'00 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

섭식경로내 방사성물질 거동분석을 위한 동적모델 개발

Development of a Dynamic Model for Estimating the Behavior of Radionuclides in Food Chain

유동한, 최용호

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

국문요약

원자력시설에서 사고발생시 대기중에 방출된 방사능은 주변의 농경지에 침적하여 농작물 또는 목초로 이동 결국은 인체에 흡수되어 인체피폭이 일어난다. 이런 식품섭취에 의한 인체피폭선량을 평가하기 위해서는 환경에 누출된 방사능이 이런 경로를 통해 이동하는 방사능의 농도를 계산하는 수학적인 모델이 필요하다. 본 연구에서는 국내에서 개발된 ECOREA모델을 재검토하여 새로운 메카니즘에 대한 모델링등을 추가하고 사용자에게 보다 편리한 interface을 제공하도록 개선하는 일련의 노력을 소개하고자 한다. 이러한 노력은 원자력시설의 가동중 또는 사고시 안전성을 확보하는데 중요하고 합리적인 환경영향평가 또는 이에 따른 대책 수립시에도 도움이 되리라고 판단된다.

abstract

The release of radionuclides from nuclear facilities following an accident into air would depose on the terrestial surface, cause the contamination of soil and finally result in the intake by human through rice and vegetables. It is necessary to develop the mathematical model for the assessment of the radiological impact on human. This study reviews the previous efforts on the development of such a model in Korea and presents the current progress on the model improvement including a more user-friendly environment and uncertainty assessment. These efforts could increase safety margins of nuclear facilities during the normal opearation and at the accident of nuclear facilities and provide a reasonable assurance on the environmental impact due to release of radionuclide to the environment or the development of an optimum regulatory guidelines with respect to human dose assessment

1. 서론

원자력시설 또는 원자력발전소등에서 사고로 인해 대기중에 방출된 방사능은 주변으로 확산되어 나가는 중 일부는 농경지나 토지에 침적하게 되며 이렇게 침적된 방사능은 토양으로 부터 농작물 또는 목초로 이동하게 된다. 이와 같은 경로를 통해 방사능물질이 인체에 흡수되어 인체 피폭이 일어나게 된다. 이런 식품섭취에 의한 내부피폭 선량을 평가하기 위해서는 환경에 누출된 방사능이 이런 경로를 통해 이동하는 방사능의 농도를 계산하는 수학적인 모델이 필요하게 된다. 우선 이러한 경로를 통해 이루어지는 주요 인체피폭경로는 그림 1에 표시되어 있다.

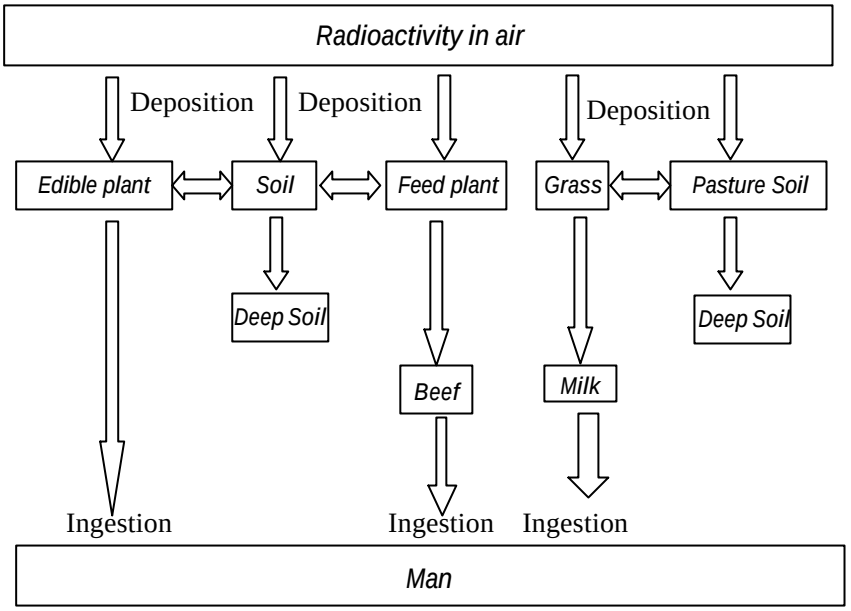

그림 1. 방사능물질의 육상섭식 경로

이러한 육상섭식경로를 통한 방사성물질의 이동에 대한 연구는 미국의 경우 1960년말부터 시작되었는데 대표적인 모델은 ORNL의 TERMOD[1], 최근의 모델로는 PATHWAY[2]등을 들 수 있다. 반면, 국내의 경우 1980년말부터 이 분야의 연구를 시작하여 ECOREA라는 모델을 개발한 적이 있다[3].

본 연구는 현재까지 진척된 국내개발모델인 ECOREA를 재평가하고 이를 바탕으로 하여 그 동안 새롭게 밝혀진 현상들을 추가한 보다 개선된 모델인 ECOREA-II의 개발에 대해 소개하려고 한다. 우선 육상섭식경로를 통한 방사성물질의 이동을 모의하기 위한 동적모델 개념을 소개하고 이러한 개념을 사용하여 국내에서 개발된 모델인 ECOREA의 모델링과 모델식을 검토한다. 이렇게 검토된 ECOREA 모델식에서의 문제점들을 앞으로 개발된 ECOREA-II에서는 어떻게 개선하는가 하는 노력에 대해 소개한다.

2. 기존모델 검토

2.1 동적모델이란?

농작물의 방사능오염은 크게 방사성물질의 작물 표면침적과 토양으로부터의 뿌리흡수에 의해 이루어진다. 뿌리흡수에 의한 식물오염은 사고후 장기적으로 지속되는 측면은 있으나 식물 표면침적에 비해 선량기여도가 훨씬 낮다. 따라서 사고시 인체선량에 커다란 영향을 미치는 식물의 표면 침적에 의한 방사선 오염의 경우에 대해 평가하는 것이 보다 중요하다.

동적 모델은 생태계내에서 이러한 물질의 이동 경로를 일정구간별로 compartment로 가정하여 이 들간의 방사성 물질의 입출력을 수학적으로 모의한 미분방정식들을 수립하는 것을 기본으로 하고 있다. 물론 이 들 copmartment간의 전이 속도계수등은 기존 실험에서 얻어진 값이나 또는 여러 수학적 단계 및 전문가 의견등을 고려하여 정량적으로 얻어져야 한다.

2.2 ECOREA 모델

국내에서 개발한 ECOREA에서는 방사능물질의 이동현상을 위해 식물부에서는 2 개의 compartment로, 토양에서는 2개의 compartment로 나누어 고려하였다(그림 2 참조). 대기중으로부터 침적된 방사능중 일부는 식물체 표면에 침적되고 나머지는 지표에 침적된다. 식물체 표면에 침적된 방사능의 일부는 가식부로 이동하고 (translocation) 일부는 바람이나 강우등의 풍화 (weathering)작용과 마른 잎, 식물체의 부스러기 등에 포함되어 토양으로 이동한다. 한편, 경작토에 침적된 방사능은 재부유 (resuspension) 및 뿌리 흡수 (root uptake)에 의하여 식물의 가식부로 이동하고 일부는 뿌리흡수가 불가능한 더욱 깊은 곳으로 이동한다고 가정한다. 이때 뿌리흡수 가능지역의 토양은 쟁기질에 의해 섞이므로 균일농도의 토양과 그밖의 soil sink로 구분한다.

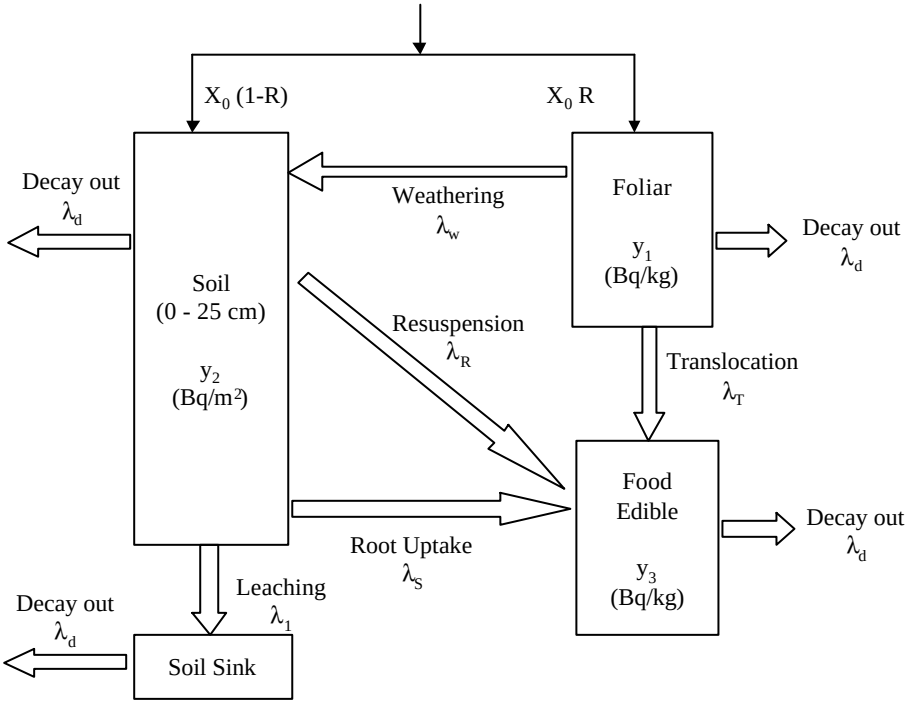

그림 2. ECOREA에서 고려된 각 compartment에서의 과정

여기서는 ECOREA 에서 고려한 주요메카니즘과 모델식을 살펴보기로 한다.

작물 엽면 침적을 고려한 차단계수

대기로부터 침적되는 방사성물질의 일부는 지표에 도달하기 전에 식물체에 의해 차단되어 식물체 표면에 잔류하게 된다. 차단계수 R은 대기로부터 침적되는 전 방사능중 농작물, 채소 도는 목초의 공기중 노출된 부분에 차단되어 침적되는 분율로 정의된다. 여기서 침적이란 습침적, 건침적 또는 두가지를 합한 전 침적을 말한다. 차단계수는 방사성물질의 물리화학적 형태, 식생밀도및 식물특성에 영향을 받고 침적당시의 기상조건에 따라서도 달라진다. 무엇보다도 식물의 성장에 따라서 이 계수는 증가할 것이다. ECOREA 에서는 이러한 차단계수를 다음과 같은 식물성장의 관계로부터 유도하여 사용한다.

$$R = 1 - e^{(-mY_t)}$$

여기서 상수 m는 2.3 ~ 3.3 m^2 /kg-dry 이고 Y_t 는 수확시기 지상부의 biomass (kg-dry/m^2) 량이다.

앞서 고려한 식에서 Y_t는 시간에 따른 함수로 작물수확시기에 지상부 biomass량을 최대로 하여 성장기간중의 biomass량이 직선적으로 증가한다고 가정하여 아래와 같은 식으로 표현한다.

$$Y_t(t) = Y_{th}\left(\frac{t_h - t}{t_e}\right)$$

여기서 Y_{th}는 수확기 단위면적당 지상부 dry biomass (kg-dry/m^2) 을 의미하며, t_h는 수확일, t_e는 작물성장기간을 의미한다.

풍화 제거작용: weathering 효과

식물체의 입면에 침적된 방사능은 자연 붕괴에 의해 감쇄될뿐만 아니라 기후의 풍화작용에 의해서 감소된다. 이때 풍화작용에 의해 제거된 방사능은 토양으로 침적된다고 가정한다. 실제 이러한 현상은 많은 영향인자에 의해 영향을 받는다 예로 방사능물질의 화학적 형태, 식물의 형태, 강우량, 식조직의 흡착성, 그리고 바람의 속도등을 들수 있다. ECOREA에서는 이러한 풍화제거반감기를 14일로 가정하여 제거속도계수, l_W = 0.0495 (d^{-1}) 를 사용하고 있다.

엽면침적에서 가식부로의 이동: translocation 효과

대기로부터 엽면에 침적한 방사능이 가식부로 이동하게 된다. 이러한 이동속도를 추산하기 위해 ECOREA에서는 이동속도계수인 l_T를 사용한다. 현 모델에서는 $l_T = F_V / t_e$로 정의되는데 이때 F_V는 수확시점을 기준으로 하여 가식부로 가는 분율로 모든 핵종에 대해 일정한 값을 사용한다. 엽채류의 경우= 1.0, 다른 작물의 경우= 0.1을 사용하며, t_e는 작물의 성장기간을 의미한다.

토양이동

토양에 포함된 방사능의 물리, 화학적 형태는 식물의 뿌리흡수에 영향을 미친다. ECOREA에서는 이러한 토양이동을 두가지로 나누어 고려하고 있다. 첫째는 경작지경우로 논이나 밭처럼 매년 주기적으로 쟁기길이 이루어져 일정깊이의 토양은 균일하게 섞어있다고 가정한다. 이 경우 토양 균일혼합층의 두께는 25 ㎝ 로 가정하고 그이하는 soil sink로 가정한다. 두번째는 목초지경우로 경작지와 달리 작토가 시행되지 않는 경우이다. 이 경우는 토양층의 0 ~ 1 ㎝ 두께는 포토로 뿌리흡수보다는 재부유가 가능한 영역이고 1 ~ 15 ㎝ 두께는 뿌리 흡수가 가능한 영역, 나머지는 soil sink로 가정한다.

이때 토양이동속도상수 l_1 는 아래와 같이 결정된다.

$$l_1 = \frac{R_p}{q\,T\,(1+\frac{r}{q}K_d)}$$

여기서 T는 토양두께, θ는 함수율, ρ는 가비중, 그리고 R_p 는 침수율을 의미한다. K_d 는 분배계수로 방사능 핵종별로 다르다.

재부유현상

토양에 침작된 방사능물질은 바람과 같은 물리적 작용으로 재부유하게 된다. 실제 이런 재부유에 영향을 주는 요소는 토양의 표면특성, 침적물질의 특성 및 풍속등과 같은 지역적 특성이 있다. ECOREA 에서는 ECOSYS에서 사용한 재부유오염인자, l_{re} 라는 개념을 사용한다. 이는 시간에 따라 침적물이 재부유하여 식물체에 침적하여 가식부를 오염시키는 과정보다는 최종적으로 가식부를 오염시키는 상태를 바탕으로 한 것으로 이 경우, 재부유오염인자는 아래와 같이 정의된다.

$$l_{re} = \frac{concentration\,in\,edible\,part(Bq/kg-fresh)}{concentration\,in\,soil\,(Bq/kg-soil)}$$

이런 재부유오염인자를 사용하여 재부유속도상수는 다음과 같이 정의한다.

$$l_r = \frac{l_{re}\,Y_V}{t_e\,P}$$

여기서 Y_V 는 가식부의 수확량 (kg/ m^2) , P는 토양의 표면밀도 (kg/ m^2)을 의미한다.

뿌리흡수를 통한 가식부로의 이동

뿌리를 통한 방사능물질의 이동은 여러 물리, 화학적 현상에 따라 변화하기 때문에 실험적으로도 측정하는 것이 매우 어렵다. ECOREA에서는 토양과 식물체가 서로 평형상태에 있다고 가정하여 얻어진 이른바 농축계수 (Biolaccumulation factor) 를 이용하여 뿌리이동속도계수를 다음과 같이 유도하였다.

$$l_S = \frac{B_{iv}\, Y_V}{t_e\, P}$$

여기서 B_{iv} 는 핵종의 토양으로부터 뿌리흡수에 의한 농축계수, Y_V 는 가식부의 수확량 (kg/ m^2) , P는 토양의 표면밀도 (kg/ m^2), t_e 는 작물성장기간을 의미한다.

3. ECOREA-II 모델 개발

기존의 ECOREA 모델을 평가하여 좀 더 개선된 모델메카니즘과 이에 대한 모델식을 추가하고 사용자 편의성및 불확실성 분석부분등을 보강하여 개선된 ECOREA-II 모델을 개발하려고 한다.

3.1 모델메카니즘 개선

<u>토양 모델링부분</u>

현 모델에서는 ECOREA 와 달리 토양에서의 방사성물질의 이동을 보다 자세히 평가하기 위해 아래와 같이 토양을 4 가지로 나누어 모델링한다.

1) 표면토양 (0 - 1 ㎝),
2) root zone 토양 (농작 토양: 1 - 25 ㎝; 목초지 토양: 1 - 15 ㎝),
3) fixed soil (농작 토양: 1 - 25 ㎝; 목초지 토양: 1 - 15 ㎝),
4) 심층토양 (농작 토양: > 25 ㎝; 목초지 토양: > 15 ㎝)

그림 3에서는 현 모델에서 고려하려는 각 compartment에서의 여러 이동 메카니즘을 보여주고 있다.

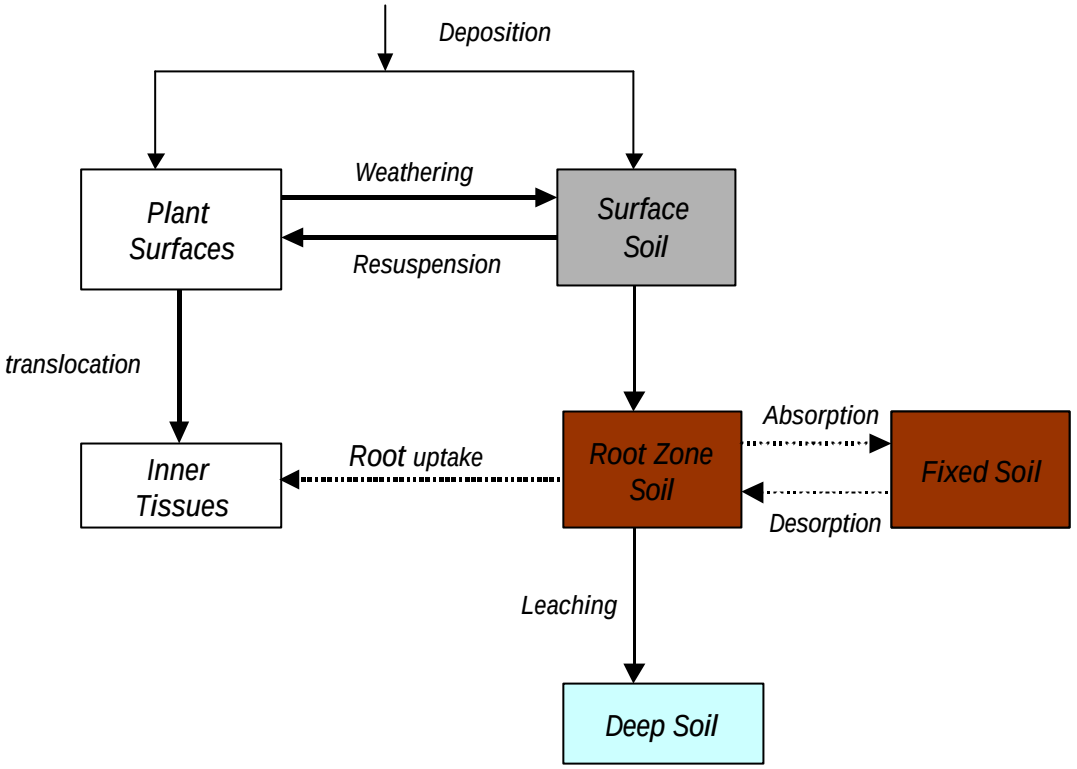

그림 3. 각 compartment사이의 이동 메카니즘

<u>식물성장 모델링과 차단계수</u>

ECOREA에서는 Biomass의 증가를 선형적으로 고려하였으나 현 모델에서는 biomass의 증가를 다음과 같이 보다 현실적인 성장모델을 사용하였다.

$$\frac{dB}{dt} = k_g\, B\left(\frac{B_{\max} - B}{B_{\max}}\right)$$

여기서 k_g는 성장계수 (d^{-1})을 의미하며, B는 현재 biomass를, B_{max}는 최대 biomass를 의미한다. 윗식은 다음과 같이 정리되어 시간에 따른 biomass는 아래식으로 표현될 수 있다

$$B(t) = \frac{B_{\max}\, B_0}{(B_{\max} - B_0)\, e^{-k_g t} + B_0}$$

여기서 B_0는 작물체의 최초 biomass를 의미한다.

따라서 식물성장과 관련되어 식물체 표면에 잔류하는 율을 표시한 차단계수 f은 다음과 같이 과 같이 정의하였다.

$$f = 1 - e^{(-aB_f)}$$

여기서 α는 잎에 의한 차단계수를 의미하고 B_f는 biomass를 의미한다.

Percolation 현상추가

이 현상은 토양의 표층부분에서 방사능물질이 root zone 토양으로 아랫쪽 방향으로 움직이는 것을 의미한다. 이러한 현상을 percolation 속도상수, λ_{pc}, 로 표시하여 모델링한다.

Adsorption and Desorption 현상추가

방사성물질중 Cs-137 의 경우, root zone 토양과 fixed soil간의 고착현상이 실험적으로 관찰되었다. 이를 모의하기 위해 모의하기 위해 다음과 같은 속도상수들을 사용한다.

adsorption rate constants, l_{ad} (d^{-1})	desorption rate constants, l_{ds} (d^{-1})
1.9×10^{-3}	2.1×10^{-4}

Growth Dilution 효과추가

작물체는 방사능물질을 작물체의 표면으로부터 흡수하여 가식부로 이동하는 동안 식물체가 성장하면서 dilution되는 현상이 발생한다. 이런 현상은 작물체의 발육초기의 성장이 이루어지는 동안에 사고가 발생하는 경우 중요하게 고려되어야 한다.

3.2 현 모델식의 문제 보완

뿌리흡수를 통한 가식부로의 이동 모델

앞서 언급했듯이 ECOREA에서는 토양과 식물체가 서로 평형상태에 있다고 가정하여 얻어진 이른바 농축계수 (Biolaccumulation factor) 를 이용하여 뿌리이동속도계수를 유도하였다. 이때 농축계수 및 수확량은 수확시점에서의 값을 사용하여 전 성장기간으로 나누었기 때문에 실제론 성장기간동안 가식부로 이동하는 평균속도를 의미하게 된다. 그러나 실제로 국내에서 수행된 실험결과에서는 가식부로 이동하는 현상이 수확기까지의 평균속도로 일정하게 일어나기 보다는 성장기중반에서 보다 많은 이동이 일어나는 것으로 알려져 있다[4]. 따라서 ECOREA모델 과는 달리 시간에 따른 속도상수의 활용이 바람직하며 그동안 국내 실험에서 얻어진 자료를 바탕으로 한 분석이 필요하다고 본다.

재부유현상 모델식

ECOREA 에서 사용한 재부유속도상수는 시간에 따라 침적물이 재부유하여 식물체에 침적하여 가식부를 오염시키는 과정을 염두에 두기보다는 최종적으로 가식부를 오염시키는 상태를 바탕으로 한 것이다. 따라서 이 상수는 작물성장기간중 평균속도계수를 의미하며 성장기간 후반에 발생하는 사고의 경우 재부유현상에 의한 방사성물질의 침적을 제대로 예측하기 힘들다.

따라서 현 모델에서는 재부유 현상을 바람이나 그밖의 요인으로 인해 일어난다고 가정하여 농작물에 대해서는 단위면적당 방사능물질의 양 (Bq/m^2)에 대한 단위부피의 공기중 방사능물질의 양 (Bq/m^3)로 정의된 재부유 상수 RF (m^{-1})를 사용하게 된다. 그러나 벼에 대해서는 이러한 재부유 현상을 고려하지 않았다. 이유는 벼의 경우, 생육기간의 대부분은 물에 잠겨 있는 특성을 고려하였기 때문이다. 이렇게 재부유된 물질이 작물체표면에 침적하는 율은 침적속도 (V_d)와 관계가 있는데 재부유 속도상수, λ_{re}, 는 이 두 상수의 곱으로 표시할 수 있다.

$$l_{re} = RF * V_d$$

3.3 입출력부분의 개선작업

ECOREA 평가코드는 예전에 fortran을 바탕으로 하여서 입력을 마련하거나 결과를 출력하는 부분에 어려움이 많았었다. 최근에 window-based S/W가 추구하는 점이 보다 사용자가 쉽게 입력이나 출력부분을 조정하는 부분에 있다. 따라서 앞으로 보다 사용자가 사용하기 편리한 동적 섭취평가 코드의 개발이 필요하다고 본다. 따라서 이러한 입력부분에 대해서 Visual Basic 으로 coding하여 보다 사용자가 편리하도록 GUI (Graphic User Interface) 부분을 강화하도록 한다. 또한 출력부분은 GIS (Geographical Information System)과 연결하여 예측결과를 가시적으로 표현함으로써 사고시 의사결정에 신속.정확성을 기할 수 있다.

3.4 불확실성분석

평가코드내에는 많은 변수들이 사용되기 때문에 이러한 변수의 불확실성이 결과에 많은 영향을 줄 수 있어 분석결과의 신뢰성을 높이기 위해 보다 불확실성 분석부분이 강화되어야 할 것이다. 이를 위해 입력변수의 불확실성분석을 위해 Monte-Carlo 및 LHS 분석기법을 도입하고 가능하면 불확실성분석 결과를 바탄으로 하여 결과에 영향을 많이 주는 주요 입력변수의 중요도를 분석하는 중요도 분석 (Importance Analysis)이 가능하도록 개발 되어야 할 것이다.

3.5 새로운 노출시나리오 개발

원자력시설의 사고시 주변 환경이나 인체에 영향을 덜 주도록 하는 여러 방안은 종합적인 Risk Management 계획의 한 부분에서 창안되어야 한다. 이를 위해서 방사성물질에 의한 인체나 생태계의 영향을 나타내는 합리적이고 정량적인 척도를 규정해야 한다. 현재 이러한 척도로는 위해도 (risk)라는 척도를 사용하는 것이 보편화 되어 있다. 이때, 방사성물질의 누출에 의한 인체위해도는 방사성물질의 독성인자 (Toxicity) 와 이런 물질이 환경내에서의 거동 및 인체 노출등을 정의하는 피폭인자 (Exposure) 의 함수으로 정의할 수 있다. 따라서 비록 독성인자가 매우 큰 물질이라도 피폭인자가 작은 경우, 즉, 환경내에서 인체로의 피폭이 작은 경우 실제 위해도는 작을 수 있다. 이런 면에서 보면 방사성물질의 섭식경로평가가 새롭게 대두되게 되었다. 특히 섭식경로내 다양한 인체피폭경로의 파악 및 평가는 필수적이라 할수 있다.

이를 위해 우선 국내 섭식경로에 대한 이해를 바탕으로 다양한 사니리오의 개발이 필요하고 이러한 시나리오에 따라 본 모델을 통한 섭식경로내 피폭선량 분석이 가능하도록 개발되어야 할 것이다.

그림 4는 현재 개발하려는 ECOREA-II 모델, user interface, uncertainty analysis, scenario generation 및 DBMS (Data Base Management System)을 이용한 GIS 활용과의 관계에 대해 보여주고 있다.

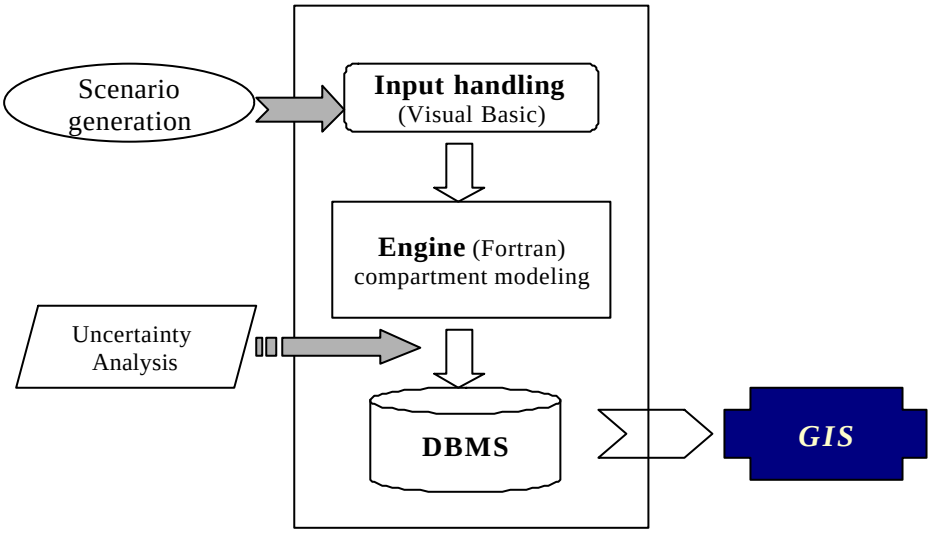

그림 4. ECOREA-II 코드

4. 결론 및 추후 연구분야

원자력시설의 가동중 또는 사고시 환경안전성을 확보하기 위해서는 합리적인 환경영향 평가기법 및 대책 수립기술이 마련되어야 한다. 육산 생태계 내에서의 방사성 핵종의 거동에 대한 연구는 이러한 면에서 매우 중요하다고 할 수 있다. 원자력시설의 건설과 가동이 점차 증가하는 우리나라 실정에 이러한 육상 생태계에서의 방사성 물질의 거동 분석의 필요성은 점차 증가하고 있다.

그 동안 이 분야에서 각종 실험들을 통해 우리나라 실정에 맞는 기초 정보를 양성해 왔고 이러한 노력은 보다 해석적인 평가코드의 개발에 밑걸음이 되리라고 본다. 또한 실험에서는 할 수 없는 대규모 스케일의 사고나 다양한 시나리오에 대한 평가, 또 불확실성이 포함한 평가결과 해석을 위해서는 동적 평가코드의 개발 및 활용이 필수적이어서 이 분야에 보다 많은 노력을 기울어져야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

[1] R.S Booth and S.V. Kaye, "A preliminary Systems Analysis Model of radioactivity Transfer to Man from Deposition in a Terrestrial Environment," NUREG/CR-1196, ORNL, USA, 1980

[2] F.W Whicker and T.B. Kirchner, "PATHWAY: A Dymanic Food Chain Model to Predict Radionuclides Ingestion after Fallout Deposition," Health Physics, 52, 717-737, 1987

[3] **이정호 외**, "**섭식경로 및 호흡에 의한 방사선 내부피폭 선량평가 코드 개발**," KAERI, KAERI/RR-933/89, 1990

[4] **최용호 외**, "Experimental Studies for Analyzing Direact Contamination Pathway of 54Mn, 57Co, 85Sr, 103Ru and 134Cs in Rice," **대한방어학회지** 25 **권** , 2000