

입상 활성탄을 이용한 형광물질 추적자시험 적용성 연구

이진용^{1*} · 황현태^{2,4} · 이명재² · 김용철³ · 엄병우³

¹강원대학교 지질학과, ²지오그린21, ³한국지질자원연구원, ⁴워털루대학교 지구과학과

Feasibility of Granular Activated Charcoal as a Detector in Fluorescent Tracer Tests

Jin-Yong Lee^{1*} · Hyoun-Tae Hwang^{2,4} · Myeong-Jae Yi² · Yong-Cheol Kim³ · Byoungwoo Yum³

¹Department of Geology, Kangwon National University

²GeoGreen21 Co., Ltd.

³Korea Institute of Geology, Mining and Materials (KIGAM)

⁴Department of Earth Sciences, University of Waterloo

ABSTRACT

In recent tests using tracer have been frequently conducted by fluorescent tracers. In this study, granular activated charcoal (GAC) as a detector for the fluorescent tracers (rhodamine WT and uranine) was investigated through laboratory and field tests. In the laboratory tests, tracer concentrations of rhodamine WT and uranine determined by the GAC were slightly different from those of standard solutions but they were excellent in linearity. Results show that GAC is excellent as tracer detector when concentration of the fluorescent tracers is greater than 10 & micro; g/L whileas no obvious differences in mixed solutions of the two tracers due to interferences. Compared to conventional methods of water sampling, field results shows a high potential of GAC as a tracer in the field. Our results also show that wet analysis is better for the lower concentrations of tracers whileas dry analysis is good for high concentrations of tracers. This study demonstrates that fluorescent tracer detection using the GAC is very useful and economical for a hydraulic connection between target areas and very longer period of the tracer test.

Key words : Tracer test, Granular activated charcoal (GAC), Rhowdamine WT, Uranin, Sorption

요 약 문

최근에 형광물질을 이용한 추적자 시험이 빈번해지고 있다. 본 연구에서는 형광물질 추적자 시험시 농도측정 방법으로서 입상 활성탄을 이용하는 방법의 적용가능성을 실내 및 현장실험을 통해 평가하였다. 실내실험 결과 로다민 WT 및 우라닌 개별용액의 경우 활성탄 흡착 농도는 실제 표준농도와의 일부 차이가 있지만 각 표준농도와 선형성은 매우 뛰어난 것으로 나타났다. 또한 10 µg/L 이상의 형광물질 농도에서는 활성탄의 적용성이 뛰어났다. 한편 두 형광물질을 혼합한 경우에는 간섭의 영향으로 활성탄 적용성이 떨어졌다. 실제 현장에서 활성탄을 이용하여 추적자 시험을 한 결과, 통상적으로 수행하는 직접적인 물시로 채취분석법과 비교하였을 때 활성탄을 이용한 흡착방법도 충분히 현장 적용성이 있으며 저농도에서는 습식 그리고 고농도에서는 건식으로 분석한다면 보다 정확한 형광물질 농도측정이 되는 것으로 나타났다. 특히 오염물질 확산 평가 등이 목적이 아니라 추적자 물질의 도달확인(즉 수리적 연결성 진단)이 주요 목적이고 추적자시험의 예상 소요기간이 길다면 활성탄을 활용한 방법은 매우 비용경제적일 것으로 사료된다.

주제어 : 추적자 시험, 활성탄, 로다민 WT, 우라닌, 흡착

*Corresponding author : hydrolee@kangwon.ac.kr

원고접수일 : 2007. 5. 18 게재승인일 : 2007. 8. 9

질의 및 토의 : 2007. 10. 31 까지

1. 서 론

추적자시험은 흔히 대수층내에서 오염물질의 확산특성을 파악하거나 지점간의 수리적 연결성을 확인하기 위하여 수행한다(이진용 외, 2001). 전통적으로 국내에서는 보존성 이온물질(브롬, 염소 및 요오드 이온 등)을 이용한 추적자시험이 주류를 이루었다(e.g., 정형재 외, 1996; 이진용 외, 2002; Lee et al., 2003, 안규천 외, 2004; 강동환 외, 2006; 정상용 외, 2006). 그런데 최근에는 이런 보존성 이온물질뿐만 아니라 염료 혹은 형광물질 추적자를 이용한 시험이 빈번해지고 있다(e.g., 전철민 외, 2004; 정상용 외, 2006; 황현태 외, 2006). 이런 물질들은 이온성 물질과 비교하여 건강상 위해성이 적은 것으로 알려져 북미 등지에서는 오래 전부터 사용되어 왔다(김정우 외, 2004).

그런데 추적자 이동거리가 멀거나 시간이 많이 걸릴 것으로 예상되는 경우 추적자 주입 후 일정시간이 경과하고 나서 주기적으로 지하수(혹은 지표수) 시료를 채취하여 추적자의 농도를 측정하고 도달여부를 판단하게 된다. 매우 짧은 거리를 대상으로 하는 시험이 아니라면 통상적으로 1일 이내에 추적자 시험을 완료하기 힘들다. 만약에 수 주 이상이 걸릴 것으로 예상되는 장기 추적자시험이라면 1일 1~2회 정도의 시료채취 및 추적자 농도측정으로 충분할 것이다. 일반적인 경우 1일 1회 농도측정을 위하여 지하수 연구자 혹은 기술자가 현장에 상주하는 것은 비용적으로 매우 비효율적인 일이 될 것이다.

형광추적자의 경우 자동 수위센서와 마찬가지로 형광 자동센서를 물(혹은 관정)속에 설치하여 정해진 시간간격으로 형광물질의 농도를 측정할 수 있다. 그런데 이 센서는 설치한 특정위치에 형광물질이 도달해야만 추적자의 검출이 가능하므로 다수의 심도와 여러 위치에 설치하기에는 비용(대당 수백만원)이 적지 않다. 그러므로 보다 경제적으로 형광성 추적자의 도달(혹은 농도)을 확인할 수 있는 방법을 고민하게 되었다(Smart and Simpson, 2002). 본 연구에서는 활성탄의 유기물질에 대한 흡착특성을 이용하여 형광물질 추적자 시험에 대한 적용가능성을 실내 및 현장시험을 통해 평가하였다. 실내실험에서는 다양한 농도하에서 물 시료를 직접 측정하는 방법과 활성탄을 이용하여 측정하는 방법을 비교하였으며 또한 실제 현장에 대한 형광추적자 시험을 통해 직접 측정법과 활성탄 흡착측정법을 비교·분석하였다.

2. 시험재료 및 방법

2.1. 형광물질 추적자

본 연구에서 고려한 추적자는 형광물질인 로다민 WT(Rhodamine WT)와 플루어레시언(별칭 우라닌(Uranine))이다. 로다민 WT는 적색을 띄는 형광물질로서 최소 검출능력, 광화학적, 미생물학적 분해 비율 및 흡착성 등에서 유용한 추적자로 사용되고 있으며, 하천과 카르스트 지역 추적자 시험에 사용되는 염료 중 가장 보존성이 높다(김정우 외, 2004). 이 형광추적자가 지하수 연구에 널리 사용되고 있는 이유는 형광광도계를 이용하여 저농도까지 측정할 수 있으며 형광색소 중 가장 안정하고(Sutton et al., 2001) 또한 극히 많은 양이 아니라면 지하수에 공급하더라도 인체에 급성 위험이 없는 것으로 알려져 있기 때문이다(Field et al., 1995). 이와 같은 장점에도 불구하고 다양한 시험 조건하에서 탁도, 흡착 및 주변매질의 특성에 일부 영향을 받는 것으로 알려지고 있다(김정우 외, 2004).

플루어레시언의 경우 녹색 형광물질로 직접적인 광분해는 비교적 큰 편이나 직사광선이 거의 들지 않는 지하수 추적자 시험에는 거의 문제가 되지 않는 것으로 알려져 있다(Harden et al., 2003). 염료 중 생물학적으로 안전한 물질이며 배경농도에 대한 조사가 충분히 이루어져야 한다. 플루어레시언 용액은 희석해도 육안으로 확인할 수 있을 정도의 선명한 녹색색 형광을 띄는데 나트륨 염인 우라닌(Uranine)은 물을 추적하거나 표시할 때 주로 사용된다.

2.2. 추적자의 검출방법

일반적으로 현장 추적자 시험시 추적자의 검출은 예상 이동경로에서 채취한 시료를 통해 이루어진다. 미리 정한 위치에서 일정 시간에 직접 지하수 혹은 하천수를 채취하여 분석하게 된다. 직접 물시료를 채취할 경우 별다른 전처리없이(탁도가 높은 경우 부유물을 가리얏힌 후) 분석기기(혹은 미터기)에 주입하여 농도를 측정한다. 이와 같이 직접 물시료의 추적자 농도를 측정하는 방법 대신 본 연구에서 고려하는 방법은 활성탄을 이용한 추적자의 검출이다. 활성탄은 목재, 갈탄 혹은 무연탄 등을 원료로 제조되는 미세 세공이 잘 발달된 무정형 탄소의 집합체로서 큰 내부 표면적을 가지는 흡착제이다. 따라서 활성탄소는 연초제조, 환경, 식품공업 등 제반산업 분야에서 필터용, 탈색, 탈취 및 가스제거 등에 활용되고 있다(지오그린21, 2006).

활성탄은 유기물 분자에 대해 고도의 흡착능력이 있으며 물리적 강도가 크다. 활성탄으로 흡착된 추적자는 자



Fig. 1. Granular activated charcoal used in this study and measurement of tracer concentration using 10-AU-005-CE fluorometer.

연적으로 탈착이 잘 되지 않으므로 추적자 시험시 여러 장소에 이를 설치하여 추적자의 도달을 확인할 수 있다 (Fig. 1). 일정기간 동안 특정 지점에 설치된 활성탄은 추출작업을 통해 추적자를 활성탄으로부터 분리시켜 농도를 측정하게 된다. 이때의 추적자 농도는 설치기간 동안 흘러간 추적자의 평균 이상의 농도가 검출된다. 활성탄의 교체는 활성탄의 추적자 검출능과 추적자의 주입 및 검출 위치를 고려하여 수행할 수 있다. 형광 추적자에 대한 활성탄 흡착법의 장점은 직접 물시료를 채취하는 것보다 고농도로 검출이 가능하며 추적자가 일정 시간에 걸쳐 흡착되므로 저농도의 추적도 가능하다는 것이다. 또한 시료 채취 주기를 늘릴 수 있어 시간·비용적으로 효율이 높다. 하지만 활성탄 자체의 입자 때문에 탁도가 증가할 수 있으며 이온성 추적자에는 사용하기 어렵다.

활성탄에 흡착된 형광추적자를 탈착시키기 위하여 KOH 용액 혹은 스마트 용액을 사용한다. KOH 용액의 경우 100 mL의 이소프로필(isopropyl) 알콜에 6~7 g의 수산화칼륨(potassium hydroxide)을 용해시켜 제조하며, 스마트 용액은 38% 수산화암모늄(ammonium hydroxide), 43% 1-propano 및 19%의 증류수를 혼합하여 제조한다(Smart and Simpson, 2002). 본 연구에서는 스마트 용액을 사용하여 활성탄에 흡착된 형광추적자를 탈착시켰다.

2.3. 형광추적자의 분석기기

본 연구에서는 직접 또는 활성탄을 통해 채취된 형광 시료는 추적자 분석 장비를 통해 시료의 농도를 측정하였다. 본 시험에서 농도 측정에 사용한 장비는 Turner Designs사(미국)의 10-AU-005-CE Field Fluorometer이며 (Fig. 1 참조), 로다민 WT와 플루어레시언(우라닌)의 분석에 최저 0.01 $\mu\text{g/L}$ 의 검출능을 가지고 있다. 이 광도계는 휴대가 간편하며 현장에서 직접 형광추적자의 농도를 측

정할 수 있다. 외부에서 단파장 혹은 고에너지의 빛이 조사되면 로다민 WT와 같은 형광물질은 여기되어 발색을 하며 저에너지 혹은 장파장의 방사선을 방출하게 된다. 각각의 형광물질은 특정 여기 및 방출 스펙트럼을 가지므로 적절한 필터를 이용하여 여기 및 방출파장을 조절함으로써 로다민 WT 뿐만 아니라 우라닌 등을 검출할 수 있다 (김정우 외, 2004).

3. 시험결과 및 고찰

3.1. 농도별 형광추적자 검출능 실내 시험

우선 활성탄에 존재하는 미세 활성탄을 제거하기 위해 증류수에 세척하였다. 세척된 활성탄은 표면에 존재하는 물기를 자연 건조를 통해 제거하여 추적자와 접촉시 나타나는 오차를 사전에 제거 하였다. 활성탄의 형광 추적자 검출능 추정에 사용된 추적자용액은 로다민 WT, 플루어레시언(우라닌) 각각 blank, 1.0×10^{-2} , 1.0×10^{-1} , 1.0×10^0 , 1.0×10^1 , 1.0×10^2 , 1.0×10^3 , 1.0×10^4 , 1.0×10^5 , 1.0×10^6 $\mu\text{g/L}$ 의 시료를 준비하여 각 추적자용액 20 mL에 활성탄 10 g을 갈색 시료병에 넣어서 24시간(1일) 경과 후 시료를 분석하였다. 활성탄의 경우, 추적자 용액과의 접촉성을 고려하여, 각 추적자용액에서 꺼내 직접 분석하는 경우와 건조시켜 분석하는 경우 두 가지를 모두 고려하였다.

3.1.1. 증류수 용액(Blank 상태)

각 형광물질의 농도에 따른 검출능력을 측정하기에 앞서 형광분석기 자체의 검출 능력과 활성탄과 순수한 증류수에서 형광 성분으로 오인되는 나타나는 배경 농도를 측정하기 위해 증류수를 사용하여 실내실험을 수행하였다. 실험 방법은 앞서 언급한 형광 용액의 실험과 똑같은 절

Table 1. Concentrations of fluorescent tracers in distilled water, which were determined using granular activated charcoal as adsorbent ($\mu\text{g}^*/\text{L}^*$: 10 g of granular activated charcoal and 20 mL of detection solution)

Distilled water ($\mu\text{g}/\text{L}$)	Concentration ($\mu\text{g}^*/\text{L}^*$)			
	Rhodamine WT		Uranine	
	Wet	Dry	Wet	Dry
0.0	0.183	0.617	0.672	0.363

Table 2. Concentrations of fluorescent tracers in rhodamine WT solution, which were determined using granular activated charcoal as adsorbent ($\mu\text{g}^*/\text{L}^*$: 10 g of granular activated charcoal and 20 mL of detection solution)

Standard solution ($\mu\text{g}/\text{L}$)	Detected concentration ($\mu\text{g}^*/\text{L}^*$)			
	Rhodamine WT		Uranine	
	Wet	Dry	Wet	Dry
Distilled water	0.183	0.617	0.672	0.363
0.01	0.000	0.086	0.184	1.350
0.1	0.037	0.060	0.058	0.832
1	0.140	0.628	0.209	0.355
10	2.180	1.450	0.572	0.518
100	12.800	6.710	1.790	1.170
1,000	150.000	52.900	19.500	7.430
10,000	587.000	620.000	85.200	95.700
100,000	2,130.000	2,340.000	410.000	524.000

차를 거쳤다. 증류수 용액을 통한 활성탄의 검출 농도는 다음과 같다. 로다민 WT의 경우, 젖은 상태의 활성탄에서 $0.183 \mu\text{g}^*/\text{L}^*$, 건조 상태의 활성탄에서 $0.617 \mu\text{g}^*/\text{L}^*$ 로 검출이 되었으며, 플루어레이션(우라닌)의 경우, 젖은 상태일 때, $0.672 \mu\text{g}^*/\text{L}^*$, 건조 상태일 때, $0.363 \mu\text{g}^*/\text{L}^*$ 의 농도로 검출되었다(Table 1).

3.1.2. 로다민 WT 용액

로다민 용액의 농도가 $0.01\sim 1.0 \mu\text{g}/\text{L}$ 의 범위일 때 검출되는 농도는 활성탄이 젖은 상태일 경우 $0.0\sim 0.140 \mu\text{g}^*/\text{L}^*$ 로 분석되었으며, 자연 건조시킨 활성탄을 사용하였을 때, $0.086\sim 0.628 \mu\text{g}^*/\text{L}^*$ 의 범위를 보였다(Table 2). 비록 농도에 따라 비례관계를 보이지만, 현장에서의 로다민 WT의 배경농도가 $0.01\sim 0.80 \mu\text{g}/\text{L}$ 임을 감안한다면, 추적자 검출시 오차를 유발할 가능성이 있는 것으로 사료된다. 로다민 용액의 농도가 $10 \mu\text{g}/\text{L}$ 이상일 경우, 검출되는 농도는 젖은 활성탄을 사용했을 때, 약 $2.18 \mu\text{g}^*/\text{L}^*$ 로 나타났고, 건조상태일 때, 약 $1.45 \mu\text{g}^*/\text{L}^*$ 로서 일반

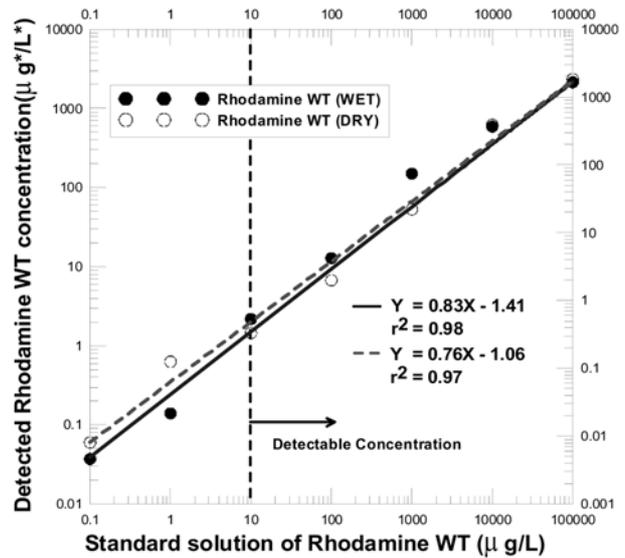


Fig. 2. Comparison between concentrations of standard solutions and charcoal desorbed rhodamine WT.

적인 배경 농도보다 높게 나타나고 있음을 확인하였다. 로다민 WT의 농도가 점점 증가 할수록 활성탄을 통해 검출되는 농도 또한 증가한다.

로다민 WT 용액이 $100 \mu\text{g}/\text{L}$ 에서 $1,000 \mu\text{g}/\text{L}$ 로 증가된 경우, 검출되는 용액은 $12.8 \mu\text{g}^*/\text{L}^*$ 에서 $150.0 \mu\text{g}^*/\text{L}^*$ 로 약 12배 가량 급격하게 증가하였다. 하지만, 검출되는 로다민 WT 용액이 우라닌 용액으로 오인되는 경우 또한 $1.79 \mu\text{g}^*/\text{L}^*$ 에서 $19.5 \mu\text{g}^*/\text{L}^*$ 로 급격하게 증가하는 것이 관찰되었다. 일반적으로 젖은 활성탄을 이용하여 추적자를 검출하는 방법이 높은 농도의 검출 용액을 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 로다민 WT를 사용하여 추적자 검출시 로다민 WT의 농도가 적어도 $10 \mu\text{g}/\text{L}$ 이상 되는 지점에서 활성탄을 설치하는 것이 바람직한 것으로 사료된다(Fig. 2).

3.1.3. 플루어레이션(우라닌)

플루어레이션(우라닌) 용액의 농도가 $0.01\sim 1.0 \mu\text{g}/\text{L}$ 의 범위일 때 검출되는 농도는 젖은 상태의 활성탄일 경우 $0.732\sim 1.430 \mu\text{g}^*/\text{L}^*$ 로 분석되었으며, 자연 건조시킨 활성탄을 사용하였을 때, $0.277\sim 0.305 \mu\text{g}^*/\text{L}^*$ 의 범위를 보였다(Table 3). 플루어레이션(우라닌) 또한 로다민 WT 추적자 용액과 비슷하게 농도에 따라 비례관계를 보이고 있지만, 플루어레이션(우라닌)의 현장 배경농도는 $0.01\sim 1.00 \mu\text{g}/\text{L}$ 임을 감안했을 때, $0.01\sim 1.0 \mu\text{g}/\text{L}$ 의 범위내의 농도는 추적자 검출에 있어 오차를 유발할 가능성이 높은 것으로 판단된다. 플루어레이션(우라닌) 용액의 농도가 $10 \mu\text{g}/\text{L}$

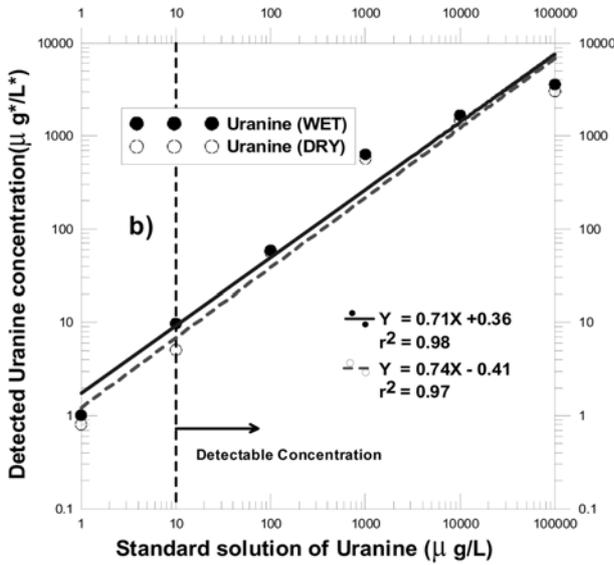


Fig. 3. Comparison between concentrations of standard solutions and charcoal desorbed uranine.

이상일 경우, 검출되는 농도는 젖은 활성탄을 사용시, 약 9.33 $\mu\text{g}^*/\text{L}^*$ 로 나타났고, 건조 상태일 때 약 1.82 $\mu\text{g}^*/\text{L}^*$ 로서 일반적인 배경 농도보다 높게 나타나고 있음을 확인하였다.

플루오레시언(우라닌)의 농도가 점점 증가할수록 활성탄을 통해 검출되는 농도 또한 증가하는 경향을 보인다. 플루오레시언(우라닌) 용액이 100 $\mu\text{g}/\text{L}$ 에서 1,000 $\mu\text{g}/\text{L}$ 로 증가된 경우, 검출되는 용액은 47.2 $\mu\text{g}^*/\text{L}^*$ 에서 490.0 $\mu\text{g}^*/\text{L}^*$ 로 약 10.4배 가량 급격하게 증가하게 된다. 이러한 현상은 앞서 로다민 WT의 경우에서와도 비슷한 경향(약 11.5배 증가)을 보였다. 플루오레시언(우라닌)의 농도와 로다민 WT와의 간섭현상(interference)은 검출되는 플루오레시언(우라닌) 용액이 로다민 WT와 같은 이물질에 의해 농도가 측정되는 현상을 야기시키는데, 플루오레시언(우라닌)이 로다민 WT보다 상대적으로 높은 농도인 $1 \times 10^5 \mu\text{g}/\text{L}$ 에서 간섭현상이 나타났다. 활성탄에 흡착된 플루오레시언(우라닌)의 검출 시험을 통해 플루오레시언(우라닌) 농도가 약 10 $\mu\text{g}/\text{L}$ 이상일 때, 활성탄을 이용한 추적자 검출이 가능한 것으로 사료된다(Fig. 3).

3.1.4. 로다민 WT와 플루오레시언(우라닌) 혼합 용액

로다민 WT와 플루오레시언(우라닌)을 혼합하였을 때 나타나는 간섭현상과 두 종류의 형광 추적자가 동시에 검출될 수 있는 농도를 측정하기 위해 로다민 WT와 플루오레시언(우라닌) 용액 20 mL씩 활성탄 10 g과 함께 24 시간을 놓아두었다. 실험에 적용된 두 추적자의 농도는 1,

Table 3. Concentrations of fluorescent tracers in uranine solution, which were determined using granular activated charcoal as adsorbent ($\mu\text{g}^*/\text{L}^*$: 10 g of granular activated charcoal and 20 mL of detection solution)

Standard solution ($\mu\text{g}/\text{L}$)	Detected concentration ($\mu\text{g}^*/\text{L}^*$)			
	Rhodamine WT		Uranine	
	Wet	Dry	Wet	Dry
Distilled water	0.183	0.617	0.672	0.363
0.01	0.000	0.000	1.430	0.277
0.1	0.000	0.000	0.281	0.252
1	0.000	0.043	0.732	0.305
10	0.000	0.000	9.330	1.820
100	0.000	0.027	47.20	24.30
1,000	0.084	0.160	490.0	265.0
10,000	0.684	0.307	917.0	478.0
100,000	9.490	3.960	2,890.0	2,660.0

Table 4. Concentrations of fluorescent tracers in uranine and rhodamine WT mixed solution, which were determined using granular activated charcoal as adsorbent ($\mu\text{g}^*/\text{L}^*$: 10 g of granular activated charcoal and 20 mL of detection solution)

Mixed standard solution ($\mu\text{g}/\text{L}$)	Detected concentration ($\mu\text{g}^*/\text{L}^*$)			
	Rhodamine WT		Uranine	
	Wet	Dry	Wet	Dry
1	0.097	0.007	1.280	2.570
10	0.626	0.272	3.010	2.220
100	13.70	3.680	46.90	19.50

10, 그리고 100 $\mu\text{g}/\text{L}$ 이며, 활성탄은 건조 상태와 젖은 상태로 분리해서 검출실험을 하였다. 먼저 로다민 WT의 검출 농도는 1~10 $\mu\text{g}/\text{L}$ 사이에서는 0.097~0.626 $\mu\text{g}^*/\text{L}^*$ 로 순수하게 로다민 WT만 존재했을 때 보다 약 3.2배 정도 낮은 검출 농도를 보였으며, 로다민 WT 농도가 100 $\mu\text{g}/\text{L}$ 일 때의 경우, 젖은 상태의 활성탄에서 13.7 $\mu\text{g}^*/\text{L}^*$, 건조상태의 활성탄에서 3.68 $\mu\text{g}^*/\text{L}^*$ 의 검출 농도를 보였다(Table 4). 순수한 로다민 WT 용액만 존재하는 경우보다는 다소 낮은 값을 보이고 있다. 플루오레시언(우라닌)의 경우, 혼합용액의 농도가 1 $\mu\text{g}/\text{L}$ 일 때, 측정되는 농도는 1.28 $\mu\text{g}^*/\text{L}^*$ (젖은 상태), 2.57 $\mu\text{g}^*/\text{L}^*$ (건조 상태)로서 본래의 용액 농도보다 약 1.3~2.6배 정도 높은 검출 농도를 보였다. 이러한 현상은 로다민 WT의 농도가 우라닌 농도 증가에 기인한 것으로 사료된다. 혼합용액의 농도가 10 및 100 $\mu\text{g}/\text{L}$ 일 때, 우라닌의 검출 농도는 젖은 상태의 활성탄과 건조 상태의 활성탄에서 각각

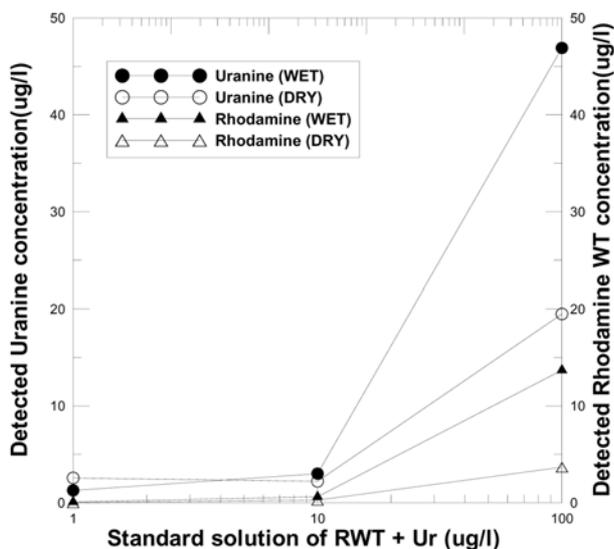


Fig. 4. Comparison between concentrations of standard solutions and charcoal desorbed rhodamine WT and uranine.

3.01~46.90 $\mu\text{g}^*/\text{L}^*$ 와 2.22~19.50 $\mu\text{g}^*/\text{L}^*$ 로 나타났다. 형광물질 혼합액의 검출실험에서 로다민 WT는 100 $\mu\text{g}/\text{L}$ 부터 유의미한 검출능을 보이며, 우라닌의 경우, 1 $\mu\text{g}/\text{L}$ 부터 활성탄을 이용한 검출이 가능할 것으로 사료된다(Fig. 4).

3.2. 현장 시험

앞서 기술한 실내시험과 더불어 활성탄을 이용한 형광 추적자 시험의 적용성을 평가하기 위하여 실제 현장에서 추적자 시험을 수행하였다. 본 현장추적자 시험은 당초 강원도 태백시에 위치하는 황지못과 주변 지역과의 수리적 연결성을 파악하는 연구의 일환으로 계획된 것이다(지오그린21, 2006). 황지못 주변 지역의 지하수 관정에 형광물질 추적자(여기서는 우라닌)를 주입하고 황지못의 다수의 위치에서 추적자의 도달을 확인하는 실험이었다(Fig. 5).

약 30 g의 입상활성탄(granular activated carbon)을 직경 15 cm의 구형체 스테인레스 스틸 재질의 망에 넣어 설치하였다. 또한 스테인레스 망 외부에는 미리 주입장소, 주입일, 채취일을 기재할 수 있는 인식표를 설치하여 교체시간을 확인할 수 있도록 하였다. 형광 추적자 검출용 활성탄은 추적자 주입지점과 추적자 검출지점인 황지못에 설치하였다. 황지못의 검출용 활성탄 설치방법은 다음과 같다. 황지못의 깊이와 흐름, 그리고 지하수 유출장소를 고려하여 지하수가 유출되는 지점을 대상으로 세 곳을 설정하였다(Fig. 5 참조). 황지못 내 활성탄 설치시 연못의 깊이(2~3 m)를 고려하여 지하수 유출지점에 활성탄 고정 추를 내리고, 연못바닥에 존재하는 이물질로부터의 오염

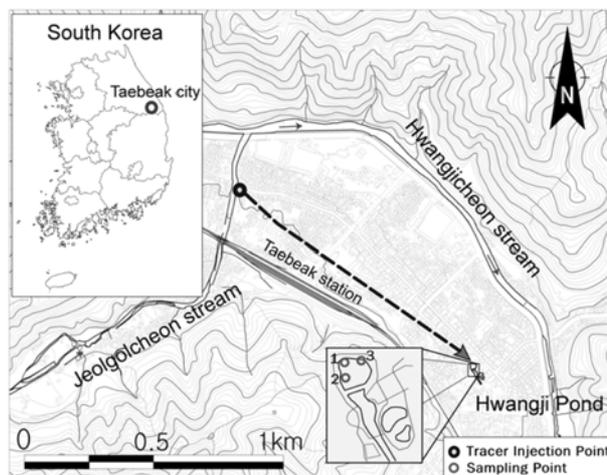


Fig. 5. Location of the fluorescent tracer study area.

을 막기 위해 부표를 이용해 활성탄이 연못 바닥으로부터 약 30~50 cm 이격 되도록 설치하였다. 한편 본 연구의 활성탄 방법과 별도로 황지연못의 수리적 연결성을 평가하는 연구를 위해 황지못 동일 지점 및 심도에서 주기적으로 물시료를 채취하여 직접 형광추적자의 농도를 측정하였다.

Fig. 6(a)에서 보는 바와 같이 세 지점에서 농도이력 곡선은 비슷하게 나타났다. 추적자는 주입 후 약 2.2 일 후 도달하였고 최고농도(138 $\mu\text{g}/\text{L}$)까지는 1.5일 정도 더 소요되었다. 황지연못 3 지점에서 측정된 최고농도는 초기 주입농도에 비하여 5.52×10^{-4} 배 작은 값이다. 질량중심이 도달한 시간과 주입 위치까지의 직선거리를 고려하였을 때 추적자의 이동속도는 약 0.18 m/min에 해당한다. 이러한 속도는 카르스트 지역 하부에 탁월한 유동채널이 존재함을 지시한다(김용철 외, 2006). 본 활성탄법의 적용성 평가를 위해 이 추적자시험 기간동안 활성탄을 세 번 교체·설치하였는데 각 활성탄은 연못내에 24시간 노출시켰다. 10 mL의 스마트용액을 이용하여 10 g의 흡착활성탄으로부터 형광물질을 추출하였다. 측정된 지점별로 농도는 크게 다르지 않았다. 그런데 활성탄을 이용하여 측정된 우라닌의 농도는 물시료를 직접 채취하여 측정된 농도에 비해 저농도(< 1 $\mu\text{g}/\text{L}$)에서는 일부 과대평가되고 고농도(> 100 $\mu\text{g}/\text{L}$)에서는 과소평가되는 결과가 나타났다(Fig. 6(b)). 또한 건식으로 측정된 농도는 대부분의 농도 범위에서 습식으로 분석한 농도에 비해 크게 평가되었다. 그럼에도 불구하고 활성탄흡착법은 개별 방법(즉 습식 혹은 건식)간에는 탁월한 선형성($r^2=0.96, 0.94$)을 보였다.

그럼으로 통상적으로 수행되는 직접적인 물시료 채취분

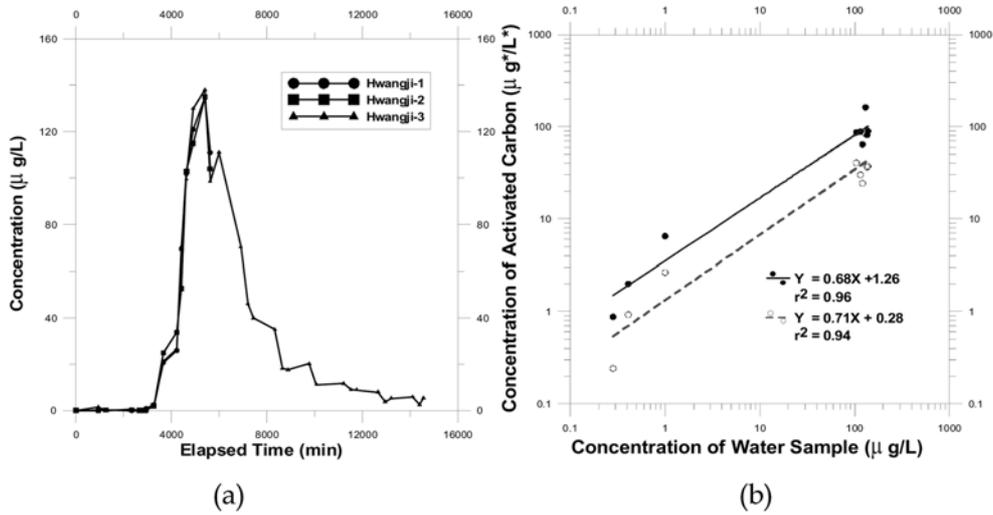


Fig. 6. (a) Breakthrough curves obtained from the field tracer test (concentration was determined using direct water sampling) and (b) comparison of uranine concentrations between water samples and granular activated charcoal (open symbol: wet, closed symbol: dry).

석법을 표준적인 농도 측정방법이라고 하였을 때 활성탄을 이용한 방법도 충분히 적용가능성이 있으며 저농도에서는 습식 그리고 고농도에서는 건식으로 분석한다면 보다 정확한 형광물질 농도측정이 될 수 있을 것이다. 특히 정확한 농도측정이 목적이 아니라 추적자 물질의 도달확인(즉 수리적 연결성 진단)이 목적이라면 활성탄을 활용한 방법은 매우 비용경제적일 것으로 사료된다.

형광물질 농도측정이 될 수 있을 것으로 기대된다. 특히 정확한 농도측정(오염물질 확산 등)이 목적이 아니라 추적자 물질의 도달확인(즉 수리적 연결성 진단)이 주요 관심이고 추적자시험의 예상 소요기간이 수 일에서 수 주로 길다면 활성탄을 활용한 방법은 매우 비용경제적일 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 형광물질 추적자 시험시 농도측정 방법으로서 입상 활성탄을 이용하는 방법의 적용가능성을 실내 및 현장실험을 통해 평가하였다. 실내실험 결과 로다민 WT 및 우라닌 개별용액의 경우 활성탄 흡착 농도는 실제 표준농도와는 일부 차이가 있지만 각 표준농도와 선형성은 매우 뛰어난 것으로 나타났다. 또한 10 µg/L 이상의 형광물질 농도에서는 활성탄의 적용성이 뛰어난 것으로 사료된다. 한편 두 형광물질을 혼합한 경우에는 간섭의 영향으로 활성탄 적용성이 떨어지는 것으로 보인다. 다만 본 실내실험에서 노출시간을 임의로 24시간으로 정하였기 때문에 향후 노출시간에 따른 영향 등을 평가할 필요가 있다.

실제 현장에서 활성탄을 이용하여 추적자 시험을 한 결과, 통상적으로 수행하는 직접적인 물시료 채취분석법을 기본적인 농도 측정방법이라고 하였을 때, 활성탄을 이용한 흡착방법도 충분히 적용가능성이 있으며 저농도에서는 습식 그리고 고농도에서는 건식으로 분석한다면 정확한

사 사

본 연구를 위해 현장에서 많은 수고를 아끼지 않은 지오그린21과 한국지질자원연구원의 연구원분들께 감사의 말씀을 드립니다. 또한 본 논문에 좋은 심사의견의 주신 임명의 심사위원님께도 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

참 고 문 헌

강동환, 정상용, 김병우, 2006, 수평적으로 불균질한 단열암반층에서 단공주입양수 추적자시험에 의한 수리분산특성, 한국지하수토양환경학회지, 11(6), 53-60.
 김용철, 김유홍, 고동찬, 이진용, 염병우, 2006, 태백시 황지용해 공동의 수리지구화학적 연구, 한국지하수토양환경학회 총회 및 춘계학술발표회, 97-99.
 김정우, 이진용, 천정용, 이명재, 김형수, 이강근, 2004, 형광추적자 Rhodamine WT의 측정농도에 영향을 주는 요인 고찰, 지질학회지, 40(3), 331-340.
 안규천, 이준학, 구민호, 김용제, 고동찬, 2005, 자유면대수층에서의 다공 추적자시험 해석, 한국지하수토양환경학회 춘계학술발표회, 312-315.

이진용, 천정용, 이강근, 이민희, 윤정기, 2001, 다공질 친층 대수층에서의 추적자 이동 연구, *지질학회지*, **37**(2), 309-316.

이진용, 황대규, 이명재, 최예권, 김정우, 이강근, 2002, 해안 매립지에서 침출수 유출차단기술 검증을 위한 추적자 시험 및 수위관측, *지질학회지*, **38**(4), 621-629.

전철민, 김재곤, 이진수, 김탁현, 2004, 화강암 기원 잔적토양에서 염료추적자의 침투 유형에 관한 연구, *자원환경지질*, **37**(4), 383-389.

정상용, 강동환, 김병우, 2006, 부산시 좌천동 단열암반층에서 자연구배 추적자시험을 이용한 수리분산특성 연구, *지질공학*, **16**(3), 245-254.

정상용, 강동환, 이민희, 손주형, 2006, 복합토양층의 불포화대와 포화대에서 연속주입 추적자시험을 이용한 수리분산특성 연구, *한국지하수토양환경학회지*, **11**(4), 48-56.

정형재, 김은진, 이강근, 배광옥, 1996, 추적자 시험(Tracer Test)의 현장적용 연구, *대한지하수환경학회 정기총회 및 학술발표회*, 74-77.

지오그린21, 2006, 태백시 황지연못 공급지하수추적자 시험 연구, *최종연구보고서*, 지질자원연구원, p. 49.

황현태, 이명재, 최예권, 목종구, 이진용, 김용철, 염병우, 2006,

Application of activated carbon bugs to the dye tracer study in a Karst area, *한국지하수토양환경학회 춘계학술대회*, 407-410

Field, M.S., Wilhelm, R.G., Quinlan, J.F., and Aley, T.J., 1995, An assessment of the potential adverse properties of fluorescent tracer dyes used for groundwater tracing, *Environmental Monitoring and Assessment*, **38**(1), 75-96.

Harden, H.S., Chanton, J.P., Rose, J.B., John, D.E., and Hooks, M.E., 2003, Comparison of sulfur hexafluoride, fluorescein and rhodamine dyes and the bacteriophage PRD-1 in tracing subsurface flow, *Journal of Hydrology*, **277**, 100-115.

Lee, J.Y., Kim, J.W., Cheon, J.Y., Yi, M.J., and Lee, K.K., 2003, Combined performance of pumping and tracer tests: a case study, *Geosciences Journal*, **7**(3), 237-241.

Smart, C. and Simpson, B., 2002, Detection of fluorescent compounds in the environment using granular activated charcoal detectors, *Environmental Geology*, **42**, 538-545.

Sutton, D.J., Kabala, Z.J., Francisco, A., and Vasudevan, D., 2001, Limitations and potential of commercially available rhodamine WT as a groundwater tracer, *Water Resources Research*, **37**(6), 1641-1656.