

열발전소 배수암거 SURGE 현상 해석

윤 성범*, 이 기혁**, 고 광오**

1. 서론

화력 및 원자력발전소의 냉각수계통은 크게 2개의 소계통으로 분류되는 바, 첫번째 계통은 냉각수펌프(cooling water pump; CWP)로부터 복수기(condenser)를 지나 seal well에 이르는 기계내부계통이며, 두번째 계통은 seal well의 weir를 월류한 냉각수가 암거 및 개수로를 흘러 바다에 이르는 기계외부계통이다.

발전도중 송전탑 등이 낙뢰로 파손되면 자동적으로 전력생산이 중단되며, 펌프로의 전원공급도 갑자기 중단되므로, 기계내부계통으로 부터의 유량이 급격히 감소한다. 그러나 배수암거가 매우 길면 배수암거내에 정상상태로 흐르던 수체(water body)는, 관성의 법칙에 의해 유속이 갑자기 멈추지 못하고, 역수면 경사와 마찰에 의해 관성이 완전히 소멸될 때까지, 외해 쪽으로 흐름이 유지되다 서서히 멈추게 되며, 이때 seal well weir의 하부수조 수위는 최저상태로 하강하며, 하류단인 바다쪽 수위보다 낮아지므로, 흐름은 반대로 바다 쪽에서 seal well쪽으로 역류하여, 경우에 따라서는 원 상태의 수위보다 높게 상승한다. 이러한 장주기의 상승과 하강이 마찰에 의해 운동량이 완전히 소모될 때까지 계속되는 현상을 surge라 한다.

Surge현상은 수격작용(water hammer)에 의해 발생하는 단주기의 압력파와는 달리, 매우 긴 주기를 가지는 중력파이므로 비정상 Bernoulli 방정식과 연속방정식으로 해석이 가능하다. 본 연구에서는 열발전소의 냉각수펌프로부터 방수 개수로에 이르는 냉각수 전 계통(기계내부 및 외부계통)에서 급작스런 펌프가동중단(trip-out)시 발생하는 surge현상을 해석한다.

2. 지배방정식

Surge 현상은 기본적으로 비정상 흐름(unsteady flow)이므로, 그림 1과 같이 여러 개의 수조와 수조사이를 연결하는 관로로 구성된 배수계통에 대해 관로의 면적이 일정한 경우 다음의 비정상 Bernoulli 방정식과 연속방정식을 적용하여 해석할 수 있다 (윤 등, 1994).

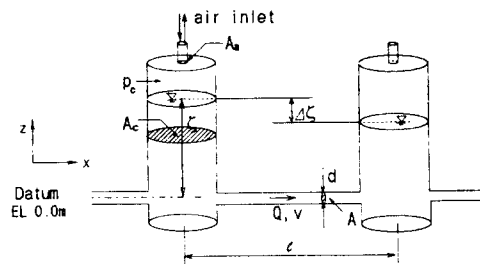


그림 1. 수조 및 관로의 개념도

* 한양대학교 토목환경공학과 조교수
** 한양대학교 토목공학과 석사과정

$$\frac{l}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \Delta H + \left(\sum k + f \frac{l}{d} \right) \frac{lv}{2g} = 0 \quad (1)$$

$$A_c \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \Delta Q = 0 \quad (2)$$

여기서 ζ 는 기준면으로부터 수면까지의 높이 (m), v 는 관로의 단면평균유속 (m/s), Q 는 관로의 유량 (m^3/s)이며, A_o 는 공기실의 공기 유출입구, A_c 는 수조의 단면적 (m^2), A 는 관로의 단면적 (m^2), l 은 인접수조간의 관로길이 (m), d 는 관로의 직경 (m), ΔQ 는 수조로부터의 순유출 유량 (m^3/s), g 는 중력가속도 (m/s^2), f 는 관로의 마찰계수, k 는 관로의 미소손실계수를 나타낸다. ΔH 는 인접수조간의 속도수두를 제외한 수두 차로써 다음과 같다.

$$\Delta H = \frac{\Delta P_c}{\gamma_w} + \Delta \zeta \quad (3)$$

여기서 ΔP_c 는 대기압과의 공기압력차 (N/m^2), $\Delta \zeta$ 는 수면고차 (m), γ_w 는 물의 단위중량 ($9810 N/m^3$)이다. 모든 공기실의 압력이 대기압일 때는 압력수두차 ΔP_c 는 사라지고, 인접수조의 수면고차 $\Delta \zeta$ 만으로 표시된다. 식 (1)은 유속의 함수이므로 수치해석의 편의를 위해 연속방정식에서 요구하는 유량변수로 다시 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{gA}{l} (\Delta H + KQ) = 0 \quad (4)$$

여기서 K 는 식 (1)로부터 다음과 같이 표현된다.

$$K = \left(\sum k + f \frac{l}{d} \right) (2gA^2)^{-1} \quad (5)$$

2.1 Seal well 공기실의 해석

Seal well은 weir를 중심으로 상류수조는 기계내부계통의 하류단이, 하류수조는 기계외부계통의 상류단이 만나는 구조물이다. 이는 서론부에서 기술한 바와 같이 해수면 승강에 의한 수면변동이 기계내부의 유량에 영향을 미치지 않고 일정하게 흐르도록 하는 것으로, 대부분의 경우 조석에 의한 공기의 압축·팽창을 방지하기 위해 천정부에 약간의 개방부를 두어 공기의 유출입이 자유롭도록 한다. 또한 공기유출입구의 단면적 A_o 가 공기실의 단면적 A_c 보다 현저히 작으면 surge에 의한 수면승강시 공기의 유출입에 제한을 가하여 surge를 제어하는 역할을 수행한다. 그러므로 seal well 공기실의 개방면적은 정상운전시 주기가 매우 긴 조석에 대해서는 공기실압력이 항상 대기압을 유지할 수 있도록 충분히 커야하며, 동력상실로 인한 순간적인 펌프 중단시 발생하는, 조석에 비해 상대적으로 짧은 주기의 surge에 대해서는 공기 유출입을 최대한 제한시켜 완충작용을 할 수 있도록 작게 설계해야 한다.

2.2 기계내부계통의 해석

기계내부계통에는 펌프가 존재하며 또한 복수기에서 여러 다발의 작은 관(tube)이 복잡한 관망의 형태를 이루므로 부정류해석이 쉽지 않다. 본 연구는 압력파의 해석보다는 약 100초 이상의 시간규모를 갖는 장주기의 surge 해석에 주목적이 있으므로, 장주기의 surge 거동에 영향을 미치지

않는 압력파를 제거한 장시간 규모의 부정류해석만 수행한다. 기계내부계통으로부터의 유량은 기계외부계통의 surge 거동에 영향을 주며 또한 영향을 받는 상호의존적이므로, 내부계통과 외부계통을 분리하여 해석할 수 없다.

2.3 Seal well weir의 해석

Seal well에 존재하는 weir는 기계내부계통과 외부계통의 연결부로서, 정상운전시에는 조석에 의한 하류부 수위변동이 내부계통의 정상유량에 영향을 주지 않도록 설치된다. weir를 통한 유량은 Homma(국립건설시험소, 1993) 공식을 이용하여 weir 상·하류의 수위차 h 및 weir상류부 수심 H 에 따라 불완전월류와 완전월류로 구분하여 주어진다.

2.4 하류부 개수로의 해석

배수암거와 바다사이에 배수암거와 규모가 비슷한 개수로가 연결되어 있을 경우에는 암거하류단에서의 수위가 유량에 따라 민감하게 변하므로 이를 고려해 주어야 한다. 개수로에서의 부정류 해석은 1차원 천수방정식을 이용하여 해석한다. 배수 개수로가 해수와 만나는 곳에서는 surge에 의한 중력파가 외해로 자유롭게 전파할 수 있도록 해야한다. 해수에서의 중력파 거동은 2차원 천수방정식으로 해석된다.

3. 수치해석

냉각수 계통을 기본적으로 여러 개의 수조와 이들 수조사이를 연결해주는 관로의 조합으로 생각하고, 각각의 수조에 대해 연속방정식 (2)를, 각각의 관로에 대해 운동방정식 (4)를 적용하며, seal well의 상·하 수조를 연결해주는 weir에 대해서는 운동방정식 대신 weir 유량공식을 사용한다. 또한 seal well 상하수조는 공기조절실의 공기압 영향하에 있으므로, 공기조절실에 대해 공기 연속방정식을 적용하여 공기밀도 ρ 를 구하고, 이를 다시 유량공식에 대입하면 공기출입구에서의 공기유출입량 Q_a 를 구할 수 있다.

개수로에는 1차원 천수방정식을, 개수로에 접하는 바다에 대해서는 2차원 천수방정식을 적용하였다. 배수 암거하류단의 개수로 인접부에서는 흐름이 관로에서 개수로로 바뀌므로 서로 다른 지배방정식 간의 접합조건이 요구되며, 개수로와 바다의 연결부에서도 연결조건이 필요하다.

수치해석은 유한차분법중 양해법으로 잘 알려진 Leap-frog법을 기본적으로 이용하였으며, 마찰항은 안정해를 구하기 위해 음해법으로 처리하였다. 식 (2)와 (4)의 연속 및 운동방정식을 유한차분화하면 다음과 같다 (그림 2 참조).

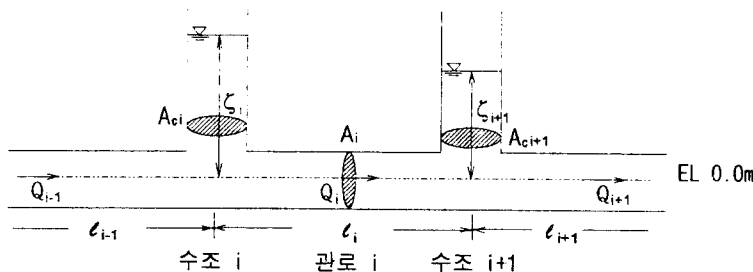


그림 2. 유한차분 격자체계도

$$\frac{\zeta_i^{n+1} - \zeta_i^n}{\Delta t} = -\frac{1}{Ac_i} (Q_i^n - Q_{i-1}^n) \quad (6)$$

$$\frac{Q_i^{n+1} - Q_i^n}{\Delta t} = -g \frac{A_i}{l_i} (\zeta_{i+1}^{n+1} - \zeta_i^{n+1} + \frac{1}{2} K_i^n |Q_i^n| (Q_i^{n+1} + Q_i^n)) \quad (7)$$

또한 공기의 연속방정식에 대해서도 같은 방법을 적용한다 (그림 3 참조).

여기서 윗첨자 n 은 시간단계를 나타내며, 아랫첨자 i 는 수조 및 관로번호를 나타낸다. 펌프흡입구가 위치하는 접근수조를 하나의 수조로 간주하고 i 를 0으로 표시하며, 기계내부계통의 관로의 i 를 0으로 한 다음, 순차적으로 다음 수조와 이에 연결되는 관로에 대해 i 를 1씩 증가시킨다. Δt 는 계산시간 간격으로 배수암거내 물의 거동이 일정거리 마다 설치하는 맨홀의 영향을 받아 중력파의 전파과정과 매우 흡사하여 Courant의 안정조건에 의한 제약을 받는다. 본 연구에서는 Δt 를 0.1초로 정하였다. 개수로 및 바다에 적용되는 천수방정식에 대한 유한차분식은 Leap-frog법으로 윤등(1996)에 자세히 기술되어 있으므로 생략한다.

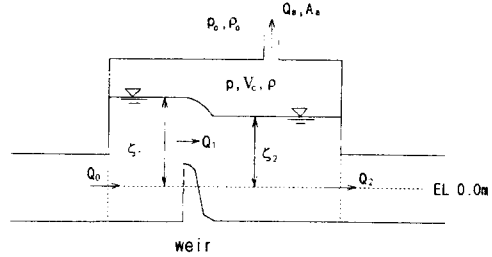


그림 3. Seal well 공기실 인접부 개념도

경계조건으로는 펌프흡입구의 수위 ζ_0 를 고정하였으며, 배수암거와 개수로 인접부에서는 수위와 유량을 공유한다. 개수로와 바다의 연결부에서는 개수로에서의 유량을 바다쪽 계산격자에 경계조건으로 입력시키고, 바다쪽 연결격자의 수위 ζ 를 개수로 끝단 계산격자에 경계조건으로 넣어 주어 접속시켰다.

초기조건으로는 펌프 정상운전시 유량이 모든 구간에 일정하게 흐르도록 하였으며, 이에 따른 각 구간의 마찰손실수두를 주어진 구간의 마찰계수 K 값과 거리 l 을 이용하여 구한 다음, 검토해수면인 최고해수위(HHWL)에 순차적으로 더하여 각 맨홀과 seal well 상·하수조의 수위를 정하였다.

4. 냉각수계통 부정류해석에

본 수치모델의 실제적용 대상으로 당진화력 발전소를 선정하여 배수암거에서 펌프의 비상정지

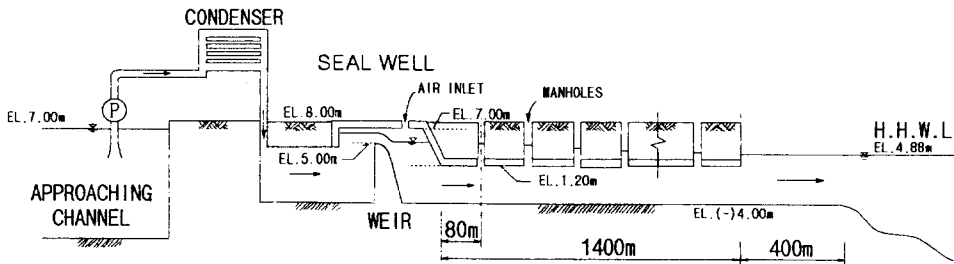


그림 4. 당진화력 발전소 냉각수 계통 중단 개념도

시 발생하는 surge현상을 전술한 방법에 의해 수치해석 하였다.

그림 4는 열 냉각수계통의 개념도로서 접근수로로부터 seal well weir까지의 기계내부계통과 weir로부터 바다에 이르는 기계외부계통을 보여준다. 접근수로의 수위는 EL 7.364m 로 유지되며, 냉각수펌프(CWP)에 의해 초당 52m³의 냉각수가 양수되어 복수기를 통과한 후, seal well weir의 상부수조에 도달하면 weir를 월류하여 기계외부계통으로 흐른다. Seal well은 weir를 중심으로 상부 및 하부의 2개 수조로 구성되어 있으며 수조의 단면적은 평균적으로 상부수조 62m², 하부수조 104.2m²이다. Seal well의 천정은 EL 7.0m 상에 두께 1m의 철근 콘크리트 slab구조로 덮혀 있고, 공기의 유출입이 가능하도록 공기유출입구(air inlet)를 둔다. Seal well 하류부 배수암거는 길이 1400m, 폭 4.7m, 높이 5.2m의 철근 콘크리트 box로서, 저면은 EL (-)4.0m, 천정은 EL 1.2m의 지하매설 구조물이다. 특히 80m 마다 단면적 1m²의 맨홀이 유지·보수 및 공기유출입의 목적으로 설치되어 있다. 배수암거의 하류단은 길이 약 400m의 개수로를 통해 바다로 연결된다.

4.1 최적 공기유출입구 면적 도출

Surge 제어효과가 클수록 공기실 내부의 압력변화는 증가하고, 공기압력변화가 콘크리트 구조물에 해로운 영향을 줄 수도 있으므로 공기유출입구 면적이 너무 작아지지 않도록 해야한다. 본 연구에서는 공기유출입구 면적을 0.02m²로부터 9m²까지 단계적으로 변화시켜, seal well 하부수

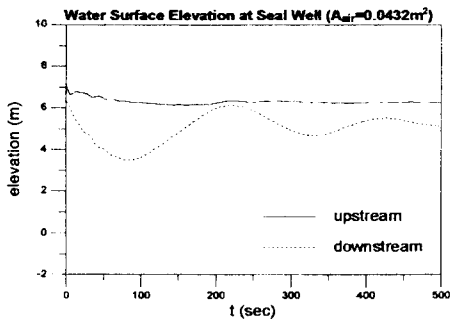


그림 5 seal well 상하부수조의 수위변화 ($A_a=0.0432m^2$)

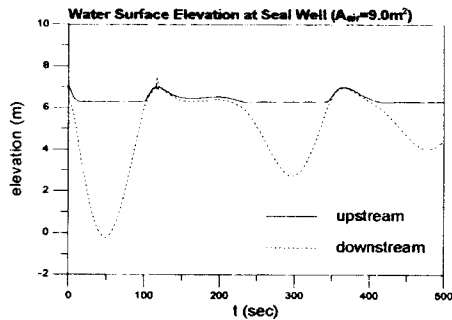


그림 6 seal well 상하부수조의 수위변화 ($A_a=9.0m^2$)

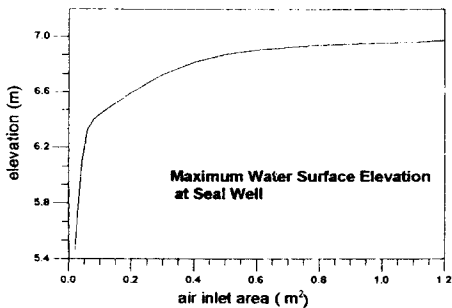


그림 7. 공기 유입구 면적에 따른 하부수조에서의 최고수위

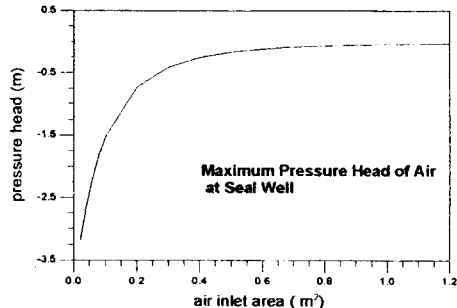


그림 8. 공기유입구 면적에 따른 공기실 내의 최대 부압수두

조에서 최초 back surge에 의한 최고 수위상승치와 공기실내의 최대 부압력수두를 구하고, 전술한 설계방법에 따라 공기유출입구의 최적면적을 결정하였다.

그림 5와 6은 공기유출입구 단면적 A_a 가 각각 $0.0432m^2$ 및 $9.0m^2$ 에 대해 seal well 상·하부 수조에서의 시간에 따른 수위변화를 보여준다. 그림 7은 공기유출입구 단면적 변화에 따른 seal well 하부수조에서의 surge에 의한 최고수위상승치를 나타낸 것으로, 수위 상승치가 seal well 천정 EL 7.0m 보다 낮아지는 공기유출입면적 A_a 가 $1.2m^2$ 이하의 경우에 대해서만 도시하였다. A_a 가 작을수록 surge 제어효과가 확실히 나타나며 특히 A_a 가 $0.05m^2$ 이하의 경우에는 정상운전시의 수위 EL 6.291m 보다 surge에 의한 수면상승고가 낮게 나타났다. 그림 8은 A_a 의 변화에 따른 공기실내의 최대 부압력수두변화를 나타낸다. A_a 가 작을수록 공기실내의 부압력수두는 증가하여 A_a 가 $0.02m^2$ 일 경우 (-)3.2m 정도이다. A_a 가 $0.3m^2$ 이상에 대해서는 공기실 내의 최대 부압력수두가 (-)0.5m 이하로서 콘크리트 구조물에 별다른 영향을 주지 않으며, 정상운전시 조석과 같이 매우 긴 주기(12hr 이상)를 가지는 해수면 변동에 대해서는 실질적으로 대기압이 유지되어 기계내부유량에 영향을 주지 않는다.

5. 결론

열발전소 seal well 구조물의 부정류해석시, 수치해석은 비정상 Bernoulli 방정식과 연속방정식을 기본으로 하고, 개수로 및 바다 연결부에 대해서는 천수방정식을 이용하여, 배수암거에서 발생한 중력파가 자유로이 외해쪽으로 전파되도록 하였다. 또한 기계내부계통과 외부계통을 연관시켜 해석하므로써 정확성을 높이고자 하였다. 특히 seal well의 천정부에 설치하는 공기유출입구의 면적이 surge 제어에 미치는 영향을 해석하기 위해 공기연속방정식과 orifice공식 및 기체상태방정식을 추가적으로 이용하였다. 공기유출입구의 최적면적 결정을 위해 공기유출입구면적과 하부수조 수위상승 및 압력변화 관계를 도표화 하였으며 해석결과에 의하면 공기유출입구 면적이 작아질수록 surge 제어에 효과적이거나, seal well 공기실의 부압수두가 증가한다. 따라서 배수암거 콘크리트 구조물 단면이 허용하는 한 공기유출입구 면적을 줄여 surge 발생시 여유고를 충분히 갖도록 설계하는 것이 바람직하다.

참고문헌

- 국립건설시험소 (1993) 최종체질 공법 조사연구 (체질에 따른 흐름의 예측기법)
- 윤성범 등 (1996) 항내 수면교란 수치예측모형의 경제처리 기법, 대한토목학회 논문집, 16권 II-1호, pp.53-62.
- 윤용남, 윤태훈, 이순탁 (1994) 수리학(I), 청문각