

지속적인 지하수개발과 지하수 환경평가에 관한 고찰

이도훈 (경희대학교 토목·건축공학부 부교수)

1. 머리말

지하수의 개발 및 이용이 지속적으로 이루어지기 위해서는 지하수의 개발에 따른 환경영향을 사전에 평가하여 지하수 개발 및 관리계획에 반영하고, 주기적인 평가를 통하여 자연환경에 미치는 영향을 최소화하는 방안을 수립하여 지속적이고 환경적으로 건전한 지하수 개발이 될 수 있도록 노력할 필요가 있다. 지하수법에는 일정량 이상의 지하수를 개발·이용할 경우에 주변지역에 미치는 영향을 분석하도록 지하수 영향조사를 위한 조사항목, 조사방법, 평가기준을 규정하고 있지만, 지하수법상의 영향조사는 개개 관정의 개발시에 국지적으로 적용되는 환경 영향 평가이기 때문에 광역적인 규모에 대한 종합적인 환경평가를 수립하는 데는 한계가 있다. 따라서 광역적인 규모에 대한 환경평가를 실행할 수 있는 프로그램이 필요하다. 지하수법의 지하수 영향조사에 관한 제반 문제점은 배상근(1995)에 의해 검토된 바 있다.

지하수 개발에 수반하는 각종 자연환경의 변화를 사전에 예측·평가하는 과정은 매우 어려우며 많은 불확실한 요소를 포함하고 있다. 특히, 개발로 인해 지하수 유동계가 나타내는 반응을 충분히 관측 및 이해하지 못한 상태에서 그 영향을 사전에 예측·평가하기 때문에 그 결과의 신뢰성에는 많은 문제점이 있을 수 있다. 따라서 국가적인 차원에서 지하수 개발의 초기단계에서부터 합리적이고 효율적인 환경평가 프로그램 및 기법 등을 구축하고, 지속적으로 시행하여 지속가능한 개발을 위한 계획 및 관리방안 수립, 지속가능한 개발이 실행되고 있는지를 판단할 수 있는 기

초자료로 활용하여야 한다.

따라서 본고에서는 지하수 과잉채수에 따른 환경문제 형태 및 과잉개발과 관련된 개념, 기문헌에 소개된 환경평가 프로그램의 구성체계 및 요구사항 등을 검토하여 지하수의 개발이 장기간에 걸쳐 환경적 장애 없이 지속적으로 개발될 수 있으며, 지속 가능한 개발을 판단할 수 있는 우리 실정에 적합한 합리적이고 체계적인 지하수 환경평가 프로그램의 구축방안에 관하여 생각해보고자 한다.

2. 지하수 과잉개발의 개념 및 환경영향

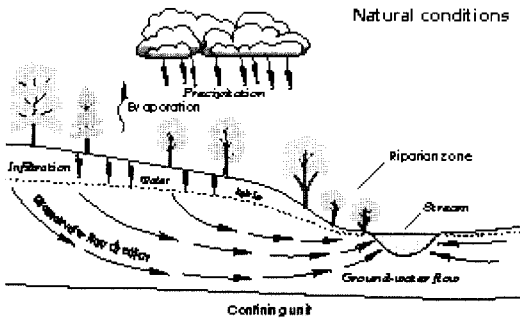
지하수 과잉개발은 지하수 개발·이용의 지속성 및 환경영향을 정의하는데 필요한 개념으로, 지하수 과잉개발은 명확히 정의하기 어려운 개념으로 알려져 있다. 지하수 과잉개발과 관련된 여러 용어들을 정리하면 다음과 같다.

① 안전채수량(safe yield)은 Meinzer(1920)에 의하여 정의된 개념으로 '바람직하지 않은 결과' 없이 지속적으로 취수할 수 있는 지하수량을 나타내며, ② 최대지속채수량(maximum sustained yield)은 특정 수원으로부터 지속적으로 취수할 수 있는 최대채수량을 의미하며(ASCE, 1961), ③ 허용지속채수량(permissive sustained yield)은 바람직하지 않은 결과 없이 어떤 지역으로부터 법적, 경제적 조건을 만족하며 지속적으로 취수할 수 있는 최대채수량을 의미하고(ASCE, 1961), ④ 최대채굴채수량(maximum mining yield)은 개발할 수 있고 이용가능한 지하수의 총저류량을 의미하며(ASCE, 1961), ⑤ 허용채

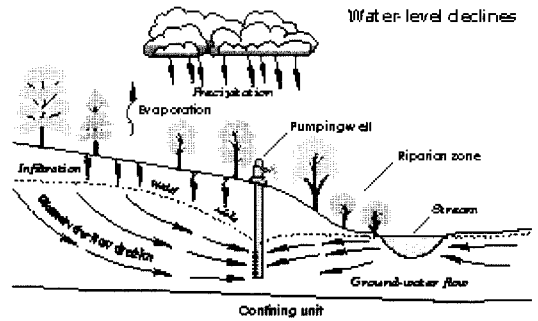
굴채수량(permissive mining yield)은 바람직하지 않은 결과 없이 법적, 경제적으로 취수할 수 있는 지하수의 총 저류량을 의미하고 (ASCE, 1961), ⑥ 지속채수량(perennial yield)은 안전채수량과 거의 동일하게 정의되는데 주어진 운영조건 아래에서 바람직하지 않은 결과 없이 지속적으로 취수할 수 있는 지하수량으로 각각 정의된다 (Todd, 1980).

위의 여러 정의들 중에서 과잉개발의 정도를 판단하는데 가장 합리적인 개념이 무엇인가에 대한 검토를 하여 지하수 환경 평가 프로그램에 적용하여야 한다. 가령 안전채수량의 개념을 채택하면, 지하수 개발량이 안전채수량을 초과하게 되면 과잉개발로 생각할 수 있게 된다. 그리고 이 용어들에 주어진 '바람직하지 않은 결과'의 예들은 다음의 경우들을 생각할 수

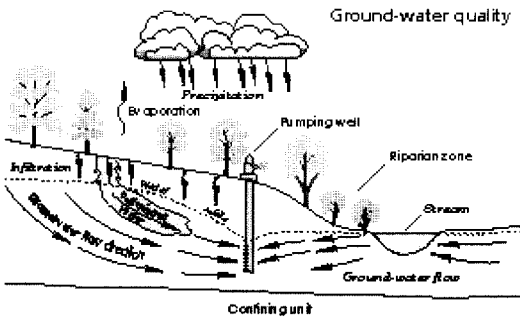
있겠다: ① 수문순환의 측면에서 보면 지하수 함양량을 초과하여 개발하게 될 경우에 지하수자원의 점진적인 고갈현상이 발생하는 경우, ② 지하수위가 저하되어 경제성 있는 양수심도를 초과하게 되는 경우, ③ 오염물질의 유입에 의해 대수층으로부터 채수되는 지하수의 수질이 악화되는 경우(그림 1.c)를 생각할 수 있으며, 특히 해안지역에 인접한 대수층으로부터 지하수가 과잉개발되면 염수가 침투되는 경우, ④ 법적인 측면으로는 공공 또는 개인 상호간의 수리권이 침해당하거나 영향을 받게되는 경우, ⑤ 지하수위의 저하로 인한 생태계 또는 농작물 등이 영향을 받게 되는 경우(그림 1.d), ⑥ 지표수체로 유입되는 지하수유출이 감소되어 지표수체의 수량과 수질에 영향을 미치는 경우(그림 1.b), ⑦ 지하수의 과잉양수로 인한 지



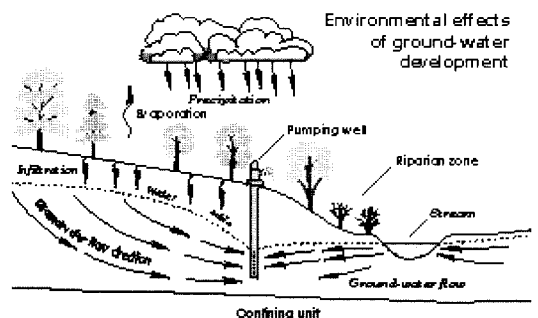
(a) 자연상태 : 강수에 의해 함양된 지하수가 하천으로 유동하는 지하수계



(b) 지하수가 양수되어 지하수위가 낮아지고, 하천물이 지하수로 침투하여 하천유량이 감소함



(c) 지표면을 통하여 유입된 오염물질이 지하수에 의해 우물로 이동



(d) 지하수위가 저하함에 따라 수변지역의 동식물이 영향을 받게되며, 하천수위가 감소함에 의해 수생 동식물이 영향을 받음

그림 1. 지하수 양수에 의한 환경영향 유형(미국 지질조사국)

반이 침하하는 경우 등이다.

국내·외에서 발생하였던 지하수위 저하, 염수침입, 지반침하 등의 사례는 배상근(1996)에 기술되어 있다. 지하수는 물 순환과정의 주요 구성요소이기 때문에 지하수의 개발은 이처럼 다양한 형태로 주변 자연환경에 영향을 미치게 되므로 환경에 미치는 영향을 파악하고 미연에 방지할 수 있도록 지하수와 환경사이의 상호작용을 이해하고, 과학적이고 체계적인 환경평가 프로그램을 구성하여 실행하는 것이 요구된다.

3. 환경평가 프로그램의 구성

앞 절에서 고찰한 것처럼 지하수의 과잉개발은 환경적으로 해로운 결과를 초래할 수 있으므로 지하수 개발 프로그램과 병행하여 종합적인 환경평가 프로그램을 실행할 필요성이 있으므로 장래 우리 실정에 적합한 프로그램을 구축하기 위하여 기 문헌에 소개된 평가 프로그램의 목적, 구성단계 및 요구조건들을 아래에 소개하고자 한다.

지하수 환경평가 프로그램은 지하수계의 주요 성분 및 변수들에 관한 관측과 분석 등을 포함한 연속적이고, 기술적인 과정으로 Das Gupta(1996)에 의하면 다음과 같은 목적을 가지고 실행된다: ① 지하수위 자료의 관측, 정리 및 분석을 포함하여 지하수계의 장래 거동 및 반응의 시공간적인 변동특성을 파악하기 위하여 지하수위 기록과 외부적 영향인자사이의 상관성을 평가하기 위한 목적, ② 자연환경상태를 파악하기 위한 자료를 수집·분석하고, 지하수계에 대한 현재 또는 장래 기대되는 외부적 영향인자로 인한 환경영향을 파악하는 것, ③ 자료수집 과정의 개선 및 수정을 위한 관측망의 검토 및 지하수자원을 보호하고 지속적으로 이용하기 위하여 정책입안자 및 관리기관들에게 적절한 계획과 전략을 제공하는 것 등이 포함된다.

그리고 Biswas(1992)는 건조지역에서 지하수 개발사업시에 실행할 수 있는 환경평가 과정을 기술하면서 지하수관리 측면을 위한 환경 영향 평가의 목적을 다음과 같이 정리하였다: ① 장래 발생될 수 있는 부정적인 환경문제를 파악하고, 이들 문제들을 방지

하기 위한 적절한 수단을 세우는 것, ② 지하수개발 사업의 환경적 이익과 불이익을 파악하고 지역사회의 사회적 동의 여부를 판단하는 것, ③ 장래 조사연구되어야 할 필요성이 있는 심각한 환경문제를 파악하고, 여러 가능한 대안으로부터 최적대안을 검토·선정하는 것, ④ 지하수관리와 관련된 의사결정 과정에서 공공의 참여를 유도하고, 특정개발사업에 관련된 모든 당사자들의 관계, 역할 및 책임을 이해하도록 도와주는 것을 들 수 있다.

환경평가 프로그램은 지역적, 사회적 및 경제적 환경에 따라서 다양한 프로그램이 구축될 수 있지만, Das Gupta(1996)에 소개된 환경평가 프로그램의 구성단계는 다음과 같다.

(1) 초기개발단계

대상구역의 수문, 지질, 기상 등의 기 관측된 자료를 수집하며, 지하수상태를 파악하는데 필요한 관련 문헌 및 기타 자료들을 검토한다. 이들 자료와 수두 및 수두경사 분포에 기초하여 지하수 유동계를 정의 하며, 단순한 물수지 모형에 기초하여 지하수계에 대한 개략적인 개념화를 구축한다.

지하수 흐름 특성은 현장 관측된 지하수위 또는 수두 자료를 이용하여 유선망 분석을 통하여 파악될 수 있다(그림 2.). 유선망은 지하수 흐름특성을 이해할 수 있는 유용한 도구이며 작성방법은 지하수 관련 서적(예, Freeze와 Cherry; 1979) 등에 소개되어 있

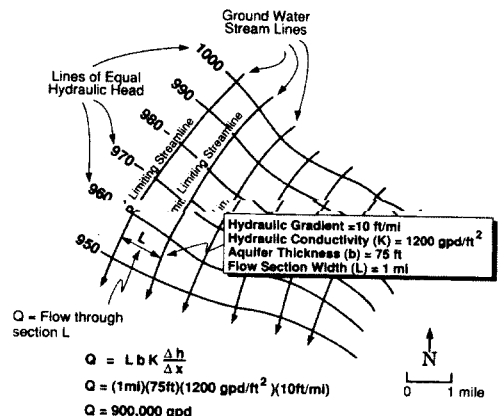


그림 2. 유선망(Roscoe Moss Company, 1990)

다. 그림 2.에 보여진 것처럼 투수계수 및 대수층 두께가 주어지면 수두경사 및 지하수 흐름율을 유선망 분석으로부터 추정할 수 있다.

(2) 중간개발단계

부가적인 현장조사 및 실험을 통하여 수문지질학적 특성 및 지하수계에 영향을 미치는 외부적 인자를 더 정확히 파악하고, 지하수 함양량의 재추정 및 지하수 물수지 분석을 통하여 지하수 이용 가능량을 산정한다.

이 단계에서 파악되어야 하는 수문지질학적 특성은 주대수층의 수와 종류, 주대수층의 공극율, 주대수층의 투수량계수 및 저류계수, 주대수층의 함양 및 유출 특성 등이 포함된다. 지하수 흐름계에 영향을 미치는 외부적 인자는 강수, 증발산, 양수량, 함양량, 하천유량 등이 포함된다. 지하수 물수지 분석은 대수층으로의 유입량과 유출량의 차이는 지하수 저류량의 변화와 같다는 개념을 이용하여 평가된다. 지하수 함양량의 추정은 매우 어려운 문제로서 여러 방법이 적용될 수 있는데 박창근(1996a)에 의하면 물수지 방법, 지하수관리 분석방법, 해석적 방법, 기저유출 분석방법 등이 함양량의 추정에 적용된다고 한다. 국내의 함양량 추정은 주로 물수지 방법과 기저유출 분석방법이 적용되었으며, 기저유출 분석방법에 의해 추정된 5대강 유역의 지하수 함양량은 이동률과 윤용남(1996)은 연간 72억톤으로, 박창근(1996b)은 연간 90억톤으로 각각 추정한 바 있다.

(3) 완성단계

이 단계에서는 지하수의 탐사 및 개발이 거의 다 이루어진 상태에서 지속적으로 지하수를 이용하고 관리하는 단계에서 다음의 과정에 따라 구축될 수 있다.

㉑ 지하수위의 현장 모니터링을 통하여 시·공간적인 변동 특성을 파악하고, 모니터링한 지하수위의 변동 특성과 수문 특성의 공간적 변화, 수질 변동, 환경적 악영향사이의 상관성을 파악한다.

㉒ 지하수계의 동적반응을 평가하는 수학적 모형을 구성하고, 현장 관측자료를 이용하여 모형의 성능을

분석하여 수학적 모형을 개선 및 수정한다.

㉓ 수학적 모형을 보정·검정하고, 모형이 환경적 영향들을 재현하는지를 검토하고, 지하수개발의 여러 대안들을 평가하며, 장래 지하수 이용의 변화에 따른 영향을 예측한다.

㉔ 지하수계의 거동에 제한적인 경제적, 사회적, 법적 요소와 기준을 파악하고, 이 기준들을 만족하는 운영조건을 결정하고, 모니터링 시스템의 타당성을 검토하며, 지속적인 모니터링을 통하여 환경평가의 적합성을 검토한다.

㉕ 지하수 이용이 계속됨에 따라서 주기적인 평가를 실행하고 평가 프로그램을 수정·보완한다.

이 단계에서는 신뢰성 있는 수학적 모형의 구축이 환경평가의 가장 중요한 요소가 된다고 볼 수 있다. 특히 대상유역의 규모가 큰 광역적인 경우에는 지하수 모형에 의한 지하수 환경평가가 유일한 방법이 될 수 있다. 지하수 모형의 유형은 흐름모형, 오염물질 이송모형, 지반침하 모형, 계획 및 관리 모형 등으로 분류할 수 있으며, 지하수 모형의 구축기법에 관한 자세한 사항들은 박남식(1995), Anderson과 Woessner(1992)에 기술되어 있으며, 지하수 모형의 종류 및 관련기관의 인터넷 주소는 이상일(1999)에 설명되어 있다.

4. 환경평가 프로그램의 실행조건

위에서 검토한 환경평가 프로그램이 성공적으로 실행되기 위해서는 여러 가지의 많은 요구조건이 만족되어야 함을 알 수 있다. 우리나라에서는 아직 광역적인 규모의 환경평가 프로그램이 시행되지 않았기 때문에 이런 평가 프로그램의 실행을 위한 주체를 선정하고, 인력 및 예산을 확보하는 행정적 과제가 해결되어야 하며, 다음의 사항들을 고려하여 추진할 필요가 있다.

첫째, 지하수 개발 및 이용의 초기단계에서부터 환경 평가 프로그램이 시행되어 주기적인 평가가 이루어지도록 하여야 한다. 개발의 초기 단계에서 평가가 이루어져야 지하수계의 변화되는 반응 특성을 관찰할

수 있으며, 가능한 대안을 수립하여 적절한 조치를 취할 수 있다. 그리고 지하수계는 정적 시스템이 아닌 외부적 요인에 의해 변화는 동적 시스템이기 때문에 주기적인 평가를 시행하여 지하수 개발 및 관리 전략에 반영하여야 한다. 이런 주기적인 평가는 지하수법에 명시된 법정계획인 지하수관리 기본계획의 수립시에 시행하는 방안을 검토하여 지하수 개발의 지속가능성을 판단하고 합리적인 개발 및 관리 계획을 수립하는데 활용할 수 있다.

둘째, 국가적인 차원의 광역적인 규모에 대한 지하수 환경평가에서는 지하수 이용에 따른 환경문제 중에서 지표수 고갈문제, 해안지역의 염수침입 문제, 지반침하 문제, 생태계 및 수질 악화 문제 등을 중점사항으로 선정하여 평가하여야 하겠다.

특히, 지하수 이용에 따른 지표수 고갈문제는 수자원 및 수생 생태계 관리 측면에서 매우 중요하다고 볼 수 있다. 즉, 갈수시 또는 평상시에 하천, 호수, 습지 같은 지표수체는 지하수유출에 의해 유지되므로 지하수의 과잉개발은 지표수체에 영향을 미치게 되어 하천유량이 감소하거나 호수 및 습지의 물이 줄어들어 이것에 의지하는 동식물 등의 생태계가 위협을 받게 된다.

셋째, 체계적이고 종합적인 지하수조사를 통하여 지하수계에 대한 명확한 개념화가 선행되어 단순한 지층구조의 파악이 아닌 물이 어느 곳으로 어떻게 유입되며, 어느 곳에 어떻게 저장되며, 어느 곳으로 어떻게 유출되는 가를 파악해야 한다.

넷째, 수문자료의 지속적인 관측 및 관측기술의 개발, 관측자료의 체계적인 관리, 조사/관측된 자료의 공개 및 공유화가 이루어져야 하며, 환경평가 과정에서는 수학적 모형이 중요한 역할을 하기 때문에 지하수모형의 개발, 적용 및 검증에 필요한 연구투자가 확대되어야 하겠다.

5. 맺음말

지하수는 물을 운반하는 특수시설 없이 광범위한 지역에서 손쉽게 이용이 가능하고, 지하수 저류량이

크기 때문에 개발가능량이 풍부하며, 좋은 수질과 일정한 수온을 유지하고 있으며, 관리가 용이한 점 등은 지하수가 현재 및 미래의 물 수요를 충족시킬 수 있는 국가의 중요한 자원으로 인식될 수 있다. 지하수 자원의 지속성은 지하수가 고갈되지 않고 장기간에 걸쳐서 공급되어야 하며, 지하수 수질상태, 지하수개발에 따른 환경영향을 파악하고 관리하는 활동에 좌우된다고 생각할 수 있다. 따라서 지하수 자원이 현대대의 필요를 충족시키면서 미래세대의 필요를 저해하지 않고 지속적인 개발이 되기 위해서 우리나라에 적합한 효율적이고 합리적인 지하수 환경평가 프로그램을 국가적 차원에서 조기에 구축·시행할 필요성이 있다.

우리나라의 지하수 이용량은 '97년말 기준으로 약 33억 8천만톤이 이용되고 있다 (한국수자원공사 http://www.kowaco.or.kr/kbible_index.htm). 그리고 기저유출 분석방법에 의해 추정된 5대 강 유역의 지하수 함양량이 연간 72~90 억톤으로 추정되었으므로(박창근: 이동률과 윤용남, 1996) 우리나라의 현재 지하수 이용량은 지하수 함양량의 약 37-47 %에 해당된다. 그러면 현재의 지하수 이용량은 환경에

표 1. 유럽국가들에서 지하수가 음용수 공급에 점유하는 비율(UNEP, 1989)

국가	비율(%)	국가	비율(%)
Belgium	67	Italy	88
Denmark	98	Luxembourg	66
German	89	Netherlands	67
Norway	15	Sweden	49
Portugal	94	Switzerland	75
Spain	20	UK	35

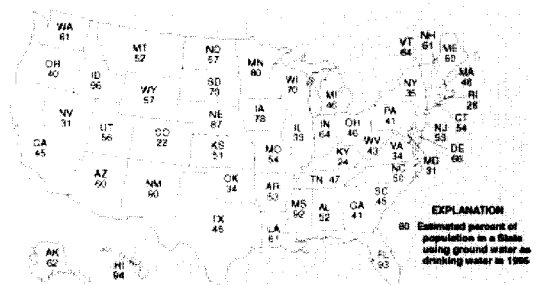


그림 3. 1995년 미국의 각 주에서 지하수를 음용수로 이용하는 인구의 비율 (미국 지질조사국).

악영향을 미치지 않고 안전하게 지속적으로 개발될 수 있는가? 또는 현재 지하수 함양량의 40% 수준으로 개발되는 지하수를 안전하게 지속적으로 현재의 지하수 개발량보다 얼마만큼 더 개발할 수 있는가? 등의 중요한 질문들에 대한 답은 신뢰성 있는 지하수 환경평가의 성패 여부에 좌우된다고 볼 수 있다.

표 1.과 그림 3.은 유럽국가 및 미국에서 지하수가 음용수 공급에 이용되는 비율을 나타낸다. 유럽국가들은 많은 나라들이 지하수가 음용수 공급에 기여하는 비율이 50% 이상을 상회하고 있으며, 미국도 각 주마다 편차가 있지만 지하수를 음용수로 이용하는 비율이 20%-96%로 분포하며 과반수 이상의 주가 음

용수의 50% 이상을 지하수로 사용하고 있다. 이들 나라의 대부분은 우리보다 잘 사는 선진국들이며, 왜 이들 나라들은 우리나라보다 음용수 공급에 지하수가 차지하는 비율이 월등하게 높은 지에 관하여 생각해 볼 필요가 있다. 단순히 지층 구조상 개발할 수 있는 지하수 자원이 풍부해서인가? 아니면 국가적 물 문제를 해결하기 위해 관련 기술을 발전시키고 노력하여 온 결과인가? 아마도 필자의 생각으로는 후자쪽이 아닌가 싶다. 우리도 아직 늦지 않았다. 국가의 물 문제 해결을 위해 지하수를 포함하여 수자원 관련 기술을 발전시키려는 국가적 차원의 의지와 투자가 요구된다. ●

〈참고 문헌〉

- 박남식(1995). 지하수 관리와 수치 모델링, 한국수자원학회지 28권 4호, pp. 37-44.
- 박창근(1996a). 우리나라 지하수 개발가능량 추정: 1. 개념정립과 기법의 개발, 지하수환경 제3권 1호, pp. 15-20.
- 박창근(1996b). 우리나라 지하수 개발가능량 추정: 2. 5대강 유역에의 적용, 지하수환경 제3권 1호, pp. 21-26.
- 배상근(1995). 지하수 관련 법제도에 대한 고찰, 한국수자원학회지, 제28권, 4호, pp. 19-27.
- 이동률, 윤용남(1996). 우리나라의 지하수 함양량 추정과 분석, 대한토목학회논문집, 제16권, 제II-4호, pp. 321-334.
- 이상일(1999). 물관리 소프트웨어 - 지하수 모형, 한국수자원학회지, 32권 2호, pp. 24-29 .
- Anderson, M.P. and W.W. Woessner(1992). Applied groundwater modeling: Simulation of flow and advective transport, Academic Press, Inc., pp. 381.
- American Society of Civil Engineers(1961). Groundwater Basin Management, Manual of engineering Practice, No. 40.
- Das Gupta, A.(1996). Groundwater and the Environment, in Water Resources:Environmental Planning, Management and Development, A.K. Biswas, Editor, McGraw-Hill, New York, pp. 117-207.
- Freeze and Cherry(1979). Groundwater, Prentice-Hall Inc., pp. 604.
- Meinzer, O.E.(1920). Quantitative methods of estimating groundwater supplies, Bull. Geol. Soc. America 31: pp. 328-329.
- Roscoe Moss Company(1990). Handbook of ground water development, Wiley-Interscience, New York.
- Todd, D.K.(1980). Groundwater Hydrology, 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc.
- United Nations Environment Programme(UNEP)(1989). Environmental data report, 2nd ed., Blackwell Reference, Oxford.