

## 지반구조물 거동의 정보확보와 시공에의 이용(VI)

장 연 수\*

### 6. 매립장 설계 시공과 계측

#### 6.1 머릿말

지반구조물의 시공을 위한 조사, 설계단계물 거치면서 발생하는 불확실성을 최소화하고 합리적인 구조물 시공을 수행하기 위하여 여러 가지 계측에 의한 정보화 시공이 이루어지고 있다. 이전 강좌 3, 4, 5에서는 연약지반에서의 시공, 터널, 지반굴착 시에 사용되는 계측에 관한 정보가 소개되었으며 본 호에서는 지반공학자에게는 다소 생소한 분야인 지반환경과 관련한 계측을 소개하고자 한다.

지반환경구조물, 예를 들어 폐기물 매립장에는 전통적인 지반공학적 측면의 구조적 안정성을 확보하는 동시에 주변지반 환경을 오염시키지 않도록 토양과 지하수에 대한 오염 방지 능력이 확보되어야 한다. 이를 위하여 매립장의 설계시공에는 2가지 요건을 모두 충족시킬 수 있는 계측 시스템이 확보되어야 하는 데 매립장에서 발생가능한 문제와 계측 방법을 보면 다음과 같다.

#### 발생가능한 문제 계측방법: 계측방법

- 1) 복토 쓰레기 사면의 변형 및 파괴 주변 차폐벽의 수평변위 : 경사계, 지중 수평 변위계 등

- 2) 흙이나 콘크리트로 이루어진 표면 복토재 침하와 크래킹:경사계, 침하판, 크래크 게이지, 컨버전스 게이지 등
- 3) 복토시스템을 통한 과대한 침투:텐시오미터, 석고 블록(gypsum block)피에조메터, neutron gage 등
- 4) 차수층내에 있는 공극과 투수계수가 큰 층의 존재:크로스홀 진동파 조사, GPR 레이다, 진동토모그래피, 진동파 리플렉션 조사 등
- 5) 매립장 기초지반 및 주변을 통한 오염물 이동관측정의 지하수위 및 수질관측, 전기 및 전자기 비저항 탐사, GPR레이다 등
- 6) 지오멤브레인과 강널차수벽 조인트(sheet pile joint) 로 부터의 누수:전기 누수 탐지 시스템, fiber-optic 조인트 관측 시스템

위에서 보는 바와 같이 1, 2항은 구조적 안정성에 관한 문제이며 3-6항은 복토재의 침투, 기초차수재, 주변차수재를 통한 오염침출수의 이동 가능성을 관찰하는 시스템으로 구성되어 있다.

본고에서는 오염침출수 이동성을 규명하기 위한 관측정의 구조 및 설계 기법과 관측정에서의 수질측정 방법을 소개하고 구조적 안정성 확보와 환경 보호측면에서의 계측사항을 매립

\* 정희원, 동국대학교 공과대학 토목환경공학과 조교수

장의 시공중, 시공후 매립수행기간 중, 매립장 사용종료 후로 나누어 소개하였다. 매립장에 대한 제측사례로서 사용중인 수도권 쓰레기 매립장과 난지도 사용종료 매립장의 경우를 소개하였다.

## 6.2 지하수 관측정의 구조 및 설계

지하수 관측정은 오염물이 존재하는 곳의 수리지질 특성 파악, 대수층의 지하수위 또는 포텐셜면 파악, 지하수 오염 여부를 탐지할 수 있는 수질 샘플링 조사, 오염물의 이동 특성 관측 등 다양한 용도로 사용된다. 따라서 관측정은 흔히 인식된 바와 같은 임시 구조물이 아닌 내구성이 있는 영구 구조물로서 구축되어야 한다.

### 6.2.1 지하수 관측정의 구조

매립장 주변의 지하수오염을 관찰할 수 있는 영구 관측정은 주변지하층으로 부터 지하수를 받아들이는 스크린 및 필터층, 관측정이 설치된 지역의 오염된 상부대수층 지하수가 하부대수층의 지하수를 오염시키는 교차오염(cross contamination)을 방지하기 위한 시멘트 또는 벤토나이트 차수재층, 지표에서의 바람 또는 차량회손에 의하여 지표수가 관측정 안으로 흘러들어 관측정내 수질의 대표성을 떨어뜨리는 것을 방지하기 위한 상부 콘크리트 보강층으로 구성된다(그림 1, 환경처, 1994).

각 부분별로 사용되는 재료의 조건에 대하여 알아보면 다음과 같다.

#### 케이싱과 스크린

관측공내 붕괴를 방지하고 스크린 이외의 지하수 집수를 억제하여 대상 대수층의 정확한 수두측정 및 수질 샘플링을 가능하게 한다. 케이싱의 직경은 51, 102, 152, 203mm로 다양하다. 지하수위 측정만이 목적인 경우에는 51mm 직경의 것을 사용하고 수질 샘플링, 깊은 관측

정, 양수시험, 시추공 불리탐사 시험들을 수행하려면 스크린과 케이싱의 직경은 102mm 이상의 것이 좋다.

관측정 케이싱의 재료는 현장의 지질, 지구 화학적 환경(geochemical environment), 관측정 깊이, 오염물의 종류와 농도, 관측정의 설계 내구수명(design life), 비용, 시추방법등 여러 요인에 맞추어 선택된다. 그러나 케이싱 재료의 가장 중요한 특성은 소요강도와 침출수질의 물리적·화학적 성분을 고려 이들 오염물질과 반응을 하지 않는 재질을 이용하는 것이다.

그림 2에는 관측정의 케이싱과 스크린의 각 부분별로 받게되는 힘의 형태를 보였다. 지하수 집수부인 스크린은 케이싱의 설치시 발생하는 조인트 부분의 인장력(tensile force)에 견딜 수 있어야 하며 관측정의 깊이가 커질수록 공내 함몰하중(collapse force)과 압축력(compressive force)에 견딜 수 있어야 한다.

케이싱의 붕괴를 초래하는 원인은 케이싱 내부와 외부 수위차로 인한 간극수압차이, 케이싱 주변에 뒤틀림재나 필터재료 설치시 일시적으로 작용하는 불균등 하중, 케이싱 외부에 시멘트나 벤토나이트 그라우트시 압력, 그라우트재의 수화작용(hydration)에서 발생하는 열, 관측정에서 잔류토사에 의한 부유물이 없는 지하수를 채집하기 위한 관측정 개발(well development)시 작용하는 케이싱에 작용하는 큰 불균등 압력 등이다.

이러한 외적 하중요소에 충분히 견딜 수 있는 케이싱 재료와 두께를 선택하여야 하는데 대체로 외부수압만을 고려할 경우에 압력에 2배의 안전율을 곱한 압을 견딜 수 있도록 두께를 선정한다(National Water Well Association and Plastic Pipe Institute, 1981). 일반적으로 케이싱의 붕괴강도는 케이싱 두께의 세제곱승에 비례하므로 약간의 두께 증가로도 붕괴저항 강도를 크게 높일 수 있다.

관측정에 사용되는 스크린 재료는 다음 특성을 만족하여야 한다.

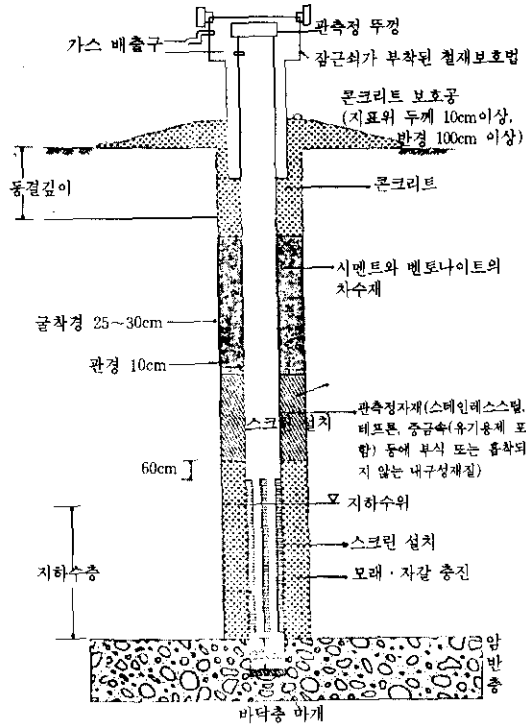


그림 1. 표준 영구 관측정의 구조도(환경처, 1994)

- 1) 스크린 재료는 현장 지하수에 포함된 화학성분과 반응하지 않아야 한다.
- 2) 지하수 채수가 촉진되도록 스크린의 유공부(open area)가 최대화되어야 한다.
- 3) 유공부는 관측정 주변 토사나 필터팩으로 인한 폐색(plugging)이 발생하지 않아야 한다.

케이싱이나 스크린에 사용되는 재료의 종류와 장단점을 표 1에 수록하였다. 매립장이나 오염토양 주변의 관측정에 대한 케이싱/스크린 재료로는 스테인레스 스틸재로 쓰는 것이 지질강도와 대부분의 화학물질과의 비반응성 때문에 좋다. 그러나 지하수내에 중금속이 포함된 경우에는 크롬이나 다른 금속성분이 용출되어 나올수 있으므로 사용하지 않는 것이 좋

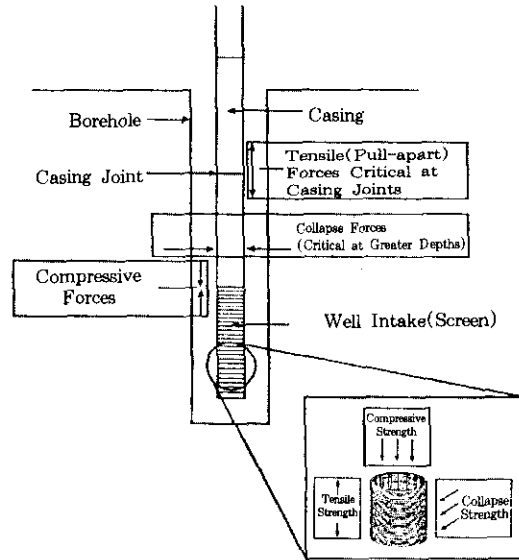


그림 2. 시공시 관측정의 케이싱과 스크린에 작용하는 힘의 개요도(USEPA, 1991)

다. PVC재료는 Methyl Ethyl Ketone(MEK), toluene trichloroethylene, tylen 등 유기성 화합물과 반응하므로 이러한 유기성분이 주 오염원인 관측정의 재료로는 사용하지 않는 것이 좋다. Teflon은 대부분의 화합물과 반응하지 않아 좋으나 재료비가 높고 강도가 약한 것이 흠이다.

스크린의 유공부 크기는 주변 토양의 공극률과 유사하도록 확보되어(15~20%) 지하수 샘플채취에 드는 시간이 스크린에 의하여 지체되지 않으면서 주변토양에 의해 폐색되지 않는 크기로 선택한다. 그림 3, 4에는 스크린의 구멍 형태를 보인 것으로 스크린 재료의 주변에 긴 홈을 파거나(slotted screen), 수직봉에 V형의 wire로 감는법(continuous slot screen), 두 개의 구멍을 일정한 간격으로 파이프의 종방향축

표 1. 케이싱이나 스크린에 사용되는 재료의 종류와 장단점

종 류	장 점	단 점
Stainless steel	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 할로젠과 방향족탄화수소의 흡착이 최소화 된다</li> <li>· 높은 온도에 강하다</li> <li>· 부식과 산화에 대해 저항성이 좋다</li> <li>· 모든종류의 구경과 슬롯크기에 적당하다</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 플라스틱보다 무겁다</li> <li>· 부식되면 크롬이 용출될 수도 있다</li> <li>· 유기물과의 반응에서 촉매로 작용할 수 있다</li> <li>· 스크린은 플라스틱제보다 비싸다</li> </ul>
PVC (Polyvinylchloride)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 경량이다</li> <li>· 약알칼리, 알콜, 지방족탄화수소, 기름등에 대한 저항성이 뛰어나다</li> <li>· 강산, 집중산화성 산, 강알칼리 등에 대한 저항성이 좋다</li> <li>· 구하기 쉽다</li> <li>· Stainless steel이나 Teflon보다 가격이 싸다</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 금속재료보다 약하고 덜 견고하며 온도에 민감하다</li> <li>· 지하수 구성성분과의 흡착등 반응이 일어날 수도 있다</li> <li>· 케톤, 에스테르, 방향족 탄화수소에 대한 저항성이 약하다</li> </ul>
Teflon	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 대부분의 화학물질에 대해 저항성이 좋다</li> <li>· 경량이다</li> <li>· 충격강도가 높다</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 시간이 지남에 따라 스크린 슬롯의 크기가 줄어든다</li> <li>· 다른 소성재료에 비해 인장강도, 마모저항성이 낮다</li> <li>· 다른 소성재나 Stainless steel에 비해 가격이 비싸다</li> </ul>
Mild steel	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 강하고 견고하며 온도변화에 민감하지 않다</li> <li>· 구하기 쉽다</li> <li>· Stainless steel이나 Teflon보다 가격이 싸다</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 플라스틱보다 무겁다</li> <li>· 지하수의 어떤성분과 반응할 수 있고 그 성분을 걸러낼 수도 있다</li> <li>· Stainless steel보다 화학적인 저항성이 뛰어나지 못하다</li> </ul>
Polypropylene	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 경량이다</li> <li>· 탄산에 대한 저항성이 탁월하다</li> <li>· 알칼리, 알콜, 케톤, 에스테르등에 대해서 저항성이 좋다</li> <li>· 기름에 대한 저항성이 좋다</li> <li>· 산화성 산, 지방족탄화수소, 방향족탄화수소에 대한 저항성이 좋다</li> <li>· Stainless steel이나 Teflon보다 가격이 싸다</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 금속재료보다 약하고 견고하지 않으며 온도에 민감하다</li> <li>· 지하수의 어떤 성분과 반응할 수 있고 그성분을 걸러낼 수도 있다</li> <li>· 성형성이 좋지 못하다</li> </ul>
Kynar	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Teflon보다 강도가 크고 물에 대한 저항성이 크다</li> <li>· 대부분의 화학물과 용제에 견딜 수 있다</li> <li>· Teflon보다 가격이 싸다</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 구하기 힘들다</li> <li>· 케톤과 아세톤에 대해 화학적 저항성이 나쁘다</li> </ul>

에 평행하게 뚫는 (bridge slot screen) 또는 파이프에 펀치를 이용하여 shutter형태로 뚫어

(shutter screen) 제작한다. 각 screen에 대한 장단점을 소개하면 표 2와 같다.

표 2. 스크린의 구멍 형태와 장단점

종 류	장 점	단 점
Slotted screen	값이싸고 쉽게 구할수 있음. 구멍 간격 크기 조절 양호	유공부(open area) 면적이 적음 30~50m이상의 심부압에 강도확보 불충분
Continuous slot screen	구멍 간격 크기조절 매우 용이 유공부 면적이 커서 지하수 채수효율 좋음	Slotted screen보다 고가 플라스틱 재료 의 경우 금속재보다 강도가 약함
Bridge/ shutter screen	구멍의 크기가 정밀하고 일정. 높은 집 수(intake)면적 확보. 값이 저가	구멍 폐쇄 용이 붕괴 저항강도 적음 최소 15cm 이상의 직경 필요

금속제 케이싱 재료의 생산시 사용된 오일  
이나 용제, 내구성을 향상시키기 위한 PVC 케  
이싱의 표면에 피복한 왁스 등의 물질은 오염  
토 토양 및 지하수와 반응을 일으킬 수 있으므  
로 지반에 삽입되기전에 세척되어야 한다.  
PVC재료는 강한 세제용액(detergent solution)  
으로 씻은 후 rinse로 헹구어 두는게 좋으며  
(Curren and Tomson, 1983). 절삭유, 윤활유,  
용매등은 스팀이나 고압의 물로 세척하는 것이  
좋다(Barcelona, 1984).

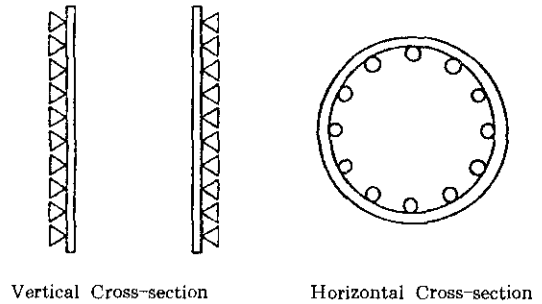


그림 4. Continuous slot Screen의 단면

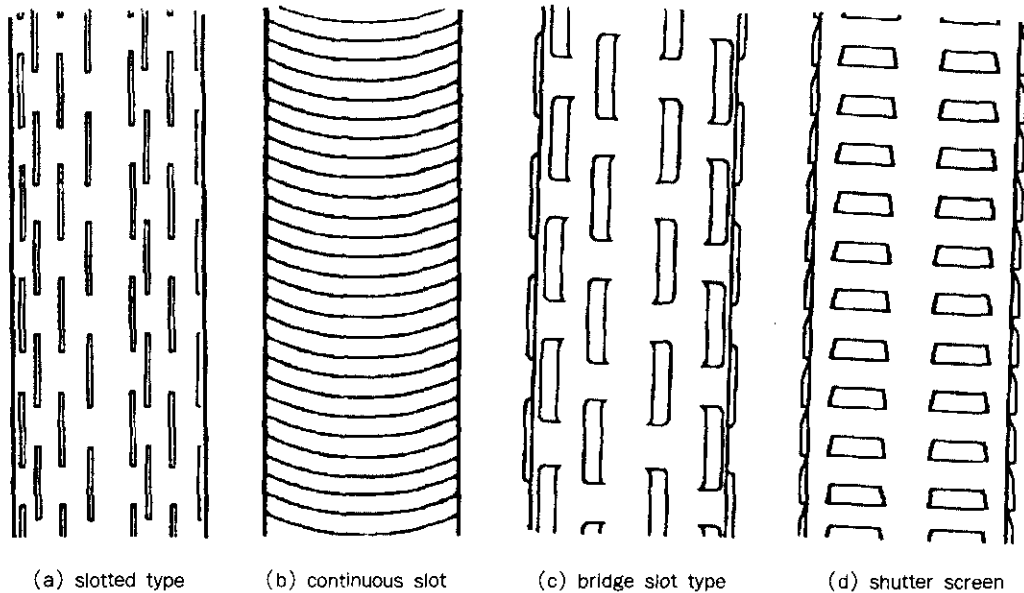


그림 3. Screen의 구멍 형태의 종류

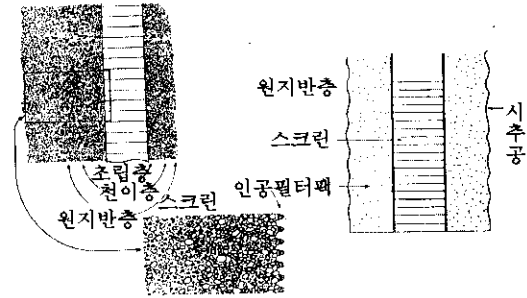
### Filter Pack

관측정의 스크린은 조립의 균등한 입도를 가진 필터재료로 둘러 쌓아 주변 원지반보다 큰 투수성을 갖도록 하고 관측정의 집수를 위한 유효경을 증가시켜 주는데 이를 필터팩(filter pack)이라 한다.

스크린 주변의 필터층은 관측정 스크린을 시공한 후 관측정 개발(well development)로 세립체를 제거하여 남은 조립체만으로 조성하는 자연 필터팩(natural filter pack, 그림 5a)과 조립의 입도조정한 재료를 지표로부터 삼입하여 조성한 인공 필터팩(artificial filter pack 또는 gravel pack, 그림 5b)으로 구분할 수 있다.

관측정 개발(well development) 과정은 그림 6에 보인바와 같이 관측정내에 물을 주입(pumping)하거나 (a), 흡입(back washing) (b) 또는 노즐을 이용 높은 속도로 jetting (c)을 실시하여 세립을 제거하고 조립의 필터층을 만드는 작업이다.

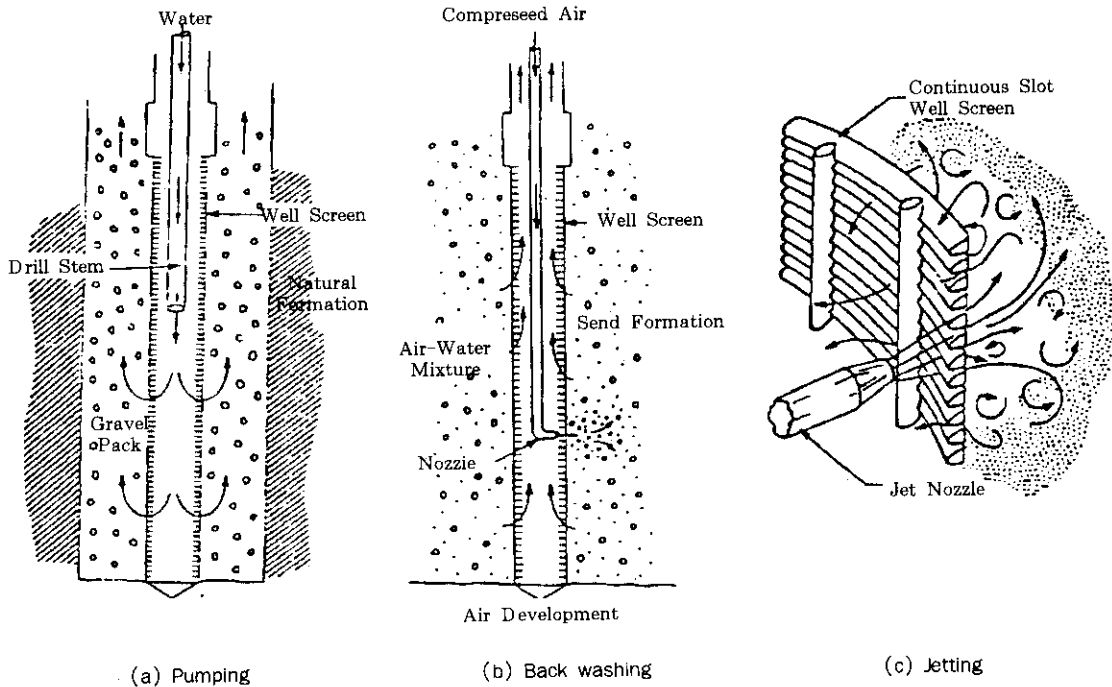
자연필터팩은 조성이 간편하고 비용이 절감되며 지하수의 화학 특성을 필터재료로 인하여 변화시키지 않는다. 그러나 원하는 필터층의 기능이 조성되기 어렵고 스크린의 유공부 크기와 맞추기도 어렵다.



(a) 자연 필터팩

(b) 인공 필터팩

그림 5 스크린 주변에 포설되는 필터팩의 종류



(a) Pumping

(b) Back washing

(c) Jetting

그림 6. 관측정 조성을 위한 세립층 제거 방법

인공필터팩은 조립의 자갈에서 중간조립의 샌드까지 흙재료를 입도조정 혼합하여 조성한다. 인공필터팩은 조립과 세립토의 교호지질층(stratified geological strata)에 유용하며 이때는 필터입자의 크기와 입도를 세립지층의 흙입도에 맞추어 조성하여야 관측정 개발후 채취된 지하수에 부유물을 최소화할 수 있다. 인공필터팩은 주변지반의 유효입경이 0.25mm 보다 작고 균동계수(uniformity coefficient, Cu)가 3.0보다 작을 때 사용하는 것이 좋다. 인공필터팩재료는 특정입도로 세척조성된 조립토로 현장운반 시공하므로 비용이 많이 들고 50mm 직경의 관측정 조성을 위해서는 최소 직경 75mm이상, 100mm 직경 관측정의 경우는 최소 직경 200mm이상의 큰 시추공을 뚫어야 하는 어려움이 있다.

인공필터팩의 입경은 다음과 같은 조건을 만족하는 범위내에 위치하는 것이 좋다.

$$5 > (D_{50}) / (D_{10}) > 3 \quad \text{Barcelona 등 (1985)}$$

$$6 > (D_{30}) / (D_{10}) \geq 4 \quad (\text{그림 7, U.S.EPA, 1975})$$

$$C_u (= \frac{D_{60}}{D_{10}}) < 2.5$$

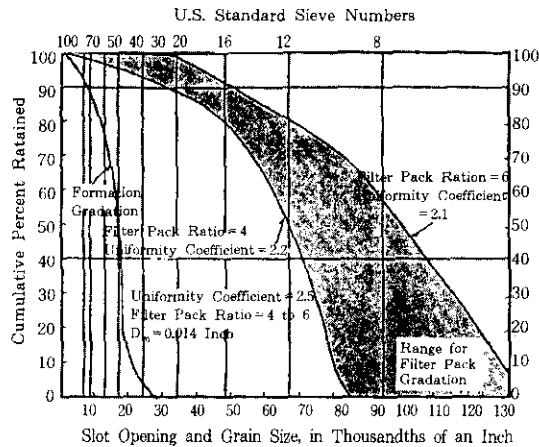


그림 7. 인공필터팩의 입도범위(빗금부분)(U.S.EPA, 1975)

관측정 스크린의 구멍크기는 필터팩의 입경이 결정된 후 선택하는데 필터팩 재료의 85~100%를 저류할 수 있는 구멍 크기를 선택한다(U.S. EPA, 1975, 그림 8 참조).

필터팩재료는 지하수위와 반응성이 없는 깨끗하고 둥근 석영질 흙이 좋으며 비 silicate계 통 광물의 함유율이 5% 이하이어야 한다(Driscoll, 1986). 특히 반응성이 있거나 분산성이 있는 석회암, 철암, 기타 탄산암(carbonaceous rock)재료는 피하는 것이 좋다.

### 인공 Filter Pack의 설치

스크린 주변부에 인공필터팩을 설치하는 방법에는 1) 중력 자유낙하식, 2) tremi pipe식, 3) reverse circulation, 4) back washing 이 있다(그림 9 참조). 필터팩을 중력 자유낙하하는 방법은 관측정이 알아 필터팩 재료의 분리(segregation)나 재료내에 빈공극이 남는 bridging현상이 일어나지 않을 경우에 사용할 수 있다. 재료분리 현상은 지하수위 아래에 필터팩을 낙하시킬 때 물의 저항으로 입자별 낙하속도가 차이가 나게되어 나타나는데 이러한 경우는 그림 9a와 같이 tremi pipe를 내려 하

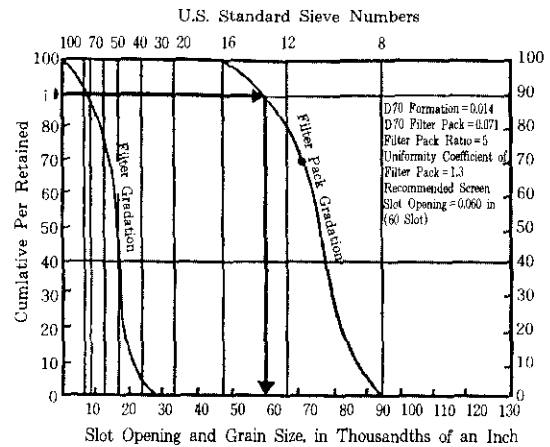


그림 8. 필터팩 재료의 90%를 저류할 수 있는 스크린 Slot 사이즈

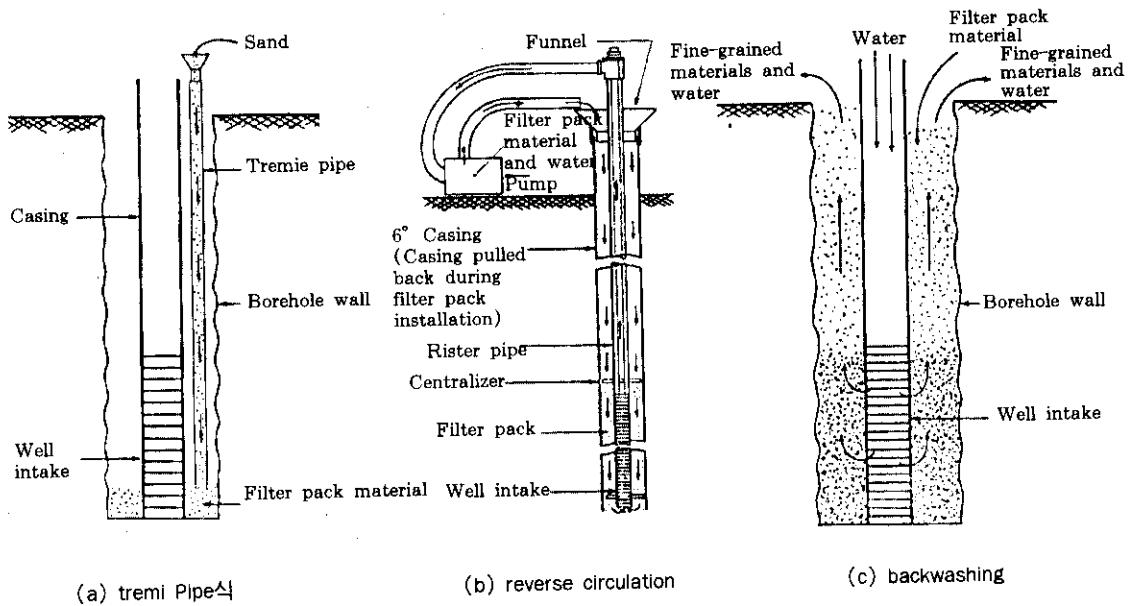


그림 9. 인공필터 Pack의 설치방법

부에서부터 채워 올라가는 것이 좋다. 이 때 파이프의 최소직경은 1½ inch 정도이며 재료의 입경이 크거나 균동계수가 2.5이상인 경우에는 더 큰 직경의 파이프를 이용한다. 역순환법(reverse circulation)을 사용할 경우에는 물과 필터팩재료를 혼합하여 스크린 주변부에 넣고 물은 스크린과 케이싱을 통하여 지표로 뽑아 올린다. 필터팩이 설치된 후에 outer casing (6" casing)을 뽑아내게 되는데 이때 screen과 riser pipe가 딸려 올라오지 않도록 주의한다(그림 9b). Backwashing법은 균동계수 2.5이하의 필터팩재료를 자유낙하시키면서 케이싱을 통하여 깨끗한 물을 주입 스크린부를 통하여 배출해 내어 빈공간이 없이 골고루 재료를 설치하는 방법이다(그림 9c).

#### 케이싱 주변부 씰링(sealing)

스크린 상부 케이싱의 주변부에 대한 sealing이 부실한 경우에는 casing과 시추공의 틈새를 통하여 상부 지표수나 대수층의 물이 필터팩과

스크린으로 유입되어 정확한 수질 측정이 어렵다. 이를 방지하기 위한 그라우트 물질로 벤토나이트와 시멘트 또는 이를 혼합한 재료가 사용된다. 벤토나이트는 건조한 과립이나 슬러리 형태로 사용된다. 건조 과립형의 벤토나이트는 10m이내 깊이에 7.5cm 이상의 주변공간이 있는 상태에 적용하며 중력낙하후 tamping rod로 다지면서 설치하여 틈새공극이 생기지 않도록 한다. 10m이상의 깊이에서 건조과립형을 사용할 경우에는 tremie-pipe를 이용한다. 슬러리형은 벤토나이트 분말을 물과 batch믹서에 혼합하여 가압한 상태로 tremie pipe를 통하여 주입한다(그림 10).

벤토나이트 쉘재료의 수화 또는 양생 작용은 24~72시간에 걸쳐서 일어나며 이시간 동안 슬러리는 견고하게 굳어 강도를 발현하게 되는데 이 양생기간이 경과하여 수화작용이 완료된후 집수효능 확보를 위한 관측정 개발(well development)을 하는 것이 좋다.



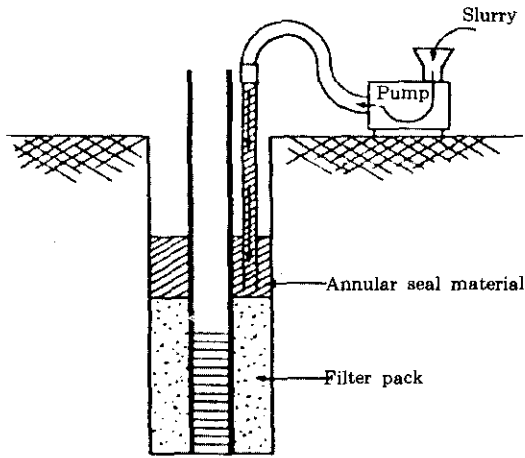


그림 10. Slurry형 Sealing재료의 Tremi Pipe를 통한 주입

벤토나이트는 pH가 높고 이온교환능력(ion exchange capacity)이 크기 때문에 집수부로부터 격리하여 설치하되 특히 필터팩과 직접 접촉하지 않도록 30cm정도의 세립 silica모래층을

삽입한다. 시멘트 그라우트재는 tremi pipe를 이용 주입하며 pipe의 내경은 1½inch이상으로 봉합하려는 바닥부 수 cm 위까지 삽입하고 그라우트한다. 그라우트 sealing재에 대한 장단점을 표 3에 소개하였다.

### 관측정의 지표면 보호

관측정은 지표부에 돌출하게 설치하거나 지표면과 동일 높이로 설치하는 2경우로 나누는데 대부분 지표수의 유입을 최소화하기 위하여 돌출상태로 하고 손상을 방지하기 위하여 콘크리트 표면처리와 자물쇄를 설치한다. 지표면과 동일높이로 설치하는 경우는 부근의 교통량이 많은 도로, 주차장, 중장비 작업이 이루어지는 곳인데 관측정 파손과 지표수 유입을 방지하기 위한 케이싱 주변에 견고한 철제 박스를 시멘트표면에 양생이 완료되기 전 밀어 넣어 굳게 한다. 동상에 의한 피해가 예상되는 지역에서는 표층 시멘트처리부를 동상 예상깊이 이하까지 연장하여 설치한다.

표 3. 씰링을 위한 그라우트 재료의 장단점

종 류	장 점	단 점
Bentonite	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 구하기 쉽다.</li> <li>· 가격이 싸다</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 수질분석 좋지 않은 화학물질이 생성될 수 있다.</li> <li>· 완전한 씰을 만들지 못하는 경우가 있다.</li> <li>· 펌핑된 슬러리안에 고형물이 14%로 제한되므로 고형물이 가라앉을 때까지 기다려야 한다.</li> <li>· 그라우트 할 때 벤토나이트 입자가 원하는 깊이에 도달하기전에 입자간 또는 케이싱과 부착 될 수 있다.</li> <li>· 재료가 얼마나 잘 위치했는지 알 수 없다.</li> <li>· 케이싱과의 완전한 부착을 보장할 수 없다.</li> </ul>
Cement	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 구하기 쉽다</li> <li>· 가격이 싸다</li> <li>· 모래나 자갈필터를 같이 사용할 수 있다.</li> <li>· 온도측정기나 음향측정기로 포설된 시멘트 씰의양부를 판단할 수 있다.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 수질분석시 좋지않은 화학물질이 생성될 수 있다.</li> <li>· 믹서, 펌프, 트레미관동이 필요하며 일반적으로 벤토나이트보다 더 깨끗해야 한다.</li> <li>· 그라우트할 때 시멘트가 수축할 수 있으므로 케이싱과의 완전한 부착을 보장할 수 없다.</li> </ul>

### 관측정의 폐쇄

관측정의 수명이 다하여 용도 폐기되는 경우 상하부 대수층간 교차오염(cross contamination) 또는 지표수로부터의 침투로 인한 대수층의 오염을 방지하기 위하여 반드시 시멘트나 벤토나이트 또는 그 혼합물을 이용하여 그라우트하여 폐공하여야 한다.

### 6.3 관측정의 배치

매립장 주변이나 오염되어 주변으로 오염물이 확산되고 있는 지점에 관측망을 설치할 때 어느 정도의 관측정을 어느 곳에 설치할 것인가 하는 문제가 대두된다.

국내 폐기물 매립시설 검사기준 및 방법(폐기물 관리법)의 별표1항에 의하면 지하수 검사정은 매립시설의 주변 지하수 흐름층 상류에 1개소 이상, 하류에 3개소 이상을 설치하도록 하고 있다. 다만 매립지의 경계선이 해수면과 인접하여 지하수 검사정 설치 어려운 경우는 해수면 인접지역에 지하수 검사정 대신 해수수질검사를 실시할 수 있는 지점을 2개소 이상 설치하여야 한다(홍문각, 1997, p375).

환경처(1991)에 의하면 차수공법의 안정성과 매립장 인근 자연지하수의 오염여부를 판정하기 위해 최소한 2개 이상의 지하수 관측정을 설치하도록 규정하고 있는데 지하수질 모니터링 지점은 지하수위 동고선도에 나타난 여러개의 유선중에서 사업지구를 통해서 흐르는 주된 유선 1~2개를 취하여 사업지구의 상류 구배 구간(hydraulically upgradient)에 1개 관측정, 사업지구 하류구간(hydraulically downgradient)에 1개 이상의 관측정을 선정하여 지하수질관리망을 선정도록 하고 상·하류 구배정은 반드시 관정형의 영구 관측정을 설치하도록 권유하고 있다.

일반적으로 오염원과 이로부터 흘러나온 오염물의 범위를 파악하고자 하는 경우 관측정 설치하는 다음과 같은 원칙에 의거하여 행한다(Driscoll, p715).

- 1) 오염원으로부터 흘러나온 오염물의 오염원에 가까운 중심부 1개
- 2) 오염원의 하류부 한계 바깥지점 1개
- 3) 오염원 상류부에 주변 기지 수질 파악용 1개
- 4) 필요한 경우 오염물의 분산(dispersion)정도 파악을 위한 관측정 수개

그림 11에는 이러한 원칙에 의거하여 매립장의 주변에 설치한 관측정의 예를 보인 것이다. 매립장의 높이가 주변지형보다 높은 경우에는 매립장의 높은 수위로 인하여 사면으로 오염물이 확산될 수 있으므로 적어도 4개의 관측정이 각 방향으로 설치되고 1개 정도는 배경수질을 파악하기 위하여 설치되어야 한다.

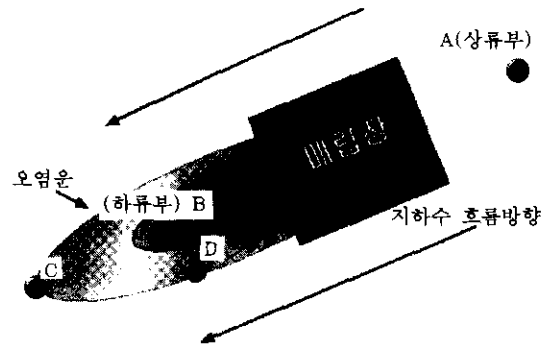
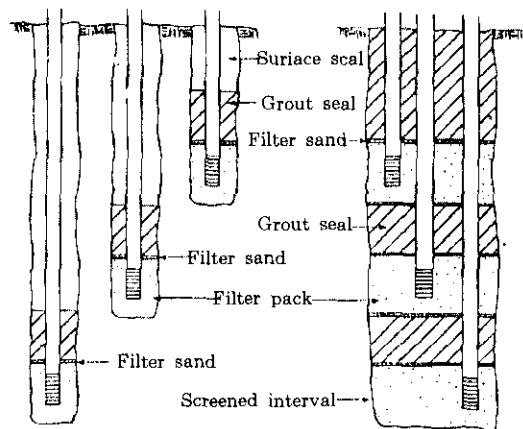


그림 11. 매립장 주변 지하수 관측정의 배치



(a) 단일망 관측정군 (b) 다중망관측정군  
그림 12. 수직흐름 특성파악을 위한 관측정의 배치

관측정의 개수 및 지점 결정과 함께 깊이를 설정하는 것도 매우 중요하며 관측정의 설치깊이는 대상 오염물의 밀도, 대수층의 이방특성(anisotropic characteristics), 지하수위와 포텐셜면의 경사에 의해 결정한다.

현장 지질특성에 따라 수직흐름이 있는 경우에는 깊이별 수두와 수리특성파악을 위한 관측정이 1개지점에 2~3개 설치되어야 한다. 심도에 따른 지하수 수두 및 수질변화 파악을 위한 관측정군을 설치하는 방법은 다음과 같다(그림 12).

1) 단일망 관측정군

(single riser/ limited interval wells)

지하수의 집수 스크린의 심도를 달리하는 관측정 2개 이상을 한지점에 설치하여 관측정군을 구성하고 지하수위와 수질의 수평, 수직변화를 계측한다(그림 12a).

2) 다중관측정군

하나의 시추공에서 여러 심도의 수위 및 수질을 감시하도록 고안된 것으로 다음과 같은 2가지 종류가 있다.

-다중망 관측정군(multi-screen monitoring well)

1개의 시추공 내부에 심도에 따라 복수의 케이싱을 설치하여 각 수위 및 수질을 관측한다. 이 때 스크린 주변은 그림 12b에 보인바와 같이 filter pack으로 채우고 시멘트나 벤토나이트로 그라우트 씬을 하며 씬링재료가 filter pack에 들어오는 것을 막기 위하여 그라우트 재와의 사이에 얇은 샌드층을 둔다.

-복합 관측정군(multi level monitoring well)

1개의 시추공 내부에 대수층의 깊이별로 복수의 수위 측정 및 시료채취 port를 설치하여 각위치에서의 수위와 수질을 관찰하며 다음과 같은 여러종류가 고안되어 있다(그림 13 참조).

- a) PVC multi level sampling(Pickens 등, 1981)
- b) Multi level capsule sampling device (Johnson, 1983)
- c) Multiple zone inflatable packer sampling device(Rehtlane and Patton, 1982)

복합관측정군은 port와 지표가 개별튜브로 연결되어 있으며 수질시료 채취시에는 얇은 깊이에서는 진공을 이용하고 port가 깊어지면 여러종류의 gas-lift sampling 기구를 사용한다.

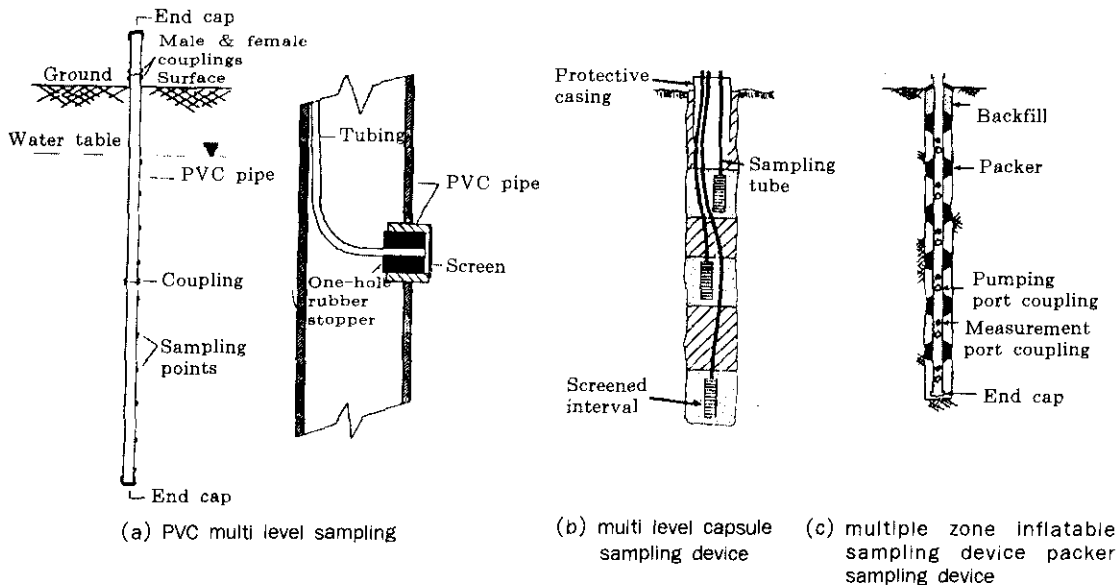


그림 13. 복합관측정군의 형태

#### 6.4 지하수 수질 조사

매립지의 차수기능이 유지되고 있는가에 대한 감시와 어떠한 작용에 의해 차수기능이 손상되었을 경우에 유출된 오염물질이 지하수중에서의 확산정도 및 사람의 생활환경에 미치는 영향정도의 감시를 위하여 지하수 수질 조사를 필요로 한다.

##### 6.4.1 기 준

관측정을 통하여 샘플링된 지하수는 이용 목적에 따라 필요수질기준을 만족하여야 한다. 국내에서 사용하는 지하수 수질기준으로는 생활용수, 농업용수, 공업용수에 대해서는 표 4의 기준을 만족하여야 하며 먹는물에 대해서는 표 5와 같이 45개 항목을 검사하여 기준을 만족하여야 한다(우, 1996).

##### 6.4.2 지하수질 관측빈도

지하수 오염지역에서의 수질관측 빈도는 지하수 유동속도, 분석하려는 오염물질의 과거 농도변화, 오염원과 양수정간의 지질학적 환경의 비교, 오염가능한 지층과 토양의 특성, 지하수면의 심도 등을 고려하여 결정한다.

관측빈도는 자료의 이용도에 따라서 매일, 일주일, 격주, 일개월, 격월 단위로 결정한다. 지하수의 흐름이 일반적으로 느리기 때문에, 보통의 경우 일년에 4회 이상은 할 필요가 없다. 하지만, 만약 각각의 시료채취점에서 중요 성분이 변화하거나 지하수의 흐름이 비정상적으로 빠르다면, 그 변화와 이동 확산의 양상을 규명하기 위하여 매월 또는 격월 간의 시료채취가 필요하다. 일단 이들의 변화를 알고 난 후에는, 시료채취 사이 기간을 늘릴 수 있다.

전체 원소의 분석은 일년에 한번 정도 하며, 감시정에서의 수질변화를 간단히 알려줄 수 있는 총고용체나 염소등을 매월 또는 격월로

표 4. 국내 지하수 수질기준

(단위:mg/L)

항 목		생활용수	농업용수	공업용수
일반 오염물질 (5개)	수소이온농도(pH)	5.8-8.5	6.0-8.5	5.0-9.0
	화학적산소요구량(COD)	6이하	8이하	10이하
	대장균군수	5,000이하 (MPN/100mL)	-	-
	질산성질소	20	20	40
	염소이온	250	250	500
특정 유해물질 (10개)	카드뮴	0.01	0.01	0.02
	비소	0.05	0.05	0.10
	시안	불검출	불검출	0.2
	수은	불검출	불검출	불검출
	유기인	불검출	불검출	0.2
	페놀	0.005	0.005	0.01
	납	0.1	0.1	0.2
	6가 크롬	0.05	0.05	0.1
	트리클로로에틸렌(TEC)	0.03	0.03	0.06
	테트라클로로에틸렌(PCE)	0.01	0.01	0.02

• 농/공용수라도 생활용수의 목적으로도 함께 이용되는 경우에는 생활용수 기준을 적용

표 5. 먹는물 수질 기준

검 사 항 목	기 준	검 사 항 목	기 준
(1) 냄새	무취	(2) 맛	맛이 없을것
(3) 색도	5도 이하	(4) 탁도	2도 이하
(5) 수소이온농도 (pH)	5.8 -8.5	(6) 암모니아성질소	0.5 mg/l이하
(7) 염소이온농도 (Cl)	150 mg/l이하	(8) 황산 이온 (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	200 mg/l이하
(9) 질산성 질소 (NO <sub>3</sub> -N)	10 mg/l이하	(10) 중발잔유물	500 mg/l이하
(11) 과망산칼슘소비량	10 mg/l이하	(12) 철 (Fe)	0.3 mg/l이하
(13) 경도	300 mg/l이하	(14) 셀레늄 (Se)	0.01 mg/l이하
(15) 수은 (Hg)	불검출	(16) 시안 (CN)	불검출
(17) 동 (Cu)	1 mg/l이하	(18) 연 (Pb)	0.1 mg/l이하
(19) 불소 (F)	1.5 mg/l이하	(20) 6가 크롬 (Cr <sup>6+</sup> )	0.05 mg/l이하
(21) 아연 (Zn)	1 mg/l이하	(22) 망간 (Mn)	0.3 mg/l이하
(23) 페놀(C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH)	0.005 mg/l이하	(24) 세제 (ABS)	0.5 mg/l이하
(25) 카드뮴(Cd)	0.01 mg/l이하	(26) 비소 (As)	0.05 mg/l이하
(27) 총트리할로메탄(THM)	0.1 mg/l이하	(28) 다이아지논	0.02 mg/l이하
(29) 파라티온	0.06 mg/l이하	(30) 말라티온	0.25 mg/l이하
(31) 페니트로티온	0.04 mg/l이하	(32) 카바릴	0.07 mg/l이하
(33) 1,1,1.트리클로로에탄	0.1 mg/l이하	(34)테트라클로로에틸렌(PCE)	0.01 mg/l이하
(35) 트리클로로에틸렌(TCE)	0.03 mg/l이하	(36) 일반 세균수(Total Colonies)	1ml중 100CFU이하
(37) 대장균군(Coliform Group)	음성 /50ml	(38) 디클로로메탄	0.02 mg/l이하
(39) 벤젠 (Benzene)	0.01 mg/l이하	(40) 톨루엔 (Toluene)	0.7 mg/l이하
(41) 에틸벤젠	0.3 mg/l이하	(42) 크실렌 (Xylene)	0.5 mg/l이하
(43) 알루미늄 (Al)	0.2 mg/l이하	(44) 1,1-디클로로에틸렌	0.03 mg/l이하
(45) 사염화탄소	0.002 mg/l이하		

측정할 수도 있다. 모든 과정에서 시료채취 계획이 항상 같을 필요는 없으며 예를 들어 심부 대수층에 뚫려 있는 관정은 매립지 바로 밑에 위치한 자유면 대수층에 설치된 관정만큼 자주 채취할 필요는 없을 것이다.

환경처(1991)에 의하면 갈수기와 풍수기에 최소한 1회이상 음용수 수질기준 항목 등에 대해 조사 분석하여야 하며 지하수의 상황, 침출수의 상태를 감안하여 필요시에는 계절당 1회로 하여 년 4회를 실시하도록 하고 매립장의 경우 다음과 같은 요소에 대한 상시 및 정기적인 수질측정이 이루어져야 한다고 규정하고 있다.

표 6. 매립장에서의 상시 및 정기 관측 요소

상시관측	오염 지시 인자:pH, 전기전도도, 온도
정기관측	지하수 특성인자: · 주양이온-Na, K, Mg, Ca · 주음이온-Cl, SO <sub>4</sub> , HCO <sub>3</sub> , CO <sub>3</sub> 기타 성분:음용수 수질기준 항목, TOC, TDS

또한 지하수 수질 관측 결과는 다음과 같이 유지 관리되도록 권유하고 있다.

- (1) 모니터링 결과치는 공사 및 사업수행 이전의 수질과 비교되어야 하므로 이의

수질조사가 사전에 선행되어야 한다.

- (2) 모니터링 결과치는 5년이상 비치하여야 한다.
- (3) 관측정에는 일반인의 접근이 불허되어야 한다.
- (4) 지하수질 분석결과와 평가기준은 공사 및 사업시행 이전의 수질과 비교하여 이보다 높지 않아야 하며 변화가 있을 수 있는 일반적인 항목은 법적기준이 있을시 이를 적용하도록 한다.

### 6.5 시공 및 사용 중인 매립장의 계측

매립장을 신설하는 경우에는 계곡부의 사면을 절개하거나 연약지반의 경우 도로와 부대시설, 침출수처리장이 들어서는 지점은 연약지반 처리를 하여야 한다. 사용중인 매립장에서는 매립되는 폐기물의 하중으로 인하여 쓰러지 매립 사면이 안정하고 기초지반의 지내력도 충분한가에 대한 계측이 매립기간 동안 계속되어야 한다.

본절에서는 김포 수도권 매립장의 시공 및 사용중의 계측 사례를 통하여 매립장의 구조 및 환경 오염 저감 측면의 필요 계측 사항에 대하여 알아보았다.

#### 6.5.1. 매립장 조성시 계측 시스템

매립장이 연약지반상에 계측되는 경우 현장 계측이 필요한 지점에 대해서는 지반의 수평, 수직변형 측정에 필요한 계측기를 설치하며 연약지반 개량이 경과함에 따른 지표침하, 지중 변형, 수평변형 등을 측정하여 측정자료에 따라 지반 개량효과를 분석하고 필요한 대책을

강구한다.

표 7과 그림 14에는 수도권 매립지 1단계 건설사업 당시 매립장 내의 도로, 관리시설, 침출수 처리장 기초지반의 연약 지반 처리시 매설하였던 계측기기의 종류와 갯수, 표준단면을 보인 것이다. 지표면 침하판, 층별침하계, 간극수압계, 지하수위계, 경사계를 설치하였으며 지하수 수질을 측정하기 위한 관측정도 3, 6, 9, 12m 심도에 깊이별로 설치하였다(동아건설, 1991; 환경처, 1992).

매립장 조성시 사용된 계측 시스템은 일반 토질 구조물의 경우와 유사하므로 구체적인 설명은 생략한다.

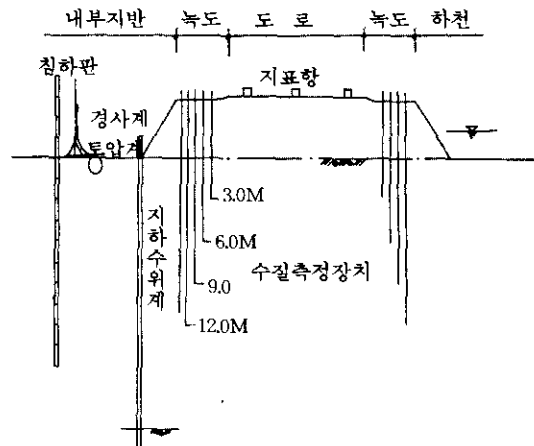


그림 14 연약지반 상의 매립장내 도로시설의 안정성 검토를 위한 계측기설치 예(환경처, 1992)

표 7. 연약지반상 매립장 조성에 사용된 계측기 설치 사례(동아건설, 1992)

구 분	지표면침하판	층별침하계	간극수압계	지하수위계	경 사 계
관 리 시 설 지 역	5	5	10	5	3
도 로	16	7	14	7	3
폐 수 처 리 장	2	2	4	2	1
계	23기	14기	28기	14기	7기

### 6.5.2 시용중인 매립장의 계측 시스템

매립장이 운영되는 경우에도 매립 쓰레기에 의하여 매립사면이 안정하고 지지력이 유지되는가에 대한 계측이 필요하다. 수도권 매립장 제1공구의 경우 다음의 계측 항목에 대하여 3~4일에 1회씩 매립이 진행되는 동안 계측이 이루어졌다(수도권, 1995. 8).

- 침하측정: 원지반 및 매립장 내부와 사면부 쓰레기층의 침하를 3일 간격으로 측정한다. 침하측정으로 현재까지의 쓰레기 침하량 및 장래장하량 예측, 폐기물 침하에 따른 사면부의 수평변위량을 파악하고 제방부의 안전성 검토에 이용한다.
- 경사계: 매립지반과 사면의 수평변위를 측정함으로써 제체를 포함한 인근 지반의 안전성을 파악한다.
- 지하수위계 및 간극수압계: 매립지 외곽부의 지하수위 변동과 간극수압 변화를

파악하여 매립지 외곽제방 사면부의 지반 안정성을 파악하는데 사용하고, 매립장 내부 침출수위 변동을 파악한다.

- 토압계: 매립사면부의 매단폐기물 축조에 따른 사면부의 지중응력 변위를 관측하고 이로부터 매립되고 있는 쓰레기의 단위중량을 파악하는 기준이 된다.
- 지표항: 매립사면부와 지단부의 지표변위량을 측정하여 사면부의 안정성을 파악하는 것으로 침하판과 경사계의 계측치와 더불어 매립지 외곽사면의 안정성을 파악하는데 중요자료이다.

매립장 준공 및 매립초기에는 “수도권매립지(제1공구) 매립작업 및 부대관리 시방서”에 의하여, 그림 15a와 같이 매립장내에 침하판(A & B), 지하수위계(B) 및 간극수압계(A), 토압계를 설치하고 제체 외측에는 경사계(A & B), 지하수위계, 수평변위 측정용 지표항,

표 8. 제1공구 매립장의 매립초기 및 보완 계측개소와 수량 비교(수도권, 1995)

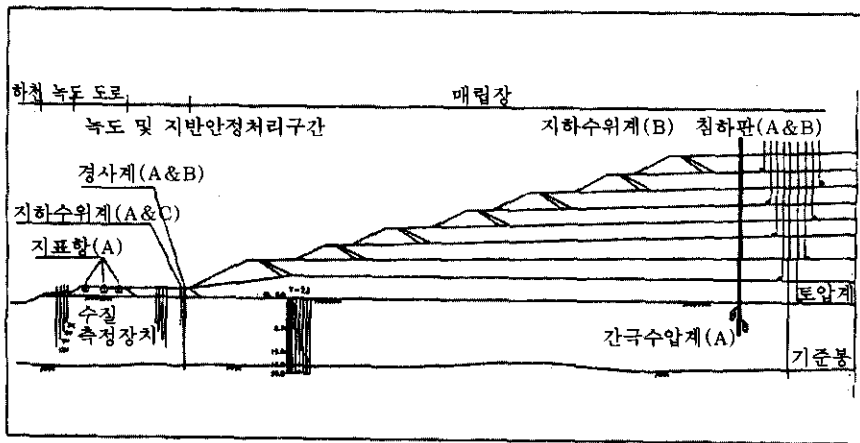
계 측 기 종 류		당초 계획수량		추가 계획수량		계		비 고
		설치개소	설치수량	설치개소	설치수량	설치개소	설치수량	
침 하 판	A TYPE	15	135			15	135	
	B TYPE	10	40			10	40	
	C TYPE			13	80	13	80	외곽부 추가
경 사 계	A TYPE	6	8			6	8	
	B TYPE			7	9	7	9	외곽부 추가
지하수위계 (수동)	자동	1	1			1	1	
	A TYPE	6	6			6	6	
	B TYPE	5	5			5	5	
	C TYPE			7	7	7	7	외곽부 추가
지 표 항	A TYPE	4	12			4	12	
	B TYPE			13	35	13	35	신규공정
토 압 계	A TYPE	15	120			15	120	
	B TYPE			1	2	1	2	외곽부 추가
간극수압계	A TYPE	5	10			5	10	
	B TYPE			13	27	13	27	외곽부 추가
수 질 측 정 장 치		7	56			7	56	
계		74	393	54	160	128	553	

침출수 외부 누출여부를 확인하는 수질측정장치 등이 설치되었었다.

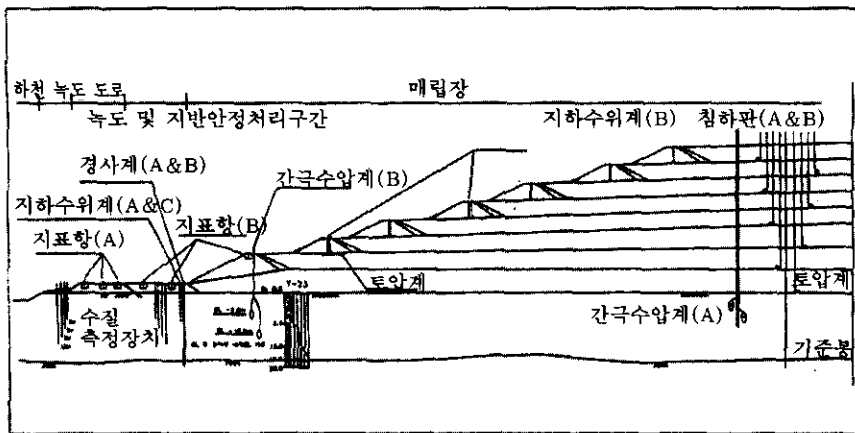
그러나, 매립장내 침출수위 상승으로 인하여 매립장내부 및 외곽 사면부의 매립쓰레기 재하중에 의한 원지반의 압밀 소산정도가 당초 예측치보다 미진하여 다단계 매립에 의한 제방의 안정성을 재검토할 필요가 있게 되었다. 이에 따라 기관리되고 있는 외곽흙제방부 사면에 대한 계측관리계획을 보완하여 사면부에서 발생하는 제반 문제점을 조기 발견 처리할 수 있도록 하였다(수도권, 1995. 4. 참조).

그림 15b는 이와 같은 계측기 추가 설계계획에 따라 보완된 매립지외곽 제방 계측기 설치 표준도이며, 당초안인 그림 15a에 비교하여 각 단의 제방부에 Type C의 표층침하판이 설치되고 체체 외곽에 간극수압계(B)가 추가로 설치되었다.

표 8에는 계측기의 당초 설치수량과 추가 계획수량을 표시하였으며, 그림 16에는 추가 보완후의 계측기 설치 평면도를 보여주고 있다.



(a) 매립장 조성당시안



(b) 변경안(1995년)

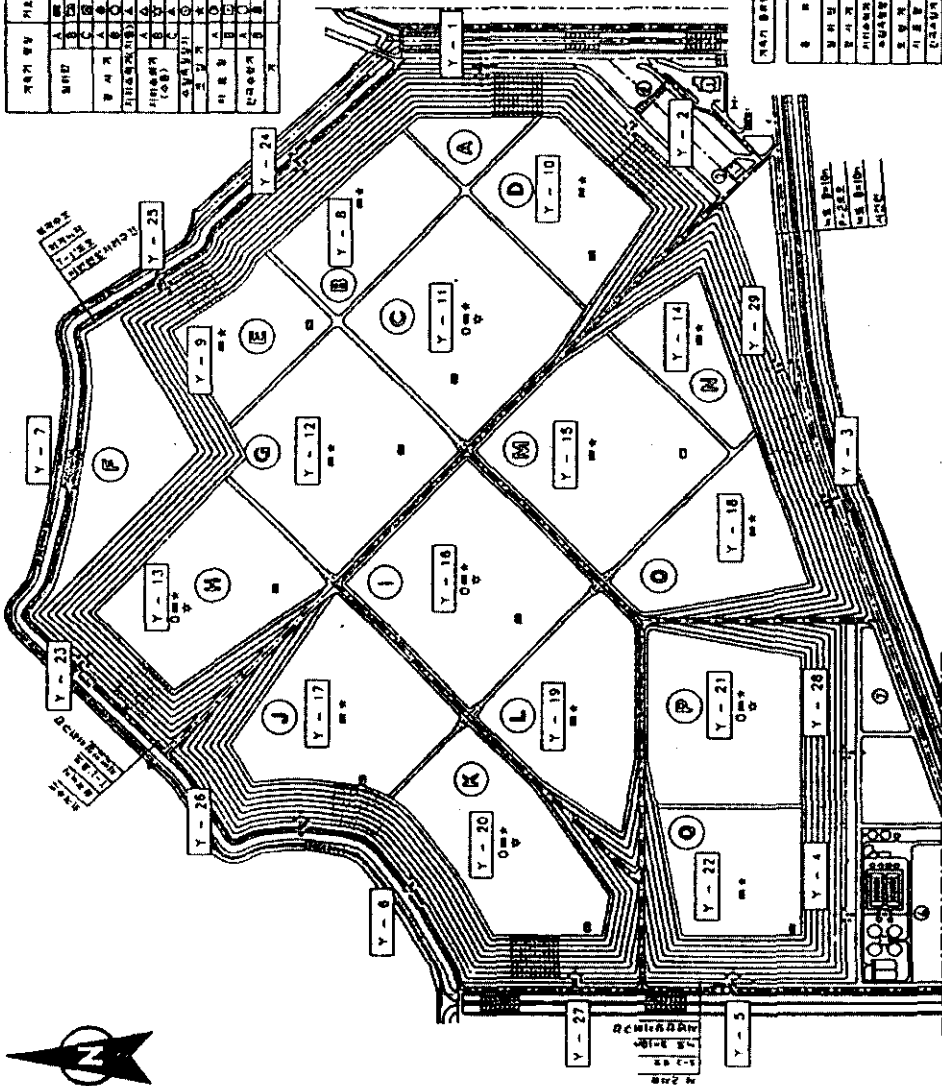
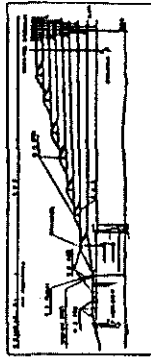
그림 15. 변경후의 제체사면의 계측기 설치 표준도



명 령

계측기 명칭	계	종	구	년	월	일	번호	비	고
보통기	1	보통기	1	1952	11	15	1152	1152	1152
보통기	2	보통기	1	1952	11	15	1152	1152	1152
보통기	3	보통기	1	1952	11	15	1152	1152	1152
보통기	4	보통기	1	1952	11	15	1152	1152	1152
보통기	5	보통기	1	1952	11	15	1152	1152	1152
보통기	6	보통기	1	1952	11	15	1152	1152	1152
보통기	7	보통기	1	1952	11	15	1152	1152	1152
보통기	8	보통기	1	1952	11	15	1152	1152	1152
보통기	9	보통기	1	1952	11	15	1152	1152	1152
보통기	10	보통기	1	1952	11	15	1152	1152	1152
보통기	11	보통기	1	1952	11	15	1152	1152	1152
보통기	12	보통기	1	1952	11	15	1152	1152	1152
보통기	13	보통기	1	1952	11	15	1152	1152	1152
보통기	14	보통기	1	1952	11	15	1152	1152	1152
보통기	15	보통기	1	1952	11	15	1152	1152	1152
보통기	16	보통기	1	1952	11	15	1152	1152	1152
보통기	17	보통기	1	1952	11	15	1152	1152	1152
보통기	18	보통기	1	1952	11	15	1152	1152	1152
보통기	19	보통기	1	1952	11	15	1152	1152	1152
보통기	20	보통기	1	1952	11	15	1152	1152	1152
보통기	21	보통기	1	1952	11	15	1152	1152	1152
보통기	22	보통기	1	1952	11	15	1152	1152	1152
보통기	23	보통기	1	1952	11	15	1152	1152	1152
보통기	24	보통기	1	1952	11	15	1152	1152	1152
보통기	25	보통기	1	1952	11	15	1152	1152	1152
보통기	26	보통기	1	1952	11	15	1152	1152	1152
보통기	27	보통기	1	1952	11	15	1152	1152	1152
보통기	28	보통기	1	1952	11	15	1152	1152	1152
보통기	29	보통기	1	1952	11	15	1152	1152	1152
보통기	30	보통기	1	1952	11	15	1152	1152	1152

계측기설치 표준도



구	비	고
1	1152	1152
2	1152	1152
3	1152	1152
4	1152	1152
5	1152	1152
6	1152	1152
7	1152	1152
8	1152	1152
9	1152	1152
10	1152	1152
11	1152	1152
12	1152	1152
13	1152	1152
14	1152	1152
15	1152	1152
16	1152	1152
17	1152	1152
18	1152	1152
19	1152	1152
20	1152	1152
21	1152	1152
22	1152	1152
23	1152	1152
24	1152	1152
25	1152	1152
26	1152	1152
27	1152	1152

그림 16. 보원후 제1공구 계측기 설치 평면도

## 6.6 사용종료 매립장에 필요한 계측 및 사례

### 6.6.1 사용종료 매립장에 필요한 계측사항

매립중과 마찬가지로 매립완료 후에도 매립 쓰레기에 대해서 쓰레기 질의 변화나 매립층의 침하량을 추정·측정하고, 장래에 침출수 처리 시설의 운전계획 및 매립지 이용계획 등에 이용한다. 한편 생활환경의 보전 및 환경오염의 방지라는 관점에서 환경영향 평가나 최종처분장 정비계획에 대한 사후 조사를 실시하고, 매립 완료후에도 환경모니터링을 실시하여야 한다. 사용종료 후 필요한 계측사항은 다음과 같다.

#### 매립지 안정화(침하량) 조사

매립지의 안정화상태를 파악하기 위해 매립층침하의 경우는 침하판과 수준점을 1ha당 1개소씩 설치하여 월 1회 이상 조사하여야 하며 가스(gas)의 발생상태를 계절당 1회 조사한다.

쓰레기 최종처분장의 매립층침하는 보통의 성토침하인 압밀침하 이외에 유기분해에 의한 침하요소가 복합되어 있어 토질공학 및 유기성분의 분해에 의한 감량화 등으로부터 침하율을 조사함으로써 매립층침하현상을 확인할 수가 있다. 일반적으로 초기압축조건 및 쓰레기 종류등에 따라 차이가 있으나 매립초기에 약 15%, 2년도에 약 6%, 계속 2~4년에 걸쳐 약 3% 정도 침하가 계속되어 최종적으로 전체의 약 1/3정도로 침하된다고 한다(환경처, 1991). 또한 매립지의 침하는 최초 5년 이내에 최종 침하량의 90% 정도가 이루어지는 것으로 알려져 있다. 냉장고나 세탁기 등 대형 쓰레기나 슬러지 등 함수비가 높은 쓰레기가 그대로 매립되었을 경우 지반침하가 불균일하여 지반에 균열이 발생하게 되어 위험하므로 관리에 주의를 요하며 매립 당시 다짐도를 최대로 하는 것이 중요하다.

매립지의 안정화는 매립종료후 10년여에 걸쳐 이루어지는 것으로 나타나므로 10여년이 경과되기까지는 매립지 부지에 구조물을 설치

할 경우 파일기초를 적용하며 화재 및 폭발 방지 등을 충분히 고려하지 않는한 시설하지 않는 것이 바람직할 것으로 판단된다(환경처, 1991). 매립장이 사용종료된 후에는 충분한 조사와 관리가 이루어져야 하며 조사결과와 기록을 토대로 매립지의 안정화 추세에 따라 향후의 토지이용계획이 수립되어야 한다.

#### 가스 및 악취도 조사

최종처분장의 최종복토를 실시하여 매립이 완료되면, 매립지는 커다란 면적의 평탄지로 변하게 된다. 그러나, 최종처분장의 하층에서는 쓰레기가 생분해하면서 침출수를 배출하며, 메탄등의 가스를 발생하고 있기 때문에 매립지는 오랜시간에 걸쳐 침하를 계속하고, 가스가 지중을 투과하여 지표로 새어나오거나 분출한다.

이러한 사용종료 매립지에서는 외기온도, 가스온도, 발생가스량, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, NO, 및 악취도에 대한 조사가 이루어진다.

악취의 모니터링에서는 매립지 주변의 생활환경 조건이나 측정일의 기상조건등을 고려하여, 측정지점 및 측정시기를 결정하여야 하지만 일반적으로 봄과 여름에 각 1회/1일, 매립부지 경계의 2~3지점에서 모니터링을 실시한다. 측정항목은 기기분석에 의한 악취 8항목(암모니아, 메틸메르캅탄, 황화수소, 황화메칠, 트리메칠아민, 아세트알데히드, 스칠렌, 2황화메틸) 및 관능시험(3점 비교식 취대법)에 의한 방법이 있으며 쓰레기의 질 및 지역의 상황에 맞게 선택하여야 한다.

이외에도 소음, 진동, 동식물, 경관 등에 대하여도 필요에 따라 모니터링을 실시한다.

### 6.6.2 난지도 사용종료 매립장의 계측사례

본절에는 난지도 매립장의 개요 및 계측기매설 현황을 간략히 설명한 후 난지도 매립지 안정화 조사를 위한 일련의 보고서를 참고하여(서울특별시, 1994a, b, 1996; 선경(주), 1996)

난지도 사용종료 매립장의 지하수 관측정과 지표지질탐사를 통한 누적수위 및 침출수질 조사, 침하판을 이용한 침하량 예측, 가스발생량 예측을 통한 향후 가스 발생추이 분석결과 등을 소개하였다.

### 매립장의 개요

난지도매립지는 1978년 매립이전에 EL 2m-8m의 평탄지였던 것이 1993년 3월말 폐쇄되기까지 약 92,000,000m<sup>3</sup>의 매립된 폐기물로 인하여 EL 94m-98m의 거대한 쓰레기 산을 형성하였다. 현재 1,094,000m<sup>2</sup>의 제1매립지와 707,000m<sup>2</sup>의 제 2매립지로 분할되어 있으며 각 매립지 중간에 면적 105,435m<sup>2</sup>의 곡간부가 위치하고 있다.

그림 17에는 난지도 안정화 공사 실시설계

시 작성한 난지도 매립지의 매립단면도와 하부 지질층의 개요를 나타낸 것이다. 보는 바와 같이 하부지반이 사질토로 구성되어 현재의 폐기물 관리법(환경부, 1996)에서 요구하는 바와 같은 차수조건을 충족시키지 못한 채 쓰레기가 매립되었음을 알 수 있다. 난지도 매립지에는 기본설계 및 실시설계 기간에 걸쳐 표 9에 보인 바와 같은 계측기들이 매설되었다.

표 9. 난지도에 매설된 계측기의 현황  
(서울특별시, 1996)

항 목	기본설계	실시설계
경 사 계	6	4
침 하 관	40	20
간극수압계	-	5
지층침하계	2	-

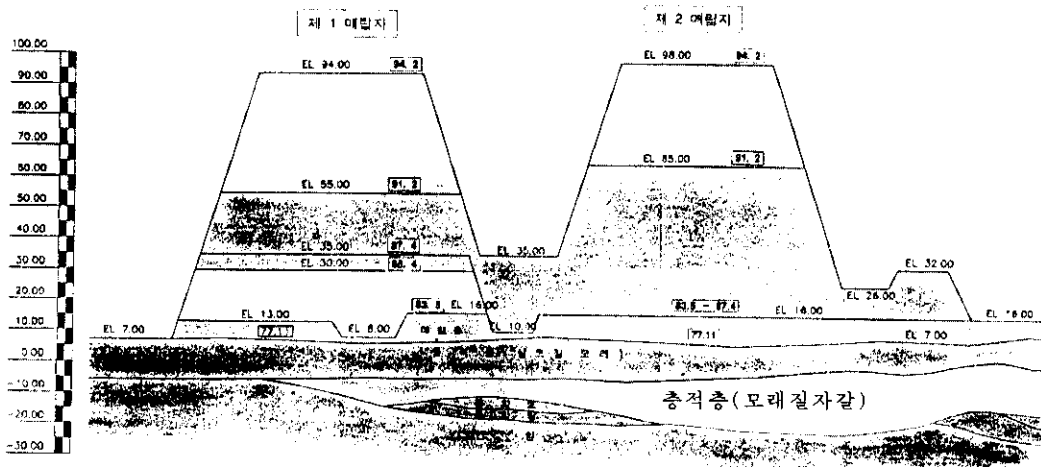


그림 17. 난지도 매립지의 매립단면도와 하부 지질층의 개요도(서울특별시, 1996)

### 누적 침출수위면 조사

매립지의 정확한 누적 침출수위면의 파악은 누적침출수로 인한 폐기물 매립 사면의 안정성과 매립장내 침출수의 주변 지반으로의 이동성을 분석하는 데 중요한 자료가 된다. 난지도의 경우 매립장 내의 폐기물이 분해되면서

나타나는 온도상승과 매립지 표면으로부터 침투된 강우, 내부 가스압력 등으로 인하여 표면 근처의 국부 침출수와 매립지 내의 실제 침출수위를 나타내는 기저수위로 나누어져 있다. 매립지 내에서의 지반조사가 어렵고 비용이 많이 소요되는 이유인하여 기저수위의

높이는 많은 불명확성을 안고 있었다.

이에대한 정확한 정보를 확보하기위하여 실시된 매립지내부와 주변지반에서의 조사는 다음과 같으며 그위치는 그림 18에 나타내었다 (서울 특별시, 1994. a. b).

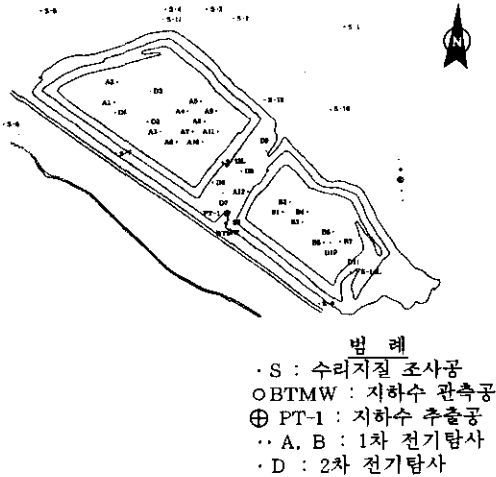


그림 18 난지도 지하수위 계측지점 위치도

- 1) 다목적관측공(S-series)의 수위 : 난지도 매립지를 중심으로 하여 그 상·하부 구배구간에 NX size(시추공 직경 3in)로 14공을 시추하였고 그 결과는 표 10과 그림 19와 같다.
- 2) 양수시험정(PT-1) 및 BTMW(Bundle Type Monitoring Well)의 수위: 양수시험정(PT-1)은 총 60m를 굴착하였으며 비고결암 구간은 직경16-20in로 굴착하여 직경 8in의 유공관 16m를 설치하였다. BTMW(Bundle Type Monitoring Well)는 각 대표지층별 potential head와 지하수위의 수직흐름특성을 해석하기 위해 양수시험정(PT-1)의 하부구간에 총심도 55m의 1개공을 설치하였다. 각 층의 potential head를 측정하기 위하여

매립구간, 상·하부 층적층, 풍화대, 기반암 구간에 직경 2 in의 piezometer를 5개소 설치하였다. 그 수위측정 결과는 표 10과 그림 19와 같다.

- 3) 전기수직탐사(VES)에 의한 수위: 93년도 12월 1차 조사는 난지도 제 1매립지(A-series로 표기)와 제 2매립지(B-series로 표기)의 기저침출수의 부존상태와 난지도 주변에서의 침출수 분산형태와 오염도의 개괄 추정을 위하여 총 19 지점에서 수행되었다(A series로 표기). 94년도 2월에 수행된 2차 전기수직탐사는 난지도 매립지 상부에 존재하는 응축 및 부유침출수의 존재 여부와 그 부존양태를 추정하기위한 목적과 1차 탐사시 미진했던 탐사지점의 보완을 목적으로 수행되었다(D series로 표기). 제 1매립지에는 5개 지점(D-1~D-5)에서 제 2매립지에는 2개 지점(D-10, D-11)에서 제 1매립지와 제 2매립지 사이의 지역에서 4개 지점(D-6~D-9)에서 전기수직탐사가 수행되었다(표 11 및 그림 20).

표 10와 그림 19에서 알 수 있듯이 난지도 매립지에서 지표고가 높아질수록 기저침출수위가 상승하는 양상을 보이고 있는데 지표고가 약 40m일 때 수위는 약 20m에 형성되고, 지표고가 약 60-98m일 때 수위는 약 40m에 형성되고 있음을 알 수 있다.

표 11과 그림 20의 전기수직탐사의 해석결과는 제1매립지에서 기저침출수위는 지표고가 89-94.8m일 때  $37.8 \pm 4.3$ m부근에 존재하고 제 2매립지 역시 제 1매립지와같이 위치에 따라 다소 차이를 보이지만 지표고가 51-98.5m일 때  $39.15 \pm 6.05$ m부근에 기저침출수위가 존재하는 것으로 나타났다. D-11의 비저항치는 S-14L의 결과치와 잘 일치하는 것으로 판단되며 S-14L 관측정에서 초기에 측정한 수위(지표고 51.42일 때 수위는 EL 25.22m)는 기저 침출수위인 것으로 나타났다.

표 10. 난지도매립지 및 그 인근지역의 지하지질분포 조사공(초기수위 1994/1·2월)

공번	표고 (m)	지하수위 (EL)(m)	
S-1	7.694	6.894	
S-2	7.422	6.322	
S-3	9.403	6.803	
S-4	8.330	8.090	
S-5	17.093	12.913	
S-6	6.340	3.190	
S-7	14.705	2.845	
S-8	20.191	4.351	
S-9	15.392	3.672	
S-10	9.139	5.209	
S-11	5.601	4.451	
S-12	8.294	4.464	
S-13L	48.480	37.980	
S-14L	51.420	25.220	
BT MW	BM-1	3.937	
	BM-2	3.967	
	BM-3	20.067	4.017
	BM-4	4.007	
	BM-5	4.677	
PT-1	20.382	4.142	

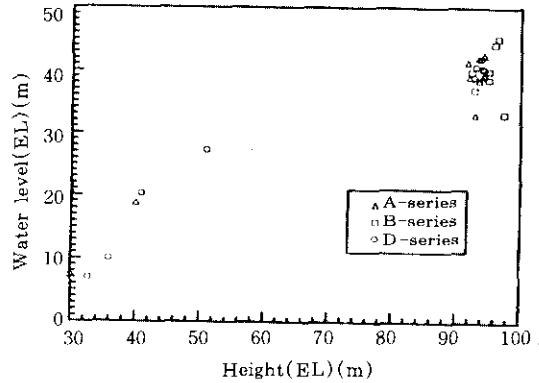


그림 20. 전기수직탐사에 의한 난지도 매립지내 기저침출수위

### 난지도 매립장의 침출수 수질

난지도 기본 계획 보고서(서울특별시, 1994)에서는 난지도 매립지의 침출수질을 파악하기 위하여 '94년 2. 5. 9월에 평균 5회에 걸쳐 사면 누출형태의 침출수(LE), 난지도 외곽 보오링에 의한 지하수와 혼합된 침출수(SE), 상부분출 침출수(CE) 등 11지점의 관측정을 통하여 수질을 검사하였다. 그결과 매립 후 오랜 시간이 경과한 매립 하부 지점은 안정화가 상당히 진행되어 오래된 매립지의 침출수 형태를 나타낸 반면 상부매립지점의 굴착 관측공내(상부 20-40m 구간)에 포집된 침출수(CE)는 산 생성 단계의 왕성한 분해시기 침출수질을 나타내고 있었다.

BOD는 일반적인 매립지 침출수에 비하여 농도가 낮으며 매립 경과년수가 오래된 침출수와 특성이 비슷하였는데 BOD/COD비가 0.15이하로 생화학적으로 분해가능한 유기물의 양이 낮은 것으로 나타났다. 누출 침출수 4개지점 중 2매립장의 BOD가 가장 높았다. 난지도 매립지 침출수중의 질소 농도는 국외 문헌의 조사결과와 비교하면 높은 편에 속하는데 그 이유로는 우리나라의 폐기물 특성상 음식 쓰레기가 많기 때문으로 볼 수 있다. 침출수의 pH가 6.8~8.7(8.2)정도이며 COD크롬의

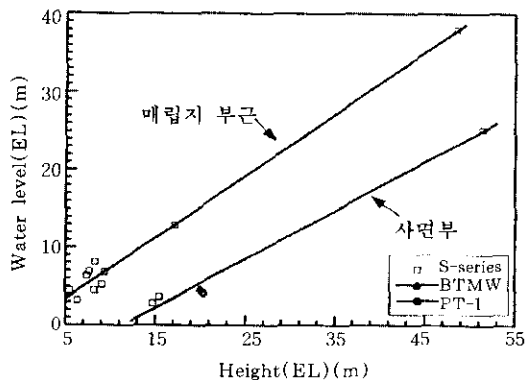


그림 19. 관측공(S-series, BTMW)와 양수시험정을 이용하여 측정한 난지도 주변과 매립사면부의 지하수위

표 11. 전기탐사에 의한 난지도 매립지내 기저침출수 분포구간

내 용	측정지점	표고(EL) (m)	기저침출수(EL)(m)	비 고
1 매 립 지	A-1	94.3	39.3	
	A-2	93.0	33	
	A-3	94.2	42.6	
	A-4	93.4	42.1	
	A-5	93.4	41.1	
	A-6	94.0	39.0	
	A-7	93.5	38.5	
	A-9	91.7	41.4	
	A-10	94.0	39	
	A-11	92.0	39	
	D-1	94.3	40.2, 41.3	A-1 인근
	D-2	93.8	42	A-3 인근
	D-3	93.7		sludge 구간
	D-4	92.7	40.4, 39	A-10 인근
	D-5	93.0	40.7	A-9 인근
범위		89-94.8	36.7-42.6	
평균			37.8±4.3	
1-2 매 립 지	A-12	40	18.8	
	D-6	40.9	20.3	제1매립지 남동쪽 사면
	D-7	30.1	7.2	PT-1 상류
	D-8	36.0	10	
	D-9	32.9	7	
범위		30.1-40.9	7-20.3	
평균		35.5±5.4	3.65±6.65	
2 매 립 지	B-1	97.5	33.1	
	B-2	96.5	45.2	
	B-3	92.8	36.9	
	B-4	96.0	44.3	
	B-5	62.3	39.8	
	B-6	95.0	40	
	B-7	95.0	38.6	
	D-10	94.0	42.4, 40.4	
	D-11	51.0	27.3	S-14L(제2매립지 남동쪽 사면)
범위		41-98.5	33.1-45.2	
평균			39.15-6.05	

농도는 대부분 1,050-5,900mg/l(2200mg/l)정도, COD/TOC도 대부분 1.5이하로 나타났다.

### 난지도 매립장 쓰레기의 침하 특성

매립지내 폐기물층의 토성시험 결과 유기물층의 입도분포는 시험대상 유기물 시료의 경우 균동계수  $C_u = 4 \sim 30$ , 유효입경  $D_e = 0.3 \sim 1.3\text{mm}$ 의 범위로 나타나 조사위치에 따라 다소 차이가 있는 것으로 나타났으며, 입도분포는 시료에 따라 빈입도(poorly graded)와 양입도(well graded)를 나타낼을 알 수 있었다. 유기물 시료의 경우 No. 200체를 통과하는 세립분의 양은 모두 3% 미만으로 나타났으며 통일분류법에 의해 분류하면 SW, SP로 분류될 수 있었다(서울 특별시, 1994. ab).

자연함수비는 시료채취위치에 따라 상이하나 대체로 50%이내에 분포하고 있음을 알 수 있었으며 비중은 형질, 비닐, 나무조각의 함량이 많을수록 비중은 감소하는 경향을 보였다. 전체적으로 유기물이 있는 층의 비중은 2.14-2.70의 범위로서, 조사 대상 유기물의 경우 우리나라에 많이 분포하는 화강풍화토의 비중 2.6-2.8 보다 약간 작은 것으로 평가되었다.

서울시 기본 조사계획시 매립지에 총 40개소의 침하판울 설치 203일간에 걸쳐 침하량을 측정한 결과 매립지반의 비균질성으로 인하여 위치에 따라 150mm-1,470mm 정도로 심한 기복을 나타내었다. 제 1매립지의 경우 산업폐기물이 집중적으로 매립되었을 것으로 판단되는

지점의 부동 침하가 1000mm이상의 큰 값을 보이고 있으며 제방과 인접 외곽도로 부근의 침하는 150-300mm 정도인 것으로 나타났다. 제2매립지의 경우는 폐기물이 매립된 구간별로 중앙부에 침하가 집중되는 경향을 보이고 외곽부는 250mm정도이며 지점별로 불규칙한 양상을 나타내었다.

### 매립가스 성상 변화 예측

현재까지로 난지도 매립지에서 수행된 매립가스성상 조사는 이승무 교수팀의 3년에 걸친  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  4성분의 조사, 서울시 지도 기본 계획 조사시 대우 엔지니어링(1992)과 기본 설계조사로 삼성건설(1994)에 의하여  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ 의 6가지 성분에서 수행된 기록이 있으며 표 12에 요약 하였다.

표 13. 발생량 예측에 사용된 매립 폐기물의 분류 및 반감기(서울 특별시, 1994)

폐기물의 종류	분 류	반감기(년)		
		Case1	Case2	Case3
음식, 주방쓰레기	급속분해물질	1	5	1
종이, 섬유, 나무	중속분해물질	2	15	15
프라스틱, 가죽, 고무	저속분해물질	20	40	40

이 결과를 보면 난지도 매립지 메탄가스 성분 최대치는 1991년도 평균 68%로 그 후 조금씩 감소하는 추세를 보이고 있어 안정화 단계로 들어서고 있음을 알 수 있다.

표 12. 문헌에 나타난 난지도 매립지 매립가스 조성 성분

	$\text{CH}_4$	$\text{CO}_2$	$\text{N}_2$	$\text{O}_2$	$\text{NH}_3$
이승무외, 1990	49.8-63.2(54.4)1	28.5-31.9(30.2)	6.6-17.1(12.1)	1.7-4.6(3.2)	N.A <sup>2</sup>
이승무외, 1991	63.2-71.5(68)	23.7-28.4(25)	2.0-7.1(4.5)	0.5-1.5(1.1)	N.A
이승무외, 1992	53.2-61.4(58)	34.1-38.3(35)	2.0-7.1(4.5)	0.5-2.0(1.1)	N.A
서울시, 1992	54.3-57.6(55.7)	39.2-42.2(41.1)	0.27-0.36(0.3)	0.07-0.09(0.10)	25.7-31.7(28.8)
서울시, 1994	48.1-54.7(51.2)	31.7-38.1(35.2)	2.45-11.3(6.5)	0.23-1.89(1.0)	19.9-26.6(23.5)

단위 : Vol(%)

주 : 1-평균값, 2-N.A.:Not Available

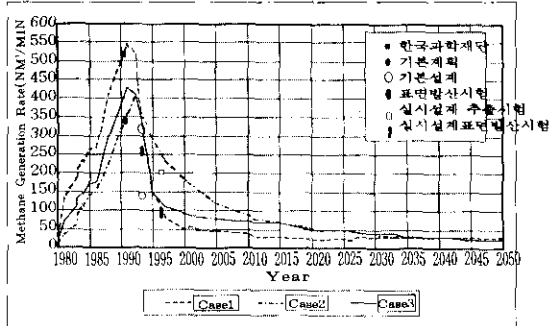


그림 21. 난지도 가스 발생량의 연도별 변화

서울시 기본설계 조사 (1994)시에는 향후 매립 가스발생량의 추정을 위하여 미국의 EMCON Associates가 캘리포니아 소재 Scholl Canyon 매립지의 가스포집 안정성 연구보고서를 통해 발표한 최적 혐기성상태 조성기간인 lag time을 고려하지 않은 1차 반응식의 가스발생량 추정모델을 사용하였다. 매립 폐기물을 표 13과 같이 급속, 중속, 완속 분해 물질로 분류하고 반감기를 3가지 경우로 가정하여 모델 해석을 한 후 현재까지 문헌에 나타난 난지도 매립지 가스발생량 조사 값과 비교하였다(그림 21).

표 14. 난지도 안정화 사업완료 후 관측정 운영계획(서울특별시, 1996)

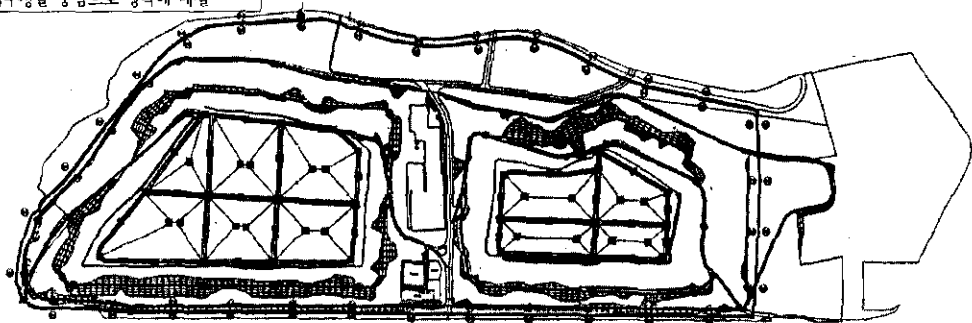
구 분	분석지점	분석주기	비고
매립지 내의 지하수위 및 수질 측정	6개소	분기별	기존 시설 이용
차수벽설치 지역 내외의 지하수위 및 수질 측정	62개소	분기별*	차수시설 내부 지하수질 31개소는 집수정 활용
매립지 주위 배경수질 측정	3개소	분기별*	난지천 및 상암동 지역
침출수 수질 분석(침출수 처리장 유입수 및 방류수)	1개소	주 1 회	침출수 원수는 임의 채취

주) \* 계절별 조사(2, 5, 9, 11월)

계측기 매설 위치	
침 하 판	상부부지정지의 정점, 권역별 내부도로의 중간지점, 교차로 및 곡선부 지점
간극수압계 경사계	내부도로의 교차 및 곡선부 지점에 설치한 침하판 지하부의 사면유지관리도로 부근에 매설
수 위 계	집수정을 중심으로 양쪽에 매설

S=1 : 10,000

수량 집계표	
침 하 판	66 개소
간극수압계	17 개소
경 사 계	17 개소
수 위 계	62 개소



- NOTE. 1. 경사계는 하부가 고정될수 있도록 풍화암 1m까지 예설한다.  
 2. 간극수압계는 1EA의 Hole에 2EA의 Sensor를 설치하는 것을 원칙으로 한다.  
 3. 수위계는 한강수위를 기준하여 15m 길이에 설치한다.  
 4. 수위계는 집수정 사이에 설치하는 것을 원칙으로 한다.

범 례	
■	침 하 판
●	간극수압계, 경사계
○	수 위 계

그림 22. 실시설계에 나타난 난지도 매립지 계측 보안 평면도(서울특별시, 1996)



그림 21에 의하면 세가지 경우 모두 현재 1990년대 초의 최대 메탄가스 발생단계를 지나 급속히 감소하는 안정화단계로 들어서는 것으로 나타나고 있으며 난지도의 실제 분해 상황을 현장에서 확인한 결과와 비교한 결과 중속 및, 완속 분해 물질의 반감기를 길게 잡은 Case 3과 현장 조사 결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 1996년의 실시설계시 측정된 가스발생량 또한 이전의 예측자료와 유사한 경향을 나타내고 있다(서울 특별시, 1996).

### 안정화 사업시 계측기와 관측정보안

표 9에 나타난 기본설계 및 실시설계 시에 매설된 계측기 이외에도 난지도 안정화 사업의 사면안정성확보 및 침출수확산 방지 목적으로 설치되는 집수정과 차수벽 설치로 인하여 지중 내 응력 간극수압의 변화가 예상되어 새로운 계측기를 그림 22에 보인 바와 같이 매설하도록 계획하였다. 또한 차수시설의 설치효과 및 기능유지의 점검, 지하수위, 침출수위의 변화 등을 파악하여 오염물질 확산 여부를 알 수 있도록 위하여 기존 관측정의 이용과 동시 차수벽 설치지역 내외부에 각각 15개소씩 지하수 수질분석을 위한 지하수위 관측정을 설치하여 운영하도록 하였으며 관측횟수는 표 14에 나타낸 바와 같다.

### 참 고 문 헌

1. 건설교통부(1994), 지하수 법령집, 91p.
2. 동국대(1997), 누적수위 저감 및 우수의 최소 침출수화 방안 연구용역 보고서, 산업기술연구원 보고서, 12월.
3. 동아건설(1991), 수도권 매립지 건설사업 1단계 시설공사, 유지 관리용 계측기 매설보고서, 12월.
4. 이승무 외(1990, 1991, 1992), "매립지 가스(LFG) 추출 이용 기술에 관한 개발 연구 I, II, III, 한국 과학 재단, 12월.
5. 이승무(1993), "매립가스 추출과 이용 기술, "매립 신기술의 이론과 실제 -환경공학 및 지반

공학적 접근 -, 한국 과학 기술원, pp205-230.

6. 수도권 매립지 기술용역단(1995), "계측관리 안전점검 자료 현황", 4월.
7. 수도권 매립지 운영관리조합(1995), "수도권 매립지 1공구 매립작업 및 부대공 사-계측관리 종합보고서", 4월.
8. 수도권 매립지 운영관리조합(1995), "수도권 매립지 1공구 기반시설보완(지반 안정성 및 지하수오염(중금속) 평가분야) 연구보고서", 8월.
9. 서울특별시(1992), "난지도 환경 오염 방지 및 안정화 대책 ", 기본 계획 보고서, (주) 대우 건설 기술 연구소.
10. 서울특별시(1994a), "난지도 매립지 안정화 공사", 기본 설계 보고서, (주) 삼성 건설, 11월.
11. 서울특별시(1994b), "난지도 매립지 안정화 공사", 지반조사 보고서, (주) 삼성 건설, 11월.
12. 서울특별시(1996), "난지도 매립지 안정화 공사", 실시 설계 보고서, (주) 대우 엔지니어링, 9월.
13. 선정(주)(1997), 난지도 매립지 주변오염실태 및 향후 예측에 관한 연구, 3월.
14. 우남철(1996), 지하수 수질과 오염, 한국지하수 자원 보전 협의회, 6월.
15. 환경처(1991), 쓰레기 처리시설 구조 지침 및 해설, 3월.
16. 환경처(1992), 수도권 매립지 건설사업 1단계 시설공사, 계측관리 종합보고서, 1월.
17. 환경처(1994), 지하수 수질 보전 등에 관한 업무 처리 지침, 43p.
18. 홍문각(1997), 환경관련 법규(폐기물편), pp. 375.
19. Barcelona, M.J.(1984), TOC Determination in groundwater, Groundwater, Vol. 22, No. 1, pp. 18-24.
20. Barcelona, M.J., Gibb, M.J., Helgrich, J.A., and Garske, E.E.(1985), Practical Guide for Groundwater Sampling: Illinois State Water Survey, SWS Contract Report 374, Champaign, Illinois, 93pp.
21. Driscoll, F.G.(1986), Groundwater and Wells, 2nd ed., Johnson Division, St. Paul, MN, pp 1089.
22. Johnson, T.L.(1983), A Comparison of Well

- Nests Versus Single-well Completions. Ground Water Monitoring Review, Vol. 3, No. 1, pp.76-78.
23. National Water Well Association and Plastic Pipe Institute (1981), Manual on the Selection and Installation of Thermoplastic Water Well Casing, National Water Well Association, Worthington, Ohio, 64pp.
  24. Pickens, J.F., Cherry, J.A., Coupland, R.M., Grisak, G.E., Merrit, W.F., and Risto, B.A.(1981), A Multilevel Device for Groundwater Sampling. Ground Water Monitoring Review, Vol. 1. No. 1, pp. 48-51.
  26. Rehtlane, E.A. and Patton, F.D.(1982), Multiple Port Piezometers vs. Standpipe Piezometers: An Economic Comparison, Proceedings of the Second National Symposium on Aquifer Restoration and Groundwater Monitoring, National Water Well Association, Worthington, Ohio, pp. 287-295.
  27. USEPA(1975), Manual of Water Well Construction Practices; U.S. EPA, Office of Water Supply, EPA-570/9-75-0001, 156pp.
  28. USEPA(1991), Handbook of Suggested Practices for the Design and Installation of Groundwater Monitoring Wells. USEPA Report, EPA/600/4-89/034, Mar..
  29. USEPA(1993a), Subsurface Characterization and Monitoring Techniques: A Desk Reference Guide, Vol 1. Solids and Groundwater, US EPA Report, May.
  30. USEPA(1993b), Subsurface Characterization and Monitoring Techniques: A Desk Reference Guide, Vol 2. The Vadose Zone, Field Screening and Analytical Methods, US EPA Report, May.