

## 콩의 생육단계별 HTO 증기 피폭후 TFWT 및 OBТ의 생체내 거동

### Behaviors of TFWT and OBТ in Soybean Plants after Their Exposure to HTO Vapor at Different Growth Stages

임광목, 최용호, 이원윤, 박효국, 강희석, 최희주, 이한수  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

피폭상자 내에서 콩을 생육단계별로 1시간 동안 HTO 증기에 피폭시켰다. HTO 흡수계수(피폭 시간 동안 피폭상자내 공기 수분중 평균 HTO 농도( $Bq\ ml^{-1}$ )에 대한 피폭종료 직후 작물체내 TFWT 농도 ( $Bq\ ml^{-1}$ )의 백분율)는 대체로 잎>껍지>콩알>줄기의 순으로 잎에서는 최고 40.2%, 줄기에서는 최고 6.4%였다. TFWT 농도는 수확시까지 피폭시기에 따라 수 천에서 수 십만 배 감소하였으며 감쇄계수는 부위간에 대체로 잎>껍지>콩알>줄기의 순이었다. 수확기에 조사한 각 부위에서의 OBТ 생산계수(피폭종료 직후 잎의 TFWT 농도에 대한 건조시료 내 OBТ 농도의 비,  $ml\ g^{-1}$ )는 콩 종실의 경우 피폭시기에 따라  $2.2\times 10^{-5}\sim 9.5\times 10^{-3}$ 의 범위로 콩의 생육중기 피폭시 가장 높았다. OBТ 생산계수의 피폭시기에 따른 변이는 종실과 꼬투리에서 경엽부에 비해 훨씬 컸다. 본 연구결과는 원자력 시설로부터 HTO의 단기적 사고방출시 주곡작물내  $^3H$  농도 예측을 위한 모델 수립 및 검증에 활용될 수 있다.

#### Abstract

Soybean plants were exposed to HTO vapor in an exposure box for 1 hour at different growth stages. HTO absorption coefficients (percent ratios of TFWT concentrations ( $Bq\ ml^{-1}$ ) at the end of exposure to mean HTO concentrations ( $Bq\ ml^{-1}$ ) in air moisture in the box during exposure) decreased in the order of leaf>shell>seed>stem with the highest values being 40.2% for leaf and 6.4% for stem. TFWT concentrations at harvest were lower than those at the end of exposure by factors of thousands to hundreds of thousands. The reduction factor decreased in the order of leaf>shell>seed>stem. OBТ production factors (ratios of the OBТ concentration in the dry plant part at harvest to the initial leaf TFWT concentration,  $ml\ g^{-1}$ ) were in the range of  $2.2\times 10^{-5}\sim 9.5\times 10^{-3}$  for soybean seeds depending on exposure times to be the highest when the exposure was performed at the middle stage of growth. The exposure time-dependent variation in the OBТ production factor was much higher in seeds and shells than in leaves and stems. Present results are referred to in establishing and validating soybean  $^3H$  models for an acute accidental release of HTO from nuclear facilities.

## 1. 서 론

$^3\text{H}$ 는 원자력 시설로부터 주로 HT(tritiated hydrogen gas)와 HTO (tritiated water)의 형태로 방출된다<sup>1)</sup>. 이중 HTO는 물과 같이 행동하므로 작물체의 기공을 통하여 잘 흡수되나 HT는 환경 중에서 HTO로 전환되기 전에는 거의 흡수되지 않는다<sup>1-3)</sup>.

작물체에 흡수된 HTO중 일부는 작물체의 대사작용에 의해 OBT (organically bound tritium, 유기결합형 tritium)로 되어 가식부위에 축적되고 나머지는 증산작용에 의해 외기로 방출되거나 TFWT(tissue free-water tritium, 조직자유수중 tritium)로 작물체내에 존재하게 된다<sup>4-6)</sup>. 따라서 HTO 방출에 따른 섭취피폭선량 평가를 위해서는 작물체내 TFWT와 OBT 농도를 예측하는 것이 중요하다.

수확된 작물체내 TFWT는 저장기간중 외기 수분과의 교환작용에 의해 농도가 감소하나 OBT는 농도가 거의 일정하게 유지되며 인체에 대한 방사선 위험도도 OBT가 TFWT보다 몇 배 큰 것으로 조사되어 있다<sup>7,8)</sup>. 따라서 저장기간이 짧고 수분 함량이 높은 채소류의 경우 TFWT의 선량 기여도가 비교적 높을 것으로 예상되나 곡류의 경우 OBT의 선량 기여도가 훨씬 높은 것으로 알려져 있다<sup>6,9,10)</sup>.

본 연구에서는 우리나라의 주식작물인 콩을 대상으로 HTO 증기피폭 실험을 작물의 생육단계별로 실시하여 HTO 흡수계수, TFWT 회석계수, OBT 생산계수 등과 같은 오염인자를 조사하고 피폭시기의 영향을 분석하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 1) 실험작물 육성

우리나라의 장려품종인 황금콩을 가로 41 cm, 세로 33 cm, 높이 23 cm인 플라스틱 포트에 육성하였다. 재배포트들은 야외에 배치하였으며 포트내 토양은 pH 5.1, 유기물 함량 1.6%의 사질양토였다.

2001년 5월 22일에 황금콩의 종자를 약 3 cm 깊이로 직파하였다. 생육밀도는 주당 2 개체로 하여 상자당 2 주인 것(A 형)과 6 주(B 형)인 것 두 가지였다. 파종량은 주당 4~6 립 정도로 파종 후 복토한 다음 생육초기에 적당히 솟아 주었다.

시비는 이식 4~5 일 전에 상자당 퇴비 40 g, 복합비료 7 g(N:P:K=21%, 17%, 17%), 석회 37 g을 뿌리고 표층토와 혼합하였고 생육중에도 수차례에 걸쳐 적당량의 복합비료를 추비로 공급하였다. 적당량의 수돗물을 2~3 일 간격으로 지표에 공급하였고 병충해 방제를 위해 살충제를 수차례 살포하였다.

### 2) 작물체 HTO 피폭

콩 재배상자를 95 cm (L) × 95 cm (W) × 130 cm (H)의 피폭상자에 집어넣고 피폭시켰다. 피폭일자는 7월 2일, 7월 13일, 7월 30일, 8월 9일, 8월 24일, 9월 17일이었다. 7월 2일과 8월 9일 피폭에서는 생육밀도가 B 형인 재배상자를 사용하였고 나머지 피폭에서는 A 형인 재배상자를 사용하였다.

피폭상자는 투명 합성수지제로서 하부 바닥과 상부의 직육면체 통으로 되어 있다. 상부의 내벽에 HTO 용액 가열장치, fan(가열장치 바로 밑에), 및 온·습도 센서를 부착하였다. 상부의 윗면은 개폐가 가능한 뚜껑으로서 피폭 직전에 HTO 용액이 담긴 작은 유리병을 가열장치 속에 집어넣거나 피폭 종료 직후 상자 내부를 환기시킬 때 열 수 있도록 하였다. 피폭상자의 틈새기는 모두 실

리콘 라버로 라이닝하여 공기의 출입을 최대한 억제하였다.

재배상자를 피폭상자의 바닥 위에 올려 놓고 그 위에 상부의 통을 덮어씌운 후 2 ml (ml당 18.5 MBq)의 HTO 용액이 담긴 유리병을 가열장치에 올려놓고 60 분간 15~20 volt, 1~1.3 amp.의 전원에 연결시켜 가열하였다. 가열과 동시에 fan을 작동시켜 증발된 HTO가 상자 내에 고루 퍼지게 하였다. 가열이 끝난 직후에는 상부의 뚜껑을 열고 외부에 있는 fan을 5분간 작동시켜 신선한 공기를 주입하고 환기를 피하였다.

피폭실험은 오전 9시에서 10시 사이에 시작하였다. 피폭중에는 펌프를 이용하여 매 5 분 동안 피폭상자 내부의 공기 1.5 l를 증류수가 담긴 20 ml의 scintillation vial에 통과시켜 공기중 수분을 포집하였고 상자 내부의 온도와 습도를 5 분 간격으로 측정, 기록하였다. 조도는 비슷한 조건 하에서 조도계로 측정하여 구하였다.

### 3) 시료 채취 및 방사능 분석

피폭상자의 환기가 종료된 직후 상자의 상부를 들어내고 시료를 채취하였다. 생육밀도가 A형인 재배상자에서는 피폭 직후에 주당 1 개체씩 2 개체를 채취하고 나머지 2 개체는 수확기(2001년 10월 5일)에 채취하였다. 생육밀도가 B형인 재배상자에서는 피폭 직후에 임의의 2 주로부터 주당 1 개체씩 2 개체를 채취한 후 시간경과에 따라 5~6 회에 걸쳐 1 개체 또는 2 개체씩 채취하였고 최종적으로 수확기에 2 개체를 채취하였다.

채취한 시료는 부위별로 나누어 냉동, 보관한 후 동결건조법으로 조직자유수를 추출하여 TFWT 농도를 측정하였다. 동결 건조된 작물체 시료는 믹서기를 이용하여 분쇄한 후 습한 공기를 통과시켜 교환과정을 통해 잔류 TFWT와 치환성 OBT를 제거하였다. 이렇게 처리된 시료들은 강력한 흡수제인  $P_2O_5$ 를 이용하여 수일 간 건조시킨 후 산화연소장치(Oxidizer 306, Canberra-Packard)를 이용하여 연소시키고 발생된 연소수를 20 ml scintillation vial에 채집하였다.

Vial에 채집된 연소수 시료내  $^3H$  농도는 액체섬광계수기(Quantulus 1220, Wallac)로 분석하였다. 측정시간은 20~30 분이었고 한 시료를 세 번 측정하여 평균값을 취하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 1) 작물체의 피폭 환경

피폭상자 내에서 작물체를 HTO 증기에 피폭시키는 동안의 피폭상자 내 기상조건과 공기수분 중 HTO 농도는 표 1과 같이 요약될 수 있다.

기온은 대체로 피폭이 진행될수록 상승하여 피폭 종료시에는 시작에 비해 4~15 °C 정도 높았다. 피폭시간 동안의 평균기온은 대체로 30~40 °C의 범위였다. 상대습도는 대체로 처음에는 증가하다가 어느 정도 경과한 다음부터는 서서히 감소하였고 평균은 80~85% 정도였다. 조도는 구름이 많은 날을 제외하고는 피폭이 진행됨에 따라 점점 증가하는 경향이었으며 평균은 구름의 양에 따라 대체로 40~70 klux의 범위였다.

피폭시간 동안의 공기수분 중 HTO 평균농도는 HTO 용액의 증발속도, 상자 내부의 절대습도, 수분의 벽면 응결정도, 외부로의 HTO 누출량, 작물체의 HTO 흡수량 등에 따라 최고 3 배 정도의 차이를 나타내었다.

그림 1은 피폭시간 동안 피폭상자내 공기수분 중 HTO의 농도변화를 조사한 것이다. 피폭상자내 공기수분 중 HTO 농도는 대체로 피폭시작 후 20~30 분 동안 급히 증가하다가 그 이후에는 서서히 감소하는 경향이였다.

표 1. 콩 HTO 피폭시 피폭상자내 기상 조건 및 공기 수분중 HTO 농도

Code of exposure	Date of exposure	Temperature(℃)		Rel. humidity(%)		Radiation(klux)		HTO in air humidity (Bq/ml)	
		Range	Mean	Range	Mean	Range	Mean	Range	Mean
SB1	July 2	34.2-44.0	39.6	75.1-85.2	81.5	42.6-72.3	54.5	7,049-103,855	77,663
SB2	July 13	28.6-34.6	32.1	81.2-87.7	86.4	28.3-48.5	36.9	10,306-188,736	147,428
SB3	July 30	36.0-40.4	38.4	68.5-87.0	84.2	30.9-54.6	39.1	6,972-159,935	114,135
SB4	Aug. 9	42.2-49.6	46.6	46.5-71.8	68.6	60.8-80.8	69.8	11,488-79,514	52,672
SB5	Aug. 24	26.8-44.6	37.6	74.3-89.0	81.0	47.0-65.0	55.5	6,161-126,812	91,909
SB6	Sep. 17	24.4-40.0	30.8	75.1-89.4	83.6	18.4-75.8	49.8	7,323-249,183	137,088

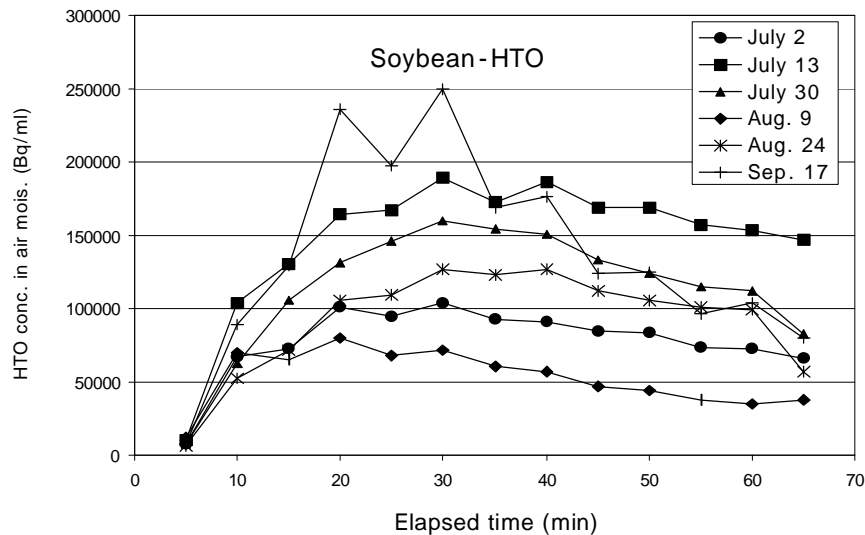


그림 1. 피폭시간 동안 피폭상자내 공기수분중 HTO 농도변화

2) 작물체내 TFWT 농도

우리나라의 주식작물인 콩의 생육단계별로 HTO 피폭실험을 실시하고 콩의 잎, 줄기, 깍지, 콩알에 있어서 피폭 직후(h0) 및 수확시에 TFWT 농도를 측정하여 공기수분중 HTO 평균농도에 대한 백분율로 나타낸 것은 각각 그림 2~5에서 보는 바와 같다. 이하에서는 이것을 상대농도라 칭한다.

앞에서 피폭 직후 TFWT 상대농도는 피폭시기에 따라 15.8~40.2%의 변이를 보였다. 7월 30일 피폭에서 가장 낮은 것은 조도가 비교적 낮았을 뿐만 아니라 작물체가 매우 무성하여 공기의 흐

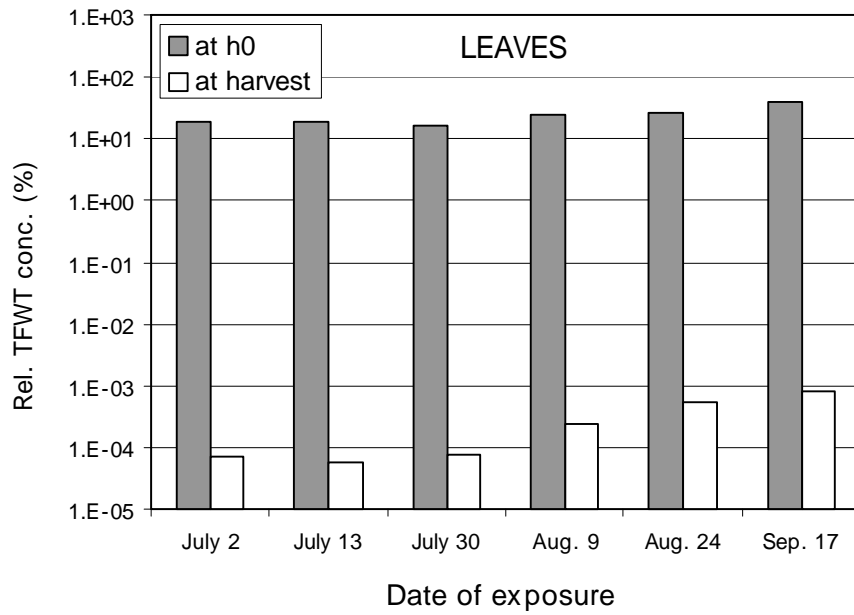


그림 2. 공기수분중 HTO 평균농도에 대한 피폭 직후 및 수확시 앞의 TFWT 농도비

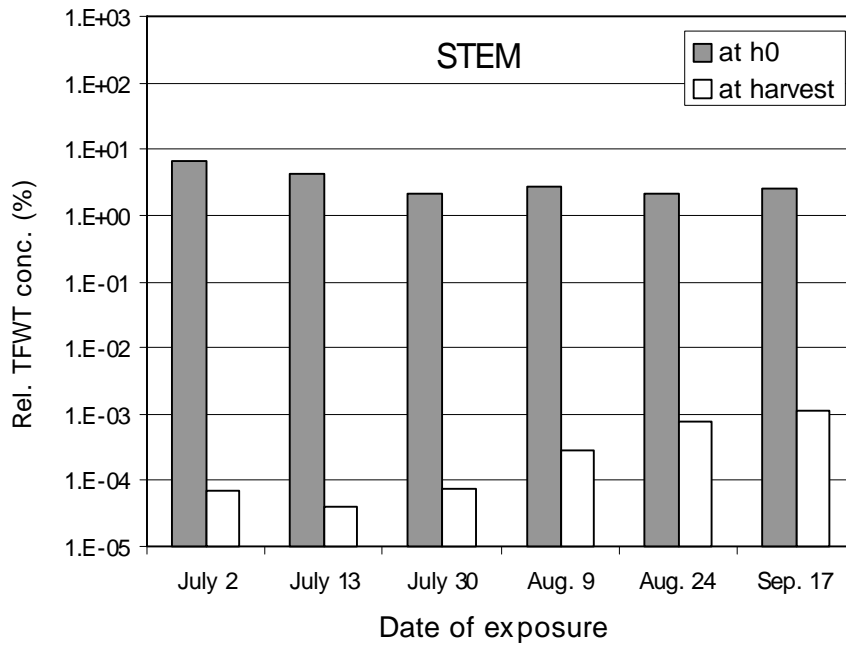


그림 3. 공기수분중 HTO 평균농도에 대한 피폭 직후 및 수확시 줄기의 TFWT 농도비

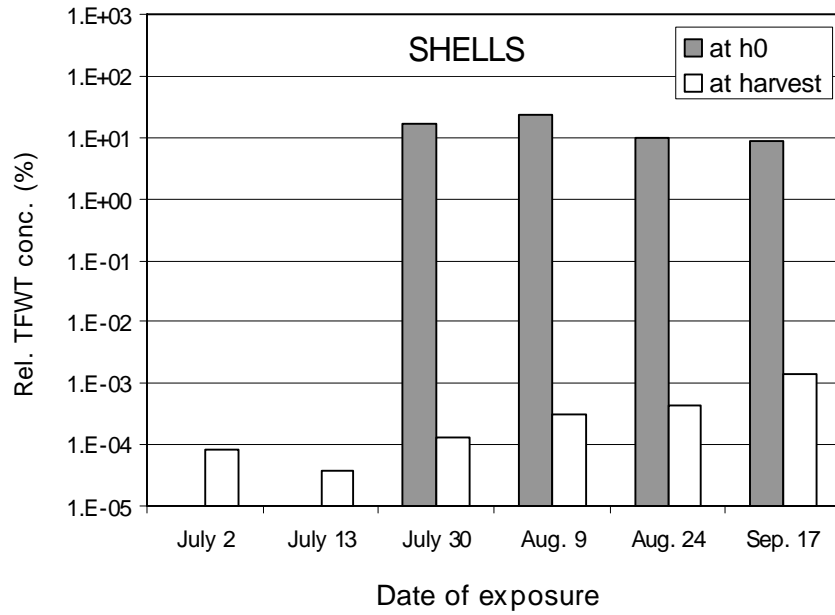


그림 4. 공기수분중 HTO 평균농도에 대한 피폭 직후 및 수확시 각지의 TFWT 농도비

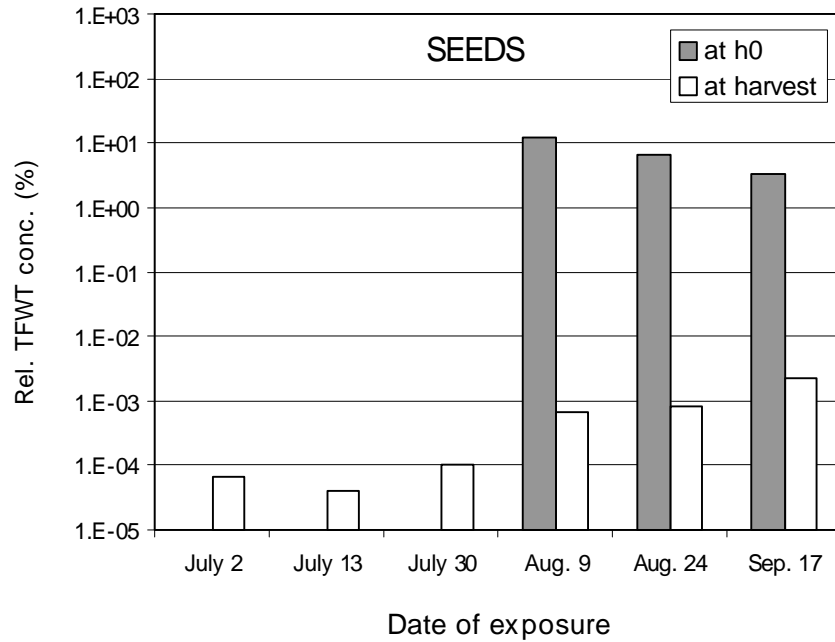


그림 5. 공기수분중 HTO 평균농도에 대한 피폭 직후 및 수확시 종실의 TFWT 농도비

름이 원활하지 못하였기 때문인 것으로 보인다. 생육후기인 9월 17일 피폭에서 가장 높은 것은 탈엽으로 인해 잎의 생육밀도가 크게 감소하여 외기와 접촉이 훨씬 용이해 졌기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 8월 9일과 8월 24일 피폭에서 상대농도가 비교적 높았던 것은 조도가 가장 높았다는 사실에 크게 기인하는 것으로 생각된다.

줄기에서 피폭 직후 TFWT 상대농도는 최고 6.4%, 최저 2.1%로 생육초기 피폭시에 높은 경향이었으며 전반적으로 잎에서보다 훨씬 낮았다. 생육초기에는 줄기의 부피 대 표면적의 비가 크고 또한 목화되지 않아 활력이 왕성하기 때문에 HTO가 보다 용이하게 흡수되었을 것으로 판단된다. 각지에서는 각지의 생리활동이 왕성한 시기이고 조도도 가장 높은 8월 9일 피폭에서 22.9%로 TFWT 상대농도가 가장 높았고 각지가 거의 황변한 9월 17일 피폭에서 8.7%로 가장 낮았다. 콩알에서도 각지와 비슷하게 8월 9일 피폭에서 12.6%로 최고였고 등숙이 많이 진행된 9월 17일 피폭에서 3.2%로 최저였다.

피폭시기에 따라 다소 차이는 있지만 피폭직후 TFWT 상대농도는 대체로 잎>각지>콩알>줄기의 순이었다. 이러한 피폭 직후 TFWT 상대농도는 HTO 흡수계수에 해당하는 것이다.

수확시 TFWT 상대농도는 잎에서는 피폭시기에 따라  $6.0 \times 10^{-5} \sim 8.1 \times 10^{-4}$ 였고 줄기, 각지, 콩알에서는 각각  $4.0 \times 10^{-5} \sim 1.2 \times 10^{-3}$ ,  $3.7 \times 10^{-5} \sim 1.4 \times 10^{-3}$ ,  $3.9 \times 10^{-5} \sim 2.2 \times 10^{-3}$ 의 범위로 피폭시기에 따라 대체로 수 십 배 정도의 차이를 보였으며 피폭시기가 늦어질수록 점점 증가하는 경향이 있었다.

위와 같은 수확시 농도는 피폭 직후에 비해 수천에서 수십만 배 감소한 것이다. 표 2는 이러한 감소 정도를 TFWT 감쇄계수로 나타낸 것이다. 감쇄계수는 피폭시기가 수확기에 가까울수록 감소하는 경향이었고 부위간에는 대체로 잎>각지>콩알>줄기의 순이었다.

7월 2일과 8월 9일 피폭에서 피폭 직후부터 최종 수확시까지 콩의 부위별로 TFWT 농도 변화를 조사한 것은 각각 그림 6 및 그림 7과 같다. 두 시기 피폭에서 모두 잎과 줄기에서는 농도가 처음 하루동안 급격히 감소하다가 이후에는 감소속도가 점점 느려졌다. 피폭 직후 수 시간 동안에는 잎에서 줄기에 비해 빨리 감소하였으나 그 이후에는 서로 비슷한 속도로 감소하였다. 7월 2일 피폭의 경우 도중에 생성된 각지와 콩알에서 경엽부에 비해 TFWT 농도가 조금 빨리 감소하여 수확기에는 부위간에 농도의 차이가 거의 없었다.

표 2. HTO 피폭시기에 따른 콩 부위별 TFWT의 감쇄계수

Date of exposure	TFWT reduction factor <sup>a</sup>			
	Stem	Leaves	Shell	Seed
July 2	$9.07 \times 10^4$	$2.58 \times 10^5$	-	-
July 13	$1.06 \times 10^5$	$3.06 \times 10^5$	-	-
July 30	$2.78 \times 10^4$	$2.12 \times 10^5$	-	-
Aug. 9	$9.79 \times 10^3$	$9.92 \times 10^4$	$7.51 \times 10^4$	$1.89 \times 10^4$
Aug. 24	$2.77 \times 10^3$	$4.86 \times 10^4$	$2.18 \times 10^4$	$7.96 \times 10^3$
Sep. 17	$2.15 \times 10^3$	$4.94 \times 10^4$	$6.04 \times 10^3$	$1.45 \times 10^3$

<sup>a</sup>  $\frac{\text{TFWT concentration at the end of exposure}}{\text{TFWT concentration at harvest (Oct. 5)}}$

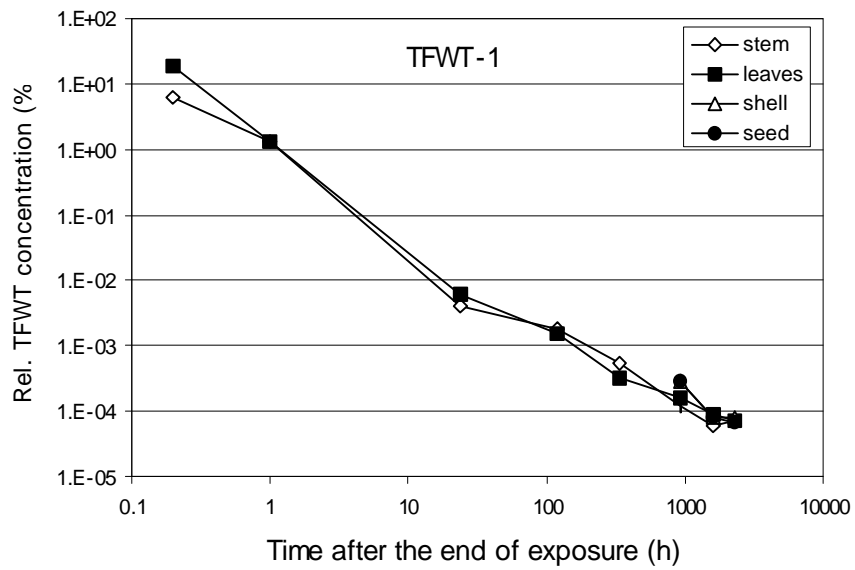


그림 6. 7월 2일 피폭시 시간에 따른 TFWT 농도의 감소 변화.  
(1차 농도는 피폭종료 직후의 것임)

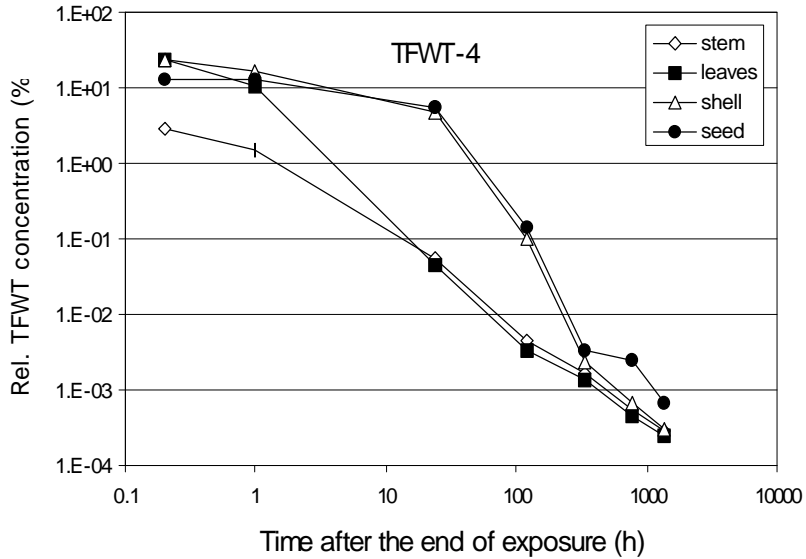


그림 7. 8월 9일 피폭시 시간에 따른 TFWT 농도의 감소 변화  
(1차 농도는 피폭 종료 직후의 것임.)

8월 9일 피폭에서는 처음 하루 동안에는 잎과 줄기에서 각지와 콩알에 비해 훨씬 빨리 감소하였으나 이후 10여일 동안은 반대로 각지와 콩알에서 더 빨리 감소하였다가 그후로 수확시까지 비



슷한 속도로 감소하였다. 이에 따라 피폭 종료후 1 시간 경과시부터는 각지와 콩알에서의 TFWT 농도가 잎보다 높아지기 시작하여 하루 경과시에는 약 100 배 정도의 차이를 보였다가 차이가 점점 작아져 수확시에는 콩알과 경엽부 간에 2 배 정도의 차이만 나타났다.

### 3) 작물체내 OBT 농도

콩의 생육단계별로 HTO 증기 피폭실험을 실시하고 피폭시기별로 수확기에 조사한 각 부위에서의 OBT 상대농도는 그림 8에 나타나 있다. OBT 상대농도는 피폭 종료 직후 잎의 TFWT 농도( $Bq\ ml^{-1}$ )에 대한 건조시료 내  $^3H$  농도( $Bq\ g^{-1}$ )의 비로 나타내었다.

콩의 각 부위별 OBT 상대농도는 HTO 피폭시기에 따라 잎의 경우  $7.65 \times 10^{-4} \sim 1.96 \times 10^{-3}$ , 줄기의 경우  $2.12 \times 10^{-4} \sim 1.13 \times 10^{-3}$ , 콩 종실의 경우  $2.22 \times 10^{-5} \sim 9.54 \times 10^{-3}$ , 콩 꼬투리의 경우  $3.50 \times 10^{-5} \sim 3.57 \times 10^{-3}$ 의 범위로 피폭시기에 따른 변이가 종실과 꼬투리에서 경엽부에 비해 훨씬 컸다. 또한 OBT 상대농도는 생육초기 피폭에서는 경엽부가 종실보다 높았으나 생육중기 이후 피폭에서는 종실이 경엽부보다 훨씬 높았다. 종실에서의 OBT 상대농도는 생육 초기인 7월 2일 피폭에서 가장 낮았고 생육 중기인 8월 9일 피폭에서 가장 높았다. 이것은 이 때가 콩 종실이 가장 왕성하게 발육하는 시기이기 때문인 것으로 보인다. 생육 중기 이후에는 피폭시기가 늦어질수록 종실과 꼬투리에서의 OBT 농도가 급히 감소하는 경향이였다.

위에서 언급한 피폭시기에 따른 OBT 생산계수, 수확시 TFWT 상대농도 및 콩 종실의 낮은 수분함량과 오랜 저장기간, OBT와 TFWT 간 방사선 위해도의 차이 등으로 볼 때 콩 종실의 발육 성기에 HTO에 피폭될 경우에는 섭취피폭 선량의 대부분이 OBT에 의하게 되고 피폭시기가 생육 초기나 생육중기로 갈수록 TFWT의 영향이 증대될 것으로 판단된다.

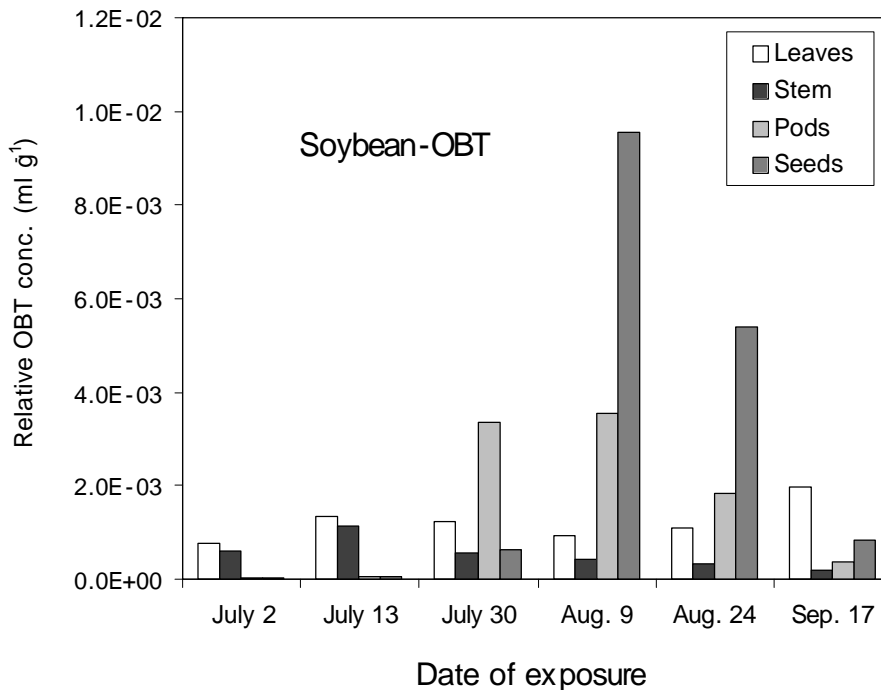


그림 8. HTO 피폭시기별 콩 수확시 각 부위의 OBT 상대농도

#### 4. 결 론

우리나라의 주곡작물인 콩의 HTO 증기 피폭 실험을 수행하여 HTO 증기의 작물체에 대한 직접오염경로를 분석하고 HTO 흡수계수, TFWT 감쇄계수, OBT 생산계수 등 각종 작물체 오염인자를 생산하였다. 본 연구결과는 원자력 시설로부터 HTO의 단기적 사고방출시 주곡작물내  $^3\text{H}$  농도 예측을 위한 모델 수립에 활용될 수 있고 현존하는 모델에 대해서는 검증을 위한 자료로도 이용될 수 있을 것으로 본다.

감사의 말씀 : 본 연구는 과학기술부가 시행한 원자력중장기연구개발사업의 결과입니다.

#### 참고문헌

1. J. A. Garland and L. C. Cox, The absorption of tritium gas by English soils, plants and the sea, *Water, Air and Soil Pollution* 14, 103-114 (1980).
2. S. Okada and N. Momoshima, Overview of tritium: characteristics, sources, and problems. *Health Physics* 65, 595-609 (1993).
3. M. Murata and H. Noguchi, Dose delivered by unit amount of tritium released into the environment, *J. Nuc. Sci. Tech.*, 34, 176- 184 (1997).
4. S. Diabatě and S. Strack, Organically bound tritium. *Health Physics* 65, 698- 712 (1993).
5. S. Diabatě and S. Strack, Doses due to Tritium Releases by NET-Data Base and Relevant Parameters on Biological Tritium Behaviour. KfK 4713, Kernforschungszentrum Karlsruhe (1990)
6. 최용호, 임광묵, 이원윤, 강희석, 최희주, 이한수, 실비아디아바테, 지그프리드슈트락, 벼의 종실 발육단계에 따른 주간 및 야간 HTO 증기 피폭시 TFWT 및 OBT 농도, *대한방사선방어학회지* 제 28권 1호, 9-18 (2003)
7. ICRP, Age-Dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides, ICRP Publication 56, Part 1, Oxford, Pergamon Press (1990).
8. A. W. Phipps, G. M. Kendall, J. W. Stather and T. P. Fell, Committed Equivalent Organ Doses from Intakes of Radionuclides. Chilton, NRPB-R245. HMSO, London (1991).
9. N. A. Higgins, TRIF-An intermediate approach to environmental tritium modelling. *J. Environ. Radioactivity*, 36, 253-267 (1997).
10. Y. H. Choi, K. M. Lim, W. Y. Lee, S. Diabate and S. Strack, Tissue free water tritium and organically bound tritium in the rice plant acutely exposed to atmospheric HTO vapor under semi-outdoor conditions, *J. of Environ. Radioactivity* 58, 67-85 (2002).