

인천지역 근린공원 농약잔류량 및 환경행적 특성 조사

김영주*, 백인찬, 이다희, 김기문, 강희규, 성지홍
인천보건환경연구원 토양환경과

The Investigation of Pesticide Residue and Environmental Fate characteristics of neighborhood parks in Incheon area

Young-Joo Kim*, In-chan Baek, Da-hee Lee, Gi-moon Kim, Hee-gyu Gang, Ji-hong Seong

Incheon Research Institute of Public Health and Environment

Abstract

The purpose of this study was to investigate the actual condition of pesticide residues used in urban neighborhood parks in Incheon and to understand the level of residues. In the case of neighborhood parks with lakes, pesticide residues in soil, trees (leaf) and lake water were investigated. For parks without lakes, pesticide residues in soil and trees (leaf) were investigated to determine the detection frequency and residual characteristics of pesticides used. The residual characteristics of a pesticide were identified in various environmental media including the surrounding atmosphere, soil, and lake water, and the environmental fate was investigated according to the material characteristics of the detected pesticide components. As a result, the detection frequency of pesticide residues in each medium was investigated as soil > trees > lake water. Residual concentrations were mostly detected at the limit of quantitation level except for 2.39 mg/kg of fenitrothion detected in soil and 2.01 mg/kg of dinotefuran detected in trees and remained. In the case of fenitrothion, which had a high concentration by each pesticide component, in the soil, the reduction rate was 43 % after 5 days and 86 % after 10 days in order to understand the amount of natural decrease by medium and environmental behavior. Dinotefuran (2.01 mg/kg), which had a high residual concentration in trees, was not detected in lake water in soil. Substances detected in lake water were azoxystrobin and carbaryl, and both substances were trace levels and decreased to almost non-detectable levels after 10 days of control.

Key words: Pesticide Residue, detection frequency, Environmental Fate, Neighborhood Park

I. 서론

근린공원이란 도심지 주택가 주변에서 시민들이 쉽게 이용할 수 있는 공원을 말한다. 도시 속 근린공원은 녹지 공간이 절대적으로 부족한 도시에 쾌적한 자연환경을 제공하며 보다 향상된 생활환경을 영위하고자 하는 시민들 삶의 욕구를 충족시키는 역할을 수행하고 있다. 또한, 도시 공원녹지는 도시 기후조절, 서식처 제공, 미적기능 생활 편의 기능 등을 제공하는 등 다양한 순기능들이 있다.

그러나 이러한 도시공원의 녹지공간 수목은 기온 상승에 따라 발생하는 솔잎혹파리, 미국 흰불나방 등의 병해충 피해를 줄이기 위해 방제작업을 시행하는 데 알 제거, 번식장소 유살법 등의 기계적 방제법 보다는 효과가 신속하고 지속력이 있는 살충·살균제 농약을 살포하는 화학적 방제법을 주로 사용하고 있는 실정이다(박일권, 2012).

병해충 및 잡초 등을 방제하기 위하여 사용된 농약은 소기의 목적을 달성한 다음 대기로의 증발, 강우에 의한 유실 및 광분해 등의 환경적 요인, 식물체내 대사에 의한 분해 또는 작물의 비대 및 성장에 따른 희석 효과 등으로 소실되는 경향을 지니고 있다(신종현 등, 2015). 구체적으로 살포된 농약성분의 소량(1% 미만)만이 방제의 목표에 달하며 99% 이상은 비표적대상인 토양, 대기 및 작물체 등에 분포하게 된다. 이 중 토양표면에 살포된 농약성분은 강우현상에 의해 수계로 유출되어 수생생태계나 지표수를 이용하는 사람에게 급·만성의 독성적 영향을 끼칠 수 있다고 보고되고 있다(이규승, 2020).

최근 해충 방제에 일부 독성이 강하거나 수목에 사용 금지된 농약을 도로, 학교, 공원에 살포하여 논란이 되었고 이는 사람과 생태계에 위해를 줄 수 있으며 또한 공원을 이용하는 시민들에게 불안감을 조성한다(노동환경연

구원, 2011).

인천 관내 근린공원에서 사용되는 농약 사용 실태 및 잔류량을 파악할 수 있는 자료가 없었다. 본 연구에서는 인천관내 도시 근린공원에 사용되고 있는 농약 실태 및 잔류량을 조사하여 농약사용으로 인한 토양, 수질오염 수준 정도를 파악하고자 하였다. 호수가 있는 근린공원의 경우 토양, 수목(나뭇잎), 호소수의 농약 잔류량과 잔류특성을 조사하고, 호수가 없는 공원에 대해서는 수목(나뭇잎), 토양에 있는 농약 잔류량을 조사하여 사용농약의 잔류 특성과 이들의 매체별 환경행적을 파악하고 유해정도를 평가하여 공원 내 토양의 적정관리를 위한 기초 자료를 제공하고 토양건강성을 확보하여 쾌적한 근린공원 조성에 기여하고자 한다.

II. 조사대상 및 방법

2.1. 조사대상

본 연구에서 조사대상은 (Table 1)과 같으며 강화군, 옹진군을 제외하고 인천지역을 대표하는 구별 대표공원 8개소를 선정하였다. 농약잔류량 조사를 위해 호수가 있는 3개소 공원, 호수가 없는 비호소수 공원 5개소로 구분하여 수목, 토양, 수목, 호소수를 시료 채취하여 분석하였다.

Table 1. Neighborhood park investigation site.

Division	District	P a r k	Area(m ²)
Park including lake water	Yeonsu-gu	Central park	370,748.9
	Namdong-gu	Incheon great p a r k	2,665,000.0
	S e o - g u	Ghungra lake p a r k	693,000.0
Park not including lake water	Joung-gu	W a l m i	588,099.3
	Dong-gu	Songhyun	72,663.6
	Michuhaul-gu	M u n h a k	218,813.0
	Bupyung-gu	B u p y u n g	113,000.0
	Gaeyang-gu	G a e y a n g	344,582.8

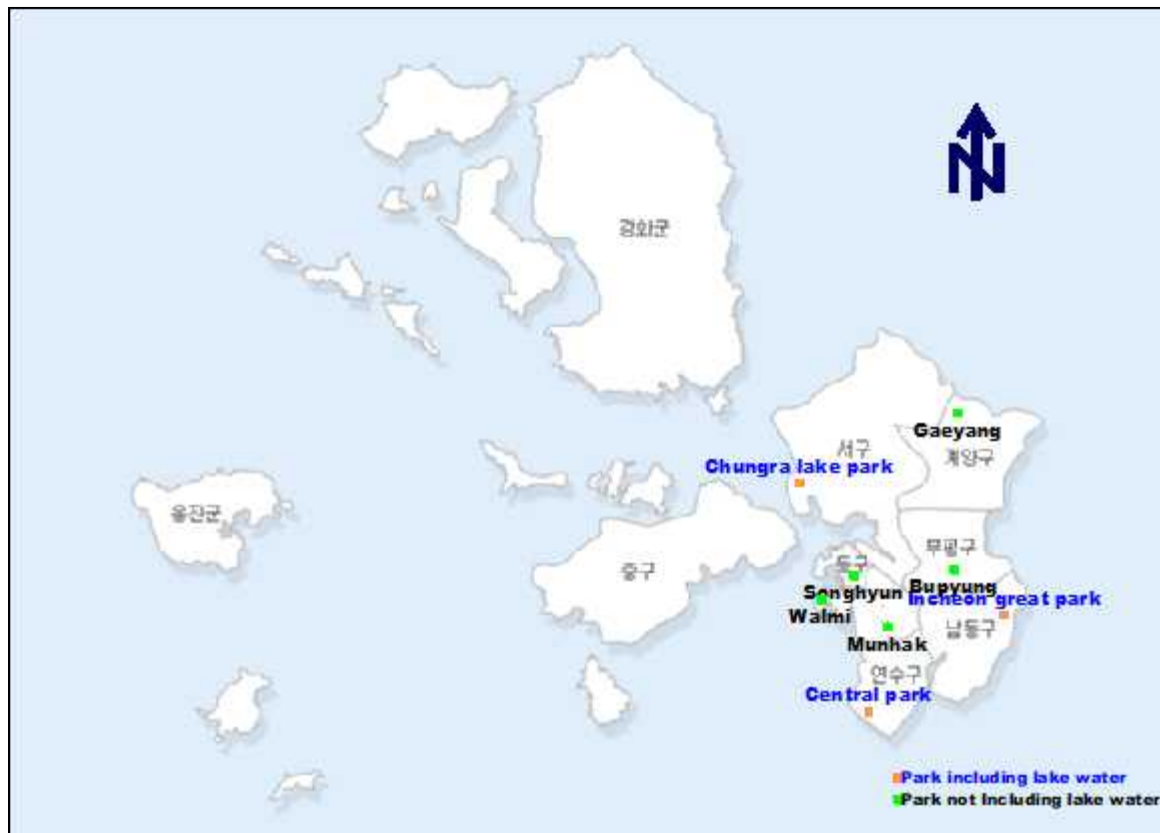


Fig. 1. 8 sampling sites in Incheon area.

2.2. 조사방법

2.2.1. 시료 채취 방법

일반적으로 근린공원 관리를 위한 방제는 1년 중 5월에 시작해 10월까지 진행된다.

이번 연구에서 시료 채취는 2021년 2월부터 10월까지 총 3회에 걸쳐 시행되었다. 2월과 3월에는 농약살포 전 1차 시료채취, 5월부터 7월까지 방제작업 후 2차 시료채취, 8월부터 10월까지 3차 시료채취를 수행하였다. 농약살포 전 시료 채취는 전년에 살포된 농약성분이 자연적으로 충분히 소멸되었다는 가정 하에 진행되었으며 이를 확인하고자 자연 함유량을 조사한 것이며 방제 후 2차(5~7월), 3차(8~10월)의 경우 각 공원별 방제시기에 맞춰 시행되었는데 농약 살포 1일 후, 살포 5일 후, 살포 10일 후 농약 잔류량을 매체별로 각각 조사하여 방제작업 후의 잔류량과 환경행적의

특성에 대해 파악하고자 하였다.

매체별로 토양과 수목은 각 공원 당 3개 지점의 표토층을 채취한 후 혼합시료 500 g을, 수목(나뭇잎) 역시 3종류 이상 혼합 시료 100 g을 최종 시료로 사용하였으며 수질의 경우 호소수가 있는 공원에서 각 검체 당 3L 씩을 채취·분석하였다.

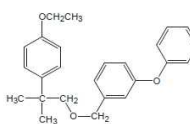
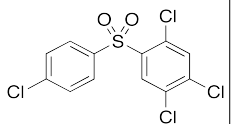
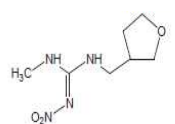
2.2.2. 분석 물질 및 방법

국내 수목 및 토양에 대한 잔류허용기준이 없고 골프장에서 농약을 관리하고 있어 시료 채취 및 보관, 분석 방법은 「물환경보전법」 제61조 및 「골프장의 농약사용량 조사 및 농약잔류량 검사방법 등에 관한 규정」 환경부고시 제2019-6호에 준하여 분석하였다.

총 시료 채취 93건 중 토양 36건, 수목 36건, 수질 21건이며 각 매체별 분석 항목은 총 31항목으로 (Table 3)과 같다. 구체적으로 골프장 농약사용량 조사 대상물질 28종과 3종 물질(에토펜프로क्स, 테트라디폰, 디노테푸란)을 추가하여 분석하였다. 기존 선택물질 28종 외 추가물질의 선택은 (Table 6)에 조사한 2020년 주 농약 사용물질 유효 성분을 기준으로 선정하였다.

3종 추가물질 중 에토펜프로क्स는 곡류, 과실, 채소 등 다양하게 사용되는 합성제충국제 열의 비침투성 살충제이며 테트라디폰은 유기염소계 살충제로 응애류 방지를 위해 사용된다. 디노테푸란은 후라니코티닐계의 침투이행성 살충제로 과수나 채소에 발생하는 총채벌레류, 진딧물류 등 방제에 주로 사용되는 약제이다. 추가물질의 분자구조 및 기본 물리적 성질을 (Table 2)에 간단히 제시하였다.

Table 2. Physical properties of added pesticides.

Division	Molecular structure	log K _{ow}	Solubility (mg/L)	V.P. (mPa)
Etofen prox		6.9	0.023	8.13 x 10 ⁻⁴
Tetra difon		4.61	0.078	3.20 x 10 ⁻⁰⁵
Dinote furan		-0.55	39800	<1.7 x 10 ⁻³

참고: PPDB. Pesticide Properties DataBase (<http://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/Reports/627.htm>, 2020)

(Table 2)에 나타난 물리적 성질로 잔류정도를 유추해 보면 유기염소계인 테트라디폰의 경우가 옥탄올/물 분배계수가 가장 높아 토양

에서의 침적 잔류 가능성이 높게 나타날 것으로 예상되나 증기압도 높아 농약 작업하는 것이 미스트 형식의 분무식이라면 대기로의 확산이 빠를 가능성도 예측해 본다. 반면, 디노테푸란은 물에 대한 용해도가 매우 높은 물리적 성질이 있다.

2.2.3. 전처리 및 기기분석

전처리 분석방법은 (Table 3)에서 나눈 그룹별로 【골프장의 농약사용량 조사 및 농약잔류량 검사방법 등에 관한 규정】에 따랐으며, 기기별 GC/MSMS, HPLC 분석 조건은 (Table 4)와 같다. 전처리 방법이 규정에 없는 수목의 경우 혼합시료 10 g을 취하여 토양 전처리 분석과 동일한 방법으로 실험을 진행하였다.

Table 3. 31 kinds of analysed pesticides.

Analytical instrument	Item(31)	
GC/MSMS (Item 27)	Group 1 (Item 3)	Dichlororvo, Propamocarb-hydrochloride, Acephate
	Group 2 (Item 24)	Dichlofluanid, Tplyuanid, Tralomethrin, Fipronil, Phorate, Cadusafos, Dimethoate, Edifenphos, Fosthiazate, Azoxystrobin, Chlorpyrifos, Diazion, Dichlobenil Fentrothion, Flutolanil, Iprodione, Pyrimethanil, Tebuconazole, Thifluzamide, Trifloxysbromin, Triflumizole, Diniconazol, Etofenprox*, Tetradifon*
HPLC (Item 4)	Group 3 (Item 4)	Cabaryl, Carbendazim, Thiophanate-methyl, Denotefuran*

* 추가 물질

Table 4. Analysis condition.

Instrument Method		
GC/ MSMS	column	Db-5MS(30m×0.25mm×0.25 μ m)
	gas flow	He(1.2 mL/min)
	Injection temperature	275 $^{\circ}$ C
	Interface temperature	280 $^{\circ}$ C
HPLC	Oven condition	70 $^{\circ}$ C (2min)→25 $^{\circ}$ C/min→195 $^{\circ}$ C (1min)→4 $^{\circ}$ C/min→235 $^{\circ}$ C→10 $^{\circ}$ C/min→240 $^{\circ}$ C→30 $^{\circ}$ C/min→300 $^{\circ}$ C (6.5min)
	Detector	UVD
	Mobile phase	acetonitrile/water(5/95, v/v)
	Wavelength	258 nm
	Flow rate	0.7(0.8) mL/min
	Oven temperature	40 $^{\circ}$ C

III. 결과

3.1. 농약사용 현황 조사

3.1.1. 용도별 농약사용 현황

(Table 5)는 최근 2년간 공원 내 발생한 병해충 종류를 나타내었고, 그에 따라 사용된 농약 및 유효 성분을 표 6에 나타내었다.

근린공원 농약 살포 시기는 범위로 5월부터 10월 사이 3회 이상 실시한다. 수목 병해충 주요 발생기간 내 2~4회 예찰을 실시한 후 병해충 발견 시 나무의사 진단 및 처방전을 받고 이를 토대로 방제 약품을 선정, 방제작업을 실시하는 형태로 진행이 된다. 공원마다 작은 차이는 있지만 인천관내 발생하는 병해충 종과 이에 따른 농약용품이 유사한 것으로 조사되었다. 용도별로 살충제가 72 %, 살균제 22 %, 제초제 6 % 비율로 살충제 > 살균제 > 제초제 순으로 사용되었다. 근린공원에서는 공

원을 이용하는 시민들에게 해충으로 인한 혐오감을 유발하는 벌레들을 방제하기 위해 살균제 보다 살충제가 주로 사용되는 것으로 해석된다.

정확한 자료 수집에 대해 여러 가지 어려운 점이 있어, 수집된 정보로만 추정할 수밖에 없는 제한사항이 있었다. 다만, 사용되는 농약 종류들이 매년 유사하게 사용된다고 한다.

앞으로 기후변화 영향으로 인한 기온상승의 가능성을 생각한다면 병해충 종류가 이 보다 더 다양해지고 개체 수 또한 증가 가능성이 있어 이를 방제하기 위한 농약의 강도와 사용횟수는 더 증가할 것으로 사료된다.

Table 5. Major tree diseases caused by pests.

		2020	2019
해충	흡즙성식엽성	진딧물, 각지벌레, 명나방, 솔나방, 응애, 알락하늘소, 흰불나방, 노랑췌기나방, 방패벌레, 해송 솜벌레, 모과나무 적성병, 대왕참나무 미국희불나방, 화양목 명나방, 장미-거세미나방, 모과나무 검은무늬 나방	진딧물, 각지벌레, 흰불나방, 소나무(해송) 진딧물 흡즙가해, 응애, 화양목 명나방, 피목가지마름병, 희불나방
	진균병해충에 의한 2차 피해병	그을음병, 녹병, 피목가지마름병, 흰가루병, 적성병, 검은무늬병, 점무늬병, 모과나무무늬병	그을음병, 엽고병, 노균병, 피목가지마름병, 그을음병, 탄저병, 피소

Table 6. Used pesticides.

상품명	유효 성분	적용 병해충	용도	독성
스미치○	페니트로티온수화제	잎말이나방	살충제	보통
돌격○	디클로르보스, 람다사이할로트린분산성액제	매미충, 가루깍지벌레, 오리나무좀, 잎말이나방	살충제	보통
베노○	카바메이트계 농약	흰가루병	살균제	저
스미치○	페니트로티온(유제)	흰가루병, 꽃매미	살충제	저
명타○	에토펜프록스유탁제	잎말이나방, 순나방	살충제	저
세베○	에토펜프록스	노린재	살충제	저
칭실홍○	디노테푸란	거세미나방	살충제	저
오○	디노테푸란	갈색날개매미충	살충제	저
테디○	테트라디폰 유제	응애	살충제	저
두아○	테부코나졸 유제	세균성벼알마름병	살균제	저
뚝○	유기인계	조경용 살충제	살충제	저
빅카○	클로티아니딘액상수화제	진딧물, 가루깍지벌레	살충제	저
슈퍼편○	아바멕틴, 설펜사플로르액상수화제	순나방, 진딧물	살충제	보통
삼공해사코나○	헥사코나중수화제	갈색무늬탄저병, 잣빛곰팡이병, 붉은별무늬병	살균제	저
살림○	메트로나졸액상수화제	검은무늬병, 갈색무늬병	살균제	저
아크라마이○	비페나제이트액상수화제	응애	살충제	저
트랜스○	설펜사플로르액상수화제	나방류 방제	살충제	저
천하태○	페녹수람액상수화제	일년생, 다년생 잡초	제초제	저

참고: 농약안전정보시스템(<http://psis.rda.go.kr>), 농촌진흥청, 월미공원사업소 2020년 농약사용자료

3.1.2. 독성 등급별 농약사용 현황

농약 독성은 그 강도에 따라 제품농약의 반수치사용량(LD50, mg/kg 체중)으로 구분관리하고 있다. (Table 7)과 같이 농약의 독성 정도는 강도에 따라 맹독성(I 급), 고독성(II 급), 보통독성(III 급), 저독성(IV 급)과 같이 4단계로 분류하고 있다. 농약의 투여경로에 따라 경구와 경피로 구분되고 있으나, 흡입독성에 대한 부분은 1999년 이후 삭제되었다(김경규, 2019).

인천 근린공원에 사용된 농약은 (Table 6)에 나열한 것과 같이 전체 중 83 % 비율로 독성이 낮은 농약들이 주로 사용된 것으로 조사되었다.

Table 7. Toxicity classification of pesticides.

Division	Test animal half lethal dose (LD50, LC50)			
	Oral toxicity		Dermal toxicity	
	Solid	Liquid	Solid	Liquid
Very high toxicity (Level I)	Under 5	Under 20	Under 10	Under 40
high toxicity (Level II)	5~50	20~200	10~100	40~400
Moderate toxicity (Level III)	50~500	200~2,000	100~1,000	400~4,000
Low toxicity (Level IV)	Over 500	Over 2,000	Over 1,000	Over 4,000

※ Solid, Liquid 구분: 농약품목 물리적 상태

3.2. 분석 결과

3.2.1. 매체별 검출빈도

대상 공원별 자연함유량을 조사해 보기 위해 2월부터 3월까지 시료 채취한 1차 결과는 토양, 수목, 호소수 모두 정량한계 이하 불검출로 나타났다. 토양의 경우 정량한계는 0.01 mg/kg, 수목은 0.05 mg/kg, 호소수의 경우

0.0005 mg/L 이다. 5월부터 7월까지 시료 채취한 2차 검출 결과는 (Table 8)에서 표시한 것과 같이 27건 검출결과를 나타내어 73 % 검출율을 보였다. 모두 방제작업 직후 시료 채취된 것을 감안한다면 토양에서는 거의 모든 곳에서 농약성분이 검출된 결과(93 %)를 나타냈지만 수목의 경우는 71 %, 호소수의 경우 44 % 검출율을 나타낸 것으로 조사되었다. 8월부터 10월까지 시료 채취한 3차 결과의 경우도 27건 검출결과를 보여 1차와 동일한 검출 결과를 나타내었다. 결과적으로 검출빈도는 2차, 3차 유사하게 나타났지만, 매체별 검출빈도는 차이를 보인다. 비교 결과, 토양에서는 동일 결과를 나타냈지만 수목에서 검출빈도가 더 증가했으며 호소수에서는 검출되지 않았다.

2차와 3차는 시기별 구분 시료채취임을 감안하면 건기와 우기로 구분되어진다. 우기 시기온이 더 높고 습하여 병충해 피해가 더 심하고 이로 인한 살균도 필요하기 때문에 농약 방제 빈도는 건기에 비하여 더 많이 증가된다. 따라서 장마, 폭우 후 폭염 시 농작물 병해충의 증가로 인한 농약 방제 횟수가 증가했으나 농약 씻김현상, 기온상승, 일조량 증가 등 주변환경 영향으로 수계에서 잔류하는 농약의 자연적 소멸 현상이 일어났을 것으로 사료된다.

Table 8. Detected frequency of pesticides in parks.

Division	1st	2nd	3rd
Soil	0	13	13
Leaf	0	10	14
Lake water	0	4	0
Detected frequency	0	27	27
Total number of cases	19	37	37
Detected rate (%)	0	73	73

3.2.2. 농약 성분별 검출빈도 및 잔류량

물질별 검출된 농약 종류는 매체별로

(Table 9)에 나타내었다. 토양의 경우 아족시스트로빈 등 총 11종류의 농약성분이 검출되었고, 수목의 경우 5종, 호소수의 경우 아족시스트로빈, 카바릴 2종류의 물질이 검출되었다. 매체별로 검출된 농약성분의 종류는 토양 > 수목 > 호소수로 정리된다. 농약성분이 잔류하는 매체 중 토양에서의 검출건수가 가장 높은 이유는 토양이 가지고 있는 성질(유기물함량, 수분, 수소이온농도 등)에 따른 흡착력이 가장 큰 역할을 하며 직접 대기와 접하고 있는 수목에서 검출율은 기온 및 일조시간 대기환경의 영향이 큰 역할을 하는 것으로 판단된다.

Table 9. Detected frequency of pesticides by chemical substance.

No.	Chemical substance	Soil	Leaf	Lake water
1	Azoxystrobin	10		3
2	Fenitrothion	9	5	
3	Tebuconazole	6		
4	Iprodione	6		
5	Flutolanil	6		
6	Chlorpyrifos	3		
7	Etofenprox	5		
8	Cabendazim	2	5	
9	Thiophanate-methyl		5	
10	Carbaryl	3	2	2
11	Dinotefuran	1	3	
Total Number		51	20	5

토양에서의 농약성분별 검출빈도율을 (Fig. 2)에 나타내었다. 아족시스트로빈 19 %, 페니트로티온 17 %, 테부코나졸 12 % 등 농도 분포 순을 나타냈고, 농도 분포로 0.01~2.39 mg/kg 범위로 조사되었으며 최고 농도 물질은 페니트로티온으로 나타났다(Fig 3). 페니트로티온이 2.39 mg/kg 높게 나온 것을 제외하면 토양에서 검출된 물질 중 잔류하는 농도 수준은 대부분 검출한계 농도 수준인 0.01 mg/kg 미량 존재하는 것으로 나타났다.

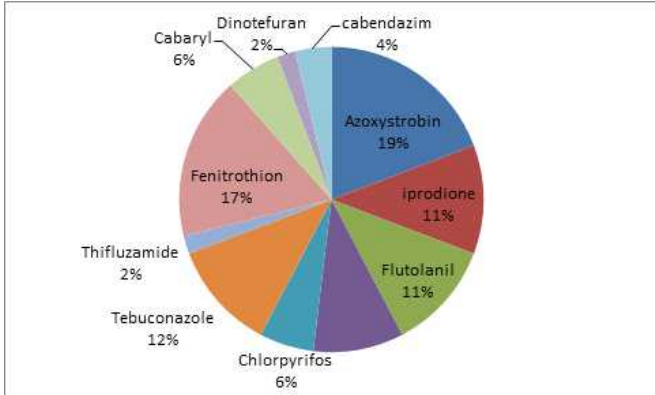


Fig. 2. Distribution of pesticidal components in soil.

페니트로티온 유효성분은 (Table 6)에서 2020년 사용된 농약물질에서 보는 바와 같이 잎말이나방, 흰가루병, 꽃매미 병충해를 막기 위해 사용된 스미치○ 농약을 사용한 것으로 역추적 된다. 이 농약은 가장 범용으로 많이 사용되고 있으며 물질의 성질에서도 비교적 빨리 소멸되는 경향을 나타내는 것으로 보인다.

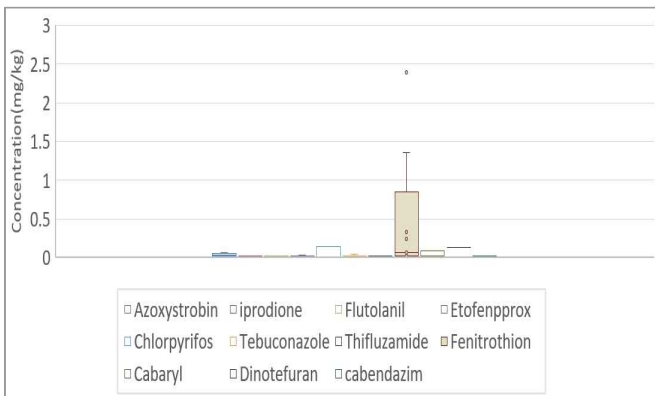


Fig. 3. Detected pesticides concentration distribution in soil.

수목에서의 물질별 검출빈도율을 (Fig. 4)에 나타내었다. 수목에서 검출된 물질은 페니트로티온, 카벤다짐, 티오파네이트-메틸, 디노테퓨란, 카바릴 총 5종으로 나타났고, 페니트로티온, 카벤다짐, 티오파네이트-메틸이 25 % 검출빈도를 나타냈으며, 디노테퓨란 15 %, 카바릴 10 % 검출빈도를 나타냈다.

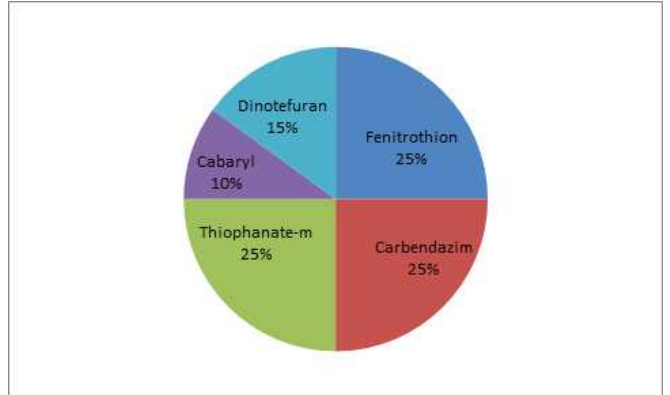


Fig. 4. Distribution of pesticidal components in tree.

(Fig. 5)에 나타난 것과 같이 농도 범위는 0.05~2.01 mg/kg 이고 최고 농도 물질은 디노테퓨란으로 조사되었다. 디노테퓨란은 이번 연구에서 추가된 물질이며 (Table 2)에 언급한 바와 같이 이 물질은 수용성이 매우 큰 물질이다.

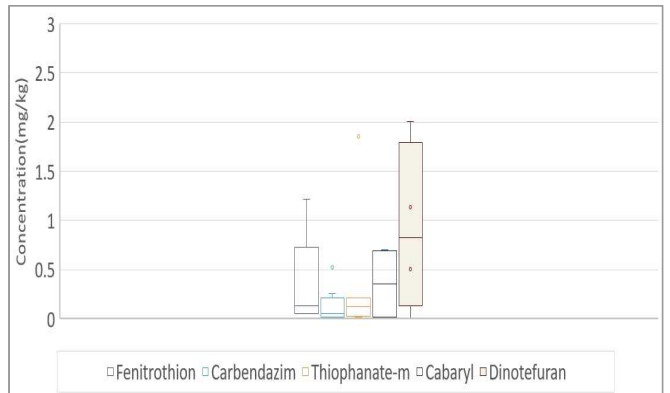


Fig. 5. Detected pesticides concentration distribution in tree.

(Fig. 6)에 나타난 바와 같이 호소수에서 검출된 물질은 2종류로 아зок시스트로빈과 카바릴이 검출되었다. 농도범위는 0.0006 mg/L에서 0.0009 mg/L로 미량 검출되었으며 최고 농도 검출 물질로 아зок시스트로빈, 카바릴 두 물질이 모두 나타났다.

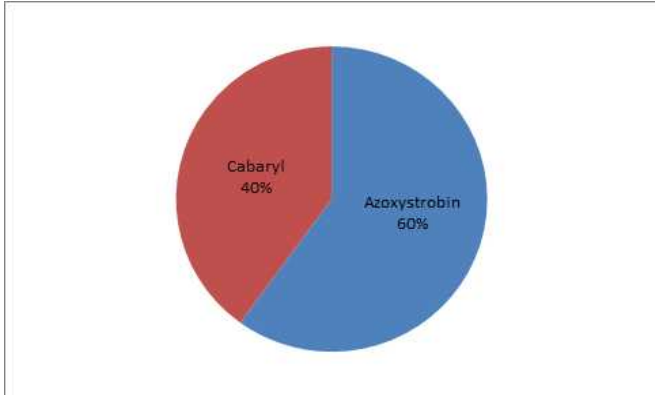


Fig. 6. Distribution of pesticidal components in pond.

3.2.3. 대상공원별 검출빈도 및 농약잔류량

(Fig. 7)은 검출된 물질의 누적 농도합을 대상공원별로 나타낸 것이다. 각 대상공원별로 검출된 물질 종류에 관계없이 누적합으로 표현한 것이고 대부분 정량한계 수준으로 검출된 농도값이라 검출건수에 비례한다. 즉, 그림에서 토양의 경우 가장 높은 농도합을 나타낸 인천대공원의 경우 검출건수가 12건, 누적농도값은 1.36 mg/kg이며 송현공원의 경우 검출건수가 1건으로 누적농도 값이 0.01 mg/kg 나타낸 것으로 예를 들 수 있다. 따라서 인천대공원의 경우 검출된 농약의 종류와 건수가 다양하다고 볼 수 있다. 총 누적합을 검출건수로 나눈 농도는 청라호수 및 인천대공원이 0.08 mg/kg 이고 송도센트럴파크 공원 0.02 mg/kg, 그 외 공원은 0.01 mg/kg 값으로 대표농도값을 표현하여 비교해 보면, 토양에서 농약 정량한계 값이 0.01 mg/kg 인 것을 감안한다면, 검출수준에서 미량 상회하는 수준으로 평가할 수 있다. 호소수가 있는 송도센트럴공원, 인천대공원, 청라호수공원과 그 외 호소수가 없는 공원에서의 누적 농도합은 각각 평균 0.63 mg/kg, 0.05 mg/kg 로 나타났으며 호소수가 있는 공원에서 농약 검출 빈도수가 비호소수 공원에 비해 많다고 설명할 수 있다. 한시료 당 검출 빈도가 물질 종류별로 다양하게 검출된다는 것은 병해충에 방제하는 농약사용

의 종류들이 다양함으로 해석할 수 있다.

반면, 각 공원별로 수목의 경우 토양 검출건수에 비해 작음에도 불구하고 농도합이 높게 나타났다. 인천대공원에서 수목 검출건수 7건이고 누적농도합이 4.55 mg/kg이며 토양의 경우 검출건수 12건 누적농도합이 1.36 mg/kg 인 것을 예로 들 수 있다. 타 공원들도 유사한 결과를 나타내 전체적으로 잔류 농도는 토양보다 수목에서 더 높게 나타나는 것으로 조사되었다.

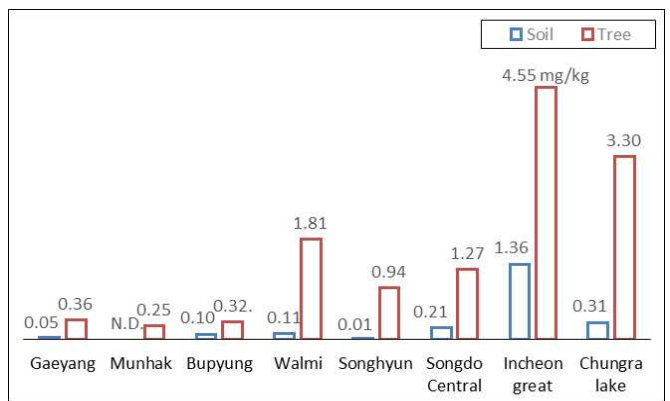


Fig. 7. Cumulated concentraion of pesticide residues by park (Unit: mg/kg).

3.2.4. 환경 행적(Envrionmental Fate) 특성

병해충, 잡초 방제용으로 살포된 농약은 실제로 소량(1% 미만)만이 목표에 도달하며 99% 이상이 환경 내로 유입되어 토양계, 수계, 동·식물계, 대기로의 이동, 분포, 분해, 잔류된다.⁷⁾ 토양 중에서 농약의 동태는 유실, 흡착, 탈착, 용탈 및 분해, 광분해와 같은 외적 요인과 토양미생물의 역할 등 다양한 요소들이 다 관여된 복합적인 내용이다.¹⁰⁾

다시 정리하면, 농약은 사용되는 순간부터 목표로 하는 대상(병해충, 수목)뿐 아니라 주변에 도달해 생물·비생물적 변환과정을 거치고, 동시에 물리적 요인에 의해 다양한 환경 매질로 이동 분포하게 되는데 이러한 시공간적 변환과 분포변화를 환경 행적이라 한다.⁵⁾

이러한 환경 행적으로 토양, 대기, 수계에서의 분해성, 이동성 및 잔류성으로 나누어 설명할 수 있다.

첫째, 토양 분해성은 미생물에 의한 분해와 화학적 분해를 같이 측정하는 토양대사시험과 광에 의한 분해시험 결과를 종합적으로 판단한다. 따라서, 시간경과에 따른 시험계의 농약과 대사분해산물 등의 분포변화, 토양광분해에 의한 휘발성 등 화학적 특징을 파악하고 정량해야 한다.

본 논문에서는 물리화학적 특성 중 물에 대한 용해도, 옥탄올/물 분배계수, 흡착계수 및 수계와 호기성 토양에서 각 농약물질의 반감기에 대해 조사를 했으며 농약사용으로 인한 대사분해 산물 등의 농도변화는 고려하지 않았다. 각 매체에서 검출빈도가 높고 농약방제 1일 후, 5일 후, 10일 후의 잔류량 감소 경향이 뚜렷한 농약물질 5종의 물리적 성질을 (Table 10)에 정리하여 나타내었다.

토양에서 잔류농도가 높은 물질 2종의 시계열 농도를 (Fig. 8)에 나타냈다. 페니트로티온 물질은 5일 후 43 % 감소율을 보였으며 10일 후 86 % 감소율을 나타냈다. 테부코나졸의 경우 검출된 지 10일 후 자연적으로 100 % 제거되는 결과를 보였다. (Table 10)에 나타난 페니트로티온 물리적 성질을 살펴보면 이 물질은 호기성 토양 반감기(2.7일)가 비교적 짧은 것과 유사하게 농도 감소율을 보이고 있으며 테부코나졸의 물리적 성질은 흡착력(K_{oc} 1000)이 매우 강하고 호기성 토양에서 반감기가 597일로 매우 긴 특성이 있으나 다른 물질에 비해 물에 녹는 성질이 커서 수계로의 이동 가능성이 있다. 이번 조사의 경우, 테부코나졸은 호소수에서 검출되지 않았으며 토양에서 검출된 농도도 정량한계 수준 0.01 mg/kg 으로 매우 낮아 다른 유기물에 부착되어 잔류할 가능성이 희박할 것으로 판단된다.

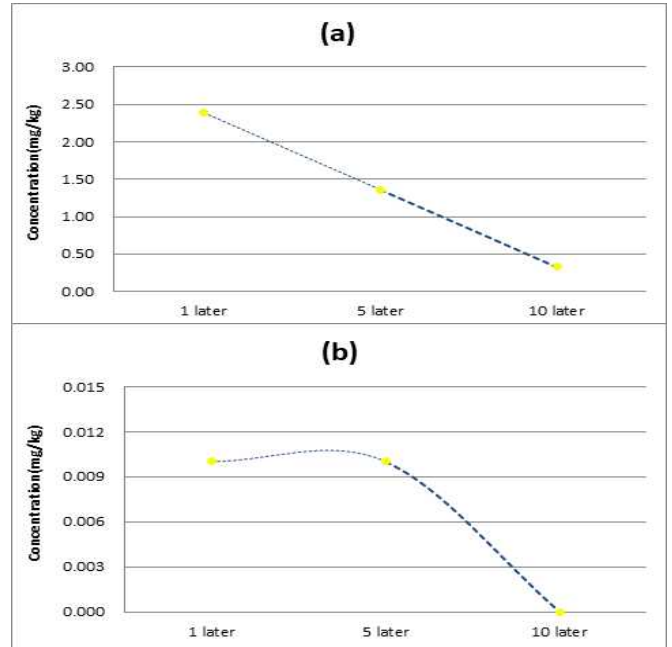


Fig. 8. Pesticide [(a): Fenitrothion, (b): Tebuconazole] concentration during sampling period in soil.

둘째, 대기에서의 분해성은 수목에 직접 방제되는 농약성분들의 이동 여부를 결정하는 요소가 된다. 직접 대기와 접촉해 있기 때문에 농약성분 자체가 가지는 휘발성과, 대기환경(기온, 습도, 광조사)에서 반응하는 물리적 성질들이 농약성분의 잔류 존재를 좌우하는 요소가 될 수 있다. (Fig. 9)는 수목에서 검출된 2종 농약성분의 농도변화를 그림으로 나타낸 것이다. 페니트로티온의 경우 방제 5일 후 37.5 %, 10일 후 68.8 % 농도가 감소하는 것으로 나타났으며 티오파네이트-메틸의 경우 방제 5일 후 정량한계(0.05 mg/kg) 이하 급격한 감소율을 보였다. (Table 10)을 보면, 페니트로티온의 대기에서의 반감기는 6.2일로 수목 생체로 흡수 및 이동성을 배제한다면, 거의 유사한 감소성을 나타내는 것으로 판단된다. 티오파네이트-메틸의 경우 증기압 높아 대기 중에 증기 및 입자상으로 존재하며 광화학반응 분해되며 소실되는 성질을 나타내는데 반감기 5시간인 매우 빠른 속도로 대기 중에서 제거된다. 농도가 빠르게 감소되는 양상이 이번 연구에서 결과와 유사한 것으로 판단된다.

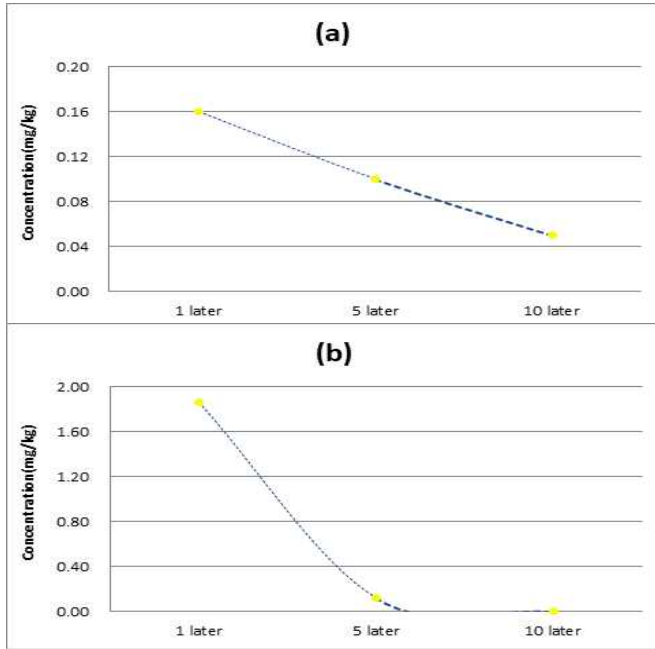


Fig. 9. Pesticide [(a): Fenitrothion, (b): Thiophanate-m] concentration during sampling period in tree.

셋째, 수계 분해성 역시 미생물에 의한 것과 화학적 요소로 나눌 수 있다. 미생물에 의한 분해는 호기성 및 혐기성 미생물에 의한 분해와 화학적 분해는 가수분해, 산화환원 과정 및 광화학적 분해를 포함한다. 이들 요소들을 모두 고려하기에는 제한적인 면이 있고 결론적으로 (Table 10)에 가수분해되어 소멸되는 물질별 반감기와 수계 광분해성에 대한 물리적 성질을 조사하여 이를 설명하고자 하였다. (Fig. 10)은 호소수에서 검출된 2종 농약성분의 농도변화를 그림으로 나타낸 것이다. 아족시스트로빈의 경우 수계에서 가수분해 반감기가 31일로 다른 물질들 보다 긴 편에 속하며 수용성 낮아 지하수 침출 가능성도 높은 편이다. 따라서 수계에서 이 물질은 부유고형물 흡착되어 오래 잔류하여 지하수계로 유입될 가능성이 크나 290nm 이상의 빛에 분해가 잘되는 성질을 가지고 있다. 이번 연구 결과 (Fig. 10)을 살펴보면, 방제 후 5일까지 농도감소가 없다가 10일 후 거의 소멸되는 결과를 볼 수 있었다. 이로 미량 검출된 아족시스트로빈은 수계에서의 광분해된 것으로 추론해

볼 수 있다. 카바릴의 경우, 방제 직후 검출되지 않았던 것이 5일 후 정량한계(0.0005 mg/L) 수준으로 검출되는 것을 보면, 물에 잘 녹는 카바릴이 강우 등에 의해 씻겨 이동했을 가능성이 크며 다행히 수계에서의 반감기가 1.8일인 물리적 가능성을 적용해 본다면 씻겨서 호소수에 유입된 후 5일 이내 소멸되는 이번 연구 결과와 유사한 결과를 나타낸 것으로 나타났다.

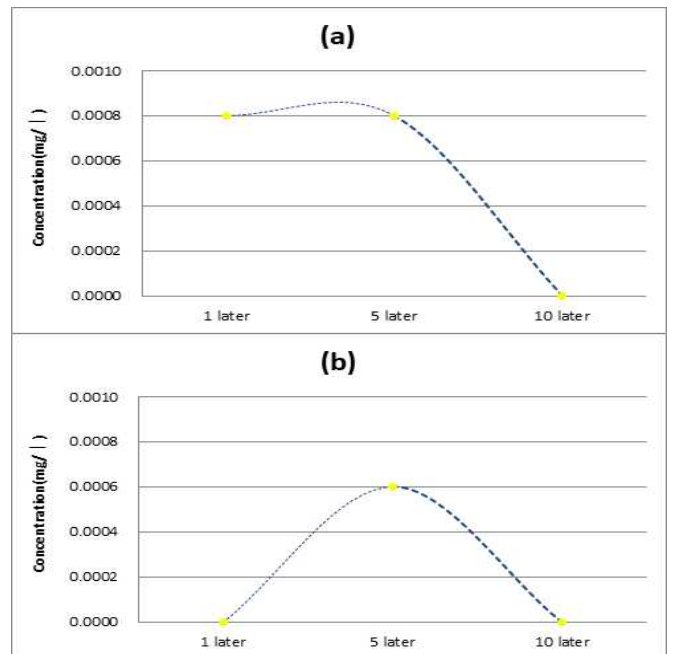


Fig. 10. Pesticide [(a): Azoxystrobin, (b): Cabaryl] concentration during sampling period in pond.

넷째, 농약 이동성과 잔류성에 대한 언급이다. 하위 토양층으로의 이동, 즉 용탈과 지하수까지 도달할 잠재성을 이동성으로 설명할 수 있다. 이러한 이동성은 물질의 물리적 성질 중 토양 흡·탈착성으로 설명할 수 있다. (Table 9)는 UK SSLRC(stands for Soil Survey and Land Research Centre)에서 분류한 토양 흡수등급에 관한 내용이다. 이번 연구 중 토양에서 검출된 테부코나졸의 흡착 등급이 높은 수준으로 유기물에 흡착되어 수계로 이동 가능성이 우려될 수 있으나 앞에서 언급한 것과 같이 검출농도 자체가 미량이라 우려할 수

준은 아니라 판단된다. 상반된 성질을 가지는 탈착성도 대조물질을 사용한 시험물질의 용탈을 설명할 수 있는 상대적 척도인 상대이동계수(RMF, Relative mobility Factor)를 사용해 평가할 수 있으나 여기서 언급할 수준은 아니라 조사에서 제외하였다.

Table 9. Classification by Soil Adsorption Grade (UK SSLRC, 1996).

Division	Soil Adsorption Grade				
	Very low	Low	Moderate	High	Very high
K _{oc}	Under 15	15~75	75~500	500~4,000	Over 4,000

그 외, 생체 및 유기물로 축적되는 정도도 생각해 볼 수 있다. 옥탄올/물 분배계수는 농

약 등의 화학물질이 환경계로부터 생체 및 유기물로 축적되는 지표로 사용된다(김균 등, 1987). EPA에서는 log K_{ow} 값이 높으면 상대적으로 수용성이 낮아지고 농축계수가 높아지게 되는 간단한 계산식을 만들기도 하였다(Neely et al., 1981). 이번 연구에서 유기물로의 축적이 문제가 되는 물질은 역시 테부코나 줄이나 미량 검출 수준이고, 검출된 다른 물질들은 미량 검출로 나타났으며 토양, 대기, 수계 각각의 매체에서 소멸되는 고유의 물리적 성질들이 있어 농도가 감소됨을 확인할 수 있었다. 따라서, 이번 조사에서 농약 사용으로 인한 생체 축적에 대해서는 우려할 수준은 아닌 것으로 사료된다.

Table 10. Physical properties of detected pesticide.

	Pesticide	water solubility (mg/L)	octanol water partition coefficient (logK _{ow})	Adsorption Coefficient (K _{oc})	Hydrolysis half-life (days)	Aerobic soil half-life (days)	Environmental Fate
1	Fenitrothion	19.0	3.3	322	183	2.7	- 토양: 적당한 이동성 가짐(K _{oc}) 호기성토양 반감기(2.7일) - 수계: 광분해(반감기 1일), 생분해 - 대기: 반감기(6.2일) - 생물농축성 낮음(BCF 1.5)
2	Tebuconazole	32.0	3.7	1,000	28	597	- 토양: 토양 및 퇴적물에서 중간 정도의 이동성, 없을 것 예상, 토양 표면 휘발성 없음, 부유고체 및 침전물에 흡착 - 수계: 가수분해 낮음 - 대기: 미립자 상 존재, 건습식 침적 제거, 광분해 안정적 - 생물농축 높음(BCF 140)
3	Thiophanate-methyl	25.0	1.4	330	41	21~63	- 토양: 적당한 이동성 가짐(K _{oc}), 생분해 가능(90%소멸, 6-18주) - 수계: 자외선, 햇빛 조사 분해 - 대기: 증기압 높아 대기 중에 증기 및 입자상 존재 광화학반응 분해(반감기 5시간) - 생물농축성 낮음(BCF 4)
4	Azoxystrobin	6.0	2.5	581	31	112	- 토양: 중간~낮은 이동성 있음 증기압 낮아 토양 표면 휘발 가능성 낮음 - 수계: 수용성 낮음 지하수 침출 가능성, 부유고형물 흡착, 광분해(290nm) - 대기: 미립자 상 존재, 건습식 침적 제거 - 생물농축성 낮음(BCF 21)
5	Carbaryl	30.2	2.4	390	1.8	10	- 토양: 적당한 이동성 가짐(K _{oc}) 알칼리토양 가수분해(생분해) - 수계: 침전물 흡착(반감기: 1.8일) - 대기: 미립자상 존재(광화학적 제거) - 생물농축 높음(BCF 30)

※ 참고: <http://www.pesticideinfo.org> Pesticide action Network Database-chemicals
<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>

3.3. 농약 위해성 평가

3.3.1 작업자 노출허용량 평가

농약 위해성 평가의 선진국 선례를 살펴보면, 미국에서는 작업자 노출평가(Occupational exposure assessment) 뿐만 아니라 거주자 노출평가(residential exposure assessment)도 실시하고 있으며 거주자 노출평가에서는 농약에 노출될 수 있는 성인 외에도 어린이에 대한 노출평가도 실시하고 있다(You et al. 2014). EU에서는 살포자, 작업자, 행인, 거주자 4그룹으로 나누어 위해성 평가를 실시하고 있다.⁴⁾

본 연구 인천 관내 근린공원에서의 방제에 사용된 농약사용량은 전체적으로 미량이며 주변 환경에 오래 잔류하지 않고 빠른 시일 내 소멸되는 물질들이 대부분이라 행인과 거주자에 대한 노출평가 보다 작업자에 대한 농약 노출정도가 가장 우려되는 사항이라 판단되었다.

따라서, 이번 연구에서 조사한 농약성분 중 토양에서 잔류 농도가 높았던 페니트로티온 물질에 대해 농작업자 노출허용량을 평가를 시행해 보고자 하였다. 먼저 위해성 평가 1단계는 독성평가로 페니트로티온의 경우 농약살포자 노출허용량(Acceptable perator exposure level, AOEL)을 유럽기준 급성독성기준치인 aRfD(acure Reference Dose)값으로 참고하였고 그 값은 0.013 mg/kg b.w. 이다. 다음 2단계로 이론적 노출량을 산정하기 위한 과정이 필요하다. 이를 수행하기 위해 영국에서 개발한 UK-POEM(United Kingdom Predictive Operator Exposure Model)을 이용하여 농약살포자에 대한 노출량을 산정하였으며 모델 조건으로 페니트로티온 함량 50 % 유제 물 20L 사용량 Home garden sprayer 장비를 사용한 것을 기본 조건으로 사용하였다. 모델 수행 결과 보호장비 미착용시 총 노출량은 0.0076 mg/kg b.w. 로 나타났다. 마지막 3단계는 위해성평가 단계로 농약살포자 위해성평가 흐름 모식도를

(Fig.11)에 나타내었다. 이 모식도 흐름에 따르면 페니트로티온의 TER(Toxicity Exposure Ratio) 값은 1보다 큰 값인 1.72 산정되어 앞에서 언급한 조건에서의 위해성 정도는 낮은 것으로 평가할 수 있었다.

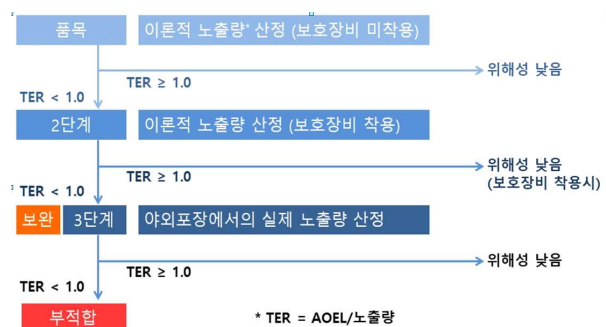


Fig. 11. Schematic diagram of risk assessment for pesticide sprayers by stage (Source: National Academy of Agricultural Sciences).

우리나라 2017년 국립농업과학원에 연구에 따르면 농약 취급 시 흡수 경로는 피부경로 92 %, 호흡경로 8 % 비율을 나타내 피부 흡수로의 노출이 가장 심각한 것으로 보고하였다.¹²⁾ 농약조제 작업 시 마스크와 장갑을 함께 착용한 경우는 99% 농약을 차단하는 효과가 있다고 보고하고 있어 반드시 작업자들은 마스크와 장갑을 착용하고 작업에 임하는 것을 준수하여야 할 것이다.

IV. 결론

인천관내 도시 근린공원에 사용되고 있는 농약잔류량 실태를 조사하고 잔류수준 정도를 파악하기 위해 토양, 수목(나뭇잎), 호소수의 농약 잔류량을 조사하고 사용농약의 검출빈도와 잔류 특성을 파악하였으며 잔류한 농약이 주위 대기, 토양, 호소수 다양한 환경 매체에서 잔류하는 특성을 파악하고자 검출된 농약성분의 물질적 특성에 맞춰 환경 행적(Fate)을 살펴보았다.

1. 그 결과 각 매체에서의 농약 잔류물질 검출빈도는 토양 > 수목 > 호소수로 나타났다. 잔류농도는 대부분 정량한계 수준으로 검출·잔류하는 것으로 나타나 인천시민들이 안심하고 근린공원을 이용할 수 있는 환경이 조성되어 있는 것으로 조사되었다.
2. 매체별 자연 감소량 및 환경 행적을 파악하기 위해 농약 성분별로 농도가 높았던 페니트로티온의 경우 토양에서 5일 후 43%, 10일 후 86% 감소율을 나타냈다. 물질 특성에 있어서 페니트로티온은 토양에서 빠른 반감기를 가지는 것으로 조사되었다.
3. 수목에서 잔류농도가 높게 검출되었던 디노테퓨란(2.01 mg/kg)의 경우 토양에서는 호소수에서 검출되지 않았다. 물에 대한 용해도가 매우 높은 물질이라 비가 온 이후 토양이나 호소수로 흘러들어갔을 확률이 크지만, 그러한 상황 정도의 농도수준은 아닌 것으로 판단된다. 이 물질은 수목에서 검출된 것이라 직접 접촉하고 있는 대기환경 상태(온도차에 의한 습식침적)에 의해 영향을 받아 농도가 감소하였을 것으로 추론된다.
4. 호소수에서 검출되었던 물질은 아족시스트로빈과 카바릴이었으며 두 물질 역시 미량 수준이며 방제 10일 후 거의 불검출 수준으로 감소하는 것으로 나타났다.

결론적으로, 인천 관내 근린공원에서 방제에 사용된 농약사용량은 전체적으로 미량이며 검출된 농약성분들이 주변 환경에 오래 잔류하지 않고 빠른 시일 내 소멸되는 물리적 성질들이 있어 주위 환경매체로의 환경행적 또한 우려할 수준이 아니었다. 따라서 인천시민이 근린공원을 이용할 때 방제 농약으로 인한 환경안정성은 확보되었다고 평가할 수 있다. 다만, 공원 방제에서 농약에 대한 노출평가를

고려해야 할 대상은 방제 작업자인 것으로 판단된다.

공원을 이용하는 시민들의 피해를 최소화하기 위해서는 플랜카드 등 방제작업을 알릴 수 있는 수단들을 동원하여 공원을 자주 이용하는 시민들에게 미리 공지할 필요성이 있으며, 작업을 할 시 방제일 기상 상태를 고려하여 풍속이 강하지 않는 날을 선택하여 빠른 시간 내 작업하는 것이 우선되어야 할 것으로 판단된다. 추가적으로 농약작업자에 대한 노출을 최소화하기 위해서는 소홀할 수 있는 작업 자세의 인지와 매 작업 시 마스크뿐만 아니라 장갑과 방제복도 반드시 착용 의무화하는 것이 요구되어 진다.

V. 참고문헌

1. 김경규, (2019). 농업기술길잡이221_농약 바르게 이해하기, 농촌진흥청.
2. 김균, 김영배, 김용화, 노정규, 농약 Cholorothalonil과 Command의 수용성 및 증기압, (1987). 한국환경학회지, 6(2), 84~93.
3. 노동환경연구원, (2011). 경기도 내 도로 주변의 가로수에 사용되는 농약의 독성연구.
4. 박일권, (2012). 삼림병해출방제용 등록 추천 약제와 새로운 약제 소개 수목보호.
5. 신종현 외 7명, (2015). 경기도내 근린공원의 농약 사용실태 및 잔류특성에 관한 연구, 경기도 보건환경연구원보.
6. 이규승, (2010). 토양 중 농약의 동태, 농약과학회지 제14권 제3호.
7. 이슬 외 6명, (2019). 농작업자의 보호장비 착용 수준에 따른 농약 노출량 저감 영향, 한국농약과학회.
8. 홍순성 외 5명, (2013). 변형된 UK-POEM을 이용한 한국 과수 농약살포자 위해성 평가, 농약과학회지 제17권 제1호.

9. American Public Health Association, (1998). Standard methods for the examination of water and wastewater, 20th Ed..
10. Anonymous, (1980). Octanol water partition coefficient, in Support document test data development standards EPA-560/11-80-027, U.S. EPA, Washington D.C. pp79-120
11. Neely etc, (1981). OECD guidelines for testing of chemicals, Paris. OECD .
12. You A.S., Hong S.S, Lee J.B., Lee S.D. and Ihm Y.B, (2014). Application of Oral Absorption in Establishment of AOEL for Pesticides and Occupational Risk Assessment for farm worker. The Korean Journal of Pesticide Science 18(4): 342-349