

토양속에서 중금속들의 확산결수결정을 위한 한가지 방법

최 동 혁

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《토지관리에서 중요한것은 또한 토지개량사업을 적극 벌리는것입니다.》(《김정일선집》
증보판 제11권 33페이지)

토양속에서 중금속들의 확산과정을 정확히 평가예보하자면 중금속들의 확산결수들을 정
확히 결정하여야 한다.

선행연구[1-3]에서는 중금속들의 확산결수결정과 예보방정식의 풀이를 분리시켜 연구
하였다.

본문에서는 토양중금속들의 확산과 확산결수결정을 동시에적으로 결정하기 위한 방법에
대하여 고찰하였다.

1. 토양속에서 중금속들의 대류확산방정식

토양속에서 중금속들의 확산과정을 반영하는 기본방정식은 다음과 같다.[1]

$$m \frac{\theta}{\theta_s} \frac{\partial c_j}{\partial t} + \theta u \frac{\partial c_j}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_j \frac{\partial c_j}{\partial z} \right) - \frac{\partial s_j}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{s_{Na}}{\sqrt{s_{Pb}}} = K_{Na-Pb} \frac{c_{Na}}{\sqrt{c_{Pb}}} \quad (2)$$

$$\frac{s_{Na}}{\sqrt{s_{Cd}}} = K_{Na-Cd} \frac{c_{Na}}{\sqrt{c_{Cd}}} \quad (3)$$

$$s_{Na} + s_{Pb} + s_{Cd} = N_0(z) \quad (4)$$

초기조건

$$t=0; \begin{cases} c_j(z, 0) = c_{j0}(z) \\ s_j(z, 0) = s_{j0}(z) \end{cases} \quad (5)$$

경계조건

$$t>0 \begin{cases} z=0; c_j(0, t) = \varphi_j(t) \\ z=L; \frac{\partial c_j(L, t)}{\partial z} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

여기서 $c_j(z, t)$ 는 토양용액속에서 j 성분의 농도(mg/100g), $s_j(z, t)$ 는 토양흡수복합체에서
 j 성분의 농도(mg/100g), K_{A-B} 는 이온교환선택성결수, D_j 는 확산결수(m²/d), m 은 토양의 공
극도, θ 는 토양의 습도, θ_s 는 토양의 포화습도, u 는 물의 수직이동속도(삼투속도)(m/d),

t 는 시간(d), z 는 공간자리표이다.

편리상 방정식 (1)–(6)의 모든 변수들을 다음의 무차원량들로 변수변환을 실시하자. 즉

$$\left. \begin{aligned} p_j(\xi, \tau) &= \frac{c_j(z, t) - c_{\Pi j}}{c_j^* - c_{\Pi j}} \\ \tau &= \frac{u^* t}{mL} \\ \xi &= \frac{z}{L}, N_j(\xi, \tau) = \frac{s_j(z, t)}{N_j^*} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

여기서 c_j^* , u^* , N_j^* 는 특성상수, $c_{\Pi j}$ 는 관개수 혹은 비물에서 j 성분의 농도(mg/100g)이다.

그러면 방정식 (1)–(7)은 다음과 같이 변형된다.

$$\frac{\theta}{\theta_s} \frac{\partial p_j}{\partial \tau} + \theta f \frac{\partial p_j}{\partial \xi} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{1}{p_{ej}} \frac{\partial p_j}{\partial \xi} \right) - \frac{N_j^*}{m(c_j^* - c_{\Pi j})} \frac{\partial N_j}{\partial \tau} \quad (8)$$

$$\frac{N_{\text{Na}}^* N_{\text{Na}}}{\sqrt{N_{\text{Pb}}^* N_{\text{Pb}}}} = K_{\text{Na-Zn}} \frac{p_{\text{Na}}(c_{\text{Na}}^* - c_{\text{IINa}}) + c_{\text{IINa}}}{\sqrt{p_{\text{Pb}}(c_{\text{Pb}}^* - c_{\text{IIPb}}) + c_{\text{IIPb}}}} \quad (9)$$

$$\frac{N_{\text{Na}}^* N_{\text{Na}}}{\sqrt{N_{\text{Cd}}^* N_{\text{Cd}}}} = K_{\text{Na-Cd}} \frac{p_{\text{Na}}(c_{\text{Na}}^* - c_{\text{IINa}}) + c_{\text{IINa}}}{\sqrt{p_{\text{Cd}}(c_{\text{Cd}}^* - c_{\text{IICd}}) + c_{\text{IICd}}}} \quad (10)$$

$$N_{\text{Na}}^* N_{\text{Na}} + N_{\text{Pb}}^* N_{\text{Pb}} + N_{\text{Cd}}^* N_{\text{Cd}} = N_0(z) \quad (11)$$

여기서

$$\left. \begin{aligned} p_{ej} &= \frac{Lu^*}{D_j} \\ f &= \frac{u}{u^*} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

이다. 초기조건과 경계조건은 다음과 같이 변화된다.

초기조건

$$\left. \begin{aligned} \tau = 0; \quad P_j(\xi, 0) &= \frac{c_{j0}(z) - c_{\Pi j}}{c_j^* - c_{\Pi j}} \\ N_j(\xi, 0) &= \frac{s_{j0}(z)}{N_j^*} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

경계조건

$$\left. \begin{aligned} \xi = 0; \quad P_j(0, \tau) &= \frac{\varphi_j(t) - c_{\Pi j}}{c_j^* - c_{\Pi j}} \\ \xi = 1; \quad \frac{\partial p_j(1, \tau)}{\partial \xi} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

여기서 P_j , N_j 는 토양용액과 흡수복합체속에서 j 성분의 무차원농도이다.

2. 확산계수의 결정

$z=0$ 에서 질량흐름은 $q_z=0$ 이므로

$$D_j(t) \frac{\partial c_j}{\partial z} = u(c_j(0, t) - c_{\Pi j}) \quad (15)$$

와 같이 표시된다.

이제 식 (7)의 무차원량들로서 식 (15)를 변수변환하면 다음의 식을 얻을수 있다.

$$D_j(t) \frac{\partial p_j}{\partial \xi} = u L p_j(0, \tau) \quad (16)$$

여기서 $\frac{\partial p_j}{\partial \xi}$ 를 다음과 같이 계차근사화하고 $D_j(t)$ 에 관해서 정돈하면

$$D_{ji}^{s+1} = \frac{2h}{uL} \frac{p_{j0}^{s+1}}{p_{j2}^{s+1} - 4p_{j1}^{s+1} + 3p_{j0}^{s+1}} \quad (17)$$

과 같은 식을 얻을수 있다.

계산은 식 (17)과 예보모형 (7)–(14)를 결합하여 진행한다.

이때 $s+1$ 시간준위의 D_{ji}^{s+1} 을 모르므로 초기근사로

$$[D_{ji}^{s+1}]^k = \frac{1}{2} \frac{p_{j0}^{s+1}}{Lu} \quad (18)$$

를 취한다.

연구지역의 3개 지점에서 Pb와 Cd에 대한 관측값과 계산값, 오차계산결과는 표와 같다.

표. 연구지역의 3개 지점에서 연과 카드미움에 대한 관측값과 계산값, 오차(2013년 6월 11일)

지점	지목	토양층	중금속					
			Pb			Cd		
			관측값 /(mg·kg ⁻¹)	계산값 /(mg·kg ⁻¹)	오차/%	관측값 /(mg·kg ⁻¹)	계산값 /(mg·kg ⁻¹)	오차/%
1	논	갈이층	247	263	6.48	12.9	11.73	9.07
		속층	248	259	4.44	4.85	4.57	5.77
2	강냉이밭	갈이층	255	271	6.27	4.75	4.29	9.68
		속층	248	211	14.92	4.48	4.15	7.37
	남새밭	갈이층	281	238	15.30	4.45	4.79	7.64
		논	382	352	7.85	5.58	5.92	6.09
		갈이층	219	269	22.83	4.96	4.13	16.73
		속층	238	227	4.62	2.82	2.31	18.09
3	강냉이밭	갈이층	235	245	4.26	3.16	3.71	17.41
		속층	215	254	18.14	3.46	3.12	9.83
	남새밭	갈이층	227	247	8.81	4.32	4.58	6.02

맺는 말

관측값과 계산값의 최대오차값이 Pb, Cd인 경우 각각 22.83, 18.09%로서 이 방법은 토양속에서 중금속들의 확산예보에 적용할수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 최동혁; 토양환경학, 김일성종합대학출판사, 106~169, 주체104(2015).
- [2] 朱颜明; 环境地球化学, 科学出版社, 158~332, 2012.
- [3] 曲格平等; 环境科学基础知识(中国大百科全书环境科学卷选编), 科学出版社, 198~260, 2013.

주체106(2017)년 11월 5일 원고접수

A Method to Decide Diffusion Coefficient of Heavy Metals in Soil

Choe Tong Hyok

In this paper we have researched a method to decide the diffusion and its coefficient of heavy metals in soil in the same time.

Key words; environment, diffusion, soil pollution