

자유면대수층내 포화대와 비포화대에서의 수리분산특성 연구

강동환, 정상용, 이민희, 김병우, 이승엽*, 손주형**

부산광역시 남구 대연 3동 599-1 부경대학교 환경·해양대학 환경지질과학과

*서울대학교 지구환경과학부

**농업기반공사

ak1k1k1@daum.net

요약문

연속주입추적자시험이 실시된 현장사이트의 규모는 4.5m×4.5m×6.0m 정도이다. 시험사이트내에서 실시된 추적자시험은 주입공(P1)에서 Rhodamine WT 50ppm 용액을 1.8 l/min의 주입율로 6일 동안 연속적으로 주입함과 동시에 관측공(P2, P3, I1, I2, I3)에서 일정한 시간간격으로 지하수를 채수하여 추적자농도를 산출하였다. 시험결과, 지하수면 하부를 포함하는 관측공(P2, P3)의 최대추적자농도는 초기주입농도의 10% 정도이며, 지하수면 상부에 위치한 지하수공(I1, I2, I3)들에서의 최대추적자농도는 초기농도의 75% 정도로서 추적자의 농도차이가 상대적으로 매우 크게 나타났다. 본 연구에서는 자유면대수층내에서 포화대를 포함한 관측공과 비포화대만을 포함한 관측공에서의 수리분산특성에 대해 비교·분석한 결과, 오염물이 연속적으로 토양에 유입되는 경우 비포화대 구간에서는 이류기작에 의한 농도회석이 거의 없으므로 오염물농도가 매우 클 것으로 판단된다.

Key Word : Continuous injection tracer test, Saturated zone, Unsaturated zone.

1. 서론

현장추적자시험은 자연구배추적자시험과 연속주입추적자시험(혹은 강제구배추적자시험)이 있다. 이 두가지 시험방법의 차이는 자연적인 지하수의 흐름을 유지하느냐, 아니면 인위적으로 지하수의 흐름방향을 조절하느냐의 차이이다. 자연구배추적자시험의 결과는 시험대수층의 수리분산정도를 정량적으로 산정하는 것이 가능하다(이진용 외, 2001). 그러나, 연속주입추적자시험은 자연구배추적자시험에 비해 동일조건에서는 시험의 성공률이 높고 시험기간이 단축되어 지기는 하나, 대수층의 수리분산특성을 정량적으로 분석하는 것에는 한계가 있다(이상호 외, 2001). 국부적인 규모에서 유류기지와 주유소 등에서의 유류유출과 광역적인 규모에서의 산성광산폐수와 매립장 침출수의 유출 등의 현실적인 지하수 오염문제를 해결하기 위한 대수층 수리분산특성 파악에 적합한 시험방법이 연속주입추적자시험이다. 이러한 일반적인 오염원들의 특성이 연속적인 점오염원(Point source)이라는 것이 연속주입추적자시험방법과 유사하기 때문이다.

이전까지의 추적자시험은 포화대의 수리분산을 정량화하기 위해 자연구배추적자시험들이 대부분 연구되어져 왔다. 지표에서 유입되는 오염물은 비포화대를 통과해야만 포화대에 도달되어 지하수에 의해 수송되어 질 수 있다. 따라서, 비포화대에서의 수리분산특성이 대수층에 미치는 영향이 매우 클 것으로 판단된다. 아직까지는 많은 연구가 되어있지는 않지만 비포화대에서의 수리분산에 대한 현장연구사례는 공극체적에 따른 비포화대내에서의 용질수송(Yoshio Tsuboyama 외, 1994), 시험사이트의 전체 지표면에 추적자를 동시 주입하여 비포화대내에서의 추적자 침투

양상과 수송특성을 연구하였으며(Rudolph D. L. 외, 1996), 또한 비포화대내에서의 중·횡분산의 정량적인 연구(Irene Forrer and Roy Kasteel 외, 1999) 등이 실시된 바 있다.

본 연구에서는 자유면대수층에서 연속주입추적자시험을 실시하여 포화대의 수리분산특성 및 비포화대 구간에서의 수리분산특성을 정성적으로 비교·분석하였다. 이러한 연구는 연속적인 점오염원에 의한 지하수오염의 분산정도를 예측함에 있어 중요한 연구자료로서 활용되어 질 수 있으며, 현장시험으로서의 좋은 사례가 될 것으로 판단된다.

2. 본론

2.1. 시험사이트와 지하수공

현장조사자료(현장지질로깅 및 수위모니터링)와 실내토양물성시험에 의한 시험사이트내 지표면하 6.0m까지의 비포화대와 포화대 구간의 토양특성은 다음과 같다. 토양층은 크게 최상부 매립층, 세립질 모래층, 실트와 세립질 모래의 혼합층, 조립질 모래층, 그리고 최하부 점토층의 상부 0.3m 정도에 분포하는 점토와 조립질 모래의 혼합층으로 구성되어 있다. 그리고, 시험사이트내 자연지하수위는 2002년 1월부터 3월까지의 시험사이트내 9개 지하수공의 모니터링 결과 지표면하 3.0m 부근에 형성되어 있었다. 지하수의 주흐름방향은 서쪽방향으로 조사되었다.

현장추적자시험에 이용된 지하수공들의 수직적인 설계단면이 Fig. 1.에 도시되어 있다. I1, I2, I3공은 개발심도가 지표면하 3.0m 이고 스크린은 지표면하 1.5~3.0m 구간에 설치되어 있으며, 내부직경은 0.085m이다(Fig. 1.(a)). P1, P2, P3공은 개발심도가 지표면하 6.0m 정도이고 지표면하 2.5~6.0m 구간에 스크린이 설치되어 있으며, 내부직경은 0.058m이다. 그리고, 여과력은 P1, P2, P3공 모두 0.016m의 두께로 채워져 있다(Fig. 1.(b)). 그리고, 모든 지하수공의 재질은 HIVP liner로 제작되어 있다. Fig. 2.에는 시험사이트내 지하수공의 배치와 현장추적자시험시 사용된 주입공(P1)과 관측공들(P2, P3, I1, I2, I3) 간의 거리를 도시하였다. P2, P3공은 P1공에서 거의 정서 방향, I1공은 정북 방향, I2공과 I3공은 서북 방향에 위치해 있다.

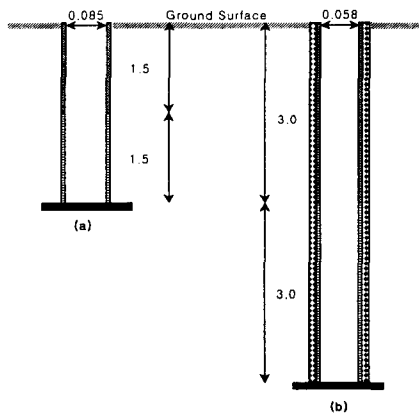


Fig. 1. Cross section of groundwater wells(unit: meters).

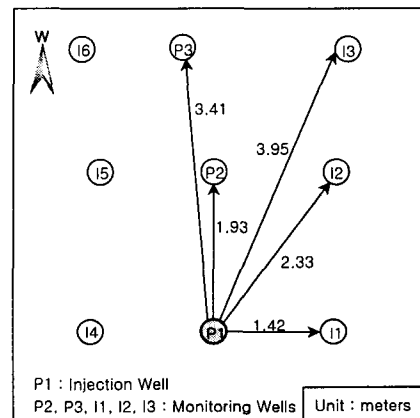


Fig. 2. Injection and monitoring wells at the test site.

2.2. 추적자와 시험방법

추적자시험에 이용될 추적자로 형광성 염료들 중에서 Rhodamine WT를 선택한 이유는 Rhodamine WT가 다른 형광성 염료들에 비해 최소검출능력, 광화학적·미생물학적 분해 비율, 흡착성, 저렴한 가격, 낮은 독성 등의 관점에서 널리 사용되는 보존적인 염료추적자이기 때문이다. Rhodamine WT의 벤토나이트 점토내 흡착율은 28% 정도로서 다른 염료들(Rhodamine B, Sulfo Rhodamine B)에 비해 매우 적은 흡착율을 나타낸다. Rhodamine WT를 추적자로 이용한 최근의 연구사례 중 충적 대수층이나 사질 대수층내의 지하수 오염연구가 성공적으로 수행된 바

있다(이상호 외, 2001).

시험기간 동안의 총 주입량은 14m³ 이었다. 추적자시험 과정은 먼저 주입공에 자동수위 측정기를 설치하여 투수시험을 실시한 후, 시험시 고려해야할 일정한 주입율을 산정하였다. 추적자용액인 Rhodamine WT를 혼합조에서 현장수와 혼합하여 50ppm의 혼합용액으로 제조한 후, 펌프를 이용하여 주입조로 양수하였다. 주입조에 밸브를 설치하여 주입수의 개폐를 조절하였으며, 주입조의 밸브와 주입공 사이에 유량계를 설치하여 추적자용액의 주입율을 일정하게 유지하였다. 추적자시험은 Rhodamine WT 50ppm 용액을 주입공(P1)의 지표면하 3.5m 지점에서 일정한 주입율(1.8ℓ/min)로 연속적으로 약 6일 동안 주입하면서 일정한 시간 간격으로 관측공(P2, P3, I1, I2, I3)에서 지하수를 채수하여 실내에서 자외선분광분석기(Lamda Bio 40)를 이용하여 추적자 농도를 측정하였다. 추적자용액의 실내분석은 부유물질들에 의한 입사광들의 산란으로 인한 분석값의 오차를 줄이기 위해 샘플시료를 24시간 침전시킨후 분석하였다.

2.3. 추적자시험 결과

자연수위 하부구간을 포함하는 즉, 포화대 구간을 포함하는 지하수공(P2, P3)과 포화대 구간을 포함하지 않는 비포화대 구간으로만 형성된 지하수공(I1, I2, I3)의 추적자농도가 매우 큰 차이를 나타내었다. 포화대의 특성을 가진 P2, P3공에서의 추적자농도는 6일 동안 초기주입농도의 6%와 3% 정도로 매우 적게 검출되었다(Fig. 3.). 비포화대의 특성을 가진 I1, I2공에서는 6일 동안 각각 초기주입농도의 75%와 45%에 이르렀다(Fig. 4.). 또한 농도이력곡선의 경향(Trend)이 P2-P3공, I1-I2공들 각각이 거의 유사하게 나타났다. 이러한 결과는 포화대와 비포화대 구간에서의 수리분산특성의 차이를 정성적으로 보여주고 있는 것이다. 시험기간동안 I3공에서는 추적자용액이 검출되지 않았다. 포화대를 포함하는 관측공(P2, P3)과 비포화대에만 관통된 지하수공(I1, I2) 사이에서 나타나는 추적자의 농도 차이의 원인은 관측공 내에 함양되는 지하수에 의해 추적자 용액이 희석(Dilution)되어 지며, 또한 추적자용액이 주입공에서 관측공으로 수송되는 과정에서 포화대 구간에 흐르고 있는 지하수에 의해 이류에 의한 역확적인 분산으로 농도가 감소한다. 그러나, 비포화대 구간에서는 추적자용액의 농도감소는 지속해서 추적자용액이 주입되는 동안 분자확산(Molecular diffusion)외에는 수리분산에 의한 농도감소요인이 거의 발생하지 않기때문에 포화대 구간에 비해 상대적으로 추적자용액의 농도가 매우 높은 것으로 사료된다. 이러한 시험결과 토양에 오염물이 연속적으로 일정하게 유입된다면 포화대보다는 비포화대 구간에서 오염물의 분산정도는 느리겠지만, 오염물의 농도가 더욱 높을 것으로 예상된다.

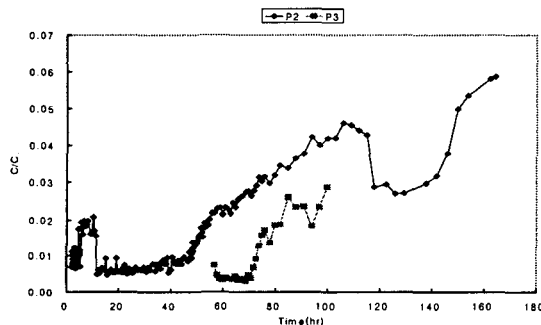


Fig. 3. Time-Concentration Breakthrough curves in P2 and P3 wells.

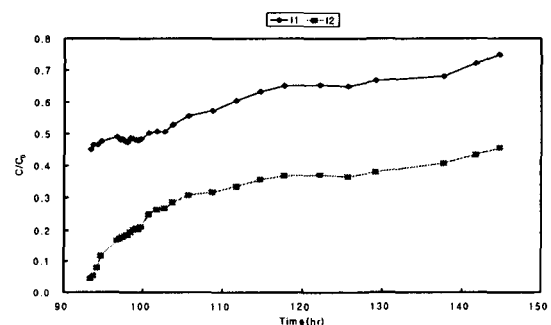


Fig. 4. Time-Concentration Breakthrough curves in I1 and I2 wells.

3. 결론

본 연구에서 실시된 현장추적자시험 결과, 포화대를 포함하는 관측공(P2, P3)과 비포화대에만 관통된 지하수공(I1, I2)에서 시험기간동안 채수된 추적자용액의 최대농도가 각각 초기주

입농도의 10%와 75%로서 상당한 차이를 나타내었다. 이러한 원인은 관측공 내에 함양되는 지하수에 의해 추적자 용액이 희석되어 지며, 또한 추적자용액이 주입공에서 관측공으로 수송되는 과정에서 포화대 구간에 흐르고 있는 지하수에 의한 역확적인분산으로 농도가 감소한다. 그러나, 비포화대 구간에서는 추적자용액의 농도감소는 분자확산이 주요인이 되므로 포화대 구간에 비해 상대적으로 농도감소가 매우 적은 것으로 사료된다. 이러한 시험결과 토양에 오염물이 연속적으로 유입된다면 포화대보다는 비포화대 구간에서 오염물의 확산속도는 느리겠지만, 오염물의 농도가 더욱 높을 것으로 판단된다.

4. 참고문헌

- 1) 이상호, 함세영, 우남철, 이철우, 2001, 지하수 추적자, 시그마프레스, 148p.
- 2) 이진용, 천정용, 이강근, 이민호, 윤정기, 2001, 다공질 천층 대수층에서의 추적자 이동 연구, 지질학회지, 제37권, 제2호, p.309-316.
- 3) *Irene Forrer and Roy Kasteel, Markus Flurry, Hannes Flühler, 1999, Longitudinal and lateral dispersion in an unsaturated field soil, Water Resources Research, 35(10), p.3049-3069.*
- 4) Rudolph, D. L., Kachanoski, R. G., Celia, M. A., Leblanc, D. R., Stevens, J. H., 1996, Infiltration and solute transport experiments in unsaturated sand and gravel, Cape Cod, Massachusetts: Experimental design and overview of results, Water Resources Research, 32(3), p.519-532.
- 5) Yoshio Tsuboyama, Sidle, R. C., Shoji Noguchi and Ikuhiro Hosoda, 1994, Flow and solute transport through the soil matrix and macropores of a hillslope segment, Water Resources Research, 30(4), p.879-890.