▣ 기술논문 ▣

도시환경 방사능오염 평가모델 METRO-K의 대응행위 결정지원을 위한 실용성 연구

황원태, 한문희, 정효준, 김은한, 이창우
한국원자력연구원

2007년 10월 25일 접수 / 2007년 12월 17일 채택

국내 환경을 고려하여 개발된 도시환경 방사능오염 평가모델 METRO-K (Model for Estimates the Transient Behavior of RadiOactive Materials in the Korean Urban Environment)는 IAEA (International Atomic Energy Agency) 주관 국제공동 연구프로그램 EMRAS (Environmental Modelling for RAdiation Safety)의 도시환경 방사능오염평가 분과에서 체르노빌 원전사고로 오염된 Pripyat 지역과 가상 방사능테러로 인한 오염 시나리오의 평가에 참여해 오고 있다. 본 논문에서는 EMRAS 프로그램의 일환으로 수행된 Pripyat 지역에 대한 METRO-K의 평가 결과를 제시하였고 다른 모델의 예측값과 비교, 논의함으로써 만일의 도시환경 방사능오염시 대응행위 결정지원을 위한 동 모델의 실용성을 고찰하였다. METRO-K를 사용한 평가결과에서 방사성물질의 오염 후 신속한 대응행위는 무엇보다 중요하다는 것을 알 수 있었다. EMRAS 프로그램에 참여한 각기 다른 모델로 평가된 예측값의 차이는 1) 모델의 수학적 구조와 관련 변수값, 2) 모델에 반영된 피폭경로, 3) 피폭영향을 주는 오염표면의 종류, 표면의 넓이 등과 같은 평가에 대한 가정, 4) 각기 다른 문헌으로부터 선택된 대응행위 관련인자의 적용값 등의 차이에 기인하였다. METRO-K을 사용하여 EMRAS 프로그램에서 요구하는 다양한 오염 시나리오에 대해 대부분의 결과를 제출하여 상호 비교되었으며, 이를 통해 METRO-K는 만일의 도시환경 방사능오염으로 인한 대응행위 결정지원에 유용한 도구가 될 수 있음을 확인하였다.

중심어 : 도시환경, 방사능오염, 대응행위

1. 서론

원자력시설은 대부분 주민 비거주지역 또는 인구밀도가 낮은 지역에 위치해 있고 만일의 방사성물질의 환경 누설시 그 피해 영향은 이들 지역에 국한될 것이라고 생각했기 때문에 환경에서 핵종거동에 대한 연구방향은 토양과 농경지 등에 주안점을 두었다. 그러나 1986년 체르노빌 원전사고와 그 이듬해 브라질 Goiania에서 일어난 ^{137}Cs 방사선원 분실사고는 많은 인공 구조물 또는 인공 표면으로 이루어진 도시환경에 대한 핵종 거동연구의 필요성과 중요성을 인식하게 되는 계기가 되었다. 이후 체르노빌 원전 사고로 피해를 상대적으로 많이 받은 북유럽 국가를 중심으로 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이에 발 맞추어 국제원자력기구 (IAEA)에서는 1988년부터 약 6년간에 걸쳐 국제 공동연구프로그램 VAMP (VAlidation of Environmental Model Prediction)[1]를 주관하여 여러 국가에서 도시환경 핵종거동에 대한 이론적, 경험적, 실험적 지식을 집대성할 수 있는 계기를 마련하였다. 또한 최근에 이에 대한 보다 나은 이해를 얻고자 IAEA에서는 방사선환경안전에 대한 7가지 최신 이슈 (issue)를 선정하여 2003년부터 EMRAS (Environmental Modelling for RAdiation Safety) 프로그램[2]을 운영해 오고 있는데 그 중 하나가 도시환경 방사능 오염평가이다.

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 우선순위를 파악하고, 3) 각 국의 실험, 정보등에 대한 의견 교환의 기회를 제공하는데 있다. 이를 위해 각기 다른 7가지 이슈에 대한 분과 (Working Group)을 조직하였으며, 그 중에서 도시환경 방사능 오염평가 분과는 방사성물질로 오염된 도시환경에서 인체에 대한 피폭을 평가하고 비교함으로써 현재까지 얻어진 과학적 지식에 대한 상호 조화를 이루고자 하는데 그 목적이 있다. 국내 환경특성을 고려하여 개발된 도시오염 평가모델 METRO-K (Model for Estimates the Transient Behavior of RadiOactive Materials in the Korean Urban Environment)[3]는 도시환경 방사능 오염평가 분과에서 평가모델로 선정되어 체르노빌 원전사고와 같은 광범위한 지역의 오염 시나리오 (widespread contamination)와 방사능테러와 같은 좁은 지역의 오염 시나리오 (localized contamination)에 대한 평가를 수행하였다. 아무런 대응행위도 수행하지 않았을 경우와 다양한 대응행위를 적용하였을 경우 피폭선량을 평가하였으며, 결과는 국외 다른 모델의 예측결과와 비교, 분석되었다

본 논문은 EMRAS 프로그램에서 수행된 체르노빌 인근 도시인 Pripyat의 오염 시나리오에 대해 국내모델 METRO-K

책임저자 : 황원태, wthwang@kaeri.re.kr, 한국원자력연구원
대전광역시 유성구 대덕대로 1045

을 사용하여 다양한 대응행위를 적용한 결과를 제시하고, 또한 다른 모델 결과와의 비교, 검토를 통해 만일의 도시환경 방사능오염시 대응행위 결정지원을 위한 도구로써 동 모델의 실용성을 고찰하는데 그 목적이 있다.

2. 재료 및 방법

2.1 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 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 표면농도를 보정하며 기타 다른 환경적 요소에 의한 제거는 고려치 않는다. 침적이 완료된 시점에서 각기 다른 표면에 대한 총 침적량이 계산되면 공기커마에 대한 데이터 라이브러리를 사용하여 피폭자의 거주 위치에 따른 피폭선량 (이하 피폭선량이라 함은 성인에 대한 유효선량을 의미한다)을 평가한다. METRO-K는 누구나 쉽게 이용할 수 있도록 GUI (Graphic User Interface) 환경에서 운용될 수 있도록 구성되어 있다.

2.2 Pripyat 지역 시나리오

IAEA 주관 국제공동연구프로그램인 EMRAS의 도시환경 방사능오염평가 분과에서는 체르노빌 원전 사고가 일어난 해인 1986년 9월 24일에 Pripyat Disrtict #4 (그림 1)에서 토양에 침적된 핵종농도의 측정값 (표 1)를 사용하여 5가지 피폭자의 시나리오 (표 2)에 대해 10가지 대응행위에 따른 선량의 변화를 평가하도록 요구하였다[4].

현재까지 METRO-K는 건물의 외부표면 오염에 따른 영향을 평가하며 건물의 내부오염에 따른 영향은 평가하지 않는다. 따라서 동 분과로부터 주어진 실내 진공청소와 실내 표면세척을 제외한 8가지 대응행위 (표 3)에 대해 선량의 변화를 평가하였다. 대응행위에 따른 선량의 저감은 다음과 같이 정의된 선량률 저감인자 (*DRRF*)에 의해 모사될 수 있다.

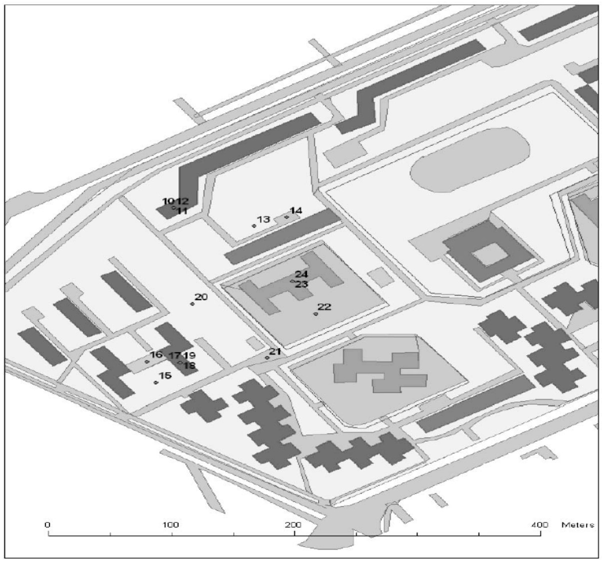

Fig. 1. Map of Pripyat District #4 for model calculations ; The numbers in the map represent the locations of model calculations and the colors of buildings represent the different stories.

Table 1. Deposition measured in a Pripyat District #4 on September 24 1986[4].

Radionuclides	Radioactivity (MBq m^{-2})	Percentage of activity (%)
^{95}Nb	4.995	30.00
^{95}Zr	2.835	17.03
^{103}Ru	0.578	3.47
^{106}Ru	1.438	8.64
^{134}Cs	0.296	1.78
^{137}Cs	0.523	3.14
^{141}Ce	0.574	3.44
^{144}Ce	5.365	32.22

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

여기서 DR_{before}(mSv h^{-1} or mGy h^{-1})와 DR_{after}는 각각 대응행위를 수행하기 전과 후의 선량률을 나타낸다. 어떤 대응행위에 대해 *DRRF*=2는 50%, *DRRF*=10은 90%의 선량률 감소을 의미하며, 결과적으로 *DRRF* 값이 높을수록 선량의 저감 측면에서 보다 유용한 대응행위라 할 수 있다. 본 평가에서는 문헌 [5]를 통해 *DRRF* 값을 선택하였으며, 이들 값은 핵종 등에 따라 차이가 있지만 아직까지 충분한 자료가 없기 때문에 본 평가에 고려된 모든 핵종에 대해 동일 값을 적용하였다.

Table 2. Hypothetical scenarios for model calculation[4] ; The upper and the lower rows represent the locations of a receptor and the fractions of his/her spending time, respectively ; Lo. is an abbreviation of the locations as shown in Fig. 1 ; Lo. 15 and Lo. 20 are outdoors on natural surfaces, Lo. 16 is an indoor in a single story house, Lo. 17 is on the 1st floor of a 9 story apartment, Lo. 21 and Lo. 22 are outdoors on paved roads, and Lo. 23 is on the 1st floor of 2 story kindergarten building.

Location \ Scenario		Indoor worker	Outdoor worker	Pensioner	School children	Pre-school children
Inside	home	Lo. 17 0.51	Lo. 17 0.51	Lo. 17 0.75	Lo. 17 0.58	Lo. 17 0.51
	work or school	Lo. 16 0.31	Lo. 16 0.10	- -	Lo. 23 0.15	Lo. 23 0.25
Outside	asphalt	Lo. 21 0.07	Lo. 21 0.08	Lo. 21 0.07	Lo. 22 0.08	Lo. 22 0.04
	dirt	Lo. 15 0.03	Lo. 20 0.23	Lo. 15 0.07	Lo. 15 0.10	Lo. 15 0.12
	kitchen garden	Lo. 15 0.05	Lo. 15 0.05	Lo. 15 0.08	Lo. 15 0.04	Lo. 15 0.03
	virgin	- 0.01	- 0.01	- 0.01	- 0.04	- 0.04
	forest meadow	- 0.02	- 0.02	- 0.02	- 0.01	- 0.01

Table 3. Applied remediation measures and their dose rate reduction factors (DRRF).

Remediation measure	Time of application after the accident[4]	DRRF[5]
Cutting and removal of grass	Day 7	5
Washing of roads	Day 14 (no rain)	5
Washing of roofs and walls	Day 14 (no rain)	5 for roofs, 7 for walls
Removal of trees and leaves	Day 30	20
Removal of soil (5 cm)	Day 180	20
Relocation of population	For the first 2 weeks	-
Relocation of population	For the first 6 weeks	-
Relocation of population	For the first 6 months	-

3. 결과 및 고찰

국내모델 METRO-K을 사용하여 EMRAS 프로그램내 도시환경 방사능오염평가 분과로부터 주어진 시나리오에 대해 선량평가를 수행하였다. 자핵종 (daughter products)을 포함하여 상대적으로 약한 에너지의 감마선을 방출하는 ^{141}Ce는 계산에 고려하지 않았다. EMRAS 프로그램내 도시환경 방사능오염 평가분과에서는 수 많은 계산결과에 대해 비교, 논의하였지만 본 논문에서는 대표적인 부분만을 제시한다.

그림 2는 METRO-K를 사용하여 어떠한 대응행위도 수행하지 않았을 경우 그림 1의 17번 위치 (9층 아파트에서 1층 실내)에서 체르노빌 원전 사고후 20년까지 매 해 8월 1일의 흡수선량률을 보여준다. 체르노빌 사고로부터 약 3개월 후에 아파트 1층 실내에서 흡수선량률은 주변 토양 또는 잔디 오염의 영향이 가장 높았으며 (84.7%), 다음으로 주변 나무 오염의 영향 (13.6%), 17번 위치의 건물과 그 주변 건물 외벽 오염의 영향 (1.7%)의 순으로 나타났다. 사고 후 20년 후에는 토양 또는 잔디 오염의 영향이 대부분 차지 (98.6%) 하였으며, 다음으로 건물의 외벽의 영향 (1.4%) 순이었으며 나무의 영향은 무시 가능하였다. 이와 같이 오염 후 시간에 따라 각기 다른 오염표면의 흡수선량에 대한 기여는 표면마다 핵종의 다른 거동에 기인한다.

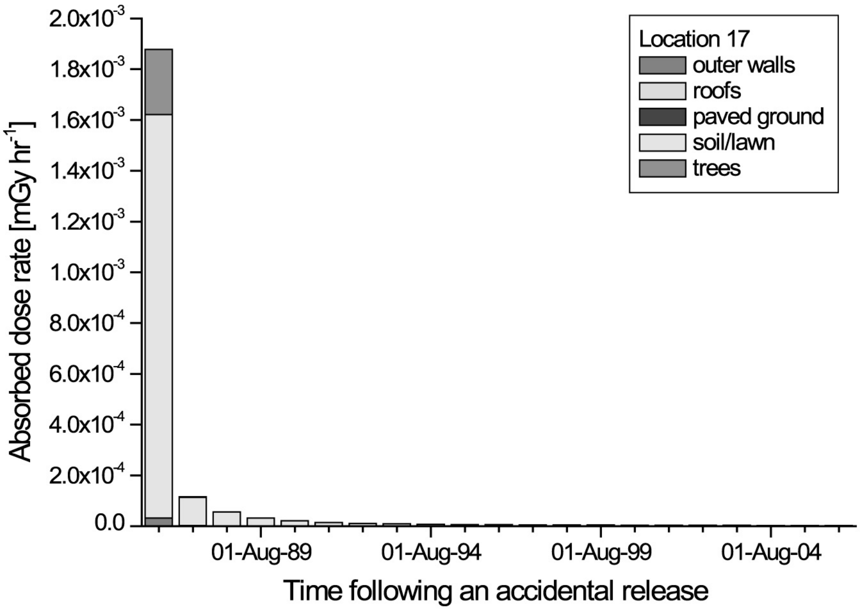

Fig. 2. Absorbed dose rates at location 17 as shown in Fig. 1 as a function of contaminated surfaces ; Location 17 is on the 1st floor of a 9 story apartment.

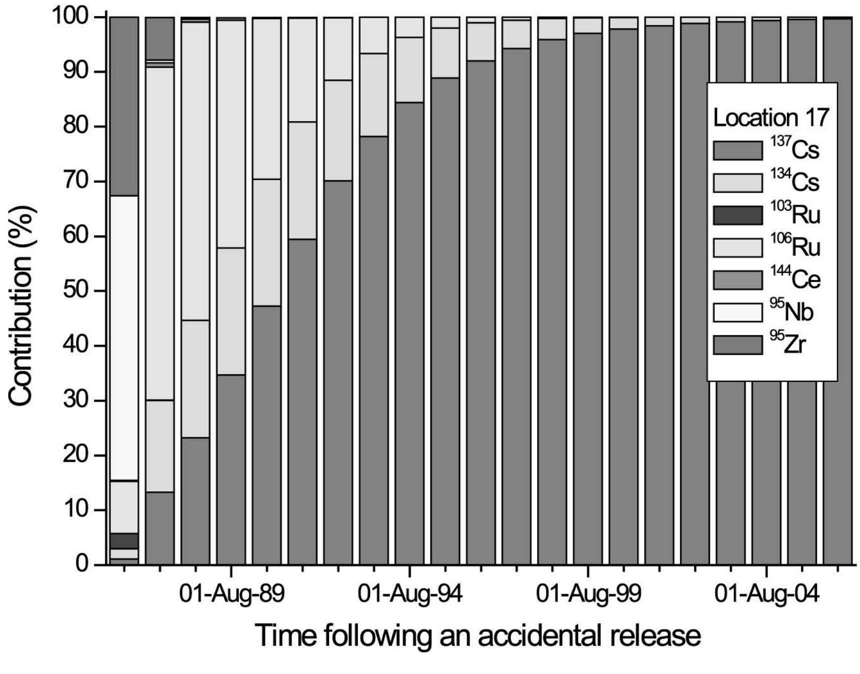

Fig. 3. Radionuclide contribution for absorbed dose rates at location 17 as shown in Fig. 1.

그림 3은 어떠한 대응행위도 수행하지 않았을 때 동일 위치의 흡수선량에 대한 핵종의 기여를 보여준다. 체르노빌 사고 첫해에서는 ^{95}Nb, ^{95}Zr의 영향이 각각 51.9%, 32.6%로 중요하게 기여한 반면 시간에 따라 상대적으로 장반감기 핵종인 ^{137}Cs의 기여가 지배적이었다.

그림 4는 아무런 대응행위를 수행하지 않았을 경우 표 2에 제시된 5가지 피폭 시나리오에 대해 오염후 첫 3개월 동안의 총 선량을 EMRAS 프로그램에 참여한 모델간 예측결과를 비교한 것이다 (Model 3는 METRO-K의 예측결과 임). 여기서 선량이라 함은 유효선량을 나타내며 도시환경 방사능오염평가 그룹에서는 연령군에 관심없이 흡수선량과 동일하다고 가정하였다. 각 시나리오에 대해 예측결과의 차이는 10배 이내로 평

가자 간에 폭넓은 공감대를 형성하고 있음을 확인할 수 있다.

EMRAS 프로그램내 도시환경 방사능오염 평가분과에서는 표 2에 제시된 5가지 피폭 시나리오에 대해 각기 다른 대응행위의 적용에 따른 흡수선량의 예측결과를 요구하였다. 그림 5는 METRO-K를 사용하여 각기 다른 대응행위에 따른 실내 작업자의 연간 흡수선량을 보여준다. 체르노빌 사고 후 첫째 해의 결과는 3개월 (1986년 5월 1일부터 1986년 8월 1일)까지의 총 흡수선량을 나타내며, 이후부터는 각 해 8월 2일부터 다음해 8월 1일까지 1년간의 흡수선량을 나타낸다. 사고후 첫째 해의 총 흡수선량은 3개월만 고려한 것이지만 다른 해의 연간선량에 비해 월등히 높음을 알 수 있다. 따라서 오염후 대응행위는 가능한 빨리 수행하는 것이 선량의 저

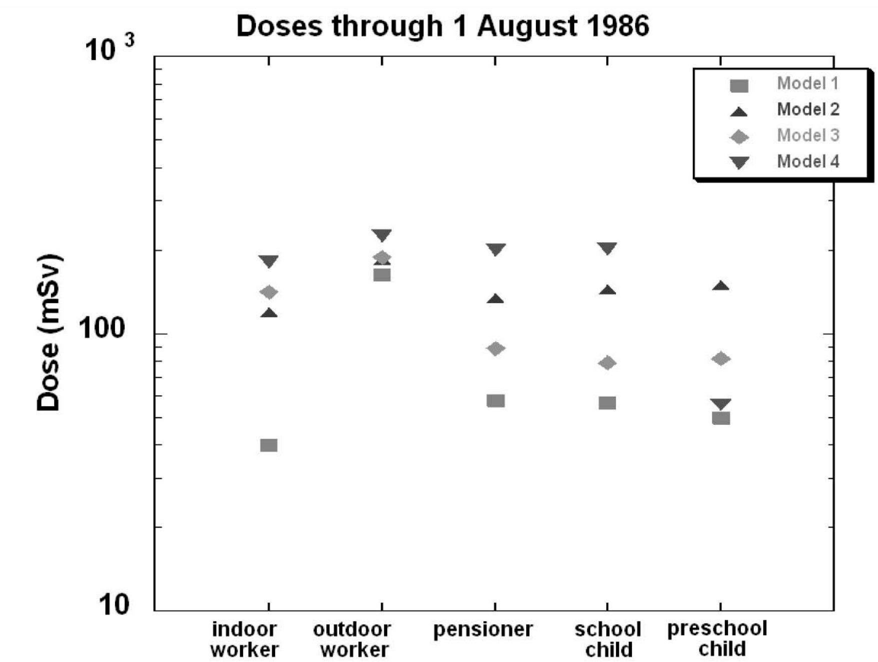

Fig. 4. Comparison of model predictions for different exposure scenarios ; Model 3 is the predicted results of METRO-K.

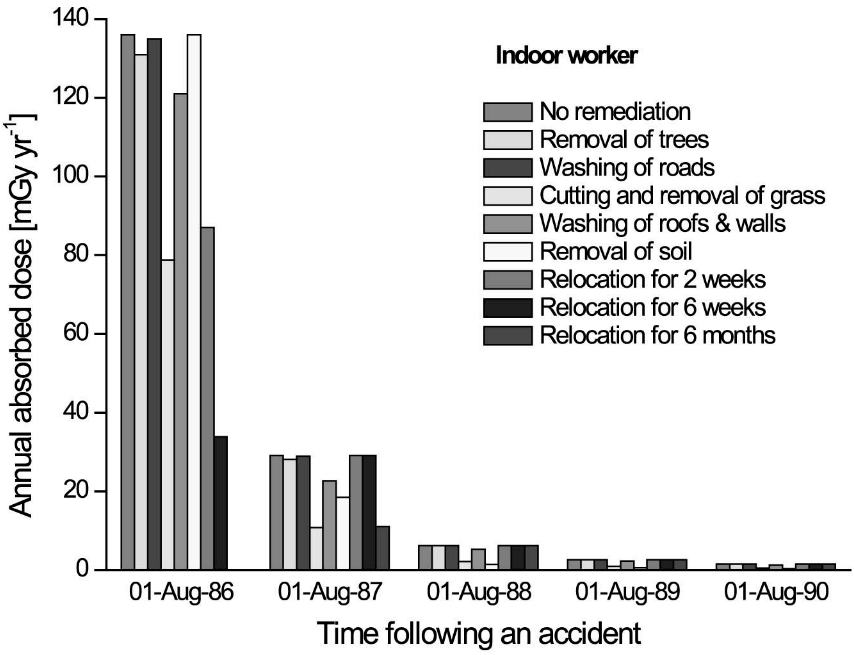

Fig. 5. Annal absorbed doses for an indoor worker resulting from a variety of remediation measures.

감에 중요하다는 것을 알 수 있다. 오염지역을 벗어나는 이주(relocation)는 단기적으로 선량의 저감에 가장 효과적이지만 경제적, 사회적 파급효과 등이 매우 큰 대응행위이다. 주민이 오염지역에서 계속 거주하는 경우에는 주변의 풀, 잔디 등을 깎고 제거하는 것이 선량의 저감에 가장 효과적이었다. 고려되는 대응행위 중에서 선량률 저감인자가 가장 높은 것은 오염토양을 제거한다든가 나무의 잎 또는 가지를 제거하는 것이지만, 시나리오의 가정에서 두 대응행위는 방사성물질의 침적 후 각각 1개월 후와 6개월 후에 수행하는 것으로 가정하였기 때문에 오염된 풀, 잔디의 제거보다 오염 후 첫 째해에서 선량의 저감효과는 낮게 나타났다. 앞서 언급한 바와 같이 오염 후 신속한 대응이 무엇보다 중요하다는 것을 재차 확인할 수 있었다.

그림 6은 각기 다른 대응행위의 적용에 따른 실내 작업자의 누적 흡수선량을 보여준다. 오염 직후 장기간 이주는 선량의 저감에 가장 효과적이며, 이주를 제외한 대응행위 중에서는 오염된 풀, 잔디를 잘라 제거하는 것이 가장 효과적이었다. 비록 본 논문에서는 제시되지 않았지만 대응행위의 선량저감에 대한 효과는 각 시나리오별로 다르게 나타났는데 이는 피폭영향을 주는 각기 다른 오염표면의 기여와 오염표면에 대한 핵종거동 등이 다르기 때문이다.

그림 7은 실내 작업자의 피폭 시나리오에 대해 도시환경 방사능오염 평가분과에 참여한 모델의 예측값 간 비교결과를 보여준다 (Model 3는 METRO-K의 예측결과 임). 오염 후 첫해에 대한 예측결과 (체르노빌 사고가 발생한 1986년 8월 1일까지 약 3개월동안 받게 되는 선량이며 그림 7에서 왼쪽 그림) 간의 차이는 10배 이내를 나타냈으나 오염 후 20년째 해 (2005년 8월 2일부터 2006년 8월 1일까지 받게 되는 연간 선량으로 그림 7에서 오른쪽 그림)에 대해서는 약 100배 차이를 나타냈다. 결과적으로 오염 후 단기 핵종거동은 상대적으로 불확실성이 적은 반면 장기 핵종거동은 불확실성이 많은 것으로 나타났다. METRO-K로 예측한 결과는 다른 모델의 예측결과와 비교하여 전혀 손색이 없음을 알 수 있다.

이들 모델 예측값의 차이는 1) 모델의 수학적 구조 (예로 미분방정식에 근거한 구간모델 vs 경험식 또는 실험식에 근거한 해석해 모델)와 관련 변수 값의 차이, 2) 모델에 반영된 피폭경로의 차이 (예로 실내표면의 오염고려 등), 3) 피폭영향을 주는 오염표면, 표면의 넓이 등과 같은 평가 가정의 차이, 4) 각기 다른 문헌으로부터 선택되어 적용된 대응행위 관련인자 (예로 선량률 저감인자 등)의 차이 등에 기인하였다.

4. 결론

국내 환경을 고려하여 개발된 도시환경 방사능오염 평가모델 METRO-K는 IAEA 주관 국제공동 연구 프로그램 EMRAS에 참여해 오고 있다. 동 프로그램의 참여를 통해 얻을 수 있었던 교훈은 1) 도시환경의 방사능오염에 대해 적절한 대응행위를 수행하기 위해서는 핵종별, 오염표면별로 피폭영향을 평가할 필요가 있으며, 2) 각기 다른 평가자들의 모델, 입력변수 값, 가정 등에 따른 평가결과의 불확실성 범위를 추정 가능케 하였으며, 3) 신뢰성있는 결과를 얻기 위해서는 무엇보다 평가자의 경험과 판단이 중요하다는 것을 알 수 있었다. METRO-K를 사용한 평가결과에서 방사성물질의 오염 후 신속한 대응행위는 무엇보다 중요하다는 것을 알 수 있었다. 국내모델 METRO-K는 EMRAS 프로그램에서 요구하는

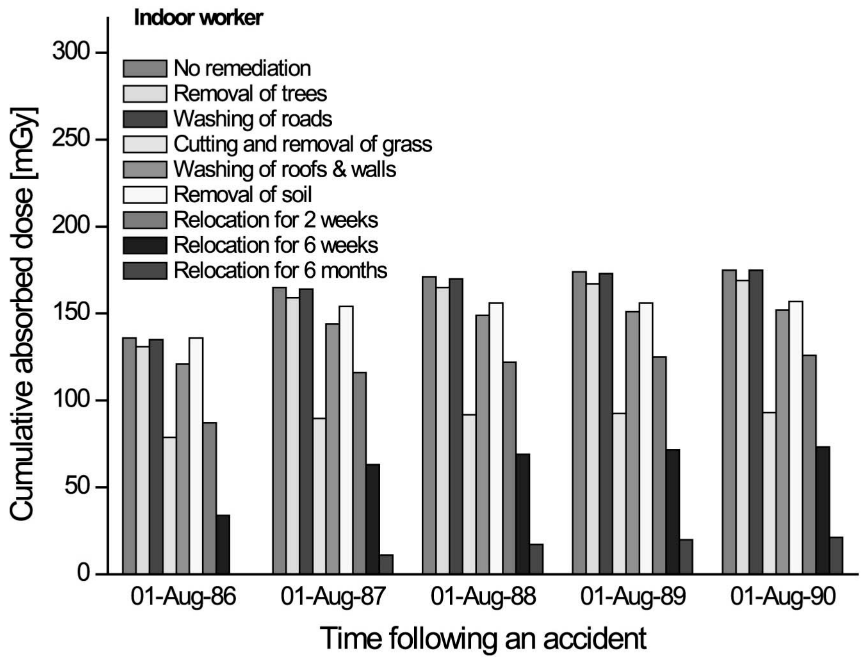

Fig. 6. Cumulative absorbed doses for an indoor worker resulting from a variety of remediation measures.

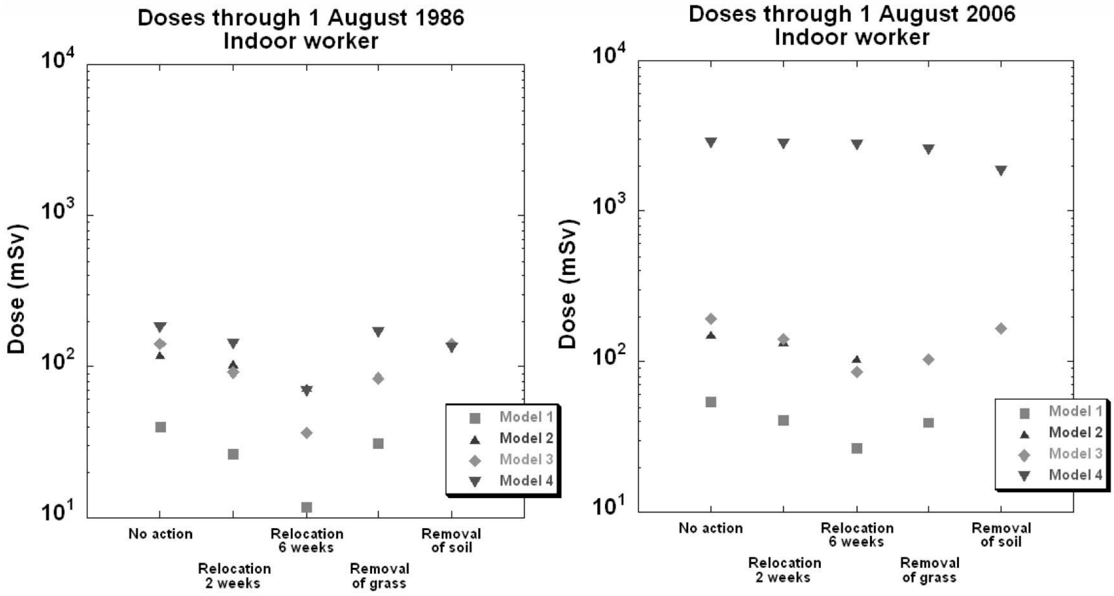

Fig. 7. Comparison of model predictions in terms of annual doses for an indoor worker ; Model 3 is the predicted results of METRO-K.

다양한 오염 시나리오에 대해 다른 모델의 예측결과와 비교하여 손색이 없음을 확인하였다. 또한 EMRAS 프로그램에서 요구하는 다양한 오염 시나리오에 대해 대부분의 결과를 제출함으로써 만일의 도시 방사능오염으로 인한 대응행위 결정지원에 유용한 도구가 될 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력 중장기 연구의 일환으로 수행 되었습니다.

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. 방사선방어학회지 2005;30(3):99-105.
4. IAEA. Environmental Modeling of Remediation of Urban Contaminated Areas - Environmental Modeling for Radiation Safety Programme (EMRAS). Draft Report for the preparation of IAEA Safety Report Series. 2006.
5. Charnock T. and Adersson K. Source of Information on Urban Recovery Countermeasures for Use in Models. Draft Report for the preparation of IAEA Safety Report Series. 2006.

A Feasibility Study for Decision-Making Support of a Radioactive Contamination Model in an Urban Environment (METRO-K)

Won Tae Hwang, Moonhee Han, Hyo Joon Jeong, Eun Han Kim and Chang Woo Lee
Korea Atomic Energy Research Institute

Abstract - A Korean urban contamination model METRO-K (**M**odel for **E**stimates the **T**ransient Behavior of **R**adi**O**active Materials in the **K**orean Urban Environment), which is capable of calculating the exposure doses resulting from radioactive contamination in an urban environment, is taking part in a model testing program EMRAS (**E**nvironmental **M**odelling for **RA**diation **S**afety) organized by the IAEA (**I**nternational **A**tomic **E**nergy **A**gency). For radioactive contamination scenarios of Pripyat districts and a hypothetical RDD (**R**adiological **D**ispersal **D**evice), the predicted results using METRO-K were submitted to the EMRAS's Urban Contamination Working Group. In this paper, the predicted results for the contamination scenarios of a Pripyat district were shown in case of both without remediation measures and with ones. Comparing with the predictied results of the models that have taken part in EMRAS program, a feasibility for decision-making support of METRO-K was investigated. As a predicted result of METRO-K, to take immediately remediation measures following a radioactive contamination, if possible, might be one of the best ways to reduce exposure dose. It was found that the discrepancies of predicted results among the models are resulted from 1) modeling approaches and applied parameter values, 2) exposure pathways which are considered in models, 3) assumptions of assessor such as contamination surfaces which might affect to an exposure receptor and their sizes, 4) parameter values which are related with remediation measures applied through literature survey. It was indentified that a Korean urban contamination model METRO-K is a useful tool for dicision-making support through the participation of EMRAS program.

Keywords : Urban environment, Radioactive contamination, Remediation measures