

제트혼합이론과 해양심층방류

서일원 (서울대학교 토목공학과 부교수)

유대영 (서울대학교 토목공학과 박사과정)

1. 서론

현재까지 인간의 생활로 인해 발생하는 오염물질을 처리하는 가장 경제적인 방법 중의 하나는 하천 또는 해양과 같은 큰 수계로 방류시키는 것이다. 이 방법은 사실상 가장 오랫동안 사용된 기술이기는 하지만 인구가 증가하고 산업활동이 대규모로 이루어짐에 따라 생활하수 및 산업폐수 양은 급속도로 증가하여 자연 수계에 그대로 방류할 경우 자연정화를 기대할 수 있는 수준을 훨씬 넘어서고 있다.

따라서 하폐수 또는 온배수를 환경적인 영향을 최소화하면서 효율적으로 처리할 수 있는 방법으로서 방류수를 제트형태로 수중에서 방류하는 기술이 연구되어 왔다.

국부적인 지역 내에서 최대의 희석률을 얻을 수 있는 방류시스템으로 수중다공확산관(Submerged Multipoint Diffuser)을 이용하는 방법이 있다. 이 방법은 오염물을 원하는 수심까지 파이프 또는 터널을 이용하여 이동시켜 여러 개의 방류구를 통해 제트의 형태로 분사시켜 방류하는 방법으로 발전소에서 배출되는 온배수, 하·폐수처리장에서 배출되는 하폐수 등을 처리하는 데에 이용되고 있다. 수중다공확산관을 이용하여 오염물을 처리하는 방법은 발전소 밀집에 따른 온배수의 유입구로의 재순환이 문제가 되는 경우나 대도시의 인구밀집으로 인해 하폐수의 효율적인 처리가 필요한 지역에서 점차로 그 필요성에 대한 인식이 커지고 있다.

해양 방류관은 1960년대부터 미국의 해안에 위치한 도시에서 발생하는 하수를 해양으로 방류하기 위하여 활발히 사용되기 시작하였으며(Koh와 Brooks, 1975), 그 후 발전소의 온배수를 방류하는 방법으로 발전하여 이에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다.

국내에서는 온배수의 심층방류시설은 아직까지 건설된 바가 없으나 하수의 심층방류는 마산, 울산, 그리고 온산 하수처리장에서 현재 가동 중에 있다(서일원 등, 1998). 현재는 하폐수 및 온배수 이외에도 지구온난화의 원인으로 꼽히는 이산화탄소를 해양에 방류하여 수중에 격리하는 기술이 연구 중이다.

2. 제트혼합 이론

2.1 개요

제트는 오리피스 혹은 슬롯을 통해 동일한 혹은 다른 유체로 방류되는 흐름이다. 제트와 대비되는 개념으로 부력류(plume)가 있는데 이는 제트와는 비슷하지만 주변 유체에 대한 상대적인 부력을 일으키는 에너지에 의한 흐름을 뜻한다. 즉 제트는 운동량으로부터 기인하는 흐름이고 부력류는 두 유체의 밀도차로부터 생기는 부력으로부터 발생한다. 대부분의 해양 방류는 제트와 부력류의 특성을 동시에 가지고 있는 부력제트의 형태로 이루어지나 방류 직후에는 주로 제트의 특성만을 갖는 거동을 보이다가 진행하면서 점차로 방류될 때의 운동량을 잃으며 부력류의 특성을 갖게 된다. 따라서 해양방류의 해석에서도 이를

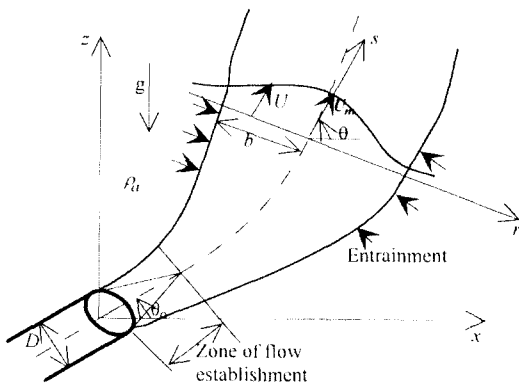


그림 1. 단일확산관을 통한 부력제트 개요도

고려하여 방류수의 진행 정도에 따라 다른 해석이 필요하다.

온배수가 방류되어 주변수와 희석되는 과정은 크게 제트 매개변수(jet parameter), 환경 매개변수(environmental parameter), 그리고 기하학적 매개변수(geometric parameter)에 의해 영향을 받는다(Fischer 등, 1979). 제트 매개변수는 방류되는 제트의 초기 유속, 유량, 온도, 운동량 흐름률, 부력흐름률 등으로서 방류구 가까운 지역에서의 혼합에 주로 영향을 미친다.

환경 매개변수는 주변 해역의 조류속, 밀도 성층화 등 온배수가 방류되는 해역의 상태를 나타내는 인자들이다. 이들 매개변수는 온배수가 방류된 이후 방류구로부터 일정 거리 떨어진 이후부터 온배수 확산에 영향을 미치게 된다. 기하학적 매개변수는 방류되는 제트의 형상, 방류되는 방향, 주변 경계와의 거리, 방류되는 수심 등을 포함한다.

방류구 가까운 영역에서의 유속 및 온도분포는 주

표 1. 하폐수확산관과 온수확산관의 비교

| | 하폐수확산관 | 온수확산관 |
|----------------------------|--------|-------|
| 수심(m) | 70 | 7 |
| 방류구 직경(m) | 0.15 | 0.3 |
| 확산관의 길이(m) | 1000 | 1000 |
| 방류구 간격(m) | 3 | 6 |
| 방류 유속(m/sec) | 2.27 | 2.83 |
| 방류 유량(m ³ /sec) | 15 | 37 |

로 방류 온배수의 특성에 의해 결정되는데 이러한 구역을 근역(near field)라고 한다. 근역 이후에 온배수의 거동은 주변수의 특징인 조류속과 성층화 등에 의해 지배받게 되고 이러한 구역은 원역(far field)라고 한다(Harleman과 Stolzenbach, 1972). 근역에서 일어나는 온배수의 희석은 주로 주변수를 포획하여 이루어지며 원역에서의 희석은 주변수의 흐름으로부터 발생하는 이송과 확산과정에 의해 이루어지고 또한 수표면에서 대기로의 열손실이 일어난다.

2.2 단일확산관

제트의 혼합이론을 설명하는데 있어서 기초가 되는 가장 간단한 형태는 원형 단일확산관을 통한 방류이다. 단일확산관을 통해 방류된 부력제트는 초기의 흐름확립구역(zone of flow establishment) 이후부터는 횡방향으로의 유속과 농도(온배수인 경우 온도)분포는 Gaussian 분포를 갖는 자기유사적인(self similar) 모습을 갖는다고 알려져있다(Fig. 1). 유속 분포와 농도분포는 그 형태는 서로 동일하나 단지 농도분포의 폭이 유속의 분포 폭에 비해 약 1.2배 더 크게 나타난다. 제트의 축을 따른 유속과 농도의 분포는 방류구로부터의 거리에 따라 반비례하는 분포를 갖는다고 알려져있다. 이와 같은 유속의 분포로부터 거리에 따른 체적흐름률을 계산하면 거리에 따른 체적 흐름률의 증가율은 중심축에서의 유속과 제트의 폭에 비례하는 결과가 나온다. 이는 주변수가 제트로 포획되는 양은 제트 중심축 유속과 제트의 외변(periphery)에 비례한다는 의미이고 결국 주변수가 제트 내부로 포획되는 속도는 제트의 중심축 유속에 비례한다는 사실을 나타내고 있다(Koh와 Brooks, 1975). 궁극적으로 단일확산관으로부터 방류되는 유체의 희석률은 단지 거리에 반비례하는 단순한 형태로 나타나게 되고 이는 여러 실험자료를 통해 확인되었다(Fischer 등, 1979).

2.3 다공확산관

온배수 또는 하폐수를 침출방류하는 경우 그 방류량은 흔히 상당한 양이 되기 때문에 여러 개의 작은

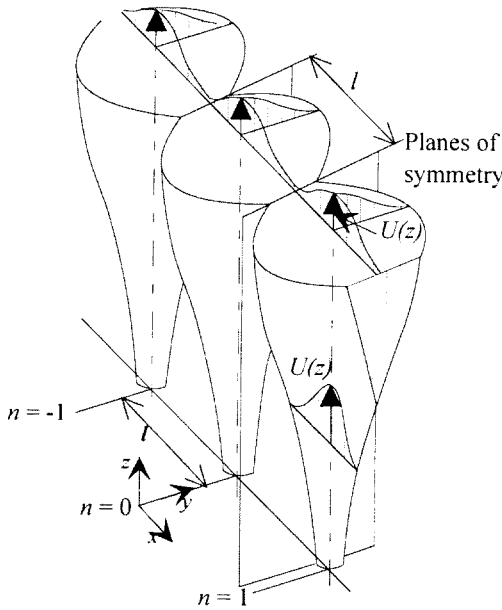
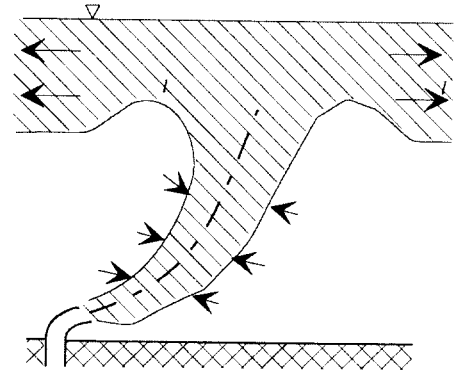
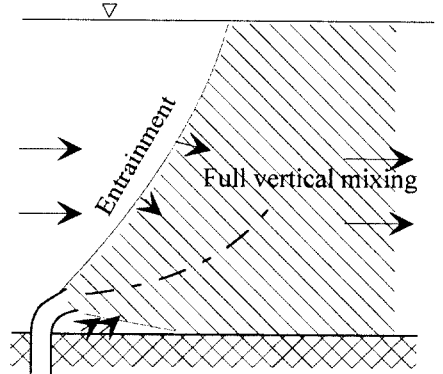


그림 2. 다공확산관을 통한 부력제트 개요도

단일확산관을 통해 방류하는 다공확산관을 사용하게 된다. 같은 유량을 방류하는 경우 다공확산관을 사용하는 편이 단일확산관을 이용하는 경우에 비해 7 - 8 배 더 높은 희석률을 얻을 수 있다(Harleman과 Stolzenbach, 1972). 다공확산관이 단일확산관과 다른 가장 큰 특징은 각각의 방류구로부터의 부력제트가 진행하면서 병합(merging)된다는 점이다. 단일확산관으로부터의 부력제트는 Gaussian분포를 보이며 점차로 그 폭이 증가하면서 진행하게 된다. 따라서 진행거리에 따른 부력제트의 폭을 증가율을 고려하여 계산해 보면 진행거리가 방류구의 간격에 약 5배 되는 지점에서 병합이 일어나기 시작하여 약 7배 이상 되는 지점부터는 방류구의 축을 따른 유속의 분포는 거의 일정하게 나타나게 되어 평면제트(plane jet)의 특성을 갖게 된다(그림 2). 이러한 병합현상 때문에 다공확산관의 수리학적 해석은 대부분 등평면확산관(equivalent slot jet)으로 가정하여 이루어진다. 등평면확산관 개념으로 다공확산관을 해석하는 경우 평면확산관의 폭은 단위길이 당 체적 흐름률과 운동량 흐름률이 다공확산관의 경우와 같다는 가정으로 구할



a) 안정방류 상태



b) 불안정방류 상태

그림 3. 부력제트의 안정성

수 있다(Jirka, 1982).

2.4 안정성

확산관을 통해 방류된 부력제트는 방류 운동량과 주변수와의 밀도차로 발생하는 부력 그리고 제한된 주변수의 수심의 관계로부터 근역에서의 안정성(stability)이 결정된다(그림 3). 즉 안정된 방류(stable discharge)란 방류된 부력제트가 다시 부력제트의 내부로 재유입이 되지 않고 수표면을 따라 층을 이루며 확산이 되는 경우를 뜻한다. 이 경우 부력제트에 의해 초기 부력제트구간(initial buoyant jet region), 수표면 접촉구간(surface impingement region), 내적 도수구간(internal hydraulic jump region) 그리고 성층화흐름구간(stratified

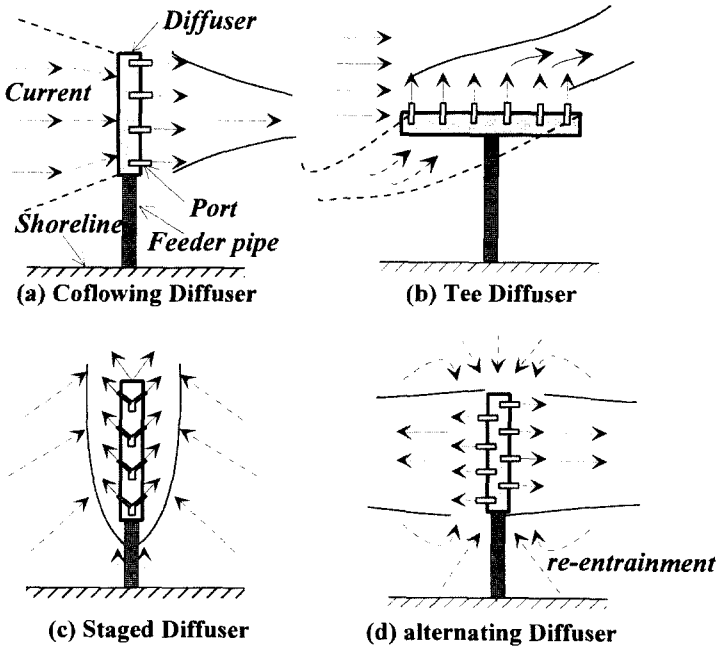


그림 4. 온수확산관의 종류

counterflow region) 등의 수리학적으로 상이한 구간이 형성된다. 불안정(unstable)한 경우는 방류되는 부력제트의 운동량이 커서 주변수의 수심에서는 안정된 성층화 흐름이 형성될 수 없는 경우이다. 이 경우 재순환 흐름이 방류구 주변에 형성되어 방류된 온배수가 재유입되어 혼합 능력이 저하되는 결과를 가져온다. 단일확산관의 안정성의 기준에 대해서는 Lee와 Jirka(1981)에 의해 실험연구가 이루어진 바가 있고 평면확산관의 경우는 Jirka와 Harleman(1979)과 Jirka(1982) 등에 의해 연구가 이루어졌다. 안정성의 기준에서 보면 작은 방류유속과 상대적으로 큰 부력을 가지고 깊은 수심에서 방류되는 하폐수 심층방류는 대부분 안정 방류이고 큰 유속으로 적은 부력의 유체가 얇은 수심에 위치한 확산관에서 방류되는 온배수 방류는 대부분 불안정 방류에 속한다.

3. 온수확산관과 하폐수확산관

온수의 심층방류와 하폐수의 심층방류는 둘 다 오

염물질을 해양심층방류를 통해 희석시켜 처리하는 방법이지만 방류되는 유체의 성격이 서로 상이하여 확산관의 특성과 그 해석 방법도 서로 차이가 난다. 일반적인 두 방류형태의 차이점은 다음과 같다.

(1) 온수의 방류는 하폐수의 방류에 비해 요구되는 희석률이 적으므로 수심 30m 이내의 천해영역에서 방류가 이루어지지만 하폐수의 방류는 큰 초기 희석률이 요구되므로 60 - 80m 정도의 심해영역에서 방류가 이루어진다.

(2) 온배수는 온도가 상승한 해수가 방류되는 형태로서 주변수와 밀도차가 약 0.3%로 부력의 효과가 적은 반면 방류되는

하폐수는 주변수와 큰 밀도차로 인해 부력효과가 온배수에 비해 약 10배 크다.

(3) 온배수는 일반적으로 그 방류량이 하폐수의 방류에 비해 상당히 크기 때문에 강한 초기 운동량의 영향으로 재순환구역과 완전연직혼합이 발생하는 불안정 방류인데 비해 하폐수의 방류는 적은 유량과 큰 부력 그리고 상대적으로 깊은 수심으로 인해 안정 방류를 형성한다.

Jirka와 Harleman(1973)은 미국 태평양 연안에 위치한 하수확산관의 자료와 600MW급의 원자력발전소의 온배수확산관 자료를 정리하여 대표적인 재원을 표 1과 같이 제시하였다.

3.1 온수확산관

온수확산관의 특징은 강한 방류 운동량에 의해 유도흐름이 발생하고 상대적으로 얇은 수심에 위치하여 수심 전체의 완전혼합이 일어나는 불안정 방류상태를 유지한다는 점이다. 온배수확산관을 통한 초기 희석률은 주변수가 방류 운동량에 의해 얼마나 포획되는

가에 의해 결정되므로 주변수의 흐름과 방류 조건 그리고 확산관에 위치하는 곳의 지형 등을 고려하여 확산관 형태를 결정하여야 한다.

온수확산관의 전형적인 형태는 다음 그림 4에 제시 바와 같이 크게 일방향확산관(unidirectional diffusers), 축방향확산관(staged diffusers), 그리고 양방향확산관(alternating diffusers)의 세 가지로 분류할 수 있고 일방향확산관은 다시 주변수의 흐름과 확산관이 이루는 각도에 따라 수직배열(perpendicular alignment)인 공류형확산관(coflowing diffusers)과 평행배열(parallel alignment)인 T형확산관(tee diffusers)으로 나눌 수 있다. 공류형확산관은 주변의 흐름방향에 수직으로 설치되어 있는 확산관의 배치에서 확산관 축과 직각방향으로 방류구가 설치되어 있는 확산관이다. 이 형태는 배면포획(back entrainment)이 희석효과의 주요인자이므로 하천에서처럼 주변수가 일방향으로 흐르는 곳에 설치하게 되면 가장 효율적이지만 해양에서처럼 조류의 방향이 주기적으로 변하는 곳에서는 온수의 방류방향과 역방향의 조류가 존재할 수 있으므로 효율이 많이 떨어지게 된다. T형확산관은 주변의 흐름의 방향과 확산관의 배치가 평행인 형태로 연안평행류가 지배적인 해역에서 주로 설치된다. 이러한 구조는 주변수의 흐름이 약한 곳에서는 높은 희석률을 보이나, 주변수의 흐름이 강한 곳에서는 인접한 방류구들에서 방류되는 온수의 궤적이 급히 굴절되는 현상에 의해 희석률이 감소하는 경향을 보인다. 축방향확산관은 방류 방향이 확산관축의 방향과 같아 방류운동량의 방향이 축

방향을 따라 외해방향으로 향하는 확산관을 뜻한다. 따라서 축방향확산관은 일방향확산관과는 달리 측면포획(side entrainment)이 희석의 주요인자이다. 축방향확산관은 방류 운동량이 외해방향이므로 방류 온배수가 해안 방향으로 다시 재순환되는 위험이 적은 장점이 있다. 양방향확산관은 방류구가 대칭의 형태를 가지고 온배수를 방류하게 되므로 전체적으로 횡방향으로의 방류운동량이 발생하지 않게 된다. 또한 이 확산관은 희석물이 여러 설계 변수들에 민감하지 않은 장점을 가지고 있다. 따라서 양방향확산관은 방류제트에 의해 유도되는 유속을 최소화해야 할 특수한 경우에 적용될 수 있다(Adams, 1982). 표 2에는 미국 및 유럽에서 시공된 대표적 온배수확산관의 특성 및 재원을 정리하였다.

3.2 하폐수확산관

방류된 하폐수는 방류수와 주변수와의 큰 밀도 차이로 발생하는 부력과 상대적으로 작은 방류 운동량으로 인해 방류된 직후에 부력류의 성격을 갖게 된다. 따라서 하폐수 방류는 유도흐름으로 인한 주변수의 포획으로 초기 희석률을 얻는 온수 방류와는 달리 부력류가 상승하면서 점차로 희석효과를 얻기 때문에 그 확산관의 형태는 상대적으로 중요성이 적다. 대신 주변수의 흐름과 성층화가 방류된 하폐수의 희석률을 지배하는 중요 인자가 된다.

방류된 하폐수는 그 부력으로 인해 수표면 방향으로 상승하면서 주변수의 흐름에 따라 굴절하는 부력류를 형성한다. 부력류는 상승하면서 주변수를 포획

하여 희석되므로 주변수와 밀도차가 점차로 적어지며 만약 주변수가 밀도 성층을 이루고 있다면 부력류의 밀도와 주변수의 밀도가 같아지는 위치에서 부력류는 상승을 멈추게 되고 비 성층 수역이라면 부력류는 수표면까

표 2. 외국의 온배수 심층방류 시공 사례

| 발전소 | Jamesport | Shoreham | Northport | San Onofre |
|--------------------------|------------|------------|------------|------------|
| 방류량(m ³ /sec) | 114.4 | 37.4 | 40.5 | 52.5 |
| 방류유속(m/sec) | 4.57 | 3.65 | 3.96 | 4 |
| 온도상승(°C) | 10 | 11 | 12 | 11.1 |
| 수심(m) | 4.9 - 16.7 | 3.7 - 6.1 | 7.9 - 12.8 | 12 |
| 확산관 길이(m) | 1434 | 1158 | 975 | 768 |
| 방류구 간격(m) | 7.6, 15.2 | 15.2, 19.5 | 30.5 | 12.2 |
| 방류구 갯수 | 123 | 66 | 100 | 63 |
| 방류구 직경(m) | 0.51 | 0.44 | 0.36 | 0.52 |

지 도달하게 된다.

주변수의 흐름 방향으로 부력류가 이동되면서 방류수의 부력과 운동량에 의한 난류운동에너지가 소멸될 때까지 회석률은 증가하는데 확산관 주변에서의 회석률의 증가율이 가장 크고 원역으로 진행함에 따라 회석률은 주변수의 수동확산에 의존하게 되어 근역에 매우 작아 전체의 5% 이내이다(김창시, 1998).

국내에는 마산/창원, 울산 그리고 온산 하수처리장에서 하폐수의 해양심층방류가 시행되고 있고 또한 가덕 신항만 및 녹산/신호 산업단지와 연계한 녹산하수처리시설에도 다공확산관을 이용한 심층방류의 실시설계가 완료되었다. 국내 하수처리장의 하폐수 확산관의 개요는 표 3과 같다(서일원 등, 1998b).

3.3 온배수 및 하폐수 확산 예측 모형

근역에서 부력제트를 해석하고 이의 온도장과 유속장을 예측하는 방법은 운동방정식과 난류모형을 결합

표 3. 국내 하폐수확산관의 개요

| 하수처리장 | 마산/창원 | 울산 | 온산 | 녹산 |
|--------------------------|-----------------------|------|------|----------------------|
| 방류량(m ³ /sec) | 12.84(2011년 계획 시간 최대) | | | 8.24(2011년 계획 시간 최대) |
| 수심(m) | 13.0 | 35.0 | 27.0 | 6.5 |
| 확산관 길이(m) | 210 | 1300 | 180 | 56 |
| 유도관 갯수 | 20 | 130 | 9 | 6 |
| 방류구 갯수 | 80 | 260 | 36 | 24 |
| 방류구 직경(m) | 0.2 | 0.2 | 0.25 | 0.5 |

표 4. 근역 혼합모형의 특성비교

| 모형 | 방류구 | 방류각도 | 주변수 밀도성층 | 주변수 흐름 | 주변수와 확산관의 각도 |
|----------|---------------------|-------------|-----------|---------------------|--------------|
| UPLUME | single | -5° ~ 90° | arbitrary | not exist | n/a |
| UOUTPLM | single | -5° ~ 90° | arbitrary | constant | assumes 90° |
| UDKH DEN | single/multiple | -5° ~ 130° | arbitrary | arbitrary | 45° ~ 135° |
| UMERGE | multiple | -5° ~ 90° | arbitrary | arbitrary | assumes 90° |
| ULINE | slot/closely spaced | assumes 90° | arbitrary | arbitrary | 0° ~ 180° |
| UM | multiple | -90° ~ 90° | arbitrary | arbitrary | 45° ~ 135° |
| RSB | multiple | -90° ~ 90° | arbitrary | arbitrary | 45° ~ 135° |
| CORMIX1 | single | arbitrary | arbitrary | constant with depth | arbitrary |
| CORMIX2 | multiple | arbitrary | arbitrary | constant with depth | arbitrary |

하여 해석하는 방법, 제트의 유속과 온도분포를 적절한 함수로 가정하여 적분하여 해석하는 방법 그리고 부력제트 특징을 이에 영향을 미치는 인자로 재구성한 무차원화된 변수로 해석하는 방법 등 크게 세 가지 해석방법으로 나눌 수 있다. 난류모형을 이용하는 방법은 다른 방법에 비해 상대적으로 적은 가정을 사용하여 정확한 해석을 할 수 있다는 장점이 있으나 넓은 범위의 해석을 하기에는 현재까지의 기술로는 어려움이 있다. 적분모형을 이용하는 방법은 부력제트의 유속 및 온도분포를 주어진 조건에 부합하는 유사함수(similarity function)로서 가정하고 이 함수를 제트 단면에 대해 적분하여 유속과 온도분포를 결정하는 방법이다. 적분모형에서는 운동량과 부력흐름률이 보존된다는 점을 만족시킴으로써 그 해석을 검증할 수 있고 주변수의 유입은 제트 중심축의 유속 또는 다른 제트 인자에 관련된 유입계수(entrainment coefficient)에 비례한다고 가정한다. 무차원화된 변수를 사용하는 차원해석법은 복잡한 부력제트의 거동을 지배적인 영향을 주는 인자만의 무차원수로서 해석하는 방법이다. 이 방법은 부력제트의 거동을 제한된 인자만으로 함수로 해석하므로 넓은 범위에서 해석이 용이하다는 장점이 있다. 적분모형은 주로 단순한 형태의 단일확산관

의 해석 등에 주로 사용되고 다공 확산관을 통해 온배수가 흐름이 있는 수계에 방류되는 경우와 같이 고려해야 할 인자가 많은 부력제트의 경우에는 주로 차원해석을 이용한 해석방법이 쓰인다.

과거 온배수 확

산관 및 하폐수 확산관의 설계에 활용되어 모형의 신뢰도가 입증된 근역해석용 프로그램과 그 적용범위를 표 4에 정리하였다(서일원 등, 1998a).

4. CO₂의 해양방류

4.1 개요

지구온난화의 원인으로 꼽히고 있는 이산화탄소의 농도를 해양방류를 통해 저감할 수 있는 방안에 대해 연구가 수행되고 있다.

이산화탄소의 배출은 크게 비점오염원과 점오염원으로 나눌 수 있다. 자동차나 난방기구로부터 발생하는 비점오염원으로부터의 이산화탄소의 배출보다는 화력발전소나 공장 등 점오염원에서 대량으로 발생하는 이산화탄소가 해양방류의 대상으로 판단된다.

이산화탄소를 제어하는 기술은 1990년대 들어 저장대 또는 폐유전에 저장하는 방법 등이 해양방류와 함께 제안되었으나 그 방법들은 이산화탄소가 고정상태가 안정적이질 못하고 비용도 상대적으로 많이 든다는 단점을 가지고 있다. 그에 비해 이산화탄소의 해양방류방법은 이산화탄소를 녹일 수 있는 무한한 용매인 해양을 이용하는 것으로 인간의 활동에 의해 생산되는 모든 이산화탄소를 해수에 유입시킨다고 해도 해수의 이산화탄소의 증가는 연간 0.016%에 지나지 않을 것이라는 연구결과가 있다.

4.2 방류방법

이산화탄소의 해양방류기술은 방류하는 이산화탄소의 상태, 이산화탄소의 방류방법, 그리고 이산화탄소의 방류깊이에 따라서 분류할 수 있는데 현재까지 연구된 대표적인 기술은 다음과 같다(그림 5).

1) 드라이아이스 방류방법: 이산화탄소를 드라이아이스형태의 고체로 만들어 바지 등의 운송수단을 이용하여 해수에 유입하는 방법이다.

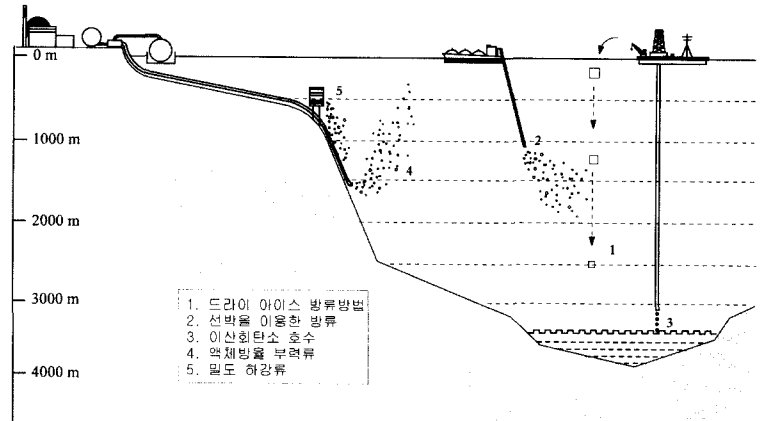


그림 5. 온수확산관의 종류

2) 선박을 이용한 방류: 이산화탄소를 액체상태로 방류하는 방법 중에 하나로 액체 이산화탄소를 LNG 선과 같은 탱커에 저장하여 방류지점으로 이동하여 해양에 방류하는 방법이다.

3) 이산화탄소 호수: 수심 3000m 보다 깊은 심해에 액체 이산화탄소를 방류하여 주변수에 비해 밀도가 커서 깊은 바다에 가라앉게 하는 방법이다.

4) 액체방출 부력류: 이산화탄소를 배출원로부터 관망을 통하여 해안으로 이동시킨 후 다공확산관을 이용하여 수심 1000 ~ 1500m 내외의 수심에 액체상태로 방류하는 기법이 액체방출 부력류 방법이다. 방류된 액화 이산화탄소는 주변수에 비해 밀도가 적으므로 액체방출 부력류의 형태를 이루며 상승하게 된다. 이러한 액체방출은 상승하면서 주변수의 혼합과 동시에 용해된다. 방류된 이산화탄소와 주변수의 혼합물인 부력류는 일정 높이까지 상승하다가 안정층에 도달하여 정지하게 되고 그곳에서 오랜 시간 머물러 있게 된다. 부력류의 형성과 더불어 이산화탄소와 주변수의 경계에는 이산화탄소-수화물이 발생하게 되는데 부력류에서의 물질교환을 저해하는 요인이 된다. 또한 방류확산관의 수, 초기 방류 시의 액체방출의 크기, 주변수의 성층화 정도 등에 따라 부력류 효과가 달라지게 된다.

5) 밀도 하강류: 밀도류를 이용한 방법은 액체방류의 일종으로서 수심이 얇은 곳에서 액화 이산화탄소

를 방류하여 심해로 이동시켜 저장하는 방법이다. 이 방법은 해수와 이산화탄소를 혼합하여 주변수보다 밀도가 높은 이산화탄소 혼합물을 생성하는 것이 중요한 요소이다. 수심 500m 가량의 천해 또는 수심 1000m 정도의 해수에 방류된 밀도류는 자연적인 지형을 따라서 하강하는 하강류를 형성하면서 하강하여 주변수와 밀도가 비슷한 위치에 머무르게 된다. 밀도가 큰 부력류를 이용하는 경우 수송에 사용되는 관의 길이를 짧게 할 수 있기 때문에 경제적이며 또한 혼합층 이하에 방류하는 경우 이산화탄소의 대기로의 재유입을 장기간 막을 수 있는 장점이 있으나 이산화탄소의 농도가 높은 밀도류가 해안지형을 타고 하강하면서 해양생태계를 파괴할 수 있는 단점이 있다. 이 방법은 수심의 영향은 적은 반면 지형의 영향을 많이 받기 때문에 입지조건이 까다로운 단점이 있다.

4.3 환경영향

이산화탄소의 해양방류기술은 방류로 인한 해양생태계의 영향이 최소화될 때만이 그 가치를 갖는다고 할 수 있다. 이산화탄소의 방류로 인해 가장 현저하게 나타나는 현상으로 해수의 pH저하를 들 수 있다. 해수 속에 존재하는 탄산칼슘(C_3CO_3)이 완충작용을 하지만 많은 양의 이산화탄소가 빠른 속도로 유입되는 경우 이러한 자연적 완충작용은 그 효과를 거의 잃는다고 할 수 있다. Adams 등(1996)의 연구결과에 의하면 드라이아이스 방류방법과 선박을 이용한 방법이 생태계에 끼치는 영향이 가장 적은 것으로 알려졌다. 반면 고정된 확산관을 사용하는 액체방울 부력류 방법과 밀도 하강류 방법이 비교적 생태계에 많은 영향

을 끼치는 것으로 나타났다. 그 외에 이산화탄소 호수 방법은 해저 바닥면에서의 생태계에는 큰 영향을 줄 것으로 예상된다.

공학적 입장에서 판단할 때는 주변의 환경에 비교적 영향이 적은 드라이아이스 방류방법과 선박을 이용한 방류방법은 다른 방법에 비해 경제성이 현저하게 떨어지므로 현실적으로 거의 불가능하다고 판단할 수 있다. 이산화탄소 호수 방법은 선박을 이용한 방류방법에 비해 경제성은 우수하지만 기술적으로 어려울 뿐만 아니라 해저 생태계에 미치는 영향이 불확실하므로 현재로는 실용화하기에 어려움이 있다고 판단된다. 반면에 액체방울 부력류 방법과 밀도하강류 방법은 기술적인 면과 경제적인 면에서 가장 적용 가능성이 높다.

세계적으로 대규모 발전소는 해안에 인접하여 있기 때문에 방류 위치까지의 수송비가 저렴할 뿐 아니라 수심 1000m 까지의 해저관로설치 기술은 이미 개발되어 있으므로 현 실정에 적합하다고 할 수 있다.

5. 결론

해양 심층방류를 통한 온배수와 하폐수의 방류와 이산화탄소의 해양방류에 대해 정리하였다. 발전소 및 대도시와 공단의 수요가 계속적으로 증가하는 상황에서 온배수와 하폐수의 심층방류에 대한 연구는 필수적이라 할 수 있다. 또한 이산화탄소의 저감을 위한 해양심층방류 연구에 대한 국가적 차원의 지원이 시급한 실정이다. 🌱

〈참고문헌〉

- 김창시 (1998) 근역혼합모형을 이용한 해양방류 하수의 혼합특성 예측, 석사학위 논문, 서울대학교
- 서일원, 이재형, 김창시 (1998a). 오염물질의 해양방류 기술: 제2편 온배수 및 하수 확산에 관한 수치모델 한국수자원학회지 제31권2호
- 서일원, 이재형, 김창시 (1998b). 오염물질의 해양방류 기술: 제4편 하수확산관의 설계 및 시공 한국수자원학회지 제31권4호
- Adams, E. E. (1982). "Dilution Analysis for Unidirectional Diffusers." Journal of Hydraulic Division, Proceedings of American Society of Civil Engineers, 108(HY3), 327 - 342.
- Fischer, H. B., List, E. J., Koh, R. C. Y., Imberger, J., and Brooks, N. H. (1979). Mixing Inland and Coastal Waters, Academic Press, New York, N.Y.
- Harleman, D. R. F., and Stolzenbach, K. D. (1972).

- "Fluid Mechanics of Heat Disposal from Power Generation." Annual Review of Fluid Mechanics, 4, 7-32.
- Jirka, G. H. (1982). "Multiport Diffuser for Heat Disposal: A Summary." Journal of Hydraulic Division, Proceedings of American Society of Civil Engineers, 108(HY12), 1425-1467.
- Jirka, G. H., and Harleman, D. R. F. (1973). "The Mechanics of Submerged Multiport Diffusers for Buoyant Discharges in Shallow Water." Technical Report 169, Ralph M Parsons Laboratory for Water Resources and Hydrodynamics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass.
- Jirka, G. H., and Harleman, D. R. F. (1979). "Stability and Mixing of a Vertical Plane Buoyant Jet in Confined Depth." Journal of Fluid Mechanics, 94(2), 275-304.
- Koh, R. C. Y., and Brooks, N. H. (1975). "Fluid Mechanics of Wastewater Disposal in the Ocean." Annual Review of Fluid Mechanics, 7, 187 - 211.
- Lee, J. H. W., and Jirka, G. H. (1981). "Vertical Round Buoyant Jet in Shallow Water." Journal of Hydraulic Division, Proceedings of American Society of Civil Engineers, 107(HY12), 1651-1675.