

¹⁴C-방사성 추적자에 의한 농약의 토양과 식물체내에서의 행적구명

경기성*· 이재구*

Elucidation of the Behaviour of Pesticides in Soil and Plant by the ¹⁴C-radiotracer

Kee Sung Kyung and Jae Koo Lee

Abstract

A few technical methods including lysimeter, micro-ecosystem and soil column experiments which have been used for elucidation of the behaviour of pesticide residues in soil by means of the ¹⁴C-radiotracer were introduced. They are essential for the investigation of soil-bound residues of pesticides, and hence the continued development and support in this field are urgently required.

1. 서 론

현대 농업에서 병해충 방제를 위한 농약의 사용은 그 위해성에 대한 논란에도 불구하고 매우 중요한 수단임에는 틀림없으나 경작지에 살포된 농약중 미분해된 잔류물과 그 대사산물들에 의한 농산물과 환경의 오염 가능성도 간과할 수 없는 실정이다. 이러한 우려에서 벗어나기 위해서는 인간과 환경에 영향이 없는 농약이 개발되어야 하나 이는 현실적으로 불가능한 일이다. 따라서 경작지에 살포된 농

약의 생태계에 대한 위해를 최소화하기 위해 위해성과 환경 잔류성이 적은 약제의 개발과 아울러 농약의 환경중 행적을 정확히 구명하는 일이 중요한 과제로 대두되고 있다.

환경중에 살포된 농약은 그림 1에서 보는 바와 같이 여러 요인과 경로를 통하여 소실되는데 이 중 토양과 식물체내에서의 행적을 구명함에 있어 F. Führ⁽¹⁾가 제시한 표 1과 2의 요인들이 많은 도움이 될 수 있을 것이다.

환경중 농약의 행적을 추적함에 있어 기존의 고

* 충북대학교 농과대학 농화학과

Department of Agricultural Chemistry, College of Agriculture, Chung Buk National University, 360-763, Cheong Ju, Korea

전적인 방법은 유기용매를 이용하여 시료중의 농약 잔류물을 추출하는 것으로 부터 시작하는데, 이 때 유기용매에 의해 추출되지 않고 시료중에 남아 있어 검출될 수 없는 추출불가 잔류물 (non-extractable bound residue) 때문에 정확한 행적 구명이 어렵다. 이 등^(2,3)의 연구에 의하면 ¹⁴C-bentazon과 ¹⁴C-carbofuran을 토양에 처리 후 3개월과 6개월간 aging하였을 때 각각 71%와 75%, 38%와 55%의 방사능이 유기용매에 의해 추출되지 않았으며, 또한 ¹⁴C-carbofuran을 처리한 토양에서 바로 42일간 재배한 벼를

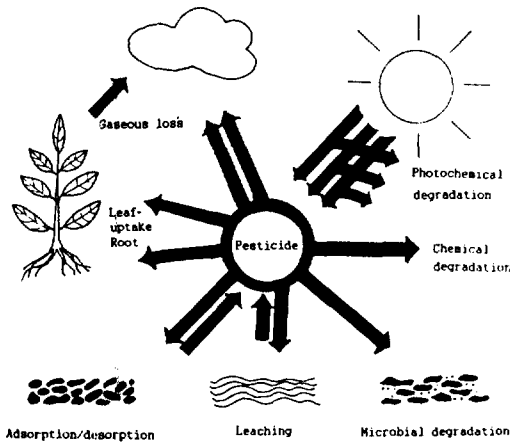


Fig. 1. The fate of a pesticide in a soil-plant system (F. Führ, 1982).

Table 1. Factors which influence leaf uptake and metabolism of pesticides (F. Führ, 1982)

1. Physicochemical behaviour
2. Formulation, droplet size and application technique
3. Precipitation or rainfall, and relative humidity
4. Temperature
5. Sunlight
6. Plant species and physiological differences, e.g. stomata, upper/lower leaf surface, hairs, waxes
7. Time of application during the vegetative period

Table 2. Factors which influence root uptake and degradation of pesticides in soil (F. Führ, 1982).

1. Physicochemical behaviour
2. Amount and method of application
3. Physicochemical and biochemical reactions in the soil, depending on
 - (a) soil type and soil properties, i.e. clay, soil organic matter, pH, oxygen supply and water regime
 - (b) adsorption/desorption
 - (c) chemical and microbial degradation
 - (d) translocation
 - (e) depth of placement(e.g. spray application on the surface, granular application in the seed bed, or seed coating)
 - (f) soil management and agricultural practices
4. Climatic factors, i.e. precipitation, temperature, relative humidity, soil moisture and sunlight.
5. Plant species:
 - (a) root development
 - (b) transpiration
 - (c) nutritional status

수확한 후 acetone으로 추출하였을 때 뿌리와 지상부 (shoot)에서 각각 91%와 74%의 방사능이 추출되지 않았다는 연구결과가 이를 잘 증명해 주고 있다. 즉 이 용매추출에 의한 분석방법은 토양과 식물체의 구성성분과 강하게 결합하여 더이상 추출되지 않는 농약잔류물은 검출할 수 없다는 단점이 있다. 이러한 문제점 때문에 오늘날 여러 선진국에서는 ¹⁴C 등의 방사성 동위원소로 표지된 화합물을 이용하여 여러 농약잔류물의 작물에 의한 흡수 이행과 대사작용, 광화학적, 화학적, 미생물학적 분해, 토양중에서의 흡착과 탈착 및 이동 등을 구명함으로써 우리의 환경중에서의 농약의 정확한 행적을 추적할 수 있다. 따라서 본보에서는 ¹⁴C로 표지된 몇몇 화합물을 이용하여 농약의 환경중 행적을 정확히 구명하는 몇가지 실험방법들을 소개하고자 한다.

2. Lysimeter 실험

방사성 동위원소로 표지된 화합물을 이용하는 실험은 방사성 물질에 의한 주변 환경의 오염가능성 때문에 실험 방법과 장소에 제한을 받게 된다. 즉 방사선 구역내의 허가된 장소에서 방사성동위원소 사용허가기준에 준하여 안전관리책임자의 통제하에서 실시되므로 비표지 화합물을 이용한 실험과 같이 포장실험을 수행할 수는 없다. 이러한 문제점을 감안하여 실제 포장과 거의 비슷한 조건하에서 방사성 추적자를 이용하여 농약의 행적을 추적할 수 있는 방법이 바로 lysimeter를 이용한 실험이며, 이 방법으로는 다음과 같은 연구를 할 수 있다⁽¹⁾.

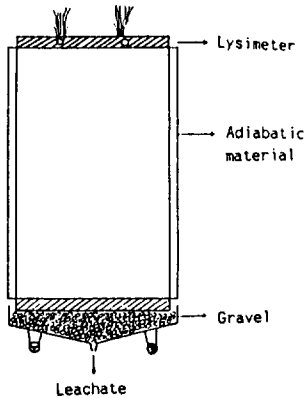


Fig. 2. Layout of the lysimeter for elucidation of the leaching behaviour of ¹⁴C-labeled pesticides (Lee et al., 1991, A report to KOSEF).

- ① 식물체에 의한 흡수 이행과 대사작용:
식물체의 지상부(shoot)와 뿌리에 의한 흡수와 축적, 식물체내에서의 대사, 기상조건과 약체의 제형에 따른 영향, 그리고 먹이연쇄 (food chain)에 유입될 가능성 구명
- ② 토양중 이동과 용탈(溶脫, leaching):
작물종류, 토양형태, 강우, 토양관리에 따른 토양중 이동과 용탈 및 지하수 오염 가능성 구명
- ③ 토양잔류물과 그 대사:
토양유기물체의 흡착, 탈착 및 고정, 추출불가

Table 3. ¹⁴C-Activity in different soil layers of the lysimeter 2 and 4 years after the carbofuran treatment and the cultivation of rice plants (Lee et al., 1991, A report to KOSEF)

Soil depth from surface (cm)	Remaining (%*)	
	After 2 years	After 4 years
0 - 10	19.85	10.15
11 - 20	11.52	5.09
21 - 30	4.55	2.68
31 - 40	1.97	1.21
41 - 50		1.04
51 - 60		0.61
61 - 70		0.54

*¹⁴C-Radioactivity applied = 100 %

Table 4. Amount of ¹⁴C-bentazon equivalents remaining in the different parts of rice plants after harvest(Lee et al., 1991, A report to KOSEF)

Parts of rice plants	¹⁴ C-radioactivities remaining (%)			
	1st year	2nd year	3rd year	4th year
Straw	2.2280	0.4273	0.1375	0.0873
Ears without rice grain	0.0028	0.0070	0.0025	0.0021
Chaff	0.0059	0.0015	0.0012	0.0009
Rice grain hulled	0.0118	0.0249	0.0213	0.0135
Total	2.2485	0.4607	0.1625	0.1038

토양 잔류물의 생물적 이용, 토양중 대사

④ 토양표면으로 부터 발생한 ¹⁴CO₂와 휘발물질의 포집

또한 토양-식물 ecosystem중에서 ¹⁴C 표지화합물의 행적에 미치는 기후조건과 토양중 물리화학적 및 미생물학적 작용과 같은 생육인자의 복합적인 영향을

작물을 재배하면서 구명할 수 있다. 이 등⁽⁴⁾은 표면적이 0.25 m²이고 높이가 1.1m인 stainless steel(두께 8mm)로 만든 lysimeter를 인근 논으로 옮겨 바닥에 내려 놓은 후 fork crane으로 서서히 눌러 soil core의 높이를 1m로 한 다음 이를 다시 서서히 들어 올려 자연상태와 유사한 soil core를 만들고(그림 2) 여기

Table 5. Amounts of radioactivities percolated from the two rice plant-grown lysimeters treated with ¹⁴C-bentazon and ¹⁴C-carbofuran, respectively, over the four growing seasons (Lee et al., 1991, A report to KOSEF)

Compound	¹⁴ C-Radioactivity percolated (%)				Total (%)
	1st year	2nd year	3rd year	4th year	
Bentazon	2.01	0.91	0.21	0.03	3.16
Carbofuran	0.17	0.10	0.02	0.01	0.30

Table 6. Methabenzthiazuron(MBT) and metabolite residues in the soil of the field and lysimeter experiments. 127 to 133 days after applicationa (Kubiak et al., 1988)

Experiment	Quantity applied (mg ai/m ²)	Soil depth (cm)	MBT + Metabolite		Total (%)
			(mg/kg)	(%) ^b	
Field	140	0 - 5	0.90	38.7	40.0 ^c
		5 - 10	0.03	1.3	
		10 - 20	ND		
		20 - 30	ND		
	280	0 - 5	1.70	35.9	36.5 ^c
		5 - 10	0.03	0.6	
		10 - 20	ND		
		20 - 30	ND		
Lysimeter	136	0 - 5	0.71	31.3	32.8 ^c
		5 - 10	0.03	1.5	
		10 - 20	ND		
		20 - 30	ND		
	274	0 - 5	1.60	35.1	36.0 ^c
		5 - 10	0.04	0.9	
		10 - 20	ND		
		20 - 30	ND		

^aData are average values of the lysimeter and field plot replications

^bQuantity of active substance applied = 100

^cNot significantly different at the 5% level. ND = not detectable

에 ^{14}C 로 표지된 제초제 bentazon과 침투성 살충제 carbofuran을 각각 처리한 후 4년간 벼를 재배하면서 토양과 식물체내에서 이 두 약제의 행적을 추적하여 보고하였으며(표 3과 4), 아울러 용탈수층의 방사능(표 5)과 토양표면으로 부터 방출된 $^{14}\text{CO}_2$ 의 량(그림 3)도 또한 정량하였다. 이들 표에서 보는 바와 같이 식물체의 뿌리로 부터 흡수되어 지상부(shoot)에 이행된 농약잔류물의 분포도 현미, 왕겨, 벼짚, 그리고 낱알을 뎀 이삭부위 등과 같이 각기 다른 부위별로 정량하였고, 또한 토양중 잔류량도 각 층위별로 정량하였다.

한편 lysimeter 실험조건은 포장실험의 조건과 유사하지만 약간 다를 수 있으므로 lysimeter실험으로부터 얻은 결과와 실제 포장조건에서 얻은 결과와는 정도의 연관성을 갖느냐가 중요한 의미를 갖게 된다. 이에 대해 Kubiak 등⁽⁶⁾은 비표지 methabenzthiazuron을 처리한 포장실험과 ^{14}C 표지 화합물을 처리한 lysimeter(표면적 0.5 m², 높이 110 cm)실험의

결과가 서로 유사하였다고 보고하였다(표 6). 다른 연구자들^(6,7)도 ^{14}C 표지화합물을 이용하여 농약의 토양중 잔류물과 용탈행적에 대해 적정하게 확립된

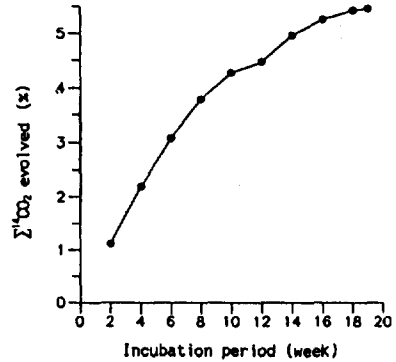


Fig. 3. Mineralization of ^{14}C -carbofuran to $^{14}\text{CO}_2$ during the 19 weeks of the lysimeter experiment (Lee et al., 1991, A report to KOSEF).

Table 7. Recovery of radioactivity in the rice experiment after soil application of ^{14}C -bentazon. ^{14}C -activity applied per pot = 100% and duration of the experiment = 42 days (Lee et al., 1989)

Treatment	^{14}C -bentazon in soil		$^{14}\text{CO}_2$ evolved during rice planting (%)	^{14}C -bentazon (%) in				Recovery (%)
	KBq/kg	Mg/kg		Root	Shoot	Soil	Earthworm	
T-1-1 ^{a)}	123	5.0	3.3	21.2	12.1	62.5		99.1
∕	∕	∕	2.9	30.4	12.9	51.7		97.9
T-1-2	∕	∕	4.0	33.8	13.5	48.5	0.05	99.8
∕	∕	∕	3.8	24.9	11.8	59.6	—	100.1
T-2-1 ^{b)}	125	5.1	3.4	2.2	1.5	91.2		98.3
∕	∕	∕	5.9	2.8	1.6	90.5		100.8
T-2-2	∕	∕	3.9	4.9	1.4	91.7	<0.01	101.9
∕	∕	∕	4.8	3.7	1.3	91.2	<0.01	101.0
T-3-1 ^{c)}	122	4.9	3.3	1.3	1.2	93.3		99.1
∕	∕	∕	1.6	1.4	1.1	91.3		95.4
T-3-2	∕	∕	4.5	1.9	1.1	93.8	0.10	101.4
∕	∕	∕	5.5	1.9	1.2	93.2	0.10	100.9

a : Freshly treated
 b : 3-Month-aged
 c : 6-Month-aged

lysimeter 실험으로 부터 얻은 결과는 실제 포장상황을 모방할 수 있다고 보고하였다.

3. Micro-ecosystem(pot) 실험

앞에서 언급한 lysimeter 실험은 표지화합물의 다량 구입과 lysimeter의 제작 등에 많은 경제적 부담이 있으므로 쉽게 시작하기가 어려운 것이 사실이다. Micro-ecosystem을 이용한 실험방법은 농약의 식물과 토양중 행적 구명에 손쉽게 이용할 수 있는 방법으로서 표지화합물을 처리한 토양에 작물을 재배하면서 작물에 의한 흡수 이행, 토양중 행적, $^{14}\text{CO}_2$ 로의 무기화, 그리고 토양과 식물체중의 대사 등을 구명할 수 있으나 용탈행적을 조사할 수는 없다. 이등(2,3)은 특수하게 제작한 micro-ecosystem (stainless steel pot, 17cm ID x 10cm H)을 이용하여 ^{14}C -bentazon과 ^{14}C -carbofuran을 토양에 처리 후 3개월과

6개월간 aging하여 bound residue를 형성한 토양과 작물재배 직전에 이들 화합물을 처리한 토양에 벼를 재배하면서 이 화합물들의 행적을 구명하였으며, 이 중 ^{14}C -bentazon 실험결과를 표 7에 제시하였다.

그러나 Führ와 Mittelstaedt(6)는 표 8에서 보는 바와 같이 micro-ecosystem하에서 작물을 재배했을 경우가 lysimeter에서 재배했을 때보다 약 50배 정도 더 높은 흡수율을 나타내어 실제포장으로 부터 얻은 결과와는 거리가 있다고 보고하였으며, 이들은 그 이유로서 ① micro-ecosystem 실험의 경우 농약은 그 내부 토양에 골고루 섞인 반면 lysimeter의 경우는 토양표면에 처리하게 되어 토양중 농약의 분포에 차이가 있으며, ② 뿌리의 양과 토양의 비가 micro-ecosystem 실험의 경우가 lysimeter 보다 높으며, ③ micro-ecosystem 실험에서는 손실된 수분을 매일 보충하여 매일 탈착이 유도되고, ④ 기후조건이 수시로 바뀌는 포장실험에 비해 micro-ecosystem 실

Table 8. The uptake of ^{14}C by sugar-beets after application of [ethylene- $^{14}\text{C}_2$]isocarbamide (Führ and Mittelstaedt, 1983)

Experiment	Plant part	^{14}C found in the plants (%)
Lysimeter (0.76m ²), 75 days, fields conditions	Leaves	1.23
	Roots	0.03
Pot experiment, 0.9kg/pot 55 days, greenhouse Normal climate	Leaves	64.0
	Roots	0.3
	Leaves	31.7
	Roots	0.6
High relative humidity	Leaves	31.7
	Roots	0.6

Table 9. Comparison of the plant uptake of ^{14}C from the ^{14}C -bentazon-treated soil in two different types of experiments (Lee et al., 1991, A report to KOSEF and Lee et al., 1989)

Experiment	^{14}C found in the plant shoots (%)	Absorption ratio
Lysimeter (0.25m ²) 40 mg, 112 days	2.25	1
Pot experiment, 42 days 7.5mg/1.5kg soil	38.32	17

험은 주로 온실내에서 행하므로 식물생장에 최적조건을 제공하게 되어 증산작용과 이행률이 높아짐에 기인한다고 하였다. 또한 이 등^(2,4)도 표 9에 나타낸 바와 같이 ¹⁴C-bentazon을 이용하여 실험하였을 때 micro-ecosystem의 경우가 lysimeter 실험의 경우보다 그 흡수량이 훨씬 많았다고 하였다. 이러한 점들을 고려해 볼 때 micro-ecosystem을 이용한 실험결과를 그 해석에 있어 신중을 기해야 할 것이다.

4. Soil column을 이용한 실험

이 방법은 경작지 포장에서 채취하여 체를 통과시킨 토양을 소형 유리관(34cm L x 5cm ID)에 30cm 높이로 충전하여 물로 포화시키고 column의 상단에 표지화합물을 처리한 다음 작물을 재배하면서 토양과 식물체내에서의 행적과 아울러 용탈행적을 구명할 수 있으며 농약의 행적을 개략적으로 측정하는데 사용된다. 그러나 이 방법은 column내의 토양이 인위적으로 충전되었기 때문에 자연상태의 토층과는 달리 뒤섞여 있으므로 농약잔류물의 이동이 달라질

수 있다. 이 등⁽⁴⁾은 그림 4에서 보는 바와 같은 장치를 이용하여 ¹⁴C-bentazon을 처리한 토양에 벼를 재배하는 경우와 재배하지 않는 경우에 이 농약의 토양중 용탈과 이에 대한 작물의 영향 및 벼에 의한 흡수와 이행에 관하여 연구하였다. 즉 표 10에서 보는 바와 같이 soil column 실험의 결과는 토층별 분포, 용탈수, 작물의 지상부와 뿌리층의 분포, 그리고 실험기간중 발생한 ¹⁴CO₂의 량 등 이 농약의 행적을 잘 나타내 주고 있다. 또한 Brumhard 등⁽⁹⁾도 표 11에서 보는 바와 같이 soil column(30cm H, 5cm ID)에 물리화학적 특성이 다른 두 토양을 충전하여 ¹⁴C-methabenzthiazuron을 처리하고 30일과 105일간의 용탈실험에서 ¹⁴CO₂로 무기화된 량, 토층별 분포량, 용탈량 등 공시약제의 행적을 구명하여 보고한 바 있으며, 이 등⁽¹⁰⁾도 soil column(34cm L x 5cm ID)을 이용하여 carbofuran과 bentazon 및 TCAB 잔류물의 토양중 용탈에 관하여 보고하였다. 한편 표 12는 soil column 실험으로 부터 얻은 결과와 실제 포장조건과 유사한 lysimeter를 이용한 실험 결과와의 연관성을 보여 주고 있다. 즉 lysimeter와 soil column의 길

Table 10. Leaching behaviour of ¹⁴C-bentazon in soil column with rice plants grown for 9 weeks. Radioactivity applied = 100 % (Lee et al., 1991, A report to KOSEF)

Soil ^{a)} column	Rice plant	¹⁴ C activity (%) in						¹⁴ CO ₂ evolved (%)	Recovery (%)
		Soil segment from top(cm)			Percolate	Shoot	Root		
		0-10	11-20	21-30					
A - 1	Yes	15.51	9.58	11.34	31.11	6.00	21.38	0.12	95.04
A - 2	Yes	15.34	9.20	24.13	19.40	5.99	21.16	0.18	95.40
A - 3	No	3.83	0.84	0.85	91.58	-	-	0.09	97.19
B - 1	Yes	17.45	13.31	6.28	21.79	2.31	23.78	0.16	95.08
B - 2	Yes	19.38	13.11	5.48	20.46	1.12	28.87	0.06	98.48
B - 3	No	3.05	0.70	0.73	91.70	-	-	0.06	96.24
C - 1	Yes	8.65	7.44	6.07	52.57	4.55	18.36	0.08	97.72
C - 2	Yes	7.33	11.13	8.54	46.80	3.87	19.87	0.08	97.62
C - 3	No	3.18	0.80	0.87	91.15	-	-	0.13	96.13

a : soils with different physico-chemical properties

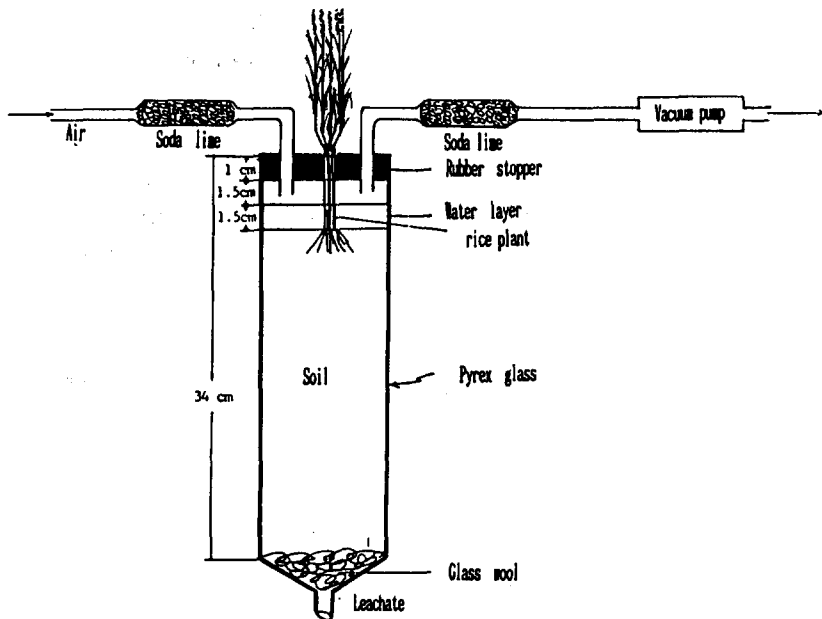


Fig. 4. Layout for leaching behaviour of ^{14}C -bentazon in soil column with and without rice plants (Lee et al., 1991, A report to KOSEF).

Table 11. Leaching behaviour of [benzene- ^{14}C]methabenzthiazuron after aging in the sandy soil (BBA standard soil 2.1) and a clayey degraded loess soil. Application rate $2.8\text{kg a.i. ha}^{-1}$ ($1.4\text{kg a.i. ha}^{-1}$). Average of two replicates. Applied radioactivity = 100% (Brumhard et al., 1987)

Time of incubation (days)	Sandy soil			Clayey loess soil		
	0	30	105	0	30	105
Mineralized to $^{14}\text{CO}_2$	—	0.2 (0.3)	0.4 (0.5)	—	0.3	0.9
Soil column						
0 - 10 cm	101.7	89.6	94.4	93.8	93.0	95.0
10 - 20 cm	0.1	0.4	0.3	0.1	0.2	0.3
20 - 30 cm	<0.1	0.2	0.2	n.d.	0.1	0.2
Percolate fraction I	n.d. (n.d.)	<0.1 (<0.1)	<0.1 (<0.1)	n.d. (n.d.)	n.d. (n.d.)	n.d. (n.d.)
fraction II	<0.1 (0.1)	0.2 (0.2)	0.3 (0.3)	<0.1 (<0.1)	0.1 (0.1)	0.1 (0.1)
Recovery	101.8	90.6	95.6	93.9	93.7	96.4

n.d. = not detected

Table 12. Comparison of the leaching behaviour of pesticide between lysimeter and soil column experiments (Lee et al., 1991, A report to KOSEF)

Compound	Lysimeter ^a (%)	Soil column ^b (%)
Bentazon	1.84	95.70
Carbofuran	0.17	68.62

a : 0.25 m² (surface area) x 100 cm (depth), 18 week

b : 0.002 m² (surface area) x 30 cm (depth), 30 days

이가 다르고 또한 lysimeter는 자연상태와 유사한 토층구조를 가진 반면 soil column은 인위적인 층전으로 토층구조가 없으므로 동일선상에서 비교할 수는 없지만 soil column내에서 이동성이 큰 bentazon이 lysimeter에서도 carbofuran보다 더 많이 용탈되어 동일한 soil column 조건에서 실험이 수행되었다면 이 실험에서 얻은 결과로 부터 실제 포장 환경중에서의 상대적인 토양중 농약의 용탈특성을 예측할 수 있으리라 본다.

5. 결 론

앞에서 방사성 동위원소로 표지된 화합물을 이용한 추적자법으로 농약의 환경중 행적을 구명하는 몇가지 실험방법을 소개하였다. 이 방법들은 각각의 특징을 가지고 있을 뿐만 아니라 방사성동위원소로 표지된 화합물을 이용한 실험은 표지화합물과 분석 시약의 구입에 상당한 경비가 필요하므로 실험 목적과 성격에 적합한 방법을 선택하는 것이 바람직하다. 농약은 농산물 생산과 저장에 필수불가결한 요소이나 인간의 건강과 생태계 보전의 차원에서 보면 위험인자로서 작용할 가능성이 있어 생태계에 전혀 무해한 농약을 개발하는 것이 궁극적인 최선의 방법이겠으나 이것은 현실적으로 어려우므로 농약의 환경중 행적을 정확히 구명하여 생태계에 대한 위해요인을 사전에 제거하려는 시도가 필요하다. 아울러 이 방면의 연구가 활성화되어 농약의 환경중 행

적이 보다 정확히 구명될 수 있도록 방사성 추적자를 이용한 새로운 연구방법들을 개발하는데 많은 노력을 경주하여야 할 것이다.

참고문헌

1. Führ, F. (1982) : *Agrochemicals: Fate in food and the environment*, Fate of herbicide chemicals in the agricultural environment with particular emphasis on the application of nuclear techniques, International Atomic Energy Agency, Vienna, 99.
2. Lee, J. K., Kyung, K. S., and Führ, F. (1989) : Bioavailability of soil aged residues of the herbicide bentazon to rice plants, *J. Korean Agric. Chem. Soc.*, 32(4), 393.
3. Lee, J. K., Kyung, K. S., and Wheeler, W. B. (1991) : Rice plant uptake of fresh and aged residues of carbofuran from soil, *J. Agric. Food Chem.*, 39(3), 588.
4. 이재구, 경기성, 오경석, 김학남 (1991) : 과학재단 연구보고서.
5. Kubiak, R., Führ, F., Mittelstaedt, W., Hansper, M., and Steffens, W. (1988) : Transferability of lysimeter results to actual field situations, *Weed Science*, 36, 514.
6. Scheunert, I., Kohli, G., Kraul, R., and Klein, W. (1977) : Fate of ¹⁴C-aldrin in crop rotation under outdoor conditions, *Ecotoxicol. Environ. Safety*, 1, 365.
7. Scheunert, I., Vockel, D., Schmitzer, Viswanathan, R., Klein, W., and Korte, F. (1983) : Fate of chemicals in plant-soil systems : Comparison of laboratory test data with results of open-air long term experiments, *Ecotoxicol. Environ. Safety*, 7, 390.
8. Führ, F. and Mittelstaedt, W. (1983) : *Proc. 5th IUPAC Congr. Pestic. Chem.: Human Welfare*

- and the Environment*, Pergamon Press, Oxford, 4, 183.
9. Brumhard, B., Führ, F., and Mittelstaedt, W. (1987) : Leaching behaviour of aged pesticides: Standardized soil column experiments with ^{14}C -metamitron and ^{14}C -methabenzthiazuron, *British Crop Protection Conference-Weeds*, 7A-4, 585.
10. Lee, J. K. and Kyeong, S. O. (1993) : Leaching behaviour of the residues of carbofuran, bentazon, and TCAB in soil, *Korean J. Environ. Agric.*, 12(1), 9.