

## 한국형 처분 시스템에 대한 생태계 평가의 한 예시

이연명, 황용수, 강철형  
한국원자력연구소

### 요 약

고준위 방사성 폐기물 처분장으로부터 유출된 핵종이 인간 생태계에 도달하여 어느 정도의 선량률로서 피폭을 일으키는가를 보이기 위한 생태계 피폭 모델링 및 평가 연구는 처분안전성 평가의 최종 단계로서 핵종 유출의 결과가 인간에게 어느 정도의 방사선 피폭을 주는가를 보이는 것이 그 주요한 내용이 된다. 이 연구를 통하여 도출된 시나리오 중에서 가장 기본이 될 수 있는 생태계에 대하여 AMBER를 사용하여 피폭 계산을 수행하여 선량 환산 인자 평가를 계산해 보았다. AMBER 코드는 핵종 이동 계산을 위해 여러 개의 구획을 설정하고 구획간의 핵종 이동은 핵종 전이 계수(mass transfer coefficient)를 이용하여 계산한다.

### 1. 서 론

사용후 핵연료의 처분을 위한 고준위 방사성 폐기물 처분장으로부터 유출된 핵종이 인간 생태계에 도달하여 어느 정도의 선량률로서 피폭을 일으키는가를 보이기 위한 생태계 피폭 모델링 및 평가 연구는 처분안전성 평가의 최종 단계로서 핵종 유출의 결과가 인간에게 어느 정도의 방사선 피폭을 주는가를 보이는 것이 그 주요한 내용이 된다.

생태계에서의 방사성 핵종의 이동 및 확산에 관한 연구는 원자력 발전소의 경우에서도 같은 방법론으로 접근되어 건설 및 운영에 따른 인허가 과정을 통해 수행되어 온 사례가 있지만 평가 대상의 핵종이나 이동 환경과 메커니즘 등이 달라 가령 원자력발전소의 경우 대기와 해양을 통한 이동이 주요한 대상이 될 때 처분장의 경우는 심부 지질환경과 천부 및 지표 환경 등에서의 지하수에 의한 핵종 이동이 그 주요한 메커니즘으로 되어 차이를 보이게도 되지만 대상 핵종의 반감기나 이동에 걸리는 속도의 차이 등 본질적으로 전혀 다른 평가모델과 방법론을 요구하게 되는 것이다.

이 연구를 통해서 생태계 평가를 위한 대상으로서 고준위 방사성 폐기물 처분장을 상정하고 이 처분 시스템에 대하여 여러가지 발생가능한 핵종의 전이 및 이동 경로를 도출해 본 후 이에 대한 정량적 평가를 수행해 봄으로서 생태계 평가의 한 방법론을 제시 하여 보고자 한다.

### 2. 평가대상생태계와RES

생태계내의 방사성 물질의 전이와 이동을 정량적으로 평가하기 위해서는 대상 생태계의 각 구획이나 모듈들이 어떻게 상호 반응을 하는지 파악하는 것이 중요하다.

생태계 평가를 위해 주요한 생태계를 우선 크게 우물과 강과 같은 지표수와 여기에 바다를 포함

시커 핵종이 최종적으로 심부로부터 유출되어 도달하게 될 목표지점으로 보고 이들 기본 생태계를 다시 일부 세분화하여 이들 사이의 전이와 이동을 고찰하는 것으로 하였다.

아래 그림 1은 이들 생태계내의 상호 반응을 도시한 RES (Rock Engineering System) [1]으로서 이러한 행렬을 통하여 생태계 평가를 위한 기본 개념이 설정될 수 있다.

source term (GW release)	GW_Release2DW			GW_Release2RW				
		Irrigation_Well2SS		NonIrrNonDrink_Well2RW				
		SurfaceSoil	Infiltration_SS2Vadose	Erosion_SS2RW				
		Erosion_Vadose2ss	Vadose	Erosion_Vadose2RW/ Recharge_Vadose2RW				
		Irrigation_RW2SS/ Flow_RW2SS			Sed_RW2RS	Flow_River2MW		
		Dredgmean2RS2SS		Resus_RS2RW	RiverSediment		BedLoad_RS2MS	
						MarineWater	Sed_MW2MS	MarineDispersion
						Res_MS2MW	MarineSediment	Net_Sediment
								FinalSink

그림 1. 평가 대상 기준 생태계에 대한 RES

이 그림을 통하여 각 LDE (Leading Diagonal Element)사이의 반응을 ODE (Off Diagonal Element)로서 나타내어 볼 수 있게 되는데 본 연구에서는 생태계에서 다루어야 할 주요 LDE를 9개로 정도로 하여 생태계로 유입되는 선원항으로서 우물과 강물을 고려하고 이 곳에서 Surface soil이나 표토나 가변 충전층(Vadose zone), 그리고 침적층(sediment)으로 상호 반응하여 이동해가는 것으로 모델링하였다. 이 후 이들 각 구획에서 다양한 섭생경로와 대기층 또는 식물군 등을 통하여 피폭을 정량적으로 평가하는 것으로 하였다.

### 3. 생태계 평가를 위한 기본 개념과 가정

생태계 평가는 안전성 평가의 최종 단계로서 지하매질을 빠져 나온 핵종의 생태환경에 대한 영향 평가이지만 평가 대상으로서 이러한 생태계는 지하매질에 비해 그 자체로 변동이 심하고 예측하기 힘들어 기준 생태계 (Reference Biosphere)라는 개념의 도입이 필요하게 된다.

이는 이전의 BIOMOVs II [6]를 통해 도출된 생태계 FEP 리스트, 국제방사선방호위원회 (ICRP)의 처분장에 관련된 제원칙 등을 고려한 방법론 [7,8]으로서 1999년 BIOMASS 에서 제안된 Reference Biosphere Methodology를 H12 보고서 [9]등 여러 나라에서 사용하고 있다.

이 연구에서는 H12에서 도입한 대로 3가지의 피폭 그룹 (Farming, Freshwater Fishing, Marine Fishing) 을 상정하여 이들 각각에 대한 피폭 선량을 계산하고자 한다.

결국 생태계 조건들의 변화는 시간에 따르게 되지만 일본의 H12 연구에서와 마찬가지로 현재의 조건 및 환경들이 변화하지 않는다고 가정하는 것이 정확한 입력 지료가 없는 현 시점에서는 가장 타당할 수 있다.

그리고 기준 생태계에서 방사성 핵종의 붕괴와 대수층에서 발생하는 흡착 등에 의한 이동 지연

효과는 무시하였으며, 그림 2에서와 같이 대수층으로 유출된 모든 핵종들이 보수적으로 강이나 우물로 도달한다고 가정하였다.

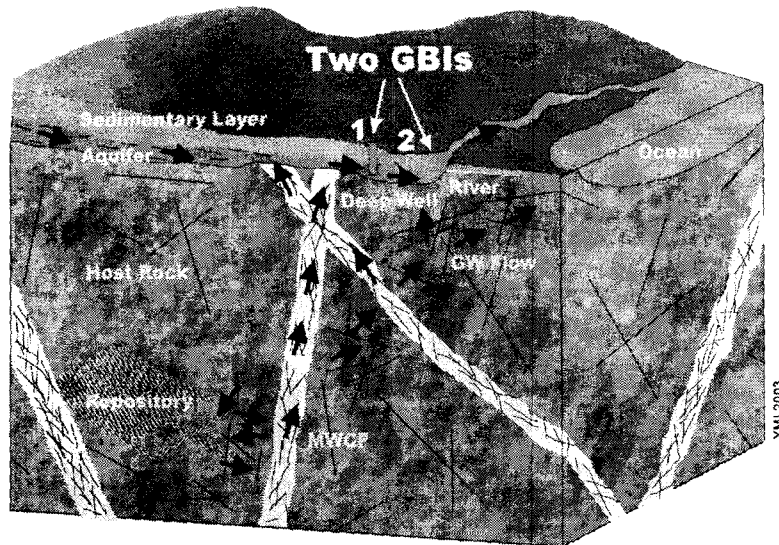


그림 2. 처분장에서 생태계로 이동하는 방사성 핵종 유동 개념도(기준 생태계)

#### 4. FEP 상호 관계 및 생태계 개념 모델링

기준 생태계에 대한 상호 반응 행렬의 작성을 위해 주요 항목들을 행렬의 대각선(LDE-Leading Diagonal Element)에 배열하고, 비 대각선 지역(ODE-Off Diagonal Element)에는 이들 항목들의 상호 반응을 할당하는데, 지표토양(surface soil)과 같은 생태계의 주요한 부분들을 LDE로 선택하여 이들 각각을 구획(compartment)으로 취급하였다. 방사성 핵종의 이동은 결국 이러한 구획들 간의 상호 반응에 의한 이동으로 설명되며, 이때 대기(atmosphere), 식물(plant), 그리고 동물(animal)의 경우 지표 토양, 강과 해양에 존재하는 핵종들의 농도로 농도평형에 도달하였다고 가정하였다. 핵종이 주로 최종적으로 도달하게 될 지표수(surface fresh water)는 강과 우물을 나타내고 다시 강에서는 강물(river water compartment)과 강 저면의 침전 지역(river sediment compartment)으로 구획되며, 우물의 경우에서도 관개를 통해 표토층으로, 또는 다시 표토층에서 가변 토양층으로 이동하게 된다고 볼 수 있다. 결국 기준 생태계에서는 핵종들은 강물과 우물을 통해 유출된다고 가정하였다. 이 때 강 구획들에서 일어나는 핵종 붕괴와 흡착에 의한 핵종 이동 지연은 무시하였다.

세 개의 피폭 그룹(농업, 지표수 수산물, 해양수산물)들이 국지적 농어산물의 섭취 방식의 분류에 따라 정의될 수 있는데 각 피폭 그룹에 대한 섭취 경로들은 아래 표 1에 요약하였다.

표 1. 피폭 그룹별 섭취 경로

Intake Pathway		Farming	Freshwater Fishing	Marine Fishing
Ingestion	Crops	Grains Rice Green Veges Root Veges Fruit		
	Animal products/ Aquatic foodstuffs	Beef, Cow liver, Cow milk Pork Mutton Chicken, Chick liver, Chick eggs	FW fish FW crustaceans	Marine Fishing Marine crustaceans Marine molluscs Seaweed
	Others	Water Soil	Water Sediment	Sediment
Inhalation		Dust	Dust	Dust Aerosol
External Irradiation		Water Soil	Water Sediment	Water Sediment

이미 언급한 상호 반응 행렬로부터 도출된 핵종 이동 경로들이 그림 3에 도시되었으며, 이에 따라 각 구획으로부터 인간환경으로의 세부 피폭 경로들은 그림 4에 도시되었다. 이러한 구획 모델링 방법은 캐나다 AECL의 EIS[10], 스웨덴 SKB-91[11], SITE-94[12] 그리고 미국 EPRI[13]의 생태계 평가 등에 사용되었던 접근론이다.

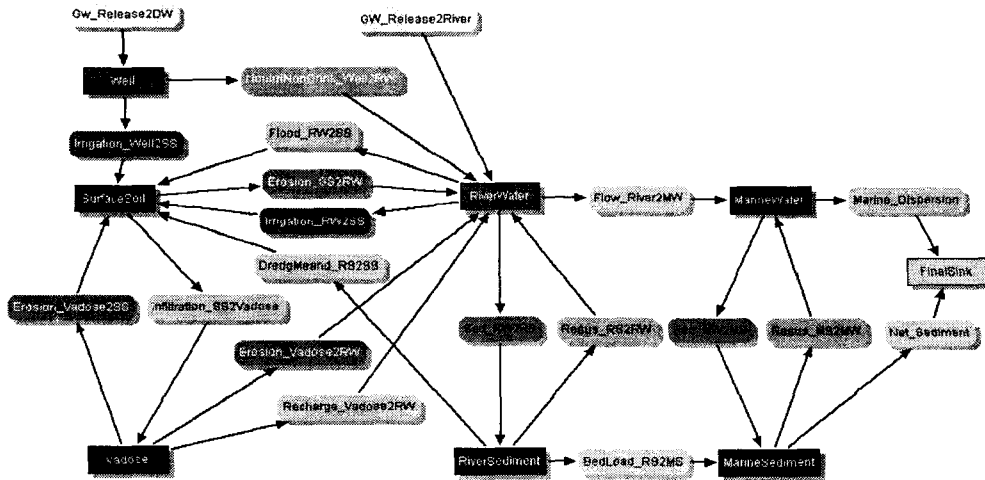


그림 3. 기준 생태계 평가를 위한 핵종 이동 개념 모델

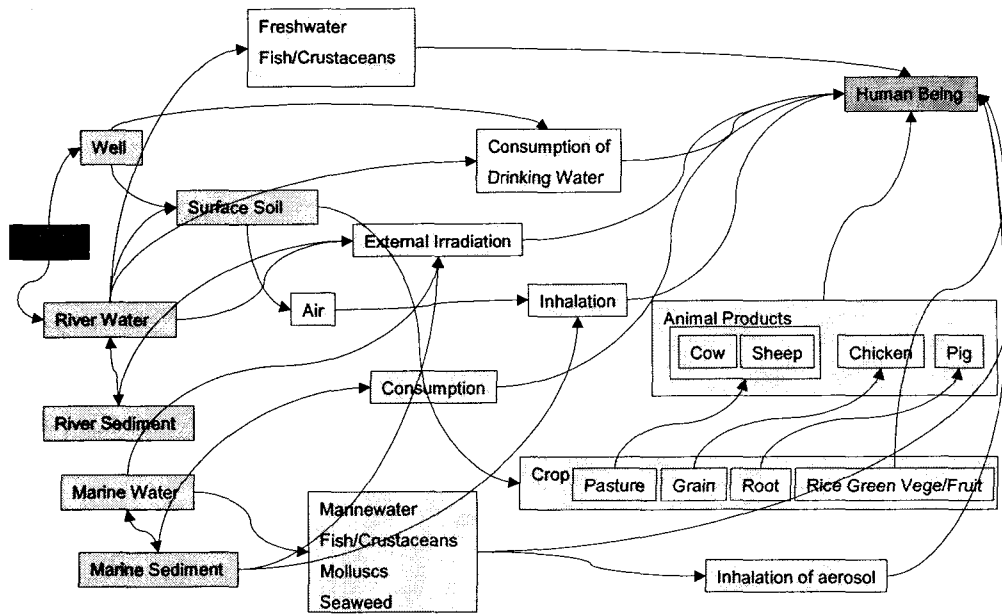


그림 4. 기존 생태계의 노출 경로(Exposure Pathway)

### 5. 수학적 모델링

기존 생태계의 핵종 이동을 도시한 그림 3을 수학적으로 모델링하기 위해서는 구획간의 물질 이동을 기술하는 물질 이동 상수(mass transfer coefficient) 뿐 아니라 구획 내 피폭 경로를 통한 물질 이동을 표현하는 수식들이 도출되어야 한다. 이러한 수학적 모델은 구획간의 물질 수지식에 따라 이루어지며 피폭 경로에 대한 수식들은 한 구획 또는 구획내 대상에 대한 핵종 농도에 대하여 관련 구획과 핵종 농도 평형에 있다고 가정하여 작성한다.

도출된 수식들을 사용한 실제 평가는 AMBER[14] 프로그램을 이용하여 수행되었는데, 이는 일본 H12 연구에서 적용된 AMBER 프로그램은 영국, 스페인 그리고 미국에서 사용되며 국제 공동연구 BIOMOVs II에서 다른 생태계 평가 코드들을 이용하여 검증된 것이다.

그림 5는 구획 모델링에서 사용하는, 물질 수지를 이용한 수학적 모델링 개념을 도시한 것이다.

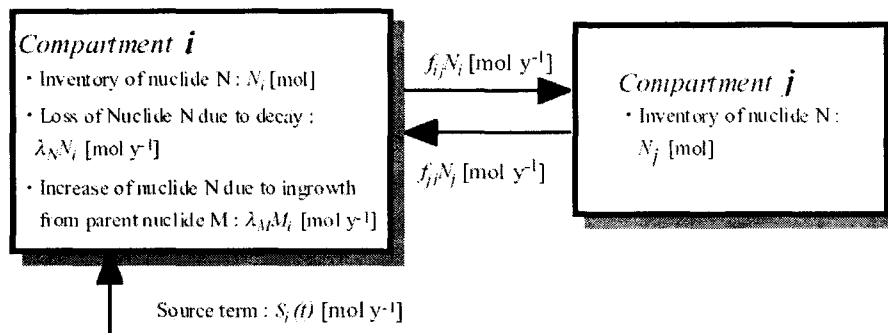


그림 5. 구획간 물질 수지를 이용한 수학적 모델링 개념

구획 모델링에서 구획  $i$ 에 존재하는 방사성 핵종에 대한 질량 [mol] ( $N_i$ ) 보존방정식은 아래와 같이 정의된다.

$$\frac{dN_i}{dt} = [\sum_{j \neq i} f_{ji} N_j + \lambda_M M_i + S_i(t)] - [\sum_{j \neq i} f_{ij} N_i + \lambda_N N_i]$$

각 구획에서 핵종들의 농도는 위 식을 각 구획 별로 연립한 다음 주어진 부대 조건들을 이용하여 행렬식을 풀어 구할 수 있다.

## 6. 생태계 영향 평가

국내 기준 생태계 평가를 위하여 처분장이 연안에 위치한다고 가정하고, 그림 3에 도시된 바와 같이 주요 구획들을 설정하였다. 대수대를 따라 이동하던 방사성 핵종들은 GBI에서 일부는 해양으로 직접 유입되고, 일부는 천부 불포화대로 이동한다. 천부 지하수대로 유입된 핵종들은 풍화작용 등에 의해 지표 표토층으로 유입된 후 풍화작용을 따라 강물이나 우물로 유입된다. 또한 강물로 유입된 핵종들은 강물 흐름에 따라 이동하여 궁극적으로 해양으로 이동하거나 침전작용에 따라 하저에 침전되다가 Bed loading과정을 거쳐 해양으로 유입된다. 이와는 별도로 심부 지하수에 섞여 양수된 핵종들은 관개수 혹은 비관개수로 이용되어 다시 지표 표토층과 강물 구획으로 유입된다.

GBI로부터 유출된 핵종들은, 지표 토양층, 연안 해수층 그리고 연안 침전층 과 같은 구획을 따라 이동하여 그림 4와 같은 경로를 따라 섭취, 호흡, 외부 피폭을 통해 인간에게 전달된다. 특히 곡류와 동물류는 먹이사슬을 형성하고 있으므로 정확한 피폭 경로 설정 및 그에 따른 피폭 선량 평가를 위해서는 핵종 이동 경로에 대한 정확한 이해와 데이터가 요구된다.

그림 6은 농업에 종사하는 피폭 그룹을 대상으로 연간 단위 방사능이 방사성원이 생태계로 유입될 경우 모든 피폭 경로를 고려한 선량 환산인자이다.

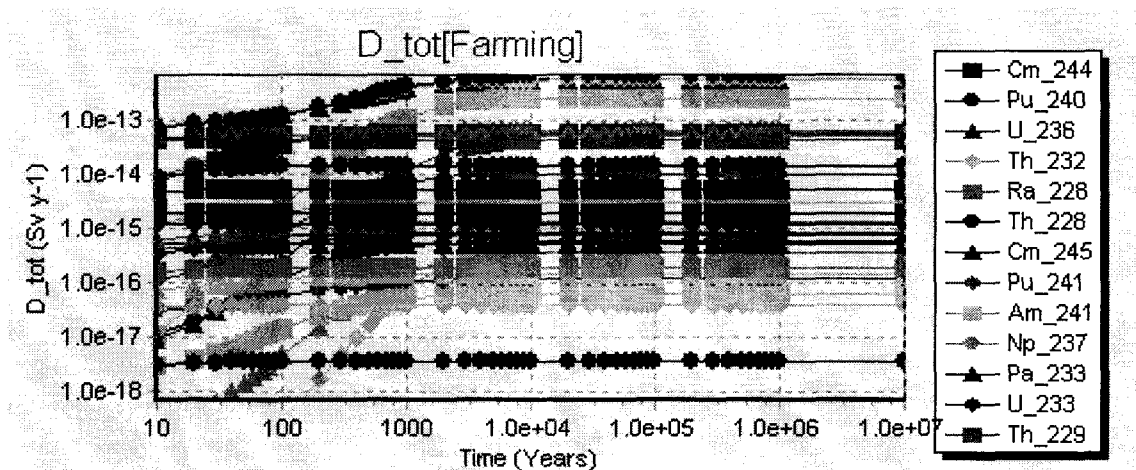


그림 6. 농경집단에 대한 핵종별 연간 피폭량

지하매질에서 강물이 아닌 우물로만 연간 단위 방사능만큼 유입되었을 때 Farming exposure group이 받는 핵종별 총선량률을 나타내게 되는데, 이 결과로 보면 어느 핵종의 경우에도 연간

1Bq의 방사능에 대해 연간  $10^{-12}$  Sv의 선량률을 넘지는 않는 것으로 나타나고 있다.

한편 아래 그림 7에서 보면 모든 피폭 그룹, 모든 pathway에 대하여 모든 핵종을 합한 경우에 대한 연간 선량률 1 Bq/yr의 핵종이 GBI를 통해 생태계로 유입되었을 때 어느 경우든  $10^{-8}$  Sv/yr의 선량률을 넘기지는 않음을 알 수 있다.

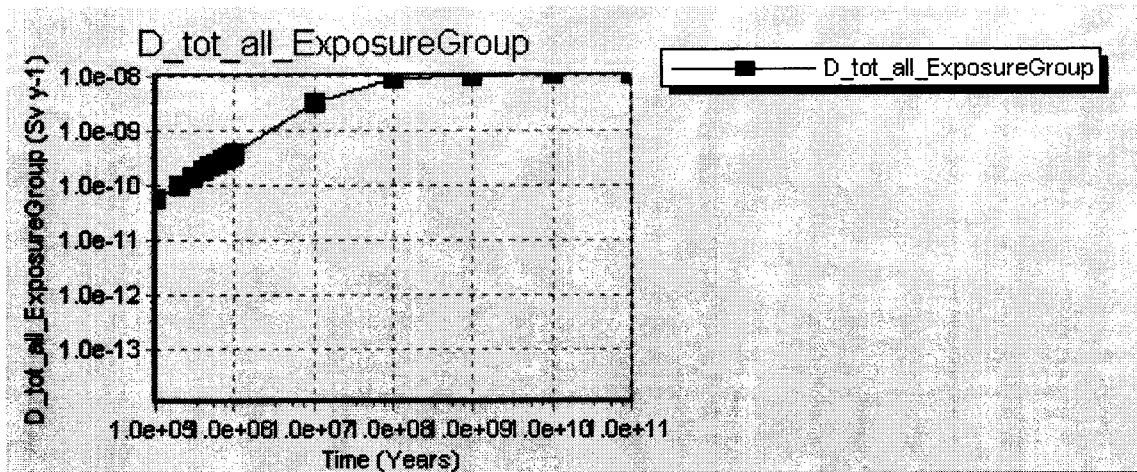


그림 7. Total dose to a member summed over all exposure group, all pathways, and all nuclides

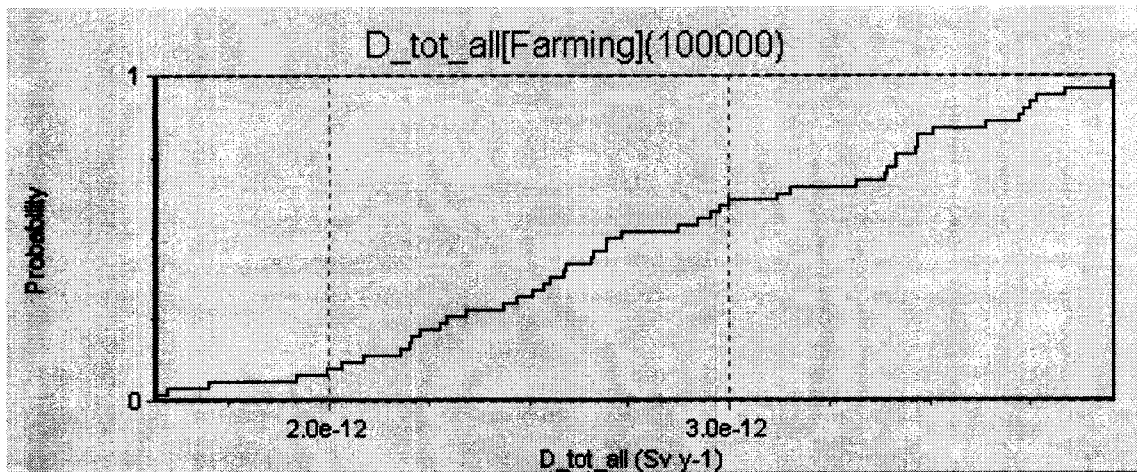


그림 8. CDF for total dose summed over all pathways and all nuclides @100k yr

10만년이 되는 시점에서 우물에서 표토층으로의 관개용의 분포에 따 Farming exposure group에 대한 선량률 CDF를 나타내는 그림 8에서 볼 때, 가령 Farming Exposure group 에 대하여 연간 총 선량률이  $1 \times 10^{-12}$  Sv/yr을 넘길 확률은 1.0이지만  $2 \times 10^{-12}$  Sv/yr가 될 확률은 0.9정도가 된다고 볼 수 있으며  $4 \times 10^{-12}$  Sv/yr가 될 확률은 어느 경우라도 일어나지 않는다고 볼 수 있다.

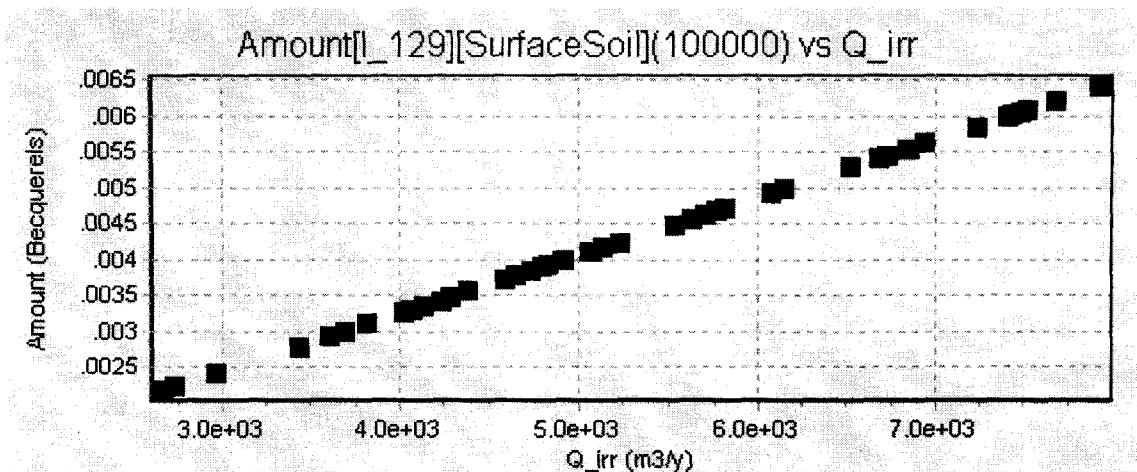


그림 9. Sensitivity of  $Q_{irr} \sim \text{Tri}[2200, 4400, 8800\text{m}^3 \text{ y}^{-1}]$  to Concentration on Surface Soil due to  $^{129}\text{I}$  @100k yr

참고로 10만년 시점에서의 관개율에 대한 핵종 농도 결과의 민감도를 보이는 그림9 에서 보면 관개율의 증가에 따라 표토층에서의 I-129의 농도의 상관관개로 당연히 관개율의 증가에 따라 선형적으로 표토의 핵종의 방사능량이 증가하고 있음을 알 수 있다.

위에서 평가된 각 핵종별 단위 방사능 량 유입에 따른 연간 개인 피폭 선량 값은 일본 H12이나 스웨덴 SR97 기준 생태계에 대한 값은 매우 유사한 바 이는 대부분의 입력 데이터 값이 외국 문헌 조사로부터 도출되었기 때문이다. 또한 국내 생태계 모델링 방법론 수준이 외국 수준과 비슷하기 때문이기도 하다.

본 연구를 통해 평가된 각 핵종별 연간 피폭 선량치들은 차기 단계에서 활용될 예정이다.

## 9. 결 론

이 연구를 통하여 성능 평가 시간대에서 생태계와 관련된 발생 가능한 시나리오의 도출을 위해 RES(Rock Engineering System) 기법을 사용하여 도출된 시나리오 중에서 가장 기본이 될 수 있는 생태계에 대한 선량 환산 인자 평가를 수행하여 보았다.

주요 입력 데이터는 일본의 H12와 국내 보건 복지부의 통계자료를 활용하였다. H12에서도 생태계 평가에 필요한 입력 자료를 해외 문헌에서 많이 참조한 만큼 이러한 평가에 대한 입력자료는 필요한 양에 비해 절대적으로 부족한 형편이다. 우리 환경에 맞는 데이터 즉, 쌀 소비량이나 육류와 해조류 섭취량 또는 식품이나 과일 등은 국내 보건 복지부 데이터를 활용하였으며, 기타 입력자료는 H12 등에서 사용한 데이터를 활용하였다.

피폭 계산을 위한 평가코드는 AMBER를 사용하였다. AMBER 코드는 핵종 이동 계산을 위해 여러 개의 구획을 설정하고 구획간의 핵종 이동은 핵종 전이 계수(mass transfer coefficient)를 이용하여 계산한다. 이러한 구획 모델 접근 방법은 핵종 이동 분석을 위하여 영국, 스페인, 미국 등에서 많이 사용하고 있으며, 1993년 OECD/NEA에서 다른 코드와 비교를 통해 검증되었고, 1996년에는 BIOMASS II라는 국제 공동 연구를 통하여 코드의 유용성이 확인되었다.

본 논문에서는 해외 선행 연구 결과를 참고로 하여 국내 생태계에 관한 선량 환산 인자를 도출하



려고 하였다. 먼저 생태계 평가를 위해, 일본의 H12와 국내자료를 이용하여 local marine 생태계에 대한 피폭 그룹별 각 핵종들에 대한 선량 환산 인자를 도출하였다. 그리고 음용수 섭취 등이 선량 증가에 미치는 영향 등도 평가되었다.

피폭 그룹은 3가지 그룹 즉, 농가, 해수 어업 피폭 그룹, 담수 어업 피폭 그룹으로 분류하였고, 각 그룹에 대하여 흡입(inhalation), 소화(ingestion), 외부 피폭(external irradiation)을 주요 피폭 메카니즘으로 고려하였다. 각 구획과 구획내의 핵종 전이 계수는 수학적으로 모델링하여 선량 환산 인자를 평가하였다.

평가 결과는 어떠한 경향을 보여주기 보다는 계산에 대한 예시로 나타내고 있지만, 본 논문에서 생성된 선량 환산 인자는 현재 원자력연구소에서 수행하고 있는 생태계 영향 평가 연구에서 추후 계속적으로 사용될 예정이다.

향후 한국형 처분 시스템이 확보되는 경우에 정의될 수 있는 지하매질과 생태환경의 접점, 즉 국내 생태계 특성과 한국형 처분 시스템이 고려된 GBI와 각종 입력자료, 그리고 국내 생태계 특성을 고려한 평가모델의 확보를 위하여 H12 등 외국의 사례 연구와 국내 섭생자료 분석 등을 통하여 예비 생태계 평가를 통하여 단위 방사능 유입당 선량률을 구할 수 있는 template를 확보해 볼 수 있는 접근 방법을 제시하는 것이 본 연구의 주요한 연구 내용으로 볼 수 있을 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. Hudson, J., Rock Engineering Systems: Theory and Practice, Ellis Horwood, Chichester, 1992.
2. IAEA, International Programme on Biosphere Modelling and Assessment Methods (BIOMASS) Themes for a New Co-ordinated Research Programme on Environmental Model Testing and Improvement, Theme 1: Radioactive Waste Disposal, Theme 2: Environmental Releases, Theme 3: Biospheric Processes, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 1996.
3. BIOMASS, Alternative Assessment Contexts: Implications for Development of Reference Biospheres and Biosphere Modelling, BIOMASS Theme 1 Working Document: BIOMASS/T1/WD02, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1999a.
4. BIOMASS, Long-term Releases from Solid Waste Disposal Facilities: The Reference Biosphere Concept, BIOMASS Theme 1 Working Document: BIOMASS/T1/WD01, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1999b.
5. BIOMASS, Biosphere System Identification and Justification, BIOMASS Theme 1 Working Document: BIOMASS/T1/WD06, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1999c.
6. BIOMOVS II, Biosphere Modelling for Dose Assessments of Radioactive Waste Repositories, BIOMOVS II Technical Report No.12, Swedish
7. ICRP, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (adopted January 17, 1977), ICRP Publication 26, Pergamon Press, Oxford, 1977.
8. ICRP, Radiation Protection Principles for the Disposal of Solid Radioactive Waste, 2-5 Annals of the ICRP, 15, No.4, ICRP Publication 46, Pergamon Press, Oxford, 1985.
9. H12, Project to Establish Technical Basis for HLW Disposal in Japan, JNC, 1999.
10. Davis, P.A., Zach, R., Stephens, M.E., Amiro, B.D., Bird, G.A., Reid, J.A.K., Sheppard, M.I.,

- Sheppard, S.C. and Stephenson, M., The Biosphere Model, BIOTRAC, for Postclosure Assessment, Atomic Energy of Canada Limited Report, AECL-10720, COG-93-10, 1993.
11. SKB, SKB 91 - Final Disposal of Spent Nuclear Fuel; Importance of the Bedrock for Safety, SKB Technical Report 92-20, 1992.
  12. SKI, SKI SITE-94 Deep Repository Performance Assessment Project, SKI Report 96:36, Swedish Nuclear Power Inspectorate, Stockholm, 1996.
  13. Smith, G.M., Watkins, B.M., Little, R.H., Jones, H.M. and Mortimer, A.M., Biosphere Modeling and Dose Assessment for Yucca Mountain, EPRI Report TR-107190 3294-18, Electric Power Research Institute, California, 1996.
  14. QuantiSci, AMBER 4.0 Reference Guide, QuantiSci Limited, Henley-on-Thames, United Kingdom, 1998.
  15. 보건복지부, 2002 국민건강 영양 조사 영양 조사 부문, 2002.
  16. 보건복지부, 2002 국민건강 영양 조사 계절별 영양 조사, 2002.