

## 화강암 기원 잔적토양에서 염료추적자의 침투 유형에 관한 연구

전철민 · 김재곤\* · 이진수 · 김탁현

한국지질자원연구원

### A Dye Tracer Study of Infiltration Pattern in a Residual Soil Developed from Granite

Chul-Min Chon, Jae Gon Kim\*, Jin-Soo Lee and Tack-Hyun Kim

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

Understanding flow pattern of water and solute in subsurface is essential for the reduction and prevention of contamination of soil and groundwater and for the investigation and remediation of contaminated site. The objective of this study is to examine the infiltration pattern in a soil developed from the Jurassic granite using Brilliant Blue FCF ( $C_{37}H_{34}N_2Na_2O_9S_3$ ), the nonfluorescent and nontoxic food dye. All image processing was conducted using geographic image processing software, ER Mapper, Version 6.2. The dye coverage was determined by counting the stained pixels in the photographs (80×80cm, 80×5cm) for the vertical and horizontal view. A homogeneous matrix flow occurred in the A horizon with weak, medium granular structure and fingering at the interface of finer-textured A horizon and coarser-textured C horizon. Pegmatitic vein originated from the granite and plant root in C horizon induced preferential flow.

**Key words** : dye tracer, Brilliant Blue FCF, homogeneous matrix flow, preferential flow, infiltration pattern

지표 및 심토환경에서 물과 용액의 유동특성을 파악하는 것은 토양 및 지하수의 오염을 저감하고 방지하거나 기 오염 지역을 조사하고 정화하는데 있어서 필수적인 요소이다. 본 연구에서는 이 비형광, 비독성의 식용색소인 청색1호(Brilliant Blue FCF,  $C_{37}H_{34}N_2Na_2O_9S_3$ )를 염료 추적자로 이용하여 화강암에서 발달된 잔적토양에서의 침투 유형 및 그 특성을 조사하였다. 디지털 촬영된 수직 및 수평 착색영상은 지형정보 영상처리 프로그램인 ER Mapper, Version 6.2를 이용하여 염료착색범위(dye coverage)로 전환되었다. 균질기반유동(homogeneous matrix flow)은 미약 입상 구조를 보이는 A 층위에서 발생하였으며, 상대적으로 세립조직인 A 층위와 조립조직인 C 층위의 경계에서는 선침투류(先浸透流, fingering)의 특징을 보여주었다. 모암인 화강암 조직의 기원인 거정질 광맥(pegmatitic vein)과 식물 뿌리는 C 층위에서 선택적 유동(preferential flow)을 유도하였음을 확인하였다.

**주요어** : 염료추적자, 청색1호, 균질기반유동, 선택적 유동, 침투 유형

### 1. 서 론

지표와 지하수 사이의 비포화대는 지하수의 함양 및 배수와 그 유로를 통한 오염물질의 거동에 있어서 특별한 조절기능을 가진다. 토양은 오염물질을 포획할 수 있는 여과체로서 작동하여 지하수 오염을 방지하거나 감소시킬 수도 있으나, 토양수 및 용질이 선택적 유동

(preferential flow)의 특성을 보일 때에는 오히려 오염 물질이 토양매체를 바로 통과하여 지하수로 빠르게 유입될 수도 있다(Flury *et al.*, 1994; Tindal and Vencill, 1995). 공극수가 균질기반유동(homogeneous matrix flow)의 특성을 가질 때에는 다시의 가정(Darcian assumption)과 현장 측정값을 기초로 한 수치모형을 이용하여 그 침투 유형을 쉽게 예측할 수 있

\*Corresponding author: jgkim@kigam.re.kr

다(Warrick *et al.*, 1997). 선택적 유동의 경우 수력학적 현상이나 오염물질의 거동을 정확하게 파악하고 추정하는 것이 매우 어렵다. 오염물질을 포함하는 용질의 유동 특성은 또한 흡착능, 산화환원, 구성광물의 종류 등과 같은 토양의 화학적 특성에 영향을 받을 뿐만 아니라 토양구조(structure), 토성(texture), 비표면적 등과 같은 물리특성에 매우 큰 영향을 받게 된다.

Flury *et al.*(1994)은 염료 추적자(dye tracer)의 관계 및 토양굴착방법(flood and excavation)을 이용하여 14 개의 현장 토양에 대한 침투 유형(infiltration pattern)을 조사하였다. 그들은 구조화된 토양들이 구조화되지 않은 토양에 비하여 선택적 유동이 쉽게 나타나며, 추적자가 더 깊이 침투된다고 보고하였다. 대공극 유동(macropore flow), 선침투류(先浸透流, fingering), 퍼널 유동(funnel flow) 등은 비포화 현장토양에서 보이는 선택적 유동으로 파악되었다(Beven and Germann, 1982; Helling and Gish, 1991).

대공극 유동은 건조/습윤과정, 결빙/해빙순환, 동물활동 및 식물뿌리 등에 의해 생성된 비모세관의 큰 공극을 통하여 공극수가 운반되는 것을 의미한다(Beven and Germann, 1982). Buttle and Leigh(1997)은 작은 대공극에 비해 상대적으로 더 큰 대공극이 공극수의 선택적 유동을 더욱 효과적으로 유도한다는 사실을 보여주었다. 토양의 대공극의 밀도가 상대적으로 높을수록 더욱 큰 배수지역을 가지게 된다(Weiler and Naef, 2003). Allaire-Leung *et al.*(2000a, b)은 공극수 유동의 유형에 대한 대공극의 연속성과 비틀림(tortuosity)의 영향을 논증하였다. 연속적인 대공극은 공극수를 더욱 빠르게 유도하여 결국 고립된 대공극보다 더 많은 양의 공극수를 유도하게 된다. 이들은 또한 대공극의 비틀림이 더욱 커질수록 주변 매체에 비해 더 큰 지연시간과 더 많은 공극수 침투를 가지게 됨을 확인해주었다.

Hill and Parlange(1972)은 선침투류가 상부세립-하부조립질 토양(fine over coarse textured soil)에서 발생할 수 있음을 증명하였다. 조립질 하부층의 투수성이 세립질 상부층의 공극수 전달속도보다 클 때, 그 유동속도는 경계면을 따라서 증가한다. 이렇게 증가된 유속이 선침투류를 유발하게 된다(Baker and Hillel, 1990). 선침투류는 또한 수분기피토양(water repellent soils)에서도 보고 되었다(Dekker and Ritsema, 1994). 토양에 있어서 이러한 수분기피는 유기물과 공극수의 함량에 좌우된다(Bisdorn *et al.*, 1993; Dekker and Ritsema, 1994). 또한 선침투류는 대기압

이 침투전선면(front)의 압력을 능가할 때 나타나기도 한다(Hill and Parlange, 1972). 토양층의 경사경계면을 따라 흐르는 측방 유동(lateral flow)은 퍼널 유동(funnel flow)라고도 하는데 이 역시 심토 토양의 선택적 유동 유형에 있어서 중요한 현상으로 인식되었다(Walter *et al.*, 2000). 포화된 내부유동은 괴상 기반암과 같이 수력학적으로 매우 제한된 층을 기반으로 한 그 상부 층에서 발생할 수 있다(Stagnitti *et al.*, 1986). 모세관 벽(capillary barrier)은 상부세립질층과 하부조립질층 경사경계면에서 발달하는데 이 역시 퍼널 유동의 원인이 된다.

한국지질자원연구원의 정밀지질조사와 농업과학기술원의 정밀토양조사가 전국토의 70% 이상이 진행되었으며 두 조사는 각각 지질특성과 농업생산력에 주안점이 주어졌다. 기존의 지질도와 토양도는 오염부지관리의 기초 자료로서 효용성이 낮다. 따라서 이러한 지질-토양-오염물질거동의 상호연관성 연구가 필요하다. 이러한 상호연관성 연구는 기존의 지질도와 토양도를 오염부지관리의 중요한 자료로 활용할 수 있게 할 것이다. 염료추적자 시험방법은 유동 유로를 가시화하고 용질의 운반 거동을 모사하는데 이용되어왔다(Flury and Fluhler, 1995). 다공질 매질에서 유동 유로를 착색하기 위하여 가장 일반적으로 사용되는 염료 추적자는 비형광성의 식용색소인 청색1호(Brilliant Blue FCF,  $C_{37}H_{34}N_2Na_2O_9S_3$ )이다. 이 청색1호 색소는 토양에서 가시도가 매우 좋으며 토양에 흡착성이 매우 약하다(Flury and Fluhler, 1995). 또한 독성이 거의 없으며 가격이 비교적 저렴하여 추적자로 매우 적합하다. 이러한 염료를 이용하여 우리나라의 여러 지질기반의 풍화잔적토에서 침투특성을 파악하고 일반화함으로써 지질-토양-오염물질거동의 상호 연관성과 관련된 기초 자료들을 생산할 수 있을 것으로 기대한다. 본 연구는 이러한 상호연관성 연구의 출발점으로서 우리나라의 대표적인 잔적토양인 화강암풍화토(마사토)를 대상으로 청색 1호 염료 추적자를 이용하여 그 잔적토양에서의 침투 유형 및 그 특성을 조사하는데 그 목적이 있다. 또한 오염물질을 포함한 용질의 거동 특성과 토양의 물리화학적 특성과의 관계를 고찰해 보고자 한다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 연구대상 토양의 특성화

본 연구에서 추적자 시험은 비경작 산림 토양에서

**Table 1.** Physical, mineralogical and chemical properties of the soils used in this study.

Site	Classification <sup>1</sup>	Parent material	Horizon	Depth (cm)	Color	Texture (clay/silt/sand) (%)	Structure	Mineralogy <sup>2</sup>	pH <sup>3</sup>	EC <sup>4</sup> (S/cm)	ILL <sup>5</sup> (%)
GR	Typic Dystrudepts	Granite	A	2-30	10YR 4/2	Sandy loam (3.3/30.0/66.7)	Weak, medium granular	Q, F, M, K	4.52	32.9	0.54
			C1	30-54	10YR 6/4	Loamy sand (2.6/20.4/77.0)	Residual rock structure	Q, F, M, K, V	6.07	25.0	0.46
			C2	54-150	10YR 6/4	Loamy sand (2.6/22.4/75.0)	Residual rock structure	Q, F, M, K, V	4.96	9.51	0.21

1 : adopted from NIAST and RDA (2000). 2 : Q: quartz, F: feldspar, M: mica, K: kaolinite, V: vermiculite. 3 and 4 : determined with 1 soil and 10 distilled water method. 5 : Ignition loss.

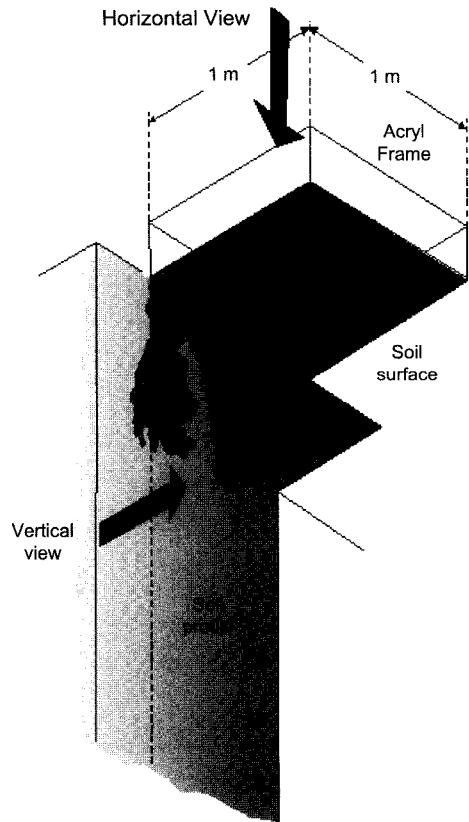
수행되었다. 주라식 화강암으로부터 발달된 연구대상 토양단면은 대전 유성구 가정동에 위치하고 있다. 토양 통 분류상 예산통(Yesan Series)에 속하며 잔자갈이 있는 양토, 침식이 있는 경사지이다. 예산통은 산성암인 화강암 및 화강편마암의 풍화잔적물을 모재로 한 토양이며 저구릉지에 분포하고 있다. 이 토양은 주로 오산, 상주, 성산, 연곡, 송산통등과 서로 인접되어 있으며 사양질토양으로 토양배수가 양호하고 토심이 보통이다. 토양의 형태적 특성을 보면 표토는 암갈색 및 황갈색의 양토, 세사양토, 조사양토이며 침식을 받은 곳에서는 황적색 혹은 적황색의 사양토, 조사양토이다. 심토는 황적색, 적색, 적황색의 잔자갈이 있는 양토, 조사양토, 사양토이다. 기층은 잔자갈이 있는 황갈색, 진갈색, 담갈색의 세사양토, 양토, 조사양토이다. 전 층을 통하여 미세한 석영입자가 존재한다. 이 토양의 자연 비옥도는 약간 낮으며 유기물 함량은 있는 편이고 토양반응은 매우 강한 산성 내지 강한 산성이다. 염기치 환용량은 약간 낮으며 염기포화도는 낮다(농업기술연구소, 1974). 기반암의 지질은 중생대(mesozoic) 복운 모화강암(two mica granite)으로서 pegmatite를 포함하고 있다(자원개발연구소, 1977).

연구대상 토양 단면의 기본적인 물리화학적 특성을 분석한 결과는 Table 1에 제시하였다. 본 토양단면은 지표로부터 35cm 깊이에서 분명한 경계면을 보이며 A와 C 층위로 대분할 수 있으며 다양한 크기의 뿌리를 포함하고 있다. A 층위의 토성(soil texture)은 실트질 양토(silty loam)에 해당하며, 약한 입상 구조(weak, granular structure)를 가지고 있다. C 층위의 토성은 양질 사토(loamy sand)이며, 모암으로부터 기원한 조립의 거정질맥을 포함하고 있다.

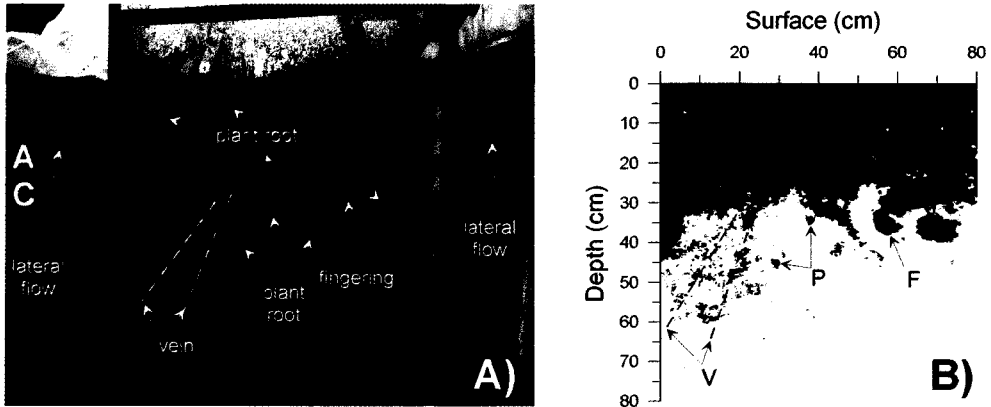
**2.2. 염료추적자 실험(Dye Tracer Experiment)**

심토에서의 유동 유로를 착색하기 위하여 식용색소인 청색1호(Brilliant Blue FCF, Neveon Hilton

Davis Inc., Cincinnati, OH) 5 g l<sup>-1</sup> 농도의 용액을 사용하였다. 염료 용액을 적용하기 전에 토양의 유기층 표토를 제거하였으며, 지표의 표면상태 영향을 최소화하기 위하여 최초 표면을 수평으로 조절하고 아크릴 사각틀(1.0×1.0 m)을 5cm 깊이로 설치하였다(Fig. 1). 이 사각틀 내부에 150 L의 염료용액을 담수하였으며, 증발이나 강우에 의한 희석을 방지하기 위하여 투명비닐로 포장하였다. 담수 후 3일이 지난 후에 사각틀 한



**Fig. 1.** Schematic presentation of the field dye tracer test.



**Fig. 2.** The digital photograph of stained soil profile (A) and selected area (B) for image analysis of vertical section. P represents for plant root in the figure; F for fingering; V for vein; I for interpedal face.

쪽 면을 수직으로 약 1.5 m의 깊이로 굴착하여 토양단면을 관찰하였고 작업공간을 확보하였다(Fig. 1). 토양층위의 수평면 관찰을 위하여 지표로부터 70cm까지 매 5cm 씩 토양을 제거하여 각각의 층을 노출시켰다. 수직 및 수평면의 영상은 주광 하에서 디지털 카메라(Sony Cybershot DSC-F717)로 취득하였다. 수평면의 영상을 취득할 때 동일한 카메라 위치를 유지하기 위하여 철제 앵글 틀로 고정하였으며 영상물간의 왜곡을 최소화하였다. 노출된 각 층에 대하여 사각틀 내부의 가로 및 세로 10cm를 제외하고 80×80cm의 영역만을 대상으로 영상처리를 수행하였는데, 이는 사각틀 주면의 경계 유동(boundary flow)의 영향을 최소화하기 위함이다.

**2.3. 영상처리(Image Processing)**

지형정보 영상처리(geographic image processing)에 널리 사용되는 컴퓨터 소프트웨어인 ER Mapper (version 6.2)를 이용하여 모든 영상처리를 진행하였다. 수직면 영상을 제외한 모든 수평면 영상은 각각의 화소규격(pixel dimension)은 1200×1200 pixel (80×80 cm)로 변환시켜서 각 영상간의 해상도를 표준화하였다. Red, Green, Blue 세 개의 밴드로 구성된 각 칼라영상에서 Red-밴드만을 이용하여 흑백영상으로 전환한 후에 메디안 필터(median filter)를 거쳐서 청색1호로 착색된 영역을 추출하였다. 수평층의 경우 염료착색범위(dye coverage)는 각각의 영상(80×80cm)에서 착색화소를 계수하여 전체 면적에 대한 백분율로 환산하여 산출하였으며, 수직면의 경우 수직면 한 영상을 5cm 간격으로 조각내어 각 조각 영상(80×5cm)에서 착색된 화소를 계수하여 산출하였다.

**3. 결과 및 토의**

**3.1. 수직단면의 착색 영상 분석**

Fig. 2는 토양단면의 수직면에 착색된 영상을 보여주고 있다. 본 토양의 경우, 염료 추적자는 수직적으로 최대 65cm의 깊이까지 침투하였으며, 수평적으로는 A와 C 층위의 경계면(35cm depth)을 따라서 아크릴 사각틀 범위 밖으로 약 30cm 정도 측방으로 확산 침투되었다. A 층위에서는 균질기반유동(homogeneous matrix flow)의 특성이 잘 나타났으며 C 층위 경계면에서 C 층위 쪽으로 확장된 파형의 전선(선침투류)을 관찰할 수 있었다. C 층위에서는 팽화된 광맥(vein)이나 식물 뿌리를 따라서 대공극 유동(macropore flow)이 관찰되었다. 또한 착색된 광맥 주변에서는 분산된 열은 착색(dispersed pale stain)도 관찰되었다. 식물 뿌리를 따라온 선택적 유동의 끝에서는 염료착색이 팽창된 구상기저(swelled and rounded bottom)의 특징을 보인다.

기반유동(matrix flow)의 전선(front)은 A와 C 층위의 경계와 거의 일치한다. 습윤 전선면이 세립조직의 A 층위 경계면을 출발하였을 때 그 경계에서 습윤 전선의 하향 움직임이 일시적으로 정지하게 되는데, 이는 A 층위의 흡입력이 더 크기 때문이며, 그 하향의 움직임이 재출발할 때까지는 그 전선이 측방으로 움직일 수도 있다(Baker and Hillel, 1990). C 층위의 투수성이 A 층위의 투수성보다 더 클 때, 그 경계면에서 선침투류(先浸透流, fingering)의 침투특성이 나타날 수 있다. 분산된 열은 착색은 상대적으로 세립조직의 주변 매질 쪽으로 광맥이 발달하여 염료를 유도했기 때문에 발생한 것으로 여겨진다. 식물뿌리는 선택적 유

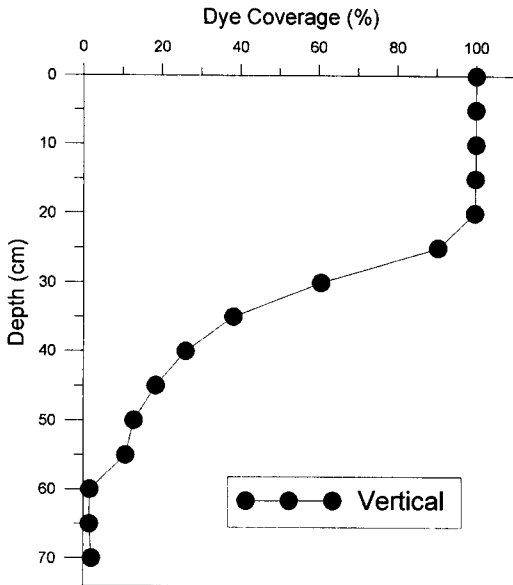


Fig. 3. Dye coverage of the vertical sections with depth.

동을 유도하였으며(Devitt and Smith, 2002; Hagen *et al.*, 2002), 그 뿌리 말단의 조립질 층은 이러한 선택적 유동의 차단자 역할을 하여 팽창된 구상기저의 양상을 유발하였다(Yasuda *et al.*, 2001). Allaire-Leung *et al.* (2000a)은 일반적인 토양에서 대공극 바로 아래에 용질의 농도가 높다는 것을 확인하였다.

본 연구대상 토양의 수직단면 영상에 대한 깊이별 염료착색범위를 계산한 결과는 Fig. 3에 나타내었다. 염료착색범위는 수직단면에 대한 정성적 관찰 결과와 매우 잘 일치하였다. 수직단면의 경우, 표토에서 전체 염료착색범위의 90% 이상이 기반유동(matrix flow)양상을 보여주었다. 심도가 깊어짐에 따라서 기저유동과 선택적 유동의 경계의 바로 밑에서 착색범위가 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

3.2. 수평단면의 착색 영상 분석

A 층위의 최초 수평면은 거의 전체가 염료로 착색되었으며 65cm 깊이까지 확장되었다(Fig. 4). C 층위에서는 광맥과 뿌리를 따라 형성된 염료착색을 관찰 할 수 있다. 또한, 광맥 및 굵은 뿌리 주변으로 염료가 침투되었음을 볼 수 있다. 수직단면의 착색영상에서 관찰한 바와 같이, 맥과 식물뿌리는 염료추적자의 유도 경로로 작용하여 선택적 유동을 야기한다(Devitt and Smith, 2002; Weiler and Naef, 2003). 수직 영상에서 관찰되었던 광맥 주변의 열은 착색은 주변 매체로

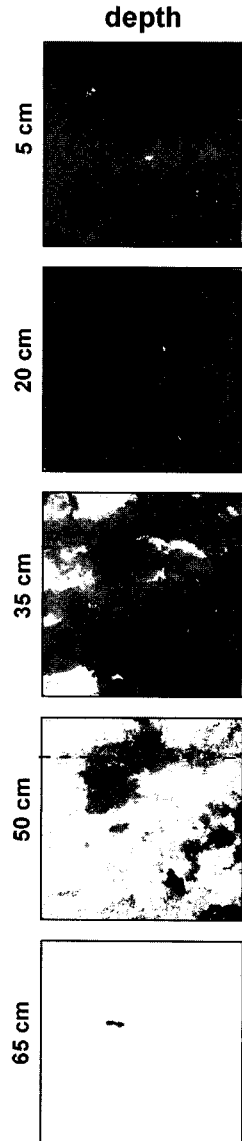


Fig. 4. Dye stained images of the horizontal sections. Dashed lines stand for vein and P stands for plant roots.

소량의 염료가 침투한 것과 연관이 있을 것으로 판단 된다.

수평면의 염료착색범위(Fig. 5)는 수직단면의 착색범위(Fig. 3)와 매우 유사한 유형을 보여주었다. A 층위의 경우 전체 면적의 약 90% 이상이 착색되었으며 염료착색범위는 C 층위에서 깊이가 증가함에 따라 급격히 감소하였다. 수평영상의 염료착색범위 자료 역시 A 층위에서는 균질기반유동이 우세하며, C 층위에서는 선택적 유동 우세한 침투 형태임을 확인시켜 주었다.

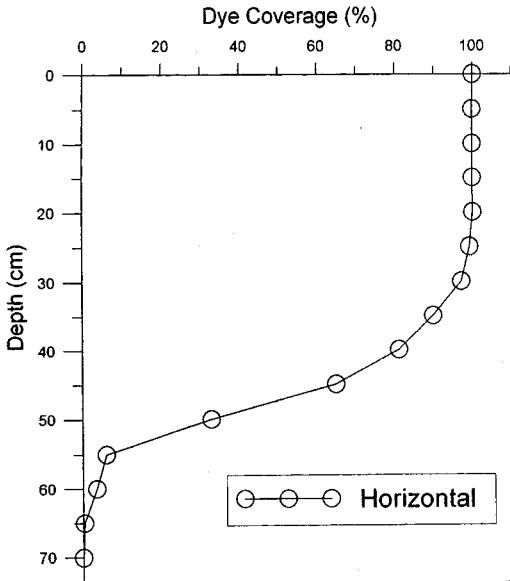


Fig. 5. Dye coverage of the horizontal sections with depth.

A 층위에서 보이는 90%이상의 착색영상은 150L의 염료용액이 3일간 담수되어 충분한 시간동안 침투된 결과이기 때문에 실시간으로 균질기반유동으로만 침투되었다고 단정 지을 수는 없다. 침투 초기에 A 층위에서 선침투류가 국부적으로 발생하였다고 가정하더라도 결국 많은 용액을 담수하여 오랜 시간이 지난 후에는 모두 착색된 것으로 관찰될 것이기 때문이다. 따라서 우세한 침투유형의 규정과 판단은 동일한 담수량과 염료 농도에 한하여 상대적으로 비교할 때에만 의미가 있다. 침투특성의 실시간적인 특징의 파악과 정량화는 염료 담수량과 담수시간의 조건을 다양하게 설정하여 실험적으로 산출될 수 있으며, 물리탐사기법의 협력연구를 통하여 토양층의 구조, 입도분포, 함수율, 지하수위, 기반암심도, 용존염류농도(EC) 등과의 관계를 규명할 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 물리탐사와 다양한 담수 조건의 실내착색실험이 병행되어야 할 것으로 판단된다.

### 3.3. 토양의 물리, 화학적 특성과 오염물질의 거동

토양의 물리, 화학적 특성을 파악하는 것은 토양 내에서 오염물질의 거동을 정확히 예측하고 오염물질의 확산방지 대책을 수립하는데 필수적인 조건이다. 특별히 오염물질의 거동모형을 예측하는데 있어서 토양 및 비포화대의 수리적 특성은 매우 중요한 입력자인데, 토양구조, 입도분포, 비표면적, 들밀도 등의 물리적 인자들은 대공극(macropore)에서의 수리전도도에 매우 큰

영향을 미친다. 이러한 비포화대의 수리전도 특성을 직접 측정하고 파악하는 것은 매우 어렵기 때문에, 많은 모형에서는 일반적으로 포화대 수리전도도  $K_{sat}$  값과 토양수의 지연계수 값을 수정하여 사용한다(van Genuchten and Nielsen, 1985), 인장침투계(Tension Infiltrometer) 혹은 원반침투계(Disc Infiltrometer)는 비포화대 및 준포화대(near-saturated) 수리전도도를 직접 측정하는 기술로서 가장 널리 알려진 방법이다. Jarvis *et al.*(2002)는 문헌 등에서 쉽게 이용가능한 토성자료(입도분포, 들밀도, 유기함량, 유효공극)를 이용하여 준포화 수리전도도를 예측하고자 시도하였으며 현장에서 인장침투계로 직접 측정된 수리전도도와 대비하였으나, 직접측정의 오차와 현장토양의 불균질적인 특성들에 의한 예측의 불확실성을 완전히 극복하지는 못하였다.

본 연구지역 토양의 층위 A와 C는 토양의 물리화학적 특성에서 분명한 차이를 보인다(Table 1). A 층위는 C 층위에 비해 상대적으로 조립질이며, 토양발달이 진행되었기 때문에 작열감량과 EC 값이 크며 약한 입상 구조(weak, granular structure)를 가진다. 우리는 염료착색 영상의 정량적 분석을 통하여 침투특성이 A 층위에서는 균질기반유동이 우세한 반면에 C 층위로부터는 선택적 유동이 우세함을 확인하였다. 이러한 토양특성의 차이, 특히 토성(soil texture)의 차이로 인하여 침투특성도 매우 특징적으로 다르게 나타나는 것으로 여겨진다. 따라서 다양한 지질기반암 기원 및 토지 용도에 따라서 다양한 토양특성을 가지는 대표적 토양들을 선정하고 염료추적시험을 실시하여 침투특성을 유형별로 파악하고 특성화함으로써, 지질-토양-오염물질 거동의 상호 연관성과 관련된 기초 자료들을 생산할 수 있을 것으로 기대한다. 또한, 인장침투계를 이용하여 수리전도도를 직접 측정하고 그 토양특성과 비교하여 상호관계를 밝혀서 정량화시키는 향후 연구들이 필요하다.

## 4. 결 론

균질기반유동(homogeneous matrix flow)은 약한 입상 구조(weak, granular structure)를 보이는 A 층위에서 발생하였으며, 상대적으로 세립조직인 A 층위와 조립조직인 C 층위의 경계에서는 선침투류(先浸透流, fingering)의 특징을 보여주었다. 모암인 화강암 조직의 기원인 거정질 광맥(pegmatitic vein)과 식물 뿌리는 C 층위에서 선택적 유동(preferential flow)을 유도하였

음을 확인하였다. 토양의 물리화학적 특성, 특별히 토양구조와 토성은 비포화대에서 침투 유형을 결정하는 중요한 인자로 파악되었으며 따라서 오염물질의 거동에 있어서 매우 중요한 역할을 하는 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 2003년 과학기술부 국책연구개발사업의 토양오염확산방지연구 (M1-0304-00-0001) 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다. 또한 이 논문을 위해 발전적인 방향으로 조언해 주신 익명의 두 심사위원께 감사드립니다.

참고문헌

농업기술연구소 (1974) 한국정밀토양도: 대전시 및 대덕군 (25000 : 1). 농촌진흥청.  
 자원개발연구소 (1977) 한국지질도: 유성도폭 (50000 : 1). 과학기술처.  
 Allaire-Leung, S.E., S.C. Gupta, and J.F. Moncrief. (2000a) Water and solute movement in soil as influenced by macropore characteristics: 1. Macropore continuity. *Geoderma*, v. 41, p. 283-301.  
 Allaire-Leung, S.E., S.C. Gupta, and J.F. Moncrief. (2000b) Water and solute movement in soil as influenced by macropore characteristics: 2. Macropore tortuosity. *Geoderma*, v. 41, p. 303-315.  
 Baker, R.S. and D. Hillel. (1990) Laboratory tests of a theory of fingering during infiltration into layered soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 54, p. 20-30.  
 Beven, K.J. and P.F. Germann. (1982) Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research*, v. 18, p. 1311-1325.  
 Bisdom, E.B.A., L.W. Dekker, and J.F.T. Schoute. (1993) Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material and soil structure. *Geoderma*, v. 56, p. 105-118.  
 Buttle, J.M. and D.G. Leigh. (1997) The influence of artificial macropores on water and solute transport in laboratory soil columns. *J. of Hydrology*, v. 191, p. 290-314.  
 Dekker, L.W. and C.J. Ritsema. (1994) How water moves in a water repellent sandy soil. 1. Potential and actual water repellency. *Water Resour. Res.*, v. 30, p. 2507-2517.

Devitt, D.A. and S.D. Smith. (2002) Root channel macropores enhance downward movement of water in a Mojave Desert ecosystem. *J. of Arid Environ.*, v. 50, p. 99-108.  
 Flury, M. and W.A. Jury. (1995) Tracer characteristics of Brilliant blue FCF. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 59, p. 22-27.  
 Flury, M., H. Fluhler, W.A. Jury, and J. Leuenberger. (1994) Susceptibility of soils to preferential flow of water: a field study. *Water Resour. Res.*, v. 30, p. 1945-1954.  
 Hangen, E., U. Buczko, O. Bens, J. Brunotte, and R.F. Huttel. (2002) Infiltration patterns into two soils under conventional and conservation tillage: influence of the spatial distribution of plant root structures and soil animal activity. *Soil and Tillage Res.*, v. 63, p. 181-186.  
 Helling, C.S. and T.J. Gish. (1991) Physical and chemical processes affecting preferential flow. P.77-86. In T.J. Gish and A. Shirmohammadi (eds). *Preferential flow*. Proc. Natl. Symp. Chicago, IL. Dec. 16-17, 1991. Am Soc. Agric. Eng., St. Joseph, MI.  
 Hill, D.E. and J.Y. Parlange. (1972) Wetting front instability in layered soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, v. 36, p. 143-147.  
 Jarvis, N.J., Zavattaro, L., Rajkai, K., Reynolds, W.D., Olsen, P.-A., McGechan, M., Meche, M., Mohanty, B. Leeds-Harrison, P.B. and Jacques, D. (2002) Indirect estimation of near-saturated hydraulic conductivity from readily available soil information. *Geoderma*, v. 108, p. 1-17.  
 Stagnitti, F., M.B. Parlange, T.S. Steenhuis, and J.Y. Parlange. (1986) Drainage from a uniform soil layer on a hillslope. *Water Resour. Res.*, v. 22, p. 631-634.  
 van Genuchten, M.T. and Nielsen, D.R. (1985) On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. *Ann. Geophys.*, v. 3, p. 615-628.  
 Walter, M.T., J.S. Kim, T.S. Steenhuis, J.Y. Parlange, A. Heilig, R.D. Braddock, J.S. Selker, and J. Boll. (2000) Funneled flow mechanism in a sloping layered soil: Laboratory investigation. *Water Res. Res.*, v. 36, p. 841-849.  
 Weiler, M. and F. Naef. (2003) An experimental tracer study of the role of macropores in infiltration in grassland soils. *Hydrol. Process.*, v. 17, p. 477-493.  
 Yasuda, H., R. Berndtsson, H. Persson, A. Bahri, and K. Takuma. (2001) Characterizing preferential transport during flood irrigation of a heavy clay soil using the dye Vitasyn Blau. *Geoderma*, v. 100, p. 49-66.