

화강암의 수리적 특성을 고려한 유효압력법칙

윤 용 균¹⁾

An Effective Pressure Law for the Transport Property of Granite

Yong-Kyun Yoon

ABSTRACT Permeability was not represented as a simple function of the difference between confining pressure(P_c) and pore pressure(P_p). The effective pressure(P_e) for measurements of the permeability is shown to be $P_c - \alpha P_p$, where α is a coefficient of effective pressure. Local values of α were determined at intervals along the pressure path which range 25 MPa to 55 MPa. The values of α ranged 0.65 to 1.09 for Pocheon granite and 1.20 to 1.43 for Wonju granite. Also, the value of α calculated by the cross-plotting method was 0.90 for Pocheon granite, 1.59 for Wonju granite and 4.35 for jointed Pocheon granite. α was found to be stress-history dependent.

1. 서 론

공극수압은 암석의 역학적 특성 및 수리적 특성에 큰 영향을 미치는 중요한 지질학적 변수이다. 공극수압이 암석의 거동에 미치는 영향을 연구하기 위해서는 보통 유효압력법칙을 사용하게 된다. 유효압력법칙에 따르면 봉압대신에 유효압력을 사용하면 포화 암석의 강도는 건조 암석의 강도와 동일한 것으로 나타난다. 투수계수도 봉압과 공극수압에 따라 변하기 때문에, 암석의 투수계수에 대해서도 유효압력법칙을 적용할 수가 있다. 유효압력(P_e)은 일반적으로 다음 식과 같이 봉압(P_c)과 공극수압(P_p)의 함수로 표시된다.^{1,2)}

$$P_e = P_c - \alpha P_p \quad (1)$$

(1)식에서 α 는 유효압력계수로서 암종, 공극율, 공극의 기하학적 특성에 따라 달라지게 된다.

Terzaghi는 토양에 대한 강도 실험을 통하여 $\alpha=1$ 인 전통적인 유효압력법칙을 제안하였다. 그러나, 많은 연구 결과에 따르면 α 는 1 이외의 값을 갖는 것으로 알려져 있으며, 동일한 암석에 대해서도 고려하는 물성이 달라지면 유효압력계수는 변하게 된다.^{1,6)} Walsh⁶⁾는 Kranz 등⁷⁾이 수행한 인장절리 시험편에 대한 투수시험 결과에 교차작도법(Cross-plotting method)을 적용하여 유효압력계수를 계산한 결과, 인장절리 시험편에 대

한 유효압력계수는 0.56이 되어 전통적인 유효압력법칙과 다르다는 것을 제안하였다. 특히, Bernabe²⁾는 유효압력계수는 일정한 상수가 아니고 봉압의 변화에 따라 달라지기 때문에, 적용한 봉압의 범위가 큰 경우에는 (1)식의 적용에 주의를 기울여야 한다고 하였다.

본 연구에서는 기발표된 포천화강암과 원주화강암 및 인장절리 포천화강암에 대한 투수시험 결과¹⁰⁾를 해석하여 유효압력계수를 계산하였다. 유효압력계수의 계산에는 교차작도법⁶⁾과 국부적인 유효압력계수 계산법²⁾을 적용하였으며, 암종과 응력역 및 절리의 유·무가 유효압력법칙에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 유효압력법칙

2.1 이론적인 유효압력법칙

투수계수는 공극이나 절리를 통한 유체의 유동 용이성을 나타내는 변수이기 때문에, 투수계수를 고려한 유효압력법칙을 유도하기 위해서는 봉압과 공극수압의 적용에 따른 유체 유동로의 체적 변화량을 고려해야 한다.

Robin¹⁾은 암석을 선형, 탄성 다공질체로 가정하여 공극의 체적 변화량을 고려한 유효압력계수를 다음과 같이 유도하였다.

1) 정회원, 세명대학교 자원환경공학과 조교수

$$\alpha = 1 - \frac{\phi K}{K_1 - K} \quad (2)$$

여기서, ϕ 는 암석의 공극율, K 는 건조 암석의 체적탄성계수(Bulk modulus), K_1 는 암석의 고유체적탄성계수 또는 광물입자의 탄성계수이다. 예를 들어 공극율과 0-50 MPa 봉압 범위에서의 체적탄성계수가 알려진 Westerly 화강암 ($\phi=0.008$, $K=1.9 \times 10^4$ MPa, $K_1=4.6 \times 10^4$ MPa)^{3,8,9)}에 대한 유효압력계수를 (2)식을 이용하여 계산하면, 이론적인 유효압력법칙은 다음과 같이 표시된다.

$$P_c = P_c - 0.99 P_p \approx P_c - P_p \quad (3)$$

(3)식에서 보는 바와 같이 투수계수 특성을 고려한 이론적인 유효압력법칙은 전통적인 유효압력법칙과 동일한 형태로 표시됨을 알 수 있다.

체적탄성계수에 대한 실측 자료가 없는 관계로 국내산 화강암에 대한 정확한 이론적인 유효압력계수를 계산할 수는 없지만, 국내산 화강암의 공극율이 Westerly 화강암과 유사하다는 것을 고려하면 국내산 화강암의 투수계수 특성을 고려한 이론적인 유효압력법칙은 전통적인 유효압력법칙과 유사할 것으로 추정된다. 그러나, Robin¹⁾과 Walsh⁶⁾가 지정한 바와 같이 암석의 거동은 비선형적이기 때문에 체적탄성계수도 압력에 따라 변하게 된다. 따라서, 유효압력계수도 주어진 압력의 전 범위에 걸쳐 일정한 상수로 표현되는 것이 아니고 압력에 따라 변할 것으로 예상할 수 있다. 또한, 절리암석의 경우에는 절리의 거칠기가 유효압력계수에 영향을 미치기 때문에 (2)식에서와 같이 공극율과 체적탄성계수만으로 유효압력계수를 계산하는 것은 상당한 오차를 수반할 수 있다.

2.2 실험적인 유효압력법칙

유효압력법칙이 암석의 투수계수에 대해서도 성립한다고 가정하면, 공극수압이 0일 때의 봉압에 따른 투수계수 측정 결과로부터 다음 식을 사용하여 임의의 봉압과 공극수압에서의 투수계수를 추정할 수 있다.^{1,2)}

$$k = k(P_c, P_p) = k(P_c, 0) = k'(P_c) \quad (4)$$

(4)식에서 보는 바와 같이 투수계수는 봉압과 공극수압의 2변수 함수로 표시되기 때문에, (1)식을 만족하는 (4)식의 그래프를 그리기 위하여 (1)식을 (4)식에 대입

하면 다음과 같이 된다.

$$k = k'(P_c - \alpha P_p) \quad (5)$$

(5)식의 좌변에 임의의 상수를 대입하여 그래프를 그리면 (5)식은 기울기가 α 인 평행한 직선군으로 표시된다. 그러나, 주어진 범위의 봉압하에서 (1)식이 성립하지 않고 유효압력계수가 봉압에 따라 변한다면, (5)식이 평행한 직선군으로 표시되는 미소 범위의 봉압 구간을 가정해야 한다.

본 연구에서는 2가지 방법을 사용하여 유효압력계수를 계산하였다. 첫 번째 방법은 교차작도법으로서, 고려하는 전 봉압 범위에서 유효압력계수가 일정하다고 가정한다.⁶⁾ 두 번째 방법은 봉압에 따라 유효압력계수가 변한다는 것을 가정하여, 봉압 증분 단계마다 국부적인 유효압력계수를 계산한다.²⁾

2.2.1 교차작도법을 이용한 유효압력계수의 계산

Walsh⁶⁾는 이론적으로 투수계수와 유효압력과는 다음과 같은 관계가 성립한다고 하였다.

$$k^{1/3} = A + B \ln(P_c) \quad (6)$$

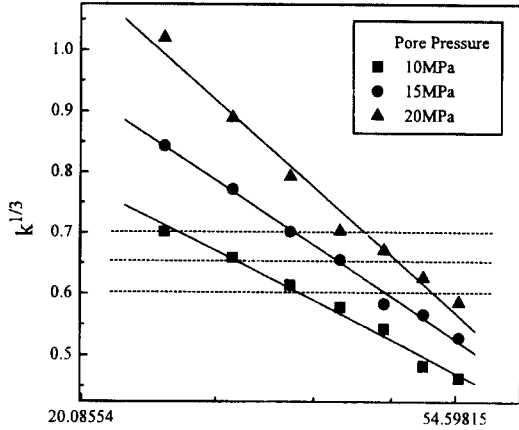
여기서, A, B는 회귀변수이다. 실험적으로 구한 유효압력법칙이 타당하다면, (6)식에서와 같이 $k^{1/3} \propto \ln(P_c)$ 인 관계가 성립하게 됨으로 본 연구에서는 실험적으로 결정한 유효압력계수의 타당성을 검증하기 위하여 (6)식을 적용하였다.

교차작도법을 이용하여 유효압력계수를 구하는 방법은 다음과 같으며, 본 연구에서는 Walsh⁶⁾가 사용한 방법과 다른 절차를 적용하였다. 1단계로, 각 공극수압에서 $\ln(P_c)$ 의 함수로서 $k^{1/3}$ 을 도시하고, 일정한 투수계수에서의 교차점(봉압과 공극수압)을 읽는다(Fig. 1(a) 참조). 2단계에서는 1단계에서 구한 일정한 투수계수에서의 봉압과 공극수압을 이용하여 P_c vs P_p 그래프를 그린다(Fig. 1(b) 참조). 만일 (1)식으로 주어진 유효압력법칙이 타당하다면 (2)단계에서 그린 그래프는 평행한 직선군으로 표시되며, 직선의 기울기가 유효압력계수가 된다.

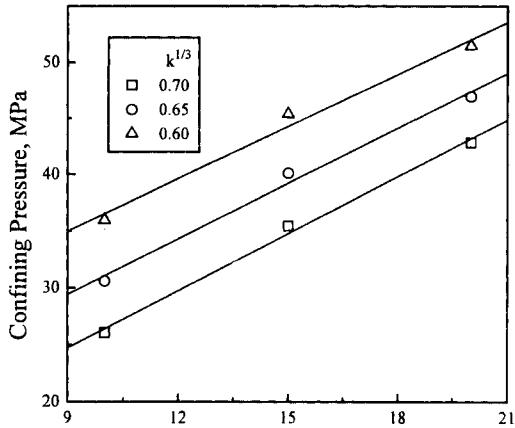
2.2.2 봉압 증분에 따른 국부적인 유효압력계수의 계산

투수계수가 봉압과 공극수압의 함수라고 가정하면, 투수계수의 미분을 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$dk = \left(\frac{\partial k}{\partial P_c} \right) dP_c + \left(\frac{\partial k}{\partial P_p} \right) dP_p \quad (7)$$



(a)



(b)

Fig. 1. Cross-plotting method. (a) Permeability data of Wonju granite are plotted as $k^{1/3}$ with $\ln(P_c)$. Dashed lines refer to cross-plots in Fig. 1(b). (b) Data from Fig. 1(a) are cross-plotted to find the expression of effective pressure. All curves have the similar slope

작은 범위의 봉압 구간에서는 유효압력계수가 변하지 않는 것으로 가정하였기 때문에, 점 $k_c=(P_c, P_p)$ 의 근방에서 (4)식은 평행한 직선군 ($P_c-\alpha P_p=\text{constant}$)에 의해 표시될 수 있다. 평행한 직선군에서는 투수계수를 일정한 관계로 (7)식은 다음과 같이 표시된다.

$$\left(\frac{\partial k}{\partial P_c}\right) dP_c + \left(\frac{\partial k}{\partial P_p}\right) dP_p = 0 \quad (8)$$

또한, (1)식은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$dP_c - \alpha dP_p = 0 \quad (9)$$

(8)식을 (9)식에 대입하면 다음 식과 같다.

$$\alpha = - \left(\frac{\partial k}{\partial P_p}\right) \div \left(\frac{\partial k}{\partial P_c}\right) \quad (10)$$

(10)식의 유효압력계수를 실험적으로 구하기 위해서는 2단계의 실험을 실시하여야 한다. 1단계 실험에서는 봉압을 변화시키고 공극수압을 일정하게 유지한 상태로 ($dP_c=\delta P, dP_p=0$) 투수계수를 측정한다. 2단계 실험에서는 봉압을 일정하게 유지하고, 1단계에서 변화시킨 봉압의 크기와 동일한 양만큼 공극수압을 변화시켜 ($dP_c=0, dP_p=\delta P$) 투수계수를 측정한다. 이때 (7)식으로부터 다음 두식을 얻을 수 있다.

$$\delta k_c = \left(\frac{dk}{dP_c}\right) \delta P \quad (11)$$

$$\delta k_p = \left(\frac{dk}{dP_p}\right) \delta P \quad (12)$$

(11), (12)식을 (10)식에 대입하여 정리하면 다음 식과 같이 표시된다.

$$\alpha = - \left(\frac{\delta k_p}{\delta k_c}\right) \quad (13)$$

3. 결과 및 고찰

윤용균 등¹⁰⁾은 봉압과 공극수압을 변화시키며 투수시험을 실시하였으며, 이러한 투수시험 결과는 2절에서 제시한 교차작도법과 국부적인 유효압력계수의 계산에 사용될 수 있다. 윤용균 등¹⁰⁾이 측정된 포천화강암과 원주화강암 및 인장절리 포천화강암에 대한 투수시험 결과가 Table 1에 표시되어 있다(시험편에 가해진 봉압은 25~55 (MPa) 범위에서 5 MPa 간격으로 단계적으로 재하시켰으며, 포천화강암의 경우에는 봉압을 55 MPa까지 증가시킨 후 봉압을 25 MPa까지 단계적으로 재하시키며 측정을 실시하였다).

포천화강암과 원주화강암에 대해서는 국부적인 유효압력계수를 구하는 방법과 교차작도법을 동시에 적용하였으며, 공극수의 유동방향과 평행한 절리가 있는 인장절리 포천화강암에 대한 유효압력계수의 계산에는 교차작도법만을 적용하였다.

Fig. 2는 포천화강암에 대한 봉압에 따른 국부적인 유효

Table 1. Results of permeability measurements from Yoon & Lee¹⁰⁾ for Pocheon granite, Wonju granite and jointed Pocheon granite. k is in μD

P_c (MPa)	Pocheon granite P_p (MPa)			Wonju granite P_p (MPa)			Jointed Pocheon granite P_p (MPa)		
	10	15	20	10	15	20	3	5	7
25	2.322	3.042	4.572	0.346	0.601	1.062	15.43	37.90	66.38
30	1.806	2.635	3.112	0.286	0.460	0.704	9.749	23.63	38.89
35	1.241	1.694	2.225	0.232	0.347	0.498	6.553	14.66	25.78
40	1.068	1.341	1.635	0.193	0.282	0.348	4.335	9.298	16.37
45	0.765	1.026	1.188	0.160	0.199	0.302	3.457	6.989	11.27
50	0.596	0.772	1.108	0.113	0.182	0.245	2.291	5.013	8.446
55	0.625	0.750	1.055	0.099	0.148	0.201	1.859	4.181	6.503
50	0.600	0.830	1.163						
45	0.744	1.011	1.279						
40	0.873	1.266	1.743						
35	0.981	1.404	1.989						
30	1.216	1.955	2.980						
25	1.634	2.681	4.210						

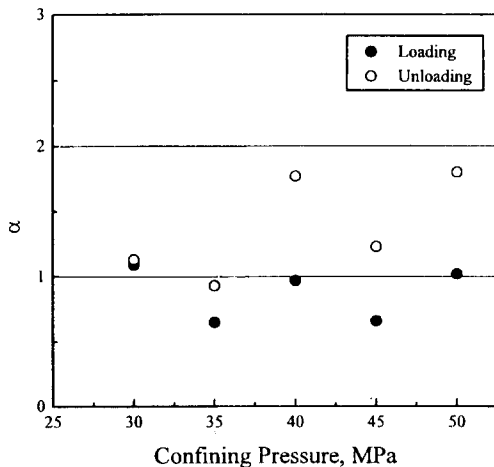


Fig. 2. α vs. confining pressure for Pocheon granite.

효율력계수의 변화를 나타낸다. (10)식에서 예상된 바와 같이 유효압력계수는 적용된 봉압 범위에서 일정하지 않고 봉압에 따라 변하는 것으로 나타났다. 또한, 유효압력계수는 재하단계와 제하단계에서 상당한 값의 차이를 나타내어 응력이력에 의존하는 것으로 나타났다. 재하단계에서 국부적인 유효압력계수는 0.65~1.09가 되었으며, 평균적으로 0.88을 나타내었다. 제하단계에서는 0.93에서 1.80까지 변하여 평균은 1.37이 되었다.

포천화강암에 교차작도법을 적용하여 유효압력계수를 구한 결과 재하단계에서는 $\alpha=0.90$, 제하단계에서는 $\alpha=1.74$ 로 나타났다. Fig. 3은 교차작도법에 의해 결정된 유효압력계수의 타당성을 검토하기 위하여 투수시

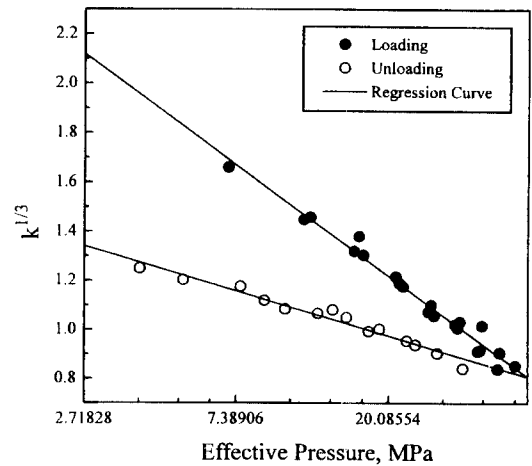


Fig. 3. Relationships between $k^{1/3}$ and $\ln(P_e)$ for Pocheon granite. (Loading: $P_e = P_c - 0.90 P_p$, Unloading: $P_e = P_c - 1.74 P_p$)

험 결과를 $k^{1/3}$ vs. $\ln(P_e)$ 관계에 따라 도시한 것이다. (1)식과 (6)식으로 부터 예상된 바와 같이 모든 봉압과 공극수압에서 측정된 투수계수는 유효압력에 따라 선형적인 관계를 나타내었으며, 이러한 결과로부터 교차작도법을 이용하여 구한 유효압력계수가 타당하다는 것을 알 수 있다.

원주화강암에 대한 평균적인 국부적 유효압력계수는 1.31, 교차작도법에 의한 유효압력계수는 1.59로 나타났다. Fig. 4는 교차작도법에 의한 유효압력법칙과 국부적인 유효압력계수를 이용한 유효압력법칙 및 전통적인 유효압력법칙의 타당성을 상호 비교하기 위하여,

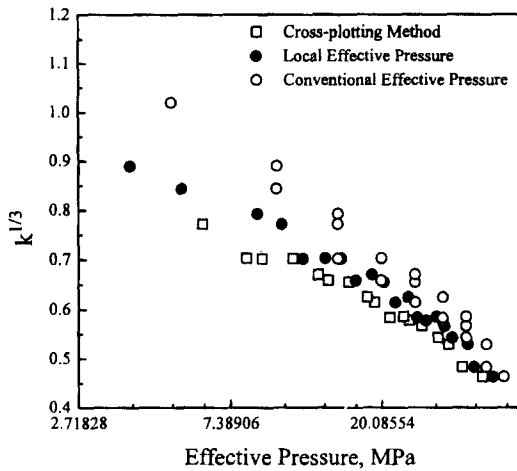


Fig. 4. Relationships between $k^{1/3}$ and $\ln P_e$ for Wonju granite. (Cross-plotting method : $P_e = P_c - 1.59 P_p$, Local effective pressure : $P_e = P_c - 1.31 P_p$, Conventional effective pressure : $P_e = P_c - P_p$)

원주화강암에 대한 투수계수를 $\ln(P_e)$ 에 따라 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 교차작도법과 국부적인 유효압력계수를 고려한 유효압력법칙은 선형적인 관계를 나타내어 (6)식을 만족하는 것으로 나타났다. 그러나, 전통적인 유효압력법칙을 사용한 경우에는 선형적인 관계에서 벗어나는 것으로 나타났기 때문에, 전통적인 유효압력법칙의 적용에 주의를 기울여야 할 것으로 생각된다.

인장절리 포천화강암에 교차작도법을 적용하여 유효압력계수를 계산한 결과 $\alpha=4.35$ 가 되었다. 유효압력계수가 1보다 크다는 것은 공극수압이 투수계수에 미치는 영향이 봉압보다 상대적으로 더 크게 작용하는 것으로 생각할 수 있다. 인장절리 포천화강암의 유효압력계수는 신선한 포천화강암에 비해 약 5배 정도 큰 것으로 나타났는데, 이러한 결과는 절리암석의 투수계수에 미치는 공극수압의 영향이 신선암편에 비해 더욱 크게 작용한다는 것을 뜻한다. 인장절리 포천화강암에 대한 투수계수가 $\ln(P_e)$ 의 함수로서 Fig. 5(a)에 표시되어 있다. 신선암의 경우와 마찬가지로 선형적인 경향을 나타내어 (6)식을 만족하는 것으로 나타났다. Fig. 5(b)는 인장절리 포천화강암의 $k^{1/3}$ 을 $\ln(P_c - P_p)$ 의 함수로 표시한 것이다. 그림에서 보듯이 전통적인 유효압력법칙에 따른 결과는 (9)식에서 상당히 벗어나는 것으로 나타났으며, 절리암석의 경우에 전통적인 유효압력법칙을 적용하는 것은 불합리하다는 것을 알 수 있다.

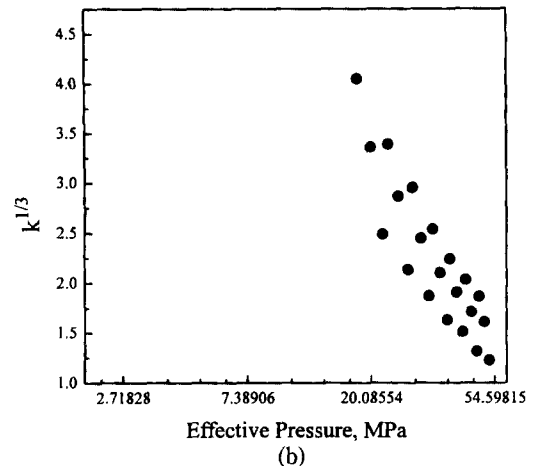
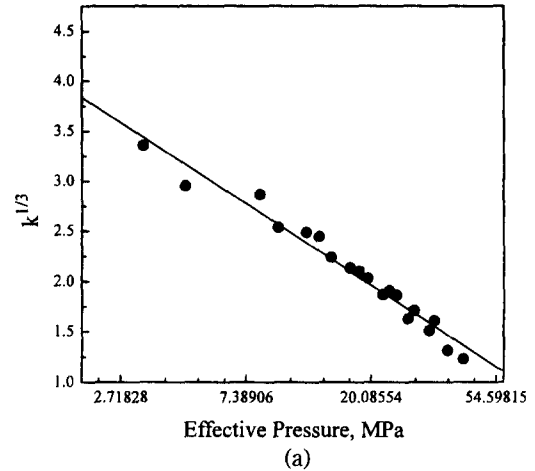


Fig. 5. $k^{1/3}$ vs. $\ln P_e$ for jointed Pocheon granite. (a) Cross-plotting method ($P_e = P_c - 4.35 P_p$), (b) Conventional effective pressure ($P_e = P_c - P_p$).

4. 결 론

교차작도법과 국부적인 유효압력계수를 구하는 방법을 적용하여 포천화강암, 원주화강암, 인장절리 포천화강암에 대한 유효압력계수를 결정하였다. 두방법에 따라 구해진 유효압력은 약간의 차이는 있지만 전반적으로 (6)식을 만족하는 것으로 나타났다. 이론적인 유효압력계수는 0.99가 되어 전통적인 유효압력법칙과 상당히 근사하였으나, 원주화강암의 경우에서 보듯이 (6)식에서 많이 벗어나는 것으로 나타났다. 특히, 인장절리 포천화강암의 경우에는 전통적인 유효압력법칙을 적용하는 경우 오차 범위가 상당히 증가하였다. 또한, 유효압력계수는 응력이력에 의존하는 것으로 나타나,

재하시의 유효압력계수가 재하시의 경우보다도 큰 것으로 나타났다.

봉압에 따른 국부적인 유효압력계수를 계산한 결과, 포천화강암의 경우에는 0.65~1.09, 원주화강암의 경우에는 1.20~1.43의 값을 갖는 것으로 나타났다. 따라서, 고려하는 봉압의 범위가 큰 경우에는 전 압력 범위에서 일정한 유효압력계수를 사용하는 것보다는 적당한 봉압 구간별로 유효압력계수를 결정하여 사용하는 것이 필요할 것으로 생각된다.

포천화강암, 원주화강암, 인장절리 포천화강암에 교차작도법을 적용하여 구한 유효압력법칙은 다음과 같다.

- 포천화강암; $P_e = P_c - 0.90 P_p$
- 원주화강암; $P_e = P_c - 1.59 P_p$
- 인장절리 포천화강암; $P_e = P_c - 4.35 P_p$

본 연구 결과에 따르면 암종 및 절리의 유·무에 따라 유효압력계수가 달라지는 것으로 나타났기 때문에, 투수계수에 압력이 미치는 영향을 해석하는 데 있어서 전통적인 유효압력법칙을 그대로 적용하는 것은 문제가 있으며, 실험적으로 구한 유효압력법칙을 사용하는 것이 필요할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. Robin, Pierre-Yves F., 1973, Note on effective pressure, *J. Geophys. Res.*, 78(14) : 2434-2437.
2. Bernabe, Y., 1986, The effective pressure law for permeability in Chelmsford granite and Barre granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 23(3) : 267-275.
3. Nur, A. and Byerlee, J. D., 1971, An exact effective stress law for elastic deformation of rock with fluids, *J. Geophys. Res.*, 76(26) : 6414-6419.
4. Garg, S. K. and Nur, A., 1973, Effective stress laws for fluid-saturated porous rocks, *J. Geophys. Res.*, 78(26) : 5911-5921.
5. Carroll, M. M., 1979, An effective stress law for anisotropic elastic deformation, *J. Geophys. Res.*, 84(B13) : 7510-7512.
6. Walsh, J. B., 1981, Effect of pore pressure and confining pressure on fracture permeability, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 18 : 429-435.
7. Kranz, R. L., Frankel, A. D., Engelder, T., and Scholz, C. H., 1979, The permeability of whole and jointed Barre granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 16 : 225-234.
8. Brace, W. F., 1965, Some new measurements of linear compressibility of rocks, *J. Geophys. Res.*, 70(2) : 391-398.
9. Heard, H.C. and Page, L., 1982, Elastic moduli, thermal expansion and inferred permeability of two granites to 350°C and 55 Megapascals, *J. Geophys. Res.*, 87(B11) : 9340-9348.
10. 윤용균, 이희근, 1993, 하중조건과 절리의 거칠기가 암석의 투수성에 미치는 영향, *한국자원공학회지*, 30(3) : 238-247.