



오염물질의 해양방류 기술(Ⅳ)

서일원 (서울대학교 토목공학과 교수)

이재형, 김창시 ((주)대우 항만단지 설계팀)

제 1 편 : 부력제트 및 확산관 이론
제 2 편 : 온배수 및 하수 확산에 관한 수치모델
제 3 편 : 온배수 확산관의 설계 및 시공
제 4 편 : 하수 확산관의 설계 및 시공
제 5 편 : 해양 방류관로의 일반 설계
제 6 편 : 확산관을 이용한 CO ₂ 해양방류

제 4 편 하수확산관의 설계 및 시공

1. 서 론

본 강좌에서는 확산관의 기초이론(제 1편), 확산관 해석에 관한 수치모형(제 2편)을 바탕으로 제 3편에서는 발전소 온배수 확산관의 설계 및 시공에 관하여 서술하였다. 이 제 4편에서는 하수처리장에서 처리된 하수를 호소, 하천, 하구 또는 해양 등 큰 수역으로 방류하는 하수확산관의 설계 및 시공에 관한 사항들을 소개한다. 하수확산관의 설계 및 시공 절차와 공법은 제 3편에서 설명한 온배수 확산관의 그것과 비슷하므로 여기에서는 제 3편에서 설명한 부분은 제외하고, 하수확산관에서 특별히 고려하여야 할 요소와 추가, 보완할 내용들을 중심으로 설명한다. 또한 여기에서 서술하는 하수확산관의 설계 및 시공에 관한 사항들은 해양에 설치하는 것을 전제로 하지만 호소, 하천 또는 하구 등 기타 수역에도 이를 준용할 수 있을 것이다.

지난 강좌에서 설명한 바와 같이 생활하수와 축산 및 공단폐수는 방류수역 주변에 환경적 부하를 유발하여 사회적·경제적 피해를 줄 수 있다. 이러한 피해를 줄이기 위하여 집수된 하수를 고도처리하는 방법이 점차 확대되고 있으나, 기술적으로는 처리공정에 개선할 여지가 많고, 경제적으로도 부담이 되기 때문에 현재까지는 기대에 미치지 못하고 있다. 외국, 특히 연안도시에서는 이러한 부담을 줄이고 환경적 악영향을 최소화하기 위하여 하수를 해양으로 방류하는 방법을 사용하고 있다. 1970년대 이후에는 근역에서의 희석 또는 혼합을 최대한으로 촉진하기 위하여 다공확산관으로 하수를 방류하는 기법이 널리 사용되고 있다. 하수확산관을 구성하는 요소들은 그림 1.과 같다. 하수처리장에서는 하수관거 또는 차집관로를 통하여 도시 및 공단에서 발생하는 생활하수 및 오수, 폐수 등을 집수하여 1차 또는 2차 처리한다. 처리된 하수는 해저 또는 바닥에 설치된 도수관(feeder pipe)을 따라 방류지점으로 수송된 후, 확산관을 통하여 수중에서 확산, 혼합된다. 도수관의 시점에는 처리장의 방류관로와 연결하는 방류조(outlet chamber)를 설치한다. 소요 희석률을 달성하기 위하여 방류공에서의 방류유속을 유지할 필요가 있는 경우(방류공과의

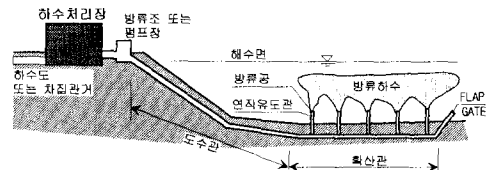


그림 1. 하수확산관의 구성

표 1. 국내 하수확산관의 개요

구 분	마산/창원	울 산	온 산	녹 산
방류량(m ³ /s)	12.84(2011년 계획시간최대)			8.24(2011년 계획시간최대)
확산관 주변수심(m)	13.0	35.0	27.0	6.5
도수관 직경 (mm) / 길이 (m)	2,000/680.0	2,200/4,500.0	1,800/2,000.0	2,500/126.0
확산관 직경 (mm) / 길이 (m)	2,000/210.0	2,000/1,300.0	1,800/180.0	2,200/56.0
연직유도관 직경 (mm)/간격(m)/수	1,350/10.0/20	200/10.0/130	1,350/18.0/9	1,200/9.0/6
방류공 직경(mm)/수	200/80	200/260	250/36	500/24
비 고		노즐 150mm		실시설계 완료

량과 방류수질 등)을 바탕으로 하수확산관을 설계한다. 현재 국내외의 하수처리장의 하수 방류량은 침두시(시간최대)에 일반적으로 약 8~10m³/s 정도이고, 국내의 계획방류수질(2011년 기준)은 COD 20mg/l, SS 18mg/l, T-N 20 mg/l, T-P

수두차가 작아 자연방류로는 적절한 유속이 보장되지 않는 경우)에는 펌프장을 설치하기도 한다.

국내에서는 1980년대에 5개 공단도시(창원, 마산, 울산, 여천, 반월)의 하수처리장 타당성조사에서 처리된 하수를 다공확산관에 의해 해양으로 방류하는 방안이 검토되었고(건설부, 1993), 마산/창원, 온산, 울산 하수처리장 등에서 현재 운영 중이다. 또한 가덕신항만 및 녹산/신호 산업단지와의 연계한 녹산하수처리시설에도 다공확산관이 도입된 실시설계가 완료되었다(부산광역시, 1997). 국내 하수처리장의 하수확산관의 시설개요는 표 1.과 같다.

온배수확산관과 마찬가지로 국내에서는 아직 하수확산관의 하수 방류에 대한 법정 혼합구역(legal mixing zone)이 설정되어 있지 않아 방류수의 농도만을 기준으로 규제하고 있으나, 주변 해역의 지형적 또는 해양학적·수리학적 특성, 수질 특성, 수역의 이용현황 및 생태계 현황, 연안의 현재 이용현황 및 장래 개발계획 등을 고려하여 확산관 주변에서의 수질 기준을 설정할 필요가 있다. 또한 하수중의 보존성 오염물질, 특히 구리, 납 등의 중금속 및 기타 유해성분이 방류수역에 미치는 영향은 운영 중에도 주기적으로 계속 점검하여 주변수역에 미치는 영향이 크다고 판단되면, 하수처리장의 처리공정을 고도화하는 등 방류수의 오염도를 저감하여 방류수역 인근의 수질을 악화시키지 않도록 관리하는 것도 중요하다.

하수확산관은 대개 하수처리장에서 처리된 하수를 수송, 방류하므로 하수처리장의 시설용량(특히 방류

2mg/l 정도이다.

2. 하수확산관의 설계

2.1 하수확산관의 특성

지난 강좌에서 설명한 온배수확산관과 하수확산관이 다른 점은 먼저 하수확산관에서 방류되는 유량이 온배수확산관보다 작다는 것이다. 인구 백만 정도의 도시에서 사용되는 하수확산관의 일반적인 특성을 온배수확산관과 비교한 자료(Jirka, 1982)에 따르면 하수확산관의 총유량은 약 8m³/s 정도이나 온배수확산관의 방류량은 약 80m³/s 정도이다. 따라서 확산관의 길이, 방류공의 크기 및 수량 등은 온배수확산관보다 작은 것이 일반적이다. 그러나, 근역에서 요구되는 희석률은 온배수확산관(약 10 정도)보다는 하수확산관(약 50~100 정도)이 더 크고, 방류된 하수는 가급적 수표면에 떠오르지 않게 하는 것이 미관상 또는 악취방지 측면에서 바람직하므로 방류수심은 하수확산관(약 50m 정도)이 온배수확산관(약 10~30m 정도)보다 일반적으로 더 깊다. 따라서 소정의 수심에 하수확산관을 설치하려면 도수관의 길이는 온배수확산관보다는 길어질 수 있으므로 하수처리장 및 확산관의 위치를 선정할 때 이러한 수심 조건을 고려하여야 경제적으로 설계, 시공할 수 있다.

다량의 방류수가 고속으로 배출되는 온배수 확산관은 상당한 범위까지 초기의 운동량(momentum)이 방류수의 거동을 좌우하는 제트(jet)의 형태를 유지하

나, 하수확산관은 온배수확산관에 비하여 초기운동량이 작으므로 방류된 하수는 방류공 근처에서 곧바로 주변수와의 밀도차에 의한 부력 및 조류의 영향을 강하게 받는 플룸(plume)의 거동을 나타낸다. 방류 방향 및 주변 수역의 밀도분포, 조류의 방향 및 크기에 따라 근역에서의 희석률이 큰 차이를 보이므로 하수 확산관을 설계할 때는 이러한 요소들을 면밀히 검토할 필요가 있다.

본 강좌 제 2편에서 개략적으로 설명한 수치모형들은 하수확산관의 혼합특성을 해석하는데 이용할 수 있다. 그러나, 근역모형 중에서 플룸들의 병합 또는 방류각도, 주변수의 밀도 분포, 조류의 크기 및 방향, 방류 수심 등에 따라 적절한 모형을 선정하여야 한다. 또 원역에서의 혼합과정 및 특성을 모의하려면 확산관 주변을 포함한 해역에 대한 광범위한 해양학적 자료, 수리학적 특성 등을 수집·분석한 후 적절한 모형을 선정하고, 오염물의 혼합 및 이동 특성을 합리적으로 설명할 수 있는 변수들을 결정하여야 한다. 이러한 수치모의는 하수확산관의 설계과정에서 확산관의 형상 및 규모, 위치, 방향 등을 결정하는 자료로 활용할 수 있고, 하수확산관 설치 후에는 관측결과를 토대로 확산관을 평가할 수 있는 유용한 수단이 될 수 있다. 그러나, 오염물의 혼합 및 이송에 관하여 보다 정확히 분석, 검증하려면 수치모의와 함께 수리모형실험, 현장관측을 병행하는 것이 바람직하다.

2.2 하수확산관의 설계

하수확산관의 설계절차는 기본적으로 온배수확산관과 같다. 먼저 개략적으로 하수처리장의 위치 및 노선을 선정한 후 지형·지질 특성, 해양물리학적·수리학적 특성 등을 조사하고, 기존 자료들을 수집하여 분석한다. 현장조사 결과 및 자료분석, 확산관의 형태 및 위치에 따른 혼합특성과 경제성, 시공성 등을 고려하여 최적의 노선을 도출한 다음에 도수관과 확산관의 제원, 방류공의 형태 등을 결정한다. 다음 단계에서는 관로의 구조계산을 수행하여 도수관 및 확산관, 방류공의 재질과 피복, 보호공 등을 결정한다. 마지막

으로 시공계획 및 유지관리계획을 수립한다.

하수확산관은 앞서 서술한대로 온배수확산관보다 훨씬 큰 희석률이 요구되므로 혼합 또는 희석효과를 극대화 할 수 있는 구조이어야 한다. 또한 확산관이 파손되거나 기대한 혼합특성(희석률, 상승높이, 오염장의 이송 및 확산 범위 등)에 미흡할 때는 주변 수역에 미치는 악영향이 온배수보다 심각할 수 있으므로 내구년한 동안에는 그 기능을 다할 수 있는 재질과 구조로 설계한다.

한편, 적절히 설계되고 부설된 하수확산관은 초기 희석이 효과적으로 이루어지지만 조석의 수세작용(flushing)이 좋지 않은 해역에 방류된 하수는 수질문제를 해결할 수 없다. 특히 만으로 방류된 하수의 최종 이송 및 확산은 조석의 수세작용에 의존하므로 하수확산관의 위치를 선정할 때는 이러한 물리적 희석효과도 고려하여야 한다. 방류 하수에 포함된 오염물질은 주변 해역의 특성에 따라 속성이 변화된다. 즉, 용존산소는 충분히 늘어나고 유기물질은 산화되며 세균은 점차 감소한다. 이런 오염물질의 변화는 종류에 따라, 또 시간에 따라 그 변화율과 양상이 바뀐다. 따라서 하수확산관은 조석에 의한 수세효과, 초기희석특성, 조류에 의한 후속 희석(이송확산) 및 세균의 감소현상들을 고려하여 하수의 정화가 가장 효과적으로 일어나도록 그 위치, 형상 등을 설계하여야 한다.

2.2.1 조사·분석

하수확산관을 설계하기 위한 조사는 예정부지 주변의 특성을 파악하는 것과 설계 및 시공에서 장애요인으로 작용할 수 있는 사항들에 대한 조사로 구분할 수 있다.

해양 하수확산관을 합리적으로 설계하려면 먼저 충분한 기간에 걸쳐 예정부지 주변을 조사한다. 지난 호에서 개략적으로 설명한 조사사항들 중에서 하수확산관에서 가장 중요한 것들은 지형, 토질 및 지질, 조석 및 해류, 수온, 밀도, 염도, 수질 및 생태현황 등이다.

지형은 도수관의 방향 및 노선을 결정하고 확산관의 위치를 선정할 때 가장 큰 영향을 미치는 요소이므로, 수심측량 및 해저지형측량을 실시하고 수심도 등

기존자료를 분석하여 부지 주변의 특성을 파악한다. 토질 및 지질은 도수관 및 확산관로의 굴착 및 되메움, 매설 깊이, 지지시설, 보호공 등의 형상과 규모, 시공방법 및 투입장비 등을 결정하는 요소들로 예정노선을 따라 충분한 깊이까지 그 간격(지질 및 구조에 따라 30~300m 정도)을 정하여 조사하고, 물리적·역학적 특성들을 시험한다. 조석 및 해류의 특성과 이동은 오염물의 회석효과, 이송 범위 및 방향 등을 결정하는 인자들로, 장기적인 관측계획을 수립하여 오염물이 이송할 것이라고 예상되는 지점 외의 충분한 범위에 걸쳐 측정한다. 하수확산관 설계시 해양수리학적 조사에서 추가해야 할 항목 중의 하나는 원역에서의 혼합특성을 규정하는 확산변수(난류 성분, 이송·확산계수 등)이다. 이 조사는 현장에서 측정하거나 문헌 및 기존 자료를 이용하여 추정하되 적정한 범위에서 선정한다. 수온, 밀도 및 염도 등도 확산관 주변뿐만 아니라, 운영 중에 확산관을 평가하기 위한 지점들을 선정하여 수심에 따라 그 분포를 충분히 파악할 수 있는 간격으로 측정한다. 수질 및 생태계 현황은 환경적 측면에서 하수확산관의 영향을 평가할 수 있는 자료이며 확산관의 규모 및 형태, 위치 등을 결정하는 변수들이므로, 이 조사는 해역의 수질 및 생태계 관리자료로 활용할 수 있도록 설계과정 뿐만 아니라 운영 중에도 주기적으로 시행한다.

하수확산관의 설계 및 시공과 관련하여 반드시 조사하여야 할 것들은 주변 해역의 지구지정 관련사항 및 해역의 이용현황, 지장물, 규제사항 등이다. 관로 및 방류지점이 문화재 보호구역, 연안오염 특별관리구역, 자연환경 보전지역, 자연생태계 보전지역, 군사시설 통제구역 등인지를 조사한다. 또 각종 해상 교통, 소유권 및 어업권, 보상관계 등도 미리 조사하고 그 대책을 수립하여야 공사를 원활히 진행할 수 있다. 위험물 또는 장애물, 해저 부설물 등 기존 시설들도 기존 자료와 현장조사 결과를 취합하여 목적, 위치, 규모, 구조 등 현황을 파악하여 이설 또는 보안대책을 수립하여야 한다. 그리고, 공사 중 발생할 수 있는 행정적 또는 법적규제와 관련된 사항 등도 사전에 조사, 분석하여 그 대책을 강구하는 것도 신속하고 원활한

하수확산관 설치에 있어 중요한 요소 중의 하나이다. 마지막으로 사전에 조사하여 평가하여야 할 것은 시공능력이다. 투입장비와 기술인력, 자재 확보 및 수송, 현장작업능력 등을 검토하여 적합한 방법으로 설계하고, 대안을 미리 수립하여야 시공할 때 발생할 수 있는 여러 상황에 대처할 수 있다.

2.2.2 확산관 수리계산

하수확산관의 수리계산은 혼합특성 해석 결과에 따라 확산관의 위치, 형상 등이 결정된 후, 각 방류공에서 필요 방류량 또는 유속을 확보하기 위하여 도수관 및 연직유도관, 방류공의 크기, 형태, 재질 등을 결정하는 것이다. 상대적으로 작은 유량이 방류되거나 수두차가 작을 경우에 확산관의 끝에서 소정의 방류량 또는 방류유속이 확보되지 못할 수 있기 때문이다. 확산관의 수리계산 절차는 제 3편 그림 3.과 같고, 확산관이 기본적으로 갖추어야 할 수리적 조건은 다음과 같다.

- 동일한 회석효과를 보장하기 위하여 각 방류공에서의 유량은 같아야 한다.
- 확산관내에서의 퇴적을 방지하기 위하여 적정한 유속(최소유속은 60-90cm/s)이 유지 되어야 한다.
- 해수침입이 발생치 않도록 모든 방류공은 만관으로 방류되어야 한다.
- 펌핑에너지를 최소화하기 위하여 손실수두가 작아야 한다.
- 검사 및 청소를 위한 유지관리시설을 갖추어야 한다.

이러한 확산관의 수리적 특성을 만족하기 위하여 일반적으로 사용되는 확산관은 다음과 같은 특성을 갖는다.

- 확산관의 직경은 끝으로 갈수록 단계적으로 작아진다.
- 임의 단면의 하류에 위치한 방류공의 단면적의 합은 그 지점의 확산관 단면적보다 작다.
- 방류공의 단면은 중구 형태로 한다.
- 확산관의 끝에는 수세 및 검사 등을 위한 flap gate

를 설치한다.

최종 방류시설인 방류공의 직경은 방류유속(대개 0.6~3.0m/s)과 손실수두 등 수리적 조건과 더불어 회석효과, 유량 변동에 따른 예상 회석률, 파와 조류, 기타 물리적 외력, 해양생물(담치 등)에 의한 피해 및 유지관리, 구조적 안정성, 경제성 등을 고려하여 결정한다.

2.2.3 구조설계

부지선정과 예비수리설계를 마치면 도수관 및 확산관의 길이, 형상, 관경 등 관로의 기본적인 제원들을 결정할 수 있다. 다음 단계는 각 관로에 대하여 구조적인 설계를 수행하는 것으로 다음과 같은 요소들을 결정한다.

- 재질
- 접합방법
- 내구력
- 지지시설
- 보호공
- 피복과 방식
- 굴착과 되메움
- 부설

관의 재질은 구조적 안정성, 유체 수송능력, 부식에 대한 저항력, 접합부의 수밀성 유지, 시공과 유지관리의 난이도 등을 검토하여 결정한다. 가격과 자재확보의 난이도 등도 고려한다. 일반적으로 철근콘크리트암거(관) 또는 강관이 많이 사용된다. 철근콘크리트관은 내식성이 우수하여 별도의 특별한 방식처리가 필요없고, 자중이 크며, 외부충격력에 대한 저항력이 크지만 대형관로인 경우에는 제작 및 운반, 시공이 곤란하며, 관로 파손시 복구가 용이치 못한 단점이 있다. 강관은 대구경인 경우 제작에 특별한 기술이 필요하다는 단점이 있으나 장거리 해저관로인 경우 시공 및 관리면에서 철근콘크리트 관로보다 뛰어나 외국의 심층방류 관로는 이를 많이 사용하고 있다. 다음 표 2.는 하수확산관 관로로 이용이 가능한 강화플라스틱관

(FRP)과 강관을 보강 또는 피복한 관들의 특성을 개략적으로 비교한 것이다.

이밖에 도수관 및 확산관에 비해 상대적으로 작아 경제적 부담이 덜한 방류공 또는 노즐은 내식성이 뛰어난 스테인레스관으로 설계(반월 하수확산관의 노즐)하기도 한다. 한편 방류공의 위치는 표류사에 의해 매몰되지 않을 만큼 바닥으로부터 충분한 높이에 설치한다. 국내의 경우 방류공은 해저 바닥으로부터 약 0.8m(마산/창원)에서 약 1.5m(녹산, 울산) 높이로 설계되었고, 미국 South Bay Outfall은 확산관을 보호하기 위하여 포설한 피복석 위로 약 30cm 정도 돌출하도록 설계하였다.

관의 접합은 관로의 연결성을 유지하기 위하여 필수적이며, 시공 후 누수의 대부분이 접합부의 불완전에 의해 발생하므로 시공의 완벽성 및 공사비, 유지관리 등을 고려하여 그 방법을 결정한다. 대부분이 대구경관인 하수확산관로에서는 겹치기 용접접합인 "수구(bell end)-삽구(spigot end)용접" 방법이나 "플랜지 접합" 방법을 많이 사용한다. 관중에 따라 일반적으로 사용되는 접합방법은 표 2.와 같다.

해양의 바다 또는 해저에 매설되는 관로에 작용하는 외력은 파도의 동적 유동, 조류력, 다른 물체에 의한 충격, 상재하중 등이 있는데, 관로부설 중에 작용할 수 있는 바람에 의한 영향, 좌굴 및 기타 작용하중 등도 고려하여 내구력을 확보할 수 있도록 관로계획을 수립한다.

관로를 해저 바닥 위에 설치하는 경우는 사석과 피복석으로 관로를 지지할 수 있고, 매설하는 경우에는 뒤채움과 되메우기 재료를 이용하여 관로를 유지하는 방법이 있는데 이들은 관로의 지지뿐만 아니라 보호공을 겸하는 방법이다. 지반이 아주 견고한 암반이기 때문에 굴착이 곤란하고 사석 및 피복석 등 지지재료가 마땅치 않아 관로를 바다 위 일정한 높이에 부양시키는 경우에는 암반 고정쇠(rock anchor)와 줄(cable)을 이용하여 지지하는 방법을 사용한다. 이러한 관로의 지지시설의 표준 형태는 그림 2.와 같다(Layton, 1976).

다른 물체가 관로와 부딪혀 발생하는 충격력 또는

표 2. 관 재질별 비교

구분	FRP Pipe	Monel 강관	PE 피복강관	도복장 강관
개요	유리섬유로 보강한 합성수지 관	니켈, 구리 등의 합금으로 제조	강관에 폴리에틸렌 수지를 피복한 강관	방식성 역청재 또는 모르타르로 피복한 강관
내식성	우수	방식 필요	우수	방식 필요
경제성	비교적 고가	가장 고가	가장 저가	가장 저가
생산규격	Ø25-Ø1,000mm	전 규격	Ø600mm 이하	전 규격
연결방법	플랜지접합	플랜지접합 및 용접	용접 후 열수축수 지나 테이프로 코팅 및 용접	플랜지접합 및 용접
설계/시공 실적	울산, 마산 연직 유도관 및 노출 설계	울산, 마산 연직 유도관 설계 반월 노출 설계		울산, 마산의 확산관 대안 설계 반월의 방류관

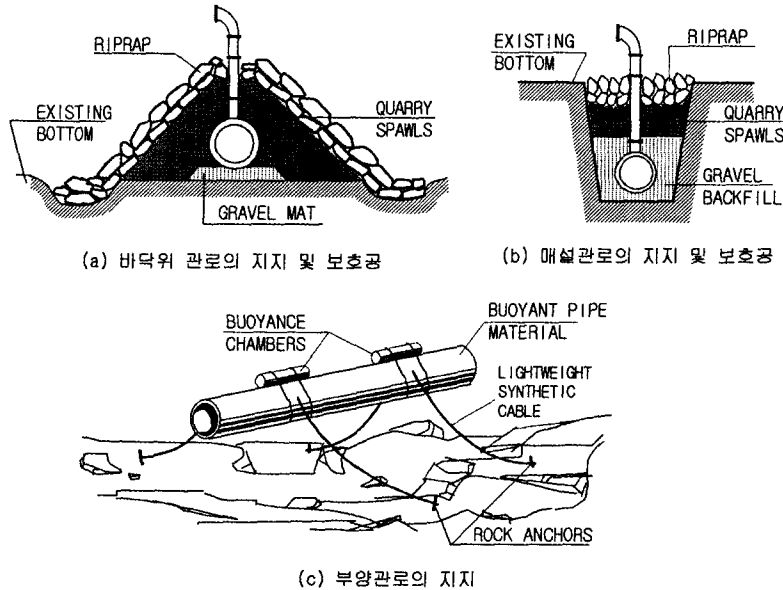


그림 2. 관로의 지지

배의 닢, 어업장구에 의해 충돌은 관로에 심각한 피해를 줄 수 있으므로 이에 대한 대책을 수립하여야 하고, 특히 쇠파지역(surf zone)에서는 관로를 충분한 깊이 매설하여야 관의 손상을 방지할 수 있다. 도수관과 확산관 등 대구경 관로는 매설하므로써 비교적 간단하게 충격으로부터 대비할 수 있지만 보통 해상 저니층 위로 노출되는 연직유도관의 손상을 방지하는 방법에 대해서는 좀 더 신중히 고려하여야 한다. 즉, 연직유도관 및 방류공을 손상에 대한 저항력이 큰 재

질 또는 외부 충격에 유연한 재질로 설계하거나(울산의 경우 FRP로 기본설계) 일정한 변형이 가능한 구조로 이음부를 설계하여 충격을 흡수하는 방법도 고려한다.

바닥의 세굴 및 닢 등에 의하여 관로가 노출되어 손상되는 것을 방지하려면 세굴되지 않는 재료로 되메우기 또는 성토하거나, 사석과 피복석 등으로 보호하거나 세굴방지매트 등을 설치하는 등 보호공을 계획하여야 한다. 녹산하수처리시설 하수확산관의 종·평면 및 관로보호공 개략도는 그림 3.과 같다(부산광역시, 1997). 여기서의 도수관 및 확산관의 저부에 모래를 포설하여 기초로 하고 사석층과 피복석 층으로 관로를 지지하면서 보호한 후, 원지반선에 맞추어 토사로 되채움하는 것으로 계획하였다.

해양에 설치되는 관의 일부는 해수에 의해 부식되며, 또한 해저 바닥의 침전물과 수송 유체의 특성에 따라 관의 부식을 촉진할 수 있다. 보통 부식방지에 소요되는 비용은 전체 공사비에 비하여 미미하므로 관로의 내구년한 동안 충분히 유지할 수 있도록 처리하거나 부식되지 않는 재질을 사용한다. 방식은 방식 피복과 전기방식이 있는데, 도장 및 복장에 의한 방식 피복으로는 완전하게 방식할 수 없으므로 도복장 방식 피복과 전기방식을 병용하는 것이 좋다. 관을 부설

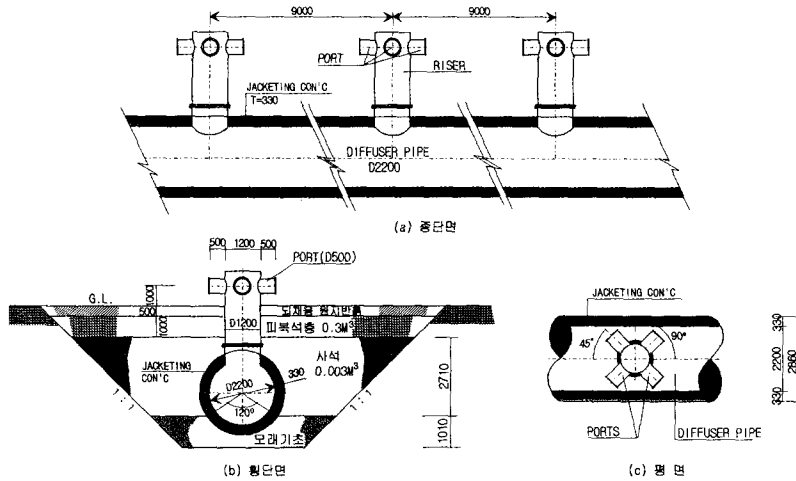


그림 3. 녹산하수처리시설 하수확산관

할 때 또는 확산관 운용 중에 발생할 수 있는 기계적 손상으로부터 관을 방호하려면 관을 중량피복한다. 부설공법으로 해저예항법을 택하였을 경우에도 해저면과의 접촉으로 관이 마모되지 않도록 관을 중량피복한다. 관로의 중량피복은 대개 (철근)콘크리트를 사용하지만 중량피복과 방식피복 구조는 관의 재질, 현장조건에 따라 그 재료, 두께 등을 결정한다. 해저에 부설되는 강관의 일반적인 방식피복 및 중량피복 구조는 그림 4.와 같다.

매설깊이는 관경, 선박의 투묘, 어구, 어업시설, 해저지형 및 지질, 지반의 안정, 수심 등을 고려하여 계획하고, 굴착단면은 굴착면을 유지할 수 있고 작업공간을 확보할 정도의 형상과 범위로 한다. 되메움재는 관로의 지지력을 확보할 수 있고 보호할 수 있는 거친 과립형 재료를 이용하며, 굴착된 토사 또는 암석류가 상당히 양호하다라도 되메움재는 별도로 운반하여 사용하도록 계획한다.

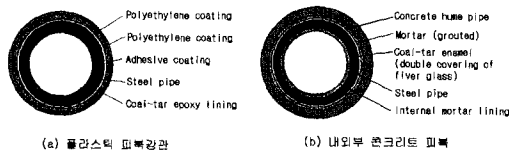


그림 4. 강관 피복

2.2.4 하수확산관의 형상

하수확산관의 형상은 온배수확산관에서 설명한 모든 형태로 계획할 수 있으나 온배수확산관과 마찬가지로 주변 조건 및 방류 조건을 고려하여 그 형상을 선정한다. 확산관은 원칙적으로 조류방향과 수직을 이루도록 배치한다. 조류의 방향에 따른 확산관의 배치 예는 그림 5.

와 같다(Layton, 1976).

Y자형의 확산관은 조류방향이 변할 때 조류방향과 확산관이 직각을 이루는 기회를 최대한 확보하기 위한 것으로, 미국 South Bay의 하수확산관이 이러한 형태로 설계되었다.

최근의 확산관은 연직유도관의 간격을 크게 하고 (보통 10m 이상), 연직유도관의 상단에 2개 이상의 방류공을 설치하고 있다. 즉 그림 2.와 같이 확산관 축을 중심으로 한방향으로만 방류하는 기본적인 구조에서 그림 6.의 (b)과 같이 양방향으로 방류공을 계획하거나(울산), (a)처럼 4개(마산/창원, 온산, 녹산)의 방류공을 설치하여 여러 방향으로 방류하도록 설계한

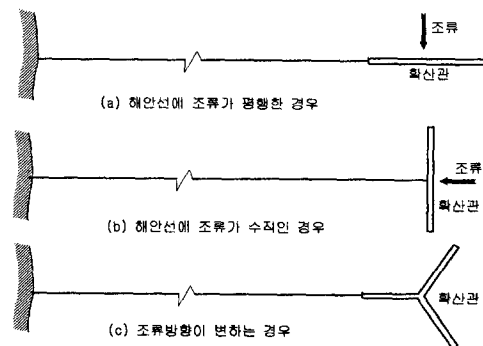


그림 5. 확산관 형상 및 배치

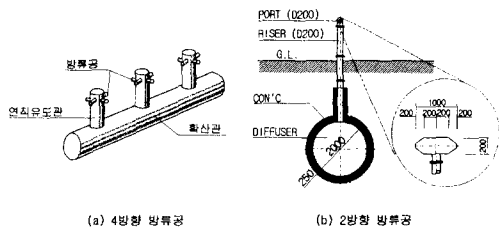


그림 6. 방류공의 형태

다. 미국의 Boston Outfall은 연직유도관의 상단에 8개의 방류공을 방사상 형태로 배치하였다. 이는 소요의 회석률을 만족하는 것을 전제로 해상 또는 수중작업량을 줄여 경제성을 도모하기 위한 방편이기도 하다.

3. 하수확산관의 시공

3.1 시공계획

하수확산관 공사는 해상 또는 수중에서 이루어지는 작업이 대부분이고 대형의 해상 장비가 동원되므로, 설계 및 시공에 독특한 경험과 기술력을 필요로 하는 특수한 공사이다. 따라서 사전에 시공에 필요한 자재, 장비, 기술인력, 작업조건 등을 고려하여 공정계획을 수립하고, 시공관리를 엄격히 하여야 안전하고 경제적으로 시공할 수 있다.

하수확산관의 시공에서 중요한 공정들은 관로의 조립 또는 제작, 매설단면의 굴착, 관로의 부설, 되메움 등이다. 시공계획은 각 단계별로 자재의 반출입, 인력 및 장비 투입계획 등을 포함하여야 하며, 특히 시공장비는 공사의 효율성을 좌우하는 요소이므로 작업의 종류, 범위, 작업 조건, 장비의 확보 여부, 작업 효율, 운전자의 숙련도, 안전 등을 고려하여 결정한다. 또한 공사가 진행됨에 따라 소기의 목표에 대한 달성도를 점검하고, 공사중 발생한 문제들은 개선 방향을 도출하면서 작업조건에 따라 공정을 조정하는 등 철저히 관리하여야 양질의 시공을 달성할 수 있다.

3.2 관로 제작

하수확산관로의 도수관 및 확산관은 관경이 크고

길이가 길기 때문에 해저 또는 해상에서 관을 제작 또는 조립하기는 곤란하다. 콘크리트 관로는 그 형상 및 치수에 별 구애받지 않아 작업장 근처에 제작장을 마련하고 일반적인 공정을 따라 침설공법에 적합한 길이로 제작한다. 그러나 강관을 사용하는 경우에 소요 규격이 공장에서 제작되지 않은 대구경이거나 현장까지 운반이 곤란하면 현장에서 직접 제작하여야 한다. 즉 강관을 소요량만큼 구입, 운반한 후, 소정의 규격으로 자르고 둥글게 말아 용접한다. 단위 길이로 제작된 강관을 몇 개 연결하여 조립단위의 강관(약 6.0m 정도)을 만들어 sand blasting과 피복(코팅, 라이닝)한 후, 이 조립단위의 강관들을 다시 몇 개 연결하여 부설단위의 강관(약 12.0~50.0m 정도)을 형성한다. 조립단위의 강관길이는 작업장 조건 및 사용 장비에 따라 변화하고, 부설단위의 길이는 조립장 조건, 침설공법과 그에 수반되는 장비에 따라 달라진다.

확산관 공사장에 가까운 육상에 계획하는 관로 조립장은 관로의 제작, 조립, 접합, 피복, 방식, 운반, 이동 등 관로를 침설하기 직전까지의 공정은 물론 침설공법에 따라 관로를 선적 또는 예항하는데 소요되는 장비와 부지를 필요로 한다.

3.3 굴착 및 침설

굴착은 해류 또는 배의 닻 등에 의해 관로가 손상되는 것을 방지하고, 세굴방지용 보호석을 설치할 수 있도록 충분한 깊이에 관로를 매설할 수 있도록 해저를 파내는 것으로 선행굴착공법과 사후굴착공법으로 대별할 수 있다. 선행굴착공법은 해저에 트렌치를 굴착한 후에 관로를 부설하고 피복석 등으로 관을 보호하는 것이고, 사후굴착공법은 관로를 계획된 선형에 따라 해저에 침설하고 펌프 또는 수압을 이용하여 관로 하부의 토사를 제거하는 방법으로 소정의 깊이까지 준설이 가능한 토질인 경우에 적용한다. 닻에 의한 피해를 방지하기 위한 최소토퍼는 다음 표 3.과 같다. 이 최소토퍼를 확보할 수 있는 깊이로 굴착하여야 한다.

육상 또는 해상에서 조립된 관을 해저에 운반, 설치하는 방류관로의 침설공법은 제 3편에서 설명한 바와

표 3. 닻의 크기와 최소토펙

닻의 무게	최소 토펙		비 고
	모래	이토	
0.9t (200lb)	1.5m 이상	2.5m 이상	화물선 500t 규모
2.7t (6000lb)	2.0m 정도	9.0m 정도	화물선 3,000t 규모

같이 일반적으로 해저예항법, 부유예항법, 그리고 포설선법으로 구분할 수 있다. 부유예항법은 우리나라 해역, 특히 설계과고가 높은 지역에서는 시공이 어려워 국내에서의 시공실적이 없고, 해저예항법은 관경 1,800~2,200mm를 관로를 2.0~3.7km 정도 시공한 전례가 있어 녹산하수처리시설 방류관로 설계에서 적용하였다(부산광역시, 1997). 한편 반월의 해양방류관 2.3km (D1,800-D1,000mm)와 마산/창원의 해양방류관 약 900m (D2,000mm)는 부설선법의 일종인 Floating Crane공법으로 시공되었다. 이 공법에 사용되는 주요 장비는 바지선, 크레인 및 준설장비로 특수한 장비가 필요치 않다는 장점이 있다.

3.4 시공절차 및 유지관리

마산/창원 하수처리장 하수확산관 공사를 기준으로 해양방류관 시공절차를 설명하면 다음과 같다.

(가) 조립

- 육상 작업장에서 표준규격 강관(D2,000mm) 3개를 용접하여 18.0m 길이 단위로 제작
- 방식·부식방지를 위하여 내외부에 콜탈에나멜 코팅과 Zinc Anodes 설치
- 용접된 강관 양끝에 Flange 설치
- 조립후 크레인으로 강관을 바지선에 상차하여 연안 작업현장으로 운송

(나) 트렌치 준설 및 고르기

- 대형 바지선에 고정된 버킷준설기로 깊이 3~5m 깊이의 트렌치 굴착
- 잠수부가 트렌치의 형태, 규격, 높이 등을 검사하고, 모래를 채워 관로기초 작업준비

(다) 침설

- 부설선(laying barge)의 크레인으로 강관을 트레

치에 내리고 잠수부가 수중 접합

- 관 용접부 검사

(라) 모래채움

- 관 주변에 모래를 채우는 작업은 수심이 얇은 경우에는 Dumping Hopper에 의해, 수심이 깊은 곳(12.0m 이상)에서는 Dump Bucket을 이용

(마) 되메움

- 트렌치 내 관로주변을 되메움
- 되메움재는 육상 터널구간에서 발생한 버력을 최대 25mm로 분쇄하여 관의 코팅 손상 방지
- 되메움재 및 되메움 깊이 등을 검사

(바) 뒷채움

- 원지반과 같은 높이로 채움

하수확산관 시공시에는 해저 준설 또는 굴착에 따른 부유물 및 저니층의 확산을 방지하기 위하여 충분한 범위에 걸쳐 오탃방지막을 설치한다.

확산관의 설계 및 시공과 더불어 중요한 부분은 유지관리이다. 하수확산관이 소요의 내구년한 동안 그 기능을 다하고 구조물로써 안정할 수 있도록 검사, 청소 및 보수하여야 한다.

점검기준 및 조사 항목, 검사 방법 및 절차, 청소 및 보수작업 표준 등을 설정하고, 이 계획에 따라 하수확산관을 관리하고 그 기록을 유지하여야 한다. 관로의 점검 항목은 구조적 손상, 관로의 부식, 주변 생물 분포 및 부착상황, 방류공의 폐쇄 등이다.

3.5 설계 및 시공사례

그림 7.은 미국 California주의 South Bay Ocean Outfall (SBOO)를 개략적으로 나타낸 것으로 각각 5.8km와 1.5km인 해저터널과 해상(海床)관로, 해저터널과 연결하는 두 개의 연결관로, 그리고 총 길이가 1.2km인 Y자형의 확산관으로 이루어졌다(Collins 등, 1996). SBOO의 침두시 설계유량은 333mdg(약 133만2천m³/일=15.42m³/s)으로 이를 처리하기 위

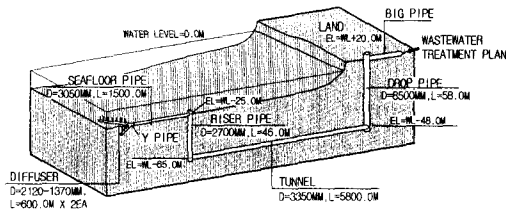


그림 7. South Bay Outfall

한 South Bay 국제하수처리장(SBIWTP)의 설계 및 시공도 1998년을 목표로 병행하여 진행 중이다.

SBOO의 설계 내구년한은 75년으로 설정되었고, 하수처리장 및 육상관로 부분을 포함한 총 공사비는 미화로 약 4억불, 시공 기간은 34개월로 계획하였다. 해저터널은 Earth Pressure Balance Machine (EPBM)을 병행한 Tunnel Boring Machine (TBM)으로 굴착하고 72도씩 분할된 프리캐스트 콘크리트를 굴착면 내부에 설치하는 구조로 설계하였다. 다섯 개의 프리캐스트 콘크리트 조각들을 연결한 터널 단면은 상부의 전하중과 최대 외부 지하수 압력, 27m의 수두차 등을 견딜수 있고, 이때 사용된 철근들은 ACI에서 규정한 균열제한을 만족하도록 설계되었다. 해저터널구간에는 지진을 유발할 수 있는 여러 단층들이 있어 침투지진가속도는 0.63g, 75년 설계년의 10% 초과확률에 대한 공칭단층변위는 76mm로 설정하였다. 직경 3.05m, 길이 약 1,433m인 해상관로는 22.9m에서 29m 수심에 설치되며, 트렌치를 굴착하여 관로를 매설한다. 피복석은 100년 빈도의 설계 파랑에 대한 모형실험 결과를 바탕으로 설계하였고, 선박의 닻 등으로부터 보호할 수 있도록 구성하였다. 관은 이중의 gasket o-ring seal과 bell and spigot으로 연결하는데, 이 연결부는 중심으로부터 약 1.5도 정도의 변위를 허용하고, 완전히 결합된 상태에서 축 방향으로 12.7cm 정도 신축이 가능하도록 설계하였다.

확산관은 약 29m 수심에 설치되며, 각각 610m인 두 개의 가지로 분기된다. 각 확산관의 내부직경은 200m 마다 2.13m, 1.83m, 1.37m로 작아지며 끝에는 관로의 수세를 위하여 flap gate를 계획하였다. 해

상관로에서 확산관으로 분기하는 Y형 관로구간에는 slide gate를 설치하여 한 쪽 관로를 수세작업을 하는 동안 다른 분기관으로만 방류할 수 있도록 하였고, 해상관로의 끝과 Y형 관로 사이에는 end gate를 부착하여 확산관의 장래 증설에 대비하였다.

확산관의 상단에는 피복석을 1.0m 두께로 포설하여 관로를 보호하였고, 간격이 7.3m인 연직유도관의 피복석으로부터 30cm 돌출되도록 하였다. 연직유도관의 높이는 설계 내구년한 동안에 발생할 수 있는 해저바닥의 변동을 고려하였다. 연직유도관은 강성, 유연성, 수리적 특성을 만족시키는 폴리에틸렌으로 만들고, 방류구의 노즐은 수리모형실험을 거쳐 설계하였다.

그림 8.은 Boston Outfall의 구조를 개략적으로 묘사한 것이다. Boston Outfall은 미국 Massachusetts Water Resources Authority (MWRA) 가 주관하여 Boston항 정화사업의 일환으로 시행되고 있다. Deer Island에 설치된 하수처리장에서 처리된 하수를 Massachusetts만 외해쪽으로 최대 56m³/s 방류하는 상당히 큰 시설이다. 도수관은 SBOO와 마찬가지로 길이 약 15km, 직경 약 8.2m의 관로를 해저 128m 지점에 터널굴착방법으로 설치하고 (McMonagle과 Otoski, 1997), 길이 2km인 확산관에는 직경 76cm, 높이 76m인 연직유도관을 55개 설치한다. 연직유도관의 상단에는 앞서 설명한 대로 200mm 직경의 방류공 8개가 방사형으로 부착된다.

4. 결론

일반적으로 온배수확산관보다는 그 규모가 작지만

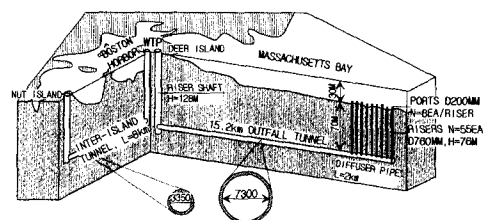


그림 8. Boston Outfall

하수확산관 해석 및 설계, 시공도 특수한 기술과 장비가 필요하며, 소요의 혼합 및 확산효과를 얻을 수 있는 하수확산관을 경제적이고 내구적으로, 안전하게 시공하는 것이 중요하다.

국내의 연안 공업도시에서도 하수처리장에서 처리한 하수를 해양으로 방류하는 하수확산관이 운영 중이다. 그러나, 설계 당시의 혼합·확산 효과가 달성되고 있는지, 또 주변 해역의 환경에 어떠한 영향을, 얼마나 미치는지를 체계적으로 관측, 분석한 자료는 미흡한 실정이다. 이러한 자료는 하수확산관의 기본 목

적을 검증하는 것으로서, 혼합 및 확산특성을 분석하는 기초연구(수리모형 실험, 수치모의)와 상호 보완하여 국내 수역에 적합한 효율적인 하수확산관을 설계하는 토대가 될 것이다. 또한 온배수 확산관 및 하수 확산관은 방류량의 증가로 규모는 커지고, 환경적 영향을 최소화하기 위하여 설계수심은 깊어질 추세이므로 이에 적합한 장비, 재료, 시공기술을 확보 또는 개발하여야 할 것이다. 더불어 방류 수역에 해양학적, 수리적, 환경적 악영향을 최소화할 수 있는 방류기법을 연구하는 노력이 필요하다. ●

〈 **참 고 문 헌** 〉

건설부 부산권수도건설사무소 (1993). 마산/창원 하수처리장 건설지
 부산광역시 (1997). 녹산하수처리시설 방류관거 기본 및 실시설계 보고서
 City of San Diego Metropolitan Wastewater Department (1997). "The South Bay Ocean Outfall Project." San Diego, California.
 Collins, F.X., McBain, G.W., Kaneshiro, J.Y., Meiron, L., and Stout, L. (1996). "The South Bay Ocean Outfall." North American Water and Environmental Congress, ASCE.
 Grace, R.A. (1978). *Marine Outfall Systems Planning, Design, and Construction*. Prentice-Hall., Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.
 Jirka, G.H. (1982). "Multiport Diffusers for Heat Disposal : A Summary." *Journal of Hydraulics Div.* 108, 12.
 Layton, J.A. (1976). "Design Procedures for Ocean Outfalls." *Coastal Engineering-1976, Chap. 167*.
 McMonagle, T.C. and Otoski R.M. (1997). "Toward a Healthy Harbor." *Civil Engineering*, Sep. 1997.