2000 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

폐기물 처분장에서의 방사성핵종 유출시 섭식경로를 통한 생태계 영향 평가

Biosphere Assessment due to Radionuclide Release in Waste Disposal Repository through Food Chain Pathways

고현석, 강창순

서울대학교
서울시 관악구 신림동 산56-1

요 약

폐기물 처분의 장기 안전성은 결국 방사성핵종 유출로 인한 최종적인 결과에 의해 평가되는데, 이러한 안전성 평가의 최종 단계에서 필요한 것이 바로 생태계 모델링이다. 특히 섭식경로 모델링을 통해 최종 방사선량이 계산되는데, 이를 위해서는 무엇보다도 부지 특성적인 입력 자료 및 피폭경로 설정이 필수적이다. 본 연구 수행을 통해 새로운 피폭경로를 고려한 생태계 평가 모델이 분석되었고, 이를 직접적으로 평가할 수 있는 섭식경로에 대한 선량 평가 프로그램이 도출되었다. 해당 코드 구현에는 최신의 입력자료를 반영시켰으며, 이전에 고려되지 않았던 새로운 피폭경로를 포함시킴으로써 보다 더 현실적이고, 신뢰도가 높은 결과를 얻을 수 있었다.

Abstract

The long-term safety of radioactive waste disposal is assessed by the consequence analysis of radionuclides release, of which the final step is carried out by the biosphere assessment. The radiation dose is calculated from the food chain modeling which especially necessitates site-specific input database and exposure pathways. A biosphere model in consideration of new exposure pathways has been analyzed, and a program for food chain calculation has been developed. The up-to-date input data are reflected and the new exposure pathways are considered in the program, so the code shows more realistic and reliable results.

1. 서 론

원자력발전의 부산물인 방사성폐기물의 안전한 관리 및 처분장 안전성 평가는 인간 및 환경 보전에 필수적이다. 특히 원자력발전과 더불어 지속적으로 누적되고 있는 사용후핵연료를 포함한 고준위폐기물에 대해 국민이 신뢰할 수 있는 최종관리방안 및 안전성 평가 방법을 수립하는 것은 원자력 발전을 안정적으로 추진하기 위한 핵심사항이라고 할 수 있다. 게다가 근래 국내 및 일본에서 발생한 일련의 원자력 관련 사고로 인해 원자력 전반에 대한 국민의 여론 및 신뢰가 부정적인 만큼 방사성폐기물 처분에 대한 국민 수용성을 높이고 환경 친화적인 처분 안전성 확보를 위해서도 체계적이고 과학적인 국내 처분 안전성 평가 수립이 필요하다.

이를 위한 최종단계로서 생태계 영향 평가가 필요하며, 이중 특히 최종 방사선량은 섭식경로를

통한 계산에 의해 도출된다. 따라서 본 연구는 생태계 모델링중 섭식경로(먹이사슬)를 통한 내부 피폭선량 계산용 코드 구현에 중점을 두고 수행되었다. 문헌 조사를 통해 주요 피폭경로와 각 경로에서의 핵종 모사식을 설정하였고, 필요한 입력자료 및 데이터베이스를 최신의 것으로 개선하였다. 또한 이전 코드에서는 고려하지 않았던 피폭경로를 고려하여 새로 추가시킴으로써 좀더 현실성 있는 선량 평가가 되도록 하였다. 특히 본 연구는 기존의 KFOOD 코드와 Genii 코드를 참조하여 입력 데이터베이스를 최신의 자료로 개선하고, 새로운 섭식경로를 추가시킴으로써 좀더 국내 상황에 알맞은 현실적인 코드를 구현하는데 목표를 두고 진행되었다.

2. 생태계 모델링의 개요 및 기존코드 분석

(1) 생태계 모델링의 개요

방사성폐기물 처분장의 폐쇄후 영향 평가를 위한 모든 생태계 모델은 비교적 단순한 수학식으로 표현되며, 기본적으로는 선형구획모델(linear donor-controlled compartment model)에 토대를 두고 있다. 현재 사용되는 생태계 모델링의 기본적인 네 가지 구획은 지표수, 토양, 대기, 그리고 먹이사슬 구획이다. 이러한 구획모델에서는 방사성핵종이 한 구획에 들어오는 즉시 순간적인 혼합이 일어나서 그 구획 전체에 걸쳐 균일한 농도의 방사성핵종이 존재하는 것으로 가정한다. 이것은 각 구획이 이러한 가정을 만족시킬 수 있는 환경 구역을 나타내야 함을 의미하기도 한다. 일반적으로 모델을 단순화시키기 위해 구획의 개수를 최소화하려는 경향이 있는데, 바로 이와 같은 요건에 의해 지나친 단순화는 제한되고 있다. 이렇게 설정된 구획들간의 방사성핵종의 이동은 전이계수(transfer coefficient)에 의해 기술되는데, 이는 한 구획의 방사성핵종이 단위시간 동안 그 구획으로부터 다른 구획으로 전달되는 분율을 의미한다. 따라서 임의의 구획에서의 한 방사성핵종의 변화율은 식 1과 같은 선형미분방정식으로 주어진다.

$$\frac{dN_A}{dt} = S - K_{AB}N_A + K_{BA}N_B - \lambda N_A + \lambda' N_{A'} \qquad \text{식 1}$$

여기서, S = 천연방벽에서 구획 A로 유출되는 핵종의 양(원자/단위시간)

N_A = 구획 A안에 있는 방사성핵종의 원자 개수

N_B = 구획 B안에 있는 방사성핵종의 원자 개수

$N_{A'}$ = 구획 A안에 있는 모핵종의 원자 개수

K_{AB}, K_{BA} = 단위시간당 구획 A에서 구획 B로의, 구획 B에서 구획 A로의 전이계수

λ = 방사성핵종의 단위 시간당 방사성 붕괴 상수

λ' = 모핵종의 단위 시간당 방사성 붕괴 상수

t = 시간

위와 같은 연립선형미분방정식을 풀게 되면 각 구획에서의 방사성핵종의 농도를 시간 종속적으로 구하게 된다. 위 식에서 전이계수는 각 구획과 방사성핵종의 물리적, 화학적, 생물학적 특성-지하수에서의 이류 및 분산, 토양 및 침전물로부터의 침출 또는 흡수 및 흡착, 바람 및 물에 의한 침식, 지형학적 과정, 인간 활동의 영향 등-에 따라 달라진다. 따라서 모델링 개발시 이러한 여러 과정들을 다루기 위해서는 평가 목적 및 관심의 대상이 되는 계산 목표가 먼저 설정되어 있어야 한다. 이렇게 다양한 환경 매개체에서의 방사성핵종의 농도가 결정되고 나면, 이 결과와 설정된 먹이사슬, 음식 소비율, 선량전환인자 등을 통해 결과적인 피폭 방사선량을 계산하게 된다. 대부분의 경우, 하나의 피폭경로로부터 받게 되는 방사선량은 식 2와 같은 단순한 곱의 형태 모델

(simple multiplicative chain model)로 표시하여 구하고 있다.

$$D_P = C \cdot TC \cdot U \cdot DCF \qquad \text{식 2}$$

여기서, D_P = 방사선량 (Sv/yr)
C = 먹이사슬의 오염원으로 작용하는 환경구획에서의 방사성핵종 농도
TC = 먹이사슬 각 부분 사이의 방사성핵종의 전달율을 나타내는 전이계수
U = 해당 먹이사슬 부분에 대한 이용률
DCF = 선량변환인자

최종적으로 도출되는 결과는 일년동안의 방사성핵종 섭취후 개인이 일생동안 받게되는 방사선량으로 계산된다. 이는 방사선 방호 기준이, 환경에서의 일년간 방사선 피폭후 개인이 남은 일생동안 받게 되는 위해도를 제한하는 개념에 토대를 두고 있기 때문이다.

(2) 현황 및 분석

섭식경로에 따른 피폭선량에 대한 연구는 원자력산업 발전과 함께 시작되었으나 본격적인 전산모델은 1971년 미국의 HERMES 코드이다. 이 코드는 구성이 복잡하고 방대한 양의 입력자료를 필요로 하기 때문에 손쉽게 이용하기 어렵다. 그래서 HERMES 코드 중의 섭식경로 부분을 발전시킨 것이 FOOD 코드인데 이것은 US NRC의 Regulatory Guide. 1.109나 캐나다의 FOODⅡ의 기본 골격으로 채택되었으며 각 지역 특성에 맞추어 변형되었다. 이 모델들은 원자력발전소의 정상가동을 가정하여 누출되는 방사능이 섭식경로의 각 부분에서 평형상태에 있다고 가정한 평형모델이다. 지금까지 평형모델로서 FOOD에 사용된 개념은 육상 섭식경로 상의 핵종 이동을 잘 설명하고 있는 것으로 받아들여지고 있다.

그러나 이 코드들은 복잡한 경로를 모델화한 것이므로 지역 특성적인 많은 입력변수들을 필요로 한다. 기존의 KFOOD[1] 코드는 육상섭식경로 모델을 세우고 호흡에 의한 피폭 모델을 추가하여 내부 피폭선량을 계산할 수 있도록 작성된 코드이다. 육상섭식경로 모델은 기존의 FOOD 모델을 기초로 하여 한국현실에 맞게 수정하고 한국의 지역 특성적인 자료를 도입하여 한국적인 섭식경로 모델을 수립하였다. 하지만 식물과 동물의 전이계수나 침적속도에 관한 국내 자료는 전무한 실정이어서 기존의 KFOOD 코드는 식물농축계수에 대한 기초실험을 수행하여 한국적 자료를 수집하여 입력 데이터베이스로 하였고, 또한 한국인의 섭취식품 종류, 섭취량 등 지역 특성적인 자료는 최대한 수집하고 지역의 고유치가 없는 자료에 대해서는 외국문헌을 참조하여 적절한 데이터베이스를 수립하였다.

기존 KFOOD 코드의 섭식경로 모델은 FOOD에 사용된 개념을 기초로 하여 작성하였다. 기체나 액체상태로 누출된 방사성 물질은 토양이나 식물체 표면에 침적된다. 토양에 침적된 방사능은 뿌리를 통하여 식물체의 가식부로 이동하고 식물체 표면에 침적된 것은 직접 가식부로 이동하며 식물성 식품으로 섭취된다. 또 사료로 섭취되어 가축으로 이동한 방사능은 동물성 식품으로 섭취된다. 한편 방사능은 오염된 식수를 통하여 가축과 인체에 섭취될 수 있다. 이 평형모델식을 설정하는 데 있어서는 방사능이 경로상의 각 부분에서 정상상태에 있다고 가정한다. 각각의 자세한 평형 모델식은 위의 생태계 모델링의 개요 부분에 서술된 형태의 모델식과 유사하므로 여기서는 생략하기로 한다.

GENii[2] 코드는 기존의 선량평가 프로그램을 집대성하여 미국 PNL에서 만들었으며, 폐기물 처분시설로부터 대기, 지하수, 지표수 및 토양으로 누출된 방사성핵종들이 인체에 미치는 선량을 평가하고 있다. 이 코드는 Regulatory Guide 1.109 모델 및 ICRP 26과 30의 기준을 충족하며, 개

인 및 대중에 대한 선량을 경로별, 핵종별로 계산할 수 있도록 만들어져 있다. 또한 다양한 경로 및 편리한 데이터베이스로 이루어져 각국의 환경에 맞추어 수정이 용이하도록 되어 있다. 이 코드는 각각의 역할을 하는 7개의 모듈로 만들어져 있다. GENii는 방대한 코드인 만큼 많은 모델입력변수가 필요하다. 이러한 여러 가지 모델입력변수 가운데 본 연구와 관련하여 고려된 참조 모델입력변수는 수산물 섭취현황, 수산물 농축계수, 내부 선량전환인자 등이다.

국민영양섭취조사보고서에 의하면 우리나라 국민들의 민물 연체, 갑각류 및 조류의 섭취는 거의 없고 민물 생선만을 섭취하는 것으로 나타났다. 우리나라에서 민물생선을 섭취하는 경로는 개천이나 저수지 등에서 낚시를 하거나, 양식장에서 인공양식된 생선을 섭취하는 경우가 대부분이며, 이러한 경우 살아있는 생선을 바로 조리하여 섭취하게 되는 경우가 많다. 바다 쪽에서는 어류와 해조류의 섭취가 많은 것으로 나타났다.

농축계수는 물 1리터 중의 방사능(Ci/l)에 대한 수산물 1kg중의 방사능(Ci/kg)비로 정의된다. 수산물에 대한 농축계수는 본 연구에서 고려한 민물고기와 바다물고기, 해조류에 대한 것을 그 대상으로 하였다.

GENii에서는 ICRP 30모델을 기준으로 선량전환인자를 계산하였다. ICRP 30에서는 ICRP 참고인에 대한 선량전환인자를 계산하였는데, ICRP 참고인의 체중이 한국인의 표준체중보다 약 10kg 정도 무겁긴 하지만, 장기별 무게에서는 그리 큰 차이를 나타내지 않은 것으로 보아 비 실효에너지의 변화도 크지 않은 것으로 나타났다.

3. 코드의 개발

KFOOD 코드는 약 10년 전에 만들어진 코드이므로 데이터베이스 파일이 상당히 오래되었다. 그러므로 현실적인 상황을 만족시키기 위해서는 입력데이터베이스 파일의 갱신이 필요하다. 또한 섭식경로 상에서 수산물에 대한 고려는 완전히 배제되어 있으므로 이를 보완할 필요가 있다. GENii 코드는 미국에서 만든 코드로 국내 실정과는 다소 거리가 있으며, 또한 기존의 선량평가 프로그램들을 집대성 한만큼 방대한 코드 내용으로 본 연구에 사용하기엔 너무 광범위하다. 그러므로 본 연구에 필요한 부분만 차용할 것이 요구된다.

(1) 데이터베이스의 갱신

KFOOD코드의 데이터베이스 파일은 9가지이다. PLTRAN file과 ANTRAN file은 각각 식물성 식품군과 동물성 식품군의 각 핵종에 대한 전이계수를 나타낸 파일들이다. 그리고 DEPKOR file은 각 핵종의 침적속도와 붕괴상수에 대한 자료이다. 따라서 이 자료들은 실험을 통해서 갱신해야 한다. 본 연구에서는 실험을 통한 방법론은 사용하고 있지 않으므로 이것의 수정은 다루지 않는다. 또한 LABKOR file은 모델에 사용되는 주요 입력변수의 설명과 파라미터 값이 수록되어 있다. 그러므로 이 file은 꼭 갱신을 필요로 하지는 않는다. 따라서 KFOOD 코드에서 수정, 보완할 데이터베이스 파일은 DITKOR, FOOKOR, NAMKOR, 선량전환인자 file 등의 4가지이다.

DITKOR file은 우리나라 국민들의 연령별 연간 식품 섭취량을 나타낸 파일이므로 갱신하기 위해서는 국민영양섭취에 대한 최근 자료가 필요하다. 기존의 KFOOD에서는 1987년의 자료를 사용했지만 본 연구에서는 이것을 갱신하여 보건복지부에서 1995년에 나온 자료인 '95'국민영양조사결과'를 이용하였다. 이 자료는 1995년 11월 1일부터 11월 20일까지 20일간 조사한 결과이며 조사규모는 전국을 대상으로 선정된 15개 시·도 100 지구 2,000 가구이다. 지역을 대도시, 중소도시, 농촌으로 나누어 식품섭취조사를 가구당 연 2일간 섭취한 식품의 총량과 가구원별 2일간의 식사상황을 조사하여 피조사 인원수로 나눈 단순 평균값으로 보고되었다. 이 자료에 의하면 경제수준 향상에 따라 동물성식품의 섭취비율이 증가하고 식물성식품 섭취비율이 감소하고 있음을 알 수

있다. 또한 곡류는 감소하고 있는 반면, 채소류·과실류 등의 섭취가 증가하고 있음을 알 수 있다. 그리고 동물성 식품의 경우에는 총 식품 중 동물성 식품이 차지하는 비율이 '69년 3.0%에서 '95년 20.9%로 7배나 증가하였음을 알 수 있다.

그리고 새롭게 추가되는 섭식경로인 수산물의 섭취량에 대한 자료 역시 이 '95'국민영양조사결과'를 이용하였다. 다만 이 보고에는 민물고기에 대한 섭취량이 수록되어 있지 않기 때문에 표 4에 있는 해양수산통계연보의 우리나라 수산물 수급동향을 이용하였다.

'95'국민영양조사결과'에서 95년의 자료만을 식품별로 나열한 후에 각 연령별로 구분하였다. KFOOD에서 적용한 식품분류와 다소 일치하지 않는 식품의 분류가 있었으나 기존의 DITKOR file의 자료대로 가중치를 주어 95년의 자료로 갱신하였다. 또한 연령별로 구분하는 것도 기존의 DITKOR file을 기본으로 하여 가중치를 주어서 계산하였다. 다만 유아의 경우는 우유만을 먹는다고 가정하여 계산하였다. 여기에 기존에는 고려되지 않았던 수산물의 섭취량에 대한 자료도 고려되어 새로운 자료로서 추가되었다. 바다물고기와 해조류의 섭취량은 '95'국민영양조사결과'에 보고되어 있는 자료를 그대로 사용하였고, 민물고기의 섭취량이 누락되어 있는 것은 내수면어업의 공급량을 민물고기의 소비량으로 가정하고 근해어업과 천해양식업의 공급량을 바다물고기의 소비량으로 가정하여 그 비율로 민물고기의 섭취량을 계산하였다. 그 계산 결과는 표 1에 수록하였다. 식수량과 호흡량의 경우에는 기존의 자료를 그대로 써도 큰 무리가 없으므로 갱신하지 않았다.

FOOKOR file은 각 식품에 대한 데이터를 수록한 것이다. 그러나 여기에 수록된 데이터들은 전부가 육상식품에 대한 자료들이므로 추가한 식품인 수산물에 대한 자료를 추가시킬 필요는 없었다. 그러므로 여기에는 13종의 식품에 대한 자료들만 수록되어 있다. 단, 식물성 식품과 동물성 식품의 생산에서 소비까지 걸리는 시간에 대한 자료가 있으므로 수산물도 생산에서 소비까지 걸리는 시간에 대한 자료를 넣을 수도 있지만 다른 자료들과 균형이 맞지 않으므로 수산물의 생산에서 소비까지 걸리는 시간은 프로그램 소스에서 직접 설정하였다. 이 file에서 갱신할 자료는 농작물의 단위면적당 수율로 농림부의 전국 및 시도 생산량 자료를 참고하여 갱신하였다. 이 자료 역시 KFOOD의 식품분류와 다소 맞지 않으므로 표 3의 KFOOD에서 사용한 식품 분류법을 참고로 8종의 식물성 식품분류를 하고 생산량을 재배면적으로 나누어 생산수율을 계산하였다. 그 계산한 결과는 표 2에 수록하였다.

NAMKOR file은 식품명과 연령군명을 수록한 file이므로 추가한 식품인 Local fish, Sea fish, Sea weed의 세 가지를 추가하였다.

선량전환인자 file은 국제 동향에 맞추어 ICRP 60을 기준으로 하는 최신 선량환산인자를 사용하였다.[7,8] 형식이 기존의 KFOOD에 사용했던 것과 다르기 때문에 형식을 맞추기 위해 23가지인 장기의 수를 Gonads, Breast, Red Bone Marrow, Lung, Thyroid, Bone surface 등의 6가지와 유효선량전환인자로만 고려하였고, 피폭 연령별군도 3개월, 1세, 5세, 10세, 15세, 성인의 6가지로 되어 있는 것을 1세와 10세를 제외하고 3개월을 infant, 5세를 child, 15세를 young, 성인을 adult로 분류하여 새롭게 수록하였다.[4,5]

(2) 섭식경로의 추가

수산물은 어류, 연체류, 갑각류, 조류로 구분된다. 그리고 각각은 다시 민물과 바다물로 나뉘어진다. 본 연구에서는 우리나라 국민들의 섭취형태를 조사하여 수산물을 민물고기, 바다물고기, 해조류의 세 가지로 구분하여 추가하였다. 다른 종의 수산물들은 섭취량이 적어 결과에 미치는 영향이 극히 적을 것으로 판단되기 때문이다.

그러나 KFOOD 코드에는 수산물 섭취에 대한 모델 방정식이 처음부터 배제되어 있었으므로, GENii 코드의 수산물 섭취부분을 참조하여 본 연구에 적용시켰다.[3] GENii에서 사용된 선량 계산식은 식 3과 같다.[2]

$$D_{ai} = \sum_{f=1}^{n} U_f \, C_{ui} \, B_{\mathrm{if}} \, \exp(-\lambda_i \, t_p) \, D_{gi} \qquad \text{식 3}$$

여기서, D_{ai} : 수산물 섭취로 인한 핵종 I에 대한 개인선량 (rem)

C_{ui} : 물의 농도 (Ci/l)

B_{if} : 수산물 f에 대한 생물학적 축적계수 (l/kg)

n : 수산물의 종류수

t_p : 생산에서 소비까지의 시간 (sec)

U_f : 개인의 수산물 섭취율 (kg/d)

위의 식은 GENii에서 쓰인 방정식이고, 이를 본 연구에서는 식 4와 같이 변형하여 사용하였다.

$$H_{ir} = \sum_{f} D_{inr} \, C_{inf} \, U_f + D_{ihr} \, X_i \, U_h \qquad \text{식 4}$$

여기서, H_{ir} : 핵종 i에 의한 장기 r의 년간 내부 피폭선량, Sv/yr

D_{inr} : 섭취에 의한 핵종 i의 장기 r에 대한 선량전환인자, Sv/Bq

C_{inf} : 식품 f 중의 핵종 i의 농도, Bq/kg

U_f : 년간 식품 f 섭취량, kg/yr or L/yr

위의 선량 계산식에서 C_{inf} (식품 f 중의 핵종 i의 농도, Bq/kg)가 GENii의 해당 수산물 식에서의 $C_{ui} \, B_{\mathrm{if}} \, \exp(-\lambda_i \, t_p)$와 같다고 놓으면 된다. 따라서 수산물섭취에 의한 선량계산식은 식 5와 같다.

$$C_{isea} = C_{ui} \, B_{\mathrm{if}} \, \exp(-\lambda_i \, t_p) \qquad \text{식 5}$$

여기서, C_{isea} : 수산물중의 핵종 i의 농도 (Bq/kg)

C_{ui} : 물의 농도 (Bq/l)

B_{if} : 수산물 f에 대한 생물학적 축적계수 (l/kg)

t_p : 생산에서 소비까지의 시간

λ_i : 핵종 i의 방사성 붕괴상수

위의 방정식을 섭식경로로서 추가 적용시키기 위해서는 프로그램 소스의 수정과 데이터베이스 file의 추가가 필요하다. 프로그램 소스의 수정은 위의 방정식을 추가하는 것이므로 데이터베이스 file과 input control file을 입력받는 부분과 계산부분, 출력부분의 부분적 수정을 하였다.[6]

입력부분에서는 위 방정식에서의 B_{if}인 수산물 f에 대한 생물학적 축적계수를 새로운 데이터베이스 file로 만들어 읽어들이는 부분을 추가하여 수정한다. 또한 입력파일인 INPKOR file에 바다물 중의 핵종 농도를 추가하는 부분을 새로이 수정해야 한다.[8]

이 부분에서는 이미 입력된 자료들을 통해 위의 방정식에 대한 계산을 한다. 특히 민물고기의 경우에는 물의 농도를 관개수의 농도로 하고 바다물고기와 해조류의 경우에는 물의농도를 바다물

의 농도로 한다. 또한 방사성 붕괴상수는 DEPKOR file에서 읽어온 자료를 그대로 사용하고, 생산에서 소비까지 걸리는 시간은 최대한 보수적으로 하여 1일로 설정했다.[2]

출력부분의 수정은 섭식경로의 추가와 추가된 경로의 합을 화면출력에 나타내는 방식으로 간단히 수행되었다.

위의 추가된 방정식에서 쓰이기 위한 데이터베이스 file은 GENii에서 쓰이는 생체축적계수에 대한 자료가 있는 bioac1.dat란 file을 정리하여 구성하였다. 기존의 bioac1.dat file은 바다물과 민물에 대해 각각 어류, 갑각류, 연체류, 조류로 구분하여 각 핵종에 대한 생체축적계수를 수록하고 있다. 그리고 식수에 대한 정화계수도 같이 수록되어 있다. 그러나 본 연구에서 고려하고 있는 종은 민물고기와 바다물고기, 해조류이므로 그것에 대한 생체축적계수만을 추출하여 자료형을 바꾸어 KFOOD에 추가된 섭식경로에 요구되는 BIOACC라는 데이터베이스 file을 만들었다.[3]

4. 코드 계산 및 분석

기존의 KFOOD 코드와 본 연구에서 수정 보완한 KFOOD 코드를 각각 16가지 핵종에 대해 계산하여 개인피폭선량을 도출하고, 그 결과를 분석하였다.[9,10] 코드계산에 사용된 가정 및 과정은 다음과 같다.

기존 코드에서는 바닷물 경로는 고려하지 않았고, 공기중 농도로 $1\ Bq/m^3$, 관개수 농도로는 $1\ Bq/\ell$를 가정하여 계산하였다. 또한 개인은 오염된 관개수를 식수로 사용한다고 가정하였으며, 동물은 오염되지 않은 물을 먹는다고 가정하였다.

반면, 수정한 코드의 경우에는 공기중 농도로 $1\ Bq/m^3$, 관개수 농도와 바닷물 농도로 $1\ Bq/\ell$를 가정하여 계산하였다. 마찬가지로 개인은 오염된 관개수를 식수로 사용한다고 가정하였으며, 동물은 오염되지 않은 물을 먹는다고 가정하였다. 단, 기존의 결과와 수정한 결과의 경우 모두에 대해, 16가지의 핵종 중 H-3와 C-14의 경우에는 공기중이나 관개수중 한가지의 침적만 허용하므로 공기중 농도만을 $1\ Bq/m^3$로 가정하고, 수산물의 경로는 무시하고 오염된 관개수를 식수로 먹지 않는다고 가정하여 계산하였다.

계산 결과의 분석을 위하여 세 가지 종류의 코드로 계산을 수행하였다. 먼저 기존의 KFOOD 코드, 그리고 동일한 피폭경로와 최신의 자료로 설정된 입력 데이터베이스 file을 사용한 KFOOD 코드, 마지막으로 최신 자료의 입력 데이터베이스 file 추가뿐만 아니라 새로운 섭식경로를 추가하여 본 연구에서 수정 개발한 코드의 세 가지 종류로 계산을 수행하였다. 편의상 첫 번째 것을 ver.1, 두 번째 것을 ver.2, 세 번째 것을 ver.3이라 하겠다.

본 연구에서 고려한 16가지 방사성 핵종에 대한 연간 개인피폭선량 계산 결과의 요약은 표와 그림으로 나타내었다. 단, 자료가 많은 관계상, 성인에 대한 내부피폭선량의 요약만을 수록하였다.

표 5와 그림 1은 성인의 경우, 16가지 핵종에 대해 ver.1, ver.2, ver.3로 계산한 섭취로 인한 선량, 호흡으로 인한 선량, 총 내부피폭선량의 결과를 요약한 것이다. 그리고 설정된 각 피폭경로별 총 내부피폭선량 결과도 16가지 핵종 모두에 대해서는 자료가 많은 관계로 Pu239 핵종에 대해서만 성인의 경우에 대해 표 6으로 요약하였다.

본 코드 계산을 통한 결과는 다음과 같다.

첫째, 입력 데이터베이스 file의 갱신으로 인한 결과 변화를 분석하기 위해 ver.1과 ver.2의 결과를 비교해 보았다. 그림 1에서 알 수 있듯이 U과 Pu 등 몇몇 핵종에 대해 피폭선량이 감소하는 변화가 있었다. ver.1과 ver.2의 결과 차이를 초래하는 주된 인자를 알아보기 위하여, 본 연구에서는 각각의 output file을 분석함과 동시에 ver.1과 ver.2에 대한 추가 계산을 수행하였다. 즉,

output file의 결과 분석을 통해 주된 요소라 유추된 선량환산인자의 실제 영향을 알아보기 위해, ver.1의 선량환산인자를 ver.2에 적용시켜(나머지 입력자료는 최신자료 유지) 계산을 수행하였다. 그 결과, 선량환산인자가 같은 상태에서는 ver.1과 ver.2 사이의 결과가 큰 차이를 나타내지 않음을 확인할 수 있었고, 따라서 이를 통해 ver.1과 ver.2의 결과 차이는 주로 선량환산인자의 차이에서 기인하는 것으로 결론지을 수 있었다. 결국 이러한 연구 결과는 섭취량의 차이보다는 선량환산인자의 차이가 선량계산 결과에 더욱 큰 영향을 미치는 것을 입증하는 것이며, 따라서 선량환산인자의 선택에 있어서 신중한 고려가 필요할 것으로 분석된다.

둘째, 피폭경로의 추가로 인한 계산 결과의 변화를 알아보기 위해 ver.2와 ver.3의 결과를 비교해 보았다. ver.2와 ver.3의 결과에서 16가지 핵종에 대한 각 경로의 합계를 비교해 보면 그다지 큰 변화는 아니었지만 적어도 약 1% 정도의 변화는 모든 핵종에 대해 나타났고, 일부 핵종은 30% 이상의 변화를 보였다. 본 연구의 계산 결과는 모든 핵종에 대해 일률적으로 같은 농도를 가정하고 계산했기 때문에, 실제로 처분장에서의 핵종 유출시 각각 다른 농도를 지니게 되는 핵종간 결과의 단순비교는 의미가 없다고 판단된다. 그러나 실제 방사성핵종 유출 시나리오에서 높은 농도를 갖는 핵종에 대해서는, 새로운 피폭경로 설정으로 인해 추가되는 방사선량에 대한 중요한 고려가 필요할 것으로 여겨진다. 게다가 앞으로 폐기물 처분장이 임해지역에 건설될 경우 본 연구에서 추가한 수산물의 섭취로 인한 피폭경로를 더욱 중요하게 고려해야 할 것으로 생각된다.

실제 계산에서 16가지 핵종 모두에 대해 그림 2에 해당하는 결과를 비교했을 때, 어떤 피폭경로가 전체피폭선량에 주요 영향을 미치는가를 알 수 있었다. 주로 쌀과 두류, 엽채류가 다른 피폭경로보다 높은 선량을 나타내었고, 일부 중금속 핵종에 대해서는 해조류도 비교적 높은 선량을 나타내었다. 이는 중금속 핵종의 해조류에 대한 생체축적계수가 비교적 높기 때문에 나타난 결과라고 볼 수 있다. 쌀과 두류, 엽채류가 높은 선량을 나타낸 것은 우리 국민들의 식습관을 반영한 결과라고 판단된다.

5. 결 론

방사성폐기물 처분장으로부터 생태계를 통해 유출된 방사성핵종이 인체에 미치는 영향을 평가하는 코드를 구현하기 위해 새로운 섭식피폭경로를 고려한 생태계 선량 평가 코드를 구현하였다.

기존 KFOOD 코드의 수정 및 보완을 위해 새로운 데이터베이스 파일을 추가하고, 기존의 데이터베이스 파일을 갱신하였으며, 또한 수산물 섭식경로를 새롭게 추가하였다.

일정한 값의 농도를 지닌 것으로 가정하고, 기존 코드와 본 연구에서 도출된 코드를 통해 16가지 핵종에 대해서 각각 피폭선량을 계산한 결과, 전체적으로 피폭선량이 감소하였으며, 입력데이터베이스 파일 중 선량전환인자의 갱신이 피폭선량의 감소에 큰 영향을 미친 것으로 나타났다. 그러므로 향후 선량전환인자의 변경에는 신중한 고려가 뒤따라야 할 것으로 여겨진다. 또한 현재 사용하고 있는 선량환산인자는 모두 외국인을 기준으로 작성된 것이므로 앞으로 관련 연구를 통하여 한국인에게 적합한 선량전환인자를 도출하는 것이 중요할 것으로 보인다.

새로운 섭식경로로서 수산물의 피폭경로를 추가했는데, 이로 인해 적게는 1%에서 많게는 30% 이상까지의 피폭선량 변화를 보였다. 이것으로 보아 방사성폐기물 처분장에서 많이 유출되는 핵종에 대해서는 추후 특별한 고려가 필요하다고 생각된다. 게다가 임해지역이나 도서지역에 방사성폐기물 처분장이 건설될 경우, 수산물을 통한 피폭경로가 더욱더 중요한 의미를 가질 것으로 판단된다. 중요한 피폭경로로 도출된 쌀과 두류, 엽채류에 대한 피폭경로에 대해서는 해당 피폭경로와 관련있는 입력자료의 선정에 있어서 보다 더 해당 지역 특성을 반영할 수 있는 자료 선택이 요구되며, 이에 따른 향후 연구가 지속되어야 할 것으로 보인다.

본 연구에서 도출된 방사선량 계산 코드는 새로운 섭식경로를 고려함으로써 향후 안전성 평가에서 보다 활용도가 높을 것으로 판단되며, 이후 입력자료 갱신 및 필요한 경로 추가를 통해 계속적으로 개선시켜야 할 것으로 사료된다.

Acknowledgement

본 논문은 “기초원자력연구개발사업”의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 이정호 외, “섭취 및 호흡에 의한 방사선 내부피폭 선량 평가코드개발”, 한국원자력연구소, 1991
2. 한필수 외, “처분 안전성 연구 - 제5권 방사성폐기물 처분에 따른 개인피폭선량평가”, KAERI-NEMAC/RR-135/94, 한국원자력연구소 부설 원자력환경관리센터, 1994
3. B.A.Napier, et.al., "Hanford Environmental Dosimetry Upgrade Project, GEN II - The Hanford Environmental Radiation Dosimetry Software System", PNL-6584, Volume 1, 2 and 3, Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington, 1988
4. 장시영 외, “주민피폭선량 평가지침(안)”, 한국원자력안전기술원, 2000
5. “INDAC 사용자 지침서(안)”, 한국원자력기술원, 2000
6. 김승렬, “PC 사용자를 위한 FORTRAN77”, 생능, 서울, 1992
7. 최병권 외, “ICRP 60 신 권고안을 반영한 소외선량 평가모델 개발 (전산코드 TEDII-60 개발)”, KOPEC/98-TD-009, 한국전력기술주식회사, 1998
8. 장시영 외, “선량환산계수의 변경과 규제영향”, 한국원자력안전기술원, 1999
9. 한필수 외, “처분 안전성 연구 - 제2권 처분 안전성 평가 코드 개발”, KAERI-NEMAC/RR-117/94, 한국원자력연구소 부설 원자력환경관리센터, 1994
10. 한필수 외, “처분 안전성 연구 - 제3권 선원항 평가 및 검증”, KAERI-NEMAC/RR-116/94, 한국원자력연구소 부설 원자력환경관리센터, 1994

표 1 KFOOD형태의 국민영양조사결과

식품군	kg/yr
1. rice	112.7
2. O. Grain	11.4
3. Legume	12.7
4. L. Veget	55.3
5. R. Veget	27.9
6. F. Veget	21.3
7. Potatoe	7.7
8. Fruits	53.3
9. Eggs	8.0
10. Pork	11.8
11. Poultry	2.4
12. Milk	23.9
13. Beef	10.6
14. L. Fish	0.24
15. S. Fish	20.0
16. S. Weed	2.4

표 2 KFOOD형태의 국내 농산물 생산량

Food Group	재배면적(㎡)	생산량(kg)	생산량/재배면적(kg/㎡)
쌀	1.0662E+10	5262700000	0.494
곡류	658170000	217431000	0.330
두류	992400000	129122000	0.130
엽채류	129290000	1201997000	9.297
근채류	704220000	2090347000	2.968
과채류	883510000	855442000	0.968
서류	477660000	1106390000	2.316
과일류	1573640000	2274604000	1.445

표 3 한국인이 섭취하는 식품군

Food Group	Relative Food
쌀 (rice)	쌀
곡류 (other grains)	보리, 밀, 옥수수, 기타
두류 (legume)	콩, 팥, 녹두, 기타
엽채류 (leafy vegetable)	배추, 파, 상추, 시금치, 양배추
근채류 (root vegetable)	무우, 마늘, 양파, 당근
과채류 (fruit vegetable)	호박, 고추, 오이
서류 (potatoes)	감자, 고구마, 기타
과일류 (fruit)	사과, 배, 감, 귤, 포도, 복숭아, 기타
난류 (egg)	달걀, 기타
돼지고기 (pork)	돼지고기, 관련제품
닭고기 (poultry)	닭고기, 기타
유류 (milk)	우유, 유제품, 기타
쇠고기 (beef)	쇠고기
어류 (seafish)	고등어, 꽁치, 명태, 조기, 갈치, 도미, 가자미, 정어리, 가오리, 청어, 뱅어, 멸치, 쥐치포, 뱅어포, 노가리
해조류 (sea weed)	미역, 김, 다시마, 파래, 우뭇가사리, 기타

표 4 어업형태 및 어류별 어획량 (단위 : 톤)

	1998	1997	1996	1995	1994
계	2835015	3243725	3244288	3348184	3476587
일반해면어업	1308336	1367406	1623822	1425213	1486357
천해양식업	777230	1015134	874810	996451	1072126
원양어업	722597	829395	715378	897227	887198
포경어업	0	0	0	0	0
내수면어업	26852	31790	30278	29293	30906

표 5 성인에 대한 내부피폭선량 요약 (단위:Sv/yr)

핵종	Ver1			Ver2			Ver3		
	Ing	Inh	Int	Ing	Inh	Int	Ing	Inh	Int
H-3	0.313E-06	0.117E-06	0.430E-06	0.410E-06	0.132E-06	0.542E-06	0.410E-06	0.132E-06	0.542E-06
C-14	0.261E-03	0.468E-07	0.261E-03	0.257E-03	0.453E-07	0.257E-03	0.257E-03	0.453E-07	0.257E-03
Fe-55	0.940E-04	0.534E-05	0.994E-04	0.168E-03	0.278E-05	0.170E-03	0.227E-03	0.278E-05	0.230E-03
Co-60	0.483E-02	0.431E-03	0.526E-02	0.193E-02	0.731E-04	0.200E-02	0.194E-02	0.731E-04	0.201E-02
Sr-90	0.239E+00	0.256E-02	0.242E+00	0.211E+00	0.176E-03	0.212E+00	0.211E+00	0.176E-03	0.212E+00
Tc-99	0.117E-01	0.168E-04	0.117E-01	0.210E-01	0.293E-04	0.211E-01	0.210E-01	0.293E-04	0.211E-01
I-129	0.639E-01	0.307E-03	0.642E-01	0.100E+00	0.702E-03	0.101E+00	0.101E+00	0.702E-03	0.101E+00
Cs-135	0.282E-02	0.878E-05	0.283E-02	0.268E-02	0.878E-05	0.269E-02	0.269E-02	0.878E-05	0.270E-02
Cs-137	0.174E-01	0.629E-04	0.175E-01	0.164E-01	0.336E-04	0.164E-01	0.165E-01	0.336E-04	0.165E-01
U-235	0.459E-01	0.241E+00	0.287E+00	0.263E-01	0.227E-01	0.490E-01	0.264E-01	0.227E-01	0.491E-01
U-238	0.440E-01	0.234E+00	0.278E+00	0.252E-01	0.212E-01	0.464E-01	0.253E-01	0.212E-01	0.465E-01
Pu-238	0.658E-01	0.951E+00	0.102E+01	0.118E+00	0.336E+00	0.455E+00	0.125E+00	0.336E+00	0.461E+00
Pu-239	0.719E-01	0.102E+01	0.110E+01	0.129E+00	0.366E+00	0.495E+00	0.136E+00	0.366E+00	0.502E+00
Pu-241	0.143E-02	0.205E-01	0.219E-01	0.246E-02	0.658E-02	0.904E-02	0.259E-02	0.658E-02	0.918E-02
Cm-242	0.992E-02	0.351E-01	0.450E-01	0.854E-02	0.380E-01	0.466E-01	0.114E-01	0.380E-01	0.495E-01
Cm-244	0.187E+00	0.556E+00	0.743E+00	0.162E+00	0.197E+00	0.359E+00	0.209E+00	0.197E+00	0.407E+00
Total	7.66E-01	3.06E+00	3.84E+00	8.25E-01	9.89E-01	1.82E+00	8.90E-01	9.89E-01	1.88E+00

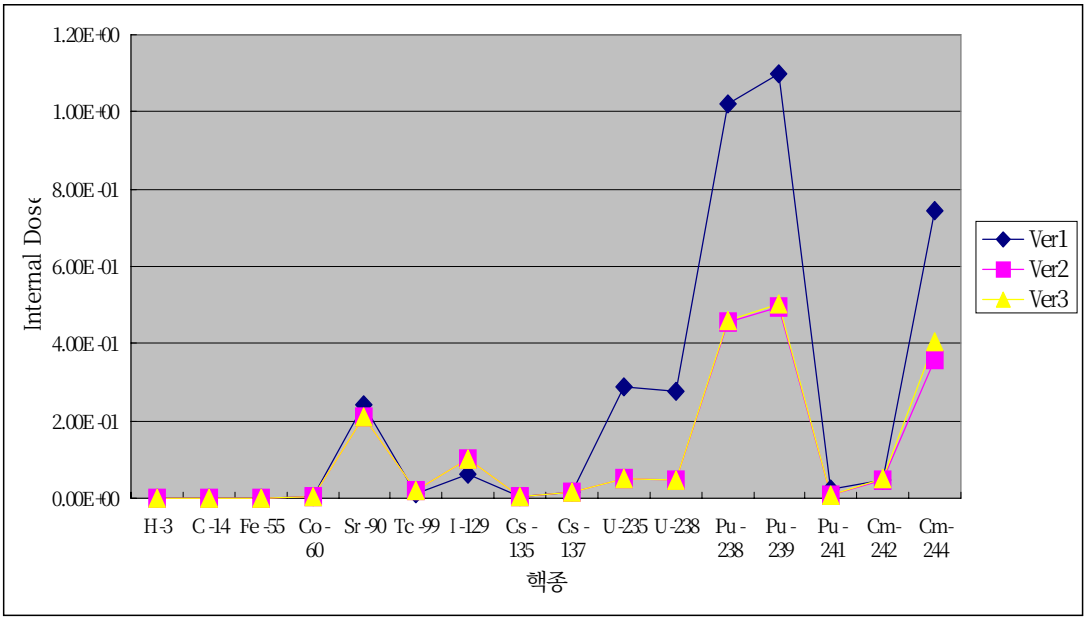

그림 1 성인에 대한 내부피폭선량

표 6 경로에 따른 내부피폭선량 - Pu239 (성인) (단위 : Sv/yr)

	ver1	ver2	ver3
Rice	0.430E-01	0.743E-01	0.743E-01
Other grains	0.587E-02	0.889E-02	0.889E-02
Legume	0.122E-01	0.167E-01	0.167E-01
Leafy veget	0.612E-02	0.930E-02	0.930E-02
Root veget	0.492E-03	0.153E-02	0.153E-02
Fruit veget	0.780E-03	0.381E-02	0.381E-02
Potatoe	0.113E-02	0.288E-03	0.288E-03
Fruit	0.209E-02	0.134E-01	0.134E-01
Eggs	0.871E-06	0.149E-05	0.149E-05
Pork	0.126E-03	0.330E-03	0.330E-03
Poultry	0.340E-06	0.888E-06	0.888E-06
Milk	0.180E-07	0.888E-06	0.459E-07
Beef	0.796E-04	0.264E-03	0.264E-03
Local fish	0.639E-04	0.133E-03	0.150E-04
Sea fish	-	-	0.500E-02
Sea weed	-	-	0.217E-02
Drinking water	-	-	0.133E-03
Total	7.20E-02	1.29E-01	1.36E-01

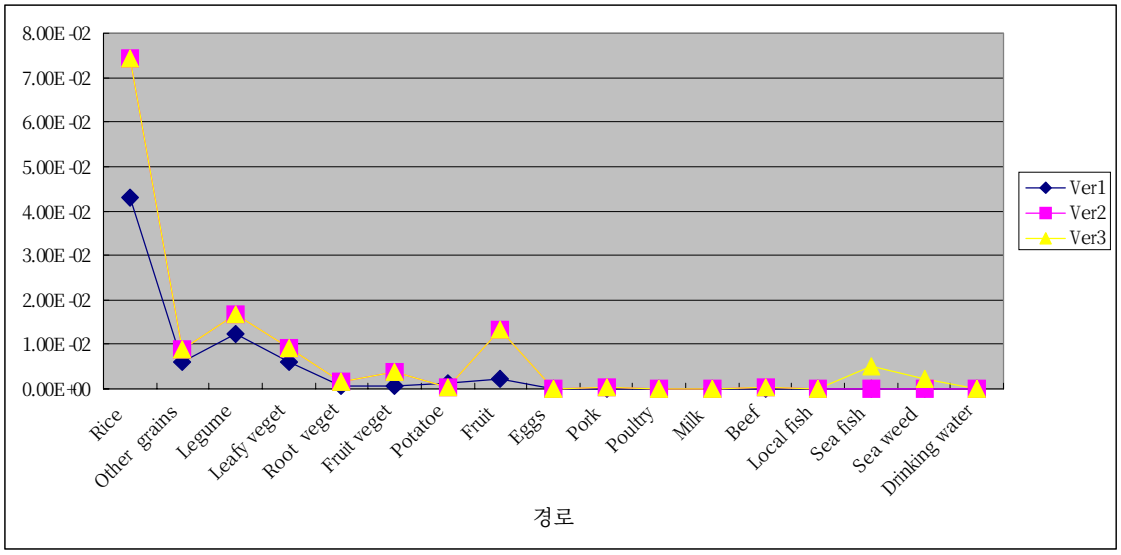

그림 2 경로에 따른 내부피폭선량 - Pu239 (성인)