

## 지하수환경영향예측을 위한 지하수모델의 적용현황 및 문제점: 환경영향평가서와 먹는샘물환경영향조사서를 중심으로

### Current Situation and Problems in Applying Groundwater Flow Models to EIAs in Korea

김강주(Kangjoo Kim)\*

**요 약 :** 본 연구는 환경영향평가와 먹는샘물 환경영향조사에서 환경영향예측에 지하수 모델이 적용되고 있는 현황을 조사, 문제점을 파악함으로써, 향후 바람직한 모델 적용이 이루어지도록 하는 것을 목적으로 착수되었다. 본 연구는 환경영향평가서 544건과 먹는샘물환경영향조사보고서 16부를 대상으로 수행하였다. 환경영향평가 대상사업의 경우, 지하수계에 영향을 초래할 수 있는 사업이 상당수 존재하는 것으로 확인되었음에도 불구하고 지하수모델 적용은 전무하였다. 전체적으로도 다른 분야에 비하여 지하수환경에 대한 평가는 거의 무시되어지고 있는 실정이었다. 먹는샘물환경영향조사보고서의 경우는 모델이 일반적으로 적용되고는 있었으나, 그 운용에 상당한 문제가 있는 것으로 확인되었다. 주요 문제점들은 종류와 수가 극히 제한된 자료를 이용한 모델보정, 부적절한 무유량경계 설정, 강수량을 몇 배나 초과할 정도로 엄청난 지하수가 함양되는 모델 제시 등이었다. 이밖에도, 수렴되지 않은 결과를 제시하는 경우도 조사대상 15건 중 3건이나 되었다. 이와 같은 현황은 모델담당자들의 전문지식 부족이 주된 원인으로 생각되어지며, 문제해결을 위해서 현장인력에 대한 보다 체계적인 재교육프로그램이 절실한 것으로 판단된다.

**Abstract :** This work was initiated to investigate current situation and problems in applying groundwater-related models for various kinds of environmental impact assessment in Korea, and therefore, to enhance appropriate application in the future. This study was carried out with 544 and 16 documents of EIA (Environmental Impact Assessment, Law of Environmental Impact Assessment) and Mineral-Water EIA ("the environmental impact investigation for mineral water developments"; Law of Drinking Water Management), respectively. It was revealed that there were considerably many cases which may cause serious impacts on subsurface environments in EIA. However, none applied groundwater models. Generally, the influences on subsurface system were underestimated or even ignored in EIA. For Mineral-Water EIA, groundwater models were applied, in general. But, numerous and serious problems were noted: limited number of calibration parameters and parameter types, setting boundary conditions without adequate bases, recharge rates several times higher than precipitation rates, numerically unstable results, etc. Such kinds of misusages seem to be caused by modelers lacking in professional knowledges. To solve the problems revealed from this study, more systematic re-education programs are suggested.

### 서 론

최근 여러 기관에서 발표된 조사자료에 의하면 도시화 및 산업화가 이미 이루어진 많은 지역에서 지하수는 이미 자원으로서의 기능을 상당부분 상실하였고 이제는 농촌지역도 예외가 아님이 밝혀졌다. 이러한 현실은 장차 예상되는 용수부족현상을 해결해줄 수 있는 잠재적 가능성이 무한한 수자원이 고갈되어 가고 있다는 점에서 심각한 것이라고 할 수 있다. 이는 육상에 존재하는 물 중에서 빙하를 제외하면 전체의 98%이상을 차지하고 있는 사실(Nace, 1971; Morris, 1968; L'vovich, 1979)에 비추어 보면 쉽게 이해할 수 있을 것이다. 그러나, 일반적으로 오염된 지하수를 정화하는 것은 지표수에 비하여 극히 복잡하고 어려운 것으로 알려져 있다(예: Kobus *et al.*, 1996; Helmig, 1997). 따라서, 여느 환경문제와 마찬가지로 지

하수문제도 사후 대책보다는 사전에 미리 오염 및 고갈을 방지한다는 관점에서 접근하는 것이 최선이라고 할 수 있다. 이러한 맥락에서 사업시행으로 인한 환경적 악영향을 미리 예측, 예방하는 취지로 시행되고 있는 환경영향평가제도는 지하수 오염 및 고갈 문제를 사전에 미리 방지할 수 있는 장치라는 점에서 바람직한 것이라고 할 수 있다.

본 연구는 제반의 환경영향조사에서 지하수 환경영향예측을 위하여 사용하고 있는 지하수 모델링 프로그램의 사용 현황을 조사, 그 문제점을 파악하고, 이에 대한 해결방안을 마련함으로써 바람직한 지하수환경영향평가제도의 정착을 꾀한다는 취지에서 수행되었다. 본 연구는 환경영향평가서 544부와 먹는샘물환경영향조사보고서 16부에 적용되고 있는 지하수모델의 적용현황을 근간으로 이루어졌다. 지하수 환경영향조사 관련 보고서에서 지하수 모델이 적용되고 있는 사례들을 분석하여 본 결과, 환경영향평가에는 지하수 모델 적용사례가 전무하였고 먹는샘물 환경영향조사에서는 거의 모든 보고서가 지하수

\* 군산대학교 환경공학과(Dept. of Environmental Engineering, Kunsan National University, San 68, Miryong-Dong, Kunsan, Chonbuk, Korea)

영향조사에 MODFLOW(McDonald and Harbaugh, 1988)라는 지하수유동모델을 적용하고 있었다. 이와 같은 현상으로 인하여, 본 연구에서는 사업내용분석에는 환경영향평가서를, 그리고 모델적용 사례분석에는 먹는샘물조사서를 대상으로 하였으며, 지하수모델로는 현재 가장 많이 사용되는 지하수유동 코드인 MODFLOW로 만들어진 모델들을 중심으로 논의하였다. 오염물질 이동모델은 조사의 표본으로 삼기에는 그 적용사례가 적어 본 연구에서는 제외하였다.

본 논문에 제시된 사례는 주로 본안 보고서(또는, 평가서)만을 기준으로 한 것이며, 그 내용은 본안 보고서에 대한 보완이나 재협의를 통하여 바뀌었을 수 있음을 독자들은 인지해 주시기 바란다. 또한, 해당업체들의 발전을 고려하여 본 논문에서 제시된 사례의 출처는 모두 생략하기로 한다.

### 지하수환경영향조사에서 모델의 적용현황

현재 우리나라에서 사업시행이 지하수계에 초래할 영향을 조사하도록 하는 주요 근거 법규들에는 환경영향평가법, 지하수법, 먹는물관리법 등이 있다. 이들 법규들은 사업규모와 목적에 따라 적용이 다르지만, 공히 사업수행이 지하수계에 초래할 환경적 악영향을 미리 예측, 저감방안을 제시하도록 하고 있다. 환경영향평가법은 환경영향평가서, 먹는물관리법은 먹는샘물 환경영향조사보고서, 그리고 지하수법은 지하수영향조사서에 사업시행이 지하수환경에 미치는 영향을 예측하고 저감방안을 마련하여 제시하게 하고 있다. 법규별 지하수 영향조사 현황은 다음과 같다.

#### 환경영향평가법

환경영향평가법은 사업이 환경적으로 건전하고 지속 가능한 개발이 되도록 함으로써, 쾌적한 환경을 유지·조성함을 목적으로 제정되었다. 동 법은 평가 대상사업을 명시하고 있고 이들에 대한 평가의 범위는 대통령령으로 정하고 있다. 평가 대상사업들은 사업시행 이전에 사업시행에 따른 제반 환경영향을 예측, 저감방안을 마련하여 환경부의 검토·협의를 거친 후에야 사업승인을 받을 수 있다. 환경영향평가는 사업수행에 따른 제반의 환경적 영향을 조사하는 것이므로 지하수환경영향도 그 대상에 포함된다고 할 수 있다.

본 연구를 위하여 환경영향평가법 상의 공식 환경영향평가서 검토기관인 한국환경정책·평가연구원(Korea Institute of Environment)에 약 1년 동안(1997. 9. 8.-1998. 8. 31) 접수된 평가서 총 544건을 조사하였다. 이들을 비교적 유사성이 있는 11가지 사업으로 분류하여 본 결과, 도로·철도건설사업(Road & Railroad Construction)이 전체의 41.5%를 차지하여 가장 많았으며, 나머지는 도시개발사업(17.1%; Urban Development), 체육시설·관광단지·산지개발사업(11.8%; Athletic Facility, Resort Area, Forest Development), 항만건설·해양개발(8.3%; Port Construction, Ocean Development), 공업단지·산업입지(7.9%; Industrial Area), 환경기초시설(6.4%; Landfill, Water Treatment & Waste Incineration Plants), 에너지개발(3.5%; Energy Development), 국방시설(1.5%; Military Facility), 하천

이용 및 수자원개발(0.7%; Water Resources Development and Stream Utilization), 공항건설(0.7%; Airport Construction), 광산개발(0.6%; Mining) 순이었다(Figure 1, Table 1).

이들 중 본안 평가서 182건에 대하여 지하수환경에 영향이 예상되는 사업들을 조사하여 보았다. 지하수환경에 영향을 초래하게 될 사업내용은 다양하고 같은 사업이라 하더라도 지역과 사업규모에 따른 차이가 있겠지만, 본 조사에서는 지하수 개발, 폐기물 매립장 건설, 500 미터 이상의 터널 건설이 수반되는 사업만을 지하수환경에 영향이 예상되는 사업으로 규정하였다(Table 1). 지하수개발은 단지 15건의 사업에서 계획하고 있는 것으로 조사되었다. 그러나, 많은 본안 보고서가 용수 확보계획을 제시하지 않았으나, 유사 사업에서의 용수이용현황을 고려하여 보면, 실제 지하수개발이 수반되는 사업은 조사된 것의 2-3배에 이를 것으로 예상된다. 지하수개발을 밝힌 사업들의 평균개발계획량은 840 m<sup>3</sup>/day이었다. 500미터 이상의 터널설치가 계획된 사업은 총 21건이었으며, 이는 전체 도로·철도 사업의 27%에 해당된다. 지하수오염에 특히 지대한 영향이 예측되는 매립장건설이 주 사업내용인 경우는 본안 평가서에는 전무하였고, 단지 2건만이 재협의 평가서의 본안과 보완으로 접수되었다. 사업에 폐기물 매립장건설이 수반되는 경우가 총 4건 있었다.

그러나, 모델을 이용하여 지하수환경에 미치는 영향을 예측한 평가서가 총 조사대상 544건 중 하나도 없었음은 물론이고, 전체적으로도 지하수 환경에 초래될 영향예측은 다른 평가항목에 비하여 무시되고 있는 실정이었다.

#### 먹는물 관리법

먹는샘물 환경영향조사보고서는 비교적 조사방법이 구체적이고 지하수 개발로 인한 제반의 환경적 측면이 고려되고는 있으나, 적용 대상이 먹는 샘물 제조업을 목적으로 지하수를 개발하는 경우에만 한정되어 다른 목적을 가지고 지하수를 개발하는 경우에는 적용되지 않는다.

전주지방환경관리청, 원주지방환경관리청, 낙동강환경관리청에 접수된 지하수영향조사서 16건(보완, 초안 보고서 제외)을 조사 분석하여 본 결과 단 1건을 제외한 모든 조사서가 지하수

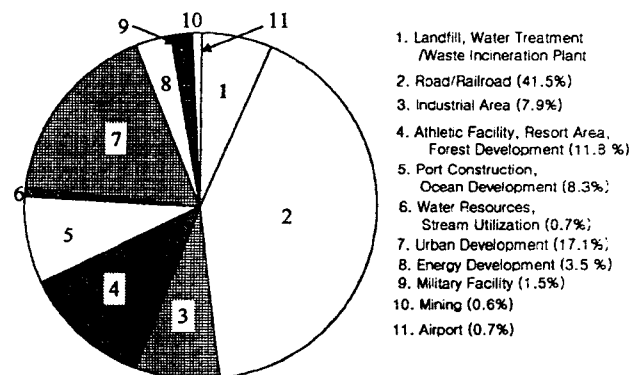


Figure 1. Project types of EIAs based on the documents submitted to Korea Environmental Institute for about a year during Sep. 8, 1997 to Aug. 31, 1998.

**Table 1.** Survey results for the EIA documents submitted to Korea Environment Institute from Sep. 8th, 1997 to Aug. 31st, 1998.

Development type	Total Reports	Main Reports	No. of cases among the main EIA reports			
			Showing water supply plan	Groundwater development	Landfill construction	constructing tunnels longer than 500 m
1) landfill, water treatment/waste incineration plants	35	13	5	3	1	0
2) road, railroad	226	79	1	0	0	21
3) industrial complex	43	10	6	3	1	0
4) athletic facility, resort area, forest development	64	19	16	7	1	0
5) ports & ocean development	45	18	0	0	0	0
6) water resources, stream utilization	4	4	0	0	0	0
7) urban	93	29	27	2	1	0
8) energy	19	5	0	0	0	0
9) military facility	8	3	0	0	0	0
10) mining	3	1	0	0	0	0
11) airports	4	1	0	0	0	0
total	544	182	57	15	4	21

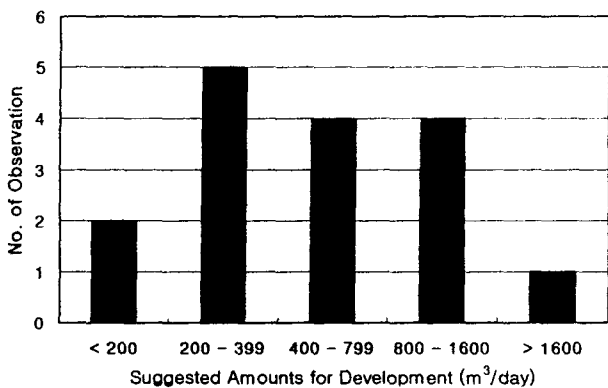
모델을 사용하여 지하수환경영향을 예측하고 있었다. 이들 사업들의 평균 개발 예상량은 654 m<sup>3</sup>/day으로 환경영향평가에서의 평균개발량(840 m<sup>3</sup>/day) 보다 오히려 작은 수준이었다(Figure 2). 이들 보고서들은 모두 USGS에서 개발한 MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1988; Harbaugh and McDonald, 1996; 이하 출처 생략)라는 지하수 유동모델을 이용하고 있었다.

**지하수법**

지하수법은 동 법 제 7조 제 1항과 제2항의 규정에 해당하는 지하수 개발에 대하여는 지하수영향조사를 실시하여야 하는 것으로 규정하고 있다. 그러나, 이 경우는 심사와 허가의 주체가 모두 시·도지사이고, 조사의 항목 및 방법 또한 각 시도의 조례로 규정되기 때문에 각 지방자치단체마다 다르게 적용될 수도 있어 지하수법에 근거한 지하수영향조사는 본 조사 대상에서 제외하였다.

**지하수모델에서의 문제점**

지하수모델이 적용된 먹는샘물 영향조사보고서를 분석하여 본 결과, 모델링의 전반에서 문제점이 발견되고 있었으며, 모



**Figure 2.** Distribution of the suggested pumping rates in the 16 Mineral Water EIA documents. The average was 654.5 m<sup>3</sup>/day.

델을 설계하고 보정하는 부분에서는 그 문제가 심각한 것으로 드러났다. 다음은 주로 발견되고 있는 문제 사례들을 정리한 것이다.

**프로그램 선정**

조사대상의 대부분이 파쇄대수층에서 지하수를 개발하는 경우라고 할 수 있었으나 연속적 모델인 MODFLOW를 사용하고 있었다. 이러한 문제는 우리나라의 지하수가 주로 암반내에 발달한 파쇄대를 채우고 있는 형태로 나타나기 때문에 자주 직면하게 되는 문제이다. 맹목적으로 연속적 모델을 현장에 적용하는 것은 무리가 있겠지만, 연구목적과 현실적인 문제에 따라서는 파쇄대수층에 대하여 MODFLOW와 같은 연속적 모델을 적용하는 것도 용인될 수 있다. 더구나, 정보가 완벽하지 않은 경우에는 파쇄대수층에 대하여 비연속(discrete) 모델을 이용하였다하더라도 연속적(continuum) 모델을 이용한 경우에 비하여 정확한 모델결과를 기대하기는 어려운 것이 아직은 현실이다. 따라서, 다공질대수층이나 또는 파쇄대수층이나라는 문제가 모델선정의 중요한 기준이 될 수는 있지만, 그것만으로는 파쇄대수층에 연속적 모델을 적용하는 것을 잘못되었다고 단언 할 수는 없다. 중요한 것은 모델의 목적, 요구되는 정확도, 얻을 수 있는 현장 정보 및 현장상황 등이 종합적으로 고려되어 모델이 선택되었느냐 하는 것이다. 이와 같은 이유로 인하여 먹는샘물영향조사 사례에서 프로그램 선정에 대한 가부 판단은 논외로 하였다.

**모델 대상지역의 크기**

주로 나타나고 있는 문제 중의 하나는 대상지역을 너무 크거나 작게 설정하는 경우이었다(Table 2). 이중에 지하수 개발로 인한 영향이 없을 것으로 생각되는 지역까지 불필요할 정도로 크게 모델대상지역을 설정하는 사례가 빈번하였다. 이러한 사례는 조사대상 15건의 보고서 중 7건에서 발견되었는데, 이들 중 1건만이 그에 대한 이유를 제시하였다. 물론, 경계조건 설정이 어려운 지역에서는 모델대상지역을 아주 크게 설정함으로써 불확실한 경계조건으로부터 모델 결과가 영향을 받

지 않도록 할 수도 있다(예; Ward *et al.*, 1987; Townley and Wilson, 1980). 그러나, 모델대상지역이 커지면 느린 계산시간, 자료 입력의 어려움, 지나치게 큰 출력 파일 등으로 인하여 모델링 작업은 그 만큼 힘들어진다. 따라서, 모델대상지역의 설정은 모델의 결과가 경계에 직접 영향을 받지 않는 범위에서 최소한의 크기로 설정하는 것이 바람직할 것이다.

Figure 3의 경우는 대상지역을 너무 작게 설정함으로써 모델 결과가 영향을 받고 있는 사례이다. 이 경우는 사업지역이 평야지역이어서 지하수 분수계로 작용할 수 있을 정도의 높은 능선이 인근에 존재하지 않아 주변과 채 30미터의 높이 차이도 나지 않는 바로 인근의 낮은 능선을 모델의 경계(무유량경계)로 설정하고 있었다. 이로 인하여, 장기 양수시에 수위강하대가 무유량경계와 부딪치게 되는 모델결과를 보였다. 수위 강하대가 무유량경계와 부딪치게되면 경계에서의 지하수수위강하는 실제 값의 두배로 나타나게 되는 것은 이미 잘 알려진 사실이다(Stallman, 1952; Ferris, 1959). 따라서, 이 사업의 경우는 대상지역을 보다 넓혔어야 했다.

### 대수층의 유형

대수층은 지하수면의 존재 유무에 따라 자유면대수층과 피압대수층으로 구분되는 데, 지하수의 유동방정식과 입력변수가 대수층의 유형에 따라 차이가 있으므로 그 선택에 신중을 기하여야 한다. 사례분석결과 12건은 대수층의 수를 1개로 설정한 2차원 모델이었으며, 3건의 보고서에서는 대수층의 수가 2개 이상인 3차원 모델이었다(Table 2). 최상부층을 피압대수층으로 설정한 경우는 4건의 보고서에서 발견되었다. MODFLOW에서 피압대수층은 자유면 대수층의 상부에 올 수 없는 데도(Harbaugh and McDonald, 1996) 자유면대수층이 피압대수층의 하부에 존재하도록 설정하는 경우도 있었다.

확실한 정보가 없다면 최상부 층을 자유면 대수층으로 하는 모델을 만드는 것이 보통이다. 물론, 확보된 정보, 모델의 목적,

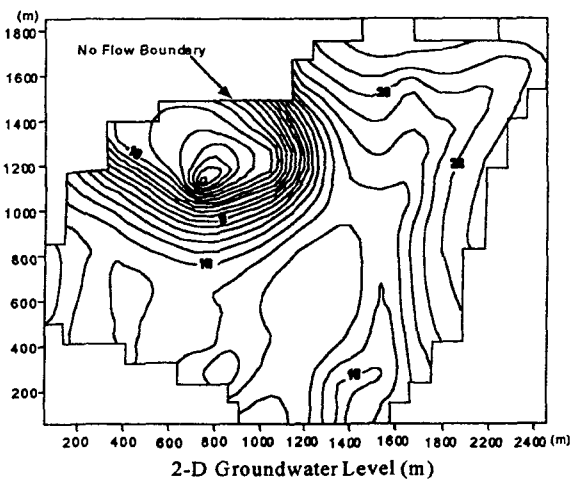


Figure 3. Simulated head values from a model. The model results show an enhanced drawdown near the model boundary by pumping. This was caused by the bounded aquifer effect (Stallman, 1952; Ferris, 1959). The figure was redrawn after the original version for clarity.

Table 2. Survey for model designs, boundary conditions and their misusages among the 15 Mineral-Water EIAs which applied groundwater models. Numbers in parentheses indicates the number of documents which applied respective boundaries

Model Domain		No. of Cases	
Domain Size	Unnecessarily big*	7	
	Too small	2	
Dimension	2-D*	12	
	3-D*	3	
Type of the Uppermost Layer	Confined*	4	
	Unconfined*	11	
Boundary Condition			
Neuman Type	No Flow (15)	Unparallel to the approximated groundwater divide or flow lines	8
	RCH (15)	-	-
	WEL (15)	-	-
Dirichlet Type	Const. Head (2)	-	-
Cauchy Type	GHB (11)	Set at higher elevation*	10
		Set at lower elevation*	1
		Cause serious recharge increases (>20%)	7
		Cause strange flow lines	7
RIV (15)	Set the same hydraulic conductivity values for bottom sediments as those of nearby aquifers	10**	
	Simulated as considerable losing streams	4	
DRN (1)	Inappropriate but not serious	1	

\*: Not misusages in itself.

\*\* : The cases of insufficient information for decision were excluded.

편의에 의하여 모델결과가 크게 영향을 받지 않는 범위에서 자유면대수층을 피압대수층으로 가정해볼 수도 있고, 하부의 피압대수층만을 고려할 수도 있다. 그러나, 1개의 피압대수층만을 설정한 모 경우는 적절하여 보이지는 않았다. 그 사업지역은 농경평야지역의 중심에 위치하고 그에 바로 인접하여 생활용수와 농업용수를 전적으로 지하수에 의존하고 있는 인가들이 분포하고 있었다. 사업자는 그들이 개발하려는 지하수는 주민들이 사용하고 있는 천층 지하수와는 단절되어 있는 심층 지하수이기 때문에 인근에 미치는 영향이 미미하다고 주장하였다. 이를 뒷받침하기 위하여 보고서는 대수층 유형이 피압대수층인 모델을 제시하였으나 1개 층만을 설정함으로써 제시된 모델은 천부와 심부 사이의 지하수 상호작용을 보여주지 못하였다. 더구나, 그러한 주장을 하면서도 제시된 모델에서는 지하수가 지표로부터 유래되는 것으로 모의하여 논리적 일관성도 상실하고 있었다.

### 경계조건

경계조건은 모델대상지역 경계에서의 종속변수(수두), 또는

종속변수의 미분값(유량)을 수학적으로 정하여주는 것으로서, 모델 설계에서 가장 많은 오차를 야기시키는 것으로 알려져 있다(Franke *et al.*, 1987). 본 조사에서도 경계조건은 가장 많은 문제점을 보이는 부분이었다. 조사대상에서 가장 흔하게 사용된 경계조건의 유형은 유량경계(무유량 경계 15건, RCH 팩키지와 WEL 팩키지 각 15건), 수두종속형경계(RIV 팩키지 15건, GHB 팩키지 11건, DRN 팩키지 1건)이었으며, 수두경계가 사용된 사례는 단 2건이었다(Table 2). 위에 기술된 팩키지에 대한 설명은 McDonald와 Harbaugh(1988)나 Anderson과 Woessner (1990)를 참조하기 바란다. 경계조건적용에서의 문제점은 다음과 같다.

**유량경계(Neuman Type)** - 먹는샘물 영향조사서 상에 적용된 경계조건을 보면, 모든 모델에서 무유량경계 조건이 적용되고 있었으나, 단지 4 건만이 무유량경계를 적절히 사용하였다고 할 수 있었다(Table 2).

가장 빈번하게 보이는 부당한 사례는 무유량 경계와는 상관이 없는 부분을 모델작성자가 임의로 설정하는 경우이었다. 무유량경계를 사용하기에 적절한 곳은 지하수 분수계(groundwater divide)나 지하수의 흐름과 평행한 부분 등임은 잘 알려진 사실이다. Figure 4는 이러한 예를 잘 보여주는 것으로 영역을 조금만 넓히면 지하수 분수령에 보다 가깝다고 할 수 있는 능선부분을 경계로 설정할 수 있었는데도 임의의 부분을 무유량 경계로 설정하고 있다. 정도의 차이는 있지만 이와 비슷한 사례는 총 8건의 보고서에서 발견되었다.

**수두경계(Dirichlet Type)** - 등수두 경계를 사용한 경우는 총 2 건으로 다른 경계조건에 비하여 그 적용 횟수가 적었다. 이들 2건의 보고서가 등수두 경계로 설정한 곳은 모두 하천이었으며 이들의 적용에는 별다른 문제점이 발견되지는 않았다.

**혼합형 경계(Cauchy Type)** - 산의 능선, 또는 모델지역의 고지대에 해당되는 부분에 대하여 GHB 팩키지를 이용하는 경우가 많이 발견되었으나 이는 대부분의 경우에서 적지 않은 문제점을 야기하고 있었다. 이와 같은 설정으로 인하여 흔히 발

견되는 오류 중 하나는 현실성이 없을 정도로 많은 지하수 함량이 일어나는 것이었고, 다른 하나는 이로 인하여 지하수의 흐름이 예측할 수 있는 실제상황에 배치되는 경우이었다.

Figure 5는 전자의 경우를 보여주는 대표적인 사례이다. 이 경우는 사업지역내의 지하수 함양률을 강우량( $3.68 \times 10^5$  m/day)의 10.2% 정도( $3.75 \times 10^4$  m/day)로 보고 이 정도의 양이 대수층에 함양되도록 RCH 팩키지를 통하여 입력하였다. 그러나, 그 보고서는 타당한 근거 없이 Figure 5a와 같이 산의 능선 부분을 GHB로 설정함으로써 능선부분이 추가적인 지하수 기원으로 작용되도록 하였다. 이러한 GHB로 인하여 제시된 물수지 결과는 RCH 팩키지에 의하여 함양되는 지하수보다 무려 26배나 많은 양이 추가적으로 유입되도록 하는 결과를 보여주고 있다(Figure 5b). 이는 강우량의 약 3배나 되는 엄청난 양의 물이 능선부분에서 함양되고 있는 것을 의미한다. 이러한 사례는 정도의 차이는 있지만, GHB 팩키지를 사용한 상당수의 보고서에서 나타나고 있었다.

GHB를 잘못 설정함으로 인하여 국부적으로는 지하수가 산 정상부를 향하여 흐르는 경우도 발견되었다. 이는 고지대에 설정된 GHB 격자에 입력한 등수두 값보다 주변의 활동격자의 수두 값이 커짐으로써 GHB가 설정된 부분이 지하수가 함양되는 곳이 아닌 지하수의 소멸부분(sink)으로 작용하여 발생한 현상이다. 그러나, 이와 같은 현상은 국지적인 것이어서 모델결과 전체에 많은 영향을 주었을 것으로는 생각되지 않았다.

이와 같이 고지대에 GHB를 설정하는 이유는 지하수의 함양이 고지대에서 주로 일어나게 함으로써, 고지대의 지하수위를 저지대보다 상대적으로 높게 만들기 위한 것으로 생각되어진다. 그러나, 이유가 실제로 그와 같았다면 그와 같은 GHB 설정은 오히려 설득력이 없다. 고지대의 수위는 이와 같은 방법보다는 지질매체의 수리전도도와 지하수함양량 등을 지역적으로 달리하는 방법이 오히려 나았을 것이다. 물론, 조사대상보고서 중에는 그러한 GHB 설정이 결과에 많은 영향을 주지는 않은 것으로 생각되는 경우도 있었고, 이와는 달리 위치에 따라 지하수의 함양율이 다르게 되도록 RCH팩키지를 적용한 사례도 있었다. GHB는 원래 어떤 수체(constant head source: water body)와 그에 영향을 받는 활동격자사이에서의 상호작용을 묘사하기 위하여 개발된 팩키지이다. 따라서 GHB를 사용하기 위해서는 이들을 연결하는 통로에 해당되는 부분의 수리전도도와 이들간의 접촉면적, 그리고 통로의 길이(두께), 수체에서의 수두에 대한 정보가 있어야 한다. 그러므로, 등수두원(constant head source)과는 상관이 없는 지역에 설정하기 위하여는 상당히 신중하여야 한다.

RIV 팩키지도 GHB에서처럼 하천 또는 계곡과 같은 수체와 대수층간의 상호작용을 묘사할수 있는 것이라는 점에서 GHB 팩키지와는 근본적으로 같다고 할 수 있다. 따라서, 이 역시 접촉면적, 격자내에서 하천의 길이, 그리고 하상 퇴적물의 두께, 수리전도도에 대한 정보가 필요하다. 모든 보고서에서는 하천과 계곡을 RIV 팩키지를 이용하여 묘사하고 있었다. 그러나, 어느 보고서에서도 적절한 전도도(conductance) 값이 사용된 경우는 없었다(Table 2). 대부분의 보고서에 사용된 전도도 값은

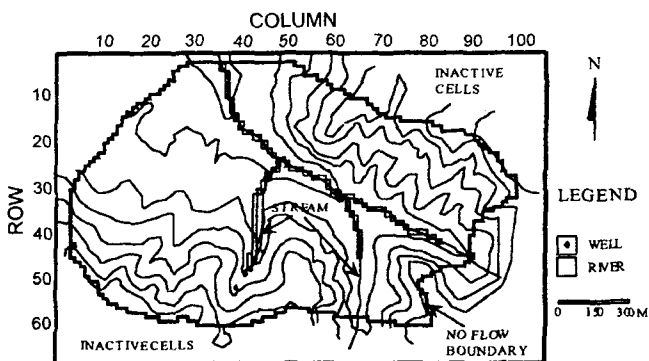
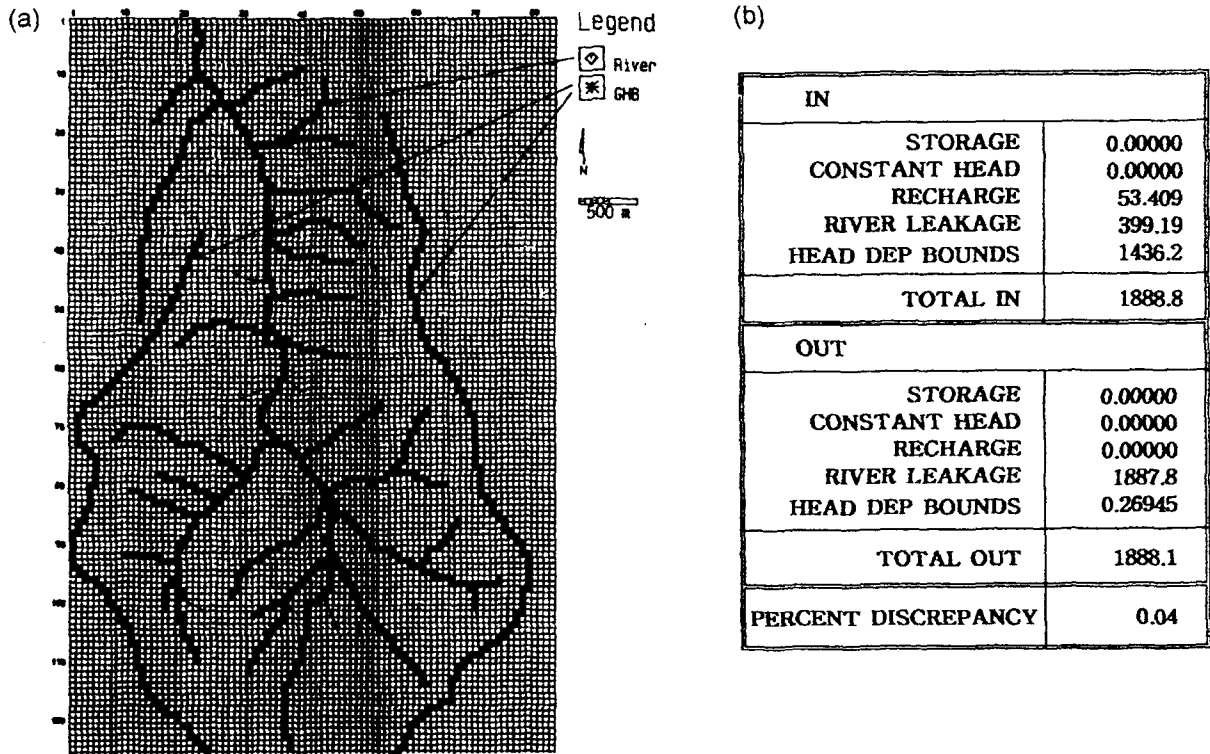


Figure 4. A model with a no-flow boundary that is poorly related to groundwater divides or flow lines. See the no-flow boundary is not parallel to the watershed boundary. Also note that the wells are closely located to the RIV cells. The pre-pumping head values of those wells will be determined by the RIV cells in large part. Therefore, using heads from those wells are not good for model calibration. The figure was redrawn after the original version.



**Figure 5.** A model that derived a tremendous recharge due to an inappropriate setting of general head boundary (GHB). (a) A model grid and boundary conditions. (b) Water budget calculation results. The model applied GHB packages along mountain ranges as shown in the figure. However, these GHB cells caused an additional recharge that is even greater than precipitation by nearly 3 times. See water input from the head dependent boundaries (= GHB cells) which is 27 times higher than that from RCH. The recharge derived from RCH package was equivalent to 10.3 % of precipitation (= 1.344 m/yr).

모두 하상 퇴적물의 수리전도도가 인근의 대수층의 값과 같은 것으로 간주하고 있었으며 하상퇴적물의 두께 또한 임의로 설정되고 있었다. RIV가 적용된 하천들은 보통은 소규모 계곡이었고 큰 하천이었다 하더라도 유속이 비교적 빠른 지역이어서 바닥 퇴적물들은 주로 모래나 자갈과 같이 수리전도도가 매우 높은 것들일 것으로 예상해볼 수 있었다. 그러므로, 주변대수층의 낮은 수리전도도와 같다는 가정은 이러한 하상퇴적물의 높은 수리전도도가 무시되어지는 것을 의미한다. 또한 일반적인 하천은 지하수 유입으로 유량이 증가하게 되는 이득하천(gaining stream)이라고 볼 수 있으나, RIV가 이용된 많은 모델이 하천을 상당구간에서 손실하천(losing stream)으로 묘사하고 있는 것도 실제와는 거리가 있는 것으로 지적되었다.

#### 입력 변수(Input Parameters)

지하수 모델의 입력자료는 되도록 현장자료를 이용하는 것이 모델결과와 신뢰도를 높이는 방법이라고 할 수 있다. 조사 대상의 모든 보고서도 수리전도도와 저유계수(storage coefficient)를 현장시험을 통하여 얻으려고 시도하고 있었다는 점에서는 바람직하였다. 그러나, 시험정들이 모두 좁은 지역에 밀집되어 있어 이들로부터 얻은 변수 값들은 모델지역을 대표하는 값이라고 보기는 어려웠다(Table 3).

수리전도도, 저유계수(hydraulic conductivity, storage coef-

icient) - 많은 사례에서 지질특성을 무시하는 모델예측이 이루어졌다. 제시된 지질도상으로는 여러가지 지층이 존재하고 이들 간의 수리적 특성, 특히 수리전도도의 차이가 클 것으로 예상되는 데도, 보통은 이들의 지질특성이 균질한 것으로 가정하고 있었다. 비균질한 것으로 자료를 입력하였다하더라도 지질과는 무관한 것이 대부분이었다. 이와 같은 실정은 각 지층에 대한 지질 특성자료를 충분히 확보하지 못한 상태에서 모델링 작업을 수행하는 것이 주된 이유로 판단된다.

수리전도도값을 입력하는 데에서도 문제점이 발견되었는데, 어느 경우에는 현장양수시험으로 측정된 투수량계수(transmissivity)를 그대로 수리전도도 값으로 입력하기도 하였다. 투수량계수는 수리전도도에 대수층의 포화두께(보통, 우물에서의 포화두께)를 곱한 것으로 서로 다른 개념의 값이다. 조사대상에서의 포화두께는 보통 100미터 이상이었던기 때문에, 이로부터 얻은 투수량계수를 수리전도도와 혼동할 경우는 실제의 100배가 넘는 값을 모델에 입력한 것이 된다.

이밖에도, 현장양수시험에서 측정된 값들(투수량계수, 저유계수)을 그대로 산술평균(arithmetic mean)하여 이들 값을 모델에 입력하는 경우는 거의 모든 보고서에서 발견되었다. 이러한 것은 두 가지 점에서 잘못된 것인데, 첫째는 자연상에서 관찰되는 수리전도도 값은 보통 대수적 분포(lognormal)를 이루고 있다는 것이며(Domenico and Schwartz, 1990), 둘째로는 이전에

언급한 것처럼 투수량계수는 수리전도도에 대수층의 두께를 곱한 값이라는 점이다. 따라서, 대수층에 대한 평균 수리전도도를 얻기 위해서는 현장에서 얻어진 투수량계수를 대수층 두께로 나누어 수리전도도를 구하고 이것을 기하평균(geometric mean)하여야 한다.

저유계수의 경우에서도 상황은 비슷하였다.

**지하수 함양율(Recharge Rate)** - 지하수 함양율도 실측을 하는 것이 가장 바람직할 것이나, 아직까지는 확실한 실측방법이 개발되어 있지 않으며, 있다 하더라도 실측비용과 시간이 많이 소요된다는 점에서 그리 현실적이지는 못하다. 따라서, 지하수 함양율은 보통 강우량의 일정비율을 설정하거나, SCS-CN법(Soil Conservation Service, 1969)과 Thornthwaite법(Thornthwaite, 1948; Thornthwaite and Mather, 1955)을 이용, 각각 유출량과 잠재증발산량을 계산한 다음 물수지를 맞추는 방법이 널리 이용되고 있다. 먹은샘물영향조사에서는 위 방법을 비롯한 여러 방법으로 함양율을 계산하여 비교·제시하는 경우가 많았다. 경우에 따라서는 비논리적인 물수지법을 이용하여 너무 높은 수치를 유도해 내기도 하거나, 논리상의 문제가 있다고 할 수 있는 방법들(예, 지하수함양율 = (연중최고수위 - 연중최저수위) × 공극율)도 널리 이용되고 있었다. 보고서에 제시된 함양율 계산결과는 계산방법에 상관없이 대부분 강우량의 10~25% 수준을 보이고 있었다. 지하수 함양율의 분포를 정확히 아는 것은 불가능하여 함양율은 보통 모델보정시 조율변수(tuning parameter)로 사용되기 때문에 위의 계산결과에 대한 가부판단은 논외로 할 것이나, 논리적 근거가 없는 방법에 의한 함양율 계산은 지양하는 것이 바람직한 것으로 지적되었다. 또한, 그렇게 계산된 결과와는 다른 값을 모델에 입력할 때에는 그에 대한 타당한 논의가 있어야 할 것이다. 그러나, 적지 않은 사례에서 계산된 값과는 상당한 차이가 있는 값을 아무런 설명 없이 모델에 사용하고 있었는데, 이 역시 시정되어야 할 것으로 지적되었다(Table 3).

**모델 보정**

모델에 사용된 변수값과 가정 및 조건들은 본질적으로 상당한 불확실성을 내포할 수밖에 없기 때문에, 모델결과가 현장에서 관찰한 값들을 보여줄 수 있도록 모델을 보정해주어야 한다. 모델 보정자료로 이용될 수 있는 것들에는 지하수 수위자료를 비롯하여 유량(flow rate), 유적(flow line), 동수경사(hydraulic gradient) 등과 같은 물리적 자료 뿐 아니라 농도와 같은 화학적 자료 등도 이용될 수 있다. Kim외(1999)는 하나의 모델을 보정하는데 여러 종류의 보정자료를 이용하면 모델 결과의 신뢰도가 더욱 높아짐을 보이기도 하였다. 그러나, 자료수집의 어려움 때문에 주로 수두자료만을 이용하고 있는 것이 일반적인 현실이다. 모델 보정에서 주로 발견되는 문제점들은 다음과 같으며, 이들도 Table 3에 정리되어 있다.

- 1) 수두를 측정할 수 있는 정호의 숫자는 평균 8.7개로 많은 것도 아니었지만, 단지 평균 4.4개 수두자료만을 보정에 이용하고 있었다.
- 2) 지하수의 순간수두(snapshot head)뿐 아니라, 양수시 및 계절별 지하수위 변화 등과 같은 부정류수두(transient head)

자료를 확보하고 있었음에도 불구하고 보정에는 이용하지 않고 있었다. 2건의 보고서에서 부정류수위와 모델결과를 비교하고는 있었지만 이들 또한 연속적인 비교는 아니고 어느 한 시점에서의 비교였다.

- 3) 모든 보고서가 보정결과를 평균오차(residual mean, mean error)라는 적절하지 못한 값으로 제시하고 있었다. 평균오차는 모든 오차를 그대로 더하여 평균하는 것이다. 그러나, 이 경우는 음과 양의 값이 서로 상쇄되기 때문에 옳은 오차 계산법이라고 볼 수 없다. 이러한 이유로 Anderson과 Woessner(1992)는 평균오차보다는 RMS 오차(root mean squared error)를 바람직한 오차계산법으로 제안하고 있다.
- 4) 보고서에 제시되었던 보정결과를 RMS오차로 다시 계산하여 본 결과 평균 2.9미터 정도의 오차를 보였다. 그 정도의 오차는 보정대상의 수효가 너무 적었을 뿐더러, 보정에 사용된 수두 값들이 대부분 RIV 팩키지로 표시되는 계곡 근처에 존재하는 관측정에서 얻은 것이며(예: Figure 4), 또한 좁은 면적에 밀집되어 있었다는 점에서 그리 좋은 결과라고는 할 수 없었다. 실제로, 관측정들 사이의 최대 거리가 평균 270 m에 지나지 않았고, 조사대상 중 8건에서 RIV로 설정된 하천으로부터 채 200미터도 떨어지지 않은 정호들로부터 얻은 수두 값들을 보정에 이용하고 있었다(Table 3). 모델에서 RIV가 적용되는 하천 부근에서의 지하수 수위는 RIV에 입력되는 하천의 수위에 의하여 상당부분 결정되어 질 수밖에 없으므로 그 근처의 정류수위자료는 모델 보정에 큰 도움을 주지 못한다. 그러나 이러한 문제는 부정류수두 값들을 보정에 이용하면 극복될 수 있다.

**수렴되지 않은 계산 결과(Unstable Solution)**

수렴되지 않은 계산결과를 제시하는 경우도 3건이나 발견되었다(Table 3). 수치모델은 보통 계산오차가 오차기준(error criterion)이내가 될 때까지 반복해서 증속변수 값을 계산하게 되며, 반복계산에 따른 오차가 오차기준이내에 들어야 그 모델이 수식을 수치적으로 정확하게 풀어내고 있다고 볼 수 있다. 그런데, 모델링 작업을 하다보면 아무리 반복횟수(number of iteration)를 증가 시켜도 최대오차(최대수두변화, maximum head change)가 오차기준이내로 줄어들지 않는 경우가 나타나기도 한다. 그 이유는 보통 오차기준 또는 반복횟수를 너무 작게 설정하였거나, 모델이 적절하게 설계되지 않았을 때 발생한다. 본 조사에서 관찰된 경우는 모두 후자에 속하는 경우이었다. Figure 6의 사례는 오차기준을 0.1 m로 비교적 높은 값이 설정되었으나, 250번의 반복계산 후에도 최대수두변화는 무려 30 m를 넘고 있었다. 그럼에도 불구하고 당 보고서는 평균오차가 약 15미터 정도이므로 모델이 잘 보정되었다고 결론을 내리고 있었다. 이보다 더 심한 경우는 최대오차가 무려 67미터에 이르는 모델의 결과를 제시하기도 하였다.

**예측**

예측은 사업수행으로 있게될 응력(stress)에 대하여 지하수 시스템의 반응(response)을 알아보는 과정으로, 일반적인 환경영향조사에서 모델이 적용되는 기본 목적이다. 대부분의 보고서

**Table 3.** Observation wells, input parameters, and model results (calibrations, sensitivity analyses, predictions) among the 15 Mineral-Water EIAs which applied groundwater models

Performed Field Tests for Parameter Acquisition		15 cases		
Observation Wells				
Average Number		8.7		
Distribution		distributed within a circle of diameters of 270 m in average		
Recharge		recharge/precipitation (%)		
		Observations	Mean	Range
Estimation	Water budget	13	26.9	5.0 ~65.5
Method	Water level fluctuation	11	11.2	3.3 ~18.1
	Model Input	15	12.4	5.6 ~20.0*
Calibration				
Calibration Target Snapshot head values		15 cases		
Transient head values		2 cases		
Average no. of heads used for calibration		4.4		
All the head values used for model calibration was collected from the wells within 200 m from RIV cells		8 cases		
Average RMS Error recalculated from this study		2.9 m		
Showing Numerically Unstable Results		3 cases		
Showing Sensitivity Analyses		none		
Prediction				
Head drawdown		15 cases		
Capture zone (particle tracking)		12 cases		
Prediction for extreme cases		1 case		

에서도 만들어진 모델을 이용하여 지하수 개발에 따른 수위 강하(15건)와 지하수의 포획구간(capture zone)을 예측(13건)하고 있었다(Table 3). 모델은 실제상황에서는 쉽게 부딪치지 않는 최악의 상황(extreme case; 예를 들면 50년 빈도의 가뭄시 사업수행이 지하수계에 미치는 영향 모사)에서의 지하수계 반응도 예측할 수 있다는 점에서 아주 훌륭한 예측도구라고 할 수 있다. 그러나, 조사대상의 대부분은 연 평균치, 또는 어느 한 시점에서 측정한 수문변수들(예, 지하수, 하천의 수위, 등)을 사용한 모델로 예측을 수행하여, 이러한 상황에 대한 결과를 보여줄 수 없었다. 단 1건의 보고서에서 가뭄시의 지하수 함양량 감소로 인한 지하수계의 영향을 예측하고 있었으나 하천의 수위 변화가 같이 고려되지 않아 완전한 예측결과라고는 볼 수 없었다.

#### 민감도 분석(Sensitivity Analysis)

민감도 분석은 불확실한 입력변수와 경계조건, 대수층의 형태 등이 변화함에 따라 모델결과(수두 값, 유량)가 얼마나 영향을 받게되는지를 조사하여 이들의 불확실성을 정량화하기 위한 것이다. 그러나, 조사대상 보고서에서는 단 한 건도 민감도 분석결과가 제시되지 않았다(Table 3).

#### 토의 및 제안

최근 접수되었던 환경영향평가서 544부와 먹는샘물 환경영향조사보고서 16부를 검토하여 본 결과, 적지 않은 문제점들

이 발견되었다. 문제점은 크게 두 가지로 요약될 수 있는데, 첫째로 환경영향평가에서 지하수 부분에 대한 영향예측 및 저감방안이 다른 항목들에 비하여 많은 부분 경시되어 있었고, 두 번째로는 지하수 모델이 집중적으로 적용되었던 먹는 샘물 환경영향조사보고서에서는 코드선택에서의 문제점보다는 코드의 응용방법에 오히려 더 큰 문제가 있었다는 점이였다.

환경영향평가 대상사업에서 여러 여건상 지하수 오염 및 고갈이 뒤따를 것으로 판단되는 사업들이 적지 않음이 본 연구에서 확인되었다. 그러나, 이들에 대한 환경영향평가서에서는 지하수분야가 상당부분 과소 평가되고 있거나, 아예 무시되고 있는 실정이었다. 환경영향평가서 본안 182건만을 기준으로 볼 때, 이들 중 지하수 환경에 심각한 오염을 초래할 수 있는 쓰레기 매립장 건설이 수반되는 사업도 4건이 있었으나 침출수 유출에 의한 지하수 환경오염정도가 심도있게 다루어지고 있는 경우는 하나도 없었다. 또한, 평균 지하수 개발계획량이 먹는샘물 사업에서의 평균을 상회하고 있는데도 환경영향평가에서는 지하수영향정도에 대한 언급이 아예 없거나 추후 실시하겠다는 언급이 있는 정도이었으며, 지하수영향예측을 하겠다고 제시한 경우에도 전기비저항탐사 결과만을 제시하는 수준으로 먹는샘물영향조사에 비하여 전체적으로 피상적이었다. 이렇듯, 환경영향평가와 먹는샘물환경영향조사 간에는 조사수준에서 상당한 차이가 있었다. 이러한 차이는 개발에 따른 영향정도가 아니라 개발 목적에 의하여 발생된 것이어서 바람직한 지하수 환경영향조사를 저해함은 물론, 평가의 형평성에도 어긋나는 것이라고 볼 수 있었다.





## 사 사

본 연구는 환경부의 '사업특성별 환경영향평가에 적용되는 모델의 비교연구' 과제의 일환으로 한국환경·정책평가연구원으로부터 연구비를 받아 수행되었으며, 이에 감사드린다.

## 참고문헌

- Anderson, M. P. and Woessner, W. W., 1992, Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport, Academic Press, 381p.
- Domenico, P. A. and Schwartz, F. W., 1990, Physical and Chemical Hydrogeology, John Wiley & Sons, 824p.
- Ferris, J. G., 1959, Groundwater, In Hydrology edited by C. O. Wisler and E. F. Brater, New York, John Wiley.
- Franke, O. L., Reilly, T. E. and Bennett, G. D., 1987, Definition of boundary and initial conditions in the analysis of saturated groundwater flow systems: An introduction, USGS Techniques of Water-Resources Investigations 03-B5, 15p.
- Harbaugh, A. W. and McDonald, M. G., 1996, User' documentation for MODFLOW-96, and update to the U.S. Geological Survey Modular Finite-Difference Ground-Water Flow Model, USGS Open-File Report 96-485, 56p.
- Helmig, R., 1997, Multiphase Flow and Transport Processes in the Subsurface, Springer-Verlag, 367p.
- Kim, K., Anderson, M. P. and Bowser, C. J., 1999, Model calibration with multiple targets: A case study, Ground Water, 37, p. 345-351.
- Kobus, H., Barczewski, B. and Koschintzky, H.-P., 1996, Groundwater and Subsurface Remediation, Environmental Engineering, eds. Springer-Verlag.
- L'vovich, M. I., 1979, World Water Resources and Their Future, edited by R.L. Nace, Washington D. C.: American Geophysical Union. (English translation from the Russian)
- McDonald, M. G. and Harbaugh, A. W., 1988, A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model, U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 6, chap. A1, 586p.
- Morris, W. V., 1968, Water, Ottawa: Department of Energy, Mines and Resources.
- Nace, R. L., 1971, Scientific Framework of World Water Balance, Ed., UNESCO Technical Papers Hydrology, No. 7., UNESCO Press.
- Soil Conservation Service, 1969, Hydrology, In SCS National Engineering Handbook, Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture, Section 4.
- Stallman, R. W., 1952, Nonequilibrium type curves for two well systems: U.S. Geological Survey Groundwater Notes, Open-File Rept. 3.
- Thornthwaite, C. W., 1948, An approach toward a rational classification of climate, Geographical Review, 38, p. 55-94.
- Thornthwaite, C. W. and Mather, J. R., 1955, The Water Balance, Laboratory of Climatology, Publication 8, p. 1-86.
- Townley, L. R. and Wilson, J. L., 1980, Description of and user's manual for a finite element aquifer flow model AQUIFEM-1, MIT Ralph M. Parsons Laboratory for Water Resources and Hydrodynamics, Technology Adaptation Program Report No. 79-3, 294p.
- Ward, D. S., Buss, D. R., Mercer, J. W. and Hughes, S. S., 1987, Evaluation of a groundwater corrective action at the Chem-Dyne hazardous waste site using a telescopic mesh refinement modeling approach, Water Resources Research, 23, p. 603-617.