

## 공기연행 수치모형을 이용한 발전소 거품저감 수중방류구조 설계 Design of the Submerged Outlet Structure for Reducing Foam at a Power Plant using a Numerical Model Simulating Air Entrainment

김지영\* · 강금석\* · 오영민 · 오상호\*\*

Ji Young Kim\*, Keum Seok Kang\*, Young Min Oh\*\* and Sang Ho Oh\*\*

**요 지 :** 발전소의 냉각수 방류과정에서 대량으로 발생하는 거품의 제거를 위하여 지금까지 소포제와 확산방지막에 의존해왔지만 유지보수나 비용 등의 문제로 안정적인 구조물에 의한 거품발생 방지 방안 마련이 요구되어 왔다. 따라서 본 연구에서는 거품저감 구조물 설계 기술을 확보하기 위하여 공기연행 해석이 가능한 난류 수치모형을 적용해 보았다. 방류수의 낙하양상에 따라 공기연행률의 차이가 있고 차단벽의 잠김 깊이와 통과 유속에 따라 연행공기의 유출률이 달라지므로 각 Case에 대한 비교를 통해 적정 단면을 설계할 필요가 있다. 본 연구에서는 단면 형상에 따른 공기 연행률과 유출률을 비교하여 거품의 발생 및 유출이 최소가 되는 단면을 찾았으며, 설계 기준은 현장 여건 특히, 바닥 수심고와 월류양상 등에 따라 달라질 수 있으나 수중 방류구 통과 유속은 1 m/s이 내가 되도록 하고 차단벽의 잠김 깊이는 최소한 수중 방류구 단면의 수직고 이상은 되어야 함을 알 수 있었다.

**핵심용어 :** 발전소, 방류구조, 거품저감, 공기연행, 수치모형

**Abstract :** Anti-foaming agents and foam fences have been used to remove the foam at the outfall of power plants, but there are some problems as consumption of maintenance costs and insufficiency of effect. Therefore, development of the methods how to remove the foam by stable coastal structure has been required. In this study, numerical simulation of air entrainment was carried out to design the submerged outlet structure for reducing foam using curtain walls. The air entrainment rate and the discharge of entrained air change according to the shape of weir and curtain wall. Hence, it is necessary to design the optimum section through comparison of each case. The optimum section which has the maximum rate of foam reduction was determined by the simulation results. In addition, it was found that the flow velocity at the submerged outlet is to be smaller than 1 m/s and the submerged depth of curtain wall is to be taller than height of the submerged outlet section.

**Keywords :** power plant, outlet structure, foam reduction, air entrainment, numerical model

### 1. 서 론

화력 및 원자력발전소는 대량의 냉각수를 필요로 하기 때문에 해안가에 위치하여 해수를 냉각수로 사용하고 있다. 사용된 냉각수는 방수로를 통해 다시 바다로 배출되는데, 이 과정에서 온배수 방류 및 거품 발생의 두 가지 중요한 환경 문제가 발생한다. 온배수 방류로 인한 환경 문제는 그 동안 현황과 대책에 관하여 많은 연구가 이루어

져 왔으나, 거품 발생 문제에 대한 연구는 거의 이루어진 바가 없다. 발전소 냉각수 방류시 거품이 발생하는 원인은 낙차로 인한 공기연행과 해수 중의 플랑크톤 및 유기물 농도가 높아 발생된 거품이 오랫동안 잔존하는 특성 때문이다. 따라서 서해안에 위치한 발전소의 경우 큰 조위차로 인하여 냉각수 방류 낙차가 크기 때문에 거품이 대량 발생하며, 해수 수온이 상승하여 해수 중의 플랑크톤 및 유기물 농도가 증가하는 봄철 이후에 거품 발생량이 증가한다.

\*한국전력공사 전력연구원(Corresponding author : Ji Young Kim, Korea Electric Power Research Institute, Daejeon 305-380, Korea, jykim77@kepri.re.kr)

\*\*한국해양연구원 연안개발·에너지연구부(Coastal Engineering & Ocean Energy Research Department, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan, Gyeonggi 426-744, Korea)

발전소 방수로의 거품은 유해성은 없지만 미관상 좋지 않아 시각적 공해를 유발하고, 주변 해역으로 확산될 경우 인근 주민들의 민원이 발생할 수 있다. 지금까지는 거품의 외해 유출을 방지하기 위하여 소포제 살포와 거품확산 방지막 설치 등의 방법에 의존하고 있는 실정이나, 소포제 살포로 인한 환경오염 및 거품 방지막의 잦은 파손 등의 문제가 있으며 거품발생량이 많은 여름철 건조 시에는 이러한 방법들로는 한계가 있어 근본적인 대책 마련이 지속적으로 요구되어 왔다.

발전소 방수로의 거품저감 방안 관련 연구는 1980년대 이후부터 본격적으로 이루어져 왔다. 일본 전력중앙연구소의 福原華一(1990)은 포말형성 원인과 발생 억제 및 제거 방안에 대한 종합적인 연구를 수행하였으며, 배수로 말단에 압력 관로를 설치하여 상부로 기포를 수집하는 장치를 고안하였다. 이 장치는 압력관로를 이용하는 것으로 신규 발전소 건설시에는 적용이 가능하나 가동 중인 발전소에는 근본적인 배수구조의 변경을 요하는 것이므로 적용이 어렵다. 국내의 경우 1980년대부터 서해안의 보령, 서천화력발전소를 대상으로 온배수의 물리적 성질을 조사하고 거품 발생의 원인을 파악하려는 시도가 이루어졌으며, 이를 통해 해수 온도, 표면 장력, pH의 연별 변동성 등이 거품 발생에 미치는 영향이 보고된 바 있다(한국전력기술주식회사, 1994; 한국전력공사 전력연구원, 2006). 한국전력기술주식회사는 일본 등 외국의 기술개발 결과를 수집, 정리하여 신규발전소 설계시 설계기준으로 삼고 있으나 수리모형실험 또는 수치해석을 통한 결과를 반영한 적이 없으며, 또한 기존의 가동 중 발전소의 배수구 구조개선 실적도 전무하다.

한편, 보령화력발전소에는 최근 냉각수 방류수를 활용한 소수력발전설비가 건설되면서 발전에 필요한 낙차를 확보하기 위해 방수로 상류측에 EL.(+)3.9 m 높이의 월류보를 설치하게 되었다(한국전력기술주식회사, 2006). 그런데, 외해 조위가 EL. (+)1.9 m 이상에서는 발전 낙차가 확보되

지 않아 소수력발전을 정지하고 방류수 전량을 기존 방류구로 방류하며, 소수력발전을 하는 경우에도 발전에 필요한 유량을 제외한 잉여 유량은 항상 기존 방류구로 배출해야 한다. 잉여 유량이 기존 방류구로 배출될 경우 방류시 낙차가 크게 발생하여 거품이 발생할 가능성이 높기 때문에, 거품 발생량을 근본적으로 저감하기 위하여 기존 방류구 좌안에 Fig. 1에 제시한 형식의 수중방류구조를 신설하는 방안을 고려하고 있다(한국전력공사, 2007). 이 수중방류구조는 방류수의 낙차 및 낙하시 발생하는 거품의 수중 관입깊이를 감소시키기 위해서 방류수가 EL.(+)3.9 m 높이의 월류보로부터 2단 낙하하는 구조를 채택하고, 수중에 관입된 거품이 수표면으로 부상한 후에 외해로 유출되는 것을 차단하기 위해서 2중 차단벽(Curtain wall) 형식으로 설계한 것이 특징이다. 또한, 월류보에서 1차 낙하한 방류수가 2차 낙하할 때의 에너지를 소산시키고 간조시 거품의 수중 관입깊이를 감소시키기 위해 Fig. 1에 보인 것처럼 2차 낙하 위치에 수평 유공판 구조를 설치할 계획이다. 이러한 거품저감 방류구조의 설계를 위하여 수리모형 실험과 수치모의실험을 수행하였는데, 본 연구에서는 수치모의 실험을 통하여 거품 발생을 최소화할 수 있는 차단벽의 높이를 산정하였다. 수치모의에는 3차원 유동해석 프로그램인 FLOW-3D(Flow Science, 2006)를 이용하였다.

## 2. 수치모형 실험

### 2.1 FLOW-3D 수치모형

발전소 방수로의 거품 발생저감 구조 설계를 위해서는 방류되는 냉각수의 유동양상은 물론 공기 연행률과 연행공기의 수중 거동양상 해석이 필요하다. 현재 3차원 유동해석에 널리 쓰이고 있는 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes) 모형 중 FLOW-3D 모형은 계산격자 내에 존재하는 고체와 유체를 구분하는 FAVOR 기법과 자유표면 추적적을 위한 VOF 기법이 최초로 적용되어 자유수면을 포함

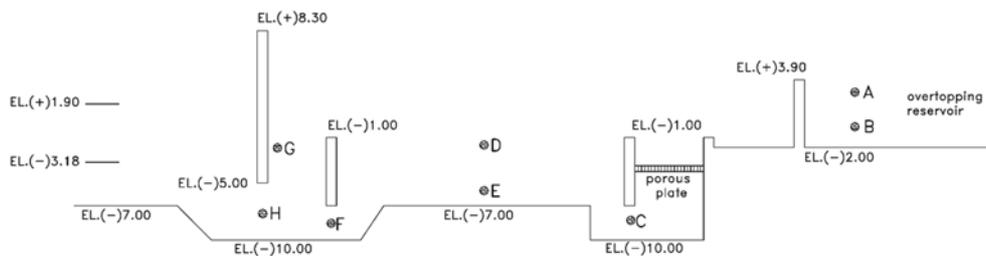


Fig. 1. Schematic diagram of the submerged outlet structure.

하는 유동해석에 탁월하며, 특히 공기연행 해석모형과 밀도가 서로 다른 유체의 혼합거동 해석모형인 Drift-flux 모형을 포함하고 있어 이러한 거품 발생저감 구조 설계에 이용될 수 있다.

### 2.1.1 자유수면 해석기법

FLOW-3D 모형에서는 자유표면의 계산을 위하여 다음 식이 사용된다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[ \frac{\partial}{\partial x}(FA_x u) + R \frac{\partial}{\partial y}(FA_y v) + \frac{\partial}{\partial z}(FA_z w) + \xi \frac{FA_x u}{x} \right] = F_{DIF} + F_{SOR} \quad (1)$$

$$F_{DIF} = \frac{1}{V_F} \cdot \left[ \frac{\partial}{\partial x}(v_F A_x \frac{\partial F}{\partial x}) + R \frac{\partial}{\partial y}(v_F A_y \frac{\partial F}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(v_F A_z \frac{\partial F}{\partial z}) + \xi \frac{v_F A_x F}{x} \right] \quad (2)$$

기체와 접하고 있는 액체 표면의 형상은 단위체적 내에 포함되어 있는 액체의 체적을 나타내는 식 (1)의 VOF 함수,  $F(x, y, z, t)$ 를 통해 얻을 수 있다. 여기서  $(u, v, w)$ 는  $(x, y, z)$  방향의 유속성분,  $V_F$ 는 유체가 흐르기 위한 체적의 점유율이며,  $(A_x, A_y, A_z)$ 는  $(x, y, z)$ 방향의 유체가 흐르기 위한 면적의 점유율이다. 확산계수  $v_F = C_F \mu / \rho$ 이며, 여기서 상수  $C_F$ 는 Turbulent Schmidt Number의 역수이다.  $F_{DIF}$ 는 난류확산항,  $F_{SOR}$ 은 질량생성항으로서 유체의 질량생성으로 인한 시간에 따른 체적 변화율을 의미한다. 그리고  $R$ 과  $\xi$ 는 좌표계에 따라 결정되는 상수로서, Cartesian 좌표계  $(x, y, z)$ 에서는  $R = 1$ ,  $\xi = 0$ 이 되며, cylindrical 좌표계  $(r, \theta, z)$ 에서는  $R = \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial \theta}$ ,  $\xi = 1$ 이 된다.

### 2.1.2 공기연행 해석모형

Flow-3D의 공기연행 해석모형은 공기의 수중 유입과 관계되는 난류 강도와 중력 및 표면장력과 같은 수면을 안정시키는 힘과의 상관관계를 고려한다. 난류는 난류 운동에너지  $Q$ 와 소산율  $D$ 의 두 물리량에 의해 특정되어진다. 난류 와(eddy)의 크기는 다음과 같이 계산되며, 이 값은 수면교란을 묘사하는데 사용된다.

$$L_i = 0.085(3/2)^{1/2} Q^{3/2} / D \quad (3)$$

공기 연행은 단위체적당 난류 운동에너지  $P_i = \rho Q$ 가 수면을 안정시키는 힘  $P_d = \rho g_n L_i + \sigma L_i$ 보다 큰 경우에 발생하도록 계산된다. 여기서,  $\rho$ 는 유체 밀도,  $\sigma$ 는 표면장력 계수,  $g_n$ 는 중력의 자유수면에 대한 수직 성분을 나타낸다.

단위시간당 공기 연행 체적비  $\delta V$ 는 수표면 면적  $A_s$  및 평균 수면고로부터의 교란영역 높이에 비례하며, 이는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\delta V = C_{air} A_s (2(P_i - P_d) / \rho)^{1/2} \quad (4)$$

여기서,  $C_{air}$ 는 비례상수이며, 본 연구에서는 Souders-Hirt (2004)의 선행연구에서 모든 검증 실험에서 사용된 평균 값인 0.5를 사용하였다. 그리고 만약  $P_i$ 가  $P_d$ 보다 작은 경우에는  $\delta V$ 는 0이 된다.

### 2.1.3 Drift-flux 모형

유체/입자, 유체/기포, 유체/유체 혼합 등 서로 다른 밀도를 가지는 유체들의 혼합 거동은 밀도의 차이에 의해 유동양상이 서로 상이하다. 공기속의 먼지나 물속의 실트의 거동은 상대 속도가 작아 표류(drift)한다고 표현할 수 있다. 이러한 표류 유속 계산을 위해 Drift-flux 모형을 사용한다. 이 모형은 요소간의 상대 거동을 개개의 불연속 요소가 아닌 하나의 연속체로 가정할 수 있다는 것에 기인한다. 이는 불연속 요소들의 상호작용이나 거동추적 같은 계산이 필요 없어 계산 효율을 향상시킨다. FLOW-3D에서는 다음 4가지 물리적 상황에서의 표류 유속 계산을 수행할 수 있으며, 관련 지배방정식의 소개는 분량상 생략하였다.

- 유체가 밀도  $\rho_1$ 과  $\rho_2$ 를 가지는 두 요소의 혼합체인 경우 하나의 유체이지만 가변 밀도를 가지는 흐름
- 밀도  $\rho_1$ 과  $\rho_2$ 를 가지는 액체와 고체의 혼합체 흐름
- 밀도  $\rho_1$ 과  $\rho_2$ 를 가지는 두 비압축성 유체
- 비압축성 요소가 포함된 압축성 가스, 이 경우 압축성 가스의 밀도는 식에 의해 주어지고, 비압축성 요소의 밀도는 가스 밀도보다 항상 큰  $\rho_1$ 을 가진다고 가정

거품저감 효과가 가장 뛰어난 단면 형상을 찾기 위하여 이상의 모형들을 함께 이용하여 거품 발생의 원인이 되는 낙차구간에서의 수면 공기연행과 수중에서의 기포의 이동 및 부상, 부상된 기포의 공기 중으로의 배출을 해석하여 공기연행률과 연행공기의 외해 유출률을 비교하였다.

## 2.2 실험 조건

Fig. 1에서 제시한 기본 설계안은 차단벽을 통과하는 유속을 1 m/s 정도로 유지하고 일정정도 잠김 깊이를 확보하기 위해 이론적으로 설계한 단면이며, 수치모의를 통하여 거품저감 효과를 보다 향상시킬 수 있는 단면형상을 찾기

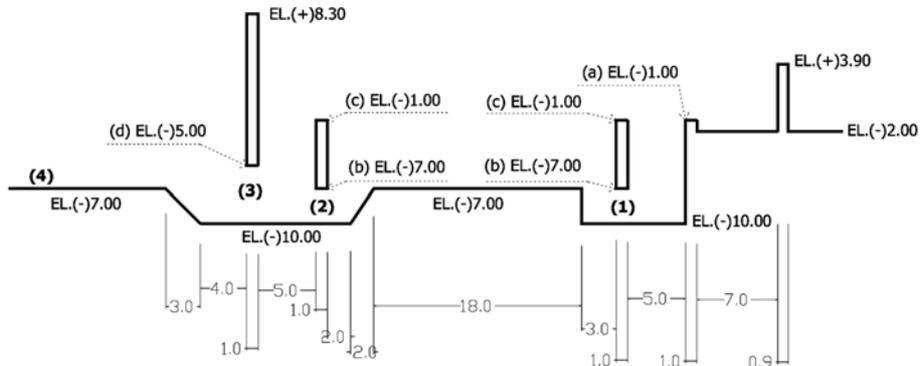


Fig. 2. Modifiable points of the section and measurement points(unit : m).

Table 1. Experimental conditions

Conditions	(a)point elevation (EL. m)	(b)point elevation (EL. m)	(c)point elevation (EL. m)	(d)point elevation (EL. m)	
L.W.O.S.T, Flowrate 78 cms	Case 1-1	0	-7	-1	-5
	Case 1-2	-1	-7	-1	-5
	Case 1-3	-2	-7	-1	-5
	Case 2-1	determine by Case 1 results	no curtain wall	-1	-5
	Case 2-2		-6	-1	-5
	Case 2-3		-8	-1	-5
SHP Stop operation, Flowrate 153 cms	Case 3-1	determine by Case 1~2 results	0	-5	
	Case 3-2		-1	-5	
	Case 3-3		-2	-5	
	Case 4-1	determine by Case 1~3 results		-4	
	Case 4-2			-6	

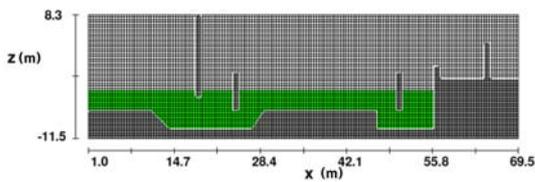


Fig. 3. Computational domain and grid.

로 하였다. 계산 효율성을 고려하여 2차원 해석을 수행하였으며, 2차원 해석에서는 감세유공판 반응이 불가하여 고려하지 않았다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 설계단면에서 수정이 가능한 (a)~(d) 4가지 지점의 높이에 따른 흐름 양상 및 공기 연행 양상을 살펴보았다. 각 지점별 형상변화에 따라 유속과 연행공기 흐름이 어떻게 변화하는지 살펴보기 위하여 (1)~(4) 지점의 수심 평균 유속 및 연행공기 체적률을 관측하였다. 수치해석을 위한 지형과 격자망은 Fig. 3과 같이 구성하였으며, 격자수는 160×50=8000개, 격자 간격은 x방향 0.42 m, z방향 0.40 m이다.

### 2.3 모형의 보정 및 검증

본 모형의 보정과 검증을 위해서는 현장 실측자료를 바탕으로 바닥 마찰계수, 공기연행해석모형의 비례상수 등의 보정과 초기 조건, 경계 조건 등이 적절히 부여되었는지 확인해 볼 필요가 있다. 그러나 본 연구에서의 해석대상 영역은 아직 건설되지 않은 구조물로 현장 실측자료가 없다. 따라서 병행 수행한 축소모형 실험(오 등, 2008 참고)에서의 수위 및 유속 관측결과를 비교하며 보정하였다. 이 모형 실험 역시 바닥 마찰계수가 반영되지 않고 scale effect 등의 영향으로 현장 조건을 정확히 재현하는데 한계가 있었으나, 수치모형에서의 결과와 모형실험 결과가 유사하게 나타났으며, 전반적으로 합리적인 계산결과가 도출되고 있는 것으로 파악되었다. Fig. 4는 Fig. 1에 표시된 각 관측점에서의 유속에 대한 수치모형 계산결과와 수리모형 실험결과를 비교한 것으로 기본설계 제원인 Case 1-1 조건에 대한 유속 결과 값이며, 유속 크기와 흐름 경향이 유사하게 나타남을 확인하였다. 여기서 각 관측점 A~H는 수증방류구조 내 흐름 경향을 파악하기 위하여 Fig. 1과 같

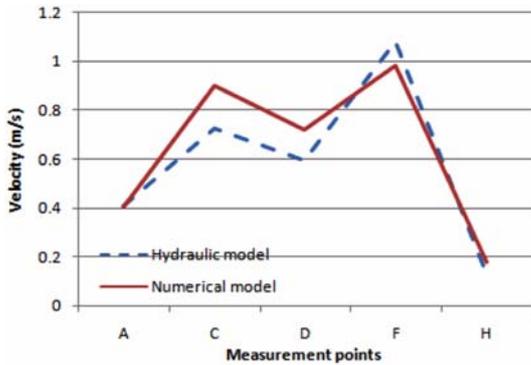


Fig. 4. Comparison of numerical and hydraulic model results at each point.

이 정한 유속관측점으로, 이 중 A, D, G 세 곳의 연직 위치는 각 관측점에서의 수심  $h$ 의 0.6배에 해당하는  $0.6h$  지점이며, 나머지 다섯 개 관측점에서의 연직 위치는 수심  $h$ 의 0.2배에 해당하는  $0.2h$  지점이다. Fig. 4에서는 저조위 시 흐름에 관여하는 주요지점의 유속값을 비교하였다.

### 3. 실험 결과

각 실험 조건별로 유속과 연행공기의 분포를 살펴보았다. 월류 후 100초간의 흐름양상을 관측하였으며, 100초

이후에는 비교적 일정한 흐름양상을 보였다.

#### 3.1 Case 1

먼저 Case 1에서는 1차 낙차 후 2차 낙차시의 월류보 높이에 따른 변화를 살펴보았다. 이 경우 월류보가 있는 경우와 없는 경우의 차이가 두드러지게 나타났으며 보가 있을 경우 높이별 차이는 거의 없었다. Fig. 5는 EL.+3.9 m 월류보에서 1차 월류 시작 후 100초간 각 관측점을 통과하는 연행공기 체적비의 변화양상을 나타낸 것으로 2차 월류보가 없는 Case1-3의 경우가 낙하구간에서 공기 연행률이 낮아 전체적으로 연행공기 분포율이 작게 나타났다. Fig. 5~14에 도시된 연행공기의 체적비는 0~1 범위의 값으로 유체 중에 공기가 포함된 비율을 나타낸다. Fig. 6은 100초 경과 시점에서 종단면 연행공기 분포도를 나타낸 것으로 Case1-3에서 전반적으로 공기 연행률이 낮음을 알 수 있다. 특히 관측점 (4) 지점은 차단벽을 통과한 이후의 위해 지점으로 이 지점에서의 연행공기 분포율이 높다는 것은 거품이 외해로 유출되는 양이 많음을 의미하는데, Case 1-3의 경우 다른 조건에 비해 현저히 작게 나타남을 확인하였다. 월류보가 있는 경우 낙하고를 증가시켜 관입깊이가 크게 나타나는 반면, 없는 경우에는 흐름방향이 수면과 수평에 가까워 관입깊이가 작아짐에 따라 공기 연행률이 현저히 줄어드는 것을 알 수 있었다. 각 조건별로 통과 유

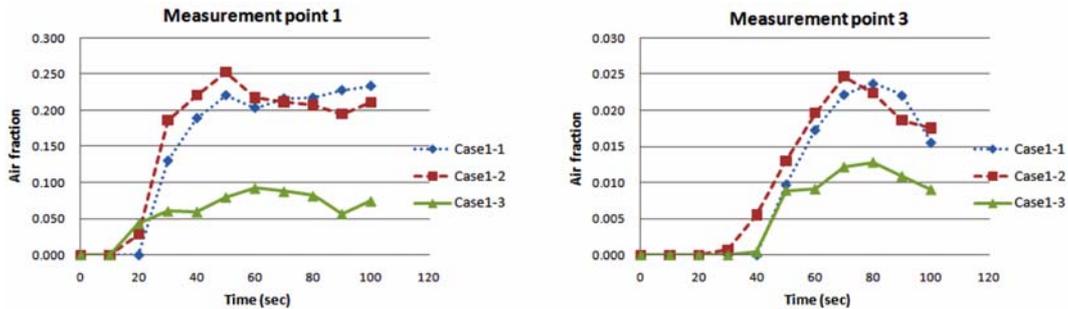


Fig. 5. Time series of entrained air volume fraction at each point(Case 1).

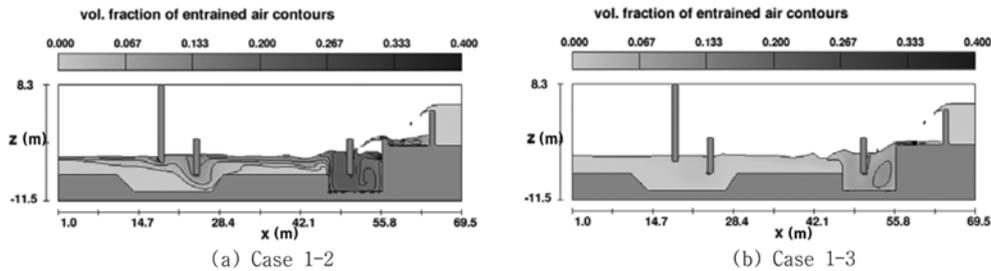


Fig. 6. Contour plots of entrained air volume fraction(Case 1).

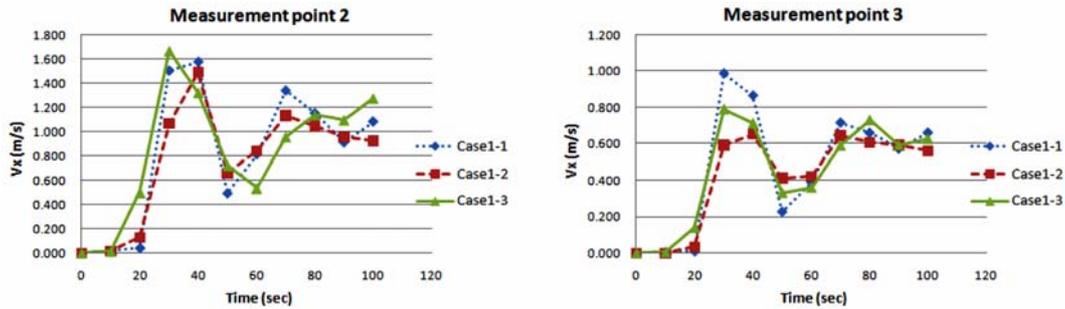


Fig. 7. Time series of horizontal mean velocity at each point(Case 1).

속을 비교한 결과 각 관측점별 단면적의 변화가 없어 유속의 차이는 거의 없었으며, 저조시 거품 차단구간인 관측점 (2)에서의 수심평균 유속이 약 1 m/s 내외로 나타났다.

### 3.2 Case 2

Case 1 실험 결과 거품발생 저감 효과가 가장 큰 경우가 Case 1-3임을 알 수 있었으며, 따라서 Fig. 2의 (a)지점의 높이를 EL. -2.0 m, 즉 월류보가 없는 것으로 결정하였다. 마찬가지로 (b)지점 높이 결정을 위한 Case 2 실험을 수행하였으며, 실험 결과 차단벽이 없는 경우(Case 2-1)와 잠김 깊이가 얇은 경우(Case 2-2)에는 공기 차단효과가 작아 외해로의 연행 공기 유출이 상대적으로 많았다. 이

변 경우에도 Case 1-3이 외해 유출이 가장 작은 것으로 확인되었다. Case 2-2의 경우 차단벽 통과 단면적이 커서 통과 유속이 Case 2-3과 Case 1-3에 비해 작지만 차단벽의 잠김 깊이가 얇아 공기 차단 효과가 떨어지며, Case 2-3의 경우 차단벽의 잠김 깊이가 깊지만 통과 유속이 커서 공기 유출이 큰 것을 알 수 있다. 따라서 Case 2 실험 결과 (b) 지점인 저조용 차단벽의 잠김 깊이는 EL. -7.0 m 이 적절한 것으로 판단되었다.

### 3.3 Case 3

Case 1~2에서는 저조시 흐름에 관여하는 차단벽과 월류보의 제원을 결정하였으며, 이 차단벽과 월류보는 고조시의 흐름에 미치는 영향은 거의 없다. 따라서 Case 1~2에

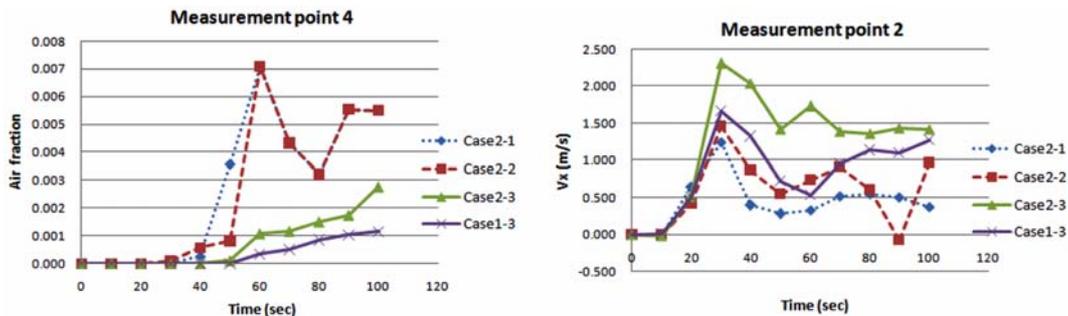


Fig. 8. Time series of entrained air volume fraction and horizontal mean velocity at each point(Case 2).

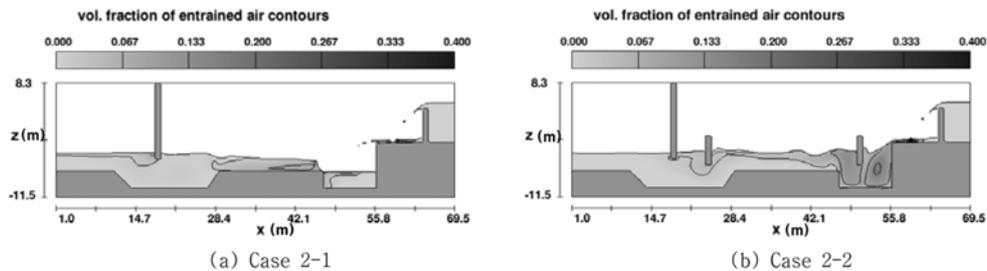
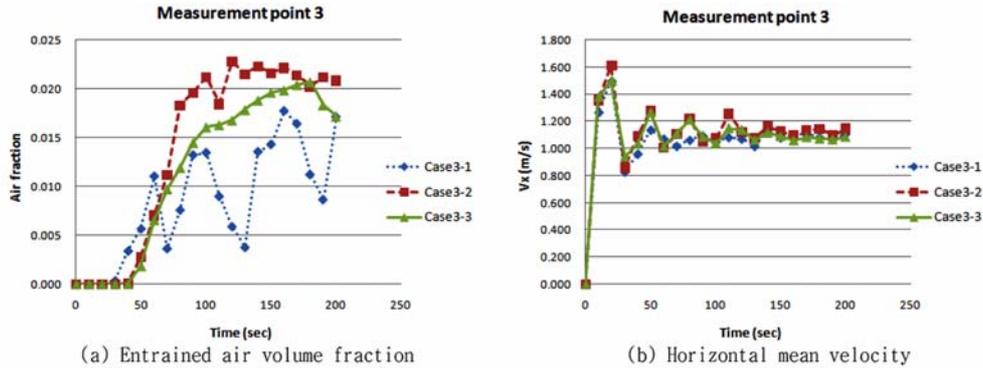


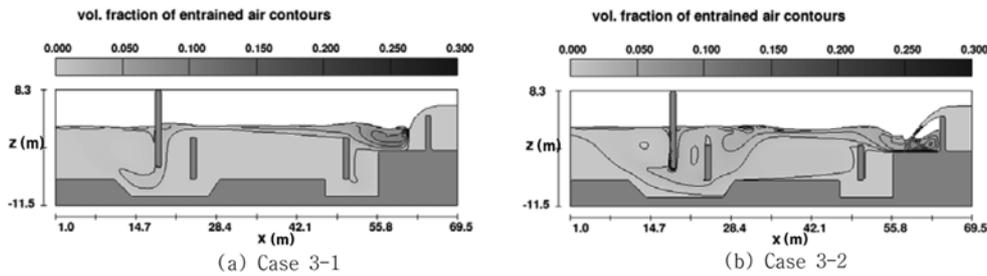
Fig. 9. Contour plots of entrained air volume fraction(Case 2).

**Table 2.** Experimental conditions of Case 3

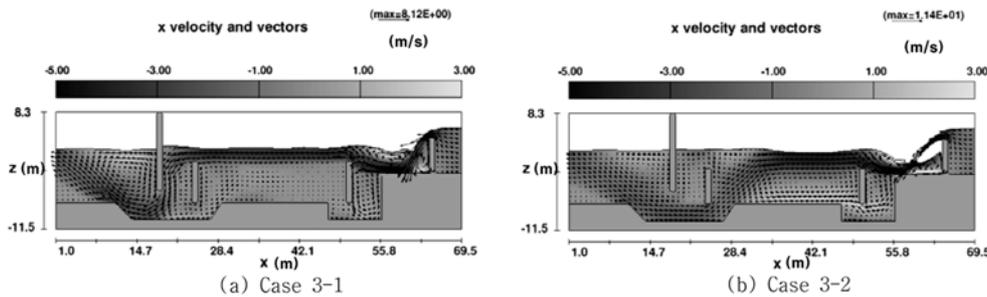
Conditions		(a)point elevation (EL. m)	(b)point elevation (EL. m)	(c)point elevation (EL. m)	(d)point elevation (EL. m)
SHP Stop operation, Flowrate 153 cms	Case 3-1	-2	-7	0	-5
	Case 3-2	-2	-7	-1	-5
	Case 3-3	-2	-7	-2	-5



**Fig. 10.** Time series of entrained air volume fraction and horizontal mean velocity at each point(Case 3).



**Fig. 11.** Contour plots of entrained air volume fraction(Case 3).



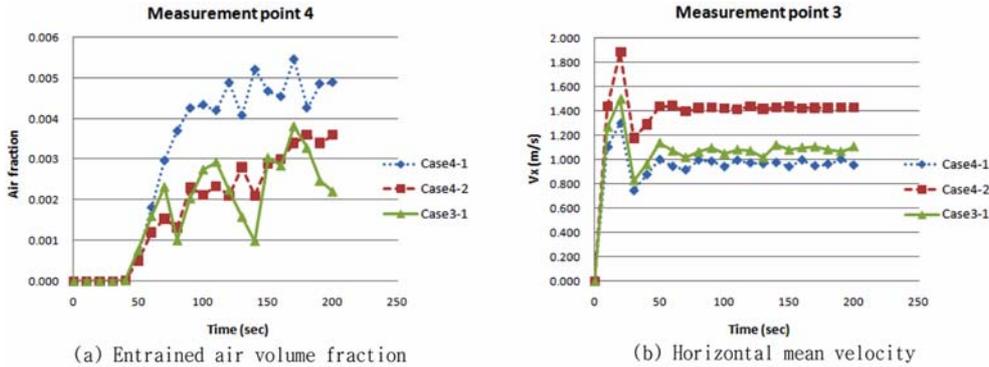
**Fig. 12.** Contour plots of horizontal velocity and vector plots of velocity(Case 3).

서 결정된 제원을 확정하고, Case 3~4에서는 고조 흐름에 관여하는 Fig. 2에서의 (c)와 (d) 지점의 높이를 결정하기로 하였다. 설계 기준에 따라 수수력발전 운전 정지 수위를 기준으로 검토하였으며, 고조시 공기 이동을 차단하는 구간인 관측점 (3) 지점과 외해 지점인 (4) 지점만 관측하였으며, 관측점 (1) ~ (2)는 고조시 흐름이 거의 없으므로

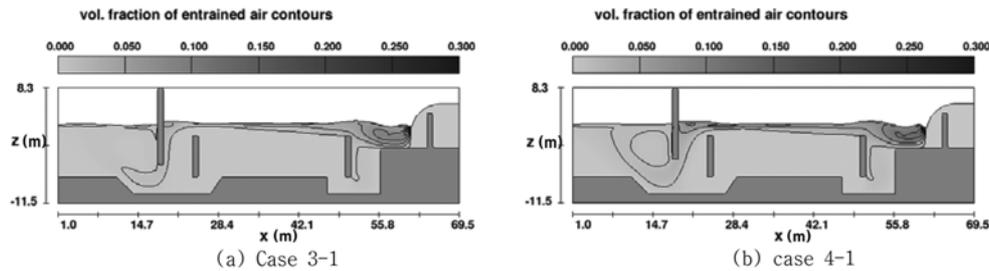
관측하지 않았다. 실험 결과, Case 3은 Table 2에서 보는 바와 같이 (c) 지점의 높이만 다르고 수중 방류구 단면적의 크기가 모두 같으므로 각 조건별 방류 유속의 차이는 없었으며, Fig. 10~11을 보면 연행공기의 유출률은 차이가 미약하나 Case 3-1의 경우가 비교적 작은 것으로 나타났다. 그리고 Fig. 12의 흐름 양상을 보면 (c) 지점의 높이

**Table 3.** Experimental conditions of Case 4

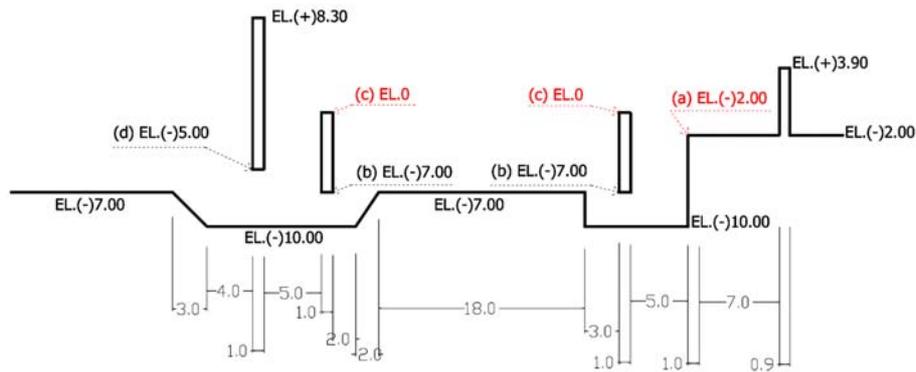
Conditions		(a) point elevation (EL. m)	(b) point elevation (EL. m)	(c) point elevation (EL. m)	(d) point elevation (EL. m)
SHP Stop operation, Flowrate 153 cms	Case 3-1	-2	-7	0	-5
	Case 4-1	-2	-7	0	-4
	Case 4-2	-2	-7	0	-6



**Fig. 13.** Time series of entrained air volume fraction and horizontal mean velocity at each point(Case 4).



**Fig. 14.** Contour plots of entrained air volume fraction(Case 4).



**Fig. 15.** Final design of the outlet structure(unit : m).

가 높은 Case 3-1의 경우 주요 흐름 구간이 수면 근처에서 형성되어 저조용 차단벽 상부를 통과하고, Case 3-2~3-3의 경우 첫 번째 차단벽을 통과한 후 흐름 구간이 낮아지면서 저조용 차단벽 하부로 대부분의 유량이 방류된다. 따

라서 Case 3-2~3-3의 경우 수중에 연행 공기가 분포하며 거품 부상이 늦어 거품의 외해 유출 차단효과가 Case 3-1보다 떨어질 것으로 보이며, Case 3-1의 경우 두 번째와 세 번째 차단벽 사이에 주요 흐름구간이 형성되어 감세공

등의 구조물을 설치하면 거품의 유출 차단효과를 높일 수 있을 것으로 보인다. 따라서 Case 3 실험 결과 (c) 지점의 높이를 EL. 0으로 결정하였다.

### 3.4 Case 4

마지막으로 최종 차단벽인 (d)지점의 높이를 결정하였다. Case 2의 저조용 차단벽과 비슷한 양상을 보였는데, 차단벽 잠김 깊이가 얇은 Case 4-1의 경우 상대적으로 공기 유출이 많았으며, 차단벽 잠김 깊이가 깊은 4-2의 경우 공기 유출 차단 효과는 나아지지 않으나 통과유속만 커져 최초 설계안인 EL. -5 m가 적절한 것으로 판단되었다. 따라서 최종 결정된 조건은 Case 3-1이며 수정 단면은 Fig. 15와 같다.

## 4. 결 론

발전소의 냉각수 방류과정에서 대량으로 발생하는 거품의 제거를 위하여 지금까지 소포제와 확산방지막에 의존해왔지만 유지보수나 비용 등의 문제로 안정적인 구조물에 의한 거품발생 방지 방안 마련이 요구되어 왔다. 따라서 본 연구에서는 거품저감 구조물 설계 기술을 확보하기 위하여 공기연행 해석이 가능한 난류 수치모형을 적용해 보았다. 방류수의 낙하양상에 따라 공기연행률의 차이가 있고 차단벽의 잠김 깊이와 통과 유속에 따라 연행공기의 유출률이 달라지는데, 바닥 수심이 한정되어 있는 경우 차단벽의 잠김 깊이가 깊어질수록 방류구 단면적이 작아지므로 통과 유속이 커져 거품 유출률이 커지고, 유속을 줄이기 위해 잠김 깊이를 너무 얇게 해도 거품 유출 차단 효과가 떨어지므로 각 Case에 대한 비교를 통해 적정 단면을 설계할 필요가 있다. 본 연구에서는 다양한 Case에 대한 검토가 부족하기는 하였으나, 구조물 형상에 따른 공기 연행률과 유출률을 비교하여 거품의 발생 및 유출을 최소화시킬 수 있는 형상을 찾을 수 있음을 확인하였다. 설계 기준은 현장 여건 특히, 바닥 수심고와 월류양상 등에 따라 달라질 수 있으나, 수중 방류구 통과 유속은 1 m/s이내가 되도록 하고, 차단벽의 잠김 깊이는 최소한 수중 방류구 단면의 수직고 이상은 되어야 함을 알

수 있었다.

향후 본 연구에서 부족했던 공기연행 수치모형의 검증 과정을 수치모형실험 결과와의 비교를 통해 보완하여 실제 현장 적용시 보다 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있도록 하겠다.

## 감사의 글

본 논문의 내용은 지식경제부 전력산업연구개발사업인 “발전소 취배수로 거품제거장치 개발” 과제의 일부이며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 오상호, 오영민, 강금석, 김지영 (2008). 발전소 수중방류구조 내 수평유공판 설치에 따른 거품발생 저감효과에 관한 실험적 연구. 한국해양·해양공학회는문집, 20(5), 472-481.
- 한국전력공사 전력연구원 (2002). 발전소 방류구의 수리학적 거품저감방안 연구.
- 한국전력공사 전력연구원 (2006). 보령화력발전소 취배수구 해수 및 거품의 성질.
- 한국전력공사 전력연구원 (2007). 보령화력발전소 배수로 거품저감구조 설계 보고서.
- 한국전력기술주식회사 (1994). 발전소 가동시 배수구 주위에 발생하는 거품저감대책.
- 한국전력기술주식회사 (2006). 보령화력 1~6호기 온배수 활용 소수력 발전설비 검토.
- Flow Science, Inc. (2006). FLOW-3D User's manual.
- Souders, D. T. and Hirt, C. W. (2004). Modeling Entrainment of Air at Turbulent Free Surfaces. World Water Congress 2004, ASCE, Salt Lake City, USA.
- Wood, I. R. (1991). Air Entrainment in Free-surface Flows, IAHR Hydraulic Structures Design Manual, A. A. Balkema.
- 福原華一 (1990). 復水器冷却水路系の發泡防止對策設計. 財團法人 電力中央研究所 研究報告.
- 電力土木技術協會 (1995). 火力原子力發電所 土木構造物の設計.

Received August 12, 2008

Accepted September 29, 2008