

새로운 진공압밀공법

조삼덕*, 김주형*¹

1. 서론

흙의 간극수압 감소를 유도하여 지반내의 유효응력을 증가시키고 그 응력 증가분을 압밀압으로 사용하는 방법을 중립응력저하공법이라고 하는데, 진공압밀공법은 중립응력저하공법의 한 방법으로 스웨덴의 Kjellman이 1950년대에 최초로 지하수위 변동 없이 지반내의 간극수압을 저하시켜 압밀을 촉진시키는 방법을 제안한 바 있다. 이 방법은 연약 점토층의 압밀을 촉진하기 위하여 연약지반을 진공상태로 만들고 대기압에 의한 하중을 작용시켜 연약지반에 관입된 연성주름관을 통하여 간극수를 빨아들이는 방법이다. 이러한 과정을 통해서 지중의 간극수가 정수위 아래로 저하되면서 기존 성토시공시 발생할 수 있는 전단파괴가 발생하지 않고 압밀침하를 유발시킬 수 있다. 이와 같은 진공압밀공법은 그림 1에 나타난 지중의 응력변화상태로 설명할 수 있는데, 성토하중으로 인한 유효응력의 증가대신 전응력을 유지하면서 간극수압의 감소로 유효응력을 증가시키는 방법이다.

그림 2는 일반적인 진공압밀공법의 설치 단면도를 나타낸 것이다. 우선 연직배수재를 개량하고자

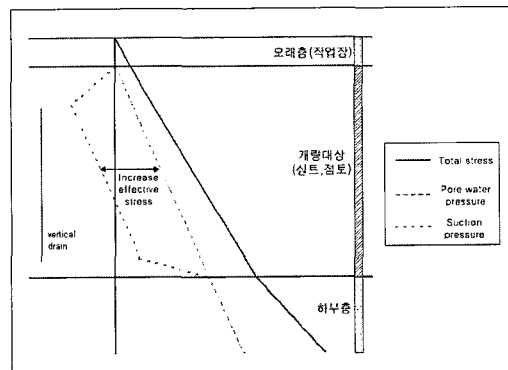


그림 1. 진공압밀공법의 원리

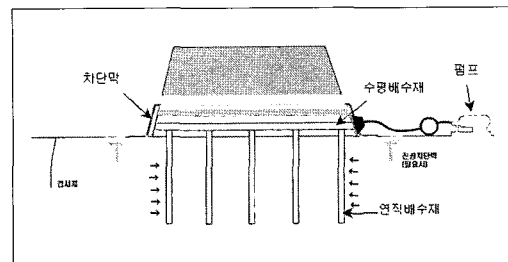


그림 2. 진공압밀공법 단면도

하는 지반에 설치하고 수평배수를 위한 수평배수재와 샌드매트를 시공한 후 수평배수재가 연결된 펌프에서 부압이 새어나가는 것을 방지하기 위해 상부에 차단막을 설치한다. 이 방법을 이용하면 처리하고자 하는 초연약지반 및 고함수비 상태의 지반에서 등방압밀효과로 깊은 심도까지 개량할 수 있다. 또한 시

* 한국건설기술연구원 수석연구원(sdcho@kict.re.kr)

*¹ 한국건설기술연구원 선임연구원(haitink@kict.re.kr)

공성이 양호하며 급속성토가 가능하고 2차 압축침하의 일부도 감소시킬 수 있다. 특히, 균등한 응력분포로 압밀침하를 발생시키므로 공기를 단축시킬 수 있고 전단파괴의 우려가 없으므로 선행압밀공법보다 품질관리가 용이하다.

현재 국내에서는 여러가지 장점이 있는 진공압밀공법 시공 사례가 증가하고 있는 추세인데 진공압밀공법 적용시 공통적인 문제점으로 제시되고 있는 것은 차단막에 의한 기밀상태가 불충분하여 진공상태 유지가 잘 되지 않는다는 것이다. 일반적으로 70kPa정도의 대기압으로 4.5m정도의 성토를 대신할 수 있는데, 시공 품질에 따라서는 완전한 기밀성을 확보하지 못해 요구되는 압력이 다 발휘되지 못하는 경우가 있다.

이와 같은 문제점들을 해결하기 위해 새로운 진공압밀공법이 개발되어 왔는데, 네덜란드에서 개발된 굴착형 진공압밀공법과 네덜란드와 일본 등에서 개발된 캡(cap)형 진공압밀공법이 바로 그것이다.

2. 새로운 진공압밀공법

2.1 굴착형 진공압밀공법

굴착형 진공압밀공법은 특수장비를 이용하여 진공압밀 배수시스템을 설치하는 공법으로 기존의 진공압밀공법을 개량한 공법이다. 이 공법은 연약점토 지반의 상부에 일정깊이로 홈을 굴착하여 배수시스템을 설치하는데 그림 3에 나타낸 것과 같은 특수장비를 이용하는 것이 본 공법의 특징이다.

그림 3에 나타낸 특수장비는 기존 플라스틱드레인보드(PDB) 설치 장비를 개량한 장비로 지반에 홈을 굴착할 수 있는 쟁기(plough) 형태의 장치가

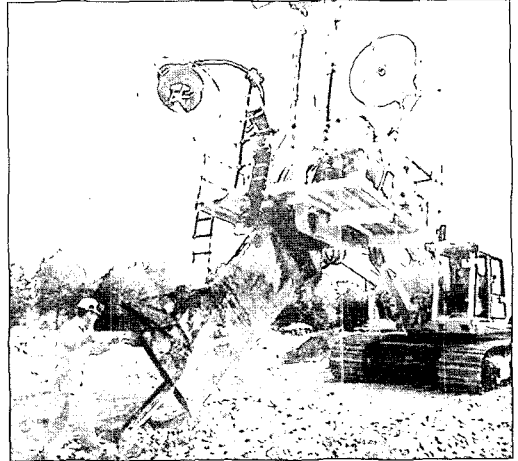


그림 3. 굴착형 진공압밀공법 설치 장비

부착되어 있으며, 연직배수재와 수평배수재를 동시에 설치할 수 있는 장비가 함께 장착되어 있다. 시공 순서는 먼저 쟁기형태의 장치를 이용하여 그림 4와 같이 지표면으로부터 약 3m 깊이로 연약점토지반의 상부까지 홈을 굴착한 후 일정 간격으로 연직배수재를 설치하고, 연직배수재 위에 그림 5와 같은 수평배수관을 설치한다. 이와 같은 일련의 과정은 앞서 소개한 특수장비를 이용하여 한번에 순차적으로 진행하기 때문에 시공속도는 매우 빠른 것으로 알려져 있다. 굴착형 진공압밀공법은 시공 후 수평배수재 주변 지반의 점토층이 자연적으로 허물어져 수평배수재를 덮어주기 때문에 지오멤브레인과 함께 막을 형성하여 진공압밀시스템을 이루는 것이 큰 특징이라고 할 수 있다. 대표적인 굴착형 진공압밀공법으로는 네덜란드에서 개발한 BeauDrain 등이 있다. 그림 6은 굴착형 진공압밀공법의 설치 과정을 나타내는 지반 단면을 나타낸 것이다.

굴착형 진공압밀공법은 주로 네덜란드에서 많이 시공되고 있는데, 그림 7은 네덜란드 Zevenhuizen 지역에서 수행한 굴착형 진공압밀공법의 적용 결과

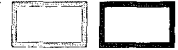


그림 4. 지반 굴착

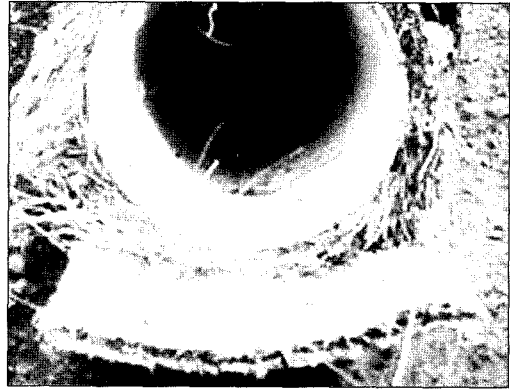


그림 5. 수평배수관

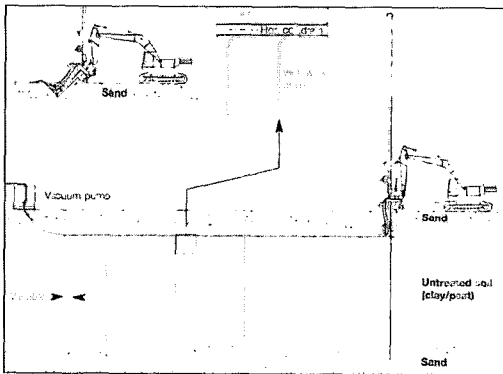


그림 6. 굴착형 진공압밀공법 설치 단면

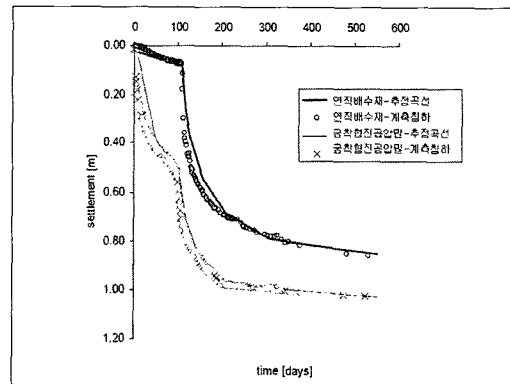


그림 7. Zevenhuizen 지역의 압밀침하 결과 (Nooy 등)

를 나타낸 것이다. 이 지역에서는 동일 지반 조건에서 두 지역으로 나누어 한 지역은 연직배수재만을 설치하였고 다른 한 지역은 굴착형 진공압밀공법시스템을 적용하였다. 두 지역의 초기 성토고는 1.5m이었으며, 시공이 시작된 지 100일 후에는 두 지역 모두 3m까지 성토를 수행하였다. 그림 7에도 나타나 있듯이 연직배수재만 설치한 지역보다는 굴착형 진공압밀공법을 설치하여 운영한 지역의 압밀침하가 훨씬 빠르게 진행된 것을 알 수 있다.

그림 8은 Zevenhuizen 지역에서 연직배수재만 설치한 지역(오른쪽)과 굴착형 진공압밀공법이 설

치된 지역(왼쪽)의 현장사진을 나타낸 것이다. 그림 7의 결과에서 나타낸 것과 같이 연직배수재만 적용한 오른쪽 지반보다 굴착형 진공압밀공법을 설치한 왼쪽의 지반이 더 많이 침하한 것을 알 수 있다. Zevenhuizen 지역에서 굴착형 진공압밀공법에 대한 펌핑은 시공시작 후 206일만에 중지하였으며, 시험자료를 근거로 역해석을 수행한 결과 총대기압의 50%정도 즉 50kPa정도의 압력이 추가 성토에 해당하는 것으로 판단되었다.

또한 네덜란드 Bodegraven과 Alphen a/d Rijn을 연결하는 고속도로 지역에 굴착형 진공압밀공법



그림 8. Zevenhuizen지역의 침하 사진 (Nooy 등)

이 적용된 사례가 있다. 이 지역의 지층은 매우 연약하고 압축성이 큰 유기질토와 점토로 구성되어 있으며, 단단한 모래층은 지표에서 약 8~9m 아래에 위치하고 있다. 유기질토와 점토의 비배수전단강도는 5~10kPa 정도로 매우 연약하며 유기질토의 단위중량은 11kN/m^3 이고 점토는 15kN/m^3 이다. 성토를 시공하는 지역 바로 옆에는 10m 폭의 운하가 위치하고 있어 고성토로 인해 예상되는 지반의 침하량이 2~3m 정도로 지반의 전단파괴가 우려되는 지역이다. 따라서 이 지역에서는 지반의 전단파괴의 우려가 없는 진공압밀공법을 선택하였으며, 그 중 굴착형 진공압밀공법을 적용하였다. 이 지역에서는 굴착형 진공압밀공법을 적용하기 위해 기존 성토시공을 통해 계측된 결과를 분석하여 굴착형 진공압밀공법 적용시 지반의 침하량 그리고 펌핑시간을 결정하였다.

시공과정은 우선 장비의 주행성 확보를 위해 1.0~1.5m 정도의 모래층을 시공하고 1m 간격으로 연직배수재를 설치하였다. 또한, 실제 성토 결과와 굴착형 진공압밀공법 적용 도중 계측된 침하자료를 역해석하여 진공압밀공법의 펌핑 종료시간과 필요한 유효부압을 평가하였다. 본 지역에서 계측한 자료를 이용하여 그림 9와 같은 응력-변형을 곡선을

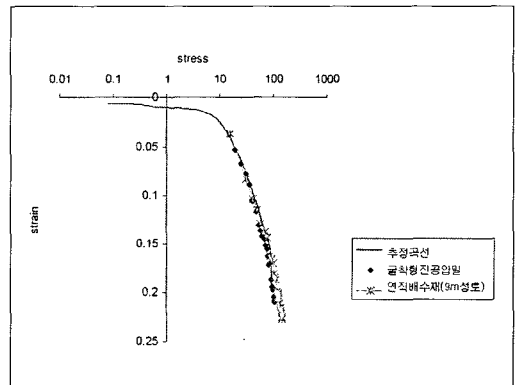


그림 9. 굴착형 진공압밀공법과 일반 연직배수공법 지반의 응력-변형을 관계 (Nooy 등)

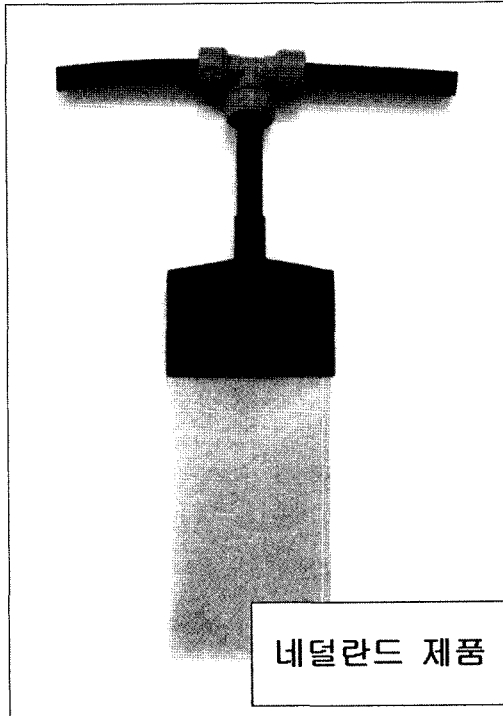
언어 해석한 결과, 선행압밀공법과 동일한 효과를 내기 위한 유효부압은 약 50kPa 정도이고, 120일 정도 펌핑을 유지한 후에 진공압밀공법을 종료한 결과 약 9m 정도의 성토를 시공하여 2~3m 정도의 침하를 유발시킨 기존의 선행채하공법과 동일한 결과를 나타내었다.

2.2 캡형 진공압밀공법

캡형 진공압밀공법 역시 기존의 진공압밀공법 적



일본 제품



네덜란드 제품

그림 10. 캡형 진공압밀공법에 사용되는 캡, 배수재, 연결호스

용시 문제가 되는 지오멤브레인 차단막의 기밀성 유

지 확보를 위해 개발된 진공압밀공법이다. 캡형 진공압밀공법은 연직배수재 상부에 캡을 씌우고 호스로 상부의 수평관과 연결시키고 수평관과 펌프를 연결시켜 지반의 간극수를 배출하는 방법으로 현재까지 개발된 제품으로는 그림 10에 나타난 것과 같은 일본의 캡부착 진공압밀공법과 네덜란드의 Beau-Drain-S 등이 있다. 이 공법은 종래의 공법과 비교해 현지 작업이 비교적 간단해 시공 비용을 절감시키고 공사 기간을 단축시키는 장점이 있다.

그림 11은 캡형 진공압밀공법의 시공 단면도를 나타낸 것으로 캡형 진공압밀공법의 시공은 먼저 공장 제작 단계에서 소정 길이의 배수구에 배수 호스 캡을 설치하고 롤 모양으로 현장에 반입한 후 이 롤을 배수구 타설기에 부착시켜 타입하고 지표면에 나온 배수 호스를 개별적으로 지상의 집수관에 설치해 진공 펌프에 연결한다. 캡형 진공압밀공법의 경우 기존의 진공압밀공법 시공시 기밀성을 유지하기 위한 지오멤브레인 차단막이나 샌드매트 등의 수평배수재는 사용하지 않는 것이 특징이다. 진공 펌프는 약 50~70kN/m² 정도의 부압을 이용하여 캡 하부의 연약지반 내의 물을 흡입하여 압밀을 진행한다. 그림 12와 그림 13은 캡형 진공압밀공법의 현장시공 사진을 나타낸 것이다.

캡형 진공압밀공법은 여러가지 장점이 있는데 이를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 캡과 배수 호스를 조립한 상태에서 작업하기 때문에 현장 작업을 최소화 할 수 있다.
- 2) 압밀촉진 효과가 우수하여 연약지반 개량공사 기간을 상당기간 단축할 수 있으며, 공사비는 약 10% 절감이 가능하다.
- 3) 종래 공법으로는 시공이 곤란했던 표층이 두꺼운 모래층이 있는 지반이나 수면 아래의 시공에 효과적이다.

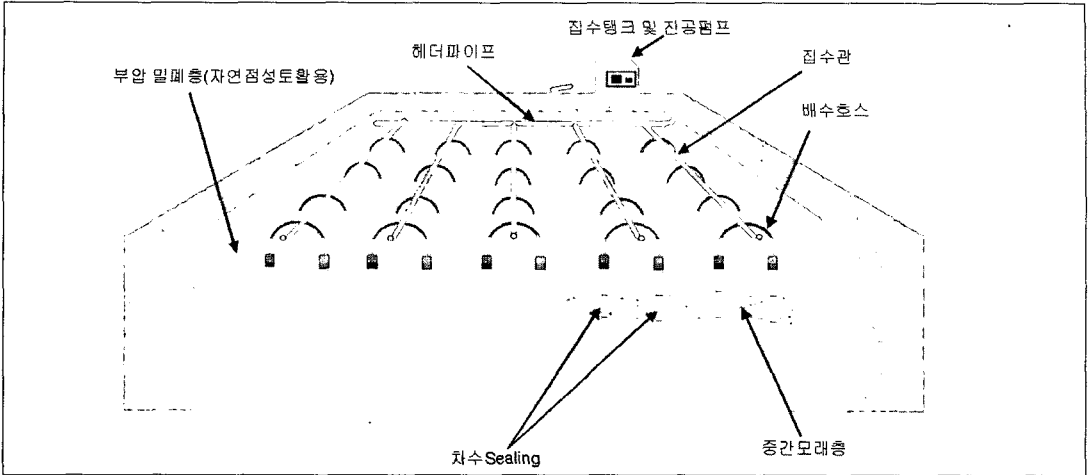


그림 11. 캡형 진공압밀공법의 시공단면도

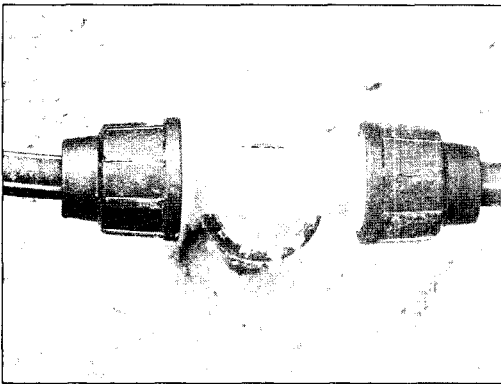


그림 12. 캡형 진공압밀공법의 현장 시공사진 (1)

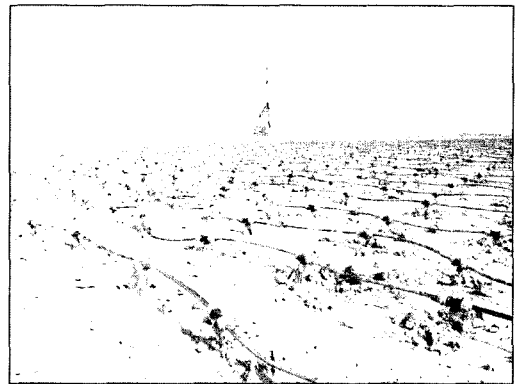


그림 13. 캡형 진공압밀공법의 현장 시공사진 (2)

- 4) 진공압밀공법의 단점이었던 기밀성 유지가 우수하며, 개별 배수재에 진공압이 작용하여 개량효과가 우수하다.
- 5) 성토 속도를 높일 수 있어 압밀촉진 및 공기 단축의 효과가 우수하다.
- 6) 상부 수평배수층(Sand mat)이 필요 없다.
- 7) 수평배수층에서 Back-pressure 작용을 하여 배수효과를 감소시키는 간극수의 영향이 없어 압밀촉진이 우수하다.

- 8) 멤브레인 차단막이나 시멘트 등의 화학적인 고화재를 전혀 사용하지 않기 때문에 환경이나 수질 오염 등 자연의 생태계를 파괴하는 일 없이 시공이 가능하다.

이와 같은 여러 장점이 있는 캡형 진공압밀공법은 최근 유럽을 비롯해 동남아, 일본 등지에서 이미 시공되었거나 또는 시공 중에 있는데, 대표적으로 태국의 Suvarnabhumi 국제공항에서는 약 420,000m² 시



공된 사례가 있으며, 일본의 경우 徳山항에서 약 11,700m², 야마구치시 가와니시 정수센터건설공사 등에서는 약 13,000m²의 면적에 시공된 사례가 있다.

3. 맺음말

본 기사에서는 국외에서 기존의 진공압밀공법의 문제점들을 최소화하여 새롭게 개발된 진공압밀공법의 시공방법과 적용사례를 소개하여 국내 현장 실무자들이 참조할 수 있도록 하였다. 여기에서 소개된 공법들은 현재까지 국내 시공실적이 없으므로 향후에 국내에 이 기술을 도입하는 경우 시험시공 등을 수행하여 시공 후 개량효과, 시공시 문제점 등을 먼저 검증한 후 실제 현장에 적용하도록 하여야 할 것이다.

참고문헌

1. <http://www.beaudrain.nl>.
2. <http://www.cofra.com/uk/cofra/index-uk.htm>.
3. http://www.pentaocean.co.jp/business/technology/doboku_03/doboku_3.html.
4. <http://www.sangjee-menard.co.kr/menard/method2.html>.
5. Nooy van der Kolff A.H. , Spierenburg S.E.J. and Mathijssen F.A.J.M., BeauDrain: A New, Innovative Consolidation System Based on the Proven Concept of Vacuum Consolidation, pp.1-11.
6. 한국지반공학회(1995), 연약지반, 지반공학시리즈 6, pp. 368-378.

- 국제 토질 및 지반공학회(ISSMGE) 회원등록 안내 -

현재 국내의 경제규모와 국제적 위상을 생각한다면, 국내 지반공학자들의 국제 활동참여율이 부족한 실정입니다(표 1참고). 이를 위해, 본 학회에서는 1)ISSMGE 회원참여율 증대, 2)각 Technical Committee 활동 지원, 3)아시아지역 국제학회 유치, 4)세부 학문분야별 조인트 세미나 개최 등을 추진하고 있습니다. 국내 지반공학의 발전을 위하여, 회원분들의 ISSMGE 입회를 부탁드립니다.

ISSMGE 입회비용 : 22.20 CHF (≒18000원)

ISSMGE 입회방법 : ISSMGE 공식 홈페이지 참고 (www.issmge.org)

	아시아						유럽	북미	남미	아프리카	오세아니아
	한국	일본	홍콩	인도	기타	총계					
회원(명)	171	1415	508	225	1049	3368	7151	2818	973	503	1077