

시추공 텔레뷰어 및 BIPS의 영상자료 해석을 통한 파쇄매질의 투수율텐서 계산 프로그램 개발 및 현장 적용성 평가

Program Development to Evaluate Permeability Tensor of Fractured Media Using Borehole Televiwer and BIPS Images and an Assessment of Feasibility of the Program on Field Sites

구 민 호 (Min Ho Koo)
이 동 우 (Dong Woo Lee)
원 경 식 (Kyeong Sik Won)

공주대학교 지질환경과학과
공주대학교 지질환경과학과
지오텍 컨설파트(주)

요약 / ABSTRACT

시추공 텔레뷰어 및 BIPS의 공내 검층자료를 이용하여 파쇄매질이 나타내는 투수율텐서를 수치적으로 계산하는 프로그램을 개발하였다. 본 프로그램은 검층자료의 분석을 통해 제공되는 불연속면의 방향과 두께 등의 기하학적인 정보를 입력자료로 사용하며, EPM 모델에 근거한 관계식을 적용하여 투수율텐서를 구성하는 9개 성분의 상대적인 값을 계산한다. 거제시 일운면에 위치하는 연구지역 시추공을 대상으로 수리간섭 시험을 실시하여 암반의 이방성을 추정하였으며 BIPS 검층자료로부터 프로그램에 의하여 산정된 이론값과 비교, 분석하여 프로그램의 현장 적용성을 평가하였다. 수리간섭시험을 통하여 추정한 연구지역 암반의 수평적인 이방성비와 주축방향은 2.8 및 N77°E인 반면, 프로그램을 적용하여 산정한 값은 3.0 및 N63°E로 나타났다. 두 결과가 불일치한 이유로는 수리간섭시험 해석결과의 신뢰성, EPM모델 및 3층법칙의 현장 적용성, 프로그램에서 가정한 단열의 크기-두께 관계식의 단순화 등의 문제점을 들 수 있다. 개발된 프로그램은 투수율텐서를 계산하는 초기모델로서 단열면의 거칠기, 충전물질의 충전정도 및 수리특성을 반영하는 수리인자의 적용을 통한 개선이 요구되며, 암반의 투수성이 양호하며 시추공 간의 거리가 가까운 연구지역에서 시추공간 수압시험을 실시할 때 3차원의 현장적용성 평가가 가능할 것으로 판단된다.

주요어 : 지하수 유동, 투수율텐서, 이방성, 시추공 텔레뷰어, BIPS

A computer program to numerically predict the permeability tensor of fractured rocks is developed using information on discontinuities which Borehole Televiwer and Borehole Image Processing System (BIPS) provide. It uses orientation and thickness of a large number of discontinuities as input data, and calculates relative values of the 9 elements consisting of the permeability tensor by the formulation based on the EPM model, which regards a fractured rock as a homogeneous, anisotropic porous medium. In order to assess feasibility of the program on field sites, the numerically calculated tensor was obtained using BIPS logs and compared to the results of pumping test conducted in the boreholes of the study area. The degree of horizontal anisotropy and the direction of maximum horizontal permeability are 2.8 and N77°E, respectively, determined from the pumping test data, while 3.0 and N63° E from the numerical analysis by the developed program. Disagreement between two analyses, especially for the principal direction of anisotropy, seems to be caused by problems in analyzing the pumping test data, in applicability of the EPM model and the cubic law, and in simplified relationship between the crack size and aperture. Aside from these problems, consideration of hydraulic parameters characterizing roughness of cracks and infilling materials seems to be required to improve feasibility of the proposed program. Three-dimensional assessment of its feasibility on field sites can be accomplished by conducting a series of cross-hole packer tests consisting of an injecting well and a monitoring well at close distance.

Key Words : groundwater flow, permeability tensor, anisotropy, Borehole Televiwer, BIPS

서 언

파쇄매질에서의 지하수 유동 이론은 그 중요성에도 불구하고 다공질매질과 관련된 이론에 비하여 아직도 미완성 단계이다. 이는 주로 파쇄계가 일반적으로 보여주는 매질의 복잡성, 불균질성, 이방성에 기인한다. 따라서 파쇄매질에서의 지하수 유동을 수학적으로 정량화하기 위해서는 모델의 단순화를 위한 적절한 가정들이 요구된다. 파쇄매질에서의 지하수 유동 모델링은 크게 3가지 접근 방법에 의하여 이루어진다.

첫째는 지하수 유동이 개개의 단열들을 따라서만 일어난다고 보는 불연속파쇄모델(discrete fracture model)로서, 각 단열계는 단순하고 일정한 모양을 가지며, 지하수 유동과 관련하여 서로 독립적이라고 가정한다. 그러나 이 모델은 밀도, 방향성, 연결성, 두께 등과 같은 단열계의 특성에 대한 정확한 정보가 미리 알려져야 하는 제한점을 가지고 있다. 즉, 지표면에서 관찰되는 2차원의 단열자취로부터 3차원의 자료를 유추해야 하므로 이 모델을 실제 현장에 적용하기가 거의 불가능하다. 또한

단열계의 특성에 대한 정확한 정보를 얻었다 하더라도, 수치 해석적 방법을 적용하려고 할 때, 방정식의 구성이나 node numbering 등이 쉽지 않아 이 모델은 본질적으로 사용하기에 비효율적인 방법이다. 따라서 불연속파쇄모델은 매우 단순한 파쇄매질에 대한 지하수 유동이나 오염물 거동의 해석적인 해(analytical solution)를 구하는데 주로 이용되었다(Streltsova and Adams, 1976; Grisak and Pickens, 1981; Tang et al., 1981).

파쇄매질에 대한 두번째 접근 방법은 Barenblatt et al. (1960)이 제시한 이중공극모델(double-porosity model)로서, 파쇄매질이 가상의 두 연속체(continuum)로 이루어졌다고 가정한다. 즉, 매질내의 균열들을 나타내는 고투수성의 연속체와 매질 대부분의 부피를 차지하는 기질을 나타내는 저투수성의 연속체가 서로 중복되면서(overlapping) 상호작용(interacting) 한다고 가정한다 (Moench, 1984). 또한 지하수의 유동은 균열을 통하여만 일어나며, 기질은 균열로 지하수를 공급하는 저장고 역할을 한다고 가정한다. 따라서 이중공극모델은 균열들의 모양이나 배치를 무시할 수 있다는 장점이 있으며,

가정된 두 개의 연속체에 근거하여 지하수의 유동을 쉽게 계산할 수 있다. Bibby(1981)와 Huyakorn et al.(1983)은 이중공극모형을 파쇄매질에서의 오염물들의 거동 문제를 해결하는데 적용하였다. 하지만 이 모델은 수학적 단순화의 장점에도 불구하고, 한 점에서 두 개의 압력 값이 존재하는 물리적으로 부적당한 가정을 내포하고 있다.

파쇄매질 모델링에 대한 세 번째 접근 방법은 균열의 분포 밀도가 높은 파쇄매질을 통계적으로 균질한 가상의 등가다공질매질(Equivalent Porous Medium: EPM)로 취급하는 단일연속체(single continuum) 모델이다(Pankow et al., 1986). 파쇄매질을 EPM으로 정의하면 다공질매질과 관련된 기존의 지하수 유동 모델을 적용할 수 있는 큰 장점을 가지기 때문에 파쇄매질에서의 광역적인 지하수 유동 분석에 많이 사용되고 있다. Long et al.(1982)은 충분한 수의 불연속면이 존재하면 파쇄매질은 다공질매질과 매우 비슷한 수리적 특성을 갖는다고 수치적 연구를 통하여 보고한 바 있다.

파쇄매질의 수리적 특성의 하나인 투수율(permeability)은 일반적으로 단층이나 절리의 발달 상태에 따라 3차원적인 이방성(anisotropy)을 나타낸다. 매질이 3차원적인 이방성을 나타내는 경우 투수율은 9개의 요소(element)로 구성된 이차(second-order)텐서로 나타내는데, 이 9개의 요소를 분석하면 이방성의 주방향(principal direction)과 각 방향에 대한 투수율의 상대적인 크기를 계산할 수 있다.

양수시험은 대수층의 수리적 특성에 대한 정보를 제공하는데, 대부분의 표준 방법들은 대수층의 등방성을 가정한다. 대수층의 이방성을 알아보기 위해서는 일반적으로 3개의 관측점 측정자료를 분석하여야 하는데(Kruseman and Ridder, 1990), 이 경우에도 2차원적인 이방성에 대한 정보만을 제공한다. 따라서 파쇄매질의 경우 양수시험은 지하수 유동 모델링에서 가장 중요한 입력변수인 투수율의 3차원적인 이방성을 추정하는데 제한점을 가지고 있다.

한편 EPM 모델에 근거하여 많은 균열을 포함하는 암반의 투수율텐서를 계산하는 이론식들이 Snow(1969)와 Oda(1985)에 의해 제시되었다. Snow(1969)는 단열의 크기가 매질을 통하여 무한

히 발달되어 있다고 가정하고, 배향(orientation), 간극(aperture), 단열간격(fracture spacing) 등의 단열이 나타내는 기하학적인 변수들을 고려하여 파쇄계의 투수율텐서를 계산하는 수학적 방법을 제시하였으며, Oda(1985)는 단열의 크기를 포함하는 모든 기하학적인 변수들의 확률밀도함수로부터 투수율텐서를 계산하는 이론식을 유도하였다. 하지만 이들의 방법은 최근까지도 활발하게 현장에 적용하지 못하고 이론적인 수준에 머물러 있는 실정이다. 그 원인으로서는 지하 내부에 발달한 암반의 단열에 대한 자세한 정보를 조사하는 방법의 기술적인 한계를 들 수 있다. 즉, 투수율텐서의 이론적인 값을 추정하기 위해서는 파쇄계가 나타내는 기하학적인 정보들을 모두 알아야 하는 현실적인 문제 때문에, 이들이 제시한 이론식들의 현장 적용성에 대한 평가가 보류되고 있다.

90년대부터 선진 여러 국가들에서는 절리계의 발달 상태를 시추공내에서 직접 탐지, 영상분석을 통해 절리계의 3차원적인 구조를 정량적으로 표현할 수 있는 기법들이 활발하게 연구, 개발되어 현장에 활용되고 있다. 이들 중 텔레뷰어(Borehole Televiewer)와 시추공영상촬영시스템(Borehole Image Processing System: BIPS)은 최근에 특히 각광을 받는 방법으로 국내에도 보급, 활용되고 있다. 일반적으로 현장에서 이루어지는 시추코아의 육안적 관찰에 의해 작성되는 주상도나 공내 물리검층이 보여주는 정보의 불확실성을 고려할 때 텔레뷰어나 BIPS는 지하의 지질구조(절리의 방향성, 발달상태)를 매우 정확하게 표현하며 이들 정보를 D/B화 할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이러한 점들은 특히 파쇄매질에서의 지하수의 유동이나 오염물들의 거동과 관련된 수리지질학적인 연구에 매우 유용한 정보를 제공하는 수단으로 이용될 수 있는 가능성을 시사하고 있다.

텔레뷰어를 이용하여 시추공으로부터 얻게되는 주요정보는 지하에 발달한 불연속면의 정확한 위치, 경사방향, 경사각 및 간극 등이며 이러한 정보들은 파쇄매질에서의 지하수를 대상으로 하는 모든 연구에 귀중한 기초자료로 사용될 수 있으리라 예상된다. 텔레뷰어는 불연속면에 대한 정확한 기하학적인 정보를 제시하나 암반의 구체적인 특성이나 절리 틈의 상태에 관한 정보는 인식할 수 없는 단

점을 갖는다.

미국에서는 90년대에 들어오면서 미국지질조사소(USGS)를 중심으로 텔리뷰어를 이용한 연구가 활발하게 진행 중에 있다. 미국지질조사소는 편마암 지역에서 관측한 시추공 텔리뷰어 자료를 해석하여 수리적으로 투수성이 양호한 단열들을 감별하였으며(Paillet et al., 1992), 방사성폐기물 부지 선정을 위한 평가의 도구로 사용하였고(Paillet, 1991), 텔리뷰어와 유향유속측정기를 사용하여 시추공들 사이의 단열의 연결성을 조사하였다(Paillet, 1993). 국내에서는 김중열 외(1995)에 의해 텔리뷰어가 소개된 후 단열망 모델링 연구(김경수 외, 1998), 유동성 단열 파악 연구(채병곤 외, 1998), 및 지반조사 매개변수 산출 연구(김중열 외, 1998) 등이 수행되었다.

한편 BIPS는 Digital CCD를 이용하여 시추공벽을 촬영하고 영상 자료를 비디오테이프에 직접 아날로그로 저장하거나 또는 공벽의 전개화상을 디지털의 그래픽파일로 저장한다는 점에서 텔리뷰어와 차이가 있다. 따라서 현장에서 시추공 영상촬영시 직접 육안으로 공벽의 화상을 관찰할 수 있는 장점을 가지며, 공벽의 전개화상이 디지털로 저장되므로 텔리뷰어에서와 같이 공내의 불연속면에 대한 정보를 파악할 수 있다. 또한 BIPS는 균열내의 충전물 유무 및 균열면의 풍화상태, 균열의 거칠음 정도(roughness) 및 두께를 정밀하게 분석할 수 있으며, 암종의 변화, 암맥의 관입상태, 그리고 암석이 가지는 일차구조와 구성광물의 입자크기까지 파악할 수 있다는 점에서 텔리뷰어보다 더 다양한 지하 정보를 제공한다.

특히 균열의 두께 및 균열내의 충전물 유무는 암반내에서의 지하수 유동량을 결정하는 가장 중요한 인자로 작용하므로 암반지하수 유동과 관련된 연구에 매우 유용한 정보를 제공하리라 예상된다. 하지만 이러한 장점에도 불구하고 BIPS의 영상 자료를 이용한 수리지질학적 연구는 국내에서 아직 보고된 바 없는데 이는 BIPS가 텔리뷰어에 비하여 최근에 개발되었기 때문으로 판단된다.

현재 국내에서 지하수환경영향조사나 온천자원 평가와 관련하여 실시되고 있는 양수시험 자료분석이나 지하수 유동 모델링에서는 위에서 언급한 현실적인 제한점 때문에 파쇄매질이 갖는 수리적인

특성들, 특히 투수율의 3차원적인 이방성을 고려하지 못하고 있다. 따라서 장기양수시 발생하는 지하수위의 변화나 오염물이 지하에 침투한 경우 그 이동 경로를 예측하려고 할 때, 등방성이나 2차원적인 이방성을 가정하는 기존의 해석 방법을 이용하는 경우에는 본질적으로 그 결과의 신뢰도가 떨어진다고 판단된다. 본 연구는 텔리뷰어나 BIPS의 영상 자료를 이용하여 파쇄매질의 기하학적인 정보를 알아내고, 이로부터 3차원의 투수율텐서를 계산하는 프로그램을 개발하여 지하수 유동이나 오염물 이동 모델링에 필요한 정확한 입력자료를 제공, 그 결과의 신뢰도를 높이고자 하는데 그 목적이 있다.

이러한 연구 목적을 달성하기 위하여 다음과 같은 연구를 수행하였다: (1) 양수정과 관측정이 설치된 연구지역을 선정하여 지표지질조사, 텔리뷰어 및 BIPS 시추공 영상촬영을 통하여 연구지역의 파쇄매질이 갖는 불연속면에 대한 정보를 획득하였다. (2) 유향유속측정기를 이용하여 시추공내에서 지하수의 유동방향을 측정하였다. (3) 현장 양수시험을 통해 연구지역의 파쇄매질이 나타내는 투수량계수의 이방성을 분석하였다. (4) 절리 및 단층이 발달한 파쇄매질이 갖는 투수율텐서를 계산하는 Fortran 프로그램을 개발하였다. (5) 개발된 프로그램을 이용하여 연구지역의 투수율텐서를 계산, 파쇄매질이 나타내는 투수율 이방성의 3차원적인 방향과 상대적인 크기를 산정하였다. (6) 프로그램에 의해 산정된 투수율텐서의 이론값과 현장 양수시험을 통해 추정된 투수량계수의 이방성을 비교 분석하여 개발된 프로그램의 현장 적용성을 평가하였다.

연구지역의 지질 및 지질구조

연구지역은 한반도 동남단에 위치한 경상남도 거제시 일운면 지세포리 일대이다. 연구지역에는 한국석유개발공사의 U-2 원유비축시설이 위치하고 있으며, 본 연구는 U-2의 제 3차기지를 건설하기 위하여 한국석유개발공사가 최근에 시추한 2개의 취수정과 8개의 관측정을 이용하여 수행되었다.

지질개요

연구지역 주변의 지질은 백악기 퇴적암류와 이

를 관입한 안산암류 및 불국사 화강암류가 주를 이룬다(Fig. 1). 불국사 화강암류는 섬록암, 화강섬록암, 흑운모화강암 등으로 산출되며, 대체로 저반상 산출 상태를 보여주고 있다. 퇴적암층은 성포리층과 장목리층으로 구분되며, 화석이 발견되지 않아 확실한 지질시대를 알 수 없으나 신리층군의 중부 내지 상부에 대비되는 것으로 보인다. 화산암류는 안산암질각력암과 안산암질암류로 구성되며 반암류에 관입을 받았다. 맥암류는 석영반암, 반화강암, 장석반암 등의 산성암맥과 중성 내지 염기성암맥으로 구분된다(원종관 외, 1980).

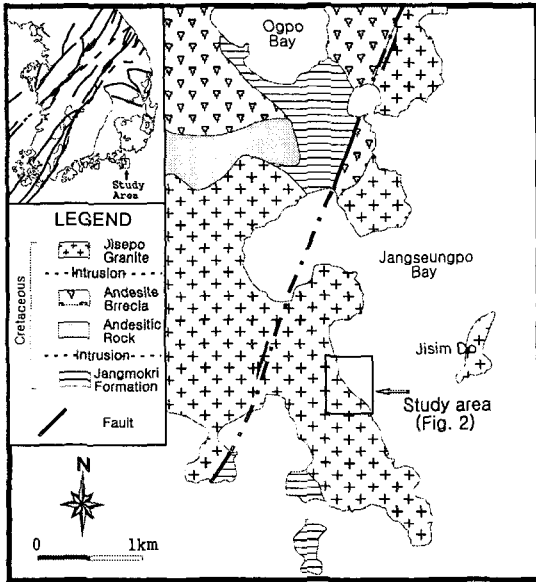


Fig. 1. Geologic map around the study area.

연구지역은 불국사 화강암류에 속하는 지세포화강암이 대부분을 차지한다. 지세포화강암은 장목리층을 비롯하여 성포리층, 안산암질 각력암, 안산암질암대를 관입하였으며, 장승포 부근에서는 장승포 단층에 의하여 안산암질각력암과 단층접촉을 하고 있다. 지세포화강암은 대체로 흑운모화강암과 각섬석-흑운모화강암으로 되어 있으며, 우백질 화강암과 애플라이트가 접촉대에서 암맥상으로 많이 분포한다.

장목리층은 거제도의 동쪽 해안을 따라 넓게 분포하며 남쪽으로 갈수록 분포 면적이 작아진다. 장

목리층은 연구지역 남서쪽에 위치하는 와현리 남부에 소규모로 분포하며, 와현리 서쪽의 구조라리 지역에서는 지세포화강암과 단층 접촉을 하고 있다.

맥암류는 백악기말에 속하며 연구지역의 모든 암층을 암맥상 또는 암상상으로 관입하였다. 중성 및 염기성 암맥은 비현정질로서 드물게 장석의 반정을 함유하여 반상조직을 나타내는 경우도 있다. 본 암맥의 두께는 대체로 3m 내외이며 7m에 달하는 것도 있다. 산성암맥은 석영반암, 규장반암 또는 규장암으로 산출되며, 거제 지역에 분포하는 모든 암층들을 관입하고 있다. 석영반암은 산성암맥의 대부분을 차지하며 흔히 유백색을 띠나 곳에 따라 담회백색 또는 담홍백색을 띠기도 한다. 규장반암은 석영반암과 점이적인 관계를 가지며 산출된다.

지질구조

연구지역 주변의 퇴적암은 남서부에 소규모로 나타나는 장목리층 뿐으로 이 층을 제외한 연구지역은 모두 지세포화강암이 점하고 있어 지질구조는 비교적 단순하다. 장목리층의 지질구조는 대체로 N40°W/15°NE의 주향과 경사를 나타내며, 구조라리 남부에서 지세포 화강암과 장승포 단층에 의하여 단층접촉하고 있다. 장승포 단층은 장승포읍 능포리에서 장승포만을 가로질러 발달하며, 일운면 지세포리를 거쳐 동부면 갈굴리까지 이르는 거제지역에서 가장 큰 단층이다. 이 단층의 주향은 N20°E 내외로 경상분지의 남동부에 발달하는 언양단층, 양산단층, 동래단층등과 동일한 단층계에 속하는 것으로 보인다. 산성 및 중성 내지 염기성 암맥의 관입이 단층이나 파쇄대의 약대를 따라서 현저하게 나타나며, 조사지역 내에 분포하는 암맥도 절리의 발달과 대체로 일치하는 경향을 보인다.

연구지역에 발달한 절리 및 단층 등과 같은 불연속면의 분포상태를 알아보기 위하여 지표지질조사를 실시하였다. 원유비축기지 전반에 걸쳐서 절리계의 분포상태에 대한 정밀 조사가 이루어졌으며, 단층이나 파쇄대를 따라 관입한 암맥류에 대한 조사도 병행되었다. Fig. 2는 연구지역 일대의 지형을 나타내며, 지질구조에 대한 조사가 이루어진 노두의 위치를 A-D로 표시하였다. 점선의 구조물은 지하에 설치된 U-2 원유비축기지를 나타내는데, A 지역 우측 및 D지역 좌측의 두 기지는 현재 운용

Table 1. Discontinuous geologic structures measured in the study area.

| KIND | Joint-1 | Joint-2 | Joint-3 | Fault | Dyke | Total |
|--------|---------|---------|---------|-------|------|-------|
| Number | 305 | 36 | 12 | 1 | 19 | 373 |

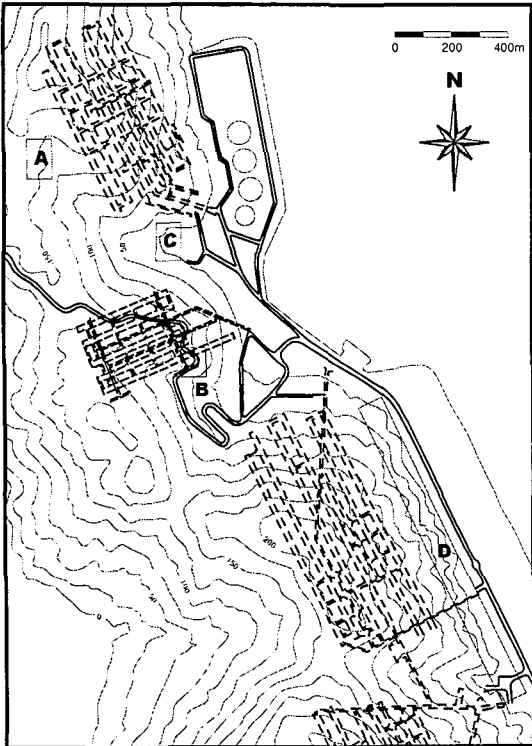


Fig. 2. Map showing the study area and outcrop sites for joint measurements.

중이며, B지역에 인접한 중앙의 기지는 U-2의 3차 기지로 건설될 예정이다. D지역은 노두 발달상태가 매우 양호한 해안 지역으로 대부분의 불연속면 지질구조의 조사는 D지역을 따라서 수행되었다.

Table 1은 A-D 지역에서 측정된 불연속 지질구조의 수를 나타낸다. 불연속면은 크게 단층, 절리 및 암맥의 3종류로 구분하였으며, 절리는 그 중요도에 따라 1, 2, 3의 세 종류로 나누었다. 절리 1은 그 지역을 대표할 수 있는 주절리이며 노두 전체를 가로지르는 큰 절리를, 절리 2는 주요 절리이지만 절리 1에 비해 약한 발달상태를 보이는 절리를, 그리고 절리 3은 절리 1과 절리 2에 비해 발달 상태와 방향성이 미약한 절리를 나타낸다. 각 절리는 모두 체계적 절리(systematic joint)이며, 비체계적 절리(non-systematic joint)나 교차절리(cross joint)는 조사 대상에서 제외하였다.

Fig. 3은 연구지역 일대의 불연속면의 발달방향을 나타내는 입체투영망도 및 Rose diagram을 도시한 것으로 절리, 단층 및 암맥을 구분하지 않고 모든 측정 자료를 이용하여 작성하였다. 그림에 나타난 바와 같이 조사 지역에서 불연속면의 발달은 그 빈도에 있어서 N10°~20°E방향이 가장 우세하며

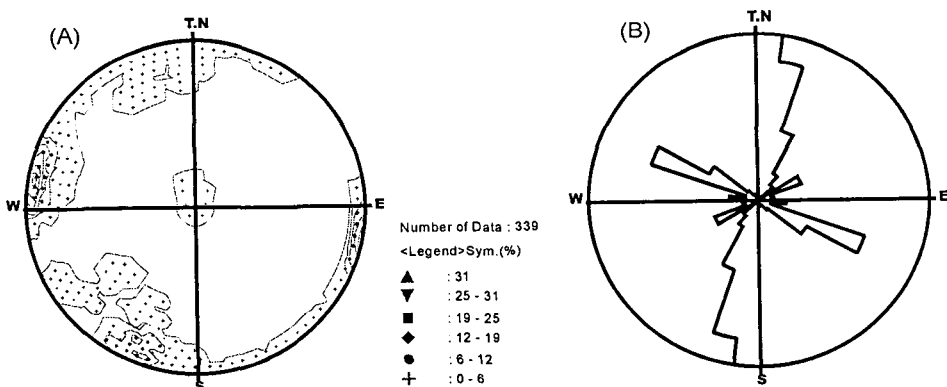


Fig. 3. Diagrams showing orientation of joints measured around the study area : (A) Stereographic diagram (lower hemisphere) and (B) Rose diagram.

N70°~80°W방향이 두 번째로 크게 나타난다. 경사각의 경우 대부분 80°~90°의 고각을 보인다.

시추공내 지질구조 조사

연구지역 지하암반에 발달한 불연속 지질구조의 특성을 알아보기 위하여 연구지역에 시추된 2개의 양수정과 8개의 관측정을 대상으로 BIPS 시추공 영상촬영을 실시하였다. 텔리뷰어 공내 검층은 본 연구가 수행되기 전 이미 벽산엔지니어링(주)에 의해 동일한 시추공들을 대상으로 실시되었으며, BIPS 검층자료와의 비교분석을 위해 본 연구에 이용되었다.

시추공들의 배치는 Fig. 4와 같으며, 본 지역은 Fig. 2의 중앙에 위치하는 3차 U-2기지 주변 지역을 나타낸다. 그림에서 BW-1과 BW-2는 양수정이며, 나머지 8개의 관측정(BO-1~6, TB-1,2)이 양수정 주변에 방사상으로 분포한다. 양수정은 수직으로 시추되었으며, 관측정은 70°의 경사각으로 시추되었다. 그림에서 관측정에 표시된 화살표는 경사공의 시추방향을 나타내는데 화살표의 시작점은 지

표면 공상단의 위치를, 끝점은 공 하단의 위치를 나타낸다. 지표지질조사에서 조사된 바와 같이 본 지역에서는 대부분의 단열이 거의 수직의 고경사를 보이는데 이러한 단열들의 공내 접촉빈도를 높이기 위하여 경사공 시추를 수행하였다.

채병곤 등(1998)은 코아 로깅과 텔리뷰어 검층자료의 비교를 통하여 텔리뷰어 검층의 여러 문제점을 제시하였다. 첫째, 단한 단열에 대한 텔리뷰어의 감별 능력 부족으로 코아 로깅 기록에서는 분명한 불연속면으로 기재된 절리면을 검층자료에서는 인지하지 못하거나 또는 그 반대의 경우가 나타난다. 둘째, 암석강도가 약한 부분에 대하여 단열의 발달 정도를 과장하는 경향이 나타난다. 결과적으로 텔리뷰어는 단열면의 방향결정에서는 매우 우수한 능력을 가지나 단열면의 감별 능력은 매우 떨어지는 것으로 보고되었다.

따라서 본 연구에서는 단열의 특성을 파악하기 위하여 주로 BIPS 검층에 의한 영상 자료를 이용하였으며 각 공에 나타나는 단열의 경사방향, 경사각, 단열두께, 및 충전유무 등을 분석하였다. 분석 기록된 단열은 단열두께 및 충전유무에 의해 투수성단열(conductive or open joints)과 비투수성단열

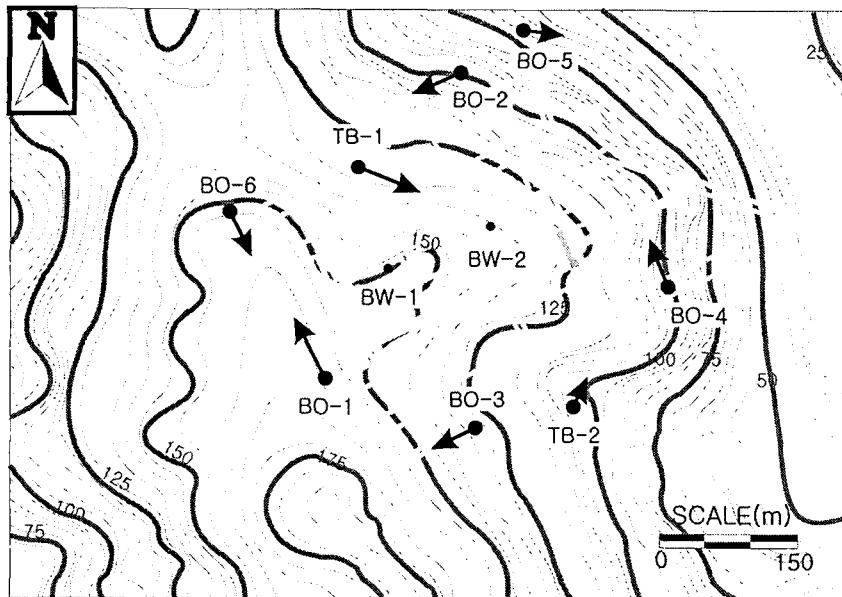


Fig. 4. Map showing boreholes in the study area ; 2 pumping wells (BW-1, 2) and 8 observation wells (BO-1~6 and TB-1, 2).

Fig. 2. Orientation of joints and fractures in the boreholes analyzed from the BIPS image logs.

| 구분 | 개 수 | 주 방 향 | 부 방 향 | 측정심도/시추심도 | |
|--------|--------|-----------|-----------------------|----------------------|-----------------|
| BO-1 | all | 208 | N30E/75SE | N75E/V | 176.7m / 177.0m |
| | open | 101 | N30E/75SE | N65E/80SE, N75W/V | |
| | closed | 107 | N15E/70SE | N70E/V | |
| BO-3 | all | 199 | N10W/80NE, N85W/256NE | N35E/70SE, N60E/75SE | 82.5 / 149.0 |
| | open | 34 | NS/70E~80W, N60E/75SE | N80E/25NW | |
| | closed | 165 | N10W/80NE, M80W/20NE | N30E/70SE | |
| BO-5 | all | 177 | N15W/V | - | 115.2 / 122.0 |
| | open | 15 | N20W/V, N80W/45NE | - | |
| | closed | 162 | N15W/V | - | |
| BO-6 | all | 25 | N40~60E/60~85NW | N10E/85NW | 30.8 / 160.0 |
| | open | 6 | N40E/V | - | |
| | closed | 19 | N60E/60NW | N10E/85NW | |
| BW-1 | all | 98 | N15E/20SE, N35W/75NE | N65E/40NW, NS/75S | 148.1 / 149.0 |
| | open | 37 | N40W/75NE | NS/75S | |
| | closed | 61 | N15E/20SE, N70E/40NW | - | |
| BW-2 | all | 111 | N55W/40NE, N80E/35NW | N80W/70SW | 142.2 / 144.0 |
| | open | 6 | N80E/80SE | - | |
| | closed | 105 | N55W/40NE, N80E/35NW | N80W/70SW | |
| TB-1 | all | 226 | N5W/V | N60E/70NW, N70W/20NE | 167.3 / 197.0 |
| | open | 47 | N5W/80SW~V | N35E/30NW, N65W/20NE | |
| | closed | 179 | N5W/V | N55E/70NW | |
| TB-2 | all | 164 | N50E/80SE, N75W/V | N55W/85SW | 93.1 / 96.0 |
| | open | 66 | N50E/80SE, N75W/V | - | |
| | closed | 98 | N75E/45NW | N55W/80SW | |
| All | all | 1208 | N10W/V, N80W/20NE | N30E/75SE, N75E/40NE | |
| | open | 312 | N30E/75SE | N60W/20NE, N80W/V | |
| | closed | 896 | N10W/V | EW/20N | |
| 지표지질조사 | 340 | N10-20E/V | N70-80W/V | | |

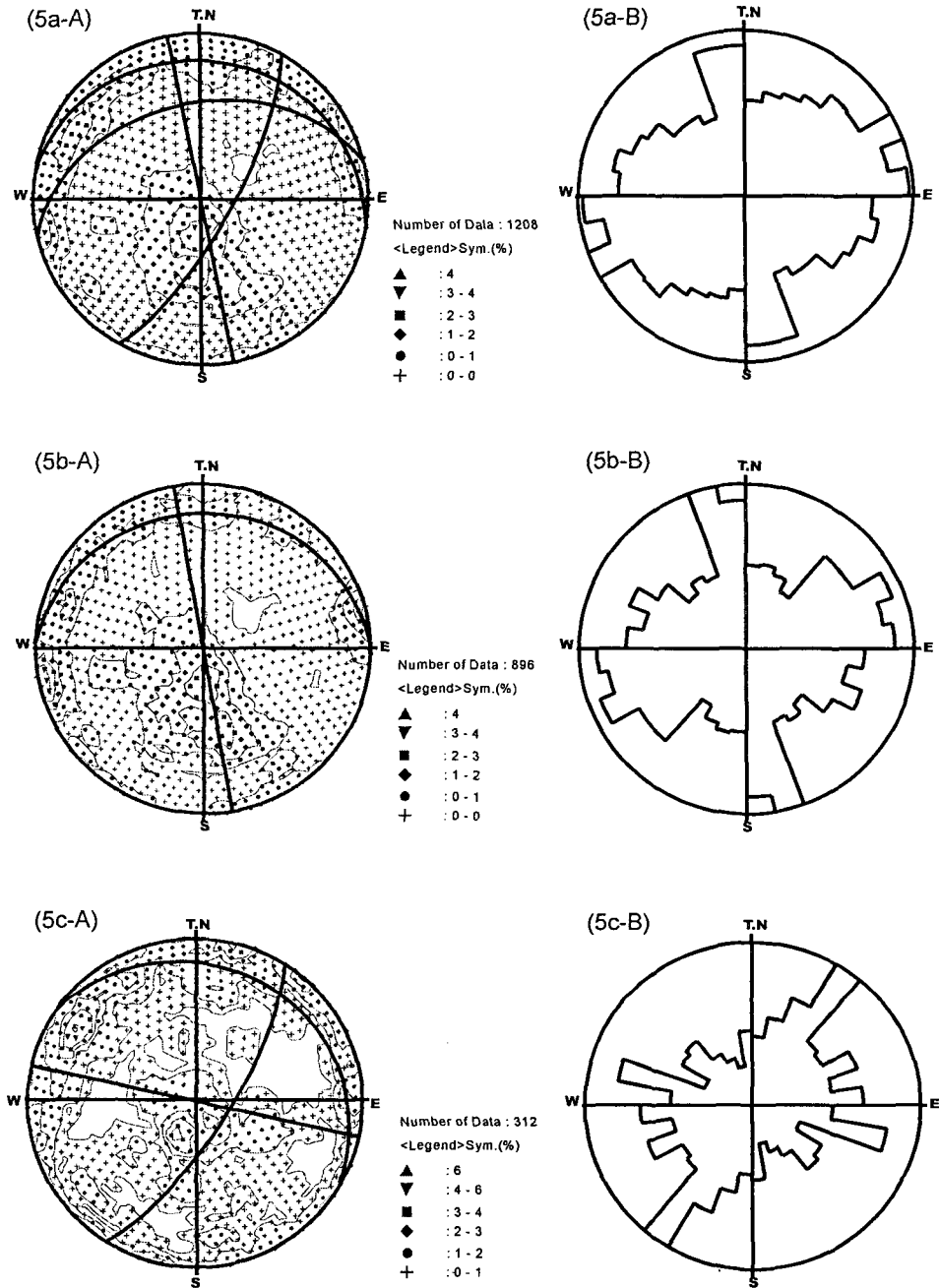


Fig. 5. Diagrams showing orientation of joints measured in the boreholes using BIPS : (A) Stereographic diagram (lower hemisphere) and (B) Rose diagram (Fig. 5a : all joints, 5b : closed joints, and 5c : open joints).

(impermeable or closed joints)로 구분하였다. 구분 기준은 임의적이기는 하지만 단열두께의 경우 1mm를 구분값으로 취하였으며, 충전유무는 화상에서 육안 관찰에 의하여 결정하였다. 단, BIPS의 경우에도 충전정도의 파악은 쉽지 않았으며 Image Analyzer와 같은 소프트웨어를 활용하면 정량적인 평가도 가능할 것으로 판단되었다.

Table 2는 BO-2와 BO-4를 제외한 8개의 공에서 실시한 BIPS 검층자료의 해석 결과를 나타낸다. 먼저 BIPS 영상으로부터 단열들을 감별하였으며, 위에서 언급한 기준에 근거하여 모든 단열들을 투수성단열 및 비투수성단열군으로 분류하였다. 마지막으로, 분류된 각 단열군을 입체투영망도에 도시하여 단열의 주방향과 부방향을 결정하였다. 8개의 공에서 인지된 단열의 총 수는 1208개이며 이 중 약 75%는 비투수성단열군으로, 나머지 25%는 투수성단열군으로 분류되었다. 단열의 주방향과 부방향은 공 별로 약간의 차이가 있으나 전체적으로 NNE-NE 및 NW-NWW의 방향성이 뚜렷하게 나타남을 볼 수 있다. Fig. 5은 지하 불연속면의 발달 방향을 나타내는 입체투영망도 및 Rose diagram을 도시한 것으로 Fig. 5a는 모든 단열자료, Fig. 5b는 비투수성단열군, Fig. 5c는 투수성단열군에 대하여 작성한 것을 나타낸다. 투수성단열군의 Rose diagram은 Fig. 3의 지표자료와 유사하게 나타나는데 이는 연구 지역에 광범위하게 일정한 방향성을 갖는 단열군이 규칙적으로 잘 발달되어 있음을 시사한다.

유향유속측정

자연 상태에서 지하수는 매우 느리게 이동하므로 지하수의 이동방향과 유속을 현장에서 직접 측정하는 것은 매우 어려운 일로 알려졌다. 유향유속 측정기는 시추공내에 투입하여 공내 지하수의 이동방향과 유속을 측정하는 기기로 열원(heat pulse)이 지하수의 이동보다 빠르게 매질을 통하여 전달되는 원리를 이용하여 개발되었다. 즉 인위적으로 공내 지하수에 열원을 공급하고 열감지 센서를 이용하여 지하수의 온도변화를 측정하여 온도장의 변화로부터 지하수의 이동방향과 유속을 계산한다.

유향유속측정기를 이용한 수리지질학적인 연구는 90년대에 들면서 활발하게 진행되고 있다. 미국 지질조사소의 Paillet et. al.(1990)은 암반대수층에서 양수시험동안 유향유속을 측정하여 투수계수의 수직분포를 파악하였다. Xiang(1995)은 3층구조를 갖는 대수층에서 유향유속측정기의 적용성을 수치적으로 분석하였다. Molz et. al.(1994)은 측정기의 이용 사례를 종합, 분석하였으며 열원방식의 문제점을 보완한 전자기(electromagnetic, EM)방식의 측정기를 소개하였다. Paillet(1998)은 유향유속 측정자료를 분석하여 공 주변에서의 지하수 유동을 수치적으로 모델링하는 기법을 소개하였다.

BW-1 및 6개의 관측정(BO-1,3,5,6, TB-1,2)에서 수직 및 수평의 지하수 유향 및 유속을 측정하였다. 측정장비는 미국 KVA사의 Groundwater Flowmeter Geoflo Model-200으로 열원을 이용하는 thermal-pulse flowmeter이다. 측정방법은 다음과 같다. 먼저 Fussy Packer가 장착된 Probe를 시추공내에 삽입하고 온도가 안정되도록 약 10분 기다린 후, 30초간 열원을 전달하고 Probe 주변에 설치된 열감지센서를 이용하여 지하수의 흐름을 측정하였다. 본 장비의 경우 3차원의 지하수 유동을 알아보기 위해서는 수직성분 및 수평성분을 각각 측정해야 하는데 수직 측정의 경우 유향은 상-하(Up-Down)로 기록되며, 수평 측정의 경우 360도의 방위각으로 측정된다.

Fig. 6은 7개의 공에서 측정한 수직유속의 심도에 따른 변화를 나타낸 것이다. 그림과 같이 모든 측정점에서 Down방향의 흐름이 측정되었으며, 유속은 전체적으로 14-17 ft/day의 높은 값을 보이며 공별 또는 심도별 변화가 크지 않은 것으로 나타났다. 유속이 크게 측정된 이유는 크게 두 가지 요인에 의한 것으로 추정된다. 첫째는 기기보정(calibration)을 들 수 있는데 본 장비는 KVA사에 의해 100 ft/day의 투수계수를 갖는 모래층에 설치된 2-inch 공경의 스크린을 이용하여 미리 보정되었다. 따라서 공의 크기와 매질특성 등의 측정조건이 매우 다른 경우 동일한 보정변수들을 적용하는 경우 측정값이 크게 달라질 가능성이 높다. 하지만 이 경우에도 심도별 유속의 상대적인 변화는 신뢰할 수 있으리라 판단된다. 유속이 크게 측정된 두 번째 요인으로는 측정 전달에 내린 짐중강우를 들

시추공 텔리뷰어 및 BIPS의 영상자료 해석을 통한 파쇄매질의 투수율테서 계산 프로그램 개발 및 현장 적용성 평가

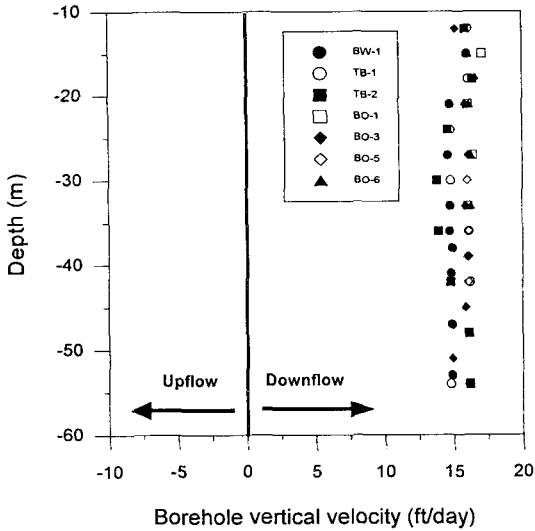


Fig. 6. Vertical distribution of the vertical component of groundwater velocity in the boreholes measured by the thermal-pulse flowmeter.

수 있다. 집중강우 후 지표면 함양을 통하여 암반 상부에 위치하는 미고결층의 수두가 높아지면서 암반대수층으로의 지하수 유입이 늘어나 공내 지하수의 유속을 증가시켰을 것으로 추정된다.

Fig. 7은 7개의 공에서 측정된 수평유속의 심도에 따른 변화를 나타낸 것이다. 화살표의 방향은 수평유속의 방향, 즉 방위각을 나타내며 화살표의 크기는 속도를 나타낸다. 수직유속과 달리 수평유속은 공에 따라 0.7-6.0 ft/day의 큰 변화를 보이며, 유향은 전체적으로 SE-E방향이 뚜렷하게 나타난다. 유향 측정값은 측정기의 기준점을 자북방향에 일치시키는 과정에서 $\pm 5^\circ$ 정도의 오차가 발생할 수 있으며, 특히 경사공으로 시추된 관측정들의 경우 이러한 오차가 더 커질 수 있다. 따라서 심도에 따라 유동방향이 약간씩 달라지는 것은 측정오차에 의해 발생했을 가능성이 큰 것으로 추정된다. 전체적으로 보았을 때 각 공에서의 심도에 따른 수평유속의 변화는 거의 나타나지 않았으나, 관측정 TB-2의 경우 심도가 깊어질수록 수평유속이 점차 감소하는 경향을 보인다.

각 공의 여러 심도에서의 측정값들을 평균하여 대표값을 구하고 평면도에 표시하면 Fig. 8과 같다.

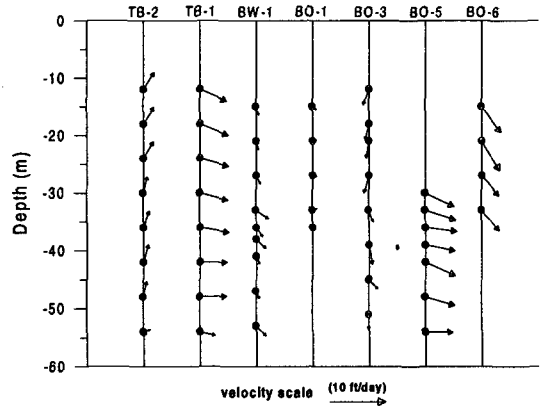


Fig. 7. Vertical distribution of the horizontal component of groundwater velocity in the boreholes measured by the thermal-pulse flowmeter.

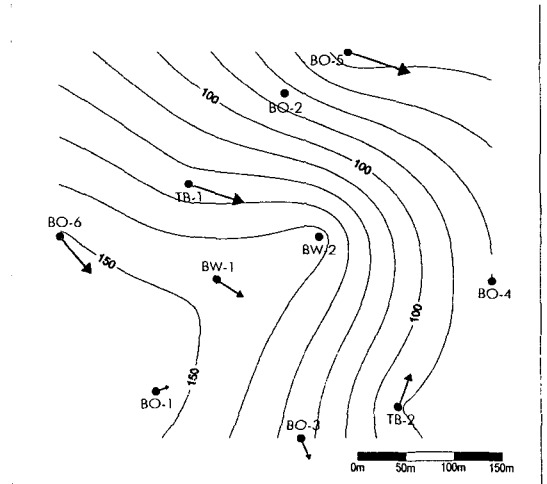


Fig. 8. Contour map of groundwater level and the horizontal direction of naturally occurring flow in the boreholes measured by the thermal-pulse flowmeter.

그림에 도시한 등수위선은 유향유속 측정 전에 각 공에서 측정된 자연수위값을 이용하여 작성하였다. 등수위선도는 Fig. 4에 도시한 등고선도와 모양이 매우 유사한데 이는 지하수면의 분포는 지표의 기복을 반영하는 산지에서의 일반적인 특성을 잘 보여준다. 그림에 도시한 지하수의 수평유동방향을

보면 등수위선에 수직한 이론적인 방향과는 약간의 차이가 있으나 전체적으로 연구지역의 동측에 위치한 저지대의 해안 방향을 향하고 있어 유향 측정의 신뢰성을 보여준다. 이론적인 방향과 차이를 보이는 요인으로는 측정오차 및 등수위선도의 작성시 발생하는 수위곡선의 왜곡을 들 수 있으며, 뒤에서 언급할 대수층이 갖는 투수성의 수평적인 이방성도 중요한 요인으로 작용할 수 있으리라 추측된다.

수리간섭시험

연구지역의 수리지질학적 특성을 조사하기 위하여 양수정인 BW-2에서 단계양수시험, 수리간섭시험, 및 수위회복시험을 실시하였다. 수리간섭시험 개시 이전에 단계양수시험을 실시하여 적정채수량을 산정하였으며, 시험 종료후 지하수위를 충분히 회복시킨 후 수리간섭시험 및 회복시험을 실시하였다. 본 시험을 실시하기 위하여 1마력의 수중모터 펌프와 Telog 자동수위측정기를 양수공내 적정심도에 설치하였다. 채수율을 측정하기 위하여 유량계를 설치하였으며 채수율을 조절할 수 있도록 Gate Valve 및 By Pass를 설치하였다. 수리간섭시험 개시 전에 8개 관측공에 Diver 자동수위기록기를 설치하여 수위강하를 측정하였다. 수리간섭시험은 11740분 동안 실시하였으며, 수리간섭시험 종료 후 공내에 설치한 수중모터펌프의 가동을 중지시키고 4일 정도 회복수위를 측정하였다.

Table 3은 BW-2에서 실시한 단계양수시험의 양수량 및 수위강하의 변화를 나타낸 것이다. 각 단계별 양수시간은 2시간이며 1-4단계의 경우 5분이

내에 안정수위에 도달하여 누계 수위강하량은 안정 수위를 나타낸다. 마지막 5단계의 경우 수위강하가 지속적으로 발생하여 적정양수량의 한계를 넘어선 것으로 판단된다. 따라서 장기수리간섭시험시 취할 수 있는 최대양수량은 $60 m^3/day$ 이하인 것으로 분석되었다.

연구지역 암반이 나타내는 수리지질학적 투수성의 이방성을 분석하기 위하여 BW-2 양수정과 주변에 설치된 8개의 관측정을 이용하여 수리간섭시험을 실시하였다. 본 시험의 양수량은 시험이 장기간 지속될 것을 고려하여 단계양수시험의 2단계 값인 $26 m^3/day$ 로 하였다. 공에 설치된 Gate Valve와 By Pass를 이용하여 일정한 양수율을 유지하도록 조절하여 양수시험시 일반적으로 발생하는 수위강하에 따른 취수량 감소 문제를 해결하였다. BW-2에서의 지하수 채수에 의해 영향을 받은 관측공은 총 4개로 BO-1, BO-3, BO-5, 및 TB-2에서 수위강하가 기록되었다. Fig. 9는 양수정 BW-2에서 측정한 수위강하 곡선을 나타낸 것으로 피압 또는 누수피압대수층에서 일반적으로 나타나는 수위강하곡선과 큰 차이를 보인다.

Fig. 10은 Fig. 9의 회복시험 자료를 이용하여 작성한 그래프이며, 그림에서 t/t' 는 양수개시 후 경과시간(t)과 양수종료 후 경과시간(t')의 비를 나타낸다. 이상적인 피압대수층의 경우 그림과 같이 도시한 그래프를 이용하면 곡선의 앞부분에 나타나는 직선구간의 기울기로부터 대수층의 투수량계수를 산정할 수 있다. 하지만 Fig. 10의 경우 곡선의 중간부분에서 기울기의 불연속점이 발생하여 서로 다른 기울기를 갖는 두 직선이 나타난다. 이는 심

Table 3. Results of step-drawdown test for BW-2.

| 구 분 | 양수량 | 누계 수위강하량 |
|------|----------------|----------|
| 1 단계 | 16.0 m^3/day | 1.2 m |
| 2 단계 | 26.1 m^3/day | 2.1 m |
| 3 단계 | 38.4 m^3/day | 3.9 m |
| 4 단계 | 50.8 m^3/day | 6.8 m |
| 5 단계 | 60.1 m^3/day | 37.2 m |

도에 따라 수리특성이 매우 다른 2개의 대수층이 존재함을 알려준다. 불연속점의 발생심도를 고려할 때 상부층은 지표면 부근의 충전층 및 풍화대에 해당하는 저유량이 작은 자유면대수층이며, 하부층은 피압의 암반대수층일 것으로 추정된다. 따라서 BW-2 시추 후 상부구간에 실시한 그라우팅의 상태가 불량하거나 심도가 충분하게 고려되지 않았던 것으로 추측된다.

이러한 추정에 근거하여 Fig. 9를 보면 양수시험 초기 수위강하가 완만하게 발생하는 구간은 주로 상부대수층이 갖는 투수성 및 저유성을 반영하는 것으로 해석된다. 공 주변에서 상부층의 저유량에 소실되면 이후 수위강하가 급격하게 일어나고 하부 암반층의 수리특성을 반영하는 안정수위 심도(약 70m)까지 떨어지게 된다. 회복시험시에는 반대로 시험 초기에는 하부암반층의 수리특성을 반영하고 수위가 상부층의 하단까지 회복하면 기울기의 불연속점이 발생하면서 이후에는 상부층의 수리특성에 의한 회복곡선을 나타내게 된다. Fig. 10에 도시한 직선의 기울기로부터 다음 식을 이용하여 투수량계수(T)를 구하였다.

$$T = \frac{2.3Q}{4\pi \Delta s} \quad (1)$$

식에서 Q는 양수율이며, Δs 는 직선의 기울기를 나타낸다. 위 식을 이용하여 구한 투수량계수는 상부층의 경우 $1.4 \text{ m}^2/\text{day}$, 하부층의 경우 $0.043 \text{ m}^2/\text{day}$ 이다. 하지만 위 식은 수평의 피압대수층일 경우 적용이 가능하므로 계산값은 본 연구지역 대수층이 나타내는 투수량계수의 어렵값 정도로 해석되어야 할 것이다.

수리지질학적 이방성의 주방향과 이방성비는 각 관측점에서 수위강하가 시작되는 수위 반응시간과 양수정에서 관측점까지의 거리를 이용하여 구하였다(한정상과 한규상, 1992). 이방성 해석에 사용된 자료는 Table 4와 같으며 이 자료를 이용하여 초기 수위반응시간이 가장 짧은 BO-1을 기준으로 영향 반경을 다음과 같이 구하였다:

BO-1 관측정 ($d = 234\text{m}$, $t = 4840\text{min}$ 기준)

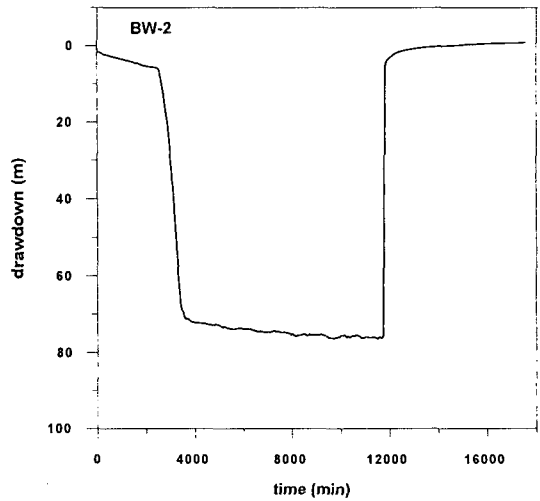


Fig. 9. Drawdown plots of the pumping test for the pumping well.

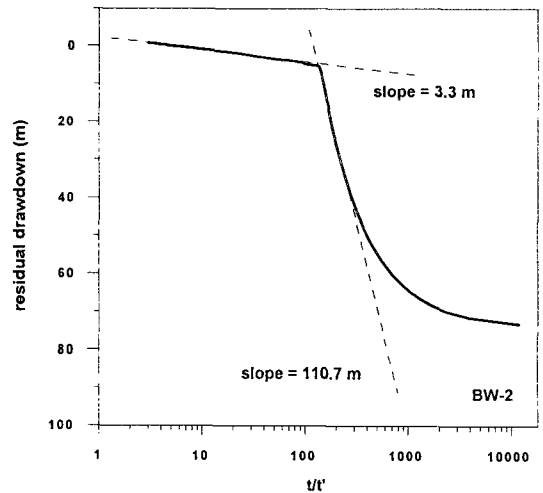


Fig. 10. Residual drawdown plot of the recovery test for the pumping well; t is the time since the start of pumping, and t' is the time since the cessation of pumping.

$$d \text{ (BO-3)} = 211 \cdot \sqrt{\frac{4840}{6880}} = 177\text{m}$$

$$d \text{ (BO-5)} = 195 \cdot \sqrt{\frac{4840}{4900}} = 194\text{m}$$

$$d \text{ (TB-2)} = 195 \cdot \sqrt{\frac{4840}{7300}} = 159\text{m}$$

Table 4. Data used to evaluate hydraulic conductivity anisotropy.

| 관측공 | 거리 (m) | 초기수위반응시간 (min) |
|--------|--------|----------------|
| BO - 1 | 234 | 4,840 |
| BO - 3 | 211 | 6,880 |
| BO - 5 | 195 | 4,900 |
| TB - 1 | 195 | 7,300 |

Fig. 11은 위에서 계산된 영향반경을 나타낸다. 따라서 이방성투수량계수비 ($T_d/T_b = a^2/b^2$)는 2.8이며 이방성의 주축(principal axis)방향은 N77E로 분석되었다.

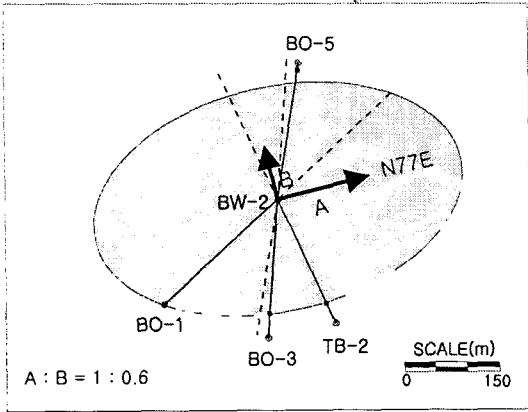


Fig. 11. Principal axes of anisotropy analyzed from the pumping test data.

파쇄매질의 투수율텐서 계산 프로그램

이론적 배경

텔리뷰어나 BIPS를 이용하여 시추공을 통과하는 절리나 단층들의 기하학적인 정보를 알아내면, 이로부터 EPM모델을 이용하여 파쇄매질이 나타내는 3차원의 투수율텐서를 계산할 수 있다(Oda, 1985). 먼저 EPM모델에 근거하여 파쇄매질을 균질한 이방성의 다공질매질이라 가정하면 Darcy의 법칙에 의해 비유량(specific discharge)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_i = -\frac{g}{\nu} \sum_j k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} = -\frac{g}{\nu} \sum_j k_{ij} J_j \quad (2)$$

여기서 g 는 중력가속도, ν 는 동점성(kinetic viscosity), J_j 는 수두경사, 그리고 k_{ij} 는 투수율텐서를 나타낸다. 파쇄매질이 나타내는 투수율텐서를 계산하기 위해 먼저 m 개의 단열이 부피 V 의 입방체(매질)에 무작위로(random) 분포하며 지하수가 단열만을 통하여 흐른다고 가정하면 비유량은

$$v_i = \frac{1}{V} \int_{V^{(e)}} v_i^{(e)} dV^{(e)} \quad (3)$$

이며 여기서 $v_i^{(e)}$ 는 각 단열에서의 유속, $V^{(e)}$ 는 각 단열의 부피를 나타낸다.

지름 r , 두께 t , 방향 \mathbf{n} (단열면에 수직인 단위벡터)을 갖는 단열 (\mathbf{n}, r, t) 의 확률밀도함수를 $E(\mathbf{n}, r, t)$ 라 표현하면 $(+\mathbf{n}, r, t)$ 와 $(-\mathbf{n}, r, t)$ 는 동일한 단열을 나타내므로 다음 식을 만족한다.

$$\begin{aligned} \int_0^\infty \int_0^\infty \int_{\Omega} E(\mathbf{n}, r, t) d\Omega dr dt \\ = \int_0^\infty \int_0^\infty \int_{\Omega/2} 2E(\mathbf{n}, r, t) d\Omega dr dt = 1 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 Ω 와 $\Omega/2$ 는 각각 구와 반구에 대한 고각(solid angle)을 나타낸다. 따라서 식 (3)에서 단열이 갖는 부피는 다음 식과 같다.

시추공 텔리뷰어 및 BIPS의 영상자료 해석을 통한 파쇄매질의 투수율텐서 계산 프로그램 개발 및 현장 적용성 평가

$$dV^{(e)} = \frac{\pi m^{(v)}}{2} r^2 t E(\mathbf{n}, r, t) d\Omega dr dt \quad (5)$$

한편 무한대의 크기를 갖는 평행판에서의 평균 유속은

$$v_i^{(e)} = -\frac{1}{12} \frac{g}{\nu} t^2 J_i^{(e)} \quad (6)$$

와 같으며 실제 단열들의 크기를 고려하는 무차원의 상수 (λ)를 도입하면 다음 식과 같이 표현된다.

$$v_i^{(e)} = -\lambda \frac{g}{\nu} t^2 J_i^{(e)} \quad (7)$$

여기서 $J_i^{(e)}$ 는 단열면에 투영된 수두경사 J 의 성분이므로(Fig. 12),

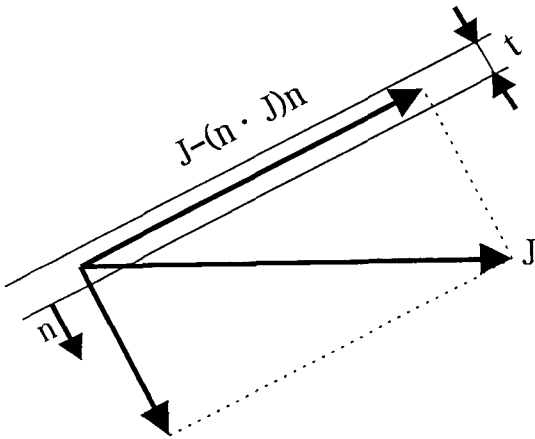


Fig. 12. Hydraulic gradient along a (n , r , t) crack.

$$J_i^{(e)} = J - (\mathbf{n} \cdot \mathbf{J}) n_i \quad (8)$$

또는

$$J_i^{(e)} = \sum_j (\delta_{ij} - n_i n_j) J_j \quad (9)$$

와 같다. 식 (5), (7), (9)를 식 (3)에 대입하면

$$v_i = -\frac{\pi \rho g \lambda}{4 \nu} \sum_j J_j \int_0^\infty \int_0^\infty \int_\Omega (\delta_{ij} - n_i n_j) r^2 t^3 E(\mathbf{n}, r, t) d\Omega dr dt \quad (10)$$

여기서 $\rho = m^{(v)}/V$ 로 단열의 밀도를 나타낸다. 위 식을 Darcy의 법칙에 의해 표현된 식 (2)와 비교하면 투수율텐서는 다음 식과 같다.

$$k_{ij} = \frac{\pi \rho \lambda}{4} \int_0^\infty \int_0^\infty \int_\Omega (\delta_{ij} - n_i n_j) r^2 t^3 E(\mathbf{n}, r, t) d\Omega dr dt \quad (11)$$

텔리뷰어나 BIPS를 이용하여 측정된 시추공내의 단열들의 기하학적인 정보와 관련하여 식 (11)을 변형하여 보자. 한 시추공으로부터 m 개의 단열에 대한 경사방향 (ϕ_i), 경사각 (θ_i), 그리고 수직의 시추공에 나타난 겹보기 단열두께 (t_i)를 측정하였다면,

$$t_i = t'_i \cos \theta_i \quad (12)$$

$$n_1^{(i)} = \sin \theta_i \sin \phi_i \quad (13)$$

$$n_2^{(i)} = \sin \theta_i \cos \phi_i \quad (14)$$

$$n_3^{(i)} = \cos \theta_i \quad (15)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 적분으로 표현된 식(11)을 합의를 풀로 바꾸면,

$$k_{ij} = \frac{\pi \lambda}{4 V} \sum_{k=1}^m (\delta_{ij} - n_i^{(k)} n_j^{(k)}) (r_k)^2 (t_k)^3 \quad (16)$$

와 같다. 텔리뷰어나 BIPS는 단열의 크기(r)에 대한 정보는 제공하지 않지만 단열의 크기(r)와 두께

(t)의 관계식을 가정하면 각 단열의 두께로부터 단열의 크기를 추정할 수 있다. 예를 들어 LEFM(Linear elastic fracture mechanics) 이론식은 단열두께와 크기의 선형적인 관계식을 제공한다(Renshaw and Park, 1997).

$$t = \sigma \frac{(1-\nu)}{\mu} r \quad (17)$$

식에서 σ , ν , 및 μ 는 각각 유효응력(effective stress), 포와송비(Poisson's ratio), 및 전단율(shear modulus)을 나타낸다. Oda(1985)가 이용한 관계식($t=cr$)은 식 (17)의 단순화된 형태이며 이러한 선형적인 관계식은 실제 현장 자료해석에 적용이 가능한 유용한 식이라 평가된다.

따라서 텔리뷰어나 BIPS를 이용하여 시추공을 통과하는 단열들의 기하학적인 정보를 알아내면 EPM 모델에 근거한 Oda(1985)의 이론식 (11)과 LEFM 모델식 (17)을 이용하여 파쇄매질이 나타내는 3차원의 투수율텐서를 산정할 수 있다. 단 식에서 도입된 λ , σ , ν , 및 μ 등의 매질의 특성을 나타내는 인자들에 대한 정보를 파악해야 하는 현실적인 제한점이 따르게 된다. 하지만 연구지역 암반에 대하여 이러한 상수들을 일정하다고 가정하면 투수율텐서의 절대값은 알 수 없으나 텐서를 구성하는 9개 성분의 상대적인 비는 알 수 있으므로 연구지역 암반이 나타내는 투수율 이방성의 주축방향과 이방성비를 추정할 수 있다.

프로그램 개발 및 적용

위에서 유도된 이론식을 이용하여 암반의 단열계가 나타내는 3차원의 투수율텐서를 산정하는 Fortran 프로그램을 개발하였으며, 가상으로 만들어진 몇 개의 단순한 단열계 자료를 입력하여 프로그램을 검증(verification)하였다. 프로그램의 입력자료는 단열의 총 개수 및 각 단열의 방향(주향 및 경사)과 두께이며 출력자료는 계산된 투수율텐서를 구성하는 9개의 성분이다. 각 성분값은 k_{11} 을 1로 가정하였을 때의 상대적인 값이며, 9개의 값을 이용하여 이방성의 주축방향과 이방성비를 산정하였다.

BIPS로 측정된 Table 2의 모든 투수성단열에 대한 정보를 입력하여 연구지역 대수층의 이방성을 분석하였으며 결과는 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.00 & 0.31 & 0.24 \\ 0.31 & 0.54 & -0.47 \\ 0.24 & -0.47 & 0.79 \end{pmatrix} \quad (18)$$

여기서 k_{11} , k_{22} , k_{33} 의 방향은 각각 EW, NS, 및 연직방향을 나타낸다. 현장 수리간섭시험을 통하여 추정된 이방성 결과(Fig. 11)와 프로그램 적용 결과를 비교하기 위하여 위 결과의 2차원의 주축방향과 이방성비를 좌표회전을 이용하여 구하였으며 관계식은 다음과 같다(Bear, 1972).

$$\tan 2\theta = \frac{2k_{12}}{(k_{11} - k_{22})} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} k'_{11} &= \frac{k_{11} + k_{22}}{2} + \frac{k_{11} - k_{22}}{2} \cos 2\theta + k_{12} \sin 2\theta \\ k'_{22} &= \frac{k_{11} + k_{22}}{2} - \frac{k_{11} - k_{22}}{2} \cos 2\theta - k_{12} \sin 2\theta \\ k'_{12} &= k'_{21} = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

식에서 θ 는 전체좌표계(global coordinate system)를 x_3 축에 대하여 반시계 방향으로 회전한 각을 나타내며 k'_{ii} 는 회전된 국소좌표계(local coordinate system)에서의 텐서 성분을 나타낸다.

식(19), (20)을 (18)의 계산결과에 적용하면 $\theta = 27.0^\circ$, $k'_{11} = 1.16$, $k'_{22} = 0.39$ 이다. 따라서 프로그램에 의해 산정된 연구지역 불연속면들의 수평방향으로의 이방성투수량계수비는 3.0이며 주축방향은 N63°E 로 분석되었다. 이 결과를 Fig. 11의 수리간섭시험 분석값과 비교하면 이방성비는 유사한 값을 보이나 방향은 14°의 차이가 나타남을 알 수 있다.

이러한 차이가 발생한 이유로는 수리간섭시험 결과의 불확실성, EPM모델의 현장 불일치, 3승법칙의 적용성 문제, 단열의 크기-두께 관계식의 단

순화 등을 들 수 있다.

첫째, 본 연구지역은 수리지질학적으로 투수성이 매우 불량한 암반특성을 가지며 양수정과 관측정의 거리가 100m 이상 떨어져 있어 통상적으로 수행되는 양수시험을 통하여 이방성을 추정하기가 매우 어려운 조건이다. 따라서 수리간섭시험시 관측정에서 측정된 초기수위반응시간을 이용하여 이방성을 산정하였는데, 수위반응이 발생하지 않은 4개의 관측정은 무시되어 오차의 발생요인으로 작용하였다. 또한 수리간섭시험 중 충격층 및 풍화대로 구성된 상부 자유면대수층으로부터 하부의 암반대수층으로의 지하수 유입이 발생하여 이방성에 의한 영향반경의 이상적인 확대가 왜곡되었을 가능성도 높은 것으로 추정된다.

둘째, 본 투수율텐서 프로그램은 파쇄매질을 균질, 이방성의 다공질매질로 취급하는 EPM모델의 가정으로부터 출발하는데 단열이 갖는 기하학적인 변수들의 확률밀도함수가 시추공별로 조금씩 다르게 나타나 연구지역 매질의 확률적 균질성을 가정하는데 무리가 있는 것으로 보인다. EPM모델을 효과적으로 적용하기 위해서는 단열이 잘 발달하여 암반의 투수성이 양호하면서 양수정에서 관측정까지의 거리가 가까운 소규모의 연구지역을 선정해야 할 것으로 생각된다.

셋째, 이미 앞에서 언급한 바와 같이 단열의 기하학적인 균일성, 단열면의 상태, 충전물질의 수리지질학적인 특성 등을 고려하지 않고 3승법칙을 단순 적용하여 절리망으로부터 투수계수를 산정하는 것은 신뢰성이 매우 떨어지는 결과를 도출할 우려가 있다. BIPS 영상 자료를 정밀하게 분석하여 이러한 단열특성들을 수치적인 인자로 표현할 수 있는 기법을 개발하여야 할 것으로 판단된다. 즉 이러한 인자로부터 유효단열두께(effective aperture thickness)를 계산하여 3승법칙을 적용하거나 3승법칙에 대응하는 개량된 식을 사용하는 것이 바람직할 것으로 추정된다. Brown(1987)은 프랙탈(fractal)면으로 표현되는 단열면 사이의 빈공간을 평균하였을 때 나타나는 단열의 두께를 기계적간극(mechanical aperture, t_m)이라 정의하고 다음식을 적용하여 수리적간극(hydraulic aperture, t_h)을 구하였다.

$$t_h^3 = t_m^3 \left[\frac{1-\alpha}{1+\alpha} \right] \quad (21)$$

여기서 α 는 두 단열면의 접촉정도를 나타내는 인자이다.

마지막으로 위에서 제시된 단열의 크기와 두께의 선형적인 관계식에서 계수로 표현된 인자들에 대한 평가를 들 수 있다. 특히 유효응력의 경우 심도에 따라 그 값이 달라지리라 예상되므로 관계식에서 유효응력을 단열 심도의 함수로 표현하는 비선형의 관계식 적용이 요구된다.

위에서 언급한 여러 가지 문제점들을 보완하면 본 연구에서 개발된 프로그램은 파쇄매질의 투수율텐서를 추정하는 유용한 도구로 사용될 수 있으리라 판단된다.

결론 및 토의

본 연구에서는 시추공 검층자료를 이용하여 파쇄매질이 갖는 투수율텐서를 계산하는 프로그램을 개발하였으며 연구지역에서 실시한 수리시험 분석 결과와 비교하여 프로그램의 현장 적용성을 평가하였다. 본 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 시추공 검층법인 델리뷰어와 BIPS를 비교하여 보았을 때 균열내의 충전물유무, 균열면의 거칠음정도, 균열두께 등에 대한 정보 제공의 측면에서 델리뷰어보다 BIPS가 수리지질학적인 연구에서 더 유용하게 이용될 수 있을 것으로 평가된다.
2. 연구지역 지표지질조사 결과 절리의 발달은 그 빈도에 있어서 N10°~20°E 및 N70°~80°W방향이 우세하게 나타났으며 대부분 80°~90°의 고경사각을 보인다.
3. 시추공 검층에 의해 분석된 단열 중에서 투수성단열만을 추출하여 Rose diagram에 도시하면 지표자료와 유사하게 나타나는 데 이는 연구 지역에 광범위하게 일정한 방향성을 갖는 단열군이 규칙적으로 잘 발달되어 있음을 시사한다.
4. 유향유속측정기를 이용하여 측정한 지하수의 유동방향을 보면 등수위선에 수직한 이론적인 방향과는 약간의 차이가 있으나 전체적으로 연구지역의 동측에 위치한 저지대의 해안 방향을 향하고 있어

유향 측정의 신뢰성을 보여준다.

5. 수리간섭시험을 통하여 연구지역 대수층의 이방성을 추정하였는데 이방성비는 2.8이며 이방성의 주축방향은 N77°E로 분석되었다.

6. EPM모델에 근거하여 암반의 단열계가 나타내는 3차원의 투수율텐서를 산정하는 Fortran 프로그램을 개발하였다. 프로그램을 적용하여 산정한 연구지역의 이방성투수량계수비는 3.0이며 주축방향은 N63°E로 수리간섭시험 결과와 비교할 때 주축방향에서 14°의 차이를 나타냈다. 두 결과가 불일치한 이유로는 수리간섭시험 결과의 불확실성, EPM모델의 현장 불일치, 3승법칙의 적용성 문제, 단열의 크기-두께 관계식의 단순화 등을 들 수 있다.

7. 본 연구에서 개발된 프로그램은 이러한 문제점들을 보완하면 파쇄매질의 투수율텐서를 추정하는 유용한 도구로 사용될 수 있으며 지하수 유동이나 오염물의 거동을 정량적으로 예측하는데 필요한 수리인자를 제공할 수 있을 것으로 평가된다.

8. 프로그램의 3차원적인 적용성 평가를 위해서는 암반의 투수성이 양호하며 시추공 간의 거리가 가까운 연구지역을 선정하여 3차원의 투수율텐서를 추정할 수 있는 시추공간 수압시험(Hsieh and Neuman, 1985, Hsieh et. al., 1985)의 실시가 요구되며, 또한 Image Analyzer 등의 소프트웨어를 이용하여 단열내 충전물의 상태, 충전정도를 정밀하게 분석하여 유효단열두께를 산정해야 할 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 1998년도 한국과학재단 산학협력연구(98-2-05-01-01-2)의 연구비 지원에 의하여 수행되었다. 자료처리에 도움을 준 지오텍 컨설팅(주)의 이창영님, 공주대학교 이성규, 이주형, 차장환군과, 연구에 필요한 자료를 제공하여 준 벽산엔지니어링(주)의 조호성님께도 깊은 감사를 드린다.

참 고 문 헌

김중열, 김유성, 현혜자, 1995, Geotomography에 의한 암반구조 연구(V): 한국자원연구소, 과학기

술처.

김중열, 김유성, 현혜자, 1998, 물리탐사 병합기술에 의한 지반조사 매개변수 산출법 연구, 한국자원연구소, 과학기술부.

김경수, 김천수, 배대석, 김원영, 최영섭, 김중렬, 1998, 3차원 단열망모델링을 위한 단열수리인자 도출, 지하수환경학회지, 5(2), 80-87.

원종관, 지정만, 김수진, 윤선, 소철섭, 김형식, 1980, 거제·울포 지질도폭 설명서(1:50,000), 한국자원연구소.

채병곤, 최영섭, 이대하, 김원영, 이승구, 김중렬, 1988, 유동성 단열 파악을 위한 암반 내 단열 특성 규명, 지하수환경학회지, 5(2), 88-100.

한정상, 한규상, 1992, 고지대 결정질파쇄암의 수리지질특성과 수리 지질학적인 이방성에 관한 연구, 지질학회지, 28(1), 19-31.

Barenblatt, G.E., I.P. Zheltov, and I.N. Kochina, 1960, Basic concepts in the theory of homogeneous liquids in fissured rocks (strata), J. Appl. Math. Mech. Engl. Transl., 24(5), 1286-1303.

Bear, J., 1972, Dynamics of fluids in porous media, Dover, 764p.

Bibby, R., 1981, Mass transport of solutes in dual-porosity media, Water Resour. Res., 17(4), 1075-1081.

Brown, S.R., 1987, Fluid flow through rock joints, the effects of surface roughness, J. Geophys. Res., 92, 1337-1347.

Grisak, G.E., and J.K. Pickens, 1981, An analytical solution for solute transport through fractured media with matrix diffusion, J. Hydrol., 52, 47-57.

Hsieh, P.A., and S.P. Neuman, 1985, Field determination of the three-dimensional hydraulic conductivity tensor of anisotropic media: 1. theory, Water Resour. Res., 21(11), 1655-1665.

Hsieh, P.A., S.P. Neuman, G.K. Stiles, and E.S. Simpson, 1985, Field determination of the three-dimensional hydraulic conductivity tensor of anisotropic media: 2. methodology

- and application to fractured rocks, *Water Resour. Res.*, 21(11), 1667-1676.
- Huyakorn, P.S., B.H. Lester, and J.W. Mercer, 1983, An efficient finite element technique for modeling transport in fractured porous media, 1, Single species transport, *Water Resour. Res.*, 19(3), 841-854.
- Kruseman, G.P., and N.A. de Ridder, 1990, Analysis and evaluation of pumping test data, 2nd ed., ILRI publication 47, Wageningen, The Netherlands.
- Long, J.C.S., J.S. Remer, C.R. Wilson, and P.A. Witherspoon, 1982, Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures, *Water Resour. Res.*, 18(3), 645-658.
- Moench, A.F., 1984, Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin, *Water Resour. Res.*, 20(7), 831-846.
- Molz, F.L., G.K. Boman, S.C. Young, and W.R. Waldrop, 1994, Borehole flowmeters: field application and data analysis, *J. Hydrol.*, 163, 347-371.
- Oda, M., 1985, Permeability tensor for discontinuous rock masses, *Geotechnique*, 35(4), 483-495.
- Paillet, F.L., 1991, Use of geophysical well logs in evaluating crystalline rocks for siting of radioactive-waste repositories, *The Log Analyst*, 33(2), 85-107.
- Paillet, F.L., 1993, Using borehole geophysics and cross-borehole flow testing to define hydraulic connections between fracture zones in bedrock aquifers, *J. Appl. Geophysics*, 30, 261-279.
- Paillet, F.L., 1998, Flow modeling and permeability estimation using borehole flow logs in heterogeneous fractured formations, *Water Resour. Res.*, 34(5), 997-1010.
- Paillet, F.L., A.E. Hess, and R.H. Morin, 1990, Estimation of the relative permeability distribution in fractured granitic rocks by means of vertical flow measurements in the Siblingen borehole, Switzerland, Colorado, U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report, 90-4034, 26p.
- Paillet, F.L., A. Green, and J. Gurrieri, 1992, Identification of hydraulically conductive fractures intersecting boreholes in fractured gneiss near Ashford, Connecticut, U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report, 92-4074, 28p.
- Pankow, J.F., R.L. Johnson, J.P. Hewetson, and J.A. Cherry, 1986, An Evaluation of contaminant migration patterns at two waste disposal sites on fractured porous media in terms of the equivalent porous medium(EPM) model, *J. Contam. Hydrol.*, 1, 65-76.
- Renshaw, C.E., and J.C. Park, 1997, Effect of mechanical interactions on the scaling of fracture length and aperture, *Nature*, 386(3), 482-484.
- Snow, D.T., 1969, Anisotropic permeability of fractured media, *Water Resour. Res.*, 5(6), 1273-1289.
- Streltsova, T.D., and A.R. Adams, 1976, Hydrodynamics of groundwater flow in a fractured formation, *Water Resour. Res.*, 12(3), 405-414.
- Tang, D.H., E.O. Frind, and E.A. Sudicky, 1981, Contaminant transport in fractured porous media: analytical solution for a single fracture, *Water Resour. Res.*, 17(3), 555-564.
- Xiang, J., 1995, The evaluation of the flowmeter test in three-layer aquifers and the influence of disturbed zones, *J. Hydrol.*, 166, 127-145.

구민호, 이동우, 원경식

구민호, 이동우
공주대학교 자연과학대학 지질환경과학과
314-701 충남 공주시 신관동 182
Tel : 0416-850-8515, 0416-850-8513
E-mail : koo@knu.kongju.ac.kr, cdpil@knu.kongju. ac.kr

원경식
지오택 컨설팅(주)
435-050
경기도 군포시 금정동 723-2 금정빌딩 602호
Tel: 0343-454-2532~4
E-mail: geoinfo@geoinfo.co.kr