

## 재성형된 포항 이암풍화토의 투수에 관한 이방성 연구

### A Study on the Anisotropic Characteristics of Permeability of a Remolded Decomposed Mudstone Soil in Pohang

김영수\* · 정성관\*\* · 김대만\*\*\* · 권용민\*\*\*\*

Kim, Young-Su · Jung, Sung-Gwan · Kim, Dae-Man · Kwon, Yong-Min

#### Abstract

Using Rowe cell for vertical and lateral consolidate test, we concerned characteristics of vertical and lateral consolidation, and permeability on the remolded Decomposed Mudstone Soil in Phoang, and then, compared it with Oedometer test results. Indirect coefficients of permeability were calculated by the results of the coefficient of consolidation that were derived from 9 different kinds of methods. The values of indirect coefficients of permeability derived from  $\sqrt{t}$  method and hyperbolic method were similar to the results of direct coefficients of permeability with respect to vertical drainage, but, in the case of lateral drainage, for all kinds of methods, the values of indirect coefficients of permeability showed overestimated ones. With vertical and lateral direct coefficient of permeability, by investigating the anisotropic effect with respect to permeability on Decomposed mudstone soil, we obtained average value, 13, with respect to anisotropic characteristics for all kinds of consolidation loadings.

**Keywords** : Mudstone soil, Direct coefficients of permeability, Indirect coefficients of permeability, Anisotropic permeability, Rowe cell, Lateral coefficient of permeability

#### 요 지

수직 및 수평방향 압밀시험을 수행할 수 있도록 제작된 Rowe cell을 사용하여 재성형된 포항 이암풍화토의 수직 및 수평 방향의 압밀과 투수특성을 살펴보고, 그 결과를 Oedometer 시험결과와 비교분석 하였다. 간접투수계수는 9가지의 압밀계수 산정법에 의해 구하여진 압밀계수로부터 산정하였다. 수직배수인 경우  $\sqrt{t}$  법과 hyperbolic 방법에 의한 간접투수계수가 비교적 직접투수계수와 잘 일치하였고, 수평배수의 경우는 전반적으로 모든 방법에서 과대평가되는 경향이 나타났다.

수직 및 수평방향 직접투수계수에 의한 이암풍화토의 투수에 대한 이방성 효과를 검토한 결과 모든 압밀하중에서 평균 약 13정도의 이방성을 보였다.

**주요어** : 이암풍화토, 직접투수계수, 간접투수계수, 투수이방성, Rowe cell, 수평투수계수

\* 정회원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수(Member, Professor, Dept, of Civil Engrg., KyoungPook Univ.)

\*\* 비회원, 경북대학교 농과대학 조경학과 교수(Nonmember, Professor, Dept, of Landscape Architecture., KyoungPook Univ.)

\*\*\* 비회원, 경북대학교 토목공학과 박사과정 수료(Nonmember, Ph. D., Graduate, Dept, of Civil Engrg., KyoungPook Univ.)

\*\*\*\* 비회원, 경북대학교 토목공학과 석사과정 졸업(Nonmember, Master of science, Dept, of Civil Engrg., Kyoung Pook Univ.)

## 1. 서론

점성토 지반에 수직배수재를 설치할 경우 발생하는 지반 침하의 대부분 수직방향으로 일어나지만 압밀에 의한 간극수의 흐름은 수평방향으로 일어난다. 따라서 현장 상태를 고려한 정확한 수평방향 투수계수 및 압밀계수의 산정은 배수재의 종류 및 간격뿐 아니라 공사비의 증감에 커다란 영향을 미치게 된다.

최근 들어 실제 현장에 부합하는 압밀현상의 예측을 위하여 수평방향 압밀계수 및 투수계수 등을 구하기 위한 연구가 Rowe cell 시험을 통해 활발히 진행되고 있다. 하지만 시험방법과 결과분석의 어려움으로 기존의 표준압밀시험결과를 이용한 설계가 이루지고 있는 것이 현 실정이다. 그러나 표준압밀시험은 시료의 포화문제, 상재하중의 불균일성 그리고 과잉간극수압의 측정이 불가능하며, 특히 정확한 수평방향 압밀계수를 산정할 수 없다. 압밀과 투수는 전단강도와 더불어 토질공학의 주된 특성중의 하나로 점성토 지반의 중요한 설계기준이 되고 있으므로 보다 정확한 시험을 통한 결과를 산정해야한다.

본 연구에서는 Rowe cell을 이용하여 포항지역에 넓게 분포하고 있는 이암풍화토를 대상으로 수직압밀, 수평압밀, sand drain을 이용한 수평압밀시험과 Oedometer압밀시험을 실시하고, 그 결과를 9가지 방법 즉, Casagrande의 log(t) 법, Talor의  $\sqrt{t}$  법, Cour의 Inflection point 법, Sivaram and Swamee 법, Parkin의 Velocity 법, Hyperbolic 법, Su의 Maximum slope 방법, Pandian et al.의 log(U/t)-log(t) 방법 그리고 Sridharan & Prakash의 수정  $\sqrt{t}$ 의 방법으로 압밀계수를 산정하여 구하여진 간접투수계수와 투수시험에 의해 구하여진 직접투수계수의 차이점을 비교 분석하였으며, 또한 투수계수와 간극비의 관계를 살펴보았다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 간접투수계수

압밀과정동안 배수되는 간극수의 투수계수( $k$ )와 단위증량( $\gamma_w$ ) 및 체적변화계수( $m_v$ )을 이용하여 식 (1)로부터는 압밀계수( $C_v$ )를 간접적으로 구할 수 있다. 압밀계수

를 산정하는 방법으로 여러 학자들에 의해 많은 방법이 제안되었다. 그 중 가장 대표적인 log(t) 방법,  $\sqrt{t}$  방법을 포함한 9가지 방법의 압밀계수를 산정하는 방법은 다음과 같다.

$$C_v = \frac{k}{\gamma_w m_v} \quad (1)$$

#### 2.1.1 Log(t) 방법

이 방법은 Casagrande에 의해 제안된 방법으로 실내압밀시험에서 압밀계수를 결정하는 가장 보편적인 두 가지 방법 중 하나로 압밀도 50%에 해당하는 시간인  $t_{50}$ 과 배수거리( $H$ )를 이용하여 식 (2)으로부터 구해진다.

$$C_v = \frac{0.197H^2}{t_{50}} \quad (2)$$

#### 2.1.2 $\sqrt{t}$ 방법

Taylor가 제안한 방법으로써  $s-\sqrt{t}$ 의 이론곡선에서 압밀도가 약 60%까지는 거의 직선이라는 사실을 근거로 식 (3)을 이용하여 압밀계수를 구하는 방법이다.

$$C_v = \frac{0.848H^2}{t_{90}} \quad (3)$$

#### 2.1.3 Su의 maximum slope 방법

이 방법은 Casagrande의 방법과 같이 반대수 용지에 시간에 대한 침하량의 실측곡선을 그린 후 실측곡선상에서 기울기가 가장 큰 부분의 접선을 긋고 그 기울기  $h$ 를 구하면 식 (4)를 이용하여 임의의 압밀도( $U$ )에 해당하는 침하량  $d_u$ 를 결정할 수 있다. 이때  $d_0$ 는 log(t) 방법에서 구한 눈금과 같다.  $d_u$ 를 구하면 그에 해당하는 시간( $t$ )를 구할 수 있다. 예로  $U=50\%$ 일 때의  $d_u$ 는  $d_{50}$ 과 같고 실측곡선에서  $d_{50}$ 에 해당하는 시간인  $t_{50}$ 을 결정할 수 있으며  $t_{50}$ 이 결정되면 식 (2)을 이용하여 압밀계수를 산정할 수 있다.

$$d_u = d_0 + \frac{h}{0.688} \frac{U(\%)}{100} \quad (4)$$

### 2.1.4 Hyperbolic 법

이 방법은 Terzaghi의 이론적 시간계수-평균 압밀도의 관계를  $t/U-t$ 의 값으로 그래프를 그렸을 경우 압밀도가 60~90%사이에서는 직선부분이 나타난다는 것에 근거하여 직선부분의 기울기( $m$ )와 절편값( $c$ )을 이용하여 압밀계수를 구하는 방법이다. 간극수압이 시료의 깊이에 따라 일정할 때는 식 (5), 간극수압이 시료의 깊이에  $\sin$  형태의 곡선일 때는 식 (6)을 이용하여 압밀계수를 구한다.

$$C_v = 0.241 \frac{m \cdot H^2}{c} \quad (5)$$

$$C_v = 0.259 \frac{m \cdot H^2}{c} \quad (6)$$

### 2.1.5 Pandian et al.의 $\log(U/t)$ - $\log t$ 법

Terzaghi의 시간계수-평균압밀도 관계를 양대수 용지에  $\log(U/t)$ - $\log(t)$ 로 나타내면 비선형적인 형태가 나타난다. 이러한 형태의 특징을 이용하여 압밀계수를 산정하는 방법을 Pandian et al.(1992)이 제안하였다. 중간 직선부의 기울기가 변화되는 부분을 교차점(intersection point)이라 하며, 이 교차점의 위치가 압밀도  $U=88.5\%$ 에 해당되므로 거기에 대한  $t_{88.5}$ 를 구할 수 있고, 이 때의 시간계수  $T_v=0.793$ 로 압밀계수는 식 (7)을 이용하여 구할 수 있다.

$$C_v = \frac{0.793 \cdot H^2}{t_{88.5}} \quad (7)$$

### 2.1.6 Velocity 법

Parkin(1985)이 제안한 방법으로 실측결과  $\log(U/t_v)$ - $\log(t_v)$ 로 양대수용지에 그린 후 이론적인 압밀곡선에 matching시켰을 때 이론적 압밀곡선의 구배가 변하는 위치에서 일치하게 된다. 그 때의 시간계수는  $T_{50}$ 이고, 그에 대응하는  $t_{50}$ 를 구하면, 압밀계수는 다음 식 (8)를 이용하여 구할 수 있다.

$$C_v = \frac{T_{50} \cdot H^2}{t_{50}} \quad (8)$$

### 2.1.7 Inflection point 법

이 방법은 F.R.Cour가 제안한 방법으로 Terzaghi의 이론적인 압밀곡선을 반대수용지에 나타내면 이 곡선은 압밀도 70%에서 변곡점(inflection point)을 가지며 그때의 시간계수는 0.405로부터  $U=70\%$ 일 때의  $t_{70}$ 과 식 (9)을 이용해서 압밀계수를 구할 수 있다고 발표했다.

$$C_v = \frac{0.405 \cdot H^2}{t_{70}} \quad (9)$$

### 2.1.8 Sridharan & Prakash 의 수정 $\sqrt{t}$ 법

Terzaghi의 이론적인 시간계수-압밀도의 관계는  $s-t/s$ 의 관계로 나타냈을 때 통상적인 curve-fitting 방법의 형태로 압밀계수를 결정할 수 있다. 1.15대신에 이보다 큰 인자인 1.33을 쓰게 되면 두 번째 직선이 곡선과 만나는 교점을 보다 정교하게 그려낼 수 있다. 그러므로  $s-\sqrt{t}$ 의 방법보다 제안된  $s-t/s$ 의 방법으로 90% 압밀도에 해당하는 시간을 더 정교하게 구할 수 있고, 압밀계수는 식 (10)을 이용하여 구할 수 있다.

$$C_v = \frac{0.848H^2}{t_{90}} \quad (10)$$

### 2.1.9 Sivaram and Swamee 법

Sivaram과 Swamee는 평균압밀도의 전 구간에 대하여 Terzaghi의 1차원 압밀이론식으로부터 다음의 식 (11)과 (12)을 유도하였다.

$$\frac{U}{100} = \frac{\sqrt{(4 \cdot t/\pi)}}{[1 + (4 \cdot t/\pi)^{5.6}]^{0.357}} \quad (11)$$

$$t = \frac{(\pi/4)(u/100)^2}{[1 - (u/100)^{5.6}]^{0.357}} \quad (12)$$

위의 식을 기본으로 하여 초기눈금  $d_0$ 은 다음 식 (13)과 같이 구한다.

$$d_0 = \frac{d_1 - d_2 \cdot \sqrt{(t_1/t_2)}}{1 - \sqrt{(t_1/t_2)}} \quad (13)$$

$d_1, d_2$ 는 압밀도가 53% 되기 이전의 임의의 시간  $t_1, t_2$ 에 대응하는 침하량이고, 압밀도 100%가 될 때의 눈금  $d_{100}$ 은 다음 식 (14)로 구한다.

$$d_{100} = d_0 - \frac{d_0 - d_3}{[1 - [(d_2 - d_3)(\sqrt{t_2}\sqrt{t_1}) / (d_1 - d_2)\sqrt{t_3}]^{5.6}]^{0.179}} \quad (14)$$

$d_3$ 는 압밀도가 53%이상 진행된 후의 임의의 시간  $t_3$ 에 대응하는 침하량이고,  $d_0$ 와  $d_{100}$ 이 결정되면 압밀계수는 다음의 식 (15)을 이용하여 구할 수 있다.

$$C_v = \frac{\pi}{4} \cdot \left( \frac{d_1 - d_2}{d_0 - d_{100}} \cdot \frac{H}{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}} \right)^2 \quad (15)$$

## 2.2 수직투수이론

Rowe cell을 이용한 투수시험에서 직접투수계수를 산정하는 방법은 다음과 같다.

$$k_v = \frac{q}{Ai} \quad (16)$$

$$i = \frac{h}{L} \quad (17)$$

여기서,  $A$  : 단면적(  $cm^2$  ),

$i$  : 동수경사,

$q$  : 유량(  $cm^2 / sec$  )

$k_v$  : 투수계수(  $cm / sec$  ),

$L$  : 시료길이,

$h$  : 수두차

식 (17)을 식 (16)에 대입하면, 다음의 식 (18)을 얻을 수 있다.

$$k_v = \frac{qL}{Ah} \quad (18)$$

## 2.3 수평투수이론

수평방향 투수시험은 그림 1과 같이 Rowe cell의 내외부 수압차에 의하여 흐름이 발생할 경우, 반경  $r$ 인 지점의 미소부분  $dr$ 에 대한 유량은 Darcy의 법칙을 적용하여 아래와 같이 식 (19)로 나타낼 수 있다.

$$q = kiA \quad (A = 2\pi rH, \quad i = \frac{dh}{dr} \text{ 이므로})$$

$$q = 2\pi rH \frac{dh}{dr} k_r \quad (19)$$

여기서  $dh/dr$ 은 동수경사,  $H$ 는 시료의 높이를 나타내며, 이를 반경  $r$ 과 수두  $h$ 에 대해 적분하면 식 (20)과 같다.

$$k_h(h_2 - h_1) = \frac{q}{2\pi} r \log_e \left( \frac{r_2}{r_1} \right) \quad (20)$$

여기서,  $r_1, r_2$ 는 모래기둥과 시료의 반경  $h_1, h_2$ 는  $r_1, r_2$ 일 때의 수두를 의미한다. 압력차와 수두차의 관계는 식 (21)과 같고, 이를 식 (20)에 대입하면 식 (22)와 같은 수평방향 투수계수 산정식이 유도된다.

$$\Delta P = \Delta h \rho g = (h_2 - h_1) \rho g \quad (21)$$

$$k_h (m/sec) = 0.26 \left( \frac{q}{H \Delta p} \right) \log_e \left( \frac{D}{d} \right) \times 10^{-4} \quad (22)$$

여기서;  $q$  : 유량( $cm^3/min$ ),

$H$  : 시료높이(m),

$\Delta h$  : 수두차(m)

$\Delta p$  : 압력차( $kN/m^2$ ),

$D$  : 시료의 직경(cm),

$d$  : 배수재의 직경(cm)

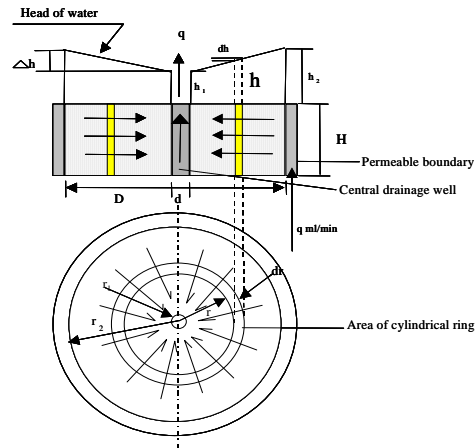


그림 1. 수평방향 직접투수시험 개요도

## 2.4 투수계수에 대한 경험식

투수는 흙의 압밀특성에 의하여 커다란 영향을 받는다. 많은 학자들이 투수계수와 간극비와의 관계에 대한 많은 방정식을 제안해 왔다. 가장 일반적인 식은  $e - \log k$ 가 선형적인 관계에 있다는 것이다. 따라서 Taylor(1948)는

모래에 대한 투수계수를 다음 식 (23)과 같이 나타내었다.

$$k = C_s \frac{\gamma_w}{\mu} \frac{e^3}{1+e} D_s^2 \quad (23)$$

여기서,  $C_s$  : 형상계수,

$\mu$  : 유체의 점성계수,

$D_s$  : 입자의 직경

또한 Taylor는 점토에서도  $e$ - $\log k$ 는 직선관계를 나타낸다고 제안하였다. 그러나 경험적인 결과 항상 직선적인 관계를 나타내는 것은 아니다. 따라서 이러한  $e$ - $\log k$ 관계의 비선형성을 고려한 경험식은 Samarasinghe et al (1982)이 제안한 다음 식 (24)와 같다.

$$k = C \frac{e^n}{1+e} \quad (24)$$

여기서,  $C, n$  :  $\log [k(1+e)] - \log(e)$  관계 직선상의 절편의 크기와 기울기

Mersi와 Olson(1971)은 변형률이 25%를 초과하는 압축성이 큰 점토의 경우에 대하여 간극비와 투수계수의 관계를 식 (25)로 제안하였다.

$$\log(k) = A \log(e) + B \quad (25)$$

여기서,  $A, B$  :  $\log(k) - \log(e)$  관계 직선상의 절편의 크기와 기울기

### 3. 실내시험

#### 3.1 시험장치

압밀 및 투수시험에 사용된 장치는 미국 GEOCOMP사에서 제작한 제품을 이용하였으며, 세부시험장치는 간극수 압계, 배압장치, volume change로 구성되어 있다. Rowe cell은 hydraulic방식을 이용한 직경 15cm를 사용하였으며, cell하단에는 간극수압을 측정할 수 있도록 되어있고, 시험장치 개요도는 그림 2과 같다.

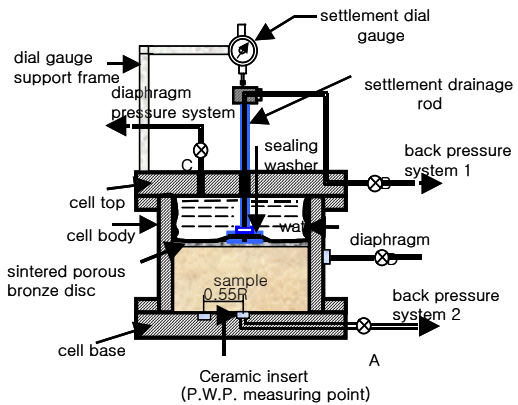


그림 2. Rowe cell 시험장치 개요도

#### 3.2 시료의 성형

시료를 채취한 후 실내에서 건조시킨 다음 No.40체 통과시료에 대해 액성한계 2배의 함수비로 slurry를 만든 후 진공장치가 연결된 토조에서 교반과 동시에 시료속의 공기를 제거하였다. 그 후 slurry를 Rowe cell 내부로 유입시키고 재하를 실시하였다.

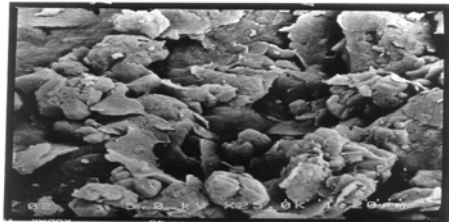
재하 단계는 20, 40, 60kPa로 예비압밀 시킨 후 본 압밀 단계는 Oedometer시험의 압밀 단계 0.8, 1.6, 3.2kg/cm<sup>2</sup>와 비교 분석을 용이하게 하기 위하여 80, 160, 320kPa의 3단계로 시험을 실시하였다.

#### 3.3 시료특성

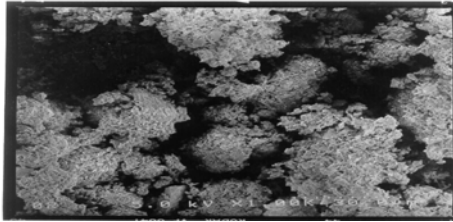
##### 3.3.1 이암풍화토

시료는 경상북도 포항시 장성동일대에 산재하고 있는 이암풍화토를 표토에서부터 대략 50cm 정도의 심도에서 채취하였다. 포항 장성동 일대의 이암풍화토는 오랜 기간에 걸쳐 풍화가 진행되어온 쇄설성 퇴적물로서 주로 석영, 장석, 백운모, 흑운모 그리고 점토광물로 구성되어 있으며, 이 외에 중광물과 같은 조암광물을 포함하기도 한다.

그림 3는 포항지역에서 채취한 이암에 대한 전자현미경 사진을 나타낸 것으로 10,000 - 25,000배 가량 확대한 결과 점토구조에서 흔히 볼 수 있는 면모구조를 가지고 있으며, 이러한 입자구조에 의해 이방성을 가지게 되는 것으로 알려져 있으며, 물리적 특성은 표 1과 같다.



(a) 25,000배율 확대



(b) 10,000배율 확대

그림 3. 이암풍화토의 전자현미경 사진

표 1. 이암풍화토의 물리적 특성

$G_s$	LL(%)	PL(%)	PI	#200통과율(%)	USCS
2.55	52.02	24.12	27.9	84	CH

### 3.3.2 모래

본 연구에서 수평방향 투수시험을 위한 drain재로 사용된 모래는 낙동강 중류지역인 경상북도 구미시 해평면 낙산리 901번지 낙산지구에서 채취하였다.

시료의 상대밀도 70%일 때의 투수계수는 정수두 투수 시험결과  $3.77 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 의 값으로 측정되었고, 물리적 특성은 표 2와 같다. 이때, 상대밀도는 ASTM-D4253, D4254에 의거하여 구하였으며, 다양한 투수시험을 실시한 결과 큰 차이를 보이지 않았으므로 70%의 상대 밀도를 사용하였다.

표 2. 모래의 물리적 특성

$G_s$	$C_c$	$C_u$	$e_{max}$	$e_{min}$	Dr(%)	USCS
2.60	1.91	2.65	1.008	0.660	70	SP

## 3.4 시험방법

표 3은 본 연구의 전체 시험개요를 보여주고 있으며, 투수계수 측정방법으로는 크게 간접적인 방법과 직접적인 방법으로 나누어 시험을 실시하였고, 시험종류는 6가지로 실시했다.

시험 결과 분석의 편이를 위해 표 3에서와 같이 각각의 시험명을 명명하여 사용하였고, 압밀계수는 간접적인 방법에서 수평과 수직으로 나누어서 산정하였다. 수직시험에서는 Oedo와 RVC시험으로 구한 간접수직투수계수를 RVK 시험으로 구한 직접수직투수계수와 각각 비교분석하였으며, 수평시험에서는 RHC와 SRHC시험으로 구한 간접수평투수계수를 SRHK시험을 통해 구한 직접수평투수계수와 각각 비교 분석하였다. 또한 직접에 대한 수직과 수평투수계수를 비교 분석하여 투수의 이방성을 알아보았다.

표 3. 시험명 명명

투수계수 측정방법	시험종류	시험명
간접적인 방법	Oedometer 수직압밀시험	Oedo
	Rowe cell 수직압밀시험	RVC
	Rowe cell 수평압밀시험	RHC
	Sand drain을 이용한 Rowe cell 수평압밀시험	SRHC
직접적인 방법	Rowe cell 수직투수시험	RVK
	sand drain을 이용한 Rowe cell 수평투수시험	SRHK

### 3.4.1 압밀시험

#### 가. 수직압밀시험(RVC압밀시험)

시료의 RVC시험은 예비 압밀 후 포화가 끝난 상태에서 그림 2의 A와 B밸브를 잠그고 diaphragm pressure를 back pressure 1, 2보다 80kPa이 높은 280kPa를 주면서 A와 B밸브를 열어 압밀하중이 80kPa이 되도록 압밀을 실시하였고, 160, 320kPa의 일련의 실험들도 이와 같은 방법으로 실시하였고, 각각의 압밀 후에는 투수시험을 실시하였다.

나. 수평압밀시험

(1) RHC압밀시험

RHC는 RVC와 유사하나 밸브 A와 B는 잠그고 D를 통하여 배수가 행해지고, back pressure가 한 방향으로만 가해지기 때문에 동수경사를 주기위한 압력차를 줄 수 없어서 투수시험은 실시하지 않았다.

(2) SRHC압밀시험

시료의 SRHC시험은 예비 압밀 후 Rowe cell장치를 해체한 후 직경 1.3cm의 Mandrel을 이용하여 흙을 제거했고, 상대밀도 70%로 모래를 치환 한 후 Rowe cell장치를 결속하여 수직압밀과 같은 방법으로 일련의 압밀들을 실시하였다.

3.4.2 직접투수시험

시료 양끝 중 어느 한쪽에  $\Delta p$ 를 가하거나 또는 감소시킬 경우 시료 내에 체적변화가 발생되는데  $\Delta p$ 를 가했을 경우는 그에 해당하는 압력만큼 시료내의 유효응력이 감소하여 시료가 swelling을 보이고 반대로  $\Delta p$ 만큼 감소시킬 경우는 그에 해당하는 압력만큼 시료내의 유효응력이 증가하여 증가된 유효응력에 해당하는 압밀현상이 나타나게 되어 체적변화가 일어난다. 이와 같이 동수경사를 발생시키는  $\Delta p$ 에 의한 시료내의 체적변화를 최소화시키기 위해서  $p_1$ 쪽에는  $\Delta p/2$ 만큼 감소시키고  $p_2$ 쪽에는  $\Delta/2$ 만큼 증가시켜 최종적으로 시료내에  $\Delta p$ 만큼의 압력차를 발생시켰다.

RVK시험은 그림 2의 A밸브인 back pressure 2를  $\Delta p/2$ 만큼 증가시키고, B밸브인 back pressure 1을  $\Delta p/2$ 만큼 감소시켜서 각각의 압력차이를 주어서 상향흐름으로 구하였고, SRHC시험은 D밸브인 back pressure 1을  $\Delta p/2$ 만큼 증가시키고, A밸브인 back pressure 2를  $\Delta p/2$ 만큼 감소시켜서 각각의 압력차를 주어서 내향류 흐름으로 구하였다.

4. 시험결과 및 분석

4.1 수직투수계수

4.1.1 직접투수계수

그림 4은 압밀하중에 대한 직접투수계수의 값을 나타낸

그래프로 압밀하중 80, 160, 320kPa압밀 후의 투수계수 값은 각각 8.51, 1.90,  $0.55 \times 10^{-8}$  cm/sec로 나타났으며, 그래프의 투수계수 감소경향은 fitting한 결과와 같은 형태를 보이고, 그 관계식  $\log(K) = -1.977\log(P) + 4.675$ 로 데이터의 양은 부족하지만 투수계수 값을 예측할 수가 있을 것으로 판단된다.

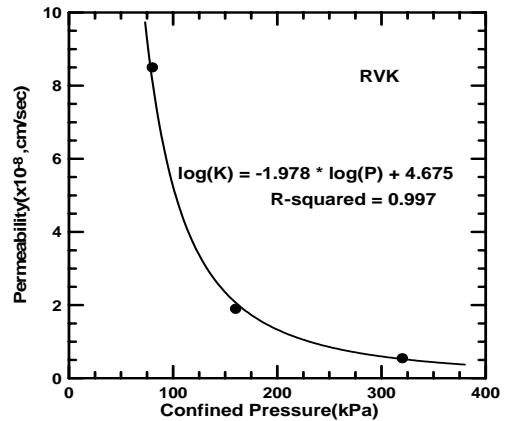


그림 4. RVK시험의 직접투수계수

그림 5는 Simarasinghe et. al이 제안한 경험식인 식 (24)의 결과를 그래프로 나타낸 것이고, 그 때의 투수상수 C, n을 표 4에 나타내었다.

시료의 높이는 시험 초기에 5.878cm에서 압밀하중 320kPa이 끝난 후에 3.617cm로 변형율이 25%를 초과하므로, Mersi & Olson의 경험식의 적용이 가능하였으며, 그림 6은 Mersi & Olson이 제안한 경험식인 식 (25)의 결과를 그래프로 나타낸 것으로 그 때의 투수상수 A, B를 구하여 표 4에 나타내었다.

이 경험식의 적용성을 검증하기 위하여 본 연구에서 구한 RVK시험의 투수계수와 비교 분석해보면, 압밀하중 80kPa에서의 간극비가 1.23일 때 Simarasinghe et. al 과 Mersi & Olson이 제안한 경험식을 통해구한 투수계수 값은 표 4의  $7.432$ 와  $8.892 \times 10^{-8}$  cm/sec이고, 이 값은 압밀하중 80kPa에서 RVK시험으로 구한 직접투수계수 값인  $8.51 \times 10^{-8}$  cm/sec와 비교적 정확하게 일치하였다.

표 4. RVK시험 결과

투수상수		Samarasinghe 제안식			Mersi & Olson 제안식		
		<i>n</i>	C(cm/sec)	k(cm/sec)	A	B	k(cm/sec)
시험방법	경험식	14.140	-8.052	7.432E-08	19.508	-8.805	8.892E-08

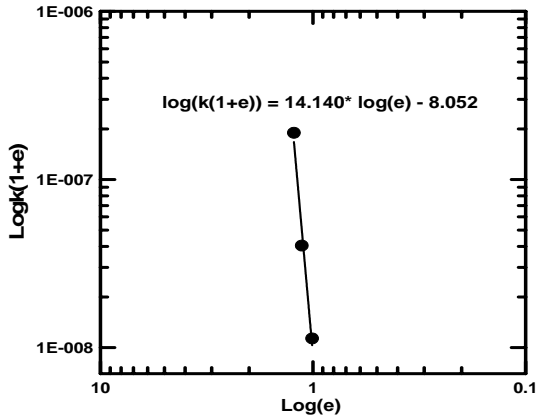


그림 5.  $\text{Log}(k(1+e)) - \text{log}(e)$

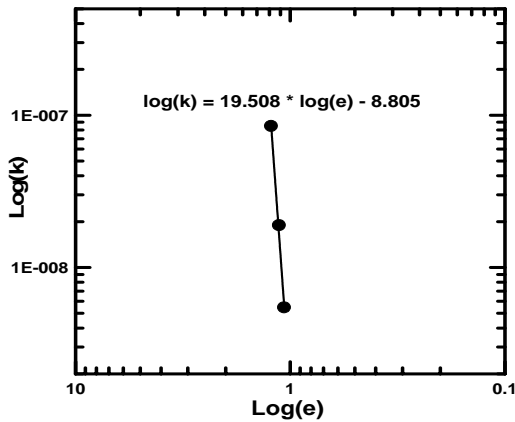


그림 6.  $\text{Log}(k) - \text{log}(e)$

#### 4.1.2 간접 투수계수

Oedo와 RVC압밀시험에서 압밀 단계마다의 9가지 방법으로 압밀계수를 산정한 후 간접수직투수계수를 구한 결과는 각각 표 5, 6과 같다. 그림 7(a)는 표 5의 결과를 그래프로 나타낸 것으로 압밀하중 80, 160, 320kPa에서 간접수직투수계수 값들은 각각 0.94~14.20, 0.98~8.57,  $0.46 \sim 8.57 \times 10^{-8} \text{cm/sec}$ 의 범위로 나타났으며, Su's maximum 방법이 최대의 투수계수 값을 그리고 Hyperbolic 방법의 투수계수 값이 최소값을 나타냈다.

그림 7(b)는 표 6의 결과를 나타낸 그래프로 80, 160, 320kPa의 압밀하중에서 간접수직투수계수 값은 2.55~40.37, 0.29~40.57,  $0.17 \sim 2.73 \times 10^{-8} \text{cm/sec}$ 의 범위로 Oedo시험과 비슷한 범위를 보였다. RVC시험에서는 sivaram&swamee 방법이 모든 압밀하중에서 최대의 값을 나타낸 반면 최소값은 압밀하중에 따라 다르게 나타났다.

그림 7에서 RVC시험의 그래프의 형태는 Oedo시험과 유사하지만 압밀하중 80~160kPa에서 투수계수 값의 변화 양상이 Oedo시험보다 더욱 급격히 감소하고, 압밀하중 160~320kPa에서 투수계수 변화는 감소가 아주 적거나 거의 비슷한 경향을 보였다. 이는 시료의 초기상태와 크기 및 시험 방법의 차이에서 나타나는 결과로 생각된다.

또한 그림 7(b)의 RVC시험에서는 압밀하중 160kPa에서 sivaram&swamee 방법과 Su's maximum 방법을 제외한 모든 방법에서 값이 비교적 일치하였고, 320kPa 일 때 모든 방법에서 거의 일치하여 Oedometer시험보다 Rowe cell을 이용한 압밀시험이 여러 방법에 의한 압밀계수의 값이 비슷한 결과를 나타내었다.

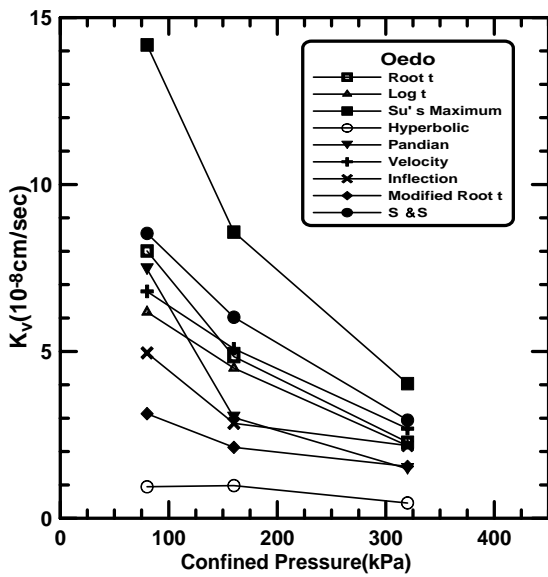
표 5. 압밀 하중에 따른 Oedo압밀시험의 간접투수계수

압밀하중 (kPa)	방법	$k(\text{cm/sec}) \times 10^{-8}$								
		logt	$\sqrt{t}$	Su's Max	Hyper	Pandian	Vel	Inflec	수정 $\sqrt{t}$	Sivaram & Swamee
80		6.18	8.01	14.20	0.94	7.46	6.80	4.96	3.14	8.54
160		4.50	4.84	8.57	0.98	3.02	5.08	2.85	2.13	6.02
320		2.17	2.28	4.03	0.46	1.48	2.69	2.18	1.56	2.94

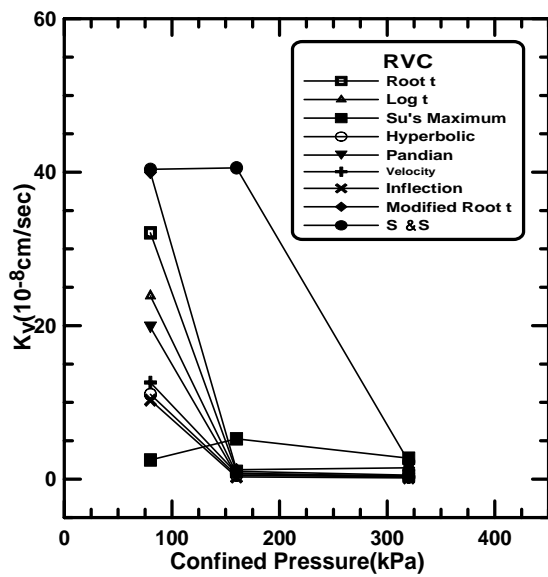


표 6. 압밀하중에 따른 RVC시험의 간접투수계수

압밀하중 (kPa)	k(cm/sec) × 10 <sup>-8</sup>								
	logt	$\sqrt{t}$	Su's Max	Hyper	Pandian	Vel	Inflec	수정 $\sqrt{t}$	Sivaram & Swamee
80	23.88	32.11	2.55	11.04	19.79	12.60	10.31	39.98	40.37
160	0.73	1.03	5.24	0.52	0.51	0.79	0.29	1.23	40.57
320	0.39	0.51	2.73	0.29	0.44	0.27	0.17	1.49	2.29



(a) Oedo압밀시험



(b) RVC압밀시험

그림 7. 수직압밀시험의 간접투수계수

그림 8은 Oedo와 RVC압밀시험의 체적계수-유효응력 관계를 보여주는 그래프이다. 그래프의 형태는 그림에서 볼 수 있듯이 선형압밀하중인 60kPa까지 현저히 감소하다가 선형압밀 근처에서 변곡점을 보이는 양상을 보여준다.

낮은 압밀하중에서 체적계수의 차이가 많이 낮지만 압밀하중이 증가할수록 일치되는 양상을 보여주고 있다. 이는 Oedo압밀시험에 비해 RVC압밀시험의 성형시에 교란이나 slurry 내부에 포함되어 있는 기포의 존재 때문에 많은 체적 변화가 발생된 것으로 판단된다.

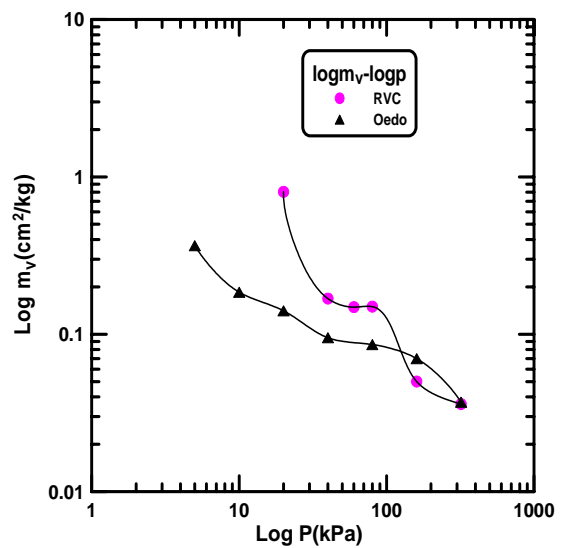


그림 8. 간접수직시험의  $\log m_v - \log p$  곡선

#### 4.1.3 직접과 간접투수계수의 비교

그림 9은 압밀하중에 대한 Oedo압밀시험과 RVC시험의 투수계수를 비교 분석한 그래프로 간접수평투수계수를 직접수평투수계수에 대해 정규화시킨 그래프이다.

압밀하중 80kPa에서는 Sivaram & Swamee 법과  $\sqrt{t}$

법이 직접투수계수 값에 일치하였다. 압밀하중 160kPa에서는 수정  $\sqrt{t}$  법이 직접투수계수 값에 가장 잘 일치하였으며, 압밀하중 320kPa에서는 Hyperbolic 방법이 직접투수계수 값에 가장 잘 일치하였다.

Oedo압밀시험과 RVK시험의 투수계수 비교에서는 압밀하중 80kPa를 제외한 압밀하중 160, 320kPa에서 Hyperbolic 방법이 직접투수계수 값에 근접하게 일치하는 것을 알 수 있었다.

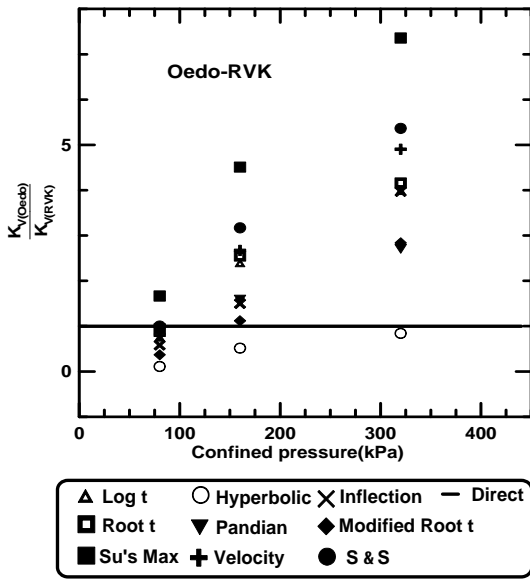


그림 9. Oedo압밀시험과 RVK시험의 투수계수 정규화 그래프

그림 10은 압밀하중에 대한 RVC압밀시험과 RVK시험의 투수계수를 비교한 그래프로 압밀하중에 따라 간접투수계수를 직접투수계수에 대해 정규화시킨 그래프이다.

압밀하중 80kPa에서는 Hyperbolic 방법, Velocity 방법, 그리고 Inflection 방법이 직접투수계수 값에 어느 정도 잘 일치하는 것을 볼 수 있고, 압밀하중 160kPa에서는  $\sqrt{t}$  방법과 수정  $\sqrt{t}$  방법이 직접투수계수 값에 어느 정도 일치하였으며, 압밀하중 320kPa에서는  $\sqrt{t}$  방법이 가장 잘 일치되었다.

RVC압밀시험과 RVK시험의 비교에서는 모든 압밀하중에서  $\sqrt{t}$  방법이 직접투수계수 값에 가장 잘 일치되었다.

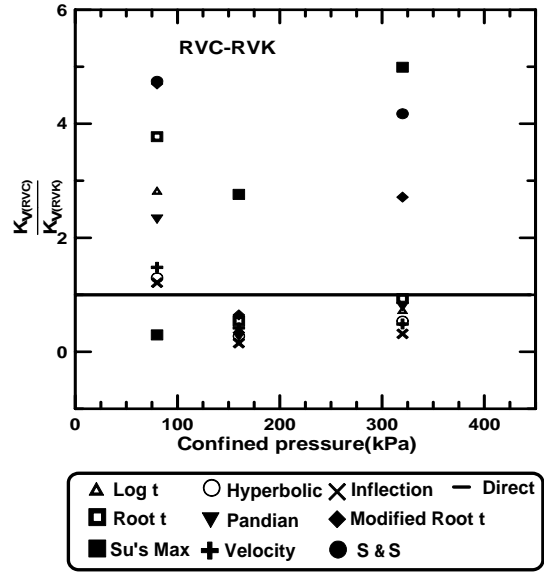


그림 10. RVC압밀시험과 RVK시험의 투수계수 정규화 그래프

## 4.2 수평투수계수

### 4.2.1 직접투수계수

그림 11은 압밀하중에 대한 직접수평투수계수의 값의 변화를 그래프로 보여주고 있으며, 압밀하중 80, 160, 320kPa에서 각각의 직접투수계수의 값은 9.30, 2.89,  $0.70 \times 10^{-7}$  cm/sec로 나타났다.

그래프의 투수계수 감소경향은 fitting한 결과와 같은 형태를 보이며, 관계식  $\log(K) = -1.867 \log(P) + 4.540$ 에 의해 모든 압밀하중에서 직접수평투수계수의 예측이 가능하다.

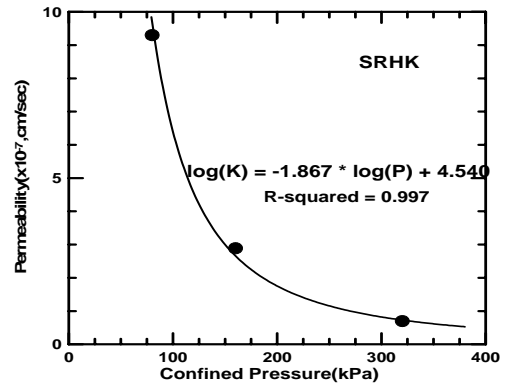


그림 11. SRHK시험의 직접투수계수

그림 12는 Simarasinghe et. al이 제안한 식 (24)의 결과를 그래프로 나타낸 것으로 투수상수 C, n은 표 7와 같다.

Mersi & Olson이 제안한 식은 변형율 25%이상의 점토에 적용한다. 본 연구에서 시험 초기 높이가 5.928cm에서 압밀하중 320kPa이 끝난 후의 시료 높이는 3.675cm로 변형율이 25%를 초과하므로, 이 제안식의 사용이 가능하였고, 그림 13은 Mersi & Olson이 제안한 경험식 (25)의 결과를 그래프로 나타낸 것으로 그 때의 투수상수 A, B는 표 7와 같다.

이 경험식들의 적용성을 검증하기 위해서 본 연구에서 구한 SRHK시험의 투수계수 값과 비교 분석한 결과는 다음과 같다. 압밀하중 80kPa에서의 간극비가 1.19일 때 Simarasinghe et. al과 Mersi & Olson이 제안한 경험식을 통해 각각의 투수상수를 이용하여 구한 투수계수 값은 표 7의 8.990과  $8.998 \times 10^{-7}$  cm/sec이고, 이 값은 SRHK시험으로 구한 직접투수계수 값인  $9.30 \times 10^{-7}$  cm/sec와 비교적 정확하게 일치하는 것을 볼 수 있다.

표 7. SRHK시험 결과

시험방법	투수상수			Mersi & Olson 제안식		
	n	C(cm/sec)	k(cm/sec)	A	B	k(cm/sec)
경험식	11.560	-6.579	8.990E-07	11.042	-6.881	8.988E-07

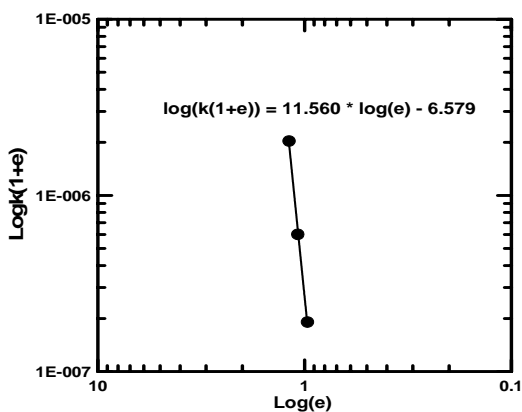


그림 12. Log(k(1+e)) - log(e)

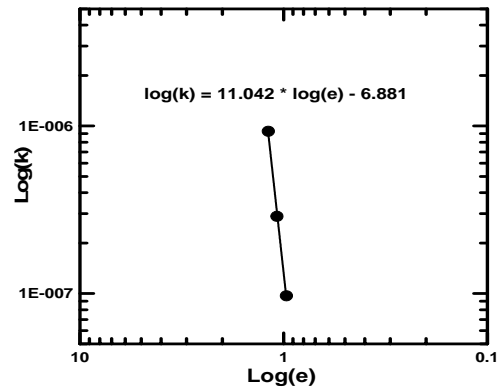


그림 13. Log(k) - log(e)

#### 4.2.2 간접과 직접투수계수의 비교

그림 14는 RHC압밀시험의 간접수평투수계수와 SRHK 시험의 직접수평투수계수를 비교한 결과로 압밀하중 80, 160, 320kPa에서 모든 방법들이 과대 평가된 것을 볼 수 있었고, 직접투수계수와 일치 정도를 보면, 그 중에서 Inflection 방법이 직접투수계수 값에 근접하게 일치하는 것을 볼 수 있다.

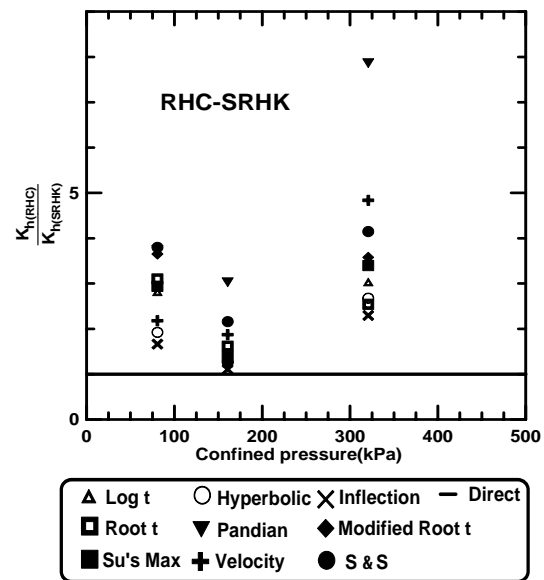


그림 14. RHC압밀시험과 SRHK시험의 투수계수 정규화 그래프

그림 15는 SRHC압밀시험의 간접수평투수계수와 SRHK 시험의 직접수평투수계수를 비교한 그래프로 간접수평투수계수를 직접수평투수계수에 대해 정규화시킨 그래프이다.

압밀하중 80kPa에서는 일치하는 방법이 없었으며, 압밀하중 160kPa에서는 Inflection 방법이 일치하였다. 그리고, 압밀하중 320kPa에서는 Hyperbolic 방법이 가장 잘 일치하였다. 모든 압밀하중에서 Hyperbolic 방법과 Inflection 방법이 직접투수계수와 가장 잘 일치한 것을 볼 수 있었다.

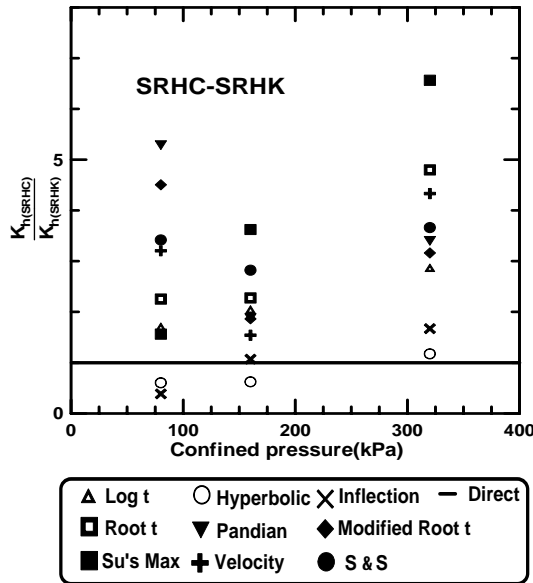


그림 15. SRHC압밀시험과 SRHK시험의 투수계수 정규화 그래프

### 4.3 직접투수이방성

투수이방성은 수직투수계수에 대한 수평투수계수의 비로 정의할 수 있고, 본 연구에서는 RVK시험을 통해 구한 직접수직투수계수와 SRHK시험을 통해 구한 직접수평투수계수를 이용하여 이암풍화토의 이방성에 따른 투수특성을 압밀하중에 따라 비교 분석한 결과는 그림 4-13과 같다.

압밀하중 80, 160, 320kPa에서 ( $K_h/K_v$ )의 값은 11, 15, 13을 나타내며, 어느 정도 이방성의 차이는 보이지만 평균 약 13정도의 이방성을 보인다. 그러나, 압밀하중 80, 160, 320kPa만으로는 이방성의 경향을 파악하기는 어려우며, 앞으로 더 높은 하중에 대하여 시험을 실시함으로써 압밀하중의 증가에 따른 이방성의 경향을 분석할 수 있을 것이라 판단된다.

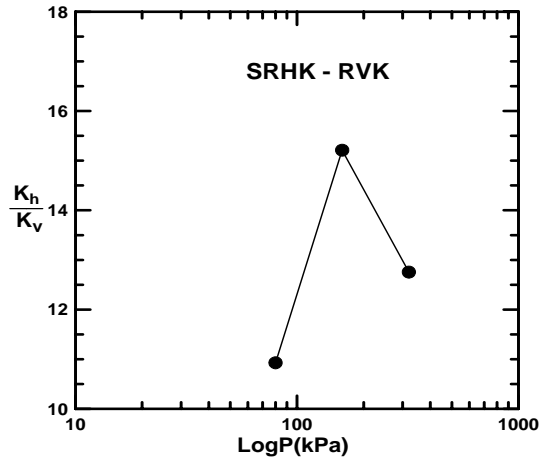


그림 16. 직접투수계수의 이방성

## 5. 결론

포항지역에서 채취하여 재성형된 이암풍화토의 Rowe cell을 이용한 압밀 및 투수특성에 대한 결론은 다음과 같다.

- (1) RVK시험에 의한 직접수직투수계수 값은 압밀하중 80, 160, 320kPa일 때 각각 8.51, 1.90,  $5.48 \times 10^{-9}$  cm/sec로 나타나 압밀하중이 증가함에 따라 감소하였으며, 제안된 9가지 방법에 의하여 산정된 간접투수계수 값들과 비교하여 보면 Oedo압밀시험의 경우는 Hyperbolic 방법이 그리고 RVC시험의 경우는  $\sqrt{t}$  방법에 의한 간접수직투수계수가 모든 압밀하중에서 가장 잘 일치하였다.
- (2) Oedo와 RVC시험에서 9가지 방법으로 구한 간접수직투수계수의 결과는 압밀하중 80, 160, 320kPa에서 Oedo 시험의 경우 0.94~14.20, 0.98~8.57, 0.46~ $8.57 \times 10^{-8}$  cm/sec의 범위로 최대값은 Su's maximum 방법에서 최소값은 Hyperbolic 방법에서 산정되었고, RVC 시험에서는 80, 160, 320kPa의 압밀하중에서 2.55~40.37, 0.29~40.57, 0.17~ $2.73 \times 10^{-8}$  cm/sec의 범위를 보였는데 sivaram&swamee 방법이 모든 압밀하중에서 최대의 값을 나타낸 반면 최소값은 압밀하중에 따라 다르게 나타났다.
- (3) 압밀하중 80, 160, 320kPa에서 SRHK시험의 직접

수평투수계수 값은 각각 9.30, 2.89,  $0.70 \times 10^{-7}$  cm/sec로 나타났고, RHC시험에 의해 산정된 9가지의 간접 수평투수계수 값은 모두과대 평가를 보였으며 그 중에서 직접수평투수계수와 가장 근접하게 산정된 방법은 Inflection 방법이었다. SRHC시험에 의한 간접수평투수계수 값 중에는 모든 압밀하중에서 Hyperbolic 방법과 Inflection 방법이 비교적 잘 일치하였다. 이와 같이 압밀에 의해 간접적으로 산정된 수평압밀계수는 실제와 잘 맞지 않고 과대하게 산정됨을 알 수 있었다.

(4) RVK시험과 SRHC시험에 의해 나타난 재성형 이암풍화토의 투수에 대한 이방비는 압밀하중 80, 160, 320kPa에서 각각 11, 15, 13을 나타내어 압밀하중 증가에 따른 일정한 경향은 나타나지 않았으며, 평균 약 13정도의 이방성을 보였다.

(접수일자 : 2002년 12월 18일)

### 참 고 문 헌

1. 김영수, 김기영, 백영식, (2000), 이암풍화토의 횡방향압밀 및 투수특성 한국지반공학회 논문집 제16권 제1호 pp.31-42.
2. Barron, R.A.(1994), The influence of drain wells on the consolidation of fine-grained soils. Diss. Providence US Eng. Office.
3. Head K. H.(1993), Manual of Soil Laboratory Testing, Pentech Press, London, Vol. 3, pp. 1129~1225.
4. Mersi, G., & Olson, R. E.(1971), Mechanics controlling the permeability of clays Clay and Clay Minerals, Vol. 19, pp. 151-158.
5. Pandian, N. S., Sridharan, A., and Kumar, K. S.,(1992), A New Method for the Determination of Coefficient of Consolidation, Geotechnical Testing Journal, Vol. 15, No.1, pp.74-79.
6. Samarasinghe, A. M., Haung, Y. H., Drenvich V. P.,(1982), Permeability and Consolidation of Normally Consolidated Soils, Journal of Geotechnical Engineering Division Vol. 108, No. GT6.
7. Shields and P.W. Rowe(1965), Radial Drainage Oedometer for Laminated Clays., Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, Vol. 91, No. SM1.
8. Sridharan, A., and Prakash, K.(1993),  $\delta$ -t/ $\delta$  method for the Determination of Coefficient of Consolidation, Technical Note, Geotechnical Testing Journal, Vol.16, No.1, pp.131-134.
9. Su. H. l.(1958), Procedure for rapid consolidation test. J. Soil Mech. Fdns Div. Am. Soc. Civ. Engrs 84, SM3, 1-13.
10. Taylor, D. W. (1948), Fundamentals of Soil Mechanics, John Wiley and Sons, N. Y., pp.700.
11. Tavenas. et al.(1983), The Permeability of Natural Soft Clays Part 1 : Method of Laboratory Measurement Can. Geotech. J. 20. 629~644.