

천해역에 방류되는 원형 다공바닥젤의 유속구조

김 대 군 · 서 일 원*
대불대학교 토목환경공학과 · 서울대학교 토목공학과
(2002년 6월 19일 접수; 2002년 9월 16일 채택)

Velocity Structure of Wall Jet Originating from Circular Orifices in Shallow Water

Dae-Geun Kim and Il-Won Seo*

Department of Civil & Environmental Engineering, Daebul University, Chonnam 526-702, Korea
*School of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National University, Seoul 141-742, Korea
(Manuscript received 19 June, 2002; accepted 16 September, 2002)

In this study, breakwater model which has several outlet pipes to discharge water is settled in the experimental open channel and mean velocity distributions of multi wall jet are measured. The length of zone of flow establishment of wall jet is shorter than that of free jet and decay rate of jet centerline longitudinal velocity along x is linear in $0.3 \leq x/l_p \leq 17$. The rate of vertical width and lateral width spreading of multi wall jet is respectively 0.0753, 0.157.

Key words : wall jet, length of zone of flow establishment, free jet, rate of width spreading

1. 서 론

국내의 전기에너지 수요는 생활수준의 향상과 산업화로 인해 급속한 성장을 보여왔다. 이러한 전력 수요에 맞추어 대규모의 발전용량을 가지는 원자력 발전소의 건설이 이루어져 왔으며, 지속적인 건설계획이 수립되어 있다. 이러한 대규모 원자력발전소는 냉각수로 사용된 다량의 온배수를 주변 수계에 방류하게 된다. 국내의 원자력발전소 부지는 영광, 고리, 울진, 월성 등 4곳에 위치하고 있는데, 신규 부지를 조성하는 것은 현실적으로 어려운 문제이다. 따라서 기존 4곳의 부지에서 발생하는 온배수의 양은 점차 증가할 것이며, 이로 인해 주변 수계에 미치는 환경적인 악영향도 점차 증가할 것이다. 또한 양호한 냉각수를 취수할 수 없어 발전효율을 떨어뜨리는 요인이 될수도 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 국내에서도 보다 효율적인 온배수 방류방식에 대한 연구가 필요한 시점이 되었다. 온배수의 수표면방류는 가장 간단하고 경제적인 방

류방식이나, 이는 주변 수계의 수온을 상승시키는 원인이 된다. 이에 주변 수계에 미치는 수온상승을 최소화하기 위하여, 월성원자력발전소에서는 온배수 방류용 유출구를 방파제의 지면에 설치하고, 이곳을 통해 온배수를 저층에 방류하는 공법을 채택하였다. 이러한 방파제의 유출구에서 방류되는 유속구조는 원형바닥젤이론을 이용하여 해석할 수 있는데, Fig. 1은 전형적인 유속분포를 나타낸 것이다. 여기에서 D 는 유출구의 직경, h_1 , h_2 는 각각 방파제 내해 및 외해의 수심이다. U_0 는 유출구에서의 방류유속이다. U_m 은 젤 중심선에서의 종방향유속이다. z_m 은 U_m 이 발생하는 연직위치이다.

고체의 바닥경계를 가지는 젤로 정의되는 바닥젤은 고정경계조건과 자유경계조건을 모두 가지게 되어 흥미로운 유속분포특성을 보이는데, 자유젤의 특성과 바닥경계의 영향을 받는 경계층 흐름특성을 모두 보이게 된다. Fig. 2는 전형적인 원형바닥젤의 유속구조를 도시한 것으로, $z_{m/2}$ 은 $U_m/2$ 이 발생하는 연직위치이다. Fig. 2(a)는 바닥의 고정경계와 무한경계를 가지는 경우로, 유속분포는 z_m 을 경계로 하부는 전형적인 난류경계층(turbulent boundary

Corresponding Author : Dae-Geun Kim, Department of Civil & Environmental Engineering, Daebul University, Chonnam 526-702, Korea
Phone : +82-61-469-1322
E-mail : greatgkim@mail.daebul.ac.kr

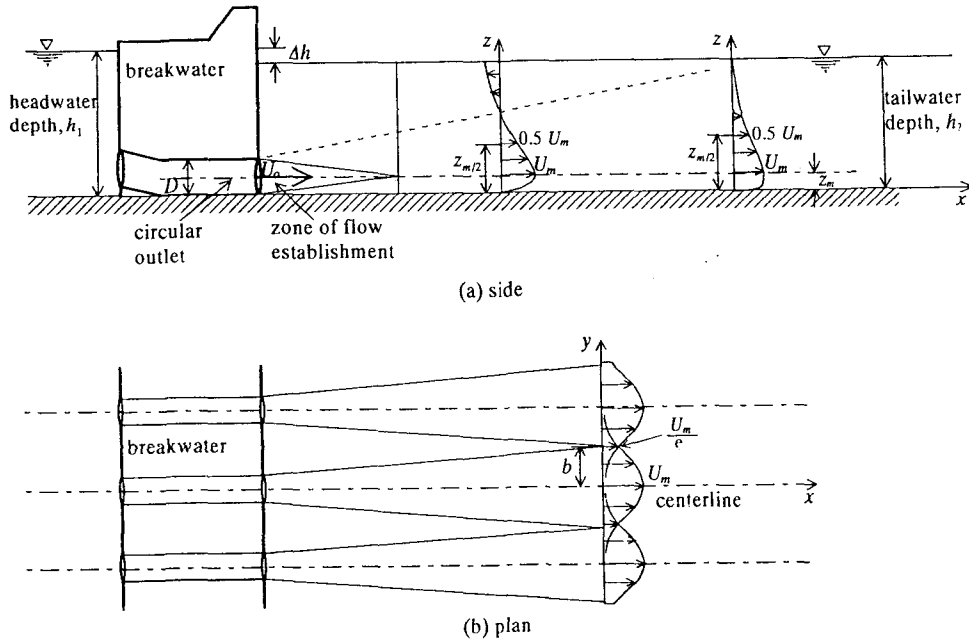


Fig. 1. Typical Mean Velocity Distribution of the Flow Discharged from Breakwater Outlets.

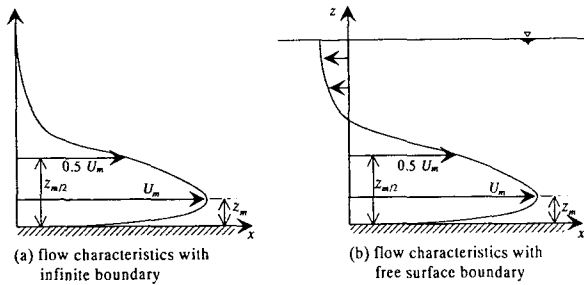


Fig. 2. Flow Characteristics of Round Wall Jet.

layer)을 형성하고 상부는 자유전단흐름층(free shear flow layer)을 형성한다. Fig. 2(b)는 바닥의 고정경계와 자유수면경계(free surface boundary)를 가지는 경우로, 질에 포획연행(jet entrainment)되는 질량을 보충하기 위하여 일정구간까지는 자유수면 근처에서 후류(back current)가 발생하는 특성을 보인다.

본 연구에서는 바닥의 고정경계와 자유수면경계를 가지는 원형의 다공바닥제의 유속구조를 해석하기 위하여 실험용 개수로에 모형을 설치하였다. 본 연구에서는 시간평균 유속을 측정하고 이를 자유제의 유속분포와 비교하였으며, 연직 및 횡방향의 질확장률을 산정하였다.

2. 이론적 배경

2.1. 유속규모와 연직길이규모

무한경계를 가지는 실험적인 연구는 수중익이나 비행체의 설계를 위하여 오래 전부터 수행되어 왔다. Glauert¹⁾는 원형 및 평면 바닥제에 대해 이론적인 연구를 수행하였으며, 유속분포는 자기상사성을 가지고 있음을 보였다. 원형바닥제의 유속분포, 거리에 따른 유속규모 및 길이규모의 변화에 대한 실험이 Bakke²⁾에 의해 수행되었다. 그는 실험결과를 통해 유속규모(U_m)는 거리의 -1.12의 지수승으로 변화하며, 연직길이규모($z_{m/2}$)는 거리의 0.94의 지수승으로 변화함을 보였다. 2차원 평면 바닥제의 유속분포, 유속규모 및 연직길이규모에 대한 연구가 Schwarz와 Cosart³⁾에 의해 수행되었다. 그들은 실험결과를 통해 유속규모는 거리의 -0.555의 지수승으로 변화하며, 연직길이규모는 거리의 1.0의 지수승으로 변화함을 보였다. $z_{m/2}$ 의 무차원방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{z_{m/2}}{l_q} = \left(\frac{fx}{l_q}, Re \right) \quad (1)$$

여기서 Re 는 방류레이놀즈수이다. 방류형상길이규모(discharge geometric length scale), l_q 는 다음과 같이 정의된다.

$$l_q = \frac{Q}{\sqrt{M}} = \sqrt{A} \quad (2)$$

여기서 Q 는 방류체적속(discharge volume flux), M 은 방류운동량속(discharge momentum flux)이고 A 는 방류구의 단면적이다. 식 (2)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{z_{m/2}}{l_q} = \frac{x}{l_q} f_1(\text{Re}) \quad (3)$$

Schwarz와 Cosart³⁾는 $f_1(\text{Re})$ 가 방류레이놀즈수의 함수형태가 아님을 밝혔으며, Lanuder와 Rodi⁴⁾는 다음과 같은 관계식을 제안하였다

$$\frac{dz_{m/2}}{dx} = 0.073 \pm 0.002 \quad \text{for 평면바닥젤} \quad (4a)$$

$$\frac{dz_{m/2}}{dx} = 0.090 \pm 0.002 \quad \text{for 원형바닥젤} \quad (4b)$$

Newmann 등⁵⁾은 원형바닥젤의 유속분포가 평면바닥젤에 비해 훨씬 빠르게 확산됨을 보였다. Davis와 Winarto⁶⁾는 방류구가 바닥경계에서 떨어진 거리에 따른 원형바닥젤의 유속분포특성을 연구하였으며, 또한 연직 및 횡방향의 젤 확장률을 연구하였다. Wagnanski 등⁷⁾과 Katz 등⁸⁾은 방류레이놀즈수를 변화시켜가며 평면바닥젤의 유속분포특성을 연구하였으며, 유속규모는 거리의 -0.47의 지수승으로 변화하며, 연직길이규모는 거리의 0.88의 지수승으로 변화함을 보였다.

자유수면을 가지는 바닥젤에 대한 연구는 평면수문(slucice gate)에서 방류되는 흐름에 대한 연구⁹⁻¹¹⁾가 있다. Rajaratnam⁹⁾은 수중에 잠긴 수문에서 방류된 흐름에 대해 평면바닥젤 이론을 이용하여 흐름을 해석하였다. 그에 의하면 유속규모는 거리의 -0.515의 지수승으로 변화하며, 연직길이규모는 거리의 1.0의 지수승으로 변화한다. Rajaratnam과 Humphries¹¹⁾의 실험결과에 의하면, 젤의 횡확장률 및 젤 중앙부의 유속분포는 수심과 젤 방류구의 두께에 따라 변한다.

Table 1에는 바닥젤의 유속규모와 연직길이규모에 대한 기존의 연구결과를 정리하였다.

2.2. 횡길이규모

일반적으로 단일젤의 유속의 횡분포는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{U}{U_m} = \exp\left[-\left(\frac{y}{b}\right)^2\right] \quad (5)$$

여기서 y 는 횡좌표, b 는 젤의 횡방향폭(lateral width)으로 젤의 중앙에서 종방향유속이 $0.37 U_m$ 이 되는 지점까지의 폭이다. 단일젤에 대한 많은 연구결과, 횡방향폭이 다음과 같은 관계를 가지고 있음이 밝혀졌다.¹³⁾

Table 1. Summary of variation of velocity and vertical length scale for wall jet

	공기중 실험		수중 실험	
	평면젤	원형젤	평면젤	원형젤
유속규모 (U_m)	$x^{0.555}$ (Schwarz & Cosart, 1961)	$x^{-1.12}$ (Bakke, 1957)	$x^{0.515}$ (Rajaratnam, 1965)	x^{-1} (deep water, Wu & Rajaratnam, 1983) $x^{-0.5}$ (shallow water, Wu & Rajaratnam, 1983)
연직길이규모 ($z_{m/2}$)	$x^{1.0}$ (Schwarz & Cosart, 1961) $x^{1.0}$ (Lauder & Rodi, 1983) $x^{0.88}$ (Wagnanski et al., 1992)	$x^{0.94}$ (Bakke, 1957) $x^{1.0}$ (Davis & Winarto, 1980) $x^{1.0}$ (Lauder & Rodi, 1983)	$x^{1.0}$ (Rajaratnam, 1965)	$x^{1.0}$ (Wu & Rajaratnam, 1983)

$$\frac{db}{dx} = 0.107 \quad (6)$$

Wood 등¹⁴⁾에 의하면, 자유다공젤(free multi jet)의 유속분포는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{U}{U_m} = \frac{\exp\left(-\left(\frac{z}{b}\right)^2\right) \sum_{n=0}^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{y_1+n}{b_1}\right)^2\right]}{\sum_{n=0}^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{n}{b_1}\right)^2\right]} \quad (7)$$

여기서 U_m 은 병합이 이루어지는 개개 젤의 중앙부에서의 유속이고, n 은 방류가 이루어지는 포트의 개수이며, y_1 과 b_1 은 다음과 같이 정의된다.

$$y_1 = y/l \quad (8a)$$

$$b_1 = b/l \quad (8b)$$

여기서 l 은 포트와 포트의 간격이다.

단일자유젤에서의 종방향유속의 감쇄율은 다음과 같이 정의된다.¹³⁾ 길이규모가 7에 이르기까지는 종방향유속의 감쇄가 발생하지 않고, 그 다음부터 x^{-1} 에 비례하여 유속이 감쇄함을 의미한다.

$$\frac{U_m}{U_0} = 7\left(\frac{l_q}{x}\right) \quad \text{for } \frac{x}{l_q} > 7.0 \quad (9)$$

3. 실험연구

3.1. 수리모형

길이 12m, 폭 0.5m, 깊이 0.5m의 실험용개수로에

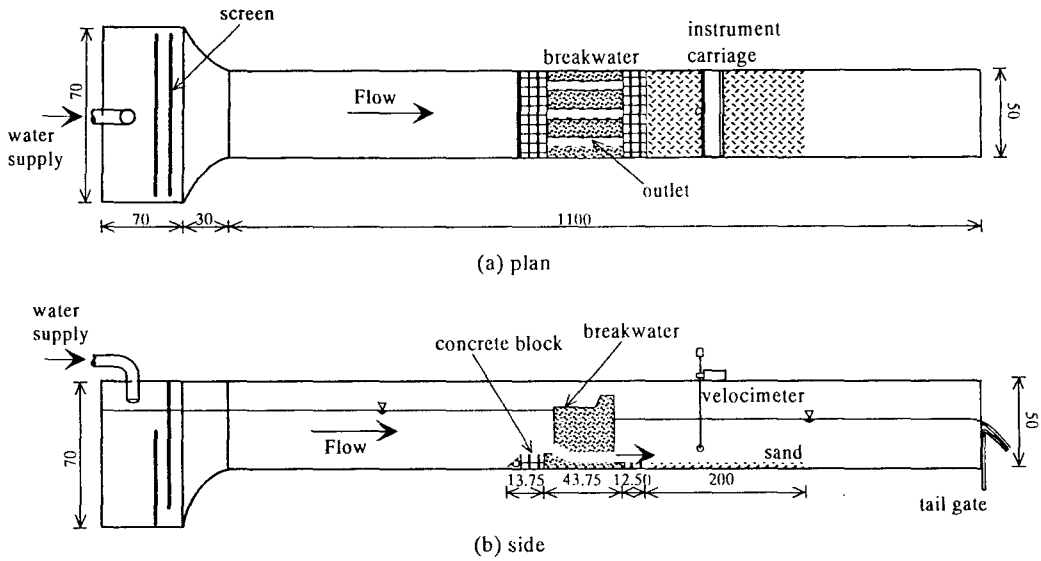


Fig. 3. Schematic Diagram of Laboratory Flume and Experimental Setup(unit: cm).

은배수방류용 방파제모형을 설치하였다. 방파제모형은 3개의 방류구를 가지고 있으며, 방류구의 직경은 5cm, 방류구간의 거리는 15cm이다. Fig. 3은 실험용 개수로에 방파제모형이 설치된 개념도를 도시한 것이다.

유량은 위어를 이용하여 조정하였으며, 수위는 정밀도 0.01cm의 포인트게이지를 이용하여 측정하였다. 유속은 실험용 프로펠러형 유속계를 사용하여 측정하였으며, 방류구에서의 유속은 방파제 모형 상류와 하류의 수위차를 이용하여 제어하였다.

3.2. 실험조건

실험은 크게 세가지 종류에 대하여 수행되었다. CASE 1은 방류유속이 약 60cm/s, CASE 2는 방류유속이 약 50cm/s, CASE 3은 방류유속이 약 40cm/s에 대하여 수행되었다. Table 2는 실험종류별 방류유속을 정리한 것이다. 본 실험에서의 방류레이놀즈수는 약 20,000~30,000이다.

4. 실험결과

4.1. 연직유속분포

Fig. 4는 CASE 1에 대한 연직유속분포를 도시한 것이다. 연직유속분포는 Fig. 2(b)의 이론적인 유속분포와 동일한 결과를 보이고 있다. 본 연구에서 수집된 자료를 이용한 결과, 식 (3)의 $f_1(Re)$ 는 0.0753으로 분석되었다. 따라서 식 (3)은 다음과 같다.

$$\frac{z_{m/2}}{l_q} = 0.0753 \left(\frac{x}{l_q} + 14.91 \right) \quad (10)$$

Table 2. Experimental Conditions of Discharge Velocity

CASE (cm/s)	CASE 1-1	CASE 1-2	CASE 1-3
		59.61	58.01
CASE 2-1	CASE 2-1	CASE 2-2	CASE 2-3
	48.51	49.41	50.60
CASE 3-1	CASE 3-1	CASE 3-2	CASE 3-3
	42.60	43.61	47.20

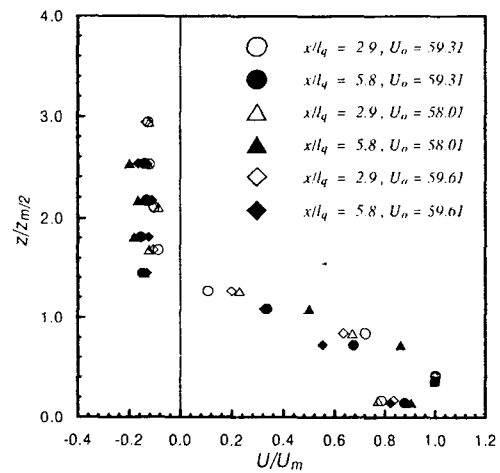


Fig. 4. Vertical Distributions of Centerline Velocity.

식 (10)을 통해 원형바닥젤의 연직길이규모는 거리의 1.0의 지수승으로 변화하며, 젤의 연직확장률은 0.0753임을 알 수 있다. 이러한 결과는 이전 연구자

들의 결과와 비슷하다.^{3,4)}

4.2. 유속감쇄율

Fig. 5는 젤 중심의 종방향유속의 감쇄율을 보여 준다. 여기에서 실선은 자유단일젤의 무차원유속분포이며, 점선은 자유다공젤(방류구 3개)의 무차원유속분포이다. 자유다공젤의 경우 젤의 확장 및 이에 따른 유속의 증첩효과로 인해 자유단일젤에 비해 유속이 큰 값을 보이고 있다. 개개의 점들은 본 실험에서 실측한 바닥젤의 유속분포이며, 일점쇄선은 실험결과를 이용하여 산정한 회귀곡선이다. 바닥젤의 유속분포특성은 첫째, 흐름확립구간의 길이가 짧고 둘째 회귀곡선으로 판단할 때, 유속의 감쇄율이 선형이라는 점이다. 회귀곡선식은 다음과 같다.

$$\frac{U_m}{U_0} = -0.0516 \frac{x}{l_q} + 1.0166$$

for $0.3 \leq x/l_q \leq 17$ (11)

바닥젤과 자유젤의 이러한 유속분포의 차이는 바

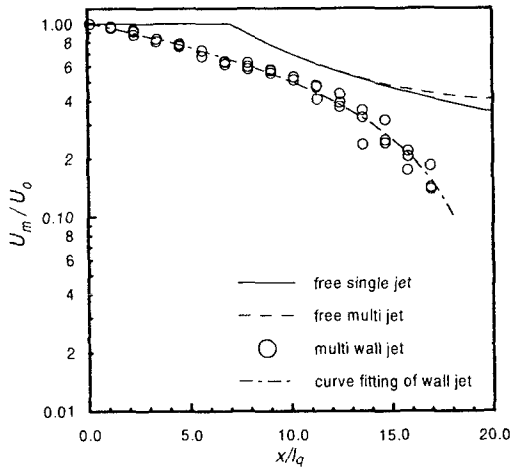


Fig. 5. Decay Rate of Centerline Longitudinal Velocity.

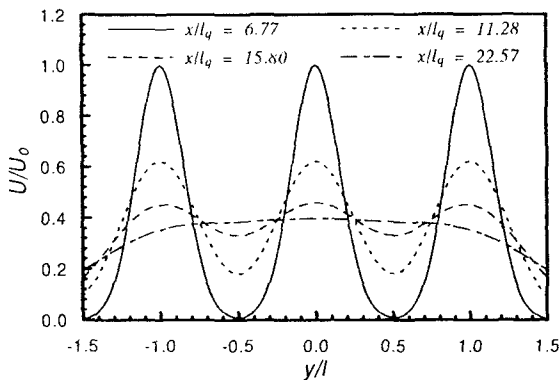


Fig. 6. Lateral Distributions of Longitudinal Velocity of Free Multi Jet.

다경계 및 자유수면경계의 유무에 따라 발생하는 것으로 유추할 수 있다.

4.3. 횡방향유속분포

Fig. 6은 식 (7)에 Fig. 5의 U_m/U_0 을 곱하여 도시한 것이다. $x/l_q \geq 15.0$ 인 경우에는 거의 2차원적인 유속분포를 보이고 있음을 알 수 있다.

다공바닥젤의 횡방향유속분포 특성을 연구하기 위하여, 식 (5)를 최적화시키도록 실측된 횡방향유속분포의 확장상수를 결정하였다. Table 3은 종방향거리에 따른 확장상수를 정리한 것이다.

Fig. 7은 종방향유속의 횡분포를 도시한 것으로, 실선은 식 (5)에 확장상수 0.157을 적용하여 도시한 것이다. 0.157은 Table 3에서 $x/l_q \geq 5.64$ 구간에 대한 확장상수의 평균값으로, 이 구간에서 유속의 횡분포는 충분히 Gaussian분포를 나타낸다. Wood 등¹⁴⁾에 의하면 원형자유젤과 평면자유젤의 확장상수는 각각 0.107과 0.120이며, Fig. 7의 점선과 일점쇄선은 이를 도시한 것이다. 바닥젤의 확장상수는 자유젤의 확장상수보다 큰 값을 보이고 있으며, 이는 바닥마찰로 인한 것으로 판단된다. 또한 바닥젤의 횡확장률은 연직확장률의 약 2배에 이르는 것으로 분석되었다.

Table 3. A Summary of Spread Constants with Several Dimensionless Distance(CASE 1-2)

x/l_q	1.13	2.26	3.38	4.51	5.64	6.77	7.90	9.03	10.17	11.28
$.db/dx$	0.726	0.354	0.260	0.193	0.181	0.169	0.161	0.149	0.128	0.154

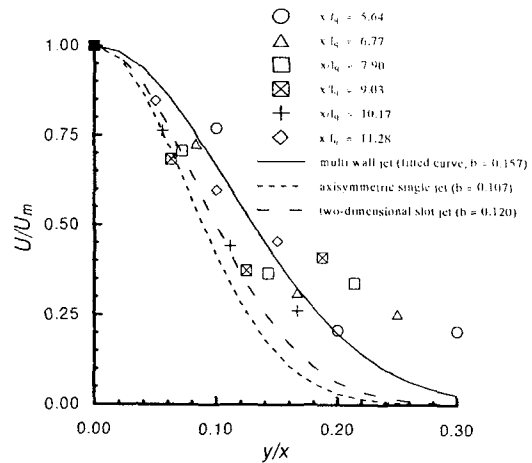


Fig. 7. Lateral Distributions of Longitudinal Velocity.

5. 결 론

원형의 방류구에서 천해역에 방류되는 젤에 대하여 유속분포를 실측하였으며, 실측된 유속분포는 원형바닥젤이론을 이용하여 해석하였다. 본 연구에서는 다공바닥젤의 횡 및 연직유속분포를 다공자유젤과 비교하였다. 다공바닥젤의 흐름확립구간은 자유젤에 비하여 훨씬 짧았으며, 젤 중앙부의 종방향유속 감쇄율은 선형이었다. 바닥젤의 연직확장률은 0.0753이었으며 이는 기존 연구결과와 거의 동일하였다. 바닥젤의 횡확장률은 0.157로서 자유젤의 확장률에 비해 큰 값을 보이고 있다. 이는 바닥의 마찰로 인해 바닥젤이 자유젤에 비해 빨리 2차원적인 유속분포특성을 보이게 됨을 의미한다. 바닥젤의 횡확장률은 연직확장률의 약 2배에 이른다.

참 고 문 헌

- 1) Glauert, M. B., 1956, The wall jet, J. of Fluid Mechanics, 1, 625-635.
- 2) Bakke, P., 1957, Experimental investigation of wall jet, J. of Fluid Mechanics, 2, 467-472.
- 3) Schwarz, W. H. and W. P. Cosart, 1961, The two-dimensional turbulent wall-jet, J. of Fluid Mechanics, 10, 481-495.
- 4) Launder, B. E. and W. Rodi, 1983, The turbulent wall jet-measurements and modeling, Annual Reviews of Fluid Mechanics, 15, 429-459
- 5) Newmann, B. G., R. P. Patel, S. B. Savage, and H.K. Tjio, 1972, Three dimensional wall jet originating from a circular orifice, Aero quart., 23, 188-200.
- 6) Davis, M. R. and H. Winarto, 1980, Jet diffusion from a circular nozzle above a solid plane, J. of Fluid Mechanics, 101, 201-221.
- 7) Wygnanski, I., Katz, Y., and Horev, E., 1992, On the application of various scaling laws to the turbulent wall jet, J. of Fluid Mechanics, 234, 669-690.
- 8) Katz, Y., E. Horev, and I. Wygnanski, 1992, The forced turbulent wall jet, J. of Fluid Mechanics, 242, 577-609.
- 9) Rajaratnam, N., 1965, Submerged hydraulic jump, J. of hydraulics div., ASCE, 91, HY4, 71-96.
- 10) Rajaratnam, N., 1976, Turbulent jets, Elsevier Scientific Publishing Co.
- 11) Rajaratnam, N. and J. A. Humphries, 1983, Diffusion of bluff wall jets in finite depth tailwater, J. of hydraulic eng. ASCE, 109(11), 1471-1486.
- 12) Wu, S. and N. Rajaratnam, 1995, Fee jumps, submerged jumps and wall jets, J. of hydraulic research, 33(2), 197-212.
- 13) Fischer, H. B., E. J. List, R. C. Y. Koh, J. Imberger, and N.H. Brooks, 1979, Mixing in inland and coastal waters, ACADEMIC PRESS, INC.
- 14) Wood, I. R., R.G. Bell, and D. L. Wilkinson, 1993, Ocean disposal of wastewater, World Scientific.