

## 강원도 흥호리 지역 암반대수층의 수리지질 및 지하수 오염취약성 예비조사

### Hydrogeology and Vulnerability of Groundwater Contamination of a Mountainous Area in Kangwon Province

---

이진용 (Jin Yong Lee)	서울대학교 지구환경과학부
이강근 (Kang Kun Lee)	서울대학교 지구환경과학부
정형재 (Hyung Jae Jung)	농업기반공사 농어촌연구원 지하수·지하공연구실(KARICO)
배광옥 (Gwang Ok Bae)	농업기반공사 농어촌연구원 지하수·지하공연구실(KARICO)

---

#### 요약 / ABSTRACT

강원도 흥호리 지역의 수리지질과 지하수의 오염취약성을 평가하였다. 연구지역의 주 대수층은 피압 단열암반 대수층으로 지하수 유동과 재충진이 주로 단열을 통해 이루어진다. 순간수위변화시험, 순간간섭시험 그리고 양수시험을 통해 얻은 대상 대수층의 평균 투수량계수와 저유계수는 각각  $3.2 \times 10^{-3} \sim 2.0 \times 10^{-2} \text{m}^2/\text{min}$ ,  $1.3 \times 10^{-7} \sim 9.15 \times 10^{-4}$ 이다. 거주지역 상부에 위치한 축산단지의 오수로 인해 단열대의 지하수가 오염되었고 오염지하수가 단열대를 통해 이동함에 따라 하부 주민거주지역의 음용 지하수의 오염취약성을 드러내고 있다.

**주요어 :** 단열암반대수층, 축산단지, 지하수오염, 지하수재충진

We hydrogeologically studied a mountainous area and its vulnerability to groundwater contamination. Groundwater flow and recharge occur mainly through a network of fractures in this area. Transmissivity and storativity obtained from slug, slug interference, and pumping tests range from  $3.2 \times 10^{-3}$  to  $2.0 \times 10^{-2} \text{m}^2/\text{min}$  and  $1.3 \times 10^{-7}$  to  $9.15 \times 10^{-4}$ , respectively. The groundwater was contaminated by livestock activities in the upgradient. The groundwater in the downgradient residential area was threatened by the upgradient livestock activities.

**Key Words :** fractured rock aquifer, livestock farming, groundwater contamination, groundwater recharge

## 서 언

많은 축산단지과 각종 농업시설이 산간지역의 상부에 위치하고 있다. 이들 농업활동과 시설로부터 유래되는 각종 오염물질들이 토양층을 통과하여 대수층에 도달함으로써 지하수를 오염시키는 결과를 낳게 되었다. 이런 각종 시설들은 전국각지에 분포되어 있고 이들에 대한 적절한 관리와 정보수집이 이루어지고 있지 않다. 국토의 70% 정도가 산으로 이루어진 우리 나라에서 산간 유역은 거의 모든 지역에서 나타나는 전형적인 유역 형태이다. 산간 지역은 거주지나 시설물이 밀집한 평지나 구릉에 비해 오염원으로부터 상대적으로 떨어져 있는 편이고 지하수가 함양되는 지역이기 때문에 지하수와 토양의 오염현상이 심각하지 않았다. 그러나 국민들의 환경 의식이 고취되면서 농촌 지역의 오염 유발 시설이 외진 곳인 산간 유역의 상류로 이동하면서 부터 오염되지 않았던 산간 지역의 지하수와 토양의 오염이 시작되었다(Cho, 2000; Cho et al., 2000). 이런 현상을 일으킨 농촌 산간 지역에 위치한 오염시설로는 계획되었거나 자연적으로 만들어진 소규모 쓰레기 매립장, 축산단지, 농한기용 소규모 산업 시설들이 있다. 이런 시설들은 농촌 산간 지역 오염의 점오염원으로 작용하며 또한 농약과 비료 살포 등과 같은 농업 활동은 비점오염원으로 작용하여 농촌 산간 지역의 지표 환경뿐만 아니라, 지하 지질 환경과 지하수를 오염시키는 원인이 되고 있다(RDC, 1996). 본 연구의 연구 대상 지역은 강원도 원주시에 소재하는 축산단지이다. 이는 전형적인 점오염원으로 이 지역 지질환경의 오염원으로 작용할 가능성이 크다. 본 논문에서는 이런 지역에 대한 수리지질 및 오염취약성을 평가하였다. 이를 통해 점차 가속화되고 있는 점 오염원 또는 비점 오염원에 의한 농촌 산간 유역의 지하수 환경 오염에 대한 기본적 정보를 제공하고자 하였다.

우리나라 산간지역은 지질특성상 상부 토양층은 매우 얇고 하부에 바로 암반이 나타나는 특성을 보여준다. 이런 이유로 오염물질이 지상 혹은 얇은 토양층에 노출되면 암반내 발달한 단열을 통해 지하수에 도달하고 광범위한 지하수 오염을 유발할 수 있다. 특별히 산간지역 하부에 위치한 거주지역의 주민들이 지하수를 음용수로 사용하는 경우가

적지 않아 건강에 치명적인 영향을 줄 수 있다.

## 연구 지역

연구대상 지역은 강원도 원주시에 위치하고 있다(Figure 1a). 연구지역의 주봉은 긴경산(352m)으로 산릉이 동서방향으로 발달해 있다. 연구지역의 층서단위는 선캠브리아기의 편마암을 기저로 이를 관입한 쥐라기의 화강암과 백악기 맥암(dyke) 및 제3기 충적층으로 이루어져 있다(Figure 1b). 곳에 따라서는 최상부에 복토층이 분포한다. 충적층은 연구지역의 중앙부에서 약 4.3m로 가장 두껍게 분포하고 다른 지역에서는 약 1m 두께로 나타난다. 선캠브리아기의 기저편마암은 주로 흑운모편마암, 호상편마암, 화강편마암으로 구성되어 비교적 단조로운 분포를 보인다. 조사지역에 집중적으로 분포하는 흑운모편마암은 편암류처럼 심하지는 않으나 부분적으로 엽상구조를 보인다. 이들 편마암류는 중생대 쥐라기의 심성암-소위 대보화강암의 관입을 받았다. 본 지역의 화강암류는 조립질내지 중립질의 흑운모화강암으로 백운모를 소량 함유하고 있는 복운모 화강암과는 점이적인 경계를 이루고 있다. 특별히 수리시험이 실시된 곳의 수직적인 수리단위를 살펴보면 상부 1m 깊이 정도까지 복토 혹은 풍화된 편마암층, 깊이 약 4m 정도까지는 풍화되지 않은 편마암층이 있고 그 하부에는 단열이 발달한 화강암층이 약 지하 35m까지 분포하고 그 하부는 균열이 거의 없는 화강암층이다. 이 층은 타부 불투수층으로 작용한다(이진용외, 1999).

연구지역의 지형적 혹은 지리적 특성을 살펴보면 화강암류가 분포하는 비교적 풍화에 강한 지역은 완만한 구릉으로 나타나고 풍화에 약한 부분은 소규모의 평지를 이루어 경작지로 이용되고 있다. 수리시험이 실시된 지역의 상부 약 500m에는 중소규모 양돈 축사가 있고 이 위치에 화강암의 노두가 관찰된다(Figure 2a). 그리고 관측정망 하부 약 1km 정도에 주민의 거주지역이 있다. 관측정망 좌측에 소하천이 있으며 건기에는 건천상태이나 우기에는 상당량의 물이 흐른다. 소하천의 흐름 방향과 지하수의 평균흐름방향은 유사하다(Figure 2b). 본 논문에서는 상부에 설치된 관정(W-2)과 소규모 관측망내 관정중 단열대수층에 스크린이 설치된 4개

강원도 홍호리 지역 암반대수층의 수리지질 및 지하수 오염취약성 예비조사

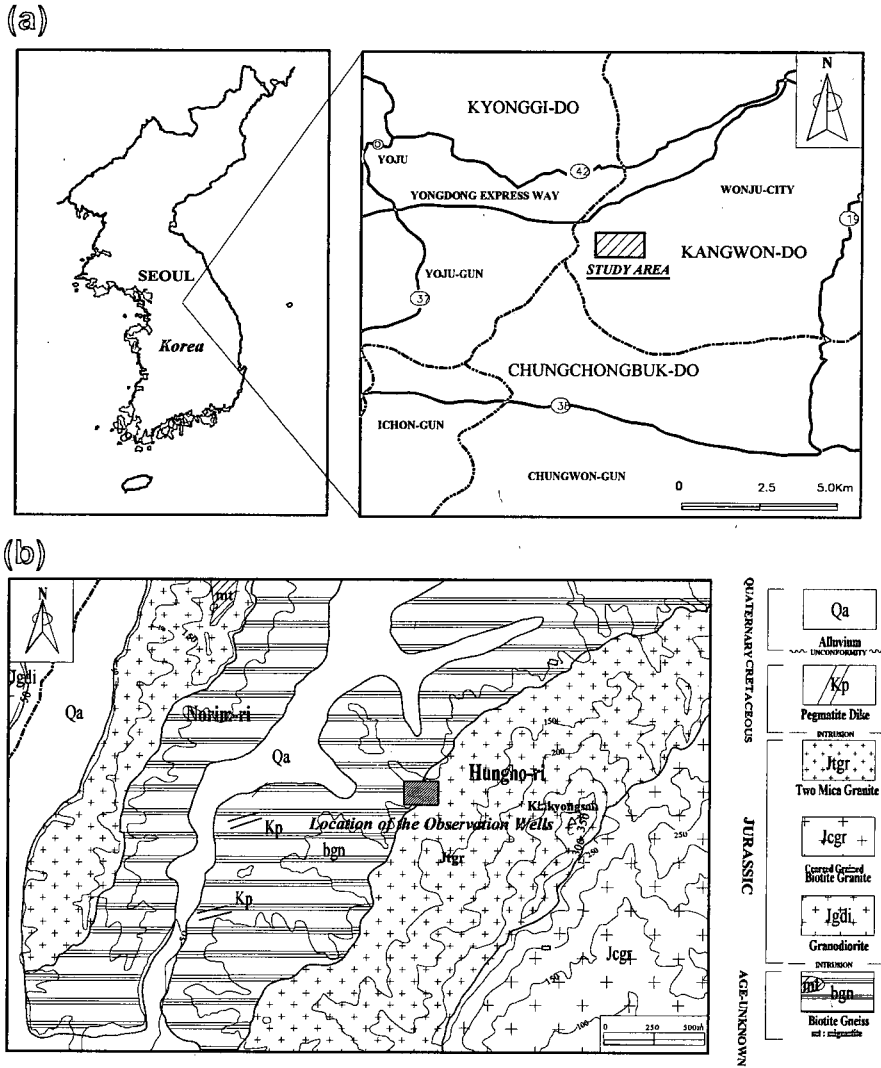


Fig. 1. Location of the study area (a) and the geological map (b).

Table 1. Well completions for the studied wells. Aquifer thickness was assumed as 30m.

Well I.D	Well radius (cm)	Casing length (cm)	Well depth (m)
C-I	6.5	400	56
PW	10.16	400	36
C-III	6.5	400	34
U-4	6.5	100	35

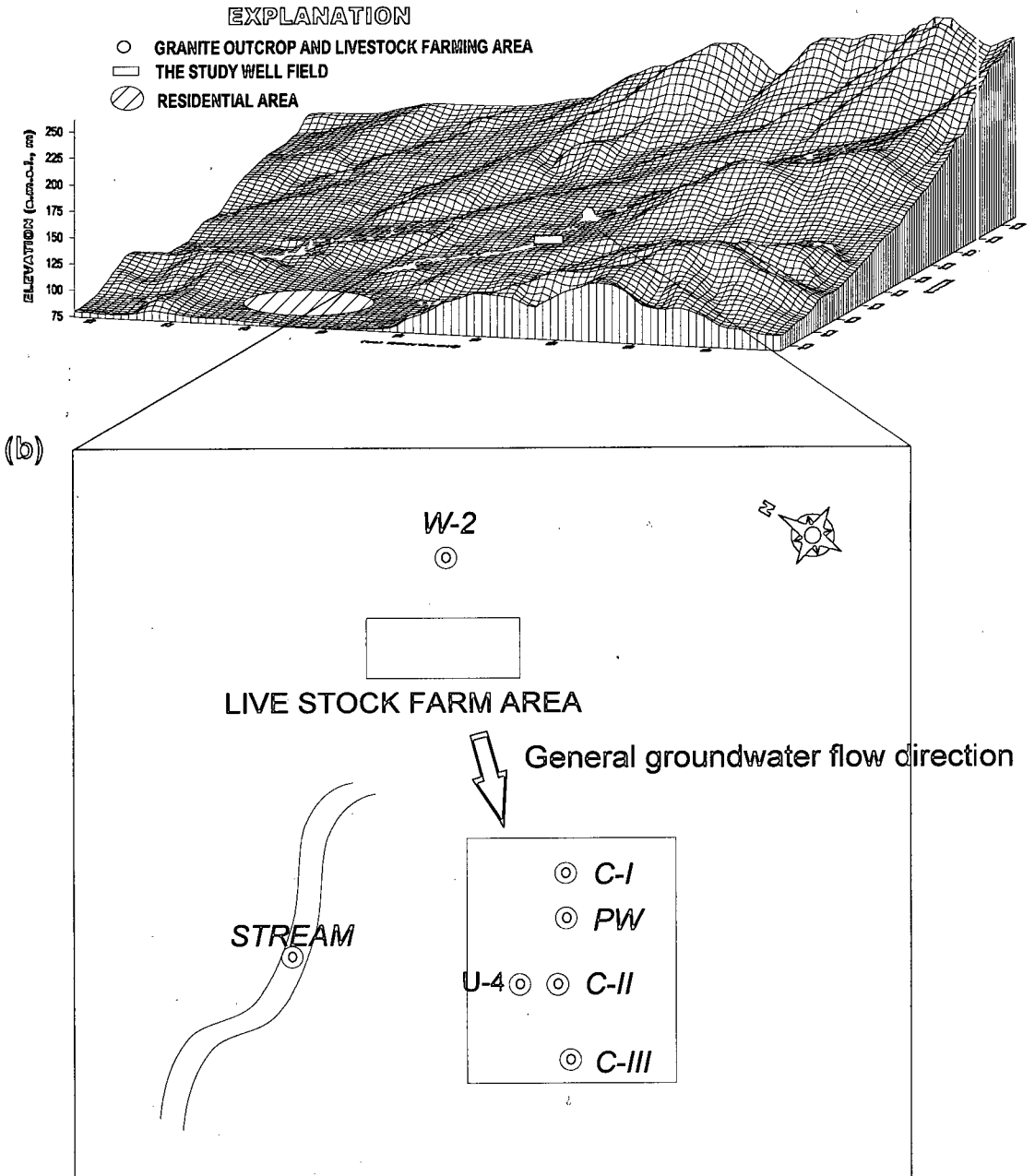


Fig. 2. The topographical map (a) and the location of study wells (b).

의 관정(C-I, PW, C-II, C-III) 및 상부 천층대수층에 설치된 관정(U-4)에 초점을 맞추어 기술하였다. 관정에 대한 간단한 현황은 Table 1에 제시하였다.

## 수 리 지 질

연구지역의 수리지질학적 특성을 파악하기 위해

자연수위변화 관측과 다양한 종류의 현장시험을 실시하고 그 결과를 분석하였다. 대상 대수층의 피압 정도를 파악하기 위해 기압에 따른 지하수위의 변화를 분석하여 기압영향율(barometric effect)을 계산하였다. 또한 대수층의 수리상수를 알기 위해 다수의 순간수위변화시험(slug test), 순간수위간섭시험(slug interference test), 양수시험(pump test)을 실시하였다. 수리시험의 해석을 위한 개념모델로는 다공성매질 모델을 이용하였다. 단열압반에 대한 다공성 매질 개념모델적용에 대한 유효성은 Lee and Lee (1999)에 자세히 기술되었다.

**자연수위변화(Natural waterlevel fluctuation)**

연구지역의 관측정에서의 자연수위변화는 강우와 밀접한 관계를 보인다(Figure 3). 우리나라는 건기와 우기가 비교적 뚜렷한 몬순기후를 보이는데 연구지역에서도 연강수량의 60% 이상이 우기(6월~8월)에 집중된다. 그 결과 우기에는 지하수 충전(recharge)이 많아 지하수위가 상승하고 반대로 건기에는 지하수위가 하강한다. 강수량과 지하수위 간에는 비교적 큰 양의 상관관계( $r^2=0.62$ ,  $p<0.01$ )를 가진다(Lee and Lee, 2000).

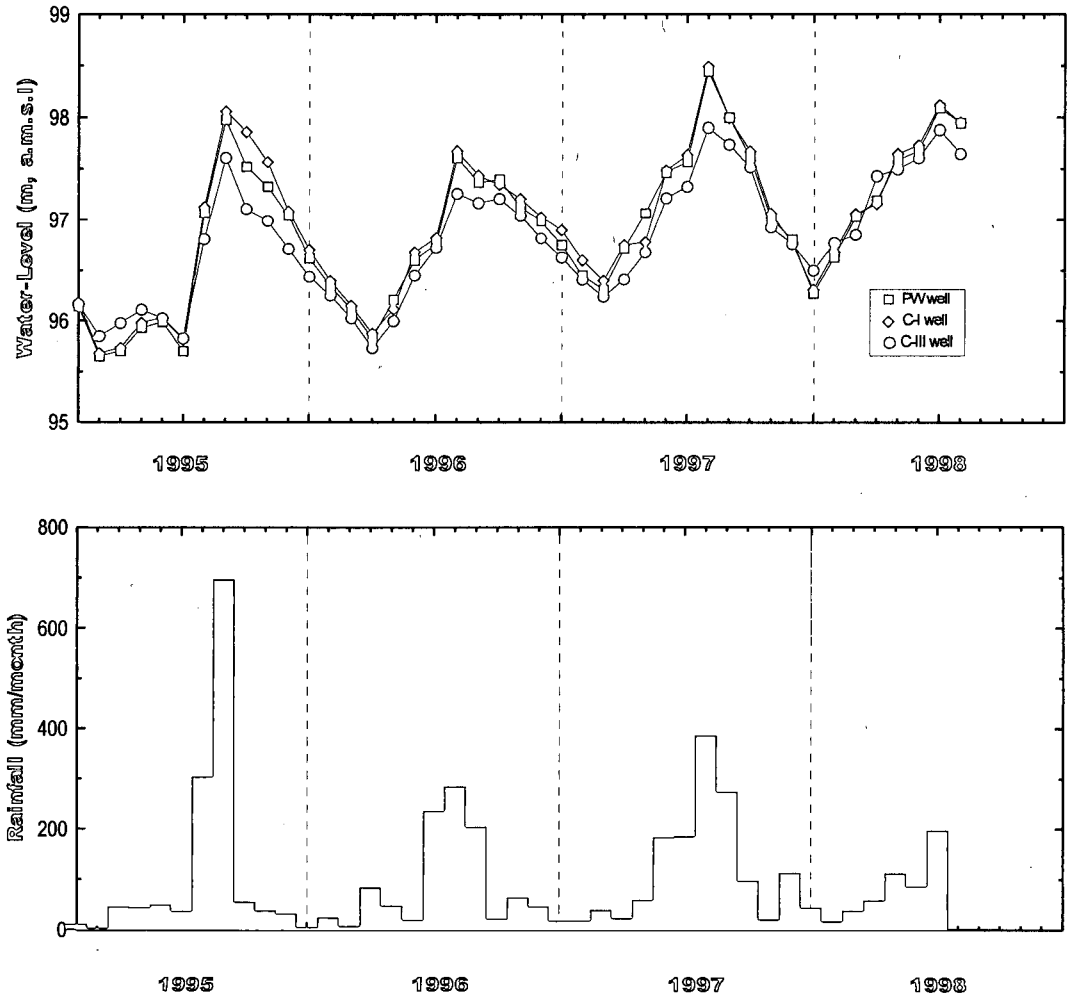


Fig. 3. Natural water level fluctuations of the study wells and monthly precipitation. The measurement period was from January 1995 to July 1998.

**기압영향율(Barometric efficiency)**

기압영향율을 통해 대수층의 피압 정도(degree of confinement)를 알 수 있다(Landmeyer, 1996). 피압대수층의 지하수위는 일상적인 대기압의 변화에 반응한다. 대기압과 접하고 있는 관정의 지하수위는 대기압과 정수압(hydrostatic pressure)간의 평형을 나타낸다. 대기압의 변화는 지하수위의 변화로 나타나는데 대기압이 상승하면 지하수위가 하강하고 기압이 하강하면 지하수위는 상승한다(Brassington, 1988). 이때 기압영향율은 다음과 같

이 표현된다.

$$\text{Barometric efficiency (BE)} = \frac{\Delta W}{\Delta B}$$

여기서  $\Delta W$ 는 지하수위변화를  $\Delta B$ 는 대기압의 변화를 나타낸다. 대부분의 경우 기압영향율은 약 20~80% 정도라고 알려져 있다(Lee, 1998). Figure 4는 하루중 대기압과 수위변화를 도시한 것이다. 이 자료로부터 계산한 관측관정의 기압영향율은 Table 2와 같다. 암반대수층에 설치된 관정(C-I,

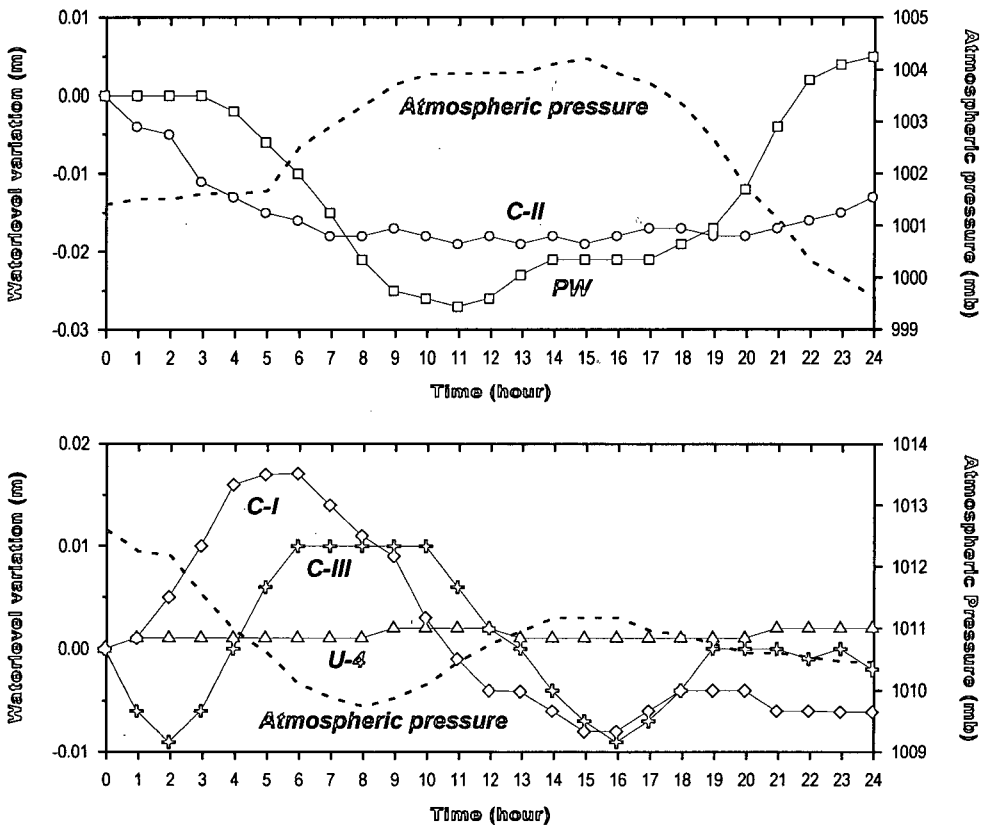


Fig. 4. Water level variations with response to change in atmospheric pressure.

Table 2. Estimated barometric efficiencies from groundwater level and barometric pressure data.

Observation well	C-I	PW	C-III	U-4
Barometric efficiency (BE)	0.97	0.96	0.71	0.17

PW, C-III)의 기압영향율을 매우 크게 나타냈다. 즉 이 암반대수층의 피압정도가 크다는 것을 나타낸다. 상대적으로 얇은 관정(U-4) 관정에서의 기압 영향율은 낮다. 실제로 단열이 발달한 연구지역의 암반대수층 최상부에 약 1~2m 두께의 풍화되지 않은 편마암이 분포하고 이 층이 하부 대수층에 대해 피압층으로 작용하며 또한 단열의 수직적인 불균질 분포도 피압의 정도를 강화하였다고 할 수 있다(Lee, 1998; Cho, 2000).

**수리시험(Hydraulic tests)**

연구지역 암반대수층의 수리성을 평가하기 위해 다양한 수리시험을 수행하였다. 시험은 Figure 2(b)에서 소하천 우측 관정에서 실시하였다. 순간수위 변화시험(slug test)은 총 68회를 각 관정에서 반복 수행하였고 양수시험(pump test)은 양수정과 양수량을 바꾸어가며 7회 실시하였다(Lee, 1998; Lee and Lee, 1999). 또한 순간간섭시험(slug inter-

ference test)은 PW와 C-I 관정에 대해 스트레스를 주는 관정을 바꾸어가며 8회 실시하였다. 순간수위 변화시험 결과를 해석하기 위해 Bouwer and Rice method(1976)와 Cooper et al. method(1967)를, 양수시험 해석을 위해서는 Theis method(1935), Cooper and Jacob method(1946), Theis recovery method(1935) 그리고 Banton and Bangoy method(1996)를, 순간간섭시험 해석을 위해서는 Novakowski method(1990)를 채택하였다.

Figure 5는 PW 관정에서 실시한 순간수위 변화 시험의 결과이다. 수위가 회복되는 양상이 충격(stress)을 주는 방법에 따라 약간의 차이를 보이고 그 결과 추정 수리상수에도 영향을 주지만 단열 혹은 파쇄다공질 매질에서 보여주는 일반적인 수위회복 양상에서 벗어나지 않는다(Lee and Lee, 1999). Figure 6은 PW와 C-I 관정을 대상으로 실시한 순간간섭시험의 결과이다. PW 관정에서 충격을 주고 C-I 관정에서 수위변화를 관찰하고 또 충격을 주는

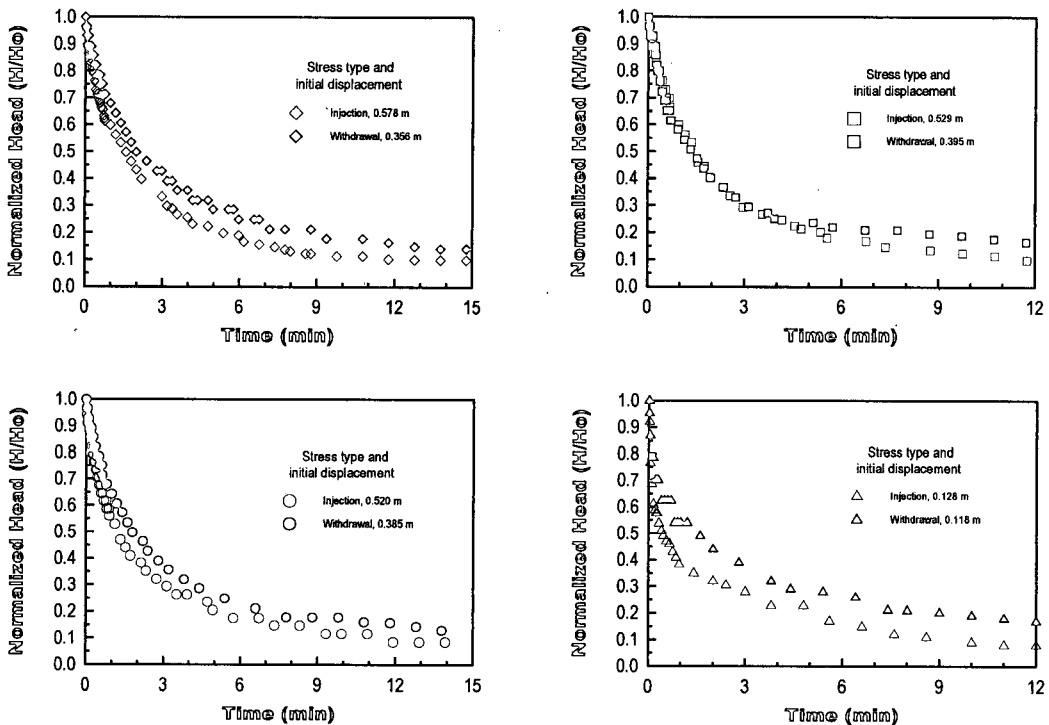


Fig. 5. Normalized head versus time plots of slug test data obtained from PW well tests. The figure was modified from Lee and Lee (1999).

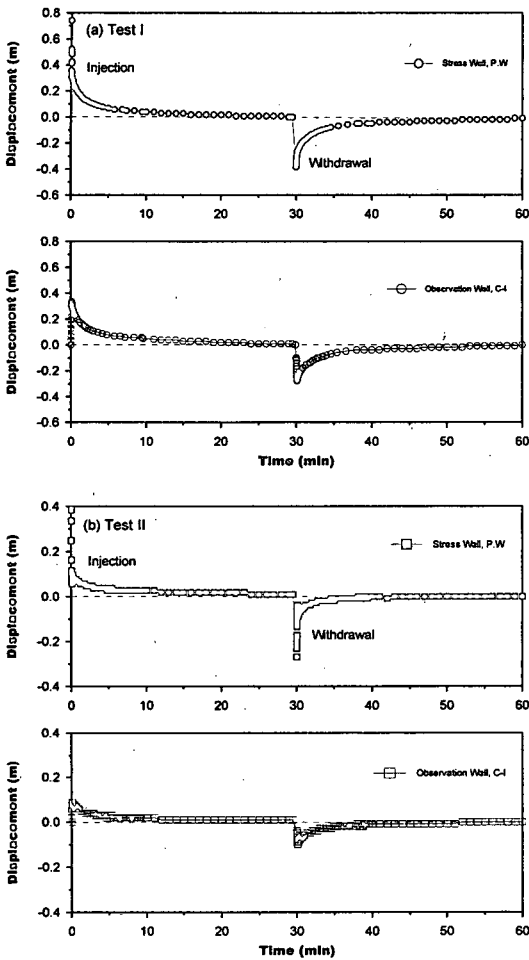


Fig. 6. Results of slug interference tests performed in PW and C-I wells.

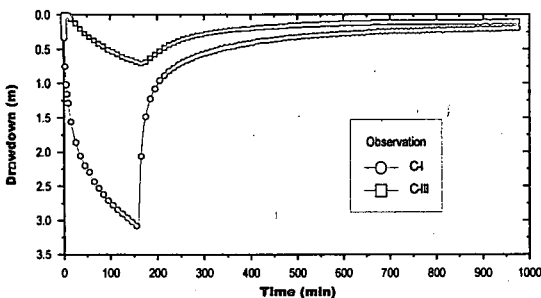


Fig. 7. Pumping test result. The pumping well was PW and observation wells were C-I and C-III. Pumping rate was 5724 gallons per day.

관정을 바꾸어 시험을 반복하였다. 실제로 이 두 관정은 단열에 의한 수리적 연결성이 좋아 인접 관정에서의 반응이 매우 빠르게 나타났다(Lee and Lee, 1999). Figure 7은 양수시험의 결과를 보여준다. 양수는 PW 관정에서 실시하고 C-I(거리=5.02m)와 C-III(거리=27.5m)에서 수위변화를 관측하였다. C-I과 같이 가까운 관정에서는 양수 시작 몇 분 이내에 수위강하가 관측되었고 C-III 관측정에서는 10분 이후에야 의미있는 수위강하를 보이기 시작했다.

Table 3은 순간수위변화 시험 자료를 Bouwer and Rice method(1976)와 Cooper et al. (1967) method로 분석한 결과이다. 이 지역의 순간수위변화 시험결과는 일반적으로 Bouwer and Rice method(1976)로 분석한 수리전도도가 Cooper et al. method(1967)로 분석한 수리전도도보다 크게 나타났다. 그러나 이 두 해석방법에 의한 추정 수리전도도간에는 선형관계를 보여준다. 즉,  $\log K_{Cooper et al.} = 1.446 \log K_{Bouwer and Rice} + 1.66$ 이며 결정계수는 0.88이다(Lee, 1998). Table 4는 순간간섭시험을 Novakowski method(1990)을 이용하여 해석한 결과이다. 투수량계수가 간섭영향의 전파속도에 주로 영향에 미치는 반면 저유계수는 간섭신호의 모양과 크기에 주로 관여한다(Novakowski, 1990). 분석결과를 보면 시험시작 기구(test initiation mechanism)에 따라 결과가 달리 나왔고 또 충격을 어떤 관정에서 주느냐에 따라 결과도 달랐다. C-I 관정에서 충격을 가했을 때의 추정 투수량 계수값이 PW 관정에서 충격을 주어 얻은 그것보다 약 10배 가량 크게 나타났다. 이런 차이에 대한 가능한 몇 가지 이유를 살펴보면 첫 번째로 시험전에 C-I 관정과 PW 관정 사이에는 자연적인 수두구배가 형성되어 있었는데 이런 수두구배가 충격신호의 전달에 어느 정도 역할을 했을 것으로 보인다. 또 실제로 Novakowski(1990)의 해는 충격정과 관측정이 같은 관정 크기를 갖는 것을 전제로 하고 있다. 그러나 두 관정은 PW 관정이 10.16cm, C-I 관정은 6.5cm의 반지름을 갖고 있다. 그러나 실제로 충격정과 관측정의 관정반경이 다르다는 것이 추정 수리상수에 정량적으로 어떠한 영향을 미칠지는 더 연구해야 할 문제이다(Lee, 1998). 특별히 여기서 주목해야 할 결과는 양수시험에서(아래에서 설명)



강원도 홍호리 지역 암반대수층의 수리지질 및 지하수 오염취약성 예비조사

Table 3. Summary of the hydraulic conductivity obtained from the slug tests.

Analysis method	Bouwer and Rice (1976)	Cooper et al.(1967)
Number of data set	70	70
Geometric mean (cm/sec)	5.87E-04	9.78E-04
Mean of logK	-3.23	-3.01
Minium of log K	-4.44	-4.92
Maxium of logK	-2.14	-1.50

Table 4. Results of the slug interference tests conducted in PW and C-I wells.

Stress well	Observation well	Stress type	Transmissivity (m <sup>2</sup> /min)	Storativity
C-I	PW	injection	1.94E-02	5.0E-06
			1.81E-02	5.0E-07
		withdrawal	1.81E-02	2.5E-06
			2.00E-02	5.6E-06
PW	C-I	injection	2.04E-03	1.0E-06
			3.99E-03	1.3E-07
		withdarwal	1.92E-03	2.5E-07
			1.02E-02	1.0E-06

Table 5. Estimates of transmissivity analyzed using different analysis methods. T is in m<sup>2</sup>/min.

Analysis method	Theis (1935)	Cooper and Jacob (1946)	Theis recovery (1935)	Banton and Bangoy (1996)
Number of data set	30	29	16	7
Geometric mean	6.96E-03	7.35E-03	7.77E-03	3.22E-03
Mean of logT	-2.16	-2.13	-2.11	-2.49
Minimum of logT	-3.29	-3.60	-3.48	-3.79
Maximum of logT	-1.21	-1.01	-1.05	-1.79

얻은 투수량계수에 비해서는 순간간섭시험을 통해 얻은 값이 훨씬 크게 나왔고 저유계수는 반대로 10~100배 작게 추정되었다. 순간수위간섭시험을 통

해 얻은 큰 투수량계수와 작은 저유계수는 두 대상 관정사이에 발달한 단열의 영향으로 볼 수 있다. 상대적으로 다른 관정부근과 달리 이 두 관정 사이

에는 단열의 밀도와 단열층이 크다(Lee and Lee, 1999). 실제로 단열은 투수량계수는 크고 저유계수는 작은 것으로 알려져 있다. 양수시험에 대해서는 영향반경이 보다 크고 영향반경내 단열과 기질(rock matrix)의 평균적인 수리특성을 반영하게 되므로 수리전도도 혹은 투수량계수는 작게 저유계수는 상대적으로 크게 평가될 것으로 사료된다.

Table 5는 양수시험을 통해 얻은 자료의 분석 결과이다. 여러 가지 해석 방법에 의해 추정된 투수량계수는 크게 다르지 않았으나 많은 경우 양수기간(pumping period)의 자료를 이용하여 추정된 투수량계수가 회복기간동안(recovery period)의 자료를 이용하여 구한 투수량계수보다 작게 추정되었다. 이는 양수기간 중에 생기는 수두손실이 회복기간동안 생기는 수두손실보다 큰 것으로부터 유래된 것으로 추정된다(Lee and Lee, 1999).

## 지하수 오염취약성

앞서 언급한 바와 같이 본 연구지역의 상류구배에 양돈축사가 있는데 여기서 가축 배설물탕의 상당량의 오염물질이 생긴다. 적절한 처리시설이 없다면 다하더라도 부주의한 취급 혹은 우기시의 다량의 강우에 의해 이런 오염물질은 필연적으로 지하로 스며들 수밖에 없다. 실제로 연구지역에서도 이러한 오염현상들이 발견된다. Table 6은 1995년 5월과 1996년 11월 사이에 있는 16회의 지하수 및 하천수 분석결과를 정리한 것이다(RDC, 1996).

오염원의 상부지역이라고 할 수 있는 W-2 관정의 지하수화학과 비교할 때 하부구배에 있는 PW, C-I, C-II, C-III 관정과 소하천의 지하수화학은 매우 다르다. 상부 축사의 영향을 직접적으로 받을 것 같은 소하천은 상당 수준의 오염이 확인되는데

Table 6. Physico-chemical parameters in groundwater and stream water samples from May 1995 to November 1996. All values are arithmetic averages over the period. Data were summarized from RDC (1996).

Location	W-2	PW	C-I	C-II	C-III	Stream
Water temp.	13.2	13.5	13.5	13.4	13.6	15.4
pH	7.8	6.0	6.0	6.4	6.1	8.3
EC ( $\mu$ S/cm)	165	375	457	411	335	982
Alkalinity (meq/L)	92.8	54.1	56.7	122.9	81.0	203
Hardness (meq/L)	90.7	161.6	226.8	215.1	126.7	278.6
Total organic carbon (mg/L)	4.7	12.1	9.0	14.0	12.4	138.8
Dissolved organic carbon (mg/L)	3.9	8.7	6.3	9.7	7.1	97.3
Phosphate-P ( $\mu$ g/L)	9.4	35.7	38.7	113.4	17.8	849.7
Ammonium-N ( $\mu$ g/L)	3.9	3.1	3.4	42.0	17.3	131.4
Nitrite-N ( $\mu$ g/L)	0.3	17.0	25.9	58.9	25.0	414.3
Nitrate-N (mg/L)	0.2	13.9	19.7	15.9	14.2	35.1

전기전도도, 알칼리도, 경도, 유기탄소량, 인, 질산성질소 등 매우 높게 나타났다. 특별히 관심이 주어지는 것은 PW, C-I, C-II, C-III 관정에서 축산활동과 관련된 상당량의 오염물질이 확인되었다는 것이다. 이들 관정은 단열 대수층에 스크린이 설치되어 있는데 상부에 투수성이 작은 풍화되지 않는 편마암층이 존재하여 지표로부터 직접적으로 오염물질이 단열대수층으로 침투한 것으로 보이지 않는다(Lee and Lee, 1999; Lee and Lee, 2000). 그러므로 이들 단열대수층을 이루는 화강암층이 노출되어 있는 축사부근에서 유래된 것으로 추정된다. 즉 축사부근에 노출된 화강암내에 발달한 단열을 통해 오염물질이 유입되고 이들이 대수층내 단열을 따라 빠르게 이동하고 있는 것으로 보인다. 특별히 이런 오염은 지하수 충전이 많은 우기에 심화되는 것을 확인하였다(Cho et al., 2000). 이러한 오염이 문제가 되는 주요한 이유는 약 1km 하부 평지에 거주하는 주민들의 상당수가 지하수를 음용으로 하고 있다는 것이다. 실제로 지금 현재 오염현상이 확인되지 않는다고 할 지라도 상당시간이 지난 후에 이곳 주민들이 음용 혹은 농업용수로 사용하는 지하수의 오염이 우려된다(Lee and Lee, 2000).

### 정리 및 토론

산간지역의 수리지질 및 지하수 오염취약성에 대해 연구하였다. 우리나라의 많은 부분이 산지로 이루어진 것을 고려할 때 본 연구의 연구과정 및 연구결과는 지하수오염에 취약한 산간지역의 연구에 상당한 기여를 할 것으로 보인다. 특히 환경의식이 고취되면서 많은 오염유발 시설 등이 산간지역으로 옮김으로서 그 동안 오염의 안전지대로 알려져 왔던 지역이 상당한 오염에 노출되어 심각성을 더해주고 있다. 특별히 상부구배에 있는 지역의 대수층이 오염되면 하부의 평지에 있는 대수층이 상당 시간이 지난 후 오염될 가능성이 커서 이에 대해 대책이 시급하다. 본 연구에서는 다양한 현장관측과 수리시험을 통해 대상 산간지역의 수리지질학적 특성을 규명하였고 지하수 및 하천수 분석을 통해 오염취약성을 진단하였다.

### 참 고 문 헌

- 이진용, 이강근, 정형재, 배광옥, 1999, 순간수위변화 및 양수시험을 통한 수리상수 추정치의 문제점 분석, *지하수환경학회지* 6(1): 14-22.
- Banton, O. and Bangoy, L.M., 1996, A new method to determine storage coefficient from pumping test recovery data, *Ground Water* 34(5): 772-777.
- Brassington, R., 1988, *Field Hydrogeology*, Open University Press, Milton, Keynes and Halsted Press, John Wiley & Sons, New York, p.82
- Cho, J.C., 2000, Molecular ecological study on the microbial community structure and the survival of pathogens in groundwater environment, Ph. D. thesis, Dept. of Microbiology, Seoul National University.
- Cho, J.C., Cho, H.B., and Kim, S.J., 2000, Heavy contamination of a subsurface aquifer and a stream by livestock wastewater in a stock farming area, Wonju, Korea, *Environmental Pollution* (in press).
- Cooper, H.H., Jr., and Jacob, C.E., 1946, A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history, *Transactions of American Geophysical Union* 27: 526-534.
- Cooper, H.H. Jr., Bredehoeft, J.D., and Papadopoulos, I.S., 1967, Response of a finite diameter well to an instantaneous charge of water, *Water Resources Research* 3(1): 263-269.
- Landmeyer, J.E., 1996, Aquifer response to record low barometric pressures in the southeastern United States, *Ground Water* 34(5): 917-924.
- Lee, J.Y., 1998, Use of field observations to characterize a fractured porous aquifer system in Won-Ju, Korea, M.S. thesis, Department of Geological Sciences, Seoul National University.
- Lee, J.Y. and Lee, K.K., 1999, Analysis of the quality of parameter estimates from repeated

pumping and slug tests in a fractured aquifer system in Wonju, Korea, *Ground Water* 37(5): 1531-1537.

Lee, J.Y. and Lee, K.K., 2000, Use of hydrologic time series data for identification of recharge mechanism in a fractured bedrock aquifer system, *Journal of Hydrology* 229(3-4):190-201.

Novakowski, K.S., 1990, Analysis of aquifer tests conducted in fractured rock: a review of the physical background and the design of a computer program for generating type curves, *Ground Water* 28(1): 99-105.

Rural Development Corporation, 1996, A study on the transport of pollutants in groundwater, Research report 96-05-04 (in Korean).

Theis, C.V., 1935, The lowering of the piezometric surface and the rate and discharge of a well using ground-water storage, *Transactions of American Geophysical Union* 16: 519-524.

---

이진용 : 서울대학교 지구환경과학부  
서울시 관악구 신림동 산56-1, 우 : 151-742  
전화 : 02-873-3647  
전송 : 02-874-7277  
e-mail : jinyong2@snu.ac.kr

이강근 : 서울대학교 지구환경과학부  
서울시 관악구 신림동 산56-1, 우 : 151-742  
전화 : 02-880-8161  
전송 : 02-874-7277  
e-mail : kklee@snu.ac.kr

정형재 : 농업기반공사 지하수지하공연구실  
경기도 안산시 사동 1031-7, 우 : 425-170  
전화 : 0345-400-1723  
전송 : 0345-409-6055  
e-mail : hjchung@karico.co.kr

배광옥 : 농업기반공사 지하수지하공연구실  
경기도 안산시 사동 1031-7, 우 : 425-170  
전화 : 0345-400-1851  
전송 : 0345-409-6055  
e-mail : gobea@karico.co.kr