

'98 추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

## 음식물 섭취에 의한 내부 피폭 선량 계산 프로그램의 개발

### Development of Internal Dose Calculation Programing via Food Ingestion

김형진, 이원근

경희대학교

경기도 용인시 기흥읍 서천리 1

이모성

청주대학교

충북 청주시 상당구 내덕동 36

#### 요 약

섭식경로에 따른 피폭 선량 계산의 대부분은 발전소에서 유출되는 방사성 물질로부터 시작하여 확산·이동되는 여러 가지 경로를 고려하여 주민의 피폭 선량을 계산하고 있다. 하지만 이러한 복잡한 경로를 수학적으로 모델링하기 위해서는 여러 가지 가정이 불가피하고, 피폭 경로와 관련한 많은 입력 자료가 필요하다. 그런데 이런 가정이나 입력 자료에는 환경과 관련한 불확실성이 존재하기 때문에 피폭선량 계산 결과의 정확성에 의문이 제기된다. 따라서 이러한 불확실한 가정 및 입력자료의 수를 줄이기 위하여 본 연구에서는 어떤 경로든 상관없이 측정된 환경 시료 중의 방사능을 사용하여 피폭 선량 계산을 할 수 있도록 하였다. 피폭선량 계산의 적용은 고리 원자력 발전소 주변 주민을 대상으로 하였으며, 선량전환 인자는 ICRP Publ.60에서 제시한 값을 사용하였다.

#### Abstract

Most of dose for public via ingestion pathway is calculating for considering several pathways; which start from radioactive material released from a nuclear power plant to diffusion and migration. But in order to model these complicate pathways mathematically, some assumptions are essential and lots of input data related with pathways are demanded. Since there is uncertainty related with environment in these assumptions and input data, the accuracy of dose calculating result is not reliable. To reduce, therefore, these uncertain assumptions and inputs, this paper presents exposure dose calculating method using the activity of environmental sample detected in any pathway. Application of dose calculation is aim at peoples around KORI nuclear power plant and the value that is used to dose conversion factor recommended in ICRP Publ. 60.

## 1. 서 론

원자력 발전소에서는 운전시 주변 환경으로 유출되는 방사성 물질로 인해 주변 주민이 받게 되는 피폭선량을 평가하고 있다. 피폭선량 평가는 1950년대의 핵무기 실험에 의해 농업 지역에 축적된 방사성 물질로부터 주민이 받는 피폭선량을 계산하기 위해 처음으로 개발되었으며, 이후 다양한 평가 방법들이 개발, 사용되어 왔고, 평가 모형 및 변수들의 정확도를 향상시키기 위한 연구가 계속되어왔다[1][2][3].

1970년대 들어 원자력의 평화적인 이용과 함께 본격적으로 원자력 발전소가 건설, 운영됨에 따라 원전의 환경 안전성을 보증하기 위한 수단으로 원전 주변 주민의 피폭선량 평가가 필수적인 요건이 되었다. 특히 미국의 경우는 10 CFR 50 Appendix I 에서 피폭선량 평가의 정확도 및 신뢰도를 더욱 강조하고 있으며, 방사성 핵종의 유출량을 피폭선량으로 환산할 수 있는 원전 설계목표치를 제시하고 있다[1][2].

이에 따라 원자력 시설로부터 유출되는 방사성 핵종으로부터 주변 주민의 피폭선량을 평가하기 위한 여러 가지 모형들이 개발되었다. 이들 모형들은 원자력 시설로부터 방출된 방사성 유출물이 주변 주민의 인체에 도달되는 경로와 방사성 물질이 인체에 흡입 혹은 섭취 되었을 때 인체가 받는 피폭선량을 평가하는 것으로 나누어진다. 후자의 모형은 ICRP Publ. 2, 30, 66으로 발전하여 보다 정확한 내부 피폭 모형이 개발되었다. 이 모형을 이용한 표준 서구인에 대한 선량 전환 인자들이 함께 제시되고 있다. 물론 ICRP에서 제시한 값들은 서구인과 한국인의 체형의 차이가 있어 그 값들을 우리 나라에서 그대로 적용하는 것은 문제가 있을 것이다. 그러나 이로부터 오는 오차는 전자 모형에 의한 오차에 비하면 매우 작을 것으로 예상된다. 전자의 모형은 일반적으로 기체 및 액체 유출물로 나누어, 각각에 대해 대기 확산 혹은 해양 확산 등의 이동 경로를 거쳐 생물체에 농축, 인체에 섭취 및 흡입되는 경로를 수학적으로 근사하고 있다. 그런데 환경은 시시각각으로 변하기 때문에 연간 평균 환경 자료를 이 모형의 입력 자료로 사용한다[4][5].

그 동안 국내에서는 주민 피폭선량평가 방법으로서 이들 결합된 모형을 사용한 미 NRC의 GASPAR, LADTAP 과 혹은 캐나다에서 개발된 PATHWAY-II 피폭선량 코드를 우리나라 환경에 맞도록 개조하여 사용하여 왔다[1]. 그런데 이 모형에서는 대기 확산 혹은 해양 확산의 불확실성이 존재하고 또한 측정된 환경 중의 방사능으로부터 피폭선량 평가가 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 피폭선량 평가 모형에서 불확실성을 많이 포함하고 있는 대기 확산 또는 해양 확산을 제거하여, 직접 환경 중에 존재하는 방사능으로부터 ICRP Publ 66의 내부 피폭 모형과 결합하여 보다 정확한 피폭 선량을 평가하는 방법 및 이를 편리하게 사용할 수 있는 프로그램을 개발하고자 하였다.

## 2. 피폭 선량 계산

### 2.1 피폭선량 평가 모형의 개요

방사선 피폭경로를 포괄하는 선량 평가 모형은 원자력 발전소로부터 유출되는 방사성 물질의 생태학적 이행 기구를 포함한다. 또한 시료의 채취에서부터 유통 시간, 섭취량과 같이 사람의 생활권에서 이행·전파되는 기구와 사람의 체내에서 방사성 물질이 이행 분포되는 생리학적 기구를 거쳐 인체 조직·기관이 받는 선량 평가까지의 여러 가지 기구를 포함하는 시스템으로 구성되어 있다[6]. 따라서 피폭 선량 평가를 위한 모형에서 각 피폭 경로에 대응하는 모니터링 항목에 대하여 측정된 데이터를 모형의 입력 데이터로 하면 환경 방사능 조사 결과로부터 선량 평가도 가능하다. 물론 이와 같은 경우에 시설로부터 유출된 방사능으로부터 피폭선량을 평가하는 프로그램의 일부 수정과 더불어 계산된 피폭 선량의 의미가 변하는 것은 불가피하게 된다.

우선 기존의 피폭 선량 평가 프로그램에서 원자력 발전소로부터 유출된 방사성 물질의 확산·분포되는 기구가 불필요하며, 대신 환경에서 존재하는 방사능이 입력 자료로 프로그램에 입력되어야 한다는 것이다. 이러한 계산이 보다 정확하기 위해서는 환경 조사 프로그램의 조사 항목들이 피폭 선량 평가 모형에서 주요 경로로 하고 있는 환경 요소들을 포함하여야 하며 방사능 조사 결과도 가능한 한 원자력 발전소 기원의 방사능을 결정할 수 있는 정도까지 측정되어야 한다.

방사능 측정의 검출 하한치는 분석 방법에 따라 결정되는데, 지금까지의 원자력 발전소 주변 환경 방사능 조사 결과로부터도 알 수 있듯이 환경 중에 원자력 발전소에 기인하는 방사능은 대부분 검출 하한치 보다 낮은 수준으로 존재한다[7]. 보통 방사능 측정의 검출 하한치는 시료 중에 포함된 방사성 핵종의 양이 개인 및 공중에 미치는 피폭 선량이 무시할 만한 선에서 결정되므로, 환경중의 방사능은 검출 하한치 이상으로 측정된 자료만을 사용하여 개인 및 공중의 피폭선량을 계산하더라도 큰 무리가 없을 것으로 생각된다.

기존의 피폭선량 평가 모형로 계산한 피폭선량은 방사성 유출물이 연간 일정한 율로 방출되고 또 연간 평균적인 환경 조건을 가상하였을 때 이들 방사성 물질에 의해 피폭되는 양이 된다[5][6]. 그러나 환경 방사능 측정 결과로부터 계산된 피폭 선량은 과거에 이들 방사성 물질이 존재하였다고 할지라도 그들에 의한 방사선이 주변 주민에게 준 피폭 선량은 알 수 없고, 단지 현재 이들 방사성 물질이 환경에 존재할 때 이들 방사성 물질이 어느 때부터 존재하였는지에 관해서는 상관없이 앞으로 주민들에게 영향을 줄 피폭량이 된다.

식품 섭취에 의한 주민 피폭선량 계산 모형을 도식화하면 아래 그림 3과 같다.

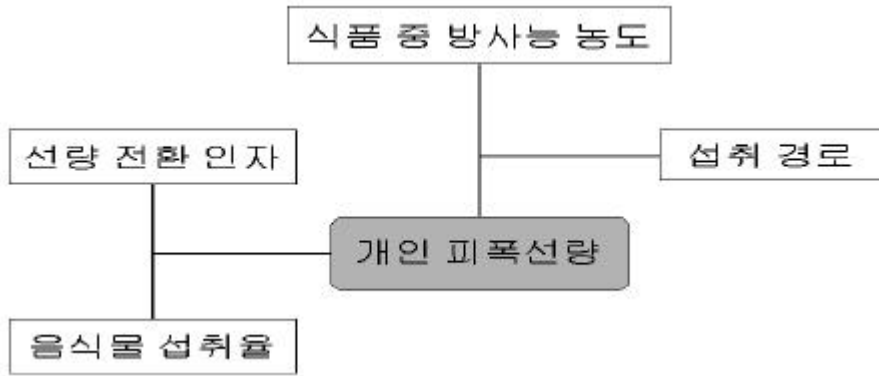


그림 1. 식품 섭취에 의한 주민 피폭선량 계산모형 도식

## 2.2 모형의 기본식

내부 피폭 모형에 의한 선량 전환 인자가 결정되어 있는 경우에 사용되고 있는 피폭선량 계산식은 다음과 같이 쓸 수 있다.[8]

$$R_{apj} = 1119 \frac{M_p U_{ap}}{Q_r} \sum_i q_i R_i B_{ip} D_{aipj} \exp(\lambda_i t_p) \quad (1)$$

여기서 a : 연령군

i : 방사성 핵종

p : 피폭 경로

j : 피폭대상 장기

$R_{apj}$  : 피폭선량(mrem/yr)

$M_p$  : 선량계산대상 지점에서의 혼합계수

$U_{ap}$  : 연령군 a, 피폭경로 p에대한 연간 섭취량(kg/yr)

$Q_r$  : 방사성 유출물의 방출율 ( $ft^3/sec$ )

$q_i$  : 방사성 핵종의 방출율 (Ci/yr)

$R_i$  : 재축적 인자

$B_{ip}$  : 생체 축적인자

$D_{aipj}$  : 선량 전환 인자

$\lambda_i$  : 방사성 핵종의 붕괴상수

$t_p$  : 액체상 유출물이 선량계산 대상 지점까지 이동하는데 걸리는 시간

$$1119 : 10^{12} (pCi/Ci) \frac{yr}{3.156 \times 10^7 sec} \frac{ft^3}{28.316 l}$$

이다. 식(1)에서

$$1119 \frac{M_p}{Q_r} \sum_i q_i R_i B_{ip} \exp(\lambda_i t_p)$$

는 연령군 a에 피폭을 주는 방사성 핵종 i가 경로 p상의 시료에 농축되는 방사능이므로 이 방사능을  $A_{ip}$ 라고 하면

$$R_{api} = \sum_i A_{ip} D_{api} U_{ap} \quad (2)$$

로 쓸 수 있다. 이 식에서 방사성 물질의 이동·확산 등 불확실한 요소들이 제거되어 있으며, 환경 중의 방사능을 사용한다면 방사성 유출물로부터 계산되는 피폭 선량보다 더 정확할 것이다. 식(2)를 단일 식품 f에 존재하는 단일 핵종 i의 피폭선량으로 단순화시키면

$$R_{fi} = A_{fi} D_i U_f \quad (3)$$

로 쓸 수 있다[11]. 여기서

$R_{fi}$  : 식품 f 내에 핵종 i 섭취로 인한 피폭선량 (Sv/yr)

$U_f$  : 식품 f의 섭취량 (Kg/yr)

$D_i$  : 핵종 i의 선량 전환 인자 (Sv/Bq)

$A_{fi}$  : 섭취 식품 f중 핵종 i의 농도 (Bq/Kg)

위 식에서 선량 전환인자  $D_i$ 는 평균 수명 70세까지의 예탁 선량을 기준으로 전신에 대한 유효 선량 당량을 계산하기 위한 전환 인자이다.

## 2.3 모형 입력 변수

### 2.3.1 섭취식품

섭취 식품은 보건 복지부에서 발간하고 있는 국민영양조사 보고서를 참조하여 육상식품 9종과 수산식품 3종으로 분류하였다[9]. 수산 식품은 어류, 연체 및 갑각류, 해조류로 구분하여 고리 원전 주변 지역의 현장 조사를 통해 개인 섭취량을 조사하였다. 조사 항목은 실제 고리 원전 주변에서 과거 20년동안 생산되는 수산 식품의 생산량과 주민의 인구수를 조사하였으며 자급용 소비량 비를 산출하여 실제 소비되는 양을 산출하였다. 그 동안 고리 원전에서 사용된 자료보다 다소 큰 값을 나타내고 있지만 이는 소비직전상태의 음식물의 무게를 측정 사용함으로써 발생하는 것이라고 사료되어진다. 해조류의 경우 대부분을 차지하는 김과 미역 다시마등이 주로 건어물 상태로 유통되어지며 이는 건어물인 경우가 그렇지 않은 경우보다 약 95%의 무게 감소가 이루어진다는 수협 전문가의 의견을 빌어 볼 때 타당한 측면에서 이 값을 사용하였으며 보수적인 측면에서도 역시 타당한 값이라 할 수 있다.

표 1. IAEA 권고에 따른 연령군의 소비단위계수

구분	소비단위계수
1세미만	0.36
1세~2세	0.48
2세~7세	0.60
7세~12세	0.82
12세~17세	1.04
17세이상	1.00

표 2. 각 식품군에 대한 일인당 음식물 섭취량 (단위 : kg/y)

식품군	섭취량					
	3개월	1년	5년	10년	15년	성인
○ 농작물						
곡류	0	90.49	113.11	154.59	196.06	188.52
채소류	0	60.83	76.04	103.92	131.8	126.73
과일류	0	31.82	39.77	54.35	68.93	66.28
김장채소	0	47.09	58.87	80.45	102.04	98.11
○ 육류						
쇠고기	0	9.95	12.44	17.00	21.56	20.73
돼지고기	0	5.94	7.42	10.15	12.87	12.37
닭고기	0	10.55	13.18	18.02	22.85	21.97
○ 우유						
생 유	0	30.38	37.97	51.90	65.82	63.29
분 유	366.387	0	0	0	0	0
○ 수산물						
어류	0	49.92	62.40	85.28	108.07	104.01
연체 및 갑각류	0	27.62	34.52	47.18	59.84	57.54
해조류	0	132.05	165.06	225.59	286.11	275.11

육상 식품은 보건 복지부의 국민 건강 조사 보고서 및 고리 원전에서 사용하고 있는 사회 환경 조사 자료를 참고하였다[9][10][11]. 그런데 이들 자료가 ICRP Publ. 66의 내부 피폭 모형에서 제시하고 있는 6개의 연령군 즉, 3개월(~ 1세미만), 1년(1세이상 ~ 3세미만), 5년(3세이상 ~ 7세미만), 10세(7세이상 ~ 12세미만) 15세(12세이상 ~ 17세미만) 성인(17세이상)으로 구분되어 있지 않아 IAEA와 한국인 영양권장량에서 제시하고 있는 “소비 단위 계수(표 1)”를 사용하여 각 연령군의 섭취량을 산정하였다[12]. 이들 자료를 표 2에 나타내

었다.

### 2.3.2 선량 전환 인자

ICRP Publ.30 모형에서 제시하고 있는 선량 전환 인자는 성인 방사선 작업자에 적용할 수 있는 것으로써 성인 이외 및 일반인에 대한 피폭 선량은 평가할 수 없는 제한점이 있다. 그런데 독일 및 영국 등 일부 국가에서는 연령군에 무관한 ICRP Publ.30 의 모형에 연령군별 신진대사 모형을 결합하여 연령군별 선량 전환 인자를 산출하여 사용하고 있다. ICRP Publ.66에서는 좀더 발전하여 일반인을 대상으로 연령군별 내부 피폭 모형을 제시하고 있다. ICRP Publ.60의 제도화 연구를 완료하고 이의 법제화를 추진 중에 있는 국내실정에서 ICRP Publ.66 모형에 근거한 선량 전환 인자(ICRP Publ.69)를 입력 자료로 하였다[13][14][15].

### 2.3.3 방사능 농도

측정된 환경 시료의 방사능은 채집 상태에서 전처리 과정을 거쳐 측정되지만, 방사능을 측정시점으로부터 시료 채집시까지의 붕괴를 고려하여 채집 시점의 방사능으로 계산이 가능하다. 그러나 식품은 불규칙한 유통 기간을 거쳐 식탁에 오른다. 어떤 식품은 채집되자마자 섭취되는가 하면 어떤 식품은 건조 혹은 장기간 젓갈로 담근 후 섭취하기도 한다. 정확한 피폭선량 평가를 위해서는 시료 채집시의 방사능이 아니라 섭취 시점에서의 방사능을 입력하여야 하나 이 본 연구에서는 이에 대한 조사가 미흡하여 시료 채취 시점에서의 방사능을 입력 자료로 할 수 있도록 하였다.

## 3. 계산 프로그램

피폭선량 계산 프로그램은 현재 개인용 PC의 발달과 더불어 현재 주로 운영체제로 사용되고 있는 Window95 혹은 Window98에서 쉽게 사용될 수 있는 Visual Basic 5.0으로 작성되었으며 input data file은 고리 원자력 발전소 주변 주민에 대한 것을 기준으로 작성된 것이기 때문에 특정 다른 지역을 대상으로 할 경우 지역 특성에 맞는 자료를 이들 파일 규격에 맞게 준비해야 한다.

## 4. 결론

음식물 섭취에 의한 방사선 피폭 선량 계산 프로그램을 작성하였다. 음식물에 오염된 핵종의 농도를 기존의 코드에서 사용하고 있는 원자력 발전소에서 유출된 방사성 물질의 이동·확산되는 경로를 통해 도출되는 값의 입력을 배제하고 즉, 확산 모형 계산에 있어서 내

포될 수 있는 많은 가정들을 배제하고 그 농도를 직접 입력할 수 있는 즉, 음식물 섭취에 의한 피폭 선량 계산 수식을 확산에 의해 입력되는 핵종의 농도값을 실측에 의한 농도로 변환을 시킴으로써 매우 간단한 수식으로 수정하였다. 따라서 이동·확산에 의한 불확실성을 줄이고 음식물 섭취에 의해 유발될 수 있는 선량을 수식계산을 통하여 정확한 값을 계산할 수 있게 하였다.

입력 자료 중 수산 식품은 직접 원전에서 생산되는 양을 기준으로 소비량을 산출하였으며, 육상 식품의 경우 현재 국내에서 발간되고 있는 통계 자료 등의 문헌 조사로 대치하였지만 자료의 신빙성 문제와 그리고 실제 주변 거주민들의 섭취량과는 다소 차이가 있음을 알 수 있으며, 좀더 정확한 자료에 대한 조사가 필요할 것으로 여겨진다. 또한 실제 방사성 핵종의 농도를 계측함에 있어서는 현재 많은 실험실 등에서는 시료 계측의 과포화 상태임을 감안하여 실제 계측상의 정확도를 좀더 향상 시켜야 할 것으로 사료된다.

#### 참고 문헌

1. 한국 전력 공사, 영광원전지역에 적합한 환경방사선 평가모델 개발, 1996
2. 한국 원자력 안전 기술원, 방사선 안전 규제 기술 개발, 1998. 3
3. 전력연구원, 월성 원전지역에 적합한 환경 방사선 영향평가모델 개발, 1997. 10
4. 한국에너지연구소, 액체 방사능 유출물에 의한 피폭선량평가, LIQDOS", 1989
5. 한국에너지연구소, 기체 방사능 유출물에 의한 피폭선량평가, GASDOS", 1989
6. 이창우, KFOOD-섭취 및 호흡경로에 의한 방사선 내부피폭선량계산을 위한 전산코드, 한국원자력연구소, 1992
7. 한국 전력 공사, 원자력발전소 주변 환경방사능 조사 보고서, 1996
8. 고리원자력본부 제 1 발전소, 고리 원전 주변주민 피폭선량 계산지침서, 1992
9. 보건 복지부, 국민 영향 조사 결과보고서, 1987, 1994
10. 한국 전력 공사, 사회 환경 자료 조사철, 1995
11. 부산광역시 기장군청 통계연보, 1996
12. 한국인구보건연구원, "한국인영양권장량", 보건사회부, 1985
13. International Commission on Radiological Protection, Limits for Intakes of radionuclides by workers, ICRP Publication 30, Annals of ICRP, 2, 1978
14. 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
15. International Commission on Radiological Protection, Recommendation of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 69 (Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides : Part3 Ingestion Dose Coefficient, Pergamon Press, 1994