

정체수역으로 방류된 수평병합부력제트의 진동운동에 대한 실험적 연구

Experimental Investigation on the Flapping Motions of Horizontal Merging Buoyant Jet Discharged into Stationary Ambient Water

류시완* / 서일원**
Lyu, Siwan / Seo, Il Won

Abstract

A series of experiments has been performed to investigate the flapping motion, which has been generally considered as an intrinsic characteristic of plane flow, of the horizontal merging buoyant jet discharged into stationary ambient water. For horizontal merging buoyant jets, the flapping motions has been observed and the average onsets of flapping motion coincided with the start of merging transition. The Strouhal number, which describes the measure of frequency of vortices on the flow boundary with respect to the local properties of the flow, varies and converges to a constant value over merging transition. Considering the merging transition and the variation of local flow properties, the characteristics of flapping motion of plane flow can be applied to merging buoyant jets.

keywords : flapping motion, horizontal merging buoyant jet, merging transition, Strouhal number

요 지

본 연구에서는 정체수역으로 방류되는 수평병합부력제트에 대한 실험을 수행하여, 평면제트의 고유한 특징으로만 알려져 왔던 진동운동에 대해 구명하고자 하였다. 연구결과, 진동운동은 병합부력제트에서도 확인되었으며, 특히 병합천이역 시점에서부터 관찰되었다. 흐름의 국부적인 특성치와 진동운동을 야기하는 와의 통과빈도와와의 관계를 나타내는 Strouhal수는 병합천이역에서 변화하여 병합이 완전히 이루어진 후에는 일정한 값으로 수렴하는 것으로 관측되었다. 평면제트에 대해서 구해진 진동운동의 특성이 병합천이역과 국부흐름특성치의 변화를 고려할 경우, 병합부력제트의 진동운동도 나타낼 수 있음을 알 수 있었다.

핵심용어 : 진동운동, 수평병합부력제트, 병합천이역, Strouhal수

1. 서 론

일반적으로 연안도시의 하수처리장에서 배출되는 하·폐수나 발전소에서 배출되는 온배수를 해양에 방

류하는 경우, 해양생태계에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 방류수를 주변수체와 급속하게 혼합시킴으로써 방류수의 농도를 초기에 감소시키는 방법을 이용하게 된다. 이러한 수중방류시스템을 통하여 방류되는

* 창원대학교 공과대학 토목공학과 전임강사
Lecturer, Dept. of Civil Engrg., Changwon National Univ., Gyeongnam 641-773, Korea
(e-mail: minilite@sarim.changwon.ac.kr)

** 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 교수
Professor, School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ., Seoul 151-742, Korea
(e-mail: seoilwon@plaza.snu.ac.kr)

하·폐수장은 주변 해수와의 밀도차이로 인하여 부력을 가지는 부력제트의 거동을 나타내게 된다. 부력제트는 방류시스템의 기하학적 형상에 따라서 여러개의 방류공 배열을 통해 형성되는 다공제트와 슬롯을 통해 형성되는 평면제트로 구분될 수 있는데, 많은 연구자들에 의하여 각각의 흐름에 대해 심도있게 연구가 수행되어져 왔다(Papanicolaou and List, 1988; Kotsovinos, 1975 등). 다공제트의 경우 원형단면을 가지는 방류공을 통해 형성되는 축대칭제트의 연속적인 배열로서 해석이 될 수 있다. 방류 초기에는 개별제트들간의 상호작용이 미미하여 축대칭제트의 거동을 보이거나 제트가 진행해 나아감에 따라 주변수를 유입하여 제트단면의 확장되고 주변 제트들과의 병합(merging)이 일어난다. 완전한 병합이 일어난 이후에는 슬롯을 통해 방류된 평면제트와 유사한 거동을 보이게 된다(Davidson, 1988, Wood 등, 1993, Lyu, 2003, 등).

슬롯을 통해 방류되는 평면제트의 경우 축대칭제트와 비교하여 거동에 있어서 명확한 차이를 보이게 된다. 축대칭제트는 제트흐름 주위로 환상전단층(annular shear layer)이 형성되고 제트가 진행해 나아감에 따라 환상전단층이 계속적으로 발달하면서 주변수를 유입하여 제트 단면이 확장되고 방류수가 희석된다. Fig. 1에 도시된 평면제트의 경우 제트흐름 양쪽으로 두 개의 독립적인 평면전단층(plane shear layer)이 형성이 된다. 이러한 전단층 내에서 형성된 와는 제트의 진행과 더불어 발달하게 된다. Wagnanski와 Gutmark(1971)는 평면제트에 대한 실험을 통하여 두 개의 전단층에서 발생하는 와는

서로 독립적으로 발달하며, 와의 운동과 발달과정 사이의 상호연관성이 거의 없음을 규명하였다. 평면제트의 양쪽에 형성된 와들의 상대적인 위치에 따라서 제트흐름의 궤적이 영향을 받게 된다. Fig. 1에 도시된 바와 같이 평면제트의 전단층에서 형성된 각각의 와들이 서로 대칭적으로 배치가 되는 경우(Fig. 1a) 제트의 궤적은 직선이 되나, 서로 교차하여 위치하는 경우(Fig. 1b))에는 제트 궤적이 사행하게 되는 진동운동(flapping motion)이 나타나게 된다. 이러한 진동운동은 평면제트의 고유한 특징으로 축대칭제트에서는 관찰되지 않는다.

진출한 바와 같이 병합부력제트의 경우 완전한 병합이 이루어지면 평면제트의 거동을 따르게 된다. 따라서 병합이 완전히 이루어진 후에는 제트단면의 확장률과 중심선유속의 감쇠율 등 흐름특성치가 평면제트의 특성치로 수렴하게 된다. Fig. 2에 도시된 바와 같이 병합과정에 의하여 개별제트 주위에 형성된 환상전단층 또한 병합되고, 그 결과 평면제트와 같이 제트흐름에 의하여 구분되는 독립적인 평면전단층이 형성될 수 있다. 따라서 완전한 병합이 이루어진 후에는 병합부력제트에서도 진동운동이 관찰될 수 있음을 알 수 있다. Papps (1995)는 실험을 통하여 완전한 병합이 이루어진 다공제트가 진동운동을 나타냄을 관찰하였다.

일반적으로 다공제트의 거동을 해석함에 있어서 방류 초기 개별제트의 특성과 개별제트들 간의 복잡한 병합과정이 명확히 구명되지 않았기에 운동량이 동일한 평면제트로 가정하고 거동을 해석하는 등평면제트 가정이 널리 이용되어 왔다. 최근 들어 병합과정에 대한 이

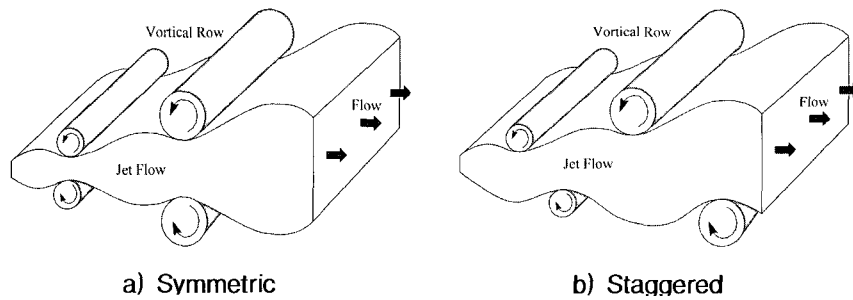


Fig. 1. Location of Large Vortical Structure

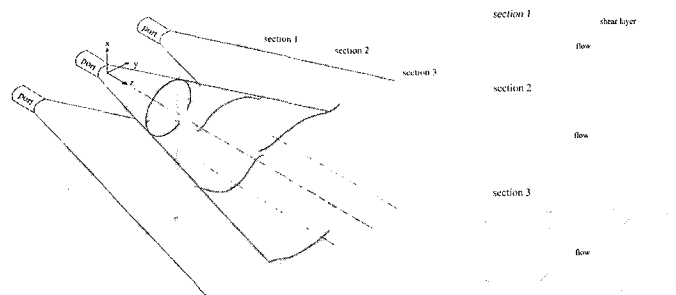


Fig. 2. Evolution of Shear Layers of Multiple Buoyant Jets

해와 관찰이 이루어져 제트 진행에 따라 '축대칭제트-병합천이역-평면제트'로 영역을 구분한 해석이 이루어지고 있는 실정이다. 이러한 경우 병합과정과 병합천이역에 대한 정확한 이해와 정의가 요구된다.

본 연구에서는 일방향 다공확산관을 통하여 정체수역으로 방류되는 병합부력제트의 진동운동에 대해 규명하고자 실험연구를 수행하였다. 실험을 통한 병합부력제트의 거동 관찰을 통하여 병합과정과 진동운동과의 관계를 규명하고 진동운동에 대한 이해를 얻고자 하였다.

2. 이론적 배경

평면제트의 진동운동에 대한 연구는 많은 연구자들에 의하여 수행되어져 왔다. Kotsovinos(1975)는 부력제트 실험을 통하여 평면제트의 진동운동을 관측하였으며, 방류수체의 무게중심과 부력중심의 불일치로 인한 현상에서 진동운동 야기된다고 주장하였다. 그러나 그러한 주장은 진동운동이 부력이 없는 운동량흐름에서도 관측됨에 따라서 그러한 주장의 부적절함이 제기되었다. Cervantes(1978)는 평면제트에서의 진동운동의 주기성을 관측하고, 다음과 같은 Strouhal수, S_t 를 도입하였다.

$$S_t = \frac{fb}{U_c} \quad (1)$$

여기서 b 는 특정지점에서의 제트의 반폭으로 제트중심에서 중심선유속의 $1/e$ 에 해당하는 유속이 관측되는 지점까지의 거리, f 는 특정단면에서의 와의 통과빈도(passing frequency), 그리고 U_c 는 특정단면에서의 제트의 중심선유속이다. 그는 실험결과 제트의 진행거리에 관계없이 $S_t = 0.1$ 로 일정한 값의 Strouhal수를 관측하였다. Goldschmidt 등(1983)은 유동가시화 장비를 이용한 실험을 통하여 평면제트의 전단경계층에서

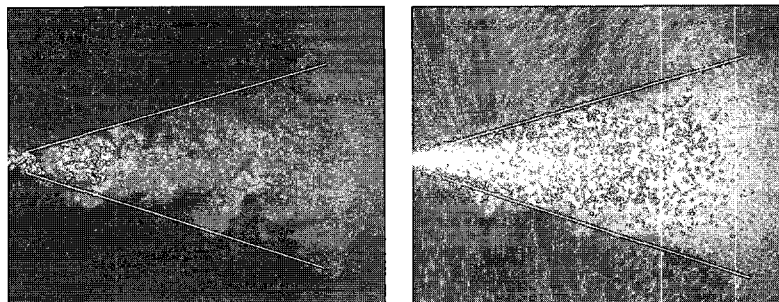
형성되는 와는 제트흐름의 반폭에 상응하는 길이규모를 가지며, 진동운동에 의해 야기되는 파형궤적의 파장 또한 제트반폭에 상응함을 관찰하였다. 또한 각각의 와는 중심선 유속의 약 60%에 해당되는 속도로 이송되는 것을 관찰하였다. Darcos 등(1992)은 실험을 통하여 Cervantes(1978)의 결과와 유사한 $S_t = 0.07$ 의 값을 얻었다.

일반적으로 부력제트의 주변수 유입현상은 대규모의 와운동(vortex motion)에 의하여 야기된다. 따라서 제트 경계층에서의 대규모 와의 발생은 부력제트의 회석거동에 지배적인 영향을 주는 요소가 된다. 경계층에서의 비대칭적인 와의 배치로 인해 야기되는 진동운동은 제트 궤적의 사행을 유발하고, 그로 인한 제트경계의 확장을 야기한다. Fig. 3은 정체수역으로 방류되는 일방향 다공부력제트의 영상을 보여준다. Fig. 3a)는 CCD 카메라를 통하여 얻어진 순간영상으로, 파형으로 진행해 가는 제트의 거동을 잘 보여준다. 함께 도시된 실선은 파형 궤적의 포락선(envelope)을 나타낸다. Fig. 3b)는 2초간 얻어진 30장의 순간영상을 중첩시킨 것으로, 이를 통하여 파형궤적의 포락선이 시간평균한 제트흐름의 폭이 됨을 확인할 수 있다. 따라서 진동운동은 제트 궤적의 사행을 유도하여 제트 경계를 궤적의 포락선으로 확장시키는 것으로 파악할 수 있다.

Dimotakis(1984)는 평면제트 경계에서 형성된 두 개의 평면전단층의 두께가 흐름두께와 비교하여 상대적으로 작고 서로 완전히 분리되어 독립적으로 발달한다고 가정하고, 하나의 경계층에서의 와의 간격, l_f 와 이송속도, u_f 를 각각 다음과 같이 제안하였다.

$$l_f = 0.68 \frac{|U_c - U_a|}{U_c + U_a} s \quad (2)$$

$$u_f = \frac{U_c \rho^{1/2} - U_a \rho_a^{1/2}}{\rho^{1/2} + \rho_a^{1/2}} \quad (3)$$



a) Instantaneous Image b) Overlaid Image (2 sec)
Fig. 3 Comparison of Instantaneous and Overlaid Images

여기서, U_a 는 주변수 유속, s 는 제트의 진행거리, ρ 는 방류수의 밀도, ρ_a 는 주변수의 밀도이다. 정체수역으로 방류되는 제트의 경우, $U_a = 0$ 이므로 위의 간격과 이송속도는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$l_f = 0.68s \quad (4)$$

$$u_f = \frac{U_c \rho^{1/2}}{\rho^{1/2} + \rho_a^{1/2}} \quad (5)$$

방류수와 주변수의 밀도차는 각각의 절대값의 크기에 비하여 상당히 작으므로 무시할 수 있다는 Boussinesq가정을 도입하면 식 (5)를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$u_f = \frac{U}{2} \quad (6)$$

식 (6)은 위의 이송속도가 중심선 유속의 50%가 된다는 것으로, Goldschmidt 등(1983)이 실험을 통하여 주장한 위의 이송속도가 중심선 유속의 60%에 해당한다는 내용과 상당히 일치하고 있다. 식 (4)와 (6)을 통하여 특정단면에서의 위의 통과빈도 f 는 다음과 같이 구해진다.

$$f = \frac{u_f}{l_f} = \frac{U_c}{1.36s} \quad (7)$$

따라서 식 (7)을 이용하여 Cervantes(1978)가 정의한 Strouhal수는 다음과 같이 표현할 수 있다

$$S_t = \frac{b}{1.36s} \quad (8)$$

일반적으로 축대칭제트와 평면제트는 모두 제트반쪽의 확장률(spreading rate, k)이 제트의 이동거리에 비례한다고 알려져 있다. 따라서 제트반쪽의 확장률은 다음과 같이 정의된다.

$$k = \frac{b}{s} \quad (9)$$

여기서 k 는 제트반쪽의 확장률이다. 평면제트에 대한 많은 연구 중에서 가장 널리 인용이 되고 검증이 된 Kotsovios(1975)의 연구결과, 평면제트의 확장률은 부력조건에 관계없이 0.120의 값이 제안되었다. 따라서 식 (8)과 (9)를 통하여 평면제트의 Strouhal수는 다음과 같

이 구해진다.

$$S_t = 0.088 \quad (10)$$

이는 Cervantes(1978)와 Dracos 등(1992)이 평면제트의 Strouhal수로 실험을 통하여 각각 제안한 0.1과 0.07과 비교할 때 상당히 일치하는 값이다.

Papps(1995)는 실험을 통하여 일방향확산관을 통해 정체수역으로 방류된 다공제트는 방류 초기에는 개별제트들 간의 상호작용이 없는 축대칭제트구간, 병합이 일어나는 병합천이역, 그리고 완전한 병합이 이루어진 병합영역으로 그 거동특성이 변화해 나감을 관찰하였다. Fig. 2에 도시된 바와 같이 비록 개별제트흐름은 서로 완전히 병합되지 않았더라도 개별제트 주변의 환상전단층은 병합된 흐름의 양쪽으로 서로 분리되어 독립적으로 발달할 수 있다(section 2). 따라서 서로 분리되어 독립적으로 발달해 나가는 평면전단층이 병합천이역에서부터 간헐적으로 발생할 수 있으며, 그 결과 병합천이역에서부터 평면제트의 고유한 특징으로 알려진 진동운동이 발생할 수 있다고 판단된다. 일반적으로 다공제트의 병합강도를 나타내기 위하여 제트반쪽을 방류공 간의 간격, p_s 로 무차원화시킨 병합정도(degree of merging, b/p_s)를 도입한다. 따라서 평면제트에 대하여 유도된 식 (8)을 두 개의 전단층이 서로 분리되어 독립적으로 발달하기 시작하는 병합 시점에서부터 적용해보면, 식 (8)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$S_t = \frac{1}{1.36} \frac{b/p_s}{(s-s_i)/p_s} \quad (11)$$

여기서 s_i 는 방류구로부터 병합시점까지의 거리이다. 식 (11)에서 제트의 진행거리를 반쪽확장률을 이용하여 표현하면, 병합정도를 이용한 다음과 같은 형태로 표현된다.

$$S_t = 0.735 \frac{b/p_s}{\frac{(b/p_s)}{k} - \frac{(b/p_s)_i}{k_i}} \quad (12)$$

여기서, 아래첨자 i 는 개별제트들 간의 병합이 일어나는 병합시점에서의 값을 나타낸다.

3. 실험장치 및 실험조건

3.1 실험시설 및 방류구모형

본 연구에서는 일방향 다공확산관을 통해 정체수역

으로 방류되는 다공부력제트의 진동운동을 정밀하게 측정하기 위해서 PIV시스템을 통한 유속측정과 유동가시화기법을 이용하여 실험을 수행하였다. 실험수조는 Fig. 4에 도시된 바와 같이 길이 6.0 m, 폭 1.2 m, 높이 0.8 m로, 측면 및 바닥면은 강화유리로 제작하여 영상취득이 용이하도록 제작하였다. 본 연구에서는 방류수와 주변수와의 밀도차를 재현하기 위하여 특별히 고안, 제작된 온수공급장치에서 공급되는 온수를 방류구에 공급되도록 하였다. 온수공급장치는 온도조절장치가 부착된 예열수조부분, 정온유지기능과 월류를 통한 정수유지기능을 갖춘 정수두수조부분으로 구성되어 있다. 정수두수조에서 방류되는 유량은 방류수 공급관을 통하여 방류구로 공급된다. 방류수의 유량은 오벌기어식 유량계(측정범위: 0.0064~0.139 l/s)를 이용하여 측정하였다.

확산관모형은 스테인레스스틸 재질의 장방형으로 길이 200 mm, 폭 420 mm, 높이 100 mm이며, 탈착이 가능한 전면부에는 15 mm 간격으로 직경 3 mm의 방류공을 설치하였다. 사용되지 않는 방류공은 진용캡으로 막음으로써 다양한 방류공간격의 실험이 가능하도록 하였다. 확산관모형과 유량공급관은 스트로폼판과 고무관을 이용하여 두 겹으로 감싸줌으로써 열원(heat source)으로 작용하지 않도록 하였다.

3.2 계측장비

본 실험에서 이용한 유동가시화장비는 유속측정에

사용되는 PIV 시스템을 이용하였다. 본 연구에 사용된 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. PIV를 통한 유속장 측정과 방류제트의 거동을 명확하게 영상으로 얻기 위하여 방류수에는 평균비중이 0.98 g/cc이고 직경이 8~12 μm 인 유리입자를 혼합한 후 레이저 광선을 투사하여 부유 중인 입자에 의해 반사된 레이저 광선을 CCD카메라를 이용하여 30 Hz로 20초간 영상을 취득하였다.

3.3 실험방법 및 조건

본 연구에서는 PIV를 통한 유속측정을 수행하고, 유속측정을 위해 취득된 영상 중에서 초당 15 프레임의 영상을 통해 진동운동의 시작점과 경계층에서의 와의 위치를 분석하였다. 본 연구에서 수행된 실험케이스는 방류초기의 운동량과 부력의 상대적인 중요도를 나타내는 밀도프루드수(densimetric Froude number) Fr_0 를 기준으로 선정되었으며, 방류공간격은 방류공 직경의 10배(30mm)로 유지하였다. Table 1은 본 연구에서 수행된 실험조건을 보여준다. Table 1에서 보여지는 바와 같이 방류 레이놀즈수는 2,260~5,825의 범위에 있으며, 이는 난류흐름을 충분히 보장하는 것으로 판단된다.

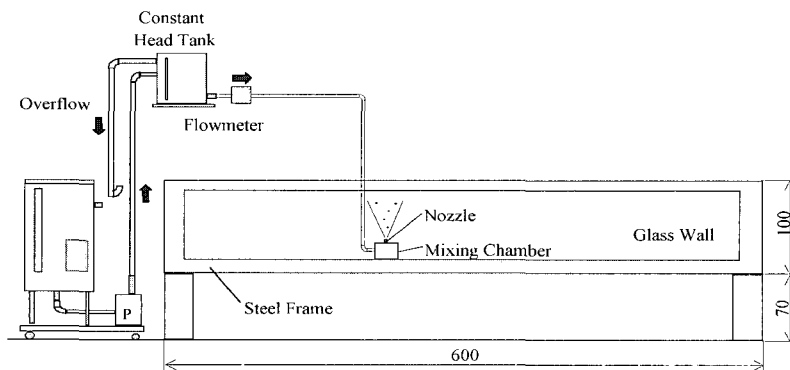


Fig. 4 Experimental Tank (unit: cm)

Table 1. Experimental Conditions

Case	H (m)	U_0 (m/s)	$4b$ (m/s ²)	Fr_0	Re_0
MH-01	0.68	0.403	0.043	35.3	2,260
MH-02	0.68	0.527	0.047	44.2	3,217
MH-03	0.68	0.858	0.100	49.6	4,438
MH-04	0.68	0.792	0.052	63.6	5,825
MH-05	0.68	0.848	0.003	312.5	2,286

4. 결과분석

Fig. 5는 15 Hz로 연속적으로 얻어진 순간영상들을 보여주고 있다. Fig. 5에서 보여지듯 제트의 경계층에서 계속적으로 와가 발생하여 제트진행과 더불어 발전해가고, 방류제트의 궤적은 경계층에 형성된 와들로 인하여 방류구로부터 방류공직경(d_p)의 30~40배에 이르는 곳에서부터 사행을 하게된다. Table 2는 각 실험케이스에서의 평균적인 진동운동의 시작점을 보여주고 있다. Table 2에 제시된 바와 같이 진동운동의 시점은 실험조건에 관계없이 $b/p_s=0.4$ 정도의 거의 일정한 지점에서 관찰되었다. Lyu(2003)는 병합부력제트의 유속 및 농도반폭 증가율(spreading rate)의 변화를 병합정도에 따라 관찰하고, 이를 통하여 spreading rate가 축대칭제트의 값에서 평면제트의 값으로 변화하는 구간인 $0.3 < b/p_s < 0.4$ 을 병합천이역으로 정의하였다. Table 2에서 제시된 진동운동 시점인 $b/p_s=0.4$ 은 Lyu에 의해 제안된 병합천이역의 시점과 거의 일치하는 값이다. Papps(1995)는 실험을 통하여 개별제트들이 완전히 병합이 이루어진 후에 진동운동이 나타난다고 주장하였다. 그러나 그의 실험에서는 자기비디오카메라(magnetic video camera)를 통한 영상 취득으로 병합천이역에 짧은 주기로 나타나는 진동운동을 정확히 파악하지 못한 결과로 판단된다. Fig. 5a)에서 관찰된 제트경계에서의 각각의 와에 1~10의 일련번호를 부여하고 이후 영상에서 각각의 진행과 발달양상을 살펴보았다. Fig. 5a)에서는 각각의 와가 서로 분리된 두 개의 경계층에서 완벽하게 교차하게 위치하여 제트 궤적의 진동운동이 확실하게 관찰된다. 이후 영상들에서 제트의 진행에 따라 국부적으로 와들이 대칭적으로 위치하거나 교차하여 위치하는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 5f)에서는 1번과 3번 그리고 2번과 4번 와가 서로 병합하여 더 큰 규모의 와로 발달해 가는 것을 관찰할 수 있다. 또한 Fig. 5j)에서는 6번과 8번 와가 서로 병합하는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 와들의 병합과정을 통하여 제트가 진행함에 따라 더욱 큰 규모의 와가 형성된다. 일련번호가 부여된 와들 이외에도 시간이 경과함에 따라 새로운 와들이 발

생하고 국부적으로 진동운동을 야기하는 것을 관찰할 수 있다.

Fig. 5를 통하여 제트가 진행할수록 각각의 와들 사이의 간격이 커지고 이송속도가 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 이는 식 (4)와 (6)이 나타내는 바와 일치하는 것으로, 제트 진행거리가 증가하고 중심선유속이 감소함에 기인하는 것으로 판단된다. 각각의 실험케이스에 대하여 특정단면에서의 통과빈도를 측정하여 Fig. 6에 도시하였다. Fig. 6에 도시된 결과는 식 (7)이 나타내는 바와 같이 특정단면에서의 와의 통과빈도는 제트 진행거리가 증가할수록 짧아지는 것을 보여준다.

Fig. 7은 Strouhal수의 측정값을 병합강도에 대하여 식 (12)을 통한 계산치와 함께 도시한 것이다. Cervantes(1978)와 Dracos 등(1992)은 평면제트에 대해서 각각 0.1과 0.07의 일정한 값의 Strouhal수를 실험을 통하여 제안하였다. 그러나 Fig. 7에 도시된 바와 같이 본 연구에서 측정된 Strouhal수는 병합정도가 0.4~1.2인 구간에서 점차 감소하여 특정한 값으로 수렴해 나감을 알 수 있다. 일반적으로 축대칭제트와 평면제트는 흐름의 진행과 관계없이 유속 및 농도반폭확장률이 일정하게 관측되며, 이는 흐름이 자기상사성(self-similarity)을 나타내는 것에 기인한다. 그러나 다공제트의 경우 방류초기에는 축대칭제트의 확장률을 따라 흐름이 발달하나 병합천이역을 거치고 완전한 병합이 이루어진 후에는 평면제트의 확장률을 따르게 된다 (Davidson, 1988; Wood, 1993). 따라서 흐름의 자기상사성이 흐름역 전체에 걸쳐서 나타나지 않으며, 특히 축대칭영역에서 평면제트의 특성으로 변화해가는 병합천이역에서는 자기상사성이 전혀 나타나지 않는다 (Papps, 1995; Lyu, 2003). Strouhal수는 특정단면에서의 국부흐름특성치와 진동운동을 야기하는 와의 통과빈도와와의 관계를 나타내는 척도로 파악할 수 있다. 따라서 병합부력제트의 경우, Cervantes(1978)와 Dracos 등(1992)이 평면제트에 대해 일정한 Strouhal수를 측정한 것과 달리 Strouhal수가 제트 진행과 병합정도에 따라 변화하는 것은 이러한 병합천이역에서의 국부흐름특성치의 변화에 기인하는 것으로 판단된다. 이는 식 (12)를

Table 2. Onsets of Flapping Motions

Case	Densimetric Froude Number, Fr_D	Onset of Flapping Motion, b/p_s
MH-01	35.3	0.41
MH-02	44.2	0.43
MH-03	49.6	0.38
MH-04	63.6	0.44
MH-05	312.5	0.42

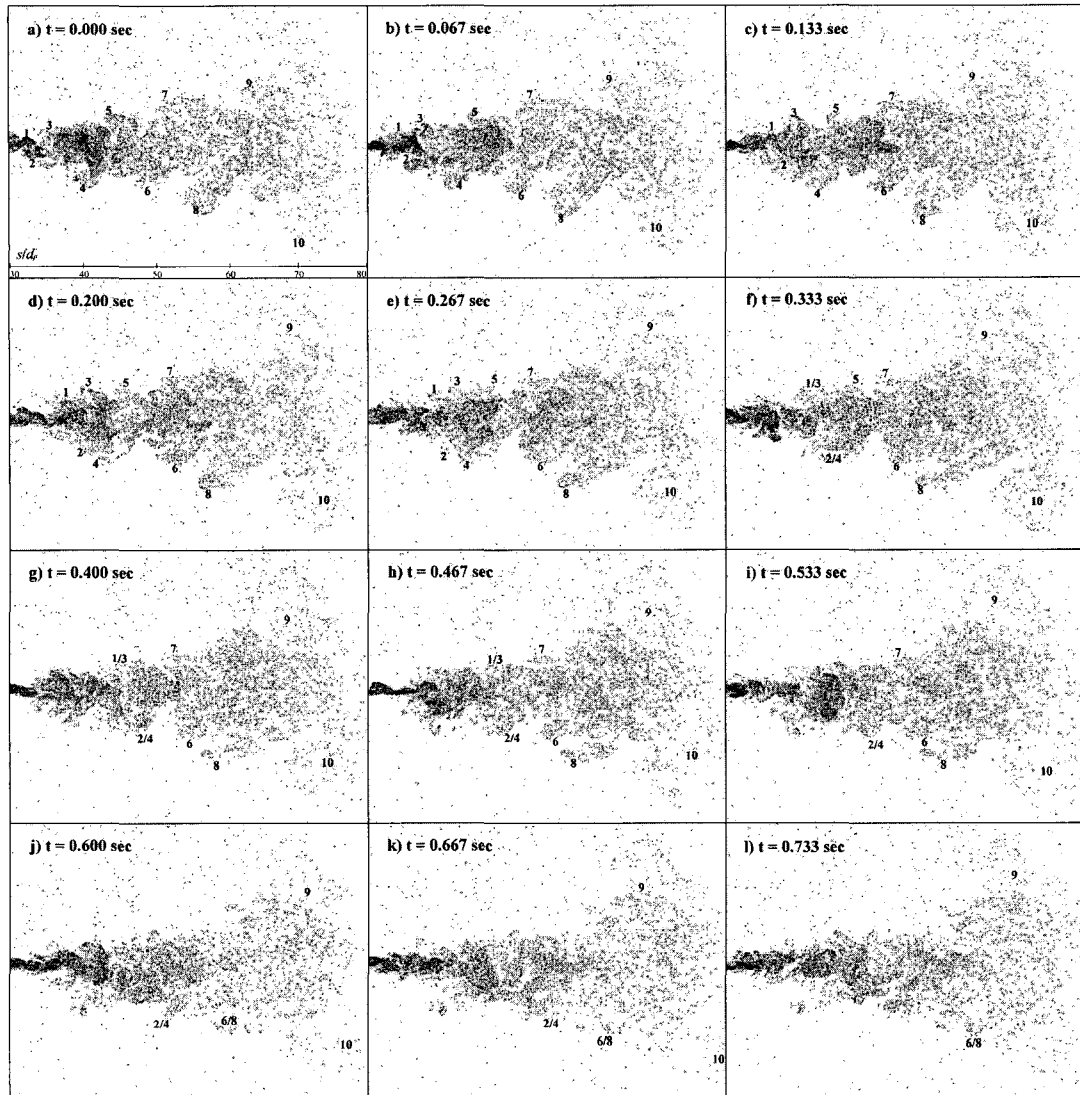


Fig. 5 Sequential Instantaneous Images of Flapping Motions (MH-05, $Fr_0 = 312.5$)

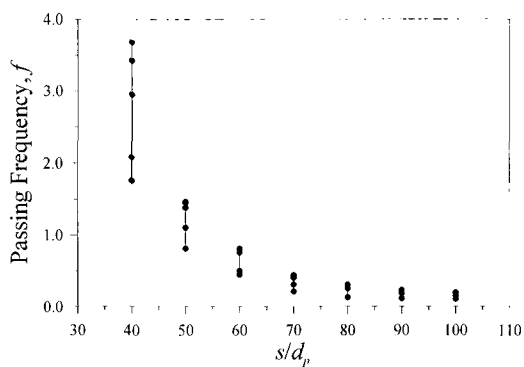


Fig. 6 Passing Frequency of Vortical Structures (Measured)

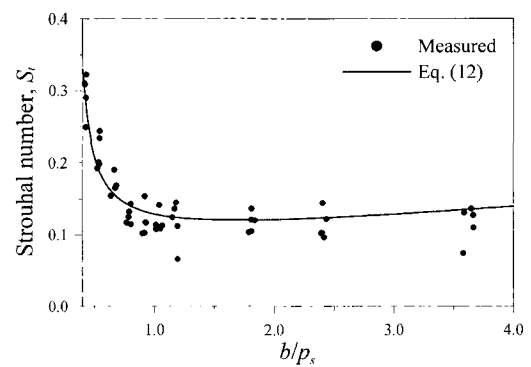


Fig. 7 Comparison of Measured and Calculated Strouhal Numbers

통해서도 파악할 수 있는 것으로, 식 (12)는 병합부력제트에서의 Strouhal수는 병합천이역 시점과 이후의 임의 지점에서의 병합정도와 반폭확장률의 함수로 나타내어진

다. 따라서 병합정도와 제트의 확장률이 계속 변화하는 병합천이역에서의 Strouhal수는 평면제트와 달리 일정한 값으로 나타나지 않는다. Lyu가 유속 및 농도반폭확장률

측정실험을 통해 제안한 병합천이역($b/p_s = 0.3 \sim 1.2$)의 시점에서의 반폭확장률과 병합정도를 식 (12)에 대입하여 계산된 Strouhal수를 Fig. 7에 실선으로 함께 도시하였다. Fig. 7을 통하여 관측치와 계산치가 상당히 잘 일치함을 알 수 있다. 식 (12)를 통하여 계산된 값은 병합천이역 뿐만 아니라 병합이 완전히 이루어진 $b/p_s = 1.2$ 이후 영역에서도 실험결과값들과 잘 일치하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 일방향확산관을 통하여 정체수역으로 분류되는 수평병합부력제트에 대한 실험을 수행하여, 평면제트의 고유한 특징으로 알려져 왔던 진동운동에 대해 규명하고자 하였다. 연구결과, 진동운동은 병합부력제트에서도 관찰되었으며, 특히 병합이 이루어지기 시작하는 병합천이역에서부터 확인되었다. 또한 실험조건에 상관없이 병합천이역의 시점에서부터 진동운동은 발생함을 관찰할 수 있었다. 흐름의 자기상사성과 관련되어 평면제트의 경우에는 Strouhal수가 일정한 상수값으로 제안되어지나, 병합부력제트의 경우에는 병합천이역에서 그 값이 변화하여 병합이 완전히 이루어진 후에는 일정한 값으로 수렴하는 것으로 관측되었다. 이는 병합천이역에서의 반폭확장률과 같은 국부흐름특성치들의 변화에 기인하는 것으로 판단되었다. 또한 평면제트에 대해서 구해진 진동운동의 특성이 병합천이역과 국부흐름특성치의 변화를 고려할 경우, 병합부력제트의 진동운동도 나타낼 수 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

Cervantes de Gortari, J.G. (1978). *An Experimental Study of the Flapping Motion of a Turbulent Plane Jet*. Ph.D. Thesis, School of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA.

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.

- Dimotakis, P.E. (1986). "Two-dimensional Shear-layer Entrainment." *AIAA Journal*, AIAA, 24(11), 1791-1796.
- Dracos, T., Giger, M. and Jirka, G.H. (1992) "Plane Turbulent Jets in a Bounded Fluid Layer." *Journal of Fluid Mechanics*, 241, 587-614.
- Goldschmidt, V.M., Moallemi, M.K. and Oler, J.W. (1983). "Structures and Flow Reversal in Turbulent Plane Jets." *Physics of Fluids*, 26(2), 428-432.
- Lyu, S (2003). *Behavior of Merging Buoyant Jets Discharged from Uni-directional Diffuser*. Ph.D Thesis, School of Civil, Urban and Geosystem Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea.
- Papanicolaou, P.N., and List, E.J. (1988). "Investigations of Round Vertical Turbulent Buoyant Jets." *Journal of Fluid Mechanics*, 195, 341-391.
- 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.
- Wood, I.R., Bell, R.G., and Wilkinson, D.L. (1993). *Ocean Disposal of Wastewater*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Wyganski, I. and Gutmark, E. (1971). "Lateral Motion of Two-dimensional Jet Boundaries." *Physics of Fluids*, 14(7), 1309-1310.
- (논문번호:03-49/접수:2003.05.21/심사완료:2005.07.13)