

# 사각형제트와 2차원제트의 거동해석의 비교 평가

## Comparative Evaluation of Behavior Analysis of Rectangular Jet and Two-dimensional Jet

권석재\* · 조홍연\*\* · 서일원\*\*\*

Kwon, Seok Jae · Cho, Hong Yeon · Seo, Il Won

### Abstract

The behavior of a three-dimensional pure rectangular water jet with aspect ratio of 10 was experimentally investigated based on the results of the mean velocity field obtained by PIV. The saddle back distribution was observed in the lateral distribution along the major axis. The theoretical centerline velocity equation derived from the point source concept using the spreading rate for the axisymmetric jet was in good agreement with the measured centerline velocity and gave the division of the potential core region, two-dimensional region, and axisymmetric region. The range of the two-dimensional region divided by the criterion of the theoretical centerline velocity decay for the aspect ratio of 10 was observed to be smaller than that of the transition region. The applicability of the two-dimensional model to the behavior of the rectangular jet with low aspect ratio or the wastewater discharged from a multipoint diffuser in the deep water of real ocean may result in significant error in the transition and axisymmetric regions after the two-dimensional region. In the two-dimensional region, the Gaussian constant tended to be conserved, and the spreading rate slightly decreased at the end of the two-dimensional region. The normalized turbulent intensity along the centerline of the jet initially abruptly increased and showed relatively higher intensity for higher Reynolds number.

**Keywords :** *three-dimensional rectangular jet, PIV, point source concept, wastewater, two-dimensional region, axisymmetric region*

### 요 지

본 연구에서는 PIV를 이용하여 측정된 평균유속장의 실험결과에 근거하여 10의 종횡비를 갖는 3차원 순수사각형제트의 거동을 고찰하였다. 장축상의 횡분포에서 안장형 분포가 관찰되었다. 점원개념으로부터 유도된 이론적인 중심선유속의 식은 측정된 중심선유속과 잘 일치하였으며 원류핵영역, 2차원영역, 그리고 축대칭영역의 분할을 제시하였다. 이러한 이론적인 중심선유속의 감소에 의해 분할된 2차원영역의 범위가 천이영역에 비해 상대적으로 작게 관찰되었다. 작은 종횡비를 갖는 사각형제트의 거동이나 실제 해양의 깊은 수심에서 다공확산관을 통해 방류되는 하·폐수의 거동을 예측하기 위한 2차원모형의 적용은 2차원영역을 지난 천이영역과 축대칭영역에서 중대한 오차를 야기할 수 있다. 2차원영역에서 가우스 상수가 보존되는 경향을 보였으며 2차원영역의 끝 지점에서 확장률이 감소함을 알 수 있었다. 중심선유속으로 무차원화 된 중심선 난류강도는 초기에 급격히 증가하였고 높은 레이놀즈수에서 상대적으로 높은 난류강도를 보여주었다.

**핵심용어 :** 3차원 사각형제트, PIV, 점원개념, 하·폐수, 2차원영역, 축대칭영역

### 1. 서 론

하·폐수처리장 배출수 및 화력·원자력 발전소 온배수가 방류되는 해역에서 방류수로 및 방류관의 배출지점 및 매우 인접한 지역은 환경이 급격하게 변화하기 때문에 생태학적인 압박(stress), 충격(shock)이 매우 강하고, 생태학적인 악영향이 발생할 수 있다(Welch와 Lindell, 1992). 이렇게 방류되는 난류제트의 역학적인 연구는 주변유체의 유입에 의해 증가해 가는 제트의 과정을 이해하는데 있어 필수적이다. 난

류제트의 가장 다양한 형태로써 사각형슬롯을 통해 방류되는 사각형제트(rectangular jet)는 난류흐름의 전형적인 경우의 하나이고 하·폐수 처리장의 침전지에서 유입구 흐름, 하·폐수 방류, 발전소에서 온배수의 방류, 여수로 방수로 등 많은 공학 분야에서 실제적인 용도로 사용되어지고 있다(Kim 등, 2001).

제트에 관한 대부분의 연구는 평면제트(plane jet)를 위한 2차원적인 접근과 원형제트를 위한 축대칭적인 접근을 서로 분리하여 수행하여

\*교신저자 · 해양수산부 국립해양조사원 해양조사연구실(E-mail : sj79kwon@nori.go.kr)

\*\*정회원 · 한국해양연구원 연안개발연구본부 책임연구원(E-mail : hych0@kordi.re.kr)

\*\*\*정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수(E-mail : seoilwon@snu.ac.kr)

왔다. 실제는 장축방향으로 유한한 사각형슬롯직경을 가지고 있음에도 불구하고 2차원의 개념에 근거를 둔 평면제트로 해석하는 경우가 많다. 예로써 처리된 하·폐수를 해양에 방류하는 다공화산관 시스템의 경우 방류되는 부력제트를 2차원부력제트로 가정한다. 그러나 실제의 경우에 어느 임의의 사각형제트 중심선의 거리까지는 2차원적인 특성을 가지다가 천이영역을 거쳐 축대칭 제트의 특성으로 바뀌게 된다. 결국 이러한 다공화산관을 통해 방류될 때 수심이 깊은 경우 2차원부력제트로만 가정하게 되므로 2차원영역을 지난 천이영역과 축대칭영역에서 오차를 초래할 수 있다. 예로써 다공화산관을 통해 방류되는 하·폐수의 근역에서의 거동을 모의하는데 가장 많이 사용하는 RSB(Roberts-Snyder-Baumgartner)와 CORMIX(Cornell Mixing Zone Expert System)2 모형 등도 결국에는 병합되기 전과 후의 부력제트를 2차원부력제트로 가정하고 하·폐수의 거동을 예측 한다 (Roberts, 1993a와 b; Jirka와 Akar, 1991). 한편, 방류지점 인접지역에서의 부정확한 근역(near-field) 흐름거동 예측은 원역(far-field)모형을 이용하여 방류수의 확산범위 예측에도 큰 오차를 유발할 수 있기 때문에, 특히 사각형제트의 경우에도 3차원적인 근역거동을 정확하게 분석하는 연구를 필요로 한다.

환경수리학에서 난류제트에 관한 과거연구는 자기보존영역에서 흐름특성을 규명하는데 집중해왔다. Morton 등(1956)에 의한 선구적 연구이후로 자기보존영역에서 수많은 실험적, 이론적, 그리고 수치적인 연구들이 수행되어져 왔다(Crow와 Champagne, 1971; Fischer등, 1979; Gutmark와 Grinstein,

1999). 속도분포, 난류특성, 희석률, 궤적, 그리고 환경공학연구자에게 관심의 대상주제가 되었던 주제들이 현재 이 영역에서는 잘 정립이 되어있다. 본 연구는 2차원제트와 축대칭제트의 두 가지 특성을 보유한 3차원적인 비부력 사각형제트(non-buoyant rectangular jet)의 역학을 위한 실험연구의 결과를 묘사하고 있다. 3차원적인 비부력 사각형제트의 거동에 대한 실험연구는 대부분 공기제트(air jet)에 관한 것이며 실험적이고 수치적인 연구들이 수행되어져 왔다(Yevdjevic, 1966; Sforza 등, 1966; Curtis, 1966; duPlessis 등, 1974; Sfeir, 1976; Pani와 Dash, 1983; Lozanova와 Stankov, 1998). 수제트(water jet)에 관한 연구는 소수의 연구자(Maxwell과 Demissie, 1976; Demissie, 1980)에 의해 수행되었는데 주로 벽 경계와 천해 등을 고려하여 미치는 영향을 연구하였다. 그러나 본 연구에서는 경계의 영향을 고려하지 않고 무한한 주변수체에 방류된다고 가정하였다.

실제적으로 사각형 방류노즐의 종횡비( $L/B$ , aspect ratio, 여기서  $L$ 은 사각형슬롯의 높이이고  $B$ 는 사각형슬롯의 폭)가 무한히 크다면 2차원적인 연구의 접근으로 흐름특성을 규명할 수 있겠지만 종횡비가 한정적인 경우 3차원 사각형제트의 거동을 보인다(그림 1). 본 연구에서는 10의 종횡비를 갖는 사각형 방류노즐을 통해 방류되는 사각형제트의 유속거동과 난류특성을 PIV(Particle Image Velocimetry)를 이용하여 관찰하였다. 그리고 적절한 레이놀즈수를 통해 난류상태를 유지하게 하였다. 특히 중심선 유속의 감소와 제트의 반경의 변화를 통해서 원류핵영역과 이 후의 천이영역, 그리고 2차원영역을 통해 형성되는 천이영역에 대한 거동특성을 파악하였다.

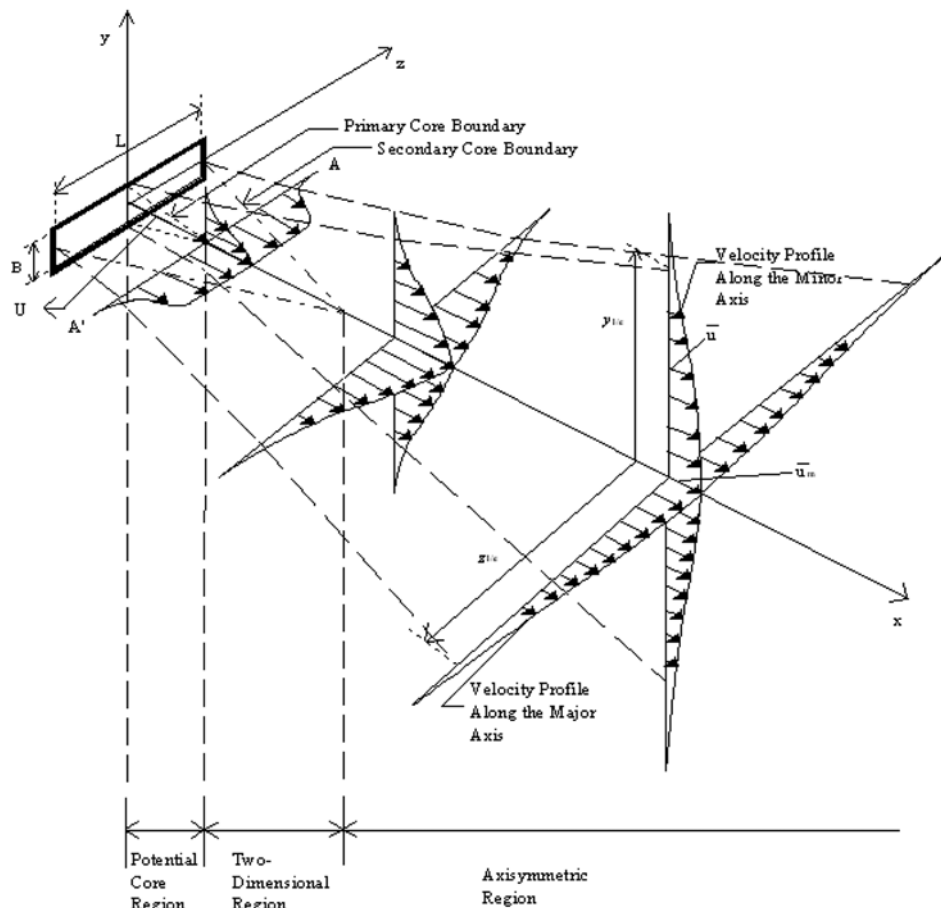


그림 1. 3차원 사각형제트의 개념도

## 2. 이론적 배경

### 2.1 사각형제트의 역학적 개념

그림 1은 3차원 사각형제트의 개념도를 보여준다. 3차원 비부력 사각형제트의 유속장에 대한 이 전의 실험연구들은 축방향에 대해 흐름영역을 세 가지 영역 즉 원류핵(potential core), 2차원(two-dimensional)영역, 축대칭(axisymmetric)영역으로 구분한다. 여기서 원류핵영역은 단축(minor axis,  $y$ -axis)에서 난류의 중심선을 향한 침투가 끝나는 지점까지의 영역으로 정의한다. 이 영역 이후로 제트의 중심선 최대유속이 감소하기 시작하고 단축을 따른 유속분포가 자기상사성(self-similarity)을 갖게 된다. 그러나 장축(major axis,  $z$ -axis)을 따른 유속분포의 중앙부분은 여전히 균일(uniform)하다. 이러한 두 번째 핵 영역에서 중심선 최대유속이 점차적으로 감소하고 장축에서 난류가 중심선을 향한 침투가 끝나는 지점까지를 2차원 영역으로 정의한다. 두 번째 핵 영역(core region)내에서 중앙부분의 혼합이 2차원적이므로 중심선 유속의 감소가 2차원 평면제트(plane jet)와 유사하다고 하여 2차원영역이라 불린다. 장축상에서 난류가 제트의 중심까지 침투한 후 장축을 따른 속도분포가 단축을 따른 속도분포와 유사해져 흐름장이 축대칭형태로 바뀌어 간다. 그래서 이 영역은 축대칭영역으로 구분된다(Demissie, 1980). 한 가지 중요한 점은 이러한 세 영역들 사이에 천이영역(transition region)들이 존재한다는 것이다.

### 2.2 2차원 평면제트와 축대칭제트

슬롯으로부터 방류되는 2차원 제트의 개념도가 그림 2에 보여 지고 있다. 일반적으로 제트의 흐름특성은 흐름확립영역(zone of flow establishment, ZFE)과 확립흐름영역(zone of established flow, ZEF)의 두 영역으로 분할하여 각각의 특성을 설명한다(Fischer 등, 1979). 이 그림에서  $B$ 는 슬롯의 높이이고  $L_0$ 는 원류핵의 길이인데 원류핵에서 중심선유속( $\bar{u}_m$ )은 초기유속( $U$ )과 같으며 일정하다. 제트의 외측선은 제트의 공칭경계(nominal boundary)를 가리키고 여기서 시간 평균된 평행유속( $\bar{u}$ )은 중심선유속으로부터 횡방향으로 어느 임의의 작은 일부분(fraction)을 가리킨다.  $L_0$ 보다 큰  $x$ 값에서 중심선  $\bar{u}_m$  유속은  $U$ 보다 작다.

제트의 자기보존영역에서 유속분포의 기하학적인 상사성의 가정에 바탕을 둔 초기의 반 경험적인 연구가 개발되어 졌다(Daily와 Harleman, 1966; Lozanova와 Stankov, 1998).

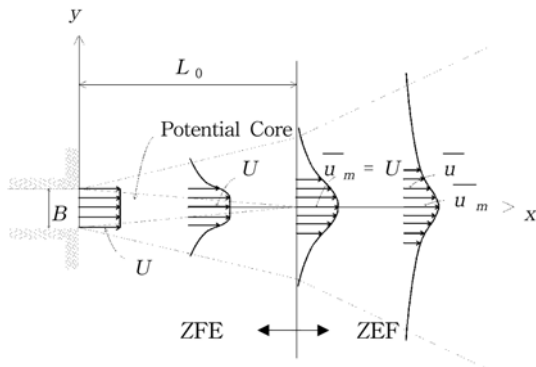


그림 2. 2차원 평면제트의 개념도

이 상사성은 다음의 식을 의미한다.

$$\bar{u}/\bar{u}_m = f(\xi) \quad (1)$$

여기서  $\xi = y/x$ ,  $x$ 는 슬롯의 중심으로부터 제트축 종방향의 좌표, 그리고  $y$ 는 수직방향의 좌표이다.

이러한 유속분포가 Gaussian 분포에 의해 근사 될 수 있다고 가정하면 평면제트를 위한 다음과 같은 전개에 의해 설명되어 질 수 있다.

$$\bar{u} = \bar{u}_m \exp\left[-k_u \left(\frac{y}{x}\right)^2\right] \quad (2)$$

여기서  $k_u$ 는 가우스 상수로서 유속실험계수이다. 유사하게 축대칭 제트의 유사성은 다음의 식에 의해 표현될 수 있다.

$$\bar{u} = \bar{u}_m \exp\left[-k_u \left(\frac{r}{x}\right)^2\right] \quad (3)$$

여기서  $r$ 은 제트의 중심선으로부터 방사거리(radial distance)를 가리킨다. 축대칭제트의 폭은  $x$ 의 선형적인 함수이다. 기존의 여러 연구자들에 의해  $k_u$ 는 55-100정도의 값을 갖는다고 제안되어졌다(Hongwei, 2000).

앞서 거론된 3차원 사각형제트를 위해서는 세 영역에서 최대유속이 달라진다. 2차원영역에서는 중심선유속이 다음과 같이 2차원제트와 유사하게 감소한다.

$$\bar{u}_m/U = a_1 x^{-1/2} \quad (4)$$

축대칭영역에서는 중심선유속이 다음 식과 같이 감소한다.

$$\bar{u}_m/U = a_2 x^{-1} \quad (5)$$

여기서  $a_1$ 과  $a_2$ 는 유속실험계수에 해당된다.

### 2.3 흐름장의 3차원적인 특성

본 연구에서 사용된 사각형노즐의 경우 종횡비가 10( $L = 35$  mm;  $B = 3.5$  mm)이기 때문에 2차원제트와 축대칭제트의 두 경우 모두를 위한 유속분포가 고려될 필요가 있다. 그러므로 사각형제트의 3차원적인 특성이 검토되어야 한다. 그림 3은 일정한 거리  $L$ 을 갖는 사각형노즐에서 분사되는 3차원제트를 보여주고 있다. Pani와 Parameswaran(1994)은 3차원 사각형제트의 유속분포를 위한 이론적인 식을 위하여 Reichardt의 이론에 근거를 두고 축대칭흐름을 위한 운동량 방정식을 사용하여 점원(point source) 개념을 위한 표현을 유도하였다. 그림 3에서 면적의 요소유원(elemental source)을 위해 점원 개념에 바탕을 둔 표현이 다음과 같이 묘사되어 질 수 있다.

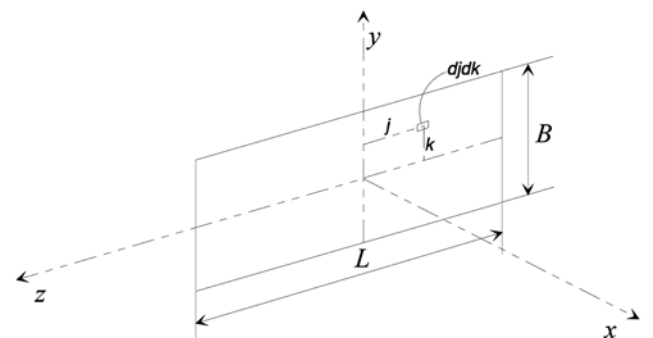


그림 3. 3차원 사각형제트를 위한 점원개념

$$\frac{\bar{u}_m^2}{U^2} = \frac{dA}{\pi b^2} \quad (6)$$

여기서  $b=cx$ 이고  $c$ 는 실험계수이다. 각각 미소면적유원  $dA=dhdk$ 는 임의의  $P$ 지점에서 특정한 동압(dynamic pressure)에 기여한다. 지배방정식이 선형이므로  $P$ 지점에서 결과적인 동압을 얻기 위해 중첩(superposition)의 원리가 적용될 수 있다. 적분을 통해 이고 인 제트의 종방향을 따라 중심선 유속분포를 유도하고 2차원제트의 경우  $L$ 증가로 무한하다고 가정하면 다음과 같은 식들로 표현될 수 있다.

$$\frac{\bar{u}}{U^2} = -\frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{B-2y}{2cx}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{B+2y}{2cx}\right) \right\} \quad (7)$$

$$\frac{\bar{u}_m}{U^2} = \operatorname{erf}\left(\frac{B}{2cx}\right) \quad (8)$$

여기서  $\bar{u}$ 는  $P$ 지점에서  $x$ 방향의 평균유속을 가리킨다. 식 (8)에서 PIV를 이용한 최근 연구들 중의 하나인 Hongwei (2000)는 축대칭제트의 확장률을 0.105로서 제안한 바가 있다. 확장률의 변화에 영향을 미치는 물리적 변수로는 Reynolds 수의 변화에 따른 난류상태, 방류수와 주변수와의 밀도 차이, 그리고 방류구의 형상 등이 있다.  $z=0$ ,  $c=0.105$ , 그리고  $L=10B$ 의 경우 다음 식과 같이 종횡비가 10인 경우의 3차원 사각형제트의 중심선에서 유속분포를 제공할 수 있다.

$$\frac{\bar{u}}{U^2} = -\frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{B-2y}{0.21x}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{B+2y}{0.21x}\right) \right\} \operatorname{erf}\left(23.8\frac{B}{x}\right) \quad (9)$$

$$\frac{\bar{u}_m}{U^2} = \operatorname{erf}\left(4.76\frac{B}{x}\right) \operatorname{erf}\left(47.6\frac{B}{x}\right) \quad (10)$$

여기서  $z$ 는 슬롯의 중심으로부터 장축방향의 좌표이다. 종횡비가 10인 사각형노즐에서 방류되는 3차원 사각형제트의 중심선유속분포가 식 (10)을 이용하여 얻어질 수 있다. 결론적으로 종횡비가 감소할수록 사각형제트의 중심선유속이 더 빨리 감소함을 알 수가 있다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험장치와 측정기기

실험은 길이 6.0 m, 폭 1.2 m, 높이 1.0 m인 강화유리로 제작된 수조에서 실행되어졌고 상세 제원은 그림 4와 같다. 일정한 제트 방류수의 초기속도를 유지하기 위하여 정수위 탱크(constant head tank)가 사용되었다. 배수계통(drainage system)이 없는 실험수조는 실험동안 주변수의 체적증가를 유발시킬 수 있다. 이는 정수위탱크와 실험수조 사이의 수두 차이(head difference, 약 270 cm)의 미약한 변화를 야기할 수 있다. 그러나 영상(image)을 취득하는 단 시간(약 22 sec.)에 형성되는 미약한 수두차이가 제트의 거동에 미치는 영향은 매우 미미할 것으로 사료되므로 이 연구에서의 0.31-0.38 mm/min.의 수두차이는 무시되어졌다. 본 연구에서 슬롯은 종횡비가 10( $L=35$  mm;  $B=3.5$  mm)으로서 중구형 취수구(round edged inlet)와 직각형 방류구(sharp edged

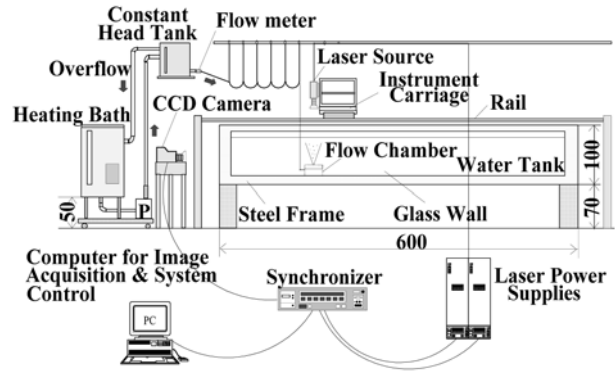


그림 4. 실험장치의 모식도 (단위: cm)

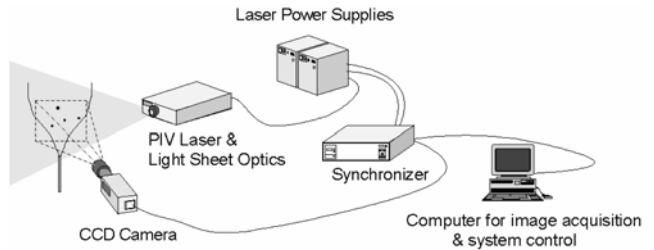


그림 5. PIV의 전형적인 시스템

outlet)를 구성하고 있다. 슬롯의 종방향 길이는 슬롯높이의 약 4배가 되는 15 mm이다. 그러므로 흐름의 조기확립이 슬롯수로를 통해 발생할 수 있다.

PIV는 이전의 유동장가시화기법이 유동장의 정성적인 관찰에 그쳤던 것을 정량적으로 분석할 수 있도록 한 유속측정장비로서 1990년대에 들어서 유체역학 분야에서 활발히 응용되고 있다(Buchhave, 1992). PIV는 레이저 및 CCD 카메라 등 측정에 필요한 장비들을 유동장 외부에 설치하기 때문에 프로펠러유속계, 열선유속계 등의 기타 유속측정장치는 달리 흐름을 교란시키지 않고 유속을 측정할 수 있다. 또한, LDV와 같은 비교관유속측정장비들이 특정한 한 지점에서의 유속 측정만이 가능한 반면, PIV는 동시에 수백에서 수천 지점의 유속측정이 가능하여 특정 시각에서의 전체 유속장의 측정이 가능하다.

본 실험에서 구축한 PIV시스템은 그림 5와 같으며, 일반적으로 광학시스템, 영상취득시스템, 그리고 분석 및 가시화시스템으로 구성된다. 광학시스템은 유속측정을 위해 레이저를 방출하는 부분으로서, 측정유체의 특성 및 측정범위에 따라서 광원으로 이용되는 레이저의 종류가 달라지게 된다. 영상취득시스템은 유속장 내의 입자들의 영상을 취득하고 이를 저장하는 장치로 CCD카메라와 이를 저장하기 위한 인터페이스로 구성되는데 이때 CCD카메라의 해상도와 초당 측정 프레임 수에 따라 측정 및 분석범위가 결정된다. 이렇게 측정, 저장된 영상들은 분석 및 가시화시스템을 통하여 분석되고 백터도나 연속적인 유속장의 영상들을 가시화 할 수 있게 된다.

본 실험에서 PIV를 통한 유동장 측정은 크게 영상취득과정과 영상분석과정으로 나눌 수 있다. 우선 유체 중에 비중이 1에 가까운 입자로서 직경이 수십  $\mu\text{m}$  정도의 유리입자를 혼합한 후 레이저 광선을 투사하여 흐름 중의 부유되는 입자에 의해 반사된 레이저 광선을 CCD카메라를 이용하여

촬영한다. 이렇게 적절한 시간간격으로 촬영된 두 개의 영상을 분석하여 입자들의 이동거리를 구하여 유속자료를 얻게 된다. 본 연구에서는 영상을 얻기 위한 광원으로 Nd-YAG 레이저(Continum Laser Co.에 의해 제작된 Minilite PIV)를 이용하였으며, 카메라는 1016×1008 해상도로 초당 30 프레임을 찍는 CCD카메라(Kodak Megaplus 1.0 ES)를 사용하였다. PIV시스템에서 공간적인 해상도는 카메라의 해상도와 이미지의 크기에 의해 좌우된다. 본 연구에서 사용된 픽셀의 크기는 0.284 mm×0.284 mm이고, 추출영역(interrogation zone)의 크기는 32×32 픽셀이며, 50% 중복(overlap)을 사용하였다. 그러므로 이러한 추출영역의 중복은 유속에 대한 보다 공간적인 정보를 제공하므로 각각의 유속 벡터가 주변의 16×16 픽셀에서 형성되는 공간평균유속을 대표한다고 가정할 수 있다.

### 3.2 실험조건

슬롯은 수조바닥으로부터 25 cm의 수직거리를 유지한 상태로 평행하게 배치되었다. 초기 수심은 86 cm가 유지되었다. 주변수와 방류수간의 온도차이는 0.3°C 이하로 무시되어졌다. 본 연구에서는 영상이미지를 촬영할 때 자동이송장치(automatic traverse system)위에 CCD카메라와 PIV레이저를 설치함으로써 평행하고 수직으로 이동시킬 수 있게끔 하였다.

순간유속단면은 15 Hz의 주기로 취득하였다. 이러한 측정에 사용된 PIV시스템의 취득주기(sampling rate)는 사각형 난류제트의 난류특성을 분석하는데 충분하지 않을지 모르지만 본 연구는 소규모(small-scale)난류에 의해 형성되는 변동(fluctuation)보다도 대규모 천이거동(large-scale transition behavior)에 초점을 맞추었다. 두 개의 연속적인 영상이미지 사이의 시간간격은 500 μs이다. 순간 유속장들이 22초 동안에 추출된 후 330개의 순간 유속장들이 취득되었다.

먼저 본 연구에서는 PIV 시스템으로 측정된 유속자료의 측정정확도를 검증하기 위하여 ADV(Acoustic Doppler Velocimetry)로 측정된 유속자료와 서로 비교하고자 하였다. 직경이 4 mm이고 종방향으로 50 mm의 길이를 갖는 원형노즐을 통해 방류되는 원형제트의 중심선 유속을 측정하였다. 원형노즐 또한 챔버의 상단에 부착하였다. 두 가지 실험경우에 대하여 초기유속을 80.2 cm/s와 128.6 cm/s를 유지함으로써 레이놀즈수는 각각 3,208과 5,142의 값을 갖게 된다. 측방향(side-looking) ADV를 이용하였고 40초 동안 50 Hz의

주기로 측정함으로써 중심선유속을 취득하였다. 본 연구에서 추가 되는 사각형제트의 거동을 파악하기 위하여 단축상에서는  $y=0$ 과  $y=\pm B/4$ 의 단면, 그리고 장축상에서는  $z=0$ 과  $z=\pm L/4$ 의 단면을 통해 영상이미지를 취득하였다. 본 연구에서 수행된 종횡비가 10인 3차원 사각형제트의 실험조건이 표 1에 수록되어 있다. 두 실험경우의 레이놀즈수는 각각 1,587과 1,984로서 적절한 난류제트로 간주될 수 있다.

## 4. 실험결과

### 4.1 ADV와 PIV 유속자료의 비교

전술한 바와 같이 본 연구에서 사용된 PIV 시스템으로 측정된 유속자료를 ADV로 측정된 유속자료와 서로 비교하였다. 그림 6은 PIV와 ADV로 측정된 제트 중심선유속을 서로 비교하여 보여주고 있다.  $x/d = 54$ 와 79 사이의 영역에서 PIV에 의해 측정된 중심선유속은 ADV에 의해 측정된 중심선유속과 일반적으로 잘 일치하고 있다. 여기서  $d$ 는 원형노즐의 내부직경을 가리킨다. ADV에 의해 측정된 중심선유속이 참값이라고 가정했을 때 레이놀즈수가 3,208과 5,142인 경우에 제곱평균제곱근(root mean square) 오차가 각각 0.317%와 0.286%인 것으로 나타났다.

### 4.2 평균유속분포

그림 7은 종횡비가 10인 경우 단축과 장축의 중앙단면상에서 CCD카메라를 이용하여 취득한 순간영상을 보여주고 있다. 그림 8은 AR10-200MINC의 경우의 실험으로 순간유속벡터필드와 시간평균한 유속벡터필드를 보여준다. 이 그림에서 순간유속벡터필드는 약간의 와류를 보여주며 벡터들이 매끄럽지 않은 반면에 평균한 시간이 증가할수록 점차적으로 전체벡터필드가 평활화(smoothing)되어 감을 보여주고 있다. 그림 9는 AR10-250MINC와 AR10-250MAJC경우의 실험으로서 단축과 장축의 중앙단면에서 유속의 횡분포를 보여준다. 이 그림에서 유속의 횡분포와 거리는 각각 초기유속( $U$ )과 슬롯높이( $B$ )에 의해 무차원화 되어있다. 그림 9(a)에서

표 1. 3차원 난류 사각형제트(rectangular jet)의 실험조건

Aspect Ratio	Axis	Section	Case	$U$ (cm/s)	$Re_j$ ( $=UB/\nu$ )
10	Major Major	Center	AR10-200MAJC	45.35	1,587
		Side	AR10-200MAJS	45.35	1,587
	Minor Minor	Center	AR10-200MINC	45.35	1,587
		Side	AR10-200MINS	45.35	1,587
	Major Major	Center	AR10-250MAJC	56.69	1,984
		Side	AR10-250MAJS	56.69	1,984
	Minor Minor	Center	AR10-250MINC	56.69	1,984
		Side	AR10-250MINS	56.69	1,984

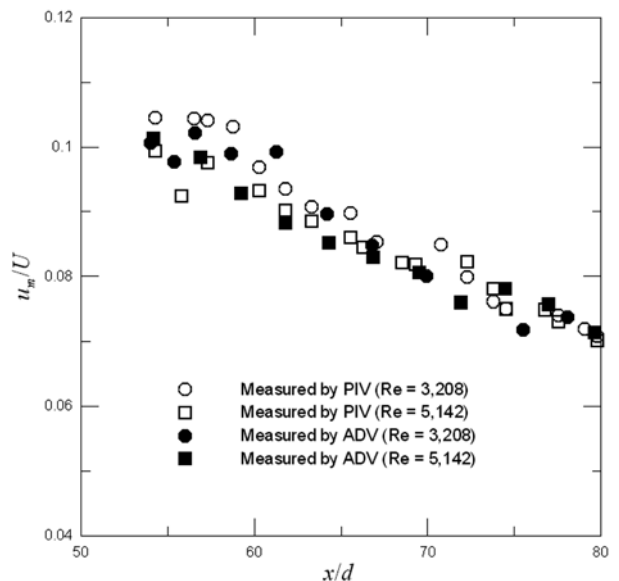
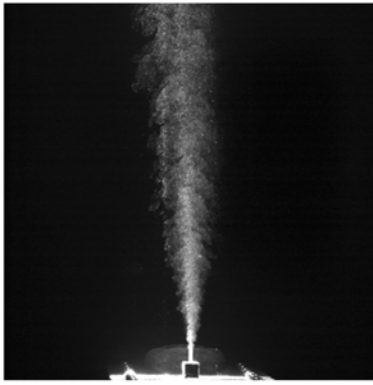
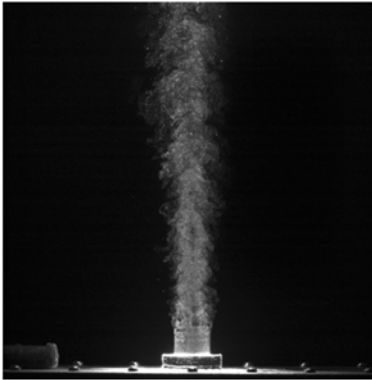


그림 6. PIV와 ADV로 측정된 제트 중심선유속의 비교



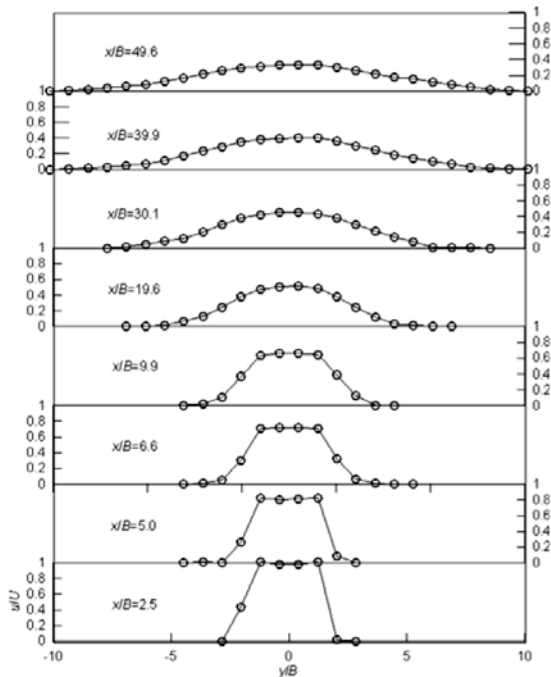
(a) 단축의 중앙단면상에서 취득된 순간영상



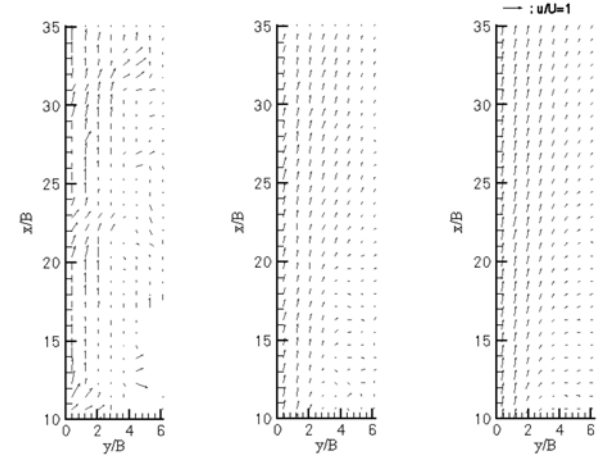
(b) 장축의 중앙단면상에서 취득된 순간영상

그림 7. CCD카메라로 취득한 순간영상 (중횡비: 10)

초기영역의 원류핵 이후로  $x/B$ 가 증가함에 따라 중심선유속은 감소하고 제트의 직경은 증가하고 있다. 반면에 그림 9(b)에서는 단축상에서의 혼합이 장축상에서의 혼합보다 더 빨리 이루어지기 때문에 장축상에서의 제트의 직경은 좀처럼 증가하지 않고 있다. 그리고 장축상에서 하나의 특이한 점은  $x/B = 5.3$ 과  $19.9$  사이에서 두개의 침투를 갖는 안장형



(a) AR10-250MNC



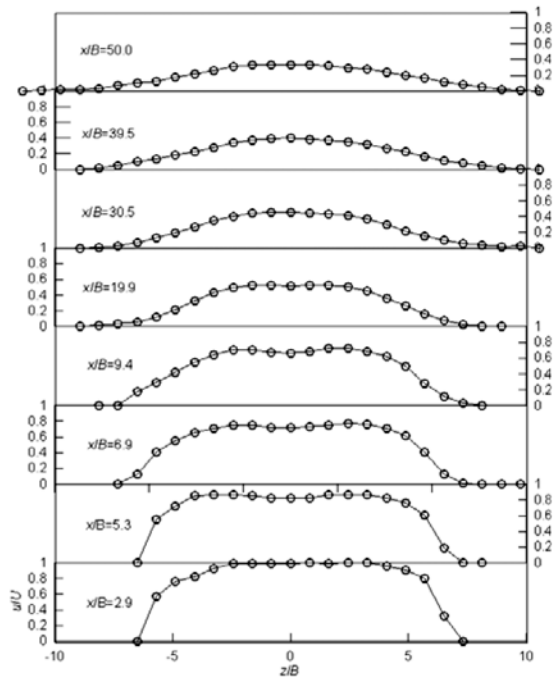
(a) 순간유속벡터필드 (b) 1초 시간평균한 유속벡터필드 (c) 3초 시간평균한 유속벡터필드

그림 8. 유속벡터필드 (AR10-200MNC)

(saddle back) 횡분포를 나타낸다는 것이다. Sforza 등(1966)은 이러한 분포가 제트의 주변에서 형성되는 타원형의 와고리(vortex ring) 때문에 발생한다고 제안하였다. 그리고 단축의 측단면에서 측정된 유속의 횡분포로부터 측단면의 중심선유속이 중앙단면의 중심선유속보다 빨리 감소하는 것을 알 수 있었다. 이는 난류가 제트의 중심선으로 중앙단면보다 측단면에서 더 빨리 침투하고 있음을 보여주는 것이다.

#### 4.3 중심선 유속의 변화

그림 10은 중횡비가 10인 경우 중심선유속의 중분포를 보여주고 있다. 식 (10)의 이론적인 결과와 측정된 중심선유속이 대체적으로 잘 일치하고 있다. 본 그림에서는 서로 다른 초기유속을 갖는 두 가지 경우의 실험으로부터 측정된 중심선 유속값을 평균하였다. 본 연구에서는 중심선유속의 감소에 따라 원류핵영역, 2차원영역, 그리고 축대칭영역을 구분하였다. 식 (4)에서 서술된  $-1/2$ 승에 가까운 중심선유속의 감소



(b) AR10-200MAJC

그림 9. 장축과 단축상의 중앙단면에서 유속의 횡분포 (중횡비: 10)

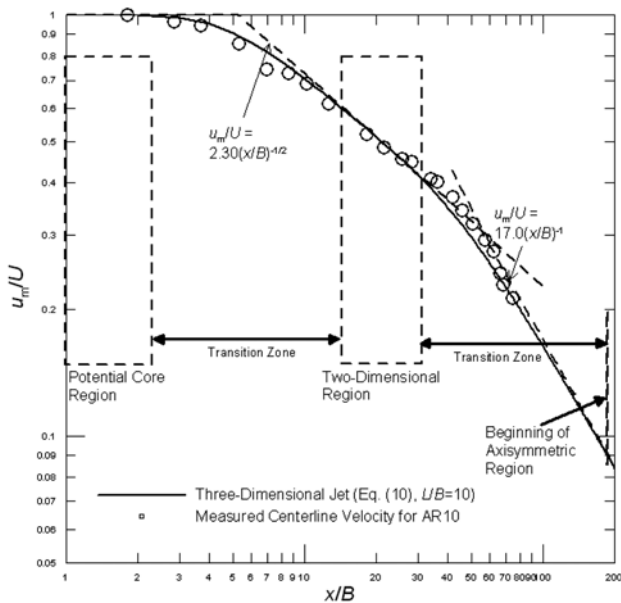


그림 10. 중심선유속의 종분포 (종횡비: 10)

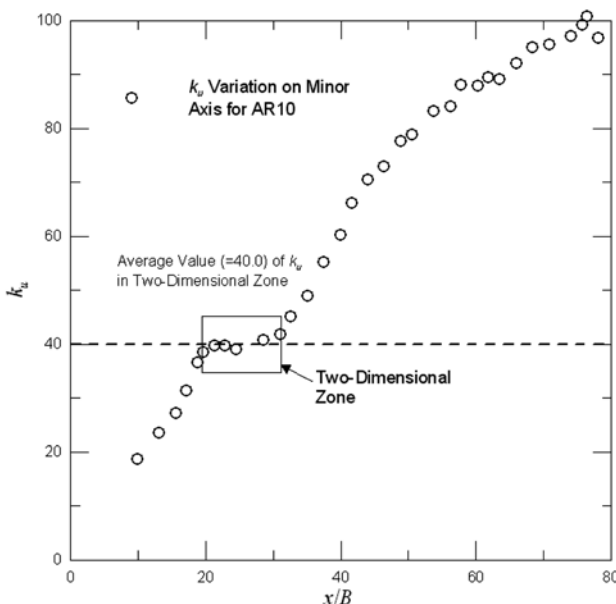


그림 11. 가우스 상수의 변화 (종횡비: 10)

영역이 2차원영역으로 간주되고 식 (5)에서 보여지는 -1승에 가까운 중심선유속의 감소영역이 축대칭영역으로 간주된다. Demissie(1980)가 제안한 영역구분의 기준은 다음과 같다.

$$\frac{\Delta u}{(u_m/U)} \leq 0.01 \quad (11)$$

여기서  $\Delta u$ 는 본 연구에서 제안한 중심선유속의 이론식과 점선식 (4)와 (5)의 차이이다. 결과적으로 이 기준에 근거한 세 영역이 그림 10에서 보여지고 있다. 이 그림에서 중심선 유속이  $x/B = 50$ 을 넘어가면서 2차원 제트가 아닌 축대칭 제트의 이론에 가깝게 중심선유속이 감소하고 있으며 종 방향의 거리가 증가할수록 그 차이는 더 커짐을 알 수 있다. 다시 말해서 방류수심이 클 때 상대적으로 작은 종횡비를 갖는 사각형제트의 경우 2차원제트의 이론을 그대로 적용하게 되면 중대한 오차를 야기할 수 있음을 보여준다. 그리고 이 그림에 근거하면 상대적으로 큰 종횡비인 10을 고려할 때 실제 2차원영역의 크기는 의외로 작고 상대적으로 큰 천이영역이 존재함을 알 수 있다.

#### 4.4 횡유속분포의 유사성

본 연구에서 단축뿐만 아니라 장축상에서 횡유속분포의 유사성을 검토하기 위하여 가우스 분포(Gaussian distribution)인 식 (3)에 근간을 두고 최소자승법을 이용하였다. 결과적으로 단축상에서는 횡유속의 전체적인 분포가 초기영역을 제외하고 가우스 분포와 잘 일치하는 반면에 장축상 횡유속분포는 가우스 분포와 잘 일치하지 않았다. 그러나  $x/B$ 가 증가할수록 장축상 횡유속분포가 점차적으로 가우스 분포와 잘 일치하는 경향이 있었다.

단축상에서 횡유속의 가우스 상수( $k_u$ )의 변화가 그림 11에서 보여진다. 이 가우스 상수는 최소자승법을 사용하여 가우스 분포[식 (3)]에 적용함으로써 계산되어졌다. 이 그림에서 또한 두 가지 실험경우로부터 계산된 가우스 상수를 평균하였다. 이 가우스 상수는  $x/B$ 가 증가할수록 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나  $x/B = 19.6$ 과  $31.0$  사이의 영역에서 가우스 상수가 보존되는 경향이 있는데 이 영역이 2차원영역으로 판단된다. 이 영역에서 평균된 가우스 상수가 40.0인데 이는 Albertson 등(1950)이 2차원영역을 위해 제안한 42.08과 잘 일치한다. 그리고 이 영역 이후 가우스 상수가 계속 증가를 하는데 축대칭영역에 도달하게 될 경우 다시 가우스 상수가 보존될 것으로 판단된다. 기존의 연구자들은 이 축대칭영역에서 가우스 상수를 55에서 100까지 다양하게 제안하였다.

#### 4.5 제트반경의 변화

대체적으로 속도분포의 형태와 상관없이 제트의 속도반경은 제트의 중심선으로부터 횡방향으로 중심선유속의  $1/e$ (본 연구) 또는  $1/2$ 에 해당하는 지점까지의 반경으로 정의되고 있다. 본 연구에서는 단축상에서 제트의 반경이 측정된 횡유속분포에 적용한 가우스 분포로부터 결정되었고 장축상에서의 제트의 반경은 측정된 유속지점을 직접 연결한 곡선으로부터 계산되었다. 그림 12는 종횡비가 10인 경우 단축과 장축상에서 두 실험경우의 평균값으로 제트의 반경을 보여주고 있다. 이 그림에서  $y_{1/e}$ 과  $z_{1/e}$ 는 각각 단축과 장축상에서

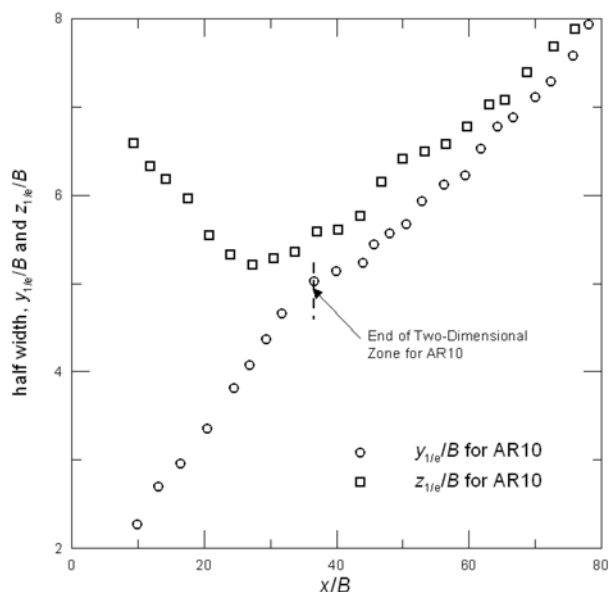


그림 12. 제트유속반경의 변화 (종횡비: 10)

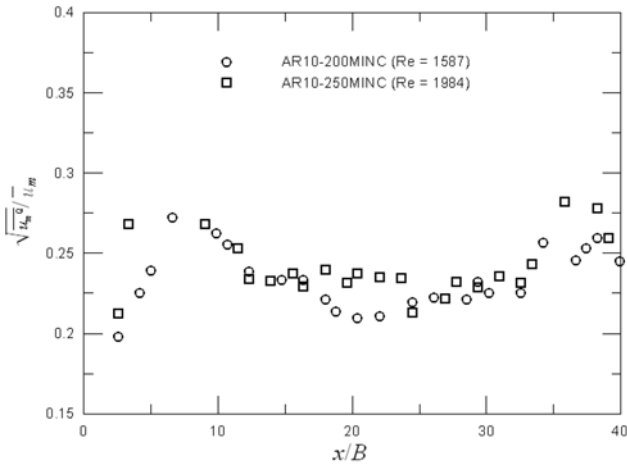


그림 13. 제트중심선 난류강도의 변화 (종횡비: 10)

중심선유속의  $1/e$ 에 해당하는 지점까지의 반경을 가리킨다.

단축상에서 제트의 반경은 종방향으로 진행될수록 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 그 경향을 자세히 관찰해보면  $x/B = 36.6$  지점에서 제트반경변화의 기울기가 약간 감소함을 알 수 있다. 바로 이 지점이 2차원영역의 끝 지점이라고 추론할 수 있다. 결국 이러한 기울기의 감소로부터 사각형제트의 경우 제트의 확장률(spreading rate)이 2차원영역과 축대칭영역에서 서로 다르게 서술되어야 할 것으로 판단된다. 본 2차원영역의 단축상에서 측정된 확장률은 0.125로서 Papanicolaou와 List(1988)에 의해 제안된 0.12의 값에 근접한다. 장축상에서 제트의 반경은 초기에 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이는 제트의 주변에서 형성되는 타원형의 와고리로 인한 안장형 횡분포로 인해 발생하는 현상이라고 판단된다. 결국 단축과 장축상에서 제트반경의 크기가 축대칭영역의 초기지점에서 같아질 것으로 예측된다.

#### 4.6 중심선 난류강도의 변화

$x$ 방향 상대난류강도를 제트중심선을 따라 그림 13에 도시하였다. 여기서 상대난류강도는 다음과 같이 정의된다.

$$x\text{방향 상대난류강도} = \frac{\sqrt{u'^2}}{u_m} = \frac{1}{u_m} \left( \frac{1}{T} \int_0^T u'^2 dt \right)^{1/2} \quad (12)$$

여기서  $u'$ 은  $x$ 방향의 난류변동성분이고  $T$ 는 난류변동성분을 평균하기 위한 시간간격을 가리킨다. 일반적으로 제트의 난류강도는 방류초기 전단층에서 유발된 불안전성에 의해 발생하여 제트가 진화해감에 따라 급격하게 증가한다고 알려져 있다(Lozanova와 Stankov, 1998). 그림 13에서 보여지듯이 제트의 중심선에서 난류강도가 초기영역에서 급격히 증가하고 있다. 그리고 두 가지의 실험경우에 있어서 레이놀즈수가 큰 경우가 작은 경우보다 상대적으로 난류강도가 더 큼을 알 수 있다. 이러한 제트의 중심선 난류강도의 분포는 본 두 가지의 실험경우가 충분히 난류상태를 유지하고 있음을 보여준다.

### 5. 결론 및 제언

본 연구에서는 PIV에 의해 취득된 평균유속장의 실험결과

에 근거하여 10의 종횡비를 갖는 3차원 사각형제트의 거동을 고찰하였다. 먼저 본 연구에서 사용된 PIV 시스템으로 측정된 유속자료를 ADV로 측정된 원형제트의 중심선 유속자료와 서로 비교한 결과 일반적으로 잘 일치하였다. 평균유속의 횡분포로부터 단축상에서의 혼합이 장축상에서의 혼합보다 더 빨리 이루어짐을 알 수 있었다. 그리고 장축상에서의 횡분포가  $x/B = 5.3$ 과 19.9 사이에서 안장형 분포를 나타냈으며 이는 제트의 주변에서 형성되는 타원형의 와고리 때문으로 판단된다.

점원개념으로부터 유도된 이론적인 중심선유속의 분포가 본 실험에서 측정된 중심선유속과 일반적으로 잘 일치하였다. 이러한 이론적인 중심선유속의 분포에 근거하여 2차원영역과 축대칭영역에서 기존의 중심선유속의 멱법칙(power law)과 Demissie(1980)가 제안한 영역구분을 적용한 결과 원류핵영역, 2차원영역, 그리고 축대칭영역을 구분할 수 있었다. 종횡비가 10인 경우  $x/B = 50$ 을 넘어가면서 2차원 제트가 아닌 축대칭제트의 이론에 가깝게 중심선유속이 감소하였으며 거리가 더 증가할수록 그 차이는 더 커졌다. 종횡비가 증가할수록 2차원영역의 범위가 증가할 것으로 예측된다. 이러한 연구결과는 상대적으로 작은 종횡비를 갖는 사각형제트의 거동이나 실제 해양에서 다공화산관의 수심이 매우 큰 경우 방류되는 하·폐수의 거동을 예측할 때 평면제트나 플룸으로 가정하는 2차원모형을 적용하게 되면 2차원영역을 지난 천이영역과 축대칭영역에서 점진적인 오차를 초래할 수 있음을 보여준다.

가우스 분포를 이용하여 최소자승법을 적용한 결과 단축상에서는 횡유속의 분포가 가우스 분포와 잘 일치하는 반면에 장축상 횡유속분포는 초기영역에서 임의의 종방향의 거리는 가우스 분포와 잘 일치하지 않았다. 종방향으로 진행할수록 단축상에서 횡유속의 가우스 상수( $k_u$ )가 증가하였고  $x/B = 19.6$ 과 31.0 사이의 영역에서 가우스 상수가 보존되는 경향이 있는데 이 영역이 2차원영역으로 판단되었다. 이 영역에서 평균된 가우스 상수는 Albertson 등이 제안한 42.08과 잘 일치하였다. 단축상에서 제트의 반경은 종방향으로 진행될수록 증가하다가  $x/B = 36.6$  지점에서 제트반경변화의 기울기가 약간 감소하였는데 이 지점을 2차원영역의 끝 지점이라고 판단할 수 있다. 본 2차원영역의 단축상에서 측정된 확장률은 0.125로서 Papanicolaou와 List(1988)가 제안한 0.12의 값에 근접하였다. 장축상에서 제트의 반경은 초기에 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보여주는데 이는 장축상에서 안장형 횡분포로 인해 발생하는 현상이라고 판단된다. 제트중심선을 따라  $x$ 방향 상대난류강도가 초기영역에서 급격히 증가하였고 레이놀즈수가 큰 경우가 작은 경우보다 상대적으로 난류강도가 더 큼을 알 수 있었다.

하·폐수가 방류될 때 근역에서 정확한 흐름 거동 해석은 해양 생태계에 미치는 영향을 예측하는 중요한 인자이기 때문에 연안 해역으로 배출되는 방류해역의 특성 및 방류관 형식에 따른 수리학적 거동 분석을 수행하여 연안 생태계에 미치는 영향을 최소화할 수 있는 대책수립이 가능할 것으로 판단된다. 향후, 방류 해역 흐름특성을 고려하여 보다 다양한 방류관 형식에 대한 흐름거동을 분석하여 보다 효과적인 생태학적 설계를 위한 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것으로 판단한다.



## 감사의 글

본 연구는 과학기술부 특정기초 연구비 지원(과제번호: R01-2006-000-11027-0; 과제명: 연안수질환경 개선을 위한 하천-해양 통합 해석기술 개발)과 서울대학교 공학연구소의 지원으로 수행되었습니다. 본 연구는 또한 한국해양연구원 중점연구사업인 “하구역 관리 및 복원기술 개발(PE-970-01)” 사업의 일환으로 추진되었습니다. 그리고 국립해양조사원의 지원에도 감사드립니다.

## 참고문헌

- Albertson, M.L., Dai, Y.B., Jensen, R.A., and Rouse, H. (1950) Diffusion of submerged Jets. *Trans. ASCE*, Vol. 115, pp. 639.
- Buchhave, P. (1992) Particle image velocimetry-status and trends. *Exp. Thermal and Fluid Sci.*, Vol. 5, pp. 586-604.
- Crow, S.C. and Champagne, F.H. (1971) Orderly structure in jet turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 48, Part 3, pp. 547-591.
- Curtis, E.S. (1966) Systematic deformations of three-dimensional air jets issuing at subsonic velocities. MS Thesis, University of Maryland, Maryland.
- Daily, J.W. and Harleman, D.R.F. (1966) *Fluid Dynamics*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- Demissie, M. (1980) Diffusion of three-dimensional slot jets with deep and shallow submergence. PhD Thesis, Civil Engineering, University of Illinois, Urbana-Champaign, USA.
- duPlessis, M.P., Wang, R.L., and Kahawita, R. (1974) Investigation of the near region of a square Jet. *Journal of Fluids Engineering*, ASME, Vol. 96, Series I, No. 3, pp. 246-251.
- Fischer, H.B., Imberger, J., List, E.J., Koh, R.C.Y., and Brooks, N. H.(1979) *Mixing in Inland and Coastal Waters*, Academic Press, New York.
- Gutmark, E.J. and Grinstein, F.F. (1999) flow control with noncircular jets. *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 31, pp. 239-272.
- Hongwei, W. (2000) Investigations of buoyant jet discharges Using DPIV and PLIF. PhD Thesis, Civil & Structural Engineering, Nanyang Technological University, Singapore.
- Jirka, G.H. and Akar, P.J. (1991) Hydrodynamic classification of submerged multiport-diffuser discharges. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 117, No. 9, pp. 1113-1128.
- Kim, Y.H., Seo, I. W., and Ahn, J. K. (2001) Flow characteristics of a two-dimensional neutrally buoyant jet in a model settling tank. *Water Engineering Research*, Vol. 2, pp. 21-31.
- Lozanova, M. and Stankov, P. (1998) Experimental investigation on the similarity of a 3D rectangular turbulent Jet. *Experiments in Fluids*, Vol. 24, pp. 470-478.
- Maxwell, W.H.C. and Demise, M. (1976) Experimental studies of wing-wall mixing control. *University of Illinois Water Resources Center, Research Report No. 110*, Feb., Illinois.
- Pani, B.S. and Dash, R.N. (1983) Three dimensional single and multiple free jets. *Journal of Hydraulic Division*, Vol. 109, No. 2, pp. 254-269.
- Pani, B.S. and Parameswaran, P.V. (1994) Momentum and heat flux characteristics of three dimensional jets based on point-source concept. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 32, No. 53-66.
- Papanicolaou, P.N. and List, E.J. (1988) Investigations of round vertical turbulent buoyant jets. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 195, pp. 341-391.
- Roberts, P.J.W. and Snyder, W.H. (1993a) Hydraulic model study for boston outfall. I: Riser configuration. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 119, No. 9, pp. 970-987.
- Roberts, P.J.W. and Snyder, W.H. (1993b) Hydraulic model study for boston outfall. II: Environmental Performance. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 119, No. 9, pp. 988-1002.
- Sfeir, A.A. (1976) The velocity and temperature fields of rectangular jets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 19, pp. 1989-1297.
- Sforza, P.M., Steiger, M.H., and Trentacoste, N. (1966) Studies on three-dimensional viscous Jets. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, Vol. 4, No. 5, pp. 800-806.
- Welch, E.B. and Lindell, T. (1992) *Ecological Effects of Wastewater*, Applied Limnology and Pollutant Effects, E & FN Spon, Part I.
- Yevdjovich, V.M. (1966) Diffusion of slot jets with finite orifice length-width ratios. *Hydraulic Papers*, No. 2, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.

(접수일: 2006.4.10/심사일: 2006.5.23/심사완료일: 2006.6.22)