

마산/창원 하수처리장 확산관의 근역혼합 특성

Mixing Characteristics of Masan-Changwon STP's Submerged Multiport Diffuser

서 일원*, ○김 창시**

1. 서론

현재 국내 해역에 적조발생의 원인이 되는 질소, 인 등의 오염물 유입량이 계속적으로 증가하고 있어 이에 대한 저감대책이 필요하며, 특히 대도시 인근의 연안지역과 폐쇄성 내만의 오염 증가는 심각한 상황이다. 마산/창원 하수처리장의 확산관이 설치된 진해만은 COD기준으로 1995년 2.50mg/ℓ에서 2000년에는 2.86mg/ℓ 정도 악화될 것으로 전망되어 국내 해역 중 가장 오염도가 심할 것으로 평가되었다(통상산업부 등, 1996). 그러므로 현재 가동 중인 마산/창원 하수처리장의 해양방류시설에서 진해만으로 방류되는 하수의 혼합특성에 따라 주변 해역에 미치는 환경 영향을 검토할 필요가 있으며, 이러한 연구는 해양오염방지 및 수질보전대책 수립의 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

마산, 창원 일원의 하수를 집수, 처리하는 마산/창원 하수처리장은 1994년 초부터 가동하여, 현재는 1차 처리된 하수를 진해만으로 방류하고 있다. 2001년을 목표로 한 시설 확장 및 2차 처리에 대한 실시설계가 완료되었고, 2011년에 대한 시설 확장 기본계획이 수립 중이다(마산시, 1996).

표 1. 마산/창원 하수처리장 개요

구 분	1단계 (기존)			2 단 계			3 단 계		
목 표 년 도	1993			2001			2011		
처 리 인 구 (1000인)	653.0			1,042.1			1,189.5		
하 수 발 생 량 (m ³ /일)	281,105			517,873			619,571		
처 리 용 량 (m ³ /일)	280,000			500,000			720,000		
수 질 (mg/ℓ)	BOD	COD	SS	BOD	COD	SS	BOD	COD	SS
- 유입수질	173	303	222	117	110	113	117	110	113
- 방류수질	100	175	68	18	17	16	18	18	16

* 서울대학교 공과대학 토목공학과 부교수

** (주)대우건설 항만단지설계팀

마산/창원 하수처리장의 해양방류시설은 해안에서 약 650m 떨어진 수심 약 13m 정도의 해역에 해안선 및 조류 방향에 거의 평행하게 설치되어 있다. 길이 210m인 확산관(diffuser pipe)의 상단에 21개의 연직유도관(riser)이 10m 간격으로 설치되어있고, 연직유도관에 4개의 방류공(port)이 4방향으로 수평하게 부착된 방사상 형태의 수중다공확산관(submerged multi-port diffuser)이다(건설교통부, 1993).

이 연구는 진해만으로 방류되는 마산/창원 하수처리장의 기존 방류자료와 계획지표에 대하여 UM, RSB, CORMIX1과 CORMIX2 등 혼합해석모형을 이용하여 최소희석률(minimum dilution), 플룸(plume)의 상승고(height of rise) 및 형태 등 방류구 근역(near-field)에서의 혼합특성을 모의, 예측한 것이다.

2. 연구의 기초이론

2.1 하수확산관

해양 하수방류관은 1960년대부터 미국의 해안에 위치한 도시에서 발생하는 오·폐수를 해양으로 방류하기 위하여 사용되기 시작하였으며(Koh와 Brooks, 1975), 그후 발전소의 온배수를 방류하는 방법으로 발전하여 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 적절한 방류시스템을 설계하고, 방류하수에 의한 주변 수역에 미치는 환경부하를 평가하기 위하여 수리모형실험과 더불어 수치모형의 개발에 관한 연구(Akar와 Jirka, 1991; 이재형과 서일원, 1994, 1996)는 활발히 진행되고 있으나, 국내의 경우 실제 운영되고 있는 방류시설의 효율성 및 주변 수역에 미치는 영향을 평가한 사례는 거의 없다.

하수처리장에서 처리된 하수를 수중으로 방류하는 방법은 주변 해역에 미치는 환경적 영향을 최소화하도록 하수를 희석 또는 분산시키는 것이 그 목적으로, 표층방류 방식과 달리 방류 초기조건 및 확산관의 기하학적 형태에 따라 혼합효과가 매우 다양하게 변화하므로 소정의 희석효과를 얻기 위하여 방류조건, 주변 수역의 특성 등에 따라 설계자가 확산관의 위치, 규모, 형식 등을 조정할 수 있는 능동적인 방법이다.

2.2 근역혼합

근역 내에서 형성되는 일반적인 하수장(wastefield)을 표현한 것이 그림 2로, 확산관의 양측에 등간격으로 설치된 원형 방류공으로부터 수평으로 방류되는 제트(jet)의 거동을 묘사한 것이다. 하수장의 특성을 표현하는 변수들은 하수장의 상단까지의 높이 z_e , 농도가 최대가 되는(또는 희석률이 최소인) 지점까지의 높이 z_m , 그리고 하수장의 두께 h_e 이다. 최소희석률 S_m 은 근역혼합구역의 끝에서 하수장의 수직면 상의 희석률 중 가장 작은 값으로 정의하며, 방류공으로부터 이 지점까지의 거리를 초기혼합구역(initial mixing zone)까지의 거리 X_i 라고 한다.

제트 형태로 방류된 하수의 첫 번째 혼합과정은 방류운동량과 부력에 의해 수표면을 향하여 상승하면서 주변수를 포획하여 희석되는 과정이다. 이 때 주변 수역이 밀도성층을 이루고 있다면 플룸의 밀도와 주변수의 밀도가 같아지는 위치에서 플룸은 상승을 멈추는데 이러한 높이를 포착고(trap level) 또는 평형상승고(equilibrium height of rise)라고 하며, 비성층 수역이라면 플룸은 수표면까지 도달한다. 수면 혹은 수중에 형성된 하수장이 잔류부력에 의해 횡방향으로 부력확장하

는 단계가 혼합의 그 다음 단계이며, 세 번째 과정은 주변 해수가 가지고 있는 난류특성과 주변수의 유속 구조에 의한 수동적인 난류확산 및 하수장의 이송단계이다. 하수장이 형성되는 단계까지를 근역이라고 하며, 그 이후는 천이역(transition zone)을 거쳐 원역(far-field)으로 구분한다.

근역혼합은 방류량 또는 방류유속, 확산관의 형태 및 주변 해수와의 밀도차, 주변 수역의 밀도분포, 조류의 크기와 방향에 따라 달라지는데, 근역에서의 하수의 혼합과정은 1차적으로 방류방식에 따라 결정된다.

3. 적용모형의 개요

3.1 UM 모형

UM 모형은 미국 EPA에서 발표한 PLUMES라는 공유프로그램에서 RSB와 동일한 입력자료를 사용하는 적분모형으로(Baumgartner 등, 1993), 플룸의 궤적 좌표를 따라 미소 플룸요소에 대한 각 물리량에 대한 보존방정식을 수립하여 플룸의 혼합거동을 계산한다. 이 모형은 음의 부력플룸과 표층방류를 모의할 수 있고 주변수의 기저농도와 미생물 감소항을 고려할 수 있다. 그러나, 플룸과 경계와의 상호작용, 즉 수표면, 해저바닥 또는 해안선에 플룸이 닿았을 때의 간섭(Coanda 효과)을 모의할 수 없다. 이 모형은 방류공의 간격이 수심에 비하여 상대적으로 작아 상승하는 플룸이 서로 중첩되어 간섭하는 병합현상을 확산관의 한 쪽에서만 고려하는 단점이 있고, 부정류 상태의 방류조건을 모의할 수 없다. UM은 기본적으로는 심해에 적용하는 모형이고, 일반적으로 축방향확산관에는 적용하지 않는다.

3.2 RSB 모형

RSB 모형은 수중다공확산관에 대한 실험(Roberts 등, 1989)에 근거한 길이규모모형(length scale model)으로, 일련의 실험적 값들과 점근식(asymptotic equation)으로 구성되어 길이규모에 따라 흐름을 분류하며, 회석률과 하수장의 특성은 계산에 의하거나 또는 실험결과 등의 기존 자료를 이용하여 내삽 또는 외삽한다(Baumgartner 등, 1993).

이 모형은 실험에 기초한 모형이므로 근본적으로 많은 제약이 있다. 우선, 주변수의 밀도분포는 안정상태(수심방향으로의 밀도가 작을 수 없다)이고, 방류량은 일정하여야 한다. 하수장은 3차원적으로 모의되나, 선형플룸으로 근사화된다. 이 모형은 일방향확산관과 축방향확산관에 대해서는 적절히 모의하지 못한다. UM과 마찬가지로 이 모형도 대기의 열전달함수를 고려하지 않으므로, 수표면에 닿은 이후의 온도 결과는 주의 깊게 검토하여야 한다.

3.3 CORMIX1 및 CORMIX2 모형

CORMIX는 3개의 부모모형으로 구성되어 있는데, CORMIX1과 CORMIX2는 수중단일확산관 및 수중다공확산관, CORMIX3은 표층방류 방법에 의해 방류된 오염물질의 초기회석 과정을 모의하는 프로그램이다(Akar와 Jirka, 1991). CORMIX1과 CORMIX2는 차원해석에 의하여 방류수의 체적 흐름률, 운동량 흐름률, 부력 흐름률, 주변 수역의 조류와 밀도성층 등 흐름의 거동을 제어하는 변수들의 상대적 중요도를 표현하는 값들인 길이규모들을 이용하여 플룸의 생성, 발달, 병합, 확산과정을 모의하는 모형이다.

CORMIX1 및 CORMIX2 모형은 방류구의 기하학적 형태에 따른 방류구 근처의 혼합 거동을 예측하는데 주안점을 두고 개발되었기 때문에, 기 개발된 수치모형들에 비하여 방류구 주위에서 발생하는 복잡한 흐름상황을 보다 정확하게 설명할 수 있다. 특히 단면 경계에서의 상호작용, 오염물질의 하상부착, 밀도성층 수역인 경우 발생하는 내부성층 현상, 가로흐름이 작을 경우에 방류구 상류 쪽으로 오염물이 확산되는 상류침투(upstream intrusion) 과정 등을 잘 묘사하는 장점을 가지고 있다. 또한 확산관의 기하학적 변화에 따른 오염물질의 회석과정을 쉽게 예측할 수 있어, 최적의 확산관을 설계하는데 유용하게 이용할 수 있다. 그러나, 하천, 호소 및 해안 등 대부분의 수계에 적용이 가능토록 개발된 반면에 단면 경계가 불규칙하고 하상의 수심이 변하는 수역의 경우에는 적용성이 떨어지는 단점을 갖고 있고, 방류구 주위에 방파제와 같은 구조물 등이 있는 경우 및 방류구로부터 멀리 떨어진 구역에서의 오염 확산 예측에서는 정확도가 떨어진다.

4. 모형의 적용

4.1 모형의 입력자료

주변수의 밀도분포는 1979년과 1980년에 KIST에서 해역의 특성을 관측한 자료의 밀도분포를 모형에 적용하였고(건설부, 1978), 방류구 지점에서 수질을 측정된 자료가 없으므로 그 동안 필요에 의해 수질 및 수온, 염도 등을 단속적으로 측정된 자료들을 이용하여 주변 수질을 판단하였다.

94년부터 96년까지의 실제 방류자료(마산시, 1994-1996)에 의한 모의에서는 월평균 일방류량에 대하여 월별 밀도분포를 각각 적용하고, 주변수의 흐름속도는 평균치인 0.10m/s를 적용하였다.

한편, 방류수의 혼합특성을 예측하기 위하여 '94-'96 기록기간 중의 최대 및 평균 일방류량 및 2001년, 2011년에 대한 계획방류량 및 계획 방류수질에 대하여 겨울과 여름으로 구분하고, 조류 속도도 최대 0.25m/s, 평균 0.10m/s, 최소 0.05m/s, 흐름이 없는 경우로 구분하여 적용하였다.

4.2 모의 결과

'94년~'96년의 방류 자료를 이용하여 마산/창원 하수처리장 해양방류 하수확산관의 근역에서의 혼합특성을 모의한 결과는 다음 그림 3 및 그림 4와 같다. 그림 3은 월평균 일방류량에 대하여 플룸의 상승높이를, 그림 4는 그 지점에서의 최소회석률을 시계열 자료로 나타낸 것이다.

'94-'96 기록기간 중의 월평균 최대일방류량 및 평균일방류량, 2001년 및 2011년에 대한 모형의 적용결과는 그림 5 및 그림 6과 같다. 그림 5는 방류량에 대한 최소회석률을 나타낸 것이고, 그림 6은 주변수의 유속 U_a 에 대한 방류유속 U_o 의 비율 변화와 최소회석률의 관계를 도시한 것이다.

위 모의결과를 분석하면 마산/창원 하수처리장의 하수확산관은 방류공 간격(연직유도관 간격)이 수심에 비해 커서 하수 플룸은 서로 병합되지 않고 독립된 형태로 수표면에 도달하는 것으로 예측되었다. 또한 초기혼합구역 내에서의 회석률은 주변 수역의 밀도분포의 영향을 거의 받지 않으며, 방류량이 커지면 회석률이 감소하고, 일정한 범위까지는 조류 속도가 커지면 회석률도 증가하는 것으로 모의되었다.

5. 결론

이 연구는 현재 운영 중인 마산/창원 하수처리장 하수확산관의 기존 방류자료 및 장래 증설계

획을 모의조건으로 하여 근역에서의 방류 하수의 혼합특성을 모의, 예측하였다. 이 연구에서 적용한 모형들은 일반적으로 심해에 설치되는 하수확산관의 혼합 거동을 모의하는 모형들로, 모형을 개발할 때 적용한 가정들 때문에 모형의 선정과 적용에 세심한 주의가 필요하며, 모의 결과를 직접 비교하기는 곤란하다. 그러므로 이 논문에서는 각 모형간의 회석률과 상승고 등을 직접 비교하기보다는 각각의 모형이 나타내는 혼합특성을 개략적으로 파악하고, 모의 결과를 분석하여 초기혼합 정도를 서술하는데 초점을 맞추었다.

6. 참고 문헌

- 건설교통부 부산권수도건설사무소 (1993). **마산/창원하수처리장 건설지**.
- 건설부(Ministry of Construction of Korea, 1978). **Wastewater Treatment and Disposal for Five Industrial Cities, Changwon Master Plan Feasibility Study**.
- 마산시 (1996). **마산/창원 하수처리장 2차 확장공사 실시설계**.
- 마산시 환경시설관리사업소 (1994-1996). **마산/창원 하수처리장 유입수/방류수 측정자료**.
- 이재형, 서일원 (1994). "CORMIX모형을 이용한 오염물질의 혼합거동 예측." **94년 대한토목학회 학술발표회**, 대한토목학회, pp. 93-96.
- 이재형, 서일원 (1996). "수중다공확산관에 의해 방류된 온수의 확산거동 예측." **대한토목학회논문집**, 제 16권 II-3, pp. 281-290.
- 통상산업부, 환경부, 건설교통부, 과학기술처, 경찰청, 수산청, 해운항만청, 기상청(1996). **1996~2000 해양오염방지 5개년 계획**. 행정간행물 등록번호 12000-67440-97-9615.
- Akar, P.J. and Jirka, G.H. (1991). *CORMIX2: An Expert System for Hydrodynamic Mixing Zone Analysis of Conventional and Toxic Multiport Diffuser Discharges*. U.S. EPA, Environmental Research Laboratory, Athens., G.A.
- 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.
- Frick, W.H. (1984). *Non-Empirical Closure of the Plume Equations. Atmospheric Environment*, Vol. 18, No. 4, pp. 653-662.
- Koh, R.C.Y. and Brooks, N.H. (1975). *Fluid Mechanics of Wastewater Disposal in the Ocean*. Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 7, pp. 187-211.
- Roberts, P.J.W (1996). "Sea Outfalls." *Environmental Hydraulics, Chap. 3*, Edited by Singh, V.P. and Hager, W.H., Water Science and Technology Library, Vol. 19, Kluwer Academic Publishers, pp. 63-110.
- 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, ASCE*, Vol. 115, No. 1, pp. 1-70.

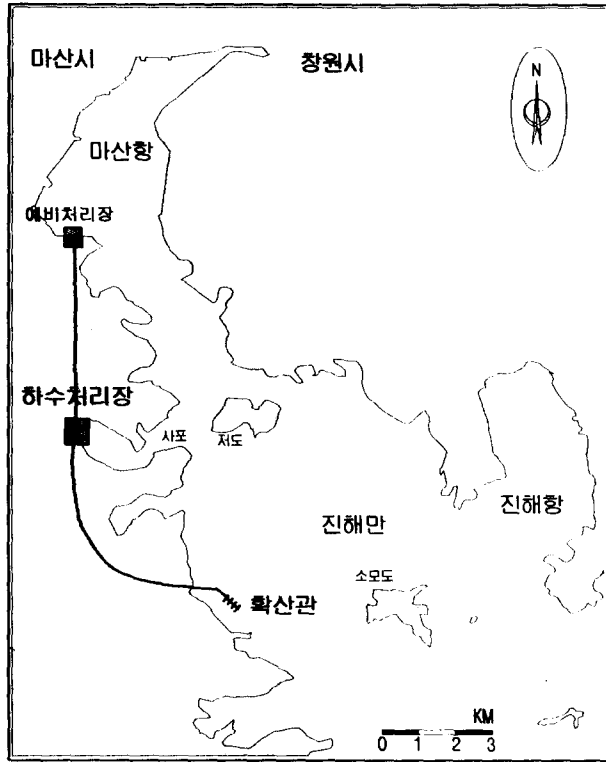


그림 1 마산/창원 하수처리장 확산관 위치

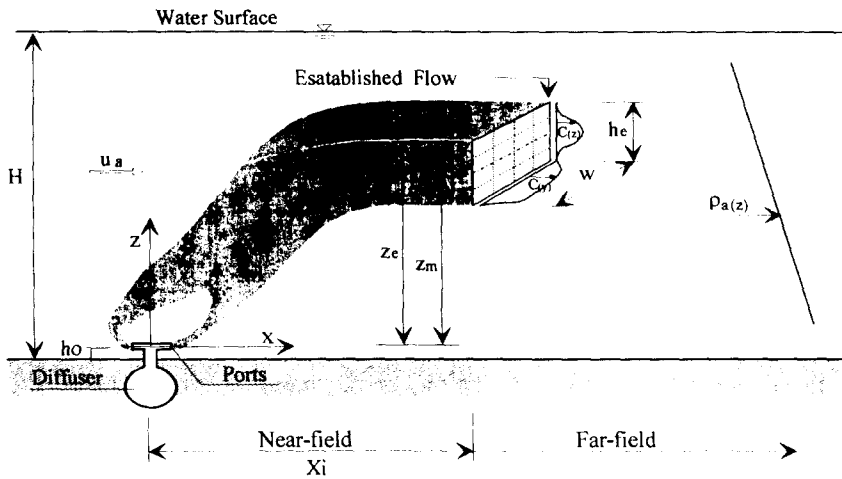


그림 2 근역에서의 하수장 개념도 [After Roberts (1996)]

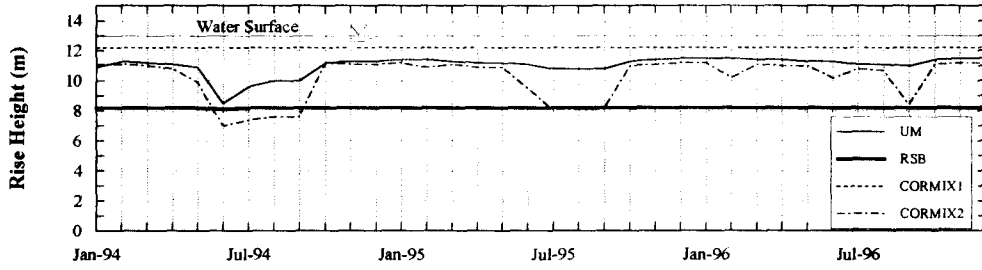


그림 3. '94-'96 기록기간 중의 하수플룸의 상승고

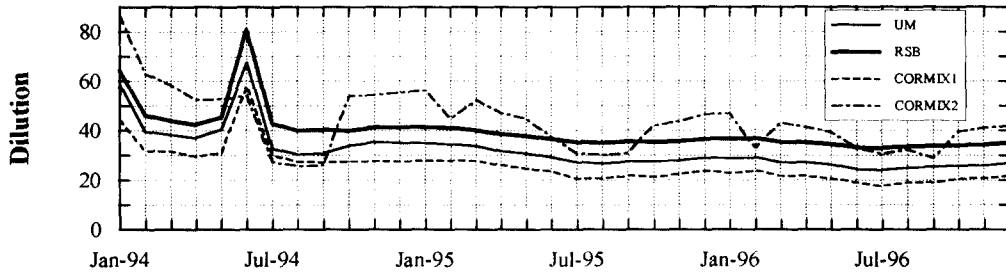


그림 4. '94-'96 기록기간 중의 하수플룸의 최소희석률

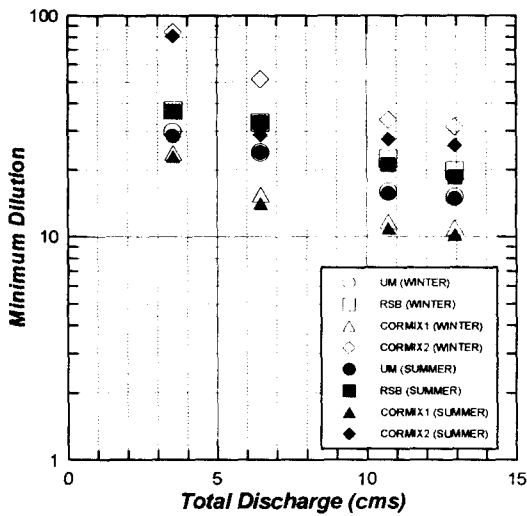


그림 5. 총방류량과 최소희석률

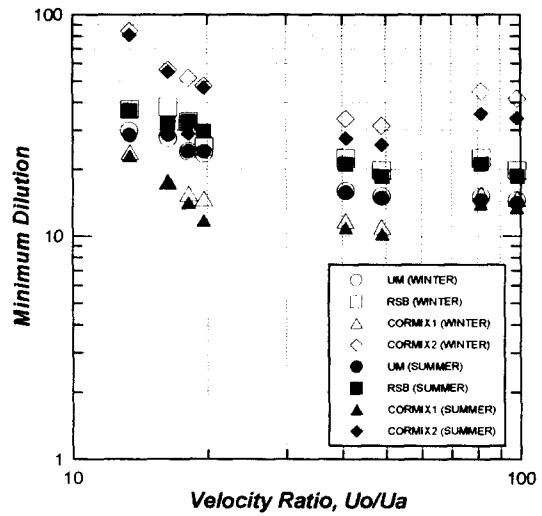


그림 6. 속도비와 최소희석률