

# 지하수 환경영향평가

## 05. 지하수 수질과 오염

## 1. 지하수 수질과 영향 요소

일반적으로 수질은 물의 화학적 조성을 뜻한다. 땅속을 흐르는 지하수의 수질은 암석과 물의 화학적 반응, 환경적, 생물학적 프로세스 등의 자연적인 요인과 인간의 활동에 의해 큰 영향을 받는다.

### 지하수수질 영향요소

지하수 수질은 다음의 다양한 요인에 의해 영향을 받는다.

#### 1) 화학적 반응

지하수 수질을 결정하는 화학적 반응에는 흡착-탈착, 이온 교환, 침전-해리, 산화-환원, 가수분해, 방사성 붕괴 등이 있다. 이러한 화학적 변화는 복합적으로 일어나며 상호 간섭하게 되어 수리지질학적 환경에 영향을 미친다.

2) 환경적 영향: 지하수의 수질은 대수층의 지질, 기후 등에 따라 변화된다.

3) 생물학적 영향: 대수층에 존재하는 미생물의 활동에 의해 탈질화작용에서부터 황산염에 영향을 주는 등 지하수 수질은 생물학적 기작에 의해 영향을 받는다.

4) 인간에 의한 영향: 지하수 수질에 영향을 끼치는 여러 가지 요소들 중 인간의 활동이 가장 큰 영향요소이다. 인간의 활동이 지하수 수질에 미치는 영향은 상당하고, 회복하기도 어렵다는 것이 매우 심각한 문제이다. 인간에 의한 오염원들에는 폐수방류, 매립지, 광산, 농약살포 등 매우 다양하다. 인간의 활동에 의한 지하수오염원에 대해서는 다음 절에서 좀 더 자세하게 살펴보겠다.

### 수질 조사항목 및 수질기준

지하수 수질은 그 사용목적에 따라 상대적인 의미를 가진다. 다시 말해 수질기준에 따라 생활용수로 적합한 물일지라도 먹는 물로 적합하지 않을 수도 있다.

국내 지하수 수질기준은 지하수법 제20조에 근거, 「지하수의 수질보전 등에 관한 규칙」 제11조의 [별표 4]에 규정하고 있다. 비음용의 경우 일반오염물질 4개 항목과 특정유해물질 15개 항목으로 총 19개 항목에 대해 생활용수, 농·어업용수, 공업용수로 구분하여 지하수수질기준을 운영하고 있다. 음용의 경우 먹는물관리법에 따라 수질기준을 적용하고 있다. 지하수법에서 규정하고 있는 지하수 수질 조사항목과 수질기준은 <표 1>, <표 2>과 같다.

<표 1>. 지하수의 수질기준 (「지하수의 수질보전 등에 관한 규칙」 제11조의 [별표 4])

이용목적별 항목		생활용수	농·어업용수	공업용수
일반 오염 물질 (4개)	수소이온농도(pH)	5.8~8.5	6.0~8.5	5.0~9.0
	총대장균군	5,000 이하 (균수/100mL)	-	-
	질산성질소	20 이하	20 이하	40 이하
	염소이온	250 이하	250 이하	500 이하
특정 유해물질 (15개)	카드뮴	0.01 이하	0.01 이하	0.02 이하
	비소	0.05 이하	0.05 이하	0.1 이하
	시안	0.01 이하	0.01 이하	0.2 이하
	수은	0.001 이하	0.001 이하	0.001 이하
	유기인	0.0005 이하	0.0005 이하	0.0005 이하
	페놀	0.005 이하	0.005 이하	0.01 이하
	납	0.1 이하	0.1 이하	0.2 이하
	6가크롬	0.05 이하	0.05 이하	0.1 이하
	트리클로로에틸렌	0.03 이하	0.03 이하	0.06 이하
	테트라클로로에틸렌	0.01 이하	0.01 이하	0.02 이하
	1,1,1-트리클로로에탄	0.15 이하	0.3 이하	0.5 이하
	벤젠	0.015 이하	-	-
	톨루엔	1 이하	-	-
	에틸벤젠	0.45 이하	-	-
	크실렌	0.75 이하	-	-

(단위: mg/L)

비고

- 다음 각 목의 어느 하나에 해당하는 경우에는 염소이온기준을 적용하지 아니할 수 있다.
  - 어업용수
  - 지하수의 이용 목적상 염소이온의 농도가 인체에 해가 되지 아니하는 경우
  - 해수침입 등으로 인하여 일시적으로 염소이온 농도가 증가한 경우
- 농·어업용수 및 공업용수가 생활용수의 목적으로도 이용되는 경우에는 생활용수의 수질기준을 적용한다.



<표 2> 먹는물의 수질기준 ('먹는물 수질기준 및 검사 등에 관한 규칙' 제 2조 관련 [별표 1])

1. 미생물에 관한 기준
가. 일반세균은 1mL 중 100CFU(Colony Forming Unit)를 넘지 아니할 것. 다만, 샘물 및 염지하수의 경우에는 저온일반세균은 20CFU/mL, 중온일반세균은 5CFU/mL를 넘지 아니하여야 하며, 먹는샘물, 먹는염지하수 및 먹는해양심층수의 경우에는 병에 넣은 후 4℃를 유지한 상태에서 12시간 이내에 검사하여 저온일반세균은 100CFU/mL, 중온일반세균은 20CFU/mL를 넘지 아니할 것
나. 총 대장균군은 100mL(샘물·먹는샘물, 염지하수·먹는염지하수 및 먹는해양심층수의 경우에는 250mL)에서 검출되지 아니할 것. 다만, 제4조제1항제1호나목 및 다목에 따라 매월 또는 매 분기 실시하는 총 대장균군의 수질검사 시료(試料) 수가 20개 이상인 정수시설의 경우에는 검출된 시료 수가 5퍼센트를 초과하지 아니하여야 한다.
다. 대장균·분원성 대장균군은 100mL에서 검출되지 아니할 것. 다만, 샘물·먹는샘물, 염지하수·먹는염지하수 및 먹는해양심층수의 경우에는 적용하지 아니한다.
라. 분원성 연쇄상구균·녹농균·살모넬라 및 쉬겔라 250mL에서 검출되지 아니할 것(샘물·먹는샘물, 염지하수·먹는염지하수 및 먹는해양심층수의 경우에만 적용한다)
마. 아황산환원혐기성포자형성균은 50mL에서 검출되지 아니할 것(샘물·먹는샘물, 염지하수·먹는염지하수 및 먹는해양심층수의 경우에만 적용한다)
바. 여시니아균은 2L에서 검출되지 아니할 것(먹는물공동시설의 물의 경우에만 적용한다)
2. 건강상 유해영향 무기물질에 관한 기준
가. 납은 0.01mg/L를 넘지 아니할 것
나. 불소는 1.5mg/L(샘물·먹는샘물 및 염지하수·먹는염지하수의 경우에는 2.0mg/L)를 넘지 아니할 것
다. 비소는 0.01mg/L(샘물·염지하수의 경우에는 0.05mg/L)를 넘지 아니할 것
라. 셀레늄은 0.01mg/L(염지하수의 경우에는 0.05mg/L)를 넘지 아니할 것
마. 수은은 0.001mg/L를 넘지 아니할 것
바. 시안은 0.01mg/L를 넘지 아니할 것
사. 크롬은 0.05mg/L를 넘지 아니할 것
아. 암모니아성 질소는 0.5mg/L를 넘지 아니할 것
자. 질산성 질소는 10mg/L를 넘지 아니할 것
차. 카드뮴은 0.005mg/L를 넘지 아니할 것
카. 보론은 1.0mg/L를 넘지 아니할 것(염지하수의 경우에는 적용하지 아니한다)
타. 브롬산염은 0.01mg/L를 넘지 아니할 것(먹는샘물, 염지하수·먹는염지하수, 먹는해양심층수 및 오존으로 살균·소독 또는 세척 등을 하여 음용수로 이용하는 지하수만 적용한다)
파. 스트론튬은 4mg/L를 넘지 아니할 것(먹는염지하수 및 먹는해양심층수의 경우에만 적용한다)
3. 건강상 유해영향 유기물질에 관한 기준
가. 페놀은 0.005mg/L를 넘지 아니할 것
나. 다이아지논은 0.02mg/L를 넘지 아니할 것
다. 파라티온은 0.06mg/L를 넘지 아니할 것
라. 페니트로티온은 0.04mg/L를 넘지 아니할 것
마. 카바릴은 0.07mg/L를 넘지 아니할 것
바. 1,1,1-트리클로로에탄은 0.1mg/L를 넘지 아니할 것
사. 테트라클로로에틸렌은 0.01mg/L를 넘지 아니할 것
아. 트리클로로에틸렌은 0.03mg/L를 넘지 아니할 것
자. 디클로로메탄은 0.02mg/L를 넘지 아니할 것
차. 벤젠은 0.01mg/L를 넘지 아니할 것
카. 톨루엔은 0.7mg/L를 넘지 아니할 것
타. 에틸벤젠은 0.3mg/L를 넘지 아니할 것
파. 크실렌은 0.5mg/L를 넘지 아니할 것
하. 1,1-디클로로에틸렌은 0.03mg/L를 넘지 아니할 것

- 거. 사염화탄소는 0.002mg/L를 넘지 아니할 것  
 너. 1,2-디브로모-3-클로로프로판은 0.003mg/L를 넘지 아니할 것  
 더. 1,4-다이옥산은 0.05mg/L를 넘지 아니할 것
4. 소독제 및 소독부산물질에 관한 기준(샘물·먹는샘물·염지하수·먹는염지하수·먹는해양심층수 및 먹는물공동시설의 물의 경우에는 적용하지 아니한다)
- 가. 잔류염소(유리잔류염소를 말한다)는 4.0mg/L를 넘지 아니할 것  
 나. 총트리할로메탄은 0.1mg/L를 넘지 아니할 것  
 다. 클로로포름은 0.08mg/L를 넘지 아니할 것  
 라. 브로모디클로로메탄은 0.03mg/L를 넘지 아니할 것  
 마. 디브로모클로로메탄은 0.1mg/L를 넘지 아니할 것  
 바. 클로랄하이드레이트는 0.03mg/L를 넘지 아니할 것  
 사. 디브로모아세토니트릴은 0.1mg/L를 넘지 아니할 것  
 아. 디클로로아세토니트릴은 0.09mg/L를 넘지 아니할 것  
 자. 트리클로로아세토니트릴은 0.004mg/L를 넘지 아니할 것  
 차. 할로아세틱에시드(디클로로아세틱에시드, 트리클로로아세틱에시드 및 디브로모아세틱에시드의 합으로 한다)는 0.1mg/L를 넘지 아니할 것  
 카. 포름알데히드는 0.5mg/L를 넘지 아니할 것
5. 심미적 영향물질에 관한 기준
- 가. 경도(硬度)는 1,000mg/L(수돗물의 경우 300mg/L, 먹는염지하수 및 먹는해양심층수의 경우 1,200mg/L)를 넘지 아니할 것. 다만, 샘물 및 염지하수의 경우에는 적용하지 아니한다.  
 나. 과망간산칼륨 소비량은 10mg/L를 넘지 아니할 것  
 다. 냄새와 맛은 소독으로 인한 냄새와 맛 이외의 냄새와 맛이 있어서는 아니될 것. 다만, 맛의 경우는 샘물, 염지하수, 먹는샘물 및 먹는물공동시설의 물에는 적용하지 아니한다.  
 라. 동은 1mg/L를 넘지 아니할 것  
 마. 색도는 5도를 넘지 아니할 것  
 바. 세제(음이온 계면활성제)는 0.5mg/L를 넘지 아니할 것. 다만, 샘물·먹는샘물, 염지하수·먹는염지하수 및 먹는해양심층수의 경우에는 검출되지 아니하여야 한다.  
 사. 수소이온 농도는 pH 5.8 이상 pH 8.5 이하이어야 할 것. 다만, 샘물, 먹는샘물 및 먹는물공동시설의 물의 경우에는 pH 4.5 이상 pH 9.5 이하이어야 한다.  
 아. 아연은 3mg/L를 넘지 아니할 것  
 자. 염소이온은 250mg/L를 넘지 아니할 것(염지하수의 경우에는 적용하지 아니한다)  
 차. 증발잔류물은 수돗물의 경우에는 500mg/L, 먹는염지하수 및 먹는해양심층수의 경우에는 미네랄 등 무해성분을 제외한 증발잔류물이 500mg/L를 넘지 아니할 것  
 카. 철은 0.3mg/L를 넘지 아니할 것. 다만, 샘물 및 염지하수의 경우에는 적용하지 아니한다.  
 타. 망간은 0.3mg/L(수돗물의 경우 0.05mg/L)를 넘지 아니할 것. 다만, 샘물 및 염지하수의 경우에는 적용하지 아니한다.  
 파. 탁도는 1NTU(Nephelometric Turbidity Unit)를 넘지 아니할 것. 다만, 지하수를 원수로 사용하는 마을 상수도, 소규모급수시설 및 전용상수도를 제외한 수돗물의 경우에는 0.5NTU를 넘지 아니하여야 한다.  
 하. 황산이온은 200mg/L를 넘지 아니할 것. 다만, 샘물, 먹는샘물 및 먹는물공동시설의 물은 250mg/L를 넘지 아니하여야 하며, 염지하수의 경우에는 적용하지 아니한다.  
 거. 알루미늄은 0.2mg/L를 넘지 아니할 것
6. 방사능에 관한 기준(염지하수의 경우에만 적용한다)
- 가. 세슘(Cs-137)은 4.0mBq/L를 넘지 아니할 것  
 나. 스트론튬(Sr-90)은 3.0mBq/L를 넘지 아니할 것  
 다. 삼중수소는 6.0Bq/L를 넘지 아니할 것



## 2. 지하수 오염

인간의 활동에 의해 자연 상태의 지하수 수질이 변화되어 지하수를 사용할 수 없게 된 경우, 즉 지하수의 용도별 수질기준을 초과했을 경우 지하수가 오염되었다고 한다. 지하수 오염은 도시화와 산업화 등으로 인해 다양한 원인으로 발생하며(그림 1), 지하수의 경우 한번 오염되면 원상태로 회복이 오래 걸리거나 쉽지 않기 때문에 사전에 예방하는 것이 중요하다. 따라서 효과적인 지하수 수질관리를 위해서는 잠재적인 지하수오염원의 현황 파악 및 관리와 함께 지하수오염 현황에 대한 조사 및 평가가 필요하다. 현행 지하수법에서는 지하수가 수질기준을 초과하여 오염이 발생하였을 경우 지하수의 이용을 중지하고 원상복구 또는 수질개선 조치를 취하도록 권고하고 있다.



<그림 1> 지하수 오염

### 잠재적 지하수 오염원과 오염물질

지하수 오염원은 점오염원과 비점오염원으로 나눌 수 있다. 점오염원은 단일 지점에 한정되어 국부적으로 오염물질이 저장되어 있다가 누출되는 오염원이고 비점오염원은 넓은 지역에 걸쳐 광범위하게 지하수를 오염시킬 수 있는 오염원이다 [표 3]. 미국 지하수오염방지 기술평가위원회의 보고서는 30개 이상의 잠재적 지하수 오염원을 6개의 카테고리로 분류하였는데, 지하수에 중대위협이 되는 잠재오염원으로서 저장탱크, 정화조, 농업활동, 도시 매립지, 방치된 유해폐기물 부지 등을 들었고, 다른 오염원으로 산업 폐기물 매립지, 주입정(injection wells), 관리된 유해폐기물 부지, 토지 투기(land application), 노변 염분(road salt), 해수 침투, 유전 탐사정으로부터의 해수 등을 들었다.<sup>1)</sup>

1) 환경오염과 복원기술(김동주, pp.29-30)

이들 오염원에서 배출되는 오염물질로는 중금속, 병원성미생물, 유기화합물, 방사성물질, 유독물질, 염류 등으로 다양한데 이러한 물질이 지하수에 지나치게 많이 녹아 있으면 생태계가 파괴되어 사람의 건강도 위협받는다. 대표적인 지하수 오염물질과 위해성을 [표 4]에 정리하였다.

<표 3> 지하수 잠재적 오염원의 구분 (이진용, 2004)

구분		내용
점오염원	유류 저장탱크	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 석유류 등 유독성 화학물질 저장, 금속성 탱크 부식 : 지하 누출</li> <li>■ 누출 유류는 비수용성 유체로 물과 잘 섞이지 않지만, 일부 용해(BTEX, TCE, PCE, MTBE 등)되어 지하수 오염 유발</li> </ul>
	유해 폐기물 처분장	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 처분장의 처분방식 및 취급 부주의 : 토양 및 지하수 오염</li> <li>■ 발암성 및 독성물질 : TCE, PCE, 납, BTEX, 페놀, PCBS, Chloroform, 비소, 카드뮴, 크롬 등</li> </ul>
	생활폐기물 매립지	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 침출수 : 인근 지하수 환경 오염</li> </ul>
	정화조	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 저류조내 고형성분 침전, 액체성분은 토양으로 침투하여 잠재적인 지하수 오염원으로 작용</li> <li>■ 오염물질 : 박테리아, 바이러스, 질산염, 금속류 및 무기물 등</li> </ul>
	조사공/방치공	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 부적절하게 시공된 우물과 공사용 시추공, 지반지질조사시 굴착한 시험공을 조사 완료 후 완벽하게 폐공처리하지 않은 경우에 발생</li> <li>■ 굴착공을 통해 오염물질이 지하로 급속히 유입</li> </ul>
비점오염원	농약과 비료	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 비료 성분 중 질산염은 용해도가 높아 지하수에 쉽게 용해되며, 질산성질소가 함유된 지하수를 유아들이 장기 복용할 경우 청색증을 일으킬 수 있음.</li> <li>■ 농약은 인체에 유해한 할로겐 유기화합물로 구성되어 있으며, 일부 자연계내 지속성이 큰 농약들이 환경에 더 치명적임.</li> <li>■ 대표적 농약(오염물질)에는 아트라진, 다이아지논 등임</li> </ul>
	산성비	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 산성비는 토양 중 알루미늄의 이동을 증가시켜 지하수 중의 알루미늄 농도를 증가시키고, 지하수를 산성화시킴</li> </ul>

<표 4> 지하수 오염물질과 위해성 (이진용, 2004)

오염물질	발생원	건강 위해성
질산성질소	비료 살포, 축산폐수, 정화조	유아질식사, 소화계 장애와 암, 지표수 독조유발
농약류	농경지와 골프장 등에서 농약의 과다사용 폐기물매립장누출	신경계 이상과 암 유발 생식기능 장애, 일부 물질은 환경호르몬으로써 먹이사슬을 따라 축적
석유화합물	지상/지하 저장탱크, 화학산업단지	벤젠 등 일부성분이 발암물질 또는 발암가능물질로 분류됨
유기용제류	금속가공 및 세척공장, 드라이클리닝, 기계산업단지	생식기능장애, 암
비소	자연적 원인	신경계와 간 손상, 암
방사성물질	핵관련 실험, 의료 폐기물	암 발생 확률을 높임
불소	자연적 원인	치아 이상, 척추 등뼈에 이상 유발
염(salt)	염수침입	식수와 관계수를 오염시켜 수자원을 줄임

#### 지하수오염유발시설

지하수법 제16조의2에서는 지하수를 오염시키거나 현저하게 오염시킬 우려가 있는 시설을 ‘지하수오염유발시설’이라 정의하고, 이러한 시설의 설치자 또는 관리자가 지하수 오염방지를 위한 조치를 하고 지하수 오염관측정의 설치를 통해 수질을 측정하여 그 결과를 보고하도록 규정하고 있다. 지하수오염유발시설의 종류는 지하수의 수질보전 등에 관한 규칙 제4조 「별표2」에 규정되어있다 (표 5).



〈표 5〉 지하수오염유발시설의 종류(지하수의 수질보전 등에 관한 규칙 제4조 「별표2」)

구분	종류
1. 지하수보전구역에 설치된 다음의 시설	가. 「토양환경보전법 시행규칙」 별표 2에 따른 특정토양오염관리대상시설 나. 「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률 시행규칙」 별표 4 제1호가목에 따른 폐수배출시설 다. 「폐기물관리법 시행령」 별표 3 제2호가목에 따른 매립시설 라. 그 밖에 가목부터 다목까지의 시설과 유사한 시설로서 특별히 관리할 필요가 있다고 인정되어 환경부장관이 관계 중앙행정기관의 장과 협의하여 고시하는 시설
2. 지하수보전구역 외의 지역에 설치된 다음의 시설	가. 「토양환경보전법 시행규칙」 별표 2에 따른 특정토양오염관리대상시설 중 「토양환경보전법」 제14조에 따라 오염된 토양의 정화조치명령을 받게 된 시설 나. 「폐기물관리법 시행령」 별표 3 제2호가목에 따른 매립시설 다. 그 밖에 가목 또는 나목의 시설과 유사한 시설로서 특별히 관리할 필요가 있다고 인정되어 환경부장관이 관계 중앙행정기관의 장과 협의하여 고시하는 시설

문제> 지하수를 생활용수로 이용할 경우 지하수법에 따라 총 64개 항목의 지하수수질기준을 만족하여야 한다.

정답> X

해설> 지하수법에서는 생활용수, 농어업용수, 공업용수 등의 비음용 지하수에 대해서는 일반오염물질 4개 항목과 특정유해물질 15개 항목에 대해 수질기준을 규정하고 있다.

### 3. 오염물질 거동 분석

지하수 내 용존되어 있는 오염물질의 거동을 분석하기 위해서는 오염물질의 지하거동을 지배하는 프로세스에 대한 이해가 필요하다. 본 절에서는 지하수 내 오염물질 거동의 주요 프로세스에 대해 살펴보고 이에 근거하여 지하수 내 오염물질 거동을 해석하기 위한 지배 방정식에 대해 알아본다.

#### 물질거동의 주요 프로세스

지하수 내 오염물질은 1) 이송, 2) 확산, 3) 수리적 분산에 의해 거동한다. 각 프로세스에 대해 설명하면 다음과 같다.

##### 1) 이송(Advection)

대수층 매질로 유입된 오염물질이나 용질(solute)은 지하수의 공극유속(pore water velocity, average linear velocity,  $v$ )과 같은 속도로 움직이는데 이를 ‘이송’이라고 한다.

$$v = \frac{1}{n_e} q$$

$v$  : 공극유속;       $n_e$  : 유효공극율(effective porosity);       $q$  : darcian velocity

## 2) 확산(Diffusion)

Darcy법칙에 의하면 수두구배가 존재하지 않으면 지하수는 흐르지 않는다. 그러나 지하매질 내에 오염물질이 유입되었을 때는 비록 수두구배가 없더라도 농도구배가 존재하면 지하수계 내에서 용질의 이온이나 분자는 농도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 무작위하게 이동하게 되는데, 이러한 현상을 ‘확산’이라고 하며 이는 Fick의 첫 번째 법칙(Fick's first law)으로 표현할 수 있다.

$$F = -D^* \frac{dC}{dx}$$

$F$  : 단위면적당 용질의 이동량

$D^*$  : 분자확산계수( $L^2/T$ )

$C$  : 용질의 농도( $M/L$ )

$\frac{dC}{dx}$  : 농도 구배

이때, 농도구배와 용질이동량 간의 비례상수를 분자확산계수라고 정의한다. 일반적으로 분자확산계수는 역학적인 분산계수에 비해 매우 작다( $<10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ). 점토와 같은 불투수층 매질 내에서 지하수의 공극유속은 매우 작기 때문에 역학적인 분산이 0에 가까우며 투입된 용질은 그 농도구배에 의해, 즉 확산에 의해 이동될 수 있다. 그러나 농도구배가 존재하지 않을 경우에는 용질의 확산 현상은 일어나지 않는다.

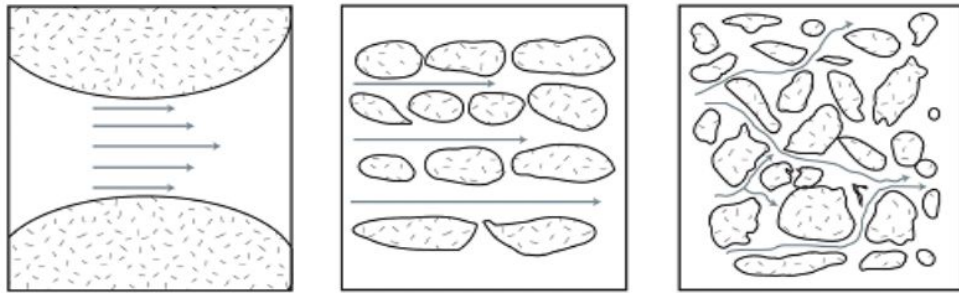
Fick의 두 번째 법칙(Fick's second law)는 시간에 따른 오염물질 농도의 변화를 농도구배에 따른 균일 대수층에서의 오염물질 이동량 변화로 설명한다.

$$\frac{dC}{dt} = D^* \frac{d^2 C}{dx^2}$$

$$\frac{dC}{dt} = -\nabla F = D^* \nabla^2 C$$

## 3) 수리분산(Hydrodynamic dispersion)

대수층 매질 내에서 지하수의 공극유속이나 평균유속은 거시적 관점(macroscopic scale)에서는 균질 혹은 일정하지만, 공극 혹은 미시적 관점(pore or microscopic scale)에서는 평균유속보다 크거나 작은 유속들이 존재한다. 이러한 유속차이(velocity difference)는 세 가지 기작, 즉 (1) 마찰손실, (2) 공극의 크기, (3) 유로장의 길이에 의해서 발생한다.



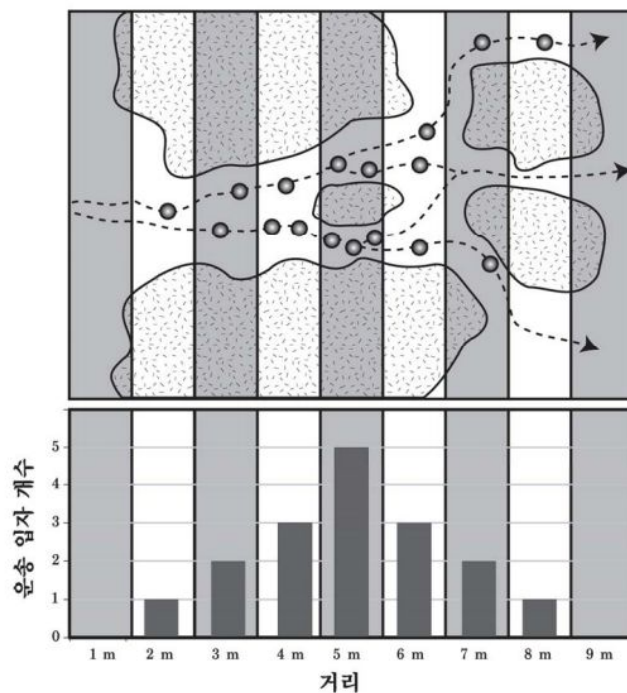
(1) 다공성

(2) 공극의 크기

(3) 유로장의 길이

<그림 2> 다공성 매질체내에서 오염물질의 역학적 분산에 기여하는 유속차이를 유발시키는 세가지 인자

이러한 유속의 차이는 지하수내 용질의 이동거리에 영향을 미치고 궁극적으로 용질의 혼합이 야기된다. 이러한 혼합을 미시적인 규모의 역학적 분산(mechanical dispersion)이라 한다. 용질의 분포는 지하수의 평균적인 공극유속으로 이동한 거리에 해당하는 지점에서 가장 높게 나타나며 그 전후 지점으로도 역학적 분산에 의해 퍼지게 된다. 전체적인 분포는 평균 이동거리에서 정점을 이루는 정규분포 형태를 띤다 (그림 3).



<그림 3> 유로장 길이방향으로 발생하는 용질 혼합

역학적 분산에는 유로장 길이 방향으로 발생하는 종분산과 흐름방향에 수직으로 발생하는 횡분산이 있다. 만약 역학적 분산계수( $D_m$ )와 공극유속( $v$ )간의 비례관계가 성립된다고 한다



면 분산지수를 도입할 수 있다.

$$D_m = \alpha v$$

여기서  $\alpha$ 는 분산지수(dispersivity)라고 하며 지질매체의 고유특성을 나타낸다.

매질 내에서 오염물질이 거동할 때 발생하는 유효분자확산(effective molecular diffusion)과 역학적 분산은 분리하여 측정할 수 없으며 일반적으로 통합하여 하나의 계수로 표현하는데 이를 수리분산계수(hydrodynamic dispersion coefficient),  $D$ 로 나타낸다.

$$D_L = \alpha_L v + D^*$$

$$D_T = \alpha_T v + D^*$$

$D_L$  : 종 분산계수

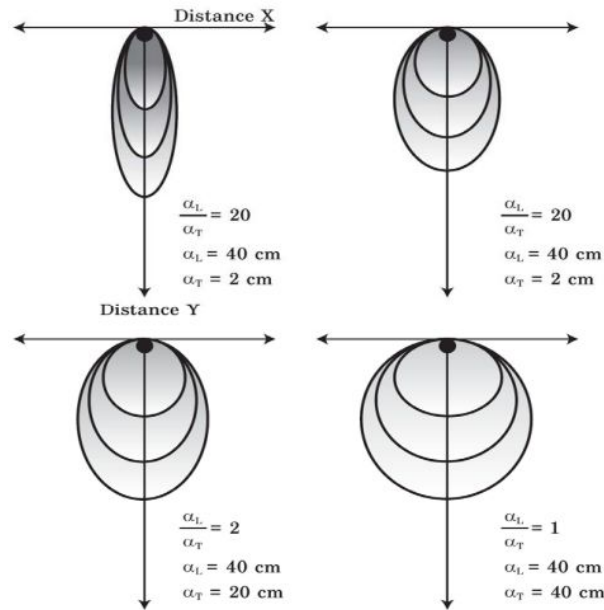
$D_T$  : 횡 분산계수

$D^*$  : 유효분자확산계수

$\alpha_L$  : 종 분산지수

$\alpha_T$  : 횡 분산지수

대수층 매질에서의 종분산지수와 횡분산지수의 비( $\frac{\alpha_L}{\alpha_T}$ )는 2차원 오염물질 거동에 있어서 오염운의 형태에 영향을 주는 요소이다. 일반적으로 그 비가 낮으면 낮을수록 오염운이 넓은 형상을 띄게 된다.



<그림 4> 종/횡분산지수의 비가 오염운의 형태에 미치는 영향

#### 오염물질 거동 방정식

포화된 다공질 매체 내에서 용질의 거동을 나타내는 지배방정식을 유도하기 위하여 단위부피의 대상영역에서의 용질의 질량보존법칙을 적용하면 다음과 같은 등식이 성립한다.

$$\left[ \frac{\text{용질 질량}}{\text{변화율}} \right] = \left[ \frac{\text{용질 유출}}{\text{유동율}} \right] - \left[ \frac{\text{용질 유입}}{\text{유동율}} \right] \pm \left[ \frac{\text{용질 질량}}{\text{증감}} \right]$$

##### 1) 이송-확산 방정식: 비반응성 물질

매질 내로 유입된 용질이 물리화학적·생물학적 반응을 일으키지 않는 물질을 비반응물질(non-reactive solute)이라 하고 이와 반대로 대수층 매체에 흡착되거나 반응을 하여 용액 내에서 용질의 질량이 시공간적으로 변하는 용질을 반응물질(reactive solute)이라 한다. 대표적인 비반응물질로는  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{I}^-$  등이 있다.

주어진 지하수 유동의 조건 하에서 등방, 균질 포화다공질매체 내로 유입된 비반응 오염물질은 이송에 의해 지하수의 유동방향과 속도를 따라 움직이는 한편 미시적 규모에서 매체의 불규칙성과 공극 크기의 차이 때문에 발생하는 역학적인 분산이나 농도구배에 의한 확산현상이 동시에 발생하는, 즉 이송과 수리분산(hydrodynamic dispersion)이 지배되는 조건하에서 거동하게 된다.

균질하고 등방성인 포화대 대수층에서 지하수계 내 비반응성 오염물질의 거동은 다음의 이송-확산 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial l^2} - v \frac{\partial C}{\partial l} \quad : \text{이송-확산 방정식}$$

$l$  : 유선방향의 좌표

$D_L$  : 종분산계수

$v$  : 유선방향에서 지하수의 공극유속

1차원계 내에서 수리분산에 의한 용질의 농도 분포는 다음과 같은 주상시험(column test)을 실시하여 구할 수 있다. 용질이 확산과 역학적인 분산의 합인 수리분산의 영향을 전혀 받지 않고 매체 내에서 지하수(혹은 유입수)와 동일하게 움직인다면 시험관 내에서 용질의 이동전면(tracer front)은 수직형 플러그 형태로 움직일 것이고 이때 용질의 운동지배식은 계단함수(step function)를 따를 것이다(연속주입인 경우)(그림 6의 b).

오가타(Ogata, 1970)는 다음과 같은 경계조건 하에서 이송-확산 방정식의 해를 구하였다.

$$C(l, 0) = 0 \quad l \geq 0$$

$$C(0, t) = C_0 \quad t \geq 0$$

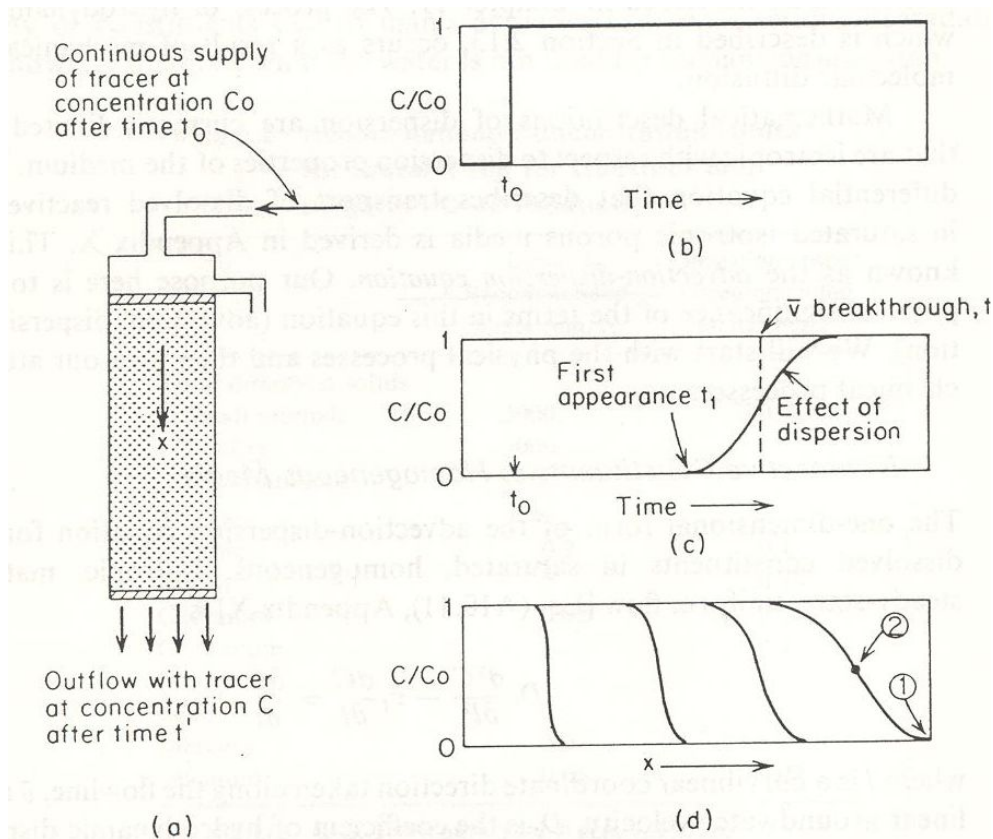
$$C(\infty, t) = 0 \quad t \geq 0$$

이때 일반해는 다음 식과 같다.

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{1-vt}{\sqrt{D_L t}} \right) + \exp \left( \frac{vl}{D_L} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{1+vt}{\sqrt{D_L t}} \right) \right]$$

시험관(column) 내에 연속적으로 유입된 용질은 이송 및 역학적인 분산작용에 의해 거동한다. 이송만을 고려한 계단함수 형태의 거동에서는 이동전면의 이동속도가 공극유속과 같으므로 이것이 배출구에 도달하는 시간은 쉽게 구할 수 있다. 그러나 실제로는 이렇게 구한 배출 시간보다 이전에 용질의 일부가 배출구에서 먼저 나타나며 그 시간 이후에도 용질의 농도는 점차 증가하여 주입 농도에 접근한다(c). 이는 시험관 내에서 용질의 일부가 수리분산현상에 의해 공극유속보다 빠르게 움직이기도 하고 느리게 움직이기도 하기 때문이다. (b), (c), (d)와 같이 시간별 농도변화곡선 및 거리별 농도분포곡선, 공극체적별 농도변화곡선, 무차원 시간별 농도변화곡선을 통틀어 농도이력곡선(breakthrough curve)이라 부른다.





**Figure 9.1** Longitudinal dispersion of a tracer passing through a column of porous medium. (a) Column with steady flow and continuous supply of tracer after time  $t_0$ ; (b) step-function-type tracer input relation; (c) relative tracer concentration in outflow from column (dashed line indicates plug flow condition and solid line illustrates effect of mechanical dispersion and molecular diffusion); (d) concentration profile in the column at various times.

#### <그림 6> 정류상태의 실내주상시험 모식도 및 농도이력곡선

#### 2) 지연효과를 고려한 이송-확산 방정식: 반응성 물질

지하수 내 오염물질이 대수층 물질이나 다른 용질 또는 기타 지하수 구성성분과 반응거나 자체적으로 감소/증가하는 물질을 반응성 물질(reactive solute)이라 한다. 반응성 물질은 대수층 구성입자 표면에 흡착, 이온교환, 대수층 내에 함유되어 있는 유기탄소에 흡착, 화학적인 침전, 비생물학적이거나 생물학적인 분해, 산화환원 반응, 방사능 붕괴나 농약물질의 분해, 가수분해, 휘발, 이온화 작용 등에 의해 그 질량이 변화한다. 따라서 반응물질의 경우, 오염물질의 1차원 거동방정식은 비반응물질의 지배방정식에 반응항(reaction term)을 추가하면 된다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial l^2} - v \frac{\partial C}{\partial l} - \frac{\rho_b}{n} \frac{\partial S}{\partial t}$$

$C$  : 액상의 오염 지하수 내에서 오염물질의 농도

$D_L$  : 종분산지수

$v$  : 지하수의 공극유속

$\rho_b$  : 대수층의 건조단위중량

$n$  : 포화매체의 공극률 또는 체적함수비

$S$  : 대수층의 단위무게당 흡착된 오염물질의 질량

$t$  : 시간

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t}$$

$$\frac{\rho_b}{n} \cdot \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\rho_b}{n} \cdot \frac{\partial S}{\partial C} \cdot \frac{\partial C}{\partial t}$$

$$(1 + R) \frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial l^2} - v \frac{\partial C}{\partial l} \quad : \text{지연효과를 고려한 이송-확산방정식}$$

여기서  $R$ 을 지연계수(Retardation Factor,  $R$ )라 하며  $S$ 와  $C$ 가 직선적인 관계를 가질 때 (예를 들어 선형흡착의 경우) 상수로 적용할 수 있다.

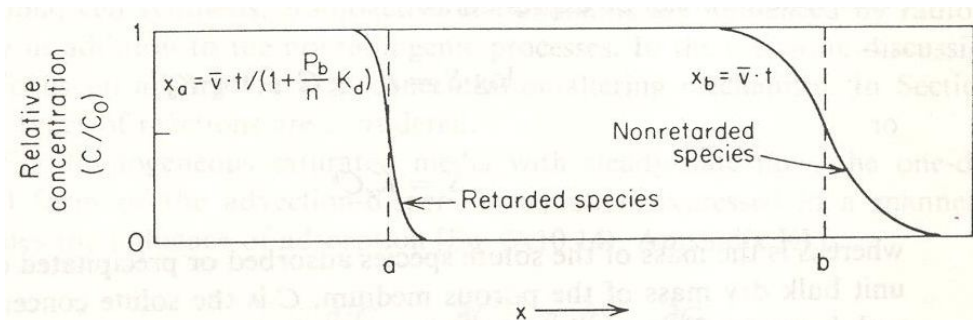
$$R = 1 + \frac{\rho_b}{n} K_d$$

$\frac{\rho_b}{n} K_d$  는 대수층의 흡착능(sorption capacity)를 충족시키는데 필요한 용질의 체적을 의미한다. 여기에 1을 더하면 바로 지연계수가 된다. 따라서 지연계수는 용질의 질량중심점 ( $0.5C_0$ )이 하류구배구간의 특징지점에서 돌출되는데 소요되는 공극체적의 배수를 의미한다.

지하수의 평균선형유속을  $v$ 라하고 농도이력곡선 상에서 용질초기농도( $C_0$ )의 50%( $0.5C_0$ )에 이르는 용질의 이동 전면을 통해 구한 용질의 속도를  $v_c$ 라 하면,

$$R = \frac{v}{v_c}$$

즉, 대수층 내에서 거동하는 오염물질의 속도가 비반응물질이나 지하수의 공극유속보다  $R$  배만큼 지연되어 거동한다는 의미이다.



**Figure 9.11** Advance of adsorbed and nonadsorbed solutes through a column of porous materials. Partitioning of adsorbed species is described by  $K_d$ . Relative velocity =  $1/[1 + (\rho_b/n)K_d]$ . Solute inputs are at concentration  $C_0$  at  $t > 0$ .

### 등온흡착(isotherm)<sup>2)</sup>관계식

1) 프로인드리히 등온흡착모델(Freundlich isotherm) : S-C 그래프

지하수 내에 용해되어 있던 오염물질의 액상 농도(C)와 흡착농도(S)와의 사이에 선형관계가 성립된다면 C의 등온흡착은 S의 함수로서 직선으로 표현되며 다음 식으로 주어진다.

$$S = K_d C : \frac{\partial S}{\partial C} = K_d$$

$K_d$  : 분배계수

이를 선형 등온흡착(linear isotherm)이라 한다. 보다 일반적인 평형모델은 Freundlich 모델이며 다음 식으로 주어진다.

$$S = K_d C^b$$

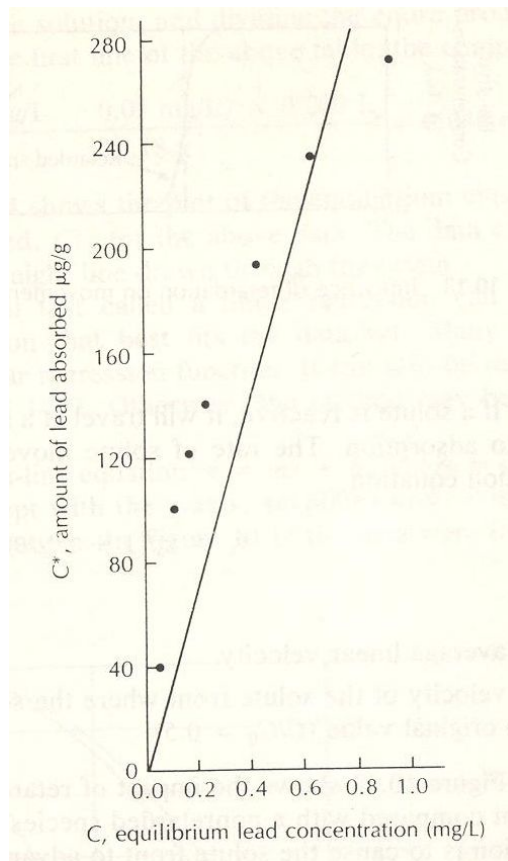
여기서  $K_d$ 와  $b$ 는 상수이며 C의 등온흡착은 S의 함수로서 곡선으로 표현되며 다음의 식을 이용하여 직선화된다.

$$\log S = b \log C + \log K_d$$

$\log S$ 를  $\log C$ 에 대하여 그래프를 작성한다면 직선으로 표현되며 이때  $b$ 는 기울기,  $\log K_d$ 는 절편이 된다. 이 모델은 sulfate, 카드뮴, 구리, 아연, 유기인 살충제, 파라치온과 관련 화합물 등의 중금속류와 유기화합물을 함유한 토양에 널리 적용되는 비선형 모델이다.

2) 용질의 농도와 흡착된 농도와의 관계를 나타내는데 이때 동일한 온도에서 반응이 이루어진다고 가정하기 때문에 isotherm이라는 용어를 사용한다. 등온흡착 또는 흡착등온으로 번역된다.





〈그림 7〉 Freundlich 등온선도

이 모델의 단점은 선형 등온흡착처럼 흡착 용질의 농도에 대한 상한계가 없다는 점이다. 따라서 실험 자료 범위의 한계를 넘어 연장하게 될 때는 특별한 주의가 요구된다.

## 2) 랭뮤어 등온흡착모델(Langmuir isotherm) : C/S-C 그래프

고체표면은 제한된 수의 흡착기(sorption site)를 가지고 있다는 전제하에 개발된 모델이다. 모든 흡착기가 채워지면, 고체 표면은 더 이상 액상에 있는 용질을 흡착할 수 없게 된다. 이 모델은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{C}{S} = \frac{1}{\beta_1 \beta_2} + \frac{C}{\beta_2}$$

여기서  $\beta_1$ 은 결합에너지와 관련된 상수(L/mg),  $\beta_2$ 는 고체에 의해 흡착될 수 있는 최대의 흡착 농도(mg/Kg)이다.

지금까지 여러 기작에 의해 오염물질의 거동을 해석하는 지배방정식을 수식으로 표현해 보았다. 실제 지하수 내 오염물질의 거동은 훨씬 복잡하다. 매질의 불균질성이나 이방성, 복잡

한 경계조건, 수리상수의 불확실성, 오염물질의 특성 등 대수층 내에서의 오염물질의 거동을 완벽하게 예측, 분석하는 것은 사실 불가능하다고 할 수 있다. 그러나 오염물질의 거동을 좌우하는 여러 기작에 대한 정확한 이해를 바탕으로 하여 간략하게나마 지하수오염원에 대한 오염물질의 거동을 분석, 예측하는 것은 그로 인한 환경영향을 최소화할 수 있는 대안을 마련하기 위한 필수적인 단계라고 할 수 있다.