

Improvement of a Dynamic Food Chain Model Considering the Influence of Radioactive Contamination of Foods by Rainfall During a Nuclear Emergency

Won Tae Hwang, Eun Han Kim, Moon Hec Han, Yong Ho Choi,
Han Soo Lee and Chang Woo Lee

Korea Atomic Energy Research Institute

원자력 사고 중 강우에 의한 음식물 오염영향을 고려한 역동학적 섭취경로모델 개선

황원태 · 김은한 · 한문희 · 최용호 · 이한수 · 이창우

한국원자력연구소

(2001년 9월 28일 접수, 2002년 1월 9일 채택)

Abstract - For the consideration of the influence on radioactive contamination of foods due to rain during the release period of radionuclides in a nuclear accident, the previous dynamic food chain model was improved. Wet interception coefficients for the agricultural plants were derived as a function of radionuclide and rainfall amount, and mathematical formula of the model was also re-established. In the results for the same time-integrated radioactive concentrations on the ground, radioactive contamination of foods decreased greatly by rainfall, and it decreased dramatically according to increasing rainfall amount. It means that predictive contamination in foods using the previous dynamic food chain model, in which dry interception to the agricultural plants is only considered, can be overestimated. Among radionuclides considering in this study (^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{131}I), influence of rainfall for food contamination was the most sensitive to ^{131}I , and the least sensitive to ^{90}Sr .

Key words : Nuclear Accident, Dynamic Food Chain Model, Food Contamination, Wet Interception Rainfall

요약 - 원자력 사고로 인해 방사성물질이 환경으로 방출되는 기간동안 강우가 있을 경우 음식물의 오염 영향을 고려하기 위해 개발된 역동학적 섭취경로모델을 개선하였다. 이를 위해 핵종별 강우량에 따른 농작물에 대한 습차단 상수를 유도하였으며, 아울러 개발된 역동학적 섭취경로모델에 대한 수학적 모델을 재정립하였다. 평가결과, 같은 지표위 농도에 대해 강우는 음식물의 오염을 크게 감소시키며, 강우량 증가에 따라 오염은 급격히 감소하였다. 이러한 사실은 원자력 사고 기간동안 강우가 있을 경우, 농작물의 건차단 만을 고려한 기존 역동학적 섭취경로모델을 사용하여 평가하였을 때 그 결과는 과대 평가될 수 있다는 사실을 나타낸다. 본 연구에서 고려하는 핵종 (^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{131}I) 중에서 강우량에 따른 음식물의 농도 감소는 ^{131}I 에서 가장 뚜렷하게 나타났으며, ^{90}Sr 이 가장 영향이 적었다.

중심어 : 원자력 사고, 역동학적 섭취경로모델, 음식물 오염, 습차단, 강우

서 론

원자력시설의 비상시 환경으로 방출된 방사성 물질에 의한 농작물의 오염은 인체에 중요한 영향을 끼치는 피폭경로이다. 이러한 사실은 1986년

체르노빌 원전 사고 분석 결과로부터 명백히 입증되었으며, 주변국가 특히 동유럽지역 주민의 경우 오염 식품섭취에 의한 피폭영향은 인체에 방사능 위해를 주는 여러 피폭경로 중 가장 높은 것으로 나타났다[1]. 체르노빌 사고로 인한 농

작물 오염의 정도는 지역에 따라 다양하게 관측되었는데 이는 사고당시 기후특성 특히 강우현상에 따라 큰 차이를 나타냈다.

사고시와 같이 단기간에 다량의 방사성물질이 농경지에 침적되는 경우 침적시점에 따른 농업 및 환경조건의 영향으로 환경에서의 방사성물질의 농도는 침적시점 뿐 아니라 침적후 시간에 따라 매우 다양한 변화를 나타낸다. 따라서 환경내 방사성물질의 농도가 항상 일정하다고 가정하는 평형모델 (equilibrium model)로는 사고시 적절하게 대처할 수 없기 때문에 침적시점과 침적후 시간에 따른 방사성물질의 농도의 변화를 해석할 수 있는 역동학적 모델 (dynamic model)이 요구된다. 우리나라의 농업 및 환경특성을 고려한 역동학적 섭취경로모델[2]이 한국원자력연구소에서 개발한 실시간 방사선피폭해석시스템 (FADAS : Following Accident Dose Assessment System) [3]에서 고려되는 여러 피폭경로중 음식물섭취에 의한 내부피폭을 평가하기 위한 모듈로서 개발된 바 있다. 그러나 이 모델에서는 사고시 음식물오염에 있어서 중요 요소인 강우에 의한 영향은 고려하고 있지 않다.

본 연구에서 사고 기간동안 강우가 있을 경우, 이에 따른 음식물 오염 영향을 고려하기 위해 농작물에 대한 습차단 상수 (wet interception coefficient)를 유도하였으며, 아울러 개발된 역동학적 모델에 대한 수학적 재정립이 이루어졌다. 수정된 역동학적 모델을 사용하여 강우에 따른 음식물 오염효과를 다양한 각도에서 비교, 분석하였다.

농작물의 핵종 차단

원자력 사고 기간동안 환경으로 누출된 방사성 물질은 농작물 또는 지표로 침적된다. 단위면적당 지표와 농작물로 침적되는 핵종의 총량, 즉 지표위 농도에 대한 농작물로 침적되는 핵종량의 비를 차단분율 (interception fraction, f)로 정의하며, Chamblain[4]은 다음과 같이 지표위 농작물의 수율 (B_f , dry-kg/m²)과의 관계를 제안하였다.

$$f = 1 - e^{-\alpha B_f} \quad (1)$$

차단상수 α (m²/dry-kg)는 지표위 농도 (Bq/m²)에 대한 농작물내 농도 (Bq/dry-kg)의 비로 정의되며, 식 (1)은 강우가 없는 건차단 (dry interception)

과 강우가 있는 습차단 (wet interception) 모두에 적용될 수 있다[6]. 개발된 역동학적 모델에서는 강우에 의한 핵종의 습차단 현상을 고려하지 않고 있으며, 과일을 제외한 모든 농작물에 대해 건차단 상수는 3.0 m²/dry-kg, 과일류는 0.3 m²/dry-kg을 적용하고 있다[2]. 따라서 사고 기간동안 강우가 있는 경우 식 (1)은 다음과 같이 수정될 수 있다.

$$f_{dry} = 1 - e^{-\alpha_{dry} B_f} \quad (2)$$

$$f_{wet} = 1 - e^{-\alpha_{wet} B_f}$$

사고 기간중 습차단과 건차단이 모두 존재하는 경우 어떤 차단현상이 먼저 일어나느냐에 따라 음식물 오염 정도는 차이가 날 수 있다. 특히 건차단이 일어나고 습차단이 이후에 일어나면 건차단으로 농작물에 침적된 핵종은 강우로 인해 제거될 수 있다. 그러나 건차단된 핵종의 약 90%는 농작물 표면에 고착되므로 10%만이 강우로 제거 가능하다[5]. 또한 강우로 제거 가능한 핵종 중에서 하루 당 약 70%가 표면에 고착된다[5]. 따라서 사고 첫째 날은 강우가 없고 둘째 날은 강우가 있다고 가정할 경우, 건차단된 핵종이 강우로 인해 제거되는 비율은 약 3%에 불과하다. 따라서, 약간의 보수적 측면에서 농작물에 차단되는 총 방사성물질의 양은 건차단과 습차단 순서에 관계없이 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

농작물에 대한 핵종의 차단분율은 실험 분석가에 따라 식 (2)와 같이 지표에 침적되는 비율 ($1-f$)을 지수함수로 가정하여 차단상수 α 값을 실험으로부터 유도하여 사용하거나 또는 농작물의 수율과 차단분율의 선형적 관계를 가정한 농작물의 단위 수율당 차단분율 (f/B_f)에 대한 실험으로부터 유도하여 평가한다. 차단분율 f 값이 0.3 이하에서는 두 방법간 차단분율은 거의 차이가 없으나, 1에 근접할수록 차이를 보이며 이 경우 α 값이 f/B_f 값보다 핵종의 차단현상을 보다 더 적절하게 반영하는 것으로 알려져 있다 [6]. 그러나 여러 문헌자료를 보면 α 값보다 f/B_f 값에 대한 실험 자료가 많이 알려져 있으며, 특히 습차단의 경우는 더욱 더 그러하다. 따라서 본 연구에서는 α 값을 f/B_f 값과 동일하다는 가정하에 문헌의 실험적 자료[6]를 사용하여 α_{wet} 값을 유도하였다. 그럼 1은 목초에 대해 강우량에 따른 실험적 자료를 내삽한 습차단 상

수를 나타냈다. 건차단 상수와 마찬가지로 목초에 대해 유도된 값은 과일류를 제외한 모든 농작물에 동일한 값을 적용하였다. 과일류에 대한 건차단 상수는 다른 농작물에 비해 약 1/10이며, 따라서 과일류에 대한 습차단 상수에 대한 적절한 자료가 없는 관계로 과일류에 대한 습차단 상수는 다른 농작물에 대한 습차단 상수의 1/10로 가정하였다.

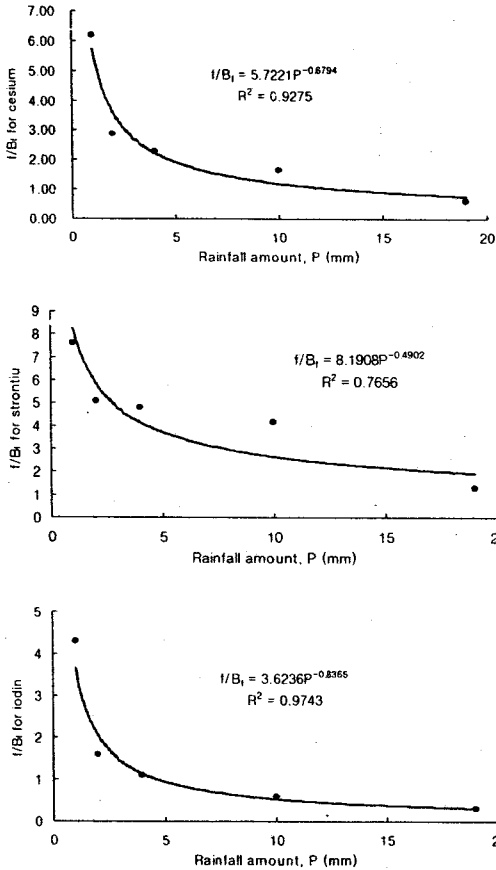


Fig. 1. Wet Interception Coefficient as a Function of Rainfall Amount.

($I/B_f \approx \alpha_{wet}$, R^2 : Coefficient of Determination)

수학적 모델의 개선

원자력 사고 기간동안 강우에 따른 음식물 오염 영향을 예측하기 위해 개발된 역동학적 섭취경로모델에 대한 수학적 모델이 재정립이 이루어졌다. 모델에서 입력값은 환경에서 측정 가능한 지표위 농도이다.

강우에 의한 습차단을 고려할 경우 농작물의 잎표면 (X_A , Bq/dry-kg)과 토양 표면의 농도 (X_C , Bq/m²)에 대한 수학적 모델과 초기값은 다음과 같이 수정되어야 하며, 기타 환경 구간에 대해서는 기존 모델식과 초기값은 동일하다.

$$\frac{dX_A}{dt} = -(\lambda_w + \lambda_g + \lambda_{tr} + \lambda_d)X_A + \left(\frac{\lambda_{re} \cdot f_{dry}}{B_f}\right)X_C$$

$$X_A(0) = \frac{(f_{dry} \cdot F_{dry}) + (f_{wet} \cdot F_{wet})}{B_f} \quad (4)$$

$$\frac{dX_C}{dt} = -(\lambda_{pe} + \lambda_{re} \cdot f_{dry} + \lambda_d)X_C + (\lambda_w \cdot B_f)X_A$$

$$X_C(0) = (1 - f_{dry})F_{dry} + (1 - f_{wet})F_{wet} \quad (5)$$

여기서,

- λ_w : 핵종의 풍화에 의한 제거율 (1/d)
- λ_g : 농작물의 성장에 따른 핵종의 희석율 (1/d)
- λ_{tr} : 농작물의 잎에서 가식부위로의 핵종 전이율 (1/d)
- λ_d : 방사능 붕괴율 (1/d)
- λ_{re} : 토양에 침적된 핵종의 재부유율 (1/d)
- λ_{pc} : 토양의 표면층에서 뿌리 흡수층으로의 이동율 (1/d)
- F_{dry} : 강우가 없는 기간동안 시간적분 지표위 농도 (Bq/m²)
- F_{wet} : 강우가 있는 기간동안 시간적분 지표위 농도 (Bq/m²)

결과 및 고찰

원자력 사고 기간동안 강우에 의한 농작물 오염을 예측하기 위해 개발된 역동학적 섭취경로모델을 재정립하였으며, 개선된 모델을 사용하여 강우에 의한 음식물 오염 영향을 고찰하였다. 핵종의 침적시점은 본 연구에서 고려된 쌀, 과일, 목초 (젖소의 사료)가 왕성하게 성장하는 8월 15일로 가정하였다. 환경내 핵종의 거동을 해석하기 위한 수많은 모델내 입력자료는 참고문헌 [2]에 잘 제시되어 있다.

그림 2는 방사성물질의 총 방출 기간동안 강우가 없는 기간동안 측정된 지표위 농도가 각 핵종

에 대해 1 Bq/m², 100 mm의 강우가 있는 기간동안 측정된 지표위 농도가 각 핵종에 대해 1 Bq/m²을 가정하였을 경우 수확기에서 쌀과 과일의 농도를 나타냈다. 지표위 농도가 같은 조건에 대해 강우는 음식물 오염을 감소시키며, 특히 ¹³¹I은 이러한 현상이 더욱 뚜렷하였다. 쌀의 오염에 대한 습차단의 영향은 ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ¹³¹I에 대해 각각 17%, 36%, 7%를 나타냈다. 또한 과일의 오염에 대한 습차단의 영향은 각각 15%, 28%, 10%를 나타냈다. 결과적으로 같은 지표위 농도에 대해 강우가 있는 경우는 강우가 없는 경우에 비해 핵종의 농작물 표면에 유지되는 분율이 훨씬 적어 음식물의 오염은 훨씬 낮은 농도를 나타낸다. 강우에 따른 음식물 오염의 감소 정도는 ¹³¹I, ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr 순으로 높았다.

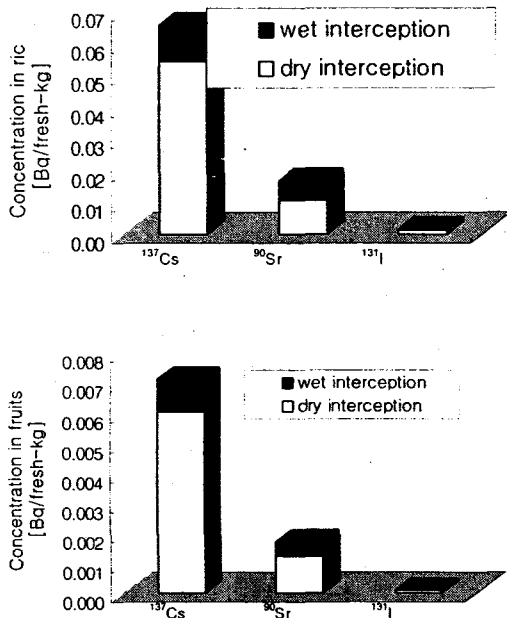


Fig. 2. Radionuclide Concentrations in Rice and Fruits at Harvest Due to a Combination of Dry and Wet Processes (Deposition Date : August 15, Rainfall Amount : 100 mm, Radionuclide Concentration on the Ground During Rain and No Rain : Each 1 Bq/m²).

그림 3은 그림 2와 동일한 조건하에서 연속적으로 생산되는 우유에 대한 평가 결과이다. 쌀, 과일과 유사하게 강우는 명백히 우유의 오염을 크게 줄인다는 사실을 나타낸다.

그림 4는 방사성물질의 총 방출기간동안 강우가 있으며, 이때 측정된 지표위 농도가 1 Bq/m²

인 경우 강우량에 따른 수확기에서 쌀에서의 핵종별 농도를 나타냈다. 강우량에 따른 쌀에서의 농도 감소는 고려되는 핵종 중에서 ¹³¹I에서 가장 뚜렷이 예측되며, ⁹⁰Sr이 가장 영향을 적게 받았다. 강우량이 매우 적은 경우 수확기에서 쌀에 대한 ¹³⁷Cs과 ⁹⁰Sr의 농도는 강우가 없는 경우보다 오히려 높게 예측되는데, 이러한 현상은 핵종과 농작물 표면과의 점착성 때문인 것으로 판단된다.

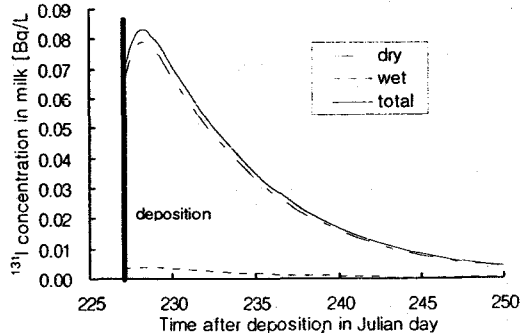
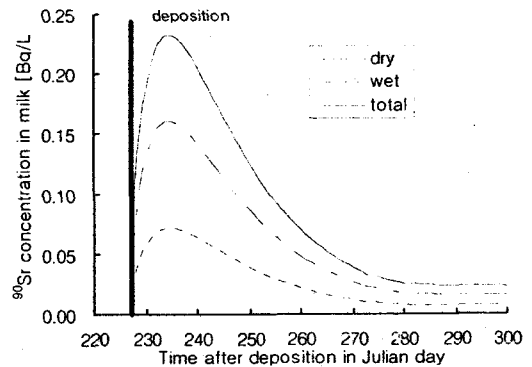
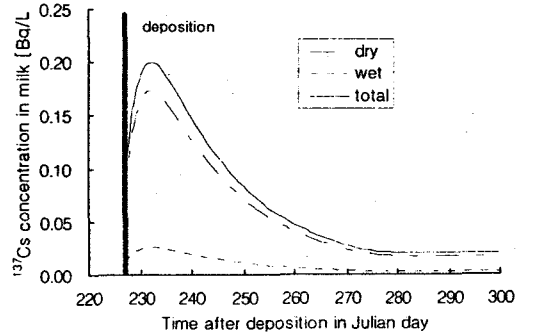


Fig. 3. Radionuclide Concentrations in Milk Due to a Combination of Dry and Wet Processes (Same Conditions as Fig. 2 are Applied).

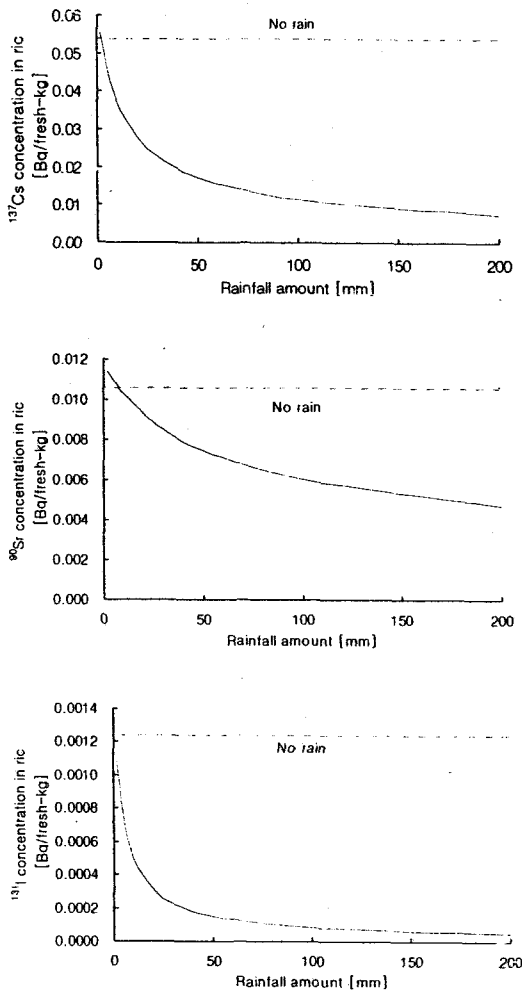


Fig. 4. Radioactive Contamination in Rice at Harvest as a Function of Rainfall Amount (Deposition Date : August 15, Radionuclide Concentration on the Ground : 1Bq/m²).

역동학적 섭취경로모델에서 평가를 위한 입력 값은 시간적분 지표위 농도이며, 시간적분 공기중 농도로부터 음식물 농도를 예측한다면 강우가 있는 경우가 상대적으로 높은 핵종의 습침적 속도 (wet deposition velocity)로 오염은 훨씬 높게 나타날 수 있다.

결론

개발된 역동학적 섭취경로모델에서는 원자력 시설의 사고 기간동안 발생할 수 있는 강우에 의한 농작물 오염 영향을 반영하지 못하고 있으며,

본 연구를 통해 이에 대한 영향을 평가할 수 있는 모델을 재정립하였다. 이를 위해 농작물에 대한 핵종별 습차단 상수를 유도하였으며, 아울러 개발된 역동학적 모델에 대한 수학적 모델을 개선했다.

평가결과, 같은 지표위 농도에 대해 강우는 음식물의 오염을 크게 감소시키며, 강우량에 따라 오염은 급격히 감소하였다. 이러한 사실은 사고 기간동안 강우가 있을 경우, 기존 역동학적 섭취경로모델을 사용하여 평가하였을 때 그 결과는 과대 평가될 수 있다는 사실을 나타낸다. 본 연구에서 고려하는 핵종 중에서 강우량에 따른 음식물의 농도 감소는 ¹³¹I에서 가장 뚜렷하게 나타났으며, ⁹⁰Sr이 가장 영향이 적었다.

본 연구의 결과물로 새롭게 수정·향상된 역동학적 섭취경로모델은 원자력 시설의 사고시 발생할 지 모르는 강우에 따른 음식물 오염을 예측함으로써 결과에 대한 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행하는 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- IAEA, "The International Chernobyl Project : Assessment of Radiological Consequences and Evaluation of Protective Measures", Technical Report (1991).
- W. T. Hwang, G. S. Cho and M. H. Han, "Development of a Dynamic Food Chain Model DYNACON and Its Application to Korean Agricultural Conditions", *Journal of Nuclear Science and Technology*, 35(6), 454-461 (1998).
- M. H. Han et al., "Development of Environmental Radiation Protection Technology : Development of Radiological Emergency Preparedness and Biological Dosimetry Technology", Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI/RR-1913/98 (1998).
- A. C. Chamblain, "Interception and Retention of Radioactive Aerosols by Vegetation",

- Atmospheric Environment 4, 57-63 (1970).
5. Personal Communication with S. R. Peterson, Lawrence Livermore National Lab.
 6. IAEA, "Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Temperate Environment", IAEA Technical Reports Series No. 364 (1994).