

최근 일본의 고압진공펌프를 이용한 지하수위저하기술과 지반개량 및 토양정화기술에의 활용에 대해서



Ozaki Tetsuji
(유)아사히테크노
(ozaki@nbh.co.jp)



Takahashi Shigeyoshi
(유)아사히테크노 사장



신창범
(주)지중공영 대표이사
(jjiiong@hanmail.net)



김재영
(주)엠코 토목설계팀
(geokimjy@korea.com)

1. 머리말

건설현장에서는 공사현장의 시공성과 안전성, 작업여건 개선을 위해 지하수처리 또는 수위저하를 목적으로 웰포인트(강제배수), 딥웰(중력배수), 진공딥웰(중력배수+강제배수) 등을 사용해오고 있다. 그러나 대부분이 투수계수가 큰 사질지반 등에서 제한적으로 적용되고 있으며, 또한 Log곡선 형태의 수위곡선을 나타내기 때문에 주변 지반의 부등침하영향 등 수위관리가 어렵고, 영향범위가 작아 대량으로 설치해야 하는 등 개선이 필요한 실정이다. 한편 최근 일본의 경우, 고압진공펌프를 이용하여 강력한 양수능력을 바탕으로 지하수양수공법을 지반개량이나 토양정화 기술로도 이용하고 있다.

따라서 본 기사에서는 진공흡인력을 이용하여 지하수의 집수능력을 중력배수의 경우에 비해 2~20배 이상의 양수 능력으로 대폭 개선한 슈퍼웰포인트공법(SWP공법,

Super Well Point)의 적용사례를 소개하고, 실내시험과 수치해석을 통한 검증결과를 보여주고자 한다.

진공효과를 이용한 웰포인트공법 및 각종 대기압 공법에는 지상에 흡인펌프가 설치되어 있어, 그 흡인 효과는 깊이가 GL-6.0m전후로 지반에 대한 진공 효과는 $P_v \approx -0.025\text{MPa}$ 정도이다. 이에 비해 슈퍼웰포인트공법은 우물정내에 양수펌프를 설치하므로 배출과정에서 진공효과를 사용하지 않고 모든 진공 에너지가 지중에 작용하도록 구성되어 있기 때문에 그 효과는 $P_v \approx -0.085\text{MPa}$ 로 상당히 높은 진공효과가 지속적으로 발휘 가능하다. 또한, 적용심도에 대해서도 양수펌프 능력이 GL-300m의 범위로 높은 진공력을 전달할 수 있다.

우선 슈퍼웰포인트공법은 지하수에 높은 진공압을 작용시키기 때문에 집수능력이 탁월하게 높아진 점이 획기적이라 할 수 있다. 최근에는 우물정내의 공기뿐만 아니라 우물정 주변 지반중의 공기를 흡인, 감압할 수 있기 때문에 이

두가지의 효과가 동시에 발휘 가능한 점도 확인되었다. 첫째는 진공상황에서는 연약지반의 수분기화가 촉진되어 넓은 범위로 입밀이 촉진되는 것이고, 둘째는 오염토양으로부터 VOCs(휘발성 유기화합물)의 회수가 가능한 점이다. 고진공에 의한 흡인효과로는 중력배수가 곤란한 Marine Clay(해성점토, $k=\alpha \times 10^{-8} \text{cm/sec}$)와 같은 점토도 압밀탈수가 가능하고, 우물정 손실이 적기 때문에 동수구배가 Log곡선의 수위곡선이 직선구배로 변화하며, 토류벽 주위의 수위도 저하되지 않는다는 점이다.

2. SWP(Super Well Point)의 구조와 원리

SWP공법의 우물정 구조를 그림 1에 표준사양을 표 1에

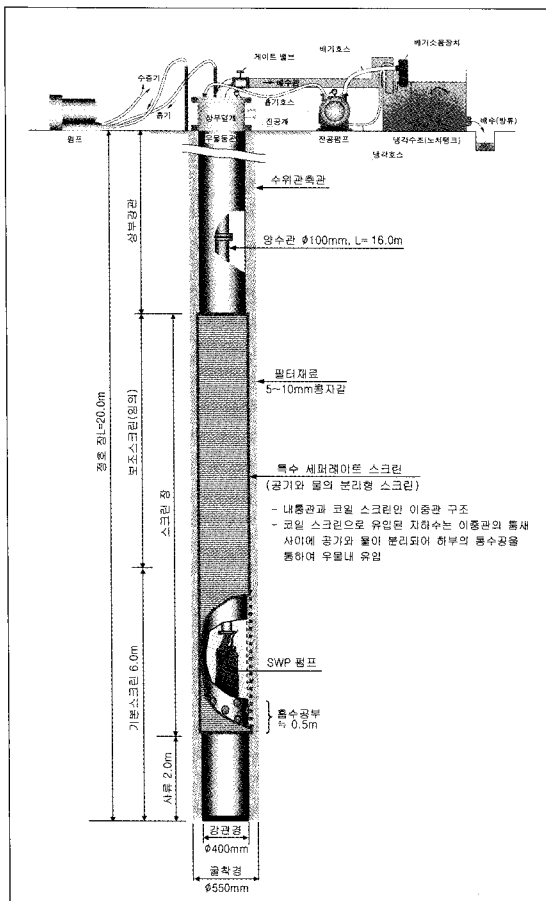


그림 1. SWP공법의 우물정 구조개요

표 1. SWP공법의 우물관 및 주요장치의 사양

우물관	직경	사양
굴착	550mm	퍼쿠션보링
우물관	400mm	강관(STK400), t=7.9mm
스크린	450mm	세퍼레이트 스크린 (ASS-A450)
양수관	100mm	강관 (SGP)

주요장치	전력	사양
진공펌프	200V, 11KW	공칭 진공도 $-9.9 \times 10^{-2} \text{MPa}$, 배기량 3.3m ³ /min
수중펌프	200V, 11KW	공칭 양정 35m, 유출량 1.0m ³ /min
Blower	200V, 11KW	공칭 최대 풍량 16m ³ /min

나타내었다. 그림 1에 나타낸 우물관은 상부 덮개에 공기를 흡인하는 작은 구멍이 있고, 저부에는 흡수공간이 있는 밀폐된 구조로써 우물관내에는 양수관이 설치되어 외부 흡수공에서 지하수면의 레벨까지 스크린(분리형)으로 둘러싸여 있다. 주요 장치는 진공펌프와 수중펌프이며 표준 사양을 표 1에 나타내었다.

SWP공법은 진공펌프로 우물내의 공기를 흡인하여 지하수에 부압을 작용시키고, 흡인된 지하수는 수중펌프로 양수하는 구조이다. 지하수를 우물에 흡인하는 기능은 진공펌프로, 지상으로 양수하는 기능은 수중펌프가 분담하게 된다. 즉, 우물관내의 포화된 지하수에 부압을 작용시켜 포텐셜을 저하시키고 외부 지하수와 동수구배를 크게 함으로써 다량의 지하수를 흡수하고, 흡수된 지하수는 수위를 상승시키지 않고 수중펌프로 양수하는 구조이다.

본 공법은 본래 진공 Deep Well공법의 약점을 보완하여 개발된 것이다. 진공 Deep Well공법의 운전방식은 본 공법과 동일하다. 그러나 진공 Deep Well공법은 스크린이 우물관과 일체화되어 지하수위가 저하하여 스크린의 위치에 도달하면 지하공기가 우물관에 포함되기 때문에 진공도가 저하되어 지하수에 부압을 작용시키지 못하는 단점이 있었다.

그래서 본 공법에서는 상술한 구조와 같이 지하공기가 포함되기 어렵게 하여 우물의 진공도를 저하시키지 않고 지하수에 큰 부압을 작용시켜 연속적으로 양수가능하도록 하였다. 흡수공은 우물관의 저부에 있기 때문에 지하수위가 이 부근에 저하될 때까지 지하공기가 우물관에 흡인되지 않고 흡인되어도 스크린과 우물관의 간극에서 지하공

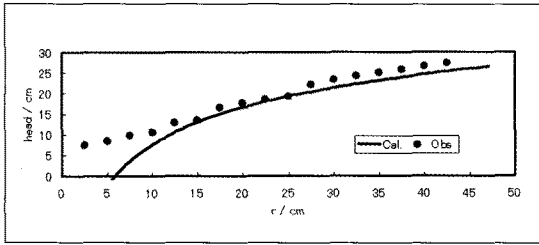


그림 2. 해석결과

(X축은 우물에서의 거리 cm, Y축은 저면에서의 입력 cm, 해석은 우물의 압력을 -225cm(부압)를 작용시켰음)

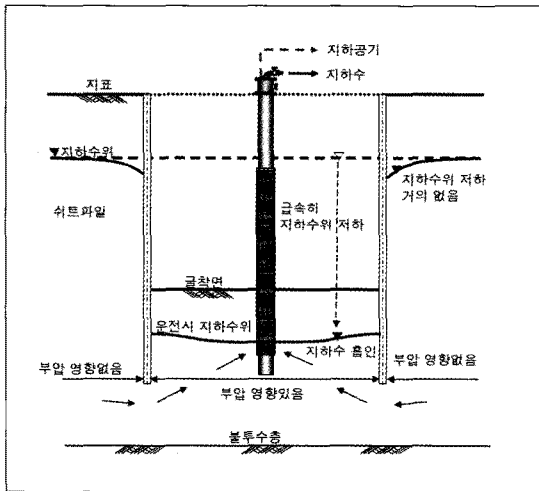


그림 3. 엄지말뚝으로 폐합한 경우의 지하수면의 저하

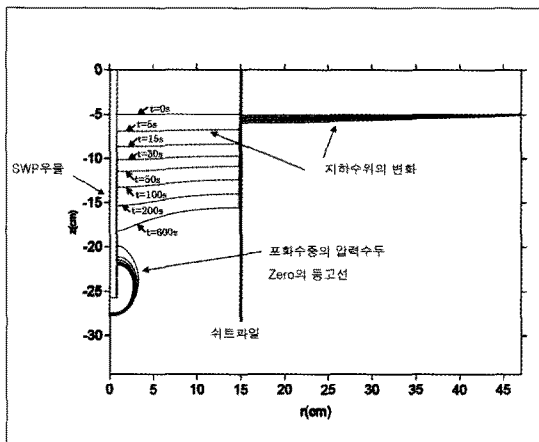


그림 4. 원통형 3차원 포화-불포화 침투류 해석결과 (해석조건 : 초기심도 5cm, 스트레이너 하단심도 26.4cm, 스트레이너 길이 3cm, 투수계수 10^{-3} cm/sec, 우물내 지하수 압력 -20cm)

기가 상승분리되어 흡입되기 어렵다.

본 공법에 대해 Nakagawa⁹⁾가 실내실험으로 해석을 수행하였고, 그 결과를 그림 2에 나타내었다. 여기서 주의해야 할 점은 경계조건이 되는 우물내의 지하수면에 부압을 작용시키는 것이다. 자연상태에서는 지하수가 부압의 상태로 존재하고, 지하수위 상부는 불포화상태의 토양수가 있기 때문에 인위적으로 포화수에 부압을 작용시켰다. 그 해석결과를 보면, 지하수위가 급속하게 저하하고, 우물부의 주변 지하수위는 거의 직선적으로 경사되고 있다. 일반적인 Deep Well공법에서 나타나는 Log곡선의 형상이 아닌 수위저하가 크게 나타나는 점을 잘 나타내고 있다. 이 형상은 우물주변부를 제외하면 실내실험결과와 현장에서 거의 동일하게 확인되고 있기 때문에 해석결과는 현상을 잘 나타내고 있다고 할 수 있다.

3. 슈트파일로 폐합된 경우의 지하수면 저하에 대한 검증

현장의 가시설 공사에서 슈트파일 등으로 폐합한 후 지하공작을 수행하는 경우, 본 기술의 적용에 따른 경험적 개요도를 그림 3에 나타내었다. 이 경우에도 슈트파일 내부의 지하수위가 급격하게 저하하며, 지하수위가 평형상태(흡수공의 약간 상부)에 도달하면 양수량이 저하하고 주변의 지하수위는 거의 저하하지 않는다. 이러한 상황은 모래 지반을 모델로 한 해석에 의해 확인되었으며, 그 결과를 그림 4에 나타내었다.

그림 4의 해석결과는 슈트파일 내부의 지하수위가 급속하게 저하하는 상황과 주변의 지하수위가 거의 저하하지 않는 것을 나타내고 있다. 이 해석결과에 대해서도 우물부(경계조건)의 압력에 부압을 작용시켰고, 이러한 조건이 SWP공법의 특징이라고 할 수 있다.

4. 토양·지하수 오염제거 및 연약지반개량공법에 이용

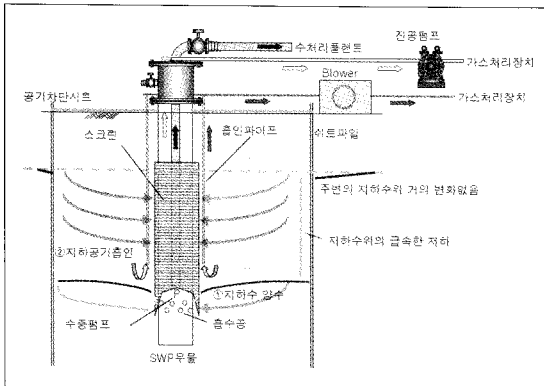


그림 5. 지하공기를 흡인하는 경우의 개요도

SWP공법은 진공펌프를 이용하여 지하수위를 크게 저하시키는 기술을 이용하여 고안된 공법이다. 대상 지반을 쉬트 파일로 폐합하고 지하수를 양수함으로써 지하공기를 흡인하는 경우의 개요도를 그림 5에 나타내었다.

- ① SWP공법의 적용으로 지하수를 양수하고 지하수위를 저하시킨다. 이 경우 SWP우물의 설치심도는 목표 지하수위면의 심도를 바탕으로 결정한다.
- ② 지하수위가 저하하고 불포화된 지층의 지하공기를 흡인한다.

여기서 지하공기의 회수를 위하여 SWP공법에 장착하는 진공펌프 외에 Blower를 설치한다. 즉 지하수위의 저하 후 지하공기를 진공펌프로 흡인공에서 흡입하고 Blower로부터 우물관 주변에 설치하는 파이프에서 흡인한다.

또한 지하공기압을 가능한 저감하기 위해 지표에 콘크리트 등으로 피복하여 공기의 지반에 재흡수를 방지한다.

4.1 토양·지하수 오염제거에 이용

토양·지하수 오염제거에 이용하는 경우, 양수에 의해 지하수에 포함된 VOCs나 기름분을 회수하고 토양에 잔류하는 물질을 지하공기로서 회수하여 토양·지하수의 오염물을 정화하는 기술이다.

오염물질이 VOCs의 경우, 정화대책으로는 토양가스흡인법과 Air-Sparging법이 많이 이용되고 있다. 이 방법은 모두 VOCs의 휘발성을 이용한 회수기술이다. 그러나 그림 5와 같은 구조는 지하수 양수를 동반한 토양가스를 흡인하

는 방식이다. 그러나 일반적인 지하수 양수방식에 비해 양수량이 크고, 지하수위가 크게 저하하기 때문에 포화대에 있는 오염토양이 간단히 불포화대로 이동가능하다는 것을 의미한다. 따라서 포화상태에 있는 오염물질을 지하공기로 회수가능한 것이다. 이러한 점이 일반적인 토양가스흡인법과의 차이점이라고 할 수 있다.

또한 지하공기의 부압이 상당히 큰 점이 특징이다. 토양가스흡인법의 경우, 지하공기의 부압은 흡인우물정에서 5m 이격되어 1kPa(10cm수두고)정도이며, 20m 이격되면 0.1kPa(1cm)정도의 부압이 된다. 이에 비해 세립 모래지반의 사례에서는 10kPa, 1kPa이 측정되었다. 이렇게 큰 부압의 발생이 VOCs의 휘발을 촉진시키게 된다.

4.2 지반개량에의 활용

성토지반 또는 연약지반에서는 압밀축진이 수행되고 있다. 이러한 공법은 지금까지 침하할 위험이 있는 지반을 사전에 강제적으로 침하시키는 방법으로 일반적으로 재하성토 등에 의한 공법이 수행되어 왔다. 지반의 압밀침하란 흙입자간에 작용하는 응력(유효응력)이 증가하여 발생하는 현상으로 지하수위의 저하 및 공기흡인에 의해 다음과 같은 구조로 압밀이 진행될 것으로 추정하고 있다.

- ① 지하수위의 저하로 지하수위 하부지반에 작용하는 부력을 제거함으로써 이에 해당하는 유효응력이 증가한다.
- ② 불포화된 지반의 간극수를 지하공기로 회수하기 위해 간극수의 석션(Suction)이 커지기 때문에 유효응력이 증가한다.
- ③ 지반내부가 부압의 상태가 되기 때문에 지표부에 작용하는 대기압과의 차이가 지반중에 작용하여 유효응력이 증가한다.
- ④ 간극수의 감소에 의해 지반의 공극이 증가하기 때문에 흡입자의 기하학적 재배치가 발생하여 침하를 촉진한다.

상기 내용중 ①에 대해서는 명확하게 밝혀졌다. 그러나 ②, ③, ④에 대해서는 실험적 검증을 진행하고 있기 때문에 그 결과는 별도로 소개하고자 한다.

5. 맺음말

건설현장에서 물(지하수)을 어떻게 처리하느냐는 중요한 문제이며, 현장의 시공성과 안전성, 작업여건을 개선하기 위해 지하수처리 또는 수위저하를 위해 많은 고민을 하고 있는 실정이다. 그러나 일반적으로 이용되고 있는 웰포인트(강제배수), 딥웰(중력배수), 진공딥웰(중력배수+강제배수) 등은 투수계수가 큰 사질지반에 제한적으로 적용되고 있다. 이러한 방법을 이용하는 경우, 곡선형의 수위곡선을 나타내기 때문에 주변 지반의 부등침하영향 등 수위관리가 어렵고, 또한 영향범위가 작아 대량으로 설치해야 하는 등 경제성이 저하된다.

최근 일본에서는 일반적인 양수방법에 비해 2~20배 이상의 양수능력으로 대폭 개선하여 진공상황에서 연약지반의 수분기화가 촉진되어 넓은 범위의 입밀축진과 오염토양에서는 VOCs(휘발성 유기화합물)의 회수가 가능하게 되었다. 그리고 고진공 우물부(경계조건)에 부압을 작용시켜 효과를 확인하는 실내시험과 수치해석을 통한 검증결과도 나타내었다.

아울러 본 기사에서는 서술하지 않은 이론적 검증방법과 현장 적용결과와의 비교에 대해서는 별도 두고하고자 한다.

참고문헌

1. Super Well Point工法 技術資料(2006), Super Well Point 協会
2. Super Well Point工法, 建設通信新聞, 2006년 5월 30일, p7.
3. 中川啓, 初井和朗, 神野健二, 和田信一郎, 朴崎鎬, 中山比佐雄, 高橋茂吉(2006), Super Well Point工法(SWP工法)の地下水低下に関する数値計算による検討, 日本地下水学会, 春季講演会講演要旨, pp94~97.
4. 細川土佐男, 高橋茂吉, 神野健二, 中山比佐雄, 朴崎鎬(2006), 飽和-不飽和浸透解析による改良型 Vacuum Deep Well工法の水位低下に関する検討, 日本地下水学会, 秋季講演会講演要旨, pp84~87.
5. 尾崎哲二, 白川俊明, 山内大祐(2006), 真空Pumpを利用した地下水および地下空気の同時回収技術について, 日本地下水学会, 秋季講演会講演要旨, pp166~171.
6. 尾崎哲二, 高橋茂吉, 中山比佐雄, 神野健二(2007), 真空Pumpを利用した新しい地下水水位低下工法, CEReport技術, 土木学会誌, vol.92, no.8.

