

도시환경에서 방사능오염 표면의 중요도 분석

황원태, 정효준, 김은한, 한문희, 안민호, 김인규

한국원자력연구원 원자력환경안전연구부

2011년 6월 7일 접수 / 2011년 9월 21일 1차 수정 / 2011년 9월 26일 2차 수정 / 2011년 9월 27일 채택

국제원자력기구(IAEA)에서 주관하는 국제비교프로그램 EMRAS-2(Environmental Modelling for RAdiation Safety, Phase 2) 내 도시오염평가분과에서 설계한 가상 방사능오염 시나리오에 대해 국내모델 METRO-K를 사용하여 도시환경을 구성하는 오염표면의 선량률에 대한 중요도를 분석하였다. 선량률에 대한 오염표면의 기여는 평가위치와 사건 발생 후 시간에 따라 뚜렷이 다른 차이를 나타냈다. 또한 사건이 발생한 당시 강우의 유무와 강우의 강도에 따라서도 오염표면의 기여는 뚜렷한 차이를 나타냈다. 결과적으로 만일 원자력발전소의 사고나 방사능분산장치의 폭발 등과 같은 불의의 사건이 발생하여 도시지역을 오염시킬 경우 방사능피폭에 따른 인체 위해 뿐 아니라 경제적·사회적 영향을 최소화하기 위해서는 해당 환경을 구성하고 있는 표면의 특성을 고려하여 적절한 대응행위를 선택하는 것이 중요하다는 사실을 알 수 있었다.

중심어 : 도시환경, 방사능오염, 오염표면, 선량률

1. 서론

국제원자력기구(IAEA)가 주관하는 국제비교프로그램 EMRAS-2 (Environmental Modelling for RAdiation Safety, Phase 2)는 이전 프로그램인 EMRAS-1 (2003~2007)의 후속 프로그램으로 변화하는 방사선환경방호의 새로운 관심사에 대한 국제적 조화를 목적으로 2009년 초에 조직되어 2012년 초까지 운영될 예정이다[1]. EMRAS-2는 9개의 분과(Working Group)로 구성되어 있으며, 그 중에서 도시오염평가분과(Urban Area Working Group)는 방사성물질의 대기중 확산과 표면으로 침적을 포함하여 도시지역에서 오염평가를 위해 사용할 수 있는 모델의 예측결과를 비교·논의하고 이를 통해 얻어진 지식과 경험 등으로부터 모델의 개선과 향상을 도모하는 것을 목표로 한다. 동 분과에서는 모델 예측결과를 비교하기 위해 1) 단거리 대기확산 시나리오, 2) 중거리 대기확산 시나리오, 3) 침적 후 대응행위 시나리오를 설계하였다. 방사성물질의 침적 후 대응행위 시나리오에는 서울의 한 도심지역이 대상지역으로 선정되었으며 한국원자력연구원에서 개발한 도시오염평가모델 METRO-K의 평가결과가 참여 중에 있다[2,3].

도시환경은 다양한 인공 또는 자연 표면으로 구성되어 있으며 방사성 핵종의 거동은 이들 표면에 따라 여러 차이를 나타낼 수 있다. 따라서 원자력발전소의 사고로 방사성물질이 대기중으로 이동·확산되어 도시지역까지 유입되는 경우나 도시지역에서 방사능분산장치의 폭발과 같은 불의의

사건이 발생할 경우 피해를 최소화하기 위해서는 해당 오염지역의 다양한 환경을 고려하여 적절한 대책을 수립하여야 한다.

본 논문에서는 EMRAS-2의 도시오염평가분과에서 설계한 방사성물질의 침적 후 대응행위 시나리오에 대해 METRO-K를 사용하여 평가한 도시환경을 구성하는 표면의 중요도를 비교·분석하였다.

2. 재료와 방법

2.1 METRO-K의 개요

공기중 방사성물질은 확산과 중력 뿐 아니라 강우에 의해 표면으로 떨어지게 되는데 전자를 건침적(dry deposition), 후자를 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-off되지만, run-off water에 포함된 일정 부분의 방사성물질은 표면에 잔류하게 된다. 건침적된 이동성 핵종은 시간이 경과

교신저자 : 황원태, wthwang@kaeri.re.kr
대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 11 한국원자력연구원

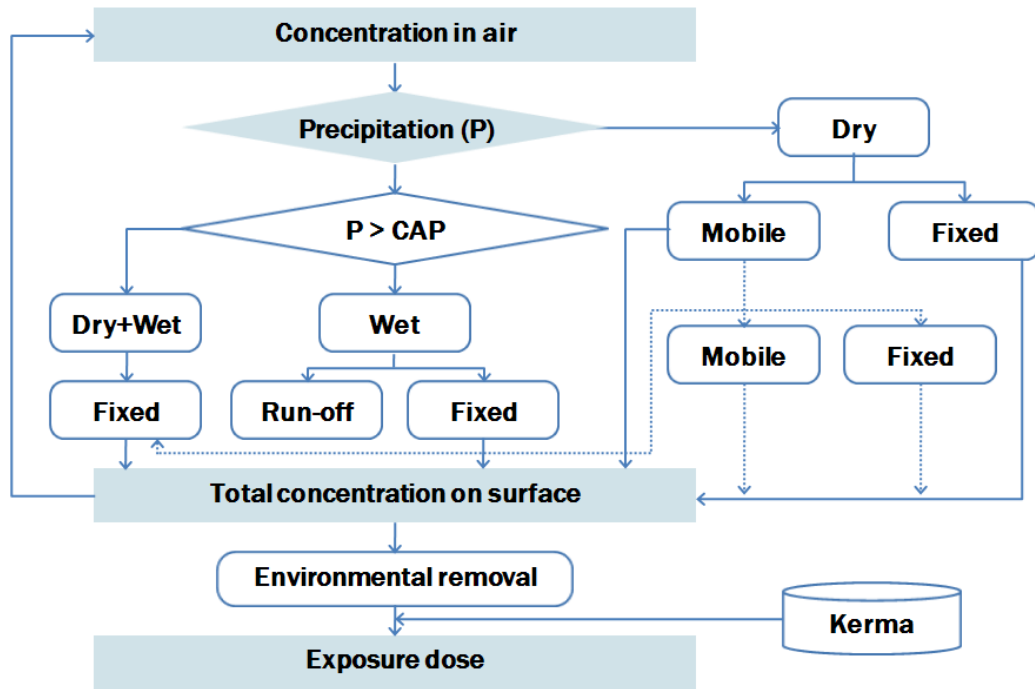
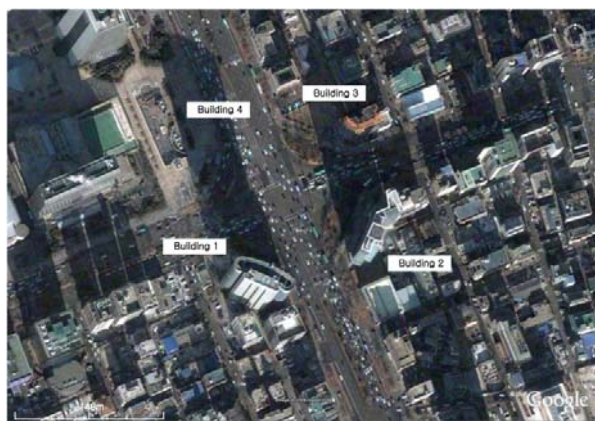


Fig. 1. Schematic diagram for radiological dose assessment of the METRO-K (CAP represents the minimum precipitation amount which causes run-off, and it is an abbreviation of the critical amount of precipitation).



(a) Business area



(b) Park area

Fig. 2. An urban area designed for the countermeasure scenarios following a radioactive contamination.

함에 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 십 수일동안 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 표면 농도를 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 선량률을

평가한다. 공기에 있는 방사성핵종의 침적이 완료된 후 표면의 농도는 기상 및 기후 등의 환경적 요소에 의해 희석된다. 이러한 방사성핵종의 도시환경내 거동은 핵종 뿐 아니라 표면의 종류 등에 따라 다르며 METRO-K에 적용하고 있는 변수값은 참고문헌[2]에 잘 기술되어 있으며, 선량평가 흐름도를 그림 1에 나타냈다.

2.2 방사능오염 시나리오

그림 2는 EMRAS-2의 도시오염평가분과에서 선정된 방사성물질의 침적후 대응행위 시나리오를 위해 선정된 서울의 한 중심가를 보여 준다. 평가 참여자를 위해 동 지역의 지형, 기후, 생활, 건물특성 등에 대한 자료를 문서화하여 제공하였으며, 보다 상세자료를 요구하는 평가자들을 위해 건물

의 좌표 및 속성(건물높이, 표면구성, 재질 등), 주변 환경구성(건물, 도로, 공원 등)에 대한 속성자료를 GIS (Geographical Information System)로 구현하여 제공하였다. 방사능오염의 발단은 명확하게 정의하지 않았지만 도시 지역에서 테러분자에 의한 방사능분산장치의 폭발을 염두하여 ^{60}Co 와 ^{239}Pu 이 선택되었다. 사건이 발생한 당일에 공기중 농도는 두 핵종에 대해 각각 1 MBq day m^{-3} , 입자의 크기는 $1 \mu\text{m}$ 를 가정하였다. 도시오염평가분과에서는 동 시나리오에 대해 사건이 발생한 당일에 비가 없는 경우, 적은 비(3 mm day^{-1})와 많은 비(20 mm day^{-1})가 내릴 경우 대해, 그리고 그러한 사건이 여름철(6월 1일)과 겨울철(1월 1일)에 각각 발생한 경우를 가정하였다. 평가지점은 그림 2에 나타난 바와 같이 상업지구에 위치한 24층 건물(Building 1으로 표시)의 외부를 포함한 4개 지점(Building 1의 1층, 10층, 24층의 실내와 외부), 공원지역의 2개 지점(공원내 오솔길과 주차장)이며, 8가지 각기 다른 대응행위의 조합된 시나리오에 대해 평가 수행을 요청받았다.

2.3 METRO-K의 적용

우리나라 대표적 도시환경을 고려하여 개발한 METRO-K를 EMRAS-2에서 설계한 침적 후 대응행위 시나리오에 적용하기 위해 위치에 따른 공기중 커마(kerma)가 수정되었다. METRO-K에서 공기중 커마는 Mechbach 등이 Monte Carlo 방법을 사용하여 평가한 값을 수정하여 활용해 오고 있다 [3]. EMRAS-2의 침적 후 대응행위 시나리오에 적용하기 위해 공기중 커마를 재수정하였으며, 그 방법의 예시를 그림 3에 나타냈다. 그림에서 나타난 바와 같이 5층 건물의 오염지붕으로부터 3층 실내의 공기 커마(K_3)는 10층 건물의 오염지붕으로부터 8층 실내의 공기 커마와 같다고 가정하였다. 또한 오염나무로부터 5층 건물의 3층 실내에서 커마(K_B)는 10층 건물의 3층 실내에서 공기 커마와 같다고 가정하였다. 도로의 폭이 다른 경우 동일한 도로의 폭으로 세분화하고, 각 세분화된 도로로부터 받는 공기커마는 거리의 제곱에 반비례한다고 가정하여 추산하였다.

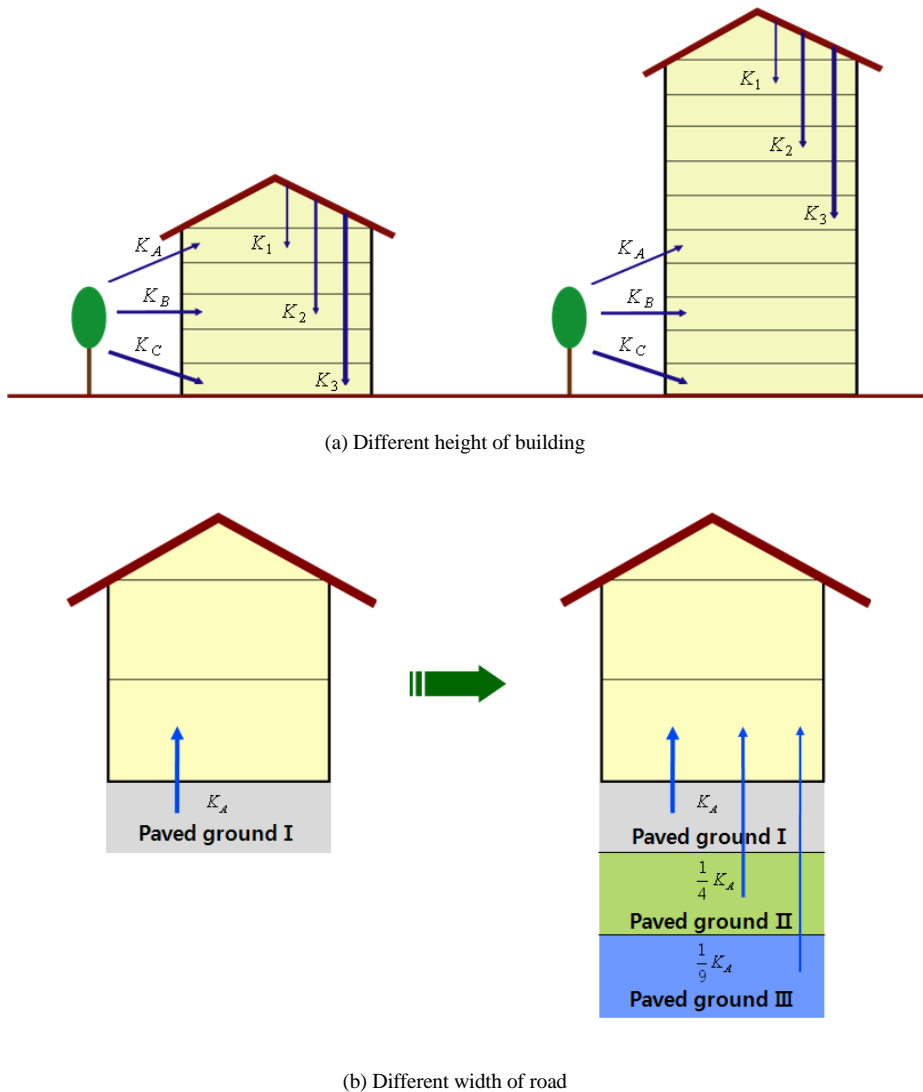


Fig. 3. Approach for the modification of kerma to apply to the hypothetical countermeasure scenarios.

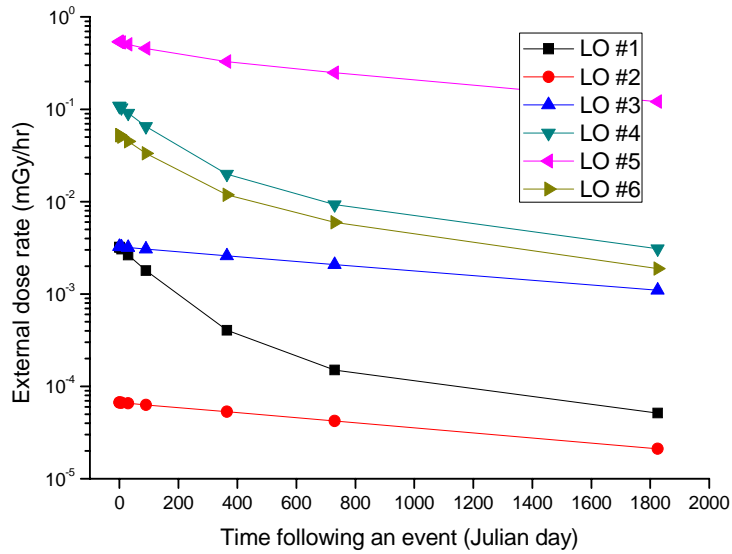


Fig. 4. Predicted external dose rate as a function of location (LO #1, LO #2, LO #3 and LO #4 represent ground floor, 10th floor, 24th floor (top floor), and outdoor of Building 1, respectively. LO #5 and LO #6 represent trail and parking lot in the park, respectively).

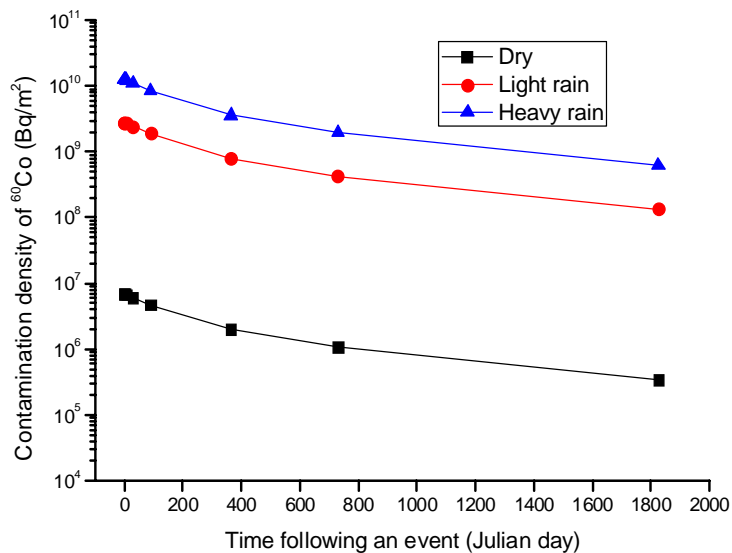


Fig. 5. Contamination density of ⁶⁰Co at outdoor of Building 1 as a function of precipitation (Light and heavy rains are assumed to be 3 mm day⁻¹ and 20 mm day⁻¹, respectively).

3. 결과와 논의

EMRAS-2 도시오염평가분과의 대응행위 시나리오에서 선택된 ⁶⁰Co과 ²³⁹Pu는 각각 5.3년, 2 x 10⁴년의 긴 방사능 반감기를 가진 방사성핵종이다. ⁶⁰Co은 베타 붕괴하여 안정원소인 ⁶⁰Ni이 되며, ²³⁹Pu는 알파 붕괴하여 ²³⁵U가 된다. ⁶⁰Co은 붕괴하면서 0.69382 MeV, 1.1732 MeV, 1.3325 MeV의 주요 감마에너지를 방출하며 각각의 수율(yield)은 0.0163%, 100%, 100%이다. 현재 단계에서 METRO-K에서는 0.3~3.0 MeV의 에너지에 대해 평가 가능하며 매우 약한 감마에너지와 수율을 갖는 ²³⁹Pu의 외부오염에 의한 선량률은 관심범위에서 제외하였다.

그림 4는 METRO-K를 사용하여 여름철에 사건이 발생하였고 당일에는 비가 없으며 아무런 대응행위도 취하지 않았을 경우 ⁶⁰Co의 침적에 의한 평가위치별 선량률을 보여준다. 건물 외부에서의 선량률이 건물 내부에서의 선량률보다 높게 나타났다. 토양 또는 잔디로 구성된 공원의 오솔길에서의 선량률이 포장된 주차장에서의 선량률보다 높게 나타났으며, 또한 시간에 따른 선량률도 상대적으로 완만하게 감소하였다. Building 1의 건물외부에서의 선량률이 건물 내부에서의 선량률보다 높게 나타났으며, 건물내부에서의 선량률도 위치에 따라 큰 차이를 나타냈다. 건물의 최상층(24층) 실내에서의 선량률이 비교적 높게 나타났으며, 건물의 중간층(10층)이 가장 낮은 선량률을 나타냈다. 각기 다른

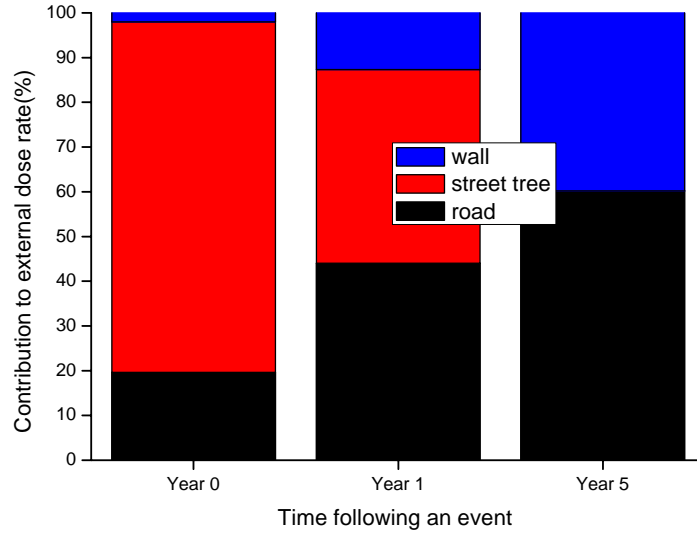


Fig. 6. Contribution of contaminated surfaces to external dose rate at ground floor of Building 1

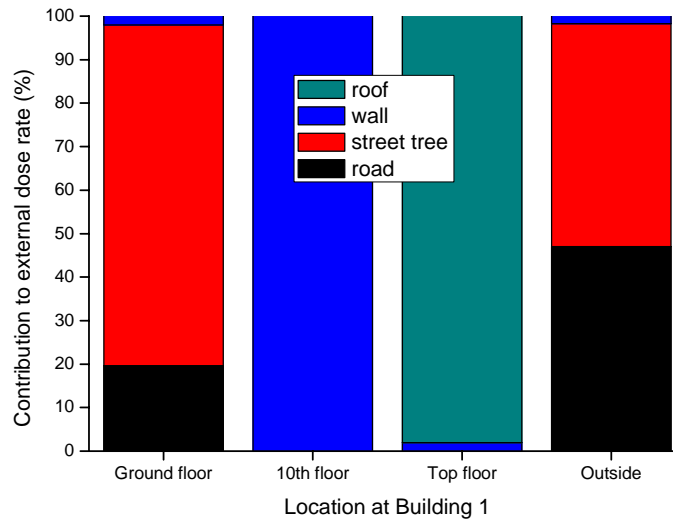


Fig. 7. Contribution of contaminated surfaces in case of no precipitation on a day when an event occurs

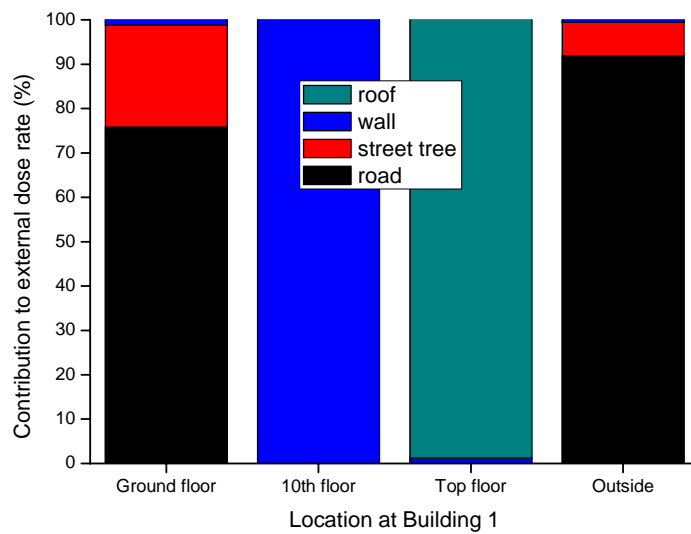


Fig. 8. Contribution of contaminated surfaces in case of heavy precipitation on the day when an event occurs

위치에서 선량률의 차이는 평가지점 선량률에 기여하는 오염표면의 차이에서 기인한다.

그림 5는 여름철에 사건이 발생하였고 아무런 대응행위도 취하지 않았을 경우 Building 1의 외부에서 사건 당일 비가 오는 정도에 따른 ⁶⁰Co의 선량률을 보여준다. 외부는 보행길로 시멘트 또는 벽돌 블록으로 포장되어 있다. 본 결과에서 사건이 발생한 당일에 강우는 표면의 침적에 중요한 역할을 하며, 강우의 정도보다는 강우의 존재에 보다 민감하였다.

그림 6은 사고당일 강우가 없고 아무런 대응행위도 취하지 않은 경우 Building 1의 1층 실내 선량률에 대한 각기 다른 오염표면의 기여를 보여준다. 사건이 발생한 직후에는 도로변 가로수에 의한 영향이 가장 높았으나 시간이 경과함에 따라 도로와 건물외벽의 중요도가 증가하였다. 이는 침적 후 방사성핵종의 거동이 표면에 따라 서로 상이함에 기인한다.

그림 7은 사건이 발생한 직후 건물외부와 건물의 실내 위치에 따른 오염표면의 기여를 보여준다. 실내 1층의 경우 가로수, 실내 10층의 경우 벽, 실내 최상층의 경우 지붕의 영향이 지배적이며, 건물 외부의 선량률은 가로수와 도로의 영향이 유사한 기여도를 나타냈다. 이는 각기 다른 평가지점에서 기여하는 오염표면 영향(침적속도, 평가지점과 오염표면간의 거리, 오염표면의 넓이 등)의 차이에 기인한다.

그림 8은 사건발생 당일 비가 많이 온 경우 위치별 선량률에 대한 오염표면의 기여를 보여 주는데 비가 없는 경우와 비교하여 표면의 중요도는 뚜렷한 차이를 보였다. 특히 건물 실내 1층과 실외의 선량률에 대한 기여는 도로가 뚜렷이 높게 나타났다. 이는 각기 다른 평가지점에서 기여하는 오염표면 영향(평가지점과 오염표면간의 거리, 오염표면의 넓이, 임계강우량, run-off water 내 방사성핵종의 잔류 비율 등)의 차이에 기인한다.

4. 결론

국내모델 METRO-K을 사용한 가상의 방사능 오염 시나리오에 대해 사건이 발생한 이후 평가위치에 따라 선량률의 차이 뿐 아니라 오염표면의 기여가 큰 차이를 나타냈다. 또한 사건이 발생할 당시의 기후조건에 따라서도 분명한 차이를 보였다. 따라서 만일 원전이나 방사능분산장치(RDD)의 폭발과 같은 사건이 발생하여 도시지역을 오염시킬 경우 방사능피폭 뿐 아니라 경제적·사회적 피해를 최소화하기 위해서는 해당 환경에서 오염표면의 특성을 고려하여 적절한 대응행위를 선택하는 것이 중요하다는 사실을 알 수 있다. 본 논문에서 제시한 결과는 어떤 특정 시나리오에 국한한 것이며, 다양한 시나리오에 대해 일반적인 결과는 아님을 밝힌다. EMRAS-2의 도시오염평가분과에서 구성한 대응행위 저감효과 시나리오에 국내모델이 참여하고 있으며, 세계 각국의 여러 모델로 계산한 결과와 비교·논의 중에 있다. 동 프로그램은 2012년 초에 완료되며 상세 비교결과는 그 이후 IAEA 기술보고서로 발간될 예정이다.

감사의 글

본 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국과학기술재단의 원자력기술개발사업으로 지원 받았습니다.

참고문헌

1. <http://www-ns.iaea.org/projects/emras/emras2>
2. 황원태, 김은한, 정효준, 서경석, 한문희. 도시환경에서 방사성물질의 오염평가 모델개발. 대한방사선방어학회지 2005;30(3):99-105.
3. 황원태, 김은한, 정효준, 서경석, 한문희. 도시환경에서 방사성물질 오염에 따른 선량평가모델. 대한방사선방어학회지 2007;32(1);1-8.

Importance Analysis of Radioactively Contaminated Surfaces in an Urban Environment

Won-Tae Hwang, Hyo-Joon Jeong, Eun-Han Kim, Moon-Hee Han, Min-Ho Ahn, and In-Kyu Kim
Korea Atomic Energy Research Institute, Nuclear Environment Safety Research Division

Abstract - EMRAS-2 (Environmental Modelling for RAdiation Safety, Phase 2) is an international comparison program, which is organized by the International Atomic Energy Agency (IAEA), in order to harmonize the modelling of radionuclide behavior in the environment. To do so, the urban contamination working group within EMRAS-2 has designed the hypothetical scenarios for a specified urban area. In this study, the importance of contaminated surfaces composing an urban environment was analyzed in terms of dose rate using METRO-K, which has been developed to take a Korean urban environment into account. The contribution of contaminated surfaces to exposure dose rate showed distinctly a great difference as a function of specified locations and time following a hypothetical event. Moreover, it showed a distinct difference according to the existence of precipitation, and its intensity. Therefore, if an urban area is contaminated radioactively by any unexpected incidents such as an accident of nuclear power plants or an explosion of radioactive dispersion devices (RDDs), appropriate measures should be taken with consideration of the type of surface composing the contaminated environment in order to minimize not only radiation-induced health detriment but also economic and social impacts.

Keywords : Urban environment, Radioactive contamination, Contaminated surface, Exposure dose rate