

담수호 저층배수시설 방류구 위치선정을 위한 저층방류수 해양수중 혼합특성해석

박 영 옥*·구본충*(농업기반공사)·권 순 국(서울대)

Park, Yeong-Wook*·Khu, Bon-Chung*·Kwun, Soon-Kuk

Abstract

Initial mixing characteristics in near field regions were analyzed by FLOW-3D, for analyzing mixing behavior of submerged discharge from freshwater lake in sea water. FLOW-3D model was applied to the region near Geum-ho dike for its verification. Simulation results from FLOW-3D were compared to the observed data for the verification periods. FLOW-3D showed reasonable prediction results compared to the observed data, except underestimation in area near outfall. Particularly, FLOW-3D showed a good prediction for movement of buoyancy jets.

In addition, FLOW-3D model was applied to the region near Saemangeum dike, which is to be constructed in near future. It was expected that the results of model application to Saemangeum area could provide substantial information in planning submerged discharge facilities. Based on the model applications to Saemangeum area, it was recommended that outfall should be located to the distance which gave an enough depth of outfall from water surface.

I. 서 론

하구나 해면을 개발하는 간척사업지구에서 방조제의 건설 후 간척농지와 배후 농경지에 필요한 관개용수를 확보하기 위해 호소의 해수를 담수로 바꾸는 과정을 거치게 된다. 이러한 담수화 과정에서 호내의 오염물질이 적절하게 배출되지 못하고 장기적으로 체류함으로써 저층에 축적되어 수질이 불량하게 되거나, 담수화 이후에도 해양과 간척지에서의 염분침출로 인한 염분성층으로 물의 수직순환이 억제됨에 따라 심층수의 혐기성화와 그에 따른 오염물질의 용출이 문제가 되고 있다.

방조제 건설후 호측의 담수화 촉진을 위한 제염기능과 담수호 바닥층 고농도의 염분의 축적에 의한 수질오염의 방지를 위한 수질관리를 위해서 제염암거나 제염펌프 등과 같은 저층배수시설을 사용하여 저층수를 지속적으로 연안해역로 흘러 보내는 방법이 사용되고 있다. 그러나 현재 기 설치되었거나 계획중인 담수호 저층배수시설의 대부분은 그 효율성 및 주변해역에 미치는 영향을 평가하지 않았으며, 방류관이 해측으로 길게 뻗어 나와있지 않고 배수갑문 전면에 위치하고 있어 저층수의 배출시 방류수의 희석효과가 매우 불량하고 악취와 함께 검게 배출되는 것이 시각적으로 확인되어 주변해역의 미관을 해치고 있다.

이러한 문제로 오염물질이 포함된 저층수를 연안해역으로 배제하고자 할 경우 어장 등 환경오염 피해우려로 환경단체나 어민들의 반대로 인하여 저층배수시설의 운영이 불가능하게 되어 담수화가 어렵거나, 농업용수로서 적합한 용수공급을 위한 담수호 확보가 어려워 간척사업의 목적이 상실될 우려 마저 있다. 따라서 담수호 저층수의 방류 등에 대한 보다 적극적인 대처 방안이 요구되는 시점이다. 최근 많은 선진국에서는 그 지역에서 발생한 하·폐수를 긴 도류관을 통해서 연안으로부터 먼 거리의 외해로 나가 깊은 수심에서 수중 방류시키는 방식을 채택하고 있다. 담수호 저층배수시설의 설계에서도 이러한 수중방류 방식을 도입하여 방류수역의 해양특성에 따라 방류관의 위치, 규모, 형식 등의 배치를 적절하게 설계 시공하여 저층방류수의 초기 희석 및 혼합을 최대화할 수 있는 방법이 필요하다.

본 연구에서는 새만금 신시배수갑문에 설치예정인 저층배수시설을 대상으로 근역혼합모형을 적용하여 기존 방류구의 설치위치보다는 초기회석 및 혼합이 높게 일어날 수 있는 새로운 방류위치의 선정을 위한 근역에서의 혼합과정을 분석하였다.

II. 연구방법

1. 이론적 배경

유체가 오리피스 혹은 슬롯(slot) 등을 통하여 동일한 유체 혹은 유사한 유체로 방류되는 흐름을 부력제트라고 한다. 수중방류관에서 배출된 오염물질의 혼합과정은 크게 부력제트의 초기혼합과정과 주변류에 의한 이송·확산과정으로 나눌 수 있다. 대부분의 방류수는 방류구역과의 밀도차에 의해 해수표면 쪽으로 부력을 가지게 되며, 주변수가 성층화된 경우에는 이들 층에 포착(trapping)되거나 수표면에 도달하게 된다. 이와 같은 과정을 나타내는 영역을 근역 또는 초기영역(initial zone)이라 정의한다(Akar, PJ, Jirka, GH, 1991).

수중방류관에서 배출된 부력제트의 초기혼합특성에 지배적인 영향을 미치는 인자들은 제트인자(jet parameter), 환경인자(environmental parameter), 기하학적 인자(geometric parameter)의 세 가지 그룹으로 분류할 수 있다(Fisher 등, 1979). 제트인자로는 방류되는 제트의 초기유속, 유량, 농도, 운동량흐름률, 부력흐름률 등으로서 방류구에서 가까운 구역에서의 혼합에 주로 영향을 미친다. 환경 인자로는 주변해역의 조류속, 밀도 성층화 등 저층수가 방류되는 해역의 상태를 나타내는 인자들이다. 기하학적 인자는 방류제트의 형상, 방류방향, 주변경계와의 거리, 방류수심 등을 포함한다. Fig. 2.1에 나타낸 바와 같이 근역에서의 혼합거동은 운동량이 지배적인 제트영역, 천이 영역(transition region), 부력(bouyant)이 지배적인 플룸영역 등 세 부분으로 나눌 수 있다.

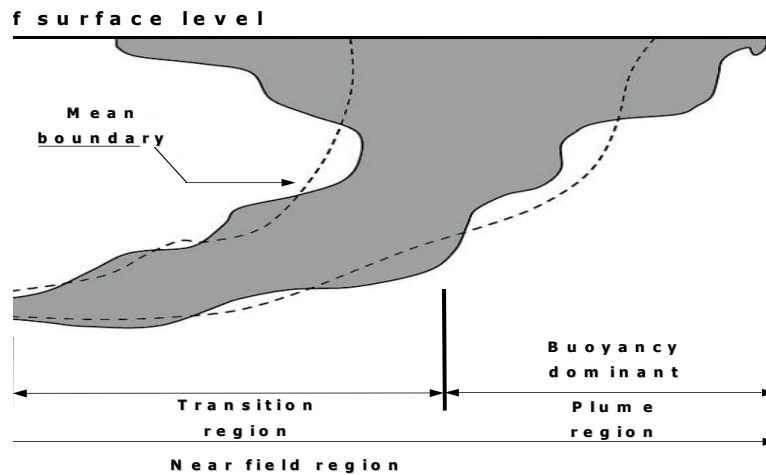


Fig. 2.1 Initial buoyant jet motion in near field region

방류초기 방류수체와 주변유체 사이의 밀도차가 없어서 부력은 작용하지 않고 운동량만 작용하는 경우를 완전제트(pure jet)라 하며 이 경우 초기 운동량 플럭스가 난류혼합을 야기한다. 이와 반대로 초기 운동량 흐름률이 없고 주변수와 밀도차나 온도차 등에 의한 부력효과만을 받는 제트를 완전플룸(pure plume)이라 한다. 또한 운동량과 부력 모두를 가지고 방류되는 흐름을 부력제트(bouyant jet) 혹은 강제플룸(forced plume)이라고 한다.

이러한 부력제트의 특성은 식(2.1)과 같이 운동량과 부력의 상대적인 중요도를 의미하는 무차원

수로 방류밀도프루드수(densimetric Froude number) F_D 와 k 가 있다.

$$F_D = \frac{U_o}{(g'_o D)^{1/2}} \quad (2.1)$$

여기서, U_o 는 방류공에서의 방류속도, D 는 방류공의 직경이다. g'_o 는 초기유효중력가속도로 식 (2.2)와 같이 정의되는데, ρ_a 와 ρ_o 는 각각 주변수 및 방류수의 밀도이며, g 는 중력가속도이다.

$$g'_o = (\rho_a - \rho_o)g/\rho_a \quad (2.2)$$

식(2.1)에서 방류유속이 커지고 유효중력가속도가 적어지면, 즉 방류밀도프루드수가 커지면($FD \rightarrow \infty$) 방류수는 완전제트에 가까워지고, 방류밀도프루드수가 적어지면($FD \rightarrow 0$) 완전플룸에 가까워진다.

유속비 k 는 주변류가 존재할 경우 방류유속과 주변유속의 상대적인 값을 나타내며 다음 식(2.3)과 같이 정의된다.

$$k = \frac{u_a}{U_o} \quad (2.3)$$

2. 수학적 모형

부력을 가지는 비압축성 유체의 수중 방류수는 유동현상이 복잡한 3차원적인 거동을 보이기 때문에 2차원적인 수리분석으로는 해석이 어렵다. 본 연구에서는 자유수면을 가지는 흐름 및 부력을 가진 유체의 난류현상 등을 모의하고, 수리구조물의 형상 모델링이 쉬운 3차원 수치해석 프로그램인 FLOW-3D 모형을 사용하여 저층배수시설에서 방류된 담수호 저층수의 혼합거동을 해석하였다. FLOW-3D 모형은 x, y, z방향의 유속을 모두 고려하여 수치모의를 수행하는 완전한 3차원 난류모형으로서 자유수면을 가지는 개수로 흐름, 비압축성 및 압축성 유체계산, 층류 및 난류해석, 정상 및 비정상 유동해석, 뉴턴 및 비뉴턴 유체계산, 그리고 열전달 해석이 가능하다. 또한 이 모형은 다른 수치해석 방법에 비하여 몇 가지의 특징을 가지고 있다. 첫째로 격자를 생성하기 편리하다. 계산시의 해석 속도를 증진시키고 해의 정확성을 높일 수 있으며 수치해석방법이 간단한 등의 장점을 가지는 직각형상의 고정 격자계(Eulerian)가 사용되고 있다. 둘째로 복잡한 3차원 형상의 표현을 위하여 FAVOR(Fractional Area Volume Obstacle Representation Method) 기법을 사용하고 있다. 또한 자유수면과 밀도차가 큰 흐름을 고려하기 위하여 VOF(Volume of Fluid) 방법을 사용하기 때문에 자유수면과 밀도차가 매우 큰 두 종류 이상의 유체가 동시에 존재하는 상태에서도 해석이 가능하다. 이 외에도 유체의 난류유동 해석을 위하여 기본 대수모형으로부터 RNG 모형까지의 난류방정식을 선택할 수 있다.

III. 연구결과

1. 모형의 검증

FLOW-3D 모형의 현장 적용성을 평가하기 위해 저층배수시설을 운영하여 담수호 저층수의 방류에 따른 주변해역에서의 수질자료 획득이 용이한 영산강 III단계 대단위 간척사업지구 중 금호방조제 해역을 선정하여 모의를 수행하였다. 저층배수시설을 통한 담수호 저층수 방류시 근해역의 혼합특성분석을 위한 해석영역의 범위는 배수갑문을 중심으로 해측으로 약 6.0 km, 담수호측으로 약 0.5 km, 방조제 노선방향으로 7.2 km을 선정하였다. 이러한 해석영역의 범위를 방류수의 혼합거동이 경계영역에 의하여 영향을 받지 않도록 선정하였다.

금호호 저층배수시설 가동시 방류수역에서 관측된 실측자료와 FLOW-3D 모형에 의하여 계산된 수표면에서의 회석률과 염분농도를 비교 분석하여 모형을 검증하였다. Fig. 3.1은 저층배수시설의

가동기간 동안 방류해역의 각 정점에서 관측된 염분농도에 의한 수표면에서의 희석률과 FLOW-3D 모형에 의해 계산된 희석률을 비교한 것이다. 그림에 도시된 것과 같이 FLOW-3D 모형의 계산결과는 전 지점에서 관측치에 의한 희석률에 비하여 다소 과대 평가하고 있으나, 전반적인 경향은 관측치와 상당히 잘 일치하는 것으로 나타났다. 또한, Fig. 3.2은 담수호 저층수의 방류지점으로부터 하류방향으로 정점별로 관측된 표층에서의 염분농도와 FLOW-3D 모형에 의하여 계산된 염분농도를 비교하여 도시한 것이다. FLOW-3D 모형에 의한 계산결과는 방류구 인접구간에서는 관측치에 비하여 다소 높았으나 거리가 증가하면서 관측치에 거의 근접하는 것으로 나타났다.

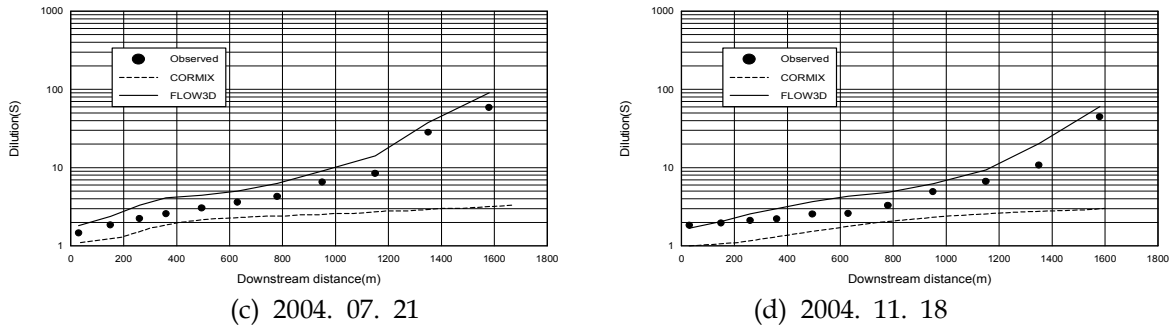


Fig. 3.1 Comparison of observed and simulated surface dilutions for verification period

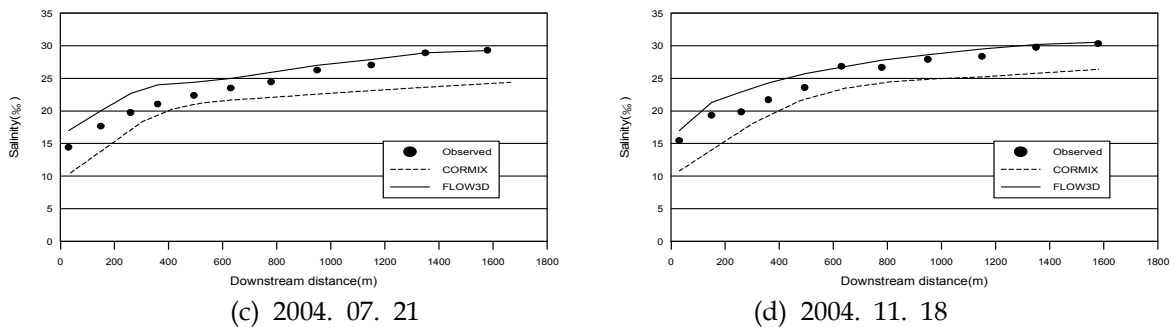


Fig. 3.2 Comparison of surface salinity between field observations and model results

2. 모형의 적용

금호간척지구 해역을 대상으로 검증된 모형을 이용하여 향후 새만금 방조제 완공 후 만경강 측 담수호의 저층수를 배제하기 위해 신시배수갑문 전면에 설치예정인 저층배수시설을 대상으로 방류위치에 따른 방류구 주위에서의 희석률과 혼합거동을 모의하였다. 본 연구에서는 Fig. 3.3에 도시된 것과 같이 신시배수갑문 전면해역에 설치 예정인 담수호 저층배수시설의 방류지점으로 원안의 방류구 계획위치(St.1)와 이 보다 외해측으로 연장하여 수중방류하는 2가지 위치(안)에 대해 방류수의 수표면 도달시의 최소희석률을 비교 분석하였다. Fig. 3.4는 담수호에서의 관리수위(EL.-1.5m)와 방류구역에서의 조위와의 내·외수위차에 의해 방류된 담수호 저층수의 수표면 도달시 최소희석률을 각 방류위치에 따라 나타낸 것이다. 모의결과 방류위치에 따른 수표면 도달시 최소희석률은 기존의 방류형태인 해안선 방류에 해당하는 Case1의 경우에는 1.03, 방류구를 외해로 연장하여 수중방류하는 Case2는 약 3.12, Case3는 약 4.37 정도로 나타났다. 이는 방류지점을 외해로 연장함에 따라 방류수심이 증가하면 방류수 상승시 주변수의 포획시간이 증가하여 주변수와 수직적 혼합의 증가로 수표면 도달시 희석률이 증가하게 된다. 또한, 동일한 방류수심에서 방류량이 적을수록 수표면 희석률이 증가하였다.

Fig. 3.5는 저층배수시설의 방류위치에 따른 방류된 담수호 저층수가 수표면에 도달하면서 확산

되는 COD의 등농도선을 방류유속과 중첩하여 수평분포도로 도시한 것이다. 그림에 도시된 COD의 수평 분포도를 보면 해안선 방류인 Case1은 고농도선이 방류구 부근의 표층에서 다소 폭넓게 나타나고 있으나, 수중방류 방식인 Case3은 방류구 주위의 일부영역을 제외하면 고농도선이 거의 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3.6은 방류된 담수호 저층수의 연직면의 유속 및 COD 농도를 중첩하여 도시한 것이다. 그림에서 보면 Case1의 경우에는 수표면이 방류구로부터 약 3.0 m 정도 밖에 되지 않는 천수조건에 해당하는 수역으로써 방류된 담수호 저층수는 강한부력에 의해 짧은 시간 내에 곧바로 수표면으로 상승하므로 거의 주변수와 혼합되지 않는 것으로 나타났다. 반면, 깊은 수중에서 방류되는 Case3의 경우에는 방류구에서 배출된 방류수가 주변수와 밀도차에 의한 강한 부력으로 인하여 수표면을 향하여 거의 수직으로 상승하는 거동양상은 Case1과 비슷하다. 그러나 방류관 주위에서의 주변수의 횡류입과 수표면으로 상승하는 과정에서 주변수와 혼합희석에 의해 수표면 도달시는 방류수의 농도는 Case1에 비하여 훨씬 감소된 상태로 도달하여 중력 확장하는 것으로 나타났다. 또한 방류수의 연직분포도를 보면 수표면에 도달된 방류수는 거의 표층에만 분포하여 그 아래층과의 밀도차에 의한 뚜렷한 경계가 발생된 것을 확인할 수 있으며, 두 경우 모두 방류수는 해수표면에 도달하는 것으로 예측되었다. 이렇게 방류수가 수중에서 포착되지 않고 해수표면에 떠오르게 되면 미관상 좋지 않고 악취가 발생될 우려가 있다.

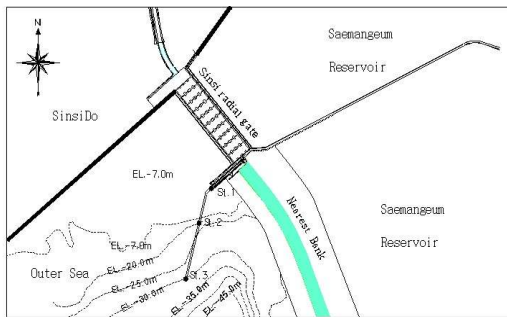


Fig. 3.3 Location of proposed submerged outfall

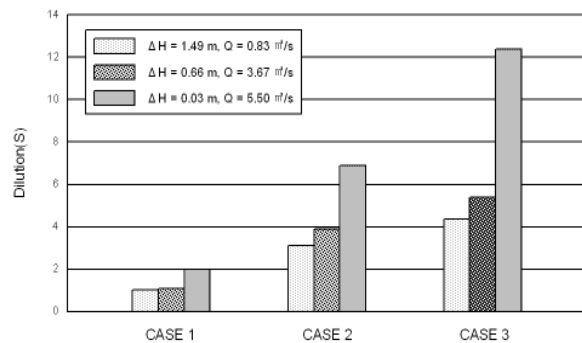
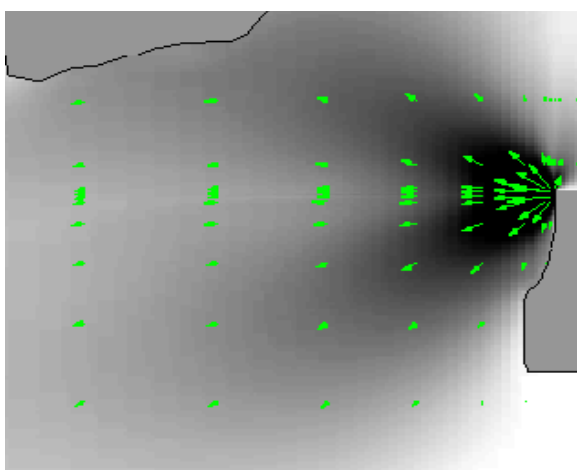
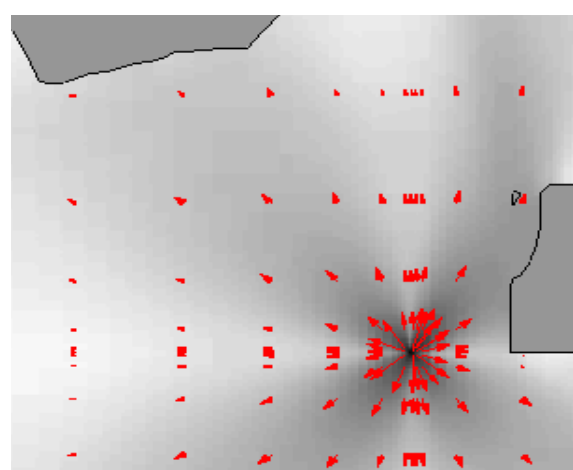


Fig. 3.4 Comparison of surface minimum dilution for different discharge conditions



(a) Case 1



(b) Case 3

Fig. 3.5 Horizontal distributions of COD concentration

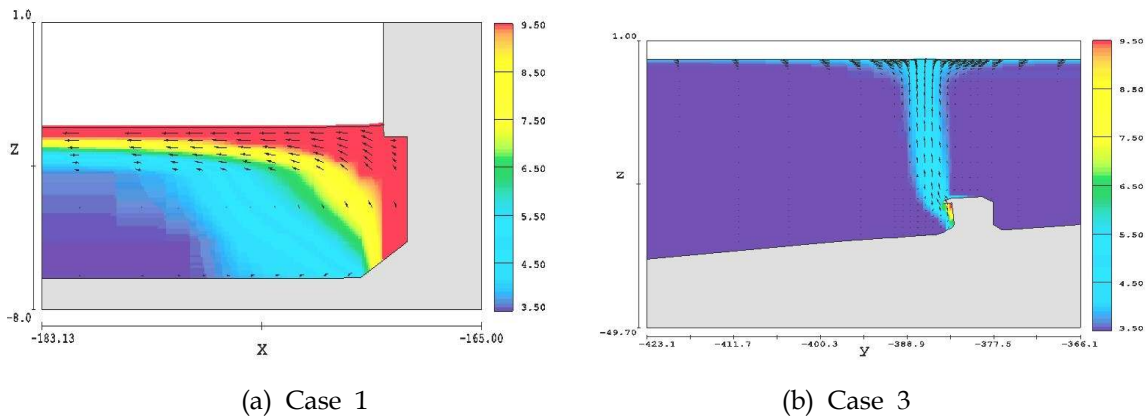


Fig. 3.6 Vertical distributions of computed COD concentration at y-z plane

참고문헌

1. 강시환, 김영도, 이호진, 김상익, 한성대 (2001) 해양수리특성의 변화를 고려한 연속적 근역혼합거동. 한국 해양환경공학회지 4(4):12-201.
2. 김대근 (2000) 수중다공확산관에서 방류된 온배수의 혼합거동 해석. 서울대학교 박사학위논문
3. 김대근, 서일원 (2003) 수표면 및 수중방류 방식으로 주변수 흐름이 있는 수역에 방류된 온수의 혼합거동 수치모의. 대한토목학회논문집 23(6B):489-497
4. 김영도 (2000) 3차원 입자추적모형에 의한 수중방류 하수의 이송 확산 예측. 대한토목학회지 20(6):107-114
5. 김창시 (1998) 근역혼합모형을 이용한 해양방류 하수의 혼합특성 예측. 서울대학교 석사학위논문
6. 농업기반공사 (2003) 새만금 지구 수리실험보고서. 농어촌연구원
7. 이남주, 최홍식, 이길성 (1994) 가로흐름 수역으로 방출되는 2차원 온배수 수치모형 비교 연구. 한국해양해양공학회지 6(1):40-50
8. 최홍식 (1996) k-1 난류모형을 이용한 온배수 수치해석. 한국수자원학회지 29(2):197-207
9. Anwar, HO (1986) Flow of surface buoyant jet in cross flow. Journal of Hydraulics Engineering 113(7):892-904
10. Flow Science Technical Notes FSI-95-TN42:1~7
11. Blumberg, AF, Ji, ZG, Ziegler, CK (1996) Modeling outfall plume behavior using a far field circulation model. Journal of Hydraulic Engineering ASCE 122(11):610-616
12. Jirka, GH, Akar, PJ (1991) Hydrodynamic classification of submerged multiport diffuser discharges. Journal of Hydraulic Engineering ASCE 117(9):1113-1128
13. Noda, EK, Associates, Inc (1992) Near-fields and far-field plume analysis sand island outfall system. Honolulu, USA
14. Robert, PJW (1997) Dispersion of buoyant waste water discharged from outfall diffusers of finite length. California institute of technology, Pasadena Report KHR-35
15. Wallace, RB, Sheff, BB (1987) Tow-dimensional buoyant jets in two-layer ambient fluid. Journal of Hydraulic Engineering 113(8):992-1005
16. Zhang, XY, Adams, EE (1999) Prediction of near field plume characteristics using far field circulation model. Journal of Hydraulic Engineering 125(3):233-241