

Contamination of Chinese Cabbage with ^{85}Sr , ^{103}Ru and ^{134}Cs Related to Time of Foliar Application

Yong-Ho Choi, Kwang-Muk Lim, Hyo-Guk Park,
Won-Yun Lee and Chang-Woo Lee
Korea Atomic Energy Research Institute

^{85}Sr , ^{103}Ru , ^{134}Cs 의 엽면처리 시기에 따른 배추의 방사능 오염

최용호 · 임광목 · 박효국 · 이원윤 · 이창우

한국원자력연구소

(1998년 9월 30일 접수, 1998년 12월 3일 채택)

Abstract - A solution containing ^{85}Sr , ^{103}Ru and ^{134}Cs was applied to Chinese cabbage in a greenhouse via foliar spraying at 5 different times during its growth. Interception of the applied activity by plant showed no difference among radionuclides and increased with decreasing time interval between application and harvest. The maximum interception factor observed was 0.87. Percentages of the intercepted activity remaining in the whole leaves at harvest varied 16~58 % for ^{85}Sr , 15~73 % for ^{103}Ru and 33~64 % for ^{134}Cs , with application time and those for the inner leaves (without 6 outmost leaves) varied 2~35 %, 0.4~46 % and 14~40 %, respectively. It was demonstrated that rain plays an important role in weathering loss of the activity. Tying the upper end of the plant prior to the last application lowered interception and remaining activity in the inner leaves by factors of 3~4. Present results can be referred to in predicting the radionuclide concentration in Chinese cabbage and deciding counter-measures at the time of an accidental release from the nuclear installation.

Key Words : radionuclide, Chinese cabbage, foliar application, interception factor, percent remaining, weathering loss, counter-measure

요약 - 온실내에서 ^{85}Sr , ^{103}Ru , ^{134}Cs 의 혼합용액을 배추의 생육중 다섯 차례에 걸쳐 엽면에 분무처리 하였다. 처리된 핵종이 작물체에 의해 차단되는 정도는 핵종간에 차이가 없었고 처리시기가 수확기에 가까울수록 점점 증가하였다. 측정된 차단계수의 최고치는 0.87이었다. 작물체에 침착한 핵종의 수확 시 잔류율은 처리시기에 따라 전체잎의 경우 ^{85}Sr 가 16~58 %, ^{103}Ru 이 15~73 %, ^{134}Cs 가 33~64 % 였고 속잎(6장의 결잎 제거)의 경우 각각 2~35 %, 0.4~46 % 및 14~40 %였다. 강우가 방사성 핵종의 환경제거 정도를 결정하는 데 중요한 역할을 한다는 것이 확인되었다. 배추의 생육후기 처리시 상단부를 묶었을 때 차단계수와 속잎 잔류율이 서너배씩 감소되었다. 본 연구결과는 배추의 생육중 사고방출시 배추내 핵종농도 예측 및 대책수립에 활용될 수 있다.

중심어 : 방사성 핵종, 배추, 엽면처리, 차단계수, 잔류율, 환경제거, 사고대책

서론

원자력시설로부터 방사성 핵종이 방출되어 농경지에 침적되면 농작물 섭취경로(food chain)를 따라 인체에까지 도달하여 내부피폭을 일으키게 된다 [1,2]. 원자력시설의 정상가동시에는 이러한 내부 피폭 선량은 무시할 수 있을 정도이지만 사고시에

는 대책이 필요할 정도로 높아질 수 있다. 따라서 원자력시설의 사고시 환경영향을 평가하고 합리적인 대책을 수립하여 주민과 생태계를 방사능으로부터 보호하기 위해서는 농작물의 방사능 오염경로에 대한 이해가 필요하다.

농작물의 방사능 오염은 방사성 핵종의 엽면침적과 토양으로부터의 뿌리흡수에 의해 이루어진다

[1-4]. 농작물의 비생육기에 사고가 발생하면 거의 전적으로 뿌리흡수를 통하여 방사성 핵종이 작물체내에 축적되지만 농작물의 생육중에 사고가 발생하면 일반적으로 엽면침적의 기여도가 뿌리흡수에 비해 훨씬 높은 것[3,4]으로 알려져 있다. 따라서 농작물의 생육중에 사고가 발생할 경우에는 엽면침적에 의한 농작물의 오염 정도를 보다 정확히 예측할 필요가 있다. 이를 위해서는 방사성 핵종의 엽면 피폭실험을 통하여 농작물 오염경로상의 핵종 이동인자에 관한 국내 고유의 자료를 확보해야 한다.

구미 각국에서는 1950년대부터 엽면침적에 관한 실험[5-7]이 자국의 주요 농작물을 대상으로 활발히 수행되어 왔으나 우리나라에서는 거의 전무한 실정이다. 엽면침적 실험의 대상이 되는 작물은 두 종류로 나눌 수 있다. 하나는 곡류나 과채류 등과 같이 특정부위가 가식부인 작물이고 다른 하나는 엽채류처럼 지상부 전체가 가식부인 작물이다. 전자의 경우에는 엽면에 침적된 방사능이 종실이나 열매로 전이하는 정도를 조사하는 것이 중요하나 후자의 경우에는 침적된 방사능이 수확시에 작물체에 잔류하는 정도를 조사하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 우리나라의 주요 엽채류인 배추를 대상으로 원전 사고시 주요 방출핵종[3,4,8] 또는 그 동위원소인 ^{85}Sr , ^{103}Ru , ^{134}Cs 를 작물생육중 다섯 차례에 걸쳐 엽면처리한 후 작물체에 의한 핵종의 차단계수, 수확시 잔류율 등과 같은 핵종 이동인자를 조사하고 작물체 오염경로를 해석하였다. 배추는 생육후기에 상단부를 끈으로 묶어주는 경우가 종종 있으므로 이러한 처치가 방사성 핵종의 엽면침적시 작물체 오염에 미치는 영향도 조사하였다.

재료 및 방법

실험작물 육성

'97년 8월 18일에 농우교배에서 생산한 장미배추(VCh-Hy-303)의 종자를 모종용 cup에 파종하고 9월 2일에 어린 작물체를 재배상자에 이식하였다. 재배상자는 가로, 세로, 높이가 각각 60 cm, 60 cm, 100 cm인 철제 상자로서 동위원소 실험실내에 1.3 m 깊이로 건조된 호속에 설치되었다. 작토층에 해당하는 상부 20 cm의 토양은 pH(1:2.5) 5.1, 유기물 함량 1.56 %, 유효인산 112 ppm, 양이온치환용량 3.3 me/100 g, 총질소 905 ppm인 사질양토였다.

이식시 재식밀도는 차단계수(interception factor) 조사 상자에서는 상자당 1개체로 하였고 수확시 잔류율 조사 상자에서는 상자당 4개체로 하였다. 단위면적의 농경지로 침적되는 방사성 핵종의 총량중 거기서 생육중인 작물체에 의해 차단되는 비율에 해당하는 차단계수[1-4,6]는 농작물의 재식밀도와 밀접한 관계가 있을 것이므로 차단계수 측정 실험에서는 재식밀도가 실제 재배와 비슷해야 한다. 배추는 품종의 특성에 따라 60 cm×35 cm~90 cm×50 cm의 면적에 한 개체씩 심는 것이 적당한 것[9]으로 되어 있으므로 본 실험에서는 차단계수 조사를 위해 상자(60 cm×60 cm)당 한 개체씩 육성하였다.

시비는 이식 3일전에 상자당 원예용 복합비료(N:P:K=21:17:17) 36 g, 소석회 30 g, 퇴비 100 g을 뿌리고 표층토와 혼합하였으며 이후 생육중 2차에 걸쳐 위의 복합비료 24 g씩을 지표에 살포하였다. 1.8 l의 수돗물을 2~3일 간격으로 지표에 공급하였고 병충해 방제를 위해 살균제와 살충제를 두세 번 살포하였다. 온실의 창문은 최대한 열어놓아 온도상승을 억제하고 통풍을 최대화하였다.

방사성 핵종 처리

^{85}Sr , ^{103}Ru , ^{134}Cs 의 무담체 원액을 0.015M HCl 용액에 혼합하여 적정농도('97년 9월 8일 기준 ml당 각각 100, 137, 18 KBq)로 희석하였다. 이 희석용액을 분무기에 담아 이식후 생육단계에 따라 다섯 차례에 걸쳐 가로, 세로, 높이 각각 90 cm, 90 cm, 130 cm의 피폭상자를 재배상자 위에 설치하고 그 속에 있는 작물체를 향하여 분사하였다. 분사높이는 작물체 최상부로부터 약 80 cm였고 1회 피폭시 상자당 분사횟수는 31회(재배상자 내 지표면을 9구획으로 나누어 3반복으로 분사한 후 네 모서리에 1회씩 추가로 분사), 총분사량은 14~16 ml, 소요시간은 약 15초였다. 피폭일자는 9월 13일, 9월 25일, 10월 6일, 10월 17일, 10월 27일(각각 수확 51일, 39일, 28일, 17일, 7일전)이었다. 매회 피폭은 차단계수 조사 상자와 잔류율 조사 상자의 두 상자에 대하여 이루어졌고 피폭시 지표면 오염을 방지하기 위하여 흡습지로 상자내 지표면을 피복하였다.

잔류율 조사 상자에서는 강우를 모사하기 위하여 피폭처리후 수확전까지 3~5일 간격으로 13회에 걸쳐 매회 작물체당 500ml의 수돗물을 물뿌리개를 이용하여 약 30 cm 높이에서 뿌려 주었다. 이와 같은 강우모사는 1차 피폭에서부터 수확까지(9월 13일~11월 3일) 약 80 mm의 강우량에 해당

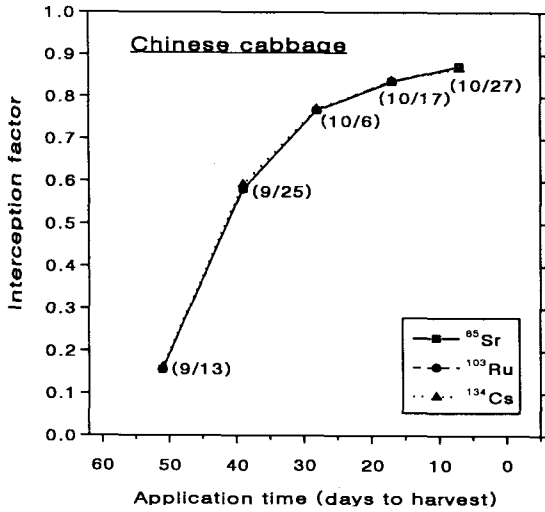


Fig. 1. Variations in interception factors of the radionuclides with time of their application.

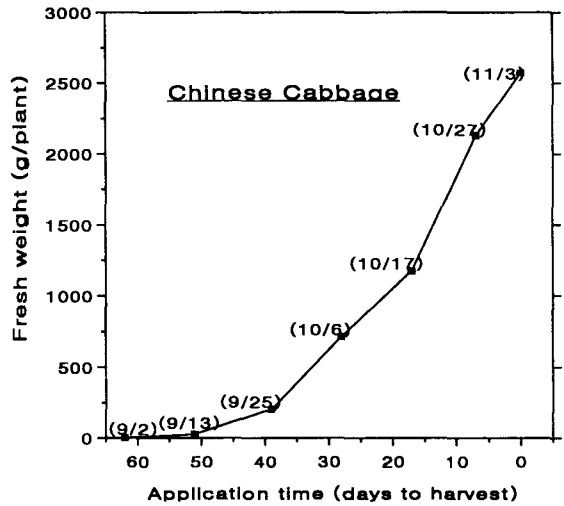


Fig. 2. Change in the fresh weight of Chinese cabbage.

한다. 이것은 '93~'95년의 3년간 실험지역에서의 상기 기간내 강우량이 51~165 mm[10-12]였던 점을 고려하여 결정한 것이다. 수확 28일전 처리에서는 강우무처리 실험도 실시하여 강우처리시와 비교하였다. 수확 7일전 처리시에는 상단부를 묶은 배추와 묶지 않은 배추를 동시에 피폭시켜 묶음처치가 방사성 핵종의 차단계수와 잔류율에 미치는 영향을 조사하였다.

시료채취 및 방사능 분석

피폭 3시간 후 차단계수 조사 상자에서 작물체 지상부를 채취하고 흡습지를 제거하였으며 잔류율 조사상자에서는 4개체중 대각선상에 있는 2개체의 지상부를 따로따로 채취하고 흡습지를 제거하였다. 잔류율 조사 상자에서의 나머지 2개체는 11월 3일 최종 수확하였는데 이때 최외부 6장의 겉잎과 내부의 속잎으로 구분하였다. 채취된 작물체 시료는 생체질량을 측정하고 잘게 잘라 온실내에서 2주 이상 자연건조한 후 110 °C로 조절된 전열기내에서 16시간 건조시켜 건조질량을 측정하고 계측용기에 담았다. 차단계수 조사상자에서 제거된 흡습지는 온실내에서 건조시킨 후 잘게 잘라 계측용기에 담았다.

작물체 및 흡습지 시료내 방사능 분석은 고순도 Ge 검출기를 이용한 γ -spectrometry법으로 실시하였다. 사용된 hardware와 software는 EG&G ORTEC사 제품이었고 계측시간은 시료에 따라

1~2시간 정도였다.

조사항목의 계산

핵종의 총침적량에 대한 작물체 침적량의 비로 정의되는 차단계수(I)는 다음과 같은 식으로 계산하였다.

$$I = \frac{\text{작물체 침적량 (Bq)}}{\text{작물체 침적량과 흡습지 침적량의 합 (Bq)}} \quad (1)$$

피폭시 작물체 침적량에 대한 수확시 잔류량으로 정의되는 잔류율(R, %)은 다음과 같은 식으로 계산하였다.

$$R = \frac{\text{수확시 전체잎 또는 속잎내 핵종 잔류량}}{\text{수확시로 붕괴보정한 핵종의 작물체 침적량}} \times 100 \quad (2)$$

결과 및 고찰

방사성 핵종의 차단계수

차단계수는 핵종간에 차이없이 수확 51일전 처리에서는 0.16이었다가 처리시기가 수확기에 가까울수록 점점 증가하여 수확 7일전 처리에서는 0.87이었다(그림 1). 수확 28일전 처리 이후부터는

Table 1. Biomass production of Chinese cabbage at harvest.

Application time (days to harvest)	Biomass production (g-fresh/plant)		
	WL	IL	IL/WL
51	2042±275	1736±249	0.85±0.007
39	1652±216	1393±218	0.84±0.022
28	1339±175	1100±170	0.82±0.019
17	1272±142	1040±137	0.82±0.017
7	1370±104	1103±101	0.80±0.013

WL : Whole leaves, IL : Inner leaves

증가속도가 매우 느려 수확직전 처리에서의 차단계수도 수확 7일전 처리와 비슷할 것으로 추정된다. Rauret 등[13]도 이와 유사하게 온실내 재배상자에서 기른 양상치에 대하여 수확기경에 방사성 에어로졸 피복실험을 수행한 결과 ^{85}Sr 와 ^{134}Cs 의 차단계수가 차이없이 0.8이라고 보고하였다. 수확기에 가까울수록 차단계수가 커지는 것은 수확기에 가까울수록 작물의 생육이 증가(그림 2)하여 작물체에 의한 지표면 피복정도가 높아지기 때문이다[7].

차단계수(I)는 작물체의 발육정도와 직접적인 관련이 있으므로 종중 단위면적당 가식부 수확량(Y, kg/m²)에 대한 상대값(I/Y, m²/kg)으로 나타내고 있다[6,14,15]. 이때 I/Y 값은 통상 재배기간 동안의 평균치에 해당하는 것으로 방사성 핵종이 연속적으로 균일하게 방출된다고 가정하는 정상가동시의 평가에 적합하다. Hoffman 등[14]이 여러 평가모델에서 사용하고 있는 엽채류에 대한 I/Y 값(m²/kg-fresh)을 조사한 바에 의하면 모델에 따라 0.1~0.53의 값을 보이고 있다. 그림 1과 그림 2의 자료로부터 본 실험에서의 I/Y 값을 근사적으로 구하면 다음과 같다.

$$\frac{(0.16+0.58+0.77+0.84+0.87) \div 5}{2.572(\text{kg-fresh/box}) \div 0.36(\text{m}^2/\text{box})} = 0.09 (\text{m}^2/\text{kg-fresh})$$

(3)

이렇게 구한 I/Y 값이 위의 범위에 비해 낮은 것은 배추는 단위면적당 수확량이 엽채류중에서도 비교적 높기 때문인 것으로 사료된다.

상기와 같은 I/Y는 연속적인 균일방출시 전체 침적시기 동안의 평균치에 해당하므로 일시적인 사고침적시의 평가에 사용하는 것은 적합치 않다. 이때에는 침적시기에 따라, 또는 작물의 단위면적당 생물량의 변화에 따라 최적의 I 값을 결정하는 모델을 수립할 필요가 있다. Chamberlain[16]이 제안한 목초지에 있어서의 작물체 차단계수와 목초

의 건생육밀도 간의 관계식이 목초 이외의 작물들에 대해서도 널리 적용[3,4,17]되고 있으나 Miller[18,19]는 이 식이 호박이나 콩과 같이 비초본성이고 잎이 넓은 작물에는 잘 맞지 않는다고 지적한 바 있다. 따라서 Chamberlain의 관계식이 배추와 같은 엽채류에도 적합한지에 대해서는 차후 면밀한 검토가 이루어져야 할 것이다.

수확시 작물체 핵종 잔류율

배추는 수확, 운송 및 조리 과정에서 몇장의 겉잎이 제거되는 것이 보통이므로 전체잎과 겉잎 6장을 제거한 속잎으로 나누어 잔류율을 조사하였다. 잔류율 조사 상자에서 배추의 생산수율은 표 1에서 보는 바와 같이 생육전반기 처리에서 후반기 처리에 비해 높은 경향이었다. 이것은 생육전반기 처리시 보다 일찍 한 상자에서 두 개체가 채취되어 상대적으로 낮은 재식밀도에서 자란 기간이 비교적 길었기 때문인 것으로 보인다.

같은 이유로 전체잎 생산수율에 대한 겉잎 생산수율의 비도 생육전반기 처리에서 다소 높게 나타났다. 즉 이 비는 배추의 발육이 양호하여 속이 충실할수록 커지게 된다. 따라서 실제재배와 비슷한 재식밀도에서 잔류율 측정실험을 수행했다면 속잎의 생산수율은 전체잎의 85% 이상이었을 것으로 예상된다. 본 연구에서는 공간적 제약으로 인하여 밀식조건에서 실험을 수행했으나 침적량에 대한 잔류량의 비로 결정되는 잔류율은 차단계수와는 달리 재식밀도와 큰 관계가 없을 것으로 판단된다. 다만, 속잎의 경우에는 적정 재식밀도에서 실험했다면 배추속의 발육이 보다 충실해졌을 것이므로 아래에서 언급될 속잎에서의 핵종 잔류율도 본 실험결과보다 약간씩 높아졌을 가능성이 있다.

핵종의 작물체 침적량에 대한 수확시 잔류율은 전체잎에 있어서나 속잎에 있어서나 세 핵종 모두

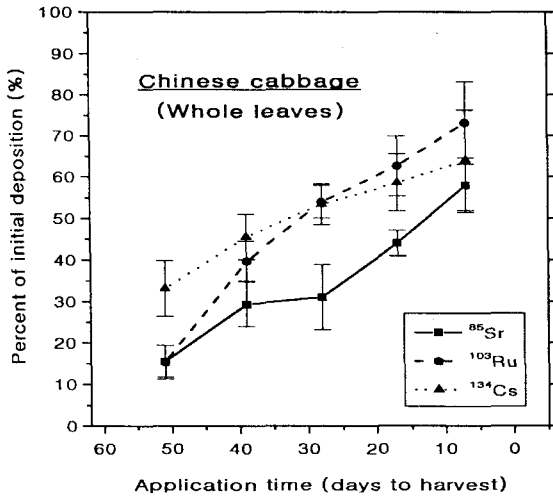


Fig. 3. Percent of initial deposition that remained in whole leaves at harvest.

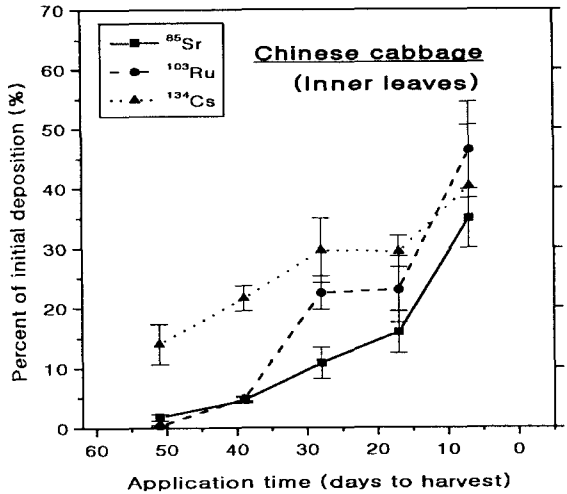


Fig. 4. Percent of initial deposition that remained in inner leaves at harvest.

처리시기가 늦어질수록 증가하는 경향이었으나 증가 양상은 전체잎과 속잎간 및 핵종간에 다소 차이가 있었다. 속잎의 경우 ^{85}Sr 와 ^{103}Ru 은 처리시기가 늦어짐에 따라 잔류율이 점점 크게 증가하였으나 ^{134}Cs 는 대체로 직선적인 증가 양상을 나타내었다(그림 3, 4). 전체잎 잔류율은 처리시기에 따라 ^{85}Sr 가 16~58%, ^{103}Ru 이 15~73%, ^{134}Cs 가 33~64%의 범위였고 속잎 잔류율은 처리시기에 따라 각각 2~35%, 0.4~46%, 14~40%의 범위였다. 따라서 결잎 6장의 무게가 전체의 15% 이하라고 보면 결잎 제거에 의한 농도감소 효과는 매우 크다고 하겠다.

전체잎에서의 잔류율은 침적한 핵종이 비나 바람 등과 같은 환경요인에 의해 작물체로부터 제거 [6,20,21]되는 정도에 거의 전적으로 좌우된다. 한편 속잎에서의 잔류율은 이외에 속잎에 의한 직접 차단 정도 및 오염된 결잎으로부터의 전이 정도에도 좌우될 것이다. 수확 51일전 처리와 7일전 처리간 잔류율의 차이가 전체잎에서는 핵종에 따라 2~5배 정도에 불과하나 속잎에서는 3~17배 정도나 된 것은 속잎에 의한 직접차단의 정도가 생육 초기와 후기간에 크게 차이났기 때문이다. 즉 출엽수가 적은 생육초기의 잎은 수확시 거의 전부 결잎이 되므로 수확 51일전 처리에서는 속잎(수확시 기준)에 의한 직접차단이 거의 일어나지 않지만 수확 7일전 처리에서는 속잎의 수가 크게 증가함에 따라 속잎에 의한 직접차단도 증가하게 되었

다.

수확 51일전 처리에서 ^{134}Cs 의 속잎 잔류율은 ^{103}Ru 이나 ^{85}Sr 보다 훨씬 컸다. 핵종간 속잎 잔류율의 차이는 주로 핵종간 작물체내 이동성의 차이 때문인 것으로 사료된다. 방사성 Cs의 이동성이 방사성 Sr이나 방사성 Ru보다 높다는 것은 여러 차례 보고[5,21]된 바 있다. 그러나 속잎 잔류율의 핵종간 차이는 수확 7일전 처리에서는 뚜렷하지 않았다. 이것은 이때에는 출엽수는 매우 증가한 반면에 수확까지의 기간은 짧아서 속잎에 의한 직접 차단의 기여가 결잎으로부터의 흡수.전이에 비해 훨씬 컸기 때문인 것으로 추정된다. 수확 51일전 처리에서 ^{134}Cs 의 전체잎 잔류율이 타핵종에 비해 높은 것도 상기와 같이 속잎으로 비교적 많이 이동되어 환경요인에 의한 제거가 상대적으로 어려워졌기 때문인 것으로 보인다.

대부분의 평가모델에서는 수확시 방사성 핵종의 작물체 잔류정도를 환경제거반감기(weathering half life, W_i)라는 매개변수로 평가하고 있고 그 값으로는 통상 작물이나 핵종, 침적시기 등에 관계없이 14일이나 15일[1-4]을 사용하고 있다. 본 실험결과로부터 계산된 핵종별, 처리시기별 W_i 값은 표 2에 나타나 있다. 이것은 방사성 핵종의 작물체 잔류율이 엽면처리후 일정한 반감기에 의해 지수함수적으로 감소한다는 가정에 입각한 것이다.

^{85}Sr , ^{103}Ru , ^{134}Cs 세 핵종의 W_i 는 처리시기에

Table 2. Weathering half-lives of radionuclides applied onto the aerial part of Chinese cabbage at 5 different times before harvest.

Application time (days to harvest)	Weathering half-life (d)		
	⁸⁵ Sr	¹⁰³ Ru	¹³⁴ Cs
51	19.1±1.5	18.8±1.7	32.0±2.3
39	22.1±2.8	29.3±2.4	34.5±3.2
28	16.7±3.5	31.6±3.1	31.1±3.8
17	14.4±1.0	25.8±6.0	22.4±4.5
7	9.0±1.8	16.7±6.9	11.5±4.4

따라 각각 9.0~22.1일, 16.7~31.6일 및 11.5~34.5일의 범위로 대체로 수확기에 가까운 처리일수록 짧아져 모두 수확 7일전 처리에서 가장 낮았다. 이것은 주로 방사성 핵종의 처리후 수일간은 엽육속으로 흡수된 방사능량은 적고 대부분이 잎의 표면에 존재하므로 비교적 빠른 속도로 제거되나 시간이 경과하면 엽육속에 존재하는 방사능이 증가하여 제거가 어려워지기 때문인 것[20]으로 판단된다. 이와 같이 침적후 시간이 경과하면 W_t 가 길어진다는 보고[20,22,23]는 적지 않다. 핵종간에는 ⁸⁵Sr의 W_t 가 타핵종에 비해 비교적 짧았는데 Aarkrog[24]도 곡류에 대한 실험에서 이와 유사한 결과를 얻은 바 있다. 그러나 한편으로 W_t 의 핵종간 차이가 뚜렷하지 않음을 보여주는 연구결과[16,25]도 없지 않다. 이러한 것은 실험조건 및 작물의 종류에 따라 달라질 것으로 사료된다.

본 실험 결과로 볼때 일시적인 사고침적의 경우 침적시기에 관계없이 일률적인 W_t 값을 적용하는 것은 비현실적이며 W_t 값으로 14일을 사용하면 배추의 생육초중기 침적시에는 선량 과소평가의 우려가 있다. 또한 정상가동시 연속적인 침적에 대한 평균치로서 14일을 사용하는 것도 과소평가

의 가능성이 있다고 할 수 있다. 실제로 목초류에 대한 야외실험에 있어서 방사성 Sr이나 Cs의 W_t 가 25일 이상임을 나타내는 보고들[25,26]도 꽤 많이 있다. 한편 침적시기에 따라서는 핵종간에도 W_t 가 비교적 크게 달라질 수 있다는 점에도 유의할 필요가 있다.

강우영향 및 묶음효과

수확전 28일 피폭에서 강우처리시 잔류율은 강우 무처리에 비해 핵종에 따라 전체잎의 경우 1.5~2.6배, 속잎의 경우 1.3~2.7배 정도 낮았다(표 3). 이런 사실은 강우가 방사성 핵종의 환경제거 정도를 결정하는 데 중요한 역할을 한다[20,27,28]는 것을 보여주고 있다. 또한 방사성 Sr이나 Cs가 작물체에 침적하였을 때 스프링클러 등을 이용하여 작물체를 세척하면 작물체내 핵종의 농도를 효과적으로 낮출 수 있다[21]는 것을 시사하고 있다.

강우처리에 의한 잔류율 감소 정도가 가장 큰 핵종은 ⁸⁵Sr였고 나머지 두 핵종은 서로 비슷하였다. Middleton[28]도 밀, 감자, 양배추에 대한 엽면 흡수 실험을 통하여 ⁸⁹Sr의 강우에 의한 제거 정도가 ¹³⁷Cs보다 크다는 것을 보여 주었다. 강우에

Table 3. Effects of a simulated rain on the radionuclide levels in mature Chinese cabbage.

Plant part	Rain	Percent of initial deposition at harvest (%)		
		⁸⁵ Sr	¹⁰³ Ru	¹³⁴ Cs
Whole leaves	Simulated	31.1±7.8	54.0±3.9	53.4±4.9
	No	81.8±17.0	82.5±17.8	80.2±13.9
Inner leaves	Simulated	10.8±2.6	22.5±2.8	29.6±5.4
	No	29.4±7.8	30.2±7.8	41.4±11.9

Note : Foliar application of RIs was made 28 days before harvest.

Table 4. Effects of tying the upper end of Chinese cabbage on the radionuclide levels in the mature plant.

Plant part	Tying	Percent of initial deposition at harvest (%)		
		^{85}Sr	^{103}Ru	^{134}Cs
Whole leaves	Yes	70.4±12.8	84.6±16.8	74.2±14.0
	No	58.0±6.6	73.2±10.1	64.0±12.2
Inner leaves	Yes	9.1±2.6	12.6±4.5	13.6±3.0
	No	34.9±4.9	46.4±8.1	40.2±10.3

Note : Tying the upper end and foliar application of RIs were made 29 and 28 days, respectively, before harvest.

의한 방사능 제거 정도는 엽면에 부착된 핵종이 강우에 녹아 땅으로 흘러내리는 정도, 강우의 작용으로 엽육속으로부터 용탈되는 정도와 엽육속으로 흡수되는 정도, 강우의 기계적 작용에 의한 탈락 및 잎의 성장과 부착형태 등에 따른 빗물의 작물체 잔류 정도와 같은 요인들이 복합적으로 작용함으로써 결정될 것으로 판단된다. 따라서 강우의 영향은 강우의 세기, 빈도 및 강우량 등에 따라 차이가 있을 것[20]이며 핵종의 침적시기에 따라서도 달라질 것으로 생각된다. 이런 점으로 볼 때, 연구결과의 현실성을 위해서는 야외실험을 수행하는 것이 가장 좋은 방법이나 이것은 사실상 불가하므로 실제의 강우를 보다 현실적으로 모사할 수 있는 방안을 모색할 필요가 있다. 본 연구에서는 강우의 빈도 및 강우량을 예년 수준으로 모사함으로써 데이터의 현실성 제고를 꾀하였다.

Ertel 등[20]이 Chernobyl 사고시 수집한 강우를 야외에서 목초류에 분사처리하여 방사성 Cs의 환경제거를 조사한 바에 의하면 처리후 한달 경과시 강우에 노출된 포트에서의 작물체 방사능 잔류정도는 그렇지 않은 포트의 30 % 정도에 불과하였다. 실험조건이 달라 직접적인 비교는 곤란하지만 본연구에서 약 한달 간의 강우처리에 의한 ^{134}Cs 잔류율의 감소 정도는 이보다 낮았다. 이것은 수확 28일전 이후의 배추는 목초와 다르게 잎이 심하게 중첩하여 밀생한다는 사실과 무관치 않을 것으로 사료된다. 즉 이러한 배추잎의 발육특성으로 인하여 ^{134}Cs 가 녹아 있는 빗물이 지표표 쉽게 떨어지지 않고 하부의 잎이나 작물체 기부에 체류하는 경향이 비교적 높았던 것으로 볼 수 있다.

수확 7일전 처리에서 배추 상단부를 끈으로 묶은 경우 차단계수는 핵종간 차이없이 0.23으로 묶

지 않았을 때의 26 %에 불과하였다. 한편 수확시 잔류율은 묶은 경우가 묶지 않았을 때에 비해 전체 잎의 경우 다소 높았으나 속잎의 경우 핵종에 따라 3~4배 정도 낮았다(표 4). 이것은 배추의 잎을 모아 상단부를 묶으면 대부분의 방사능이 겹잎에 침적되기 때문이다. 이처럼 배추의 생육후기에 상단부를 묶어주게 되면 핵종의 차단계수와 수확시 속잎 잔류율을 크게 감소시켜 배추내 핵종농도를 현저히 낮출 수 있을 것이다. 배추의 상단부를 끈으로 묶어주는 것은 비교적 손쉬운 작업이므로 이것은 배추의 생육후기 사고발생시 사고대책으로서의 이용가능성이 높다고 하겠다.

결론

배추의 생육중 시기별로 ^{85}Sr , ^{103}Ru , ^{134}Cs 를 엽면처리하고 작물체 차단계수와 수확시 잔류율을 조사하여 배추의 생육중 사고방출시 배추내 핵종농도를 예측하는 데 필요한 기초자료를 생산하였다. 차단계수는 핵종간에 차이가 없었지만 환경제거 정도에 의해 결정되는 수확시 작물체 잔류율은 처리시기에 따라서는 핵종간에 꽤 큰 차이가 있었으므로 유의할 필요가 있다. 수확한 배추의 겹잎 제거 및 생육후기 처리시 배추 상단부의 결속으로 배추내 핵종농도가 크게 감소하여 사고대책으로서의 이용가능성이 확인되었다.

방사성 핵종의 차단계수와 잔류율은 재배조건이나 기상요인에 크게 좌우되므로 현실성 높은 자료를 얻기 위해서는 야외포장 실험이 요구되나 본 실험은 방사선안전관리상의 제약으로 인해 동위원소 실험은실내에서 수행되었다. 그러나 온실의 창문을 최대한 개방하였고 강우모사 처리를 하였으

더 비교적 대형의 재배상자내에 경작지를 재현하고 관행적인 영농법을 적용함으로써 야외포장과의 유사성을 확보하였으므로 본 연구결과를 실제 재배에 적용하여도 큰 오류는 없을 것으로 본다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부가 시행한 원자력증장기연구개발사업의 결과입니다.

참고문헌

- IAEA, Generic Models and Parameters for Assessing the Environmental Transfer of Radionuclides from Routine Releases, Safety Series No. 57, Vienna(1982).
- 최용호, 이창우, 김진규, 이명호, 이정호, "가동중 원자력 시설에 의한 연간 섭취경로 피폭선량 평가의 현실성 제고를 위한 KFOOD 코드의 개선," 한국원자력학회지, 25, 437-446 (1993).
- 이창우, 최용호, 황원태, 이정호, "쌀 섭취경로에서 동적모델을 사용한 장반감기핵종의 거동해석 및 내부피폭선량 계산," 대한방사선방어학회지, 17, 15-22(1992).
- M. L. Abbott and A. S. Rood, "COMIDA: A radionuclide food chain model for acute fallout deposition," *Health Phys.* 66, 17-29 (1994).
- A. Aarkrog, "Radionuclide levels in mature grain related to radiostromium content and time of direct contamination," *Health Phys.* 28, 557-562(1975).
- P. J. Coughtrey and M. C. Thorne, Radionuclide Distribution and Transport in Terrestrial Ecosystem - A Critical Review of Data, A. A. Balkema, Rotterdam(1983).
- J. E. Pinder III, T. G. Ciravolo and J. W. Bowling, "The interrelationships among plant biomass, plant surface area and the interception of particulate deposition by grasses," *Health Phys.* 55, 51-58(1988).
- IPSN, The Tchernobyl Accident, Rapport IPSN 2/86, Revision 3(1986).
- 표현구 등, 채소원예각론, 향문사(1996).
- 김병우 등, 대덕 핵시설 주변 기상정보 종합 해석, KAERI/RR-1291/93, 한국원자력연구소 (1993).
- 김은한 등, 대덕 원자력시설 주변 기상정보 종합 해석, KAERI/RR-1443/94, 한국원자력연구소(1994).
- 한문희 등, 대덕 원자력시설 주변 기상정보 종합 해석, KAERI/RR-270/95, 한국원자력연구소(1995).
- G. Rauret, V. R. Vallejo, D. Cancio and J. Real, "Transfer of radionuclides in soil-plant systems following aerosol simulation of accidental release: design and first results," *J. Environ. Radioactivity* 29, 163-184(1995).
- F. O. Hoffman, U. Bergstroem, C. Gyllander and A.-B. Wilkens, "Comparison of predictions from internationally recognized assessment models for the transfer of selected radionuclides through terrestrial food chains," *Nuclear Safety* 25, 533-546 (1984).
- F. O. Hoffman, C. F. Baes III, et al., A Statistical Analysis of Selected Parameters for Predicting Food Chain Transport and Internal Dose of Radionuclides, NUREG/CR-1004, ORNL/NUREG/TM-282(1979).
- A. C. Chamberlain, "Interception and retention of radioactive aerosol by vegetation," *Atmos. Environ.* 4, 57-78(1970).
- F. W. Boone, Y. C. Ng and J. M. Palms, "Terrestrial pathways of radionuclide particulates," *Health Phys.* 41, 735-747 (1981).
- C. W. Miller, "Validation of a model to predict aerosol interception by vegetation," in: International Symposium on the Biological Implications of Radionuclides Released from Nuclear Industries, IAEA, Vienna, IAEA-SM-237/53, pp. 351-361(1979).
- C. W. Miller, "An analysis of measured values for the fraction of a radioactive aerosol intercepted by vegetation," *Health Phys.* 38, 705-712(1980).
- J. Ertel, G. Voigt and H. G. Paretzke, "Weathering of ^{134/137}Cs following leaf contamination of grass cultures in an outdoor experiment," *Radia. Environ. Biophys.* 28, 319-326(1989).

21. I. A. Scotti, "Effect of treatment time on the ^{134}Cs and ^{85}Sr concentrations in green bean plants," *J. Environ. Radioactivity* 33, 183-191(1996).
22. W. E. Martin, "Losses of ^{90}Sr , ^{89}Sr and ^{131}I from fallout-contaminated plants," *Radia. Bot.* 4, 275-284(1964).
23. J. P. Witherspoon and F. G. Taylor, "Interception and retention of a simulated fallout by agricultural plants," *Health Phys.* 19, 493-499(1970).
24. A. Aarkrog, "On the direct contamination of rye, barley, wheat and oats with ^{85}Sr , ^{134}Cs , ^{54}Mn and ^{141}Ce ," *Radia. Bot.* 9, 357-366(1969).
25. R. Kirchmann, E. Fagniard and S. Van Puymbroeck, "Studies on foliar contamination by radiocaesium and radiostrotrintium," in: *Radiological Concentration Processes, Proc. of an Intern. Symp.*, Stockholm, 25-29 April, 1966, pp. 475-483, Pergamon Press(1967).
26. R. C. Chadwick and A. C. Chamberlain, "Field loss of radionuclides from grass," *Atmos. Environ.* 4, 51-56(1969).
27. J. Moorby and H. M. Squire, "The loss of radioactive isotopes from the leaves of plants in dry conditions," *Radia. Bot.* 3, 163-167(1963).
28. L. J. Middleton, "Radioactive strontium and caesium in the edible parts of crop plants after foliar contamination," *Int. J. Rad. Biol.* 4, 387-402(1959).