

[기술보고]

강원도 탄산염지역 대수층의 수리전도도 특성

박영운¹ · 이진용^{2*} · 임홍균² · 박유철³

¹강원대학교 지구자원연구소, ²강원대학교 지질학과, ³강원대학교 지구물리학과

[Technical Report]

Characteristics of the Hydraulic Conductivity of Carbonate Aquifers in Gangwon Province

Youngyun Park¹, Jin-Yong Lee^{2*}, Hong-Gyun Lim² and Yu-Chul Park³

¹Research Institute for Earth Resources, Kangwon National University, Korea

²Department of Geology, Kangwon National University, Korea

³Department of Geophysics, Kangwon National University, Korea

이 연구는 영월과 정선 내 탄산염암지역 지하수의 수리전도도를 이용하여 탄산염암지역 지하수의 유동특성을 알아보기 위해 수행하였다. 이 연구를 위해 영월과 정선 내 탄산염암지역에서 개발된 46개 관정의 수리전도도 자료를 수집하였다. 이들 관정들은 주로 연구지역을 북동-남서 방향으로 가로지르는 골지천, 조양강 및 동강 주변으로 개발되었으며 이들의 수리전도도는 0.004-1.1 m/day의 범위를 보였다. 수리전도도는 관정의 심도가 깊어질수록 점차 줄어드는 경향($y = -0.003x - 0.927$, $r^2 = 0.129$)을 보였다. 연구지역은 수리전도도에 따라 A(<0.1 m/day), B(0.1-1 m/day) 및 C(> 1 m/day) 구역으로 구분하였다. A, B 및 C 구역은 각각 연구지역의 87%(n=40), 11%(n=5) 및 2%(n=1)에 해당되었다. A 구역은 단열의 영향을 거의 받지 않았고 B 구역은 단열의 영향을 조금 받았으며 C 구역은 단열의 영향을 많이 받았다. 이 연구 결과는 탄산염지역 지하수의 유동이 주로 단열에 의해서 영향을 받고 있음을 보여주었다.

주요어 : 탄산염지역, 지하수, 수리전도도, 단열, 군집분석

We investigated the flow properties of groundwater in areas of carbonate rocks at Yeongwol and Jeongseon, Gangwon Province, based on measurements of hydraulic conductivity. Existing hydraulic conductivity data were compiled from 46 wells in the study area. These wells were sunk close to Golji stream and the Joyang and Dong rivers, which flow through the study area. The hydraulic conductivities range from 0.004 to 1.1 m/day, and show a gradually decreasing trend with decreasing well depth ($y = -0.003x - 0.927$, $r^2 = 0.129$). The study area was classified into zone A (<0.1 m/day), zone B (0.1-1.0 m/day), and zone C (> 1 m/day) according to hydraulic conductivity. Zones A, B, and C make up 87% (n=40), 11% (n=5), and 2% (n=2) of the surface of the study area, respectively. Among the three zones, zone A contains few fractures whereas zone C contains many fractures. These results indicate that groundwater flow in carbonate regions is strongly influenced by the fracture network

Key words : carbonate region, groundwater, hydraulic conductivity, fracture, cluster analysis

서 론

탄산염지역은 전 세계의 약 20%를 차지하며(White, 1988), 이 지역들 중 많은 지역에서 지하수를 생활용수로 사용하고 있다(Johnston and Bush, 1988; Williams et al.,

2006). 이들 지역에서는 지하수를 안정적으로 공급하고 지하수의 수질을 보호하는 것이 매우 중요하다. 따라서 이러한 지역들을 중심으로 탄산염 지역 내 지하수의 수리특성과 유동패턴을 해석하는 연구들이 활발히 수행되었다(Peterson and Wicks, 2003; Cole et al., 2009). 그러나

*Corresponding author: hydrolee@kangwon.ac.kr

탄산염암의 불균질하고 복잡한 암석학적 특성으로 인해 아직까지 탄산염지역 지하수의 수리특성과 유동패턴에 대해서 명확하게 이해하지 못하고 있다(Wicks and Herman, 1994; Eisenlohr et al., 1997). 최근까지 수행된 연구들에 의하면, 탄산염지역 지하수의 유동패턴은 매우 다양하고 복잡하기 때문에 이들의 수리전도도가 매우 넓은 범위를 보이는 것으로 알려져 있다(Motyka et al., 1998; Williams et al., 2006).

탄산염지역 지하수의 투수율과 유동패턴은 주로 탄산염암 내 단열시스템에 의해서 영향을 받지만(White, 2003), 동굴의 형태, 층의 경사각 및 암석의 종류 등도 지하수의 투수율과 유동패턴에 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Palmer, 1991; Safko and Hickey, 1992; Cole et al., 2009). 일반적으로 기반암의 단열시스템에서 층의 주향과 경사, 단열의 간극, 단열면의 거칠기, 단열의 길이 및 단열을 충전한 광물의 특성 등이 지하수의 유동에 영향을 주는 것으로 알려져 있으며(Cesano et al., 2003), 이러한 요소들은 탄산염지역 지하수에도 매우 중요한 역할을 한다. Bakalowicz (2005)와 White (2003)는 탄산염 지역 내 단열시스템을 이용하여 지하수의 유동기작을 설명하였다. Ford and Ewers (1978)는 층의 경사가 급한 지역에서 지하수가 층리면을 따라 이동하는 것을 관찰하였고, Worthington (2001)은 층의 경사가 완만한 지역에서 지하수가 층리면보다는 절리나 단층면을 통해서 이동하는 것을 확인하였다. 또한 석회암(limestone)보다 고회암(dolostone)에서 단열이 더 잘 발달하기 때문에(Safko and Hickey, 1992), 석회암지역보다 고회암지역에서 지하수의 이동이 더 원활하다고 보고하기도 하였다(Gaswirth et al., 2006).

우리나라의 경우에는 많은 탄산염지역에서 지하수를 생활용수 및 농업용수로 사용하고 있고 이들 지역에서 지하수를 개발할 때 이루어지는 기초조사 및 영향조사 등의 보고서는 많이 있다. 그러나 이들 지역의 수리특성 및 유동패턴에 대한 학술적인 연구는 활발하게 이루어지지 않았다. 특히 영월과 정선은 우리나라 대표적인 탄산염 지역으로서 생활 및 농업용수의 지하수 의존도가 매우 높아 지하수의 개발이 활발히 이루어 졌지만 이들 지역 지하수의 유동특성에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 또한 영월과 정선지역 탄산염암은 매우 복잡한 암석학적 특징을 보이므로 이들 지역의 지하수 유동과 탄산염암의 조직 및 구조와의 상관관계를 정확하게 이해하는 것은 이들 지역에 지하수를 안정적으로 공급하기 위한 기초자료로서 매우 중요하다. 이 연구는 영월과 정선지역 지하수의 수리특성을 이해하기 위한 예비연구로

수행되었다. 이 연구의 목적은 연구지역 지하수의 수리전도도 자료를 수집하고 정리하여 수리전도도의 분포특성을 알아보고 지하수 유동에 영향을 주는 주요 인자를 밝혀 영월과 정선지역 지하수의 유동특성을 이해하는 것이다.

연구지역

자연환경

연구지역은 강원도 영월과 정선지역 일대로서 강원도 영서지역에 위치한다(Fig. 1). 이들 지역은 고도 1,000 m 이상의 높은 산들이 잘 발달되어 있고 한강의 지류들인 평창강, 주천강, 동강 등이 이들 지역을 통과한다.

연구지역은 강원도 내륙 산간에 위치하여 기온의 연교차가 큰 대륙성 기후를 나타낸다. 기상청에서 30년 동안 측정된 영서지방의 기온, 강수량과 상대습도의 월변화를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 보면 연평균 기온은 8.6°C 이고 1월에 -4.9°C로 가장 낮고 8월에 20.8°C로 가장 높다. 연강수량은 약 1,300 mm이고 연 강수량의 약 58%가 7월부터 9월에 내린다. 기온, 강수량 및 상대습도의 월별변화패턴은 모두 겨울에 낮고 여름에 높은 변화 패턴을 보인다. 그러나 4월에는 강수량이 3월보다 증가

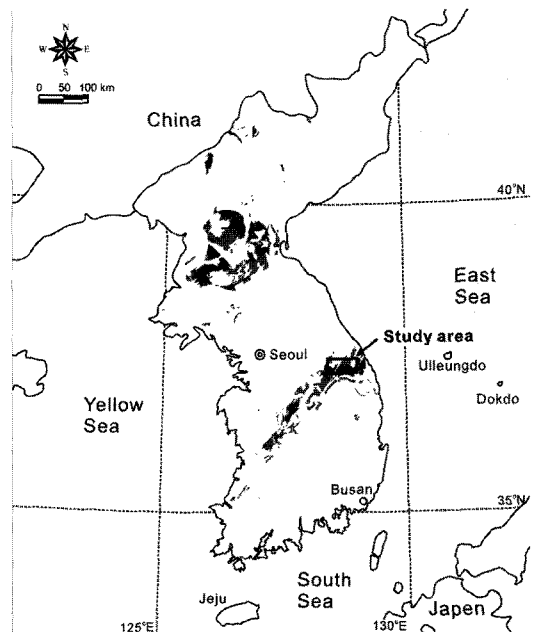


Fig. 1. Location of the study area and distribution of carbonate rocks on the Korean Peninsula, as summarized by Woo et al. (2002).

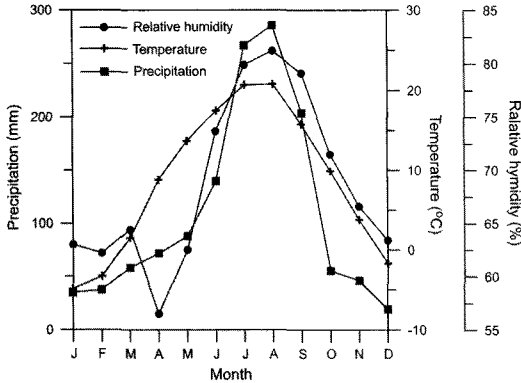


Fig. 2. Temporal variations in air temperature, precipitation, and relative humidity in the Yeongseo area of Korea for the last 30 years.

하였음에도 불구하고 상대습도는 약 57%로 연평균 값 (67%)보다도 현저히 낮았다.

지하수 개발 및 이용현황

국토해양부의 2010년 지하수조사연보에 따르면 영월과 정선의 지하수개발 가능량은 각각 112,635,000 및 146,205,000 m³/yr이고 이들 중 각각 8.8 및 3.3%만 개발되었다. 이들 지역에서 개발된 지하수는 생활용, 공업용, 농업용 및 기타용 등 다양한 용도로 사용되고 있지만 주로 생활용(57%) 및 농업용(40%)으로 사용되고 있으며 이들은 전체 사용량 14,679,243 m³/yr의 97%를 차지한다. 영월과 정선의 일이용량은 각각 27,045 및 13,172 m³/day이다. 이들 지역의 지하수 사용량을 재분하여 >30, 30-100, 100-150 및 >150 m³/day로 나누어 살펴보았다 (Fig. 3). 영월과 정선에서 지하수의 일사용량 패턴이 다르게 나타났다. 영월의 일사용량은 주로 <100 m³/day

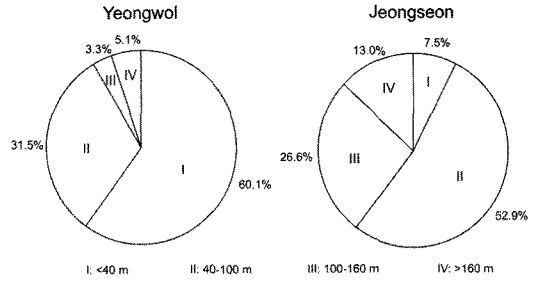


Fig. 4. Groundwater use according to well depth at Yeongwol and Jeongseon. Data are from MLTM (2010).

(68.1%)이고 정선의 일사용량은 30-150 m³/day(77.2%)인 것을 확인하였다.

관정의 깊이에 따른 지하수 이용량을 Fig. 4에 나타내었다. 영월은 심도가 40 m보다 적은 천부관정의 사용량 (60.1%)이 가장 많았고 정선은 심도가 40-100 m인 관정의 사용량(52.9%)이 가장 많았다. 이러한 결과들은 이 두 지역에서 사용되는 지하수의 용도가 다르기 때문이다. 지하수 사용량 중에 생활용이 차지하는 비율은 영월에(56%) 비해서 정선이(60%) 더 높았고 농업용이 차지하는 비율은 정선에(38%) 비해서 영월이(41%) 더 높았다.

일반지질

한반도의 탄산염지역은 한반도 면적의 약 6%를 차지한다(Fig. 1). 한반도의 탄산염암은 하부고생대(캠브리아기-오도비스기)의 조선누층군과 상부고생대(석탄기와 페름기)의 평안누층군으로 구분된다(우경식 외, 2002). 영월과 정선은 우리나라의 대표적인 탄산염지역이며 이들 지역에 분포하는 대부분의 탄산염암은 조선누층군에 해당된다. 영월지역의 조선누층군은 Yosimura (1940)에 의해서 처음 연구되었으며 하부로부터 삼방산층, 마차리층, 외곡층, 문곡층, 영홍층으로 구분하였다. 이들 중 삼방산층을 제외한 나머지 층들이 주로 탄산염암으로 구성되어 있다(대한지질학회, 1999). 정선지역의 조선누층군은 Hisakoshi (1943)에 의해서 처음 조사되었으며 지역에 따라 암상 또는 층서가 달라 동부, 중부 및 서부로 나누어 층서를 정리하였다. 정선지역은 Hisakoshi (1943) 이후 여러 연구자들에 의해서 연구되었으며(태백산지구지하자원조사단, 1962; 김옥준 외, 1973; 정창희 외, 1979) 연구자들마다 층서를 달리 해석하기도 하였다(대한지질학회, 1999). 정선지역 내 탄산염암은 주로 정선읍을 중심으로 남서-북서방향으로 넓게 발달되어 있다.

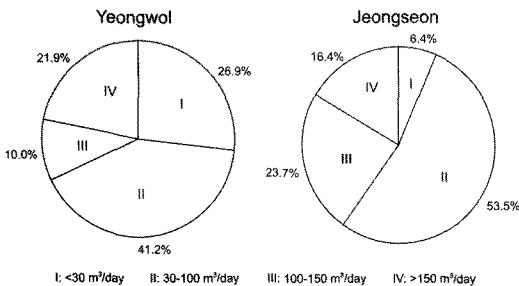


Fig. 3. Daily use of groundwater at Yeongwol and Jeongseon. Data are from the Ministry of Land, Transport and Maritime affairs (MLTM) (2010).

연구방법

카르스트 지형이 잘 발달되어 있는 영월과 정선지역은 농업용수와 생활용수 공급을 위해 지하수의 개발이 활발히 이루어졌다. 이들 지역에서 지하수 개발 시 보고된 기초조사 및 영향조사 보고서로부터 관정심도, 수리전도도, 투수계수 등의 자료들을 추출하여 국가지하수정보센터(<http://www.gims.go.kr>)에서 체계적으로 정리하였다. 본 연구에서 영월과 정선지역에 개발된 관정들 중 시추자료를 분석하여 탄산염암지역에서 개발된 46개의 관정의 자료를 이용하여 우리나라 탄산염암지역 지하수의 수리전도도의 특성을 분석하였다(Fig. 5). 이들 관정들의 시추자료를 살펴보면 지역에 따라서 매우 큰 차이를 보이는 하지만 대부분의 지역에서 지표로부터 약 17m부터 기반암이 시작되는 것으로 조사되었다. 따라서 이번 연구에서는 관정의 깊이가 50m 이상인 암반관정을 대상으로 수리전도도 자료만을 수집하여 수리전도도의 공간적인 분포특성, 수리전도도와 관정깊이의 상관성 분석 및 군집분석을 수행하였다. 그러나 이번 연구에서 연구지역의 야외조사를 병행하지 않아 수리전도도와 지형적인 특성(동굴, 싱크홀 등)의 상관성을 고려하지 않았다. 또한 관정의 세부적인 규격에 대한 정보도 수집하지 못하여 케이싱 구간이나 그라우팅 깊이에 대한 영향도 고려하지 않았다.

결과 및 토론

수리학적 특성

영월과 정선의 탄산염암 지역에 개발된 암반관정들의

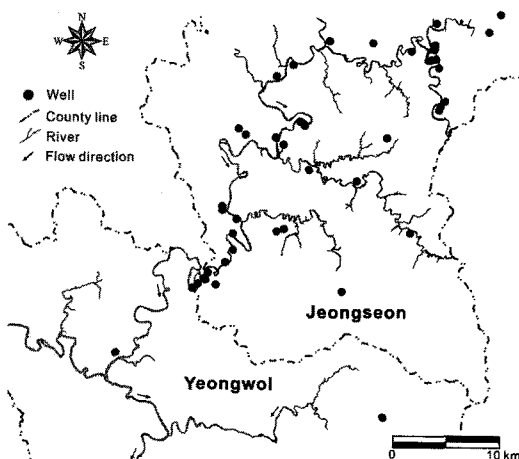


Fig. 5. Locations of wells in areas of carbonate rocks at Yeongwol and Jeongseon.

심도는 55-227 m(관정심도의 평균 = 154 m)이다. 각각의 관정들에서 양수시험을 통하여 수리전도도 값을 측정하였다. 측정된 수리전도도는 0.004-1.1 m/day(평균값 = 0.078 m/day)로 매우 넓은 범위를 보였다(Fig. 6). 이것은 영월과 정선지역에 많이 발달된 스트라트산층들과 다양한 속성작용의 영향으로 판단된다. 영월과 정선지역 탄산염암은 해수속성작용, 담수속성작용, 매물속성작용 및 돌로마이트화작용 등의 속성작용을 받은 것으로 알려져 있다(우경식 외, 2002).

탄산염지역 내 관정의 심도와 수리전도도의 상관관계를 살펴보았다(Fig. 7). 관정의 심도가 깊어질수록 수리전도도는 점차 감소하는 경향을($y = -0.003x - 0.927$, $r^2 = 0.129$) 보였다. 또한 천부관정의 수리전도도는 넓은 분포범위를 보였지만 심부관정의 수리전도도는 천부관정에 비해 상대적으로 좁은 분포범위를 보였다. 관정의 심도에 따른 수리전도도의 분포의 상한선(위쪽 점선)은 $y = -0.008x + 0.6$ 으로 계산되었고 하한선(아래쪽 점선)은 $y = 0.002x - 2.6$ 으로 계산되었다(Fig. 7). 그러나 이번 연구에서는 조사된 관정이 골치천, 조양강 및 동강 주변에 밀집되어 있고 관정의 수가 충분하지 못하여 자료의 신뢰성이 다소 떨어지지만 더 많은 자료를 수집하고 분석하면 이번 연구에서 제시된 경향성을 보다 명확하게 보여줄 것으로 판단된다.

공간적인 분포특성

영월과 정선의 탄산염지역 내 관정들은 대부분 정선지역을 가로지르는 골치천, 조양강과 동강 주변으로 분포하였다(Fig. 5). 이들 관정들의 분포지역을 행정구역별로 살펴보면 전체 관정의 56.8%가 정선군 임계면과 정

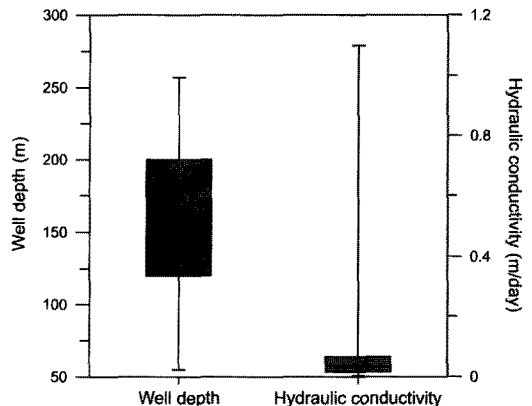


Fig. 6. Distribution of well depth and hydraulic conductivity in areas of carbonate rocks at Youngwol and Jeongseon.

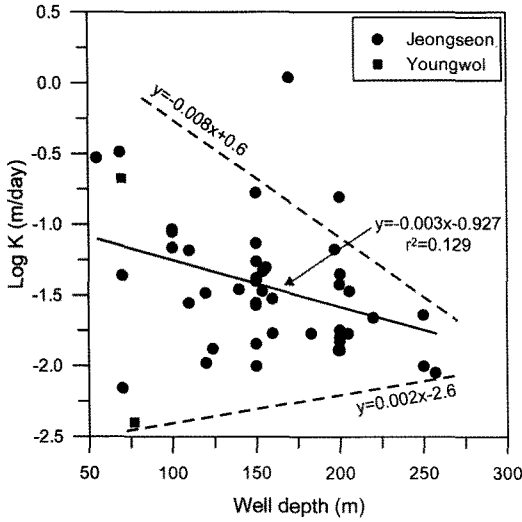


Fig. 7. Relation between well depth and hydraulic conductivity in areas of carbonate rocks at Youngwol and Jeongseon.

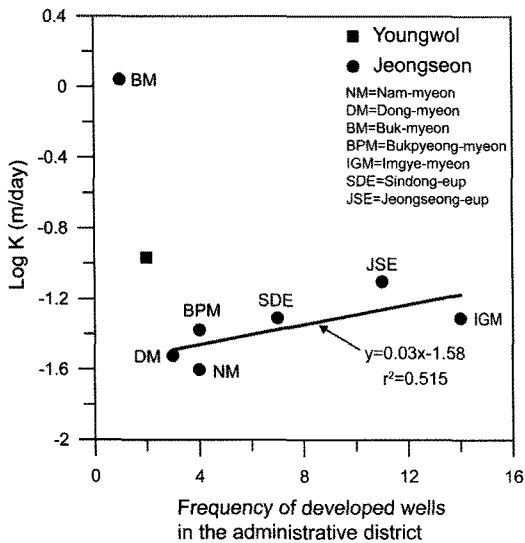


Fig. 8. Relation between the number of wells in the administrative district and hydraulic conductivity in areas of carbonate rocks at Youngwol and Jeongseon.

선읍지역에 집중적으로 개발되었다. 이것은 이번 연구에서 연구지역을 탄산염암지역으로 한정하였고 정선군 임계면과 정선읍에 정선석회암층이 넓게 발달되어 있기 때문이다. 행정구역별 관정의 분포 수와 수리전도도의 평균을 이용하여 이들의 상관관계를 Fig. 8에 나타내었다. 영월지역의 2개 관정과 북면의 1개 관정을 제외하고는 개발된 관정의 수와 수리전도도가 뚜렷한 양의 상관관계(회귀방정식; $y = 0.03x - 1.58$, $r^2 = 0.515$)를 보였다.

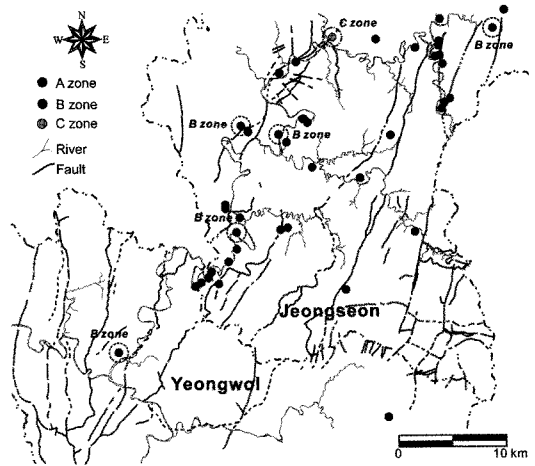


Fig. 9. Result of a cluster analysis for hydraulic conductivity in areas of carbonate rocks at Yeongwol and Jeongseon.

이번 연구에서 이에 대한 원인을 규명하지 못하였다. 이러한 결과를 보다 정확하게 해석하기 위해서는 이들 지역 지하수의 주된 용도, 주민수, 행정구역별 면적 등이 같이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

군집분석

탄산염지역 수리전도도를 이용하여 군집분석을 수행하였다. 군집분석 결과와 연구지역 내 단열시스템을 Fig. 9에 나타내었다. 연구지역 주향 및 단층 자료는 한국지질자원연구원 지질정보시스템에서 제공하는 1:50,000 지질도로부터 수집하였다(<http://geoinfo.kigam.re.kr/subject/geologicalmap.action>). 군집분석 결과로부터 연구지역을 수리전도도에 따라 A, B 및 C 세 구역으로 구분할 수 있었다. 전체 관정의 87%(n=40)가 A 구역에 해당되었고 이 관정들은 연구지역에 고르게 분포되어 있다. A 구역의 수리전도도는 0.1 m/day보다 낮은 값을 갖으며 이 범위의 수리전도도가 연구지역의 일반적인 수리전도도일 것으로 판단된다. B 구역은 전체 관정의 11%(n=5)가 포함되며 B 구역 내 관정들의 수리전도도는 0.1-1 m/day의 범위를 보였다. B 구역의 관정들은 연구지역의 남서-북동 방향으로 산포되어 있다. 이 방향은 연구지역 내 탄산염암의 주향 및 단층의 방향과 거의 비슷하였다. 또한 정선읍에 위치한 B 구역의 관정은 A 구역 관정들과 매우 가까운 곳에 위치하고 동일한 기반암을 갖는 B 구역 관정과 A 구역 관정들의 수리전도도는 매우 큰 차이를 보였다. 이러한 결과들로부터 B 구역 내 관정들이 연구지역 내 스트러스트 단층에 의한 단열과 연관이 있는 것으로 판단되며 이것을

명확하게 규명하기 위해서는 관정 시추자료의 구조분석과 관정주변의 야외조사가 병행되어야 할 것이다.

C 구역 내에 분포하는 관정은 전체 관정의 2%(n=1)를 차지한다. C 구역의 관정 W-10의 수리전도도는 1.1 m/day로서 다른 구역에 비해 매우 높은 값을 보이며 스러스트 단층에 의한 단열에 의해 직접적인 영향을 받았을 것으로 판단된다. 이번 연구에서 C 구역에 포함된 관정이 하나이기 때문에 자료의 신뢰성을 확보하기 위해서는 시추자료 및 야외조사를 통한 추가적인 연구를 통해 W-10이 단열대의 직접적인 영향을 받는지 확인해야 한다. Fig 9에서 보면 연구지역에 단층들이 매우 잘 발달되어 있고 이들 단층들이 대부분 스러스트이기 때문에 수평적으로 어느 정도 거리가 지 영향을 주는지는 야외조사를 통해 확인해야 된다. 그러나 단열이 잘 발달한 탄산염지역에서 단열과 수리전도도는 뚜렷한 양의 상관관계를 갖기 때문에(Gaswirth et al., 2006), B와 C 구역의 수리전도도가 A 구역 수리전도도보다 높은 값인 것을 단열에 의한 영향으로 해석하였다.

결 론

영월과 정선은 우리나라의 대표적인 탄산염암지역이다. 이들 지역에 농업 및 생활용수의 목적으로 많은 관정들이 개발되었고 관정개발시 양수시험을 통해 수리전도도를 측정하였다. 그러나 이들 자료들은 기초조사 및 영향조사 보고서에 제시되었을 뿐 이들 자료들은 거의 활용되지 않았다. 본 연구에서 이들 자료를 정리하고 분석하여 탄산염암 지역 지하수의 유동특성을 알아보았다. 연구지역 내 수리전도도는 넓은 범위를 보였고(0.004 - 1.1 m/day) 관정의 심도가 깊어질수록 점차 낮아지는 경향($y = -0.003x - 0.927$, $r^2 = 0.129$)을 보였다. 그러나 이 경향성은 보다 많은 자료의 분석을 통해 자료의 신뢰성을 높여야 한다.

연구지역 내 분포하는 관정들의 수리전도도를 이용하여 군집분석을 해 본 결과 연구지역을 A, B 및 C 구역으로 구분할 수 있었다. A, B 및 C 구역의 수리전도도 값은 각각 >0.1, 0.1-1 및 1 m/day이었으며 이 구역들은 탄산염암의 암석화학적 특성보다는 연구지역 내 발달되어 있는 스러스트 단층의 영향 정도에 의해서 구분되는 것으로 해석하였다.

사 사

본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지

지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행되었습니다 (No. 2009T100200058). 논문심사과정에서 논문을 면밀히 검토해주시고 훌륭한 조언을 주신 문상호 박사님, 조병욱 박사님 그리고 익명의 심사위원께 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

- 국가지하수정보센터, <http://www.gims.go.kr>.
 국토해양부, 2010, 2010년 지하수조사연보, 국토해양부, 637p.
 김옥준, 이하영, 이대성, 윤석규, 1973, 남한 대석회암통의 층서 및 지질구조. 광산지질학회지, 6, 81-114.
 대한지질학회, 1999, 한국의 지질. 시그마프레스, 802p.
 우경식, 박수인, 정공수, 이창진, 2002, 한반도 고생대 퇴적암류에 대한 고찰. 위해 박용안교수 정년퇴임기념 논문집, 한림원, 83-120.
 정창희, 이하영, 고인석, 이종덕, 1979, 한국 하부 고생대층의 층서와 퇴적환경 (특히 정선지역을 중심으로), 학술원 논문집(자연과학편), 18, 123-169.
 태백산지구지하자원조사단, 1962, 태백산지구 지질도, 대한지질학회, 107p.
 한국지질자원연구원 지질정보시스템, <http://geoinfo.kigam.re.kr>.
 Bakalowicz, M., 2005, Karst groundwater: a challenge for new resources. Hydrogeology Journal, 13, 148-160.
 Cesano, D., Bagtzoglou, A.C. and Olofsson, B., 2003, Quantifying fractured rock hydraulic heterogeneity and groundwater inflow prediction in underground excavations: the heterogeneity index. Tunnelling and Underground Space Technology, 18, 19-34.
 Cole, J., Coniglio, M. and Gautrey, S., 2009, The role of buried bedrock valley on the development of karstic aquifers in flat-lying carbonate bedrock: insights from Guelph, Ontario, Canada. Hydrogeology Journal, 17, 1411-1425.
 Eisenlohr, L., Bouzelboudjen, M., Kiraly, L. and Rossier, Y., 1997, Numerical versus statistical modeling of natural response of a karst hydrogeological system. Journal of Hydrology, 202, 244-262.
 Ford, D.C. and Ewers, R.O., 1978, The development and Limestone caves in the dimensions of length and depth. Canadian Journal of Earth Sciences, 15, 1783-1798.
 Gaswirth, S.B., Budd, D.A. and Crawford, B.R., 2006, Textural and stratigraphic controls on fractured dolomite in a carbonate aquifer system, Ocala limestone, west-central Florida. Sedimentary Geology, 184, 241-254.
 Hisakoshi, S., 1943, Geology of Seizen District, Kogendo, Tyosen. Journal of Geological Society of Japan, 50, 269-277.
 Johnston, R.H. and Bush, P.W., 1988, Summary of the hydrology of the Floridan Aquifer System in Florida and in parts of Georgia, South Carolina, and Alabama. U.S. Geological Survey Professional Paper, 1403-A.
 Motyka, J., Pulido-Bosch, A. and Gisbert, B.J., 1998, Matrix hydrogeological properties of Devonian carbonate rocks of Olkusz (Southern Poland). Journal of Hydrology,

- 211, 140-150.
- Palmer, A.N., 1991, Origin and morphology of limestone caves. *GSA Bulletin*, 103, 1-21.
- Peterson, E.W. and Wicks, C.M., 2003, Characterization of the physical and hydraulic properties of the sediment in karst aquifers of the Springfield Plateau, Central Missouri, USA. *Hydrogeology Journal*, 11, 357-367.
- Safko, P.S. and Hickey, J.J., 1992, A preliminary approach to the use of borehole data, including television surveys, for characterizing secondary porosity of carbonate rocks in the Floridan Aquifer System. U.S. Geological Survey Water Resources Investigation, 91-4168.
- White, W.B., 1988, *Geomorphology and hydrology of karst terrains*. Oxford University Press, New York, 464p.
- White, W.B., 2003, Conceptual model for karst aquifers. *Speleogenesis and Evaluation of Karst Aquifers*, 1, 1-6.
- Wicks, C.M. and Herman, J.S., 1994, The effects of a confining unit on the geological evolution of ground water in the Upper Floridan aquifer system. *Journal of Hydrology*, 153, 139-155.
- Williams, A., Bloomfield, J., Griffiths, K. and Butler, A., 2006, Characterising the vertical variations in hydraulic conductivity within the Chalk aquifer. *Journal of Hydrology*, 330, 53-62.
- Worthington, S.R.H., 2001, Depth of conduit flow in unconfined carbonate aquifers. *Geology*, 29, 335-338.
- Yoshimura, I., 1940, Geology of the Neietsu district, Kogendo, Tysen (Korea). *Journal of Geological Society of Japan*, 47, 112-122.

이진용

강원대학교 지질학과
200-701 강원도 춘천시 효자2동 강원대학길1
Tel: 033-250-8551
Fax: 033-242-8550
E-mail: hydrolee@kangwon.ac.kr

임흥균

강원대학교 지질학과
200-701 강원도 춘천시 효자2동 강원대학길1
Tel: 033-250-8551
Fax: 033-242-8550
E-mail: dnany@nate.com

박유철

강원대학교 지구물리학과
200-701 강원도 춘천시 효자2동 강원대학길1
Tel: 033-250-8586
Fax: 033-244-8580
E-mail: parkyc@kangwon.ac.kr

2011년 3월 8일 원고접수, 2011년 3월 16일 게재승인

박영운

강원대학교 지구자원연구소
200-701 강원도 춘천시 효자2동 강원대학길1
Tel: 033-250-8550
Fax: 033-242-8550
E-mail: young-yun@nate.com