

## Deposition Velocity of Iodine Vapor ( $I_2$ ) for Radish Plants and Its Root-Translocation Factor : Results of Experimental Exposures

요오드 증기( $I_2$ )의 무 작물체에 대한 침적속도 및 뿌리 전류계수 : 피폭실험 결과

Yong-Ho Choi<sup>1)</sup>, Kwang-Muk Lim, In Jun, Doo-Won Park and Dong-Kwon Keum  
Korea Atomic Energy Research Institute, 1045 Daedeokdaero, Yuseong-gu, Daejeon

최용호<sup>1)</sup>, 임광목, 전인, 박두원, 금동권  
한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045

(Received June 26, 2009 / Revised January 12, 2010 / Approved March 08, 2010)

### Abstract

In order to measure the deposition velocity of  $I_2$  vapor for radish plants and its translocation factor for their roots, radish plants were exposed to  $I_2$  vapor for 80 min. at different growth stages between 29 and 53 d after sowing. The exposure was performed in a transparent chamber during the morning time. Deposition velocities ( $ms^{-1}$ ) were on the whole in the range of  $1.0 \times 10^{-4} \sim 2.0 \times 10^{-4}$  showing an increasing tendency with an increase in the biomass density. The results showed some agreement with existing reports that a higher relative humidity would lead to a higher deposition velocity. The acquired deposition velocities were lower than by factors of several tens than some field measurements probably due to a very low wind speed (about  $0.2 ms^{-1}$ ) in the chamber. Translocation factors (ratio of the total iodine in the roots at harvest to the total plant deposition), estimated in a more or less conservative way, were  $1.3 \times 10^{-3}$  for an exposure at 29 d after sowing and  $5.0 \times 10^{-3}$  for an exposure at 53 d after sowing. In using the present experimental data, meteorological conditions and chemical and physical forms of iodine need to be carefully considered.

**Key words** :  $I_2$  vapor, Exposure, Radish, Deposition velocity, Translocation factor, Root

### 요 약

무에 대한  $I_2$  증기의 작물체 침적속도와 뿌리 전류계수를 측정하기 위하여 파종 후 29 일에서 53 일 사이에 생육시기별로 작물체를  $I_2$  증기에 80 분 간 피폭시켰다. 피폭은 오전 중에 투명한 상자 내에서 수행되었다. 침적속도( $ms^{-1}$ )는 대체로  $1.0 \times 10^{-4} \sim 2.0 \times 10^{-4}$ 의 범위로 생육밀도가 높을수록 증가하는 경향이였다. 또한 상대습도가 높을 경우 값이 커진다는 기존 보고와 어느 정도 일치하였다. 본 침적속도는 몇몇 야외 측정치보다 수 십 배 정도 낮았고 이는 주로 피폭상자 내의 낮은 풍속( $0.2 ms^{-1}$  내외)에 기인하는 것으로 추정되었다. 뿌리 전류계수(작물체 총침적량에 대한 수확시 뿌리 내 함유량의 비)는 다소 보수적으로 계산하여 파종 후 29 일 피폭에서  $1.3 \times 10^{-3}$ , 파종 후 53 일 피폭에서는  $5.0 \times 10^{-3}$ 이었다. 본 실험결과의 이용에 있어

1) Corresponding Author. E-mail : yhchoi1@kaeri.re.kr

서는 기상 조건, 요오드의 물리화학적 형태 등에 유의할 필요가 있다.

중심단어 : I<sub>2</sub> 증기, 피폭, 무, 침적속도, 전류계수, 뿌리

## I. 서론

요오드는 방사성 폐기물에 대한 환경영향 평가에 있어서 주목해야 할 원소 중 하나이다. 이와 관련하여 중요한 방사성 요오드 동위원소는 <sup>125</sup>I, <sup>131</sup>I 및 <sup>129</sup>I 등이다. <sup>125</sup>I와 <sup>131</sup>I는 병원 에서 진단 및 치료용으로 많이 사용되고 있다[1]. 또한 핵분열 산물인 <sup>131</sup>I은 Chernobyl과 같은 원자력 사고시에 대량 방출 되는 핵종이다[2]. <sup>129</sup>I도 핵분열 산물로서 반감기가  $1.6 \times 10^7$  년으로 매우 길어 원전 방사성 폐기물 처분의 장기적 안전성 평가에서 중요시 되고 있다[3~5]. 이러한 방사성 요오드 핵 종들을 함유하는 폐기물의 보관, 운반, 처리, 처분 또는 저장 중에 예기치 못 한 화재나 폭발 사고 등이 발생하면 이 핵종 들이 대기로 방출될 수 있을 것이다.

대기로 방출된 요오드는 기체상과 입자상, 두 가지 형태로 공기 중에 존재한다[2,6]. 이 둘 중 기체상 요오드로서 중요한 것은 원소상 요오드(I<sub>2</sub>, elemental iodine)와 CH<sub>3</sub>I와 같은 유기 요오드이다[2,7,8]. 이들은 휘발성 물질이므로 각종 용기나 구조물의 자연적인 손상에 의해서도 대기로 방출될 가능성이 있다. 대기에 존재하는 기체상이나 입자상 요오드는 지상의 작물체 표면에 침적하여 작물체에 흡수되고 작물체 내에서 전류하여 열매나 뿌리 등과 같은 가식부위에 함유될 수 있다 [7~11].

방사성 물질이 작물체에 침적하는 정도는 작물체 침적속도 ( $V_g$ , ms<sup>-1</sup>)로 평가될 수 있다[7, 12]. 기체상 요오드 중에서 I<sub>2</sub> 증기는 반응성 기체로서 CH<sub>3</sub>I 증기에 비해  $V_g$  값이 훨씬 큰 것으로 알려져 있다[2,8]. 작물체에 침적한 방사성 핵종이 가 식부위로 이동하는 정도는 작물체 침적량에 대한 수확시 가 식부위 함유량의 비로 정의되는 전류계수로 나타낼 수 있다 [13,14]. I<sub>2</sub> 증기의 작물체 침적이나 가식부위로의 전류에 대 해 조사한 사례는 해외의 경우 다수 있지만 우리나라에서는 벼에 대한 최용호 등[11]의 보고와 배추에 대한 이한수 등[15] 의 보고 외에는 찾아보기 어렵다.

본 연구에서는 한국인이 많이 먹는 채소로서 전국 각지에 서 재배되고 있는 무에 대해 안정 I<sub>2</sub> 증기(<sup>127</sup>I<sub>2</sub>) 피폭실험을 수 행하여 I<sub>2</sub> 증기의 작물체 침적속도와 수확시 뿌리로의 전류계 수를 조사하였다. 이를 위해 무의 생육단계별로 피폭 상자 내 에서 작물체를 안정 I<sub>2</sub> 증기에 피폭시키고 피폭 직후 및 수확

시에 작물체를 채취하여 요오드 농도를 측정하였다.

## II. 재료 및 방법

### 가. 실험작물 육성

시중에서 구입한 백자무의 종자를 8 월 24 일에 흙이 담긴 15 개의 플라스틱 포트(지름 30 cm, 높이 30 cm)에 파종하여 작물체를 육성하였다. 포트 당 6~7 립의 종자를 파종하였고 출아한 후 솟아서 포트 당 한 개체만 자라게 하였다. 재배토 양은 pH 5.1, 유기물 함량 1.6 %인 사질양토였다. 포트 15 개 중에서 8 개는 피폭용, 2 개는 대조용(control), 나머지는 생 장 조사용으로 하였다. 포트들은 야외에 서로 1 m 이상의 거 리를 두고 배치하였다.

파종 2 일 전에 원예용 복합비료(N : P : K = 13 % : 8 % : 7 %) 7.1 g, 소석회 5.9 g과 부숙퇴비 5.9 g을 기비로 살포하고 상층도와 섞어 주었다. 이후 작물의 생육중인 10 월 9 일에 상기의 복합비료를 포트 당 4.7 g씩 추가로 공급하였고 병충 해 방제를 위해 2~3 회에 걸쳐 살충제와 살균제를 뿌려 주었 다. 작물이 시들지 않도록 2~3 일에 한 번씩 충분히 급수하 였다.

### 나. 작물체 I<sub>2</sub> 증기 피폭

파종한 무가 출아한 후 수확하기 전까지 4 회에 걸쳐 매회 두 포트의 작물체를 피폭상자 내에서 80 분 간 I<sub>2</sub> 증기에 피폭 시켰다. 피폭 시간을 80 분으로 한 것은 이 정도면 방사성 폐 기물과 관련한 방사성 I<sub>2</sub> 증기 방출사고 시 플룸이 통과하기 에 충분하고 또한 피폭상자 내에서 끊임없이 미세하게 변화 하는 각종 요인들(풍속, I<sub>2</sub> 증기의 농도 분포, 공기와 엽면의 접촉 정도 등)의 영향이 평균되는 데에도 충분할 것으로 판단 했기 때문이다. 한편, 피폭시간이 이보다 다소 짧거나 길어도 I<sub>2</sub> 증기의 작물체 침적량은 I<sub>2</sub> 증기의 공급량에 거의 직선적으 로 비례하여 감소하거나 증가할 것으로 예상되므로 조사코자 하는 인자값에는 큰 차이가 없을 것으로 사료된다. Nakamura와 Ohmomoto[8]는 피폭상자 실험에서 이와 같은 비 례 관계를 확인하였다.

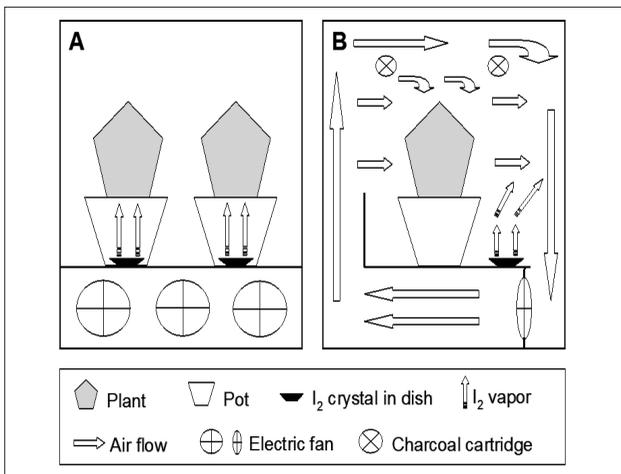
피폭일자는 9 월 22 일, 9 월 24 일, 10 월 7 일 및 10 월 16 일(각각 파종 후 29, 31, 44, 53 일에 해당)이었고 피폭 시작

시각은 오전 10 시 경이었다. 피폭상자는 한 면이 여단이 문으로 된 6면체의 투명한 플라스틱 상자라 가로, 세로, 높이가 각각 118 cm, 92 cm, 150 cm였다. 상자 내부에 온·습도 센서와 조도 센서를 부착하여 매 8 분마다 측정하였고 풍속 센서도 부착하여 수시로 풍속을 점검하였다. 한 쪽 벽면에는 작물체의 최상부보다 10~20 cm 이상 높은 부위에 2 개의 활성탄 카트리지를 부착, 교체할 수 있게 하여 외부로부터 펌프를 가동시켜 상자 공기 중  $I_2$  증기를 80 분 간 연속적으로 채집하였다. 카트리지가 당 8 분씩 4 l (분 당 0.5 l) 의 공기를 통과시켰다.

그림 1은 작물체의  $I_2$  증기 피폭 방법을 개략적으로 보여주고 있다. 작물체를  $I_2$  증기에 피폭시키기 위해서 안정 요오드( $^{127}I$ ) 크리스탈을 두 개의 시약 접시에 같은 양으로 나누어 담은 후 피폭상자 내 포트의 바닥 높이에 놓아 승화시키고 팬을 이용하여 상자 내에서 순환시켰다. 여기서 순환 방향은 발생된  $I_2$  증기가 작물체와 바로 접촉하지 않고 상자 내부의 공기와 잘 섞인 다음에 작물체에 침적되도록 하였다[8,11,16]. 팬의 가동에 따른 공기의 순환 속도는  $0.2 \text{ ms}^{-1}$  내외였다. 크리스탈의 투여량은 9 월 22 일 피폭에서는 300 mg이었으나 작물체에 요오드의 영향으로 추정되는 이상 징후가 있었으므로 이 후에는 60~80 mg으로 줄였다. 승화된 크리스탈의 양은 투여량의 50~90% 정도였다. 상자 내부의 온도상승을 억제하기 위하여 두 개의 포트 주위에 아이스 박스용 냉동팩을 12 개 놓았다.

**다. 시료 채취 및 분석**

피폭 종료 후 즉시 피폭상자에서 두 포트의 작물체를 모두 꺼내어 한 포트의 작물체는 바로 채취하고 나머지 한 포트의



**Fig. 1. Schematic diagram showing how to expose radish plants to  $I_2$  vapor in the exposure box. A and B are views from the front and the left, respectively.**

작물체는 야외에서 육성한 다음 통상적인 수확기 무렵인 11 월 13 일(파종 후 81 일)에 채취하였다. 채취한 작물체는 경엽부, 상근부(지상으로 돌출된 부분), 하근부의 세 부위로 나누어 생체중을 측정하였다.

생체중이 측정된 부위별 시료는 즉시 잘게 잘라 잘 섞은 다음 플라스틱 캡슐에 2 g 내외씩 담아 한국원자력연구원의 하나로를 이용한 중성자방사화 분석법으로 요오드 농도를 측정하였다. 여기서 이용된 열중성자의 선속밀도는  $1.7 \times 10^{13} \text{ n cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ , 조사 시간은 60 s, 냉각 시간은 300 s였다. 냉각 과정을 거친 시료 내  $^{128}I$ ( $^{127}I$ 의 중성자방사화에 의해 생성)의 농도를 감마스펙트로메트리법으로 측정하여  $^{127}I$ 의 농도를 구하였다. 이 측정 시스템(EG&G ORTEC)은 채널 수 8192 개의 MCA와 이에 연결된 HPGe 디텍타로 구성되어 있었다. 활성탄 시료에 대해서도 동일한 방법으로 측정하여 피폭상자 내 공기중 요오드 농도를 구하였다. 본 중성자방사화 분석법의 최소검출가능농도(MDA)는 0.18 ppm 정도였다.

**라. 인자값 계산**

피폭 상자 내 공기 시료와 피폭 직후 및 수확시의 작물체 시료 내 요오드 농도 측정 결과로부터  $I_2$  증기의 작물체 침적 속도( $V_g$ ,  $\text{ms}^{-1}$ )와 뿌리 전류계수( $T_f$ , dimensionless)를 각각 식 (1) 및 (2)와 같이 구하였다[7,11~14].

$$V_g = \frac{D_f}{C_f \times E_f} \dots\dots\dots (1)$$

- 여기서,
- $D_f$  :  $I_2$ 의 작물체 침적밀도 ( $\text{gm}^{-2}$ )
- $C_f$  : 피폭상자 내 공기중  $I_2$  농도 ( $\text{gm}^{-3}$ )
- $E_f$  : 피폭시간 (s)

$$T_f = \frac{R_f}{P_f} \dots\dots\dots (2)$$

- 여기서,
- $R_f$  : 수확시 두 뿌리 내 요오드 총량 (g)
- $P_f$  : 피폭 종료시 작물체 내 요오드 총량 (g)

식 (1)에서  $D_f$  는  $1 \text{ m}^2$ 에서 자라고 있는 작물체에 대한 침적량에 해당한다. 본 실험에서는 약  $1 \text{ m}^2$  ( $1.18 \text{ m} \times 0.92 \text{ m}$ )에 두 개체를 놓고 피폭시켰으므로  $D_f$  계산시  $\text{m}^2$  당 작물체 침적량은 피폭 종료 직후 채취한 한 개의 작물체 내 요오드 함유량의 두 배로 하였다. 한편  $C_f$  는 피폭 시간 동안의 평균

농도로 하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 가. 피폭상자 내 기상 및 공기중 I<sub>2</sub> 농도

피폭 시간 동안의 피폭 상자 내 기상 조건과 공기중 I<sub>2</sub> 증기 농도는 표 1과 같이 조사되었다.

기온은 피폭이 진행됨에 따라 조금씩 올라가 80 분 간 최대 8 °C 정도 상승하였다. 이것은 주로 투명한 상자 내부에서의 온실효과에 의한 것으로 보인다. 피폭 시간 동안의 평균 기온은 피폭시기에 따라 17.0~24.3 °C 의 범위로 비교적 강한 일사로 인하여 10 월 7 일 피폭에서 가장 높았다. 상대습도는 온도와는 정반대로 10 월 7 일 피폭에서 60.5 %로 가장 낮았고 10 월 16 일 피폭에서 81.1 %로 가장 높았다. 이와 같은 상대습도는 상자 내부의 기온 상승과 작물체의 증산작용에 따른 수분 공급에 크게 좌우되었을 것으로 판단된다. 이런 정도의 습도는 9 월 하순에서 10 월 중순 사이에 우리나라에서 자주 나타나고 있다[17]. 상자 내 평균 조도는 20.0~45.1 klux의 범위로 구름이 다소 낀 가을철에 흔히 접할 수 있는 수준이었으나 외부보다는 약간 낮았을 것으로 추정된다. 이상으로 볼 때 상자 내 기상 조건은 우리나라에서 통상 가을 무의 생육기에 나타나는 기상 조건과 크게 다르지 않다고 할 수 있겠다.

피폭상자 내 공기중 I<sub>2</sub> 농도는 피폭 시기에 따라 평균 7.4 × 10<sup>-5</sup>~1.1 × 10<sup>-4</sup> g l<sup>-1</sup>의 범위로 피폭 시기 간에 대체로 비슷한 수준을 유지하였다. 9월 22일 피폭에서는 이후의 피폭들에 비해 I<sub>2</sub> crystal의 투여량이 4~5 배나 많았음에도 불구하고 공기중 I<sub>2</sub> 농도가 그리 높지 않았다. 피폭상자 내 공기중 I<sub>2</sub> 농도는 I<sub>2</sub>의 승화량, I<sub>2</sub>의 내벽 흡착 정도, 이전에 흡착된 I<sub>2</sub>의 탈착 정도, 외기로의 누출량, 작물체에 의한 흡수량 등에 의해 결정될 것으로 보인다.

#### 나. 부위별 성장곡선

그림 2는 파종 후 시간 경과에 따른 무의 뿌리와 경엽부의 생체중 변화를 보여 주고 있다. 파종 후 약 한 달 간은 뿌리의

**Table 1. Meteorological conditions and air concentrations of I<sub>2</sub> in the exposure box.**

Date of exposure	Temperature (°C)		Rel. humidity (%)		Solar radiation(klux)		I <sub>2</sub> conc. <sup>a</sup> in air(g/l)
	Range	Mean	Range	Mean	Range	Mean	
Sep. 22	19.9-24.6	21.8	66.8-69.7	67.8	17.5-35.3	28.8	1.1 × 10 <sup>-4</sup>
Sep. 24	20.2-23.8	22.0	63.7-74.4	67.3	16.2-70.1	37.9	7.4 × 10 <sup>-5</sup>
Oct. 7	21.6-29.4	24.3	57.3-63.4	60.5	17.4-84.9	45.1	7.6 × 10 <sup>-5</sup>
Oct. 16	15.8-18.5	17.0	80.5-81.3	81.1	17.8-22.0	20.0	9.0 × 10 <sup>-5</sup>

<sup>a</sup> Average for the whole exposure time.

발육이 매우 미미하였으므로 경엽부와 뿌리를 분리하지 않고 작물체 전체 무게를 측정하였다.

뿌리의 생체중은 파종 후 약 한 달 간은 매우 느리게 증가하다가 이후에는 수확 시까지 거의 직선적으로 매우 빠르게 증가하였다. 경엽부의 생체중은 출아 후 수일 경과 시부터 수확하기 한 달 전까지 비교적 빠르게 증가하다가 이후 수확 시까지 서서히 감소하는 경향이였다. 뿌리의 지속적인 비대로 인하여 파종 후 약 45 일 경과 시부터 뿌리의 생체중이 경엽부를 초과하기 시작하였다.

#### 다. I<sub>2</sub> 증기의 작물체 침적속도

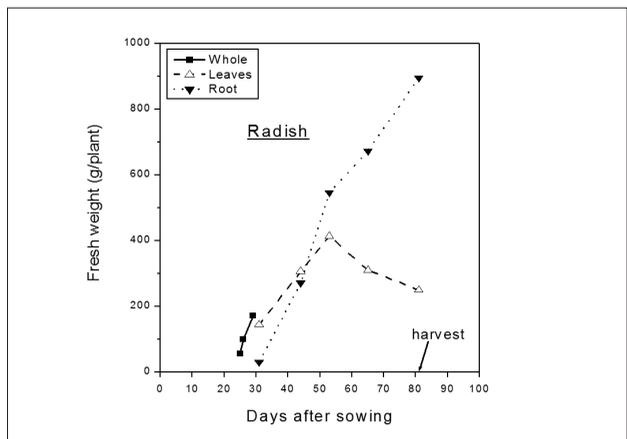
표 2는 피폭이 끝난 직후 채취한 작물체 부위별 요오드 농도와 이로부터 구한 I<sub>2</sub> 증기의 작물체 침적속도(V<sub>g</sub>, ms<sup>-1</sup>)를 나타내고 있다. 여기서 하근부(지하에 묻혀 있는 부분)는 피폭에 노출되지 않았으므로 조사 대상에서 제외하였다. 또한 9 월 22 일과 9 월 24 일 피폭에서는 지상으로 나와 있는 뿌리 부분(상근부, upper roots)이 거의 없었으므로 경엽부만 조사하였다.

경엽부의 경우 I<sub>2</sub> 크리스탈의 투여량이 특히 많았던 9 월 22 일 피폭에서 타 피폭에 비해 요오드 농도가 6~12 배 정도 높았다. 이로 인해 9 월 22 일에 피폭된 작물체에서는 요오드의 독성으로 추정되는 이상 징후가 있었으나 심각한 생육 장

**Table 2. Summarized experimental results for the deposition of I<sub>2</sub> vapor to radish plants at their different growth stages.**

Date of exposure	Plant iodine concentration (ppm) <sup>a</sup>		Plant deposition velocity of I <sub>2</sub> (V <sub>g</sub> , m s <sup>-1</sup> )		
	Leaves	Upper roots	Leaves	Upper roots	Total
Sep. 22	7.3 × 10 <sup>2</sup>	-	3.9 × 10 <sup>-4</sup>	-	3.9 × 10 <sup>-4</sup>
Sep. 24	1.2 × 10 <sup>2</sup>	-	9.6 × 10 <sup>-5</sup>	-	9.6 × 10 <sup>-5</sup>
Oct. 7	6.1 × 10 <sup>1</sup>	2.3 × 10 <sup>0</sup>	1.0 × 10 <sup>-4</sup>	1.3 × 10 <sup>-6</sup>	1.0 × 10 <sup>-4</sup>
Oct. 16	9.9 × 10 <sup>1</sup>	3.6 × 10 <sup>0</sup>	1.9 × 10 <sup>-4</sup>	2.7 × 10 <sup>-6</sup>	1.9 × 10 <sup>-4</sup>

<sup>a</sup> Average for the whole exposure time.



**Fig. 2. Growth curves of radish plants.**

해로 이어지지 않는 않았다. 10 월 7 일과 10 월 16 일 피폭에서 상근부 내 요오드 농도는 경엽부에 비해 수십 배 정도 낮았다. 이것은 상근부로의 공기 흐름이 경엽부에 의해 많이 차단되었고 또한 상근부에는 기공의 발달이 경엽부에 비해 미미하였기 때문인 것으로 보인다.

위와 같은 농도 측정결과에 따라  $I_2$  증기는 거의 전적으로 경엽부에 침적되었고 상근부로의 침적은 무시할 수 있는 것으로 나타났다. 즉, 경엽부에 대한 침적속도가 곧 작물체 전체에 대한 침적속도인 것으로 조사되었다. 작물체 침적속도는 피폭시기에 따라  $9.6 \times 10^{-5} \sim 3.9 \times 10^{-4}$ 의 범위로 9 월 22 일 피폭에서 생육밀도가 가장 낮았음에도 불구하고 타 피폭에 비해 2 배 이상 높았다. 이것은 요오드 독성으로 인한 생물학적 이상으로 외부 환경요인에 대한 조절능력을 상실하여 공기로부터의  $I_2$  증기 흡수율이 크게 증가하였기 때문인 것으로 추정된다.

작물체의 이상 징후가 관찰되지 않았던 세 번의 피폭에서는 침적속도가  $9.6 \times 10^{-5} \sim 1.9 \times 10^{-4}$ 의 범위로 10 월 16 일 피폭에서 나머지 두 피폭에 비해 2 배 정도 높았다. 이것은 10 월 16 일 피폭에서 습도와 작물체의 생육밀도가 가장 높았기 때문인 것으로 사료된다. Barry와 Chamberlain[7]은 습도가 90 % 이상일 때는 15 % 이하일 때에 비해 bean의 잎에 대한  $I_2$  증기의 침적이 10~20 배 증가하였다고 보고하였다. 그들은 이것을 기공의 개폐와 밀접한 관련이 있는 것으로 보았다. 한편, 식물의 기공은 조도가 높을수록 많이 열리는 것으로 알려져 있다[18]. 그러나 10 월 7 일 피폭에서는 조도가 가장 높았지만 침적속도는 그다지 높지 않았다. 이는 높은 조도로 인하여 상자 내부의 온도가 크게 상승하였고 이에 따라 상대습도가 가장 낮아졌기 때문인 것으로 추정된다.

위와 같이 조사된 무에 대한  $I_2$  증기의 침적속도는 최용호 등[11]이 벼에 대해 본 연구와 비슷한 방법으로 조사한 것과 대체로 유사한 수준이다. 한편 이한수 등[15]이 역시 피폭상자 실험을 통하여 측정한 배추에 대한  $^{125}I_2$  증기의 작물체 침적속도는  $3.6 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-2}$ 로 본 실험 결과보다 대체로 수십 배 컸다. 이것은 피폭상자 내 공기의 순환 경로와 같은 피폭 조건의 차이에 크게 기인하는 것으로 추정된다. 또한 침적속도는 작물의 종류에 따라서도 달라질 수 있을 것이다. Tschiersch 등[19]이 피폭상자를 이용하여 일곱 가지 엽채류에 대해  $^{131}I_2$  증기 피폭실험을 수행하고 조사한  $I_2$  증기의 작물체 침적속도는 작물의 종류에 따라  $1.6 \times 10^{-4} \sim 1.6 \times 10^{-3}$ 의 범위로 10 배의 변이를 보였다. 이는 주로 작물에 따라 기공의 열림이나 잎의 발육 형태 등이 다르기 때문인 것으로 설명되었다.

Voillequé와 Keller[20]는 Pelletier 등[21]이 평균 풍속  $6 \text{ ms}^{-1}$  인 야외에서 수행한  $I_2$  증기의 작물체 침적실험 결과에 입각하여  $I_2$  증기의 작물체 침적속도를  $1.0 \times 10^{-2}$  정도로 보았다. 또한 Voigt[22]에 의하면 Chernobyl 사고시 덴마크의 목초지에서 조사된  $I_2$  증기의 작물체 침적속도는  $1.8 \times 10^{-3} \sim 1.2 \times 10^{-2}$ 의 범위였다. 이러한 값들에 비해 본 연구에서 측정된 값은 대체로 수십 배 정도 낮다. 이것은 피폭상자 내 풍속이 정온상태(calm)에 가까운  $0.2 \text{ ms}^{-1}$  정도에 불과하였다는 사실과 밀접한 관련이 있을 것으로 추정된다.  $I_2$  증기를 비롯한 각종 물질의 침적속도는 풍속이 낮을수록 감소하는 것으로 알려져 있다[7,12,20,21]. 상기 Tschiersch 등[19]의 실험에서도 풍속이  $0.1 \sim 0.2 \text{ ms}^{-1}$ 로 본 실험과 비슷하여 침적속도가 본 실험과는 큰 차이가 없었으나 위의 야외조사 값에 비해서는 대체로 10 배 정도 낮았다. 한편, 본 실험과 위의 야외조사 간 침적속도의 차이는 작물의 형태 및 생리적 차이와 기공의 개폐에 영향을 미치는 기상 조건, 즉 습도나 조도 등의 차이에도 어느 정도 기인하였을 가능성이 있을 것으로 본다.

이상으로 볼 때, 본 연구에서 구해진 침적속도를 실제적인 평가에 그대로 적용하면 작물체 내 요오드 농도를 과소평가할 가능성이 클 것으로 판단되므로 주의를 요한다. 반면에, 본 연구 결과는 풍속이 매우 낮을 경우 불필요하게 높은 침적속도를 적용하지 않도록 주의해야 한다는 점도 함께 시사하고 있다.

IAEA[23]는  $I_2$  증기의 총침적속도(작물체와 토양을 합한 전체 표면에 대한 침적속도)에 대한 일반치(default value)로  $4.0 \times 10^{-2}$ 를 제안하였는데, 이것은 Heinemann 등[24]이 보고한 작물체 침적속도를 0.5로 나누어 산출한 값이다. 따라서 IAEA는  $I_2$  증기의 작물체 침적속도를 결과적으로  $2.0 \times 10^{-2}$ 로 보았다고 할 수 있다. Müller와 Pröhl [25]은 그들의 ECOSYS-87 모델에서  $I_2$  증기의 작물체 침적속도에 대한 최고치로 작물체의 종류에 따라  $1.5 \times 10^{-2} \sim 2.0 \times 10^{-2}$ 를 사용하였고 작물체 침적속도는 엽면적지수가 최대일 때 최고에 달하는 것으로 보았다. 본 연구에서도 10 월 16 일 피폭에서 엽면적지수가 거의 최대였던 것으로 추정된다. 이와 같은 IAEA나 ECOSYS-87 모델의 침적속도는 위에서 살펴 본 Voillequé와 Keller[20] 및 Voigt[22]의 보고치보다도 높은 것으로 풍속이 매우 낮은 조건에 적용하면 작물체의 요오드 농도를 지나치게 과대평가할지 모르므로 주의해야 한다.

한편,  $I_2$  증기의 작물체 침적은 기공을 통한 흡수 외에도 작물체 표면 침착에 의해서도 일어날 수 있을 것이다[8]. 두 가지 현상의 상대적 중요도는 작물의 종류나 기상 상태 등에 따라 달라질 것으로 예상된다.

**라. I<sub>2</sub> 증기의 뿌리 전류계수**

표 3은 무의 수확시에 부위별로 요오드 농도를 측정하고 뿌리에 대한 I<sub>2</sub> 증기의 전류계수를 조사한 것이다. 작물체 내 요오드 농도는 9 월 22 일과 10 월 16 일에 피폭된 무의 상근 부로부터 조제된 각각 세 개의 방사화분석용 시료들 중 각각 하나의 시료에서만 측정되었고 나머지 경우에는 모두 최소검출가능농도(MDA) 이하였다. 이것은 9 월 22 일 피폭의 경우 I<sub>2</sub> 증기의 작물체 침적량이 가장 많았고 10 월 16 일 피폭의 경우 침적에서부터 수확까지의 기간이 가장 짧았던 것과 관련이 있을 것으로 보인다.

9 월 22 일에 피폭된 무의 상근부 내 요오드는 거의 전부 경엽부로부터 전이된 것이고 10 월 16 일에 피폭된 무의 경우 경엽부로부터 전이된 것과 상근부에 침적된 후 수확기까지 잔류한 것의 합일 것으로 판단된다. 10 월 16 일 피폭에 있어서 수확시 상근부 내 요오드 농도는 침적 직후에 비해 10 배 정도 낮았다. 이것은 상근부에 흡수 또는 침착되었던 요오드가 공기중으로 다시 증발하였거나 외피표와 함께 이탈하였고 또한 하근부 등 타부위로 이동하였으며 동시에 침적후 수확시까지 상근부의 생체중도 증가하였기 때문인 것으로 판단된다.

식 (2)와 같이 구한 상근부에 대한 I<sub>2</sub> 증기의 전류계수는 10 월 16 일 피폭에서  $2.3 \times 10^{-3}$ 으로 9월 22일 피폭에 비해 5 배 정도 높았다. 이것은 10 월 16 일 피폭의 경우 상근부에 대한 직접 침적의 영향이 포함되었을 뿐만 아니라 침적에서부터 수확까지의 시간이 짧아 상근부로부터의 요오드 소실도 적었기 때문인 것으로 보인다. 하근부 내 요오드 농도를 MDA 수준인 0.18 ppm으로 가정하고 구한 전체 뿌리에 대한 전류계수도 10 월 16 일 피폭에서  $5.0 \times 10^{-3}$ 으로 9 월 22 일 피폭에 비해 4 배 가까이 높았다.

위와 같은 무 뿌리에 대한 I<sub>2</sub> 증기의 전류계수는 최용호 등 [11]이 보고한 쌀알에 대한 전류계수보다 10 배 정도 높은 것이다. 한편, Choi 등[14]이 보고한 무 뿌리에 대한 다른 핵종의 전류계수와 비교하면 I<sub>2</sub> 증기의 전류계수는 Sr이나 Ru와는 대체로 비슷하나 Co나 Cs에 비해서는 수십 배 정도 낮다. Sr과 Ru는 통상 작물체 내에서 이동성이 낮은 원소로 분류되고 있다[25]. 또한, 본 연구에서는 MDA 이하인 시료들로 인하여

I<sub>2</sub> 증기의 전류계수가 다소 과대평가되었을 가능성이 있다는 점도 고려할 필요가 있다. 요오드의 전류계수는 침적시기, 요오드의 물리화학적 형태, 작물의 종류, 기상 조건 등에 따라 달라질 것으로 사료된다.

Müller와 Pröhl[25]은 요오드를 Cs와 함께 작물체 내에서 이동성이 높은 원소로 분류하면서 근채류에서의 최고치로 0.1을 사용한 바 있다. 이는 본 연구 결과와는 상반되는 것으로 I<sub>2</sub>와 달리 물에 잘 녹는 iodide (NaI나 KI 등) 형태의 요오드에 치중한 결과인 것으로 추정된다. Hungate 등[9]이 bean의 잎을 I<sub>2</sub> 증기와 NaI 용액에 피폭시킨 후 65 시간 경과시 비피폭 부위로 요오드가 전이된 정도를 조사·비교한 결과에 의하면 iodide 형태의 요오드가 I<sub>2</sub> 형태의 요오드에 비해 최고 10 배 정도 많이 전이된 것으로 나타났다.

**IV. 결 론**

원소상 요오드(I<sub>2</sub>) 증기의 무에 대한 작물체 침적속도와 뿌리 전류계수가 피폭상자를 이용한 작물체의 I<sub>2</sub> 증기 피폭 실험을 통하여 측정되었다.

측정된 침적속도는 경엽부의 생육밀도가 높을수록 증가하는 경향이었고 상대습도가 높아짐에 따라 증가했다는 기존의 보고와 어느 정도 일치함을 보여 주었다. 본 침적속도는 풍속이 높은 야외에서의 측정치에 비해 크게 낮았으므로 실제 평가에 적용할 경우 이 점에 유의할 필요가 있다. 동시에 풍속이 매우 낮은 조건에 대하여 통상적인 침적속도를 적용하면 지나친 과대평가를 초래할 가능성이 있다는 것도 고려되어야 한다.

I<sub>2</sub> 증기의 뿌리 전류계수는 이동성이 낮은 핵종으로 분류되고 있는 Sr이나 Ru와 비슷한 것으로 조사되었다. 생육 후반기 침적에서 전반기 침적에 비해 전류계수가 크게 높아 침적시 상근부의 지상 돌출에 따른 상근부로의 I<sub>2</sub> 증기 침적이 전류계수를 증가시키는 중요한 요인인 것으로 보여 졌다. 요오드는 화학적 형태에 따라 전류계수가 크게 달라질 수 있을 것이므로 사용상 주의를 요한다.

**감사의 글**

이 논문은 교육과학기술부가 시행한 원자력중장기연구개발사업의 결과물입니다.

**참고문헌**

[1] 강상훈, 한선호, 이흥래, 지광용, 이인구, “RI 폐기물 내

**Table 3. Summarized experimental results for the translocation of iodine to the roots of the radish plants exposed to I<sub>2</sub> vapor at different growth stages.**

Date of exposure	Plant iodine concentration (ppm) <sup>a</sup>			Translocation factor (T <sub>f</sub> , dimensionless)		
	Leaves	Upper roots	Lower roots	Upper roots	Lower roots <sup>c</sup>	Total <sup>c</sup>
Sep. 22	<MDA	2.0 × 10 <sup>-1</sup> b	<MDA	4.8 × 10 <sup>-4</sup>	<8.2 × 10 <sup>-4</sup>	1.3 × 10 <sup>-3</sup>
Sep. 24	<MDA	<MDA	<MDA	-	-	-
Oct. 7	<MDA	<MDA	<MDA	-	-	-
Oct. 16	<MDA	3.5 × 10 <sup>-1</sup> b	<MDA	2.3 × 10 <sup>-3</sup>	<2.7 × 10 <sup>-3</sup>	5.0 × 10 <sup>-3</sup>

<sup>a</sup> concentrations at harvest time with the MDA being around 0.18 ppm  
<sup>b</sup> single values for one sample with the concentrations in the other two samples below MDAs  
<sup>c</sup> assuming that the concentrations in the lower roots are equal to 0.18 ppm as the MDA.

- 방사성 요오드 분석을 위한 분리 및 회수," 방사성폐기물학회지, 5, pp. 267-272 (2007).
- [2] H. Noguchi and M. Murata, "Physicochemical speciation of airborne  $^{131}I$  in Japan from Chernobyl," *J. Environ. Radioactivity*, 7, pp. 65-74 (1988).
- [3] A. Agüero, P. Pinedo, I. Simón, D. Cancio, M. Moraleda, C. Trueba and D. Pérez-Sánchez, "Application of the Spanish methodological approach for biosphere assessment to a generic high-level waste disposal site," *Science of the Total Environment*, 403, pp. 34-58 (2008).
- [4] D. J. Ashworth and G. Shaw, "A comparison of the soil migration and plant uptake of radioactive chlorine and iodine from contaminated groundwater," *J. Environ. Radioactivity*, 89, pp. 61-80 (2006).
- [5] 성석현, 정의영, 김기홍, "국내 방사성폐기물 특성과 방사성폐기물 처분시설 폐기물 인수기준," 방사성폐기물학회지, 6, pp. 347-356 (2008)
- [6] M. Eisenbud and M. E. Wrenn, "Biological disposition of radioiodine—a review," *Health Physics*, 9, pp. 1133-1139 (1963).
- [7] P. J. Barry and A. C. Chamberlain, "Deposition of iodine onto plant leaves from air," *Health Physics*, 9, pp. 1149-1157 (1963).
- [8] Y. Nakamura and Y. Ohmomo, "Factors used for the estimation of gaseous radioactive iodine intake through vegetation—II. uptake of elemental iodine by spinach leaves," *Health Physics*, 38, pp. 315-320 (1980).
- [9] F. P. Hungate, J. F. Cline, R. L. Uhler and A. A. Selders, "Foliar sorption of  $^{131}I$  by plants," *Health Physics*, 9, pp. 1159-1166 (1963).
- [10] R. K. Singhal, U. Narayanan and I. S. Bhat, "Laboratory evaluation of interception and translocation of  $^{131}I$  in fenugreek and okra plants," *Health Physics*, 67, pp. 529-534 (1994).
- [11] 최용호, 임광묵, 이창민, 박효국, 박두원, 최근식, 최희주, 이한수, 이창우, "벼에 대한 원소상 요오드 증기 ( $I_2$ )의 직접오염경로 해석 실험," 대한방사선방어학회지, 29, pp. 165-172 (2004).
- [12] J. E. Till and H. R. Meyer, *Radiological Assessment*, U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-3332, ORNL-5968 (1983).
- [13] International Atomic Energy Agency, *Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Temperate Environments*, Technical Reports Series No. 364, IAEA, Vienna (1994).
- [14] Y. H. Choi, K. M. Lim, D. Yu, H. G. Park, Y. G. Choi and C. M. Lee, "Transfer pathway of  $^{54}Mn$ ,  $^{57}Co$ ,  $^{85}Sr$ ,  $^{103}Ru$  and  $^{134}Cs$  in rice and radish plants directly contaminated at different growth stages," *Annals of Nuclear Energy*, 29, pp. 429-446 (2002).
- [15] 이한수, 최희주, 강희석, 유동한, 금동권, 임광묵, 박효국, 최용호, 이창우, "요오드의 배추에 대한 침적," 대한방사선방어학회지, 29, pp. 173-177 (2004).
- [16] S. Uchida, Y. Muramatsu, M. Sumiya and Y. Ohmomo, "Biological half-life of gaseous elemental iodine deposited onto rice grains," *Health Physics*, 60, pp. 675-679 (1991).
- [17] 김은한, 최근식, 최상도, 한국원자력연구원 부지 기상 정보 종합해석, 한국원자력연구원, KAERI/TR-3753/2009 (2009).
- [18] 박종성, 조재영, 이은용, 조동삼, 변종영, 이석순, 최관삼, 신제 작물생리학, 향문사 (1991).
- [19] J. Tschiersch, T. Shinonaga and H. Heuberger, "Dry deposition of gaseous radioiodine and particulate radiocaesium onto leafy vegetables," *Science of the Total Environment*, 407, pp. 5685-5693 (2009).
- [20] P. G. Voillequé and J. H. Keller, "Air-to-vegetation transport of  $^{131}I$  as hypiodous acid acid (HOI)," *Health Physics*, 40, pp. 91-94 (1981).
- [21] C. A. Pelletier and J. D. Zimbrick, "Kinetics of environmental radioiodine transport through the milk food chain," in: *Environmental Surveillance in the Vicinity of Nuclear Facilities*, W. C. Reinig, ed., Charles C. Thomas, Springfield, IL (1970).
- [22] G. Voigt, "Physical transport and chemical and biological processes in agricultural systems," in: *Health Impacts of Large Releases of Radionuclides*, Wiley, Ciba Foundation Symposium

203, pp. 3-20 (1997)

- [23] International Atomic Energy Agency, *Generic Models and Parameters for Assessing the Environmental Transfer of Radionuclides from Routine Releases*, Safety Series No. 57, IAEA, Vienna (1982).
- [24] K. Heinemann and K. J. Vogt, "Measurements of the deposition of iodine onto vegetation and of the biological half-life of iodine on vegetation," *Health Physics*, 39, pp. 463-474 (1980).
- [25] H. Müller and G. Pröhl, "ECOSYS-87: a dynamic model for assessing radiological consequences of nuclear accidents," *Health Physics*, 64, pp. 232-252 (1993).