

### 3. 추적자 시험 (Tracer Tests)

#### 3.1 목적

추적자 시험은 크게 두 가지 목적을 가지고 수행된다. 하나는 지하 매질의 관심 있는 두 지점이나 영역사이의 연결성을 확인하고자 하는 것이고, 다른 하나는 대수층에서 용질의 이동 특성을 반영하는 물리·화학·생물학적 매개변수를 추정하고자 하는 것이다. 지하 매질의 연결성을 확인하는 목적 수행은 주로 카르스트 지형에서 이루어져왔고, 최근에는 암반대수층에서 관찰되는 큰 규모 단열의 연결성을 확인하는데에도 적용되고 있다. 보다 많은 추적자 시험이 두 번째 목적을 갖고 수행되고 있는데, 이는 자연에 노출된 여러 가지 오염물질이 어떤 과정과 경로를 통해서 지하 매질을 이동하는지 파악하고자 할 때 가장 결정적인 정보를 제공해준다. 특히, 최근에는 많은 나라에서 문제가 되고 있는 방사성 폐기물의 지하 저장과 관련하여, 방사성 폐기물 지하 저장소가 위치한 암반 대수층에서의 용질 이동 현상을 파악하고 결정하는 과정에서 제대로 행해진 추적자 시험 결과가 중요한 지표로서 큰 역할을 수행하고 있는 것으로 알고 있다.

현재 우리나라에서 수행되고 있는 많은 종류의 추적자 시험도 대부분 두 번째 목적인 대수층의 용질이동 특성을 파악하기 위해서 행해지고 있다. 이런 맥락에서 다음의 내용들은 이 두 번째 목적에 중심을 두고 서술하였다.

### 3.2 추적자 종류

종류	내용
이온	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 지하수를 연구하는데 있어서 가장 많이 사용되는 추적자다. 염소(<math>\text{Cl}^-</math>), 브롬(<math>\text{Br}^-</math>), 요오드(<math>\text{I}^-</math>), 황산이온(<math>\text{SO}_4^{2-}</math>)과 같은 음이온과 리튬(<math>\text{Li}^+</math>), 암모늄(<math>\text{NH}_4^+</math>), 마그네슘(<math>\text{Mg}^{2+}</math>), 칼륨(<math>\text{K}^+</math>)과 같은 양이온과 유기음이온이 있다.</li> <li>○ 대부분의 음이온은 대수층 매질에 영향받지 않지만, pH가 낮은 경우에는 주변의 점토광물과 이온 교환을 할 수도 있다. 반면에 양이온은 이온교환 과정을 통해서 점토 광물과 쉽게 반응하여 잘 사용되지 않는다.</li> <li>○ 주입이온의 농도는 현장에서 검출되는 농도가 배경농도보다는 크면서도 높은 농도에 의해 밀도효과가 일어나지 않을 정도이어야 한다.</li> <li>○ 지하수 전기전도도의 변화양상으로 회수되는 추적자의 농도를 측정할 수 있으므로, 불필요한 실내 분석의 경비를 줄일 수 있다.</li> </ul>
염소	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 염소는 밀도효과를 피할 수 있고, 점토가 적은 곳에서 유용하다.</li> <li>○ 배경농도가 높기 때문에 먼 거리의 관측정에서 측정할 수 있는 농도를 제공하기 위해서는 많은 양이 사용되어야 한다. Davis 외(1980)는 밀도효과를 영향을 줄이기 위해서는 염소의 주입 농도가 3000ppm을 넘지 말아야 한다고 보고했다.</li> <li>○ 비교적 보존성이 좋은 추적자이며, 가격이 저렴하고 안정적이다.</li> <li>○ 농도는 적정방법, 전기전도도 측정, 이온선택전극으로 측정할 수 있다.</li> </ul>
브롬	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 자연상에서 1ppm 이하의 매우 낮은 배경농도를 갖고있기 때문에 염소보다 낮은 농도의 주입용액을 사용할 수 있다.</li> <li>○ 가장 일반적으로 널리 쓰여지는 이온 추적자이다.</li> <li>○ 생물학적으로 안정하고, 침전이나 흡착에 대해서도 안정하다.</li> <li>○ 검출하고 분석하는 방법은 전기전도도나 이온선택전극을 이용한 저렴한 방법에서부터 중성자활성 분석 또는 액체크로마토그래피와 같은 다소 비싼 방법 에까지 다양하다.</li> </ul>
요오드	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 자연상에 존재하는 배경농도가 0.01ppm 이하로 매우 낮다.</li> <li>○ 요오드는 수착되는 정도가 매우 심하고, 미생물의 활동에 영향받는다.</li> </ul>

종류	내용
염료	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 가격이 비교적 저렴하고, 사용하기 쉬우며 효과적이기 때문에 지표수와 지하수를 추적하는데 많이 사용되어져 왔다.</li> <li>○ 일반적으로 사용되는 염료 추적자에는 fluorescein, pyranine, lissamine FF, rhodamine B, rhodamine WT, 과 sulfo rhodamine B를 포함한 형광염료와 photine CU와 amino G acid를 포함한 광학 표백제가 있다.</li> <li>○ 검출도가 매우 높고, 독성이 낮으며, 현장에서의 빠른 분석이 가능하다.</li> <li>○ 부유 물질, 온도, pH, 탄산염 함유량, 염분 그리고, 발사된 형광 빛이 다른 광물에 흡수되는 “quenching”, 흡착, 광화학적, 생물학적 감소에 따라 측정되는 염료의 농도가 달라진다는 단점이 있다.</li> <li>○ 매우 낮은 농도까지 감지될 수 있기 때문에 주입 농도가 낮아도 된다. (지하를 통해 이동하는 거리가 1Km 일 때 60g의 염료를 사용하라고 추천한다.)</li> <li>○ 시료를 채취하지 않고 직접 filter fluorimeter를 사용하여 형광도를 측정하기도 하지만, 대부분의 경우 시료를 채취한 후 농도를 측정한다. 채취된 시료는 pH가 5-11이 되게 표준용액을 넣어 완충시켜야 하고, 부유물이 있으면 원심분리기로 분리하는 것이 좋다. 염료를 주입하고 회수할 때는 태양광선을 차단하고 해야 하며, 될 수 있으면 시료를 채취하자마자 분석해야 좋다.</li> </ul>
Rhodamine WT	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 오렌지색을 띠며, 다른 염료에 비해 가장 보존적인 추적자로서 측정 가능한 단위가 0.1ppb로 염료 중에서 가장 낮고, 광화학적, 생물학적 붕괴비와 흡착이 작아 많은 정량적인 자료를 얻고자 하는 추적자 시험에서 많이 쓰인다.</li> <li>○ 보통 카르스트 지역이나 투수도가 좋은 모래나 자갈 층에서 많이 사용된다.</li> </ul>
Fluorescein	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ uranin, sodium fluorescein, pthalien으로도 불려지는데, 녹색을 띤다.</li> <li>○ 대부분의 녹색 염료와 같이 이 염료도 배경농도가 매우 높아 분석 민감도가 떨어지고, 광화학적 감쇄와 흡착이 높아 주입용액의 양이 많아야 한다는 단점이 있다. 그리고 pH에 심하게 영향받아 산성 하에서 색이 연해지고, 염분이 높을수록 형광이 약해지며, 산화물질과 부유 물질에 영향받는다.</li> </ul>

종류	내용
포자 (Spores)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 관정에서 사용 시 지속적인 양수와 여과작용 필요</li> <li>○ 평균지름이 33미크론이고, 구에 가까우며, 밀도가 물보다 약간 높아 물 속에 떠있게 하기 위해서는 약간의 교란이 필요</li> <li>○ 물의 화학적 성분에 영향을 받지 않으며, 점토나 실트에 흡착되지 않으므로, 포자의 이동속도는 지하수의 이동 속도와 거의 같다.</li> <li>○ 주입 농도를 아주 높게 할 수 있으며, 건강상의 위협은 없다.</li> <li>○ 현미경하에서 쉽게 검출할 수 있고, 최소한 다섯 개의 염료를 사용할 수 있어 동시에 여러 개의 추적이 가능</li> <li>○ 포자를 준비하고 채취, 분석하는데 많은 시간이 필요</li> <li>○ 오염된 물에서 잘 살아남는다는 장점이 있지만, 유속이 느리거나, 침전물이 많은 경우에는 어려움이 있다.</li> </ul>
박테리아	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 박테리아는 배양하기 쉽고, 검출하기가 간단하므로 가장 일반적으로 쓰이는 미생물 추적자이다.</li> <li>○ 지금까지 사용된 박테리아에는 <i>Escherichia coliform</i>(E. coli), <i>Streptococcus faecalis</i>, <i>Bacillus stearothermophilus</i>, <i>Serratia marcescens</i>, 그리고 <i>Serratia indica</i>가 있다.</li> <li>○ 압을 걸어서 관정에 주입하는 것이 일반적이고, 베일러나 수동 펌프를 이용해서 시료를 채취하며, 시료는 분석하기 전까지 냉장 보관한다.</li> <li>○ 추적자로 사용한 박테리아와 이미 존재해 있던 박테리아를 구분하기 위한 부수적인 실험필요</li> <li>○ 표면에 흡착될 수도 있어 해석할 때 이것을 고려해야 한다.</li> <li>○ 인간에게 해롭지 않은 박테리아를 사용해야 한다.</li> </ul>

### 3.3 추적자 선택

추적자를 선택할 때는 일반적으로 추적자 시험의 목적, 매질의 형태, 추적자 농도의 측정범위, 시료의 채취와 분석방법, 추적자의 물리, 화학, 생물학적 성질, 독성, 유용한 자금 등을 고려해야 한다.

#### 1) 시험의 목적

단순히 지하수의 흐름 경로를 알아보기 위해서는 어떤 종류의 추적자를 써도 무관하지만, 지하수의 속도, 공극률, 분산계수를 구하고자 할 때는 보존성 추적자를, 용질의 속도와 분배계수를 구하고자 할 때는 비보존성 추적자를 사용하는 것이 바람직하다. 지하수 충전을 알고자 할 때는 환경추적자를 지하수의 연도를 알고자 할 때는 방사성핵종을 사용해야 한다.

#### 2) 매질의 형태

카르스트 지형의 경우 형광염료, 포자, 삼중수소를 주로 사용한다. 다공질 매질에서는 다양한 추적자를 사용할 수 있으나, 염료나 입자물질 추적자는 거의 사용하지 않는다. 파쇄암반에서 역시 다양한 추적자를 사용할 수 있다. 그러나 파쇄암반에서 염료와 입자물질의 추적자는 때에 따라서만 유용할 수 있다.

#### 3) 추적자 농도의 측정 범위

추적자를 선택하기 전에 그 지역의 지하수에 분포하는 추적자의 배경농도를 알아두는 것이 올바른 추적자를 선택하는데 도움이 된다. 그리고 주입된 추적자가 지하수와 혼합하여 희석되는 현상을 고려하여 주입하는 추적자의 농도와 양을 결정해야 하는데, 이 때는 주입형태, 주입정과 관측정과 거리, 분산도, 공극률과 수리전도도 등을 고려한다. 그리고 추적자의 감지 한도가 ppm 또는 ppb인지 아니면 ppt인지 생각하고, 같이 사용하는 다른 추적자나 자연적으로 존재하는 물질에 의한 간섭이나 그 지역 지하수의 수화학도 고려하여 추적자를 선택해야 한다.

#### 4) 시료의 채취와 분석방법

특정 추적자를 현장에서 비교적 쉽게 채취할 수 있는 장비가 구비될 수 있는지 확

인한 후 추적자를 결정해야 함은 물론이고, 채취된 시료로부터 추적자의 농도나 양을 정량적으로 측정할 수 있는 장비가 주변에서 접근가능한지 확인할 필요도 있다. 물론 분석비가 추적자 시험의 경비의 상당 부분을 차지해서는 안된다. 현재 한국에서는 몇 가지 음이온을 추적자로 주로 사용하고 있는데, 음이온은 추적자로서 시료를 채취하고 분석하는데 그다지 많은 비용이 들지 않고, 비교적 간단하기 때문에 추천할 만한 추적자다.

## 5) 추적자의 성질

지하수와 혼합되어 지하수의 밀도나 점성에 영향을 주는 추적자는 그 농도와 양을 조절해야한다. 예를 들어, 염소의 경우 농도가 3000ppm 이상으로 높으면 밀도효과를 낼 수 있다. 추적자의 용해도, 지하수내에서의 안정성, 흡착과 관련한 성질 등은 추적자를 포함한 지하수의 유동에 영향을 준다. 그러나 다른 측면에서는 지하수내에서 이온 교환, 흡착, 탈착, 생분해, 방사성 붕괴 등을 겪는 추적자를 사용해서 이러한 물리·화학·생물학적 반응을 하는 특정 오염물의 유동을 보다 잘 이해할 수도 있다.

## 6) 독성

추적자를 선택할 때 가장 먼저 고려해야 할 부분이 인체에 대한 독성, 병원성을 고려해야 한다. 몇 가지 박테리아나, 방사성핵종, 일부 음이온은 관련 문헌을 참고하여 법적인 규제를 벗어나지 않는 범위 내에서 행해져야 한다. 우리가 많이 쓰는 음이온 중에서 브롬은 Dreisback(1955)과 Von Oettingon(1958)의 의학 연구에 의하면 성인의 경우 혈액에 포함된 양이 2.4g을 넘으면 위험하다고 한다. 이것은 200ppm의 브롬 농도를 갖는 지하수 12L를 마셨을 때의 양인데, 지속적으로 브롬을 함유한 물을 접할 경우 의학적으로 위험할 수도 있으므로 많은 양을 사용하는 것은 자제해야 하겠다.

### 3.4 추적자 시험의 종류와 수행방법

추적자 시험은 관심의 대상이 되는 현장에서 이루어지므로 시험조건을 제어하기가 매우 힘들다. 체계화된 감시망을 구축하고 지속적으로 모니터링하기에는 경제적 부담도 크고, 장기간의 시간이 소요된다. 그러나 현장시험 없이는 실내시험의 결과나 이론적 연구가 지지되기 힘들다. 결국은 다른 시험과 마찬가지로 추적자 시험도 현장 적용성을 목적으로 하기 때문이다. 추적자 시험은 크게 단공 시험과 다공 시험으로 나눌 수 있다. 아래는 현장추적자 시험의 예이며, 가장 많이 사용되는 추적자종인 이온이나 염료를 이용한 시험에 초점을 맞췄다.

#### 1) 단공 추적자 시험 (Single-well tracer tests)

##### (1) 단공 주입-양수 시험 (Single-well injection-withdrawal test)

이 방법은 Mercado가 1966년에 사암 대수층에서 주입된 추적용액의 퍼져 나가는 형태를 연구하기 위해서 처음으로 제시한 방법이다. 지하수 흐름 조건은 방사상의 발산과 수렴이고, 자연적인 지하수 흐름속도를 무시할 정도로 크다고 가정한다.

이 방법의 수행 과정은 다음과 같다.

- ① 한 관정에 일정한 농도를 갖는 추적용액을 일정한 속도로 얼마간 주입한다. 이때 주입용액의 농도, 주입속도, 주입시간과 주입량을 기록해둔다. 만약에 주위에 관측정이 가까운 거리에 위치하며, 추적자용액으로 이용할 많은 양의 물을 확보할 수 있다면, 주입단계 동안에 관측정에서의 농도변화 양상을 관찰하여 농도 이력곡선을 구할 수 있다.
- ② 추적용액의 주입이 끝나자마자 바로 같은 관정에서 주입속도와 같은 속도로 양수한다. 주입과정이 끝나고 바로 양수과정으로 넘어 가려면 시간을 절약해야 하는데, 이는 농업용 양수기를 사용하여 양수기의 입수구와 출수구에 연결된 호스만 서로 바꾸어 주고 바로 가동하면 충분히 시간을 절약할 수 있어서 이때 소요되는 시간을 거의 무시할 수 있다. 그렇지만 입수구와 출수구를 교체하는데 걸린 시간을 기록해 두고 시험결과 해석에 필요하다면 오차원인으로 첨가할 수도 있다. 농업용 양수기는 양수기 안에 물이 가득차 있어야만 물을 끌어

올릴 수 있다.

- ③ 양수하면서 농도 변화를 관찰한다. 농도 측정에 사용되는 시료는 양수기를 통과하지 않은 물을 채취하도록 배관을 배열하는 것이 바람직하다.

## (2) 표류-양수 시험 (Drift-pumpback test)

추적자를 한 관정에 주입시킨 후 어느 정도의 시간이 흐른 후에 다시 같은 관정에서 양수를 하면서 회수되는 지하수의 추적자 농도 변화를 관찰한다는 점에서 단공 주입-양수 시험과 비슷하다. 그렇지만, 앞의 방법과 비교해서 표류-양수 시험의 가장 큰 특징은 추적 용액의 주입방법에 있다. 앞의 방법이 추적 용액을 압을 가하여 주입함으로써 자연적인 흐름 장을 교란시키는 반면에, 이 방법은 추적자를 주입하는 과정에서 흐름 장을 교란시키지 않고 자연적인 수두구배 하에서 추적자를 함유한 지하수가 흘러가게 한다.

보다 자세한 수행 과정은 다음과 같다.

- ① 관정의 자연 수위와 총 깊이를 측정한다.
- ② 주입호스를 관정 바닥까지 내린 후 수위가 안정될 때까지 기다린다.
- ③ 수위가 안정되면 수면 아래에 잠겨 있는 호스의 체적과 같은 양의 추적 용액을 천천히 주입한다.
- ④ 수위가 다시 안정되면 호스를 꺼내어 어느 정도의 시간까지 자연 수위구배 하에서 흘러가게 한다. 호스와 추적 용액을 주입한 후 호스를 빼내는 과정에서 자연 수두구배를 교란시키지 않도록 주의를 기울여야 한다.
- ⑤ 얼마간의 시간이 흐른 뒤, 수중 펌프나 농업용 펌프 등을 이용해서 양수를 하고 회수되는 지하수의 농도 변화를 관찰한다.

Pickens and others(1981)에 의하면 이 방법은 근접거리에서만 유용한 것으로 보인다. 이 방법은 보통 피압대수층에서 유의미하지만, 양수량을 조절하여 대수층 두께에 대한 수위강하가 크지 않게 유지시켜 준다면 자유면 대수층에서도 유의미한 실험결과를 얻을 수 있을 것이다. 그리고 시험 관정은 대수층을 완전 관통해야 수직 방향의



수리전도도에 의한 오류를 피할 수 있다. Hall et al.(1991)은 관정에 의해서 생기는 “velocity shadow”의 영향을 받지 않는 거리만큼 이동시켜야 한다고 했다. 만약 그렇지 않았을 때, 계산된 지하수의 속도는 실제보다 작은 값을 보여준다. 회수되는 지하수의 추적자 농도는 다공 추적자 시험(multi-well tracer tests)의 경우 보다 열 배정도 작은 값을 보여주기 때문에 표류-양수 시험에서의 주입 농도는 다공 추적자 시험의 그것보다 커야 한다.

### (3) 점희석 시험 (Point-dilution test)

모든 추적자 시험에서 주입정에 추적 용액을 주입하는 행위는 점희석 시험을 수행할 기회를 제공하므로, 이 추적자 시험은 다른 추적자 시험 전에 실시하여 보다 자세하고 유용한 정보를 제공해준다. 이 추적자 시험방법은 다양한 깊이에서 농도변화를 관측하여 관측정 주변 수리전도도의 수직 측면도를 얻을 수 있다. 일반적으로 이 시험은 관정내의 수직적인 혼합을 피하기 위해서 격리된 구간에서 실행하는 것이 전통적인데, 관정이 크고 수평 이송속도가 지배적일 때는 격리된 구간이 아니더라도 수직적인 혼합은 무시될 수 있다고 가정한다.

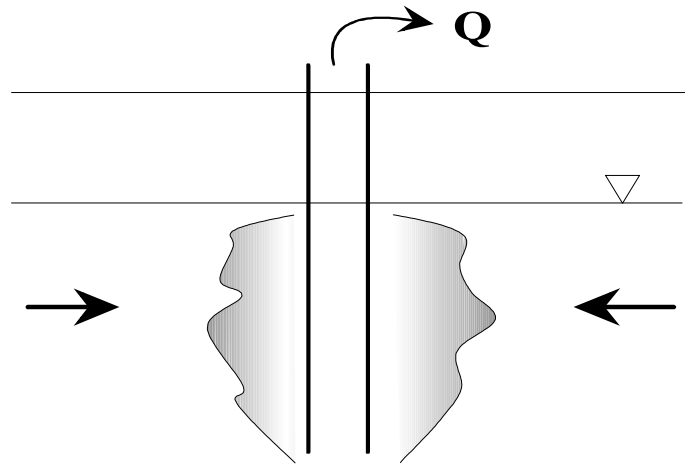
수행방법은 다음과 같다.

- ① 시험하고자 하는 관정의 자연 수위를 측정한다.
- ② 관정이 무너져 있을 수도 있으므로 관정의 총 깊이를 확인한다. 그리고 나서 주입 호스와 다중 시료 채취기를 관정 바닥까지 내린 후 수위가 자연수위 또는 거의 정상상태로 회복될 때까지 기다린다. 대부분의 경우, 주입 호스를 내린 후 수위가 자연수위로 회복될 때까지 시간이 많이 걸리므로 어느 정도 수위가 안정되었다고 판단될 때까지만 기다리면 된다. 수위 회복에 걸리는 시간을 기록한다. 그리고 가급적 호스는 두께가 얇은 것을 사용한다.
- ③ 안정수위 아래에 잠겨 있는 주입 호스의 내부 용량과 똑같은 양의 일정한 농도를 갖는 추적 용액을 준비한 후, 천천히 호스 안으로 주입한다.
- ④ 추적 용액을 주입한 후 앞서 기록한 수위회복에 걸리는 시간만큼 기다렸다가 주입 호스를 밖으로 꺼낸다. 호스의 아래 부분에 추를 매달아 호스가 올라오면

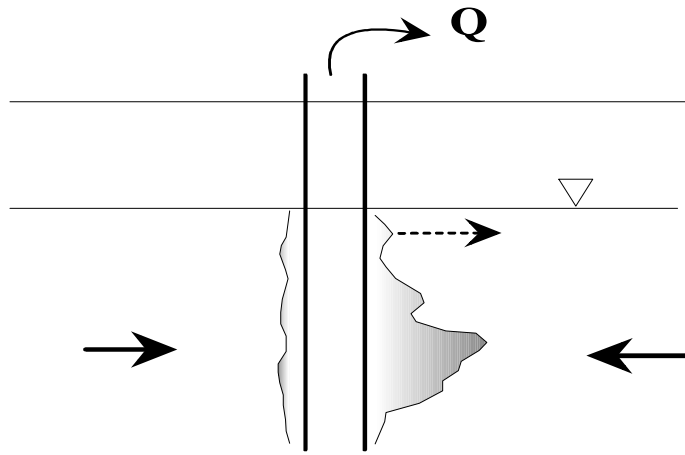
서 관정 안의 용액을 혼합시킬 수 있게 해주면 좋다.

- ⑤ 주입 호스를 관정에서 제거한 다음 다중 시료 채취기나 이에 상응하는 장치를 이용하여 깊이에 따른 농도감소 경향을 관측한다.

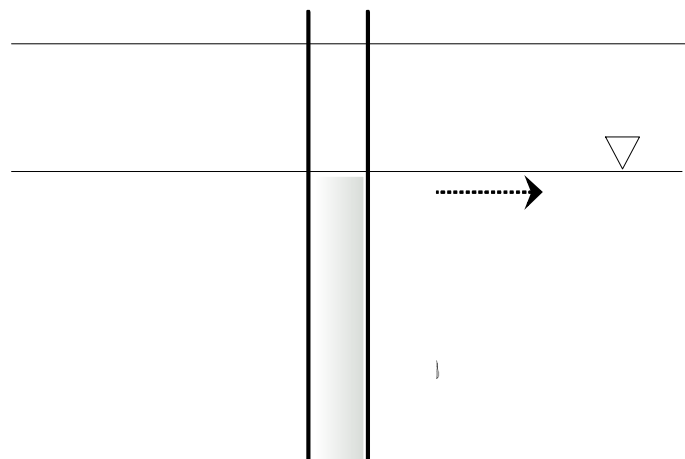
점희석 시험에서 가장 신경을 써야 할 부분은 주입된 추적 용액이 관정 안의 지하수와 빠르고 고르게 혼합하도록 하는 것이다. 그리고, 다양한 깊이에서 농도변화를 관찰하는 과정에서 관정 내에서의 수직적인 혼합이 유발될 수도 있으므로 다중 시료 채취기를 이에 알맞게 고안해야 할 것이다. 수직적인 혼합을 피하는 가장 좋은 방법은 경제적인 문제가 해결된다면 농도변화 감지 센서를 원하는 깊이 마다 설치해 두는 것이다.



a) 주입-양수 시험



b) 표류-양수 시험



c) 점회석 시험

그림 3.1 단공 추적자 시험

## 2) 다공 추적자 시험 (Multi-well tracer tests)

### (1) 자연 구배 추적자 시험 (Natural gradient tracer test)

적은 양의 추적자를 지하수계로 유입시켜 지하수의 자연적 흐름에 따라 추적자가 흐르도록 하여 그 흐름을 파악한다. 치밀한 샘플링 지역망 구축이 요구된다. 특별한 장비의 설치가 요구되지 않는다. 그러나 장기간의 시간이 요구되므로 주입정과 관측정 사이의 거리가 먼 경우에는 자제하는 것이 좋다. 캐나다의 Borden Landfill Site와 미국의 Cape Cod Site가 이런 시험의 대표적 예이다. 이 시험은 한 개의 주입정과 한 개 이상의 관측정이 필요하다. 관측정은 주입정의 하류 부에 위치해야하며, 관측정과 주입정은 수두구배 방향으로 직렬로 배열되는 것이 좋지만, 이것은 그다지 쉽지 않은 게 현실이다. 직렬 배열의 경우, 수리전도도와 대수층의 두께, 그리고 유효 공극률은 몰라도 평균선속도를 구할 수 있다.

이 시험법의 수행과정은 다음과 같다.

- ① 적당한 양의 추적 용액을 준비한다.
- ② 순간 주입일 때는 단공 시험인 표류-양수 시험이나 점희석 시험과 같은 방법으로 추적용액을 주입정에 주입한다. 물론, 시험의 목적에 따라서 주입하는 방법은 달라질 수 있지만, 잊지 말아야 할 것은 자연 구배 추적자 시험에서는 추적 용액을 주입하는 과정에서 자연적인 수두 구배를 교란시켜서는 안된다는 것이다. 따라서, 주입량과 주입 속도 등을 잘 고려하여 이를 수행해야 한다. 연속적인 주입도 가능하지만, 이를 수행하기 위해서는 많은 양의 물을 확보해야 하는 어려움과 수두 구배를 교란시키지 않는데 보다 많은 어려움이 따르므로 자연 구배 추적자 시험에서는 피하는 것이 좋다.
- ③ 주입정의 하류부에 있는 관측정에서 지하수의 농도 변화를 관측한다. 이때 역시 지하수를 회수하는 과정에서 자연 수두 구배를 교란해서는 안되므로 회수하는 지하수의 양을 최대한 줄일 수 있는 방법을 택한다. 베일러를 이용한 시료 채취는 육체적인 어려움과 베일러를 내리고 올리는 과정에서 관정 안의 지하수를 혼합시키는 일을 하므로 그다지 좋은 방법은 아니다. 진공펌프와 같은 소형 펌프를 이용하여 일정한 깊이에 시료채취 튜브를 위치시킨 후 시료를 채취하여

농도를 측정하는 것이 바람직하다. 소형 펌프에 여분이 있으면, 한 개의 관측정에 여러 깊이의 시료를 채취하여 시간과 수직 공간에 따른 농도의 분포를 구하는 것도 아주 유용한 자료를 제공해 줄 것이다.

## **(2) 가압 구배 추적자 시험 (Forced gradient tracer test)**

### **a. 발산 흐름 추적자 시험 (Divergent flow tracer test)**

이 방법은 일정한 농도의 추적 용액을 주입하므로써 정호 주위에 천이방사상흐름(transient radial flow)을 만들어 주입정 주변에 방사상으로 배열된 여러 개의 관측정에서 농도 변화를 관찰하는 방법이다. 이 시험을 수행하기 위해서는 많은 양의 물이 확보해야한다는 어려움이 있다.

- ① 주변의 지하수를 양수하여, 큰 용량의 물탱크에 지하수를 확보한 후 이것으로 추적 용액을 만든다.
- ② 주입호스를 내린 다음 지하수위가 안정되면, 추적 용액을 주입한다. 물탱크 두 개를 준비하여 하나는 추적 용액으로, 다른 하나는 추격용액(chase fluid)으로 사용하면, 보다 작은 양의 추적자를 사용하여 시험을 수행할 수 있고, 환경에도 도움이 된다.
- ③ 방사상으로 배열된, 또는 임의로 배열된 주입정 주변의 관측정에서 농도변화를 관찰한다.

### **b. 수렴 흐름 추적자 시험 (Convergent flow tracer test)**

양수정에서 지속적으로 양수하여 방사상의 수렴 흐름 하에서 실행하는 방법이다. 많은 양의 물을 확보할 필요가 없다는 점에서 발산시험법보다 수행하기가 쉽다.

- ① 양수정에서 시험이 끝날 때까지 지속적으로 양수한다. 이 과정에서 추적 용액을 만들기 위한 물을 확보한다. 지표로 양수된 물은 시험영역으로 다시 충전되

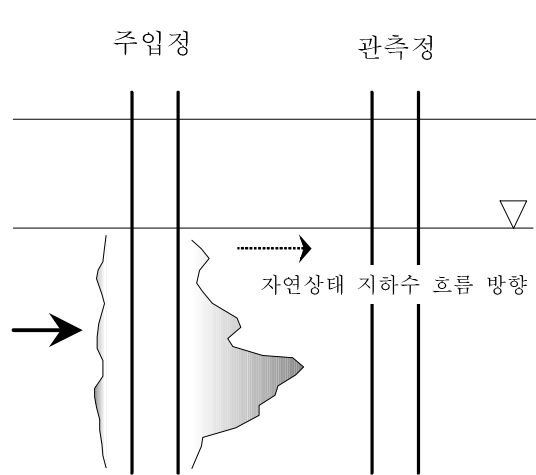
지 않는 곳으로 버린다. 양수비는 시간에 따라서 수위가 강하함에 따라 변하기 때문에 주기적으로 이를 기록한다.

- ② 양수정과 관측정에서의 수위가 안정되면, 주변의 한 관정에 추적용액을 천천히 주입한다.
- ③ 양수호스의 우회밸브로 시료를 채취하여 농도 변화를 관찰한다.

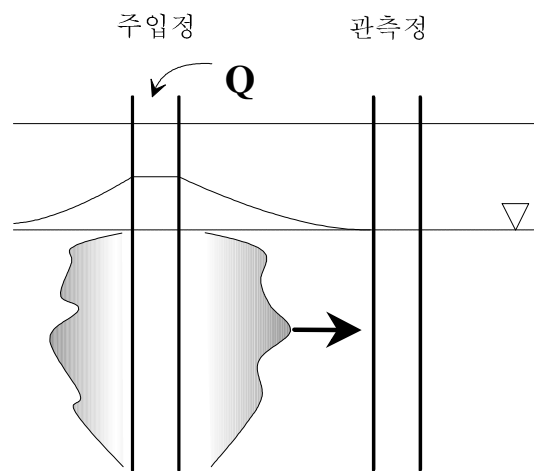
### c. 재순환 추적자 시험 (Recirculating tracer test)

정상상태를 유지하기 위해 한 공에서는 양수하고 다른 공에서는 같은 속도로 주입한다. 추적자를 지속적으로 같은 농도로 주입하고, 양수정에서는 이를 측정한다. 발산 시험에서처럼 많은 양의 물을 미리 확보할 필요가 없다는 장점이 있다. 투수성이 좋은 대수층계에서 수백 미터 내외에서 수행 가능하다. 그러나 관측정이 하나이므로 실험값의 질이 좋지 않다. 열극이 있는 곳에서 팩커를 이용하여 추적자 시험을 할 수 있다. 다른 시험방법보다 더욱 숙련된 기술이 요구된다.

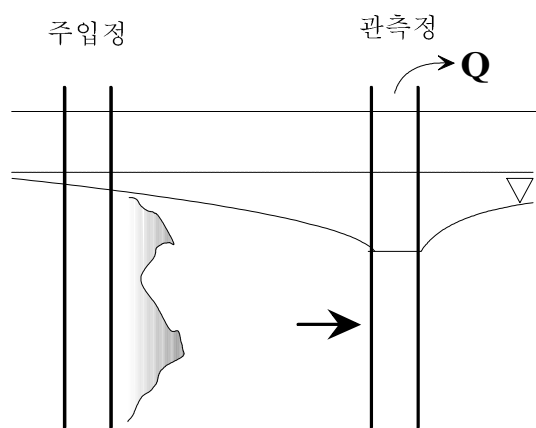
- ① 두 개의 관정중 한 관정에서는 양수를 시작하고, 양수된 물은 다른 관정으로 주입한다.
- ② 펌프와 주입정 사이의 배관에 수위가 안정되었을 때 추적자를 일정하게 주입할 수 있게 우회밸브를 내어 추적자가 담겨 있는 용기와 연결되어 있어야 한다.
- ③ 수위가 안정되면 일정한 속도로 추적자를 주입한다. 지속적으로 추적자를 주입하게 되면, 서로 다른 유선을 통해 다른 속도로 이동하면서 생기는 분산의 영향을 확실히 알 수가 없으므로, 이러한 분산에 대한 민감도를 높이기 위해서 순간적인 추적자 주입이 바람직하다.
- ④ 양수정과 펌프 사이의 호스에 있는 시료를 채취할 수 있는 우회밸브로부터 시료를 채취하여 농도변화를 관찰한다.



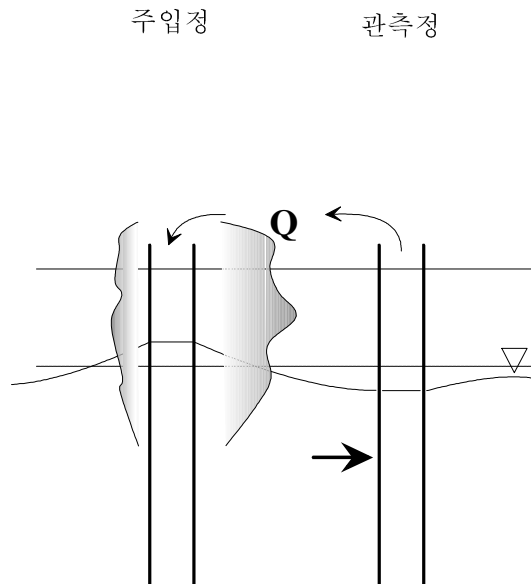
a) 자연구배 추적자 시험



b) 발산 흐름 추적자 시험



c) 수렴 흐름 추적자 시험



d) 재순환 추적자 시험

그림 3.2 다공 추적자 시험

### 3.5 장비

다음의 시험 장비는 추적자로 가장 많이 이용되는 이온을 사용하는 경우에 초점을 두고 나열하였으며, 현장의 특성에 따라 여러 가지 다른 장비를 쓸 수 있을 것이다.

구분		장비
공통 장비		추적자, 혼합탱크, 유량계(디지털, 아날로그), 주입호스, 자동 수위관측기(또는 수위계), 선택적 이온전극, EC meter, 비커, 스탠드, 증류수, 시료병, 매직, 아이스박스
추 적 자 주 입	가압 주입	주입펌프, 연결호스(펌프-혼합탱크), 발전기
	팩커 이용 주입	팩커, 콤프레서(또는 헬륨탱크, 고압펌프), 압력 게이지, 고압연결튜브(팩커-콤프레서, 팩커-팩커), 발전기
시 료 채 취	자연 채취	진공펌프, 베일러
	양수 채취	양수펌프, 발전기, 우회밸브
	다중 채취	진공펌프, 시료채취튜브(다양한 길이),
기타		휘발유통, 엔진오일, 멀티탭, 배관장비, 렌치, 스페너, 테이프, 드라이버, 클램프, 의자, 줄자, 삽, 야전등



### 3.6 해석 방법

추적자 시험은 다른 많은 종류의 시험들과 마찬가지로 기본적으로는 자극-반응(stimulus-response) 기법이다. 이런 종류의 모든 실험들은 연구하고자 하는 계(system)를 교란시키고 나서 계가 주어진 자극에 어떻게 반응하는가를 관찰한다. 이런 반응을 분석하여 계에 대한 여러 가지 정보를 얻을 수 있다. 이런 의미에서 추적자 시험은 계에 추적자를 주입하는 자극과정과 계에서 추적자의 시간과 공간에 대한 반응과정으로 구성된다. 추적자의 시간과 공간에 대한 반응을 해석함으로써 구하고자 하는 여러 가지 매개변수들의 값을 얻을 수 있다 (Levenspiel, 1972).

추적자 시험의 결과를 분석하는 것은 수리시험의 결과를 분석하는 과정과 유사하다. 우선 적절한 모델을 선택하는 과정(진단; diagnosis)이 필요하고, 그 다음에 모델에 의해 계산된 농도 이력곡선이 실험에 의해서 관찰된 곡선과 잘 맞을 때 까지 모델의 매개변수들을 조정하는 과정(매개변수 추정; parameter estimation)이 필요하다.

해석해가 있는 모델의 경우, 매개변수 추정은 수리시험의 경우처럼 type curve matching을 통해서 쉽게 행해질 수 있다. 과거와는 달리 최근에는 반전기법을 이용해서 용질이동 특성을 결정하는 경우도 많아지고 있다. 접근법에 있어서의 유사함에도 불구하고, 추적자 시험의 해석은 수리시험의 해석보다 실질적으로 더 많은 어려움을 내포하고 있다. 가장 큰 어려움은 매질의 불균질성에 대해 유체 흐름과 용질 이동이 서로 다르게 반응한다는데서 비롯된다. 분산과 확산이 유체의 흐름에서 매질의 불균질성에 의한 영향을 걸러주는 경향이 있는 반면에, 추적자 시험에서는 용질이 주로 이송에 의해 영향 받기 때문에 매질의 불균질성에 의한 영향을 걸러주지 못한다. 이렇게 매질의 불균질성을 보다 현실적으로 반영하여 유체의 흐름과 용질의 이동을 모의하기 위해서 수치모델을 이용하기도 한다. 그러나 수치모델을 제대로 수행하기 위해서는 여러 가지 지질학적-, 지구물리적-, 그리고 수리적인 자료가 뒷받침되어야 하기 때문에 이 또한 쉬운 문제는 아니다.

그래서 대부분의 경우 간단한 이송-확산 방정식을 기본으로 하고 여기에 실험에 영향을 미치는 요소를 조금씩 첨가하여 실험 결과를 해석하려고 시도하고 있다. 이러한 과정에서 관정내에서의 혼합에 의한 영향, 기질로의 확산, 정체수(stagnant water)로의 확산을 이송-확산 방정식에 첨가되어 결과를 해석하려는 시도가 있었다. 어떤 경우는 한 개의 단열을 통한 유체와 용질의 흐름이 선호 경로를 따라서 형성된 여러

개의 통로를 통해서 이루어진다는 통로 모델(channel model)이 제시되어, 한 개의 단열을 여러개의 이송-확산 방정식을 따르는 통로의 합으로 해석을 시도하기도 하지만, 개개의 통로를 분리함에 있어서 어느 정도의 불확실한 독단이 개입한다는 문제점을 안고 있다.

다음에 제시된 각각의 추적자 시험에 대한 결과 분석방법은 지금까지 언급한 이 분야에 있어서의 많은 불확실성에 대한 문제들과 개인적인 성량의 한계로 인하여 일부 깨끗하고 명확한 기술이 되지 못한 점이 매우 유감이다. 이 점은 앞으로 계속되는 개정판에 보다 현실적이고 명확한 해석방법을 기술하도록 노력하겠고, 이 분야에 있어서 많은 여러분의 아낌없는 조언을 기다리고 있습니다.

## 1) 단공 주입-양수 시험 (Single-well injection-withdrawal test)

이 시험을 통해서 구할 수 있는 것은 분산도인데, 주입단계에서 방사상으로 다양한 거리의 관측점 또는 시료 채취점에서의 농도 이력곡선을 분석하여 구할 수도 있고, 양수단계에서 주입-양수정의 농도 이력곡선을 분석하여 구할 수도 있다.

### a. 양수-주입정에서의 농도변화 자료를 이용한 종분산도 추정

전체 대수층 두께에 대한 종분산도는 주입-양수정에서의 양수단계의 농도변화자료로부터 얻은 전체 주입부피에 양수부피의 비에 대한 상대적인 농도 그래프를 이용하여 다음 식으로부터 추정할 수 있다.

$$\alpha = \frac{3U_I^{1/2}[\Delta(U_P/U_I)]^2}{32\pi^{3/2}(b\theta)^{1/2}} \quad (3.1)$$

$U_I$  = 전체 주입부피[m<sup>3</sup>]

$U_P$  = 시간에 따른 양수부피[m<sup>3</sup>]

$\Delta(U_P/U_I)$  = 0.5C<sub>0</sub>에서의 점선과 C/C<sub>0</sub>=0.0과 1.0인 선과의 교차점사이의 무차원 양수부피 증가분[-]

$b$  = 대수층 두께[m]

$\theta$  = 공극률[-]

Gelhar와 Collins(1971)가 구한 양수단계에서 주입-양수정에서의 상대농도에 대한 해는 다음과 같다.

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \left( \frac{U_P}{U_I} - 1 \right) / \left[ \frac{16}{3} \frac{\alpha}{R} \left( 2 - \left| 1 - \frac{U_P}{U_I} \right| \left( 1 - \frac{U_P}{U_I} \right) \right) \right]^{1/2} \right\} \quad (3.2)$$

$R = (Qt/\pi b\theta)^{1/2}$  = 주입단계가 끝나는 순간의 평균 방사상 최전방 위치[m].

#### b. 관측정에서의 농도변화 자료를 이용한 분산도 추정

앞에서도 언급했듯이, 종분산도는 주입단계에서 관측정 또는 관측 점에서의 시간에 대한 상대 농도 이력곡선으로부터 추정할 수 있다.

$$\alpha = (3r/16\pi)(\Delta t/t_{0.5})^2 \quad (3.3)$$

$\Delta t$  =  $0.5C_0$ 에서의 접선과  $C/C_0=0.0$ 과  $1.0$ 인 선과의 교차점사이의 시간 증가분 [day],

$t_{0.5}$  = 거리가  $r$ 인 지점에서 상대농도가 주입농도의  $1/2$ 일 때의 시간[day].

#### c. 다중 시료 채취점에서의 농도변화 자료를 이용한 분산도의 수직 측면도 추정

주입 단계에서 같은 관측정에서 다중 시료 채취기를 이용하여 여러 가지 깊이에서의 농도이력곡선을 얻을 수 있었다면, 이 자료로부터 관측정 주변의 수직적 분산도 측면도를 다음 식을 이용하여 추정할 수 있다. 다음은 Gelhar와 Collins(1971)가 제공한 해로서, 유한한 관측정 반지름과 분자확산에 의한 영향을 포함한다는 장점이 있다.

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left\{ (r^2 - r_i^2) / \left[ 16\alpha \left( \frac{\overline{r_i^3} - r_w^3}{3} + \frac{D^*}{\alpha A_i} \frac{\overline{r_i^4} - r_w^4}{4} \right) \right]^{1/2} \right\} \quad (3.4)$$

$r_w$  = 관측정의 반지름[m],

$\bar{r}_i( = [(Q/b)_i t / \pi \theta]^{1/2} )$  = 시간  $t$ 에서  $i$ 번째 층의 평균 방사상 최전방 위치[m],

$A_i = (Q/b)_i / 2\pi \theta$  [m<sup>2</sup>/day]

$(Q/b)_i$  ( $= r^2 \pi \theta / t_{0.5}$ )는  $i$ 번째 층의 단위 대수층 두께당 유출량

## 2) 표류-양수 시험 (Drift-pumpback test)

이 시험의 결과를 해석하기 위해서는 대수층의 투계( $b$ )와 유효공극률( $n_e$ )을 알아야 한다. 대수층의 두께와 유효 공극율을 알고 있다면, 다음의 식을 이용하여 지하수의 이송속도를 구할 수 있다.

$$v = (Qt_p / \pi b n_e)^{1/2} / t_* \quad (3.5)$$

$Q$  = 양수율[m<sup>3</sup>/s],

$t_p$  = 양수하기 시작한 후 질량의 중심이 회수될 때까지 걸린 시간[day],

$n_e$  = 유효공극률[-],

$t_*$  = 표류시간[day],

이 식은 국지적 지하수의 속도가 매우 작아서 양수단계 동안에 양수에 의한 지하수의 흐름에 비해 무시될 수 있다는 가정을 도입했다.

만약 국지적 지하수의 속도가 무시될 수 없을 정도로 크면, 이를 무시할 경우 오차를 유발시킬 가능성이 있다. 따라서, 이때는 다음의 식을 이용하여 이송속도를 구할 수 있다.

$$v = \frac{(Q/\pi b n)^{1/2} t^{1/2}}{T} \quad (3.6)$$

$t = t_a - t_p$ ,

$T = t_a - t_i$ ,

$t_a$  = 질량 중심이 회수된 때의 시간[day],

$t_p$  = 양수하기 시작했을 때의 시간[day],  
 $t_i$  = 추적 용액을 주입했을 때의 시간[day].

이 식의 앞의 국지적인 지하수의 속도를 무시한 경우와 차이는 추적자를 포함한 지하수의 유동 시간이 표류시간과 양수시간을 포함한다는 것이다.

앞의 두 식, (3.5)과 (3.6)은 둘 다 대수층의 두께와 유효 공극률을 알아야 평균선속도를 구할 수 있다. 실제로 유효 공극률은 깊이에 따라서 그 값이 다를 수도 있고 일정하다고 하더라도 그 값을 제대로 구하기가 쉽지 않다. 현장의 시료로 실내실험으로 구한 공극률은 대개 유효 공극률이 아닌 전체 공극률을 나타내는 경우가 많다. 그러나 이 두 식과 Darcy의 법칙( $v = KI/n_e$ )을 이용하면, 두 개의 비선형 식을 얻을 수 있고, 이로써 알고자 하는 두 값인 평균선속도와 유효공극률을 구할 수 있다.

$$v = \frac{Qt}{\pi b T^2 KI} \quad (3.7)$$

$$n_e = \frac{\pi b K^2 T^2}{Qt} \quad (3.8)$$

### 3) 점희석 시험 (Point-dilution test)

Kearl et al.(1988)은 관정의 축에 수직으로 관통하여 흐르는 지하수의 속도,  $v^*$ ,를 point-dilution test의 결과로부터 다음 식을 이용하여 구할 수 있음을 보여주었다.

$$v^* = -(V/At) \ln(C/C_0) \quad (3.9)$$

$$v^* = v_m a \quad (3.10)$$

$V$  = 시험구간의 부피[ft<sup>3</sup>],  
 $A$  = 시험구간의 단면적[ft<sup>2</sup>],  
 $t$  = 시간[days],  
 $C$  = 시간  $t$ 일 때 추적자의 농도[ppm],

$C_0$  = 초기 추적자의 농도[ppm],  
 $v$  = 평균선속도[ft/day],  
 $a$  = 흐름 왜곡 인자(flow distortion factor)[-].

흐름 왜곡 인자는 관정의 수리전도도가 주변 대수층의 그것보다는 매우 크기 때문에 관정 주변으로부터 관정 안으로 지하수 흐름이 수렴하기 때문에 발생하는 것이다. 흐름 왜곡 인자는 스크린이나 자갈 팩과 같은 관정 구조에 대한 함수로서 관정 주변의 대수층이 잘 분급된 경우에 있어서 수리전도도는 그렇지 않은 경우에 비해 관정 설계구조에 덜 영향받는다. 실제로 잘 정의된 조건을 갖고 실행한 실내 실험과 컴퓨터 모의를 통해서 구한 흐름 왜곡 인자는 현장의 경우에 비해 작은 값을 보여준다. 그러나, 실제 평균선속도를 구하기 위해서는 흐름 왜곡 인자를 구해야 하는데, 관정의 깊이 마다 다르고 구하기도 쉽지 않기 때문에 일정하다고 가정하고 문제를 해결한다.

#### 4) 자연 구배 추적자 시험 (Natural gradient tracer test)

관측정에서의 농도 이력곡선 자료를 이용해서 type curve matching 방법을 이용해서 평균선속도, 유효공극률, 종분산도를 구할 수 있다. type curve matching은 상용화된 프로그램인 CATTI(Sauty and Kinzelbach, 1992)를 이용하면 쉽다. 자연적인 지하수의 흐름 방향을 알고, 주입정과 관측정이 수두구배 방향으로 직렬로 배열되어 있다면 1차원의 다음 해를 이용해서 변수값을 구해낸다.

$$C(x, t) = \frac{\Delta M}{2An_e \sqrt{\pi D_L t}} \exp\left[-\frac{(x-ut)^2}{4D_L t}\right] \exp(-\lambda t) \quad (3.11)$$

$\Delta M$  = 단위 단면적 당 주입한 추적자의 질량[kg],  
 $x$  = 주입정과 관측정 사이의 거리[m],  
 $A$  = 지하수 흐름의 단면적[m<sup>2</sup>],  
 $a_L$  = 종분산도[m],  
 $D_L (= a_L u)$  = 종분산계수[m<sup>2</sup>/s],  
 $u$  = 평균선속도[m/s],  
 $\lambda$  = 붕괴비[1/s].

지하수의 흐름 방향을 알고, 그 방향이 x축과 평행한 경우에는 2차원의 다음 해를 이용해서 변수값을 구할 수 있다.

$$C(x, y, t) = \frac{\Delta M}{4\pi mn_e \sqrt{\pi D_L D_T t}} \exp\left[-\frac{(x-ut)^2}{4D_L t} - \frac{y^2}{4D_T t}\right] \exp(-\lambda t) \quad (3.12)$$

$D_T (= \alpha_T u) =$  횡분산계수[m<sup>2</sup>/s],

$\alpha_T =$  횡분산도[m],

$m =$  대수층의 두께[m].

#### 5) 발산 흐름 추적자 시험 (Divergent flow tracer test)

아직 까지 이 시험 방법에서 시간에 따른 농도에 대한 해석해가 발표되지 않았다. 따라서 이 방법은 수치모델이나 추계적 모델로서 변수값을 구할 수 있다. Novakowski 외(1994)가 암반대수층의 단일 단열을 통한 용질의 이동을 발산 흐름 추적자 시험을 통해 수치적으로 분석한 예가 있다.

#### 6) 수렴 흐름 추적자 시험 (Convergent flow tracer test)

최근에 Moench(1989)가 라플라스 변형해(Laplace transform solution)를 발표하였다. CATTI에서는 수렴하는 흐름 장에서의 순간주입 추적자 시험에 대한 근사해가 제시되었다. Moench의 해로부터 컴퓨터를 이용하여 수치적으로 변수값을 구할 수도 있고, 보다 쉽게는 다음의 근사해를 이용해서 type curve matching 방법으로 CATTI에서 변수값을 구할 수 있다.

$$C(r, t) = \frac{\Delta M}{2Q \sqrt{\pi \alpha_L u t^{3/2}}} \exp\left(-\frac{(r-ut)^2}{4D_L t}\right) \exp(-\lambda t) \quad (3.13)$$

$r =$  방사상의 거리[m].

## 7) 재순환 추적자 시험 (Recirculating tracer test)

이 시험을 통해서 얻은 자료는 수치모델을 통해서 모의할 수 있는데, 그 결과를 분석하는 것은 그리 쉬운 일이 아니다. 농도 이력곡선의 모양은 앞서 언급했듯이 서로 다른 유선을 따라서 서로 다른 속도로 유동하는 추적자에 의해서 결정된다. 또한, 추적자를 포함한 지하수를 다시 양수정으로 주입하게 되므로 농도 이력 곡선은 약한 이중 첨점을 가지고, 꼬기가 아주 길어지는 것이 특징이다. 따라서, 자료를 해석할 때는 두 번째 첨점이 생기기 위한 상승부분에서 뒷부분은 제외하고 해석해야 한다.

## 3.7 참고문헌

- Davis, S. N., D. J. Campbell, H. W. Bentley and T. J. Flynn, 1996, *Ground Water Tracers*, NGWA, p. 200.
- Gelhar, L. W. and M. A. Collins, 1971, General analysis of longitudinal dispersion in nonuniform flow, *Water Resources Research*, Vol. 7, No. 6, pp. 1511-1521.
- Hall, S. H., S. P. Luttrell and W. E. Cronin, 1991, A method for estimating porosity and groundwater velocity, *Ground Water*, Vol. 29, No. 2, pp. 171-174.
- Hall, S. H., Spring 1993, Single well tracer tests in aquifer characterization, *Ground Water Monitoring Review*, pp. 118-124.
- Hoopes, J. A. and D. R. F. Harleman, 1967a, Dispersion in radial flow from a recharge well, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 72, No. 14, pp. 3595-3607.
- Keys, W. S. and Brown, R. F., 1978, The use of temperature logs to trace the movement of injected water, *Ground Water*, Vol. 16, No. 1, pp. 32-48.
- Leap, D. I. and P. G. Kaplan, 1988, A single-well tracing method for estimating regional advective velocity in a confined aquifer : Theory and preliminary laboratory verification. *Water Resources Research*, Vol. 24, No. 7, pp. 993-998.
- Levenspiel, O., 1972, *Chemical Reaction Engineering*, 2nd ed., New York, Wiley.
- Moench, A. F., 1989, Convergent radial dispersion: A laplace transform solution for



- aquifer tracer testing, *Water Resources Research*, Vol. 25, No. 3, pp. 439-449.
- Novakowski, K. S. and P. A. Lapcevic, 1994, Field measurement of radial solute transport in fractured rock, *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 1, pp. 37-44.
- Pickens, J. F. and Grisak, G. E., 1981, Scale-dependent dispersion in a stratified granular aquifer, *Water Resources Research*, Vol. 17, No. 4, pp. 1191-1211.
- Sauty, J. -P. and W. Kinzelbach, April 1992, CATTI, User's manual, interpretational ground water modeling center.