

水中擴散管에 의한 溫排水 및 下水의 海洋放流

李在炯*, 徐一源**

1. 머리말

도시 및 공단에서 발생하는 下水와 발전소에서 발생하는 溫排水는 그 양이 매우 방대하여 처리에 많은 문제점을 발생시키며, 이러한 하·폐수 및 온배수가 자연환경에 악영향이 미치지 않는 정도로 처리를 하는 것은 기술적으로나 경제적으로 거의 불가능한 현실이다. 溫排水 및 적절히 처리된 下水를 해양으로 방류하여 희석시키는 방법(Harleman and Stolzenbach, 1972, Koh and Brooks, 1975)은 1960년대부터 美國 등 선진국을 중심으로 많은 연구와 적용이 이루어져왔다. 일반적으로 下水의 경우는 自然水體로 방류되기 전에 1, 2차 처리 등을 한 후 방류구를 통해 해양으로 방류하는 방법을 사용하는 반면, 발전소에서 발생하는 溫排水는 복수기(Condensor)를 거친 冷却水를 그대로 해양으로 방류하는 형태를 가지게 된다. 따라서 적절한 방류시스템의 설계와 下水와 溫排水의 방류가 주변 自然水體에 미치는 환경영향을 평가하기 위하여 水理模型實驗(서일원, 1996)과 더불어 數值模型의 개발에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

2. 水中擴散管

美國 각 州의 경우는 混合區域(mixing zone) 개

념(EPA, 1990)을 도입하여 방류수가 주변 自然水體로 유입될 때 환경오염을 최소화하는 방법을 사용하고 있다. 이 혼합구역은 방류구로부터 어느 일정 범위를 지정하여 이 범위내에서 오염물의 강력한 초기희석이 이루어지도록 법적으로 규제를 가하는 것이다. 따라서 기존의 표면방류 혹은 단순한 방류형태를 이용해서는 이 기준을 만족하기가 어렵다.

溫排水 및 下水를 해양으로 방류하는 방법에는 여러 가지 방법이 있을 수 있다. 개수로 혹은 암거를 이용하여 해안가에 인접하여 수표면에서 방류하는 表層放流 방법이 있는데 이 방법은 경제성 면에서 타당성이 있는 방법이나 오염물의 혼합 및 희석 과정이 주로 주변 水體에 존재하는 난류성분에 의존하는 피동적인 방법으로 그 희석효과가 불량하다. 이에 반하여 수중에서 방류하는 방법이 있는데 이 방법은 관로를 일정거리 외해로 끌고 나가 해저 바닥에서 고속으로 방류하는 방법으로 고속방류에 따른 운동량, 방류수와 주변수의 밀도차에 의한 부력효과를 이용하여 방류구 근접 지역에서 높은 희석률을 유도하는 방법이다. 따라서 이 방법은 表層放流와는 달리 방류구 시스템의 초기조건 및 기하학적 형태에 따라 혼합 및 희석현상이 매우 다양하게 변화하며, 목표하는 소정의 희석효과를 설계자가 조정가능한 능동적인 방류방법이라 할 수 있다. 이 방류방식은 방류관로 끝단의 처리방식에 따라 單一擴散管(single port diffuser)과 多孔擴散管

* 서울대학교 토목공학과 박사과정수료/(주)대우 수자원개발팀

** 서울대학교 토목공학과 부교수

(multi-port diffuser)으로 구분이 된다. 방류관로 끝에서 별다른 시설이 없이 그대로 방류하는 경우는 單一擴散管 형태가 되고, 끝단에 다수의 포트를 설치하여 이 포트를 통해 방류하는 경우는 多孔擴散管 형태(Figure 1. 참조)가 된다.

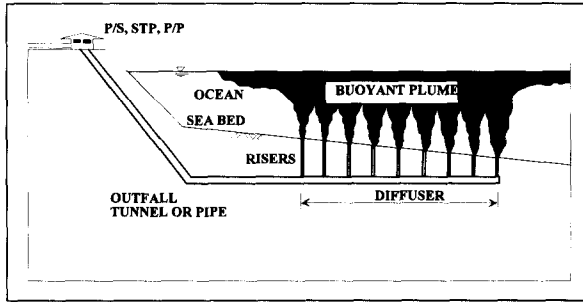


Figure 1. Schematic Diagram of Multi-port Diffuser

水中擴散管을 통해 해양으로 방류된 방류수는 세 단계의 亂流擴散過程을 거쳐 주위 해수와 혼합이 이루어진다. 첫 번째 단계는 해저에서 수면쪽으로 상승하는 浮力플룸으로서 제트 경계면에서 발생하는 剪斷흐름에 의해 발생하는渦에 의해 주위 해수가 플룸 내로 捕獲連行되면서 혼합이 이루어지는 단계이다. 이 단계에서 주변수의 密度成層 현상이 뚜렷한 경우는 수면까지 방류수가 상승하지 못하고 방류수와 주위수의 밀도가 같아지는 지점에서 상승을 멈추고 橫方向으로 浮力擴張을 하게 되는데, 이 높이를 最終平衡高(terminal equilibrium level)라고 한다. 이러한 소위 汚染場의 內部 捕捉(internal trapping)현상은 下水擴散管에서 두드러지는 현상으로서 방류수심이 깊고, 방류수와 주변 해수의 밀도차가 큰 경우에 발생한다. 두 번째 단계는 수면 혹은 最終平衡高에서 형성된 汚染場이 橫方向으로 浮力擴張을 하는 단계이며 이 단계에서는 殘留浮力(residual buoyancy)이 횡방향 확장에 중요한 역할을 하게 된다. 횡방향 부력확장에 이어 발생하는 세 번째 단계는 주변 해수가 가지고 있는 亂流특성과 주변 해수의 유속구조에 의한 受動亂流擴散과 汚染場의 移送단계이다. 이 세 단계중 첫 번째 단계만이 방류구 설계자의 의도하에 조절이 가능한 것이며, 이 첫 단계의 조절방식에 따라 후

속 단계에 많은 영향을 미치게 된다. 따라서 水中擴散管의 계획 및 설계시에는 이 모든 단계의 확산메카니즘을 모두 고려하여 적절한 설계가 이루어지도록 하여야 한다.

3. 混合區域解析 모델(Mixing Zone Analysis Model)

해양에서의 하수 및 온배수 확산을 모의하기 위한 수치모델 연구는 많이 진행되어왔다. 그러나 모형의 정확성 측면, 실제 자연현상의 재현성 측면, 그리고 경계조건 및 초기조건을 반영하는 측면에서 바라보았을 때 현재까지 만족할 만한 모형이 없는 실정이고, 특히 수중다공확산관과 같이 近域의 거동이 복잡한 경우에 있어 방류구 近域과 遠域을 통합적으로 모의하는 모형은 시도단계에 불과한 실정이다. 현재까지는 주로 방류구 근역과 원역을 분리하여 독립적으로 해석하는 수준에 머물러 있어 구역별 연계성이 부족한 상태이다. Table 1.은 미국 EPA에서 사용하는 방류구 근역에서의 오염물 혼합을 모의하는 混合區域 解析모델이다(EPA, 1990). 이 모델들은 대부분 확산관으로부터 수표면까지 플룸의 궤적에 따른 희석률을 예측하는 모형으로서 원역까지의 혼합 및 확산거동을 모의하는 것은 CORMIX모델 만이 가능하다.

浮力제트의 거동은 질량, 운동량, 에너지 그리고 스칼라 변수(농도) 등을 수학적으로 적절히 고려하면 모형화될 수 있다. 일반적으로 이루어지는 가정은 흐름은 定常流, 非壓縮性이며, 압력은 靜水壓 조건으로 근사화될 수 있고, 흐름은 完全亂流상태이며 軸對稱이고, 亂流擴散이 지배적이며 원주방향으로의 확산만이 의미가 있다고 가정된다. 속도와 농도의 분포는 적절한 분포로 가정되며, 捕獲連行 函數(entrapment function)의 형태를 먼저 가정하고 실험자료를 이용하여 적합성을 검증한다. 플룸의 解는 여러 가지 방법으로 구할 수 있고, 종종 미분방정식계를 제트 및 플룸 단면에 걸쳐 적분함으로써 변수를 하나의 독립변수로 줄이는 방법을 사용한다. 제트방류의 수학적모델은 내부변수와 외부변수 그리고 경계메카니즘의 시스템으로 구성된다. 내부변수는 질량, 운동량 그리고 에너지를 포

Table 1. EPA 混合區域 解析모델 特性比較(EPA, 1990)

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

함하고, 외부변수는 방류특성과 주변수의 연직밀도 그리고 조류를 포함하며, 그리고 포획연행은 경계 메카니즘이다. 유도된 방정식은 주변수로서 플룸의 거동을 기술한다. 흐름이 없는 경우, 주변수는 방류수와 주변수간의 초기밀도차, 주변수의 밀도경사, 그리고 포트유량 혹은 단위길이당의 유량이며, 흐름이 존재하는 경우에는 조류속이 포함된다.

4. 下水擴散管과 溫排水擴散管的 비교

下水擴散管과 溫排水擴散管은 방류량의 차이, 방류수와 주변해수의 밀도차, 그리고 요구되는 희석률차이로 인해서 두 확산관의 방류 위치와 발생되는 汚染場의 형태에 많은 차이점을 갖게되고 이에 따라 희석률 추정해석 방법에도 차이점을 갖는다. Table 2.는 인구 백만의 도시에서 사용되는 전

형적인 下水擴散管 및 溫排水擴散管을 비교한 것이다. 下水擴散管의 경우는 보통 해양의 수질규제기준(혼합구역의 기준)을 만족시키기 위해서는 100 이상의 희석률이 요구되는 반면에 溫排水擴散管의 경우는 약 10정도의 희석률이 요구된다. 이에 따라 보다 큰 희석률을 얻기위하여 下水擴散管의 경우는 방류수심이 溫排水擴散管보다 깊은 수심 50m 정도에서 행하고 있으며 방류플룸의 형태도 부력플룸의 형태를 뚜렷히 나타낸다. 그러나 溫排水擴散管의 경우는 방류수심이 얇고, 방류수심에 비해 확산관의 길이가 길며 방류량이 커서 방류구 주위에서 방류수가 수심전체에 걸쳐 완전혼합이 이루어지는 매우 불안정한 흐름양상을 나타낸다(Holley et al., 1986). 따라서 下水擴散管의 近域解析은 일반적인 浮力제트이론(Fischer et al., 1979)을 사용하여 해석이 가능한 반면, 溫排水擴

Table 2. Comparison of Typical Sewage Diffuser & Thermal Diffuser Outfalls (Jirka, 1982)

Design Variable	Units	Sewage Diffuser	Thermal Diffuser
Total Discharge, Q_0	m^3/s	8	80
Relative Density Deficit, $\Delta\rho_0/\rho_s$	-	0.025	0.0025
Total Buoyancy Flux, P_0	m^4/s^3	2	2
Discharge Velocity, U_0	m/s	5	5
Total Momentum Flux, M_0	m^4/s^2	40	400
Near-field Dilution Requirement, S	-	≥ 100	≤ 10
Ambient Depth, H	m	50	10
Ambient Velocity, u_s	m/s	0.3	0.3
Diffuser Length, L_D	m	500	500
Distributed Momentum Flux, $M_0/L_D H$	m^3/s^2	0.0016	0.08
Order of Magnitude of Induced Velocities, $O[(M_0/L_D H)^{1/2}]$	m/s	0.04	0.3

(Servicing a Coastal City of 1 Million Population)

散管은 浮力제트이론을 적용하지 못하고 淺海擴散管 理論(Jirka, 1972)을 적용해야 한다. Figure 2는 대표적으로 사용되는 확산관 형태로서 수심 10m의 해양 대륙붕에 溫排水擴散管으로 적용시 각 형태별 요구되는 제원을 제시한 일레이다.

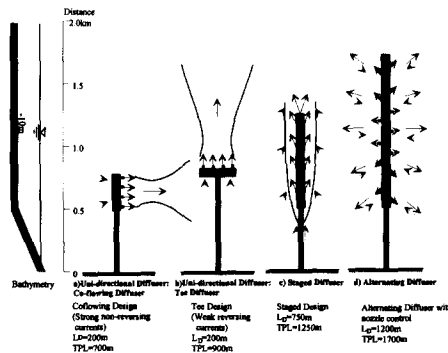


Figure 2. Design Comparison for Diffusers in Coastal Environment

5. 맺음말

향후 우리나라의 경우에도 下水 및 溫排水의 발생량이 생활수준의 향상에 따라 급격하게 증가하리라 판단되고, 특히 그 量이 處理能力 이상으로 증가하여 비용 및 처리 용량상에 많은 문제점을 야기시키게 되리라 예견된다. 우리나라에서도 가까운 미래에 下水 및 溫排水의 水中擴散管을 통한 방류가 불가피해지리라 생각된다. 따라서 미국 등 선진

국에서는 연구 및 기술의 安定化 段階에 진입한 水中擴散管을 이용한 海洋 深層放流技法에 대한 기초적 연구와 설계기술의 개발이 시급한 실정이고 이에 대한 많은 관심과 연구가 요망된다.

참 고 문 헌

1. 서일원(1996). “원자력발전소 온배수 방류시스템 설계기법 개발을 위한 연구.” 최종보고서, 기초전력공학공동연구소
2. EPA (1990). *Technical Guidance Manual for Performing Waste Load Allocations, Book 3: Estuaries. Part 1: Estuaries and Waste Load Allocation Models.* EPA
3. Fischer, H.B., et.al(1979). *Mixing in Inland and Coastal Waters.* Academic Press
4. Harleman, D.R.F., and Stolzenbach, K.D. (1972). “Fluid Mechanics of Heat Disposal from Power Generation.” *Ann, Rev. Fluid Mech.*, 4, 7-32
5. Holley, E.R., and Jirka, G.H.(1986). *Mixing in Rivers.* Technical Rep. E-86-11, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss..
6. Jirka, G.H. (1982). “Multiport Diffusers for Heat Disposal: A Summary.” *J. of Hydraulics Div.* 108, 12.
7. Koh, R.C.Y., and Brooks, N.H. (1975). “Fluid Mechanics of Wastewater Disposal in the Ocean.” *Ann. Rev. Fluid Mechanics* ☼