

온도검층과 수압시험을 통한 파쇄암반의 단열분포와 지하수 흐름 상관성 고찰

박승혁 · 정일문*

한국건설기술연구원 수자원하천연구소

Correlation between the Distribution of Discontinuities and Groundwater Flow in Fractured Rock

Seunghyuk Park and Il-Moon Chung*

Hydroscience and Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

Received 2 December 2016; received in revised form 13 December 2016; accepted 18 December 2016

장성군 지하수 기초조사 사업의 일환으로 전기비저항탐사를 수행하여 암반대수층의 정성적인 분포를 판별하고 이를 기반으로 관측정을 설치하였다. 온도검층, BIPS 영상자료, 공내 구간별 수압시험 해석을 통하여 지하수가 유동하는 투수성 단열구간의 위치를 파악하고 단열과 절리틈새의 분포특성과 위의 3가지 시험결과값의 상관성을 고찰해 본 결과 수압시험 결과로 나타난 투수성은 단열의 크기에 상관성을 갖고 온도검층 결과, 온도변화는 절리틈새의 크기에 상관성을 갖는 것으로 나타나 투수성 단열 분류시 온도검층이 효율적인 방법임을 확인하였다.

주요어: 암반대수층, 전기비저항탐사, 투수성단열, 온도검층, BIPS, 수압시험

The qualitative distribution of a fractured aquifer was characterized by electrical resistivity surveying as a part of basic groundwater investigation in Jangseong. The results were then used to choose sites for observation wells. The locations and distributions of permeable discontinuities were studied by analyses of temperature logs, a borehole image-processing system (BIPS), and hydraulic pressure testing using a double packer. The pressure test showed that the size of the discontinuities correlated with the Lugeon value and the results of the temperature log. The results show that temperature measurement is an effective method to identify permeable discontinuities, with the temperature difference correlating with the size of the aperture of the discontinuity.

Key words: fractured aquifer, electrical resistivity survey, permeable discontinuities, temperature logs, BIPS, hydraulic pressure test

서 론

대수층은 물을 저장하고 우물에 물을 충분히 공급할 정도의 속도로 이동시킬 수 있는 지질단위로 그 구성물질로는 미고결 모래나 자갈층, 사암, 석회암, 대리암 또는 파쇄된 화산암이나 변성암이 있다(Fetter, 1994). 미고결 모래나 자갈층 등은 다공성 매질로 물이 흐를 수 있는 유효공극을 따라 중력배수로 인해 물이 산출되지만, 이암, 셰일 같은 고결된 지층은 저투수성 혹은 불투수성 매질로 주변 습곡이나 단층 작용을 받아 생긴 2차공극(단열, 절리, 파쇄, 단층)을 따라 물이 산출된다(한정상, 1998). 따라서 자연상태에서 다공성 매질의 대수층은 지하수가 균질하게 분포하지만 비다공성

매질에서는 단열 중에서도 투수성이 높은 단열을 따라 지하수가 분포한다(구민호 외, 1999). 한편, 시추공의 수리지질학적 특성을 파악하기 위해 일반적으로 양수시험을 실시하여 시간에 따른 수위강하 혹은 수위회복 양상을 표준곡선과 비교하여 수리특성인자를 도출하고 대수층의 경계조건을 규명한다(Kruseman and Ridder, 1970, Tripp and Christian, 1989). 또한 암반 내 지하수 유동의 매개체가 되는 단열의 특성을 현장에서 파악하는 시추공 원위치시험으로 시추공 지구물리검층, 패커를 이용한 수압시험법 등이 있다(Conaway, 1976, Drury, 1984, Malard and Chapuis, 1995, Pehme et al., 2010, 오양균 외, 2010, Quinn et al., 2011). 양수시험은 대수층의 수리지질 특성을 직접적으로 알

*Corresponding author: imchung@kict.re.kr

© 2016, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

수 있는 가장 좋은 방법이나 양수를 하기에 충분한 물공급이 이루어지지 못하는 암반에서는 시추공내 단열의 특성을 파악하여 간접적으로 암반의 수리적 특성을 규명한다(Quinn et al., 2011).

국외에서는 일찍부터 암반대수층의 특성을 규명하기 위한 많은 연구가 이루어 졌다. 가장 획기적인 방법이 물리검층이며 이중 연속적인 온도경사검층을 통해 암반에서 지하수가 유입되고 유출되는 위치를 찾는데 많은 기여를 하였다. 그 외에도 온도검층에 대한 많은 아이디어로 시추공내 흔히 생길 수 있는 대류현상을 막는 방법도 개발되었고, 온도감지 센서의 민감도 개선은 지온경사에 의한 영향을 고려할

만큼 측정기기 발전으로 연계되었다. 한편, 암반대수층의 단열 특성을 규명하기 위해 유향유속시험, 수압시험, 레이더를 이용한 시추공간 토모그래피 등 다양한 방법이 소개되었으며 최근에 와서는 암반대수층에서 두드러지게 나타나는 대수층 수리상수의 3차원 특성을 규명하기 위한 다양한 현장 조사와 함께 통계적인 방법도 시도되고 있다(Conaway, 1976, Drury, 1984, Tripp et al., 1989, PHEME et al., 2010, Quinn et al., 2011, Martinez et al., 2013, Stober and Bucher, 2014).

현재까지 국내에서는 암반대수층에 대해 양수시험을 통해 수리상수값 산정이 쉽지 않고 실사 수리상수값을 구한다 하

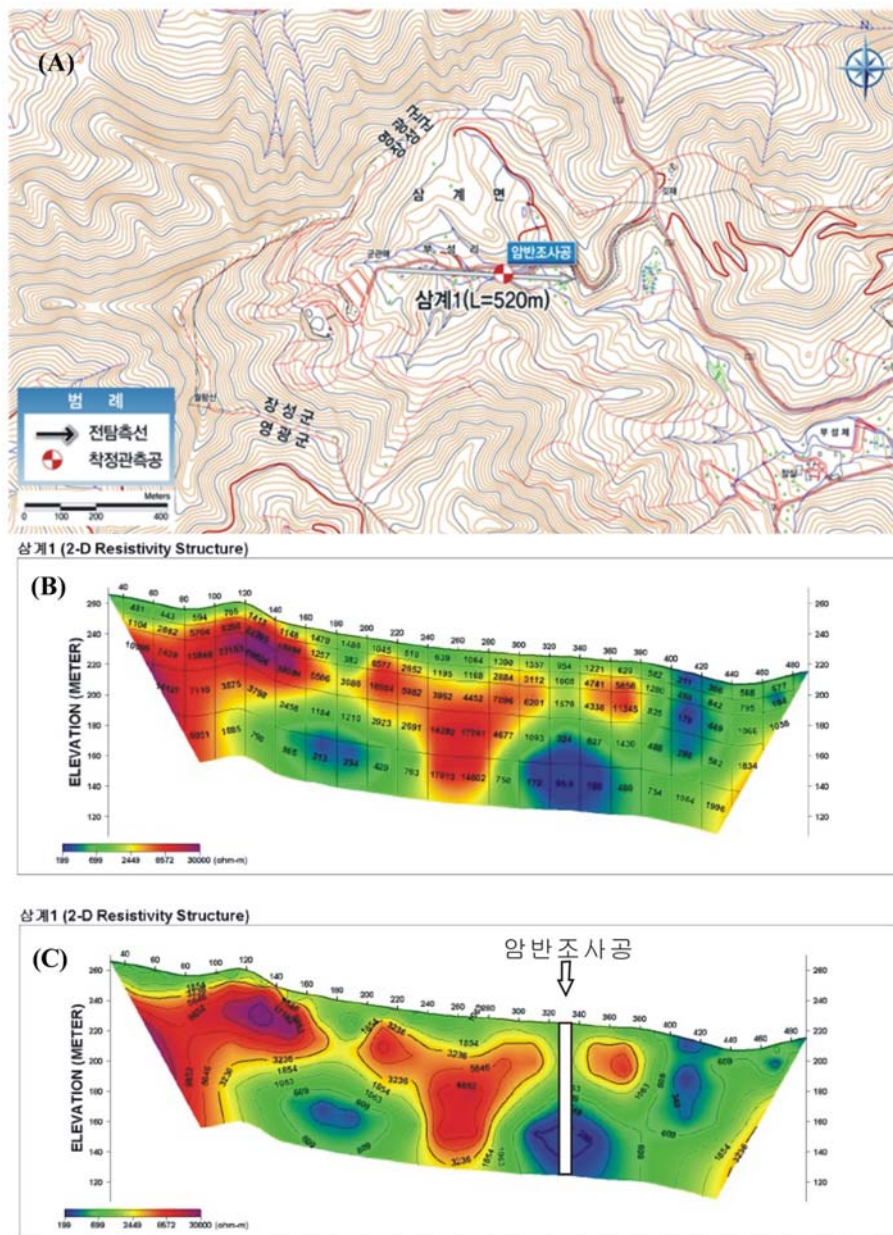


Fig. 1. Geophysical survey results: (A) location map, (B) apparent resistivity pseudo-sections, (C) comparison of results of DC resistivity dipole-dipole sounding survey and borehole location.

더라도 수평적인 대수층의 특성만 반영하는 2차원적인 한 계로 인해 3차원적 지하수 모델링을 사용하게 되었다. 하지만, 정확한 모델링을 위해서는 3차원 공간상 최적화된 수리 상수값을 찾는 것이 선행되어야 하는데, 아직은 지구물리 검 층자료를 이용하여 지하수 유동가능성이 높은 파쇄대 구간 을 찾아내는 것에 국한하여 조사가 진행되었다. 최근 방사 성 폐기물 처리장이 암반속에 설치되면서 위해성 평가를 위 해서는 암반내 단열특성을 반영한 모델링이 더욱 중요하게 되었고, 패커를 이용하여 심도별 수리전도도를 구하고 모델 링에 이를 반영하여 보다 광역적인 암반내 지하수 유동현상 을 구현하였다. 또한 최근에 와서 복잡한 암반대수층간 단 열의 연결성을 확인하기 위해 시추공간 토모그래피 방법을 활용하기도 하였다(구민호 외, 1999, 김구영 외, 2003, 이철 우 외, 2008, 고용권 외, 2009, 지성훈 외, 2010).

본 연구에서는 선행연구를 따라 현장에서 암반대수층의 특성을 규명하기 위한 예비조사로서 지구물리 탐사를 실시 하고, 예비조사를 기초로 예상되는 부지에 표준관입시험과 더블 패커를 이용한 수압시험을 수행하여 심도별 시추공내 루전(Lugeon)값을 파악하였다. 하지만 비다공성 매질에서 주 로 지하수가 유동하는 구간은 제한적이고 불균질하므로 상 기 시험으로 파악하기 어려운 투수성 단열의 특성분석을 위 해 공내 온도변화 분석과 시추공영상촬영시스템(Borehole image processing system; BIPS)의 영상자료분석을 수행하 였다. 이를 통해 투수성 단열을 규명하고 수압시험결과와 비 교하여 지하수 유동구간의 위치와 투수성 단열에 영향을 주 는 절리틈새의 특성을 비교하여 온도변화와의 상관성을 고 찰하였다.

연구지역 및 시추, 착정지점 선정

본 연구지역은 전라남도 장성군 삼계면 부성리에 위치한 지역으로 장성군과 영광군의 경계인 월랑산 우측 골짜기 부 근이다. 지질도상 유라기 화강암에 위치한 지역으로 주변지 형을 토대로 선구조상 지하수 부존이 유력한 지점을 선정하 여 수직단면상 암반의 상태를 확인하기 위해 지구물리탐사 방법 중의 하나인 쌍극자 전기비저항 탐사를 수행하였다 (Fig. 1(a)).

탐사장비는 미국 AGI사의 Super Sting R8/IP를 사용하였 으며 착정예상 심도인 100 m를 가탐심도로 하기 위해 기본 전극간격을 20m로 탐사를 수행하였다. 그 결과 획득한 겹 보기 비저항값을 역산하여 2차원단면상 전기비저항 분포를 확인한 결과 Fig. 1(b)와 같이 축선을 따라 241~6,9826 Ω-m의 비저항 분포를 보이고 대상지역에 저비저항대로 확 인되는 곳은 축선의 시작점에서 약 180~200 m 부근과 320~340 m 부근, 400~420m 부근으로 300 Ω-m 이하의 겹 보기 전기비저항값이 나타나는 것으로 확인된다. 이중 축선

에서 400~420 m 부근은 주변 골짜기의 계곡의 영향으로 판 단되고 나머지 지점에서 지표하 심도 30~40 m 부근부터 300 Ω-m 이하의 겹보기 전기비저항값이 지하수가 부존할 가 능성이 높은 파쇄대로 판단된다. 따라서 상대적으로 하류부 에 위치하여 지하수 부존 가능성이 높게 예상되는 320~340 m 지점을 Fig. 1(b)과 같이 암반조사를 위한 시추 와 착정 지점으로 선정하게 되었다.

지질공학적 조사

상기 선정된 지점에 대해 시추 조사를 실시하여 표준관입 시험을 수행하며 채취한 시료에 대해서 입도분석과 시추주 상도를 작성하였고 더블 패커를 이용한 수압시험을 병행하 였다.

그 결과 지표하 2.5 m까지는 표준관입시험을 실시하여 N 값이 2/30~3/30으로 상대밀도가 매우 느슨한 습윤한 모래층 으로 확인되었고 담홍색~담회색의 단단한 흑운모 화강암층 에서 1~5 m 틈새에 방해석이나 사질입자가 충전되어 있는 풍화대 층이 지표하 2.5~12.8 m, 27.8~45.8 m, 57.8~60.8 m, 75.8~100 m에 분포하는 것으로 나타났다.

한편, 수압시험은 시추조사 완료 후 double packer를 사 용하여 5 m 간격으로 시험구간을 정해 공저에서 상향으로 실험을 수행하였다. 주입한 압력은 1, 3, 5, 7, 9 kg/cm²의 압력으로 가압한후 다시 역순으로 감압하여 9단계를 각 단 계별로 10분이상 연속적으로 주입하였고, 대상 암반을 균 질, 등방으로 가정하여 실험에서 구한 Lugeon 값을 수리전 도도로 환산하여 해당심도의 수리전도도값을 산정하였다. 각 시험구간에서 구한 암반의 수리지질적 흐름유형과 산정된 수리전도도 값은 Table 1과 같으며 이를 바탕으로 시추조사 시 판단된 지층별 수리전도도 단위를 m/day로 환산하면 Table 2와 같다.

시추공 지구물리검층

상기 선정된 지점에 대해 시추 후 지구물리검층을 실시하 기 위해 시추공에서 3 m 이격된 지점에 직경 200 mm로 착 정을 수행하였다. 미고결층이 있는 지표하 3 m까지 무공관 케이싱을 설치하고 지표수의 유입을 막기 위하여 그라우팅 을 수행하였고 지표하 3 m부터 착정공 바닥까지 나공상태 를 유지하였다.

지구물리검층은 공내영상촬영(BIPS)와 더불어 대수층 조 사를 위해 전기비저항 검층(RES), 자연전위 검층(SP), 자연 감마검층(NGAM), 온도검층(TEMP)을 수행하였다(Fig. 2).

BIPS결과, 담회색 또는 황갈색의 화강암 속에 염기성 암 맥이 여러 구간에서 관입 또는 포획되어 분포한다. 관찰된 275개의 절리 가운데 135개가 개방성 절리(49.1%)이며 이 중 132개가 절리틈새(aperture) 1 cm이하의 틈새형(gapped) 절리이고, 3개소가 절리틈새 1 cm~10 cm인 개방형(very

Table 1. Summary of hydraulic pressure testing using a double packer (modified from the basic groundwater investigation in Jangseong, 2014)

Borehole	Depth (GL. -m)	Rock Description	Depth to W.L. (GL. -m)	Lugeon (Lu)	K (cm/sec)	Flow Pattern
JSE-1	5-10	biotite granite	0.9	0.238	3.08×10^{-6}	Dilation
	10-15	biotite granite	0.9	0.826	1.07×10^{-5}	Dilation
	15-20	biotite granite	0.9	0.503	6.51×10^{-6}	Laminar
	20-25	biotite granite	0.9	0.232	3.01×10^{-6}	Dilation
	25-30	biotite granite	0.9	0.580	7.50×10^{-6}	Turbulent
	30-35	biotite granite	0.9	0.016	2.03×10^{-7}	Dilation
	35-40	biotite granite	0.9	0.848	1.10×10^{-5}	Dilation
	40-45	biotite granite	0.9	0.017	2.15×10^{-7}	Dilation
	45-50	biotite granite	0.9	0.225	2.91×10^{-6}	Dilation
	50-55	biotite granite	0.9	0.017	2.21×10^{-7}	Dilation
	55-60	biotite granite	0.9	1.188	1.54×10^{-5}	Void Filling
	60-65	biotite granite	0.9	0.076	9.86×10^{-7}	Dilation
	65-70	biotite granite	0.9	0.035	4.56×10^{-7}	Dilation
	70-75	biotite granite	0.9	0.220	2.85×10^{-6}	Dilation
	75-80	biotite granite	0.9	0.201	2.60×10^{-6}	Void Filling
	80-85	biotite granite	0.9	0.069	8.95×10^{-7}	Void Filling
85-90	biotite granite	0.9	0.015	1.94×10^{-7}	Dilation	
90-95	biotite granite	0.9	0.265	3.43×10^{-6}	Dilation	
95-100	biotite granite	0.9	0.036	4.65×10^{-7}	Dilation	

Table 2. Summary of the geological engineering survey (modified from the basic groundwater investigation in Jangseong, 2014).

Borehole	Boring Log					Hydraulic Pressure Test Using Double Packer	
	Decomposition	Depth (GL-m)	Thickness (m)	Soil & Rock Descriptions	TCR/RQD (%)	Lugeon	K (m/day)
JSE-1	-	0.0~1.8	1.8	sand with gravel	-	-	-
	-	1.8~2.5	0.7	sand with silt	-	-	-
	weathered	2.5~12.8	10.3	biotite granite	85~100/51~70	0.238~0.826	2.66×10^{-3} ~ 9.24×10^{-3}
	fresh	12.8~27.8	15.0	biotite granite	100/75~97	0.232~0.826	2.60×10^{-3} ~ 9.24×10^{-3}
	weathered	27.8~33.8	6.0	biotite granite	100/50~67	0.016~0.580	1.75×10^{-4} ~ 6.48×10^{-3}
	weathered	33.8~42.8	9.0	biotite granite	100/78~80	0.016~0.848	1.75×10^{-4} ~ 9.50×10^{-3}
	weathered	42.8~45.8	3.0	biotite granite	100/62	0.017~0.225	1.86×10^{-4} ~ 2.51×10^{-3}
	fresh	45.8~57.8	12.0	biotite granite	100/71~100	0.017~1.188	1.91×10^{-4} ~ 1.33×10^{-2}
	weathered	57.8~60.8	3.0	biotite granite	100/68	0.076~1.188	8.52×10^{-4} ~ 1.33×10^{-2}
	fresh	60.8~75.8	15.0	biotite granite	100/80~100	0.035~0.220	3.94×10^{-4} ~ 2.46×10^{-3}
	weathered	75.8~84.6	8.8	biotite granite	100/45~60	0.069~0.201	7.73×10^{-4} ~ 2.25×10^{-3}
	weathered	84.6~90.6	6.0	biotite granite	100/75~78	0.015~0.265	1.68×10^{-4} ~ 2.96×10^{-3}
	weathered	90.6~100.0	9.4	biotite granite	100/50~70	0.036~0.265	4.02×10^{-4} ~ 2.96×10^{-3}

wide)절리이다(Table 3).

전기비저항 검층과 자연전위 검층, 자연감마 검층, 온도 검층을 BIPS결과와 비교하여 지하수가 유동할 수 있는 구간을 판단하여 보면, 지표하 23~24 m, 32~35 m, 43~44 m, 77~78 m로 판단된다.

그러나 모든 절리구간이 지하수가 유동하는 구간인지 좀

더 명확히 확인하기 위해 Conaway(1977)가 제안한 것을 참고하여 온도검층 결과의 심도별 온도차(temperature difference; DTEMP)를 BIPS결과에서 확인된 심도별 절리의 틈새와 비교하였다(Fig. 3 (a)~(d)).

Fig. 3(a)를 보면, 심도 23~24 m에서 전기비저항값은 1900 Ω -m에서 1200 Ω -m까지 값이 변하면서 자연전위값은

Table 3. Types of discontinuities (modified from the basic groundwater investigation in Jangseong, 2014).

Type	Closed Features			Gapped Features			Open Features		
	Very tight	Tight	Partly Open	Open	Moderately Wide	Wide	Very Wide	Extremely Wide	Cavernous
Aperture	< 0.1 mm	~0.25 mm	~0.5 mm	~2.5 mm	~10 mm	1 cm <	~10 cm	~1.0 m	1.0 m <
Numbers	129	1	10	79	53	0	3	0	0
Percent	46.9	0.4	3.6	28.7	19.3	0.0	1.1	0.0	0.0
	50.9			48.0			1.1		

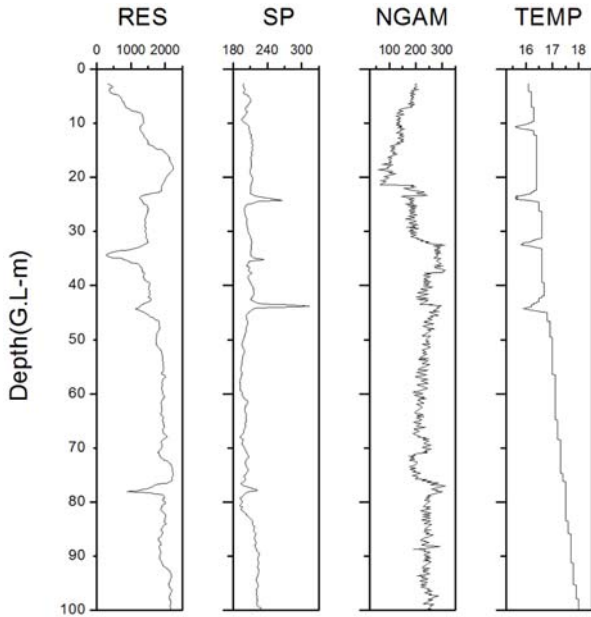


Fig. 2. Geophysical well logs (from the basic groundwater investigation in Jangseong, 2014).

소폭 상승하지만 자연감마의 값은 심도 22~23.7m에서 상승하다 24 m부터는 감소한다. BIPS 결과는 23.55m에서 절리 틈새 9.44 mm, 25.37m에서 15.54 mm로 나타나고 심도 별 온도변화상에서는 심도 24m 구간 주변에서 0.3°C 온도 변화가 나타나 대략 심도 23.5~24.5 m 구간에서 지하수가 유입되어 온도변화가 나타나는 것으로 추정된다.

Fig. 3 (b)를 보면, 심도 33 m 부근에서 전기비저항값은 1500 Ω-m에서 1000 Ω-m까지 값이 감소하면서 자연전위값은 210 mV를 유지하고 있다. 이 부근의 BIPS결과는 32.4 m와 32.68 m에서 각각 7.18 mm, 10.81 mm의 절리 틈새를 보이고 있고, 자연감마의 값도 240CPS에서 300CPS까지 증가하고 있어 암반대수층 매질의 주된 물질인 흑운모 화강암의 장석질 성분이 많이 함유된 지하수가 여기에 분포하는 것으로 판단된다.

Fig. 3 (c)에서는 BIPS 결과 심도 43.86 m에서 절리 틈새 9.63mm의 절리가 주변절리와 연결되어 나타나 단열을 형성한다. 이 단열의 영향으로 자연감마곡선과 자연전위 곡선이 증가하면서 비저항양상이 감소하는 양상이 나타나고 온도변

화 0.2°C로 나타나 Fig. 3 (a)와 마찬가지로 온도변화가 나타나는 주변 심도 42.5~44.5 m 구간에서 지하수가 유입되는 것으로 사료된다.

Fig. 3 (d)에서는 지온경사(약 0.02°C/m)보다 크지만 다른 구간에 비해 작은 폭으로 온도증가가 나타난다. BIPS 결과 심도 74.5 m의 절리는 닫힌 절리로 나타나고, 심도 76.21 m에서는 절리 틈새 7.92 mm의 틈새형 절리로 나타나 지하수 유입되는 절리로 판단가능성이 있으나 온도검층장비의 측정 한계로 인해 그 온도변화가 0.1°C 내외로 다른 구간에 비해 미미하게 나타난다. 76.2~77.39 m 구간의 단열에서 전기비저항값과 자연감마값이 전형적으로 소폭 감소하거나 상승하지만 여기서의 온도변화를 통한 지하수 유입은 확인되지 않는다.

Fig. 3을 Fig. 4와 함께 비교해 보면, 온도변화는 대부분 0.1 m당 0.0~±0.1°C인 반면, 11.2 m, 24.2 m, 32.7 m, 44.7 m에서는 0.2~0.3°C의 온도변화가 나타난다. 온도측정치의 민감도 한계로 인해 지온경사보다 측정온도가 크기 때문에 온도변화 분석에 한계가 있었지만 이 온도변화 주변에서 BIPS 결과와 일치하는 구간은 심도 10.26 m, 24.5 m, 23.11 m, 31.32 m, 32.12 m, 42.02 m, 42.56 m, 43.51 m로 대부분 -0.1°C의 온도변화가 나타난다. 이는 온도가 일정한 지하수가 공내로 유입되면서 지온증온율로 일정하게 온도가 증가하는 공내수의 온도변화에 영향을 주는 것으로 판단된다. BIPS 결과 절리 틈새가 10 mm 이상 되는 열린절리 구간은 심도 10.5 m, 25.37 m, 32.68 m로 경사각이 74.31°, 30.33°, 55.32°로 나타나 주변절리와 연결되어 그 지점 혹은 그 주변에서 공내수의 온도를 변화시키는 것으로 판단된다. 그 구간의 주절리의 방향은 S34°W, N42°W, S76°W이고 절리간격은 240, 390, 280 mm이며 절리 틈새는 10.91, 15.54, 10.81 mm로 나타난다.

종합 분석

수압시험과 온도검층 및 BIPS결과를 서로 비교하기 위하여 수압시험 구간(5 m)별로 BIPS의 결과 확인된 절리 틈새와 온도값을 정리하였다(Table 4). BIPS결과는 수압시험구간에 대한 절리 틈새 총합의 비율과 수압시험 구간별 절리 틈새의 총합에 대한 가장 큰 절리 틈새의 비율로 각각 비교하

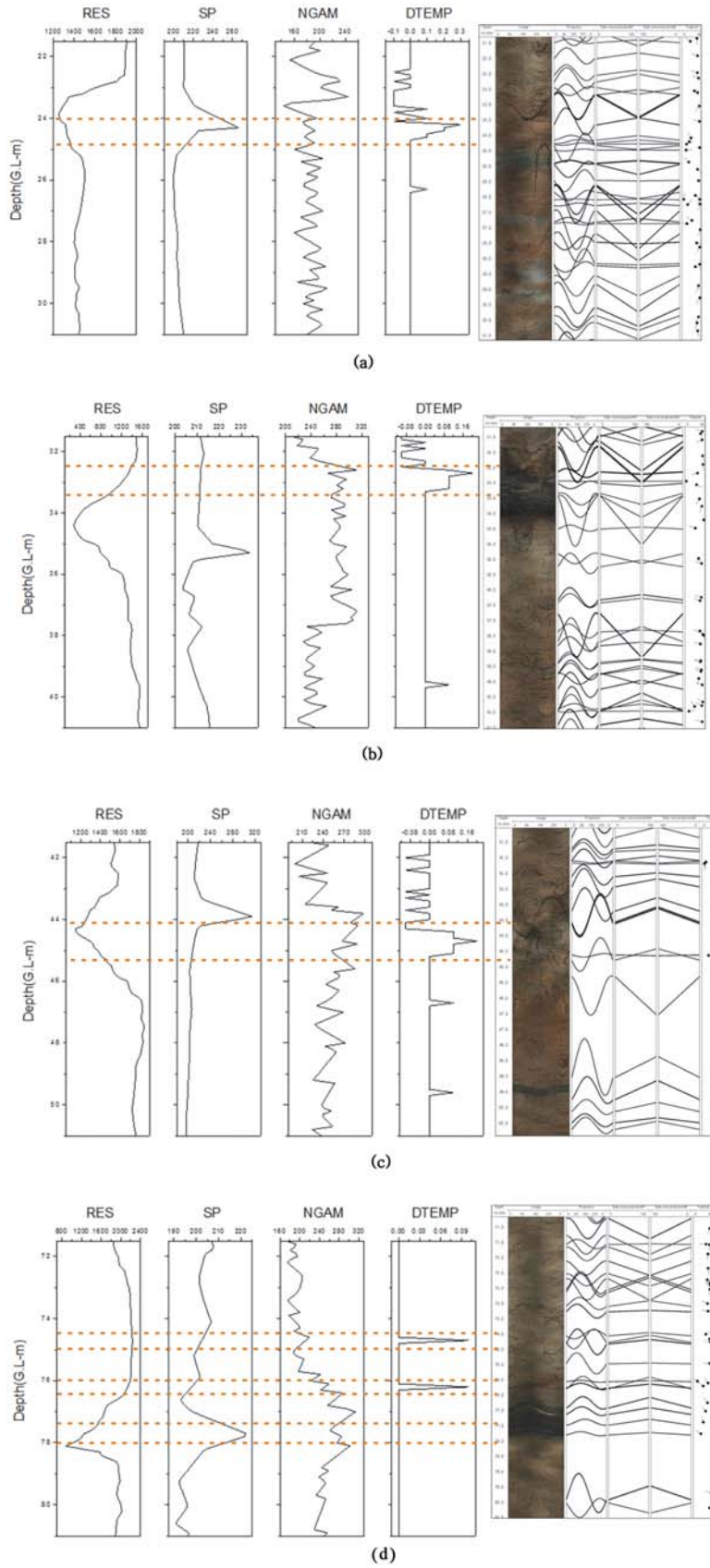


Fig. 3. Results of normal resistivity, spontaneous potential, natural gamma, and differential temperature log compared with the result of BIPS at depths of (a) 21.5-31.0 m, (b) 31.5-41.0 m, (c) 41.5-51.0 m, and (d) 71.5-81.0 m.

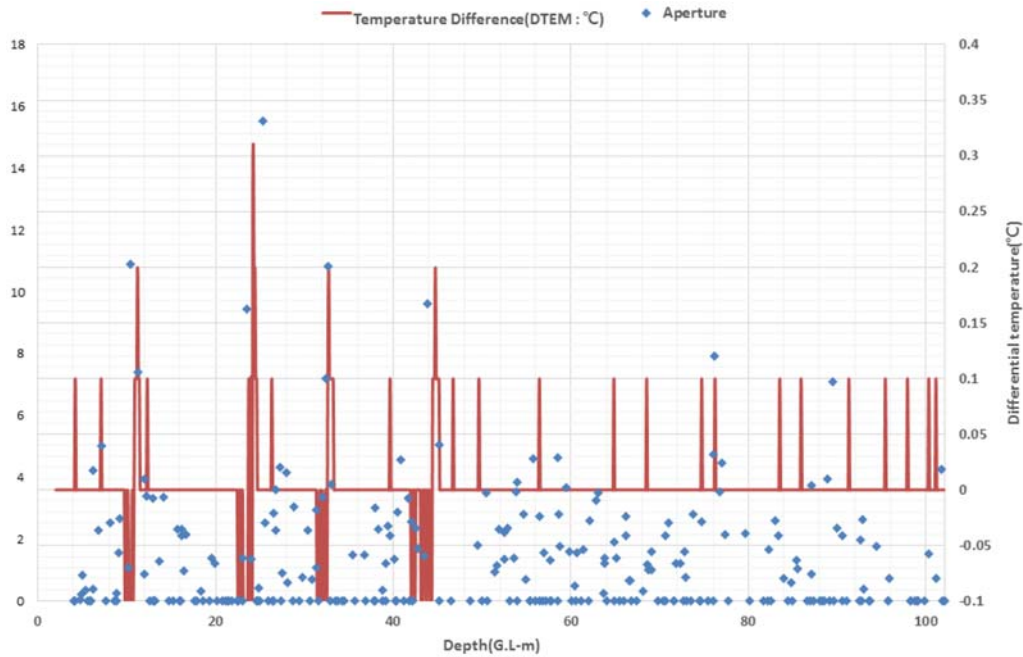
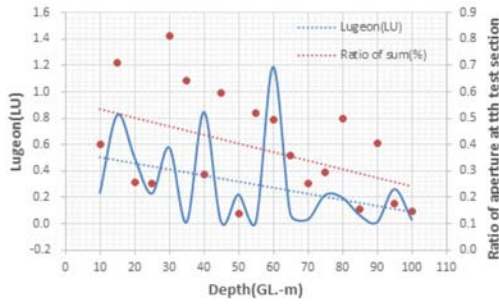


Fig. 4. Aperture and differential temperature with respect to borehole depth.

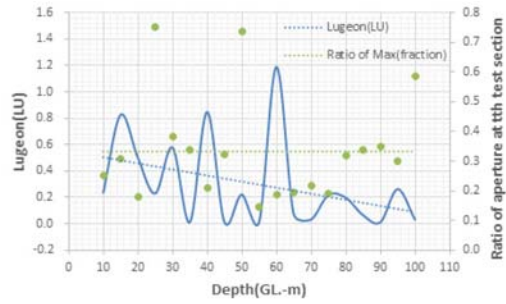
Table 4. Comparison of results from hydraulic pressure testing using a double packer, the aperture of discontinuities according to BIPS, and the mean and median temperature (modified from the basic groundwater investigation in Jangseong, 2014).

Depth $S_1 \sim S_2$ (G.L.-m)	Hydraulic Pressure Test			Distribution of Discontinuities				Temperature Log	
	Lugeon (Lu)	K (cm/sec)	Flow Pattern	$\sum_{S_1}^{S_2} aperture$ (mm)	$\frac{\sum_{S_1}^{S_2} aperture}{\Delta S} \times 100$ (%)	$aperture_{max}$ (mm)	$\frac{aperture_{max}}{\sum_{S_1}^{S_2} aperture}$ (fraction)	Average (°C)	Median (°C)
5~10	0.238	3.08×10^{-6}	Dilation	20.13	0.40	5.03	0.25	16.25	16.30
10~15	0.826	1.07×10^{-5}	Dilation	35.56	0.71	10.91	0.31	16.24	16.40
15~20	0.503	6.51×10^{-6}	Laminar	12.81	0.26	2.31	0.18	16.40	16.40
20~25	0.232	3.01×10^{-6}	Dilation	12.58	0.25	9.44	0.75	16.24	16.40
25~30	0.580	7.50×10^{-6}	Turbulent	40.60	0.81	15.54	0.38	16.57	16.60
30~35	0.016	2.03×10^{-7}	Dilation	32.15	0.64	10.81	0.34	16.45	16.60
35~40	0.848	1.10×10^{-5}	Dilation	14.41	0.29	3.00	0.21	16.61	16.60
40~45	0.017	2.15×10^{-7}	Dilation	29.79	0.60	9.63	0.32	16.49	16.60
45~50	0.225	2.91×10^{-6}	Dilation	6.86	0.14	5.05	0.74	16.87	16.90
50~55	0.017	2.21×10^{-7}	Dilation	26.08	0.52	3.83	0.15	17.00	17.00
55~60	1.188	1.54×10^{-5}	Void Filling	24.72	0.49	4.65	0.19	17.07	17.10
60~65	0.076	9.86×10^{-7}	Dilation	17.83	0.36	3.50	0.20	17.11	17.10
65~70	0.035	4.56×10^{-7}	Dilation	12.69	0.25	2.75	0.22	17.23	17.20
70~75	0.220	2.85×10^{-6}	Dilation	14.82	0.30	2.82	0.19	17.31	17.30
75~80	0.201	2.60×10^{-6}	Void Filling	24.96	0.50	7.92	0.32	17.48	17.50
80~85	0.069	8.95×10^{-7}	Void Filling	7.68	0.15	2.59	0.34	17.53	17.50
85~90	0.015	1.94×10^{-7}	Dilation	20.36	0.41	7.10	0.35	17.68	17.70
90~95	0.265	3.43×10^{-6}	Dilation	8.84	0.18	2.64	0.30	17.77	17.80
95~100	0.036	4.65×10^{-7}	Dilation	7.27	0.15	4.27	0.59	17.94	17.90

Note. S_1 =the depth to begging of the test section, S_2 =the depth to the end of the test section, ΔS =the length of the test section, $aperture_{max}$ =the maximum of the aperture at the test section

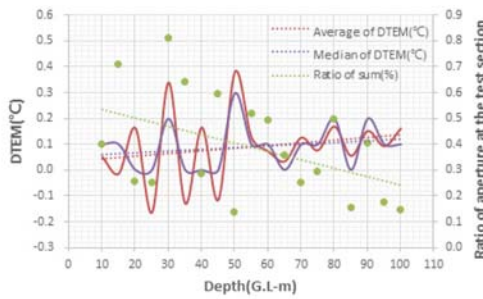


(a) The linear correlation of Lugeon with size of discontinuities

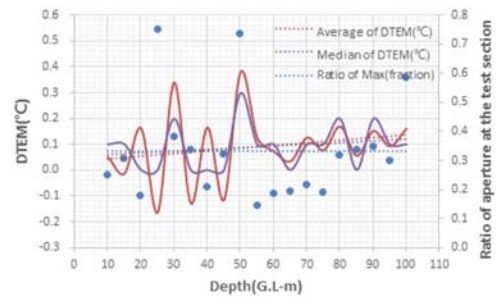


(b) The linear correlation of Lugeon with size of aperture in the discontinuities

Fig. 5. Correlation of the ratio of aperture at the test section and the Lugeon value.



(a) The linear correlation between size of discontinuities and temperature difference



(b) The linear correlation between size of aperture in the discontinuities and temperature difference

Fig. 6. Correlation of the temperature difference and discontinuities.

였으며 수압시험구간에 대한 온도값은 평균과 중앙값을 적용하여 구간별 온도변화에 대한 절리틈새의 영향을 비교해 보았다.

그 결과 상기 수압시험 구간에 대한 루전(Lugeon)값과 절리틈새 분포 비율값의 변화양상은 Fig 5(a) 그래프에서와

같이 시험구간별 절리틈새의 분포비율($\frac{\sum_{S_i} aperture}{\Delta S} \times 100$)과

비슷한 경향을 나타내지만 시험구간 중에서 가장 큰 절리틈새 분포 비율($\frac{aperture_{max}}{\sum_{S_i} aperture}$)과는 다른 경향을 보인다(Fig. 5(b)).

온도변화와 관련하여 Fig 6(b)와 같이 시추공의 심도에 따라 시험구간별 온도변화 값은 시험구간 중에서 가장 큰 절리틈새 분포 비율에 심도에 따라 증가하는 경향을 가지는 것으로 판단되며 이는 시험구간별 온도의 대표값으로 평균값이나 중앙값에 대해 비슷한 양상으로 나타난다.

결론

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 시추조사를 바탕으로 암반층 상부매질의 입도분석을 수행한 결과 자갈을 포함한 모래로 구성되어 있어 강우가 침투하여 직접적으로 암반층 상부 풍화대층에 도달하는 확률이 높을 것이라 판단된다.

2. 전기비저항, 자연전위, 자연감마, 온도에 대한 물리검층과 BIPS결과를 종합해 보면, 온도변화 분포와 절리분포의 상관분석결과와 지하수 유동에 따른 온도변화는 심도별 절리틈새의 크기변화와 상관성을 나타낸다.

따라서 암반대수층에서는 물리검층을 통하여 정확한 지하수 유입구간 파악을 통해 지하수 유동특성을 파악하는 것이 중요하다고 판단된다. 본 연구를 통해 투수성단열과 밀접한 절리틈새의 분포특성을 각각 시험구간별 절리틈새 총합의 비율(Fig. 5(a))과 시험구간별 최대 절리틈새의 비율(Fig. 5(b))로 나타난 결과 암반대수층에서 많이 수행하는 패커를 이용한 수압시험결과는 시험구간별 절리틈새의 합과 비슷한 경향으로 분포하여 단열의 크기와 상관성이 있는 것으로 확인된다. 한편, 심도별 온도변화는 절리틈새의 총 길이 보다 는 최대길이의 분포에 상관성이 나타나 단열의 크기 보다 는 절리틈새의 특성이 더 온도변화에 영향을 주는 것으로 파악된다. 따라서 온도검층을 수행하여 심도별 온도변화 분석으

로 공내 지하수 유입구간을 찾는 것이 효율적인 것으로 확인되었다. 향후 이를 적절히 수행하기 위해서는 기존문헌에서 제안한 대로 물리검층장비의 교정과 측정값의 환경영향 보정 등으로 신뢰성을 확보하고 심도에 따른 공내 지온경사보다 민감한 온도측정값(3order 이하)이 획득되어야 한다. 또한 BIPS결과를 통해 확인된 단열구간에서 대해 공경검층과 전기전도도 검층, 유향유속 검층을 통한 비교연구를 통해 균열암반의 수리특성 평가가 이루어 져야 할 것이다.

사 사

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술 지역특성화사업 「제주권 국토교통기술 지역거점 센터」의 연구비지원(과제번호 : 16RDRP-B076272-03)에 의해 수행되었으며, 국토교통부의 대행사업 “장성지역 지하수 기초조사”의 일환으로 조사된 수리지질자료를 분석에 이용하였습니다.

References

- 고용권, 김건영, 배대석, 김경수, 류지훈, 박경우, 지성훈, 2009, 수압시험에 의한 암반투수성평가, 한국원자력연구원 기술보고서(KAERI/TR-3841), pp.2-19.
- 고용권, 김건영, 배대석, 김경수, 류지훈, 박경우, 지성훈, 2009, YS-4 시추공 수압파쇄시험, 한국원자력연구원 기술보고서(KAERI/TR-3843), pp.1-2.
- 구민호, 이동우, 원경식, 1999, 시추공 텔리뷰어 및 BIPS의 영상 자료 해석을 통한 파쇄매질의 투수율 텐서 계산 프로그램 개발 및 현장 적용성 평가, 지질공학회지, 9(3), 12월, pp. 188-190.
- 김구영, 이철우, 김용제, 우남철, 2003, 양수시험 자료를 이용한 균열암반 대수층의 수리적 특성해석, 지질학회지, 39(23), 359-369.
- 오양균, 장찬동, 이태중, 2010, 시추공 물리검층 자료를 통한 결정질 암반 투수성 단열 판별에 대한 고찰: 석모도 사례, 지질학회지, 46(6), 595-607.
- 이선중, 이철희, 김지수, 2010, 시추, 검층, 탐사 자료의 분석으로 본 청주 화강암의 물성, KSEG Conference, November 25-26, pp.117-118.
- 이병대, 이인호, 추장오, 함세영, 성익환, 황세호, 2002, 도수로 터널 주변지역의 지하수 유동성 단열 규명, 한국지하수토양환경학회지, 7(3), 33-43.
- 이철우, 문상호, 2008, 이천 온천원 보호지구의 지온경사 해석, 한국지질공학회지, 18(2), 185-188.
- 전선급, 구민호, 김용제, 강인욱, 2005, 국가지하수 관측망의 양수시험 자료를 이용한 국내 대수층 특성의 통계적 분석, 한국지하수토양환경학회지, 20(6), 37-43.
- 지성훈, 고용권, 김경수, 김건영, 박경우, 류지훈, 2010, 처분장 안전성 평가를 위한 지하수 유동 모델링 현황 분석, 한국원자력연구원 기술보고서, (KAERI/AR-847), pp.1-12.
- 한정상, 1998, 지하수환경과 오염, 박영사, pp.78-84.
- 황세호, 신제현, 박 찬, 선우춘, 송원경, 2014, 현장 물리검층 자료와 실내물성시험결과의 비교를 통한 암반평가, 한국암반공학회 춘계총회 및 학술발표 논문집, pp.113-115.
- Conaway, J., G., 1976, Countinuous logging of borehole temperature gradients, Ph.D dissertation, Univ. Western Ontario, London, Canada, pp. 1-10.
- Drury, M., 1984, Borehole temperature logging for the detection of water flow, Geoexploration, 22, 231-235.
- Fetter, C., W., 1994, Applied hydrogeology, 3rd ed., Prentice Hall, pp. 110.
- Kruseman, G., P. and Ridder, N., P., 1990, Analysis and evaluation of pumping test data, 2nd ed., ILRI publication 47, pp. 33-37.
- Malard, F. and Chapuis, R., 1995, Temperture logging to describe the movement of sewage-polluted surface water infiltrating into a fractured rock aquifer, Journal of Hydrology, 173, 191-199.
- Martinez, J., J., Longuevergne, L., Borgne, T., L., Davy, P., Russian, A., and Bour, O., 2013, Temporal and spatial scaling of hydraulic response to recharge in fracture aquifer : in sights from a frequency domain analysis, Water Resources Research, 49, 3008. 3019-3021.
- PHEME, P., E., Parker, B., L., Cherry, J., A., and Greenhouse, J., 2010, P., Improved resolution of ambient flow through fractured rock with temperature logs, Vol. 48, Np. 2, Groundwater, pp. 195.
- Quinn, P., M., Parker, B., L., and Cherry, J., A., 2011, Using constant head step tests to determine hydraulic apertures in fractured rock, Journal of Contaminant Hydrology, 126(1-2, 25) 85-99.
- Stober, I. and Bucher, K., 2014, Hydraulic conductivity of fractured upper crust: insights from hydraulic tests in borehole and fluid-rock interaction in crystalline basement rocks, Geofluids, 15, 163-165.
- Tripp, D., W. and Christian, J., T., 1989, Evaluation of deep pumping tests, J. Geotech. Engrg, 115, 670-681.

박승혁

한국건설기술연구원 수자원하천연구소

411-712 경기도 고양시 일산서구 대화동 2311

Tel: 031-910-0280

Fax: 031-910-0251

E-mail: imac@kict.re.kr

정일문

한국건설기술연구원 수자원하천연구소

411-712 경기도 고양시 일산서구 대화동 2311

Tel: 031-910-0334

Fax: 031-910-0251

E-mail: imchung@kict.re.kr