

韓國水資源學會論文集
第30卷 第6號 · 1997年 12月
pp. 761~768

열발전소 배수암거 부정류해석 수치모형의 개발 :

I. 모형의 정립

Development of Numerical Model for Unsteady Flow Analysis in
Discharge Culvert of Thermal Power Plant:

I. Model Setup

윤 성 범* / 이 기 혁**

Yoon, Sung Bum / Lee, Kee Hyuck

Abstract

A numerical model is developed to analyze the incompressible unsteady flow induced by the pump trip-out in the cooling water discharge culvert of thermal power plants. The numerical model has various features to deal concurrently with the overall behavior of complicated unsteady flow due to the presence of cooling water internal system, seal well, air chamber, culvert, manholes, open channel and sea water. A leap-frog finite difference scheme is employed to solve governing equations, and the model is tested for a simple case of two tanks connected with a pipe. A fixed free surface boundary condition used earlier at the downstream end of culvert for large water body is investigated.

Keywords: thermal power plant, trip-out, unsteady flow, numerical model

요 지

열발전소에서 비상 가동중단으로 냉각수 배수계통에 발생하는 비입축성 부정류를 해석하는 수치모형이 개발되었다. 개발된 수치모형은 냉각수 기계내부계통, 폐정, 공기실, 관로, 맨홀, 개수로 및 바다등에 의한 복잡한 흐름에 대해 전체적인 부정류거동을 동시에 해석할 수 있는 기능을 가진다. 수치해법으로는 leap-frog 유한차분법을 적용하였으며, 간단한 경우에 대한 모형의 검증과 함께, 종래 배수암거 하류단에 적용되던 고정수위경계조건에 대한 검토가 이루어졌다.

핵심용어: 열발전소, 비상 가동중단, 부정류, 수치해석

* 한양대학교 공과대학 토목·환경공학과 부교수

** 한국전력기술(주) 토목구조기술처(전:한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정)

1. 서 론

대부분의 화력 및 원자력발전소 등의 열발전소에서는 발전효율을 높이기 위해 복수기(condenser)에 일정한 유량의 냉각수를 지속적으로 공급해 주어야 하므로, 조석간만의 차가 심한 경우, 배수암거 하류단 해수위 변동이 기계내부계통의 냉각수 유량에 영향을 미치지 않도록 배수계통내에 폐정(閂井, seal well)이라는 완충 구조물을 둔다. 폐정은 중앙부의 위어를 중심으로 상하부에 각각 수조를 설치하여 하부수조의 수위변동이 상부수조의 수위에 주는 영향을 최소화할 수 있도록 한 구조물로서, 통상 천정부는 콘크리트 슬래브로 덮혀있고, 수조의 수면과 천정사이의 공기실 공기압이 정상운전시 대기압을 유지하도록 천정에 공기유출입구를 둔다. 공기유출입구의 면적을 적당히 선정하면 서어지(surge) 발생시 이를 제어하는 역할을 한다. 또한 조석승강에 따른 배수암거내의 공기 간힘을 방지하고, 유자보수의 목적으로 배수암거 천정부에 맨홀(manhole)을 적절한 간격마다 설치하며, 배수암거와 바다 사이에는 개수로를 둔다.

발전중 송전탑 등이 낙뢰 등으로 파손되면 자동적으로 전력생산이 중단되며, 펌프로의 전원공급도 갑자기 중단되므로, 기계내부계통으로부터의 유량이 급격히 감소한다. 그러나 배수암거가 매우 깊면 배수암거내에 정상상태로 흐르던 수체(water body)는 역수면 경사와 마찰에 의해 관성이 완전히 소멸될 때까지 외해쪽으로 흐름이 유지되다 서서히 멈추게 된다. 이때 폐정 위어(weir)의 하부수조 수위는 최저상태로 하강하고 하류단인 바다쪽 수위보다 낮아지므로, 흐름은 반대로 바다쪽에서 폐정쪽으로 흐르기 시작하며 경우에 따라서 원래 상태의 수위보다 높게 상승한다. 이러한 장주기의 상승과 하강이 마찰에 의해 운동량이 완전히 소모될 때까지 계속되는 현상을 서어지라 하며 일종의 중복파(standing wave)이다.

국외 및 국내의 연구동향을 살펴보면 Wood(1970), Chaudry(1987), Wylie et al.(1993), 및 이재수 등(1995)이 공기유출입구가 없는 공기실을 이용하여 관수로계통에의 단주기 압력파를 포함한 장주기 서어지 현상을 수치해석 하였다. 이들 수치모형은 단주기 압력파까지 고려하므로 계산격자가 조밀해야 하며 압력파의 전파속도가 장주기 중력파에 비해 매우 빠르므로 계산 시간 간격이 작아져야 한다. 이러한 기존 모형을 발전소 배수암거에서와 같이 개수로와 관수로가 혼재하는 경우에 적용하기 위해서는 기존 모형의 상당한 수정이 필요하다.

본 연구에서는 화력 및 원자력발전소의 배수암거에서 급작스런 펌프가동중단(trip-out)시 발생되는 장주기의 서어지 현상을 해석하는 수치모형을 개발하며, 특히 단순 관수로에만 적용되던 기존의 해석방법을 공기실과 공기유출입구, 맨홀, 개수로 및 기계내부계통 등을 종합적으로 고려할 수 있도록 개선하여 실무에서의 적용가능성을 높이고자 한다. 본 연구는 배수암거에서의 흐름 현상이 매우 복잡하므로 수치모형의 정립과정과 적용과정을 따로 분리하여 2편의 논문으로 구성함으로써 실무자의 이해를 돋고자 한다. 제1편 수치모형의 정립에서는 냉각수 계통내의 흐름을 나타내 주는 지배방정식을 수립하고 기계내부계통, 폐정공기실, 폐정위어, 하류부 개수로 및 바다인접부에 적용될 해석기법이 소개되며, 수치해석을 위한 수치해석기법과 해석해가 가능한 간단한 경우에 대한 수치모형의 정확성 검증이 제시된다. 수립된 수치모형의 현장적용은 연이은 후속논문에 자세히 소개된다.

2. 지배방정식

서어지 현상은 기본적으로 부정류(unsteady flow)이므로, 그럼 1과 같이 여러 개의 수조와 수조사이를 연결하는 관로로 구성된 배수계통에 대해 관로의 면적이 일정한 경우 다음의 비정상 Bernoulli 방정식과 연속방정식을 적용하여 해석할 수 있다.

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

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

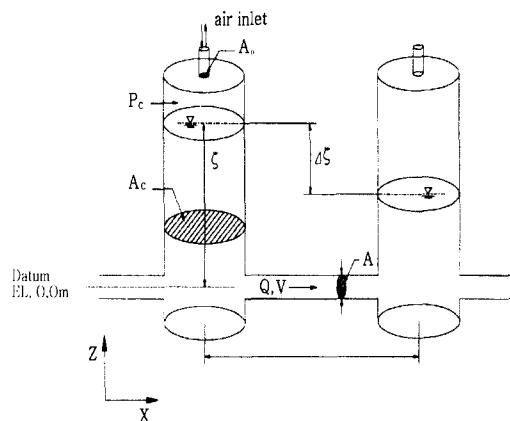


그림 1. 수조 및 관로의 개념도

여기서 ξ 는 기준면으로부터 수면까지의 높이(m), v 는 관로의 단면평균유속(m/s), Q 는 관로의 유량(m^3/s)이며, A_a 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 순유출유량(m^3/s), g 는 중력가속도(m/s^2), f 는 관로의 마찰계수, k 는 관로의 미소손실계수를 나타낸다. ΔH 는 인접수조간의 속도수두를 제외한 수두차로서 다음과 같다.

$$\Delta H = \frac{\Delta p_c}{\gamma_w} + \Delta \xi \quad (3)$$

여기서 Δp_c 는 대기압과의 공기압력차(N/m^2), $\Delta \xi$ 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 $\Delta \xi$ 만으로 표시된다. 식 (1)은 유속의 함수이므로 수치해석의 편의를 위해 연속방정식에서 요구하는 유량변수로 다시 나타내면 다음과 같다.

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

여기서 K 는 식 (1)로부터 다음과 같이 표현된다.

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

2.1 폐정 공기실의 해석

폐정은 위어를 중심으로 상류수조는 기계내부계통의 하류단이, 하류수조는 기계외부계통의 상류단이 만나는 구조물이다. 이는 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 자유롭게 한다. 또한 공기유출입구의 단면적 A_a 가 공기실의 단면적 A_c 보다 현저히 작으면 서어지에 의한 수면승강시 공기의 유출입에 제한을 가하여 서어지를 제어하는 역할을 수행한다. 그러므로 폐정 공기실의 개방면적은 정상운전시 주기가 매우 긴 조석에 대해서는 공기실압력이 항상 대기압을 유지할 수 있도록 충분히 커야하며, 동력상실로 인한 순간적인 펌프중단시 발생하는 조석에 비해 상대적으로 짧은 주기의 서어지에 대해서는 공기 유출입을 최대한 제한시켜 완충작용을 할 수 있도록 작게 설계해야 한다. 이 2가지 목적을 동시에 만족시키기 위해서는 공기실의 개방

면적에 따른 공기압축과 팽창이 서어지의 거동에 미치는 영향을 해석해야 하고, 이를 고려하여 최적조건을 구해야 할 것이다. 공기실내의 공기압력은 다음의 기체상태방정식으로부터 구한다.

$$p = p_0 \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma \quad (6)$$

여기서 p 는 공기실의 절대압력(N/m^2), p_0 는 절대 대기압력($101.300 N/m^2$), ρ 는 공기실의 공기밀도(kg/m^3), ρ_0 는 대기압시의 공기밀도($1.21 kg/m^3$)이다. γ 는 기체상수로서 정상기체에 대해 1.405의 값을 가진다. 그러므로 공기실내의 계기압력 p_c 는 다음과 같이 구한다.

$$p_c = p - p_0 \quad (7)$$

공기실내의 공기밀도 ρ 는 다음과 같이 공기의 연속방정식을 만족시켜야 한다.

$$V_c \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \left(Q_a - A_c \frac{\partial \xi}{\partial t} \right) = 0 \quad (8)$$

여기서 V_c 는 공기실의 체적(m^3), Q_a 는 공기유출입구를 통한 공기의 유출량(m^3/s), A_c 는 전술한 바와 같이 수조의 단면적(m^2), $\partial \xi / \partial t$ 는 수면의 상승속도(m/s)이다. 수면상승속도는 식 (2)로 표시되므로, 이를 식 (8)에 대입하면 다음과 같은 공기의 연속방정식을 얻는다.

$$V_c \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho (Q_a + \Delta Q) = 0 \quad (9)$$

Q_a 는 압력 p 인 공기실로부터 압력 p_0 인 대기중으로의 공기유출량을 표시하며, 이는 다음과 같은 정상상태의 유량공식으로 표현된다(Vennard와 Street, 1982). 공기실압력 p 가 대기압력 p_0 보다 클 때 대기중으로 공기가 유출되며, 이때의 유량은 다음 식으로 주어진다.

$$Q_a = C A_a \sqrt{2 \frac{p}{\rho} \frac{\gamma}{\gamma-1} \left(1 - \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right)} \quad (10)$$

반대로 p 가 p_0 보다 작을 때는 공기가 대기로부터 공기실로 유입하게 되며 그때의 유량은 다음 식으로 주어진다.

$$Q_a = -C A_a \sqrt{2 \frac{p_0}{\rho} \frac{\gamma}{\gamma-1} \left(1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right)} \quad (11)$$

여기서 C 는 공기 유출입구의 유량계수로서 유출구의 형상에 따라 정해지는 상수이다.

2.2 기계내부계통의 해석

냉각수계통중 기계내부계통은 냉각수펌프(CWP)로부터 폐정 중앙부의 위어에 이르는 계통으로 복수기(condenser)를 통하여 열교환이 이루어지는 소계통이다. 이 계통에는 펌프가 존재하며 또한 복수기에서 여러 다발의 작은 관(tube)이 복잡한 관망의 형태를 이루므로 부정류해석이 쉽지 않다. 단주기의 압력파 및 장시간 규모의 부정류해석은 관로자체의 수격압에 의한 수축팽창 등을 고려하여 동시에 해석할 수 있으나, 내부계통이 매우 복잡하고 또한 관로자체의 수축팽창에 따른 추가적인 지배방정식을 필요로 하며, 수치해석 과정이 매우 복잡하다. 본 연구은 압력파의 해석보다는 약 100초 이상의 시간규모를 갖는 장주기의 서어지 해석에 주목적이 있으므로, 장주기의 서어지 거동에 영향을 미치지 않는 압력파를 제거한 장시간 규모의 부정류 해석만 수행한다. 이 장시간 규모 부정류해석은 식(4)를 이용하여 해석할 수 있으나 전술한 바와 같이 내부계통의 관망이 매우 복잡하므로, 식(4)를 직접 적용하기 위해서는 관망을 하나의 단순관로로 환산하여 식(4)의 변수 A/l 과 K 를 구하는 작업이 요구된다. 이를 위해 단주기 압력파와 장시간규모 부정류를 동시에 해석할 수 있는 LIQT(Stoner Associates, 1989)와 같은 상용코드를 이용하여 내부계통의 상·하류 수위차에 대한 초기유량의 유량변화 과정을 해석하고, 이로부터 이동평균을 취해 압력파 성분을 제거하여 장시간 규모의 부정류 거동을 분리한 다음, 식(4)에 A/l 과 K 를 가정하여 구한 장시간 규모의 부정류 해석결과와 비교하여 전시간 구간에 걸쳐 부정류 거동이 거의 일치할 때까지 시행착오과정을 수행함으로써, 단일관로로 환산된 A/l 과 K 를 구할 수 있다.

2.3 폐정위어의 해석

폐정에 존재하는 위어는 기계내부계통과 외부계통의 연결부로서, 정상운전시에는 조석에 의한 하류부 수위변동이 내부계통의 정상유량에 영향을 주지 않도록 설치된다. 위어를 통한 유량은 Homma공식(국립건설시험소, 1993)을 이용하여 위어 상·하류의 수위차 h 및 위어 상류부 수심 H 에 따라 그림 2와 같이 불완전월류와 완전월류로 구분하여 주어진다.

불완전월류

$$(h < \frac{H}{3} \text{ 일 때}) Q = C(H-h) B \sqrt{2gh} \quad (12)$$

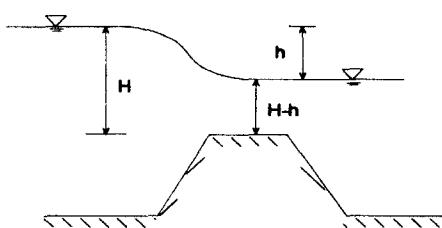
완전월류

$$(h > \frac{H}{3} \text{ 일 때}) Q = \frac{2}{3} H B C \sqrt{2gh} \quad (13)$$

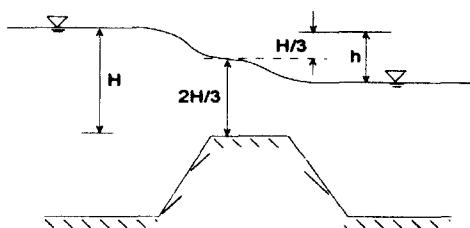
여기서 Q 는 월류유량(m^3/s), B 는 위어의 폭(m), g 는 중력가속도(m/s^2), C 는 유량계수로 발전소의 위어형태에 따라 결정된다.

2.4 하류부 개수로의 해석

배수암거 하류단이 매우 깊고 넓은 바다에 수중으로 연결되어 있을 때, 배수암거로부터의 유량변동이 암거하류단의 수위에 영향을 미치지 않으므로 통상 시간변동이 거의 없는 해수위를 경계조건으로 입력시킬 수 있다. 그러나 배수암거와 바다사이에 배수암거와 규모가 비슷한 개수로가 연결되어 있을 경우에는 암거하류단에서의 수위가 유량에 따라 민감하게 변하므로 이를 고려해 주어야 한다. 이 조건은 우리나라 서해안에 위치하는 거의 모든 열발전소에 똑같이 적용된다. 개수로에서의 부정류 해석은 1차원 천수방정식으로 다음과 같이 주어진다.



(a) 불완전 월류



(b) 완전 월류

그림 2. 사다리꼴 위어의 월류

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + ghB \frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (15)$$

여기서 h 는 정상운전시 개수로의 수심(m), B 는 개수로의 폭(m), ζ 는 자유수면의 표고(m), Q 는 유량(m^3/s)이다.

2.5 바다 인접부의 해석

방류 개수로가 해수와 만나는 곳에서는 서어지에 의한 중력파가 의해로 자유롭게 전파할 수 있도록 해야한다. 해수에서의 중력파 거동은 다음의 2차원 천수방정식으로 해석된다.

$$\frac{\partial M}{\partial t} + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (18)$$

여기서 x 축은 개수로 진행방향, y 축은 개수로와 직각 즉 해안선 방향을 나타낸다. M, N 은 각각 x, y 방향의 단위 폭당 유량($m^3/s/m$), h 는 평균수심(m), ζ 는 자유수면의 표고(m)를 표시한다.

3. 수치기법

냉각수 계통을 기본적으로 여러개의 수조와 이들 수조사이를 연결해주는 관로의 조합으로 생각하고, 각각의 수조에 대해 연속방정식 (2)를, 각각의 관로에 대해 운동방정식 (4)을 적용하며, 폐정의 상·하 수조를 연결해주는 위어에 대해서는 운동방정식 대신 위어 유량공식 (12)와 (13)을 사용한다. 또한 폐정 상·하수조는 공기조절실의 공기 압 영향을 받으므로 공기조절실에 대해 공기연속방정식

(9)를 적용하여 공기밀도 ρ 를 구하고, 이를 다시 식 (10)과 (11)에 대입하면 공기유출입구에서의 공기유출 입량 Q_a 를 구할 수 있다.

개수로에 대해서는 식 (14)와 (15)를 연립하여 해를 구하며, 개수로와 접하는 해수에 대해서는 식 (16)~(18)을 적용한다. 배수암거 하류단의 개수로 인접부에서는 흐름이 관로흐름에서 개수로흐름으로 바뀌므로 서로 다른 지배방정식 간의 접속조건이 요구되며, 개수로와 바다의 연결부에서도 연결조건이 필요하다. 또한 배수암거상에 설치되는 맨홀은 각각을 수조로 해석하며, 수조의 면적이 폐정의 상·하 수조와는 달리 매우 작아 공기조절실 역할을 하지 못하므로, 자유수면이 항상 대기압 영향하에 있다고 가정하였다. 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 3 참조). 또한 공기의 연속방정식 (9)에 대해서도 같은 방법을 적용한다(그림 4 참조).

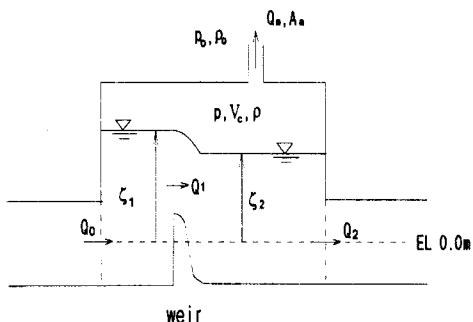


그림 4. Seal well 공기실 인접부의 개념도

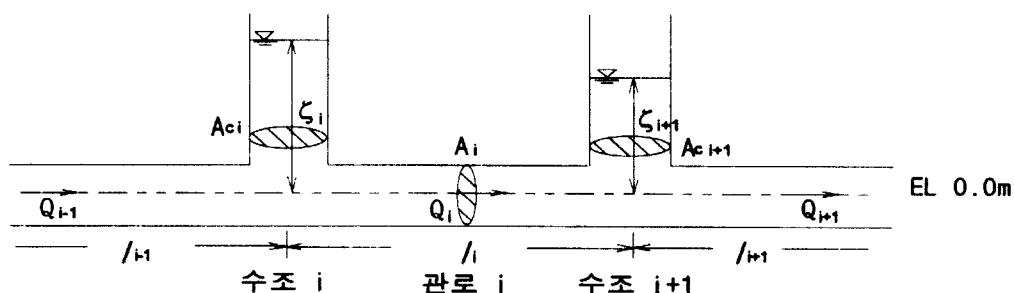


그림 3. 유한차분 격자체계도

$$\frac{\zeta_i^{n+1} - \zeta_i^n}{\Delta t} = -\frac{1}{A_{ci}}(Q_i^n - Q_{i-1}^n) \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \frac{Q_i^{n+1} - Q_i^n}{\Delta t} &= -\frac{gA_i}{l_i}(\zeta_{i+1}^{n+1} - \zeta_i^{n+1} \\ &\quad + \frac{K_i^n |Q_i^n|(Q_i^{n+1} + Q_i^n)}{2}) \end{aligned} \quad (20)$$

$$\frac{\rho^{n+1} - \rho^n}{\Delta t} = -(\rho^{n+1} + \rho^n) \frac{(Q_a^n + Q_2^n - Q_0^n)}{2V_c} \quad (21)$$

여기서 윗첨자 n 은 시간단계를 나타내며, 아랫첨자 i 는 수조 및 관로번호를 나타낸다. 펌프흡입구가 위치하는 접근수로를 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 흐름의 거동이 맨홀의 영향을 받아 중력과의 전파과정과 매우 흡사하여 Courant의 안정조건에 의한 제약을 받는다. 개수로에 적용되는 식 (14)과 (15)에 대한 유한차분식은 leap-frog 법을 이용하여 시간 및 공간 교호격자로 계산영역을 나누어 차분화하면 아래와 같다(윤성범 등, 1996).

$$\frac{Q_i^{n+1} - Q_i^n}{\Delta t} + gh_i B \frac{\zeta_{i+1}^n - \zeta_i^n}{\Delta x} = 0 \quad (22)$$

$$\frac{\zeta_i^{n+1} - \zeta_i^n}{\Delta t} + \frac{1}{B} \frac{Q_i^{n+1} - Q_{i-1}^n}{\Delta x} = 0 \quad (23)$$

바다에 적용되는 식 (16)~(18)은 개수로와 같은 방법으로, 계산을 용이하게 하기 위해 동간격($\Delta x = \Delta y$)의 격자를 이용하여 차분화하면 아래와 같다(그림 5 참조).

$$\frac{M_{i,j}^{n+1} - M_{i,j}^n}{\Delta t} + gh_{i,j} \frac{\zeta_{i+1,j}^n - \zeta_{i,j}^n}{\Delta x} = 0 \quad (24)$$

$$\frac{N_{i,j}^{n+1} - N_{i,j}^n}{\Delta t} + gh_{i,j} \frac{\zeta_{i,j+1}^n - \zeta_{i,j}^n}{\Delta x} = 0 \quad (25)$$

$$\frac{\zeta_{i,j}^{n+1} - \zeta_{i,j}^n}{\Delta t} + \frac{M_{i,j}^{n+1} - M_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} + \frac{N_{i,j}^{n+1} - N_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta x} = 0 \quad (26)$$

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 적용하여 연결시켰다. 초기조건으로는 정상운전시의 유량이 모든 구간에 일정하게 흐르도록 하

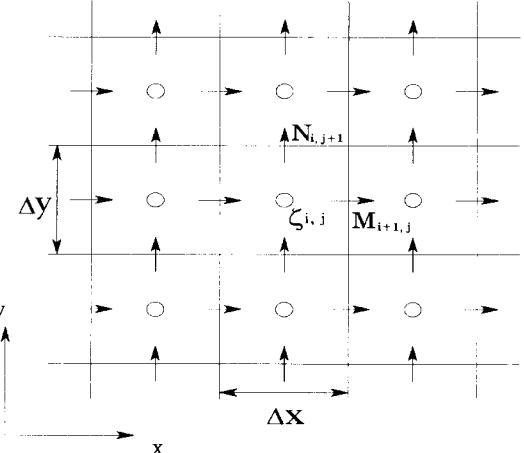


그림 5. 시간 및 공간교호 격자망

였으며, 이에 따른 각 구간의 마찰손실수두를 주어진 구간의 마찰계수 K 값과 거리 l 을 이용하여 구한 다음, 검토해수면인 최고해수위(HHWL)에 순차적으로 더하여 각 맨홀과 폐정 상하수조의 수위를 정한다.

4. 수치모형의 검증

본 연구에서 수립된 수치모형을 검증하기 위하여 그림 6과 같이 단순관수로로 연결된 2개의 수조에 대해 해석해와 수치해를 구하였다.

해석해는 관내마찰이 없는 경우 연속방정식과 Bernoulli 방정식을 이용하여 2개 수조의 수위 ζ_1 과 ζ_2 에 대해 다음 식과 같이 간단히 구할 수 있다.

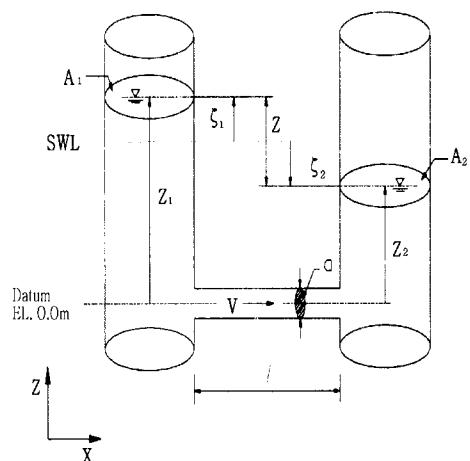


그림 6. 검증에 적용된 수조 및 관로

$$\xi_1 = \frac{A_2}{A_1 + A_2} z \quad (27)$$

$$\xi_2 = \frac{-A_1}{A_1 + A_2} z \quad (28)$$

$$z = z_0 \cos \left[\frac{\sqrt{ga(A_1+A_2)}}{l A_1 A_2} t \right] \quad (29)$$

여기서 A_1 은 수조 1의 단면적(m^2), A_2 는 수조 2의 단면적(m^2), a 는 관로의 단면적(m^2), z 는 두 수조의 수위차(m), z_0 는 초기 수위차(m), l 은 인접수조간의 관로길이(m)를 나타낸다. 관의 길이 $l=10$ m, 관의 단면적 $a=1$ m^2 , 초기 수위차 $z_0=4$ m($z_1=8$ m, $z_2=4$ m) 초기관내유속 $V=0$ m/s, $A_1=3$ m^2 및 $A_2=6$ m^2 인 경우에 대해 수치해를 구하고 식 (27) 및 (28)에 의한 해석해와 비교하였다. 그림 7에 보인 바와 같이 수치해와 해석해는 거의 일치하는 정확성을 보이며, 2개 수조의 단면적차이에 따라 큰 수조의 진동폭이 작아짐을 알 수 있다. 해석해 (27)과 (28)에서 어느 한 쪽 수조단면적이 무한히 커질 때, 큰 쪽 수조의 진폭이 거의 0으로 접근됨으로, 관로가 저수지 또는 바다에 연결될 경우 수위를 일정한 값으로 고정시키는 것이 일반적이다. 그러나 이는 관로를 통한 유량변동이 순간적으로 수조전면의 수위를 균등하게 상승 또는 하강시킨다는 가정하에서 얻어진 해석해이므로 변동주기가 비교적 짧은 경우 수조내에 단파가 발생하여 수면이 불균일하므로 물리적으로 타당하지 않다. 이 문제를 해결하기 위해서는 넓은 수조에 대해 전술한 바와 같이 천수방정식 등을 이용하여 파의 전파과정을 따로 해석하여야 한다.

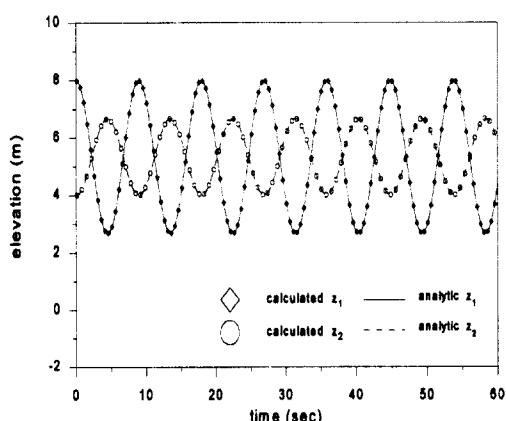


그림 7. 수치해와 해석해의 비교

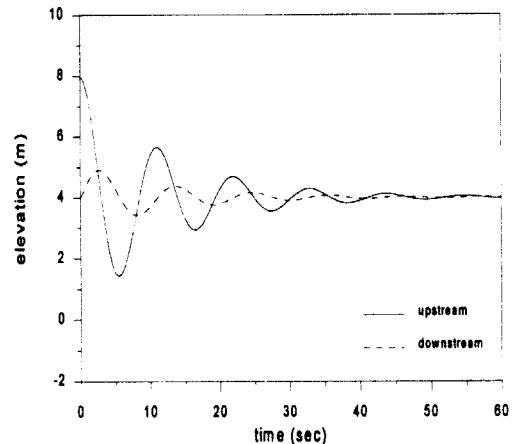


그림 8. 개수로에서의 변동수위를 고려한 상·하류 수조의 수위변화

본 연구에서는 배수암거 하류단이 무한히 긴 개수로에 연결되어 있을 경우 기존의 방법에서와 같이 하류단 수위를 고정하였을 경우와 파의 전파를 허용하는 경우에 대해 수치해석을 실시하고 그 차이점에 대해 분석한다. 하류단 경계조건의 영향이 크게 나타나도록 하류단 수조를 폭 1 m, 수심 4 m, 길이 무한대의 사각형 수조를 설치하고 그 밖의 조건은 처음의 실험조건과 동일하게 두었다. 하류부 수조에는 식 (22)와 (23)을 적용하여 해석하였다.

하류부 수조면적이 무한히 넓다고 가정하고 이 경우의 해석해인 고정수위조건을 사용하면 마찰이 없으므로 그림 7과 같이 진동을 계속하게 된다. 그러나 그림 8에 보인 바와 같이 하류부 수조에서 수면변동을 허용한 경우, 관로 하류단에서의 수위는 계통내 마찰이 없음에도 불구하고 진폭이 시간에 따라 감소되는 감쇠진동을 보이며, 이에따라 그림 8에서와 같이 상부수조의 수위도 감쇠진동을 한다. 이는 하류단에서 발생된 중력파가 개수로를 따라 계속 전파되므로 파를 발생시키는데 필요한 에너지가 계통으로부터 계속 공급되어 일어나는 현상인데, 이는 물리적으로 타당한 현상이다. 이러한 현상은 항만내 공진현상 해석시 항 입구에서 파에너지가 계속 외래로 방출되는 방사감쇠(radiation damping)와 유사한 물리적 현상이다(Mei, 1983).

5. 결 론

화력 및 원자력 발전소의 갑작스런 가동중단으로 냉각수 배수계통에 발생하는 비압축성 부정류를 해석하기 위해 폐정, 관로, 맨홀, 개수로, 바다 등 실제상황을 종

합적으로 고려할 수 있는 수치모형을 개발하였다. 기본적으로 배수계통을 여러 개의 수조와 관로의 조합으로 간주하고 비정상 Bernoulli 방정식과 연속방정식을 적용하였으며, 폐정위어에는 Bernoulli 방정식 대신 Homma의 위어 공식을 적용하였다.

배수암거 하류단의 개수로와 바다에 대해서는 기존의 고정수위조건을 개선하여 계통내에서 발생한 중력파가 외해쪽으로 전파되도록 천수방정식을 적용하였다. 특히 폐정공기실이 서어지며 미치는 효과를 해석할 수 있도록 기체 연속방정식, 상태방정식 및 유량공식을 사용하였다. 수치기법으로는 기본적으로 leap-frog 유한차분법을 적용하였으며, 해석해가 알려진 간단한 경우에 대해 수치모형의 정확성을 검토하여 만족할 만한 결과를 얻었다. 또한 수치실험을 통하여 종래 부정류 해석에 사용되던 관로 하류부 넓은 수조에 대한 고정수위 경계조건이 타당치 않음을 밝히고 이의 개선책을 제시하였다.

감사의 글

이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 현

국립건설시험소 (1993). 최종체질 공법 조사연구(체질

- 에 따른 흐름의 예측기법). pp. 24-26.
- 윤성범, 이종인, 이정규, 채장원 (1996). "항내 수면교란 수치예측모형의 경계처리 기법." 대한토목학회 논문집, 제16권, 제II-1호, pp. 53-62.
- 이재수, 윤용남, 김중훈 (1995). "공기실을 사용한 압력수두의 완화효과에 대한 분석." 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제28권 제5호, pp. 141-150.
- Chaudhry, M.H. (1987). *Applied hydraulic transient*. Van Nostrand Reinhold, N.Y.
- Mei, C.C. (1983). *The applied dynamics of ocean surface waves*. John Wiley & Sons, New York, pp. 190-193.
- Stoner Associates (1989). *LIQT user guide*. Stoner Associates, INC, U.S.A.
- Vennard, J.K. and Street, R.L. (1982). *Elementary fluid mechanics*. 6th edition, John Wiley & Sons, New York, pp. 532-537.
- Wood, D.J. (1970). "Pressure surge attenuation utilizing an air chamber." *J. Hyd. Eng.*, ASCE, Vol. 96, No. HY5, pp. 1143-1156.
- Wylie, E.B. and Streeter, V.C. (1993). *Fluid transient in systems*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.

〈최종본 접수일 : 1997년 12월 2일〉