2004 춘계학술발표회 논문집
원자력학회

AMBER를 이용한 방사성폐기물 처분시스템에 대한 생태계 선량환산인자 평가

An evaluation of flux to dose conversion factors using AMBER for biosphere assessment

이연명*·황용수·강철형
처분종합성능평가과제 (*ymlee@kaeri.re.kr)
한국원자력연구소

요 약

심부 지질 환경을 갖는 결정암질 모암내의 방사성 폐기물 처분장으로부터 유출된 핵종은 지하 매질을 거쳐 궁극적으로 인간생태환경으로 도달하게 된다. 그 결과로 인간에게 주는 피폭선량률을 정량적으로 계산하는 것은 처분안전성 평가의 최종 단계가 된다. 방사성 폐기물에 포함된 핵종에 대해 붕괴사슬을 고려하고 방사성 폐기물 처분 시스템의 주요한 부분을 이루는 생태계를 구획으로 모델링한 후 이 들 각 구획간의 핵종 이동에 대한 전이계수(mass transfer coefficient)를 적용하여 각 핵종별 선량 환산 인자 (Flux to dose conversion factor; DCF)를 평가해 보았다. 계산은 AMBER 코드로 수행하였다.

Abstract

Nuclides in radioactive wastes are assumed to be transported in the geosphere by groundwater and probably discharged into the biosphere. Quantitative evaluation of doses to human beings due to nuclide transport in the biosphere and through the various pathways is the final step of safety assessment. To calculate the flux to dose conversion factors (DCFs) for 18 nuclides with their decay chains, a mathematical model for the mass transfer coefficients has been constructed considering material balance among the compartments in biosphere and then is implemented to AMBER.

1. 서론

심부 지질환경내 결정암류의 모암내에 위치한 처분장으로부터 지하수에 의해 유출된 핵종은 필연적으로 지하수의 유동을 따라 지표에 도달하여 인간 생태계로 전이, 이동하게 된다. 생태계로 유출된 핵종이 인간에게 주는 피폭을 정량적인 선량률로서 산출하기 위한 일련의 생태계 피폭 시나리오 도출, 개념적/수학적 모델링 및 그 평가는 처분안전성 평가의 최종 단계가 된다.

생태계에서의 방사성 핵종의 이동 및 확산에 관한 연구는 원전의 건설 및 운영에 따른 인허가 과정을 위해 이미 원자력 발전소에 대해 유사한 방법론으로 접근되어 수행되어 온 사례가 있지만, 관련된 주요 방사성 핵종이나 핵종 각각의 이동 특성과 메커니즘 등은 상이하다. 가령 원자력발전소의 경우 대기와 해양을 통한 확산 이동이 주요한 이동메카니즘이 될 때 처분장의 경우는 심부 및 천부 지질환경과 생태환경 등에서의 지하수의 유동에 의한 다양한 형태의 핵종 이동이 그 주요한 메커니즘으로 된다.

이렇게 매질과 시스템 측면에서의 차이를 보이기도 하지만 대상 핵종의 반감기나 다양한 매질을 거쳐 생태계로의 이동에 걸리는 속도에 따른 평가 기간의 차이 등 처분장의 경우는

원전의 경우와는 본질적으로 다른 평가모델과 방법론을 요구하게 된다.

생태계 평가의 한 방법으로서 우선 평가 대상이 되는 처분 시스템 주변 특정 지역에 대한 지역 생태계 특성들이 자세히 파악하여 지하수가 생태계로 방출되는 지하매질과 경계를 이루는 접점지역을 찾아 이 곳을 생태계 평가를 위한 선원항, 즉 GBI (Geosphere-Biosphere Interface) 로 간주하면 이후의 생태계에 대한 모델링을 독립적으로 해 나갈 수 있다. 핵종 전이 및 이동에 관련된 다양한 FEPs (Features, Events, and Processes)로부터 취사선택과정을 통하여 핵종 유출 시나리오를 도출해 내고 이에 대한 개념 모델을 선정하게 되면 비로소 정량적인 평가가 가능한 수학적 모델이 완성된다. 실제 평가를 위해서는 적당한 평가도구로서의 전산코드와 다양한 관련 입력자료가 요구된다.

평가의 결과로서 피폭 대상 개인당 핵종별 연간 피폭선량률을 얻게 되는데 생태계로 유입되는 핵종별 단위 방사능플럭스 (Bq/yr)에 대한 선량률 $\left(\frac{Sv/yr}{Bq/yr}\right)$, 그러니까 선량 환산 인자 (Flux-to-dose conversion factor; DCF)를 단위 방사능당 피폭선량률로 산출하면 이 단위 선량률을 통해, GBI 로 유입되는 핵종별 방사능값을 연간 개인별 피폭 선량률로 환산할 수 있고 처분장의 안전성과 처분 시스템에 대한 인간 환경에 대하여 장기간에 걸친 방사선적 안전성을 보이기 위해 안전 기준치와의 비교를 위한 지표 (Safety indicator)로 사용할 수 있게 된다.

물론 신뢰도 제고를 위해서는 생태계산에 사용된 입력 변수들의 불확실성에 대한 평가도 뒤따르는 것이 바람직하다.

이 연구를 통해서 방사성 폐기물 처분장과 이 처분장이 총체적으로 관련되어 있는 처분 시스템에서 임의로 선정되어 유출된 18개 모핵종과 이들의 자핵종 총 31개 핵종에 대하여 여러가지 발생가능한 핵종의 전이 및 이동 경로에 대한 모델링을 거쳐 이에 대한 정량적 평가를 AMBER코드 [1]를 이용하여 수행하여 각 핵종별 선량 환산 인자를 도출해 보고 일부 생태 시스템 파라미터에 대한 간단하긴 하지만 파라메트릭 스터디를 통해 그 민감도도 검토해 보았다.

2. 생태계 평가를 위한 기본 개념과 가정

평가 대상으로서 생태계는, 정적이며 상대적으로 단순한 지하매질에 비해서는 그 자체로서 시간과 공간에 따른 변동이 심하고, 미래의 환경변화에 따른 불확실성을 필연적으로 내재하게 되어 현 시점에서는 예측하기 힘든 시스템이다.

이 때문에 기준 생태계 (Reference Biosphere)라는 개념의 도입이 필요하게 되어, 1999년 IAEA 국제공동연구로 진행되었던 BIOMASS[2~4] 에서 기준 생태환경이 제안되었다. BIOMASS연구를 통하여 가정된 기준 생태계는 “처분장에서 장기간에 걸쳐 생태 환경으로 유출된 방사성 핵종으로 인한 방사선적 영향을 평가하기 위한 일관된 개념을 마련하기 위해 요구되는 합리적인 가정과 가설의 집합”으로 정의하고 있는데, 이는 1996년 BIOMOVS II [5]를 통해 도출된 생태계 FEP 리스트와 국제방사선방호위원회 (ICRP)의 처분장에 관련된 제원칙 등을 고려한 생태계에 대한 기준 시스템을 제세하는 한 방법론 (Reference Biosphere Methodology) [6~7]이 된다.

이 기준생태계 방법론은 H12 보고서 [8]등 여러 나라에서 널리 사용하고 있는 개념이다. 이

연구를 통해서도 이러한 기준 생태계를 가정하여 적용하는 것은, 생태계 조건들의 변화는 시간의 흐름에 따를 수밖에 없더라도 현재 시점의 조건 및 환경들이 변화하지 않고 그대로 유지된다고 가정하는 것이 정확한 입력 자료가 없고 다른 대안이 없는 현 시점에서는 가장 적합한 개념이기 때문이다.

생태계 평가에 대한 골격이 만들어지면 지질환경과 지하수의 유동과 조건이나 지표의 지형지세 (Topography) 등 이 시스템에 대한 상세한 파악과 적합한 가정을 통해 GBI 와 피폭 집단을 정해야 하고, BIOMOVS II 와 같은 국제 공동연구 등에서 개발된 FEP (Features, events, and processes) 리스트를 선별하여 평가 대상 생태계에 적합하고 가능한 리스트를 도출하여야 한다.

피폭 대상을 결정하는 방법으로는 핵종이 이동하는 경로를 따라 최종적이고도 단일한 피폭 대상으로서의 피폭 집단 (Exposure group)과 피폭 위치를 먼저 선정하여 이들을 결정 집단 (Critical group)으로 간주하는 방법도 있겠지만 개개의 핵종에 대해 이 들 핵종의 지하 및 생태환경에서의 특성적인 거동을 고려하면 이에 따라 다수의 피폭 집단들이 그 위치에 따라 다르게 형성될 수 있다는 가정이 보다 합리적인 것으로 간주되어 각 피폭 집단을 미리 설정하여 평가한 후 이 피폭 집단사이에서 결정적인 피폭 집단 (Critical exposure group)을 찾아 내는 방법이 유용할 수 있다.

이에 따라 전형적인 한국 임해 처분장 환경을 고려하여 3가지의 피폭 집단, 즉 농축 (Farming), 담수어업 (Freshwater Fishing), 그리고 해양어업 (Marine Fishing) 을 도출해 보았다. 이러한 각 집단에 대해서는 우리나라의 환경 생태계 섭생 자료에 따라 보다 합리적인 가정이 필요하겠지만, 평가의 단순화를 위해 국지적 농축산물이나 수해산물의 섭취 방식의 분류에 따라 정의해 보았다. 집단내에서 자급자족이 이루어지는 농축수산물에 대해서만 한정된 피폭 경로를 가정하였는데, 가령 해양어업의 경우에는 평가대상 생태계내에서의 음용수나 쌀의 섭취는 무시하는 것으로 하였다.

GBI도 사실은 보다 다양한 형태로 존재할 수 있지만 이 연구에서는, 그림 1에서 보는 바와 같이 강이나 하천을 통하여 생태계로 핵종이 유입되는 경우와 바다로 직접 유입되는 경우의 2개의 시나리오로만 한정하였다.

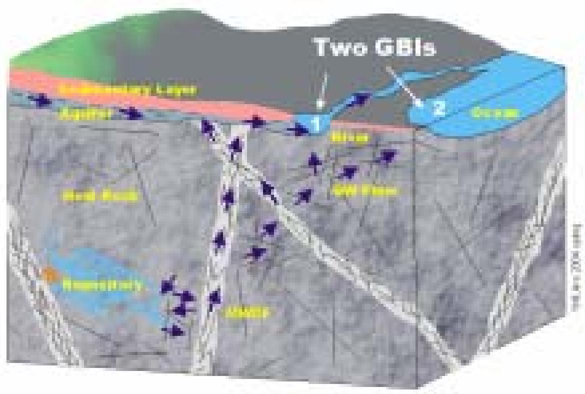

그림 1. 처분장에서 생태계로 이동하는 방사성 핵종 유동 개념도 (기준 생태계)

3. FEP 상호 관계 및 생태계 개념 모델링

생태계내에서 방사성 물질의 전이와 이동을 모델링하고 평가하기 위해서는 대상 생태계

시스템을 이루는 각 요소, 즉 구획들 상호간 핵종의 전이와 이동 메커니즘을 파악하는 것이 필요하다. 구획은 아무래도 강이나, 바다, 우물, 그리고 강에서도 강물과 강바닥 등 이렇게 물리적으로나 이동현상으로나 현저하게 구분되는 형태를 따라가는 것이 모델링상 편리하다. 즉, 지표 토양층과 가변 불포화 토양층, 지표수와 그 바닥, 그리고 강물과 핵종의 유입해 영향을 받을 만 한 넓이를 갖는 연안해수층과 그 침전층은 경계가 분명한 좋은 구획일 수 있다.

구획 모델링 방법은 캐나다 AECL의 EIS[9], 스웨덴 SKB-91[10], SITE-94[11] 그리고 미국 EPRI[12]의 생태계 평가 등에 사용되었던 일반적인 접근방법이다.

구획을 따라 전이, 이동, 분포하는 핵종은 다양한 경로의 섭취나 호흡, 그리고 외부 피폭 등을 통해 인간에게 전달되어 피폭을 주게 된다. 곡류와 가금류와 그리고 인간과의 직간접적인 먹이사슬을 형성하고 있는 경우 등 복잡한 모델링 방법론과 이에 따른 방대한 자료를 가능한 한 정확하게 평가하기 위해서는 핵종 이동 경로에 대한 이해와 함께 타당한 피폭 경로 설정과 신뢰도 있는 데이터가 요구된다.

GBI가 강이 되는 경우에는 농축이나 민물어업에 관련된 취락을 고려한 지표수에서 근원된 피폭 경로가, 그리고 처분장이 임해에 위치하게 된다는 전제하에 GBI가 바다로 되는 경우에는 해양 어업집단에 관련되어 바다에서 근원된 피폭 경로가 고려되는 것으로 하였다. 처분장이 위치하는 심부 지하매질로부터 유출된 핵종이 이 들 두 생태계와의 경계로서 강과 바다를 목표지점으로 하여 이동해 나와 생태계로 들어 선 순간부터 생태계의 각 구획사이에서 일어나는 전이와 이동을 고찰하는 것으로 하면, 각 구획간의 상호 반응은 그림 2와 같이 매트릭스형태로 표시되어 간편해진다. 생태계내의 각 구획간의 상호 반응을 도시한 이러한 매트릭스를 RES (Rock Engineering System) [13]라고 하는데, 행렬을 통하여 생태계 평가를 위한 기본 개념과 상호 반응이 일목요연하게 설정되고 파악되어질 수 있게 된다.

이 들 그림에서 보면 각 주대각선 (LDE; Leading diagonal dlement)는 생태계를 이루는 각 단위 요소로서의 구획이 된다. 그림 2a에서 볼 때 GBI가 강으로 되는 경우, 선원항으로서 생태계로 유입하는 지하수와 그 지하수가 들어 오는 강물 (River water), 강물에 의해 관개나 홍수 등에 의해 2차 오염되는 표토(Surface soil), 표토로부터 오염된 지하수가 스며들 표토하부의 가변 충전층 (Vadose zone), 강물내의 오염물이 침전하게 될 강바닥 (River sediment), 그리고 마지막으로 시스템외로 벗어나는 구획을 기술하는 최종 Sink항 이렇게 6개의 구획으로 구성된다. 그러나 핵종의 유출지점을 바다로 고려하는 경우는 이 보다 단순해져서 처분장이 해저 암반매질내에 위치하는 경우나 지표수와는 관계없이 모두 해수로 유입되게 되는 경우일텐데, 이 경우 그림 2b와 같이 해수 (Ocean) 와 해수바닥 (Ocean sediment)과 선원항, 그리고 Sink항 이렇게 단지 4개만의 구획이 주대각선에 위치하게 된다.

주대각선주변의 외대각선 (ODE; Off-diagonal elements)은 이 주대각선상 구획들간의 상호반응을 보여주게 되는데, 이들은 선별된 FEPs 가 된다.

시스템 및 개념적 모델링이 완료되어 이 들 각 구획에서 인간 피폭에 이르기까지 다양한 섭생경로를 통한 직접적인 피폭이나 수증기나 대기층 또는 식물군 등 간접적인 경로를 통하여 이루어지는 메커니즘에 대한 수학적 모델링이 가능해지면 비로소 AMBER와 같은 전산코드를 통하여 정량적인 피폭 선량을 계산해 낼 수 있게 된다.

평가대상이 되는 구획모델은 그림 2에서와 같은 RES 상호 반응 행렬에 나타낸 주대각선의

구획들과 이 구획 상호간의 반응, 즉 핵종 이동 및 전이 경로들에 의해 그림 3과 같이 만들어 질 수 있다.

방사성 핵종의 이동은 결국 이러한 구획들간의 상호 반응과 섭생을 통한 전이 및 이동으로 설명되며, 이때 대기(atmosphere), 식물(plant), 그리고 동물(animal)의 경우에 대해서는 지표 토양, 강과 해양에 존재하는 핵종들의 농도로서 평형에 도달하였다고 가정한다.

source term (GW release)			GW_Release2RW		
	SurfaceSoil	Infiltration_SS2Vadose	Erosion_SS2RW		
	Erosion_Vadose2ss	Vadose	Erosion_Vadose2RW Rechrge_Vadose2RW		
	Irrigation_RW2SS/Flood_RW2SS		RiverWater	Sed_RW2RS	Flow_River2FinalSink
	Dredgeand_RS2SS		Resus_RS2RW	RiverSediment	Net_Sediment
					FinalSink

a

source term (GW release)	GW_Release2MW		
	MarineWater	Sed_MW2MS	Marine_Dispersion
	Res_MS2MW	MarineSediment	Net_Sediment
			FinalSink

b

그림 2. 평가 대상 기준 생태계에 대한 RES (GBI: a. 강과 b. 바다)

한편 각 구획으로부터 인간환경으로의 세부 피폭 경로, 즉 선정된 세 개의 피폭 집단, 즉 농축, 담수어업, 그리고 해양 어업집단들에 대한 섭취 경로들은 그림 4에 요약되어 있다.

다만 이 들 세 피폭 집단의 일반적인 생활 양식은, 물론 피폭 집단에 속한 개인의 나이와 식생활 습관 생활양식 등의 차이는 있겠지만, 각 집단의 평균적인 피폭을 평가하기 위하여 대상을 성인으로 하였고 일반적으로 모두 동일하다고 가정하였다. 그리고 각 집단의 개인의 피폭 선량은 피폭집단내의 모든 경로에 대한 선량의 합으로 계산되어진다.

a b

그림 3. 기준 생태계 평가를 위한 핵종 이동 개념 모델 (GBI: a. 강; b. 바다)

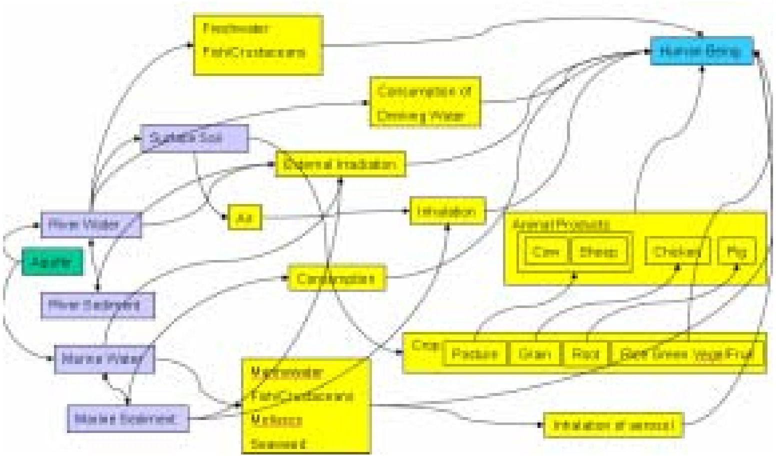

그림 4. 생태계의 노출 경로 (Exposure Pathway)

4. 수학적 모델링

구획모델에서는 구획간의 물질 이동에 따른 구획간의 물질 수지식을 기술하므로서 수학적인 모델링이 이루어지며 이러한 피폭 경로에 대한 수식들은 한 구획 또는 구획내 대상에 대한 핵종의 질량에 대하여 관련 구획과 핵종의 질량 평형에 있다고 가정하여 작성된다

이를 위하여 물질 이동 상수 (Mass transfer coefficient) 뿐 아니라 구획 내 피폭 경로를 통한 물질 이동을 표현하는 다양한 수식들이 도출되어야 한다. 도출된 수식들을 사용한 실제 평가는 AMBER 코드를 이용하여 수행되었다. 일본 H12 연구에서도 적용된 AMBER 프로그램은 영국, 스페인 그리고 미국 등 여러나라에서 사용되며 국제 공동연구 BIOMOVS II 를 통해서 다른 생태계 평가 코드들을 이용하여 검증된 것이다.

구획 모델링에서 구획 i에 존재하는 방사성 핵종에 대한 질량 [mol] (N_i) 에 대한 질량보존으로부터 지배방정식을 얻을 수 있다:

즉, $\frac{dN_i}{dt} = \left[\sum_{j \neq i} f_{ji} N_j + \lambda_M M_i + S_i(t) \right] - \left[\sum_{j \neq i} f_{iji} N_i + \lambda_N N_i \right]$ 로 되고, 여기에서, N_i = 구획 i내의 방사성핵종 N의 양 [mol], N_j = 구획 j 내의 방사성핵종 N의 양 [mol], M_j = 구획 j 내의 방사성핵종 M의 양 (핵종 N의 모핵종) [mol], $S_i(t)$ = 구획 i로 유입되는 핵종 N의 선원항 유입율 [mol/y], λ_M , λ_N = 핵종 M과 N의 붕괴상수 [y^{-1}], 그리고 f_{ji}, f_{ij} = 구획 j에서 구획 i로, 구획 i에서 구획 j로 이동하는 핵종의 전달 계수 (transfer coefficient) [y^{-1}]로 된다.

결국 각 구획내에서 핵종들의 질량에 관한 지배방정식을 나타내는 이 식을 각 구획 별로 연립하여 얻어낸 연립 방정식과 필요한 경계 및 초기 조건을 이용하여 각 구획내의 각 핵종의 질량을 구해낼 수 있고 이에 따라 각 구획의 크기를 고려하여 구획내의 균질하게 평형에 도달한 핵종농도를 계산 할 수 있게 된다.

각각의 피폭 대상 집단에 대한 피폭 경로는 세 개의 피폭경로로 구분되어 섭취(ingestion), 와 흡입(inhalation)에 의한 내부 피폭(internal exposure)과 외부 피폭 (external exposure)으로 나눌 수 있고, 이 세 가지 피폭 경로를 통한 연간 개인 피폭 선량은 각 구획의 핵종

농도로부터 산출될 수 있다. 이 연구에서는 H12 에서 사용한 수학적 모델식을 주로 사용하였지만 생태 모델식은 입력자료의 형태에 따라 대동소이해서 변수의 일차결합으로 이루어지는 단순한 모델로 나타내지는 것이 일반적이다. [8]

5. 생태계 영향 평가 결과

평가에 고려된 대상 핵종은 표 1 에 보이는 대로 모핵종 18 와 붕괴 사슬에 의해 나타나는 U-234, Th-230, Ra-226, U-235, Pu-231, Ac-227, U-236, Th-232, Ra-228, Np-237, Pa-233, U-233, Th-229 등 13 개의 자핵종이 되는데 고려된 붕괴 사슬은 다음과 같다:

Pu-238 -> U-234 -> Th-230 -> Ra-226 -> NULL;

Pu-239 -> U-235 -> Pu-231 -> Ac-227 -> NULL;

Pu-240 -> U-236 -> Th-232 -> Ra-228 -> NULL;

Pu-241 -> Am-241 -> Np-237 -> Pa-233 -> U-233 -> Th-229 -> NULL;

Am-241 -> Np-237 -> Pa-233 -> U-233 -> Th-229 -> NULL;

Cm-242 -> Pu-238 -> U-234 -> Th-230 -Ra-226 -> NULL;

Cm-244 -> Pu-240 -> U-236 -> Th-232 -> Ra-228 -> NULL.

표 1. Nuclide-Specific Input data

Parent	Daughter	ln2/half-life	Bq/y	Chain
Cm-244	Pu-240	0.0383	1	4N
Pu-240	U-236	0.000106	1	
U-236	Th-232	2.96E-08		
Th-232	Ra-228	4.95E-11		
Ra-228	Th-228	0.121		
Th-228	NULL	0.363		
Pu-241	Am-241	0.0481	1	4N+1
Am-241	Np-237	0.0016	1	
Np-237	Pa-233	3.24E-07		
Pa-233	U-233	9.38		
U-233	Th-229	4.36E-06		
Th-229	NULL	9.44E-05		
Cm-242	Pu-238	0.000147	1	4N+2
Pu-238	U-234	8.77E+01	1	
U-234	Th-230	2.83E-06		
Th-230	Ra-226	9.00E-06		
Ra-226	NULL	0.000433		
Pu-239	U-235	2.88E-05	1	4N+3
U-235	Pa-231	9.85E-10		
Pa-231	Ac-227	2.11E-05		
Ac-227	NULL	0.0318		
H-3	NULL	12.33	1	FP/AP
C-14	NULL	0.000121	1	
Ni-59	NULL	9.19E-06	1	
Co-60	NULL	0.132	1	
Ni-63	NULL	0.00722	1	
Sr-90	NULL	0.0238	1	
Nb-94	NULL	2.00E+04	1	
Tc-99	NULL	3.25E-06	1	
I-129	NULL	4.41E-08	1	
Cs-135	NULL	3.01E-07	1	
Cs-137	NULL	0.0231	1	

한편 생태계 평가를 위해서는 방대한 자료가 요구되지만 현시점에서 국내에서는 구할 수 없는 것이 많아 이 들 중 상당 부분에 대하여 문헌치나 다른 나라의 데이터들을 주로 사용하였다. 그러나 활용 가능한 우리나라의 국지적인 데이터들, 예를 들어 관개수의 양, 강의 유량, 음식의 생산 및 소비량 등은 가능한 한 국내에서 발간된 문헌과 통계치들을 이용하였는데 표 2 는 보건복지부에서 2002 년도에 실시한 계절별 국민영양조사자료로 부터 가공하여 얻은 식품별 1 인 1 일 평균 섭취량이다. [14]

표 2. Consumption Rate (성인 음식 섭취 자료)

foodstuff		units	best estimate	min	max
agricultural products	rice	kg-fw/y	81.9	5	150
	grain	kg-fw/y	29.6	5	150
	root veges	kg-fw/y	8.9	5	400
	green veges	kg-fw/y	98.3	25	200
	fruits	kg-fw/y	62.7	0	100
animal products	beef	kg-fw/y	9.7	4	100
	muton	kg-fw/y	0.6	4	100
	pork	kg-fw/y	13.3	4	100
	chicken	kg-fw/y	4	1	100
	cow liver	kg-fw/y	6.7	0	40
	chicken river	kg-fw/y	0	0	40
	chicken eggs	kg-fw/y	6.7	10	200
	cow's milk	kg-fw/y	32.9	20	400
freshwater products	freshwater fish	kg-fw/y	1	n/a	n/a
	freshwater crustaceans	kg-fw/y	0.1	n/a	n/a
marine products	marine fish	kg-fw/y	12.4	n/a	n/a
	marine crustaceans	kg-fw/y	3.9	n/a	n/a
	marine molluscs	kg-fw/y	1.5	n/a	n/a
	marine plants	kg-fw/y	2.2	n/a	n/a
others	water	m3/y	0.61	0.4	0.75
	soil	kg-fw/y	0.037	0.001	0.1

이 값들은 가을, 지역별 그리고 식품별 1 인 1 일 평균 섭취량에서 얻은 자료로, 다만 실제 계산을 위해서는 이 들 자료중 양고기는 개고기와 오리고기로, 민물 갑각류 (Freshwater crustaceans)는 민물 연체류 (Freshwater mollusks)로 우리 생활에 보다 근접하도록 대체하였고 성인 1 인 평균 섭취량으로 간주하였다.

표 3. Best Estimate for Transfer Processes Operating between Biosphere Compartments

	transfer process	AMBER parameter	units	best estimates	min	max
Liquid transfer	irrigation	Q_irr	m^3/y	4.40E+03	-	-
	infiltration/recharge	d_d	m/y	7.00E-01	4.50E-01	1.00E+00
	flooding	Q_fw	m^3/y	1.00E+02	1.00E+01	1.00E+03
	river flow	Q_rw	m^3/y	6.31E+09	3.00E+05	3.00E+10
	marine discharge	Q_m	m^3/y	4.00E+11	4.00E+09	2.00E+11
Solid transfers	erosion	E_sed	m/y	1.00E-04	6.40E-06	3.40E-03
	dredging/restoring	v_dw	m^3/y	1.60E+00	5.00E-01	5.00E+00
	river sediment suspension	r_sed	m/y	1.00E-04	6.40E-06	3.40E-03
	river gross sedimentation	v_g (river)	m/y	1.60E-03	1.60E-06	1.60E-04
	bed-load	B_l	kg/y	1.60E+03	1.00E+03	2.20E+03
	diffusion due to bioturbation in a local marine environment	B_mand	m^2/y	3.20E-05	3.20E-06	3.20E-04
	gross sedimentation in a local marine environment	v_g (Marine)	m/y	7.50E-05	3.80E-06	3.70E-04
	Net sedimentation	v_nf	m/y	5.00E-05	7.50E-06	3.70E-03

표 3 은 구획간의 물질 이동을 기술하는 물질 이동 상수에 관한 시스템 관련 입력 자료로 대부분의 자료는 현 시점에서 따로 구할 수 없어 우리와 환경이 비슷한 일본에서 H12 의 평가에 사용된 값이나 스웨덴에서 사용된 문헌치 [15]등을 준용하였다. 그러나 각 구획별 면적은 주요한 파라미터로 간주되어 이 들에 대하여 문헌치나 우리나라의 전형적인 환경을 고려하여 강물과 강바닥 구획의 면적은 모두 10^4 m^2 으로, 표토의 면적도 10^6 m^2 으로 하였으며 해수와 해수 침적층의 면적은 모두 2×10^6 m^2 으로 추정하였다. 그리고 이 들 값에 대한 민감도를 검토해 보고 일부 자료에 대한 파라메트릭 조사 결과에 대해서는 뒤에서

따로 논의하기로 한다.

이러한 자료를 사용하여 계산한 결과를 그림 5~8과 표 4에 나타내었다.

그림 5와 6은 각각 GBI가 강인 경우에 대해서 연간 단위 방사능 1Bq/yr가 강물을 통해 생태계로 유입된 경우에 대해 농축업에 종사하는 피폭 집단과 담수어업 종사자 피폭 집단내 성인이 받을 수 있는 최대 선량률을 보이고 있다. 따라서 y축은 1Bq/yr의 방사능에 대한 Sv/yr로 나타나 선량환산인자로 사용할 수 있는 값이 된다.

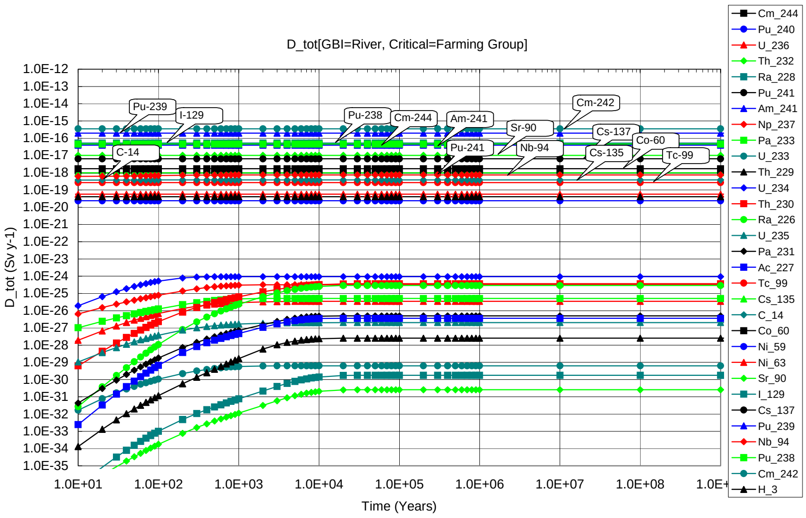

그림 5. Response of the biosphere assessment model to steady, unit flux input (1 Bq/yr) @ River GBI (*Farming* exposure group)

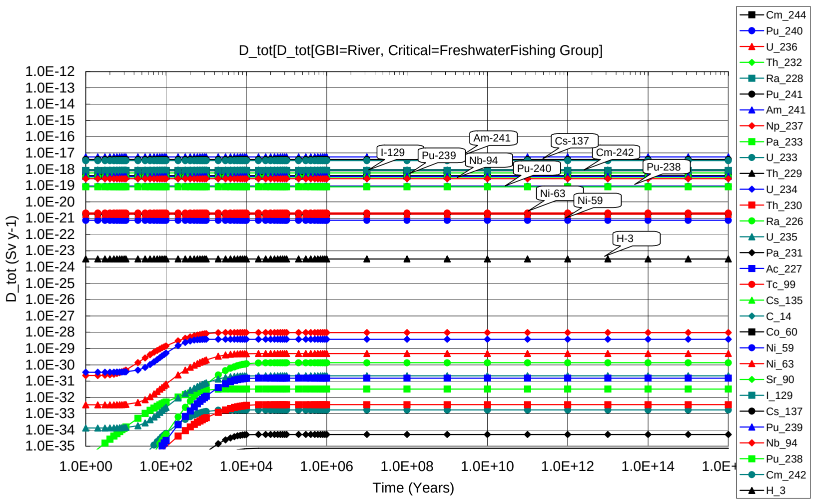

그림 6. Response of the biosphere assessment model to steady, unit flux input (1 Bq/yr) @ River GBI (*Freshwater Fishing* exposure group)

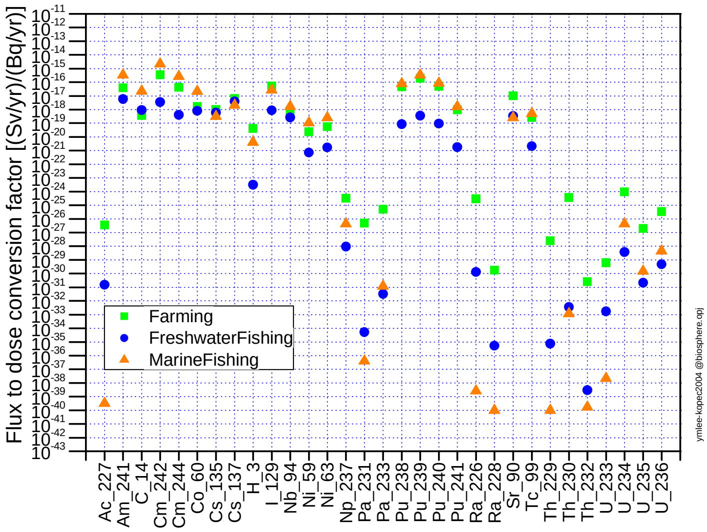

그림 7. Flux to dose conversion factor for each nuclide for each exposure group

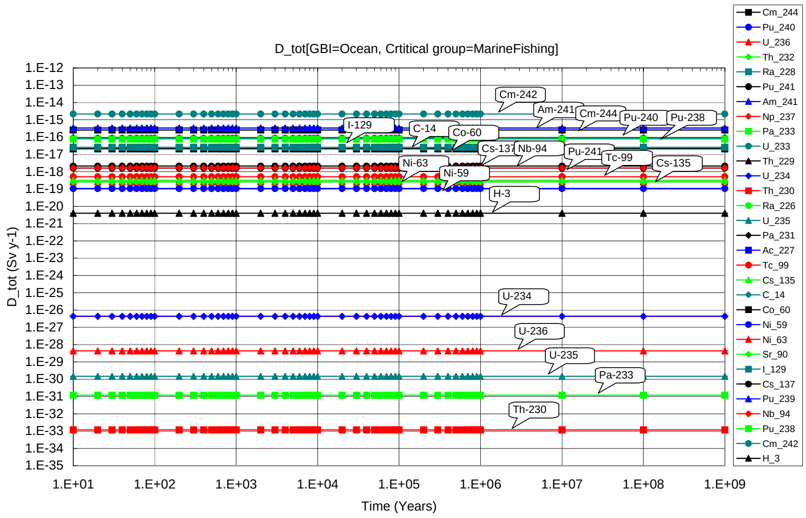

그림 8. Response of the biosphere assessment model to steady, unit flux input (1 Bq/yr) @ Ocean GBI (*Marinewater Fishing* exposure group)

이 결과로만 보면 농축피폭 집단에 대해서는 어느 핵종의 경우에도 연간 1Bq의 방사능에 대해 연간 10^{15} Sv/yr의 선량률을 넘지는 않는 것으로 나타나고 있는 것을 알 수 있고 (그림 5), 담수어업 피폭 집단의 경우는 이 보다 더 낮아 어느 핵종의 경우라도 연간 10^{17} Sv/yr의 선량률을 넘지는 않는 것으로 나타나고 있다 (그림 6). 이 결과에 따른 각각의 핵종이 줄 수 있는 최대 선량률은 따로 표 4에 각각 요약해 놓았다. 이 결과를 통해서 볼 때 GBI가 강으로 되는 경우에는 농축피폭집단이 결정집단이 될 수 있다는 것을 알 수 있다.

피폭에 주로 기여하는 핵종은 Cm-242나 Pu-239과 같은 액티나이드 핵종과 함께, I-129와 Sr-90 그리고 Cs-137, Co-60과 같은 핵종도 그 기여가 상당히 큰 것을 알 수 있다.

담수 어업에 종사하는 피폭 집단에 대한 피폭은 거의 모든 핵종에 대해 농축피폭 집단의

경우보다 상대적으로 낮지만, 그림 7에서 보면 유일하게 C-14에 대해서는 담수어업집단이 받는 피폭이 농축집단이 받는 피폭보다 높은 것을 알 수 있다.

한편 GBI가 해수로 될 때는 해양 어업에 종사하는 피폭 집단이 유일한 피폭그룹으로 되는데, 대상으로 선량 환산인자를 나타낸 그림 8에서 보면 Cm-242의 기여가 여전히 크면서 다른 액티나이드 핵동의 기여가 두드러지는 것을 알 수 있다.

Ac-227, Pa-231, Ra-226, Ra-228, Th-229, Th-232, 그리고 Th-234와 같은 붕괴사슬 자핵종은 강이 GBI가 되는 경우와 마찬가지로 여기에서도 피폭에 거의 기여하지 않는 것으로 나타나는 것도 알 수 있다. 그렇지만 GBI가 강으로 되는 경우에 비해 GBI가 바다로 되는 경우에는 Am-241, C-14, Nb-94, Ni-59, Ni-63, Sr-90 또는 Tc-99 등의 핵종과 함께, Cm이나 Pu동위원소 핵종들에 대해 심한 차이를 보이지는 않더라도 보다 높은 최대 피폭 선량, 즉 선량환산인자를 보여주는 반면, I-129, Cs-137, Cs-135나 H-3 등은 거의 비슷한 정도의 피폭을 보여주고 있는 것을 알 수 있다.

표 4. Flux to dose conversion factors

GBI	River		Ocean
Exposure	Farming	FreshwaterFishing	MarineFishing
Ac_227	3.61E-27	1.52E-31	3.17E-40
Am_241	3.97E-17	5.81E-18	3.34E-16
C_14	3.79E-19	9.05E-19	2.19E-17
Cm_242	3.52E-16	3.43E-18	2.17E-15
Cm_244	4.23E-17	4.12E-19	2.61E-16
Co_60	1.71E-18	8.24E-19	2.13E-17
Cs_135	9.92E-19	6.05E-19	3.20E-19
Cs_137	6.43E-18	4.01E-18	2.13E-18
H_3	4.06E-20	3.14E-24	3.99E-21
I_129	5.23E-17	8.68E-19	2.62E-17
Nb_94	7.38E-19	2.64E-19	1.65E-18
Ni_59	2.39E-20	7.32E-22	1.08E-19
Ni_63	5.64E-20	1.74E-21	2.57E-19
Np_237	3.16E-25	9.54E-29	4.35E-27
Pa_231	4.95E-27	5.31E-35	4.01E-37
Pa_233	5.07E-26	3.25E-32	1.20E-31
Pu_238	4.60E-17	8.51E-20	7.80E-17
Pu_239	1.96E-16	3.62E-19	3.32E-16
Pu_240	5.05E-17	9.25E-20	8.49E-17
Pu_241	9.58E-19	1.78E-21	1.63E-18
Ra_226	2.90E-25	1.34E-30	2.68E-39
Ra_228	1.76E-30	5.42E-36	1.00E-40
Sr_90	1.01E-17	3.36E-19	2.55E-19
Tc_99	2.68E-19	2.07E-21	5.10E-19
Th_229	2.53E-28	7.52E-36	1.00E-40
Th_230	3.60E-25	3.60E-33	1.18E-33
Th_232	2.60E-31	2.99E-39	1.75E-40
U_233	6.31E-30	1.70E-33	2.13E-38
U_234	9.35E-25	3.72E-29	4.39E-27
U_235	2.01E-27	2.11E-31	1.49E-30
U_236	3.48E-26	4.87E-30	4.40E-29

그림 9는 실제 가상 처분장에서 유출된 핵종이 인간 생태 환경으로 나왔을 때 실제 피폭선량을 이 연구를 통하여 구한 DCF를 적용하여 얻은 결과이다.

처분장은 예시를 목적으로 가상적으로 설정한 것으로 전형적인 우리나라 동해안 임해의 지하 수백미터의 결정암반층을 고려한 것이다. C-14과 I-129같은 핵분열 생성물에 의한 핵종이면서 지연효과가 거의 나타나지 않는 핵종들이 전반부의 피크를 형성하고 있고 역시 핵분열생성물에 의한 핵종으로 Nb-94, Ni-59 그리고 Tc-99와 같은 핵종이 뒷부분의 피크를 이루고 있는 것을 알 수 있어서 액티나이드 핵종은 후반 피크에 거의 기여를 하고 있지 않는 것으로 나타나고 있는데, 이는 전형적인 중저준위 핵종이 고려되었기 때문이다.

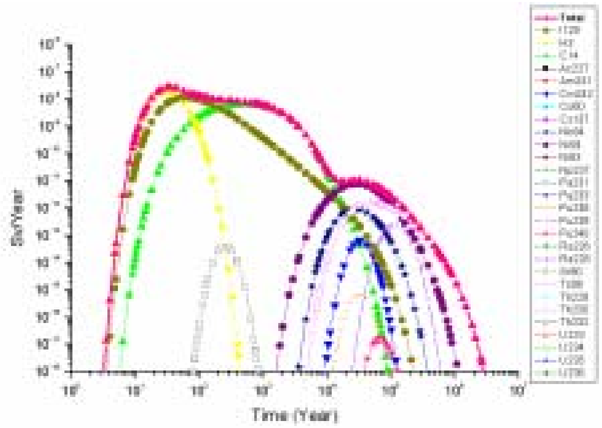

그림 9. Annual dose to Farming exposure group in case of river GBI

한편 생태계 구획모델에서 구획시스템의 크기나 핵종의 전이율이 결과에 미치는 영향을 검토해 보기 위해 I-129 핵종에 대해 임의의 변화를 주어 간단한 파라메트릭 스터디를 수행해 보았다.

대상 파라미터는 방사능이 최초로 유입되는 강물구획에 대해 인접구획으로의 전이에 관계되는 5개의 파라미터와 농축피폭그룹에 직접적으로 영향을 주는 경작에 의한 주요한 섭생경로에 영향을 미치는 표토층의 넓이 또는 부피이다. 전이에 관련된 4개의 파라미터, 강물의 유량률 (River flow, Q_rw), 표토로의 관개율 (Irrigation, Q_irr), 표토로의 홍수율 (Flooding, Q_fw), 그리고 강물에서 강바닥으로의 침적율에 관계되는 침적율 (River gross sedimentation, s_g) 중 강바닥으로의 침적율은 무시할 수 있을 정도로 민감도를 보이지 않았다.

가장 민감하게 나타난 강물의 유량율은 시간당 강물이 흐르는 유량을 나타내는데 그림 10에서 보는 대로 피폭 선량 결과에 직비례하여 나타나는 것을 알 수 있다. 선원항으로서 강물로 유입되는 핵종의 방사능이 희석되어 시스템밖으로 빠져나가게 되어서 이러한 결과가 나타나는 것을 알 수 있다. 그러나 그림 10~13에서 보여지는 대로 Q_rw를 제외한 3개의 파라미터에 대해서는 강한 민감도는 보이지는 않는 것으로 나타났다. 이 는 그 외 다른 파라미터도 같은 이유이지만 관개수의 경우를 볼 때, 처음 강물로 방사성 핵종의 유입이 이루어지면 구획모델에 따라 질량보존을 위한 핵종의 전이가 이루어지면서 표토층으로 관개수를 따라 강물에 녹아 있는 I-129가 이동하게 되면 그 질량과 표토층의 부피에 의해 표토층의 I-129의 농도가 결정되고 이 농도에 따라 피폭경로를 따른 피폭이 이루어지게 되는데, 관개에 사용되는 강물의 양이 강물 전체에 비해 작은 값이 되어, Q_irr가 강물 전체가 시스템밖으로 나가게 되는 전이에 관계되는 Q_rw에 비해 덜 민감한 것으로 나타나기 때문이다.

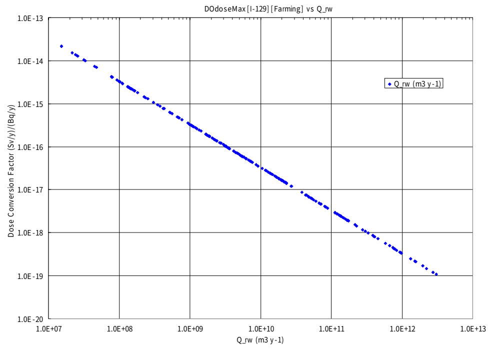

그림 10. Sensitivity of Q_rw to DCF for ^{129}I (LogTri (6.8, 9.8, 12.8) #=200)

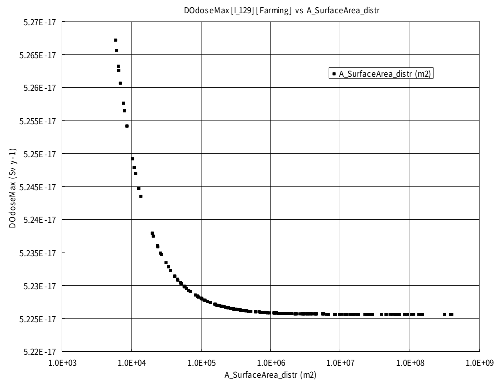

그림 11. Sensitivity of area (surface soil) to DCF for ^{129}I (LogTri (3, 6, 9) #=200)

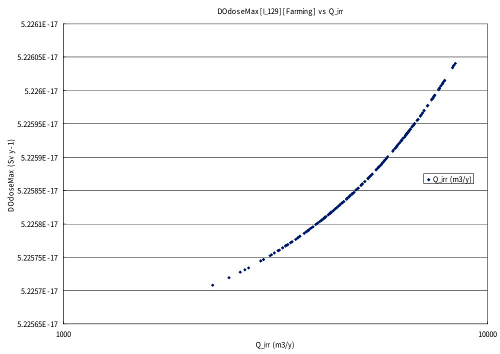

그림 12. Sensitivity of Q_irr to DCF for ^{129}I (Tri (2200, 4400, 8800) #=200)

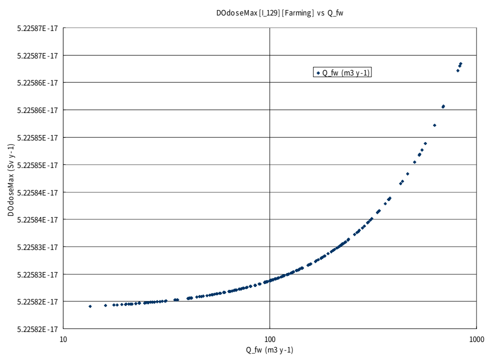

그림 13. Sensitivity of Q_fw to DCF for ^{129}I (LogTri (1, 2, 3) #=200)

6. 결론

방사성 폐기물 처분장으로부터 지하수에 의해 유출된 핵종은 지하수의 유동을 따라 지표에 도달하여 인간 생태계로 전이, 이동한 유출된 핵종이 인간에게 어느 정도의 피폭을 주는지 정량적인 결과로서 선량률, 즉 생태계의 인간에게 주는 선량 환산 인자를 산출하였다.
지하수가 생태계로 방출되는 GBI 지점을 강물과 해수로 보아 이 곳을 선원항으로 하여 생태계내에서 핵종 전이 및 이동에 관련된 다양한 FEPs 으로부터 이동 시나리오를 도출해내고 개념 및 수학적 모델링을 거쳐 관련 입력자료를 통하여 계산을 수행하였다.
결과로서 얻어진 피폭 대상 개인당 핵종별 연간 피폭선량률은 결국 생태계로 유입되는 핵종별 단위 방사능에 대한 선량률, 그러니까 선량 환산 인자 (Flux-to-dose conversion factor)가 된다. 이렇게 구해진 방사선 피폭 선량률은, GBI 로 유입되는 핵종별 단위방사능에 대한 플럭스를 알 수 있을 때 처분장의 안전성과 처분 시스템에 대한 인간 환경에 대하여 장기간에 걸친 방사선적 안전성을 보이기 위해 안전 기준치와의 비교를 위한 지표 (Safety indicator)로 활용될 수 있다.
피폭 집단은 3가지 집단 즉, 농축, 담수 어업 피폭 집단 및 해수 어업 피폭 집단으로 분류하였고, 각 집단에 대하여 흡입(inhalation), 소화(ingestion), 외부 피폭(external irradiation)을 피폭 메카니즘으로 고려하고, 각 구획과 구획내의 핵종 전이 계수는 수학적으로 모델링한 후 관련 입력자료는 국내 실측 섭생자료와 함께 문헌이나 해외의 사례를 준용하였다.
GBI 가 다른 생태계 시나리오에 대하여 그리고 방사성 폐기물에 관련된 18 개 핵종과 그 자핵종을 포함한 31 개 핵종에 대하여 최대 선량치가 나올 때까지 계산을 수행하여 3 개의 피폭집단에 대하여 우선 결정 피폭 집단을 선별해내고 그 집단이 받는 최대 선량치를 선량환산인자로 제시해 보았다.
이에 대한 정량적 평가는 국제적으로 검증된 AMBER코드를 사용하여 수행하였다.
방사성 폐기물 처분장에 대한 안전성을 보이기 위한 목적으로 활용될 수 있는 이러한 연구는 이전에 수행된 한국형 처분 시스템에 대한 생태계 평가 방법론 [16, 17]을 심도있게 확장한 것으로 그 결과와 함께 예비 생태계 평가를 통하여 단위 방사능 유입당 선량률을 구할 수 있는 정형 (Template)을 확보한다는 측면에서 매우 유용한 결과로 활용될 것이 기대된다.

참고문헌

1. AMBER 4.4 Reference Guide, Enviros Quantisci , Henley-on-Thames, U.K., 2002.
2. 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, 1999.
3. 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, 1999.
4. BIOMASS, Biosphere System Identification and Justification, BIOMASS Theme 1 Working

Document: BIOMASS/T1/WD06, IAEA, Vienna, 1999.
5. BIOMOVS II, Biosphere Modelling for Dose Assessments of Radioactive Waste Repositories, BIOMOVS II TR No.12, Sweden.
6. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (adopted January 17, 1977), ICRP Publication 26, Pergamon Press, Oxford, 1977.
7. 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.
8. H12, Project to Establish Technical Basis for HLW Disposal in Japan, JNC, 1999.
9. Davis, P.A. et al., The Biosphere Model, BIOTRAC, for Postclosure Assessment, AECL-10720, COG-93-10, 1993.
10. SKB 91- Final Disposal of Spent Nuclear Fuel; Importance of the Bedrock for Safety, SKB TR 92-20, 1992.
11. SKI SITE-94 Deep Repository Performance Assessment Project, SKI Report 96:36, Swedish Nuclear Power Inspectorate, Stockholm, 1996.
12. Smith, G.M. et al., Biosphere Modeling and Dose Assessment for Yucca Mountain, EPRI Report TR-107190 3294-18, 1996.
13. Hudson, J., Rock Engineering Systems: Theory and Practice, Ellis Horwood, Chichester, 1992.
14. 2002년도 계절별 국민영양조사, 보건복지부, 2002. 12.
15. Ulla Bergström et al., Models for dose assessments-Modules for various biosphere types, TR-99-14, 1999.
16. 이연명외, 한국형 처분시스템에 대한 생태계 평가의 한 예시, 한국방사성폐기물학회논문집, 제주대학교, 2003. 11.
17. 이연명외, 생태계 접점에 따른 선량환산 인자 평가, 대한방사선방어학회 춘계학술발표논문집, 2004.