

# 개별진공압공법이 적용된 지반의 최적 단계진공압 산정 및 침하예측

## Determination of Optimum Stepped Vacuum Pressure and Settlement for IVPM-applied Ground

윤명석<sup>1</sup> · 안동욱<sup>2</sup> · 박재만<sup>3</sup> · 김수삼<sup>4</sup>

Myung-Seok Yoon<sup>1</sup>, Dong-Wook Ahn<sup>2</sup>, Jea-Man Park<sup>3</sup> and Soo-Sam Kim<sup>4</sup>

(Received February 21, 2011 / Revised April 5, 2011 / Accepted April 20, 2011)

### 요 약

개별진공압공법은 지반에 타설된 연직배수재에 진공압을 직접 가하여 간극수를 배출하여 일정한 전응력 상태에서 유효응력이 증가함에 따라 압밀을 촉진 시키는 공법이다. 연약지반 개량에 일반적으로 사용되는 공법인 성토재하공법(preloading)과는 다르게 성토하중이 필요로 하지 않기 때문에 성토재료의 확보 문제와 지반의 국부적인 전단파괴에 대해 이점을 가지고 있다. 또한 기존의 진공압밀 공법에서의 문제점인 펌프효율의 감소, 고가의 기밀시트에 소요되는 비용, 그리고 기밀시트의 잦은 파손의 문제 등을 직접적으로 배수재에 진공압을 가함으로써 개선시킨 공법이다. 그러나 개별진공압공법은 직접 고압의 진공압을 직접 배수재에 가함으로써 배수재 주변의 투수계수가 감소하며 경화되는 영역(hardening zone)과 필터재료의 막힘 현상(clogging)에 의해서 간극수의 배출이 줄어들게 되어 지반개량의 효율이 크게 감소하게 된다. 따라서 본 연구에서는 높은 지반개량 효과를 얻을 수 있는 진공압의 적용기간을 찾기 위해서 단계진공압(-20, -40, -60, -80kPa) 적용기간을 각각 다르게 적용하였다. 실험을 진행하는 동안 각 조건에 따라 개량 시간에 따른 침하량을 측정하였으며, 실험 종료 후 최종침하량, 함수비, 콘저항치를 측정하였다. 파악된 데이터를 비교/분석하여 개별진공압공법에 적합한 단계진공압 적용기간을 도출한 후 수치해석을 실시하여 제안된 단계진공압 적용에 따른 침하량을 예측하였다.

**주제어:** 개별진공압공법, 단계진공압, 침하량, 수치해석

### ABSTRACT

Individual Vacuum Pressure Method (IVPM) is a soft ground improvement technique, in which a vacuum pressure can be directly applied to the vertical drain board to promote consolidation and to strengthen the soft ground. This method does not require surcharge loads, different to embankment or pre-loading method. In this study, the ground improvement efficiency of Individual Vacuum Pressure Method was estimated when suction pressure increases step by step(-20, -40, -60, -80kPa) with different periods. During Individual Vacuum Pressure Method process, surface settlement and pore pressure were monitored, and cone resistance as well as water content were also measured after the completion of Individual Vacuum Pressure Method treatment. From the results, optimum duration of each step of vacuum pressure was determined, and the settlement was calculated using FEM numerical analysis.

**Key words:** Individual Vacuum Pressure Method, Stepped vacuum pressure, Settlement, Numerical analysis

## 1. 서 론

개별진공압공법은 지반 내 타설된 배수재를 진공펌프와 직접적으로 연결하여, 진공압을 배수재에 직접적으로 적용시켜 전응력이 일정한 상태에서 간극수가 배출되며, 유효응력의 증가로 인해 압밀이 진행되는 원리를 이용한 공법이다. 이

는 기존의 성토재하공법 및 연직배수공법과는 다르게 성토하중을 필요로 하지 않으며, 진공압밀공법의 단점으로 지적되었던 진공효율의 감소문제, 굴착 및 수평배수재 설치로 인한 경제적·시간적 손실의 문제와 기밀 재료 및 유지관리의 문제 등을 개선시킬 수 있다.

개별진공압공법은 높은 진공압을 직접 배수재에 가함으

1) 한양대학교 건설환경공학과 박사과정(주저자: ddingkko@hanyang.ac.kr)  
 2) 포항산업과학연구원 강구조연구소 선임연구원(교신저자: ahndw@rist.re.kr)  
 3) 한양대학교 건설환경공학과 박사과정  
 4) 한양대학교 건설환경공학과 명예교수 & 한국토지주택공사 토지주택연구원 연구원장

로써 배수재 주변의 투수계수가 감소하여 경화가 발생하는 Hardening Zone과 필터재료의 막힘 현상에 의해서 간극수의 배출이 감소하여 지반개량의 효율이 크게 저하되는데, 이상일(2007)은 경화영역의 발생을 지연시키고 지반을 개량하기 위해서는 낮은 진공압에서 높은 진공압으로 단계적으로 진공압을 재하해야 한다고 제안한 바 있다.

하지만 현재 개별진공압공법에 있어서 단계진공압의 재하에 대한 정량적인 연구 결과는 도출되지 않았다. 그러므로 본 연구에서는 실내실험을 통해 4가지 조건의 단계진공압의 재하에 대한 효율을 평가하고자 하였고, 결과분석을 통해 개량효율의 증가를 기대할 수 있는 단계진공압 재하기간의 선정 방법을 제안하고자 하였다. 또한 수치해석을 실시하여 제안된 단계진공압 적용에 따른 침하량을 예측하였다.

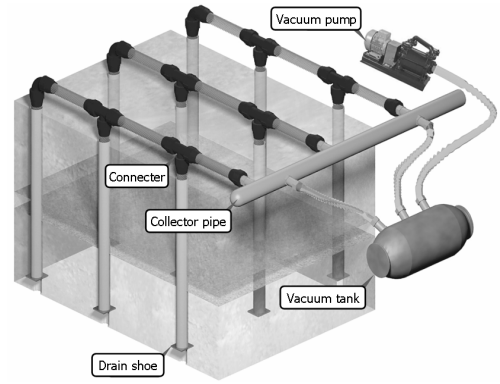


그림 2. 개별진공압공법의 개념도

## 2. 이론적 배경

### 2.1 개별진공압공법의 원리

그림 1에 개별진공압을 적용함으로써 개선될 수 있는 주요 사항을 나타냈다. 개별진공압공법은 성토하중이나 멤브레인 없이 진공압만을 이용하여 지반을 개량하기 때문에 기존의 성토재하공법과 진공압밀(대기압재하)공법의 단점들을 동시에 극복할 수 있고, 적합한 배수재를 선정 후 배수재와 진공펌프를 직접 연결하고 배수재가 타입되는 깊이를 조절하여 기밀 층의 두께를 자유자재로 조절할 수 있기 때문에 진공효율을 증가시킬 수 있다. 또한 균일한 진공압을 지반에 적용시킬 수 있기 때문에, 지반 내 부등침하 및 전단 파괴를 방지하여 시공 상에 존재하는 위험을 예방할 수 있는 것도 개별진공압공법의 장점이라 할 수 있다. 그림 2는 개별진공압공법의 개념도이다.

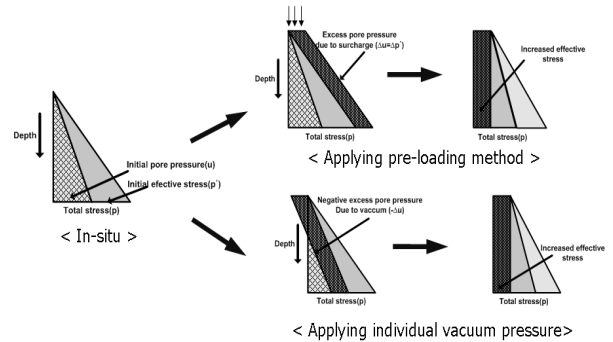


그림 3. 선행재하공법과 개별진공압밀공법의 응력변화 (김기년, 2008)

### 2.2 개별진공압공법의 지반내 응력 변화

성토재하공법과 개별진공압공법의 가장 큰 차이점은 지반내의 응력 변화로 설명할 수 있다. 김기년(2008)은 압밀이 진행되는 동안 지반내의 응력 변화를 그림 3과 같이 제안하였다. 식 (1)은 성토재하공법에서의 응력 변화를 식으로 나타낸 것이다.

$$p + \Delta p' = (p' + \Delta p') + u \quad (1)$$

여기서,  $p$  : 재하전의 전응력  
 $p'$  : 재하전의 유효응력  
 $\Delta p'$  : 압밀응력의 증가  
 $u$  : 간극수압

그림 3에 나타난 것과 같이, 성토재하공법에서는 압밀이 완료된 후 전응력은  $\Delta p'$ 만큼 증가하게 된다. 개별진공압공법은 자연 상태에서 감소시킨 간극수압의 크기만큼 압밀응력이 증가하고, 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta u = \Delta p' \quad (2)$$

식 (2)는 식 (3)과 같이 정리할 수 있다.

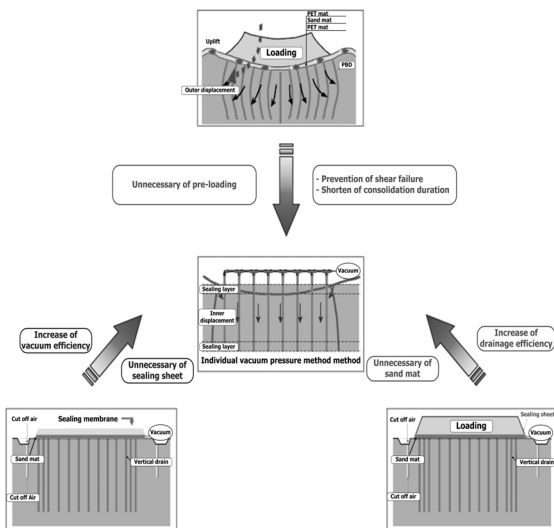


그림 1. 개별진공압의 적용에 의한 개선사항

표 1. 실내실험 조건

Test No.	변동인자				고정인자			
	단계진공압 (kPa)				USCS	재하기간 (days)	개량영역의 심도 (mm)	기밀영역의 심도 (mm)
	-20	-40	-60	-80				
Test1	1일	1일	1일	27일	CL	30	500	500
Test2	2일	2일	2일	24일				
Test3	3일	3일	3일	21일				
Test4	4일	4일	4일	18일				

표 2. 점토 시료의 지반공학특성

액성한계 (%)	소성한계 (%)	소성지수 (%)	비중	200번채 통과율(%)	USCS	압축지수 (C <sub>c</sub> )	압밀계수 (c <sub>v</sub> , cm <sup>2</sup> /sec)	투수계수 (k, cm/sec)
44.0	21.7	22.3	2.66	99.3	CL	0.27	8×10 <sup>-3</sup>	1.7×10 <sup>-7</sup>

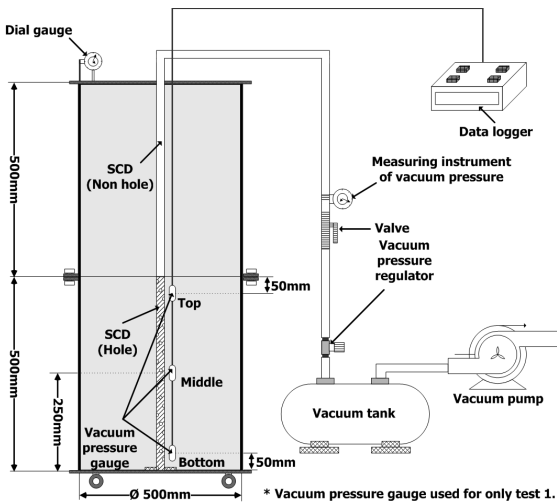


그림 4. 실내실험 모식도



그림 5. 실내실험 전경

$$p = (p' + \Delta p') + (u - \Delta u) \quad (3)$$

이 상태에서 압밀에 작용하는 응력은 모두  $\Delta p'$ 만큼 증가한다. 그러나 성토재하공법의 전응력은  $\Delta p'$ 만큼 증가하지만 개별진공압공법의 경우 전응력의 변화는 발생하지 않는다.

### 3. 실내실험

#### 3.1 조건 및 방법

본 연구에서는 실내실험을 통해 단계진공압에 따른 영향을 정량적으로 파악하고자 표 1의 조건으로 실험을 실시하였다. 단계진공압을 4단계(-20, -40, -60, -80kPa)로 분류하고, 각각의 진공압에 재하기간을 1일~4일로 다르게 하여, 개량기간에 따른 침하특성 및 실험 종료 후 깊이 및 위치에 따른 큰관입저항치와 함수비를 측정하여 단계진공압의 영향을 파악하고자 하였다.

이때 진공압 재하는 모든 실험 조건에서 침하량이 수렴되는 경향을 보인 30일까지 실험을 지속하였다. 그림 4와 5에 본 실험의 실내실험 모식도 및 전경을 나타냈다.

#### 3.2 사용된 시료의 특성

실내실험 전 이 시료에 대한 지반공학특성 물성 및 공학실험을 실시하였고, 그 결과를 표 2에 제시하였다. 본 연구에 사용된 시료는 부산○○현장에서 채취한 시료로서 액성한계는 44.0%, 소성지수는 21.7%에 해당하였으며, 통일분류법에 의해 저소성 점토로 구분되었다.

표준압밀실험 결과 본 연구에서 사용된 시료의 압축지수는 평균 0.27, 압밀계수는 8×10<sup>-3</sup>cm<sup>2</sup>/sec의 값을 보였다. 실내실험을 위한 시료조성 시에는 현장조건과 유사한 상태로 재조성하면서, 액성한계를 고려하여 완전포화체로 실험기내에 타설이 용이할 수 있도록 액성한계의 약 1.5배 높은 함수비(66%)로 교반하여 사용하였다.

### 3.3 강도 및 함수비 측정 위치

실내시험 종료 후의 개량 효율을 파악하기 위하여 콘관입 저항치와 함수비를 그림 6과 7의 위치에서 측정하였다.

연직 방향으로는 그림 6에 나타난 것과 같이 실험기 상단을 기준으로 200, 400, 500, 600, 700, 800mm의 6개 층에서 측정을 실시하였고, 수평 방향으로는 그림 7과 같이 24개 지점에서 측정하였다. 또한 이때 배수재로부터의 거리에 따라 Zone A(70mm), B(130mm), C(190mm)로 나누어 배수재와 방사 방향으로 떨어진 거리에 따른 개량 특성을 파악하고자 하였다.

표 3에 배수재로부터 방사 방향으로 측정 위치까지 떨어진 거리에 따라 구분한 영역을 나타냈다.

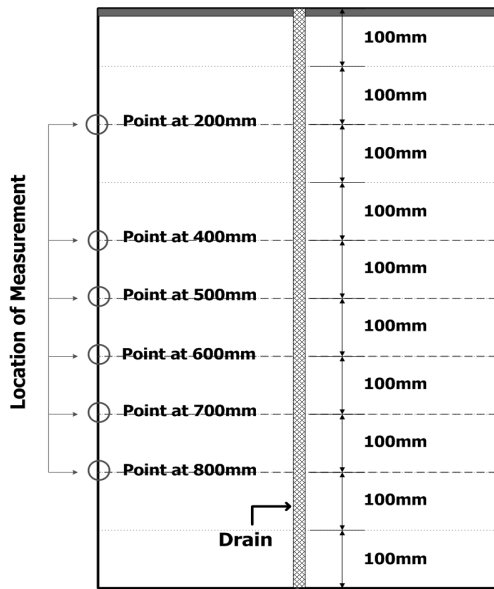


그림 6. 연직방향의 강도와 함수비 측정 위치

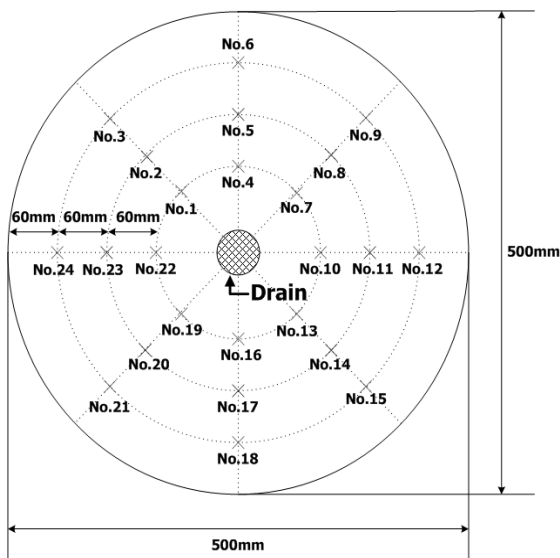


그림 7. 수평방향의 강도와 함수비 측정 위치

### 3.4 실내시험결과

#### 3.4.1 침하특성

그림 8에 단계진공압에 따른 효율을 파악하고자 Test1~4의 시간에 따른 침하 거동을 나타냈다. 실험 시작 후 약 400시간까지는 최종 진공압인 -80kPa까지 빠르게 진공압을 증가시키수록 침하량이 더 크게 나타났다. 하지만 개량기간이 증가함에 따라 Test1과 Test2의 침하량의 증가가 감소하는 경향을 보였고, 약 600시간 후에는 점차 수렴하였다. Test3과 Test4의 400시간 이후의 침하 거동은 개량 초기와 유사한 증가를 보였으며, 최종적으로는 -80kPa까지 빠르게 진공압을 증가시켰던 Test1과 Test2의 침하량을 초과하였다. 400시간까지의 침하량을 비교해보면 진공압을 최종 진공압까지 빠르게 증가시켜준 Test2>Test1>Test3> Test4의 순으로 나타났지만, 실험 종료후의 최종 침하량은 Test3>Test4>Test2>Test1로 바뀌었다. 이를 통해 단계적으로 진공압을 증가하여 장기적인 압밀 효율을 증대할 수 있다는 것을 파악할 수 있었다.

그림 9에 진공압의 증가 기간에 따른 최종 침하량과 증가 침하량을 나타냈다. 진공압의 증가기간을 1일에서 3일까지 증가한 경우에는 최종 침하량이 증가하였으나, 진공압 증가기간을 3일에서 4일로 연장시켰을 때의 최종 침하량은 감소한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 증가 침하량을 통해서 명확하게 파악할 수 있는데, 진공압 증가 기간을 연장함에 따라 추가된 침하량이 진공압 증가기간을 1일에서 2일로 연장시켰을 때와 2일에서 3일로 연장시켰을 때는 점차 증가하였지만 3일에서 4일로 진공압 증가 기간을 연장한 경우에는 감소

표 3. 배수재로부터의 거리에 따른 영역 분류

영역	측정 위치
Zone A (70mm)	No. 1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22
Zone B (130mm)	No. 2, 5, 8, 11, 14, 17, 20, 23
Zone C (190mm)	No. 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24

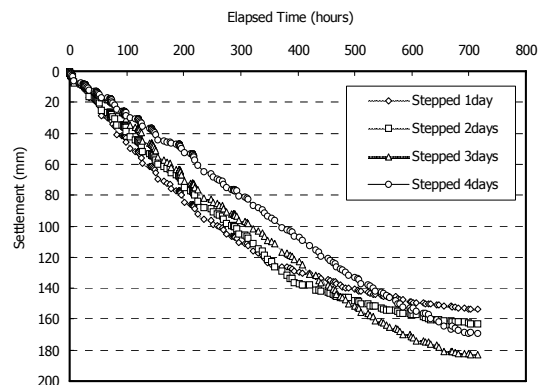


그림 8. 단계진공압에 따른 침하분포

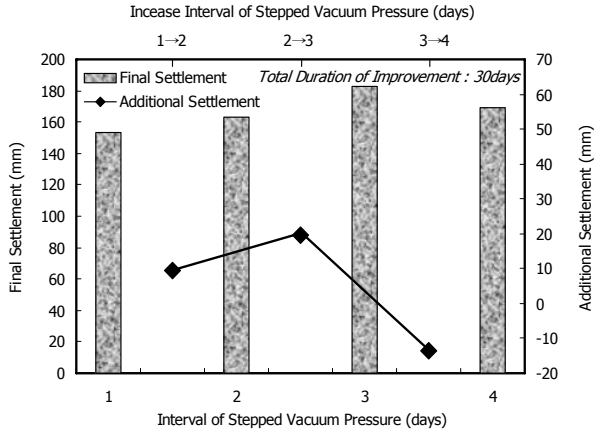


그림 9. 단계진공압에 의한 최종 및 증가 침하량

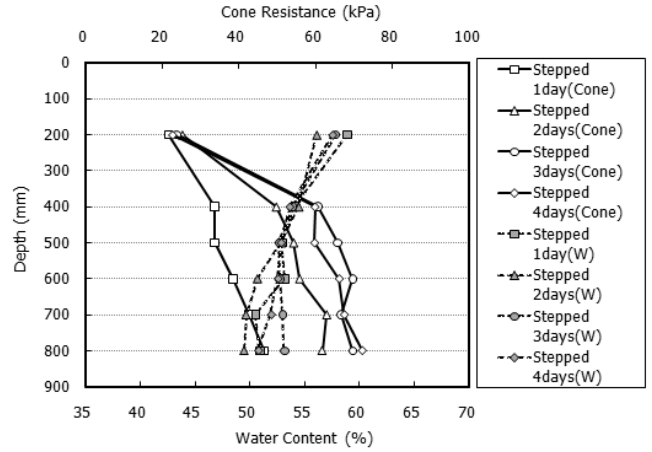


그림 11. 깊이에 따른 강도와 함수비의 변화 (Zone B, 130mm 지점)

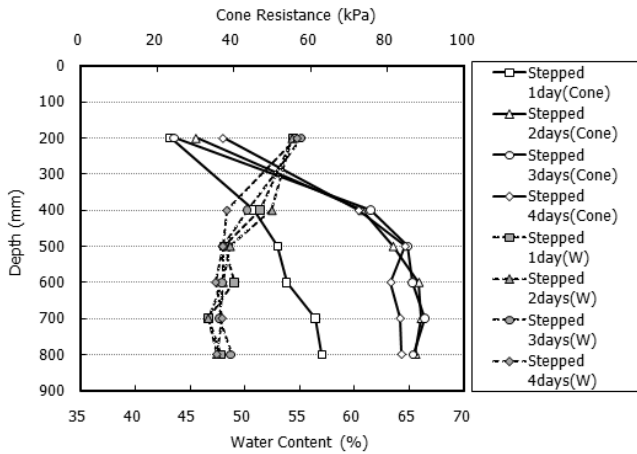


그림 10. 깊이에 따른 강도와 함수비의 변화 (Zone A, 70mm 지점)

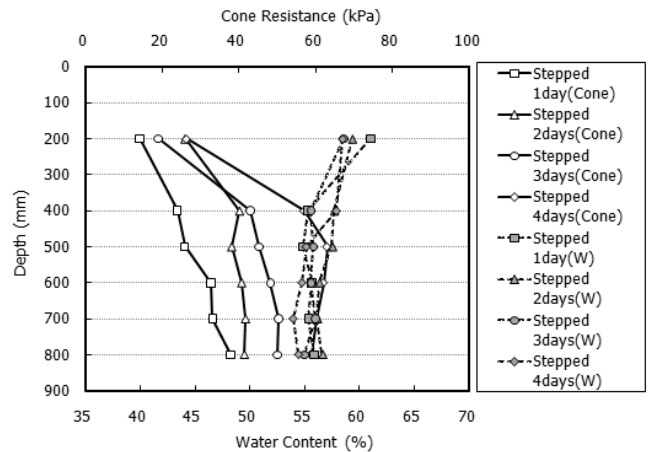


그림 12. 깊이에 따른 강도와 함수비의 변화 (Zone C, 190mm 지점)

하는 경향을 나타냈다. 이를 통해 개별진공압공법의 개량 효율을 높이기 위해 적절한 단계진공압 적용기간을 산정하는 것이 필요하다고 판단된다.

### 3.4.2 강도 및 함수비 특성

그림 10~12는 단계진공압에 따른 강도 증가 및 함수비 변화를 배수재의 깊이 및 배수재와의 거리에 따라 나타냈다. 모든 실험 조건에서 강도 증가 현상과 함수비 감소 현상은 깊이가 깊어지고 배수재에 가까울수록 크게 나타났다. 이러한 경향은 방사배수 압밀 실험에서도 확인할 수 있다(윤찬영 외, 2008). 배수재와의 거리가 가까운 Zone A의 강도 증가 및 함수비 감소 경향은 Test1~4의 실험 조건에서 유사한 경향을 나타냈으며, 값의 차이도 미미하였다. 특히 개량영역에서의 개량효과가 뚜렷하게 나타났다. Zone B의 경우에는 3일 간격으로 진공압을 증가시켜준 Test3의 강도 증가가 가장 크게 나타났으며, 1일 간격으로 최종 진공압인 -80kPa까지 진공압을 증가한 Test1의 강도가 가장 낮게 나타났다.

표 4. 단계진공압 기간에 따른 개량효율

영역	개량효율
Zone A	Test1 ≃ Test2 ≃ Test3 ≃ Test4
Zone B	Test3 ≃ Test4 > Test2 > Test1
Zone C	Test4 > Test3 > Test2 > Test1

Zone C에서는 진공압을 증가시킨 간격이 증가할수록 강도 증가가 크게 나타났다. 이를 통해 진공압 증가 기간이 증가할수록 개량 범위가 증가한다는 것을 파악하였다. 단계진공압 기간에 따른 강도 및 함수비 증가 특성을 크기에 따라 표 4에 제시하였다.

### 3.4.3 최종 침하량의 예측 및 단계진공압 적용기간 산정

Monden(1963)은 방사형 압밀이론에서  $U_h$ 가  $T_h$ 의 함수임을 고려하여  $T_h$ 의 관계식으로 변형했을 때,  $U_h$ 와  $\ln(1-U)$ 가 1차원 함수의 관계를 이용하여, 임의의 시간  $t_i$ 에서의 압밀도  $U_i$ 를 가정하고 각 측정치( $t_j, U_j$ )가 직선관계를 갖도록

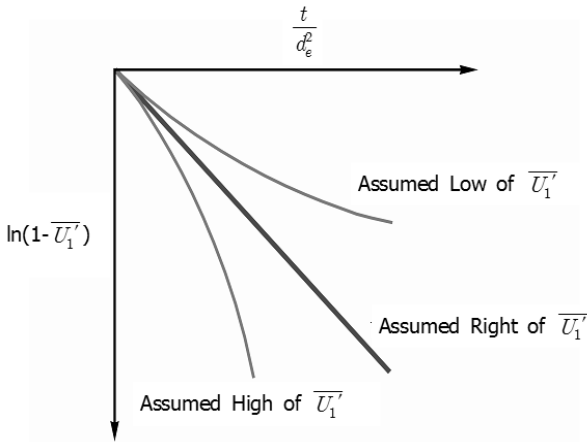


그림 13. Monden의 시산법(Monden, 1963)

반복하는 시산법을 통한 최종침하량 산정방법을 제시하였다 (식 (4)).

$$U_h(z, T_h) = 1 - \exp\left(\frac{-8T_h}{F}\right)$$

$$1 - U_h = \exp\left(\frac{-8T_h}{F}\right) \quad (4)$$

$$-\frac{8T_h}{F} = \ln(1 - U_h)$$

본 연구에서는 Monden의 시산법에 의해 각 실험의 최종 침하량을 예측하여, 시간의 경과에 따른 압밀도를 파악하고자 하였다. Monden의 시산법을 적용하기 위해서는, 임의의 시간  $t$ 에 대한 압밀도  $U_i$ 를 가정하여야 하며, 가정된 압밀도를 이용하여 시산법으로  $t/d_e^2$ 과  $\ln(1 - U_i)$ 의 관계에서 가장 직선성이 큰 압밀도에 대해서 회귀직선을 결정한다(그림 13).

이렇게 결정된 압밀도  $U_i$ 를 이용하여 식 (5)로 최종 침하량을 예측한다.

$$U_i = \frac{S}{S_f} \times 100(\%) \quad (5)$$

여기서,  $U_i$  : 압밀도  
 $S$  : 실측 침하량  
 $S_f$  : 예측된 최종 침하량

각 조건에서 결정된 압밀도를 이용하여 각 진공압 단계별 (-20, -40, -60kPa)로 분류하여 표 5에 나타냈다.

그림 14는 각 단계진공압에 따른 압밀도와 적용기간의 관계를 나타낸 것이다. 산정된 압밀도 분포를 바탕으로 각 단계진공압 조건에서 발생하는 압밀도의 변화가 감소되어 수렴하는 부분의 연장성과 적용초기에 발생된 압밀도 곡선의 연장선이 만나는 점을 압밀효과가 가장 높은 적용기간으로 가정

표 5. 진공압 적용기간에 따른 압밀도

적용기간(일)	압밀도 (%)		
	-20kPa	-40kPa	-60kPa
0	0	0	0
1	30.22	21.54	24.71
2	39.58	43.14	47.13
3	41.03	52.11	54.58
4	42.63	59.74	58.37

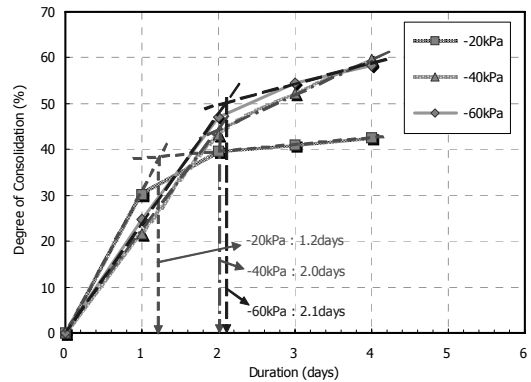


그림 14. 단계진공압 기간과 압밀도의 관계

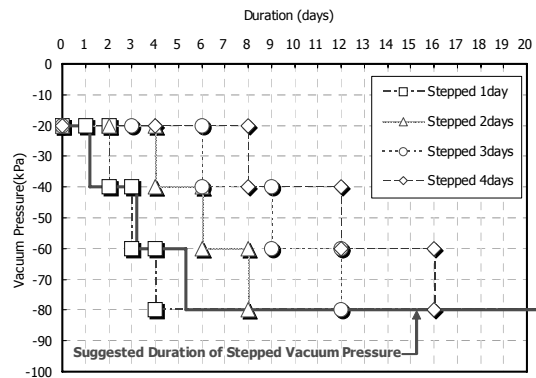


그림 15. 본 연구에서 제안한 단계진공압 기간

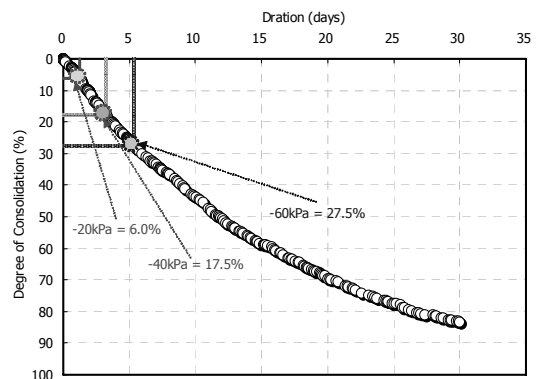


그림 16. 제안한 단계진공압 기간에 의한 압밀도

하였다. 그 결과 각 진공압 단계에 따른 적용기간은 -20kPa→1.2일, -40kPa→2.0일, -60kPa→2.1일로 나타났다. 그림 15에 실험 조건별 적용기간과 그림 14를 통해 산정한 적용기간을 비교하였다.

그림 16은 제안된 최적 단계진공압 적용기간에 따른 압밀도를 나타낸 것이다. 이때 제안된 최적 단계진공압 적용기간에 따른 압밀도는 -20kPa→약6.0%, -40kPa→약17.5%, -60kPa→약27.5%로 나타났다. 이를 통해 압밀도로 단계진공압 적용기간을 예측하여 단계적으로 진공압을 조절하면, 개별진공압공법의 효율을 증가시킬 수 있다고 판단된다.

#### 4. 수치해석

##### 4.1 수치해석개요

개별진공압공법 적용시 개량지반의 효과적인 해석을 위해 배수재와 점토부를 각각 모델링하는 기법을 적용하여 해석의 신뢰성을 높이고, 개별적인 유한요소 생성의 번거로움을 줄이기 위해 개량영역 내에서 진공압과 배수재 파라미터를 입력하면 요소가 자동으로 생성되어, 깊이별 진공압의 손실을 고려하고자 하였다.

본 연구에서는 지반의 등방변형을 고려할 수 있는 Modified Cam Clay 이론을 바탕으로 깊이별로 손실된 진공압을 각 배수재 요소에 직접 입력할 수 있는 유한요소해석 프로그램을 사용하였다(그림 17). 깊이별 손실량을 직접 배수재에 입력함으로써 현장여건을 가장 가깝게 구현할 수 있고, 배수재를 Bar 요소로 모델링하여 요소개수를 최소화하고 면요소로 작성하였을 경우 경계면의 진공압차가 발생하는 것을 방지하여 적분오차를 최소화할 수 있다는 장점이 있다. 또한 Hansbo(1981)의 방사형 압밀 이론을 적용하기 위해 Hird 등(1992)이 제안한 이론을 사용하였다.

##### 4.2 수치해석조건

실내실험의 침하량과 수치해석의 침하량을 비교하고자 수치해석시 모든 조건은 실내실험조건과 동일하게 적용하였으며, 예상 경화영역은 70mm(배수재 필터와의 거리)로 적용하

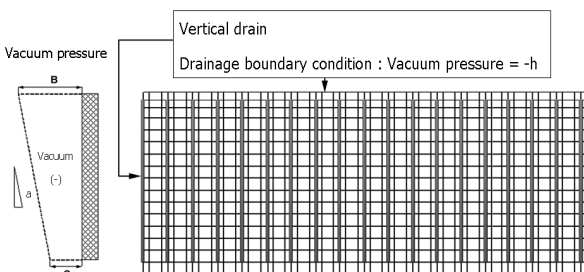


그림 17. 배수재의 Bar 요소 모델링

였다. 실내실험의 경우에는 기밀층을 포함한 개량영역의 깊이가 1m로 짧고, 실내실험 결과를 통해서도 진공압의 손실은 거의 나타나지 않았기 때문에, 배수재 내부에서의 진공압 손실은 없는 것으로 가정하였다.

##### 4.3 수치해석결과

그림 18~21은 단계진공압에 의한 실험결과와 수치해석결과를 나타낸 것이다. 수치해석시 각각 실제 진공압 적용기간을 입력하였으며, 나머지 조건은 모두 동일하게 설정하였다. 수치해석에 의해 예측된 최종 침하량과 실측결과가 매우 유사한 것으로 나타났다. 하지만 단계적으로 개별진공압을 증가시켜준 초기의 침하량 급증현상은 해석결과에서 더 크게 나타났다. 이러한 경향의 차이는 수치해석 모델의 민감도에 의한 영향으로 실제로 압밀이 진행되면서 Clogging 및 경화영역 발생 등의 침하저감요인에 의한 영향을 해석적으로 예측하지 못하였기 때문에 나타난 결과라고 판단된다. 전반적으로 모든 해석결과에서 실측결과에 근접한 예측결과를 보이고 있음을 알 수 있었다.

그림 22는 실내실험을 통해 제안된 단계 진공압 적용기간에 대한 검증을 실시하기 위해 그림 18~21의 침하량 예측결과와 본 연구를 통해 제안한 단계 진공압 적용기간으로 해석한 침하량을 비교하였다. 제안된 단계 진공압 적용기간의 예

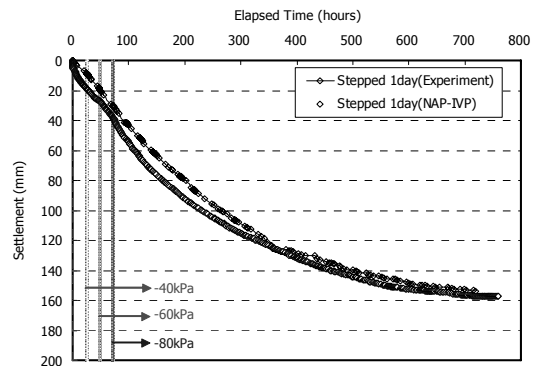


그림 18. 단계진공압기간이 1일일 때의 침하량

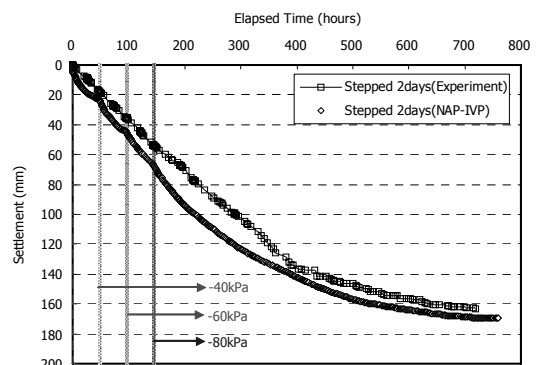


그림 19. 단계진공압기간이 2일일 때의 침하량

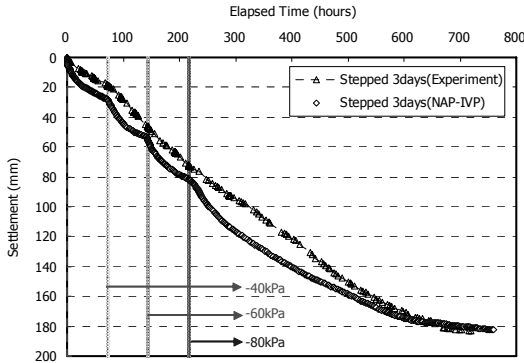


그림 20. 단계진공압기간이 3일일 때의 침하량

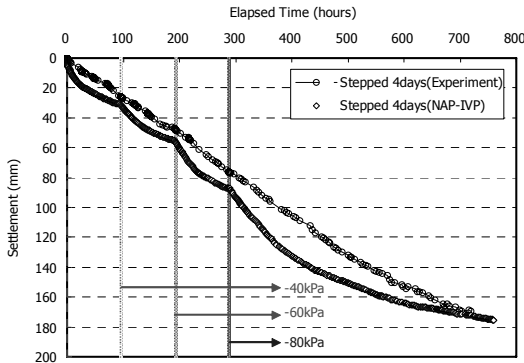


그림 21. 단계진공압기간이 4일일 때의 침하량

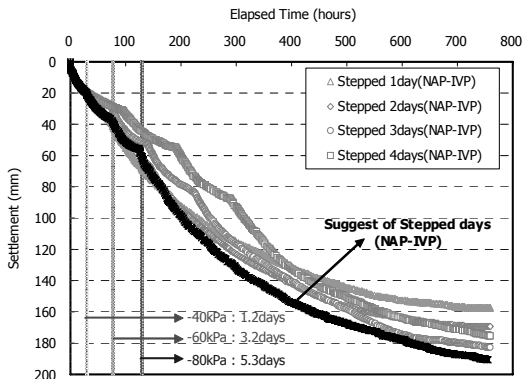


그림 22. 본 연구에서 제안한 단계진공압기간에 의한 수치해석결과(침하량)

측 침하량과 실측 침하량을 비교한 결과, 다른 실험결과에 비해 더 큰 침하가 발생하는 것을 알 수 있었다. 이를 통해 단계진공압의 적용 기간에 따라 침하양상이 변화하는 것을 확인하였다.

## 5. 결론

본 연구에서는 단계진공압에 의한 개별진공압공법의 개량 효율을 파악하고자 실내실험 및 수치해석을 실시하였고, 다음의 결론을 얻었다.

1. 단계진공압 기간이 1일에서 3일까지 증가한 경우에는 침하량, 강도, 함수비를 통해 파악한 개량효율도 함께 증가하였지만 3일에서 4일로 증가시켰을 때는 개량효율이 감소하는 것을 알 수 있었다. 이를 통해 개별진공압공법의 개량 효율을 높이기 위해 적절한 단계진공압 적용기간을 산정하는 것이 필요하다고 판단된다.
2. 실내실험을 통해 압밀도에 의한 최적의 적용기간을 파악하였고, 단계 진공압 적용기간을 산정할 경우, 각 단계별 압밀도를 기준으로 이에 해당하는 기간을 산정해야 한다는 것을 파악하였다.
3. 수치해석결과는 실내실험결과에 비해 초기에는 침하량을 과대평가하였지만, 시간이 경과함에 따라 유사한 경향을 나타냈다. 이를 통해 깊이별로 손실된 진공압을 고려하여 타당한 예측치를 제시할 수 있다고 판단된다.

## 참고문헌

1. 김기년(2008), 「석션보드드레인 공법에서 하드닝 존을 고려한 압밀 침하 해석」, 한양대학교 박사학위논문.
2. 윤찬영·천성호·정충기·이원택(2008), “방사배수 압밀 중 위치별 간극수압 측정을 통한 투수계수와 관련물성치의 결정방법”, 「대한토목학회논문집」, 28(1C): 9~17.
3. 이상일(2007), 「Suction drain method에서 진공압 적용기간에 따른 개량효과에 관한 기초적 연구」, 한양대학교 석사학위논문.
4. Hansbo S. (1981), “Consolidation of Fine-Grained Soils by Prefabricated Drains”, *Proc. 10th Int. Conf Soil Mech. Found Eng, Stockholm, Sweden*, 3: 677~682.
5. Hird, C. C., Pyrah, I. C., Russell, D. (1992), “Finite Element Modelling of Vertical Drain Beneath Embankments on Soft Ground”, *Geotechnique*, 42(3): 499~511.
6. Monden H. (1963), “A New Time fitting Method for the Settlement Analysis of Foundation on Soft Clays”, *Memoir Faculty of Engineering, Hiroshima University*, 20(1): 21.