

낙동강 중류 유역의 단열계 특성 및 지하수계와의 관련성

김득호 · 이종현 · 박규태 · 김성창 · 최유미 · 서유리 · 노경명 · 함세영*

부산대학교 지구환경시스템학부

Characteristics of Joint Systems and Their Relationship with Groundwater System in the Nakdong River Mid-basin

Deuk-Ho Kim, Jong-Hyun Lee, Kyu Tae Park, Seong Chang Kim, Yu-Mi Choi, Yu-Ri Seo, Gyung Myung Noh, and Se-Yeong Hamm*

Division of Earth Environmental System, Pusan National University

낙동강 중류 지역(함안군, 창령군, 의령군)의 백악기 퇴적암의 단열계 특성(단열의 방향성과 단열계 밀도)을 파악하고, 단열과 단층, 수계 그리고 연구지역내 지하수공의 일일 사용량과의 관련성을 분석하였다. 단열계는 J1(N90°-110°E), J2(N0°-35°E), J3(N0°-35°W)로 분류되며, 주로 남북방향과 동서방향 단열군의 방향성이 우세하다. 연구지역의 동편과 서편의 함안층 분포지역에서는 남북방향의 단열계가 우세한 반면에, 연구지역의 중간부분인 칠곡층 분포지역에서는 동서방향의 단열계가 우세하다. 이는 연구지역의 동편과 서편에 위치하는 북북동-남남서 방향의 단층계와 관련되는 것으로 보인다. 또한 낙동강 주변에서도 단열 밀도가 높게 나타나며, 이는 동서방향의 단열계가 낙동강과 연관됨을 암시한다. 한편, 연구지역내 지하수공의 일일 사용량과 단열 밀도 간에는 약한 양의 상관성을 보이며, 지하수 비양수량과 단열 밀도 간에는 음의 상관성을 보인다. 이는 단열 밀도가 지하수 산출량을 결정하는 주요 요인이 될 수 없음을 지시한다.

주요어 : 낙동강, 퇴적암, 단열 밀도, 지하수 양수량, 비양수량

The characteristics of joint system (joint orientation and density) were studied for Cretaceous sedimentary rocks in the Nakdong River mid-basin (Haman-Gun, Changnyeong-Gun, and Uiryeong-Gun areas), and were related with faults, river system, and groundwater usage in the study area. The joint system was classified into J1 (N90°-110°E), J2 (N0°-35°E), and J3 (N0°-35°W), and was dominant along N-S and E-W directions. The N-S trending joint system is dominant in Haman Formation in the eastern and western parts of the study area, while the E-W trending joint system is prevalent in Chilgok Formation in the central part. The joint system may be associated with the faults located in the eastern and western parts in the study area which are elongated to NNE-SSW direction. Additionally, the joint density is higher along the Nakdong River, indicating close relationship between E-W trending joints and the river. Daily groundwater discharge versus joint density shows weak positive relationship, and specific capacity versus joint density appears negatively related. This indicates that groundwater occurrence does not greatly rely on joint density.

Key words : nakdong river, sedimentary rock, joint density, groundwater discharge, specific capacity

서 론

기반암내의 지하수 유동 체계는 단층, 절리, 단열계의 물리적 특성 및 발달 상태와 범위에 지배된다(Leckenby *et al.*, 2005; Barton *et al.*, 1995; Caine *et al.*, 1996;

Dholakia *et al.*, 1998; 손문 외, 2002; 이덕선 외, 2007). 즉, 암석의 투수성은 다양한 규모의 단층과 단열계의 성질에 좌우되며(Leckenby *et al.*, 2005), 어떤 특정한 방향의 단열계를 따라 높은 지하수 유동성을 보이기도 한다(Barton *et al.*, 1995). 또한, 어떤 지역의 지하수 유

*Corresponding author: hsy@pusan.ac.kr

동을 이해하기 위해서는 그 지역에 존재하는 단층의 투수성을 알아야 한다(Babiker and Gudmundsson, 2004). Caine *et al.*(1996)은 단층의 구조와 수리지질의 영역을 구분하는 개념모델을 제시하였다. 그들에 의하면, 단층대가 투수성 통로, 장벽 또는 투수성 통로와 장벽의 혼합 시스템의 역할을 하는지는 단층 중심부와 손상대의 상대적인 비율, 그 암석의 고유한 입도와 단열의 투수성에 좌우된다. 또한 다수의 연구들은 활성단층이 기반암 내 지하수 유동을 크게 좌우한다고 보고하고 있다(Barton *et al.*, 1995; Mayer and Sharp, 1998; Gudmundsson, 2000; Gudmundsson *et al.*, 2001). Babiker and Gudmundsson (2004)은 수단의 홍해 부근 지역에 대해서 단층 및 암맥과 지하수의 관련성을 연구한 결과, 단층(홍해와 직각 방향으로 발달함)은 지하수 통로가 되고, 암맥(홍해와 평행하게 나타남)은 지하수 방벽이 된다고 하였다. 채병근 외(1997)는 암반내 단열 중 유동성 단열을 추출하기 위한 연구를 수행하였고, 진광민 외(2007)은 단열발달사와 단열 밀도 변화에 대한 연구를 통해 유체의 유동 통로로서의 단열특성을 규명하였다.

기반암내에는 단열계와 단층대가 발달되어 있기 때문에 지하에 터널을 굴착하면, 터널내로 지하수가 유출된다. Lin and Lee(2008)은 대만의 Syueshan 터널 굴착으로 인한 응력 변화와 이로 인해서 발생하는 단열의 간극과 수리전도도 변화를 UDEC(Universal Distinct Element Code)를 이용하여 해석하였다. 이병대 외(2000)는 영천도수로 터널 굴착 현장에서 관측된 지하수위 변동과 단열 구조자료를 이용하여, 이들과 터널내 지하수 유출량의 관련성을 규명하였다. 또한 이병대 외(2002)는 주입시험 및 지구물리검층 자료를 이용하여 영천도수로 터널지역의 단열암반내 지하수 유동을 분석하였다. 박재현 외(2001)는 청송군 현서면 일대의 도수로 터널내 지하수 유출량과 수리전도도, 절리빈도, 절리간극, 단층의 관련성을 고찰하였다. 이희근 외(1995)는 동해신광산 터널굴착공사와 관련된 지표수 및 지하수의 유동변화에 대한 조사 연구에서 지질구조와 지하수 유동의 관련성을 고찰하고, 터널 굴착으로 인한 지표수와 지하수 변화를 분석하였다. 또한 Song *et al.*(2001)은 지질 및 지구물리탐사자료를 이용하여 상촌터널 굴착과 지하수 유출의 관련성을 해석하였다. 또한 하천으로의 지하수 유출량과 유출수의 수질은 소유역내의 암석의 종류, 지질구조(단열계 특성, 종류, 밀도), 층적층의 특성, 식생, 지형기복, 수리지질학적 요인(대수층의 발달상태 및 수리상수)과 인위적 영향(지하수 개발, 저수지 담수 및 배출, 농업용

관개)에 좌우된다(Domenico, 1997).

본 연구에서는 함안군 대산면, 칠서면 일대, 의령군 정곡면, 지정면, 낙서면, 부림면, 유곡면 일대, 그리고 창령군 창녕읍, 남지읍, 대지면, 유어면, 계성면, 영산면, 장마면 일대의 낙동강 유역에 대한 단열계의 특성(단열의 방향성 및 공간적 밀도)과 지질, 단층, 수계 및 지하수공의 일일 사용량 간의 관련성을 분석하고자 하였다.

지질개요

연구지역(동경 128° 19' 40"~128° 29' 55", 북위 35° 19' 48"~35° 30' 04")은 함안군 대산면, 칠서면 일대와 의령군 정곡면, 지정면, 낙서면, 부림면, 유곡면 일대 및 창령군 창녕읍, 남지읍, 대지면, 유어면, 계성면, 영산면, 장마면 일대를 포함하는 낙동강 중류 유역이다. 연구지역 내에는 낙동강이 북부에서 남부로 사행하여 흐르고, 남강은 남쪽에서 북동방향으로 사행한다. 낙동강과 남강의 본류는 함안군 대산면, 의령군 지정면, 창령군 남지읍의 경계에서 합류하고 있고, 낙동강과 남강을 경계로 함안군, 의령군, 창녕군의 경계가 설정되어 있다(Fig. 1).

연구지역은 경상분지 내 밀양소분지에 속하며, 지질은 하부로부터 백악기 경상누층군 하양층군의 칠곡층,

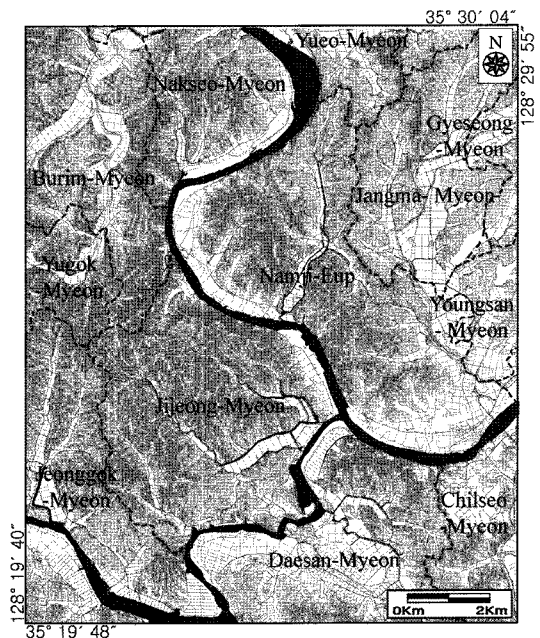


Fig. 1. Location of the study area.

신라역암층, 함안층과 이들 암석을 관입하고 있는 불국사 화강암 그리고 연구지역의 낙동강변을 따라 제 4기 충적층이 상기 암석들을 피복하고 있다(엄상호 외, 1983). 최승오와 여상철(1972)은 창녕군 유어면, 의령군 낙서면, 지정면에 산성암맥이 그리고 창녕군 유어면, 함안군 칠서면에 염기성암맥이 나타나는 것으로 되어 있으나, 본 연구에서는 확인할 수 없었다. 엄상호 외(1983)는 산성암맥과 염기성암맥에 대해서 언급하지 않았다. 따라서, 본 연구에서는 주로 엄상호 외(1983)의 연구과 본 연구의 지질조사에서 확인한 사실을 바탕으로 하여 지질을 기재하였다.

본 지역의 퇴적암류들은 대개 북북서-남남동 방향의 주향과 남동방향의 완만한 경사를 보이며 연구지역의 전역에서 수조의 단층이 나타난다(엄상호 외, 1983).

칠곡층

본 연구지역에서 층서상 최하위에 위치하는 칠곡층은 연구지역 중간부분(의령군 낙서면과 지정면일대 그리고 창녕군 남지읍)에 넓게 분포하며 동쪽 경계와 서쪽 경계에서 북북동-남남서 방향으로 발달된 대규모 단층에 의해 경계지어진다. 구성암석은 역암, 역질 사암, 사암, 실트스톤, 이암 등이며 퇴적물은 비화산기원의 것과 화산기원의 것들을 모두 포함한다. 현미경하 관찰에 의하면 화산기원퇴적물에는 폭발기원의 것과 침식기원의 것이 모두 포함된다(엄상호 외, 1983).

본 층에 포함된 자색 세일이나 이암에서 간혹 연흔, 사층리, 건얼이 발견된다. 따라서 본 층이 퇴적될 당시의 환경은 호소나 범람원으로 생각되며 본 칠곡층내의 자색퇴적물의 퇴적상태는 상하층간에 분명한 한계를 보여주지 않고 점이적인 것이 특징적이다. 층리면은 주향 N30°E~N50°E, 경사 8°~12°SE를 보인다(최승오와 여상철, 1972).

신라역암층

연구지역의 북부에 국부적으로 분포하는 신라역암층은 칠곡층 상부를 덮고 있으며 본 지역의 신라역암층의 동쪽경계와 서쪽경계에는 단층이 발견된다(엄상호 외, 1983). 주요 구성암석은 역암, 역질 사암, 사암 및 이암이며, 클래스트(clast)와 기질은 화산기원 쇄설물을 포함한다. 적색 세립퇴적물이 혼재되는 역암의 기질은 여러 가지 색을 띤다. 화산암질의 역은 현무암질이나 안산암질이 우세하다. 역들의 주요 구성암종은 안산암, 조면암, 응회암, 현무암, 석영맥, 규암, 화강암질 편마암 등이다.

본 층은 대체적으로 N20°~30°E 주향에 8°~12°SE의 낮은 경사를 보여준다.

층의 하부 경계와 상부 경계는 역암이 시작되는 층준과 역질 사암이 끝나는 층준이며 층의 두께는 지역에 따라 다소 차이는 있으나 대체로 250 m 내외이다. 그러나 이 층이 함안층으로 전이되기 때문에 암상, 수직층서 등에서 뚜렷한 상한을 설정하기는 어렵다. 단층들에 의해 반복 분포되는 남지역의 신라역암층에서는 역의 크기와 양, 암석의 산출빈도 및 층의 두께가 현저히 감소된다.

함안층

연구지역 퇴적암류 중 최상부를 이루는 함안층은 연구지역의 남서부 지역(함안군 대산면과 칠서면)에서 주로 관찰되며, 자색의 세일, 이암, 사질 세일, 녹회색 사암, 회색 또는 암회색의 세일, 이암, 실트스톤 등으로 구성되어 있다(최승오와 여상철, 1972). 본 층은 하부에서는 주로 자색이 우세한 세일, 이암, 사질 세일의 호층에 간혹 자색 사암이 협재되어 있으며, 중부에서는 녹색 또는 암녹색, 회색, 암회색의 사질 세일과 사암이 우세하게 발달하고 있고, 상부에서는 자색 세일과 사암, 회색 또는 암회색의 사질 세일 또는 사암이 호층을 이루어 분포되고 있다. 함안층의 거의 모든 사암들은 화산기원퇴적물을 함유하는 것이 특징이다. 층리의 주향과 경사는 각각 N20°~60°E와 5°~15°SE가 지배적이나, 본 역 북서부에서는 N50°~60°W에 10°NE 내외의 방향이 우세하게 나타나고 있다.

엄상호 외(1983)는 연구지역의 남지일대에서는 심성암체의 관입과 단층들의 발달에 의해서 그 분포가 넓어졌다고 보고하였고, 층의 하한은 신라역암 상부의 중립-세립 역질 사암이 끝나고 자색 이암과 얇은 판상 사암과 실트스톤이 협재되기 시작하는 층준으로 지시하였다. 함안층의 상부는 암회색-흑색 이암에 협재된 최상위 자색 이암 층준이다.

불국사 화강암

본 암은 남부 의령군 지정면 성당리에 소규모의 타원형으로 관입하고 있다(최승오와 여상철, 1972). 본 암은 유백색 내지 회백색을 띠며 때로는 반상조직을 보이기도 하는데 간간이 석영이 반정으로 나타난다. 한편 유색 광물이 극소량 함유되며 주변부는 많은 변질을 받고 있다. 비교적 절리의 발달이 양호하다. 정상누층군 하양군층 퇴적암류들 수개 처에서 소규모로 관입하고 있는 화

성암류로서 산성암류(흑운모화강암, 산성 암맥, 규장암 등), 중성암류(섬록암), 염기성암류(염기성 암맥)가 있다.

층적층

제4기 충적층은 본 연구지역 북쪽에서 남쪽으로 사행하여 흐르는 낙동강과 남쪽에서 북동방향으로 사행하여 남지읍부근에서 낙동강과 합류하는 남강의 주변부를 따라 넓게 분포하고 있다. 하부의 암석들을 피복하고 있는 본 층은 대부분이 모래, 역, 점토 등으로 구성되어 있다.

단열계 분석

단열계 분석방법

연구지역의 암상 분포에 따른 단열계의 주향, 경사와 공간적인 단열 밀도를 파악하기 위하여, 연구지역 전역 (10' × 10' 또는 15 km × 15 km)을 30" × 30"(750 m × 750 m)의 400개 격자를 나누었다. 그러나 160개 격자에 대해서는 노두부재로 인하여 단열 측정이 이루어지지 못하고, 240개 격자에 대해서 단열계의 주향, 경사와 공간적인 단열 밀도를 측정하였다. 설정된 각 격자마다 단열들이 잘 발달된 1개 노두를 찾아서, 각 노두의 암상 특성을 기재하고, 이들 노두에 나타나는 단열들을 출현 빈도에 따라 J1, J2, J3의 각 단열군에 대해서 4개 이상의

단열의 주향과 경사를 측정하였다. 또한 노두상의 대표적인 지점에 1 m 길이의 측선을 설정하여 이 측선에 교차하는 단열의 개수(단열 개수/m)를 측정하여 단열 밀도를 결정하였다.

격자별로 획득한 단열계의 주향, 경사 분석을 위해서 4개의 격자를 1' × 1'(1.5 km × 1.5 km)로 재구성하여 각 격자별로 최대 4개 노두의 측정 자료들을 이용하였다. 이와 같이 총 91개 격자의 단열들의 주향, 경사를 π-등고선도와 장미도표(rose diagram)로 도시하였다. 한편, 연구지역 전체의 91개 격자에 대한 공간적인 단열 주향 분포도를 작성하였다.

결과 및 고찰

주요 단층 분석

연구지역 주요단층을 보면, 연구지역의 동편에는 길게 연장된 북북동-남남서 방향(경사 12°SE)의 단층과 북동-남서방향의 소규모 단층들이 분포하며 이들은 신라역암층과 칠곡층, 함안층과 칠곡층의 경계가 되고 있다(Fig. 2). 또한 연구지역의 서편에도 동쪽의 단층과 비슷하게 북북동-남남서 방향의 단층과 과 북동-남서방향의 소규모 단층들이 신라역암층과 칠곡층, 함안층과 칠곡층의 경계가 되고 있다. 동편과 서편의 단층은 백악기 퇴적암들(칠곡층, 신라

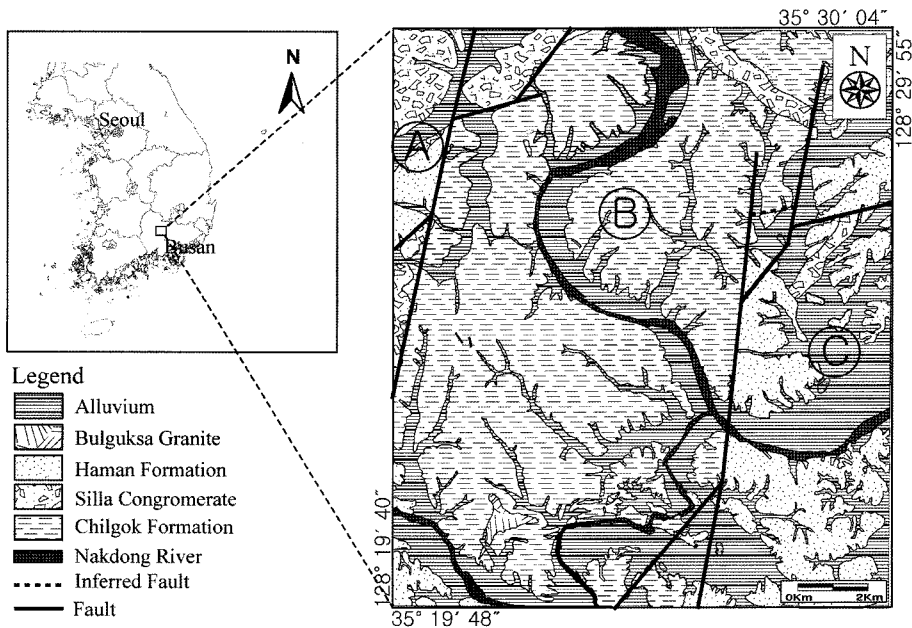


Fig. 2. Geological map of the study area (Um et al, 1983).

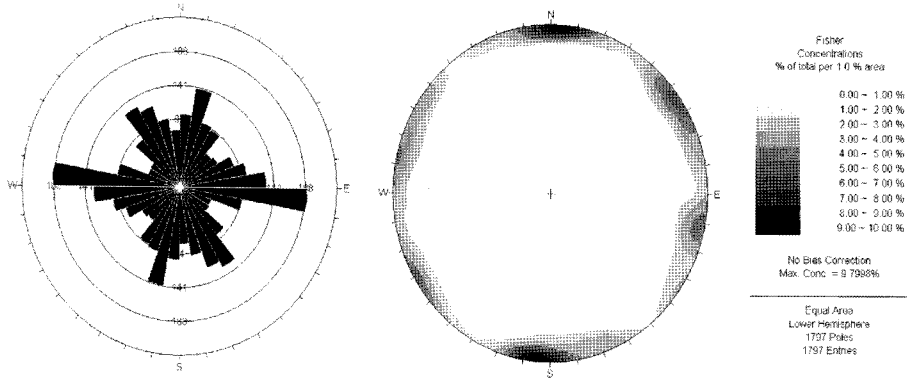


Fig. 3. Rose diagram and π -contoured diagram of the joints in the study area.

역암층, 함안층)을 절단하고 있는 것으로 보아, 단층의 주요 운동시기가 백악기 이후로 추정된다. 연구지역의 동편과 서편에 발달된 단층들을 경계로 연구지역을 ④, ③ 그리고 ②의 3부분으로 나누어 보면(Fig. 2), ④부분에서 함안층과 신라역암층이 협재되고, 중간부분인 ③부분에는 칠곡층이 분포하고 있고, ②부분에서 다시 함안층과 신라역암층이 나타나는 분포양상을 보인다.

단층은 지하수의 유동 통로가 되거나, 단층점토에 의해 지하수 유동의 장벽 역할을 할 수도 있다. 본 연구지역의 동편과 서편에 남북으로 길게 연장된 단층은 낙동강의 유로와 관련성이 없는 것으로 보아 불투수성 장벽의 역할을 하지는 않는 것으로 추정된다.

단열계의 지역적인 분포 특성

연구지역의 총 240개 노두에서 단열계 주향, 경사 측정을 통해 획득한 총 1,796개의 단열을 π -등고선도와 장미도표로 도시한 결과, 단열의 주향 빈도가 가장 높은 동서방향의 단열군 J1 ($N90^{\circ}\sim 110^{\circ}E$), 북북동방향의 단열군 J2 ($N0^{\circ}\sim 35^{\circ}E$), 그리고 단열의 주향 빈도가 가장 낮은 북북서방향의 단열군 J3 ($N0^{\circ}\sim 35^{\circ}W$)로 분류된다(Fig. 3). $60''\times 60''(1.5\text{ km}\times 1.5\text{ km})$ 격자별로 단열계를 장미도표에 도시하면, 전반적으로 동서방향과 북북동-남남서방향의 주향을 가지는 단열들이 우세하게 분포하며, 단열의 경사는 대부분 60° 수직이어서 급한 편이다(Fig. 4). 이들은 동편과 서편의 단층들과 비슷한 주향을 보인다. 한편, 연구지역의 단열 밀도 분포도를 보면, 단열 밀도는 창녕군 남지읍과 의령군 지정면 경계부에서 평균 8.5개/m 로 가장 크고, 의령군 창녕군 계성면과 장마면이 평균 7개/m, 그리고 의령군 유곡면(평균 7.5개/m), 부림면(평균 6.7개/m), 낙서면(평균 6.2개), 정곡면(평균 6개

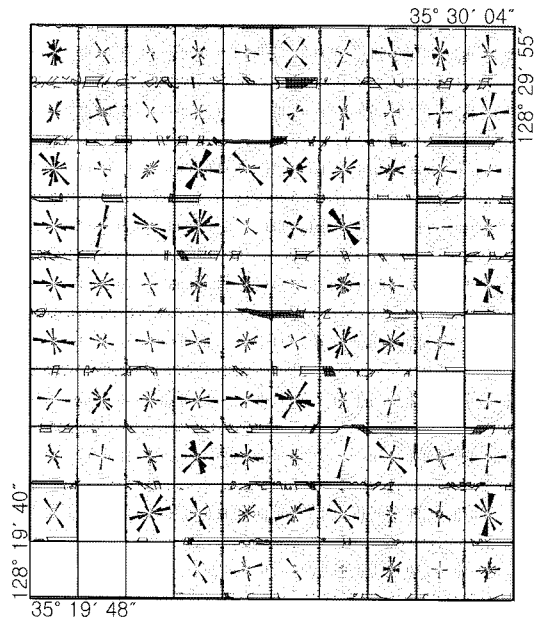


Fig. 4. Rose diagram distribution of the joints using domain by $60''\times 60''$.

/m)에서도 크게 나타난다(Fig. 5). 단열 밀도는 단층 주변부에서 높은 경향성을 보이며, 이는 단층작용과 밀접한 관련성을 가지는 것으로 판단된다. 또한 낙동강 본류 주변에도 단열 밀도가 높은 경향성을 보이며, 이는 동서방향의 단열계와 관련되는 것으로 판단된다.

지질에 따른 단열계의 특성

칠곡층과 함안층의 지질에 따른 단열계의 주향과 단열 밀도를 살펴보면, ④지역의 함안층에서는 북북서-남남동 방향의 단열군($N0^{\circ}\sim 35^{\circ}W$)이 가장 우세하게 나타

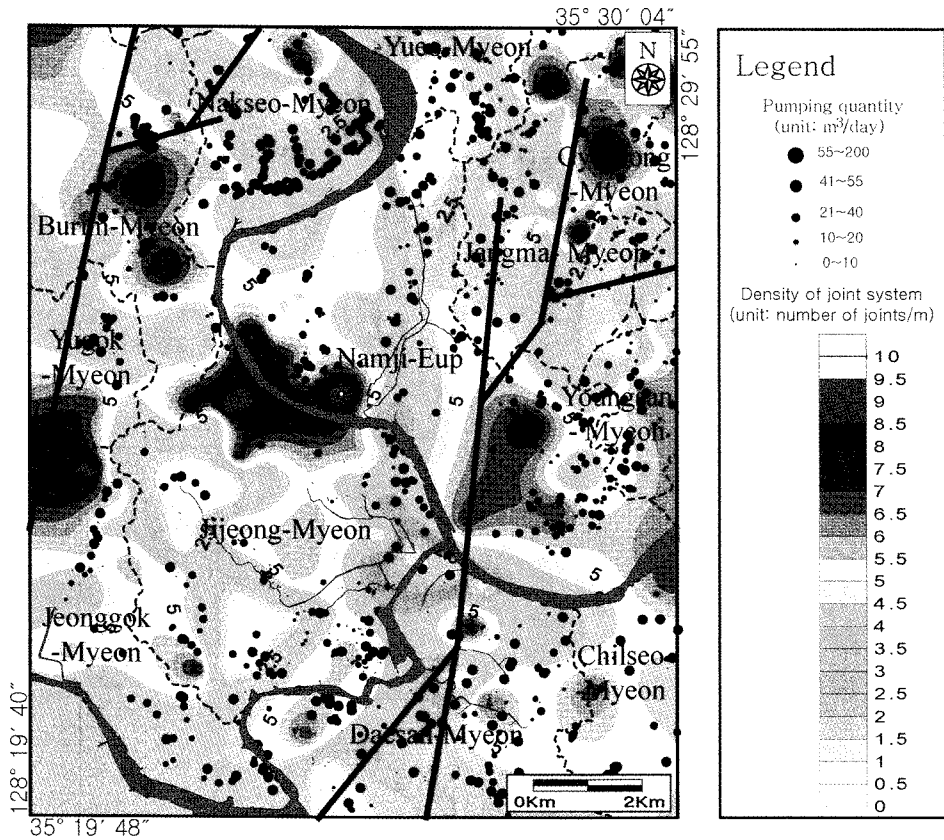


Fig. 5. Relationship between groundwater pumpage and joint density.

났으며, 북북동-남남서 방향의 단열군도 다수 관찰된다. 단열 밀도는 평균 5.1개/m로 나타난다. © 지역의 함안층에서는 북북동-남남서 방향의 단열군(N0°~35°E)이 가장 우세하게 나타나며, 동서방향의 단열군도 관찰된다. 단열 밀도는 4.5개/m로 나타난다.

한편, ㉔지역에 넓게 분포하는 칠곡층에서는 동서방향의 단열군(N90°~110°E)이 가장 우세하게 나타났으며 북북서방향과 북북동방향의 단열군도 일부 관찰된다. 칠곡층에서는 단열 밀도가 평균 4.3개/m로 비교적 낮게 나타났는데 이는 노두가 잘 나타나지 않는 층적층의 분포 때문으로 사료된다. 따라서, 칠곡층이 나타나는 연구지역의 ㉔부분에서는 동서방향의 단열군이 우세한 반면에, 연구지역의 동편(㉔부분)과 서편(㉔부분)에서는 남북방향 계열의 단열군이 우세함을 알 수 있다.

지하수 이용량 분석

지하수 이용량은 자연적인 요인(대수층의 지하수 부존

성)과 인위적인 요인(지하수 수요량)에 따라 달라진다. 본 연구지역에서의 지하수 이용량도 자연적인 요인 및 인위적인 요인과 복합적으로 관련되는 것으로 판단된다. 연구지역인 함안군, 의령군, 창녕군내 총 1,347개소(함안군 213개소, 의령군 542개소, 창녕군 592개소)의 일일 지하수 사용량 자료를 이용하여 연구지역의 지하수공 일일 사용량 분포도를 작성하였다. 함안군의 전체 일일 지하수 이용량은 9,543 m³/일이다. 함안군 내에서 지역적으로 가장 큰 면적을 차지하는 대산면(총 면적 34.35km²)이 일일 지하수 이용량 6,990 m³/일의 높은 값을 가지며, 칠서면(총 면적 13.83km²)이 일일 지하수 이용량 2,552 m³/일으로서 낮게 나타난다. 의령군 전체의 일일 지하수 이용량 20,885 m³/일이고, 의령군내에서는 낙서면(총 면적 21.71 km²)이 일일 지하수 이용량 7,269 m³/일 으로서 가장 높고, 다음으로는 지정면(총 면적 49.73km²)이 일일 지하수 이용량 5,561 m³/일이다. 또한 부림면(총 면적 29.45 km²)이 일일 지하수 이용량은 3,836 m³/일이며, 정

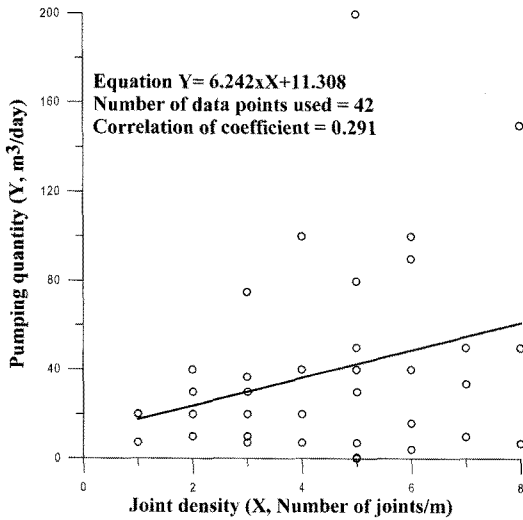


Fig. 6. Graph showing correlation between pumping quantity and joint density.

곡면(총 면적 26.33 km²)이 일일 지하수 이용량 2,805 m³/일, 그리고 유곡면(총 면적 8.94km²)이 일일 지하수 이용량 1,414 m³/일으로서 가장 적다. 낙서면이 면적에 비해 가장 높은 일일 지하수 이용량을 보이는데 이는 지하수를 사용하는 인구수와 밀접한 관련이 있는 것으로 보인다.

한편, 창녕군 전체의 일일 지하수 이용량은 23,800 m³/일이다. 창녕군 내에서는 연구지역내 가장 큰 면적을 차지하는 남지읍(총 면적 55.70 km²)이 일일 지하수 이용량 7,700 m³/일으로서 가장 높으며, 장마면(총 면적 28.14 km²)이 일일 지하수 이용량 5,610 m³/일, 유어면(총 면적 8.62 km²)이 일일 지하수 이용량 2,580 m³/일이다. 그리고, 계성면(총 면적 7.85 km²)이 일일 지하수 이용량은 2,280 m³/일이고, 영산면(총 면적 7.12 km²)이 일일 지하수 이용량 2,415 m³/일으로서 낮게 나타난다.

Table 1. Result of ANOVA.

Source of variation	Sum of squares	Degrees of freedom	Mean squares	p-value	F-test	F _{0.05} (1,40)
SSR	5703.9	1	5703.9	0.062	3.697	4.08
SSE	61720.8	40	1543.0			
SST	67424.7	41				

Table 2. Result of linear regression analysis.

Factor	Unstandardized coefficients		Standardized coefficients	t-test	p-value
	Coefficient	Standard error			
Constant	11.308	15.674		0.721	0.475
Joint density	6.242	3.246	0.291	1.923	0.062

단열 밀도와 지하수 이용량의 관련성 분석

연구지역의 지하수공별 일일 사용량 분포와 단열 밀도 분포를 서로 비교·분석하여 보았다. 단층주변부와 낙동강 본류, 지류 주변부와 같이 단열 밀도가 큰 지역에는 일일 지하수 이용량이 큰 관정들이 분포하고 있다 (Fig. 5). 이는 일일 지하수 이용량 분포와 단열의 밀도 분포는 어느 정도 서로 상관성이 있음을 지시하는 것이다. 따라서, 일일 지하수 이용량과 단열의 밀도간의 상관성을 분석하였다(Fig. 6). 상관분석을 위해서는 단열 밀도와 지하수공 위치가 서로 가까운 42개 자료를 이용하였다. 상관성 분석을 하기 이전에 회귀모형의 타당성을 살펴보면(Table 1), F값이 3.697이고 F_{0.05}(1,40) 값이 4.08이며, 유의확률(p-value) 0.062이 유의수준 0.05(95%)보다 크므로 회귀모형이 통계적으로 유의하다고 할 수 없다. 아울러 회귀계수들의 통계적인 유의성을 검토한 결과(Table 2), 단열 밀도의 회귀계수가 유의수준 0.05 (95%)을 벗어난 것으로 나타났다.

따라서, 단열 밀도는 지하수 이용량에 크게 영향을 미치지 않으며, 단열 밀도가 지하수 산출량을 결정하는 주요 요인이 아니라는 것을 알 수 있다. Hamm et al.(2007)은 금정산 화강암 지역의 시추공 자료를 이용한 단열의 간극, 빈도, 방향성과 수리전도도간의 상관성 분석에서 단열의 간극과 수리전도도의 상관성이 단열 밀도와 수리전도도간의 상관성보다 크다는 것을 보고한 바 있다.

단열 밀도와 비양수량의 관련성 분석

우물의 지하수 산출능력을 나타내는 수치인 비양수량(Mace, 1997)과 단열 밀도의 관련성을 살펴보았다. 단열 밀도와 비양수량의 상관분석을 위해서 비양수량은 지하수위값 획득이 가능한 25개 지하수공의 자료를 이용하였으며, 단열 밀도는 그 지하수공을 포함하는 격자의 평

Table 3. Result of ANOVA.

source of variation	sum of squares	degrees of freedom	mean squares	p-value	F-value	F _{0.05} (1.24)
SSR	12.6	1	12.60	0.003	10.655	4.26
SSE	27.2	24	1.18			
SST	39.8	25				

Table 4. Result of regression analysis.

Factor	Unstandardized coefficients		Standardized coefficients	t-test	p-value
	Coefficient	Standard error			
Constant	22.799	13.824		1.649	0.113
Joint density	-0.916	0.281	-0.563	-3.264	0.003

균 단열 밀도를 이용하였다. 분산분석(ANOVA)을 통하여 회귀모형의 타당성을 살펴보면(Table 3), F값이 10.655이고 F_{0.05}(1.24)값이 4.26이며, 유의확률(p-value) 0.003이 유의수준 0.05(95%)보다 낮으므로 회귀모형이 통계적으로 유의하다고 할 수 있다. 아울러 회귀계수들의 통계적인 유의성을 검토한 결과(Table 4), 단열 밀도의 회귀계수가 유의수준 0.05(95%)을 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 단열 밀도는 비양수량에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 단열 밀도와 비양수량의 상관성 분석 결과, 비양수량(S)과 단열 밀도(D)간의 회귀식은

$$\ln S = -0.916 \times \ln D + 22.799 \quad (1)$$

이며, 상관계수는 -0.563이다(Fig. 7). 즉, 단열 밀도가 증가하면 비양수량은 감소하는 반비례 관계를 보임을 알 수 있다.

결 론

암반의 단열발달이 유체의 유동에 영향을 미친다는 사실은 지금까지 여러 학자들에 의해 논의되어 왔으며, 단열발달과 유체의 유동성 사이의 상호관련성을 파악하기 위하여 다양한 연구들이 시도되었다. 본 연구에서는 낙동강 중류 지역의 소유역에 대해 단열계 특성(단열의 주향, 경사와 단열 밀도)과 단층, 지질, 수계, 그리고 지하수 이용량의 관련성을 규명하고자 하였다.

연구지역의 단열자료 분석 결과, 단열의 주향 방향과 빈도에 따라 동서방향의 단열군 J1(N90°~110°E), 북북동방향의 단열군 J2(N0°~35°E), 그리고 북북서방향의 단열군 J3(N0°~35°W)로 분류된다. 이는 연구지역의 동편과 서편에 분포하는 북북동-남남서 방향의 단층계 및

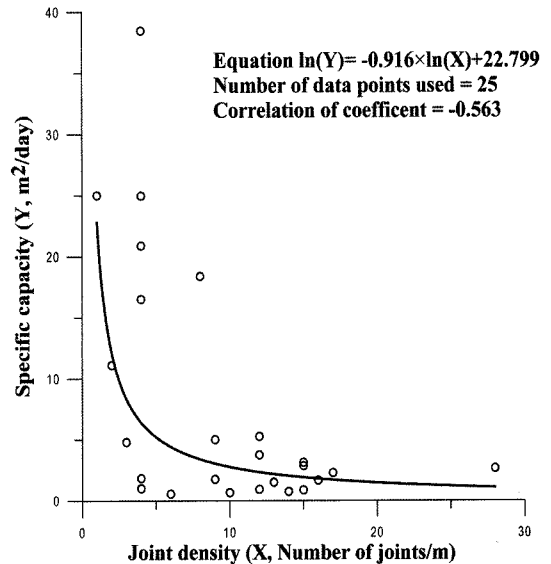


Fig. 7. Relationship between specific capacity and fracture density.

이에 수반되는 소규모 단층들과 관련되는 것으로 보인다. 또한 낙동강 본류 주변에서도 단열 밀도가 높게 나타나며, 이는 동서방향의 단열계가 낙동강과 연관됨을 암시한다. 또한 칠곡층이 분포하는 연구지역의 중간부분에서는 동서방향의 단열계가 우세한 반면에, 함안층이 분포하는 연구지역의 동편과 서편에서는 남북방향 계열의 단열계가 우세하게 나타난다.

한편, 연구지역에 분포하는 일일 지하수 이용량과 단열 밀도의 상관성을 살펴 본 결과, 단열 밀도 증가에 따라 일일 지하수 이용량이 증가하는 경향성을 보여주지만, 상관계수는 0.291로서 매우 낮은 편이다. 또한 비

양수량과 단열 밀도 간의 상관성 분석 결과, 단열 밀도가 증가하면 비양수량은 감소하는 반비례 관계를 나타내며, 상관계수는 -0.563 이다. 이는 지하수 산출량을 결정하는 것은 단열 밀도보다는 오히려 특정한 구조대나 단층이 지배적인 요인임을 지시한다.

따라서, 이번 연구에서는 연구지역내 각 노두에 발달한 단열들의 방향성과 밀도만을 조사하였지만, 앞으로 보다 상세한 연구를 위해서는 연구지역내 유동성 단열의 특성과 수리지질 특성(수리전도도, 투수량계수, 저류계수)을 함께 고려하여야 할 것이다.

사 사

이 논문은 2007년도 부산대학교 기초과학연구원 기초과학연구 기반조성연구비 지원에 의하여 연구되었다. 아울러 지하수 이용량 자료를 제공해주신 함안군청, 의령군청, 창녕군청 관계자분들께 감사드린다.

참 고 문 헌

박재현, 함세영, 성익환, 이병대, 정재열, 2001, 청송군 현서면 일대 도수로터널내 지하수 유입량과 수리지질 특성의 관련성, 지질공학, 11(2), 141-152.
 손문, 함세영, 김인수, 이윤희, 정훈, 류준길, 송원경, 2002, 부산시 금정산 일원의 지하수 유동 해석을 위한 단열계 분석, 지질공학, 12(3), 305-317.
 엄상호, 최현일, 손진담, 오재호, 광영훈, 신성진, 윤현수, 1983, 경상분지의 경상누층군에 대한 지질 및 지화학 적 연구, 한국동력자원연구소, 연구특보 36, 124 p.
 이덕선, 강지훈, 함세영, 배상근, 박기호, 김문수, 이정환, 2007, 구미-왜관-성주 지역 낙동강유역에 대한 단열계의 특성 연구, 2007년 춘계 지질과학기술 공동학술대회 초록집, 527-528.
 이병대, 성익환, 함세영, 조병욱, 김정숙, 박재현, 2000, 도수로터널 굴착에 따른 주변 지역의 지하수위 변동과 단열구조의 관련성 연구, 지질공학, 10(2), 143-162.
 이병대, 이인호, 추창오, 함세영, 성익환, 황세호, 2002, 도수로터널 주변 지역의 지하수 유동성 단열 규명, 2002, 한국지하수토양환경학회지, 7(3), 33-44.
 이희근, 전효택, 이종운, 이대혁, 류동우, 오석영, 1995, 동해신광산 터널굴착공사와 관련된 지표수 및 지하수의 유동변화에 대한 조사연구(I)-수문학 및 암반수리학적 접근을 중심으로, 터널과 지하공간, 5(4), 347-362.
 진광민, 김영석, 2007, 경주시 봉길리 지역의 단열발달사 및 단열밀도 해석, 지질공학, 17(3), 455-469.
 채병곤, 최영섭, 이대하, 김원영, 이승구, 김중렬, 1998, 유동성 단열 파악을 위한 암반 내 단열특성 규명, 지하수환경, 5(2), 88-99.
 최승오, 여상철, 1972, 한국지질도(1:50,000) 남지도폭 및 설명서, 국립지질조사소, 27p.
 Babiker, M. and Gudmundsson, A., 2004, The effects of

dykes and faults on groundwater flow in an arid land, the Red Sea Hills, Sudan, Journal of Hydrology, 297, 256-273
 Barton, C. A., Zoback, M. D., and Moos, D., 1995, Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock, Geology, 23, 683-686.
 Caine, J. S. and Forster, C. B., 1999, Fault zone architecture and fluid flow: insights from field data and numerical modeling, in Faults and Subsurface Fluid Flow in the Shallow Crust (Haneberg, W., Mozley, P.S., Moore, J.C., and Goodwin, L. B., eds.), AGU Geophysical Monograph Series, 113, 101-127.
 Caine, J. S., Evans, J. P., and Forster, C. B., 1996, Fault zone architecture and permeability structure, Geology, 24(11), 1025-1028.
 Dholakia, S. K., A., Aydin, A., Pollard, D. D., and Zoback, M. D., 1998, Fault-controlled hydrocarbon pathways in the Monterey Formation, California, American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 82, 1551-1574.
 Domenico, P.A., 1997, Physical and Chemical Hydrogeology, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc.
 Gudmundsson, A., 2000, Active fault zones and groundwater flow, Geophysical Research Letters, 27, 2993-2996.
 Gudmundsson, A., Berg, S. S., Lyslo, K. B., and Skurtveit, E., 2001, Fracture networks and fluid transport in active fault zones, Journal of Structural Geology, 23, 343-353.
 Hamm, S. -Y., Kim, M. S., Cheong, J. -Y., Kim, J. -Y., Son, M., and Kim, T. -W., 2007, Relationship between hydraulic conductivity and fracture properties estimated from packer tests and borehole data in a fractured granite, Engineering Geology, 92, 73-87.
 Leckenby, R. J., Sanderson, D. J., and Lonergan, L., 2005, Estimating flow heterogeneity in natural fracture systems, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 148, 116-129.
 Lin, H. I. and Lee, C. -H., 2008, An approach to assessing the hydraulic conductivity disturbance in fractured rocks around the Syueshan tunnel, Taiwan, Tunnelling and Underground Space Technology, doi: 10.1016/j.tust.2008.06.003.
 Mace, R. E., 1997, Determination of transmissivity from specific capacity tests in a karst aquifer, Ground water, 35(5), 738-742.
 Mayer, J. R. and Sharp, J. M., 1998, Fracture control of regional groundwater flow in a carbonate aquifer in a semi-arid region, Geological Society of American Bulletin, 110, 269-283.
 Sigda, J. M., Goodwin, L. B., Mozley, P. S., and Wilson, J. L., 1999, Permeability alteration in small-displacement faults in poorly lithified sediments, Rio Grande Rift, Central New Mexico, in Faults and Subsurface Fluid Flow in the Shallow Crust (Haneberg, W., Mozley, P.S., Moore, J.C., and Goodwin, L.B., eds.), AGU Geophysical Monograph Series, 113, 51-68.
 Song, W. -K., Chwae, U., and Hwang, H. S., 2001, Geotechnical investigation on the correlation between tunnel excavation and groundwater geotechnical, geosystem engineering, 4, 39-42.

2008년 11월 26일 원고접수, 2008년 12월 11일 게재승인

김득호

부산대학교 지구환경시스템학부
609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지
Tel: 051-510-3451
Fax: 051-516-7767
E-mail: emzh1865@naver.com

이종현

부산대학교 지구환경시스템학부
609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지
Tel: 051-510-3451
Fax: 051-516-7767
E-mail: bled-@hanmail.net

박규태

부산대학교 지구환경시스템학부
609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지
Tel: 051-510-3451
Fax: 051-516-7767
E-mail: pkt1129@hotmail.com

김성창

부산대학교 지구환경시스템학부
609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지
Tel: 051-510-3451
Fax: 051-516-7767
E-mail: bbyojock@empal.com

최유미

부산대학교 지구환경시스템학부
609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지
Tel: 051-510-3451
Fax: 051-516-7767
E-mail: midirock@hanmail.net

서유리

부산대학교 지구환경시스템학부
609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지
Tel
: 051-510-3451
Fax: 051-516-7767
E-mail: jy888@hanmail.net

노경명

부산대학교 지구환경시스템학부
609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지
Tel: 051-510-3451
Fax: 051-516-7767
E-mail: march628@nate.com

함세영

부산대학교 지구환경시스템학부
609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지
Tel: 051-510-2251
Fax: 051-516-7767
E-mail: hsy@pusan.ac.kr