

## 쌀 섭취경로에서 동적모델을 사용한 장반감기핵종의 거동해석 및 내부피폭 선량계산

이창우 · 최용호 · 황원태 · 이정호

한국원자력연구소

### 요 약

논 - 쌀 - 사람 경로에서 동적모델을 이용하여 Cs-137 과 Sr-90의 거동을 분석하고 쌀 섭취에 의한 내부피폭 선량을 계산하였다. 토양 흡착력이 큰 Cs-137이 더 오랫동안 논 토양에 잔류하였다. 벼 성장기간중에 침적이 있을 때는 옆면침적경로에 의한 오염이 지배적이었다.

*Key words:* 쌀 섭취경로, 동적모델, 섭취선량

### 1. 서론

원자력 시설로부터 누출된 방사능은 농작물이나 농경지에 침적되어 식품섭취경로를 통하여 인체에 흡수되어 내부피폭을 일으킨다. 누출된 방사능에 의한 피폭평가는 원자력 시설 건설 및 가동에 필수적인 요건으로써 이제까지 많은 평가모델들이 연구 되어왔다. 원자력 시설의 안전성 평가를 위한 섭취경로 모델들은 대부분 평형 모델로서 시설의 정상가동시 방사능 누출속도가 식품 이동경로상의 각 단계에서 평형상태에 있다고 가정한 것이다. 현재 사용되고 있는 평형모델들은 1976년에 개발된 FOOD모델[1]을 기초로 각 지역의 환경에 맞게 개발된 것들이며 당 연구실에서도 한국실정을 고려한 KFOOD를 개발한 바 있다[2].

그러나 평형모델은 비상사와 같이 방사능이 급

격히 누출되었을 때는 방사능의 거동을 설명하는데 적절치 못하다. 이 때는 food chain상의 방사능 농도가 시간에 따른 변화를 보이게 되므로 이를 설명하기 위한 동적모델이 필요하다. 지금까지 발표된 모델들로서는 TERMOD[3]를 기초로 해서 RADFOOD[4], PATHWAY[5] 및 ECOSYS[6] 등이 있으며 당 연구실에서도 ECOREA 모델을 개발한 바 있다.[2] 이 동적모델은 먹이사슬 상의 각 경로를 compartment로 나누고 각 구간간의 물질수지에의 system analysis model을 기본으로 하고 있다.

섭취경로모델은 대상지역 환경을 설명할 수 있는 많은 모델 파라미터를 필요로 한다. 지역에 따라 농업, 사회환경이 다를 뿐 만아니라 식습관 및 생활형태도 차이가 있으므로 지역특이성 있는 데이터 베이스를 수립해야 한다. 특히 한국인은 쌀을

\* 이 연구는 과거에서 시행한 특정연구과제의 일환으로 수행하였다.

주식으로 하고 채식을 많이하므로 이들 경로에 대한 정밀한 분석 및 자료가 필요하다.

본 연구에서는 동적모델 ECOREA를 이용하여 한국인의 주식인 쌀 섭취를 통한 피폭경로를 분석하였다. 지표상에 일정량의 방사능이 침적된 후 시간 경과에 따른 쌀 중의 방사능 농도를 계산하고 쌀 섭취에 의한 내부피폭선량을 계산하였다. 또 방사능 침적시점에 따른 엽면 침적 및 뿌리흡수 효과를 고찰하였다.

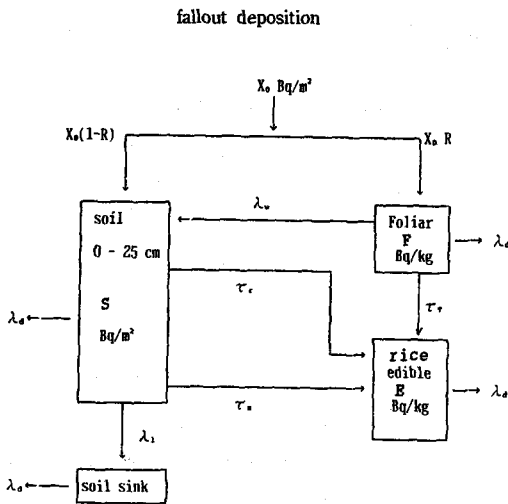


Figure 1. Structural diagram of compartment model for rice field-rice-man pathway.

## 2. 핵종이동경로 및 모델식

본 연구에서 이용한 동적모델 ECOREA에서 설정한 쌀을 통한 핵종이동경로는 그림 1에 나타난 바와 같다. 대기로부터 침적된 방사능중 일부는 벼의 잎에 침적되고 나머지는 벼논에 침적된다. 방사능이 벼의 잎에 침적되는 분율은 방사능 입자의 물리 화학적 특성에 영향을 받을 뿐만 아니라 지표를 덮고 있는 벼의 canopy량에 크게 좌우된다. 그래서 벼 생육기간중의 엽면침적량은 벼의 성장

상태에 따라 달라지게 된다. 벼의 표면에 침적된 방사능은 벼 낱알의 가식부로 이동하고 일부는 풍화(weathering)되거나 마른잎, 잎부스러기에 포함되어 토양으로 이동한다. 일단 논토양에 떨어진 방사능은 재부유 또는 뿌리흡수에 의하여 식물의 가식부로 이동하고 일부는 뿌리흡수가 불가능한 깊은 토양으로 이동한다. 그림 1의 이동모델에서 뿌리흡수 지역의 토양은 쟁기질에 의해 균일하게 섞인다고 가정하여 깊이 25cm까지의 균일 compartment로 하고 그 이하는 뿌리흡수가 불가능한 soil sink로 구분하였다. 그림 1에 표시된 각 compartment 간의 물질수지식을 각 구간간의 이동을 나타내는 이동계수를 이용하여 표시하면 아래와 같다.

엽면 침적에 의한 벼의 잎에서의 방사능 농도 변화율,

$$\frac{dF}{dt} = -(\lambda_w + \tau_t + \lambda_d) F \quad (1)$$

초기의 침적이 일어난 시점에서 벼잎에 의해 차단되는 방사능에 의한 벼의 방사능 농도는 차단계수 R 과 함께 표현되므로 초기조건은,

$$F(t_0) = X_0 R / Y_h(t_0), \quad \text{at } t = t_0 \quad (2)$$

뿌리흡수 지역의 토양중 방사능 농도 변화율은,

$$\frac{dS}{dt} = \lambda_w Y_h F - (\tau_s + \tau_r + \lambda_1 + \lambda_d) S \quad (3)$$

침적이 일어난 시점에서 토양중 방사능 농도로 표시되는 초기조건은,

$$S(t_0) = X (1 - R) \quad (4)$$

벼의 가식부에서 방사능 농도 변화율 및 초기 조건,

**Table 1. Description of parameters and symbols.**

| Parameter      | Definition  | Unit                    |
|----------------|---|-------------------------|
| $B_v$          | Soil-to rice concentration factor   |                         |
| $D$            | Effective dose conversion factor by ingestion   | Sv/Bq                   |
| $E$            | Radioactivity concentration in edible part  | Bq/kg                   |
| $F$            | Radioactivity concentration in foliage  | Bq/kg-fresh             |
| $H$            | Cumulative effective dose equivalent  | Sv                      |
| $p$            | Effective surface soil density  | kg-soil/m <sup>2</sup>  |
| $R$            | Interception factor by foliage  |                         |
| $S$            | Radioactivity concentration in soil layer   | Bq/m <sup>2</sup>       |
| $t$            | Time from fallout deposition  | d                       |
| $t_e$          | Growing period of rice  | d                       |
| $t_o$          | Deposition date, Julian day   |                         |
| $t_s$          | Seeding date, Julian day  |                         |
| $T_v$          | Translocation factor  |                         |
| $U$            | Annual consumption rate of rice   | Kg/yr                   |
| $X_o$          | Initial amount of deposited radioactivity   | Bq/m <sup>2</sup>       |
| $Y_h$          | Yield of total biomass above ground, fresh  | kg-fresh/m <sup>2</sup> |
| $Y_t$          | Yield of total biomass above ground at $t = t_o$  | kg-dry/m <sup>2</sup>   |
| $Y_{th}$       | Yield of total biomass above ground at harvest time, dry  | kg-dry/m <sup>2</sup>   |
| $Y_v$          | Yield of edible part  | kg-fresh/m <sup>2</sup> |
| $\lambda_d$    | Radiological decay constant   | d <sup>-1</sup>         |
| $\lambda_l$    | Soil leaching rate constant   | d <sup>-1</sup>         |
| $\lambda_{re}$ | Resuspension constant   |                         |
| $\lambda_w$    | Environmental weathering removal constant   | d <sup>-1</sup>         |
| $\tau_r$       | Transfer coefficient from soil compartment to edible part by resuspension: = $(\lambda_{re} Y_v) / (t_e P)$ | d <sup>-1</sup>         |
| $\tau_s$       | Transfer coefficient from soil compartment to edible part by root uptake: = $(B_v Y_v) / (t_e P)$           |                         |
| $\tau_T$       | Transfer coefficient from foliar compartment to edible part by translocation: = $T_v/t_e$                   | d <sup>-1</sup>         |

$$\frac{dE}{dt} = \tau_T Y_h / Y_v F + (\tau_s / Y_v + \tau_r / Y_v) S - \lambda_d E \quad (5)$$

$$E(t_o) = 0.0 \quad (6)$$

한편, 쌀의 섭취에 의한 내부선량은 쌀소비량과 선량전환인자를 고려하여,

$$H(t) = D E(t) U \quad (7)$$

누적선량은 아래와 같다.

$$H(t) = \int D E(t) U dt \quad (8)$$

윗 식들에서 사용된 변수를 표 1에 설명하였다.

### 3. 입력변수 설정

본 연구의 쌀 섭취경로 모델에서 사용된 변수치를 표 2에 설명하였다. 이 표에서 방사능이 벼잎에 침적되는 분률인 차단계수 R은 Chamberlain[7]이 제안한 식을 이용하였다.

$$R = 1 - \exp(-\mu Y_i) \quad (9)$$

Table 2. Input parameter and selection criteria of dynamic model for rice field-rice-pathway.

| Parameter      | Selection criteria   | Sample data         |         |
|----------------|--|---------------------|---------|
|                |  | Sr-90               | Cs-137  |
| $B_v$          | Values selected from experiment [2]  | 0.17                | 0.028   |
| D              | Values from GSF model [19] based on ICRP30, Sv/Bq  | 3.5E-8              | 1.4E-8  |
| $\lambda_d$    | Radiological decay constant, $d^{-1}$  | 6.55E-5             | 6.31E-5 |
| $\lambda_1$    | $\lambda_1 = R_p / \theta T (1 + \rho / \theta \times K_d)$ [9] selected values of the parameters in the formular are for Korean rice field[2], $d^{-1}$ | 0.07                | 0.003   |
|                |  | Nuclide independent |         |
| P              | Average value of rice field(25cm depth) of Chun-Nam province [11], kg-soil/m <sup>2</sup>  | 155.2               |         |
| R              | $R = 1 - \exp(-\mu Y_t)$ [7]<br>assuming $\mu$ value is 2.8m <sup>2</sup> / kg [8]   |                     |         |
| $t_e$          | Growing period of rice from May 1 to Sep. 30 [2], d  | 150                 |         |
| $t_s$          | Seeding date of rice, Julian day of May 1 [2], d   | 121                 |         |
| $T_v$          | Assumed a constant rate of translocation for growing period [2]  | 0.1                 |         |
| $Y_h$          | Estimation from edible part yield and crop index [2], kg-fresh/m <sup>2</sup>  | 6.3                 |         |
| $Y_t$          | $Y_t = Y_{th}(t_o - t_s) / t_e$ assuming that above ground biomass increase linearly until harvest time [2]  |                     |         |
| $Y_{th}$       | Estimation from Y and dry matter portion, kg-dry / m <sup>2</sup>  | 1.32                |         |
| $Y_v$          | Korean average value [12], kg-fresh/m <sup>2</sup>   | 0.44                |         |
| U              | Average value for Korean adult people [13, 14], kg/yr  | 122.02              |         |
| $\lambda_{re}$ | assumed no soil resuspension due to water culture [2]  | 0.0                 |         |
| $\lambda_w$    | Estimation based on the 14-day default value for environmental half-life [2], $d^{-1}$   | 0.0495              |         |

윗 식은 차단계수가 작물의 식생밀도의 함수로만 나타나있다. 침적물의 물리, 화학적 특성이나 기상조건도 역시 침적에 영향을 미치나 이들에 대한 자료가 충분치 못할 뿐만 아니라 자료간에 유의성이 없어 이용하기에 한계가 있다. 윗 식은 목초류의 실험 결과로부터 유도된 것으로 벼에 적용하기에는 무리가 있을 수 있으나 더 좋은 자료는 없는 상황에서 그대로 적용하였다. 이 식의  $Y_t$ 는 벼의 지상부 dry biomass를 의미하고 있는데 벼 재배기간 중에 수확기까지 직선적으로 증가한다고 가정하였다( $Y_t = Y_{th}(t_o - t_s) / t_e$ ). 또 이식의 상수  $\mu$ 의 범위는 실험적으로 2.3 ~ 3.3 m<sup>2</sup> / kg-dry에 분포하는데 여기서는 Boone 등

[8]이 사용한 중간치 2.8m<sup>2</sup> / kg를 적용하였다.

는 토양 뿌리흡수 층으로부터 그 이하 층으로 이동하는 leaching rate constant,  $\lambda_1$ 은 BaesIII이 사용한 식으로부터 계산하였다[9].

$$\lambda_1 = \frac{R}{\theta T (1 + \rho / \theta \times K_d)} \quad (10)$$

여기서  $R_p$ 는 일일 수침투율(cm/d),  $\theta$ 는 토양 함수비(ml-water/cm<sup>3</sup>-soil), T는 토양 깊이(cm),  $\rho$ 는 토양의 겉보기 밀도(g/cm<sup>3</sup>)이고  $K_d$ 는 핵종의 분배계수 (ml/g)이다. 윗 식의 사용시 문제점은 계산결과가 비현실적으로 적거나 토양깊이를 작게 잡을때는 계수 값이 지나치게 크게 될 수 있다는

점이다. 이식은 토양 깊이가 15~30cm 일때 잘 맞는 것으로 알려졌다. 또 이식에서 사용될 분배계수는 보고된 실험치의 범위 아주 넓게 분포하고 있어서 불확실성이 크다. 이것은 토양의 구성 성분에 영향을 받으므로 각 지역의 농경지 특성에 따라 크게 변하기 때문이다. 여기서는 한국의 평균적 농토양을 고려하여 BaesIII 등이 정리한 자료를 사용하였다. 윗식의 다른 변수들은 한국의 기후 및 경작조건을 고려하여 결정하였다.

한편 표 2에 설명된 전이계수, 벼 생산수율, 쌀 소비량 등에 관련된 자료는 실험과 자료조사를 통하여 국내 특이성있는 데이터를 선정하였다.

#### 4. 계산방법

방사능 침적후 시간에 따른 토양 및 쌀중의 핵종농도와 쌀 섭취에 의한 연간 선량 및 누적선량을 계산하였다. 대상 핵종으로는 Sr-90과 Cs-137로서 이들의 반감기는 30년 정도인데 토양에 흡착력이 강한 핵종으로서 방사능 관리상 중요한 것들이다. 이 계산에서는 벼논에 각 핵종이 1 Bq/m<sup>2</sup>의 농도로 일시에 균일하게 침적 되었다고 가정하였다. 식(1) ~ 식(6) 까지의 연립 상분방정식의 해는 GEAR 방법을 사용한 수치해를 구하였고 IMSL에서 개발된 소프트웨어 [15]를 사용하였다.

#### 5. 결과 및 고찰

벼 논에 방사능이 침적하였을때 (1월 1일) 뿌리흡수층 토양속에 잔류하는 방사능의 시간에 따른 변화를 그림 2에 나타내었다. 이 그림에서의 Cs-137과 Sr-90의 반감기는 각각 30년과 27.7년으로 비슷하나 Cs-137이 Sr-90보다 훨씬 오랫동안 잔류하고 있음을 보여주고 있다. 이것은 Cesium의 토양과의 흡착력이 Strontium보다 훨씬 커서 leaching에 의해 soil sink로 유실되는 속도( $\lambda_1$ )가 작기 때문으로 사료된다.

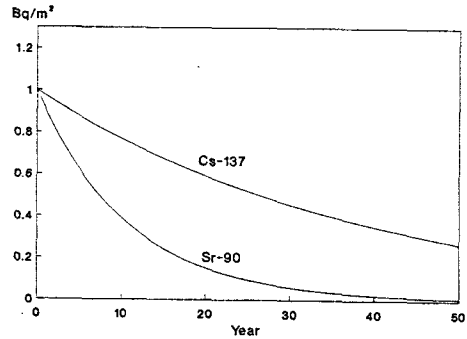


Figure 2. Radioactivity concentration of Sr-90 and Cs-137 in rice field soil as a function of time after fallout deposition of January 1.

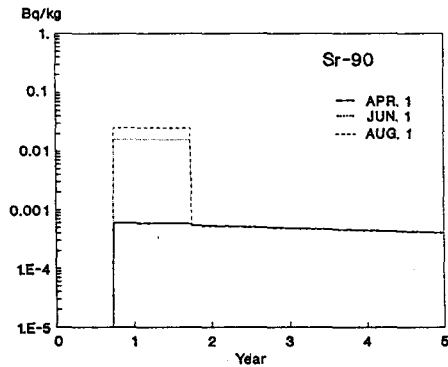


Figure 3. Radioactivity concentration of Sr-90 in rice as a function of time for different deposition date.

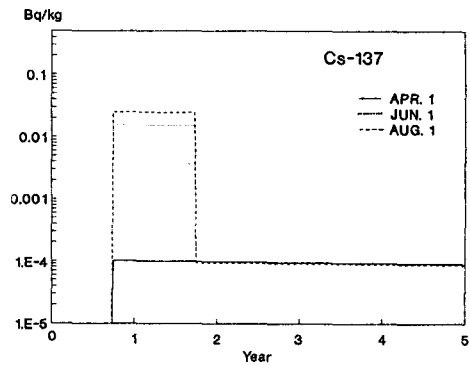


Figure 4. Radioactivity concentration of Cs-137 in rice as a function of time for different deposition date.

방사능의 침적이후 수확시점에서 쌀중의 방사능 농도의 시간에 따른 변화를 그림 3과 그림 4에 나타내었다. 여기서 벼는 5월 1일에 파종하여 9월 30일에 수확된다고 가정하고 수확된 벼는 다음해 수확시점까지 소비된다고 가정하였다. 이 그림에서 보면 방사능의 침적시점에 따라 수확된 벼 중의 방사능 농도가 크게 차이나는 것을 보여 주고 있다. 4월에 침적이 있을때는 벼의 파종 전이므로 뿌리흡수 경로에 의해서만이 오염되지만 성장기간 중에 침적이 일어났을 때는 엽면침적 경로가 추가되는데 엽면 침적에 의한 오염효과가 뿌리흡수보다 훨씬 심각함을 알 수 있다. 또 이 그림에서 침적 시기가 6월인 경우 보다 8월인 때에 오염효과가 큰 것으로 나타났는데 이것은 벼의 성장에 따른 biomass 증가에 의한 차단계수가 커지기 때문일 것이다. 식(9)에서 계산되는 차단계수는 biomass량의 함수인데 벼의 경우 biomass량은 수확시점까지 직선적으로 증가한다고 가정하고 있다. 본 모델에서 엽면에 침적된 방사능이 벼의 가식부로 이동하는 효과는 이동계수(translocation factor),  $T_v$ 를 사용하여 설명하고 있는데 이 계산에서는 핵종에 관계 없이 0.1로 일정하다고 가정하였다. 그러나 이 인자는 낙진의 물리화학적 특성 및 침적시기에 따라 크게 영향을 받을 수 있는 것으로 불확실성이 큰 변수로 알려져 있다. 목초의 경우는 엽면 자체가 가식부이므로 침적된 방사능이 그대로 섭취된다고 볼 수 있으므로 1.0으로 가정하는 것이 타당 하지만 곡물에 대해서는 정확한 자료를 얻기가 힘들다. 곡물의 경우 Cesium이 Strontium에서보다 이동계수가 크다는 보고도 있으나 [16] 실험상의 어려움 때문에 자료가 충분치 못하여 불확실성을 해결하기 쉽지 않다.

일회 침적후 오염된 논에서 수확한 쌀의 섭취에 의한 내부 피폭선량을 계산한 결과를 그림 5와 그림 6에 나타내었다. 한국인 성인의 년평균 쌀 소비량을 고려한 50년간의 쌀 섭취에 의한 50년

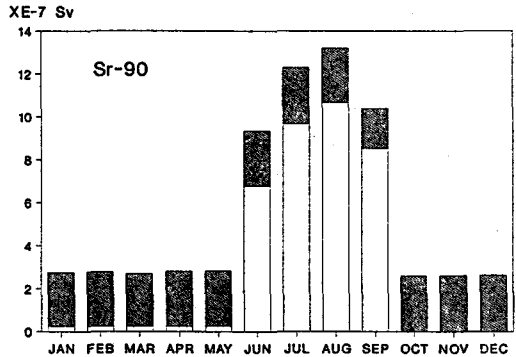


Figure 5. 50-year integrated radiation dose from Sr-90 ingested with rice (white part is from the ingestion of rice harvested in first year, dashed part is from the other 49 years.)

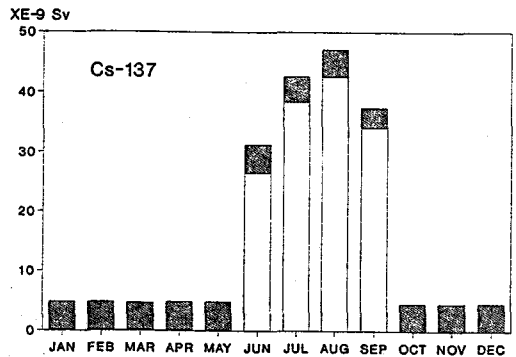


Figure 6. 50-year integrated radiation dose from Cs-137 ingested with rice (white part is from the ingestion of rice harvested in first year, dashed part is from the other 49 years.)

누적 유효선량당량을 계산한 결과이다. 여기서 침적시기의 영향을 보기위해 매월 1일 기준의 월별 계산결과를 표시한 것인데 막대의 흰 부분은 침적이 일어난 해 수확된 쌀의 섭취에 의한 선량이고 빗금친 부분은 다음 49년간의 누적 선량이다. 이 그림의 흰부분의 경우 침적시기가 벼의 비성장기간(1월~5월)일 때는 첫해의 뿌리흡수에 의한 오염만을 나타내지만 성장기간(6월~9월)일 때는 뿌리흡수와 엽면침적의 효과를 함께 포함하고 있

다. 이 그림으로 보더라도 첫 해의 엽면 침적 효과가 지배적인 것임을 알 수 있다. 특히 엽면 침적 효과는 8월이 가장 큰 것을 알 수 있는데 이것은 벼의 성장이 충분하여 엽면 차단 침적량이 크고 가식부로 이동할 수 있는 시간적 여유가 충분하기 때문인 것으로 사료된다. 한편 침적 다음 해부터의 (빗금친 부분) 뿌리흡수에 의한 선량을 비교해 보면 Sr-90에 의한 선량이 Cs-137에 의한 것보다 큼을 알 수 있는데 이것은 논 토양 중 흡착력이 큰 Cesium이 잔류 농도는 크지만 뿌리흡수에 의한 농축계수와 선량전환인자는 Sr-90에서 더 크기 때문일 것이다.

## 6. 결 론

논-쌀-사람 경로에서 동적모델을 사용하여 시간경과에 따른 토양 및 쌀중의 핵종농도와 선량을 계산하였다. Cs-137 이 Sr-90 보다 논토양에 오랫동안 잔류하였다. 벼의 성장기간중에 침적이 있을 때는 첫 해의 엽면침적에 의한 쌀의 오염이 지배적이었고 그 이후에는 뿌리흡수 경로가 주 오염 경로였다. 시기별로는 벼의 성장이 왕성한 8월에 침적이 일어날 경우 엽면침적 오염이 가장크고 피폭량도 많았다.

## 참 고 문 헌

1. D. A. Baker, G. R. Hoenes, and J. K. Soldat, FOOD : An Interactive Code to calculate Internal Radiation Doses from Contaminated Food Products, Battelle Pacific Northwest Laboratory Report, BNWL-SA-5523(1976)
2. 이정호 등, 섭취 및 호흡에 의한 방사선 내부 피폭선량 평가 코드 개발, 한국원자력 연구소, KAERI/RR-998/90, 1991
3. R. S. Booth and S. V. Kaye, A Preliminary Systems Analysis Model for Radioactivity Transfer to Man from Deposition in a Terrestrial Environment, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, ORNL-TM-3135(1971)
4. J. Koch and J. Radmor, RADFOOD-A Dynamic Model for Radioactivity Transfer through the Human Food Chain, Health Physics, 50, 721~737(1986)
5. F. W. Whicker and T. B. Kirchner, PATHWAY: A Dynamic Food Chain Model to Predict Radionuclides Ingestion after Fallout Deposition, Health Physics, 52, 717~737(1987)
6. H. Mueller, G. Proehl, J. Eklund and H. Fuehr, ECOSYS-87: ein Rechenmodell Zur abschätzung der Strahlenexposition nach Kurzzeitiger Deposition von Radionukliden auf Landwirtschaftlich genutzten Flächen, Benutzer Handbuch, GSF-Institut fuer Strahlenschutz, 8042 Neuherberg FRG(1989)
7. A. C. Chamberlain, Interception and Retention of Radioactive Aerosols by Vegetation, Atmospheric Environment, 4, 57~78(1970)
8. F. W. Boone, Y. C. Ng, and J. M. Palms, Terrestrial Pathway of Radionuclide Particulates, Health Physics, 41, 735~742(1981)
9. C. F. Baes III, R. D. Sharp, A. L. Sjoreen, and R. W. Shor, A Review and Analysis of Parameters for Assessing Transport of Environmentally Released Radionuclides through Agriculture, Oak Ridge National Laboratory, Oak ridge, ORNL-5786(1984)
10. D. Nosske, S. Gerich and S. Langer, Dosisfaktoren fuer Inhalation oder Ingestion von Radionuklidverbindungen (Erwachsene), ISH-Heft 63, Institute fuer Strahlenhygiene des Bundesgesundheitsamtes, Neuherberg/Munhen(1985)
11. 조백현 등, 토양학, 향문사(1980)

12. 농림수산부, 농림수산통계 연보(1988)
13. 보건사회부, 국민 영양 조사 보고서(1987)
14. 한국 인구 보건 연구원, 한국인 영양 권장량, 고문사(1985)
15. International Mathematical & Statistical Libraries, INC., For the IMSL Library of Fortran Subroutines in Mathematics and Statistic, IMSL, Houston, USA
16. Y. C. Ng. et al., Methodology for Assessing Dose Commitment to Individuals and to the Population from Ingestion of Terrestrial Foods contaminated by Emissions from a Nuclear Fuel Reprocessing Plant at the Savannah River Plant, UCID-17743, Lawrence Livermore Laboratory (1978)



# Nuclides Transport Analysis and Dose Calculation Using Dynamic Model for Rice Ingestion Pathway

Chang-Woo Lee, Yong-Ho Choi, Won-Tae Hwang, and Jeong-Ho Lee

*Korea Atomic Energy Research Institute*

## ABSTRACT

Transport behaviors of Cs-137 and Sr-90 were analyzed and ingestion doses were calculated using dynamic model for rice field-rice-man pathway. Cs-137 binding strongly to soil remain longer in rice field than Sr-90. Foliar deposition on rice plant during growing period is the main contamination mechanism.

*Key words: Rice pathway, Dynamic model, Ingestion dose*