

## 원형바닥젯의 유속구조 해석 Analysis of Velocity Structure of Round Wall Jet

김 대 근\* / 서 일 원\*\*  
Kim, Dae Geun / Seo, Il Won

---

### Abstract

In this study, breakwater model which has several outlet pipes to discharge heated water is settled in the experimental open channel and velocity distribution of wall jet is measured. Numerical simulation of velocity structure of wall jet using 3-dimensional computer model, Fluent model, is also carried out. The calculated results are verified with the experimental results and the flow characteristics of wall jet are investigated. The length of zone of flow establishment of wall jet is shorter than that of free jet, and the diminution rate of jet centerline longitudinal velocity is larger than that of free jet. Characteristics of buoyant jet and non-buoyant simple jet simulated by Fluent model are compared. Near the outlet pipe, jet centerline longitudinal velocity of buoyant jet is bigger than that of non-buoyant jet, but in the region where  $x/l_0$  is over 15, this is reversed. Comparison of vertical distribution of longitudinal velocity shows that positive velocity of non-buoyant jet is bigger than that of buoyant jet in the bottom layer and in the upper layer, negative velocity of non-buoyant jet is bigger too. Flow separation in free surface of the buoyant jet occurs in smaller distances from the outlet than the non-buoyant jet. Buoyant jet expands faster than the non-buoyant jet in vertical direction.

---

### 요 지

본 연구에서는 실험개수로에 온수방류용 방류구가 있는 방파제의 모형을 설치하여 바닥젯의 유속분포를 측정하였다. 또한 3차원 모형인 Fluent 모형을 이용하여 방파제의 방류구로부터 배출된 바닥젯의 유속구조를 수치모의하여 실험결과와 비교·검증하였으며 흐름특성을 규명하였다. 바닥젯은 자유젯에 비하여 흐름의 확립구간이 짧았으며, 종방향거리에 대한 젯 중앙유속의 감소율이 자유젯보다 크게 나타나고 있음이 밝혀졌다. 단순젯과 부력젯의 젯 중앙선에서의 종방향유속을 비교한 결과, 방류구 근처에서는 부력젯의 유속이 크게 발생하나  $x/l_0$ 가 15보다 큰 구간에서는 도리어 작게 된다. 종방향유속의 연직분포를 비교한 결과, 방류구로부터 멀어질수록 저층에서는 단순젯의 유속이 크게 나타나며 상층에서는 단순젯의 부의 유속이 크게 나타나고 있음이 밝혀졌다. 또한 부력젯의 경우 자유수면에서의 유속의 분리가 단순젯보다 방류구로부터 가까운 거리에서 발생한다. 부력젯의 연직방향으로의 폭은 단순젯의 폭보다 빨리 확장된다.

*Keywords:* round wall jet, free jet, velocity distribution

---

\* 서울대학교 대학원 토목공학과 박사과정  
\*\* 서울대학교 공과대학 토목공학과 부교수

## 1. 서 론

일반적으로 원자력발전소의 운전시 원자로에서 공급되는 전체 열량중에서 절반정도는 방열된다. 이러한 방열은 복수기(condenser)를 통하여 이루어지며 냉각매체의 종류에 따라 강, 바다 또는 대기중으로 방출된다. 현재 국내에 설치되어 있는 화력 및 원자력발전소는 거의 해안에 위치하고 있으며 해수를 냉각수로 이용하고 있다. 이에 따라 복수기로부터 해양에 방출되는 주변수보다 수온이 높은 온배수는 인근연안의 형상, 조류특성, 방류방법에 따라 정도의 차이는 있지만 열오염(thermal pollution)을 발생시킬 가능성이 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 월성원자력발전소 3, 4호기 온배수영향의 저감방안으로 제시된 것이 온수방류용 방류구를 가진 방파제 축조에 의한 저층방류안이다(한국전력공사, 1994). 이 안은 월성원전 3, 4호기의 냉각수 배수구 주위에 방파제를 축조하여 2개호기분의 온수를 방파제의 저층에 설치된 방류구를 통해 외해로 수중방류함으로써, 수표면방류에 비해 상대적으로 큰 초기혼합을 유도하여 열영향의 범위를 줄이고자 하는 방안이다. 서일원(1995)은 유공방파제의 내부와 외해간의 수두차에 의해 배출되는 방류수의 종방향, 횡방향, 연직방향의 유속분포를 규명하기 위하여 수리모형 실험을 수행하였다. 수리모형실험에서는 일정한 수온의 담수를 이용하여 주변의 해수와 방류수를 재현하였기 때문에 온수의 유출특성인 부력젯(buoyant jet)의 유속구조해석이라기 보다는 방파제의 내·외부역의 수두차에 의해 효율적인 초기혼합을 유도할 수 있는 방류유속이 발생하는지의 여부에 초점이 맞추어져 수행되었다.

본 연구에서는 모형실험연구에서 측정된 유속분포를 원형바다젤(round wall jet)이론에 의해 분석하였다. 또한 방파제의 방류구를 통해 온수를 저층방류하는 경우의 유속구조를 수치모형에 의해 해석하였다. 실험자료를 이용하여 수치모형의 실효성을 검증하였고, 나아가서 수치모의를 수행하여 부력젯과 단순젯(non-buoyant simple jet)의 흐름특성을 분석하였다.

## 2. 연구동향

국내의 경우 온배수와 관련된 연구는 주로 표층방류에 집중되어 왔다. 실험연구로는 윤태훈(1994)의 방류구길이에 따른 온수의 귀환길이에 관한 연구가 있다. 이남주 등(1994)은 수치모형을 이용한 표층방류의 해석을 위한 난류방정식으로 4방정식모형을 제시하였으

며, 난류모형과 관련한 국내·외의 연구를 요약·정리하였으며, 정태성(1994)은 3차원 온배수확산모형을 개발하여 월성해역에 적용한 바 있다. 또한 한국전력공사(1996)에서는 기존 발전소 부지의 온배수 영향 저감방안을 연구하기 위하여 3차원 온배수확산 수치모형을 이용하였다. 심충방류와 관계된 연구로 주목할만한 것은 윤태훈(1985), 윤태훈 등(1986, 1987), 윤태훈과 전시영(1987), 윤태훈과 한운우(1988)의 실험연구 및 수치모형연구인데, 이들은 켈에 관한 일련의 연구를 수행하여 부력, 밀도푸르드수, 가로흐름의 영향이 켈의 거동에 미치는 영향을 분석하였다.

원형바다젤의 실험적인 연구동향을 살펴보면 다음과 같다. 바다젤의 실험적인 연구는 공중익 및 수중익의 설계를 위하여 많은 연구가 수행된 바 있다(Newman 등, 1972; Davis 와 Winarto, 1980; Wagnanski 등, 1992). Newman 등(1972)은 바닥면에 접한 원형노즐에서의 분사를 연구했는데, 연구 결과 방류구에서 일정거리 이상 떨어진 곳에서는 평균유속의 분포가 저면에 수직인 방향보다는 평행한 방향으로 급속히 확산됨을 보고하였다. Davis와 Winarto(1980)는 바닥면에 위치한 원형노즐로 부터의 분사에 대해 수평방향의 확산이 연직방향의 확산보다 크게 되는 구조를 파악하기 위하여 난류흐름의 구조를 상세히 측정하였다. 난류와 레이놀즈응력의 측정결과를 분석하여 바다면에 수평한 방향으로의 혼합효과가 연직방향으로의 혼합효과보다 크게 나타나고 그 비가 8.5정도임을 보였다. Wagnanski 등(1992)은 2차원 평면바다젤에 대하여 다양한 레이놀즈수에 따른 평균유속분포를 실험을 통하여 측정하였다. 그 결과 흐름의 주된 형태는 초기모멘텀플럭스, 유체의 점성과 밀도에 의해 결정됨을 보고하였다. 하지만 위와 같은 연구는 주로 공기를 이용한 실험이 대부분이고 수리학분야에서는 국내·외를 통하여 연구가 활발히 수행되지 못하고 있는 실정이다.

Fig. 1은 저면에 밀착된 원형바다젤의 전형적인 평균유속의 분포를 보이고 있다.  $D$ 는 방류관의 직경이고,  $h$ 는 수심이며,  $U_0$ 는 방류구에서의 초기방류유속이고,  $U_m$ 은 단면의 최대유속이고,  $y_m$ 은 최대유속이 발생하는 지점의 연직방향의 거리이다.  $y_m/z$ 는 단면최대유속의 반이 되는 위치를 설명하고 있다. 지금까지 주로 연구된 공기를 이용한 저층분사의 경우는  $y$ 방향으로 무한한 경계를 가지게 되므로 Fig. 1(b)와 같은 연직방향의 평균유속의 분포를 가지는데 크게 2개의 층으로 이루어진 것으로 설명할 수 있다.

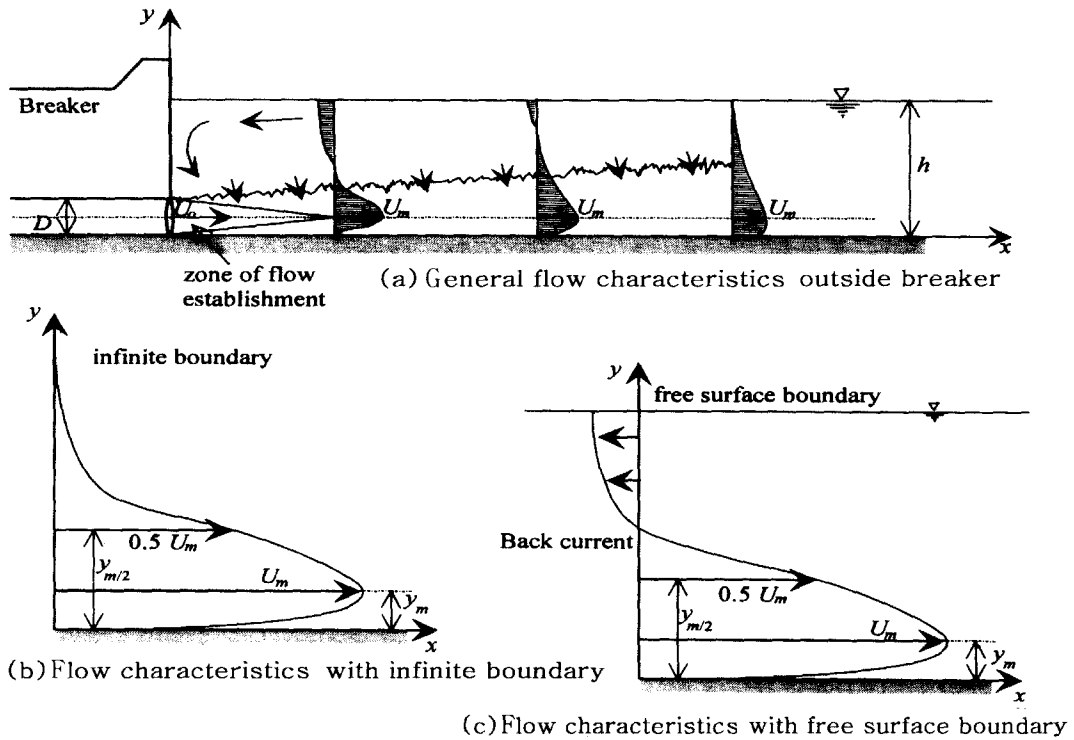


Fig. 1. Flow Characteristics of Round Wall Jet

저면에서  $y_m$ 까지는 내측으로 전형적인 난류경계층(turbulent boundary layer)과 같은 형태를 가지고 그 외측은 자유전단흐름(free shear flow)의 형태를 가진다.

본 연구에서는 저층의 바닥경계뿐만 아니라 자유수면 경계가 존재하고, 또한 방파제의 저면에서 방류가 이루어지므로 방파제가 경계로 존재하고 있다. 따라서 질에 의해 포획된 주변수의 보충을 위하여 자유수면 부근에서는 방류방향과 반대방향으로의 역류가 발생하게 된다. 이러한 유속구조를 도시한 것이 Fig. 1(c)이다.

### 3. 수리모형실험

수리모형실험에서는 월성원자력발전소 3, 4호기 부지에 축조될 유공방파제를 모형으로 재현하였으며 방류수는 주변수와 동일한 수온을 가지는 물을 이용하였다. 실험수로는 경사조절식 개수로로서 길이, 폭, 높이가 각각 15 m, 0.5 m, 0.5 m이다. 개수로에 공급되는 유량은 상류에 설치되어 있는 위어를 이용하여 측정하였다. 수위는 개수로의 양단에 위치한 레일위를 종방향으로 움직이는 이송장치에 표준형 포인트게이지(오차 0.1 mm)를 부착하여 측정하였고, 이송장치는 포인트게이지

및 유속계의 검출부를 수로내에 원하는 측정지점에 정확하게 위치시킬 수 있도록 중, 횡, 연직방향으로 이동할 수 있도록 제작하였다. 유속은 프로펠러형(직경 2 cm) 유속계를 이용하여 측정하였다.

월성원자력발전소 3, 4호기 유공방파제의 모형은 1/40의 축척으로 제작하였다. 방파제 모형은 아크릴을 이용하여 제작하였으며 3개의 방류관을 재현하였다. 이상과 같이 모형을 재현하여 실험수로에 설치했을 때의 개요는 Fig. 2와 같다. 유속의 측정위치는 방류관의 중앙을 기준으로 적절한 위치를 선정하였다. 유속은 각 지점에서 여러 번 측정하여 평균값을 사용하였다. 실험에서는 방파제 내부와 외해의 수두차를 이용하여 방파제 저면의 방류구에서 유량이 방류되도록 하였다. 방파제 외해의 수위는 20 cm, 방류구의 직경은 5 cm이며 방파제 내부의 수위를 조절하여 방류유속을 제어하였다. 본 연구에서는 방류유속이 60.1 cm/sec인 경우의 자료를 이용하였다. 방파제 외부해역에서의 초기방류유속을 수치실험의 방류경계조건으로 하였으며 종방향, 수평방향 및 연직방향의 유속분포를 수치모의결과와 비교하였다.

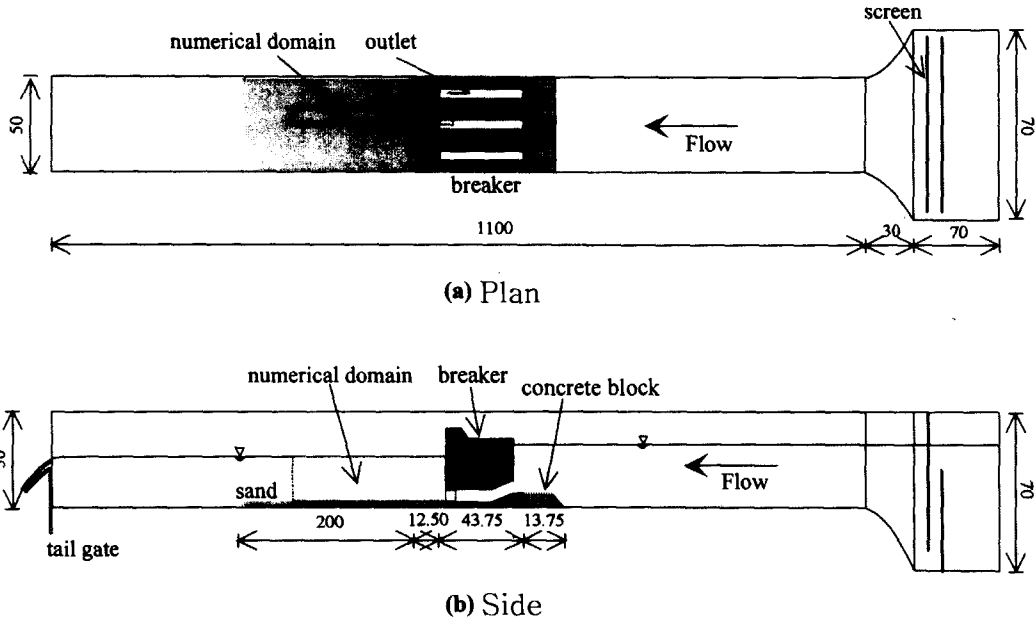


Fig. 2. Experimental Setup of Breaker Model (unit: cm)

#### 4. 수치모의

##### 4.1 수치모형

본 연구에서는 유공방과제의 저층에 설치된 방류관을 통해 배출되는 방류수의 유속구조를 3차원 난류수치모의를 이용하여 분석하였으며, 그 결과를 실험결과와 비교하였다. 더불어 초과수운을 가지는 운수를 방류할 때의 유속구조를 검토하였다. 본 연구의 수치모의는 Fluent 모형(Fluent Inc., 1993)을 이용하여 수행하였다. Fluent 모형은 Fluent사에 의해 개발된 모형으로서 유체의 흐름 및 열전달, 화학반응 등을 해석할 수 있다. 사용된 난류모형은  $k-\epsilon$  모형이다.

Fluent 모형에서 사용하는 지배방정식은 3차원 Navier-Stokes 방정식을 시간적분한 레이놀즈 방정식으로 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (2)$$

여기서  $\rho$ 는 유체의 밀도이고  $x_i$ ,  $u_i$ 는 각 방향으로의 거리 및 시간평균된 유속이며  $t$ 는 시간,  $p$ 는 정수압이고,  $g_i$ 는 중력가속도, 그리고  $\tau_{ij}$ 는 응력텐서로서 다음

과 같이 주어진다.

$$\tau_{ij} = (\mu + \mu_T) \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - \rho \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (3)$$

여기서  $\mu$ 는 분자점성계수이고  $\mu_T$ 는 난류점성계수로서 다음에 설명될 난류모형을 이용하여 계산한다.  $k$ 는 난류운동에너지로 다음과 같다.

$$k = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \overline{u_i'^2} \quad (4)$$

여기서  $u_i'$ 은 각 방향의 유속성분을 시간 평균했을 때 생기는 변동량이다. 수온확산방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho T) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i T) = \frac{\partial f_i}{\partial x_i} + S_T \quad (5)$$

여기서  $T$ 는 수온이며  $S_T$ 는 생성항이다.  $f_i$ 는 다음과 같다.

$$f_i = \left( K + \frac{\mu_T}{\sigma_h} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (6)$$

여기서  $K$ ,  $\sigma_h$ 는 각각 열전도계수(thermal conductivity)와 Prandtl 수이다.

##### 4.2 난류모형

Fluent 모형에서 사용하는 난류모형 중 본 연구에서

채택한  $k-\varepsilon$  난류모형은 Navier-Stokes 방정식의 시간 적분시 생기는 레이놀즈응력이 평균유속의 경사에 비례한다는 Boussinesq 가정에서 출발한다. 이 모형에서 난류점성계수  $\mu_T$ 는 난류의 유속규모와 길이규모의 곱의 형태에 비례하는 것으로 가정되는데 유속규모는  $\sqrt{k}$ , 길이규모는  $\sqrt{k^3/\varepsilon}$ 에 비례하는 것으로 알려져 있다. 따라서 난류점성계수는 다음과 같이 표현된다.

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

여기서  $C_\mu$ 는 경험적으로 유도되는 비례상수이며,  $\varepsilon$ 은 난류운동에너지의 소산율이다. 난류운동에너지 및 이의 소산율은 다음과 같은 이동방정식을 이용하여 계산한다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + (1 - C_{3\varepsilon}) G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (9)$$

여기서  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$ ,  $C_{3\varepsilon}$ 은 경험적인 상수이며  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$ 은 각각 난류운동에너지와 이의 소산율의 난류확산을 지배하는 Prandtl 수이다.  $G_k$ 와  $G_b$ 는 각각 난류운동 에너지 생성항 및 부력으로 인한 난류의 생성항으로 다음과 같다.

$$G_k = \mu_T \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (10)$$

Table 1. Empirical Coefficients Used in Calculation

$C_\mu$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$	$\sigma_h$	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	$C_{3\varepsilon}$
0.09	1.0	1.3	0.7	1.44	1.92	1.0 or 0.0

$$G_b = -g_i \frac{\mu_T}{\rho \sigma_h} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (11)$$

본 연구에서는 위의 식 (6)~(11)에서 도입된 경험적인 상수를 Table 1에 주어진 바와 같은 표준값을 사용하였다(Rodi, 1993).  $C_{3\varepsilon}$ 은 방류수의 부력효과를 고려하는 경우는 0.0의 값을 가지며 고려하지 않는 경우는 1.0의 값을 가진다.

### 4.3 모형의 적용

본 연구에서 사용된 격자계는 Fig. 3과 같으며 12,600개의 절점으로 이루어져 있다. 난류경계조건으로는 유입부의 정확한 난류의 경계치를 알 수 없으므로, 난류강도( $I$ )를 평균유속의 5%로 가정하고 특성길이( $L$ )는 방류관의 반경인 2.5 cm를 이용하였다. 이와 같은 조건이 주어지게 되면 Fluent 모형은 다음과 같은 계산과정을 거쳐서 유입부의 난류경계값으로 사용한다.

$$k = \frac{3}{2} (u')^2 = \frac{3}{2} (u_{avg} I)^2 \quad (12)$$

$$\varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l} \quad (13)$$

단, 식 (13)에서  $l=0.07L$ 이다. 정확한 난류경계의 값을 알 수 없는 경우에 위와 같이 난류경계를 부여했을 경우 합리적인 결과를 도출하는 것으로 알려져 있다

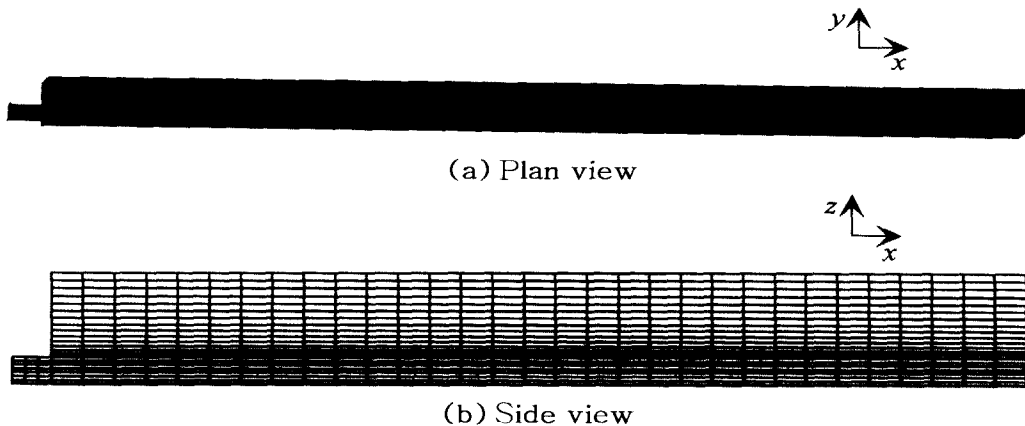


Fig. 3. Computational Grid

(Fluent Inc., 1993).

벽면 근처에서의 경계층흐름의 해석시, 벽면에서는 유속의 경사가 급하므로 정확한 해를 구하기 위해서는 촘촘하게 격자를 배치해야 한다. 하지만 격자수를 늘리는 방법은 경제성이 없을 뿐만 아니라, 벽면 근처에서는 점성의 영향이 커지므로 난류모형의 적용이 적합하지 않을 수도 있다. 따라서 벽 근처에서의 유속분포는 실험에 의해 제안된 벽함수를 이용한다. Fluent 모형에서 난류모형의 적용시 사용자가 입력해야 할 자료는 방류경계에서의 경계조건뿐이다. 자유수면의 처리는 수표면의 변동을 무시하였으며 자유활강(free slip)조건을 부여하였다. 이는 자유수면의 변동이 미소한 경우를 모의하는데 효과적으로 사용될 수 있는 것으로 알려져 있다.

## 5. 결과분석

### 5.1 부력이 없는 단순젤의 유속구조

Fig. 4는 수리모형실험결과와 수치모의 결과를 비교한 것이다. 이 그림에서 종방향거리를 다음과 같은 특성길이로 무차원화시켜서 도시하였다.

$$l_Q = \frac{Q}{M^{1/2}} = \sqrt{A} \quad (14)$$

여기서  $Q$ 와  $M$ 은 각각 체적속(volume flux)과 운동량속(momentum flux)이며  $A$ 는 젤 방류구의 단면적이다. 그림에서 실선은 경계의 영향을 받지 않는 자유젤의 유속감쇠율의 실험자료를 정리한 것(Fischer 등,

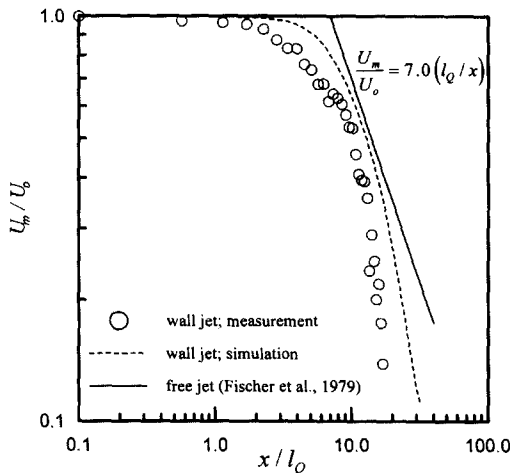


Fig. 4. Comparison of Longitudinal Distribution of Centerline Velocity of Free Jet and Wall Jet

1979)으로서 무차원거리가 7인 지점까지는 유속의 감쇠가 없으며 그 이후에 유속이 감쇠하고 있다. 점으로 도시한 것은 원형바닥젤의 실험자료를 도시한 것으로서 방류구에 가까운 지점에서부터 젤의 중앙유속이 감쇠하고 있으며 자유젤(free jet)에 비해 급격한 유속의 감쇠현상을 보이고 있다. 이는 바닥마찰과 유한수심으로 인한 자유수면의 영향때문인 것으로 판단된다. 수치모형의 계산결과로서 방류관의 정중앙선을 따르는 유속을 함께 도시하였다. 여기서  $U_0$ 는 방류구의 중심선에서 측정된 유속이다. 계산유속이 실험치를 과대평가하고 있음을 알 수 있다. 이 그림에서 원형바닥젤의 중심선에서의 유속의 감쇠는 무차원거리가 약 3에서부터 발생하고 있다. 즉, 자유젤에 비하여 흐름의 확립구간이 짧다는 것을 보여주는 것이다. 또한 유속의 감쇠율이 자유젤보다 크다는 것을 알 수 있다. Fig. 5의 (a), (b)는

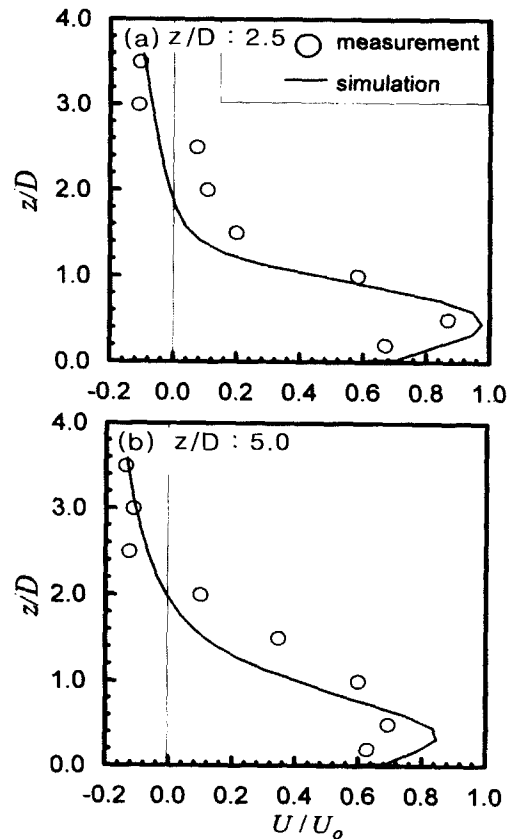


Fig. 5. Experimental and Computational Vertical Velocity Distributions; (a)  $X/D = 2.5$ ; (b)  $X/D = 5.0$

방류구의 중심을 따라 종방향의 두 지점에서의 연직방향의 유속분포의 실험치와 계산치를 비교·도시한 것으로서 두 값이 비교적 잘 일치하고 있다. 실험결과와 수치모의결과를 이상과 같이 비교해 봄으로써 본 연구에서 사용한 수치모형이 원형바닥젤의 유속구조를 모의하는데 적절한 도구가 될 수 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 방류구로부터 떨어진 거리에 따른 연직유속 분포의 모의결과를 도시한 것이다. 젤의 중앙유속이 급격히 감소하고 있음을 잘 보여주고 있다. Fig. 7은 방류구로부터 떨어진 거리에 따른 횡방향 유속분포를 도시한 것이다. 계산결과가 전체적으로 Gauss 함수의 형태를 보이고 있음을 알 수 있다.

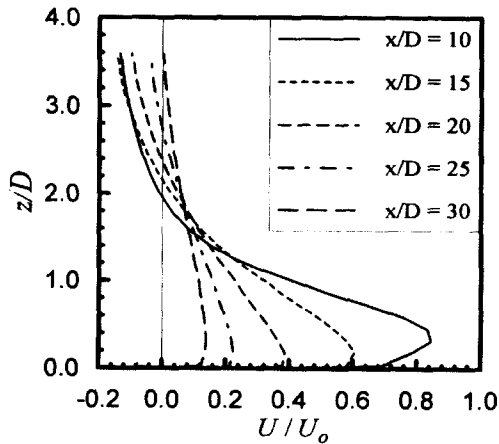


Fig. 6. Simulated Vertical Velocity Distributions of Round Wall Jet

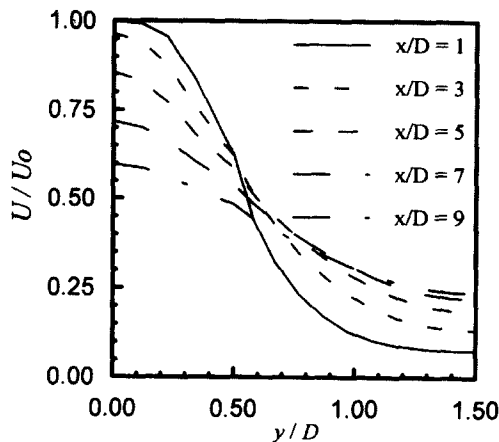


Fig. 7. Simulated Lateral Velocity Distributions of Round Wall Jet

## 5.2 부력젤의 유속구조

본 연구에서 모형실험을 수행한 방파제의 온수방류용 방류구를 통해 배출되는 부력젤의 거동을 규명하기 위해서, 방파제 외부역(외해)에서의 초기수온을 20°C로 하였으며 방류되는 온수의 수온을 30°C로 하였다. 이 경우 방류밀도푸르드수는 약 15이다. 이상과 같이 주변수의 유입이 없는 상태에서 방류구를 통하여 온수가 계속해서 공급되면 정상상태에서는 방파제 외해의 수온이 일정하게 되어 부력의 효과를 관찰할 수 없게 된다. 이에 본 연구에서는 해가 완전히 정상상태에 도달하기 전에 계산을 종료하고 부력의 영향을 고찰하였다. 자료를 분석하는데 사용한 시간에서의 수온의 무차원화된 연직분포는 Fig. 8과 같다. Fig. 8에서  $\Delta T_0$ 는 방류되는 온수의 초과수온이고  $\Delta T$ 는 계산된 수온의 초과수온이다.

Fig. 9는 단순젤과 부력젤의 젤 중앙선에서의 종방향유속을 비교하여 도시한 것으로 방류구 근처에서는 부력젤의 유속이 크게 발생하나 일정거리 이후 ( $x/l_0$ )가 약 15정도)에서는 도리어 작게 된다. 이는 부력젤의 경우 일정거리 이후에서는 부력의 영향으로 인해 연직상향으로의 유속이 커지게 되어 종방향유속을 감소시키는 역할을 하게 되는 것으로 사료된다.

Fig. 10은 종방향유속의 연직분포를 종방향거리에 따라 부력젤과 단순젤을 비교·도시한 것으로 방류구로부터 멀어질수록 저층에서는 단순젤의 유속이 크게 나타나며, 상층에서는 단순젤의 부유속(negative 경

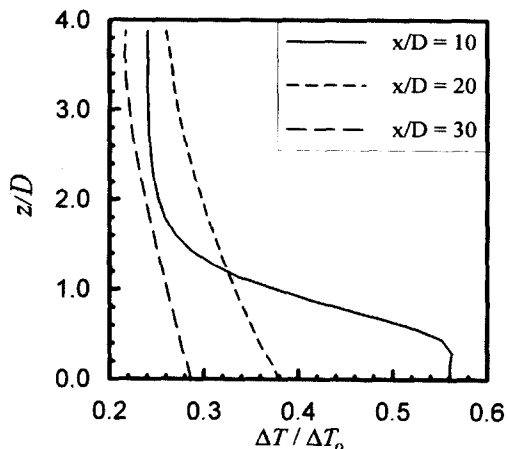


Fig. 8. Excess Temperature Distribution at Time of Data Analysis

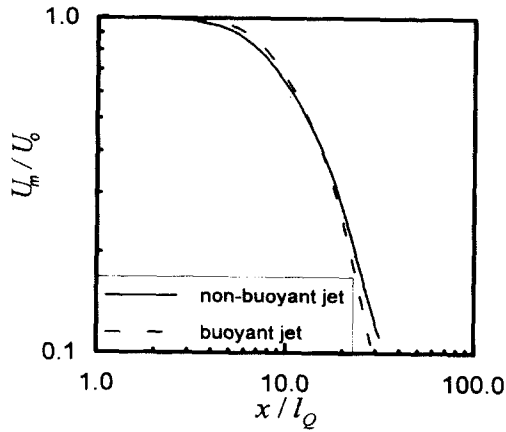


Fig. 9. Comparison of Longitudinal Distributions of Centerline Velocity of Non-buoyant and Buoyant jet

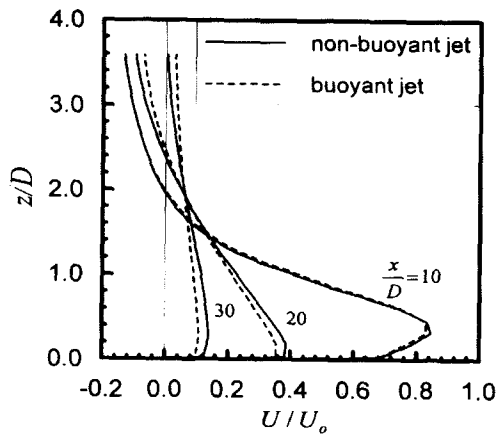


Fig. 10. Comparison Vertical Distributions of Centerline Velocity of Non-buoyant Jet and Buoyant Jet

velocity)이 크게 나타나고있다. 또한 부력젤의 자유수면에서의 유속의 분리가 단순젤에 비해 방류구로부터 가까운 거리에서 발생하게 됨을 간접적으로 알 수 있다.

Fig. 11은 연직방향의 유속을 수심별로 도시해 본 것으로 예상했듯이 부력젤의 경우에 부력의 영향으로 더 큰 양의 유속을 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 12는 연직방향으로의 젤의 폭이 확장되는 정도를 도시한 것으로 종방향유속 침두값의 반이 되는 위치를 도시한 것이다. 부력젤의 폭이 단순젤의 폭보다 빨리 확장되고 있음을 알 수 있다.

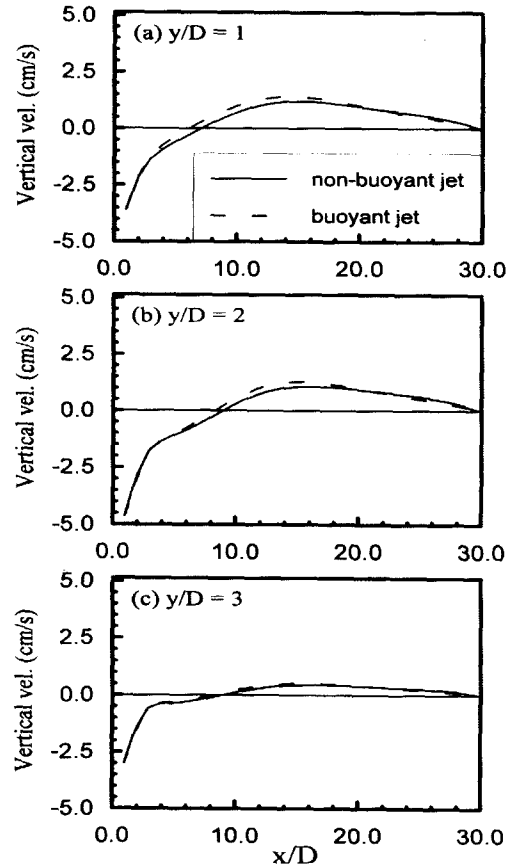


Fig. 11. Comparison of Distribution of Vertical Velocity

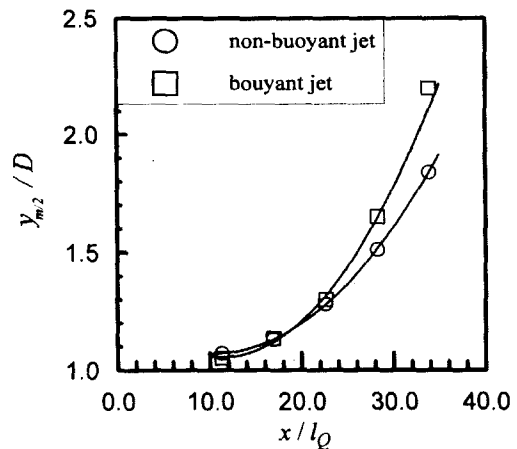


Fig. 12. The Comparison of Width Evolution of Non-Buoyant Jet and Buoyant Jet



## 6. 결 론

본 연구에서는 온배수저감방안으로써 설계된 방과제의 온수방류용 수중방류구를 통해 배출되는 원형바닥젤의 유속구조를 수리모형실험과 수치모의를 통하여 규명하였다. 실험결과와 계산결과는 비교적 잘 일치하였으며, 원형바닥젤의 유속구조는 다음과 같은 특징을 가지고 있음을 알 수 있었다.

원형바닥젤은 방류구 바로 앞에서부터 젤의 중앙유속이 감소(무차원화된 종방향거리가 약 3에서부터 발생)하고 있으며 진행하면서 자유젤에 비해 급격한 유속의 감소현상을 보이고 있다. 이는 바닥마찰의 영향으로 중앙부의 유속이 방류초기부터 감소하기 때문이다. 그리고 종방향 거리에 대한 젤 중앙유속의 감소율이 자유젤의 7보다 크다.

단순젤과 부력젤의 젤 중앙선에서의 종방향유속은 방류구 근처에서는 부력젤의 유속이 크게 발생하나 일정거리 이후( $x/l_0$ 가 약 15정도)에서는 도리어 작게 된다. 이는 부력젤의 경우 일정거리 이후에서는 부력의 영향으로 인해 연직상향으로의 유속이 커지게 되어 종방향 유속을 감소시키는 역할을 하게 되는 것으로 사료된다. 방류구로부터 멀어질수록 저층에서는 단순젤의 유속이 크게 나타나며, 상층에서는 단순젤의 부유속이 크게 나타나고 있다. 또한 부력젤의 경우 자유수면에서의 유속의 분리가 단순젤에 비해 방류구로부터 가까운 거리에서 발생하게 됨을 알 수 있다. 연직방향의 유속은 부력의 영향으로 부력젤의 경우에 더 큰 양의 유속을 보이고 있다. 부력젤의 연직방향으로의 폭은 단순젤의 폭보다 빨리 확장된다.

## 참 고 문 헌

서일원 (1995). "월성원자력 3, 4호기 배수방과제에 대한 수리모형실험." 연구보고서 한국전력공사 원자력 건설처, 서울대학교 공학연구소.  
 윤태훈 (1985). "변동수심의 수역에서 수중부력젤의 거동-발달과정흐름영역." 대한토목학회논문집, 제5권, 제1호, pp. 75-81.  
 윤태훈 (1994). "온수방류의 귀환에 방류구길이의 영향에 관한 연구." 연구보고서 한국전력공사.  
 윤태훈, 전시영 (1987). "수평정지수역으로 유입되는 음부력흐름." 대한토목학회논문집, 제7권, 제4호, pp. 51-60.  
 윤태훈, 차영기, 김창완 (1986). "조석의 영향을 받는 수역에서 연직상향부력젤-정지수역." 대한토목학회논

문집, 제6권, 제2호, pp. 93-101.  
 윤태훈, 차영기, 김창완 (1987). "흐름수역에서 연직상향부력젤" 대한토목학회논문집, 제7권, 제1호, pp. 11-22.  
 윤태훈, 한운우 (1988). "가로흐름에 방류되는 평면부력젤" 대한토목학회논문집, 제8권 제3호, pp. 53-60.  
 이남주, 이길성, 최홍식 (1994). "가로흐름 수역으로 방출되는 2차원 표면온배수 수치모형 비교연구." 한국해안·해양공학회지, 제6권, 제1호, pp. 40-50.  
 정태성 (1994). "연안 해수유동 및 온배수 확산에 관한 3차원 수치모형." 공학박사논문, 서울대학교.  
 한국전력공사 원자력건설처 (1994). 원자력발전소의 온배수 영향 저감방안 연구-월성원전-. 연구보고서.  
 한국전력공사 원자력건설처 (1996). 원자력발전소의 온배수 영향 저감방안 연구. 연구보고서.  
 Davis, M.R., and Winarto, H. (1980). "Jet diffusion from a circular nozzle above a solid plane." *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 101, pp. 201-221.  
 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, Inc.  
 Fluent, Inc. (1993). *Fluent user's guide*.  
 Katz, Y. Horev, E. and Wagnanski, I. (1992). "The forced turbulent wall jet." *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 242, pp. 577-609.  
 Launder, B.E. and Rodi, W. (1983). "The turbulent wall jet-measurements and modeling." *Annual Reviews of Fluid Mechanics*, Vol. 15, pp. 429-459.  
 Newmann, B.G., Patel, R.P., Savage, S.B., and Tjio, H.K. (1972). "Three dimensional wall jet originating from a circular orifice." *Aero Quart.*, Vol. 23, pp.188-200.  
 Rodi, W. (1993). *Turbulence models and their application in hydraulics*. A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands.  
 Wagnanski, I., Katz, Y., and Horev, E. (1992). "On the application of various scaling laws to the turbulent wall jet." *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 234, pp. 669-690.  
 <최종본 접수일 : 1997년 8월 23일>