배수방식에 따른 온수 방류의 3차원 수치모의

A Three-Dimensional Numerical Model of Thermal Discharge for Different Type of Effluent

이진우* · 이승오** · 김창완*** · 조용식****

Lee, Jin Woo · Lee, Seung Oh · Kim, Chang Wan · Cho, Yong-Sik

Abstract

The mixing characteristics of heated water discharged from different types of effluents are simulated using a commercial software, Flow-3D model. In order to verify the model, the comparison of numerical results with the experimental data are conducted for each type of effluent, the submerged and surface overfall. It is observed that the numerical results show a reasonable agreement with the experimental data. Based on this study the application to the heated water discharge problem in the field can be expected as a further study and it can be the fundamental data when determining the type of effluent in a powerplant.

key words : Flow-3D, submerged discharge, surface discharge, heated water discharge

1. 서 론

최근 급증하는 전력수요로 인해 원자력 발전에 대한 의존도가 크게 증대됨에 따라 원자력 발전소의 단위 용량이 대형화되고 있다. 하지만 신규 발전소에 대한 추가적인 부지확보의 어려움으로 인해 기존 부지에 대규모 발전단지가 형성됨으로써, 발전소 부지 인근해역에 상당한 규모의 온수 방류가 이루어지고 있다. 이러한 온수 방류는 해수온도의 상승을 일으키고 발전소 인근 해역의 생태계에 대하여 점차적으로 심각한 영향을 주게 되며 현재 심화되고 있는 지구 온난화 현상에 의한 해수온도 상승과 맞물려 주변 해양 환경조건이 점점 더 악화되고 있는 실정이다. 원자력발전소에서 방류되는 온수는 일반적으로 주변수의 수온보다 약 5~10°C 정도 높기 때문에 해양으로 방류하게 되면 주위수와의 열교환 및 조류에 의하여 온수 방류지점을 중심으로 해수온도 경사가 발생하게 된다. 따라서 기존의 자연상태와는 다른 해수온도 상승영역이 발생하게 되며 주변해역의 물리적 특성을 변화시키고, 해수의 열 균형을 파괴시켜 주변환경 및 생태계에 악영향을 초래할 수 있다.

국내의 경우 원자력발전소에서 온배수를 해양으로 방류할 때 사용하는 주된 방법은 개거나 암거에 의한 표층방류(수표면 방류)이다. 표층방류의 경우 시공 및 유지상의 경제성은 비교적 우수하나, 온수가 방류된 후에 주변 해수와 혼합되는 효과가 떨어져서 방류구 주위의 해양 환경에 악영향을 초래할 뿐만 아니라, 온수가 주변수의 흐름에 의해 냉각수의 취수구로 재순환되어 발전소의 냉각효율을 저하시키는 단점이 있다. 이러한 단점을 개선하기 위하여 심층방류(Submerged discharge)를 이용한 방류방법이 제안되었다. 심층방류방안(Submerged discharge)은 연안의 표층방류시 해양생물이 주로 밀집되어 있는 조간대나 표층에 서식하는 생물들이 입게 되는 영향을 고려하여, 배수관로를 바닥경사를 따라 연장 설치하여 온수를 심층에서 방류함으로

* 한양대학교 토목공학과 · 석사과정 · E-mail: moonguy@hanyang.ac.kr

** 박사후 과정 · 한양대학교 토목공학과 BK21 첨단 글로벌 건설리더 양성 사업단 · E-mail: seungoh.lee@gmail.com

*** 한국건설기술연구원 · E-mail: cwkim@kict.re.kr

**** 교신저자 · 정회원 · 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수 · E-mail: ysc59@hanyang.ac.kr

서 난류확산효과(온수와 저온 심층수간의 밀도차에 의한 부력발생)에 의한 초기 희석률을 증가시켜 표층의 고온수 영향범위를 줄일 수 있는 방안이다. 난류확산효과를 증대시키기 위해 일반적으로 배수구에 확산기(Diffuser)를 설치하며, 분산방류에 따른 확산 영역감소효과를 위해 관로내에 여러개의 배수구(Multi-port)를 설치하기도 한다.

본 연구에서는 실제 지형자료를 이용하여 온수방류로 인한 영향을 수치적으로 도모하기 위한 기초단계로서 주변수의 흐름이 없는 경우 표층배수방식과 심층배수방식의 혼합거동을 분석하고 비교하였다. 표층배수방식은 기존 표층 방류구의 제원을 바탕으로 한 개거를 이용하여 모의하였고 심층배수방식으로는 연직다공확산관을 이용하여 수치해석을 실시하였다. 수치모의는 상용 3차원 수치모형 코드인 FLOW-3D를 이용하였고, 한국전력 전력연구원에서 주관한 발전소 온수 심층방류 수리실험의 결과 보고서(1999)를 이용하여 모형의 적용성을 검토하였다.

2. 연구방법

부력을 가지는 비압축성 유체의 흐름을 해석하기 위하여 FLOW-3D에서 사용하는 지배방정식은 직교좌표계(x, y, z) 에서의 3차원 연속방정식, 운동량방정식, 에너지 전달 방정식 및 상태 방정식이다.(Flow Science, 2002).

$$V_F\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}u_iA_i=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(c_p\mu/\rho A_j\frac{\partial \rho}{\partial x_i}\right) \tag{1}$$

C_p는 난류 Schmidt 수의 역수에 관련된 상수이고, μ는 운동량 확산계수이다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t}+\frac{1}{V_f}(u_jA_j\frac{\partial u_i}{\partial x_j})=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x_i}+G_i+f_i \tag{2}$$

$$V_F\frac{\partial}{\partial t}(\rho I)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho I u_iA_i)=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(c_I\mu/\rho A_j\frac{\partial \rho I}{\partial x_i}\right)+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(KA_j\frac{\partial T}{\partial x_i}\right) \tag{3}$$

여기서, u_i는 i방향에서의 평균속도를 의미하며 A_i는 i방향에서의 유체에서의 부분개방면적(fractional open area) 이다. V_f는 부분체적(fractional volume), P는 압력이며 G_i는 body 가속도를 의미한다. I는 거시적으로 혼합된 내부에너지이고, T는 온도, C_I는 난류 Prandtl 수의 역수, k는 열 전단율이다. 그리고 점성가속도 f_i는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\rho V_f f_i=\tau_{b,i}-\left[\frac{\partial}{\partial x_i}(A_jS_{ij})\right] \tag{4}$$

$\tau_{b,i}$는 벽면에서의 전단력이고, S_{ij}는 다음과 같이 주어진 인장변형율 의미한다.

$$S_{ii}=-2\mu_{tot}\left[\frac{\partial u_i}{\partial x_i}RIGHT\right],\quad S_{ij}=-\mu_{tot}\left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}RIGHT\right] \tag{5}$$

μ_{tot}는 전체 동점성 계수(dynamic viscosity)이며 난류의 효과가 포함된 동점성과 와도점성의 합이다. 또한,

상태방정식에서 수온과 밀도 관계는 다음 식을 이용하였다.

$$\frac{\rho_0-\rho}{\rho_0}=\alpha(T-T_0) \tag{6}$$

여기서, T_0와 ρ_0는 각각 기준수온과 기준수온에서의 밀도이다.

FLOW-3D에서는 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 $k-\varepsilon$난류모델을 사용하였고, 지배방정식은 유한체적법을 이용하여 이산화되며, 격자계의 구성시 격자망과 지형은 독립적으로 입력되는 FAVOR(Fractional Area and Volume Obstacle Repre-sentation)기법과 SOR(successive over relaxation)법을 이용하여 압력항을 해석하였다.

3. 수치모의

본 연구에서는 수리실험을 바탕으로 모형의 검증을 실시하였다. 표층배수에 필요한 개거의 제원과 심층배수시 필요한 연직다공확산관의 제원은 기존의 수리실험에서 사용하였던 조건과 일치하도록하였다. 개거는 폭 $3cm$의 정사각형 단면으로 결정하였고 연직다공확산관의 제원은 총 길이 $1.2m$의 확산관에 직경이 $1cm$인 5개의 포트(port)를 $4cm$간격으로 배열하였다. 또한, 모의할 정지수체의 수심은 $38cm$, 온수방류유속은 심층배수시 $16.06cm/\sec$로 모의하였고 표층방류유속은 통상적으로 심층방류유속의 30~50 %로 사용되기 때문에 $6.42cm/\sec$로 가정하였다.

수치모의를 위한 격자수는 240 ×160 ×40이고 x축, y축, z축은 모두 고정격자와 가변격자를 조합하여 사용하였다.

표 1. 수치모형을 위한 변수

Case	H_e (cm)	U_0 ($cm/\sec$)	$\triangle T_0$
표층배수	38.0	6.424	10
심층배수	38.0	16.06	10

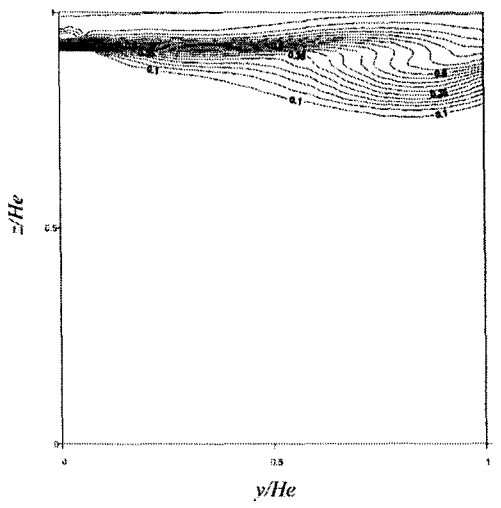

그림 1. 표층배수시 무차원 초과수온분포

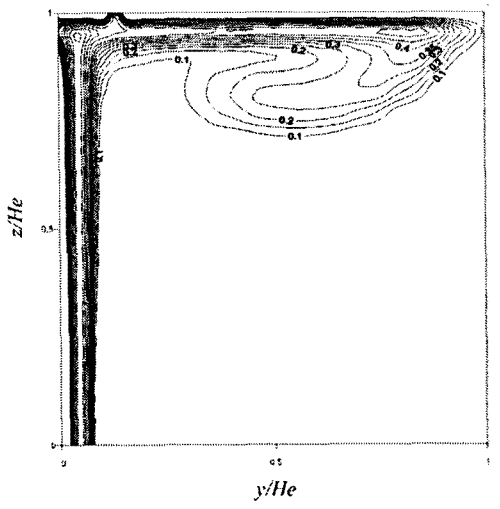

그림 2. 심층배수시 무차원 초과수온분포

그림 1과 그림 2는 개거와 확산관의 축을 따른 종단면(xz 평면)의 중앙 단면에서의 초과수온분포도이다. 초과수온이란, 측정된 지점의 수온에서 주변수의 수온을 뺀 값($\triangle T$)을 방류구에서 방류되는 온수와 주변수의 수온의 차이($\triangle T_0$)로 나눈 무차원화된 수온이다.

4. 결 론

본 연구에서는 상용 프로그램인 FLOW-3D를 이용하여 주변수의 흐름이 없는 경우의 표층배수방식과 심층배수방식의 혼합거동을 비교하였다. 수치모형으로 얻어진 결과는 기존의 수리실험의 결과와 비교하였을때 주변수에 대한 온수의 혼합범위를 잘 모의하고 있음을 알 수 있다. 본 연구를 통해 3차원 수치모형 코드인 FLOW-3D를 이용한 수치모의 결과의 타당성이 검증되었고, 이를 바탕으로 국내에서도 원자력발전소 근해의 실제지형에 적용하여 모의할 경우 기존의 수리실험의 단점을 보완할 수 있는 방안이 될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국전력 전력연구원의 재정적 지원을 받았습니다.

참고 문헌

1. 김효일, 고광훈, 이기혁, (2001). "온배수 영향 저감을 위한 심층배수 구조물의 적용성 검토." 대한토목학회지, 제49권, 제11호, pp. 26-34.
2. 서일원, 김대근, (1997). "원자력발전소 온배수 현황과 대책." 대한토목학회지, 제45권, 제9호, pp. 29-36
3. 한국전력공사 전력연구원, (1996). 원자력발전소의 온배수 영향 저감방안 연구.
4. 한국전력공사 전력연구원, (1999). 발전소 온배수 심층방류기술 연구 최종보고서.
5. 한국전력공사 전력연구원, (1999). 발전소 온배수 심층방류 수리실험 결과 보고서.
6. 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, New York.
7. Flow Science, I. (2002), "FLOW-3D user's manuals." 8th edition, Flow Science, Inc., Santa Fe, New Mexico.