

밀도성층화된 흐름수역으로 방류되는 해양방류관의 초기확산해석

Initial Mixing Analysis of Ocean Outfalls Discharged into Density Stratified Flowing Ambients

이 재 형* / 서 일 원**

Lee, Jaehyung / Seo, Il Won

Abstract

A numerical model is applied to analyze the mixing characteristics of an axisymmetric turbulent buoyant jet discharged into flowing stratified ambients. The numerical model is a Gaussian-vortex model which incorporates the effects of the vortex-pair known as the representative characteristics of far-field in flowing ambients. Six ocean outfalls that have field data for the initial dilution at the water surface are selected for testing the applicability of the developed numerical model. The comparisons of the observed initial dilutions and the simulated ones show that the developed numerical model could be used for the analyses of the initial mixings induced by the sewage diffuser discharged into the ocean.

Keywords: ocean outfall, turbulent buoyant jet, jet integral model, sewage diffuser, initial dilution

요 지

밀도성층화된 흐름 수역으로 방류되는 부력제트에 의한 초기확산을 해석하기 위하여 수치모형을 적용하였다. 수치모형은 제트적분모형으로서 흐름수역의 원역에서의 대표적 특성으로 밝혀진 쌍와흐름특성을 모형에 반영한 Gaussian-vortex모형이다. 수치모형의 현장 적용성을 검토하기 위하여 수표면에서의 초기희석에 대한 관측이 수행된 6개의 해양방류관에 수치모형을 적용하였다. 현장관측자료에 대한 수치모형의 적용결과, 개발된 수치모형이 하수확산관에 의해 해양으로 방류되는 오염물질의 초기 확산해석에 활용될 수 있음을 알 수 있었다.

핵심용어 : 해양방류관, 난류부력제트, 제트적분모형, 하수확산관, 초기희석

* (주)대우건설 항만단지설계팀 (전 서울대학교 토목공학과 박사과정)
Daewoo Corp., Seoul CPO Box 8269, 100-095, Korea (Former Ph.D. Student, Dept. of Civil Engrg.,
Seoul National Univ., Seoul 151-742, Korea)
(jhlee@mail.dwconst.co.kr)

** 서울대학교 공과대학 토목공학과 부교수
Assoc. Prof., Dept. of Civil Engrg., Seoul National Univ., Seoul 151-742, Korea

1. 서 론

해안도시 및 공단에서 발생하는 하수 및 폐수를 인근 해안에 방류하여 처리하는 방법은 방류지점의 해역 특성과 해역의 이용 현황을 적절히 고려하면 하수 및 폐수의 고도처리에 요구되는 시설과 비용을 줄이면서 해양을 하·폐수의 처리장으로 활용할 수 있다. Table 1은 일반적인 하수처리 방법에 의해 제거되는 하수의 성상을 나타내며 괄호안의 수치는 각 처리방법에 의해 얻어지는 수질개선 효과와 동일한 수질을 달성하는데 요구되는 희석(dilution ratio)을 나타낸 것이다. 이 표로부터 하수처리의 경우 약 100배의 희석을 확보할 수 있다면 하수처리장에서 3차처리를 하는 것과 같은 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이와 같은 원리를 이용하여 외국에서는 하·폐수를 해양방류관(ocean outfall)을 통해 해양으로 방류하여 처리하는 방법이 광범위하게 사용되어져 왔다(서일원 등, 1998).

해양방류관을 통해 방류되는 하수의 흐름은 하수와 해수와의 밀도차와 초기 방류운동량의 영향을 갖는 난류부력제트의 흐름형태를 띠게된다. 부력제트에 의한 오염물질의 희석은 방류구 인근역과 방류구로부터 멀리 떨어진 지점의 경우 다른 혼합기구에 의해 이루어진다. 제트유속과 주변수 유속의 차이에 따른 속도경사에 의해 발생하는 난류(jet induced turbulence)가 방류구 인근역에서의 희석을 결정하는 지배적인 인자가 되고 이 난류는 비교적 소규모 난류(small scale turbulence)이다. 방류구로부터 멀리 떨어진 지점에서

는 주변수가 갖고 있는 지구물리학적 난류(geophysical turbulence)가 오염물의 희석에 지배적인 인자로 작용한다.

본 연구는 난류부력제트의 형태로 방류되는 오염물질의 초기확산 예측에 대한 연구로 제트에 의한 소규모 난류에 의해 방류구 인근역에서 발생하는 초기확산 과정에 대한 것이다. 오염물질이 방류되는 유입수체는 밀도성층화된 흐름수역으로서 일반적인 해양환경을 고려한다. 본 연구에서는 이 유입수체에 방류되는 원형부력제트의 초기확산을 모의할 수 있는 수치모형에 관한 연구를 수행하였다.

2. Gaussian-Vortex 제트적분모형

Gaussian-vortex 제트적분모형의 근간이 되는 보존방정식은 제트영역 전체를 하나의 상사함수(similarity function)로 가정하는 기존모형들(Fischer 등, 1979; Muellenhoff 등, 1985)과는 다르게 본 연구에서는 제트영역을 Gaussian흐름영역과 쌍와흐름영역으로 영역을 분할한 후, 각 영역별로 Gaussian분포와 쌍와흐름분포(vortex-pair distribution)에 대한 각각의 상사함수를 분리 적용하여 유도하였다. 이와 같이 영역분할을 하는 이유는 제트단면의 유속분포가 제트의 진행에 따라 Gaussian분포에서 쌍와흐름분포로 변하고, 이에 따라서 제트의 유속구조, 확장율, 궤적, 그리고 희석 등 제트의 주요변수들이 흐름특성 변화에 따라 각 영역별로 상이한 특성을 보이기 때문이다(Wood 등, 1993; 이재형, 1999; 이재형과 서일원,

Table 1. The percentage removal of the constituent effluent by treatment processes and equivalent required dilution(Adapted from Macdonald, 1984)

처리기법 성상	1차처리				2차처리	3차처리			
	스크린, 0.5mm	스크린 + 부유	용존산소 부유	고효율 침전	일차 침전	생물학적 처리	화학적 처리	산화지	염소 소독
부유고형물	15 (1.2)	25 (1.3)	45 (1.8)	25 (1.3)	50 (2)	95 (20)	80 (5)	60 (2.5)	0 -
침전물질	55 (2.2)	80 (5)	90 (10)	95 (20)	95 (20)	99 (100)	99 (100)	99 (100)	0 -
부상물질	98 (50)	99 (100)	99 (100)	98 (50)	98 (50)	99 (100)	99 (100)	99 (100)	0 -
유지,기름	30 (1.4)	40 (1.7)	70 (3.3)	45 (1.8)	50 (2)	90 (10)	90 (10)	90 (10)	0 -
대장균	0 -	0 -	20 (1.3)	0 -	20 (1.3)	99 (100)	50 (2)	80 (5)	99.99
독성물질	0 -	0 -	0 -	0 -	20 (1.3)	50 (2)	50 (2)	50 (2)	-

1999a).

각 흐름영역에서 운동량보존과 부력보존에 대한 지배방정식은 기본적으로 경계층근사를 가정하고 정상상태와 비압축성 유체, 그리고 정수압 분포를 가정한다. 또한 난류흐름 상태를 가정하며 Boussinesq 근사 (Schlichting, 1979)를 가정하여 부력제트에 대한 지배방정식을 유도할 수 있다. 이에 대한 유도과정은 이재형과 서일원(1999a)에 자세히 설명되어 있고 유도된 지배방정식의 최종결과만을 수록하면 다음과 같다.

(1) Gaussian 흐름영역

제트의 초과유속분포와 부력분포가 Gaussian 분포 형태를 갖는 Gaussian 흐름영역에서 부력제트의 미소 요소에 대해 운동량보존식과 부력보존식을 구성하면 식 (1)~식 (3)을 얻을 수 있다.

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

$$\frac{d}{ds} [(I_m U_{eg}^2 b^2 + U_a \cos \gamma_r I_q U_{eg} b^2) \sin \alpha_r] = I_{\Delta} g_c' b^2 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{ds} (U_a \cos \gamma_r I_{\Delta} g_c' b^2 + I_{B\Delta} U_{eg} g_c' b^2) = \\ - \sin \alpha_r \frac{dg_a'}{dz} (I_q U_{eg} b^2 + U_a \cos \gamma_r \pi (1.65b)^2) \end{aligned} \quad (3)$$

이 식들에서 s 는 제트중심선을 따른 좌표, x 는 주변수 흐름방향과 평행한 직교좌표, y 는 x 축과 함께 평면을 이루는 직교좌표이고, z 는 연직방향의 직교좌표로 정의된다. U_{eg} 는 제트중심선에서의 초과유속, U_a 는 주변수 유속, b 는 제트의 반폭을 나타내고, $I_m, I_q, I_{\Delta}, I_{B\Delta}$ 는 형상상수(shape constant)이며 분포의 상사가정(similarity assumption)에 의해 정의되는 값이다. γ_r 은 초과유속벡터와 x 축이 이루는 각, α_r 은 초과유속벡터와 $x-y$ 평면과 이루는 각을 나타내는 변수이고, g 를 중력가속도, $\rho_a(z)$ 를 주변수 밀도, 그리고 $\rho_a(0)$ 을 방류구 높이에서의 주변수 밀도라 할 때 $g_a' = (\rho_a(0) - \rho_a(z)) / \rho_a(0) \cdot g$ 로 정의되는 변수이고, g_c' 은 제트중심선에서의 변환 중력가속도(reduced gravitational acceleration)이다. 또한 각 유속벡터들이 갖는 방향에 의해 식 (4)~식 (6)의 기하학적 관계식이 성립한다. :

$$\frac{dz}{ds} = \frac{U_{eg} \sin \alpha_r}{U_a \cos \gamma_r + U_{eg}} \quad (4)$$

$$\frac{dx}{ds} = \frac{U_a + U_{eg} \cos \gamma_r}{U_a \cos \gamma_r + U_{eg}} \quad (5)$$

$$\frac{dy}{ds} = \frac{U_{eg} \cos \alpha_r \sin \sigma_r}{U_a \cos \gamma_r + U_{eg}} \quad (6)$$

그리고 주변수 유입에 의한 부력제트 반폭의 확장은 식 (7)로 표현될 수 있다.

$$\frac{db}{ds} = k_s \frac{U_{eg}}{U_a \cos \gamma_r + U_{eg}} \quad (7)$$

여기서 확장계수 k_s 는 방류유속을 U_0 , 방류구의 연직각을 θ_0 로 정의할 때 식 (8)과 같이 방류각과 유속비의 함수로 제안할 수 있다.

$$k_s = \frac{0.11}{[1 - 0.9 \sin \theta_0 (U_a / U_0)^{0.16}]^2} \quad (8)$$

(2) 쌍와 흐름영역

제트단면내에 쌍와가 발생하는 쌍와 흐름영역에 대해 주변수 유속의 크기로 이동하는 제트 단면 요소에 대해 Lagrangian 방법을 이용하여 운동량보존식과 부력보존식을 유도한 결과는 식 (9)~식 (11)과 같다.

$$M \cos \gamma_r = M_T \cos \gamma_{rT} \quad (9)$$

$$M \sin \gamma_r = \frac{B_0 t}{U_a} + M_T \sin \gamma_{rT} \quad (10)$$

$$\frac{d}{dt} (I_{\Delta} g_c' b^2 \sin \gamma_r) = - U_{ev} \frac{dg_a'}{dz} (I_A b^2 \sin \gamma_r) \quad (11)$$

위 식들에서 t 는 시간을 나타내는 변수이고, U_{ev} 는 제트중심선에서의 초과유속, M 은 운동량, M_T 는 Gaussian 흐름영역에서 쌍와 흐름영역으로 천이하는 지점에서의 운동량, 그리고 B_0 는 방류수가 갖고 있는 초기 부력이다. $I_A, I_v, I_{\Delta v}$ 는 형상상수이고, γ_{rT} 는 천이지점에서 초과유속이 x 축과 이루는 각, 그리

고 σ_r 은 초과유속벡터의 $x-y$ 평면성분과 x 축이 이루는 각을 나타내는 변수이다. 또한 각 유속벡터들이 이루는 각에 의해 식 (12)~식 (14)와 같이 부력제트의 궤적을 추적할 수 있는 기하학적 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dx}{dt} = U_a + U_{ev} \cos \gamma_r \quad (12)$$

$$\frac{dy}{dt} = U_{ev} \cos \alpha_r \sin \sigma_r \quad (13)$$

$$\frac{dz}{dt} = U_{ev} \sin \alpha_r \quad (14)$$

그리고 쌍와흐름영역에서의 부력제트의 확장에 대해서는 식 (15)와 같이 초과유속에 비례하는 관계식이 성립한다.

$$\frac{db}{dt} = mU_{ev} = \frac{mM}{I_v b^2 \sin \gamma_r} \quad (15)$$

여기서 m 은 쌍와흐름영역의 확장계수로서 식 (16)과 같이 방류유속과 주변수 유속의 함수로 제안된다.

$$m = 0.3 \left[1 + \sin \gamma_{rT} \left(\frac{U_a}{U_0} \right)^{1/3} \right] \quad (16)$$

식 (3)과 식 (11)의 우변항은 주변수가 갖고 있는 수심방향의 밀도경사에 의해 발생하는 항으로서 부력을 감소시키는 역할을 한다. 즉 밀도성층이 존재하는 경우에는 제트가 갖고 있는 부력이 보존되지 않음을 의미하고, 이에 따라 수심방향의 밀도성층이 큰 경우는 오염원의 내부포착(internal trapping) 현상이 발생된다.

Gaussian 흐름영역과 쌍와흐름영역에 대한 적절한 천이식을 도입하고, 각 흐름영역에서의 7개 미지수 $U_{cg}(U_{ev})$, b , γ_r , g_c' , x , y , z 에 대해 상기 7개의 연립 상미분방정식을 풀면 각 영역에서의 해를 얻을 수 있는 수치모형을 구성할 수 있다(이재형과 서일원, 1999a; 이재형, 1999).

3. 수치모형의 검증

수심방향으로 밀도성층이 있고 흐름이 있는 수역으로 방류되는 부력제트에 대한 수리모형실험 자료에 수치모형을 적용하여 모형의 검증을 수행하였다. 사용된

실험자료는 Wright(1977)와 Fan(1967)의 수리모형실험 자료이다. Wright는 연직으로 방류되는 부력제트에 대한 실험을 수행하였고, Fan은 임의의 방향으로 방류되는 부력제트에 대한 모형실험을 수행하였다. 이들 실험에 대한 실험조건과 실험범위, 그리고 밀도가 균일한 흐름수역에서의 부력제트의 혼합거동에 대한 수치모형의 검증은 이재형과 서일원(1999b)에 자세히 서술되어 있다.

수치모형의 매개변수는 확장계수와 형상상수이다. 이들 값으로는 이재형과 서일원(1999b)에서 사용된 값들을 동일하게 적용하였고, 밀도성층이 존재하는 경우 제트적분모형의 수립과정에서 등장하는 형상상수 I_A 의 값은 분포형의 상사성을 이용하여 형상상수 I_A 의 값

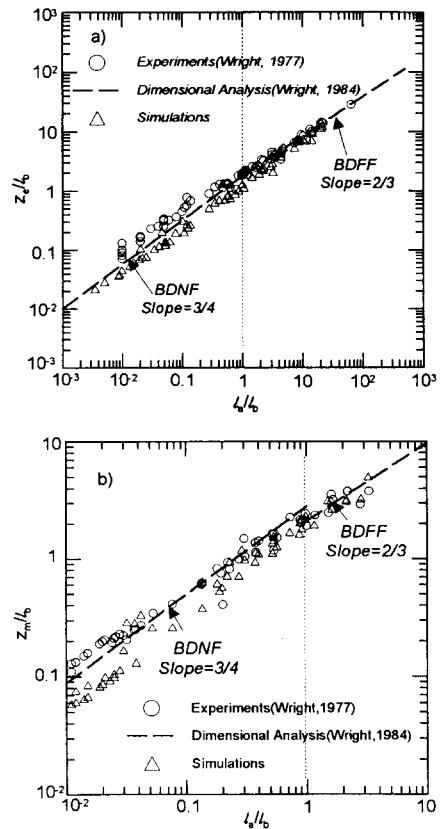


Fig. 1. Simulation Results for Buoyancy Dominated Flow of Vertical Buoyant Jets in Stratified Crossflow Ambients: a) Equilibrium Height of Rise, b) Maximum Height of Rise

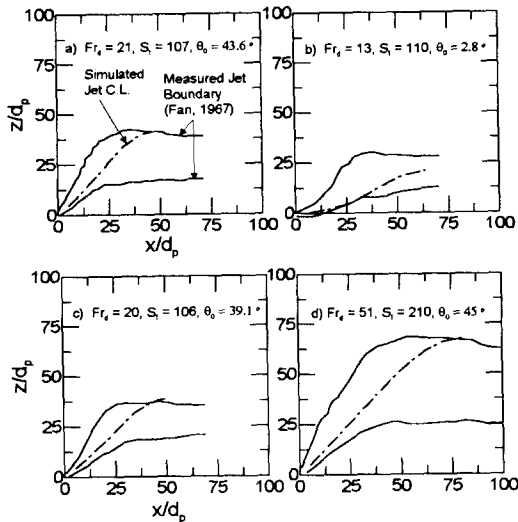


Fig. 2. Simulation Results of Trajectories of Inclined Buoyant Jets in Stagnant Stratified Ambients

과 동일한 값으로 가정하였다.

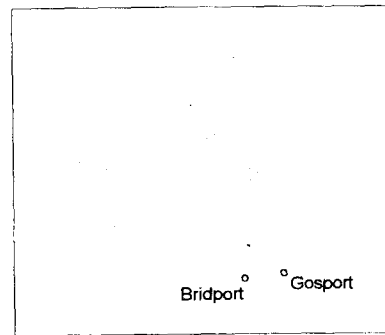
Fig. 1은 부력이 지배하는 영역에서의 평형상승고와 최대상승고에 대한 Wright의 실험결과와 수치모형의 결과를 길이축척을 사용하여 무차원화시켜 도시한 것이다. 그림에서 길이축척 $l_a (= U_a / \varepsilon^{1/2})$ 는 주변수 유속과 밀도성층의 크기의 비를 나타내는 길이차원을 갖는 변수이다. 평형상승고와 최대상승고에 대한 수치모형이 실험치 및 차원해석 결과를 만족스럽게 모의하고 있음을 알 수 있다. Fig. 2는 밀도성층 수역으로 임의의 각도로 방류되는 부력제트에 대한 실험결과와 수치모의 결과를 도시한 것이다. 실험자료는 사진을 이용하여 제트의 궤적을 촬영한 것으로 제트의 경계와 밀도성층이 존재하는 경우 발생하는 내부포착 현상을 잘 보여주고 있다. 중심선으로 표시된 수치모의 결과로부터 밀도성층의 크기 ($S_j = \Delta\rho_0 / (d_p \rho_a / dz)$)의 변화와 수평면으로 부터의 초기 방류각도 (θ_0) 변화에 따른 제트의 궤적변화를 수치모형이 비교적 만족스럽게 모의하고 있음을 알 수 있다.

4. 수치모형의 적용

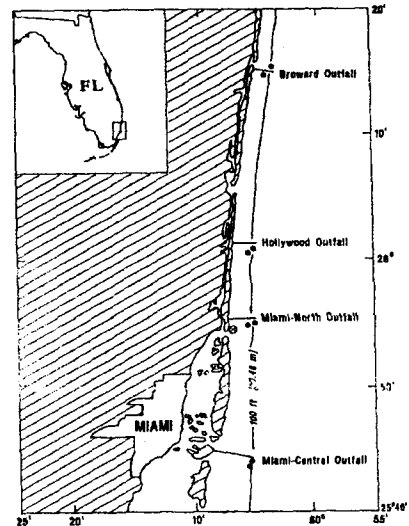
4.1 개요

수치모형의 현장 적용성을 검토하기 위하여 현장관측이 시행된 기존 해양방류관에 수치모형을 적용하여

모형의 결과와 관측자료를 비교하였다. 본 연구에서 사용한 현장 관측자료는 조류와 해류에 의한 주변수 흐름이 존재하고 계절에 따라 해저면과 수표면간의 온도차에 의한 밀도성층이 존재하는 수역에서 해저에 설치된 방류관을 통해 방류되는 하수의 희석 자료들이다. 일반적으로 단일확산관 혹은 다공확산관에 의해서 방류되는 오염물질의 오염운은 조류, 해류 등의 주변수와 파랑에 의해 영향을 받고, 궤적이 시간에 따라 매우 불규칙적으로 변화하는 특성을 갖고 있어서 오염운의 중심선, 폭, 농도분포 등 관련된 제트 변수값들을 측정하기가 매우 어렵다. 특히 초기희석의 대부분이 발생하는 방류구로부터 방류구 상부 수표면 구간에서의 희석의 측정은 방류수의 궤적과 오염장 중심의 위치가 고



(a) WRC Outfalls in United Kingdom



(b) SEFLOE II Outfalls in Florida, USA

Fig. 3. Location of Ocean Outfalls

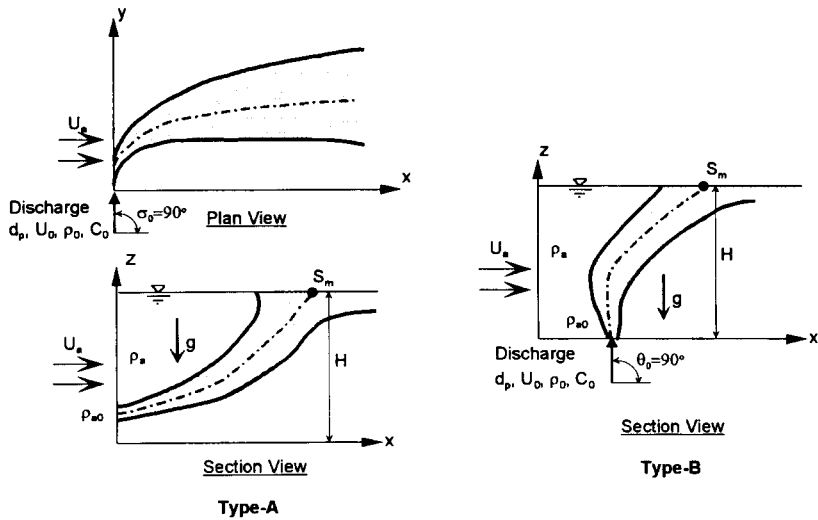


Fig. 4. Schematic Drawing of Outfall Configurations

정되어 있지 않고, 주변수 흐름과 파랑에 따라 위치가 이동하기 때문에 정확한 측정을 하는 것이 매우 어렵다. 따라서 현장 관측자료의 분산이 매우 큰 것이 보통이다(Lee와 Neville-Jones, 1987; Proni 등, 1994).

현재까지 현장에서 방류관에 의한 방류수의 궤적, 폭, 유속 분포, 그리고 농도 분포 등의 값들에 대한 정밀한 관측이 이루어진 경우는 없고, 주로 방류수가 수 표면과 접촉하는 면의 중심 위치에서 농도를 측정하였다. 대부분의 현장 관측에서 희석의 측정 위치는 방류관으로부터 배출된 방류수가 수 표면과 접촉하는 지점으로서 이 접촉면의 중심, 즉 오염장의 중심(sewage boil)에서의 값이다. 방류구로부터 방류수가 수 표면과 접촉하는 지점까지의 이 영역에서 발생하는 희석의 크기는 확산관의 방류 특성에 크게 의존한다. 따라서 이 영역의 끝인 수 표면에서의 희석의 값은 해당 확산관의 적정성을 판단할 수 있는 지표로 사용될 수 있으며, 이를 초기희석(initial dilution)이라 부르고, 오염장의 중심에서의 이 값을 최소희석(minimum dilution)으로 정의된다. 본 연구에서는 수 표면에서 특히, 오염장의 중심에서 측정된 최소희석에 주안점을 두고 현장 관측자료와 비교하였고, 이 값은 해양방류관의 설계에 있어서 가장 중요한 설계변수로 작용한다.

Fig. 3은 본 연구의 수치모형을 적용한 대상 해양방류관의 위치를 도시한 것이고, Fig. 4는 이들 해양방류관의 전형적인 방류형태를 개략적으로 나타낸 것

이다. 그리고 이들 방류관의 제원, 방류 조건과 주변수 조건의 평균 특성과 함께 부력제트의 거동에 지배적인 역할을 하는 변수들을 Table 2에 수록하였다. 방류수는 주변 해수에 비해 밀도가 작은 생활하수이고, 방류수와 해수와의 밀도차에 의해 연직방향의 부력이 발생되며, 이는 변환 중력가속도($g' = \Delta\rho/\rho \cdot g$)로 나타내고 이 값은 약 0.25 m/s^2 이다.

4.2 대상 해양방류관

4.2.1 WRC 해양방류관

영국에 설치되어 있는 Gosport, Bridport 방류관은 단일확산관으로서 수심(H)과 방류공 직경(d_p)의 비가 약 18 정도이고 방류관이 위치하고 있는 해역은 중심방향으로 밀도가 균일한 특성을 나타내고 있다. 방류 밀도 Froude수($Fr_d = U_0/\sqrt{g'd_p}$)는 하수확산관의 전형적인 범위인 1~2의 범위를 나타내고 있고, 방류 유속(U_0)과 주변수 유속(U_a)의 비($k = U_0/U_a$)는 0.5~4의 범위로서 방류유속에 비해 주변수의 유속이 매우 큰 해역에 위치하고 있다. 이러한 방류 특성과 주변수 특성으로 인하여 방류된 제트의 거동은 주로 부력과 주변수 흐름에 의해 지배되는 특성을 갖게 되고, 주변수 흐름이 희석 변화에 지배적인 영향을 미치는 인자로 작용하게 되며, 수 표면 근방에서의 희석은 부력지배원역(buoyancy-dominated far-field, BDF)

Table 2. Range of Design Parameters of Ocean Outfalls
(Adapted from Lee and Neville-Jones(1987) & Proni et al.(1994))

Outfall Parameter		WRC Outfalls		SEFLOE II Outfalls			
		Gospport	Bridport	Hollywood	Broward	Miami-Central	Miami-North
Discharge Parameters	U_0 (m/s)	0.41~0.45	0.36~0.45	0.48~1.06	0.99~1.44	0.78~1.18	0.40~0.87
	d_p (m)	0.91	0.38	1.52	1.37	1.22	0.61
	No. of Ports	1	1	1	1	5	12
	Diffuser Length (m) /Port Spacing (m)	-	-	-	-	39/9.8	110/12.2
	Dist. Offshore (m)	unknown	unknown	3,050	2,130	5,730	3,350
	$\Delta\rho/\rho_{\infty}$	0.025	0.025	0.025	0.025	0.026	0.026
	θ_0 (deg)	0	90	0	0	90	0
	σ_0 (deg)	90	0	90	90	0	90
Ambient Conditions	U_a (m/s)	0.11~0.81	0.10~0.29	0.09~0.40	0.08~0.35	0.07~0.53	0.08~0.45
	$d\rho_a/dz$ (kg/m ⁴)	-	-	0~0.01044	0~0.02708	0~0.01789	0.00735
	H_p (m)	15.5	7.2	27.0	32.5	28.2	29.0
Parameters	Fr_d	0.85~0.95	1.15~1.28	0.80~1.75	1.66~2.43	1.39~2.12	1.68~3.85
	$k = U_0 / U_a$	0.51~4.10	1.24~4.50	1.20~11.00	2.83~18.00	2.10~16.20	1.70~10.90
Dilution	Minimum Surface Dilution, S_m	14 - 183	41 - 225	15 - 68	15 - 68	14 - 45	19 - 72

에서의 회석특성을 갖게된다(이재형과 서일원, 1999b). Bridport 방류관은 주변수 흐름방향에 직각을 이루면서 연직방향으로 방류(Fig. 4, Type B)되는 반면, Gospport 방류관은 가로흐름이 작용하는 수역으로 해저와 수평하게 방류되는 형태(Fig. 4, Type A)를 갖게되어 방류수의 궤적은 3차원적인 특성을 나타낸다. 그러나 수표면에서의 회석이 BDFD의 특성을 갖는 경우는 수표면에서의 최소회석이 방류구의 방류방향에 영향을 크게 받지 않는 특성을 갖는다.

영국 Water Research Center에서는 1969년부터 1970년까지 영국내 5개 지점에 설치된 해양 하수방류관의 초기회석에 대한 관측을 수행하였다(Agg, 1978). 초기회석에 대한 지표로서 수표면에서의 최소회석을 측정하였고, 이 측정을 위한 관측 표본은 오염장의 중심에서 채취하였다. 염도, 대장균 그리고 방류수에 투입된 방사성 추적자(Br-82)의 방사선 농도를 수표면의 오염장 중심에서 측정함으로써 하수확산관에 의한 초기회석을 측정하였다. Lee와 Neville-Jones(1987)는 이들 확산관의 초기회석에 대한 관측자료를 정리하여 차원해석으로부터 유도된 회석 관계식의 계수를 추정하는데 이용하였다. 본 연구에서는 이들 방류관중에

서 단일확산관인 Gospport 방류관과 Bridport 방류관을 연구 대상으로 선정하여 수치모형을 적용하였고, 결과 비교를 위하여 사용된 수표면에서의 회석 관측자료는 원 관측자료를 정리, 분석하여 발표한 Lee와 Neville-Jones(1987)의 자료를 이용하였다. Gospport 방류관은 방류방향이 주변수 흐름에 직각이고 해저와 수평하게 방류되는 가로흐름하의 수평부력제트 문제로 해석될 수 있으며, Bridport 방류관은 가로흐름하의 연직부력제트 문제로 해석이 된다.

4.2.2 SEFLOE II 해양방류관

미국 Florida에 설치되어 있는 Hollywood, Broward, Miami-Central, 그리고 Miami-North 방류관의 경우에는 H/d_p 가 18~48, k 가 1~18의 범위를 나타낸다. 수심방향으로의 밀도성층은 미국 Florida해역에서 주로 여름철에 발생하고 있다. Miami-Central 방류관은 주변수 흐름방향에 직각을 이루면서 연직방향으로 방류(Fig. 4, Type B)되는 반면, 다른 방류관은 모두 가로흐름이 작용하는 수역으로 해저와 수평하게 방류되는 형태(Fig. 4, Type A)를 갖게되어 방류수의 궤적은 3차원적인 특성을 나타낸다.

미국 해양대기국(NOAA)은 South East Florida Outfalls Experiment II(SEFLOE II) 프로젝트에서 미국 Florida 남동쪽 해안에 위치한 4개소의 해양 방류관의 초기회석에 대한 광범위한 관측을 수행하였다(Proni 등, 1994). 이 해양방류관들의 방류수는 2차 처리된 생활하수로서 밀도는 약 0.998 g/cm^3 이다. 이 프로젝트의 대상 방류관중 Hollywood와 Broward 방류관은 단일확산관이고, Miami-Central과 Miami-North 방류관은 다공확산관이다. SEFLOE II에서 주된 측정항목은 방류관에 의해 방류된 하수가 수표면에 도달했을 때 이 수표면에서의 최소회석이었으며, 이 값들은 색소 실험과 염도 측정을 통해 관측되었다. 색소 실험에서는 오염장 중심의 수표면 밑 수면 아래 2m 이내 지점에서 표본을 채취하여 색소의 농도(C_m)를 측정 후, 처리장 최종 방류지점에서의 색소 투입농도(C_0)와의 비($S_m = C_0/C_m$)를 계산하여 초기회석을 결정하였다. 염도 측정에서는 전도도, 온도, 그리고 수심을 동시에 측정할 수 있는 CTD장비(conductivity-temperature-depth device)를 이용하여 오염장의 중심에서 수면 아래 1m 이내 지점에서 염도결손치(salinity deficit)를 측정하였다. 초기회석은 방류수의 염도결손치(Δs_e)와 오염장 중심에서의 최대 염도결손치(Δs_m)와의 비($S_m = \Delta s_e/\Delta s_m$)로 추정되었다. Hollywood 방류관과 Broward 방류관은 해저 바닥과 수평하고 주변수 흐름에 직각으로 방류를 하고 있고, 따라서 이들 방류관들은 가로흐름하에 수평으로 방류되는 부력제트 문제로 해석된다.

Miami-Central 방류관의 경우 방류공간의 간격과 수심과의 비는 $0.34(=9.8/28.2)$, 그리고 Miami-North 방류관의 경우는 $0.42(=12.2/29)$ 의 값을 갖는다. Lee와 Neville-Jones(1987)는 방류공간의 간격과 방류수심의 비가 1/3보다 큰 다공확산관의 경우는 단일확산관으로 해석해야 함을 제안한 바 있다. 이에 대한 이유는 방류공간의 간격이 수심에 비해 큰 경우 다공확산관의 각 방류공으로부터 방류된 제트가 병합이 일어나기 전에 수표면에 도달하는 형태를 갖게되거나, 혹은 각 방류공으로부터 방류된 제트간의 병합이 미미하여 병합현상이 수표면에서의 회석에 미치는 영향이 작기 때문에 각각의 방류공을 개별적인 단일확산관으로 해석해야 하는 것이다. 따라서 Miami-Central과 Miami-North 방류관에 대하여 인접 방류공간의 병합 효과를 고려하지 않은 본 연구의 수치모형을 적용하였

다. Miami-Central 방류관은 가로흐름하의 연직부력제트 문제로 해석되고, Miami-North 방류관은 가로흐름하의 수평부력제트 문제로 해석될 수 있다.

4.3 모형의 적용결과 및 분석

4.3.1 WRC 해양방류관

Gosport와 Bridport 방류관은 방류유속이 작고 방류수와 해수와의 밀도차에 의한 부력의 크기가 큰 방류특성을 갖고 있다. 또한 방류방향에 직각으로 흐르는 주변수 유속의 크기가 방류유속에 비해 매우 커서 방류와 동시에 주변수의 영향을 지배적으로 받는 흐름이 된다. 수심방향으로의 밀도변화가 거의 없는 수역으로 방류되는 이들 방류관의 제트 궤적은 수평방향(x-y 평면)으로는 방류방향과 직각으로 흐르는 가로흐름의 영향을 받아 방류와 동시에 주변수 흐름방향으로 만곡되고, 연직방향(x-z 평면)으로는 주변수 흐름에 의해 만곡되면서 수표면에 도달하는 형태가 된다. Fig. 5는 Gosport 방류관의 Exp. No. 3과 Exp. No. 8 조건하에서 수치모형으로부터 추정된 오염장의 궤적과 수표면에서 최소회석을 나타낸 것이다. Exp. No. 8의 경우에 비해 Exp. No. 3의 방류조건하에서 부력류 폭의 성장이 매우 빠르고 회석이 커서 수표면에서의 농도가 매우 작게 나타나게 된다.

회석에 대한 수치모의 결과에서 방류수가 수표면에 도달했을 때의 흐름형태는 Gosport와 Bridport의 일부 관측조건에서 부력이 지배하는 근역(buoyancy-

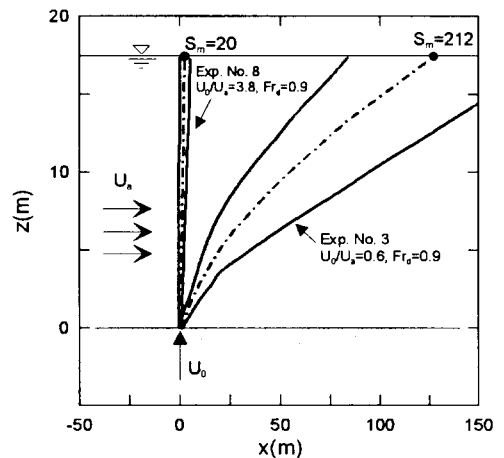


Fig. 5. Typical Wastefield Trajectory of Gosport Outfall

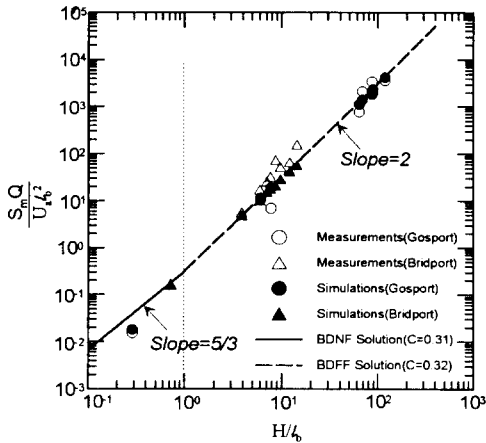


Fig. 6. Comparison of Simulated Surface Minimum Dilutions with Field Measurement Data of Gosport & Bridport Outfalls (Measured Data Source: Lee and Neville-Jones, 1987)

dominated near field, BDNF)에 속하는 것으로 모의되었다(Exp. No. 8). 이것은 BDNF에서 BDFF로 바뀌는 천이지점 보다 수심이 작기 때문이다. 그외 Gosport, Bridport 방류관의 모든 관측조건하에서는 수표면에서 BDFF가 되는 것으로 모의되었고(Exp. No. 3), 이것은 주변수에 의해 이송되면서 주로 부력에 의해 흐름이 지배되는 이송열의 흐름이다. Fig. 6은 수표면에서의 최소희석에 대한 수치모의 결과와 관측치의 평균값을 길이축척 $l_b (= B_0/U_b^3)$ 와 체적흐름률 $Q (= U_0 \pi d_b^2/4)$ 를 이용하여 무차원화시켜 나타낸 것이다. 또한 차원해석을 이용하여 유도된 BDNF와 BDFF의 희석 관계식과 이들 식의 계수값(Lee and Neville-Jones, 1987; Proni 등, 1994)을 함께 나타내었다. 그림으로부터 Gosport와 Bridport 방류관에 의한 수표면에서의 희석과정은 대부분 원역에 위치하고 있음을 알 수 있다. 또한 수치모형에 의해 계산된 수표면에서의 희석 값들이 현장 관측자료와 차원해석에 의한 희석 관계식이 나타내고 있는 부력지배영역에서의 희석 기울기 변화를 만족스럽게 모의하고 있음을 알 수 있다.

4.3.2 SEFLOE II 해양방류관

(1) 단일확산관

Hollywood와 Broward 방류관은 Gosport와

Bridport 방류관과 마찬가지로 방류유속이 작고 방류수와 해수와의 밀도차에 의한 부력의 크기가 큰 방류 특성을 갖고 있다. 하수의 방류위치에서는 계절별로 수표면과 해저의 온도차에 의한 밀도성층이 형성되기는 하나 밀도성층의 강도가 미미하고, 방류관의 크기에 비해 수심이 깊지 않아서 4개 해양방류관 모두에서 오염원이 수중에서 포착되는 현상은 발생하지 않고 수표면까지 상승하는 것으로 관측되었다. 수치모의 결과에서도 4개 방류관 모두 방류수의 궤적이 수표면까지 상승하는 것으로 예측이 되었다. 방류수의 궤적에 대한 수치모의 결과는 방류방향에 직각으로 흐르는 주변수 유속의 크기가 방류유속에 비해 매우 커서 방류와 동시에 주변수의 영향을 지배적으로 받는 제트 흐름이 되는 것으로 예측되었고, 수평방향(x-y 평면)으로는 방류방향과 직각으로 흐르는 가로흐름의 영향을 받아 방류와 동시에 주변수 흐름방향으로 만곡되고, 연직방향(x-z 평면)으로는 주변수 흐름에 의해 만곡되면서 수표면에 도달하는 형태가 된다. 따라서 수치모형으로부터 추정된 이들 4개의 방류관에 의한 방류수 궤적은 방류유속과 주변수의 유속비에 크게 의존한다.

Fig. 7과 Fig. 8은 Hollywood와 Broward 방류관의 수표면 최소희석에 대한 관측결과와 수치모형에 의해 계산된 희석을 함께 도시한 것이다. 이를 통해 알 수 있는 것은 수표면에서의 제트흐름이 대부분 $H/l_b < 1$ 인 BDNF에 해당된다는 것이다. 하수방류관으로서는 비교적 낮은 희석을 보이고 있는 것은 바로 방류수의 궤적이 수표면에 도달할 때 BDFF가 되지 못하기 때문이며, 이는 BDFF가 되어 방류수 궤적이 수표면과 접촉하는 Gosport와 Bridport 방류관의 예와 비교하면 흥미로운 사실이다. 수치모형은 근역과 원역에 있어 각 영역별로 희석의 기울기 변화를 정확하게 예측하고 있고, $H/l_b < 1$ 인 근역에서의 희석을 관측치보다 작게 예측하는 경향을 보이고 있으나 원역에서는 비교적 만족스럽게 예측하고 있음을 알 수 있다.

(2) 다공확산관

다공확산관의 형태를 갖는 Miami-Central 방류관과 Miami-North 방류관에 대한 수치모형의 적용결과는 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다. 단일방류관인 Hollywood와 Broward 방류관에서의와 마찬가지로 제트 궤적이 수표면에 도달할 때 대부분 부력이 지배하는 근역에 해당됨을 알 수 있다. 그림에서 $C = 0.15$

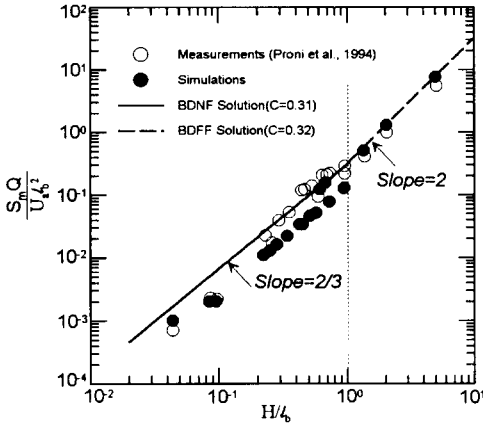


Fig. 7. Comparisons of Simulated Surface Minimum Dilutions with Measurements of Hollywood Outfall

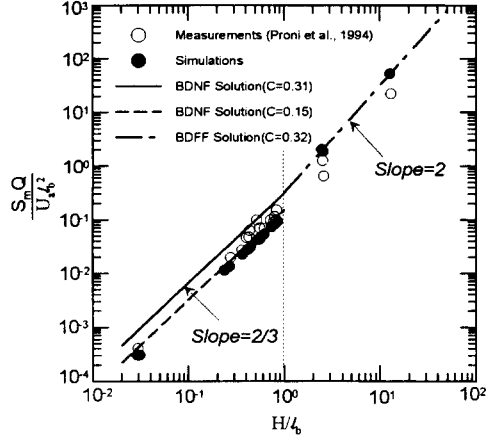


Fig. 9. Comparisons of Simulated Surface Minimum Dilutions with Measurements of Miami-Central Outfall

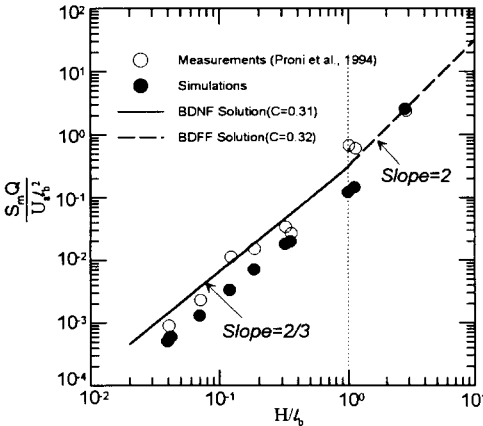


Fig. 8. Comparisons of Simulated Surface Minimum Dilutions with Measurements of Broward Outfall

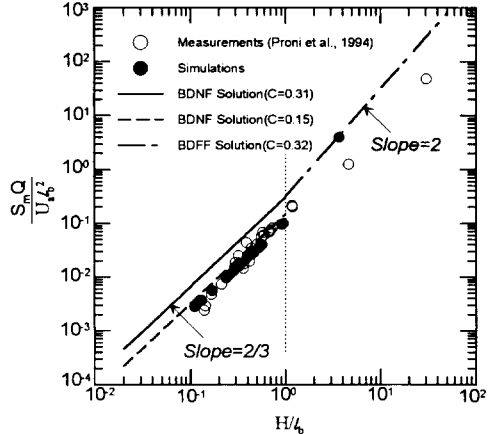


Fig. 10. Comparisons of Simulated Surface Minimum Dilutions with Measurements of Miami-North Outfall

의 값을 갖는 BDNF에 대한 회석 관계식은 Proni 등 (1994)이 다공확산관에 대한 현장 관측자료의 상관해석을 수행하여 다공확산관의 경우에 있어서는 단일방류관에 대한 실험자료 및 현장 관측자료를 사용하여 추정된 값인 0.31보다는 0.15를 사용하는 것이 더 적합함을 제시하였다. 수치모의된 회석이 부력이 지배하는 근역 영역에서 다공확산관에 대한 회석 예측식과 만족스럽게 일치하고 있음을 알 수 있고, 따라서 본 연구의 수치모형을 이용하여 다공확산관을 근사적으로 해석할 수 있는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 난류부력제트의 초기확산해석을 위해 수립된 Gaussian-vortex 제트적분모형(이재형과 서일원, 1999a)의 현장 적용성을 파악하기 위하여 개발된 수치모형을 현장 관측자료가 있는 실제 해양방류관에 적용하였다. Gaussian-vortex모형을 실제 해양방류관에 적용한 결과 수치모형이 실제 관측치를 만족스럽게 모의함을 알 수 있었다. 초기확산 과정중 주변수 흐름과 방류수가 갖고 있는 부력이 지배적인 회석인자

로 작용하는 부력이 지배하는 근역과 원역에서 수치모형이 기존의 연구결과와 관측치를 비교적 만족스럽게 예측하고 있음을 알 수 있었다. 또한 방류공간의 간격이 수심에 비해 큰 다공화산관의 경우에도 본 연구의 수치모형을 적용할 수 있음을 확인하였다. 그러나 밀도성층의 영향이 뚜렷한 현장관측자료에 대한 수치모형의 검증이 부족하였고, 향후 이에 대한 자료수집과 모형의 적용 및 보완이 후속 연구로 진행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

서일원, 이재형, 김창시(1998). "오염물질의 해양방류 기술(IV) : 하수화산관의 설계 및 시공", 한국수자원학회지, Vol. 31 No. 4, 78-88.

이재형(1999). 밀도성층화된 흐름수역으로 방류되는 원형부력체트의 혼합예측모형. 박사학위논문, 서울대학교.

이재형, 서일원(1999a). "난류원형부력체트의 혼합거동해석 : I. 수치모형의 개발." 대한토목학회 논문집 (심사중).

이재형, 서일원(1999b). "난류원형부력체트의 혼합거동해석 : II. 모형의 검증." 대한토목학회 논문집 (심사중).

Agg, A.R.(1978). "Initial Dilutions." *Investigations of Sewage Discharges to Some British Coastal Waters*, Chap. 6, Technical Report 99, Water Res. Center.

Fan, L.N.(1967). *Turbulent Buoyant Jets into Stratified or Flowing Ambient Fluids*. Rep. No. KH-R-15, Calif. Inst. of Technol., Pasadena, Calif.

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.

Lee, J.H.W., and Neville-Jones, P.(1987). "Initial Dilution of Horizontal Jet in Crossflow." *J. of Hydr. Engrg.*, ASCE, 113(5), pp. 615-629.

MacDonald, G.J.(1984). "Pretreatment of Effluents in Relation to Outfall Design and Operation." Joint Session on Coastal Outfalls, In *Water Supply and Waste Disposal for Large Industry*, *Proceeding Annual Conference*, New Zealand Water Supply and Disposal Assoc., New Plymouth.

Muellerhoff, 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.

Proni, J.R., Huang, H., and Dammann, W.P.(1994). "Initial Dilution of Southeast Florida Ocean Outfalls." *J. of Hydr. Engrg.*, ASCE, 120(12), pp. 1409-1425.

Schlichting, H.(1979). *Boundary Layer Theory*. McGraw-Hill, New York, 6th edition.

Wood, I.R., Bell, R.G., and Wilkinson, D.L.(1993). *Ocean Disposal of Wastewater*. World Scientific.

Wright, S.J.(1977). *Effects of Ambient Crossflows and Density Stratification on the Characteristic Behavior of Round Turbulent Buoyant Jets*. W.M. Keck Lab. of Hydr. and Water Res., Calif. Inst. of Technol., KH-R-36.

Wright, S.J.(1984). "Buoyant Jets in Density-Stratified Crossflow." *J. of Hydr. Engrg.*, ASCE, 110(5), pp. 643-656.

(논문번호:99-080/접수:1999.09.27/심사완료:2000.01.08)