

공압파쇄를 고려한 단일불연속면에서의 간극에 따른 투수성 변화에 대한 연구

A Study on Permeability Variation by Aperture in the Single Discontinuity Considering Pneumatic Fracturing

정 교 철(Gyo Cheol Jeong)	안동대학교 지구환경과학과
김 기 종(Gi Jong Kim)	한주토건(주)
부 성 안(Seong An Booh)	농업기반공사 농어촌연구원
서 용 석(Seo, Yong Seok)	한국건설기술연구원 토목연구부

요약 / ABSTRACT

보조수자원 확보로서의 지하수 개발은 안정적인 물 확보측면에서 매우 중요한 역할을 한다. 지하수 개발공에서 양수량 증가 및 오염물질 제거를 위한 방법으로 공압파쇄기술이 선진 외국에서 개발되어 최근 많이 활용되고 있다.

이 연구는 공압파쇄기술 및 방사성폐기물 지하 심부 처분 시 만들어지는 자연방벽에서의 손상발달에 의해 새로이 발생하거나 간극이 커진 단일불연속면에서의 투수특성을 구명하기 위한 연구이며, 지하수 개발공에서의 양수량 증가 및 오염의 확산/치료 연구에 있어서 기초자료로 활용될 수 있다. 이 연구의 결과로는 봉압, 수리학적 간극 및 투수성과의 상관관계에서 봉압의 증가에 따라 수리학적 간극은 지속적으로 감소하는 경향을 보이고 있고, 동일한 봉압에서 간극에 따른 투수성 변화를 비교해 보면 간극이 커질수록 투수성 또한 증가하는 특징을 알 수 있다. 특히 중·조립 화강암에서의 간극에 따른 투수성 증가가 세립 화강암에서 보다 크다는 것을 알 수 있다.

주요어 : 공압파쇄기술, 손상발달, 투수성, 수리학적 간극, 화강암

Groundwater development as a means of acquiring subsidiary water resource is very important for the persistent security of water resource. Nowadays, pneumatic fracturing technology which was developed in the advanced countries is applied for increasing pumping rate and eliminating contaminants.

This study gives an experimental data to clarify permeability characteristics of the single discontinuity which is newly developed or increased in aperture by the pneumatic fracturing or damage propagation of the natural barrier for the nuclear waste disposal. On the basis of understanding the relationship between permeability and hydraulic aperture the result could apply as one of the basic data for researches concerned with increasing pumping rate and eliminating contaminants. Hydraulic aperture is decreased exponentially with increasing confining pressure and proportioned to permeability in the same confining pressure. Especially, with the increasing aperture permeability of coarse- and medium- grained granite shows the more rapid increasing than that of fine- grained granite.

Key Words : pneumatic fracturing technology, damage propagation, permeability, hydraulic aperture, granite

서 언

최근 세계적으로 물 부족 국가로 분류되는 나라가 점차 증가되고 있다. 우리 나라 또한 생활수준의 향상과 산업화의 영향에 의해 물 수요는 날로 증가되고 있는 반면 기후의 변화, 오염의 확산 등에 의한 물 부족현상은 빠르게 진행되고 있다. 따라서 보조수자원 확보로서의 지하수 개발은 물 확보측면에서 매우 중요한 역할을 한다. 이러한 이유로 지금까지 우리 나라에서도 농업용수, 공업용수 및 생활용수로서 많은 량의 지하수를 개발 사용하여 왔다(송재용 외, 2002).

지하수 개발공에서 양수량 증가 및 오염물질 제거를 위한 방법으로 수압파쇄기술(hydraulic fracturing technology)과 공압파쇄기술(pneumatic fracturing technology)이 선진 외국에서는 개발되어 왔다. 이 중 선진 외국에서 최근 많이 활용되고 있는 공압파쇄기술은 지하암반 불연속면 내의 주입 압력 재료로서 공기를 사용하여 새로운 불연속면을 발생시키거나 닫혀져 있는 균열 간극을 열어주는 기술이다(Fig. 1). 이 공압파쇄기술은 암반 내 불연속면을 통한 투수성을 증가시켜 한정된 지하수의 양수량을 증가시키는 방법으로서 뿐만 아니라 지하 오염물질 제거를 위한 방법으로 많은 연구가 되어 왔다(Ahlers et al., 1999; Ding et al., 1999; Dury et al., 1998; Illman et al., 2000). 또한 최근 방사성폐기물 및 각종 산업폐기물의 암반

을 대상으로 한 지층처분 등에서와 같이 지하 암반 내 지하수 유동특성과 관련하여 단일 및 복수의 불연속면에서의 투수성에 관한 많은 연구들이 수행되어 왔다(Keller et al., 1999; Tsang et al., 1987, 1988; Oda et al., 1986; Moreno et al., 1988; Brown et al., 1998; 이희석, 1999; 정교철 등, 2001; Jeong et al., 2001).

암반 내 불연속면을 통하여 흐르는 지하수 유동 양상은 다공질 매체에서의 지하수 유동과 전혀 다른 특성을 보인다. 특히 지하 봉압에 의한 불연속면 간극의 크기에 따라 투수성이 변화하며, 지하에 유입된 오염물질은 이들 불연속면을 통하여 자체적으로 느린 속도로 이동하지만, 이들이 지하수와 접하게 되면 암반 내 균열을 따라 지하수와 함께 이동하게 되므로 그 이동성이 급격히 증가하게 된다. 따라서, 암반 내에 발달하는 불연속면을 대상으로 한 수리지질학적 특성에 관한 연구는 지하수 유동과 오염물질 거동 해석에 중요한 역할을 한다.

그러나 암석 내에 균열이 발생한다고 해서 무조건 지하수의 침투가 가능한 것이 아니며, 지하 굴착에 의해 주변암석의 파괴 및 균열 등이 발생하면 지하수 침투의 가능성이 있으므로 장기간에 걸쳐 지하수 유동 상황을 검토할 필요가 있다. 그리고 주변암석의 변형과 지하수 흐름은 암반 내에 넓게 분포하고 있는 크고 작은 균열의 분포와 이러한 균열의 연속성에 크게 지배를 받고 있어 암반을 대상으로 하는 굴착 등에 있어서 이러한

균열의 경향 등을 적절히 평가할 필요가 있으며, 특히 암반 균열계의 구조가 변하는 쪽의 경우에는 이것에 따라서 지하수 흐름의 변화를 검토해야 할 필요성이 있다(鈴木, 1995; 鈴木, 長田, 1996).

본 논문은 공압파쇄기술 및 방사성폐기물 지하심부 처분 시 만들어지는 자연방벽에서의 손상발달에 의해 새로이 발생하거나 간극이 커진 단일 불연속면에서의 투수특성을 구명하기 위한 연구이다. 이 연구는 불연속면에서의 투수성과 수리학적 간극을 비교·검토하여 지하수 개발공에서의 양수량 증가 및 오염의 확산/치료 연구에 있어 기초자료로 활용하게 함에 그 목적이 있다.

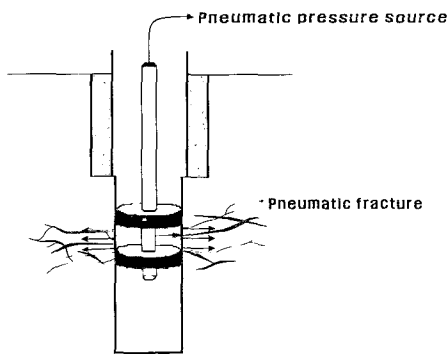


Fig. 1. Concept of pneumatic fracturing.

공시체 및 시험

암석공시체

본 연구에 있어서 암석공시체 제작은 무결암에 가까운 신선한 암석을 대상으로 화강암을 선정하였다. 또한 본 연구에 사용된 암석공시체는 세립질, 중립질, 조립질 화강암으로 NX 코아바렐로 채취한 코아를 심도별로 구분하고 크랙과 맥(vein), 그리고 불연속면의 흔적이 없는 신선한 암석코아를 선정 후 코아절단기로 직경과 길이의 비를 1:2로 절단하여 9개의 암석공시체를 제작하였다(Table 1).

연구에 사용된 세립질 (<1mm) 공시체는 경북 상주군 공성면 영오리 신일석재 개발지역에서 석재자원 허가를 위해 시험시추 하였던 6개 공중에서 DH-2번 공에 해당되며, 주라기의 흑운모화강암이다(김선억 등, 1990). 중립질 (1~5mm) 화강암 공시체는 경남 거창군 웅양면 산포리 석창산업 지역에서 석재자원 개발을 위해 시험시추한 6개공 중에서 6호 공에 해당된다. 중립질 화강암은 백악기 흑운모화강암으로써 전체적으로 중립 내지 조립의 입도를 갖는다(김주용 등, 2000). 조립질 (>5mm) 화강암시료 채취 지역은 경기도 포천군 판인면 초과리 석재자원개발을 위해 가락산업주식회사 지역에서 시험시추 했던 8개공중에서 DH98-1번 공에 해당되며, 주라기의 흑운모화강암이다(김정호 등, 1998).

Table 1. Rock specimens

Rock specimens	Specimen No.	Diameter (cm)	Length (cm)	Depth (m)
Fine-grained granite	BFS-1	5.47	10.90	13.05-13.16
	BFS-2	5.47	10.77	13.18-13.29
	BFS-3	5.47	10.98	13.31-13.49
Medium-grained granite	BMS-1	5.47	10.96	22.15-22.26
	BMS-2	5.47	10.93	22.28-22.39
	BMS-3	5.47	10.84	22.41-22.52
Coarse-grained granite	BCS-1	5.48	10.93	13.96-14.07
	BCS-2	5.48	10.97	14.09-14.20
	BCS-3	5.48	10.83	14.39-14.50

시 험

단일불연속면 발생

코어 공시체에서 단일불연속면을 발생시키기 위하여 일축압축기를 사용한 압열인장시험(brazilian test)을 하였으나 단일불연속면 발생이 어려워 새로이 쐐기형 연결장치를 제작하여 사용하였다. Fig.2(a)는 쐐기형 연결장치에 공시체를 장착한 모습이며, Fig.2(b)는 선 하중을 주기 위한 쐐기형 연결장치를 나타낸 그림이다.

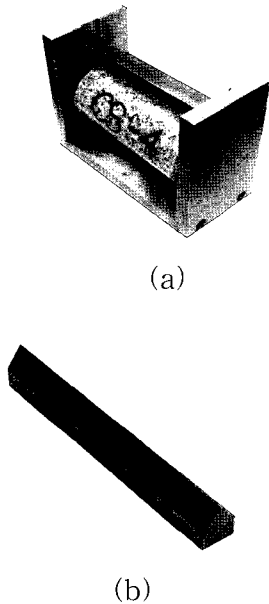


Fig. 2. Wedge-type connecting device.

단일불연속면 형성을 위한 연결장치는 강재(steel)로 제작하였으며, 하부 받침대는 150×70×12mm의 크기로, 좌·우측 부의 틀은 120×70×12mm 크기로 제작하였다. 면 하중을 선 하중으로 변화시키기 위해 쐐기형 모양으로 상부와 하부 2개를 제작하였으며, 크기는 130×16×20mm으로 제작하였다(Fig. 3). 또한, 하부 받침대와 좌·우측 틀의 중앙부에 넓이 16mm, 길이 2mm의 홈을 만들어 5각뿔 모양의 쐐기형 연결장치 한 개를 하부에 고정시켰으며, 상부의 쐐기형 연결장치가 일축압축시험기의 하중에 의해 수직이동시 유격이 발생하지 않도록 하였다.

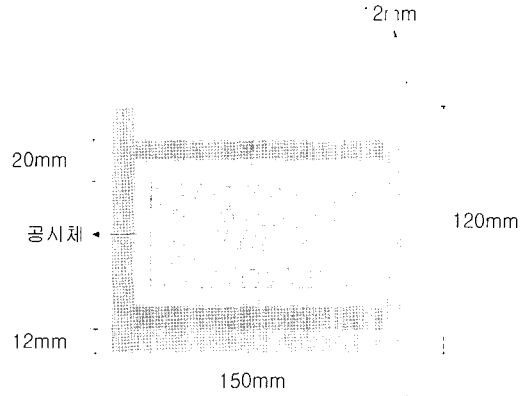


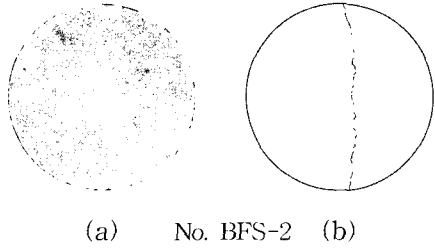
Fig. 3. Schematic diagram of the wedge-type connecting device.

압열인장시험을 위해 영국 ELE International에서 제작된 Compression Machines (ADR 2000) 일축압축시험기에 단일불연속면 형성을 위해 쐐기형 연결장치를 제작하여 실시하였다. 쐐기형 연결장치의 받침대는 공시체와 상부의 가압판(W120mm)이 충분히 장착될 수 있는 길이(외부:150mm, 내부:126mm)로 제작하였으며, 쐐기형 모양의 가압판은 상부와 하부에 설치되어 있는데 상부는 시료의 장착을 위해 탈착이 가능하도록 하였고 하부는 하부 받침대에 좌·틀과 함께 고정을 시켰다.

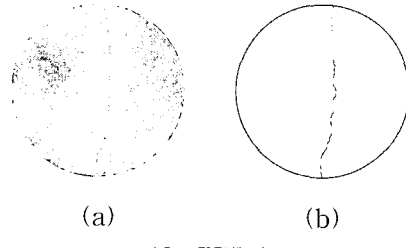
다음 Fig. 4~6은 쐐기형 연결장치에 의한 압열인장시험 결과를 스캐닝한 것으로 모든 공시체에서 정확한 단일불연속면이 형성되어 있음을 확인할 수 있다.

투수시험

투수시험에 사용된 장비는 크게 5부분으로 나누어지는데 암석공시체에 투수압과 봉압을 가압할 수 있는 기본 셀 장치와 이와 연결되어 투수압을 일정하게 가압하는 투수시험기인 Pressure Test 3500(영국 ELE), 가압되는 투수압을 측정하는 Pressure Gauge 및 기본 셀 장치로 일정한 봉압을 가압하는 Constant Pressure Test Unit 등으로 구성되어 있다(Fig. 7). 기본 셀 장치의 내부에 장착되는 우레탄 고무 자켓은 NX 코아 크기로 내경이 54.74mm이며 허용오차는 ±0.75mm,

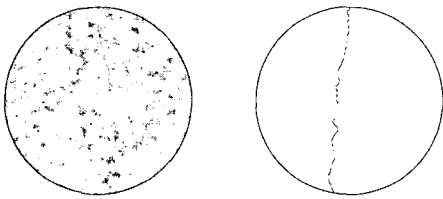


(a) No. BFS-2 (b)



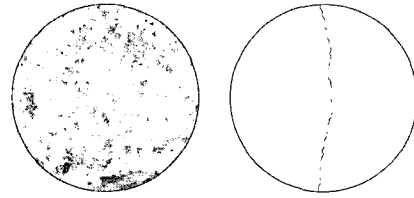
(a) (b)

No. BFS-1



(a) (b)

No. BMS-2

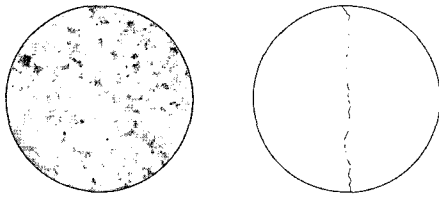


(a) (b)

No. BCS-3

Fig. 4. Single discontinuity showing on the section of fine-grained granite specimen(BFS).

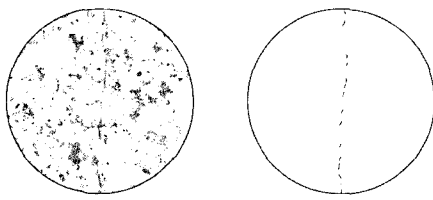
Fig. 6. Single discontinuity showing on the section of fine-grained granite specimen(BCS).



(a) (b)

No.BMS-3

길이는 130mm이다. 시험에 사용되는 암석공시체의 크기는 NX 코아(Ψ54mm)와 비슷한 Ψ54.7mm로 제작되었으며, 각각의 시험에 대해 크기효과(scale effect)를 고려하여 직경에 2배가 되도록 109±1mm의 길이로 제작하였다.



(a) (b)

No. BCS-2

Fig. 5. Single discontinuity showing on the section of fine-grained granite specimen(BMS).

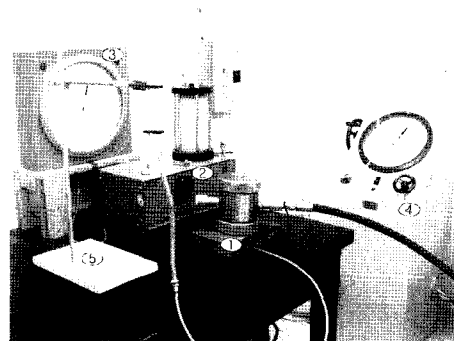


Fig. 7. Permeability test unit equipment: (1) Base Cell Assembly, (2) Pressure Test 3500, (3) Pressure Gauge, (4) Constant Pressure Test Unit, (5) Burette

그리고 투수시험기인 Pressure Test 3500은 유압식으로 실린더 상부에는 유압유, 하부에는 순수한 물이 함께 분리되어 가득 차 있으며 투수압을 가할 경우 최소 500kPa에서 최대 3500kPa까지 투수압을 일정하게 기본 셀 장치 내에 장착되어 있는 암석공시체에 가압 할 수 있다(Fig. 8).

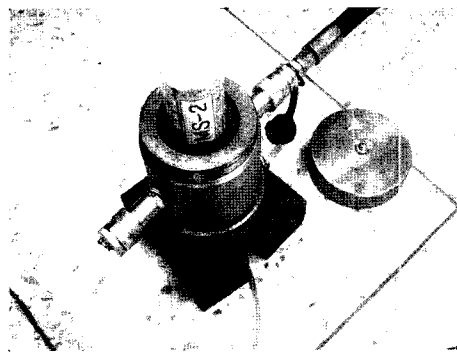


Fig. 8. Photograph of the Base Cell Assembly.

기본 셀 장치와 내부에 들어있는 우레탄 고무 자켓 사이의 공간은 유압유의 주입에 의해 봉압이 가해지며 Constant Pressure Test Unit은 최대 70MPa까지 봉압을 가할 수 있다.

각각의 암석공시체에 대한 투수시험은 기본 셀 장치에 암석공시체를 장착시키고 하부 기본 셀 장치 뚜껑으로 연결된 나일론 튜브(nylon opaque tube)와 뷰렛(burette) 내부의 공기를 제거한 후 상부 셀 뚜껑을 닫고 투수시험기인 Pressure Test 3500으로 투수압이 전달되는 나일론 튜브를 연결한다. 그리고 Constant Pressure Test Unit에서 서서히 봉압을 증가시키면서 동시에 투수압도 함께 증가시킨다. 여기서 사용되는 연결튜브인 나일론 튜브는 외경이 6mm, 내경이 4mm로 Pressure Test 3500에서 전달되는 최대 3500kPa의 투수압을 견딜 수 있다. 이 때 투수되어 나온 물의 유출량을 뷰렛을 통해 확인하면서 시험에 적용되는 일정한 봉압 및 투수압 까지 상승시킨다(Fig. 9).

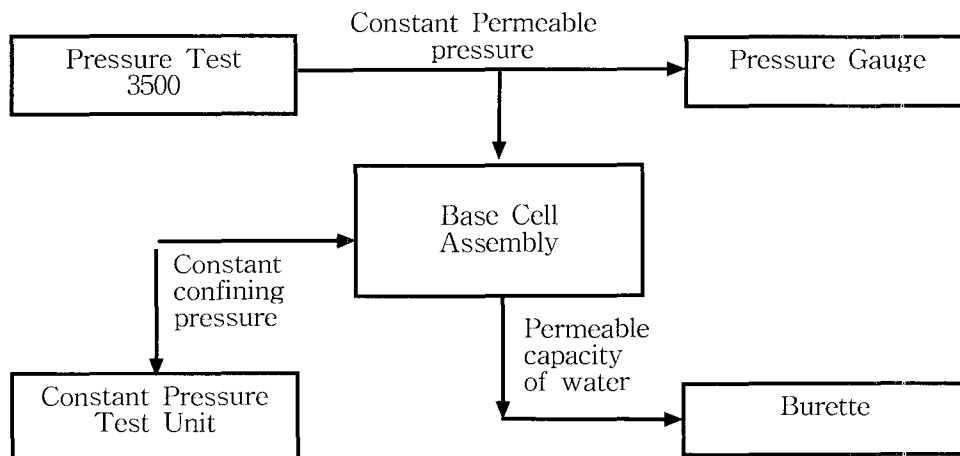


Fig. 9. Schematic diagram of the permeability test system.

단일불연속면에서의 투수특성

결정질 암반의 수리지질학적 특성은 균열대, 파쇄대, 단층대 등과 같은 지질구조대에 의해서 크게 지배를 받는다. 이는 대부분의 지하수 흐름이 주요 지질 구조대를 따라서 일어나기 때문이다. 결정질 암반이 원자력발전소와 같은 구조물 건설의 기초지반으로 활용될 때는 매우 높은 안전성이 요구되므로 결정질 암반의 지질공학적, 수리지질학적 특성을 파악하는 것이 매우 중요하다.

실제로 지하 0.5km~1km에 존재하고 있는 지하수는 인위적 작용이나 다른 자연적인 변화를 받지 않는 한 유동을 하지 않는다고 생각하고 있으며 이것은 지하 심부에 존재해 있는 지하수가 유동하여 주변 암석으로 침투할 수 있는 암석역학적 조건으로는 밀착된 상태에서의 파괴 즉, 소성변형을 나타내는 것과 암석이 완전히 2개 이상으로 분리되어 암석 사이의 크랙과 같은 공간을 만드는 상태의 파괴 등으로 생각해 볼 수 있다. 전자에서는 점토광물 등에 의한 물의 흡인이 동반하지 않는 한 중력수로서의 물의 침투는 없다고 생각되며 후자는 주변 암석 사이에 틈과 같은 공간이 형성되어 있기 때문에 중력수의 침투는 가능할 것이다. 여기서 후자에 속하는 단층은 지표까지 단층의 흔적이 존재하지 않을 경우는 지하 심부까지 물이 침투될 수 있는 가능성은 매우 희박하다(윤지선 역, 1995).

이와 같이 지하수는 주변 암석이 응력평형상태에 놓여져 있을 경우 자연상태의 지하수 통로로 지하수의 흐름을 보이나 공압파쇄 및 지하굴착 등과 같이 지하 응력평형상태가 교란되었을 경우에는 주변암석에 발생된 파괴, 균열, 크랙 등에 의해 지하수의 유입통로를 제공하는 결과를 초래하게 된다.

봉압에 의한 투수성 변화

지하 암반 내 단일불연속면에서의 간극에 따른 투수계수를 추정하기 위하여 Fig. 10에서와 같은 투수시험용 셀에 단계적으로 봉압과 투수압을 상승시키면서 정수위 투수시험을 적용하여 시험을

실시하였다(김만일, 1999).

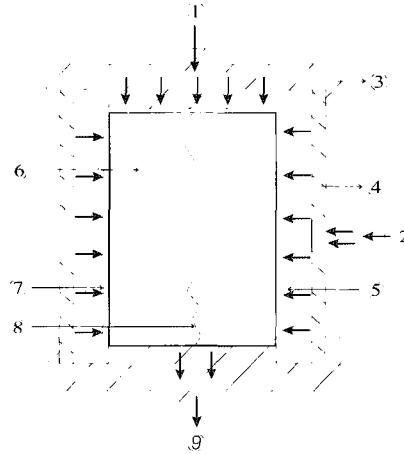


Fig. 10. Diagram of base cell assembly in permeability test; (1) Constant Permeable Pressure (2) Constant Confining Pressure (3) Permeability End Cap (4) Base Cell Assembly (5) Oil Pressure (6) Rock Specimen (7) Urethane Rubber Jacket (8) Crack in rock specimen (9) Capacity of water outflow.

세립질 공시체(Fig. 11) BFS-1번의 경우에 10MPa의 봉압 하에서의 투수계수는 $3.15 \sim 3.49 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$ 의 범위로 나타났으며, 15MPa의 봉압 하에서는 $1.82 \sim 2.01 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$ 의 범위를 나타내어 봉압 10MPa하보다 투수계수가 낮아지는 양상을 보였다. 또한 20MPa의 봉압 하에서는 $4.01 \sim 6.06 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$ 의 범위로 더욱 감소하여 단계적으로 봉압이 증가할수록 투수계수는 점점 더 낮아지는 결과로 나타났다. 세립질 공시체 BFS-2번의 경우에 10MPa의 봉압 하에서의 투수계수는 $5.02 \sim 5.60 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$ 의 범위로 나타났으며, 15MPa의 봉압 하에서는 $2.10 \sim 2.44 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$ 의 범위를 나타내어 봉압 10MPa하보다 투수계수가 낮아지는 양상을 보였다. 또한 20MPa의 봉압 하에서는 $1.01 \times 10^{-7} \sim 8.90 \times 10^{-8} \text{ cm/sec}$ 의 범위로 더욱 감소하여 BFS-1번 공시체와 마찬가지로 봉압

이 증가할수록 투수계수는 점점 더 낮아지는 결과로 나타났다.

이와 같은 경우는 세립질 공시체 BFS-3번의 경우도 마찬가지로 나타났다. 그러나 세립질 공시체 BFS-3번의 경우는 BFS-1, BFS-2번 공시체와 같이 큰 폭으로 감소하지 않고 봉압 10MPa에서 $6.80 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$ 로 가장 높은 투수성을 보였으며, 20MPa에서 가장 낮은 투수성인 $1.47 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$ 로 나타난다.

중립질 공시체(Fig. 12) BMS-1번의 경우에 10MPa의 봉압 하에서의 가장 높은 투수계수인 $9.71 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$ 로 나타났으며, 20MPa의 봉압 하에서는 가장 낮은 $7.00 \times 10^{-8} \text{ cm/sec}$ 로 나타났다. BMS-2번의 경우 역시 10MPa의 봉압 하에서 가장 높은 $9.71 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ 의 투수계수를 나타내었으며, 20MPa에서 $1.30 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ 로 가장 낮은 투수계수를 나타내어 봉압이 증가할수록 투수성이 낮아졌다. BMS-3번 공시체 역시 10MPa의 봉압 하에서 가장 높은 $9.38 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ 의 투수계수 값을 나타내었고 20MPa의 봉압 하에서 가장 낮은 투수계수인 $1.20 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ 로 나타났다.

따라서 중립질 공시체 역시 세립질 공시체와 마찬가지로 봉압이 증가할수록 투수성이 낮아지는 결과로 나타났으며, BMS-1번 공시체를 제외한 나머지 공시체에서의 전체적인 투수계수는 세립질 공시체 보다 투수계수가 높게 나타나 결과적으로 세립질 공시체보다는 높은 투수성으로 나타났다.

조립질 공시체(Fig. 13) BCS-1번의 경우에 10MPa의 봉압 하에서의 가장 높은 투수계수인 $6.73 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ 로 타났으며, 20MPa의 봉압 하에서 가장 낮은 $6.54 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$ 로 나타났다. BCS-2번의 경우 역시 10MPa의 봉압 하에서 가장 높은 $1.17 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$ 의 투수계수를 나타내었으며, 20MPa에서 $1.22 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ 로 가장 낮은 투수계수를 나타내어 봉압이 증가할수록 투수성이 낮아졌다. BCS-3번 공시체 역시 10MPa의 봉압 하에서 가장 높은 $7.05 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$

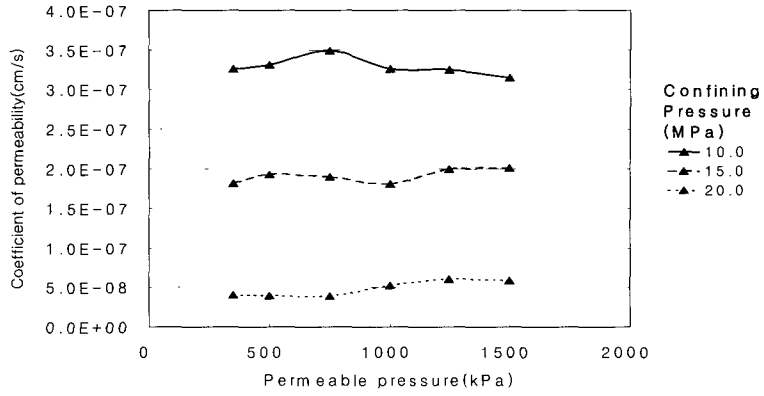
의 투수계수 값을 나타내었고 20MPa 봉압 하에서 가장 낮은 투수계수인 $1.98 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ 로 나타났다. 따라서 조립질 공시체 역시 세립질과 중립질 공시체와 마찬가지로 봉압이 증가할수록 투수성이 낮아지는 결과로 나타났다.

그림에서와 같이 세립질, 중립질, 조립질 모든 공시체에서 봉압의 변화에 따라 투수계수가 낮아지는 것을 알 수 있다. 조립질 공시체의 경우, 봉압 10MPa를 기준으로 하여 측정된 투수계수를 비교하면 봉압이 15MPa 일 때, 봉압 10MPa에 해당하는 투수계수의 약 55.53%이며, 20MPa 일 때, 봉압 10MPa에 해당하는 투수계수의 약 19.66%의 투수계수로 측정되었다. 또한 중립질, 공시체의 경우 봉압이 15MPa 일 때, 봉압 10MPa에 해당하는 투수계수의 약 34.11%이며, 20MPa 일 때는 봉압 10MPa에 해당하는 투수계수의 약 13.44%로 측정되었다. 세립질의 경우, 봉압이 15MPa 일 때, 봉압 10MPa에 해당하는 투수계수의 약 31.22%이며, 20MPa 일 때는 봉압 10MPa에 해당하는 투수계수의 약 9.22%로 측정되었다. 위의 결과를 볼 때, 봉압의 증가에 따라 투수계수의 변화는 세립질 화강암에서 보다 조립질 화강암으로 갈수록 투수계수가 보다 큰 변화를 보이며 감소하는 것을 알 수 있으며, 따라서 조립질 화강암이 봉압에 보다 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

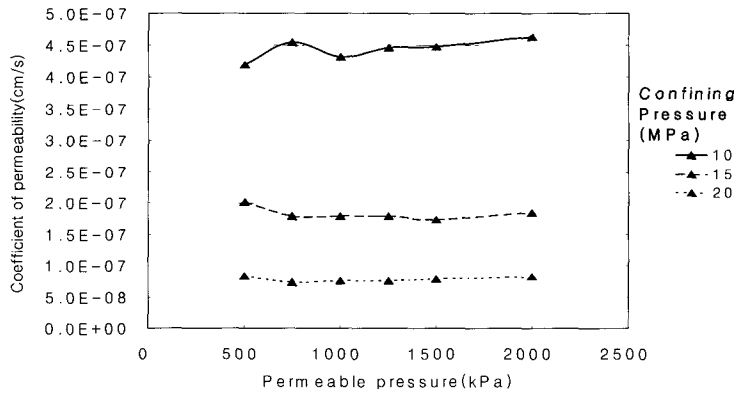
또한 일정한 봉압하에서의 조립질, 중립질, 세립질 공시체에 대한 투수계수를 조립질 공시체를 기준으로 하여 비교하면, 봉압 10MPa일 경우 중립질 공시체는 조립질 공시체의 약 83.60%를 보이고 있으며, 세립질 공시체는 조립질 공시체의 약 6.96%로 측정되었다. 또한 봉압 15MPa일 경우 중립질 공시체는 조립질 공시체의 약 96.89%를 보이고 있으며, 세립질 공시체는 조립질 공시체의 약 12.01%로 측정되었다. 그리고 봉압 20MPa일 경우 중립질 공시체는 조립질 공시체의 약 119.45%를 보이고 있으며, 세립질 공시체는 조립질 공시체의 약 13.48%로 측정되었다. 측정된 결과를 볼 때, 같은 봉압하에서의 투수계수는 결정의 크기에 의해 크게 좌우됨을 볼 수 있으며, 조립질과 중립질 공시체의 차이는 크지 않으나 세립질로 갈수록 투수계수가 조립질 및 중립질 공시체의 투

공압파쇄를 고려한 단일불연속면에서의 간극에 따른 특수성 변화에 대한 연구

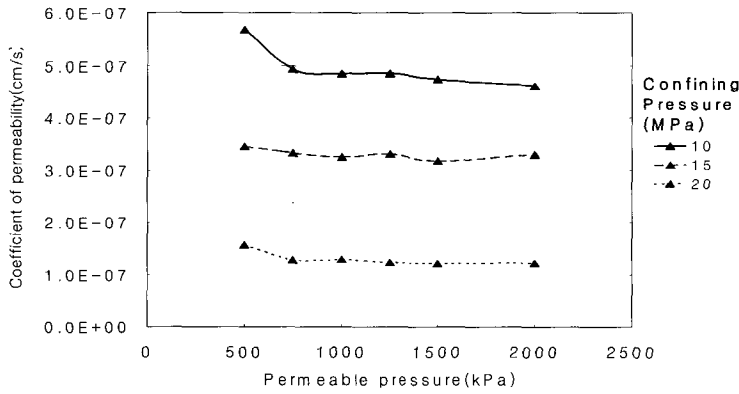
수계수에 비해 크게 낮아짐을 알 수 있다.



BFS-1



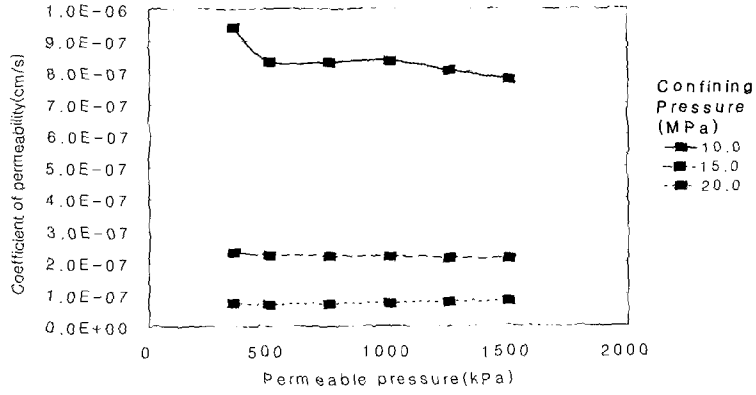
BFS-2



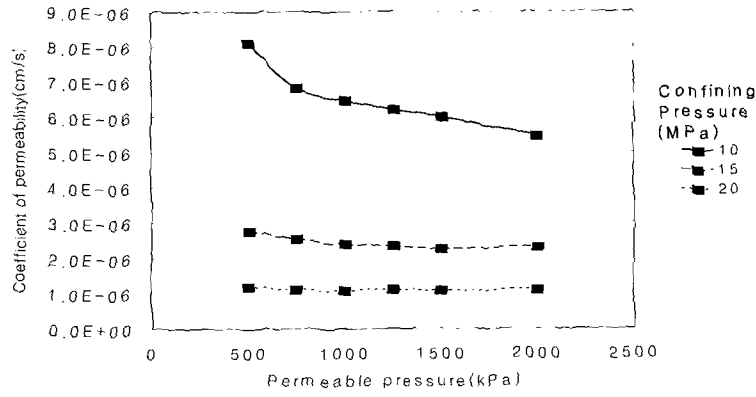
BFS-3

Fig. 11. The relationships between confining pressure and permeability(Fine-grained granite)

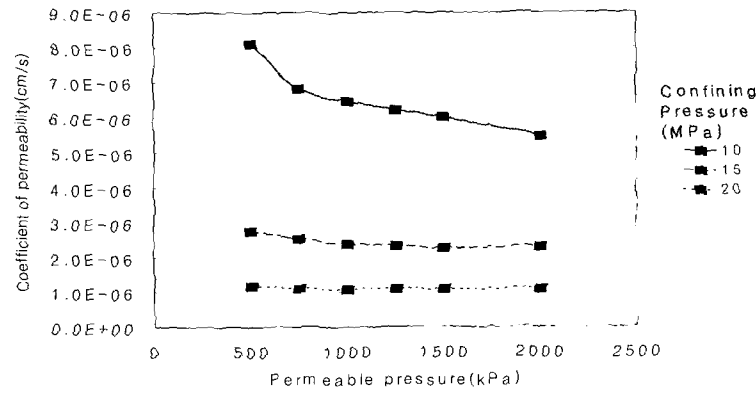
정교철, 김기중, 부성안, 서용석



BMS-1



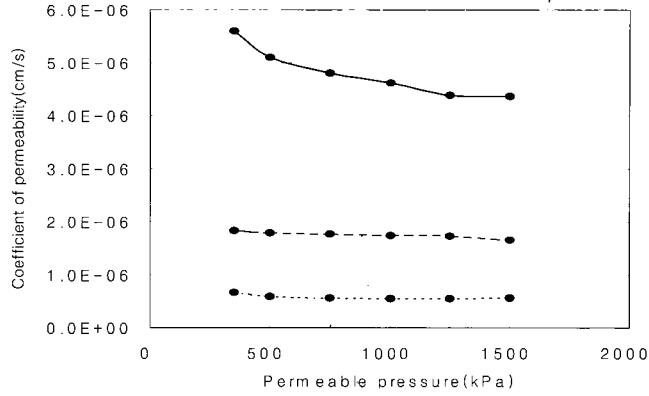
BMS-2



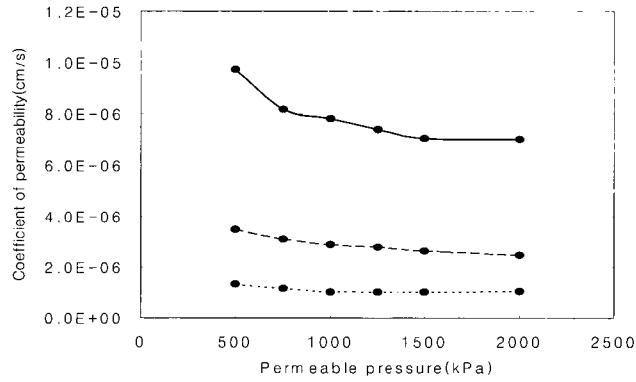
BMS-3

Fig. 12. The relationships between con pressure and permeability(Medium-grained granite) fining

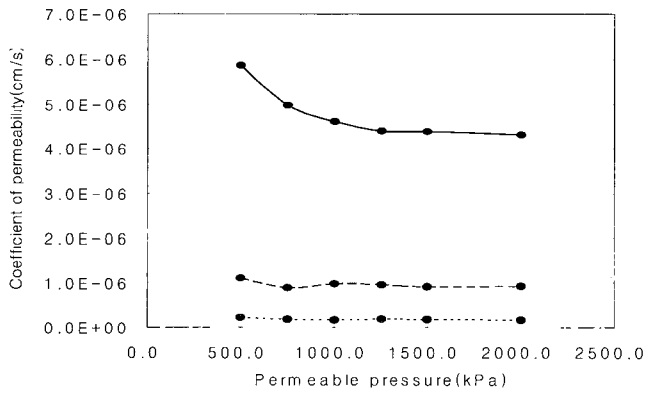
공압파쇄를 고려한 단일불연속면에서의 간극에 따른 특수성 변화에 대한 연구



BCS-1



BCS-2



BCS-3

Fig. 13. The relationships between Confining pressure and permeability(Coarse-grained granite)

균열의 수리학적 간극 폭

불연속성암반에서의 지하수 유동은 단일불연속면에 있어서의 간극과 거칠기에 많은 영향을 받는다. 이와 같이 불연속성암반에서 지하수를 개발할 경우에는 암반 내 발달하고 있는 균열성 불연속면 하나 하나가 매우 중요한 역할을 한다. 공압 파쇄에 의해 암반 균열에 변형이 발생하여 간극에 변화가 일어났을 경우 이 간극변화에 대한 투수성 변화를 정확하게 구명할 필요가 있다. 이를 위해서는 정확한 간극과 거칠기에 따른 투수특성을 구명하여야 하나 암반 내 간극과 거칠기는 불연속면에서 일정하게 발달되어 있는 것이 아니라 매우 불규칙하게 발달하고 있으므로 일률적으로 간극을 적용하기는 어려움이 있어 본 연구에서는 판상구조로 본 간극을 적용하여 보았다.

또한 고준위 방사성폐기물의 지층처분은 선진 외국뿐만 아니라 우리 나라에서도 일반적으로 신선했던 결정질 암반에서 지하 약 800m이하를 고려하고 있다. 따라서 본 시험에 적용된 봉압은 지하 심부 800m에서 1,000m 정도의 깊이에서 작용하는 봉압에 최대한 접근하기 위하여 최대 20MPa의 봉압을 가하였다. 앞서 시험을 통해 단일불연속면이 형성된 화강암 공시체는 봉압의 증가에 따라 투수계수가 감소함을 보이고 있으며, 이는 봉압이 증가하면 단일불연속면의 불연속면에 봉압이 집중될 것이고 이로 인한 간극 폭의 감소에 기인한 것으로 판단된다.

본 연구에서는 Tsang(1992)이 제안한 수리학적 간극 폭을 구하는 식 중 정상류일 경우에 대한 다음 식을 이용하여 간극 폭을 구하였다.

$$Q = -\frac{\gamma}{12\mu} \frac{\Delta h}{L} t^3 w, \quad (1)$$

$$t_h = \left(\frac{12\mu QL}{\gamma w |\Delta h|} \right)^{1/3} \quad (2)$$

여기서, 불연속면의 폭을 w , 거리 L 만큼 떨어져 있는 두 점의 수두차가 Δh 이며, γ 은 유

체밀도, Q 는 단위시간당 유량이다. 또한 μ 는 물의 동점성계수로서 본 계산식에서는 15°C를 기준으로 적용하였다.

Tsang(1992)의 계산식에 의해 구해진 수리학적 간극을 그래프로 작도한 것은 Fig. 14~16으로서 x 축은 봉압의 변화를 나타낸 것이고 y 축은 수리학적 간극을 나타낸다. 또한 범례는 500kPa, 1,000kPa, 1,500kPa에 대한 투수압의 변화를 분류해 놓은 것이다.

그래프에서 실선은 각각의 평균 간극으로 봉압과 수리학적 간극의 상관관계를 아주 잘 나타내주고 있다. 즉, 봉압이 증가할수록 수리학적 간극은 투수계수에서와 마찬가지로 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 봉압에 의한 투수성 변화와 간극에 따른 투수성 변화를 비교해 보면 간극이 커질수록 투수성 또한 증가하는 특징을 알 수 있다. 특히 중·조립 화강암에서의 간극에 따른 투수성 증가가 세립 화강암에서 보다 크다는 것을 알 수 있다. 물론 봉압의 증가에 따른 투수계수의 변화도 세립질 화강암에서 보다 조립질 화강암으로 갈수록 투수계수가 보다 큰 변화를 보이며 감소하는 것을 알 수 있다.

결 언

본 연구는 지하수 공에서의 양수량을 증가시키기 위한 방법으로서의 공압파쇄 평가에 대한 기초적인 자료로서 단일불연속면에서의 간극에 따른 투수성 변화 특성을 구명한 것이다. 또한 방사성폐기물의 지층 처분과 관련하여 검토하여 보았다.

1) 투수압 및 봉압의 단계적인 증가에 따른 투수계수의 변화를 볼 때, 투수압이 증가할수록 단위시간당 유출량의 변화는 크지 않으며, 봉압이 증가할수록 투수계수가 감소하는 것을 시험을 통해 정량적으로 확인하였다. 따라서 봉압이 매우 클 경우, 즉 지하 심부에서의 투수계수는 봉압에 크게 의존됨을 알 수 있다. 또한 입도 별로 봉압에 따른 투수계수의 감소 폭을 살펴보면 세립질이 가장 큰 감소 폭을 보였으며, 조립질이 가장 작은 감소 폭을 나타냈다.

공압파쇄를 고려한 단일불연속면에서의 간극에 따른 특수성 변화에 대한 연구

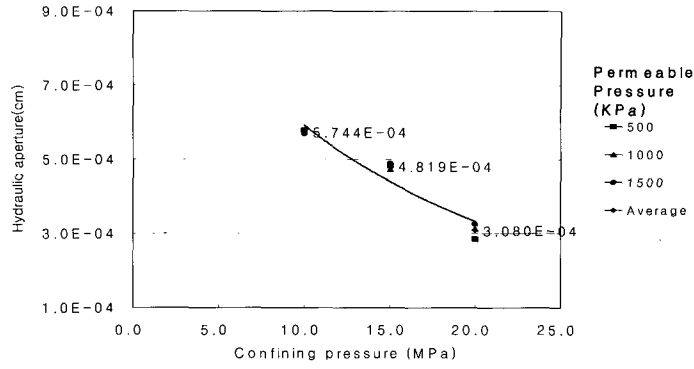


Fig. 14. The relationships between confining pressure and hydraulic aperture (fine-grained granite)

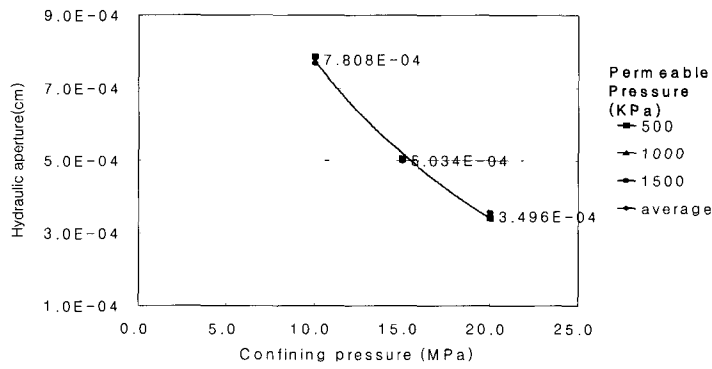


Fig. 15. The relationships between confining pressure and hydraulic aperture (medium-grained granite).

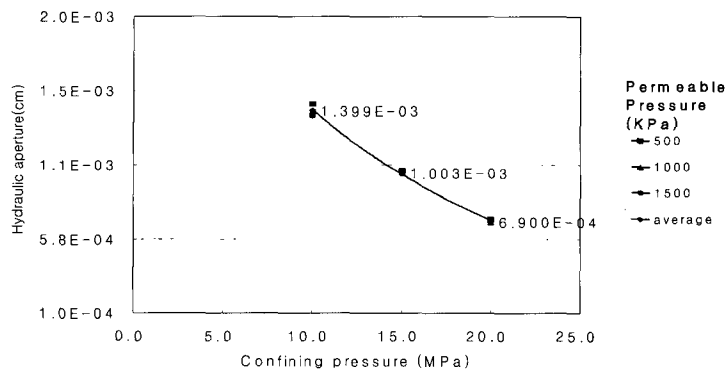


Fig. 16. The relationships between confining pressure and hydraulic aperture (coarse-grained granite).

2) 봉압의 증가에 따라 투수계수의 변화는 세립질 화강암에서 보다 조립질 화강암으로 갈수록 투수계수가 보다 큰 변화를 보이며 감소하는 것을 알 수 있으며, 따라서 조립질 화강암이 봉압에 보다 큰 영향을 받는 것으로 판단된다. 또한 일정한 봉압하에서의 투수계수는 결정의 크기에 의해 크게 좌우됨을 볼 수 있으며, 조립질과 중립질 공시체의 차이는 크지 않으나 세립질로 갈수록 투수계수가 조립질 및 중립질 공시체의 투수계수에 비해 크게 낮아지는 것으로 분석되었다.

3) 봉압과 수리학적 간극과의 상관관계에서 봉압의 증가에 따라 수리학적 간극은 지수적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 따라서 지하심부에 작용하는 봉압에 의해 투수계수가 감소되는 이유는 결국 봉압의 작용에 따른 간극의 감소에서 기인되는 것이라고 판단된다.

본 논문에서는 공압과쇄로 발생된 불연속면에서의 간극 및 봉압에 의한 간극을 수리학적 간극으로 해석하였으나 정확한 해석을 위해서는 실험에 의한 간극들의 실측치가 필요하다. 지금까지는 간극의 실측을 위해 실제 균열에 투수시험을 실시한 후 아세톤으로 세척하고, 그 다음 레진(resin)을 주입하여 굳힌 후 단면을 만들어 직접 측정하였으나(Gale, 1977) 간극이 작을 때는 주입이 대단히 어렵고, 불규칙한 간극에 레진을 고르게 주입한다는 것은 거의 불가능한 것으로 알려져 있다. 본 연구에 계속하여 간극의 실제 측정을 위한 콘포컬 레이저 현미경 시스템을 개발하였다. 거칠기를 고려한 간극의 실측을 위해 현재 시험 중에 있으며, 또한 균열을 통한 투수성의 정확한 해석을 위해 불연속면 거칠기의 정량적 해석도 수행 중에 있다.

사 사

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단, 농업기반공사의 연구비지원(과제번호#3-4-1)에 의해 수행되었다.

참고문헌

김만일, 1999, 암반손상에 따른 투수성 변화에 대한 연구, 안동대학교 대학원 석사학위논문, p. 27, 70-72, 74.

김선억, 윤현수, 김윤규, 장세원, 박덕원, 박용순, 이춘오, 이병태, 이병태, 김경수, 1990, 화강암류 석재자원 조사연구, 한국동력자원연구소, p. 235.

김정호, 이희일, 송운호, 이명중, 조성준, 신일철, 1998, 화강암 지역 석산 지역에서의 시추공레이다 탐사(경기도 포천군 가락 석재), 석재자원조사 및 산업화 연구, 한국자원연구소, p. 357-433.

김주용, 윤현수, 박석환, 박용순, 홍세선, 김선억, 이한영, 이병태, 이춘오, 2000, 석재·골재자원 부존조사 및 품질관리 기술, 산업자원부, p. 517.

송재용, 정교철, 박상주, 2002, 정호간 수리간섭을 이용한 지하수량 증가, 대한지질공학회 학술발표회, p. 125~128.

윤지선 역, 1995, 암의 역학, 구미서관, p.655.

이희석, 1999, 주기전단 하중하의 암석 절리의 역학적 및 수리학적 거동 연구, 서울대학교 대학원 박사학위 논문, p. 282.

정교철, 채병곤, 김만일, 서용석, 2001, 화강암의 손상과정에 따른 투수계수 특성 연구, 지질공학, 제11권, 제3호, p. 315-325.

Abelin, H., Brigersson, L., Morenc, L. Widen, H., Agren, T. & Neretnicks, I., 1991., A large scale flow and tracer experiment in granite 2. Results and interpretation. Water Resour. Res., Vol. 27, p. 3119-3135.

Ahlers, C. F., Finsterle, S. and Bodvarsson, G. S., 1999, Characterization and prediction of subsurface pneumatic response at Yucca Mountain, Nevada, J. Contaminant Hydrology, Vol. 38, p. 47-68.

Brawn, E. T., 1981, Rock Characterization Testing & Monitoring ISRM. Suggested

- Methods, p. 27-28.
- Brawn, S. R. and Scholz, C. H., Broad bandwidth study of the topography of natural rock surfaces, *J. Geophys. Res.*, Vol. 90(B14), p. 12575-12582.
- Brawn, S. R., 1987, Fluid flow through rock joints : The effect of surface roughness, *J. Geophys. Res.*, Vol. 92, (B2), p. 1337-1347.
- Ding, Y., Schuring, J. R. and Chan, P. C., 1999, Volatile contaminant extraction enhanced by pneumatic fracturing, *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, Vol. 3, No. 2, p. 69-76.
- Dury, O., Fisher, U. and Schulin, R., 1998, Dependence of hydraulic and pneumatic characteristics of soils on a dissolved organic compound, *J. Contaminant Hydrology*, Vol. 33, p. 39-57.
- Gale, J. E., 1977, Comparison of coupled fracture deformation and fluid flow models with direct measurements of fracture pore structure and stress-flow properties, *Proc. 28th U. S. Symp. on Rock Mechanics*, p. 1213-1222.
- Hakami, E. and Stephansson, O., 1993, Experimental technique for aperture studies of intersecting joints, *Eurock '93, Proc. ISRM Int. Symp. on Safety and Environmental Issues in Rock Eng.*, Lisbon, p. 301-308.
- Hakami, E., and Larsson, E., 1996, Aperture measurements and flow experiments on a single natural fracture, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 33. No. 4, p. 395-404.
- Illman, W. A. and Neuman, S. P., 2000, Type-curve interpretation of multilate single-hole pneumatic injection tests in unsaturated fractured rock, *GROUND WATER*, Vol. 38, No. 6, p. 899-911.
- Jeong, G. C., Seo, Y. S., Chae, B. G. and Kim, M. I., 2001, Change of crack characteristics induced by damage process, *Proc. of the 38th U.S. Rock Mechanics Symposium*, Washington D.C., p. 1191-1197.
- Keller, A. A., Roberts, P. V. and Blunt, M. J., 1999, Effect of fracture aperture variations on the dispersion of contaminants, *Water Resour. Res.*, Vol. 35. No. 1, p. 55-63.
- Moreno, L., Tsang, Y. W., Tsang, C. F., Hale, F. V. and Neretnieks, L., 1988, Flow and tracer transport in a single fractured: a stochastic model and its relation to some field observations, *Water Resour. Res.*, Vol. 24. No. 12, p. 2033-2048.
- Oda, M., 1986, An equivalent continuum model for coupled stress and fluid flow analysis in jointed rock masses, *Water Resour. Res.*, Vol. 22. No. 13, p. 1845-1856.
- Pyrak-Nolte, L. T. Myer, L. R., Cook, N. G. W. and Witherspoon, P. A., 1987, Hydraulic and mechanical properties of natural fractures in low permeability rock, *Proc. 6th ISRM Congress, Montreal*, Vol. 1, p. 225-231.
- Rayan, T. M. and Farer, I. W., 1987, Laboratory determination of fracture permeability, *Proc. of 28th U. S. Symp. on Rock Mechanics*, p. 593-600.
- Sundaram, P. N. and Frink, D., 1983, Electrical analogy of hydraulic flow through rock fractures, *Geotech. Testing J.*, Vol. 6(1), p. 3-9.
- Sundaram, P. N., Watkins, D. J., and Ralph, W. E., 1987, Laboratory investigations of coupled stress-deformation-hydraulic flow in a natural rock fracture, *Proc. 28th U. S. Symp. on Rock Mechanics*, p. 585-592.
- Tsang, Y. W. and Tsang, C. F., 1987, Channel

정교철, 김기중, 부성안, 서용석

model of flow through fractured media,
Water Resour. Res., Vol. 23. No. 3, p.
467-479.

Tsang, Y. W. and Tsang, C. F., 1988, Flow and
tracer transport in fractured media: a
variable aperture channel model and its
properties, Water Resour. Res., Vol. 24.
No. 12, p. 2049-2060.

Tsang, Y. W., 1992, Usage of "equivalent
apertures" for rock fractures as derived
from hydraulic and tracer tests, Water
Resour. Res., Vol. 28. No. 5, p. 1451-1455.

Zhao, J., 1997, Joint surface matching and shear
strength, part a: joint matching
coefficient(JMC), Int. J. Rock Mech. Min.
Sci. & Geomech. Absrt., Vol. 34(2), p.
173-178.

鈴木, 長田昌, 1996, 變形下における岩石の透水性
に関する研究, 土木學會第51回年次 學術講
演會, p. 616-617.

鈴木健一郎, 1995, 不連続性岩盤の 水理・力學特性
の 評價と 岩石風化に 關する 基礎的 研究,
埼玉大學 博士學位論文, p. 61-62.

e-mail : ttankcho@hanmail.net

부성안

농업기반공사 농어촌연구원

425-170 경기도 안산시 사동 1031-7

TEL : 031-400-1855

FAX : 031-409-6055

서용석

한국건설기술연구원 토목연구부

411-712 경기도 고양시 일산구 대화동 2311

Tel: 031-910-0225

Fax: 031-910-0211

e-mail: ysseo@kict.re.kr

정교철

안동대학교 자연과학대학 지구환경과학과

760-749 경북 안동시 송천동 388

TEL : 054-820-5753

FAX : 054-823-1627

e-mail : jeong@andong.ac.kr

Dept. of Earth and Environmental Sciences

Andong National University

760-749, Korea

김기중

한주토건(주)

680-020 울산광역시 남구 삼산동 1599-4

TEL : 052-260-9093

FAX : 052-260-6837