

장미형확산관 형태의 해양방류시스템의 혼합특성 연구

A Study on Mixing Characteristics of Ocean Outfall System with Rosette Diffuser

김영도^{1*} · 서일원² · 권석재³ · 류시완⁴ · 권재현¹

Kim, Young Do^{1*} · Seo, Il Won² · Kwon, Seok Jae³ · Lyu, Siwan⁴ · Kwon, Jae Hyun¹

1 인제대학교 환경공학부, 2 서울대학교 건설환경공학부

3 국립해양조사원 해양조사연구실, 4 창원대학교 토목공학과

(2008년 4월 23일 접수 ; 2008년 6월 10일 채택)

Abstract

The hybrid model can be used to predict the initial near field mixing and the far field transport of the buoyant jets, which are discharged from the submerged wastewater ocean outfall. In the near field, the jet integral model can be used for single port diffusers while the σ transformed particle tracking model was used in the far field. In this study, the experimental study was performed to verify the developed hybrid model in the previous research. The developed hybrid model properly predict the surface and vertical concentration distribution of the single buoyant jets with various effluent and ambient conditions. The hybrid model can also simulate the surface concentration distribution of the rosette diffuser except for the parallel diffuser with the higher densimetric Froude number due to the assumption that dynamic effects of the effluent plumes are negligible in the far field. The application of the hybrid model to rosette diffusers can predict the concentration near the diffuser more accurately when the line-plume approximation is used.

Key words : hybrid model, ocean outfall, single buoyant jet, rosette diffuser, densimetric Froude number

주 제 어 : 결합모형, 해양방류, 단일확산관, 장미형확산관, 밀도 Froude 수

1. 서론

해양에 설치된 확산관에 의해 수중방류된 하수는 주변수 특성, 방류수 특성, 그리고 확산관 특성에 따라 부력제트에 의한 능동적 초기회석과 주변류에 의한 수동적 이송·확산 혼합과정이 단계별로 시간적, 공간적으로 상이한 범위에서 발생한다(Fischer 등, 1979). 이러한 근역과 원역의 규모 차이로 인해 현재까지의 처리하수의 혼합확산에 관한 수치해

석 연구에서는 근역과 원역을 분리하여 각 영역별로 서로 다른 개념의 모형을 적용하여 왔다(김영도 와 서일원, 2004). 그러나 근역모형에서는 일반적으로 정상상태를 가정하는데 비하여, 방류해역의 수리조건은 시간적, 공간적인 측면에서 매우 다양한 변화를 갖는다. 조석환경에서의 해수유동은 만일 조석성분에 지배를 받고 지형적 특성에 따라 변하며, 밀도성층화의 정도도 해수의 온도변화에 따라 계절적으로 변화한다(강시환 등, 2002). 이러한 변화는 근역혼합의 초

*Corresponding author Tel:+82-55-320-3252, FAX:+82-55-334-7092, E-mail: ydkim@inje.ac.kr (Kim,Y.D.)

기회석물, 평형상승고, 하수플룸의 크기 및 형성위치 등을 변화시키고, 이는 결과적으로 하수플룸의 원역으로의 이동 궤적 및 최종 귀착위치 등을 변화시킨다(Zhang, 1995). 또한 조석환경에서의 조류의 변화가 근역모형에서 주변유속으로 사용되는 평균적인 흐름인 잔차류보다 훨씬 큰 폭으로 진동하므로, 하수플룸은 평균흐름에 의해 이송되기 전에 얼마 동안 확산관 주위에 머무르는 현상이 나타나는데, 기존의 근역모형만으로는 이러한 현상을 해석할 수 없다(Roberts, 1999). 또한 원역에서의 이송·확산을 해석함에 있어 중요한 변수인 유속이 하수장의 형성위치에 따라 변하기 때문에 근역혼합 특성의 정확한 예측은 원역 해석에 있어서도 매우 중요하다(Zhang, 1995). 이와 같이 각 영역에서의 혼합양상이 다른 영역에서의 혼합특성에 서로 영향을 받는 데에 비하여 영역분할 예측에서는 이러한 상호작용을 무시하므로 많은 오차가 발생하기 때문에, 최근 들어 두 영역모형의 유기적인 결합방법이 많은 관심사가 되고 있다(Zhang과 Adams, 1999; Kim 등, 2001; Kim 등, 2002).

본 연구에서는 장미형확산관의 초기혼합 및 원역혼합을 해석하기 위하여, 선행연구에서 개발된 결합모형(Kim 등, 2002; 김영도와 서일원, 2004)의 수치해석 결과와 실험결과와의 비교를 통해 타당성을 검증하고자 한다. 근역-원역 결합모형을 검증하기 위해서는 먼저 영역모형들을 각각의 대상영역에서 검증해야 하며, 근역과 원역의 천이구간에서 결합방법에 대한 타당성이 검토되어야 한다. 영역별 모형의 검증방법으로는 원역모형의 경우, 이송·확산방정식의 여러 조건에서의 해석해를 사용할 수 있다(Fischer 등, 1979). 근역모형의 경우에는 부력제트의 초기혼합이 단순한 경우를 제외하고는 해석해를 구하기 어려우므로 일정한 조건에서의 수리실험 결과와 비교함으로써 검증할 수 있다(Roberts 등, 1989; Davidson, 1989). 그러나 결합방법에 대한 검증에 있어서는 일반적으로 정상상태를 가정하는 실험실 연구에서나 비정상상태가 대부분인 현장 연구에서 두 영역의 혼합특성을 동시에 측정하는 것은 매우 어렵다(Kim, 2002). 더욱이 염분에 의한 음부력제트를 정지수체에 방류하고, 이송장치를 이용해 상대적인 주변유속을 구현하는 기존의 실험연구에서는 난류성분에 의한 확산과정이 생략되므로 원역 및 천이구간에 대하여 하수플룸의 농도분포를 구할 수 없다. 이에 Kim 등(2002)과 김영도와 서일원(2004)에서는 Fig. 1에 제시한 바와 같은 영역별 혼합해석 모형의 동적연결을 통하여 방류조건과 주변류조건에 따른 근역에서부터 원역까지의 혼합특성을 모의할 수 있는 결합모형을 제시한 바 있다.

결합모형을 현장에 적용함에 있어서는 해수유동모형에 의하여 시간에 따른 유속장의 변화예측이 선행되어야 한다. 그러나 방류해역의 지형적 특성이 단순한 경우에는 일정한 시점에서의 주변흐름이 대상해역 전체에서 동일하다고 가정

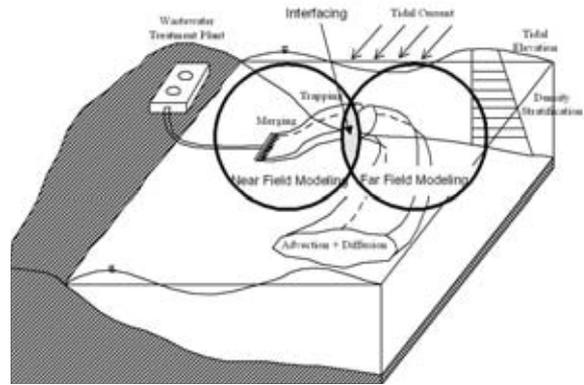


Fig. 1. 수중방류 하수의 근역 및 원역 혼합.

하고 방류지점에서 연속적으로 측정된 해류의 시계열자료가 해수유동모형의 유속장을 대치할 수 있다(Wood 등, 1993; Roberts, 1999). 또한 밀도성층화 구조를 해수유동모형을 이용해 정확하게 예측하기 위해서는 대상영역 전체에 대한 해수의 수심별 수온 및 염분 자료를 이용해 모형을 검증해야 한다. 그러나 이를 위해서는 상당한 시간과 노력이 필요할 뿐만 아니라, 평형상승고가 비선형 밀도분포구조를 갖는 수온약층의 높이와 일치하는 경우가 대부분인데 비하여, 해수유동 모형을 이용해서는 이러한 수온약층의 정확한 예측이 어렵다. 뿐만 아니라, 평형상승고를 예측하기 위해서는 방류지점 인근에서의 정확한 밀도성층 분포만이 필요하므로, 해당지점에서 CTD(Conductivity-Temperature-Depth) 측정에 의한 온도 및 염분의 연직분포를 사용하는 것이 효율적으로 보다 정확한 평형상승고를 예측할 수 있다. 본 연구에서는 기 개발된 결합모형을 검증하기 위하여 다양한 방류조건 및 주변수 조건에서 실험연구를 수행하였다. 흐름수역에서 단공확산관과 장미형확산관을 통해 방류된 부력제트들의 혼합거동을 측정하였고, 이를 결합모형의 모의결과와 비교·분석함으로써 김영도와 서일원(2004)에서 개발된 결합모형의 현장 적용성을 평가하고자 하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1. 실험장치 및 계측기기

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 실험수조 및 확산관 모형, 그리고 측정장비의 상세제원을 평면도 및 측면도로 나타낸 것이다. 실험수조는 정류부와 유입부로 구성된 유량공급부, 길이 15.5 m, 폭 4.9 m, 높이 0.6 m 규모의 수로부, 그리고 수문이 설치된 배수부로 구성되어 있다(서일원 등, 2000; 서일원 등, 2002). 실험수조에는 사진촬영장비 및 수온측정용 열전대(thermocouple)를 설치하기 위한 두 개의 이송장치가 설치되어 있으며, 측정범위 8.3~300.0 l/s인 전자기식 유량계가 설치되어 있어 실험수조에 공급되는 주변수 유량

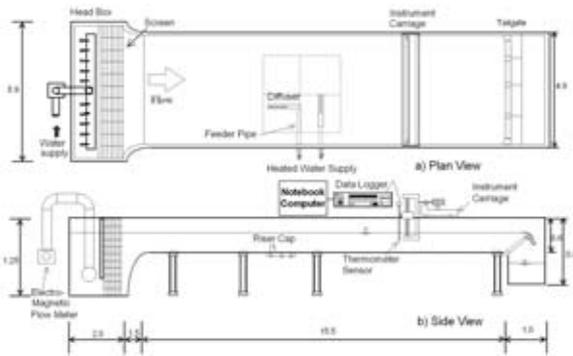


Fig. 2. 실험수조 및 계측장비 개요도.

을 측정할 수 있다. 확산관 모형은 길이가 각각 1.2 m, 1.0 m인 두 개의 모형을 주변흐름과 확산관 축이 이루는 각도가 각각 0°와 90°가 되도록 설치하였다. 각각의 확산관 모형에는 4 cm, 10 cm 간격으로 연결부를 배치하여 탈착이 가능한 아크릴 연직유도관 모형을 간격별로 조절하면서 부력제트들의 병합에 따른 혼합양상을 측정할 수 있도록 하였다. 확산관의 유입부에는 온도계를 설치하여 방류수의 수온을 측정하였으며, 확산관 모형의 본체는 수조바닥면의 하부에 설치하고, 연직유도관 모형만 수조바닥면의 상부에 설치하여 주변흐름의 교란을 최소화하였다. 단공확산관 실험의 경우, 방류공의 직경이 1.7 cm인 연직유도관 모형을 사용하였으며, 장미형확산관에 대한 실험에서는 방류공 직경이 1.0 cm인 연직유도관 모형을 사용하였다.

실제 해양에서 수중방류되는 하수는 담수로서 염분을 갖는 주변해수와 밀도차이 때문에 부력제트의 거동을 보이는 데, 본 연구에서는 실온의 주변수에 온수를 방류함으로써 밀도차를 발생시켜 부력제트를 구현하였다. 이러한 온수부력제트 실험은 염분을 갖는 음부력제트를 이송장치를 이용해 정체수역에 방류함으로써 상대적인 주변유속을 갖게 하는 기존 연구(Roberts 등, 1989; Davidson, 1989)에 비하여 상대적으로 낮은 밀도차를 구현할 수밖에 없는 단점이 있다. 그러나 본 연구에서와 같이 결합모형에 의한 모의결과를 검증하고자 할 때, 부력제트에 의한 근역혼합 거동과 주변흐름의 난류성분에 의한 수동적 이송·확산 과정을 동시에 구현하여 중간영역이상의 구간까지 부력제트의 혼합양상을 측정할 수 있는 장점이 있다(Kim 등, 2002). 온수방류를 위해서 0.1℃ 정밀도의 온도조절장치와 전자기식 펌프가 부착된 온수공급장치를 이용하였으며, 측정범위가 각각 0.005~0.194 l/s, 0.012~3.33 l/s인 두 대의 전자기식 유량계를 통해 방류유량을 조절하였다.

방류온수와 주변수가 혼합함으로써 형성되는 온도장 측정을 위하여 ±0.1℃의 정확도를 갖는 40개의 열전대를 지지대에 연결하여 일정한 간격으로 이송장치에 일렬배치하였

다. 먼저 예비실험을 수행한 후, 방류조건 및 주변수조건에 따른 온수플룸의 영향범위를 파악하였으며, 이를 바탕으로 측정범위 및 측정위치를 결정하였다. 이송장치의 움직임은 상하방향으로는 전동장치를 이용하였고, 흐름방향으로는 수조의 측면에 설치된 레일을 이용하였다. 온도계에서 감지된 검출신호들은 40 채널을 갖는 자료수집장치를 거쳐 각 측정점 및 측정시간에 따라 소형컴퓨터에 자동저장되도록 하였다. 온수공급장치를 통한 방류유량의 제한을 고려하여 한 측정점에 대한 시간에 따른 측정 회수를 결정하였으며, 한 측정점에서의 연속적인 측정값을 시간평균함으로써 정상상태의 온도장을 구하였다. 또한 온수방류전 주변수의 온도와 방류후의 온도를 각각 측정하여 온수플룸의 농도장계산에 있어서 상대적인 온도차를 이용함으로써 대기온도 및 수조바닥면 온도변화에 의한 오차가 발생하지 않도록 하였다. 본 연구에서는 자동이송장치와 자료수집장치로 구성된 측정시스템을 이용하여 짧은 시간에 광범위한 영역의 온도장을 정확하게 측정할 수 있으므로, 근역과 원역의 중간영역이라 할 수 있는 천이구간까지 온수방류실험에서 나타나는 수표면 온도손실을 무시할 수 있다. 또한 본 실험에서 구현한 온수플룸들의 폭이 수조폭에 비하여 작으므로 수조의 양 측면에서 나타나는 온도손실도 무시할 수 있다.

2.2 실험 조건

일반적으로 흐름수역에서 방류된 부력제트에 혼합양상에 관한 실험에서 고려하여야 할 무차원수로는 밀도 Froude 수(F_j)와 유속비(k)가 있으며, 유체의 운동이 충분히 난류일 경우, 일반적으로 방류 Reynolds 수의 영향은 무시한다. 밀도 Froude 수는 밀도차에 의한 부력효과와 방류수가 갖는 운동량간의 상대적인 영향력을 나타내는 무차원수로서 식(1)과 같이 나타낼 수 있고, 유속비는 방류유속에 대한 주변수 유속의 비로서 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_j = \frac{U_o}{\sqrt{g'_o d_p}} \quad (1)$$

$$k = U_a/U_o \quad (2)$$

여기서, U_o 는 방류유속, $g' (= \Delta\rho/\rho)$ 은 유효중력가속도, d_p 는 방류공의 직경이고, U_a 는 주변흐름의 유속이다.

흐름수역에서 수평으로 방류되는 단일부력제트의 혼합거동에 대한 실험에서의 방류조건 및 주변수조건과 이에 관한 주요 무차원수는 Table 1에 제시한 바와 같다. 단공확산관의 경우에는 주변류 방향과 동일한 방향으로 방류되는 경우(co-flow, CO 계열), 45°의 각을 이루어 방류되는 경우(oblique co-flow, OB 계열), 그리고 직각으로 방류되는 경우(cross-flow, CR 계열)의 3가지로 분류하여 실험을 수행

하였다. 국내의 마산·창원하수종말처리장의 해양방류관의 경우, 95년도 실제방류량을 근거로 산정해보면 $F_j=4.2$, $k=0.04\sim0.17$ 이며, 최종년도 설계최대방류량을 기준으로 살펴보면 $F_j=4.4\sim14.7$, $k=0.01\sim0.33$ 이다(서일원 등, 2000). 본 연구에서는 실험조건을 선정함에 있어서는 가급적 이와 같은 국내 하수확산관의 수리특성 범위를 포함하도록 하였으며, 이에 따른 밀도 Froude 수와 유속비의 범위는

Table 1. 단일부력제트 실험조건

Case	h(m)	U_0 (m/s)	U_a (m/s)	g_0' (m/s ²)	F_j	k
CO-01	0.26	0.42	0.025	0.035	17.46	0.06
CO-02	0.26	0.12	0.010	0.021	6.55	0.08
CO-03	0.26	0.26	0.025	0.043	9.71	0.09
CO-04	0.26	0.14	0.015	0.020	7.62	0.11
CO-05	0.26	0.13	0.025	0.020	7.02	0.19
CO-06	0.26	0.14	0.042	0.012	9.34	0.31
CO-07	0.26	0.13	0.042	0.015	8.12	0.32
CO-08	0.26	0.07	0.043	0.013	5.02	0.58
OB-01	0.26	0.41	0.025	0.046	14.58	0.06
OB-02	0.26	0.22	0.025	0.039	8.49	0.11
OB-03	0.26	0.12	0.025	0.057	3.89	0.21
OB-04	0.26	0.06	0.025	0.043	2.04	0.46
CR-01	0.26	0.39	0.030	0.041	14.84	0.08
CR-02	0.26	0.24	0.025	0.036	9.53	0.11
CR-03	0.26	0.13	0.025	0.045	4.83	0.18
CR-04	0.26	0.07	0.030	0.042	2.73	0.41

Table 2. 장미형 확산관 실험조건

Case	h(m)	s_r/d_p	U_0 (m/s)	U_a (m/s)	g_0' (m/s ²)	F_j	k
PE-101	0.32	10.0	0.039	0.009	0.110	1.16	0.22
PE-102	0.32	10.0	0.039	0.018	0.111	1.16	0.46
PE-103	0.32	10.0	0.035	0.024	0.109	1.07	0.68
PE-104	0.32	10.0	0.038	0.036	0.109	1.15	0.94
PE-201	0.32	10.0	0.077	0.009	0.114	2.27	0.11
PE-202	0.32	10.0	0.081	0.018	0.114	2.39	0.23
PE-203	0.32	10.0	0.075	0.026	0.116	2.21	0.34
PE-204	0.32	10.0	0.056	0.034	0.114	1.66	0.61
PE-301	0.32	10.0	0.136	0.009	0.127	3.83	0.06
PE-302	0.32	10.0	0.153	0.019	0.127	4.30	0.13
PE-303	0.32	10.0	0.140	0.027	0.114	4.13	0.19
PE-304	0.32	10.0	0.137	0.035	0.114	4.05	0.26
PA-101	0.32	12.0	0.038	0.009	0.096	1.22	0.25
PA-102	0.32	12.0	0.039	0.017	0.096	1.27	0.43
PA-103	0.32	12.0	0.039	0.026	0.096	1.27	0.65
PA-104	0.32	12.0	0.042	0.038	0.096	1.34	0.91
PA-201	0.32	12.0	0.068	0.009	0.101	2.14	0.14
PA-202	0.32	12.0	0.076	0.017	0.101	2.39	0.22
PA-203	0.32	12.0	0.073	0.025	0.101	2.31	0.34
PA-204	0.32	12.0	0.062	0.033	0.111	1.86	0.54
PA-301	0.32	12.0	0.138	0.009	0.110	4.17	0.07
PA-302	0.32	12.0	0.135	0.018	0.110	4.07	0.13
PA-303	0.32	12.0	0.133	0.025	0.112	3.98	0.19
PA-304	0.32	12.0	0.136	0.033	0.112	4.07	0.24

각각 $F_j=2.04\sim17.46$, $k=0.06\sim0.58$ 이다.

흐름수역에서 4공형태 장미형확산관의 혼합양상에 대한 실험조건 및 이에 따른 무차원 수는 Table 2에 제시한 바와 같다. 장미형확산관의 경우에는 확산관 축이 흐름방향에 대하여 직각인 경우(perpendicular diffuser, PE 계열)와 평행한 경우(parallel diffuser, PA 계열)에 대하여 실험을 수행하였다. 유도관간의 간격은 PE 계열의 경우는 $10d_p$, PA 계열은 $12d_p$ 로 고정하였으며, 밀도 Froude 수와 유속비의 범위는 각각 $F_j=1.07\sim4.30$, $k=0.06\sim0.94$ 이다.

3. 합 모형의 개요

3.1. 제트적분 모형

각 방류포트를 원점으로 하고 주변수의 흐름방향을 x축으로 하는 직각좌표계(Fig. 4참조)에서 부력제트의 궤적에 직각인 미소요소에 대한 질량, 운동량, 부력의 보존방정식을 제트 단면에 대하여 적분한 지배방정식은 식(1)~(3)과 같다(김영도와 서일원, 2004).

$$\frac{d}{ds} [(I_m U_c^2 b^2 + U_a \cos \gamma I_q U_c b^2) \cos \gamma] = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d}{ds} [(I_m U_c^2 b^2 + U_a \cos \gamma I_q U_c b^2) \sin \alpha] = I_A g_c' b^2 \quad (2)$$

$$\frac{d}{ds} [(U_a \cos I_A g_c' b^2 + I_{B,A} U_c g_c' b^2) \sin \alpha] = 0 \quad (3)$$

여기서, s는 제트중심선을 따른 좌표축, U_c 는 제트중심선에서의 초과유속, U_a 는 주변수 유속, b는 제트 반폭, g_c' 은 중심선 유효중력가속도이고 I_m , I_q , I_A , $I_{B,A}$ 는 형상상수로써 제트 단면내의 속도, 밀도차 및 농도 등의 분포를 Gaussian 함수로 가정하면, 각각 $\pi/2$, π , $\pi\lambda^2$, $1.19\pi\lambda^2/(1+\lambda^2)$ 와 같다.

3.2. 입자추적 모형

무작위행보에 의한 입자추적 모형에서는 입자들의 운동이 확정적인 이송역학과 특정 분포를 갖는 확률적인 확산운동의 합으로 이루어졌다고 가정한다. 입자의 위치, $x(t)$ 는 비선형 Langevin 방정식에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다(김영도와 서일원, 2004).

$$\frac{dx}{dt} = a(x, t) + B(x, t)R_n \quad (18)$$

여기서, R_n 은 평균이 0이고 단위표준편차를 갖는 독립적인 무작위수이다. σ 좌표계에서의 입자추적 모형을 위한 지배방정식을 나타내면 다음과 같다(김영도와 서일원, 2004).

$$\begin{aligned} & \frac{\delta HC}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x} \left[\left\{ U + \frac{1}{H} \frac{\delta E_H H}{\delta x} \right\} \right] \quad (19) \\ & + \frac{\delta}{\delta y} \left[\left\{ V + \frac{1}{H} \frac{\delta E_H H}{\delta x} \right\} \right] + \frac{\delta}{\delta z} \left[\left\{ \frac{Q}{H} + \frac{1}{H} \frac{\delta}{\delta z} \left(\frac{E_y}{H} \right) \right\} HC \right] \\ & = \frac{\partial^2}{\partial x^2} (E_H HC) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} (E_H HC) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(\frac{E_y}{H^2} HC \right) \end{aligned}$$

여기서, C는 오염물질의 농도, H는 수심, U, V, Q는 각각 x, y, z방향 유속, E_H는 수평확산계수, E_V는 연직확산계수이다. 입자의 이송을 위한 유속성분은 입자와 근접해 있는 8개 격자점에서의 유속값을 선형보간하여 구하였다. 경계 조건을 처리함에 있어서는 개방경계를 통과한 입자는 외부로 손실되는 것으로 가정하였고, 폐경계에서는 반사율을 고려하여 내부점으로 반사되도록 하였다(김영도와 서일원, 2004).

3.3 각 영역모형의 결합방법

흐름모형에서 계산된 주변유속을 통해 근역특성을 계산하고, 계산된 하수플룸의 위치 및 희석률을 통해 계산된 농도장을 반영하여 입자를 삽입하였다. 삽입된 입자들은 유속장에 의해 이송되고, 무작위행보 모형을 통해 확산된다. 입자를 삽입함에 있어서 Gaussian 분포로 근사하여 입력하였으며, 근역모형에서 계산된 반폭 및 중심선 농도와 입자추적 모형에서 계산된 입자위치를 이용한 농도장을 중첩시킴으로써 전체 농도장을 구할 수 있다.

4. 실험결과 분석

4.1 단공확산관

Fig. 3은 수평부력제트가 주변흐름의 방향과 동일한 방향으로 방류되는 경우(CO 계열), 45°의 각을 이루어 방류되는 경우(OB 계열), 그리고 직각으로 방류되는 경우(CR 계열)에 대한 부력제트의 혼합거동에 대한 사진을 나타낸 것이다. 부력제트의 방류방향이 주변류에 대해 직각인 유속성분을 갖는 경우(OB, CR 계열)에는 주변흐름에 의한 강제유입이 발생하며, 부력제트의 궤적이 주변흐름의 방향에 따라 굴절되는 현상을 확인할 수 있다. 이와 같은 강제유입으로 인하여 동일한 방류조건 및 주변류조건에 대하여 수표면 최소희석률은 CR 계열이 가장 크고, OB 계열, CO 계열 순으로 나타난다(서일원 등, 2002).

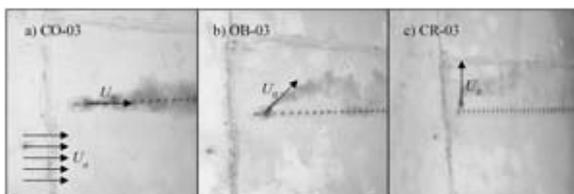


Fig. 3. 방류방향에 따른 단공부력제트의 궤적변화.

Fig. 4~6은 측정된 수표면 농도분포를 결합모형의 모의 결과와 비교한 것이다. 결합모형에서는 부력제트의 반폭과 중심선희석률을 이용하여 농도장을 계산하고, 이를 반영하여 매 초마다 1000개의 질량입자를 투입하여 120초동안 모의함으로써 정상상태의 해를 구하였다. 수평확산계수(E_H)와 연직확산계수(E_V)는 동방향 방류(CO 계열)에 대하여 계산된 플룸의 폭과 두께를 실험결과와의 비교를 통해 선정하였으며, 각각 E_H=2.0×10⁻³ m²/s, E_V=1.0×10⁻⁶ m²/s를 사용하였다(Kim 등, 2002; 김영도와 서일원, 2004). Fig. 4~6은 각각 CO 계열, OB 계열, CR 계열의 방류조건에 따른 실험 결과와 결합모형의 수치해석결과를 비교한 것이다. 실험 결과를 살펴보면, 방류방향과 주변수의 방향이 일치하는 CO 계열의 경우 k=0.06인 경우에 최대농도는 방류구에서 54d_p 지점이고, k=0.09인 경우에는 44d_p 지점이다. 반면에 수치

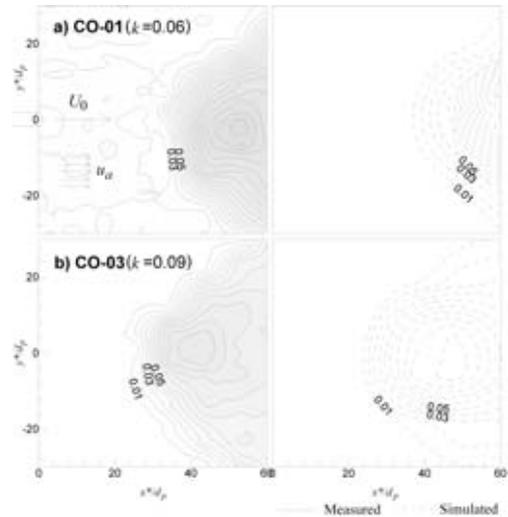


Fig. 4. 방류조건 및 주변수조건에 따른 수표면 농도장 비교(CO 계열).

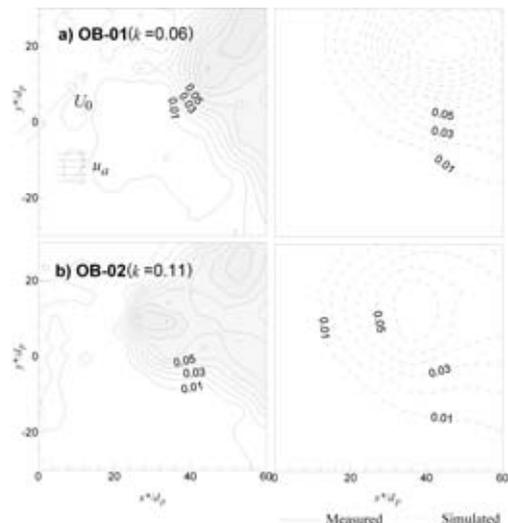


Fig. 5. 방류조건 및 주변수조건에 따른 수표면 농도장 비교(OB 계열).

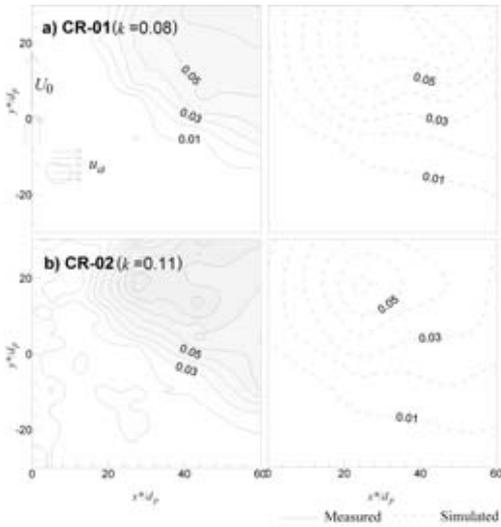


Fig. 6. 방류조건 및 주변수조건에 따른 수표면 농도장 비교(CR 계열).

해석 결과에서는 $k=0.06$ 인 경우에 $56d_p$ 지점이고, $k=0.09$ 인 경우에 $47d_p$ 지점이다. 이와 같이 최대농도가 발생하는 지점은 평균적으로 약 5% 정도의 오차가 발생하였지만, 전체 희석률이 100이 되는 부분에 대한 농도장의 형태는 그림 4에 나타난 바와 같이 매우 정확하게 모의하였다. 이는 방류조건이 다른 OB 계열과 CR 계열의 경우에도 유사하게 나타났으며, 전체적으로 결합모형은 방류조건 및 주변수조건에 따라 수표면 농도분포의 위치와 형태를 단일확산관에 대하여 정확하게 모의하였다.

4.2 장미형확산관

Fig. 7은 장미형확산관이 주변수의 흐름방향과 직각인 경우(PE 계열)에 대하여 밀도 Froude 수와 유속비에 따른 부력제트의 혼합거동에 대한 사진을 나타낸 것이다. PE 계열의 경우, 밀도 Froude 수와 유속비가 작은 경우는 개별적인

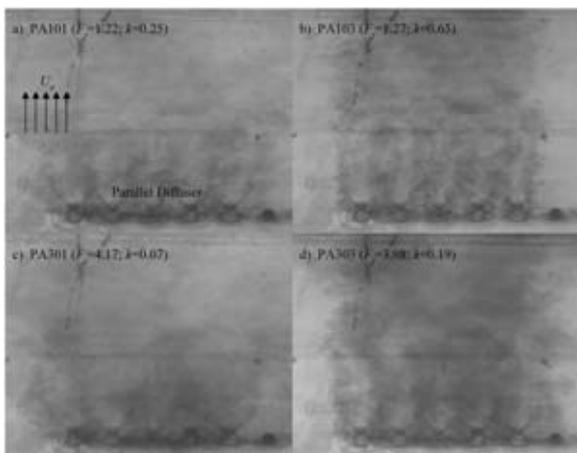


Fig. 7. 방류조건 및 주변수 조건에 따른 장미형확산관 혼합양상 (PE 계열).

부력제트들이 유도관에 인접하여 형성되며, 각 유도관주변의 플룸들은 확산관 축과 가까운 지점에서 수표면에 도달하며, 폭이 넓은 수표면 하수장을 형성하였다. 유속비가 증가함에 따라 하수장의 폭은 좁아지고 수표면 도달위치는 길어지는 것을 확인할 수 있었다. 밀도 Froude 수가 큰 경우에는 인접한 연직유도관에서 발생한 부력제트가 서로 가까워지며 유속비가 증가함에 따라 확산관 축에서 하류방향으로 먼 지점에 폭이 좁은 하수장을 형성하였다.

Fig. 8은 장미형확산관이 주변수의 흐름방향과 평행한 경우(PA 계열)에 대하여 밀도 Froude 수와 유속비에 따른 부력제트의 혼합거동에 대한 사진을 나타낸 것이다. PA 계열의 경우, 밀도 Froude 수가 작은 경우에는 양측면에서의 발생된 개별적인 부력제트들이 확산관 인근에서 병합되어 확산관 축을 따라 폭이 좁은 타원형 하수플룸을 형성하였다. 유속비가 증가함에 따라 하수플룸은 확산관 후면부에서 길게 나타났다. 밀도 Froude 수가 큰 경우에는 주변수 흐름방향에 수직인 방류운동량의 영향이 증가하고, 이러한 방류운동량의 증가로 인하여 양측의 플룸은 확산관 양쪽으로 분리되었다. 이와 같은 분리현상으로 인하여 확산관 축의 연장선 상에서 하류방향으로는 오히려 저농도의 구간이 나타난다.

Fig. 9는 장미형확산관이 주변수의 흐름방향과 직각인 경우(PE 계열)에 대한 수표면에서의 농도분포를 결합모형의 모의결과와 비교한 것이다. 수평확산계수와 연직확산계수는 단일부력제트에서 사용한 값과 동일한 값을 사용하였다. 또한 20개의 방류공이 위치한 지점에서 방류각도에 따라 개별적으로 제트적분 모형을 적용하여 하수플룸의 농도장을 구하였으며, 이를 반영하여 각 부력제트에 대하여 1000개의 입자를 매 시간간격마다 투입하였다. 결합모형은 밀도 Froude 수와 유속비에 따라 최대농도 발생지점 및 하수플룸의 수표면 농도장 형태를 잘 모의하였다.

Fig. 10은 장미형확산관이 주변수의 흐름방향과 평행한

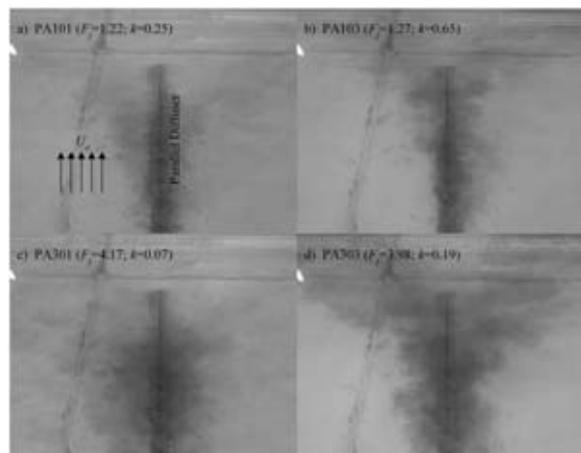


Fig. 8. 방류조건 및 주변수 조건에 따른 장미형확산관 혼합양상 (PA 계열).

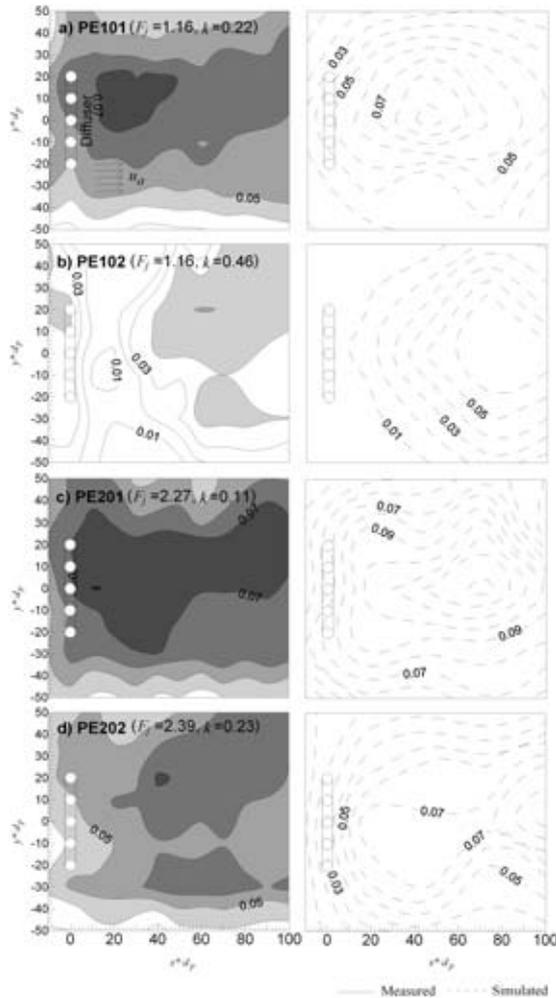


Fig. 9. 방류조건 및 주변조건에 따른 장미형확산관의 수표면 농도장 비교 (PE 계열).

경우(PA 계열)에 대한 수표면에서의 농도분포를 결합모형의 모의결과와 비교한 것으로서, 결합모형은 전체적으로 수표면에서의 농도분포 및 최대농도 발생지점을 잘 모의하였다. 실험에서 구한 수표면농도분포를 살펴보면 유속비에 비해서 밀도 Froude 수가 큰 경우에는 부력제트의 횡방향 유속성분이 주변흐름에 영향을 미치므로, 확산관 축을 중심으로 병합된 하수플룸이 양쪽으로 갈라지는 분리현상이 발생한다. 그러나, 모의결과를 살펴보면 결합모형은 이러한 분리현상을 정확하게 모의하지 못 하였다. 이것은 방류유량이 전체흐름에 미치는 영향이 작다고 가정하여 부력제트가 수표면에 도달한 이후에는 주변흐름에 의한 수동적 확산만을 모의하였는데, 이때 사용된 주변유속이 단면평균유속을 사용하였으므로 나타나는 결과이다.

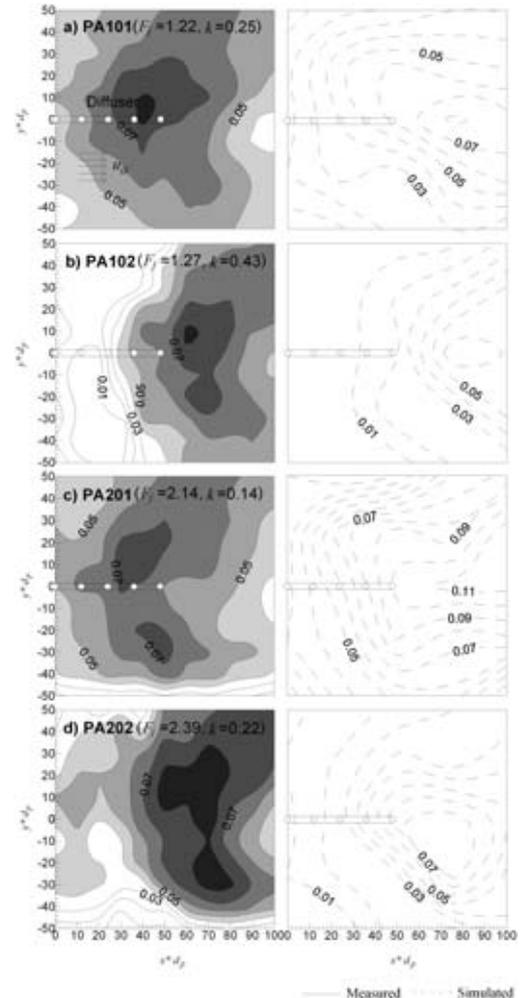


Fig. 10. 방류조건 및 주변조건에 따른 장미형확산관의 수표면 농도장 비교 (PA 계열).

결론

본 연구에서는 입자삽입법을 이용하여 기 개발된 근역-원역 결합모형(김영도와 서일원, 2004)을 검증하기 위해 다양한 조건에서의 수리실험을 수행하였다. 결합모형은 단공 확산관의 경우에 대하여 방류조건 및 주변수 조건에 따른 수표면 농도분포를 잘 모의하였다. 이와 같은 결합모형을 국내의 해양방류관에 있어서 대다수를 차지하는 장미형확산관의 적용성을 검토하였다. 제트적분모형을 이용해 장미형확산관의 각각의 방류구에서 개별 부력제트를 해석한 결합모형의 수치해석 결과는 밀도 Froude 수와 유속비에 따라 전반적으로 하수플룸의 최대농도 발생지점과 복잡한 수표면 농도장 형태를 잘 모의하였다. 그러나, 유속비에 비해서 밀도 Froude 수가 큰 평행확산관(PA 계열)의 경우, 방류 부력제트의 횡방향운동량의 영향으로 양측에서 발생한 부력제트

들이 확산관 후면부에서 분리되는 현상이 발생하였는데, 결합모형에서는 방류유량이 전체 흐름에 미치는 영향이 작다고 가정하여 부력제트가 수표면에 도달한 이후에는 단면평균유속에 의한 수동적 확산만을 모의함으로써 이러한 분리현상을 정확하게 구현하지 못 하였다.

본 연구에서는 기 개발된 결합모형을 국내의 해양방류 시스템에 널리 사용되고 있는 4공형태의 장미형확산관에 적용하여 이를 검증하였다. 장미형 하수확산관에서 방류된 부력제트들을 선플룸으로 가정한 후에 특성길이모형을 적용한 선행 연구의 결과에 의하면 방류인근 지점에서의 최대농도가 과소 예측되는데, 이는 장미형 하수확산관의 경우 근역모형의 적용함에 있어서 방류구 간격에 의한 영향을 무시할 수 없다는 것을 의미한다. 따라서 선플룸 해석보다는 본 연구에서와 같이 개별적인 부력제트 해석하는 결합모형을 적용하는 것이 타당하다고 판단된다.



감사의 글

본 논문은 2005년도 인제대학교 학술연구조성비 보조에 의해 수행되었기에 감사를 표합니다.

참고문헌

1. Davidson, M.J. (1989) *The Behavior of Single and Multiple, Horizontally Discharged, Buoyant Flows in a Non-turbulent Coflowing Ambient Fluid*. PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
2. Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J., and Brooks, N.H. (1979) *Mixing in inland and coastal waters*. Academic Press, New York.
3. Kim, Y.D. (2002) *Jet integral-particle tracking hybrid model for the mixing of wastewater from ocean outfalls*. PhD Thesis, School of Civil, Urban, Geosystems Engineering, Seoul National University.
4. Kim, Y.D., Seo, I.W., Kang, S.W., and Oh, B.C. (2001) Modeling the mixing of wastewater effluent discharged from ocean outfalls using a hybrid model. *Costal Engineering Journal*, World Scientific Publishing Co. & JSCE, Vol. 43, No. 4, pp. 259-288.
5. Kim, Y.D., Seo, I.W., Kang, S.W., and Oh, B.C. (2002) Jet integral-particle tracking hybrid model for single buoyant jets. *J. Hydr. Engrg., ASCE*, Vol. 128, No. 8, pp. 753-760.
6. Roberts, P.J.W. (1999) Modeling Malama bay outfall plumes, I: Near field, II: Far field. *J. Hydr. Engrg., ASCE*, Vol. 124, No. 6, pp. 564-583.
7. Roberts, P.J.W., Snyder, W.H., and Baumgartner, D.J. (1989) Ocean outfalls, I: Submerged wastefield formation, II: Spatial evolution of submerged wastefields, III: Effect of diffuser design on submerged wastefield. *J. Hyd. Div., ASCE*, Vol. 115, No. 1, pp. 1-70.
8. Wood, I.R., Bell, R.G., and Wilkinson, D.L. (1993) *Ocean Disposal of Wastewater*. World Scientific Publishing Co., Singapore.
9. Zhang, X.-Y. (1995) *Ocean outfall modeling - Interfacing near and far field models with particle tracking method*. PhD Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, MIT, Cambridge, MA.
10. Zhang, X.-Y. and Adams, E.E. (1999) Prediction of near field plume characteristics using far field circulation model. *J. Hydr. Engrg., ASCE*, Vol. 125, No. 3, pp. 233-241.
11. 강시환, 김영도, 김상익, 오병철 (2002) 해양 현장관측을 통한 속초 해양방류 하수플룸의 통계적 근역혼합 특성. 대한토목학회논문집, *대한토목학회*, 제 22권, 제 6-B호, pp. 843-850.
12. 김영도, 서일원 (2004) 영역모형들간의 결합을 통한 해양방류 시스템의 혼합거동 모의. *대한토목학회논문집*, 대한토목학회, 제 24권, 제 5B호, pp. 391-401.
13. 서일원, 권석재, 김영도 (2002) 흐름수역에서 수평부력제트의 거동해석. *대한토목학회논문집*, 대한토목학회, 제 22권, 제 3-B호, pp. 271-280.
14. 서일원, 여홍구, 이동섭, 류시완 (2000) 정체수역으로 방류된 수평부력제트의 병합특성. *대한토목학회논문집*, 대한토목학회, 제20권, 제4-B호, pp. 513-524.