

하 천 환 경 분 과

저층방류 해석을 위한 수치모의

김 철(호남대학교 토목환경공학과 교수)

김 대 근(대불대학교 토목환경공학과 교수)

제 1 장 서 론

제 2 장 연구방법

1절 이론적 배경

2절 수학적 모형

제 3 장 모형의 검증

1절 수치모의 조건

2절 검증결과

제 4 장 모형의 적용

제 5 장 결론

참 고 문 헌

제 1 장 서 론

온수 방류방식의 분류는 냉각수 공급방식별로 냉각수 통과방식(once-through cooling system)과 냉각수 재순환방식(closed-cycle cooling system)으로 구분된다. 배출구조별 분류는 수표면방류 방식(surface discharge type)과 수중방류 방식(submerged discharge type)으로 구분된다. 국내·외의 연구결과 수중 방류방식이 회석효과가 좋아 환경에 미치는 영향이 작은 것으로 평가되고 있으나, 국내의 발전소에서는 대부분 수표면방류 방식을 채택하고 있다. 국내의 경우 월성원자력발전소 3, 4호기의 온수를 수중방류하기 위하여 방파제의 저면에 방류구를 설치한 사례가 있다 (서일원, 1995).

온수의 초기확산은 방류구의 형상, 방류구에서의 운동량 및 부력플럭스의 상대적 강도에 의해서 결정된다. 운동량플럭스는 방류된 온수와 주변수와의 난류혼합을 유발하고, 부력플럭스는 온수의 연직 난류혼합을 억제하면서 횡방향의 확장을 유발한다. 상대적으로 운동량플럭스가 온수의 흐름을 지배하는 경우의 흐름을 제트(jet)라 하고, 부력플럭스가 온수의 흐름을 지배하는 경우의 흐름을 플룸(plume)이라 한다.

온수의 혼합과정은 온수와 주변수와의 경계에서 나타나는 제트 포획연행(jet entrainment), 난류확산, 주변수의 흐름에 의해 지배되며, 이 외에도 지형의 형태, 대기와의 열교환 등에 영향을 받는다. 온수가 방류되면 방류구 근처에서는 제트와 주변수간의 유속차에 의해 전단응력이 발생하고, 이로 인해 난류가 형성되어 운동량의 교환이 빠르게 일어나면서 주변수와 제트가 혼합되는데 이를 제트 포획연행이라 한다. 온수의 혼합과정은 방류구 근처에서는 제트의 포획연행에 의해 지배되며, 방류구에서 멀어질수록 점차 난류확산과 주변수 흐름에 의한 혼합이 지배하게 된다. 또한 수표면과 대기와의 열교환은 근역(near field)에서는 온수의 혼합거동에 미치는 영향이 미미하나, 원역(far field)에서는 그 영향이 크다. 본 연구는 근역에서의 혼합거동을 해석하는 것이 주요 관심사이므로 수표면과 대기와의 열교환은 고려하지 않았다.

주변수 흐름이 있는 수역에서 수표면 방류되는 온수에 대한 수치해석적인 접근은 Mcguirk 등(1978, 1979)에 의해 처음으로 시도되었다. Mcguirk 등(1978)은 수심적분 2차원 $k-\epsilon$ 난류모형을 이용하여 다양한 경우에 대한 유속과 수온분포를 모의하였으며 그 결과를 실험치와 비교하였다. Mcguirk 등(1979)은 3차원 $k-\epsilon$ 난류모형을 이용하여 정지수체에 온수가 방류되는 경우에 대한 해석을 수행하였다. 박 등(1983)은 $k-\epsilon$ 난류모형에 온도자승 유동항($\overline{T^2}$)과 그 감쇄율의 전달방정식을 추가한 4방정식 난류모델을 도입하여 연직 2차원 온수혼합을 모의한 바 있다.

이 등 (1995)은 주변수 흐름이 있는 수역에서 수표면 방류되는 온수에 대한 수치해석을 위하여 4-방정식 난류모델을 이용한 바 있다. 이 외에도 난류모델을 포함한 수치모형을 이용하여 발전소에서 방류되는 온수의 혼합을 모의하고자 한 연구는 국내·외에 많은데, 이러한 연구동향은 정태성(1994)과 김대근(2000)의 연구결과를 참조할 수 있다.

본 연구에서는 수심이 방류구 높이의 약 2배 정도인 연안해역에 주변수 흐름이 있는 경우, 수표면방류와 수중방류 방식으로 온수를 방류하는 경우에 대해 수치해석적인 접근을 통해 혼합거동을 분석하고 비교하였다. 수중방류는 기존 수표면 방류방식을 최소한으로 변형한 형식으로, 기존 수표면 방류구와 동일한 제원을 가지는 암거를 통해 수중으로 방류되는 것을 모의하였다. 또한 방류유속을 변화시켜 가며 주변수체에 재순환영역이 형성될 때와 형성되지 않는 조건에 따른 각 방류방식별 혼합특성을 분석하였다. 수치모의는 범용 3차원 수치모형 코드인 FLOW-3D를 이용하였으며, 모형의 적용성을 검토하기 위해서는 Michail 등(1975)의 실험자료를 이용하였다.

제 2 장 연구방법

1절 이론적 배경

온수를 수표면 방류하는 경우의 주요한 흐름특성을 Fig. 1에 도시하였다. Fig. 1에서 b_o 와 h_o 는 각각 방류구의 폭과 수심, V_o 와 V_a 는 각각 방류유속과 주변수의 유속, ρ_o 와 ρ_a 는 각각 방류수와 주변수의 밀도이다. 방류된 온수는 주변수 흐름에 의해 꺾적이 꺾이게 되며, 주변수 흐름은 제트에 가로막혀 외해로 향하게 된다. 방류구 하류의 연안측에서는 제트의 포획연행이 제한을 받게 되므로, 수심이 낮아지며 재순환영역이 형성된다.

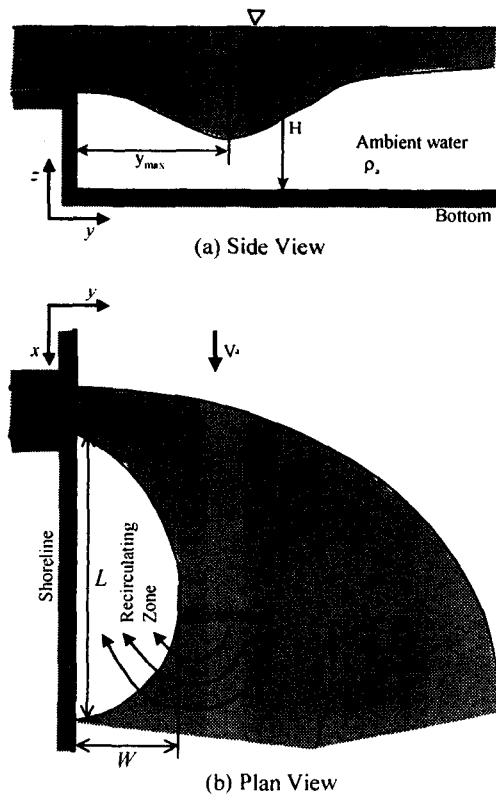


Fig. 1 General Characteristics of a Surface Discharge of Heated Water

주변수의 흐름이 없는 경우에 대한 온수의 무차원 최대연직침투깊이(maximum vertical jet

depth), h_{\max}^* 와 최대침투깊이까지의 수평거리 y_{\max}^* 는 다양한 실험을 통해 다음과 같이 표현됨이 밝혀졌다(Adams 등, 1974).

$$h_{\max}^* = \frac{h_{\max}}{\sqrt{h_o b_o}} = 0.42 F_o' \quad (1)$$

$$y_{\max}^* = \frac{y_{\max}}{\sqrt{h_o b_o}} = 5.5 F_o' \quad (2)$$

여기서 F_o' 은 수정방류밀도푸르드수로 다음 식으로 표현된다.

$$F_o' = F_o A^{1/4} \quad (3)$$

여기서 F_o 와 A 는 각각 방류밀도푸르드수(discharge densimetric Froude number)와 방류구의 형상비(channel aspect ratio)로 다음과 같이 정의된다.

$$F_o = \frac{V_o}{\sqrt{(\Delta\rho_o/\rho_w)gh_o}} \quad (4)$$

$$A = \frac{h_o}{b_o} \quad (5)$$

최대연직침투깊이는 방류된 제트가 바닥면의 영향을 받는지 여부를 판단하는데 중요한 변수로, Koester(1974)는 실험연구를 통해 h_{\max}/H 가 0.75 이하이면 제트는 바닥면의 영향을 받지 않는다고 제안하였다. Adams 등(1974)은 여러 연구자들의 실험결과를 이용하여 상기 결과가 타당함을 증명하였다. h_{\max}/H 가 0.75 이상이면 제트가 바닥면의 영향을 받게 되므로 천수역(shallow water)으로 구분되며, 천수역에서의 회석률은 심해역(deep water)에서의 회석률보다 감소한다.

주변수의 흐름이 있는 경우, 천수역에서는 제트의 궤적이 바닥면까지 영향을 미쳐 주변수 흐름을 방해하게 된다. 따라서 주변수로 인해 온수의 궤적은 더욱 꺾이게 되고 결국 제트는 연안에 접하게 되면서 재순환영역이 형성된다. 방류된 제트가 연안에 접할 것인지 여부를 판단하기 위한 실험결과, 이를 결정하는 가장 중요한 인자는 주변수의 수심과 유속비로 나타났

다. Adams 등(1974)에 의하면, 제트가 연안에 접하면서 재순환영역이 형성되는 조건은 다음과 같다.

$$R > 0.05 \left(\frac{h_{\max}}{H} \right)^{-1.5} \quad (6)$$

여기서 $R (= V_u/V_o)$ 은 주변수와 방류수의 유속비이다.

Michail 등(1975)의 방류구와 주변수의 수심이 동일한 경우에 대한 실험을 통해 재순환영역에 형성되는 와(eddy)의 크기는 다음과 같은 방류수와 주변수 흐름의 운동량플럭스비, M_r 에 의해서만 영향을 받는다는 사실이 밝혀졌다.

$$M_r = \left(\frac{V_o}{V_u} \right)^2 \frac{b_o}{B} \quad (7)$$

여기서서 B 는 주변수의 수로폭이다.

2절 수학적모형

부력을 가지는 비압축성 유체의 흐름을 해석하기 위하여 FLOW-3D에서 사용하는 지배방정식은 직교좌표계(x, y, z)에서의 연속방정식, 운동방정식, 에너지 전달방정식, 상태방정식이다(Flow Science, 2003). 물과 공기의 경계인 자유수면을 모델링하기 위하여 VOF(volume of fluid)함수를 정의하는데, 함수의 값이 1인 경우는 검사체적에 물이 가득한 상태를 의미하고 함수의 값이 0인 경우는 검사체적에 물이 없는 경우를 의미하고 자유수면에서는 함수의 값이 0과 1사이의 값을 가진다.

본 연구에서는 난류모형으로 RNG $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하였는데 RNG $k-\epsilon$ 난류모델은 $k-\epsilon$ 난류모델의 단점을 보완하기 위하여 Yakhot 등(1992)이 개발한 모형으로 통계적인 기법을 도입하여 얻은 모델상수를 적용하므로 모델상수에 민감하지 않은 결과를 보이는 것으로 알려져 있다. 또한 전통적인 $k-\epsilon$ 난류모델에 비해 복잡한 난류유동장의 해석을 정확하게 수행할 수 있으며, 특히 낮은 레이놀즈수와 고전단흐름의 모의에 적합한 것으로 알려져 있다.

지배방정식은 유한체적법을 이용하여 이산화되며, 격자계의 구성시 격자망과 지형은 독립적으로 입력되는 FAVOR (Fractional Area and Volume Obstacle Representation)기법이 사용된다.

지배방정식의 차분식은 운동방정식의 압력항과 연속방정식의 유속항을 제외하면 모두 양해법으로 차분된다. 연속방정식을 만족하도록 압력항을 계산하기 위해서는 SOR(successive over relaxation)법과 SADI(special alternating-direction line implicit)법을 사용할 수 있다. 계산절차는 (1) 운동방정식을 양해법으로 풀어서 각 방향의 유속을 계산 (2) 연속방정식을 만족하도록 운동방정식의 압력과 유속을 반복 계산 (3) 자유수면, 난류특성, 에너지 수송방정식을 계산하는 순서로 이루어진다. 계산시간 간격은 수치모형의 안정조건을 만족하도록 자동으로 조정된다.

제 3 장 모형의 검증

1절 수치모의 조건

모형의 검증을 위하여 Fig. 2와 같은 2차원 개수로에 대해 수치실험을 수행하였다. 개수로의 제원은 Mikhail 등(1975)의 수리모형실험, McGuirk 등(1978)의 수치실험 검증결과와 상호 비교, 검토하기 위하여 기존 연구자들의 실험조건과 비슷하도록 결정하였다. 결정된 개수로의 제원은 길이 4.0m, 폭 0.6m, 수심 0.06m이다. 주변수의 수온은 20.0℃, 방류구를 통해 배출되는 온수의 수온은 29.6℃이다. 이 외의 수치실험 조건은 Table 1과 같다. 상태방정식에서 수온과 밀도 관계는 다음 식을 이용하였다.

$$\frac{\rho_o - \rho}{\rho_o} = \alpha (T - T_o) \tag{8}$$

여기서 T_o 와 ρ_o 는 각각 기준수온과 기준수온에서의 밀도이다. 본 연구에서의 기준수온은 20℃이다. α 는 열팽창계수(thermal expansion coeff.)로 본 연구에서는 윤용남(2002)의 자료를 이용하여 20℃에서 30℃ 구간의 수온과 밀도의 회귀분석 결과인 0.00024489를 사용하였다. 난류 모델과 관련된 각종 상수는 FLOW-3D모형에서 제공하는 기본값을 이용하였다. 수치모의를 위한 계산격자는 66×33×8이고 x축의 격자는 가변격자를 사용하였으며, y축의 격자크기는 2.0cm의 고정격자를 사용하였다. z축의 격자크기는 1.0cm와 2.0cm의 2가지 종류를 사용하였는데, 바닥면에서부터 6개(계산초기에 VOF함수가 1인 격자)는 1.0cm 그 위의 2개(계산초기에 VOF함수가 0인 격자)는 2.0cm의 격자크기를 가지도록 구성하였다.

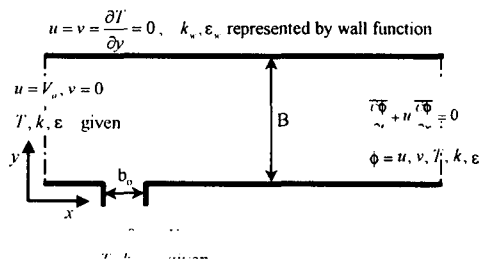


Fig. 2 Channel Layout and Associated Boundary Conditions

Table 1 Conditions of Numerical Experiments for Model Verification

Case	b_o (m)	V_a (m/sec)	V_o (m/sec)	R	M_r	F_o	F'_o	$\frac{h_{max}}{H}$	Remarks
1	0.06	0.05	0.4900	0.102	9.60	12.93	12.93	5.43	Shallow water ^{*)}
2	0.06	0.05	0.2465	0.203	2.43	6.50	6.50	2.73	Shallow water
3	0.06	0.05	0.1000	0.500	0.40	2.64	2.64	1.11	Shallow water
4	0.06	0.05	0.0600	0.830	0.14	1.58	1.58	0.66	Deep water
5	0.0064	0.05	0.4900	0.102	1.02	12.93	22.63	3.10	Shallow water

*) results of criteria which delineate deep and shallow ambient water

2절 검증결과

Fig. 3은 Case 5에 대한 제트중심선의 궤적을 도시한 것이다. 실험결과는 수온분포의 중심선이며, 수치모의 결과는 수온과 유속분포의 중심선을 함께 도시하였다. 수치실험 결과는 수표면에서의 궤적으로 유속의 중심선이 수온의 중심선보다 방류구에서 멀리 떨어진 곳에 위치하는데, 이는 온수의 재순환이 발생함에 따라 수온의 궤적이 방류구 쪽으로 꺾이기 때문이다.

Fig. 4와 5는 Case 1에서 5에 대한 온수의 재순환영역을 제대로 모의하는지 검토하기 위하여 도시한 것으로, Fig. 4는 재순환영역의 길이, L을 개수로의 폭으로 나누어 도시한 것이며 Fig. 5는 재순환영역의 폭, W를 개수로의 폭으로 나누어 도시한 것이다. 재순환영역은 유속벡터를 이용하여 유선(streamline)을 도시하고, 이를 이용하여 결정하였다. Fig. 4와 5에서 M_r 이 1.02인 Case 5의 계산결과는 다른 경우의 계산결과와 비교하면, 재순환영역의 길이는 상대적으로 짧고 폭은 상대적으로 넓은 결과를 보이고 있다. 이는 Case 1에서 4는 방류구의 폭은 일정하면서 방류유속이 변하는 경우로서 계산결과가 연속적이나, Case 5는 다른 경우에 비해 방류구의 폭이 좁은 경우이기 때문이다.

Fig. 6은 Case 5에 대한 제트중심선에서의 무차원초과수온을 도시한 것이다. Fig. 6에서 ΔT_o 는 방류초과수온이고, ΔT 는 제트중심선에서의 초과수온이다. 이상의 수치모의 결과는 모두 수표면($z/H = 11/12$)에서의 값을 이용한 것이다. 제트중심선의 궤적, 재순환영역의 크기, 무차원초과수온의 분포 모두 좋은 결과를 보이고 있어, 부력류 해석에 본 모형의 적용이 타당함을 알 수 있다.

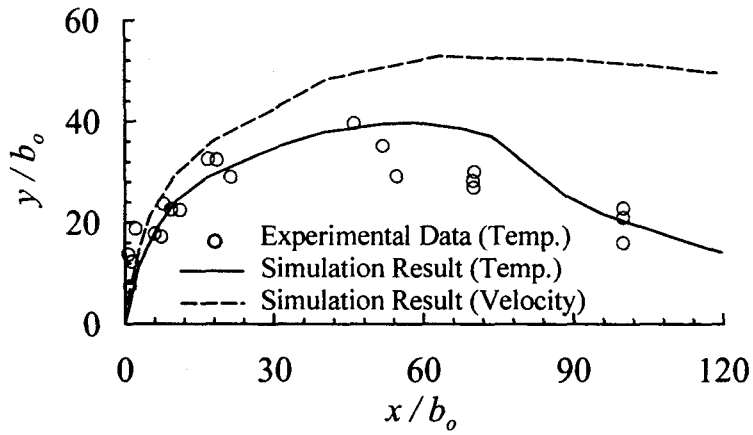


Fig. 3 Centerline Trajectory (Case 5)

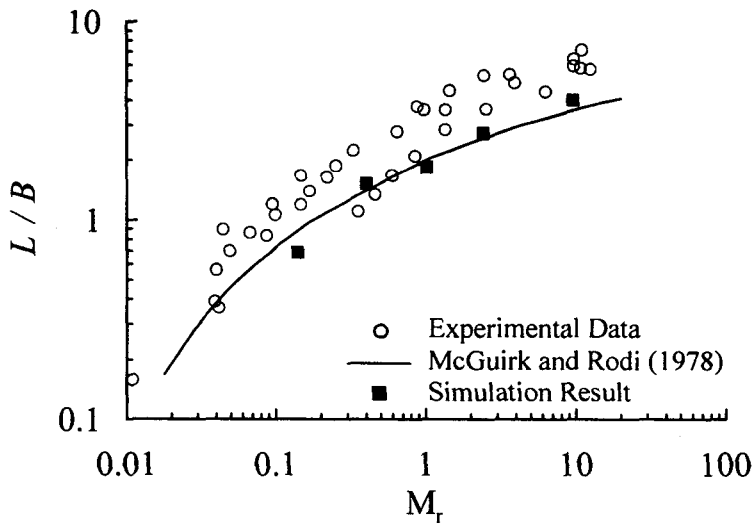


Fig. 4 Recirculation Eddy Length

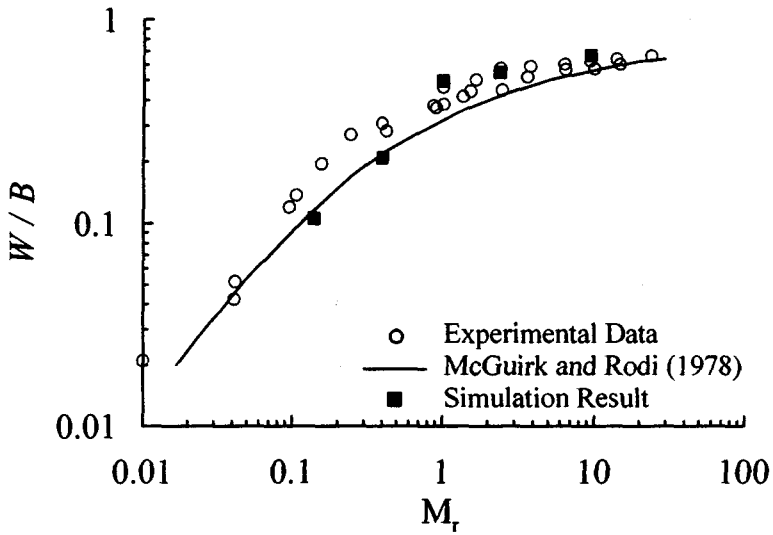


Fig. 5 Recirculation Eddy Height

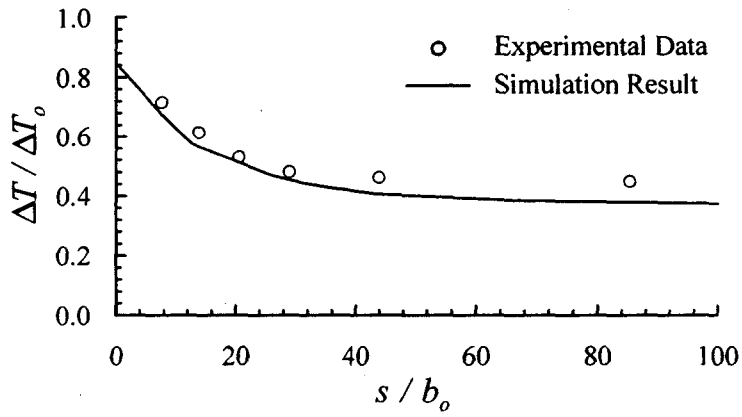


Fig. 6 Dimensionless Excess Temperature Distributions along the Jet Centerline Trajectory (Case 5)

제 4 장 모형의 적용

온수를 모형의 검증시와 유사한 2차원 개수로에서 수표면과 수중으로 방류하는 경우에 대한 혼합특성을 검토하기 위하여 Table 1의 Case 1에서 4와 같은 조건에 대해 연직방향으로 Fig. 7과 같은 방류조건에 대해 수치모의를 수행하였다. 이 경우 방류구의 수심(h_o)은 0.03m이다. 방류구의 수심이 변경됨에 따라 Table 1의 방류밀도푸르드수 등의 조건이 변하지만, 주변수체의 조건은 Table 1과 동일하다. Fig. 7에서 (a)는 수표면방류, (b)는 수중방류를 나타내는 것으로 방류구의 형상은 일정한 상태에서 방류유속을 변화시켜가며 수표면방류와 수중방류의 혼합거동을 비교·분석하였다.

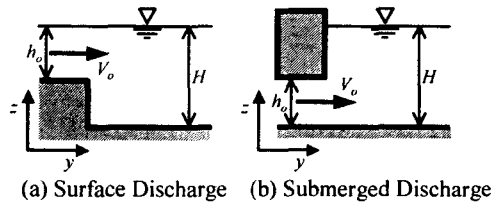


Fig. 7 Discharge Channel Layout (Side view)

Fig. 8은 각 Case별 수표면방류와 수중방류시의 x-y평면의 유속장과 수온분포를 도시한 것이다. 수심은 수표면과 수중에서의 혼합거동을 검토하기 위하여 $z/H=11/12$ 와 $3/12$ 을 선정하여 도시하였다. z/H 가 $11/12$ 는 수표면, $3/12$ 는 수중방류구의 중간지점에 해당하는 연직위치이다. 수표면방류인 경우 천해역에서 심해역으로 진행하면서 방류된 부력제트가 바닥면에 미치는 영향이 감소하고 있음을 알 수 있다. 특히, Case 1은 방류밀도푸르드수가 가장 큰 경우로 대표적인 천수조건에 해당하는데 부력제트에 의해 바닥면의 흐름과 수온분포가 크게 영향받고 있으며 Case 4는 심해조건에 해당되어 흐름과 수온분포가 부력제트의 영향을 거의 받지 않고 있다. Case 1과 Case 2는 수표면방류의 경우 수표면과 바닥면에서 모두 재순환영역이 형성되고 있으나, 수중방류의 경우 수표면방류에 비해 재순환영역이 작고 Case 2의 수표면에서는 재순환영역이 형성되지 않고 있다. Case 3과 Case 4는 수표면방류와 수중방류시 모두 재순환영역이 형성되지 않고 있다. Case 1의 경우 방류구 하류에서는 전 단면에 걸쳐 거의 동일한 수온분포를 보이고 있다. 이는 주변수역이 천수조건에 해당하기 때문에 방류된 부력제트의 강한 운동량에 의해 전 수심에 걸쳐 급격한 혼합이 발생하기 때문이다. 하지만 Case 4의 경우 부력제트의 부력

의 영향이 크게 작용하고 있음을 알 수 있는데, 이는 방류구 근처를 제외하면 수중방류의 경우 바닥면에서는 온수의 궤적이 거의 나타나지 않으며 수표면에서 온수의 궤적이 나타나면서 거의 수표면방류의 온수궤적과 동일한 형태를 보이는 것에서 확인할 수 있다.

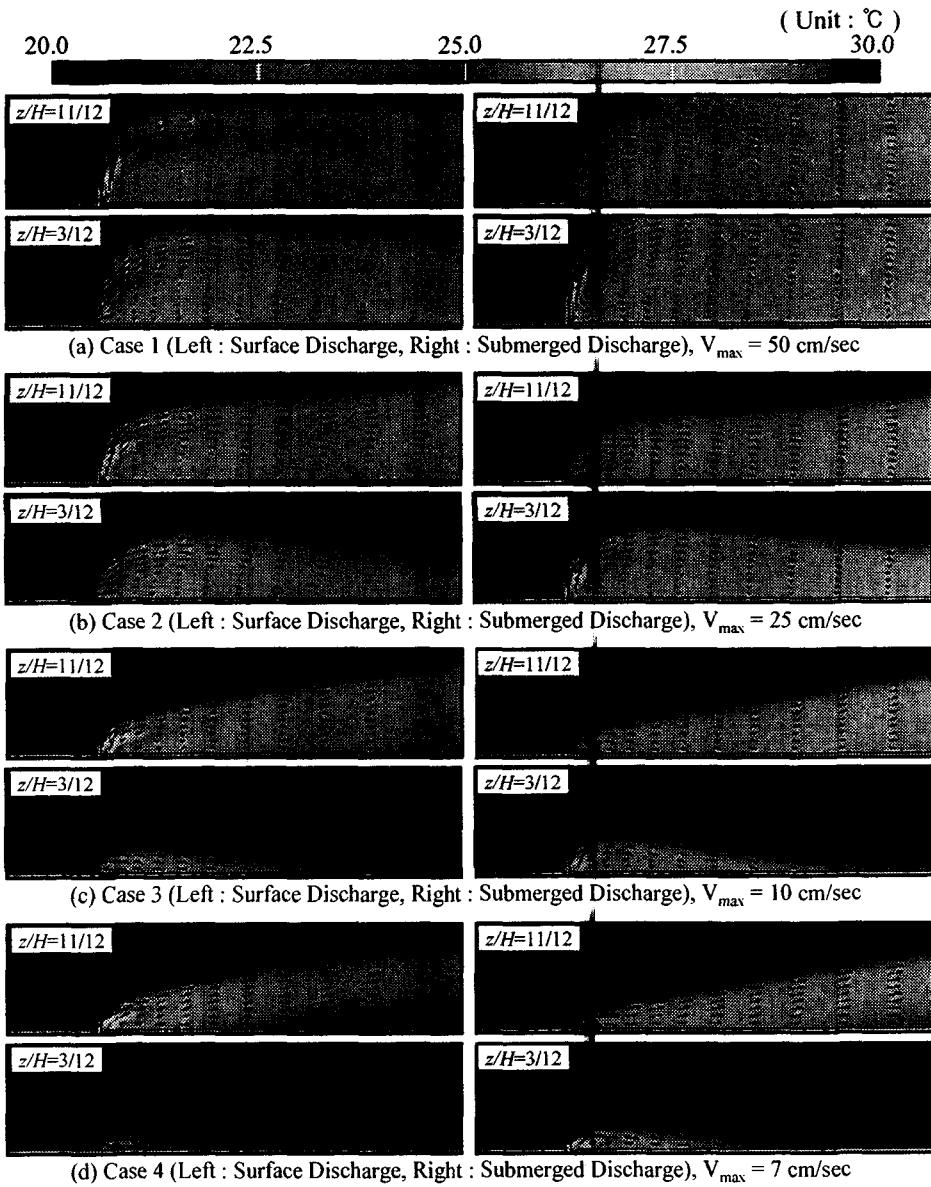


Fig. 8 Velocity Fields and Water Temperature Distributions in x-y Plane

Fig. 9는 Case 1과 Case 4에 대하여 $x/B=1/6, 1.0, 2.0$ 인 위치에서 y - z 평면의 유속장과 무차원 초과수온분포를 도시한 것이다. Case 1은 천수조건에 해당하는데 부력제트의 운동량이 강하여 온수의 궤적이 이의 영향을 크게 받고 있다. 특히, 수중방류인 경우 전단면에 걸쳐 온수의 완전한 혼합이 이루어져 회석물의 관점에서 수표면방류에 비해 유리함을 알 수 있다. Case 4는 심해조건에 해당하는데 부력제트의 운동량이 미약함을 알 수 있으며, 부력의 영향으로 온수의 궤적이 점차 수표면으로 이동하는 모습을 확인할 수 있다. 수중방류인 경우, 방류 직후에는 최대의 초과수온이 수중에 위치하나 x/B 가 1이상인 하류에서는 최대의 초과수온이 수표면에 위치하며, 점차 수표면방류시의 온수궤적과 동일한 형태를 보인다.

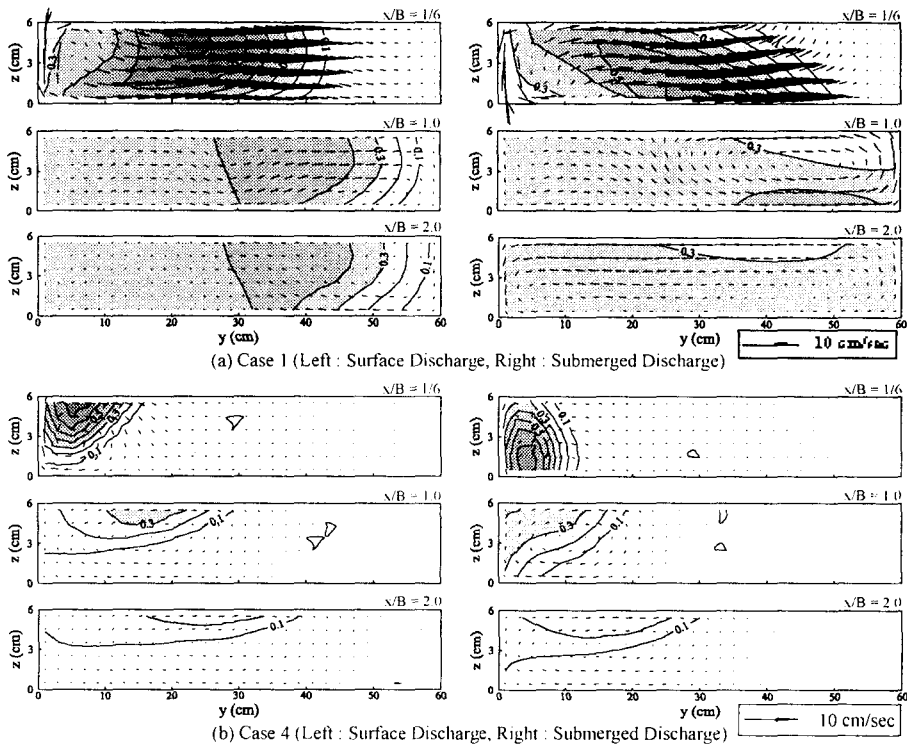


Fig. 9 Velocity Fields and Dimensionless Excess Temperature Distributions in y - z Plane

Fig. 10은 방류방식에 따른 재순환영역의 규모를 분석하기 위하여 수심별 재순환영역의 길이와 폭을 비교·도시한 것이다. Case 3과 4는 Fig. 8에서 알 수 있듯이 재순환영역이 형성되지

않으므로 Case 1과 2에 대한 재순환영역만을 비교하였다. 수표면방류의 경우, L/B 는 Case 1의 경우에 약 4.56, Case 2의 경우에 약 2.51의 수심평균값을 가지는데 수심에 따른 변화는 크지 않은 편이다. 이는 W/B 도 마찬가지로 Case 1의 경우에 약 0.61, Case 2의 경우에 약 0.36의 수심평균값을 가진다. 이는 주변수조건이 천수조건이므로 수표면방류의 영향이 바닥면까지 영향을 미치는 것으로 해석할 수 있다. 하지만 수중방류의 경우 재순환영역의 크기는 수심이 깊어질수록 증가하는 경향을 보인다. 수중방류시 수심평균한 재순환영역의 크기는 Case 1의 경우 L/B 는 2.05, W/B 는 0.54이고 Case 2의 경우 L/B 는 0.32, W/B 는 0.14이다. 즉, 부력제트의 운동량으로 인해 재순환영역이 형성되는 경우 수중방류 방식을 사용하면 수표면방류 방식보다 재순환영역의 크기를 줄일 수 있다.

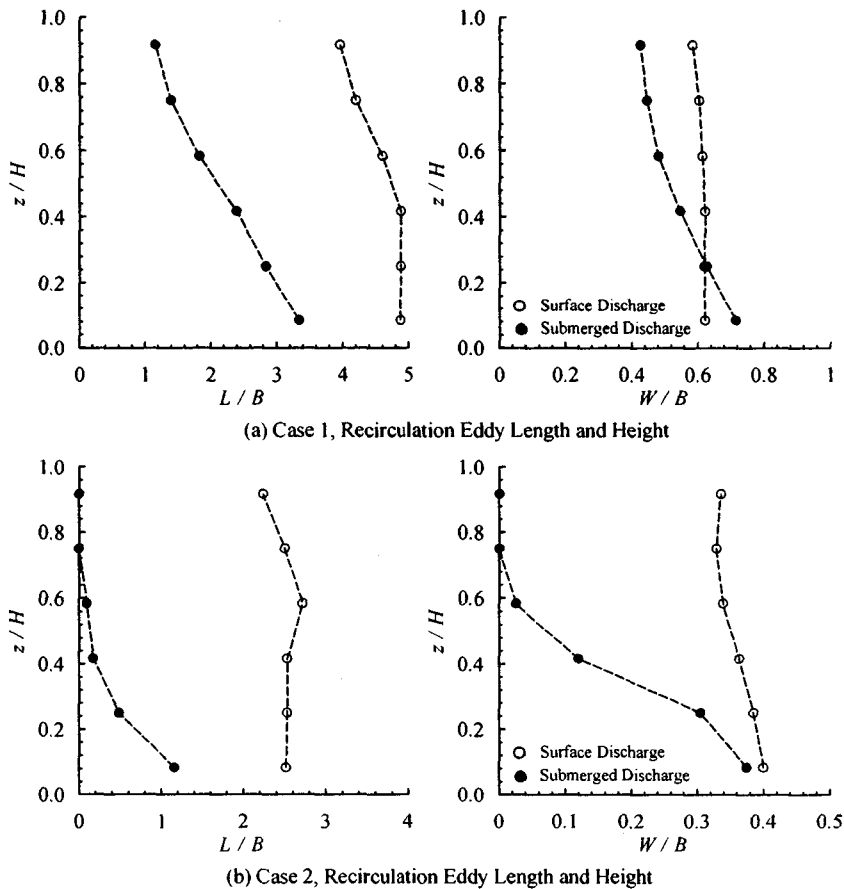


Fig. 10 Recirculation Eddy Size with Water Depth

Fig. 11은 각 Case별 수표면방류와 수중방류시의 종방향 위치에 따른 무차원초과수온을 도시한 것이다. 무차원초과수온은 종방향 위치별 각 y-z단면에서의 최대 초과수온을 방류초과수온으로 나눈 값이다. 즉, 각 y-z단면에서의 무차원초과수온의 역수는 최소희석률 (minimum dilution)을 의미한다. Case 1의 경우 수중방류시 수표면방류에 비해 최소희석률이 높은 결과를 보인다. 또한 x/b_o 가 10 이상인 경우에는 수표면방류 및 수중방류인 경우 모두 초과수온의 변화가 거의 없다. 이는 부력제트의 강한 운동량으로 인한 천수조건으로 인해 방류구 주변 근역에서 강한 초기혼합이 발생하기 때문이며, 이는 Fig. 8(a)에서도 확인할 수 있다. 특히 이러한 초기혼합은 수중방류인 경우에 그 효과가 더 뛰어난 것을 알 수 있다. Case 2의 경우 거의 동일한 최소희석률을 보이나, x/b_o 가 20 이상인 경우에는 수중방류시의 최소희석률이 높은 결과를 보인다. Case 3과 4는 재순환영역이 형성되지 않는 조건으로 수표면방류시 수중방류에 비해 최소희석률이 높은 결과를 보이고 있다. 즉, 수심이 작은 연안해역에서 방류제트의 운동량이 작은 경우에는 혼합의 관점에서 수중방류의 효과를 얻기 어려움을 알 수 있다. 또한 이 경우, 수중방류시에는 x/b_o 가 10 부근에서 초과수온이 변동하지 않다가 갑자기 감소 후 수표면방류와 거의 동일한 형태의 감소형태를 보이는데, 이는 최대 초과수온이 부력으로 인해 저층에서 수표면에 도달한 후 부력확장과 난류확산의 과정을 순차적으로 거치면서 발생하는 초과수온의 감소현상을 잘 설명하는 것으로 판단된다.

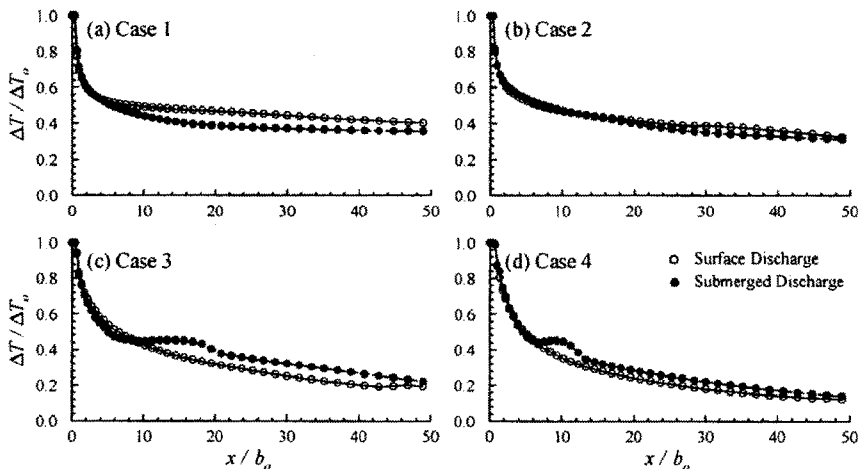


Fig. 11 Dimensionless Excess Temperature Distributions

제 5 장 결 론

본 연구에서는 주변수 흐름이 있는 수역에 수표면과 수중방류 방식으로 온수를 방류하는 경우에 대해 FLOW-3D를 이용하여 혼합거동을 각기 모의하고 그 결과를 비교하였다. 모형의 검증은 Michail 등(1975)의 실험자료와 McGuirk 등(1978)의 수치실험 자료를 이용하였다. 모형의 검증결과, 제트중심선의 궤적, 재순환영역의 크기, 무차원초과수온의 분포에서 FLOW-3D의 결과는 기존 실험자료와 잘 일치하고 있음이 밝혀졌으며, 이로써 부력류 해석에 본 모형의 적용이 타당함을 알 수 있었다.

방류조건이 동일한 상태에서 방류방식으로 수표면방류와 수중방류를 채택한 경우에 대한 수치모의를 수행하였다. 모의 결과 다음과 같은 주요 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 운동량플럭스비와 방류밀도푸르드수가 큰 천수조건에서는 재순환영역이 형성되는데, 수중방류 방식을 사용하는 경우에 수표면방류 방식을 사용하는 경우에 비해 재순환영역의 크기가 작게 발생한다. 수표면방류 방식의 경우, Case 1의 수심평균 재순환영역의 크기는 L/B 가 4.56, W/B 가 0.61이며, Case 2의 경우 L/B 는 2.51, W/B 가 0.36이다. 수중방류 방식의 경우, Case 1의 수심평균 재순환영역의 크기는 L/B 가 2.05, W/B 가 0.54이며, Case 2의 경우 L/B 는 0.32, W/B 가 0.14이다. 수표면방류 방식의 경우, 재순환영역의 크기가 수심에 따라 큰 변화가 없는 반면에 수중방류시에는 수표면에 가까울수록 재순환영역의 크기가 감소한다.
- 2) 천수조건에서 수중방류 방식인 경우가 수표면방류 방식보다 초기혼합이 크게 발생하기 때문에 최소회석률이 높은 결과를 보인다.
- 3) 운동량플럭스비와 방류밀도푸르드수가 감소하면서 재순환영역의 크기가 감소하다 결국 발생하지 않는다. 재순환영역이 발생하지 않는 경우에는 수표면방류시 수중방류에 비해 최소회석률이 높은 결과를 보인다.
- 4) 이상의 결과를 종합할 때, 수심이 깊지 않은 공공수역에서 온수를 방류하는 경우 운동량플럭스비와 방류밀도푸르드수가 큰 천수조건에서는 재순환영역의 규모와 최소회석률의 관점에서 수표면방류 방식에 비해 수중방류 방식이 유리하나, 운동량플럭스비와 방류밀도푸르드수가 작은 심해조건에서는 수중방류 방식의 효과를 얻기 어려웠다. 단, 이상의 연구는 제한된 경우에 대한 해석결과이므로 보다 정량적인 기준을 얻기 위해서는 향후 실험 및 수치해석에 대한 추가연구가 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 김대근 (2000) 수중다공확산관에서 방류된 온배수의 혼합거동 해석, 박사학위논문, 서울대학교.
- 박상우, 정명균 (1983) 온수의 표면방출에 의한 2차원 비정상 난류 열확산의 예측, 대한기계학회논문집, 대한기계학회, 제7권, 제4호, pp. 451-460.
- 서일원 (1995) 월성원자력 3, 4호기 배수방파제에 대한 수리모형실험 보고서, 연구보고서, 한국전력공사 원자력건설처, 서울대학교 공학연구소.
- 윤용남 (2002) 수리학 (기초와 응용), 청문각.
- 이남주, 최홍식, 허재영 (1995) 가로흐름 수역으로 방출되는 3차원 온배수 난류모형, 한국해양해양공학회지, 한국해양해양공학회, 제7권, 제2호, pp. 148-155.
- 정태성 (1994) 연안 해수유동 및 온배수 확산에 관한 3차원 수치모형, 박사학위논문, 서울대학교.
- Adams, E.E. and Stolzenbach, K.D. (1974) Zone models for the near-field: surface discharges, European course on heat disposal from power generation in the water environment(Chap. 7), Delft Hydraulics Lab.
- Flow Science (2003) FLOW-3D (Theory Manual), Los Alamos, NM.
- Koester, G.E. (1974) Experimental study of submerged single-port thermal discharges. S.M. Thesis, Dept. of Civil Engineering, MIT, Cambridge, Massachusetts.
- McGuirk, J.J. and Rodi, W. (1978) A depth-averaged mathematical model for the near field of the side discharge into open-channel flow. J. of Fluid Mechanics, Vol. 86, Part 4, pp. 761-781.
- McGuirk, J.J. and Rodi, W. (1979) Mathematical modeling of three-dimensional heated surface jets. J. of Fluid Mechanics, Vol. 95, Part 4, pp. 609-633.
- Michail, R., Chu, V.H. and Savage, S.B. (1975) The reattachment of a two-dimensional turbulent jet in a confined crossflow. Proc., 16th IAHR Cong., Sao Paulo, Brazil, Vol. 3, pp. 414-419.
- Yakhot, V., Orszag, S.A., Thangam, S., Gatski, T.B., and Speziale, C.G. (1992) Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique, Physics of Fluids, Vol. 4, No. 7, pp. 1510-1520.