

자연하도 하구부에서 갈수시 양수에 의한 지하수 유동특성 및 취수능력 결정에 관한 연구

Study on the Characteristics of Groundwater Movement Caused by Pumping During Drought Period and Estimation of Pumping Capacity in Natural River Estuary

안 승 섭* · 최 윤 영**
Ahn, Seung Seop · Choi, Yun Young

Summary

In this study, pumping capacity in the area of natural river estuary is estimated by the quantitative analysis using finite element method.

The study area is Iga-ri pumping station in the estuary of Seojung-chun which runs to the East coast.

First of all, hydraulic properties and effects of different seawater levels are analyzed in this area. Variations of groundwater level caused by pumping and properties of seawater intrusion are analyzed, then compared the case of reinforcing the existing intake weir with the case of setting up an weir at the upper stream. The observed data of groundwater drawdown caused by pumping during drought period and seawater intrusion are compared with results of the analysis done by groundwater model using finite element method, and it is found that both are similar. Accordingly, groundwater model used in this study reflects well the variation of groundwater level caused by pumping.

I. 서 론

지하수는 용수공급 체계에 있어 안정적이며 양질의 용수를 얻을 수 있으나 지하수 개발에 따른 효용성 증대를 위해서는 많은 노력과 시간이 요구되고 있다. 따라서 안정적인 용수 확보를 위한 지하수의 이용 및 관리체계를 위해

서 기초적으로 지하수수지를 이용할 수 있으며 지하수수지를 파악하기 위한 기초자료 중의 일부가 양수량이다.

이와 같이 지하수의 이용확대에 따라 지하수자원의 개발에 대한 필요성이 더욱 증가되어 지하수 개발에 의해 여러지역에서 물공급 증대를 위한 양수가 이루어지게 되었으나 이

*경일대학교 공과대학
**경일대학교 공과대학(강사)

키워드 : 양수량, 지하수 유동특성, 취수능력, 해수침입, 유한요소법

에 따른 지하수 감소량이나 양수정 부근의 수리 환경변화를 예측하지 않음으로써 그 피해가 예상되고 있는 실정이다.

지하수 유동 및 오염에 관한 연구로는 Hubbert(1940)¹⁾가 지하수 유동이론을 모형적으로 해석한 것이 시초이며, Higgins(1959)²⁾의 지하수 오염에 관한 해석, Lau 등(1959)³⁾의 다공질 매체를 통한 지하수 오염확산, Toth(1963)⁴⁾의 소규모 배수유역에 대한 지하수 흐름의 이론적 해석, Wang & Anderson(1982)⁵⁾의 유한차분 및 유한요소법에 의한 지하수 모델링 등이 있으며 국내에서는 김영기(1976)⁶⁾의 반야월층의 지하수유동에 관한 연구, 안종성(1983)⁷⁾의 동위원소를 이용한 한강유역내 지하수와 지표수의 연관성에 관한 연구, 김계남(1990)⁸⁾의 암반에서의 지하수 유동특성 분석, 배상근(1991, 1992)⁹⁾의 대구 지역의 유한차분법을 이용한 지하수 유동계 해석 등이 연구된 바 있다.

한편 바다로 직접 유입하는 소하천의 경우에 하천 하구부에서 지표수는 해수와 담수(하천수)가 혼합되는 경계층을 이루게 되며, 하천을 유하하는 유량의 크기에 따라서 지표수를 형성하는 해수/담수의 경계층은 하천(하도)을 따라 상류로 이동하게 된다. 뿐만 아니라 하천의 유량이 줄어서 건천화될 때는 하천 복류수의 수위가 낮아지면서 해수가 하상의 대수층을 따라 하천상류로 이동하게 된다. 이와 같이 하도상에서 발생하는 하천수와 해수의 경계면 이동구조는 하천유량의 규모, 하도 대수층의 구조, 하천 주변의 토지이용상태 및 양수규모 등의 지배를 받게 된다.

따라서, 본 연구에서는 바다로 직접 유입하는 소하천의 하구부에서 해수유입방지를 위하여 취수보를 설치하여 양수할 경우에 양수량의 영향으로 인한 시간적 지하수위 저하변화와 해수의 침입특성에 대하여 유한요소법을 이용한 정량적인 분석을 실시하는데 그 목적

을 두었다.

II. 모델의 기본이론

1. 유한요소이론

본 연구에서 양수량의 영향으로 인한 시간적 지하수위 변화해석은 비정상 흐름 방정식을 기본방정식으로 사용하였고 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \dots\dots\dots(1)$$

여기서, S 는 저류계수이고 T 는 투수량계수이다. 한편, 지하수위변화 해석을 위해 사용된 기본방정식으로부터 유한요소법을 이용한 요소의 선형대수방정식을 유도하는 방법에는 Galerkin의 가중잔차법(Weighted Residual Method)을 적용하였다. 여기서, 식 (1)의 수두에 대한 근사해는 식 (2)로 나타낼 수 있으며 식 (2)를 미분방정식에 대입하여 각각의 기본함수에 가중시켰을 때 Galerkin법은 식 (3)이 만족되어야 하고 이 때 L 은 절점, $h_L(t)$ 는 절점에서의 수두, $N_L(x, y)$ 은 형상함수, N 은 절점의 총 개수 및 D 는 전체 계산범위의 적분을 나타낸다.

$$\hat{h}(x, y, t) = \sum_{L=1}^N h_L(t) N_L(x, y) \dots\dots(2)$$

$$\iint_D \left(\frac{\partial^2 \hat{h}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \hat{h}}{\partial y^2} - \frac{S}{T} \frac{\partial \hat{h}}{\partial t} \right) N_L(x, y) dx dy = 0 \dots\dots\dots(3)$$

여기서, 식 (3)을 부분적분하면 식 (4)와 같이 기본함수에 대한 가중잔차조건의 유한요소방정식으로 나타낼 수 있으며 이 때 Γ 는 계산영역의 경계, n_x 및 n_y 는 단위벡터 성분 및 σ 는 적분변수이다.

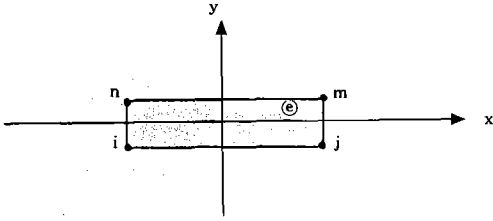


Fig. 1. Element illustrating area coordinates

$$\begin{aligned} & \iint_D \left(\frac{\partial \hat{h}}{\partial x} \frac{\partial N_L}{\partial x} + \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} \frac{\partial N_L}{\partial y} \right) dx dy \\ & + \iint_D \frac{S}{T} \frac{\partial \hat{h}}{\partial t} N_L dx dy \\ & = \int_{\Gamma} \left(\frac{\partial \hat{h}}{\partial x} n_x + \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} n_y \right) N_L d\sigma \quad \dots\dots\dots(4) \end{aligned}$$

한편, 본 연구에서는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 절점을 사각형 요소로 정의하였다. 각 절점에 대한 형상함수는 식 (5)와 같으며 목적함수 $\hat{h}_e(x, y, t)$ 는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. 이 때 i, j, m, n 는 모서리 절점을 나타내며 a 는 $(x_j - x_i)/2$ 및 $(x_m - x_n)/2$ 이고 b 는 $(x_n - x_i)/2$ 및 $(x_m - x_j)/2$ 이다.

$$\begin{aligned} N_i^e(x, y) &= \left(\left(1 - \frac{x}{a}\right) \left(1 - \frac{y}{b}\right) \right) / 4 \\ N_j^e(x, y) &= \left(\left(1 + \frac{x}{a}\right) \left(1 - \frac{y}{b}\right) \right) / 4 \\ N_m^e(x, y) &= \left(\left(1 + \frac{x}{a}\right) \left(1 + \frac{y}{b}\right) \right) / 4 \\ N_n^e(x, y) &= \left(\left(1 - \frac{x}{a}\right) \left(1 + \frac{y}{b}\right) \right) / 4 \quad \dots\dots\dots(5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{h}_e(x, y, t) &= N_i^e(x, y) h_i(t) + N_j^e(x, y) h_j(t) \\ &+ N_m^e(x, y) h_m(t) \\ &+ N_n^e(x, y) h_n(t) \quad \dots\dots\dots(6) \end{aligned}$$

여기서, 요소의 형상함수는 절점의 시간 도함수 $\partial h_i / \partial t$ 의 항에서 정의되고, 요소에 대한 $\partial \hat{h} / \partial t$ 의 공간 변화는 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{h}_e}{\partial t} &= N_i^e(x, y) \frac{\partial h_i}{\partial t} + N_j^e(x, y) \frac{\partial h_j}{\partial t} \\ &+ N_m^e(x, y) \frac{\partial h_m}{\partial t} + N_n^e(x, y) \frac{\partial h_n}{\partial t} \quad (7) \end{aligned}$$

한편, 식 (4)를 행렬형태로 쓰면 다음 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$[G]\{h\} + [P]\left\{\frac{\partial h}{\partial t}\right\} = \{f\} \quad \dots\dots\dots(8)$$

이 때 식 (8)에 대한 각 항의 해를 구하기 위해 식 (4)와 비교하면 $[G]$ 매트릭스 정상상태에서 유도한 전달 매트릭스, $\{h\}$ 는 시간 t 에서 절점 수두 $h_L(t)$ 의 벡터, $[P]$ 는 비정상류 방정식의 저유항을 계산하기 위한 정방형 매트릭스, $\{\partial h / \partial t\}$ 는 $\partial h_L / \partial t$ 의 벡터이며 $\{f\}$ 는 경계조건을 나타내는 벡터이다. 한편, 식 (4)를 적분하면 계산 영역에 대한 요소의 합인 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \sum_e \left\{ \iint_e \left(\frac{\partial \hat{h}_e}{\partial x} \frac{\partial N_L}{\partial x} + \frac{\partial \hat{h}_e}{\partial y} \frac{\partial N_L}{\partial y} \right) dx dy \right\} \\ & + \sum_e \left\{ \iint_e \left(\frac{S}{T} \frac{\partial \hat{h}_e}{\partial t} N_L dx dy \right) \right\} \\ & = \int_{\Gamma} \left(\frac{\partial \hat{h}}{\partial x} n_x + \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} n_y \right) N_L d\sigma \quad \dots\dots\dots(9) \end{aligned}$$

여기서, 절점 i, j, m, n 로 이루어진 요소는 $L=i, j, m, n$ 일 때 4개의 방정식을 구성하게 되며 식 (6)을 식 (9)의 첫 항에 대입하고 $h_i(t), h_j(t), h_m(t), h_n(t)$ 의 관계에서 요소 $[G]$ 의 L 번째 행에 대한 구성은 다음 식 (10)과 같다.

$$\begin{aligned} G_{L,i}^e &= \int_{-a}^a \int_{-b}^b \left(\frac{\partial N_i^e}{\partial x} \frac{\partial N_L^e}{\partial x} + \frac{\partial N_i^e}{\partial y} \frac{\partial N_L^e}{\partial y} \right) dx dy \\ G_{L,j}^e &= \int_{-a}^a \int_{-b}^b \left(\frac{\partial N_j^e}{\partial x} \frac{\partial N_L^e}{\partial x} + \frac{\partial N_j^e}{\partial y} \frac{\partial N_L^e}{\partial y} \right) dx dy \\ G_{L,m}^e &= \int_{-a}^a \int_{-b}^b \left(\frac{\partial N_m^e}{\partial x} \frac{\partial N_L^e}{\partial x} + \frac{\partial N_m^e}{\partial y} \frac{\partial N_L^e}{\partial y} \right) dx dy \end{aligned}$$

$$G_{L,n}^e = \int_{-a}^a \int_{-b}^b \left(\frac{\partial N_n^e}{\partial x} \frac{\partial N_L^e}{\partial x} + \frac{\partial N_n^e}{\partial y} \frac{\partial N_L^e}{\partial y} \right) dx dy \dots\dots\dots(10)$$

또한, 식 (7)의 시간 도함수를 식 (9)의 두 번째 항에 대입하고, $\partial h_i/\partial t$, $\partial h_j/\partial t$, $\partial h_m/\partial t$ 및 $\partial h_n/\partial t$ 의 관계에서 요소 [P]의 다음 식 (11)로 나타낼 수 있다.

$$P_{L,i}^e = \frac{S}{T} \int \int_{-a}^a \int_{-b}^b N_i^e N_L^e dx dy$$

$$P_{L,j}^e = \frac{S}{T} \int \int_{-a}^a \int_{-b}^b N_j^e N_L^e dx dy$$

$$P_{L,m}^e = \frac{S}{T} \int \int_{-a}^a \int_{-b}^b N_m^e N_L^e dx dy$$

$$P_{L,n}^e = \frac{S}{T} \int \int_{-a}^a \int_{-b}^b N_n^e N_L^e dx dy \dots\dots(11)$$

한편, 지하수의 염수농도에 관한 공간적·시간적 분포계산을 위한 기본방정식은 다음 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(n D_L \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(n D_T \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(n C \bar{v}_x \right) = n \frac{\partial C}{\partial t} \dots\dots\dots(12)$$

이송확산 계수와 공극율이 독립적이라면 다음 식 (13)으로 나타낼 수 있고 형상함수 $N_L(x, y)$ 에 의해 가중된 잔차 \hat{C} 을 0으로 놓으면 식 (14)와 같다.

$$D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_T \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - \bar{v}_x \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t} \dots\dots(13)$$

$$\left(D_L \frac{\partial^2 \hat{C}}{\partial x^2} + D_T \frac{\partial^2 \hat{C}}{\partial y^2} - \bar{v}_x \frac{\partial \hat{C}}{\partial x} - \frac{\partial \hat{C}}{\partial t} \right) N_L(x, y) dx dy = 0 \dots\dots\dots(14)$$

한편, 요소 i, j, m, n 내의 해를 구하기 위해 절점 값을 보간하고 각 항에 대한 부분적분을

수행하면 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_e \left\{ \int \int_D \left(D_L \frac{\partial \hat{C}^e}{\partial x^2} \frac{\partial N_L}{\partial x} + D_T \frac{\partial \hat{C}^e}{\partial y^2} \frac{\partial N_L}{\partial x} + \bar{v}_x \frac{\partial \hat{C}^e}{\partial x} N_L + \frac{\partial \hat{C}^e}{\partial t} N_L \right) dx dy \right\}$$

$$= \int \int_{\Gamma} \left(D_L \frac{\partial \hat{C}}{\partial x} n_x + D_T \frac{\partial \hat{C}}{\partial y} n_y \right) N_L d\sigma \dots\dots\dots(15)$$

여기서, 식 (15)의 시스템 방정식을 행렬을 이용하면 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$[G] \{C\} + [U] \{C\} + [P] \left\{ \frac{\partial C}{\partial t} \right\} = \{f\} \quad (16)$$

여기서 {C}는 절점 농도를 나타내고 $\left\{ \frac{\partial C}{\partial t} \right\}$ 는 절점 농도에 대한 시간 도함수를 나타내며 [G], [U], [P]와 {f}는 식 (16)의 좌변항의 각 항에 대한 적분 및 우변항의 경계적분에 해당되나 [G] 및 [P]가 식 (10) 및 (11)과 유사하므로 질량 수송 방정식에 대한 전형적인 요소에 대한 행렬구성은 [A]를 [G]+[U]로 하여 다음 식 (17)로서 나타낼 수 있다.

$$[A] \{C\} + [P] \left\{ \frac{\partial C}{\partial t} \right\} = \{f\} \dots\dots\dots(17)$$

2. 초기 및 경계조건

본 연구에서 유한요소법을 이용한 지하수위 변화에 대한 해를 구하기 위해 주어지는 초기조건은 양수가 시작되기 전인 $t=0$ 에 대하여 모든 절점에서 투수계수는 0이고 h_1 은 EL. 7.47m이며 거리(1)은 300m이다. 경계조건인 $t>0$ 에 대해서는 h_1 및 h_2 가 각각 EL. 7.47m 및 EL. 0.00m로 가정하였다. 또한 해수침입의 농도분포에 대한 해를 구하기 위해 주어지는 초기조건은 양수가 시작되기 전인 $t=0$ 에 대하여 해

안으로부터 유입되는 해수의 초기농도와 유출(이가리 양수장)되는 최종 농도인 C_0 및 C 에 대하여 투수계수는 0이고 $C(0, t) = C_0 = 30,000$ (mg/l)과 $C(150, t) = 0$ 이며 거리(l)은 150m이다. 경계조건은 $t > 0$ 일때 $C(0, t) = C_0 = 30,000$ (mg/l) 및 $C(150, t) = 5,000$ (mg/l)로 가정하였다. 이 때 경과시간의 최대치는 현재 이가리 양수장에서 갈수기(1994~95)에 양수가 지속될 경우 염수가 양수되기 시작하는 시간인 14,400분(10일)으로 설정하였다.

III. 모델의 적용 및 분석

1. 대상지역

본 연구에서는 자연하도 하구부에서 갈수시 양수량에 의한 지하수 유동과 취수능력을 분석하기 위하여 농업용수취수 목적으로 서정천 하구부에 지하취수보를 설치하여 하천복류수를 취수하고 있는 이가리 양수장을 대상으로 하였다. 이 양수장은 해수의 침입가능성이 크므로 양수장과 함께 해수의 침입방지와 갈수시 안정적인 하천복류수 취수를 목적으로 차수벽(지하댐)의 기능을 담당할 수 있는 취수보를 설치하고 있는 것이 특징이다.

서정천유역은 하도의 하구부가 동해로 직접 유입되는 유역면적 20.2km², 유로연장 16.1km인 소하천 유역으로서, 유역의 상류부는 고주산(EL.347.5m), 장구재(EL.585.5m) 및 천령산(EL.775.0m) 등으로 둘러싸여 급경사 산지를 형성하고 있다. 하도의 특성은 상류부가 급경사 하도를 이루고 있으나 하류부의 하도는 완만한 충적평지부를 유하하는 직선수로를 형성하고 있으며, 하도의 우안은 급경사 산지와 접해 있고 좌안은 비교적 넓은 충적평야를 이루고 있다.

특히, 하천주변에 발달한 농경지에 농업용수를 공급시키기 위해서 하천 양안에는 양수장이 산재해 있으며, 하천 하류부는 충적하천

으로 형성되어 저수(갈수)시에는 지표수가 거의 없으므로 취수보에 의한 취수가 불가능하므로 농업용수의 취수방법은 주로 하천복류수를 이용하는 양수장에 의존하고 있으며, 하천수와 대수층 지하수의 거동이 불가분의 관계에 있는 특수한 지역이다.

2. 하도의 수리·수문 및 해수위 특성

1) 현황분석

하천유역의 현황분석을 위해서는 장기간의 관측자료가 필요하나, 본 연구 대상유역내에는 수문관측자료가 없으므로 포함지역에서 발생한 1980~95년까지의 수문자료를 이용하여 저수(갈수)유출 시뮬레이션을 실시하였으며 그 결과를 이용하여 현황분석을 실시한 결과 Table 1과 같았다.

2) 수리특성분석

본 연구에서는 분석대상유역내 하도구간의 수리특성 분석을 위하여 하도의 통수능력이나 유출상태 평가에 널리 이용되고 있는 HEC-2 모델을 이용하였다. 수리특성분석의 범위는 전절의 현황분석결과를 기초로 하여 갈수위·저수위·평수위 및 풍수위시의 수리특성을 분석하였으며, 하도의 계산구간을 취수보 설치 지점에서 상류로 1,000m까지 100m간격으로 하도구간을 구분하고, 갈수량을 0.01m³/s로 하여 구간별 수리특성을 분석한 결과 갈수시에는 대부분의 수심이 0.1m 전후의 유출상황을 나타내고 있어 하도의 흐름 보다는 하천복류수의 흐름을 형성하는 하천임을 알 수 있었다.

Table 1. Flow duration of study basin

(Unit : m³/s)

Year	Drought flow	Low flow	Normal flow	Flood flow
1980~93	0.03	0.10	0.30	0.52
1994~95	0.01	0.03	0.10	0.23

3) 해수위 특성분석

본 연구의 대상구역 가운데서 해수위의 영향을 받는 하도구간은 구역의 최하류부인 하구부의 하도구간이며, 농업용수의 양수로 인한 지하수위의 저하 때문에 이가리 양수장 부근에서 해수침입이 자주 발생되고 있다. 특히, 이 구역의 해수침입 문제는 서정천의 저수위와 하천복류수의 유량에 직접적인 영향을 받고 있으며, 동해안의 조위에도 간접적인 영향을 받고 있다.

한편 포항항의 조석은 1972년부터 관측되어 왔으며, 그 동안에 관측된 주요 조위기록과 그 조위차 등의 조위특성을 검토하면 다음과 같다. 먼저, 고극조위는 EL. 0.73m이고 만조시의 대조, 평균 및 소조시의 조위는 각각 EL. 0.161m, EL. 0.154m 및 EL. 0.147m이며, 간조시의 소조, 평균 및 대조시의 조위는 각각 EL. 0.099m, EL. 0.092m 및 EL. 0.085m였다. 다음으로, 포항항의 평균해면은 EL. 0.123m이고 만조와 간조에 의한 평균 대조차, 소조차 및 평균조차는 각각 0.076m, 0.046m 및 0.062m인 것으로 나타났다.

따라서 이들 조위변동은 서정천 유역 하구부의 해수침입에 영향을 미치는 중요한 인자로서 저수(갈수)시 농업용수를 양수할 때, 본 하도의 저수(갈수)위와 하천복류수위의 상태에 따라서 해수침입 현상이 발생할 수도 있다.

그리고 조석과 조류에 의한 해수면의 변동은 해수와 담수의 비중에 의한 지하수위 변동에도 영향을 미치게 된다. 그러므로 포항항의 해수면 변동을 조사하여 월별 평균해수면(M. S.L.) 및 최고조위(EST.H.W.L.)를 살펴보면 Table 2와 같다.

그 결과 연평균해면은 EL. 0.123m이고 10~12월의 3개월 기간중의 월평균해면은 EL. 0.194m 이상으로 나타나고 있으며, 4~6월의 3개월 기간중의 월평균해면은 EL. 0.05m 전후로서 연중 월별 최대교차는 약 EL. 0.14m인 것으로 나타났다. 그리고 월별 최고조위의 기록을 보면 2월의 EL. 0.27m에서 9월의 EL. 0.73m(1981년 9월 발생)까지 큰 변화를 보이고 있다.

Table 2. Monthly M. S. L. & EST. H. W. L. of Pohang port

(Unit : EL. m)

Month W. L.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Mean
M. S. L.	0.171	0.121	0.076	0.056	0.059	0.046	0.093	0.124	0.152	0.198	0.197	0.194	0.123
EST. H. W. L.	0.32	0.27	0.36	0.32	0.36	0.43	0.48	0.58	0.73	0.48	0.36	0.37	-

3. 모델의 적용 및 분석결과의 검토

1) 유한요소망의 구성

본 연구에서는 양수에 의한 지하수위 변동 및 해수침입 현상을 해석하기 위하여 서정천 유역하구에 적용한 유한요소법을 이용한 지하수모델은 비정상상태와 정상상태의 지하수류 계산 및 양수에 의한 압력차에 따라 두가지 성분의 각 유체흐름을 알 수 있도록 구성하였다.

먼저, 본 분석에 이용된 대수층의 구분에 있어 기존 양수장의 지질구조를 기초로 하여 지하 12m까지 등방성의 비피압 대수층으로 설정하였고 이에 따른 투수계수의 값은 $1.7 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ (한국동력자원연구소, 1987)로 정하였다.

다음으로 양수에 의한 지하수위 저하계산을 위해서 격자 파라미터는 Table 4에서 보는 바와 같이 관측소의 최종 관측치(10일 양수할

경우 양수장의 지하수위 EL. 0.5m)와 수렴하는 격자구성요소 10개와 X와 Y의 각 격자거리 30m로 지정하였으며 이가리 양수장 부근에서 상류측으로 약 300m까지 격자망을 구성한 분석지역의 격자망을 Fig. 2와 같이 구성하였다. 마지막으로 양수의 영향으로 인한 염수침입에 대한 농도분포 계산을 위하여 격자파라미터는 수위저하에 사용된 격자구성요소와 같이 10개 지정하였으며 X, Y의 각 격자거리는 15m로하여 기존의 이가리 양수장 부근의 취수보에서 해안으로 하구(No. 0)까지 약 150m를 Fig. 3과 같이 구성하였다.

2) 지하수위 및 해수침입 분석

본 연구에서는 갈수기에 있어 이가리 양수장의 장기적인 양수에 대한 기존 취수보의 취수능력을 검토하고 현재의 이가리 양수장에서 양수가 10일 정도 이루어 질 경우 해수침입으로 인한 염수성분이 관측되고 있어 농업용수로 이용하기가 부적합한 상태이다. 이에 현재 이용중인 취수보의 깊이를 보강하는 방법(조건 1)과 No. 1~No. 2지점 사이의 용두교로 이설하여 설치하는 방법(조건 2)에 대하여 유한요소법을 이용한 시간별 지하수위 저하와 이로 인해 발생하는 해수침입 영향을 분석하기 위한 시뮬레이션을 실시하였다.

① 기존 취수보를 기준으로 할 경우

본 연구의 대상지점인 이가리 양수장에는 Fig. 4와 같이 현재 위치에 4m(지상 1m, 지하 3m)의 취수보가 설치되어 있으며, 이 양수장에서는 410m³(12시간 기준)을 양수하고 있으므로 일 양수량을 410m³으로 하였을 경우에 대하여 지하수위 변동 및 해수의 침입특성에 대하여 분석하였다.

먼저, 지하수위 변동은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 현재의 위치에 기존 4m깊이의 취수보가 양수시간이 1,000분 경과했을 경우 서정천 하구의 취수보 지점 ⑩에 대한 지하수위는

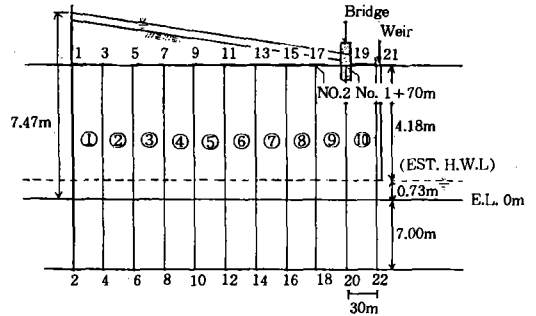


Fig. 2. Grid spacing for study area(Ground-water Level)

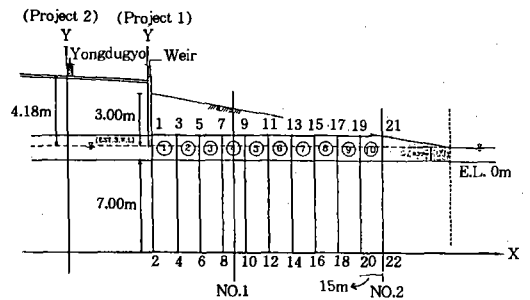


Fig. 3. Grid spacing for study area(Seawater intrusion)

Table 3. Pumping discharge

Quantity	Pumping discharge		
	Discharge	Day	Year
	0.0095m ³ /s	410m ³ (12hr)	20,500m ³ (50day)

웨어 상단으로부터 하부로 7.0m 깊이를 기준면(EL. 0.07-7.0)으로 보았음으로 계산치에서 이값을 빼면 EL. 2.89m이고 14,400 분(10일)이 경과했을 경우에는 EL. 0.53m 로 저하되었다.

다음으로, 해수의 침입으로 인한 염분의 농도 변화는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 현재의 위치에 기존 4m깊이의 취수보가 양수시간이 1,000분 경과했을 경우 서정천 하구의 취수보 하류부 15m, 30m지점에 대한 염분농도는 0.0 mg/l 0.1mg/l 이고 14,400분(10일)이 경과했을 경우에는 102.6 및 506.8mg/l 로 확산되었다.

Table 4. Comparison of groundwater level changes caused by pumping

Time (min)	Groundwater level(m)	Observed	Calculated (Present condition)
1000.00		10.09	9.82
2000.00		9.41	9.16
3000.00		8.83	8.76
4000.00		8.66	8.48
5000.00		8.35	8.28
6000.00		8.20	8.11
7000.00		8.06	7.98
8000.00		8.01	7.88
9000.00		7.88	7.79
10000.00		7.80	7.71
11000.00		7.72	7.64
12000.00		7.64	7.58
13000.00		7.59	7.53
14000.00		7.55	7.48
14400.00		7.50	7.46

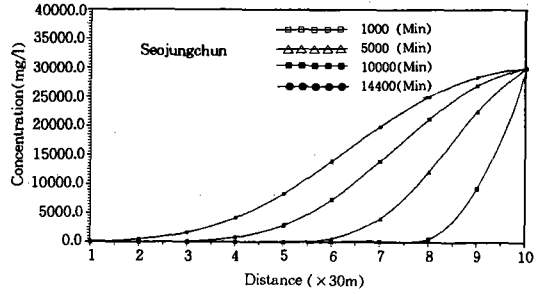


Fig. 6. Changes of brine concentration(Present)

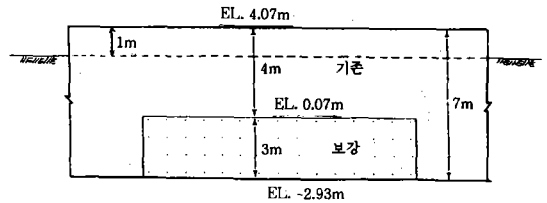


Fig. 7. Plan of intake weir

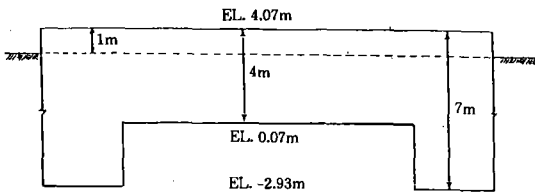


Fig. 4. Existing intake weir

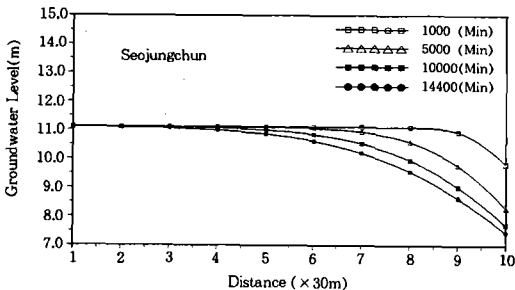


Fig. 5. Changes of groundwater level(Present)

② 기존 취수보형태를 보강할 경우(조건 1)
기존 취수보에 Fig. 7과 같이 지하로 3m를

더 깊게 보강했을 경우에 지하수위 변동 및 해수의 침입특성을 분석한 결과 다음과 같았다.

먼저, Fig. 8에서 보는 바와 같이 취수보 지점 ⑩의 지하수위가 1,000분 양수했을 경우에는 EL. 2.89m였으나 14,400분(10일)이 경과했을 경우에는 지하수위가 EL. 0.79m 로서 고극조위 EL. 0.73m보다 지하수위가 높은 것으로 분석되었다.

다음으로, 해수의 침입으로 인한 염분의 농도 변화는 Fig. 9에서 보는 바와 같이 취수보 하류부 15m, 30m 지점의 염분농도가 1,000분 양수했을 경우에는 모두 0.0mg/l 로 분석되어 기존의 취수보 상태와 거의 일치하였으나 14,400분(10일)이 경과했을 경우에는 염분농도 분포가 38.3mg/l 및 79.8mg/l 로서 기존보다 각각 64.3mg/l, 427.0mg/l 이 저하된 것으로 나타났다.

③ 취수장 위치를 조정할 경우(조건 2)

이가리 양수장은 현재의 취수보 위치와 깊이를 고려해 볼 때, 해안과 인접해 있고 하천

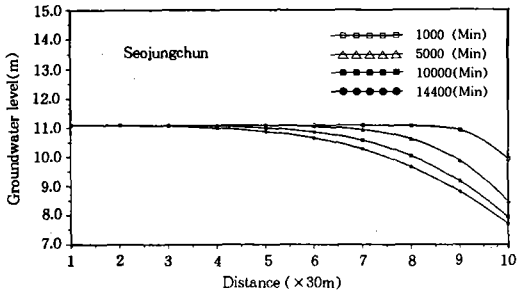


Fig. 8. Changes of groundwater level(Case 1)

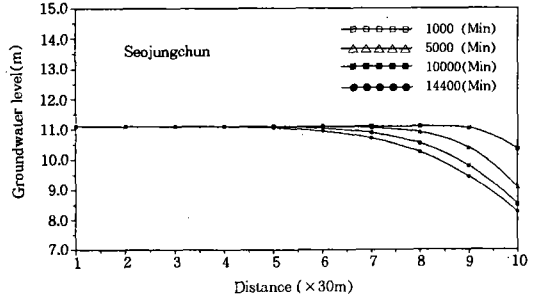


Fig. 11. Changes of groundwater level(Case 2)

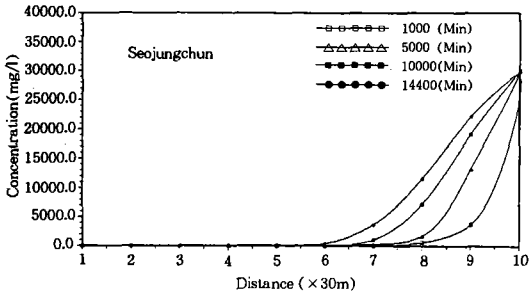


Fig. 9. Changes of brine concentration(Case 1)

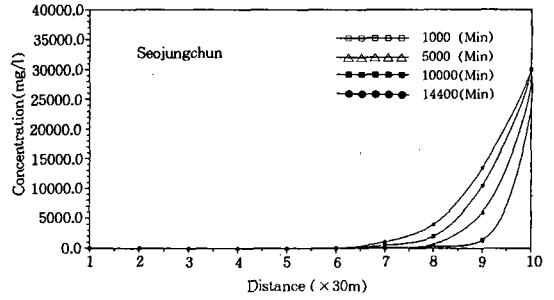


Fig. 12. Changes of brine concentration(Case 2)

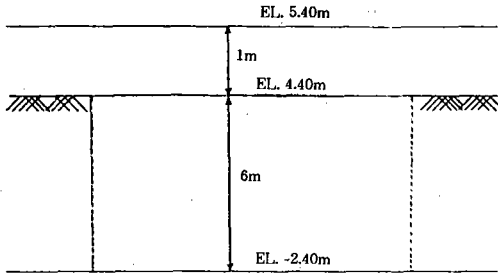


Fig. 10. Plan of intake weir

복류수에 의한 지하수위가 고극조위와 큰 차이를 보이고 있지 않아 장시간의 양수가 이루어질 경우에 해수침입의 영향이 다소 큰 지점으로 분석되었다.

따라서 본 연구에서는 현지 측량성과에 의한 No.1 지점과 No.2지점 사이의 용두교(No. 1+70m)에 Fig. 10과 같이 지하차수벽을 하상으로 부터 깊이 7m(EL.-2.40m)까지 설치하여 용두교 부근에서 양수할 경우에 시간별 양수에 의한 지하수위 변동과 염분의 농도변

화에 대한분석 결과는 위의 Fig. 11~12에 도시한 바와 같다.

3) 분석결과와 비교검토

본 분석결과에서 나타난 바와 같이 기존의 취수보와 기존 취수보에 3m를 더 깊게 보강했을 경우 및 용두교 직상류에서 도로를 따라 7m 깊이의 차수벽을 설치하여 10일 동안 양수할 경우에 지하수위 변화와 염수침입 분포는 Fig. 13 및 Fig. 14와 같이 비교검토 되었다.

먼저, 기존 취수보의 경우 ⑨지점의 지하수위는 각각 EL. 1.71m, ⑩지점의 지하수위는 EL. 0.53m로서 하구해안의 고극조위인 EL. 0.73m보다 지하수위가 약 0.2m가 낮아지는 것으로 분석되어 기존의 취수보로는 장시간에 걸친 양수에 문제가 있는 것으로 판단된다.

다음으로, Fig. 13에 도시한 것과 같이 현재 위치에 설치된 취수보를 3m(EL. -2.93m) 더 깊게 보강했을 경우 취수보 지점 ⑩의 지하수위가 10일 양수량을 기준으로 지하수위가

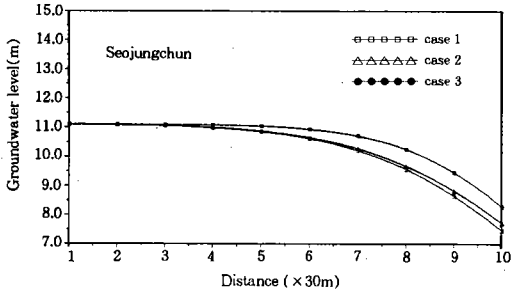


Fig. 13. Changes of groundwater level for distance

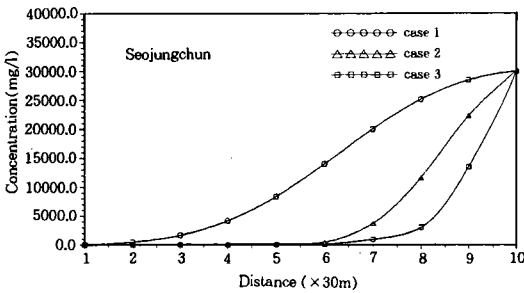


Fig. 14. Changes of brine concentration for distance

EL. 0.79m로 나타나 고극조위보다 다소 높은 것으로 분석되었고 양수 시간의 경과에 따른 해수침입 영향을 분석한 염수농도 변화의 계산결과에서도 해수영향이 미세한 것으로 분석되었다.

마지막으로, 현재 취수보가 있는 이가리 양수장을 현지 측량구간인 No.1+70m 지점으로 대체하여 No.1+70m 부근에서 양수할 경우에 따른 계산 결과, 취수보 지점 ㉑의 지하수위가 10일간 양수했을 때 지하수위는 EL. 2.52m로 나타나 고극조위인 EL. 0.73m보다 약 1.8m 정도 높은 것으로 분석되었다. 그리고 분석된 지하수위를 이용하여 분석구간의 해수침입에 대한 영향을 분석한 결과에서도 보는 바와 같이 1,000분 경과할 경우에 취수부 하류부 15m, 30m지점에서 염수농도가 각각 0.0mg/l, 0.1mg/l 이고 14,400분이 경과 할 경우

염수농도가 0.5mg/l 를 나타내고 있어 조건 2가 장시간 양수할 때 보다 안정적인 용수확보를 위한 가장 적절한 방안으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 바다로 직접 유입하는 자연하도의 하구부에서 해수침입방지 기능을 가진 취수보를 설치하여 양수할 경우에 양수량의 영향으로 인한 시간적 지하수위 저하와 해수의 침입특성 및 취수능력 결정에 대하여 유한요소법을 이용하여 정량적인 분석을 실시하였다.

연구대상 유역은 동해로 유입되는 서정천 하구부의 이가리 양수장을 대상으로 하였고, 양수시기는 최근의 대표갈수년 자료로부터 추정된 갈수량 유하시의 유량조건으로 하였으며, 분석검토한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 하도의 유출상황인 수리특성을 검토한 결과 저수(갈수)시에는 대부분의 수심이 0.1m 전후의 유출상황을 나타내고 있어 하도의 흐름 보다는 하천복류수의 흐름을 형성하는 하천임을 알 수 있다.

2) 하구하도의 해수위 영향분석에서 하구부의 해안조석과 조류에 의한 해수면 변동은 포항 검조소의 월별 최고조위의 자료를 분석해 볼 때 최극조위는 EL. 0.73m임을 알 수 있었으며, 이 고극고조위는 저수(갈수)시에 서정천 상류부로 염수가 침입할 수 있는 중요한 원인임을 알 수 있었다.

3) 양수장이 위치하고 있는 기존 취수보와 이가리 양수장의 기존 취수보의 차수벽을 3m 더 깊게 보강했을 경우 및 양수장의 기존 취수보를 상류로 이설하여 시설을 개체하여 10일간 양수했을 경우에 따른 지하수위 계산 및 염수침입에 관한 농도분포 계산을 실시한 결과 안정적인 용수확보를 위해서 취수보를 용두교지점으로 이설할 경우 기존 취수보에 의

한 양수조건 보다 우수한 것으로 판단된다.

4) 본 연구에서 양수에 의한 지하수위 변동 계산을 위하여 유한요소법을 이용한 지하수모델이 실제적으로 1994~95년의 가뭄시에 이가리 양수정에서 일 410m³/day를 10일간 양수했을 경우에 인근 해안으로부터 해수침입의 영향이 관측되어 기존 취수보에 대한 본 분석의 결과와 비교적 일치하고 있으므로 본 모델은 양수에 따른 지하수위 변동을 잘 반영하고 있음을 알 수 있었다.

따라서, 하천 하류부의 갈수(저수)량, 지질 및 지하수위 측정 등을 정기적으로 실시하여 본 모델을 적용할 경우 취수보(지하차수벽)의 적정한 위치와 규모 등에 대한 우수한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Hubbert, M. K(1940) : The theory of groundwater motion. J. Geol., 48, 785-944.
2. Higgins, G. H.(1959) : Evaluation of the groundwater contamination hazard from underground nuclear explosives. J. Geophys. Res., 64, 1509-1519.
3. Lau, L. K.·Kaufman, W. J.(1959) : Dispersion of a water tracer in radial lami-

nar flow through homogeneous porous media. Hydraulic Lab. and Sanitary Eng. Res. Lab., Univ. of California, Berkeley, Progr. rept. 5.

4. Toth, J.(1963) : A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins, J. Geophys. Res.
5. Wang, H. F. and Anderson, M. P.(1982) : Introduction to groundwater modeling, finite difference and finite element methods. W. H. Freeman and Co.
6. 김영기(1976), 반야월층의 지하수유동에 관한 연구, 공산지질학회 논문집 제 9-4집
7. 안종성(1983), 동위원소를 이용한 한강유역내 지하수와 지표수의 연관성에 관한 연구, 한국수문학회지, 제 16권 제 4호.
8. 김계남(1990), 암반에서의 지하수 유동특성 분석, 한국수문학회지, 제 23권 제 2호.
9. 배상근(1991, 92), 대구지역의 지하수 유동계의 해석, 계명대학교 산업기술연구소 논문집 제 14-2집.
10. 포항철강공업관리공단(1989), 포항철강공단 홍수대비조사연구.
11. 한국동력자원연구소(1987), 국토이용지질조사연구보고서.