

Generalized Preferential Flow Model (GPFM)의 개념과 적용사례 연구

김영진^{1*} · 타모 스테인휴이스² · 남경필¹

¹서울대학교 건설환경공학부, ²코넬대학교 생명환경공학과

Concept and Application of Generalized Preferential Flow Model (GPFM)

Young-Jin Kim^{1*} · Tammo Steenhuis² · Kyoungphile Nam¹

¹Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

²Department of Bio. & Environmental Engineering, Cornell University

ABSTRACT

In recent years the convective-dispersive equation has been often discredited in predicting subsurface solute transport under field conditions due to presence of preferential flow paths. Kim et al. (2005) proposed a simple equation that can predict the breakthrough of solutes without excessive data requirements. In their Generalized Preferential Flow Model (GPFM), the soil is conceptually divided in a saturated “distribution layer” near the surface and a “conveyance zone” with preferential flow paths below. In this study, we test the model with previously published data, and compare it with a classical convective-dispersive model (CDM). With three parameters required-apparent water content of the distribution zone, and solute velocity and dispersion in the conveyance zone-GPFM was able to describe the breakthrough of solutes both through silty and sandy loam soils. Although both GPFM and CDM fitted the data well in visual, variables for GPFM were more realistic. The most sensitive parameter was the apparent water content, indicating that it is the determining factor to apply GPFM to various soil types, while Kim et al. (2005) reported that changing the velocity of GPFM reproduced solute transport when same soils were used. Overall, it seems that the GPFM has a great potential to predict solute leaching under field conditions with a wide range of generality.

Key word : Unsaturated zone, Preferential flow, Solute transport, Convective-dispersive model.

요 약 문

최근 들어 preferential flow같은 현장조건의 불균질한 매질을 이동하는 지하수 거동해석에 이류 분산 방정식을 적용하는데 많은 문제점들이 제기되어 왔다. 이에 따라 Kim 등(2005)은 최소한의 모형인자로 preferential flow 경로를 통한 토양지하수의 흐름을 예측할 수 있는 간단한 모형을 개발한 바 있다. Kim 등(2005)이 제시한 Generalized Preferential Flow Model(GPFM)은 토양을 표층주변의 분배 층(distribution layer)과 그 밑의 운반구역(conveyance zone)으로 나누어 거동을 예측하고 있다. 본 연구에서는 GPFM을 간단히 소개하고 기존의 다른 실험결과에 적용한 후 이류분산방정식(CDM)과의 비교를 통해 모형을 검증해 보고자 하였다. 기존에 발표된 두 개의 실험값에 GPFM을 적용해본 결과, GPFM은 세 가지 인자-유효함수비, 유속, 분산계수-를 입력하여 silty 및 sandy loam 토양 내 추적자의 파괴곡선을 잘 예측하였다. CDM을 이용한 예측 값과 비교한 결과 GPFM과 CDM 모두 실제 관측된 파괴곡선과 일치된 경향을 보였으나, GPFM에 의해 추측된 인자들이 더 현실적으로 가능한 값을 나타내었다. 인용된 두 실험값에 GPFM을 적용할 경우 예측 값에 가장 영향을 끼친 인자는 유효함수비로 나타났는데, 이는 Kim 등(2005)이 같은 종류의 토양에서 유속이 GPFM의 결과에 가장 영향을 끼쳤다고 보고한 것에 비해, 다른 성질의 토양에서는 유효 함수비가 가장 결정적인 인자임을 보여준다. 본 연구를 통해 GPFM이 이용하기가 쉽고 여러 가지 현장조건에 적용성이 높아 preferential flow 경로를 통한 토양지하수의 흐름을 예측할 수 있는 유용한 도구임을 확인하였다.

주제어 : 불포화층, Preferential flow, 용질이동, 이류분산방정식

*Corresponding author : yk70@snu.ac.kr

원고접수일 : 2007. 5. 21 게재승인일 : 2007. 10. 16

질의 및 토의 : 2007. 12. 31 까지

*본 논문은 2007년 춘계학술발표회 특별호 논문입니다.

1. 서 론

토양 내 수분과 용질의 빠른 흐름을 일컫는 ‘Preferential flow’는 1980년대 이후에야 많이 연구되기 시작했으나 이미 1882년 Lawes 등(1882)에 의해 direct drainage 라는 이름으로 보고된바 있다. 일반적으로 ‘Preferential flow’란 용어는 토양 지하수의 불균등하고 빠른 이동을 뜻하는데, 균등하고 비교적 느린 흐름을 뜻하는 ‘matrix flow’의 반대 개념으로 쓰이고 있다. 최근까지 토양 내 수분과 오염물질의 거동을 예측할 때, 지하수의 흐름을 matrix flow로 가정하여 개발된 이류 분산 방정식(convective-dispersive model, CDM)이 가장 효과적인 도구로 간주되어왔다(van der Molen, 1956). 그러나 1980년대 들어 특히 현장에서 ‘preferential flow’가 예외적인 현상이 아닌 일반적인 현상으로 간주되기 시작함에 따라, 불 균질 매질이나 현장 조건에서 기존의 이류 분산 방정식을 보완, 혹은 대체하여 적용할 수 있는 모형에 대한 연구가 늘어나고 있다(Ritsema 등, 1998; Kim 등, 2005). Kung 등(2000)은 미국 4개 지역의 현장 토양에서의 용질 이동이 흡사한 경향을 나타냄을 보고하였다. 이는 현장조건에서 preferential flow 경로를 따라 이동하는 토양지하수와 용질을 한가지 방정식으로 해석할 수 있음을 암시하고 있으나, 지금까지 보편적으로 받아들여지는 방정식은 개발되고 있지 않은 실정이다.

Kim 등(2005)은 기존의 이류분산 방정식에 Steenhuis 등(1994)이 제시한 토층 표양 근처의 용질이동 현상을 경계조건으로 하여, 변수를 많이 필요로 하지 않으면서도 현장 조건에 적용 가능한 Generalized Preferential Flow Model(GPFM)을 발표하였다(Fig. 1). 그들은 최근 많이 이용되고 있는 ‘two layer 이론’을 채택하여 새로운 경계조건과 그에 따른 이류분산방정식의 해법을 제시하였는데, 이 GPFM은 세 개의 인자만으로 preferential flow 경로를 따라 이동하는 토양수분과 오염물질의 복잡한 거동을 예측할 수 있는 장점이 있다(Kim 등, 2005). 본 연구는 GPFM을 간단히 소개하고 기존의 실험결과에 적용하여 그 효율성과 일반성(generality)을 분석하였고, 또한 기존의 이류분산 방정식과 비교한 결과도 분석해 보았다.

2. 모형개발

GPFM은 토양을 크게 분배 층(distribution layer)과 운반구역(conveyance zone)으로 나누고 있는 ‘two layer 이론’을 채택하고 있는데, 강우 시 물과 용질은 분배 층에

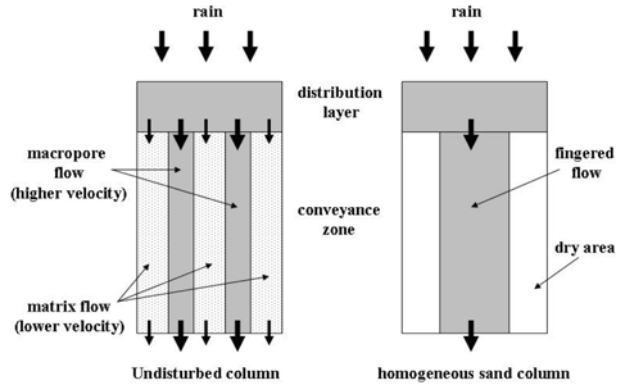


Fig. 1. The schematic diagram of preferential flow paths in undisturbed and homogeneous soils.

서 섞인 후 그 층이 포화되면 운반구역으로 내보내져 preferential flow 경로를 통해 이동한다는 것이 기본 개념이다.

분배 층에서 용질의 농도는 Steenhuis 등(1994)의 이론과 같이 변하는 것으로 규정하고 있다.

$$C = C_0 \exp(-\eta t) \tag{1}$$

여기서 η 는 강우량을 포화 층의 유효 함수비로 나눈 값 (q/w)인데 유효함수비, w 는 다시 $d(\rho k_d + s)$ 와 같다. 여기서 d 는 포화 층의 깊이, s 는 포화함수비, ρ 는 토양의 밀도, k_d 는 탈착계수이다.

분배 층을 빠져나온 수분과 용질의 운반구역내 흐름은 이류분산 방정식을 따른다.

$$D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t} \tag{2}$$

여기서 v 는 유속이며 $q/[\beta(\rho k_d + s)]$ 과 같은 값을 갖는데, β 는 총 공극 중 이동가능 공극의 비이고 D 는 분산계수를 뜻한다.

Kim 등(2005)은 라플라스 변환을 이용하여 경계조건 (1)에 대한 방정식 (2)의 해법을 다음과 같이 나타내었다.

$$C = \frac{1}{2} C_0 \exp(-\eta t) \left[\exp\left\{ \frac{vx}{2D} (1-\alpha) \right\} \operatorname{erfc}\left(\frac{x-vt\alpha}{2\sqrt{Dt}} \right) + \exp\left\{ \frac{vx}{2D} (1+\alpha) \right\} \operatorname{erfc}\left(\frac{x+vt\alpha}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \tag{3}$$

단, $\alpha = \sqrt{1 - \frac{4D\eta}{v^2}}$ 이고 < 1

위의 GPFM(방정식 3)은 λ 이 0이거나 C 의 값이 C_0 값에 수렴할 경우 이류분산 방정식과 같아진다. 또한 이류분산 방정식이 그러하였듯이, x 와 t 가 충분히 클 경우 뒷부분을 생략하여도 큰 차이가 없게 된다.

3. 모델적용

GPFM을 검증하기위해 Akhtar 등(2003)의 실험결과에 GPFM을 적용해 보았다. Akhtar 등(2003)의 실험은 13.5 meq/l의 LiCl 용액을 39개의 나비 30 cm 길이 40 cm Arkport sandy loam 칼럼에 각각 5.5 cm 주입한 후 유출된 용액을 분석하였다. 5.5 cm 강우는 첫 주에는 하루에 두 번, 그 뒤로는 매주 한 번씩 적용되었다. 주입된 수량에 따른 39개 칼럼의 파과곡선과 GPFM으로 예측된 값은 Fig. 2에 나타나 있다. Fig. 2에서 유속은 mobile region의 %로 표기되어있는데, 이는 전체 공극중 이동성을 갖는 공극의 비를 속도로 간주하는 방법(reduced variables)이 사용되었기 때문이다. Fig에서 볼 수 있듯이 GPFM으로 예측된 값은 실험결과와 상당히 일치하였는데, 예측 값은 방정식 (3)의 알파(α)가 1에 가까운 값으로 유지되는 한 유속, 함수비, 분산계수 세 가지 인자 중 유속보다는 함수비(W)에 따라 더 민감하게 변화하였다. 분산계수는 거의 영향을 끼치지 않는 것으로 나타났다. Fig. 2에서 유속은 2%와 5% 두 가지를 보여주고 있으며 사용된 함수비는 8 cm, 분산계수는 1이었다.

두 번째 실험에서는 Parker와 van Genuchten(1984)의 실험결과를 이용하여 GPFM을 CDM과 비교하였다. Parker와 van Genuchten(1984)은 30 cm Glendale clay loam 칼럼에 12 cm/d의 20 mg/l 보론 용액을 5일 동안 주입한 실험결과를 이용하여 CDM이 토양수분 거동모형으로 적합함을 보고한바 있다. 보고된 유효속도는 38.5 cm/d였다. GPFM을 위해 사용된 값은 $W=22$ cm, $V=30$ cm/d, 그리고 분산도(D/V)는 1이었다. CDM을 적용하기 위해서는 CXTFIT 프로그램(Parker와 van Genuchten, 1984)을 사용하였는데 $V=14.4$ cm/d, 분산도(D/V)는 5.7이었다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 두 모형 모두 실험값과 상당히 근사한 모형결과를 보여주었다. 그러나 CDM의 경우 CXTFIT 프로그램을 돌리는데 필요한 다른 계수들(β , ω , R 등)이 Parker와 van Genuchten(1984)이 제시한 합리적인 범위를 많게는 1000배 이상 훨씬 벗어나는 점이 발견되었다. 이는 관측된 파과 곡선에 예측 값을 맞춰가며 인자를 추측해내는 일반적인 해석방법에 오류가 있을 수 있음을 보여주는 결과로, 반드시 추측된 인자가 합리

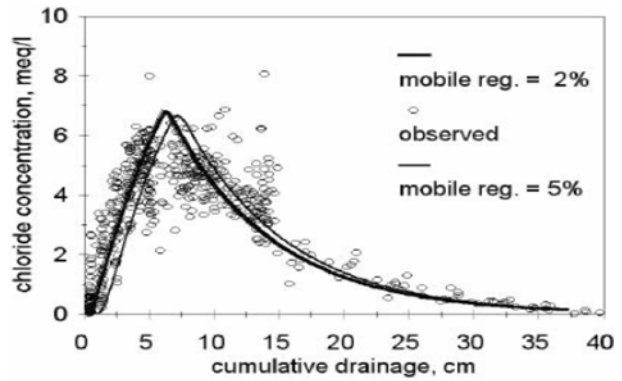


Fig. 2. Fitting results of GPFM to the data set of Akhtar et al (2003). Mobile regions (water fractions) indicate velocities in this case because reduced variables were used.

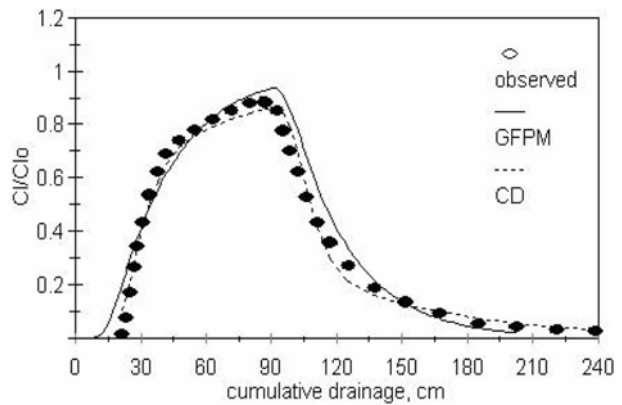


Fig. 3. Fitting results of the GPFM to the data set of Parker and van Genuchten (1984).

적인 값인지 검증할 필요가 있음을 암시한다. 반면에 GPFM의 경우 인자의 추정 값이 실제 관측결과 및 제시된 범위의 값과 유사함을 보여주었다. GPFM으로 예측된 값은 측정된 값과 거의 유사하여 운반 층에서 흡착현상이 거의 일어나지 않음을 암시하였는데, 이는 Kung 등(2000)이 preferential flow 경로를 포함하는 토양에 대해 보고한 결과와 일치하는 것이다. 예측 값에 가장 큰 영향을 준 인자는 이번에도 함수비였다. 특성이 다른 두 종류의 토양에서 분배 층의 함수비(W)가 예측 값에 가장 큰 영향을 끼친 결과는 Steenhuis 등(1994)이 분배 층의 두께가 유출 경향에 가장 큰 영향을 끼쳤다고 보고한 내용과 일치하는 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 Kim 등(2005)이 개발한 GPFM을 다른 실험결과에 적용함으로써 모형을 검증해 보았고, 또한 적

용한 후 기존의 이류 분산방정식(CDM) 적용 결과와 비교하였다. 적용결과 GPFM은 v, w, D 세가지 인자만으로 관측 값과 비교적 일치하는 결과를 보여주었다. 특히 CDM과 비교하여 더 합리적인 추측 값을 보임으로써 불균질 매질에서의 용질이동을 예측하는데 더 효과적임을 알 수 있었고 예측된 파과곡선이 관측한 그것과 일치하더라도 추측 인자가 합리적인 값인지 반드시 검증이 필요함을 보여주었다. Kim 등(2005)이 한 종류의 토양을 이용한 실험으로 GPFM의 인자 중 속도(V)가 용질이동을 예측하는데 결정적인 요인이라고 보고한 것에 비해 여러 가지 종류의 토양이 사용된 경우 함수비(W)가 가장 민감한 인자였다. 분배 층 함수비의 증감에 관해서는 아직 자세히 밝혀진 바 없으며 향후 연구가 필요할 것 이다. 종합적으로 판단할때, preferential flow 경로를 포함하는 현장 토양에서 GPFM이 토양지하수 거동예측에 더욱 효과적임을 확인하였다. 본 연구는 CDM이 토양지하수 거동예측에 좋은 모형임을 부인하지는 않으나, GPFM이 조건에 따라 CDM으로 변환되는 특성을 가졌고 현장에서 사용하기 편리한 점을 감안할 때 CDM을 대체할 수 있는 더욱 일반성을 갖춘 모형임을 보여주고 있다.

참 고 문 헌

Akhtar, M.S., Steenhuis, T.S., Richards, B.K., and McBride, M.B., 2003, Chloride and lithium transport in large arrays of

undisturbed silt loam and sandy loam soil columns, *Vadose Zone J.*, **2**, 715-727.

Kim, Y.-J., Darnault, C.J.G., Bailey, N.O., Parlange, J.-Y., and Steenhuis, T.S., 2005, Equation for Describing Solute Transport in Field Soils with Preferential Flow Paths, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **69**, 291-300.

Kung, K.-J.S., T.S. Steenhuis, E. Kladviko, T.J. Gish, G. Bubbenzer, and C.S. Helling., 2000. Impact of preferential flow on the transport of adsorptive and non-adsorptive tracers, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **64**, 1290-1296.

Lawes, J.B., Gilbert, J.H., and Warington, R., On the Amount and Composition of the Rain and Drainage Water Collected at Rothamstead, Williams Clowes and Sons, Ltd., London, 167 pp. Originally published in *J. Royal Agr. Soc. of England XVII (1881) : 241-279, 311-350; XVIII (1882) : 1-71 (1882).*

Parker, J.C. and van Genuchten, M.Th., 1984, Determining Transport Parameters from Laboratory and Field Tracer Experiments, *Virginia Ag. Exp. Station, Blacksburg. Bull.*, 84-3.

Ritsema, C.J., Dekker, L.W., Nieber, J.L., and Steenhuis, T.S., 1998, Modeling and field evidence of finger formation and finger recurrence in a water repellent sandy soil, *Water Resour. Res.*, **34**, 555-567.

Steenhuis, T.S., Boll, J., Shalit, G., Selker, J.S., and Merwin, I.A., 1994, A simple equation for predicting preferential flow solute concentrations, *J. Environ. Qual.*, **23**, 1058-1064.

van der Molen, W.H., 1956, Desalinisation of saline soils as a column process, *Soil Sci.*, **81**, 1927.