap of predictive results was due to the difference of mathematical modeling approaches, parameter values, understanding of assessors. Even if final results (for example, dose rates from contaminated surfaces which might affect to a receptor) are similar, the understanding on the contribution of contaminated surfaces showed a great difference. Judging from the authors, it is due to the lack of understanding and information on radioactive terrors as well as the social and cultural gaps which assessors have been experienced. Therefore, it can be known that the experience of assessors and their subjective judgements might be important factors to get reliable results. If the acquisition of a little additional information is possible, it was identified that the METRO-K might be a useful tool for decision support against contamination resulting from radioactive terrors by improving the existing model.

Key words : EMRAS program, METRO-K, Radiological dispersal device, Hypothetical city.

요약

국제원자력기구 (IAEA)가 주관하는 EMRAS (Environmental Modeling for Radiation Safety) 프로그램의 도시오염 평가분과에서 설계한 가상의 도심에서 방사능 분산장치의 폭발로 인한 피폭선량 결과비교에

1) Corresponding Author. E-mail : wthwang@kaeri.re.kr

국내모델 METRO-K의 계산결과가 참여하였다. 본 논문에서는 동 분과에서 수행된 수많은 계산결과 중에서 극히 일부분만을 집중적으로 논의하였다. 참가모델 (METRO-K, RESRAD-RDD, CPHR)이 수행한 예측 결과의 차이는 다른 수학적 접근방식, 적용값, 평가자의 이해 등에 기인하였다. 비록 최종결과 (예로 영향을 주는 모든 오염표면으로부터 받게 되는 피폭선량률)는 유사할지 모르지만 오염표면 기여에 대한 이해 등에 있어서는 큰 차이를 나타냈다. 이는 평가자가 경험한 사회적, 문화적 차이 뿐 아니라 방사능테러에 대한 정보와 이해 부족으로 판단된다. 따라서 이러한 정보가 부족한 상황에서는 평가자의 경험과 주관적 판단이 무엇보다 중요하다는 사실을 알 수 있었다. 방사능테러에 대한 약간의 추가적 정보를 획득할 수 있다면 METRO-K는 기존 모델을 확장하여 만일의 경우 도심에서 발생할 수 있을지 모르는 방사능테러에 따른 대응행위 결정지원에 충분히 활용할 수 있음을 EMRAS 프로그램을 통해 확인할 수 있었다.

중심단어 : EMRAS 프로그램, METRO-K, 방사능분산장치, 가상도시

I. 서론

원자력시설은 대부분 상대적으로 산업시설이 낙후되어 있고 인구밀도가 낮은 지역에 위치해 있으며 만일의 방사성물질의 환경 누설시 그 피해 영향은 이들 지역에 국한될 것이라고 생각했기 때문에 그동안 환경에서 핵종거동에 대한 연구방향은 토양과 농경지 등에 주안점을 두었다. 그러나 1986년 체르노빌 원전사고와 그 이듬해 브라질 고이아니아(Goiania)시에서 일어난 ¹³⁷Cs 방사선원 분실사고는 인공 구조물 또는 인공 표면으로 구성된 도시환경에 대한 핵종 거동연구의 필요성과 중요성을 인식하게 되는 계기가 되었다. 도시환경에서 핵종에 대한 거동연구는 국제원자력기구 (IAEA)가 1988년부터 약 6년간에 걸쳐 국제공동연구프로그램 VAMP (Validation of Environmental Model Prediction)[1]를 주관하여 여러 국가에서 수행된 이에 대한 이론적, 경험적, 실험적 지식을 집대성하였다. 또한 최근에 도시환경에 대한 핵종 거동의 보다 나은 이해를 얻고자 IAEA에서는 2003년부터 약 5년에 걸쳐 EMRAS (Environmental Modelling for Radiation Safety) 프로그램[2]을 운영하였다.

EMRAS 프로그램의 주요 목적은 1) 환경에서 핵종거동에 대한 모델 예측값 간의 비교 또는 측정값이 유용한 경우에는 측정값과 예측값 간의 비교를 통해 모델 예측결과에 대한 신뢰성을 향상시키며, 2) 그 결과로부터 향후 연구에 대한 우선 순위를 파악하고, 3) 각 국의 실험, 정보등에 대한 의견 교환의 기회를 제공하는데 있다. 이를 위해 각기 다른 7가지 현안에 대해 분과 (Working Group)을 조직하였으며, 그 중에서 도시환경 방사능 오염평가 분과 (Urban Remediation Working Group ; 이하 도시오염 평가분과라 한다)는 방사성물질로 오염된 도시환경에서 인체에 대한 피폭을 평가하고 모델 결과간에 비교, 논의함으로써 현재까지 얻어진 과학적 지식에 대한 상호 조화를 이루고

자 하는데 그 목적이 있다.

국내 환경특성을 고려하여 개발된 도시환경 방사능오염 평가모델 METRO-K (Model for Estimates the Transient Behavior of Radioactive Materials in the Korean Urban Environment)[3]는 도시오염 평가분과에서 평가모델로 선정되어 체르노빌 원전사고와 같은 광범위한 지역 (widespread contamination)의 오염 시나리오에 대한 평가를 수행하였다. 또한 동 분과에서는 2001년 9월 11일 미국의 도심에서 발생한 테러 (이하 911 테러라 한다)를 계기로 테러분자가 재래식 폭약에 탈취한 방사성물질을 포함시켜 인명살상 뿐 아니라 사회적 혼란 등을 야기시키는 광범위한 지역의 오염 시나리오와 대비되는 좁은 지역의 오염 (localized contamination) 시나리오도 포함시켰다.

METRO-K는 당초 체르노빌 원전사고와 같이 광범위한 지역의 오염평가를 목적으로 개발하였으나 여러 가정을 사용하여 좁은 지역의 오염 시나리오에도 평가결과를 제출하여 다른 참가모델의 예측결과와 비교, 논의되었다. 본 논문은 EMRAS 프로그램의 도시오염 평가분과에서 수행된 가상의 도심에서 방사능분산장치 (Radiological Dispersal Devices ; RDDs)의 폭발로 인한 참가 모델의 예측 결과를 비교하였으며, 이를 통해 METRO-K의 방사능테러에 대한 적용의 유용성을 확인하고 향후 개선방향을 모색하는데 그 목적이 있다.

II. 재료 및 방법

가. METRO-K의 개요

원자력시설로부터 환경으로 누설된 방사성물질은 확산과 중력 뿐 아니라 강우에 의해 침적된다. 전자에 의한 침적을 건침적 (dry deposition), 후자에 의한 침적을 습침적 (wet deposition)이라 한다. 건침적된 방사성물질 중에서 일정

부분은 표면의 습기 등에 의해 고착되는데, 고착된 핵종은 바람이나 강우 등과 같은 외부의 환경적 요소에 의해 쉽게 제거되지 않는다. 반면 나머지 일정 부분은 핵종과 표면 간에 고착정도가 약해 상대적으로 환경적 요소에 의해 쉽게 제거된다. 전자를 고착성 분율 (fixed fraction), 후자를 이동성 분율 (mobile fraction)이라 한다. 습침적된 핵종은 대부분 고착성이 되며, 표면에 따라 일정 강우량 이상에서는 run-off가 일어난다. Run-off가 일어나는 최소 강우량을 임계량이라 하며 이는 표면의 종류와 상태 등에 따라 다르다. 임계량을 초과한 강우는 모두 run-off 되지만 run-off water에 포함된 일정 부분의 방사성물질은 표면에 잔류하게 된다. 건침적된 이동성 핵종은 시간이 경과함에 따라 습기 등으로 인해 계속해서 일정부분은 고착성 핵종이 되며, 만일 도중에 강우가 있다면 모두 고착성이 되고 임계량 이상에서는 run-off가 되어 일정 부분은 표면에서 제거된다. 방사성물질의 환경누설은 체르노빌 원전사고에서 보았듯이 수십일동안 지속될 수 있는데 METRO-K에서는 하루 단위로 공기중 평균농도 (Bq m⁻³)와 강우량 (mm) 자료를 사용하여 단계적으로 각기 다른 표면에서의 총 침적량을 계산한다. 핵종의 침적이 진행되는 동안에는 이전 시간에 침적된 핵종에 대해 방사능 붕괴와 run-off를 고려하여 표면농도를 보정하며 기타 다른 환경적 요소에 의한 제거는 고려치 않는다. 침적이 완료된 시점에서 각기 다른 표면에 대한 총 침적량이 계산되면 공기 커마(kerma)에 대한 데이터 라이브러리를 사용하여 피폭자의 거주 위치에 따른 피폭선량 (이하 피폭선량이라 함은 성인에 대한 유효선량을 의미한다)을 평가한다. 그림 1은 METRO-K의 피폭선량평가 흐름도를 보여준다.

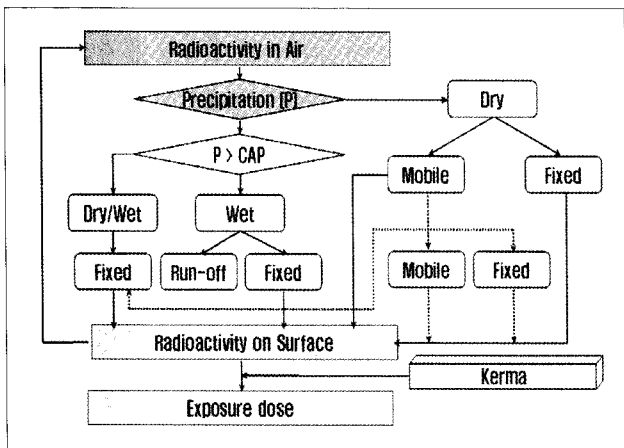


Fig. 1. Schematic diagram for radiological dose assessment of the METRO-K; CAP represents the minium precipitation amount which occurs run-off, and it is an abbreviation of the critical amount of precipitation.

나. 특정위치에 대한 피폭선량평가

도시환경을 구성하는 인공 구조물의 방사선에 대한 차폐 영향으로 피폭자의 거주 위치에 따라 피폭선량은 큰 차이를 나타낼 수 있다. 또한 피폭자가 위치한 위치를 중심으로 주변환경 (피폭자의 정면에 넓은 공원 또는 다른 여러 건물로 구성)에 따라 피폭선량은 차이를 나타낼 수 있다. 특정 위치에서 피폭선량은 그림 2와 같이 각기 다른 오염표면으로부터 받게되는 영향의 합으로 나타낼 수 있으며 이를 수학 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$H_i(t) = 8.64 \times 10^{-14} DCF_i \sum_k y_k \left[\sum_j \omega_j C_j(t) K_{ijk} \right] \dots\dots\dots (1)$$

여기서,

i : 피폭자 위치

j : 오염 표면

k : 에너지

H_i(t) : 시간 *t*에서 피폭 선량을 (Sv d⁻¹; d는 day를 나타냄)

DCF_i : *r*-선 선량환산인자 (Sv Gy⁻¹)

ω_j : 오염 표면의 거칠기에 따른 선량감쇄인자

y_k : *r*-선 생성율 (*r* sec⁻¹ Bq⁻¹)

C_j : 시간 에서 표면농도 (Bq m⁻²)

K_{ijk} : kerma (pGy per mm⁻²)

다. 공기커마의 적용

도시환경은 피폭자가 위치한 장소마다 주변 환경의 공간적 구조물의 복잡성과 다양성 등으로 피폭선량 예측을 수학적으로 모델링하기란 여간 어려운 일이 아니다. 특정 주변 환경에 대해 상세 모델링을 하였더라도 주변의 공간적 구조물의 배치 등이 바뀌게 되면 전체적으로 모델링을 새롭게 하여야 하며, 또한 point kernel 방법이 아닌 Monte-

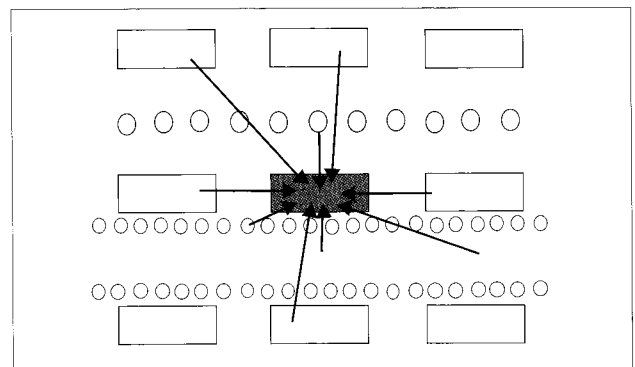


Fig. 2. Conceptual diagram to calculate the radiological dose at the specified location of a receptor

Carlo 방법을 사용할 경우 상당한 계산시간의 소요 등으로 활용의 유연성이 떨어지게 된다. 따라서 METRO-K에서는 도시환경을 구성하는 5가지 기본 표면(지붕, 포장도로, 외벽, 잔디/토양, 나무)을 조합하여 피폭자가 위치한 주변 환경을 구성하는 방법을 사용하였다. 주변 환경을 구성하는 각기 다른 오염표면으로부터 받게 되는 피폭선량을 개별적으로 평가하고 주변의 여러 오염표면으로부터 받게 되는 피폭선량을 합하여 최종적으로 피폭자의 위치에 따른 피폭선량을 얻을 수 있다. 이러한 방법의 장점은 주변의 복잡하고 다양한 공간적 구조를 쉽게 구성할 수 있으며 오염표면마다 각기 다른 제어대책을 수립하는데 용이하다.

피폭자의 위치에서 각기 다른 오염표면으로부터 받게 되는 피폭선량은 피폭자의 특정 위치에 대해 에너지별, 오염표면별 공기 커마를 데이터 라이브러리화하여 이용하였다. Meckbach 등은 Monte Carlo 방법을 사용하여 유럽 도시 지역의 4가지 대표적 거주형태(조립식 단층주택, 2층의 기와 콘크리트 주택, 2층의 다세대 연립주택, 5층의 대형건물)에 대해 공기 커마를 제시하고 있다[4]. 이 결과는 PARATII[5]와 CHERURB-95[6]에 활용되고 있으며, EXPURT[7]에서도 향후 모델 개선시 이들 결과를 활용할 예정에 있을 만큼 폭넓게 이용되고 있다. METRO-K에서는 우리나라 도시 거주민의 7가지 대표적 거주형태(단층 전원주택, 단층 콘크리트 슬라브 주택, 2층 콘크리트 슬라브 주택, 2층 기와주택, 3층 기와 다세대주택, 5층 대형 공공건물, 고층 아파트)에 적합하도록 Meckbach 등이 계산한 공기 커마를 조합하여 적용하였다. 조합하는 방법으로는 그림 3과 같이 고층 아파트(10층으로 가정)인 경우 지붕의 오염으로 인한 최상층 실내의 공기 커마는 유럽 5층 대형건물의 지붕 오염으로 인한 5층 실내의 공기 커마를, 아파트 중간층(5층으로 가정) 실내에 대한 공기 커마는 유럽 대형건물에 대한 1층 실내의 공기 커마를 적용하였다. 또한 아파트 주변

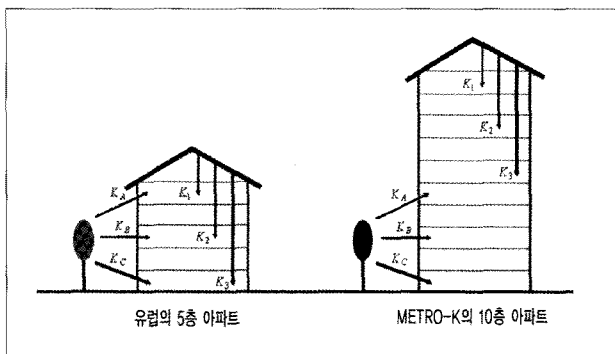


Fig. 3. Schematic diagram for the application Meckbach's air kerma to the METRO-K

나무의 오염으로 인한 저층과 중간층 실내에서 공기 커마는 유럽 대형건물 1층과 5층 실내에서 나무의 오염으로 인한 공기 커마를 적용하였다. 아파트의 고층 실내에 대한 공기 커마는 유럽 대형건물의 5층 실내에서 나무의 오염으로 인한 공기 커마와 지붕과 같은 다른 오염표면으로 인한 공기 커마와 비교하여 무시 가능한 수준일 것으로 판단된다.

라. 가상 방사능테러 시나리오

EMRAS 프로그램의 도시오염 평가분과에서는 가상의 도심에서 방사능분산장치의 폭발로 인한 모델간 피폭선량 예측결과와 비교를 위한 시나리오를 설계하였다. 동 시나리오에는 아무런 대응행위를 수행하지 않았을 경우 방사능 테러가 발생한 인근 지역 건물의 외부와 내부에서 피폭선량을, 생활 또는 업무 종사로 인한 연간 피폭선량을 상호 비교하기 위한 기회를 제공한다. 또한 피폭선량의 저감화를 위해 다양한 대응행위를 수행하였을 경우 피폭영향의 변화를 상호 비교하였다. 그림 4는 동 시나리오에 사용된 가상 도시를 보여 주며, 방사능 테러는 그림의 한 가운데인 공원의 분수대에서 발생되었다고 가정하였다. 그림에 나타낸 바와 같이 방사능 테러가 발생한 주변은 대형 상업용 건물, 거주용 건물, 고속도로, 간선도로, 주차장, 공원, 나무 등으로 구성되어 있다. 테러에 사용된 방사능분산장치는 5 kg의 재래식 폭약에 분말형태 ¹³⁷Cs이 50 TBq (브라질 고이아니아에서 발생한 분실 선원의 방사능과 동일하다고 가정)이 함유되어 있다고 가정하였다. 방사능분산장치는 임의의 년도 7월 1일에 지표부근에서 폭발하였다고 가정하였다. 이 당시 기상상태는 맑았으며, 5 m/sec의 서풍이 주 풍향이었다. 도시오염 평가분과에서 평가자에게 주어진 기본 정보로는 방사능 테러 발생 당시의 기상상태, 높이에 따른

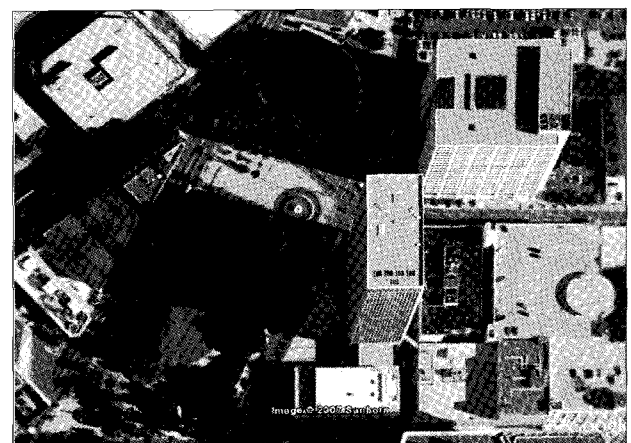


Fig. 4. Map of a hypothetical city used for the explosive scenario of a radiological dispersal device

공기중 농도, 기준 표면 (reference surface)의 농도 등이다. 기준 표면이라 함은 일반적으로 토양 또는 잔디를 나타낸다.

마. 공기중 농도와 기준표면의 농도

방사능 분산장치의 지면에서 폭발 후 분말형태의 ¹³⁷Cs이 공기중으로 확산되는 비율은 30%, 그중에서 인체로 흡입이 가능한 비율은 50%로 가정하였다. 기준표면으로 ¹³⁷Cs의 침적속도는 흡입이 가능한 비율에 대해서는 3×10^{-3} m/sec, 흡입이 불가능한 비율에 대해서는 8×10^{-2} m/sec를 적용하였다. 이러한 가정에 근거하여 지표로부터 높이에 따른 공기중 농도와 기준표면의 농도는 미국 로렌스 리버모어 국립연구소 (LLNL)에서 개발한 HOTSPOT 프로그램을 사용하여 예측하였다. 동 프로그램은 폭발에 따른 입자의 거동 특성을 실험식과 경험식으로부터 모사하고 있으며, 이후 공기중 이동 및 확산특성은 직선궤적 Gaussian 플룸모델을 사용하여 평가한다. 그림 5는 HOTSPOT으로 모사한 폭발 지점에서 풍하거리에 따른 기준 표면의 농도, 그림 6은 공원의 분수대에서 가장 가까운 60층 상업용 건물 (이하 건물 #1이라 한다)이 위치한 지점에서 높이에 따른 공기중 농도를 보여준다. 건물 #1의 높이는 265 m이며, 지면에서 100 m까지 높이에 따른 공기중 농도는 큰 차이를 보이지 않으나 그 이상의 높이에서는 급격히 감소하여 지면과 최상층 높이에서의 농도는 약 20,000배의 차이를 보였다.

바. 대응행위

EMRAS 프로그램의 도시오염 평가분과에서는 방사능 테러 후 피폭선량을 줄이기 위한 10가지의 대응행위와 그들

의 적용시점을 평가자에게 제공하고(표 1) 이들 대응행위의 적용에 따른 피폭영향을 평가하도록 요구하였다. 현재까지 METRO-K는 건물의 외부표면 오염에 따른 영향만을 평가하며 건물의 내부오염에 따른 영향은 고려치 않고 있다. 따라서 동 분과로부터 주어진 실내의 진공청소와 실내의 표면세척을 제외한 8가지 대응행위에 대해 피폭선량 평가를 수행하였다.

대응행위에 따른 선량의 저감은 다음과 같이 정의된 선량을 저감인자 (DRRF)에 의해 모사될 수 있다.

$$DRRF = \frac{DR_{before}}{DR_{after}} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 DR_{before} (mSv/hr 또는 mGy/hr)와 DR_{after}는 각각 대응행위를 수행하기 전과 후의 선량률을 나타낸다. 어떤 대응행위에 대해 DRRF=2는 50%, DRRF=10은 90%의 선량을 감소를 의미하며, 결과적으로 DRRF 값이 높을수록 선량

Table 1. Remediation actions applied following the explosion of a radiological dispersal device and their dose rate reduction factors

대응행위	적용시점	선량율저감인자
풀 또는 잡초제거	폭발후 7일	5
포장도로 세척	폭발후 14일 (강우없음)	5
지붕과 외벽의 세척	폭발후 14일 (강우없음)	5 (지붕) 7 (외벽)
나무와 잎 제거	폭발후 30일	20
5 cm까지 토양의 표면제거	폭발후 180일	20
이주	폭발 직후부터 2주	-
이주	폭발 직후부터 6주	-
이주	폭발 직후부터 6개월	-
실내진공청소	-	-
실내표면세척	-	-

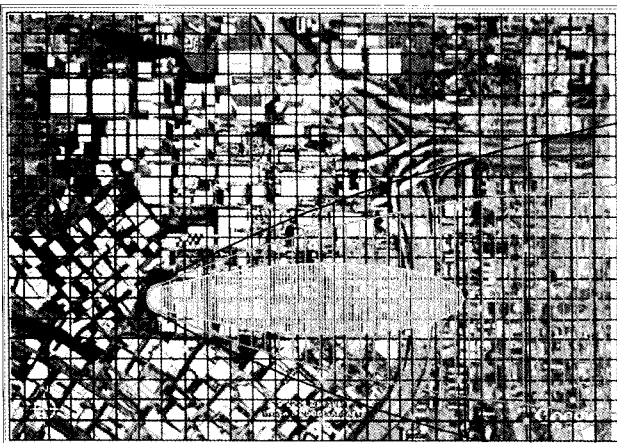


Fig. 5. ¹³⁷Cs contamination on the reference surface for the hypothetical scenario. The inner area corresponds to deposition of at least 1000 kBq/m²; The middle area corresponds to deposition between 100 and 1000 kBq/m². The outer area corresponds to deposition between 10 and 100 kBq/m².

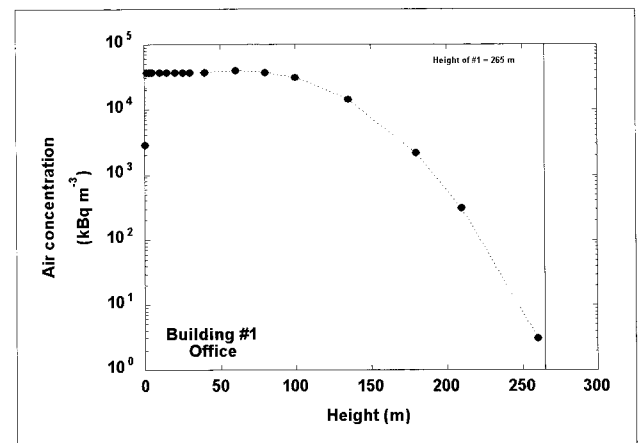


Fig. 6. Air concentration of ¹³⁷Cs with height at Building #1 of the hypothetical scenario; Building #1 is a sixty story building and for bussiness. It is the nearest location from the foundation of the park where the explosion of a radiological dispersal device has happened.

의 저감 측면에서 보다 유용한 대응행위라 할 수 있다. 본 평가에서는 문헌 [8]를 통해 DRRF값을 선택하였다.

III. 결과 및 고찰

EMRAS 프로그램의 도시오염 평가분과에서 설계한 가상의 도심에서 방사능분산장치의 폭발로 인한 피폭선량평가에는 3 가지 모델 (우리나라의 METRO-K, 미국의 RESRAD-RDD, 체코의 CPHR)이 계산에 참여하여 비교 논의되었다. 이들 모델은 당초 각기 다른 목적으로 개발되었기 때문에 수학적 접근 방식 (METRO-K와 RESRAD-RDD는 경험식에 근거한 구간모델 (compartment model)이며 구간간 핵종이동은 고려하지 않음, CPHR은 미분방정식에 근거한 구간모델이며 구간간 핵종이동을 고려함)과 적용 값 등은 상이할지 모른다. 또한 도시오염 평가분과에서는 각기 모델에 필요한 모든 정보를 제공하지 않기 때문에 많은 부분은 평가자의 주관적 판단에 의존한다. 따라서 예측 결과는 평가자간의 다른 이해 또는 해석 등으로 차이를 나타낼 수 있으며 긍정적인 측면에서는 결과의 다양한 해석이 가능하다는 것을 의미한다.

도시오염 평가분과에서는 방사능테러가 발생한 주변의 6가지 건물의 외부에서 피폭선량, 각기 다른 건물내 거주 위치에 따른 피폭선량, 각기 다른 대응행위에 따른 피폭선량 저감효과 등 수 많은 계산을 요청하였다. 이러한 상세 계산 결과는 2008년 하반기에 발간될 IAEA 기술보고서에 수록될 예정이며, 본 논문에서는 방사능 테러가 발생한 가장 인접한 건물 #1에 대한 일부 결과만을 다루었다.

주어진 시나리오에 대한 모사를 위해 건물 #1의 주변환경과 가장 유사한 환경을 METRO-K에서 선택하였다. 그림 7의 왼쪽은 전산모사를 위한 방사능테러가 발생한 가상 도시의 개략도를 보여 주며, 오른쪽은 METRO-K에서 가상 도시를 가장 잘 모사할 수 있는 환경 (아파트가 밀집하며 도로 건너편에 넓은 공원이 있음)을 보여준다. 모사하고자 하는 건물 구조물의 재료, 두께 등에 있어서 차이가 있지만 앞서 언급한 공

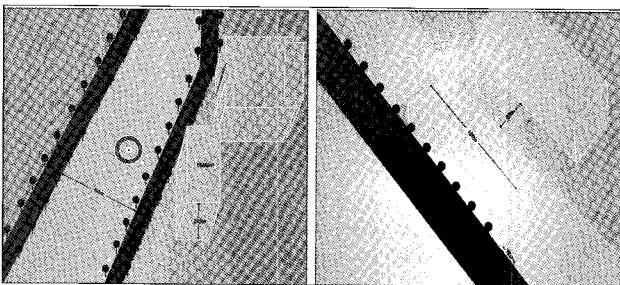


Fig. 7. Simplified diagrams for the hypothetical city where the explosion of a radiological dispersal device has happened (left-hand side) and for an apartment town in METRO-K (right-hand side)

기 커마의 적용과 유사하게 가상 도시에서 건물 #1의 오염된 지붕으로부터 최상층 (60층)에 대한 공기 커마는 METRO-K에서 오염된 지붕으로부터 아파트 최상층 (10층)에 대한 공기 커마와 같다고 가정하였다. 건물 #1의 지붕은 편평한 콘크리트이며, 핵종의 침적 및 거동은 포장도로와 같다고 가정하였다. 피폭자에 대한 공기 커마는 오염표면의 면적에 비례하고 오염표면과 피폭자 간 거리의 제곱에 반비례한다고 가정하였다.

그림 8은 각기 다른 모델을 사용하여 방사능 테러 후 건물 #1의 외부에서 시간에 따른 ¹³⁷Cs의 농도와 방사능테러 발생 직후 동일한 초기 농도로 정규화한 결과를 보여준다. 방사능 테러 직후 RESRAD-RDD와 CPHR은 유사한 농도를 나타낸 반면 METRO-K는 이들 결과보다 낮은 농도를 보여준다. 그 이유는 RESRAD-RDD와 CPHR은 건물 외부의 표면 농도는 HOTSPOT으로 계산된 기준표면 (토양 또는 잔디)과 동일하다고 가정한 반면 METRO-K는 포장된 표면으로 가정하였기 때문이다. 아스팔트 또는 콘크리트와 같이 포장된 표면으로의 침적량은 토양표면으로의 침적량에 비해 적고 침적 후 시간에 따라 농도의 감소는 상대적으로 빠르다는 것을 알 수 있다. CPHR의 결과는 다른 모델의 결과와 달리 침적 후 농도가 증가하는 현상을 보이는데 환경구성요소를 나타내는 구간간 핵종이동을 고려함에 따른 영향인 것으로 판단된다.

그림 9는 방사능 테러가 발생한 후 건물 #1의 외부에서 시간에 따른 피폭선량률에 대한 오염 표면의 기여를 나타냈다. 방사능 테러 직후 METRO-K의 경우 토양 또는 잔디, 가로수, 포장도로의 순으로 오염 표면에 대한 피폭선량률의 기여가 높았다. 오염 나무의 영향을 고려치 않는 RESRAD-RDD는 토양 또는 잔디, 포장도로 순으로 높은 반면 CPHR은 포장도로, 외벽의 순으로 피폭선량률에 대한 기여가 높았다. METRO-K 결과에서는 방사능 테러가 발생한 직후에서는 가로수의 영향이 높지만 상대적으로 짧은 환경요소에 의한 제거반감기로

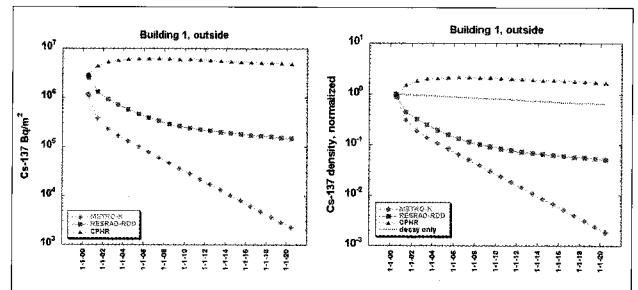


Fig. 8. ¹³⁷Cs concentrations with time following the explosion of a radiological dispersal device at outdoor of Building #1 (left-hand side), and results normalized with the same initial concentration (right-hand side) ; The horizontal lines of the figures represent time following an event. For example, 1-1-02 means the same day of the second year following an event.

급격히 그 영향은 줄어들며, 대신 외벽이 한 중요한 오염표면이 됨을 알 수 있다.

그림 10은 건물 #1의 1층 실내에서 모델간 예측된 피폭선량률과 동일한 초기 선량율로 정규화한 결과를 보여준다. METRO-K와 RESRAD-RDD는 전 기간에 걸쳐 3배 범위내에서 유사한 결과를 나타낸 반면 CPHR은 상당한 차이를 나타냈다. 또한 피폭선량률의 감소 기울기도 CPHR은 다른 모델에 비해 매우 완만하였다. 이러한 차이는 수학적 접근방식과 적용값 이외에도 피폭선량률에 기여하는 오염 표면의 이해 등에 대한 차이에 기인하였다.

그림 11은 방사능 테러가 발생한 후 건물 #1의 1층 실내에서 피폭선량률에 대한 오염 표면의 기여를 나타냈다. METRO-K의 결과는 방사능 테러가 발생한 직후에는 건물 #1의 외부에서 피폭선량률에 대한 기여와 마찬가지로 토양 또는 잔디, 가로수, 포장도로의 순으로 높았다. 반면 RESRAD-RDD는 오염 토양의 실내유입에 따른 바닥의 오염과 공기의 실내 유입에 따른 내벽의 오염으로 인한 영향이 상당한 부분을 차지하였다. CPHR은 외벽과 포장도로의 오염영향이 지배적이었다. 이와 같이 실내 거주에 따른 피폭선량 평가에서 고

려하는 오염원은 모델간에 큰 차이를 나타냄을 알 수 있다. 이는 평가자의 생활, 문화적 이해 등의 차이로 판단된다. 피폭선량률에 대한 METRO-K의 결과는 RESRAD-RDD의 결과와 큰 차이는 없지만 피폭 오염원에 대한 평가자의 이해는 큰 차이를 나타냄을 알 수 있다.

그림 12는 건물 #1의 최상층인 60층 실내에서 모델간 예측된 피폭선량률과 동일한 초기 피폭선량률로 정규화한 결과를 보여준다. 모델간 예측결과는 큰 차이를 보여주며, 특히 METRO-K의 결과는 다른 모델의 결과에 비해 극히 낮은 피폭선량률을 나타냈다. 방사능 테러 후 5년 이내에서 피폭선량률의 감소는 METRO-K 결과가, 이후에는 CPHR 결과가 가장 완만하게 나타났다. 마찬가지로 이러한 피폭선량률의 감소 기울기는 기여하는 오염표면에 따라 다르게 나타난다.

그림 13은 방사능 테러가 발생한 후 건물 #1의 최상층 (60층) 실내에서 피폭선량률에 대한 오염 표면의 기여를 나타냈다. 모델간 예측결과는 큰 차이를 보여주는데 METRO-K는 지붕의 오염으로 인한 피폭영향이 지배적인 반면 RESRAD-RDD와 CPHR은 각각 오염 토양의 실내유입에 따른 바닥의 오염, 외벽의 영향이 지배적이었다. METRO-K는 지붕과 외벽

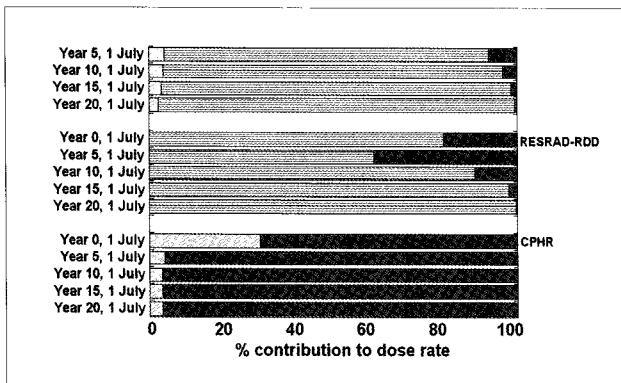


Fig. 9. Contribution of contaminated surfaces for exposure dose rate at outside of Building #1

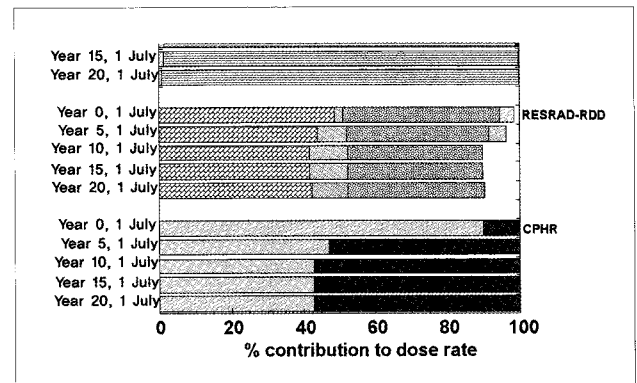


Fig. 11. Contribution of contaminated surfaces for exposure dose rate on the first floor of Building #1

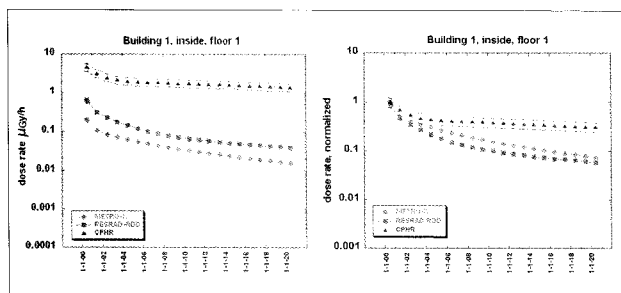


Fig. 10. Exposure dose rate with time following the explosion of a radiological dispersal device on the first floor of Building #1 (left-hand side), and results normalized with the same initial dose rate (right-hand side); The horizontal lines of the figures represent time following an event. For example, 1-1-02 means the same day of the second year following an event.

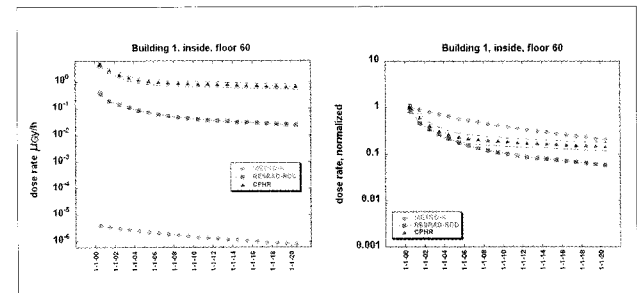


Fig. 12. Exposure dose rate with time following the explosion of a radiological dispersal device on the top floor of Building #1 (left-hand side), and results normalized for the same initial dose rate (right-hand side); The horizontal lines of the figures represent time following an event. For example, 1-1-02 means the same day of the second year following an event.

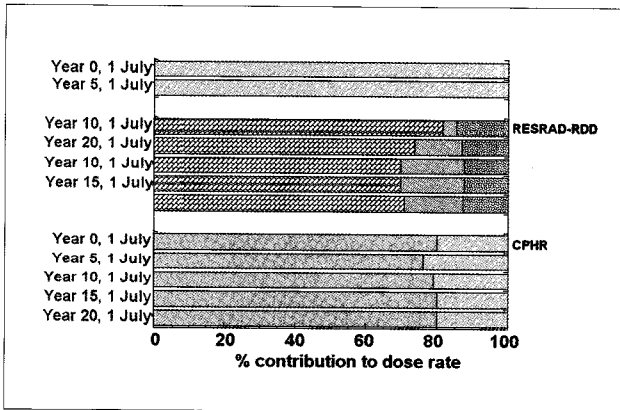


Fig. 13. Contribution of contaminated surfaces for exposure dose rates on the top floor of Building #1

의 오염만을 고려한 반면 RESRAD-RDD는 오염 토양의 실내 유입에 따른 바닥의 오염과 외부 공기의 유입에 따른 내벽의 오염을 피폭의 중요한 기여 표면으로 평가하였다. CPHR은 METRO-K와 마찬가지로 지붕과 외벽의 오염만을 고려하고 있으나 피폭선량률에서는 큰 차이를 나타내고 있다.

그림 14는 방사능테러가 발생한 후 여러 다른 대응행위의 적용에 따라 건물 #1의 1층 실내에 근무 (주당 40시간 근무) 하는 성인의 연간 피폭선량을 보여준다. CPHR이 가장 높게 평가된 반면 METRO-K가 가장 낮게 평가되었다. 3가지 모델의 결과 모두 방사능 테러가 발생한 당해연도에서는 발생 직후부터 오염지역을 완전히 벗어나는 6개월간의 이주가 가장 높은 선량의 감소를 보였다. 그러나 이주는 경제적, 사회적 파급효과가 큰 극단적인 대응행위이며 장기간의 궁극적 대응행위로는 적절하지 못하다. 이주를 제외하고 방사능 테러가 발생한 당해연도에서 가장 효과적인 대응행위로는 METRO-K에서는 풀 또는 잡초의 제거, RESRAD-RDD에서는 도로의 세척, CPHR에서는 외벽의 세척으로 나타났다. 이와 같이 대응행위의 적용에 따른 선량감소 효과는 모델에 따라 큰 차이를 나타내는데 이는 선량에 기여하는 표면과 대응행위 적용에 따른 선량저감효율 등에 대한 평가자의 가정이 다르기 때문이다.

IV. 결론

IAEA가 주관하는 EMRAS 프로그램의 도시오염 평가분과에서 설계한 가상의 도심에서 방사능 분산장치의 폭발로 인한 피폭선량 결과비교에 국내모델 METRO-K의 계산결과가 참여하였다. 동 분과에서 함께 수행된 체르노빌 원전 인근의 Pripjat 지역의 오염 시나리오에 대한 결과보다 방사능테러에 대한 정보와 이에 대한 평가자의 경험 부족 등으로 모델간 예측결과는 상대적으로 차이가 컸다. 따라서 이러한 정보가 부족한 상황에서는 평가자의 경험과 주관적 판단이 무엇보다 중요하다는 사실을 알 수 있었다. IAEA에서는 EMRAS 후속 프로그램을 준비하고 있는데 도심에서 방사능분산장치의 폭발로 인한 대기중 이동 및 확산, 피폭경로, 피폭선량, 대응행위 결정지원 등을 포함하는 확장된 국제 상호비교가 잠정적으로 우선순위 의제로 채택되었다. 이를 통해 방사능테러에 대한 상호 이해 차이의 폭을 좁히고 결과에 대한 조화가 있길 기대해 본다.

감사의 글

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국과

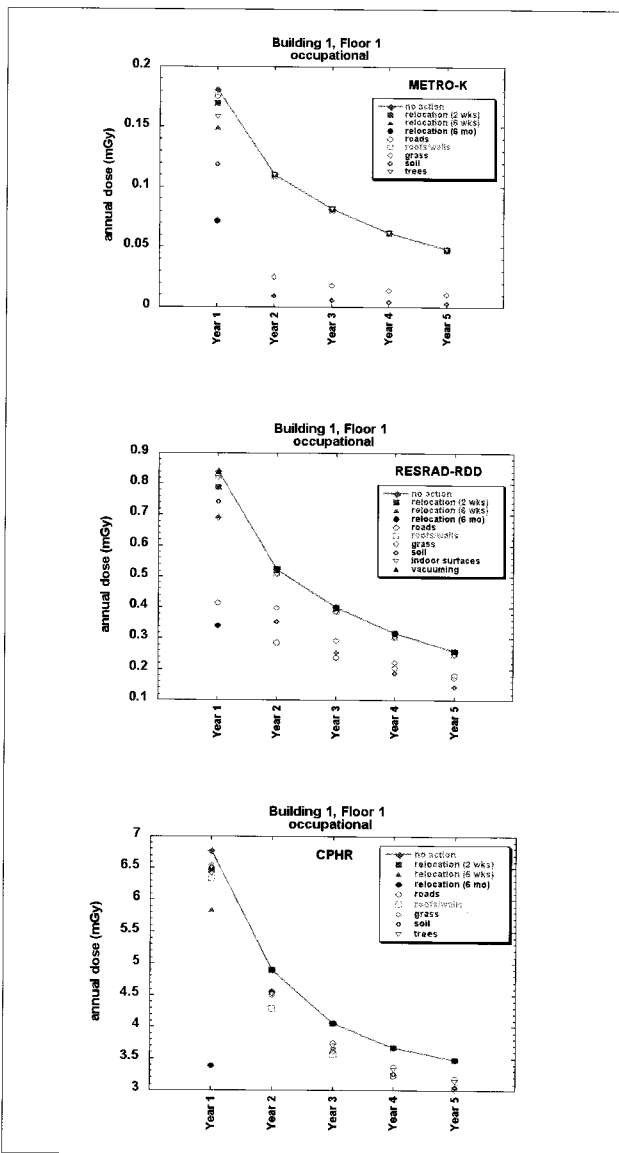


Fig. 14. Change of annual doses with application of various remediation actions

학재단의 원자력기술개발사업으로 지원받았습니다. (연구과
제 관리코드 : M20702010001-08M0201-00110)

참고문헌

- [1] IAEA, "Validation of Environmental Model Predictions (VAMP) : A Programme for Testing and Improving Biospheric Models Using Data from the Chernobyl Fallout", STI/PUB/932 (1993).
- [2] <http://www-ns.iaea.org/projects/emras/>.
- [3] 황원태, 김은한, 정효준, 서경석, 한문희, "도시환경에서 방사성물질의 오염평가 모델개발", 대한방사선방어학회지, 30(3), 99-105 (2005).
- [4] R. Meckbach, P. Jacob, H. G. Paretzke, "Gamma Exposures to Radionuclides Deposited in Urban Environments ; Part I : Kerma Rates from Contaminated Surfaces", Radiation Protection Dosimetry, 21(3), 167-179 (1988).
- [5] E. R. Rochedo, L. F. Conti, H. G. Paretzke, "PARATI - A Dynamic Model for Radiological Assessments in Urban Areas ; Part I : Modelling of Urban Areas Their Contamination and Radiation Fields", Radiat. Environ. Biophys., 35, 243-261 (1996).
- [6] S. R. Peterson, S. Chouhan, B. Heinmiller, J. Koch, "CHERURB-95 : Urban Contamination and Dose Model", A research report prepared for the Atomic Energy Control Board (1995).
- [7] M. J. Crick, J. Brown, "EXPURT : A Model for Evaluating Exposure from Radioactive Material Deposited in the Urban Environment", NRPB report, NRPB-R235 (1990).
- [8] T. Charnock T. K. Adersson, "Source of Information on Urban Recovery Countermeasures for Use in Models", Draft Report for the preparation of IAEA Safety Report Series (2006).