

일방향 확산관에서 방류되는 병합부력제트의 거동

○류시완¹⁾ · 서일원²⁾

1 서론

하·폐수 및 온배수를 해양으로 방류하는 해양방류시설은 일반적으로 다수의 원형방류공들을 인접하여 설치한 다공확산관을 이용한다. 이러한 경우, 개별 방류공을 통해 방류된 방류제트는 진행해 나가면서 주변수를 유입하게 되고 제트 단면적의 증가가 이루어진다. 일방향확산관을 통해 방류된 제트는 방류구 인근에서는 개별제트들 간의 상호작용없이 축대칭제트의 거동을 보이나, 제트가 진행함에 따라 제트 단면이 증가하여 인접한 제트들간의 병합이 이루어지고 결국 평면제트의 거동을 나타내게 된다(Davidson, 1989). 이러한 병합과정으로 인하여 주변수가 유입되는 면적이 감소되고 다공확산관의 회석효율에 상당한 영향을 주게된다(Wang과 Davidson, 1999). 다공확산관을 통해 방류된 하수장의 거동을 파악하는데 있어서 개별 방류공들을 통해 방류된 흐름들 간의 상호작용 및 병합과정은 지금까지 명확히 구명되지 않았기 때문에, 체적흐름률이 같은 등평면제트를 가정해서 근사적인 해석을 해오는 실정이었으나 등평면제트가정을 통한 해석은 방류구 인근에서의 개별제트의 거동을 제대로 모의하지 못함에 따라 실제 방류제트의 거동과 상당한 오차를 나타내게 된다. 따라서 방류하수장의 병합거동을 구명하고 그를 바탕으로 하여 방류하수장 거동의 해석 및 예측에 있어서의 정확도를 개선할 필요성이 있다.

본 연구에서는 병합거동에 대한 심층적인 이해를 위하여 실험연구를 수행하였다. 실험연구에서는 수직, 수평으로 방류되는 병합부력제트의 거동을 수행하였으며, 제트의 진행에 따른 흐름특성치들의 변화를 관찰함으로써 개별제트들의 병합이 이루어지는 병합천이역을 정량적으로 규정하고자 하였다. 또한 방류 직후 병합과정에 의하여 평면제트의 거동으로 근사해 가는 병합부력제트의 거동을 정확하게 모의할 수 있는 제트적분모형을 구성하였다. 이를 통해 병합부력제트의 거동을 정확하게 구명하고 예측하고자 하였다.

2 이론적 배경

방류공간격이 p_s 인 일방향확산관을 통해 방류되는 병합부력제트는 그림 1에 보여지는 바와 같이 축대칭영역(axi-symmetric zone), 천이영역(transitional zone), 그리고 2차원영역(two-dimensional zone)을 거치면서 발달하게 된다. 일반적으로 제트의 경계로 농도나 온도와 같은 스칼라량이나 유속이 단면 최대값의 $1/e$ 의 값을 가지는 지점을 반폭, b 이라고 정의해 왔다. 축대칭제트의 경우 시간평균유속과 농도는 자기상사(self-similarity)를 나타내며 Gaussian함수를 통해서 표현될 수 있다. 평면제트의 경우에도, 유속 및 농도가 방류슬롯의 폭방향으로는 일정한 분포를 보이나 방류슬롯의 높이방향으로는 축대칭제트와 같이 Gaussian함수로 표현할 수 있으며 자기상사를 보인다(Kotsovinos, 1975). Wood 등(1993)은 병합부력제트의 유속 및 농도분포가 개별제트의 분포들의 중첩을 통해 표현할 수 있다고 주장하였다. 방류제트는 경계층에서의 난류운동에 의하여 주변수를 유입하여 제트반폭이 점차로 증가하게 되는데, 축대칭제트와 평면제트는 유속 및 농도분포가 자기상사를 따르므로 제트반폭은 진행거리에 비례하여 선형적으로 증가하게 된다. 그러나 병합부력제트는 방류 초기에 축대칭제트의 거동을 나타내다가 병합이 이루어진 후에는 평면제트의 거동을 보이므로, 반폭의 확장률은 축대칭제트와 평면제트의 값 사이에서 변화가 일어날 것으로 예상된다. 따라서, 확장률의 변화를 통하여 병합천이역을 규정할 수 있을 것으로 판단된다. Wood 등(1993)은 개별제트들간의 병합이 이루어지는 병합천이역을 병합정도 b/p_s 가 0.3에서 0.8에 해당하는 구간으로 정의하였다. Papps(1995)는 개별제트들 간의 병합이 이루어진 후에는 평면제트의 고유한 특징으로 알려진 와동현상(flapping motion)이 발생함을 관찰하였고, 와동현상의 발생지점을 통하여 병합천이역을 병합정도가 0.6에서 1.1에 해당하는 구간으로 정의하였다. 한편 병합부력제트의 경우 병합천이역에서 확장률이 변화하므로 유속 및 농도분포는 축대칭제트나 평면제트의 경우와 달리 더 이상 자기상사를 따르지 않게 된다.

3 적분모형

1) 한국건설기술연구원 수자원환경부 선임연구원 (minilite@kict.re.kr)

2) 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 교수 (seoilwon@plaza.snu.ac.kr)

일반확산관을 통해 방류된 병합부력제트의 거동모형을 위한 적분모형을 구성하기 위하여, 방류공을 통해 방류되는 제트흐름의 유속에 직각으로 존재하고 두 대칭평면 사이로 폭이 제한되며 r_1 방향으로의 길이는 무한한 검사체적(control volume)을 가정한다. 이러한 경우 수평, 수직방향 운동량흐름률과 부력흐름률에 대한 보존방정식은 각각 다음과 같이 수립된다.

$$\frac{d}{ds} [I_m U_c^2 b p_s \cos\theta] = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d}{ds} [I_m U_c^2 b p_s \sin\theta] = I_{\Delta} \Delta b p_s \quad (2)$$

$$\frac{d}{ds} [I_{q\Delta} U_c \Delta b p_s] = 0 \quad (3)$$

여기서, θ 는 방류수 궤적이 바닥과 이루는 각도이며 $I_m, I_{\Delta}, I_{q\Delta}$ 는 각각 운동량, 부력 그리고 부력흐름률에 대한 형상함수(shape function)로 검사체적 내의 유속 및 농도분포의 적분을 통해 결정된다. 한편, 제트흐름의 궤적과 속도 벡터들과의 관계를 통해 다음과 같은 기하학적 관계를 도출할 수 있다.

$$\frac{dx}{ds} = \cos\theta, \quad \frac{dz}{ds} = \sin\theta \quad (4)$$

일반적으로 적분모형에서 상미분방정식시스템의 완결을 위하여 다음과 같이 확장방정식을 완결방정식으로 사용된다.

$$\frac{db}{ds} = k \quad (5)$$

여기서 k 는 유속분포를 통하여 얻어지는 반쪽의 확장률이다.

이상에서 유도된 보존방정식과 기하학적 관계식, 그리고 확장방정식으로 구성된 6개의 상미분방정식에 대하여 6개의 미지수($U_c, \Delta, b, x, z, \theta$)를 구함으로써 궤적을 따른 임의의 지점에서의 중심선유속, 중심선부력, 그리고 제트반폭을 구할 수 있다. 또한 부력손실분을 통하여 중심선회석률을 구할 수 있다. 수학적 모형에서 수립된 지배방정식들은 그 해가 계산증분과 시간증분의 크기에 관계없이 안정적으로 구해지는 非堅固(non-stiff)상미분방정식 시스템이다. 따라서 본 연구에서는 4차의 정확도로 안정적 해를 얻을 수 있는 4차 Runge-Kutta기법을 이용하였다.

4 실험장치 및 실험조건

본 연구에서는 병합부력제트의 거동을 정밀하게 측정하기 위해서 PIV시스템을 이용한 유속측정과 열전대(thermocouple)를 이용하여 온도측정을 수행하였다. 실험수조는 길이 6.0 m, 폭 1.2 m, 높이 0.8 m로 측면 및 바닥면은 강화유리로 제작하여 PIV시스템을 위한 레이저의 투과 및 카메라에 의한 영상취득이 용이하도록 제작하였다. 실험수조 상단에는 이동레일을 설치하여 실험장치를 설치한 이송장치가 이동할 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 방류수와 주변수와의 밀도차를 재현하기 위하여 특별히 고안, 제작된 온수공급장치에서 공급되는 온수를 방류구에 공급되도록 하였다. 방류수의 유량은 오벌기어식 유량계(측정범위: 0.0064~0.139 l/s)를 이용하여 측정하였다. 확산관모형은 스테인레스스틸 재질의 장방향으로 길이 200 mm, 폭 420 mm, 높이 100 mm이며, 탈착이 가능한 전면부에는 15 mm 간격으로 직경 3 mm의 방류공을 설치하였다. 사용되지 않는 방류공은 전용캡으로 막음으로써 다양한 방류공간격의 실험이 가능하도록 하였다. 확산관모형과 유량공급관은 스트로폼판과 고무판을 이용하여 두 겹으로 감싸줌으로써 열원(heat source)으로 작용하지 않도록 하였다.

유속측정을 위한 PIV시스템은 두 대의 32 mJ/pulse의 Nd-YAG laser(Continuum Minilite PIV)와 CCD카메라(Kodak Megaplug 1.0 ES), 그리고 CCD카메라와 레이저의 동기화를 위한 동기장치(TSI-610034 Laserpulse synchronizer)로 구성되었다. 방류수에는 평균비중이 0.98 g/cc이고 직경이 8~12 μ m인 유리입자를 혼합한 후 레이저 광선을 투사하여 부유 중인 입자에 의해 반사된 레이저 광선을 CCD카메라를 이용하여 30 Hz로 20초간 영상을 취득하였다. 본 연구에서는 시차를 두고 취득된 두 개의 영상을 비교하여 영상에 기록된 입자들의 변위를 통해 유속장을 얻는 이중영상 교차상관기법(double-frame cross-correlation)을 이용하여 초당 15 Hz의 유속장자료를 취득하였다. 온도측정은 5개의 K-type 열전대(지름 0.32 mm)와 40채널 데이터로거(Keithley, EL2700)를 통하여 각 측정점에서 15 Hz로 20초간 수행되었다. 온도측정을 위한 열전대는 특별히 제작된 지지대에 고정하고 0.1 mm의 정밀도를 가지고 작동되는 자동이송장치를 이용하여 정확한 측정에 위치하도록 하였다.

본 연구에서는 수직방향(P-MV series)과 수평방향(P-MH series)으로 방류되는 병합부력제트에 대해서 각각 실험이 수행되었다. 각 실험케이스에 대하여 먼저 PIV 유속측정을 위한 영상을 취득한 후 온도측정을 수행하였다. 본 연구에서 수행된 실험조건은 표 1에 제시된 바와 같다.

5 결과분석

그림 2는 방류공으로부터의 거리에 따른 확장률과 반폭비의 변화를 보여주고 있다. 그림 2a)에 도시된 유속반폭의 확장률을 보면 $s/d_p = 15 \sim 50$ 인 범위에서 거의 선형적인 증가양상을 보임을 관찰할 수 있다. 그림 2b)와 c)에 제시된 온도반폭 확장률과 반폭비 또한 동일한 구간에서 선형적인 증가양상을 보인다. 따라서 그림 2를 통하여 확장률과 반폭비가 $s/d_p = 15 \sim 50$ 구간에서 축대칭제트의 값에서 평면제트의 값으로 변화함을 알 수 있다. 병합부력제트의 경우 개별제트간의 상호작용과 병합과정은 방류공간격에 영향을 받게된다. 따라서 병합정도 b/p_s 를 통하여 다양한 방류공간격을 가지고 방류되는 병합부력제트의 병합거동과 병합천이역을 표현할 수 있다. 그림 3은 병합정도에 대한 유속 및 온도반폭의 확장률 변화를 보여준다. 병합정도가 0.2인 곳을 병합이 이루어지기 전의 축방향제트거동영역 그리고 2.0인 곳을 병합이 완전히 이루어진 평면제트거동영역으로 가정하고, 두 곳에서 측정된 값을 통하여 도시하였다. 그림 3에서 k_{axi} 는 $b/p_s = 0.2$, k_{plane} 은 $b/p_s = 2.0$ 인 곳에서 측정된 확장률이다. 그림 3을 통하여 유속 및 온도반폭 확장률은 병합정도 b/p_s 가 0.3에서 1.2인 구간에서 축대칭제트에서 평면제트의 값으로 변화함을 관찰할 수 있다.

그림 4는 수평으로 방류된 병합부력제트의 궤적에 대한 관측치와 본 연구에서 관측된 병합천이역 및 흐름특성치 변화를 고려한 적분모형 모의결과를 비교한 것이다. 또한 Wood 등(1993)이 제안한 병합천이역을 바탕으로 한 모의 결과를 점선으로 함께 도시하였다. 그림 4를 통하여 본 연구를 통한 모의결과가 Wood 등(1993)의 결과보다 궤적모의에 있어서 정확함을 알 수 있다. 그림 5는 병합부력제트의 회석률에 대한 적분모형 모의결과를 관측치와 함께 도시한 것이다. 회석률 모의에 있어서는 본 연구에서의 모의결과와 Wood 등(1993)의 모의결과와의 차이는 크지 않으며, 두 결과 모두 관측치와 잘 일치함을 알 수 있다. 그러나 그림 5는 제트의 이동거리에 대한 회석률을 도시한 것으로서, 앞서 그림 4에서 살펴본 바와 같이 궤적의 길이가 정확하게 모의된 것을 전제로 할 때, 그림 5에 도시된 회석률 모의결과의 정확성이 의미를 가질 수 있다고 판단된다. 따라서 본 연구에서 제안한 병합천이역을 고려한 모의결과가 정확한 방류제트의 궤적을 모의할 수 있고, 그를 바탕으로 회석률 예측에서도 그 정확도가 개선되었다고 판단되는 바이다. 한편 그림 5의 관측치와 모의결과 모두에서 $s/d_p = 40 \sim 50$ 배되는 지점에서 회석률 증가상이 변화함을 관찰할 수 있다. 이는 개별제트들 간의 병합에 따른 유입면적감소에 기인하는 것으로 사료된다. 따라서, $s/d_p = 40 \sim 50$ 인 곳에 이르러 병합이 완전히 이루어지고 이후에는 평면제트의 거동을 나타냄으로써, 축대칭제트에서 병합천이역에서의 회석률 증가양상과는 다른 변화를 나타내는 것으로 판단된다.

6 결론

본 연구에서는 일방향확산관을 통하여 정제수역으로 방류되는 병합부력제트의 거동을 규명하고자 실험연구를 수행하고, 병합부력제트의 거동을 모의할 수 있는 적분모형을 구성하였다. 또한 실험결과와 적분모형 모의결과의 비교를 통하여 본 연구의 결과를 검증하고 그를 통한 병합부력제트 모의에 있어서의 개선효과를 살펴보았다. 실험연구결과, 유속 및 온도반폭의 확장률과 반폭비와 같은 흐름특성치들은 제트반폭을 방류공 간격으로 무차원화시킨 병합정도, b/p_s 가 0.3에서 1.2 사이에서 변화함을 관찰할 수 있었고, 이 구간을 병합천이역으로 정의할 수 있다고 판단된다. 이러한 병합천이역 내에서 흐름특성치들은 축대칭제트의 값에서 평면제트의 값으로 선형적으로 변화함을 관찰할 수 있었다. 본 연구에서의 실험결과 얻어진 병합천이역을 바탕으로, 수평으로 방류되는 병합부력제트의 궤적과 중심선회석률에 대한 적분모형 모의결과는 관측치와 상당히 잘 일치함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Davidson, M.J. (1989). The Behaviour of Single and Multiple Horizontally-discharged Buoyant Flows in a Non-turbulent Coflowing Ambient Fluid. *Report No. 89-3*, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
2. Kotsovinos, N.E. (1975). A Study of the Entrainment and Turbulence in a Plane Buoyant Jet, Ph.D. Thesis, W.M. Keck Laboratory of Hydraulic and Water Resources, California Institute of Technology, Pasadena, California, U.S.A.
3. Papps, D.A. (1995). Merging Buoyant Jets in Stationary and Flowing Ambient Fluids. Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
4. Wang, H.J. and Davidson, M.J. (1999). Modeling Merging Jets in a Coflowing Environment. XXVIII IAHR Congress, Graz, Austria (CD-ROM).
5. Wood, I.R., Bell, R.G., and Wilkinson, D.L. (1993). *Ocean Disposal of Wastewater*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.

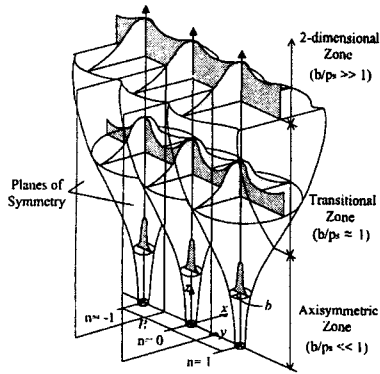
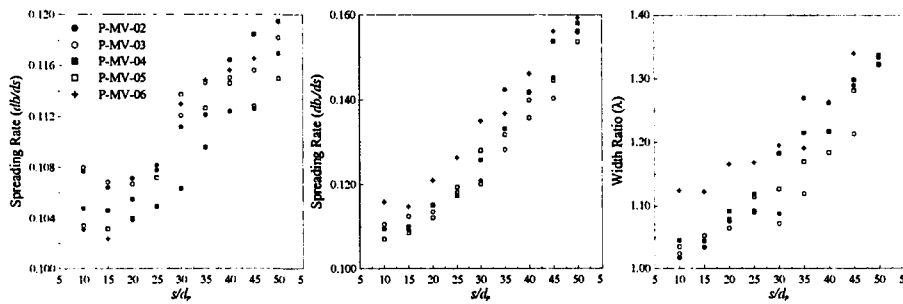


그림 1 일방향 병합부력제트의 거동

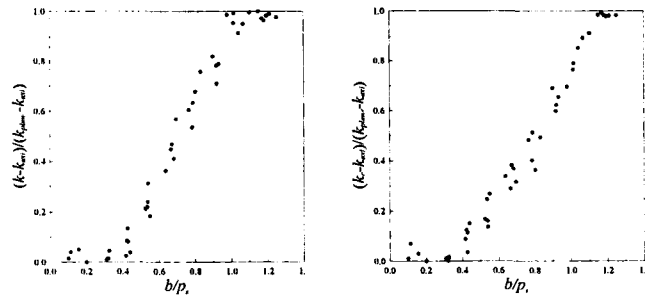
표 1 병합부력제트 실험조건

Case	H (m)	U ₀ (m/s)	Δ ₀ (m/s ²)	Fr ₀	Re ₀
P-MV-02	0.68	0.731	0.025	85.1	4,791
P-MV-03	0.68	0.675	0.640	48.7	5,352
P-MV-04	0.68	0.724	0.107	40.4	6,799
P-MV-05	0.68	0.710	0.156	32.9	7,530
P-MV-06	0.68	0.676	0.210	26.9	8,198
P-MH-01	0.68	0.403	0.043	35.3	2,260
P-MH-02	0.68	0.527	0.047	44.2	3,217
P-MH-03	0.68	0.858	0.100	49.6	4,438
P-MH-04	0.68	0.792	0.052	63.6	5,825
P-MH-05	0.68	0.848	0.003	312.5	2,286



a) 유속반폭 확장률 b) 온도반폭 확장률 c) 반폭비

그림 2 제트케직에 따른 흐름특성치 변화



a) 유속반폭 확장률 b) 온도반폭 확장률

그림 3 병합정도에 대한 확장률변화

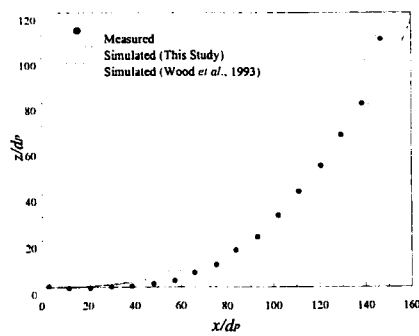


그림 4 중심선케직 (P-MH-01)

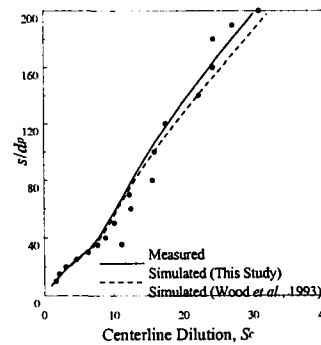


그림 5 중심선희석률(P-MH-01)