

HTO의 토양처리 시기에 따른 벼의 OBT 생산 및 HTO의 지하이동

OBT Production by Rice and Underground Migration of HTO Related to Time of HTO Application to Soil

최용호, 임광목, 박효국, 이원윤, 이정호

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

HTO의 토양침적 시기가 벼의 OBT(Organically-Bound Tritium) 생산에 미치는 영향을 조사하기 위하여 온실내에서 벼의 재배기간중 여섯 차례에 걸쳐 HTO 용액을 각기 다른 재배상자에 처리하였다. 벼 지상부의 각 부위내 OBT 농도는 처리시기에 따라 5~25배 정도의 변이를 보였다. 벧짚과 현미내 OBT에 대한 HTO의 토양-작물체 전이계수($m^2/kg-dry$)는 각 부위의 생육 최성기경 처리에서 가장 높아 각각 2.1×10^{-4} 및 3.3×10^{-4} 이었다. 배출수내 HTO 농도는 처리후 2~3주 경과시 가장 높았다가 서서히 감소하였다. 처리된 HTO의 약 20%가 재배상자로부터 용탈되었다. 수확 1주후 상부 30cm 토양내 HTO의 잔류량은 처리량의 4% 이하였다. 처리한 HTO의 70~90% 정도가 증발 및 증산 작용에 의해 대기중으로 달아난 것으로 추정되었다.

Abstract

For investigating the effect of time of HTO deposition to soil on the OBT production by rice, an HTO solution was applied to culture boxes in a greenhouse at 6 different times during the growing season of rice. OBT concentrations in different aerial parts of mature rice varied with application times by factors of 5~25. The highest soil-to-plant transfer factors ($m^2/kg-dry$) of HTO for OBT in straw and hulled seed were 2.1×10^{-4} and 3.3×10^{-4} , respectively, coming from the application made when each part grew most actively. HTO concentration in percolating water reached its maximum in 2~3 weeks after application and then decreased slowly. About 20% of applied HTO leached out of the boxes. Less than 4% of applied HTO remained in top 30 cm soil 1 week after harvest. It was estimated that 70~90% of applied HTO escaped into the air via evaporation and transpiration

1. 서론

^3H 은 각종 원자력 시설로부터 HTO 형태로 대기중으로 방출되어 건침적과 습침적 과정을 거쳐 경작지에 침적될 수 있다¹⁻³⁾. 따라서 작물 생육중에 방출된 HTO는 대기로부터뿐만 아니라 토양으로부터도 작물체에 흡수된다. 그러므로 작물의 생육중 일시적으로 방출된 HTO에 의한 섭취피폭선량을 예측하기 위해서는 HTO의 지표면 처리 시기에 따른 작물체 내 ^3H 축적에 관한 실험 데이터가 필요하다. 그러나 이에 관한 연구 보고는 거의 전무하다.

벼는 아시아 여러 나라에서 가장 중요하게 취급되는 작물로서 종실은 인간에 의해 소비되고 벼짚은 동물의 사료로 이용된다. 벼에 흡수된 HTO의 일부는 주로 광합성에 의해 유기 결합 트리튬(OBT, Organically-Bound Tritium)으로 되어 여러 기관에 축적되고 나머지는 증산작용에 의해 대기중으로 달아나거나 조직자유수 트리튬(TWT, Tissue-Water Tritium)으로 체내에 남게 된다⁴⁻⁵⁾.

벼의 종실과 벼짚은 통상 수분함량이 비교적 낮을 뿐 아니라 저장기간이 상당히 길어 TWT 농도가 저장기간중 조직자유수와 주변 공기중 수분 간의 교환에 의해 감소하게 된다. 이에 반해 종실 내 OBT 농도는 거의 변화가 없고⁴⁾ 방사성 위해도도 OBT가 TWT보다 몇 배 큰 것⁶⁾으로 알려져 있다. 이러한 조건하에서의 섭취선량은 거의 전적으로 OBT에 기인할 것⁷⁾으로 예상된다.

따라서 본 연구에서는 벼의 생육단계별로 모의논에 HTO를 처리하고 종실과 벼짚내 OBT 축적 정도를 조사하였다. 또한 관개수의 지하침투에 따른 HTO의 용탈정도를 측정하고 상층토내 HTO의 깊이별 분포 양상을 조사하였다.

2. 재료 및 방법

가. 작물육성 및 HTO처리

동위원소 실험온실내에 건조된 1.3m 깊이의 호속에 가로, 세로, 높이가 각각 0.6m, 0.6m, 1.0m인 철제 재배상자를 설치한 다음 야외에서 채취한 세 층위의 토양으로 채웠다. 상부 20cm의 토양은 pH 5.2, 유기물함량 0.91%, 유효태 인산 86.9ppm, 양이온치환용량 4.2me/100g, 치환성 Ca함량 1.84me/100g, 치환성 K함량 0.12me/100g, 모래함량 79%, 점토함량 4.0%인 양질사토였다. 재배상자에 수도물을 적당히 공급하여 벼의 이식시 수심이 약 3cm 되게 하였다.

기비로 이식 1일전에 상자당 N 2.8g, P 1.9g, K 2.5g, 소석회 36g, 퇴비 360g을 살포하고 상층토와 섞어 주었다. 5월 28일에 32일 된 동진벼의 모를 주당 4본식으로 상자당 16주씩 이식하였다. 추비로는 각 상자에 대해 이식 13일후 N 1.1g, 60일후 N 1.1g과 K 1.1g, 90일후 N 0.6g을 시용하였다. 재배상자는 수확 3주전까지 관개하였고 5~7일마다 9ℓ 씩 배수하였다.

6개의 재배상자내 담수의 표면에 ml당 33,400Bq의 HTO용액 64ml씩을 각각 이식 1일전 및 이식 4, 56, 78, 97, 112일 후에 마이크로피펫을 이용하여 균일하게 처리하였다. 이식전 처리에서는 처리후 기비와 함께 상층도와 섞어 주었다. 처리하지 않은 한 상자에서 대조군을 육성하였다.

나. 시료처리 및 방사능 분석

이식 137일후 각 상자내 작물체를 네 그룹으로 나누어 수확하여 종실과 벧짚으로 구분하고 온실내에서 한달간 건조한 다음 종실은 현미와 왕겨로 분리하였다. 건조된 시료들은 분쇄한 후 wet air로 5~10일간 세척하여 남아있는 TWT와 교환성 OBT를 제거하고 진공 상태에서 4~5일간 P₂O₅ 위에 두어 습기를 제거한 다음 최고 0.5g 정도의 펠릿으로 만들었다.

산화연소장치를 이용한 연소에 의해 위의 펠릿으로부터 생성된 물을 20ml 폴리에틸렌 바이알에 회수하여 액체섬광계수법으로 ³H를 분석하였다. 작물체 건물내 OBT 농도는 건물 1g이 연소수 0.6g을 생성한다는 가정하에 계산⁴⁾되었다. HTO 처리후 매회 배출된 9ℓ의 물로부터 8ml을 20ml 바이알에 취하여 Instagel 12ml과 각테일한 후 ³H 농도를 측정하였다. 작물 수확 후 1주 경과시 3개의 재배상자에서 3반복으로 30cm 깊이의 토양을 5cm 간격으로 채취하고 동결건조법으로 토양수를 추출하여 액체섬광계수법으로 ³H을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 벧 지상부내 OBT축적

HTO 처리시기에 따른 벧 지상부내 OBT 축적 정도는 표 1에 나타나 있다. 대조군의 벧짚내 OBT 농도는 0.04Bq/g으로 처리 작물체내 농도보다 6~30배 정도 낮았다. 이로써 재배상자간 교차오염은 실험결과에 유의할 만한 영향을 미치지 않았다고 볼 수 있다. OBT 농도는 처리시기에 따라 비교적 크게 변하였는데 변이정도는 현미에서 가장 높았고 벧짚에서 가장 낮았다. 이것은 벧짚은 벧의 전생애에 걸쳐 존재하나 종실은 일부분 동안만 존재한다는 사실과 관련이 있을 것으로 본다. 처리된 HTO 중에서 벧 지상부 OBT로 전환된 비율은 처리시기에 따라 $3.7 \times 10^{-3} \sim 1.8 \times 10^{-2}$ %에 불과하였다.

벧짚과 현미에 있어서 OBT 농도의 최고치는 각각 이식 56일 및 97일후 처리에서 관찰되었다. 이것은 두 부위가 가장 왕성히 발육하는 시기와 일치하는 것이다. Arai 등⁸⁾도 콩과 밀 종실에 대하여 이와 유사한 실험결과를 얻은 바 있다. 이식 1일전 처리에서 OBT 농도는 이식 4일후 처리에서보다 높았다. 이것은 이식 1일전 처리에서는 HTO가 상층도와 혼합됨으로써 증발이 감소되어 비교적 많은 양의 HTO가 근계에 남아 있었기 때문인 것으로 판단된다.

처음 세번째 처리까지는 세 부위 중 벧짚내 OBT 농도가 가장 높았고 그 다음 두번째 처

리에서는 현미내 농도가 가장 높았다. 한편 마지막 처리에서는 다시 벗짚내 OBT 농도가 현미나 왕겨보다 훨씬 높았다. 이것은 벗의 결실 후기에는 벗짚으로부터 종실로의 동화물질 전류가 현저히 감소하기 때문인 것으로 보인다. 모든 측정치중 가장 높은 OBT 농도는 이식 97일후 처리의 현미에서 관찰되었다.

작물체내 OBT에 대한 토양으로부터의 HTO 전이계수($m^2/kg-dry$)는 처리시기에 따라 현미에서 $1.3 \times 10^{-5} \sim 3.3 \times 10^{-4}$, 왕겨에서 $6.5 \times 10^{-6} \sim 1.1 \times 10^{-4}$, 벗짚에서 $4.0 \times 10^{-5} \sim 2.1 \times 10^{-4}$ 이었다. 이 전이계수에는 토양중 HTO의 뿌리흡수뿐만 아니라 증발된 HTO의 엽면흡수도 포함되어 있을 것이다. 그러나 증발된 HTO는 주변 공기속으로 신속히 흩날릴 것이므로 그 영향은 미미할 것으로 추정된다.

나. 관개수의 침투에 따른 HTO 용탈

그림 1은 HTO 처리후 시간 경과에 따른 배출수내 HTO 농도 변화를 보여 주고 있다. 이식후 처리된 재배상자에서 배출수내 HTO 농도는 처리후 처음 며칠 동안 급히 상승하여 약 2주내에 최고치에 달하였다가 서서히 감소하였다. 생육 후기에 가서는 감소 정도가 낮아지거나 다소 증가하기까지 하였다. 이것은 생육 후기에는 관개량이 적었고 또한 이식 120일 이후에는 관개를 하지 않아 관개수에 의한 농도희석 효과가 사라졌기 때문이다.

배출수내 HTO의 최고 농도가 마지막 처리에서 가장 높았던 것도 위와 같은 이유로 설명될 수 있을 것이다. 즉, 재배상자간 최고 농도의 차이는 주로 처리후 최고 농도에 이르기까지의 관개량의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 이식 1일전 처리상자에서는 이식후 처리상자에 비해 최고 농도에 도달하기까지 약 10일 정도 더 소요되었으며 최고 농도도 비교적 낮았고 시간 경과에 따른 농도 변화도 크지 않았다. 이러한 것은 HTO와 상층토의 혼합에 기인하는 것으로 볼 수 있다.

재배상자에 처리된 HTO중 용탈되어 나온 HTO의 비율은 처리시기에 따라 8.0~28.4%의 범위였다. 용탈율이 가장 높았던 것은 이식 56일후 처리였으며 마지막 처리에서도 용탈 기간은 짧았으나 배출수내 HTO의 농도가 매우 높아 용탈율이 비교적 높았다.

다. 상층토내 깊이별 HTO 분포

이식 112일후 처리시 상부 30cm 토양내 층위별 HTO의 분포 비율은 토양의 깊이가 깊어짐에 따라 지수함수적으로 감소하였고 이식 4일후 처리에서는 지하 25cm까지 토양 깊이에 따라 직선적으로 증가하다가 그 이하에서는 증가가 중지되었다(그림 2). 상부 30cm 토양내에 남아있는 HTO의 양은 이식 112일후 처리에서 4일후 처리보다 2배 가량 많았다. 이와 같은 HTO의 토양내 분포 양상은 HTO의 증발, 뿌리흡수, 침투, 확산, 토양흡착 등과 같은 요인들의 복합작용의 결과일 것으로 사료된다.

이식 1일전에 처리된 HTO는 30cm 깊이 전체에 걸쳐 비교적 균일하게 분포하였고 이식 4일후 처리된 HTO보다 약 2배나 많이 이 깊이 내에 잔존하였다. 이것은 HTO와 상층토의 혼합 및 그에 따른 증발감소에 기인하는 것이다.

처리시기별 30cm 깊이내 HTO의 지하분포 양상으로 볼 때 지하 30cm 이하에 분포하는 HTO의 양은 이식 1일전 처리의 경우 처리량의 5~6% 이하이고 이식후 처리의 경우에는 이보다도 훨씬 적은 양인 것으로 볼 수 있다. 위와 같은 실험결과들로부터 HTO의 처리시기에 따라 처리량의 70~90% 정도가 증발과 증산 작용에 의해 대기중으로 돌아났다는 추정이 가능하다.

4. 결론

벼 생육중 재배상자의 담수표면에 HTO를 처리한 후 조사한 수확기 작물체내 OB³H농도는 부위별로 처리시기에 따라 5~25배 정도의 변이를 보였다. 현미와 벳짚내 OB³H농도는 각각의 생육최성기 처리에서 가장 높았다.

처리된 HTO중 벼의 OB³H로 합성된 분율은 거의 무시할 수 있는 수준이었다. 반면에 침투수와 함께 재배상자 밖으로 용탈된 HTO는 상당량에 달하였다. 이것은 관개중인 논에 HTO가 침적되면 비교적 높은 지하수 오염이 초래될 수 있다는 것을 나타낸다. 수확 1주후 상부 30cm 토양에 남아있는 HTO의 양은 처리량의 4% 이하였다. 이로써 차기재배시 OB³H 생산은 크게 낮아질 것으로 예상된다.

벼 재배기간중 HTO의 사고방출시 HTO의 뿌리흡수에 따른 작물체내 OB³H 농도를 예측하기 위해서는 대기로부터 담수표면으로의 HTO 침적량을 계산해야 하므로 이에 관한 연구가 수행되어야 한다. 또한 HTO의 엽면피폭 실험도 수행하여 엽면흡수에 의한 OB³H 생산에 관한 자료도 축적할 필요가 있다.

* 이 연구는 과학기술부가 시행한 원자력중장기연구개발사업의 결과입니다.

참 고 문 헌

- 1) NCRP, Tritium in the environment, NCRP Report No. 62, Washington, D.C., 1979.
- 2) H. Amano and A. Kasai, The transfer of atmospheric HTO from nuclear facilities during normal operation, J. Environ. Radioactivity, 8, 239-253, 1988
- 3) L. F. Belovodski, V. K. Gaevoy, A. V. Golubev and T. A. Kosheleva, Tritium oxide wash-out by drops, J. Environ. Radioactivity, 36, 129-139, 1997.
- 4) S. Diabaté and S. Strack. Organically bound tritium in wheat after short-term exposure to atmospheric tritium under laboratory condition, J. Environ. Radioactivity, 36, 157-175, 1997.
- 5) S. Diabaté 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) ICRP, Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides, ICRP Publication 56, Part 1, Pergamon Press, Oxford, 1990.
- 7) N. A. Higgins, TRIF - An intermediate approach to environmental tritium modelling, J. Environ. Radioactivity, 36, 253-267, 1997.
- 8) K. Arai, H. Takeda and T. Iwakura, Studies on the tritium uptake in some edible plants and transfer to the rat, In Proceedings of the Second Workshop on Tritium Radiobiology and Health Physics, NIRS-M-52, Chiba, Japan, pp. 35-49, 1985.

Table 1. OBT concentration in different parts of rice varying with time of HTO application

OBT concentration (Bq/g-dry)			% transfer*
Hulled seed	Chaff	Straw	
0.16 ± 0.03	0.25 ± 0.04	0.50 ± 0.23	7.9×10^{-3}
0.08 ± 0.02	0.10 ± 0.03	0.24 ± 0.04	3.7×10^{-3}
0.20 ± 0.02	0.39 ± 0.07	1.23 ± 0.23	1.6×10^{-2}
1.06 ± 0.07	0.50 ± 0.08	0.90 ± 0.23	1.8×10^{-2}
1.95 ± 0.16	0.67 ± 0.12	0.51 ± 0.10	1.7×10^{-2}
0.15 ± 0.04	0.04 ± 0.01	0.53 ± 0.15	5.8×10^{-3}
N.D.	N.D.	0.04 ± 0.01	-

* percent of applied HTO that was incorporated into OBT.