

FOOD III 코드를 이용한 섭취경로 내부피폭 비교해석

최 용호 · 정 규희 · 김 진규 · 이 정호
한국에너지연구소 환경안전연구실

요 약

우리나라의 환경특성에 적합한 섭취경로 내부피폭 해석코드를 확립하기 위한 준비과정으로서 FOOD III 코드를 부분적으로 보완하여 한국 성인 남자에 대한 선량평가 결과를 보완전의 결과와 비교하고 앞으로의 개선방안을 논의 하였다. 평가예제로는 1984년도 고리 원전 1호기에서의 Mn-54, Co-58, Co-60, I-131, I-132의 방출량 자료와 부지경계선상 대기확산인자(X/Q)의 최대값을 사용하였다. 보완된 코드로 계산한 결과, 장기별 선량은 보완 전에 비해 20~70% 정도 낮아졌으며 예탁실효선량당량은 ICRP 제한치의 0.16%인 7.935×10^{-6} Sv/y로 계산되어 보완전의 1.32×10^{-5} Sv/y에 비해 40% 정도 낮게 평가되었다.

1. 서 론

원자력 시설의 가동에 의해 생성, 방출되는 방사성 물질은 시설 주변으로 확산, 침적되어 대기나 지표로부터 외부 피폭원이 되거나 호흡이나 섭취 경로를 통하여 인체에 흡수되어 내부 피폭원이 된다.

외부 피폭이나 호흡 경로를 통한 내부 피폭은 비교적 단순한 과정으로 이루어지지만 섭취 경로를 통한 내부 피폭은 생태계 구성 요소간의 복잡한 핵종 이동 과정을 거쳐 이루어 진다. 예를 들면 대기중 방사성 물질이 토양에 침적되어 뿌리를 통해 작물에 흡수·농축되고 이 작물을 가축이 사료로 섭취함으로써 가축의 체내에 방사성 물질이 축적되며, 이 가축을 사람이 소비함으로써 인체의 내부 피폭을 초래하게 된다. 원자력 시설의 정상 가동시 이와 같은 내부 피폭은 통상 방사성 핵종이 일정한 율로 연속적으로 방출된다고 가정하는 평형 모델을 사용하여 평가하고 있는데, 평가의 현실성을 위해서는 식품중

농도 예측 및 선량 계산에 사용되는 각종 수식의 구조나 매개 변수치 등이 부지 주변의 자연 및 사회 경제적 특성에 적합한 것이어야 한다. 이러한 선량 평가의 현실성은 종래에는 방사선 방어 원칙상 보수적 경향으로 인해 그 중요성이 크게 인식되지 못하였으나 국제 방사선 방어 위원회(ICRP)에 의해 ALARA(as low as reasonably achievable) 개념[1]이 도입된 이후부터는 점점 중요시 되고 있다.

본 연구에서는 우리나라의 특성에 맞는 섭취 경로 컴퓨터 코드를 확립하기 위한 준비 과정으로서 캐나다의 육상 섭취 경로 피폭 해석 코드인 FOOD III[2, 3]를 부분적으로 수정·보완하여 한국 성인 남자가 소비하는 육상 식품중 핵종 농도 및 그 섭취에 따른 내부 피폭 선량에 대한 보완 전·후의 계산 결과를 비교·평가하고 앞으로 좀더 현실적인 평가를 하기 위한 개선 방안을 제시하였다. 계산의 선원항으로는 고리 원전 1호기가 육소 및 기타 입자상 방사성 물질을 비교적 대량으로 방출한 1984년의 자료[4]를

사용하였는데 대상 핵종은 Mn-54, Co-58, Co-60, I-131, I-132의 다섯 핵종으로 하였다. 이들 핵종의 방출량은 육소 및 입자상 방사성 물질 총방출량의 거의 100%에 달하고 있다.

2. 농도 및 선량 계산 모델

FOOD III는 전신인 FOOD II[5]에 예탁 실효 선량당량 계산을 위한 부프로그램을 추가한 것으로 사용되는 모델은 미국 BNPL에서 개발한 섭취 경로 피폭 해석 코드인 FOOD[6]에서 사용되는 것과 기본적으로 동일하다.

육상 식물성 식품의 핵종 농도는 다음과 같이 크게 두 요소에 의해 결정되는 모델 구조를 보인다.

$$C_{iv} = C_{ivd} + C_{ivs} \text{-----(1)}$$

여기서,

- C_{iv} : 작물체 가식부내 핵종 i의 농도 (Bq/kg),
- C_{ivd} : 작물체 표면에서의 침적에 의한 가식부내 핵종 i의 농도(Bq/kg)이며
- C_{ivs} : 뿌리 흡수에 의한 가식부내 핵종 i의 농도 (Bq/kg)이다.
- C_{ivd} 는 다음 식으로 구한다.

$$C_{ivd} = \frac{(d_i + R_i) f_r T_v}{Y_v} \frac{(1 - e^{-\lambda_{ei} T_e})}{\lambda_{ei}} \text{-----(2)}$$

여기서,

- d_i : 핵종 i의 대기로부터의 1일의 평균 침적률 (Bq/m² d),
- R_i : 핵종 i의 관개에 의한 1일의 평균 침적률 (Bq/m² d),
- f_r : 침적 핵종의 작물체에 의한 포획 분률,
- T_v : 작물체 표면에 존재하는 핵종의 가식부로의 전이계수,
- λ_{ei} : 작물체로부터 핵종i의 유효 제거상수 (d⁻¹),
- T_e : 작물체 지상부의 오염에 대한 노출 기간(d),
- Y_v : 작물의 단위 면적당 수확량(kg-wet/m²)이며 대기로부터의 침적률 d_i 는 다음과 같이 계산된다.

$$d_i = 86400 V_{ii} X_i \text{-----(3)}$$

여기서,

- V_{ii} : 핵종 i의 총침적속도 (m/s)이며
- X_i : 대기중 핵종 i의 평균 농도 (Bq/m³)이다.
- 관개에 의한 침적률 R_i 는 다음과 같이 계산된다.

$$R_i = W_i I \text{-----(4)}$$

여기서,

- W_i : 관개수중 핵종 i의 평균 농도 (Bq/l),
- I : T_e중 1일 평균 관개율 (1/m² d)이며
- $\lambda_{ei} = \lambda_i + 0.693/T_w$ ----- (5)

여기서,

- λ_i : 핵종 i의 붕괴상수 (d⁻¹),
- T_w : 비나 바람에 의한 핵종의 제거 반감기 (d) 이다.

식(1)의 C_{ivs} 는

$$C_{ivs} = \frac{(d_b + R_b) B_{iv}}{P} \frac{(1 - e^{-\lambda_{iv} T_b})}{\lambda_{iv}} \text{-----(6)}$$

로 주어지며

여기서,

- B_{iv} : 뿌리 흡수에 의한 핵종 i의 토양-작물 가식부 전이계수 (Bq/kg-wet per Bq/kg-dry soil),
- P : 토양의 유효 표면 밀도 (kg-dry soil/m²)이며
- T_b : 토양내 핵종 축적 기간(d)이다.

소비 당시의 식품내 핵종 i의 농도는 수확 후 소비까지의 경과 시간 동안 방사능 붕괴에 의해 감소되므로

$$C'_{iv} = C_{iv} e^{-\lambda_{iv} T_h} \text{-----(7)}$$

여기서,

- C'_{iv} : 소비 당시의 식물성 식품내 핵종 i의 농도 (Bq/kg)이며
- T_h : 수확 후 소비까지의 경과 시간 (d)이다.

한편 동물성 식품내 핵종 농도도 크게 두가지 요소에 의해 결정 되는데 하나는 사료의 섭취요 하나는 물의 섭취이다. 호흡에 의해서도 방사성 물질이 섭취되지만 FOOD III에서는 이것을 고려하지 않고 소비 당시의 동물성 식품내 핵종 농도를 다음 식으로 구한다.

$$C'_{ia} = S_{ia} (C_{if} Q_f + C_{iw} Q_w) e^{-\lambda_{ei} T_h} \text{-----(8)}$$

여기서,

- C'_{ia} : 소비 당시의 동물성 식품내 핵종 i의 농도

(Bq/kg or Bq/l),

S_{ia} : 동물의 핵종 i의 1일 섭취량에 대한 가식부로
의 전이계수 (Bq/kg or Bq/l per Bq/d),

C_{if} : 사료중 핵종 i의 농도 (Bq/kg),

Q_f : 동물의 사료 섭취율 (kg/d),

C_{iw} : 동물의 식수중 핵종 i의 농도 (Bq/l)이며

Q_w : 동물의 식수 섭취율 (l/d) 이다.

NCRP[7]나 USNRC[8]도 호흡에 의한 동물 가식
부내 핵종 축적은 위의 요소들에 비해 무시될 수 있
는 것으로 보고 있다.

방사성 핵종 i의 섭취에 의한 내부 피폭선량은 섭
취 후 통상 50년간 받게 되는 예탁 선량당량치를 구
하여 평가하는데[1,8,9]1년간의 식품섭취를 통해 핵
종 i로부터 받게 되는 각 장기의 내부피폭 선량은 다
음 식으로 구한다.

$$R_r = \sum_{j=1}^n C_{ij} U_j D_{ir} \text{ ----- (9)}$$

여기서,

R_r : 핵종 i로부터 장기 r이 받는 연간 내부 피폭선
량 (Sv/y),

C_{ij} : 식품 j내 핵종 i의 농도 (Bq/kg or Bq/l),

U_j : 식품 j의 연간 섭취량 (kg/y or l/y)이며

D_{ir} : 핵종 i의 단위 섭취에 대한 장기 r에서의 선량
환산인자 (Sv/Bq) 이다.

한편, ICRP 보고서 26의 선량 제한 체계에 의하면
확률적 영향에 대해서는 장기별 선량을 각 장기의
위험계수(1 Sv의 피폭에 의해 특정 장기에서 치명적
암이 발생할 확률)에 입각하여[10] 전신에 대한 균
일 조사시의 선량으로 환산한 값인 예탁 실효 선량
당량을 구하여 평가한다. 1년간의 식품 섭취를 통해
핵종 i로부터 50년간 받게 되는 예탁 실효 선량당량
은 다음 식으로 구한다.

$$H_i = \sum_{j=1}^n C_{ij} U_j E_i \text{ ----- (10)}$$

여기서,

H_i : 핵종 i의 연간 섭취에 의한 예탁 실효 선량당
량 (Sv/y)이며

E_i : 핵종 i의 단위 섭취에 대한 확률적 선량 환산
인자 (Sv/Bq)이다.

이상에서 사용하고 있는 기호들은 이하에서도 같
은 의미로 사용하고자 한다.

3. 고유 입력 자료의 설정

FOOD III의 데이터 파일에는 각종 매개 변수치,
식품의 생산 및 소비에 관한 자료, 선량 환산인자 등
의 입력 자료가 수록되어 있는데 이들의 값은 가능한
한 평가 지역의 환경 특성에 적합한 것을 사용해야
한다. 이중에서도 특히 식품의 생산 및 소비에 관한
자료는 자연 및 사회·경제적 조건에 크게 좌우되는
것으로서 나라마다 상당한 차이를 나타낸다. 따라서
본 연구에서는 정부의 통계 자료[11,12]를 기초로
하여 우리나라에서의 주요 육상 식품, 단위 면적당
농작물 생산량 그리고 한국 성인 남자의 각종 식품
소비율 등을 표 1과 같이 결정·사용하였다. 두류와
쌀, 기타 곡류를 제외한 농작물의 T_e 및 T_h 값, 그리고
동물이 섭취하는 사료 작물의 T_e 와 Y_v 및 동물성 식
품의 T_h 값, 사람의 식수 소비율은 우리나라와 캐나다
간에 큰 차이가 없을 것으로 판단되거나 우리나라의
것을 구하기 어려워서 편의상 캐나다의 것을 준용하
거나 혹은 그대로 사용하였다.

두류와 쌀, 기타 곡류의 T_e 와 T_h 값은 비교의 목적
상 코드의 보완 전·후에 서로 다른 값을 사용하였
는데 표1의 값은 보완후에 사용한 값이고 보완전의
코드에서 사용한 값은 캐나다의 자료를 준용하여
 T_e 는 세 가지 곡류 전부 90일, T_h 는 두류와 기타 곡
류에서는 1일, 쌀에서는 10일로 하였다. 곡류의 T_e 를
120일로 한 것은 우리나라에서의 재배 기간을 고려
한 것이고 T_h 를 30일로 늘린 것은 보통 1년에 1번
수확하여 다음 1년간 먹게되는 소비 패턴을 고려한
것이다.

한편 사용된 선량 환산인자는 두 가지로서 장기별
선량 계산에는 Battelle 선량 환산인자[13]를, 유효
예탁 선량당량 계산에는 AECL의 확률적 선량 환산
인자[9]를 사용하였다. 이것들은 서구인을 기준으로
한 것이지만 특별히 한국인에 대한 선량 환산인자가
설정되어 있지 않으므로 본 연구에서는 그대로 사용
하였다.

Table 1. Data on food production and consumption used for Korean male-adult internal dose calculation.

Food type	Time of exposure, T _e (d)	Yield, Y _v (kg-wet/m ²)	Hold-up time, T _h (d)	Consumption rate (kg/d, l/d)
Leafy veget.	90.0	5.16	1.0	0.180
Fruit veget.	60.0	1.99	1.0	0.042
Potatoes	90.0	2.13	10.0	0.047
Root veget.	90.0	2.39	1.0	0.084
O.A.G. veget. ^a	60.0	0.10	1.0	0.018
Legumes	120.0 ^c	0.13	30.0 ^c	0.086
Fruit	90.0	1.15	10.0	0.075
Rice	120.0 ^c	0.46	30.0 ^c	0.388
Other grains	120.0 ^c	0.25	30.0 ^c	0.064
Eggs	90.0 ^d	0.84 ^d	1.0	0.025
Milk ^b	30.0 ^d	1.30 ^d	1.0	0.051
Beef	90.0 ^d	0.84 ^d	15.0	0.016
Pork	90.0 ^d	0.84 ^d	15.0	0.018
Poultry	90.0 ^d	0.84 ^d	1.0	0.012
Water ^b	—	—	—	1.200

a : other above-ground vegetables.

b : l/d used as unit.

c : different values used before code modification.

d : values for feed crops.

4. 코드의 수정 · 보완

FOOD III의 주프로그램인 FOOD3.F4에서는 작물체 표면에서의 침적에 의한 가식부내 핵종 i 의 농도를 식(2)와 같이 구하고 있는데 여기서 핵종 i 의 관계에 의한 침적률 R_i 가 포함된 것은 구미의 스프레이 혹은 스프링클러 관계 방식이 염면 침적을 초래하기 때문이다. 따라서 지면 관계를 주로 하는 우리나라에서는 관계에 의한 염면 침적이 거의 없을 것으로 예상되므로 보완된 코드에서는 식(2)에서 R_i 를 삭제하였다. 또한 FOOD III에서는 관개율 I에 대해 모든 작물에 있어서 동일한 값을 적용하도록 되어 있는데 이것은 작물간 관개율의 차이가 클 경우 합당하지 못하므로 작물별로 관개율을 입력하도록 수정하였다. 우리나라에서 거의 유일한 관개 대상인 벼의 관개율은 재배 기간 동안 약 $10 \text{ l/m}^2 \text{ d}$ [14]이므로 보완전에는 I 값으로 이것을 사용하였고 보완된 코드에서는 쌀에 대

해서만 이값을 사용하고 다른 작물에 대해서는 0을 사용하였다.

식 (3)에서 사용하는 총침적속도 V_{ii} 는 건침적과 습침적 양자의 효과를 합한 것인데 이에 대해 NRPB 및 CEA[15]는 유기 옥소 및 불활성 기체를 제외한 모든 핵종에 대해 $5.0 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 를 제안하고 있으며 Slinn[16]은 V_{ii} 값의 범위를 $1.0 \times 10^{-2} \text{ m/s} \sim 5.0 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ 로 보고 있다. FOOD III에서는 V_{ii} 값으로 옥소에 대해서는 $1.0 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ 를, 나머지 핵종에 대해서는 $1.0 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 를 사용하고 있는데 여기서 $1.0 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 는 이상의 조사 결과와 비교하여 볼때 5~50배 정도 낮은 값이기 때문에 보완된 코드에서는 10배 높은 $1.0 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ 를 사용하였다. V_{ii} 값은 방사성 물질의 조성, 입자의 크기 및 밀도, 마찰 속도, 지면 조도, 강우 시간, 빗방울의 크기, 강우율 등에 따라 달라지는 것으로 [10] 부지 특성치를 구하기 위해서는 상당한 조사와 실험이 뒤따라야 할 것이다.

한편, 염채류 표면에 침적된 방사성 물질은 조리 중 세척 등에 의하여 일부 제거되는데 Thompson 등 [17]이 채소류의 표면에 처리한 I-131이 조리 과정 중 제거되는 정도를 조사한 결과에 의하면 적어도 30% 이상이 제거됨을 보여 주고 있다. FOOD III에서는 이러한 감소 현상을 고려하고 있지 않은데, 이것은 특히 식물체 전체가 가식의 대상이 된다는 점에서 T_b 를 1.0으로 보고있는 염채류의 경우 과대 평가를 초래하게 된다. 따라서 보완된 코드에서는 여타 핵종들도 위와 같은 정도로 제거된다는 가정하에 염채류의 엽면 침적량 계산결과에 0.7을 곱하도록 함으로써 30% 정도의 제거 효과를 고려 하였다.

FOOD III에서는 식 (6)에서도 식 (4)에서 구한 R_i 값을 그대로 사용하고 있는데 식 (6)에서는 T_b 동안 매일 계속하여 일정량씩 토양에 축적되는 것으로 보아야 하므로 R_i 값을 구할때 T_e 중 1일 평균 관개율 I 대신에 이것을 연중 평균한 값을 사용해야 한다. 따라서 보완된 코드에서는 R_i 대신 $R_i T_e / 365$ 를 사용하였다. 또한 식 (6)의 λ_{bi} 는 용탈에 의한 토양으로부터의 핵종 제거 작용을 고려할 때 다음 식으로

정의되는 λ_{bi} 로 대신해야 할 것이다.

$$\lambda_{bi} = \lambda_i + \lambda_{th} \text{-----} (11)$$

여기서,

λ_{bi} : 토양으로부터 핵종 i 의 유효 제거상수(d^{-1})

λ_{th} : 용탈에 의한 핵종 i 의 제거상수(d^{-1})

NRPB 및 CEA[15]는 Pu, Cs, Sr 등에 대한 측정 자료를 근거로 용탈에 의한 제거 반감기로서 전핵종에 대해 100년을 제안하고 있다. 따라서 보완된 코드에서는 λ_{th} 로 $1.9 \times 10^{-5} d^{-1}$ 을 사용하였다.

한편, FOOD III에서는 사료중 방사능 농도를 구함에 있어서 사료의 수확과 소비까지의 방사능 붕괴 기간을 고려하고 있지 않으므로 보완된 코드에서는 우유 및 쇠고기의 경우 10일을, 계란, 돼지고기, 가금류에 대해서는 30일을 적용하였다. 전자의 경우는 비교적 단시일 내에 소비되는 목초와 소비 기간이 긴 곡류를 위주로 하는 농후 사료를 1:1 정도로 섭취 [18]하므로 비교적 짧게 하였고 후자의 경우는 농후 사료에 거의 전적으로 의존하므로 표 1의 곡류에서와 같이 30일로 하였다. 마지막으로 곡류의 T_e 와 T_h 를 수정한 것은 앞에서 설명한 바와 같다.

Table 2. Source terms and annual average radionuclide concentrations in air and in water for FOOD III input with $6.178E-05 \text{sec/m}^3$ used as X/Q .

Radio-nuclide	Annual release (Ci/y)	Release rate (Bq/sec)	Conc. in air (Bq/m ³)	Conc. in water (Bq/l)
Mn-54	1.4 E-06	1.640 E-03	1.012 E-07	1.012 E-05
Co-58	3.4 E-06	3.980 E-03	2.458 E-07	2.458 E-05
Co-60	8.9 E-02	1.041 E+02	6.433 E-03	6.433 E-01
I-131	1.2 E-02	1.404 E+01	8.674 E-04	8.674 E-02
I-132	1.1 E-02	1.290 E+01	7.951 E-04	7.951 E-02

5. 공기중 및 수중 핵종 농도의 결정

연간 평균 공기중 핵종 농도는 1년간의 기상 자료로부터 얻어지는 대기 확산인자 $X/Q(\text{sec/m}^3)$ 값에 연간 초당 평균 방출량 (Bq/sec)을 곱하여 구할 수 있다. 본 연구에서는 XOQDOQ 코드[19]로 구한 1984년도의 부지 경계선상 X/Q 의 최대값인 6.178×10^{-5}

sec/m^3 를 사용하여 표2와 같이 연간 평균 공기중 농도를 구하였다.

관개수나 음료수중 핵종 농도는 예측할 수 있는 타당한 기법이 마련되어 있지 못하므로 여러가지 희석 요인들을 고려하여 연간 평균 강우중 농도의 1/2로 가정하였다. 이에 의하면 수중 핵종 농도는 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$C_{iw} = \frac{X_i W_r}{2 \times 10^3} \text{ (Bq/l)} \text{ ----- (12)}$$

여기서,

W_r : 습계거비

W_r 은 공기중 핵종 농도(Bq/m³)에 대한 지표에서의 강우중 핵종 농도(Bq/m³)의 비로서 그 값은 방사성 입자의 크기, 빗방울의 크기, 강우율 등에 따라 달라지는데, NCRP[7]의 조사 결과를 종합하여 본 연구에서는 다섯 가지 핵종 모두에 대하여 2.0x10⁵을 사용하였다. 이상과 같이 구한 수증 핵종 농도도 표 2에 나타나 있다. 이것은 실제보다 과대할 것으로 예상되나 달리 적절한 기법이 없으므로 본 연구에서는 다소 비현실적이지만 방사선 방호 목적상 그대로 사용하였다.

6. 계산 결과 및 고찰

코드의 보완전·후에 한국 성인 남자가 소비하는 각 식품별 핵종 농도를 계산한 결과는 표 3과 4에 나타나 있다.

보완된 코드로 계산한 농도는 원래의 코드로 계산한 것에 비해 전반적으로 낮아졌는데 이것은 보완된 코드에서는 관개에 의한 엽면 침적효과를 제거한 것, 비 이외의 작물에 대한 관개율을 0.1/m² d로 한 것, 몇몇 식품에 대하여는 조리 중 세척 효과를 고려하거나 T_h 를 늘려 잡은 것, 비의 경우는 C_{ivs} 를 구할 때 R_i 대신 $R_i T_i / 365$ 를 사용한 것 등의 농도 감소 요인들이 복합적으로 작용하여 Mn-54, Co-58, Co-60의 총 침적 속도를 10배로 높인 것과 곡류의 T_h 를 늘려잡은 것과 같은 농도 상승 요인을 압도하였기 때문이다.

특히 반감기가 2.26 시간으로 비교적 짧은 I-132의 경우 보완된 코드에서 두류, 쌀, 기타 곡류의 T_h 를 30일로 늘려잡음으로써 그것들 내 농도가 0으로 계산되었으며 또한 쇠고기와 돼지고기내 농도는 보완전·후 공히 T_h 가 15일로 비교적 긴 때문에 0으로 계산되었다. 반감기가 수년 이상으로 비교적 긴 핵종들은 T_h 값에 따른 농도의 변화가 거의 없지만 반감기가 짧은 핵종들은 T_h 값의 크기에 따라 과소 평가 혹은 과대 평가하게 될 가능성이 크다. 이와같은 문제를 해결하기 위해 1년에 1~2번에 수확하여 장기

Table 3. Radionuclide concentrations in foods calculated with the original FOOD III computer code.

Food type	Radionuclide conc. (Bq/kg, Bq/l)				
	Mn-54	Co-58	Co-60	I-131	I-132
Leafy veget.	1.055E-04	2.164E-04	6.813E+00	5.313E-01	6.826E-06
Fruit veget.	2.913E-05	5.560E-05	1.772E+00	1.389E-01	1.779E-06
Potatoes	2.778E-05	4.881E-05	1.721E+00	5.981E-02	6.270E-35
Root veget.	2.565E-05	4.759E-05	1.550E+00	1.159E-01	1.484E-06
O.A.G. veget.	5.101E-04	1.086E-03	3.337E+01	2.734E+00	3.517E-05
Legumes	4.077E-04	8.557E-04	2.674E+01	2.104E+00	2.706E-05
Fruit	4.838E-05	8.953E-05	3.102E+00	1.102E-01	1.157E-34
Rice	1.155E-04	2.223E-04	7.605E+00	2.744E-01	2.886E-34
Other grains	2.138E-04	4.455E-04	1.395E+01	1.095E+00	1.408E-05
Eggs	1.097E-06	2.331E-06	6.998E-02	1.010E-01	2.732E-05
Milk*	1.553E-06	8.152E-05	2.388E+00	9.601E+00	4.754E-05
Beef	2.427E-05	8.978E-06	3.178E-01	1.569E-01	0.000E+00
Pork	7.349E-06	3.507E-06	1.202E-01	5.843E-02	0.000E+00
Poultry	1.207E-06	2.331E-08	6.998E-04	2.524E-04	6.830E-08
Water*	1.012E-05	2.458E-05	6.433E-01	8.674E-02	7.951E-02

* : Bq/l used as unit.

Table 4. Radionuclide concentrations in foods calculated with the modified FOOD III computer code.

Food type	Radionuclide conc. (Bq/kg, Bq/l)				
	Mn-54	Co-58	Co-60	I-131	I-132
Leafy veget.	5.958E-05	1.207E-04	3.816E+00	1.726E-01	2.217E-06
Fruit veget.	2.316E-05	4.422E-05	1.409E+00	6.437E-02	8.248E-07
Potatoes	2.208E-05	3.881E-05	1.368E+00	2.772E-02	2.906E-35
Root veget.	2.039E-05	3.785E-05	1.232E+00	5.373E-02	6.877E-07
O.A.G. veget.	4.057E-04	8.633E-04	2.654E+01	1.267E+00	1.630E-05
Legumes	3.063E-04	5.155E-04	2.123E+01	8.017E-02	0.000E+00
Fruit	3.846E-05	7.120E-05	2.467E+00	5.107E-02	5.364E-35
Rice	8.957E-05	1.464E-04	6.087E+00	2.272E-02	0.000E+00
Other grains	1.606E-04	2.684E-04	1.108E+01	4.172E-02	0.000E+00
Eggs	8.940E-07	1.681E-06	5.916E-02	4.039E-02	2.651E-05
Milk*	1.219E-06	5.964E-05	1.908E+00	2.191E+00	3.281E-05
Beef	1.942E-05	6.774E-06	2.584E-01	4.988E-02	0.000E+00
Pork	5.969E-06	2.515E-06	1.014E-01	2.273E-02	0.000E+00
Poultry	9.834E-07	1.681E-08	5.916E-04	1.010E-04	6.628E-08
Water*	1.012E-05	2.458E-05	6.433E-01	8.674E-02	7.951E-02

* : Bq/l used as unit.

간 동안 소비되는 농작물의 T_h 는 소비 기간 동안 각 핵종의 반감기에 따른 농도 감소 경향을 고려하여 그 기간 동안의 평균 농도를 산출할 수 있는 값을 핵종별로 구하여 사용하는 것이 바람직하며 이것은 특히 단반감기 핵종일수록 더욱 필요한 것으로 생각된다.

표 5와 6은 핵종별 한국 성인 남자의 7개 장기에 있어서의 피폭 선량을 보완전·후의 코드로 계산한

결과를 나타내고 있다. 보완된 코드로 계산한 값이 보완전에 비해 장기에 따라 20~70% 정도 낮았는데 특히 갑상선, 뼈, 신장에서 크게 감소하였다. 보완된 코드로 계산한 각 장기별 선량은 미국 EPA의 일반인에 대한 제한치인 전신 0.25 mSv, 갑상선 0.75 mSv, 그리고 기타 기관 0.25 mSv 와 비교해 볼 때 무시할 수 있을 정도이다.

Table 5. Korean male-adult's organ doses by intakes of 5 radionuclides calculated with the original FOOD III code.

Organ	Internal dose (Sv/y)					Total
	Mn-54	Co-58	Co-60	I-131	I-132	
Body	3.11E-12	1.27E-11	1.14E-06	9.96E-08	4.91E-10	1.24E-06
GI-LLI*	5.33E-11	1.19E-10	1.01E-05	4.73E-08	2.59E-10	1.01E-05
Thyroid	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.69E-05	1.81E-07	5.71E-05
Bone	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.22E-07	5.14E-10	1.23E-07
Liver	1.58E-11	5.68E-12	5.16E-07	1.76E-07	1.38E-09	6.93E-07
Lung	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Kidney	5.03E-12	0.00E+00	0.00E+00	3.04E-07	2.20E-09	3.06E-07

* : gastrointestinal tract-lower large intestine.

Table 6. Korean male-adult's organ doses by intakes of 5 radionuclides calculated with the modified FOOD III code.

Organ	Internal dose (Sv/y)					Total
	Mn-54	Co-58	Co-60	I-131	I-132	
Body	2.36E-12	8.61E-12	8.90E-07	2.67E-08	4.91E-10	9.17E-07
GI-LLI	4.06E-11	8.07E-11	7.88E-06	1.27E-08	2.59E-10	7.89E-06
Thyroid	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.53E-05	1.81E-07	1.54E-05
Bone	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.28E-08	5.14E-10	3.33E-08
Liver	1.20E-11	3.85E-12	4.04E-07	4.73E-08	1.38E-09	4.52E-07
Lung	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Kidney	3.82E-12	0.00E+00	0.00E+00	8.15E-08	2.20E-09	8.37E-08

표 7과 8은 한국 성인 남자의 예탁 실효 선량당량을 식품별 및 핵종별로 코드의 보완전·후에 계산한 결과를 보여주고 있는데, 이것도 역시 보완된 코드로 계산한 값이 보완전에 비해 전반적으로 낮았으며 총량은 40% 정도 낮게 평가되었다. 각 식품별 기여도는 보완전·후 공히 우리나라 사람이 많이 먹는 쌀과 두류가 가장 컸고 핵종별 기여도는 방출량과 선량 환산인자가 비교적 높은 Co-60과 I-131이 가장 컸다.

보완된 코드로 계산한 총 예탁 실효 선량당량은 7.935x10⁻⁶ Sv/y로서 ICRP 제한치인 5 mSv의 0.16%에 불과한 것으로 나타났다.

이상의 선량 계산 결과는 소비되는 식품이 전부 부지 경계선 상의 X/Q값이 가장 높은 곳에서 생산된다는 비현실적인 가정에 기초하고 있는 것으로 소비되는 식품의 생산지를 고려한 평가를 하게 되면 피폭 선량은 이보다 훨씬 낮아질 것이다.

Table 7. Korean male-adult's effective committed dose equivalent contributed by each food and nuclide calculated with the original FOOD III code.

Food type	Effective committed dose equivalent (Sv/y)					Total
	Mn-54	Co-58	Co-60	I-131	I-132	
Leafy veget.	4.51E-12	9.39E-12	1.12E-06	3.84E-07	5.83E-14	1.504E-06
Fruit veget.	2.90E-13	5.63E-13	6.80E-08	2.34E-08	3.55E-15	9.140E-08
Potatoes	3.10E-13	5.53E-13	7.39E-08	1.13E-08	1.40E-43	8.520E-08
Root veget.	5.12E-13	9.64E-13	1.19E-07	3.91E-08	5.92E-15	1.581E-07
O.A.G. veget.	2.18E-12	4.71E-12	5.48E-07	1.98E-07	3.01E-14	7.460E-07
Legumes	8.32E-12	1.77E-11	2.10E-06	7.27E-07	1.10E-13	2.827E-06
Fruit	8.61E-13	1.62E-12	2.12E-07	3.32E-08	4.12E-43	2.452E-07
Rice	1.06E-11	2.08E-11	2.69E-06	4.28E-07	5.32E-42	3.118E-06
Other grains	3.25E-12	6.87E-12	8.16E-07	2.82E-07	4.28E-14	1.098E-06
Eggs	6.51E-15	1.40E-14	1.60E-09	1.01E-08	3.24E-14	1.170E-08
Milk	1.88E-14	1.00E-12	1.11E-07	1.97E-06	1.15E-13	2.081E-06
Beef	9.22E-14	3.46E-14	4.64E-09	1.01E-08	0.00E-00	1.474E-08
Pork	3.14E-14	1.52E-14	1.98E-09	4.23E-09	0.00E-00	6.210E-09
Poultry	3.44E-15	6.74E-17	7.67E-12	1.22E-11	3.89E-17	1.987E-11
Water	2.88E-12	7.11E-12	7.05E-07	4.18E-07	4.53E-09	1.128E-06
Total	3.39E-11	7.14E-11	8.58E-06	4.54E-06	4.53E-09	1.312E-05

Table 8. Korean male-adult's effective committed dose equivalent contributed by each food and nuclide calculated with the modified FOOD III code.

Food type	Effective committed dose equivalent (Sv/y)					
	Mn-54	Co-58	Co-60	I-131	I-132	Total
Leafy veget.	2.55E-12	5.24E-12	6.27E-07	1.25E-07	1.89E-14	7.520E-07
Fruit veget.	2.13E-13	4.48E-13	5.40E-08	1.09E-08	1.64E-15	6.490E-08
Potatoes	2.46E-13	4.40E-13	5.87E-08	5.23E-09	6.45E-44	6.393E-08
Root veget.	4.07E-13	7.66E-13	9.45E-08	1.81E-08	2.74E-15	1.126E-07
O.A.G. veget.	1.73E-12	3.75E-12	4.36E-07	9.17E-08	1.39E-14	5.277E-07
Legumes	6.25E-12	1.07E-11	1.67E-06	2.77E-08	0.00E+00	1.698E-06
Fruit	6.85E-13	1.29E-12	1.69E-07	1.54E-08	1.91E-43	1.844E-07
Rice	8.25E-12	1.37E-11	2.16E-06	3.54E-08	0.00E+00	2.195E-06
Other grains	2.44E-12	4.14E-12	6.47E-07	1.07E-08	0.00E+00	6.577E-07
Eggs	5.31E-15	1.01E-14	1.35E-09	4.06E-09	3.15E-14	5.410E-09
Milk	1.48E-14	7.33E-13	8.89E-08	4.49E-07	7.95E-14	5.379E-07
Beef	7.38E-14	2.61E-14	3.78E-09	3.21E-09	0.00E+00	6.990E-09
Pork	2.55E-14	1.09E-14	1.67E-09	1.64E-09	0.00E+00	3.310E-09
Poultry	2.80E-15	4.86E-17	6.48E-12	4.87E-12	3.78E-17	1.135E-11
Water	2.88E-12	7.11E-12	7.05E-07	4.18E-07	4.53E-09	1.128E-06
Total	2.58E-11	4.83E-11	6.71E-06	1.22E-06	4.53E-09	7.935E-06

7. 결 론

References

캐나다의 FOOD III 섭식 경로 피폭 해석 코드를 우리나라의 환경 특성에 보다 적합하도록 부분적으로 수정·보완한 후 1984년도 고리 1호기의 기체상 방출원 자료를 사용하여 한국 성인 남자의 내부 피폭 선량을 계산한 결과 보완전에 비해 장기별 선량에 있어서 20~70%가량, 예탁 실효 선량당량에 있어서는 40% 정도 낮아졌는데, 장기별 선량은 미국 EPA 제한치에 비해 무시할 수 있을 정도였고 예탁 실효 선량당량도 7.935×10^{-6} Sv/y로서 ICRP 제한치의 0.16%에 불과하였다.

앞으로 좀더 현실적인 평가를 위해서는 소비되는 식품의 생산지를 고려해야 하며 수증 핵종 농도를 합리적으로 구할 수 있는 기법을 설정해야 할 것이다. 또한 각종 수식에 사용되는 변수들에 대하여 각각의 핵종이나 식품에 따른, 혹은 우리나라의 특성에 맞는 최적의 값을 구하기 위한 노력을 계속해야 하며 그러한 값들이 얻어지는대로 그것들을 이용할 수 있도록 코드를 수정·보완해 나가야 할 것이다.

1. ICRP, *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 26, Pergamon press (1977).
2. R. Zach, *Expansion of FOOD II : Implementation of Variable Dose Factor Files (FOOD III)*, AECL-WNRE (1979)
3. R. Zach, *Sensitivity Analysis of the Terrestrial Food Chain Model FOOD III*, AECL-6794 (1980).
4. 한국전력공사, 1986년도 원자력발전소 방사선관리 연보, 87-원발(방)-01(1987).
5. R. Zach, *FOOD II : An Interactive Code for Calculating Concentrations of Radionuclides in Food Products*, AECL-6305 (1978).
6. D. A. Baker, *FOOD-An Interactive Code to Calculate Internal Radiation Doses from Contaminated food Products*, USERDA Report BNWL-SA-5523, BPNL (1976).
7. NCRP, *Radiological Assessment : Predicting the*

- Transport, Bioaccumulation and Uptake by Man of Radionuclides Released to the Environment*, NCRP Report No. 76(1984).
8. USNRC, *Calculation of Annual Doses to Man from Routine Releases of Reactor Effluent for the Purpose of Evaluating Compliance with 10 CFR 50, Appendix I*, Regulatory Guide 1.109 (1976).
 9. J. R. Johnson and D. W. Dunford, *Dose Conversion Factors for Intakes of Selected Radionuclides by Infants and Adults*, AECL-7919 (1983).
 10. USNRC, *Radiological Assessment : A Textbook on Environmental Dose Analysis*, NUREG/CR-3332, ORNL-5968 (1983).
 11. Ministry of Agriculture & Fisheries ROK, *Statistical Yearbook of Agriculture, Forestry and Fisheries* (1985).
 12. 보건사회부, 국민영양조사보고서 (1985).
 13. D. A. Baker, *User Guide for Computer Program FOOD*, USERDA Report BNWL-2209, BPNL (1977).
 14. 이은웅 등, 수도작 (삼정판), 향문사(1977).
 15. NRPB and CEA, *Methodology for Evaluating the Radiological Consequences of Radioactive Effluents Released in Normal Operations*, CEC, Doc. No. V/3865/79-EN, FR (1979).
 16. W. G. N. Slinn, "Parameterization for resuspension and for wet and dry deposition of particles and gases for use in radiation dose calculation", *Nuclear Safety* 19, p 206 (1978).
 17. J. C. Thompson, Jr. and M. Howe, "Retention and removal of I-131 from contaminated vegetables", *Health Physics* 24 (3), p 345 (1973).
 18. 강만희 등, 신고 가축사양학, 향문사(1986).
 19. U. S. NRC, *XOQDOQ : Computer Program for the Meteorological Evaluation of Routine Effluent Releases at Nuclear Power Stations*, NUREG/CR-2919 (1982).

Comparative Analyses of the Internal Radiation Exposures due to Food Chain Pathway Using FOOD III Code

**Yong Ho Choi, Kyu Hoi Chung, Jin Kyu Kim, and
Jeong Ho Lee**

Environmental Radiation Safety Department, KAERI

Abstract

In order to develop a food-chain computer code suitable to the environmental conditions of Korea, the FOOD III code was partially modified. The execution results for Korean male-adult were compared to those from the Canadian version of FOOD III to deduce a more realistic approach in dose assessment. The amounts of Mn-54, Co-58, Co-60, I-131 and I-132 released from Kori unit 1 in 1984 were used as the source terms for the sample calculation. The maximum atmospheric dispersion factor (X/Q) value on the site boundary was applied. Through the code modification, organ doses decreased by about 20~70% and the effective committed dose equivalent by about 40% to be 7.935×10^{-6} Sv/y which is 0.16% of the ICRP limit, 5×10^{-3} Sv/y.