

충적층 지하수의 평가 및 활용 방안

윤 성 택

고려대학교 지구환경과학과 교수

1. 서언 및 배경

우리나라에서는 2006년이면 물 수요량(350억톤/년)이 물 공급량(346억톤/년)을 초과하는 물 부족 사태가 예상되고 있다. 한편, 지표수의 수질이 매우 악화되면서 최근 지하수에 대한 관심이 대폭 증대되고 있다. 지하수는 과학적 근거에 입각하여 잘 관리·개발한다면 지속적으로 이용할 수 있는 재생자원으로서의 가치를 가진다. 우리나라에는 연간 총 강수량(1,276억톤)의 12배에 해당하는 막대한 양의 지하수가 부존(15,440억톤)되어 있으며, 매년 함양되는 양은 연간 지표수 총 이용량에 맞먹는 약 228억톤 정도로 알려져 있다. 그러나 아직까지도 지표수에 비하여 지하수 자원의 양과 질에 대한 과학적 분석 자료는 매우 부족한 실정이며, 특히 유역별로 지표수와 지하수의 연계성을 수문/수리지질 측면에서 파악한 예는 거의 찾아 볼 수 없다. 국내 부존 지하수는 산출 특성(특히, 지하수가 부존의 수리지질 조건)에 따라 천부 충적층 지하수와 심부 암반 지하수로 구분되는데, 이들은 수리적으로 상호 연결되어 있다. 국내에서 암반 지하수는 대부분 지방 상수도나 간이상수도 등 음용수원으로 개발·이용되어왔으며, 충적층 지하수는 농업용 또는 소규모 가정용수로 폭넓게 개발되고 있다.

충적층(alluvium)은 ‘지질학적으로 비교적 최근에 하천이나 기타 유수에 의해 운반 퇴적된 점토, 실트, 모래, 자갈 및 기타 미고결 쇄설물’을 통칭한다. 따라서 충적층은 현재 또는 고기(古期)의 하천, 특히 사행(meandering)하는 하천을 따라 특징적으로 발달한다(그림 1). 하천변의 충적층은 하천수와 밀접한 수리적 연계성을 가지고 있어, 하천으로 유출되는 지하수(또는 반대로 충적층이나 암반으로 배출되는 하천수)의 양과 수질을 조절(buffering)함으로써 하천 생태계를 유지하는데 있어 중요한 역할을 한다. 특히, 충적층 지하수 중 복류수는 비강우 시기에 하천 흐름을 유지하는데 있어 너무도 중요하다. 하나의 수계에서 충적층이 형성되는 곳은 하상 자체, 범람원, 삼각주, 선상지 등 매우 다양한데, 이러한 퇴적 환경에 따라 물 환경의 차이를 유발하는 충적층 자체의 특성들(예를 들면, 두께, 층서, 구성물질의 입도 분포 및 광물학적 특성 등)이 달라진다. 후술하겠지만, 이러한 지질학적 환경의 차이를 해석하고 이해하는 것은 충적층 지하수의 최적 개발 이용에 있어 매우 중요한 요소이다.

충적층 지하수는 ‘충적층 지질매체의 입자간 공극에 부존하는 지하수’를 말하며, 부존 심도가 얇은 반면 지역에 따라 풍부한 수량을 확보할 수 있다는 장점이 있다. 또한, 충적층 지하수는 표층 하천수의 오염에 비해 상대적으로 오염의 영향이 적고 비교적 쉽게 이용할 수 있다는 특성 때문에 널리 이용되어 왔다. 우리나라 하천수계의 주변에서 충적층 지하수 또는 하천복류수를 상수원이나 농업용수로 이용

하는 경우는 매우 흔하다. 최근에는 상수원으로서 개발되어 오던 주요 하천의 수질 저하가 문제시됨에 따라, 충적층 지하수의 개발 이용과 함께 충적층을 이용한 취수용수의 수질 개선사업(강변여과, 지하댐)이 적극 검토되고 있다. 이와 같이, 충적층 지하수는 그 자체가 중요한 물 공급원일 뿐 아니라, 물 환경 측면에서 보면 지표수의 수량과 수질에 직접적인 영향을 미치는 매우 중요한 물질이다.

근래에 와서 수자원과 관련된 현안 문제들 중 특히 지표수의 오염 증가에 따른 대체 수자원 확보의 필요성 증대, 농업활동에 의한 천부 지하수계의 오염 증가, 강기슭 지역(riparian zone)의 인위적 훼손으로 인한 생태 위기 등이 중요한 물 관련 환경 문제로 대두되면서 충적층 지하수의 수리학적, 생지구화학적, 생태학적 중요성에 대한 인식이 대단히 높아지고 있다. 그러나 충적층 지하수도 생활하수의 유입 및 비료의 과다 사용 등에 의하여 상당히 오염되고 있음이 알려지고 있다. 특히, 질산성질소, 철, 망간, 대장균 및 일반세균 등이 수질 기준을 초과하는 경우가 빈번하다. 이에 따라, 충적층 지하수의 수리적/수리지질학적/수리화학적(수질) 특성을 종합적으로 정확히 이해하고 올바르게 평가하는 일은 수자원 측면에서 매우 중요한 일로 부각되었다. 그럼에도 불구하고, 국내에서 충적층 지하수에 대한 연구는 극히 미비한 실정이다. 이에, 충적층 지하수에 대한 과학적(특히 수리지구화학적) 이해를 통하여 보다 체계적이고 과학적인 평가 및 이용 관리 방안에 대하여 토의해 보고자 한다.

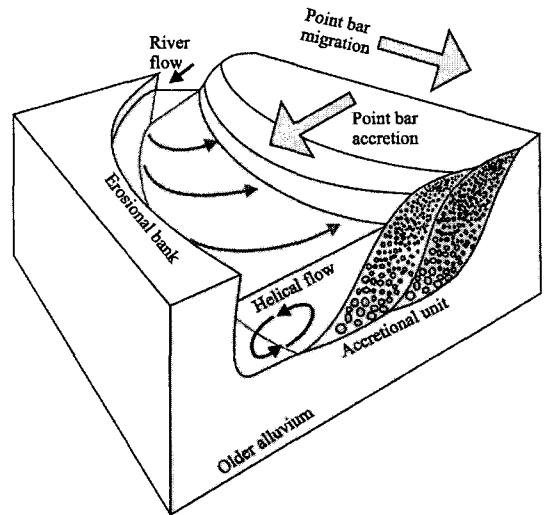


그림 1. 곡류 하천변의 충적층 발달 모델

2. 충적층 지하수의 부존 특성과 수질

(1) 충적층 지하수의 수리/생태학적 중요성: 재인식과 공감의 필요성 고찰

충적층 지하수의 부존 및 수질 특성을 보다 과학적으로 이해하기 위해서는 먼저 충적층 환경이 갖는 생태수리학적 중요성을 이해함이 필수적이다. 기본적으로 수리적 관점에서 보면, 하천수를 비롯한 모든 지표수는 필연적으로 지하수의 유동과 밀접한 연관 관계를 맺고 있다(Hayashi and Rosenberry, 2002; Rains and Mount, 2002). 좀 더 넓은 관점으로 확대해 보면, 충적층 환경은 대기권, 암석권, 생물권, 수권이 서로 접하고 있는, 따라서 에너지와 원소의 순환이 매우 빠르게 일어나는 매우 역동적인 환경이며, 인간의 삶과 밀접한 관계를 맺고 있는 매우 중요한 생태 환경이다. 충적층 환경에서의 지하수의 유동과 순환을 보면, 일차적으로는 기저유출(base flow)을 통하여 하천수의 수위와 생태에 큰 영향을 미친다. 충적층 환경의 지표수를 통하여 직접 유입되는 지하수는 연중 거의 일정한 온도를 유지하면서 질소, 인과 같은 영양염류(nutrients)는 물론 많은 무기 원소들을 공급한다. 지하수 유동에 수반된 영양염류의 유입은 호수나 하천수의 부영양화 정도를 결정한다. 그러므로 충적층 환경에서의 지하수 유동은 하천 및 호수 환경의 동식물에게 직간접적으로 중요한 생태적 영향을 미치고 있으며, 아울러 물 환경의 건강성 유지에 있어 중요한 역할을 담당하고 있는 강기슭 지대(riparian zone)의 식물에게 수분을 공급하는 등 중요한 역할을 담당하고 있다(Dawson and Ehleringer, 1991; Hayashi and Rosenberry, 2002).

이와 같이, 충적층 지하수의 유동과 화학성이 내포하는 생태수리학적 중요성은 수자원의 양적 확보뿐만 아니라 수자원의 질을 결정하는 중요한 요소임을 반드시 인지해야 할 것이다. 그러나 불행하게도 국내에서는 지표수와 지하수 시스템 사이의 환경수리학적 연관성에 대한 정확하고 체계적인 인식이 없이

서로 분리된 접근만이 이루어지고 있으며, 이는 결국 수자원의 고갈, 부영양화 등 지표수의 수질 오염, 대체 수자원의 확보 문제 등 많은 현안 문제에 대하여 종합적이고도 효율적인 접근과 해결책 제시를 저해하고 있다고 판단된다.

수리적 관점에서 좀 더 살펴보면, 충적층 환경은 지표수와 천부 지하수 및 심부 지하수가 모두 함께 영향을 미치고 있는 매우 역동적인 환경이다(Rains and Mount, 2002). 아울러 지표 환경에 가깝기 때문에 인위적인 오염에도 상당히 취약한 모습을 보일 수 있는 특성이 있다. 최근 국내의 일부 지역에서는 농업활동과 관련하여 질산성 질소에 의한 충적층 지하수의 오염이 심각한 수준임이 보고되었다(김경호 외, 2002; Min et al., 2002). 한편, 충적층 매질의 다양한 지질/지구화학적 특성에 따라 질산성 질소 등 일부 지표 기원 오염물질은 오히려 충적층 환경 내에서 자연적으로 뚜렷이 저감(attenuation)된다는 사실도 보고되고 있다(채기탁 외, 2002b; Min et al., 2003). 뒤에서 자세히 토의하겠지만, 이러한 사실들은 충적층 지하수의 개발 활용과 관련하여 매우 중요한 정보들을 시사하고 있다. 이에, 충적층 지하수의 부존과 화학적 특성을 체계적이고 과학적으로 이해하기 위한 연구는 수자원과 관련한 많은 환경 문제에 실질적 접근에 있어 근본적인 열쇠가 될 것이다.

(2) 국내 충적층 지하수의 부존 특성과 수질 개관

국내의 충적층은 주로 대규모 하천변을 따라 분포하며, 국토 면적의 약 28%인 약 2,737,000 ha를 점하고 있다. 두께는 6~40 m로 다양하며, 평균 두께는 약 7 m인 것으로 보고되었다(농림부, 지하수개발공사, 1967; 한국수자원공사, 1995). 지질학적으로는, 대부분 모래층, 자갈층 또는 이의 혼합체인 사력층 등으로 구성된 대수층과 점토층, 실트층과 같은 난대수층으로 다양하게 구성되어 있으며, 각 층별 구성 성분 역시 매우 다양하다. 이러한 지질학적, 층서적, 광물·지구화학적 특성의 차이와 변화 경향은 충적층 지하수의 양과 수질을 변화시키는 가장 중요한 요인인데 충적층 퇴적시의 퇴적환경에 따라 결정되며(그림 2), GPR, 탄성과 탐사, 물리검층 등 지구물리학적 조사와 퇴적학적 연구를 통하여 밝혀낼 수 있다(그림 3).

한국수자원공사(1996)는 지형적인 요인에 의해 형성된 방식과 이에 따른 퇴적층의 조성별 특징을 기준으로 하여 충적층을 해안 충적층(주로 백색 패사, 점토, 실트로 구성), 평야 충적층(하천 하류나 중류에서의 범람에 의한 충적층으로서 대부분 실트나 가는 모래로 구성), 하성 충적층(하천 상류나 지류의 하안 또는 하상에 발달된 충적층으로서 주로 상부 모래층과 하부 사력층으로 구성), 분지 충적층(선상지, 봉적지 등 침식분지에 형성되며, 자갈에서 실트까지 다양한 입도의 퇴적물로 구성), 곡간 충적층(하상 경사가 급한 계곡 사이에 형성되며, 주로 분급이 불량한 자갈 및 모래로 구성) 등으로 구분하였다. 앞서 언급한대로, 충적층은 같은 규모라

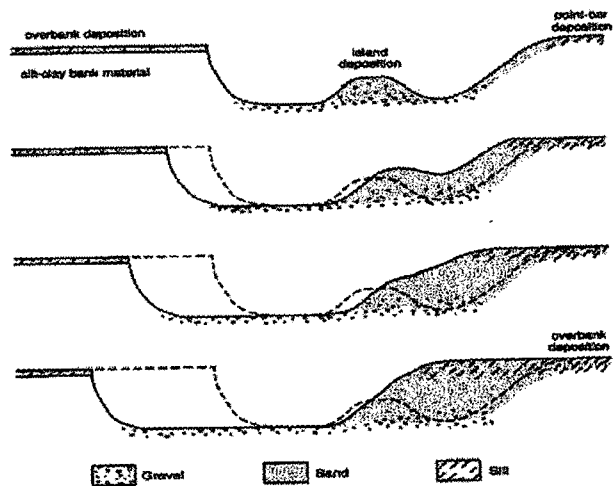


그림 2. 이동하는 하천 주변의 충적층의 지질 특성 변화

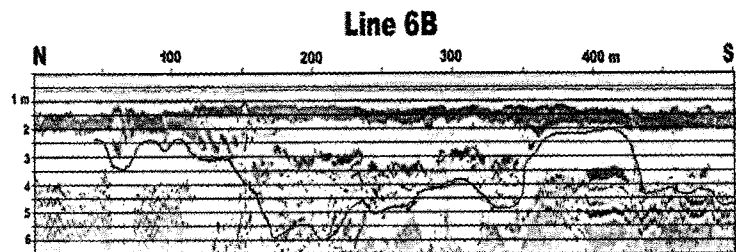


그림 3. GPR 탐사에 의한 충적층 천부의 지질 특성 해석 예 (자료 제공: 이철우 교수)

하더라도 퇴적물을 형성한 상류 모암의 물리화학적 성질과 운반/퇴적 환경(운반거리, 운반체(바람, 물)의 유체 특성, 퇴적조건 등)의 차이에 따라 그 구성이 달라지게 마련이다. 현재까지의 조사 분석 자료에 의하면, 국내에서는 화강암류와 화강편마암류가 분포하는 지역에서 그 풍화에 의해 가장 양호한 충적 대수층이 형성되는 반면, 퇴적암류와 화산암류 지역은 대수층 형성에 다소 불리한 것으로 제시되었다(한국수자원공사, 1995). 단순히 지하수의 함양성과 대규모 대수층 형성의 용이성이라는 측면에서 보면, 충적층은 넓게 분포하고, 깊은 부존 심도를 가지며, 공극률이 클수록 유리하다. 점토, 미세 실트 및 미세 모래 등이 혼합 또는 층상으로 포함된 충적층은 이들로 말미암아 오히려 투수성이 떨어지는 경우가 있다. 따라서 충적층 매질 내에서 지하수의 저장과 유동이 용이하고 산출량을 확보하기 위해서는 지질매체인 대수층의 공극률이 커서 비산출율이 커야 유리하다. 1967년까지 조사된 우리나라 충적층에 대한 분석에 의하면, 대체적으로 다공질 대수층으로 파악되는 모래, 자갈 및 전석층의 평균심도는 4.9 m이고, 미고결 하상퇴적층의 평균 공극률은 35~38%이며, 비산출률은 14.2% 정도인 것으로 보고되었다(농림부, 지하수개발공사, 1967). 표 1에는 국내 천부지하수 중 하도 내에 부존된 천부지하수의 부존량과 최대 개발 가능량을, 표 2에는 층별 두께와 함께 지하수의 함양량과 채수가능량을 판단하는 기준이 되는 공극률과 비산출율을 정리하였다. 농어촌개발공사(1989)는 제주도를 제외한 전국의 충적층 지하수의 부존량을 추정하였는데, 총면적 27,380 km², 심도 3 m, 공극률 35%, 비산출률 14.2%인 조건에서 충적층 지하수 총량은 280억톤, 채수 가능량은 110억톤으로 제시하였다. 한편, 1966년~1971년 사이의 5개년 동안 한강유역의 충적층에 설치된 2,786개 지하수공에 대한 대수성 시험 결과를 보면 1개 공당 평균 채수율은 629 m³/일인 것으로 조사되었다.

표 1. 국내 천부지하수 중 하도(channel) 내에 부존된 천부 지하수의 특성

	면적 (km ²)	포화대 두께 (m)	평균 공극률	부존량 (억m ³)	평균 비산출률	최대개발 가능량(억m ³)
충적층	27,380	6	0.35	575	0.142	233
풍화대		3	0.343	282	0.19	156
계				857		389

표 2. 국내 충적 대수층의 평균 두께와 공극률, 비산출률(한국수자원공사, 1995)

층 별	평균 두께		공극률		비산출률	
	두께(m)	%	공극률(%)	가산치(%)	비산출률(%)	가산치(%)
점 토 층	1.88	26.9	56	14.8	2	0.5
실 토 층	0.22	3.2	45	1.4	5	0.2
사 층	1.35	19.3	35	6.8	22	4.2
사 력 층	1.75	25.0	32	8.8	22	5.5
전 석 층	1.79	25.6	30	7.7	15	3.8

국내 충적층 지하수의 수질 현황과 수질 특성에 관한 본격적인 연구는 1990년대 중반 이후에 와서야 시작되었는데, 주로 낙동강 유역에서의 강변여과수 개발과 관련된 연구(환경부 외, 1996; 창원시, 1997; 환경부, 경상남도, 1998) 및 4대강 유역 광역 지하수 조사 연구 등 충적층 특성 조사의 일환으로 진행되어왔다(한국수자원공사, 2000, 2002). 충적층 지하수의 개발 이용에 있어서는 양적인 측면만큼이나 수질(수리화학)에 관한 조사 연구가 중요함에도 불구하고, 수질에 대한 연구의 중요성은 상대적으로 매우 간과되어 왔으며 따라서 그동안 축적된 자료는 지극히 부족한 실정이다. 특히, 충적층 지하수의 수질은

하나의 소규모 충적층 부존 지역 내에서도 오염원의 유무와 존재량, 지하수의 흐름, 충적층 지질매체의 광물/지화학적 특성 등에 의해 너무나도 다양하게 나타남에도 불구하고, 그동안의 조사 연구 결과를 보면 대부분 수개 시료에 대하여 일회성의 수질 분석에 의존하는 지극히 비과학적인 인식에서 접근하였음을 알 수가 있다. 이에, 이용 가능한 자료, 특히 낙동강과 금강 권역의 충적층 지하수 수질 분석 자료를 중심으로 국내 충적층 지하수의 수질 현황을 개략 검토하면 다음과 같다.

낙동강 유역 중·하류의 4개 지역(창녕군 월하리, 창원시 대산면, 양산시 용당리, 영덕군 일대)에서 건기와 우기로 나누어 분석한 충적층 지하수의 수질 분석 자료를 보면, 상당 부분의 지하수에서 질산성 질소(47.8%), 수소이온농도(6.5%), 철(20.1%), 망간(24.5%) 등이 먹는 물 수질 기준을 초과하고 있는 것으로 나타났다(한국수자원공사, 2000). 그밖에 암모니아성 질소, 아연, 불소 등이 일부 수질 기준을 초과하는 것으로 나타났으며, 기타 먹는물 수질 항목의 초과 빈도는 거의 전무하였다. 특히, 농업활동이 활발한 지역에서는 비점오염원에서 기원하는 대표적인 오염물질인 질산성 질소가 전체 시료의 22.3%에서 농업용수 및 생활용수의 수질 기준(NO₃-N 20 mg/L) 마저도 초과하는 것으로 조사되었다. 따라서 낙동강에 인접한 대규모 충적층 지역의 충적층 지하수는 특히 질산성 질소에 의해 심각하게 오염되어 있는 것으로 나타났다. 표 3에서는 질산성 질소 오염이 4개 조사 지역 중 가장 심각한 것으로 조사된 창녕군 월하리 지역의 분석 자료를 나타내고 있다.

표 3. 낙동강 유역 창녕군 월하리 지역의 충적층 지하수 수질 현황
(농업용수 수질 기준 초과 항목 및 빈도)

항 목	농업용수 수질기준	1차 (1999년 10월)	2차 (2000년 4월)	3차 (2000년 8월)
수소이온농도(pH)	6.0~8.5	5/20 (25.0%)	13/24 (54.2%)	9/21 (42.9%)
질산성 질소	20 mg/L 이하	7/20 (35.0%)	10/24 (41.7%)	10/21 (47.6%)

금강 유역의 경우, 5개 지역의 충적층에서 채수한 지하수 시료의 분석 결과를 보면, 먹는 물 수질 기준을 초과한 주요 항목은 낙동강에서와 마찬가지로 역시 질산성 질소, 수소이온농도, 철, 망간 등이었다. 특히, 질산성 질소의 경우에는 총 190개 시료 중 54개(28.4%)에서 먹는 물 수질 기준을 초과하였다(한국수자원공사, 2002). 따라서 국내 주요 강변 충적층 지하수의 오염은 일차적으로는 활발한 농업 활동과 주거활동에 수반되는 질산성 질소(및 일반세균)의 오염으로 특징되며, 그밖에 충적 대수층 지질 매체와 유동 지하수 간의 수리지구화학 반응에 의해 조절되는 지역적인 환원환경 하에서의 높은 용존 철과 망간에 의한 오염으로 귀결됨을 알 수 있다.

(3) 국내 충적층 지하수의 수질(수리지구화학) 특성과 오염 요인

1) 수리지구화학 조사 자료와 수질 오염 특성의 상관성: 야외에서 측정하는 몇 가지 수질 항목을 이용하면, 그 충적층 지하수가 높은 질산성 질소 함량을 나타낼지를 어느 정도 예상할 수 있다. 일단은 상대적으로 높은 용존산소값(DO)과 높은 산화환원전위(Eh)를 갖는 지하수일수록 질산성 질소의 함량이 높을 개연성이 크다. 또한, 질산성 질소 오염 지하수는 대개 비교적 낮은 pH(6 이하)를 갖으며 비오염 지하수에 비해 알칼리도가 낮다(Min et al., 2003).

충적층 지하수의 수질을 파악하고 예측하기 위해서는 먹는물 수질 기준 항목 외에도 반드시 주요 용존 양이온 및 음이온을 분석함이 필수적이다. 주요 용존 이온 간의 함량 상관성을 살펴본 결과, 충적층 지하수 내 질산성 질소의 함량이 높아질수록 일반적으로 총용존고체량(TDS), Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻의 함량은 정(+)의 비례관계로 증가하며, 반대로 HCO₃⁻는 반비례 관계를 보임을 확인하였다(Min et al., 2002; Chae et al., 2003). 한편, 높은 질산성 질소를 포함하는 충적층 지하수의 산출 특성을 수리지질학적 관

점에서 살펴본 결과, 높은 질산성 질소 함량은 지하수면(GWL)에 인접한 천부에서 특징적으로 높게 나타나며, 또한 중립질 이상의 비교적 균질한 사질 대수층일수록 상당히 깊은 심도까지 높은 질산성 질소 함량을 유지함을 알 수 있었다(Kraft et al., 1999; Min et al., 2002).

반면, 높은 용존 철과 망간 함량을 보이는 지하수는 수리지구화학적으로는 대개 1 이하까지 떨어지는 매우 낮은 용존산소값(DO; 0.5~2 mg/L)과 200 mV 이하의 비교적 낮은 산화환원전위값(-100~200 mV)을 갖는다. 또한 높은 함량의 질산성 질소를 포함하는 지하수에 비하여 pH는 대체적으로 1 단위 이상 높아 7 내외의 값을 나타내며, 아울러 약 3~4배 이상의 높은 알칼리도를 보인다. 높은 철과 망간 농도를 보이는 충적층 지하수는 사질 대수층이 난대수층인 실트층과 접하는 경계부에서 특징적으로 산출되며(McMahon, 2001), 불균질하게 협재된 실트 및 점토층과의 주변부에서도 잘 나타난다. 이러한 경향은 이러한 지질 특성 하에서 지하수의 유속이 저하되고 풍부한 유기물에 의해 지구화학적 환경이 산화환경에서 환원환경으로 전이됨에 기인하는 것으로 판단된다(채기탁 외, 2002a; Cey et al., 1999; Chae et al., 2003).

2) 수질 오염 특성과 충적층 지질과의 관계 - 다양한 수리화학 유형의 형성 기작 및 향후 연구에 대한 제안: 자연 상태에서 형성되는 충적층 지하수의 수질은 크게 인위적인 오염의 영향(특히, 농업활동과 관련된 과량의 비료와 분뇨 투입의 영향)과 대수층 내에서의 지구화학 반응의 영향(특히, 충적층 내에 협재된 세립질 지질매체(주로 실트층과 점토층)에 의한 산화환원 환경의 변화)으로 대분하여 생각해 볼 수 있다(Min et al., 2003; Chae et al., 2003). 이 밖에 국내에서는 강 하류에 위치한 해안 충적층이나 하성 충적층에서 아주 드물게 조류(tide)의 영향에 의한 해수 유입의 흔적이 잔존하여 특이한 수질 유형을 나타내는 경우도 관찰되었다.

지금까지의 연구 결과를 보면, 국내 충적층 지하수의 수질 특성은 수리지구화학적 상(hydrogeochemical facies)에 의해 분류가 용이한데(그림 4 및 표 4 참조), 각 수질 상(相)의 형성에 영향을 미치는 기원과 기작 및 각 수질 상의 수리지질학적 부존 특성에 대하여 요약 정리하면 다음과 같다.

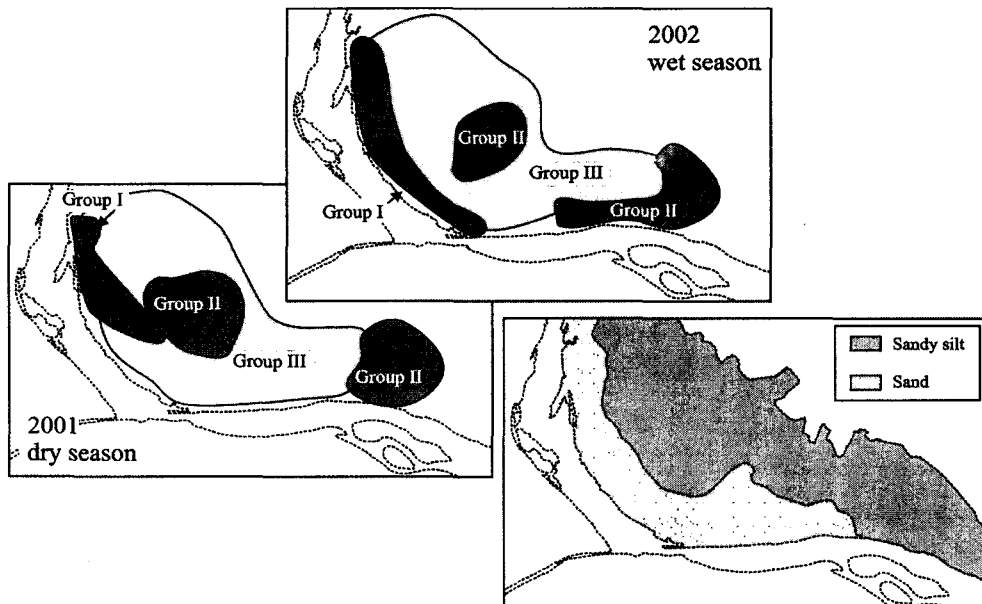


그림 4. 금강 권역 부어 지역의 충적층 지하수의 수질 유형과 지질(퇴적상) 간의 상관성(출처: Chae et al., 2003). Group I = Ca-NO₃(Cl) 유형, Group II = Ca-HCO₃ 유형(단, Fe- and Mn-rich, NO₃-poor), Group III = Ca-HCO₃ 유형. Group I은 특징적으로 사질 충적층 환경에서, Group II는 실트질이 풍부한 충적층 환경에서 산출됨.

표 4. 금강 권역 부여 지역의 충적층 지하수의 수질 유형별 수질 현황(먹는물 수질 기준 초과 비율) 비교

	NO ₃	Fe	Mn	NO ₃ , Fe, or Mn
Group I (n=12)	12 (100%)	3 (25%)	3 (25%)	12 (100%)
Group II (n=12)	0 (0%)	12 (100%)	12 (100%)	12 (100%)
Group III (n=31)	13 (42%)	11 (36%)	11 (36%)	21 (68%)
Total (n=55)	25 (46%)	26 (47%)	26 (47%)	45 (82%)

비오염 지표수가 나타내는 수질 유형과 동일한 Ca-HCO₃ 유형의 충적층 지하수(표 4와 그림 4의 경우 Group III)는 주로 인위적 오염의 영향이 적은 충적층의 상류 구배(즉, 산기슭에 인접한 마을의 생활용 관정이나 우물 등)에서 특징적으로 나타났다. 또한, 충적층을 지나 풍화대에 까지 개설된 관정의 지하수에서도 많이 나타났다. 이들은 인위적 오염의 영향이 적은 배경 수질의 특성을 보여주는바, 그 수질은 빗물이 상부 토양층을 통과하여 충적 대수층에 유입될 때 일어나는 물-암석 반응에 의해 지배된다. 이는 일반적인 비오염 지하수의 수질 형성과 동일하다. 한편, 창녕군 월하리 충적층 지역의 연구 결과를 보면, Ca-HCO₃ 유형의 충적층 지하수는 -16% 내외의 탄소동위원소 값을 나타내어 오염된 Ca-Cl(NO₃) 유형의 충적층 지하수(-18~-20%)에 비해 다소 높지만 동일 지역 암반 지하수의 값과 유사한 탄소동위원소 값을 나타내었는바, 이는 충적층 환경에서의 다양한 수체와 오염도를 조사함에 있어 탄소동위원소 조성 값이 유용할 수 있음을 시사한다(한국수자원공사, 2000).

한편, Ca-Cl(NO₃) 유형의 충적층 지하수(표 4와 그림 4의 경우 Group I)는 농업활동이 활발한 대규모 충적층 지역에서 특징적으로 관찰된다. 특히, 충적층 한가운데의 농업용 관개공이나 축사와 소규모 마을이 위치하는 지역의 지하수 공에서 빈번히 나타난다. 이러한 수질 유형은 전 세계적으로 호기성 사질 대수층 지역에서 특히 지하수면 직하부의 천부 충적층 지하수에서 많이 보고되고 있다. 이 유형의 충적층 지하수의 형성은 상당 부분 지표 농업활동과 밀접한 관계를 가지는데, 특히 과도하게 살포된 질소계 비료의 산화와 관련된 질산화 작용(nitrification)이 중요한 요인인 것으로 판단된다. 참고적으로, 우리나라에서는 농업활동과 관련하여 질소계 비료의 사용량이 너무 높아 연간 1 ha 당 투입되는 비료양이 무려 224 kg/ha/yr(연중 농업활동이 이루어지는 있는 낙동강 유역의 이릉 지역의 경우 354 kgN/ha/yr)에 이르는 것으로 알려졌다(영국은 128 kg/ha/yr, 미국은 27.5 kg/ha/yr로 보고됨). 한편, 이러한 호기성 지질(지구화학) 조건에서는 질산화가 매우 용이하며, 이에 따라 지하수의 pH와 알칼리도는 점차 감소하는 경향을 보이게 된다. 대표적인 예가 창녕군 월하리 지역의 충적층 지하수에서 관찰되었다(그림 5). 즉, 충적층 상류 구배에서 강을 향하여 일어나는 지하수의 유동에 수반되어 충적층 지하수의 수질 특성은 Ca-HCO₃ 유형에서 Ca-Cl(NO₃) 유형으로 전이되는 특성이 관찰되었다. 이는 상류 구배에서 유입된 비오염 지하수에 충적층 한 복판에서의 사계절 농업활동에 의한 오염물질(비료와 분뇨 기원)이 지속적으로 유입된 결과이다. 따라서 이 유형의 충적층 지하수는 질산성 질소에 의한 오염 취약성이 가장 큰

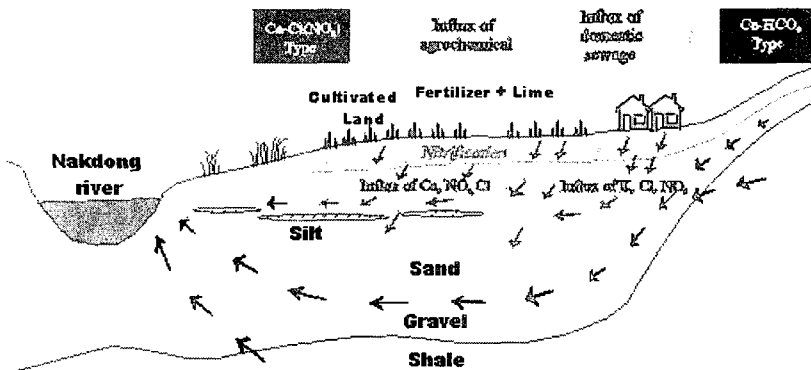


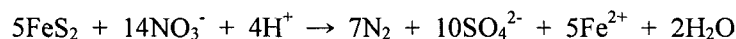
그림 5. 충적층 지하수의 수질 유형 변화 예(창녕군 월하리 지역)

단적인 예이다.

한편, 이러한 유형의 지하수에서 가장 문제가 되는 질산성 질소 문제를 효과적으로 관리하여 오염을 저감하기 위해서는 무엇보다도 질소의 오염원을 밝히는 일이 가장 중요하다. 이러한 측면에서 질소 동위원소의 활용은 질소 오염원을 구별해내고 탈질 등 생지구화학적 반응을 예측하

는데 매우 좋은 연구 기법으로 알려져 있다(Aravena et al., 1993; Bohlke and Denver, 1995; Min et al., 2003). Min et al. (2002, 2003)은 월하리 충적층 지하수에 대한 질소동위원소 연구를 통하여 충적층 지하수 내 질산성 질소의 오염원은 대부분 비료와 분뇨의 혼합 기원임을 밝히는 한편, 이를 이용하여 충적층 환경에서의 다양한 수체 간의 혼합 양상을 정량적으로 규명하였다(그림 6).

국내 충적층 환경에서는 표 4와 그림 4에서의 Group II 유형(또는 지역에 따라 Ca-SO₄ 유형)의 충적층 지하수가 산출되는 경우가 있는데, 이러한 수질 유형의 형성은 충적층 내에서의 국부적인 지질 특성에 의해 좌우되는 것으로 판단된다. 이 유형의 지하수는 대체적으로 높은 철과 망간 함량을 나타내며, 전술한 Ca-Cl(NO₃) 유형과 비교하면 특징적으로 매우 낮은 질산성 질소 함량을 보인다. 낙동강 충적층 지역에서는 특징적으로 사질 대수층과 실트층의 경계부를 사이에 두고 1~2 m 사이에서 질산성 질소 농도의 급격한 저감이 관찰되었는데(Min et al., 2003), 이러한 곳에서는 pH, 알칼리도, SO₄²⁻, NH₄⁺, Fe, Mn 등의 함량은 일반적으로 높아지는 현상이 관찰된다(Cey et al., 1999). 이러한 수리지구화학 변화 경향은 지하수계의 지구화학적 환경이 국부적으로 환원환경으로 전이됨을 지시하며, 이에 따라 질산성 질소의 자연적인 저감이 탈질화(denitrification)에 지배됨을 시사한다. 이때, 탈질을 야기하는 주요 환원 물질은 일반적으로 대수층 내의 유기물인데, 이 과정에 대해서는 비교적 잘 알려져 있다. 한편, 금강 권역 부여 지역의 충적층 지하수에서도 위와 같이 Fe, Mn, 알칼리도의 농도 증가가 인지되는 영역에서 특징적으로 질산성 질소와 SO₄²⁻의 농도가 저감되는 특성을 고찰하였다(채기탁 외, 2002a; Chae et al., 2003). 이는 대수층의 환원환경이 탈질화의 조건을 지나 황산염 환원(sulfate reduction)에 까지 이른 결과로 해석된다. 이와 관련하여, 낙동강 유역 용당 지역의 일부 충적층 지하수에서는 매우 높은 황동위원소 값(31.3‰)이 나타남바, 이는 국내 일부 충적층 지하수 환경에서 실제로 황산염 환원이 일어나고 있음을 증거하는 것으로 사료된다. 이러한 수질 유형, 특히 Ca-SO₄ 유형의 충적층 지하수는 충적층 지질매체 내에서 다음과 같은 탈질화 반응에 의하여 형성되는 것으로 해석된다(김경호 외, 2002b; Min et al., 2003).



이와 같이, 혐기성 조건(약 Eh 200 mV 이하)에서의 질산성 질소에 의한 황철석의 산화반응은 이론적으로 지하수 내에 높은 SO₄ 농도를 제공할 수 있다. 그러나 아직 국내에서는 질산성 질소의 자연 저감에 있어 중요한 역할을 하는 충적 대수층 내의 황화물(주로 황철석)을 확인 정량하고, 나아가 황동위원소 분석 등을 통하여 충적층 내에서의 황과 질소의 순환 과정을 정확히 해석하는 연구는 수행되지 못

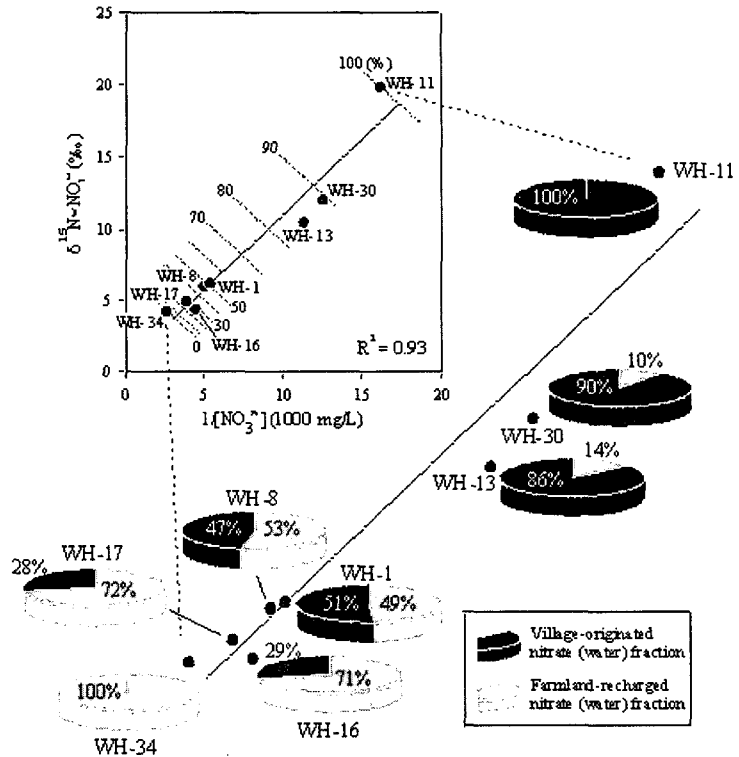


그림 6. 질소동위원소 자료를 이용한 질산성 질소의 오염원 규명 및 수체간 혼합비 산정 예(월하리 지역)

하였다. 더욱이, 비료의 영향을 크게 받은 Ca-Cl(NO₃) 유형의 일부 지하수에서도 상대적으로 높은 농도의 SO₄가 함유되는 것으로 확인되고 있는바, Ca-SO₄ 유형의 충적층 지하수의 형성 과정과 기작에 대한 보다 체계적인 연구가 필요하다고 생각된다. 즉, 질산성 질소의 자연 저감 기작, 특히 탈질의 발생에 있어 두 가지 중요한 환원 물질인 유기물과 황화광물의 상대적 중요성(기여도)을 확인하고 평가하는 자세한 연구가 요청된다.

요약하면, 국내 충적층 지질 매체에서는 질산성 질소의 자연 저감이 발생하고 있고 또한 발생할 수 있음이 폭넓게 밝혀진 바, 이는 향후 국내 충적층 지하수의 개발 이용은 물론 보전 대책 수립에 있어 세심히 고려되어야 할 것으로 생각된다. 무엇보다 국내 지하수의 개발 이용을 현실적으로 가장 크게 제한하고 있는 질산성 질소의 문제와 관련하여, 하나의 충적층 환경 내에서도 질산성 질소의 농도가 검출 한계 이하로 자연적으로 급격히 저감되는 지역이 실제 존재함을 확인하였는바, 이러한 자연 현상을 과학적으로 이해하고 효과적으로 잘 활용해야 할 것이다. 즉, 충적층 지질매체의 생성(퇴적) 환경 해석(특히, 구하상의 위치 및 퇴적 특성 규명 포함)에 입각하여 지질 매체의 오염물질 자연 저감 능력을 해석하고 또한 예측할 수 있음으로써(Min et al., 2003), 보다 경제적이고 합리적인 방법으로 충적층 지하수를 이용할 수 있을 것이다. 이 분야에 대한 집중적인 연구 지원이 요구된다.

아울러, 앞으로 국내 충적층 지하수의 친환경적 개발과 보존을 위한 수질 특성 해석에 있어서는 반드시 상기한 바와 같은 수리지구화학 연구와 더불어 환경동위원소(산소-수소, 탄소, 황, 질소 등) 기법 적용 연구를 폭넓고 정밀하게 수행할 필요가 있다. 특히, 국내에서는 충적층 지하수의 충전 및 배출 특성, 농업활동과 관련된 관개 복류수(irrigation return flow)의 영향, 천부 충적층 지하수의 증발 효과 등 주요 사항들에 대한 연구가 수행되지 못하고 있는바, 이들 문제를 해석 규명하기 위한 체계적인 환경동위원소 연구가 요망된다. 이와 같은 노력은 충적층 지하수자체의 연구 뿐 아니라 지표수-지하수 연계 시스템의 이해와 활용 측면에서도 필수적으로 큰 도움이 될 것이다. 한편, 이러한 수리지구화학/환경동위원소 연구 결과는 반드시 수리지질학적 연구를 토대로 한 수리모델링 및 수리지구화학 모델링과 접목하여 종합적으로 해석해야 할 것이다(Bohlke and Denver, 1995; Harrington et al., 2002). 이와 관련하여, 최근 Chae(2003)는 국내에서 처음으로 비료 성분을 투입 고려한 보다 개선된 수리지구화학 모델링을 수행하고 이를 지구통계 기법 및 수리화학/환경동위원소/수리지질 자료와 연계 해석함으로써, 오염원의 평가 및 오염물질의 이동과 운명(저감) 해석에 성공적으로 활용한 바 있다.

3. 충적층 지하수의 평가 및 활용 방안: 실례와 제안

(1) 충적층 지하수의 개발(양수)과 관련한 수체 기여도 평가

최근 국내 일부 지역에서 충적층을 활용한 강변여과(bank filtration) 사업이 진행되고 있는바, 양수시 지하수(복류수)와 하천수 간의 혼합비 도출 문제로 귀결될 수 있는 원수 단가 산정 문제가 논란이 된 바 있다. 지금까지 충적층 지하수의 양수와 관련한 하천수 유입 비율 산정을 위해서는 충적 대수층의 수리지질 특성과 수위 자료를 기초로 한 지하 대수층 수체 유동 평가 기법이 적용되고 있으나, 수리지구화학 자료를 활용한 평가 기법은 고려된 바 없다. 참고적으로 라인강의 경우, 하천수의 경도와 배후 지하수의 경도가 뚜렷이 구분됨을 이용하여 취수된 강변여과수의 경도 자료로부터 하천수의 유입 비율을 산정하고 있다. 그림 7은 충적층 지하수의 양수에 따른 수위 변화 및 다양한 수체의 유입 효과를 모식적으로 나타내고 있다. 이 그림에서는 수체를 하천수와 지하수로 단순화하였으나, 실제로 지하수는 직접 침투수와 광역 순환 지하수로 세분할 수 있다.

취수원수, 하천수, 충적층 지하수에 존재하는 보존성(conservative) 원소(예: 염소, 황산염, 불소, 수소 또는 산소동위원소비 등) 및 기타 수질 항목(예: pH, 총용존고체 함량, 경도 등)의 함량 분석 자료

를 이용하여 아래와 같은 아주 간단한 질량보존식을 적용하면 각 수체의 기여도(혼합비)를 쉽게 계산할 수 있다.

평가 대상 취수관정(또는 취수관정군)에서의 평균 일일 취수량을 QO , 해당 관정으로 유입되는 지하수(충적층지하수와 암반 균열 대수층 지하수로 구분되나, 합쳐서 충적층 지하수로 고려해도 무방)의 일일 유입량을 GI , 해당 관정으로 유입되는 하천수의 일일 유입량을 SI 라 하고, 보존성이 강한 수리화학 분석 항목 i (여러 항목을 함께 고려해도 됨)에 대하여 QO , GI , SI 중의 함량(농도)을 각각 Qi , Gi , Si 라 하면, 현장 조사를 통하여 측정되는 값은 GI 와 SI 를 제외한 QO , Qi , Gi , Si 이다. 이 때, 다음과 같은 간단한 질량 보존식이 성립되며, 이를 풀면 미지변수 GI 와 SI 를 계산해 낼 수 있다.

$$QO = GI + SI \quad (1)$$

$$QO \times Qi = GI \times Gi + SI \times Si \quad (2)$$

이때, 보다 객관적인 결과를 도출하기 위해서는 장기적인 수위 관찰, 대수성 분포 조사 및 수질 특성과 그 변화 요인을 고찰함이 필요하며, 또한 수리모델링에 의한 평가 결과와 보완 해석함이 좋을 것이다.

한편, 강변 여과를 시행하고 있는 낙동강 유역의 어느 지역 현장에서 서로 다른 물(취수된 강변 여과수, 강물, 천부 충적층 지하수, 배후의 암반 지하수)을 채수하고 수리지구화학 및 환경동위원소 조사 연구를 수행함으로써, 강변 여과수를 형성하는 서로 다른 수체의 혼합비를 지화학적 기법에 의해 산출할 수 있는지를 검토하여 보았다. 그림 8에는 유형별 물의 산소-수소 동위원소비를 도시하였는데, 흰색 원으로 표시된 강변 여과수의 동위원소비가 강물의 것과 상당한 차이를 보임을 알 수 있다. 오히려 강변여과수는 충적층 배후의 마을에서 채수한 생활용 우물 및 지하수 관정의 물과 유사한 동위원소비를 나타내고 있다. 따라서 강물과 혼합되어 취수되고 있는 강변 여과수를 형성하고 있는 것으로 생각되는 수체는 많은 부분이 배후지로부터 유입되어 강으로 배출되고 있는 광역 순환 지하수인 것으로 생각된다. 자료의 제한으로 말미암아 혼합비에 대한 정량적 산출은 유보키로 한다.

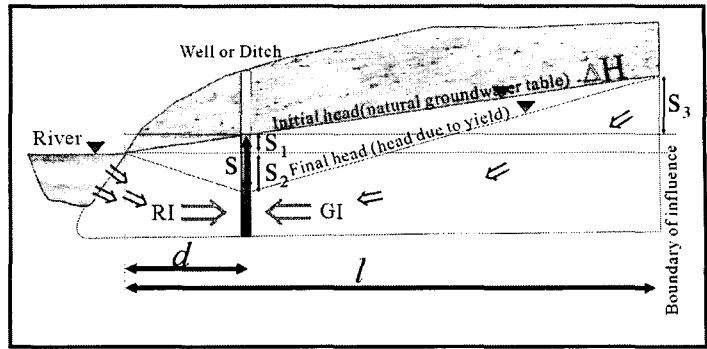


그림 7. 강변 충적층에서의 양수행위에 수반된 지하수-지표수 상호작용

(GI = 관정으로 유입되는 지하수량, RI = 관정으로 유입되는 하천수량, S = 양수시의 수위강하량, $S1$ = 초기 관정 지하수두와 하천수두와의 편차, $S2$ = 양수에 의한 안정수두와 하천수두와의 편차, $S3$ = 초기 관정 지하수두와 영향 범위 경계부 지하수두와의 편차, d = 하천에서 관정까지의 수평 거리, l = 하천에서 지하수 영향 범위 경계까지의 거리, ΔH = 초기 지하수위 경사도)
(그림 제공: 김형수 박사)

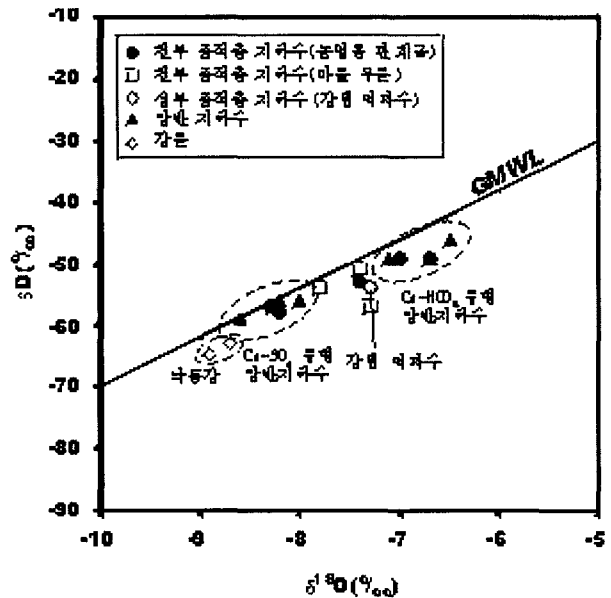


그림 8. 강변 여과수를 위시한 유형별 자연수의 산소-수소 동위원소비 변화 예

(2) 충적층 지하수의 수량/수질 기초 평가의 고려 사항

충적층 지하수의 개발 이용에 있어 특히 안정적인 지하수 수량과 수질을 확보하기 위해서는 사전 조사에 있어서 다음과 같은 사항들이 반드시 고려되고 평가되어야 할 것으로 판단된다.

첫째, 고려 대상 충적층이 위치하고 있는 지역의 일반적인 자연적 조건들이다. 충적층의 지질학적 기원 및 주변 암상의 지질, 충적층 분포 면적 및 두께, 토지이용현황, 기후 및 식생의 영향 등이 이에 해당한다. 이들은 충적 대수층 지하수의 수량과 수질에 영향을 미치는 기본적인 요인들이기 때문이다.

둘째, 충적 대수층의 수리지질학적 조건들이다. 충적층 발달상태, 대수층 매질의 입자 크기, 투수성 및 양수 가능량 등이다. 이는 지하수의 함양과 유동에 결정적인 영향을 미치는 요인들로서 적정량의 지하수 부존성과 이와 관련된 경제성을 산출하는데 필수적이다.

셋째, 충적층 지하수의 수질 특성에 영향을 미치는 조건들이다. 여기에는 오염원의 분포 및 배후 인근 지역의 특성, 충적 대수층 매질과 지하수의 반응을 통한 자연정화능력의 가능성 등이 포함된다.

(3) 충적층 지하수의 수량과 수질의 최적 확보를 위한 지질학적 고려 사항

충적층 지하수의 개발·이용에 있어서 요구되어지는 지하수의 양과 수질의 수준은 우선적으로는 그 용도(사용 목적)에 따라 결정될 것이다. 지하수의 양과 질 모두가 충분히 만족됨이 최적 조건이겠으나, 양자를 모두 만족시키는 최적 개발지를 찾는다는 것은 쉽지 않다. 양이 많으면 질이 불만족스러운 경우가 흔하기 때문이다. 충적층 지하수의 양과 질은 무엇보다도 개발 지역의 지질 특성, 특히 충적층 자체의 입도 분포 및 광물·지화학 특성에 의해 결정됨을 명심해야 한다. 이러한 충적층의 지질 특성은 기본적으로 퇴적 환경에 의해 좌우되며, 따라서 이에 대한 정밀한 선행 조사가 요구된다.

수량의 확보 측면에서 보면, 당연히 충적층은 모래 또는 자갈층으로서 높은 투수계수를 가질수록 좋을 것이다. 강변여과와 지하댐 등 대량의 충적층 지하수 개발에 있어서는 대수층의 투수계수는 10^{-1} cm/s 정도로 커야 하고 포화 대수층의 두께도 적어도 5 m 이상을 꾸준히 유지해야 한다고 알려져 있다. 그러나 단순히 자갈과 모래로 이루어진 충적층의 경우에는 지표 기원 오염물질의 유입이 매우 용이하여 오염에 대단히 취약하며, 또한 단순 여과 이외에는 대수층 지질매체에 의한 오염물질 자연저감 과정을 기대하기 어렵다. 따라서 앞서 기술한 바와 같이, 대표적인 무기오염물질인 질산성 질소의 자연저감을 기대하기 위해서는 적정량의 유기물 또는 황화물을 함유하고 있는 실트질 층이 수리적 특징을 크게 떨어뜨리지 않는 상황에서 적절히 협재되어 있는 지질 특성이 유리할 것이다. 이와 같이 서로 상반되는 것처럼 보이는 양과 질의 문제를 최적 조건에서 함께 기대할 수 있는 적절한 지질 조건이 무엇인지에 대한 정밀 검토가 요망된다. 한편 무기오염물질, 특히 중금속의 오염 제어(특히, 자연저감)라는 측면에서 보면, 대수층의 퇴적 환경에 따라 달라지는 특정 대수층 구성 물질의 존재 여부 및 존재량의 예측이 중요한 것으로 생각된다. 예를 들면, 산화성 환경에서 퇴적된 충적층 중에는 중금속의 흡착 기능이 뛰어난 철수산화물이 존재하여 적색 또는 갈색을 나타내는 경우가 흔하다.

요약하면, 충적층 지하수 개발 이용을 검토할 때는 반드시 충적층 자체에 대하여 층서적 특징, 입도 분포와 색 등 물리적 특징, 광물 조성 특징, 유기물 함량과 이온교환능 등 지구화학적 특징 등을 면밀히 규명하기 위한 정밀 지질 조사/연구가 무엇보다 중요함을 인식해야 한다.

(4) 충적층 지하수의 활용 증대 방안

근래, 충적층 지하수의 활용을 극대화하기 위한 새로운 기술들, 예컨대 강변여과와 인공함양 기술, 지하수댐 건설 기술 등이 적극 검토되고 있다. 이들은 조건에 따라 경제적이며 지속적으로 양질의 물을 제공할 수 있는 좋은 수단인 것으로 나타났다.

특히, 지하수 인공 함양은 일차적으로 충적 대수층 내에서의 취수 원수의 수질 개선 효과(연수화, 황화수소 감소, 부영양화 물질 및 세균 감소, 물리적인 입자 제거, 독성 물질 제거 등)를 위하여 시행된

다. 특히, 유도 방식 인공함양에 해당하는 강변 여과 방식은 하상의 투수성이 높고 하천변 대수층이 상당히 두꺼우면서 투수성이 높은 모래 또는 자갈로 구성된 경우에 효과적인데, 지하수위와 다른 하천의 유량에 큰 영향을 미치지 않으면서 대규모의 지하수를 개발할 수 있다는 장점이 있다. 실제 국내의 강변 여과 현장에서 취득된 자료를 보면, 탁도와 대장균류 등 미생물 저감의 측면에서 효과가 우수한 것으로 나타났다. 그러나 철, 망간, 질산성/암모니아성 질소, 유기오염물질 등의 항목에서는 탁월한 수질 개선 효과가 나타나지 않았는데, 이에 대한 적절한 대책(대수층의 자연 저감 기능을 활용함도 필요)이 연구 검토되어야 할 것이다.

상기 기술들과 관련한 보다 자세한 논의는 본 심포지움의 “지하수 인공함양 기술 개발(김형수 박사)”를 참고하길 바란다.

4. 결론 및 제안

충적층은 하천수와 수리적 연계가 강하여 하천으로 유출되는 각종 오염물질을 정화 제거하는데 있어 중요한 역할을 하며, 충적층 지하수는 특히 갈수기에 건강한 하천을 유지하는데 있어 핵심 역할을 담당한다. 충적층 지하수는 대규모의 용수 개발에 적절하며, 앞으로도 물부족 시대의 중요한 수자원으로 강변 여과와 인공함양 및 지하수담 건설 등을 위시하여 그 활용성이 대폭 증대될 것으로 예상된다. 하지만, 과잉 개발 이용의 경우 지표수 및 하천 생태계에 심각한 영향을 줄 수 있다. 또한, 최근 들어 충적층 내 또는 그 주변에서의 대규모 농업활동(특히, 과량의 비료를 사용한 농업활동)은 특히 질소계 오염물질에 의한 충적층 지하수와 하천수의 가장 중요한 수질 오염원으로 부각되었다. 이에, 충적층 지하수의 환경친화적 개발 이용을 위한 체계적인 연구 및 기술 개발이 절실히 요구되고 있다. 이와 관련하여 특히 다음 사항들에 대한 집중적인 연구 개발 투자가 요청된다.

첫째, 유역별 충적층 지하수에 대한 체계적인 수리지질 및 수리지구화학 연구가 이루어져야 한다. 특히, 계절별로 강우 현상을 고려하여 충적층 환경의 다양한 수체들, 즉 광역 순환 지하수, 직접 침투 지표수, 하천수 간의 연계성(상관성)을 정량적으로 해석하기 위한 종합적인 연구가 절실히 요구된다.

둘째, 이와 관련하여 지하수학 및 지표수문학 전공자가 서로 협력하여 지질 특성별로 지표수와 지하수간의 충전 및 배출의 상관성을 해석하기 위한 통합적인 연구, 즉 ‘watershed study’가 하루빨리 추진되어야 한다.

셋째, 충적층 지하수의 가장 중요한 수질 오염물질인 질소계 화합물에 대하여 그 기원과 거동 및 오염부하량 등을 체계적으로 파악하기 위한 지역별 연구가 시급하다. 특히, 농업활동 중 투입되는 비료에 의한 수질 오염 문제를 과학적으로 규명하기 위한 수리화학 및 환경동위원소 연구가 수행되어야 한다. 이를 통하여, 질소계 오염물질에 의한 충적층 지하수와 하천수의 오염을 최소화할 수 있는 오염원 관리 및 저감 대책이 제시될 수 있을 것이다.

넷째, 충적층 지질매체의 퇴적 환경에 연관되는 광물 및 지화학적 특성과 관련하여, 충적층 지하수 내 각종 오염물질(특히, 질소계 화합물, 철, 망간, 중금속류 등)의 자연저감 기작을 밝히기 위한 수리지질/지구화학 연구가 수행되어야 한다. 이러한 연구 결과는 강변여과와 지하수담 시설 등의 입지 선정에 필수적인 자료로 활용함으로써, 정화 효율의 극대화에 기여할 수 있을 것이다.

다섯째, 이와 관련하여 국내 부존 충적층의 지질 특성을 퇴적 환경, 입도 및 광물/지화학 특성에 따라 보다 세분화하여 나타낼 수 있는 ‘제4기 정밀지질도(Quaternary Geologic Map)’의 작성 사업이 국가적 차원에서 이루어져야 할 것이다.

사 사 : 본 논문은 고려대학교 천부지권환경연구실(EGRL)의 지원에 의하여 이루어졌다. 본 발표 주제와 관련하여 공동연구를 수행하고 있는 군산대 김강주 교수, 충북대 이철우 교수 및 수자원연구소의 김형수 박사의 도움에 감사를 표한다.

5. 참고문헌

- 김경호, 윤성택, 채기탁, 최병영, 김순오, 김강주, 김형수, 이철우, 2002a, 금강 권역 충적층 지하수의 질산염 오염: 질산성 질소의 기원과 거동 고찰 및 안전한 용수 공급을 위한 제언: 지질공학 12(4), p. 471-484.
- 김경호, 윤성택, 채기탁, 허철호, 김형수, 이철우, 김강주, 2002b, Hydrochemistry of an alluvial aquifer in the Cheonan area: role of the pyrite oxidation on denitrification: 한국지하수토양환경학회 추계학술발표회 논문집, p. 287-290.
- 농림부, 지하수개발공사, 1965-1967, 농업용수원 개발 지하수 조사 보고서.
- 창원시, 1997, 창원시 강변여과수 개발 타당성 조사 보고서.
- 채기탁, 윤성택, 김경호, 김형수, 김강주, 이철우, 2002a, 부여지역 충적층 지하수의 수리지구화학 특성에 관한 예비 연구: 수리환경 변화와 환원대(reducing zone)의 이동: 한국지하수토양환경학회 춘계학술발표회 논문집, p. 176-178.
- 채기탁, 윤성택, 김경호, 허철호, 김강주, 이철우, 김형수, 2002b. Hydrogeochemistry of alluvial groundwater in the Osong area, Cheongju: natural attenuation of nitrogen compounds: 한국지하수토양환경학회 추계학술발표회 논문집, p. 107-110.
- 한국수자원공사, 1995, 충적층지하수 산출특성과 활용방안 연구 보고서, p. 129.
- 한국수자원공사, 1996, 전국 충적층 지하수 조사 보고서, p. 263.
- 한국수자원공사, 2000, 낙동강권역 광역 지하수 조사 용역 보고서, p. 348.
- 한국수자원공사, 2002, 금강권역 광역 지하수 조사 연구. p. 390.
- 환경부, 경상남도, 1998, 이룡지구 강변여과수 시범 개발 조사 사업 보고서.
- 환경부, 부산광역시, 경상남도, 1996, 부산·경남지역 복류수 및 강변여과수 개발 타당성 조사 보고서.
- Aravena, R., Evans, M. L. and Cherry, J. A., 1993, Stable isotopes of oxygen and nitrogen in source identification of nitrate from septic systems: Ground Water 31, p. 180-186.
- Bohlke, J. K. and Denver, J. M., 1995, Combined use of groundwater dating, chemical, and isotopic analyses to resolve the history and fate of nitrate contamination in two agricultural watersheds, Atlantic coastal plain, Maryland: Water Resources Research 31, p. 2319-2339.
- Cey E. E., Rudolph, D. L., Aravena, R. and Parkin, G., 1999, Role of the riparian zone in controlling the distribution and fate of agricultural nitrogen near a small stream in southern Ontario: Journal of Contaminant Hydrology 37, p. 45-67.
- Chae, G. T., 2003, Geostatistical, hydrogeochemical, and environmental isotopic studies of alluvial groundwaters in the Buyeo and Osong areas in the Geum River watershed, Korea: Emphasis on geochemistry of nitrate: Unpub. Ph.D. thesis, Korea University, 144 p.
- Chae, G. T., Kim, K., Yun, S. T., Kim, K. H., Kim, S. O., Choi, B. Y. and Rhee, C. W., 2003, Hydrogeochemistry of alluvial groundwaters in an agricultural area of Korea: An Implication for Groundwater Contamination Susceptibility: Chemosphere, submitted.
- Dawson, T. E. and Ehleringer, J. R., 1991, Streamside trees that do not use stream water: Nature 350, p. 335-337.
- Harrington, G. A., Cook, P. G. and Herczeg, A. L., 2002, Spatial and temporal variability of ground water recharge in central australia: a tracer approach: Ground Water 40(5), p. 518-528.

- Hayashi, M. and Rosenberry, D. O., 2002, Effects of ground water exchange on the hydrology and ecology of surface water: *Ground Water* 40(3), p. 309-316.
- Kraft, G. J., Stites W. and Mechenich, D. J., 1999, Impacts of irrigated vegetable agriculture on a humid north-central U.S. sand plain aquifer: *Ground Water* 37, p. 572-580.
- McMahon, P. B., 2001, Aquifer/aquitard interfaces: mixing zones that enhance biogeochemical reactions: *Hydrogeology Journal* 9, p. 34-43.
- Min, J. H., Yun, S. T., Kim, K., Kim, H. S., Hahn, J. and Lee, K. S., 2002, Nitrate contamination of alluvial groundwaters in the Nakdong River basin, Korea: *Geosciences Journal* 6(1), p. 35-46.
- Min, J. H., Yun, S. T., Kim, K., Kim, H. S. and Kim, D. J., 2003, Geologic controls on the chemical behaviour of nitrate in riverside alluvial aquifers, Korea: *Hydrological Processes* 17, p. 1197-1211.
- Rains, M. C. and Mount, J. F., 2002, Origin of shallow ground water in an alluvial aquifer as determined by isotopic and chemical procedures: *Ground Water* 40(5), p. 552-563.