

국가지하수 관측망의 양수시험 자료를 이용한 국내 대수층 특성의 통계적 분석

전선금¹ · 구민호^{1*} · 김용제² · 강인옥³

¹공주대학교 지질환경과학과, ²한국지질자원연구원, ³한국수자원공사

Statistical Analysis of Aquifer Characteristics Using Pumping Test Data of National Groundwater Monitoring Wells for Korea

Seon-Keum Jeon¹ · Min-Ho Koo^{1*} · Yongje Kim² · In-Oak Kang³

¹Department of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University

²Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

³Korea Water Resources Corporation

ABSTRACT

314 pumping test data of the National Groundwater Monitoring Wells (NGMWs) are analyzed to present statistical properties of fractured-rock and alluvial aquifers of Korea such as distribution of hydraulic conductivity, empirical relations between transmissivity and specific capacity, and time-drawdown patterns of pumping and recovery test. The mean hydraulic conductivity of alluvial aquifers (1.26 m/day) is 17 times greater than that of fractured-rock aquifers (0.076 m/day). Hydraulic conductivity of fracture-rock aquifers ranges in value over 4 orders of magnitude which coincide with representative values of fractured crystalline rocks and shows distinctive differences among rock types with the lowest values for metamorphic rocks and the highest values for sedimentary rocks. In consideration of the estimated transmissivity with some simplifying assumptions, it is likely that 32% of groundwater flow for NGMWs would occur through fractured-rock aquifers and 68% through alluvial aquifers. Based on 314 pairs of data, empirical relations between transmissivity and specific capacity are presented for both fractured-rock and alluvial aquifers. Depending on time-drawdown patterns during pumping and recovery test, NGMWs are classified into 4~5 types. Most of NGMWs (83.7%) exhibit the recharge boundary type, which can be attributed to sources of water supply such as streams adjacent to the pumping well, the vertical groundwater flux between fractured-rock and the alluvial aquifers, and the delayed yield associated with gravity drainage occurring in unconfined aquifers.

Key words : Pumping test, Hydraulic conductivity, Specific capacity, Alluvial aquifer, Fractured-rock aquifer

요 약 문

국가지하수 관측망의 314개 관정에 대한 양수시험 자료를 분석하여 국내 암반 및 충적대수층이 나타내는 수리전도도 분포, 투수량계수와 비양수량과의 관계, 양수 및 회복시험 유형에 관한 통계 자료를 제시하였다. 충적대수층의 평균 수리전도도는 1.26 m/day로 암반대수층(0.076 m/day)보다 약 17배 크게 나타났다. 암반대수층 수리전도도의 평균과 분산도는 국외의 결정질 균열 암반과 거의 일치하였으며, 암종별 평균값은 퇴적암, 화성암, 변성암 순으로 뚜렷한 차이를 보였다. 투수량계수 분석 결과 국가지하수 관측망의 지하수는 암반을 통하여 32%, 충적층을 통하여 68% 정도가 흐르는 것으로 나타났다. 회귀분석을 통하여 국가지하수 관측망의 대수층이 나타내는 비양수량과 투수량계수의 관계식을 제시하였다. 양수 및 회복시험의 수위강하 양상에 따라 대수층의 유형을 4~5개로 분류하여 각 유형이 나타내는 대수층의 특성을 분석하였다. 국가지하수 관측망 대수층의 대부분(83.7%)은 함양경계형을 보였으며, 관측소

*Corresponding author : koo@kongju.ac.kr

원고접수일 : 2005. 8. 1 게재승인일 : 2005. 8. 22

질의 및 토의 : 2006. 2. 28 까지

인근의 하천, 암반 및 충적대수층의 수리적 연결에 의한 두 대수층간의 수직적인 지하수의 흐름, 자유면대수층에서 충전배수에 의해 발생하는 지연산출 등 다양한 공급원에 의하여 함양경계형이 나타난 것으로 분석되었다.

주제어 : 양수시험, 수리전도도, 비양수량, 충적층대수층, 암반대수층

1. 서 론

건설교통부와 한국수자원공사는 1996년의 '지하수관리 기본계획'에 근거하여 국내 지하수자원의 체계적인 관리를 위한 목적으로 국가지하수 관측망을 설치·운영하고 있다. 국가지하수 관측망은 지하수 관리 정책의 수립, 지하수 보전 구역의 지정, 지하수 수위 및 수질의 분석 및 예측 등 지하수 관리를 위해 필요한 기초적인 지하수 정보를 취득할 수 있는 시설이다(김규범 외, 2000). 국가지하수 관측망은 설치 분포의 공간적인 균등성 및 관측 자료의 신뢰성을 고려할 때 국내 지하수의 수위 및 수질 변동을 감시하는 대표 관측소의 기능을 충분히 담당할 수 있을 것으로 예상된다. 또한 체계적인 관리 시스템을 통하여 축적된 장기 관측 자료는 지하수 관련 연구 분야에 다양하게 활용되면서 국내 지하수 관련 기반 기술을 고양시키는 역할을 할 것으로 기대된다. 1995년 15개의 관측소 설치를 시작으로 2003년 말 현재 266개의 관측소가 설치되어 양질의 지하수 수위 및 수질 계측 자료가 축적되고 있으며, 최근 이들 장기 관측 자료를 이용한 연구가 활발히 수행되고 있다.

국가지하수 관측망의 관측 자료를 이용한 연구로는 지하수 수위 및 수질 변동 특성(김규범 외, 2000; 이명재 외, 2004; 김규범·이강근, 2003), 지하수 함양량 산정(구민호·김형수, 2001; 박창희 외, 2002; 문상기·우남철, 2001; 문상기 외, 2002), 결측 자료 보완 기법(정상용 외, 2001), 최적 관측주기 결정 방법(김규범 외, 2003), 측정 자료의 이상값 분석 방법(이명재 외, 2005) 등이 수행되었다. 그러나 최근 수행된 이러한 연구들은 대부분 관측소에서 측정된 장기 관측 자료를 분석한 것으로 관측 자료의 변동 특성과 밀접한 연계성을 가지는 대수층(매질)의 특성에 관한 연구는 찾아 볼 수 없는 실정이다.

국가지하수 관측망과 무관하게 국내 대수층의 수리 특성을 분석한 논문은 다수 보고된 바 있다. 국내 대수층에 관한 연구는 주로 특정 지역의 대수층 특성 규명(김윤영·이강근, 1999; 함세영 외, 2002; 박경우 외, 2003; 강래수 외, 2003), 광역적인 규모에서의 대수층 특성에 관한 통계 분석(최병수, 1999; 우윤정 외, 2003; 김주용 외, 2003), 대수성 시험 해석 방법에 관한 연구(Lee and Lee, 2000; 강철희 외, 2001; 이철우 외, 2002; 성현정

외, 2003; 김구영 외, 2003)로 대별된다. 이러한 개별적 연구 외에도 최근 건설교통부의 '지하수기초조사'와 같은 지속적인 정부 지원 사업을 통하여 국내 대수층에 관한 다양한 조사와 연구가 수행되어 상당한 양의 기초 자료가 확보되었음에도 불구하고 아직도 국내 대수층이 가지는 수리특성에 대한 개괄적인 내용이 밝혀지지 않은 상황이다.

본 연구의 목적은 국가지하수 관측망 설치 시 수행된 양수시험 자료를 이용하여 국내 암반 및 충적대수층이 나타내는 수리특성의 통계적 분석 자료를 제시하는데 있다. 본 연구에서는 1995년부터 2001년까지 설치된 국가지하수 관측망의 준공보고서에 수록된 314개 관정에 대한 양수시험 자료를 분석하였으며, 이로부터 국내 암반 및 충적대수층이 나타내는 수리전도도 분포, 투수량계수와 비양수량과의 관계, 양수 및 회복시험 유형 등과 같은 수리 특성 요소들의 전반적인 특성을 규명하고자 하였다.

2. 분석 자료

1995년부터 2001년까지 설치된 국가지하수 관측망의 준공보고서(건설교통부·한국수자원공사, 1995; 건설교통부·한국수자원공사, 1997; 건설교통부·한국수자원공사, 1998; 건설교통부·한국수자원공사, 1999a; 건설교통부·한국수자원공사, 1999b; 건설교통부·한국수자원공사, 2000; 건설교통부·한국수자원공사, 2001)를 분석 자료로 이용하였다. Table 1은 분석에 이용된 314개 암반(202개) 및 충적(112개) 관정의 유역별·연도별 설치 개소 수를, Fig. 1은 각 관측소의 위치를 나타낸다. 국가지하수관측망 관측소는 Fig. 1a와 같이 국내 수문지질에 따른 78개 소유역에 비교적 균등하게 분포하도록 선정되었다. 하지만 본 연구에 이용된 202개 관측소의 87.6%가 표고 200 m 이내에 위치하여 내륙산간 지역에 대한 관측소 설치 밀도가 상대적으로 매우 낮은 것으로 나타났다. 따라서 본 논문의 연구 결과는 국토 면적의 70%를 차지하는 산악지역을 제외한 구릉 및 평야지대에 발달된 대수층 특성에 대한 통계적 자료로 활용되어야 할 것이다. 하지만 지하수 개발이 대부분 구릉 및 평야지대에 집중된다는 점을 고려하면, 본 연구 결과는 실효적인 측면에서의 국내 대수층 특성에 대한 통계 자료로 이해해도 무방할 것으로 판단된다.

Table 1. Installation of the National Groundwater Monitoring Wells (NGMWs)

유역	1995		1996		1997		1998		1999		2000		2001	
	암반	층적	암반	층적	암반	층적	암반	층적	암반	층적	암반	층적	암반	층적
한강	3	3	6	5	8	1	7	3	5	3	3	2	7	3
금강	2	2	6	3	6	3	7	2	5	2	5	2	2	2
낙동강	4	3	8	8	10	8	6	2	2	1	4	3	9	3
남해안	1	1	3	2	1	-	6	3	2	-	1	-	-	-
동해안	1	1	2	2	7	4	3	1	-	-	-	-	6	3
서해안	1	-	6	5	8	3	6	1	2	2	4	1	2	1
섬진강	1	1	2	2	3	2	2	-	3	2	-	-	4	3
영산강	1	1	3	2	2	2	-	-	1	1	-	-	3	2
합계	26		65		68		49		31		25		50	

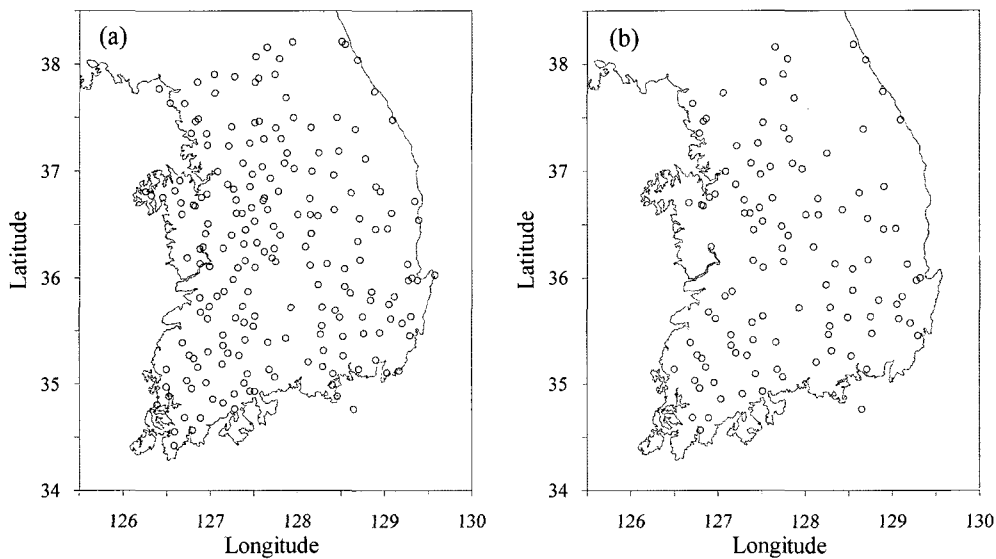


Fig. 1. Location of the National Groundwater Monitoring Wells(NGMWs): (a) 202 fractured-rock wells, (b) 112 alluvial wells.

국가지하수 관측망 준공보고서로부터 각 관정에 관한 지형 및 지질 정보와 대수층 특성 자료를 D/B화하여 통계분석 및 상관분석에 이용하였다. 지형 및 지질 정보를 나타내는 요소는 표고, 배출지역까지의 거리, 인근 하천의 규모, 지형의 경사도, 및 기반암의 종류이며, 대수층 특성을 나타내는 요소는 지하수위, 수리전도도, 투수량계수, 대수층수두손실계수, 및 우물수두손실계수이다. 또한 관측소 설치 당시 수행된 단계 및 장기양수시험 자료를 분석하여 투수량계수와 비양수량(specific capacity)과의 관계식을 도출하였으며, 양수 및 회복시험 시 발생하는 특징적인 수위강하 및 회복 양상에 따라 대수층의 유형을 4-5개로 분류하여 각 유형이 나타내는 대수층의 통계적 특성을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 국내 암반 및 층적대수층의 수리 특성

3.1.1. 통계분석

Fig. 2는 202개소의 암반 관정 및 112개소의 층적 관정에서 관측소 설치 당시 측정된 지하수 심도를 히스토그램으로 도시한 것으로 로그정규분포를 보인다. 로그 변환된 지하수 심도의 평균과 표준편차는 암반 관정이 0.70(5.0 m)과 0.27로 층적 관정의 0.63(4.3 m), 0.19에 비하여 다소 크게 나타났다. Fig. 3은 암반 및 층적 관정이 모두 설치된 112개 관측소의 지하수 심도를 비교한 것으로 대부분의 관측소에서 암반과 층적 관정의 지하수 심도가 비슷한 값을 보이며, 일부 암반 관정에서 상대적으로

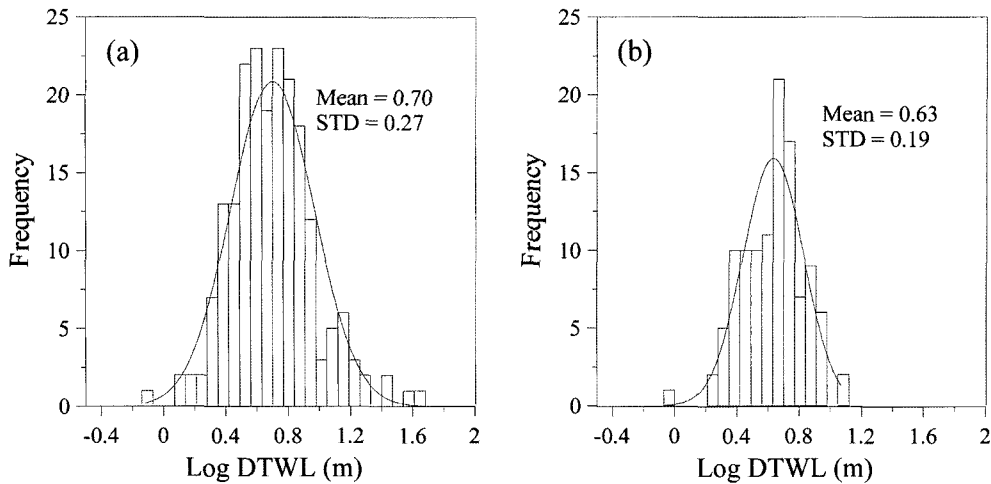


Fig. 2. Histogram of the log-transformed depth to water level data for NGMWs: (a) fractured-rock wells, (b) alluvial wells.

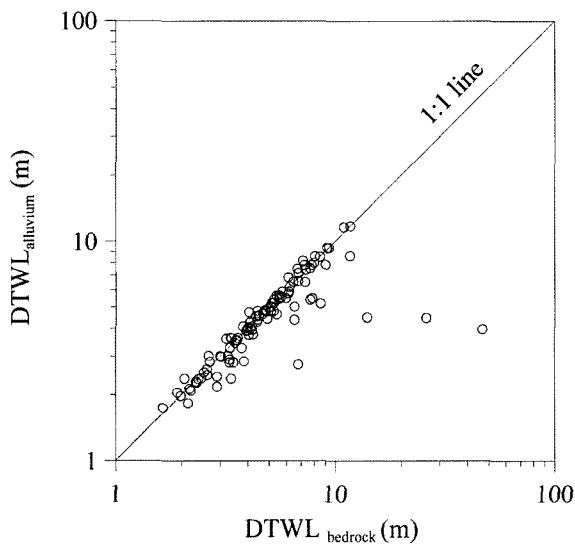


Fig. 3. Comparison of depth to water level data for fractured-rock and alluvial wells.

으로 큰 값을 나타내는데 한국수자원공사는 수위 강하 원인 규명을 위한 조치로 이들 관측소에 대한 현장 정밀 조사를 계획 중이다. 암반 및 충적 관정의 지하수위는 암반대수층의 피압 여부에 대한 간접적인 정보를 제공한다. 즉, Fig. 3에 도시된 대부분의 관측소와 같이 암반과 충적층 지하수의 수위가 거의 일치하며 강우에 대한 수위 반응 양상도 유사한 경우 암반과 충적층은 수리적 연결 상태가 양호한 하나의 자유면 대수층으로 해석할 수 있다.

Fig. 4는 양수시험을 통해 산정된 수리전도도를 히스토그램으로 도시한 것으로 로그정규분포를 잘 보여준다. 충적대수층의 평균 수리전도도는 0.10(1.26 m/day)으로 암

반대수층의 평균값인 -1.12(0.076 m/day)보다 약 17배 크게 나타났다. 그림에서 화살표 실선은 화성암 및 변성암과 같은 결정질 균열 암반과 미고결 퇴적층이 일반적으로 나타내는 수리전도도의 범위이다(Domenico and Schwartz, 1998), 그림과 같이 국내 암반대수층의 수리전도도는 국외의 결정질 균열 암반이 나타내는 값의 범위에 거의 일치한다. 국내 충적대수층은 주로 모래로 구성된 퇴적층이 대종을 이루며, 미사(silt)와 자갈의 혼합 비율에 따라 입도분포 특성이 달라지면서 수리전도도가 결정되는 것으로 분석된다. 김주용 외(2003)은 전국 5대강 유역의 주요 충적 평야지대를 대상으로 시추조사 및 양수시험을 수행하여, 충적층의 두께 및 구성물질과 대수층의 투수성과의 상관관계를 연구한 바 있다.

Fig. 5는 국가지하수 관측망의 암반 및 충적대수층이 나타내는 수리전도도의 공간적인 분포를 도시한 것이다. 수리전도도는 동일한 수리지질단위 내에서도 값의 범위가 수백 배 차이가 나며 통계적 상관거리(range)도 매우 짧은 물리량이므로, 지구통계기법을 국가지하수 관측망 자료에 적용하여 공간적 상호관계와 연속성의 정도를 파악하는 것은 무의미한 것으로 판단된다. 따라서 Fig. 5는 공간적 분포 경향을 나타내기 보다는 관측소의 지점별 자료 정도로 해석해야 할 것이다.

국내 암반대수층의 암종별 수리전도도의 변화를 알아보기 위하여 관측소의 기반암을 크게 화성암, 퇴적암, 및 변성암으로 구분하여 각각에 대한 통계 자료를 구하였다(Fig. 6). 암종별 수리전도도의 평균값은 퇴적암 지역에서 -0.94(0.11 m/day)로 가장 크게 나타났고, 화성암 지역 -1.08(0.083 m/day), 변성암 지역 -1.36(0.044 m/day)

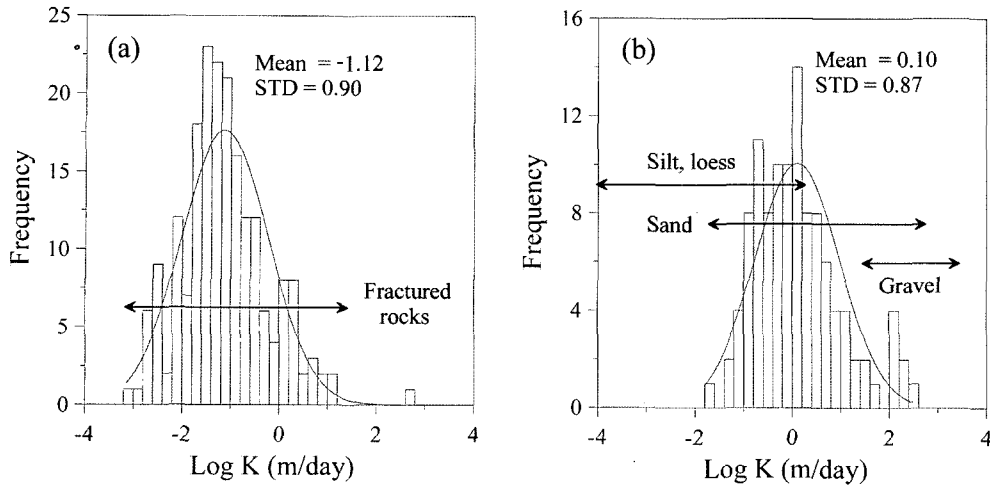


Fig. 4. Histogram of the log-transformed hydraulic conductivity data for NGMWs: (a) fractured-rock aquifers, (b) alluvial aquifers. Representative values of hydraulic conductivity for various rock types(from Domenico and Schwartz, 1998) are illustrated by arrow lines.

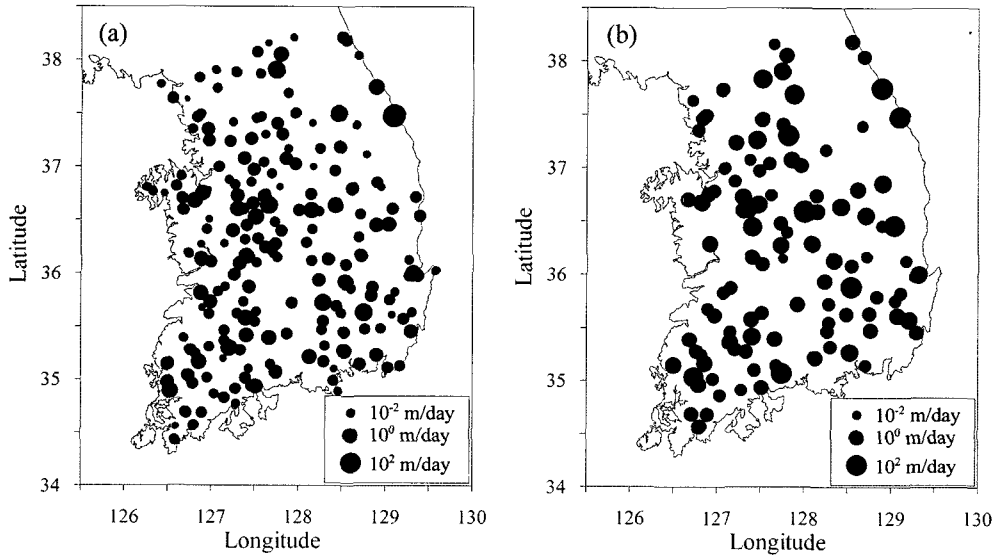


Fig. 5. Map showing distribution of hydraulic conductivity: (a) fractured-rock aquifers, (b) alluvial aquifers.

순으로 암종별로 뚜렷한 차이를 보인다. 퇴적암류는 층리의 발달로 인하여 일반적으로 결정질암에 비하여 투수성이 좋은 것으로 알려져 있으며, 국가지하수 관측망의 분석 결과도 이러한 경향이 잘 반영된 것으로 유추할 수 있다. 변성암은 오래 전에 형성되어 단층의 발달이 많은 편이나 일반적으로 절리가 불규칙적이고 연장성이 짧은 특징을 보이므로 지하수 흐름의 통로 역할을 하는 불연속면의 연결성이 불량하여 수리전도도가 상대적으로 작게 나타난 것으로 해석된다.

Fig. 6d~f는 기반암의 종류에 따른 충적대수층의 수리전도도 빈도 분포를 도시한 것이다. 충적대수층의 평균 수

리전도도는 화성암 지역에서 0.23(1.70 m/day)으로 가장 큰 값을 보이며, 퇴적암과 변성암 지역은 각각 -0.058(0.88 m/day), -0.062(0.87 m/day)로 유사하게 나타났다. 화성암 지역 충적 관정 기반암의 대부분(83%)은 화강암이며, 화강암과 같은 심성암류는 일반적으로 풍화토층이 사질토이고 하부 풍화암층의 두께가 두꺼운 특징을 가지는 것으로 알려져 있다(이수곤, 2003). 화성암 지역의 충적층이 퇴적암 및 변성암 지역에 비하여 수리전도도가 2 배 정도 큰 것은 화강암의 이러한 풍화 특성과 관련이 깊을 것으로 추정된다.

Fig. 7은 암반 및 충적 관정이 동시에 설치된 112개

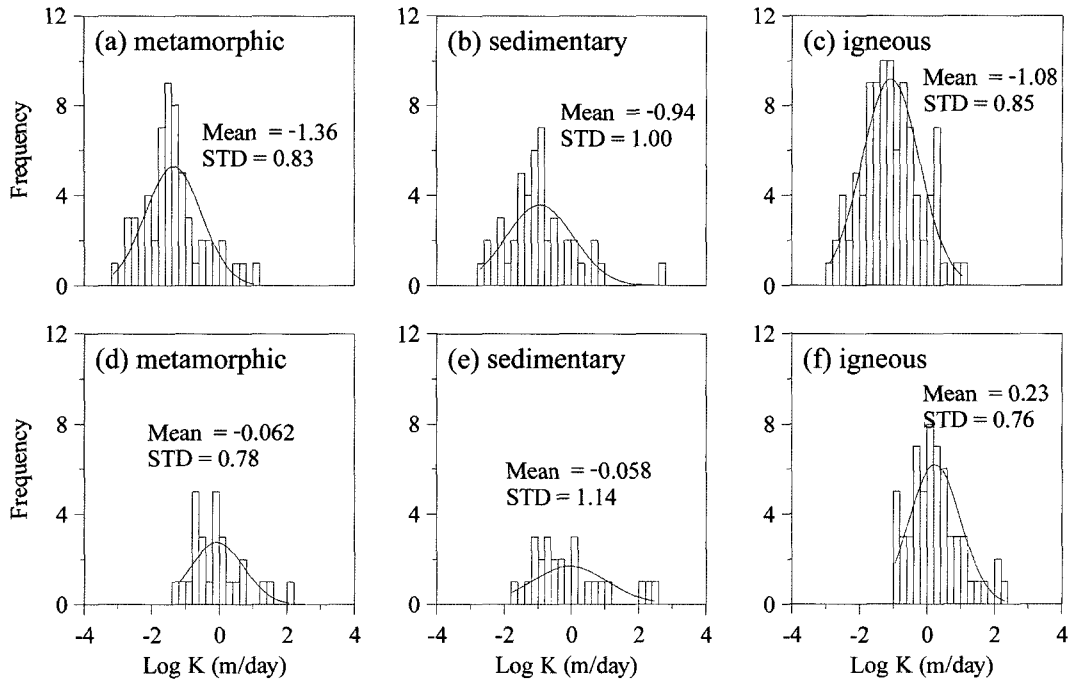


Fig. 6. Variation of hydraulic conductivity by types of bedrock: (a)~(c) fractured-rock aquifers, (d)~(f) alluvial aquifers.

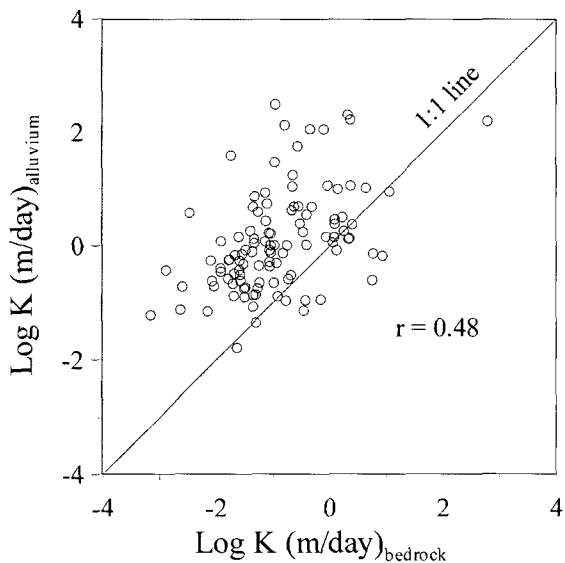


Fig. 7. Comparison of the hydraulic conductivity between the fractured-rock aquifer and the alluvial aquifer.

관측소에서의 암반대수층과 충적대수층의 수리전도도를 비교한 것이다. 대부분의 관측소에서 암반대수층보다 충적대수층의 수리전도도가 크게 나타났으며, 충적대수층의 수리전도도가 증가할수록 암반대수층의 값도 커지는 비례 경향을 보였다(상관계수 = 0.48). 충적대수층과 하부 암반대수층의 수리전도도가 비례 경향을 보이는 것에 대한 지

질학적 요인은 분명하지 않다. 다만, 국가지하수 관측망의 암반 관정 설치 심도가 70 m 내외이며, 우리나라 결정질 암의 경우 일반적으로 천부 30~50 m 심도에서 파쇄대가 잘 발달된다는 점을 고려할 때 천부 암반 파쇄대와 상부 풍화대 및 충적층의 수리적 연결성이 비교적 양호하여 이러한 경향성이 나타났을 가능성을 예상할 수 있다. 또한 암반 관정 개발 시 충적층 및 풍화대 구간에 대해 실시하는 그리우팅의 수밀기능 저하에 따른 두 대수층의 수리적 연결 가능성도 배제할 수 없으나 이는 현장에 대한 세부 조사를 통하여 밝혀져야 할 것이다.

Fig. 8은 양수시험을 통해 산정된 투수량계수를 히스토그램으로 도시한 것으로 로그정규분포를 잘 보여준다. 충적대수층의 평균 투수량계수는 0.85(7.1 m²/day)로 암반대수층의 평균값인 0.52(3.3 m²/day)보다 약 2.2배 큰 것으로, 표준편차는 거의 동일한 것으로 나타났다. Darcy의 법칙에 의하면 단위 시간당 단위 폭의 대수층을 통해 흐르는 지하수의 양은 수두구배와 투수량계수에 의하여 결정된다. 국내 지하수의 경우 Fig. 3과 같이 암반과 충적층의 수두가 대부분 거의 같으므로 암반과 충적대수층의 수두구배도 유사한 것으로 간주해도 무방하다. 따라서 암반과 충적층을 통해 흐르는 지하수량의 비는 두 매질이 나타내는 투수량계수의 상대적 크기에 의하여 결정되며, 본 연구의 분석 결과를 적용할 경우 관측망 지하수는 평

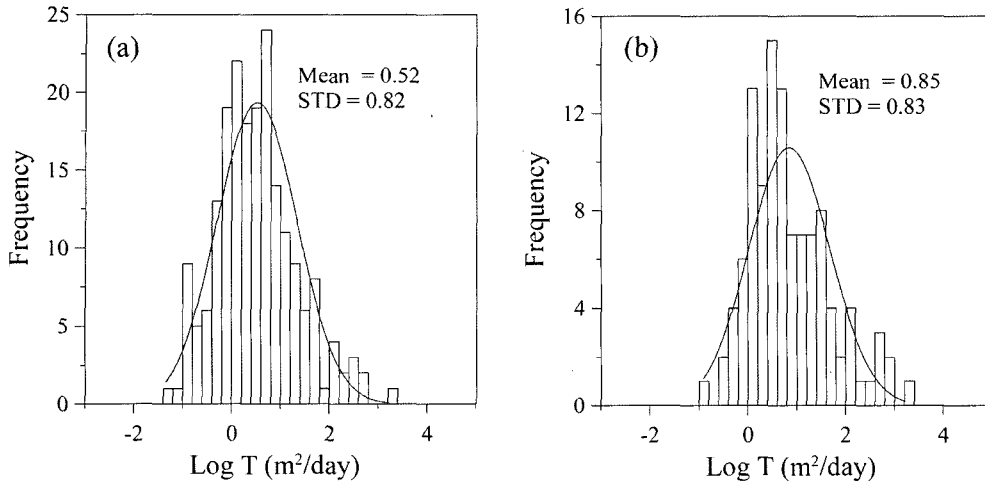


Fig. 8. Histogram of the log-transformed transmissivity data for NGMWs: (a) fractured-rock aquifers, (b) alluvial aquifers.

균적으로 암반을 통하여 32%, 충적층을 통하여 68% 정도가 흐르는 것으로 해석된다.

하지만 이러한 분석 결과를 국내 지하수의 전반적인 상황으로 확대 해석하는 데는 세 가지 문제점이 따른다. 첫째, 국가지하수 관측망 관측소의 대부분이 표고 200 m 이내에 위치하므로 관측소 설치 밀도가 낮은 산악지역 지하수의 경우 본 연구 결과의 적용 대상에서 제외된다. 둘째, 전술한 바와 같이 천부 균열 암반과 상부 충적 대수층의 수리적 연결에 의해 암반대수층의 투수량계수가 다소 과다산정 되었다면 실제 암반을 통하여 흐르는 지하수량의 비율은 좀 더 낮게 조정되어야 할 것이다. 셋째, 국가지하수 관측망 암반 관정의 평균 굴착 심도는 70 m 내의이므로 심부 암반 지하수를 고려할 경우 암반의 평균 투수량계수가 다소 증가할 수 있다. 두 번째와 세 번째 요인은 서로 상쇄되는 결과를 초래하므로 두 요인의 영향 정도에 따라 본 연구를 통해 제시한 32%의 수치는 상향 또는 하향 조정될 수 있다.

지하수를 채수할 때 우물에서 발생하는 수두손실은 대수층수두손실과 우물수두손실의 합으로 표현될 수 있다.

$$s_w = BQ + CQ^2 \tag{1}$$

여기서 s_w 는 우물수위강하량, Q 는 양수량, B 는 대수층수두손실계수, C 는 우물수두손실계수를 나타낸다. 식(1)의 양변을 Q 로 나누어주면 다음과 같다.

$$\frac{s_w}{Q} = B + CQ \tag{2}$$

위 식에서 비수위강하량(s_w/Q)은 양수량과 선형의 관계가

되므로 단계양수시험으로부터 대수층수두손실계수와 우물수두손실계수를 구할 수 있다.

단계양수시험을 통해 산정된 국가지하수 관측망의 대수층수두손실계수와 우물수두손실계수는 다른 변수와 마찬가지로 로그정규분포를 보였다. 암반대수층의 평균 대수층우물수두손실계수(B)는 $0.049 \text{ day}^2/\text{m}^5$ 로 충적대수층의 평균값인 $0.025 \text{ day}^2/\text{m}^5$ 보다 약 2배 큰 것으로, 표준편차는 거의 동일한 것으로 나타났다. 한편, 우물수두손실계수(C)의 평균값은 암반대수층에서 $0.00032 \text{ day}^2/\text{m}^5$, 충적대수층에서 $0.00035 \text{ day}^2/\text{m}^5$ 로 유사하게 나타났다.

3.1.2. 상관분석

관정이 설치된 지점의 표고, 배출지역까지의 거리, 인근 하천의 규모, 지형의 경사도, 지하수 심도, 수리전도도, 투수량계수, 대수층수두손실계수, 우물수두손실계수, 비양수량 등 10개의 지형 및 대수층 특성 요소를 추출하여 이들 변수들 간의 상관관계를 분석하였다.

암반대수층의 경우 지하수 심도가 표고(0.17) 및 지형의 경사도(0.23)와 미약한 정의 상관관계를 보여 표고가 높아질수록 암반 지하수의 심도가 다소 증가하는 것으로 나타났다. 한편, 충적대수층에서는 지하수 심도가 인근 하천의 규모와 정의 상관관계(0.303)를 보였으나 이에 대한 수리지질학적 원인은 분명하지 않다.

우리나라의 경우 하천은 일반적으로 지하수 배출지역을 나타내는데, 대수층의 투수량계수, 대수층수두손실계수, 우물수두손실계수 등의 대수층 변수들이 관정에서 하천까지의 거리에 대하여 유의미한 수준의 상관관계를 보였다. 투수량계수는 하천까지의 거리에 대해 암반대수층의 경우

상관관계를 보이지 않은 반면, 충적대수층에서는 미약한 부의 상관관계(-0.17)를 보였는데, 이는 하천에 가까울수록 충적층이 다소 두꺼워지면서 투수량계수를 증가시켰기 때문인 것으로 추정된다. 한편, 대수층수두손실계수와 우물수두손실계수는 암반 및 충적대수층 모두 하천까지의 거리에 대하여 뚜렷한 정의 상관관계(0.43~0.61)를 보여 배출지역에 가까울수록 암반대수층과 충적대수층 모두에서 대수층 및 우물수두손실계수가 감소하는 것으로 나타났다. 대수층수두손실계수(Log B)와 우물수두손실계수(Log C)는 투수량계수(Log T)에 대하여 -0.83 ~ -0.86 수준의 높은 부의 상관관계를 보였다.

우물 양수 시 양수량과 수위강하의 비로 정의되는 비양수량(Q/s_w)은 대수층의 투수량계수와 높은 상관성을 보이는 수리상수로 알려져 있으며, 둘 사이의 관계식으로부터 투수량계수를 산정하는데 널리 이용된다. Brown(1963), Theis(1963) 등은 비양수량으로부터 투수량계수를 산정할 수 있는 이론식을 제시하였으나, 그 적용성에 대한 논란이 많이 제기되었다(Razack and Huntley, 1991; Huntley et al., 1992). Razack and Huntley(1991)은 충적대수층에 이론식을 적용할 경우 우물수두손실에 의하여 투수량계수가 과소평가될 수 있음을 지적하였으며, 광역적인 규모의 비균질 충적대수층에서 수행한 양수시험을 자료를 분석하여 다음과 같은 지수함수 형태의 경험식을 제시하였다.

$$T = \alpha(Q/s_w)^\beta \quad (3)$$

Huntley et al.(1992)은 미국 San Diego County의 균열 암반대수층에서 수행된 60회의 양수시험을 통해 구한 투수량계수와 비양수량 자료를 이용하여 경험식을 제시하였

다. 한편, 국내에서는 최병수(1999)와 우윤정 외(2003)가 제주도 화산암 대수층에서 수행된 양수시험 자료를 분석하여 경험식을 제시한 바 있다. 국내의 경우 내륙의 암반 또는 충적대수층에서의 비양수량과 투수량계수의 관계에 관한 연구는 아직 보고된 바 없다.

Fig. 9는 국가지하수 관측망의 202개 암반 및 112개 충적 관정에서 수행된 양수시험 자료를 회귀 분석하여 도시한 비양수량과 투수량계수의 관계를 나타낸다. 국가지하수 관측망의 경우 암반대수층의 관계식은 Huntley et al.(1992)에 비하여 투수량계수가 다소 크게 산정되는 특징을 보이는 반면, 충적대수층의 관계식은 Razack and Huntley(1991)의 비하여 작게 산정되는 특징을 보이며 암반의 관계식과 매우 유사한 것으로 나타났다. Table 2는 전술한 국내의 선행 연구 결과와 본 연구 결과를 비교한 것이다.

회귀 상수 α 및 β 에 대한 95% 신뢰구간(confidence interval) 추정치는 암반대수층에서 0.42~0.53과 0.95~1.04, 충적대수층에서 0.39~0.69와 0.87~1.04로 분석되었

Table 2. Comparison of regression constants in the empirical relation between specific capacity and transmissivity (both in units of m^2/day)

Authors	Constants	
	α	β
Razack and Huntley(1991)	15.3	0.67
Huntley et al.(1992)	0.12	1.18
최병수(1999)	0.448	1.053
우윤정 외(2003)	0.582	0.974
NGMWs(rock)	0.47	0.996
NGMWs(alluvium)	0.52	0.953

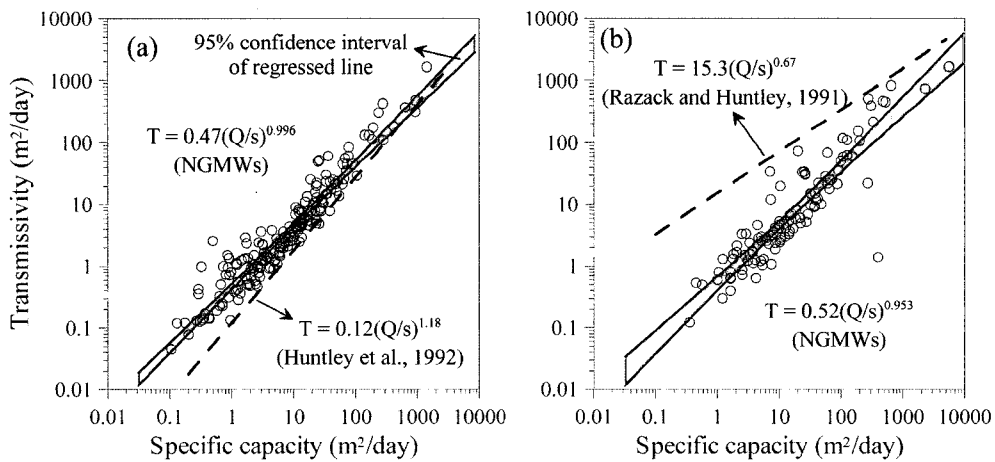


Fig. 9. Relationship between transmissivity and specific capacity: (a) fractured-rock aquifers, (b) alluvial aquifers.

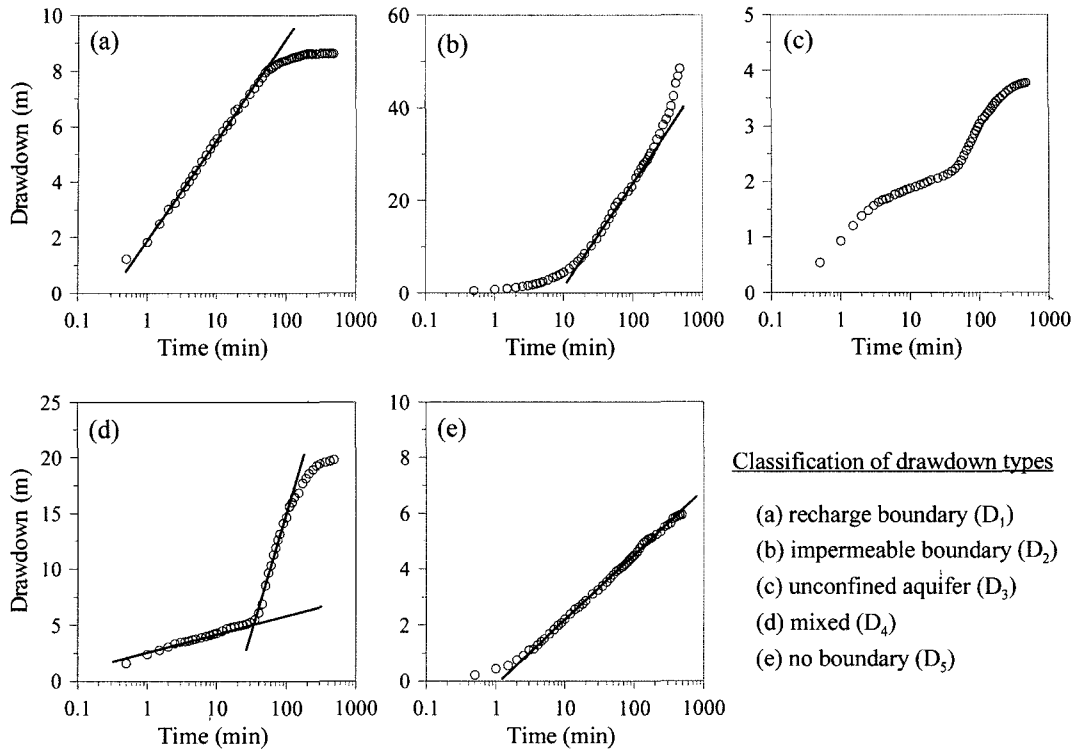


Fig. 10. Time-drawdown patterns of NGMWs during pumping test: (a) recharge boundary(D_1), (b) impermeable boundary(D_2), (c) unconfined aquifer(D_3), (d) mixed(D_4), and (e) no boundary pattern(D_5).

다. Fig. 9에서 검은 색으로 표시된 영역은 회귀직선에 대한 95% 신뢰구간을 나타낸다. 최병수(1999)와 우윤정 외(2003)가 제시한 관계식은 95% 신뢰구간 영역 내에 포함되며, 이는 비양수량과 투수량계수와와의 상관성과 관련하여 제주도의 화산암 대수층이 내륙의 대수층과 동일한 통계적 특성을 보이고 있음을 입증한다. 본 연구를 통해 제시된 관계식은 시간과 경비가 많이 소요되는 양수시험을 수행하지 않더라도 비양수량 자료를 통하여 대수층의 투수량계수를 쉽게 추정할 수 있는 경험식으로 널리 이용될 수 있을 것이다.

3.2. 양수 및 회복시험 유형 분석

3.2.1. 양수시험 유형 분석

국가지하수 관측망의 양수시험 자료는 양수 단계에서의 시간-수위강하 곡선의 모양에 따라 크게 5개의 유형으로 분류되었다(Fig. 10). Fig. 10a는 양수시험 시 대수층에 물이 공급되면서 수위강하가 둔화되는 함양경계형(D_1)으로, 양수정 주변에 하천이나 호수와 같은 공급원이 위치하는 경우, 암반과 충전대수층의 수리적 연결성이 양호하여 양수 시 수직적인 지하수 흐름이 발생하는 경우 등이 이에 해당한다. Fig. 10b는 화성암체, 맥암, 단층 등에 의

해 지하수의 공급이 차단되는 불투수경계형(D_2), Fig. 10c는 3단계에 걸쳐 수위강하가 일어나는 자유면대수층형(D_3)을 나타낸다. Fig. 10d는 양수시험의 시간-수위강하 그래프에서 2개의 기울기가 나타나는 혼합형(D_4)으로 건설교통부·한국수자원공사(2000)는 이런 유형의 지하수 관측소는 상당수가 산록부에 위치하고 있어 불투수 경계에 의해 제한 받고 있기 때문인 것으로 해석하였다. 즉, 그래프의 초반부 직선은 대수층의 특성을 반영하는 수위강하 구간이며, 중반부 직선은 양수의 영향권이 불투수 경계에 도달된 후 그 영향으로 기울기가 증가된 것이며, 후반부에서 수위강하가 둔화된 것은 D_1 형과 같이 공급원의 영향이 나타난 것으로 해석할 수 있다. Fig. 10e는 양수시험 후반부까지 이론적인 Jacob 직선이 잘 나타나는 무경계형(D_5)으로 양수시험을 장기간 지속할 경우 함양경계형이나 불투수경계형으로 변환될 수 있다.

이러한 기준에 근거하여 국가지하수 관측망 관측소를 5개의 양수시험 유형으로 분류하였다. Table 3은 배출지역까지의 거리에 따른 각 유형의 개소수를 나타낸다. 양수시험 자료가 누락된 7개를 제외한 307개 관측소 중 257개소(83.7%)가 함양경계형을 보였다. 함양경계형은 배출지역(하천)으로부터 가까운 관측소뿐만 아니라 500 m 이

Table 3. Frequency of NGMWs classified by patterns of drawdown and distance to the discharge boundary

Distance to the discharge boundary	Patterns of drawdown												Total		
	D ₁		D ₂		D ₃		D ₄		D ₅		No data				
	R	A	R	A	R	A	R	A	R	A	R	A	R	A	
0~50 m	52	38	3	·	1	2	11	1	1	1	1	·	·	69	42
50~100 m	32	23	2	·	1	1	3	1	1	·	1	1	·	40	26
100~200 m	32	19	1	·	·	1	4	·	·	·	·	·	1	37	21
200~500 m	25	11	·	1	2	1	4	1	1	1	1	1	1	33	16
> 500 m	18	7	2	·	·	·	2	·	·	·	·	1	·	23	7
Total	159	98	8	1	4	5	24	3	3	2	4	3	·	202	112

상 멀리 떨어진 관측소군에서도 83%의 높은 비율을 차지하였다. 따라서 국내 암반대수층은 대부분 상부의 충전대수층과 수리적 연결성이 양호하여 양수 시 충전대수층으로부터 수직적인 물의 공급이 이루어지는 것으로 유추할 수 있다. 또한 충전대수층은 양수 시 하부 암반대수층으로부터 물을 공급받거나, 자유면대수층의 수위강하 2단계에서 발생하는 중력배수가 공급원 역할을 하기 때문에 함양경계형이 높은 비율을 차지한 것으로 풀이된다. 이러한 추론을 종합하면, 암반 및 충전대수층으로 대별되는 국내 대수층은 대부분 연결성이 양호하여 양수 및 지하수 함양과 같은 외부에서 가해진 수리적 스트레스에 대하여 독립된 반응을 보이지 않고 지속적인 지하수 교환에 의하여 밀접한 연계성을 가지는 하나의 대수층임을 시사한다.

양수시험 시 불투수경계형을 보이는 관측소는 9개소(2.9%)에 불과하며 이중 8개는 암반 관측소이다. 이들 관측소는 다른 유형의 관측소와 대비될 수 있는 뚜렷한 지질학적, 지형학적 특징은 발견되지 않으나, 전체적으로 수리전도도가 낮은 공통점을 가지는 것으로 나타나 투수성 균열의 발달이 미약하고, 대수층의 규모가 작아 불투수경계형을 보인 것으로 추정된다.

자유면대수층형을 보이는 관측소는 암반 4개소(2.0%), 충전 5개소(4.6%)이며, 모두 퇴적암 및 화성암 지역에 위치하는 특징을 보인다. 24시간 이내의 양수시험 동안 자유면대수층형이 보이는 3단계의 시간-수위강하 곡선이 나타나기 위해서는 Fig. 10c와 같이 중력배수가 빠르게 발생하여 시간-수위강하 곡선에서 2단계, 3단계로 진행해야 한다. 충전층의 경우 구성 매질의 입경이 클수록 중력배수가 빠르게 일어나므로 자유면대수층형을 보이는 관측소는 수리전도도가 큰 특징을 보일 것으로 유추할 수 있다. 자유면대수층형을 보이는 암반 및 충전대수층의 평균 수리전도도는 1.14 m/day와 2.87 m/day로 관측망 전체 평균값보다 각각 15배 및 2.3배 크게 나타나 이러한 추론을

뒷받침한다. Fig. 10a의 함양경계형 중 중력배수가 공급원 역할을 하는 관측소의 경우 자유면대수층형의 2단계에서 양수시험이 종료된 것으로 볼 수 있으므로 사실상 동일한 유형으로 분류되어야 한다. 하지만 시간-수위강하 곡선만으로는 함양경계형의 공급원이 주변 하천인지, 하부 암반 또는 상부 충전대수층인지, 중력배수에 의한 것인지 구별할 수 없으므로 공급원의 종류에 따른 함양경계형의 재분류는 불가능하다.

혼합형을 보이는 관측소는 암반 24개소(12.1%), 충전 3개소(2.8%)로 주로 암반대수층에서 나타나며, 평균 수리전도도는 암반 및 충전이 각각 0.052 m/day와 0.49 m/day로 불투수경계형과 같이 다소 낮은 특징을 보인다. 무경계형은 가장 작은 빈도수를 보이는 유형으로 암반 3개소(1.5%), 충전 2개소(1.8%)에서 나타났다. 전술한 바와 같이 무경계형은 장기양수시험을 수행할 경우 다른 유형의 시간-수위강하 곡선이 나타날 것으로 예상된다.

3.2.2. 회복시험 유형 분석

Theis 방정식에서 $u < 0.01$ 이라 가정하면 회복시험의 잔류수위강하 곡선은 경계가 없는 경우 x 축($\log t/t'$) 절편의 1에 수렴하며, 함양경계의 경우 1보다 큰 점에, 불투수경계의 경우 1보다 작은 점에 수렴한다. 국가지하수 관측망의 회복시험 자료는 회복 단계에서의 시간-잔류수위강하 곡선의 모양에 따라 함양경계형(R₁), 불투수경계형(R₂), 혼합함양경계형(R₃), 및 혼합불투수경계형(R₄) 등 4가지 유형으로 분류되었다(Fig. 11).

Table 4는 양수 및 회복시험 유형의 관측소 개소수를 동시에 나타낸 것이다. 양수시험에서 함양경계형을 보이는 관측소의 대부분은 회복시험에서도 함양경계형을 보여, 양수 및 회복시험 시 국내 대수층이 보편적으로 나타내는 유형인 것으로 해석된다. 양수시험 시 불투수경계형을 보이는 관측소는 회복시험 시 4가지 유형으로 고르게 나타

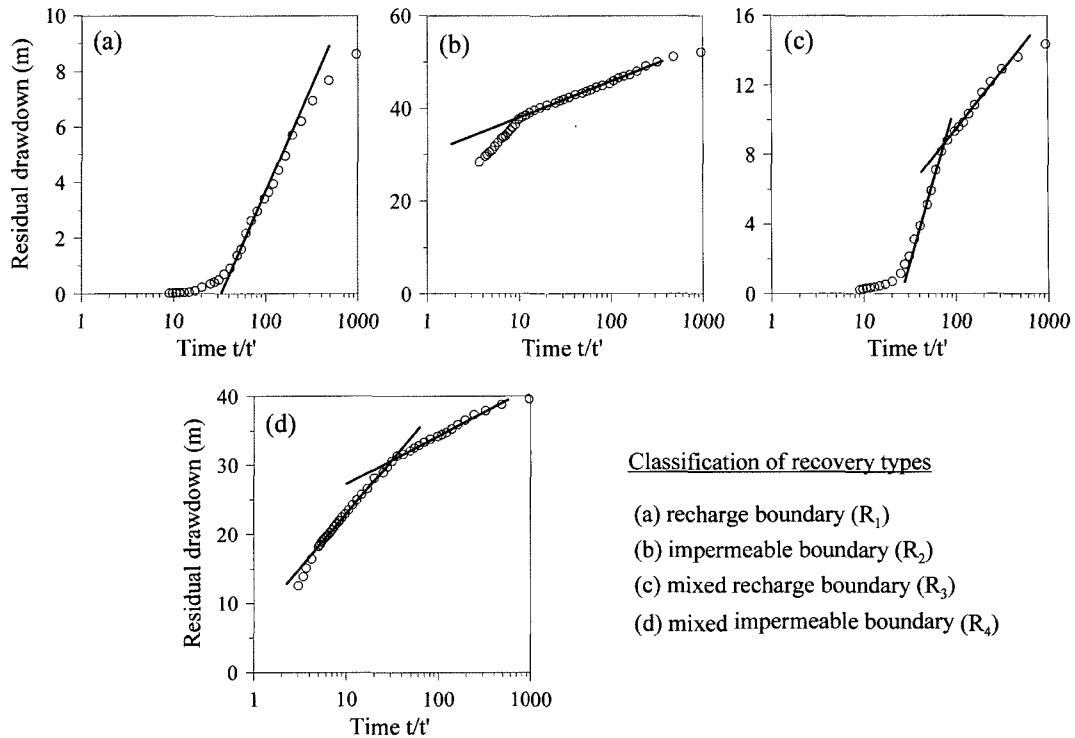


Fig. 11. Time-drawdown patterns of NGMWs during recovery test: (a) recharge boundary(R_1), (b) impermeable boundary(R_2), (c) mixed recharge boundary(R_3), (d) mixed impermeable boundary pattern(R_4).

Table 4. Frequency of NGMWs classified by patterns of drawdown and recovery

Drawdown patterns	Recovery patterns				Total
	R_1	R_2	R_3	R_4	
D_1	244	9	4		257
D_2	2	2	3	2	9
D_3	9	·	·	·	9
D_4	4	1	18	4	27
D_5	3	2	·	·	5
Total	262	14	25	6	307

났다. 양수시험 유형에서는 함양경계형이나 불투수경계형을 보인 관측소의 일부는 회복시험 유형에서 반대의 유형을 보였는데 현재의 자료만으로는 그 원인을 밝힐 수 없었다.

자유면대수층형은 회복시험 시 모두 함양경계형으로 나타났다는데, 이는 전술한 바와 같이 함양경계형의 일부는 양수를 지속할 경우 자유면대수층형의 수위강하 유형이 될 수 있음을 반증한다. 양수시험 시 주로 암반 관측소에서 나타난 혼합형은 회복시험 시 다양한 유형으로 분산되었으나 대부분 혼합함양형을 보여, 혼합형 역시 주로 함양

경계에 의해 지배되는 것으로 해석된다. 양수시험에서 무경계형으로 분류되었던 5개 관측소는 회복시험 시 함양경계형과 불투수경계형을 보였다. 함양경계형을 보인 3개 관측소는 모두 배출지역까지의 거리가 50 m 이내이며 인근 하천의 폭도 50 m 이상인 것으로 확인되어, 회복 단계에서 하천에 의한 지하수 공급의 영향이 나타난 것으로 풀이된다.

Fig. 12는 양수 및 회복시험 유형에 따른 수리전도도의 분포를 Box-Whisker diagram으로 도시한 것이다. 자유면형(D_3)을 보이는 대수층의 평균 수리전도도가 가장 크게 나타났으며, 불투수 경계와 관련된 D_2 , D_4 , R_4 등의 유형의 대수층이 상대적으로 낮은 값을 보였다. 무경계형(D_3)은 자료의 개수가 작아서 일반적인 해석이 어렵지만 함양경계형(D_1 , R_1)보다 다소 작은 값을 보였다. 전술한 바와 같이 자유면대수층의 양수시험에서 중력배수에 의해 수위강하가 둔화되는 2단계의 진입 시점은 구성 매질의 유효입경에 의해 결정되며, 이는 대수층의 수리전도도와 밀접한 관련이 있다. 무경계형의 경우 대수층을 구성하는 매질의 유효입경이 작아서 중력배수가 매우 서서히 발생하는 것으로 추정할 수 있으며, 중력배수 영향이 나타난 함양경계형에 비하여 수리전도도가 작게 산정된 것으로 해석된다.

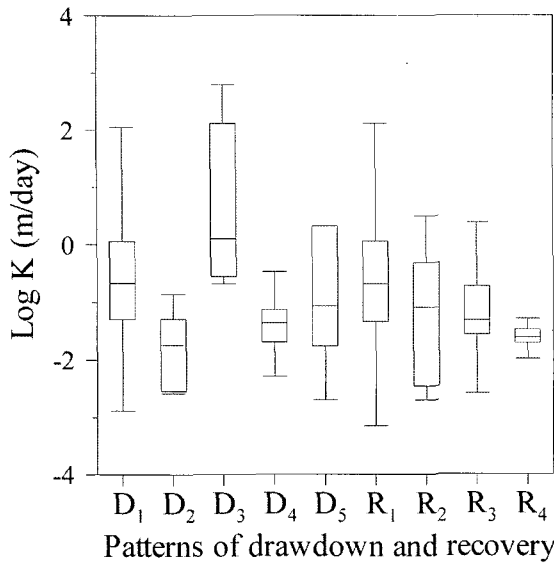


Fig. 12. Comparison of hydraulic conductivity for various patterns of time-drawdown and recovery.

4. 결 론

본 연구에서는 1995년부터 2001년까지 설치된 국가지하수 관측망의 준공보고서에 수록된 314개 관정에 대한 양수시험 자료를 이용하여 국내 암반 및 충적대수층이 나타내는 수리특성을 통계 분석하였다. 본 연구를 통해 규명된 국내 대수층의 주요 특성은 다음과 같다.

1) 충적대수층의 평균 수리전도도는 1.26 m/day로 암반대수층(0.076 m/day)보다 약 17배 크게 나타났다. 암반대수층 수리전도도의 평균과 분산도는 국외의 결정질 균열 암반과 거의 일치하였다. 충적대수층은 수리전도도의 분포로 보아 주로 모래로 구성된 퇴적층이 대종을 이루며, 미사와 자갈의 혼합 정도에 따라 입도분포 특성이 달라지면서 수리전도도가 결정되는 것으로 분석되었다.

2) 암반대수층의 수리전도도는 암종별로 뚜렷한 차이를 보였는데 퇴적암 지역에서 평균 0.11 m/day로 가장 크게 나타났고, 화성암 지역 0.083 m/day, 변성암 지역 0.044 m/day 순이다. 한편 충적대수층의 수리전도도는 화성암 지역에서 평균 1.70 m/day로 가장 크게 나타나 투수성이 좋은 사질의 풍화토를 형성하는 화강암의 풍화특성이 잘 반영된 것으로 해석된다.

3) 암반 및 충적대수층의 평균 투수량계수는 각각 3.3, 7.1 m²/day이며, 이는 동일한 수두구배를 가정할 때 국가지하수 관측망의 지하수는 암반을 통하여 32%, 충적층을 통하여 68% 정도가 흐르는 것으로 풀이된다. 하지만 이

러한 분석 결과는 암반대수층의 투수량계수 과다산정 가능성 및 관정 개발 심도 하부의 암반 지하수 흐름 등이 고려되어야 하는 제한점을 가진다.

4) 회귀분석을 통하여 국가지하수 관측망의 대수층이 나타내는 비양수량과 투수량계수의 관계식을 제시하였다. 관계식은 Razack and Huntley(1991), Huntley et al. (1992) 등이 제시한 국외의 사례와 다소 차이가 있으며, 제주도 화산암 대수층을 대상으로 분석된 최병수(1999)와 우윤정 외(2003)의 관계식과는 거의 동일한 것으로 나타났다. 제시된 관계식은 비양수량 자료를 통하여 국내 대수층의 투수량계수를 쉽게 추정할 수 있는 경험식으로 이용될 수 있다.

5) 양수 및 회복시험의 시간-수위강하 양상에 따라 대수층의 유형을 4~5개로 분류하여 각 유형이 나타내는 대수층의 통계적 특성을 분석하였다. 암반 및 충적대수층의 대부분(83.7%)은 함양경계형을 보였으며, 관측소 인근의 하천, 암반 및 충적대수층의 수리적 연결에 의한 두 대수층간의 수직적인 지하수의 흐름, 자유면대수층의 수위강하 2단계에서 발생하는 중력배수 등 다양한 공급원에 의하여 함양경계형이 나타난 것으로 분석되었다. 또한 함양경계형이 배출지역까지의 거리에 관계없이 80% 이상의 높은 비율을 차지하였는데, 이는 암반 및 충적층으로 대별되는 국내 대수층은 대부분 둘 사이의 수리적 연결성이 양호한 자유면대수층임을 시사한다.

사 사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호 3-2-2)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

강래수, 함세영, 최성자, 이병대, 2003, 여러 가지 양수시험 분석 방법 적용을 통한 목천지역 암반대수층의 수리지질학적 특성, 지질공학, 13(1), 67-82.

강철희, 이대하, 이철우, 김용제, 채병곤, 우남철, 2001, 이방성대수층에서의 투수량계수 텐서, 2001년 한국지하수토양환경학회 총회 및 추계학술대회, 한국지하수토양환경학회, 전주대학교, p. 172-175.

건설교통부, 한국수자원공사, 1995, '95 지하수 관측망 설치공사 준공보고서.

건설교통부, 한국수자원공사, 1997, '96 지하수 관측망 설치공사 준공보고서.

- 건설교통부, 한국수자원공사, 1998, '97 지하수 관측망 설치공사 준공보고서.
- 건설교통부, 한국수자원공사, 1999, '98 지하수 관측망 설치공사 준공보고서.
- 건설교통부, 한국수자원공사, 1999, '99 지하수 관측망 설치공사 준공보고서.
- 건설교통부, 한국수자원공사, 2000, 2000 지하수 관측망 설치공사 준공보고서.
- 건설교통부, 한국수자원공사, 2001, 2001 지하수 관측망 설치공사 준공보고서.
- 구민호, 김형수, 2001, 지하수 및 토양의 온도 관측 자료를 이용한 함양량 산정 기법, 2001년 한국지하수토양환경학회 총회 및 추계학술발표회, 한국지하수토양환경학회, 전주대학교, p. 83-87.
- 김구영, 이철우, 김용제, 우남철, 2003, 양수시험 자료를 이용한 균열암반 대수층의 수리적 특성 해석, 지질학회지, **39**(3), 359-370.
- 김규범, 김정우, 원종호, 이명재, 이진용, 이강근, 2003, 국가지하수 관측소의 장기수위관측자료를 활용한 관측주기 결정연구, 2003년 한국지하수토양환경학회 총회 및 추계학술발표회, 한국지하수토양환경학회, 제주대학교, p. 119-201.
- 김규범, 이강근, 2003, 수질 장기관측자료를 활용한 우리나라의 지하수 수질변동 특성, 2003년 한국지하수토양환경학회 총회 및 추계학술발표회, 한국지하수토양환경학회, 강원대학교, p. 94-96.
- 김규범, 최영진, 유영권, 류정아, 손영철, 2000, 국가 지하수 관측소의 장기관측자료에 의한 지하수 변동 특성, 2000년 한국지하수토양환경학회 총회 및 추계학술발표회, 한국지하수토양환경학회, 포항공대, p. 36-39.
- 김윤영, 이강근, 1999, 한강의 수리시스템과 한강변 대수층의 수리지질 특성, 지하수환경, **6**(1), 33-41.
- 김주용, 양동윤, 조민조, 최영섭, 오근창, 2003, 한국 제4기 미고결층 분포 및 수리지질 특성 연구, 2003년도 대한지질공학회 총회 및 학술발표회, 대한지질공학회, p. 55-66.
- 문상기, 우남철, 2001, 누적 강수량과 지하수위 곡선을 이용한 지하수 함양률 산정 기법, 지하수토양환경, **6**(1), 33-43.
- 문상기, 우남철, 이광식, 2002, 지하수위 유형과 유역별 지하수 함양률의 관련성 연구: 국가 지하수 관측망 자료의 분석, 지하수토양환경, **7**(3), 45-59.
- 박경우, 고용권, 김경수, 배대석, 조성일, 2003, 유성지역 결정질 암반에서 수행한 양수시험에 대한 해석, 2003년 한국지하수토양환경학회 총회 및 추계학술발표회, 한국지하수토양환경학회, 제주대학교, p. 592-596.
- 박창희, 구민호, 이대하, 김형수, 2002, 국가 지하수 관측망의 수위 및 온도 자료를 이용한 함양량 산정, 2002년 한국지하수토양환경학회 총회 및 추계학술대회, 한국지하수토양환경학회, 서울시립대학교, p. 351-356.
- 성현정, 이철우, 우남철, 김구영, 김용제, 2003, 균열암반에서의 양수시험자료 해석과 GRF 모델, 2003년 한국지하수토양환경학회 총회 및 추계학술발표회, 강원대학교, p. 250-254.
- 우윤정, 함세영, 정재열, 이상선, 정차연, 박윤석, 김봉상, 2003, 양수 시험 분석에 의한 제주도 화산암 대수층의 수리적 특성, 2003년 한국지하수토양환경학회 총회 및 추계학술발표회, 한국지하수토양환경학회, p. 292-295.
- 이명재, 김규범, 손영철, 이진용, 이강근, 2004, 국가 지하수 관측소 지하수위 자료에 대한 시계열분석 연구, 지질학회지, **40**(3), 305-329.
- 이명재, 이진용, 김규범, 원종호, 2005, 국가지하수 관측소 측정자료의 이상값 분석, 지하수토양환경, **10**(1), 65-74.
- 이수곤, 2003, 우리나라 암석의 풍화특성과 지질공학적 특성, 2003년도 대한지질공학회 총회 및 학술발표회, 대한지질공학회, p. 75-80.
- 이철우, 이대하, 정지근, 김구영, 김용제, 2002, 양수시험 시 방사상호를 보이는 균열암반대수층에서의 우물손실, 지하수토양환경, **7**(4), 17-23.
- 정상용, 심병완, 강동환, 김병우, 박희영, 원종호, 김규범, 2001, 크리깅에 의한 장기관측 지하수위 결측자료 보완, 지질학회지, **37**(3), 421-430.
- 최병수, 1999, 제주도 지하수의 우물 비양수량 자료를 이용한 대수층상수 결정방법, 지하수환경, **6**(4), 180-187.
- 함세영, 정재열, 류상민, 김무진, 김형수, 2002, 창원시 대산면 강변여과수 취수지역의 수리지질 특성, 지질학회지, **38**(4), 595-610.
- Brown, R.H., 1963, Estimating the transmissivity of an artesian aquifer from the specific capacity of a well, U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1536-I, p. 336-338.
- Domenico, P.A. and Schwartz, F.W., 1998, Physical and Chemical Hydrogeology, 2nd Ed., Wiley & Sons, New York, p. 506.
- Huntley, D., Nommensen, R., and Steffey, D., 1992, The use of specific capacity to assess transmissivity in fractured-rock aquifers, *Ground Water*, **30**(3), 396-402.
- Lee, J.Y. and Lee, K.K., 2000, A general solution of determining storage coefficient from multi-step pumping test recovery data, *Journal of the Korean Society of Groundwater Environment*, **7**(1), 20-23.
- Razack, M. and Huntley, D., 1991, Assessing transmissivity from specific capacity in a large and heterogeneous alluvial aquifer, *Ground Water*, **29**(6), 856-861.
- Theis, C.V., 1963, Estimating the transmissivity of a water-table aquifer from the specific capacity of a well, U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1536-I, p. 332-336.