

도시환경에서 방사성물질 오염에 따른 선량평가모델

황원태, 김은한, 정효준, 서경석, 한문화

한국원자력연구소

2006년 8월 23일 접수 / 2006년 9월 25일 채택

도시지역의 방사능 오염으로 거주민의 피폭영향을 평가할 수 있는 모델 METRO-K를 개발하였다. 모델의 특성으로 1) 실험 또는 경험자료를 사용하기 때문에 수학식이 간단하여 이해가 쉬울 뿐 아니라 계산에 필요한 변수의 수가 적으며 2) 도시환경을 구성하는 5가지 기본표면 만을 사용하여 복잡하고 다양한 주변 환경을 쉽게 구성할 수 있으며 3) 각기 다른 오염 표면으로 인한 선량을 평가함으로써 표면마다 적합한 제염대책을 수립하는데 용이하다. 피폭자의 특정 위치에서 각기 다른 오염표면으로부터 받게 되는 선량은 감마에너지와 오염 표면별 공기커마 값을 데이터 라이브러리로 만들어 평가에 이용하였다. 유럽 도시 지역의 4가지 대표적 거주형태에 대한 공기커마 값을 사용하여 우리나라 도시 지역의 7가지 대표적 주거형태에 적합하도록 공기커마 값을 조합하여 적용하였다. 장기간 방사성물질의 누설을 고려하여 하루 단위의 핵종별 공기중 농도, 강우량, 핵종의 화학적 형태 구성분율이 입력되면 침적 후 시간에 따른 각기 다른 표면에서의 공기중 흡수선량률과 피폭자의 거주 위치에 따른 인체 선량률이 평가된다. 아파트 밀집지역에 대한 가상 오염 시나리오의 적용결과 피폭자의 거주위치 뿐 아니라 피폭자가 거주하는 주변 환경에 따라 인체 선량률은 확연한 차이를 나타냈다.

중심어 : 도시환경, 방사능 오염, 거주형태, METRO-K, 공기커마

1. 서론

원자력발전소를 포함한 원자력시설 (이하 원자력시설이라 한다)의 비정상적 상황으로 환경으로 누설된 방사성물질은 지상으로 침적되고 결과적으로 여러 표면의 오염으로부터 인체에 대한 방사능 피폭영향을 미칠 수 있다. 지상에 침적된 방사성물질로부터 베타선 또는 감마선에 의한 외부피폭은 방사능 사고결과해석에서 인체에 대한 중요 피폭경로로 고려된다. 영국의 Sizewell 가압경수로에 대한 다양한 가상 사고에 대한 결과를 보면 침적에 의한 외부피폭은 누설 사고로 인한 방사선에 의한 총 치사암 발생률의 최대 74%까지 차지하며, 사고 유형별 발생확률을 고려한 가중 평균 치사암 발생확률에 대해서도 총 치사암 발생확률의 65%나 기여하는 것으로 나타났다 [1].

도시지역 또는 인구밀집지역 (이하 도시지역 또는 도시환경이라 한다)을 구성하는 인공 구조물에 대한 방사선 차폐 연구는 1950년대부터 시작되었으나 1980년대에 이르러 비로소 복잡한 건물 또는 가옥의 유형, 주변 환경, 표면에 따른 핵종의 침적정도 등을 고려하여 보다 실질적인 도시환경에서의 피폭영향을 평가하고자 하는 노력이 시도되었다. 1980년대 이전까지는 원자력시설의 비정상적 상황으로 방사성물질이

환경으로 누설된다 하더라도 원자력시설은 대부분 비도시지역 또는 인구밀도가 낮은 지역 (이하 농촌지역이라 한다)에 위치해 있고 피해의 영향은 이들 지역에 국한될 것이고 생각했기 때문에 연구의 방향은 토양과 농경지 등에서의 핵종 거동에 주안점을 두었다. 그러나 1986년 체르노빌 원전사고와 이듬 해 1987년 브라질 Goiania 도시에서 방사선원 분실사고는 주로 인공 구조물로 이루어진 도시환경에 대한 핵종 거동 연구의 필요성과 중요성을 인식하게 되는 계기가 되었다. 이후 체르노빌 원전사고로 피해를 상대적으로 많이 받은 북유럽 국가를 중심으로 도시환경에서 방사능 오염 및 제염 등에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 [2,3]. 이에 발맞추어 국제원자력기구 (IAEA)에서는 1988년부터 약 6년간에 걸쳐 국제 공동프로그램 VAMP (VAlidation of Environmental Model Prediction) 프로그램[4]을 주관하여 여러 국가에서 도시환경에 대한 핵종거동에 대한 이론적 경험적 실험적 지식을 집대성할 수 있는 계기를 마련하였다. 또한 최근에 이에 대한 보다 나은 이해를 얻고자 IAEA에서는 VAMP 프로그램을 확장하여 방사선 환경안전에 대한 7가지 최신 이슈를 선정하여 2003년부터 EMRAS (Programme on Environmental Modeling for RAdiation Safety) 프로그램[5]을 운영해 오고 있는데 그 중 하나가 도시환경에서 핵종거동 및 제염평가이다.

국토가 넓지 않아 원자력시설로부터 불과 수십 km 내에 인구 100만 이상의 대도시가 위치하는 지형학적 특수성을 갖는 우리나라의 경우 도시환경에서 핵종거동에 대한 연구는 만일의 방사성물질 환경 누설시 피해 최소화를 위해 매우 중

책임저자 : 황원태, wthwang@kaeri.re.kr, 한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150번지 한국원자력연구소 원자력환경연구부

요한 분야라 할 수 있다. 그 이유로 도시지역은 농촌지역에 비해 인구밀도가 높고 산업화가되어 있어 만일의 방사성물질 누설이 발생한다면 방사선에 의한 인체 피해 (도시 거주민의 개인에 대한 최대선량은 원자력시설과 인접한 농촌 거주민보다 낮을지 모르나 집단선량은 매우 높을 수 있음) 뿐 아니라 경제적 사회적으로 미치는 영향은 훨씬 심각하게 나타날 수 있기 때문이다.

앞서 언급한 바와 같이 우리나라의 지형학적 특수성으로 인한 중요성으로 국내 도시환경을 고려한 방사능 오염 및 선량평가 모델 METRO-K (Model for Estimates the Transient Behavior of RadiOactive Materials in the Korean Urban Environment)가 국가 중장기 연구의 일환으로 개발되었다. 체르노빌 원전사고처럼 방사성물질이 장시간 방출되는 경우를 고려하여 하루 단위의 핵종별 공기중 농도, 강우량, 핵종의 화학적 형태 구성분율이 입력되면 침적 후 시간에 따른 각기 다른 표면에서의 핵종농도와 피폭자의 거주 위치에 따른 인체 선량률 (이하 선량률이라 한다)이 평가된다. 도시환경을 구성하는 표면으로 침적과정에 대한 수학적 모델과 결과에 대한 고찰 등은 이전 논문[6]에 자세히 기술되어 있기 때문에 본 논문에서는 침적 후 피폭자의 위치에 따른 선량 평가방법에 그 주안점을 두었다.

2. 선량평가방법

일반적으로 원자력시설은 도시지역으로부터 수십 km 이상 떨어진 농촌지역에 위치하기 때문에 만일 원자력시설로부터 방사성물질의 환경누설이 있다고 하더라도 도시지역까지 방사성물질이 도달하는데 상당한 시간이 소요되며, 대기를 통해 장시간 이동에 따라 확산 또는 회석되기 때문에 도시 지역 거주민은 방사능의 급성적 효과보다는 주로 만성적 효

과에 의해 그 피해를 받게 된다. 따라서 대피 또는 소개 등과 같은 긴급 대응책은 대량의 방사성물질 누출사고와 같은 특수한 상황을 제외하고는 필요하지 않을 것이다. 또한 대기학 산모델로부터 공기중 핵종 농도의 예측값은 많은 불확실성을 나타내기 때문에 실측값으로부터 도시환경의 피해 최소화를 위한 대응책을 수립하는 것이 보다 효과적일 것이다. 다만 신속한 예측이 필요한 경우 또는 실측치 자료가 부족한 경우에는 대기학산모델로부터 예측된 공기중 농도의 결과가 유용할 것이다 이러한 이유로 현재까지 개발된 대부분 도시환경 방사능 오염평가 모델은 대기학산모델과는 독립적으로 환경에서 쉽게 측정될 수 있는 공기중 농도 또는 침적량 등과 같은 측정량으로부터 환경에서의 거동을 예측하고 있다. 현재까지 개발된 대표적 모델로는 영국 HPA (Health Protection Agency)의 EXPURT[7], 캐나다 AECL (Atomic Energy of Canada Limited)의 CHERURB-95[8], 브라질과 독일 GSF (Institute of Radiation Protection) 연구소가 공동 개발한 PARATI[9] 등을 들 수 있다.

그림 1은 우리나라의 도시환경을 고려하여 개발된 METRO-K의 개략도를 나타냈다. 원자력시설로부터 환경으로 누설된 방사성물질은 확산과 중력 (이하 전침적이라 한다)뿐 아니라 강우 (이하 습침적이라 한다)에 의해 침적된다. 전침적된 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, 후자를 이동성 분율이라 한다. 습침적된 핵종은 대부분 고착성이 되며, 표면에 따라 일정 강우량 이상에서는 유출 (run-off)이 일어난다. 유출이 일어나는 최소 강우량을 임계량이라 하며 이는 표면의 종류와 상태 등에 따라 다르다. 임계량을 초과한 강우는 모두 유출되지만 유출수 (run-off water)에 포함된 일

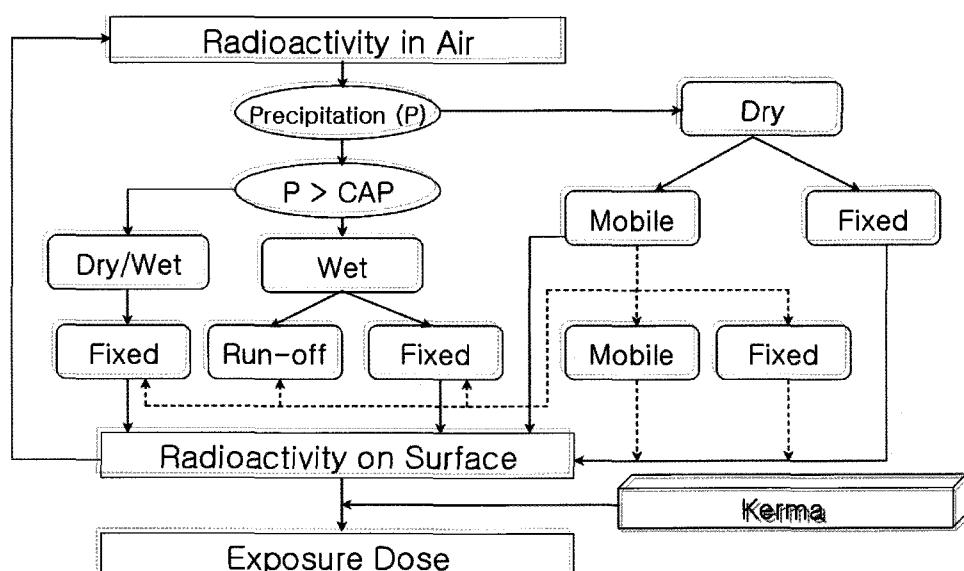


Fig. 1. Schematic flow diagram of METRO-K ; Dotted lines represent the behavior of radionuclides being deposited previously ; CAP is an abbreviation of critical amount of precipitation.

정 부분의 방사성물질은 표면에 잔류하게 된다. 이는 강우와 유출수에서 핵종 농도는 서로 차이를 나타낸다는 것을 의미하며 이미 여러 실험의 결과에서 입증되었다[10]. 견침적된 이동성 핵종은 시간이 경과함에 따라 습기 등으로 인해 계속해서 일정부분은 고착성 핵종이 되며, 만일 도중에 강우가 있다면 모두 고착성이 되고 임계량 이상에서는 유출되어 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 유출을 고려하여 표면농도를 보정하며 기타 다른 환경적 요소에 의한 제거는 고려치 않는다. 침적이 완료된 시점에서 각기 다른 표면에 대한 총 침적량이 계산되면 공기커마 ($\text{pGy per photon mm}^{-2}$) 데이터 라이브러리를 사용하여 피폭자의 거주 위치에 따른 선량률 (이하 선량률이라 함은 성인에 대한 유효선량률을 의미한다)을 평가한다. METRO-K는 누구나 쉽게 이용할 수 있도록 GUI (Graphic User Interface) 환경에서 운용될 수 있도록 구성하였다. 현재까지 원자력발전소의 비정상적 상황에서 방사성물질이 환경으로 누설되는 경우 지표침적에 의한 외부피폭에 중요하게 기여하는 3가지 핵종 (^{137}Cs , ^{106}Ru , ^{131}I)을 고려하고 있다. 요오드는 크게 3가지 다른 화학적 형태 (입자, 유기, 원소형태)로 환경으로 방출될 수 있는데, 이를 화학적 형태에 따라 환경에서 거동은 상당한 차이를 나타낸다. 따라서 요오드의 경우에는 입자, 유기, 원소형태를 구분하여 적용된다. 핵종의 반감기를 고려하여 ^{137}Cs 은 년 단위로, ^{106}Ru 은 월 단위로, ^{131}I 은 일 단위로 평가한다.

2.1 표면에서 환경적 요소에 의한 핵종의 제거

도시환경의 표면은 크게 아스팔트, 콘크리트 등으로 이루어진 비침투성 표면과 토양, 잔디 등으로 이루어진 침투성 표면으로 구성된다. 표면에 침적된 방사성물질은 바람과 강우,

재부유 등에 의해 제거 또는 희석 (이하 제거라 한다)된다. 이 외에 비침투성 표면은 차량의 통행과 사람의 활동, 침투성 표면은 보다 깊은 토양 층으로 이동 등으로 표면의 농도는 시간에 따라 감소하게 된다. 이와 같이 바람, 강우, 토양내 이동 등과 같은 자연적 요소에 의한 제거 뿐 아니라 차량의 통행, 사람의 활동 등과 같은 인위적 요소에 의한 제거로 인한 방사성물질의 농도 감소 또는 이로 인한 공기중 흡수선량률 (이하 흡수선량률이라 한다)의 감소를 통틀어 환경적 요소에 의한 제거라 한다. 환경적 요소에 의한 흡수선량률의 감소는 핵종과 표면 간에 흡착성이 약해 쉽게 제거되는 단반감기 항과 흡착성이 강해 쉽게 제거되지 않는 장반감기 항으로 표현될 수 있다 [11].

여기서,

$$D(t) = D_0 \exp\left(-\frac{0.693t}{T_d}\right) \cdot \left[A \exp\left(-\frac{0.693t}{T_{w,1}}\right) + (1-A) \exp\left(-\frac{0.693t}{T_{w,2}}\right) \right] \quad (1)$$

$D(t)$: 침적 후 시간 t 에서 흡수선량률 (Gy d^{-1})

D_0 : 침적이 종료된 직후 ($t=0$)에서 흡수선량률 (Gy d^{-1})

A : 환경적 요소에 의해 단반감기를 갖는 핵종의 분율

$T_{w,1}$: 환경적 요소에 의한 단반감기 (d^{-1})

$T_{w,2}$: 환경적 요소에 의한 장반감기 (d^{-1})

T_d : 방사능 붕괴에 의한 반감기 (d^{-1})

식 (1)에서 환경적 요소에 의해 단반감기를 갖는 핵종의 분율 (A), 환경적 요소에 의한 단반감기와 장반감기 ($T_{w,1}$ 와 $T_{w,2}$)는 핵종과 표면의 종류 뿐 아니라 다양한 기후 및 사회적 조건 등에 따라 다르다. 체르노빌 원전사고 이후 이들 변수에 대한 여러 분석 실험적 자료가 수집되어 표면의 오염 후 시간에 따른 흡수선량률을 예측하는데 활용되고 있지만 이들 예측 값 간에는 상당한 차이를 보이고 있다. 특히 침적 후 시간

Table 1. Parameter values in Eq. (1) applied to METRO-K in order to simulate the reduction of absorbed dose rate in air

Surfaces						
Parameters	Roof	Paved road	Outer wall	Lawn/Soil	Tree	
A	Cs	0.5	0.6	0.2	0.63	0.8
	Ru	0.29	0.3	0.17	0.95	0.95
	I	0.75	0.75	0.3	0.95	0.8
$T_{w,1}$ (day)	Cs	340	80	365	317.6	36.5
	Ru	29.2	69.4	314	91	36.5
	I	17	40	182.5	160	18
$T_{w,2}$ (day)	Cs	2420	10100	6930	15600	36500
	Ru	2420	10100	6930	4450	36500
	I	2420	10100	6930	15600	36500

이 경과함에 따라 예측 값 간에는 더 큰 차이를 나타내고 있는데 이는 상대적으로 짧은 시간에 수행된 결과로부터 핵종의 장기 거동을 예측하고 있을 뿐 아니라 관측 또는 실험이 수행된 지역의 사회, 환경적 조건 등의 차이에 기인한다. 현재까지 분석되거나 실험이 수행된 대부분의 자료는 장반감기 핵종인 Cs에 대한 것으로 모델 예측값 간의 비교, 모델 예측값과 측정값 간의 비교에서도 대표적 핵종으로 고려되고 있다. 따라서 도시환경을 구성하는 표면에 침적된 핵종의 환경적 요소에 의한 제거에 대한 연구결과는 아직까지 매우 제한적이며 또한 불확실성이 매우 크다고 할 수 있다. CHERURB-95은 당초 CHERURB 모델을 체르노빌 원전사고 이후에 세계 각국에서 수행된 도시환경에서 핵종거동에 대한 연구결과를 분석하여 확장·개선한 것이다. CHERURB-95에서는 Cs 뿐 아니라 침적으로 인한 외부피폭에 중요한 Ru, I에 대한 중요자료를 포함하고 있다. 캐나다와 우리나라의 사회·환경적 요소 등이 상이하겠지만 현재까지 국내 자료가 전무한 상황이므로 METRO-K에서는 CHERURB-95에서 적용되는 변수값을 사용하였다. 표 1은 METRO-K에서 침적된 핵종의 환경적 요소에 의한 흡수선량률의 변화를 모사하기 위해 적용된 식(1)의 변수값을 보여준다.

2.2 피폭자의 거주 위치에 따른 선량평가

도시환경은 피폭자가 위치한 장소마다 주변 환경의 공간적 구조물의 복잡성과 다양성 등으로 선량 예측을 수학적으로 모델링하기란 여간 어려운 일이 아니다. 특정 주변 환경에 대해 모델링을 하였더라도 주변의 공간적 구조물의 배치 등이 바뀌게 되면 전체적으로 모델링을 새롭게 하여야 하며, 또한 point kernel 방법이 아닌 몬테칼로 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 선량률을 개별적으로 평가하고 주변의 여러 오염표면으로부터 받게 되는 선량률을 합하여 최종적으로 피폭자의 위치에 따른 선량률을 얻을 수 있다. 이러한 방법의 장점은 주변의 복잡하고 다양한 공간적 구조를 쉽게 구성할 수 있으며 오염표면마다 각기 다른 제염대책을 수립하는데 용이하다.

피폭자의 위치에서 각기 다른 오염표면으로부터 받게 되는 선량률은 피폭자의 특정 위치에 대해 에너지별, 오염 표면별 공기커마 값을 데이터 라이브러리화하여 이용하였다. Meckbach 등은 몬테칼로 방법을 사용하여 유럽 도시지역의 4가지 대표적 거주형태(조립식 단층주택, 2층의 기와 콘크리트 주택, 2층의 다세대 연립주택, 5층의 대형 건물)에 대해 공기커마 값을 제시하고 있다 [12]. 이 결과는 PARATI와 CHERURB-95에 활용되고 있으며, EXPURT에서도 향후 모델 개선시 이를 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 공기커마 값을 조합하여 적용하였다.

조합하는 방법으로는 그림 2와 같이 고층 아파트(10층으로 가정)인 경우 지붕의 오염으로 인한 최상층 실내의 공기커마 값은 유럽 5층 대형건물의 지붕 오염으로 인한 5층 실내의 공기커마 값을, 아파트 중간층(5층으로 가정) 실내에 대한 공기커마 값은 유럽 대형건물에 대한 1층 실내의 공기커마 값을 적용하였다. 또한 아파트 주변 나무의 오염으로 인한 저층과 중간층 실내에서 공기커마 값은 유럽 대형건물 1층과 5층 실내에서 나무의 오염으로 인한 공기커마 값을 적용하였다. 아파트의 고층 실내에 대한 공기커마 값은 유럽 대형건물의 5층 실내에서 나무의 오염으로 인한 공기커마 값과 지붕과 같은 다른 오염표면으로 인한 공기커마 값과 비교하여 무시 가능한 수준일 것으로 판단된다. 이와 같이 유럽의 4가지 대표적 거주형태에 대한 공기커마 값을 조합하여 우리나라의 7가지 대표적 거주형태에 대한 공기커마 데이터 라이브러리를 작성하였다. 조합하여 재구성한 예시로써 우리나라의 도시민의 대표적 거주형태인 고층 아파트 지역에서 피폭자의 거주위치에 대한 오염 표면별, 에너지별 공기커마 값을 표 2에 나타냈다. METRO-K는 피폭자가 거주하는 가옥의 표면오염에 따른 피폭영향 뿐 아니라 주변 환경의 표면오염에 따른 피폭영향도 고려한다. 예로 피폭자가 아파트의 고층에 위치하고 도로 건너 주변에 다른 아파트가 있는 경우 피폭자의 총 선량률은 피폭자가 거주하는 아파트의 표면오염 뿐 아니라 도로, 주변 아파트의 외벽과 지붕의 표면오염 인한 영향의 합이 된다. 표에 제시된 3가지 에너지 이외의 다른 에너지에 대한 공기커마 값은 로그내삽을 통해 얻는다.

도시환경을 구성하는 각기 다른 표면의 오염농도가 평가되면 핵종의 감마 에너지 방출률과 공기커마 등을 사용하여 피폭자의 위치에 따른 선량률을 평가한다.

$$H_i(t) = 8.64 \times 10^{-14} DCF_i \sum_k y_k \sum_j \omega_j C_j(t) K_{ijk} \quad (2)$$

여기서,

i: 피폭자 위치

j: 오염 표면

k: 에너지

H_i: 시간 *t*에서 선량률 (Sv d⁻¹)

DCF_i: 감마선 선량환산인자 (Sv Gy⁻¹)

도시환경을 구성하는 각기 다른 표면의 오염농도가 평가되면 핵종의 감마 에너지 방출률과 공기커마 등을 사용하여 피폭자의 위치에 따른 선량률을 평가한다.

$$H_i(t) = 8.64 \times 10^{-14} DCF_i \sum_k y_k \sum_j \omega_j C_j(t) K_{ijk} \quad (2)$$

여기서,

i: 피폭자 위치

j: 오염 표면

k: 에너지

H_i(t): 시간 *t*에서 선량률 (Sv d⁻¹)

DCF_i: 감마선 선량환산인자 (Sv Gy⁻¹)

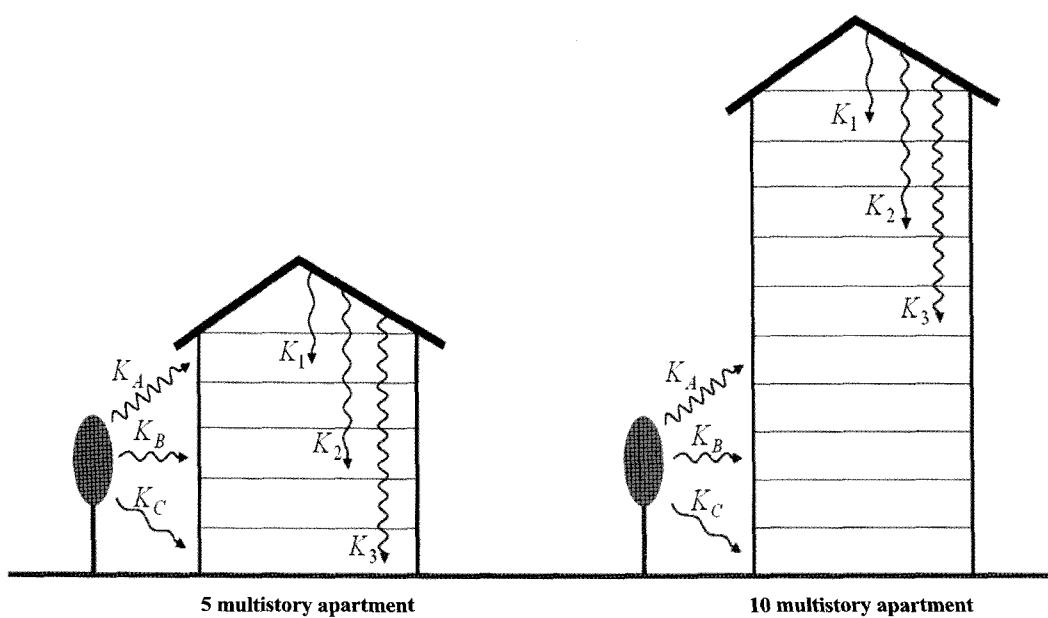


Fig. 2. An example of kerma values applied to METRO-K in order to predict dose rates for different urban environments.

Table 2. Kerma values for the multistory apartment applied to METRO-K (pGy per photon mm²)

		Contaminated surfaces													
		A residing building of a receptor						Neigh. buildings across the street			A park across the street				
Locations		WD	OW	RF	BS	GD	GT	RD	OW	RF	RD	PK	OW	RF	ST
0.3 MeV	Basement	0.001	0.002	0	0.31	0.004	0	0.004	0.01	0	0.004	0.001	0.003	0	0.004
	L. floor	2.9	0.5	0	0	1.8	0.33	1	2	0	1.4	1.6	0.7	0	0.65
	M. floor	2.9	0.6	0	0	0.25	0.03	0.09	1.8	0.01	0.15	0.9	0.7	0.03	0.05
	H. floor	2.8	0.4	0.6	0	0	0	0	1.1	0.3	0	0.51	0.4	0.1	0
	Road	8.1	57	0	0.004	0.25	0.01	200	130	2	230	66	32	1	25
	Garden	6.6	45	0	0.003	252	10	0.2	57	3	0.2	3	56	3	0.05
0.662 MeV	Basement	0.009	0.008	0	0.71	0.01	0.0005	0.018	0.042	0	0.013	0.004	0.024	0	0.013
	L. floor	6.5	2.1	0	0	5.1	0.9	2.6	5.4	0	3.9	4.8	2	0	1.8
	M. floor	6.5	2.1	0	0	0.5	0.06	0.15	5.3	0.08	0.3	2.2	2	0.05	0.09
	H. floor	6.5	2	3.8	0	0	0	0	3	0.6	0	1	0.9	0.25	0
	Road	16	115	0	0.08	0.3	0.02	430	270	3	495	140	68	1.5	52
	Garden	14	89	0	0.04	530	21	0.4	110	4	0.5	4	110	4	0.1
3 MeV	Basement	0.05	0.4	0	2.7	0.2	0.02	0.3	1.7	0.2	0.2	0.07	1.2	0	0.2
	L. floor	24	26	0	0.04	39	4.7	2.4	32	0	34	43	14	0	10
	M. floor	25	28	0.01	0	3.3	0.4	1.1	33	1	2	20	14	0.7	0.8
	H. floor	24	26	56	0	0	0	0	21	3.3	0	9.3	10	2.1	0
	Road	48	315	0	0.03	1	0.08	1,260	810	8.5	1,490	585	220	2.5	154
	Garden	38	250	0	0.02	1,580	61	4	320	9.5	2	10	320	9	0.5

Abbreviation : WD : Window OW : Outer wall RF : Roof BS : Basement window GD : Garden GT : Garden trees RD : Road PK : Park ST : Street trees L. floor : Lower floor (1st floor) M. floor : Middle floor (5th floor) H. floor : Higher floor (10th floor)

w_i : 오염 표면의 거칠기에 따른 선량감쇄인자

y_k : 감마선 방출률 ($\text{photon sec}^{-1} \text{Bq}^{-1}$)

G : 시간에서 표면농도 (Bq m^{-2})

K_{ik} : 공기커마 (pGy per photon mm⁻²)

침적 후 시간에 따른 농도 $G(t)$ 는 식 (1)에서 나타낸 바와 같이 시간에 따른 흡수선량률의 변화와 동일하다고 가정한다. 엄밀히 말하면 식 (1)은 침적 후 오염표면의 농도가 아닌 흡수선량률의 변화를 예측하는데 적용된다. 특히 토양, 잔디 등과 같은 침투성 표면에 대해서는 감마선의 자체 차폐효과로 표면농도의 변화와 흡수선량률의 변화는 다소 차이가 있을 것이다. 선량률은 표면농도보다는 흡수선량률에 보다 직접적으로 관계하기 때문에 식 (2)는 농도의 변화보다는 흡수선량률의 변화를 내포하고 있다고 할 수 있다. 감마선 선량환산인자 DCF 는 피폭자의 거주위치에 따라 피폭영향을 주는 오염표면의 기하학적 구조와 감마선의 스펙트럼 등이 다르기 때문에 실외와 실내에 위치한 성인에 대해 각각 0.8 Sv Gy^{-1} , 0.7 Sv Gy^{-1} 를 적용하였다 [13]. 오염 표면의 거칠기에 따른 선량감쇄인자 w_i 는 오면이 지붕, 포장도로, 외벽, 잔디/토양, 나무에 대해 각각 $1.0, 0.9, 0.95, 0.8, 0.9$ 를 적용하였다 [8].

3. 결과 및 고찰

우리나라의 도시환경을 고려하여 개발된 방사능 오염에 따른 선량평가 모델 METRO-K의 적용결과로 오염표면마다 동일한 1 Gy d^{-1} 의 초기 흡수선량률에 대해 시간에 따른 환경적 요소 (방사능 붕괴는 제외)에 의한 흡수선량률의 변화를 그림 3에 나타냈다. 침적 후 시간에 따른 흡수선량률은 표면에 따라 큰 차이를 나타냈다. 전반적으로 건물 외벽의 오염으로 인한 흡수선량률의 감소가 가장 느리게 진행되는 반면 나무의 오염으로 인한 흡수선량률의 감소가 가장 빠르게 진행되었다. 특히 포장도로와 나무의 ^{137}Cs 오염은 특별한 제염 대책이 이루어지지 않더라도 침적 후 1년 정도만 경과하면 각각 흡수선량률이 각각 약 60%, 80%가 감소되는 반면 외벽의 경우에는 단지 15% 정도 만이 감소되었다. 나무에 침적되어 1년이 경과하면 나무로부터 받게 되는 흡수선량률은 급격히 감소하는데 이는 침적 후 첫 해가 지나면 나무 잎에 침적된 핵종이 낙엽과 함께 지상에 떨어져 제거되기 때문이다. 비록 외벽에 전침적되는 정도는 나무에 비해 약 100배 적지만 침적 후 10년이 되어도 불과 40% 정도 만의 흡수선량률의 감소를 보여 상당히 오랜기간동안 잔존하는 것을 알 수 있다. 또한 같은 오염표면에 대해서도 핵종에 따라 환경적 요소에 의한 흡수선량률의 감소는 뚜렷한 차이를 나타내고 있다. 지붕에 침적되어 한 달 경과 후 환경적 요소에 의한 ^{106}Ru 의 흡수선량률 감소는 약 15%에 불과한 반면, ^{131}I 은 약 50%를 나타냈다. 방사능 붕괴에 의한 흡수선량률의 감소를 고려할 경우 지붕의 ^{131}I 오염으로 인한 흡수선량률의 감소는 ^{106}Ru 보다 훨씬 빠르다.

가상의 ^{137}Cs 환경누설 시나리오를 구성하여 침적이 완료된 직후 피폭자의 거주위치에 따라 각기 다른 오염 표면으로부터 받게 되는 선량률을 평가하였다. 공기중 ^{137}Cs 의 농도는 일주일동안 1 Bq m^{-3} 로 일정하며, 이 기간동안 강우는 없다고

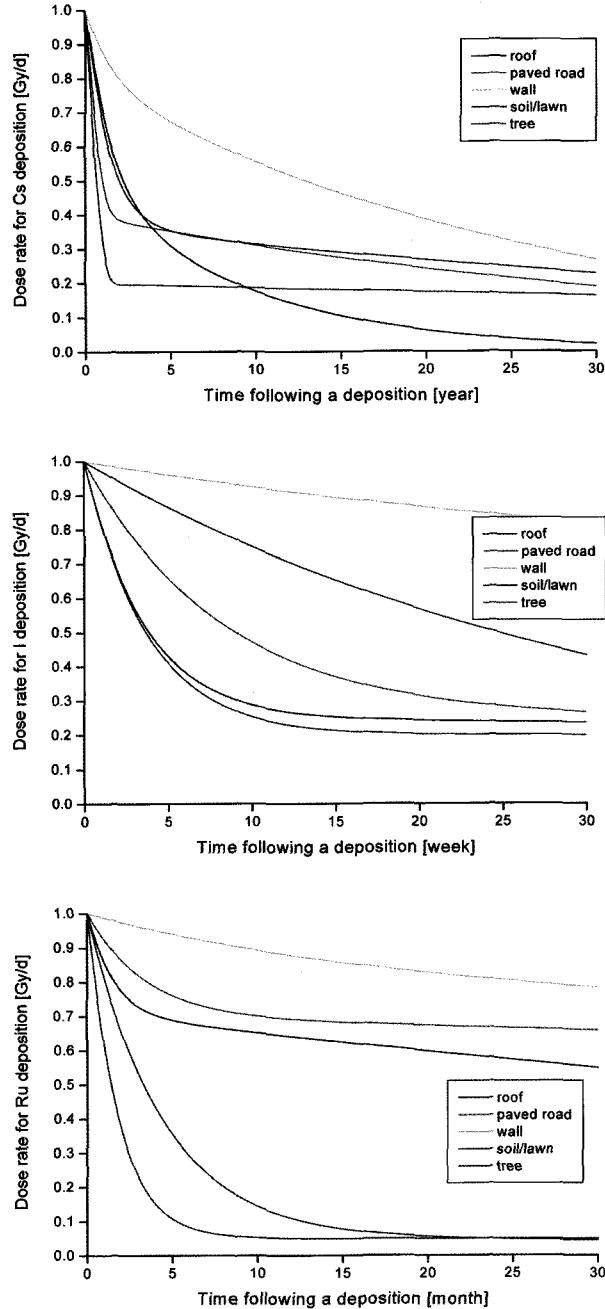


Fig. 3. Temporal behavior of air absorbed dose rates due to environmental removal on different surfaces ; Top, middle and bottom figures are for ^{137}Cs , ^{131}I and ^{106}Ru , respectively.

가정하였다.

그림 4는 피폭자가 거주하는 아파트 정면에 다른 아파트 또는 고층 건물이 있는 경우 피폭자의 위치에 따른 선량률을 나타냈다. 피폭자가 아파트의 내부보다는 외부에 위치할 경우 훨씬 높은 선량률을 나타냈으며, 특히 피폭자가 포장도로보다는 정원에 위치할 경우 보다 높은 값을 보였다. 피폭자가 아파트의 정원에 위치할 경우 피폭자가 거주하는 아파트의 정원과 나무의 표면오염으로 받게 되는 피폭영향이 지배적이었다. 피

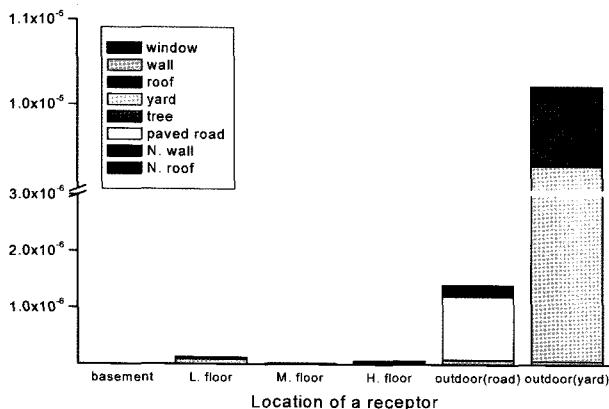


Fig. 4. Dose rates at different receptor locations in a multistory apartment with neighboring ones across the street. (Abbreviation ; N. : Neighboring apartments, L. : Lower, M. : Middle, H. : Higher)

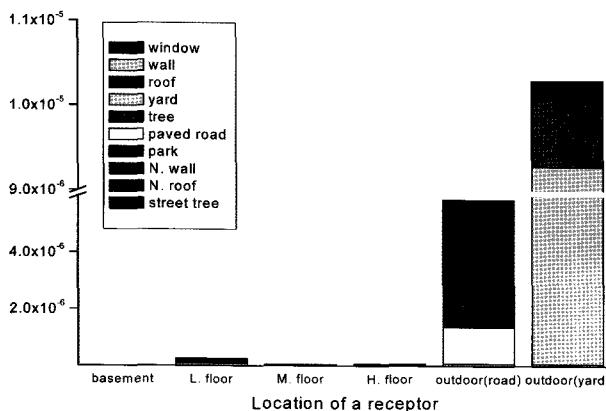


Fig. 5. Dose rates at different receptor locations in a multistory apartment with neighboring ones across the street. (Abbreviation ; N. : Neighboring apartments, L. : Lower, M. : Middle, H. : Higher)

폭자가 아파트의 정원에 위치한 경우 폭자가 거주하는 아파트 외벽의 오염으로 인한 공기커마 값이 정원 나무의 오염으로 인한 공기커마 값 보다 약 4배 (^{137}Cs 의 방사능 봉괴에 따른 감마 에너지는 0.662 MeV, 감마 방출률은 85%)가 높음에도 불구하고 오염 나무로 인한 선량률의 기여가 높게 나타나는데 이는 나무에 대한 건침적속도 ($6.12 \times 10^4 \text{ m sec}^{-1}$ [6])가 외벽에 대한 건침적속도 ($1.8 \times 10^5 \text{ m sec}^{-1}$ [6])보다 훨씬 높기 때문이다. 폭자가 포장도로에 위치한 경우 오염된 포장도로에 대한 높은 공기커마로 포장도로의 오염에 의한 선량의 기여가 가장 높게 나타났다.

그림 5는 그림 4와 같은 조건에 대해 폭자가 거주하는 아파트의 정면에 고층 건물대신 넓은 공원이 있는 경우 각기 다른 오염표면으로부터 받게 되는 선량률을 나타냈다. 마찬가지로 폭자가 거주하는 아파트의 오염 정원과 나무가 선량률에 기여하는 주요 오염표면이었다. 폭자가 포장도로에 위치

한 경우 공원, 가로수, 포장도로의 순으로 선량률의 기여가 높은 표면으로 나타났으며, 이는 그림 3과 비교하여 알 수 있듯이 폭자가 거주하는 주변환경에 따라 선량률에 미치는 오염표면의 영향이 다르다는 것을 말해 준다. 포장도로에 위치한 폭자에 대해 폭자가 거주하는 아파트의 정면에 넓은 공원이 있는 경우가 다른 고층 건물이 있는 경우 보다 높은 선량률을 나타냈다. 아파트의 실내 거주위치에 따라서도 다른 선량률을 나타냈는데 아파트의 저층 (1층), 고층 (10층), 중간 층 (5층), 지하의 순서대로 높은 선량률을 나타냈다. 저층에 위치한 경우 정원, 고층에 위치한 경우 지붕의 오염 영향이 가장 높았다.

4. 결론

도시지역의 방사능 오염으로 거주민의 폭영향을 평가할 수 있는 모델 METRO-K는 크게 다음과 같은 특성이 있다. 1) 실험 또는 경험자료를 사용하기 때문에 모델의 수학식이 간단하여 계산에 필요한 변수의 수가 적으며, 2) 도시환경을 구성하는 기본 표면을 사용하여 복잡하고 다양한 주변 환경을 쉽게 구성할 수 있으며, 3) 오염 표면마다 기여하는 선량률을 평가함으로써 표면마다 각기 다른 제염대책을 수립하는데 용이하다. 아파트 밀집지역에 대한 가상 오염 시나리오의 적용결과 폭자가 거주위치 뿐 아니라 폭자가 거주하는 주변 환경에 따라 선량은 확연한 차이를 나타냈다. 이러한 차이는 주로 각기 다른 표면의 침적정도와 환경적 요소에 의한 제거, 그리고 주변 환경에 따라 다른 표면별 공기커마값 등에 기인한다. METRO-K는 2004년부터 IAEA 주관 국제 공동연구프로그램 EMRAS에 참여하고 있으며, 최근에 채르노빌 인근 Pripyat 도시지역 오염 시나리오에 대한 결과를 제출하여 다른 참여 모델의 결과와 비교, 고찰 중에 있다. 향후 METRO-K는 국내 도시지역의 방사능 오염에 따른 제염대책 결정지원을 위한 도구로 확장할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행하는 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었습니다

참고문헌

1. Kelly GN. The Importance of the Urban Environment for Accident Consequences. Radiation Protection Dosimetry 1985;21(1):13-20.
2. Workshop on Accidental Urban Contamination. Denmark;Riso National Laboratory 1987.
3. Conference on Radioactive Contamination in Urban Areas. Denmark;Riso National Laboratory 2003.
4. 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.
5. <http://www-ns.iaea.org/projects/emras/>.
6. 황원태, 김은한, 정효준, 서경석, 한문화. 도시환경에서 방사성물질의 오염평가 모델개발. 방사선방어학회지 2005;30(3): 99-105.
7. Crick MJ, and Brown J. EXPURT : A Model for

- Evaluating Exposure from Radioactive Material Deposited in the Urban Environment. NRPB report NRPB-R235 1990.
- 8. Peterson SR, Chouhan S, Heinmiller B, Koch J. CHERURB-95 : Urban Contamination and Dose Model. A research report prepared for the Atomic Energy Control Board 1995.
 - 9. Rochedo ER, Conti LF, Paretzke HG. PARATI - A Dynamic Model for Radiological Assessments in Urban Areas ; Part I. Modelling of Urban Areas Their Contamination and Radiation Fields. Radiat. Environ. Biophys. 1996;35:243-261.
 - 10. Roed J. Run-Off from Weathering of Roof Material Following the Chernobyle Accident. Radiation Protection Dosimetry 1987;21(1):59-63.
 - 11. Gale HJ, Humphreys DLO, Fisher EMR. Weathering of Caesium-137 in Soil. Nature 1964;201(4916):257-261.
 - 12. Jacob P, Meckbach R, Paretzke HG. Gamma Exposures to Radionuclides Deposited in Urban Environments. Part I : Kerma Rates from Contaminated Surfaces. Radiation Protection Dosimetry 1988;21(3):167-179.
 - 13. Jacob P, Meckbach R. Shielding Factors and External Dose Evaluation. Radiation Protection Dosimetry 1987;21(1):79-86.

A Model for Radiological Dose Assessment in an Urban Environment

Won Tae Hwang, Eun Han Kim, Hyo Joon Jeong, Kyung Suk Suh and Moon Hee Han
Korea Atomic Energy Research Institute

Abstract - A model for radiological dose assessment in an urban environment, METRO-K has been developed. Characteristics of the model are as follows ; 1) mathematical structures are simple (i.e. simplified input parameters) and easy to understand due to get the results by analytical methods using experimental and empirical data, 2) complex urban environment can easily be made up using only 5 types of basic surfaces, 3) various remediation measures can be applied to different surfaces by evaluating the exposure doses contributing from each contamination surface. Exposure doses contributing from each contamination surface at a particular location of a receptor were evaluated using the data library of kerma values as a function of gamma energy and contamination surface. A kerma data library was prepared for 7 representative types of Korean urban buildings by extending those data given for 4 representative types of European urban buildings. Initial input data are daily radionuclide concentration in air and precipitation, and fraction of chemical type. Final outputs are absorbed dose rate in air contributing from the basic surfaces as a function of time following a radionuclide deposition, and exposure dose rate contributing from various surfaces constituting the urban environment at a particular location of a receptor. As the result of a contaminative scenario for an apartment built-up area, exposure dose rates show a distinct difference for surrounding environment as well as locations of a receptor.

Keywords : urban environment, Radioactive contamination, Building type, METRO-K, Kerma