

원자력 사고중 강우에 의한 농작물 오염 영향
**Influence of Radioactive Contamination to Agricultural Products by
Rainfall During a Nuclear Accident**

황원태 · 한문희 · 최용호 · 이한수 · 이창우

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

원자력 사고중 강우에 따른 농작물 오염 영향을 평가하기 위해 핵종별 농작물에 대한 습차단 상수를 유도하였으며, 아울러 개발된 동적 섭식경로모델에 대한 수학적 모델이 수정되었다. 평가결과 사고중 강우는 농작물의 오염을 크게 감소시키며, 강우량 증가에 따라 오염도는 급격히 감소하였다. 이러한 사실은 원자력 사고중 강우가 있을 경우, 농작물에 대한 건차단 만을 고려한 기존 동적 섭식경로모델을 사용하여 평가하였을 때 그 결과는 과대 평가될 수 있다는 사실을 나타낸다. 강우량에 따른 농작물의 농도 감소는 ^{131}I 에서 가장 뚜렷하게 나타났으며, ^{90}Sr 이 가장 영향이 적었다.

Abstract

For the consideration of the effects on radioactive contamination of agricultural products by rainfall during a nuclear accident, the wet interception coefficients for the plants were derived, and the previous dynamic food chain model was also modified. From the results, radioactive contamination of agricultural products was greatly decreased by rainfall, and it decreased dramatically according to increase of rainfall amount. It means that the predictive contamination in agricultural products using the previous dynamic food chain model, in which dry interception to the plants is only considered, can be overestimated. Influence of rainfall on the contamination of agricultural products was the most sensitive for ^{131}I , and the least sensitive for ^{90}Sr .

1. 서 론

원자력시설의 비상시 환경으로 방출된 방사성물질에 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 피폭경로중 가장 높은 것으로 나타났다. 체르노빌 사고로 인한 농작물 오염의 정도는 지역에 따라 다양하게 관측되었는데 이는 사고당시 기후특성 특히 강우현상에 따라 큰 차이를 보였다.

사고시와 같이 단기간에 다량의 방사성물질이 농경지에 침적되는 경우 침적시점에 따른 농업 및 환경조건의 영향으로 환경내 방사성물질의 농도는 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 동적모델 (dynamic model)이 요구된다. 우리나라의 농업 및 환경특성을 고려한 동적 섭취경로모델[1]이 한국원자력연구소에서 개발한 실시간 방사선피폭해석시스템 (FADAS : **F**ollowing **A**ccident **D**ose **A**ssessment **S**ystem)[2]에서 고려되는 여러 피폭경로중 음식물섭취에 의한 내부피폭을 평가하기 위한 모듈로서 개발된 바 있다. 그러나 이 모델에서는 사고시 농작물 오염에 있어서 중요한 요소인 강우에 의한 영향은 고려하고 있지 않고 있다.

본 연구에서 사고시 강우에 따른 농작물 오염 영향을 고려하기 위해 농작물에 대한 습차단 상수 (wet interception coefficient)를 유도하였으며, 아울러 개발된 동적모델에 대한 수학적 재정립이 이루어졌다. 수정된 동적모델을 사용하여 강우에 따른 농작물 오염효과를 다양한 각도에서 비교, 분석하였다.

2. 농작물의 핵종 차단

원자력 사고시 환경으로 누출된 방사성물질은 농작물 또는 지표로 침적된다. 지표와 농작물로 침적되는 핵종의 총량에 대한 농작물로 침적되는 핵종량의 비를 차단분율 (interception fraction, f)로 정의되며, Chamblain[3]은 다음과 같이 지상위 농작물의 수율 (B_f , dry-kg/m²)과의 관계를 지수함수로 가정하였다.

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

차단상수 α (m²/dry-kg)는 총 침적량 (Bq/m²)에 대한 농작물 농도 (Bq/dry-kg)의 비로 정의되며, 건차단 (dry interception)과 습차단 (wet interception) 모두에 적용될 수 있다[5]. 개발된 동적모델에서는 강우에 의한 핵종 차단현상을 고려하지 않고 있으며, 과일을 제외한 모든 농작물에 대해 건차단 상수는 3.0 m²/dry-kg, 과일류는 0.3 m²/dry-kg을 적용하고 있

다[1]. 만일 사고중 강우가 있는 경우 식 (1)은 다음과 같이 수정될 수 있다.

$$f = f_{dry} + f_{wet} = [1 - e^{-\alpha_{dry} B_f}] + [1 - e^{-\alpha_{wet} B_f}] \quad (2)$$

농작물에 대한 핵종의 차단분율은 실험 분석가에 따라 식 (2)와 같이 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. 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[4]. 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[4]를 사용하여 핵종별 강우량에 따른 α_{wet} 값을 다음과 같이 유도하였다.

$$\alpha_{wet} = a R^b \quad (3)$$

여기서,

a, b : 상수 (표 1)

R : 강우량 (mm)

과일류에 대한 건차단 상수는 다른 농작물에 비해 약 1/10이며, 따라서 과일류에 대한 습차단 상수에 대한 적절한 자료가 없는 관계로 과일류에 대한 습차단 상수는 식 (3)으로 평가된 값의 1/10로 가정하였다.

3. 동적섭식경로모델의 수정

원자력 사고시 습차단에 따른 농작물 오염 영향을 예측하기 위해 개발된 동적섭식경로 모델의 수학적 모델이 재정립되었다. 습차단을 고려할 경우 농작물의 잎표면 (X_A , Bq/dry-kg)과 토양표면의 농도 (X_C , Bq/m²)에 대한 수학적 모델과 초기값은 다음과 같이 수정되어야 하며, 기타 환경 구간에 대해서는 기존 모델식과 초기값은 동일하다.

$$\frac{dX_A}{dt} = -(\lambda_w + \lambda_g + \lambda_{tr} + \lambda_d)X_A + \left(\frac{\lambda_{re} \cdot f_{dry}}{B_f} \right) X_C \quad (4)$$

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

$$\frac{dX_C}{dt} = -(\lambda_{pe} + \lambda_{re} \cdot f_{dry} + \lambda_d)X_C + (\lambda_w \cdot B_f)X_A \quad (5)$$

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

여기서,

λ_w : 기후에 의한 핵종 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)

4. 결과 및 고찰

원자력 사고시 강우에 의한 농작물 오염을 예측하기 위해 개발된 동적모델을 재정립하였으며, 재정립된 모델을 사용하여 강우에 의한 농작물 오염 영향을 고찰하였다. 핵종의 침적 시점은 본 연구에서 고려된 쌀, 과일, 목초 (젓소의 사료)가 왕성하게 성장하는 8월 15일로 가정하였다.

그림 1은 총 사고 기간중 강우가 없는 기간과 강우가 있는 기간 (강우량 100 mm)에서 측정된 시간 적분 지표위 방사성물질의 농도가 각각 1Bq/m²로 가정하였을 경우 수확기에서 쌀과 과일의 농도를 보여준다. 그림에 나타난 바와 같이 습차단은 농작물 오염을 감소시키며, ¹³¹I은 이러한 현상이 더욱 더 뚜렷하였다. 쌀의 총 오염에 대한 습차단의 영향은 ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ¹³¹I에 대해 각각 17%, 36%, 7%를 나타냈다. 또한 과일의 총 오염에 대한 습차단의 영향은 각각 15%, 28%, 10%를 나타냈다. 결과적으로 같은 지표위 농도에 대해 강우가 있는 경우는 농작물 표면에 침적된 핵종의 강우에 의한 제거로 강우가 없는 경우에 비해 농작물의 오염은 훨씬 낮은 농도를 나타냈다. 강우에 따른 농작물 오염의 감소는 ¹³¹I, ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr 순으로 높았다.

그림 2는 침적후 연속적으로 생산되는 우유의 경우 그림 1과 같은 조건에 대해 평가한 결과를 나타냈다. 쌀과 과일과 유사하게 강우는 명백히 우유의 오염을 크게 줄인다는 사실을 나타낸다.

그림 3은 사고기간 내내 강우가 있으며, 시간 적분 지표위 농도가 1Bq/m²인 경우 강우량에 따른 수확기에서 쌀에서의 핵종별 농도를 나타냈다. 강우량에 따른 쌀에서의 농도 감소

는 ^{131}I 에서 가장 뚜렷이 예측되며, ^{90}Sr 이 가장 영향을 적게 받는다는 사실을 나타낸다. 강우량이 매우 적은 경우 수확기에서 쌀에 대한 ^{137}Cs 과 ^{90}Sr 의 농도는 강우가 없는 경우보다 오히려 높게 나타났으며, 이러한 현상은 핵종과 농작물 잎표면과의 점착성 때문인 것으로 판단된다.

5. 결 론

개발된 동적 섭취경로모델은 사고중 강우에 의한 농작물 오염 영향을 반영하지 못하고 있으며, 본 연구를 통해 원자력 사고중 강우에 따른 농작물 오염 영향을 평가할 수 있는 모델을 재정립코자 하였다. 이를 위해 농작물에 대한 핵종별 습차단 상수를 유도하였으며, 아울러 개발된 동적 섭취경로모델에 대한 수학적 모델의 수정이 이루어졌다.

평가결과 사고중 강우는 농작물의 농도를 크게 감소시키며, 강우량에 따라 오염도는 급격히 감소하였다. 이러한 사실은 원자력 사고중 강우가 있을 경우, 기존 동적 섭취경로모델을 사용하여 평가하였을 때 그 결과는 과대 평가될 수 있다는 사실을 나타낸다. 강우량에 따른 음식물의 농도 감소는 ^{131}I 에서 가장 뚜렷하게 나타났으며, ^{90}Sr 이 가장 영향이 적었다.

본 연구의 결과물로 새롭게 수정·향상된 동적 섭취경로모델은 사고중 강우에 따른 농작물 오염을 예측함으로써 결과에 대한 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행하는 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

5. 참고문헌

- [1] 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).
- [2] 한문희 외, "방사선 환경방호 기술개발 : 방사선 비상대응 및 생체방어 기술개발", 한국 원자력연구소, KAERI/RR-1913/98 (1998).
- [3] A. C. Chamblain, "Interception and Retention of Radioactive Aerosols by Vegetation", *Atmospheric Environment* 4, 57-63 (1970).
- [4] IAEA, "Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Temperate Environment", IAEA Technical Reports Series No. 364 (1994).

표 1. 유도된 습차단 상수 평가를 위한 상수

핵종 상수	^{137}Cs	^{90}Sr	^{131}I
<i>a</i>	5.7221	8.1908	3.6236
<i>b</i>	-0.6794	-0.4902	-0.8365

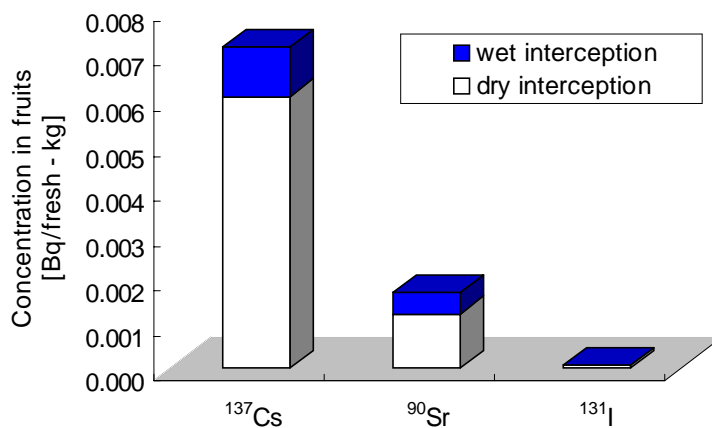
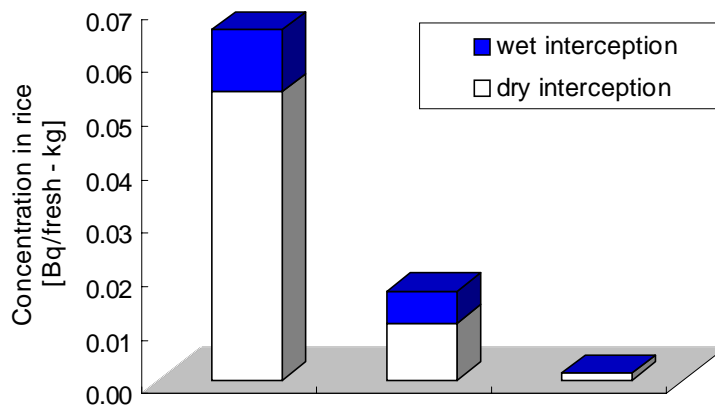


그림 1. 강우가 없는 기간과 강우 (강우량 100 mm)가 있는 기간동안 측정된 시간 적분 지표위 방사성물질의 농도가 각각 $1\text{Bq}/\text{m}^2$ 일 때 수확기에서 쌀과 과일의 핵종 농도

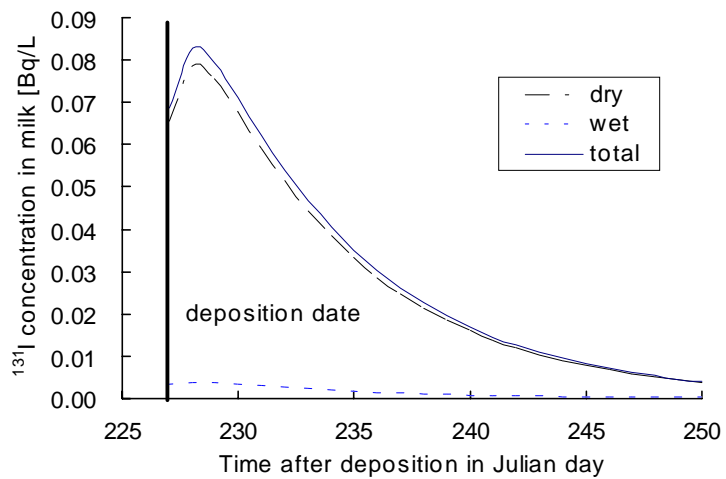
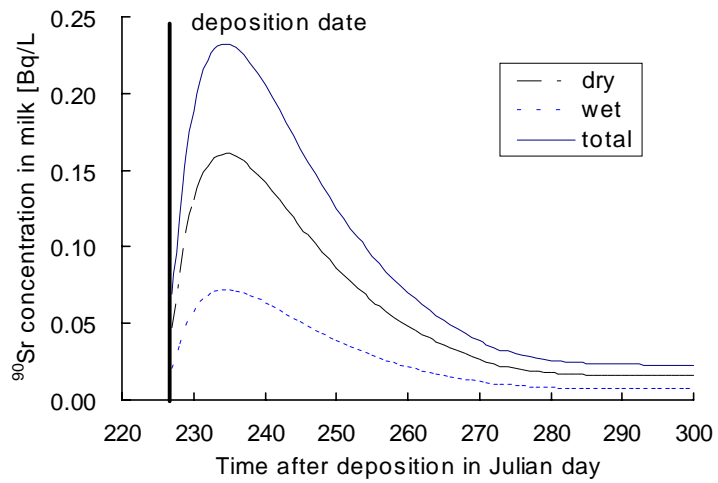
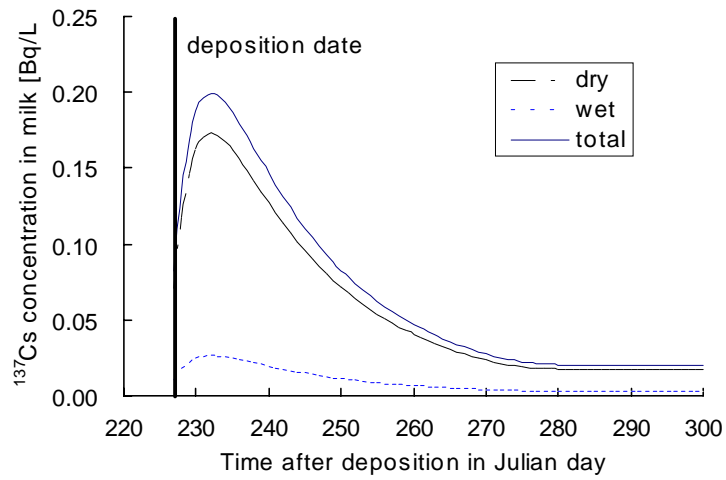


그림 2. 그림 1의 가정과 동일한 조건에서 우유에 대한 핵종농도

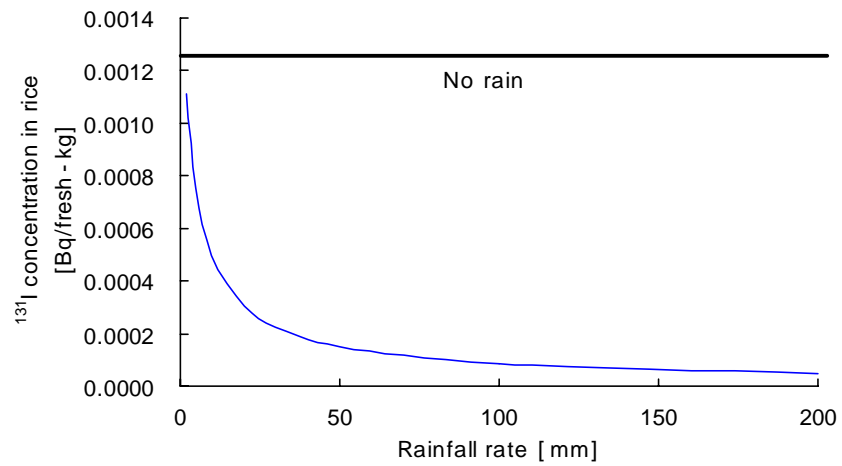
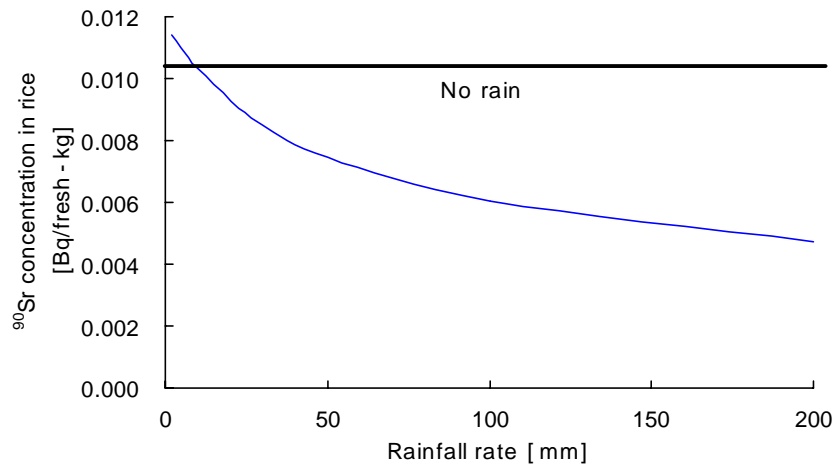
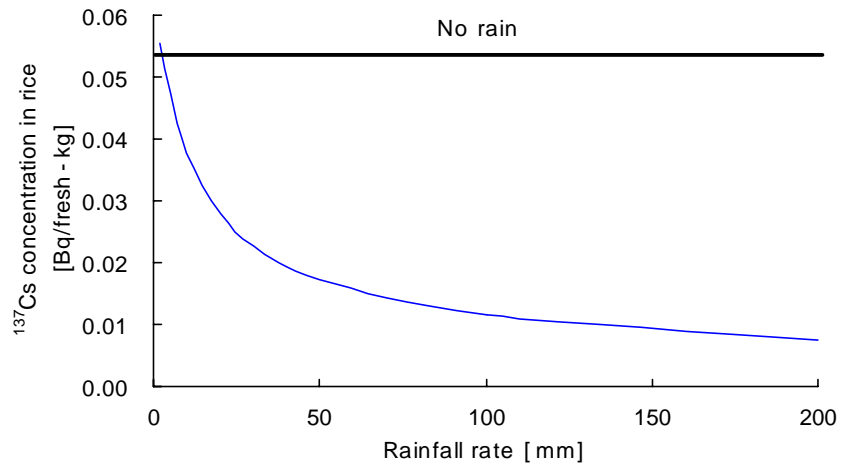


그림 3. 강우량에 따른 쌀의 오염 영향