

An Experimental Study on the Direct Contamination Pathway of Elemental Iodine Vapor (I_2) for Rice Plants

Y.H. Choi · K.M. Lim · C.M. Lee* · H.G. Park · D.W. Park ·
G.S. Choi · H.J. Choi · H.S. Lee · C.W. Lee

Korea Atomic Energy Research Institute

*Korea Advanced Institute of Science and Technology

벼에 대한 원소상 요오드 증기(I_2)의 직접오염경로 해석 실험

최용호 · 임광목 · 이창민* · 박효국 · 박두원 · 최근식 · 최희주 ·
이한수 · 이창우

한국원자력연구소

*한국과학기술원

(2003년 9월 25일 접수, 2004년 7월 8일 채택)

Abstract - Rice plants were exposed to I_2 vapor for 80 min at different growth stages in an exposure box to investigate the parameters concerning direct plant contamination. Deposition velocity ($m s^{-1}$) of the I_2 vapor for the straws was in the range of 1.4×10^{-5} - 1.3×10^{-4} depending on the exposure time, being comparatively low during the earlier part of the plant growth. Ear deposition velocity was in the range of 2.5×10^{-5} - 6.7×10^{-5} . Whole-plant deposition velocity was in the range of 1.4×10^{-5} - 1.8×10^{-4} with the highest from the exposure performed on Aug. 18 (7 d after the start of heading). The time-dependent variation generally decreased when the deposition velocity was normalized to the biomass density. No noteworthy tendency in the deposition velocity was observed with regard to the temperature, sunlight and humidity. Translocation factor for the hulled seeds was 3.3×10^{-5} - 4.7×10^{-4} with the highest from the Aug. 23 exposure. It was found that a leaf deposition even before the ear emergence resulted in a considerable seed translocation.

Key words : I_2 vapor, rice plant, exposure, direct contamination, experiment, deposition velocity, translocation factor

요약 - 피폭상자 내에서 벼를 생육단계별로 80 분 간 I_2 증기에 피폭시키고 작물체 직접오염 관련 인자를 조사하였다. I_2 증기의 경엽부 침적속도($m s^{-1}$)는 피폭시기에 따라 1.4×10^{-5} - 1.3×10^{-4} 의 범위로 생육 전반기 피폭시 비교적 낮았다. 이삭 침적속도는 2.5×10^{-5} - 6.7×10^{-5} 의 범위였다. 전체 작물체에 대한 침적속도는 1.4×10^{-5} - 1.8×10^{-4} 의 범위로 8월 18일(출수 시작후 7일) 피폭시 가장 높았다. 침적속도를 생육밀도 기준으로 나타내면 시기에 따른 변이 정도가 대체로 감소하였다. 기온, 일광 및 습도에 대한 이렇다할 침적속도의 경향성은 관찰되지 않았다. 요오드의 현미 전류계수는 3.3×10^{-5} - 4.7×10^{-4} 의 범위로 8월 23일 피폭에서 가장 높았다. 출수전 경엽부에 침적한 요오드도 상당량 현미로 전류하는 것으로 나타났다.

중심어 : I_2 증기, 벼, 피폭, 직접오염, 실험, 침적속도, 전류계수

서론

방사성 요오드(I)의 동위원소 중에서 ^{131}I 은

Windscale 사고, TMI 사고 및 Chernobyl 사고에서 그랬듯이 원자로 사고시에 환경 중으로 대량 방출되어 지상에 가장 많이 침적되는 방사성 핵

중이다[1-3]. 한편 ^{129}I 는 생성량은 ^{131}I 보다 훨씬 적지만 반감기가 1.6×10^7 년으로 매우 길어 원자로부터는 재처리시설의 가동이나 방사성 폐기물 처분장 운영에 있어서 중요한 핵종이다[4,5].

^{131}I 은 위와 같이 침적량은 매우 많으나 반감기가 약 8 일에 불과해 침적으로부터 소비까지의 기간이 비교적 짧은 엽채류나 grass→cow→milk 경로에서 중요시되고 있다[6-8]. 쌀과 같은 곡류의 경우에는 침적시기가 수확기로부터 멀거나 저장기간이 길어지면 ^{131}I 의 영향이 크게 감소하지만 우리나라처럼 쌀을 많이 생산, 소비하는 나라에서는 적어도 단기적으로는 중요하게 취급될 필요가 있다. 이에 반해 ^{129}I 은 긴 반감기로 인하여 식품을 장기간 저장하여도 농도가 감소하지 않으므로 저장기간이 긴 곡류에서도 문제시될 수 있다[4,7,9].

대기중에서 방사성 I는 입자상과 기체상으로 존재한다. 기체상 방사성 I는 크게 원소상 요오드 (I_2 , elemental iodine), hypoiodous acid(HOI)와 유기 iodide(주로 CH_3I)로 나눌 수 있다[6,10]. 입자상 I는 보통 에어로졸 형태로 여타 입자상 방사성 물질과 유사한 점이 많으나 기체상 I는 환경중에서의 거동 양식이 입자상 물질과 다르고 또한 기체의 종류에 따라서도 차이가 크다[10].

위와 같은 여러 형태의 방사성 I들이 대기중에 존재하는 분율은 방출점에서의 분율과 방출에서부터 조사시까지의 대기화학작용에 좌우된다. Chernobyl 사고후 일본에서의 한 조사결과에 의하면 대기중 I의 8~27%가 입자상이었고 3~7%가 I_2 , 3~10%가 HOI, 59~82%가 유기 iodide였다고 한다[10]. 이처럼 여러 가지 I중 I_2 는 존재비가 그리 높지는 않지만 작물체에 대한 침적속도가 다른 I에 비해 대체로 만 배 정도까지 높은 것으로[6,10] 알려져 있으므로 중요하게 고려될 필요가 있다.

작물체의 방사능 오염은 방사성 핵종의 토양 침적후 뿌리흡수에 따른 간접오염 경로와 대기로부터

작물체 지상부에 직접 침적되는 직접오염 경로를 통하여 이루어진다. 본 연구에서는 벼에 있어서 방사성 I_2 의 작물체 직접오염 경로를 해석하고 보다 현실적인 오염인자를 생산하기 위하여 안정 I_2 를 추적자로 이용한 작물체 피폭실험을 수행하였다. 이를 위해 피폭상자 내에서 안정 I 크리스탈의 승화를 통해 발생된 I_2 증기에 벼를 노출시켰다[4,7,9]. 피폭실험은 침적시기의 영향을 분석하기 위하여 생육단계별로 수 차례에 걸쳐 수행하였다.

재료 및 방법

작물 육성

우리 나라의 장려품종인 동진벼를 야외에서 플라스틱 포트에 육성하였다. 포트의 크기는 가로가 41 cm, 세로가 33 cm, 높이가 25 cm였다. 포트에 재배토(표 1)를 넣은 다음 수돗물로 관개하여 는 상태를 재현하였다.

포트 당 6.1 g의 수도용 복합비료(N:P:K = 21%:17%:17%), 15 g의 소석회 및 50 g의 부숙퇴비를 이식 2 일 전에 살포하고 표층토와 섞어 주었다. 1999년 5월 21일 동진벼의 모를 10여 개의 포트에 포트 당 6주씩, 1주 4본식으로 이식한 후 관행에 준하여 작물을 관리하였다. 작물의 생육 중에 3 회에 걸쳐 적당량의 복합비료를 추가로 공급하였다.

작물체 I_2 가스 피폭

벼의 이식 후 수확 시까지 생육단계에 따라 9 회에 걸쳐 피폭상자 내에서 매회 한 포트의 작물체를 I_2 증기에 80 분 간 피폭시켰다. 피폭상자는 크기가 118 cm (L) × 92 cm (W) × 150 cm (H)로 투명한 합성수지로 제작하였고 내부에 온도 센서와 광센서를 부착하였다. 기온의 상승을 억제하기 위하여 포트 주위에 아이스 박스용 냉

Table 1. Physicochemical properties of the pot soil.

pH (1:2.5)	O.M. (%)	T-N (ppm)	C.E.C (cmol)	E.C. (cmol)			Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Soil type
				Ca	Mg	K				
5.1	1.56	905	3.3	1.38	0.36	0.67	73	23	4	SL

O.M. : Organic matter, T-N : Total nitrogen, C.E.C. : Cation exchange capacity, E.C. : Exchangeable cation, SL : Sandy loam.

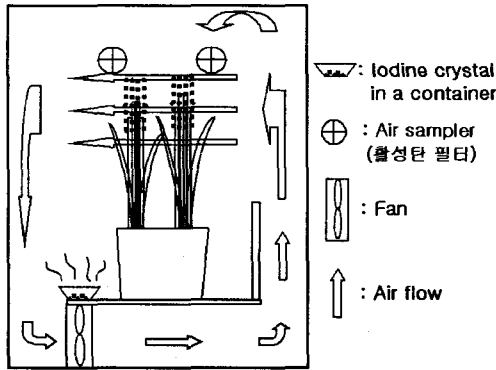


Fig. 1. Schematic diagram of the exposure box in operation.

동팩을 날씨에 따라 최고 8 개까지 놓았다. 작물체 I₂ 증기 피폭은 그림 1과 같이 피폭상자 내에 I 크리스탈을 배치한 후 fan을 작동시켜 승화된 I₂ 증기가 공기와 함께 fan 쪽으로 빨려들어 하부공간을 한바퀴 돌아 작물체에 도달하도록 하였다[7]. 1 회 피폭시 I 크리스탈 공급량은 33~63 mg 범위였고 이중 80 분의 피폭시간 동안 승화된 양은 55~100%였다. 피폭 중에는 분당 0.5 l 의 내부공기를 8 분간씩 활성탄 필터에 통과시켜 피폭 상자 내 공기 중 I₂ 증기를 채취하였고 매 8 분마다 온·습도와 조도를 측정하였다. 풍속은 0.2 m s⁻¹ 내외로 유지되었다. 피폭일자는 7월 7일, 7월 21일, 8월 11일, 8월 18일, 8월 23일, 9월 1일, 9월 4일, 9월 15일, 10월 5일이었고 벼의 출수는 8월 11일에 시작하였다

시료 채취 및 분석

피폭 종료 직후에는 1 주당 2 줄기(얼자)씩 총 12 줄기를 지상 약 7 cm 정도만 남기고 채취하여 잘게 자른 다음 두 그룹으로 나누어 비닐봉지에 담아 냉동, 보관하였다. 이 때 벼의 출수 후 피폭시에는 벧짚과 이삭으로 구분하여 처리하였다.

벼의 수확기인 10월 14일에는 최종적으로 포트당 18 줄기를 채취하여 수 일간 자연 건조한 다음 벧짚, 왕겨, 쌀알로 구분하였고 각각 세 그룹으로 나누어 무게를 측정하고 냉동, 보관하였다.

시료내 I 농도는 I를 화학적으로 분리한 다음 ICP-mass spectrometry 법으로 측정하였다 [11,12]. 이 때 ¹²⁵I를 시료에 처리한 다음 화학분리 과정의 최종 산물 내 ¹²⁵I의 농도를 v- spectrometry법으로 측정하여 I의 회수율을 산출하였다. 본 분석법의 검출하한은 0.2 ppb 정도였다.

오염인자 계산

작물체의 직접오염 경로상 중요한 오염인자인 작물체 침적속도(deposition velocity, V_g)와 전류계수(translocation factor, T)를 구하였다.

공기 중 I₂ 증기의 작물체에 대한 침적속도(m s⁻¹)는 다음 식으로 계산하였다.

$$V_g = \frac{A_{pi}}{C_v \cdot T_e} \tag{1}$$

여기서,

A_{pi} : 피폭 종료 직후 단위면적당 작물체내 I 함량 (g m⁻²)

C_v : 피폭상자내 I₂ 증기 농도 (g m⁻³)

T_e : 피폭시간 (s)

작물체에 침적한 총 I 중 가식부위로 이동한 분율로 정의되는 전류계수(unitless)는 다음 식으로 계산하였다.

$$T = \frac{A_{sh}}{A_{pi}} \tag{2}$$

여기서,

A_{sh} : 수확시 단위면적당 쌀알(현미)내 I 함량 (g m⁻²)

결과 및 고찰

피폭상자내 기상조건 및 공기중 I₂ 농도

표 2는 매회 피폭시 피폭상자내 기상 조건과 공기중 I₂ 농도를 측정된 것이다. 기온은 대체로 피폭이 진행됨에 따라 점점 상승하여 최고 13.5 °C 상승하였고 80 분 동안의 평균기온은 피폭시기에 따라 18.2~37.8 °C의 범위였다.

상대습도는 대체로 피폭이 진행됨에 따라 점점 감소하였고, 피폭시간 동안 평균치는 46.4%~63.1%의 범위로 우리나라에서 7월과 9월 사이에 관측되는 상대습도에 비해 다소 낮은 편이었다. 이것은 주로 피폭상자내 기온의 상승에 따른 결과인 것으로 판단된다. 조도는 피폭이 진행됨에 따라 점점 상승하는 경향이었고 평균은 최고 77.6 klux, 최저 18.1 klux로 측정되었다.

피폭 상자 내 공기 중 I₂의 평균 농도는 2.6×

Table 2. Meteorological condition and I₂ concentration in the exposure box during the exposure of rice plants at different times.

Date of exposure	Temperature (°C)		Rel. humidity (%)		Sunlight (klux)		I ₂ conc. ^a in air(g m ⁻³)
	Range	Mean	Range	Mean	Range	Mean	
July 7	31.9~39.6	36.0	45.9~46.5	46.4	67.6~88.0	77.6	0.038
July 21	35.3~41.0	37.8	46.4~49.7	47.2	58.9~84.3	72.7	0.035
Aug. 11	33.6~38.2	36.5	46.1~57.2	49.8	35.6~69.3	53.4	0.048
Aug. 18	28.6~29.8	29.3	61.2~64.8	62.6	11.2~24.6	18.1	0.026
Aug. 23	25.3~34.7	30.5	50.3~58.0	52.1	56.4~80.1	69.2	0.047
Sep. 1	28.2~32.8	29.3	46.8~65.0	51.7	19.6~68.4	36.6	0.026
Sep. 4	28.3~38.8	31.8	45.6~52.6	47.5	39.2~88.0	67.5	0.065
Sep. 15	26.5~40.0	32.4	42.5~55.1	48.7	53.2~72.7	63.9	0.054
Oct. 5	17.6~20.1	18.2	62.4~66.0	63.1	9.8~35.5	16.3	0.053

^a average for the whole exposure time, 80 min.

Table 3. Growth data for rice plants at different dates of exposure.

Date of exposure	No. per hill		Weight (g-fresh tiller ⁻¹) ^a		Biomass density (g-fresh m ⁻²)		
	Tiller	Ear	Straw	Ear	Straw	Ear	Total
July 7	11.3	-	1.31	-	654.8	-	654.8
July 21	12.3	-	2.30	-	1255.9	-	1255.9
Aug. 11	11.3	-	5.50	-	2756.1	-	2756.1
Aug. 18	11.0	9.3	5.93	0.65	2890.6	266.0	3156.6
Aug. 23	10.7	10.0	5.97	0.86	2830.4	381.4	3211.8
Sep. 1	10.7	10.7	5.39	1.33	2556.8	631.1	3187.9
Sep. 4	10.3	10.3	5.38	1.85	2459.3	846.5	3305.8
Sep. 15	10.3	10.0	4.70	2.06	2146.4	912.8	3059.2
Oct. 5	11.0	11.0	5.03	1.95	2452.0	953.3	3405.3

^a Ear weight per tiller was calculated only for the tillers bearing an ear.

10⁻⁵ ~ 6.5×10⁻⁵ g l⁻¹의 변이를 보였다. 이러한 변이는 I₂의 승화량, I₂의 상자 내벽 흡착 정도, 이전에 흡착되어 있던 I₂의 탈착 정도, 외기로의 누출량, 작물체 흡수량 등의 차이에 기인하는 것으로 생각된다.

작물체 침적속도

I₂의 작물체 침적속도(V_g, m s⁻¹)를 구하기 위하여 피폭시기별로 조사한 작물체의 생육 데이터는 표 3과 같다. 주 당 줄기(얼자, tiller) 수는 대

체로 10-12 개로 출수 이후에는 큰 변화가 없었고 주 당 이삭 수는 대체로 9-11 개로 출수가 끝난 무렵부터는 큰 변화가 없었다. 작물체 줄기 당 경엽부의 생체중은 생육 전반기에 급히 증가하여 등숙초기에 6 g 정도로 최고였다가 이후 다소 감소하는 경향이였다. 줄기 당 이삭의 생체중은 출수후 약 3-4 주 간 증가하여 최고 2 g 정도에 달한 후에는 큰 변화가 없었다. 생육밀도는 경엽부의 경우 최고 약 3 kg-fresh m⁻², 이삭의 경우 최고 약 1 kg-fresh m⁻²였으며 경엽부에 대한 이삭

Table 4. Deposition velocity of I₂ vapor for rice plants at different dates of exposure.

Date of exposure	I conc.(g g-fresh ⁻¹) ^a		I deposition (g m ⁻²)		Deposition velocity (m s ⁻¹)		
	Straw	Ear	Straw	Ear	Straw	Ear	Whole
July 7	4.1×10 ⁻⁶ ± 1.2×10 ⁻⁶	-	2.7×10 ⁻³	-	1.5×10 ⁻⁵	-	1.5×10 ⁻⁵
July 21	1.9×10 ⁻⁶	-	2.4×10 ⁻³	-	1.4×10 ⁻⁵	-	1.4×10 ⁻⁵
Aug. 11	5.4×10 ⁻⁶ ± 1.6×10 ⁻⁶	-	1.5×10 ⁻²	-	6.4×10 ⁻⁵	-	6.4×10 ⁻⁵
Aug. 18	5.6×10 ⁻⁶ ± 1.8×10 ⁻⁶	2.2×10 ⁻⁵ ± 4.7×10 ⁻⁶	1.6×10 ⁻²	5.9×10 ⁻³	1.3×10 ⁻⁴	4.7×10 ⁻⁵	1.8×10 ⁻⁴
Aug. 23	2.4×10 ⁻⁶	1.5×10 ⁻⁵	6.8×10 ⁻³	5.6×10 ⁻³	3.0×10 ⁻⁵	2.5×10 ⁻⁵	5.5×10 ⁻⁵
Sep. 1	1.8×10 ⁻⁶ ± 7.8×10 ⁻⁷	1.2×10 ⁻⁵ ± 1.1×10 ⁻⁶	4.5×10 ⁻³	7.4×10 ⁻³	3.6×10 ⁻⁵	5.9×10 ⁻⁵	9.5×10 ⁻⁵
Sep. 4	5.4×10 ⁻⁶ ± 2.6×10 ⁻⁶	1.6×10 ⁻⁵ ± 8.1×10 ⁻⁶	1.3×10 ⁻²	1.3×10 ⁻²	4.2×10 ⁻⁵	4.2×10 ⁻⁵	8.4×10 ⁻⁵
Sep. 15	1.1×10 ⁻⁵ ± 7.8×10 ⁻⁷	1.9×10 ⁻⁵ ± 3.5×10 ⁻⁶	2.3×10 ⁻²	1.7×10 ⁻²	8.9×10 ⁻⁵	6.7×10 ⁻⁵	1.6×10 ⁻⁴
Oct. 5	5.4×10 ⁻⁶ ± 1.6×10 ⁻⁶	1.3×10 ⁻⁵ ± 1.6×10 ⁻⁶	1.3×10 ⁻²	1.3×10 ⁻²	5.2×10 ⁻⁵	4.9×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻⁴

^a means and standard deviations for two plant samples.

의 생육밀도 비는 수확기에 가까울수록 증가하는 경향이였다.

피폭시기별 작물체의 생육밀도, 피폭 직후 작물체내 I 농도(두 개의 시료에 대한 평균치) 및 공기중 I 평균농도를 이용하여 식 (1)과 같이 계산한 I₂의 작물체 침적속도(V_g, m s⁻¹)는 표 4에 나타나 있다.

경엽부에 대한 침적속도는 피폭시기에 따라 1.4×10⁻⁵-1.3×10⁻⁴의 범위로 생육밀도가 매우 낮은 7월 7일과 7월 21일 피폭시에 가장 낮았고 경엽부가 가장 무성하고 생리적으로도 왕성한 8월 18일 피폭에서 가장 높았으나 그 이외 피폭에서는 피폭시기에 따라 이렇다할 경향성 없이 3 배 정도의 변이만을 보였다. 이삭에 대한 침적속도는 2.5×10⁻⁵-6.7×10⁻⁵의 범위로 피폭시기에 따른 변화가 비교적 작았다. 이삭 침적속도는 출수 초기에는 경엽부 침적속도보다 작았으나 그 이후에는 큰 차이가 없었다. 이것은 출수 초기에 경엽부와 이삭 간 생육밀도의 차이가 특히 크기 때문이다. 전체 작물체에 대한 침적속도는 1.4×10⁻⁵-1.8×10⁻⁴의 범위로 경엽부 침적속도와 같이 8월 18일 피폭에서 최고였다.

이상에서 본 바와 같이 작물체 침적속도는 통상 생육밀도와 비례관계에 있기 때문에 Uchida 등[4]은 생육밀도 기준의 침적속도(mass-normalized V_g; NV_g)를 사용하였다. 표 5는 V_g를 NV_g(m³ kg-fresh⁻¹ s⁻¹)로 환산한 것이다. 경엽부의 경우 NV_g는 1.1×10⁻⁵-4.4×10⁻⁵의 범위로 V_g에

비해 변이 배수가 줄어들었을 뿐만 아니라 7월 7일 피폭과 7월 21일 피폭에서 특히 낮지도 않았다. 이삭의 경우에도 출수 초기(8월 18일)를 제외하면 NV_g가 5.0×10⁻⁵-9.4×10⁻⁵로 변이가 다소 줄어들었으나 출수 초기에는 NV_g가 1.8×10⁻⁴로 타 시기에 비해 2-4 배 정도나 높았다. Uchida 등[4]도 이와 유사한 경향을 보고한 바 있다. 이것은 출수 초기에는 이삭의 무게에 대한 표면적의 비가 상대적으로 높고 호흡과 같은 생리활동도 매우 활발하기 때문인 것으로 판단된다. 출수후 NV_g는 V_g와 달리 이삭에서 경엽부보다 항상 높게 나타나 침적의 효율면에서는 이삭이 경엽부보다 높다고 하겠다. 전체 작물체에 대한 NV_g는 1.1×10⁻⁵-5.6×10⁻⁵의 범위로 5 배 정도의 변이를 보여 V_g에 비해 변이 정도가 감소하였다. 따라서 NV_g를 사용하면 V_g 사용시에 비해 입력변수에 따른 평가모델의 불확실성을 다소 줄일 수 있을 것이다.

Uchida 등[4]이 본 실험과 비슷한 방법(단 피폭 시간 3-4 시간, 온도 28±2°C, 습도 75±10%, 조도 15 klux)으로 출수에서 호숙기 사이에 측정된 I₂의 이삭 (엄밀히 말하면 벼의 조곡) 침적속도는 V_g가 평균 8.7×10⁻⁵이었고 NV_g가 평균 1.5×10⁻⁴이었다. 이러한 값에 비해 본 조사치들은 대체로 다소 낮지만 큰 차이는 아니었다. 참고로 Muramatsu 등[13]이 Uchida 등과 같은 조건에서 조사한 CH₃I의 이삭 침적속도는 I₂에 비해 300 배 가량 낮았다.

Table 5. Mass-normalized deposition velocity (NV_g)

Date of exposure	NV_g ($m^3 kg^{-1} s^{-1}$) ^a		
	Straw	Ear	Whole
July 7	2.3×10^{-5}	-	2.3×10^{-5}
July 21	1.1×10^{-5}	-	1.1×10^{-5}
Aug. 11	2.3×10^{-5}	-	2.3×10^{-5}
Aug. 18	4.4×10^{-5}	1.8×10^{-4}	5.6×10^{-5}
Aug. 23	1.1×10^{-5}	6.5×10^{-5}	1.7×10^{-5}
Sep. 1	1.4×10^{-5}	9.4×10^{-5}	3.0×10^{-5}
Sep. 4	1.7×10^{-5}	5.0×10^{-5}	2.6×10^{-5}
Sep. 15	4.2×10^{-5}	7.3×10^{-5}	5.1×10^{-5}
Oct. 5	2.1×10^{-5}	5.2×10^{-5}	3.0×10^{-5}

^a $\frac{\text{deposition velocity (m s}^{-1}\text{)}}{\text{biomass density (kg-fresh m}^{-2}\text{)}}$

위와 같은 I₂ 증기의 작물체 침적속도(V_g)는 Pelletier 등[14]이 야외실험(평균 풍속 : $6 m s^{-1}$)을 통하여 얻은 값인 1×10^{-2} [6]에 비해 수십-수백 배 낮다. 또한 Chernobyl 사고시 덴마크의 목초지에서 조사된 1.8×10^{-3} - 1.2×10^{-2} [15]에 비해서도 10 배 이상 낮다. 이것은 작물의 종류가 다르기 때문이기도 하지만 보다 중요한 요인은 풍속이나 습도와 같은 기상조건의 차이인 것으로 판단된다. I₂의 침적속도는 풍속이 낮아질수록 감소하는 것으로 알려져 있다[6,16]. Barry와 Chamberlain[15]은 bean (*Vicia fava*)의 잎에서 습도가 90% 이상일 때는 15% 이하일 때에 비해 I₂의 침적이 10-20 배 증가하였다고 보고하면서 이를 기공의 개폐와 밀접한 관련이 있는 것으로 추정하였다.

본 실험에서 풍속은 $0.2 m s^{-1}$ 내외로 야외조건에 비해서는 매우 낮았고 습도도 비교적 낮았다. 그러나 본 연구에서는 습도에 따른 침적속도의 변화에 있어서 이렇다할 경향성은 발견할 수 없었다. 이것은 피폭일자 간에 습도의 변화 정도가 심하지 않을 뿐 아니라 기공의 개폐는 습도 외에 조도와 온도에도 좌우되며 기상 요인의 영향 또한 작물체의 수분 상태에 따라 달라지기 때문인 것으로 판단된다[17]. 한편 기공의 개폐를 조절하는 가장 중요한 인자 중의 하나로 알려져 있는 조도의 경우에도 경향성이 나타나지 않았다. 이것은 조도의 영향은 광 자체뿐만 아니라 습도와 온도의 변화를 통해서도 나타나는 매우 복합적인 것이다[17]라는 사실과 어느 정도 관련이 있을 것

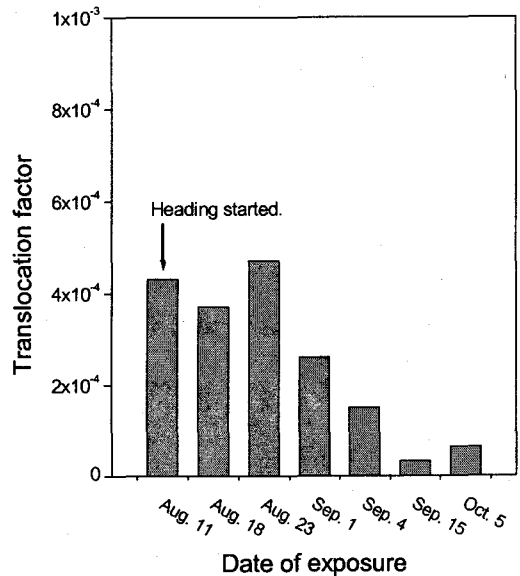


Fig. 2. Translocation factors of iodine for the hulled seeds of the rice plants exposed to I₂ vapor at different times.

으로 보인다.

이상으로 볼 때 바람이 거의 없고 습도도 비교적 낮은 피폭상자 내에서의 실험 결과를 야외 현장에 그대로 적용하는 것은 과소평가의 가능성이 매우 높다고 하겠다. 한편 I₂ 증기의 작물체 침적은 기공을 통한 흡수보다는 주로 단순한 표면침착에 기인한다는 가정을 뒷받침하는 실험결과를 얻었다는 보고도 있다[18]. 따라서 I₂ 증기의 작물체 침적 기작과 기상 요인의 영향에 관해서는 앞으로 보다 세밀한 연구가 수행되어야 할 것이다.

쌀알 전류계수

생육시기별로 I₂에 피폭된 벼에 대해서 수확기에 조사한 I의 쌀알(현미) 전류계수는 그림 2와 같다. 여기서 쌀알의 I 함유량은 세 개의 시료에 대한 평균치를 사용하였다. 7월 7일과 7월 21일 피폭에서는 시료 처리 및 분석에서의 오류로 인하여 믿을만한 결과를 얻지 못하였으므로 전류계수를 나타내지 않았다.

전류계수는 쌀알의 발육초기에 해당하는 8월 23일 피폭에서 4.7×10^{-4} 로 가장 높았다가 그 이후로는 대체로 점점 감소하여 황숙기경 피폭에서는 최고치에 비해 10 배 정도 낮았다. 이것은 벼가 수확기에 가까워질수록 기온이 떨어지고 조적이

황변, 노화하여 물질의 흡수 및 운반과 같은 생리 활동이 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 전류기간이 점점 짧아지는 것도 약간이나마 하나의 요인으로 작용할 수 있을 것이다. 이와 같은 피폭시기에 따른 전류계수의 변화 양상은 최 등 [19]이 보고한 Mn, Co, Sr, Ru, Cs 전류계수의 변화 양상과 크게 다르지 않다.

출수 시작일인 8월 11일 피폭(아직 출수하지 않은 재배상자 사용)에서도 전류계수가 4.3×10^{-4} 으로 비교적 높게 나타났다. 출수 전 피폭에서 I₂는 잎에만 침적하고 출수 후 피폭에서는 잎과 쌀알껍질(이후 왕겨가 될 부위)에 침적한다. 따라서 위와 같은 전류계수는 현미내 I의 축적에 있어서 잎으로부터의 전류도 껍질로부터의 전류 못지않게 중요하다는 것을 암시한다. 한편, 출수 직전에는 이삭이 지엽의 잎집 속에 터질 듯이 배어 있으므로 틈새기를 통하여 쌀알껍질이 공기에 노출되었을 가능성도 배제할 수 없다. Sumiya 등[20]은 출수한 벼의 I₂ 피폭 실험에서 현미내 I는 주로 쌀알껍질로부터의 이동에 기인하는 것임을 암시하는 실험 결과를 얻었다고 보고한 바 있다. 그러나 이들의 결론은 이삭을 가리고 피폭한 벼와 가리지 않고 피폭한 벼의 조곡(현미+껍질)내 I 함량 차이에 근거한 것이므로 현미 자체로의 전류에 있어서는 그와 다를 수도 있을 것이다.

IAEA[21]가 발표한 핵종별, 작물별 전류계수에 대한 기대치는 이동성이 매우 낮은 핵종으로 알려진 Sr과 Ru의 경우 곡류의 수확전 60 일 이내 침적시 각각 3.5×10^{-3} - 3.0×10^{-2} 및 1.0×10^{-3} - 2.5×10^{-2} 정도이다. 최 등[19]은 이 두 핵종에 대해서 침적시기별로 조사한 쌀알 전류계수가 최고 각각 1.3×10^{-2} 및 3.8×10^{-3} 이라고 발표하였다. 본 연구에서 조사된 I의 전류계수는 이와 같은 값들에 비해 대체로 수십 배 정도 낮다. 따라서 I는 작물체 침적후 가식부위로의 이동성이 가장 낮은 핵종에 속하는 것으로 볼 수 있겠다. 이것은 Müller와 Pröhl[22]이 ECOSYS-87 모델에서 I를 Cs와 함께 이동성이 높은 핵종으로 분류한 것과 상반되는 것이다. 작물의 종류와 I의 화학적 형태가 다르면 전류계수도 크게 달라질 수 있을 것으로 추정되므로 평가모델에서 어떤 값을 사용해야 될지 차후 면밀한 검토가 이루어져야 할 것이다.

참고로 Muramatsu 등[13]과 Uchida 등[4]에 의하면 벼의 등숙기 피폭시 쌀알(현미)로의 I 전류는 피폭원이 CH₃I 증기인 경우 I₂ 증기에 비해 10 배 정도 높았다. 이것은 기체상 I의 종류에 따라

작물체 침적후 체표면 침투성, 세포벽에 대한 흡착, 체액 내에서의 용해 등과 같은 체내 거동에 있어서 차이가 있기 때문인 것으로 판단된다.

결 론

원자력 사고시 원소상 방사성 요오드 증기의 벼에 대한 직접오염경로를 해석하기 위하여 피폭 상자 내에서 벼의 생육단계별로 작물체를 안정 I₂ 증기에 피폭시키고 피폭 직후와 수확기에 작물체를 채취하여 분석하였다.

I₂ 증기의 작물체 침적속도(V_g)는 일본에서 벼에 대해 비슷한 방법으로 조사한 것과는 큰 차이가 없었으나 다른 나라에서 야외조사나 야외실험으로 얻은 값에 비해서는 대체로 수십-수백 배 정도나 낮았다. 이것은 작물의 종류보다도 주로 바람이나 습도와 같은 기상조건의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 따라서 본 실험에서 얻은 침적속도를 평가모델에서 이용코자 할 때는 이러한 점에 주의해야 한다. 작물체 침적속도를 생육밀도 기준으로 표시한 NV_g (mass-normalized V_g)는 침적시기에 따른 변이가 V_g보다 작았다. 모델의 불확실성을 줄이기 위해 V_g 대신 NV_g의 사용을 고려할 필요가 있다.

I₂ 증기의 작물체 침적후 쌀알로의 I 전류에 있어서는 쌀알껍질로부터의 이동뿐만 아니라 잎으로부터의 이동도 중요한 것으로 나타났다. 피폭원이 I₂ 증기일 경우 I의 쌀알 전류계수는 작물체내 이동성이 낮은 핵종으로 알려져 있는 Sr이나 Ru보다도 낮아 I는 이동성이 매우 낮은 핵종으로 분류될 수 있다. 피폭시기에 따른 I 전류계수는 쌀알의 발육초기 피폭시에 가장 높았다가 그 이후 피폭시기가 수확기에 가까워질수록 점점 감소하는 경향이였다.

여러 연구자들의 보고를 종합해 볼 때 I의 작물체 침적속도와 가식부 전류계수는 피폭 당시 I의 물리·화학적 형태에 따라 크게 다르므로 방사성 I의 방출에 따른 섭취 피폭선량을 보다 현실적으로 평가하기 위해서는 I의 형태별로 이동인자를 생산하고 공기중 농도도 형태별로 평가하여 작물체내 농도를 예측하도록 해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력중장기사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. M. J. Crick and G. S. Linsley, *An Assessment of the Radiological Impact of the Windscale Reactor Fire*, October, 1957, NRPB-R135, National Radiological Protection Board (1982)
2. R. S. Daniels, "Three Mile Island assessments," in : *Environmental Radioactivity*, Proc. the 19th Annual Meeting, 6-7 April, 1983, NCRP(1983)
3. IPSN, *The Tchernobyl Accident*, Rapport IPSN 2/86, Revision 3(1986)
4. S. Uchida, M. Sumiya, Y. Muramatsu, Y. Ohmomo, S. Yamaguchi, H. Obata and M. Umebayashi, "Deposition velocity of gaseous I to rice grains," *Health Phys.*, 55, 779-782(1988)
5. M. I. Sheppard and J. L. Hawkins, "Iodine and microbial interactions in an organic soil," *J. Environ. Radioactivity*, 29, 91-109(1995)
6. P. G. Voilleque and J. H. Keller, "Air-to-vegetation transport of ^{131}I as hypoiodous acid (HOI)," *Health Phys.*, 40, 91-94(1981)
7. S. Uchida, Y. Muramatsu, M. Sumiya and Y. Ohmomo, "Biological half-life of gaseous elemental iodine deposited onto rice grains," *Health Phys.*, 60, 675-679(1991)
8. R. K. Singhal, U. Narayanan and I. S. Bhat, "Laboratory evaluation of interception and translocation of ^{131}I in fenugreek and okra plants," *Health Phys.*, 67, 529-534(1994)
9. Y. Nakamura, M. Sumiya, S. Uchida and Y. Ohmomo, "Transfer of gaseous iodine to rice plants," *J. Radiat. Res.*, 27, 171-182(1986)
10. H. Noguchi and M. Murata, "Physicochemical speciation of airborne ^{131}I in Japan from Chernobyl," *J. Environ. Radioactivity*, 7, 65-74(1988)
11. R. J. Cox and C. J. Pickford, "Determination of iodine-129 in vegetable samples by inductively coupled plasma mass spectrometry," *J. of Analytical Atomic Spectrometry*, 7, 635-640(1992)
12. J. W. Olesik, *Anal. Chem. Plasma Atomic Emission Spectroscopy*, Boca ration, CRC press(1990)
13. Y. Muramatsu, S. Uchida, M. Sumiya and Y. Ohmomo, "Deposition velocity of gaseous organic iodine from the atmosphere to rice plants," *Health Phys.*, 71, 757-762(1996)
14. 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*, Edited by W. C. Reinig, Springfield, IL : Charles C. Thomas(1970)
15. 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, 3-20(1997)
16. P. J. Barry and A. C. Chamberlain, "Deposition of iodine onto plant leaves from air," *Health Phys.*, 9, 1149-1157 (1963)
17. 박종성, 조재영, 이은웅, 조동삼, 변종영, 이석순, 최관삼, 신제 작물생리학, 향문사(1991)
18. 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 Phys.*, 38, 315-320(1980)
19. Y. H. Choi, K. M. Lim, D. Yu, H. G. Park, Y. G. Choi and C. M. Lee, "Transfer pathways 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, 429-446(2002)
20. M. Sumiya, S. Uchida, Y. Muramatsu, Y. Ohmomo and H. Obata, "Transfer of gaseous iodine from atmosphere to rough rice, brown rice and polished rice," *Hoken Butsuri*, 22, 265-268(1987)
21. IAEA, *Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Temperate Environments*, Technical Report Series No. 364(1994)
22. H. Müller and G. Pröhl, "ECOSYS-87: A dynamic model for assessing radiological consequences of nuclear accidents," *Health Phys.*, 64, 232-252(1993)