

# 오염물질의 해양방류 기술(Ⅱ)

서 일 원 (서울대학교 토목공학과 교수)

이 재 형, 김 창 시((주)대우 항만단지 설계팀)

김 대 근 (서울대학교 토목공학과 박사과정)

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<sub>2</sub> 해양방류

## 제 2 편

### 온배수 및 하수확산관에 관한 수치모델

#### 1. 서 론

하천, 호소 및 해양의 오염문제는 온수 및 하·폐수의 방류에 따른 오염물의 확산에 의해 발생한다. 원자력발전소에서 냉각수로 사용된 후 배출되는 대량의 온수는 인근 해안지역에 고온역을 형성하여 생태계를 변화시키며, 하수처리장에서 배출된 하수에는 고농도의 유해성분이 존재하기 때문에 주변 환경을 오염시키게 된다. 이러한 국부적인 고온역과 고농도역을 최소화하기 위한 여러 가지 방류방법이 연구되어 왔는데, 그 중에서 초기혼합을 극대화시킬 수 있는 수중확산관시스템이 외국에서는 많이 사용되고 있다.

방류된 온배수 및 하수의 흐름영역은 혼합과정을 지배하는 주된 물리적 요인에 의해 근역 및 원역으로 구분되는데, 각 영역의 혼합과정 및 특성은 제1편에서 설명하였으며 특히 온배수의 근역과 원역에서의 혼합과정을 개념적으로 도시한 것이 그림 1이다.

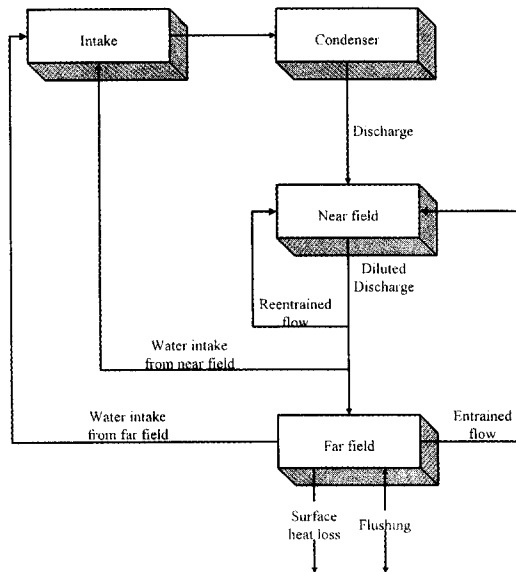


그림 1. 온배수의 근역 및 원역에서의 혼합과정

근역 및 원역을 모두 해석할 수 있는 전역모형 (complete field model)은 각 영역에서의 혼합특성이 다양한 길이 및 시간규모를 가지고 있어 실제 적용에 한계가 있기 때문에 최근까지도 근역 및 원역으로 구분하여 각 영역별로 적절한 가정을 도입하여 방류수의 혼합특성을 연구하는 것이 일반적이다(정경태, 1984; Zhang, 1995). 근역에서의 방류수의 혼합거동은 주로 적분모형을 이용하는데 이는 질량, 운동량, 부력에 관한 보존방정식에 속도와 부력의 자기상사함수를 적용하여, 제트 단면에 대하여 적분하여 얻은 상미분방정식을 해석하는 것이다. 적분모형은 근역에서 플룸의 특성을 해석하는데 비교적 접근이 용이하고 신뢰성 있는 모델이지만 원역으로의 모형의 확장이

용이하지 않고 복잡한 지형과 주변류흐름의 비정상성을 재현할 수 없는 단점이 있다. 적분모형은 다시 Eulerian 적분모형과 Lagrangian 적분모형의 두 가지 범주로 나눌 수 있다. Eulerian 모형들은 플룸의 중심선 궤적에 따른 여러 변수들의 변화율을 표현한 일련의 상미분방정식을 풀어 포획(entrain)된 질량과 이에 따른 희석률을 계산하고, Lagrangian 모형들은 시간에 따른 플룸의 궤적좌표를 따라 플룸요소들을 추적하면서 각 물리량에 대한 보존방정식을 수립하므로써 플룸의 혼합특성의 변화를 계산한다. 근역을 모의하는데 사용하는 또 다른 모형으로 특성길이모형(length scale model)이 있는데 이는 일련의 특성길이를 이용하여 모의유역을 흐름특성이 동일한 유역으로 구분하고 각 유역별로 혼합특성을 계산한다.

원역에서의 혼합거동은 주로 편미분방정식으로 구성된 지배방정식에 적절한 경계조건을 부여하여 유한차분법 또는 유한요소법을 이용하여 해를 구하는 방식으로 적분모형에 비해 지형재현이나 주변류흐름의 재현은 유연하게 표현할 수 있으나 확산관에서 온수가 방류되어 혼합되는 과정이 다양한 범위의 시간 및 길이규모를 가지고 진행되므로 근역과 원역에서의 혼합과정을 동시에 합리적으로 모의하기는 불가능하다. 여기서 원역모형이라는 명칭은 계산영역내에 위치하는 근역에서의 혼합과정을 모의하기에는 격자의 해상도가 낮아 제대로 모의하기 힘들고 원역의 혼합과정만을 합리적으로 모의할 수 있는 모형이라는 의미에서 명명되었다. 원역모형의 경우 일반적으로 수 일에서 길게는 수 개월간의 시간규모와 수 킬로미터에서 수 십 킬로미터의 길이규모의 영역에서의 혼합양상을 다루게 된다. 수치모형의 격자는 아주 작게 잡아도 수 십 미터에서 크게는 수 킬로미터에 이르게 되므로 근역을 해석하기에는 격자의 해상도가 문제가 된다. 이러한 문제점으로 인해 기존의 원역모형은 온수 및 하·폐수의 수표면방류를 해석하기 위하여 주로 사용되어져 왔다.

본 강좌의 제1편에서는 확산관 설계의 기초가 되는 부력제트 및 확산관이론에 대하여 기술하였고 제2편에서는 제1편의 이론을 바탕으로 구성된 수치모형에

관한 내용을 소개하고자 한다. 과거 원자력발전소의 온배수확산관 및 하수처리장의 방류구 설계에 활용되어 모형의 신뢰도가 입증된 근역해석용 프로그램들을 중심으로 소개하고, 최근의 국내·외의 원역모형에 대한 연구들을 제시하고자 한다.

## 2. 근역모형

### 2.1 UPLUME 모형

UPLUME 모형은 흐름이 없고 밀도성층의 형태가 일정치 않은 수역에 임의의 각도로 방류하는 부력플룸을 모의하는 모형(Baumgartner와 Trent, 1970; Baumgartner 등, 1971)이다.

플룸의 거동은 흐름확립구역(zone of flow establishment)과 발달 흐름구역(zone of established flow)으로 구분하여 해석하는 Eulerian 적분모형이다. 흐름확립구역 이후에서의 유속과 농도분포는 자기상사성(self similarity)의 가정 하에 하나의 독립변수(플룸 축에 따른 원호길이)로 연속방정식, 운동량방정식, 밀도차에 대한 식을 플룸의 단면적에 대하여 적분한다.

발달흐름영역에서의 흐름은 다음과 같이 가정한다.

- ① 흐름은 정상상태이고 비압축성이다.
- ② 난류확산은 방사상(radial)방향으로만 의미가 있다.
- ③ 정수압상태이다.
- ④ 플룸의 흐름은 축대칭이다.
- ⑤ 플룸 횡단면의 유속 및 농도분포는 Gaussian분포이다.

UPLUME 모형에서는 속도분포에 의해 농도분포를 가중 평균하여 흐름률평균 희석률(flux-averaged dilution)을 환산하는데, 궤적 중심선에서의 최소희석률을 1.77배 하여 흐름률평균 희석률로 취한다. 플룸의 평균밀도가 주변수의 밀도와 같아지는 지점 이상에서 플룸은 수평으로 확장하고, 이후의 확산과정은 수동적으로 바뀌어 희석률 증가가 둔화된다. 만약 플룸이 방류포트까지의 수심의 0.9배에 도달하면 플룸은 저지현상(blocking)에 의해 더 이상의 희석이 이루

어지지 않는 것으로 판단한다. 이 모형은 연직방향의 유속이 0이 되거나, 중심선과 수평면이 이루는 각도가 0°가 될 때, 혹은 플룸이 수표면에 도달할 때 계산을 종료한다.

## 2.2 UOUTPLM 모형

UOUTPLM 모형은 단일플룸을 모의하는 Lagrangian 적분모형(Winiarski와 Frick 1976, 1978)으로, 조류가 있는 수역에서 주변 해수를 포획하여 질량이 증가하는 플룸요소의 특성들을 연속적으로 모의한다. 플룸요소의 밀도(또는 온도, 염도)와 속도는 요소 횡단면의 평균치를 취하고, 플룸요소와 포획된 주변수의 질량의 합, 수평방향의 운동량, 그리고 에너지는 보존되는 것으로 가정한다. 포획되는 주변수의 질량은 조류의 흐름방향에 직각인 평면에 투영된 플룸요소의 면적과 같다고 가정하는 투영면적포획과 흡인포획에 의한 포획량(플룸요소의 외부면적에 전단속도를 곱한 것의 0.1배) 중에서 큰 값을 포획량으로 취한다.

주변수를 포획한 플룸요소의 질량은 본래 플룸요소의 질량에 포획된 주변수의 질량을 추가한 것이 되는데, 플룸요소의 새로운 온도와 농도 등은 이전의 질량과 연행된 주변수의 질량의 상대적인 값으로 가중평균하여 계산한다. 수평방향의 속도도 같은 방법으로 구하므로 수평방향의 운동량은 보존되고, 주변수를 포획한 플룸요소의 새로운 밀도에 의한 부력은 연직방향의 가속도를 발생시키기 때문에 연직방향의 유속은 부력에 지배된다. 항력은 무시할 만하다고 가정하고, 플룸요소의 길이는 총속도에 따라 변하며, 반경은 주변수를 포획한 후의 새로운 질량과 밀도에 따라 변화한다. 희석률은 초기 체적과 계산단계에서의 플룸요소의 체적의 비율로 계산하는데, 연직방향의 유속이 0이거나, 수표면에 도달하거나, 길이축척 또는 모형 수행의 한계에 도달하면 계산을 종료한다.

## 2.3 UDKHDEN 모형

UDKHDEN 모형은 단일확산관, 다공확산관 모두에 적용이 가능한 3차원 Eulerian 적분모형으로

Hirst(1971a, b), Davis(1975), Kannberg와 Davis(1976)의 연구를 기초로 개발되었다.

흐름확립구역의 형성과정과 플룸들의 병합과정의 다양한 플룸형상을 고려할 수 있는 모형이다. 병합이 발생한 이후의 플룸은 2차원 등가슬롯플룸으로 간주한다. 주변수의 수심에 따라 밀도 또는 조류속도를 다르게 입력할 수 있고, 온도와 염도, 또는 밀도 중에서 선택하여 방류수와 주변수의 특성을 나타낼 수 있고, 포획함수는 국부적 푸르드수, 플룸의 간격, 초과속

도와 주변유속에 의존하는 양함수로 표현된다. 속도와 농도, 온도분포는 자기상사성(멱함수 형태)에 기초하며, 병합구역에서는 이 유사분포를 중첩하여 계산한다.

방류구에서 균등하다고 가정한 플룸의 온도, 농도, 유속분포는 흐름확립구역에서 경계층이 제트의 중심 쪽으로 확산되어감에 따라 자기상사를 가지는 분포형태로 변하는데, 이 때의 속도와 농도, 온도분포의 변화율은 각각 다르게 취급한다. UDKHDEN 모형에서 도입된 가정은 다음과 같다.

- ① 흐름은 평균적으로 정상상태를 유지한다.
- ② 유체는 비압축성이고, 밀도변화는 단지 부력항에만 포함된다.
- ③ 유체의 다른 특성치는 모두 상수이다.
- ④ 마찰열은 무시한다.
- ⑤ 압력은 완전한 정수압분포이다.
- ⑥ 주변수의 난류효과는 포획연행함수에서만 고려된다.

⑦ 병합 전까지의 제트 흐름은 축대칭이고, 자유경계층 흐름이다.

발달흐름영역에서도 흐름확립구역에서의 지배방정식을 이용하여 희석특성을 계산하는데, 형태만 약간 달라질 뿐이다. 중심선의 농도 또는 온도, 플룸의 폭, 그리고 플룸의 좌표를 종속변수로 취하고, Gaussian 형태로 근사화된 멱함수를 이용하여 이 방정식들을 계산한다.

포획량은 플룸의 크기, 초과유속, 국부적 푸르드수와 주변수 유속 등으로 표현된 경험적인 함수로부터 결정한다. 플룸이 병합되면 플룸들은 축대칭으로 가

정하지 않고 주변수를 포획하는 표면적을 감소시켜 포획함수는 수정되고 병합된 플룸들은 일정한 간격으로 일직선 위에 있다고 가정되며 양단효과는 무시된다.

## 2.4 UMERGE 모형

UMERGE 모형은 플룸의 궤적을 따라 플룸요소를 추적함으로써 양의 부력을 가진 흐름을 해석하는 Lagrangian 적분모형이다. 인접 플룸 사이의 간섭을 고려할 수 있는 2차원모형으로, 확산관 축에 직각방향으로 흐르는 조류속도가 수심에 따라 변화하는 환경을 모의할 수 있다. 이때 방류포트들은 확산관 위에 등간격으로 배치되어 있다고 가정하는데, 수평면에 대한 방류각도는 임의로 설정할 수 있다.

투영면적포획 또는 흡인포획 과정은 UOUTPLM 모형과 같은 방식으로 처리되나, 이 두 포획량 중 큰 값을 취하지 않고 흐름장 중첩에 의하여 두 값을 합한다. 주변수의 유속이 없는 경우 포획은 순전히 플룸의 방사상의 흡인포획에 의존하며, 중간정도의 조류속도에서는 두 가지 포획이 모두 유효하나 조류방향의 반대쪽에 있는 부분에서의 흡인포획량은 다소 감소한다. 주변유속이 큰 경우의 포획은 주로 투영면적포획에 의존한다(Frick 1981, 1984). 병합방정식은 순전히 기하학적인 측면만을 고려하여 구성한다. 인접 플룸과 중첩되는 부분의 질량은 정상적인 플룸의 크기를 증대시켜 재분배하고, 포획량도 이와 같이 조정된다. 이 모형의 유도에 도입된 가정은 다음과 같다.

① 인접플룸간의 상호교환은 플룸요소의 평균적인 특성을 변화시키지 않으나 플룸의 반경에는 영향을 미친다.

② 이 모형은 플룸의 평균특성들을 계산한다.

③ 주변수는 플룸의 존재에 의한 영향을 받지 않는다.

④ 주변수에 의해서 플룸에 미치는 순압력은 없고, 인접한 플룸요소간에도 순힘이 상호작용하지 않는다.

⑤ 에너지와 염도는 보존된다.

⑥ 비열은 이 시스템에서 관측된 온도범위 내에서는 일정하다.

⑦ 흡인에 의한 포획과 더불어 플룸의 투영면적에 닿는 모든 유체는 포획된다.

⑧ 조류의 방향은 확산관 축에 직각으로 가정한다.

⑨ 플룸의 모든 질량은 플룸의 경계 내에 존재한다.

포획이 이루어진 후 새로운 계산 단계에서의 플룸 요소의 평균 수평속도와 온도 및 염도는 원래 요소와 포획된 질량에 대한 가중평균에 의해서 계산하며, 수직방향의 속도를 계산할 때는 부력을 고려한다. 포획을 고려한 플룸의 새로운 속도와 시간간격에 의해 구간 이동거리를 구하여 이전의 플룸 좌표에 더하므로써 플룸의 새 위치를 결정하는데, 플룸요소의 양면 사이의 속도차 때문에 각 시간 증분에 따른 플룸요소의 길이는 변화한다. 중첩되는 질량을 플룸의 다른 부분으로 분배한 후 플룸요소의 반경에서의 변화를 계산하고 포획항을 수정함으로써 병합의 효과를 고려한다. 플룸의 속성들은 주어진 시간간격별로 한번에 계산되고, 수직방향의 속도가 음이 되거나(최대상승고에 도달), 수표면에 도달하거나 또는 지정된 반복계산 횟수를 초과할 때까지 반복계산 한다.

## 2.5 ULINE 모형

ULINE 모형은 균일한 밀도를 가진 유체내로 방류되는 플룸의 실험(Roberts, 1977)에 기초하여 임의의 성층구조를 가진 주변수에서의 희석률을 계산할 수 있도록 확장된 모형이다. 조류의 방향은 일정하다고 가정하나 확산관 축에 대한 조류속과 그 방향에 대한 제한조건은 없으며, 조류속과 밀도는 수심에 따라 변화시킬 수 있다. 주변수의 밀도와 방류플룸의 밀도가 같아지는 높이에서 플룸은 포착되고, 그렇지 않으면 수면에 도달하게 된다. 이 모형은 플룸이 최종상승고에 도달하거나 수면에 도달하면 수행을 끝낸다.

## 2.6 UM 모형

UM 모형은 UMERGE 모형을 개선, 발전시킨 모형으로 음의 부력플룸과 표층방류를 모의할 수 있으며, 주변수의 농도를 고려할 수 있다. 이 모형은 미환경청(USEPA)에서 개발된 다른 모형들과 마찬가지로 투영면적포획 가정(Frick, 1984)을 사용한다.

UM 모형의 가장 기본적인 가정은 각 플룸요소들은 동일한 궤적을 따라 움직이며 농도와 유속 등 모든 물리량들은 정상상태라는 것이다. 플룸요소는 플룸의 바깥 경계면과 궤적의 중심선에 연직인 플룸 내부의 평면으로 이루어진 미소단면으로 정의한다. 플룸의 궤적에 대한 요소의 길이는 작지만 궤적이 회절 되어 플룸요소의 중심이 플룸의 횡단면 중심과 일치하지 않을 때 UM 모형은 이를 반영하지 않고, 궤적의 반경이 플룸의 반경보다 작을 때(플룸이 중첩되는 부분이 발생할 때) 초기회석률 계산을 중단하는 결점이 있다.

UM 모형은 주변수의 유속은 횡단면의 중심에 있고 항력 효과와 자유수면과의 상호작용은 없고 바닥은 편평하다고 가정한다. UM 모형의 밀도는 Teeter와 Baumgartner(1979)의 상태방정식(equation of state)으로 계산한다. 열의 복사, 전도 및 확산은 작고, 온도는 보존성 양이라고 가정한다. 플룸이 병합되면 주변수와와 접촉면적이 감소하므로써 포획량이 감소하므로 투영면적포획 개념에 의해 적용한 기하학적 값들을 수정한다. UM 모형은 확산관에서 같은 방향으로 방류되는 인접플룸 간의 병합만을 고려하는데, 플룸이 병합되면 2차원적인 문제로 단순화하여 해석한다. 또한 확산관의 길이가 길어 확산관 끝의 플룸이 중심 쪽으로 휘어지는 양단효과와 내부확산의 불균형은 무시한다.

UM 모형은 평균회석률이 아닌 중심선의 회석률을 계산한다. 기존의 회석률 모형에서는 농도, 속도, 밀도의 분포를 Gaussian 분포로 전제하였으나, Baumgartner 등(1993)은 Gaussian 분포는 무한한 영역까지 확장되는 반면, 플룸요소들은 유한 경계를 가지므로 플룸의 경계면에서의 값을 정의하기 위하여 이 분포를 수정할 필요가 있다고 하였다. UM 모형은 플룸요소의 중심부에서의 분포가 Gaussian 분포와 잘 일치하는 3/2떡분포를 이용하여 중심선 농도를 결정한다. UM 모형은 기본적으로 심해에 적용하는 모형으로서 일반적으로 축방향확산관에는 적용하지 않으며, 초기회석모형이지만 Brooks 방법을 추가하여 원역의 회석률을 계산할 수 있다(Brooks, 1973).

## 2.7 RSB 모형

RSB 모형은 수중다공확산관에 대한 실험(Roberts 등, 1989)에 근거한 특성길이모형으로 임의의 속도와 방향을 가진 조류가 있는 밀도성층 수역에서의 부력제트의 병합 거동과 오염장의 수중형상을 계산한다.

RSB 모형은 특성길이에 따라 흐름을 분류하며, 회석률과 오염장의 특성은 계산에 의하거나 또는 실험 결과 등의 기존 자료를 이용하여 내삽 또는 외삽한다. 비선형 밀도성층 수역에서는 플룸의 최종상승고까지의 밀도분포를 선형으로 가정한다. 선형성층 수역에서는 플룸이 느리게 확장하고 그 두께가 더 얇으며, 혼합이 작게 발생하므로, 이러한 가정에 의한 회석률은 비선형 성층환경에서보다 더 작게 나타난다(Roberts 등, 1989). RSB는 최소회석률을 계산하고 그 1.15배를 흐름률의 평균회석률로 취한다.

RSB 모형은 미국 EPA에서 발표한 PLUMES으로 실행할 수 있는 모형으로, UM 모형과 동일한 입력파일을 사용하며, 입력자료도 동일하다. 이 모형은 실험에 기초한 모형이므로 근본적으로 많은 제약이 있다. 우선, 주변수의 밀도분포는 안정상태(수심방향으로의 밀도가 작을 수 없다)이고, 방류량은 일정하여야 한다. 오염장은 3차원적으로 모의되나, 선형플룸으로 근사화된다. 이 모형은 일방향확산관과 축방향확산관에 대해서는 적절히 모의하지 못하며, UM과 마찬가지로 대기의 열전달함수를 고려하지 못하므로 수표면에 닿은 이후의 결과 중 특히 온도에 관해서 주의 깊게 검토하여야 한다.

## 2.8 CORMIX1 및 CORMIX2 모형

CORMIX 모형은 EPA의 지원을 받아 Cornell 대학에서 개발된 특성길이모형(Akar와 Jirka, 1991)으로, BOD와 COD, 온도 등과 같은 일반 오염물질과 독성 오염물질의 초기혼합 및 회석과정을 모의할 수 있는 전문가시스템이다. CORMIX 모형은 3개의 부모형으로 구성되어 있는데, CORMIX1 및 CORMIX2 모형은 각각 수중단일확산관 및 수중다공확산관에 의해 방류된 오염물질의 초기회석 과정을

모의하는 프로그램이며, CORMIX3 모형은 암거나 수로 등을 이용한 표층방류 방법에 의해 방류된 오염물질의 초기회석 과정을 모의하는 프로그램이다. 여기서는 수중확산관의 모의에 적용이 가능한 CORMIX1 및 CORMIX2 모형의 일반적 특징들을 개략적으로 소개한다.

CORMIX1 모형은 총 체적흐름률, 운동량 흐름률, 부력 흐름률, 주변수의 유속과 주변수의

밀도경사 등 주어진 변수들을 이용하여 특성길이들을 계산하고 이를 이용하여 흐름을 구역화 한 다음 혼합특성들을 계산한다. 일반적인 확산흐름은 3차원이지만, 근역에 대한 혼합해석에서는 2차원 흐름변수들을 사용하기도 한다. CORMIX2 모형에서는 방류구의 세부특성, 즉 방류포트의 직경과 간격을 무시하고, 등가슬롯폭을 적용하여 초기조건을 설정한다. 즉, CORMIX2 모형에서는 2차원 슬롯방류의 개념을 기초로 확산관의 단위길이당 흐름률 변수들로 특성길이를 계산하여 방류수의 혼합특성을 계산한다.

CORMIX1 및 CORMIX2 모형의 주요 입력자료는 해역의 해양수리학적 자료(조류의 속도 및 방향, 밀도 분포, 염도, 온도 등), 확산관의 제원(도수관 길이 및 방향, 확산관의 길이와 관경, 방류공의 수 및 관경, 확산관 축의 방향, 방류공의 각도 등 확산관의 기하학적 특성), 방류수의 특성(방류수의 온도, 밀도, 유량 등), 법적혼합구역 자료(길이, 면적 또는 체적으로 나타낸 법적혼합구역의 범위와 수질 기준 등) 등이다.

CORMIX 모형에서는 주변수의 밀도분포를 균등한 것으로, 또는 성층화된 조건으로 모의할 수 있다. CORMIX1 및 CORMIX2 모형은 방류시스템의 기하학적 형태에 따른 방류원 근처의 혼합거동을 예측하는데 주안점을 두고 개발되었기 때문에, 기 개발된 수치모형들에 비하여 방류원 주위에서 발생하는 복잡한 흐름상황을 보다 정확하게 설명할 수 있다. 특히 단면 경계에서의 상호작용, 오염물질의 하상부착, 밀도성층 구역인 경우 발생하는 내부성층 현상, 가로흐름이 작을 경우에 방류구 상류 쪽으로 오염물이 확산되는 상류침투과정 등을 묘사할 수 있는 장점을 가지고 있

다. 또한 확산관의 기하학적 변화에 따른 오염물질의 회석과정을 쉽게 예측할 수 있어, 최적의 확산관을 설계하는데 유용하게 이용할 수 있다.

CORMIX1과 CORMIX2 모형은 하천, 호소 및 해안 등 대부분의 수계에 적용이 가능토록 개발되었으나 단면 경계가 불규칙하고 하상의 수심이 변하는 수역의 경우에는 적용성이 떨어지는 단점을 가지고 있다. 단면 경계를 일직선으로 가정하고 또한 수심을 일정하게 가정해야 하는 문제점이 있어 방류구 주위에 방파제와 같은 구조물 등이 있는 경우와 방류구로부터 멀리 떨어진 구역에서의 오염확산을 예측할 경우에는 결과에 대한 신중한 검토가 필요하다. CORMIX2 모형에서는 Tee형 확산관의 회석을 산정식이 확산관에서의 방류모멘텀에 비해 주변수의 모멘텀이 지배적인 경우에는 실측치에 비해 과소산정하는 경향이 있다.

## 2.9 요약

위에서 언급한 각 수치모형에 대한 적용성과 특성을 요약하여 정리하면 표 1과 같다.

그림 2는 마산/창원 하수처리장과 하수방류용 확산관이 위치한 진해만을

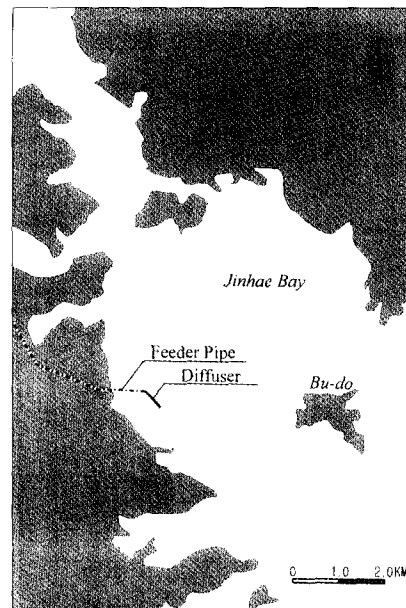


그림 2. 마산/창원 하수처리장과 하수방류용 확산관이 위치한 진해만

표 1. EPA의 근역혼합모형의 특성비교

Mode Parameter	UPLUME	UOUTPLM	UDKHDEN	UMERGE	ULINE	UM	RSB	CORMIX1	CORMIX2
Port	Single	Single	Single/ Multiple	Multiple	Slot/Closely spaced	Multiple	Multiple	Single	Multiple
Discharge Angle	-5° ~ 90°	-5° ~ 90°	-5° ~ 130°	-5° ~ 90°	Assumes 90°	-90° ~ 90°	-90° ~ 90°	Arbitrary	Arbitrary
Density Profile	Arbitrary	Arbitrary	Arbitrary	Arbitrary	Arbitrary	Arbitrary	Arbitrary	Arbitrary	Arbitrary
Current Speed	No	Constant with depth	Arbitrary	Arbitrary	Arbitrary	Arbitrary	Arbitrary	Constant with depth	Constant with depth
Current Angle relative to the Diffuser	N/A	Assumes 90°	45° ~ 135°	Assumes 90°	0° ~ 180°	45° ~ 135°	45° ~ 135°	Arbitrary	Arbitrary

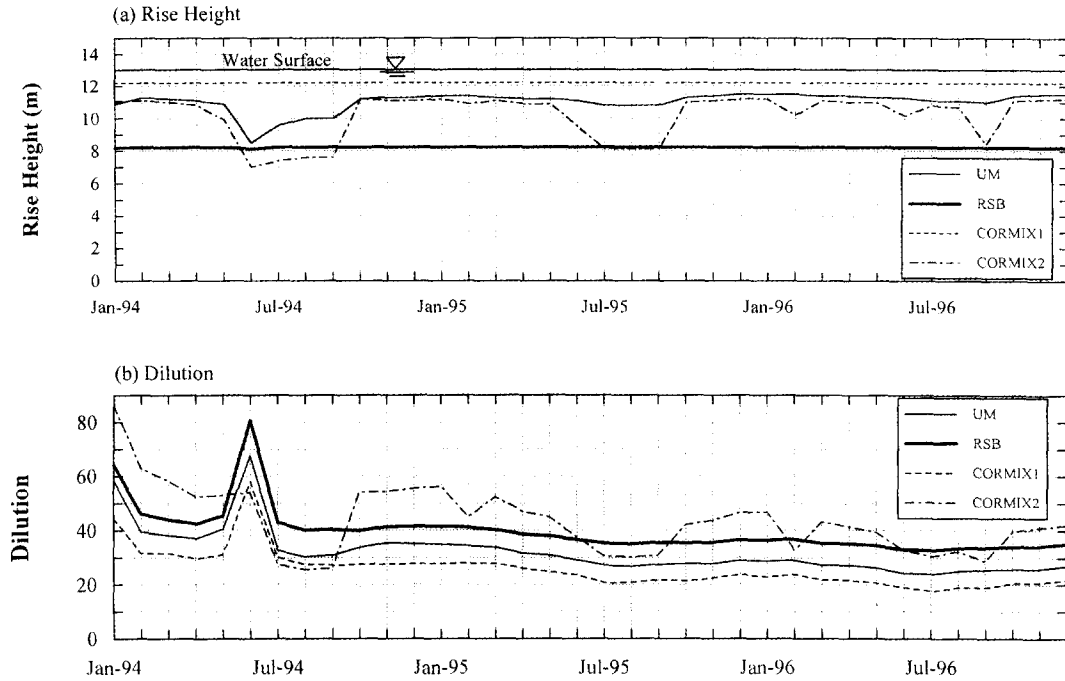


그림 3 여러 근역모형의 계산결과 비교

도시한 것으로 이 곳은 일종의 Tee형 확산관을 이용하여 하수를 방류하고 있다. 그림 3은 이상에서 소개한 근역모형중 UM, RSB, CORMIX1, CORMIX2 모형을 마산/창원 하수처리장의 다공확산관시스템에 적용했을 때의 계산결과를 비교·도시한 것이다(김창시, 1998).

### 3. 원역모형

국내의 경우 3차원 수치모형을 이용한 유동장 및 오염물의 이동확산에 관한 연구는 최홍식(1989), 정태성(1994), 서승원(1997)의 연구가 있는데 이들의 연구는 모두 온수의 표층방류에 대한 문제를 다루고 있다. 정태성은 연안해역에서의 해수유동 및 수표면

방류로 인한 온수의 확산현상을 규명하는데 활용할 수 있는 3차원 수치모형을 개발하여 고리해역과 월성해역에 적용하였으며, 최홍식은  $k-\epsilon$  모델에 평균온도 자승유동( $T'^2$ ) 및 그 감쇄율의 전달방정식을 추가한 4-방정식모형을 이용하여 3차원 정상상태의 온수확산현상을 해석하기 위한 모형을 개발한 바 있다. 이들의 연구는 방류구 부근에서는 격자를 세격자로 하고 외해에서는 큰 격자를 사용하는 방식으로 근역과 원역을 동시에 모의하고자 하는 시도였다. 이에 반해 서승원의 연구는 근역의 특성을 좀 더 합리적으로 예측할 수 있도록 하기 위하여 근역의 부력제트의 특성을 미리 근역모형인 CORMIX3 모형으로부터 계산하여 수치모형의 계산격자에 덧붙이는 형태(서승원과 김덕호, 1996)를 이용하거나, 근역에서는 부력을 가지는 입자를 정의하여 이를 추적하는 방법을 사용하고 원역에서는 일반적인 수치해법을 사용하는 방식(서승원, 1997)을 택하여 근역과 원역을 포함한 전영역에서 경제적이고 합리적인 계산결과를 얻으려는 노력을 수행하였다.

외국의 경우 3차원 수치모형에 관한 연구는 국내의 경우와 비교할 수 없을 정도로 많이 수행되고 있지만 여기에서는 검증이 이루어진 모형에 대해서만 소개하고자 한다(정경태, 1984; Cheng과 Smith, 1989). ECOM-3D는 Blumberg와 Mellor(1987)에 의해 개발된 모형으로 HydroQual사에 의해 상용화된 모형이다. 이 모형은 월성원자력 3, 4호기를 위한 취·배수 구조물의 건설 및 냉각수의 추가방출에 따른 해수 유동의 변화와 온수의 영향범위를 예측, 평가하는데 이용되었다. Zhang(1995)은 동일한 수치모형을 이용하여 이상적인 유역에 하수확산관이 설치되어 있음을 가정하고 여러 수치실험을 수행하여 확산관을 통해 배출된 하수의 초기희석률 및 하수체적의 상승높이를 근역모형과 비교하였다. 비교 결과 적절한 경계조건의 부여 및 매개변수의 조정을 통하여 3차원 수치모형의 성긴 격자를 이용하여 근역에서의 혼합거동을 모의할 수 있음을 제시하였다. ODYSSEE는 Benque 등에 의해 개발된 모형으로 수리모형실험의 결과를 이용하여 밀도성층화가 진행된 경우의 온도장의 예측

성을 검토하였으며(Darras, 1987), Gravelines 원자력발전소의 온수방출에 따른 거동양상을 모의하는데 사용된 바 있다. Sheng(1989)은 평면좌표계는 경계 밀착좌표계를 이용하고 연직좌표계는  $\sigma$ -변환을 이용한 CH3D모형을 개발하여 James River, Chesapeake Bay, Lake Okeechobee에 적용하여 모형의 적용성을 검토하였다. 이 모형은 계속해서 수정 및 보완작업이 진행되고 있으며 미공병단의 WES(Waterways Experiment Station)에서 후처리기능을 보완하여 사용중이다. Yabusaki 등(1989)은 TEMPEST모형을 이용하여 New Bedford Bay의 하수확산관의 확산과정을 모의하였다. 하지만 확산관에서의 방류조건을 부여하는 방식에 대해서는 전혀 언급이 없다. 3차원 수치모형을 이용하여 확산관을 통해 방류된 오염물질의 혼합과정을 해석하려는 시도라는 점에서는 특기할 만 하지만 확산관이 위치한 곳에서의 방류경계의 처리에서 발생할 수 있는 오차에 대한 평가가 이루어지지 않았다.

이상의 연구는 대부분 표층방류와 관계된 연구이지만 Zhang(1995)의 연구는 무작위 입자추적법을 이용한 3차원 수치모형을 이용하여 확산관에서 방류된 오염물의 확산과정을 모의하고자 한 시도라는 측면에서 주목할 만 하다.

#### 4. 결 론

최근 고성능 컴퓨터의 보급으로 근역 및 원역에서의 오염물 혼합거동을 수치모형을 이용하여 해석하고자 하는 노력이 많이 이루어지고 있다. 본 고에서는 최근에 연구가 이루어졌고 많은 연구자에 의해 그 적용성이 검증된 근역모형과 3차원 수치모형을 이용한 원역모형에 대해 살펴보았으며 점차 근역과 원역을 동시에 모의하고자 하는 노력이 이루어지고 있음을 살펴보았다. 하지만 다공확산관을 이용한 오염물의 방류현상을 근역 및 원역에서 모두 만족할 정도의 정확도를 가지고 예측할 수 있는 모형은 아직까지 개발되지 못하고 있다. 이러한 시점에서 모형의 사용자는 해석하고자 문제의 성격을 제대로 파악하고 주어진



문제에 최적의 모형을 선정하여야 할 것이다. 또한 근역의 특성을 세부적으로 정확하게 모의할 수 있는 근역모형의 지속적인 개발과 근역 및 원역을 동시에 경

제적이고 합리적으로 모의할 수 있는 방법에 대한 연구도 수행되어야 할 것이다. ●

〈참고 문헌〉

김창시 (1998). "근역혼합모형을 이용한 해양방류 하수의 혼합특성 예측." 석사학위논문, 서울대학교.

서승원 (1997). "3차원의 조화유한요소모형 개발과 Eulerian-Lagrangian 결합에 의한 근·원역의 확산해석 연구." 한국과학재단, 과제번호 951-1201-011-2.

서승원, 김덕호 (1996). "근역특성이 고려된 수심적분모형을 이용한 표층온배수 모의." 한국해양해양공학회지, 제 8권, 제 1호, pp. 18-27.

정경태 (1984). "온배수 수치모델기법의 검토." 대한토목학회지, 제 32권, 제 3호, pp. 68-76.

정태성 (1994). "연안 해수유동 및 온배수 확산에 관한 3차원 수치모형." 박사학위논문, 서울대학교.

최홍식 (1989). "표면온배수 수치모형의 비교평가." 박사학위논문, 서울대학교.

Baumgartner, D.J. and Trent, D.S. (1970). Ocean Outfall Design: Part I. Literature Review and Theoretical Development. U.S. Department of Interior, Federal Water Quality Administration, NTIS No. PB-203-749, p. 129.

Baumgartner, D.J., Trent, D.S., and Byram K.V. (1971). User's Guide and Documentation for Outfall Plume Model. Working Paper No. 80, U.S. Environmental Protection Agency, NTIS No. PB-204-577/BA, Pacific Northwest Water Lab., Corvallis, OR., p.29.

Baumgartner, D.J., Frick, W.E. and Roberts, P.J.W. (1993). Dilution Models for Effluent Discharges (Second Edition). EPA/600-R-93/139, U.S. Environmental Protection Agency, ERL-Narragansett, Newport, Oregon.

Blumberg, A.F. and Mellor, G.L. (1987). "A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model." Three dimensional coastal ocean models, Coastal and estuarine sciences 4, American geophysical union, pp. 1-16.

Brooks, N.H. (1973). Dispersion in Hydrologic and Coastal Environments. EPA-660/3-73-010, U.S. Environmental Protection Agency, Corvallis, OR., p. 136.

Cheng, R.T. and Smith, P.E. (1989). "A survey of three-dimensional numerical estuarine models." Estuarine and Coastal Modelling, Spaulding, M.L. eds., ASCE, pp. 1-15.

Darras, M., Donnars, P. and Pechon, P. (1987). "Three dimensional numerical model for thermal impact studies." Three-Dimensional Models of Marine and Estuarine Dynamics, Nihoul, J.C.J., and Jamart, B.M. eds., ELSEVIER, pp. 489-504.

Davis, L.R. (1975). Analysis of Multiple Cell Mechanical Draft Cooling Towers. EPA-660/3-75-039, U.S. Environmental Protection Agency, Corvallis, OR., p. 39.

Frick, W.E. (1981). A Theory and User's Guide for the Plume Model MERGE, Revised. Tetra Tech, Inc., Corvallis, OR., p. 86.

Frick, W.E. (1984). Non-empirical Closure of the Plume Equations. Atmospheric Environment, 18:653-62.

Hirst, E.A. (1971a). Analysis of Buoyant Jets within the Zone of Flow Establishment. Rep. ORNL-TM-3470, U.S. Atomic Energy Commission, Oak Ridge National Lab., Oak Ridge, TN., p. 41.

Hirst, E.A. (1971b). Analysis of Round, Turbulent, Buoyant Jets Discharged to the Flowing Stratified Ambients. Rep. ORNL-TM-4685, U.S. Atomic Energy Commission, Oak Ridge National Lab., Oak Ridge, TN., p. 37.

Kannberg, L.D. and Davis, L.R. (1976). An Experimental/Analytical Investigation of Deep Submerged Multiple Buoyant Jets.

- 
- EPA-600/3-76-101, U.S. Environmental Protection Agency, Corvallis, OR., p. 266.
- Muellenhoff, W.P., Soldate, Jr., A.M., Baumgartner, D.J., Schuldt, M.D., Davis, L.R., and Frick, W.E. (1985). Initial Mixing Characteristics of Municipal Ocean Discharges. Vol. I Procedures and Applications. EPA 630/3-85-073a, Marine Operation Division: 301(h) Program, Office of Marine and Estuarine Protection, Washington, D.C.
- Roberts, P.J.W. (1977). Dispersion of Buoyant Waste Discharge from Outfall Diffusers of Finite Length. Rep. No. KH-R-35, W.M. Keck Lab. of Hydraul. and Water Resources, California Institute of Technology, Pasadena, CA., p. 183.
- Roberts, P.J.W., Snyder, W.H. and Baumgartner, D.H. (1989). "Ocean Outfalls, I : Submerged Wastefield Formation. II : Spatial Evolution of Submerged Wastefields, III : Effect of Diffuser Design on Submerged Wastefields." Journal of Hydraulic Division, SCE, Vol. 115, No. 1, pp. 1-70.
- Sheng, S.D. (1989). "Evolution of a three-dimensional curvilinear-grid hydrodynamics model for estuaries, lakes and coastal waters : CH3D." Estuarine and Coastal Modelling, Spaulding, M.L. eds., ASCE, pp. 40-49.
- Teeter, A.M. and Baumgartner, D.J. (1979). Predictions of Initial Dilution for Municipal Ocean Discharges. CERL Pub. No. 043, U.S. Environmental Protection Agency, OR., p. 88.
- Winiarski, L.D. and Frick, W.E. (1976). Cooling Tower Plume Model. EPA-600/3-76-100, U.S. Environmental Protection Agency, Corvallis, OR.
- Winiarski, L.D. and Frick, W.E. (1978). "Methods of Improving Plume Models." Proceedings of a Symposium at the Center of Adult Education, University of Maryland, May 2-4, Chapter 2, pp.1-12., Edited by Nietubiez, R.S and Green, R.L., Water Resources Research Center, University of Maryland, College Park, MD.
- Yabusaki, S., Onishi, Y., Richmond, M. and Trent, D. (1989). "Circulation and transport modelling in New Bedford harbor." Estuarine and Coastal Modelling, Spaulding, M.L. eds., ASCE, pp. 82-91.
- Zhang, X.Y. (1995). "Ocean outfall modeling - Interfacing near and far field models with partial tracking method." Submitted to the Department of Civil and Environmental Engineering in partial fulfillment of the requirements for the Ph. D at the MIT.