'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

환경에 존재하는 방사능 농도를 고려한 내부선량평가 전산 프로그램

The Computer Program for Internal Dose Assessment via Environmental Samples

김형진, 김희근, 성래경*, 이원근**

한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16
*(주) KONEC
경기도 성남시 분당구 야탑동 145
**경희대학교 원자력공학과
경기도 용인시 기흥읍 서천리 1

요 약

원자력 발전소의 가동에 따라 방사능에 의한 환경 오염과 주변 주민 피폭에 대한 관심이 증가하고 있다. 따라서 방사선 피폭 평가 기술은 방사선 방호 및 대 국민 신뢰도를 확보하기 위해 아주 중요한 요소가 되고 있다. 현재까지 많은 연구가 진행되었고 그리고 앞으로도 꾸준히 많은 연구가 진행되고 있지만 지금까지 보고된 바에 의하면 섭식 경로에 따른 피폭 선량 계산은 발전소에서 유출되는 방사선원으로부터 시작하여 확산·이동되는 여러 가지 경로를 모사하여 주민에 대한 피폭 선량을 계산하고 있다. 하지만 본 연구에서는 여러 가지 경로들 중에 음식물 섭취에 의한 체내 피폭 계산과 토양, 해수에 의한 피폭계산을 확산으로 인한 방사성 핵종의 이동을 배제하고 이런 경로를 통해 도출되는 핵종 농도를 직접적인 계측으로 얻어지는 값을 사용하여 피폭선량을 계산할 수 있도록 하였다.

Abstract

It has been an increasingly interesting topic to research nuclear power plant pollution on environment and radiological exposure to nearby residents. Therefore, dose assessment research has been particularly important for protecting the public and gaining their acceptance. Radiation dosage has previously been calculated by assessing several pathways to human ingestion by humans of radioactive materials produced by power plants. To reduce these uncertainty, this paper proposes a more streamlined exposure calculation method, based on the direct assessment of activities of environmental sample detected in each pathway.

1. 서론

원자력발전소에서는 운전시 주변 환경으로 유출되는 방사성 물질로 인해 주변 주민이 받

게되는 피폭선량을 ODCM을 이용하여 평가하고 있다[1][2]. 기존의 피폭선량 평가 코드들은 원전으로부터 유출되는 방사성 핵종 및 유출 방사능으로부터 주민 피폭선량을 계산할 수 있도록 되어 있기 때문에 환경에 존재하는 방사성 핵종으로부터 피폭선량을 계산하기 위해서는 이들 코드를 분해하여 방사성 핵종 및 방사능으로부터 피폭선량을 계산할 수 있도록 재구성하여야 한다[2]. 이 경우 간단히 내부피폭 선량평가 모델을 이용하여 방사능 섭취량으로부터 피폭선량을 계산할 수 있으며 최종 피폭경로상의 시료에 대해 수 계산이 가능해진다. 그러나 토양의 방사능으로부터 전이된 식품의 섭취로 인한 피폭선량 같이 최종 피폭 경로상에 위치하지 않은 시료중의 방사능으로부터 피폭선량 계산은 복잡한 단점이 있다. 최종 피폭경로상의 시료에 대한 피폭선량 계산도 음식물별 연간 섭취량, 핵종별 피폭선량 환산계수 등을 일일이 입력해야 하는 번거로움이 있다. 그리고 환경 매질에 존재하는 방사능으로부터 피폭선량을 계산하는 것은 방사능 측정에 사용되는 검출기의 검출하한이 존재하며, 일부 방사성 동위원소는 자연에도 존재하고, 조사 대상이 되는 환경 시료의 제한 등으로 정확한 선량평가가 곤란하다는 문제점을 가지고 있다.

그럼에도 불구하고 원전 주변의 환경 방사능 조사를 하면서 종종 직면하게 되는 문제중의 하나는 일부 환경 시료중에서 원전 영향으로 예상되는 방사성 핵종이 검출되었을 때 이에 의한 영향이 얼마나 되느냐 하는 문제이다. 음식물에 대해서는 선량환산계수 및 연간 섭취량 등으로 예탁선량 계산이 가능하나 음식물 이외에 대해서는 사용할 수 있는 계산 방법이 모호한 실정이다. 따라서 이러한 제한점을 극복하고 주변주민 선량 평가에 간단하게 사용할 수 있는 내부 피폭선량 계산 프로그램을 개발할 필요가 있다고 판단되었다. 한편 이외에도 ICRP-60 권고에 따라 피폭선량평가 연령군을 6개로 좀더 세분하고 새로운 선량환산계수를 적용할 수 있도록 프로그램을 개발하였다.

2. 내부피폭 선량계산

가. 개요

환경내 존재하는 인공 및 자연 방사성 핵종으로부터 피폭선량을 계산하는 방법으로는 방사성 유출물들의 인체에 대한 피폭 경로를 조사, 분석하여 각 매질에 존재할 수 있는 방사성 핵종들과 방사능을 조사하여 평가하는 방법과 직접 측정된 환경 시료의 방사성 핵종의 농도로부터 내부 및 외부 피폭을 계산하는 방법이 있다. 전자의 경우는 방사성 유출물에 의한 총체적인 피폭선량을 추정할 수 있다는 의미에서 매우 중요한 계산 방법으로서 지금도 계속 사용되고 있다. 그러나 후자의 경우 계산된 결과는 전자의 방식과는 달리 현재 존재하는 환경 시료중의 방사능을 고려한 실질적인 피폭선량을 계산할 수 있는 방법론이기는 하나 여러 가지 단점도 있다. 먼저 실제 환경중의 방사능 농도는 거의 모든 값이 계측할 수 있는 값 이하의 즉 최소검출농도(Minimum Detectable Concentration : MDC)이하의 값이며, 이러한 값을 이용한 선량평가는 그 해석이 모호할 경우가 있다. 그리고 실제 방사성 물질은 수많은 경로를 통하여 인체내로 유입되기 때문에 단순한 Critical Pathway만을 고려한 선량평가에 대한 회의적인 견해도 있을 수 있다.

환경 시료 중 방사능 농도를 고려한 주민의 개인 피폭선량 계산을 도식화하면 그림 1과 같다.

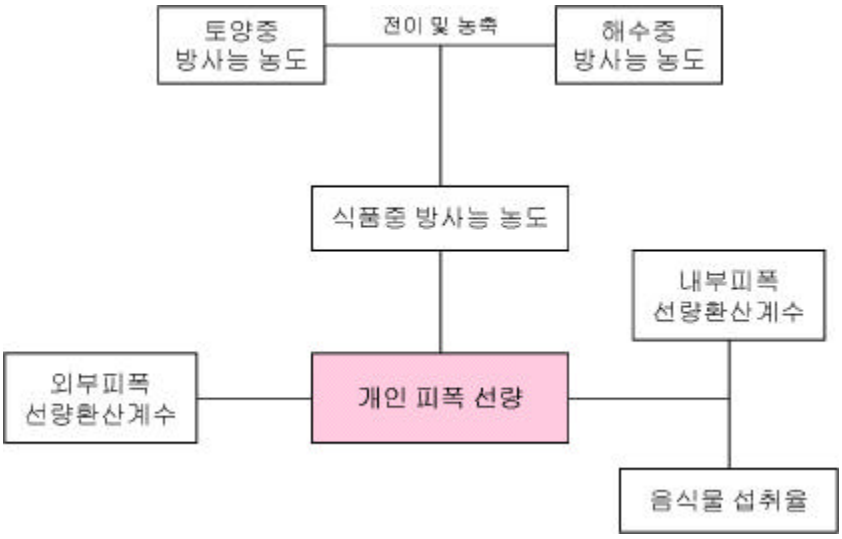

그림 1. 환경 시료중 방사능 농도에 의한 주민의 개인피폭선량 모델 도식

나. 선량평가를 위한 기본식

식품시료의 농도에 의한 내부피폭

오염된 식품의 시료로부터 검출되는 방사성 핵종의 농도에 의한 내부피폭을 계산하는 식은 다음과 같다.

$$H_{fi} = U_f \times D_i \times C_{fi}$$

여기서,

H_{fi} : **식품 f 내 핵종 i 섭취로 인한 피폭선량** (Sv/yr)
U_f : **식품 f 의 섭취량** (kg/yr)
D_i : **핵종 i의 선량환산계수** (Sv/Bq)
C_{fi} : **섭취식품 f 중 핵종 i의 농도** (Bq/kg)

오염된 토양으로부터 전이되는 식물성 식품에 의한 내부피폭

오염된 토양에서 재배되는 식품중의 농도는 핵종 전이계수를 매개로 하여 다음과 같다.

$$C_{pfi} = B_{pfi} \times C_{si}$$

여기서,

C_{pfi} : **식물성 식품 f 에 대한 핵종 i 의 식물전이계수**
B_{pfi} : **식물성 식품 f 내 핵종 i 의 농도** (Bq/kg)
C_{si} : **토양내 핵종 i의 농도** (Bq/kg)

따라서 오염된 토양으로부터 식물성 식품으로 전이된 방사성 핵종의 농도에 의한 내부피폭을 계산하는 식은 다음과 같다.

$$H_{fi} = U_f \times D_f \times C_{pfi}$$
$$= U_f \times D_i \times C_{si} \times B_{pfi}$$

여기서 섭취되는 식품은 모두 오염된 토양에서 재배된다는 가정이 필요하다.

오염된 토양으로부터 전이되는 동물성 식품에 의한 내부피폭

오염된 토양으로부터 재배된 사료를 가축이 섭취할 경우 가축에 대한 농도는 다음과 같다.

$$C_{afi} = B_{afi} \times U_{af} \times C_{pfi}$$
$$= B_{afi} \times U_{af} \times C_{si} \times B_{pfi}$$

여기서

C_{afi} : 동물성 식품 f 내 핵종 i 의 농도 (Bq/kg)
B_{afi} : 동물성 식품 f 에 대한 핵종 i 의 동물전이계수
U_{af} : 동물의 사료 섭취량 (kg/yr)

따라서 오염된 토양으로부터 동물성 식품으로 전이된 방사성 핵종의 농도에 의한 내부피폭을 계산하는 식음 다음과 같다.

$$H_{fi} = U_f \times D_i \times C_{pfi}$$
$$= U_f \times D_i \times B_{pfi} (1 + B_{afi} \times U_{af}) C_{si}$$

오염된 해수로부터 농축되는 해산식품에 의한 내부피폭

오염된 해수에서 서식하는 해산물의 농도는 핵종 농축계수를 매개로 하여 다음과 같다.

$$C_{pfi} = B_{ofi} \times C_{oi}$$

여기서,

B_{ofi} : 해산식품 f 내 핵종 i 의 농축계수
C_{ofi} : 해산식품 f 내 핵종 i 의 농도 (Bq/kg)
C_{oi} : 해수내 핵종 i 의농도 (Bq/kg)

따라서 오염된 해수로부터 해산식품으로 농축된 방사성 핵종의 농도에 의한 내부피폭을 계산하는 식은 다음과 같다.

$$H_{fi} = U_f \times D_i \times C_{ofi}$$

$$= U_f \times D_i \times C_{oi} \times B_{ofi}$$

지표로부터의 외부피폭

일정한 농도로 오염된 토양이 균일한 두께로 무한하게 펼쳐있다고 가정하면, 외부피폭 선량은 다음과 같다.

$$H_{bi} = D_{bi} \times C_{svi}$$

여기서,

H_{bi} : **핵종 i 에 의한 외부피폭선량** (Sv/y)
D_{bi} : **토양내 핵종 i 에 대한 외부피폭 선량환산계수**
C_{si} : **토양의 농도**
C_{svi} : **토양 부피당 핵종 i 의농도** ($C_{svi} = C_{si} \times 10^{-3}$)

여기서는 방사능이 일정한 두께로 균일하게 분포되어 있다는 가정하에 그리고 부수적인 측면에서 오염된 토양에 대해 표면에 대한 외부 피폭 선량환산계수를 사용하였다.

다. 입력 변수 고찰

위 식들을 이용하여 환경 시료중 방사능 농도에 의해 계산되는 피폭선량은 고리 원전 주변 지역 주민들이 그 지역에서 생산되는 단일 식품을 1년간 섭취할 경우이거나 혹은 토양 및 해수로부터 전이·농축되어 오염된 식품을 섭취할 경우 어느 정도의 선량을 받을 수 있는가에 대한 값을 계산하는 것이다. 고리 원전 주변 주민들의 각 연령군에 대한 단일 식품의 연간 섭취로 받게되는 전신 유효선량을 계산할 수 있도록 하였다.

현재 ICRP Pub. 60의 개념이 도입됨에 따라 과거에 선량평가시 각 장기에 대한 등가선량 평가의 개념이 퇴색되었으며, ICRP Pub. 66의 내부피폭 모델을 기초로 하여 산출된 유효선량환산계수로 인해 전신에 대한 유효선량만을 평가함으로서 각 장기에 대한 피폭의 등가선량에 대한 평가도 만족시킬 수 있다고 판단된다.

연령군

연령군은 현재 ICRP-66의 내부피폭 모델에서 제시하고 있는 6개의 연령군으로 즉, 3개월, 1년, 3년, 5년, 10년, 15년, 성인으로 구분하여 나타내었으며, 각 연령군에 따라 섭취량을 적용하였다. 일반적으로 1세 미만의 유아의 경우에는 분유의 섭취 이외에는 전혀 섭취량이 없는 것으로 가정하여 분유만의 섭취로 선량평가 계산을 하였으며 그 외의 연령군에 대해서는 분유를 제외한 모든 종류의 음식물을 섭취하는 것으로 하였다.

섭취식품

고리원전 주변 주민들이 섭취하는 음식물의 종류를 표에 나타내었다. 이것은 국민영양조사보고서를 참고하여 한국인이 많이 섭취하는 식품을 육상식품 9종과 해산식품3종으로 구분하였다.

주변 주민들의 음식물 섭취량 조사는 먼저 보건복지부에서 발행한 보고서에 수록된 우리

나라 국민들의 각 식품에 대한 섭취량[4][11]과 고리 주변 지역의 생산량을 기준으로 성인에 대한 값을 평가하였으며, 그 외의 연령군에 대한 섭취량은 한국인 영양권장량[5]에서 제시하고 있는 "소비단위계수"를 사용하여 각 연령군에 맞는 섭취량을 다시 산정 하였다. 여기서 소비단위계수라 함은 각 연령에 적합한 필요 칼로리를 산출하여 성인을 기준으로 각각의 연령에 대한 필요 칼로리 분율을 나타낸 것이다.

표 1. 각 연령군의 소비단위계수

구분	소비단위계수
1세 미만	0.36
1세 이상 2세 미만	0.48
2세 이상 7세 미만	0.60
7세 이상 12세 미만	0.82
13세 이상 17세 미만	1.04
17세 이상	1.00

오염되었다고 가정되는 토양에서 자란 사료를 섭취한 가축을 사람이 섭취할 경우 고려되어지는 가축의 사료 섭취량은 동물식품 농도계산에 필수적인 파라메타가 된다.

이 값은 축산학 개론에 게재되어 있는 가축의 사료 섭취량을 참고하였다. 그리고 우유에 대한 농도 전이를 파악하기 위한 젖소에 대한 사료의 섭취량을 일반적으로 사람이 섭취하기 위한 쇠고기의 사료 섭취량과 구별하였으며, 사람이 섭취하기 위한 쇠고기의 사료 섭취량은 일하는 소와 젖소의 평균값[6]을 사용하였다.

선량환산 계수

일반적으로 방사선 영향평가 프로그램의 평가대상이 일반 주민이므로 모든 연령군에 대한 피폭선량평가가 수행되어야 하며, 이를 위해서는 연령군 별 섭취에 의한 내부피폭 선량환산계수를 고려하여야 한다. 일반인에 대한 선량환산계수는 ICRP-66의 모델에 따른 ICRP-69에서 각 연령의 섭취에 따른 선량환산계수[7]을 제시하고 있으며, 이를 도입하였다.

외부피폭선량환산계수의 경우 Federal Guide Report No.12에 수록되어 있는 자료를 인용하였다. 이 보고서에는 토양의 깊이에 따라 각각의 외부피폭선량환산계수[8]을 제시하고 있지만, 주로 토양으로부터 인체에 미치는 영향이 가장 큰 표면에 대한 외부 피폭선량 환산계수를 사용함으로서 보다 보수적인 측면에서 선량을 평가할 수 있다는 장점이 있다. 물론 채취토양의 깊이에 따라 적합한 선량 전환인자를 적용하는 것이 정확한 값을 계산할 수 있지만, 이러한 방법은 너무나 많은 자료를 요구할 뿐만 아니라 실제 시료 채취는 주로 표면에서 이루어 질 것으로 예상되기 때문에 표면에 대한 외부 피폭 선량환산계수의 사용은 문제가 없을 것으로 판단된다. 또한 표면에 대한 값은 토양의 밀도와는 무관하게 사용할 수 있음을 이 보고서에서는 권고하고 있다.

전이계수

전이계수는 크게 두 종류로 나눌 수가 있다. 첫 번째는 식물성 식품의 전이계수이고 두 번째는 동물성 전이계수이다[9].

식물성 식품의 전이계수(Biv)는 토양속에 존재하는 핵종이 작물체에 흡수되어 가식부위로 전이되는 정도를 나타내는 계수로서 섭식경로를 통한 내부피폭선량모델에서 육상 식물성 식품중 핵종 농도를 예측하는 데 필요한 매개 변수로서 다음과 같이 정의된다.

$$B_{iv} = \frac{\text{작물체 가식부중 핵종 i의 농도 (Bq/kg - fresh or dry)}}{\text{건토중 핵종 i의 농도(Bq/kg - dry soil)}}$$

동물성 식품의 전이계수(Sim)는 동물성 식품내 핵종농도 예측을 위한 매개변수로서 가축의 1일 핵종 섭취량에 대한 가식 부위내 핵종농도의 비로 정의된다.

$$S_{im} = \frac{\text{가축 가식부중 핵종 i의 농도(Bq/kg)}}{\text{가축의 1일 핵종 i의 섭취량(Bq/d)}}$$

국외 자료는 크게 5개의 모델에서 서로 다른 전이계수 값을 사용하고 있다. 따라서 이 값들중 극단적인 값의 이용을 피하기 위하여 주로 각 모델값의 평균치를 이용하고자 하였다.

농축계수[1][10]

유기체내에서의 농축계수는 다음과 같이 정의되고 있다.

$$\text{농축계수}(B_{ip}) = \frac{\text{생물중의 방사성 핵종의 평형농도}}{\text{수중의 방사성 핵종의 농도}}$$

농축계수 Bip는 유기체내의 평형 방사능 농도를 해수내의 방사능 농도로 나눈 것으로 해수로부터 생체로의 축적정도를 나타낸다. 보통 L/kg의 단위로 표현되는데, 이는 (pCi/kg)/(pCi/L)로부터 유도된 단위이다. 그리고 본 논문에서는 NUREG/CR-3332의 농축계수를 조정하여 보수적인 값을 취하였다.

방사능 농도

측정된 환경시료의 방사능은 채집상태에서 전처리 과정을 거쳐 측정되지만, 방사능을 측정시점으로부터 시료 채집시까지의 붕괴를 고려하여 채집 시점의 방사능으로 계산이 가능하다. 그러나 식품은 불규칙한 유통기간을 거쳐 식탁에 오른다. 어떤 식품은 채집되자마자 섭취되는가 하면 어떤 식품은 건조 혹은 장기간 젓갈로 담근후 섭취하기도 한다 정확한 피폭선량 평가를 위해서는 시료 채집시의 방사능이 아니라 섭취 시점에서의 방사능을 입력하여야 하나 이에 대한 조사가 미흡하여 채취시점에서의 방사능을 입력자료로 하였다.

3. 결론

환경시료중 방사능 농도를 고려한 방사선 피폭계산 프로그램을 개발하였다. 본 프로그램에서는 토양, 해수 및 식품 시료에 오염된 핵종의 농도를 환경시료중 계측되는 농도를 이용하여 간단하게 선량으로 계산할 수 있도록 하였다. 계산 프로그램 내 수식은 간단하여 실제 수계산으로도 가능하지만, 이를 전산화하여 DB함으로써 사용하기에 좀더 편리하게 하였다. 이 결과 원자력 발전소 주변에서 시행되고 있는 환경 감시 및 환경 방사선 조사로부터 식품

시료나 토양 혹은 해수에 대한 농도로부터 일반인이 알기 쉬운 선량으로 전환할 수 있는 이점이 있다고 판단된다. 입력 자료를 국내에서 발간되고 있는 통계 자료로 대치하였지만 자료의 주민들의 섭취량과는 다소 차이가 있을 수 있어 각 발전소별 specific한 자료의 요구사항이 문제점으로 지적될 수 있다. 본 프로그램은 정상적으로 가동되는 원자력 발전소주변의 환경 시료를 채취, 직접 계측을 통한 평가가 가능하여 일반인들에 대한 이해를 도울수 있을 뿐만 아니라 실제 거의 영향을 받지 않기 때문에 대민 홍보에도 일조를 할 수 있으리라 여겨진다.

참고문헌

1. 한국전력공사, 영광원전지역에 적합한 환경방사선 평가모델 개발, 1996
2. 한국원자력안전기술원, 방사선 안전 규제 기술 개발, 1998. 3
3. International Commission on Radiological Protection, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, Annals of the ICRP, 21 (1-3), Pergamon Press, 1991
4. 보건복지부, 국민영양조사 결과보고서, 1994, 1997
5. 한국인구보건연구원, 한국인 영양권장량, 보건복지부, 1985
6. 육종륭외, 축산학 개론, 항문사, 1989
7. International Commission on Radiological Protection, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 69 Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides : Part 3 Ingestion Dose Coefficient, Press, 1994
8. EPA, Federal Guidance No.12, External Exposure to Radionuclides in Air, Water and Soil, 1993
9. 이창우, KFOOD-섭취 및 호흡경로에 의한 방사선 내부피폭선량계산을 위한 전산코드, 한국 원자력연구소, 1992
10. J.E. Till, A and H. R. Mayer, Radiological Assessment, A Text book on Environmental Dose Analysis, NUREG/CR-3332, ORNL-5968, 1983
11. 한국전력공사, 사회환경자료 조사철, 1996