

대심도 환경 봉압하 단일불연속면에서의 투수특성에 대한 연구

김 기 종
정 교 철

한주토건(주)
안동대학교 지구환경과학과

1. 서 언

지하공간 개발의 대상이 되는 암반은 대부분 결정질 암반으로서 미고결 충적층이나 다공질 암반에 비해 지하수의 유동성이 극히 제한되는 암반이다. 이러한 암반 내에 불연속면이 존재하는 경우 불연속면을 통하여 흐르는 지하수 유동양상은 다공질 매체에서의 지하수 유동과 전혀 다른 성격을 보인다. 따라서, 지하 암반의 불연속면의 발달 상태와 그 특성에 대한 정밀조사 및 연구자료는 암반을 개발·이용하기 위한 기초적 단계이며, 그 지하 구조물의 안정성을 유지하는데 필수적인 자료를 산출하게 된다. 또한, 지하에 유입된 오염물질은 자체적으로 느린 속도로 이동하기도 하지만, 이들이 지하수와 접하게 되면 암반 내 불연속면을 따라 지하수와 함께 이동하게 되므로 그 이동성이 급격히 증가하게 된다. 따라서, 암반 내에 발달하는 불연속면을 대상으로 한 수리지질학적 특성에 관한 연구는 지하수 유동과 오염물질 거동을 예측함에 있어 매우 중요하다.

따라서 본 연구는 지하 심부에 작용하는 봉압 하에서 단일불연속면이 가지는 투수특성을 규명하기 위한 것으로 주요 대상이 되는 신선한 조립, 중립, 세립질 화강암 공시체를 대상으로 단계적으로 봉압을 증가시키면서 봉압과 투수계수와의 상관관계를 검토하고 봉압과 수리지질학적 간극을 비교·검토하였다.

2. 연구방법

본 연구에 있어서 암석공시체 제작은 심층암반을 대상으로 하기 때문에 무결암에 가까운 신선한 암석을 대상으로 제작하는 것이 필수적이며, 이에 부합되는 암석으로 화강암을 선정하였다. 또한 본 연구에 사용된 암석공시체는 세립질, 중립질, 조립질 화강암으로 NX 코아 바렐로 채취한 코아를 심도별로 구분하고 Crack과 맥(vein), 그리고 불연속면의 흔적이 없는 신선한 암석코아를 선정한 후 코아절단기로 직경과 길이의 비를 1:2로 절단하여 암석공시체를 제작하였다.

실제 지하수의 유동특성을 재현시키기 위해 모든 공시체를 단일불연속면을 형성시켰으며,

단일 불연속면이 형성된 공시체는 다시 삼축압축실험에 사용되는 Base cell assembly를 이용하여 공시체에 최대 10MPa~20MPa 까지 봉압을 가해줌으로써 지하 심부 암반환경을 재현한 뒤 영국 ELE International의 Pressure Test 3500을 사용하여 단계적으로 투수압을 증가시키면서 단일불연속면의 투수특성을 파악 하였다. 그리고 각각의 공시체의 단일불연속면에 대한 거칠기를 측정하여 입도에 따른 JRC 값을 측정한 뒤 비교·검토하였다.

또한 암석 공시체의 수리학적 간극을 구하여 봉압의 증가에 따른 수리학적 간극의 감소와 투수계수의 감소와의 상관관계를 비교·검토하였다.

3. 단일불연속면에 대한 투수특성

연구에 사용되는 암석공시체는 썬기형 연결장치를 이용한 압열인장시험에 의해 완벽한 단일불연속면이 형성되어 있으며, 투수시험에서 투수계수를 구하기 위해서는 실내투수시험 중 정수위 투수시험을 적용하여 시험을 실시하였다.

투수시험 결과 세립질, 중립질, 조립질 모든 공시체에서 봉압의 변화에 따라 투수계수가 낮아지는 것을 알 수 있다. 또한 봉압이 10MPa 일 때의 투수압의 증가에 대한 투수계수 값의 편차와 15MPa 일 때의 투수압의 증가에 대한 투수계수 값의 편차가 감소하는 양상을 보이고 있으며, 20MPa 일 때는 더욱 더 편차가 감소하여 봉압이 증가할수록 투수계수의 편차가 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 지하 심부 암반에서의 투수계수는 투수압과는 별다른 상관성을 보이지 않으나 횡으로 작용하는 봉압에 의해 영향을 받기 때문에 심부의 투수계수는 투수압 보다는 봉압에 의존함을 알 수 있다(fig 1 ~ fig 9).

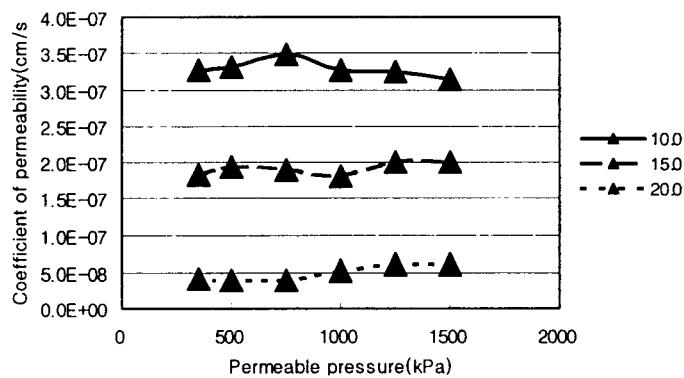


Fig. 1 The relationships of confining pressure and permeability(BFS-1)

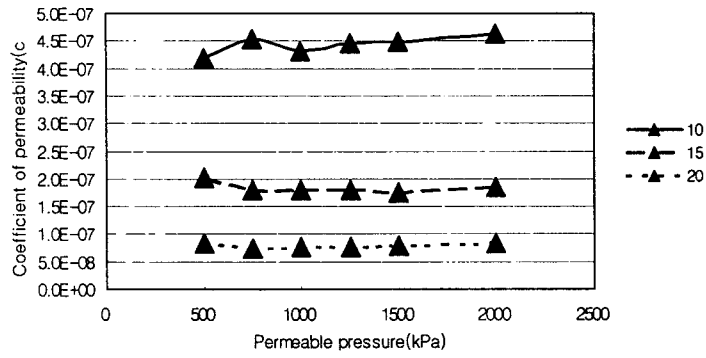


Fig. 2 The relationships of confining pressure and permeability(BFS-2)

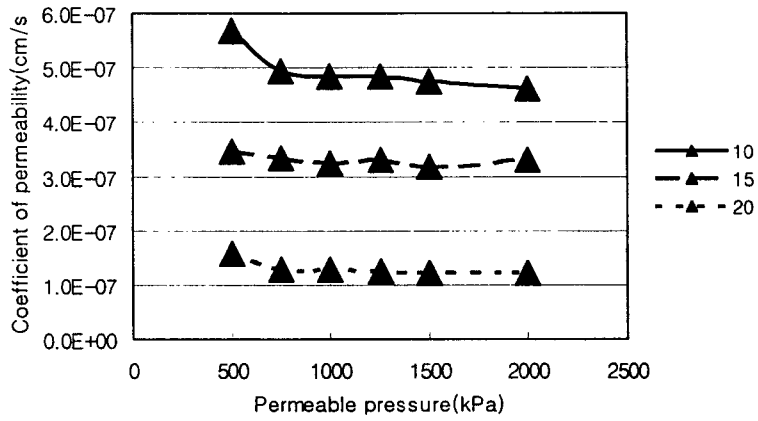


Fig. 3 The relationships of confining pressure and permeability(BFS-3)

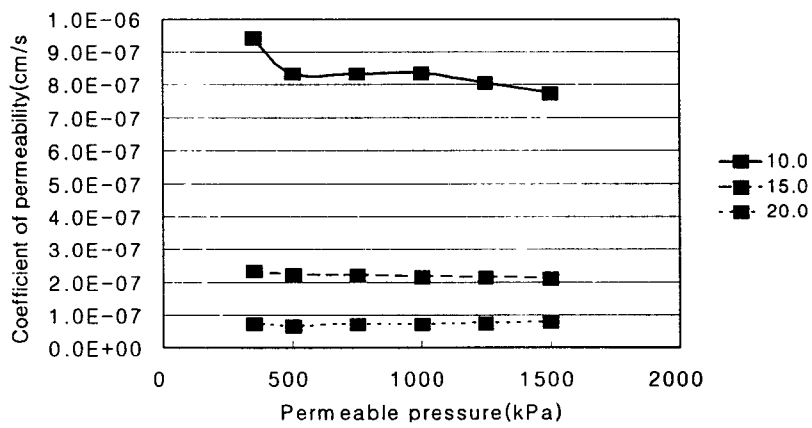


Fig. 4 The relationships of confining pressure and permeability (BMS-1)

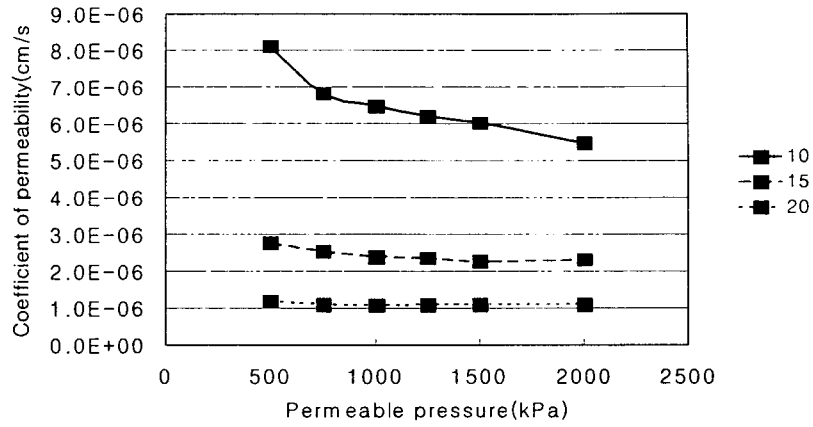


Fig. 5 The relationships of confining pressure and permeability(BMS-2)

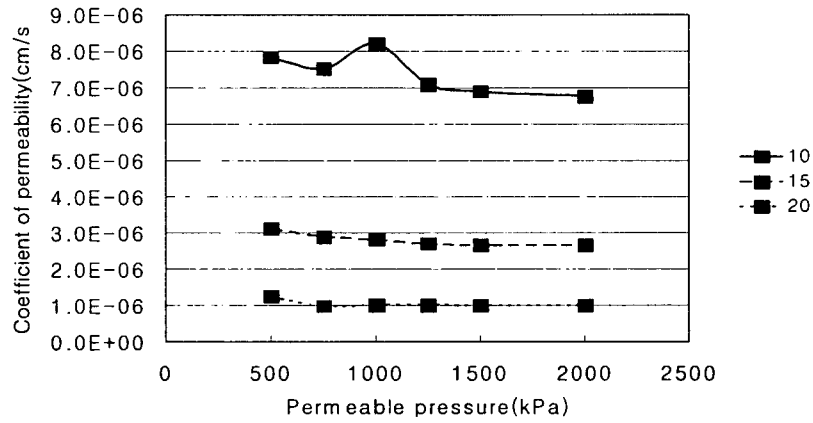


Fig. 6 The relationships of confining pressure and permeability(BMS-3)

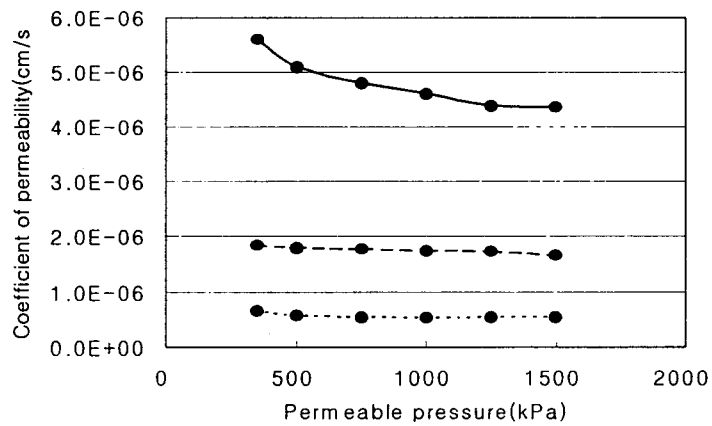


Fig. 7 The relationships of Confining pressure and permeability(BCS-1)

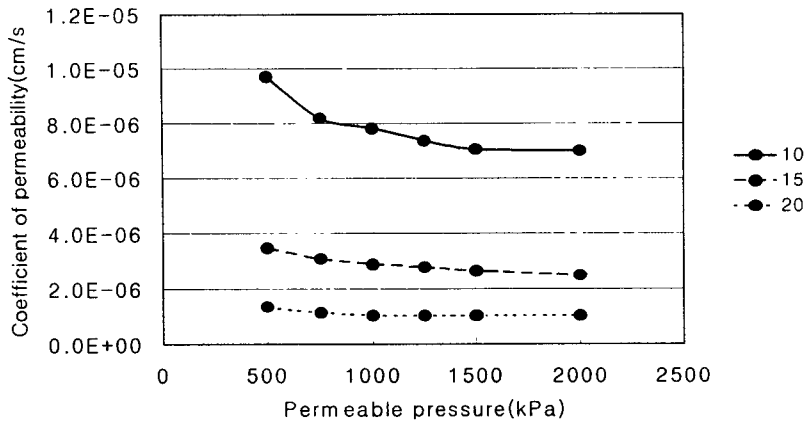


Fig. 8 The relationships of Confining pressure and permeability(BCS-2)

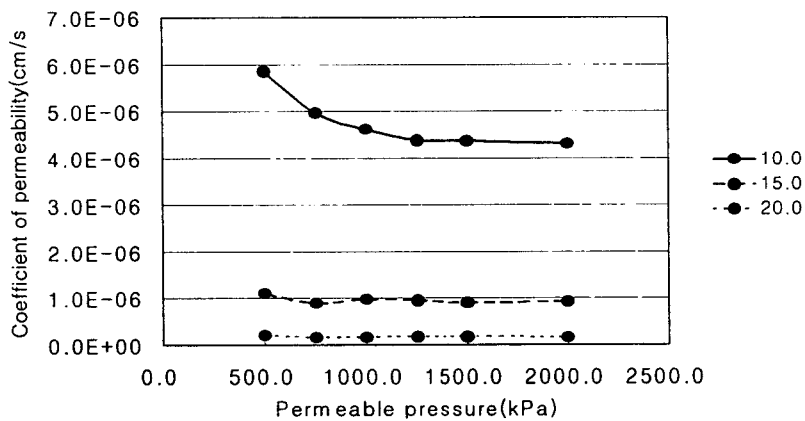


Fig. 9 The relationships of Confining pressure and permeability(BCS-3)

4. 거칠기 측정결과

본 연구에서 각 공시체의 단일불연속면에 대한 거칠기 측정을 위하여 Fig. 4.21과 같이 단일불연속면이 형성된 상부를 기준으로 Left line을 A-A' 단면, Center line을 B-B' 단면, Right line을 C-C' 단면으로 선정하여 JRC 값을 측정하였으며, Profile gauge를 이용하여 불연속면을 측정한 후 이를 디지털화(digitizing)하여 각각의 거칠기 등급을 Barton N. & Choubey, (1977)가 제시한 표준등급과 비교하여 나타내었다. 세립질 공시체는 5~10으로 비교적 낮거나 중간 정도의 등급인 3~5 등급의 범위를 나타내고 있으며, 중립질 공시체는 8~14로 5~7 등급의 범위를 나타내고 있다. 또한 조립질 공시체의 JRC 값은 10~14 등급으로 BCS-2번 공시체의 C-C' 단면을 제외하고 대부분의 단면에서 13~14점의 JRC 값을 나타내고 있어 JRC 값은 입도가 커질수록 높게 나타나는 결과를 보였다. 즉, 단일불연속면을 형성시키기 위한 썬기형 압열인장시험 시 암석공시체의 파괴는 입자간의 작은 미세균열

에 의해 큰 영향을 받기 때문에 입자가 작은 세립질에 비해 상대적으로 입자가 큰 조립질암에서 JRC 값이 크게 나타난 것이다.

5. 암석의 수리학적 간극 폭

본 실험에 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 감소한다는 것이 입증되었다. 이는 봉압이 증가하면 단일불연속면의 불연속면에 봉압이 집중될 것이고 이로 인해 간극이 점점 더 감소되어 실제 투수계수의 감소에 영향을 미치게 될 것이다.

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

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

여기서, 불연속 면의 폭을 w , 거리 L 만큼 떨어져 있는 두 점의 수두차가 Δh 이며, γ 은 유체밀도, Q 는 단위시간당 유량이다. 그리고 μ 는 물의 동점성계수로서 본 계산식에서는 15°C를 기준으로 적용하였다.

Tsang(1992)의 계산식에 의해 구해진 수리학적 간극을 그래프로 작도한 것은 Fig. 10~12로서 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 나타내 주고 있다. 즉, 봉압이 증가할수록 수리학적 간극은 투수계수에서와 마찬가지로 감소하는 것으로 나타났다.

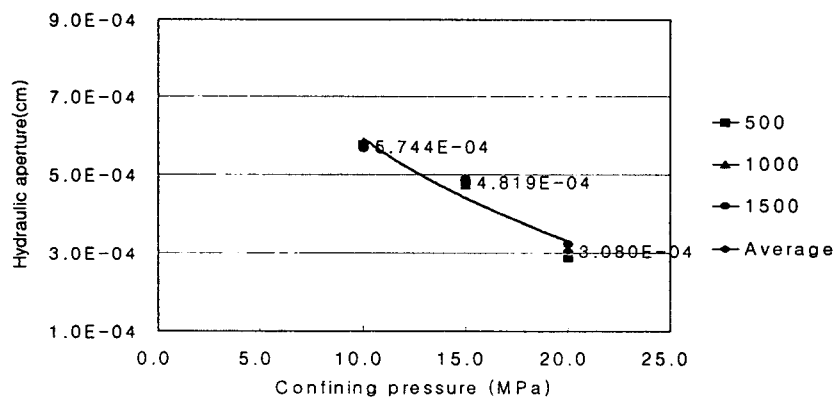


Fig. 10 The relationships of confining pressure and hydraulic aperture (Fine-grained granite)

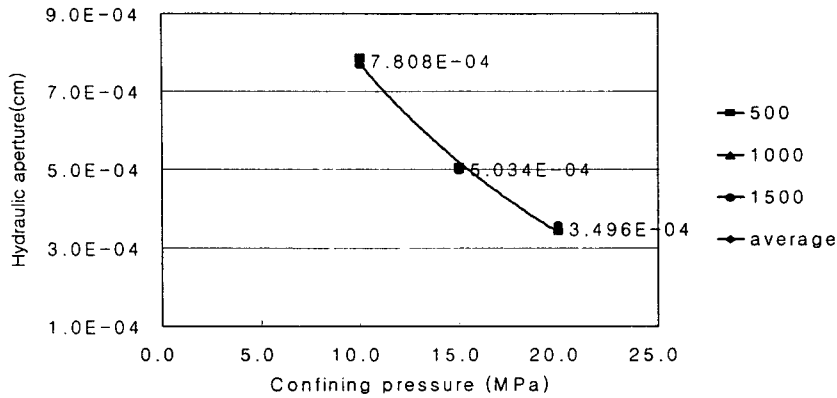


Fig. 11 The relationships of confining pressure and hydraulic aperture(Medium-grained granite)

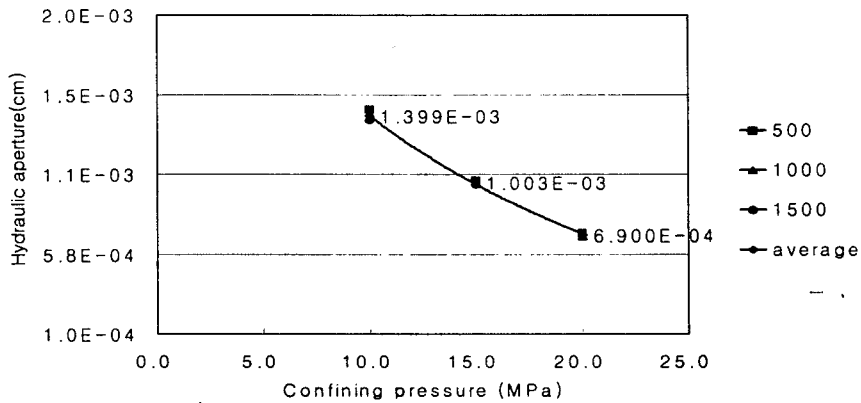


Fig. 12 The relationships of confining pressure and hydraulic aperture(Coarse-grained granite)

6. 결 언

본 연구에 사용된 단일불연속면은 썩기형 연결장치를 설치한 압열인장시험에 의해 인공적으로 형성시킨 것으로서 절리변수 중에서 가장 중요한 간극과 거칠기와 같은 인자들을 사실적으로 표현시켜 자연절리에 최대한 가깝게 공시체를 제작하였다. 또한 최대 20MPa까지 봉압을 줌으로써 지하 심부 1,000m 깊이의 심부환경을 재현하여 지하수 투수특성은 파악하였다. 투수압, 봉압, JRC값 및 간극의 변화에 따른 투수성 변화를 볼 때, 지하 천부에서는 각각의 요소에 의해 개별적으로 지하수 유동에 영향을 미치나, 지하 심부에서의 지하수 및 유체 유동특성은 대부분 봉압에 의해 좌우된다. 따라서 고준위 방사성 폐기물의 심층처분에 있어 봉압에 대한 연구가 선행되어야 할 것이다.

참고문헌

- 김만일, 1999, 암반손상에 따른 투수성 변화에 대한 연구, 안동대학교 대학원 석사학위논문, p. 27, 70-72, 74.
- 이희석, 1999, 주기전단 하중하의 암석 절리의 역학적 및 수리학적 거동 연구, 서울대학교 대학원 박사학위 논문, p. 37-40.
- 정교철, 경재복, 김종우, 김지수, 김학준, 손호웅, 함세영, 1999, 토목지질공학, 시그마프레스, p. 43.
- Abelin, H., Brigrersson, L., Moreno, L. Widen, H., Agren, T. & Neretnieks, I., 1991., A large scale flow and tracer experiment in granite 2. Results and interpretation. *Water Resour. Res.*, Vol. 27, p. 3119-3135.
- Bandis, S. C., Lumsden, A. C. and Barton, N. R., 1983, Fundamentals of rock joint deformation, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 20, No. 6, p. 249-268.
- Barton, N. and Choubey, V., 1977, The shear strength of rock joints in theory and practice, *Rock Mech.* Vol. 10, p. 1-54.
- 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.
- 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 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.
- 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. Sympo. 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. Sympo. on Rock Mechanics*, p. 585-592.
- Suzuki Kenichiro, 1995, 불연속성암반의 수리·역학특성의 평가와 암석풍화의 관계에 대한 기초적 연구, *saitama university 박사학위논문*, p. 61-62
- 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, 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.