



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위 논문

# 낙동강 하구 상부퇴적사질토의 통수능 평가

Evaluation of Discharge Capacity of Upper Sand Deposit at the  
Nakdong River Estuary



2017년 2월

한국해양대학교 대학원

토목환경공학과

정 진 영

본 논문을 정진영의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 : 서영교   
위원 : 이재하   
위원 : 김태형 



2017년 2월

한국해양대학교 대학원

# 목 차

<b>List of Tables</b> .....	iv
<b>List of Figures</b> .....	v
<b>Abstract</b> .....	ix
<b>1. 서 론</b> .....	<b>1</b>
1.1 연구의 배경.....	1
1.2 연구목적 및 범위.....	3
<b>2. 기존 연구</b> .....	<b>4</b>
2.1 모래의 투수성.....	4
2.1.1 투수계수 영향 인자.....	4
2.1.2 모래의 입도에 의한 수리전도도 산정 경험적 방법.....	6
2.2 수평배수층 재료 기준.....	8
2.2.1 국내기준.....	8
2.2.2 국외기준.....	10
<b>3. 상부퇴적사질토의 기본적 특성 및 투수특성</b> .....	<b>11</b>
3.1 조사 및 기본적 특성.....	11
3.1.1 조사위치 및 방법.....	11
3.1.2 시추조사.....	12
3.1.3 표준관입시험.....	12

3.1.4 분포현황	13
3.2 입도분포 특성	15
3.2.1 입도분포	15
3.2.2 비교 분석	16
3.3 투수특성	19
3.3.1 투수시험 개요	19
3.3.2 시료조성	22
3.3.3 현장투수시험 결과	23
3.3.4 실내투수시험 결과	24
3.3.5 비교 분석	25
<b>4. 압밀 이론 고찰</b>	<b>27</b>
4.1 기본개념	27
4.2 수정 Cam-Clay 모델	29
<b>5. 수치 해석을 통한 상부퇴적사질토의 통수능 평가</b>	<b>33</b>
5.1 적용 프로그램	33
5.1.1 프로그램 검증	35
5.2 해석조건 및 내용	39
5.2.1 해석조건	39
5.2.2 해석개요	43

5.3 해석 결과 및 고찰.....	43
5.3.1 통수능을 고려한 Sand Mat의 두께 적절성 검증.....	43
5.3.2 해석결과.....	45
6. 결론.....	56
참고문헌.....	58
감사의 글.....	60



## List of Tables

<b>Table 2.1</b> Permeability of the common soil(홍원표 등 4,2012).....	5
<b>Table 3.1</b> Range for investigation(김병준,2016).....	11
<b>Table 3.2</b> Properties of upper sedimented sandy soil(Kwater, 2014b).....	14
<b>Table 3.3</b> Particle criterion of soil(Budhu, 2012).....	17
<b>Table 3.4</b> Condition of constant head permeability test(김병준,2016).....	22
<b>Table 3.5</b> Limit of permeability coefficient application(Kim, 2002).....	23
<b>Table 3.6</b> Results of permeability test in BH-1.....	23
<b>Table 3.7</b> Comparison of permeability between midstream sand and upper sedimented sandy of Nakdong river.....	26
<b>Table 5.1</b> Soil parameters in analysis.....	36
<b>Table 5.2</b> Soil parameters used in numerical analysis.....	40

## List of Figures

<b>Fig. 1.1</b> Map of study area(김병준, 2016).....	2
<b>Fig. 2.1</b> Size distribution range of used sand.....	9
<b>Fig. 2.2</b> Sand Drain Sand and Sand Mat Proper Size of Sand.....	10
<b>Fig. 3.1</b> The distribution of soil layers in Eco-delta City, located at the Nakdong river estuary(김병준,2016).....	13
<b>Fig. 3.2</b> N value distribution of upper sedimented sandy soil (Kwater, 2014b).....	14
<b>Fig. 3.3</b> Particle size distribution curve of representative sedimented sandy soil samples obtained from different depths of BH-1, 2, and 3.....	15
<b>Fig. 3.4</b> Particle size distribution of Joomunjin, Nakdong river estuary and midstream sands.....	17
<b>Fig. 3.5</b> Evaluation results of sand mat applicability using particle size distribution(BH-1) .....	18
<b>Fig. 3.6</b> Schematic diagram of field permeability test.....	20
<b>Fig. 3.7</b> Laboratory permeability test(김병준,2016).....	21
<b>Fig. 3.8</b> Remolded process of constant head permeability test(김병준,2016).....	22
<b>Fig. 3.9</b> Results of constant head permeability tests.....	25
<b>Fig. 5.1</b> Finite element mesh used in column loading problems.....	37
<b>Fig. 5.2</b> Numerical analysis and Biot's analytical solution comparison .....	38
<b>Fig. 5.3</b> Analysis conditions.....	39



<b>Fig. 5.4</b> Finite element mesh and boundary.....	42
<b>Fig. 5.5</b> Horizontal drain function of sand mat.....	44
<b>Fig. 5.6</b> Average degree of consolidation with without P.V.D.....	45
<b>Fig. 5.7</b> Average degree of consolidation with P.V.D 1.5m.....	46
<b>Fig. 5.8</b> Average degree of consolidation with P.V.D 2.0m.....	47
<b>Fig. 5.9</b> Average degree of consolidation with sand mat 1m.....	48
<b>Fig. 5.10</b> Average degree of consolidation with upper sand deposit 1m.....	48
<b>Fig. 5.11</b> Average degree of consolidation with upper sand deposit 2m.....	49
<b>Fig. 5.12</b> Average degree of consolidation with upper sand deposit 3m.....	49
<b>Fig. 5.13</b> Average degree of consolidation with upper sand deposit 4m.....	50
<b>Fig. 5.14</b> Average degree of consolidation with permeability $k = 2.46 \times 10^{-7} (m/sec)$ upper sand deposit .....	51
<b>Fig. 5.15</b> Average degree of consolidation with permeability $k = 2.46 \times 10^{-8} (m/sec)$ upper sand deposit .....	51
<b>Fig. 5.16</b> Comparison of 90% degree of consolidation with different sand deposit thicknesses and permeability.....	53
<b>Fig. 5.17</b> Average degree of consolidation of permeability $k = 2.46 \times 10^{-7} (m/sec)$ P.V.D 2m.....	54
<b>Fig. 5.18</b> Average degree of consolidation of permeability $k = 2.46 \times 10^{-8} (m/sec)$ P.V.D 2m.....	55
<b>Fig. 5.19</b> Comparison of 90% degree of consolidation with different permeability.....	55

# Evaluation of Discharge Capacity of Upper Sand Deposit at the Nakdong River Estuary

Jeong, Jin Yeong

Department of Civil and Environmental Engineering, Graduate School  
of Korea Maritime and Ocean University

## Abstract

This research focused on the region of the Eco Delta City Project Site, a site utilization project through the soft ground improvement of the Nakdong River estuary, to identify whether the upper sand deposit has the role of horizontal drainer in the Eco Delta Region.

Firstly, sampling and field and laboratory tests were carried out to identify the physical and mechanical properties of the upper sand deposit. As the results, the distribution depth was 4 to 13 m and the N value ranged from 3 to 12m as the result of standard penetration test, being distributed in much loose state, having good permeability in the permeability test.

In evaluating the possibility of application as horizontal drainer based on the size distribution curve of the upper sand deposit, the fraction of fine particles in some sections is 20% or larger and does not satisfy the horizontal drainer criteria, but satisfies the criteria if the content of fine particles (less than 5%) is low.

GTS NX, an universal analysis program was used to conduct numerical analysis, and the average degree of consolidation of soft ground in case of

appling the sand mat and the upper sand deposit were compared. As the results of numerical analysis, the upper sand deposit in the delta region may play similar roles as sand matwhen accumulated to be 2m or more. As a result of the numerical analysis conducted by different the permeability coefficients of the upper sand deposit layer to show the generalized guideline data, it was found that there is a difference according to the permeability coefficient, butthe difference is small when P.V.D is applied.

KEY WORDS : Sand Mat; Permeability; Upper Sand Deposit; Horizontal Drainer



# 제 1 장 서론

## 1.1 연구의 배경

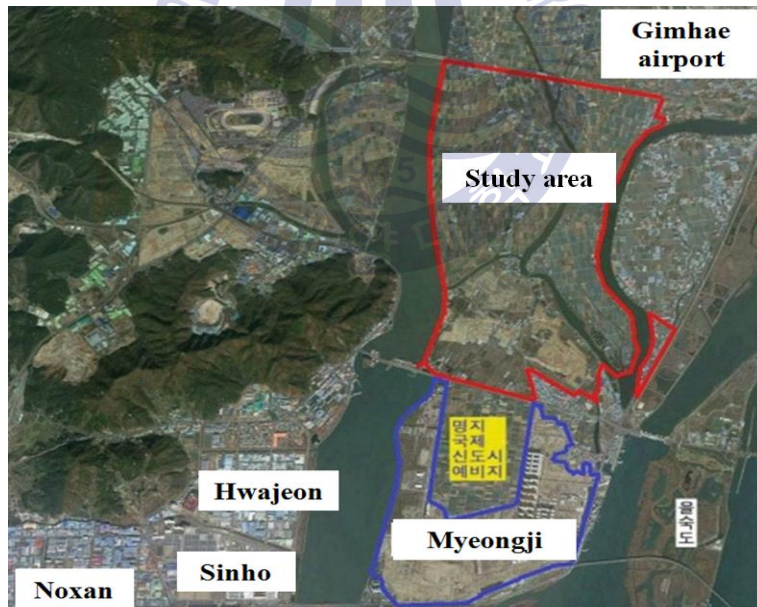
낙동강 하구에 관한 연구는 다양한 분야에서 수많은 목적으로 과거부터 현재까지 활발하게 진행되어오고 있다. 건설기술 발달에 의한 연약지반 개량의 효율성 증대, 공기 단축, 경제적 효율성의 증대는 낙동강 하구에 연약지반 개량을 통한 부지 활용을 가능하게 하였으며, 부족한 산업부지 확충과 새로운 건설부지 확보차원에서 해안 및 강 주변 연약지반의 활용도도 점차 증가하고 있다. 대표적으로 낙동강 하구 델타지역에 위치한 연구지역은 서부산권 에코델타시티 조성사업이 현재 진행 중이다. 에코델타 조성사업은 낙동강 하구를 기반으로 규모는  $11,888km^2$ (약 360만평)이며, 인구 약 7만5천명 수용이 가능하다(김병준, 2016).

낙동강 하구 델타지역은 국내에서 퇴적층의 심도가 가장 깊은 연약지반(최대 70m)으로 알려져 있다. 상부에는 실트질 층적토 또는 사질토층이 분포하며 아래로 연약한 실트질 점토층, 모래층 및 자갈층 순이다. 낙동강 하구 델타지역의 퇴적층은 제 4기 퇴적층으로 풍화암층 위에 퇴적되어있으며, 압밀침하를 유발하는 연약지반이 분포되어 일반적으로 연직배수공법과 재하성토에 의한 연약지반 개량공법이 적용되고 있다. 또한 장비의 주행성 확보 및 원활한 배수를 위해 토목섬유와 모래에 의한 수평배수층을 설치하는 것이 보편적 방법이다. 하지만 서해안의 경우와 다르게 낙동강 하구 델타지역은 지표면에 연약지반이 바로 노출된 상태가 아닌 퇴적사질토 하부에 분포하고 있으며, 퇴적사질토는 에코델타 시티가 예정된 지역의 경우 상부에 약 10~15m의 깊은 층후를 형성하고 있어, 서해안과 동일하게 토목섬유와 수평배수층 설치가 필요한 지에 관한 연

구가 필요한 실정이다(김병준, 2016)

특히 약 10m 정도의 두꺼운 층으로 형성되어 있는 상부퇴적사질토의 수평배수층 역할 규명은 우선적으로 필요한 시점이다. 에코델타시티는 현재 1단계 사업이 진행중이며 향후 2, 3 단계 사업이 예정되어 있는데 대부분 연약지반 개량에 있어 수평배수층 역할을 할 수 있는 1m 정도의 모래나 사석층 포설이 예정되어 있다. 이것은 설계나 시공 측면에서 대단히 낭비적인 요소라 할 수 있다(김병준, 2016)

기존문헌을 살펴보면 아직까지 낙동강 델타지역 상부퇴적사질토층의 수평배수층 역할 규명과 관련된 연구는 진행되지 않은 상태로 이 부분에 대한 연구의 필요성이 시급히 요구되는 상황이다. 다음 Fig. 1.1은 연구대상 지역을 나타낸다(김병준, 2016)



**Fig. 1.1** Map of study area(김병준, 2016)

## 1.2 연구목적 및 범위

본 연구의 목적은 상부 퇴적사질토층에 관한 기존문헌 조사, 투수실험, 수치 해석을 통해 상부퇴적사질토에 대한 투수성을 평가하여 수평배수층으로서의 기능을 규명하는데 있다.

먼저 낙동강 하구 델타지역에 위치한 연구지역의 상부퇴적사질토에 관한 물리·역학적 특성 연구 및 실제 수평배수공법 설계 (Sand Mat) 기준과 비교하고, 다음으로 수치해석을 통해 투수계수와 상부퇴적사질토층의 두께에 따라 평균압밀도 90% 이르는 시간을 비교하여 상부퇴적사질토의 수평배수층 역할을 규명하고자 한다.

본 논문은 총 6장으로 구성되었으며 제 1장 서론과 제 6장 결론을 제외한 각 장의 구체적인 내용은 다음과 같다.

제 2장에서는 기존 연구에 대한 고찰로서, 일반적인 모래의 투수특성 및 낙동강 지역 모래의 투수계수 경험적 산정방법, 수평배수재 재료의 기준에 대하여 조사하였다.

제 3장에서는 본 연구의 대상지역인 낙동강 델타지역의 상부퇴적사질토층의 기본·투수 특성을 조사하였다.

제 4장에서는 본 연구의 수치해석에 사용되는 압밀이론과 수정 Cam-Clay 모델의 이론적 설명을 기술하였다.

제 5장에서는 앞선 연구 내용을 바탕으로 GTS NX 프로그램을 이용한 수치 해석을 실시하였다. 해석의 신뢰성을 증명하기 위해 Biot(1941) 정해와 GTS NX 수치해석 결과 값을 비교하여 검증을 하였고, 퇴적사질토층의 두께별로 Sand Mat 포설 시와 평균압밀도를 비교하여 상부퇴적사질토층의 수평배수재로서의 기능을 분석하였다. 또한 추가적으로 투수계수 값을 변화시킨 해석을 진행하여 델타지역 이외의 퇴적사질토층의 수평배수재로서 기능을 판단하는데 근거 자료를 제시하고자 하였다.

## 제 2 장 기존 연구

### 2.1 모래의 투수성

#### 2.1.1 투수계수 영향 인자

흙의 투수계수는 다음과 같은 인자에 영향을 받는다.

- 1) 흙의 종류: 조립토는 세립토보다 더 큰 투수계수를 가진다. 세립토의 이중층(double layer)내의 물은 침투 간극의 공간을 크게 감소시킨다.
- 2) 입자크기: 투수계수는 조립토의 경우  $D_{50}^2$  (또는  $D_{10}^2$ )에 의존한다.
- 3) 유체특성, 특히 점도:  $k_1 : k_2 \approx \mu_2 : \mu_1$ , 여기서  $\mu$ 는 동점성계수(물의 동점성계수는  $15.6^\circ\text{C}$ 에서  $1.12 \times 10^{-3} \text{ N.s/m}^2$  이다)이고 아래첨자 1과 2는 주어진 흙에 대해서 두 종류의 유체를 나타낸다.
- 4) 간극비:  $k_1 : k_2 \approx e_{1}^2 : e_{2}^2$ , 여기서 아래첨자 1과 2는 조립토에 대한 흙 구조의 두 가지 종류를 나타낸다. 이 비는 다른 간극비를 가진 유사한 흙의 투수계수를 비교하는데 유용하다.
- 5) 간극크기: 상호 연결된 간극공간이 클수록 높은 투수계수를 보인다. 큰 간극은 높은 다공성을 의미하지는 않는다. 흙 속에서의 물의 흐름은 간극크기의 제곱과 관계가 있으며 전체 간극의 체적과는 무관하다.
- 6) 균질성, 흙의 층 구조(layering), 갈라진 틈(fissuring): 물은 느슨층, 갈라진 틈새, 그리고 층으로 이루어진 흙 사이로 빠르게 스며드는 경향이 있다. 비극적인 재해는 주로 이와 같은 침투현상으로부터 발생한다.

7) 갇힌공기: 간극에 고립된 공기는 투수계수를 감소시킨다. 흙 내부의 공기를 없애는 것은 상당히 어려우며, 심지어 지하수위 하부의 흙은 포화되었다고 가정하지만 여전히 고립된 공기가 존재한다.

8) Darcy의 법칙의 유효성: Darcy의 법칙은 층류에 대해서만 유효하다 (Reynolds 수가 2100이하). Fancher et al.(1933)은 투수계수 결정을 위해 Darcy의 법칙의 적용에 대해서 다음과 같은 기준을 제시하였다.

$$\frac{vD_s\gamma_w}{\mu g} \leq 1 \quad (2.1)$$

여기서  $v$ 는 속도,  $D_s$ 는 평균 흙 입자의 부피와 동등한 구의 직경,  $\mu$ 는 물의 동점성 계수, 그리고  $g$ 는 중력가속도이다.

여러 종류의 흙에 대한  $k_z$ 의 일반적인 범위는 Table 2.1과 같다.

**Table 2.1** Permeability of the common soils(홍원표 등 4,2012)

Soil type	$k_z$ (cm/s)	State	Drainage
Clean gravel(GW,GP)	$>1.0$	High	Very good
Clean gravel, sand, mixed gravel and soil(SW, SP)	$1.0$ to $10^{-3}$	Medium	Good
Fine sand, silt, sand, mixed clay soil (SW-SC)	$10^{-3}$ to $10^{-5}$	Low	Poor
Weathered and fissured clayey silt, silty clay(MH, ML)	$10^{-5}$ to $10^{-7}$	Very low	Poor
Homogeneous clay(CL, CH)	$<10^{-7}$	Impermeable	Very poor



### 2.1.2 모래의 입도에 의한 수리전도도 산정 경험적 방법

일정한 동수구배 하에서 지하수가 대수층을 통해 이동하는 능력을 투수성이라 하며, 대수층의 투수성을 결정짓는 수리특성인자로는 수리전도도(투수계수)(한정상, 1998). 대수층의 수리전도도는 현장 대수성시험이나 실내시험을 통해 수치를 얻는 것이 일반적이나, 수리전도도와 공극율, 입경 사이의 경험식을 바탕으로 수치를 구할 수 있다.(김태형 등4,2014)

수리전도도를 산정하는 경험적인 방법은 다음과 같다.

Vukovic and Soro(1992)에 의하면 수리전도도 산정의 여러 경험식은 다음과 같이 일반화하여 표현할 수 있다(Odong, 2013).

$$k = \frac{g}{\mu} \cdot C \cdot f(n) \cdot d_e^2 \quad (2.2)$$

여기서,  $k$ 는 수리전도도( $LT^{-1}$ ),  $g$ 는 중력가속도( $LT^{-2}$ ),  $\mu$ 는  $20^\circ C$  기준 동점성계수( $L^2T^{-1}$ ),  $C$ 는 분급계수(무차원),  $f(n)$ 은 공극율함수(무차원),  $d_e$ 는 유효입경(L)이다.

동점성계수는 점성계수와 유체의 밀도로 표현된다.

$$\mu = \frac{\nu}{\rho} \quad (2.3)$$

여기서,  $\mu$ 는 동점성계수( $L^2T^{-1}$ ),  $\nu$ 는 점성계수( $ML^{-1}T^{-1}$ ),  $\rho$ 는 유체의 밀도( $ML^{-3}$ )이다.

$$n = 0.255(1 + 0.83^U) \quad (2.4)$$

$$U = \left( \frac{d_{60}}{d_{10}} \right) \quad (2.5)$$

여기서,  $n$ 은 공극율(무차원),  $U$ 는 균등계수(무차원),  $d_{50}$ 은 입도분포곡선에서 60%에 해당되는 입자의 크기(L),  $d_{10}$ 은 입도분포곡선에서 10%에 해당되는 입자의 크기(L)이고 유효입경이라고 한다.(김태형 등4,2014)

일반화된 식 (2.2)에서 분급계수항과 공극율함수항을 여러 경험식에 적용하면 다음과 같다.

Hazen식 (1892)은 균등계수가 5보다 작고, 유효입경이 0.1mm에서 3mm인 세립질 모래에서 자갈까지 적용된다.

$$k = \frac{g}{\mu} \cdot 6.0 \times 10^{-4} \cdot [1 + 10(n - 0.26)] \cdot d_{10}^2 \quad (2.6)$$

Kozeny-Carman식(1956)은 Kozeny(1927)가 경험식을 제안하고, 후에 Carman(1937, 1956)이 수정하여 만든 경험식이다. 주로 중립질 토양에 적용되고, 유효입경이 3mm 이상 또는 점토질 토양에는 적합하지 않는 것으로 알려져 있다(Carrier, 2003).

$$k = \frac{g}{\mu} \cdot 8.3 \times 10^{-3} \cdot \left[ \frac{n^3}{(1-n)^2} \right] \cdot d_{10}^2 \quad (2.7)$$

Slichter식(1898)은 입경이 0.01mm에서 5mm인 조건에 적용한다.

$$k = \frac{g}{\mu} \cdot 1.0 \times 10^{-2} \cdot n^{3.287} \cdot d_{10}^2 \quad (2.8)$$

Terzaghi식(1925)은 주로 조립질 모래에 적용되고(Cheng and Chen, 2007), 분급계수( $C_t$ )의 범위는  $6.1 \times 10^{-3}$  에서  $10.7 \times 10^{-3}$  이다.

$$k = \frac{g}{\mu} \cdot C_t \cdot \left( \frac{n - 0.13}{\sqrt[3]{1-n}} \right)^2 \cdot d_{10}^2 \quad (2.9)$$

미국 개척국(U.S. Bureau of Reclamation)에서 제안한 경험식 (Vukovic and Soro, 1992)은 다른 경험식과 다르게  $d_{20}$ 을 이용하여 식을 표현하고, 균등계수가 5보다 작은 중립질 모래에 적용된다(Cheng and Chen, 2007).

## 2.2 수평배수층 재료 기준

### 2.2.1 국내 기준

현재 우리나라에서 사용되고 있는 수평배수층에 대한 기준은 KCS (11 30 15:2016)를 따르게 되어 있다(국토교통부, 2016). 내용을 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

(1) 수평배수층은 주행성 확보에 적합한 재료를 사용한다.

(2) 수평배수층 포설재료는 다양한 재료의 사용이 가능하나, 반드시 공사감독자의 승인을 득한 후, 품질기준을 만족하고, 환경문제 발생우려가 없는 재료를 사용하여야 한다.

(3) 수평배수층 재료는 염분이 함유될 경우 환경문제가 유발될 수 있으므로 세척하여 사용하여야 한다. 단, 해수의 유입이 빈번하거나 염해의 우려가 없는 지역은 공사 감독자와의 협의를 통해 세척과정을 생략할 수 있다.

(4) 수평배수층 포설 재료의 품질기준은 다음과 같다.

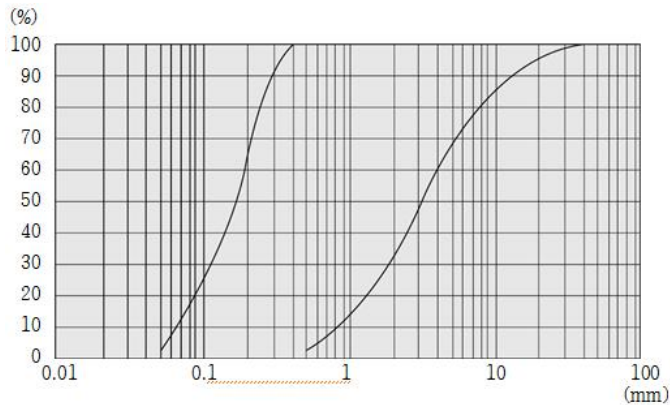
#### ① 모래

가. D15: 0.075mm~0.9mm

나. D85: 0.4mm~8.0mm

다. 0.08mm 통과량(#200번체): 15%이하

라. 다음 입도분포 범위 내에 있어야 한다



**Fig. 2.1** Size distribution range of sand used for horizontal drainage material

마. 투수계수:  $1 \times 10^{-3}$  cm/sec 이상

바. 이때, D85 및 D15는 각각 입경가적곡선에 있어서 통과중량 백분율이 85% 및 15%에 해당하는 재료의 입경을 말한다.

② 쇄석

가. 쇄석의 재료기준은 설계도서를 따른다.

나. 설계도서에 재료기준이 규정되지 않은 경우는 아래 기준을 만족하는 재료를 사용한다.

(가) 0.08mm체 통과량: 15%이하

(나) 투수계수:  $1 \times 10^{-3}$  cm/sec 이상

③ 기타 재료는 설계 요구조건을 충족시킬 수 있어야 한다.

(5) 세립분의 함량 또는 입도가 품질기준을 초과할 때에는 투수시험을 실시하고 공사 감독자의 승인을 받아 사용할 수 있다.

(6) 사용재료는 충분한 내구성을 가져야 한다. 사용 재료는 시공에 앞서 설계도서에서 제시한 방법에 따라 재료시험을 실시하고 그 결과를 공사 감독자에게 제출하여 승인을 받아야 한다. 또한 풍화된 것으로 추정되는 재료를 사용할 때에는 다짐에 의한 투수성 저하를 고려하여 지반강도시험 및 투수시험을 실시하여야 한다.

## 2.2.2 국외 기준

수평배수재(샌드드레인재)의 입도분포 범위는 대표적으로 일본 규정과 캘리포니아주의 시방규정을 들 수 있다.

일본의 규정은 Skempton이 제안한 입도분포로서(그림 2.2), 샌드드레인재는 균등계수  $C_u > 3$ , #200체 통과량은 3%이하,  $D_{15}=0.1\sim 0.84\text{mm}$ ,  $D_{85}= 0.84\sim 5.0\text{mm}$ 로 규정되어 있고, 샌드매트재는  $k > 1.0\times 10^{-3}\text{cm/sec}$ ,  $D_{15}= 0.074\sim 0.84\text{mm}$ ,  $D_{85}= 0.4\sim 5.0\text{mm}$ 로 규정되어 있다.

캘리포니아주의 시방규정은 Skempton이 제시한 드레인용 입도 분포곡선과 유사하나 통과량 5%이상에서의 입경을 비교적 크게 규정하고 있다(그림 2.2).

연직배수재의 투수계수에 대한 규정은 뚜렷하지 않고 압밀의 속도와 밀접한 관계가 있는 것으로 생각된다. 현재 우리 나라에서는 드레인재로서의 적합성을 입도분포와 투수계수(보통 일본 규정에 준함 ; 샌드매트의 경우는  $k > 10^{-3}\text{cm/sec}$ , 샌드드레인의 경우는 보통 샌드매트와 동일한 규정 적용)만으로 판단하고 있으나 정확한 실내모형실험과 현장실험을 통해 드레인재로서의 사용 여부를 결정해야 할 것이다.

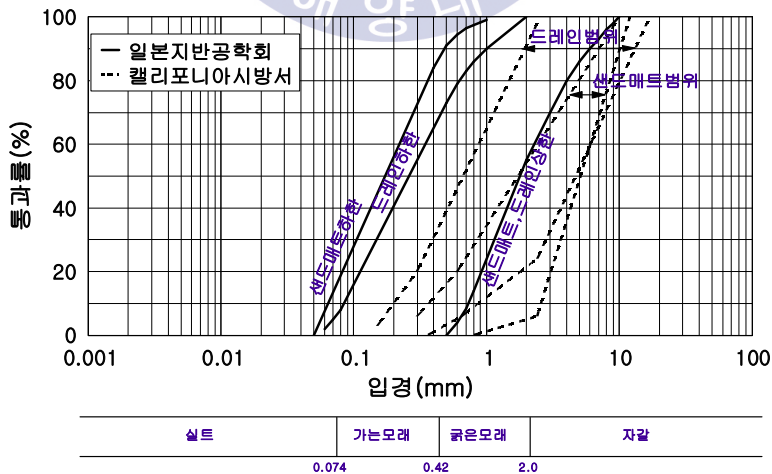


Fig. 2.2 Sand Drain Sand and Sand Mat Proper Size of Sand

## 제 3 장 상부퇴적사질토의 기본적 특성 및 투수특성

### 3.1 조사 및 기본적 특성

#### 3.1.1 조사위치 및 방법

연구지역의 조사 위치는 부산광역시 강서구 명지동, 강동동, 대저 2동 일원으로 현재 4개 공구로 나누어 연약지반 개량을 통한 단지조성이 이루어지고 있다. 본 토질조사를 위한 위치의 선정은 현황 측량도상에서 시추조사 3개소를 계획한 후, 현장답사 및 기존 문헌을 조사하여 적합한 위치를 선정하였으며 Fig. 3.1은 조사위치를 나타내며, 조사범위는 Table 3.1과 같다.

**Table 3.1** Range for investigation(김병준,2016)

Section		Test methods
Field survey		Boring test
		Sampling of disturbed and undisturbed soil
Field test		Standard penetration test
		Field permeability test
Laboratory test	Physical test	Water content, Specific gravity, Particle size distribution, Sieve analysis
	Mechanical test	Constant head permeability test, Direct shear test

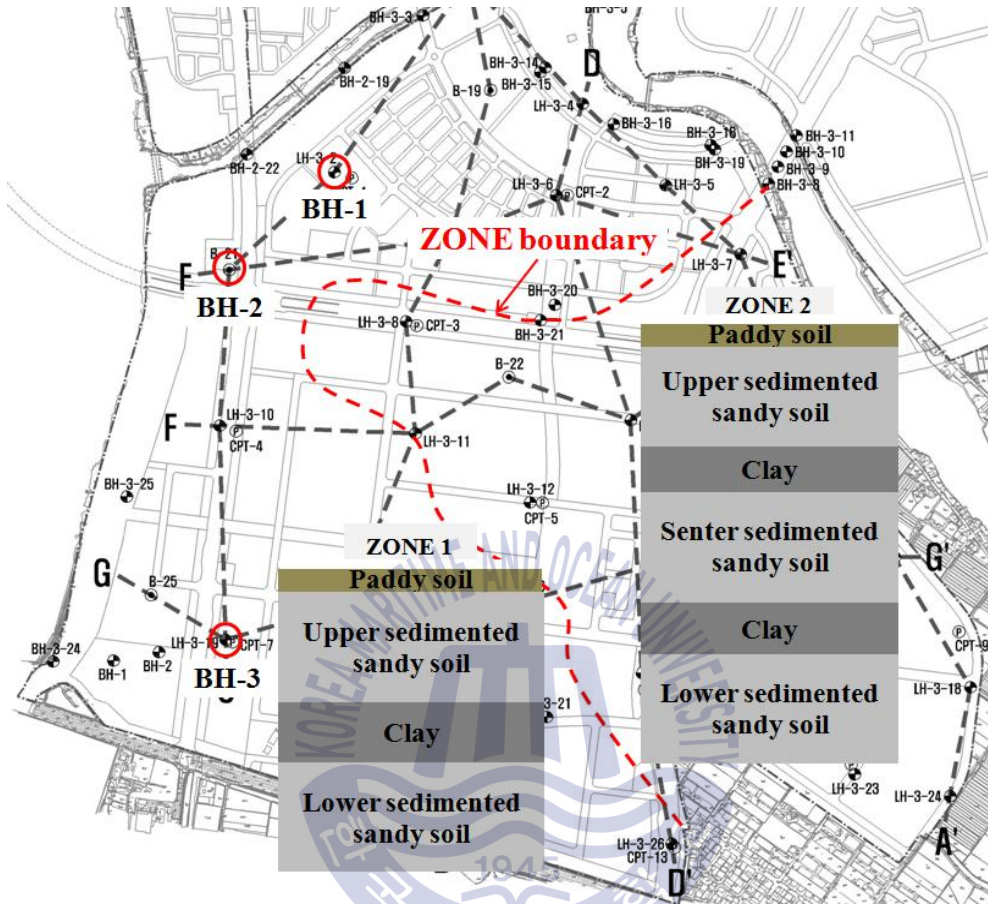
### 3.1.2 시추조사

시추조사는 델타지역에 위치한 연구지역 상부퇴적사질토층의 분포상태 및 기초공학적 자료를 수집하기 위하여 1, 2, 3공구에 대하여 각각 1개씩 총 3개소를 수행하였으며, 각 시추공의 굴진 심도는 조사목적에 감안하여 지표면 아래 15 m 심도까지 굴진하였다(김병준,2016)

본 조사지역의 시추조사는 NX Size로 시행하였고, 시추방법은 시추공의 붕괴를 방지하기 위하여 NX 규격의 케이싱을 설치하여 굴진작업과 병행하여 매 1.0m 간격으로 실시하고 시험시에 분리형 샘플러(Split spoon sampler)에 의해 채취된 시료는 육안관찰 후 실내토성시험을 실시하기 위하여 시료병에 넣어 운반하였다. 표준관입시험시 채취된 시료와 N치를 근거로 하여 지층분포 상태를 확인 하였다(김병준,2016)

### 3.1.3 표준관입시험

표준관입시험은 시추조사와 병행하여 지층의 상대밀도(Relative density), 연경도(Consistency index) 및 구성성분을 파악하기 위하여 한국산업규격(KS F 2307)에 규정된 방법에 의거 1.0m 간격으로 연속성 있게 실시하였으며, 교란된 시료도 함께 채취하였다. 표준관입시험에 의한 타격횟수(N치)는 중량 63.5kg의 해머를 76cm 높이에서 자유낙하시켜 표준외경 50.8mm의 분리형 샘플러(Split spoon sampler)가 30cm 관입하는데 소요되는 타격횟수로서 45cm 관입하는데 소요되는 타격횟수를 측정하였으며, 초기 15cm 관입에 소요된 타격횟수는 예비 타격으로 간주하여 제외하였고, 나머지 30cm 관입에 소요된 타격횟수를 관입저항치인 N치로 표기하였다. 그리고 지층이 조밀하여 50회 이상 타격을 가하여도 30cm 관입이 불가능한 지층에서는 50회 타격에 의한 관입량을 측정하여 주상도에 기록하였다(김병준,2016)



**Fig. 3.1** Test locations of BH-1, 2, 3 and the distribution of soil layers in Eco-delta City, located at the Nakdong river estuary(김병준,2016)

### 3.1.4 분포현황

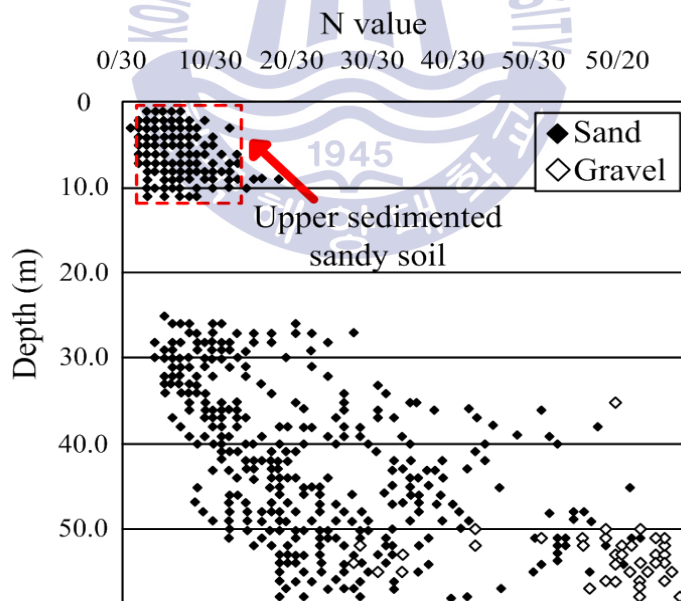
Kwater(2014b)는 낙동강 하구 델타지역의 상부퇴적사질토층 분포현황을 조사하기 위해 시추조사를 실시하였으며, 조사결과 상부퇴적사질토층의 분포심도는 4.0~13.0m를 이루며 표준관입시험결과 N치는 3~12로 측정되었으며, 대단히 느슨한 또는 중간정도 느슨한 상태인 것으로 나타났다(김병준,2016)



통일분류법(USCS)으로 토성을 분류한 결과 상부퇴적사질토층은 주로 실트질 또는 점토질 모래로 구성되어 있으며, 표준관입시험 결과를 이용하여 설계 시 내부마찰각은 25.0°, 점착력은 5.0kPa를 적용하였다(Table 3.2, Fig. 3.2)

**Table 3.2** Properties of upper deposit sandy soil(Kwater, 2014b)

Item	Value
Standard Penetration Test (SPT)	3~12
Unified Soil Classification System (USCS)	SM, SC
Internal friction angle applied in design(°)	25.0
Cohesion applied in design (kPa)	5.0

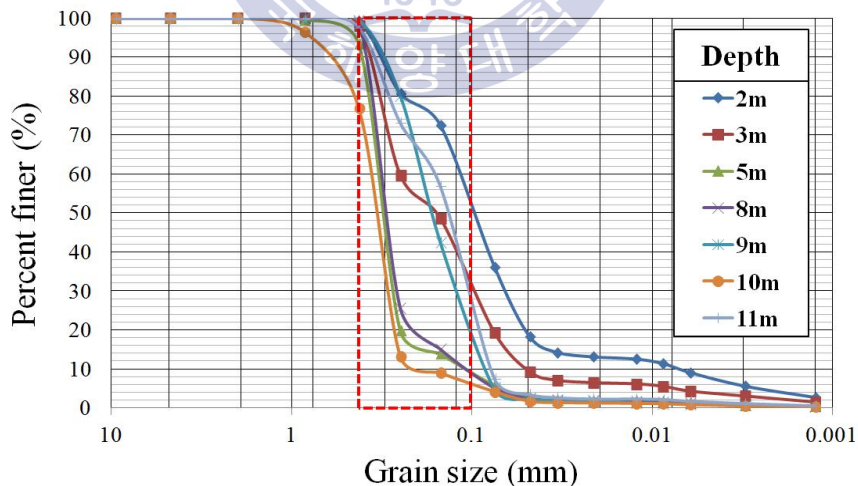


**Fig. 3.2** N value distribution of upper deposit sandy soil(Kwater, 2014b)

## 3.2 입도분포 특성

### 3.2.1 입도분포

입도분포는 세립토, 조립토, 자갈의 구성비가 어떤지를 입경과 백분율의 그래프로 나타내며, 흙시료의 입경에 따른 구성비와 입도의 연속성 등을 확인할 수 있다. 모래의 전단강도와 투수계수는 입경의 크기에 영향을 받으므로 상부퇴적사질토의 입도분포가 어느 범주 내에 분포하는지에 대한 분석은 매우 중요하다. 조립토와 세립토의 구분은 입경  $0.074mm$ 를 기준(USCS, ASTM)으로 하며, 조립토의 경우는 각 크기의 체에 남은 양을 가지고 입도 분포를 알 수 있지만 세립토의 경우는  $0.074mm$ 간격의 체 이하로 체를 만들기가 거의 불가능하므로 입도분포는 물에 떨어뜨려 흙입자가 가라 앉는 속도를 측정하여 간접적으로 구하게 된다. 연구지역 상부퇴적사질토의 투수성을 분석하기 위해 각 심도별 입도분포 자료를 분석하였으며 결과는 Fig. 3.3과 같다. 퇴적환경에 상관없이  $0.1\sim 0.4mm$ 의 가는 모래가 주를 이루고 있다(김병준,2016)



**Fig. 3.3** Particle size distribution curve of representative deposit sandy soil samples obtained from different depths of BH-1, 2, and 3

### 3.2.2 비교 분석

#### 1) 다른 모래와 비교

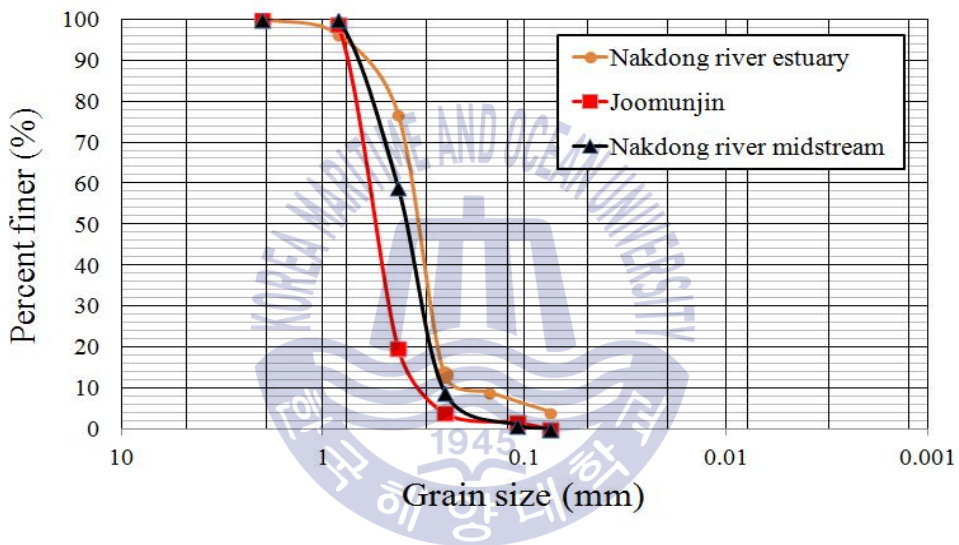
낙동강 델타지역 상부퇴적사질토와 기존에 연구된 주문진 표준사 및 낙동강 중류 모래와의 입도분포를 비교하여 델타지역 상부퇴적사질토의 입도의 좋고 나쁨과 자갈, 모래, 실트, 점토 등의 구성 비율을 비교하였다.

비교 분석을 수행한 결과(Fig. 3.4) 경향은 유사하게 나타나지만 #40체에서의 결과에 다소 차이를 보이는 것으로 나타났다. 주문진 표준사는 낙동강 중류 모래 및 연구지역 상부퇴적사질토층에 비해 입경이 비교적 크고 균질하게 분포하는 하고 있으며, 중간크기의 모래가 주류인 것으로 판단된다. 낙동강 중류의 모래는 주문진 표준사와 유사하게 중간크기의 모래가 주류이지만 가는 모래의 함유율이 주문진 표준사에 비해 비교적 높은 것으로 판단된다. 연구지역 상부퇴적사질토층의 경우 중간크기 모래의 함유율은 비교적 낮고 가는 모래가 주류인 것으로 조사되었으며, 통일분류법(USCS)을 통하여 좀 더 정확하게 분류하면 주문진 표준사와 낙동강 중류의 모래는 SP로 입도 불량한 모래를 뜻한다. 반면 상부퇴적사질토층은 SM, SC로 실트질 및 점토질을 일부 함유하는 것으로 조사되었다. 결과적으로 중간크기의 모래 함유율에 다소 차이가 있지만 입도분포 경향은 주문진 표준사 및 낙동강 중류 모래와 낙동강 하구 상부퇴적사질토는 매우 유사한 것으로 판단된다(김병준, 2016).

통일분류법(USCS)에 의하면 사질토는 조립토에 해당되며, 조립토는 세립분 함유율이 0~49%까지를 포함하고 있다. Kwon(2012)의 연구에 따르면 모래와 점토의 혼합율에 따른 전단강도시험 결과 모래의 함유율 65%를 기준으로 모래 또는 점토의 역학적 거동이 구분되는 천이구간이 발생하는 것으로 나타났다. 그러므로 연구지역 상부퇴적사질토 역시 모래와 세립분(실트, 점토)의 비율에 따라 모래와 점토의 중간적인 거동 등을 보일 가능성이 있을 것으로 판단된다. 이를 검증하기 위해 다음 절에서는 실제 상부퇴적사질토층에 대한 세립분 함유율에 따른 투수특성을 분석하였다(김병준, 2016)

**Table 3.3** Particle criterion of soil(Budhu, 2012)

USCS	Fines	Sand			Gravel	
	(silt, clay)	Fine	Medium	Coarse	Fine	Coarse
	0.001~0.075	0.075~0.425	0.425~2	2~4.75	4.75~75	



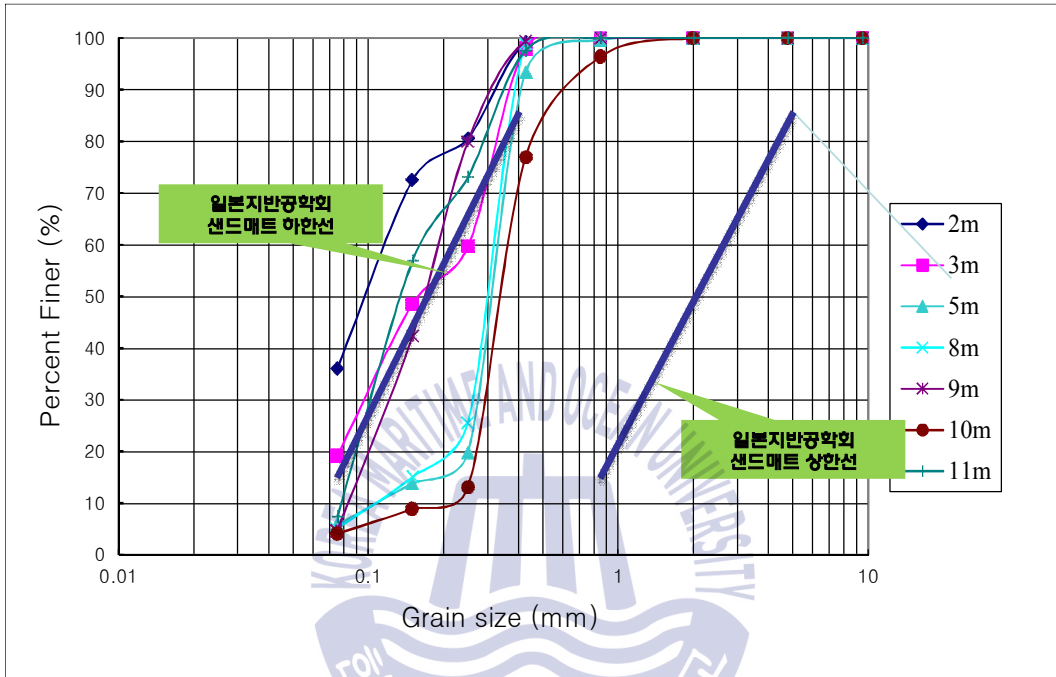
**Fig. 3.4** Particle size distribution of Joomunjin, Nakdong river estuary and midstream sands

2) 기준과 비교

입도분포곡선을 통해 수평배수재로써의 적용가능성을 평가하기 위해, 본 검토에서는 심도별로 채취된 퇴적사질토의 입도분포곡선을 우리나라 및 일본 기준(2.2 절)에 적용하여 수평배수재로써의 적용가능성을 평가하였다(그림 2.2).

검토결과 일부 구간의 경우 세립분 함유율이 20%이상으로 샌드매트 기준을 만족하지 못하나 세립분 함유량(5% 이하)이 낮을 경우 기준을 만족하는 것으로 검토되었다. 그러나 기준을 만족하지 못하여도 퇴적사질토층이 층후가 깊을 경

우 수평배수층 으로서의 기능을 충분히 수행할 수 있을 것으로 판단된다. 이 부분은 제 5장에서 수치해석으로 통해 검토해 보았다.



**Fig. 3.5** Evaluation results of sand mat applicability using particle size distribution(BH-1)

### 3) 경험식 결과와 비교

경험식을 사용해 산출된 투수계수와 직접 현장 시험을 통해 산출된 투수계수에 비교는 분급계수 C, 공극률함수 f(n), 동점성계수등, 경험식에 사용되는 계수들의 값을 시험을 통하여 구하지 못해 비교를 실시할 수 없었다.

### 3.3 투수특성

#### 3.3.1 투수시험 개요

흙의 투수성은 세립분 함유율에 의해 크게 영향을 받으며, 흙의 투수성 결정에 있어 중요한 변수가 된다. 연구지역의 시추조사결과 심도에 따른 세립분 함유율이 일부 큰 차이를 보이므로 이를 고려하여 본 연구에서는 세립분 함유율 및 상대밀도의 변화에 따른 상부퇴적사질토의 투수성을 분석하고자 한다.

투수시험은 KS F 2322에 정의되어 있으며, 이에 제안되어 있는 기준으로 시험을 수행하였다. 상부퇴적사질토층은 자연적인 퇴적환경에 의해 수직·수평 투수계수가 위치와 심도에 따라 변화하며, 이를 평가하기 위해서는 위치별 투수시험이 수행되어야 한다. 그러나 상부퇴적사질토층은 토질의 특성상 지표면을 제외하고 완벽한 불교란 시료 채취가 어려워 정확한 투수계수 산정에 문제점이 있으며, 지표면과 가까운 상부퇴적사질토층의 경우에도 세립분 함유율이 낮을 경우 진동에 의한 교란이 쉽게 발생하여 정확한 투수계수 평가가 어렵다. 이러한 이유로 현장 및 실내투수시험을 수행하였다.

현장투수시험의 경우 연구지역에 분포하는 상부퇴적사질토층에 대한 투수계수 측정 및 지층의 구성 물질에 따른 투수계수의 변화를 측정하기 위하여 케이싱 내부에 물을 채운 후 수위 강하속도를 측정하여 투수계수를 산출하였다. 투수계수를 산출하는 관계식은 시험구간이 지하수면 하부에 위치하는 경우와 지하수면 상부에 위치하는 경우로 나누어 측정하였으며, 시험에 사용된 산출관계식은 다음과 같다.

시험구간이 지하수면 하부에 위치하는 경우.

$$k = \frac{d^2 \times \ln\left(\frac{2L}{D}\right)}{8L \times (t_2 - t_1)} \times \ln\left(\frac{H_2}{H_1}\right) \quad (3.1)$$

시험구간이 지하수면 상부에 위치하는 경우.

$$k = \frac{Q}{2\pi L^2} \left[ 2.30 \cdot \log_{10} \frac{L}{\gamma} + \sqrt{1 + \left(1 + \frac{L}{\gamma}\right)^2} - 1 \right] \quad (3.2)$$

시험구간이 지하수면 하부에 위치

시험구간이 지하수면 상부에 위치

$k$  : 투수계수( $cm/sec$ )

$k$  : 투수계수( $cm/sec$ )

$L$  : 시험구간( $cm$ )

$Tu$  : 시험심도에서 지하수위까지

$d$  : 케이싱직경( $cm$ )

거리( $cm$ )

$t_1, t_2$  : 경과시간

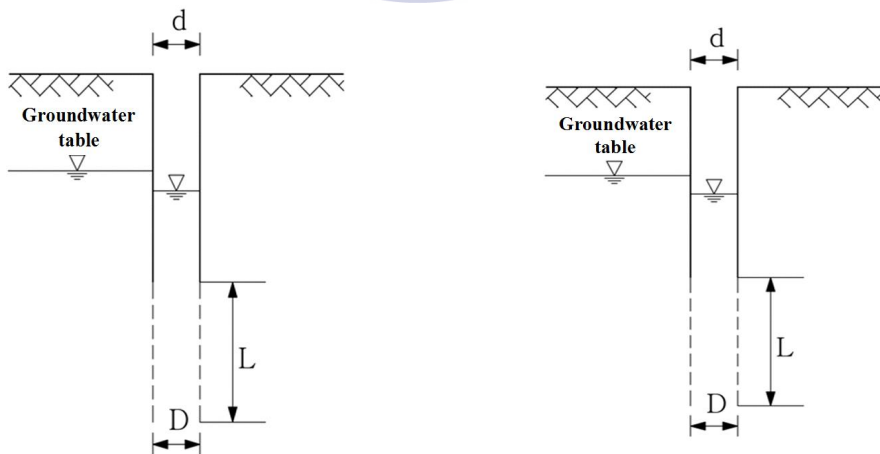
$L$  : 시험구간( $cm$ )

$D$  : 시추공경( $cm$ )

$\gamma$  : 케이싱 반경( $cm$ )

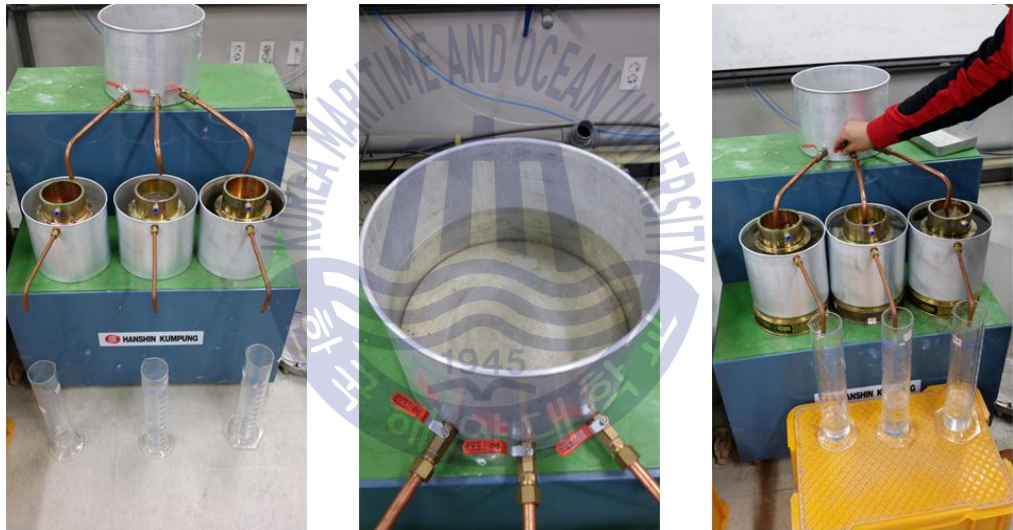
$H_1, H_2$  : Piezometric Head( $cm$ )

$Q$  : 주입유량( $cm^3/sec$ )



**Fig. 3.6** Schematic diagram of field permeability test

실내투수시험의 경우 상부퇴적사질토층의 투수성이 대단히 양호한 것으로 판단되어 정수위 투수시험을 수행하였다. 현장에서 채취된 시료를 시험용 몰드에 재성형하여 사용하였으며, Kumpung 정수위 실내투수시험기(HANSIN, Korea)로 시험을 수행하였다. 시료는 시험 몰드에 부직포와 함께 직접 성형하였으며, 성형이 완료된 몰드는 하부 월류 수조 안에 넣어 월류구를 막은 후 수돗물을 흘려 시료를 포화시켰다. 하부 월류구의 유출량이 일정한 것을 확인한 후 수위차( $h$ )를 측정하고 Valve를 열음과 동시에  $t$ 초 동안 침투된 유량( $Q, cc$ )과 수온( $T, ^\circ C$ )을 잰다. 이 과정을 3회 이상 반복하여 측정하였다(김병준,2016)



**Fig. 3.7** Laboratory permeability test(김병준,2016)

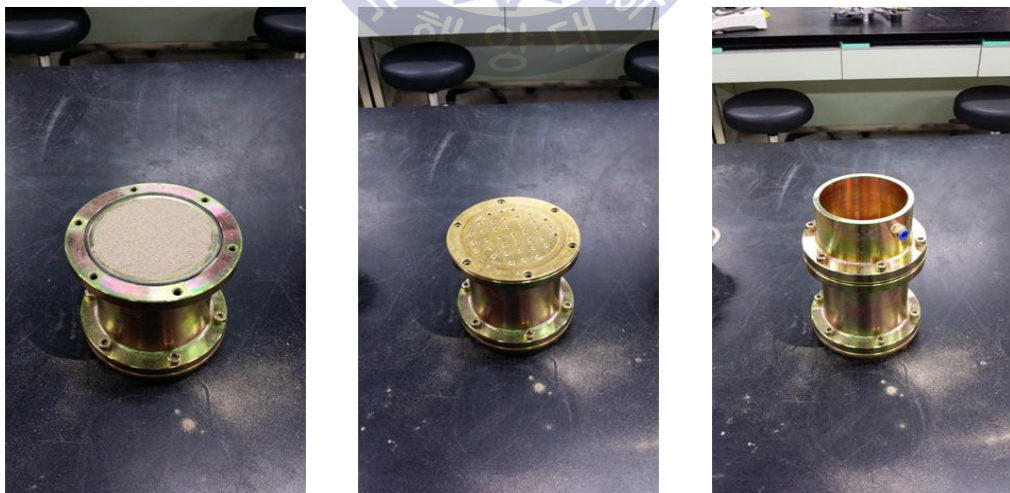


### 3.3.2 시료조성

낙동강 하구 델타 상부퇴적사질토층의 경우 현장투수시험을 통하여 투수성이 매우 양호하다는 것을 확인하였으며, 앞서 조사된 기본 물성치와 N치(3~12)를 통하여 지반의 상태가 연약한 사질토임을 감안하여 시료의 조성은 상대밀도 20%, 30%, 40%, 세립분 함유량 0%, 5%, 10%, 15%로 조성하여 정수위 투수시험을 수행하였다(김병준,2016)

**Table 3.4** Condition of constant head permeability test(김병준,2016)

Relative density (%)	Fine content (%)	Remark
20	5	Saturation condition
	10	
	15	
30	5	
	10	
	15	
40	5	
	10	
	15	



**Fig. 3.8** Remolded process of constant head permeability test(김병준,2016)

### 3.3.3 현장투수시험 결과

연구지역 상부퇴적사질토층은 지반의 상태가 느슨하여 일정 구간 이상 불교란 시료 채취가 곤란하다. 그러므로 현장에서 투수시험을 실시하여 상부퇴적사질토의 투수계수를 평가하여야한다. 현장투수시험은 BH-1에서 2번 수행되었으며, 시험결과 일반적인 모래의 투수계수(Table 3.5)를 기준으로 판단하였을 경우 BH-1의 상부퇴적사질토층의 투수성은 대단히 양호한 것으로 나타났다.

BH-2, BH-3의 퇴적특성이 BH-1과 대단히 유사하기 때문에 BH-2, BH-3의 투수 결과도 BH-1의 결과와 유사할 것으로 예상된다. 투수시험결과는 Table 3.6과 같다.

**Table 3.5** Limit of permeability coefficient application(Kim, 2002)

Permeability coefficient	100~1 ( <i>cm/sec</i> )	$1 \sim 10^{-3}$ ( <i>cm/sec</i> )	$10^{-3} \sim 10^{-7}$ ( <i>cm/sec</i> )
Soil type	Gravel	Sand and Gravel	Organic and minerals silt, sand+silt+clay mixing, bedded sedimentary clay
Drainage	Good( $100 \sim 10^{-4}$ <i>cm/sec</i> )		Normal ( $10^{-4} \sim 10^{-7}$ <i>cm/sec</i> )

**Table 3.6** Results of permeability test in BH-1

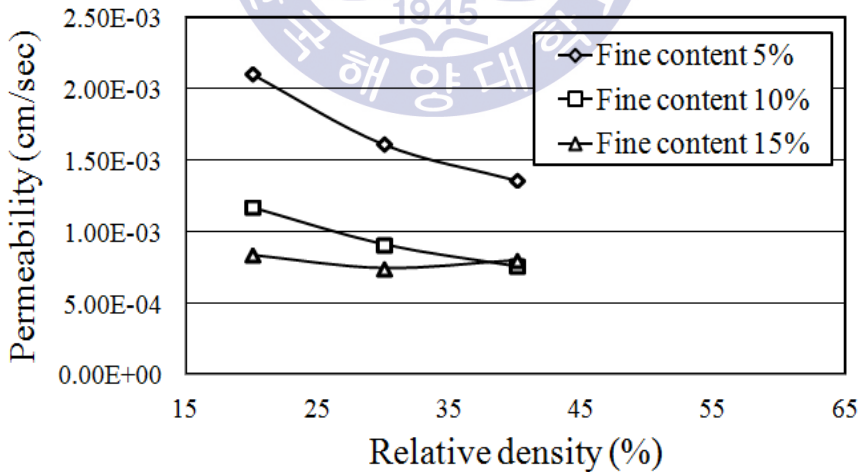
Item	Depth(G.L(-), <i>m</i> )	Permeability ( <i>cm/sec</i> )
BH-1 (1)	3.5~4.2	1.174E-03
BH-1 (2)	8.0~8.7	2.46E-04

### 3.3.4 실내투수시험 결과

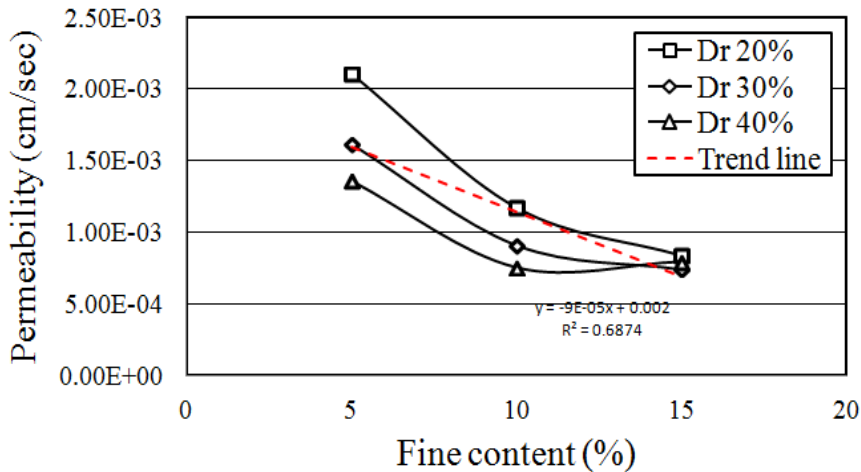
시험결과 상대밀도 및 세립분 함유율이 증가할수록 투수계수는 낮아진다. 하지만 세립분 함유율이 낮은 경우(10% 이하) 투수계수에 미치는 상대밀도의 영향이 존재하나 15%인 경우 상대밀도에 의한 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 결과적으로 15% 이상의 세립분이 함유된 모래의 경우 투수계수는 상대밀도의 영향을 받지 않는 것으로 판단된다. 세립분에 따른 투수계수를 구할 수 있는 식(3.3)을 Fig. 3.8(b)을 이용하여 다음과 같이 제시하였으며, 시험결과는 Fig. 3.9과 같다.

$$k = -9E-05F_{content} + 0.002 \text{ (상관관계 } R^2 = 0.6874) \quad (3.3)$$

여기서  $k$ 는 투수계수,  $F_{content}$ 는 세립분 함유량이다.



(a) Coefficient of permeability vs. Relative density( $D_r$ )



(b) Coefficient of permeability vs. Fine content

**Fig. 3.9** Results of constant head permeability tests

### 3.3.5 비교 분석

낙동강 중류 지역의 모래는 시험결과 상대밀도 40%일 경우 세립분 함유율에 따라 각각 다른 투수계수를 나타내며, 세립분 함유량 10%의 경우 가장 큰 투수계수를 나타낸다. 본 연구에서는 상부퇴적사질토와 동일한 조건에서 시험이 수행된 세립분 함유율 10%와 비교분석하였다. 그 결과 에코 델타 상부퇴적모래는 상부퇴적사질토와 동일하게 세립분 함유율이 증가할수록 투수계수가 낮아지며, 상대밀도와 상관없이 세립분 함유율이 10%이상 증가할수록 세립분 함유율에 따른 투수계수의 차이가 점차 감소하는 경향을 보인다. 결과적으로 낙동강 중류 모래와 비교시 본 연구지역 모래는 상대밀도 및 세립분 함유율에 따른 거동은 유사한 경향을 보이며, 동일한 시험조건(상대밀도 40% - 세립분 함유율 10%)에서는 상부퇴적사질토의 투수계수가 낙동강 중류 모래와 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 비교결과는 Table 3.7과 같다.

**Table 3.7** Comparison of permeability between midstream sand and upper deposit sandy soil of Nakdong river

Sort	Relative density (%)	Fine content (%)	Permeability coefficient (cm/sec)	Remark
Sand of midstream on Nakdong river	40	10	7.05E-05	Saturation
Upper deposit sandy soil			7.58E-04	



## 제 4 장 압밀이론 고찰

### 4.1 기본개념

흙은, 고체(토립자), 액체(간극수), 기체(공기)로 이루어진 삼상재료로서 지반 공학적 관점에서 대상으로 하는 토질은 크게 사질토와 점성토로 분류되며, 사질토의 경우 탄성침하에 의한 즉시 침하가 주를 이루고, 점성토의 경우 간극수의 배출과 더불어 장기간에 걸쳐 발생하는 압밀침하로 이루어진다. 즉, 흙이 하중을 받으면 체적이 감소하는데 공학적으로 보면 흙 입자와 물은 비압축성이므로 이러한 체적의 감소는 흙 입자사이의 간극을 차지하고 있는 공기가 압축되거나 또는 간극내에 포함된 간극수의 배출로 인하여 발생한다. 만일 흙이 하중을 받기 전부터 물로 완전히 포화되어 있었다면 압축이 일어나기 전에 먼저 물이 배출되어야 한다. 완전 포화되어 있거나 또는 부분적으로 포화되어 있는 흙에 하중이 가해지면 그 하중으로 인해 간극수압이 발생한다. 이것을 과잉간극수압(excess pore water pressure)이라 하는데, 이 간극수압으로 인한 수두차로 물이 흙 속을 흐를 수 있다.(류승석,2012)

물이 흙 속을 통하여 흐를 때에 물이 흐르는 속도는 투수계수에 의존하므로 투수계수가 작은 점토를 통해 물이 흘러나간다면 물이 흐르는 속도는 대단히 느리다. 이와 같이 오랜 시간에 걸쳐 흙 속에서 물이 흘러나가면서 흙이 천천히 압축되는 현상을 압밀(consolidation)이라고 한다. 일반적으로 포화된 점토지반에 추가하중이 가해지면 그에 따른 변형이 발생한다. 점성토 지반이 체적변형을 일으키기 위해서는 간극내에 포함된 간극수의 배출이 필요한데, 낮은 투수계수로 인해 오랜 기간에 걸쳐서 발생하게 된다. 즉, 점성토 지반의 침하는 재하 후 상당한 시간적 지연을 거쳐서 변형과 투수의 문제가 결합된 상태로 발

생한다. 이러한 복합적인 메카니즘을 설명할수 있는 것이 압밀이론이다. 압밀현상이 변형과 투수문제의 결합 현상이므로 점토의 변형특성(응력-변형률-시간관계)과 투수특성(간극수의 유동법칙)을 모델화하고, 압밀이론에 도입하여야 한다. 그리고 도입된 변형특성과 투수특성의 성격에 의해서 압밀이론은 여러 갈래로 분화된다고 할 수 있다. 변형특성은 탄성과 비탄성으로 투수특성은 Darcy's 흐름과 비Darcy's 흐름으로 크게 대별할수 있다. 이와 같이 압밀이론은 단순하게는 4가지의 조합이 있으며, 4종류의 압밀이론이 존재하게 된다.(류승석,2012)

압밀이론의 전개는 주로 변형특성에 의해서 행해지며, 투수특성을 부차적 역할을 한다. 때문에 변형특성에 탄성을 채용한 것은 탄성압밀이론, 비탄성을 채용한 것은 2차 압밀이론으로 부르고 있다. 탄성압밀이론에서는 선형탄성(응력-변형률-시간관계가 직선)과 Darcy's 흐름을 조합한 것이 많으며, Terzaghi(1924), Barron(1948), Biot(1941) 및 Yoshikuni(1994) 등의 이론이 해당하고, 가장 기초적인 압밀이론이다. 이 중에서 Biot와 Yoshikuni의 이론은 표현만 다를 뿐 본질적인 것은 동일하다. 또한, Terzaghi와 Barron의 방정식은 열전도형의 압밀방정식이라 불리며, 그들의 이론 자체는 Biot와 Yoshikuni의 압밀이론과 기본적으로 동일하다. 그러나 어느 특정의 변형조건하에서만 성립하는 한정압밀이론이다. 그 특정의 조건이란, 간극수의 흐름방향은 물론 1차원압밀에 있어서 침하와 같이 점토층의 표면이 항상 수평에 평면을 유지한 상태로 침하하는 것이다. 이 한정조건이 있기 위해서는 Terzaghi나 Barron의 압밀이론에서는 압밀정수로서 체적압축계수  $m_v$  와 압밀계수  $c_v$  만으로 압밀해석이 가능하다. 일반적으로 지반의 압축이 1차원적이 아닐 경우에는 불가하다. 탄성압밀이론 중에서 Mikasa(1963)의 이론은 특이한 경우이다. 1차원문제에 한정된 설명이지만, 압밀방정식을 변형률로 표현함으로써 선형탄성으로부터 비선형탄성(응력-변형률-시간관계가 곡선, 예를 들어  $e-\log p$ 에서 직선)까지, 또한 일정하중으로부터 점증변화 하중의 문제까지 하나의 방정식으로 해결할 수 있게 되었다. 그리고 그의 이론은 극히 연약한 점토에 대해서 특히 위력을 발휘한다. 비Darcy's 흐름을 고려한 압밀 이론중의 하나로 Hansbo(1981)의 이론이 있으며, Sand drain에 의한 압밀의 문제에 적용되어진다.(류승석,2012)

## 4.2 수정 Cam-Clay 모델

Roscoe, Schofield(1963)등은 Rendulic, Henkel과 Drucker 등의 이론적인 개념을 수용하는 한편 이를 수정하여 흙의 거동을 매우 명확하게 표현할 수 있는 구성식을 세웠다. 즉, 한계상태개념 과 등방삼축시험을 토대로 하여 설립된 원형 Cam-Clay 모델은 다음의 기본 가정사항을 가지고 있다.(남기현,1995)

- 1) 체적변형률 증분( $d\varepsilon_v$ ) 는 일부 회복가능하고 전단변형률 증분은 회복불가능하다.
- 2) 전단중에 소요되는 에너지는 모두 마찰로서 소비된다.
- 3) 항복곡면은 소성 Potential면으로 된다. 즉 Associated Flow Rule이 적용된다.

수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$d\varepsilon_v = d\varepsilon_v^p + d\varepsilon_v^e, d\varepsilon_e = d\varepsilon_e^p \quad (4.1)$$

$$pd\varepsilon_v^p + pd\varepsilon^p = Md\varepsilon^p \quad (4.2)$$

$$d\varepsilon^p / d\varepsilon_v^p = -dq / dp \quad (4.3)$$

그러나 Roscoe 와 Burland는 Cam-Clay 모델을 제안한 뒤 위 가정사항외에 원형 Cam-Clay 모델과는 소비에너지 추정에 있어서 다른 관점을 갖고 수정한 수정 Cam-Clay 모델을 제안하였다.

먼저 등방연속체가 변형하는 동안에 소산된 일의 증분량은 다음과 같다.

$$d_w = pd\varepsilon_v^p + pd\varepsilon^p \quad (4.4)$$

등방응력( $q=0$ ) 아래서 전단변형은 없는 것으로 간주한다. 즉  $d\varepsilon_e=0$  이고 원형



Cam-Clay 모델과는 달리 다음과 같이 가정한다.

$$(d_w)_{q=0} = p d\varepsilon_v^p \quad (4.5)$$

또는 한계상태에서  $q/p = M$  이고  $d\varepsilon_v^p = 0$  이므로

$$(d_w)_{q=Mp} = p M d\varepsilon^p \quad (4.6)$$

식 (4.5)과 (4.6)의 두 조건을 일반화하면

$$d_w = p \sqrt{(d\varepsilon_v^p)^2 + (M d\varepsilon^p)^2} \quad (4.7)$$

윗 식의 소비 에너지는 소성체적변형률과 소성전단변형률에 함께 영향을 주고 있음을 의미한다.

식 (4.4)과 (4.7)를 연립하여 풀면 다음과 같다.

$$\frac{d\varepsilon_v^p}{d\varepsilon^p} = \frac{M^2 - (q/p)^2}{2(q/p)} \quad (4.8)$$

식 (4.7)와 (4.8)을 원형 Cam-Clay 모델과 비교하면

$(d_w)_{q=Mp} = p M d\varepsilon^p$  및  $d\varepsilon_v^p / d\varepsilon^p = M - q/p$  에 각각 대응하는 식이 된다.

식 (4.8)에 Associated Flow Rule을 적용하여 적분하면 다짐의 항복궤적 식을 얻는다.

$$P \left\{ \frac{(q/p)^2 + M^2}{M^2} \right\} (1 - k/\lambda) \quad (4.9)$$

이 식은 항복하는 동안의 흙의 거동을 표시한다. 또한 식(3.6)을 항복함수라 하며 다음과 같이 바꾸어 쓸수 있다.

$$F = q^2 - M^2 p_c p + M^2 p^2 \quad (4.10)$$

여기서

$$q = \{3/2 S_{ij} S_{ij}\}^{1/2} \quad (4.11)$$

$$p = 1/3 \sigma_{ij} \quad (4.12)$$

$$J_{2D} = 1/2 S_{ij} S_{ij} \quad (4.13)$$

항복함수 F는  $p, q, \varepsilon^p_v$  의 함수이므로 전미분을 취하면 다음과 같다.

$$dF = \frac{\partial F}{\partial p} dp + \frac{\partial F}{\partial q} dq + \frac{\partial F}{\partial \varepsilon^p_v} d\varepsilon^p_v = 0 \quad (4.14)$$

또한 응력증분과 탄성변형률의 관계식은

$$d\sigma_{ij} = C_{ijkl} d\varepsilon_{ij}^e = C_{ijkl} (d\varepsilon_{kl} - d_{-kl}^p) \quad (4.15)$$

그리고 소성변형률의 Vector 방향을 고려한 식은 다음과 같다.

$$d\varepsilon^p = \Lambda A_{ij} \quad (4.16)$$

$$(A_{ij} = \frac{\partial \theta \partial p}{\partial p \partial \sigma_{ij}} + \frac{\partial \theta \partial p}{\partial q \partial \sigma_{ij}}, \theta = plastic\ potential)$$

$\Lambda$ 는 비례상수로서 관련탄성과 관련소성에 대하여 다음과 같다.

$$\Lambda = \frac{B_{ij} C_{ijkl} d\varepsilon_{kl}}{B_{ij} C_{ijkl} A_{kl} - \frac{\partial F}{\partial \varepsilon_v} - \frac{\partial F}{\partial P}} \quad (4.17)$$

$$\Lambda = \frac{A_{ij} C_{ijkl} d\varepsilon_{kl}}{A_{ij} C_{ijkl} A_{kl} - \gamma A_{ij}} \quad (4.18)$$

여기서

$$B_{ij} = \frac{\partial F \partial p}{\partial p \partial \sigma_{ij}} + \frac{\partial F \partial q}{\partial q \partial \sigma_{ij}} \quad (4.19)$$

$$\gamma = \frac{\partial F}{\partial p_o} p_o \frac{1 + e_o}{\lambda - k} \quad (4.20)$$

이상과 같이 수정 Cam-Clay 모델을 검토하여 볼 때 다음과 같은 특성을 알 수 있다. 이 모델은 탄소성 등방재료의 성질을 갖는 연약한 점토에 대한 배수 및 비배수 거동을 설명할 수 있으나 재료의 변형거동에 있어서 과압밀된 점토와 같이 강성이 큰 토질재료의 연화변형률 거동은 표현이 불가능하다. 또한 압밀의 크리프적 성질과 변형의 시간의존성은 포함하지 않고 있다고 판단된다.(남기현,1995)

본 연구에서는 점토지반의 모델 타입을 수정 Cam-Clay 모델을 사용하여 해석을 실시하였다.



## 제 5 장 수치해석을 통한 상부퇴적사질토의 통수능 평가

### 5.1 적용 프로그램

본 연구의 해석에 사용된 수치 해석 프로그램은 범용 지반해석 유한요소 프로그램인 GTS NX 이며 시공단계 압밀 해석을 실시하였다. 시공단계해석은 원지반 조건에서 순차적인 전 시공과정을 포함한 해석을 실시한다. 특히, 압밀해석을 시공단계에 포함시킴으로서 실제 현장에서 시공조건에 맞는 수치해석을 수행하여 보다 정확한 지반변형 해석결과를 예측할 수 있다.

Modified Cam Clay 및 Cam Clay 모델을 적용함으로써 지반내 거동의 응력 상태를 파악할 수 있으며, 연직배수재가 타설된 지반의 시공단계를 고려한 압밀침하량 산정에 활용될 수 있다. 또한 투수계수가 작은 연약지반의 경우에 시공 중 과잉간극수압으로 인해 흡입자의 간극수가 배출됨에 따라 압밀소요시간(1차압밀)을 예측할 수 있고, 간극수압과 지반응력변형 연계해석이 가능하다. 따라서 시공단계에 따른 지반 내 거동을 실제거동과 유사하게 묘사하여 신뢰성 높은 수치해석 결과를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다.

다음은 유한요소해석의 흐름도 이다.

1) 요소화(element discretisation): 유한요소해석을 적용하기 위해 해석대상을 기하학적 형상으로 정의하고, 이 과정에서 단순화와 근사화를 통해 작은 영역으로 세분화.

2) 변수의 근사화(variable approximation): 변위, 응력 등의 거동을 정의하기 위한 변수를 선정하고 요소 내에서의 거동 규칙을 정의함. 일반적으로 지반문제에서는 변위를 미지수로 설정.

3) 요소방정식(element equation): 최소일의 원리를 사용하여 요소 지배방정식을 도출.

4) 시스템방정식(formulation): 요소방정식을 전체 자유도(degree of freedom)에 대하여 시스템 방정식 계산.

5) 하중 및 경계조건: 하중, 변위 등 해석 전 알고 있는 경계조건을 반영하여 시스템방정식을 조정. 전체방정식을 확정 짓는 마지막 단계.

6) 시스템방정식 풀이(수치적분): 다원연립방정식의 형태에서 각 절점의 변위를 얻고, 이차적으로 변위로부터 응력과 변형률을 얻는 형태로 해를 구함.



### 5.1.1 프로그램 검증

본 절에서는 해석에 사용된 GTS NX 프로그램을 검증하여 연구결과의 보다 높은 신뢰성을 얻기 위해 Biot(1941)이 제시한 압밀이론 정해의 결과에 GTS NX에 의한 해석결과를 함께 비교, 분석하여 제시하고자 한다.

이 검증 예제는 포화된 다공성 흙의 일차원 탄성압밀을 모사 하였고 Biot(1941)의 정해는 유체의 흐름 방정식과 열전도 방정식의 유사성을 이용하여 유래 되었다.

정해에서 표현된 과잉간극수압  $p_w^{ex}(=p_w-p_{u0})$ 과 수직변위  $u_y$ 는 다음과 같다.

$$p_w^{ex} = 2t^\sigma \frac{\alpha_f - \alpha_i}{\alpha_c \alpha_f} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{M} \sin\left(\frac{My}{H}\right) \exp(-M^2 T) \quad (5.1)$$

$$u_y = 2t^\sigma (\alpha_f - \alpha_i) H \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{M^2} \cos\left(\frac{My}{H}\right) (1 - \exp(-M^2 T)) \quad (5.2)$$

$$M = \frac{(2n+1)\pi}{2} \quad (5.3)$$

$$T = \frac{c_v t}{H^2} \quad (5.4)$$

$$\alpha_f = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{E(1-\nu)} = \frac{1}{\lambda+2\mu} \quad (5.5)$$

$$\alpha_i = \frac{\alpha_f}{1 + \alpha_c^2 \alpha_f (n\beta_w)^{-1}} \quad (5.6)$$

$$c_v = \frac{k_w}{\gamma_w (\alpha_c^2 \alpha_f + n\beta_w)} \quad (5.7)$$

여기서  $\alpha_c$ 는 Biot의 연계 계수이고  $\alpha_f$ 는 최종압축률이며  $\alpha_i$ 는 순간압축률이  
다. 그리고  $c_v$ 는 압밀계수이다.

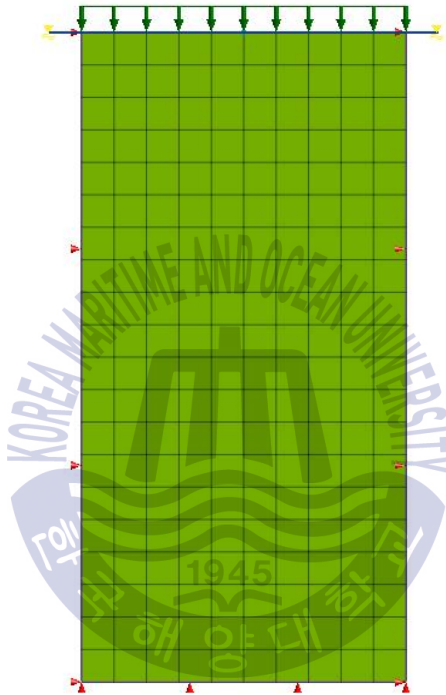
모델링의 높이는 2m 이며 하중은 등분포하중  $10^2$  kPa을 재하 하였다. 경계  
조건은 변형에 대해서는 좌우측 경계에서 수평변위를 고정으로 하고, 동시에  
저면 경계에서는 연직 변위를 고정 경계로 설정하였다. 초기 수두는 어디든 모  
델링 높이 만큼 작용하고 있다. 즉,  $p_0 = H$ .

검증에 사용된 지반정수는 Table 5.1에 나타나 있다.

**Table 5.1** Soil parameters used in numerical analysis

Parameters	Value
Young's modulus (E)	$10^{-3} kPa$
Poisson's ratio	0.25
Porosity	0.2
Hydraulic conductivity ( $k$ )	$10^{-4} m/sec$
Biot's coupling coefficient ( $\alpha_c$ )	1.0
Surface traction loading ( $t^\sigma$ )	$10^2 kPa$
Compressibility of water ( $\beta_w$ )	$5.1 \times 10^{-8} 1/kPa$

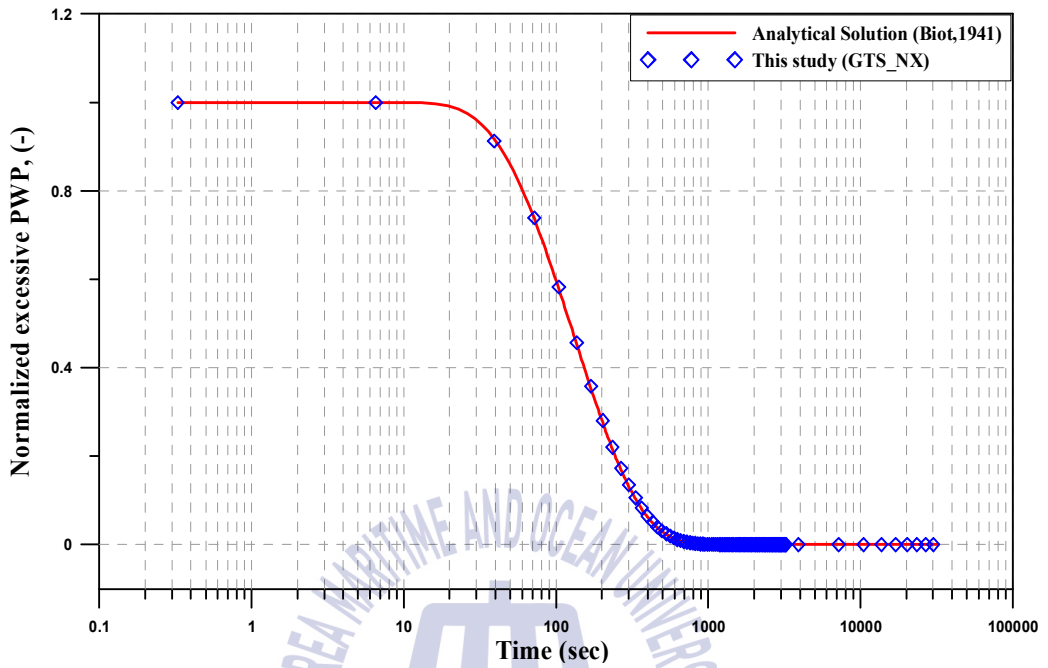
수치해석 모델링 단면은 Fig 5.1과 같다. 연직변위와 과잉간극수압을 측정하였고, 연직변위는 단면 최상부에서 과잉간극수압은 단면 최하부에서 측정하였다.



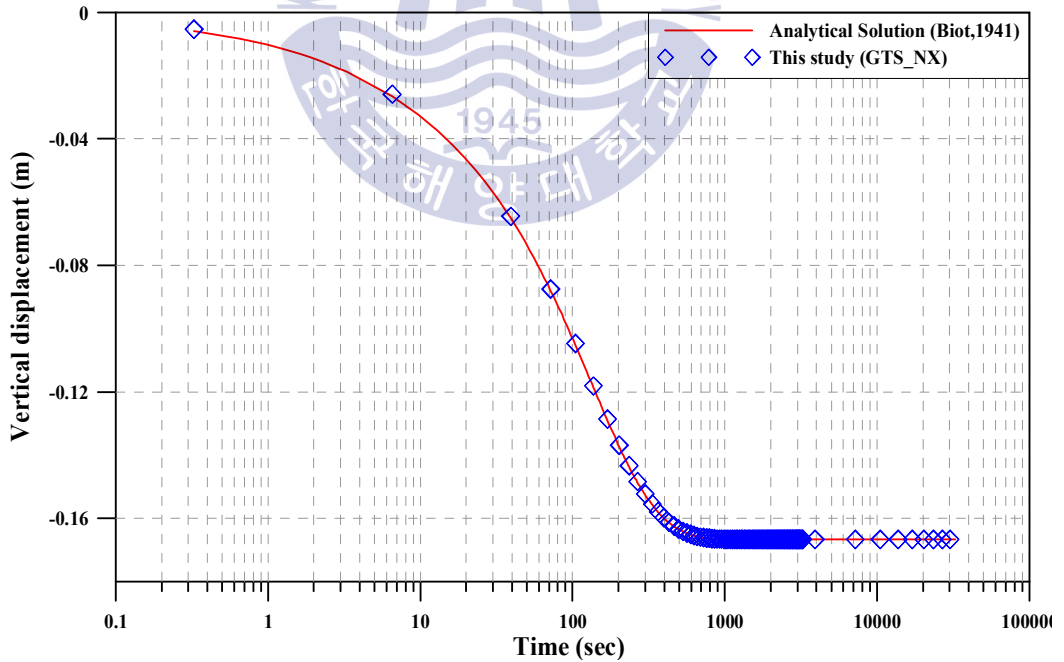
**Fig. 5.1** Finite element mesh used in column loading problem

GTS NX 수치해석 결과와 Biot(1941)의 정해 방정식 5.1, 5.2 와의 비교는 Fig 5.2 와 같다. 그림에서 보이는바 와 같이 수치해석 결과와 Biot(1941) 정해 계산 값의 비교 그래프가 대단히 일치함을 알 수 있다. 따라서 본 연구의 GTS NX 를 이용한 수치해석 결과는 신뢰성을 가지고 있음을 알 수 있다.





(a) Normalized excess pore water pressure at the bottom of column



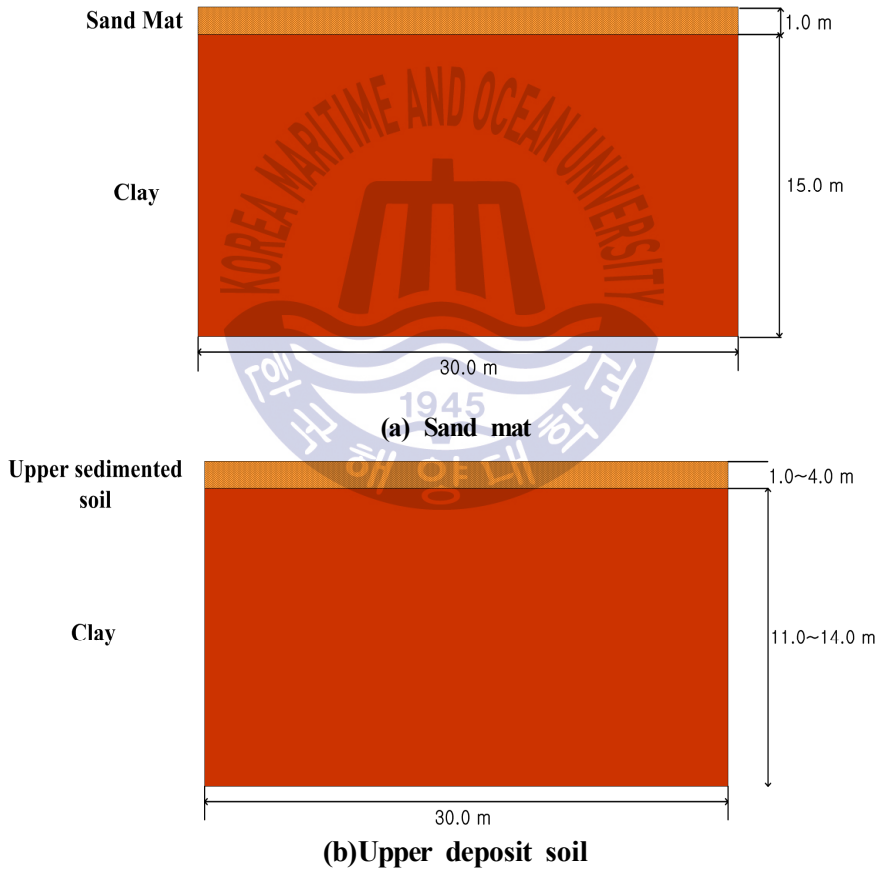
(b) Vertical displacement at the top of column

**Fig. 5.2** Comparison of numerical analysis and Biot's analytical solution

## 5.2 해석조건 및 내용

### 5.2.1 해석조건

본 연구에서는 연약지반 위에 퇴적사질토층이 분포하는 낙동강 하구 델타지역을 대상으로 압밀해석을 실시하였으며, 성토기간은 6개월, 6단계 단계성토 방치기간은 8개월을 계획하였다. 해석단면 및 주요제원은 Fig. 5.3과 같다.



**Fig. 5.3** Analysis conditions

Sand Mat 포설 시 와 상부 퇴적사질토층의 분포 두께에 따른 지반의 압밀도 변화를 이용하여 상부 퇴적사질토층이 Sand Mat 역할을 할 수 있는지를 알아보기 위해 실제 연구대상 지역은 연약점토층 상부에 최소 4.0 m 이상의 사질토 층이 퇴적되어 있지만 본 연구에서는 연약지반만 존재한다는 가정하에, 상부 퇴적사질토층의 두께를 1.0~4.0m로 변화시키고 P.V.D 설치를 하지 않았을 때와, 1.5m, 2.0m 간격으로 설치하였을 때를 모사하여 해석을 수행하였다.

압밀해석에 적용되는 토질 정수는 델타 지역에서의 현장계측 및 기본적인 역학시험으로 얻은 값과, 계측 과 시험을 통해 구하지 못한 지반정수는 문헌조사를 통해 보편적으로 사용되는 지반정수를 이용하였다. 해석에 사용된 주요 지반정수를 요약하면 Table 5.2와 같다.

**Table 5.2** Soil parameters used in numerical analysis

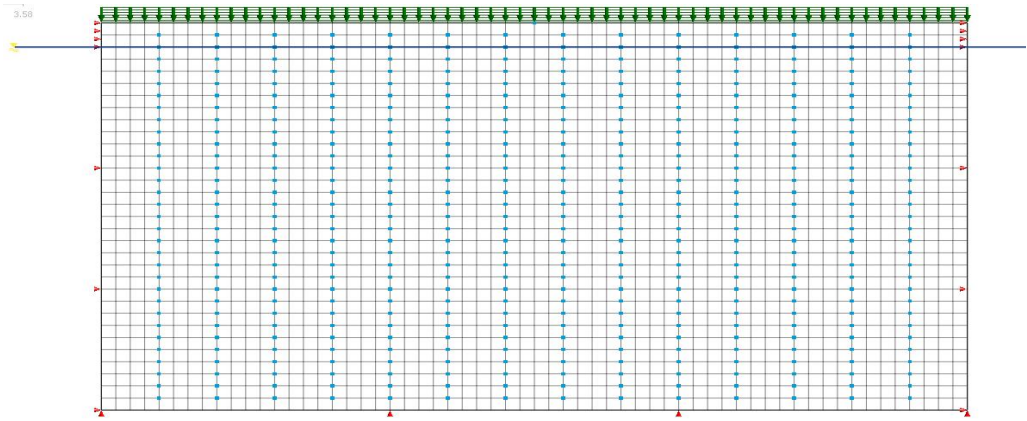
Parameters	Sand Mat	Upper deposit soil	Clay
Modulus of Elasticity ( $kPa$ )	10000	15000	3000
Poisson's Ratio	0.3	0.3	0.38
Unit Weight ( $kN/m^3$ )	20	20	15
Unit Weight (Saturated) ( $kN/m^3$ )	21	21	16
Cohesion ( $kPa$ )	5	5	-
Friction Angle	36	36	-
Permeability Coefficients ( $m/sec$ )	$1.7 \times 10^{-4}$	$2.46 \times 10^{-6}$	$2.31 \times 10^{-8}$
OCR	-	-	1
Slope of consol line ( $\lambda$ )	-	-	0.118
Slope of over consol line ( $\kappa$ )	-	-	0.033
Critical state specific vol. ( $I$ )	-	-	3.579
Slope of critical state line ( $M$ )	-	-	0.772

Fig. 5.4는 대상 지반의 해석에 사용된 메쉬(mesh)와 경계조건을 표현한 그림이다. 지반요소는 4절점 4각형 등방요소를 이용하여 기초지반을 모델링하였으며, 연구 대상 지역이 단지 개발 지역임을 고려하여 무한한 수평거리로 가정하여 등분포 하중을 재하 함으로써 성토단계를 모사하였다.

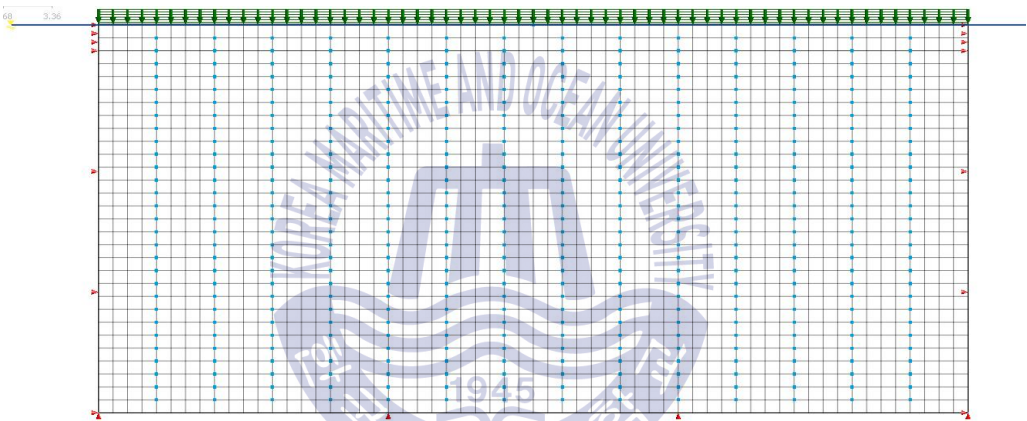
경계조건은 변형에 대해서는 좌우측 경계에서 수평변위를 고정으로 하고, 동시에 저면 경계에서는 연직 변위를 고정 경계로 설정하였다. 지하수위는 Sand Mat 포설 지반에는 실제 설계와 유사하게 Sand Mat 층 아래에 설정 하였고 상부 퇴적사질토 지반에는 지하수위가 지표면과 일치하게 설정하였다. P.V.D 간격은 1.5m 2.0m 두 가지로 나누어 해석을 진행하였다

지반구성모델은 점성토 지반은 수정 Cam-Clay 모델(4.2절 참조)을, Sand Mat 와 사질토층에 대하여서는 Mohr-Coulomb 모델을 이용하였다.





(a) Sand mat modeling



(b) Upper deposit soil modeling

**Fig. 5.4** Finite element mesh and boundary

## 5.2.2 해석개요

해석은 다음과 같은 내용으로 진행되었다.

- 1) 상부 퇴적사질토층과 Sand Mat는 Mohr-Coulomb 모델을 점토층은 수정 Cam-Clay 모델을 사용하였다.
- 2) 성토단계는 6단계로, 단계별 성토기간은 1개월, 성토 후 방치기간 8개월로 계획하였다.
- 3) 성토재 단위중량은  $1.7(tf/m^3)$ 로, 단계별 성토고는 1m, 성토 높이 6m, 성토단계는 등분포하중 재하로 모사하였다.
- 4) 단계별 압밀해석 및 전체과정은 시공단계해석으로 해석을 진행하였다.
- 5) 지하수위를 제외한 측면, 바닥면의 경계조건은 동일하다.
- 6) P.V.D 미설치시와 1.5m ,2.0m 간격으로 설치시에 Sand Mat 1m와 상부 퇴적사질토 1, 2, 3, 4 m 의 평균압밀도를 비교하였다.
- 7) P.V.D 설치 간격에 따른 각 퇴적사질토층의 평균압밀도를 비교하였다.

## 5.3 해석 결과 및 고찰

### 5.3.1 통수능을 고려한 Sand Mat의 두께 적절성 검증

Sand Mat의 기능 중 간극수의 배출기능만을 고려하여 Sand Mat의 두께를 결정할 때 지배되는 인자는 Sand Mat의 투수계수(k), 배수량(Q) 및 배수거리(L)이다.

성토로 인한 지반의 평균 침하속도를 S cm/day라 하고 이 침하량이 연약층의 압밀에 의한 것이라 한다면 성토 단위 길이당 압밀로 인한 전체 배수량 (Q)은  $L \cdot S$ 가 된다.

Sand Mat의 두께를  $h$ , 투수계수를  $k$ , Sand Mat의 단면적을  $A$ 라 하면 배수량은  $k \cdot i \cdot A$ 로 표시된다. 이때  $i$ 는 동수구배로  $i = \frac{\Delta h_w}{L}$ 가 된다. 지하수의 배수를 무시하고 Sand Mat의 배수만을 연약층의 압밀배수로 본다면 다음 식이 성립한다(김용기,2008)

$$Q = L \cdot S = k \cdot i \cdot A = \frac{k \cdot \Delta h_w \cdot h}{L} \quad (5.8)$$

위 식을  $\Delta h_w$ 에 대하여 정리하면,

$$\Delta h_w = \frac{L^2 \cdot S}{k \cdot h} \quad (5.9)$$

여기서

$Q$  : 배수량

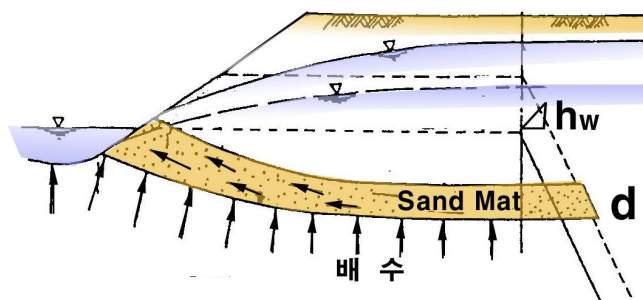
$S$  : 평균침하속도

$k$  : Sand Mat의 투수계수

$h$  : Sand Mat두께

$\Delta h_w$  : Sand Mat 내 압력수두

$L$  : Sand Mat 배수거리



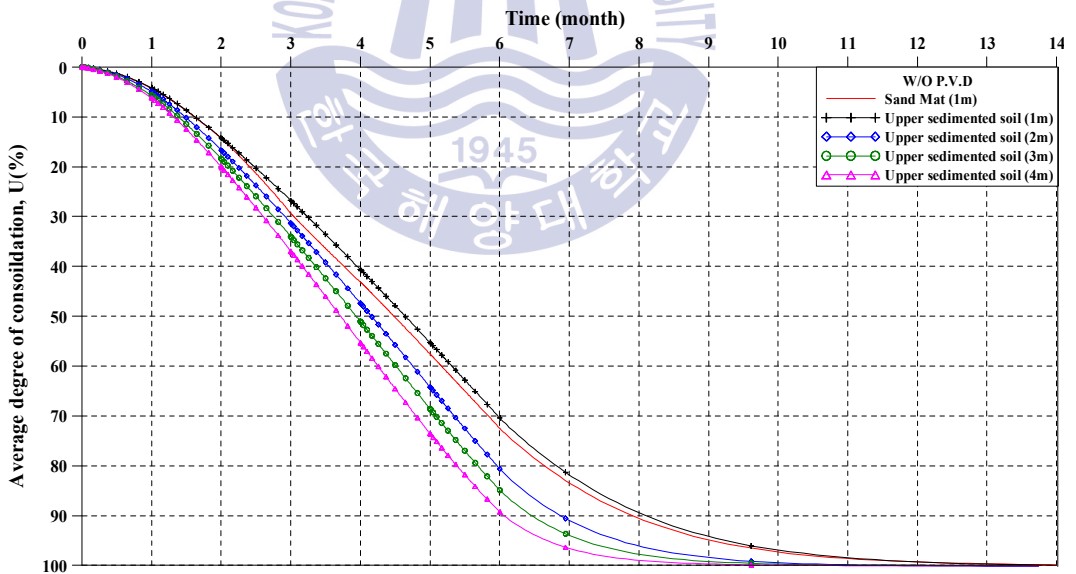
**Fig. 5.5** Horizontal drain function of sand mat

즉, Sand Mat 두께를 가정하고 위의 식을 이용하여  $\Delta h_w$ 를 구한후 이 값이  $h$ 보다 작을 경우 Sand Mat를 통하여 배수가 원활하게 이루어진다고 볼 수 있다.

본 연구에서는 Sand Mat 두께  $h = 1m$  가정하고  $K = 1.7 \times 10^{-2} cm/sec$ ,  $L = 15m$ ,  $S = 0.78 cm/day$  을 이용하여 식(5.9)을 계산한 결과 Sand Mat 내 압력수두  $\Delta h_w = 12cm$  로 나타났다. 따라서  $\Delta h_w < h$  이므로 Sand Mat 두께는 적합하다고 판단하여 해석에 1m 의 Sand Mat 두께를 적용하였다. 5.3.2 해석 결과

### 5.3.2 해석결과

P.V.D 시공을 고려하지 않은 상태에서 상부 퇴적사질토층의 두께 변화에 따라 평균압밀도를 나타낸 그림은 다음과 같다.



**Fig. 5.6** Average degree of consolidation with without P.V.D

Fig. 5.6은 동일한 성토 및 방치 기간에서 Sand Mat 포설시와 퇴적사질토층의 두께 1, 2, 3, 4m 일때의 평균압밀도를 나타낸 것이다.

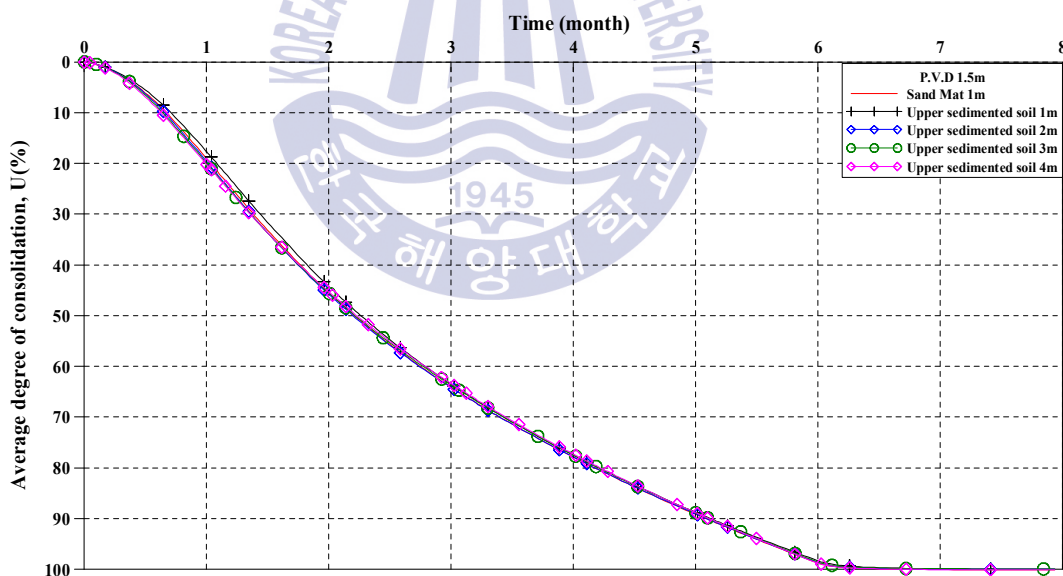


평균압밀도는 침하량 기준에 의한 평균 압밀도 산정 식 (5.10)을 이용하여 구하였다.

$$U_{av} = \frac{S_t(\text{임의 시간에서 침하량})}{S_c(\text{최종 압밀 침하량})} \quad (5.10)$$

퇴적사질토층의 두께가 1m일 때는 Sand Mat 1m를 포설 할 때 보다 압밀지연이 발생하고, 반대로 두께가 2m이상일 때는 압밀이 촉진됨을 알 수 있다. 이는 퇴적사질토층의 두께가 어느 이상 충분히 확보되면 퇴적사질토층도 Sand Mat 와 같은 수평배수층 역할을 할 수 있는 것이다.

Fig. 5.7는 동일한 퇴적사질토층과 Sand Mat 두께에서 P.V.D를 1.5m 간격으로 시공했을 때의 평균압밀도를 나타낸다.

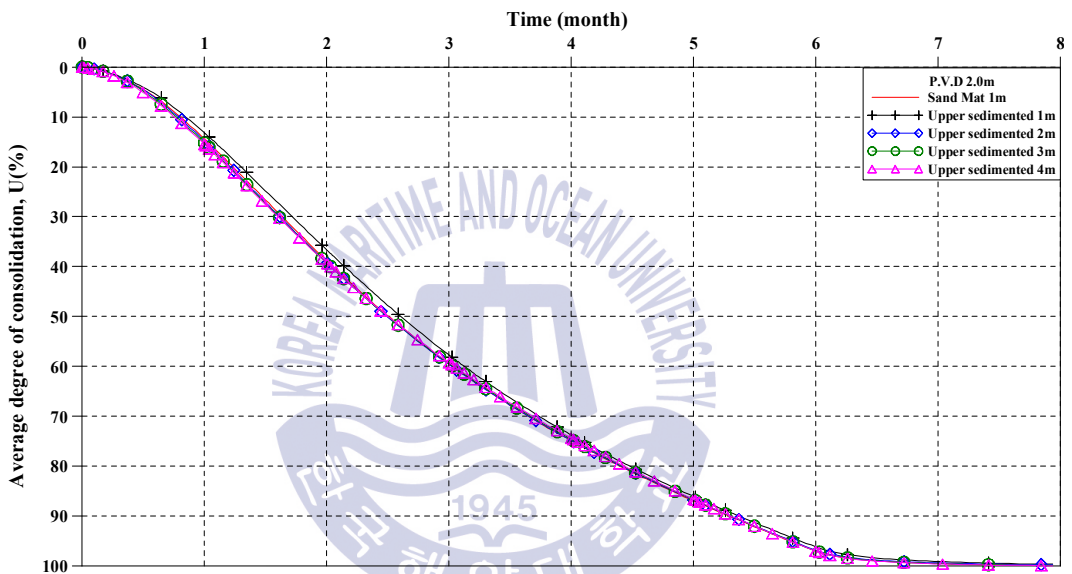


**Fig. 5.7** Average degree of consolidation with P.V.D 1.5m

상기 그림에서 볼 수 있듯이 Sand Mat 포설 시 와 비교 했을 때 퇴적사질토층 1m, 일 때에는 약간의 압밀이 지연되며 Sand Mat 1m 와 퇴적사질토층 2,

3, 4m 평균압밀도의 변화 과정은 일정한 것으로 나타났다. 전체적인 압밀 완료 시점은 P.V.D를 시공하지 않은 경우보다 빠름을 알 수 있다.

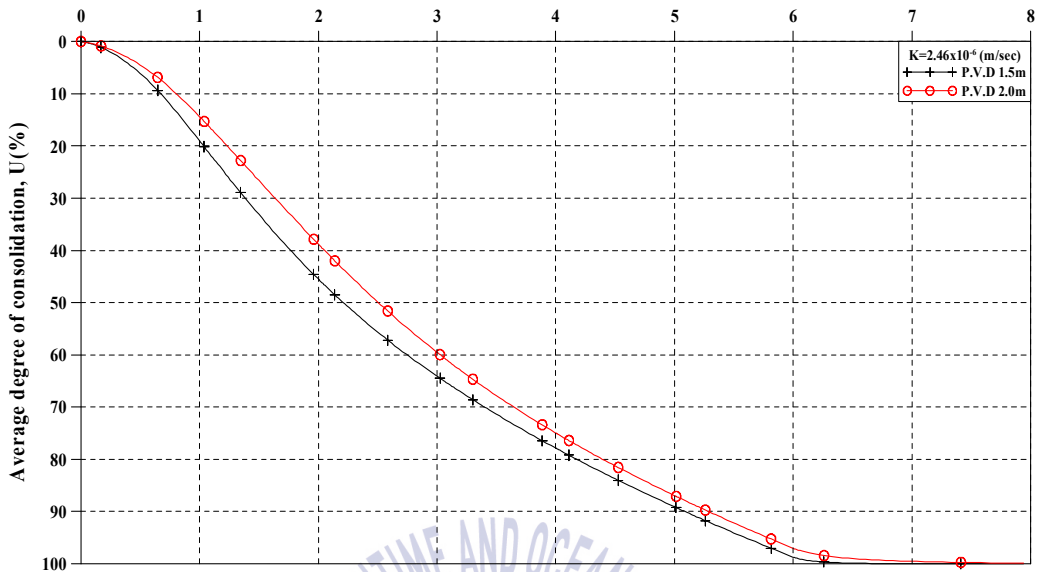
Fig. 5.8는 P.V.D를 2m 간격으로 시공 했을 때 의 평균압밀도의 변화를 나타낸다. 이 경우 평균압밀도의 변화 과정은 P.V.D 1.5m 시공 시 와 같고, 압밀완료 시점만 앞당겨 진 것을 알 수 있다. 또한 P.V.D를 1.5m 간격과 2.0m 간격으로 설치하였을 때의 압밀완료 시점이 유사하게 나타남을 알 수 있다



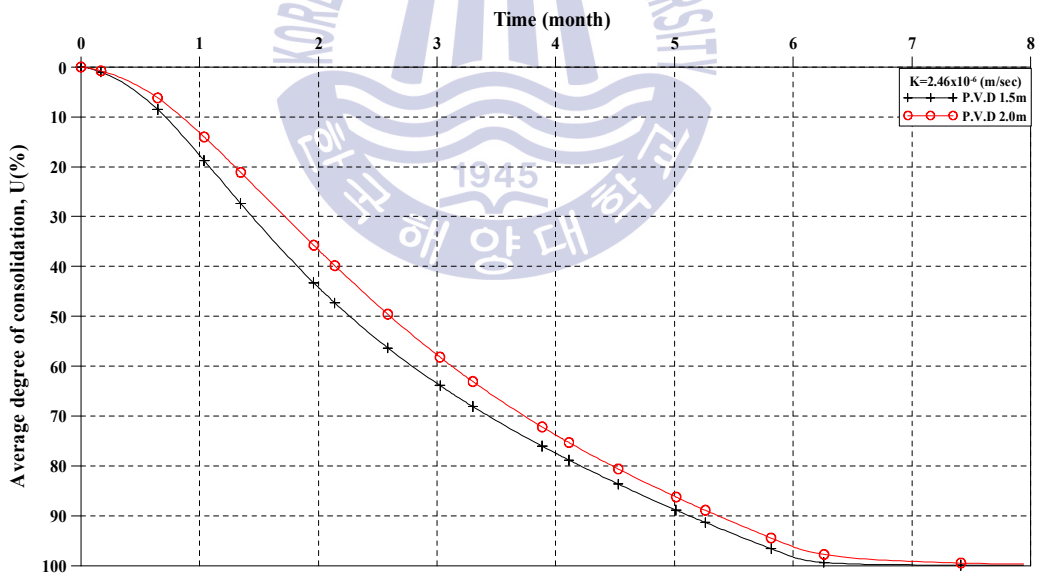
**Fig. 5.8** Average degree of consolidation with P.V.D 2.0m

P.V.D 설치 간격에 의한 Sand Mat 포설 시 와 각 퇴적사질토 두께별로 평균 압밀도에 어떠한 영향이 있는지를 좀 더 세밀하게 알아보기 위하여 조건별로 평균압밀도를 비교하여 보았다.

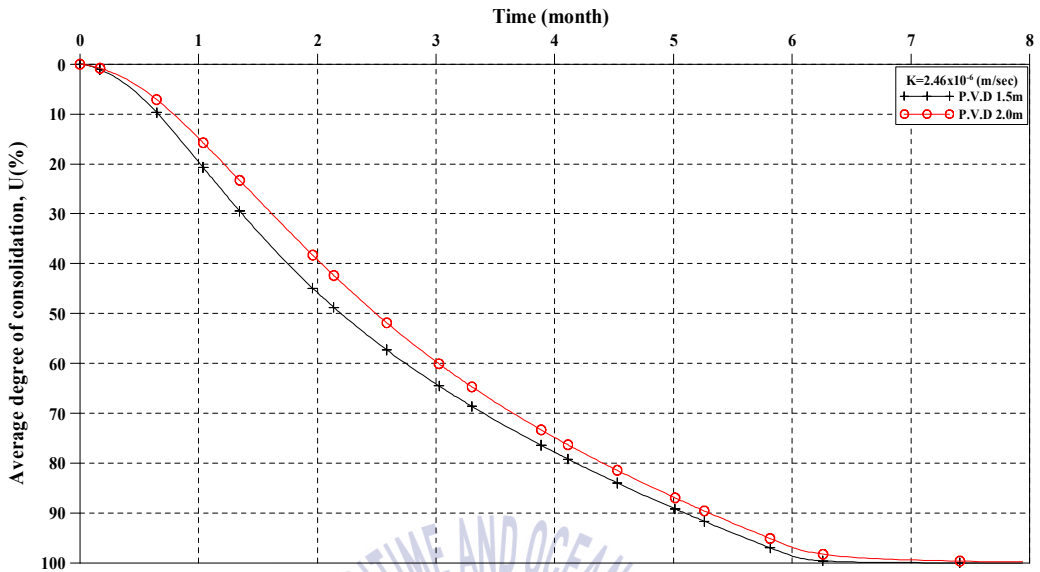
다음 Fig. 5.10 ~ Fig. 5.13는 각 퇴적사질토 두께별 P.V.D를 1.5m, 2.0m로 시공했을 때의 평균압밀도의 비교를 나타낸 것이다. 보는 바 와 같이 성토 중에는 압밀도에 차이가 보이지만 결국 압밀완료 시점은 비슷함을 알 수 있다.



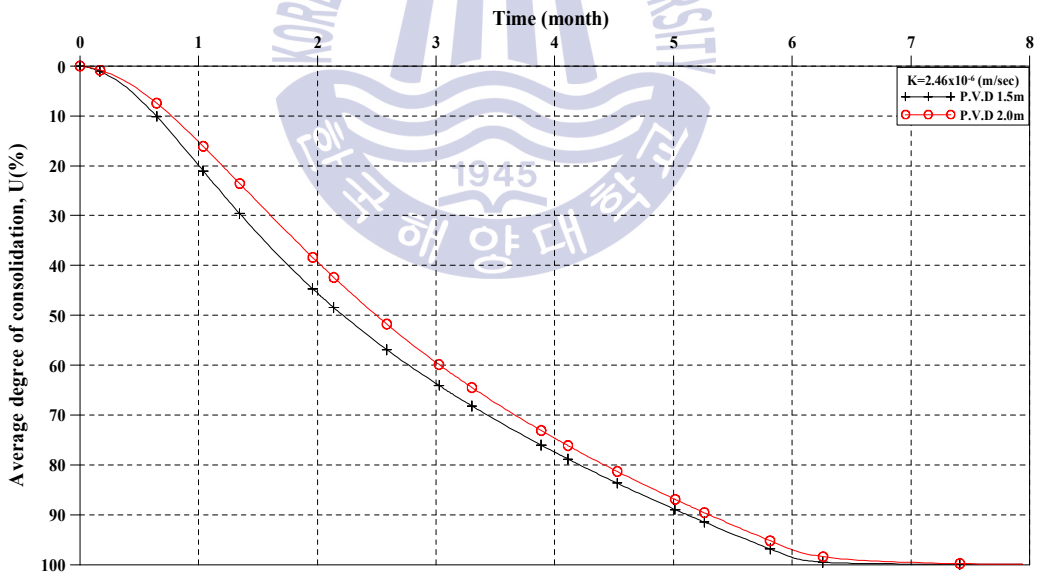
**Fig. 5.9** Average degree of consolidation with sand mat 1m



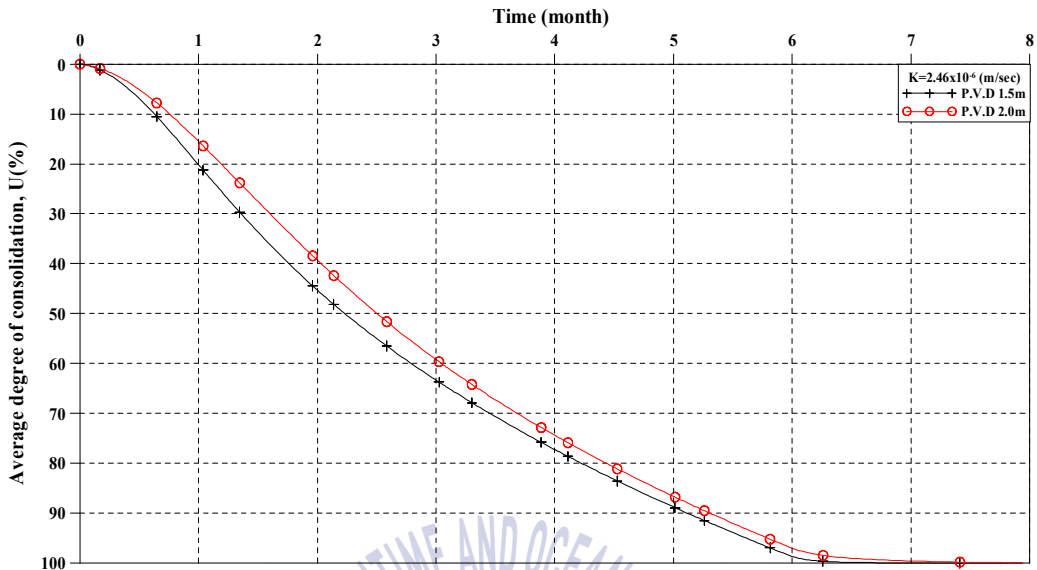
**Fig. 5.10** Average degree of consolidation with upper sand deposit 1m



**Fig. 5.11** Average degree of consolidation with upper sand deposit 2m



**Fig. 5.12** Average degree of consolidation with upper sand deposit 3m

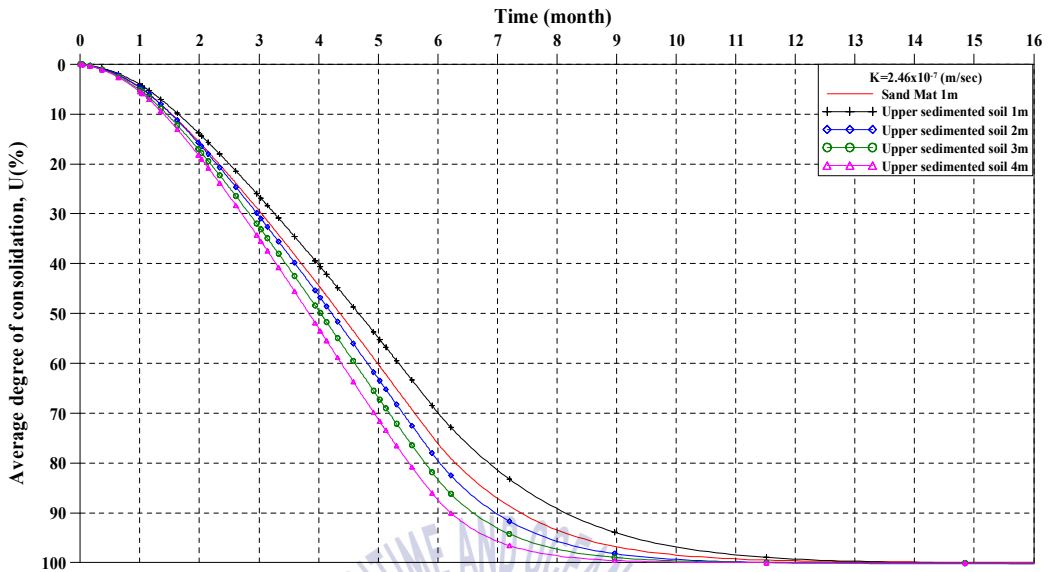


**Fig. 5.13** Average degree of consolidation with upper sand deposit 4m

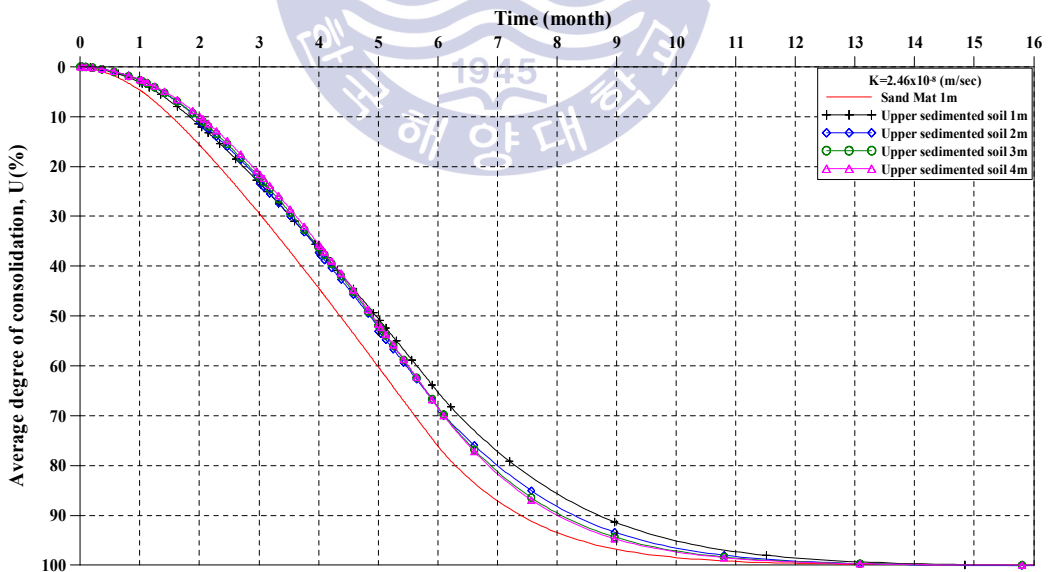
해석결과 상부퇴적사질토 층의 두께가 2m 이상 되면 상부배수층의 역할을 수행할 수 있는 것으로 판단되며 P.V.D 시공시는 Sand Mat 포설과 퇴적사질토 층의 두께에 상관없이 압밀완료 시점은 유사함을 알 수 있다.

따라서 경제적이고 효율적인 시공을 위해서는 Sand Mat를 포설하지 않아도 되고 압밀 촉진을 위한 P.V.D 1.5~2.0m 간격의 시공에 있어서도 압밀완료 시점의 차이가 미비 하므로 최소한의 간격만 유지 하면 될 것으로 판단된다.

본 연구를 바탕으로 낙동강 에코델타 지역의 상부퇴적사질토층의 수평배수재로서의 기능을 확인하였고, 더 나아가 퇴적사질토층의 투수계수를 변화 시켜 해석을 실시함으로써 에코델타 지역 이외의 퇴적사질토층의 수평배수재로서의 기능을 판단하는데 도움이 되고자 투수계수를  $k = 2.46 \times 10^{-7} (m/sec)$ ,  $k = 2.46 \times 10^{-8} (m/sec)$ 로 변화시켜 해석을 실시하였고 해석 결과는 Fig. 5.14, Fig. 5.15 에 나타나있다.



**Fig. 5.14** Average degree of consolidation with permeability  $k = 2.46 \times 10^{-7}$  (m/sec) of upper sand deposit

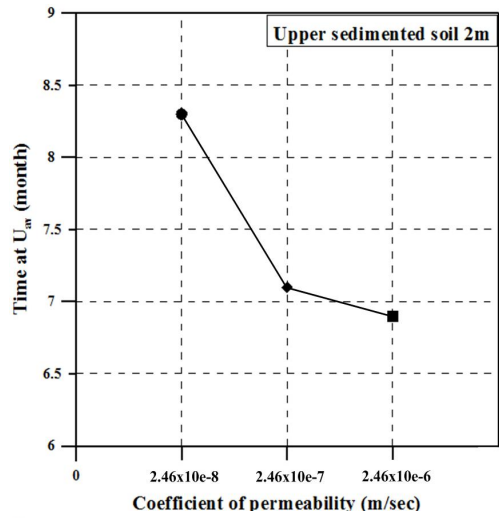
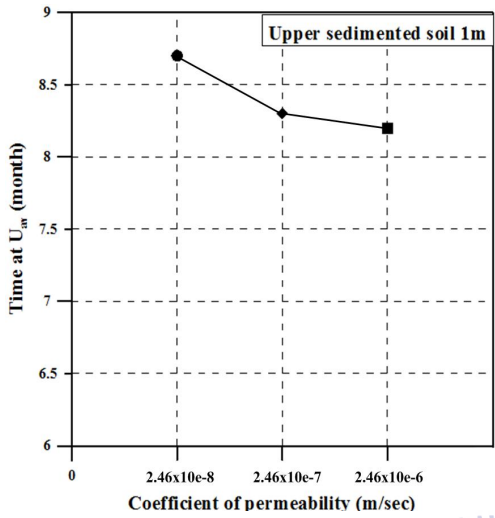


**Fig. 5.15** Average degree of consolidation with permeability  $k = 2.46 \times 10^{-8}$  (m/sec) of upper sand deposit

그림에서 나타나 있는 바와 같이 상부모래층의 투수계수  $k = 2.46 \times 10^{-7} (m/sec)$  일 때는  $k = 2.46 \times 10^{-6} (m/sec)$  일 때에 비하여 압밀시간이 증가하기는 하나 퇴적사질토층의 두께가 2m 이상이면 Sand Mat의 이상의 투수성을 가지나  $k = 2.46 \times 10^{-8} (m/sec)$  일 때는 퇴적사질토층의 두께가 2m 이상 4m 까지 되어도 투수기능이 저하된다.

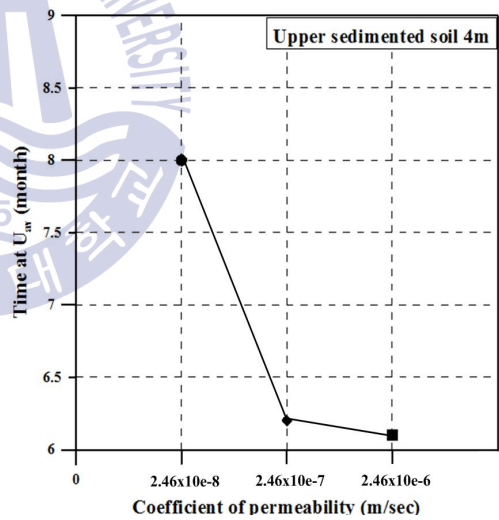
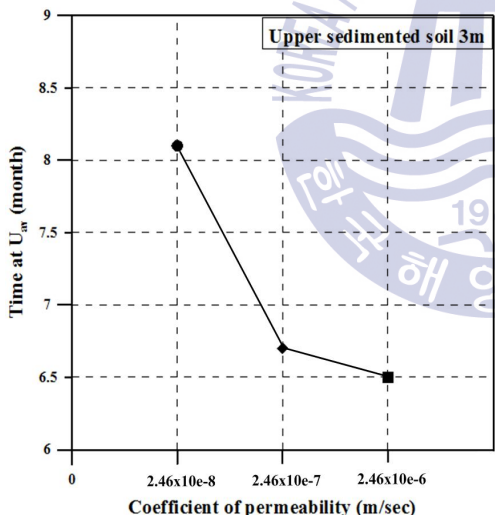
Fig. 5.16 는 투수계수에 따른 두께별 압밀도가 90%도달하는 시간을 비교한 그래프이다. 퇴적사질토층의 두께가 두꺼워 질수록 90%압밀에 도달하는 시간이 감소하고 투수계수별 차이는 증가함을 알 수 있다.





(a) Upper sand deposit 1m

(b) Upper sand deposit 2m



(c) Upper sand deposit 3m

(d) Upper sand deposit 4m

Fig. 5.16 Comparison of 90% degree of consolidation with different sand deposit thicknesses and permeability



Fig. 5.17, Fig5.18 는 상부퇴적사질토의 투수계수  $k = 2.46 \times 10^{-7} (m/sec)$ ,  $k = 2.46 \times 10^{-8} (m/sec)$ 일 때 P.V.D 2.0m 시공시 평균압밀도 그래프이다.

두 경우 약간의 압밀 완료 시점의 차이는 있지만 비슷한 압밀 경향을 보이고 P.V.D 시공 시에는 투수계수  $k = 2.46 \times 10^{-8} (m/sec)$ 일 때에도 Sand Mat와 비슷한 역할을 할 수 있음을 알 수 있다. 이것은 P.V.D를 통해 지반 내의 물이 원활히 상부로의 배수가 이루어질 것이라 예측을 할 수 있다.

Fig. 5.19은 P.V.D 2m 시공 시 투수계수 별 90%압밀에 다다른 시간 비교 그래프이다. 퇴적사질토층 두께 2m이상부터 Sand Mat 포설시보다 압밀 속도가 빠르므로 두께 2m에서만 비교를 하였다. P.V.D 시공 시 그렇지 않은 경우보다 90%압밀에 도달하는 시간의 격차가 크지 않음을 알 수 있다.

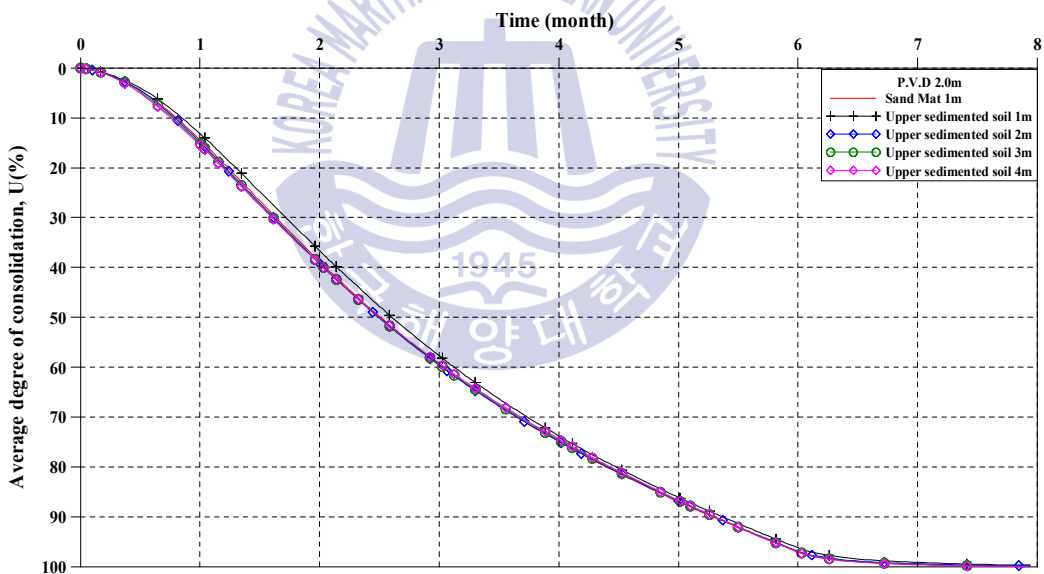
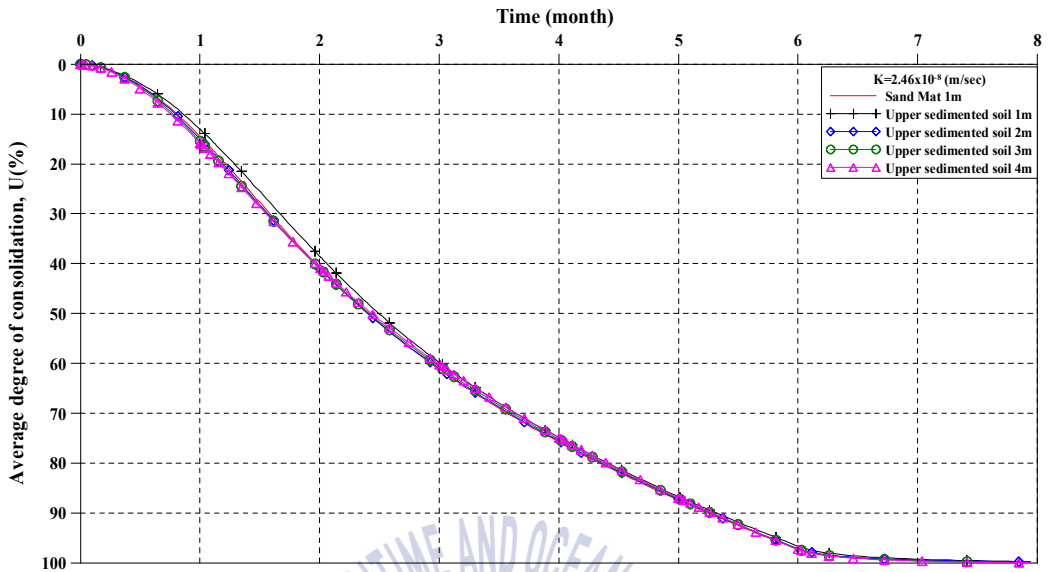
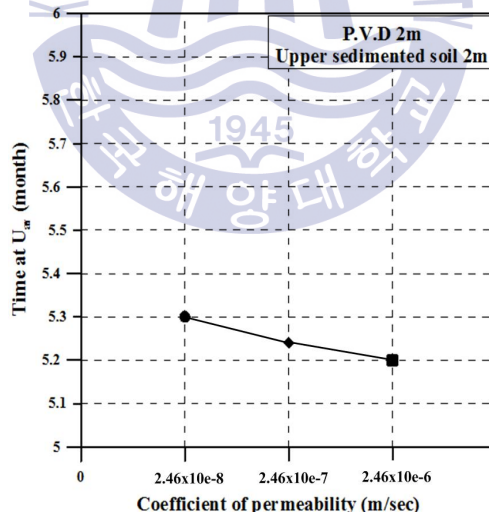


Fig. 5.17 Average degree of consolidation of permeability  $k = 2.46 \times 10^{-7} (m/sec)$  with P.V.D 2m



**Fig. 5.18** Average degree of consolidation of permeability  $k = 2.46 \times 10^{-8} \text{ (m/sec)}$  with P.V.D 2m



**Fig. 5.19** Comparison of 90% degree of consolidation with different permeability

## 제 6 장 결론

본 연구는 낙동강 하구 델타지역에 위치한 연구지역의 상부퇴적사토에 대한 물리·역학적 특성을 조사하여 상부퇴적사질토층이 Sand Mat와 같은 수평배수재로서의 기능을 수행할 수 있는지를 검토하고, 현장 및 실내 시험을 통해 도출된 지반정수 값을 이용하여 GTS NX 프로그램으로 해석을 실시하였다. 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 상부퇴적사질토층의 물리·역학적 특성을 파악하기 위해 시추조사와 현장 및 실내 투수시험을 실시하였으며, 그 결과 분포 심도는 4~13m의 층후를 이루며, 표준관입시험결과 N값은 3~12로 매우 느슨한 상태로 분포하는 것으로 조사되었고, 투수시험결과 투수성이 양호한 것으로 나타났다.

2) 입도분포곡선을 통해 수평배수재로서의 적용가능성을 평가하기 위해, 본 검토에서는 심도별로 채취된 퇴적사질토의 입도분포곡선을 우리나라 및 일본 기준(2.2 절)에 적용하여 수평배수재로서의 적용가능성을 평가하였다. 검토결과 일부 구간의 경우 세립분 함유율이 20%이상으로 샌드매트 기준을 만족하지 못하나 세립분 함유량(5% 이하)이 낮을 경우 기준을 만족하는 것으로 검토되었다.

3) 침하량 기준으로 평균압밀도를 산정하였고 상부퇴적사질토의 수평배수재로서의 기능을 알아보기 위해 델타지역 연약지반위에 Sand Mat 1m 포설할 때와 연약지반위에 퇴적사질토층이 1, 2, 3, 4m 두께로 위치하고 있는 경우의 평균압밀도를 비교하였고, 그 결과 두께가 2m 이상이 되면 Sand Mat 포설 경우보다 더 빠른 시간 내에 압밀이 완료됨을 알 수 있었다. 따라서 델타지역 퇴적사질토층은 수평배수재로서의 기능을 수행할 수 있다고 판단된다.

4) P.V.D의 간격을 1.5m, 2.0m 두 가지로 설정하고 해석을 진행한 결과 전체적인 압밀완료 시간은 단축되지만 퇴적사질토두께별 시간별 평균압밀도는 유사함을 알 수 있었다. 이는 낙동강 델타지역의 상부퇴적사질토층의 투수성이 우수하여 P.V.D 간격에 의한 배수·침하 속도에 영향을 덜 받는 것으로 판단된다.

5) 낙동강 델타 지역 이외의 지역에서 퇴적사질토층의 수평배수기능을 판단할 때 고려할만한 근거 자료를 제시하고자 투수계수를  $k = 2.46 \times 10^{-7} (m/sec)$ ,  $k = 2.46 \times 10^{-8} (m/sec)$ 로 바꾸어 해석을 실시하였다.  $k = 2.46 \times 10^{-7} (m/sec)$ 일 경우에는 압밀시간의 지연은 있지만 델타지역과 마찬가지로 두께가 2m이상 되면 수평배수재로서의 기능을 수행할 수 있는 것으로 나타났고, 이와 다르게  $k = 2.46 \times 10^{-8} (m/sec)$ 일 경우에는 1~4m의 두께에도 수평배수재로의 기능에는 한계가 있는 것으로 나타났다. 하지만 P.V.D 시공 시에는 Sand Mat와 압밀이 유사하게 일어남을 알 수 있었다.



## References

1. 김상규, 김운태, 김재홍 (2014), 대심도 연약지반 연직배수재 설계시 고려사항, 한국지반공학회지 Vol.30, No.5 pp. 15~24.
2. 김종국, 박기순, 김학중, 이강운, 채영수 (2002), 인천국제공항 연약지반 개량 연구사례(Ⅲ), Vol.18, No.1
3. 김은호 (2007), 표준압밀시험과 Rowe Cell 시험에 의한 재성형 점토의 압밀 특성, pp. 45
4. 김용기 (2008), 연약지반의 침하를 고려한 샌드매트 두께 산정, pp. 57
5. 박춘식, 김종환, 백진술, (2013), MCC 모델에 의한 연약지반의 교대측방이동 영향범위에 관한 연구, 한국지반공학회지 Vol.33, No.1, pp. 195~205.
6. 김태형, 정재훈, 김민, 오세형, 이재성 (2014), 낙동강 중하류 모래자갈층에서 입도분석에 의한 수리전도도 산정, Proceeding of KSEG 2014 spring Conference pp. 331~332.
7. 류승석 (2012), 실내시험과 현장계측에 의한 연약 점성토 지반의 압밀특성 연구, pp. 120
8. 윤대호, 김재홍, 김운태 (2016), 피압에 따른 연약지반의 압밀 거동, 한국지반 환경공학회 논문집 17(2), pp. 31~39.
9. 남기현 (1995), 수정 Cam-Clay 모델에 의한 Pack-Drain 지반의 거동해석, pp. 91
10. 김재홍, 권정근, 정진영, 황웅기, 김태형 (2016), 낙동강 델타지역 상부 퇴적 사질토의 수평배수재 적용가능성에 관한 연구, 한국지반신소재학회 가을학술 발표회, pp. 89~90.
11. 김재홍, 김태형, 권정근, 김병준, 정진영 (2015), 낙동강 델타지역 퇴적사질 토의 물리 역학적 특성에 관한 연구, 대한토목학회(학술대회), pp. 1~2.

12. Chung, S.G. Lee, N.K. Lee, J.M. Min, S.C. & Hong, Y.P., 2010a. Hydraulic Characteristics of Busan Clay in the Floodplain of the Nakdong River Delta. *Journal of Korean Geotechnical Society*, 26(11), pp. 47~61.
13. Chung, S.G. Chung, J.G. Jang, W.Y. & Lee, J.M., 2010c. Correlations between CPT and FVT results for Busan Clay. *Marine Georesources and Geotechnology*. 28(1), pp. 49~63.
14. Chung, S.G. & Lee, N.K., 2010b. Smear effect and well resistance of PVD-installed ground based on hyperbolic method. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(4), pp.640-642.
15. Lambe, T.W. & Whitman, R.V., 1979. *Soil Mechanics*, Si Version. 1st Edn., John Wiley and Sons:New York, ISBN; 0471024910.
16. Korea Water Resource Corporation(Kwater), 2014a.  
[http://www.ecodeltacity.kwater.or.kr/Ecodeltacity/sub\\_01](http://www.ecodeltacity.kwater.or.kr/Ecodeltacity/sub_01)
17. Korea Water Resource Corporation(Kwater), 2014b. Soil Investigation Report of Busan Eco-Delta City Section 3. pp.38.
18. Kwon, J.G., 2012. Study on the Development of Quality Assurance Method of the Sand Compaction Pile. Ph.D. Thesis, Busan:Busan National University.
19. Kim, M. Do, H.Y. Kim, G.J. & Chung, S.G., 2000. Settlement Characteristics of Sand Deposit in the Mouth of Nakdong River. *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol.2, pp.501-504.
20. Jang, H.S., 2004. Study on the engineering Characteristics about the soft clay at the mouth of Nakdong river and management of settlement include 2th. Master Thesis, Busan:Busan National University.
21. Gang, C.G., 2011. Unsaturated permeability Characteristics of silty sand on the Nak-dong River. Master Thesis, Daegu:Kyungpook National University.

## 감사의 글

2년간의 길다면 길고 짧다면 짧은 대학원 석사 생활을 마치게 되기까지 감사한 분들이 무척이나 많습니다.

먼저 2년 올바른 길로 인도해주기 위해 많은 이야기와 지도를 해주신 김태형 교수님께 가장 큰 감사의 인사를 올립니다. 사회에 나가서도 학교에서 교수님께 지도 받은 지식, 경험, 조언을 바탕으로 인정받는 기술자로 성장해 나가겠습니다. 또한 바쁘신 와중에도 논문 심사를 해주신 서영교 교수님과 이재하 교수님도 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 논문이 완성되기까지 학부에서부터 대학원 교육과정까지 토목에 대한 전공지식을 쌓을 수 있게 도움을 주신 김도삼 교수님, 이중우 교수님, 경갑수 교수님, 김태곤 교수님께도 항상 감사하고 존경하는 마음 잊지 않고 살겠습니다.

2년 동안 같이 동거동락 했던 연구실 든든한 기둥 황웅기 박사님께 감사를 드립니다. 박사님으로부터 많은 것을 배웠고 후배로써 마음을 의지할 수 있어서 연구실 생활동안 마음이 든든했습니다. 감사하고 존경합니다. 저보다 먼저 졸업했지만 성웅이 형, 병준이 형도 감사합니다. 덕분에 많이 배우고 즐거운 연구실 생활 할 수 있었습니다. 그리고 호성이형 같이 더 오래 생활했으면 좋았겠지만 이렇게 저 먼저 졸업하네요. 고생이 많겠지만 파이팅입니다.

대학원 생활에 활력소가 되어준 우리 경환이 형, 흥원이, 민영이 졸업축하하고 졸업 후에도 각자가 가고자 하는 길에서 다들 성공했으면 좋겠다. 그리고 앞으로 열심히 대학원생활 할 승효, 상민이, 의석이, 주현이 너희가 토목환경공학부 대학원 미래다. 종혁아 너도 준비 잘해서 꿈을 이루었으면 좋겠다.

마지막으로 지금껏 아들 뒷바라지 하느라 고생하신 부모님께 졸업의 영광을 돌립니다. 부모님께서 항상 믿어주시고 응원해주시고 지원해 주신 덕분에 큰 어려움 없이 대학원 졸업까지 마칠 수 있었습니다. 큰 사람 훌륭한 사람 되어 효도하겠습니다. 그리고 동생 진호야 형 생각 많이 해주고 챙겨줘서 고맙다. 또한 저를 믿고 응원해주신 일가친지 모두에게 항상 감사드립니다.