

Influence of Radioactive Contamination to Agricultural Products Due to Dry and Wet Deposition Processes During a Nuclear Emergency

Won-Tae Hwang · Eun-Han Kim · Kyung-Suk Suh ·
Moon-Hee Han · Yong-Ho Choi and Chang-Woo Lee
Korea Atomic Energy Research Institute

원자력 사고 중 핵종의 건·습침적에 따른 농작물 오염 영향

황원태 · 김은한 · 서경석 · 한문희 · 최용호 · 이창우
한국원자력연구소

(2002년 3월 20일 접수, 2002년 9월 17일 채택)

Abstract - Combined with deposition model onto the ground of radionuclides, the influence of radioactive contamination to agricultural products was analyzed due to wet deposition as well as dry deposition from radioactive air concentration during a nuclear emergency. The previous dynamic food chain model, in which initial input parameter is only radionuclide concentrations on the ground, was improved for the evaluating of radioactive contamination to agricultural products from either radionuclide concentrations in air or radionuclide concentrations on the ground. As the results, in case of deposition onto the ground, wet deposition was more dominant process than dry deposition. While the contamination levels of agricultural products were dependent on the a variety of factors such as radionuclides and rainfall rate. It means that the contamination levels of agricultural products are determined from which is more dominant process between deposition on the ground and interception onto agricultural plants.

Key words : dry deposition, wet deposition, dynamic food chain model, rainfall rate, agricultural products

요약 - 핵종의 지표 침적 모델의 고찰과 함께 방사성물질의 공기중 농도로부터 건침적 뿐 아니라 습침적에 따른 농작물 오염 영향을 분석, 고찰하였다. 이를 위해 방사성물질의 지표 침적량으로부터 농작물의 오염을 평가하는 기존 동적 섭취경로모델을 공기중 농도 또는 지표 침적량으로부터 평가할 수 있도록 개선하였다. 평가결과, 방사성물질의 지표 침적량은 습침적에 의한 영향이 건침적에 의한 영향보다 뚜렷이 높으나, 농작물의 오염정도는 핵종, 강우율 등에 따라 다르게 나타났다. 이러한 현상은 방사성물질의 지표 침적과 농작물에로의 차단중 어느 과정이 농작물 오염에 보다 지배적으로 작용하는가에 기인한다.

중심어 : 건침적, 습침적, 동적섭식경로모델, 강우율, 농작물

서 론

원자력시설로부터 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 피폭은 인체에 방사능 위해를 주는 여러 피폭경로 중 가장 높은 것으로 나타났다[1]. 체르노빌 사고로 인한 농작물 오염

의 정도는 사고당시 강우의 유무에 따라 비록 인근 지역이라 할지라도 매우 다양하게 관측되었다.

사고시와 같이 단기간에 다량의 방사성물질이 농경지에 침적되는 경우 침적시점에 따른 농업과 환경특성으로 방사성물질의 농도는 침적시점 뿐 아니라 침적후 시간에 따라 매우 다양한 변화를 나타낸다. 이러한 환경중 방사성물질의 농도변화를 해석할 수 있는 동적 섭식경로모델[2]이 한국 원자력연구소에서 개발한 실시간 방사선피폭해석 시스템 (FADAS : Following Accident Dose Assessment System)[3]에서 고려되는 여러 피폭 경로중 농작물 섭취에 의한 내부피폭을 평가하기 위한 모듈로서 개발된 바 있다. 이 모델에서 초기 입력변수는 핵종의 지표 침적량이며, 최근의 연구 결과[4]로 사고 기간중 강우에 의한 농작물의 핵종 차단을 고려한 모델의 개선이 이루어졌다.

원자력 사고시 공기중 핵종 농도는 현재 동적 모델의 입력자료인 핵종의 지표 침적량과 마찬가지로 쉽게 측정 가능하며, 또한 실시간 방사선피폭해석시스템으로부터 예측 가능하다. 따라서, 본 연구를 통해 강우에 의한 습침적 (wet deposition) 의 고려와 함께 공기중 방사성물질의 농도로부터 농작물 오염 예측이 가능토록 기존 동적모델을 개선하였다. 이를 위해 방사성물질의 건침적 (dry deposition) 및 습침적 현상이 고찰되었으며, 개선된 모델을 사용하여 농작물 오염 영향을 다양한 각도에서 비교, 분석하였다.

대기중 방사성물질의 지표침적

원자력시설로부터 환경으로 방출된 방사성물질은 주변의 지형 및 기상조건 등에 따라 이동·확산된다. 이러한 과정동안 방사성물질은 중력 등에 의해 지표로 침적되는데 이러한 과정을 건침적이라 한다. 또한 방사성물질은 구름층 내에서 강우형성에 기여함으로써 궁극적으로 강우에 의해 지표로 침적되기도 하고, 구름층 아래에 존재하는 방사성물질은 낙하하는 강우와 접촉에 의해 지표로 침적되는데 이러한 과정을 통틀어 습침적이라 한다.

건침적에 의한 핵종의 지표오염은 지표에 근접한 공기중 농도에 거의 비례하며, 이들 공기중 핵종이 지표로 침적되는 정도는 건침적 속도 (dry deposition velocity)라는 비례상수에 의해 묘사된다.

$$F_{dry} = C_{a,dry} v_{d,dry} \Delta T_{dry} \quad (1)$$

여기서,

F_{dry} : 건침적에 의한 지표에서의 핵종 농도 (Bq/m^2)

$C_{a,dry}$: 건침적 기간중 공기중 핵종의 평균농도 (Bq/m^3)

$v_{d,dry}$: 건침적 속도 (m/sec)

ΔT_{dry} : 건침적 기간 (sec)

일반적으로 핵종의 건침적 속도는 지면으로부터 1 m의 높이에서 공기중 농도와 지표에서의 농도를 실험으로 측정하여 결정된다[5]. 건침적 속도는 지표의 조도 및 흡착 특성, 풍속의 수직변화 등과 같은 여러 주변 조건에 따라 10배 이상의 차이를 나타낼 수 있다[5]. 원자력시설로부터 환경으로 방출되는 핵종에 대한 실험 자료에 근거하여 최적 건침적 속도는 원소형 요오드에 대해 10^{-2} m/sec, 유기 요오드에 대해 10^{-4} m/sec, 직경이 약 $1 \mu m$ 인 에어로졸에 대해 10^{-3} m/sec 이 권고된다[5].

핵종의 습침적에 의한 지표에서의 농도도 식 (1)과 유사하게 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{wet} = \overline{C_{a,wet}} v_{d,wet} \Delta T_{wet} \quad (2)$$

여기서,

F_{wet} : 습침적에 의한 지표에서의 핵종 농도 (Bq/m^2)

$\overline{C_{a,wet}}$: 습침적 기간중 공기의 수직컬럼 핵종의 평균농도 (Bq/m^3)

$v_{d,wet}$: 습침적 속도 (m/sec)

ΔT_{wet} : 습침적 기간 (sec)

핵종의 건침적에 의한 지표오염은 단지 지표 부근의 공기중 농도에 영향을 받으나, 습침적의 경우에는 오염 공기의 수직 컬럼 (column) 전체에 영향을 받는다. 즉 공기의 수직 컬럼내 핵종의 평균 농도는 수학적으로 다음과 같다[6].

$$\overline{C_{a,wet}} = \frac{1}{L} \int_0^{\infty} C(x, y, z) dz \quad (3)$$

여기서,

L : 강우에 영향을 받는 오염 공기의 수직 컬럼 높이 (m)

습침적 속도는 실험 자료로부터 유도된 강우에 의한 제거율 (washout rate) Λ (1/sec)로부터 나타낼 수 있다.

$$v_{d, wet} = \Lambda L \quad (4)$$

강우에 의한 제거율은 공기의 단위 부피당 핵종 농도 (Bq/m^3)에 대한 단위 부피 및 단위 시간당 핵종의 제거율 ($Bq/m^3 \cdot sec$)로 정의되며, 강우율에 따라 다음과 같은 실험적 관계를 가진다[6].

$$\Lambda = 8.0 \times 10^{-5} I^{0.6} ; \text{원소형요오드} \quad (5)$$

$$= 1.2 \times 10^{-4} I^{0.4} ; \text{에어로졸} \quad (6)$$

여기서,

I : 강우율 (mm/hr)

강우에 영향을 받는 공기의 수직 컬럼 높이는 대략적으로 대기 혼합층 (mixing layer)의 높이에 해당한다. 대기 혼합층의 높이는 대기안정도를 포함한 기상조건 등에 따라 다양하며, 강우가 있는 기상 조건에서 많은 경우 Pasquill-Gifford의 대기안정도 등급 D (중립)를 나타내며, 이 경우 대략 500 m로 알려져 있다[6]. 따라서 강우가 있는 경우 다른 기상 조건에 관계없이 $L = 500$ m의 적용은 크게 무리가 없을 것으로 판단한다.

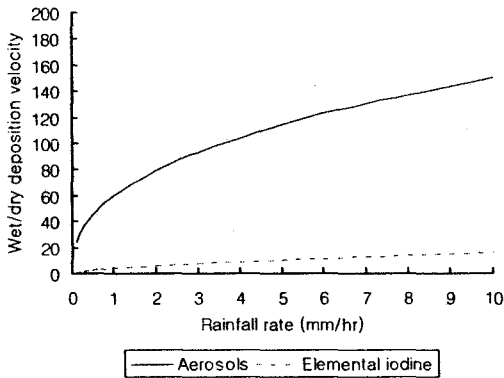


그림 1. 습침적 속도에 대한 건침적 속도의 비 (대기 혼합층 = 500 m)

그림 1은 대기의 혼합층을 500 m로 가정하여 강우율에 따른 습침적 속도에 대한 건침적 속도의 비를 나타냈다. 그림에 나타난 바와 같이 습침적 속도는 건침적 속도에 비해 훨씬 높으며, 특히 에어로졸에 대해서는 더욱 그러하다. 예로 1

mm/hr의 강우를 가정할 경우 습침적 속도는 건침적 속도에 비해 에어로졸의 경우 약 60배, 원소형 요오드의 경우 약 4배가 높다.

결과 및 고찰

원자력시설의 사고시 공기중 핵종 농도는 환경에서 쉽게 측정할 수 있으며, 동적모델의 초기 입력변수로 핵종의 지표 침적량 (Bq/m^2) 또는 공기중 농도 (Bq/m^3)를 통해 농작물 오염 예측이 가능하도록 개선하였다. 개선된 모델을 사용하여 다양한 가상 사고시나리오에 대해 농작물의 오염 영향을 고찰하였다. 핵종의 침적시점은 대부분 농작물이 왕성하게 성장하는 8월 15일 (벼와 목초의 성장기: 5월 1월 ~ 9월 30일)로 가정하였다. 동적모델은 환경 구성요소를 각 구간으로 나누고 구간간 핵종의 이동율을 사용하여 시간에 따른 핵종농도를 예측하는 구간모델 (compartment model)이다[2]. 동적모델내 많은 변수는 우리나라의 농업, 환경적 특성을 고려하였으며, 상세한 모델 및 적용 변수값은 참고문헌 [2]에 잘 기술되어 있다.

강우에 따른 오염 공기의 수직 컬럼내 평균 핵종 농도는 측정하기 쉽지 않다. 지표는 방사성물질의 반사체로 작용하기 때문에 건침적의 경우와 동일하게 지표로부터 일정 높이에서 측정된 공기중 농도를 적용해도 큰 오차가 없을 것이다.

그림 2는 다음 가정하에 예측된 강우율에 따른 침적 핵종량과 쌀의 수확기에서 농도를 보여준다.

- 1) 방사성물질의 환경 방출이 하루동안 지속되며, 전 방출기간에 대해 강우가 있다.
- 2) 각 핵종에 대해 측정된 공기중 농도는 $1 Bq/m^3$ 이다.

그림에서 나타난 5 mm/hr 이내의 강우율 (총 강우량: 120 mm)에 대해서 ^{137}Cs 과 ^{90}Sr 은 ^{131}I 보다 높은 습침적 속도로 지표 침적량이 상대적으로 많다. 3가지 핵종 모두 강우율의 증가에 따라 지표 침적량은 증가하나 쌀에서의 농도는 핵종에 따라 상이한 변화를 나타낸다. ^{137}Cs 과 ^{131}I 의 경우 쌀에서의 농도는 0.5 mm/hr의 강우율 (총 강우량: 12 mm)에서 최대치를 나타낸 후 강우율의 증가에 따라 지표 침적량은 증가함에도 불구하고 서서히 감소하는 것을 보여준다. 반면 ^{90}Sr 의 경우 쌀에서의 농도는 강우율에 따라 1 mm/hr 이하 (총 강우량: 24 mm)에서는 급격하게 증가하며 그 이상의 강우율에서도 서서히 증가하는 것을 보여준다. 이와 같이 강우율에 따른

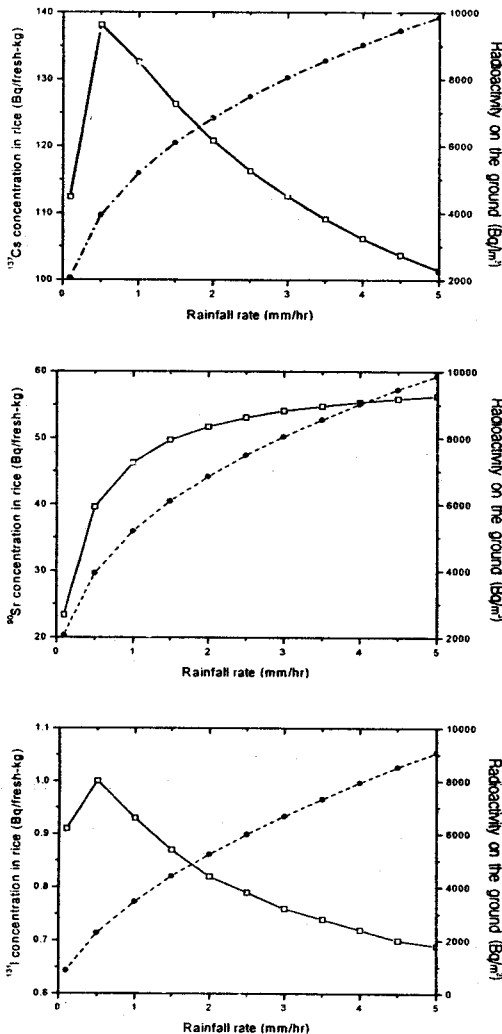


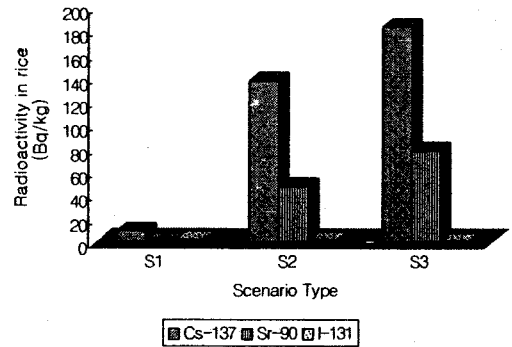
그림 2. 강우율에 따른 침적 핵종량과 쌀의 수확기에서 농도 (침적시점 : 8월 15일, 공기중 농도 : 1 Bq/m³, 방출 및 강우기간 : 1일)

쌀에서의 핵종 농도 변화는 핵종의 습침적과 농작물에로의 습차단 (wet interception)간 상호관계에 기인한다. 이전 연구의 결과[6]에서 핵종의 동일 지표 침적량에 대해 강우량은 농작물 오염을 감소시키며, 특히 강우량에 따른 감소효과는 ¹³¹I, ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr 순으로 높았다. 따라서 강우율에 따른 농작물내 핵종별 농도는 습침적과 습차단중 어느 과정이 오염에 보다 지배적으로 작용하는가에 따라 달리 나타났다.

건침적과 습침적에 의한 농작물 오염 영향의 상호비교를 고찰하기 위해 3가지 가상 사고 시나

리오를 구성하였으며, 핵종의 환경방출은 이들 동안 지속된다고 가정하였다.

- 1) S1 : 총 방출기간동안 강우가 없으며, 단지 건침적에 의해 농작물 오염
- 2) S2 : 하루동안은 건침적, 나머지 하루동안은 습침적에 의해 농작물 오염
- 3) S3 : 총 방출기간동안 지속적으로 1 mm/hr의 강우로 습침적에 의해 농작물 오염



- S1 : 총 방출기간동안 강우가 없으며, 단지 건침적에 의해 오염
 S2 : 하루동안은 건침적, 다른 하루동안은 습침적 (강우율: 1mm/hr)에 의해 오염
 S3 : 총 방출기간동안 지속적으로 습침적 (강우율: 1mm/hr)에 의해 오염

그림 3. 가상 사고 시나리오에 대한 수확기에서 쌀에서의 핵종 농도 (침적시점 : 8월 15일, 방출기간 : 2일, 공기중 핵종의 평균농도 : 1 Bq/m³)

공기중 핵종의 평균 농도는 건침적과 습침적 기간동안 동일한 1 Bq/m³로 가정하였다. 그림 3은 3가지 가상 사고 시나리오에 대한 수확기에서 쌀에서의 핵종 농도를 보여준다. ¹³⁷Cs과 ⁹⁰Sr의 경우, 습침적에 의한 오염 영향이 건침적에 의한 오염 영향보다 훨씬 우세하다는 사실을 나타낸 반면, ¹³¹I의 경우에는 건침적에 의한 영향이 우세하다는 사실을 보여준다. 그림 4는 그림 3과 동일한 조건 및 가정에 대해 연속으로 생산되는 우유에서의 핵종 농도를 보여준다. 쌀의 경우와 마찬가지로 우유내 ¹³⁷Cs과 ⁹⁰Sr의 농도는 습침적에 의한 영향이, ¹³¹I의 농도는 건침적에 의한 영향이 우세하다는 사실을 보여준다. 핵종에 따른 농작물 오염 영향의 차이는 그림 1에서 이미 설명한 바와 같이 핵종의 지표 침적량과 농작물에의 핵종 차단과의 관계로부터 기인한다. 예로 1 mm/hr의

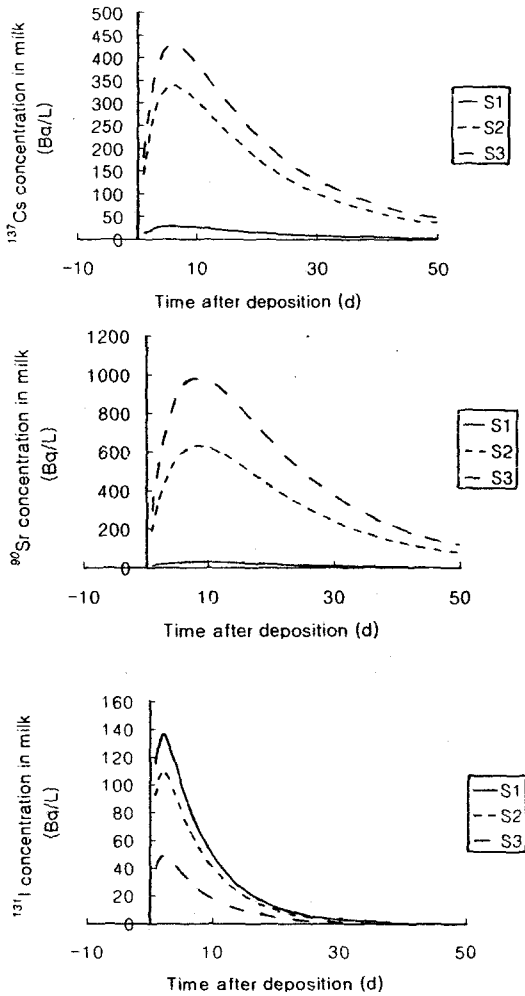


그림 4. 그림 3과 동일한 조건 및 가정에 대해 연속으로 생산되는 우유내 핵종 농도

강우율에 대해 ^{137}Cs 과 ^{90}Sr 의 습침적 속도는 건침적 속도에 비해 약 60배 정도 높으며, 습차단에 의한 농도 감소는 단지 수 배 정도에 지나지 않는다. 반면 ^{131}I 의 습침적 속도는 건침적 속도에 비해 약 4배 정도에 지나지 않는 반면, 습차단에 의한 농도 감소가 상대적으로 우세하다.

결 론

방사성물질의 지표 침적 모델의 고찰과 함께 공기중 농도로부터 건침적 뿐 아니라 습침적에 따른 농작물 오염 영향을 분석, 고찰하였다. 원자력시설의 사고시 공기중 핵종 농도는 환경에서

쉽게 측정할 수 있으며, 동적모델의 초기 입력변수로 핵종의 지표 침적량 또는 공기중 농도를 통해 농작물 오염 예측이 가능하도록 개선하였다.

평가결과, 핵종의 지표 침적량은 습침적에 의한 영향이 건침적에 의한 영향보다 뚜렷이 높으나, 농작물의 오염정도는 핵종 및 강우율에 따라 다르게 나타났다. 이러한 현상은 핵종의 지표 침적과 농작물에의 차단중 어느 과정이 오염에 보다 지배적으로 작용하는가에 기인한다. 적용 결과는 가상 사고 시나리오에 대한 부분적 평가 및 분석 결과이며, 이는 핵종에 따른 침적시점, 침적기간, 농작물, 강우량 및 강우율 등 여러 요소에 따라 다를 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행하는 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. IAEA, "The International Chernobyl Project : Assessment of Radiological Consequences and Evaluation of Protective Measures", Technical Report (1991).
2. 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).
3. 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).
4. 황원태, 김은한, 한문희, 최용호, 이한수, 이창우, "원자력 사고 중 강우에 의한 음식물 오염 영향을 고려한 역동학적 섭취경로모델 개선", *대한방사선방어학회지*, 27(1) (2002).

5. John E. Till and H. Robert Meyer, *Radiological Assessment : A Textbook on Environmental Dose Analysis*, NUREG/CR-3332, ORNL-5968, U. S. NRC (1983).
6. R. O. Chester and C. T. Garten, Jr. "The Calculation of Wet Deposition from Radioactive Plumes", *Nuclear Safety*, Vol. 22, No. 3 (1981).