

## WINFLOW 모델을 이용한 지하수 유동해석

### Groundwater Movement Analysis Using the WINFLOW Model

최 윤 영\* · 안 승 섭\*\* · 김 재 광\*\*\*

Choi, Yun Young · Ahn, Seung Seop · Kim, Jae Kwang

#### Abstract

This study examines groundwater movement system analysis and movement forecast algorithm using finite element method. The target is Cheongha-myeon area, Bukgu, Pohang-city which has many difficulties in water supply during drought period. From the comparison of the differences between obtained values by WINFLOW model and observed values, it is thought that groundwater head distribution under steady flow is reflected well at the level of reliability. Groundwater movement of study area shows stable pattern from western watershed to eastern coastal area while flow path is dense and steep in the center of the coastal area. The results of particle tracing for each well show a comparatively straight line from the western boundary side to the observation position at the upper area of the well, and are analyzed as it diffuses according to getting closer to the coast at the lower area of the well. The result of effect circle examination attendant on pumping amount in study area shows variation tendency that groundwater head decreases at the side and the lower area more than at the upper area of the well when groundwater flows from west to east(coast). As mentioned above, satisfactory results of groundwater movement analysis using WINFLOW model, two dimensional groundwater movement analysis model, are obtained through the great decrease of physical uncertainty of groundwater movement system.

Keywords : Groundwater movement, WINFLOW model

#### I. 서 론

대수층내에서 발생하는 유동시스템은 대수층의

조건에 따라 시·공간적으로 변동이 매우 심하고 유동상태를 나타내는 특성인자 수가 매우 많으므로 지하수 유동해석에 모두 반영한다는 것은 어려운 문제들이다.

지하수 유동과정을 모델화 하기 위한 국외의 연구로서 Hubbert(1940)가 지하수 유동이론을 모델적으로 해석한 것이 시초이며, Freeze와 Witherspoon(1966)의 수학적 모델에 의한 3차원, 비균질 이방성 유역에 있어서의 정상지하수 흐름 해석, Nara-

\* 경북도립경도대학 건설환경과  
\*\* 경일대학교 건설공학부  
\*\*\* (주)반석건설 대표이사  
\*\* Corresponding author. Tel.: +82-53-850-7314  
fax: +82-53-850-7611  
E-mail address: ahnss0@bear.kyungil.ac.kr

simhan과 Witherspoon(1976)의 3차원 지하수 흐름체계에 대한 유한차분 방정식의 적용, Wang & Anderson(1982)의 유한차분 및 요소법에 의한 지하수 모델링에 관한 연구가 있었으며, Gupta 등(1984)은 복잡한 지하수시스템에 대한 3차원 유한요소모델을 개발하였고, 최근에 와서 지하수에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다. 국내의 연구로는 김영기(1976)의 반야월층의 지하수유동에 관한 연구, 김계남(1990)의 암반에서의 지하수 유동특성 분석에 관한 연구가 있었으며, 최근에는 최윤영(1998)의 지하수 유동시스템 해석 등의 연구가 있었다.

본 연구에서는 WINFLOW 모델을 이용하여 지하수두 분포 및 유동경로 등 분석구역의 광역적인 지하수 유동시스템을 해석함으로써 향후 분석구역에 대한 지하수 오염해석, 양수정 개발, 영향원해석 등의 지하수 관리 및 이용을 극대화할 수 있는 방향을 제시하는데 그 목적이 있다.

## II. 지하수유동모델의 기본이론

본 연구에서 사용된 WINFLOW 모델은 유한요소법에 근거한 2차원 모델로서 3차원 모델인 MODFLOW와 달리 다양한 지질조건하의 지하수 유동해석에는 다소 문제점을 가지고 있으나 대수층 조건이 비교적 단순한 조건하에서는 쉽게 모델구축을 할 수 있는 장점을 가지고 있으며 관정의 지하수두, 저수지, 하천 및 지질구조 등의 지형 및 지질 조건과 몇가지의 수리매개변수 등을 이용하여 지하수 유동, 우물의 영향분포 및 오염원 경로추적 등을 해석할 수 있다. WINFLOW모델의 해석의 흐름도는 Fig. 1과 같고, 대수층에서의 2차원 지하수 흐름에 대한 지배방정식은 다음 식과 같다.

$$S \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + Q + \frac{K'}{B'} (h_a - h)$$

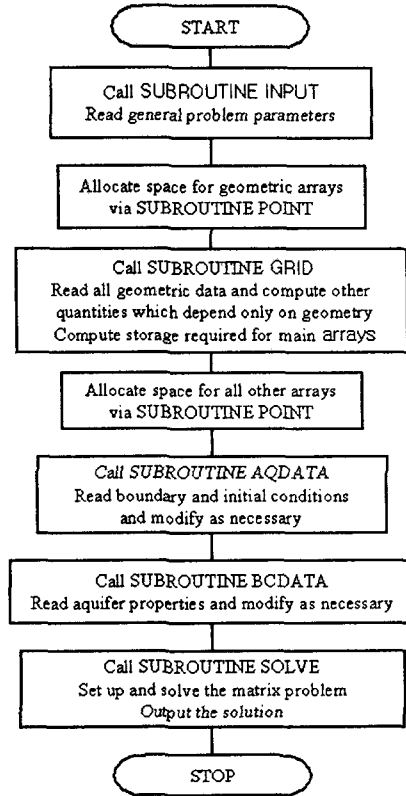


Fig. 1 Flowchart of main program

여기서,  $S$ 는 대수층 저류상수,  $h$ 는 평균 수두,  $T_{xx}$ 는  $x$  방향의 투수량 계수,  $T_{yy}$ 는  $y$  방향의 투수량 계수이다.  $Q$ 는 대수층의 연직 흐름율이며,  $K'$ 는 대수층의 상부 또는 하부층의 연직투수율이고  $B'$ 는 대수층 상부 또는 하부층의 두께,  $h_a$ 는 인접 대수층에서의 수두 및  $t$ 는 시간이다.

WINFLOW 모델에서의 부정류 문제를 해결하거나 반복 선형 해를 구하기 위하여 필요한 변수들에 대한 내용을 나타내면 Table 1과 같다.

## III. 모델의 적용 및 분석

### 1. 분석 대상구역 및 분석자료

본 연구의 대상구역으로는 Fig. 2에서 보는 바와

Table 1 Choice of WINFLOW solution strategy parameters

Type of solution		WINFLOW PARAMETERS						
		LINEAR	STEADY	DT	ALPHA	TOL	MAXIT	NSYS
Steady state	• Linear(ized)	T	T	-	-	-	Default 5 <sup>(1)</sup>	-
	• Modified nonlinear	F	T	-	-	small	Default 5 <sup>(1)</sup>	999
	• Nonlinear	F	T	-	-	small	Default 5 <sup>(1)</sup>	1, 2, ...
Unsteady	• Linear(ized)	T	F	Physically based	0.5~1.0	-	Default 5 <sup>(1)</sup>	-
	• Quasi-linearized	F	F	Physically based	0.5~1.0	Very large	Default 5 <sup>(1)</sup>	1 or 999
	• Modified nonlinear	F	F	Physically based	0.5~1.0	small	Default 5 <sup>(1)</sup>	999
	• Nonlinear	F	F	Physically based	0.5~1.0	small	Default 5 <sup>(1)</sup>	1, 2, ...
	• Nonlinear & Change of status	F(2)	F	Physically based	1.0 <sup>(2)</sup>	small	Should be larger than 5	1, 2, ...

Notes : (1) Iterations can occur during linear(ized) solutions when rising water nodes are activated or 3rd-type leakage fluxes are modified.

(2) If a change of status is anticipated, this version of Winflow requires LINEAR.FALSE. and ALPHA=1.0. Critical time steps probably depend on the confined aquifer storativity,  $S = S_0B$ .

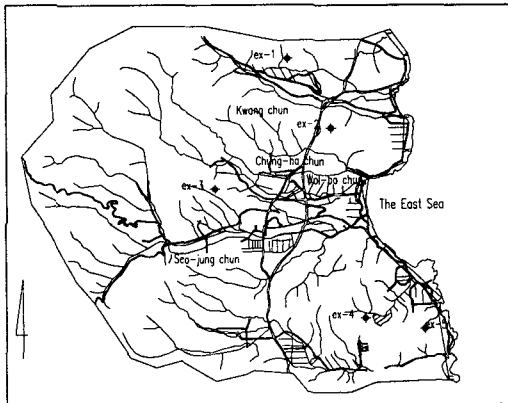


Fig. 2 Study catchment map

같이 비교적 정밀한 강우, 지질 및 지하수위 등의 수문자료가 있는 포항시 청하면유역을 선정하였다. 유역의 지형적특성은 동측에 해안선이 접해 있고 서측은 천령산(EL. 775.0 m)과 고주산(EL. 347.5 m)이 주변의 낮은 봉우리들과 함께 분수계를 이루고 있으며, 남북측은 일정한 분수계가 존재하지 않고 눈·밭으로 이루어진 지형을 가지고 있다. 대상

지역의 총면적은 75.12 km<sup>2</sup>로서 동서 약 9 km이고 남북 약 9.5 km인 장방형 형상을 띄고 있다. 천령산과 고주산을 정점으로 하여 동서사면보다 남북사면이 매우 완만한 경사를 나타내고 있으며, 전면적의 80% 이상이 충적층으로 이루어져 있다. 유역내의 지배적인 절리 방향은 J1:NS/87E, J2:N18E, J3:N72E/78SE 및 J4:N60E/ 82NW로 나타났다. 그리고 지형 및 지질특성상 심하게 풍화된 퇴적암류가 구릉성 산지를 이루고 있으며 불연속면에서의 용수유출이 관측되고 있다.

또한 연구 지역의 수문특성을 조사한 결과 Table 2와 같이 연평균강우량 1,095.1 mm, 연평균 증발량은 1,571.0 mm, 연평균 상대습도는 67%인 것으로 나타났다.

## 2. 경계조건 및 매개변수 추정

### 가. 격자망 구성

유동해석을 위해 조사 관측한 유역의 경계면 및

Table 2 Meteorological characteristics in study catchment

Dist.	Mean atm. tem.(°C)	Max. atm. tem.(°C)	Min. atm. tem.(°C)	Rainfall (mm)	Gauge evapo.(mm)	Relative humid.(%)
Year mean	13.1	37.9	-14.4	1,095.1	1,571.0	67

\*KOWACO. 1991~2001, Data Book of Hydrology

Table 3 Well inventory of study catchment

WELL No.	Area name	Ground EL. (m)	Water level (EL. m)	Pumping rate (m <sup>3</sup> /D)	EC (μs/cm)	Remark
ex-1	Haksan	80.3	21.8	1,000	39.35	PH(7.69)
ex-2	Josa	65.8	14.7	950	40.68	-
ex-3	Yuljeon	101.6	33.9	1,000	174.36	PH(6.91)
ex-4	Sodong	39.0	10.6	1,100	102.60	-
ex-5	Chungjin	33.4	6.2	850	115.00	-

정호의 위치는 Fig. 2와 같으며 분석에 이용된 관측정은 Table 3과 같이 총 5개로서 ex-3를 제외하면 E.L. 100 m 이하 지점에 위치하고 있으며 지하수위는 E.L. 40 m 이하에 위치하고 있다.

다음으로, 모의발생을 위한 지하수 함양량은 갈수기 및 풍수기를 고려하지 않고 일반적으로 지하수 함양에 직접적인 영향을 미치는 강우, 증발산 하천유입 등을 고려하여 년평균강우량에 대한 평균 침투율을 약 13%(POSCO, 1989)로 계산에 적용하였다. 지하수 유동해석을 위한 유한요소망의 격자망(X,Y) 구성은 수리지질학적 특성을 고려하여 종·횡축에 있어 120×120개의 격자요소로 구성하였으며, 이용된 도면의 축척은 1:25,000이다. 격자간의 간격은 X·Y방향이 75 m이며 부정류 해석시 관측정 심도가 100 m를 넘는 곳이 있어 이들 관정에 의한 양수를 고려할 수 있게 하기 위해 EL. -150 m지점을 하부경계로 설정하였다.

#### 나. 경계조건 및 입력자료

경계설정에서 동측지역은 해수면, 서측 및 남북측지역은 분수계를 경계지역으로 설정하였으며 이에 따른 경계조건으로서 상부경계는 일정수두경계, 측면 및 하부경계는 불투수경계로 하였다. 투수

계수(K)는 지질구성 분포를 고려하여 충적층, 풍화층 및 퇴적암층의 경우에  $1.70 \times 10^{-4}$  cm/s,  $5.0 \times 10^{-6}$  및  $1.0 \times 10^{-6}$  cm/s(한국동력자원연구소, 1987)로 산정하였으며 공극률은 평균 38%(농림부, 1967), 36%(Morris and Johnson, 1967) 및 13%(Davis and Dewiest, 1966)으로 설정하였다.

### 3. 모델의 적용

#### 가. 정류상태 해석

WINFLOW 모델을 이용한 정류상태하의 지하수 수두분포 분석 결과와 실측치에 대한 통계 분석 결과 Table 4 및 Fig. 3에서 보는 바와 같이 가장 작은 변동폭을 나타낸 관정은 ex-5(0.3 m), 가장 큰 변동폭을 나타낸 관정은 ex-1(3.9 m)으로 산정되었고, 관측치와 계산치의 잔차 평균 1.560, 잔차 합의 제곱 25, 절대오차 평균 1.823로 나타났다. 모형으로 예측된 값의 정확도를 평가하기 위해 모형효율을 구하였다.

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 - \sum_{i=1}^n (x_i' - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Table 4 Comparison of observation and analysis values

(Unit : m)

Well No.	Observation G.W.L.(E.L. m)	Analysis G.W.L.(E.L. m)	Statistical values
ex-1	21.8	25.7	Residual mean = 1.560 Residual standard Dev. = 1.606 Residual sum of squares. = 25 Absolute residual mean = 1.823 Res. std. dev. / Range = 0.058
ex-2	14.7	16.7	
ex-3	33.9	36.0	
ex-4	10.6	9.9	
ex-5	6.2	6.5	

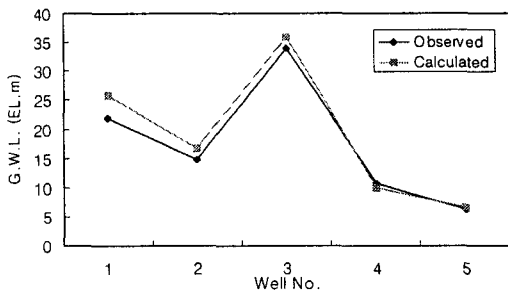


Fig. 3 Groundwater level comparison of each wells

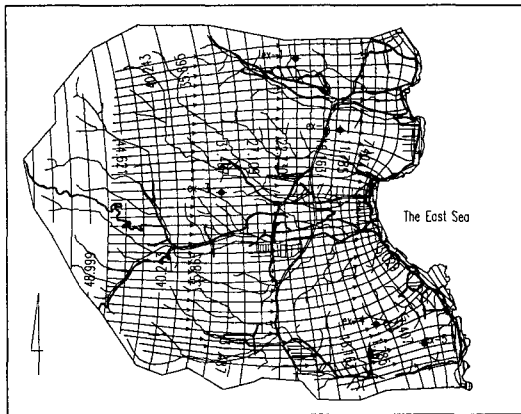


Fig. 4 Velocity vector by potential distribution

여기서,  $x_i$  는 분석 결과치,  $x'_i$  는 관측치,  $\bar{x}$  는 분석결과치의 평균값이다. 효율 E의 값을 검토한 결과 0.96으로 효율이 매우 높은 것으로 분석되었다.

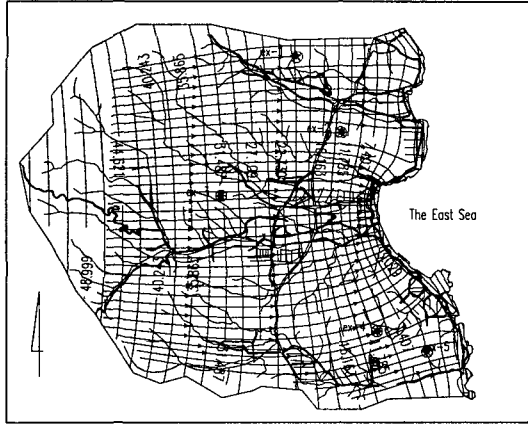
연구대상유역에 대한 정류상태에서의 지하수두 분포는 서측의 경계면에서부터 동측으로 완만한 경사를 이루고 있으며 전유역에 걸쳐 비교적 유사한 수두경사를 이루고 있는 것으로 나타났다. 또한,

Fig. 4에서 보는 바와 같이 지하수두 분포를 이용한 벡터 추적을 실시한 결과 지하수가 동측방향으로 모든 지점에서 고르게 유출되고 있는 것으로 분석되었다. 이와 같은 결과는 지하수두 분포가 지형과 하천의 수로방향을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 그리고 동측 해안지점의 중앙부에서는 타 지역보다 조밀한 유출현상을 나타내고 있는데 이 지점은 대부분 농경지로써 주변 해안의 남·북측지점에 비하여 상대적으로 표고가 약 10~30 m정도가 낮기 때문인 것으로 판단된다.

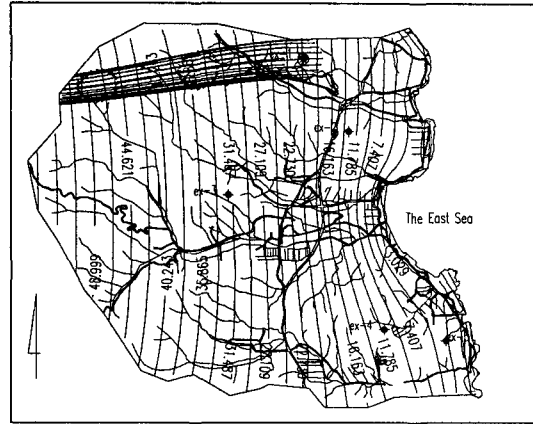
관측 관정이 있는 ex-1~ex5 지점은 각각 독립적인 유동계를 형성하고 있는 대수층으로 판단되며 유속벡터의 분포도가 서측경계면에서 동측으로 유출되고 있는 것을 고려해 볼 때 각 관정에 있어 지속적인 안정채수량에 대한 영향은 관정의 상류측이 가장 큰 영향을 주는 것으로 판단된다.

#### 나. 부정류상태 해석

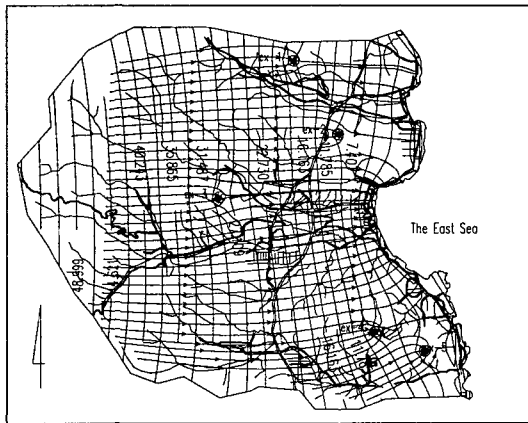
WINFLOW 모델을 이용하여 부정류상태하의 지하수두분포 분석을 실시하였으며, 양수량 1,000  $m^3/day$  및 3,000  $m^3/day$ 일 때 양수기간 90일 경과 후의 모의발생 결과는 Fig. 5와 같다. 먼저, 양수량 1,000  $m^3/day$ 일 경우 지하수두는 정류상태일 경우와 유사한 분포를 나타내고 있으며 관정 ex-1~ex-5 주변의 지하수유동계는 거의 변동이 없음을 보이고 있다. 다음으로, 양수량 3,000  $m^3/day$ 일 경우 관정 ex-1~ex-5 주변의 약 100~200 m에서 지하수두가 증가하여, 정류상태와는 다른 지하수두 유동계를 나타내고 있다.



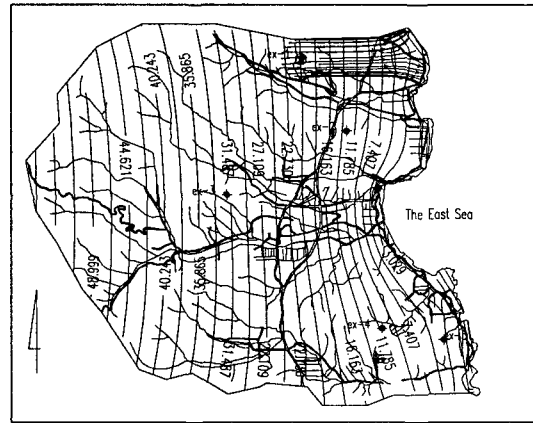
(a) Pumping 1,000 m<sup>3</sup>/day



(a) Upper zone



(b) Pumping 3,000 m<sup>3</sup>/day



(b) Down zone

Fig. 5 Groundwater level distribution from unsteady state (after 90 day)

Fig. 6 Particle tracer of well(ex-1, 1,000 m<sup>3</sup>/day)

향을 나타내고 있으며 ex-1 지점에서 해안지역으로 근접할수록 입자의 영향반경은 커지는 경향을 나타내고 있다.

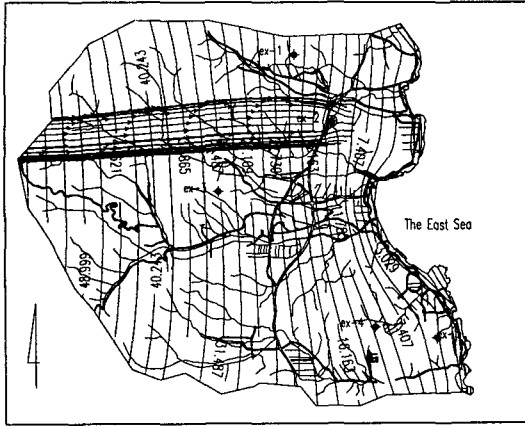
다음으로, Fig. 7에서 보는 바와 같이 양수량이 3,000 m<sup>3</sup>/day인 비정상류 모의발생일 경우에 입자경로는 상류지역에서 ex-1 지점으로 근접할수록 입자의 영향반경은 양수량이 1,000 m<sup>3</sup>/day때 보다 더욱 커지는 경향을 나타내고 있고 ex-1 지점에서 해안지역으로 근접할수록 양수량의 증가로 인한 영향 때문에 입자의 영향반경은 다소 작아지는 경향을 나타내고 있다.

#### 4. 입자추적 해석

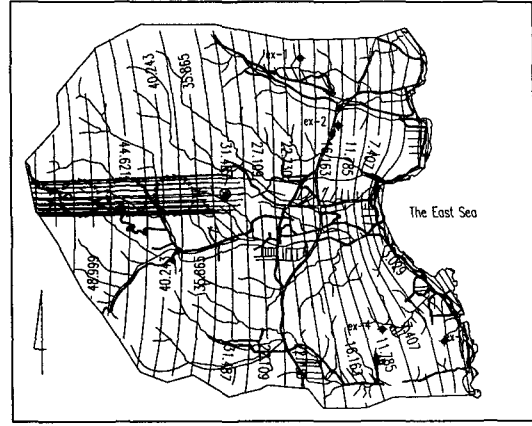
##### 가. ex-1 관정

ex-1 관정은 청하면 학산지역에 위치하고 있고, 지하수는 대체적으로 상류부에서 하류부로 안정되게 유동하고 있다. 먼저, Fig. 6에서 보는 바와 같이 양수량이 1,000 m<sup>3</sup>/day인 비정상류 모의발생일 경우에 입자경로는 상류지역에서 ex-1 지점으로 근접할수록 입자의 영향반경은 다소 커지는 경

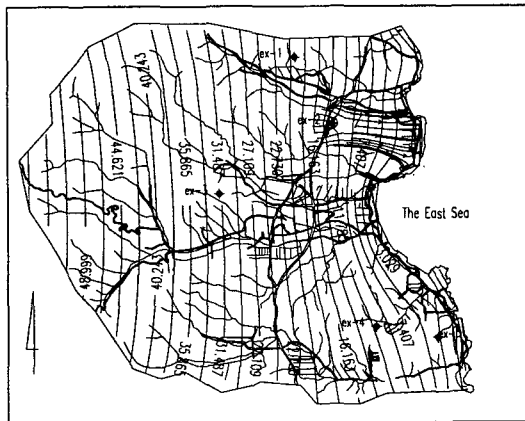




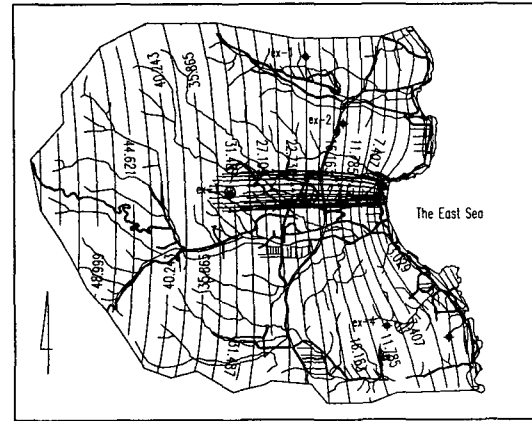
(a) Upper zone



(a) Upper zone



(b) Down zone



(b) Down zone

Fig. 9 Particle tracer of well(ex-2, 3,000 m<sup>3</sup>/day)

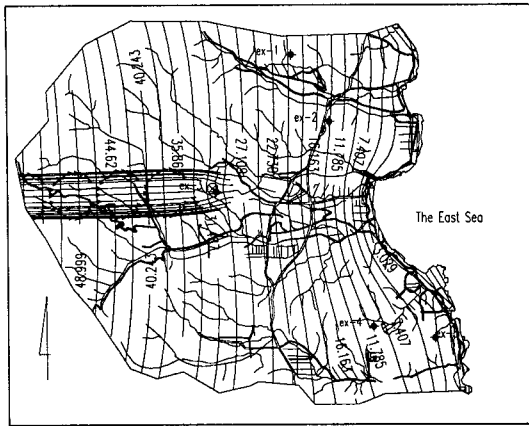
Fig. 10 Particle tracer of well(ex-3, 1,000 m<sup>3</sup>/day)

고, 지형적으로 관측점 중에서 가장 높은 지대에 위치하고 있다. Fig. 10에서 나타난 바와 같이 지하수는 전반적으로 사면을 따라 상류부에서 하류부로 안정되게 유동하고 있으며 지하수두분포가 다른 지역에 비해 비교적 높은 것으로 나타났다. 먼저, 양수량이 1,000 m<sup>3</sup>/day인 경우에 ex-3 관정 상류지역에 있어서 입자경로는 직선에 가까운 형태를 가지는 것으로 분석되었고 입자의 영향반경은 ex-2 지점과 거의 유사한 경향을 가지는 것으로 나타났다. 그리고 ex-3 지점에서 해안지역으로 근

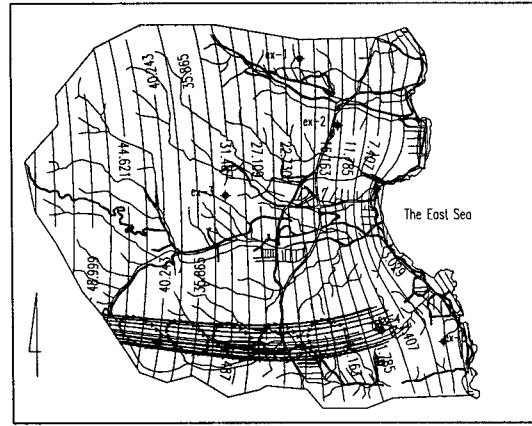
접할수록 입자의 영향반경은 다른 지점과는 상이하게 작아지는 경향을 나타내고 있다.

다음으로, Fig. 11에서 보는 바와 같이 양수량이 3,000 m<sup>3</sup>/day일 경우에 상류지역에서 ex-3 지점으로 근접할수록 입자의 영향반경은 양수량이 1,000 m<sup>3</sup>/day때 보다 커지는 경향을 나타내고 있고 ex-3 지점에서 해안지역으로 근접할수록 양수량의 증가로 인한 하류지역의 지하수두 감소로 인해 입자의 영향반경은 작아지는 경향을 나타내고 있다.

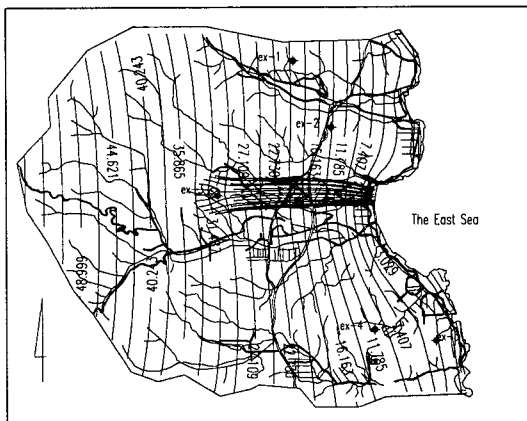




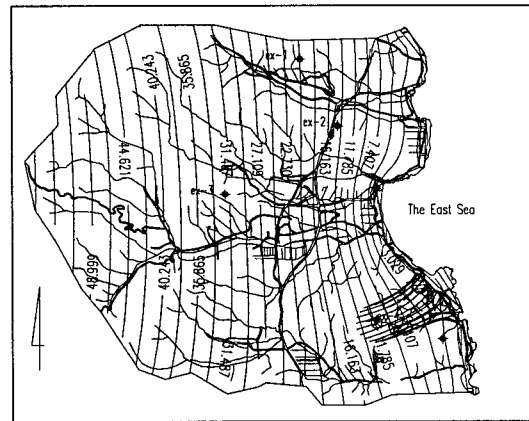
(a) Upper zone



(a) Upper zone



(b) Down zone



(b) Down zone

Fig. 11 Particle tracer of well(ex-3, 3,000 m<sup>3</sup>/day)

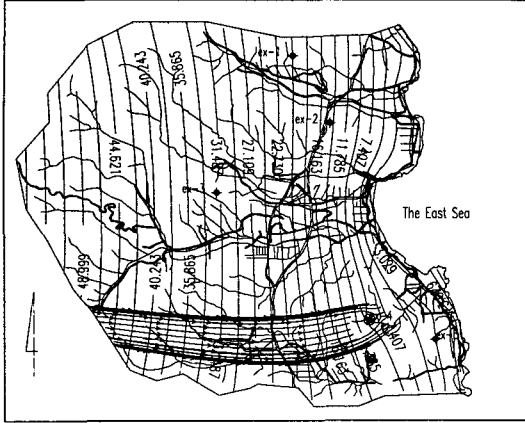
Fig. 12 Particle tracer of well(ex-4, 1,000 m<sup>3</sup>/day)

라. ex-4 관정

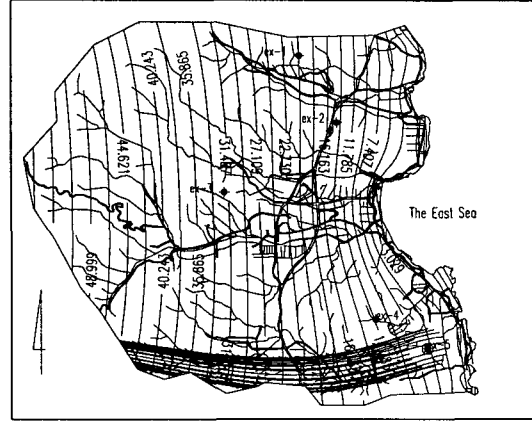
ex-4 관정은 청하면 소동지역에 위치하고 있고, 지하수는 대체적으로 상류부에서 하류부로 안정되게 유동하고 있다. Fig. 12에서 보는 바와 같이 양수량이 1,000 m<sup>3</sup>/day일 경우에 ex-4 관정 상류지역에 있어 입자경로는 다른 지점과는 달리 곡선형을 가지는 것으로 분석되었다. 이러한 이유는 ex-4 관정 상류에 안심저수지와 고현저수지가 위치하고 있어 두 저수지 사이를 정점으로 지하수 유동계가 분리되어 있는 것으로 판단된다. 상류지역

에서 ex-4 지점으로 근접할수록 입자의 영향반경은 다소 커지는 경향을 나타내고 있으며, ex-4 지점에서 해안 지역으로 근접할수록 입자의 영향반경은 다소 커지는 것으로 분석되었다.

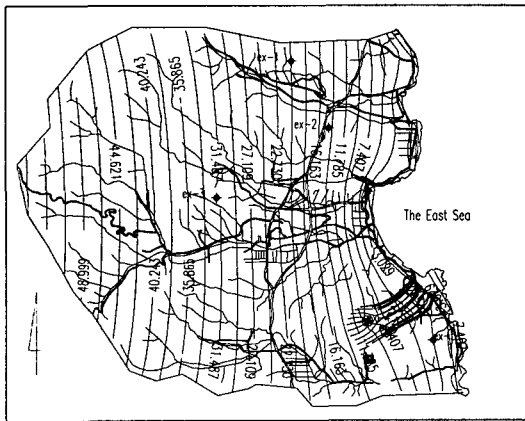
다음으로, Fig. 13에서 보는 바와 같이 양수량이 3,000 m<sup>3</sup>/day일 경우에 입자경로는 양수량 1,000 m<sup>3</sup>/day인 경우와 같은 형태를 가지는 것으로 분석되었다. 그러나 상류지역에서 ex-4 지점으로 근접할수록 입자의 영향반경은 양수량이 1,000 m<sup>3</sup>/day 때 보다 커지는 경향을 나타내고 있고 ex-4 지점에서 해안지역으로 근접할수록 양수량의 증가로 인



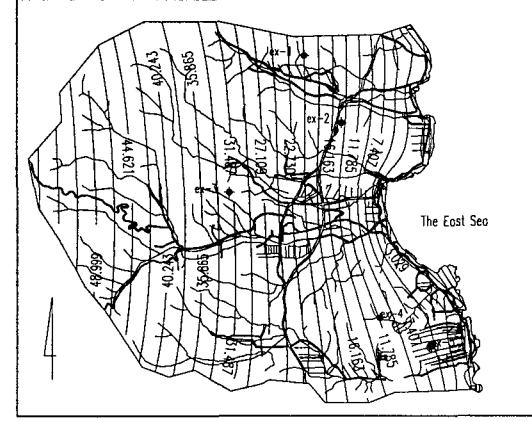
(a) Upper zone



(a) Upper zone



(b) Down zone



(b) Down zone

Fig. 13 Particle tracer of well(ex-4, 3,000 m<sup>3</sup>/day)

Fig. 14 Particle tracer of well(ex-5, 1,000 m<sup>3</sup>/day)

한 영향 때문에 입자의 영향반경은 작아지는 경향을 나타내고 있다.

마. ex-5 관정

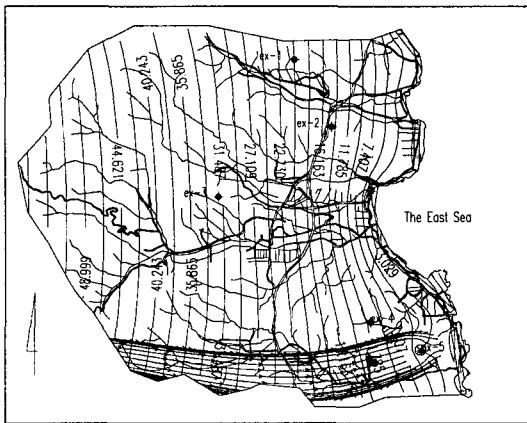
ex-5 관정은 청하면 청진리지역에 위치하고 있고, Fig. 14에서 나타난 바와 같이 상류부보다 하류부에서 완만한 수두경사를 가지면서 안정되게 유동하고 있다. 먼저, 양수량이 1,000 m<sup>3</sup>/day인 경우에 상류지역에서 ex-5 지점으로 근접할수록 입자의 영향반경은 다소 커지는 경향을 나타내고 있고 ex-5 지점에서 해안지역으로 근접할수록 입자

의 영향반경은 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 이러한 이유는 다른 지점과는 달리 해안지점까지 가장 짧은 유동거리를 가지고 있고 이 지점의 지하수두가 타 지점과 비교할 때 평균해수면과 가깝기 때문인 것으로 판단된다.

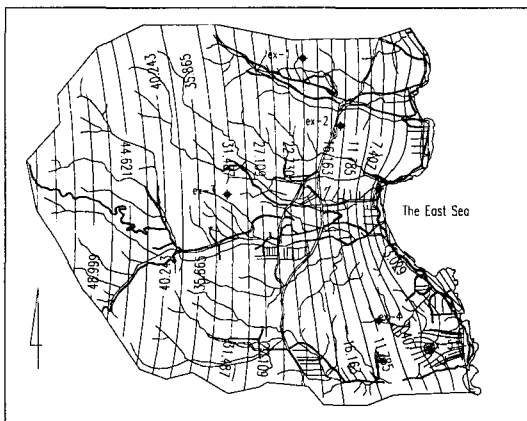
다음으로 Fig. 15는 양수량이 3,000 m<sup>3</sup>/day일 경우에 입자추적 결과로써 상류지역에서 ex-5 지점으로 근접할수록 입자의 영향반경은 양수량이 1,000 m<sup>3</sup>/day때 보다 커지는 경향을 나타내고 있고 ex-5 지점에서 해안지역으로 근접할수록 양수량의 증가로 인한 하류부 지하수두 감소로 인해 입

Table 5 Relation of observed values and computed values

No.	Well	Observation G.W.L (E.L. m)	Analysis G.W.L (E.L. m)	Relative error (%)	Remark
ex-1		21.8	25.7	17.8	Max.
ex-2		14.7	16.7	13.6	-
ex-3		33.9	36.0	6.2	-
ex-4		10.6	9.9	6.6	-
ex-5		6.2	6.5	4.8	Min.



(a) Upper zone



(b) Down zone

Fig. 15 Particle tracer of well(ex-5, 3,000 m<sup>3</sup>/day)

자의 영향반경은 작아지는 것으로 분석되었다.

### 5. 분석결과의 비교검토

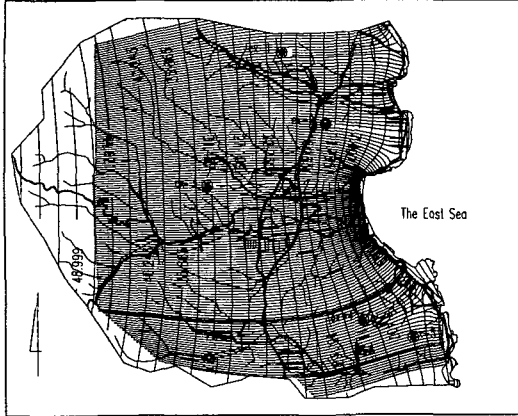
#### 가. 수두분포 및 유동경로 해석

정류상태하의 지하수수두분포 해석 결과 Table 5에 나타낸 바와 같이 관측치와 계산된 지하수두와의 상대오차는 4.8~17.8%의 범위를 나타내었다. 이러한 결과는 WINFLOW 모델에 의한 모의발생 결과치는 정류상태하에서의 지하수두 분포를 신뢰수준 내에서 잘 반영하고 있는 것으로 판단되며 남북방향으로는 일정 수두분포, 동서방향으로는 완만하고 안정된 수두경사를 이루는 것으로 분석되었다.

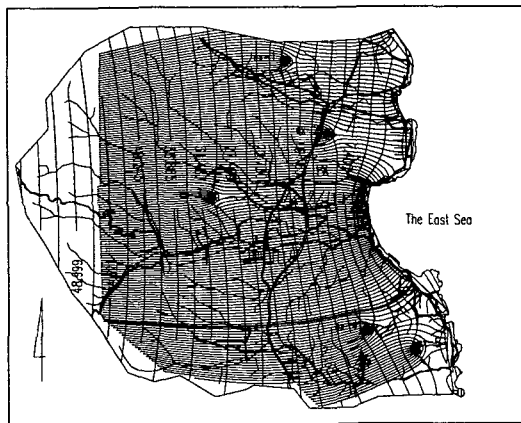
그리고 모의발생한 수두분포 결과치를 이용하여 지하수 유동경로 해석을 실시한 결과 지하수 유동은 서측의 분수계에서 해안지역으로 안정된 유동형태를 보이고 있으나 해안지역의 중심부에서는 조밀하고 급한 유동경로를 보이고 있다. 이러한 이유는 이 지역이 국지적으로 인근지역의 표고보다 약 50~80 m 정도 낮고 투수성이 양호한 지질로 구성되어 있기 때문인 것으로 판단된다.

#### 나. 입자추적 및 영향원 해석

관정별 오염원에 대한 입자추적을 위하여 관정상하류 양방향에 대한 입자추적을 실시하였다. 각 지점에 대한 입자추적은 상류의 경우에 서측 경계면에서 관측지점까지 비교적 직선에 가까운 형태를 보이고 있으며 하류부에서는 해안으로 근접할수록



(a) Pumping : 1,000 m<sup>3</sup>/day



(b) Pumping : 3,000 m<sup>3</sup>/day

Fig. 16 Groundwater level variation for well

확산되는 것으로 분석되었는데 이것은 해안으로 갈수록 평균해수면과 동일한 수두분포를 이룸으로써 유사한 수두경사계가 많이 분포되어 있기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 양수변화량에 따른 입자추적 경로를 보면 양수량이 많을 경우는 국지적으로 상류유역과 대부분의 하류유역에서 경로의 반경이 감소함을 알 수 있다. 이것은 양수량이 많을 경우에는 주변의 지하수두가 점차 감소하기 때문에 오염원의 확산이 줄어드는 것으로써 양수량과 함양량이 같아야 하는 안정적인 지하수 유동을 고려해볼 때 궁극적인 오염원 확산제어 기능은 아닌 것으로

판단된다.

양수량 변화에 따른 지하수두 영향원 변동특성은 Fig. 16에 나타낸 바와 같이 정류상태하의 초기 수두분포에서 각 관정에 1,000 m<sup>3</sup>/day을 양수할 경우 우물주변의 지하수두 및 유동이 큰 변동을 나타내고 있지 않으나 3,000 m<sup>3</sup>/day을 양수할 경우 지하수두 및 유동에 많은 영향을 주는 것으로 분석되었다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 WINFLOW 모델을 이용하여 지하수두 분포 및 유동경로 등 광역적인 지하수 유동 시스템을 해석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 모델에 의해 산정된 계산치와 관측치의 오차를 비교해 볼 때 정류상태하에서의 지하수두 분포를 신뢰도 수준에 있어 잘 반영하고 있는 것으로 판단되며 남북방향으로는 일정 수두분포, 동서방향으로는 완만하고 안정된 수두경사를 이루는 것으로 분석되었다.

2) 지하수 유동은 서측의 분수계에서 해안지역으로 안정된 유동형태를 보이고 있으나 해안지역 중심부에 해당하는 지역에서는 인근지역의 표고보다 약 50~80 m 정도 낮고 투수성이 양호한 지질로 구성되어 있어 조밀하고 급한 유동경로를 나타내었다.

3) 각 지점에 대한 입자추적은 관정 상류의 경우에 서측 경계면에서 관측지점까지 비교적 직선에 가까운 형태를 보이고 있으며 하류부에서는 해안으로 근접할수록 확산되는 것으로 분석되었다.

4) 양수량에 따른 영향원을 살펴보면 상류부보다 관정 측면과 하류부에서 더욱 크게 지하수두가 감소하는 변화경향을 나타내어 지하수유동방향 및 유속이 관정의 영향원 분포에 많은 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

본 연구에서 제시한 WINFLOW 모델을 이용하여 청하면유역에서의 지하수 유동해석을 실시한 결

과 비교적 손쉬운 모델적용과 더불어 유동시스템의 물리적 불확실성을 크게 감소시킴으로서 지하수 유동해석에 있어 양호한 결과를 얻을 수 있었으며 본 모델을 이용함에 있어 매개변수의 정확한 추정을 위해 수문관측자료, 지질구조 및 수위관측자료가 보다 많이 축적된다면 더욱 우수한 계산 결과치를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

### References

1. Davis, S. N. and Dewiest, R. J. M., 1966, *Hydrogeology*, John Wiley and Sons.
2. Freeze, R. A. and Witherspoon, P. A., 1966, Theoretical analysis of regional groundwater flow: 1. Analytical and numerical solutions to the mathematical model, *WRR*, 2.
3. G. N. Kim, 1990, Evaluation of the Groundwater Flow in Fractured Rock Masses, *KWRA*, v.23, n.2. (in Korean)
4. Gupta, S. K., Cole, C. R. and Pinder, G.F., 1984, A finite element three dimensional groundwater model for a multiaquifer system, *WRR*, 20.
5. Hubbert, M. K, 1940, The Theory of Groundwater Motion, *J. Geol.*, 48.
6. KARICO, 1967, Groundwater Examination Report. (in Korean)
7. Morris O. A. and Johnson, A. I., 1967, Summary of hydrologic and physical properties of rock and soil materials, as analyzed by the Hydrologic Laboratory of the U. S. Geological Survey.
8. Natasimhan, T. N. and Witherspoon, P. A., 1976, An integrated finite difference method for analyzing fluid flow in porous media, *WRR*, 12.
9. POSCO, 1989, Flood Prediction examination of Pohang Iron and Steel Co. (in Korean)
10. Strack, O. D. L., 1989, *Groundwater Mechanics*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
11. Wang, H. F., Anderson, M. P., 1982. *Introduction to Groundwater Modeling-Finite Difference and Finite Element methods*, W. H. Freeman and Company.
12. Y. K. Kim, 1976, A Study on the Groundwater Flow of Banyawueol Layer, *KGA.*, v.9, n.4. (in Korean)
13. Y. Y. Choi, 1998, Analysis of Groundwater Flow System., Ph. D.(Eng.) Thesis, Uni. of Yeongnam. (in Korean)