

## 포화된 사질토에서 등방재하시험에 의한 비배수 공극수압의 거동분석

### Analysis of the Behavior of Undrained Pore Water Pressure in Saturated Sand by Isotropic Loading Test

임 성 훈\*

Eam, Sung Hoon

#### Abstract

It is known in some literatures that the  $B$  value is not equal to unity in saturated soil when effective stress is given, in which the  $B$  Value is the ratio of measured excess pore water pressure and isometric loading pressure. In this study the  $B$  value was measured on various effective stresses and on various incremental loading stresses in various grain size of specimens with saturated sand. The test results showed that the  $B$  value was affected largely by grain size of sand in specimen and the amount of effective stress. There was the semi-logarithmic relationship between  $B$  value and effective stress, and also there was the linear relationship between the gradient of the former semi-logarithmic relationship and grain size of specimen.

*Keywords* : Pore water pressure,  $B$  value, Effective stress, Sand, Isotropic loading, Grain size

#### I. 서 론

흙의 응력 변형거동에 있어서 공극수압의 측정과 예측은 기본적으로 중요하게 고려해야 할 항목이다. Terzaghi(1923, 1936)는 흙에 대한 압밀해석에서 최초로 공극수압의 개념을 도입하였고 포화토의 전단저항은 외부에서 작용하는 전응력이 아닌

토립자들이 실제로 받고 있는 유효응력과 관계된다고 하였다. 외부 하중에 대한 토립자와 공극수의 상호역할은 다양한 인자의 영향을 받는다. Bishop 등 (1950)은 후에 Skempton(1954)의 공극수압계수  $B$ 로 유도되는 식을 제안하면서 토립자의 접촉면적의 영향에 의한 과잉공극수압의 감소는 0.5~3.0% 정도로 실험의 오차를 고려한다면 무시할 수 있을 정도로 작은 값이라고 하였다. 유효응력이 작은 경우에는 토립자들의 접촉면에서의 응력이 작으므로 흙 구조의 강성이 큰 영향을 미치지 않는다. 현재 표준화된 공극수압계수 측정방법(ASTM D4767- 04)에서도 유효응력이 무시할 수 있을 정

\* 공주대학교 산업과학대학 생물산업공학부  
농업토목전공  
\* Corresponding author. Tel.: +82-41-330-1264  
Fax: +82-41-330-1269  
E-mail address: geotechkor@kongju.ac.kr

도로 작은 상태에서 공극수압계수  $B$ 를 측정하도록 되어있다. 그러나 토립자간 접촉면에서의 저항력이 발휘될 정도의 유효응력을 받고 있는 경우에는 공극수압계수는 다른 거동특성을 나타낸다.(Eam et.al, 2003, Eam, 2003).

본 연구에서는 흙이 유효응력을 받고 있는 경우의 비배수 과잉공극수압거동을 실험적으로 구명하기 위해서 공시체 성형시료의 입경을 각각 달리하여 토립자간 지지특성을 다양하게 조성하여 입경과 유효응력이 비배수 과잉공극수압거동에 미치는 영향을 삼축 등방재하시험에 의해서 고찰하고, 일정한 유효응력 하에서 등방재하중분의 크기와 과잉공극수압 거동의 관계를 구명하고자 한다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 시험재료 및 공시체 성형

토립자의 입경이 작으면 비표면적이 커지므로 특정 접촉면의 크기는 작아도 전체 접촉면적은 증가한다. 또한 토립자의 입경이 큰 경우에도 입자의 표면 거칠기 정도에 따라서 접촉면의 면적이 변하므로 입자 크기가 크면 전체 접촉면적은 더욱 작아진다. 이러한 특성들과 함께 흙의 건조밀도, 공극비 등이 유효응력과 공극수압의 거동에 상호 복합적인

영향을 나타낸다. 이러한 복잡하고 상호의존적인 인자들 중에서 토립자의 접촉면적과 공극수압거동의 관계를 분석하기 위해서 동일지점에서 채취한 모래를 입경범위에 따라 분리하고 공극비가 일정한 범위 내에 포함되도록 공시체를 성형하였다.

표준망체 No. 4~No. 200까지 1조를 사용하여 각 시료에서 입도분포가 좁은 범위 안에 포함되도록 모래를 분리하였다. 모든 공시체가 특정한 범위의 공극비를 나타내도록 하기 위해서, 개략적으로 어느 정도의 다짐에너지를 가해야 하는지를 판단할 목적으로 최대공극비와 최소건조밀도를 측정하였다. 최대 공극비가 가장 작은 S-1 공시체는 전혀 다져지지 않은 상태이므로 모든 공시체가 일정한 공극비를 갖기 위해서는 성형시의 최소한의 다짐을 고려한다면 최대공극비가 가장 큰 S-6, S-7 공시체(입경: 0.105~0.074 mm)의 성형 후 공극비가 S-1 공시체의 최대공극비보다 더 작은 공극비를 나타내어야 한다. 그러나 입도가 불량한 모래는 다짐이 잘 되지 않기 때문에 S-6 공시체를 성형하였을 때의 공극비는 다른 공시체에 비해서 약간 크게 나타났고, S-4에서 가장 크게 나타났으나 그 분포 범위는 최대공극비의 분포범위에 비해서 좁혀졌다. 입경의 크기에 따른 흙의 밀도, 자유낙하에 의한 공시체 성형시의 최소건조단위체적중량과 최대공극비 및 성형 후 건조단위체적중량과 공극비는 Table

Table 1 Physical properties of the used soil particle

Specimen No.	Particle size (mm)	Specific gravity $G_s$	Minimum dry density $\gamma_{dmin}$ ( $kg/m^3$ )	Maximum void ratio $e_{max}$	Dry density $\gamma_d$ ( $kg/m^3$ )	Void ratio $e$
S-1	4.76~2.00	2.64	1,410	0.872	1,496	0.765
S-2	2.00~0.85	2.69	1,401	0.920	1,542	0.745
S-3	0.85~0.42	2.67	1,349	0.979	1,521	0.756
S-4	0.42~0.25	2.72	1,267	1.147	1,469	0.852
S-5	0.25~0.105	2.75	1,219	1.257	1,492	0.844
S-6	0.105~0.074	2.72	1,110	1.451	1,483	0.834
S-7	0.105~0.074	2.72	1,110	1.451	1,479	0.826

1과 같다.

## 2. 공시체 포화

입도시험에서 분산제로 사용되는 헥사메타인산나트륨 포화용액을 10 ml/l로 희석하여 모래시료를 24시간 수침시켜 입경을 분리시킨 후 세척하여 입경이 작은 입자들이 남아있지 않도록 하였다. 또한 모래입자 알갱이들이 완전히 포화되도록 하기 위해서 세척 후 수침상태로 가열하여 100 °C를 약 10분 동안 유지시킨 후 수침상태에서 상온으로 냉각시켜서 사용하였다.

높이 13 cm, 직경 5 cm 몰드를 사용하여 1층의 높이가 약 2 cm가 되도록 7층으로 다져서 공시체를 성형하였다. 성형과정 중에 공시체 내부나 삼축압축 Cell system에 기포유입을 방지하기 위해서 수조 내에서 수중성형을 하였다. 측정에 사용된 삼축압축시험기의 차분압력센서(differential pressure transducer)는 격막(diaphragm)의 최대 변형각도가 0.0015" 로써 최대압력 22.1 MPa에서의 체적 변화량이  $4.65 \times 10^{-5} \text{ cm}^3$ 로 되어 있다. 이러한 체적변형이 발생할 수 있는 체적탄성계수는 사용된 몰드의 내용적을 기준으로 하고, 모래입자의 체적탄성계수를 36,000 MPa (Terzaghi 등 1996)로 하면 약 17배 정도 크므로 공극수압측정을 위해서 수은 마노미터를 사용할 때 나타나는 시간지연효과를 무시할 수 있을 것으로 판단된다.

Bishop(1973)은 수은 마노미터에 의한 압력측정과정에서 나타나는 배수량을 상쇄시키기 위해서 수은의 압력을 증가시키는 방법을 사용하였고, Mesri 등(1976)은 공극수압계수가 1이 되지 않는 원인은 압력측정과정에서 나타나는 배수 때문이라고 하였다. 그러나 이 시험에 사용된 센서의 격막의 배수량은 무시할 수 있을 정도로 작은 양으로 판단할 수 있다. 센서의 변형량이 크면, 점토의 경우에 투수계수가 매우 작기 때문에 시간지연효과(time lag, Gibson, 1961)를 나타낼 수 있으나 시

험에 사용된 것과 같은 전기식 센서들은 이러한 영향을 무시할 수 있다.

## 3. 시험방법

### 가. 다양한 유효응력 하에서 등방재하시험

Table 2는 시험과정을 요약한 것으로 S-1~S-6까지의 공시체는 각각의 압밀압력으로 약 1시간 동안 압밀시키고, 압밀이 종료된 후에 비배수 상태에서  $\Delta\sigma_3=20 \text{ kPa}$ 를 가하여 공시체 내부에서 발생하는 공극수압을 측정하였다. 모래에서 압밀은 매우 신속하게 종료되기 때문에 압밀시간 1시간은 내부의 공극수압이 소산되기에 충분한 시간으로 판단되었다.

Table 2 Schemes of the test on sand

Specimen No.	Consolidation pressure $\sigma_3$ (kPa), ( $\therefore$ Effective stress) when $\Delta\sigma_3 = 20$ (kPa)						
	50	100	200	300	400	500	600
S-1							
S-2							
S-3							
S-4							
S-5							
S-6							

### 나. 일정한 유효응력 하에서 등방재하시험

Fig. 1은 시험과정을 요약한 것으로 초기에 구속압력을 300 kPa, 부압(back pressure)을 200 kPa 가하여 유효응력이 100 kPa가 되도록 하고 1

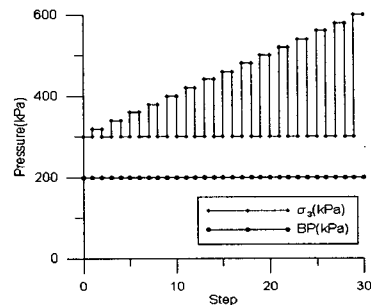


Fig. 1 Scheme of the test

시간 경과 후에, 1단계 재하로 비배수 상태에서 구속압력을 320 kPa로 증가시킨 후( $=\Delta\sigma_3 20$  kPa) 나타나는 공극수압이 일정해진 것으로 판단할 수 있을 때까지 약 100초간 측정하였다. 모래에서 압밀은 매우 빨리 종료되기 때문에 초기 압밀배수시간 1시간은 내부의 공극수압이 소산되는데 충분한 것으로 판단되었다. Eigenbrod 등(1990)은 경험상 200 kPa의 부압은 점성토를 포화시키기에 충분한 압력이라고 하였다. Black 등(1973)의 표에서도 200 kPa는 포화도 약 95%의 시료를 완전히 포화시킬 수 있는 압력이다. 따라서 주어진 부압은 점성토보다 포화조건이 양호한 입도 조정된 사질토에서도 전술한 포화시키기 위한 다양한 방법들에도 불구하고 유입되었을 수도 있는 기포들을 용해시키기 위한 적절한 압력으로 사료된다.

1단계 측정이 완료된 후에, 주어진  $\Delta\sigma_3$ 를 제거하고 발생한 공극수압을 소산시킨 후 유효응력 100 kPa에서 2단계 재하로 비배수 상태로 구속압력을 340 kPa로 증가시키고 공극수압을 측정하였다. 이와 같은 과정을 구속압력을 20 kPa씩 증가시키면서 반복하여 구속압력이 600 kPa( $\Delta\sigma_3 = 300$  kPa)가 될 때까지 전체 15회를 측정하였다. 유효응력이 0인 상태에서 공극수압 측정은 점성토에서는 토립자간의 점착력에 의해서 공시체의 자립이 가능하지만 순수한 모래에서는 유효응력이 없으면 공시체가 붕괴되기 때문에 시험이 불가능하였다. 이러한 방법에서 주어진  $\Delta\sigma_3$ 를 제거했을 때 공시체의 변형률이  $\Delta\sigma_3$ 가 주어지기 전의 상태에 근접하게 회복되었기 때문에 공시체의 체적변화가 없는 것으로 판단하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 입경에 따른 공극수압의 변화

Fig. 2는 각각의 공시체에 대해서 유효응력 50, 100, 200, 300, 400, 500 및 600 kPa에서 비배

수 조건으로  $\Delta\sigma_3 = 20$  kPa를 가하였을 때 시간에 따른 공극수압의 변화를 나타낸 것이다. 모든 시험 결과에서 측정된 공극수압은 가해진  $\Delta\sigma_3$ 보다 작게 나타났고, 발생한 공극수압의 크기는 공시체의 입경이 작아질수록 작게 나타났다. 각각의 공시체에서는 유효응력이 증가할수록 공극수압의 크기는 작아졌고, 이러한 결과는 암석에 대한 Mesri 등(1976)의 결과와 호상점토에 대한 Eigenbrod 등(1990)의 결과와 일치한다. 입경이 작아질수록 측정된 공극수압은 작게 나타났다. Bishop 등(1950)은 토립자의 접촉 면적이 공극수압의 변화에 미치는 영향은 유효응력에 따라서 변화하고 그 범위는 0.5%~3%로 작기 때문에 무시할 수 있다고 하였으나 이는 유효응력이 무시할 수 있을 정도로 작을 경우에는 잘 성립되지만 유효응력이 큰 경우에는 접촉면적의 영향이 공극수압에 큰 영향을 미친다는 알 수 있다. 동일한 공극비인 경우에도 토립자의 크기가 작아지면 입자의 비표면적은 커지고 따라서 접촉면적도 증가하여 토립자의 크기가 큰 경우보다 비배수 과잉공극수압에 큰 영향을 나타낸다.

#### 2. 유효응력에 따른 공극수압의 변화

모래는 정적인 하중에 대해서 매우 큰 힘에도 지지할 수 있고 압축성이 작다. 따라서 등방압밀에 의한 체적 변화량을 측정하는데 있어서 미량의 누수와 기계적 진동 및 온도변화 등도 큰 영향을 나타내는 것으로 생각되어 이 연구에서는 축 변형률을 기준으로 하였다. 삼축 시험 시스템 자체도 압력재하에 대한 반발인장의 영향이 있기 때문에 정확하다고는 할 수 없으나 미량의 누수의 영향은 피할 수 있을 것으로 생각된다. 이 때 공시체는 재성형하여 등방성이므로 축 변형률은 공시체직경의 변형률과 같다고 가정하고 각각의 유효응력에서의 압밀 종료 후의 체적은 다음과 같이 산출하였다.

재성형한 등방 공시체에서 등방재하시 축변형률( $\epsilon_a$ ) = 직경의 변형률( $\epsilon_d$ )이므로

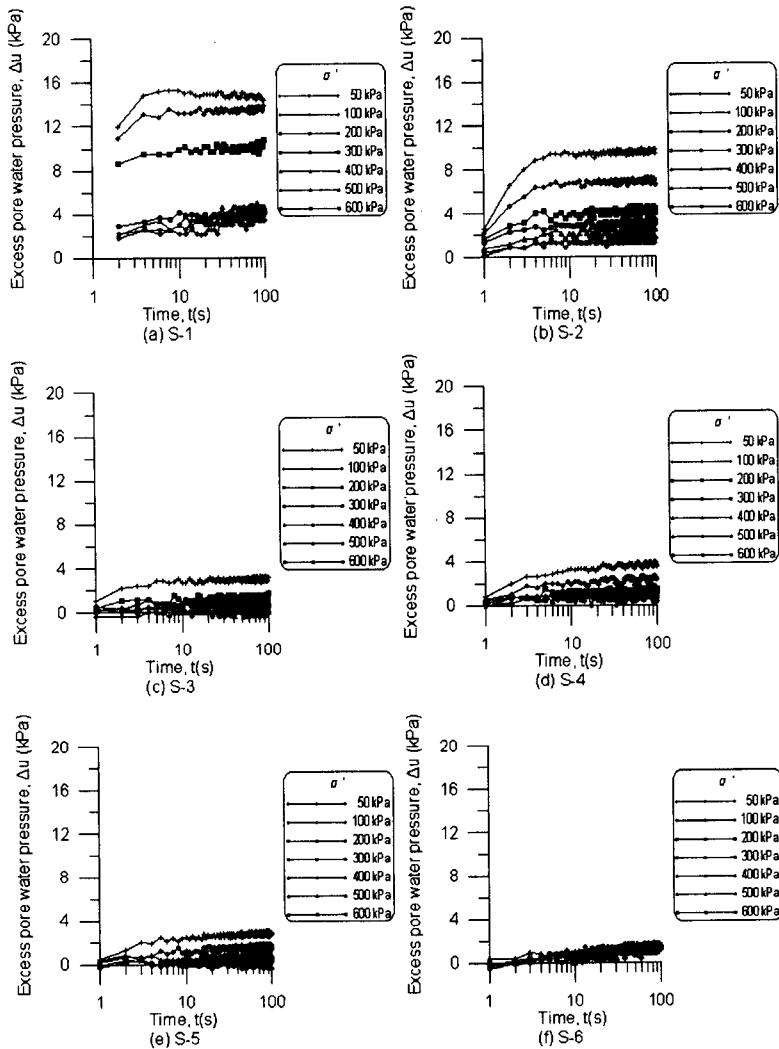


Fig. 2 The relationship between excess pore water pressure and time with  $\Delta\sigma_3=20$  kPa in various effective stress

$$\begin{aligned}
 \Delta V &= V_0 - V \\
 &= \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \cdot h_0 - \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h \\
 &= \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \cdot h_0 - \\
 &\quad \frac{\pi \cdot D_0^2 \cdot (1 - \epsilon_a)^2}{4} \cdot h_0 \cdot (1 - \epsilon_a) \\
 &= \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \cdot h_0 \{1 - (1 - \epsilon_a)^3\} \\
 &= V_0 \{1 - (1 - \epsilon_a)^3\}
 \end{aligned}$$

$$\therefore V = V_0 \cdot (1 - \epsilon_a)^3 \dots \dots \dots (1)$$

- 여기서,  $V_0$ : 압밀전 초기체적  
 $V$ : 압밀종료 후의 체적  
 $D_0$ : 압밀전 초기 공시체 직경  
 $D$ : 압밀종료 후의 공시체 직경  
 $h_0$ : 압밀전 초기 공시체 높이  
 $h$ : 압밀종료 후 공시체 높이

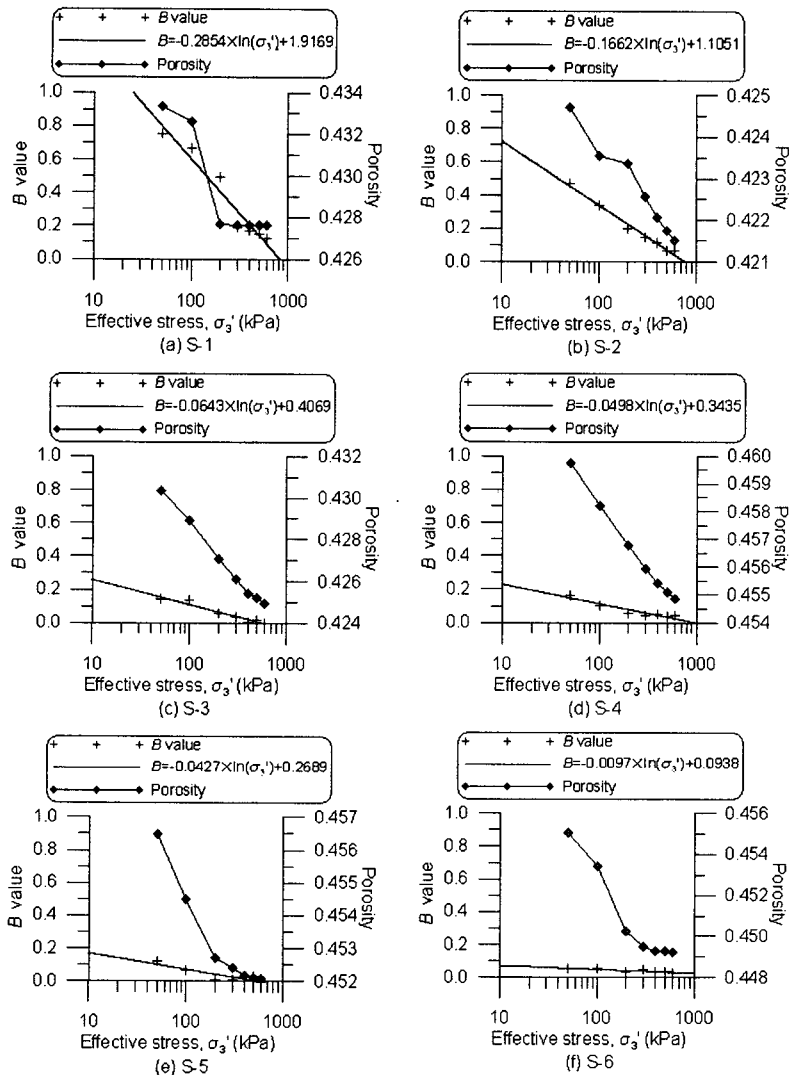


Fig. 3 The B values according to various effective confining pressures

$$\epsilon_a: \text{종방향 축변형률} = \frac{\Delta h}{h_0}$$

일반적으로 체적 변형률은 푸아송비와 축 변형률에 관한 함수로 나타나지만 이때 사용되는 축 변형률은 축차응력에 의한 변형률이다. 이 연구에서 사용된 축 변형률은 등방압밀에서 측정된 축 변형률이므로 푸아송비의 영향이 포함되어 있다.

Fig. 3은 측정의 기계오차에 의한 부정확성을 감

소시키기 위해서 공극수압이 일정해지는 구간으로 판단되는 5~30초 동안 측정된 공극수압의 평균치로부터 유효응력의 변화에 따른 공극수압계수 B와 식(1)로부터 산출된 공극률의 관계를 반대수 그래프로 나타낸 것이다. 시료의 입경이 큰 공시체 S-1과 S-2에서는 유효응력에 따른 공극률이 약간 불규칙적으로 나타났다. S-3과 S-4공시체에서는 전형적인 반대수 선형관계를 나타내고 있고,

S-5와 S-6에서는 S형 곡선을 나타내고 있다. 시험 시료가 모래이기 때문에 공극률의 변화 범위는 매우 작게 나타났다. 본 실험결과를 향후 공극수압의 거동에 대한 모델링 결과와 비교하기 위해서는 공극비 보다는 공극률이 적합할 것으로 판단되어 유효응력에 따른 공시체의 압축을 공극률로 표현하였다. 유효응력의 크기에 따른 공극수압계수  $B$ 의 관계는 반대수 선형관계를 나타내고 있다. Eam 등 (2003)은 점성토에서 압밀 종료 후 즉 유효응력을 받고 있는 공시체에서 공극수압계수를 측정 한 결과 시간  $t=0$ 인 초기에는 공극수압이 0이고 시간의 경과에 따른 함수관계로 나타난다고 하였다. 이러한 결과를 본 연구결과와 연관시키면 사질토와 점성토에서 공극수압의 시간에 따른 거동양상은 다르게 나타나지만 공시체 입경의 크기가 감소할수록 공극수압계수도 작게 되어 점성토 크기의 입경에서는 결국 초기에 0이 된다는 가설을 세울 수 있다. 이러한 가설은 입도가 불량한 모래와 점성토라는 양극단에 있는 시료의 시험으로부터 얻은 결과이므로 보다 다양한 흙에 대한 추가적인 시험이 필요할 것으로 사료된다.

비록 각각 다른 물리량을 나타내고 있으나 유효응력에 따른 공극수압계수의 변화와 공극률의 변화를 비교고찰하면 S-1과 S-2에서는 시험의 결과가 약간 불규칙하게 나타났으나 S-3과 S-4에서는 공극수압계수와 공극률이 상호 선형관계에 있는 것으로 나타난다. 그러나 입경이 작은 S-5와 S-6 공시체에서는 유효응력에 따른 공극률의 변화가 일정하지 않고 공극수압계수도 매우 작은 범위에서 변화하므로 상호 밀접한 관계가 있는 것으로 판단하기에는 다소 미흡하지만 두 값 모두 유효응력과 반대수 선형관계가 있는 것으로 고려하면 공극률과 공극수압계수도 일정한 관계가 있는 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 4는 각각의 유효응력에 따른 공극수압계수의 관계에서 반대수 선형회귀 직선의 기울기와 공시체 성형 시료의 입경과의 관계를 나타낸 것이다.

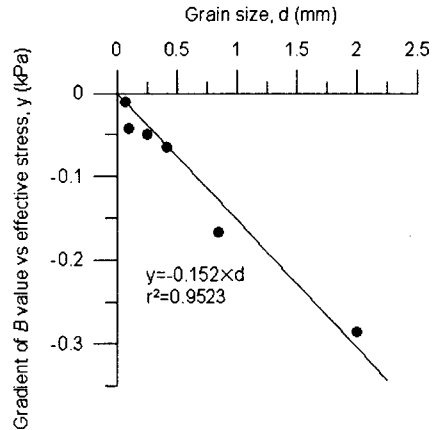


Fig. 4 The relationship between gradient of B value vs effective stress and grain size

유사한 공극비에서도 구성입자들의 평균적인 크기가 작아지면 공극의 직경도 작아지게 되므로 접촉면의 개소는 많아지고 접촉면적은 넓어진다. Fig. 4의 결과는 동일한 공극률에서도 공극수압은 구성입자 크기의 영향을 받아서 입자의 크기가 커질수록 발생하는 공극수압의 크기는 커지고 유효응력의 증가에 따른 공극수압의 감소율도 커진다는 것을 의미한다. 또한 각각의 공시체에서 유효응력에 따른 공극수압계수의 관계를 반대수 선형관계로 고려하고 이 선형관계에서 기울기 또한 입경의 크기에 따라서 일정한 관계를 나타내는 것으로 고려한다면 시료의 입경과 유효응력에 따른 공극수압계수의 변화를 일관되게 설명할 수 있을 것으로 사료된다.

### 3. 등방재하증분의 크기에 따른 공극수압의 변화

Fig. 5는 15단계에 걸쳐서 측정 한 과잉공극수압의 변화를 나타낸 것이다. 공극수압은 증가하여 약 10초 전후에서 일정해졌다. 이 경과시간은 압력 재하 장치의 작동에 요구되는 시간이다. 이후에 나타나는 작은 감소는 누수 혹은 압력 측정 장치의 정밀도의 한계 의해서 발생하는 것으로 판단된다. 물은 체적탄성계수가 크기 때문에 매우 작은 체적변화에도 압력의 변화는 크다. 일정경과시간동안의

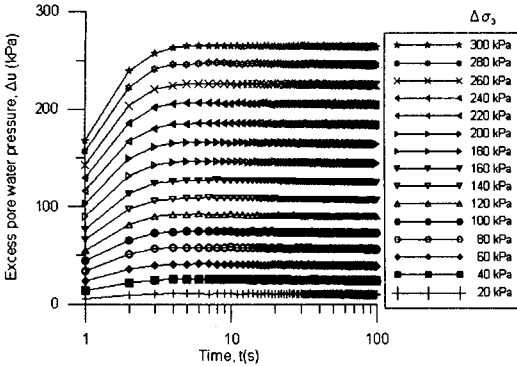


Fig. 5 The responses of pore water pressure due to  $\Delta\sigma_3$  with back pressure 200 kPa

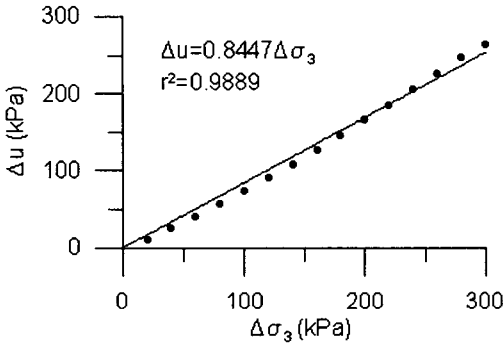


Fig. 6 The relationship between  $\Delta\sigma_3$  and  $\Delta u$  during from 5 to 20 seconds

압력감소량이 작은 것으로 볼 때 누수량이 발생하였다고 하여도 그 양은 미량으로 추정된다. 공극수압계수의 측정값은 기계오차를 최소화하기 위해서 5~20초 동안 나타나는 평균값으로 하였다.

Fig. 6은 측정된 공극수압의 평균값( $\Delta u$ )과 전응력 증가량( $\Delta\sigma_3$ )의 관계를 나타낸 것이다.  $\Delta u$ 와  $\Delta\sigma_3$ 와의 선형 회귀식에서  $\Delta\sigma_3$ 가 0인 상태에서  $\Delta u$ 가 나타날 수 없으므로 세로절편을 좌표원점에 고정시킨 경우 결정계수  $r^2=0.9889$ 로 밀접한 선형 관계가 있는 것으로 나타났다. 직선의 기울기는 1보다 작게 나타났으며 이것은 15회 측정된 공극수압계수의 평균값이 직선의 기울기인 약 0.8447라는 것을 의미한다.

Fig. 7은 동일 실험결과에서 공극수압계수( $B$ )와

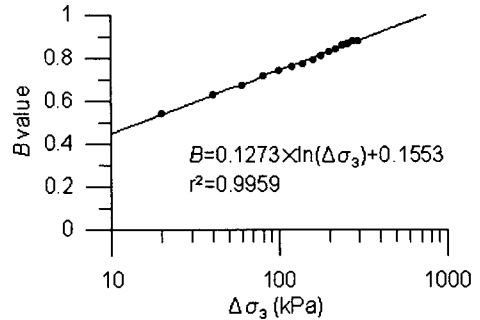


Fig. 7 The relationship between  $\Delta\sigma_3$  and B value

전응력 증분( $\Delta\sigma_3$ )과의 관계를 나타낸 것이다. 공극수압계수  $B$ 와  $\Delta\sigma_3$ 는 반대수선형관계로 나타났고, 이때의 결정계수  $r^2=0.9959$ 로 1에 근접하게 나타났다.

Fig. 6과 Fig. 7에서 모두 높은 선형관계가 나타나고 있으나 두 그래프는 전혀 다른 의미를 나타낸다. Fig. 6을 기준으로 한다면  $\Delta\sigma_3$ 를 아무리 큰 값을 주어도 공극수압계수는 주어진  $\Delta\sigma_3$ 보다 항상 0.8447배 작은 값을 나타내어 공극수압계수  $B$ 는 항상 1보다 작은 값으로 일정하다는 것을 의미한다.

Fig. 7을 기준으로 한다면  $\Delta\sigma_3$ 를 증가시킬수록 공극수압계수는 증가하고  $\Delta\sigma_3$ 가 762 kPa 이상이 되면 공극수압계수도 1 이상이 된다. 후자를 기준으로 할 경우에 해석방법의 수식화 과정이 복잡해지고 실제의 재하에서 후자와 같이 하중증가율이 큰 경우는 희박하므로 재하증분이 낮은 경우에는 전자를 기준으로 하는 것이 타당할 것으로 사료된다. Terzaghi 등(1996)은 섬유질 이탄토와 같은 포화된 유기질 흙에서 1보다 약간 큰 공극수압계수 값이 반복적으로 측정되었다고 하였다. 이러한 원인에 대해서는 유기질 입자의 압축성이 물의 압축성보다 큰 것이 그 원인이라고 하였다. Fig. 7을 과잉공극수압해석의 기준으로 한다면 사질토에 대해서도  $\Delta\sigma_3$ 가 특정한 값을 넘어서면 공극수압계수가 1보다 크게 나타날 수 있는 가능성을 보여준다. 두 경우에 대해서 단순고찰을 하면 공시체 강성이



매우 낮은 이탄토에 주어졌던  $\Delta\sigma_3$ 의 공시체에 대한 영향이 본 연구에서 유추된 762 kPa 이상  $\Delta\sigma_3$ 의 공시체에 대한 영향과 대응하는 것으로 추론할 수는 있으나 Fig. 6과 Fig. 7 중에서 합리적인 해석방법을 판단하기 위해서는 좀더 이론적인 분석이 필요할 것으로 생각된다.

#### IV. 결 론

본 연구에서 입도를 분리한 모래를 각각의 입경 범위별로 유사한 공극률이 되도록 성형하여 포화시킨 공시체에서 유효응력에 따른 비배수 공극수압의 거동을 실험하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 유효응력을 받고 있는 경우에는 공극수압계수가 1보다 작은 값이 나타났다.
2. 일정한 유효응력 하에서 등방재하증분의 크기에 따른 공극수압계수의 관계는 등방재하증분이 작은 범위에서는 선형비례관계로, 재하증분이 큰 경우에는 반대수 선형비례관계로 해석하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.
3. 유효응력에 따른 공극수압계수의 크기는 반대수 선형비례관계가 있는 것으로 나타났다.
4. 각각의 공시체를 유사한 공극률이 되도록 성형하였음에도 입경의 크기가 작아질수록 측정된 공극수압도 작게 나타났다.

#### References

1. ASTM D4767-04. 2005. Standard test method for consolidated undrained triaxial compression test for cohesive soils.
2. Bishop, A. W. 1973. The influence of an undrained change in stress on the pore-pressure in porous media of low compressibility. *Geotechnique* ICE. 23(3): 435-442.
3. Bishop, A. W., and A. K. G. Eldin. 1950. Undrained triaxial tests on saturated sands and their significance in the general theory of shear strength. *Geotechnique*. ICE. 2(1): 13-32.
4. Black, D. K., and K. L. Lee. 1973. Saturating laboratory samples by back pressure. *J. of the Soil Mechanics and Foundation Division*. ASCE. 99(SM1): 75-93.
5. Christie, I. F. 1964. A re-appraisal of merchant's contribution to the theory of consolidation. *Geotechnique*. ICE. 14(4): 309-320.
6. Eam, S. H. 2003. The behavior of undrained pore water pressure in normally consolidated and saturated clay(II) - visco elastic analysis model. *J. of the Korean Society of Agricultural Engineers*. 45(4): 137-143. (in Korean)
7. Eam, S. H., and D. W. Lee. 2003. The behavior of undrained pore water pressure in normally consolidated and saturated clay (I) - analysis by isotropic loading test. *J. of the Korean Society of Agricultural Engineers*. 45(4): 126-136. (in Korean)
8. Eigenbrod, K. D., and J. P. Burak. 1990. Measurement of B-Values Less Than Unity for Thinly Interbedded Varved Clay. *Geotechnical Testing Journal*. ASTM. 13(4): 370-374.
9. Gibson, R. E., and K. Y. Lo. 1961. A theory of consolidation for soils exhibiting secondary compression. *Acta Polytechnica Scandinavica*, 296/1961, Ci 10. Reprinted by Norwegian Geotechnical Institute. quoted by Christie, I. F. 1964.
10. Mesri, G., K. Adachi., and C. R. Ullrich. 1976. Pore-pressure response in rock to undrained change in all-round stress. *Geotechnique*. ICE. 26(2): 317-330.
11. Skempton, A. W. 1954. The Pore Pressure Coefficients A and B. *Geotechnique*. ICE.

- 4(4): 143-147.
12. Terzaghi, K. 1923. Die berechnung der durchlässigkeitsziffer des tones aus dem verlauf der hydrodynamischen spannung-serscheinungen. *Sitz, Akademie der Wissenschaften Part IIa 132*: 125-138. Mathematisch-Naturwissenschaftliche, Klasse, Vienna, Austria, quoted by Terzaghi, K., R. B. Peck, and G. Mesri. 1996.
13. Terzaghi, K. 1936. The shearing resistance of saturated soils and the angles between the planes of shear. In *Proc. of the 1st ICSMFE*. Vol.1, 54-56. Cambridge, Mass.
14. Terzaghi, K., R. B. Peck, and G. Mesri. 1996. *Soil Mechanics in Engineering Practice, Third Edition*. :John Wiley & Sons