

지하 하수 처리장의 설계사례

김 호영
SK건설 토목기술팀

1. 서 론

우리나라의 생활 하수 발생량은 1980년 하루 6백76만톤에서 1994년에는 1천4백63만톤으로 14년동안 2배 이상 증가하였으며, 폐수는 1980년 하루 1백96만톤에서 1995년에는 8백84만톤으로 4.5배 늘어났다. 이와 같이 하수와 폐수의 발생량이 경제 성장을 웃돌아 증가함에 따라 미처리된 하수의 방류로 인해 하천과 바다의 오염이 늘어나고 있다. 정부에서는 1970년부터 대대적으로 하수관망을 정비하고 하수 처리장을 건설하여 왔으며, 1976년 150,000톤/일 규모의 청계천 하수처리장의 준공을 시작으로 1999년 현재 우리나라의 하수 처리능력은 150개 하수처리장에 시설용량은 17,711,000톤/일 규모로 확대되었다. 이에 따라 1999년말 현재 하수도 보급율은 68%에 이르지만, 정부는 2005년까지 190여개의 하수처리장을 추가로 건설하여 하수처리율을 80%까지 향상시킬 계획이다. 하수 처리장의 건설을 위해서는 넓은 부지가 필요하며, 운영 중에는 불쾌한 냄새 등으로 인해 주변 지역에 새로운 환경 문제를 유발하고 있다. 민원으로 인해 부지확보가 어려워짐에 따라 정부에서는 처리장을 구조물로 완전히 엄격하여 그 상부는 주민 친화시설을 조성하는 방안을 강구 중이며, 부지 활용도를 높이기 위하여 복층식 하수 처리장을 건설하는 방법도 이용하고 있으나, 이에 따라 건설비용은 대폭적으로 증가할 것으로 예상된다.

스웨덴, 노르웨이, 핀란드와 같은 북유럽 국가들은 하수 처리장의 입지 대책으로 오래 전부터 지하 공간을 활용하고 있다. 지하 하수처리장은 도시 공간의 효율적 이용, 에너지 절약, 환경보전 등 여러 가지 이점을 가지고 있을 뿐만 아니라 조건에 따라서는 지상 시설에 비해서도 경제적으로 건설이 가능하다. 우리 나라는 지형이나 지질 조건이 이들 나라와 매우 유사하여 도심이나 도시 주변에 지하공간 개발에 적합한 지역이 많다. 또한 그 동안 지하 유류비축기지, 지하 양수 발전소, 지하철과 같은 대규모 지하공간의 건설이 활성화됨에 따라 안전하고 값싼 지하 구조물의 건설기술이 정착되어 있다. 따라서 앞으로 하수 처리장의 건설을 위해 전국적으로 넓은 면적의 부지가 필요한 점을 감안한다면 외국과 같이 지하공간을 활용하는 방안을 강구할 필요가 있다 하겠다.

2. 우리나라 하수도 정책 방향

우리나라의 하수도 정책방향을 요약하면 표 1과 같다(박희정). 즉, 하수처리 체계는 BOD 및 SS 처리 위주에서 질소, 인 처리로 전환하여 하수 처리장에 탈질 및 탈인공정을 도입하게 되었다. 또한 1990년대 중반까지 오염발생원의 하폐수를 먼 거리까지 이송, 집합시켜 대규모 하수 처리장에서 함께 처리하던 종전의 방식을 전환하여 오염 발생원에서 현장 처리하는 중소규모 하수 처리장 위주로 건설함으로써, 소하천의 건천화를 방지하고, 하수차집과 이송과정에서 다량의 불명수 유입을 사전 예방하여 처리장의 효율 향상을 도모하게 되었다(최근웅).

표 1. 우리나라 하수도 여건 변화 및 대응전략

과 거	여 건	금후 대응방향
홍수방지 위주 하수 배제	하천수질 악화, BOD 중심의 처리, 호소, 하천 부영양화	질소, 인 중심의 고도처리
행정구역 단위의 광역관리	관로 유지비 증가, 소하천 건천화	발생원 중심의 중소규모 시설 설치
합류식 위주 관거 설치	유입수질 저농도, 처리효율 저하, 실제와 차이가 있는 하수 처리율 사용	우수 및 오수 분리관거 설치, 실질 처리율 개념 도입
시설관리 지방행정 조직 직접 운영	비전문성, 운영비용 과다, 기술개발 미진	민자유치 및 민간 경영기법 도입

우리나라는 현재 하수도 보급율이 68%에 이르지만, 그 동안 하수관거 정비가 늦어지므로 방류 수역에 미치는 오염 부하량의 삭감으로 본 실제 하수 처리율은 낮아 4대강 수역의 수질개선이 가시화 되지 못하고 있다. 따라서 앞으로는 처리장 중심의 투자에서 하수관거 정비 우선 투자로 전환할 예정이다. 처리장 건설과 운영에 있어서도 그 동안 지방행정 조직이 직접 운영하는 방식을 탈피하여 건설 과정에서부터 민자유치를 유도하고 향후 운영도 투자자가 직접 수행하는 방향으로 전환하여, 민간의 경영기법 및 전문기술을 도입하는 하수도 사업 경영체계 개선을 지향하고 있다. 이러한 정책방향과 하수 처리장의 지하화 방안과의 관련성에 대해 고찰하면 다음과 같다.

첫째로, 고도처리 시설을 추가로 설치함에 따라 신설 하수처리장의 요구 면적이 증가한다. 현재 주로 사용되고 있는 기존의 활성오니법이 아닌 다양한 방법의 처리공정이 도입되면서 처리장 면적을 줄이는 노력이 진행되고 있지만, 이러한 공법들도 평면적을 줄이는 효과는 있지만 처리장의 전체적인 체적은 획기적으로 줄이는 데 한계가 있다.

두번째로 발생원 중심의 중소규모 하수 처리장의 신설을 위해서는 지역별로 많은 수의 하수처리장이 건설되어야 한다. 이는 대규모로 집약된 처리장을 건설하는 것과 비하여 입지 선정에 더 많은 제약을 가질 수 있다. 이러한 두 가지 여건을 고려한다면, 하수 처리장을 지하에 적극적으로 유치하므로써 입지 선정에 유연성을 가질 수 있다.

한편, 우수 분리 관거 방식을 도입함에 따라 하수량과 온도가 계절적 변화에 관계 없이 일정한 값을 유지하게 된다. 이러한 항상성을 이용하여 하수를 에너지 절약 시스템에 활용할 수 있으며, 쓰레기 처리장과 같은 혐오시설이나 여타 에너지 공급시설을 복합화 한 플랜트에 하수처리 시스템을 연계할 수 있는 가능성이 높아진다.

마지막으로 민자유치 방식이 활성화됨에 따라 기존에 개별적으로 추진되던 사업들이 보다 고도화 되고 복합화된 민간 사업 시스템으로 연결될 수 있는 방안이 제시될 수 있다 하겠다.

3. 하수 처리장의 건설 방식

하수 처리장은 최종 방류 지점 부근에 자연 유하가 가능한 곳으로서, 주변에 인구가 밀집되지 않은 개활지에 건설되어 왔다. 그러나 대도시에서는 하천변이나 해안에 이러한 지점을 찾기가 매우 어려운

실정이므로 냄새와 같은 환경 문제를 해소하고 부지를 작게 사용하는 방법을 추구하고 있다. 이러한 하수 처리장의 건설 방식은 그림 1과 같이 지상식, 엄개식, 복층식, 개착식, 지하동굴식 등과 같이 분류될 수 있다.

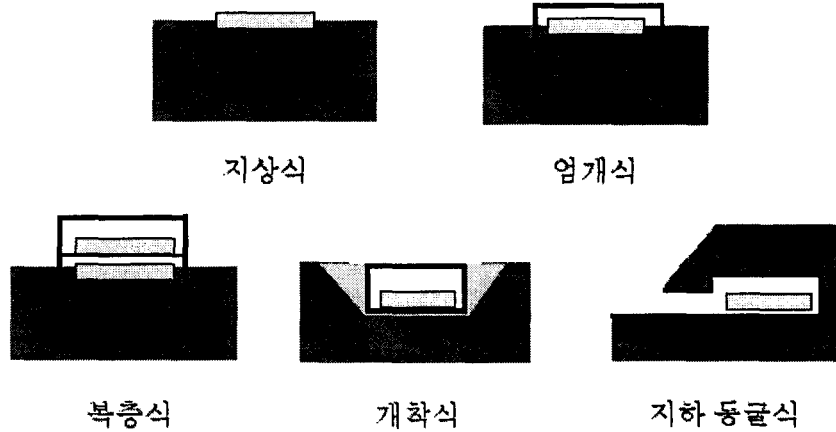


그림 1. 하수처리장의 건설 방식

- 지상식 : 일반적으로 하수 처리장은 평지에 다수의 침전지와 포기조를 평면적으로 배열하는 형태로 건설된다. 이와 같은 open-type은 기후 변화에 따라 처리 공정이 영향을 받을 뿐만 아니라 냄새, 거품, 소음과 같은 환경문제를 유발하여 민원대상이 되고 있다.

- 엄개식 : 냄새와 소음 문제를 해결하고 상부 공간을 공원, 주차장 등 시민 편의 시설로 활용하기 위하여 콘크리트 구조물을 구축하여 하수 처리시설을 완전히 엄개하는 방식이다. 지상식에 비하여 구조물을 위한 추가적이 비용이 요구된다.

- 복층식 : 부지가 부족한 경우 구조물을 복층으로하여 부지의 활용도를 높이는 방식이다. 상층 수조의 하중을 지지하기 위하여 하부 구조물이 매우 견고하여야 한다.

- 개착식 : 지반을 개착하여 지하에 시설을 유치하는 방식이다. 지압을 지지하기 위하여 견고한 구조물을 구축해야 하므로 건설비가 많이 든다. 그러나 처리시설이 완전히 지하로 유치됨에 따라 지상 환경을 쾌적하게 유지할 수 있다. 최종 방류 지점이 배수 수준보다 낮을 경우 별도의 펌프장과 배수 시설이 필요하며, 운영비가 많이 소요된다.

- 지하동굴식 : 산속으로 수평 터널을 굴착하여 견고한 암반 내에 처리장을 유치하는 방법으로서 최종 방류 지점 부근에 지형 및 지질적으로 양호한 조건의 산지가 필요하다.

이상의 하수 처리장 건설방식 중에서 지하공간을 활용하는 방법은 엄개식, 개착식 및 지하 동굴식으로 대별될 수 있으며, 이에 대해 각각의 특징을 정리하면 표 2와 같다.

엄개식 건설방식은 지상 부지의 활용성이 매우 제한적이라는 점에서 본격적인 의미의 지하공간 활용 방안은 아니라 할 수 있다. 개착식 건설 방식 또한 상부 부지를 다양한 용도로 사용하는 데 제약 조건이 있다.

지하 동굴식은 어느정도 규모 이상의 대단면 터널을 굴착해야 하는 지질조건을 갖춘 지역을 찾아야 하는 입지 선정의 제약을 제외하고는 많은 점에서 장점을 가지고 있다. 특히 도시 주변의 공원이거나 일반 임야 등 활용성이 크지 않은 산지를 활용하면 부지비용이 절감될 수 있으므로 전체 사업비 측면에서 유리할 수도 있다. 또한 산지의 규모가 충분히 크다면 쓰레기 처리장 등과 같은 타 환경시설과 복합적으로 건설할 수 있는 장점이 있다.

표 2. 지하 하수처리장 건설방식의 특징 비교

항 목	업개식	개착식	동굴식
입지 유연성	양호	양호	불리
부지 활용성	불리	보통	양호
경제성	양호	불리	불리
환경 친화성	불리	보통	양호
민원 유발	불리	보통	양호
유지관리	보통	불리	양호
장래 확장성	보통	불리	양호
내구성	보통	불리	양호

도시 공간의 입체적 활용과 미개발 공간을 활용하는 것이 지하공간 개발의 기본 개념이며, 지상 환경의 훼손을 최소화하는 것이 지하공간 개발의 목적이라는 점을 감안할 때 지하 동굴식 하수 처리장은 이러한 이념에 잘 부합하는 개발방식이라 하겠다.

4. 동굴식 하수처리장의 해외사례

특히 동굴식 하수처리장이 많이 건설된 지역은 북유럽 일대의 스웨덴, 노르웨이, 핀란드가 대표적인 나라이며, 이들 국가의 대표적 동굴식 하수처리장을 정리하면 표 3과 같다.

4.1 스웨덴

스웨덴은 1950년대 이후 총 15개의 하수 처리장이 지하에 건설되었으며, 이들의 처리 용량은 스웨덴 전체 하수 처리량의 30%에 달한다. 스웨덴은 지상 환경을 보호하고 불쾌한 냄새와 소음으로 인한 주변 지역의 환경 오염을 방지하기 위한 목적으로 하수 처리장을 지하에 건설하였다. 최근에는 하수 처리장 주위에 최소 200m의 완충 지대를 설치하도록 하는 규정으로 인해 적절한 부지를 구하기가 매우 어려워 도심의 산지를 이용하여 지하 처리장을 건설하고 있다. 또한 지하 환경은 온도와 습도가 일정하게 유지되므로 수처리 공정의 신뢰성이 대폭적으로 향상되었다.

헨릭스달(Henriksdal) 처리장

스톡홀름 시에는 4개의 하수 처리장이 모두 지하에 건설되었으며, 현재 3개가 운영되고 있다. 그중에서 가장 규모가 큰 헨릭스달 하수 처리장은 도심에 위치한 길이 800m, 폭 400m, 높이 40m의 나즈막한 산 밑의 견고한 암반을 굴착하여 지하에 건설되었다. 모든 시설물은 지하 동굴 내에 건설되었으며, 동굴은 지형과 지질 조건에 따라 적절히 배치되었다. 특히 터널의 크기와 방향은 암반공학적으로 안정성을 가장 효과적으로 확보할 수 있는 형태로 설계되었다. 지하 하수처리장은 시야로부터 완전히 감추어질 뿐만 아니라 기계 소음도 없으므로 지상 부지를 타용도로 사용하는데 아무런 지장이 없다. 냄새는 높은 굴뚝을 통하여 배출하고, 필요시 정화를 할 수 있다. 실제로 헨릭스달 처리장의 건설이 끝난 후에 그 상부에 아파트 단지가 건설되었다.

표 3. 북구 지역 지하 동굴식 하수처리장 사례

처리장명(도시)	처리 용량 (인구/Volume)	처리 방법	건설/ 운영년도	Engineering	비 고
<i>Sweden</i>					
Henriksdal (Stockholm)	725,000 P.E 370,000 m ³ /d	활성슬러지법 CPR	1차 1941 2차 1970	VA-technik	USD 95 mill
Bromma (Stockholm)	260,000 P.E 160,000 m ³ /d	"	1970		
Loudden (Stockholm)	30,000 P.E 19,000 m ³ /d	"	1차 1950 2차 1969		
Sickla (Stockholm)	800,000 P.E	활성슬러지법	1972		
Käppala (Lidingo)	500,000 P.E 140,000 m ³ /d	"	1969	VBB AB	USD 42 mill
Käppala Ext. (Lidingo)	700,000 P.E 216,000 m ³ /d	BNR	1998(신규) 2000(기존)	RUST VA-Projekt AB	증설 및 기존3차추가
Skansverket (Uddevalla)	100,000 P.E	활성슬러지법 CPR	1973		
Sundsvall	65,000 P.E	"	1970		
Trollhättan	62,000 P.E 45,000 m ³ /d	"	1차 1968 2차 1981	VBB AB	
Lysekil	60,000 P.E	"	1976	Purac AB, VBB AB	
Fjällbacka	5,000 P.E	"	1970		
<i>Norway</i>					
Veas (Oslo)	600,000 P.E	1차 (화학적)	1974~1986	Samfunnsteknikk (FBB)	
Nord Jæren (Stavanger)	240,000 P.E 350,000 m ³ /d	1 차 (화학적)	1989~1991 1992	Berdal Strømme a.s.	USD 60 mill
Ladehammeren (Trondheim)	120,000 P.E			Prosjektering a.s.	USD 13 mill
<i>Finland</i>					
Viikinmäki (Helsinki)	650,000 P/E 330,000 m ³ /d	활성슬러지법	1986~1994 1995	Saanio & Riekkola Consulting Engineer Rock Plan Ltd.	USD 196 mill
Kariniemi (Lahti)	50,000 m ³ /d	활성슬러지법	1977	Maa ja Vesi Oy	
Sipoo			1971	Maa ja Vesi Oy	
Raisio			1977	Kalliotekniikka Oy	

4.2 노르웨이

노르웨이는 수도 오슬로를 비롯하여 베르겐, 트론하임, 스타방게르 등 대도시들이 해안에 위치하고 있으며, 피요르드 해안지형의 특성상 평지가 부족하며 견고한 암반이 노출된 높은 산이 해안에 많이 분포한다. 이러한 지형적 특성으로 인해 많은 하수 처리장이 해안의 산 속에 지하 동굴식으로 건설되었다. 노르웨이 하수 처리장들은 통상 1차 처리만을 거친 후에 처리수는 터널을 통해 먼 바다의 해저로 방류하는 방식으로 설계되어 있다.

노르드예렌(Nord-Jæren) 처리장

스타방게르 지역의 5개 도시로부터 터널을 통해 차집된 하수는 해안의 견고한 암반 중에 건설된 노르드예렌 하수 처리장에서 처리되어 해저 터널을 통해 해안으로부터 1.8km 떨어진 바다 밑으로 방류된다. 처리장 규모는 처리인구 240,000명, 최대 처리 용량 340,000m³/day로서, 주된 시설은 산 속에 건설되었으며, 슬러지 처리시설과 사무실만 지상에 건설되었다. 건설공사는 1989년 2월에 시작되어 15개월 후에 처리장에 대한 발파 공사가 완료되었으며, 콘크리트 타설작업을 포함한 내부 시설공사에는 총 24개월이 소요되어 1992년 3월에 모든 공사가 완료되었다. 하수 처리공정은 스크린, 침사지, 전처리 및 침전지로 구성된다. 그림 2는 유입펌프장과 침사지의 측면도이다. 터널을 통해 유입된 하수는 -12.5m의 sump로부터 +7.5m의 스크린까지 양수된다. 응집제는 지하 처리장 내의 원통형 사일로에 저장된다.

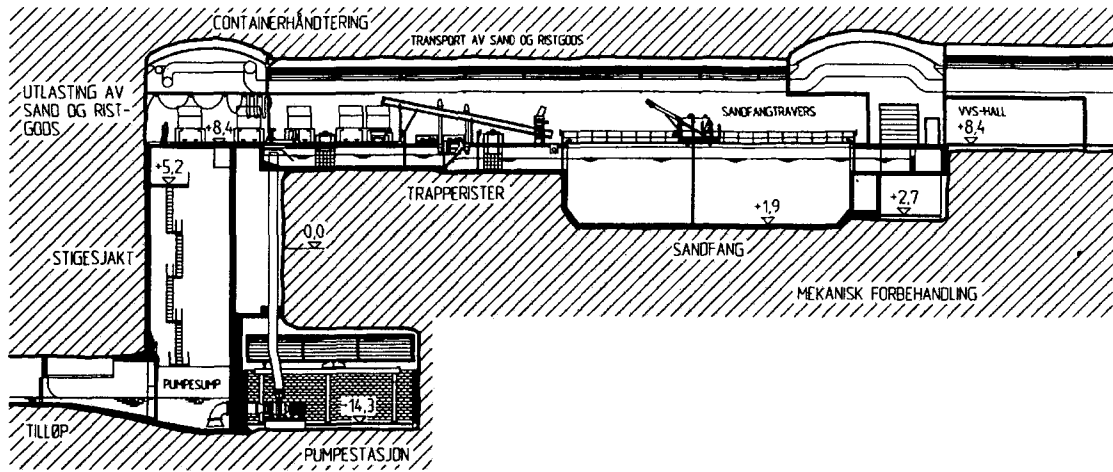


그림 2. 노르드예렌 처리장의 펌프장과 침사지

지하공간의 환기 시스템은 별도의 공조 설비로 구성된다. 처리장 동굴 30m 상부로부터 수직갱을 통해 유입된 맑은 공기는 펌프실, 침사지, 침전지, 진입터널, 제어실, 화학약품실로 배분되어 공급된다. 지하공간의 실내 온도는 18℃로 유지되며, 지하 처리장에서 오염된 공기는 지표로부터 30m 높이의 굴뚝을 통해 배출된다.

4.3 핀란드

헬싱키 중앙 하수 처리장

헬싱키의 첫 번째 하수 처리장은 1910년대에 건설되었다. 인구 증가에 따라 하수 처리장은 증가하여 1970년대 초에는 11개에 달하였지만, 집중화된 단일 처리장을 건설하여 처리 효율을 증대하고, 환경규제를 해결하기 위하여 1986년에 중앙 하수처리장이 계획되었다. 본 처리장은 헬싱키 시와 북쪽의 주변도시들을 포함한 처리인구 650,000명의 하수를 차집하여 처리하므로써, 기존에 운영되고 있던 지상의 5개 처리장 부지를 타당도로 재개발하게 된다.

중앙 지하 하수 처리장의 장점은 몇가지 요소로 나눌 수 있다. 기존 처리장들의 중심에 위치하며, 대상부지는 미개발지로서 지하 공사에 지장이 없으며, 지형적으로 충분히 높기 때문에 펌프장은 처리

장 유입부에만 건설하면 처리수는 최종 방류지점까지 자연 유하된다. 슬러지 처리를 포함한 모든 처리 시설이 지하에 건설될 수 있도록 부지 면적이 충분히 크며, 견고한 기반암을 갖추고 있다. 그림 3은 중앙 처리장의 시설 측면도이다.

● WASTEWATER TREATMENT PROCESS

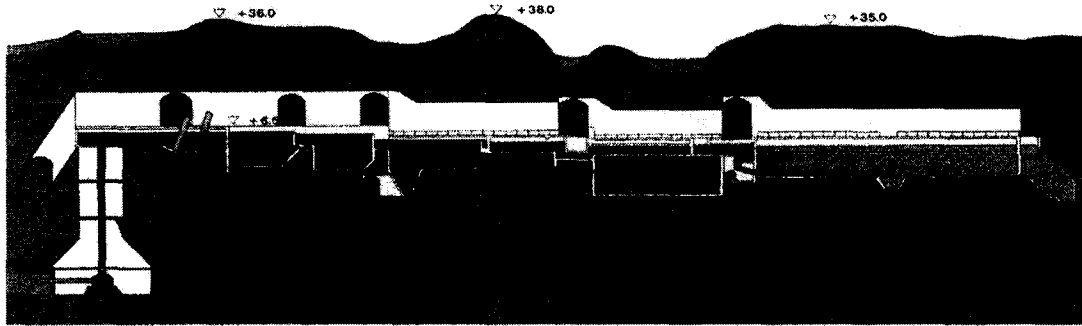


그림 3. 헬싱키 중앙 하수처리장 시설 측면도

처리방법은 활성 슬러지법으로서 1차 침전지, 포기조, 최종 침전지는 각 7지로 구성되며, 장래 일부 확장이 가능하다. 지하 처리장의 지표로부터의 심도는 10m 이상이나 골짜기 부분에서 표토는 불과 4m 밖에 되지 않는다. 그러나 처리 시설을 위한 동굴의 폭은 17~19m로서 표토 두께에 비해 매우 큰 편이며, 동굴 간격은 10~12m이다. 이에 따라 지하 동굴의 안정성 평가를 위해 암반공학적 해석이 실시되었다. 지하 시설의 설계는 시설배치에 따른 지하 구조물의 안정성 확보 및 물류의 최적화에 대해 중점적으로 검토가 이루어졌다.

5. 동굴식 지하 하수 처리장의 기술적 문제

5.1 지질 조건

지하 하수 처리장이 평면적으로 차지하는 공간은 시설용량에 따라 다르지만 처리용량 20만톤 규모를 가정할 때 처리시설의 전체 폭과 길이가 약 200~400m에 달하며, 부지 내에는 다수의 대규모 동굴이 평행하거나 교차하여 배치된다. 따라서 대상 부지는 지질적으로 균질하여야 하며, 지층 경계나 단층대, 대수층 등과 같이 공학적으로 불리한 지질 경계가 존재하지 않아야 한다. 즉, 암반은 균질하면서 단일의 대규모 암체로 구성되고, 대규모 파쇄대가 존재하거나 암반 절리가 대규모로 포함되지 않아야 한다.

또한 표토층이 깊으면 동굴 상부 경암층의 두께가 얇아지므로 안정성에 영향을 주게 되며, 터널 입구 형성을 위한 토공 비용이 증가하고, 상부 대수층의 두께가 증가하게 됨에 따라 지하수 조건도 불리하게 되므로 표토층은 깊지 않아야 한다.

따라서 기획 단계에서 입지 선정을 위해 충분한 지질 조사가 선행되어야 하며, 조사 내용이 정밀하고 정확할수록 설계의 신뢰도, 동굴의 안정성, 비용 분석의 정확도가 증가하게 된다.

5.2 동굴의 규모와 안정성

일반적으로 지하 동굴은 폭이 15~20m의 범위를 가지며, 폭과 높이가 커질수록 전체 굴착량은 감소하게 되어 경제적이다. 이러한 대규모 동굴은 그 동안 국내에서는 지하 유류 비축기지외와 지하 양수

발전소에만 적용되어 왔으며, 이들 시설은 통상 지하 60~100m 이상의 깊이에 건설되었다. 지하 하수 처리장에서 동굴의 심도는 30~40m 정도이거나, 지형적 조건에 따라 이보다 훨씬 얇아 질 수도 있다.

암반의 보강 방식은 통상 록볼트, 슛크리트, 철재지보, 콘크리트 라이닝이 사용되며, 안정성을 높이기 위해서 이들 보강은 복합적으로 사용된다. 그러나 지하 하수 처리장의 경우, 철재 지보나 콘크리트 라이닝과 같이 비용이 많이 드는 보강방식을 사용한다면 경제성을 확보하기 어려우며, 록볼트와 슛크리트 만을 사용하여 보강을 최소화하여야 한다. 따라서 심도 30m 내외에서 폭 20m 정도의 대규모 동굴을 록볼트와 슛크리트에 의해 유지할 수 있는 설계 및 시공 기술이 요구된다.

5.3 발파 진동

지하 동굴의 굴착공사는 발파에 의해 이루어진다. 발파는 지반의 진동을 유발시켜 주변 가옥과 시설물에 손상을 입힐 수 있다. 발파 진동이 전달되는 정도는 지반의 특성에 따라 달라지며, 거리가 멀어질수록 감소하게 된다. 따라서 설계 단계에서 주변 시설물과 관련한 지반의 발파 진동 특성에 대한 분석을 실시하고 필요시 발파 진동을 저감시키는 방안이 강구되어야 한다. 발파 진동을 감소시키는 기본적인 방법은 1회에 사용되는 화약의 양을 줄이는 것이며, 비전기식 뇌관, 다단 발파기 등과 같은 최신 장비를 사용하여 발파에 의한 피해를 방지할 수 있다.

5.4 지하수의 처리

지하에 동굴을 굴착하게 되면 주변 암반의 지하수가 동굴 내부로 흘러들게 된다. 이에 따라 지하수위가 저하되어 주변 환경에 영향을 줄 수 있다. 또한 동굴 내부로 흘러드는 지하수는 운영에 성가신 문제를 유발할 뿐만 아니라 장기적으로 동굴의 안정성에 영향을 줄 수 있으므로 이에 대한 대책이 필요하다.

기본적으로 지수공법을 이용하여 지하수 유입량을 감소시켜야 하며, 지수 공법으로는 주위 암반을 시멘트 액으로 그라우팅(grouting)하여 수리 전도도를 감소시키는 방법이 가장 일반적으로 사용되고 있다. 암반의 수리적 특성은 지점에 따라 매우 달라질 뿐만 아니라 파쇄대와 직접적인 관계가 있으므로, 터널이 진행 되기 전에 사전 조사를 통해 필요 지점에 대해 그라우팅을 집중적으로 실시함으로써 경제적이며 효과적인 시공이 이루어지도록 해야 한다.

지수 대책이 효과적으로 이루어졌다 하더라도 일부 지하수가 동굴 내부로 스며드는 것을 완전히 방지할 수는 없다. 이 경우 슛크리트나 콘크리트 구조물 후방에 배수 재료를 시공함으로써 유입되는 지하수를 적절히 유도 배수할 수 있다.

5.5 지하공간의 환기

지하 하수 처리장에서 발생하는 불쾌한 냄새와 유독 가스를 제거하고 주변 환경으로의 확산을 방지하며, 작업 환경을 쾌적하게 유지하기 위해서는 적절한 환기가 필요하다. 환기는 급기와 배기로 나누어지며, 급기는 진입 터널이나 별도의 환기 수갱을 통해 이루어 지고, 배기는 통상 수갱과 연결된 지상의 굴뚝을 통해 이루어진다.

그림 4는 지하 동굴 내의 환기 방법을 나타낸 것이다. 포기조나 침전지의 수면 바로 위에서 덕트를 통해 오염된 공기는 배출되며, 맑은 공기는 천정부의 덕트를 통해 공급되므로써 작업장은 항상 쾌적한 상태를 유지할 수 있다. 한편, 지하에서 발생하는 냄새와 가스의 확산을 방지하기 위하여 지하공간 내부의 기압은 지상보다 항상 일정 수준 낮게 유지되어야 한다.

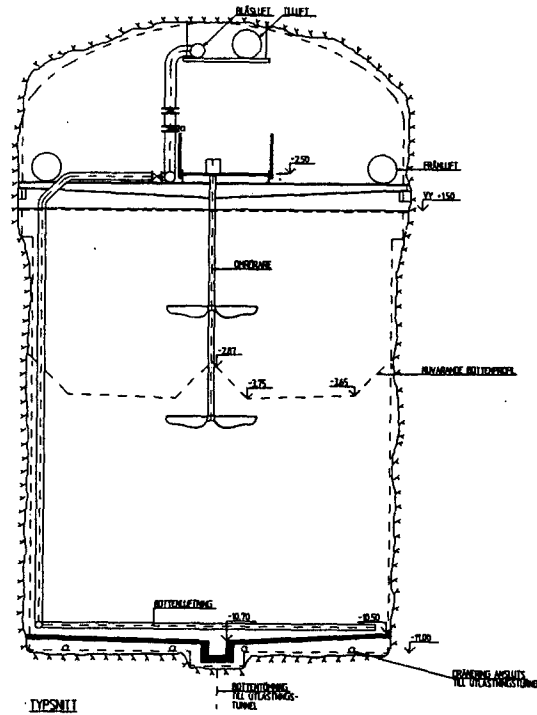


그림 4. 지하 하수처리장의 환기 방법

6. 동굴식 하수처리장의 국내 설계 사례

6.1 개요

부산시 중앙 하수처리장은 부산 시내의 보수천을 중심으로 한 보수동, 중앙동, 광복동 일대의 중앙 처리구역의 생활 하수를 분류식 관로를 통하여 차집하여 감천항의 암남공원에 인접한 매립장 내에 신설하도록 계획되었다. 그림 5는 중앙 하수처리장의 처리구역을 간략히 나타낸 것이다. 본 시설은 기본 계획 단계에서 환경 친화적인 시설의 도입이라는 목표에 부합하기 위하여 감천항 암남 공원 지하에 동굴식으로 건설하는 방식이 제시되었다. 특히 부지에 인접하여 부산시 공영 수산물 도매 시장이 건설될 예정이어서, 지하 동굴식 처리장 방안은 설득력을 가질 수 있었다. 이후 본 사업이 기본설계 턴 키 방식으로 발주되는 과정에서 환경부 의견에 의해 다양한 대안을 제시할 수 있도록 하기 위하여 동 굴식과 병행하여 매립지 지하에 개착식으로도 설계가 가능하도록 조건이 변경되었다. 따라서 경남 내의 지하 동굴식 하수처리장 방식과, 준설토로 이루어진 초연약 지반에서 개착방식의 두 가지 중 택일이 가능하게 되었다.

하수 처리장의 처리용량은 120,000톤/일이며, 질소, 인 제거공정이 포함되는 고도처리 방식이 요구되었다. 본 사업은 5개 컨소시엄이 입찰에 참가하여 2000년 6월 최종적으로 매립지 지하의 개착방식이 선정되었다. 비록 최종안으로 채택되지는 못하였지만, 국내에서 지하 동굴 방식으로 설계된 사례로는 최초인 점을 감안하여 설계 내용을 간략히 소개하고자 한다.



그림 5. 부산시 중앙 하수처리장 하수처리 구역

6.2 하수 처리공정 선정

고도 처리 공정으로는 활성오니 변법과 생물막 공법이 검토되었다. 활성 오니 변법은 생물막 공법에 비하여 운영이 안정적이며, 유지관리비가 적게 드는 장점을 가지고 있다. 그러나 상대적으로 부지면적을 많이 차지하게 되어 본 부지에서 지상 매립지에 건설하기는 어려운 여건이었다. 그러나 암남공원 지하에 설정된 도시계획 구역 내에서는 충분히 건설이 가능한 것으로 검토되었다. 선정된 처리공정은 MA20 방식으로서 전체적인 Flow Diagram을 모식적으로 나타내면 그림 6과 같다.

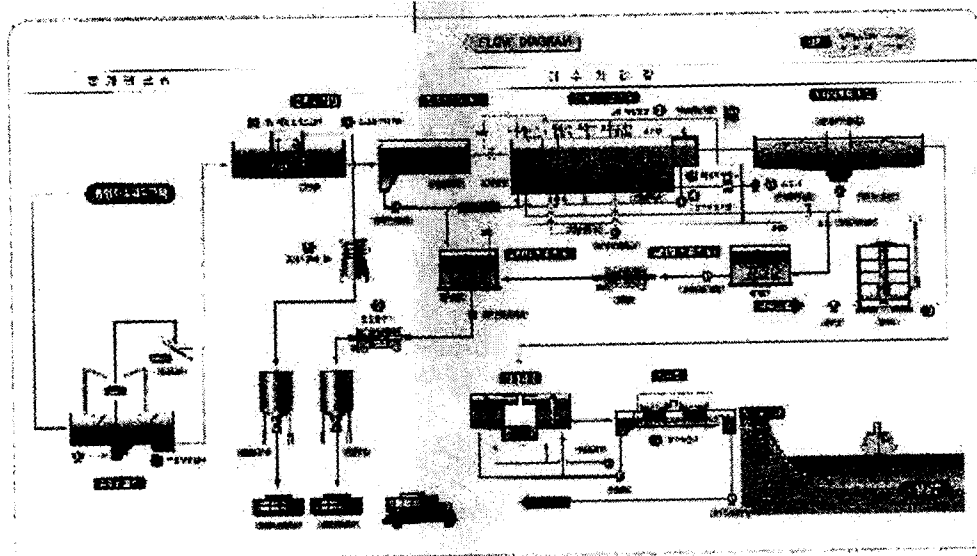


그림 6. 하수처리 Flow Diagram

6.3 지반 조사

당초 기본 계획에 따라 설정된 도시 계획 구역 내에서 기반암의 특성을 파악하기 위한 다양한 조사가 진행되었다. 암남 공원은 표고 150미터의 독립된 산으로서 부지의 동서면은 높이 50미터 이상의 해안절벽으로 이루어져 있다. 기반암은 중생대에 이루어진 경상계 퇴적암 지층으로서 사암, 셰일, 역암이 교호되어 있는 단일 암체를 구성한다. 그림 7은 대상 지역의 지질도를 보여준다. 지층의 층리는 동서방향으로, 층리면의 경사는 20도 내외의 단순한 형태를 가진다.

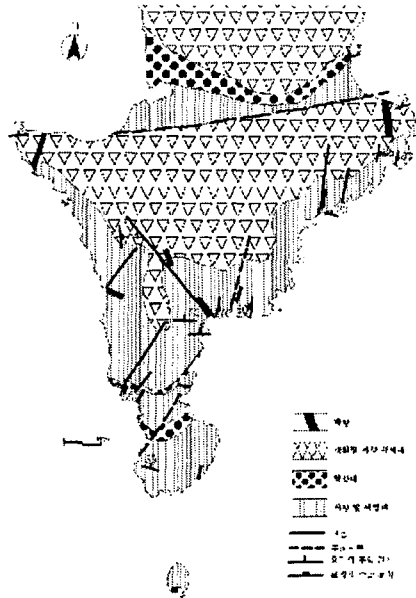


그림 7. 암남공원 주변 지질도

지반조사는 먼저 해안에 노출된 노두를 따라 각층에 대한 세부조사를 실시하여, 지층별 특성과 절리면에 대한 세부조사를 실시하였다. 대상 지역이 고도 차이가 큰 단일 산지임을 고려하여 지하 100미터 하부의 기반암 상태를 파악하기 위한 방법으로 국내 최초로 3차원 전기 비저항 탐사를 실시하였다. 전기 비저항 탐사 결과에 따라 시추조사가 이루어졌으며, 세부 조사를 위해 탄성파 반사법, BIPS, 수압파쇄법 등의 조사가 병행되었다. 그림 8은 시추조사 결과에 따른 RQD 분포를 나타낸 것이다. 처리장이 건설되는 +10~-10mE.L. 주변에서 암반의 RQD는 일부 지역을 제외하고는 대체로 75% 이상의 양호한 것으로 파악되었다. 또한 지하수위는 지표하부 40미터 이하에 낮게 분포하고 있는 것으로 나타났다.

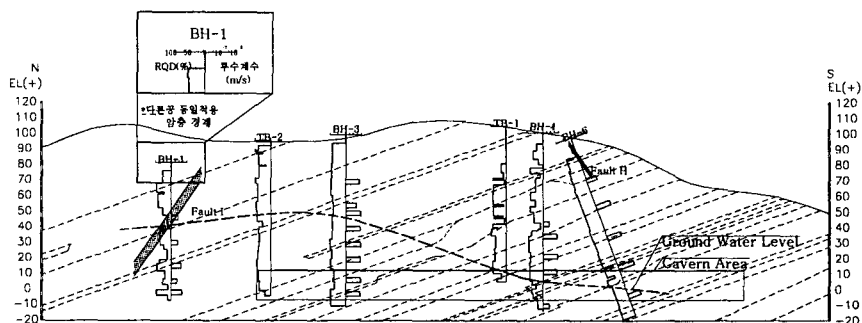


그림 8. 시추공 내의 RQD 분포와 지하수위

6.4 시설배치 및 단면 검토

동굴의 축방향은 단층, 층리, dyke, 주절리 등 구조선에 대해 큰 각도로 교차하는 방향을 선정하므로써 동굴의 안정성을 확보하고 지하수 유입에 따른 지수 대책이 용이하도록 계획되었다. 그림 9에 서와 같이 가장 유리한 방향은 N6° W로 검토되었으며, 이에 따라 당초 기본계획에서 동서방향이던 동굴의 방향을 남북방향으로 변경하였다.

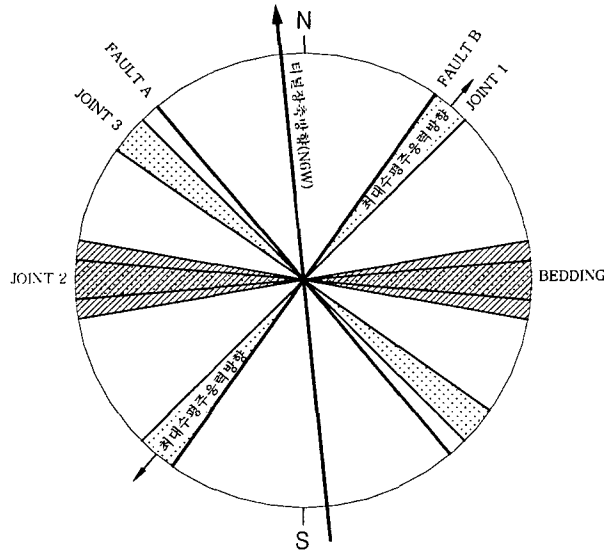


그림 9. 처리장 동굴의 축방향 결정

처리장 동굴의 단면은 안정성을 확보하는 범위 내에서 동굴의 폭을 최대한 크게하는 것이 바람직하다. 예비 검토 결과 대상 지역의 암반 조건에서 공동의 폭 20미터까지는 슛크리트와 록볼트에 의한 안정성 확보가 가능한 것으로 검토되었다. 그러나 안전율을 확보하고 시설의 적정한 배치를 이루는 범위 내에서 최적화된 동굴의 폭은 16미터, 동굴 간격은 18미터로 결정되었다. 이에 따라 각 처리 시설의 동굴 단면이 설계되었으며, 각 시설의 표준단면은 그림 10과 같다. 동굴의 방향과 폭이 결정됨에 따라 처리장 동굴 배치는 그림 11과 같이 설계되었다.

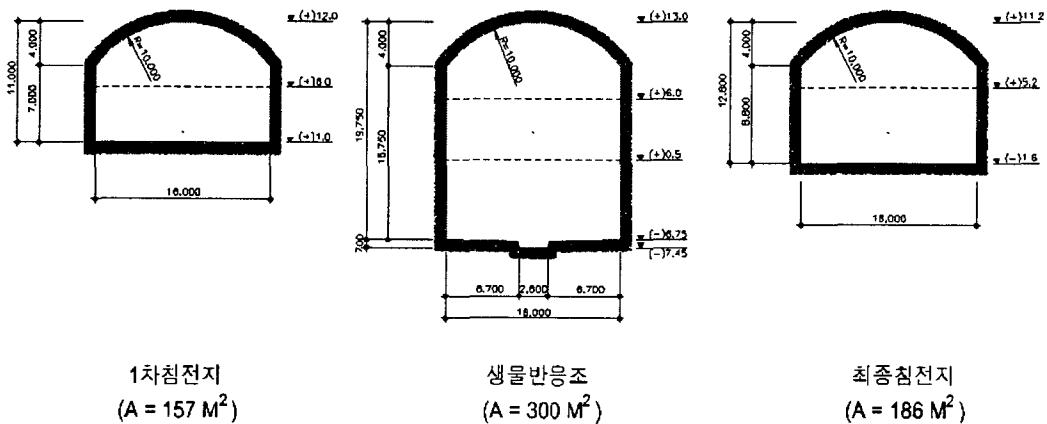


그림 10. 처리장 동굴 표준 단면

동굴 배치는 지질조사 결과 확인된 부지 북측에 존재하는 단층대를 배제하고, 단면이 가장 큰 생물 반응조를 암질이 가장 양호한 지역에 배치하며, 동굴 상부 경암층 두께를 최소 50미터 이상 확보하는 조건을 충족시키고 있다.

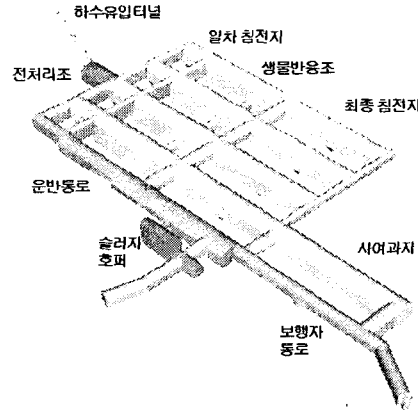


그림 11. 처리장 동굴 배치 투시도

처리장 동굴 내부의 시설배치는 그림에서와 같이 하수는 부지 북쪽으로부터 터널식 유입관로를 따라 전처리 시설로 유입되며, 이후 4열로 평행하게 배치된 1차 침전지, 생물 반응조, 최종 침전지 및 사여과지를 거쳐 소독조를 거쳐 지상 관로를 따라 최종적으로 바다로 배출된다. 보행자 통로와 운반 터널은 주처리시설과 평행하게 배열되므로서 유지관리 동선을 최소화하였으며, 지하 처리장 내에 송풍기실, 전기실, 탈수기실, 슬러지 Hopper 등 가능한 제반 시설을 유치하여 혐오 이미지의 시설물이 지상에 배치되는 것을 최소화하였다.

6.5 환기 및 소화 설비 계획

본 시설물은 국내 최초의 지하 동굴식 하수 처리장으로서 추후 관광 및 교육을 위한 방문객이 많을 것으로 예상하여, 지하공간 내의 환기 및 방재에 문제가 없도록 설계가 이루어졌다.

■ 급기·배기·취기 계획

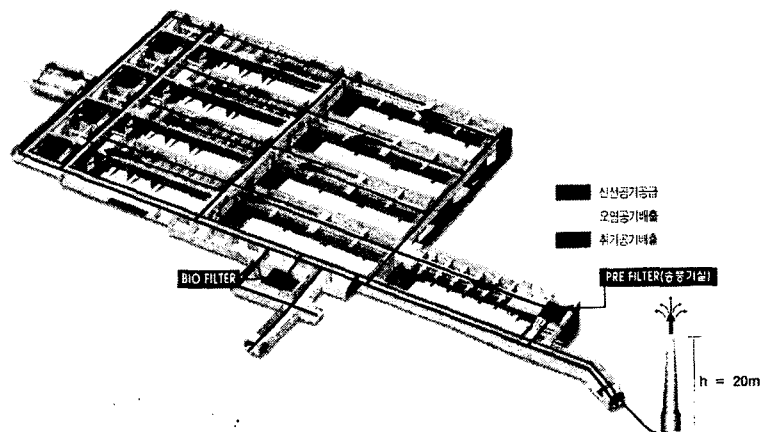


그림 12. 급기, 배기 및 취기 계획

그림 12는 동굴 내 급기, 배기 및 취기 배출 계획을 도시한 것으로서 가장 취기농도가 강한 전처리 시설과 1차 침전지 부분은 밀폐형으로 취기를 배출하고 생물 반응조와 최종 침전지는 수면 상부에서 즉시 취기를 포집할 수 있도록 덕트를 배치하여 수집된 취기는 Bio-filter를 통해 탈취 후 최종적으로 지상의 굴뚝을 통하여 배출되도록 설계하였다. 급기는 송풍기실의 Pre-filter를 통해 정화되고 온습도 제어 후 각 시설에 공급되도록 설계하였다. 또한 결로 방지를 위하여 실내 공기의 노점 온도를 벽면의 표면 온도보다 낮게 유지되도록 냉각 및 감습장치를 설치하였다.

6.6 지상 및 지하 시설물 배치

하수 처리 공정과 관련된 제반 시설은 지하에 유치하게 되므로 지상 부지에는 관리동만 배치되어, 여분의 부지에는 환경 친화시설을 다양하게 유치할 수 있도록 하여 주민 친화적인 하수 처리장이 되도록 하였다. 또한 이러한 잉여 부지는 감천항의 수변공간으로서 다양하게 활용될 수 있을 것으로 기대되었다.

7. 결 언

하수 처리장 건설에서 심각하게 대두되고 있는 지상 입지의 부족과 민원 문제를 해결하는 방안으로서 외국에서 많이 활용되고 있는 동굴식 지하 하수 처리장에 대해 사례를 살펴보고 기술적인 문제들을 간략히 고찰하였다. 최근들어 하수 처리장을 구조물로 엄개하거나 복층식으로 건설하여 용지 부족과 환경 오염을 해결하는 방법이 검토되고 있는 것을 감안한다면 기왕에 공원으로 활용되고 있는 도심 또는 도시 주변의 산밀을 굴착하여 지하공간을 활용하는 방법은 논리적으로도 타당성을 가진다 하겠다. 이러한 점에서 부산시 중앙 하수처리장은 부지 여건 상 동굴식 지하 하수처리장은 건설하는데 매우 적합한 조건을 갖추고 있으며, 실제 설계 사례를 통하여 이의 타당성과 가능성이 확인되었다 하겠다. 비록 경쟁 입찰 과정에서 지하 동굴식 처리장이 채택되지는 못하였지만, 향후 하수 처리장 관련 전문가들의 인식전환과 정책 입안과정에서 적극적인 검토를 통하여 지하 하수처리장의 건설 가능성은 많은 것으로 판단된다.

부산과 같은 해안 도시는 해안 매립을 통해 처리장 부지를 확보하는 방안이 주로 검토되고 있으나, 매립 또한 새로운 환경 문제를 유발하는 것이며, 냄새나 소음과 같은 문제는 여전히 해결해야 할 과제로 남아 있다.

외국의 사례를 통해 알 수 있듯이 지하 하수 처리장은 환경적 문제를 해결하는 방안이 될 뿐 아니라 지상 토지의 활용을 고려한다면 경제적인 이점까지 제공하게 된다. 앞으로 하수 처리장의 기획 단계에서 입지 선정의 대안으로서 지하공간의 활용방안에 대해 적극적으로 검토가 이루어질 수 있기를 바라며, 관련 분야의 전문가들에 의해 지하 하수 처리장의 건설과 관련하여 기술적으로 더욱 구체적인 연구가 진행되기를 기대한다.

참 고 문 헌

1. 박희정, 2000. 3, 하수도 정책 방향, 환경부 내부 자료
2. 최근웅, 2000, 하수도 업무 주요 추진과제 및 향후 기술동향, 환경부 내부 자료