

정 오 표

페이지	위치	틀린 내용	바로 잡음
8	위에서 3줄	anount	amount
9	위에서 4줄	appoximation	approximation
41	아래서 2줄	$(1-e^{-kt})$	$(1-e^{-kt})$
47	아래서 끝	$\exp[-a(t-t_0)]$	$\exp[-a(t-t_0)]$
49	아래서 1줄	수문곡선	수문곡선
51	아래서 3줄	groundwave	groundwater
65	위에서 4줄	- Q	- Q_x
73	위에서 6줄	e^{-b}	e^{-bt}
"	아래서 4 및 5줄	"	"
74	아래서 7줄	d_i	dt
84	아래서 4줄	양수와 해수	담수와 해수
109	아래서 3줄	강관정	관정
111		그림 3-7의 범례 기호 누락	→ 지하수 흐름 —— 풍수기 지하수위 — — 설치후 지하수위 ---- 설치전 지하수위
114	위에서 3줄	400만 m^2	400만 m^3
141	아래서 끝	$(1+\beta)$	$(1+\beta)$
142	아래서 3줄	$()^A$	$()^A$
157	위에서 7줄	$\delta(z-z_s)$	$\delta(z-z_s)$
209	위에서 7줄	식(6-1)의 끝괄호 누락	- $u_{i,j}$
211	식 (6-2)와 (6-3)	끝괄호 누락	+ $u_{i,j-1}$
231	아래서 11줄	743 m^3/day	743 m^2/day
295	아래서 7줄	운반하는 굴진한다	운반하여 굴진한다
322	위에서 8줄	$(0.01)^2$	$(0.01)^2$
323	위에서 9줄	우물통심원	우물통을 중심으로 동심원
"	" 12줄	PE파이프	PE파이프
"	" 15줄	식 (8-8)	식 (8-10)
360	아래서 2줄	식 (6-5)	식 (5)
365	중간	그림 5-3	그림 1.
"	맨아래	그림 5-4	그림 2.
368	위에서 6줄	+ $O((\Delta x)^4)$	+ $O((\Delta x)^4)$
"	아래서 5줄	식(21) 끝항 인쇄 누락	- R/T
369	위에서 8 및 10줄	식(24) 및 (25) 좌변끝항 누락	+ R/T
370	위에서 6줄	식(26) 좌변끝항 인쇄 누락	+ R/T
"	아래서 2줄과 1줄	$=h_{i,j}$, $=h_{i-1,j}$	$=h_{i,j}$, $=h_{i-1,j}$
371	위에서 1줄과 4줄	$=h_{i-1,j}$, $=h_{i,j-1}$	$=h_{i-1,j}$, $=h_{i,j-1}$
372	위에서 12줄	식(32) 우변끝항 및 우변끝항	$h_{i-1,j}$, - R/T
374	위에서 9줄	식(42) 좌변끝항 및 우변끝항	$h_{i-1,j}$, - R/T

제2차년도
최종보고서

631.28
L 293A
V.2

소유역지하댐 개발에 관한 기술개발 연구

A Technical Study of Groundwater Dam Development
in a Small basin area

연 구 기 관
농 어 촌 진 흥 공 사
1996. 12

농 립 부

제 출 문

농 립 부 장관 귀하

본 보고서를 “소유역 지하댐 개발에 관한 기술개발 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

1996. 12

주관연구기관명 : 농어촌진흥공사

총괄연구책임자 : 최 병 수

연 구 원 : 정 형 재

연 구 원 : 이 기 철

연 구 원 : 김 정 희

협동연구기관명 : 서 울 대 학 교

자연과학종합연구소

협동연구책임자 : 이 강 근

연 구 원 : 배 광 옥

요 약 문

I 제 목

소유역 지하댐 개발에 관한 기술개발 연구

II 연구개발의 목적 및 중요성

본 연구의 목적은 농어촌의 소유역 지역에서 지하수 저류량을 극대화 할 수 있는 지하댐개발을 시행코자 할 때 설계기초가 될 수 있는 제 기준을 정립하는데 있다.

최근 세계적인 기상이변이 자주 일어나고 있는데 '94/'95년 우리나라 남부 지역의 가뭄은 이러한 기상이변의 하나로서 50년 빈도에 해당된다고 한다. 그러나 '95년말 농업생산기반정비사업 통계년보(농림부, 1996)에 의하면 전국 논면적 1,206천ha 중 수리답은 907천ha (75%)이며 이중 5년이상 내한 능력이 있는 수리답은 521천ha (43%)로서 수리불안전답이 685천ha (57%)에 이르러 기상이변에 대처할 준비상태가 미약하다고 볼 수 있다.

가뭄에 대비하여 지하수저류량을 증대시키는 방안으로 지하댐 개발이 자주 논의되어 왔으며 우리나라에서는 '83년 경북 상주군 이안면에서 농업용수개발을 위한 지하댐 시험사업을 시행한 바 있다. 그러나 지하댐에 대한 지하수문의 복잡성으로 아직까지 지하수의 유효저수량과 개발이용량 설계에 대한 이론정립이 안되어 있고 지하댐 조사설계 기준도 마련되지 않은 실정이다.

'94/'95 가뭄이후 가뭄대책을 위한 지하댐개발의 필요성이 다시 대두되고 있는데 앞으로 지하댐 개발사업의 확대시행에 대비하여 농어촌 소유역지역의 지하수저류량을 극대화하는 방안 연구와 저장된 지하수의 이용을 극대화할 수 있는 기술개발 연구가 선행되어야 할 것이다.

Ⅲ 연구개발의 내용 및 범위

1. 연구범위

본 연구의 대상은 미고결 대수층에 지하댐을 설치했을때의 지하수저류량과 그 이용에 관한 사항이다. 대수층의 지하수 함양과 저류특성에 관한 분야의 연구와 지하댐 설계 기준정립에 관한 사항 그리고 소유역에서의 지하수 수문분석을 수치모델로서 전산화하여 지하댐설계시 실용화 할 수 있도록 연구범위를 정하였다.

2. 연구내용

본 연구의 목표는 크게 두가지로 나눌수 있다. 그 첫째는 소유역 지하댐 개발에 관한 적정설계 기준마련에 있고 두째는 소유역 지하댐 설계에 적용할 수 있는 지하수문 분석 모델 개발이다. 이들 연구목표에 대한 연구내용은 다음과 같이 세부연구 과제를 설정하여 연구를 추진하였다.

연구 목표	세 부 연 구 내 용
1. 소유역지하댐 개발에 관한 적정설계기준	<ul style="list-style-type: none">• 소유역의 지하수함양과 대수층의 평가 방법• 기존시설의 문제점 평가분석• 소유역 지하댐 개발에 관한 조사 설계기준 정립
2. 소유역 지하수문 분석 모델 개발	<ul style="list-style-type: none">• 소유역 지하수문 분석에 적합한 전산모델 개발• 소유역 지하댐의 유효저수량과 이용가능량 산정의 전산처리 시스템 도입

IV 연구개발 결과 및 활용방안

1. 연구개발결과

본 연구의 연구개발 결과를 연구내용 별로 요약하면 다음과 같다.

가. 소유역 지하수함양과 대수층 평가방법 연구

1) 지하수 함양과 강우량의 관계

풍수기와 갈수기의 월 강우량을 각각의 지하수위와 비교하여 분석하면 지역의 월별 지하수 함양율을 계산할 수 있었으며, 지하수 함양율(Recharge ratio)과 대수층 비산출율(Specific yield)의 관계를 추정할 수 있다.

2) 지하수위 강하와 하천유출의 관계

갈수기의 하천 기저유출과 관계 대수층의 지하수위 강하를 비교 분석한 결과 기저유출 기본공식에서의 감쇠상수 b 와 지하수 자연함양율 α 의 사이에 일정한 관계가 성립됨을 알 수 있었으며 이를 이용하여 지하수위 강하곡선을 해석하는 기본공식을 유도할 수 있었다.

3) 지하수위 강하곡선 해석방법

지하수위 강하곡선을 그래프방식으로 해석하므로서 지하수 자연함양율과 대수층 비산출율을 간단히 구할 수 있도록 작도법을 고안하였으며 이 방법을 이용할 때에 통일을 기할수 있도록 하였다.

4) 지하수함양 분석에 의한 대수층평가의 적정성

지하수위 강하곡선 해석에 의하여 지하수 함양율과 대수층 비산출율을 구하는 방법을 제시하였고 이의 적용 타당성을 분석하기 위하여 시범지구에서 현장 적용시험을 실시하였는 바, 하천 기저유출 조사에 의한 유출 감쇠상수 b 와 지

하수위 강하곡선 해석으로 얻은 지하수 함양율로 부터 계산된 b값은 20%의 오차를 보여 주었으며, 이것은 시험 오차로서 지하수위 강하곡선 해석에 의한 지하수 함양율과 대수층 비산출율 산정방법이 타당성이 있음을 입증하는 것이라고 판단된다.

나. 기존시설의 문제점 평가 분석

- 기존시설의 이용효과와 문제점을 분석하기 위하여 '82~'83 기간중 준공된 기존시설 45지구에 대한 이용실태를 조사하였는데 이중 지하댐 사업으로 물막이벽을 설치한 지구는 5개지구이고 나머지 40지구는 방사상집수정만 설치한 지구였다.

- 기존시설의 이용현황은 '93년 평균 가동시간에 비하여 가뭄이 심했던 '94년 평균가 동시간은 전년대비 61.7%의 증가를 나타내며 가뭄시의 이용효과를 보여주었다.

- 기존시설의 설계내용 검토결과 수원공인 방사상집수정의 설계수준은 문제점이 없으나 지하물막이벽 설계지구의 지하수저류량과 이용가능량산정에 있어서는 정립된 설계기준이 없이 현지 여건을 감안하여 용수수요에 맞추어 저류량과 이용가능량을 판단하는 모순을 보여주었다.

다. 물리탐사 자료에 의한 대수층 해석

- 수직비저항 전탐 자료해석에 쓰이는 전산해석 모델중 전진방법(Forward method)을 채택하여 시범지구에 대한 대수층 층상구조를 해석한 결과 역산방법 (Inversiion method)을 이용한 결과보다 지질학적으로 더 타당하다는 결론을 얻었다.

- 수직탐사자료 해석으로 얻어진 각층의 두께와 비저항 값을 이용하여 투

수량계수의 관계식을 구할 수 있었다.

라. 소유역 지하수문 분석모델 개발

- 지하댐 설치 예정지구의 지하수 유동현상을 분석하기 위하여 2차원 모델인 지하수 문분석모델 SUBDAM을 개발하였다.

- SUBDAM의 현장 적용성과 범용성을 개선하기 위하여 모델링영역을 제한 없이 디자인 할 수 있도록 문자형 전처리시스템과 블록중심 격자망을 도입 보완하였으며 또한 빠른 계산속도를 위하여 SIP 반복계산법을 도입하였다.

- 보조프로그램인 STORAGE는 SUBDAM에서 생성된 정류상태의 수위 변동자료를 비교하여 지하수 저장량을 계산해 주는 기능을 담당한다. 또한 SUBDAM의 부정류 상태 모델링으로 생성된 저류량 변동에서 지하댐 이용가능량을 산정할 수 있다.

2. 활용방안

본 연구과제 수행중 제안된 내용중 실용화 할 수 있는 사항은

- 지하수위 강하곡선 해석에 의한 대수층 평가방법
- 물탐자료에 의한 대수층해석 모델
- 소유역 지하수문 분석 및 지하수저류량 변동분석모델

으로서 소유역내 지하댐 조사 설계에 적용할 수 있을뿐 아니라 일반적인 대수층 평가방법으로도 활용이 기대된다. 다만 연구기간의 부족으로 충분한 현장 적용실험을 이행하지 못하였으나 앞으로 관계 기술자들이 본 연구내용을 활용하여 현장자료를 축적한다면 본 연구 결과는 범용성을 확보하여 매우 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

여 백

SUMMARY

1. Subject :

A Technical study of Groundwater Dam Development in a Small basin area

2. Objectives and Necessities of the reseaches

The objectives of this research is to establish the standands of investigation and design methods for the groundwater dams in a small basin of the rural area.

In recent years, unusual changes in weather have brought extremely dry weather on earth, and in Korea we had severe drought years in 1994 and 1995.

The groundwater dam have been known as an useful counter-measure for the drought, but we do not have a proper design criteria for it. Technical studies of groundwater recharge and its use in the groundwater dam area are needed before enforcement of dam development.

3. Scope and targets of the researches

The scope of the researches is concentrated in the groundwater evaluation, recharge and usefull amount during the dry season.

The targets of the researches are

- To establish the investigation and design standards for the

groundwater dam development

- To develop a computer model for analysing groundwater storage and useful amount in the groundwater dams.

4. Conclusion and Practical application of the researches

4-1 Groundwater recharge and aquifer evaluation in the small basin area

- Natural recharge ratio is defined as a proportion of total amount of water infiltrated into aquifer to that of precipitation within a certain period. Since it is difficult to determine the amount of infiltration, the natural recharge ratio is alternatively calculated by the differential ratio of water level to the monthly rainfall for both rainy and dry season.
- The base flow of the stream is equivalent to the draining rate from aquifer. This leads the relationship between the base flow and the groundwater level depression to a mathematical formula.
- The recharge ratio can be determined by utilizing groundwater level hydrographs during no rainy period. A graphic method was introduced for simple analysis of the mathematical formula.

The advantage of this method is to solve the relationship between the groundwater recharge ratio and the specific

yield of the aquifer.

- Field tests for calculating recharge ratio were performed in the study areas and the results showed good approximation within the range of field test errors.

4-2 Assessment on the existing establishments

- Five groundwater dam areas and 40 collector well development areas which had been constructed till 1993 in Korea were studied in their utilization effects and the design methods.

The operating hours in 1994 were increased by 61.7% compared to that of 1993, which showed good effects of the existing establishment during the drought season.

4-3 Aquifer analysis model by geophysical prospecting

- To interpret electrical profiling data of the study area by computer model, the Forward method showed better results than that of Inversion method
- The relationship between resistivity and transmissibility of the aquifer in the study area was derived by comparing the geoelectrical characteristics to the geohydrological characteristics of the same aquifer.

4-4 Model development for groundwater storage and the useful amount.

- Two dimensional groundwater flow model, SUBDAM, was developed to analyse groundwater recharge and storage in the 1st year of researches.
- For the better applicability of SUBDAM, the text preprocessor and the block centered grid were adopted in the 2nd year.
Also the iteration method was changed to SIP(Strongly Implicit Procedure) for fast simulation.
- The sub-program STORAGE is used for estimating storage and useful amount using the data created from the transient flow modeling of SUBDAM.

4-5 Practical application

The applicable results of the researches are

- The aquifer evaluation methods by analysing groundwater level depression curve.
- The aquifer analysis model using the relationship between resistivity and transmissibility of the aquifers.
- Storage analysis model by groundwater flow modeling with SUBDAM and STORAGE.

These results are to be used in practical use in general groundwater investigation and evaluation as well as in groundwater dam sites.

CONTENTS

Chapter 1. Introduction

Sec. 1. Background and Needs

Sec. 2. Objectives

Sec. 3. Scope and Methodology

3-1. Scope of researches

3-2. Methodology of the researches

3-3. Investigation in the Case study areas

3-4. Researchers

Sec. 4. Final arrangement for the comments on Intermediate report

Chapter 2. Groundwater Recharge Analysis

Sec. 1. Introduction

Sec. 2. Relationship between Surface water and Groundwater recharge

2-1. The Hydrologic cycle and Groundwater recharge

2-2. Hydrographs

2-3. Water budget and Groundwater recharge

2-4. Type of groundwater recharge

Sec. 3. Relationship between Drought and Groundwater

3-1. Drought year frequency

3-2. Drought affection to groundwater level

Sec. 4. Goundwater Recharge Assessment

- 4-1. Methods for estimating recharge ratio
- 4-2. Recharge assessment by Analysing groundwater level depression curve due to basin drainage

Chapter 3. Groundwater Dams

- Sec. 1. Comprehension on the groundwater dams
 - 1-1. Concepts of groundwater dams
 - 1-2. Classification of groundwater dams
- Sec. 2. Groundwater dam Development in Korea
 - 2-1. Ian Pilot project of Groundwater dam
 - 2-2. Other establishments
- Sec. 3. Groundwater dams in foreign countries
 - 3-1. An outline of groundwater dams in the world
 - 3-2. India and Africa
 - 3-3. Japan
 - 3-4. China

Chapter 4. Assessment on the Existing groundwater dams

- Sec. 1. Inquiries in Utilization of existing establishments
 - 1-1. Utilization analysis of existing groundwater dams and collector wells
 - 1-2. The rate of operation of establishments during drought season
 - 1-3. Utilization analysis in the areas with cut off walls

Sec. 2. Analysis on the Design criteria of existing establishments

2-1. Design of storage amount and its use

2-2. Cut off wall design

2-3. Collector well design

Chapter 5. Studies on Aquifer analysis model by Geophysical prospecting

Sec. 1. Introduction

Sec. 2. Theoretical background

2-1. Geoelectrical parameters and equivalence problem

2-2. Relationship between the Electrical and Hydrogeological properties of Aquifers

2-3. Electrical resistivity modeling by Finite-difference methods

Sec. 3. Analysis of Electrical profiling data

3-1. Computer program for analysing of profiling data

3-2. Analysis of profiling data in Kanam area

Sec. 4. Relationship between the electrical and the hydrogeological properties of aquifers in Kanam Area

Sec. 5. Two dimensional modeling of electrical resistivities by Finite-difference methods

5-1. Effects of different depth of electrodes

5-2. Effects of different moisture of top soil

5-3. Effects of electrical anomalies around the electrodes

5-4. Conclusion of resistivity modeling

Chapter 6. Model development of Ground water flow in a small basin

Sec. 1. Introduction

Sec. 2. Text preprocessor of SUBDAM

Sec. 3. Improvement of iteration methods

Sec. 4. Boundary condition near the dam site

Sec. 5. Estimation of usable amount of water

Sec. 6. Geohydrological analysis in ground water dam basin using MODFLOW

Chapter 7. Investigation in the Case study areas

Sec. 1. Outline of investigations

1-1. Objectives

1-2. Selection of the Case study areas

1-3. Investigation contents

Sec. 2. Groundwater Investigation

2-1. Methodology

2-2. Investigation results for each areas

Sec. 3. Hydrological investigation

3-1. Investigation Objectives and contents

3-2. Investigation results for each areas

3-3. Synthetic analysis on the investigation results

Chapter 8. The Essentials in the investigation and design for ground water dam development

Sec. 1. Investigation and design procedure

1-1. The order in investigation and design procedure

1-2. Investigation items and scope in the ground water investigation

1-3. Matters to be attended in the step of investigation and design

Sec. 2. The Essentials in the investigation step

2-1. Site selection

2-2. Ground water investigation

2-3. Meteorological and hydrological investigation

2-4. Ground water resource evaluation

Sec. 3. The Essentials in planning and designing step

3-1. Design factors of groundwater dams

3-2. Estimation of storage and usage amount

3-3. Design of pumping station

3-4. Design of cut off wall

Chapter 9. Conclusions and Practical Application

Sec. 1. Conclusions of researches

Sec. 2. Practical application of researches

REFERENCES

APPEDICES

- I Description on the Groundwater Flow Model and Programs
- II Manuals for the Programs of Electrical profiling data analysis

목 차

제 1 장 서 론 /27	
제 1 절 연구의 배경과 필요성 /27	
제 2 절 연구의 목적 /28	
제 3 절 연구의 범위와 방법 /29	
1. 연구범위 /29	
2. 연구방법 /30	
3. 시범지구조사 /34	
4. 연구진 /36	
제 4 절 중간평가 보완요구에 대한 조치 /37	
제 2 장 지하수 함양 분석 /39	
제 1 절 서 론 /39	
제 2 절 지표수와 지하수함양의 관계 /40	
1. 물의 순환과정과 지하수함양 /40	
2. 수문곡선 /48	
3. 물 수지와 지하수함양 /50	
가. 지하수의 물 수지 /51	
나. 지하수 수지분석의 검토사항 /52	
4. 지하수 함양의 유형 /53	
가. 자연함양 /54	
나. 하천수 함양 /55	
다. 인공함양 /56	
제 3 절 가뭄과 지하수의 관계 /60	
1. 가뭄 빈도 /60	
2. 가뭄과 지하수위강하 /61	
제 4 절 지하수 함양 평가방법 /64	
1. 지하수 함양량 추정 방법 /64	
가. 수문분석에 의한 지하수 함양량 이론 /64	
나. 지하수 자연함양을 산정 방법 /66	
2. 지하수위 강하곡선 해석에 의한 지하수 함양 평가 방법 /72	

제 3 장 지하댐의 개념과 시공사례 /80

제 1 절 지하댐의 이해 /80

1. 지하댐의 개념 /80
2. 지하댐의 종류 /84
 - 가. 사용목적에 따른 구분 /84
 - 나. 저류형태에 따른 구분 /85
 - 다. 물막이벽 시공법에 따른 구분 /85

제 2 절 국내 지하댐 시공사례 /86

1. 이안 지하댐 시험사업 /86
 - 가. 지하댐 조사 개요 /86
 - 나. 지하수 이용가능량 분석 /89
 - 다. 지하댐 시험사업 준공 개요 /89
 - 라. 지하 물막이벽 시공내역 /91
 - 마. 방사상 집수정 시공내역 /92
 - 바. 사후평가 조사 /93
2. 기타지구 사례 /95
 - 가. 지하 물막이벽 시공지구 /95
 - 나. 방사상집수정 시공지구 /98

제 3 절 외국의 지하댐 시공사례 /100

1. 개 요 /100
2. 인도 및 아프리카지역 사례 /100
 - 가. 인도 남부지역 /100
 - 나. 에티오피아 /102
3. 일본의 사례 /103
 - 가. 가바지마(樺島)지하댐 /104
 - 나. 미야코지마(宮古島)지하댐 /107
4. 중국의 사례 /112
 - 가. 후빙(富平)지하댐 개요 /112
 - 나. 후빙(富平)지하댐 건설에 관한 기술검토 /113

제 4 장 기존시설에 대한 분석 /117

제 1 절 이용현황 분석 /117

1. 지하댐 및 방사상집수정 이용현황 조사 /117

2.	가뭄때의 시설 가동을 분석	/126
3.	물막이벽 시공지구의 이용현황 분석	/128
제 2 절	기존시설 설계내용 분석	/130
1.	지하댐 저류량과 이용량 산출	/130
2.	물막이벽의 설계	/133
3.	방사상 집수정 설계	/138
가.	우물통 설계	/138
나.	채수가능량 설계	/139
다.	수평찬공 설계	/139
라.	사이편식 방사상 집수정	/143
제 5 장	물리탐사 자료에 의한 대수층 해석모델 개발	/146
제 1 절	서론	/146
제 2 절	이론적 배경	/148
1.	지전기적 매개변수와 등가의 문제	/148
2.	대수층의 전기적특성과 수리적특성 사이의 관계	/153
3.	유한차분법을 이용한 전기비저항 모델링	/156
제 3 절	수직전기탐사 자료의 해석	/159
1.	수직 탐사자료 해석 전산 프로그램	/159
2.	가남지구 수직 전기탐사자료의 해석	/161
제 4 절	가남지구 대수층의 전기적, 수리적 특성 사이의 관계	/169
제 5 절	유한차분법을 이용한 2차원 전기비저항 모델링	/174
1.	전극의 접지심도가 다를 때의 영향	/175
2.	강우가 표토의 최상부를 적셨을 때의 영향	/175
3.	전극 주위에 비저항 이상체가 존재할 때의 영향	/176
4.	비저항탐사 모델링 결론	/177
제 6 장	소유역 지하수문 분석모델 개발	/181
제 1 절	서론	/181
제 2 절	SUBDAM의 문자형 전처리	/184
제 3 절	반복계산 방법의 개선	/207
제 4 절	지하댐 구조물 경계조건	/213
제 5 절	실제 이용가능량의 산정	/213

제 6 절 MODFLOW를 이용한 지하담육역의 지하수문 분석 /217

제 7 장 시범지구 조사 /223

제 1 절 조사 개요 /223

1. 목 적 /223
2. 시범조사지구 선정 /223
3. 조사내용 /225

제 2 절 지하수 조사 /227

1. 조사 방법 /227
2. 지구별 조사 결과 /230
 - 가. 가남지구 /230
 - 나. 대산지구 /232
 - 다. 낙안지구 /234
 - 라. 어모지구 /235
 - 마. 농소지구 /236

제 3 절 지하수 수문조사 /237

1. 조사내용 /237
 - 가. 조사 목적 /237
 - 나. 조사방법 및 조사내용 /239
2. 지구별 조사결과 /244
 - 가. 가남 지구 /244
 - 나. 대산 지구 /251
 - 다. 어모(중왕) 지구 /259
3. 조사결과 종합 분석 /260

제 4 절 지하수문분석 모델링 /263

1. 시범지구의 위치와 수리지질개요 /263
2. 수문정보 /266
3. 모델링영역과 입력자료 /267
4. 시뮬레이션 결과 - MODFLOW 시뮬레이션 결과와의 비교 /267

제 8 장 지하담 조사 설계 요령 /278

제 1 절 지하담 조사 설계 과정 /278

1. 조사 설계 순서 /278

- 2. 지하수 조사 항목과 규모 /280
- 3. 조사 설계 단계별 유의사항 /282
 - 가. 지구선정 단계 /282
 - 나. 조사 예비단계 /282
 - 다. 조사 실시단계 /283
 - 라. 조사결과 평가단계 /283
 - 마. 설계 단계 /283
- 제 2 절 조사 요령 /284
 - 1. 지하댐 예정지구 선정 조사요령 /284
 - 2. 지하수조사 과정별 조사요령 /288
 - 가. 지형조사 /288
 - 나. 지표지질조사 /289
 - 다. 물리탐사 /290
 - 라. 시추조사 /295
 - 마. 대수층조사 /296
 - 바. 수위관측조사 /301
 - 3. 기상·수문 조사 /303
 - 가. 일반사항 /303
 - 나. 기상조사 /304
 - 다. 수문조사 /304
 - 4. 지하수 부존평가 /307
 - 가. 지역단위 부존량 평가 /307
 - 나. 수문분석 모델링 /309
 - 다. 안정 채수량 /310
- 제 3 절 계획 설계 요령 /311
 - 1. 지하댐의 설계요소 /311
 - 2. 지하댐 저류량과 이용량 산정요령 /313
 - 3. 취수공 설계 /316
 - 가. 방사상 집수정 계획 설계절차 /316
 - 나. 계획 취수량 결정 /318
 - 다. 방사상 집수정의 실용적인 설계방안 /319
 - 라. 사이편 집수정의 설계 /321
 - 4. 지하 물막이벽 설계 /324

제 9 장 결 론 및 연구성과 활용계획 /329

제 1 절 결 론 /329

1. 소유역 지하수함양과 대수층평가방법 연구 /329
2. 지하댐 시공사례와 기존시설에 대한 분석 /334
3. 물리탐사 자료에 의한 대수층 해석 모델 /337
4. 소유역 지하수문 분석 모델 개발 /338

제 2 절 연구성과 활용계획 /340

1. 소유역 지하댐 조사·설계의 적용 /340
2. 연구성과 실용화 보급계획 /341

참 고 문 헌 /345

부 록 /355

I. 소유역 지하수문 분석모델 설명서 /357

II. 전기탐사자료 해석P/G 사용설명서 /403

별 책

지하댐개발 후보지구 지하수조사 보고서

표 목 차

- 표 2-1 무강우 지속일수에 의한 가뭄 빈도 /61
 표 2-2 지하수위 변동에 따른 가채수량 변화 /70
 표 2-3 대수층 지질별 지하수 함양율 산출 /72
 표 2-4 무강우 지속기간과 수위강하량의 관계(어모지구) /77
- 표 3-1 저수지와 지하댐의 장단점 비교 /83
 표 3-2 이안지하댐 시범조사 조사내용 /88
 표 3-3 이안지구 집수정 채수능력 시험결과 /94
 표 3-4 지하댐(물막이벽) 설치지구 내역 /98
 표 3-5 도별 지하댐 및 방사상 집수정 설치현황 /99
- 표 4-1 지하댐 및 방사상집수정 이용현황 조사총괄 /118
 표 4-2 도별 지하댐 및 방사상 집수정 이용현황 분석 /126
 표 4-3 기존시설 가동시간별 분석 /127
 표 4-4 지하댐(물막이벽 설치)지구 이용현황 분석 /129
 표 4-5 지하댐(물막이벽 설치)지구 가뭄 이용 효과 분석 /130
 표 4-6 지하댐 저류량과 이용가능량 산출 내용 검토 /134
 표 4-7 물막이벽 그라우팅공법 비교 /136
 표 4-8 지하댐사업지구 물막이벽 설계내용 비교 /137
- 표 5-1 가남지구 수직탐사 해석 결과 (평균) /163
- 표 7-1 소유역 지하댐 시범조사 후보지구 내역 /224
 표 7-2 소유역 지하댐 연구 시범조사 지구 내역 /225
 표 7-3 시범조사 지구별 조사대상 면적 /228
 표 7-4 시범조사 지구 조사 작업량표 /229
 표 7-5 가남지구 하천 기저유량 측정결과(양화천) /245
 표 7-6 대산지구 하천 기저유량 측정결과(옥률천) /252
 표 7-7 어모(중왕)지구 하천 기저유량 측정결과(아천) /260
 표 7-8 기저유출 조사결과와 지하수위 관측조사결과와의 비교 /261
 표 7-9 시범지구(가남) 현장 수위측정자료 /265
 표 7-10 시범지구(가남)의 Slug test에 의한 투수시험 결과표 /265

- 표 7-11 가남지구 과거 7년에 대한 강우량 자료 /266
- 표 7-12 SUBDAM을 이용한 시범지구 모델링을 위한 정류상 부정류상태 문제에 대한 입력자료 /268
- 표 7-13 SUBDAM과 MODFLOW에 의해 시범지구 모델링에서 생성된 정류상태수위변동 자료를 STORAGE에 입력하여 저장량의 변동을 계산한 결과 /269
- 표 8-1 수리지질조사 기준조사량 /281
- 표 8-2 지하수조사에 이용되는 물리탐사 /291
- 표 8-3 지하 물막이 공법 일람표 /325

그림 목 차

- 그림 2-1 지하수의 순환과 함양 /42
- 그림 2-2 수문곡선의 구성요소 /49
- 그림 2-3 수문곡선 분리법(N-day법) /49
- 그림 2-4 어모지구 자연수위 변화도 /78
- 그림 2-5 어모지구 지하수위 강하와 시간 관계도 /79
- 그림 3-1 지하댐의 설치 모형도 /81
- 그림 3-2 지하댐의 종류 /82
- 그림 3-3 이안 지하댐 시험사업 위치도 /87
- 그림 3-4 모래저장댐 /101
- 그림 3-5 지하댐 이용 분포 /101
- 그림 3-6 가바지마 지하댐 물 수지분석 /107
- 그림 3-7 미나후크 지하댐 단면도 /111
- 그림 3-8 후빙 지하댐 위치도 /111
- 그림 4-1 이안 지하댐 유역 Cell 분할도 /131
- 그림 4-2 사이펀 집수정 모형도 /145
- 그림 5-1 지전기적 매개변수를 설명하는 주상지층 /150
- 그림 5-2 등가원리의 설명도 /150

- 그림 5-3 등가문제의 예시도 /155
- 그림 5-4 대수층 구성입도별 비산출율 /155
- 그림 5-5 가남지구 조사 위치도 /164
- 그림 5-6~5-9 : 축선 1~16의 2차원 비저항 구조 가상단면도 /165
- 그림 5-10 Longitudinal Unit Conductance 와 Transverse Unit Resistance 가 수직탐 사자료에 미치는 영향 /171
- 그림 5-11 가남지구 대수층의 전기적, 수리적 특성 사이의 관계식 /172
- 그림 5-12 유한차분법을 이용하여 얻어진 지표에서의 전위값과 이론적인 전위값 비교 /178
- 그림 5-13 모델링 자료의 비교에 기본이 되는 이상적인 1차원 4층 모델 /178
- 그림 5-14 전국접지심도가 Schlumberger 배열의 수직탐사에 미치는 영향 /179
- 그림 5-15 강우가 Schlumberger 배열의 수직탐사에 미치는 영향 /179
- 그림 5-16 전국주위의 비저항 이상체가 Schlumberger 배열의 수직탐사에 미치는 영향 /180
-
- 그림 6-1 전처리기 PREDAM의 경계조건 및 모델링영역의 표현 /194
- 그림 6-2 전처리기 PREDAM, 본 프로그램 SUBDAM, 저류량변동 계산 프로그램 STORAGE를 이용한 소유역 지하수문분석 모델링 수행과정 /207
- 그림 6-3 선 반복계산 SOR법을 이용한 수치계산법 /212
- 그림 6-4 경기도 가남지구 - 4계절의 지하수함양이 다른 부정류상태 유효저류량 변동 모델링 /216
- 그림 6-5 MODFLOW를 이용한 소유역 지하수문분석 모델링 과정 /217
- 그림 6-6 ModelCad를 이용하여 구성한 MODFLOW 계산용 격자망 /220
- 그림 6-7 MODFLOW를 이용한 지하댐이 설치되지 않은 소유역에서의 정류상태 모델링 결과 /221
- 그림 6-8 MODFLOW를 이용한 지하댐이 설치된 소유역에서의 정류상태 모델링 결과 /222
-
- 그림 7-1 가남지구 지하수문조사 위치도 /240
- 그림 7-2 대산지구 지하수문조사 위치도 /241
- 그림 7-3 자기수위계 구조도 /243
- 그림 7-4 가남지구 하천 자동수위 기록 예 /243
- 그림 7-5 가남지구 하천수위 변동곡선(양화천) /246
- 그림 7-6 가남지구 하천 기저유출(경과시간 대 유량변화) /247

그림 7-7	가남지구 지하수위 변동곡선 (K_1)	/248
그림 7- 8	가남지구 무강우기간 지하수위강하 추정곡선	/249
그림 7- 9	가남지구 무강우기간 지하수위 강하 : 경과기간 대 ($1-s/s_m$)	/253
그림 7-10	대산지구 하천수위 변동 곡선(옥률천)	/254
그림 7-11	대산지구 지하수위 변동 곡선 (N_1)	/255
그림 7-12	대산지구 무강우기간 지하수위강하 추정곡선	/256
그림 7-13	대산지구 무강우기간 지하수위강하 : 경과기간 대 ($1-s/s_m$)	/257
그림 7-14	가남지구 모델링영역 위치도	/264
그림 7-15	가남지구 - 봄, 정류상태의 지하수함양이 있고 물막이벽이 없을때	/270
그림 7-16	가남지구 - 봄, 정류상태의 지하수함양이 있고 물막이벽이 있을때	/271
그림 7-17	가남지구 - 여름, 정류상태의 지하수함양이 있고 물막이벽이 없을때	/272
그림 7-18	가남지구 - 여름, 정류상태의 지하수함양이 있고 물막이벽이 있을때	/273
그림 7-19	가남지구 - 가을, 정류상태의 지하수함양이 있고 물막이벽이 없을때	/274
그림 7-20	가남지구 - 가을, 정류상태의 지하수함양이 있고 물막이벽이 있을때	/275
그림 7-21	가남지구 - 겨울, 정류상태의 지하수함양이 있고 물막이벽이 없을때	/276
그림 7-22	가남지구 - 겨울, 정류상태의 지하수함양이 있고 물막이벽이 있을때	/277
그림 8-1	관개 개선사업 조사설계 흐름도	/279
그림 8-2	하천 유출단면도 예	/306
그림 8-3	방사상 집수정 계획 설계 절차	/217

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 배경과 필요성

최근 세계적인 가뭄과 홍수, 한파와 폭서등 기상이변이 자주 일어나고 있다. '94년 여름부터 '95년 여름까지 우리나라 남부 지역에 발생한 2년 연속 가뭄은 이러한 기상이변의 하나로서 50년의 가뭄빈도에 해당된다고 한다. 그러나 이러한 기상이변에 대처할 준비 상태는 아주 미약하다. '95년말 농업생산기반정비사업 통계년보 (농림부 1996)에 의하면 전국 논면적 1,206천ha 중 수리답은 907천ha (75%)이며 이중 5년이상 내한 능력이 있는 수리답은 521천ha (43%) 로서 수리불안전답이 685천ha (57%)에 이르고 있다.

가뭄이 발생하면 하천굴착, 우물파기, 다단 양수 등 긴급 가뭄대책이 시행되고 또한 항구적인 가뭄대책도 논의 되지만 가뭄이 지나고 나면 소위 항구적 가뭄대책사업은 언제 올지도 모르는 가뭄에 대한 생산성 없는 투자가 되기 때문에 투자순위가 밀리게 되며 다음에 가뭄이 와도 전례를 답습하는 악순환을 거쳐왔다.

가뭄은 장기간 강수의 부족으로 물이 부족한 상태라고 말 할 수 있는데 물의 소요는 계절별로 다르기 때문에 특히 농작물 생육기에 비가 오지 않으면 농업 재해가 따른다. 가뭄 기간에는 저수지의 저수율이 급히 떨어지고 부족수량을 하천굴착이나 우물파기 등 지하수원으로 보충하게 되는데, 가뭄이 장기화되면 이러한 지하수원도 고갈되기 때문에 지하수 저류량을 증대시키는 방안을 연구할 필요성이 제기되었다.

지하수자원의 효율적 관리를 위한 원칙중 첫째는 장기간에 걸친 안전취수량

(Safe yield)를 극대화 할 수 있도록 하는 방안이다. 이것은 유역내의 자연함양과 인공함양 기술을 포함하며 지하수 이용효율을 극대화 하기 위하여 지표수와 지하수의 연계이용 (Conjunctive use) 또는 재 이용방법도 포함하는 개념이다.

가뭄이 오면 지하수 함양이 부족한 상태가 되어 지하수위도 수 m식 낮아지는데 지하수 이용이 많은 지역과 집수유역이 비교적 적은 지역에서는 수위강하가 더 빨리 나타나게 된다. 가뭄에 대비하여 지하수저류량을 증대시키는 방안으로 지하 물막이벽이 유효하다는 것은 오래전부터 논의되었으며 우리나라에서는 '83년 처음으로 경북 상주군 이안면에서 농업용수개발을 위한 지하댐 시험사업을 시행한 바 있다. 그러나 지하댐에 대한 이해의 부족으로 이 사업은 널리 보급되지 못하고 있으며 그 대신 지하 물막이벽 없이 지하수 다량 취수시설인 방사상집수정 개발이 많이 보급되어 있다.

'94~'95 가뭄이후 가뭄대책을 위한 지하댐개발의 필요성이 다시 대두되고 있는 바 (농어촌용수와 지하수개발 심포지엄 '94. 6. 30. : 농어촌용수 개발과 관리 심포지엄 '95. 3. 16.) 앞으로 지하댐 개발사업의 시행에 대비하여 농어촌 소유역지역의 지하수저류량을 극대화하는 방안 연구와 저장된 지하수의 이용효율을 극대화할 수 있는 기술개발 연구가 선행되어야 할 것이다.

제 2 절 연구의 목적

본 연구의 목적은 농어촌의 소유역 지역에서 지하수 저류량을 극대화 할 수 있는 지하댐 개발을 시행코자 할 때 설계 기초가 될 수 있는 제 기준을 정립하는데 있다.

지금까지 우리나라의 지하댐 개발사업은 몇개 지역에서 시범사업으로 시행된 바 있으나 지하수문의 복잡성으로 아직까지 지하댐의 유효저수량과 이용가능량 설계에 대한 이론적 실험적 기준이 마련되지 않은 실정이다.

본 연구에서는 기존시설에 대한 문제점을 평가 분석하고 소유역에서 대수층 평가방법의 개선방안을 연구 하므로써 소유역 지하댐개발을 위한 조사 설계의 적정 기준을 제안코자 하였다. 또한 복잡한 지하수 수문계산을 전산화하고 소유역내의 지하수 수문분석 전산모델을 개발하여 지하댐 설계시 저류량과 이용 계획량을 지하수 모델링에 의거 산출할 수 있도록 실용화 하는데 본 연구의 목적이 있다.

제 3 절 연구의 범위와 방법

1. 연구범위

본 연구의 대상은 미고결 대수층에 지하댐을 설치했을 때의 지하수 저류량과 그 이용에 관한 사항이다. 기반암 내의 파쇄대, 용암 동굴 및 석회암 동굴등암 반 지하수를 대상으로 한 지하댐 개발도 가능한 일이나 이 분야는 수리지질학적으로 대단히 복잡한 별도의 연구가 수반되어야 하므로 본 연구 과제에서는 제외하였다. 또한 지하수 자원관리에 필수적인 수질 보전 문제도 별도의 연구 대상이라고 판단되어 본 연구에는 포함시키지 않았다.

지하댐에 관한 기술은 조사에서 개발에 이르기까지 여러 단계가 있겠으나 지하수 조사 과정과 수원공 개발등 기왕에 시행하고 있는 분야는 기존방법을 따르되 그 개선방안이 있는지를 이번 연구에서 검토하였으며, 지하수의 저장과 관련되는 대수층의 지하수 함양과 저류특성에 관한 분야의 연구와, 특히 소유

역에서 유역 전체의 지하수 수문분석을 수치모델로서 전산화하여 지하담 설계 시 저류량 및 이용량 산정에 실용화하는 연구를 중점적으로 수행하였다.

2. 연구방법

본 연구의 목표는 크게 두가지로 나눌 수 있다. 그 첫째는 소유역 지하담 개발에 관한 적정 설계기준 마련에 있고 두째는 소유역 지하담 설계에 적용할 수 있는 지하수문 분석 모델 개발이다. 이들 연구목표에 대한 세부연구 과제를 다음과 같이 정하여 연구를 추진하였다.

연구 목표	세 부 연 구 과 제
1. 소유역지하담 개발에 관한 적정설계 기준	<ul style="list-style-type: none"> • 소유역의 지하수함양과 대수층의 평가방법 • 지하담 시공사례와 기존시설의 문제점 분석 • 소유역 지하담개발에 관한 조사 설계기준 정립
2. 소유역 지하수문 분석 모델 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 소유역 지하수문 분석에 적합한 전산모델 개발 • 소유역 지하담의 유효저수량과 이용가능량 산정의 전산처리 시스템 도입

가. 소유역 지하수함양과 대수층 평가방법 개선방안

지하담 설계의 요소는 지하수 저류능력과 이용가능량이라고 볼 수 있다. 저류능력은 대수층의 크기와 비산출율(유효공극율)에 의하여 결정되며 이용가능량은 대수층의 투수특성과 취수시설의 영향권에 의하여 제한을 받는다.

대수층의 크기와 투수성 등은 지하수 조사과정 즉, 지표지질조사, 물리탐사,

시추조사, 착정 및 양수시험 등의 조사단계를 거쳐 수집된 자료들을 분석하여 얻을 수 있으며 지금까지의 지하수조사 방법에 의존하면 된다. 그러나 지하담 조사 설계의 경우는 대상유역 전체의 저류가능량과 이용가능량을 파악하여야 하며 특히 가뭄에 대비한 시설이므로 풍수기와 갈수기의 수문변화를 관측하여 설계에 반영하여야 한다.

본 연구에서는 소유역단위 대수층 평가에서 지금까지 지질 기술자들이 소홀히 다루어 온 지하수문 분야를 간편한 방법으로 접근하여 실용화하는 방안을 연구하였다. 이것은 대수층의 지하수위 변동을 장기관측 조사하므로써 지하수위 변화와 강우량과의 관계를 규명하고 지하수 자연함양율과 대수층 비산출율을 구하여 지하담의 저류량을 산정하는데 이용하는 것이다. 지금까지의 대수층 평가에서는 지하수 부존량만을 고려하였으나 강우량과 지하수위 변동에 따라서 변동하는 저류량을 평가하기 위하여는 지하수함양율 개념 도입이 필요하다. 또한 저류량 계산에 필수 요소인 대수층 비산출율(유효공극율)은 수리이론적으로 대수층 양수시험시 비 정상류의 해석에 의해서 구할수 있는데, 지하담 대상지구는 통상 충적층의 자유면대수층으로서 양수시험시 대개 수십분 이내에 평형상태에 도달되므로 이러한 경우 비산출율을 산정하기 어렵다. 그러므로 대수층의 구성물질의 입도 성분에 따라서 유효공극율을 추정하는 방법으로 저류량을 계산하는 예가 많았으나 이것은 조사자료가 부족할 때에 한하여 불가피하게 사용하는 방법이다.

본 연구에서는 지하수문과 지표수문의 관계를 정립하고 하천의 기저유출과 관계 대수층의 지하수위 강하 사이의 관계를 수식화 하였으며, 지하수위 변동 곡선을 해석하므로써 대수층의 지하수 함양율(recharge ratio)과 비산출율(specific yield)를 구하는 방법을 제시하고 이를 제 2장에 기술하였다.

또한 대수층 평가에 주요한 역할을 해온 물리탐사 방법중 수직 비저항 탐사

의 해석에 있어 해석 정밀도를 높이고 기술자들의 개인차를 줄일 수 있도록 비저항 탐사자료의 전산해석 방법을 도입하였고, 대수층의 비저항값과 대수층 수리상수 사이의 관계를 규명 하므로써 시추 및 착정조사 자료가 부족한 지역에서 전기탐사에 의하여 대수층 수리상수를 추정하는 방법을 제시하였고 이를 제 5장에 기술하였다.

나. 지하댐 시공사례와 기존시설의 문제점 분석

지하댐 조사 설계기준을 정립하기 위하여 우선 국내의 지하댐 시공사례 자료를 수집하여 분석하였다. 국내에서는 1983년에 준공된 경북 상주군 이안면 양범리 지역의 이안 지하댐 시험사업을 시작으로 '93년 까지 지하댐 개발 사업지구 5개지구와 방사상집수정 개발지구 40개지구 계 45개지구가 준공되었다.

이를 대상으로 이용현황 실태를 조사하였는 바, 조사내용은 준공 당시의 계획 양수량과 이용수량의 대비, 년도별 양수 가동시간과 가뭄과의 관계등을 현지 조사하였다.

한편 기존 시설 설계 자료를 수집 분석하여 기존 설계의 문제점과 개선해야 할 사항을 검토하였으며 이들 검토내용은 제 4장에 기술하였다.

외국의 지하댐 시공사례에 대하여는 관련문헌들을 조사하여 인도 남부지역과 아프리카지역의 건조지대에서 지하댐의 일종인 모래저장댐(sand storage dam) 시공사례와 우리나라와 기후가 비슷한 일본의 지하댐 시공사례, 그리고 중국 황토 고원지대의 지하댐 사례등을 수집하여 제 3장에 수록하였다.

다. 소유역 지하댐개발 설계기준 정립

소유역 지하댐 개발을 위하여 조사설계 방법은 기존의 지하수 조사방법과 설계 방법을 응용 할 수 있으나 본 연구의 목표는 기존 조사 설계 방법의 개선점

을 보완하고 실용화하여 실무자들이 쉽게 이용할 수 있는 설계기준을 제시하는데 있다. 그러기 위하여 지하댐 조사 설계와 관련되는 조사과정별 조사요령과 지하댐 설계과정에 참고해야 할 사항들을 종합 정리하여 제 8장에 수록 하였다.

라. 소유역 지하수문 분석 전산모델 개발

지하수문의 복잡성과 시간적 변화성으로 지하댐 설치시와 이용시의 지하수위 및 지하수량 변동을 예측하는데는 전산모델을 도입하는것이 필요하게 되었다. 지하수의 수량변동 및 지하수 환경의 변화 양상을 예측하는데는 수치적 모델들이 유용하게 쓰이며 지하수 유동계를 모델링 하는 상용 모델들이 많이 보급되어 있으나 실무자들이 파악하고 이용하기에는 복잡한 면이 적지않다. 그러므로 현장 문제에 잘 일치하면서 사용이 간편한 고유모델의 개발이 필요하다. 이를 위하여 1차년도에는 기존 3차원 지하수 유동모델인 MODFLOW의 장단점과 소유역 지하댐에 적용 가능성을 분석하여 MODFLOW 보다 사용이 간편하고 소유역 지하수위 분포와 저류량을 해석할 수 있는 2차원 모델 프로그램 SUBDAM을 개발하였다.

2차년도에는 1차년도에 개발한 소유역 지하수문 분석 모델인 SUBDAM을 다양한 형태의 소유역 지하수문 분석에 적용할 수 있는 범용 모델로 개선시키기 위하여 모든 입력자료를 효율적으로 처리하고 모델링 영역의 형태를 제한없이 디자인 할 수 있는 문자형 전처리시스템을 개발하였다. 또한 기존 격자점중심 격자망 (point-centered grid)을 보다 수치계산의 효율성이 높은 블록중심 격자망 (block-centered grid)으로 대체하였다. 블록중심 격자망은 기존의 모델이 직사각형 모양의 유역형태만을 표현할 수 밖에 없는 단점을 극복할 수 있게 하며 다양한 모양의 유역형태를 모델링에 반영할 수 있게 한다. 또한 보다 빠른 계산 속도를 가지는 반복 계산방법(iterative method)으로 SIP

(strongly implicit procedure)법을 새로 도입하였다. 부정류 상태 (transient state) 모델링 수행시 지하수 함양단계를 기존의 4계절 구분에서 12개월로 더욱 세분하여 표현할 수 있도록 그 기능을 개선하였다.

마. 유효저수량과 이용가능량 전산처리 시스템 도입

새로 개발된 전산모델과 MODFLOW 프로그램을 시범지구 (경기도 여주군 가남지구)에 적용하여 시뮬레이션하였고 시범지구의 지하수 유동현상을 모델링 하여 지하수위 변동에 따른 지하수저장량의 변동을 계산하였다. 이 연구결과는 제 6장에 기술하였으나 지하수 이용가능량 해석 즉 안정채수량 산정의 기준은 아직까지 명확한 수문학적 기초가 부족한 분야로서 향후 지속적인 연구가 요망 된다.

소유역 지하댐의 저류량 증가분중 이용가능량을 최대 80%로 보고 월별 저류량변동에 따라 월별 이용가능량을 계산할 수 있는데 이는 부정류상태 모델링 시 SUBDAM에서 생성된 월별 저류량 변동자료를 프로그램 STORAGE에서 받아들여 이용가능량을 산정할 수 있도록 하였다.

3. 시범지구조사

소유역 지하댐 개발에 관한 연구 사례지구로서 5개지구를 선정하여 기존 자료의 분석, 지하수 조사, 지표수문 및 지하수문 조사와 지하수문 분석 모델링 을 시행하였다.

본 사례지구 조사는 앞에서 설명한 조사방법의 적용 대상지구로서 일차적으로 5개지구에 대한 지하수 조사를 시행하고 자료를 수집한 다음, 본 연구과제 수행으로 개발된 기법들을 적용할 때의 장단점을 비교 검토하여 연구 내용을 실용화 하는데 그 목적이 있다.

시범조사지구의 선정은 금후 지하댐개발이 요망되는 지역중에서 지형조건과 대수층조건이 유리한 지구를 선정하여 본 연구과제 수행중 얻은 조사자료를 향후에 이용할 수 있도록 기존의 층적층 대상 수맥조사 방법을 채택하여 조사를 시행하였으며, 특히 지하수조사 결과는 향후 이 지역 지하수 이용계획에 활용할 수 있도록 본 연구보고서의 별책으로 편집하여 놓았다.

시범조사지구 중 경기도 여주군 가남지구는 본 연구의 세부연구과제인 물리탐사자료 해석에 의한 대수층 평가방법 연구와 소유역 지하수문분석 모델개발 연구의 사례지구로서 서울대학교 자연과학종합연구소팀과 협동연구로 조사하였으며, 또한 이 지구 외 2개지구에서 지표수와 지하수의 수문조사를 시행하였다.

4. 연구진

본 연구과제를 수행하기 위한 연차별 연구진은 다음과 같다.

연차	구분	성명	소속	비고
1차년 (95)	총괄연구책임자	최병수	농어촌진흥공사 농공기술연구소	연구총괄 및 지하댐조사 설계 기준정립
	연구원	정형재	" 농공기술연구소	시범지구조사
	"	오세웅	" 지하수개발처	"
	"	서정진	" 전남지사	"
	"	정차연	" 경남지사	"
	협동연구원	최근원	한국농공학회	기존시설이용현황조사
	협동연구책임자	이강근	서울대학교 교수	소유역지하수문분석 모델개발
	"연구원	배광옥	대학원	"
	협동연구책임자	이기화	서울대학교 교수	물리탐사자료에 의한 대수층 해석모델
"연구원	한원석	대학원	"	
2차년 (96)	총괄연구책임자	최병수	농어촌진흥공사 농공기술연구소	연구총괄 및 지하댐조사 설계 기준정립
	책임연구원	정형재	" "	지하수문자료 분석
	연구원	이기철	" "	시범조사지구 지하수유동 모델링
	"	송성호	" "	"
	"	김정희	" "	시범지구 지하수문 관측 및 분석
	"	오세웅	" 지하수사업처	시범지구 지하수조사 보고서 및 수맥도작성
	협동연구책임자	이강근	서울대학교 교수	소유역 지하수문분석 모델개발
	연구원	배광옥	" 대학원	"

제 4 절 중간평가 보완요구에 대한 조치

본 연구과제의 1차년도 연구결과에 대한 중간평가 결과 차년도 보완요구사항과 이에대한 2차년도 조치내용은 다음과 같다.

1. 보완요구사항

① 국내에서 개발한 지하댐이나 방사상 집수정 등 기존자료와 1차년도 연구자료를 정리·분석함으로써 소유역 지하댐 조사설계 기준을 제시할 수 있을 것으로 판단되므로 연구기간을 2년으로 단축 조정함이 타당함.

② 지하댐의 포장수량은 강우유출과 관련이 있으므로 가뭄이 계속되는 경우의 지하댐 효율을 지표수 유출과 관련하여 검토할 필요가 있음.

③ MODFLOW의 정확도는 인정받고 있는 것으로 판단되므로 간략 System을 개발하는 방법과 MODFLOW를 손쉽게 이용할 수 있는 System의 개발과 비교하여야 할 것임.

④ 해외의 지하댐 설치에 관한 사례와 추이에 대해 검토할 필요가 있음.

⑤ 지하댐 개발사업의 확대시행 가능성과 그 우위성에 대한 진단이 병행되어야 할 것임.

2. 조치내용

① 기존 자료와 1차년도 연구자료를 정리하여 지하댐 조사설계 기준을 제시하기로 하고 연구기간을 2년으로 단축 시행함. 단 사례지구 조사분석은 업무량을 조정하여 2개지구만 시행하였음.

② 가뭄기간의 지하댐 저류량은 기저유출과 관계가 있으므로 기저유출과 지

하수위 변동관계를 수문공식으로 정립하여 제2장에 기술하였으며 시범조사지구 2개지구 (경기 여주 가남지구, 전북 남원 대산지구)에 지하수문 및 하천유출 관측조사를 시행하여 그 분석 결과를 제 8장에 수록하였음.

③ 지하수 수문분석 모델인 SUBDAM 프로그램은 MODFLOW를 간략 System으로 개발한것으로 경기도 여주군 가남지구에 대하여 지하댐 저류량분석 결과는 MODFLOW 분석 결과와 큰 차이가 없었음. SUBDAM을 실용화 하기위하여 MODELCAD의 전처리 System을 SUBDAM에 도입하여 Up-Grade 하였으며 또한 STORAGE 프로그램에 이용가능량 산정기능을 추가하여 지하댐 설계에 이용할 수 있도록 보완하였음.

④ 해외의 지하댐 시공사례는 일본의 토목기술학회지와 지하수 핸드북, 미국의 지하수학회지 (Groundwater) 등에서 자료를 수집하였으며 일본, 중국, 아프리카, 인도등의 지하댐 시공사례를 분석하여 제 3장에 수록하였음.

⑤ 지하댐 개발사업의 효과를 분석하기 위하여 기존시설 이용현황을 조사하고 물막이벽 설치지구와 미설치지구의 차이점을 분석하여 제 4장에 수록하였으며 향후 지하댐 개발사업 확대를 위하여 입지선정 조건과 조사설계 기준을 검토하여 제 8장에 기술하였음.

제 2 장 지하수 함양 분석

제 1 절 서 론

지하수는 재생 가능한 자원이나 그 이용량은 지역별 여건 즉 기후, 지질조건, 이용분야에 따라 큰 차이가 있을 수 있다. 근래에 수자원 이용량이 급증하는 반면 인간활동에 따라 지하수 함양지역은 줄어들고 오염이 계속되고 있어 지하수가 재생자원이라고 볼수 없게 되었다.

지하수자원을 효율적으로 관리하기 위하여는 다음과 같은 세가지 원칙이 지켜져야 된다(Fletcher G. Driscoll : Ground water and wells 1986). 즉,

- 지하수 저장량을 증대시킬 수 있는 기술개발
- 지하수 수질보전
- 지하수자원의 가치있는 이용

그 첫째는 장기간에 걸친 안정채수량(safe yield)를 극대화 하는것으로 과잉취수가 안되도록 지하수 저장량을 늘리는 기술 보급을 말한다.

두째는 인간활동에 의한 지하수 수질오염 영향을 극소화 시키는 노력으로 과거에는 개인이나 정부당국이나 지하수 수질이 환경에 미치는 영향을 인식하는데 매우 인색하여 왔으나 이제는 폐기물 등 지하수 오염원의 차단과 기히 오염된 지하수의 정화처리등 지하수 수질환경 보전에 적극적인 방향으로 지하수법이 시행되고 있다.

세째는 지하수개발의 우선순위를 결정하는 것으로서 가뭄발생, 인구가동, 농업 및 공업의 확대등 급증하는 용수 수요에 제한적인 수자원을 어느분야에 우

선적으로 이용할 것이냐 하는 문제이며 지하수 수자원 관리 계획수립의 기본이 된다.

본 장에서는 농어촌지역에서 가뭄에 대비한 농업용수 확보를 위하여 장기적인 안정채수량 증대 방안으로서의 지하담 필요성과 지하수 함양에 대하여 검토하였다. 지하수함양은 지표수와 밀접한 관련이 있고 특히 강우의 지하침투, 증발산, 유출형태등이 지하수함양을 좌우하므로 지표수와 지하수의 수문학적 관계의 개념을 도입 기술하였고, 이를 기초로 하여 가뭄과 지하수의 관계, 기저 유출과 지하수의 관계, 지하수위 변동과 지하수 함양과의 관계 등을 연구하였다.

제 2 절 지표수와 지하수 함양의 관계

1. 물의 순환과정과 지하수 함양

물은 대기중에서는 기체로 존재하다가 응집하여 비가 되고 땅에 떨어진 물은 수문순환과정에 따라 계속 이동한다(그림 2-1). 강우는 낙하도중 증발, 식물등에 의한 차단, 흙 표면의 굴곡에 의한 저류 등에 의하여 강우의 일부는 손실되며, 나머지는 다시 흙의 내부로 침투한다. 강우강도가 침투능(infiltration capacity)보다 크게되면 침투량을 제외한 나머지 강우는 지표면으로 유출(surface runoff)되고, 지하로 침투된 물은 흙의 공극(空隙)을 채우며 중력에 의거 수직으로 움직여서 지하수 수면에 도달한다. 지하수면에 도달하기전에 일부는 수평방향으로 흘러 지표로 유출되기도 하는데 이것은 중간유출이라 한다.

지하수면에 도달된 것만이 지하수량의 보충과 지하수위 상승을 가져오는데 이러한 과정을 지하수 함양(groundwater recharge)이라 한다. 지하수위가 하천 수위보다 높아지면 하천은 지하수로부터 물을 공급받게 되며 이러한 현상

을 지하수 유출(groundwater runoff)이라 한다. 지하수 흐름의 속도는 하천의 유속보다 훨씬 느리기 때문에 지하수 유출은 비가 그친 후에도 계속되며 이렇게 지하수로 부터 공급되는 물의 양을 하천의 기저유출(基底流出, base flow)이라고 한다.

지하수 함양과 가장 밀접한 관계가 있는 침투, 증발산 및 기저유출에 대하여 약술하면 다음과 같다.

가) 침 투

강우가 지표면에 도달하여 흠속으로 스며드는 현상을 침투(浸透, infiltration)라고 하는데 이것은 지하수함양의 초기단계가 된다. 강우 초기에는 침투된 물은 토양수분을 보충하는데 손실되나 강우가 계속되면 토양수분 초과량은 아래로 침투(浸漏, percolate)하여 지하수면에 도달한다.

침투율(infiltration rate)의 산정공식은 여러가지 알려져 있으나 대표적인 호-톤(Horton, 1940)의 공식은 다음과 같이 표시된다.

$$f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad \text{-----}(2-1)$$

여기서 f 는 침투율, f_0 는 초기침투율, f_c 는 최종침투율, k 는 상수이다. 침투는 초기에 최대를 나타내며 주어진 조건하에서 최대의 침투가능량을 침투능(浸透能, infiltration capacity)이라고 한다.

이식은 $t = 0$ 일 때 $f = f_0$, $t = \infty$ 일 때 $f = f_c$ 를 나타내며 f_c 의 값은 보통 흠의 투수계수 K 값과 같은 값을 가지는 경우가 많다.

일정기간 누가침투량 F 는 식 (2-1)을 적분하여

$$F = \int_0^t f dt = f_c t + \frac{1}{k} (f_0 - f_c) (1 - e^{-kt}) \quad \text{-----}(2-2)$$

로 구할 수 있다.

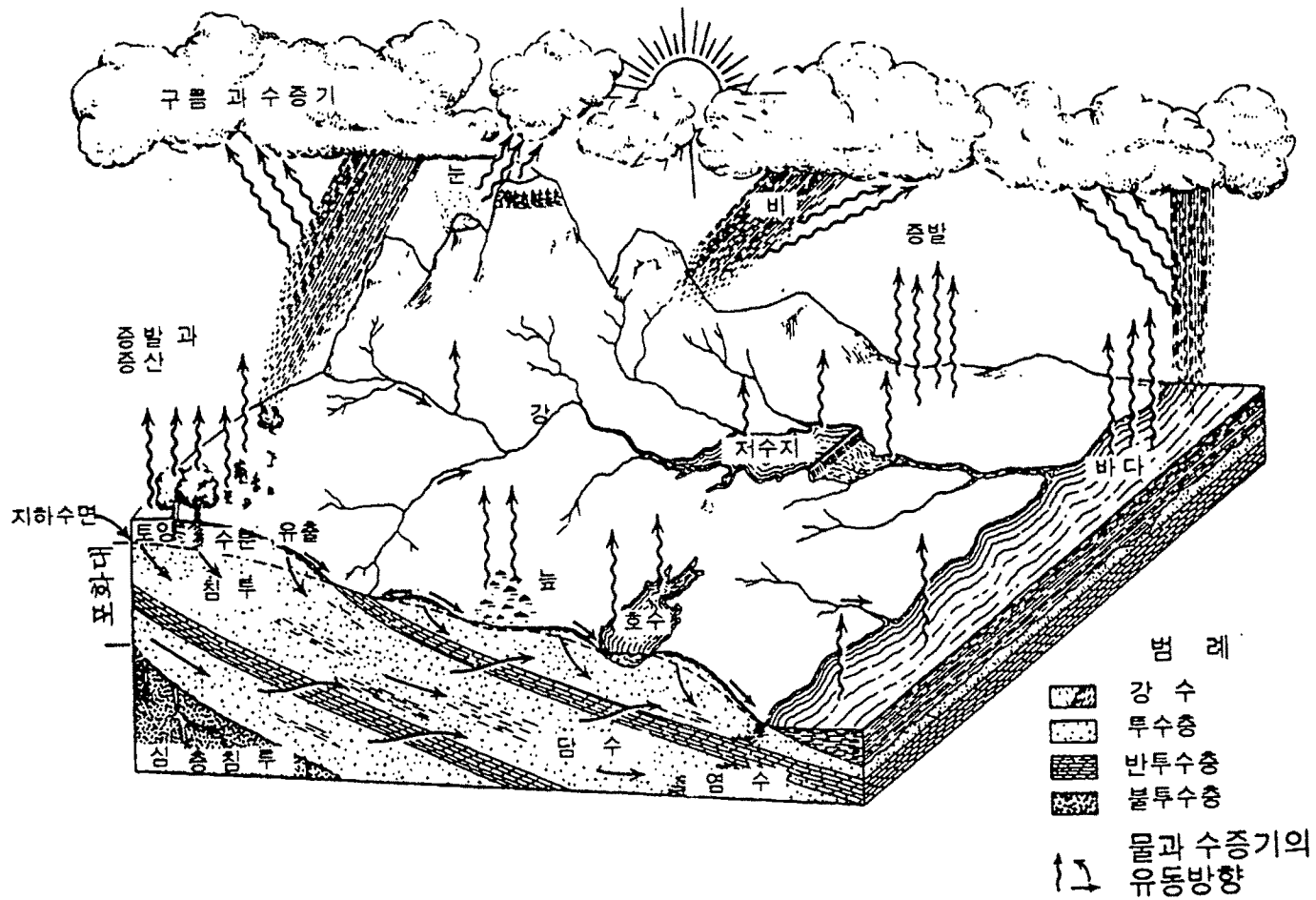


그림 2-1 지하수의 순환과 함양

나) 증발산

어떤 물질이 액체의 상태에서 기체의 상태로 변하는 것을 증발(蒸發, evaporation)이라 하는데 물의 경우 물 분자가 충분한 에너지를 받아 수면으로 부터 대기로 이탈하는 것을 말한다. 한편 식물 표면에서의 증발현상을 증산(蒸散, transpiration)이라고 하며 증발과 증산을 통칭하여 증발산(蒸發散, evapotranspiration)이라 한다.

지하수 함양에 감소 영향을 주는 증발산은 주로 수면과 지표면에서 발생하는 현상이나 지하수도 흠속의 모세관 현상과 식물 뿌리의 흡수에 의해 대기와 접촉하여 증발산이 이루어지므로 지하수 물 수지에 증발산은 큰 역할을 한다고 볼 수 있다. 그러나 증발량의 산정은 여러가지 요소가 관계되는 복잡한 과정으로 이론적으로나 실험적으로 많은 공식이 제안되고 있으나 그 사용에는 범위와 적용조건을 충분히 검토하여야 한다.

(1) 증발량 산정

대기와 접하여 있는 자유수면으로 부터 증발량을 산정하는 방법은 여러가지 있으나 공기 역학적 방법과 에너지 보존법칙의 이론을 근거로 간편하게 적용할 수 있는 경험공식을 소개하면 일반적으로 다음과 같은 형식을 보여준다.

$$E = Nf(u)(e_0 - e_a) \text{ -----(2-3)}$$

여기서 N : 상수, $f(u)$: 풍속 u 의 함수

e_0 : 수면에서 물의 온도의 포화 증기압

e_a : 대기온도에서의 증기압

위식에서 u 는 수면위 2m 또는 8m 위치에서의 풍속(km/hr)이며 e 는 mmHg 단위로써 대표적인 것은 다음과 같다.

미국(Meyer) : $E(\text{mm/day}) = 0.36(1+0.0621u_8)(e_0 - e_a)$ -----(2-4)

영국(Penman) : $E(\text{mm/day}) = 0.35(1+0.149u_2)(e_0 - e_a)$ -----(2-5)

상온일 때 습지에서의 증발량은 수면증발량의 0.9정도, 풀밭에서의 증발량은 풀의 성장도에 따라 수면증발량의 0.5~0.8정도로 알려져 있다.

한편 증발접시(evaporation pan)에 의한 증발량자료가 많이 쓰이고 있는데 기상자료의 하나로서 관측소에서 계속 측정되고 있다. 증발접시는 소형(지름 20cm, 깊이 10cm) 또는 대형(지름 120cm, 깊이 30cm)의 원통형 접시를 설치하는데 일반적으로 증발접시에 의한 증발량은 증발접시 벽의 가열등으로 저수지의 증발량보다 크다. 증발접시에 의한 증발량과 저수지 증발량의 비를 증발접시 계수(pan coefficient)라 하며 보통 0.7~0.8의 값을 갖는다.

(2) 증발산량 산정

증발산은 기상학적 요인이외에 식물의 종류, 식물의 밀도, 성장속도, 잎표면 크기등 식물 요소와 흙의 공극율, 투수계수, 입자의 크기, 흙의 함수율등 토양 요소에 직접적으로 영향을 받으므로 증발산량의 추정방법은 매우 복잡하다.

(가) 펜만(Penman) 방법

펜만(Penman)은 식 (2-5)를 수정하여 증발산량 산정공식을 다음 식으로

제시하였다.
$$E = \frac{\Delta \cdot H + \gamma E_a}{\Delta + \gamma}$$
 -----(2-6)

이 식중에서

$$E_a = 0.35(1+0.149u_2)(e_0 - e_a)$$
 -----(2-7)

$$\Delta = \frac{e_0 - e_s}{T_0 - T_a}$$
 -----(2-8)

$$H = (1 - \gamma)R_A [0.18 + 0.55n/N] - \sigma T_A^4 [0.56 - 0.09\sqrt{e_a}] [0.10 + 0.9n/\Lambda] \quad (2-9)$$

이며 여기서

R_A : 대기권에 도달하는 태양에너지 (cal/cm²/day)

n : 일조시간 (일조계로부터 측정)

N : 낮의 최대길이 (일출에서 일몰까지)

σ : Stephan-Boltzmann정수 (1.17×10^{-7} cal/cm²/°K⁴/day)

T_A : 절대온도 (°K = °C + 273)

T_0, T_a : 물체표면과 대기의 온도

e_0 : T_0 에서의 물의 포화증기압

e_a : T_a 에서의 물의 증기압

γ : 상수 (= 0.486 mmHg/°C)

펜만(Penman)방법은 물의 공급이 무제한일 경우의 증발산량 중 최대증발산량(potential evapotranspiration)을 나타내며 실제 식물소비수량은 이 보다 적다. 실험에 의하면 식물소비수량 cu 와 펜만 방법의 E 값은 $cu = 0.95E$ 의 관계를 갖는다.

(나) 블래니-크라이들(Blaney-Criddle)방법

블래니와 크라이들 등은 식물에 의한 물의 소비량(consumptive use)은 기후와 식물의 종류에만 영향을 받는다는 가정하에 다음 식으로 관계식을 수립하였다.

$$cu = \frac{K \cdot T_m \cdot P}{100} = K_j \quad \text{-----}(2-10)$$

여기서 cu : 식물 소비수량 (inch)

K : 곡물계수(옥수수 0.75, 콩 0.65, 보리 0.75 등)

T_m : 월평균기온 (°F)

P : 월간 낮길이와 연간 낮길이의 비(%) - 평균 10%내외

$$f = \frac{T_m \cdot P}{100} \text{ ----- (2-11)}$$

식(2-10)은 월별 식물소비수량으로 낮의 길이와 기온만의 함수로 표시하였으며 따라서 식물 성장기간 또는 계절별 총 소비수량은 $CU = \sum cu = \sum K \cdot f = K \sum f$ 로 표시할 수 있다.

(다) 손즈웨이트(Thorntwaite)방법

손즈웨이트(1948)는 기후인자를 고려 식물소비수량을 다음과 같이 제시하였다.

$$E = cT_m^a \text{ -----(2-12)}$$

여기서, E : 식물소비수량 (cm), T_m : 월평균기온 (°C), c : 지역계수,

a 는 연간 열지표(annual heat index) I 를 사용하여 다음과 같이 주어진다.

$$a = 67.5 \times 10^{-8} I^3 - 77.1 \times 10^{-6} I^2 + 0.0179 I + 0.49$$

$$I = \sum_{m=1}^{12} \left(\frac{T_m}{5} \right)^{1.514} \text{ -----(2-13)}$$

낮 길이가 12시간, 월 30일의 경우 (2-12)식은 다음과 같이 간단히 표시할 수 있다.

$$E = 1.62 \left(\frac{10 T_m}{I} \right)^a \text{ -----(2-14)}$$

다) 기저유출

지상에 큰 저수지가 있거나 또는 해빙과정에서 물이 공급되는 경우가 아니면 대부분의 하천은 강우가 없는 기간에 인근 대수층으로 부터 공급되는 물로서 유지된다. 이것은 대수층의 지하수 포장량 감소를 나타내는 것이므로 기저유출의 분석은 지하수 함양 해석에 매우 중요한 역할을 한다.

기저유출의 수문곡선 해석은 여러가지의 방법이 있다. 호-톤(Horton)은 기저유출의 수문곡선이 감쇠곡선임을 감안하여 다음과 같은 공식을 제안하였다.

$$Q = Q_0 e^{-cd^n} \text{ -----(2-15)}$$

여기서 Q는 단위 시간당 유량(예: m³/sec)이고 d는 기저유출 시점으로 부터의 시간(day), Q₀는 d=0 일 때의 기저유출량, e는 자연 대수, c와 n은 상수들이다.

반스(Barnes, B.S., 1939)는 기저유출 감쇠곡선을 다음과 같은 지수함수로 표시하였다.

$$Q = Q_0 K^t \text{ -----(2-16)}$$

여기서 Q와 Q₀는 식 (2-15)에서와 같고 t는 경과시간(days), K는 유역의 수리지질특성을 나타내는 감쇠상수로서, 현지 유량 측정자료에 의한 여러개의 Q-t 곡선을 그리고 그 접선을 그어 기울기를 구하면 K값을 정할 수 있는데 보통 0.89~0.95의 값을 갖는다.

코박스(Kovacs, G., 1963)는 기저유출이 대수층내의 지하수 흐름에 관계된다는 가정하에 수직흐름과 수평흐름으로 나누어 실험을 한 결과 다음과 같은 공식을 제안하였다.

$$\text{수직흐름의 경우} \quad q = q_0 \exp[-a(t-t_0)] \text{ -----(2-17)}$$

$$\text{수평흐름의 경우} \quad q = \frac{q_0}{a(t-t_0)^n} \quad \text{-----}(2-18)$$

여기서 q_0 는 t_0 때의 유출량이며 식 (2-17)은 앞의 호-톤 공식과 유사한데 소유역에서 투수성이 좋은 대수층의 경우, 특히 석회암의 투수성 지반에서 잘 맞는것으로 보고되었다.

2. 수문곡선

수위와 유량 또는 속도 등의 특성을 시간에 따라 나타낸 그림을 수문곡선 (hydrograph)이라고 한다. 유량을 시간에 따라 나타낸 곡선을 유량수문곡선 (discharge hydrograph), 수위를 시간에 따라 나타낸 곡선을 수위수문곡선 (stage hydrograph)이라 하며 일반적으로 수문곡선이라 할 때는 유량수문곡선을 뜻한다. 지하수위를 시간에 따라 나타낸 곡선을 지하수위 수문곡선 (groundwater level hydrograph)이라 한다.

강우에 의한 유출은 직접유출과 기저유출로 나눌 수 있고 직접유출은 지표면 유출과 중간유출로 나누어지는데 수문곡선은 이들 각 요소를 포함하고 있으며 감쇠곡선의 양상을 나타내는데는 앞서 설명한 반스(Barnes)의 지수곡선식을 사용할 수 있다. 즉,

$$q_t = q_0 K_r^t = q_0 e^{-bt} \quad \text{-----}(2-19)$$

단 q_t : t_0 인 시각으로부터 t 시간후의 유량

$$K_r = 1 \text{ 보다 작은 감소상수, } b = -\log_e K,$$

식(2-19)의 시간단위는 24시간을 주로 사용하고 K_r 의 값은 주어진 단위시

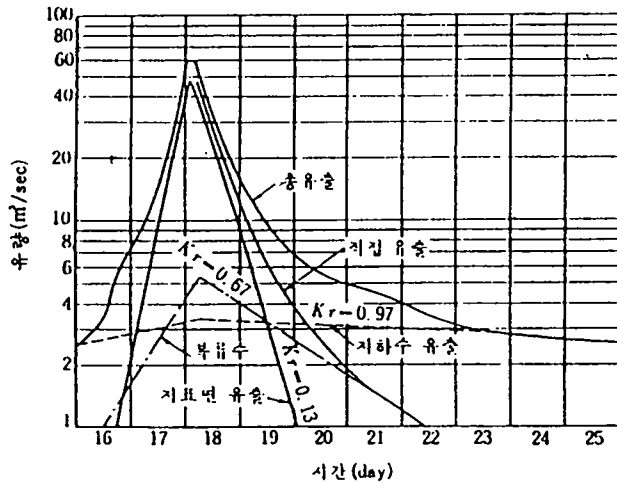


그림 2-2 수문곡선의 구성요소

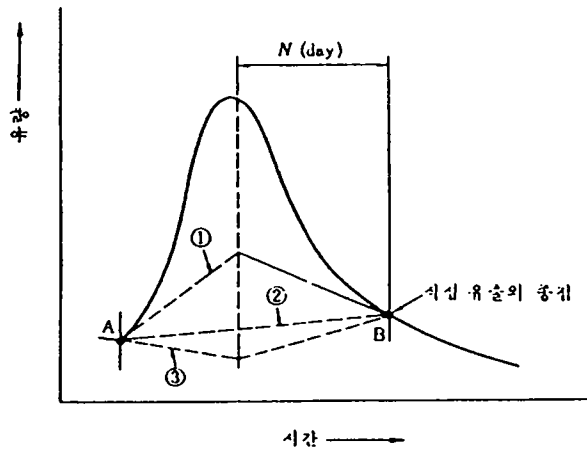


그림 2-3 수문곡선 분리법(N-day법)

간에 달라진다. 이식은 유량 q 를 대수축(logarithm scale)으로 하는 반 대수지에서 직선으로 나타나는데 반드시 직선으로 되지는 않고 K , 값이 증가됨에 따라 경사가 감소되는 곡선을 나타낸다(그림 2-2). 이는 흐름의 속도가 서로 다른 지표면유출, 중간유출 및 지하수유출의 특성 때문이므로 경우에 따라서는 이들 각 요소를 총 유출에서 분리하여 해석할 필요가 있다.

직접유출과 기저유출을 분리하는 방법으로 N-day 법이 있다. 이 방법은 첨두유량(尖頭流量)이 발생한 시간부터 직접유출이 끝나는 시간 N 을 유역면적 크기 A 의 함수로 나타내는 방법으로 다음과 같이 표시된다

$$N=0.8A^{0.2} \text{ -----(2-20)}$$

여기서 A : 유역면적 (km^2) .

N : 첨두유량이 발생하는 시간부터 직접유출이 끝나는 시간까지 소요 일(day)로서 그림 2-3에서와 같이 첨두유량이 발생한 시점으로부터 직접유출이 끝나는 N 일에 해당하는 B점을 잡아 수문곡선 상승부 시점인 A와 직접유출 종점인 B를 연결하여 유출을 분리하는 데 A-B의 연결 방법은 3가지가 있다. 즉 ①수문곡선을 반대수지에 그리고 B 이하의 직선부분을 연결하여 첨두 발생 시간과 만나는 점을 구하여 A - B 를 연결, ② A - B 를 직선으로 연결, ③ A점 이전의 수문곡선을 반대수지에 그리고 직선으로 연장해 첨두시간과 만나는 점을 찾아 A -B 를 연결하는 것이다.

3. 물 수지와 지하수함양

지하수의 함양(涵養, recharge)을 추정하는데는 질량보존의 법칙에 의한 물수지분석(water balance analysis)을 시행하는 것이 일반적이다. 이것은 조사지역 내로 유입 및 유출되는 물의 량과 지역내에 저류되는 수자원량의 변화

사이에는 항상 평형조건이 이루어진다는 가정으로 다음과 같은 기본식으로 표시할 수 있다.

$$I = O \pm \Delta S \quad \text{-----}(2-21)$$

여기서 I : 지역내로 유입되는 물의 총량 (inflow)

O : 지역밖으로 유출되는 물의 총량 (outflow)

ΔS : 지역내에서 주어진 기간동안 저류변화량 (storage change)

으로서 각 요소별 구성요소를 보면

○ 유입량요소: 지표수유입 + 지하수유입 + 강우 + 지역밖으로부터의 유입

(imported water)

○ 유출량요소: 지표수유출 + 지하수유출 + 증발산 + 소비 · 이용량 + 지역밖으로의 유출

(exported water)

○ 저류량요소 : 지표수저류량 변화 + 지하수저류량 변화 + 토양수 변화

로 세분할 수 있으며 식 (2-21)은 지역의 상황에 따라 여러가지 복잡한 형태의 물 수지공식으로 변환할 수 있다.

지하수는 수문순환과정의 일부분이므로 지하수의 물 수지는 지표수의 물 수지와 불가분의 관계에 있으나 지하수 유역단위(groundwater basin)로 대수층내의 지하수 물 수지를 검토하기 위하여 유출량과 유입량의 구성요소를 비교하면 다음과 같다.

유 입 량	유 출 량
<ul style="list-style-type: none"> ○ 대수층 경계 밖으로부터의 유입 또는 누수유입 ○ 강우의 침투 (자연함양) ○ 하천 또는 호수 바닥에서 침투 ○ 관개용수 또는 하수의 유입 ○ 인공함양 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 대수층 경계 밖으로 유출 또는 누수 ○ 증발산 ○ 하천 또는 호수로의 유출 (기저유출) ○ 용천에 의한 유출 ○ 양수이용 또는 인공배수

어느 기간중 지하수 유입량과 유출량의 차이는 대상지역의 대수층안에 저장되는데, 자유지하수의 경우는 지하수면 상부의 불포화지층 공극에 저류되고 피압지하수의 경우는 물과 대수층 구성물질의 압축율에 따라 저류된다. 그러므로 저류량 변화는 전자의 경우 지하수면 상승으로 나타내고 후자의 경우는 정수압의 상승으로 나타난다.

대수층 단위체적 중 지하수를 저류할 수 있는 공극체적 비율을 저류계수 (storativity, S)라 정의하는데 대수층면적 A에 지하수위 상승량 Δh 에 의한 저류량 V_w 는

$$V_w = S \times A \times \Delta h \quad \text{-----} (2-22)$$

로 표시할 수가 있다. 만일 수위상승이 지역내에서 일괄적이 아니고 저류계수도 각 지점별로 다르다면 대상지역을 같은 성질을 갖고 있는 소구역들로 분할하고 각 소구역별 저류량을 총합하여 전체 저류량을 계산한다. 즉,

$$V_w = \sum_{i=1}^n S_i \times A_i \times (\Delta h)_i \quad \text{-----} (2-23)$$

4. 지하수 함양의 유형

지하수 함양이란 자연적 혹은 인공적 수단에 의해 지표수 혹은 다른 대수층의 지하수가 지질매체를 통해 특정한 지하수체(대수층)로 유입되는 현상을 말한다. 미고결 대수층의 경우 강우 혹은 지표수가 비 포화대를 통해 혹은 지표수체와 지하수체의 경계부를 통해 유입되는 현상으로 볼 수 있다.

지하수 함양은 크게 자연함양과 인공함양의 두 가지로 나눌 수 있다. 지하수 자연함양은 투수성을 가진 비 포화대를 통한 강우의 하향 유입, 강이나 호수의 투수성 좋은 바닥면을 통한 지표수의 유입, 다른 대수층으로 부터의 지하수 유입의 세 가지 요소로 이루어진다. 이러한 자연함양과 동시에 지하수의 유출현상이 일어난다. 태양열에너지에 의한 증발현상, 식물에 의한 증산작용, 용천이나 이득하천에 의한 유출, 주변 대수층으로의 유출 등은 지하수의 자연함양과 반대되는 지하수 유출현상의 요소들이다. 실제의 지하수 함양량을 결정하고자 한다면 위의 자연함양요소들에 의한 유입량에서 유출현상의 요소들에 의한 유출량을 제외하면 된다. 그러나 지하수의 자연함양 및 유출현상의 모든 요소들을 정량적으로 결정하기는 대단히 어려운 일이다. 지하수의 함양을 강우에 의한 자연함양만 있다고 보는 경우 그 대수층의 안정 채수량 (safe yield)은 강우에 의한 지하수 함양량의 최소 20%에서 최대 80% 정도로 보는 것이 일반적이다 (Huisman and Olsthoorn, 1988).

지하수 함양량의 증가는 안정 채수량의 증가를 가져온다. 안정 채수량을 증가시키기 위해 자연함양만에 의존하지 않고 인공함양법을 사용할 수 있다. 인공함양법은 크게 간접 인공함양과 직접 인공함양의 두 가지로 분류할 수 있다.

간접 인공함양법은 지하수의 유출지역에 지하수 채수시설을 설치함으로써 지하수 함양의 증가효과를 낼 수 있다. 본 연구의 관심 대상인 지하댐의 개념은 간접 인공함양법과 유사한 것으로 볼 수 있다. 이와는 달리 직접 인공함양법

은 저수지나 연못, 소규모의 댐 등의 지표수 저장소나 인공 주입정을 이용하여 지하수위를 인위적으로 높여주는 방식이다. 저수지등의 지표수체를 이용하여 지하수 인공함양을 실시하는 경우 저수지 바닥을 통한 침투량, 비포화대 하부에서의 유입량, 대수층에서의 수평흐름 정도를 나타내는 투수량 계수가 중요한 요소로 작용한다. 지하수 함양의 유형을 세분하여 기술하면 다음과 같다.

가. 자연함양

자연상태에서 지하수의 함양은 강우의 지하침투와 하천 및 호수 등 지표수의 침투등을 들 수 있으나 일반적으로 자연함양(natural recharge) 이라 할 때는 전자를 뜻한다.

자연함양은 지표면이 투수성 지반으로 된 자유면 지하수에서 일어나며 피압 지하수의 경우는 인근 자유면대수층으로 부터 2차적으로 함양된다.

자연함양과 강우량의 관계에 영향을 주는 인자는 강우형태(비·눈 등), 기후 조건, 토양수분, 강우특성(기간, 강도, 최대강우량 등), 지표의 지형적 특성과 투수성 및 식생현황을 들 수 있다.

침투(infiltration)는 자연함양의 시작으로 지표에서 지하수면에 이르기 까지 불포화상태의 수직흐름을 말하며 이는 흙의 수직적 구성성분과 관련이 있다. 그러나 지역의 지하수 관리측면에서는 강우 기간별 순간 침투량이 문제가 아니라 계절별 또는 연간 함양량이 관심사가 된다.

지하수 관리모델에서는 보통 연간 평균 함양량 또는 계절별 함양량을 가정하며 때로는 강우기와 갈수기의 기간적 분석을 위하여 월평균 함양량을 이용한다.

연간 또는 계절별 강우량에 의한 자연함양량을 추정하기 위하여는 자연함양이 강우량보다는 대수층특성에 관계된다는 가정을 채택하는 것이 편리하다. 즉 일정기간의 강우량 중 일정비율이 함양된다고 가정할 때 다음식으로 표현할 수

있다(Jacob Bear, 1979).

$$N = \alpha(P - P_0), \quad P > P_0$$

$$N = 0, \quad P \leq P_0$$

여기서 N : 연간 자연함양량, P : 연 강우량

α : 비례상수 (자연함양율, recharge ratio)

P_0 : 함양 시작 강우량(threshold precipitation)이며,

예를 들어 $\alpha = 0.4$, $P_0 = 200\text{mm/year}$ 이면 $P = 1,200\text{mm/year}$ 일 때에 $N = 400\text{mm/year}$ 로 함양량을 추정할 수 있다.

나. 하천수의 함양

자유대수층 위를 흐르는 하천은 대수층과 물을 주고받는 관계에 있다. 대부분 하천의 기저유출은 하천 수면보다 하천 인근 대수층의 지하수면이 높을 때 유출되는 지하수로서 이러한 하천을 배수하천(effluent stream) 또는 이득하천(gaining stream) 이라 한다.

한편 하천의 수위가 인근 대수층의 지하수위보다 높으면 하천수는 대수층으로 유입되며 이러한 하천을 함양하천(influent stream) 또는 손실하천(losing stream)이라 한다.

함양하천은 대수층에 물을 보충하는 선 공급원(line source) 역할을 하며 투수량은 하천수의 깊이와 하상의 투수계수에 관계된다.

같은 하천이라도 우기와 건기에 따라서 함양하천과 배수하천이 될 수도 있다. 대부분의 소하천 유역에서는 우기 초기에 하천유량의 증가로 지하수위보다

높은 하천수위를 갖고 있으며 인근 대수층에 함양이 되나 갈수기에는 하천유량이 감소하여 기저유출로 바뀌며 가뭄이 계속될 경우 건천이 되기도 한다.

피압대수층에서는 하천수의 직접 함양은 이루어지지 않으나 만약 하천바닥이 깊게 파이고 피압대수층의 상부와 접하여 있으면 물의 교환작용이 이루어질 수 있다. 즉 피압지하수의 정수압면이 하천수위면 보다 높으면 배수하천이 되고 낮으면 함양하천이 된다.

다. 인공함양

지하수 인공함양(artificial recharge)이란 자연함양과 상대적인 표현으로서 인위적으로 지표수를 지하에 유입시키는 작용을 말하며 함양수의 수량과 수질, 함양장소 및 함양시기 등을 조절하므로써 지하수의 관리계획을 수립할 수가 있다. 인공함양의 종류를 분류하면 다음과 같다.

1) 함양 목적에 따른 분류

(가) 지역 수문의 조절용 : 지하수위 또는 정수압을 높이므로써 지하수의 유동방향과 유동량을 조절하는 목적으로 이용된다. 해수침입 억제방법, 용천의 유량통제 방법, 인근 지표수(하천 또는 호수)의 유입 또는 유출억제 방법 등이 있으며, 특히 피압대수층의 경우 저류계수가 낮기 때문에 적은량의 충전으로도 수두를 크게 높일 수 있으며 해안대수층의 해수침입 방지에 유용하다.

(나) 수자원 저류용 : 자유대수층은 유효공극이 상대적으로 크기 때문에 지하저류지로 활용할 수 있다. 예를 들어 저류계수가 15%인 평야부 대수층면적 10km²에 평균 1m의 지하수위 상승은 1.5×10^6 m³의 수자원을 저장할 수 있다. 저장된 지하수를 사용하지 않고 오랫동안 그대로 두면 지하수는 서서히 지역 하류로 유출되므로 시간적으로 장단기 저류계획을 세워 이용할 수 있다. 장기 저류는 우기에 지표유출이 과잉일 때 하천이나 호수의 물을 대수층에 저장시켰

다가 갈수기에 활용하는 것이고 단기저류는 물 소비지역에 공급된 일정량의 물 중 소비시간별로 잉여 수량을 지하에 저류시키고 초과 수요가 발생시 양수 재 이용하는 것을 말한다.

물의 저류에 있어 대수층저류와 저수지저류의 경제적, 또는 수문학적 가능성 검토사항을 열거하면 다음과 같다.

대수층 저류	저수지 저류
<ul style="list-style-type: none"> • 주입우물 또는 침수지 비용 • 양수시설 비용 • 에너지 손실 • 증발산 손실 (지하수면이 지표에 가까이 있을 때) • 누수 손실 	<ul style="list-style-type: none"> • 토지 비용 • 댐 건설 및 이용시설 비용 • 수력발전에 의한 에너지 이용여부 • 증발 손실 • 침투 손실 • 댐 위치의 적정성 • 수질오염 가능성

(다) 수질 조절용 : 물을 대수층에 유입시키면 수동력학적 분산(hydrodynamic dispersion)과정에 의해 대수층에 있는 지하수와 혼합된다. 인공함양으로 사용하는 물이 기존 지하수의 수질보다 좋을 수도 있고 나쁠 수도 있는데 전자는 수질을 개선하는 경우이고 후자는 수질을 저하시키는 예이다. 그러나 수질 허용기준 범위내에서 조절한다면 수자원 이용가능량을 늘리는 효과가 있을 수 있다.

대수층내에서 물의 흐름은 매우 느리기 때문에 유입시킨 물이 재사용 되기까지는 상당한 기간(년간 또는 수년간)이 소요될 수 있다. 이 기간중 대수층내에서 흡착 또는 이온교환 등 화학반응과 방사능 붕괴 및 여과작용 등이 일어나므로 유입된 물의 수질개선이 이루어질 수도 있다. 하수 등을 지하에 함양시켰다가 재 이용하는 것은 이러한 원리를 이용한 것이다. 또한 부유물질이 많은 지표수는 침투지에서 여과하여 함양시키는 방법을 이용하면 수질개선이 이루어진다.

(라) 기타 목적에 따른 인공함양

① 자연함양량이 지하수 이용 수요량 보다 부족할 때 보충수로서의 인공함양

② 폐수의 지하심부 방류 - 이경우 대수층조사를 철저히 하여 폐수가 이용하는 대수층의 지하수에 접촉되지 않도록 유의해야 한다.

③ 대수층을 물공급 도수로로 활용 - 주입우물의 수위는 높아지고 양수우물의 수위는 낮아지므로 수두차에 의하여 지하수 유향이 정해지며 대수층은 도수로(conduit) 역할을 한다.

④ 저(低)수위에 의한 악 영향방지 - 지하수위가 낮아 지반침하나 식물고사 등의 피해를 방지하도록 높은 수위를 유지하기 위한 인공함양

⑤ 냉각수 이용 - 공장 등의 냉각 시스템에서 열수를 지하에 함양하여 냉각시킨 후 양수 이용

2) 함양 방법에 의한 분류

(가) 침투량 증대 방법 : 지표면의 조도(粗度, roughness), 경사도, 식물 밀도 등을 조절하여 지하 침투량을 증가시키는 방법으로 예를 들어 배수하천에 돌담 또는 보(weir) 등을 시설하여 경사를 줄이고 물 퍼짐을 넓히는 방법을 들 수 있다.

(나) 침투지에 의한 방법 : 바닥의 투수성이 좋은 인공저수지나 함양목적의 침투지(浸透池, infiltration basin)를 이용하는 방법이며 지형상 넓은 침투지 설치가 어려울 때는 등고선을 따라 도랑을 파서 물을 유도하는 경우도 있다. 침투지에 의한 인공함양의 경제성은 침투율 유지에 관련된다. 사력질에서 침투율은 3m/day, 세사에서 2m/day 실트질에서 0.5m/day로 알려져 있으나 시간이 지날수록 공극이 점차 막혀져서 침투속도가 감소된다. 그러므로 어느 기준 이하로 침투율이 떨어지면 침투지를 건조시켜 청소하여야 하며 때로는 바닥면을 2~5cm정도 긁어서 침투율을 복원할 수 있다. 이런 작업은 흙의 성분과

물의 성질에 따라 다르나 연간 2~3회 정도 시행하여야 한다.

(다) 우물주입 방법 (artificial recharge through wells) : 인공함양을 목적으로 우물을 설치할 수도 있으나 일반 양수우물도 주입우물로 사용할 수 있다. 우물주입 인공함양 공법은 ① 피압대수층의 함양, ② 자유대수층이 깊고 중간이 불투층이 산재한 경우, ③ 침투지 등의 토지확보가 어려운 경우, ④ 기존 우물을 함양우물로 활용하므로써 추가비용을 절감할 경우에 적용된다.

주입효과는 침투지에서와 마찬가지로 시간경과에 따라 감소되는데 주입우물의 경우는 주입수가 우물에서 빠져나가 유속이 떨어질 때 미세립자가 대수층 공극내에 축적되는 것이므로 상당한 두께로 막힘효과가 생기며 따라서 청소도 어렵게 된다. 그러므로 우물주입 함양수는 먹는물 정도의 수질이 요구되며 염소처리, 침사 및 여과 등의 수처리 과정을 거쳐야 한다. 또한 주입물이 현저히 떨어질 경우 산화처리, 산소공급, 효소처리 등 화학적 방법과, 순간 과잉양수 등 물리적인 방법으로 청소할 수도 있다.

(라) 유도함양(induced recharge) : 하천이나 호수 인근에 집수암거 (infiltration gallery) 또는 충전 우물 집단(well field)이 있어 이들의 양수 시설을 가동할 때 지하수위를 낮추어 지표수체로 부터 수두경사를 크게 하므로써 함양량을 증대시키는 것을 말한다. 이 방법은 별도의 함양시설을 시공하지 않고서도 지하수시설의 이용시 자연적으로 함양을 유도하는 동시에 지표수가 함양되어 대수층을 통과하는 동안 정수처리되는 장점이 있다.

제 3 절 가뭄과 지하수의 관계

1. 가뭄빈도

가뭄의 정도를 해석하는 방법으로 증발량 크기를 비교하는 방법과 과우일수에 의한 가뭄빈도 평가방법이 있다. 과우일수에 의한 가뭄평가는 평균강우량에 비해 강우가 적은 일수를 합계하여 가뭄정도를 해석하는 기준으로 하고 있으며 우리나라에서 기상학적인 가뭄을 평가하는데 가장 유용한 방법이라고 할 수 있다. (김현영 등 : 항구적가뭄대책 1995, 우리나라 가뭄 평가방법 연구 - 한국 관개배수 학회지 vol.3, no.1)

그러나 가뭄과 지하수의 관계를 규명하는데는 무강우 지속일수에 의한 가뭄 평가기준이 더 적절할 것으로 판단된다. 왜냐하면 무강우지속일수와 지하수위 강하와의 사이에는 어떤 일정한 관계가 있기 때문이다.

Hershfield 등(1972)은 dry-day 즉 무강우 지속일수에 따라 가뭄정도를 해석하였다. 그는 dry-day를 계산할때 강우가 있으되 강우로서 수문 및 농업에 아무런 영향을 미치지 않는 강우 즉 무강우 취급을 할 수 있는 기준우량을 0.25인치(6.4mm)로 적용하였다. 우리나라에서 Hershfield 방법에 따라 무강우 지속일수에 의한 가뭄분석에 따르면 무강우·계속일수가 30일 이상되면 10년 빈도가뭄에 해당된다.

표2-1은 우리나라 전국 측후소별로 관개기간인 5월부터 9월까지 5개월 기간 중 무강우 지속일수에 따른 가뭄빈도 기대년을 계산한 것이다.

표2-1 무강우 지속일수에의한 가뭄빈도 (관개기간 5~9월)

기대년 지명	2	5	10	20	25	30	50	100
부산	22.4	29.2	33.9	39.3	39.7	40.9	44.0	48.2
진주	20.4	27.8	32.7	37.4	38.9	40.1	43.5	48.0
대구	21.7	27.6	31.6	35.4	36.6	37.5	40.2	43.9
광주	21.3	28.0	32.4	36.6	38.0	39.1	42.1	46.2
전주	19.7	26.4	30.9	35.0	37.4	40.4	44.5	48.6
대전	20.0	26.4	30.6	34.7	36.0	37.0	39.9	43.9
청주	21.2	29.0	34.1	39.0	40.6	41.9	45.4	50.2
수원	21.7	27.3	31.1	34.6	35.8	36.7	39.2	42.7
서울	21.2	27.9	32.0	36.5	37.8	38.9	42.0	46.0
평균	21.0	27.7	32.1	36.5	37.8	39.1	42.3	46.4

※자료 : 농어촌진흥공사 조사설계처 수문분석반

2. 가뭄과 지하수위 강하

농어촌진흥공사에서는 '71~'75 기간중 전국 123개의 층적층 관정을 대상으로 시설관정 관측조사사업을 시행하여 관측우물에서 지하수위 변화와 월별 채수량변동을 조사하였다. 이 보고서에 의하면

- 지하수위는 강수량에따라 민감하게 반응하며, 일시에 다량의 강수가 내린 것 보다 소량씩 연속적인 강수가 지하수위에 미치는 영향이 뚜렷하다.
- 자연수위강하가 우물 채수량에 미치는 영향은 자연수위 강하량 1m 당 채수량 감소율은 33%이었다.
- 강우가 내린지 자연수위 회복기간은 1~2일 소요되며 수위회복후 강우가

없으면 수위는 서서히 하강한다.

층적대수층의 지하수위 (water-table)와 강우량과의 관계는 지하수학자들의 연구대상이 되어 왔다. 그러나 강우량과 지하함양율의 관계, 함양된 지하수의 유입과 유출관계등 지역적 특성을 고려해야하는 문제때문에 강우량과 지하수위 관계를 범용적으로 설명할 수 있는 수리적 모델이 아직 정립되지 않고 있다.

Viswanathan 등은 (1983) 자유면 대수층에서 강우와 지하수위 관계를 연구하여 다음과 같은 회귀법에 의거 지하침투를 결정짓는 토양계수를 구하였다.

$$Y_t^{\cdot} = \lambda Y_{t-1}^{\cdot} + \alpha X_t \text{ ----- (2-25)}$$

$$Y_t = Y_t^{\cdot} + e_t$$

단, Y_t : 관측우물에서 t일 측정된 지하수위

Y_t^{\cdot} : actual water table

X_t : t 일의 강우량

λ : 배수와 관련된 상수

α : 토양공극과 관련된 상수

e_t : 오차

이는 t 일의 강우량이 당일의 지하수위에 미치는 영향을 설명하는것으로 지하수위 변동은 전날의 수위에 관계되고 당일의 강우량과 토양계수에 따라 좌우 되는데 토양계수란 지점별로 다르기 때문에 같은 지역 안에서도 지점별로 함양율이 다르다는 것을 보여주고 있다.

만일 강우가 없이 가뭄이 지속된다면 가뭄기간동안의 수위강하는

$$Y_t / Y_{t-1} = \lambda$$

의 관계를 나타내고 지하수위 변동은 지수함수 (exponential function)로 표시될 수 있음을 암시하고 있다. 즉 t-1 시점을 기준으로 dt 시간동안 Y_0 에서 Y_t 로 변동했다고 보면 위 식을 적분하여

$$Y_t = Y_0 e^{kt} \quad \text{-----} \quad (2-26)$$

로 표시할 수 있다. 이에 대한 검토는 다음절에서 지하수함양과 연계하여 논의하기로 한다.

농어촌진흥공사의 기설관정 관측조사 보고서 자료를 이용하여 가뭄때 지하수위 강하량을 산출해 보았다. 표2-2 는 풍수기와 갈수기의 강우량과 지하수위 및 가채수량의 비교자료이다. 여기서 강우량은 수위측정시점에서 그 이전 1개월간의 강우량 누계(mon- thly rainfall)이고 자연수위는 지표로부터 지하수위 까지의 심도이다. 전체적인 평균개념으로 볼때 풍수기의 월 강우량은 257.54mm, 갈수기 월 강우량은 59.64mm로 강우량 차이는 197.89mm 이었는데, 지하수위는 풍수기에 0.652m, 갈수기에 1.419m 로 차이량은 0.767m 이었다. 이것은 월 강우량이 영(zero)일때, 즉 무강우 지속일수가 30일(10년 빈도 가뭄에 상당함)일때 지하수위 강하량을 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\frac{257.54}{197.89} \times 0.767m = 0.998m$$

즉 10년 빈도의 가뭄이 올때 지하수위 강하량은 평시 수위보다 약 1m 정도 낮아짐을 나타낸다. 또한 이때의 지하수 채수량변화는 평시의 양수량에 비해 약 33%정도 감소된다고 보고 되어 있다.

제 4 절 지하수 함양 평가방법 연구

1. 지하수함양량 추정방법

가. 물 수지분석에 의한 지하수함양량 이론

지하수 부존량평가에서 지하수함양량 산정은 매우 중요한 사항으로서 함양량 추정방법은 Darcy 법칙에 의한 지하수유동 공식을 적용하여 대수층의 저류량 변화를 추정하는 방법과 비포화 지층에서의 토양수분 함양율(soil moisture content) 분석에 의한 방법, 유역내의 물 수지(regional water balance) 분석에 의한 방법등 여러가지 기법이 사용되고 있다. 이들 방법 중 어느 방법을 채택하는 가는 수집가능한 현장자료가 어느쪽에 적합한지에 달려 있으며 가능하다면 몇가지의 방법을 동시에 적용하여 자연함양량을 비교분석하여 크로스체크 할 필요가 있다.

자료취득과 분석방법면에서 물 수지분석 방법이 여러가지 편리성이 있다. 이것은 조사 대상지역의 유입량과 유출량의 각 변수를 파악하여 검토하는 것으로 지역단위 물 수지공식(equation of regional groundwater balance)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \left(\begin{array}{c} \text{지하수} \\ \text{유입량} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{지하수} \\ \text{유출량} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{자} \\ \text{연} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{하천에서} \\ \text{함양량} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{하천으로} \\ \text{유출량} \end{array} \right) \\ & + \left(\begin{array}{c} \text{인공} \\ \text{함양량} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{용천} \\ \text{유출량} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{증발산} \\ \text{량} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{양수 및} \\ \text{배수량} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{지하수저류} \\ \text{증가량} \end{array} \right) \quad \text{--(2-27)} \end{aligned}$$

한편 소유역에서 기저유출을 중심으로 물 수지를 검토하면 위의 유입 유출의 구성요소 중 일부를 무시할 수 있으므로 주요 요소만을 써서 물 수지공식을 쓰면 다음과 같다.

$$R = Q_i + P - Q_0 - E - Q_x \quad \text{-----} \quad (2-28)$$

여기서 R : 지하수 함양량

Q_i : 하천에서 유입량 Q_0 : 하천 유출량

P : 강우 침투량 E : 증발산 손실

Q_x : 취수 이용량

지하수 물 수지 분석에서 주요 요소는 앞에서 기술된 바와 같으나 지역의 조건에 따라서 추가로 검토할 사항은 다음과 같다.

(1) 관개용수의 회수 : 관개용수로 공급된 물은 식물의 소비수량으로 모두 소모되지 않고 일부는 침투하여 지하수에 보충된다. 이 량은 수로조직에서의 누수량을 포함하여 급수량의 20~40%에 이른다. 관개용수의 지하수 회수는 지하수 함양량의 증가요인인 동시에 비료·농약 등에 의한 오염농도 증가의 요인이 되기도 한다. 특히 생활하수 등이 관개용수로 쓰일 때는 수질문제가 야기될 수 있다.

(2) 증 발 산 : 증발산은 대수층 지하수를 대기 중으로 이동시키는 과정의 하나이다. 지하수위가 지표에서 1~1.5m 이상 되면 증발은 무시해도 되나 수목이 있을 때는 증산작용은 상당한 깊이까지 영향을 준다. 특히 지하수면이 지표면 가까이 있을 때는 증발산량은 물 수지 분석에 중요한 인자가 된다.

(3) 용 천(湧泉, spring) : 대수층내의 지하수면이 지표면과 접촉하여 물이 유출하는 현상을 용천이라 한다. 용천 유출량은 대개 적은 량이므로 물 수지

분석에서는 거의 무시될 수 있으나 때로는 용천 량이 매우 커서 인근의 물 흐름을 주도하는 경우도 있다 (예, 제주도 해안변의 용천수). 용천 유출량은 용천 주변 대수층의 지하수면(또는 정수압면) 높이에 관계된다. 갈수기에 유출이 계속되면 지하수위가 낮아지고 이에 따라 용천량도 줄어든다. 이것은 하천에서의 기저유출과 같아서 그 감수곡선은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$Q_t = Q_0 \exp[-\beta(t - t_0)] \quad \text{-----}(2-29)$$

여기서 Q_0 , Q_t : 시간 t_0 및 t 에서의 용천 유출량

β : 대수층의 저류계수와 관련되는 감쇠상수

(4) 양수 및 배수 : 지하수 이용을 위하여 터파기 우물, 관정, 수평우물, 집수암거, 방사상집수정 등 다양한 우물시설이 개발된다. 지역 물수지 분석에서는 개별 양수량 보다는 지역 전체의 양수량과 그 분포가 중요한 요인이 된다. 농업지역에서 지하수위가 높은 경우 식물뿌리 권역 아래로 수위를 조절하기 위하여 도랑을 치거나 지하배수관을 묻어 물을 빼는 것도 물 수지 분석에서 제외되어서는 안된다.

나. 지하수 자연함양을 산정 방법

식(2-28)은 대상지구내의 물수지 평형개념을 단순화한 표현이지만 실제로 이용하는데는 매우 복잡하다. 왜냐하면 지표수와 지하수의 유입량, 유출량 산정이 쉽지않고 증발산량 산정방법도 복잡하며 또한 지구내에 지하수 이용이 있으면 여러가지 변수가 발생하기 때문에 더욱 어렵게된다.

그러므로 식(2-28)을 더욱 간단하게 하도록 대상지역 내에서 취수이용이 없고 $Q_i = Q_0$ 인 상태하에 물 수지를 생각하면 함양량은 강우량과 증발산 손실의 차이에 해당된다. 그러므로 구역내의 증발산량을 산정할 수만 있다면 강수

에 의한 지하수 함양량 추정이 가능하나, 실제 증발산량 산정방법은 매우 복잡하고 오류가 클 수 있으므로 강우량 중 일정부분이 지하에 함양된다는 가정하에 강우량과 대수층 관계를 다음과 같이 설정하였다.

대수층면적 A에 강우량 P가 내렸을때 지하수 함양량 R은 다음 식으로 쓸 수 있다.

$$R = \alpha A(P - P_0) \quad \text{-----} \quad (2-30)$$

여기서 P_0 : 지하수침투가 시작되는 강우량(threshold rainfall)

α : 지하수함양율 (Recharge ratio)로서

이것은 앞절에서 설명된 강우에 의한 자연함양량(Jacob Bear, 1979)과 같이 된다. 여기서 지하수함양율은 강우량이 표토에 침투(percolation)하여 지하수면에 도달하는것과 표류수로 저류되었다가 2차적으로 지하에 함양되는것 등을 모두 합하여 강우량에 대한 함양량의 비율(%)을 말하는 것으로 단위시간당 함양속도를 의미하는 지하함양계수(recharge rate, $m^3/sec/ha$)와는 개념의 차이가 있다.

식 (2-30)에서 P_0 를 고려한것은 Hershfield에 의한 무강우취급 강우량 즉 강우가 있으되 수문 및 농업에 아무런 영향을 주지 못하는 강우량을 제외하는 것이 합리적이라고 보기 때문이다. 또한 현장 관측조사 자료는 하루에 다량의 강우가 있을 때 그 일부분만 지하수함양에 보탬이 된다는 것을 보여주고 있는데 Leach(1980)는 강우와 자연함양의 관계를 조사하면서 1일 100mm이상은 제외하고 월 강우량을 계산하도록 제안하였다.

같은 지역에서 어떤 시점에 강우량 P_1 에 의한 함양량이 R_1 이었다면 일정시간 경과후 강우량 P_2 에 의한 함양량 R_2 와의 차이는

$$R_1 = \alpha A(P_1 - P_0)$$

$$R_2 = \alpha A(P_2 - P_0)$$

$$R_1 - R_2 = \alpha A(P_1 - P_2)$$

$$\Delta R = \alpha \cdot A \cdot \Delta P \text{ -----(2-31)}$$

한편 지하수함양량 증가분 ΔR 에 따라 이지역 지하수위가 $\Delta h (= h_2 - h_1)$ 만큼 상승하였다고 하면

$$\alpha \cdot A \cdot \Delta P = A \cdot \Delta h \cdot S_y$$

$$\alpha = \frac{\Delta h}{\Delta P} \cdot S_y = \frac{h_1 - h_2}{P_1 - P_2} \cdot S_y \text{ -----(2-32)}$$

즉 t_1 과 t_2 시점에서 지하수 수두 h_1, h_2 를 관측하고 또 각 시점에서 그 이전 일정기간의 강우량(월 강우량) P_1, P_2 를 알면 지하수함양율 α 를 구할 수 있다. 여기서 S_y 는 대수층의 비산출율(specific yield)이다.

농어촌진흥공사에서 '71~'74 기간중 시행한 기설관정 관측조사 자료 (표 2-2)에 의하면 우리 나라 총적대수층에서 풍수기와 갈수기의 월 강우량 차이는 평균 197.9mm, 자연수위 차이는 0.767m 로 보고되었다. 이자료는 총 조사 대상공수 123공의 관측자료를 대수층 지질별 심도별로 분류하고 지하수위가 가장 높을때 평균 자연수위와 그 이전 1개월간의 강우량, 그리고 지하수위가 가장 낮은 때의 월강우량과 자연수위를 비교하므로써 풍수기와 갈수기의 월강우량 차이와 자연수위 차이를 분석하였는데, 이자료를 앞의 공식 (2-32)를 적용하여 지하수 함양율을 계산한 결과 평균 지하수함양율 $\alpha = 0.581$ 을 얻었으며 여기서 필요한 대수층 비산출율은 $S_y = 0.15$ 로 추정하였다.

대수층 지질별 지하수 함양계수 산출내역은 표 2-3과 같으며 이것은 전국 평균개념의 자료에 의한 것이므로 지역별로는 해당 지역의 강우량과 지하수위 자료를 사용하여 분석하여야 할 것이다.

여 백

표 2-2 지하수위변동에 따른 가채수량변화

대수층 지질별	심도별	공수	지하수위가 가장 높을때		
			강수량 (mm)	자연수위 (m)	가채수량 (m ³ /D)
점토질사	4m 이하	2	395.90	0.45	1,357
"	4~6m	4	235.50	0.403	553
"	6m 이상	2	210.65	0.288	1,345
	평균	(8)	269.38	0.386	952
모래	4m 이하	5	333.04	0.52	2,497
"	4~6m	14	270.72	0.574	1,439
"	6m 이상	11	259.14	0.647	1,462
	평균	(30)	276.86	0.591	1,624
사력	4m 이하	10	218.99	0.459	1,728
"	4~6m	17	242.65	0.717	1,442
"	6m 이상	13	226.10	0.998	1,383
	평균	(40)	231.36	0.744	1,494
사력혼전석	4m 이하	11	236.10	0.732	1,447
"	4~6m	20	302.07	0.760	1,648
"	6m 이상	14	237.39	0.455	1,717
	평균	(45)	265.82	0.658	1,620
	총평균	(123)	257.54	0.652	1,537

※ 자료 : 시설관정 관측조사 종합보고서 1975 p435
 - 강수량은 월간 강수량
 - 자연수위는 지표로부터 지하수위 까지 심도

지하수위가 가장 낮을때			강수량 차이 mm	자연수위차 이(교차량) m	가채수량차이		비고
강우량 (mm)	자연수위 (m)	가채수량 (m ³ /D)			감소량 (m ³ /D)	%	
26.81	1,592	711	269.09	1.142	646	51.4	자연수위교 차량 1.0m 당가채수량 감소비율
59.17	0.795	385	176.32	0.392	167	30.1	
33.9	0.752	778	176.85	0.464	567	42.1	
44.74	0.984	565	224.64	0.598	387	40.6	67.6%
45.42	1.137	2,200	287.62	0.617	297	11.9	감소비율
135.90	1.316	1,020	134.81	0.742	418	29.0	
33.12	1.375	1,274	226.01	0.728	188	12.9	
82.47	1.308	1,310	194.38	0.716	313	19.2	26.6
24.29	1.145	1,052	194.70	0.683	675	39.1	
75.86	1.504	1,170	166.79	0.786	271	18.7	
38.40	2.188	976	187.69	1.190	406	29.4	
50.79	1.636	1,078	180.56	0.892	416	27.8	31.2
53.33	1.110	1,029	182.80	0.378	418	28.9	
54.36	1.569	1,090	247.70	0.808	557	33.7	
57.02	1.317	1,499	180.37	0.862	218	12.7	
54.93	1.378	1,203	210.88	0.720	417	25.7	35.6
59.64	1.419	1,147	197.89	0.767	390	25.3	32.9

표2-3 대수층 지질별 지하수함양율 산출

대수층 지질별	조사 공수	풍수기		갈수기		교차량		함양률 α
		강우량 (mm)	자연수위 (m)	강우량 (mm)	자연수위 (m)	강우량 (mm)	자연수위 (m)	
점토질사	8	269.38	0.386	44.74	0.984	224.64	0.598	0.399
모래	30	276.86	0.591	82.47	1.308	194.38	0.716	0.552
사력	40	231.36	0.744	50.79	1.636	180.56	0.892	0.739
혼전석	45	256.82	0.658	54.93	1.378	210.88	0.720	0.512
평균	123	257.54	0.652	59.64	1.419	197.89	0.767	0.581

2. 지하수위 강하곡선 해석에 의한 지하수함양 평가 방법

가. 지하수위강하·기저유출·지하수함양율의 상호관계 유도

농어촌진흥공사에서 '74년 시행한 총적관정의 지하수위 변동 관측기록을 검토하면 강우후 2~3일간은 수위상승이 있으나 강우가 없을때는 수위강하곡선은 일정한 형태를 보이고 있어 이 곡선이 대수층 특성과 관계가 있을것으로 판단된다.

그림 2-4는 경상북도 금릉군 어모면 중왕리에 있는 총적관정(공번 2-6)에서 '74. 5. 1.~12. 15. 기간중의 지하수위 변동과 강우량을 대비한 것인데 강우가 없는 기간의 지하수위 강하형태가 일정한 경향을 갖는 곡선을 나타내고 있다. 만일 무강우 기간이 계속되었다면 이 지하수위 강하곡선이 앞에서 설명된

바와 같이 지수함수로 표시 될 수 있음을 보여주고 있는데 이것은 지하수위 강하가 갈수기의 하천 기저유출(base flow)과 관계가 있음을 의미한다.

갈수기의 기저유출량(base flow)은 유역내 대수층의 지하수 저류량중에서 유출되는 유량으로 이는 앞절의 기저유출 공식중 소유역 자유대수층에 적합한 식 (2-17)을 다시 쓰면,

$$Q = Q_0 e^{-bt} \quad \text{-----}(2-33)$$

여기서 Q_0 : 기준시점 ($t=0$)에서 기저유출량

Q : t 시간 경과후 기저유출량

b : 감쇠상수(대수층 특성과 관련됨)

한편 유역내 대수층의 지하수 포장량은 대수층 면적 A , 대수층 수두 h (하부 불투층면으로 부터 지하수면 높이), 대수층의 비산출율 또는 유효공극율을 S_y 라 할 때

$$V = A \cdot h \cdot S_y \quad \text{-----}(2-34)$$

로 주어지므로 기저유출량은 지하수 포장량의 변화율과 같다고 보면

$$Q = -\frac{dV}{dt} = -A \cdot S_y \cdot \frac{dh}{dt} = Q_0 e^{-bt}$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{-Q_0}{A \cdot S_y} e^{-bt} \quad \text{-----}(2-35)$$

(2-35)식의 양변을 적분하고 $t = 0$ 일 때 $h = h_1$, $t = t$ 일 때 $h = h_2$ 라하면 지하수위강하량 $s = h_1 - h_2$ 는

$$s = \frac{Q_0}{A \cdot S_y} \cdot \frac{1}{b} (1 - e^{-bt}) \quad \text{-----}(2-36)$$

이 되며 장기간 무강우시 즉 $t \rightarrow \infty$ 일때 지하수위 최대강하량 s_m 은

$$s_m = \frac{Q_0}{A \cdot S_y} \cdot \frac{1}{b} \quad \text{-----} (2-37)$$

한편 식 (2-32)에서 장기간 무강우시 $P_2 = 0$ 이므로 이때의 지하수위 최대 강하량은

$$s_m = \frac{P_1}{S_y} \cdot \alpha \quad \text{가 되므로}$$

$$\frac{Q_0}{A \cdot S_y} \cdot \frac{1}{b} = \alpha \cdot \frac{P_1}{S_y} \quad \text{또는} \quad \frac{1}{b} = \alpha \cdot \frac{A \cdot P_1}{Q_0} \quad \text{-----} (2-38)$$

여기서 P_1 은 풍수기 때의 월 강우량 총량으로서 풍수기 직후 무강우기간에 기저 유출이 계속되면 무강우기간의 유출량과 강우량 사이에 $A \cdot P_1 \approx Q_0 \cdot T$ 의 관계를 가정할 수가 있다. 이것은 풍수기의 1개월간에 지하에 함양된 물이 무강우 기간중 기저유출과 증발산량으로 소모된다고 본것이다. 즉 T기간 동안 무강우일 경우

$$A \cdot P_1 \approx \int_0^T (Q_t + E_t) dt \quad \text{-----} (2-39)$$

단 Q_t, E_t 는 무강우기간중 t 일의 유출량과 증발산량이다.

한편 증발량 경험공식은 앞의 2절에서의 식 (2-3)을 다시 쓰면

$$E = C (e_s - e) f(u) \quad \text{-----} (2-40)$$

로 표시되는데 여기서 C는 상수, f(u)는 풍속과 관련된 함수이며 e_s, e 는 각각 공기의 포화증발압과 실제증기압으로서 풍수기 직후 즉 수위강하시점 ($t = 0$)에서는 $e \approx e_s$ 가 되어 $E \approx 0$ 으로 최소가 되나 무강우가 계속될수록 $e \ll e_s$

가 되어 증발은 커지게 되며 이것은 기저유출 Q_b 가 점차 작아지는 것과 상쇄된다고 볼 수 있다. 그러나 E 가 증가되더라도 증발되는 물의 양은 한계가 있는 것이므로 $Q_b + E_t \approx Q_0$ 의 범위가 될 것으로 가정할 수 있다. 그러므로 증발산량 산출과정의 복잡한 계산을 피하고 지하수위 강하곡선 해석만으로 대수층 상수를 구하는데 큰 무리는 없을 것으로 본다. 그러므로 식 (2-38)은

$$\frac{1}{b} = \alpha \cdot T \quad \text{-----(2-41)}$$

여기서 T 는 최대 수위강하량에 이르는 기간이 된다.

식 (2-37)과 (2-41)을 식 (2-36)에 대입하여 다시 쓰면

$$s = s_m(1 - e^{-\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{t}{T}}) \quad , \quad s_m = \frac{P_1}{S_y} \cdot \alpha \quad \text{-----(2-42)}$$

이 되며, 식 (2-42)는 가뭄기간의 지하수위 강하량을 가뭄전의 월 강우량과 지역의 지하수함양을 및 대수층 비산출율에 의거 해석할 수 있음을 나타내고 있다.

나. 지하수위 강하곡선 해석 작도법

그림 2-4에서와 같이 지하수위 변동은 강우량과 관련하여 상승과 강하를 반복하고 있는데 지하수위강하의 특성을 해석하기 위하여는 무강우기간의 강하곡선 즉 지수함수곡선을 도출해 내야한다. 그러므로 강우의 영향을 배제하기 위하여 투명지에 강하곡선을 수평방향으로 이동하면서 곡선이 매끈하게 연결되도록, 즉 a-b, c-d, e-f, g-h 부분이 변곡점이 생기지않도록 연결하여 작도하면 그림에서 점선으로 표시된 선과 같이된다. 이 지수함수곡선을 식 (2-42)에 의해 쉽게 해석하기 위하여 다음과 같이 작도법을 고안하였다.

식 (2-42)를 상용대수(Logarithm) 계산식으로 다시 쓰면

$$\log(1 - s/s_m) = -\frac{1}{2.3\alpha} \cdot \frac{t}{T} \quad \text{-----}(2-43)$$

으로 되어 반 대수지의 대수축에 $(1 - s/s_m)$ 을 잡고 다른 축에 t (day)를 잡아 작도하면 직선형이 되고 직선의 기울기를 구하면 α 를 구할 수 있다.

앞의 그림 2-4 에서 7월 20일을 시점으로 볼 때 무강우 계속시의 점선곡선에서 최대 수위강하량 $s_m = 1.05\text{m}$ 과 수위강하 계속기간 $T = 70\text{일}$ 을 잡고, 편대수 방안지에 작도한 $(1 - s/s_m)$ 와 t 의 직선에서 log scale이 1 cycle이 되는 기간 $t = 57\text{일}$ 을 잡아 기울기 α 를 계산하여 보면

$$\log 1 - \log 0.1 = 1 = \frac{1}{2.3\alpha} \cdot \frac{57}{70} \quad \text{에서}$$

$$\alpha = \frac{1}{2.3} \cdot \frac{57}{70} = 0.354 \quad \text{을 구할 수 있었다.}$$

그러나 최대수위강하를 어느만큼 보느냐는 작도하는 사람에 따라 여러가지 있을 수 있으므로 그림 2-4의 최대수위강하 점선과 같이 갈수기의 최저수위를 기준으로 하고 무강우 수위강하곡선이 최저수위선과 만나는 점까지의 기간을 수위강하 계속기간으로 잡아 α 를 다시 계산해 보면

$$\alpha = \frac{1}{2.3} \cdot \frac{44}{55} = 0.354$$

로서 앞에서 한 계산과 같은 결과를 얻었다. 그러므로 지하수위 강하곡선 해석을 위한 작도법에서 갈수기 최저수위를 기준으로 한 최대수위강하량과 수위강하 계속기간을 계산하는 것이 실무면에서 편리하다. 표 2-4는 갈수기 최저수위를

기준으로 한 무강우 경과일수와 지하수위강하량 s 및 $(1-s/s_m)$ 의 값을 나타낸 것이며 그림 2-5는 이것을 편대수 방안에 작도한 것이다.

한편 '94년 어모지구의 강우량은 7월 중 474m/m 이었는데 지하수 함양이 가능한 유효우량 즉 5m/m 이하의 강우량을 제외한 강우량은 394m/m 로서 대수층 비산출률을 다음과 같이 산출할 수 있다.

즉, $s_m = \frac{P_1}{S_y} \alpha$ 에서 $s_m = 0.94\text{m}$, $P_1 = 0.394\text{m}$, $\alpha = 0.354$ 를 대입하면

$$S_y = \frac{0.394}{0.94} \times 0.354 = 0.148$$

로서 대수층 유효공극율이 15%임을 보여주며, 이는 매우 합리적인 결과로서 지하수위 강하곡선 해석에 의한 대수층 평가방법의 타당성을 입증해 주는 것으로 판단된다.

표2-4 무강우경과일수와수위강하량(어모지구)

무강우 경과일수 (days)	자연수위 (m)	수위강하량 (m)	$1-s/s_m$	비 고
0	0.9	0	1.000	기 준 일 : '74. 7. 20 T = 55 days s _m = 0.94 m
5	1.05	0.15	0.840	
10	1.22	0.32	0.660	
15	1.35	0.45	0.521	
20	1.47	0.57	0.394	
25	1.55	0.65	0.309	
30	1.63	0.73	0.223	
35	1.67	0.77	0.181	
40	1.73	0.83	0.117	
45	1.77	0.87	0.074	
50	1.80	0.90	0.043	

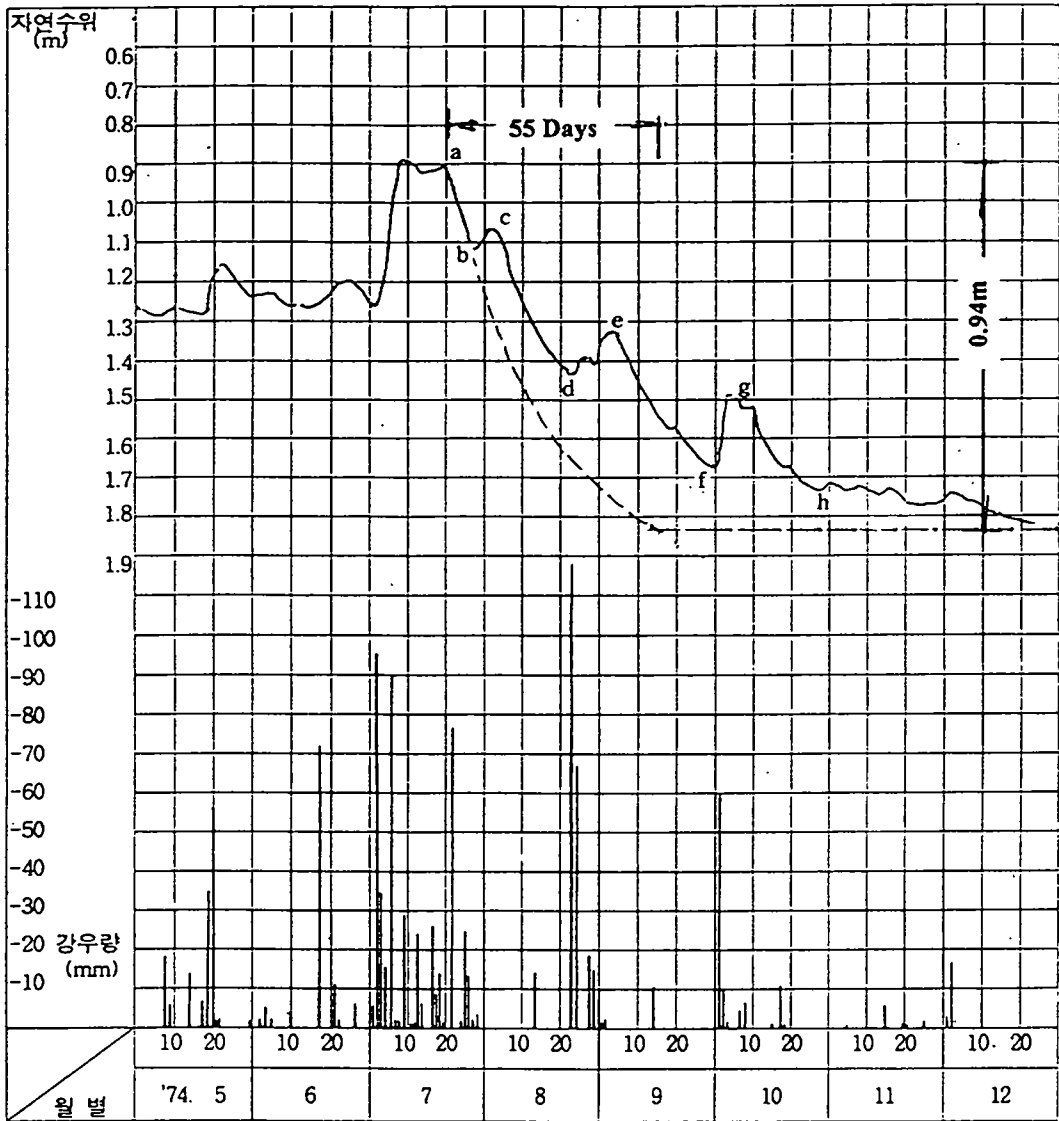


그림 2-4 어모지구 자연수위 변화도 (1974. 5. 1. - 12. 22.)

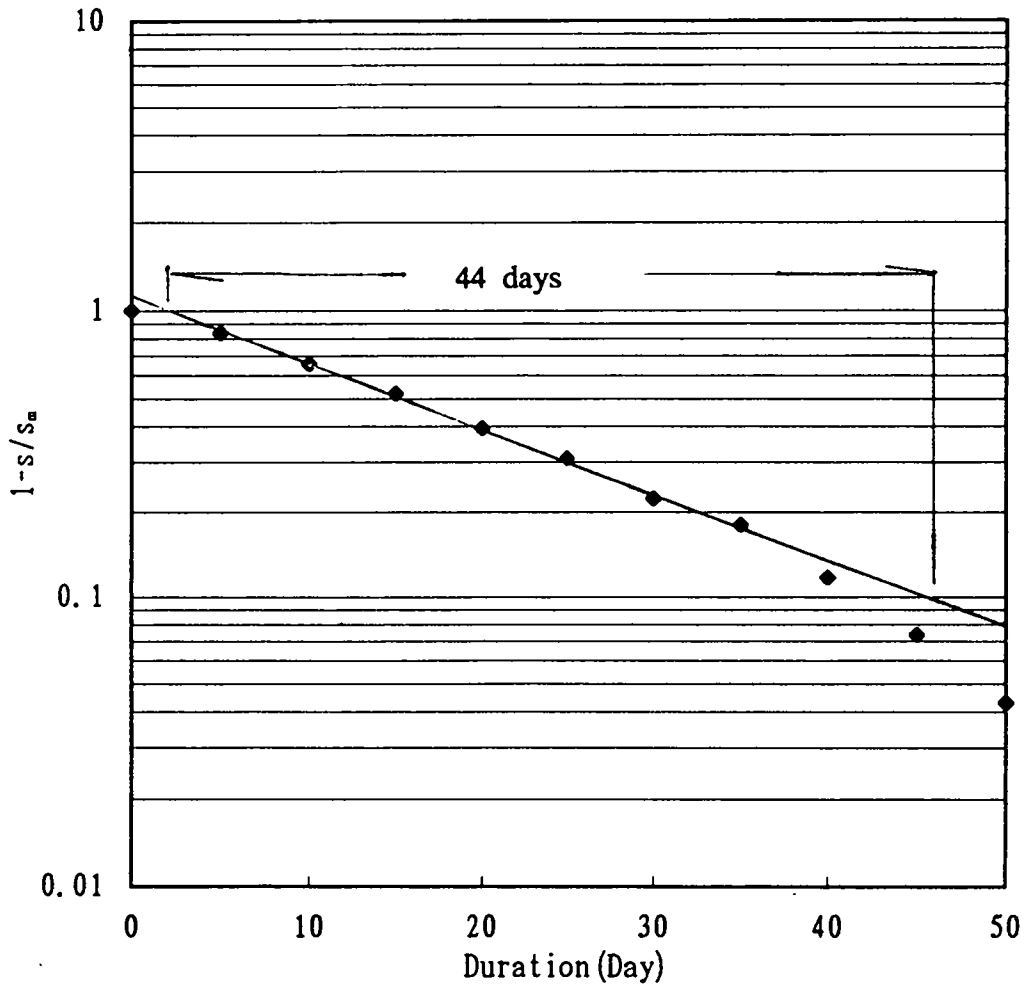


그림 2-5 어모지구 지하수위 강하와 시간 관계도

제 3 장 지하댐의 개념과 시공사례

제 1 절 지하댐의 이해

1. 지하댐의 개념

지하댐의 일반적 정의는 지하수가 유동하는 대수층내에 인공적인 물막이벽을 시설하여 지하수를 대수층내에 저류 또는 함양시키고 관정등의 이용시설에 의해 취수 사용하는 지하 저류지를 말한다.

흔히 말하는 지하저류지 (Groundwater Reservoir)는 물막이벽이 없는 자연상태의 두꺼운 지하수 저장체를 의미하며 저장된 지하수가 수두 경사에 따라 하류부로 유동하는것을 차단하기 위하여 물막이 벽을 설치하고 지하수위를 상승시켜 지하수 저장량을 증가시키는 시설이 지하댐 (Groundwater Dam / Subsurface Dam)이다.

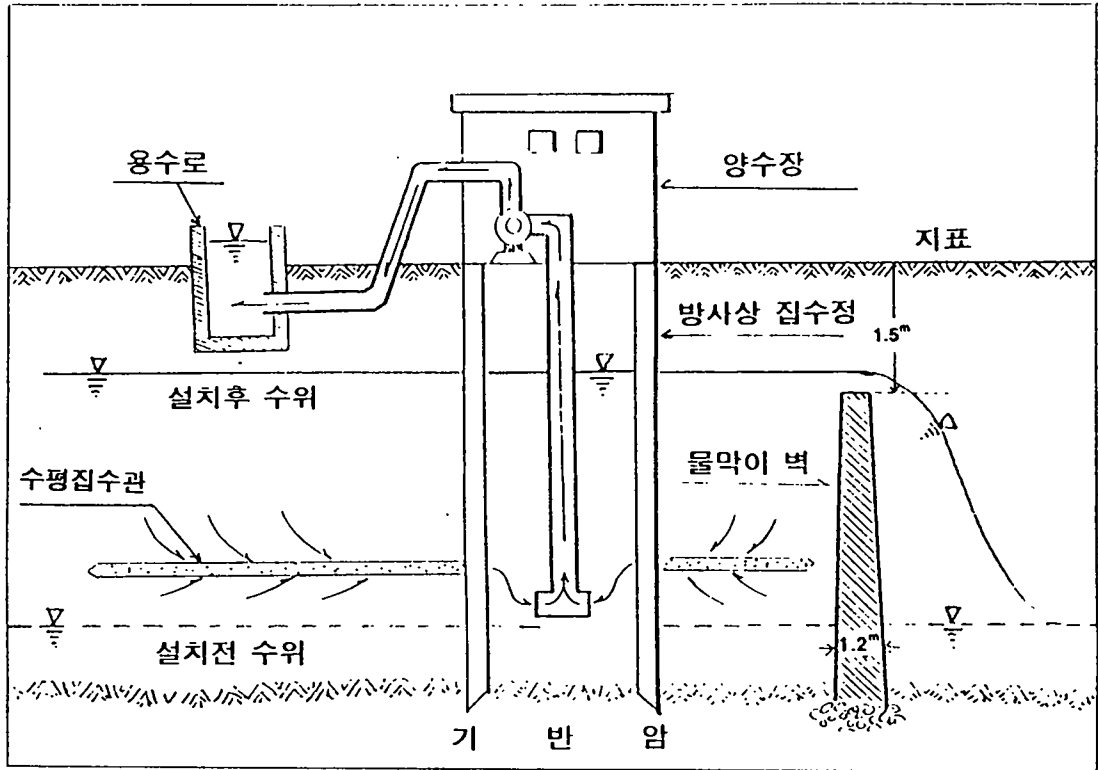
그림 3-1은 지하댐 설치모형을 나타낸 것이다. 지하댐은 대수층의 유효공극을 즉 비산출율이 크고 저류체적이 커야 되기 때문에 미고결 자유면 대수층인 충적층을 대상으로 한다. 지하댐을 설치할 수 있는 지질 및 지형적 조건을 들면

첫째 유효공극율이 큰 대수층이 넓고 두껍게 발달하여 다량의 지하수를 저장할 수 있는 지역이다.

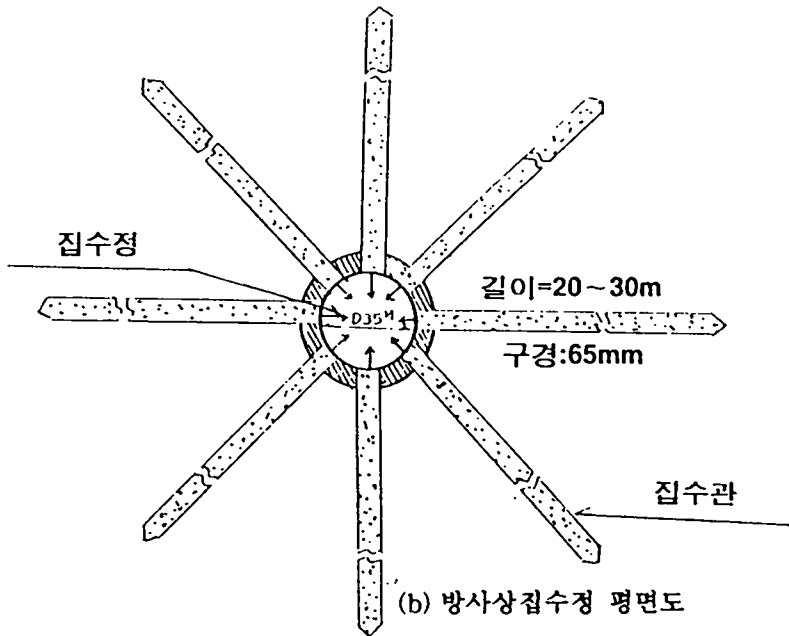
둘째 지하수 함양원이 되는 계곡하천과 넓은 유역을 갖는 지역이고

셋째 하상 및 유역의 경사가 완만하여야 하고

넷째 지하 물막이벽 설치가 가능한 협곡부 또는 분지지형이 존재하는 지역이어야 한다.



(a) 지하댐 단면도



(b) 방사상집수정 평면도

그림 3-1 지하댐의 설치 모형도

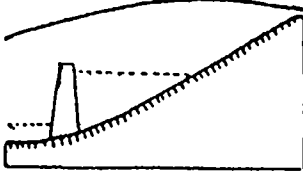
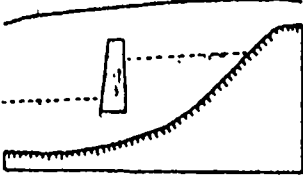
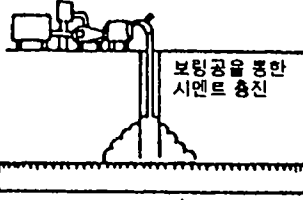
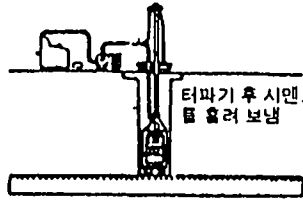
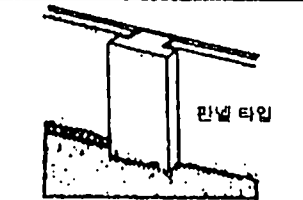
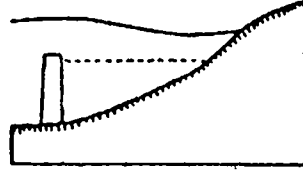
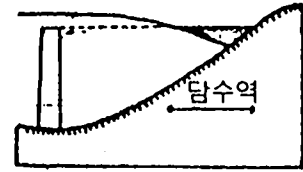
분류구분	설		명
목적에 따른 구분	< 지하수위의 상승을 목적으로 하는 형 > < 저류형 >		< 염수침입방지를 목적으로 하는 형 >
		< 유출억제형 > 	
물막이벽 공법에 따른 구분	< 주입공법 > 	< 지하연속벽공법 > 	< 타입 공법 > 
	저류형태 에 따른 구분	< 완전지하저류 > 	< 일부지표저류 > 

그림 3-2 지하댐의 종류

지하댐에 의해 저류된 지하수는 이용시 별도의 양수시설이 필요하기 때문에 일반적인 지하댐의 개념은 지하 물막이벽 시설과 양수 이용시설을 포함한다. 양수 이용시설로는 관정 이외에 집수암거와 방사상집수정등이 있으나 저류된 지하수를 최대한 활용하기 위하여는 집수반경이 큰 방사상집수정을 많이 시공한다.

지하댐과 지표저수지의 장단점을 비교하면 다음 표와 같다.

표 3-1 저수지와 지하댐의 장단점 비교

구 분	장 점	단 점
저수지	<ol style="list-style-type: none"> 1. 자연 유하에 의한 이용 2. 다목적 기능보유 3. 광물질 함양량이 적다 4. 조사 평가가 쉽다 5. 일시에 다량의 용수사용가능 6. 홍수조절 기능이 있다 7. 유지관리비가 저렴 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 증발손실이 크다 2. 수물면적이 크다 3. 댐 붕괴시 위험이 있음 4. 수질오염 가능성이 높다 5. 긴 용수로 시설 필요 6. 신규적지가 드물다 7. 공사비가 비싸다
지하댐	<ol style="list-style-type: none"> 1. 증발손실이 적음 2. 수물 면적이 없음 3. 구조물 붕괴 위험이 없음 4. 일정 수온유지 5. 수질오염 위험이 적음 6. 용수로가 짧음 7. 공사비가 비교적 싸다 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 별도의 양수시설이 필요 2. 관개시 수온상승 시설 필요 3. 광물성 함량이 비교적 높다 4. 조사 평가가 비교적 어렵다 5. 일시에 다량의 용수 사용불가 6. 유지관리비가 비교적 높다

2. 지하댐의 종류

지하댐은 그 사용목적이나, 저류형태에 따라 유형이 구분되며 물막이벽 시공법에 따라 분류하기도 한다.

가. 사용목적에 따른 구분

1) 저류형

지하수의 유출을 완전 차단하고 그 대부분을 지하수 저류지에 저류시킬 목적으로 지하 불투수성 기반암까지 물막이벽을 시공하는 형으로 지하수위 상승을 목적으로 한다. 이 경우는 지하수의 유역이 적거나 저류수량이 부족할때 이용되며 강우시 저류초과 수량은 물막이벽 상단을 월류하게 된다.

2) 유출억제형

지하수 유출의 일부를 차단하여 지하수의 일부는 그대로 유출시킴으로서 지하수위를 일정수준 유지시킬 수 있도록 물막이벽을 기반암까지 미달되게 시공하거나 일부만 시공하는 방법이 있고, 또한 투수계수를 대수층보다 적게 만드는 방법이 있다. 이 경우는 지하수 유역이 크든가 지하수 함양이 양호한 지역에 시공하는 방법이다. 하천 유수를 막아 이용하는 보(Weir)도 유출억제형 지하댐의 유형이라고 볼 수 있다.

3) 염수 침입 방지형

해안 인구에 시공되는 지하댐으로 양수와 해수 경계 부근에 물막이벽을 시공함으로써 해수의 침입을 방지하고 담수의 유출을 억제하는 형태로 완전 저류형에 속하며 물막이벽은 기반암까지 시공하고 상부는 해수면 최고 조위를 감안하며 시공해야한다.

나. 저류형태에 따른 구분

1) 완전 지하 저류형

지하수 유동을 완전히 지하내 저류시키고 지표에는 노출되지 않는 형태이다. 이 경우 내륙에서 지상은 농경지로 사용하거나 기타 목적으로 사용토록 한다. 저류형 또는 유출 억제형이 대부분 이에 속한다.

2) 일부 지표 저류형

대부분의 지하수를 지하에 저류시키고 지하수위가 상승됨에 따라 지형상 일부 저지대에 지하수가 노출되어 지표에 저류되는 경우이다. 물막이벽이 하천의 하상부에 보 형태로 존재하는 경우, 또는 해안 인접부에 시공한 지하댐에서 지하댐 안의 지하수위가 지표이상 상승하는 경우 등을 말한다.

3) 지표댐 병용형

계곡부의 지표수도 동시에 저류하는 형태로 이것은 사막 인근지역(예-아프리카지역)에서 강우시 지표수를 저류시켜 사용하다가 지표수가 고갈되면 지하수를 이용하는 지하댐이다.

다. 물막이벽 시공법에 따른 구분

1) 주입공법형

일반적으로 그라우팅공법을 말한다. 즉 보링기로 지하를 찬공하여 시멘트등을 강제주입함으로써 지하 공극을 충전하여 지하수 유동을 억제시키는 방법이다. 이 방법은 완전 불투수층으로는 개량이 곤란하나 $K = 10^{-5}$ cm/sec 까지는 개량이 가능하고 근래에 와서는 약액주입(Chemical grouting)공법이 보급되어 거의 불투수성에 이르도록 시공이 가능하게 되었다.

2) 치환 공법형

지하댐 위치를 인력이나 기계로 일정 심도까지 굴착 또는 절개하여 점토, 벤

트나이트, 시멘트를 이용한 콘크리트 벽을 타설하는 시공방법이다. 이 공법은 완전 지수는 물론 거의 영구적이며 목적에 따라 공법을 적절히 적용할 수 있고 규모도 자유롭게 조정할 수 있는 장점이 있으나 비교적 공사비가 비싼 것이 단점이다.

3) 타입공법형

파일이나 Sheet pile 등을 지하에 강제 타입하여 지하 물막이벽을 형성하는 방법으로 연약지반에 주로 이용되며 암반층이나 건석이 많은 지층에서는 시공이 불가하다. 완전지수를 위해서는 주입공법을 겸용하는것이 바람직하다.

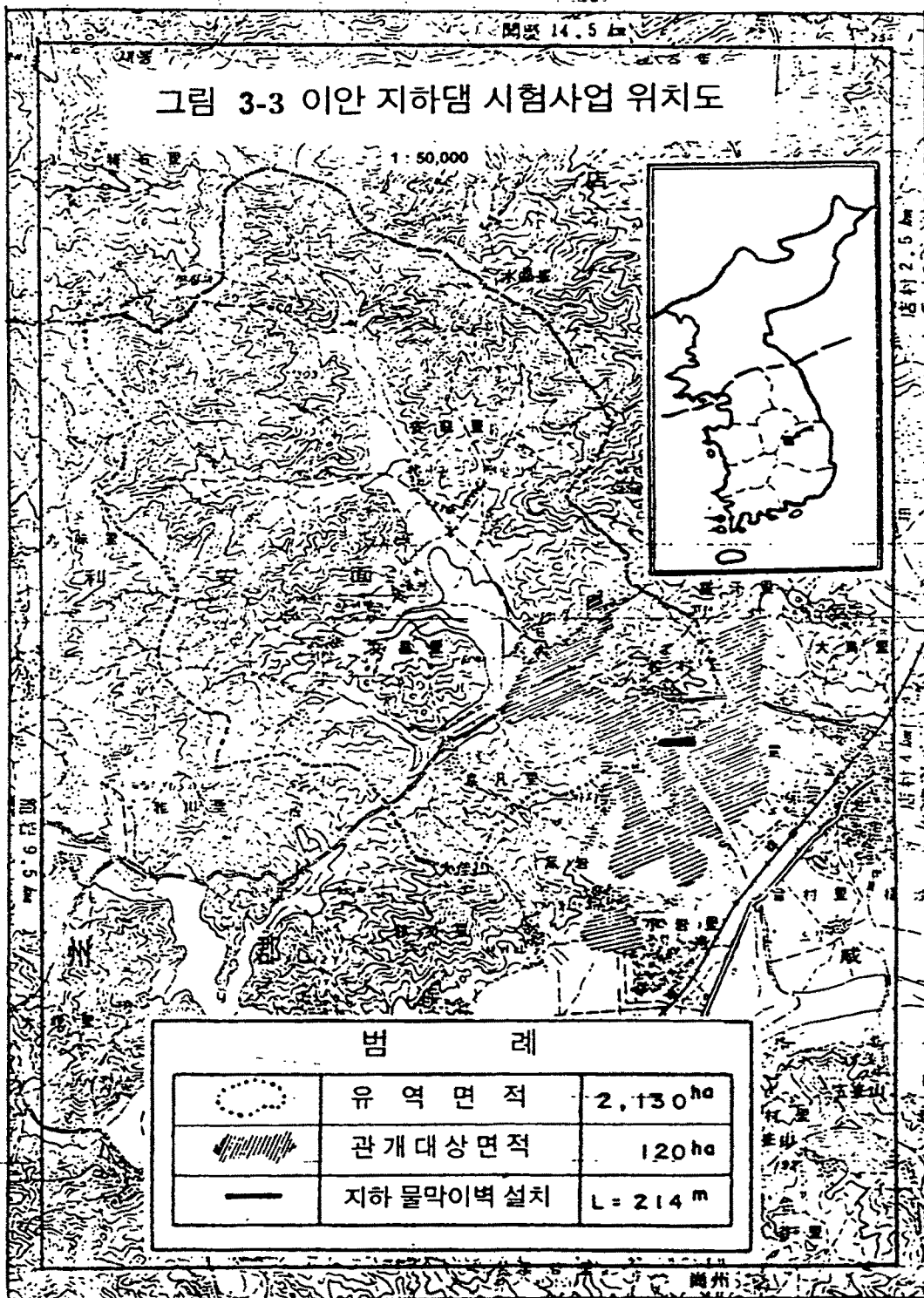
제 2절 국내 지하댐 시공 사례

1. 이안지하댐 시험사업

가. 지하댐 조사 개요

1981년 여름의 극심한 가뭄으로 국내에서는 처음으로 지하댐 개발이 논의되어 정부는 농업용수 10개년 개발계획 수립에 지하댐 개발사업을 포함하기로 하고 그 시험 사업을 경상북도 상주군 이안면(利安面) 양범리(良凡里) 지역에서 시행하기로 결정하였다.

일반적으로 지하댐의 입지조건으로서, ① 양대수층이 두껍게 발달하여 다량의 지하수를 저장할 수 있는 분지형 지형으로, ② 하천 경사가 비교적 완만하고, ③ 하류부의 유출구에 해당하는 협곡부가 있어 지하댐 물막이벽 설치 길이가 짧아야 한다는 조건을 들 수 있는데, 이안지구는 이러한 입지적 조건에 부합될



뿐만 아니라 지하수원 이외에는 이 지역의 농업용수 확보방안이 없기 때문에 우리나라에서 최초의 지하댐 시범지구로 선정되었다.

1981. 11. 18. 부터 1982. 11. 29. 까지 시행된 지하댐 조사내용을 요약하면 다음 표와 같다.

표 3-2. 이안지구 지하댐 시범조사 조사내용

조사구분	종 별	단위	조사량	조 사 내 용
지하수조사	지표지질조사	ha	200	지하수 집수 유역의 지질분포와 지질구조 조사
	전 기 탐 사	점	100	층적층 심도 조사
	기설관정조사	공	10	수리계수산출
	수위관측조사	점	50	지하수면 일제관측
	시 추 조 사	공	14	지하지질 및 대수층 확인
	착 정 조 사	공	3	대수층상수 및 취수공 설계 자료조사
토 목 조 사	기 본 조 사	지구	1	고저측량 및 품셈조사
	수 문 조 사	"	1	관개 및 수문분석
	기 타 조 사	"	1	댐 측량설계
농 업 조 사		"	1	경제분석 조사
토 양 조 사		"	1	토양특성 및 침투량 조사

본 지구는 타원형의 집수유역으로 둘러싸여 있는 분지형 지역으로 분포암석은 시대 미상의 화강암질 편마암과 석영편마암이며 지구내 이안천의 유역면적은 2,130ha로 그 중 총적층 면적은 372ha(17%)이다. 전기탐사 및 시추조사 결과 총적층의 심도는 평균 4.5m이었고 구하상 지역은 7m정도의 두께를 갖고 있었다. 기설관정 조사에서 얻은 이 지역 대수층의 평균 투수량계수는 $268\text{m}^2/\text{day}$ 이었고 구하상 지역에 착정한 우물에서의 평균 투수량계수는 $403\text{m}^2/\text{day}$ 로서 대수층 투수기능은 좋은 것으로 나타났다.

나. 지하수 이용가능량 분석

본 지구의 지하수 포장량은 4,143,000톤으로 계산되었다. 이는 총 유역면적 2,130ha를 지하수문과 관계되는 요소 즉 산계와 수계, 본류와 지류, 지형경사, 지층의 투수성, 지층심도, 분포지질, 물막이벽 설치예정지와와의 거리등을 세분하여 23개의 Cell (소구역) 로 나누고 각 Cell별 지하수 포장량은 면적 x 총적층평균심도 x 비산출율로 구하였으며 비산출율은 점토 0.02, 토사 0.05, 모래 0.15, 자갈 0.22를 적용하였다.

가뭄시 이용가능량은 가뭄 10년 빈도를 가정하여 무강우 30일간 613,800톤으로 계산되었다. 이는 단위 Cell당 지하수 포장량이 하류부의 물막이벽까지 도달되는데 필요한 소요일수를 구하고 지하수 포장량을 소요일수로 나누어 Cell별 1일 유출가능량을 구한 후 가뭄기간 30일을 곱하여 산정한 것이다.

다. 지하댐 시험사업 준공 개요

- 1) 사업명 : 이안 지하댐 시험사업
- 2) 사업목적 : 수리불안전담 120ha의 수리담화로 연간 158 M/T의 미곡증수 효과 거양

3) 준공사업비

항 목		준공사업비(천원)
순 공 사 비	지하물막이벽	105,373
	취 수 공 (집수정, 수평찬공, 관정)	94,938
	취수시설 (양수장, 양수기외)	107,304
	평 야 부 (용수로, 기지)	90,123
	부대공사	9,184
	계	406,922
자 재 대		83,751
용지매수 및 보상비		14,988
설 계 비		41,020
공 감 비		56,897
관 리 비		7,079
유 지 출		2,693
합 계		613,350

4) 사업내용

공	종	사 업 량	비 고
지하물막이벽	그라우팅	194 m	S.G.R.약액주입
	콘크리트	36 "	
	소 계	230 "	
취수공	방사상집수정	4 개소	우물통구경3.5m 심도7.5m (연 1.055m) φ8" x 7m
	(수평찬공)	(50 공)	
	관 정	3 공	
양수시설	양 수 장	9 개소	
	양 수 기	13 대	
평야부	용수간선	7.4 km	
	용수지선	1.8 "	
	소 계	9.2 "	
부대시설		1 식	

5) 사업기간 : 1983. 4. 17~1983. 12. 31

6) 조사설계 및 공사감리 : 농어촌진흥공사

라. 지하 물막이벽 시공내역

지하 물막이벽 총 대상구간은 230m로서 S.G.R 공법 (특수약액 주입공법 : Space Grouting Rocket System)으로 194m, 콘크리트 타설공법으로 36m를 시공하였다.

S.G.R 공법은 먼저 지하물막이벽 구간에 공간격 1m로 192개소의 시추공을 일렬로 뚫고 그 시추공 내부에 이중관을 통하여 주입된 약액이 대상 지층부위에서 반응하여 불투수성 물질로 변하도록 하고 그 물질에 약간의 압력을 가하여 대상지층에 침투시키므로써 불투수층을 형성시키는 방법으로 시추공 하부로부터 상부로 주입한 후 차례로 인근 시추공을 주입 완료하여 하나의 벽, 즉 지하 물막이벽을 형성시키는 공법이다.

평균 주입 심도는 5m, 초기 주입압력 3 kg/cm²으로부터 약 8 kg/cm²에 이르기까지 서서히 승압시키면서 주입 완료하였다.

S.G.R 공법은 ①공사시기의 제한을 받지 않고, ②원지반 변동 없이 공사시공이 가능하고 ③비교적 깊은 심도 (약 30m내외)까지도 시공이 가능한 반면, ④시공심도가 얇을 경우 (5 m내외)는 콘크리트 공법보다 공사비가 높으며 ⑤물막힘 효과 및 약액침투 효과판정이 다소 어려운 점이 있다.

본 지하 물막이벽의 효과를 확인하기 위하여 6개의 시험공을 시추하여 투수 시험을 시행한 결과, 평균 투수계수는 3.92×10^{-5} cm/sec로서 주입시공 전 2.45×10^{-1} cm/sec에 비하여 만족할 만한 개량효과를 보여 주었다.

콘크리트 타설구간 36m는 지하 물막이벽의 우안부로서 기반암 상부까지 완

전 절개후 두께 0.3m, 평균심도 5m의 콘크리트벽을 구축하였다. 콘크리트 타설 공법은 ①“물막힘” 효과판정이 가능하고 ②심도 5m이내에서는 공사비가 타 공종에 비해 다소 저렴하나 ㉞강우기에 시공이 어렵고 ㉟시공심도가 깊어질수록 공사비가 높아지며 ㊱공사기간중 원지반 교란 및 용지 보상면적이 커지는 단점이 있다.

지하 물막이벽 시공방법은 상기한 공법외에 여러가지가 보급되어 있으나 장·단점이 있으므로 각 공법이 갖는 특성을 활용해야겠지만 우선 ①지수효과, ②내구성, ③강도, ④약품공해, ⑤공사비, ⑥시공의 난이도 등이 먼저 고려되어야 할 것이다.

마. 방사상 집수정 시공내역

지하댐 내부의 취수시설로서 관정과 집수암거등을 이용할 수도 있으나 대량 취수에 적합한 방사상집수정 공법을 우리나라에서는 처음으로 도입하였다.

방사상 집수정은 관정과 집수암거의 장점을 복합한 시설물로서, 일반적으로 수직찬공에 의한 관정의 취수부는 양대수층과 접하는 단면이 한정되어 있는데 비하여 방사상집수정은 수평찬공에 의해 지층중 가장 양호한 대수층을 대상으로 수평집수관을 20~30m씩 방사상으로 다수 설치하므로써 다량의 지하수가 중앙의 우물통으로 집수되도록 하여 양수이용하는 시설이다.

본 이안지구에서는 이러한 방사상집수정을 4개소 설치하였는데 우물통은 수평찬공 작업이 가능한 공간을 제공하고 동시에 집수정으로서의 기능을 만족시켜 주는 원통형 구조물로서 깊이 7.5m, 내경3.5m (외경 4.0m)의 규모로 설치하였다.

4개소의 집수정중 3개소는 철근 콘크리트로, 1개소는 조립식 파형강판(波形網板, Corrugated Steel Plate)로 각각 우물통을 시공하였다.

철근콘크리트 집수정의 시공 순서는 ① Shoe 제작 ② 원통형 거푸집제작 ③ 철근조립 ④ 콘크리트 타설 ⑤ 터파기 및 침하 의 과정으로서 집수정 심도 7.5m를 3회로 나누어 1회에 2.5m씩 침하시켰다.

조립식 파형강판은 내압강도, 시공의 간편성, 공기단축 등의 장점이 있어 터널 및 하수도 공사에 많이 쓰이고 있어 집수정 공사에 적용성을 검토하기 위하여 시도하였다. 본 시험사업에 이용한 파형강판은 1830×928×4mm의 평면강판을 특수 압형기에 넣어 세로로 4개의 물결주름이 생기도록 하고 아연으로 표면처리(Zn metalizing)한 것으로서 우물통의 터파기를 먼저하고 파형강판을 조립해 내려가는 공정이 된다.

수평찬공 공사는 4개소의 집수정에서 집수정 1개소당 6~20공씩 총 50공의 수평찬공을 시공하였으며, 총 찬공연장은 1,055m에 이른다. 수평찬공 공당 평균 토출량은 1일 400~500톤으로서 20공이 설치된 교촌집수정의 경우 1일 8,000~10,000톤의 취수가 가능하다는 결론을 얻었으며, 대수층이 양호하고 찬공공수를 늘릴 경우 집수정 1개소당 취수가능량이 이보다 훨씬 증가될 수 있을 것으로 판단되었다.

찬공 장비로서는 국내 최초로 도입된 TOP-MB형 수평착정기를 이용하였으며, 찬공구경은 4인치로 찬공 완료시마다 구경 2.5인치 피·브이·씨 스트레너(P.V.C Strainer) 집수관을 삽입하여 수평찬공이 붕괴되지 않도록 하였다.

바. 사후평가조사

'83. 12. 이안지하댐 시험사업을 준공하고 이듬해 5월부터 12월까지 사후평가 조사를 시행하였다. 조사내용은 취수공별 채수능력, 수온 상승 시설의 효과, 수위관측, 급수상황조사와 농업 및 경제분석을 조사하였는데 사후평가 주안점은 계획 양수량을 채수할 수 있는가에 대한 것이었다.

취수공별 채수능력 시험결과 다음표와 같이 평균 채수량이 당초 계획 수량의 72%로 감소되었는데 양수량 감소 원인으로서는 집수유공관의 침하 또는 막힘효과, 수평관의 경사도, 지역내 유입수량감소 등을 검토하였다.

표 3-3. 이안지구 집수정 채수능력 시험 결과

집수정명		당초설계		채수 능력 시험		비 고
		전양정(m)	양수량(m ³ /d)	전양정(m)	양수량(m ³ /d)	
교 촌	1호펌프	40	3,744	48	1,530	66%
	2호펌프	10	3,744	10	3,413	
	소계		7,488		4,943	
지 산	1호펌프	28	3,168	28	3,168	63%
	2호펌프	18	7,056	30	3,312	
	소계		10,224		6,480	
양 범 1		30	3,312	33	3,168	95%
양 범 2		16	3,888	17	3,456	88%
계			24,912		18,047	72%

이를 보완하기 위하여 각 수평공에 에어써징(공기청소) 정비작업을 시행하였으며 정비후 수평공의 연장이 당초 1,055m에서 920m로 약 13% 감소되었음을 확인하였다. 또한 수평집수관이 모두 우물통 유출구에서부터 평균 6° 정도로 상방으로 굴착되었음을 확인하였는데, 이것은 시공 당시는 인지되지 않은 사실로서 수평관 20m당 1.4m정도가 올라오므로 대수층 영역이 좁아지는 주요원인이 되었다고 볼 수 있었다.

방사상집수정의 채수량 증대방안으로 교촌집수정에 4공, 지산집수정에 2공의 수평착정을 추가로 시행하고 양수시험한 결과 시행전 양수량에 비하여 교촌집수정은 11%, 지산집수정은 3%의 양수량 증가가 있었으나 큰 효과는 거두지 못했다.

2. 기타지구 사례

가. 지하 물막이벽 시공지구

'83년 이안지하댐 시험사업은 지하수 대량 채수시설로서 농업용수개발사업에서 지하수를 보조수원에서 주수원으로 이용할 수 있음을 입증하여 주었다. 그리하여 '84년 이후부터 방사상집수정과 지하댐 개발사업이 확대 시행되었는데 '86년에는 충남 공주시 옥성지구, 경북 영일군 남송지구, 전북 정읍군 고천지구, 정읍군 우일지구등 4개지구가 지하댐 개발사업으로 추가 준공되었다. 이 지구들의 사업 내역을 약술하면 다음과 같다.

1) 옥성지구

본 지구는 충남 공주시에서 청양방면으로 6.5km 떨어진 우성면 상서리, 옥성리 일대로서 관계하천인 유구천의 연장은 30km정도이며 평균 하폭은 50m, 평균 유폭은 20~30m, 유역면적은 27,500ha로서 구역내의 총적층 두께는 평균 10m 이상 된다.

분포지질이 호상편마암으로 총적층 퇴적물은 세립질을 많이 함유하고 있으나 분급이 잘 되어 지하수 부존성은 비교적 양호하며, 모래, 자갈, 사력혼전석으로 구성된 대수층두께가 4~9m로 투수량계수는 평균 $113\sim 183\text{m}^2/\text{day}$ 로 조사되었다.

이 지구의 기설 수원공으로 동천보가 있으나 용수부족지가 184ha인데 그 중 146ha를 지하댐으로 관개하도록 지하 물막이벽 482m를 시공하고 4개소의 방사

상집수정을 설치하였다. 지하 물막이벽은 유구천의 금강 유입부에 위치를 잡아 시멘트 주입재에 의한 그라우팅 공법으로 시공하였으며, 집수정은 구역내에서 대수층이 양호한 지점에 배치하여 양수량 3,900 ~ 8,400 m³/day 범위로 1일 이 용량 27,900 m³/day을 취수하도록 하였으며 4개의 집수정 양수시설 제어조작을 관리실에서 일괄하도록 시공하였다.

2) 남송지구

경북 영일군 흥해읍 남송동 일대에 위치한 망천(望泉)평야의 영일농지개발조 합 구역 1,400ha 중 수리불안전담 155ha의 관개를 위하여 '84년 3월부터 10월까 지 수리지질조사를 시행한 결과 지하담 개발 가능지구로 조사되었다.

본 지구의 지형은 분지형이고 수계는 곡강천으로 유역면적은 15,300ha로서 구 룡지에서 발원하는 세곡천들이 수지상(樹支狀)을 이루고 갈수기에는 대부분 건 천이 된다. 곡강천은 이들 수지상 세곡천이 합류하여 하폭 40m, 연장 5km로 동 해에 유입된다. 이 일대의 분포지질은 대부분 제 3기의 퇴적암 미고결층에 해당 되며, 충적층의 발달은 10~15m 내외로 비교적 두꺼운 편이나 세립질 사층이 전 반적으로 발달하여 있다. 지하수조사 결과 대수층의 평균 투수량계수는 300m²/day 이상으로서 양호하게 나타났다.

곡강천의 동해 유입부에 협곡이 있어 이곳에 영일농조에서 재래식 집수암거 시설(곡강양수장)을 양수하여 유역밖의 몽리구역 175ha를 관개하고 있었는데, 이의 월 취수량은 952,000m³으로서 물 수지분석 결과 유역내 수리불안전담 155ha의 관개용수를 추가로 확보하기 위하여는 지하 물막이벽을 시공하여 월 810,000m³을(1일 27,000m³/day) 취수할 수 있을 것으로 검토되었다.

지하물막이벽 시공은 연장 89m, 심도는 12.3m ~ 22.4m로 시멘트와 water glass를 혼용하여 그라우팅 공법으로 시공하였고 방사상집수정은 개소당 3,000~8,000 m³/day의 범위에서 4개소를 설치하였다.

3) 고천지구

이 지구는 전북 정읍군 태인면 고천리, 중산리, 오봉리에 위치하며 동고 서저한 지형으로 주변 산계들에서 발원하는 수지상의 소계곡류가 합류하여 유역 2,700ha의 중심부에 있는 본 지구를 관통하고 있다. 분포지질은 중생대의 편상화강암류이며 층적층의 발달은 평균 6~7m로서 두껍지는 못하나 이 중 4m정도가 투수성이 양호한 모래층으로 이루어져 있어 지하담·개발이 가능할 것으로 조사되었다.

본 지구의 개발 대상면적은 134.3ha로서 기존시설이 미흡하므로 지하 물막이벽을 시공함으로써 지하수 저류량을 최대한 활용하는 방향으로 설계하고 1일 25,110 m³/day을 5개의 방사상집수정에서 취수하도록 시공하였으나 이것은 다소 무리한 계획으로서 그 이용현황은 당초계획에 미치지 못하는 것으로 이번 연구에서 조사되었다(표 4-4 참조).

4) 우일지구

본 지구는 전북 정읍군 정우면 우일리 일대의 평야부로서 주위에 표고 100m 내외의 비교적 낮은 산계가 본 지역의 평야부로 구름을 이루며 내려오고 이들 산계를 분수령으로 하는 소계곡류가 수지상으로 합류하여 한교천(漢橋川)을 이루며 지구 중앙을 북류하고 있다. 하천 연장은 8km, 하폭은 30m, 하상경사는 1/300정도, 유역면적은 3,000ha이다.

분포지질은 중생대의 편마상화강암이 유역 전체에 분포되어 있으며 풍화가 심하여 노두는 나타나지 않고 있다. 층적층 두께는 평균 6.5m, 그중 대수층인 모래층 두께가 평균 4.0m, 투수량계수 평균 133m²/day 로서 지하담지구로서는 양호한 조건은 아니나 본 구역의 수리불안전담 99ha에 대한 별도의 용수대책이 없으므로 지하 물막이벽을 시공하여 저류된 지하수를 최대한 이용하도록 설계 및 시공을 하게 되었다.

물막이벽의 시공은 연장 778m 구간을 평균 높이 4.4m 의 점토다짐벽을 지하에 시공하였으며 제정은 지표면에서 1.0m 아래에 오도록 시공하였다. 방사상집수정은 개소당 양수량을 2,200~5,800 m³/day 범위에서 4개소를 시공하여 16,200 m³/day를 취수하도록 하였는데 비교적 긴 물막이벽에 비하여 얇은 대수층의 저류능력에 한계가 있어 실제이용은 당초계획에 비하여 아주 저조한 것으로 본 연구기간에 조사되었다.

물막이벽을 시공한 지하댐 개발지구는 앞의 이안지구를 합하여 5개 지구가 되는데 지구별 내역을 요약하면 다음 표와 같다.

표 3-4. 지하댐 (물막이벽) 설치지구 내역

지구명	위치			준공 년도	유역면적 (ha)	몽리면적 (ha)	1일취수량 (m ³ /d)	집수정 (개소)	물 막 이 벽 길이(m)
	도	군	면						
이안	경북	상주	이안	'83	2,130	120	24,000	4	230
옥성	충남	공주	우성	'86	27,500	146	27,900	4	482
남송	경북	연일	홍해	'86	15,300	155	27,000	4	89
고천	전북	정읍	태인	'86	2,700	134	25,110	5	192
우일	"	"	정우	'86	2,200	99	16,200	4	778
계	5지구				49,830	654	120,200	21	1,771

나 방사상집수정 시공지구

지하 물막이벽의 효과에 대하여는 지하수문 해석의 복잡성으로 수리적 이론정립이 되어 있지 않았기 때문에, 5개지구의 지하댐개발사업 시행후 물막이벽

공사비 투자(총공사비의 약 20%)에 비하여 그 효과가 따르지 못하는것으로 이해되었다.

대수층에 풍부한 수량이 저류되어 있고 이를 양수 이용하는 기간에 계속 보충하는 넓은 유역을 가진 지역에서는 굳이 지하 물막이벽을 시공해야 할 필요성이 없다. 그러므로 '86년 이후에는 넓은 유역의 하천 인근 지역에 지하물막이벽 없이 방사상집수정만 시공하여 왔는데 93년말까지 준공된 방사상집수정 지구수는 총 40지구에 달한다.

표 3-5는 대량 지하수 시설로서 지하댐사업지구(물막이벽 시공지구)와 방사상집수정 사업지구의 도별 현황이다.

표 3-5. 도별 지하댐 및 방사상집수정 설치 현황 ('93년까지)

도 별	대량 지하수 시설			방사상집수정수 (개소)	몽리면적 (ha)	계 획양수량 (m ³ /d)	비고
	지하댐 (지구)	집수정 (지구)	계 (지구)				
경기		9	9	17	499	99,152	
강원		3	3	6	132	27,667	
충북		2	2	3	63	11,700	
충남	1	6	7	15	394	77,880	
전북	2	6	8	16	424	80,440	
전남		1	1	1	24	4,000	
경북	2	5	7	13	464	87,610	
경남		8	8	18	447	91,200	
계	5	40	45	89	2,423	475,649	

※지구별 내역은 표 4-1 지하댐 및 방사상집수정 이용현황 조사총괄 참조

제 3 절 외국의 지하댐 시공사례

1. 개 요

건조지대에서 지표저수지는 증발손실이 클 뿐아니라 토사유입으로 인한 저수지 매립, 오염물질 유입 및 축적 등 심각한 불이익이 따른다. 이러한 결함을 극복하기 위하여 물을 지하에 저장하는 방법이 로마시대부터 시행되어 왔는데 이스라엘 등 중동지역에서는 지하동굴을 건설하여 물을 저장하였으며 아프리카 지역에서는 인공적으로 모래층을 만들어 모래 공극에 물을 저장하는 방법이 이용되어 왔다. 이 모래저장댐(sand storage dam)은 그림 3-4와 같이 하천을 가로질러 하부의 불투수층에 이르기까지 터파기한 다음 불투수층벽을 쌓아 댐을 만들면 홍수시 댐 내부에 모래가 쌓이어 인공대수층이 되므로 여기에 저장된 물을 갈수기에 이용하는 시설이다. 이것은 지하댐의 일종으로서 근래에는 적정 위치선정, 설계 및 시공에 수리지질학적 접근이 시도되어 선진국에서도 이용되고 있다. 그림 3-5는 세계적인 지하댐 이용분포를 보여준다(Nielson A., 1986).

근대적인 지하댐의 구상과 시공은 일본에서 시작되었다고 볼 수 있다. 일본은 나가사키(長崎)현의 가바지마(樺島)댐과 오키나와현의 미나후크(皆福)댐을 70년대에 건설하여 그 효능을 입증하였으며 특히 도서지방의 생활용수와 농업용수 확보를 위하여 많은 후보지를 선정하여 계획하고 있다.

2. 인도 및 아프리카 지역 사례

가. 인도 남부 지역

인도의 남부 Kerala주 Palghat Gap지역에 2개의 지하댐이 건설되었다. 지하댐

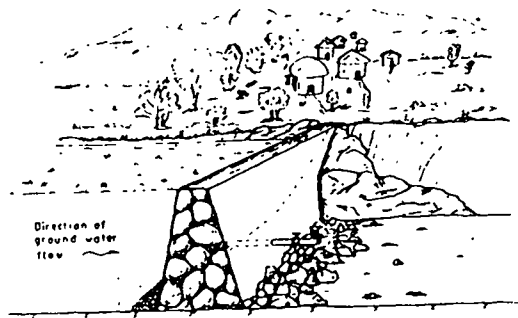


그림 3-4 모래저장댐

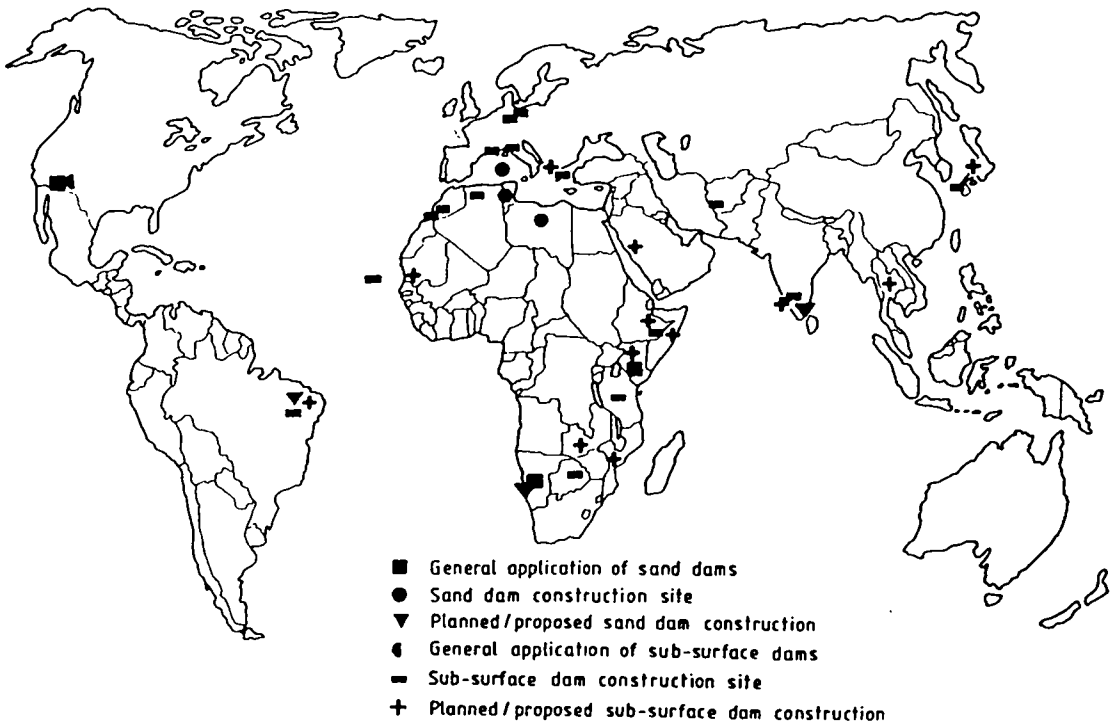


그림 3-5 지하댐 이용 분포

이 있는 지역은 서부해안쪽으로 평행한 2개의 구릉이 뻗어 있는 지구대(graben)로서 표고는 50m 내외이며 년강수량은 2400mm로서 많은 편이나 주로 우기인 6~8월 중에 내린다. 산업은 농업이 주로서 우기에는 물이 풍부하므로 1모작관개에는 충분하나 갈수기에는 우물과 하천이 고갈되므로 2모작을 위하여 추가로 물이 소요된다.

1962~1964년 기간중 농가 자력으로 계곡부에 130m의 뚝을 쌓아서 지하댐을 시설하였다. 뚝은 폭 10cm의 석고 벽돌은 기반암 바닥으로부터 평균 5m 최대 9m를 쌓아올린 것이다. 뚝 안쪽에는 뚝과 평행으로 자갈 배수로를 만들고 우물과 연결하여 양수할 수 있도록 시공되었다.

대수층은 모래이고 유역은 10ha로서 관개면적은 논 1.5ha와 코코넛 밭 1ha이다. 이것은 갈수기 관개에 효과가 있었으며 1979년 정부는 시범사업으로 그 인근에 전기비저항탐사등 수리지질조사를 시행하여 제2의 지하댐을 건설하였다. 기반암은 화강암과 편마암으로 계곡중앙부는 모래가 퇴적되고 가장자리는 세립질로 되어있어 평균 유효공극율은 7.5%이었다. 길이 150m 평균심도 4m로 댐을 건설하였는데 석회벽돌벽과 플라스틱 쉬트벽으로 구성되었다. 상류부의 침수방지를 위하여 뚝의 정부(crest)는 지하 1m에 위치하도록 하였다.

취수공은 뚝 인근에 두개의 우물을 시공하고 서로 연결되도록 하였다. 공사기간은 3개월, 공사비는 양수장비를 포함 7,500US\$, 유역면적은 20ha로서 평균 저류량은 15,000m³이며 관개면적은 6ha로서 투자효율은 1.06으로 보고되었다.

나. 에티오피아

에티오피아정부는 스웨덴의 지원을 받아 Haraghe지역 농촌용수개발계획을 수립(1977) 하였는데 이 계획에 의거 1981년 Bombas와 Gursum에 지하댐을 건설하였다.

Bombas 지역은 주민 500명의 식수공급을 위하여 모래담을 건설하였는데 결정질 암석인 기반암까지 3m를 굴착하고 콘크리트 블럭으로 뚝을 쌓아 지표 모래층보다 0.8m 높게 담을 만들었다. 담의 하류부는 홍수시 세굴을 방지하도록 전석을 깔았다. 물은 담의 하류부 300m 거리에 있는 철제 탱크까지 파이프를 배수되어 주민이 이용할 수 있도록 되었다. 이 담의 공사비는 15,000US\$로서 첫 우수기에 담 내부가 물과 모래로 넘치게 되어 차수효과가 입증되었으며 시공후 단절없이 활용되고 있다. 그러나 지하담 내부에 물이 고이므로 짐승들이 모여들어 식수를 오염시키는 문제점이 발생되어 관리상 주의가 요망되고 있다.

Gursum 지역은 인구 5000명의 식수공급을 위한 모래담을 건설하였으나 담 지역의 지질이 실트와 점토질이 많아 투수도가 매우 낮으므로 이를 개량하기 위하여 200m'을 터파기해냈다. 담 벽체는 세메트로 접착한 돌쌓기 공법을 썼고 터파기 주변에는 콘크리트 블럭으로 기둥을 세우고 그 위에 반원형의 콘크리트 덮개를 시공하였다. 부족한 집수량은 담 상류부의 용천지역에 pvc 스트레너를 매설하여 담으로 중력 도수하였다. 총공사비는 150,000US\$ 이었다.

3. 일본의 사례

지하담의 구상을 구체적으로 명확하게 제안한 사람은 마쓰오신이치로(松尾新一郎)이다. 그는 1964년 지하수 규제목적의 지중담 구상을 발표하여 지하수학자간에 많은 논의를 거쳤다. 이 구상을 근거로 하여 1973년 가바지마(樺島) 지하담과 1979년 미야코지마(宮古島) 지하담이 건설되어 매우 효과적으로 이용되고 있으며 기타지역에서도 지하담 건설계획이 수립되어 있다. 일본은 지하수위가 지표에 가까이 있다. 이것은 지하수 유출량에 비해 강우의 함양이 크기때문이라고 본다. 이러한 경우 지하수위 상승의 여지가 적다. 지하수위를 지표면까지 상승시키면 토양의 습윤화로 작물에 나쁜 영향을 줄 수 있다. 이런 이유로

지하수위를 높이는 것이 곤란한 경우가 많다.

그러나 지하수위가 비교적 깊은 곳은 지하수 유출이 함양보다 크기때문에 지표에 나쁜 영향을 주지 않는 범위에서 지하수위를 상승시킬 수 있다. 미야코지마 지하댐은 이경우에 해당된다. 한편 지하수 취수를 위하여는 집수에 필요한 동수경사를 주어야 하는데 해안변 대수층에서는 염수의 침입이 문제가 된다. 이러한 경우 지하댐은 염수침입을 효과적으로 억제하며 상류부의 물을 최대한 이용할 수 있는 시설이 된다. 가바지마 지하댐은 이경우의 예이다.

가. 가바지마(樺島) 지하댐

1) 지구개요

가바지마는 나가사키현 노모사키(長崎縣 野母崎町)에 속하는 나가사키 반도의 남단에서 350m 지점에 위치한 면적 2.21km²의 작은 섬으로, 인구 약 1,400명이 섬 V자 계곡부 입구에 집중되어 생활하고 있으며 이들의 주업은 어업과 과수재배이다. 이 섬에는 이용가능한 지표수는 거의 없기 때문에 1974년 이 섬에 독특한 물막이벽을 건설하고 생활용수를 이용하였으나 시공 방법이나 이용 등이 충분치 못해 갈수기에는 급수 시설등 생활용수상에 애로가 있었다.

1977년부터 1980년까지 지하댐의 실용화를 위한 수리지질 조사, 물 수지 분석, 기존 물막이벽의 검토등을 실시하여 현지 실험을 거쳐 기존의 지하댐 시공에 이르렀다.

2) 지형 및 지질

이 지하댐은 가바지마항 반대편 서해안 협곡에 위치하고 협곡 말단부에 물막이벽이 설치되었다. 협곡은 북북동에서 남남서 방향으로 이루어져 있으며 우안은 110~130m의 비교적 높은 능선으로 된 V자 계곡이며 완만하게 경사를 가지고 서해에 달하게 된다. 계곡의 저폭은 약 60m정도이며, 연장 1km정도, 폭 2~

3m의 소하천이 흐르고 있으나 충적층이 분포되어 하천수는 복류(伏流)되어 지하댐의 수원이 되고 있다. 동 유역 면적은 35ha에 지나지 않으나 임상이 양호하고 강우량이 많아 지하댐의 수원 공급에 유리한 조건을 이루고 있다.

이 섬의 지질은 결정질 편마암으로 분포되어 있고 곳에 따라 풍화작용을 심히 받아 표토는 20m 내외의 풍화대를 이룬 곳이 있으며 섬 대부분을 두터운 표토로 피복되어 노두는 해안에서 주로 관찰되고 있다.

지하댐 부근 지질은 약 30m 하부에 결정 편암의 경암이 나타나고 그 상부는 풍화암 또는 풍화대로 이루어져 있으며 그 상부는 계곡을 따라 약 20m의 사력층이 약간의 점토와 부식토를 혼재하면서 해안부에서 약 550m까지 퇴적되어 있다. 이들은 이 지하댐의 대수층을 형성하고 있다.

3) 저수량 산정

지하댐 용량은 지하대수층 체적과 유효공극율의 상관관계에 의해 구할 수 있다. 본 지하댐은 지질 조사 결과를 기준으로한 각 지층 내의 저류수량은 다음과 같다.

$$\text{풍화대층} \quad : 143,100\text{m}^3 \times 0.002 = 2,860\text{m}^3$$

$$\text{자갈혼재 점토층} : 43,200\text{m}^3 \times 0.15 = 6,480\text{m}^3$$

$$\text{계} \quad : \quad \quad \quad 9,340\text{m}^3$$

이 수량은 1일 200m³씩 양수하면 약 47일간의 수량에 해당되나 계속되는 강우와 함양시설 등의 보완 시설로 생활용수의 해결책으로 이용되고 있다.

4) 지하댐의 시공

물막이벽의 시공공법은 다양하나 이 지구의 현지 여건에 적합한 공법을 선정 함에는

- 경제적으로 실천 가능성이 있고,
- 차수공법으로 확실성이 있어야 하며,

• 안정성이 있는 무해한 공법이라야 한다.

이 지구에 적합한 공법으로는 이중Strainer를 사용하는 주입공법이 토사층이나 암반층에 가장 적응성이 높아 이 지구에 가장 효과적인 공법으로 선택되었다.

이 그라우팅 시공은 댐 중앙부에서 시작하여 확대해 가는데 양안 부근에서는 부분적으로 시공하지 않은 구간도 있다. 주입 압력은 2~3kg/cm²로 하고 시멘트와 벤토나이트를 5:4 비율로 혼합하여 주입하였다. 주입전 사력층의 투수계수는 $K = 3 \sim 6 \times 10^{-2}$ cm/sec 이었으나 주입후 8×10^{-6} cm/sec로 개량되었다.

사력층 상부의 평균 10m 두께의 부식토는 불투수층으로 간주하고 지하수함양을 위하여 Sand pile 공법을 시공하였으며 이것은 250mm 워빗트로 공간격 5m 씩 3열을 배열하여 총 69공(연굴착장 1,133m)을 시공하였다.

취수공은 구경 200mm, 심도 19m, 스트레나구간 9m(11~19m)인 우물 2공을 개발하여 1일 400m³/day를 취수할 수 있었다.

5) 지하댐 물수지 분석

지하댐 건설후 1974년 갈수기인 8~9월중 지하수위가 해수면보다 낮게 떨어졌으며 이때 Cl 이온농도가 가장 높아 해수 침입 우려가 거론되었다. 이러한 사정을 배경으로 1977년 8월 부터 '78년 11월 까지 지하수위 관측조사와 강우량, 증발량 등을 조사하여 지하댐 저류량 변화를 분석하였다.

기간중 총강우량은 1,564mm로서 평년강우량의 60%이었으며 물수요는 250m³/day로서 이것은 지하댐에 유입하는 하천의 집수면적은 0.58km²으로 볼때 이기간 전체 강우량중 209mm에 해당되며 1일 0.4mm에 상당한다.

유역의 증발량은 전국 하천유량 조사에서 구해진 구주(九州)지방 증발량 600mm을 적용하여 이기간의 증발량은 850mm로 추산하였다.

조사기간의 초기와 최종의 지하수위를 비교하면 약 4m의 수위저하가 있었는데 이것은 대수층 유효공극율을 0.1로 가정할때 15,000m³, 유역의 강우량으로 환

산할때 30mm에 상당한다. 그러므로 강우량중 증발량, 취수량, 저류변화량을 제하면 520mm내외의 무효유출이 있었음을 알 수 있는데 이것은 지표수유출과 지하수유출로 구분할 수 있으며 지하수 유출은 지하댐의 차수능력과 관계된다.

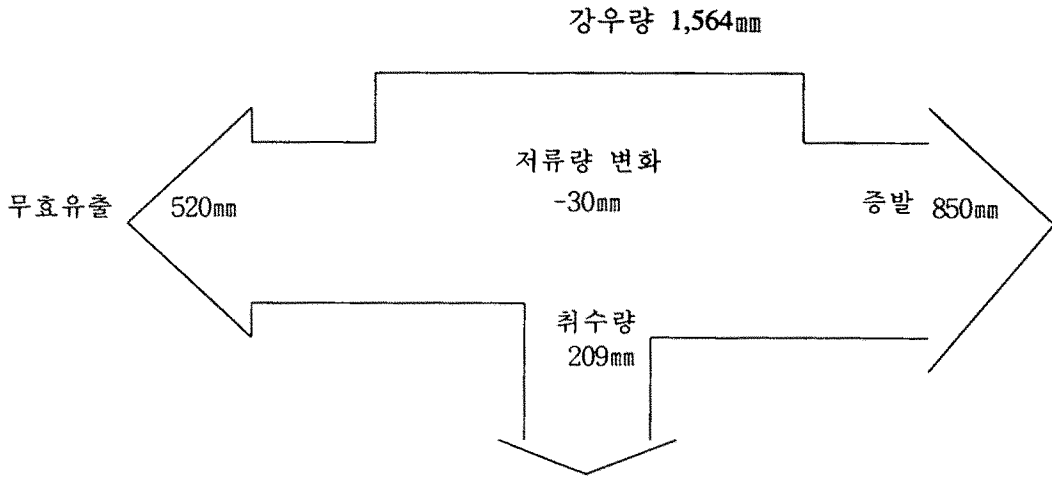


그림 3-6 가바지마 지하댐 물수지 분석 ('77. 8~'78. 11)

나. 미야코지마(宮古島) 지하댐

1) 지구개요

미야코지마는 오키나와현의 한섬으로 8000ha의 경지에 대한 농업용수를 확보하기 위하여 1974년 농림성과 오키나와 개발청이 지하댐 조사에 착수하였다. 2년간에 걸친 수리지질조사와 관측 실험 자료를 근거로 1977년부터 1979년까지 물막이벽 시공, 취수시설 및 방수시설을 건설하였고 미나후크(皆福) 지하댐이라고 명명하였다.

제장 500m, 두께 5.0m, 높이 16.5m의 물막이벽은 그라우팅 공법으로 시공되었고 총 저수용량은 700,000m³, 유역면적은 1.7km²이다.

취수공은 구경 3.5m, 심도 25m의 우물통을 물막이벽 옆에 설치하여 상류부에는 집수용 수평공 2조, 하류부에 방수용 수평공 2조를 시공하였다. (그림 3-7 참조) 또한 취수용 관정 5공이외에 지하수위 관측공 114공을 설치하였다.

2) 지형 및 지질

미나후크 댐이 있는 미야코지마섬은 오키나와 섬 남서 300km 지점에 위치하여 약 159km²의 면적을 갖고 북서~남동의 이등변삼각형의 형상을 이루고 있다. 남쪽과 동쪽은 해안 침식 단애가 계속적으로 형성되어 있고 서쪽 해안은 비교적 완만하다.

섬의 대부분은 최고 100m의 구릉이외는 60m내외의 대지상이며 동고서저의 완만한 대지지형으로 북서에서 남동으로 이루어지는 수열의 구릉성 산맥이 1~2km의 간격으로 뻗어있고 그 사이에는 기복이 완만한 평원으로 이루어져 있다.

지질 분포는 약 100만년 전에 퇴적된 제3기 선신세(鮮新世)에서부터 제4기 하부 경신세(更新世)의 Mudstone 및 Sandstone과 이와 부정합으로 피복된 Limestone이 분포되어 있다. 유구층군(琉球層群)으로 알려진 이 석회암층의 두께는 최대 60m에서 수 m에 이른다. 지질구조의 특징은 북서에서 남동으로 거의 평평한 계단식 단층이 수조 발달하여 있고 동쪽이 떨어진 단층이다. 이들 단층 낙차는 큰것이 60m이고 보통 수m이다. 단층 운동에 의해 형성된 지하계곡 구조가 잘 발달되어 지하수 저류가 가능하고 이 지하 계곡 구조를 따라 지하수가 유동하여 해안에서 용출수로 나타나고 있다. 지하계곡의 적당한 곳에 물막이벽을 설치하면 유출은 억제하여 지하담에 저장시킬 수 있다.

3) 지하담 저류량

이 지역 지질인 유구층군은 이암, 역암, 산호초석회암, 사질석회암, 이질석회암으로 되어 있으며 이중 산호초석회암은 투수계수가 $10^{-1} \sim 10^1$ cm/sec 로 매우 좋은 대수층을 이루고 있다

유효공극율은 대수층인 산호초 석회암의 위치 및 그 두께에 따라 공극율의 차이가 상당하나 불균질한 상태를 나타내고 또한 측정방법에 따라서도 다소 달라진다. 그러나 각 지역에 설치된 관정에서 양수시험한 결과와 안전률을 감안하여 평균 7% 내외로 계산하고 있다. 이를 근거로 지하댐 내부의 저류용량을 약 700,000m³으로 추정된다.

4) 지하댐 시공

① 물막이벽

지하물막이벽의 시공 공법은 지질조건, 시공의 난이도, 경제성 등을 검토한 결과, 석회암 공동등에 시공이 적절한 Cement주입 공법을 택하였다.

주입은 공극간 2.0m, 3열 지그재그식 배열로 시공하고 그 중간 각 삼각형의 중심점에 제4열의 보완공을 설치하여 Cement milk 주입으로 주입폭을 5.0m가 되도록 하였다.

주입 결과는 당초 투수계수가 5×10^{-1} cm/sec 였으나 시공후 3×10^{-5} cm/sec 가 되도록 지반을 개량하는데 성공하였다.

② 취수 시설

취수시설은 일반적으로 사용하는 관정방식 방법과 직경 3.5m의 우물통을 설치하여 하류측에 방수공 밸브를 달고 개폐할 수 있도록 하는 방법을 택했다. 상하류부에 각각 수평공을 $\phi = 200$ m/m, $\ell = 100$ m 공과 $\phi = 400$ m/m, $\ell = 30$ m 씩 굴착하여 상류부는 취수용으로, 하류부는 방수용으로 이용토록 하였으며 이용치 않을때는 밸브를 폐쇄할 수 있도록 하였다. (그림 3-7 참조)

일반 관정식 양수정은 $\phi = 200$ m/m, 심도 20~25m로 강관정 5개소를 설치하였다. 관정의 양수 능력은 평균 1,440 m³/day, 집수정은 7,200 m³/day의 양수능력을 유지토록 하여 1일 평균 14,400 m³/day의 양수 능력을 갖도록 하고 있다.

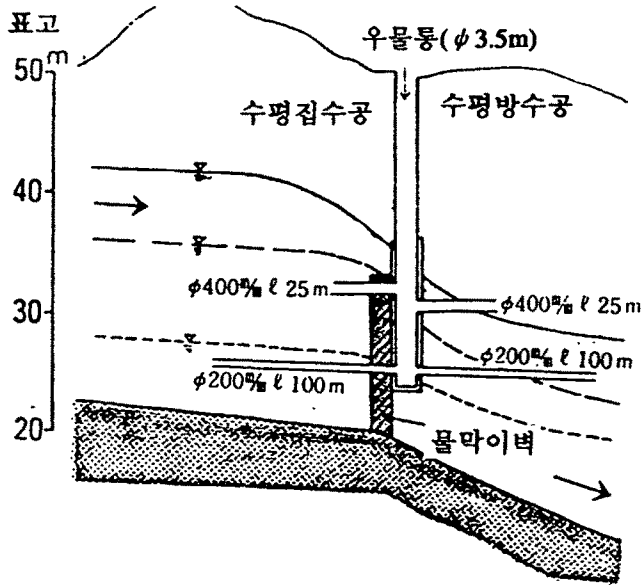
③ 배수 방법

집중 호우시 지하수위의 급격한 상승에 따라 저류구역의 지표 침수를 피하고 지하에서 자연상태로 배제하기 위하여 물막이벽 높이를 지표에서 8.0m 하부까지를 설계 시공하였다. 호우시 저류수의 배제 방법은 제체 월류방식 외에 물막이벽 외제측에 시공된 우물통에서 상류측에 집수용 수평공과 하류측에는 배수용 수평공을 굴착하여 자연 월류방식과 병행하여 배수토록 시공하였다.

5) 취수시험

지하댐 시공 완료후 3회에 걸쳐 취수시험을 실시하였으며 그결과를 종합하면 다음표와 같다.

구 분	제 1회	제 2회	제 3회
취 수 기 간	1979. 7. 17~8. 14	1979. 11. 20~12. 24	1980. 7. 25~9. 14
취 수 일 수	30일간	35일간	52일간
연 취수시간	300시간	700시간	670시간
일 평균취수시간	10시간	20시간	전반 20시간 후반 6시간
총 취 수 량 기간중 방수량	161,700m' 0m'	250,000m' 96,000m'	290,000m' 0m'
일 평균취수량	5,390m' ;	7,140m' 방수량 2,740m'	전반 8,350m' 후반 2,820m' 평균 5,590m'
일 최대취수량	6,200m'	9,000m'	10,300m'
일 최대취수속도	10.3m'/min	7.5m'/min	8.6m'/min
취 수 방 법	집수우물 (양수) 관정 4공 (양수)	집수우물 (방수) 관정 4공 (양수)	집수우물 (양수) 관정 4공 (양수)



지하수의 흐름
 물막이벽 설치후 풍수기 지하수위
 물막이벽 설치후 평균 지하수위
 물막이벽 설치전 평균 지하수위

그림 3-7 미나후크 지하댐 단면도

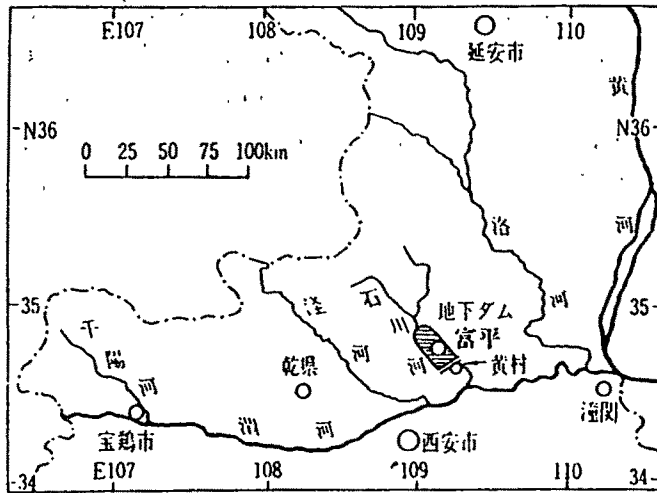


그림 3-8 후빙 지하댐 위치도

4. 중국의 사례

가. 후빙(富平) 지하댐 개요

황하의 지천인 위하(渭河)는 중국 협서성(협西省) 서안시(西安市) 북방 약 10 km 위치에 동서로 흐르고 있다. 이 위하의 북쪽은 황토 고원지대로서 고도가 800~1500m이고 평균 년 강우량이 580mm로서 건조지대에 속한다. 위하의 지천인 석천(石川)은 연장 38.5km로서 그 하류부에 후빙(富平)지하댐을 건설중에 있다. 본 지하댐 사례는 일본의 아카이고이치(赤井浩一)가 1981년 11월 기술자문을 위하여 현지 방문 조사한 결과를 기록한 것으로 그 시공후의 결과에 대하여는 자료를 수집할 수 없었다. (그림 3-8 참조)

본 지구의 지질은 표토층은 제 4기의 황토층으로 두께가 130~170m이고 그 하부는 중생대의 쇄설암이다. 황토의 투수성은 수직방향의 수평방향보다 1~2배 크기때문에 우기에 지하수 함양이 유리하다. 석천(石川)의 상류에서 지하댐까지의 길이는 36.5km 이고 하곡평야의 폭은 4.3km, 유역면적은 156km²이다. 하천폭은 넓고 대수층은 비교적 두꺼워서 최대 50m 평균 30m에 이른다.

대수층 투수계수는 2.4×10^{-2} cm/sec, 유효공극율은 0.2로 양호한 것으로 보고되었다.

지하수위는 본래 높아서 자분하는 곳도 있었으나 십수년간 농업용수, 공업용수의 수요가 증대함에 따라 지하수위가 대폭 낮아져서 최근에는 30m에 이른다. 지형과 수리지질조건으로 보아 석천(石川)의 하곡은 지하댐의 최적지로 평가되며 물수지 계산 결과 연간 양수량은 7,000만 m³, 공급량 5,000만 m³, 대수층의 저수용량은 5억 m³으로 보고되었다.

나. 후빙(富平) 지하댐 건설에 관한 기술검토

1) 함양수원

저수지에 주입수원으로서

- ① 타 유역으로 부터의 도수
- ② 평년 석천의 홍수유량 2,000만 m³의 이용
- ③ 하상의 지하수류 차수함양
- ④ 강수침투에 의한 함양 증가

등을 들 수 있는데 그중 ①, ②가 주요 수원이 된다.

2) 저수용량 산정

저수용량 산정에 고려할 사항은

- ① 생태환경을 파괴하지 않는 범위의 최고 수위
- ② 수원의 확보성
- ③ 인공주입 시설의 작업효율
- ④ 지하댐의 차수효율
- ⑤ 기타 경제적 조건

등이 있는데 이러한 제 조건을 감안하여 설계한 저수지 용량은 7,000만~1억 m³이다.

3) 함양방법

- ① 지상의 저수지로부터의 함양
- ② 용수를 도수하여 관개 등의 인공함양을 시행하는 방법
- ③ 지상에 셋강과 소류지 등을 만들어 홍수의 일부를 담아서 인공주입하는 방법
- ④ 우물 인공 주입

등이 있으나 ①과 ②가 주 대상이 된다. 석천의 서측 하천부지에 자연 지형을 이용하여 셋강(Creek)을 조성하고 홍수시 도수하여 주입실험을 실시한 결과 평

균 침투율은 시간당 6~10mm/h 이었다.

셋강의 면적을 약 2만m², 심도를 약 2m로 하여 20개를 설치하여 주입실험을 하였는데 총 154개소를 계획하여 총면적 420만m²에 총저수량 400만m³을 도수하면 1일 약 80만m³의 지하수 보충이 예상된다. 또한 황토고원의 계곡부에 높이 13.5m의 어스댐을 건설하여 용량 300만m³의 침투지를 시설하였는데 지면하 27m 부위에 투수성이 좋은 사력층이 있어 지하침투가 잘되고 있었고 침투지를 이용한 효과가 양호하였다. 저수지 수심 5~10m일때 침투량은 일 4~7만m³ 이었고 수원은 석천의 홍수량을 도수하거나 비관개기의 유출량을 담아 놓도록 되었다.

4) 지하댐 건설재료와 시공법

지하댐의 물막이벽은 석천과 온천하(溫泉河) 사이의 연장 3850m 구간이며 심도 20m미만은 1200m로 이중 830m 구간은 점토로 충전공법으로 시험시공하였다. 심도 20~50m 구간은 870m, 심도 50~80m구간은 1710m이다.

물막이벽의 시공재료에 대하여는 얇은 심도부분은 점성토 충전으로 가능하나 심도가 깊어지면 기계굴착이 불가피하며 이토질 사력층에 몰탈주입을 하거나 sheet pile 공법을 시공하여야 한다. 심도 30m이상 지역은 연속벽 공법을 검토할 필요가 있다.

5) 지하댐 건설후의 이용효과

현존하는 1000공 이상의 우물과 9개소의 양수량을 활용하면 농업관개용수뿐 아니라 황토고원에 도수하여 관개면적을 대폭 확대할 수 있고 공업용수도 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 우리나라에서의 적용성

외국의 지하댐 시공사례에서 볼 때 지하댐은 그지역의 기후와 필요성에 따라 규모와 시공방법이 크게 달라질 수 있음을 알수 있다. 우리나라는 기후조건에서

는 모래저장댐의 실용성은 희박하다고 하겠으며 여러가지면에서 일본의 경우에 가깝다고 할수 있는데 일본에서는 '70년대에 지하댐개발이 시행된 이후 주로 도서지방 해안변에 위치를 선정하고 있음을 유의할 필요가 있다고 생각된다.

우리나라에서도 내륙지역에서는 수위상승효과가 적고 또한 지하수위를 무리하게 상승시키면 작물에 나쁜 영향을 주기 때문에 지하댐 위치선정에 제한이 되고있다. 그러나 해안지역에서의 지하댐은 염수침입을 방지함과 동시에 상류부의 담수를 최대한 이용할수 있으므로 3면이 바다인 우리나라에서는 해안지역 가뭄대책에 지하댐개발이 매우 바람직할 것으로 판단된다.

여 백

제 4 장 기존시설에 대한 분석

제 1 절 이용현황 분석

1. 지하댐 및 방사상지수정 이용현황 조사

앞 장에서 설명된 바와 같이 국내의 지하댐 시공사례는 유역의 유출계곡에 지하 물막이벽을 설치한 지하댐 5개 지구와 물막이벽 없이 지하 저류지에 대규모 취수시설만을 시공한 방사상집수정지구 40개 지구가 있는데, 이 시설들의 이용현황을 조사하여 기존시설의 효과와 문제점을 검토하였다.

조사내용은 준공 당시의 계획양수량을 기준으로 하여 매년 어느정도 활용하고 있는가를 주안점으로 하고 최근 3년간('92~'94)의 연간 양수시간과 연간 양수량 및 급수면적을 현지 조사하였다. 조사방법은 관할 농지개량조합 또는 관련 시·군을 방문하여 청문하거나 설문서에 의하여 자료를 수집하였으며, 조사기간은 1995년 4월부터 10월까지 시행하였다.

표 4-1은 기존시설 이용현황 조사자료를 총괄한 것으로 총 45개지구에 대한 이용실태조사내용을 정리 수록하였다. 연간 양수시간과 양수량 및 급수면적의 상관관계는 양수기의 성능변화, 급수율 기타 여러가지 요인들에 의하여 일정한 관계가 유지될 수 없을 뿐 아니라 양수량은 계기에 의한 정확한 측정자료가 아니고 추정된 값이므로 자료의 신뢰도에는 한계가있다. 그러나 양수시간 자료는 현지 양수장의 기록부에 의한것이므로 이것을 기초로 하여 비교 검토하면 평균 가동율과 이용효과를 분석하는데 이용할 수 있을것으로 판단된다.

계획양수량과 이용양수량의 비교분석을 위하여는 같은 단위의 수량으로 표시하여야 하므로 시간당 양수량을 산출하여 < >안에 기록하였다.

표 4-1 지하댐 및 방사상 집수정 이용현황조사 총괄

지구명	위 치				준 공 현 황					조사 집수정
	도	군	면	리	준공년도	유역면적 ha	동리면적 ha	양수량 ㎥/일	집수정 개 소	
신호	경기	평택	횡성	신호	88		70	13,440 <558>	3	#1
고당		이천	울면	고당	87	29,500	60	10,620 <482>	2	#1
주미1		"	호법	주미	87	1,800	35	7,082 <295>	1	#1, 2
주미 2		"	호법	주미	88	3,200	89	19,500 <810>	2	#2 #3
신행		"	장호원	노탑	93		50	10,320 <430>	2	#1, 2
안흥		"	이천	안흥	89	65	30	6,000 <248>	1	#1
어농		"	모가	어농	93	70	45	8,690 <380>	2	#1, 2
지내		여주	북내	지내	92		30	6,000 <250>	1	#1
고안		안성	일죽	방초	90		90	17,500 <720>	3	#1 #2 #3
	소계 (평균)		9지구				499	99,152 <4,173>	17	15
반계	강원	원주	문막	반계	91	155,000	60	11,500 <522>	3	#1,2,3
송포		고성	거진	송포	93	-	50	10,387 <435>	2	#1,2
백촌		고성	토성면	백촌	85	-	22	5,780 <240>	1	#1
	소계 (평균)		3지구				132	27,667 <1,197>	6	6

양수량 란의 < >는 시간당 양수량 ㎥/h

이 용 현 황									비 고
92 년 도			93 년 도			94 년 도			
양수시 간 hr	양수량 천 ³ /년	급수면적 ha	양수시간 hr	양수량 천 ³ /년	급수면적 ha	양수시간 hr	양수량 천 ³ /년	급수면적 ha	
1,114	156 <140>	30	673	94 <140>	30	2,298	323 <140>	30	기호농조
480	152 <317>	60	480	152 <317>	60	700	221 <316>	60	이천군
480	80 <167>	35	500	83 <166>	35	720	119 <165>	35	"
480	121	50	490	123	50	700	176	50	"
450	57 <630>	40	470	59 <630>	40	700	88 <630>	40	"
.	.	.	600	171 <285>	50	630	175 <278>	50	이천농조
450	92 <205>	30	450	94 <210>	30	590	121 <205>	30	이천군
470	108 <230>	45	480	111 <230>	45	590	136 <230>	45	"
.	.	.	140	25 <178>	25	100	18 <180>	25	여주군
353	32	20	1,468	132	20	1,306	118	20	기호농조
748	92	20	1,091	134	20	1,023	125	20	"
453	55 <335>	20	1,173	144 <334>	20	1,179	144 <334>	20	"
(536)	945 <2,024>	350	(638)	1,322 <2,487>	425	(830)	1,764 <2,576>	425	
1,206	712 <590>	60	473	243 <514>	60	1,177	617 <569>	60	원주농조
.	.	.	64	24 <375>	50	186	81 <435>	50	영북농조
156	38 <241>	22	55	13 <241>	22	286	69 <241>	22	"
(943)	750 <831>	82	(267)	280 <1,130>	132	(654)	767 <1,245>	132	

지구명	위 치				준 공 현 황					조사 집수정
	도	군	면	리	준공년도	유역면적 ha	동리면적 ha	양수량 ㎥/일	집수정 개 소	
장재	충북	보은	속리	구인	86		23	3,700 <154>	1	#1
천남		"	삼승	내망	90		40	8,000 <333>	2	#1, 2
	소계 (평균)		2지구				63	11,700 <487>	3	3.
옥성	충남	공주	우성	상서	86	27,500	146	27,800 <1,159>	4	#1,2 #3,4
와룡		홍성	갈산	와리	84	7,700	35	8,640 <360>	1	#1
모산		아산	배방	신동	90	28,800	56	10,000 <417>	3	#1,2,3
모종		"	모종		88	34,200	62	12,000 <496>	3	#1,2,3
구룡		청양	장평	구룡	87	23,000	60	12,960 <540>	2	#1,2
신달		공주	유구	신달	91	453	17	3,370 <140>	1	#1
용성		"	이인	용성	85	3,180	18	3,110 <129>	1	#1
	소계 (평균)		7지구				394	77,880 <3,241>	15	15
덕천	전북	고창	대산	덕천	90	270	25	5,000 <208>	1	#1
고천		정읍	태인	고천	86	2,700	134	25,110 <1,046>	5	#1 #2 #3 #4
우일		정읍	북면	화해	86	2,200	99	16,200 <675>	4	#1
대송		김제	봉남	내광	90		25	4,300 <179>	1	#1

이 용 현 황									비 고
92 년 도			93 년 도			94 년 도			
양수시간 hr	양수량 천 ³ /년	급수면적 ha	양수시간 hr	양수량 천 ³ /년	급수면적 ha	양수시간 hr	양수량 천 ³ /년	급수면적 ha	
1,600	213 <133>	20	1,874	249 <133>	20	1,981	264 <133>	20	보은농조
1,040	339 <326>	40	931	304 <326>	40	955	311 <326>	40	"
(1,226)	552 <459>	60	(1,245)	553 <459>	60	(1,297)	575 <459>	60	
791	917 <1,159>	146	1,313	1,522 <1,159>	146.7	1,312	1,520 <1,159>	146	공주농조 (지하댐)
644	232 <360>	35	162	58 <360>	35	500	180 <360>	35	홍성농조
1,200	502 <418>	56	960	402 <418>	56	1,270	530 <417>	56	온양농조
1,140	570 <500>	62	840	420 <500>	62	1,200	595 <438>	62	"
810	451 <557>	60	800	432 <540>	60	1,182	638 <539>	60	청양농조
765	107 <140>	17	540	76 <140>	17	960	134 <139>	17	공주시
450	59 <130>	18	450	59 <130>	18	850	111 <130>	18	"
(910)	2,838 <3,264>	394	(893)	2,969 <3,247>	394.7	(1,155)	3,708 <3,182>	394	
957	98 <102>	25	1,151	118 <103>	25	720	74 <103>	25	고창농조
373	93	28	412	102	28	826	205	28	정읍농조 (지하댐)
928	174	20	971	182	24	1,873	351	20	
948	273	37	985	284	37	950	274	37	
728	147 <927>	30	783	158 <927>	30	340	69 <928>	30	
nd	nd	nd	495	114 <230>	36	1,564	360 <230>	36	정읍농조 (지하댐)
nd	nd	nd	224	39 <174>	25	221	36 <163>	25	동진농조

nd : 자료없음

지구명	위 치				준 공 현 황					조사 집수정 개 소
	도	군	면	리	준공년도	유역면적 ha	동리면적 ha	양수량 ㎥/일	집수정 개 소	
금상	전북	전주	덕진	금상	84	1,545	29	7,680 <320>	1	#1
내광		김제	봉남	내광	86		55	15,750 <656>	2	#1, 2
성계1		김제	금산	성계	85	5,240	50	5,000 <208>	1	#1
성계2		"	"	"	86		7	1,400	1	
	소계 (평균)		8지구				424	80,440 <3,104>	16	11
고달	전남	곡성	고달	목동	86	400	24	4,000 <166>	1	#1
이안	경북	상주	이안	양범	83	2,130	120	24,000 <1,000>	4	#1,2 #3,4
광천		김천	개령	양천	87	1,000	47	12,000 <486>	1	#1
광기		"	감천	광기	85	-	36	9,400 <396>	1	#1
황계		"	개령	황계	88	38,000	40	10,000 <414>	1	#1
반구		영주	장수	반구	84	620	20	3,750 <158>	1	#1
지동		"	이산	지동	86	18,160	46	7,700 <248>	1	#1
남송		포항	흥해	남송	86	7,890	155	24,200 <1,008>	4	#1,2 #3,4
	소계 (평균)		7지구				464	91,610 <3,710>	13	13

이 용 현 황									비 고
92 년 도			93 년 도			94 년 도			
양수시간 hr	양수량 천㎥/년	급수면적 ha	양수시간 hr	양수량 천㎥/년	급수면적 ha	양수시간 hr	양수량 천㎥/년	급수면적 ha	
1,395	502 <360>	29	945	340 <360>	29	2,182	786 <360>	29	전주농조
nd	nd	nd	735	481 <655>	55	1,433	939 <656>	55	동진농조
nd	nd	nd	273	55 <201>	75	296	60 <203>	75	"
nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	(사용실적없음)
(738)	1,287 <1,389>	169	(701)	1,873 <2,650>	364	(1,076)	3,154 <2,643>	360	nd : 자료없음
947	74 <78>	23	957	74 <78>	24	1,742	136 <78>	26	곡성농조
843	723 <857>	62	570	488 <857>	62	1,330	1,140 <857>	62	상주농조 (지하댐)
480	223 <465>	50	500	243 <465>	50	800	388 <485>	50	금릉군
1,440	207 <144>	36	1,200	173 <144>	36	480	69 <144>	15	김천시
480	199 <414>	40	500	208 <416>	40	800	333 <416>	40	"
780	123 <158>	20	780	123 <158>	20	960	145 <158>	20	영주시
550	136 <247>	30	520	129 <247>	30	750	186 <247>	30	"
900	907 <1,008>	155	989	997 <1,008>	155	1,450	1,462 <1,007>	155	영일농조 (지하댐)
(564)	2,518 <3,293>	393	(749)	2,361 <3,295>	393	(1,147)	3,723 <3,314>	372	

지구명	위 치				준 공 현 황					조사 집수정 개 소
	도	군	면	리	준공년도	유역면적 ha	몽리면적 ha	양수량 ㎥/일	집수정 개 소	
가조	경남	거창	가조	석강	88		130	25,320 <1,055>	7	#1~7
고품1		합천	용주	고품	87		46	15,200 <633>	2	#1, 2
고품2		"	"	"	88		20	5,400 <225>	1	#1
상안		울주	농소	상안	91		45	4,800 <200>	1	#1
등촌		울산	중구	송정	91		60	13,260 <553>	3	#1, 2 3
대곡		의령	부림	대곡	84		38	6,840 <285>	1	#1
서암		"	의령	동등	87	8,000	84	15,200 <633>	3	#1, 2 3
두양		하동	옥종	두양	85	10,000	24	5,180 <216>	1	#1
	소계 (평균)		8지구				447	91,200 <3,800>	18	18
합계			45지구				2,423	479,649 <19,878 >	89	82

이 용 현 황									비 고
92 년 도			93 년 도			94 년 도			
양수시간 hr	양수량 천 ³ /년	급수면적 ha	양수시간 hr	양수량 천 ³ /년	급수면적 ha	양수시간 hr	양수량 천 ³ /년	급수면적 ha	
1,270	1,340 <1,055>	130	425	448 <1,055>	130	1,621	1,711 <1,055>	130	거창농조
1,200	734 <612>	46	nd	nd	nd	1,200	734 <612>	46	합천군
900	204 <225>	20	900	204 <225>	20	1,200	272 <225>	20	"
600	137 <224>	45	620	142 <224>	45	850	194 <224>	46	울산시
600	333 <553>	60	800	444 <553>	60	900	499 <553>	60	울산농조
719	205 <285>	38	270	77 <285>	38	1,887	534 <285>	38	의령농조
232	147 <633>	21	489	310 <633>	35	1,570	994 <633>	77	"
nd	nd	nd	100	22 <216>	24	200	43 <216>	24	하동군
(941)	3,100 <3,587>	360	(546)	1,647 <3,191>	352	(1,405)	4,981 <3,803>	441	nd : 자료없음
(785)	12,064 <14,925 >	1,831	(689)	11,079 <16,582 >	2,169.7	(1,114)	18,808 <17,300 >	2,210	< >는 시간당 양수량 m ³ /h

2. 가뭄때의 시설 가동율 분석

1994년 가뭄은 여름장마가 실종되고 강수량이 평수년의 2/3 정도에 머무르면서 극심한 농업가뭄으로 평가되고 있다. 이번의 지하댐 및 방사상집수정의 이용현황 조사자료를 분석하여 가뭄때의 기존시설 활용효과를 검토하였는 바, 표 4-1에서 '93년과 '94년의 각 도별 이용현황을 다시 정리한 결과 표 4-2와 같다.

표 4-2 도별 지하댐 및 방사상집수정 이용현황 분석

도 별	조사 지구 수	조사 집수 정	'93		'94		가동시 간증가 율(%)
			평균가동시간 (시간)	양수량 (천 m ³)	평균가동시간 (시간)	양수량 (천 m ³)	
경 기	9	15	638	1,322	830	1,764	30.1
강 원	3	6	267	280	654	767	145
충 북	2	3	1,245	553	1,297	575	4.2
충 남	7	15	893	2,969	1,155	3,708	29.3
전 북	8	11	701	1,873	1,076	3,154	<u>53.5</u>
전 남	1	1	957	74	1,742	136	<u>83.4</u>
경 북	7	13	749	2,361	1,147	3,723	<u>53.5</u>
경 남	8	18	546	1,647	1,405	4,981	<u>157</u>
계	45	82	689	11,079	1,114	18,808	61.7

표에서 보는바와 같이 평수년에 해당하는 '93년은 년 평균 가동시간이 689 시간인데 비하여 '94년은 1,114시간으로 전년대비 61.7%의 증가를 나타내며 '94년 가뭄대책에 충분히 활용한 실적을 보여주고 있다. 특히 평균 가동실적 증가율의 도별 분포와 '94년 가뭄 도별 분포가 일치하는것은 이 시설물들의 가뭄대비 효용을 입증하는 것이라 평가된다. 한편 시설의 연간 가동시간을 분석 하면 평균적으로 500~1,000시간 범위에 해당한다고 볼 수 있으나, '94년 이 용실적은 1,000시간 이상의 가동지구도 18지구(40%)나 된다. 그러나 500시간 미만인 지구도 '93년에 15지구(34%), '94년에 8지구(18%)가 있었는데 이들 비효율적 운영지구에 대한 원인분석이 별도로 요망된다.

표 4-3 기존시설 가동시간별 분석

년가동시간	1993		1994		2년연속 가동불량지구
	지구수	%	지구수	%	
200 이하	7	16	4	9	지내 (경기여주), 두양 (경남하동) 송포 (강원고성), 성계2(전북김제)
200 ~ 500	8	18	4	9	대송 (전북김제), 성계 (전북김제) 광기 (경북김천), 백촌 (강원고성)
500 ~ 1,000	25	55	19	42	
1,000 이상	5	11	18	40	
계	45	100	45	100	

3. 물막이벽 시공지구의 이용현황 분석

지하 물막이벽 설치지구인 이안지구의 4지구에 대한 이용현황을 별도로 분석한 결과 년 가동시간이 '93년의 831시간에서 '94년에 1330시간으로 증가하여 '94년 가뭄 이용률 60%로 나타났으며 이것은 기존시설 전체분석에서 나타난 증가율과 같으나 지하물막이벽 설치지구가 평시나 또는 가뭄시에 일반지구에 비하여 20%정도 가동시간이 많은 것을 알 수 있었다.

또한 당초 설계량과 실 이용량을 비교하기 위하여 이용수량을 시간당 양수량으로 바꾸어 비교해 본 결과 표 4-4와 같다. 유역면적이 넓고 대수층 두께가 큰 남송지구, 옥성지구 등 2지구는 당초 계획양수량의 90%이상 활용하고 있으나, 이안지구와 고천지구는 당초계획의 85% 정도이고 우일지구는 34%로서 이들 3개 지구가 소유역인 동시에 대수층 두께가 상대적으로 얇기 때문인 것으로 판단된다. 이안·고천·우일지구는 유역 면적이 2,500ha 내외의 소유역인 반면 옥성·남송지구는 이들에 비해 7~10배의 큰유역을 갖는 지구이다. 유역면적이 어느정도가 되어야 지하담개발에 적절한지 분명한 기준은 없지만 유역면적이 크다는 것은 갈수기에 집수량이 많다는 것을 의미하며 따라서 가뭄에 견딜 능력이 그 만큼 더 크다는 것을 알 수 있다.

표 4-5는 지하담(물막이벽 설치) 5개 지구에 대하여 월 이용계획량과 '94년 양수이용량의 비교표이다. '94 양수이용량은 관개기간 중 총 양수량이나 가뭄시 월 이용계획량 보다는 17%이상 증가되고 있어 가뭄기간중의 이용효과를 증명하고 있다. 그러나 고천지구와 우일지구는 타지구에 비하여 이용실적이 저조한데 이는 지역조건이 불리하여 설계수량이 부적합하게 계획된 것으로 추정된다. 특히 우일지구는 양수시설의 고장 또는 관리상의 문제가 있지 않은가 생각된다.

'84년에 시행한 이안지하담 사후 평가조사결과에 의하면 취수시설인 방사상

집수정 4개소에서 양수량은 당초 계획대비 평균 72%로 분석된 바 있다(표 3-3 참조). 그러나 이것도 '84년도가 평년강우 상태인 점을 고려할때 가뭄시 이용율은 더 떨어질 수 있을 것으로 판단된다. 이렇게 이용수량이 계획수량에 크게 못미치는 사유는 유역이 협소한 영향 때문이기도 하지만 보다 큰 이유는 대수층의 두께가 얇아 지하 물막이벽의 효과가 미흡하기 때문인것으로 판단된다.

표4-4 지하댐(물막이벽 설치)지구 이용현황 분석

지구명	당초설계		'93년			'94년			양수량 비율 (%)
	계획수량 (m ³ /d)	면적 (ha)	양수시간 (시간)	양수량 (천 m ³)	면적 (ha)	양수시간 (시간)	양수량 (천 m ³)	면적 (ha)	
이안	24,000 (1,000)	120	570	488 (856)	62	1,330	1,140 (857)	62	(85.7)
남송	27,000 (1,125)	155	989	997 (1,008)	155	1,450	1,462 (1,008)	155	(90.0)
옥성	27,900 (1,162)	146	1,313	1,522 (1,159)	146	1,312	1,520 (1,158)	146	(99.7)
고천	25,100 (1,046)	134	788	726 (921)	115	997	899 (902)	115	(88.0)
우일	16,200 (675)	99	495	114 (230)	36	1,564	360 (230)	36	(34.1)
계 (평균)	120,200 (5,008)	654	831	3,847 (4,174)	514	1,330	5,381 (4,155)	514	(82.9)

()는 시간당 양수량, 단위 : m³/hr

표 4-5 지하댐(물막이벽 설치)지구 가뭄이용효과 분석

지구명	위치			유역면적 (ha)	몽리면적 (ha)	월 이용 계획량(천m ³)	'94 양수 이용량 (천m ³)	증가율 (%)
	도	군	면					
이안	경북	상주	이안	2,130	120	720	1,140	57
남송	"	영일	홍해	15,300	155	918	1,462	59
옥성	충남	공주	우성	27,500	146	865	1,520	75
고천	전북	정읍	태인	2,700	134	803	899	12
우일	"	정읍	정우	2,200	99	520	360	△30
계				49,830	654	3,826	4,482	17

제 2 절 기존시설 설계 내용 분석

1. 지하댐 저류량과 이용가능량 산정내용

지하댐 설계의 기본은 지하수 저류량과 이용가능량을 적합하게 추정하는데 있다고 볼 수 있다. 앞 절에서 소개한 이안 시험사업지구의 예를 보면 유역전체를 지하수문 특성을 감안하여 23개 소구역으로 세분하고(그림 4-1 참조), 각 Cell별로

"면적 × 대수층두께 × 비산출률"로 저류량을 계산하고 이들을 합산하여 지하댐내의 저류가능량을 산정 하였으며, 이용가능량은 각 Cell에서 지하 물막이 벽까지 흐르는데 걸리는 소요일수 f (거리/지하수유속)를 구하고 Cell안의 저



류량 Q 를 f 로 나누어 Cell별 1일 유출량($q=Q/f$)을 계산한 다음 가뭄시 30일간의 이용가능량을 구하였다. 즉, 예를 들어 최상부의 Cell 1에서 저류량은 $343,000\text{m}^3$ 로 계산되었는데 이것이 물막이벽까지의 지하수 흐름으로 걸리는 기간은 4,400일이 소요되므로 1일 유출량을 $343,000\text{m}^3/4,400\text{일} = 78\text{m}^3/\text{일}$ 로 계산하고 30일간 이용량을 $78\text{m}^3/\text{일} \times 30\text{일} = 2,340\text{m}^3/\text{월}$ 로 산출하였다. 이렇게 하여 23개 Cell에 대한 저류량과 이용가능량을 합한 결과 지하댐내의 지하수 총 포장량 즉, 지하수 저류량은 $4.143\text{천}\text{m}^3$ 으로 산정되었고 지하수 이용가능량은 무강우 1개월간 $614\text{천}\text{m}^3$ 으로 계산되었다. 여기서 몇가지의 의문점이 제기되었다. 즉, 무강우기간에 토양수분 이외는 지하수를 함유할 수 없는 산지유역 전체의 면적에 1.5 ~ 2m의 대수층을 가정하여 저류량을 산정하므로써 저류량이 과다 계상된 감이 있으며, 이용가능량 산출에 있어 지하수 도달기간을 계산한 다음 30일간의 이용가능량을 역으로 산출하는 것은 논리적 모순을 내포하고 있다는 것이다. 실제로 Cell 1 내의 지하수는 가뭄기간에 물막이벽까지 도달하지 못하는 것이나 그런데도 $2,340\text{m}^3$ 의 지하수가 이용되었다는 것은 모순이라고 본다. 이안지구의 이용계획량이 과다 책정되었음은 준공 직후의 사후평가 조사에서 보여 주듯이 실 이용가능량이 계획량의 72% 정도이었음을 보고 알 수 있다.

지하수의 유동은 연속적 이동이며 Cell별 독립 개념이 아니므로 이러한 모순의 극복은 지하수 유동모델링의 도입으로 전체유역에 대한 지하수 저류량과 이용량을 해석하므로써 가능할 것으로 판단된다.

표 4-6은 이안지구 외 4개 지하댐지구의 저류량 및 이용가능량 설계자료에 대한 검토내역이다. 이들 설계 내역을 보면 정립된 기준이 없이 현지 여건을 감안하여 임의적으로 저류량과 이용가능량을 계산하고 있다.

본 연구에서는 유역 전체의 저류량과 집수량을 어떻게 고려할 것이냐, 저류

계수(비산출률)을 어떻게 적용할 것인가, 이용가능량을 저류량에 비하여 어느 정도까지 할 것인가, 관개기간중 관개수 침투수의 회수이용율을 어느정도 고려할 것인가 등을 연구 세부내용으로 설정하고 이들을 이론적 및 실무적으로 정립하여 지하댐 설계기준으로 제시코자 한다.

2. 물막이벽 설계 내용

지하 물막이벽 공법의 종류는 절개공법(open cut)과 주입공법(grouting)으로 구분할 수 있으며 절개공법은 콘크리트벽과 점토벽으로 나눌 수 있다.

콘크리트벽 공법은 지하 불투수층까지의 흙을 완전히 터파기해 난후 철근콘크리트벽을 시공하는 것으로 물막이 효과는 직접 확인이 가능하나 물푸기 작업을 병행하여야 하므로 강우기나 풍수기에는 시공하기 어렵고 공사기간중 지하수를 계속 퍼내어야 하므로 상류부의 용수부족에 따른 민원 발생이 생길 수 있다. 이 공법은 명확한 한계를 지을 수는 없지만 터파기 심도에 따라서 공사비 증가가 상대적으로 크므로 물막이벽 심도의 제한을 받는다. 점토벽 공법은 콘크리트벽 공법과 비슷한 방법이나 재료가 다를 뿐으로 인근에 양질의 점토가 있을때 시공이 가능하다.

주입공법은 물막이벽 구간에 시멘트몰터 또는 약액을 주입하여 지층의 공극을 불투수성 재료로 채움으로서 물막이벽 효과를 거두는 것이다. 이 공법은 공사기간의 제약이 없고 원지반의 변동 없이 시공이 가능하며 시공심도가 깊어져도 큰 어려움이 없다는 장점이 있으나 지표에서 기계에 의한 시공이므로 물막힘 효과를 직접 관찰할 수 없고 시공심도가 얇거나 혼전석지층의 경우는 시공 효과가 불량하다는 단점이 있다.

이안지구 시험사업에서는 이러한 공법들의 비교검토를 위하여 물막이벽 230m구간중 콘크리트벽 36m와 주입공법으로 194m를 시공하였으며, 시공심

표 4-6 지하댐 저류량과 이용가능량 산출 내용 검토

지구명	유역면적 <대수층면적> (물리면적)	지하수저류량 (이용가능량)	1일 용수량 (월 이용수량)	지하수저류량, 이용가능량 산출내용	검 토 내 용
이안	ha 2.130 <334> (120)	천m ³ 4,143 (614)	24,000 m ³ /d (720 천m ³)	<ul style="list-style-type: none"> • 유역면적을 23개소구역으로 나누어서 구역별 포장량을 계산함 (유효공극율을 지층별로 0.05~0.22 적용) • 각 소구역별 저류량이 지하댐까지 도달되는 시간을 계산하고 역으로 1일 유출량과 월간 유출량을 계산하여 이용가능량으로 함 	<ul style="list-style-type: none"> • 지하수저류량은 유효공극율 (비상출윤)에 의한 산출이나 소구역별 일괄 적용으로 과다 계상된 감이 있음 • 소구역별 지하수저류량이 지하댐까지의 유동시간을 계산하고 30일간 이용량을 역으로 산출하는것은 모순임→유역에대한 지하수유동모델링 해석으로 이용가능량 점검을 요함
남송	15.300 <406> (155)	4,017 (2,678)	27,000 m ³ /d (918 천m ³)	<ul style="list-style-type: none"> • 총적층면적 x 유효심도 x 유효공극율 = 유효저류량 공식에따라 계산 (유효공극율 0.15 적용) • 집수효율을 2/3로 잡아 이용가능량을 산출 	<ul style="list-style-type: none"> • 유역집수개념은 무시하고 총적층에 저류된 량만 계산 • 유효저류량에서 이용가능량의 비율을 어떻게 정하는 가는 별도 연구과제임

지구명	유역면적 <대수층면적> (몽리면적)	지하수저류량 (이용가능량)	1일용수량 (월이용수량)	지하수저류량, 이용가능량 산출내용	검 토 내 용
육성	ha 27,500 <303> (146)	천 m ³ 2,850 (954)	27,900 m ³ /d (865 천 m ³)	<ul style="list-style-type: none"> • 총적층면적 x 대수층평균두께 x 유효 공극율의 공식에 따라 유효저류량 계산 (유효공극율 0.10 적용) • 침수효율을 1/3으로 잡아 이용가능량 산출 	<ul style="list-style-type: none"> • 충분한 유역을 감안하여 안정적으로 이용계획량에 맞추어 이용 가능량을 산출하였으나 실재는 이용가능량을 먼저 추정하고 여기에 맞는 이용계획을 수립하여야 함
고천	2,700 <343> (134)	1,534 (760)	25,100 m ³ /d (803 천 m ³)	<ul style="list-style-type: none"> • 유역면적을 10개의 소유역으로 구분, 지층구성분에 따라 유효공극율 차등 적용으로 유효포장량을 계산하고 이의 80%를 유효저류량으로함 (사력15%, 조립사20%, 세사15%, 점토0) • 취수장 (방사상침수정) 경계단면통과 량을 수두차에 의한 유속개념으로 이용가능량 계산 	<ul style="list-style-type: none"> • 소유역으로 구분하여 지층별로 유효공극율을 차등 적용한것은 잘되었으나 지역별 지층구조확인이 어려우며 경계단면 통과량의 개념은 실제와 차이가 클 수 있음 • 관개수의 침투량을 회수이용을 10%로 하여 이용계획량을 가능량보다 크게 잡은것은 가능성이 있는 것으로 판단됨
우일	2,200 <862> (99)	2,457 (775)	16,200 m ³ /d (520 천 m ³)	<ul style="list-style-type: none"> • 총적층면적 x 대수층평균두께 x 유효 공극율의 공식에 따라 유효저류량 계산(유효공극율 0.10 적용)하고 생활용수등 이용량을 손실량으로 간주하였음 • 침수효율을 1/3정도 잡아 이용가능량 산출 	<ul style="list-style-type: none"> • 유효저류량에서 손실량(생활용수 및 관개용수이용량)을 공제한 것은 이용가능량으로 계산될 부분임

도 5m이내에서는 주입공법보다 절개공법이 경제적 면이나 시공측면에서 유리하다는 것으로 나타났다. 주입공법은 S.G.R.공법을 채택하였는데 이것은 국내에 처음으로 도입된 것으로 물막이벽의 주입공법들에 대한 비교내용은 표 4-7과 같다.

표 4-7 물막이벽 그라우팅 공법 비교

구 분	일반주입 (시멘트)	약 액 주 입		비 고
		J.S.P	S.G.R.	
도입년도	재래식	1979	1982	
적용지질	암반균열대	점토·모래층	전지층	
주입방법	저압주입식 (10kg/cm ²)	고압주입식 (200kg/cm ²)	저압주입식 (5kg/cm ²)	
막힘효과	주입반경 암 반 : 1.0m 모래질층: 0.3m	주입반경 : 0.6m 자갈층에서 불균 질벽 형성	주입반경 : 0.8m 규질지수벽 형성	
강 도 (kg/cm ²)	5~10	10~90	4~10	
주 입 재	일반시멘트	Cement Pozzolith	규산소다 SGR 1~10호	
주입단가비	1.0	3.0	2.0	

※ J.S.P. : Jumb Special Pile

S.G.R. : Space Grout Roket System

표 4-8은 지하물막이벽을 시공한 이안지구와 4개지구의 물막이벽 설계내용을 비교한 것인 바, 그 시공결과는 확인하지 못하였으나 물막이벽 공사비가 총

공사비의 20% 정도로서 물막이벽의 효율적인 설계가 지하댐사업의 경제적 타당성을 좌우하게 됨을 알수 있다. 그러나 현재까지 물막이벽 시공에 대한 효과를 측정할 조사자료가 없으며 물막이벽의 내구성 조사도 이루어 지지 않고 있다.

이안지구 S.G.R.그라우팅 시공구간의 지층 투수도를 측정한 자료는 시공전 평균 2.45×10^{-1} cm/sec 이던것이 시공후 3.92×10^{-5} cm/sec 로 개선된 것으로 보고되어 있으나, 1993년 4월에 이곳에서 4공의 시험공으로 관측한 자료는 2.22×10^{-2} cm/sec 이었음이 보고되었다(김희성, 1996). 이것은 S.G.R. 주입재료가 장기간에 걸쳐 용해되어 유출되었음을 암시하고 있는데 본 이안지구 뿐 아니라 다른지구 까지도 일괄 조사하여 대책을 수립하여야 할것이다.

표 4-8 지하댐사업지구 물막이벽 설계내용 비교

지구명	물막이벽 크기		공 법		물막이벽 공 사 비	총공사비 대비 공사비비율
	길이	높이	절개공법	주입공법		
이 안	230	5.0	철근콘크리트 36m	SGR 194m	110,000	22.4
남 송	89	18.8			200,519	19.5
고 천	192	7.5	철근콘크리트 36m		90,750	10.4
우 일	785	6.7	점토벽 785m		114,334	21.3
옥 성	482	9.16		시멘트주입 482m	412,800	41.1

3. 방사상집수정 설계 내용

가. 우물통 설계

방사상집수정은 대수층 하단까지 우물통을 설치한 후 우물통 속에 수평착정기를 장치하여 수평집수관을 20 ~ 30m씩 방사상으로 설치하므로써 대수층안에 저류된 지하수를 중앙의 우물통 안으로 집수하는 시설이다. 그러므로 방사상집수정 설계는 우선 우물통 설계를 하여야 한다.

이안지구 시험사업에서는 조립식 파형강판(波形鋼板) 공법과 철근 콘크리트 우물통 공법을 시험시공 하였으나, 조립식 파형강판 공법은 예상과 달리 대수층의 붕락으로 시공상의 간편성을 기대할 수 없었으며 위험성마저 있었으므로 보급되지 않았다.

철근 콘크리트 우물통의 구조는 통상 외경 4.0m 내경 3.5m의 원통형 철근 콘크리트 구조로서 하단은 외경 4.10m인 쐐기형 철판 구조물인 선단 장치(Shoe)가 있고 그위에 원통형 거푸집과 철근을 조립한 후 콘크리트를 타설한다. 1회 타설량은 원통 높이 2 ~ 3m를 기준으로 하고 우물의 계획심도를 감안하여 몇회로 나누어 하며, 콘크리트가 양생된 후 거푸집을 철거하고 우물통 속을 인력 또는 기계장치로 터파기하여 우물통 철근콘크리트의 자중으로 가라앉게 한다. 우물통이 지하수면 아래로 잠입한 상태에서 작업하여야 하므로 물푸기 작업을 병행하여야 하는데 물푸기량의 계산은 자유면 대수층의 양수량 공식을 적용하여 산출할 수 있다. 즉,

$$Q = \frac{\pi K(H^2 - h_0^2)}{2.30 \log R/r_0} \text{-----}(4-1)$$

여기서 K : 투수계수

H : 자연수두

h₀ : 양수수두

R : 영향반경

r₀ : 우물통 반경

물푸기 소요일수를 산출하여 물푸기량을 계상한다. 우물통은 대수층 하단까지 침하시키고 필요하면 풍화대나 기반암 부위까지 내릴 수 있다. 우물통 침하가 완료되면 우물바닥은 수중 콘크리트 또는 급결액을 사용하여 바닥 콘크리트를 시공하도록 하였다.

나. 채수가능량 산정

방사상 집수정 채수가능량은 자유면대수층에 대한 Thiem의 평형공식을 적용하여 산정할 수가 있다. 즉, 수평집수관의 평균 길이를 반경으로 하는 대구경 수직 우물에 해당하는 채수량으로 추정할 수 있는데 다만 집수효율을 감안하여 안전율을 적용하고 대구경 우물의 채수량 산정공식을 다음과 같이 쓸수 있다.

$$Q = \frac{\pi K(H^2 - h^2)}{2.3 \log R/r} (1 - \alpha) \quad \text{-----(4-2)}$$

여기서 Q : 집수정 채수량

K : 대수층투수계수

H : 집수정 자연수두

h : 집수정 양수수두

R : 집수정 영향반경

r : 집수관 평균길이(집수반경)

α : 채수량 안전율

집수정 영향반경 R은 자유면지하수에서 통상 500m를 적용하고 있으며, 안전율은 조사 설계자에 따라서 0~0.5의 범위에서 적용되었다.

다. 수평찬공 설계

수평착정기를 우물통 바닥 상판에 설치하고 우물통 내부에서 360° 로 회전

하면서 방사상(radial)으로 필요한 공수를 수평찬공하는데 찬공구경이나 길이(찬공심도)는 장비에 따라 다를 수 있다. 국내에서 최초로 도입하여 이안시협 사업에 사용한 장비는 일본의 Tone사 제품으로 Top-MB 형 수평착정기인데 이 장비를 기준으로 한 수평찬공 설계요령은 다음과 같다.(이안지하댐 시험사업 준공보고서, 1984)

- 1) 수평찬공구경 : 일반적으로 $\phi 110\text{mm}$ 적용
- 2) 수평집수관자재 구경 : 일반적으로 $\phi 65\text{mm}$ 적용
- 3) 공당 산출량 : 관수로 유량공식인 Manning 공식을 적용하여 산출함. 즉,

$$q = AV, \quad V = \frac{1}{n} R^{2/3} \times I^{1/2} \quad \text{-----}(4-3)$$

여기서 A : 집수관 단면적(πr^2) V : 관내 평균유속

n : 조도계수(PVC 경우 0.013적용)

R = D/4 : 경심 (D는 관경)

I : 동수기울기 = $\frac{\text{자연수두} - \text{양수수두}}{\text{영향반경}}$ (영향반경 500m 적용)

4) 공수 산정 및 찬공길이

수평찬공의 개소수와 수평찬공 심도를 결정하기 위하여 Petrovic 경험공식을 이용하였는데 이 공식을 소개하면 다음과 같다.

Petrovic 경험공식

하천에서 어느정도 거리에 떨어져 있는 위치의 방사상집수정의 경우 집수정의 양수량을 다음 공식으로 제시하였다. 즉,

$$Q = \frac{L \cdot m \cdot K \cdot H \cdot \sqrt{A - B \times h/H - 1}}{C} \quad \text{-----}(4-4)$$

여기서

Q : 총 양수량

m : 수평 착정 공수

A, B, C : Petrovic의 상수

K : 대수층 투수계수 (m/s)

L : 수평 착정 길이

H : 갈수기 대수층 두께

h : 안정수위시 대수층 두께

이고 Petrovic의 상수는,

수평 착정 공수	A	B	C
4	4	3	5.25
8	3	2.9	7.31
12	4.068	3.068	10.00
16	3.718	2.718	11.2

로 제시하였다. 여기서 계획양수량 Q와 대수층에 관련된 K, H, h 를 대입하고 Petrovic의 상수 A · B · C 를 적용하면 미정수는 수평찬공수 m와 찬공길이 L만 남는다. 그러므로 두가지중 어느것이든 결정할 수만 있다면 나머지도 구해진다.

수평찬공수를 정하기 위하여 Manning공식을 이용한 공당채수량을 먼저 구하고 계획양수량과 비교하여 다음과 같이 필요 공수를 산정한다.

$$m = \frac{\text{물리면적} \times \text{단위용수량}}{\text{공당채수량}} \times (1 + \delta) \quad \text{-----} \quad (4-4)$$

여기서 m 는 수평찬공수이고 δ 은 현지여건에 따라 적용하는 여유율이다.

수평찬공의 길이는 앞의 공식 (4-3)을 다시 써서

$$L = \frac{Q \cdot C}{m \cdot K \cdot H \cdot \sqrt{A - B \cdot h/H - 1}} (1 + \beta) \quad \text{-----} \quad (4-5)$$

로 계산할 수 있는데 여기서 β 는 유입안전율로서 이안지구의 경우 δ 를 0.35, β 를 2.5로 적용하였다. 이안지구 이외의 다른지구 설계에서는 Petrovic 경험 공식의 복잡성과 Petrovic상수의 모호성을 극복하기 위하여 식 (4-5)와 비슷한 새로운 경험공식을 유도하여 사용하였는데 그 내용은 다음공식과 같다. 즉,

$$L = \frac{q}{\pi \cdot r \cdot n \cdot K \cdot H} (1 + \beta) \quad \text{-----}(4-6)$$

여기서 q : 공당취수량, r : 집수관 자재반경, n : 자재 개공을 이고, K , H , β 는 식 (4-5)에서와 같다.

그러나 어떤 공식을 사용하더라도 불확실한 대수층의 상태를 보완하기 위하여는 안전율을 지나치게 잡아 설계하는 경향이 생기게 마련인데, 취수가능량 산정시의 안전율 α , 찬공길이 산출시의 유입안전율 β , 찬공공수 산정시의 여유율 δ 가 서로 중복되게 계상되면 결국 전체적인 과다설계가 될 가능성이 크다고 하겠다.

한편 물막이벽 설치지구가 아닌 하천 인근에 설치하는 방사상집수정지구에서는 집수정 취수량은 하천 유로까지의 거리와 밀접한 관계가 있으므로 Milojevic 경험공식을 적용하기도 하였는데 그 내용은 다음과 같다(Milojevic : ASCE, Hyd. Div. vol. 89, No 6, 1963 참조)

$$\frac{Q}{KT(H-h)} = \left(\frac{t}{L}\right)^{0.10} \times \left(\frac{D}{L}\right)^{0.15} \times [4.13N^{0.1415} - 1.22\left(\frac{T}{L}\right)] \left(\frac{1}{\log \frac{2d}{L}}\right)^4$$

$$A = 0.914 + 0.0183 - 0.348 \left(\frac{T}{L}\right)^{2/3} \quad \text{-----}(4-7)$$

단, D : 수평집수관 관경

t : 불투수층 으로부터 수평집수관 높이
 L : 수평집수관 길이 N : 수평집수관 공수
 d : 집수정에서 하천유로까지 거리
 T : 대수층두께 K : 대수층 투수계수
 $H-h$: 집수정 수위강하량, Q : 집수정 채수량

여기서 마지막 항은 하천까지 거리에 따른 보정항으로 $d = 5L$ 일 경우 1.0 이되고, $d > 5L$ 이면 1.0보 적고, $d < 5L$ 이면 1.0보 큰 값을 갖는다. 식 (4-7) 에서 A 는 공수와 길이에 따른 값으로 0.9~1.2 범위이다.

라. 사이펀식 방사상집수정

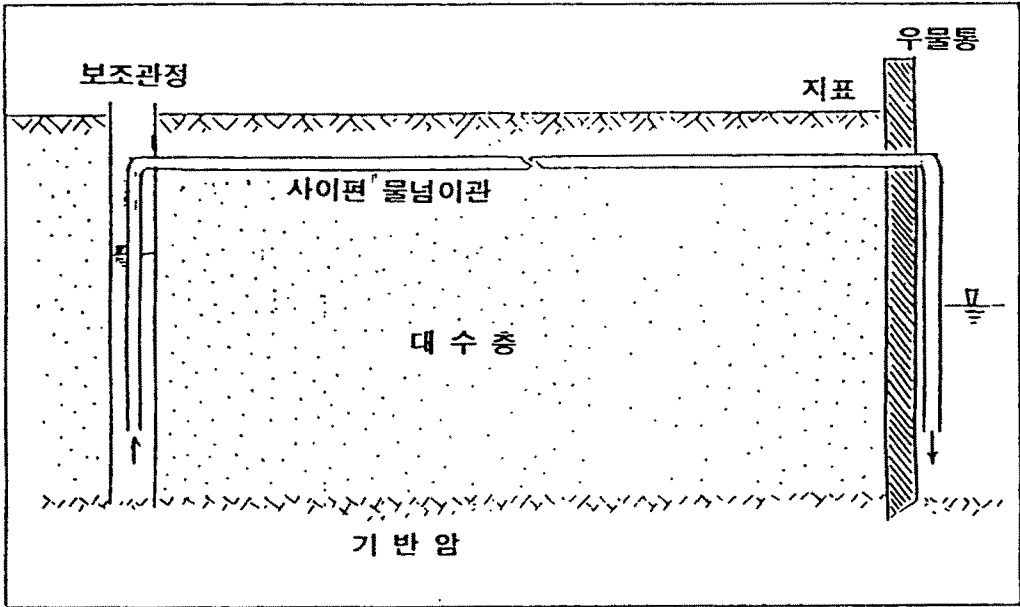
방사상집수정을 개발할 때의 문제점은 수평찬공 길이가 착정장비의 능력에 의해 제한된다는 점과 수평찬공 후 유공집수관을 박아 놓더라도 세사유입을 방지할 수 없다는것이 가장 큰 문제점으로 대두되었다. 실제로 방사상집수정 개발지구에서 이 용을 계속할 때에 세사유입에 의거 집수정 주위가 함몰된 사례가 있었으므로 이를 극복할 수 있는 새로운 공법이 연구되었는데 그것은 수평착정 대신 수직착정공에서 사이펀 (Siphon) 식으로 집수하는 공법이다.

이 공법은 농어촌진흥공사 지하수개발팀이 자체 개발한 것으로 당초에는 채수량 부족 관정의 집수량 증대방안으로 소구경의 보조관정을 주 관정 주위에 굴착하고 보조관정에서 사이펀관을 주 관정으로 연결하여 양수시험을 시행한 결과 보조관정의 지하수가 주 관정 안으로 물넘이가 이루어져 양수량 증가 효과를 얻었으므로 여러개의 집단 보조우물을 사이펀관으로 우물통에 집수하는 사이펀식 방사상집수정으로 발전시킨 것이다.(그림 4-2 참조)

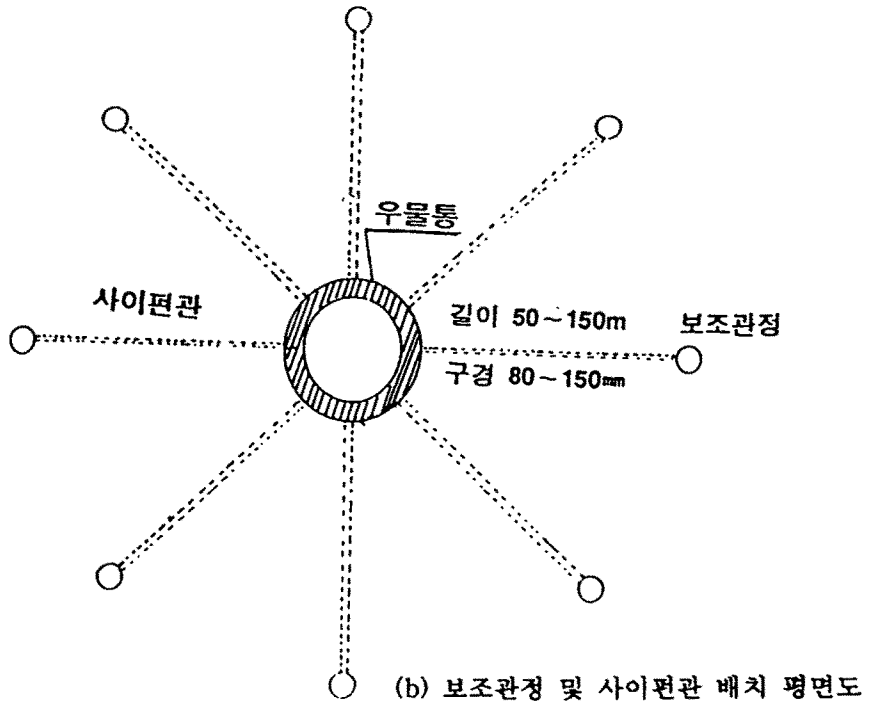
사이펀식 방사상집수정에 있어서도 집수정 채수가능량 산정은 앞 절에서의

식 (4-2)와 같이 할수 있으며 다만 집수반경을 임의로 조정하여 설계할 수 있는것이 특징이라고 할 수 있다. 수평착정식 집수정에서는 수평착정기의 작업능력에 따라 수평집수관의 길이가 결정되지만 사이편식 집수정에 있어서는 보조관정의 거리를 100m이상 확장하여도 사이편관 설치가 가능하므로 수평착정식보다 훨씬 많은 량의 지하수를 채수할 수 있었다. 또한 보조관정 우물자재 설치시 gravel packing을 충분히 하므로써 세사 유입을 방지할 수 있었다.

이 공법으로 시공한 지구의 예를 들면 경기도 평택시 신호지구, 이천군 주미지구, 안성군 고안지구와 전북 김제시 대송지구등이 있는데 사이편 집수만으로 집수정을 개발한 지구도 있고 수평착정과 사이편 보조관정개발을 병행한 지구도 있다. 사이편식 집수정은 보조관정 개발이 간단하고 사이편관 연결도 지상에서 손쉽게 시공되므로 수평착정식 방사상집수정에 비하여 공사비가 훨씬 저렴한 장점도 있었다.



(a) 사이편집수정 설치 단면도



(b) 보조관정 및 사이편관 배치 평면도

그림 4-2 사이편 집수정 모형도

제 5 장 물리탐사 자료에 의한 대수층해석 모델 개발

제 1 절 서 론

수자원의 공급원으로서 지하수의 역할이 중요해짐에 따라, 지하수의 부존 가능성이 높은 지역을 찾는 방법은 점점 더 과학적으로 개발되어 왔으며 지구물리학적 방법이 지하수조사에 중요한 역할을 해왔다. 여러 지구물리학적 방법 중에서도 전기비저항 탐사방법이 저렴한 비용으로 대수층의 존재를 규명하는 가장 유효한 방법이다. 그러나 대수층의 특성을 추정하기 위해 지표에서의 전기비저항 탐사방법이 널리 사용되고 있기는 하지만, 그 적용은 정성적인 성격이 강하고, 정량적인 적용은 아직도 많은 논의의 대상이 되고 있다(Kelly and Frohlich, 1985, Mazac *et al.*, 1985).

전기탐사의 해석결과는 보통 지구 내부를 몇개의 층으로 구분하고, 각 지층에 해당하는 비저항치를 제시하는 방식으로 표현된다. 이 해석결과가 실제 대수층의 두께와 비저항치에 일치하는가에 대한 의문이 제기되고 있다. 비저항탐사 곡선의 역산에서 가장 문제가 되는 점은 등가(equivalence)와 은폐(suppression)의 현상이다. Equivalence는 비저항이 주위 지층보다 높거나 낮은 경우 이 층의 두께와 비저항값이 별도로 결정되지 않는 현상이고 Suppression은 지층이 얇은 경우 비저항치가 주위의 지층에 비하여 현저히 높거나 낮은 경우가 아니면 이 지층이 비저항곡선에 나타나지 않는 현상이다.

Suppression 문제는 대수층의 두께가 매우 얇은 경우가 아니면 일어나지 않으므로 무시되어질 수 있고, equivalence의 문제는 D, Z 파라미터(Dar Zarrouk parameters) 개념을 도입한 메일렛(Maillet 1947)에 의해 정량적

으로 정립되었다. Equivalence는 만일 주위 지층보다 비저항이 낮은층의 경우 h/ρ 가 같거나, 주위 지층보다 비저항이 높은 경우 ρh 가 같은 여러 다른층들이 식별할 수 없을 정도로 비슷한 비저항곡선을 나타낼 수 있음을 의미한다.

따라서 대수층의 비저항치나 두께를 모르는 경우 대수층 규모의 추정에 불가피한 오차가 수반된다. 만일 지질주상도가 존재하는 경우 각 지층의 두께가 결정되므로 전탐 자료의 역산 과정에서 각 지층에 상응하는 비저항치가 비교적 정확하게 계산되며 대수층의 기하학적 규모를 명확하게 결정할 수가 있다.

이번 연구의 목적은 소유역 충적 대수층의 전기적 특성과 수리적 특성 사이의 관계를 알아보는 데 있다. 1983년 농어촌진흥공은 경기도 여주군 가남면에서 83점의 수직전기비저항탐사와 10개의 시추조사 및 22점의 양수시험을 수행하였다. 그 결과로 겉보기비저항 곡선과 대수층의 투수량계수, 10개의 시추공 근처의 지질단면도가 얻어졌으며, 이 자료들을 이용하여 대수층의 전기적, 수리적 특성 사이의 관계식을 구하였다. 해석 결과 이 지역의 대수층은 비저항이 매우 높은 기반암 위에 존재하여 전류의 대부분이 대수층에 수평방향으로 흐르는 성질이 있기 때문에 수평방향 전기전도도와 투수량계수와 관계의 관계를 먼저 구했으며, 해석에 의해서 구해진 대수층의 비저항과 두께를 이용하여 투수량계수와 비저항, 수리전도도와 비저항 사이의 관계식도 구하였다. 한편 대수층의 2가지 주요 기능이 투수성과 저류성임을 감안하여 대수층의 전기적 성질을 이용한 대수층 저류계수 산출 방안을 검토하였으나, 대수층 지층계수를 이용한 대수층의 공극률 추정은 가능하지만 대수층 구성 입자의 입도분석이 수반되어야 유효공극률을 구할 수 있으므로 이번 연구에서는 보류하였다.

한편, 대수층의 전기적, 수리적 특성 사이의 정확한 관계를 구하기 위해서는 전기탐사 자료의 정확도가 요구되는데, 그러기 위해서는 탐사를 수행할 때에 일어날 수 있는 오차들을 제거해야 한다. 오차를 제거해 전탐 자료의 신뢰도

를 높이기 위해서는, 어떤 상황에서 수직탐사 자료의 왜곡이 일어나는지, 또 그 자료들을 왜곡시키는 오차의 크기는 얼마인지 밝혀져야 하므로 이러한 것들을 알아보기 위하여 유한차분법(finite difference method: FDM)을 이용한 2차원 전기비저항 모델링을 수행하였다. 2차원 지하구조의 어느 한 지점에서 점전류를 발생시키면 그것으로 인한 지표나 지하에서의 전위분포를 구할 수 있는데(Dey and Morrison, 1979), 이 전위값들을 실제 탐사에서 얻어지는 전위값으로 가정하여 모델링을 수행하였다. 오차를 일으킬 수 있고 실제 탐사시에 벌어질 수 있는 여러 상황들을 고려하여 모델링을 하였고 각각의 경우 오차를 일으킬 것이라고 생각되는 요인들이 이상적인 경우의 겔보기비저항 곡선을 얼마나 왜곡시키는지 연구되었다.

제 2 절 이론적 배경

1. 지전기적 매개변수와 등가의 문제

전기탐사에 의한 지층별 비저항 구분은 실제 지층의 두께와 각 지층이 갖는 비저항값에 일치하지 않을 수 있는데, 예를 들면 균질 암석층에서도 지하수의 염도가 심도에 따라 변화하면 지전기적 지층은 여러 지층으로 구분될 수 있는 반면, 여러 종류의 암석층이 쌓인 지층에서도 각층의 비저항이 같으면 하나의 지전기층으로 나타나는 것이다. 이러한 문제들의 정량적인 해석을 위하여 지전기학적 매개변수(geoelectric parameters)의 개념과 등가(equivalence) 및 은폐(suppression)의 이론이 도입되었다 (Maillet, 1947; Niwas and Singhal, 1981; Kelly and Reiter, 1984; Frohlich and Kelly, 1985;

Kalinski *et al.*, 1993).

지전기 파라미터의 기본사항은 비저항 ρ_i 와 지층 두께 h_i (아래첨자 i 는 지층순서임)이며 이를 기본요소로 하는 2차적인 파라미터들은 다음과 같다.

① 수평방향 단위 전기전도도(Longitudinal unit conductance), $S_i = h_i / \rho_i$,

② 수직방향 단위 전기저항(Transverse unit resistance), $T_i = h_i \rho_i$,

③ 수평방향 비저항(Longitudinal resistivity), $\rho_L = h_i / S_i$,

④ 수직방향 비저항(Transverse resistivity), $\rho_t = T_i / h_i$,

⑤ 이방성 계수(Anisotropy coefficient) $\lambda = \sqrt{\rho_t / \rho_L}$

등방성인 지층의 경우 $\rho_t = \rho_L$ 이므로 $\lambda = 1$ 이 된다.

n 개 지층의 총 수평방향 단위 전기전도도는

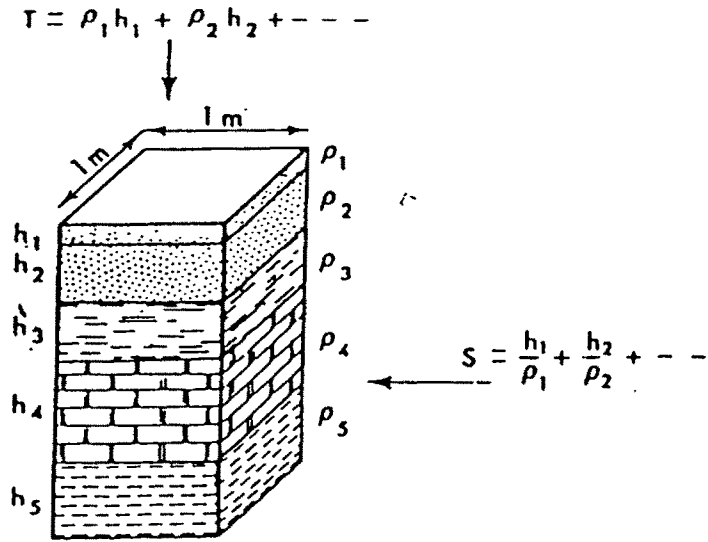
$$S = \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\rho_i} = \frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + \dots + \frac{h_n}{\rho_n} \quad \text{-----}(5-1)$$

이고 총 수직방향 단위 전기저항은

$$T = \sum_{i=1}^n h_i \rho_i = h_1 \rho_1 + h_2 \rho_2 + \dots + h_n \rho_n, \quad \text{-----}(5-2)$$

이므로 수평방향 평균 비저항과 수직방향 평균 비저항은

$$\rho_L = \frac{H}{S} = \frac{\sum_1^n h_i}{\sum_1^n \frac{h_i}{\rho_i}} ; \quad \rho_t = \frac{T}{H} = \frac{\sum_1^n h_i \rho_i}{\sum_1^n h_i} \quad \text{-----}(5-3)$$



ρ = 비저항, h = 지층두께, S = 수평방향 총 전기전도도

T = 수직방향 총 전기저항

그림 5-1 지전기적 매개변수를 설명하는 주상지층

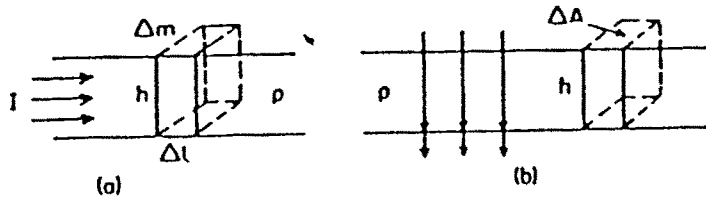


그림 5-2 등가원리의 설명도

로 주어지고 등방성 계수는

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_L}} = \frac{\sqrt{TS}}{H} \quad \text{-----(5-4)}$$

로 주어진다.

그림 5-1은 무한한 대수층 중 단위면적(1m×1m)의 주상을 보여주는데 만일 전류가 수직으로만 흐른다면 주상의 각 층들은 직렬로 연결된 저항과 같은 역할을 할 것이다. 즉,

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad \text{이므로}$$

$$R = \rho_1 \frac{h_1}{1 \times 1} + \rho_2 \frac{h_2}{1 \times 1} + \dots + \rho_n \frac{h_n}{1 \times 1} = \sum_i \rho_i h_i = r \quad \text{-----(5-5)}$$

만일 전류가 지층에 수평한 방향으로 흐른다면 주상의 각 층들은 병렬로 연결된 저항과 같은 역할을 하고 이때의 전기전도도는 다음과 같이 주어진다. 즉,

$$S = \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad \text{이므로}$$

$$S = \frac{1 \times h_1}{\rho_1 \times 1} + \frac{1 \times h_2}{\rho_2 \times 1} + \dots + \frac{1 \times h_n}{\rho_n \times 1} = \frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + \dots + \frac{h_n}{\rho_n} = \sum_i \frac{h_i}{\rho_i} \quad \text{(5-6)}$$

수직방향 단위 전기저항 T의 단위는 Ω 대신 Ω-m² 을 쓰며 수평방향 단위 전기전도도 S의 단위는 m / ohm-m = mho(siemens) 를 쓴다. 여기서 S_i = h_i / ρ_i = σ_i h_i 로 쓰면 σ_i 는 ρ_i 의 역수 즉 전기전도율(conductivity)로서 T_i = ρ_i h_i 와 유사한 형식이 되고, 이것은 또한 대수층 투수량계수 관계식 T_h = K_i b_i (K : 수리전도도, b : 대수층 두께)와 매우 비슷하므로

수평 전기전도도 또는 수직 전기저항이 대수층의 수리적 특성을 규명하는데 이
 용될 수 있음을 보여 준다. 그러나 S는 K와 ρ 가 반비례 관계에 있을 때 유용
 하고, 비례 관계에 있을 때는 T가 유용하다(Mazac and Landa, 1979). 이
 러한 특성때문에 메일렛(Maillet, 1947)은 지전기적 매개변수 중 T와 S를
 D.Z.파라미터(Dar Zarrouk paramenters)라고 명명하였다.

조사자료 해석의 실제 응용에 있어서는 전류원으로 부터의 거리, 지표면의
 비균질성, 측정 오차 등으로 비저항 분포가 분산되어 나타나나, 이를 해석하기
 위하여 포괄적인 ρ_a 곡선을 그리므로 서 불가피하게 해석상의 모호성이 수반되
 다. Equivalence에서 두가지 경우의 모델을 상정할 수 있다. 예를 들어 비저
 항이 아주 큰 지층들 사이에 비저항이 낮고 얇은 층이 끼어 있을 때 지층의 전
 류 흐름의 대부분은 이 층으로 집중되며 지층면에 평행하게 흐를것이다. 그림
 5-2.a 와 같이 단면적 $h \cdot \Delta m$ 길이 Δl 인 미소체에서 전기저항은
 $R = \rho \Delta l / (h \Delta m)$ 이고 만일 ρ 를 크게 잡더라도 동시에 h 를 같은 비율로
 크게 잡으면 R 는 변화가 없으므로 이 층에서는 전기적 등가현상이 생긴다. 반
 면 이 중간층의 비저항이 양쪽 지층의 비저항보다 훨씬 크면 전류는 이 층을
 피하려고 가장 가까운 통로를 찾아 이 층에 수직으로 통과할 것이다.(그림
 5-2.b) 이 때 미소체내의 전기저항은 $R = \rho h / \Delta A$ 가 되고 (단 ΔA 는 통과
 단면) ρh 가 일정하면 즉 ρ 가 커질 때 h 를 작게 잡으면 R 는 일정하게
 되어 전기적 등가관계가 성립된다.

만일 지층이 그 심도에 비하여 두께가 아주 얇은 경우 그 비저항이 ρ_a 곡선
 에 미치는 영향은 극히 적으므로 이 지층이 나타나지 않고 은폐(suppress)된다.

한편 h/ρ 또는 $h\rho$ 를 일정하게 두고 수직탐사 비저항곡선 형태에 큰 변동

없이 두 세가지의 지층 해석이 가능하다. 예를 들면 그림 5-3은 4층구조의 수직탐사 곡선을 보여 주는데 제 4층은 염수 침입에 의하여 낮은 비저항을 나타내는 것으로 보여진다. 염수침입선의 심도에 해당하는 제 3층 심도를 구하기 위하여 $h_3\rho_3$ 를 일정하게 두고 몇 가지의 해석 가능성을 그림에서 보여주는 데 심도의 차이가 클 때에는 기존의 지질주상 자료나 인근 지점의 탐사자료를 참고하여 판단하여야 한다.

2. 대수층의 전기적 특성과 수리적 특성의 관계

아-치(Archie, 1942)는 지층계수(地層係數, formation factor, F)라는 개념을 도입하였다. ρ 를 공극수(pore water)에 의해 포화(saturation)된 지층의 비저항이라 하고 ρ_w 를 공극수의 비저항이라고 하면 지층계수는 다음과 같이 주어진다.

$$F = \rho / \rho_w \text{ -----(5-7)}$$

아-치(Archie)에 의하면 F 는 공극률(porosity, n)과도 다음과 같이 연관되어 질 수 있다.

$$F = a \cdot n^{-m} \text{ -----(5-8)}$$

여기서 a 와 m 은 암석의 형태에 의해 결정되는 경험적인 상수들이다. 예를 들면 담수에 의해 포화된 고화되지 않은 모래층에서 a 와 m 의 값은 각각 1.0과 1.3로 보고되었다(Frohlich, 1974). 고결 인자(cementation factors)인 m 는 보통 1 ~ 2의 범위인데 아-치(Archie, 1942)는 고결작용을 받은 사암이나 석회암에서 $m=2$ 를 적용하여 $F = 1 / n^2$ 를 제시하였다. 그러므로 식 (5-7)과 (5-8)에서 대수층의 비저항과 지하수의 비저항을 알고 암석의 종류에

의한 상수 a , m 의 값을 정하여 주면 대수층의 공극율을 추정할 수가 있다. 즉 충적층의 대수층에서 $a=1.0$, $m=1.3$ 을 적용하면 공극율 n 은

$$n = (\rho_w / \rho)^{1.3} \text{-----}(5-9)$$

로 계산할 수 있다. 대수층의 공극율은 대수층의 저류능을 나타내며 자유면 지하수에서의 지하수 포장능력은 비산출율(specific yield) 즉 유효공극율(effective porosity)로 계산된다. 유효공극율은 대수층의 구성 입자의 크기에 관계되는데 데이비스(Davis and DeWiest, 1966)등은 그림 5-4와 같이 대수층의 입도별 공극율과 비산출율의 관계를 제시하였다. 그러므로 대수층의 비저항치와 입도분석치를 알면 대수층의 저류능력을 평가할 수 있다.

한편 다공질 매체내에서의 수리전도도(hydraulic conductivity)는 유체의 특성인 점성도(μ)와 비중(γ) 및 매질의 특성이 수리전도도를 특징짓는데 큰 영향을 미친다. 허버트(Hubbert, 1940)에 의하면 k 를 투수도(permeability)라고 할 때 수리전도도는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$K = k \cdot \gamma / \mu \text{-----}(5-10)$$

아치(Archie, 1950)는 고화되지 않은 퇴적물과 고화된 퇴적물을 가자고 투수 와 공극률을 측정한 결과 다음과 같은 관계식을 밝혀내었다.

$$k = a_1 \cdot n^{b_1} \text{-----}(5-11)$$

여기서 a_1 , b_1 은 물질에 관련된 상수이다. 식 (5-7)과 (5-10)을 정리하면

$$K = a_2 \cdot n^{b_2} \text{-----}(5-12)$$

이 얻어진다. 여기서 a_2 , b_2 는 물질에 관련된 상수이다. 식 (5-9)와 (5-12)를 정리하면

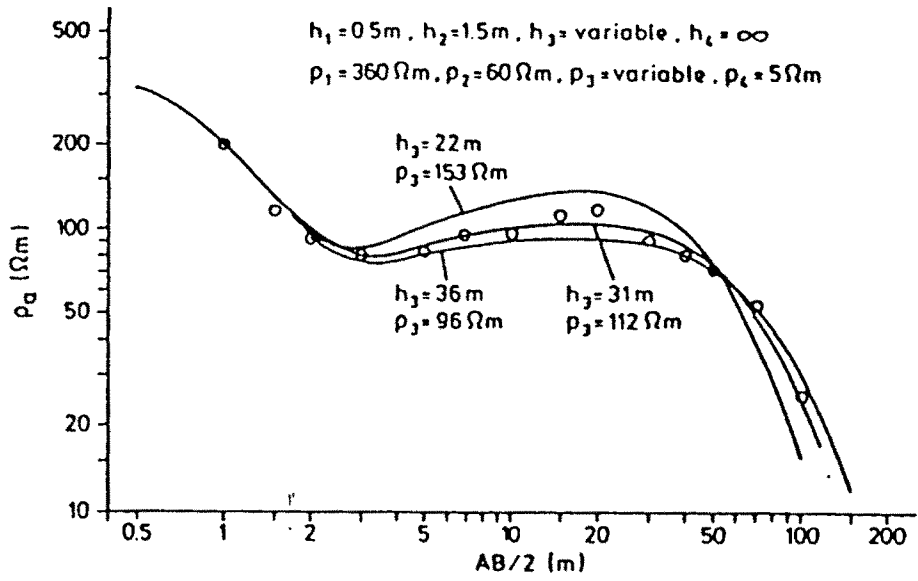
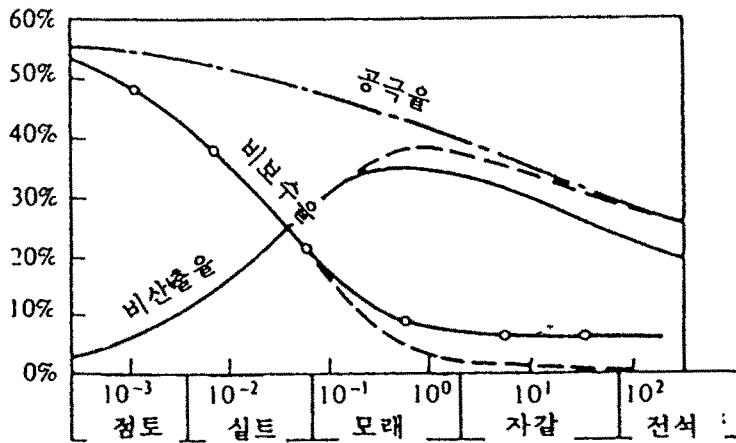


그림 5-3 등가문제의 예시도



평균 입경 (mm)

양호한 분급상태 ———

보통 분급상태 - - - - -

그림 5-4 대수층 구성입도별 비산출율

$$K = a_3 \cdot F^{b_3} \text{ -----(5-13)}$$

이 되고 공극수(pore water)의 비저항 ρ_w 를 상수라고 가정할 수 있으므로 (Heigold, 1979)

$$K = a_4 \cdot \rho^{b_4} \text{ -----(5-14)}$$

이 된다. 여기서 a_3, b_3, a_4, b_4 는 물질에 관련된 상수이다(Kelly, 1977; Mazac, 1985).

식 (5-14)는 수리전도도와 전기비저항 사이의 관계를 설명하고 있다. 식 (5-14)의 양변에 층의 두께 h 를 곱하여 정리하면

$$T_h = a_5 \cdot \rho^{b_5} \text{ -----(5-15)}$$

이 되고, T_h 는 투수량계수(transmissivity), a_5, b_5 는 물질에 관련된 상수이다. 투수량계수와 전기비저항사이의 관계가 식(5-15)에 의해 확립되었다. 그러나 식(5-14)의 b_4 가 음수라면 즉, 수리전도도와 비저항이 서로 반비례한다면 식(5-14)의 양변에 h 를 곱하여 정리한 결과는

$$T_h = a_6 \cdot S^{b_6} \text{ -----(5-16)}$$

이 된다. 식(5-16)에 의해 투수량계수와 전기전도도(longitudinal unit conductance)의 관계가 확립되었으며 S 가 투수량계수와 관련을 갖기 위한 조건은 비저항과 수리전도도가 서로 반비례하는 관계를 가져야하는 것임을 알 수 있다.

3. 유한차분법을 이용한 전기비저항 모델링

2차원 지하구조를 여러 개의 격자로 쪼개어 한 격자점에서 점전류를 발생시

켰을 때 유한차분법을 이용하여 지표나 지하, 어느 곳의 격자점에서나 전위값이 얻어질 수 있으며(Dey and Morrison, 1979) 이 전위값들이 얻어지는 대략적인 흐름은 다음과 같다.

1) 연속방정식은 J 를 전류밀도(current density), ρ 를 전하밀도(charge density)라고

하면 다음과 같이 주어진다.

$$\nabla \cdot \vec{J} = \frac{\partial \rho}{\partial t} \delta(x-x_s)\delta(y-y_s)\delta(z-z_s) \quad \text{-----(5-17)}$$

위의 식을 2차원의 경우에 맞게 단순화시켜 정리하면

$$-\nabla \cdot [\sigma(x, z) \nabla \phi(x, y, z)] = \frac{\partial \rho}{\partial t} \delta(x-x_s)\delta(y-y_s)\delta(z-z_s) \quad \text{(5-18)}$$

이 된다.

여기서 σ 는 전기전도도(conductivity)이며 ϕ 는 전위(potential)이다.

2) 수정된 연속방정식에 주향방향(비저항의 변화가 없는 방향)에 대하여 (x, y, z) 영역에서 (x, K_y, z) 영역으로 Fourier transform을 실시하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} -\nabla \cdot [\sigma(x, z) \nabla \Phi(x, K_y, z)] + K_y^2 \sigma(x, z) \Phi(x, K_y, z) \\ = \frac{I}{2\Delta A} \delta(x-x_s)\delta(z-z_s) \quad \text{-----(5-19)} \end{aligned}$$

여기서 Φ 은 transform된 전위값이며, I 는 전류의 크기, ΔA 는 (x_s, y_s) 주위에 존재하는 4개 격자의 면적을 각각 합한 값의 1/4되는 표현적인 면적(representative area)이다.

3) 위의 2)에서 얻어진 식에 다음과 같은 경계조건을 적용한다.

① ϕ 는 서로 다른 격자들의 경계면에서 연속이다.

② 전류밀도의 수직성분은 서로 다른 격자의 경계면에서 연속이다.

위의 경계조건은 모든 격자점들에서 성립하는 식이지만 2차원 반무한공간을 구현하려면 왼쪽 끝 부분과, 오른쪽 끝 부분, 그리고 밑쪽의 끝 부분의 격자들을 무한히 떨어진 곳으로 생각해야 하므로 이들의 주위에는 한 방향, 또는 두 방향으로 다른 격자가 존재하지 않게 된다. 따라서 이들에 대한 경계조건은 약간 수정되어야 한다. 즉, η 의 방향을 격자면에 수직한 바깥쪽 방향, r 을 전류원까지의 거리, θ 를 전류원에서 격자점까지의 선분과 η 가 이루는 각이라 하면 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \phi(x, K_y, z)}{\partial \eta} + \frac{K_y K_1(K_y \cdot r)}{K_0(K_y \cdot r)} \cos \theta = 0 \quad \text{-----}(5-20)$$

여기서 K_0 와 K_1 은 각각 변형된 0차 Bessel 함수(modified Bessel function of order zero), 1차 Bessel 함수(modified Bessel function of order one)이다. 이들 경계조건을 이용하여 점과 면적에 의한 구역화(discretization by point and area)에 의해 모든 격자점에서의 유한차분방정식이 얻어진다. 이러한 방정식을 통해 격자점 (i, j) 에서의 transform된 전위값 ϕ 는 그 주위의 격자점 $(i-1, j)$, $(i+1, j)$, $(i, j-1)$, 그리고 $(i, j+1)$ 에서의 전위값에 의해서만 결정되게 된다는 것을 알 수 있으며 이러한 유한차분방정식은 행렬의 표현을 빌어 다음과 같이 간단하게 표현될 수 있다. 즉,

$$C\phi = S \quad \text{-----}(5-21)$$

여기서 C 는 capacitance 행렬이고 S 는 전류원의 위치에 관련된 행렬이다.

본 연구에서는, capacitance 행렬 C 를 대칭(symmetric)인 행렬로 만들어 주어 계산 시간을 단축시켜주는 면적에 의한 구역화 방법을 이용하였다.

4) 위에서 주어진 연립방정식을 풀어 \emptyset 행렬을 구한다. 그리하면 모든 격자 점의 Fourier transform된 영역에서의 전위값이 얻어진다.

5) Fourier transform된 영역에서의 전위값을 실제 공간으로 역 Fourier transform한다.

제 3 절 수직 전기탐사 자료의 해석

1. 수직탐사 해석 전산 프로그램

비저항 수직탐사 자료의 해석은 보통 양대수지에 전극간격과 겹보기 비저항치를 작도하여 표준곡선법(master curve matching)과 보조곡선법(auxilliary point method)에 의하여 수직 1차원적인 지층 해석을 시행한다. 본 연구에서는 이러한 작도법 대신 전산 프로그램에 의하여 수직 비저항탐사 자료를 해석하는 방법을 이용하였다.

1차원 층상구조를 해석하기 위한 전산 방법은 크게 전진방법(forward method)과 역산방법(inversion method)으로 나눌 수 있다. 전진방법은 해석자가 직접 모델을 만들어 그 모델에 의한 겹보기 비저항값을 관측된 겹보기 비저항값과 비교하면서 그들 사이의 오차가 미리 정해놓은 기준 안에 들어올 때까지 모델을 계속 수정하며 해석하는 방법이다. 전진방법은 모델수정에 거의 모든 시간이 소요되므로 이번 연구에서는 대화식 해석방법을 이용하였다. 대화식 해석방법이란 그림 화면(graphic interface)을 이용하여 컴퓨터와 대

화하듯이 모델을 결정할 수 있기 때문에 시간을 절약할 수 있는 장점을 가진 전진계산방법의 일종이다. 역산방법은 자동화된 알고리즘에 따라 관측값과 모델에 의해 계산된 값의 오차를 최소화시키는 모델을 찾아가는 방법이다 (Pelton *et al.*, 1978; Zohdy, 1989). Zohdy의 역산방법은 초기값 (initial guess)을 필요로 하지 않고, 수직탐사에 의해 얻어진 결보기비저항 곡선 만으로 부터 그 곡선을 야기하는 지하구조를 찾아내는 방법이다. 자동화된 알고리즘에 의해 계산이 수행되는 역산방법은 전진방법보다 해석시간이 덜 걸린다는 장점이 있으나 역산방법은 단순히 수학적으로 오차가 가장 작은 모델을 만들어 내기 때문에, 불필요한 작은 잡음에 의해서도 실제와 다른 모델을 만들 수 있으며 지질학적으로 타당성이 없는 모델을 만들 가능성도 존재한다.

이에 반해 전진방법은 해석자가 일일이 모델을 결정해야 하므로 시간이 많이 걸린다는 단점이 있으나 시추공 등의 지질 자료를 해석 시에 고려할 수 있어 좀 더 지질학적으로 타당성이 있는 모델을 만들 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 대화식해석 프로그램인 ESII (Electrical Sounding Interactive Interpretation)를 사용하였는데 이것은 SE(hv)로 명명되었던 슈럼버저 수직탐사 대화식 해석 프로그램을 서울대학교 지구물리 연구실에서 보완시킨 Upgrade Version 이다(Kim and Lee, 1993). ESII는 dipole-dipole 배열, pole-pole 배열, 슈럼버저(Schlumbweger)배열, 웨너(Wenner)배열 등의 전위전극과 전류전극이 탐사중심에 대해 대칭이거나 비대칭인 모든 수직전기탐사 배열법에 의해 관측된 자료의 해석에 사용될 수 있다.

해석자가 컴퓨터 모니터 앞에서 마우스로 간편하게 지하모델을 설정하여 주변 주어진 모델에 의해 이론값이 계산되며 이 이론값과 관측된 값을 비교하면서 해석을 수행하게 된다. ESII는 coprocessor를 장착한 386기종 이상의 컴퓨터에서 효율적으로 사용될 수 있다. ESII가 실행되기 위해서는 여러가지 내

장화일이 필요한데 이러한 내장화일과 ESII.FOR, ESII.EXE 등을 힌 디렉토리로 하여야 한다. ESII 프로그램에 대한 자료 입력, 실행 및 출력 방법 등이 보고서 후미 부록에 수록 하였다.

본 연구에서는 Zohdy(1989)의 방법을 이용하여 역산해석도 수행하였다. 전진방법과 역산방법을 모두 사용하여 수직탐사 자료를 해석하였으나 역산방법(Zohdy의 방법)을 이용하여 해석한 결과보다는 전진방법(대화식해석방법)을 이용하여 해석된 결과가 지질학적으로 더 타당하다는 결론을 얻었다.

2. 가남지구 수직 전기탐사 자료해석

농업진흥공사에서 1983년 경기도 여주군 가남면에서 수리지질도를 작성하는 목적으로 83점의 전기탐사를 실시하였다. 그림 5-5에 탐사위치가 표현되어 있다. 이지역의 지질개요는 시대미상의 편암(schist)과 대상흑운모편마암(banded biotite gneiss)등의 변성암류를 전체적으로 관입한 중생대 쥬라기의 흑운모화강암(biotite granite)과 한강변에 부정합으로 존재하는 제 4기의 충적층이 본 지역의 대부분을 차지한다. 신해리 부근에는 섬장암질화강암(syenitic granite)이 분포하고 있으나 매우 작은 규모를 이루고 있다.

저반의 형태로 이 지역에 존재하는 흑운모화강암은 불규칙한 방향성을 보이는 규장암(felsite)과 거정질화강암(pegmatic vein)이 맥상으로 관입되어 있으며, 심하게 풍화를 받아 신선한 노두는 거의 보이지 않는 것으로 미루어 풍화에 대한 저항도가 약한 암질로 사료된다. 또한, 이 지역의 충적층은 대부분 유수의 영향으로 인하여 범람지를 이루거나 하천의 주변에 퇴적되어 넓게 분포하고 있으며, 양화천 주변에 분포하는 것은 다른 지역보다 분급과 원마도가 양호한 편이다. 모래, 실트, 점토, 각력, 역 등이 층상구조를 이루며 충적층을 구성하고 있다.

흑운모화강암은 조립질로서 낮은 지형을 보여주며, 한강변에 존재하는 층적층은 평탄한 편이다. 즉, 이 지역의 지형은 흑운모화강암이 구릉지를 이루며, 층적층은 평탄부를 이루고 있는 비교적 단순한 형태이다.

83점의 탐사는 16개의 측선을 따라 웨너(Wenner)배열법의 수직탐사로 이루어졌고, 일반적으로 a 로 표시되는 전극 사이 간격의 최대값은 약 40 m이다. 수직탐사를 직접 실행하지 않고 기존의 탐사자료에 의한 겘보기비저항 곡선으로부터 자료를 얻어야 하기 때문에 정량적인 해석을 위하여 겘보기비저항 곡선을 수치화(digitizing)해서 각 깊이(a)에 따른 겘보기비저항 값을 얻어내었다.

서로 다른 비저항과 두께를 갖는 지하의 모델에 의해서도 지표에서 관측되는 겘보기비저항값은 거의 같을 수 있으므로 지하의 구조를 수직탐사 자료만을 이용하여 유일하게 결정하는 것은 매우 어려운 일이다. 그러나 만약 층들의 비저항이나 두께, 둘 중의 하나라도 알 수 있다면 해석의 신뢰도를 높일 수 있을 것이다. 이런 취지에서 10개의 시추공의 자료가 이용되었다. 그러나 시추공의 위치가 전탐측점과 일치하지 않기 때문에 10개의 시추공에서 얻어진 각 층의 두께를 2차원 내삽을 수행하여 전탐측점에서의 층의 두께를 추정하였다. Kitanidis(1989)에 소개된 바와 같이 먼저 두께 자료들의 semivariogram을 구한 후에 그것을 이용하여 2차원 내삽이 이루어졌다. 추정된 층의 두께를 고려하면서 대화식 해석방법을 이용하여 수직탐사 자료를 정확히 해석하고자 하였다.

16개의 측선을 따라 수직탐사가 이루어졌기 때문에 같은 측선에 위치한 자료들을 모아 가상 2차원 비저항구조 단면도를 작성할 수 있었다(그림 5-6, 그림 5-7, 그림 5-8, 그림 5-9). 이 가상단면도는 두 측점에서 같은 층으로 표현된 부분이라 하더라도 비저항은 차이를 가질 수도 있고 지질단면과도 꼭 일치하지는 않으나 각 측점에서 층들의 두께의 수평적인 변화를 한 눈에 볼 수 있다.

가상단면도에서 구분된 층은 각 층들의 비저항값과 두께, 지하수의 수위를

고려할 때 제 1층은 표토, 제 2층은 충적층, 제 3층은 풍화대, 그리고 제 4층은 기반암이라고 할 수 있으며 제 2층이 대수층으로 생각된다. 각 층의 비저항은 지하로 내려갈 수록 점차 증가하는 양상을 보여주고 있으며 표 5-1에 각 층의 평균비저항과 평균 두께가 나타나 있다.

표 5-1. 가남지역 수직탐사 자료 해석 결과의 평균.

	평균 비저항(ohm-m)	평균 두께(m)
제 1층	144.8	1.8
제 2층	187.0	3.8
제 3층	505.7	10.0
제 4층	1654.8	∞

제 2층의 비저항이 제 3층의 비저항보다 낮은 값을 갖는 것은 이 지역에 넓게 존재하는 점토질사층 등 점토류에 의한 것으로 추정된다. 점토는 1~100 ohm-m의 비저항을 갖는다(Telford *et al.*, 1990). 여기서 제 2층으로 표시된 충적층은 지질단면도에 의하면 실제로는 몇 개의 층으로 구성되어 있다. 해석 결과에 나온 제 2층은 이 여러 층들의 전기비저항과 두께를 대표하는 한 층으로 표현된 것이다. 이것은 수직전기탐사에 의해서 비저항 차이가 매우 크지 않는 한, 얇은 층은 발견될 수 없다는 은폐(suppression)의 문제와도 일맥상통한다. 대수층이 여러 층으로 이루어 졌을 때 이 것을 한 층으로 가정하여 해석하는 방법이 타당성이 있다는 것도 알려져 있으며(Kosinski and Kelly, 1981). 또 이번 연구의 관심의 대상은 대수층의 평균 비저항과 평균 투수량계수의 관계이기 때문에 제 2층에 존재하는 여러 층을 1개의 층으로 통합하여 해석하였다.

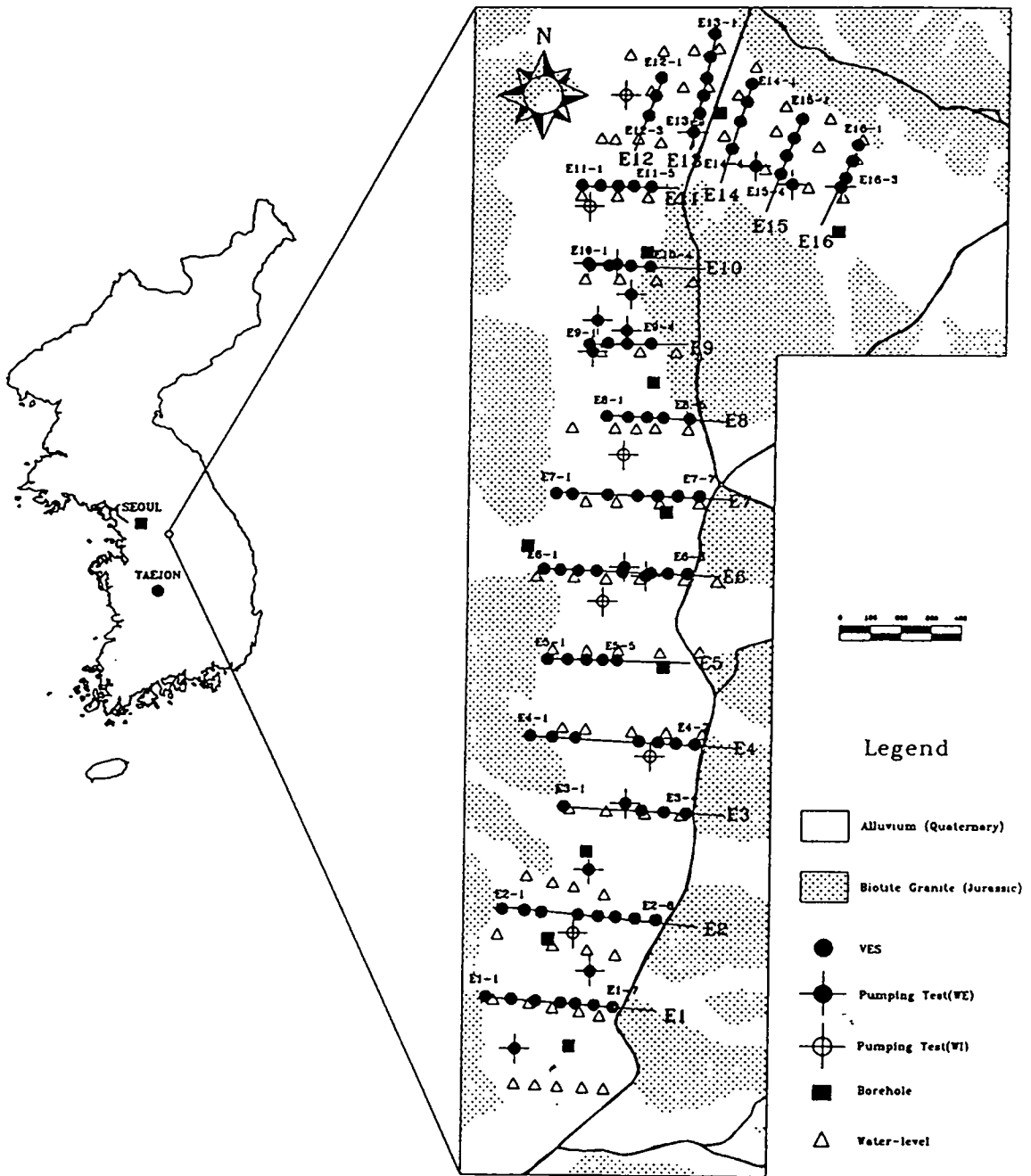


그림 5-5 가남지역의 지질도 및 탐사위치도

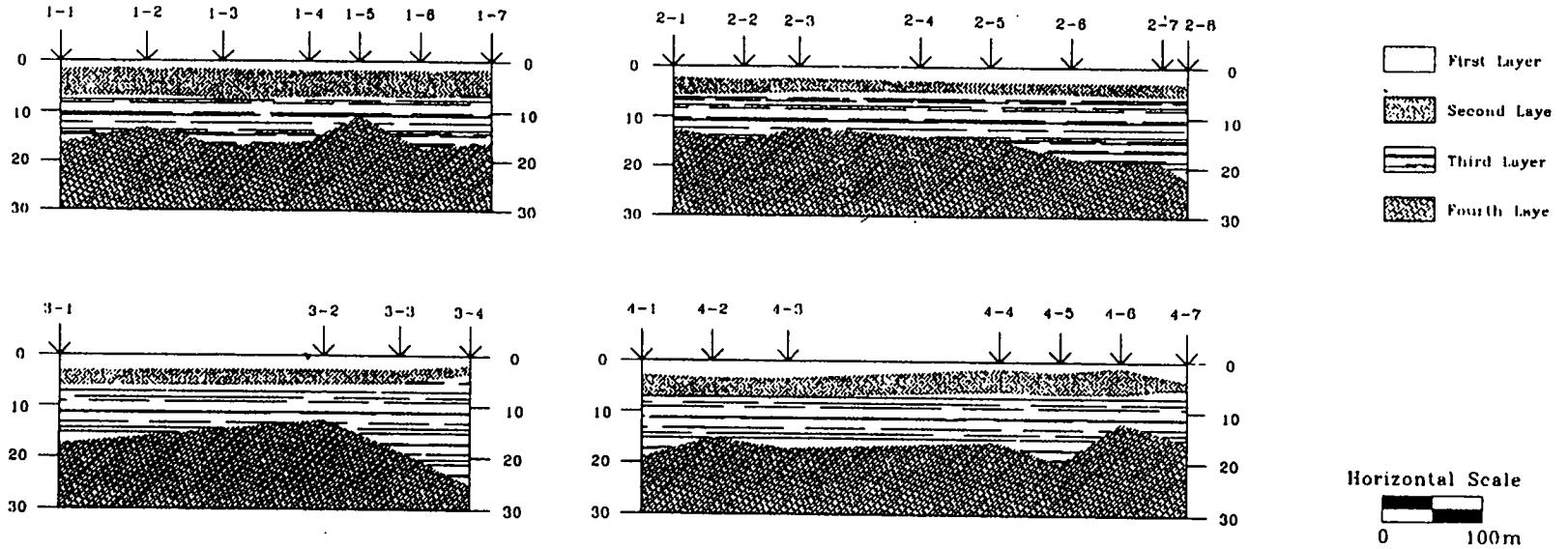


그림 5-6 축선 1, 2, 3, 4의 2차원 비저항 가상 단면도

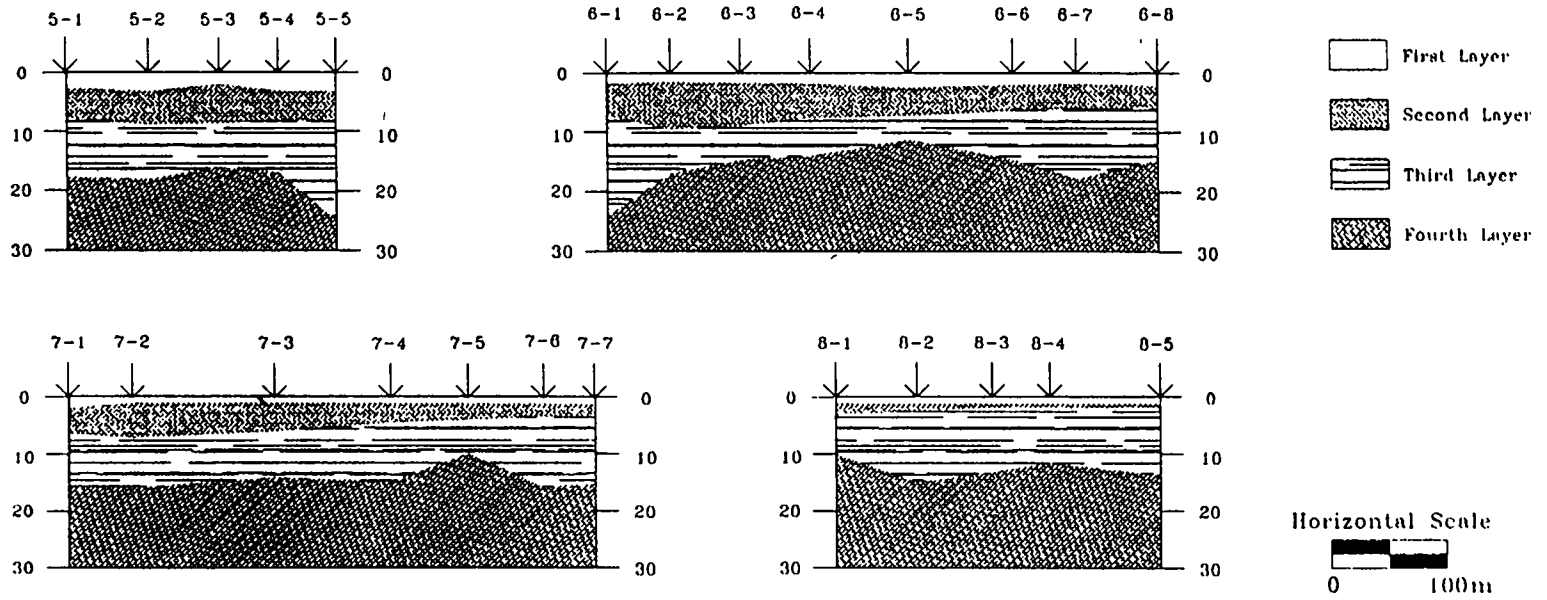


그림 5-7 축선 5, 6, 7, 8의 2차원 비저항 가상 단면도

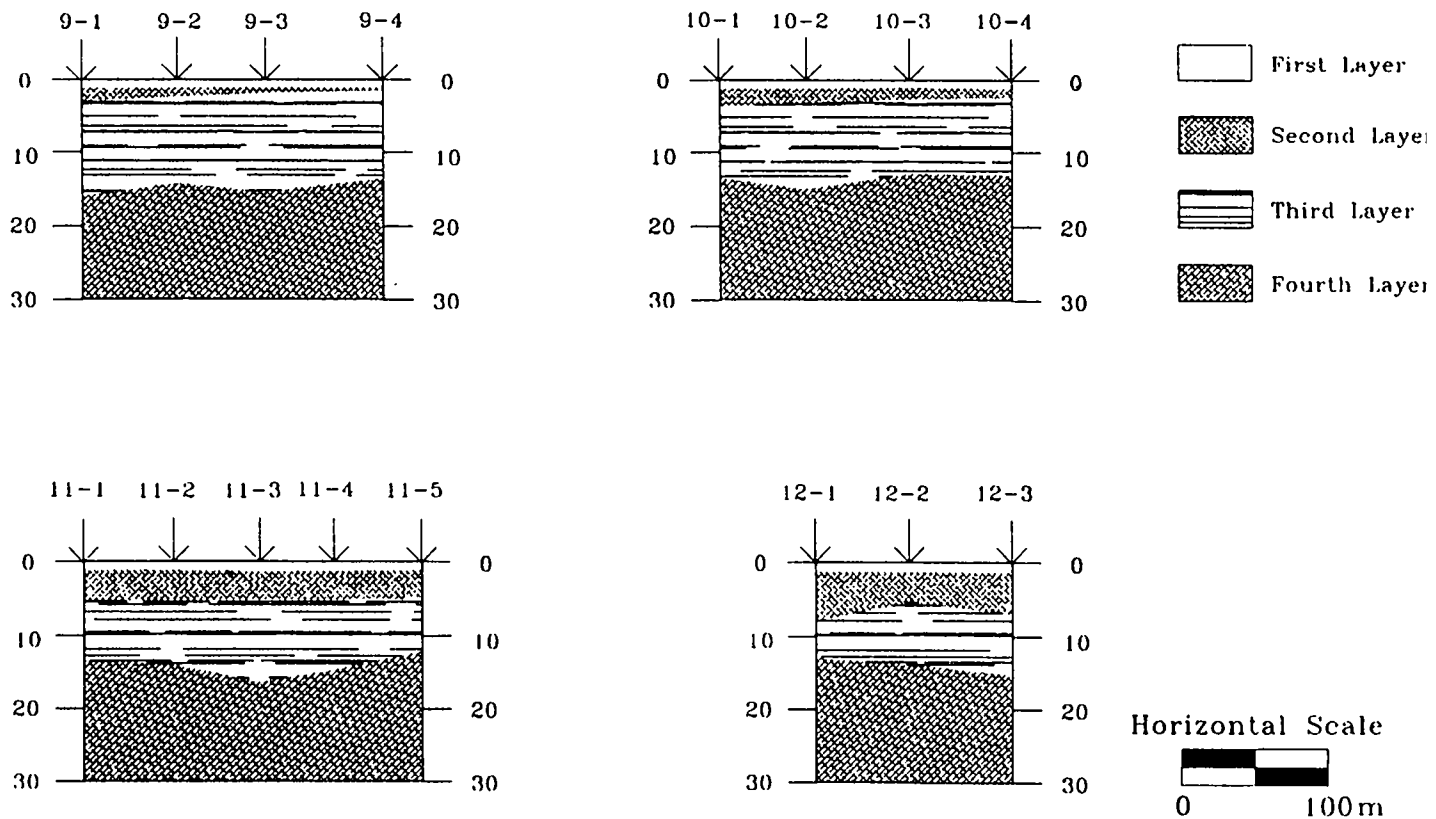


그림 5-8 축선 9, 10, 11, 12의 2차원 비저항 가상 단면도

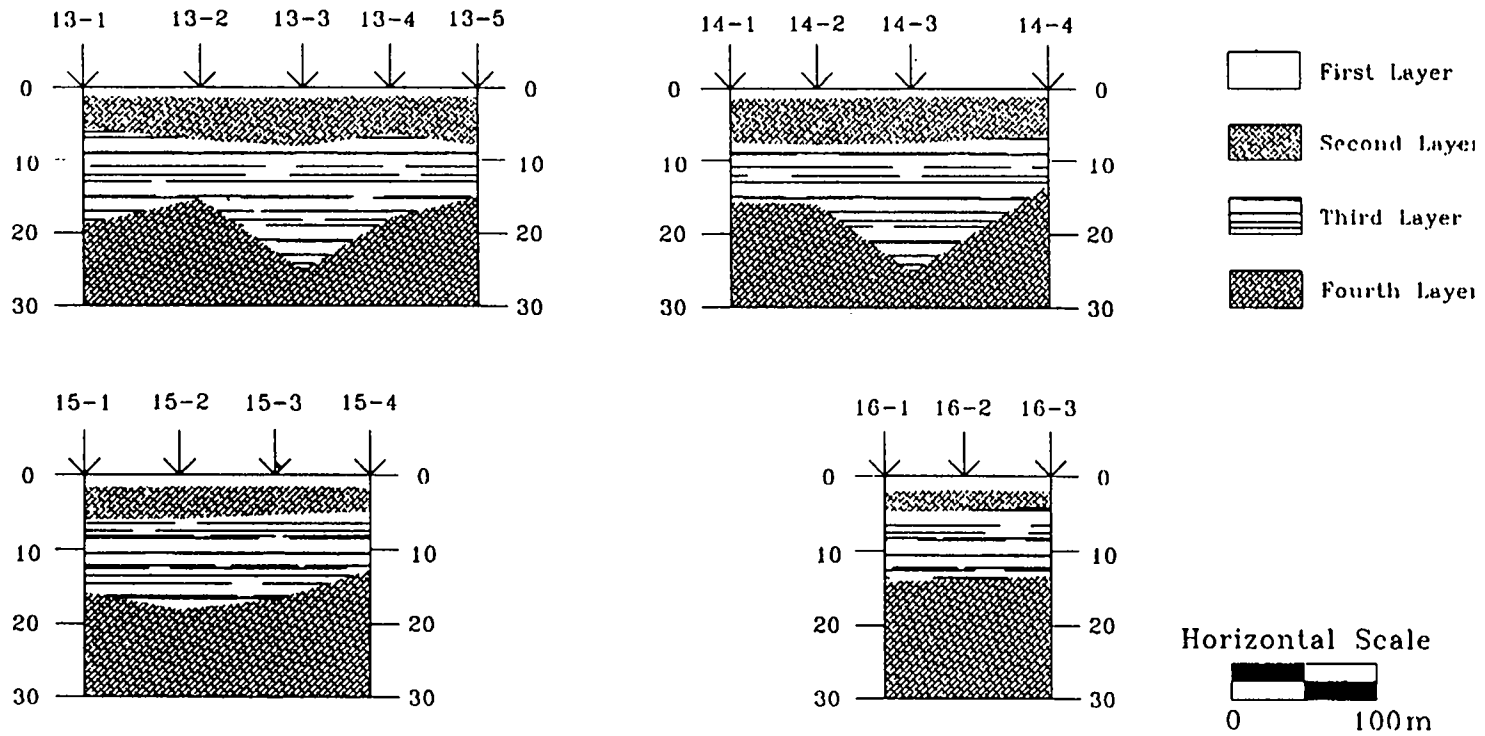


그림 5-9 축선 13, 14, 15, 16의 2차원 비저항 가상 단면도

제 4 절 가남지구 대수층의 전기적 특성과 수리적 특성 사이의 관계

시추공의 자료를 이용한 정밀한 해석을 시도하여 각 측점에서 각 층들의 비저항과 두께를 구하였지만, 앞에서도 언급되었듯이 수직탐사 자료의 해석을 통해 각 층의 비저항과 두께를 정확하고 유일하게 알아 낼 수는 없기 때문에 D.Z. 파라미터가 이용된다. 예를 들어 3층의 지하구조를 가진 경우 H-type ($\rho_1 \rho_2 \rho_3$)의 지층에서는 2층에 흐르는 전류가 주로 지층에 평행한 방향으로 흐르기 때문에 수평방향 콘덕탄스(longitudinal unit conductance, S)가, K-type($\rho_1 \rho_2 \rho_3$)의 지층에서는 2층에 흐르는 전류가 주로 지층에 수직인 방향으로 흐르기 때문에 수직방향 전기저항(transverse unit resistance, T)이 겉보기비저항 곡선의 모양을 결정하는 중요한 물리량이 된다. 여기서 ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 는 각각 1층, 2층, 그리고 3층의 비저항을 의미한다. 그림5-10에 이것이 잘 표현되어 있다. 그림5-10의 (1)은 H-type의 경우이고 (2)는 K-type의 경우이다. (1)의 5층의 경우 비저항이 각각 100, 50, 200 ohm-m의 층들의 두께는 모두 10 m이며, 이들은 최상부의 층과 최하부의 층보다 비저항이 매우 낮기 때문에 S 가 겉보기비저항 곡선을 결정하는 중요한 역할을 한다. 이들 세 층의 S 를 합한 값과, 30 m의 두께를 갖고 85.7 ohm-m인 층의 S 는 동일하게 되는데 이런 두 곳에서의 슈림버저 겉보기비저항 곡선이 거의 차이가 없음을 보여주고 있다. (2)의 경우에는 (1)과 반대로 5층 구조일 때 비저항이 각각 5000, 4000, 3000 ohm-m인 층들의 두께는 모두 10 m이며, 이들은 주위의 층보다 비저항이 매우 높기 때문에, 이런 상황에서는 T 가 겉보기비저항 곡선을 결정하는 중요한 역할을 한다. 이들 세 층의 T 를 합한 값과, 두께가 30 m이고 비저항이 4000 ohm-m를 갖는 층의 T 가 같아지는데 이 두 경우의

슈림버저 겔보기비저항 곡선도 거의 차이가 없음을 보여주고 있다.

그러므로 T 는 대수층이 기반암의 바로 위에 존재할 때보다는 낮은 투수도 (permeability)를 갖는 비저항이 낮은 물질(예를 들면 점토류) 위에 존재할 때 효과적으로 이용될 수 있고, S 는 대수층이 고비저항을 갖는 두 층 사이에 존재할 때 효과적으로 이용될 수 있다(Kelly and Frohlich, 1985). 가남 지역의 대수층은 비저항이 높은 기반암 위에 존재하는 것으로 밝혀졌으므로 이 지역에서는 T 보다 S 가 겔보기비저항 곡선의 모양을 결정하는 중요한 물리량이 된다. 그러므로 먼저 S 와 투수량계수와와의 관계를 구하였다. 투수량계수의 측점과 전탐측점이 다르기 때문에 투수량계수의 semivariogram을 구한 후 2차원 내삽을 실시하여 전탐측점에서의 값을 구하였다. 식 (5-9), (5-10), 그리고 (5-11)의 양변에 대수(logarithm)를 취하면 일차함수의 모양이 되어 계산상 편리하게 취급될 수 있으므로 각 자료의 대수(logarithm)값에 최소자승역산방법(Lines and Treitel, 1984)을 적용하여 이후의 관계식을 구하였다.

먼저 투수량계수 T_h 와 S 사이에는 다음과 같이 비례하는 관계가 있음이 밝혀졌다.

$$\log T_h(m^2/day) = 0.08168 \cdot \log S(\text{siemens}) + 2.90331$$

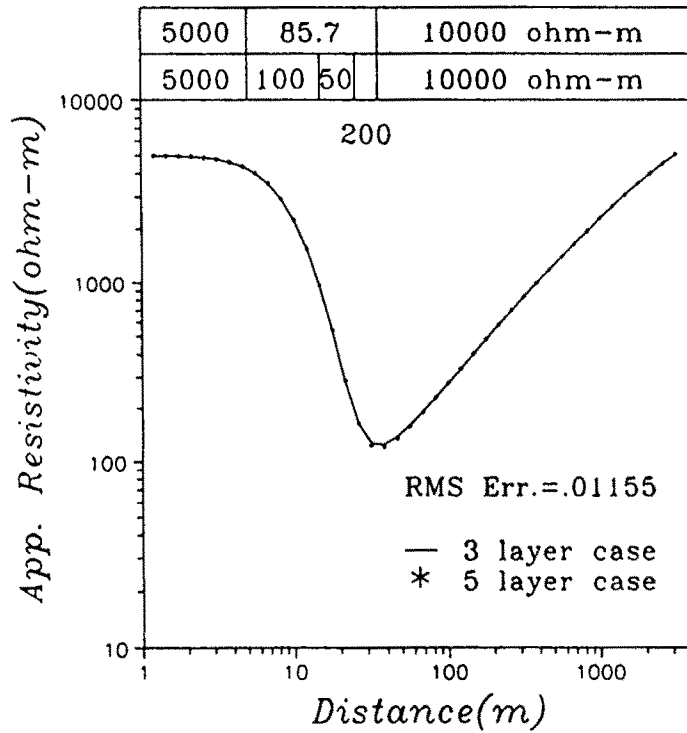
그리고 전탐 자료의 해석에 의해 얻어진 제 2층의 비저항과 두께를 이용하여 다른 물리량들 사이의 관계도 구하였다. 투수량계수와 비저항 사이의 관계식을 구하였는데 다음과 같다.

$$\log T_h(m^2/day) = -0.09390 \cdot \log \rho(\text{ohm-m}) + 3.0151$$

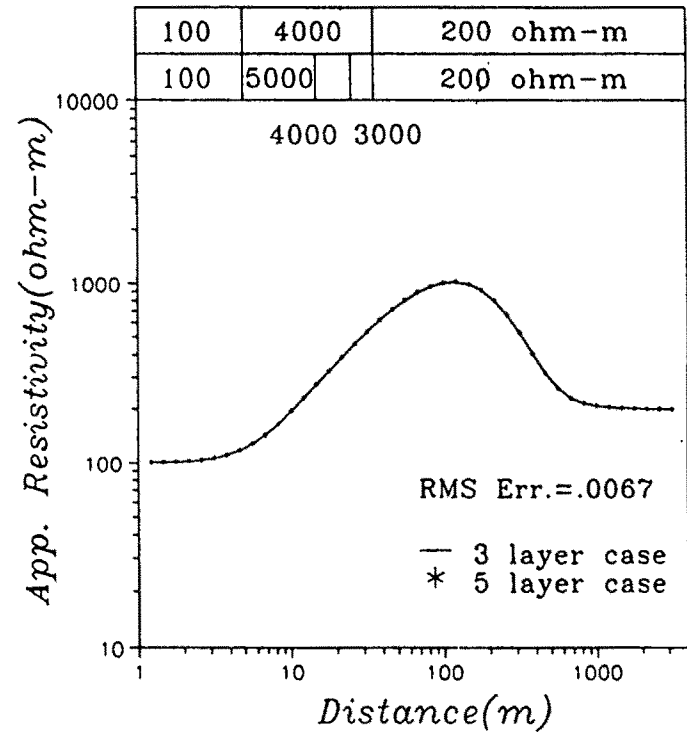
투수량계수와 비저항 사이에는 반비례하는 관계가 얻어졌다. 마지막으로 수리전도도와 비저항 사이의 관계식을 구하였다. 양수시험의 자료에 수리전도도

$$10/100+10/50+10/200 \approx 30/85.7$$

$$(5000+4000+3000) \times 10 = 4000 \times 30$$

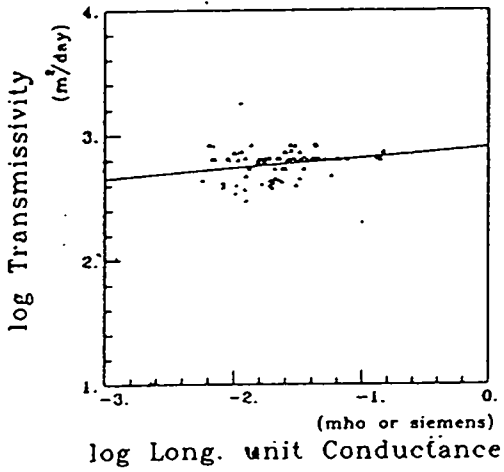


(1)

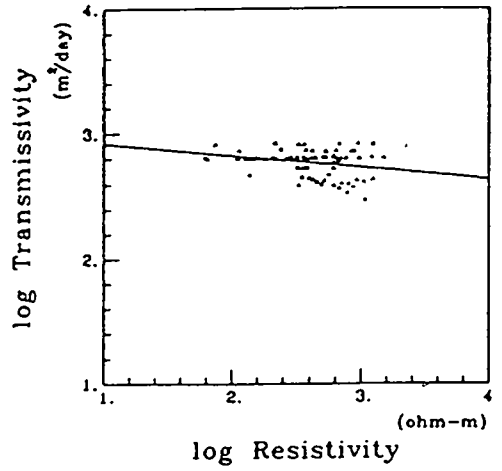


(2)

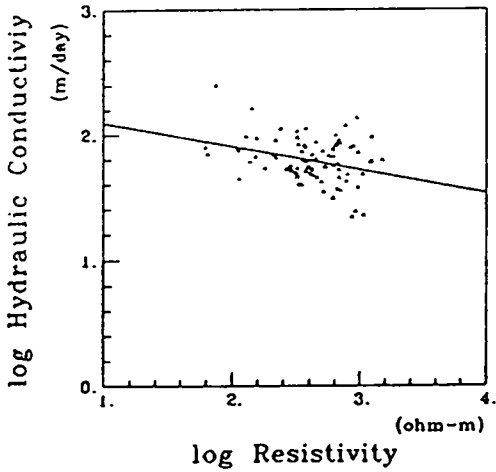
그림5-10 Longitudinal unit conductance와 Transverse unit resistance가
수직탐사자료에 미치는 영향
(1) H-type (2) K-type



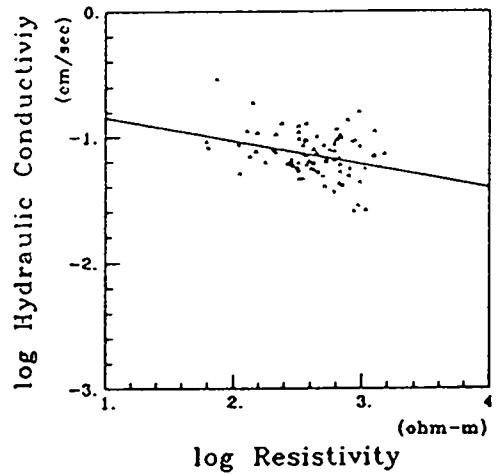
$$T_h = 800.40538 S^{0.08168}$$



$$T_h = 1035.59513 \rho^{-0.09390}$$



$$K = 193.04120 \rho^{-0.18901}$$



$$K = 0.22343 \rho^{-0.18901}$$

그림 5-11 가남지역 대수층의 전기적, 수리적 특성 사이의 관계식

는 포함되어 있지 않기 때문에 투수량계수를 해석에 의해 얻어진 제 2층의 두께로 나눈 값을 수리전도도로 생각하여 이것 역시 2차원 내삼을 통하여 전탐측점에서의 값을 구한 뒤에 다음과 같은 관계식을 구하였다.

$$\log K(m/day) = -0.18901 \cdot \log \rho(ohm-m) + 2.2856$$

$$\log K(cm/sec) = -0.18901 \cdot \log \rho(ohm-m) - 0.6508$$

수리전도도와 전기비저항 사이에는 반비례하는 관계식이 존재하는 것이 밝혀졌다. 이것은 이 지역에서 longitudinal unit conductance와 투수량계수와 의 관계를 구하려는 시도가 의미 있는 일이라는 것을 뒷받침해준다. 위의 결과들은 그림 5-11에 잘 표현되어 있으며 다음과 같이 결론을 내릴 수 있다.

1) 가남지역의 대수층은 비저항이 높은 기반암 위에 존재하므로 transverse unit resistance(T)보다는 longitudinal unit conductance(S)가 대수층의 특성을 알아보는데 있어서 더 유용한 물리량이며, 이 지역 대수층의 투수량계수(T_h , m^2/day)와 longitudinal unit conductance(S , siemens)사이에는 다음과 같이 비례하는 관계식이 존재한다.

$$T_h = 800.40538 \cdot S^{0.08168}$$

2) 각 측정에서의 수직탐사 자료를 해석하여 각 층들의 전기비저항과 두께를 계산하고 결과를 이용하여 투수량계수와 전기비저항(ρ , ohm-m), 수리전도도(K , cm/sec)와 전기비저항 사이의 관계를 알아본 결과 다음과 같은 관계식이 얻어졌다.

$$T_h = 1035.59513 \cdot \rho^{-0.09390}$$

$$K = 0.22343 \cdot \rho^{-0.18901}$$

위의 식에서 이 지역 대수층의 수리전도도와 비저항은 서로 반비례한다는 것

을 알 수 있다. 이것은 longitudinal unit conductance(S)가 투수량계수와 밀접하게 연관되어질 수 있는 조건이므로, 이 지역에서 S 가 대수층의 전기적, 수리적 특성을 고찰하는데 있어서 유용한 물리량이라는 것이 확인되었다.

제 5 절 유한차분법을 이용한 2차원 전기비저항 모델링

1차원 층상구조의 지역에서 수직탐사를 실시하였을 때, 오차를 일으킬 수 있는 여러 가지 상황에 대하여 모델링을 하였다. 전기탐사의 신뢰도를 높이기 위해서는 발생할 수 있는 오차의 크기나 오차가 일어나는 상황을 알아야 하므로 이러한 것들을 알아보기 위하여 유한차분법을 이용한 2차원 전기비저항 모델링을 수행하였다. 유한차분법을 이용한 2차원 모델링의 정확도를 알아보기 위하여, 균질한 반무한공간 지표의 한 점에서 점전류를 발생시켰을 때 지표에서의 이론적인 전위값과 유한차분법을 이용하여 계산된 전위값을 비교하여 보았다(그림 5-12). 수치적인 계산에 의해 나온 값들이 이론 값과 약 6%정도 어긋나 잘 맞음을 알 수 있다.

비교의 기본이 되는 이상적인 1차원 층상구조는 4층으로 하였는데 1, 2, 3, 4층의 비저항은 각각 300, 1200, 150, 5000 ohm-m로 하였고 1, 2, 3층의 두께는 각각 1.4, 2.7, 24 m로 하였다(그림 5-13). 제 3층을 대수층으로 생각하였고, 수직탐사에 이용된 전극배열은 다른 배열법보다 분해능이 높고 많이 사용되고 있는 Schlumberger 배열법이며 다음과 같은 경우에 대해 모델링을 수행하였다.

1. 전극의 접지심도가 다를 때의 영향

모델링의 경우나 이론적인 계산을 하는 경우나 모두 겉보기비저항을 계산할 때 전극들은 지표 위의 한 점에서 접지 되는 것으로 생각한다. 그러나 실제로 전극들은 땅 속에 박히게 되며 땅 속에 박히는 깊이도 늘 바뀌게 된다. 이러한 차이가 얼마나 수직탐사 자료에 영향을 미치는지 연구되었다. 모델의 최상부에는 10 cm, 10 cm, 120 cm의 두께를 갖고 비저항이 모두 300 ohm-m인 층을 위치시켜 이상적인 4층 모델의 제 1층(두께: 1.4 m, 비저항: 300 ohm-m)의 조건과 같게 하였다. 이런 모델에서 전류원이 지표, 지하 10 cm, 지하 20 cm에 있을 때에 의한 차이를 알아보았으며 모델링에 이용된 격자점의 개수는 200×19 이다. 전극이 지하에 박혀있을 때에는 전극의 끝 점에서만 전류가 발생한다고 가정하였다. 전류원이 지표에 있는 경우와 10 cm 지하에 있는 경우에 얻어지는 Schlumberger 겉보기비저항 곡선의 차이는 0.25%로 극히 적은 양이었다. 그러므로 접지심도에 의한 차이는 무시될 수 있으며, 앞으로의 모델링에서도 전류원은 지표에 존재하는 것으로 하였다. 그림 5-14에는 접지심도가 10, 20cm인 경우에 얻어지는 Schlumberger 겉보기비저항 곡선이 도시되어 있다. 실선은 10 cm의 경우이고 점으로 표시된 것은 20 cm 경우의 Schlumberger 겉보기비저항 곡선이다. 이 두 경우의 차이는 약 0.19%로 이것 역시 무시할 수 있는 양이라 할 수 있다.

2. 강우가 표토의 최상부를 적었을 때의 영향

강우로 표토가 지하 5 cm까지 젖게 되어 낮은 비저항을 가질 때 일어날 수 있는 오차에 대해 연구하였다. 이상적인 4층 모델의 최상부에 낮은 비저항을 갖고 두께가 5 cm인 층을 얹어 강우의 상황을 구현하였다. 최상부 층의 비저항은 1차원 4층 모델의 대수층의 비저항으로 설정한 150 ohm-m로 하였으며

모델링에 이용된 격자점의 크기는 200×19 이다. 최상부에 150 ohm-m 층이 있는 경우와 없는 경우의 Schlumberger 겹보기비저항 곡선이 그림 5-15에 나타나 있다. 실선은 최상부의 5 cm까지 이상적인 경우와 같이 300 ohm-m로 준 것이며 점으로 표시된 것은 150 ohm-m의 층을 준 것이다. 두 경우 낮은 깊이에서 매우 작은 차이를 보여줄 뿐, 전체적인 차이는 약 0.74%밖에 나지 않으므로 강우에 의한 영향도 거의 없다고 할 수 있다.

3. 전극 주위에 비저항 이상체가 존재할 때의 영향

전류 전극과 전위 전극의 주위에 고비저항의 이상체와 저비저항의 이상체가 존재할 때 이들에 의해서 얼마나 겹보기비저항 곡선이 왜곡되는지를 알아보았다. 이상체의 비저항은 고비저항체의 경우 5000 ohm-m로, 저비저항체의 경우에는 18 ohm-m로 주었으며 모양은 전위전극과 전류전극 주변의 것 모두 수평방향으로는 2 m, 수직방향으로는 0.7 m로 주었다. 이상적인 4층 모델의 기반암의 비저항값이 5000 ohm-m이기 때문에 고비저항체의 비저항을 이와 같이 주었고, 고비저항체의 비저항값과 주위 매질의 비저항값의 비율과, 주위 매질의 비저항과 저 비저항체의 비율이 같아지도록 저 비저항체의 비저항을 정하였다($5000/300 \approx 300/18$). 모델링에 사용된 격자점의 수는 400×18 이며 전위전극 주위의 이상체는 전위전극이 위치하는 오직 한 곳에만 주었고, 전류전극 주위의 이상체는 전위전극의 중심으로부터 40 m에서 90 m떨어진 곳까지 10 m의 간격으로 위치시켰다. 그림 5-16의 (1)과 (2)는 전위전극 주위에, (3)과 (4)는 전류전극 주위에 고비저항과 저비저항 이상체가 존재할 경우의 Schlumberger 겹보기비저항곡선이다. (1), (2), (3), 그리고 (4) 모두 실선은 비저항 이상체가 존재하지 않는 경우의 겹보기비저항 곡선이고 점들은 (1)과 (2)의 경우에는 전위전극 주변에 이상체가 위치할 때, (3)과 (4)의 경우에

는 전류전극 주변에 이상체가 위치할 때의 겹보기비저항 곡선이다 (1)과 (2)에서 두 곡선의 모양이 거의 평행하다는 것을 알 수 있는데 이것은 다른 배열법에 비해 Schlumberger 배열이 갖는 특성이라고 할 수 있다. 즉, 각 층의 비저항값의 상대적인 수직적인 변화는 알아낼 수 있으나, 전위전극 부근의 비저항이상체때문에 비저항의 절대적인 값은 다른 값으로 해석될 수 있다는 문제점이 제기된다. (3)과 (4)에서 뒷 부분의 튀는 값들은 무시되어 질 수 있을 정도의 작은 값들로 보인다. 이상으로부터 전위전극 주변의 이상체가 전류전극 주변의 그것보다 훨씬 더 많은 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다.

4. 비저항탐사 모델링의 결론

수직 전기탐사의 경우 오차를 일으킬 수 있는 몇가지 상황에 대하여 유한차분법을 이용한 2차원 전기비저항 모델링을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 전극의 접지심도의 차이는 탐사 자료에 거의 영향을 미치지 못한다.

(2) 강우에 의해 표토가 낮은 비저항을 갖게 되어도 이것에 의해서는 탐사자료가 거의 왜곡되지 않는다.

(3) Schlumberger 배열법을 이용한 수직탐사는, 전위전극의 주위에 비저항 이상체가 존재하는 경우에는 전 측점에서 계산된 비저항 값이 거의 같은 양만큼 커지거나(고비저항 이상체의 경우) 작아지는(저비저항 이상체의 경우) 특성이 있어 각 층의 비저항값이 다르게 해석되는 문제점이 제기되며, 전류전극 주위의 비저항 이상체는 탐사 자료에 큰 영향을 끼치지 못하는 것으로 밝혀졌다.

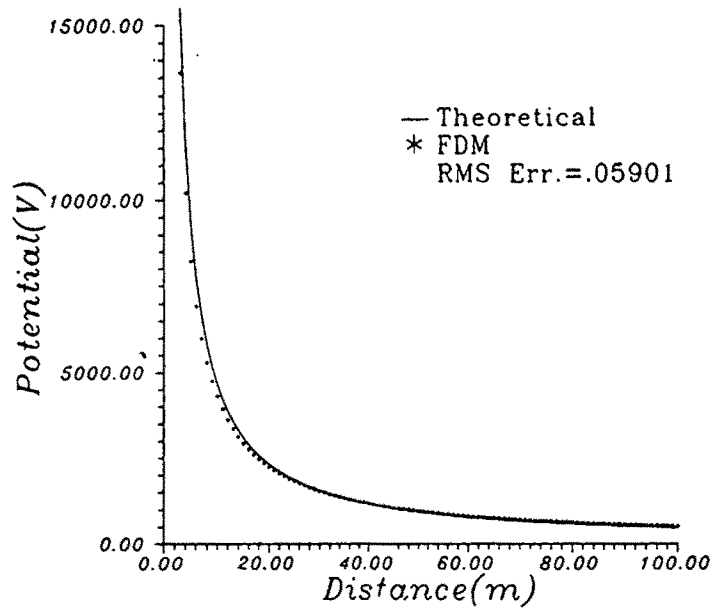


그림5-12 유한차분법을 이용하여 얻어진 지표에서의 전위값과 이론적인 전위값의 비교
(146 ohm-m의 반무한공간, 표면에서 2000 A의 점전류)

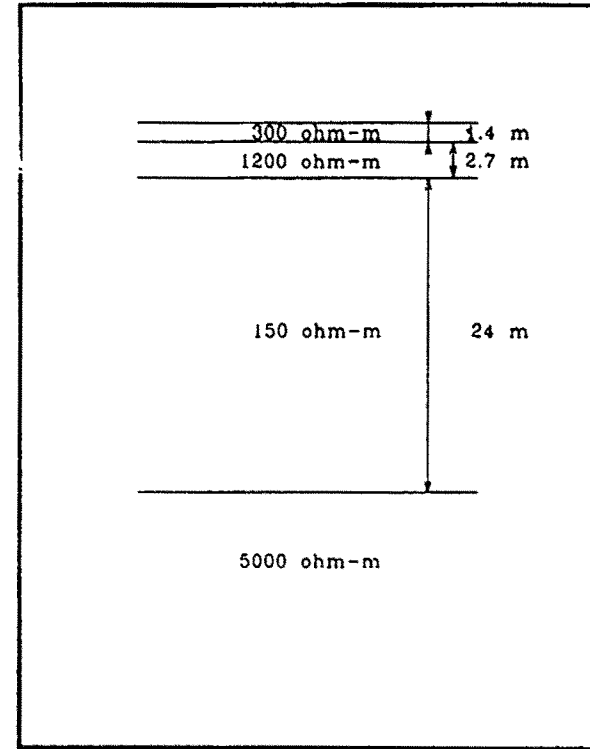


그림5-13 모델링 자료의 비교에 기본이 되는 이상적인 1차원 4층 모델

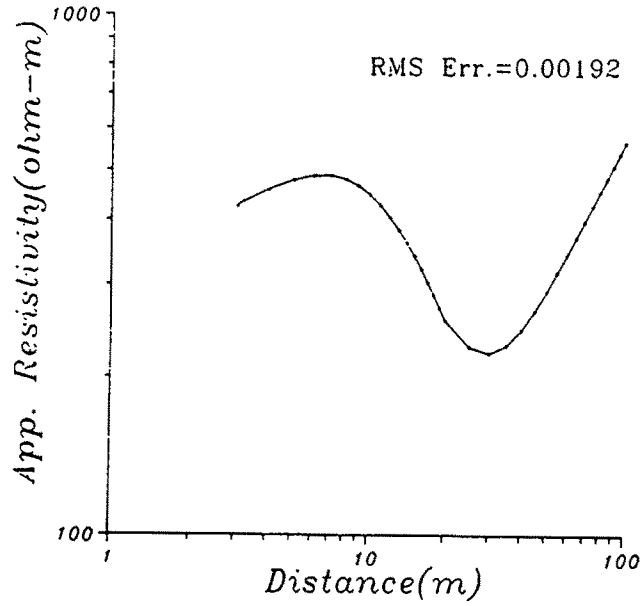


그림 5-14 전극의 접지심도가 Schlumberger 배열의 수직탐사에 미치는 영향
(실선 : 전류원이 지표 하 10 cm, 점 : 전류원이 지표 하 20 cm)

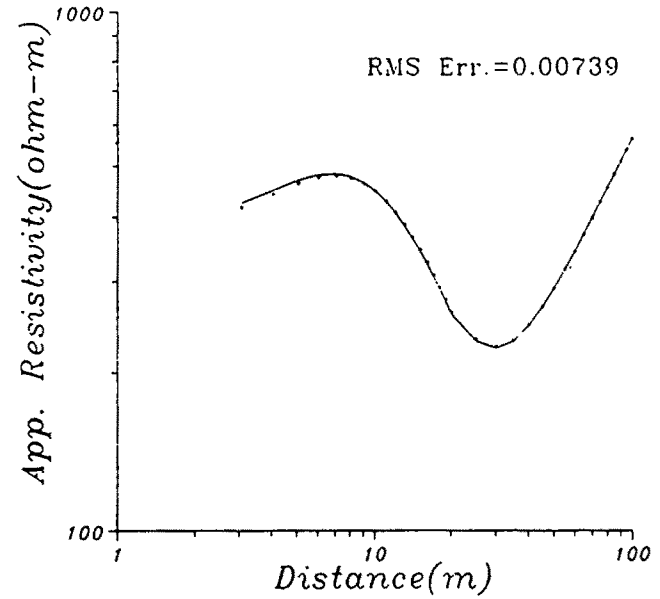
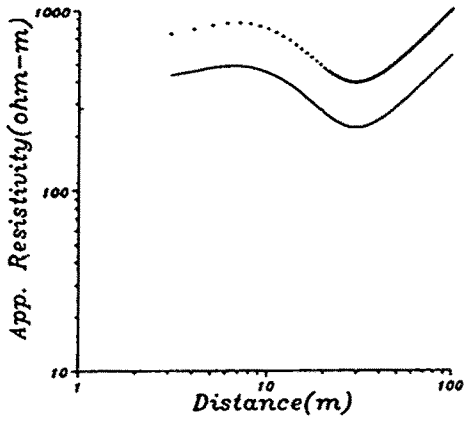
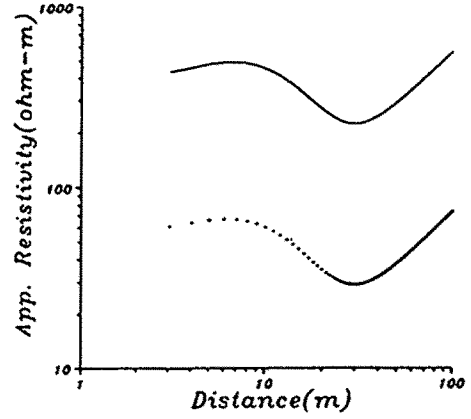


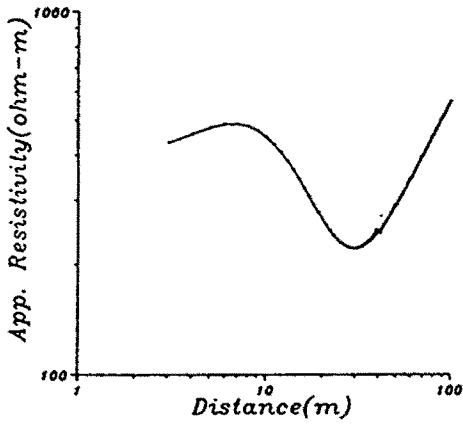
그림 5-15 강우가 Schlumberger 배열의 수직탐사에 미치는 영향
(실선 : 강우가 없을 때, 점 : 강우가 있을 때)



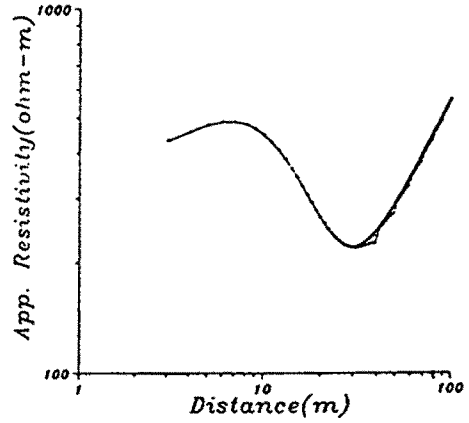
(1)



(2)



(3)



(4)

그림 5-16 전극 주위의 비저항 이상체가 Schlumberger 배열의 수직탐사에 미치는 영향

- (1) 실선: 이상체가 없는 경우, 점: 고비저항 이상체가 전위전극 주변에 존재하는 경우
- (2) 실선: 이상체가 없는 경우, 점: 저비저항 이상체가 전위전극 주변에 존재하는 경우
- (3) 실선: 이상체가 없는 경우, 점: 고비저항 이상체가 전류전극 주변에 존재하는 경우
- (4) 실선: 이상체가 없는 경우, 점: 저비저항 이상체가 전류전극 주변에 존재하는 경우

제 6 장 소유역 지하수문분석 모델 개발

제 1 절 서 론

가뭄 시기의 물 부족현상을 극복하기 위한 효과적인 하나의 수단으로 지하수 저류량을 인공적으로 증대시키는 지하댐 건설을 들 수 있다. 지하댐은 인공적인 지하수 수평 흐름 방벽을 건설하여 지하수의 유효 저류량을 증가시킨다는 측면에서 간접인공함양법의 하나라고 할 수 있다. 지하댐의 건설은 주로 미고결 토양층에 형성된 대수층을 주 대상으로 한다. 토양층이 지표에서 그리 깊지 않은 깊이까지 발달되어 있는 우리 나라의 토질 상태를 고려할 때 미고결 토양 대수층은 그 유형을 자유면 대수층으로 분류할 수 있다. 이러한 사실을 토대로 지하댐 문제를 정량적으로 혹은 수치적으로 모델링하기 위한 전 단계로 그 개념적 모델을 정리한다면 자유면 대수층에 지하수의 수평흐름을 제어하는 인공 방벽을 설치하여 인공 방벽의 상류부의 지하수위를 높여 대수층의 유효 저류량을 증가시키는 개념으로 요약할 수 있다. 이 때 지하댐이 설치된 소유역의 바깥 경계부위는 그 수리지질학적 특성에 따라 정흐름량 혹은 정수위 경계조건으로 취급할 수 있다. 이렇게 설정된 현상의 물리적 특성에 기반한 개념적 모델에 기초하여 수학적 모델을 재설정하게 된다. 재설정된 수학적 모델의 근사해는 여러 유형의 수치적 방법을 이용하여 구할 수 있다.

지하댐이 설치될 예정인 혹은 이미 설치된 소유역의 지하 수리수문 현상 즉, 지하수위와 유효 저류량의 변동을 정량적으로 예측하고 이에 기반한 지하댐 설계 규모의 결정을 용이하게 하기 위하여 "소유역 지하댐 개발에 관한 연구-소유

역 지하수문분석 모델 개발의 95년도 연구에서 소유역 지하수문 분석용 유한 차분 모델인 SUBDAM과 저류량 변동 계산 프로그램인 STORAGE를 개발한 바 있다. SUBDAM은 평면 2차원 영역에 대한 정류 및 부정류 상태의 지하수위 변동 모델링을 모두 수행할 수 있고 부정류 상태 모델링시에는 시간에 따른 저류량의 변동량 계산도 수행할 수 있다. STORAGE는 SUBDAM의 정류 상태 모델링 결과 얻어진 지하수위 변동 자료를 입력 자료로 하여 저류량의 변동량을 계산하는 기능을 수행한다.

일차적으로 개발된 SUBDAM에서는 모델링의 편의성을 고려하여 모델링 영역을 직사각형 모양으로만 정의할 수 있게 하였다. 그러나 실제 소유역의 형태는 부정형의 다각형 형태를 취하고 있으므로 지하수 유역의 형태적 특성을 최대한 반영하는 모델링을 수행하기 위해서는 이러한 모델링 영역 형태면의 제한점에 대한 개선이 필요하다.

부정류 상태 모델링시 SUBDAM에서 설정할 수 있는 지하수 함양단계는 최대 4단계까지 설정할 수 있다. 이는 4계절 변화에 따른 지하수 함양률의 변동을 고려한 모델링을 가능하게 하기 위하여 부여된 기능이라고 할 수 있다. 자유면 대수층의 지하수 함양에 가장 큰 영향인자라고 할 수 있는 강우의 월변화가 두드러진 우리 나라의 실정을 감안할 때, 더욱 세분된 월별 지하수 함양률까지를 모델링에 반영할 수 있도록 지하수 함양단계의 최대 반영 단계수를 12단계 이상으로 늘려 그 기능을 보완하여야 한다.

SUBDAM에서 사용하는 반복계산 방법은 GSLR법으로 수렴속도가 다소 느린 것이 단점이라고 할 수 있다. 수렴속도의 향상을 위해 다른 반복계산 방법의 도입이 요구된다. 가장 수렴속도가 빠른 반복계산 방법으로는 SIP법이 있으나 이는 프로그래밍상에서 다소간의 복잡한 면을 가지고 있다.

부정류 상태 문제의 모델링시 SUBDAM을 이용하여 시간에 따른 저류량의

변동을 계산할 수 있다. 저류량의 변동은 지하수위의 변화량, 대수층의 저류계수, 소유역의 유효 면적을 이용하여 계산된다. 저류량의 변동량은 그 지하수 유역에서의 지하수 실제 이용가능량의 증가분을 의미한다. 저류량 변동 계산 자료를 이용하여 실제 이용가능량 증가분을 산정할 수 있다.

2차년도 연구목적은 이미 개발된 지하담 지하수 유역 분석 모델인 SUBDAM의 수정, 보완이라고 할 수 있다. 요약적으로 살펴보면 다음과 같다.

가. 다양한 형태의 모델링 영역과 격자망 구성이 가능한 SUBDAM의 문자형 전처리기의 개발 - SUBDAM은 이미 자체로 입력 자료의 전처리 시스템을 갖추고 있으나 보다 다양한 형태의 모델링 영역을 구성할 수 있는 기능을 갖추고 보다 세분된 지하수 함양단계를 고려할 수 있는 문자형 전처리를 개발한다.

나. GSLR법 보다 더욱 빠른 반복계산 방법의 도입 - 프로그래밍 구조의 이해가 쉽고 사용하기에 간편한 반복계산 방법을 도입한다.

다. 실제 이용가능량 증가분 계산 방법의 개발

라. MODFLOW를 이용한 지하수 소유역 수문분석 방법의 적용 - 유사 3차원 유한 차분 모델인 MODFLOW와 그래픽 전처리 시스템인 ModelCad를 이용하여 지하담이 설치된 소유역의 지하 수문현상을 분석하는 전 과정을 고찰하고 이의 적용 가능성을 평가한다.

본 장에서는 이러한 목적으로 수행된 SUBDAM의 수정·보완 연구내용을 기술하였으며, 참고로 1차년도에 개발된 SUBDAM과 STORAGE의 내용과 P/G 사용 설명서를 부록에 편집 수록하였다.

수정, 보완된 SUBDAM 모델의 상용화는 여러 유형의 지하담 시설 지구에 대한 지하수 관련 관측자료와 모델링 결과와의 비교를 통해 모델의 정확도와 실용성이 검증될 때 가능하다. 이러한 개발된 모델의 검증단계는 많은 시간을

필요로 한다. 개선 및 보강된 SUBDAM 모델의 현실 문제에 대한 검증작업 또한 향후 다각도로 이루어져야 한다. 세밀한 검증작업에 의해서만 SUBDAM 모델의 생명력이 보장될 수 있음을 명심해야 할 것이다.

제 2 절 SUBDAM의 문자형 전처리기

지하수 유동 현상 모델링과 관련하여 가장 많이 그리고 널리 쓰이고 있는 모델은 MODFLOW라고 할 수 있다. MODFLOW는 1988년 Andersen에 의해 개발된 PREMOD라는 문자형 전처리기와 Geraghty & Miller사에 의해 개발된 ModelCad라는 그래픽 전처리기를 가지고 있다. 특히 ModelCad는 Geraghty & Miller사에 의해 계속적으로 개선되어 오고 있으며 사용자 인터페이스와 메모리 관리면의 기능이 크게 향상되어 사용이 더욱 편리해지고 더 조밀한 격자망 구성에 의한 세밀한 모델링을 수행할 수 있게 한다.

이러한 전처리기의 편의성과 효율성에 비해 실제 전처리 시스템을 구축하는 작업은 매우 어려운 작업임과 동시에 매우 긴 시간과 인력을 필요로 하는 작업이라고 할 수 있다. 전세계적으로 개발된 지하수 관련 모델들 중 어떤 형태의 전처리기든 전처리기를 따로 갖추고 있는 경우는 극히 드물다. 국내에 알려진 모델들 중 MODFLOW와 AQUA 정도가 그래픽 전처리 시스템을 완벽하게 갖추고 있다.

전처리 시스템 개발의 목적은 표현 그대로 입력자료 처리의 편의성을 추구하는 것이다. 이를 구체적으로 표현하면 입력 상수의 입력, 격자망의 구성, 경계 조건의 정의, 초기 조건의 정의 등을 그래픽 화면상에서 마우스나 키보드를 이

용하여 쉽게 처리하는 것이다. 물론 문자형 전처리기의 경우에는 키보드만을 이용하여 화면상에 나타나는 지시 사항에 맞게 숫자 또는 문자를 입력해 주어야 한다. 문자형 전처리는 그래픽 전처리에 비해 편의성이 매우 떨어지며 전처리 자료의 입력 범위를 선택하여 지도나 여러 가지 도면상에서 먼저 구성하는 작업을 필요로 한다. 이에 반해 그래픽 전처리는 그래픽 화면상에서 자료입력의 범위 혹은 모델링 영역의 범위를 구성하면서 동시에 입력상수 및 조건 등을 입력할 수 있다. 전처리 시스템 사용의 목적을 추가한다면 격자망 및 경계 조건의 아주 복잡한 기하 형태를 어느 정도 세밀하게 표현하는 것을 가능하게 한다는 것이다. 전처리를 이용하면 각 격자점 혹은 격자셀 하나하나에 고유값을 지정해 줄 수 있으므로 이러한 모델링 영역 형태의 복잡한 기하나 경계 조건의 복잡한 기하를 표현하는 것이 가능하다.

SUBDAM을 이용한 모델링시 입력 자료 처리의 편의성을 제공하고 복잡한 모델링 영역 및 경계 조건의 표현을 가능하게 하기 위하여 PREDAM이라는 문자형 전처리를 개발하였다. PREDAM은 95년도에 개발된 SUBDAM의 약점인 모델링 영역의 복잡한 기하를 반영할 수 없는 점을 보완하기 위하여 개발되었다. 또한 PREDAM은 부정류 상태 모델링시 최대 20단계까지의 지하수 함양을 고려할 수 있도록 기능을 확장하였다. 프로그램 PREDAM의 원본코드는 FORTRAN으로 작성하였다. 아래의 영문 내용은 SUBDAM의 문자형 전처리기 PREDAM을 이용하여 정류 상태의 입력 자료 파일을 작성할 때의 출력 화면을 보여준다.

NAME OF INPUT DATA-SAVE FILE

FILE NAME, [Extension must be "xxx.PDI"] (?)

PRELIMINARY INPUT

PROJECT NAME (?)

SITE NAME (?)

PROGRAM OPERATOR NAME (?)

YEAR/MONTH/DAY (?)

PROBLEM TYPE SELECTION

SELECTION OF PROBLEM TYPE (?)

1. STEADY-STATE SIMULATION

2. TRANSIENT SIMULATION

*[1 or 2] (?)

PROBLEM DOMAIN DEFINITION

THE SIZE OF PROBLEM DOMAIN (?)

1. ROW (X-COORDINATE, [meter]) =

2. COLUMN (Y-COORDINATE, [meter]) =

THE NUMBER OF GRID POINTS (?)

1. ROW (X-COORDINATE; < #52) =

2. COLUMN (Y-COORDINATE; < #52) =

HYDRAULIC PARAMETERS INPUT

HYDRAULIC CONDUCTIVITY VALUE, [meter/sec] (?)

RECHARGE DATA INPUT

AREAL RECHARGE RATE, [meter/sec] (?)

ESTABLISH BOUNDARY CONDITIONS

BOUNDARIES ARE REPRESENTED BY FOLLOWING CONVENTION:

>0 : ACTIVE CELL

<0 : CONSTANT HEAD CELL

=0 : INACTIVE, NO-FLOW & FLOW-BARRIER CELL

ROW 1 COLUMN 1 = 0

ROW 2 COLUMN 1 = -1

*INPUT CONSTANT HEAD VALUE OF THIS CELL, [meter] (?)

ROW 3 COLUMN 1 =

•

•

•

ROW 1 COLUMN 2 =

HEAD VALUE AS AN INITIAL GUESS

INITIAL GUESS, [meter] (?)

ITERATION PARAMETER

CONVERGENCE CRITERION, [<0.001] (?)

OUTPUT, HEAD-SAVE, & STORAGE CHANGE-SAVE FILE NAME

NAME OF OUTPUT FILE, [xxx.OUT] (?)

NAME OF HEAD-SAVE FILE, [xxx.DAT] (?)

*** INPUT FILE CREATION IS SUCCESSFUL ***

위에서 보는 바와 같이 정류 상태 모델링 입력 자료 파일을 생성하기 위한 PREDAM 작동에서는 크게 10가지의 항목에 대한 자료 입력이 필요하다. 입력 자료 파일명, 프로젝트명, 모델링 현장명, 모델링 수행자 이름, 날짜 등의 자료, 정류 상태 혹은 부정류 상태 모델링의 선택, 모델링 영역의 크기와 격자점의 개수의 정의, 수리상수, 지하수 함양 자료, 경계 조건, 초기 추정치, 반복 계산 변

수, SUBDAM을 이용한 정류 상태 모델링 후 출력 자료가 저장되는 각종 출력 파일명 등의 자료가 SUBDAM의 정류 상태 모델링을 수행하기 위한 입력 자료로 이용된다.

다음으로 아래의 영문 내용은 SUBDAM의 문자형 전처리기 PREDAM을 이용하여 부정류 상태의 입력 자료 파일을 작성할 때의 출력 화면을 보여준다.

NAME OF INPUT DATA-SAVE FILE

FILE NAME, [Extension must be "xxx.PDI"] (?)

PRELIMINARY INPUT

PROJECT NAME (?)

SITE NAME (?)

PROGRAM OPERATOR NAME (?)

YEAR/MONTH/DAY (?)

PROBLEM TYPE SELECTION

SELECTION OF PROBLEM TYPE (?)

1. STEADY-STATE SIMULATION

2. TRANSIENT SIMULATION

*[1 or 2] (?)

PROBLEM DOMAIN DEFINITION

THE SIZE OF PROBLEM DOMAIN (?)

1. ROW (X-COORDINATE, [meter]) =
2. COLUMN (Y-COORDINATE, [meter]) =

THE NUMBER OF GRID POINTS (?)

1. ROW (X-COORDINATE; < #52) =
 2. COLUMN (Y-COORDINATE; < #52) =
-

HYDRAULIC PARAMETERS INPUT

HYDRAULIC CONDUCTIVITY VALUE, [meter/sec] (?)

STORAGE COEFFICIENT or SPECIFIC YIELD (?)

EFFECTIVE POROSITY OF AQUIFER (?)

RECHARGE DATA INPUT

NUMBER OF UNIFORM RECHARGE RATE INTERVALS, (<#21) (?)

>>FOR RECHARGE INTERVAL, 1

AREAL RECHARGE RATE, [meter/sec] (?)

MAINTENANCE DURATION OF THIS INTERVAL, [days] (?)

>>FOR RECHARGE INTERVAL, 2

AREAL RECHARGE RATE, [meter/sec] (?) :

MAINTENANCE DURATION OF THIS INTERVAL, [days] (?)

-
-
-

ESTABLISH BOUNDARY CONDITIONS

BOUNDARIES ARE REPRESENTED BY FOLLOWING CONVENTION:

>0 : ACTIVE CELL

<0 : CONSTANT HEAD CELL

=0 : INACTIVE, NO-FLOW & FLOW-BARRIER CELL

ROW 1 COLUMN 1 = 0

ROW 2 COLUMN 1 = -1

*INPUT CONSTANT HEAD VALUE OF THIS CELL, [meter] (?)

ROW 3 COLUMN 1 = 1

-
-
-

ROW 1 COLUMN 2 = 1

-
-

HEAD VALUE AS AN INITIAL GUESS

INITIAL GUESS, [meter] (?)

ITERATION PARAMETER

CONVERGENCE CRITERION, [<0.001] (?)

OUTPUT, HEAD-SAVE, & STORAGE CHANGE-SAVE FILE NAME

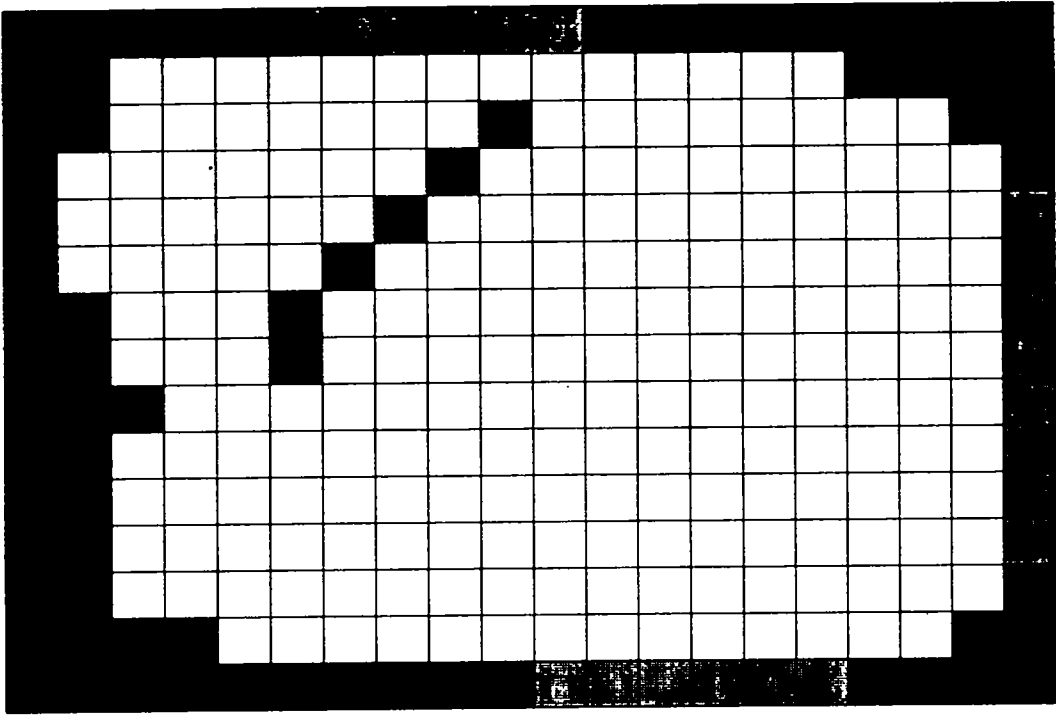
NAME OF OUTPUT FILE, [xxx.OUT] (?)

NAME OF STORAGE CHANGE-SAVE FILE, [xxx.SCS] (?)

*** INPUT FILE CREATION IS SUCCESSFUL ***

위의 부정류 상태 모델링 입력 자료 파일 또한 정류 상태와 마찬가지로 크게 10가지 항목의 입력 자료 목록이 필요하다. 정류상태 입력 자료와 큰 차이는 없으나 수리상수 항목의 저류계수, 유효 공극률 항과 지하수 함양 자료 입력 항목의 최대 20 단계까지의 시간에 따른 지하수 함양률을 고려할 수 있는 기능과 출력 파일명 입력 항목의 유효 저류량 변동 저장 파일의 입력이 다른 점이라고 할 수 있다. 지하수 함양률을 시간에 따라 최대 20단계까지 고려할 수 있으므로 일정 지하수 함양 기간을 한달 단위 이하로 줄일 수 있게 되었다.

정류 및 부정류 상태 모델링 입력 자료 모두 불규칙한 형태의 모델링 영역의 표현이 가능하다는 것이 PREDAM의 특징이다. 이는 IBOUND(I, J)라는 변수를 사용하여 경계 조건을 세 가지의 서로 다른 특성을 가지는 격자 세포로 표현하게 함으로써 가능하게 되었다. IBOUND(I, J)값이 0보다 크면 모델링 계산 수행시 지하수위값이 실제로 계산되는 격자 세포를 의미한다. IBOUND(I, J)값이 0보다 작은 값으로 정의되면 일정한 지하수위값을 가져 모델링 계산 수행시 초기 입력값이 그대로 유지되는 일정수두 경계 조건 셀을 나타낸다. IBOUND(I, J)값이 0이면 수치계산 수행시 고려되지 않는 셀이나 지하수 흐름이 없는 경계 조건 즉 무흐름량 경계조건 셀 혹은 지하댐의 구조물 즉 지하수의 수평흐름을 억제하는 수평흐름 방벽이라는 경계조건 셀 중의 하나를 의미한다. 이 중 수치계산 수행시 계산에 관여하지 않는 셀 특성을 부여할 수 있음으로 하여 불규칙한 형태의 모델링 영역을 표현하여 모델링을 수행할 수 있게 되었다. 그림 1은 PREDAM에서 불규칙한 형태의 모델링 영역을 표현하는 방법을 나타낸다. 첫 단계로는 직사각형 모양의 원시 격자망을 구성한다. 다음 단계로 지하수위를 실제로 계산할 영역을 제외한 나머지 격자셀들을 비활성 격자셀로 정의한다. 다음으로 정수위 및 무흐름량 경계 조건에 맞게 IBOUND(I, J) 값을 설정하고 활성 격자셀의 IBOUND(I, J)값을 정확하게 설정한다.



- : 비활성, 무흐름량, 수평흐름 방벽 경계 조건 [$IBOUND(I, J) = 0$]
- : 정수위 경계 조건 [$IBOUND(I, J) < 0$]
- : 활성 격자셀 [$IBOUND(I, J) > 0$]

그림 6-1. 전처리기 PREDAM의 복잡한 경계조건 및 모델링 영역의 표현.

FORTRAN 프로그래밍 언어로 작성한 PREDAM의 원본 코드는 아래와 같다

```
C-----  
C      Preprocessor "PREDAM" of 2D Groundwater Flow Model "SUBDAM"  
C-----
```

```
C..... VARIABLES .....
```

```
      Real*8  H(100,100)  
      Real*8  LROW,LCOL,HC,S,ne,Rchg,inigh,CONVERG  
      Real*8  Rch(30),Mainday(30)  
      Integer inumx,inumy,iprob,IBOUND(100,100)  
      Character*20 pdifile,outfile,datfile,scsfile  
      Character*80 project,site,operator,date
```

```
CEnd.....
```

```
C..... PRELIMINARY INPUT.....
```

```
      Write(*,100)
```

```

100      Format(72('-')/,1x,'NAME OF INPUT DATA-SAVE FILE'
1          /72('-')/)
Write(*,*)'FILE NAME, [Extension must be "xxx.PDI"] (?)
Read(*,2) pdifile

Open(1,File=pdifile)

Write(*,200)

200      Format(72('-')/,1x,'PRELIMINARY INPUT'/72('-')/)

Write(*,1) 'PROJECT NAME (?) '
Read(*,2) project
WRITE(1,2) project

Write(*,1) 'SITE NAME (?) '
Read(*,2) site
WRITE(1,2) site

Write(*,1) 'PROGRAM OPERATOR NAME (?) '
Read(*,2) operator
WRITE(1,2) operator

Write(*,1) 'YEAR/MONTH/DAY (?) '
Read(*,2) date

```

WRITE(1,2) date

1 Format(1x,A)

2 Format(A)

C..... END OF PRELIMINARY INPUT.....

C..... PROBLEM TYPE SELECTION.....

Write(*,300)

300 Format(72('-')/,1x,'PROBLEM TYPE SELECTION'/72('-')/)

Write(*,*) 'SELECTION OF PROBLEM TYPE (?) '

Write(*,*) ' 1. STEADY-STATE SIMULATION'

Write(*,*) ' 2. TRANSIENT SIMULATION '

Write(*,*) ' *[1 or 2] (?) '

Read(*,*) iprob

WRITE(1,3) iprob

3 FORMAT(I1)

C..... END OF PROBLEM TYPE SELECTION.....

C..... DOMAIN DEFINITION.....

Write(*,400)

400 Format(72('-')/,1x,'PROBLEM DOMAIN DIFINITION'/72('-')/)

Write(*,*) 'THE SIZE OF PROBLEM DOMAIN (?) '

Write(*,*) ' 1. ROW (X-COORDINATE,[meter]) = '

Read(*,*) LROW

Write(*,*) ' 2. COLUMN (Y-COORDINATE,[meter]) = '

Read(*,*) LCOL

WRITE(1,4) LROW,LCOL

4 FORMAT(F8.2,2X,F8.2)

Write(*,*) 'THE NUMBER OF GRID POINTS (?) '

Write(*,*) ' 1. ROW (X-COORDINATE; < #52) = '

Read(*,*) inumx

Write(*,*) ' 2. COLUMN (Y-COORDINATE; < #52) = '

Read(*,*) inumy

WRITE(1,5) inumx,inumy

5 FORMAT(I2,2X,I2)

C..... END OF DOMAIN DEFINITION.....

C..... HYDRAULIC PARAMETERS INPUT.....

Write(*,500)

500 Format(72('-')/,1x,'HYDRAULIC PARAMETERS INPUT'/72('-')/)

Write(*,*) 'HYDRAULIC CONDUCTIVITY VALUE,[meter/sec] (?)

Read(*,*) HC

WRITE(1,6) HC

6 FORMAT(F12.10)

IF (iprob.EQ.2) THEN

Write(*,*) 'STORAGE COEFFICIENT or SPECIFIC YIELD (?) '

Read(*,*) S

WRITE(1,7) S

7 FORMAT(F10.8)

Write(*,*) 'EFFECTIVE POROSITY OF AQUIFER (?) '

Read(*,*) ne

WRITE(1,8) ne

8 FORMAT(F10.8)

ENDIF

C..... END OF HYDRAULIC PARAMETERS INPUT.....

C..... RECHARGE DATA INPUT.....

Write(*,600)

600 Format(72('-')/,1x,'RECHARGE DATA INPUT'/72('-')/)

IF (iprob.EQ.1) THEN

Write(*,*) 'AREAL RECHARGE RATE, [meter/sec] (?) '

Read(*,*) Rchg

WRITE(1,9) Rchg

9 FORMAT(F20.18)

ENDIF

IF (iprob.EQ.2) THEN

Write(*,*) 'NUMBER OF UNIFORM RECHARGE RATE INTERVALS, (<#21) (?)

Read(*,*) irch

WRITE(1,10) irch

10 FORMAT(I2)

```

Do ii=1,irch
  Write(*,11) ii
11  Format(1x,'>>FOR RECHARGE INTERVAL, ',1X,I2/,40('-'))
  Write(*,*) 'AREAL RECHARGE RATE,[meter/sec] (?) '
  Read(*,*) Rch(ii)
  Write(*,*) 'MAINTENANCE DURATION OF THIS INTERVAL,[days] (?)
  Read(*,*) Mainday(ii)

  WRITE(1,12) ii,Rch(ii),Mainday(ii)
12  FORMAT(I2,2x,F18.16,2x,F5.1)

  Enddo

ENDIF

C..... END OF RECHARGE DATA INPUT.....

C..... BOUNDARY CONDITIONS.....

  Write(*,700)
700  Format(72('-')/,1x,'ESTABLISH BOUNDARY CONDITIONS'/72('-')/)
  Write(*,*)'BOUNDARIES ARE REPRESENTED BY FOLLOWING CONVENTION:
  Write(*,*)'   >0 : ACTIVE CELL'
  Write(*,*)'   <0 : CONSTANT HEAD CELL'

```

```

Write(*,*)'   =0 : INACTIVE, NO-FLOW & FLOW-BARRIER CELL'
Write(*,*)

Do j=1,inumy
Do i=1,inumx
  Write(*,13) i,j
13  Format(3x,'ROW',I3,2x,'COLUMN',I3,2x,'= ')
  Read(*,*) IBOUND(i,j)

  IF (IBOUND(i,j) .LT. 0) THEN
    Write(*,14)
14  Format(5x,
1  '*INPUT CONSTANT HEAD VALUE OF THIS CELL, [meter] (?) ')
    Read(*,*) H(i,j)
  ELSEIF (IBOUND(i,j) .EQ. 0) THEN
    H(i,j)=999.99
  ENDIF

Enddo

Enddo

Do i=1,inumx
  WRITE(1,15) (IBOUND(i,j), j=1,inumy)
15  FORMAT(51I4)

```

Enddo

C..... END OF BOUNDARY CONDITIONS.....

C..... INITIAL GUESS.....

Write(*,800)

800 Format(72('-')/,1x,'HEAD VALUE AS AN INITIAL GUESS'/72('-')/)

Write(*,*) 'INITIAL GUESS, [meter] (?) '

Read(*,*) inigh

Do j=1,inumy

Do i=1,inumx

IF (IBOUND(i,j) .GT. 0) THEN

H(i,j)=inigh

ENDIF

Enddo

Enddo

Do i=1,inumx

WRITE(1,16) (H(i,j), j=1,inumy)

16 FORMAT(20F8.2)

Enddo

C..... END OF INITIAL GUESS.....

C..... ITERATION PARAMETER INPUT.....

Write(*,900)

900 Format(72('-')/,1x,' ITERATION PARAMETER'/72('-')/)

Write(*,*) 'CONVERGENCE CRITERION, [<0.001] (?) '

Read(*,*) CONVERG

WRITE(1,17) CONVERG

17 FORMAT(F10.8)

C..... END OF ITERATION PARAMETER INPUT.....

C..... OUTPUT, HEAD-SAVE, & STORAGE CHANGE-SAVE FILE NAME.....

Write(*,1000)

1000 Format(72('-')/,1x,

1 'OUTPUT, HEAD-SAVE, & STORAGE CHANGE-SAVE FILE NAME

2 /72('-')/)

Write(*,*) 'NAME OF OUTPUT FILE, [xxx.OUT] (?)

Read(*,2) outfile

WRITE(1,2) outfile

IF (iprob .EQ. 1) THEN

Write(*,*) 'NAME OF HEAD-SAVE FILE, [xxx.DAT] (?)

Read(*,2) datfile

WRITE(1,2) datfile

ENDIF

IF (iprob .EQ. 2) THEN

Write(*,*) 'NAME OF STORAGE CHANGE-SAVE FILE, [xxx.SCS] (?)

Read(*,2) scsfile

WRITE(1,2) scsfile

ENDIF

C..... END OF OUTPUT, HEAD-SAVE, & STORAGE CHANGE-SAVE FILE NAME.....

C..... PROGRAM TERMINATION.....

WRITE(*,*)

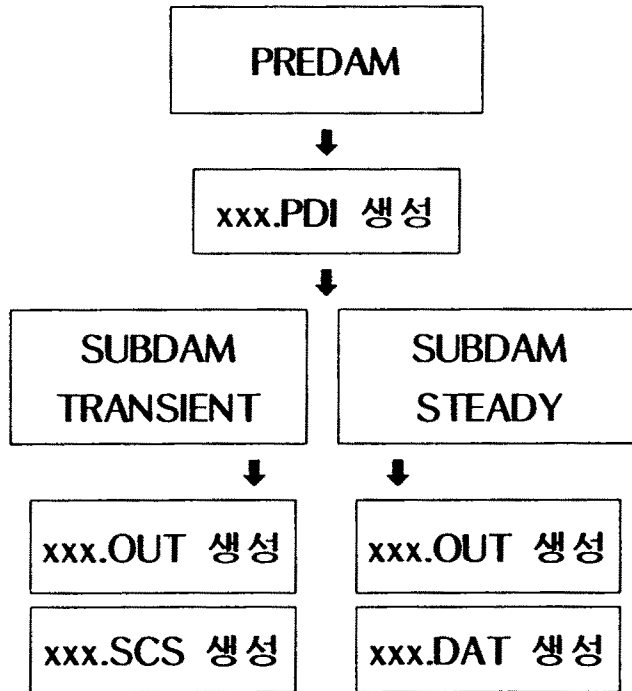
STOP '*** INPUT FILE CREATION IS SUCCESSFUL ***'

END

C..... END OF PROGRAM TERMINATION.....

SUBDAM의 전처리기 PREDAM을 개발함으로써 SUBDAM을 이용한 소유역 지하 수문현상이 보다 현실에 근접한 조건에서 수행될 수 있게 되었으며 사용자가 보다 간편하게 모델을 운용할 수 있는 길이 열리게 되었다.

그림 6-2는 SUBDAM의 문자형 전처리기 PREDAM과 SUBDAM 그리고 저류량 변동 계산 프로그램인 STORAGE를 이용한 소유역 지하수문 분석 모델링 수행 정형을 요약적으로 나타내고 있다.



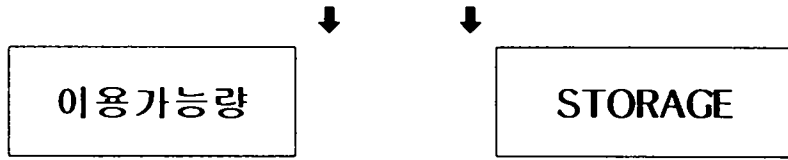


그림 6-2. 전처리기 PREDAM, 본 프로그램 SUBDAM, 저류량 변동 계산 프로그램 STORAGE를 이용한 소유역 지하수문분석 모델링 수행 과정.

제 3 절 반복계산 방법의 개선

소유역 지하수문분석 모델 SUBDAM은 유한차분법 (Finite Difference Method)이라는 수치계산 방법에 기초를 두고 있다. 유한차분법은 지하수의 정류 및 부정류 지배 방정식을 여러 개의 격자점 혹은 격자셀로 세분하여 각각의 격자점 및 격자셀에서의 지하수위값을 계산하는 수치계산 방식을 말한다. 일단 유한차분법을 사용한다는 것은 지하수 지배 방정식을 대수적 표현 방식인 유한차분식으로 전개하는 작업을 가장 기초적인 작업으로 삼는다. 이렇게 전개된 유한차분식은 다시 각각의 격자점 혹은 격자셀의 지하수위값과 수리상수값들, 대수층의 기하, 격자망의 기하를 표현하는 값들을 이용하여 행렬식으로 재구성된다. 이러한 행렬식은 반복계산법이라는 수치 계산법을 이용하여 수치계산 오차값이 최소값 혹은 일정한 기준 이하의 값을 가질 때까지 반복적으로 재구성되어 계산된다. 이러한 과정을 거쳐 유한차분법이라는 수치 방법을 이용한 모델링 작업이 수행된다.

여기서 모델링 작업에 걸리는 시간을 가장 좌우하는 요소는 반복계산의 방법이라고 할 수 있다. 지금까지 여러 학자들에 의하여 개발된 반복계산 방법은 매

우 다양하다. Gauss-Seidel 반복계산법, Successive Over-Relaxation (SOR)법 (구획 반복계산법과 선 반복계산법), Alternating Direction Implicit (ADI)법, Strongly Implicit Procedure (SIP)법 등이 대표적인 반복계산 방법들이다. 이 중 Gauss-Seidel법은 Explicit법으로 분류되며, SOR법, ADI법, SIP법은 Implicit법으로 분류된다. 일반적으로 격자점의 개수가 적고, 경계 조건이 복잡하지 않을 때에는 Gauss-Seidel법과 같은 Explicit법을 간편하게 사용할 수 있다. 하지만 격자점이 많아지고 경계 조건이 복잡해지면 Explicit법은 그 수렴 속도가 매우 느려질 뿐만 아니라 계산 결과의 정확도도 떨어지는 것으로 알려져 있다. 이러한 경우에는 Implicit법을 사용하는 것이 좋다. 격자점이 많고 경계 조건이 매우 복잡할 때 수렴 속도면에서 가장 효율적인 방법은 가장 고난도의 Implicit법은 SIP법이다. 그 다음으로 ADI법과 SOR법의 순이라고 할 수 있다. 이 중 ADI법과 SIP법은 프로그래밍하기에 매우 어려운 방법이라고 할 수 있다. 소유역 지하담 유역과 같은 비교적 크게 복잡하지 않은 수리지질계에 대한 모델링에는 효율성과 프로그래밍에 걸리는 시간, 프로그램 즉 모델 구조에 대한 사용자의 이해의 편의성을 고려할 때 SOR법이 가장 적합하다고 할 수 있다. 본 연구개발에서는 SUBDAM모델의 반복 계산 방법을 GSLR법에서 SOR법으로 개선하였다. 새로 도입된 반복 계산 방법인 SOR법에 대해 살펴보면 다음과 같다.

SOR법은 본질상 Gauss-Seidel법과 같은 Explicit 반복 계산법의 수렴 속도를 가속시키기 위한 시도로 사용되었다. Gauss-Seidel 반복 계산법을 유한차분식 행렬식을 적용할 때 일정한 수렴 기준에 도달하기 전까지 몇 번의 반복적인 행렬식 계산을 수행하여야 한다. SOR법은 이러한 반복 계산 과정에서 두 개의 연속되는 반복 계산 과정에서 수치 계산을 통해 값을 얻어야 하는 하나의 격자점에서의 수치 계산값의 변화에 주목한다. 수치 계산값의 변화의 방향과 다음 반복 계산 과정에서도 연속되는 수치 계산 결과의 경향성을 찾는 것이다. 다음

반복 계산 단계에서 계산될 수치 계산값의 보정값을 이러한 방향성과 경향성을 고려하여 미리 예측하여 얻어낼 수 있는 것이다. 이러한 선행 예측 과정을 통해 얻어진 수치 계산값들을 다음 반복 계산 단계의 입력값으로 쓸 수 있다. 결과적으로 두 번의 반복 계산이 한 번의 반복 계산 단계에서 수행되는 결과를 얻는 것이다. 이는 반복 계산 횟수의 감소를 가져오며 그 만큼 수렴 속도가 빨라지는 결과를 얻을 수 있다. 이를 수식으로 표현하면 식(6-1)과 같다.

$$u_{i,j}^{k+1'} = u_{i,j}^k + \omega(u_{i,j}^{k+1} - u_{i,j}^k) \quad (6-1)$$

식(6-1)과 같은 수치 계산 관계식에 의한 반복 계산을 Over-Relaxation 혹은 Successive Over-Relaxation이라고 한다. 여기서 k 는 반복 계산 단계를 의미하며 $u_{i,j}^{k+1}$ 은 Gauss-Seidel 반복 계산법으로부터 얻어진 가장 새로운 계산값을 나타낸다. $u_{i,j}^k$ 은 k 번째 반복 계산 단계에서 식(6-1)의 계산 과정을 적용하여 얻어진 보정 후 계산값을 나타내며, $u_{i,j}^{k+1'}$ 은 $k+1$ 번째 반복 계산 단계에서 식(6-1)을 적용하여 얻어진 보정후 계산값으로 $k+2$ 번째 반복 계산 단계의 초기 추정치로 사용된다. 당연히 $u_{i,j}^{k+1'}$ 값은 Gauss-Seidel 반복 계산에 의해 얻어진 보정 전의 값인 $u_{i,j}^{k+1}$ 보다는 최종 수치 계산 결과값에 근접한 값이라고 볼 수 있다. 식(6-1)은 $u_{i,j}^{k+1}$ 값이 각각의 격자점에서 얻어진 직후 바로 수치계산에 적용되고 $u_{i,j}^{k+1'}$ 값이 모든 반복 계산 과정에서 $u_{i,j}^{k+1}$ 값을 대체하여 저장된다. 식(6-1)에서 ω 는 Relaxation 변수라고 하며, $1 < \omega < 2$ 의 범위의 값을 대입하면 Over Relaxation법이 적용된다. Over Relaxation법은 $u_{i,j}^k$ 값과 $u_{i,j}^{k+1}$ 값을 이용한 선형 외삽법 (Linear Extrapolation)과 유사하다고 할 수 있다. 참고로 어떤 문제들에서는 Relaxation 변수를 $0 < \omega < 1$ 의 범위의 값을 대입하는 Under

Relaxation법을 적용하기도 한다. Under Relaxation법은 하나의 격자점에서의 수렴 양상이 진동하는 양상을 보이는 문제나 최종 계산 결과가 터무니없는 값을 출력하는 문제에 적합하다고 알려져 있다. Under Relaxation법의 경우, 보정된 계산값 $u_{i,j}^{k+1}$ 은 $u_{i,j}^k$ 값과 $u_{i,j}^{k+1}$ 값 사이의 값을 의미한다. Over Relaxation법은 일반적으로 Dirichlet (정수위) 경계 조건을 포함하는 Laplace 방정식의 수치해를 구하는데 적합하다. Under Relaxation법은 때때로 타원형 (Elliptic) 수치해 문제라고도 불리우며 비선형 방정식의 수치해를 구할 때 주로 사용된다. 비선형 문제의 수렴성을 보장하기 위해서는 Under Relaxation법을 사용하는 것이 필수적이다. Over Relaxation법인지 Under Relaxation법인지를 규정하는 Relaxation 변수는 $0 < \omega < 2$ 의 범위로 제한된다. 수치 계산값의 수렴성은 반복 계산이 진행됨에 따라 얻어지는 수치 계산 결과값 u 의 변화량이 반복 계산이 진행될수록 감소하는 양상으로 나타난다. ω 값을 2보다 큰 값을 사용하게 되면 반복 계산의 전진에 따라 변화량이 변화하지 않거나 더 큰 값으로 증가해 가는 경향을 나타내게 된다. 이는 수렴해를 구해야 하는 수치 계산의 본질적 속성에 만지 않는 결과라고 할 수 있다. 그러나 ω 값의 선택에 특별한 규칙이 정해져 있는 것은 아니고 일부의 경험적인 가이드라인 정도가 설정되어 있다. 이는 전적으로 모델링 수행자의 몫이라고 할 수 있다. 물론 ω 값은 0과 2사이의 범위에서 선택되어야 한다.

SOR법에는 구획 반복 계산법과 선 반복 계산법이 있다. 선 반복 계산법은 가장 간단한 구획 반복 계산법이라고 할 수 있다. 구획 반복 계산법에서는 전체 영역의 격자점을 몇 개의 격자점 소집단으로 구획하고 이 소집단들의 격자점에 해당하는 유한차분식을 전개하고 이들을 전체 영역에 해당하는 행렬식으로 만들어 소거법에 의해 수치 계산값을 얻는다. 이러한 과정에 의해 동시에 모

든 격자점의 수치해가 얻어진다. 이러한 구획 반복 계산법은 이러한 Implicit적 속성을 가지고 있으므로 Implicit 반복 계산법이라고도 한다.

SUBDAM에 적용된 반복 계산법은 SOR법 중 선 반복 계산법이다. 선 반복 계산법은 전체 격자망의 행 (Row) 혹은 열 (Column)중 하나를 격자점 소집단화의 기준으로 설정한다. 이 방법을 더욱 세밀하게 알아보기 위하여 Dirichlet 경계 조건을 가진 Laplace 방정식의 직사각형 영역에서의 5격자점 계산 방식을 생각하자. 5격자점 계산 방식을 일반화하기 위하여 격자점 간격 Δx 와 Δy 는 같은 값을 가질 수도 있고 다른 값을 가질 수도 있는 것으로 한다. 격자 중횡비를 $\beta = \Delta x / \Delta y$ 라고 하면 Gauss-Seidel법은 식(6-2)와 같이 쓸 수 있다.

$$u_{i,j}^{k+1} = \frac{u_{i+1,j}^k + u_{i-1,j}^k + \beta^2(u_{i,j+1}^k + u_{i,j-1}^{k+1})}{2(1 + \beta^2)} \quad (6-2)$$

위첨자 k 는 반복 계산 단계, i 는 열, j 는 행을 의미한다. 직사각형 영역의 맨 아래쪽 즉 첫 열에서부터 행을 따라 계산을 수행해 나간다면 수치 계산식은 식(6-3)과 같다.

$$u_{i,j}^{k+1} = \frac{u_{i+1,j}^{k+1} + u_{i-1,j}^{k+1} + \beta^2(u_{i,j+1}^k + u_{i,j-1}^{k+1})}{2(1 + \beta^2)} \quad (6-3)$$

식(6-3)을 자세히 살펴보면 경계 조건에 의해 혹은 이전 행에서의 계산에 의해 $u_{i,j-1}^{k+1}$ 은 이미 정해진 값을 가지므로 미지값은 3개로 결정된다. $u_{i,j+1}$ 값은 k 번째 반복 계산에서 얻어진 값을 사용하므로 3개의 미지값을 구하기 위하여 효율적인 Thomas 알고리즘이 사용될 수 있다. 선 반복 계산 SOR법을 이용한 수치 계산 방식은 그림 6-3에서 살펴볼 수 있다.

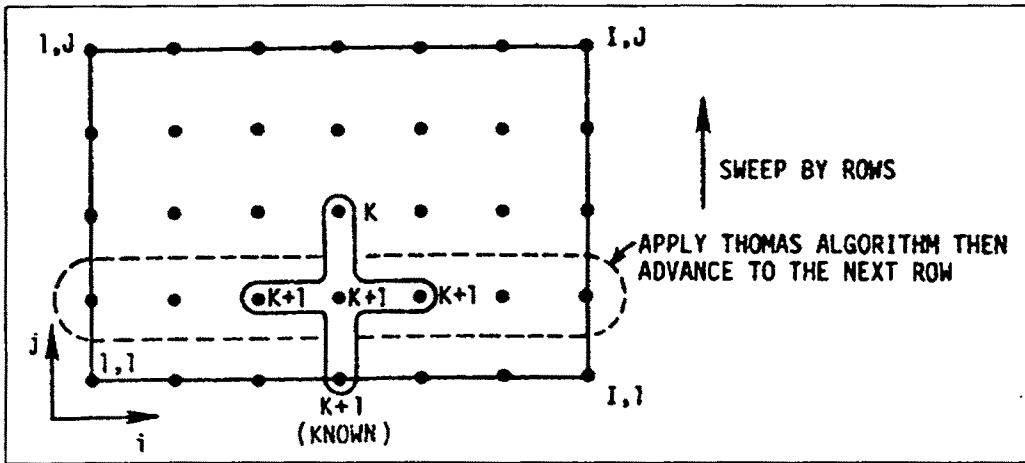


그림 6-3. 선 반복 계산 SOR법을 이용한 수치 계산법.

위에서 보는 바와 같이 선 반복 계산법은 $k+1$ 반복 계산 단계에서 $I-2$ 개의 미지값에 대하여 전개된 $I-2$ 개의 연립방정식을 푸는 문제가 된다. Successive Over Relaxation법은 다음 행으로의 수치 계산의 이동 전에 같은 방식으로 수행될 수 있다. SOR법을 적용하는 작업은 약간의 유통성이 존재한다. 먼저 각 행에 대하여 식(6-3)을 수행하기 위하여 Thomas 알고리즘이 사용된 후에 새로 계산된 값들을 식(6-1)에 의해 다음 행으로 수치 계산이 진행되기 전에 Over Relaxation하는 방법이 있다.

이와는 달리 Relaxation 변수 ω 를 전개된 유한차분식을 풀기 전에 유한차분식에 첨가시킬 수 있다. 이는 SOR법에 의한 새로운 $u_{i,j}^{k+1}$ 를 얻기 위해 식(6-3)의 우변을 식(6-1)의 우변으로 변형시키는 것에 의해 가능하다. 결과식은 식(6-4)와 같다.

$$u_{i,j}^{k+1} = (1 - \omega)u_{i,j}^k + \frac{\omega[u_{i+1,j}^{k+1} + u_{i-1,j}^{k+1} + \beta^2(u_{i,j+1}^k + u_{i,j-1}^k)]}{2(1 + \beta^2)} \quad (6-4)$$

식(6-4) 역시 Thomas 알고리즘을 이용하여 각 행에 대한 수치 계산값을 제공한다. 한 가지 주의할 사항은 식(6-4)에 Thomas 알고리즘을 이용하기 위하여 $\omega \leq (1 + \beta^2)$ 이라는 조건이 만족되는지를 확인하여야 한다.

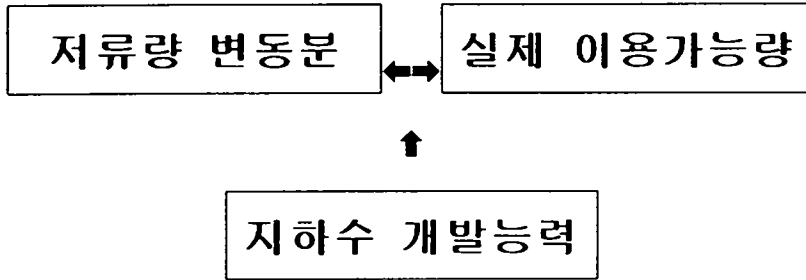
제 4 절 지하댐 구조물 경계조건의 표현

지하댐 구조물이란 지하수의 수평 흐름을 억제하는 수평흐름 방벽을 말한다. 수평흐름 방벽 경계 조건은 무흐름량 경계 조건으로 표현하였으며 이 역시 기존의 직선 형태의 표현 방식을 벗어나 자유로운 형태의 수평흐름 방벽의 모양을 모델링에 반영할 수 있도록 하였다. 간단한 수평흐름 방벽의 표현 형태는 그림 6-1에서 살펴볼 수 있다. 수평흐름 방벽의 설정 역시 IBOUND(I, J)라는 경계 조건 변수를 이용하는 것이 가능하며 그 설정값을 0으로 입력하면 된다. 설정면에서는 이전의 SUBDAM에서의 표현 방식보다 더 간단해 졌다고 볼 수 있다.

제 5 절 실제 이용가능량의 산정

수평흐름 방벽 즉 지하댐 설치 후의 지하수위 변동은 그 대수층 및 소유역에서의 유효 저류량의 변동으로 귀결된다. 저류량의 변동분은 지하수 채수정을 얼마나 효율적으로 설치하느냐에 따라서 실제 채수 및 이용가능성 여부가 판가름

난다. 저류량의 변동분을 모두 실제 이용가능량으로 만드는 것은 지하수 개발 능력 및 채수정의 설치 효율과 관련된 문제인 것이다.



실제 이용가능량의 산정에 영향을 주는 인자로는 대수층 및 소유역의 유효 면적과 대수층의 유효 공극률 혹은 (비)저류계수가 있다. 소유역의 유효 면적은 모델링을 수행하는 영역의 활성 격자셀의 면적을 의미한다. 실제로는 수평흐름 방벽의 상류부에 해당하는 유역의 면적만을 유효 면적으로 처리하여야 하며 평균 지하수위 변화량도 수평흐름 방벽의 상류부에서의 평균 지하수위 변화량을 입력 자료로 사용하여야 한다. SUBDAM에서는 부정류 상태의 모델링시 유효 저류량 변동을 계산할 때 이를 고려하였다. 다른 영향 인자인 유효 공극률은 그 정확한 값을 구하기 힘들으나 대수층의 비저류계수는 양수시험 등의 현장 수리시험을 수행하여 구할 수 있다. 자유면 대수층에서의 비저류계수는 그 대수층의 유효공극률과 같은 값으로 통상적으로 사용된다. STORAGE를 이용한 정류상태 모델링시 수평흐름 방벽 설치 전후의 유효 저류량 변동을 계산할 때와 SUBDAM을 이용하여 부정류 상태 모델링시 수평흐름 방벽 설치 전후의 유효 저류량의 시간에 따른 변동분을 계산할 때 모두 수평흐름 방벽 상류부에서의 평균 지하수위 변동량, 소유역의 유효 면적, 대수층의 유효 공극률 혹은 비저류계수를 고려하여 계산할 수 있도록 하였다.

지하댐을 소유역에 설치하는 목적은 펌수기의 지하수 함양을 증가시키는 효과를 기반으로 갈수기의 지하수 함양이 연쇄적으로 증가하는 효과를 유도하여 대수층의 유효 저류량을 증가시켜 갈수기의 물부족 현상을 해소하는 것이라고 할 수 있다. 문제의 핵심은 갈수기 즉 가뭄시에 사용가능한 지하수의 양 혹은 대수층의 유효 저류량이 얼마만큼 일 것인가 하는 것이다. 이는 SUBDAM을 이용한 소유역에서의 부정류 상태 유효 저류량 변동 모델링 결과를 통해서 예측하는 것이 가능하다. 그림 4는 95년도 시범지구인 경기도 가남지구에서 4계절에 따른 지하수 함양률이 다를 때 제한된 유역 면적에서의 유효 저류량의 변동분을 모델링한 결과이다. 입력 자료로 쓰인 유효 면적은 $500,000\text{m}^2$, 유효 공극률은 0.15이다.

아래의 그림 4의 결과에서 볼 수 있듯이 지하댐이 설치되었을 때 지하수 함양이 많은 여름철에는 저류량이 1만5천톤 가량 증가하며 지하수 함양이 적은 겨울철에는 7천톤 가량의 지하수 저류량의 증가가 있다. 이는 소유역의 제한된 면적에 대한 저류량의 증가분을 나타낸 것으로 실제 유역의 면적에 대해 모델링을 수행할 경우 저류량의 변동량은 더욱 커질 것으로 본다. 결과적으로 지하댐을 설치할 경우 여름철에는 8천톤 이상의 저류량의 증가가 더 생기고 겨울철에는 3천5백톤 가량의 저류량의 증가가 더 발생한다.

이와 같이 SUBDAM을 이용하여 지하댐이 설치된 직후부터 시작하여 연속적인 부정류 상태 모델링을 수행한다면 1년간 혹은 다년간의 지하수 저장량 변동곡선을 얻을 수 있고 이를 이용하여 원하는 시기의 지하수 저류량 증가분을 예측할 수 있다.

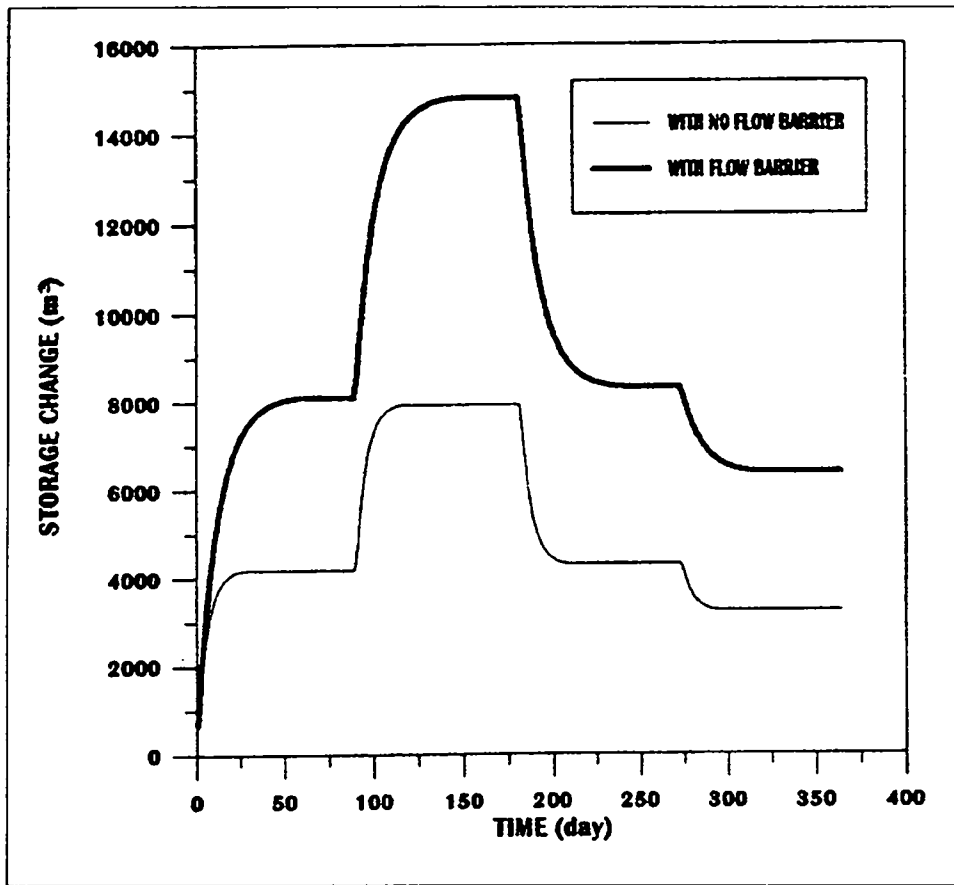


그림 6-4. 경기도 가남지구-4계절의 지하수 함양이 다른 부정류 상태 유효저류량 변동 모델링.

제 6 절 MODFLOW를 이용한 지하댐 구역의 지하수문분석

미국지질조사소에서 개발하고 Geraghty & Miller사에 의해 보완된 유사 3차원 유한차분 지하수 유동 모델인 MODFLOW를 이용하여 지하댐 소유역의 지하수문 현상을 분석할 수 있다. MODFLOW를 이용하면 정류 상태의 모델링에서 지하댐 소유역의 지하수위 변화 자료를 얻을 수 있다. MODFLOW를 이용한 부정류 상태 모델링에서 시간에 따른 유효 저류량의 변동 곡선을 얻는 것은 불가능하다. 즉 MODFLOW를 이용해서는 지하댐 소유역의 정류상태 모델링만을 수행할 수 있다. MODFLOW를 이용한 소유역 지하수문분석 모델링 과정은 그림 6-5와 같다.

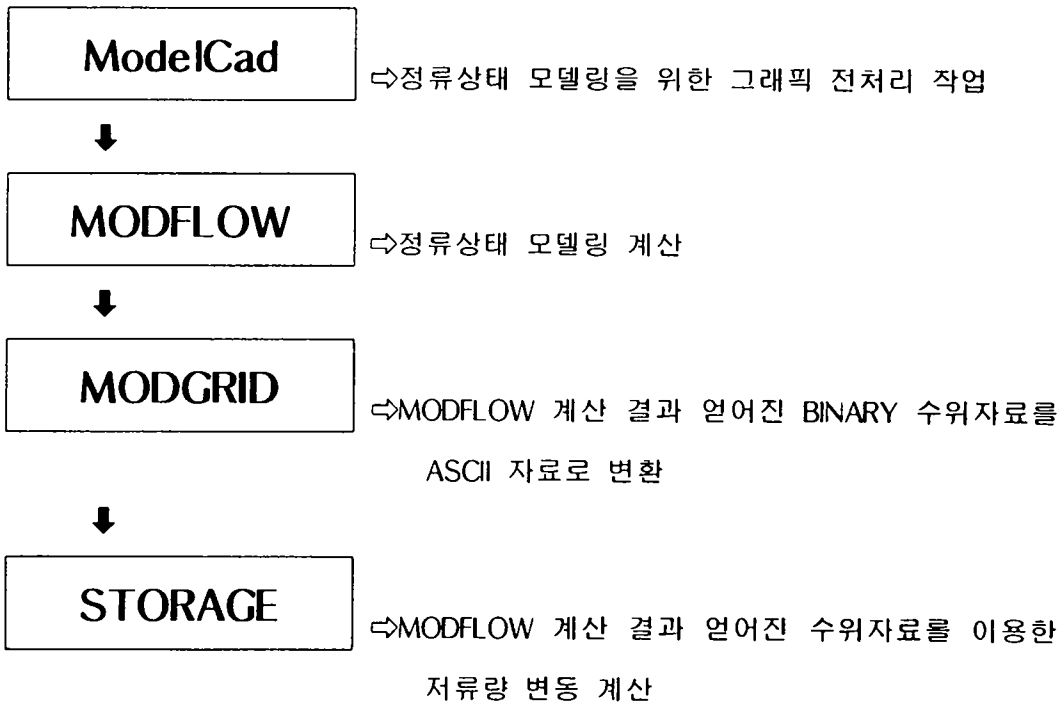


그림 6-5. MODFLOW를 이용한 소유역 지하수문분석 모델링.

위의 그림과 같이 MODFLOW를 이용한 소유역 지하수문분석 모델링의 과정은 크게 4가지의 단계를 거친다. 먼저 ModelCad를 이용하여 모델링의 전처리 작업을 수행한다. 여기서는 각종 수리상수 입력, 모델링 영역의 정의, 경계 조건의 입력, 수평흐름 방벽 경계 조건의 지정, 지하수 함양 자료의 입력 등의 과정이 수행된다. 이렇게 입력된 자료들은 MODCR386.EXE라는 프로그램을 실행하여 실제 MODFLOW의 입력 자료 파일들인 BASIC PACKAGE FILE (xxx.BAS), BLOCK CENTERED FLOW PACKAGE FILE (xxx.BCF), RECHARGE PACKAGE FILE (xxx.RCH), HORIZONTAL FLOW BARRIER PACKAGE FILE (xxx.HFB), OUTPUT CONTROL PACKAGE FILE (xxx.OC), STRONGLY IMPLICIT PROCEDURE PACKAGE FILE (xxx.SIP) 등으로 재구성한다. MODFLOW에 이들 입력 파일들을 입력하여 모델링을 수행한다. 계산 결과는 xxx.HDS라는 BINARY 형식의 지하수위 계산 파일이 만들어진다. 이를 MODGRID.EXE라는 프로그램을 이용하여 ASCII 형식의 파일 (xxx.DAT)로 변환시킨다. 이렇게 만들어진 지하댐 설치 전의 수위 자료 파일과 지하댐 설치 후의 수위 자료 파일을 STORAGE에 입력시켜 지하댐 설치 전 후의 지하수 유효 저류량의 변동량을 추정한다.

MODFLOW를 이용하여 소유역 지하수문분석 모델링을 수행하였다. 모델링에 사용한 임의의 입력자료들은 다음과 같다.

수리전도도 : 1.0×10^{-5} m/sec

지하수 함양률 : 1.0×10^{-12} m/sec

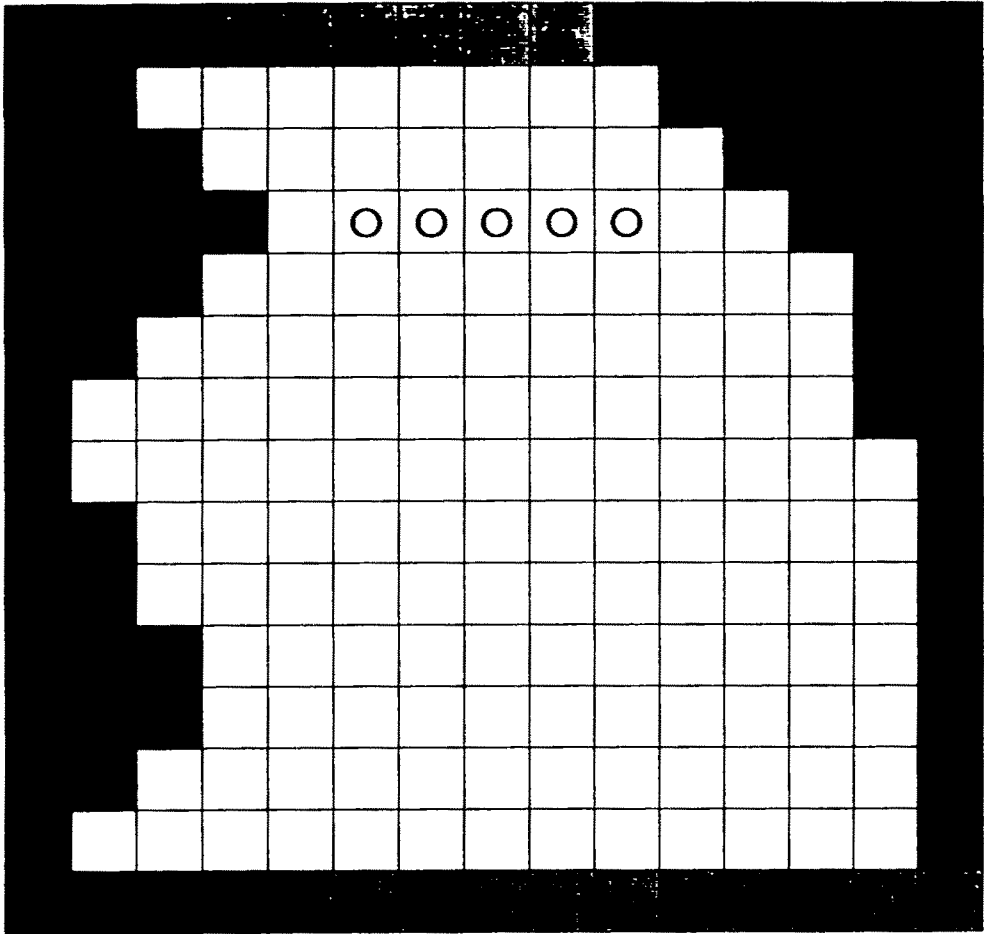
상류부 정수위 경계 조건 : 10 m

하류부 정수위 경계 조건 : 5 m

수평흐름 방벽 두께 : 1 m

수평흐름 방벽의 수리전도도 : 1.0×10^{-9} m/sec

그림 6-6은 MODFLOW 모델링을 위해 ModelCad를 사용하여 구성된 격자망을 나타낸다. 흑색으로 채워진 격자셀은 비활성 격자셀 혹은 무흐름량 경계 조건을 의미하며 회색을 칠한 경계 조건은 정수위 경계 조건을 의미한다. 원형이 그려진 격자셀은 수평흐름 방벽을 의미하는 경계조건을 나타낸다. 그림 6-7은 수평흐름 방벽을 설치하지 않았을 때의 정류 상태의 수위 분포를 나타낸다. 그림 6-8은 수평흐름 방벽을 설치하였을 때의 정류 상태의 수위 분포를 나타낸다.







-  : 비활성 격자셀 혹은 무흐름량 경계
-  : 정수위 경계
-  : 활성 격자셀
-  : 수평흐름 방벽 경계

그림 6-6 ModelCad를 이용하여 구성한 MODFLOW 계산용 격자망.

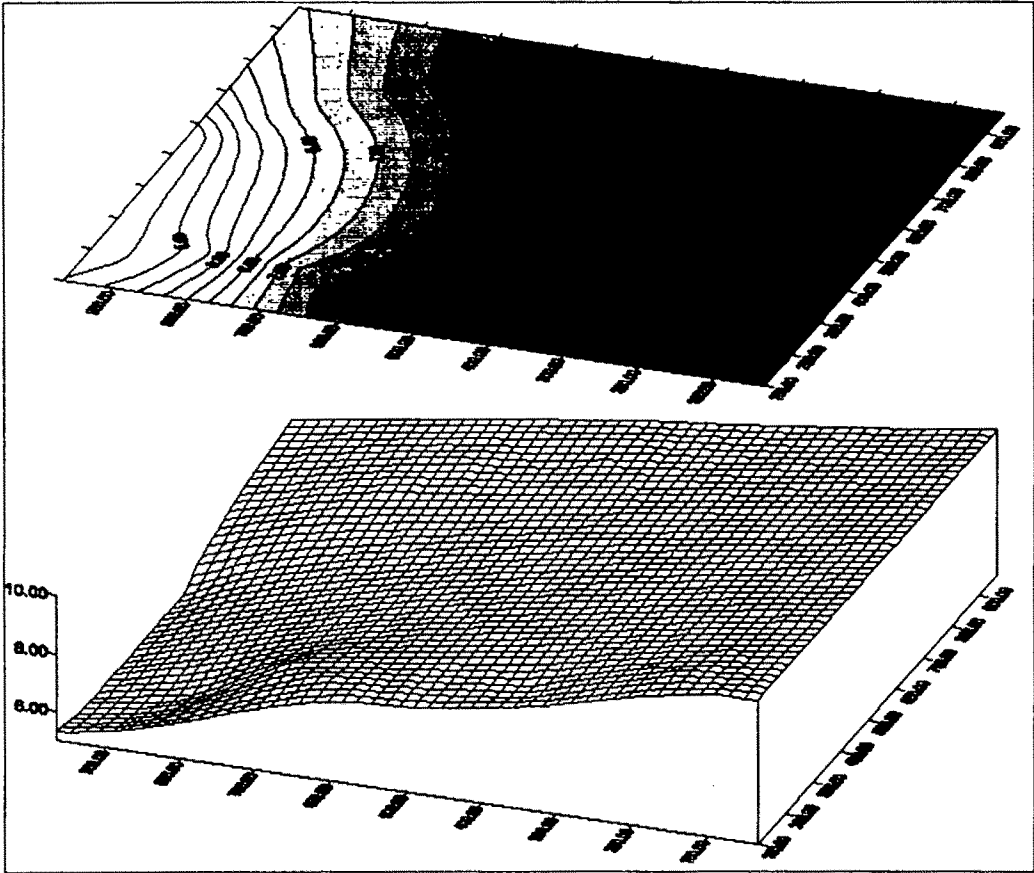


그림 6-7. MODFLOW를 이용한 지하댐이 설치되지 않은 소유역에서의 정류 상태 모델링 결과.

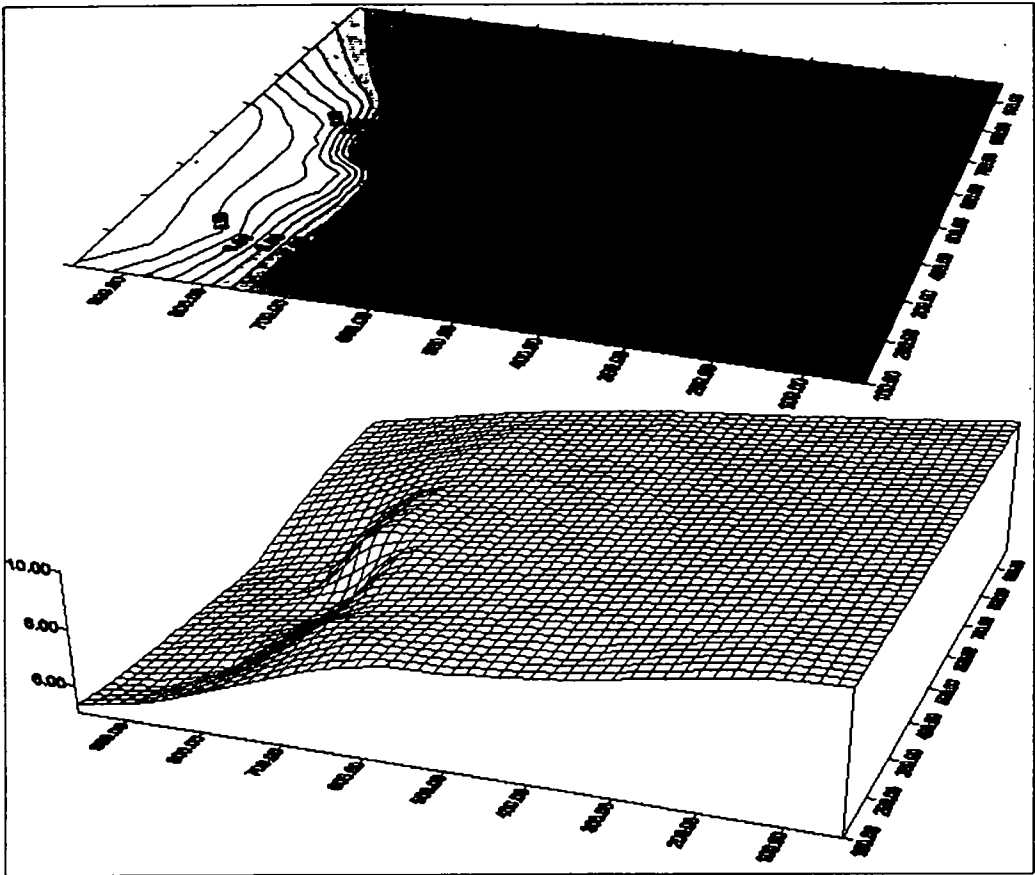


그림 6-8. MODFLOW를 이용한 지하댐이 설치된 소유역에서의 정류상태 모델링 결과.

제 7 장 시범지구 조사

제 1 절 조사 개요

1. 목 적

소유역 지하댐 개발에 관한 연구 사례지구로서 시범지구를 선정하고 지하수 조사와 수문조사를 시행하므로써 지하댐 조사설계에 필요한 제반자료를 수집 분석코자 한다. 본 연구과제의 세부과제로 시행된 지하수 수문분석 모델연구 결과를 적용하여 지하댐 설계시 지하수 함양량과 이용가능량을 추정하기 위하여는 우선 사례지구에서 적용할 자료를 확보할 필요가 있다.

2. 시범조사지구의 선정

지하댐 조사설계 사례지구로서 기 시설된 5개지구와 신규 후보지구 5개지구를 포함하여 10개 지구를 본 연구 계획기간내에 조사할 계획이었으나 연구기간 조정등 불가피한 사유로 일부지역 일부공종에 대하여서만 조사를 시행하였다.

기 시설지구 내역은 제 3장에서 설명한 바와 같으며 이들 지구에 대한 지하수조사는 기히 시행되었으나 지하수 저류량평가등에 대한 설계내용을 재 검토하고 문제점등을 분석하여 제 4장 제 2절에 수록하였다.

추가 5개지구의 지구선정은 총적대수층 발달이 양호하고 유역조건이 유리한 지구를 선정하기 위하여 농어촌진흥공사에서 수맥조사를 시행한 결과 방사상집수정 개발 가능지구로 제시된 83개 지구에 대하여 도상검토를 시행하고 지역별 특성을 고려하여 가뭄 우심지역인 전북, 전남, 경북, 경남 지역에 17개 지구와 경기도에 1개지구를 시범조사 후보지구로 선정하였는 바 그 내역은 표 7-1과 같다.

표 7-1 소유역 지하댐 시범조사 후보지역 내역

도 별	수맥조사 지구명	조사 년도	위치			조사 면적 ha	개발가능 면적 ha	도폭명 1/25,000	비 고
			군	면	리				
경 기	가남	82	여주	가남	양귀	280		여주	
전 북	부절	83	남원	산동	부절	160	150	남원	요천 증류부
	대산	"	"	대산	대산	140	106	정송	
전 남	용능	83	승주	낙안	용능	120	28	남내 별교 석현	'82조사 신기지구 포함
	대곡	84	담양	금성	대곡	60	53		
	운평	"	승주	서	운평	125	65	괴목 순천 신평	해안지역 지하댐 후보지
	가장	86	승주	울촌	가장			지산	"
	길은		진도	지산	길은			별교	"
경 북	신기	82	보성	별교	신기				"
	대본	83	월성	양북	용능	130	66	어일 하서	"
	망천	85	영일	의창	망천	97	97	포항 환호	남송지구인접
	중왕	86	금릉	어모	중왕	130	100	개령	인접 병목지구
경 남	다남	87	"	어모	다남	120	90	"	
	수곡	82	진양	수곡	대천	100	50	대평	수맥조사시범지구 82담안지구 82고모지구
	하평	86	김해	진례	송현	60	23	부림 무계 입실	
	천곡	87	울주	농소	천곡	30	30		
	방하		거제	둔덕	방하			거제	해안지역 지하댐 후보지
	서상		남해	서면	서상		서상	"	

조사 후보지구 중에서 경기도에 1지구를 우선적으로 선정하였는데 이것은 물리탐사에 의한 대수층해석 모델 개발과 소유역 지하수문분석 모델개발을 위한 협동연구과제 수행을 위하여 가까운 지역을 택한 것이며, 기타지역은 현장답사를 시행하여 각 도별로 대표적으로 1개 지구씩을 선정하였으며 계 5개 지구에 대한 신규 조사를 시행하므로써 본 연구의 사례지구 자료로 사용키로 하였다. 시범조사지구 선정 내역은 표 7-2와 같다.

표 7-2 소유역 지하담연구 시범조사지구 내역

지구명	위 치			유역면적 (ha)	총적층면적 (ha)	수 맥 조 사 현 황		
	도	군	면			조사년도	지구명	조사면적
가남	경기	여주	가남	4,300	500	'83	가남1,2	280 ha
대산	전북	남원	대산	1,800	770	'84	대 산	140
낙안	전남	송주	낙안	7,500	1,600	'83	용농·신기	150
어모	경북	금릉	어모	4,600	880	'87	중왕·다남	250
농소	경남	울주	농소	9,500	550	'87	천 남	30

3. 조사내용

시범지구에 대한 조사내용은 지하수 부존상태조사, 지하수문 관측조사, 지하수 모델링 분석등으로 구분할 수 있는데 시범조사지구로 선정된 가남 외 4개지구의 지구별 조사내용은 연구목적에 따라서 그 내용을 달리하고 있다.

가. 물리탐사에 의한 대수층 해석

경기도 여주군 가남지구는 협동연구를 위하여 선정된 지구인데 가남1지구의 '82 수맥조사 자료 중 전기탐사 측정별 비저항곡선을 digitizing하여 심도별 겹보기 비저항값을 구하고 이것을 수직탐사 비저항자료 해석 프로그램 ESII에 입력하여 지층별 고유 비저항값을 해석하였다. 이렇게 재 해석된 지층별 비저항값과 대수층 양수시험에서 얻어진 대수층 투수성 상수를 비교 분석하므로써 이 지구에서의 지층 비저항과 투수량계수 관계공식을 유도하였다.(제 5장 참조)

나. 지하수 부존조사

전북 대산지구, 전남 낙안지구, 경북 어모지구, 경남 농소지구등 4개 지구는 표 7-2에서 보는 바와 같이 유역내의 일부 구역에서만 수맥조사가 되었으므로 지하담 후보지구로서 유역내의 전 대수층에 대한 지하수 부존조사가 필요하였다. 이 4개 지구의 지하수조사 개요와 내용은 다음 절에 기술되었으나, 조사 세부내용과 조사자료 및 수맥도 작성도면은 향후 이 지역의 지하수 이용에 참고할 수 있도록 별책으로 엮어서 "지하담 후보지구 지하수조사 보고서"로 작성하였다.

다. 지하수 수문관측조사

시범조사지구 중 경기도 가남지구(가남1)와 전북 대산지구를 선정하여 지표수와 지하수의 수문관측조사를 시행하였다. 조사내용은 강우량, 증발산량의 자료 수집과 하천 유출량 조사, 지하수위 변동조사인데 자동 수위관측을 위하여 각 지구에서 하천에 1개소, 지하수 관측공 2개소씩 자기수위계(自記水位計)를 설치하여 연속적인 수위관측을 시행하였다.

한편 지하수위 강하곡선 해석 사례지구인 경북 김천시 어모지구내 중왕리지

역의 관계하천인 아천(牙川)의 중상류 부근에서 기저유출량 변동조사를 시행하여 기저유출 감쇠상수를 구하고 지하수위강하곡선 해석에 의한 지하수함양율과의 관계를 검토하였다.

라. 소유역 지하수문분석 모델링

경기도 여주군 가남2지구는 지하수 수문분석모델 시험적용 사례지구로서 모델 입력자료는 “83 수맥조사자료(지하수위, 대수층두께, 투수량계수 등)를 초기자료로 사용하여 steady state를 구하고 본 연구기간중의 수위를 측정하여 transient state를 해석하는 지하수 유동모델링을 시행하였다.

제 2 절 지하수 조사

1. 조사방법

지하댐 조사·설계를 위하여는 소유역내 전체 대수층의 지하수 부존상태를 파악하여야 하나 표 7-2에서와 같이 사례지구의 지하수 조사는 유역내 총적층 면적 중 일부구역에만 조사되어 있다.

이번 조사에서는 유역내 전체 대수층을 대상으로 부족 자료를 보완하도록 계획하였으나 총적층 전 면적에 대한 조사는 조사량이 너무 많고 조사기간이 부족하므로 지하댐 설치시의 영향범위를 고려하여 조사대상 면적을 정하고 그 중에서 기왕에 수맥조사를 시행한 구역을 제외한 면적을 대상으로 조사계획을 수립하였다.

지구별 조사대상 면적은 표 7-3과 같다.

표 7-3 시범조사 지구별 조사대상 면적

지 구 명	총적층면적	조사대상면적	기조사면적	금회조사면적	비 고
	ha	ha	ha	ha	
가남	500	300	280	-	조사부족면적 은 현지 답사 및 수위 관측 조사로 보완
대산	770	250	140	90	
낙안	1,600	300	150	150	
어모	800	350	250	90	
농소	550	150	30	90	
계	4,220	1,350	850	420	

조사방법은 수맥조사사업의 조사기준과 조사방법을 채택하였는데 지구별 조사공정과 조사잡업량은 표 7-4과 같으며, 조사공정별 조사방법을 약술하면 다음과 같다.

1) 지표지질조사 : 조사대상 면적의 2배 면적을 기준으로 하여 조사구역 주위의 지질분포와 구조, 조사구역내의 하상퇴적물조사, 기설우물의 분포와 이용 현황등을 조사함.

2) 기설관정조사 : 기설우물중에서 채수량 확인을 요하는 위치를 선정하여 양수시험을 시행하고 지하수 부존과 관련된 수리지질자료 수집.

3) 전탐조사 : 전기비저항 수직탐사를 축선간격 150~300m 축점간격 50~200m 범위로 축점 배열을 하여 시행하고 총적층 대상조사는 Wenner 배열로 축심 50m를 기준으로 함.

4) 수위관측공조사 : 조사지구내 수위등고선을 작성할 수 있도록 기설우물을 포함하여 grid식으로 조사지점을 배치하고 오거보링기로 지하수위면 이하로 굴

착하여 지하수 함양이 동일한 상태에서 일제히 수위를 관측하므로서 지하수의 유향을 조사함.

5) 시추조사 : 기 시행한 지표지질조사, 기설관정조사, 전탐조사 자료를 근거로 지구내 지하지질, 대수층구조, 기반암선 등을 확인할 수 있는 위치를 선정하고 시추공을 굴착함. 시추공내에 $\phi 2\sim 3$ 인치 PVC 유공관을 삽입하고 에어써징 및 간이양수시험과 Slug test를 실시하여 개략적인 대수층 성질을 파악함.

6) 착정조사 : 대수층의 지하수 부존상태와 이용가능량을 파악하기 위하여 적정위치를 선정하여 구경 $\phi 14$ 인치로 굴착하고 $\phi 8$ 인치 PVC 우물자재를 설치하여 양수시험을 시행함.

7) 토목조사 : 조사구역내의 제조사 위치에 대한 고저측량을 실시하여 수위 및 기반암 등고선을 작도할 자료를 제공함.

표 7-4 소유역 지하담 연구 시범조사지구 조사작업량

조사공종	단위	지구별 작업량						수맥조사 기준작업량 (30ha당)
		가남	대산	낙안	어모	농소	계	
조사면적	ha		90	150	90	90	420	
지표지질조사	ha		180	300	180	180	840	60
기설관정관측	공		24		28	15	67	3
수위관측공조사	공	32	43	70	53	42	240	14
전탐조사	점		62	100	62	60	284	20
시추조사	공		6		7		13	2
착정조사	공		3		3		6	1
토목조사	ha		90		90		180	30

2. 지구별 조사결과

가. 가남지구

1) 지구개요

가남(加南)지구는 경기도 여주군 가남면 심석리·태평리·삼군리·신해리·오산리·하귀리·양귀리 일대 (북위 37° 12' ~37° 15' , 동경 127° 30')에 위치하며, 대체적으로 낮은 구릉지와 하천주변에 넓게 발달한 하상충적층 평야부이다. 본 지구의 남쪽 설성면에서 발원하여 가남면, 능서면을 거쳐 남한강에 유입되는 양화천(陽花川)이 본 지구를 남북으로 관통하고 있고 본 지구의 북부 삼군리에서 지류인 안금천(安金川)과 "Y"자형으로 합류되는데 양화천 유역은 '82년(가남 1지구)에, 안금천 유역은 '83년(가남 2지구)에 각각 수맥조사를 시행한 바 있다. 양화천은 연장 약 30km 하폭 50m 로 상시 유폭은 50m이나 전기에는 5m 이내로 줄어들고 소하천인 안금천은 연장 4.5km 하폭 50m로 전기에는 건천으로 변한다. 하천 경사는 양화천이 1.5/1000, 안금천이 2.5/1000 정도로 유역 면적은 4,300ha 정도이다.

2) 지하수 부존상태

본 지구의 분포지질은 쥘라기의 흑운모화강암이 전반적으로 분포되어 있고 이의 풍화물질로 퇴적된 충적층은 분급이 양호한 모래가 주 구성물로 지하수 저류에 양호한 조건을 갖추고 있다. '82~'83년에 이 지역에 280ha의 충적층을 대상으로 지하수 조사를 시행하였는데 조사작업량은 다음과 같다.(같다.)

조 사 공 정	단 위	가남 1 (양화천)	가남 2 (안금천)	계
지표지질조사	ha	300	260	550
기설관정조사	공	16	5	21
전기탐사	점	83	71	154
수위관측조사	점	82	70	152
시추조사	공	10	8	18
착정조사	공	6	5	11
토목조사	ha	150	130	280

가남1지역의 전기탐사와 시추조사 결과는 총적층 평균심도 5.5m 중 사층의 평균 두께가 2~3m 를 보여주며 착정 및 양수시험 결과 우물 양수량은 공당 500~1,000m³/day, 평균 투수량 계수는 743m³/day 로서 양호한 대수층을 나타내고 있다. 양화천 상류부인 심석리 남단에서 지구 북단부까지 직선거리 3.7km 구간에서 지하수위는 약 8m의 수두차를 가지며 동수경사는 약 2/1,000정도이었다.

안금천 유역인 가남2지역은 총적층 평균심도 5.8m, 주대수층인 사층 두께는 3m이상으로 양호하고 착정 및 양수시험 결과 공당 평균 양수량 1,056m³/day 로 양화천 지역보다 양호하였다.

본 조사지역은 하천보와 소형관정등 불안전 수리시설로 관개하고 있어 가뭄에 대비한 항구적인 수리시설이 없으나 지하수 부존상태가 양호하므로 본 지구 북부의 양화천과 안금천 합류지점 하류부에 물막이벽을 설치할 경우 지하수 이용증가를 가져올 수 있다.

3) 조사내용

본 지구는 수맥조사가 완료되어 조사자료가 충분히 집적되어 있어 추가 면적에 대한 지하수 조사는 시행하지 않았으나 본 연구의 협동연구과제로 서울대학교 자연과학종합연구소 연구팀이 수행한 "물리탐사에 의한 대수층 해석모델 연구"와 "소유역 지하수문 분석 모델연구"의 사례지구로 조사하였다. 물리탐사에 의한 대수층해석에는 가남1지구 조사자료를 적용하였고(그림 5-5참조), 소유역 지하수문 분석모델 연구에는 가남2지구 조사자료를 입력자료로 사용하였다(그림 7-14참조). 지하수문 분석 모델에 적용할 자료는 최근 수위자료를 이용할 필요가 있기 때문에 '95년 9월중 지하수위 관측조사를 시행하였으며 기설 우물에서 Slug Test를 시행하여 대수층 수리전도도를 구하였다.(제 4절 참조)

나. 대산지구

1) 지구개요

대산(大山)지구는 전라북도 남원군 대산면 운교리 신계리 금성리 수덕리에 걸쳐있는 남원시에서 북서부로 10km지점에 위치한 지구이다. 지구의 수계는 옥률천(玉栗川)이 수지상으로 된 소수계를 합류하여 남쪽으로 흐르면서 본 지구 중앙으로 관류한 후 삼천(蓼川)과 합류되며 하천 연장은 약 18km, 유역은 1,800ha, 하천경사는 1/200 정도, 하폭은 20~80m로 건기에는 일부 하상이 건천화 된다. 충적층 두께는 2~8m로 추정되고 분포지질인 대보화강암의 풍화생성물인 모래 및 사력으로 구성되어 있다.

본 지구는 '84년중에 지구 북부지역 140ha에 대하여 수맥조사가 되어있으나 하류부인 남쪽에 대수층 발달이 좋을 것으로 보아 유역의 유출부에 해당하는 정송교 지점을 지하담 위치로 예정하고 지하수조사를 추가 시행하였다.

2) 조사내용

본 지구의 지하수 추가조사는 '95. 8. 31~9. 27 기간중 대수층 면적 90ha를 대상으로 수맥조사 전 과정을 조사하였으며 조사작업량은 표 7-4와 같다.

전기탐사 결과 표토층 평균두께는 1.2m, 비저항 값은 196 ohm-m이고, 제 2층은 주 대수층으로 평균 7m의 두께를 보이며 평균 비저항 값은 139 ohm-m이었으며, 제 3층은 풍화대로서 평균 비저항 값은 396 ohm-m로 나타났다.

시추조사결과 본 지구의 총적층 평균 심도는 7m 내외로 나타났고 토사 2.0m, 모래 2.9m, 사력층 1.4m, 사력혼전석층 0.75m, 풍화대 3.3m로 구성되어 있다.

착정 및 양수시험 3공을 시행한 결과 W-1, W-3 공은 양수량 900m³/day 내외를 보여 대수층이 양호하였으나 W-2공은 실트질의 협재로 투수성이 불량한 것으로 나타났다.

3) 지하수 부존상태

조사결과를 종합하면 본 지역의 평균 총적층 두께는 6.4m이고 주대수층은 모래, 사력, 혼전석으로 구성되어 있으며 일부지역 (W-2공 주변)을 제외하고 평균 양수량 920 m³/day의 판정개발이 가능한 좋은 대수층을 형성하고 있다.

따라서 방사상 집수정 개발도 가능할 것이며 물막이 벽을 설치할 경우 효과가 있을 것으로 판단된다.

본 지구의 조사위치와 시추 및 착정조사 주상도 및 수리지질도 등은 별책으로 지하담개발 후보지구 지하수조사 보고서에 수록하였다.

다. 낙안지구

1) 지구개요

낙안(樂安)지구는 전라남도 순천시 낙안면 용능리, 신기리, 남내리, 옥산리, 평촌리, 이곡리 일대와 보성군 벌교읍 지동리, 낙정리, 고읍리 일대의 평야부이다. 전체 총정충 면적은 1,600ha로서 광활한 평야이나, '82년 신기리 지역에 58ha, '83년 용능리 지역에 120ha 등 지구 가장자리 구역만 수맥조사를 시행한 바 있다.

본 지역의 특징은 수지상의 수많은 소수계를 합류하여 벌교천(伐交川)을 이루어 남류하다가 벌교읍 북단에 이르러 병목처럼 유출구가 좁아지면서 순천만으로 유입되는 것이다. 이 협곡부의 폭은 약 500m 되는데 하천은 폭 60m 이고 갈수량이 많아서 이 지점에 보를 설치하여 하류부의 보성농지 개량조합 관개답 75ha를 몽리하고 있다. 이 천연적인 지하저류지에 지하물막이 벽을 시공한다면 그 효과가 클 것으로 추정되므로 이번에 시범조사지구로 선정하여 유역 전체의 지하수 부존조사를 시행하였다.

2) 조사내용

본 지구의 분포지질은 반상편마암으로서 풍화가 심하여 노두를 관찰할 수 없을 정도이다. 총적층퇴적물은 세립내지 중립질 모래가 주 성분이며 기초사된 지역의 대수층 투수량계수는 40~70m³/day 로서 좋은 대수층이라고 할 수는 없으나 이는 변두리 지역이었으므로 구하상에 해당되는 지구 중앙부를 조사하여 유역 전체의 지하수 저류를 조사하고자 하였다. 그러나 1차년도 사업비 범위내에서 150ha에 대한 전기탐사와 지하수위 관측조사만을 시행하였는데 전탐 조사 결과는 대수층 평균 두께가 6m 정도로서 금후 시추 및 착정조사와 양수 시험등 대수층조사를 추가 시행하여 대수층의 저류능력을 파악할 필요가 있다. 본 지구의 세부 조사내용은 별책의 지하담개발 후보지구 지하수조사 보고서에

수록하였다.

라. 어모지구

1) 지구개요

어모(禦侮)지구는 경상북도 김천시 북동쪽으로 7km 떨어진 어모면 중왕리, 다남리, 은림리 지역의 하안 평야이다. 수계는 어모면 북서부에서 발원하는 아천(牙川)이 남서쪽으로 약 10km를 흘러 본 역을 관류하며 하폭은 80m 유폭은 20m 정도이나 갈수기에는 건천이 된다. 아천 북부의 중왕지구 130ha는 '86년에 수맥조사를 완료하였고 아천 남쪽의 다남지구 120ha는 '87년에 조사되었다.

이 아천의 양안에 발달된 충적 평야는 조립질 모래와 자갈등으로 된 양호한 대수층을 갖고 있어 지하수를 본 지구의 농업용수 주수원으로 공급하고 있다.

아천은 본 지구를 관통하여 감천으로 유입하는데 지구 유출부에 해당하는 다남리와 덕촌리 접경에서 병목으로 좁아져서 이 지점에 지하댐 설치를 검토코자 하는바, 지하댐 유역중 지구 북쪽의 본리천 소수계 유역에 대한 검토가 필요하여 이번에 은림리(隱林里)지역 90ha를 대상으로 지하수 조사를 시행하였다.

2) 조사내용

은림리 북쪽에서 남쪽으로 사행하여 흐르는 본리천은 하폭이 30m 정도이고 하천수량고 풍부하지 못하다. 본 지구 분포지질은 변성기원인 김천화강암체에 속하며 이의 풍화퇴적물은 실트, 모래, 자갈 등이 주 구성물질이다.

본 지역에서 62점의 전탐조사를 시행한 결과 충적층두께는 평균 8.4m, 이중 대수층으로 보이는 제 2층은 평균 7.8m의 두께에 평균 비저항 값은 88 ohm-m로 해석되었다.

시추조사 결과 지층의 평균 구성은 토사 및 실트 3.1m, 모래 2.3m, 사력 0.2m 사력혼진석층 0.2m를 보여주었다.

3) 지하수 부존상태

은림리 지역은 중왕리, 다남리, 지역에 비하여 지하수 부존상태가 불리한 것으로 조사되었는데 이는 유역이 상대적으로 적고 대수층이 상대적으로 빈약한 데다 실트 및 점토질이 협재되어 있기 때문이라고 판단된다.

그러나 본리천에서 250~300m 떨어져 분포하는 구하상대에서는 소형관정이 다수 이용되고 있어 지하담 저류량 검토시 이를 감안하여야 될것이다.

본 지구의 금회 지하수 조사구역과 시추·착정조사 주상등 세부 조사내용은 별책으로 지하담개발 후보지구 지하수조사 보고서에 수록하여 놓았다.

마. 농소지구

1) 지구개요

본 농소(農所)지구는 경상남도 울산시 울주군 농소면 중산리, 신천리, 천곡리 일대의 하안평야로서 울산만에서 북쪽으로 12km 지역에 위치하고 있다. 수계는 경북 경주시 지역에서 발원하여 남류하는 동천(東川)이 본 지구를 관류하며 울산시로 흘러가는데 하폭은 150m 내외이고 10,000ha 이상의 광활한 유역을 갖고 있다.

본 지구의 남서쪽인 천곡리 지역에서 '87년에 30ha를 대상으로 수맥조사한 결과 총적층 심도가 평균 8.5m이고, 대수층 투수량계수는 100m³/day, 관정 양수량은 1,500m³/day 를 보여 양호한 대수층을 확인한 바 있다.

동천의 하류부에서 소지류인 신천천과 합류되는 지점에서 유역의 유출부가 좁아지는 병목을 이루고 있어 지하담 설치에 적합하다고 판단된다.

2) 조사내용

본 지구의 분포지질은 중생대 퇴적암류인 신라통의 울산층이 분포하나 지구 동측의 중산리 지역은 불국사통 화강암이 관입되어 있다. 본 지역 동천 우안평

야 90ha에 대하여 전기탐사와 수위관측조사를 시행하였는데 전탐조사결과 표토층 비저항 값이 275 ohm-m, 제 2층은 충적층으로 심도 0.7~17m에서 비저항값이 144 ohm-m로 해석되었는데 충적층 두께는 풍화암을 포함한 것으로 보이므로 향후 시추조사를 시행하여 확인할 필요가 있다. 지하수위 등고선을 작도한 결과 수위경사는 지표경사와 비슷하고 하천 유향과 같은 방향으로 나타났다.

본 지구는 지형적인 여건과 충분한 대수층 두께로 보아 지하댐 설치 적지로 볼 수 있으나 근년에 울산시 도시개발이 확장되면서 본 지구내까지 아파트 단지가 들어서고 공단이 조성되는 등 지하수 환경오염원이 증가되어가고 있으므로 지하댐 설치시는 오염방지 대책을 같이 검토하여야 할 것이다.

본 지구의 지하수조사 결과 세부내용은 별책으로 지하댐개발 후보지구 지하수조사 보고서에 수록하여 놓았다.

제 3 절 지하수 수문조사

1. 조사내용

가. 조사목적

본 연구과제의 1차년도 연구결과 지하수위 강하곡선해석에 의한 대수층 특성 검토 방법을 제안하였는바 그 주 내용은 지하수함양율과 대수층 저류계수(비산출율)를 산정하는 것이며 이것은 지하댐의 저류량과 이용량 산정에 중요한 항목이 된다.

지하수위 강하곡선 해석방법의 이론에 대하여는 제2장 제4절에 기술하였지만 그 결과적인 공식을 다시 쓰면 다음과 같이 요약된다.

$$s = s_m(1 - e^{-\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{t}{T}}) \text{----- (7-1)}$$

$$s_m = \frac{P_1}{S_y} \cdot \alpha, \quad \frac{1}{\alpha} = b \cdot T$$

여기서 s : 지하수위강하량

s_m : 최대 지하수위강하량

P_1 : 갈수기전의 월강우량

S_y : 대수층 비산출율

α : 지하수 자연함양율

t : 무강우 경과기간

T : 지하수위강하량이 0에서 s_m 에 이르는 경과기간

b : 기저유출량 공식에서의 감쇠상수 ($Q = Q_0 e^{-bt}$)

이 관계식은 대수층면적에 내린 월강우량과 무강우기간 동안의 기저유출량 사이에 $A \cdot P_1 \approx Q_0 \cdot T$ 의 관계가 성립하는 것을 가정하여 $\frac{1}{\alpha} = b \cdot T$ 를 유

도한 것이므로 이러한 가정이 성립함을 입증하기 위하여는 대수층의 지하수위 강하곡선 해석에 의하여 구한 α 값과 관계하천의 기저유출 측정에 의하여 구한 b 값 사이에 위의 관계식이 성립하는가를 검증할 필요가 있다.

나. 조사방법 및 조사내용

위의 조사목적에 따라 2개 지구를 선정하여 지하수위 장기 관측조사와 하천 유출량 조사를 시행하였다. 대상지구는 경기도 가남지구와 전북 대산지구이며 각각 하천에 1개소와 인근 대수층에 있는 관측우물 2개소에 자기수위계를 설치하여 '96년 6월부터 10월까지 하천수위와 지하수위 변동을 관측조사하였다.

또한 이기간 동안 월 2회씩 하천의 유량을 측정하였으며 비관개기인 9월과 10월에는 갈수기 기저유출 조사를 시행하였다.

그림 7-1과 그림 7-2는 가남지구와 대산지구의 조사위치를 보여준다. 하천 유출량조사는 유속계법을 이용하였는데 하천의 유폭이 5m 정도인 점을 감안하여 유폭을 5등분하고 소구역별 유수단면과 평균유속(V_{60})을 구하여 유량을 계산하였다.

한편 1차년도 지하수위 변동곡선 해석 사례지구인 경북 어모(중왕리)에서도 하천 기저유출량 조사를 시행하고 유출 감쇠상수를 구하였다.

지구별 조사내용을 요약하면 다음과 같다.

지구명	관 측 위 치				수위관측점		유량측정 지점	조사기간
	도	군	면	리	하천	관측우물		
가남	경기	여주	가남	삼군	개소 1	개소 2	개소 1	6월 ~ 10월 " 10월 중
대산	전북	남원	대산	수덕	1	2	1	
어모	경북	김천	어모	중왕	-	-	1	

참고로 조사에 사용된 조사기기의 사양을 소개하면 다음과 같다.

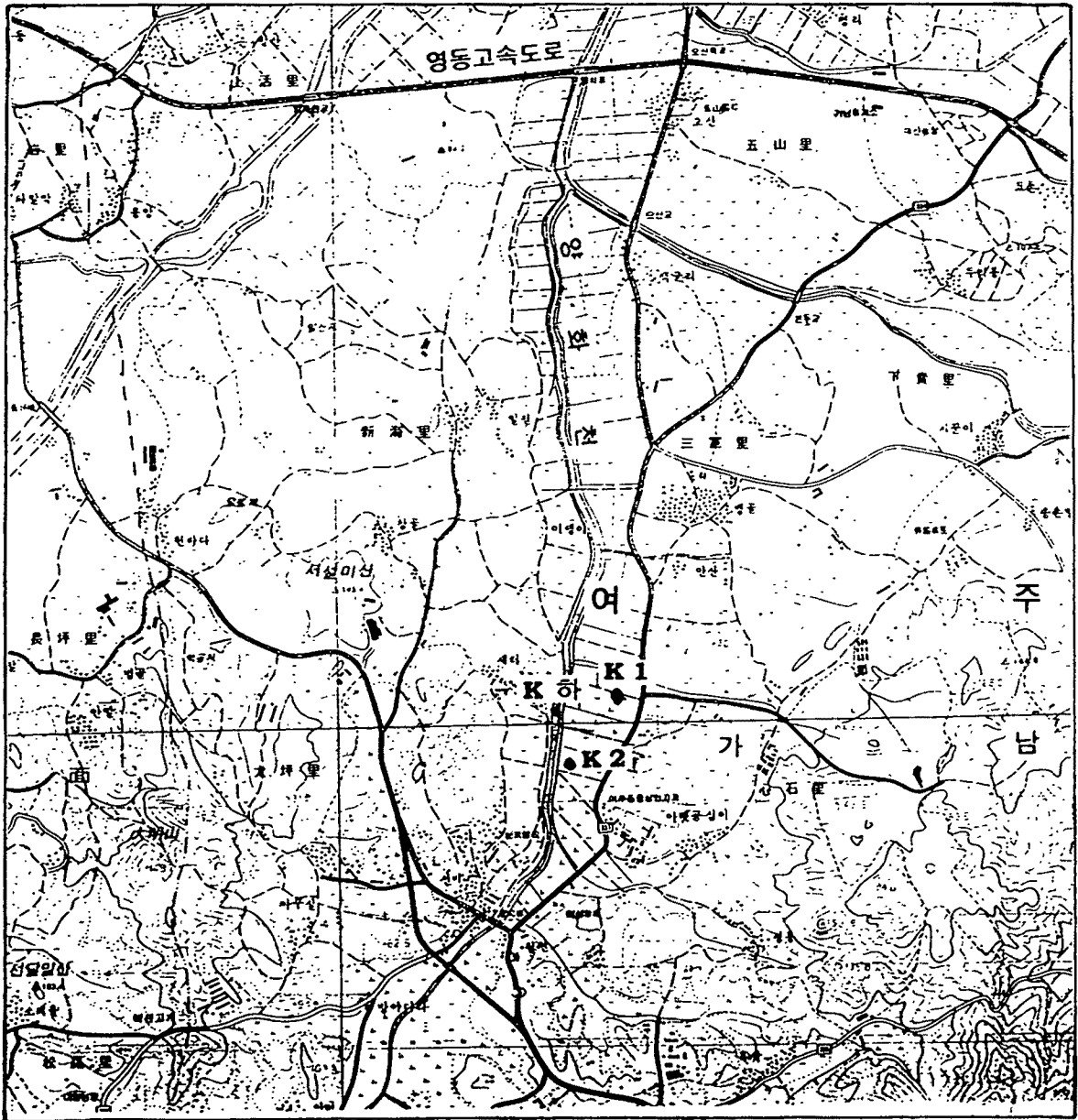


그림 7-1. 가남지구 지하수문조사 위치도

K₁, K₂ : 지하수위 관측공

K하 : 양화천 수위 및 유출 관측점

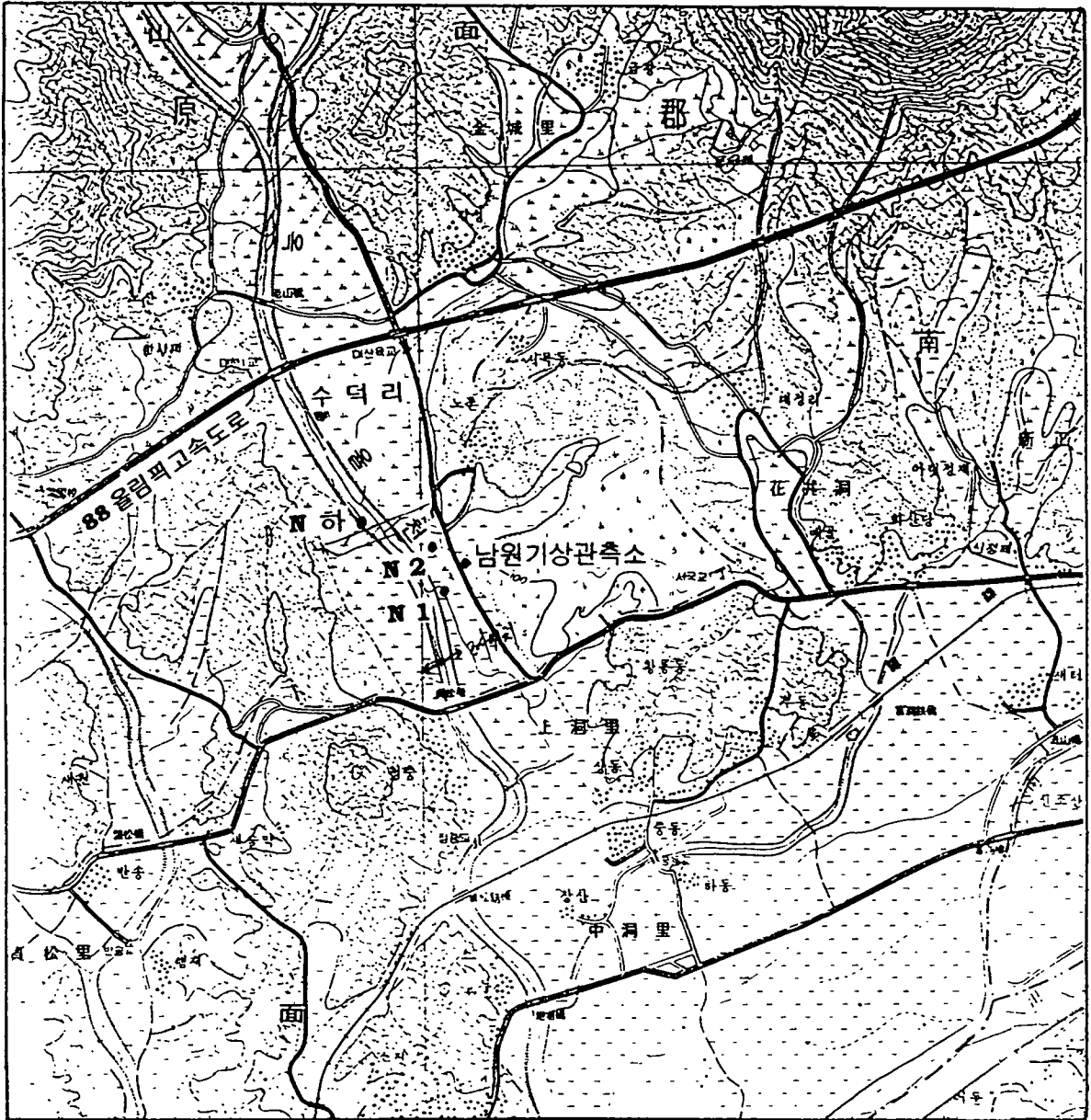


그림 7-2. 대산지구 지하수문조사 위치도
 N₁, N₂ : 지하수위 관측공
 N하 : 울천 수위 및 유출 관측점

1) 자기수위계(自記水位計)

가남 및 대산지구에 설치된 자기수위계는 일본제품인 리살자기수위계로서 지구별로 하천변 1개소 관측공 우물 2개소 계 3개소씩 설치되었으며 자기수위계의 구조는 그림 7-3, 수위기록지는 그림 7-4에서 보여주고 있다.

리살자기수위계의 사양

- 검출방식 : 부표(float)식
- 측정범위 : 0~3~6m
- 정 도 : 플스케일의 $\pm 2\%$
- 부표지름 : 관측공용 30mm, 하천용 100mm
- 기 록 지 : Drum roll 식
- 기 록 펜 : 카트리지펜(청색)
- 회전속도 : 40mm/day
- 회전동력 : 건전지용 원통시계
- 기록기간 : 30days
- 외형크기 : 330(W) × 295(H) × 162(D)mm
- 중 량 : 약 4.5kg

2) 이동식 유속계

하천유량측정에 이용한 유속계는 독일제 SEBA Current meter M₁으로서 프로펠러의 회전수에 의거 유속을 결정한다. 유속(V)과 회전수(n)의 관계는

$V = k \cdot n + \Delta$ 의 식을 따르며

여기서 n : 초당 프로펠라의 회전수

k : 프로펠라의 일회전분의 수리적 거리

Δ : 유속계의 상수

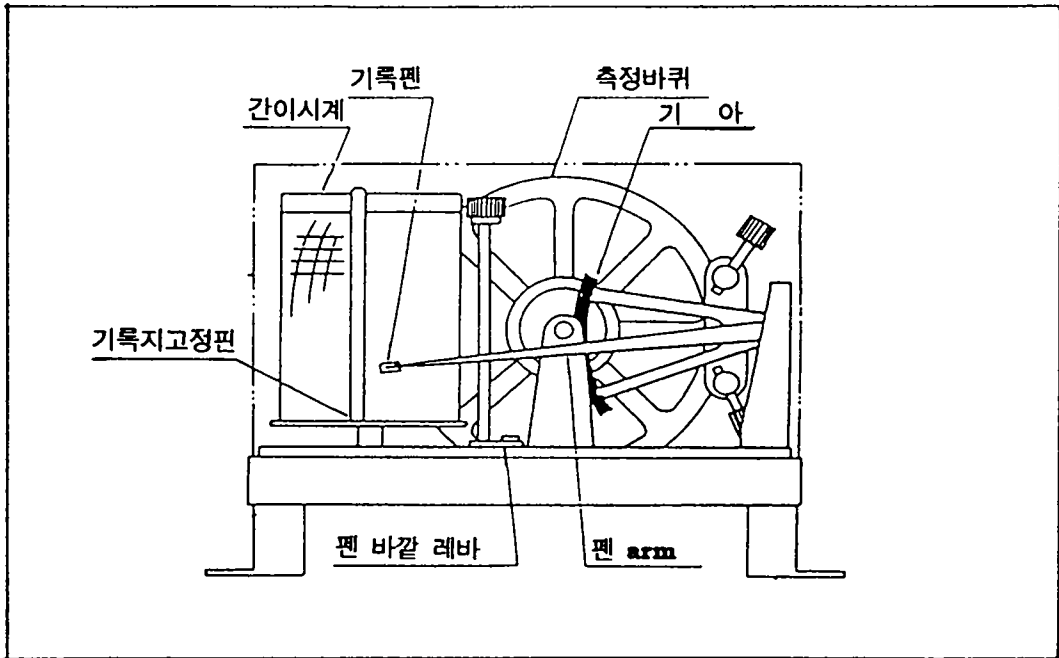


그림 7-3 수위계 내부구조

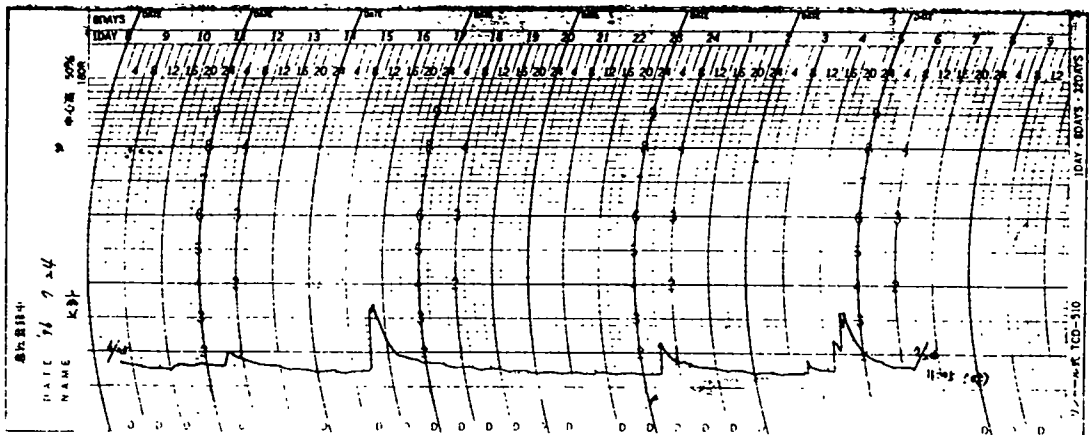


그림 7-4 자동수위기록 예(하천 수위변화)

를 나타내고 속도 산출은 아래와 같이 한다.

$$0.00 \leq n \leq 1.74 \quad V = 24.74 \times n + 1.23$$

$$1.74 < n < 10.00 \quad V = 25.68 \times n - 0.42$$

SEBA Current meter M₁의 사양

- 측정장치 : 재질-스테인레스 프로펠라식

고정-200cm 스테인레스 로드 에 이동 측정위치에 고정

- 규격 : 프로펠라 : ϕ 50mm

pitch : ϕ 250mm

rod : ϕ 9mm

- 측정범위 : 0.025 ~ 5m/sec

- 측정값 표시 : Electronic Counter Z4 방수액정판

2. 지구별 조사결과

가. 가남지구

1) 기저유출

가남지구 양화천의 하천수위 변화 관측결과는 그림 7-5와 같으나 수위변동에 따라서 유량측정이 연속적으로 시행되지 못하여 수위-유량 곡선을 얻지는 못하였다.

하천의 기저유출량조사는 비관개기인 9월과 10월 각 1회씩 2회 측정하였으며 측정결과는 표 7-5에 나타나 있다. 이를 경과기간 대 유량변화 그래프를 반대수지에 그리면 그림 7-6과 같이 되는데 1차 측정값이 고르지 못한것은 관개용수의 영향이 있었기 때문인 것으로 판단된다.

그림 7-6에서 기울기를 구하면 기저유출의 감쇠상수 b 를 구할 수 있으며 1차조사에서 $b=0.041/\text{day}$, 2차조사시에 $b=0.019/\text{day}$ 를 얻었다.

표 7-5 가남지구 하천 기저유량 측정 결과(양화천)

구분	측정일	측정시각	경과시간 (일)	유량(m^3/sec)	비 고
1차	'96. 9. 12	12:00	0.50	0.1771	9.13~9. 18 기간의 유량 곡선에서 $Q=Q_0e^{-bt}$ 에 의 한 감쇠상수 산출 $b=0.041/\text{day}$
	9. 13	14:30	1.60	0.2101	
	9. 16	11:10	4.47	0.1952	
	9. 18	14:40	6.62	0.1716	
	9. 20	13:10	8.55	0.2169	
	9. 22	14:20	10.60	0.1741	
2차	'96. 10. 16	12:20	0.51	0.1450	$b=0.019/\text{day}$
	10. 18	14:30	2.60	0.1405	
	10. 22	9:20	6.40	0.1309	
	10. 24	15:00	8.63	0.1228	

2) 지하수위 변동곡선

가남지구의 지하수위 관측을 위하여 전동 오-거로 관측공 2개소를 설치하고 자기수위계를 설치하였으나 1개소(K_2)는 점토층의 함몰로 관측공의 기능을 상실되어 자료를 얻지못하였으며 1개소(K_1)에서의 수위변동곡선은 그림 7-7과 같다.

그림에서 보면 강우후 지하수위 강하가 바로 일어나지 않고 얼마동안 정체된 모습을 보이고 있는데 이것은 관측공 설치후 충분한 공내청소가 되지 않아 관

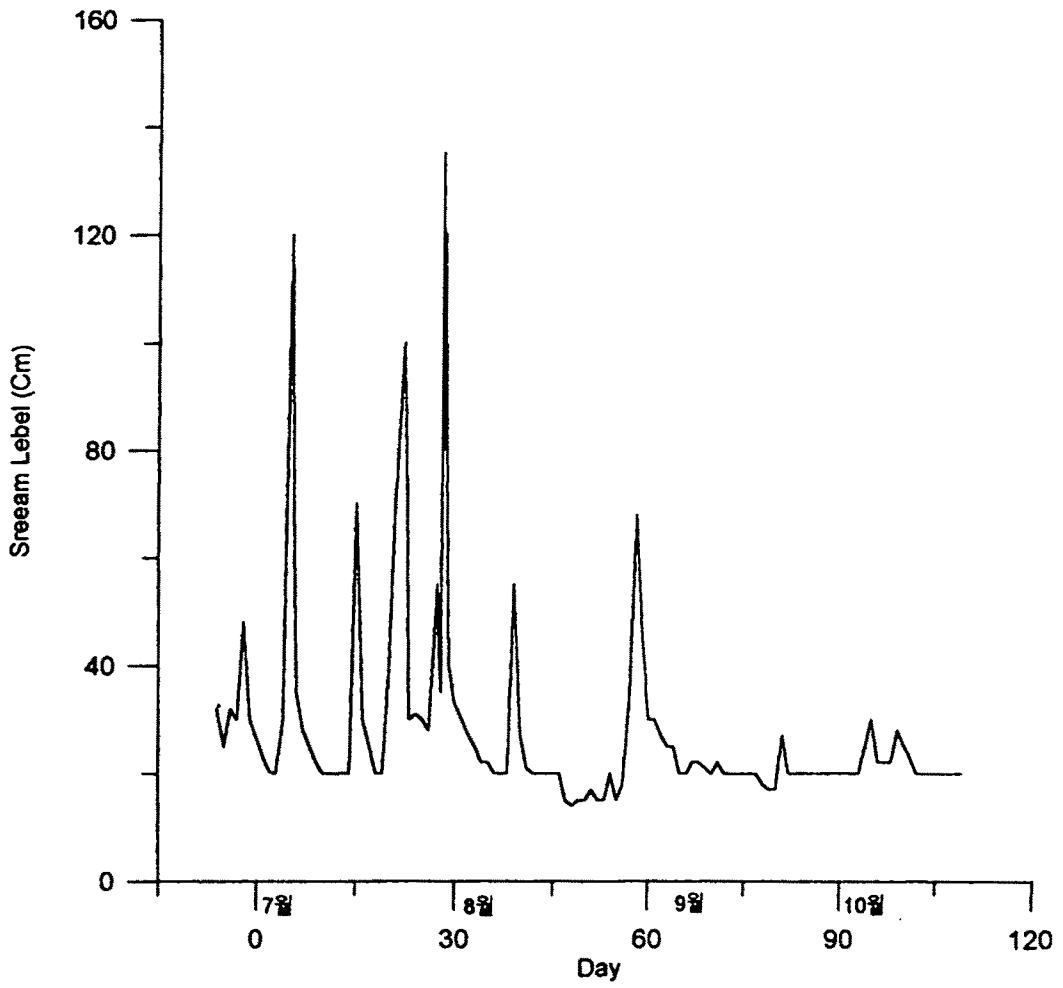


그림 7-5. 가남지구 하천수위 변동곡선(양화천)

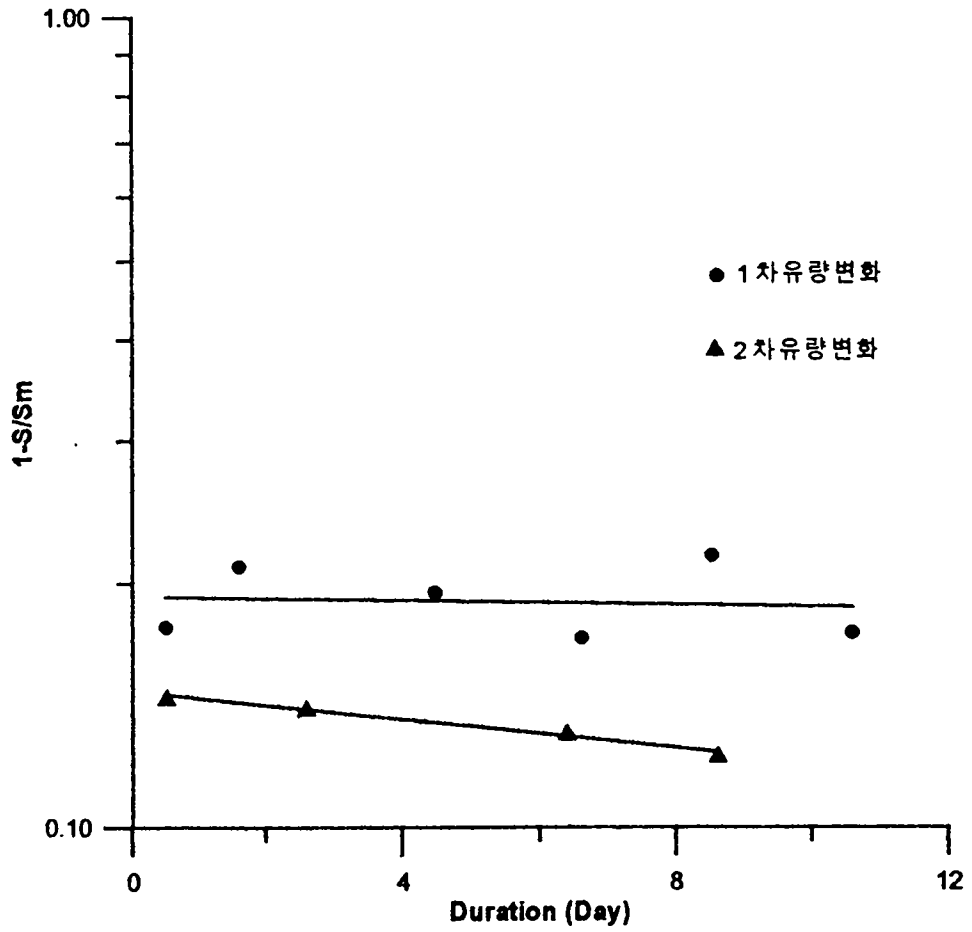


그림 7-6 가남지구 하천 기저유출(경과시간 대 유량변화)

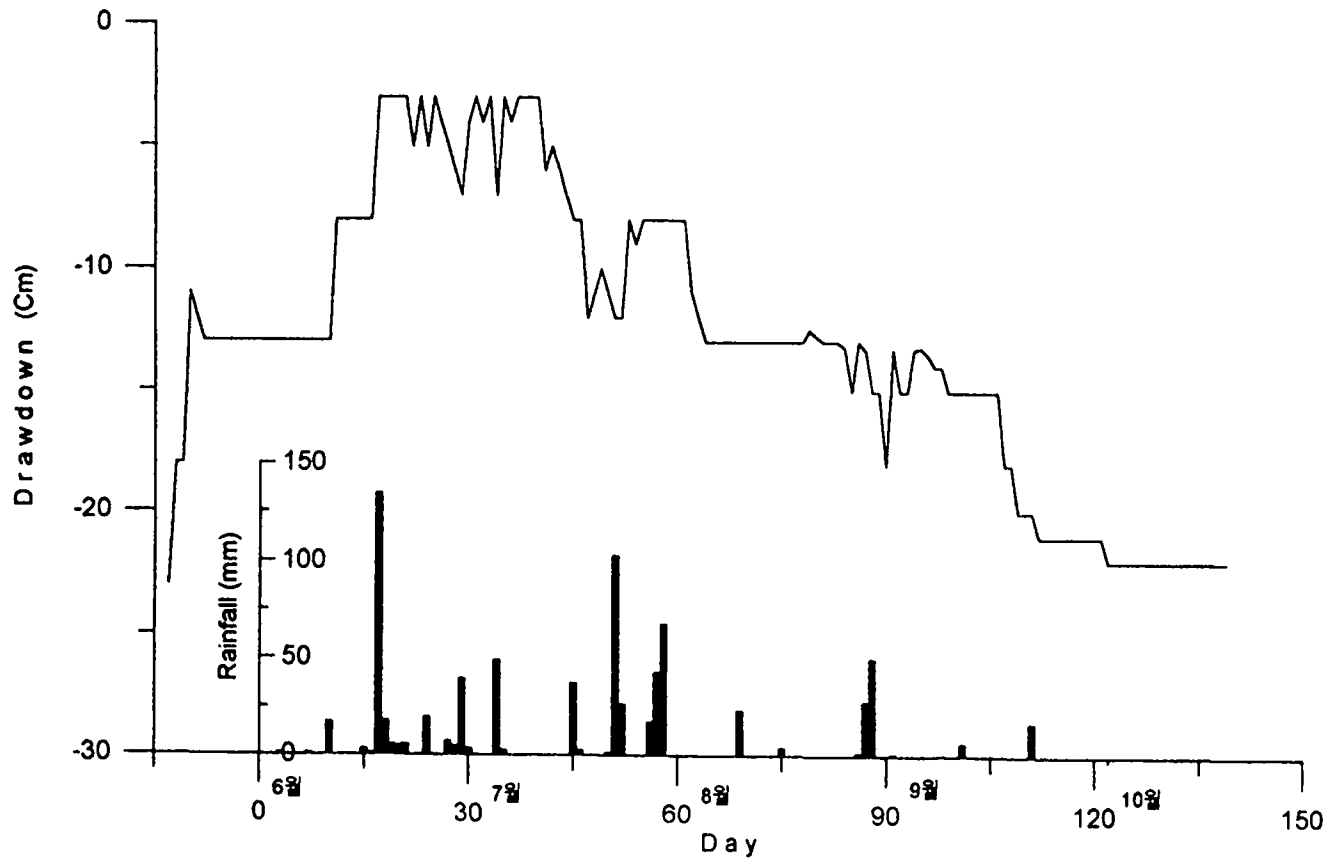


그림 7-7. 가남지구 지하수위 변동곡선(K₁)

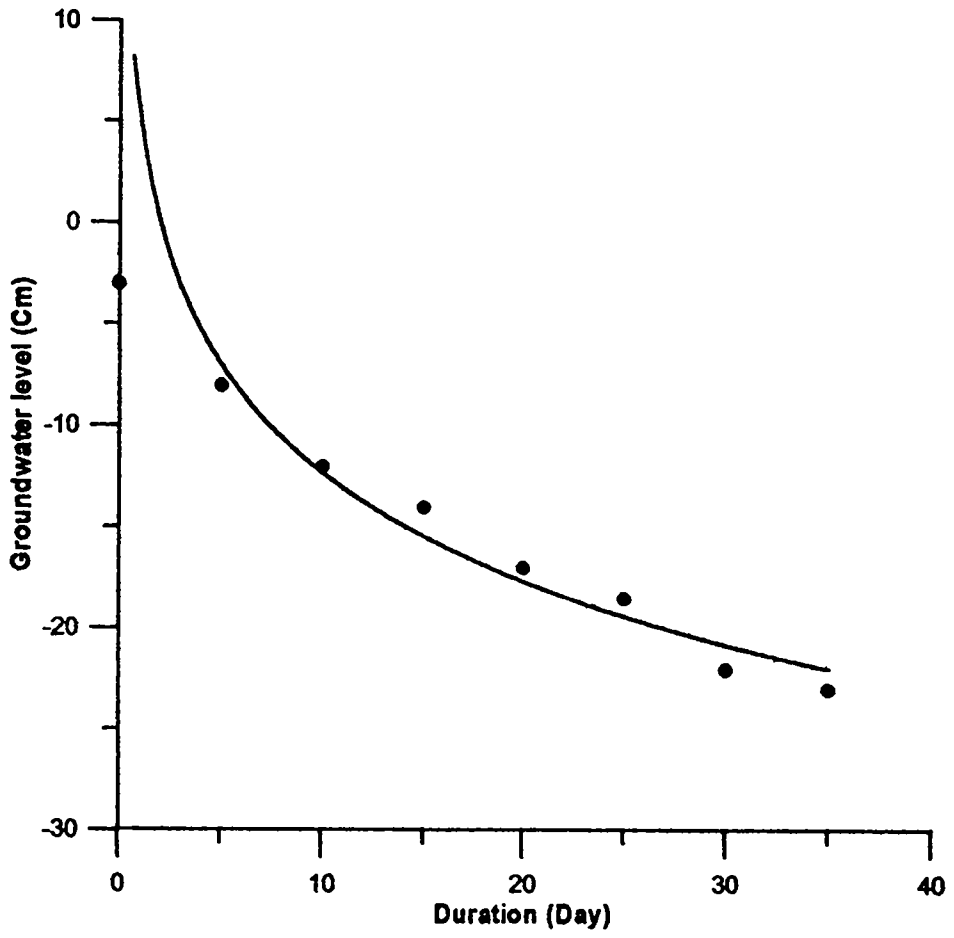


그림 7-8 가남지구 무강우기간 지하수위강하 추정곡선

측공내의 수위강하에 장애가 있었기 때문에 판단된다.

이러한 경우 강우기간의 수위상승효과를 제거한 무강우 기간의 수위강하 곡선을 그리기 위하여 수위강하 시점보다는 수위강하 종점을 연결하여 작도하는 것이 타당할 것으로 판단되며 이렇게 작도한 가남지구 무강우 수위강하곡선은 그림 7-8과 같으며 이 곡선에서 경과시간별 수위강하량을 읽으면 다음과 같다.

경과시간 (days)	지하수위 (cm)	수위강하량 (cm)	$1-s/s_m$	비 고
0	3	0	1	$s_m = 20 \text{ cm}$ $T = 35 \text{ days}$
5	8	5	0.75	
10	12	9	0.55	
15	14	11	0.45	
20	17	14	0.3	
25	18.5	15.5	0.23	
30	22	19	0.05	
35	23	20	0	

위 표에서 경과시간과 $(1-s/s_m)$ 의 관계를 반대수지에 그리어 그림 7-9를 얻었으며 여기서 1cycle의 경과기간 $t=39$ 일을 구하여 식(7-1)에 대입하여 α 와 b 의 값을 구하였다. 즉,

$$1 = \frac{1}{2 \cdot 30 \alpha} \cdot \frac{39}{35}$$

$$\alpha = \frac{1}{2 \cdot 30 \alpha} \cdot \frac{39}{35} = 0.4348 \times 1.1143 = 0.4845$$

$$b = \frac{1}{\alpha \cdot T} = \frac{1}{0.4845 \times 35} = 0.059/\text{day}$$

나. 대산지구

1) 기저유출측정

대산지구 관계하천인 옥률천은 하천제방 공사가 완료되어 직선적인 유로를 갖고 있으며 하천홍수량 관측을 위한 물넘이 웨어(weir)가 설치되어 있다. 이 지점(그림7-2의 N하 지점)에 수위계를 설치하여 수위와 유량을 그림 7-10과 같다.

하천기저유출조사는 수위계 설치지점 하류부에서 비관개기간인 9월과 10월 중 2회 시행하였으며 측정결과는 표 7-6과 같다. 유량측정 결과를 가남지구 예와 같이 경과시간별로 그래프를 그리어 기울기를 구한 결과 하천기저유출량 감쇠상수가 9월중 자료에서는 $b=0.192/\text{day}$, 10월 조사자료에서는 $b=0.116/\text{day}$ 로 계산되었는데 9월중의 감쇠상수가 더 크게 나타난 것은 9월 까지 관개용수가 공급되기 때문이라고 판단된다. 농민들의 자문에 따르면 벼의 품질향상을 위해 추수직전까지 관개용수를 급수하여야 한다고 하였다. 그러므로 대수층 특성과 관련되는 감쇠상수는 무강우, 비관개기인 10월중 조사자료를 채용해야 할 것으로 판단된다.

표 7-6 대산지구 하천기저유량 측정 결과(옥률천)

구분	측정일	측정시각	경과시간 (일)	유량(m ³ /sec)	비 고
1차	'96. 9. 5	15:36	0.65	0.0956	9월6일 10시부터 9월 7일 15시 30분 기간 중 유량변화에 의거 b계산 b=0.192/day
	9. 6	10:15	1.43	0.0967	
	"	14:45	1.61	0.0926	
	"	17:00	1.71	0.0938	
	9. 7	11:15	2.47	0.0781	
	"	13:50	2.57	0.0720	
	"	15:30	2.65	0.0642	
2차	'96. 10. 7	16:00	0.60	0.1612	b=0.116/day
	10. 8	11:00	1.46	0.1093	
	"	13:00	1.54	0.1308	
	"	16:00	1.67	0.1252	
	"	17:20	1.72	0.1217	
	10. 9	11:00	2.46	0.1200	
	"	13:00	2.54	0.1176	
	"	16:00	2.67	0.1235	
	10. 10	11:00	3.46	0.1108	
	"	14:00	3.58	0.0888	

2) 지하수위 변동곡선

지하수위 관측을 위하여 '95년 이 지역에 대한 지하수조사에서 설치된 조사우물(W-2)과 시추공(B-2)에 자기수위계를 설치하였으며 지하수위 변동곡선은 그림 7-11과 그림 7-12와 같다. 시추공에서 측정된 자료는 관개기인 7~8월 중 심한 변동을 나타내고 있는데 이것은 인근의 소형관정에서 양수이용하기때

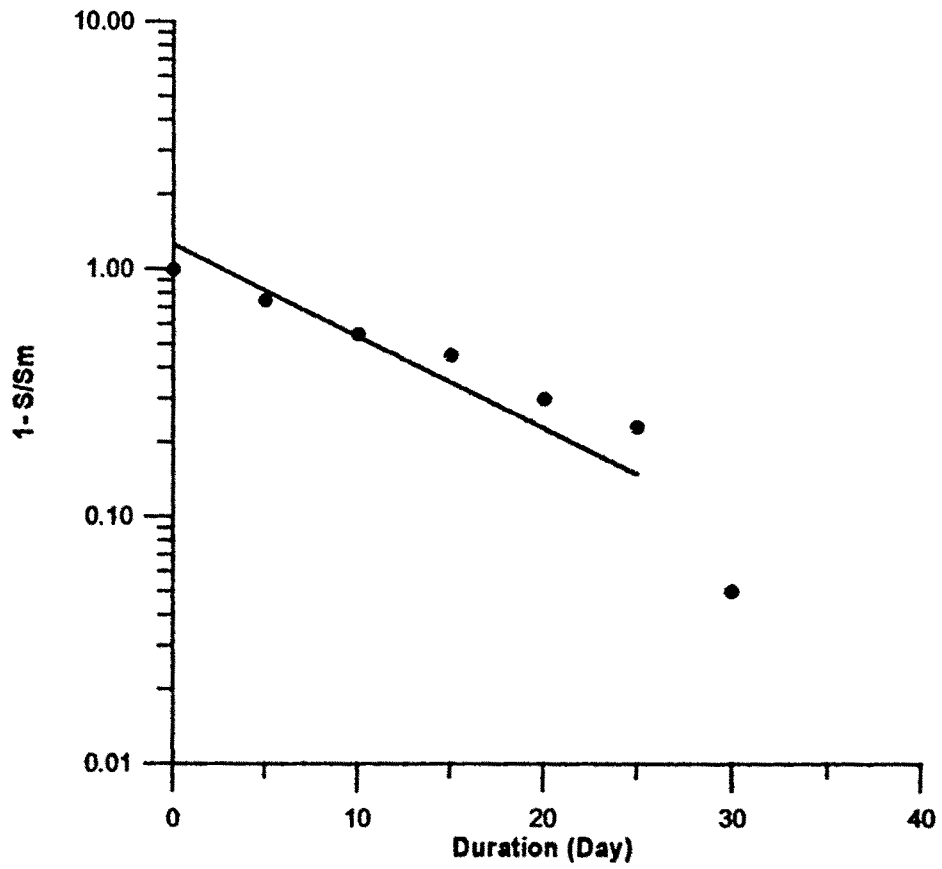


그림 7-9 가남지구 무강우기간 지하수위강하 경과기간 대 (1-S/Sm)

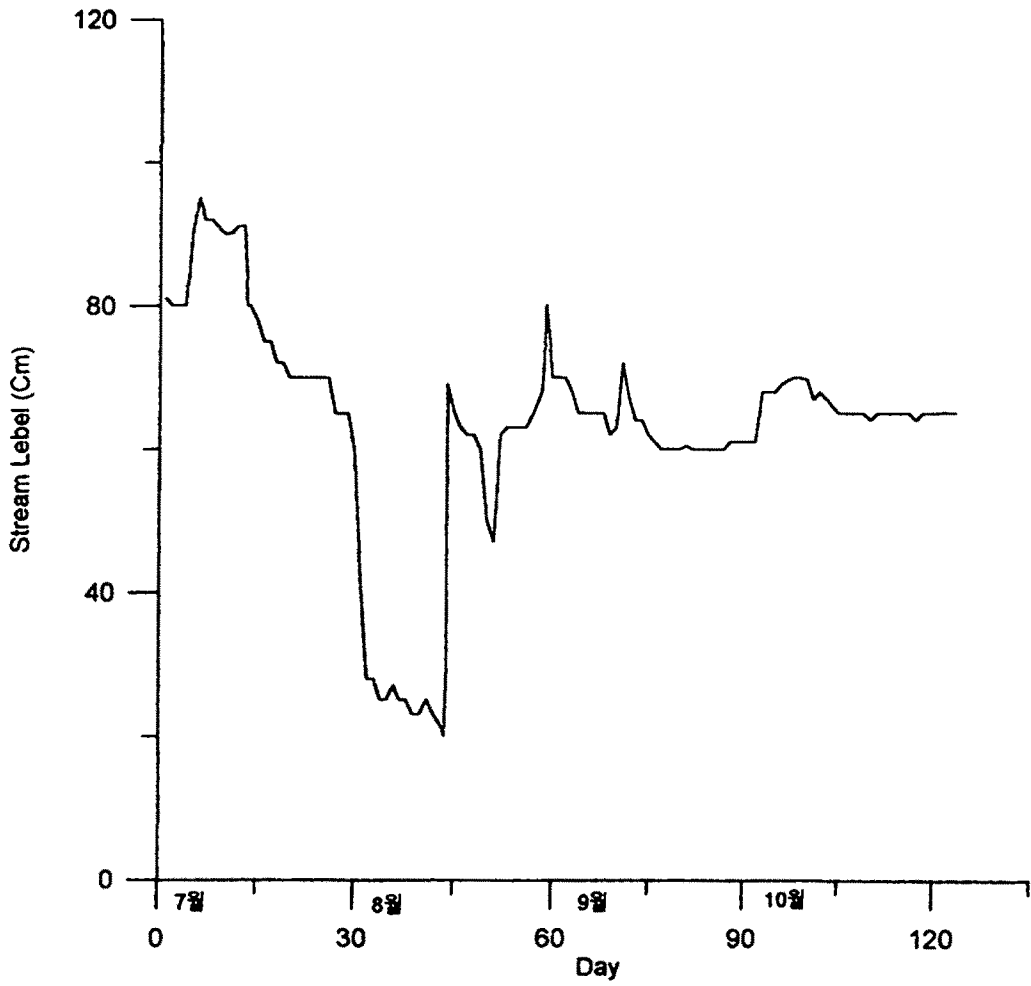


그림 7-10. 대산지구 하천수위 변동곡선(옥윤천)

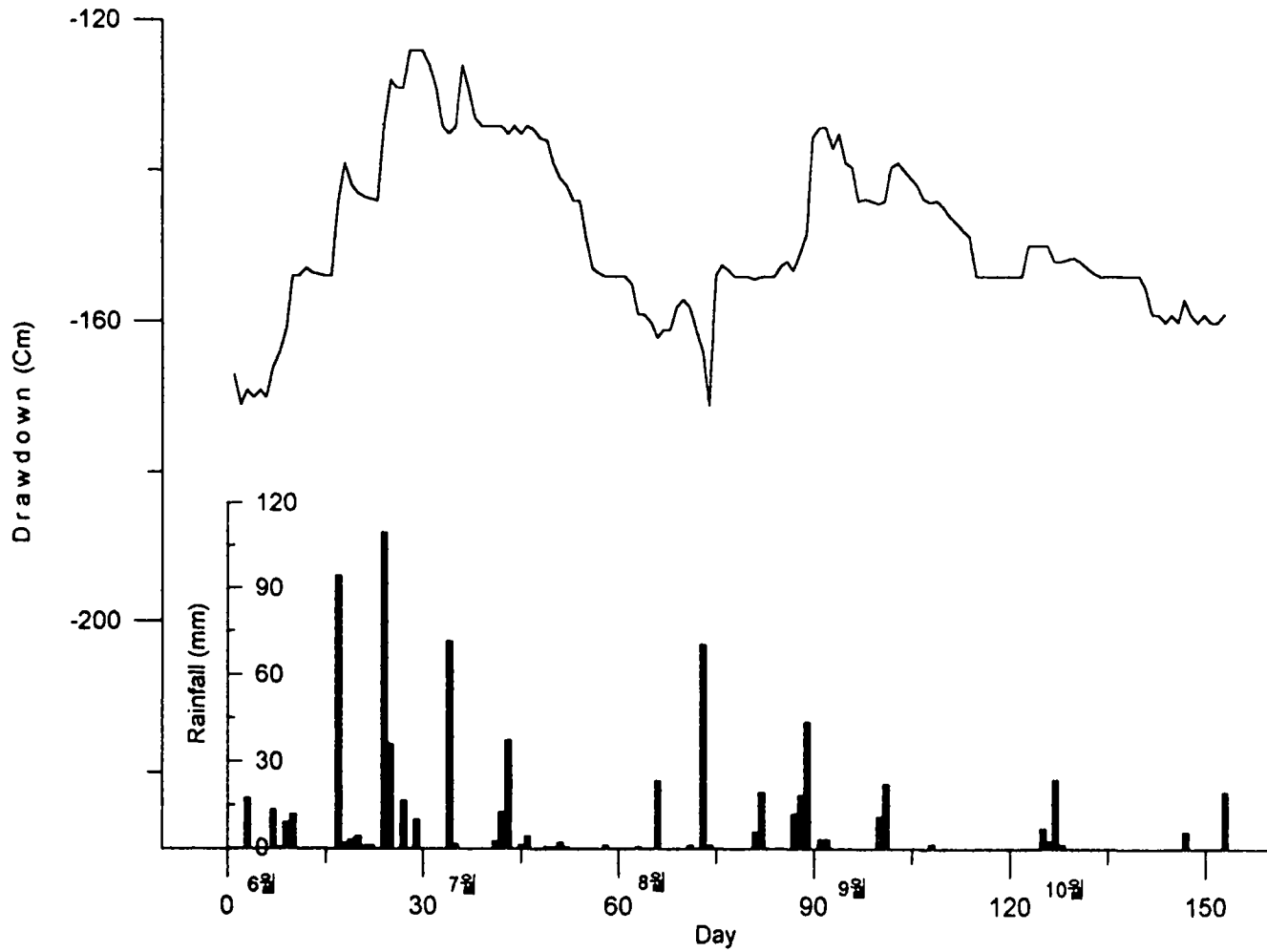


그림 7-11. 대산지구 지하수위 변동곡선 (N₁)

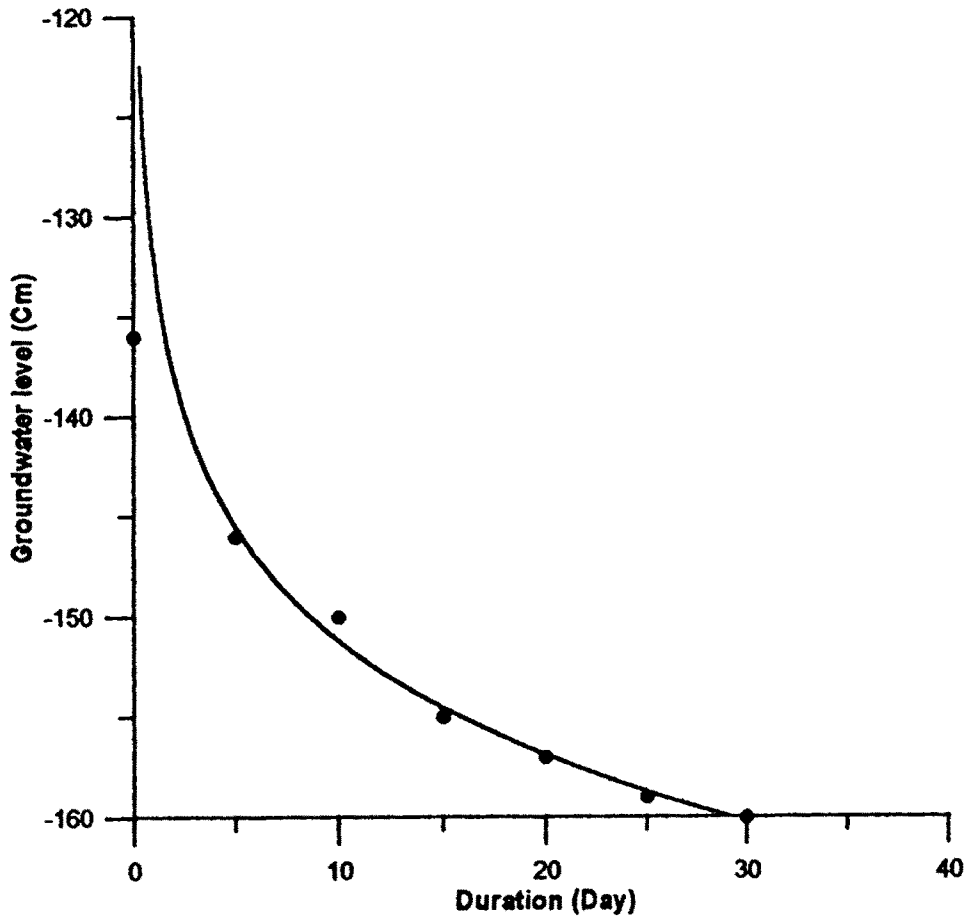


그림 7-12 대산지구 무강우기간 지하수위강하 추정곡선

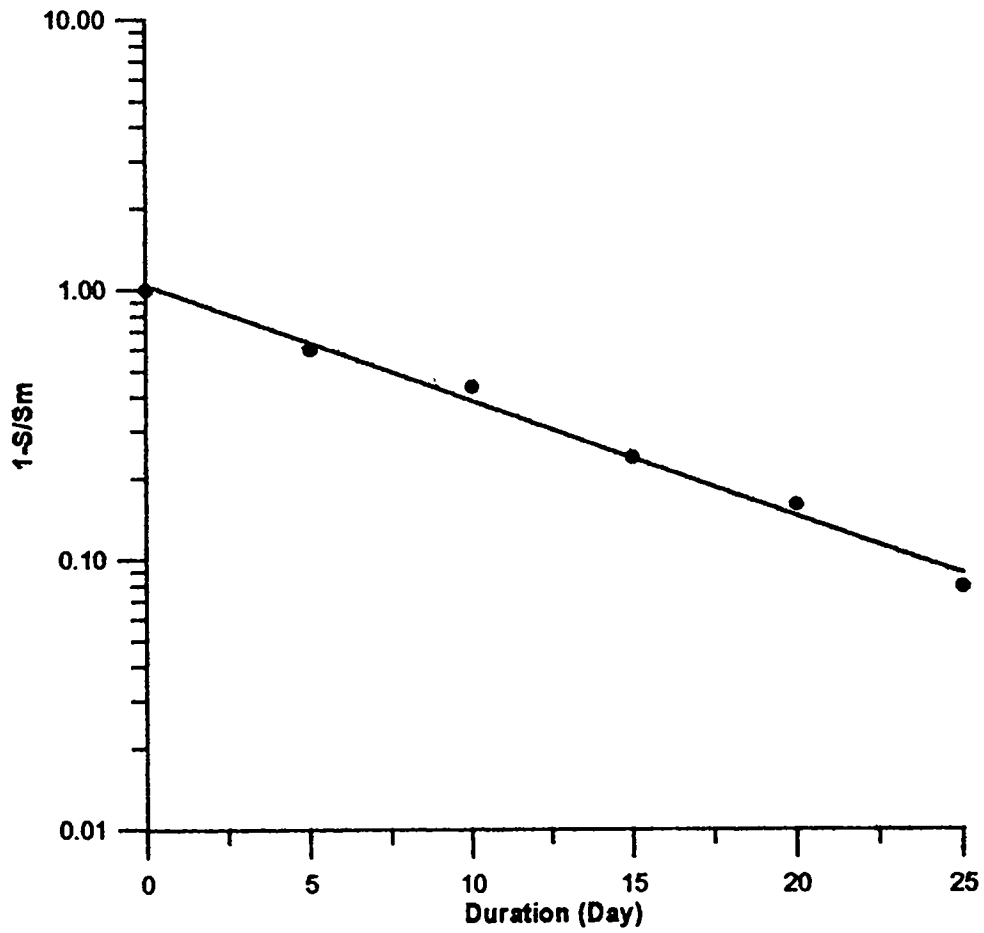


그림 7-13 대산지구 무강우기간 지하수위강하: 경과기간 대 ($1-S/S_m$)

문에 그영향권 안에 있는 관측공의 수위변동을 보여주고 있다.

조사우물에서 관측된 자료(N₁)는 비교적 정상적인 수위변동을 보여주며 7월 15일부터 8월 10일 기간과 9월 1일부터 10월 말까지의 지하수위 강하곡선을 평행이동 방법에 의해 강우에 의한 수위상승부를 제거하여 무강우 강하곡선을 작도하고 여기서 경과기간별 수위강하량을 읽은 결과 다음 표와 같다.

경과시간 (days)	지하수위 (cm)	수위강하량 (cm)	1-s/s _m	비 고
0	136	0	1	최대수위강하량 s _m = 25cm 최대수위강하 경과시간 T=30days
5	146	10	0.6	
10	150	14	0.44	
15	155	19	0.24	
20	157	21	0.16	
25	159	23	0.08	
30	160	25	0	

그러므로 가남지구예와 같이 경과기간 대 (1-s/s_m) 그래프를 그리어(그림 7-13참조) 1 cycle에 대한 경과기간 t=25일을 구하고 (7-1)식에 의거 α와 b의 값을 구하면 다음과 같다.

$$1 = \frac{1}{2 \cdot 30 \alpha} \cdot \frac{25}{30}$$

$$\alpha = \frac{0.833}{2 \cdot 30} = 0.362$$

$$b = \frac{1}{\alpha \cdot T} = \frac{1}{0.3652 \times 30} = 0.0921/day$$

다. 어모(중왕)지구

본지구는 본 연구과제 시범조사지구로 '95년도 본지구내 소지구인 은림리지역에대한 지하수조사를 시행한 바 있다. 또한 본 지구의 동부지역인 중왕지구에서 '74년 기설관정관측조사 시행시 지하수위 일일 관측조사를 실시하였고 그 조사자료를 분석하여 지하수위 강하곡선 해석방법을 연구하는 사례지구로 삼았다.

'96 연구계획의 일환으로 이 지역에 지하수위자동관측시설을 설치하고 지하수위 변동관측과 동시에 하천유량을 측정하여 비교코자 하였으나, 현지답사 결과 하천바닥면이 인근 논바닥면보다 1~1.5m 높게 퇴적되어 있어 하천유량이 쉽게 말라버리는 현상으로 하천유량측정에 문제점이 있다고 판단되어 수위관측시설은 이 지구 대신 가남지구에 설치하였다.

본지구를 10월중 재 답사한 결과 하천(아천) 하류부는 건천으로 되었으나 상류부로 올라가면서 일부구간에서 하천유출을 발견할 수 있었다. 이 부위에서도 하상은 인근 논보다 1m정도 높아 지하수가 제당밑 배수로에 의거 배수되고 있었으나 하천유량의 변동은 나름대로 대수층의 지하수와 연결되어 있으므로 이를 조사하여 기저유출 감쇠상수를 구하여 보았다.

조사지점은 아천의 중상류부로 갈수기 하천도수로를 만들어 놓은 약 1.5m 폭의 도랑으로 수심 5~8cm 정도의 유출이 있었는데 수심이 얕아서 유속계 측정이 문제가 있는 것으로 판단되어 부표(浮漂)를 띄워 유속을 측정하였다. 부표는 구경 8cm 길이 20cm인 플라스틱 빈병을 사용하였고 이동구간은 유폭이 일정한 구간을 잡아 8~10m를 정하여 걸리는 시간을 초단위로 읽고 여러번 반복하여 평균 유속을 구하였다. 유출단면은 유폭을 몇구간으로 구분하여 수심을 측정하고 단면적을 구하였다.

측정일시별 유출단면적, 평균유속 및 유량은 다음 표 7-7과 같으며, 최초 측정일인 16일 0시를 시점으로 한 경과기간 대 유량을 반대수지에 그리어 직선

의 기울기를 구한 결과 $b=0.072/\text{day}$ 를 얻었다.

표 7-7 어모지구 하천 기저유출량 측정 결과(아천)

측정일	측정시각	경과기간	유출단면	평균유속	유 량	비 고
'96.		day	m'	m/sec	m'/sec	
10. 16	17:00	0.71	0.121	0.560	0.0677	
10. 19	11:40	3.48	0.095	0.555	0.0526	
10. 22	13:40	6.57	0.080	0.526	0.0421	
10. 24	16:00	8.67	0.075	0.476	0.0358	

한편 '74년 이 지구에서 장기 관측한 지하수위 변동곡선을 해석한 결과는 $s_m=0.94\text{m}$, $T=55\text{day}$, $S_y=0.148$, $\alpha=0.354$ 를 얻었는데(제2장 제4절의 2-4참조), 이들로부터 유출감쇠상수를 역으로 구하면 다음과 같다.

$$b = \frac{1}{\alpha \cdot T} = \frac{1}{0.354 \times 55} = 0.0514/\text{day}$$

3. 조사결과 종합분석

이번 조사의 목적은 무강우기간 지하수위 강하곡선을 해석하여 구한 대수층 지역 지하수함양율과 하천의 기저유출에 의한 감쇠상수의 관계를 규명하는데 있었다. 이를 위하여 가남의 2개지구에서 하천 기저유출량조사와 인근대수층의 지하수위 변동관측조사를 시행하였는데 지구별 조사내용은 앞에서 기술한 바와 같으며 그 결과를 종합비교하면 다음표와 같다.

표 7-8 기저유출 조사결과와 지하수위 관측조사결과와의 비교

지 구	기저유출조사 b값		지하수위강하곡선해석			오차범위 ⓑ/ⓐ
	1차(9월)	2차(10월) ⓐ	함양율 α	무강우기간 T	$b = \frac{1}{\alpha \cdot T}$ ⓑ	
	/day	/day		day	/day	%
가남	0.041	0.019	0.0485	35	0.059	+210
대산	0.192	0.116	0.362	30	0.092	-20
중왕	-	0.072	0.394	55	0.051	-29

표에서 보는 바와 같이 기저유출량조사에서 얻는 감쇠상수 b값을 기준으로할 때 지하수위강하곡선 해석에의하여 지하수함양율 α 를 구하고 그 역수에 관계되는 b값을 구하여 앞의 b값과 비교하면 3지구 모두 같은 범위를 나타내고 있어 지하수 함양율 산출방법의 이용 가능성을 보여주고 있다. 만일 후자가 전자에 비하여 일정한 비율로 상회하던지 또는 하회한다면 그 요인에 해당하는 상수를 정하여 보정하면 된다. 그러나 지구별 비교량의 오차범위가 산만하므로 지구별 조건을 검토할 필요가 있다.

(1) 가남지구 : 이지구의 기저유출조사 9월과 10월에 1회씩 2차에 걸쳐 조사하였는데 1차 조사시 까지는 관개기가 완전히 끝나지 않은 상태여서 기저유출조사의 감쇠상수에 영향을 미친것으로 해석된다. 그러므로 2차조사 자료를 채택하였다.

이 지구에서의 문제점은 관측공 설치시 충분히 우물개발이 안 되었기 때문에 지하수위 변동 측정에 장애요인이 있었다.

지하수위 강하곡선 해석에서 이를 감안하여 작도하였으나 임의적인 작도가 큰 오차를 가져왔다고 판단된다.

(2) 대산지구 : 이지구의 기저유출조사에서도 9월중 자료는 관개기 영향이 있으므로 10월중 조사자료를 이용하는 것이 좋다. 관측공 시설도 지하수조사 당시 개발된 우물을 이용하였으므로 정상적인 수위변동곡선을 얻을 수 있었다. 이 지구에서 기저유출조사에의한 b값을 기준할때 지하수위강하곡선 해석에의한 b값은 20%적게 나타났으며 이는 시험오차범위에 속한다고 볼 수 있다.

(3) 중왕지구 : 이지구에서의 기저유출조사는 다소 문제점이 있는데 하상이 배수로 보다 높기 때문에 하천유출보다 배수로에 의한 유출이 우세하다고 볼 수 있다. 위표에서 지하수위강하곡선 해석에의한 b값이 하천의 기저유출조사에 의한 b값에 비하여 30%정도 적게 났으며 대산지구에 비교하여 오차가 큰것은 이러한 현지 조건때문인 것으로 판단된다.

지구별 조건으로 보아 이번 조사에서는 대산지구를 사례로하는 것이 타당할 것으로 보여지며 20%의 시험오차를 인정한다면 지하수위 강하곡선 해석에 의한 지하수 함양율과 비산출율 산정방법은 타당하다고 판단된다. 물론 이번 연구에서 시험사례가 부족하지만 앞으로 이러한 시험자료를 축적하면 이 방법의 타당성이 입증될 것이 확실시 된다.

제 4 절 지하수문분석 모델링

1차년도 연구 개발된 지하수문분석 모델 SUBDAM의 현실 적용성을 검토하기 위하여 경기도 가남의 시범지구에 대한 모델링을 수행하였다. 또한 이 모델링 결과를 MODFLOW에 의한 모델링 결과와 비교하여 SUBDAM의 유효성을 검증하고자 하였다.

1. 시범지구의 위치와 수리지질 개요

시범지구는 경기도 여주군 가남면 하귀리, 본두리, 삼군리 일대의 약 1,450ha의 유역면적을 가지는 지역이다. 실제로 모델링을 위한 기초조사가 수행된 지역은 본두교 하류부의 약간의 면적과 상류부의 130ha에 해당하는 곳이다. 시범지구의지도상의 위치는 그림 7-14에 표시되어 있다. 조사지역은 낮은 구릉지와 하천 주변의 넓게 발달한 하상 충적층이 평야를 이루고 있어 비교적 완만한 지형을 보여준다. 본 역의 지표부는 제4기의 충적층이 덮고 있으며, 그 하부는 중생대 쥐라기의 흑운모 화강암이 기반암을 이루고 있다. 투수성이 좋은 충적층과 기반암의 풍화대 구간은 지표로부터 평균 약 12m의 두께를 점하고 있으며 상류부에서의 포화두께는 약 10.5m 하류부의 평균 포화두께는 약 8.8m로 상류부에서 하류부의 거리를 1km로 볼 때 약 0.0017의 수위 동수구배를 보여준다. 이들 수치는 1995년 가을에 수행한 야외조사 자료에 근거한 것으로 수위측정자료는 표 7-9에 기록하였다. 그림 7-14에는 수위 측정을 수행한 공번의 지도상 위치가 표시되어 있다. 또한 대수층매질은 수리전도도값이 평균 3.5×10^{-3} m/sec의 값을 보여준다. 야외에서 측정된 수리전도도값은 표 7-10에 요약되어 있다.

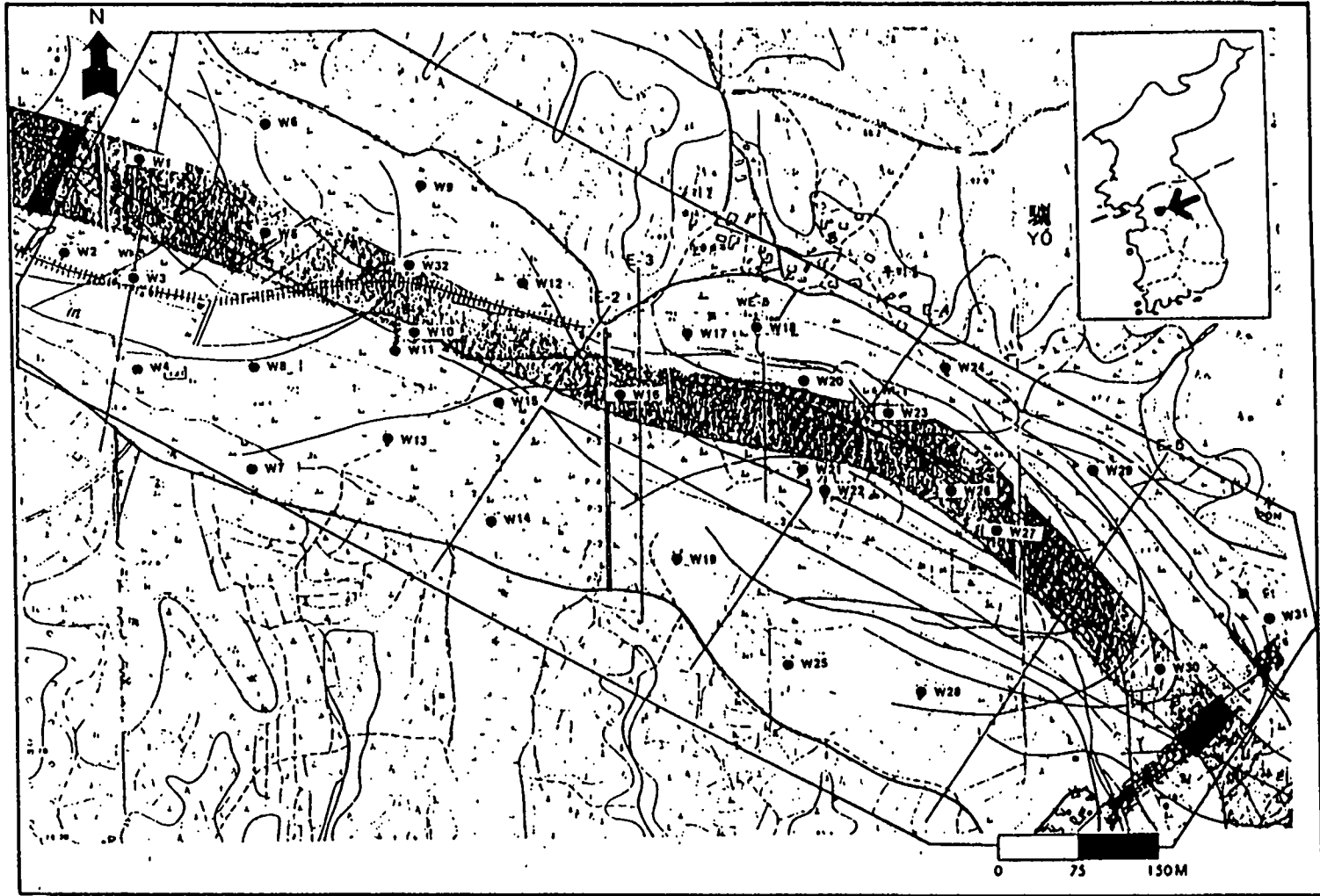


그림 7-14 시범지구 (가남) 모델링 영역 위치도

표 7-9 시범지구(가남) 현장 수위측정 자료

공 번 (Well Number)	수 위, m (케이싱 상단 기준)	공 번 (Well Number)	수 위, m (케이싱 상단 기준)
W1	2.685	W17	1.687
W2	2.701	W18	1.709
W3	2.487	W19	1.947
W4	2.438	W20	1.165
W5	2.299	W21	2.255
W6	2.395	W22	2.187
W7	2.258	W23	1.151
W8	2.264	W24	1.274
W9	2.227	W25	1.178
W10	2.009	W26	1.204
W11	1.978	W27	1.213
W12	1.854	W28	0.987
W13	2.017	W29	1.031
W14	1.833	W30	1.019
W15	1.837	W31	0.925
W16	1.692	W32	0.952

표 7-10 시범지구(가남)의 Slug Test에 의한 투수시험 결과표

공번(Well Number)	수리전도도(Hydraulic Concuctivity), cm/sec
W5	2.47×10^{-3}
W8	1.004
W11	1.38
W16	4.84×10^{-2}
W20	7.79×10^{-3}
W21	3.44×10^{-4}
W23	4.51×10^{-3}

2. 수문정보

조사지역에 대한 지하수 함양량을 추정하기 위하여 1984년 농업진흥공사에서 발간한 가남지구지하수조사보고서의 강우량자료에 대한 분석을 수행하였다. 표 7-11은 5년을 주기로 기록한 강우자료를 나타낸다. 이를 토대로 가남지역의 지하수 함양단계를 4개의 계절적 단계로 구분하였으며 우리 나라의 계절 구분 개념과 일치시켜 봄, 여름, 가을, 겨울의 지하수 함양률을 계산하였다. 지하수 함양률은 강우량의 약 30%를 접하는 양으로 계산하였으며 각각 봄에는 0.6855mm/day, 여름에는 2.5271mm/day, 가을에는 0.705mm/day, 겨울에는 0.1782mm/day의 지하수 함양률을 갖는 것으로 확인되었다. 이 결과는 우리 나라의 경우 강우량이 집중된 여름철에 충전층 대수층에 대한 지하수 함양률이 높다는 것을 보여주며 봄과 가을의 지하수 함양률이 비슷한 수치를 나타내며, 겨울의 지하수 함양률이 강우량이 가장 적은 계절답게 낮은 수치를 기록한다는 것을 보여준다.

표 7-11 가남지구의 과거 7년에 대한 강우량 자료

	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
1935년	5.2	4.6	17.9	67.9	63.6	163.5	237.9	275.3	90.4	32.5	59.4	5.2
1945년	4.0	5.9	125.0	30.5	170.3	252.0	470.4	169.9	165.5	63.1	6.6	23.9
1955년	12.0	5.0	17.4	53.2	64.2	182.5	333.5	63.0	204.6	34.7	55.3	13.4
1965년	16.9	7.5	30.3	22.6	19.2	48.7	555.2	431.4	21.3	54.7	90.8	12.1
1975년	13.7	39.0	67.7	100.1	55.9	40.1	401.2	185.2	154.5	44.3	37.2	23.7
1980년	30.0	7.0	34.4	226.2	80.8	193.5	202.4	205.4	84.7	54.8	15.1	53.5
1981년	20.9	15.4	51.3	50.7	62.4	64.9	448.5	374.1	129.9	36.8	29.3	17.1

3. 모델링 영역과 입력자료

SUBDAM과 MODFLOW를 이용한 모델링의 영역은 가로 0.5km, 세로 1km의 영역에 해당하며, 모델링 영역의 경계조건은 SUBDAM 모델에서 정의한 경계조건의 영역과 일치한다. 그림 7-14의 다각형의 영역은 시범지구의 모델링 영역을 나타내주고 있다. 모델링 수행을 위한 입력자료는 표 7-12에 제시되어 있다.

4. 시뮬레이션 결과 - MODFLOW 시뮬레이션 결과와의 비교

그림 7-15에서 그림 7-22까지는 SUBDAM(가)과 MODFLOW(나)를 이용하여 시범지구에 대한 정류 상태의 모델링을 수행한 결과를 나타낸 것이다.

모두 예제의 시뮬레이션과 비슷한 양상의 결과를 보여준다. 그림 7-15, 7-17, 7-19, 7-21은 각각 인공 물막이벽을 설치하지 않았을 때의 봄, 여름, 가을, 겨울의 계산 결과를 보여주며, 그림 7-16, 7-18, 7-20, 7-22는 인공 물막이벽을 설치하였을 때의 봄, 여름, 가을, 겨울의 계산결과를 보여준다.

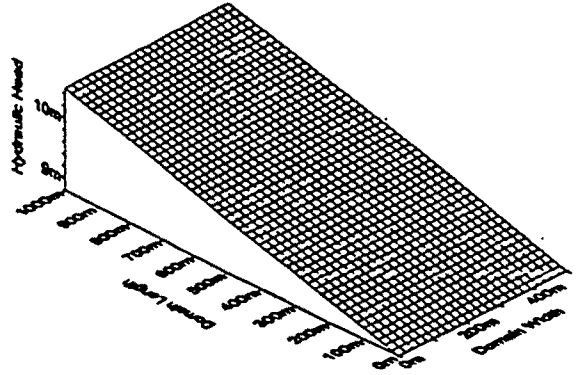
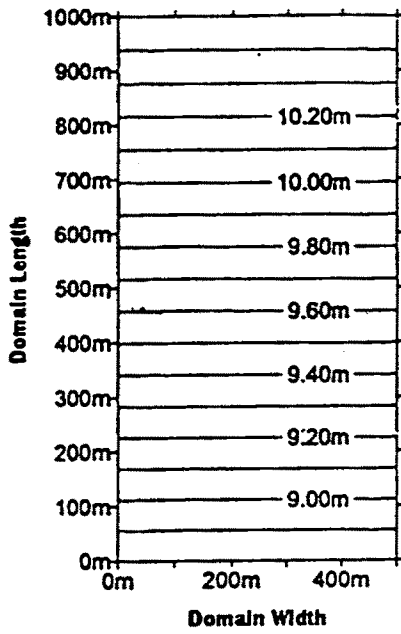
SUBDAM 계산 결과에 의하면 여름철에는 물막이벽 주변부에서 최대 1.3m 이상의 수위상승이 있을 수 있는 것을 확인할 수 있다. 이들 정류상태 수위계산 자료들을 STORAGE를 이용하여 차수벽 설치 전후의 지하수 저장량 변동량을 계산하는데 적용하였다. 그 결과는 표 7-13에 요약되어 있다. SUBDAM에 의한 결과는 인공 지하댐이 설치된다면 여름철에 전체 유역에서 최대 4만톤 가량의 지하수 저장량의 변화가 생기며 4계절에 걸쳐 최소 3만톤의 수준은 유지할 수 있음을 보여준다. MODFLOW의 결과는 지하댐 설치시 물막이벽의 투수성이 고려될 때 최소 1만3천톤에서 1만5천톤 가량의 지하수 저장량의 변화가 있을 수 있음을 시사한다.

	정류상태 문제	부정류상태 문제
입 력 자 료	• Output file name (GN_1.OUT)	
	• Project name (GANAM SITE SIMULATION)	
	• Site name (GANAM SITE)	
	• Program operator name (BGO SNU GWELAB)	
	• Date (1995/10/24)	
	• Steady-state or Transient (SELECT 1 OR 2)	
	• No barrier problem or Barrier problem (SELECT 1 OR 2)	
	• Domain size(width, length) (500M, 1000M)	
	• Grid point number(width, length) (26, 26)	
	• Hydraulic conductivity (3.5E-3 m/sec)	
	• Barrier location(distance from lower and left boundary) (200M, 50M)	
	• Constant head(upper, lower) (10.5m, 8.8m)	
	• Initial guess (9.5m)	
	▶ Recharge rate	▶ Storage coefficient (0.15)
▶ 봄 (7.9E-9 m/sec)	▶ Effective porosity (0.15)	
▶ 여름 (2.9E-8 m/sec)	▶ Number of recharge intervals (4)	
▶ 가을 (8.2E-9 m/sec)	▶ Recharge rate (옆의 4계절에 따름)	
▶ 겨울 (2.1E-9 m/sec)	▶ Maintenance duration (90,92,92,91)	
▶ Convergence criterion (0.0001)	▶ Head-save file name (GN_#.DAT)	
▶ Head-save file name (GN_1.DAT)	▶ Storage change-save file name (GN_1.STR)	

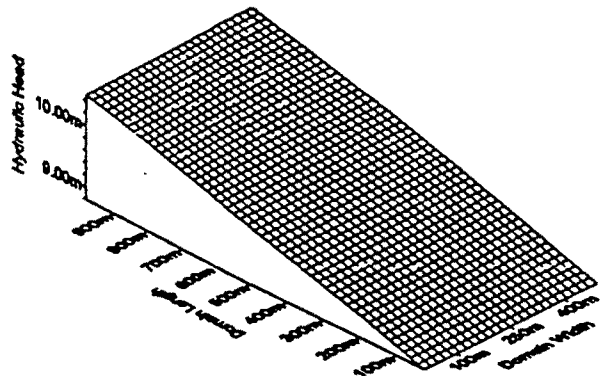
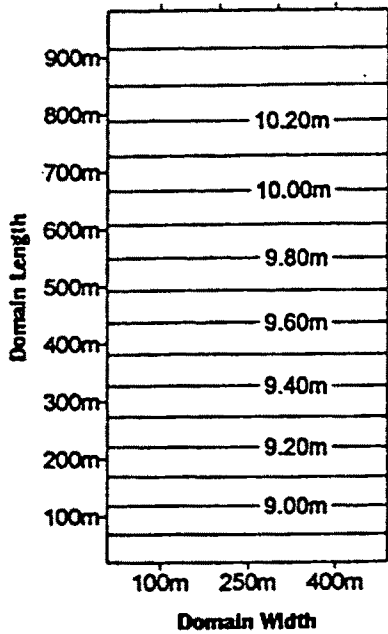
표7-12. SUBDAM을 이용한 시범지구 모델링을 위한 정류상태와 부정류상태 문제에 대한 입력자료.

구 분	봄		여 름		가 을		겨 울	
	SUBDA M	MOD- FLOW	SUBDA M	MOD- FLOW	SUBDA M	MOD- FLOW	SUBDA M	MOD- FLOW
평균 수위 변화 (m)	0.4712	0.1861	0.5105	0.204	0.4717	0.1863	0.4602	0.1812
저장량 변화 (m ³)	35339	13956	38288	15301	35381	13974	34512	13588

표 7-13. SUBDAM과 MODFLOW에 의해 시범지구 모델링에서 생성된 정류상태 수위변동 자료를 STORAGE에 입력하여 저장량의 변동을 계산한 결과, 비교대상은 정류상태의 물막이벽 설치 전후의 수위자료들임.

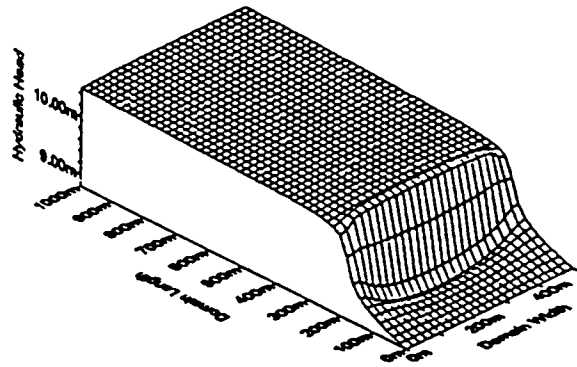
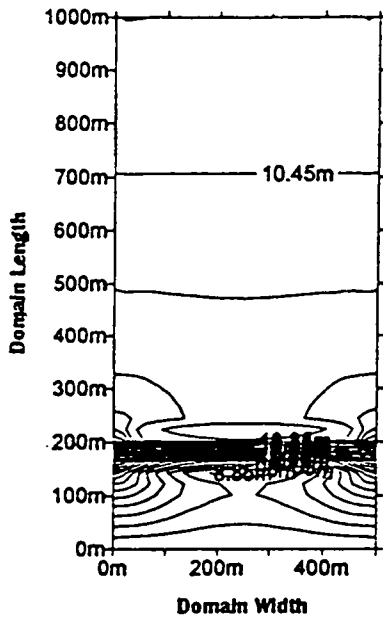


(가) SUBDAM

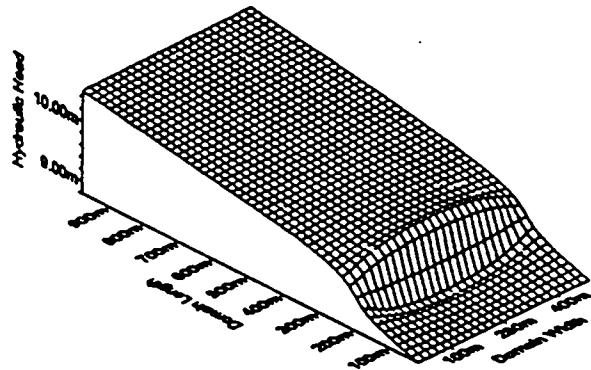
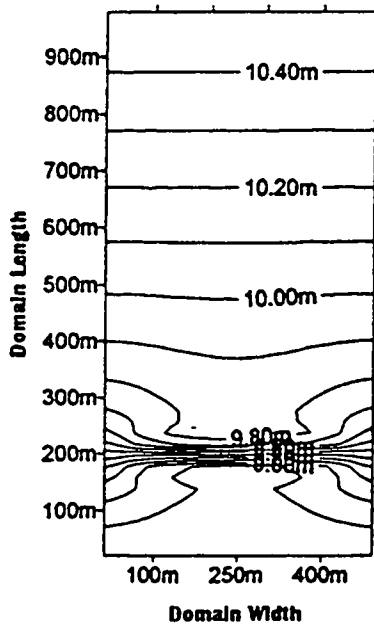


(나) MODFLOW

그림 7-15 가남지구 - 봄, 정류상태의 지하수 함양이 있고 물막이벽이 없을때

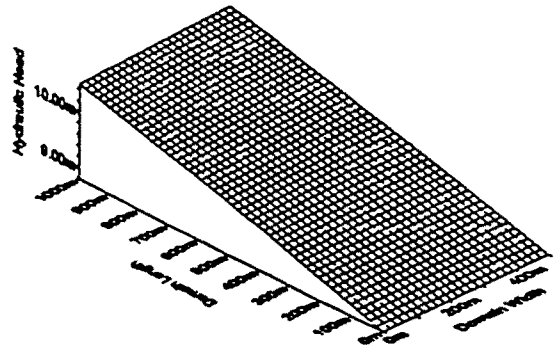
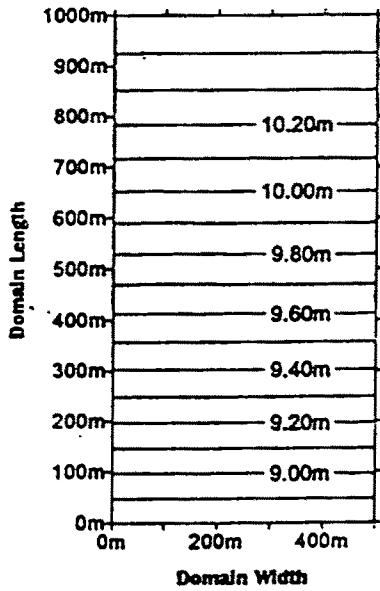


(가) SUBDAM

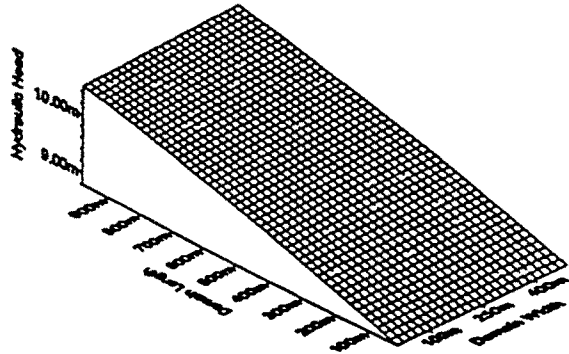
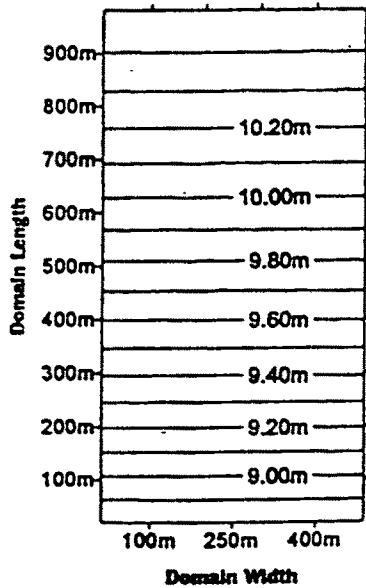


(나) MODFLOW

그림 7-16 가남지구 - 봄, 정류상태의 지하수 함양이 있고 물막이벽이 있을때

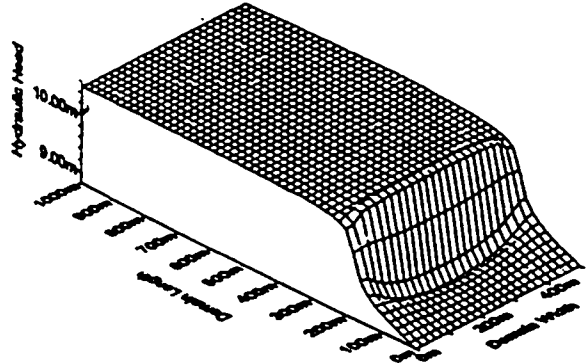
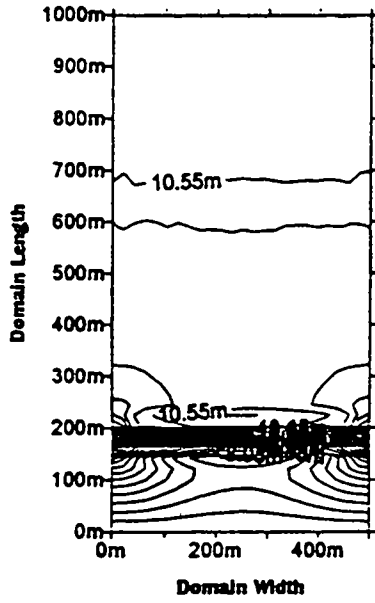


(가) SUBDAM

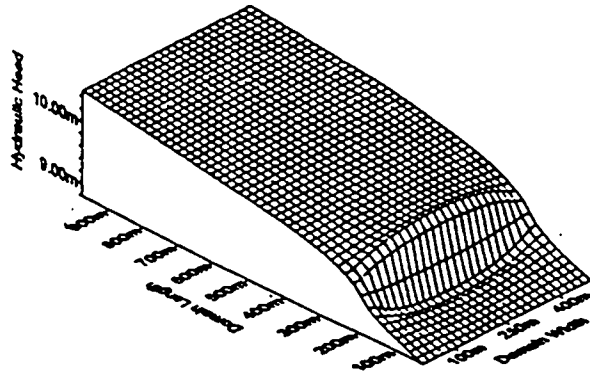
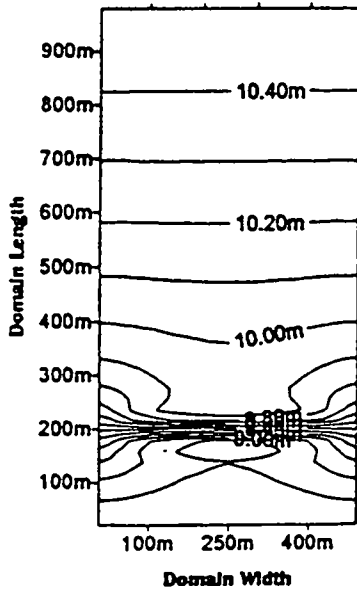


(나) MODFLOW

그림 7-17 가남지구 - 여름, 정류상태의 지하수 함양이 있고 물막이벽이 없을 때

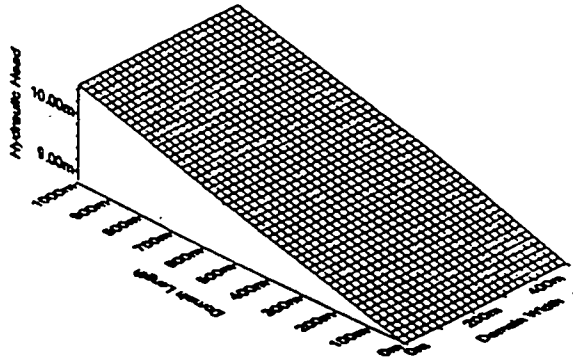
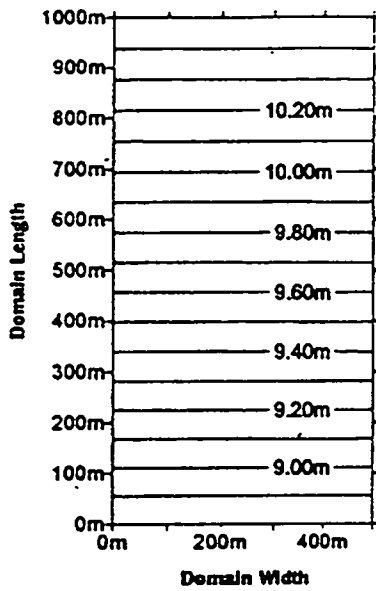


(가) SUBDAM

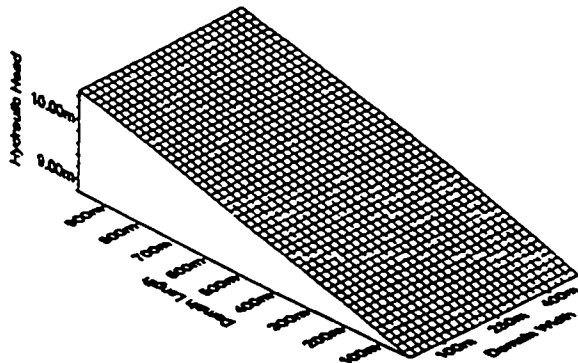
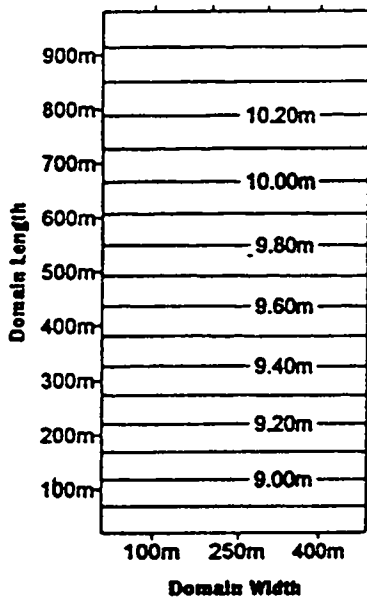


(나) MODFLOW

그림 7-18 가남지구 - 여름, 정류상태의 지하수 함양이 있고 물막이벽이 있을때

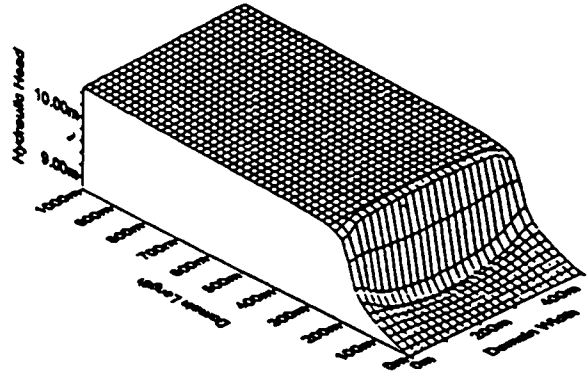
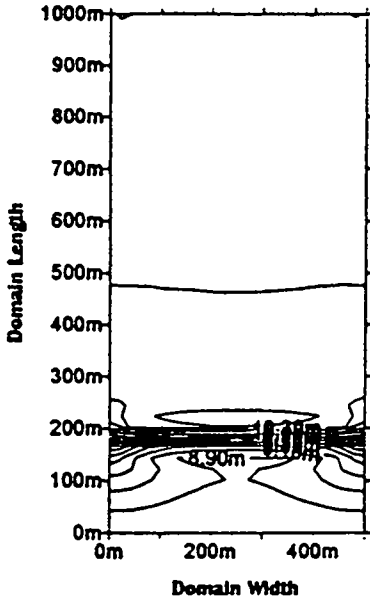


(가) SUBDAM

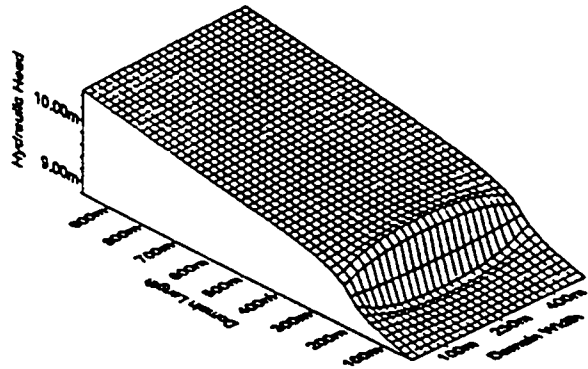
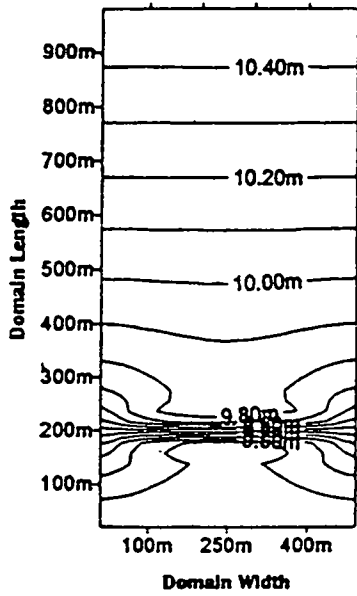


(나) MODFLOW

그림 7-19 가남지구 - 가을, 정류상태의 지하수 함양이 있고 물막이벽이 없을때

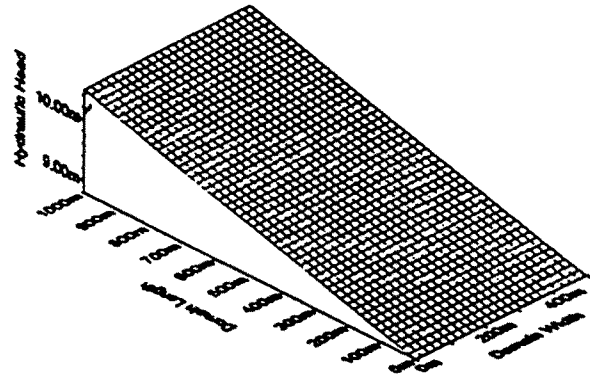
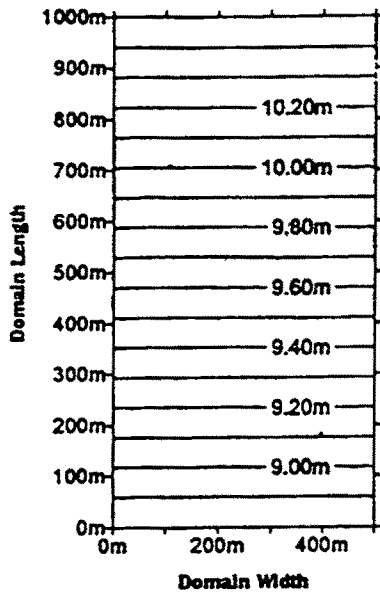


(가) SUBDAM

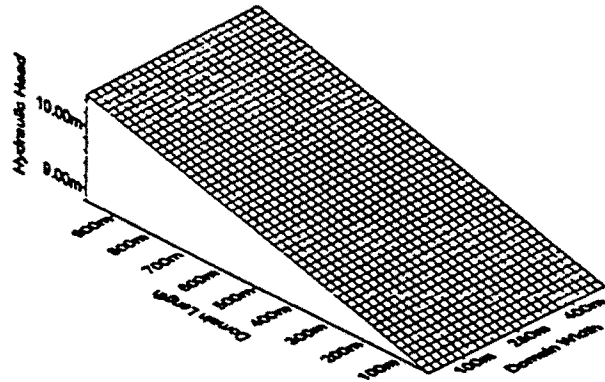
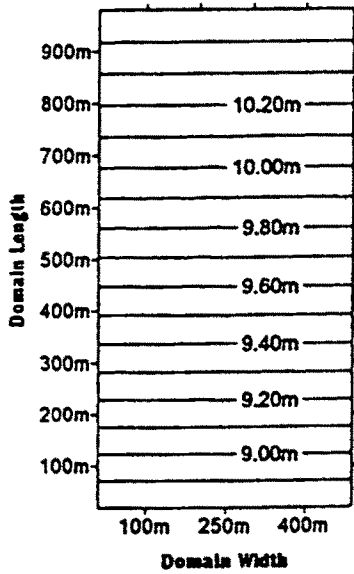


(나) MODFLOW

그림 7-20 가남지구 - 가을, 정류상태의 기하수 함양이 있고 물막이벽이 있을때

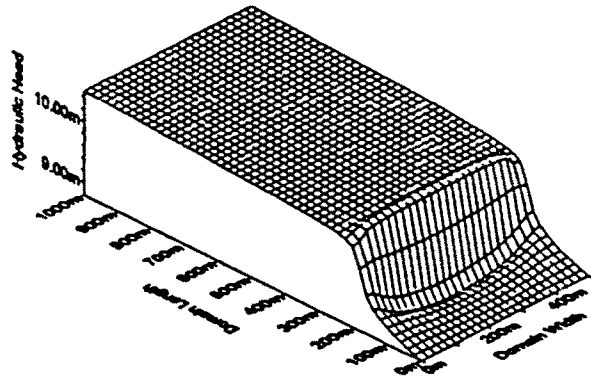
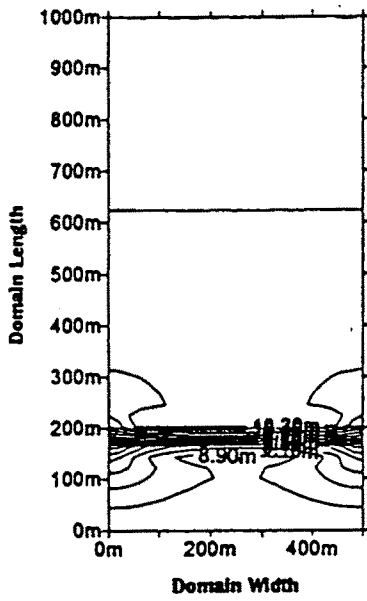


(가) SUBDAM

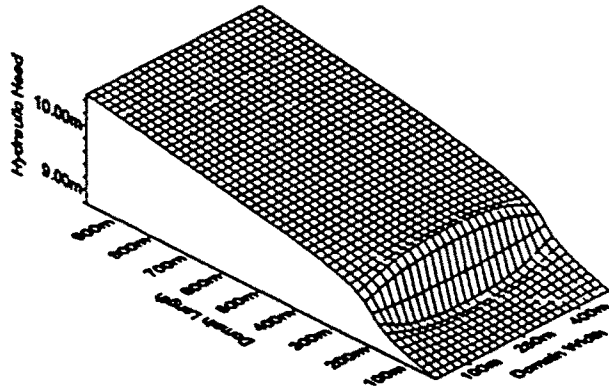
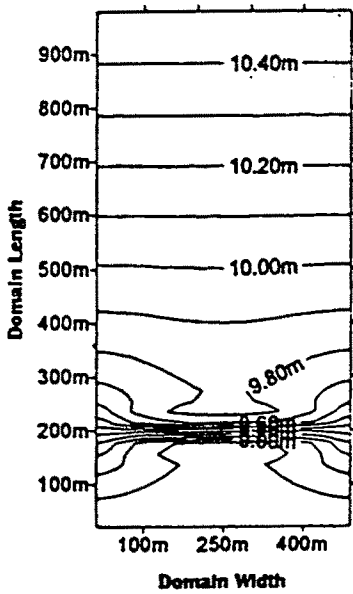


(나) MODFLOW

그림 7-21 가남지구 - 겨울, 정류상태의 지하수 함양이 있고 물막이벽이 없을때



(가) SUBDAM



(나) MODFLOW

그림 7-22 가남지구 - 겨울, 정류상태의 지하수 함양이 있고 물막이벽이 있을때

제 8 장 지하댐 조사 설계 요령

제 1 절 지하댐 조사설계 과정

1. 조사 설계의 순서

조사설계의 순서는 실시하고자하는 사업의 규모 및 지역의 특성에 따라 결정되어야 하기 때문에 일률적으로 규정하기는 어려우나 일반적인 조사단계별 조사내용과 순서는 관개개선사업의 조사설계 순서에 따를 수 있다(그림 8-1 참조). 조사를 효율적으로 수행하기 위하여 지역특성을 거시적으로 이해하고 필요한 세부조사를 시행하는 것이 합리적이기 때문에 조사를 크게 나누어 예정지조사(답사)와 기본조사 및 실시설계조사로 나누어진다.

예정지조사는 사업의 필요성을 판정하고 계획의 기본구상과 기본조사 계획을 작성하기 위하여 개략적인 현황을 파악하는 조사이다. 기본조사는 계획의 수립을 위하여 필요한 기초자료를 얻기위한 현지조사이며 실시설계조사는 기본조사에서 설정한 기본계획과 주요공사계획에 따라 사업시행계획 수립에 필요한 세부측량설계 및 시공계획을 작성하고 이에 따라 공사비를 계산하는 과정이다.

지하댐개발을 위한 조사 설계에서는 개발대상이 지하수이기 때문에 지표수개발을 위주로 한 조사흐름도에서 조사항목과 조사내용이 다소 달라질 수 있으며 단계별 조사과정은 다음과 같이 설정할 수 있다.

- 지구선정조사 : 예정지조사 단계로서 사업의 필요성과 기술적 경제적 타당성 검토
- 지하수조사 : 기본조사 단계로서 지하수 부존조사를 시행하여 설계자료 취득
- 설 계 조 사 : 실시설계 단계로서 측량설계에 의한 대상구역 및 시설물 예정 위치 확정, 사업효과 추정, 공사비계산 등 사업계획 수립

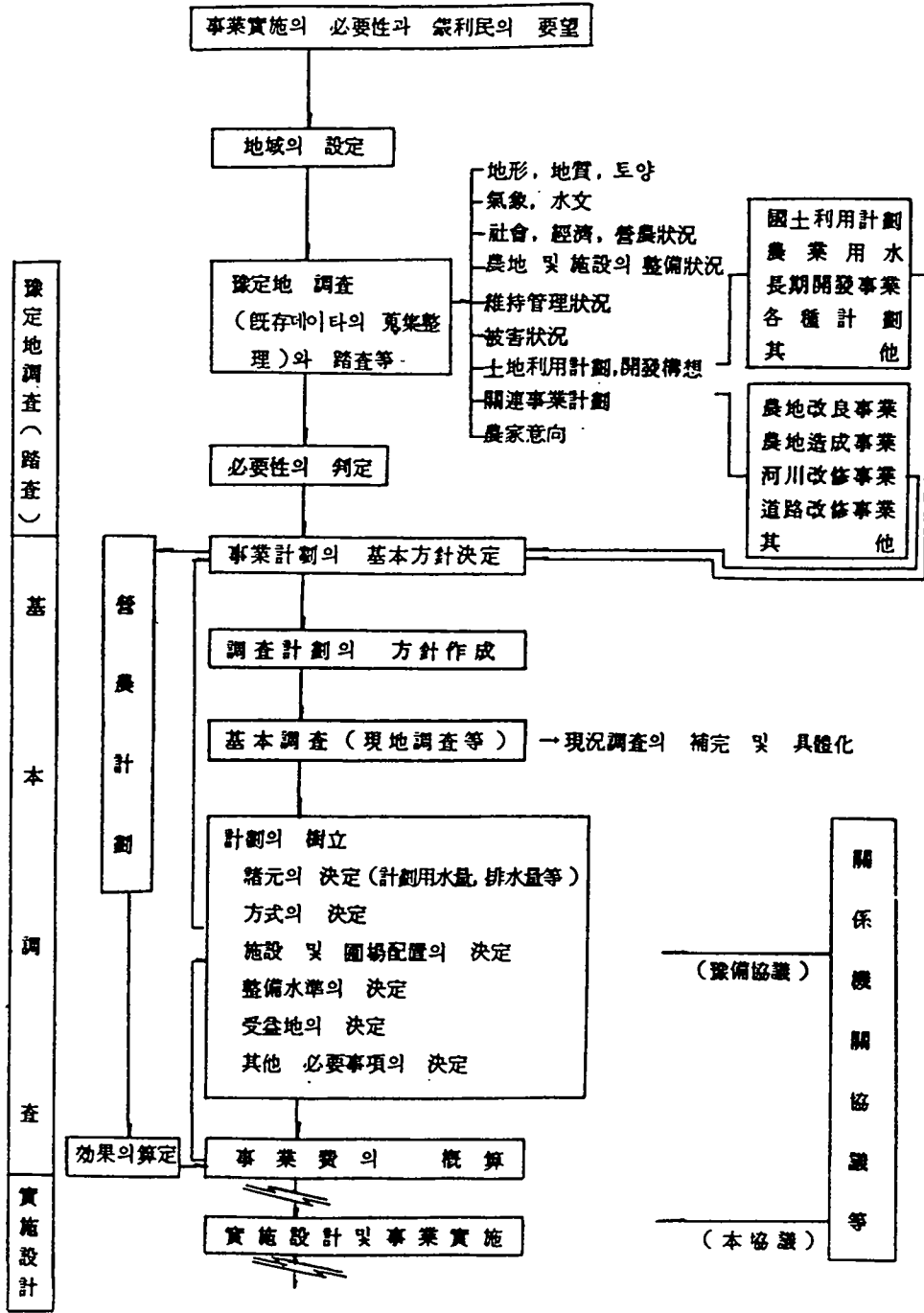


그림 8-1. 관개개선사업 조사설계 흐름도
 (농지개량사업 계획설계 기준, 관계편, p20. 노림부 1983)

지하댐조사 설계에서는 지하수분야외에 기상수문분야 토양 및 농업분야, 이용시설 등 각 분야의 조사 및 계획 설계가 필요하나 본 장에서는 주로 지하수 분야의 조사설계 요령을 검토하였으므로 필요시 관련 문헌과 도서를 참고하여야 할 것이다.

2. 지하수 조사항목과 규모

지하수조사에 있어서 우선 대상을 분명히 하고 특질을 이해하는 것이 중요하며 지하수에 대한 체계적 접근이 필요하다. 지하수조사의 항목은 다음과 같다.

- 기본조사 ----- 지구답사 및 지형조사
지표지질조사
- 물리탐사 ----- 선구조추출
저주파탐사
전기탐사
- 지하지질조사 ----- 시추조사
물리검층
- 대수층조사 ----- 기설관정조사
착정조사
양수시험
- 토목조사 ----- 수준측량 및 면적조사
기존수리시설 현황조사
- 지하수문조사 ----- 기상 및 수문조사
지하수위 관측조사
지하수 이용 및 영향조사

지하수조사의 규모는 조사목적과 요구되는 문제점의 범위, 대상지역의 자연적 사회적 조건에 따라 결정된다.

지역적 관점에서 보면 광역적 조사와 국소적 조사로 나눌 수 있고 시간적 관

점에서 보면 장기적 조사와 단기적 조사로 나눌 수 있다.

광역조사는 최소한 하나의 지하수역(地下水域, groundwater basin)을 포함하여 조사지구 전체를 하나의 물 수지 구역으로 조사하는 것이고 국소조사는 지하수 개발예정지 조사나 또는 토목공사 등에 관련된 지하수 조사이다..

장기적 조사는 최소한 1수문년을 기간으로 하는 조사이고 그 이하는 단기적 조사라고 할 수 있다.

지하댐 설계자료 취득을 위한 지하수조사는 그 범위로 볼때 광역조사에 해당되고 기간으로 볼때 장기조사에 해당된다고 할수 있다.

조사작업량은 지역조건에 따라 결정되어야 하나 경제적인 조사량 기준으로 현재 농어촌진흥공사에서 적용하고 있는 수맥조사 조사량기준은 다음 표와 같다

표 8-1 수리지질조사 기준조사량 (1지구 30ha 기준)

구 분	단 위	총적층조사	암반조사	비 고
(기본조사)				
지구 답사	ha	30	30	
지표지질조사	"	60	60	
(물리탐사)				
선구조추출	지구	1	1	
저주파탐사	점		200	
전기탐사	"	15	10	
(시추조사)				
총적층시추	공	2		
암반시추	"		1~4	물리검층 및 수질 검사병행
(대수층조사)				
기설관정조사	공	3		기설관정 양수시험
착 정 조 사	"	1		양수시험병행
수위관측공설치	"	14		지하수면 일제조사
(토목조사)				
수준측량	지구	1	1	
수문조사	"	1	1	필요시 시행

※자료 : 농어촌진흥공사 수맥조사 시행기준

3. 조사설계의 단계별 유의사항

가. 지구선정 단계

기본계획에 앞서 대상지구에 관련된 각종 통계자료와 기존자료를 근거로 현지를 답사하고 관계기관과 수혜대상 주민의 의견을 청취하여 사업의 필요성을 판단하여야 한다. 기존자료는 지형도(1/50,000, 1/25,000, 1/5,000), 지질도, 토양도, 수원별 관개구역도 등 간행물과 대상지구내의 수원공시설의 자료 등을 수집한다.

답사시 지하수부존 가능성을 개략적으로 판단하고 기타 수원개발 예정지의 유무를 검토하며 지하댐 적정여부와 물막이벽 사이트선정등 기술적 타당성을 검토하여야 하므로 이 분야에 경험이 많은 기술자가 참여하여야 한다.

또한 지구선정 단계에서 사업시행 여부를 가늠하기 위하여 현재의 영농현황과 수리상황, 영농개선에 대한 농가의 의향등을 청문조사하여 사회경제적 가능성을 검토하여야 한다.

나. 조사 예비단계

조사목적과 조사방법을 확실히 하는 것이 중요하다. 조사대상과 접근방법 및 그에 대응하는 조사계획, 규모, 각 조사항목의 정도(精度), 중점조사 항목 등을 결정하여야 한다.

문제가 있는 경우는 어느 특정항목만을 상세히 조사해도 좋은 결과를 얻을 수도 있음을 유의해야 한다.

조사시행시 대상지역은 물론 같은 범주에 속하는 기존자료를 수집하는 것이 필요하다. 이것은 작업의 능률을 높일 뿐 아니라 개인적인 독단을 피하기 위한 점도 있다.

지하수위 조사와 유동조사 등에는 기존의 우물들을 이용할 수 있는데 조사에 앞서 각 우물의 심도, 구경, 주상지질 등 여러 항목을 미리 파악할 필요가 있다.

다. 조사 실시단계

지하수현상의 복잡성으로 지하수조사에 의하여 모든 것을 명확히 하기는 불가능한 것이다. 어느 부분은 추측하는 영역도 있을 수 있는데 그럴 때는 추측하는 최소한의 근거 자료가 필요하다. 다시 말하면 하나의 현상에 대하여 가설을 세우고 이것을 하나하나 검증해 가는 것인데 이것은 조사의 능률을 높이는 데도 필요하다.

기본적 조사사항 이외에 추가하여 청문조사도 필요하다. 이것은 지하수에 관한 자연적 요인 이외에 사회적 요인을 동시에 파악하는데 도움이 된다.

라. 조사결과 평가단계

평가단계에서 유의할 사항은 어떤 문제에 대하여 하나의 결론을 도출하는 데는 방법에 따라 서로 다른 결과가 나올 수 있으므로 몇 가지의 방법과 절차를 병행하여 결과를 비교 검증하는 것이 필요하다. 또한 지하수에 대한 이론은 자연현상을 단순화시키고 여러 가지 가정을 두고 유도한 것이므로 실제 결과는 이론적 해석과 다를 수 있으며 이러한 경우 현장조건을 재검토하여 이론의 경우와 다른 점을 찾아 결과를 보완하는 것이 좋다.

마. 설계 단계

지하수 조사단계는 지하수 부존을 평가하기 위한 확인단계라 할 수 있으나 조사결과를 인용하여 계획을 수립할 때는 목적과 자료의 중요도에 따라 조사결과를 재 검토할 필요가 있다.

지하수 부존평가의 제 1단계는 조사결과를 분석 정리하여 지역의 수리지질구조를 정립하고 대수층 구조와 지하수위 분포를 확인하는 것이다. 특히 지하댐 설계에 있어서는 지하 물막이벽을 설치하였을때의 저류량과 이용가능량이 주 검토대상이 된다. 저류량은 대수층의 체적과 저류계수에 의해 산정되나 조사량이 부족하거나 조사방법 및 조사시기가 부적절한 경우에는 신뢰할 수 없는 결과가 나올 수 있다. 또한 지하수 이용가능량은 대수층의 집수능력 즉 투수계수와 관계되므로 이에 대한 면밀한 검토가 요구된다.

이러한 설계 자료 확인절차를 거치더라도 별도로 유의 해야할 사항은 지하댐 시설이 가뭄시에 어떠한 영향을 받을 것인가를 고려해야 된다. 이를 위하여는 강우량과 유출량, 지하수함양량과 배수량(Drainage) 등을 비교 분석하므로써 가뭄상황에서의 시설관리와 지하수 및 지표수의 연계이용방안도 검토되어야 한다.

제 2 절 조사 요령

1. 지하댐 예정지구 선정조사 요령

가. 예정지 답사

답사에는 기수집된 자료를 도면에 표시하여 현지에서 확인한다. 지형 및 지질상황과 하천등 유수상황, 기존 수리시설, 경지구획, 도로 등을 조사하여 결과를 도면에 정리한다. 답사시에는 가능한한 지구의 실정에 밝은 사람을 대동하는 것이 바람직하다.

예정지답사의 결과 판단하여야할 사항은 다음과 같다.

1) 예정지 조사에서 얻은 결과를 바탕으로, 해당지역에서의 사업의 필요성, 타당성 검토

- 용수부족지의 피해상황 파악
- 수리시설현황, 이용현황, 노후화 현황 파악
- 물관리등 수리 및 유지관리 상황
- 관련사업(수자원개발, 하천개보수등)의 추진계획

2) 농민의견, 행정기관장의 의견, 농조의 의견 등을 종합한 조사설계 방향의 검토

3) 관련되는 계획과의 저촉여부 확인

- 수원이 별도 사업의 시설에 의할때 그 사업계획의 범위와 진척사항
- 하천개보수 계획과의 관련성
- 기타 타사업과의 관련성

4) 사업실시의 가능성 검토

- 몽리구역 개략 선정(지형도에 정리)
- 필요수량 계산(단위용수량, 유효수량, 수원의존량)
- 주요공사의 개략계획(수원공, 지하댐, 이용시설 등)
- 사례지구와 비교한 사업비 효과 개략 분석

나. 지하저수지 사이트의 요건

지하저수지란 지하의 대수층을 이용해 물을 저류함으로써 하천의 유황을 평활하게 만들어 수자원을 개발하는 시스템이다. 지하저수지 사이트로서의 요건은 대수층조건과 지형조건으로 나누어 생각할 수 있는데 대수층조건으로서는

- ① 함양이 용이한 곳
- ② 지하수위의 변동에따라 큰 장애가 발생하지 않는 곳

등의 두 조건을 들 수 있는데 ①의 조건을 만족하는 지층으로서는 모래와 자갈

층이다. 모래와 자갈층은 유효공극율이 크고 투수계수가 크기때문에 물의 저장과 이동이 용이하다. 모래·자갈층이외에 석회암등도 공극이 큰 경우는 지하저수지에 적합하다. 일본의 미야코지마(宮古島) 지하댐은 석회암 지역의 좋은 예이다.

②의 조건을 만족하는데 문제가 되는것은 점토층의 존재다. 자갈층의 상부에 압밀되기 쉬운 점토층이 두껍게 존재하는 경우 지반침하의 염려가 있다. 지하수위가 높은 지역에서는 지하수위를 상승시켰을때 경지에 습지가 발생하여 농작물에 피해를 줄 수 있기 때문에 충분한 검토가 필요하다.

지형조건으로서는

- ① 대수층이 넓고 평활하게 퇴적된 지역
- ② 지하수함양원이 되는 계곡하천과 넓은 유역이 있는 지역
- ③ 하상 및 경지의 경사가 완만한 지역
- ④ 물막이벽 설치 사이트로서 협곡부가 존재하는 지역

등의 조건을 들 수 있는데 ①, ②, ③의 조건은 강과 큰 하천에 의해 발달한 평야부에서도 만족된다. 대개 이러한 하안평야는 대수층이 비교적 두껍고 자연적인 지하저수지 역할을 하는 경우가 많다. 그러나 지하댐 계획으로 지하수를 이용하려 하면 ④의 조건을 동시에 만족하는 지역이어야 하는데 이러한 곳은 대개 소유역 계곡평야로서 계곡하천의 유출부가 협곡부를 이루어 있는 지형이 지하댐 예정지구로 유리하다고 할 수 있다.

다. 지표수와 지하수 연계이용

지구선정조사시 유역의 수자원 효율적 이용방안이 검토되어야 한다. 가뭄이 발생할 경우 지표수와 지하수를 통합하여 효율적으로 이용하면 가뭄을 극복할 수 있기 때문이다. 지표저수지와 지하저수지의 장단점 비교검토에 대하여는 제

3장 제1절의 지하댐 개념에 기술하였으나 이를 다시 요약하면 다음과 같다.

○지상저수지 : 물의 출납이 용이하다. 하천수는 자동적으로 저수되어 게이트를 열고 유출한다. 용량이 적다 (저수량은 강수량 환산에서 수십㎞ 정도임).

○지하저수지 : 물의 출납이 어렵다. 주입을 위한 함양시설이 필요하다. 용량이 크다 (지상댐이 용량에 비해 수배).

그러므로 지하저수지는 지상저수지를 도와 수자원개발에 기여하는 역할이 크다고 할 수 있다.

특히 이상갈수대책에서 지표수의 개발수량은 10년 빈도의 기준갈수년을 대상으로 필요한 댐의 용량을 계산하는 방식이 통상적이다. 바꾸어 말하면 10년에 1회정도 심한 심한 가뭄이 발생하여 저수지용량 부족을 초래하는 것을 상정하고 있다.

이것은 계획수립에 항상 따라다니는 문제로서 계획이 크면 반드시 좋은 것만이 아니라 경제성도 생각해야 하기때문이다. 계획범위를 넘는 이상갈수 현상이 발생했을때 최소한의 가뭄대책은 지하수를 효율적으로 이용하는 것이다.

이의 방법은 지표수와 지하수의 연계이용(Conjunctive use) 방안으로서

- ① 하천에 지상저수지가 없이 지하저수지만 설치할때와
- ② 상류에 지상저수지가 설치되어 있고 그 하류에 지하저수지를 설치하여 운영하는 경우를 상정할 수 있다.

①의 경우는 풍수시 지표수를 먼저 이용하고 지하수를 보존하였다가 유황이 나빠져 지표수를 이용할 수 없을때 지하수를 사용하는 하천수와 지하수의 연계이용이다.

②의 경우 지상저수지와 지하저수지가 연계운동될때의 규칙은 다음과 같이 설정하는 것이 바람직하다.

- 지상저수지의 공간용량을 가능한 한 크게 하기 위하여 지하저수지 용량을

여유있게 하고 항상 지상저수지의 물을 지하저수지로 함양시킨다.

- 하천수가 부족할때 지구내의 급수는 먼저 지상저수지에서 실시하고 지상저수량이 0 이 될때 지하저수지에서 보급한다.

이렇게 운용할때 지상저수지가 1년 이내에서 유향조절을 담당하고 지하저수지는 수년에 걸쳐 유향의 조절을 담당할 수 있도록 자연적으로 역할의 분담이 이루어진다.

2. 지하수조사 과정별 조사요령

가. 지형조사

지하수의 거동은 수문학적 순환과정에서 함양(recharge), 유동(flow), 배출(discharge)의 과정으로 나눌 수 있는데 이들은 지형의 규모, 기복의 고저, 지표경사 등과 깊은 관계가 있으며 대부분 지하수면의 형태는 지형의 영향을 받는다. 그러므로 수자원으로서의 지하수개발·이용 측면에서나 또는 배수 계획 수립을 위하여 지형조사가 요구된다.

지형조사는 지하수조사의 예비조사단계로서 조사대상지역의 지형분류, 지형면 구분 등이 주 작업으로 1차적으로는 지형도(1/25,000 또는 1/50,000)에 의한 실내작업을 시행한다. 지형조사만을 별도로 현지조사할 필요는 없으며 대개 지표지질조사와 병행하게 되는데 현장조사시는 지형도와 항공사진을 기초로 작성한 조사지역의 지형분류도를 현지 보정 및 확인하며 지형도에서 읽을 수 없는 미소한 기복의 존재, 용천의 위치와 고도, 지하수 산출지점과 고도 등을 점검하여 지하수면 등고선도 작성에 참고 자료로 한다. 지형조사만으로 지하수 부존성을 평가할 수는 없으나 지형조사 단계에서 기설 우물의 수위관측조사와 수준 측량을 병행하면 지하수면 등고선을 작성할 수 있다.

나. 지표지질조사

지표지질조사의 목적은 여러 지질학적 현상들을 야외에서 직접 확인하고 이에 관련된 지구조(地構造)적인 과정을 노출된 암석, 지층의 종류 및 분포로부터 추론하여 최종 결과물인 지질도를 작성하는 일련의 과정을 말한다.

지하수 조사목적의 지표지질조사는 대수층 발달조건과 관련있는 지하지질구조를 찾기 위한 기초조사로서, 사전답사, 지질도 및 위성영상자료(Landsat)에 의한 도상답사, 현장지질조사, 지질구조도 및 보고서 작성의 4단계로 나눌 수 있다.

첫째, 사전답사는 해당지역이 대수층 발달에 좋은 조건인지를 확인하고 이를 근거로 지하수 조사 및 개발에 필요한 장비의 진입가능성과 주변의 작업환경을 살펴야 하며 이때 해당지역의 토지소유자와의 협의도 이루어져야 한다.

둘째, 지질도 및 위성자료에 의한 도상답사는 해당지역의 지형과 지질의 관계를 알기 위해 조사용 축척의 지형도상에 지질도를 옮겨 기록하는 것이 좋다. 위성자료는 지형적으로 나타나는 단층선 들과 선구조선(lineament)을 알 수 있기 때문에 현장지질조사에 앞서 중요한 점토자료가 된다.

셋째, 현장지질조사는 사전답사와 실내 도상작업에서 나타난 여러 지질학적 상황들을 실제 확인하는 과정으로 진행한다. 현장지질조사는 단층이나 선구조선의 인지는 물론이고 충적층 퇴적환경에 영향을 주는 지형조건과 퇴적물 입도 구성등을 확인하는 작업도 필요하다.

넷째, 지질구조도 및 보고서 작성은 지질 구조적 현상들이 일반적으로 규모가 너무 크고 복잡하기 때문에, 조사대상 지역의 지질구조에 대한 정보를 얻기가 어렵다. 그렇기 때문에 현장지질조사에 의한 자료를 기초로 세부적인 지질구조도를 작성하여야 한다. 조사보고서에는 사전답사에서 부터 도상답사 및 현장지질조사까지의 조사내용과 분석된 사항을 빠짐없이 기록하여 이를 근거로

물리탐사의 기본설계에 기초자료가 되도록 한다.

다. 물리탐사

1) 개 요

물리탐사는 지반의 물리적 현상을 이용하여 지질 및 지질구조를 추측하는 방법으로 지하수조사에 매우 유효한 수단이 된다. 물리탐사는 타 방법에 비교하여 조사작업의 간편성, 신속성, 경제성의 측면에서 큰 장점이 있으며 지하수조사에 있어서 물리탐사의 주역할은 다음과 같다.

- 대수층 지반의 구조추정
- 대수층 지반의 성질파악
- 특수지층의 추적 또는 대비

지하수조사에 사용되는 물리탐사 방법은 표 8-2와 같다.

물리탐사의 결과 구해지는 것은 지반의 물리량의 평면적 또는 수직적 분포를 나타내는 것으로서 복잡한 지질 및 지질구조의 평균적이고 단순화된 상태를 보여주는 것이다. 지하수조사에 있어서 물리량은 당연히 수리지질학적 관점에서 해석하여야 하며 지하수도 지질현상의 일부라고 볼 수 있음을 유의해야 한다.

표 8-2 지하수조사에 이용되는 물리탐사

탐사방법		이용하는 물리현상	측정기록	구하는 물리량	주 적용대상
전기 탐사	비저항법	정상 전류현상	전위차, 전류, 저항	비저항(Ωm)	지질판별 및 수리지질구조대수층분포
	자연전위법 (SP)	자연분극현상	전위차	자연전위(mV)	
	유도분극법 (IP)	유도분극현상	전위차 · 주파수 · 전류 · 저항	전 원(ms) 주파수효과(fe)	
전자 탐사	저주파 (VLF)	유도전자장현상	자장강도, phase 변이	경사각, 이심율	지질구조대 분포
	전자파 (EM)	"	주파수영역, 임피던스	비저항(Ωm)	
탄성파탐사 (굴절법)		탄성파동현상	탄성파 전달시간	탄성파 전달속도	지질판별 및 수리지질구조

계획단계는 조사지역을 포함한 주위의 지형지질과 해당지역의 수리지질상황을 파악할 수 있도록 조사규모와 물리탐사 축선, 측정점의 배치를 하여야 한다. 측정치의 해석단계에서는 수리지질학적으로 부자연스런 측정치가 있을 때는 해석치를 점검하여 경우에 따라서는 제외할 수 있다.

지하수조사의 주 대상인 지하지질의 암상(岩相), 함수량, 표토의 성질과 두께 등이 평면적으로나 수직적으로 변화가 현저할 때 이의 영향을 포함하는 물리량을 일률적으로 해석하는 것은 실제적으로 용이하지 않으므로 경우에 따라서는 별도의 물리탐사 방법을 동시에 시행하여 비교 해석하는 것이 좋다.

2) 전기 비저항 탐사

비저항법(比抵抗法)은 대지(大地)에 전류를 흘릴 때 형성된 전위차를 측정하여 지층의 비저항을 해석하는 방법이다. 지층의 암석을 구성하고 있는 광물의

종류, 구성입자간의 공극에 들어있는 물의 이온농도와 온도에 따라 다른 비저항을 나타내기 때문에 이 성질을 이용하여 지하지질구조를 추정할 수 있다.

전극간격을 확대하여 측정하면 전류는 더 깊은 심도를 흐르게 되므로 겉보기 비저항도 깊은 심도의 지질 영향을 나타낸다. 수직탐사는 이러한 현상을 이용하여 같은 지점에서 수직적인 비저항 분포를 추정하는 것이며, 보통 사용하는 전극배열 방식은 웨너법(Wenner method), 슬럼버저법(Shlumberger method), 3극법(Pole-dipole method), 쌍극자법(Dipol-dipole method) 등이 있으나 충전충탐사에서는 보통 웨너식 배열법을 사용한다.

조사대상지역에서의 측선과 측정배치는 주위의 지형과 지질을 고려하여 계획하여야 한다. 충전충 지역에서 수직탐사 측선간격은 150~300m 측정간격은 50~200m범위내에서 배열하며 측정심도는 50m를 기준으로 하고 있다.

탐사시 각각의 전극간격에 해당되는 겉보기 비저항값 ρ_a 와 전극간격 a 의 관계를 그리면 비저항곡선을 얻을 수 있다. 실측된 비저항곡선의 해석절차를 약술하면 다음과 같다.

① 측정된 겉보기비저항 값을 투명 양대수방안지에 플롯트하여 비저항 곡선을 그리고 표준곡선도 위에 언저 합치되는 표준곡선을 찾는다.

② 표준곡선도의 원점($\rho_a/\rho_1=1, a/d=1$)을 비저항 곡선도 위에 플롯트하면 이점의 비저항값과 심도를 읽어 제1층의 값(ρ_1, d_1)으로 한다.

③ 제2층의 비저항은 합치된 표준곡선의 ρ_2/ρ_1 값을 읽어 ρ_2 를 계산한다.

④ 제2층의 심도와 제3층의 비저항을 구하기 위하여는 별도의 보조곡선을 이용하여 구한다.

3층구조 이상에서는 표준곡선과 보조곡선을 반복하여 이용(curve matching) 하므로써 구할 수 있으나 순서가 복잡할 뿐 아니라 오차가 예상외로 커질 수

있으므로 주의를 요한다. 근년에는 전탐해석에 대한 여러가지 전산프로그램이 개발되고 PC가 보급되어 이러한 번잡한 해석방법을 피하고 컴퓨터 해석으로 하고 있다.

그러나 이러한 해석이 실제와 잘 맞는지는 별도의 검토가 필요하다. 비저항은 지층의 고유 구성물질의 조직, 공극율, 점토분, 지하수 수질, 함수량 등 각종 성질을 반영하고 있기 때문에 구해진 비저항 값이 어느 특정 지질상황을 나타낸다고 해석할 수는 없다.

3) 탄성과 탐사

탄성과 탐사는 지표 또는 지중에서 인공적으로 발생시킨 탄성파가 땅속을 전파하는 속도를 측정함으로써 지질구조를 해석하는 방법이다. 일반적으로 지하수탐사에 쓰이는 탄성과 탐사는 굴절파(refraction wave)를 측정하는 굴절법(屈折法)을 쓴다.

진원 에서 발생한 탄성파가 땅속으로 전파할 때 그 일부는 제2층에 도달하여 반사하거나 굴절하여 다시 표토에 도달되는데 최초로 도달되는 시간을 측정하므로서 진원으로부터의 거리와 도달시간의 관계를 그리면 주시곡선(走時曲線, time-distance graph)을 얻는다. 이 주시곡선을 해석하므로서 제1층의 속도 V_1 , 제2층의 속도 V_2 그리고 제1층의 심도 Z 를 구할 수 있다.

굴절법은 충적층의 심도를 구하는데 특히 유리한데 이것은 충적층의 점토, 모래층에서 탄성파 속도는 0.5~1.5km/sec, 사력층에서 1.0~2.5km/sec인데, 화강암에서 3.5~5.5km/sec로서 지층구분이 확실하게 나타나기 때문이다. 같은 기반암에서도 풍화대나 파쇄대에서 속도가 아주 작아지므로 이러한 성질을 지하수탐사에 이용할 수 있다.

4) 전자탐사

전자탐사법은 금속광체 또는 파쇄대나 단층과 같은 지질구조선에 점토광물

및 물이 많이 함유되어 있어 전기전도도가 높은 전기적 양도체를 탐사하는 방법이다. 이 방법은 일반적으로 송신 코일에 교류전류를 흘려 발생하는 1차 자장이 지하의 양도체에 2차전류(와전류)를 여기(勵起)시키고 이 2차전류에 의한 2차 자장을 측정하여 양도체의 위치 및 부존상황에 대한 정보를 얻어내는 방법으로, 특정주파수를 이용하는 극저주파(VLF : Very Low Frequency) 탐사와 광대역 주파수를 이용하는 MT(Magneto Telluric)탐사로 나눌 수 있다.

극저주파탐사는 전세계 여러 곳에 설치된 수십 미터 높이의 수직안테나에 강력한 교류를 통해 발생하는 대 잠수함용 15~25kHz의 주파수대역의 전자파를 광채탐사의 신호원으로 사용하여 수신기만을 갖고 광채를 탐사하는 방법으로, 우리나라의 경우 신호원으로 호주의 NWC(22.3kHz)와 일본의 NDT(17.4kHz)를 이용하며 가탐 심도가 약 50m 내외인 천부의 지질구조조사에 적합한 방법이다.

MT탐사는 0.001~20,000Hz에 이르는 광대역 주파수의 자연전자장(뇌우에 의한 지전류 : telluric current)을 에너지원으로 하며, 이러한 자연발생적인 지전류가 땅속을 통과하면서 발생시키는 전기장 및 자기장을 측정하여 광채탐사나 지질구조를 탐사하는 방법으로 그 탐사심도가 수십 km에 달하기 때문에 심부탐사에 적합하며, 국부적인 이상대의 파악보다는 광역적인 구조파악에 적합한 방법이다.

극저주파탐사의 측정은 예상구조선에 수직되게 측선을 설정하고 등간격으로 측정한 후 위치를 이동하여 반복적으로 실시한다. 이때, 측정되는 것은 경사각(tilting angle, 동상성분)과 이심율(ellpticity, 이상성분)로서 측정된 값은 전도성 광체나 지질구조선의 직상부에서 항상 두 측정치가 0으로 되는 반전점(cross-over point)이 형성되며, 이 점들을 연결하면 지질구조선의 방향을 알아낼 수 있다.

라. 시추조사

시추조사(試錐調査, boring test)의 목적은 지표지질조사와 물리탐사 결과에 의하여 추정되는 지하지질구조와 지하수 부존성을 확인하는데 있다. 시추조사의 분류는 조사목적에 따라 지질조사 시추와 지하수조사 시추로 구분할 수 있고 조사대상 지층에 따라 충적층 시추와 암반시추로 구분할 수도 있다. 지하수 시추조사는 지층의 투수성, 대수층의 심도 및 두께 확인과 지하수개발 및 관측공의 설계자료 취득을 목적으로 한다.

시추조사 굴착방법은 찬공(鑽工)주입수의 방식에 따라 오거식, 이수회전식, 청수회전식, 압축공기식 등으로 나눌 수 있다. 오거식은 주입수 없이 구멍을 파내는 방법으로 수동 오거(hand auger)와 기계 오거가 있는데, 수동 오거는 토양시료 채취와 지하수위 관측조사등 얇은 심도(4m이내) 조사에 많이 이용된다.

이수회전식은 점토 또는 벤토나이트를 물에 혼합한 이수(mud fluid)를 시추공에 주입하여 이수의 특성으로 공벽(孔壁)을 유지시키며 이수의 회전에 따라 굴착 쇄설물을 지표로 운반시키는 공법이며 보통 충적층 조사에 많이 이용한다.

충적층의 지하수 시추조사는 지역의 지형 및 지표지질조사와 물리탐사결과를 감안하여 지역을 대표할 수 있는 지점을 선정하고 이수공법 선단장치인 윙빗트(wing bit) 또는 트리콘빗트(tricone bit)로 지층을 분쇄하고 이수 순환의 상승속도(20~40m/min)에 의하여 쇄설물을 지표로 운반하는 굴진한다. 이공법은 원지층을 확인할 수 없는 단점이 있으나 쇄설물, 즉 슬라임(slim)을 굴진 심도별로 채취하여 분석하면 지층별 구성성분을 판별할 수 있다. 지질기술자는 슬라임의 입도와 광물성분, 깨진 면 등을 관찰하므로써 퇴적물의 원천과 퇴적 상황, 지하수부존 가능성 등을 추정하며 지질주상도(drill log)를 작성한다.

시추조사의 2차 목적은 대수층을 조사하는 것인데 지하수의 수위와 수질을 관측하기 위하여는 시추굴진 완료후 공내에 관 자재를 삽입하여 관측공을 설치

하여야 한다. 관측공은 수위관측과 수질시료 채취는 물론 대수층 상수를 구하는데도 이용된다. 보통 관측우물의 구경은 50mm내외인데 양수시험을 위하여 150mm 이상의 큰 구경을 설치하는 경우도 있어 이를 위한 대구경 시추조사를 착정조사(鑿井調査, test drilling)로 구분하기도 한다.

관측공 설치 절차를 약술하면, 대수층 구간에 유공관(screen 또는 strainer)을 삽입하고 그 주위 공벽에 2~5mm 구경의 세 골재를 충전하여 대수층의 모래 유입을 막아야 한다. 이 골재 필터(gravel filter)의 두께는 5cm 이상이어야 하므로 관측공 구경과 필터 두께 등을 감안하여 시추구경을 결정하여야 한다. 골재 충전후 공내에 물 또는 공기를 주입하여 공 내부와 시추 굴착시 형성된 점토공벽을 씻어 내야 한다.

마. 대수층 조사

1) 대수층 조사 개요

대수층조사(帶水層調査, aquifer testing)의 목적은 대수층의 특성을 파악하여 대수층에 저류 되어 있는 지하수를 정량적으로 평가하는데 있다.

대수층의 특성이란 물 전달능력과 저류능력을 말하며 이것을 정량적으로 표현하기 위하여 수리학적정수(수리상수)가 도입되었다. 기본적인 수리상수는 수리전도도(hydraulic conductivity), 투수량계수(transmissivity), 투수계수(permeability) 및 저류계수(storage coefficient) 등이다. 이외에 여러 개의 관측공을 이용하면 대수층의 이방성(formation anisotropy)과 지하수의 유향 및 유속을 조사할 수 있다.

대수층의 수리상수를 구하는데는 실내법과 야외법이 있는데 실내법은 특정지점의 대수층시료를 채취하여 다-시 법칙에 의한 실내실험으로 공극율과 투수계수 등을 구하는 것이며 이 실험치를 야외에 적용하는데는 한계가 있다. 야외법

은 대수층의 자연상태를 유지하고 양수시험 또는 주입시험에 의해 수위변화를 관측하고 그 자료를 이론적인 대수층 수리모델과 비교하므로써 대수층 수리상수를 해석하는 것이다.

2) 양수시험

① 양수시험 설계

양수시험(揚水試驗, pumping test)을 시행하고자 하는 지역의 선 조사 자료를 종합하여 양수시험 시행에 관한 계획을 수립한다. 양수시험 설계단계에서 필요한 자료는 다음과 같다.

○ 대수층정보 - 자유면대수층, 피압대수층, 누수층 여부

- 대수층 두께와 대수층 경계

○ 우물정보 - 시험대상 우물 개소와 위치

- 착정 구경, 우물자재구경, 심도

- 우물주상도, 우물자재 설치도

- 자연수위

○ 관측공정보 - 관측공 개소와 위치, 양수우물과의 거리

양수시험의 방법에 있어 일정양수량법(constant flow rate)과 일정수위강하법(constant draw down)이 있는데, 일정양수량법은 수위강하량이 양수시간의 함수가 되고 일정수위강하법은 양수량이 시간의 함수가 된다. 일반적으로 양수량을 고정하고 시험하는 일정양수량법을 많이 채택한다. 양수우물의 개소와 관련하여 단일우물시험법과 몇개공의 동시양수시험법(multi-well test)이 있는데 계획 수립시에 그 시행여부가 검토되어야 한다.

② 양수장비와 계측장비

양수시 수위강하량과 양정을 고려하여 적정양수기를 선정한다. 양수수위가 지표에서 7~8m 미만이면 흡상 펌프를 사용할 수 있으나 그 이상일 경우는

수중모터펌프를 사용하여야 한다. 동력은 펌프규격에 맞는 전력을 이용하여야 하나 전력이 연결되지 않는 곳에서는 발전기 또는 엔진을 사용하여야 하므로 장기간 양수시험 시 인근 주거지에 소음공해가 있을 수 있다.

양수장비 이외에 배출지점까지의 배관과 유량을 조정하기 위한 제수변, 유량 측정장치, 수위측정장치, 시계 등이 필수장비이며, 양수우물 및 관측공의 표고와 거리를 측량하는 장비도 필요하다.

유량측정장치로는 삼각 웨어(weir), 사각 웨어, 원구언(circular orifice)장치 등이 이용되나 유량계(流量計, flow meter)를 토출구에 연결하여 계측하는 것이 편리하다.

수위측정장치는 전류식 수위측정기를 많이 이용하나 양수우물과 관측공별로 측정인력이 과다하므로 자동수위기록계를 이용하는 것이 편리하다.

③ 양수시험 실시

양수시험은 양수량을 일정하게 유지시키면서 시간경과에 따른 지하수위 강하를 측정한다. 이때의 일정양수량(계획양수량)을 결정하기 위하여는 우선 예비양수시험(단계양수시험)을 시행하여 양수량과 수위강하량을 양대수 방안지에 플롯트하고 직선 상에 변곡점이 생기지 않는 범위에서 정한다. 장기양수시험을 할 때는 비평형 상태의 수위강하를 고려하여 계획양수량을 결정하여야 한다.

양수시험 개시전 양수우물과 각 관측공의 초기수위(자연수위)를 측정하고 제수변 밸브를 잠근 상태에서 펌프가동과 동시에 밸브를 서서 풀어 계획양수량에 이르게 한다. 양수시험중 양수량을 일정하게 유지해야 하므로 수시로 유량을 확인하고 밸브를 조정하여야 한다.

수위측정은 양수개시 직후와 양수정지 직후에 수위가 급격히 변할 뿐 아니라 결과의 해석에 매우 중요한 역할을 하므로 세밀히 측정하여야 한다. 구체적으로 예를 들면 양수개시후 1분간은 10초단위, 다음 5분간은 30초단위, 10분간

은 1분단위, 30분간은 5분단위, 1시간은 10분단위 그 이후는 30분단위로 시간 간격을 늘리면서 수위를 측정한다. 양수우물과 동시에 각 관측공에서도 동시에 관측하여야 하므로 각 측정장소에 인원과 측정기를 배치하여야 하므로 인력을 절감하기 위하여 부표식(float) 또는 수심감지센서 장치를 갖춘 자동수위 기록계를 고정 설치하는 것이 좋다.

양수시험 계속시간은 우물의 조건에 따라서 다를 수 있다. 평형상태에 도달하는 시간이 수시간 정도인 경우도 있고 며칠이 걸리는 수도 있다.

양수시험 종료 시에는 펌프를 정지시키는 직후 수위가 상승되는데 양수시험 개시 때와 같은 시간간격으로 회복수위를 측정한다.

④ 자료 해석

양수시험 결과의 기록은 양수개시 시점부터 양수종료후 회복수위 측정까지 양수량과 각 시간별 수위측정 자료가 되는데 양수우물과 관측우물의 수위측정 값에서 초기수위(자연수위) 값을 빼면 수위강하량이 되며 양수개시 부터 경과 시간과 수위강하량의 관계를 대수방안지에 작도(t-s곡선)하여 해석한다.

t-s 곡선의 해석방법은 앞절의 우물수리학에서 설명한 정상류의 평형공식 및 부정류의 비평형공식의 이론과 표준곡선 등을 참고한다. 다만 유의하여야 할 것은 모든 우물 수리공식은 관측공에서 적용함이 원칙이며 관측공이 없는 경우는 회복수위법이나 다음에 설명하는 순간주입법(slug test)을 병행 조사하는 것이 좋다.

관측공이 여러 방향으로 있을 때는 각 관측공에서의 수리상수를 구하면 대수층의 평면적인 이방성(異方性, anisotropy)을 해석할 수 있다.

3) 순간수위변화시험

순간수위변화시험은 오거공 또는 시추공내에서 수위를 순간적으로 상승시키거나 저하시킨 후 수위회복 과정을 시간경과와 함께 측정하므로써 대수층 상

수를 해석하는 방법이다. 수위변화가 순식간에 일어나므로 주위에 있는 관측공에 미치는 영향은 측정하기 어려우므로 단일공 시험으로 하며 대수층의 수리전도도가 10^{-2} cm/sec 이하인 경우에 이용할 수 있다.

공내에서 부피 V의 물을 베일러(bailer)에 의해 순간적으로 퍼 올린 후 수위 회복과 시간경과의 관계를 나타내는 순간배수시험(bailing test) 공식은 다음과 같다.

$$s' = \frac{V}{Tt} \text{-----} (8-1)$$

여기서 s' 는 잔류수위강하량, T는 투수량계수, t는 배수직후 경과시간으로서 t시간후의 잔류 수위강하량을 측정하면 대수층 투수량계수를 추정할 수 있다. 만일 배수량을 크게 하기 위하여 베일러 작동을 여러번 계속 시행하였다면 위 식은 다음과 같이 수정하여 쓸 수 있다.

$$s' = \frac{V}{T} \left[\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} + \dots + \frac{1}{t_n} \right] \text{-----} (8-2)$$

여기서 t_1, t_2, \dots, t_n 는 베일러 작동시점부터 s' 를 측정한 시점까지의 경과 시간이다.

순간배수의 역으로 순간주입을 하는 경우도 순간배수의 공식을 이용할 수 있다. 근래에는 일정부피의 슬러그(slug)를 순간적으로 공내에 삽입하여 상승된 수위가 강하하는 것을 측정하여 해석하는 슬러그시험법(slug test)이 많이 이용되는데 이것은 이 시험법에 적용되는 수학적 모델과 전산프로그램이 개발되어(예 AQTESOLV) 보급되었기 때문이다. 순간 수위변화는 수동으로 측정할 수 없을 정도로 민감하므로 자동 순간 수위측정장치(예, Hermit 2000)를 이

용하여야 한다.

슬러그시험 자료 해석방법에는 자유면대수층층에 적용하는 바우어-라이스 법(Bouwer-Rice method)과 부정류상태의 피압대수층에 적용하는 쿠퍼법(Cooper method)등이 있다.

바. 지하수위관측조사

1) 일제관측조사

지하수위 측정은 지하수면 또는 정수압면의 위치를 확인하는 작업으로 조사 작업에 특별히 어려운 점은 없으나 그 결과로 얻는 지하수 정보는 광범위하게 이용된다. 관측조사의 목적에 따라 단기간에 광범위한 지역에서 일제히 조사하는 일제관측조사와 장기간 같은 위치에서 계속적으로 조사하는 장기관측조사로 나눌 수 있다.

일제관측조사의 목적은 조사지역 전체의 지하수부존상황과 지하수유동상황을 파악하는데 있다. 조사의 결과는 지하수면 등고선도(groundwater table contour map)를 작도하여 지하수체(groundwater body)의 연속성을 확인하고 지하수면의 경사도에 따라 지하수 유동방향을 판정할 수 있다. 또한 지하수면 등고선도에 의하여 유선망(flow nets)도를 작도하면 흐름의 패턴을 해석하여 수리전도도의 분포를 구할 수 있다.

관측점의 선정은 시추조사공과 기존 우물시설을 이용하는데 넓은 지역의 등수위선을 그리기 위하여는 필요한 위치를 선정하여 관측공을 추가로 설치하여야 한다. 지하수위가 지표면에서 가까이 있는 지역은 오거 시추로도 지하수위를 관측할 수 있다.

관측공 신설시 대수층과 충분히 접촉되도록 깊게 하여야 하며 공내에 이수가 남아있을 때는 정확한 지하수위를 나타내지 못하므로 청소하여야 한다.

관측점은 많이 있을수록 좋으나 수위관측 인력과 소요시간의 문제로 적절한 관측점을 선정하여야 하는데 경험적으로 1㎢에 10점 이상이면 1/10,000 축척의 수위등고선도를 작성할 수가 있다. 충적층 평야지역에서는 지형과 지질이 단조로운 평탄부의 관측점을 줄이고 대신 산록부의 관측점을 늘리는 것이 좋다. 피압대수층의 경우는 자유면대수층의 경우보다 관측점의 수를 줄일 수 있다.

일제관측조사는 가능한 단기간에 마쳐야 하며 만일 조사기간중 비가오거나 양수작업등으로 지하수위 변동을 가져오는 경우는 조사작업은 실패로 돌아갈 수 있으므로 유의하여야 한다.

수위관측의 기준점은 각 관측점 상호간의 수준측량으로 표고를 결정하게 되는데 레벨 또는 핸드레벨을 사용할 수 있다.

2) 장기관측조사

지하수체는 공간적으로 변동하는 동시에 시간적으로도 변동하고 있으므로 일제관측조사에 이어 장기적 측정자료를 얻으면 지역 지하수 부존평가와 관리에 매우 유용하다. 지하수위는 강우에 의한 지하수함양과 하천 또는 관개수의 침투로 상승되고 증발산과 하천의 기저유출로 강하된다. 그러므로 지하수위의 변동조사는 지하수문 조사의 기초가 되며 지하수면의 상승은 지하수 저류량의 증가를 가져온다.

장기관측조사의 관측공은 조사대상 지하수역을 대표할 수 있는 지점을 선정하여야 하며 대수층의 수두를 잘 반영할 수 있도록 설치되어야 한다. 관측공 구경은 수위계측봉이 여유있게 삽입될 수 있는 충분한 구경이어야 하며 대수층 부위에는 개공율이 좋은 스트레나 관을 설치하도록 한다. 대수층이 다층구조로 되어 있을 때는 다른 대수층의 수두영향을 받지 않도록 밀폐하여야 한다.

관측장비는 수동식 수위측정기와 자기식(自記式) 수위계가 있는데, 수동식은 강철 테이프 자를 직접 관측공안에 넣어 수면을 확인하는 방법과 2선의 전선을

우물속에 삽입하여 수면이 닿을 때 전류가 흐르게 하여 수위심도를 재는 방법이 일반적이다. 수동식은 매일 일정한 시간에 인력으로 수위를 측정하여야 하므로 장기관측에는 적절치 않다. 자기식에는 부표식(float)과 수압식이 있는데 부표식 수위계는 지하수면 위에 부자를 띄우고 줄을 도르래에 연결하여 수면이 오르고 내릴 때 도르래가 돌게하고 그 움직임을 일정하게 회전하는 원통 기록지에 펜으로 그리도록 한 장치이고, 수압식은 압력 센서를 수중에 설치하여 수위변동에 따른 압력변동을 전자장치에 의해 자동 기록하므로써 압력을 수위로 환산하는 장치이다. 부표식은 수위심도가 10m 이내에서만 사용이 가능하나 수압식 전자장비에 비하여 저렴하므로 총적층 지하수위 관측에 경제적인 장비이다.

3. 기상·수문 조사

가. 일반사항

기상·수문 등의 조사는 계획대상 지역의 강수량, 하천의 수위, 유량 및 유로 등에 대해 자료를 수집하여 계획설계, 시공계획 및 시설관리에 활용하기 위한 것이다.

조사항목으로서는 기온, 강수량, 강설량, 강우일수, 증발산량, 하천수위와 유량, 지하수위, 하천상황등으로서 계획단계에서부터 설계조사단계까지 계속적으로 실시된다.

일반적인 지하수조사에 있어서는 기상·수문조사가 필수적인 조사과정은 아니라고 볼 수 있으나 지하댐조사와 같은 대규모 지하수 이용계획에서는 지표수 이용계획수립에서와 거의 맞먹는 조사가 이루어져야 한다. 특히 강우량과 하천 유량(갈수량)은 지하수함양조건과 밀접한 관계가 있으므로 지하댐 조사에서는 매우 중요한 항목이 된다.

나. 기상조사

기상관계자료는 기설측후소 및 관측소의 자료를 이용할 수 있는 경우가 많다. 대상지역과 관련이 있는 관측소에서 가능한한 10년 정도 이상의 기록을 수립해서 지역의 기상상황을 파악하고 계획 및 설계에 이용한다. 조사항목은 다음과 같다.

1) 기온

계획지구내에서 가까운 대표적 관측소의 기록에 의하여 월별 평균기온 및 평균 최고 최저기온, 결빙기 등에 대하여 조사한다.

2) 강우량

강우량은 지역적으로 큰 차이가 있으므로 지역내 또는 인근에 관측소가 없는 경우는 별도의 관측시설이 필요하다. 우량관측기기는 자기우량계와 보통우량계가 있으며 보통우량계 설치시는 매일 일정시각에 관측한다. 설치시 유의사항은 지형이 험착하여 풍향, 풍력에 의한 영향이 있는 곳은 피하여야 하며 부근에 건물 수목등 장애물이 없어야 하고 관리가 용이한 곳이어야 한다.

조사사항으로는 연평균강우량, 월평균강우량, 월별평균강우일수, 최대강우량, 최대연속우량, 최대 연속가뭄일수 등이다.

3) 증발량

계획지구에서 가까운 대표적 관측소에서 년 및 월별 평균증발량, 관개기간중 전증발량 등의 기록을 조사한다.

다. 수문조사

1) 하천상황

하천상황조사는 수로의 기능과 배수기능을 파악하는 조사이다. 하천의 연장, 기울기, 단면, 홍수량, 홍수위, 유역유출율, 홍수도달시간이 주요 조사항목이다. 또한 하상의 변동과 하상재료 조사는 하천수의 지하수함양과 관련이 있는 조사항목으로 기존자료가 없는 경우에는 하상의 상승 또는 저하 등을 청문에 의해 조사한다.

2) 하천수위 및 유량

하천의 수위와 유량(流量)을 동시에 측정하면 수위-유량곡선을 얻을 수 있고 이것을 강우량과 비교하여 홍수추적이 가능하다. 지하댐은 물막이 벽이 지하에 설치되므로 이에 대한 홍수대책은 필요하지 않으나 지하 물막이벽위에 보를 시설하여 지표수·지하수 연계이용을 고려할 때는 하천시설의 홍수 배제능력을 감안하여야 한다.

하천수위 측정기기는 보통수위계와 자기수위계가 있다. 보통수위계중 가장 간단한 것은 준척수위계(準尺水位計, staff gage)로서 눈금자를 교각이나 제방 기타 구조물에 고정시켜 자의 눈금과 접촉하는 하천수위를 측정한다. 자기수위계는 부표(float)를 수면위에 띄우고 쇠줄이나 테이프에 의해 바퀴주위를 돌아 기록기에 연결되어 있어 수위변동에 따라 부표가 움직이면 바퀴가 돌게되고 여기에 펜이 부착되어 있어 일정한 속도로 회전하는 기록지위에 수위변동을 그래프로 그린다.

유량측정은 관측지점에서 유출단면을 통과하는 유량을 계산하는 것으로서 하천유량측정 지점선정에 유의할 사항은 다음과 같다.

① 상당한 구간에서 유로가 직선적이고 기울기가 일정하며 수로단면의 변화가 없는 장소

② 지하물막이벽 예정위치에 가까운곳 또는 지하수 관측공과 관련이 있는 지점 유량측정방법에는 유속계에 의한 속도-면적법을 이용하는 것이 보통이다. 경우에 따라서는 부표법 및 유량측정 웨어(Weir)를 응용하기도 한다.

① 부표법 : 부표를 일정주간 떠내려 보내 시간을 측정하는 방법으로 물결 소용돌이 등의 영향으로 정밀도가 낮아 불가피한 경우 이용한다.

② 유량측정용 웨어 : 적은 유량을 측정할때 사용하며 소유역 갈수량 측정에는 이 방법이 적합하다.

③ 유속계법 : 계측지점에서 계기로 유속을 측정하는 정통적인 방법이나 수

심이 10cm 이상일 때에만 이용할 수 있다.

3) 하천유량 산정방법

앞에서 유량측정에 대하여 개략적으로 설명되었으나 하천유량 측정은 지하댐 설계자료에 중요한 부분이므로 세부적인 산정방법을 기술코자 한다.

어떤 관측점에 있어서의 평균유속을 결정하기위해 충분한 수의 점유속을 측정하여야 한다. 유량측정 절차는 그림 8-2와 같이 관측점의 통수단면을 여러개의 소단면으로 나누고 각단면의 중앙에서 수심을 측정하여 수심의 20%위차와 80%위차에서 유속계로 유속을 측정하면 두 값의 평균값이 이 소단면의 평균유속이 된다.

이것은 미국지질조사소(USGS)에서 제시한 경험공식으로 평균유속 V_m 은

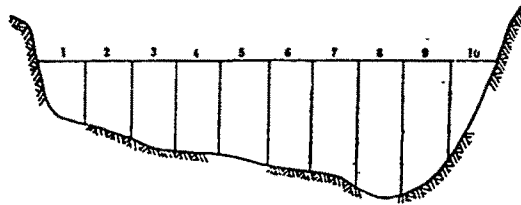


그림 8-2. 하천 유출단면도 예

$$V_m = \frac{1}{2} (V_{0.2} + V_{0.8}) \quad \text{-----} \quad (8-3)$$

이 된다. 이때 회전식 유속계에 의한 유속공식은

$$V = A + BN \quad \text{-----} \quad (8-4)$$

으로 주어지는데 여기서 A,B는 계기에 따른 상수이고 N은 회전수이다. 수심이 얇은 곳(d=30cm이내)에서는 수면으로 부터 수심의 60%만큼 아래에 있는 점의 유속을 측정하여 $V_m = V_{0.6}$ 을 사용해도 큰 무리는 없다.

각 단면의 평균유속이 결정되면 소단면의 면적을 곱하고 이를 합산하므로써 총유량을 결정한다. 즉

$$Q = \sum_i^n A_i V_{mi} \text{ ----- (8-5)}$$

소단면의 개수는 하천의 유폭에 관련되나 유폭 5m이내의 소하천에서는 5개소 정도면 적당하다.

4) 지하수위

지하수위 관측조사방법은 앞의 지하수조사과정에서 설명한 내용과 같다.

지하수위 변동과 지표수문조사와의 직접적인 관계는 기저유출량에 있으며 지하수위 변동곡선 해석에 있어서는 본 연구에서 제시한 방법을 이용하면 대수층 상수인 비산출율과 지하수 함양율을 구할 수 있다.(제2장 제4절 참조)

4. 지하수 부존 평가

가. 지역단위 부존량 평가

지하수자원의 평가(groundwater resource evaluation)는 조사목적에 따른 각 조사과정의 결과를 종합 분석하여 결론을 도출하는 과정을 말한다. 지하수자원의 평가는 목적에 따라 지하수 부존량 평가와 지하수 이용에 따른 환경영향평가로 나눌 수 있다.

지하수조사를 지역적 관점에서 국지조사와 지역조사로 구분하는데 국지조사는 지하수 개발예정지 조사라고 볼 수 있으며 이 경우 지하수 개발지점에서의 이용가능량과 양수시 영향범위를 평가하면 된다. 그러나 지역단위로 볼 때 이러한 국지적 평가는 불완전한 평가이므로 지하수 개발 예정구역이 포함된 지하수 유역단위를 하나의 물 수지 구역으로 지하수 부존량과 부존상태를 평가하는 지역단위 부존량평가(regional basin evaluation)가 필요하다.

지역단위 지하수 부존평가 과정을 요약하면 다음과 같다.

① 지역수리지질구조의 정립(hydrogeological setting)

- 지표수/지하수유역과 대수층의 경계
- 대수층 구조와 두께 및 지하수유동형태 (지하수위 등고선도, 유향등)
- 지하수함양지역과 배출지역

② 대수층의 평가

- 지하수의 부존형태 (자유면, 피압 또는 누수대수층 등)
- 양수시 지하수 흐름 형태 (정상류 또는 부정류)
- 대수층 수리상수 (수리전도도, 투수량계수, 저류계수 등)

③ 지역 수문단위 물 수지 분석 (regional hydrologic water budget)

- 강우, 유출, 증발산, 지하함양, 지하유출, 이용 등 지하수 부존량에 대한 (+) 및 (-) 요인분석

④ 지하수 부존 종합평가

- ①, ②, ③을 종합하는 장기적 지역단위 부존량평가
- 지하수 수문분석 모델링
- 지하수 관리계획 수립

대수층의 지하수 부존량 평가를 위하여는 대수층 구조와 크기, 대수층 수리 특성을 파악하는 것이 필수적이다. 지역내의 지하수 저류량은 자유면 지하수의 경우 대수층 총체적 중 유효공극율, 즉 비산출율에 의하여 결정되며, 피압지하수의 경우 정수압면과 대수층 저류계수에 따라 좌우된다. 저류량중 이용가능량을 평가하기 위하여는 대수층의 투수량계수와 수리전도도가 주요 인자가 된다.

지하수가 재생가능한 순환자원이란 측면에서 볼 때 대수층 분석만으로는 지하수 부존을 완전하게 평가할 수 없다. 유역단위의 물 수지에 의한 지표수와 지하수의 순환관계, 즉 강우량, 지표유출, 증발산량, 지하침투 및 함양, 지하유

출, 지하수이용양 등을 포함하여 평가하여야 한다.

자유면지하수의 경우 강우량, 하천수 또는 저수지의 물은 직접 지하수면으로 함양되며 한편 배수하천에서는 대수층으로부터 기저유출로 지하수가 손실되므로 지하수 부존량의 증감요인이 된다. 또한 계절적인 증발산량 변화도 지하수 부존량에 큰 변동을 가져온다. 피압대수층에서는 지상의 강우 또는 지표수가 직접 함양되지 못하나 상류부의 함양지역에서는 자유면지역에서의 함양과 똑같은 현상이 발생한다.

이러한 모든 요인들을 종합적으로 분석하고 평가하는 데는 지하수에 대한 수문 및 수리적인 이론이 뒷받침이 되고 현지 경험이 풍부한 전문가가 요구되며 많은 자료를 정리 분석하여야 한다.

나. 지하수 모델링 분석

근래에는 지하수자원 평가에 적용할 전산모델이 개발되어 지역별 지하수 모델링 분석 방법이 많이 보급되고 있다. 지하수 분석모델중 지하수 부존평가에 주로 이용되는 것은 지하수 유동모델로서 대수층상수, 경계조건, 초기조건 등을 이용하여 지하수 유동계를 시뮬레이션하고 향후의 지하수변동을 예측할 수 있다.

지하수 유동모델중 가장 일반적으로 사용되는 것은 미국 지질조사소에서 개발한 MODFLOW(McDonald and Harbaugh, 1988)로서 이것은 유한차분법으로 3차원 지하수유동 지배방정식을 풀이하는데 사용된다. MODFLOW는 지하수의 흐름조건 등 여러가지 경계조건과 다양한 선택사양을 모듈화 하고 있어 적용범위가 넓은 장점이 있으나 입력자료의 수가 너무 많고 복잡한 모델링 정보를 다룸으로 해서 생기는 단점도 있다.

지하수의 저류량과 이용가능량 평가를 위하여 본 연구에서 MODFLOW보다 단순화된 2차원 유동모델인 SUBDAM을 개발하였으며 이것은 지하댐 지구가

아닌 다른 지역에서도 지하수 부존량평가에 이용될 수 있다.

다. 안정채수량 분석

지하수역에서 주어진 조건하에 나쁜 영향이 발생하지 않는 범위에서 항구적으로 취수 이용할 수 있는 양수량을 안정채수량(安定採水量, safe yield)이라 정의된다.

안정채수량은 지역단위 지하수역내에서 총량적인 양수량 개념이므로 지하수 개발공의 적정양수량(適定揚水量)과는 다르다. 적정양수량은 우물 양수시 대수층 성질 또는 양수기 성능에 무리를 주지 않는 양수량 범위를 말한다. 자유면 대수층에서는 수위강하량(대수층손실)이 포화된 대수층 두께의 2/3에 해당되는 양수량을 적정양수량으로 정한다. 일반적으로 단계양수시험에 의하여 적정양수량을 정할 수 있는데 양수량을 증가시키면서 각 양수량별 수위강하량을 측정하여 방안지 또는 양대수지에 양수량 대 수위강하량을 작도하면 초기에는 직선형으로 나타나나 양수량이 증가되면서 변곡점이 생기며 이때의 양수량을 한계(限界)양수량이라 하고 한계양수량 이내에서 양수능력을 감안한 적정양수량을 결정한다.

안정채수량은 지역 수문단위의 대수층에서 안정적인 지하수 이용량으로서 이를 초과하여 개발하면 부정적인 영향이 발생할 수 있는 한계량이다. 부정적인 영향이라 함은 ① 지역내 지하수 부존량의 점진적인 감소 ② 지하수의 수질저하 ③ 지하수위 저하에 의한 비경제적인 양수 ④ 지하수위 저하에 의한 지반침하 ⑤ 기존시설에 대한 우물간섭 등을 들 수 있는데 이러한 요인이 발생되지 않게 하기 위하여는 지하수역내에 함양되거나 또는 공급되는 전체수량의 범위 내로 안정채수량을 제한하여야 한다. 이것은 지하수함양의 패턴과 개발 이용의 패턴에 따라서 안정채수량이 변할 수 있음을 의미한다.

안정채수량의 정량적 결정은 지역수문단위의 물 수지 분석에 의해 가능하다. 지역내에 함양원(공급원)이 충분한 경우 지하수 이용은 함양을 촉진시키므로 안정채수량을 증가시킬 수 있다.

자유면 지하수역에는 지하수 이용시설의 재 배치에 따라서 안전채수량을 증가시킬 수도 있다. 즉 우물들을 하천 등 함양원 인근에 배치하므로 서 유도함양량을 증가시킬 수 있다.

피압대수층의 경우는 인근에 있는 지하수 함양지역으로 부터 지역내로 대수층을 통한 지하수 유동이 일어나므로 대수층 투수계수가 안정채수량 결정에 중요한 인자가 된다. 이밖에 안전채수량에 영향을 주는 요인은 지역내의 식생현황, 지표면의 침투율, 도시화면적 등이 있다.

제 3 절 계획 설계 요령

1. 지하댐 설계의 요소

지하댐 설계에 있어 기술적인 검토사항은 설치목적에 맞는 이용수량 확보와 물막이벽의 위치 및 공법, 취수공의 위치 및 공법, 양수 및 이용방법등이 주요 사항이 된다.

이용수량 설계에 있어서는 지하수의 공급원이 되는 대수층의 체적과 대수층의 저수능력을 판단하는 저류계수(Storativity of aquifer)의 산정이 우선되어야 하며 또한 계절에 따른 저류량의 변화를 예측하여야 한다.

대수층의 체적과 저류능력에 대한 조사는 지하수조사의 단계별 과정을 거쳐 추정하게 되는데 보통 지질조사, 물리탐사, 시추조사등을 시행하여 대수층의 두

계와 수평면적을 구하고 이를 적산하여 대수층 체적을 구할 수 있다. 다음 단계인 착정조사와 양수시험은 대수층의 특성을 조사하는 과정으로 대수층안에서의 투수량계수, 저류계수, 영향반경과 양수가능량등 이용계획 수립에 필요한 자료를 얻는다.

대수층의 저류능력 산정의 기초는 저류계수(Storativity/Storage coefficient)에 있는데 이는 자유면대수층에서는 유효공극율(Effective porosity) 또는 비산출율(Specific yield)과 같은 개념이다. 저류계수는 우물 양수시험중 관측공에서의 수위강하(Drawdown) 자료를 해석하므로써 구해질 수 있으나 대수층의 상태 (자유면대수층, 피압대수층, 누수층 등)에 따라서는 $10^{-4} \sim 10^{-1}$ 범위의 큰 오차가 생길수 있으므로 통상 대수층의 구성성분별 유효공극율 표준값을 적용하는 예가 많다. 그러나 이것은 해당지역의 고유값이 아니므로 저류량 계산에 오류를 범할 소지가 많다. 그러므로 본 연구에서 제안한 지하수위 강하곡선 해석에 의한 대수층 비산출율 산정방법을 이용하여 비교 검토하는것도 한 방법이 될 것이다.(제 2장 4절 참조)

물막이벽은 그 길이에 따라 공사비 차이가 크므로 물막이벽 길이를 극소화할 수 있는 유역의 협곡부인 병목 지점에 위치를 선정하게 된다. 물막이벽 위치가 결정되면 예정선 위에서 일정간격으로 시추조사를 하고 지층구조 확인과 지층 투수계수 측정을 시행한다.

취수공의 위치는 유역안에서 대수층의 깊이가 가장 깊고 집수가 양호한 즉, 투수성이 좋은 지점에 선정하는데 이 지점에서 착정조사와 양수시험을 시행하므로써 취수공의 공종과 규모를 결정할 수 있고 또한 지구내에 취수공의 배치와 도수 방법을 검토할 수 있다.

취수공의 위치와 계획양수량이 결정되면 이를 양수 이용할 수 있는 제반 이용시설 설계가 따라야 한다. 지하수의 이용시설에는 양수장, 펌프, 송수관 및

전기설비등을 들수 있으나 본 장에서는 이용시설 세부설계요령에 대하여는 기술하지 못하였으므로 필요시 “농지개량사업 계획설계기준 - 양배수장편” (농림부, 1984)을 참고하면 될 것이다.

2. 지하댐 저류량과 이용량 산정요령

가. 지하댐 저류량 산정

지하댐 설계에서 가장 핵심적인 요소는 지하수 저류량의 산정과 저류량중 이용가능량의 계획이라고 할수 있는데 그럼에도 불구하고 이 분야에 명확한 기준이 설정되어 있지는 않다.

지하수저류량의 산정은 유효대수층의 체적과 유효공극율을 곱하여 계산된다. 대수층의 체적은 지구내 지하수조사 과정에서 물리탐사, 시추조사, 착정조사 등 지하지질조사의 결과를 종합하여 대수층의 지층별 두께와 체적을 구할 수 있다.

통상적으로 저류량 계산에서는 대수층의 구성이 비슷한 구역을 나누고 각구역별로 구역면적 × 대수층 평균두께 × 비산출율의 공식에 의하여 구역내 저류량을 계산하고 전구역의 저류량을 합산하여 총 저류량을 산출한다.

대상지역의 지하지질 자료가 충분하면 지역내에 여러개의 지층단면도를 작도하고 이들을 서로 연결하여 펜스다이어그램(Fence diagram)을 작성할 수 있다. 이 경우 지역내 대수층의 지층별 체적을 구할수 있으며 수리지질조사에 의거 지층별 유효공극율(비산출율)을 알고 있으면 대수층 지층별 체적에 지층별 비산출율을 곱하여 지층별 저류량을 구할수 있으므로 각지층별 저류량을 합산하여 총저류량을 산정할 수 있다. 이 방법은 앞의 방법에 비하여 더 정확한 산정 방법이라고 할수 있으나 많은 량의 조사자료를 필요로 한다.

소유역지하댐 설계에서 유효대수층이라 함은 총적층 면적에 해당하는 대수층을 의미한다. 저류량의 확대를 위하여 총적층 외곽의 산지유역까지 포함시키는 것은 바람직하지 않다. 산지유역에서도 강우시 지하수 함양이 발생되나 이것은 풍수기의 고려사항이고 갈수기에는 지하수 함양에 보탬이 되지 않는다고 보아야 안전하다. 이안 지하댐 시험사업에서는 산지유역을 포함하여 저류량을 산정한 결과 이용량을 과다 설계하는 결과를 가져왔다.

대수층의 지층별 체적계산에서 총적층 아래에 있는 풍화대나 암반파쇄대 등도 지층의 투수성이 양호하다면 유효대수층으로 포함시킬 수 있다. 이 경우 저류량의 이용계획에서는 해당 대수층의 심도를 고려하여 이용량과 취수시설을 설계하여야 할 것이다.

저류량 산정에 있어서 대수층의 체적보다 더 큰비중을 갖는 요소는 비산출을 즉 유효공극율이다. 유효공극율은 대수층의 불교란 시료를 채취하여 실내 시험에 의해 구하는 것이 가장 정밀 하겠지만 실제로 넓은 대수층 전체에 대하여 지층별 시료채취에 의한 시험은 비 경제적이다. 통상 대수층 양수시험에 의하여 저류계수를 구하는 것이 보통인데 투수성이 좋은 얇은 대수층에서는 양수시험에 의한 저류계수 산출이 매우 어렵다. 이러한 경우 본 연구에서 제안한 지하수위 강하곡선 해석에 의한 대수층 비산출을 산정방법은 매우 유효하게 사용할 수 있을 것이다. (제 2장 4절 참조)

나. 지하댐 이용량 계획

지하저수지의 저류량중 이용가능량을 산정하는 기준은 아직 정립되어 있지 못하다. Huisman과 Olsthoorn(1988)등은 강우에 의한 지하수 함양량의 20%~80% 범위를 대수층 안정채수량으로 제안하였다. 안정채수량에 대하여

는 앞 절에서도 설명되었지만 지역 수문단위 대수층에서 부정적인 영향이 발생하지 않는 범위에서 항구적으로 취수 이용할 수 있는 양수량을 말하며 이의 정량적인 결정은 지역 수문단위의 물 수지분석에 의해 가능하다. 지역내 함양원이 충분한 경우는 지하수 이용자체가 함양을 촉진하므로 안정채수량은 증가시킬 수 있다.

지하댐의 이용가능량 기준은 저류량 중 얼마나 효율적으로 이용하느냐 하는 문제로서 이것은 대수층의 투수성과 취수우물의 효율적인 밀도에 관련이 있다. 지하 물막이벽 설치로 지하수 저류량이 증가 되었을 때 증가 분을 모두 실제 이용가능량으로 만드는 것은 지하수 개발능력과 취수정 설치효율의 문제이다.

지하댐지구의 이용가능량 설계에서는 물막이벽 설치 이전의 이용가능량과 물막이 벽 설치후 저류량증가분의 이용가능량으로 구분하여 고려할 수 있다. 물막이 벽 설치이전의 이용가능량은 적정양수량 기준으로 우물의 수위 강하를 대수층심도의 2/3를 채택하고 우물 밀도를 효율적으로 배치하였을 때 총저류량의 약 20%에 해당한다. 이것은 기하학적으로 각 우물에서 양수된 수위강하 원뿔의 체적으로 개산한 것이다.

물막이벽 설치후 저류량 증가분은 이론적으로는 100% 이용이 가능하다고 할 수 있으나 물막이벽의 누수 및 지표의 증발산 등 손실요인이 있으므로 이를 감안하여 최대 80%로 보는 것이 타당하다. 그러므로 지하댐 지구의 이용량 계획에서는 물막이벽 설치전 저류량의 20%와 물막이벽 설치에의한 저류증가량의 80%를 합하여 이용량으로 채택하는 것이 합리적이라고 판단된다.

한편 이용수량이 주로 논 관개용수일 경우는 삼투수에의한 지하수함양 및 재이용을 고려할 때 토양에 따라 이용가능량의 10% 내외를 가산할 수도 있다.

다. 지하수문분석 모델링에 의한 저류량과 이용량 산정

같은 지구내에서도 구역별로 수리지질학적 특성이 다를 수 있으므로 이들의

다양한 구조를 필산으로 계산하는 것은 한계가 있으며 더욱이 계절별 지하수위 변동으로 인한 저류량 변동은 필요한 시기에 맞추어 계산하기가 매우 어렵게 된다. 이러한 복잡한 문제를 정량적으로 혹은 수치적으로 모델링하는 전산모델이 도입되었으며 본 연구에서는 특히 소유역지하담에 적용하기 위한 소유역 지하수문분석 모델개발이 시도되었다.

SUBDAM은 평면 2차원 영역에대한 정류 및 부정류상태의 지하수위 변동 모델링을 수행할 수 있고 부정류상태 모델링시에는 시간에 따른 저류량의 변동량 계산도 수행할 수 있다. SUBDAM에서 설정하는 지하수함양단계는 4계절 변화에 따라 4단계로 구분할 수 있으며 계절별 함양율의 변동을 고려한 모델링을 가능하게 한다.

STORAG는 SUBDAM의 정류상태모델링 결과 얻어진 지하수위 변동자료를 입력자료로 사용하여 저류량의 변동을 계산하는 기능을 수행한다. 계절별 및 월별 저류량 변동을 계산하면 계절별, 월별 지하수 이용가능량을 산정할수 있다. 즉 저류량 변동을 유효 저류면적에 대한 지하수 함양량의 증가분으로 환산하여 이중 최대 80%를 최대 이용가능량 증가분으로 하고, 원래의 안정채수량에 이용가능량증가분을 합하면 지하수유역의 이용가능량을 산정할 수 있다. 이러한 이용가능량 산정기능이 STORAGE에 첨가되어 있다. (제6장 및 부록 I 참조)

3. 취수공 설계

가. 방사상 집수정 계획 설계 절차

방사상집수정의 계획 설계과정중 우선적으로 검토하여야 할 사항은 개발대상 지구의 지하수 부존조사를 거쳐 집수정 설계시 취수가능량을 산정하고 개발대상면적에 대한 소요수량을 충족할 수 있는지 여부를 검토하여야 한다. 만약 취

수량이 부족하다면 개발 계획면적을 감 조정하던지 또는 집수정 취수량을 증가시키는 방안을 강구하여야 할 것이다. 집수정 취수량을 증가시키는 방안으로는 집수정 하류부에 지하물막이벽을 시설하는 방안과 집수정의 유효반경을 크게하는 방법을 들수 있는데, 유효반경을 키우는 방법은 수평착정의 길이를 연장시키던지 사이편 집수역을 넓히는 것으로 수평착정식으로는 한계가 있으며 사이편식이 집수 유효반경을 키울수 있는 최선의 공법이라고 판단된다. 방사상 집수정의 계획 설계 과정을 흐름도로 나타내면 그림 8-3과 같다.

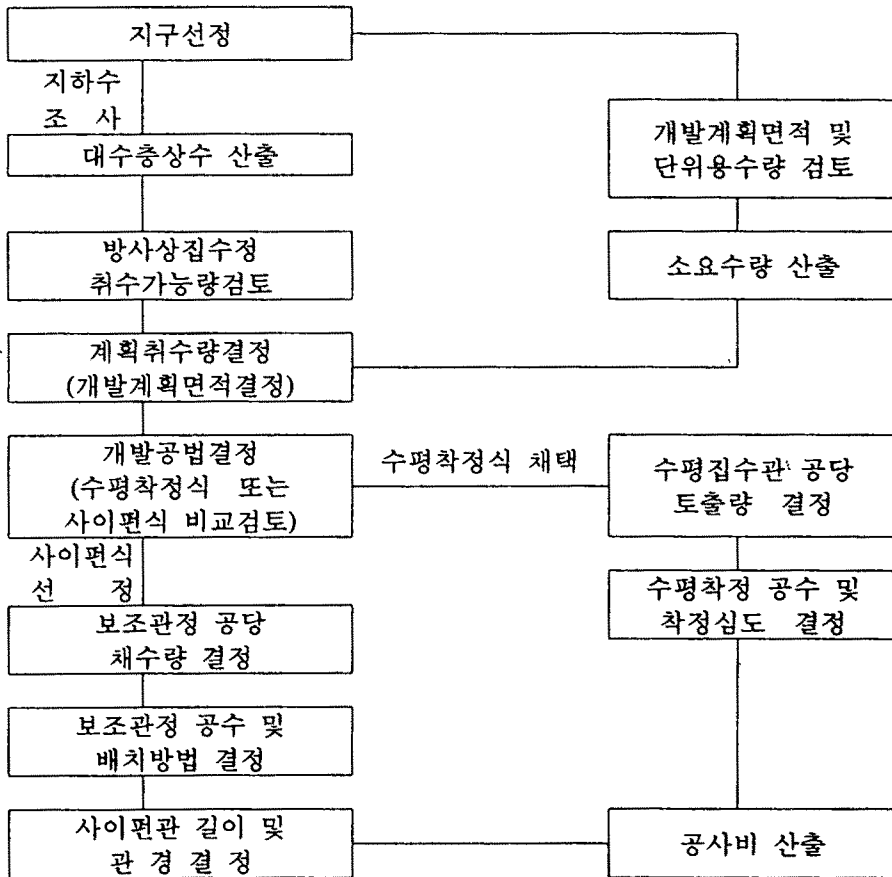


그림 8-3 방사상집수정 계획 설계 절차

나. 계획 취수량 결정

방사상 집수정 채수가능량은 수평집수관의 평균 길이를 반경으로 하는 대구경 수직 우물에 해당하는 채수량으로 추정할 수 있다. 다만 수평집수관의 개소수와 배치상태에 따라 대구경 우물의 집수 유효반경을 수평관 평균 길이의 75~85%범위로 적용하도록 하고 있다(Walton, 1970 : Raghunath, 1982). 지하수가 상류로 부터 하류로 흐를 때 수평착정공을 360° 전구간에 시공하지 않고 일부 부채꼴 구간에만 시공하여도 된다는 보고도 있다. 즉, 수평공 4공을 90° 구간에 등간격으로 배열했을때 유효반경은 60% 이었으며, 수평공 7공을 130° 구간에만 등간격으로 배열시 유효반경은 수평집수관 평균길이의 74%이었다.(Mikels and Klaer, 1956)

대구경 우물의 채수량 산정공식은 Thiem의 평형공식을 적용할 수 있다. 즉,

$$Q = \frac{2\pi T(H-h)}{2.3\log R/r} (1-\alpha) \quad : \text{피압 대수층} \text{-----} (8-6)$$

$$Q = \frac{\pi K(H^2-h^2)}{2.3\log R/r} (1-\alpha) \quad : \text{비피압 대수층}$$

여기서 Q : 집수정 채수량

T : 투수량계수(T = KH) h : 집수정 양수수두

H : 집수정 자연수두 r : 집수유효반경

R : 집수정 영향반경 K : 대수층투수계수

α : 채수량 안전율

집수정 영향반경 R은 자유면지하수 (비피압대수층)에서 통상 500m를 적용하고 있으나 피압지하수에서는 1,000m 이상 되는 경우도 있으므로 집수정 조

사 설계시 반드시 착정조사를 실시하고 최소한 24시간 이상 양수시험을 거쳐 영향반경을 산정하도록 하여야 한다. 영향반경을 잘못 추정할 때 채수량 산정에 미치는 영향은 영향반경 오차의 약 1/2 에 해당된다.

채수량안전율 α 는 채수량 산정시 불확실한 상수 값을 대입하였을 경우를 고려한것이라고 볼수 있는데 K, R 등 대수층 상수 값을 정확히 측정하였다면 α 값은 지형과 대수층 경계에 따라 영향받는 요소만을 고려하면 되 것이다. 대수층 경계가 광활하고 집수정 영향권 밖에 있는 경우 $\alpha=0$ 로 보고, 대수층 경계가 집수정 영향권안에 50% 중첩되어 있을 경우를 가정하여 수치 접근방법으로 α 값을 계산한 결과 $\alpha \approx 0.2$ 에 해당되었으므로 지형과 대수층 경계조건에 따라 안전율은 10% 내외를 적용하는것이 바람직하다.

다. 방사상 집수정의 실용적인 설계방안

방사상집수정의 설계 기본은 취수가능량을 먼저 설계하고 이에 맞는 수평착정을 설계하는 것인데, 수평찬공 설계에 대하여는 여러가지 논의가 있었지만 (제 4장 제 2절 참조) 수평찬공 공수와 길이 산정에 이용하던 Petrovic 경험 공식은 상수가 너무 많을뿐 아니라 적용 범위가 좁고, 본래 양수량 산정을 목적으로 설정된 경험공식을 역으로 적용하는데 문제가 있다고 지적되었다. (지하수개발 사업평가회 보고서 1989)

수평관 내부의 유량을 추정하는데 이용되던 Manning공식은 유속이 빠를때 즉 난류영역에 적합하며 관내유속이 천이영역(transient zone)인 경우에는 Hazen-William 공식이 더 적합할 것으로 판단되었다. 수평집수관 내부를 가득 채우고 흐르는 관내유속에 대한 Hazen-William 공식은 다음과 같이 주어진다.(한국농공학회 : 농업토목핸드북 1991, p771 참조)

$$V = 0.84935 CR^{0.63} I^{0.54}$$

$$\text{또는 } q = 0.27853 CD^{2.63} I^{0.54} \text{ ----- (8-7)}$$

단, C : 유속계수 (PVC 경우 150 적용)

D : 관경 R : 동수반경 D/4

I : 동수기울기

한편 Milojevic 공식도 하천변에서의 양수량 계산에 적용할 수는 있으나 복잡한 계산을 통하여 수평 찬공 심도를 역으로 구하는 것은 문제점이 있다. 또한 이렇게 설계한 수평찬공심도가 수평착정기 능력에 적합한지도 문제가 된다.

그러므로 실용적으로 수평찬공 심도를 먼저 결정하는 것이 바람직하다고 할 수 있다. 수평찬공의 구경과 심도는 전적으로 장비의 능력에 해당되는 것으로 '82년 경북 이안 지하댐 시험사업을 위하여 도입된 Top-MB형 수평착정기의 경험적인 찬공능력은 구경 110mm로 사력층에서 20m, 토사층에서 40m정도로서 평균 30m내외이었다. 미고결지층의 찬공에서는 지층 함몰을 방지하기 위하여 Shield pipe를 회전시키며 동시에 굴진하여야 하므로 찬공심도에 제한을 받는다. 암반층 굴진에서는 Shield pipe 없이 Air hammer 공법으로 찬공할 수 있기때문에 이보다 훨씬 장공을 굴진할 수 있다.

공당 토출량은 Hazen-William 공식을 적용하여 산출하고 계획양수량을 공당 토출량으로 나누어 수평찬공수를 정하되 여유율 10~20%를 가산하여 산정하는 것이 바람직하다. 즉,

$$m = Q / q (1 + \beta) \text{ -----(8-8)}$$

여기서 m : 수평착정공수

Q : 계획양수량

q : 수평착정 공당 토출량

β : 여유율

또한 위의 공식들은 대수층의 균질 등방성을 전제한 경우이지만 실제로는 대부분 불균질 이방성이므로 지역에 따라 수평찬공 각도의 조정으로 부채꼴형이 되거나 찬공길이의 불균형 상태가 될 경우라도 채수량 산정공식 (8-6)에서 안전율 α 를 적절히 적용하면 실제적으로 큰 차질은 없을 것이다.

라. 사이펀 집수정의 설계

1) 사이펀 집수정의 원리

수평착정에 의한 방사상집수정은 수평찬공길이의 제한성과 세사유입에 따른 문제점이 있었으므로 이를 극복할 수 있는 새로운 공법이 연구되었는데 그것은 수평착정대신 수직착정공에서 사이펀 (Siphon) 식으로 집수하는 공법이다.

관수로의 일부가 동수경사선 위로 올라가 있는 경우를 사이펀 (Siphon) 이라고 하는데 수두차가 있는 두 지점을 사이펀관으로 연결하고 관내의 공기를 뽑아낸 후 밀폐시키면 사이펀 곡관부의 최상단에서 압력이 최저상태가 되어 양쪽의 수두차 때문에 높은 수두면의 물이 뽑아 올려져서 낮은 수두면으로 유입된다. 이때의 관내유량은 다음 공식으로 표시된다.

$$Q = A \cdot V = \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2gh}{1 + f_1 + f_2 + f_3 \cdot L/D}} \quad \text{-----} \quad (8-9)$$

여기서, Q : 유량 (m³/sec)

g : 동력가속도 (9.8m/sec²)

h : 사이펀 수두차 (m)

D : 사이펀 관경 L : 사이펀 관길이

f₁ : 유입손실계수 f₂ : 곡관손실계수

f₃ : 관 마찰손실계수로 $f_3 = 124.5 n^2 D^{-1/3}$ 로 표시되며 n은 조도계수

이러한 사이편 원리를 지하수의 집수에 이용하기 위하여 그림 4-2과 같이 보조관정에서 우물통으로 물넘이관을 설치하면 우물통에서 양수할때 양수수위가 떨어짐에 따라 보조관정과 우물통의 수위차가 발생하므로 보조관정안의 물이 사이편관을 통하여 우물통으로 넘어간다. 이때의 사이편 유량은 식 (8-9)에서 $f_1 = 0.25$ (단 유입부를 45° 로 절삭한 경우), $f_2 = 0.2 \times 2$ 개소를 적용하고 관마찰 손실이 적은 PVC관 또는 PE관을 사용할 경우 조도계수는 $n = 0.01$ 을 적용할 수 있으므로

$f_3 = 124.5 \times (0.01)^2 \times D^{-1/3} = 0.0125 / D^{1/3}$ 을 대입하면

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{19.6h}{1.65 + 0.0125LD^{-1.333}}} \quad (m^3/sec) \quad \text{-----} \quad (8-10)$$

이 되며 이는 사이편집수정 유량산정의 기본 공식이 된다.

2) 사이편 집수정의 설계

사이편식 방사상집수정에 있어서도 채수량 산정은 앞 절에서의 방법과 같으며 다만 집수유효반경을 임의로 조정하여 설계할 수 있는것이 특징이라고 할 수 있다. 수평착정식 집수정에서는 수평착정기의 작업능력으로 보아 유효반경이 30m 정도로 제한을 받지만 사이편식 집수정에 있어서는 유효반경을 100m 이상 확장하여도 사이편관 설치가 가능하므로 수평착정식보다 훨씬 많은 량의 지하수를 채수할 수 있다.

보조관정의 개발공법은 일반 총적관정 개발방법과 같이 구경 $\phi 14"$ 로 착정하여 $\phi 8"$ 우물자재를 삽입 설치하면 된다. 다만 사이편 설치후 매립상태가 되어 우물청소작업이 매우 힘들게 되므로 사전에 슬라임 유입방지 대책을 철저히 하여야 한다. 특히 세사층이 있는 지역에서는 필터벽을 두겹게 하고 구경 $\phi 2m/m$ 정도의 세골재 (왕사)를 충전하도록 설계하는 것이 좋다.

보조관정 단일공의 가채수량은 양수시 수위강하량이 8m 이내가 되는 범위에서 양수가능량으로 한다. 그러나 집수정 영향권 내에서 여러개의 보조관정을 동시 양수하면 우물 상호간섭효과가 발생하여 각 공별 가채수량은 단일공 가채수량의 약 60%정도로 감소되는 것으로보고되어 있다. 그러므로 사이편관 취수량을 단일공 가채수량의 1/2로 정하고 집수정 계획취수량을 사이편관 취수량으로 나누어 보조관정 소요공수를 결정한다. 이때 현장여건에 따라서 10~20%의 여유를 가산할 수도 있다.

보조관정의 배치는 균질등방성의 대수층이 넓게 분포되어 있는 지역에서는 우물통심원 주위의 원주상에 등간격으로 배치하는 것이 원칙이며, 이때 원주의 반경 즉 우물통 중심에서 보조관정까지 거리는 집수정의 유효반경에 20% 내외의 여유를 가산한 거리가 된다.

사이편관의 재질은 관내 마찰손실이 적은 PVC 또는 PE 파이프가 적합하며 시공면에서도 간편하다. 사이편관의 길이 L은 우물통과 보조관정 사이의 수평 매립관과 보조관정 및 우물통 내부에 삽입하는 수직관 길이의 합이 된다. 관경의 결정은 식 (8-8)에 의해서 산출할 수 있는데 수두차 h의 크기에 따라 좌우된다. 양수 초기에는 수두차가 크게 나타나나 보조관정의 수위가 계속 떨어지면서 수두차가 감소되고 평형상태에 도달되면 수두차는 0.5~1.0m의 범위인 것으로 보고된 바 있으므로 사이편관 구경 결정시 $h=1.0\text{m}$ 로 가정하여 계산하여도 무리는 없다.

수평관의 설치는 우물통에서 보조관정쪽으로 1/500 정도의 하향 경사를 두므로써 수평관 내부의 공기가 우물통 곡관부로 모이도록 하며 곡관 상단에 배기관을 연결하여 진공펌프를 이용하여 배기할 수 있도록 설계한다.

3) 사이편 집수정의 장단점

사이편식 집수정에서도 수평착정식 집수정과 같이 우물통 설치와 이용시설의

방법은 동일하며 다만 집수방법의 차이에 따른 장단점을 비교하면 다음과 같다.

가) 장 점

- ① 지상에서 수직관정을 개발하므로 지하에서 시공하는 수평착정공법에 비하여 시공이 용이하고 사고위험이 적다.
- ② 실트 또는 세사층 발달지역에서도 수직착정후 필터골재를 충분히 삽입하여 세사유입을 방지할 수 있고 지층함몰현상을 예방할 수 있다.
- ③ 설계 및 시공상 보조관정의 위치를 임의로 조정하여 집수정의 유효반경을 확장할 수 있고 수평착정식 집수정보다 다량의 취수량을 확보할 수 있다.
- ④ 보조관정의 채수량에 따라 사이편 관정을 임의로 조정할 수 있다.
- ⑤ 공사기간이 짧고 공사비가 비교적 저렴하여 경제적이다.

나) 단 점

- ① 사이편관 매설에 따라 지상물 훼손범위가 비교적 넓다.
- ② 보조관정은 사이편관 설치후 매설하게 되므로 향후 우물청소등 정비를 필요로 할 때에는 터파기 및 되메움을 하여야 하는 번거로움이 있다.

4. 지하 물막이벽의 설계

지하 물막이벽 공법은 크게 절개공법(open cutt method)과 주입공법(grouting method)로 나눌 수 있는데 우리나라에서는 이안지하댐 시험사업등 5개지구에서 지하 물막이벽을 시공한 바 있으며, 절개공법으로 콘크리트벽과 점토벽을 시공하였고 주입공법으로는 일반시멘트주입과 약액주입(SGR)법을 시험한 사례가 있다.

주입공법과 절개공법은 각각 장단점이 있으나 이상의 시험사업 결과 경제적 타당성으로는 대수층 심도 5m이내에서는 절개공법이 유리하고 5m이상의 깊은 심도에서는 주입공법이 경제적인 것으로 보고되었다.

그러나 대수층의 모래, 사력 및 전석층에서는 시멘트주입효과가 미흡하고 약액주입은 내구성에 의문이 제기되고 있어 우리나라에서 지하 물막이벽 공법은 아직까지 기준이 정립되지 않은 단계라고 할 수 있다. 참고로 일본에서 시행하고 있는 지하 물막이벽공법의 종류와 장단점을 소개하면 다음과 같다.

○ 물막이벽 공법의 분류

I 치환공법 : 트렌치 또는 보링 등에 의하여 굴착을 행하여 시멘트, 벤트나이트 등의 차수성 재료로 교체한다. 연벽공법, 연주공법이라고도 한다.

II 강제교반공법 : 보링공에서 주변에 고압의 시멘트액이나 물약을 분사하고 지반을 교반하여 고결시킨다.

III 주입공법 : 보링공에서 주변에 그라우트액을 주입하여 지반의 공허점을 메운다.

IV 강널말뚝공법 : 강널말뚝을 연속적으로 박아 넣어 물막이벽을 만든다.

이상의 공법에서 대표적인 것을 선택하여 그 특징을 열거하면 표 8-3과 같다.

표 8-3 지하 물막이벽 공법 일람표

분류	형식	공법 (유사공법)	공법개요	잇점	결점	현장에서의 적용
I	주입형식 차수막공 법	OMZ공법	주입관을 세트한 특수강 널말뚝을 타설후, 인발할때 생기는 공극에 주입액을 충전한다.	<ul style="list-style-type: none"> • 확실하게 연속차수막을 할 수 있다. • 지반을 분단하지 않는다. • 공비가싸다 	<ul style="list-style-type: none"> • 대형기계가 필요하게 된다. 	<ul style="list-style-type: none"> • 대형기계가 반입되지 않으므로 어렵다.
I · II	주입형식 차수막공 법	JET GROUT 공법	약액고압 젯트를 분사하는 로드를 인발하면서 삭토한 공극에 약액에 의해 병풍상의 차수막을 만든다.	<ul style="list-style-type: none"> • 점성토로는 잘 되지 않는다. • 대형기계를 필요로하지 않는다. 	<ul style="list-style-type: none"> • 사층·역층에서는 어렵다. • 전석에 의한 결함부의 확인이 안된다. 	<ul style="list-style-type: none"> • 사력의 호층 및 자갈섞인 풍화점토층은 만들 수 없다.

분류	형식	공법 (유사공법)	공법개요	잇점	결점	현장에서의 적용
I	주입형식 차수벽 공법	OBW공 법	미리보링한 구 멍에 날개모양 으로 넓힐 수 있는로타리 교 반장치를 삽입 하여 주입공법 과 병용하여 연속 주입벽을 만든다.	• 확실한 연 속벽이 된 다.	• 비교적 큰 기계가 필 요하다. • 단단한 지 반에서 시 공이 되지 않는다. • 공비가 다 소 높다.	• 기계의 반입방법 에 문제 가있다. • 홍적층의 자갈섞인 풍화점토 에서는 어렵다.
II	주입형식 주열갱공 법 (고압 젯트방식)	CCP공법 (J.S.공법) (컬러젯 트공법)	약액고압젯트 를 분산하는 로드를 회전시 켜 주입주를 만들고 이것을 연속시킨다.	• 대형기계 가 필요없 다. • 로드주입에 비하여 확 실성이 높 다.	• 사층·역층 에서는 연 속하기 어 렵다. • 수착정밀 도가 작다. • 밀착한 간 격이므로 공비가 높 다.	• N값에 의 해 생기 는 지름 이 다르 므로 품 질의 관 리가 어 렵다.
III	주입형식 주열갱공 법 (순결액 방식)	LAG공법 (D.D.S 공법)	순간적으로 고 회하는 약액을 2중관 타입의 주입관에 의해 선단에서 주입 고화한다.	• 대형기계 가 필요없 다. • 약액의 일 수가 적다	• 공비가 비 싸진다.	• 시공가능
III	주입형식 주열갱공 법 (2중관 방식)	SOLETA NCH 주입공법 (더블스 트레이너 주입 공 법)(슬리 이브주입 공법)	보링후 케이싱 및 이내부에 맨체트류브를 건입하고 슬리 이브 그라우트 로, 시일하여 케이싱을 인발 하여 더블파카 부칙의 파이프 를 주입한다.	• 불확실 개 소는 재주 입이 가능 하다.	• 지층에 따 른 약액의 일산이 있 다.	• 시공가능

분류	형식	공법 (유사공법)	공법개요	잇점	결점	현장에서 의 적용
III	주입형식주 열개공법 (로드주입 방식)	로드주입 공법	보링로드에서 주입하고 주입 주를 만들어 이 것을 연속시킨 다.	<ul style="list-style-type: none"> • 불확실한 공법이다. • 공비가 비싸다. 	<ul style="list-style-type: none"> • 시공이 가능하지만 주입량이 상당히 크게 된다. 	
IV	강제널말뚝 형식(조인 트무처리)	강제널말 뚝공법	강제널말뚝을 연속적으로 박 는다.	<ul style="list-style-type: none"> • 특수한 기술이 필요 없다. • 조인트를 제외하면 확실한 공법이라 할 수 있다. 	<ul style="list-style-type: none"> • 조인트에서 누수한다. 	<ul style="list-style-type: none"> • 될수가 없으므로 어렵다.
I · II	강제 널말 뚝형식 (특수조인 트처리)	위터카타 공법	강제 널말뚝에 약액일산방지 앵글을 붙여 강 제 널말뚝타설 후 조인트부에 확실한 주입을 하여 누수를 방 지한다.	<ul style="list-style-type: none"> • 확실하게 지수가 된다. • OH액으로 주입하면 강제널말뚝이 변형해도 누수가 안된다. 	<ul style="list-style-type: none"> • 강제 널말뚝이 부식한다 • 강제 널말뚝 	<ul style="list-style-type: none"> • 대형기계가 반입되지 않으므로 어렵다.
I	강제널말뚝 형식 (박형 널말 뚝방식)	시트월공 법	얇은 강제널말 뚝을 가이드를 사용하여 치고 조인트부를 주 입한다.	<ul style="list-style-type: none"> • 조인트부이 외는 확실한 막이 된다. • 합성수지의 시이트도 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 부식이 빠르다. • 대형기계가 필요 • 조인트부에 주입 필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 대형기계가 반입되지 않으므로 어렵다. • 해수에 의해 부식이 있으므로 부적당

분류	형식	공법 (유사공법)	공법개요	잇점	결점	현장에서의 적용
II	지하연속 벽공법(콘 크리트벽 방식)	OWS · SOLETA NCH공법 이코스공법 , BW공법 등	니수중에서 트렌치 나 구멍을 파고 그 속에 콘크리트를 타 설하고 이것을 연속 시킨다.	<ul style="list-style-type: none"> • 현재에는 가장 확실 한 공법이 다. • 암반속에 서도 시공 이 가능 • 강성이 높 은 벽을 만든다. 	<ul style="list-style-type: none"> • 큰기계 가 필 요 	<ul style="list-style-type: none"> • 대형기 계가 반 입되지 않으므 로 어렵 다.
II	지하연속 벽공법(시 멘트벤트 나이트벽 방식)	특수연벽공 법 (자경성, 안정액공법 , K소일공 법)	니수중에서 트렌치 를 파고 니수자신을 시멘트등으로 고화 한다.	<ul style="list-style-type: none"> • 가장확실한 공법이다. • 공비가 비 교적 싸다. 	<ul style="list-style-type: none"> • 큰 기 계가 필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 대형 기계가 반입되 지 않으 므로 어 렵다.

※ 자료 : (일본)지하수핸드북 제9편 14장 지하댐

제 9 장 결론 및 연구성과 활용계획

제 1 절 결 론

본 연구의 목적은 농어촌 소유역의 가뭄 극복을 위하여 지하수 저류량을 극대화 하는 방안을 연구하고 지하댐 개발에 필요한 조사·설계 기준을 정립하는데 있다. 또한 소유역의 지하수 수문분석을 전산 모델화하여 지하댐 설계시 지하수 유효저수량과 이용가능량을 추정할 수 있도록 지하댐 고유모델을 개발하는데 목적이 있다.

본 연구의 연구내용과 범위는 기존시설(지하댐과 방사상집수정)의 문제점 평가분석, 소유역의 지하수함양과 대수층의 평가방법, 소유역 지하수문 분석모델 개발과 소유역 지하댐의 유효저수량과 이용가능량 상정의 전산처리 시스템 도입 등에 관하여 중점적으로 연구를 수행하였으며 연구 결과를 현지에 적용하기 위하여 사례지구에 대한 조사를 병행하여 수행하였다. 연구결과를 종합 정리하여 소유역 지하댐개발에 관한 조사 설계기준을 정립코자 노력하였는 바, 본 연구의 연구결과와 그 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 소유역 지하수함양과 대수층 평가방법 연구

가. 강우량과 지하수함양의 관계

지하수 부존량 평가에서 지하수함양량을 산정하는 방법의 하나로서 유역내의 수문수지분석(regional hydrologic budget)에 의한 방법이 유용한 것으로 알려졌다. 이것은 조사 대상지역의 하천을 중심으로 지표수와 지하수를 합한

물수지(water balance) 평형공식

$$R = Q_i + P - Q_o - E - Q_x$$

에 기초를 두고 있다(여기서 R : 지하수함양량, Q_i : 하천수 및 지하수유입량, Q_o : 하천수 및 지하수유출량, P : 강우량, E : 증발산 손실, Q_x : 지하수 취수이용량). 이 식은 대상지구내의 물수지를 단순화한 표현이지만 실제로 이용하는 데는 지표수와 지하수의 유입량, 유출량 산정이 쉽지 않고 증발산량 산정방법이 복잡하여 지하수함양량 계산이 매우 어렵다.

그러므로 식을 간단하게 정상류 상태(steady state)를 가정하여 $Q_i = Q_o$ 라 보고, 강우량 중 일정부분이 지하에 함양되었을 때의 강우량과 지하수함양량의 관계를 다음과 같이 설정하였다.

$$\text{즉, } R = \alpha A(P - P_0)$$

여기서 R : 지하수함양량, P : 강우량, A : 대수층면적

P_0 : 지하수침투가 시작되는 강우량(지하수 저류량증가가 시작되는 강우량)

α : 지하수함양율 (recharge ratio)

같은 지역에서 어떤 시점에서 강우량 P_1 에 의한 함양량 R_1 과 일정시간 경과 후 강우량 P_2 에 의한 함양량 R_2 와의 차이는

$$R_1 - R_2 = \alpha A(P_1 - P_2)$$

$$\Delta R = \alpha \cdot A \cdot \Delta P$$

이고 지하수함양량 증가분 ΔR 에 따라 이 지역 지하수위가 $\Delta h (= h_2 - h_1)$ 만큼 상승하였다고 볼 수 있으므로, 대수층의 비산출율(유효공극율)을 S_y 라 할 때 다음 식이 성립한다.

$$\alpha \cdot A \cdot \Delta P = A \cdot \Delta h \cdot S_y$$

$$\alpha = \frac{\Delta h}{\Delta P} \cdot S_y = \frac{h_1 - h_2}{P_1 - P_2} \cdot S_y$$

즉 t_1 과 t_2 시점에서 지하수 수두 h_1, h_2 를 관측하고 또 각 시점에서 그 이전 일정기간의 강수량(월 강수량) P_1, P_2 를 알면 지하수함양율(월별) α 를 알 수 있다.

나. 지하수위 강하와 하천유출의 관계

갈수기의 하천 기저유출량(base flow)은 유역내 대수층의 지하수 저류량중에서 유출되는 유량은 $Q = Q_0 e^{-bt}$ 로 쓸수 있는데(단, Q_0 : 기준시점($t=0$)에서 기저유출량, Q : t 시간 경과후 기저유출량, b : 감쇠상수), 한편 유역내 대수층의 지하수 포장량 V 는 대수층 면적 A , 대수층 수두 h , 대수층의 비산출율을 S_y 라 할때

$$V = A \cdot h \cdot S_y$$

로 주어지며 기저유출량은 지하수 포장량의 변화율과 같다고 볼 수 있으므로 다음과 같은 식이 유도된다.

$$s = \frac{Q_0}{A \cdot S_y} \cdot \frac{1}{b} (1 - e^{-bt})$$

여기서 s 는 지하수위강하량($=h_1 - h_2$)으로 장기간 무강우시($t \rightarrow \infty$) 지하수위 최대강하량은

$$s_m = \frac{Q_0}{A \cdot S_y} \cdot \frac{1}{b}$$

가 된다. 한편 장기간 무강우시 $P_2 = 0$ 이므로 이때의 지하수위 최대 강하량은 함양율 공식에서 $s_m = \frac{P_1}{S_y} \cdot \alpha$ 가 되므로 $\frac{Q_0}{AS_y} \cdot \frac{1}{b} = \alpha \cdot \frac{P_1}{S_y}$ 로 쓸수

가 있으며

유출관계상수와 지하수 함양율 사이의 관계는 다음과 같이 유도된다.

$$\frac{1}{b} = \alpha \cdot \frac{A \cdot P_1}{Q_0}$$

한편 무강우 초기부터 최저 지하수위에 이르는 기간을 T 라 하면 $A \cdot P_1 \approx Q_0 \cdot T$ 의 관계를 가정할 수 있고 $\frac{1}{b} = \alpha \cdot T$ 가 되므로 지하수위 변동자료의 해석을 위한 기본공식을 다음과 같이 유도하였다.

$$s = s_m(1 - e^{-\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{t}{T}}), \quad s_m = \frac{P_1}{S_y} \cdot \alpha$$

다. 지하수위 강하곡선 해석방법

지하수위 강하곡선을 해석하기 위하여 앞의 식을 적용함에 있어 최대수위강하량 s_m 과 경과기간 T , 자연함양율 α 을 동시에 풀 수 없으므로 다음과 같이 작도법을 고안하였다. 즉 위 식을 상용대수계산식으로 다시 쓰면

$$\log(1 - s/s_m) = -\frac{1}{2.30\alpha} \cdot \frac{t}{T}$$

로 되어 반 대수지의 \log 눈금에 $(1 - s/s_m)$ 을 잡고 다른쪽에 경과기간 을 잡아 작도하면 직선형이 되고 직선의 기울기를 구하면 α 를 구할 수 있다. 단 최대 수위강하량 s_m 은 관측조사기간중 최고수위(peak)로부터 갈수기의 최저수위까지의 강하량으로 잡고 무강우시 수위강하곡선이 최저수위에 도달되는 기간을 T 로 잡는다.

라. 지하수함양 분석에 의한 대수층평가의 적정성 검토

지하수함양을 α 와 기저유출에 의한 대수층상수 b 의 관계를 유도하기 위하여 $A \cdot P_1 \approx Q_0 \cdot T$ 을 가정하였는 바, 이의 적용 타당성을 분석하기 위하여 현장 수문조사를 시행하고 무강우기간 지하수위 강하곡선을 해석하여 구한 대수층지역 지하수함양율과 하천의 기저유출에 의한 감쇠상수의 관계를 비교하였다. 시범지구 3개지구에서 하천 기저유출량 조사와 인근대수층의 지하수위변동 관측 조사 결과를 종합분석하면 다음과 같다.

지 구	기저유출조사 b값		지하수위강하곡선해석			오차범위 ⓑ/Ⓐ
	1차(9월)	2차(10월) Ⓐ	함양율 α	무강우기간 T	$b = \frac{1}{\alpha \cdot T}$ ⓑ	
가남	/day 0.041	/day 0.019	0.0485	day 35	/day 0.059	% +210
대산	0.192	0.116	0.362	30	0.092	-20
중왕	-	0.072	0.394	55	0.051	-29

기저유출량조사에서 얻는 감쇠상수 b 값을 기준으로할때 지하수위강하곡선 해석에의하여 지하수함양율 α 를 구하고 그 역수에 관계되는 b 값을 구하여 앞의 b 값과 비교한 결과 3지구 모두 같은 범위를 나타내고 있어 지하수 함양율 산출 방법의 이용 가능성을 보여주고 있다. 그러나 지구별 비교량의 오차범위가 다소 산만하므로 지구별 조건을 검토한 결과 가남지구와 중왕지구에서는 지하수위 변동 측정등에 장애요인이 있어 이런 원인이 큰 오차를 가져왔다고 판단된다. 대산지구의 조사에서는 관측공 시설이 양호하여 정상적인 수위변동곡선을 얻을 수 있었으며 이 지구에서 기저유출조사에 의한 b 값을 기준할때 지하수위

강하곡선 해석에 의한 b값은 20%적게 나타났으며 이는 시험오차범위에 속한다고 볼 수 있다.

지구별 조건으로 보아 대산지구 조사자료를 실험사례로 하고 20%의 시험오차를 인정한다면 지하수위 강하곡선 해석에 의한 지하수 함양율과 비산출율 산정방법은 타당하다고 판단된다. 이번 연구에서는 시험사례가 다소 부족한 감이 있지만 앞으로 이러한 시험자료를 축적하면 이 방법의 타당성이 입증될 것이 확실시 된다.

2. 지하댐 시공사례와 기존시설에 대한 분석

가. 국내 지하댐 시공사례와 이용현황

이안 지하댐 시험사업은 1983년 12월 준공되었고 지하수 다량 채수시설로서 농업용수개발사업에서 지하수를 보조수원으로만 이용하던 개념에서 주수원으로 이용할 수 있음을 입증하여 주었다. 이를 시효로 하여 '86년에는 충남 공주군 옥성지구 외 3개 지구에서 지하댐 개발사업이 추가로 준공되었으며 국내 지하댐시공 사례는 모두 5개지구가 된다. 한편 대수층에 풍부한 수량이 저류되어 있는 넓은 평야 지역에서는 지하 물막이벽 없이 방사상집수정만 시공하였는데 93년말까지 준공된 방사상집수정 지구수는 총 40지구에 달한다.

본 연구 1차년도에 이 시설들의 이용현황을 조사하여 기존시설의 효과와 문제점을 검토하였다. 지하댐 및 방사상집수정의 이용현황 조사자료를 분석하여 가뭄때의 기존시설 활용효과를 검토하였는 바, 평수년에 해당하는 '93년은 년 평균 가동시간이 689시간인데 비하여 '94년은 1,114시간으로 전년대비 61.7%의 증가를 나타내며 '94년 가뭄대책에 충분히 활용한 실적을 보여주고 있다. 특히 평균 가동실적 증가율의 도별 분포와 '94년 가뭄 도별 분포가 일치

하는것은 이 시설물들의 가뭄대비 효용을 입증하는 것이라 평가된다. 지하 물막이벽 설치지구인 이안지구의 4지구에 대한 이용현황을 별도로 분석한 결과 년 가동시간이 '93년의 831시간에서 '94년에 1330시간으로 증가하여 '94년 가뭄 이용율 60%로 나타났으며 이것은 기존시설 전체분석에서 나타난 증가율과 같으나 물막이벽 설치지구가 평시나 또는 가뭄시에 일반지구에 비하여 가동시간이 20%정도 많은 것으로 나타났다.

또한 당초 설계량과 실 이용량을 비교한 결과 유역면적이 넓고 대수층 두께가 비교적 두꺼운 2지구는 당초 계획양수량의 90%이상 활용하고 있으나 유역이 작고 대수층 두께가 상대적으로 얇은 지구는 활용율이 80% 미만으로 나타나 유역면적의 크기가 지하댐 예정지구 선정의 기준이 됨을 알수 있었다.

나. 지하댐 저류량과 이용가능량 산정내용 검토

지하댐 설계의 기본은 지하수 저류량과 이용가능량을 적합하게 추정하는데 있다. 이안 시험사업지구의 예를 보면 유역전체를 지하수문 특성을 감안하여 23개 소구역으로 세분하고 각 Cell별로 면적 \times 대수층두께 \times 비산출률로 저류량을 계산하고 이들을 합산하여 지하댐내의 저류가능량을 산정 하였으며, 이용가능량은 각 Cell에서 지하 물막이벽 까지 흐르는데 걸리는 소요일수를 구하고 각 Cell안의 저류량 Q 를 소요일수로 나누어 Cell별 1일 유출량을 계산한 다음 가뭄시 30일간의 이용가능량을 구하였다. 여기서의 문제점은 무강우기간에 토양수분 이외는 지하수를 함유할 수 없는 산지유역 전체의 면적에 1 ~ 2m의 대수층을 가정하여 저류량을 산정하므로써 저류량이 과다 계상된 감이 있으며, 이용가능량 산출에 있어 지하수 도달기간을 계산한 다음 30일간의 이용가능량을 역으로 산출하는 논리적 모순을 내포하고 있다는 것이다.

지하수의 유동은 연속적 이동이며 Cell별 독립 개념이 아니므로 이러한 모순의 극복은 지하수 유동모델링의 도입으로 전체유역에 대한 지하수 저류량과 이용량을 해석하므로써 가능할 것으로 판단된다.

다. 외국의 지하댐 시공사례와 우리나라에서 적용성

건조지대에서 지표저수지는 증발손실이 클 뿐아니라 토사유입으로 인한 저수지 매립, 오염물질 유입 및 축적 등 심각한 불이익이 따른다. 이러한 결함을 극복하기 위하여 물을 지하에 저장하는 방법이 로마시대부터 시행되어 왔는데 중동지역에서는 지하동굴을 건설하여 물을 저장하였으며 아프리카 지역에서는 인공적으로 모래층을 만들어 모래 공극에 물을 저장하는 방법이 이용되어 왔다. 이 모래저장댐(sand storage dam)은 하천의 하부에 불투층벽을 쌓아 홍수시 댐 내부에 모래가 쌓이어 인공 대수층이 되고 여기에 저장된 물을 갈수기에 이용하는 시설로서 지하댐의 일종이다.

근대적인 지하댐의 구상과 시공은 일본에서 시작되었다고 볼 수 있는데 나가사키(長崎)현의 가바지마(樺島)댐과 오키나와현의 미나후크(皆福)댐을 70년대에 건설하여 그 효능을 입증하였다. 일본은 지하수위가 지표에 가까이 있어 지하수위 상승의 여지가 적고 지하수위가 비교적 깊은 곳은 대개 도서지방이나 해안지대이기 때문에 이러한 지역에 많은 후보지를 선정하여 지하댐 건설을 계획하고 있다.

중국의 경우 협서성(陝西省) 서안시(西安市) 북방 약 10km 위치의 황토 고원지대에서 관계 하천인 석천(石川) 하류부에 후평(富平)지하댐을 건설중에 있다. 석천(石川)의 상류에서 지하댐까지의 길이는 36.5km 이고 하곡평야의 폭은 4.3km, 유역면적은 156km²로서 하천폭이 넓고 대수층이 비교적 두꺼워서 평균 30m에 이르며 지형과 수리지질조건으로 보아 석천(石川)의 하곡은 지하댐 개

발의 최적지로 평가되며 물수지 계산 결과 대수층의 저수용량은 5억 m³, 연간 양수가능량 7,000만 m³, 공급계획량 5,000만 m³, 으로 보고되었다.

외국의 지하댐 시공사례에서 볼 때 지하댐은 그지역의 기후와 필요성에 따라 규모와 시공방법이 크게 달라질 수 있음을 알수 있는데 우리나라는 기후와 기타 조건에서 일본의 경우에 가깝다고 할수 있으며 일본에서 지하댐개발은 주로 도서지방 해안변에 위치를 선정하고 있음을 유의할 필요가 있다. 우리나라에서도 내륙지역에서는 수위상승효과가 적고 또한 지하수위를 무리하게 상승시키면 작물에 나쁜 영향을 주기 때문에 지하댐 위치선정에 제한이 되고있다. 그러나 해안지역에서의 지하댐은 염수침입을 방지함과 동시에 상류부의 담수를 최대한 이용할수 있으므로 3면이 바다인 우리나라에서 이러한 종류의 지하댐개발이 많이 보급될 수 있을것이다.

3. 물리탐사 자료에 의한 대수층 해석 모델

대수층 평가에서 지구물리화학적 방법이 중요한 역할을 해오고 있다. 여러가지 지구물리화학적 방법중에서도 전기비저항 탐사가 저렴한 비용으로 대수층의 존재를 규명하는 가장 유효한 방법으로 알려져있다. 그러나 그 적용은 정성적인 성격이며 정량적인 적용은 아직 미흡한 상태에 있다. 본 연구 1차년도에 대수층 비저항 탐사자료를 정량적으로 해석하여 대수층의 특성을 규명하는 연구를 시도하였다.

농어촌진흥공가 1983년 경기도 여주군 가남면에서 시행한 수맥조사 보고서에 제시된 수직전기비저항탐사자료와 시추조사 및 양수시험자료를 비교분석하여 대수층의 비저항과 투수량계수 사이의 관계를 유도한 결과 대수층의 투수량계수 $T(m^2/day)$ 와 비저항 ρ (ohm-m)사이의 관계식은 다음식 과 같다.

$$T = 1035.595 \rho^{-0.0939}$$

한편, 대수층의 전기적, 수리적 특성 사이의 정확한 관계를 구하기 위해서는 전기탐사 자료의 정확도가 요구되는데, 오차를 일으킬 수 있고 실제 탐사 시에 벌어질 수 있는 여러 상황들을 고려하여 유한차분법(finite difference method; FDM)을 이용한 2차원 전기비저항 모델링을 수행하였는 바, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 전극의 접지심도의 차이는 탐사자료에 거의 영향을 미치지 않는다.
- (2) 표토의 습윤상태는 탐사자료를 왜곡시키지 않는다.
- (3) 전류전극 주위의 비저항 이상체는 탐사자료에 큰 영향을 주지 않는다.

4. 소유역 지하수문 분석 모델 개발

가. 소유역 지하수문 분석 모델 SUBDAM의 개선

'95년도에 개발한 소유역 지하수문 분석 모델인 SUBDAM을 다양한 형태의 소유역 지하수문 분석에 적용할 수 있는 범용모델로 개선시키기 위하여 모든 입력자료를 효율적으로 처리하고 모델링 영역의 형태를 제한없이 디자인할 수 있는 문자형 전처리시스템을 개발하였다. 또한 기존 격자점중심 격자망(point-centered grid)을 보다 수치계산의 효율성을 높은 블록중심 격자망(block-centered grid)으로 대체하였다. 블록중심 격자망은 기존의 모델이 직사각형 모양의 유역형태만을 표현할 수밖에 없는 단점을 극복할 수 있게 하며 다양한 모양의 유역형태를 모델링에 반영할 수 있게 한다. 또한 보다 빠른 계

산 속도를 가지는 반복계산방법 (iterative method)으로 SIP (strongly implicit procedure)법을 새로 도입하였다. 부정류 상태 (transient state) 모델링 수행시 지하수 함양단계를 기존의 4계절 구분에서 12개월로 더욱 세분하여 표현할 수 있도록 그 기능을 개선하였다.

나. 이용가능량의 산정기능 보완

이용가능량을 산정하는 기준은 아직까지 명확하게 설정되어 있지 않다. 이것은 지하수 관정의 개발 기술과 설치 밀도 그리고 그 양수 영향권이 어느 정도로 확산되느냐에 따라서 각 관정에서의 안정채수량을 결정하는 문제이다. 그러나 이는 지하댐이 설치되지 않은 경우에 해당되며 지하댐의 설치로 간접적인 인공 함양의 효과를 고려하면 지하수 함양량은 더 큰 값을 가지는 것으로 볼 수 있으며 따라서 안정채수량도 증가한다.

Huisman 과 Olsthoorn (1988)은 강우에 의한 지하수 함양량의 최소 20에서 최대 80% 정도를 그 대수층의 안정채수량으로 제시하였다. SUBDAM의 부정류 상태 모델링시의 저류량 변동을 유효 저류면적에의 지하수함양량의 증가분으로 환산하여 이중 최대 80%를 최대 이용가능량 증가분으로 산정할 수 있다. 원래의 안정채수량에 이용가능량의 증가분을 합하면 그 지하수구역의 이용가능량으로 산정할 수 있다. 계절별 및 월별 저류량 변동을 이런 방법으로 계산한다면 계절별 및 월별 지하수 이용가능량을 계산할 수 있다. 이러한 이용가능량 산정기능을 STORAGE에 첨가하였다. 이는 부정류 상태 모델링시 SUBDAM에서 생성된 계절별 및 월별 저류량의 변동자료를 STORAGE에서 받아들여 이용가능량을 결정할 수 있게 한다.

제 2 절 연구성과 활용계획

1. 소유역 지하댐 조사·설계의 적용

본 연구과제 수행중 제시된 세부연구과제 연구성과 중 실용화가 가능한 분야는 다음과 같으며 이들은 향후 지하댐 조사 설계에 적용할 수 있을 뿐 아니라 일반적인 지하수 조사에 있어서도 응용이 가능하다.

가. 지하수위 변동자료 해석에 의한 대수층 평가방법

1) 풍수기와 갈수기의 지하수위를 측정하고 월 강우량을 비교하면 그 지역 대수층의 지하수 자연함양율을 추정할 수 있다.

2) 관측우물에서 지하수위를 장기관측하면 지하수위 변동곡선을 작도하여 해석하므로써 지하수함양율과 대수층 저류계수(비산출율)를 산출할 수 있다.

나. 물리탐사자료에 의한 대수층 해석방법

1) 비저항 수직탐사자료 해석을 위하여 사용한 전산프로그램 ESII 는 기존의 슬림버저수직탐사 해석프로그램인 SE(hv)를 웨너식 수직탐사자료를 해석할 수 있도록 Up-grade한 대화식 프로그램으로서 층적층 전기탐사에 유용하다.

2) 비교적 넓은 구역의 대수층에서 시추조사 또는 양수시험자료가 부족한 경우는 비용이 저렴한 전기비저항탐사에 의해 보완할 수 있다. 이것은 시추 또는 양수시험 자료가 있는 위치에서 수직 비저항탐사를 시행하고 대수층의 비저항 값과 투수성 상수를 비교하고 이 전기적 수리적 특성의 관계를 다른 위치의 전기탐사해석에 응용하는 것이다. 이때 지층해석의 정도를 높이기 위하여 H-type ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$)의 지층에서는 수평단위 콘덕턴스를, K-type($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$)의

지층에서는 수직단위 저항을 분석에 이용한다.

다. 소유역 지하수문 분석 전산모델

SUBDAM은 소유역의 지하수함양을 고려한 2차원 포화대 지하수유동모델이다. 모델영역내에서 정상류상태 및 부정류상태의 지하수위 분포와 수위 증감에 따른 저류량 변동을 분석할 수 있다. 모델의 범용화를 위하여 MODFLOW의 PREMOD라는 문자형 전처리시스템과 ModelCad라는 그래픽 전처리시스템을 SUBDAM에 도입하였으며 계산속도를 빠르게 하기위하여 SIP법을 이용하였다. 물막이벽 설치시 지하수위 상승분에 대한 저류량 변동은 보조프로그램인 STORAGE에 연결하여 분석하고 월별 계절별 이용가능량을 산정하는 기능이 있다.

2. 연구성과 실용화 보급계획

가. 기 발표된 연구성과

본 연구와 관련된 보고서 발간 또는 학술지 기고 내용은 다음과 같다.

- 1) 소유역 지하댐개발에 관한 기술개발 연구 1차년도 중간보고서 : 최병수 외, 1995. 12.
- 2) 가남지역 대수층의 전기적 수리적 특성 사이의 관계 - 한국지하수환경학회지 Vol. 2, no.2, 1995. 6. : 이기화, 최병수, 한원석
- 3) 자유면 대수층지역에서 지하수위 변동자료 해석에 의한 대수층 특성 연구 - 농공기술지(농어촌진흥공사 발행) 통권 제50호, 1996. 6. : 최병수
- 4) 지하댐개발 후보지구 지하수조사 보고서, 1996. : 농어촌진흥공사 농어촌연구원.

나. 금후 보급계획

본 연구보고서에는 연구개발 내용과 아울러 소유역 지하댐개발에 관한 위치 선정 기준, 지하수조사 요령, 지하댐 저류량 및 이용량 산정요령, 수원공(방사상집수정) 설계요령 등 지하댐 조사 설계에 참고될 연구내용을 별장(제 8장)으로 정리 수록하였다. 또한 본연구에서 개발한 전산프로그램(ESII, SUBDAM, STORAGE 등)의 사용자설명서를 부록으로 첨부하고 전산프로그램을 개방하여 관심있는 기술자가 쉽게 이용할수 있게 하고자 한다.

유속계 및 기록계 (M1 & Z4)



현장조사



유속계 및 기록계

리살식 자기수위계



현장설치

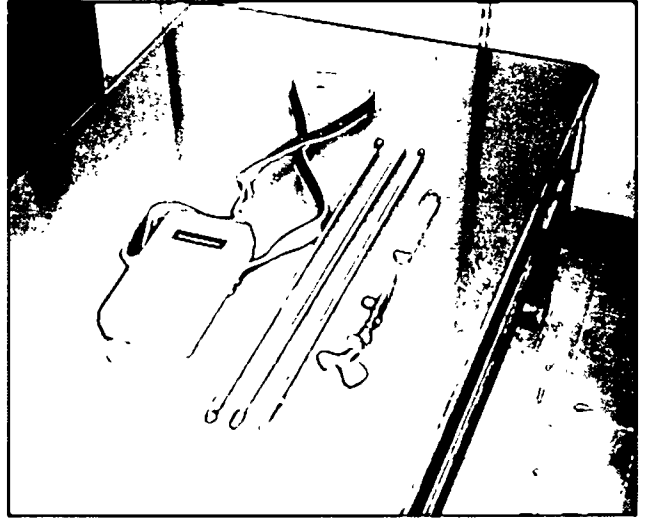


수위계

유속계 및 기록계 (M1 & Z4)

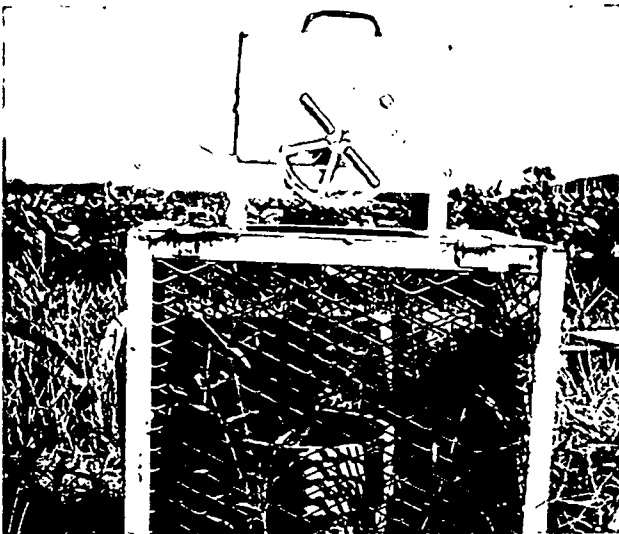


현장조사

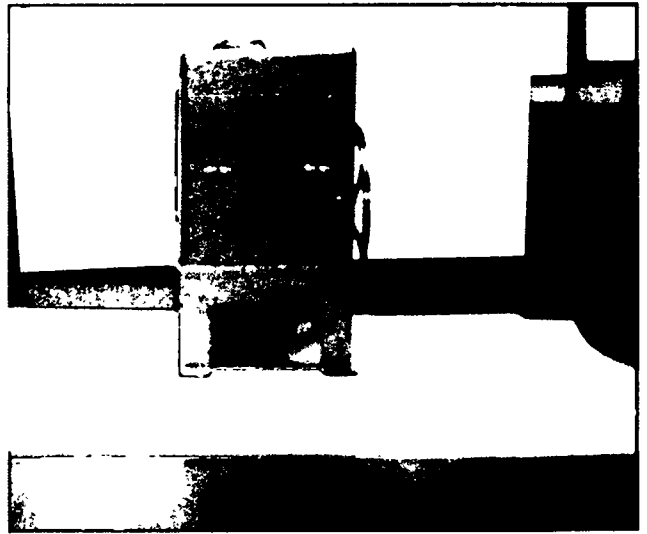


유속계 및 기록계

리살식 자기수위계



현장설치



수위계

여 백

참 고 문 헌

1. 지하수 및 지하수문 일반

Fletcher G. Driscoll : Groundwater and Wells - Johnson Division.
Chap.24, 1986.

Walton W. C. : Groundwater Resources Evaluation, Chap. 6, Chap. 9,
1970.

Raudkivi A. J. : Hydrology, An advanced introduction to Hydrological
Process, Chap. 6, Chap. 7, 1979.

Freeze R. A. & Cherry J. A. : Groundwater, Chap. 6, Chap. 8, 1979

Huisman L. and Olsthoorn T. N. : Artificial groundwater recharge -
Pitman Advanced Publ. Program(Delft Univ.) Chap. 1, 1982.

Jacob Bear : Hydraulics of Groundwater, Chap. 2, Chap.3, 1979

Todd D. K. : Groundwater Hydrology, Chap. 6, Chap. 9, 1980.

Australian Water Resources Council(AWWC) : Proceedings of the
groundwater Recharge Conference 1980. -Reports.

선우 중호 : 수 문 학, 제 3장~제 7장, 1983.

윤 용 남 : 수문학 기초와 응용, 제 2장~8장, 1975.

건설산업 조사회(일본) : 지하수 핸드북 - 제 4편 1장, 제 5편 1~3장, 제 9편
2~3장 및 14장 1979.

2. 지하수 함양. 가뭄. 지하수위.

Hershfield D. M., Brankenside, D. L., Comer, G. H. : Some measures of Agricultural Drought - Proc. of Second International Symposium in Hydrology, 1972.

Leach L. M. : Natural recharge in the Mossman and Mulgave and it's relationship to rainfall - AWRC Groundwater Recharge Conference, 1980.

Viswanathan M. N. : The rainfall/water table level relationship of an unconfined aquifer - Ground Water vol.21 No.1, p49, 1983.

Marios Sophocleous : The role of Specific yield in groundwater recharge estimation - Ground Water vol. 23, No.1, p52, 1985.

Smart G. M. : Drought analysis and soil moisture prediction - ASCE Irrigation and Drainage Div. vol. 109, No. 2, p251, 1983.

Randall D., Houdk H. : Drought management of existing water supply system - ASCE Jn. of Water Resources, vol. 116, no. 1, 1990

Stoner R. F. : Conjunctive use of surface and groundwater supplies - ICID Bulletin vol. 27, no. 2, 1978.

Helway O. J. : Regional groundwater management - Ground Water 1978, p 318-321.

Morel-Seytoux H. L. : A simple case of conjunctive surface-ground water management Ground Water 1975, p 506-516.

Rushton K. R., Ward C. : The estimation of groundwater recharge - ASCE Hyd. Div. vol. 41, no. 3/4, 1979.

Henry J. L., Palmer J. R. : Natural and artificial recharge of groundwater in the Callide Valley - Australian Water Resources Council, Conference report, 1980

Lui Y., Zhang C. : A comparative study of calculation methods for recharge of rainfall seepage to groundwater in plain area - Ground Water 1993, p 12.

김 현 영 : 항구적 가뭄대책 방향 -농어촌용수 개발과 관리 심포지엄 보고서(농어촌진흥공사) p 279, 1995.

농어촌진흥공사 : 시설관정 관측조사 종합보고서, 1975.

상 동 : 지하수개발과 농어촌용수 심포지엄 보고서, 1994.

오 재 섭 외 : 주요 토양의 삼투속도에 관한 연구 - 농사시험연구보고서(농촌진흥청) 제 16집 1974.

농림부, 농어촌진흥공사 : '94, '95 가뭄 극복, 1995, 12.

상 동 : 농업생산기반정비사업 통계연보, 1996.

안 중 기 : 소유역 곡저부 천층지하수의 수위와 흐름 변화 -건국대 박사학위 논문, 1995

3. 지하댐 관련

Hanson G., Nilsson A. : Groundwater Dams for rural water supplies in developing countries - Ground Water vol. 24 No. 4, p497, 1986.

Smith C. G., Hanor J. S. : Underground storage of treated water - A field test Ground Water 1975, p410-417.

Ambroggi R. P. : Underground reservoirs to control the water cycle, Ground Water 1978, p158-166.

Cluer B. L. : Storage basin volume and Drainage basin dynamics, Camas Prairie, South Idaho - Ground Water 1989, p323-332.

Nathan, Buras : Conjunctive operation of dams and aquifers - ASCE Hyd. Div. vol. 89, no. 6, 1963, p 111-131.

Robert Y. D. : Optimum conjunctive operation of groundwater basins -
ASCE Hyd. Div. vol. 90, no. 4, 1964.

농어촌진흥공사 : 이안지하댐 조사시험보고서, 1982.

상 동 : 이안지하댐 시험사업 준공보고서, 1984.

상 동 : 이안지하댐 시험사업 사후평가보고서(김종경), 1985.

상 동 : 일본의 지하댐 시공에 관한 고찰(양재만), 1983. 8.

상 동 : 경북 상주군 이안지구 지하댐 시험사업 계획서, 1982.

상 동 : 충남 공주군 옥성지구 지하댐개발 사업계획서, 1984.

상 동 : 전북 정읍군 고천지구 지하댐개발 사업계획서, 1985.

상 동 : 경북 영일군 남송지구 지하댐개발 사업계획서, 1985.

상 동 : 전북 정읍군 우일지구 지하댐개발 사업계획서, 1985.

농 립 부 : 농지개량사업 계획설계 기준(관개편), 1983.

상 동 : 농지개량사업 계획설계 기준(양배수장편), 1984.

상 동 : 농지개량사업 계획설계 기준(수로공편), 1988.

김 회 성 : 3차원 흐름모형을 이용한 지하차수벽의 투수특성 규명
-충북대 박사학위 논문, 1966.

松美侍一郎 : 지하수 규제목적의 지하댐 구상 - (일본)토목학회지 vol.53, no.3
1968.

石崎勝義 : 지하저수지에 의한 수자원 개발 - (일본)토목기술자료집 vol.19
no.9, 1977.

상 동 : 지하댐과 지하수함양 - (일본)토질공학회편 토와 기초 vol.31, no.3
1983.

岡本隆一 등 : 지하댐의 차수공법 - (일본) 토와 기초 vol.31, no.3, 1983.

相場瑞夫 등 : 宮古島 지하댐의 수문거동 - (일본) 토와 기초 vol.31, no.3
1983.

- 佐合純造 : 평야부의 지하수 물수지 (일본) 토목기술자료 vol.21, no.4, 1979.
- 赤井浩一 : 중국 峽西省 富平지하댐시험공사에 대하여-(일본)토와 기초 vol.31, no.3, 1983.
- 富田友幸 등 : 지하수 인공함양과 지하댐 - (일본)농업토목학회지 vol.55, no.7, 1987.

4. 방사상집수정

- Milojevic M. : Radial collector wells adjacent to the river bank - ASCE Hydraulic Div. vol. 89, No. 6, p133, 1963.
- Hantush M., Papadopulos I. S. : Flow to collector wells - ASCE Hyd. Div. vol.88, no.5. p221-244, 1962
- Gidley H. K. : Performance records of radial collector wells in Ohio river valley - Amer. Water Works Acc. vol.52, 1960.
- Papadopulos I. S., Cooper H. H. : Drawdown in a well of large diameter - Water Res. Research vol. 3, 1967.
- Sammel E. A. : Aquifer test in large diameter wells in India - Ground Water, 1977 p265-272.
- Bourgeois P. O., Bownell J. D., Kirk J. W., Larsen C. H. : Camada's largest well-Collector well design-field reports, Ground Water 1977, p39-46.
- Rushton K. R., Holt S. M. : Estimating aquifer parameters for large diameter wells, Ground Water 1981, p505-509.
- Mishra G. C., Chachadi A. D. : Analysis of flow to a large diameter well during the recovery period, Ground Water 1985, p646-651
- 최 병 수 : 사이편 집수정 설계 요령 - 농공기술 제 6권 3호 (농어촌진흥공사), 1989.
- 박 흥 룡 : 방사상집수정 설계에 대한 제언 - 지하수개발사업 평가보고서

(농림수산부), 1989

이 기 철 : 방사상집수정 수리정수 조사연구 보고서(농어촌진흥공사), 1990.

5. 물리탐사자료에 의한 대수층 해석

여 상철, 이 인기 : 한국지질도 여주도폭 1:50,000, (국립지질광물연구소) 1975.

Archie, G. E., 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Amer. Inst. Min. Metall. Pet. Eng. Tech. Rep.* 1422.

Archie, G. E., 1950. Introduction to petrophysics of reservoir rocks, *Bulletin of the AAPG*, Vol. 34, pp. 943-961.

Dey, A., and Morrison, H. F., 1979. Resistivity modeling for arbitrarily shaped two-dimensional structures, *Geophysical Prospecting*, Vol. 27, pp. 106-136.

Frohlich, R. K., 1974. Combined geoelectrical and drill-hole investigations for detecting fresh water aquifers in northwestern Missouri, *Geophysics*, Vol. 39, pp. 340-352.

Frohlich, R. K., and Kelly, W. E., 1985. The relation between hydraulic transmissivity and transverse resistance in a complicated aquifer of glacial outwash deposits, *Journal of Hydrology*, Vol. 79, pp. 215-229.

Heigold, P. C., Gilkeson, R. H., Cartwright, K., and Reed, P. C., 1979. Aquifer transmissivity from surficial electrical methods, *Ground Water*, Vol. 17, pp. 338-345.

Hubbert, M. K., 1940. The theory of ground-water motion, *Journal of Geology*, Vol. 48, pp. 785-944.

Kalinski, R. J., Kelly, W. E., and Bogardi, I., 1993. Combined use of geoelectric sounding and profiling to quantify aquifer protection properties, *Ground Water*, Vol. 31, pp. 538-544.

Kelly, W. E., 1977. Geoelectric sounding for estimating aquifer hydraulic conductivity, *Ground Water*, Vol. 15, pp. 420-424.

Kelly, W. E., and Frohlich, R. K., 1985. Relations between aquifer

- electrical and hydraulic properties, *Ground Water*, Vol. 23, pp. 182-189.
- Kelly, W. E., and Reiter, P. F., 1984, Influence of anisotropy on relations between electrical and hydraulic properties of aquifers, *Journal of Hydrology*, Vol. 74, pp. 311-321.
- Kim, H. S., and Lee, K., 1993, Interactive interpretation methods for one-dimensional Schlumberger electrical sounding and magnetotelluric data, *J. Geol. Soc. Kor.*, Vol. 29, pp. 493-506.
- Kitanidis, P. K., 1989, *Applied basic geostatistics*, in Lecture Note: *Estimation of spatial functions and predictive groundwater modeling*, Stanford University, California, pp. 103-120.
- Kosinski, W. K., and Kelly, W. E., 1981, Geoelectric soundings for predicting aquifer properties, *Ground Water*, Vol. 19, pp. 163-171.
- Lines, L. R., and Treitel, S., Tutorial, 1984, A review of least-squares inversion and its application to geophysical problems, *Geophysical prospecting*, Vol. 32, pp. 159-186.
- Maillet, R., 1947, The fundamental equations of electrical prospecting, *Geophysics*, Vol. 12, pp. 529-556.
- Mazac, O., and Landa I., 1979, On determination of hydraulic conductivity and transmissivity of granular aquifers by vertical electric sounding, *Journal of Geological Sciences*, Vol. 16, pp. 123-139.
- Mazac, O., Kelly, W. E., and Landa, I., 1985, A hydrogeophysical model for relations between electrical and hydraulic properties of aquifers, *Journal of Hydrology*, Vol. 79, pp. 1-19.
- Niwas, S., and Singhal, D. C., 1981, Estimation of aquifer transmissivity from Dar Zarrouk parameters in porous media, *Journal of Hydrology*, Vol. 50, pp. 393-399.
- Pelton, W. H., Rijo, L., and Swift, C. M., 1978, Inversion of two-dimensional resistivity and induced-polarization data, *Geophysics*, Vol. 43, pp. 788-803.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., and Sheriff, R. E., 1990, *Applied Geophysics*, Cambridge University Press, pp. 285-292.
- Zohdy, A. A. R., 1989, A new method for the automatic interpretation

of Schlumberger and Wenner sounding curves. *Geophysics*. Vol. 54, pp. 245-253.

6. 지하수문분석 모델

농어촌진흥공사 : 가남(Ⅱ)지구 수맥조사 보고서, 1984.

상 동 : 가남지구 지하담조사 보고서, 1984.

상 동 : 소유역 지하담개발에 관한 기술개발 연구 중간 보고서, 1995.

Anderson, D. A., J. C. Tannehill, and R. H. Pletcher. 1984. *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer*. Hemisphere Publishing Corporation, New York.

Bear, J., 1979. *Hydraulics of groundwater*. McGraw-Hill, New York.

Bezner, H. C. 1989. *FORTRAN 77*. Prentice-Hall International, Singapore.

Finnemore, E. J. 1995. A program to calculate groundwater mound heights. *Ground Water*, vol. 33, no. 1, pp.139-143.

Geraghty & Miller, Inc. 1993. *ModelCad : Computer Aided Design Software for Ground Water Modelling*.

Hantush, M. S. 1967. Growth and decay of groundwater-mounds in response to uniform percolation. *Water Resour. Res.*, vol. 3, no. 1, pp.227-234.

Hsieh, P. A. and J. R. Freckleton. 1993. Documentation of a computer program to simulate horizontal-flow barriers using the U.S. Geological Survey's modular three-dimensional finite-difference gound-water flow model. U.S.GS. Open-File Report 92-477.

Huyakorn, P. S. and G. F. Pinder. 1983. *Computational Methods in Subsurface Flow*. Academic Press, New York.

- McDonald, M. G. and A. W. Harbaugh. 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. U.S.GS Techniques of Water-Resources of Investigations, Book 6, Chapter A1.
- Ortiz, N. V., D. B. McWhorter, D. K. Sunada, and H. R. Duke. 1978. Growth of groundwater mounds affected by in-transit water. Water Resour. Res., vol. 14, no. 6, pp.1084-1088.
- Oweis, I. S. and G. C. Biswas. 1993. Leachate mound changes in landfills due to changes in percolation by a cap. Ground Water, vol. 31, no. 4, pp.664-674
- Rai, S. N. and R. N. Singh. 1995. Two-dimensional modeling of water table fluctuation in response to localised transient recharge. J. Hydrol., vol. 167, pp. 167-174
- Van der Heijde, P., Y. Bachmat, J. Bredehoeft, B. Andrews, D. Holtz, and S. sebastian. 1985. Groundwater management : the use of numerical models. AGU, Water Resources Monograph, Washinton, D.C.,
- Wang, H. F. and M. P. Anderson. 1982. Introduction to Groundwater Modeling. W. H. Freeman and Company, New York.

여 백

부 록

I 소유역 지하수문분석 모델 설명서

II 전기탐사자료 해석 P/G 사용설명서

여 백

I 소유역 지하수문분석 모델 설명서

목 차

제 1장 소유역 지하수문분석 모델 개발

1. 배경이론

1. 1 평면 2차원 포화대 지하수 유동 지배식
1. 2 초기 및 경계조건
1. 3 유한차분법

2. 모델 SUBDAM

2. 1 개요
2. 2 모델의 구성
2. 3 계산 수행 과정
2. 4 입력 자료
2. 5 출력 자료
2. 6 예제 시뮬레이션 - MODFLOW 시뮬레이션 결과와의 비교

3. 프로그램 STORAGE

제 2장 모델 · 프로그램 사용 설명서

1. 개요
2. 필요 시스템과 프로그램의 설치
3. SUBDAM

- 3. 1 계산수행 순서도
- 3. 2 입력자료
- 3. 3 정류상태 문제의 출력화면
- 3. 4 정류상태 문제의 출력파일
- 3. 5 부정류상태 문제의 출력화면
- 3. 6 부정류상태 문제의 출력파일

4. STORAGE

- 4. 1 계산수행 순서도
- 4. 2 입력자료
- 4. 3 출력화면
- 4. 4 출력파일

제 1 장 소유역 지하수문 분석모델 개발

1. 배경 이론

1. 1 평면 2차원 포화대 지하수 유동 지배식

Darcy(1856)의 법칙의 지하수 유동현상을 설명하는데 빠지지 않는 지하수학의 가장 기본이 되는 법칙이다. Darcy의 법칙은 식(1)과 같이 정량적인 형태로 표현할 수 있다.

$$Q = -KA \frac{h_2 - h_1}{l_2 - l_1} \text{-----}(1)$$

식(1)은 Darcy가 행한 실험의 결과 해석에 의한 경험식으로 Q 는 유량 [L^3/T], $h_2 - h_1$ 은 두 지점간의 수위차 [L], A 는 단면적 [L^2], K 는 수리전도도 [L^2/T], $l_2 - l_1$ 은 두 지점간의 거리 [L]를 나타낸다. 이 식의 의미는 두 지점간의 수위차가 존재할 때 두 지점간의 물의 유량은 수위차에 비례하며, 두 지점간의 거리에 반비례하고, 단면적에 비례한다는 것이다. 위의 Darcy의 법칙을 표현하는 식과 질량보전의 법칙, 연속방정식을 이용하여 지하수의 유동현상을 지배하는 편미분 방정식을 유도할 수 있다.

등방 균질의 지질매체가 물로 포화되어 있을 때 자유면 대수층의 부정류 상태 2차원 지하수 유동지배식은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S \frac{\partial h(x, y, t)}{\partial t} = T \left(\frac{\partial^2 h(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h(x, y, t)}{\partial y^2} \right) + R(x, y, t) \text{-----}(2)$$

$h(x,y,t)$ 는 지하수위[L], t 는 시간[T], S 는 저류계수[무차원], T 는 투수량 계수[L²/T], x 는 횡축[L], y 는 종축[L], $R(x,y,t)$ 는 평면유입(+ 부호) 혹은 평면유출(- 부호) [L/T]을 의미한다.

평면유입 혹은 평면유출이 없다고 가정하면, 그리고 정류 상태의 지하수 흐름을 생각한다면 위의 식(2)에서 좌변은 0이 되고, 우변의 $R(x,y,t)$ 도 소거할 수 있다. 따라서 식(2)는 식(3)과 같은 라플라스(Laplace) 방정식으로 변한다.

$$\frac{\partial^2 h(x,y,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h(x,y,t)}{\partial y^2} = 0 \text{-----}(3)$$

즉 본 연구의 내용과 관련시켜 생각해 볼 때 식(3)은 평면적 지하수 함양이라는 요소를 고려하지 않은 정류상태의 자유면 대수층에서의 지하수위 분포를 얻을 수 있는 지배 방정식으로 볼 수 있다. 물론 이 식은 대수층의 매질 자체가 등방 균질이라는 가정에 근거한 것이다. 만일 대수층 매질의 이방성과 불균질성을 고려한다면 식(3)은 식(4)와 같이 바꾸어 표현될 수 있다.

$$K_{xx} \frac{\partial^2 h(x,y,t)}{\partial x^2} + K_{yy} \frac{\partial^2 h(x,y,t)}{\partial y^2} = 0 \text{-----}(4)$$

식(4)에서 첨가된 K_{xx} , K_{yy} 는 각각 x 방향의 수리전도도와 y 방향으로의 수리전도도를 나타낸다.

이와는 달리 대수층의 상부의 지표면을 통해 고르게 분포하는 강우에 의한 지하수 함양과 대수층 매질의 등방 균질성을 고려한다면 그 때의 정류 상태 지하수 유동 지배식은 식(6-5)와 같은 포아송(Poisson) 방정식의 형태로 표현된다.

$$\frac{\partial^2 h(x,y,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h(x,y,t)}{\partial y^2} = - \frac{R(x,y,t)}{T} \text{-----}(5)$$

만일 평면적 지하수 함양이 없는 상태를 표현하고자 한다면, 위의 식에서 $R(x, y, t)$ 을 0으로 놓으면 된다. 그 때의 유동 지배식은 라플라스 방정식의 형태와 같게 된다.

본 연구에서는 식(2)와 식(5)를 수학적 모델로 하여 정류 상태에서 평면적 지하수 함양이 있을 때와 없을 때, 부정류 상태에서 계절별 지하수 함양의 정도가 달리 표현될 때의 계산이 가능하도록 하였다. 위의 식들에서 확인할 수 있듯이 모델링하고자 하는 영역의 수위분포를 크게 좌우하는 요소로는 대수층 매질의 수리전도도 혹은 투수량계수, 문제 영역에 대한 지하수 함양률, 그리고 문제 영역의 경계조건 등이 있다. 경계조건과 관련되어 모델링 영역의 수위 동수구배 역시 수위분포의 형태를 좌우하는 중요한 요소로 보아야 한다.

1. 2 초기 및 경계조건

수치적 방법을 동원하여 지하수의 유동현상을 분석하고자 할 때에는 부정류 상태의 문제에서는 초기조건과 경계조건을, 정류상태의 조건에서는 경계조건을 명확하게 정의하는 것이 필수적이다. 초기조건과 경계조건의 정의의 문제는 유동현상의 물리적 실제성을 살리는 측면에서 대단히 중요하며 정확한 해를 구하기 위해서도 세심한 주의를 기울여야 하는 문제이다. 실제 야외의 유동현상을 고찰함에 있어서 초기조건과 경계조건은 여러 가지의 수리지질학적 정보들과 실제 현상에 대한 경험을 통해 결정될 수 있다. 이렇게 결정된 초기 및 경계조건은 수학적 표현 형태로 재정립되어지며 앞절의 편미분방정식과 함께 완전한 수학적 모델을 구성하는 한 요소로 작용한다.

가. 초기 조건

초기 조건을 정의하는 문제는 식(2)와 같은 부정류 상태의 지배식을 풀기 위하여 필수적이다. 초기조건은 유한차분법의 경우 계산 초기시간에 대해 즉 $t=0$ 일 때 모델링 영역의 모든 절점들에 대해 특정한 수위값으로 정의하며 수학적 표현형태는 식(6) 및 식(7)과 같다.

$$h(x, y, 0) = H_0 \text{ -----(6)}$$

$$H_0 = f(x, y, 0) \text{ -----(7)}$$

식(6)에서의 H_0 가 모든 모델링 영역에서 하나의 일정한 값으로 정의된다면 식(7)의 상수함수의 형태가 될 것이다. 그렇지 않고 초기수위값이 모델링하고자 하는 평면에서 어떤 곡선함수의 형태로 변화하는 양상을 보여준다면 초기조건은 특정한 함수꼴로 표현할 수 있다.

나. 경계 조건

지하수 유동문제를 다룰 때 경계조건은 보통 다섯 가지의 종류로 나누어서 생각한다. 정수위(specified head)경계, 정흐름량(specified flow)경계, 수위종속 흐름량(head dependent flow)경계, 부정류 자유면(free surface)경계, 삼출면(seepage face)경계가 다섯 유형의 경계 조건을 대표한다. 이들 중에서 본 연구의 대상인 지하댐 문제와 관련시켜 고려하여야 할 경계 조건의 유형은 정수위경계, 정흐름량경계의 두 가지이다.

정수위 경계 조건은 2차원을 기준으로 할 때 정수위 경계선을 식(8)과 같은 함수형태로 표현할 수 있으며, 만일 이 경계선에서의 수위값이 하나의 일정한 값이라면 식(9)와 같이 나타내는 것이 가능하다.

$$h = f_1(x, y), \text{ 혹은 } h = f_2(x, y, t) \quad \text{-----}(8)$$

$$h = \phi_0, \quad \phi_0 = \text{constant} \quad \text{-----}(9)$$

식(8)에서 함수 f_1 은 시간에 따라서는 변하지 않고 공간에 따라서만 변화하는 값을 보이는 것을 표시하며, 함수 f_2 는 시간과 공간 모두에서 변화하는 것을 의미한다. 정수위 경계 조건은 Dirichlet 경계 조건 혹은 제1 유형의 경계 조건으로 불리우기도 한다.

정흐름량 경계는 평면 2차원 문제를 기준으로 할 때 경계선의 모든 점들에 대한 흐름벡터의 방향이 직교하는 특성을 가지고 있다. 이러한 저흐름량 경계를 수식의 형태로 표현하면 식(10)과 같다.

$$q = f(x, y, t) \quad \text{-----}(10)$$

q 는 경계선에서의 비유출 혹은 비유입량(specific discharge), [L/T]을 나타내며 함수 f 는 실측 자료나 현장 경험을 통해서 얻어질 수 있는 값이어야 한다.

특히 불투수성 매질에 의해 무흐름 경계가 형성되어 있을 경우나 지하수의 유선 자체를 하나의 경계선으로 보는 경우에는 그 경계선을 통한 지하수의 흐름은 없는 것으로 보므로 이러한 무흐름 경계를 식(11)로 나타내는 것이 가능하다.

$$q = 0 \quad \text{-----}(11)$$

이렇듯 흐름량이 일정한 값으로 혹은 어떤 함수값으로 정의하는 것이 가능한 경계를 Neumann 경계 혹은 제2 유형의 경계 조건이라고도 한다.

본 연구의 내용중 모델링의 영역을 모형화할 때 영역의 형태는 직사각형의 형태로 통일하였으며 이렇게 할 경우 네 개의 경계선이 형성된다. 형성된 네

개의 경계선은 위에서 제시한 경계 조건의 형태로 표현될 수 있는 바, 상부로 부터 각각 시계방향으로 정수위 경계(상류구배), 무흐름 경계, 정수위 경계(하류구배), 무흐름 경계로 정의할 수 있다. 무흐름 경계는 지하수의 유선을 무흐름 경계선을 정의한 데 기초를 두고 있다. 그림 1 은 모델링 영역의 경계 조건을 표현해 주는 그림으로 새로 개발한 지하댐 모델의 격자망 구성과 경계 조건 정의와 깊은 관련이 있다.

1. 3 유한차분법

가. 개요

지하수의 유동 문제를 분석하기 위한 방법으로는 크게 세 가지의 유형이 있다. 미분방정식의 해석해를 이용하는 해석적 방법(analytical method), 모래함(sand tank) 모델, 전기적 아날로그, 이온운동 아날로그, 멤브레인 아날로그 등을 이용한 아날로그 방법(analog method), 유한차분법, 유한요소법, 경계요소법, 해석요소법 등의 다양한 수치해석 방법을 이용한 수치적 방법(numerical method) 등이 그것이다. 해석적 방법은 복잡한 유동계에 대한 모델링에서는 사용할 수 없으며, 아날로그 방법은 여러 가지 장점에도 불구하고 아날로그-디지털 전환장치의 복잡성과 비경제성에 의해 요즘에는 거의 사용되지 않고 있다. 실제적인 면에서 수치해석적 방법은 큰 규모의 복잡한 지하수 유동계에 대한 시뮬레이션에 적합하고 실제 현상을 더 간편하게 분석할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구의 목적이 되는 새로운 평면 2차원 유동 모델의 개발은 수치해석적 방법중 유한차분법에 근거하고 있다. 유한차분법은 첫 번째 단계로 지하수 유동 현상을 지배하는 편미분 방정식을 대수적 차분식으로 표현한다. 새롭게 표

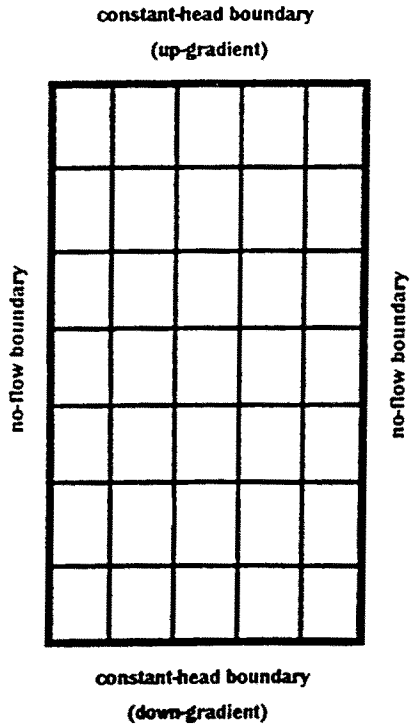


그림 5-3 SUBDAM에서의 모델링 영역의 경계조건

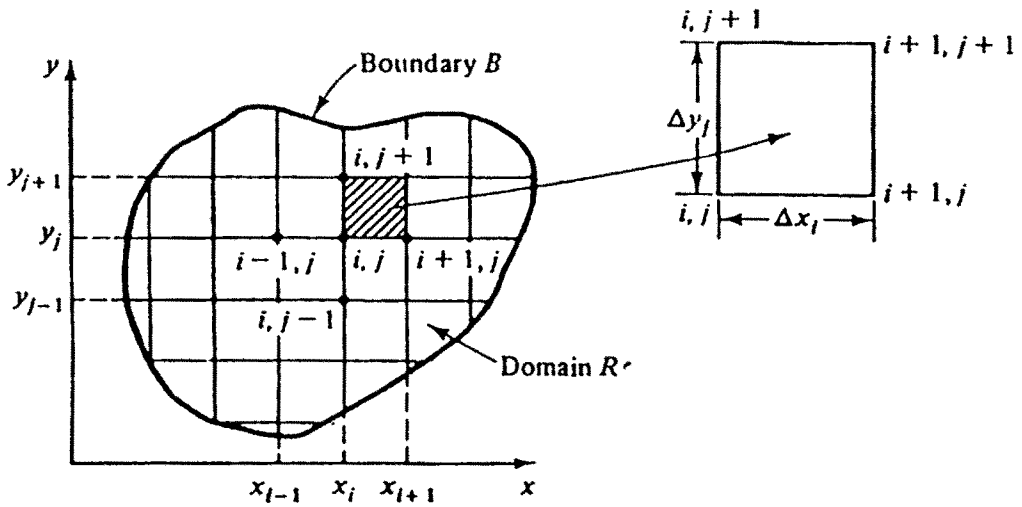


그림 5-4 수치계산을 위한 유한차분 격자망

현된 유한 차분식을 이용한 컴퓨터 프로그래밍을 통하여 수치적 방법으로 각 격자점에 대한 해를 구할 수 있게 된다. 물론 이 과정에서 초기조건, 경계조건에 대한 고려가 이루어진다. 유한차분법을 이용한 수치계산의 경우 모델링의 영역은 사각형의 격자망으로 재구성되며 각각의 격자점에 대한 지하수위값을 구하는 것이 수치계산의 목적이 된다.

유한차분법은 유한차분식의 전개와 프로그래밍이 쉽다는 장점이 있으나, 복잡한 경계를 표현하는 데에는 어느 정도의 한계점을 지니고 있다. 이러한 단점을 보완할 수 있는 수치적 방법들과 좌표축 변환의 방법들이 계속해서 고안되고 있으며 실제로 여러 가지 모델들에 적용되고 있는만큼 수치적 방법을 이용한 지하수 유동현상 분석의 미래는 밝다고 본다.

나. 유한차분식의 전개

유한차분법은 편미분 방정식을 유한차분식으로 재구성하는 것에서부터 시작한다. 유한차분식을 전개하는 데에는 세 가지의 방법이 있다.

먼저 $h=h(x)$ 를 x 축의 양의 방향에 대하여 테일러 급수(Taylor series)로 전개하면 식(12)와 같다.

$$h(x+\Delta x) = h(x) + \Delta x \frac{dh(x)}{dx} + \frac{(\Delta x)^2}{2} \frac{d^2h(x)}{dx^2} + \frac{(\Delta x)^3}{3!} \frac{d^3h(x)}{dx^3} + \dots$$

-----(12)

식(12)의 양변을 Δx 로 나누면 식(13)이 유도된다.

$$\frac{dh(x)}{dx} = \frac{h(x+\Delta x) - h(x)}{\Delta x} + O(\Delta x)$$

-----(13)

이 때 $O(\Delta x)$ 는 테일러 급수의 나머지 항들을 나타낸다. 식(13)에서 우변의 첫 번째 항은 점 x 에서의 일계 미분으로 근사시킬 수 있으며, 트렁케이션 오차(truncation error) $O(\Delta x)$ 는 식(14)로 쓸 수 있다.

$$O(\Delta x) = \frac{\Delta x}{2} \frac{d^2 h(x)}{dx^2} \quad \text{-----}(14)$$

$$\frac{dh(x)}{dx} \approx \frac{h(x + \Delta x) - h(x)}{\Delta x} \quad \text{-----}(15)$$

식(15)를 미분식 dh/dx 의 순차분(forward difference) 근사식이라 한다.

비슷한 방법으로 x 축의 음의 방향에 대해 테일러 급수를 식(16)과 같이 전개할 수 있다.

$$\begin{aligned} h(x - \Delta x) = & \\ h(x) - \Delta x \frac{dh(x)}{dx} + \frac{(\Delta x)^2}{2} \frac{d^2 h(x)}{dx^2} - \frac{(\Delta x)^3}{3!} \frac{d^3 h(x)}{dx^3} + \dots & \\ & \text{-----}(16) \end{aligned}$$

여기서 역차분(backward difference) 근사식은 식(17)과 같으며, 트렁케이션 오차는 식(6-14)와 같다.

$$\frac{dh(x)}{dx} \approx \frac{h(x) - h(x - \Delta x)}{\Delta x} \quad \text{-----}(17)$$

다시 식(12)에서 식(16)을 빼면 식(18)과 같은 중차분(central difference) 근사식을 구할 수 있다.

$$\frac{dh(x)}{dx} \approx \frac{h(x+\Delta x) - h(x-\Delta x)}{2\Delta x} \text{ -----(18)}$$

위에서 살펴본 바와 같이 유한차분식은 순차분, 역차분, 중차분 근사식의 세 가지로 나눌 수 있다.

다시 이계 미분식의 유한차분 근사식을 구하기 위하여 식(12)와 식(16)을 더하면 식(19)를 얻는다.

$$h(x+\Delta x) + h(x-\Delta x) = 2h(x) + \frac{(\Delta x)^2}{2} \frac{d^2h(x)}{dx^2} + O((\Delta x)^4) \text{ -----(19)}$$

식(19)를 이용하여 식(20)과 같은 이계 미분식의 유한차분식을 유도할 수 있으며 이 때의 트렁케이션 오차는 $O((\Delta x)^2)$ 으로 표현할 수 있다.

$$\frac{d^2h(x)}{dx^2} \approx \frac{h(x+\Delta x) - h(x) + h(x-\Delta x)}{(\Delta x)^2} \text{ -----(20)}$$

이 때 앞절의 식(5)로 표현된 포아송 방정식은 식(21)과 같은 유한차분식으로 표현되어진다.

$$\frac{h_{i+1,j} - 2h_{i,j} + h_{i-1,j}}{(\Delta x)^2} + \frac{h_{i,j+1} - 2h_{i,j} + h_{i,j-1}}{(\Delta y)^2} = -\frac{j}{R} \text{ -----(21)}$$

식(21)에서 Δx , Δy , R , T 는 전체 모델링 영역에서 일정한 상수값을 유지한다고 본다. 또한 아래첨자 i , j 는 각각 x 축 방향의 격자점의 번호와 y 축 방향의 격자점의 번호를 표시한다.

공간에 대한 유한차분식의 전개와는 달리 시간에 대한 유한차분식은 순차분과 역차분만을 사용한다. 식(22)는 시간에 대한 미분식의 순차분식을 식(23)은 역차분식을 나타낸다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{h(t+\Delta t) - h(t)}{\Delta t} \quad \text{-----}(22)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{h(t) - h(t-\Delta t)}{\Delta t} \quad \text{-----}(23)$$

위의 시간에 대한 순차분과 역차분을 이용하여 식(2)를 전개하면 식(24)와 식(25)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{h_{i+1,j}^n - 2h_{i,j}^n + h_{i-1,j}^n}{(\Delta x)^2} + \frac{h_{i,j+1}^n - 2h_{i,j}^n + h_{i,j-1}^n}{(\Delta y)^2} + \dots \\ & = \frac{S}{T} \frac{h_{i,j}^{n+1} - h_{i,j}^n}{\Delta t} \end{aligned} \quad \text{-----}(24)$$

$$\begin{aligned} & \frac{h_{i+1,j}^{n+1} - 2h_{i,j}^{n+1} + h_{i-1,j}^{n+1}}{(\Delta x)^2} + \frac{h_{i,j+1}^{n+1} - 2h_{i,j}^{n+1} + h_{i,j-1}^{n+1}}{(\Delta y)^2} + \dots \\ & = \frac{S}{T} \frac{h_{i,j}^{n+1} - h_{i,j}^n}{\Delta t} \end{aligned} \quad \text{-----}(25)$$

두 식에서 위첨자의 $n+1$ 은 현재의 계산시간단계(time level)를 n 은 이전의 계산시간단계를 나타낸다. 식(24)와 식(25)의 표현 형태에서 알 수 있는 바와 같이 식(24)는 하나의 현재 계산단계의 값을 얻기 위해 다섯 개의 이전

시간단계의 값을 사용하나 식(25)는 다섯 개의 현재의 시간단계의 값을 얻기 위해 하나의 이전단계의 값을 사용한다. 즉 식(25)는 더 많은 연립방정식을 구성하여 현재의 계산시간단계에 대한 계산을 수행하여야 함을 알 수 있다.

본 연구에서는 이 두 식과는 약간 다른 수치계산 방법으로 유한차분식을 쓴다. 식(26)은 본 연구에서 사용하는 부정류 지배식에 대한 유한차분식이다.

$$\frac{h_{i+1,j}^{n+1} - 2h_{i,j}^{n+1} + h_{i-1,j}^{n+1}}{(\Delta x)^2} + \frac{h_{i,j+1}^n - 2h_{i,j}^{n+1} + h_{i,j-1}^{n+1}}{(\Delta y)^2} + \dots$$

$$= \frac{S}{T} \frac{h_{i,j}^{n+1} - h_{i,j}^n}{\Delta t} \quad \text{-----(26)}$$

식(26)을 이용한 수치계산 과정에 대해서는 "라"항에서 자세하게 살펴보기로 한다.

유한차분법에서는 정흐름량 경계조건을 유한차분식으로 표현할 수 있다. 특히 식(27)과 같은 무흐름 경계조건의 경우 순차분, 역차분, 중차분 근사식을 각각 식(28), 식(29), 식(30)으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dh}{dx} = 0 \quad \text{----- (27)}$$

$$\frac{h_{i+1,j} - h_{i,j}}{\Delta x} = 0, \quad h_{i+1,j} = h_{i,j} \quad \text{-----(28)}$$

$$\frac{h_{i,j} - h_{i-1,j}}{\Delta x} = 0, \quad h_{i,j} = h_{i-1,j} \quad \text{-----(29)}$$

$$\frac{h_{i+1,j} - h_{i-1,j}}{2\Delta x} = 0, \quad h_{i+1,j} = h_{i-1,j}, \quad \text{-----}(30)$$

본 연구에서는 특히 지하수의 수평흐름을 막는 인공 차수벽을 무흐름 경계로 표현할 수 있으며 이는 식(31)과 같이 순차분식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{h_{i,j+1} - h_{i,j}}{\Delta y} = 0, \quad h_{i,j+1} = h_{i,j} \quad \text{-----}(31)$$

또한 새로운 모델의 모델링 영역에서 좌, 우의 무흐름 경계조건은 각각 식(28)의 순차분식과 식(29)의 역차분식을 사용할 수 있다.

다. 유한차분 격자망

유한차분식을 구성하여 지하수 유동계를 분석하기 위해서는 유한 격자망을 형성시켜야 한다. 유한차분 격자망은 문제 영역의 복잡한 경계부를 나타내는데 어느 정도 제한점을 가지고 있으나 수치계산과 격자 생성면에서 편리하다. 그림 2는 유한차분식의 해를 구하기 위한 격자망의 형태를 표현하고 있다. Δx 와 Δy 는 각각 x 축 방향, y 축 방향의 격자점간의 단위길이를 표현한다.

본 연구의 결과 개발된 모델 SUBDAM은 문제 영역의 형태를 직사각형으로 단순화하고 $\Delta x = \Delta y$ 인 격자망과 $\Delta x \neq \Delta y$ 인 격자망을 모두 생성시킬 수 있으며 편의상 $\Delta x_i = \Delta y_j x_{i+1}$ 와 $\Delta y_j = \Delta y_{j+1}$ 의 조건을 만족시키도록 하였다. 문제 영역의 경계부를 단순한 직선의 형태로 표현하므로 따로 경계부에서의 격자망의 크기나 형태를 재조정해줄 필요가 없다. 계산시간 문제와 관련하여 모델 SUBDAM에서의 x 축과 y 축 각각의 격자점의 개수는 최대 51개까지로 제한하였다.

라. 수치계산 방법

새로운 모델 SUBDAM에서 사용하는 수치계산 방법은 GSLR(Gauss-Seidel Line Relaxation)방법이다. 식(21)의 정류상태 유한차분식과 식(26)의 부정류 상태 유한차분식을 풀기 위하여 x 축과 평행한 격자선들을 따라 행렬식을 구성하여 이를 $j=2$ 에서부터 차례로 풀어나가는 방식이다. $j=1$ 과 $j=N$ 은 정수위 경계이므로 수위값을 다시 계산할 필요가 없다. 여기서 N 은 y 축의 격자점의 개수를 표시한다. GSLR방법은 정류 상태에서는 반복계산을 중심으로 계산을 진행하며, 부정류 상태에서는 시간간격에 따른 시간의 경과를 중심으로 계산을 진행한다.

$j=2$ 에서 $j=N-1$ 까지의 행렬식을 구성하기 위해 식(21)과 식(26)에 대한 약간의 조작이 필요하다. 식(21)은 식(32)와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{(\Delta x)^2} h_{i+1,j}^{m+1} - 2\left(\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2}\right)h_{i,j}^{m+1} + \frac{1}{(\Delta x)^2} h_{i-1}^{m+1} \\ = -\frac{1}{(\Delta y)^2} h_{i,j+1}^m - \frac{1}{(\Delta y)^2} h_{i,j-1}^{m+1} - \frac{K}{T} \end{aligned} \quad \text{-----}(32)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} b & c & . & . & . & . & . & 0 \\ a & b & c & . & . & . & . & 0 \\ & & \dots & & & & & \\ & & \dots & & & & & \\ 0 & . & . & . & . & a & b & c \\ 0 & . & . & . & . & . & a & b \end{bmatrix} \quad \text{-----}(33)$$

$$\{H\} = \begin{pmatrix} h_M \\ h_{M-1} \\ \cdot \\ \cdot \\ h_2 \\ h_1 \end{pmatrix} \quad \text{-----(34)}$$

$$[B] = \begin{bmatrix} p_M \\ p_{M-1} \\ \cdot \\ \cdot \\ p_2 \\ p_1 \end{bmatrix} \quad \text{-----(35)}$$

$$a = \frac{1}{(\Delta x)^2} \quad \text{-----(36)}$$

$$b = -2\left(\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2}\right) \quad \text{-----(37)}$$

$$c = \frac{1}{(\Delta x)^2} \quad \text{-----(38)}$$

$$p_i = -\frac{1}{(\Delta y)^2} h_{i,j+1}^m - \frac{1}{(\Delta y)^2} h_{i,j-1}^{m+1} - \frac{R}{T} \quad \text{-----(39)}$$

$$[A]\{H\} = [B] \quad \text{-----(40)}$$

식(32)에서 위첨자 $m+1$ 은 현재의 반복계산단계(iteration level)를 m 은 전단계의 반복계산수준을 의미한다. 위의 식(34)와 식(35)의 M 은 x 축 격자점의 개수를 나타낸 것이다. j 가 2부터 $N-1$ 까지 계산될 때 한 번의 반복계산이 종료되며, 식(40)의 행렬식은 한 번의 반복계산마다 $N-2$ 회 재구성되어 풀이된다. 또한 지정한 오차값이 수렴치에 도달했을 때 정류상태에 대한 모든 계산이 끝난다.

부정류 상태의 유한 차분식인 식(26)은 행렬식의 구성을 위한 식(41)로 표현할 수 있으며, 이 식을 위와 똑같은 과정을 거쳐 행렬식(49)로 만들 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{(\Delta x)^2} h_{i+1,j}^{n+1} - \left\{ 2 \left(\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} \right) + \frac{S}{T\Delta t} \right\} h_{i,j}^{n+1} + \frac{1}{(\Delta x)^2} h_{i-1}^{n+1} \\ = -\frac{S}{T\Delta t} h_{i,j}^n - \frac{1}{(\Delta y)^2} h_{i,j+1}^n - \frac{1}{(\Delta y)^2} h_{i,j-1}^n - \frac{F}{I} \end{aligned} \quad \text{-----}(41)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} e & f & . & . & . & . & . & 0 \\ d & e & f & . & . & . & . & 0 \\ & & \cdots & & & & & \\ & & \cdots & & & & & \\ 0 & . & . & . & . & d & e & f \\ 0 & . & . & . & . & . & d & e \end{bmatrix} \quad \text{-----}(42)$$

$$\{H\} = \begin{pmatrix} h_M \\ h_{M-1} \\ \cdot \\ \cdot \\ h_2 \\ h_1 \end{pmatrix} \quad \text{-----}(43)$$

$$[D] = \begin{bmatrix} \dot{p}_M \\ \dot{p}_{M-1} \\ \vdots \\ \dot{p}_2 \\ \dot{p}_1 \end{bmatrix} \text{-----}(44)$$

$$d = \frac{1}{(\Delta x)^2} \text{-----}(45)$$

$$e = -2\left(\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2}\right) - \frac{S}{T\Delta t} \text{-----}(46)$$

$$f = \frac{1}{(\Delta x)^2} \text{-----}(47)$$

$$p_i = -\frac{S}{T\Delta t} h_{i,j}^n - \frac{1}{(\Delta y)^2} h_{i,j+1}^n - \frac{1}{(\Delta y)^2} h_{i,j-1}^{n+1} - \frac{R}{T} \text{-----}(48)$$

$$[C](H) = [D] \text{-----}(49)$$

앞의 정류 상태에 대한 반복계산의 경우와는 달리 Δt 의 시간간격을 가지는 시간에 대한 계산단계들을 연속적으로 풀어나간다. 부정류 상태의 계산의 경우에는 주어진 시간의 길이(total time length)를 모두 계산하였을 때 계산이 종료되며 초기조건은 정류상태의 수위분포를 계산하여 사용한다. 식(41)에서 $n+1$ 의 현재시간에서의 계산단계를 n 은 Δt 만큼 이전 단계의 계산값을 표시한다. 한 번의 시간간격에 따르는 계산단계에 대해 정류상태와 마찬가지로 $N-2$

번의 식(49)와 같은 행렬식이 풀이된다.

행렬식을 구성하는데 있어서는 좌우의 무흐름 경계에 대해서도 고려되어야 한다. 이 경우 $i=1$ 혹은 $i=M$ 일 경우로 나누어서 생각하면 된다. $i=1$ 일 경우 식(33)과 식(42)에서 식(34)와 식(43)의 h_1 에 대응하는 $a=-1, b=1, d=-1, e=1$ 의 값을 갖고, $i=M$ 일 경우 식(33)과 식(42)에서 식(34)와 식(43)의 h_M 에 대응하는 $b=1, c=-1, e=1, f=-1$ 의 값을 갖는다. 그리고 두 경우 모두 식(35)와 식(44)의 $p_M=p_1=0$ 의 값을 갖는다. 정수위 경계는 실제로 계산되는 영역 밖에 위치하므로 고려하지 않아도 된다.

마. 시간 간격의 결정, 수치계산의 안정도, 해의 수렴성

유한차분법은 편미분 방정식을 유한차분식으로 근사시켜 수치적 계산에 의해 해를 구한다. 원래의 편미분 방정식의 정해(exact solution)를 h_E 라 하고, 차분식의 정해를 h_D , 차분식의 수치해를 h_N 이라 하면, 트렁케이션 오차는 $|h_E - h_D|$, 수치오차 혹은 라운드오프 오차는

$|h_D - h_N|$ 으로 정의할 수 있다(Bear, 1979). 해의 수렴(convergence)은 트렁케이션 오차가 0에 수렴할 때를 말하며, 계산 결과의 안정도(stability)란 수치오차 혹은 라운드오프 오차가 0에 수렴할 때를 말한다. Trescott et al.(1976)은 큰 트렁케이션 오차를 피하기 위해서는 $\Delta x_i / \Delta x_{i-1} \leq 1.5$ 의 관계를 만족해야 한다고 제안하였다. 본 연구에서는 Δx 와 Δy 모두 등간격의 격자망이 사용되므로 큰 값의 트렁케이션 오차는 고려하지 않아도 된다.

부정류 상태의 문제를 풀 때에는 시간 간격을 결정하는 문제가 해의 안정도와 관련되는 중요한 문제로 작용한다. Rushton과 Redshaw(1979)는 2차원 문제의 경우 부등식(5-50)과 같은 관계를 만족하여야 한다는 연구 결과를 제시하였다.

$$\frac{T\Delta t}{S\Delta x\Delta y} \leq 0.25 \quad \text{-----}(50)$$

모델 SUBDAM에서는 위의 관계가 0.25일 때를 택하여 식(51)에 의해 안정적인 시간 간격을 결정할 수 있도록 하였다.

$$\Delta t = \frac{0.25 S\Delta x\Delta y}{T} \quad \text{-----}(51)$$

이러한 점에 기초할 때 SUBDAM에 의해 구해지는 유동 지배식의 해들은 수렴성 면에서나 안정도의 면에서나 신뢰성있는 계산 결과들이라 할 수 있다.

2. 모델 SUBDAM

2.1 개요

지하댐이 설치될 혹은 설치된 지하수 소유역의 지하수위 분포와 지하수 저장량의 변화를 분석하기 위하여 모델 SUBDAM을 개발하였다. SUBDAM은 평면 2차원 유한차분 모델이다. SUBDAM 개발의 주요 목적은 지하댐 설치시의 지하댐의 효과를 정량적으로 분석하는 것이다. 인공 차수벽 설치 전후의 수위분포를 계산할 수 있으며, 최대 4개의 서로 다른 지하수 함양단계를 정의하여 시간의 경과에 따른 지하수 저장량의 변동을 정량적으로 파악할 수 있다. 모델링 영역은 간편하게 직사각형의 모양으로 모형화하였고 이 때 4개의 경계선은 상부로부터 시계방향으로 각각 정수위(상류구배), 무흐름, 정수위(하류구배), 무흐름 경계로 정의하였다. SUBDAM의 입력자료는 모두 대화식 입력이 가능하여 다른 상용모델들과는 달리 입력자료의 수가 적다. 모든 입력자료와

계산결과는 출력화일로 확인할 수 있다. SUBDAM의 장점은 지하담과 관련된 수위 및 저장량 문제를 정류 상태의 문제와 더불어 부정류 상태의 문제까지 다룰 수 있다는 것이다. 또한 차수벽의 설치 여부와 설치 위치를 사용자가 결정할 수 있다. 부정류 상태의 문제의 경우 최대 4개까지의 지하수 함양단계를 나누어 입력할 수 있으며, 이에 따라 필요한 시기의 지하수 저장량의 시간적 변화를 편리하게 계산할 수 있다는 장점도 있다. SUBDAM은 프로그래밍 언어로 FORTRAN을 사용하였다.

2. 2 모델의 구성

SUBDAM의 원본 코드는 1개의 주프로그램(SUBDAM.FOR)과 총 5가지의 서브루틴으로 구성된다. 5개의 서브루틴 중 대표적인 2개의 서브루틴을 나눈다면 정류 상태의 문제를 계산하는 STEADY와 부정류 상태의 문제를 계산하는 TRANSIENT로 나눌 수 있다. 두 서브루틴 모두에는 구성된 행렬식을 LU 디콤포지션으로 푸는 LUDCMP (A,N,NP,INDX,D)와 LUBKSB(A,N,NP,INDX,B)의 두 개의 서브루틴이 첨가된다. 특히 서브루틴 TRANSIENT는 초기조건을 계산하는 INITIAL(CONV)이라는 서브루틴이 하나 더 첨가되어 있다. 이 서브루틴은 지하수 함양이 없을 때 정류상태의 수위값을 계산하여 이를 초기조건화 하는 역할을 담당한다. 서브루틴 STEADY와 TRANSIENT는 각각 입력자료를 받아들이는 부분, 행렬식을 계산하는 부분, 계산된 지하수위 자료와 지하수 저장량 변동자료를 출력하는 부분으로 구성된다.

2. 3 계산 수행 과정

SUBDAM을 이용하여 크게 두 가지 유형의 문제를 나누어서 풀 수 있다.

먼저 주프로그램의 입력자료 중 정류 상태 문제 혹은 부정류 상태 문제를 선택한다. 두 가지 유형의 문제는 몇 가지의 서로 다른 입력자료를 요구한다.

가. 정류 상태 문제

먼저 주프로그램에서 입력자료를 받고 정류상태 문제를 선택할 때 서브루틴 STEADY로 계산 순서가 옮겨간다. 이 서브루틴에서도 마찬가지로 정류 상태 문제에 필요한 입력자료를 받아들인다. 이 때 인공 차수벽의 설치 문제는 사용자가 고 존재와 설치 위치를 결정할 수 있다. 주어진 입력자료에 기초하고 GSLR방법을 이용하여 반복계산을 수행하고 계산값이 수렴조건에 도달했을 때 계산이 종료된다. 다음 단계에서 마지막으로 계산된 수위값을 자료화일 (*.DAT)로 저장하고 정류 상태에 대한 시뮬레이션은 완전히 종료된다. 그림 3은 정류 상태의 계산 수행 과정을 요약적으로 표현하고 있다.

나. 부정류 상태 문제

정류 상태의 계산과 마찬가지로 주프로그램으로부터 입력자료를 받고 부정류 문제를 선택할 때 서브루틴 TRANSIENT로 계산순서가 옮겨진다. 부정류 문제에 고유한 입력자료를 받아들이고 다시 서브루틴 INITIAL(CONV)를 통해 초기조건을 생성시킨다. 다음 단계로 안정도 높은 시간 간격(Δt)을 계산하여 계산 단계들에 대한 연속적인 수위값의 계산이 이루어지며 동시에 초기조건을 기준으로 전체 영역에서의 지하수 저장량의 변화가 시간대의 변화에 따라 계산된다. 저장량의 변화는 계산 즉시 메모리에 시간과 함께 저장되며 수위값은 단계별로 지하수 함양단계의 마지막 시간대의 수위값만이 저장된다. 여기서 단계별 지하수 함양이란 최대 4개의 지하수 함양률이 그 지속시간과 더불어 입력되어질 수 있으며 이 때 하나의 함양률과 그 지속시간이 하나의 지하수 함양

단계를 구성한다. 계산된 부정류 상태의 경과시간이 주어진 조건을 만족하면 모든 입출력 자료들이 출력화일(*.OUT)에 저장되고 부정류 상태의 계산은 종료된다. 그림 4는 부정류 상태에 대한 계산 수행 과정을 요약적으로 표현하고 있다.

2. 4 입력 자료

SUBDAM의 모든 입력 자료는 프로그램의 실행과정에서 사용자가 직접 입력할 수 있다. 주요 입력 자료로는 정류 혹은 부정류 문제의 선택, 차수벽 설치 유무, 차수벽의 위치, 문제 영역의 가로-세로 길이, 가로-세로 격자점의 개수, 수리전도도, 정수위 경계의 수위값, 지하수 함양률, 저류계수, 유효공극률, 출력화일들의 화일명 등이다. 특히 부정류 상태 문제에서 지하수 함양률은 최대 4개의 지하수 함양단계로 나누어 입력이 가능하며 각 단계의 지속시간이 포함되어야 한다. 표 1 은 정류 상태와 부정류 상태의 모든 입력 자료를 제시하고 있다.

2. 5 출력 자료

위의 입력자료들은 출력화일(*.OUT)에 모두 저장되어지며 이 이외에 계산된 수위값과 지하수 저장량 변동자료 또한 출력화일에 저장된다. 또한 수위값은 지하수위 등고선도와 그래프 형태로의 표현을 쉽게하기 위하여 수위자료화일(*.DAT)에 지하수 저장량 변동자료는 저장량 출력화일(*.STR)에 저장하여 출력할 수 있다.

2. 6. 예제 시뮬레이션 - MODFLOW 시뮬레이션 결과와의 비교

새로 개발된 모델 SUBDAM을 시험구동하고 상용 모델인 MODFLOW

의 시뮬레이션 결과와 비교하여 SUBDAM의 유효성을 검증하기 위하여 임의의 예제에 대한 모델링을 수행하였다. 표 2 는 정류 상태 계산을 위한 입력자료와 부정류 상태의 계산을 수행한 입력자료를 제시한 것이다. MODFLOW에는 부정류 상태에서 지하수 저장량의 변동을 계산해주는 기능이 포함되어있지 않으므로 비교는 정류 상태의 계산 결과에만 한정하였다.

그림 5 부터 그림 8 까지는 정류 상태의 문제를 SUBDAM(그림들 중의 (가)의 경우)과 MODFLOW(그림들 중의 (나)의 경우)를 이용하여 계산한 결과를 수위등고선도와 유사삼차원적 표현으로 나타낸 것이다. 지하수 함양과 인공 차수벽이 없는 그림 5 와 지하수 함양만 있고 인공 차수벽은 없는 그림 6 은 두 모델을 이용한 계산 결과가 차이를 보이지 않는 것을 확인할 수 있으며, 차수벽을 설치하고 지하수 함양이 없는 그림 7 과 차수벽과 지하수 함양이 모두 있는 그림 8 은 삼차원적 표현 형태에서 약간의 차이를 발견할 수 있다. 이 두 그림은 MODFLOW의 계산 결과가 SUBDAM에 의한 계산 결과보다 더 낮은 수위분포를 보여주는 것으로 이 차이는 MODFLOW에서 차수벽의 수리전도도를 고려하여 계산을 수행하기 때문인 것으로 볼 수 있다. 참고로 SUBDAM의 차수벽은 누수가 일어나지 않는 완벽한 차수벽임을 가정한다. 그림 9 는 모델 SUBDAM을 이용하여 부정류 상태의 문제를 취급하여 시간에 따른 지하수 저장량의 변화곡선을 얻은 것이다. 그림 9의 (가)는 1년 동안 0.864mm/day의 지하수 함양률이 지속되는 경우의 저장량의 변동곡선이며, (나)는 첫 200일 동안은 함양률이 0.0864mm/day로 유지되다가 다음 165일 동안은 0.864mm/day의 함양률이 지속되는 경우를 계산한 것이다. 그림 9의 (다)는 지하수 함양률이 첫 3개월 동안은 0.00864mm/day, 다음 3개월 동안은 0.864mm/day, 다음 3개월 동안은 0.00864mm/day, 마지막 3개월 동안은 0.0864mm/day의 함양률이 지속되는 경우의 지하수 저장량의 변동을 계산

한 것이다. 그림 9 에서 굵은선은 차수벽 설치후의 저장량 변동곡선을 표시하며 가는선은 차수벽 설치전의 저장량 변동곡선을 표시한다. 이렇게 볼 때 지하댐이 설치된다면 해마다 적어도 1만톤 이상의 지하수 저장량 증가효과를 가져오게됨을 확인할 수 있다.

3. 프로그램 STORAGE

프로그램 STORAGE는 SUBDAM에 의한 계산결과 형성된 수위자료화일(*.DAT) 중 비교하고자 하는 두 개의 화일을 읽어들이 전체 면적에 대한 평균적 수위 변화폭을 계산하여 지하수 저장량의 변동을 계산하는 기능을 가진다. 이 프로그램은 수위자료화일명, 모델 영역의 전체 면적, 유효공극률의 아주 간단한 입력자료만을 필요로 하며 계산을 수행하는데 소요되는 시간도 길지 않다. 계산결과 얻어진 지하수 저장량의 변화폭은 계산종료와 함께 출력화일에 저장되고 화면에도 그 결과가 출력된다. 그림 10은 프로그램 STORAGE의 계산 수행 순서도이다.

앞 절의 예제에서 SUBDAM과 MODFLOW에 의한 모델링 결과 얻어진 수위 자료화일을 이용하여 지하수 저장량의 변화정도를 비교하였다. 그 결과는 표 3 에 요약되어 있다. 물론 이 계산에서 사용한 수위자료는 SUBDAM과 MODFLOW 모두 정류 상태 계산결과만을 사용하였다. 표 3 에서 알 수 있듯이 SUBDAM의 계산 결과에 의하면 지하수 함양일 있을 때와 없을 때의 차이를 볼 때 차수벽을 설치한 후의 수위는 그 전의 수위보다 평균 0.17m 더 상승하는 것으로 나타난다. MODFLOW 계산결과와는 상이한 것으로 약 0.15m의 차이가 있다. 이는 차수벽의 성질을 완전 차수벽으로 하느냐 투수성을 가지는 것으로 하느냐의 차이에서 온 것이다. 전체영역에서의 저장량은 지하수 함양이

있을 때 약 2만톤, 없을 때 약 1만톤의 저장량의 증가가 있는 것으로 계산된다. MODFLOW 계산 결과는 약 3천톤에서 6천톤의 저장량의 증가가 있는 것을 확인할 수 있다.

구 분	지하수 함양이 없을 때		지하수 함양이 있을 때	
	SUBDAM	MODFLOW	SUBDAM	MODFLOW
평균 수위 변화 (m)	0.1223	0.038	0.2992	0.0821
저장량 변화 (m ³)	9172.8	2851.8	22443.2	6157.3

표 3 SUBDAM과 MODFLOW에 의해 예제에서 생성된 정류상태 수위변동 자료를 STORAGE에 의해 예제에서 생성된 정류상태 수위변동 자료를 STORAGE에 입력하여 저장량의 변동을 계산한 결과, 비교대상은 정류상태의 차수벽 설치 전후의 수위자료들임.

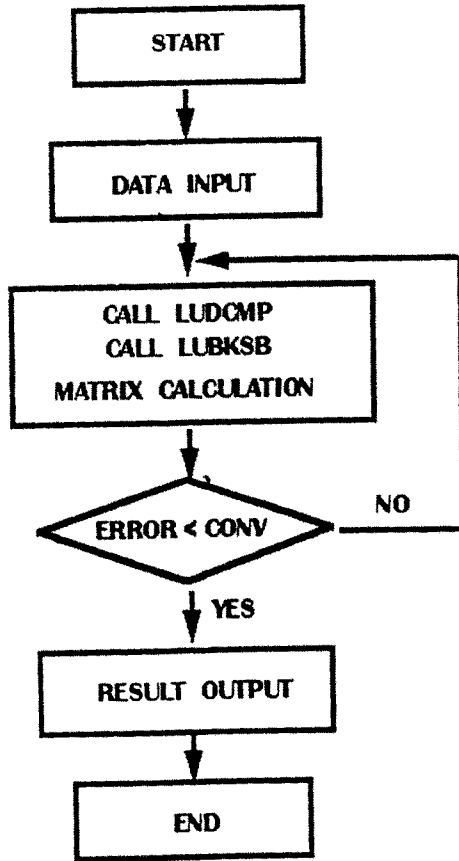


그림 3. SUBDAM의 정류상태 계산 순서도

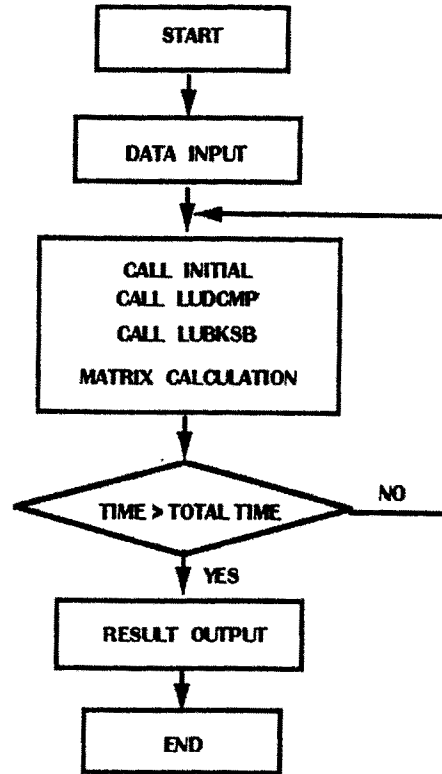


그림 4. SUBDAM의 부정류상태 계산 순서도

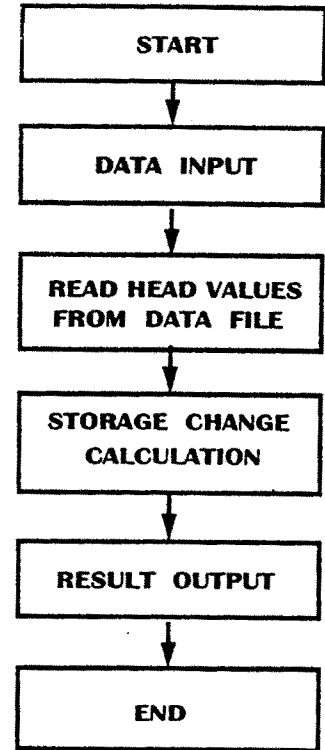
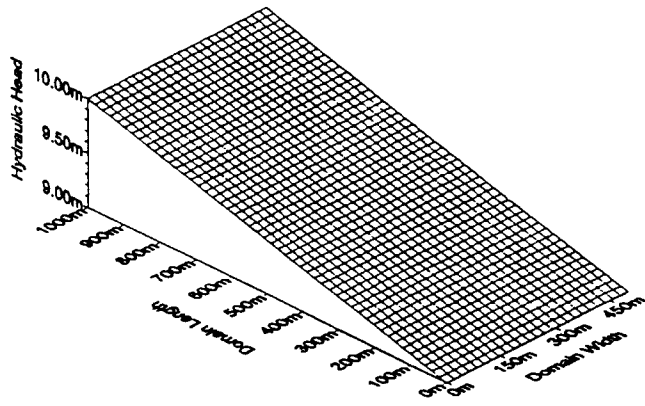
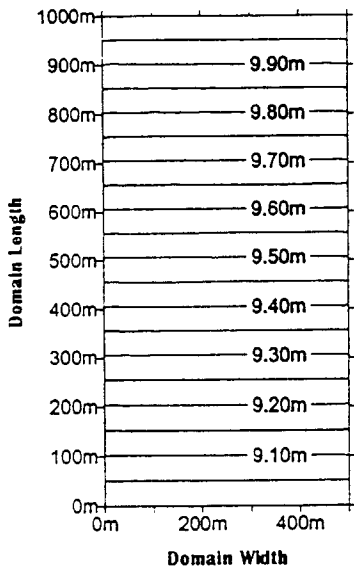
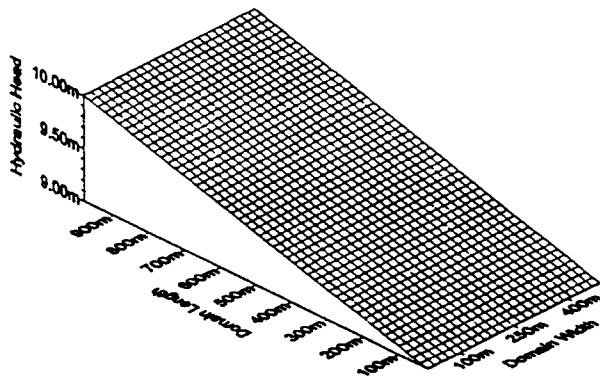
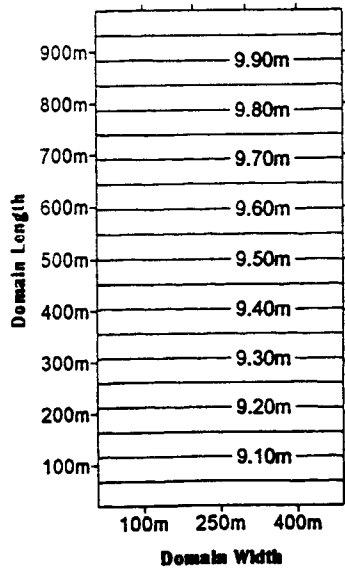


그림 10. STORAGE의 계산 순서도

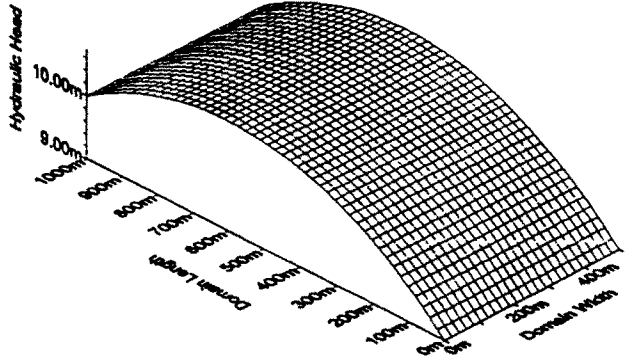
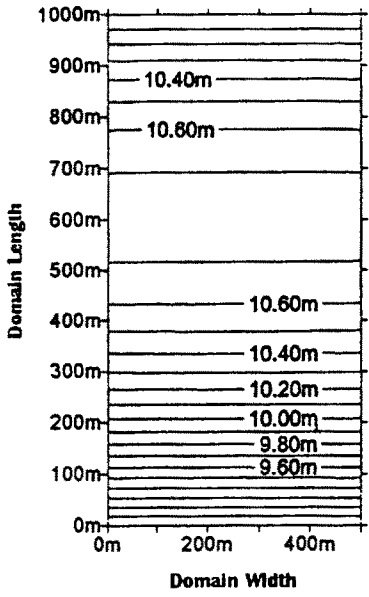


(가) SUBDAM

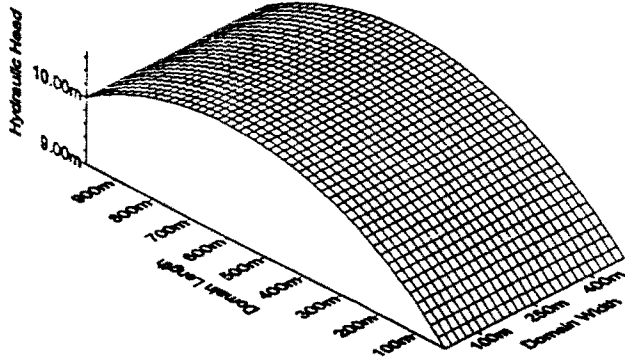
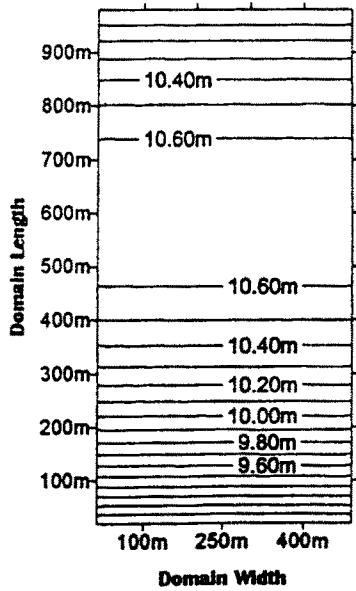


(나) MODFLOW

그림 5 예제 - 정류상태의 지하수 함양이 없을때

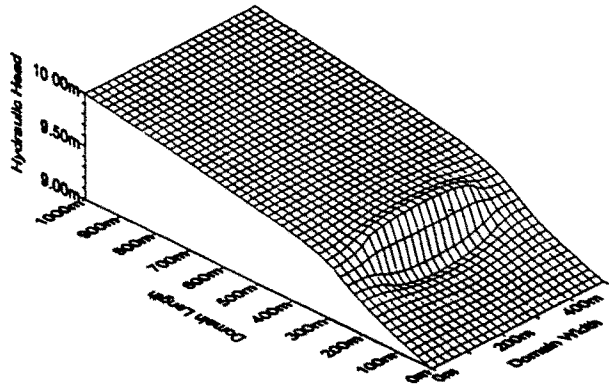
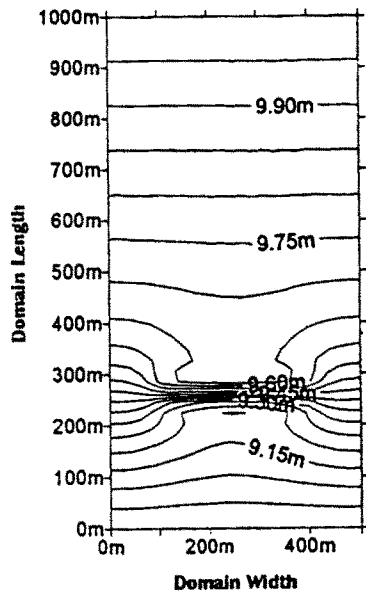


(가) SUBDAM

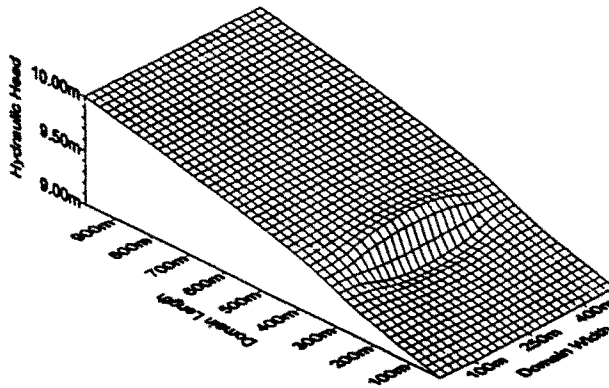
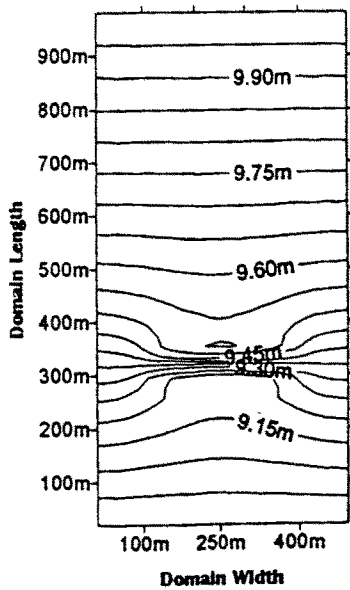


(나) MODFLOW

그림 6 예제 - 정류상태의 지하수 함양이 있을때

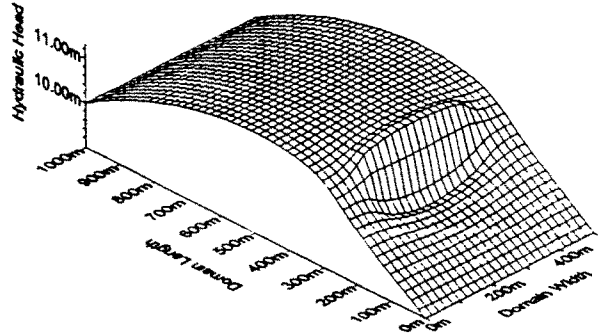
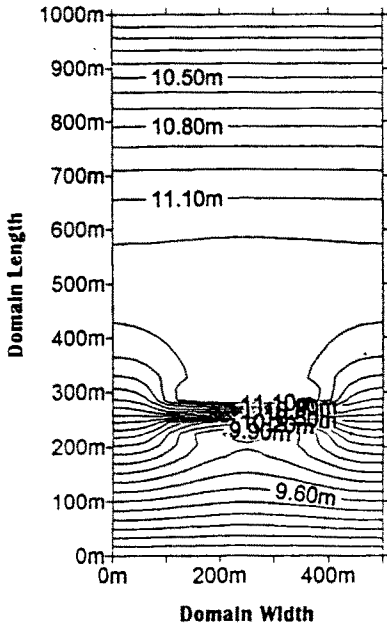


(가) SUBDAM

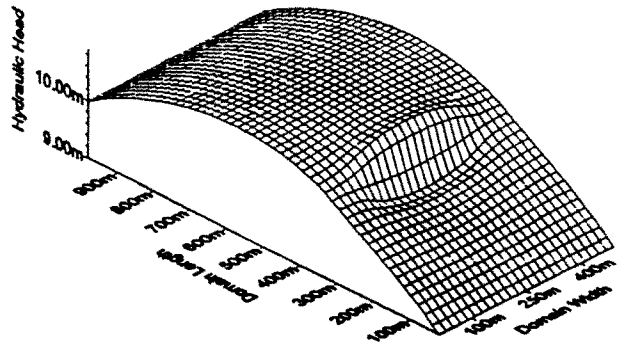
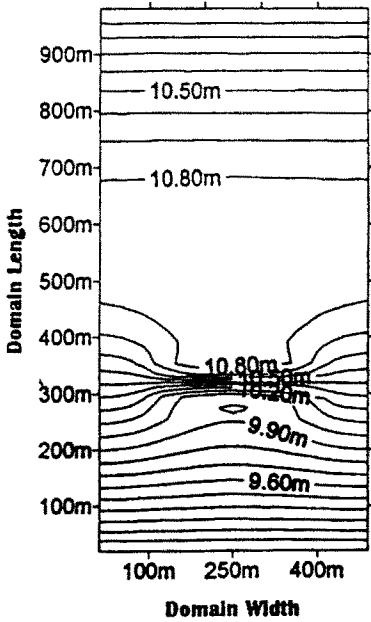


(나) MODFLOW

그림 7 예제 - 정류상태의 지하수 함양이 없고 물막이벽이 있을때

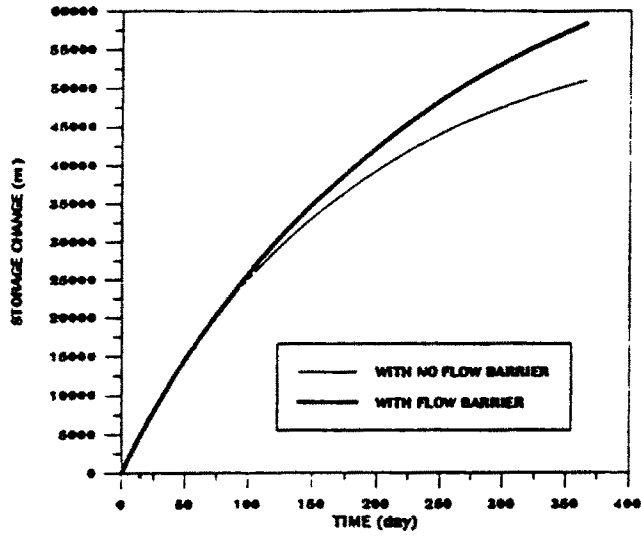


(가) SUBDAM

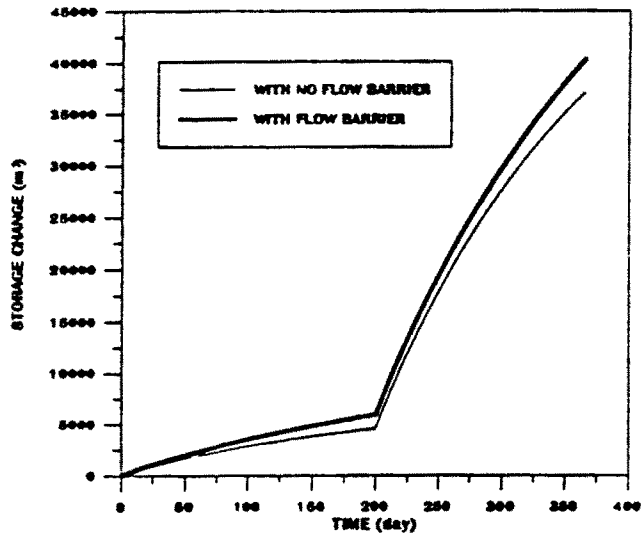


(나) MODFLOW

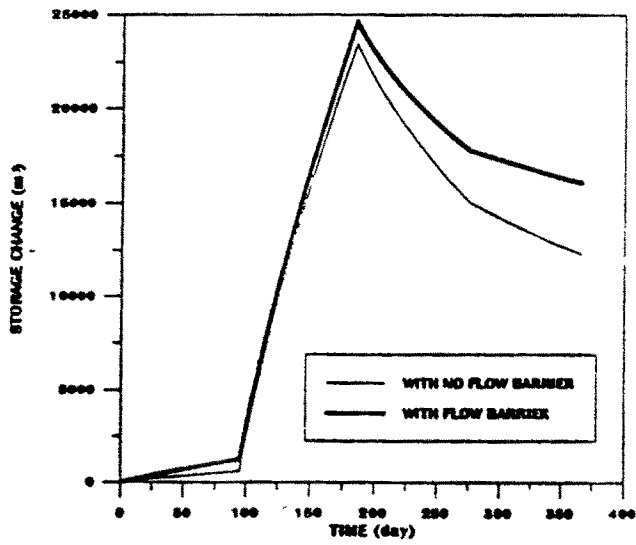
그림 8 예제 - 정류상태의 지하수 함양이 있고 물막이벽이 있을때



(가) 1개의 지하수 함양단계



(나) 2개의 지하수 함양단계



(다) 4개의 지하수 함양단계

그림 9 예제 - 서로 다른 지하수 함양 단계에 대한 부정류 문제 계산 결과

	정류상태 문제	부정류상태 문제
입 력 자 료	● Output file name (EX_1.OUT)	
	● Project name (TEST SIMULATION)	
	● Site name (ARBITRARY SITE)	
	● Program operator name (BGO SNU GWELAB)	
	● Date (1995/10/24)	
	● Steady-state or Transient (SELECT 1 OR 2)	
	● No barrier problem or Barrier problem (SELECT 1 OR 2)	
	● Domain size(width, length) (500M, 1000M)	
	● Grid point number(width, length) (26, 26)	
	● Hydraulic conductivity (1.0E-4 m/sec)	
	● Barrier location(distance from lower and left boundary) (300M, 100M)	
	● Constant head(upper, lower) (10m, 9m)	
	● Initial guess (9.5m)	
	▶ Recharge rate (1.0E-8 m/sec)	▶ Storage coefficient (0.15)
	▶ Convergence criterion (0.0001)	▶ Effective porosity (0.15)
	▶ Head-save file name (EX_1.DAT)	▶ Number of recharge intervals (1)
		▶ Recharge rate (1.0e-8 m/sec)
	▶ Maintenance duration (365)	
	▶ Head-save file name (EX_2.DAT)	
	▶ Storage change-save file name (EX_2.STR)	

표 2. SUBDAM의 '입력자료 예제

	정류상태 문제	부정류상태 문제
입 력 자 료	● Output file name	
	● Project name	
	● Site name	
	● Program operator name	
	● Date	
	● Steady-state or Transient	
	● No barrier problem or Barrier problem	
	● Domain size(width, length)	
	● Grid point number(width, length)	
	● Hydraulic conductivity	
	● Barrier location(distance from lower and left boundary)	
	● Constant head(upper, lower)	
	● Initial guess	
	▶ Recharge rate	▶ Storage coefficient
	▶ Convergence criterion	▶ Effective porosity
	▶ Head-save file name	▶ Number of recharge intervals
		▶ Recharge rate
	▶ Maintenance duration	
	▶ Head-save file name	
	▶ Storage change-save file name	

표 1. SUBDAM의 입력자료 항목

제 2장 모델 · 프로그램 사용설명서

1. 개 요

SUBDAM과 STORAGE는 지하댐이 설치된 유역이나 지하댐의 시공이 계획된 지하수 소유역의 유동계를 모델링하여 지하수위의 변화와 지하수 저장량의 변동을 파악하기 위하여 개발되었다. 두 프로그램 모두 다루기에 편리한 장점을 가지고 있으며 입력자료의 수도 다른 상용 프로그램들에 비해 적다.

SUBDAM은 평면 2차원 유한차분 모델로 원본 코드는 FORTRAN을 이용하여 작성하였다. 이 모델은 정류상태의 문제와 부정류상태의 문제를 모두 취급할 수 있으며 지하수 함양과 인공차수벽에 관한 문제도 다룰 수 있다. 부정류상태의 문제를 취급할 때에는 최대 4개까지의 지하수 함양단계를 고려하여 시간에 따른 저장량의 변화를 계산할 수 있는 기능도 가지고 있다.

STORAGE는 SUBDAM에서 생성된 지하수위자료 파일을 입력자료로 받아들여 지하수위의 평균적 변화정도를 계산한데 기초하여 그 유역에서의 지하수 저장량의 변화를 계산해준다. 이 프로그램도 SUBDAM과 마찬가지로 원본 프로그램은 FORTRAN으로 작성되었다.

2. 필요 시스템과 프로그램의 설치

두 프로그램을 구동시키기 위해서는 IBM PC나 호환기종이 필요하며 640K의 RAM 메모리가 필요하다. 486이상의 기종일수록 계산시간을 단축시킬 수 있다. 이 이외에 표준 DOS 키보드, 플로피디스크 드라이버, 버전 3.0이상의 DOS, math coprocessor 등이 필요하다.

원본 디스켓에는 다음과 같은 파일이 포함되어 있다.

SUBDAM.FOR - 원본 코드
SUBDAM.EXE - 실행 파일
STORAGE.FOR - 원본 코드
STORAGE.EXE - 실행 파일
RUN386.EXE - 실행 보조파일

위의 파일들 중 마지막 RUN386.EXE 파일은 프로그램을 실행시키기 위해 꼭 필요한 DOS-Extender 파일이다. 하드디스크에 프로그램을 설치하기 위해서는 DOS COPY 명령이나 DISKCOPY 유틸리티를 사용하면 간단하다. 예를들면 아래와 같다.

- ① 원본 디스켓을 B드라이브에 넣는다.
- ② C:\> md subdam
- ③ C:\> cd subdam
- ④ C:\SUBDAM> COPY B:*. *

위와 같은 과정을 거치면 프로그램의 설치작업은 끝난다.

3. SUBDAM

3.1 계산 수행 순서도

그림 3은 SUBDAM의 정류상태의 계산 수행 순서도이며 그림 4는 부정류 상태의 문제에 대한 계산 순서도이다.

정류상태 문제의 경우 초기에 입력자료를 받아들이고 이에 기초하여 행렬식을 구성한다. 다음으로 행렬식을 푸는 서브루틴을 이용하여 행렬식을 풀어 문제 영역에서의 지하수위값을 얻는다. 이를 이전의 값과 비교하여 오차를 구하고 오차가 수렴조건을 만족하지 않으면 다시 반복적인 계산을 수행한다. 수렴조건에 만족하는 해가 구해지면 이를 출력화일에 저장하고 계산은 끝이 난다.

부정류상태의 문제의 경우도 정류상태의 문제풀이 방식과 비슷하나 여기서는 반복계산의 조건이 정해진 시간까지의 계산이 수행되었는가로 정해진다. 부정류 문제에서는 지하수함양의 단계를 최대 4단계까지 구분해서 계산을 수행한다. 이는 시간과 지하수 함양에 따른 지하수 저장량의 변동을 살펴보기 위한 것이다.

정류상태의 문제는 저장량의 변화들 비교하기 위해 STORAGE를 이용해야 하지만 부정류상태의 문제는 자체에서 시간에 따른 저장량의 변화를 계산하는 과정을 지원해주고 있다.

3.2 입력자료

표 1에는 모델 SUBDAM의 정류상태의 문제와 부정류 상태의 문제에 필요한 입력자료의 항목들이 제시되어 있다.

입력자료에서 수치를 입력시켜야 하는 자료들은 그 단위를 정확하게 맞추어 입력시켜야만 한다.

수치가 들어가야 할 입력자료에 문자가 입력되면 즉시 프로그램 작업이 멈추어지고 DOS prompt로 빠져나와 에러메시지가 제시된다. 따라서 입력자료를 입력시킬 때는 주의깊게 화면에 출력되는 명령들을 자세히 살펴보고 정확한 입력자료를 넣어주어야 한다.

3.3 정류상태(steady-state) 문제의 출력화면

다음은 입력자료 입력시의 명령문구들이 화면에 출력되는 예이다.

THE NAME OF OUTPUT FILE (?)

PROJECT NAME (?)

SITE NAME (?)

PROGRAM OPERATOR NAME (?)

YEAR/MONTH/DAY (?)

SELECTION OF NUMBER OF PROBLEM TYPE (I) (?)

1. STEADY-STATE SIMULATION
2. TRANSIENT SIMULATION

SELECTION OF NUMBER OF PROBLEM TYPE (II) (?)

1. BEFORE CONSTRUCTION OF ARTIFICIAL BARRIER
2. AFTER CONSTRUCTION OF ARTIFICIAL BARRIER

THE SIZE OF PROBLEM DOMAIN (?)

1. WIDTH (X-COORDINATE,[meter]) =
2. LENGTH (Y-COORDINATE,[meter]) =

THE NUMBER OF GRID POINTS (?)

1. WIDTH (X-COORDINATE; < #52) =
2. LENGTH (Y-COORDINATE; < #52) =

HYDRAULIC CONDUCTIVITY VALUE, [meter/sec] (?)

DISTANCE FROM LOWER BOUNDARY TO BARRIER, [meter] (?)

DISTANCE FROM LEFT BOUNDARY TO BARRIER, [meter] (?)

HEAD VALUES OF CONSTANT-HEAD BOUNDARIES (?)

1. HEAD VALUE OF UPPER BOUNDARY, [meter] =
2. HEAD VALUE OF LOWER BOUNDARY, [meter] =

INITIAL GUESS OF HEAD VALUES, [meter] (?)

AREAL RECHARGE RATE, [meter/sec] (?)

CONVERGENCE CRITERION, [≤ 0.001] (?)

THE NAME OF HEAD-SAVE FILE (?)

여기까지는 정류상태의 문제에 대한 입력값을 주는 단계이다. 실제 계산이 수행되면 다음과 같은 출력화면이 표시된다.

```
.  
.  
.  
.  
ITERATION NUMBER = 132      ERROR = 0.004877  
ITERATION NUMBER = 133      ERROR = 0.003952  
ITERATION NUMBER = 134      ERROR = 0.002901  
.  
.  
.
```

만약 수렴조건을 0.0001로 입력시켰다면 위의 ERROR값이 그 이하로 떨어져야만이 계산은 끝나게 된다.

200.000	0.000000	9.00000
220.000	0.000000	9.00000
240.000	0.000000	9.00000
260.000	0.000000	9.00000
280.000	0.000000	9.00000
300.000	0.000000	9.00000
320.000	0.000000	9.00000
340.000	0.000000	9.00000
360.000	0.000000	9.00000
380.000	0.000000	9.00000
400.000	0.000000	9.00000
420.000	0.000000	9.00000
440.000	0.000000	9.00000
460.000	0.000000	9.00000

.....중략.....

420.000	1000.00	10.0000
440.000	1000.00	10.0000
460.000	1000.00	10.0000
480.000	1000.00	10.0000
500.000	1000.00	10.0000

<<< END OF OUTPUT FILE >>>

3.5 부정류상태(transient) 문제의 출력화면

다음은 부정류상태 문제에 대한 SUBDAM의 출력화면의 예이다.

THE NAME OF OUTPUT FILE (?)

PROJECT NAME (?)

SITE NAME (?)

PROGRAM OPERATOR NAME (?)

YEAR/MONTH/DAY (?)

SELECTION OF NUMBER OF PROBLEM TYPE (I) (?)

1. STEADY-STATE SIMULATION
2. TRANSIENT SIMULATION

SELECTION OF NUMBER OF PROBLEM TYPE (II) (?)

1. BEFORE CONSTRUCTION OF ARTIFICIAL BARRIER
2. AFTER CONSTRUCTION OF ARTIFICIAL BARRIER

THE SIZE OF PROBLEM DOMAIN (?)

1. WIDTH (X-COORDINATE,[meter]) =
2. LENGTH (Y-COORDINATE,[meter]) =

THE NUMBER OF GRID POINTS (?)

1. WIDTH (X-COORDINATE; < #52) =
2. LENGTH (Y-COORDINATE; < #52) =

HYDRAULIC CONDUCTIVITY VALUE, [meter/sec] (?)

DISTANCE FROM LOWER BOUNDARY TO BARRIER, [meter] (?)

DISTANCE FROM LEFT BOUNDARY TO BARRIER, [meter] (?)

STORAGE COEFFICIENT or SPECIFIC YIELD (?)

EFFECTIVE POROSITY OF AQUIFER (?)

HEAD VALUES OF CONSTANT-HEAD BOUNDARIES (?)

1. HEAD VALUE OF UPPER BOUNDARY, [meter] =
2. HEAD VALUE OF LOWER BOUNDARY, [meter] =

INITIAL GUESS OF HEAD VALUES, [meter] (?)

>> INFORMATION OF AREAL RECHARGE RATE, [meter/sec] <<

NUMBER OF UNIFORM RECHARGE RATE INTERVALS, (<#5) (?)

>>> FOR RECHARGE INTERVAL 1

AREAL RECHARGE RATE, [meter/sec] (?)

MAINTENANCE DURATION OF THIS INTERVAL, [days] (?)

THE NAME OF HEAD-SAVE FILE IN THIS INTERVAL (?)

THE NAME OF STORAGE-CHANGE SAVE FILE (?)

여기까지가 입력자료를 주는 부분이다. 계산이 시작되면 화면에는 다음과 같은 출력내용이 나타난다.

.

.

.

Number of Time Marching = 132 Time = 13.877

Number of Time Marching = 133 Time = 13.984

Number of Time Marching = 134 Time = 14.075

.

.

.

>>> INITIAL CONDITION

ROW	COLUMN	HEAD
0.00000	0.00000	9.00000
20.0000	0.00000	9.00000
40.0000	0.00000	9.00000
60.0000	0.00000	9.00000
80.0000	0.00000	9.00000
100.000	0.00000	9.00000
120.000	0.00000	9.00000
140.000	0.00000	9.00000
중략		
480.000	1000.00	10.0000
500.000	1000.00	10.0000

>>> RECHARGE INTERVAL 1
TRANSIENT STORAGE CHANGE

TIME	STORAGE [M ³]
0.347222	6.97872
0.694444	12.5980
1.04167	18.1877
1.38889	23.7581
1.73611	29.3023
중략	
94.4445	1246.99
94.7917	1250.81
95.1389	1254.62

HYDRAULIC HEAD DATA IN THE END OF INTERVAL 1

ROW	COLUMN	HEAD
0.000000	0.000000	9.00000
20.0000	0.000000	9.00000
40.0000	0.000000	9.00000
60.0000	0.000000	9.00000
80.0000	0.000000	9.00000
100.000	0.000000	9.00000
중략		
400.000	1000.00	10.0000
420.000	1000.00	10.0000
440.000	1000.00	10.0000
460.000	1000.00	10.0000
480.000	1000.00	10.0000
500.000	1000.00	10.0000

>>> RECHARGE INTERVAL 2
TRANSIENT STORAGE CHANGE

TIME	STORAGE [M ³]
95.3472	1376.70

95.6944	1500.64
96.0417	1623.71
96.3889	1745.97

중략

185.278	24667.6
---------	---------

HYDRAULIC HEAD DATA IN THE END OF INTERVAL 2

ROW	COLUMN	HEAD
0.00000	0.00000	9.00000
20.0000	0.00000	9.00000
40.0000	0.00000	9.00000
60.0000	0.00000	9.00000
440.000	1000.00	10.0000
460.000	1000.00	10.0000
480.000	1000.00	10.0000
500.000	1000.00	10.0000

중략

>>> RECHARGE INTERVAL 3
TRANSIENT STORAGE CHANGE

TIME	STORAGE [M ³]
185.347	24620.8
185.694	24572.0
186.042	24523.9
186.389	24476.6
186.736	24430.0

중략

274.236	17870.4
274.583	17852.7
274.931	17835.0
275.278	17817.3

HYDRAULIC HEAD DATA IN THE END OF INTERVAL 3

ROW	COLUMN	HEAD
0.00000	0.00000	9.00000
20.0000	0.00000	9.00000
40.0000	0.00000	9.00000
60.0000	0.00000	9.00000
80.0000	0.00000	9.00000
100.000	0.00000	9.00000
420.000	1000.00	10.0000
440.000	1000.00	10.0000
460.000	1000.00	10.0000
480.000	1000.00	10.0000
500.000	1000.00	10.0000

중략

>>> RECHARGE INTERVAL 4
TRANSIENT STORAGE CHANGE

TIME	STORAGE [M ³]	
275.347	17810.4	
275.694	17803.7	
276.042	17797.0	
276.389	17790.1	
중략		
364.583	16111.4	
364.931	16105.6	
365.278	16099.8	

HYDRAULIC HEAD DATA IN THE END OF INTERVAL 4		

ROW	COLUMN	HEAD

0.00000	0.00000	9.00000
20.0000	0.00000	9.00000
40.0000	0.00000	9.00000
60.0000	0.00000	9.00000
80.0000	0.00000	9.00000
100.000	0.00000	9.00000
중략		
480.000	1000.00	10.0000
500.000	1000.00	10.0000

<<< END OF OUTPUT FILE >>>

4. STORAGE

4.1 계산 수행 순서도

그림 10은 STORAGE의 계산 순서도를 나타낸다. 핵심은 전체 모델링 면적의 평균적인 수위변화량을 구하여 전체면적의 지하수 저장량의 변동량을 계산하는 것이다.

4.2 입력자료

STORAGE를 이용하여 지하수 저장량의 변동량을 구하기 위해 필요한 입력자료는 다음과 같다.

- 모델링 영역의 면적
- 대수층의 유효공극률
- 비교하고자하는 두 개의 지하수위 자료파일명

4.3 출력화면

다음은 STORAGE 실행시의 출력화면의 예이다.

OUTPUT FILE NAME (?)

AREA OF PROBLEM DOMAIN, [meter²] (?)

EFFECTIVE POROSITY OR SPECIFIC YIELD (?)

ONE HEAD FILE NAME CONSTRUCTED BY "SUBDAM" (?)

ANOTHER HEAD FILE NAME CONSTRUCTED BY "SUBDAM" (?)

여 백

II 전기탐사자료 해석 P/G 사용설명서

목 차

1. ESII
 1. 1 사용 목적
 1. 2 입력 화일
 1. 3 사용 방법
 1. 4 출력 화일

2. ZOH_INV
 2. 1 사용 목적
 2. 2 입력 화일
 2. 3 사용 방법
 2. 4 출력 화일

3. ESIGRIM
 3. 1 사용 목적
 3. 2 입력 화일
 3. 3 사용 방법
 3. 4 출력 화일

4. ZOH_GRIM
 4. 1 사용 목적
 4. 2 입력 화일
 4. 3 사용 방법
 4. 4 출력 화일

여 백

전기탐사 자료의 해석

1차원 층상구조를 해석하기 위한 방법은 크게 전진계산방법(forward method)과 역산법(inversion method)으로 나눌 수 있다.

전진계산방법은 해석자가 직접 모델을 만들어 그 모델에 의한 겐보기비저항값을 관측된 겐보기비저항값과 비교하면서 그들 사이의 오차가 미리 정해놓은 기준 안에 들어올 때까지 모델을 계속 수정하며 해석하는 방법이다. 전진계산방법은 모델수정에 거의 모든 시간이 소요되므로 대화식해석방법을 이용하면 효과적이다. 대화식해석방법이란 graphic interface를 이용하여 간편하게 모델을 결정할 수 있기 때문에 시간을 절약할 수 있는 장점을 가진 전진계산방법의 일종이다. 이후 소개될 ESII가 전진계산방법의 한 종류인 대화식해석방법의 해석에 이용되는 프로그램이다.

역산법은 자동화된 알고리즘에 따라 관측값과 모델에 의해 계산된 값의 오차를 최소화시키는 모델을 찾아가는 방법이다. 이후에 소개될 Zohdy의 알고리즘에 따른 ZOH_INV가 역산을 수행하는 프로그램이다. Zohdy의 방법은 다른 역산법과 달리 초기값(initial guess)을 필요로 하지 않고, 수직탐사에 의해 얻어진 겐보기비저항 곡선만으로 부터 관측된 겐보기비저항값을 야기하는 지하 비저항구조를 찾아내는 방법이다.

자료를 해석하는데 있어서 역산법은 단순히 수학적으로 가장 오차가 작은 모델을 만들어 내기 때문에 실제의 경우에는 지질학적으로 타당성이 없는 모델을 만들어 낼 가능성도 존재하기 때문에 기존의 시추공등의 자료를 이용할 수 있는 전진계산방법이 아직은 더 추천할만하다고 사료된다.

1 ESII

1-1. 사용 목적

직접적인 수직전기탐사의 결과로 얻어지거나 기존의 걸보기비저항 곡선을 digitizing하여 얻어진 수직탐사 자료들을 이용하여 이러한 관측값을 야기하는 지하 비저항모형을 전진계산방법(대화식해석방법)으로 결정한다.

1-2. 입력 파일

ESII는 수직전기탐사 대화식 해석용 프로그램이다. 이것은 pole-pole 배열, dipole-dipole 배열, Schlumberger 배열, Wenner 배열 등의 전위전극과 전류전극이 탐사 중심에 대해 대칭이거나 비대칭인 모든 수직전기탐사 배열법에 의해 관측된 자료의 해석에 사용될 수 있다. 해석자가 컴퓨터 모니터 앞에서 마우스로 간편하게 지하모형을 설정하면 주어진 모델에 의해 이론값이 계산되며 이 이론값과 관측된 값을 비교하면서 해석을 수행하게 된다. ESII는 coprocessor를 장착한 386기종 이상의 컴퓨터에서 효율적으로 사용될 수 있고 드물게 어느 컴퓨터에서는 작동이 되지 않는다. ESII가 실행되기 위해서는 여러가지 내장화일이 필요한데 이러한 내장화일과 ESILFOR, ESILEXE 등을 ESIIZIP으로 압축하여 놓았다(MOUSE.COM, FORM.CRD, INPUT.CRD, LOUT.CRD, HALOIBMV.DEV, HALOHERC.DEV, FONT1.FNT, FONT2.FNT). 이러한 내장화일들은 모두 한 디렉토리에 있어야 한다. ESII를 실행시키기 전에 탐사가 행해진 상황에 맞게 편집하여야 하는 중요한 화일이 있는데 그것은 FORM.CRD이다. FORM.CRD는 다음과 같다.

<FORM.CRD>

```

*****
*   Monitor & Method Pannel   ;Format(60x,11);           -   *
*-----*
* Selection of Input Type (Ohm =1, Ohm-m =2) ;           2   *
* Selection of Array Type (1P=1, 2P=2, GP=3) ;           3   *
* Selection of Monitor (Herc.=1, VGA=2 ) ;               2   *
* Mehtod of RMS Value (Log. = 1, Other =2) ;             2   *
*****
*   Screen Format Pannel      ;   Min. Value ;   Max. Value   *
*-----*
* Format(32x, f18.8, 1x, f18.8) ; _____; _____ *
*-----*
* Dist. of Current Pole (CC'/2) ;           1.0           300.0 *
* Resistivity (Ohm-m) ;           1.0           10000.0 *
*****

```

위의 화일에서 밑줄 친 부분이 입력되어야 할 자료들이다. 맨 처음에 입력되는 자료는 수직전기탐사 자료가 저항값인지 겐보기비저항값으로 환산된 값인지를 선택하는 것인데 1을 택하면 저항값이고 2를 택하면 겐보기비저항값이다. 그 다음에 입력해주는 것은 탐사에 이용된 배열의 형태를 결정해 주는 것이다. Pole-pole 배열을 이용하여 탐사를 수행하였으면 1을 택하고, dipole-dipole 배열을 이용하였으면 2를 택하고, Schlumberger나 Wenner 배열 등의 전류전극과 전위전극이 탐사의 중심점에 대해 대칭인 배열을 이용하였을 경우에는 3을 택하면 된다. 다음에는 사용하는 그래픽 카드가 허클리스인지 VGA인지를 택해야 하며 물어보며, 그 다음에는 RMS 오차를 계산하는 방법을 선택하여야 한다. 1을 선택하면 RMS 오차는 다음과 같이 계산되며

$$RMS(\%) = 100 \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=N} \log_{10} \left(\frac{\text{계산값}}{\text{관측값}} \right)^2}{N}}$$

2를 선택하면 다음과 같이 계산된다.

$$RMS(\%) = 100 \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=N} \left(\frac{\text{관측값} - \text{계산값}}{\text{관측값}} \right)^2}{N}}$$

일반적으로 수직전기탐사 겐보기비저항 곡선은 log-log 용지에 도시되는데 2를 선택하면 log scale에서 같은 간격을 갖게되는 두 자료의 RMS 값이 다르게 표현될 수 있다는 점에 주의해야 한다. 즉, 관측값이 1이고 계산값이 10이 나온 경우와 관측값이 10이고 계산값이 100인 경우는 log-log 용지에 같은 간격을 갖고 떨어져 있게 되지만 2를 이용하여 RMS 오차를 구하면 이 두 경우의 RMS 값은 서로 다르게 표현된다. 마지막으로 탐사에서 얻어진 자료의 비저항 값과 전류전극까지의 거리의 최대값, 최소값을 적어 주어야 한다. 비저항값은 겐보기비저항으로 환산되었을 때의 값을 의미하며 일반적으로 최소를 1, 최대를 100,000 정도로 주면 대부분의 자료를 소화할 수 있으나 필요에 따라 바꾸어 쓰면 된다. 전류전극까지의 거리는 pole-pole 배열의 경우에는 전류전극과 전위전극 사이의 거리를 1/2배 한 값이고, dipole-dipole 배열의 경우에는 전류전극들의 가운데 지점과 전위전극들의 가운데 지점 사이의 거리를 1/2배 한 값이며, Schlumberger 배열의 경우에는 전류전극들 사이의 거리를 1/2배 한 값이며, Wenner 배열의 경우에는 전극들 사이의 거리를 3/2배 한 값이므로 이것을 고려하여 전류전극까지의 거리의 최대값과 최소값을 주면 된다. FORM.CRD를 수정할 때에 숫자들이 적히는 위치는 반드시 위의 형식과 같이 주어야 한다. 즉, FORM.CRD의 2번째 줄에 표시된 대로 '-'이 있는 곳에 숫자를 써야 하며 11번째 줄에서는 점이 찍힌 앞부분에 숫자의 정수부를, 뒷 부분에는 숫자의 소수부를 써야한다.

입력 파일명은 사용자가 정의한다. 그러나 일정한 형식에 맞추어야 하는데 다음 예를 보면서 설명한다.

<INPUT.CRD>

```

*****0*****0*****0*****0*****0*****0*****0*****0
* No. of observed Data (40X, 12) :14 *
* -- (Maximum value 50) *
*****
* Current Pole Position ; Potential Pole Position ; Observed Value *
* -----,-- -----,-- -----,---- *
*-----*
1.467799 1 1989.089000
2.154435 1 1966.816000
3.162278 1 1903.241000
4.641589 1 1740.032000
6.812921 1 1395.191000
10.000000 1 865.956800
14.677990 1 354.936500
21.544350 1 90.635900
31.622780 1 36.597690
46.415890 1 45.986600
68.129200 1 67.078190
100.000000 1 97.862990
146.779900 1 142.400400
215.443500 1 206.433300

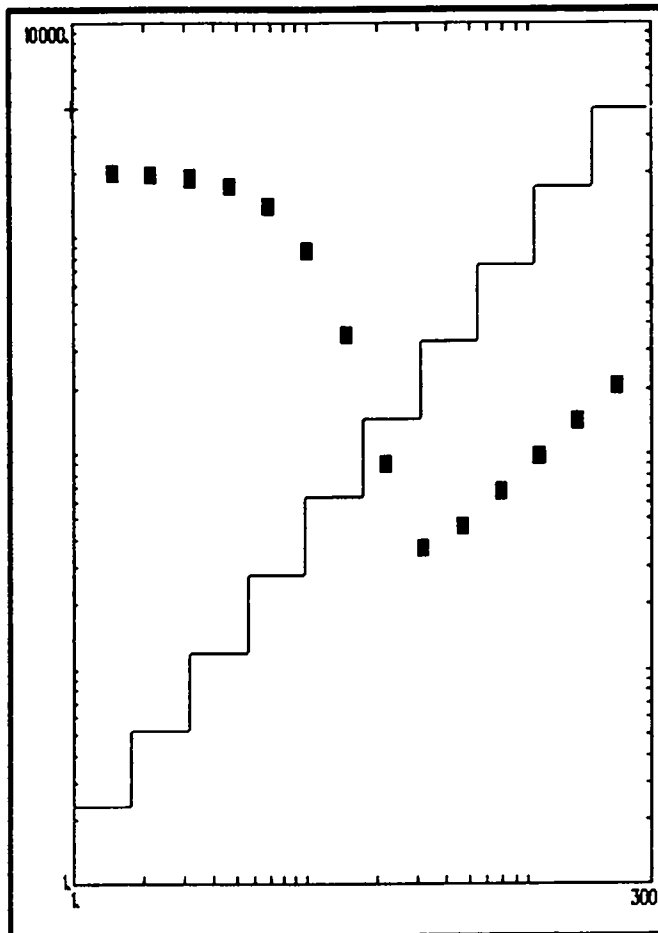
```

앞의 표에서 밑줄 친 부분이 입력되는 부분이다. 위에서 2 번째 줄에 측정의 개수를 적어 주어야 하며 8 번째 줄부터 자료의 입력이 있어야 한다. 이 부분은 특별한 형식이 없고 2개나 3개의 숫자들을 적어주면 된다. FORM.CRD의 'Selection of Array Type'에서 1을 택하였으면(pole-pole 배열) 한 줄에 전류전극과 전위전극 사이의 거리와 그 전극의 배열에서 얻어진 저항값(혹은 걸보기비저항값)의 두 가지 양을 적어주면 되고, 2를 택하면(dipole-dipole 배열) 한 줄에 중심점에서 가까운 전극까지의 거리, 먼 전극까지의

거리, 그리고 그 전극의 배열에서 얻어진 저항값(혹은 걸보기비저항값)의 3가지 양을 적어주면 된다. 그리고 3을 택하였으면(Schlumberger , Wenner 배열 등) 중심점에서 전류 전극까지의 거리, 전위전극까지의 거리, 그 전극의 배열에서 얻어진 저항값(혹은 걸보기 비저항값)의 3가지 양을 적어주면 된다. 비저항값은 FORM.CRD의 'Selection of Input Type'에서 1을 택하였으면 저항값을, 2를 택하였으면 걸보기비저항값을 적어주면 된다.

1-3. 사용 방법

FORM.CRD와 입력 파일(예로 INPUT.CRD)을 위에서 설명한 대로 만들었으면 ESII의 실행을 위한 준비가 모두 끝난 것이다. ESII를 실행하기 전에 반드시 마우스 드라이버(MS 마우스와 호환되는 드라이버는 가능하지만, ESIIZIP에 포함되어 있는 MOUSE.COM을 사용하는 것이 좋다.)를 띄워놓아야하는데 그렇지 않고 ESII를 실행시키면 시스템이 다운된다. 이 경우에는 재부팅을 하여야 한다. ESII를 실행시키면 입력 파일과 출력 파일의 이름을 물어오고 각각의 이름을 적어주면 그림 1과 같은 초기화면이 뜬다. 그림 1에서 x축 방향은 지하의 깊이, y축 방향은 비저항을 나타낸다. 오른쪽 윗 부분에 지금 작업하고 있는 파일의 이름을 적어 많은 파일을 다룰 때 혼동을 일으키지 않도록 하였다. 내부가 검은 색으로 칠해져 있는 부분이 관측값이며 계단모양의 선은 초기모델의 모양이다. 마우스의 왼쪽 버튼을 클릭하면 계단모양선이 y축 방향으로 움직이게 되고(모델의 비저항을 바꾸어준다) 오른쪽 버튼을 클릭하면 계단모양의 선이 x축 방향으로 움직이게 된다(모델의 깊이를 바꾸어 준다). 이렇게 마우스의 왼쪽과 오른쪽 버튼을 이용하여 모델을 만든 후에 커서를 SOLVE PANNEL에 갖다 놓고 왼쪽 버튼을 클릭하면 사용자가 정해놓은 모델에 의해 결정되는 계산된 걸보기비저항값을 구하게 된다.



```

*****
*   Electrical   *
*   Sounding    *
*   Interactive  *
*   Interpretation *
*   -----     *
*   Kin, Myoung-Soo *
*   *****     *
input.crd

```

SOLVE

```

DEPTH:      .9928
RESI.:      3976.7738

```

QUIT

그림 1. ESII의 초기 화면

그림 2에서 속이 빈 동그라미가 계산된 값이다. SOLVE PANNEL의 바로 아래에 적혀 있는 RMS 오차가 만족스러울 정도로 작지 않으면 다시 모델을 수정하여 계산을 하면 된다. 여러 번의 수정을 거친 뒤 만족할만한 모델이 설정되면 QUIT PANNEL에 마우스의 커서를 갖다 놓고 오른쪽 버튼을 클릭하면 DOS로 빠져 나가게 된다. 이렇게 해석을 하고 나면 해석 결과가 사용자가 정의한 이름의 화일에 일정한 형식으로 저장된다.

1-4. 출력 화일

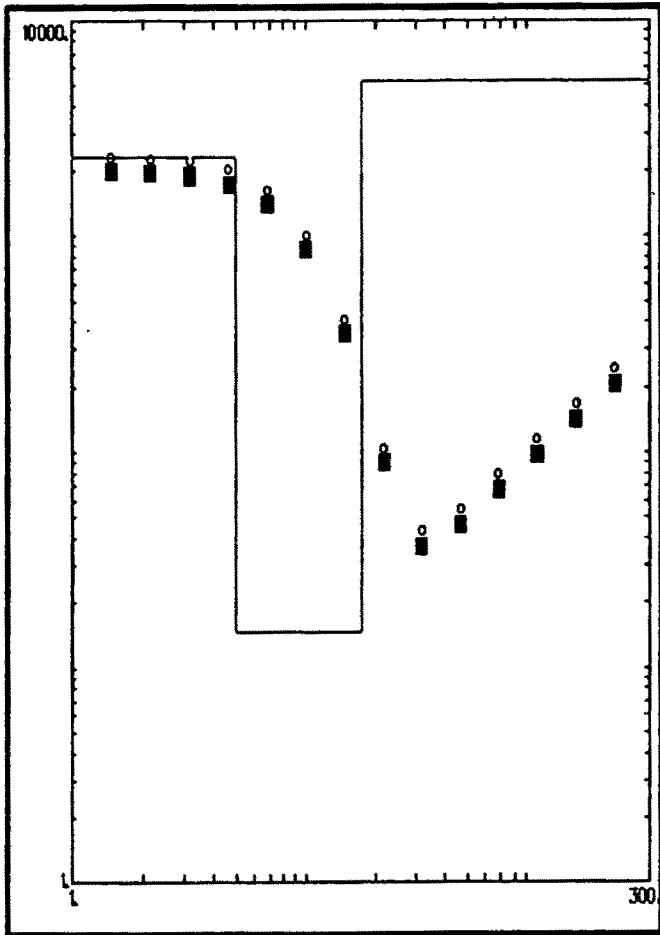
출력 화일의 이름은 사용자가 정의한다. 예를 들어 ESII를 실행시켜 출력 화일을 LOU.T.CRD라고 해준 다음, 해석을 끝내고 QUIT PANNEL을 클릭하고 나왔다면 LOU.T.CRD는 다음과 같이 만들어진다.

<LOU.T.CRD>

```
*****
*      Depth & Resistivity of Layer      *
*****
  1      1.769      2315.170
  2      3.129      2315.170
  3      4.962      2315.170
  4      9.791       14.748
  5     17.321       14.748
  6     30.639      5212.005
  7     54.198      5212.005
  8     95.873      5212.005
  9    169.593      5212.005
 10                                5212.005
```

No of data = 14

```
*****
* Outer Pole Inner Pole Observed. Calculated. *
```



```

*****
*      Electrical      *
*      Sounding       *
*      Interactive    *
*      Interpretation *
*      Kin, Myoung-Soo *
*      *****       *
input.crd

```

SOLVE

RMS(X): 6.97

DEPTH: 214.8386
RESI.: 28.7886

QUIT

그림 2. ESH를 이용하여 전탐 자료를 해석한 그림

```

*****
1. 47      1.00    1989.09    2308.37
2. 15      1.00    1966.82    2284.89
3. 16      1.00    1903.24    2213.81
4. 64      1.00    1740.03    2026.31
6. 81      1.00    1395.19    1625.03
10.00     1.00     865.96     1006.48
14.68     1.00     354.94     410.87
21.54     1.00      90.64     105.25
31.62     1.00      36.60      43.50
46.42     1.00      45.99      54.80
68.13     1.00      67.08      79.89
100.00    1.00      97.86     116.43
146.78    1.00     142.40     169.24
215.44    1.00     206.43     245.01
*****
RMS VALUE:    7.0
*****

```

출력 파일의 처음 부분을 통해 3층까지 2315 ohm-m의 비저항을 갖는 층이 있는 것으로 해석된 것을 알 수 있다. 그러나 이것은 편의상 초기모델을 10개의 층으로 했기 때문이지 실제로 3층을 갖는 것은 아니다. 이들 세층은 한 층으로 보아야 한다. 그 다음의 층들도 마찬가지로 생각해서, 위의 결과는 지하 약 5 m 까지는 약 2315 ohm-m를 갖는 층, 지하 약 5 m에서 약 17 m까지는 약 15 ohm-m를 갖는 층, 지하 17 m 부터 5212 ohm-m의 층이라는 것을 설명하는 것이다. 출력 파일의 그 다음 부분은 Schlumberger 배열이나 Wenner 배열의 경우 각 측정점의 중심점에서 전류전극까지의 거리, 전위전극까지의 거리, 관측값, 계산된 값을 표시하며 마지막에 RMS 오차가 적혀있게 된다.

2 ZOH_INV

2-1. 사용 목적

수직탐사 자료들을 이용하여 이러한 관측값을 야기하는 지하 비저항모델을 역산법 (Zohdy의 방법)으로 결정한다.

2-2. 입력 파일

사용자가 정의한다. 입력 파일의 형식은 한 줄에 2개의 자료를 포함한다. 첫 번째 입력되는 숫자는 3-1-2에서 설명된대로 전류전극까지의 거리이고 두 번째 숫자는 겐보기 비저항값이다. Zohdy 방법의 특성상 반드시 두 번째 숫자는 저항값이 아닌 겐보기비저항값을 입력하여야 한다. 다음은 입력 파일의 이름을 INPUT.DAT라고 정하였을 경우의 예이다. 이것은 전위전극의 자료가 없는 것만을 제외하고는 앞의 ESII의 입력 자료와 같다.

<INPUT.DAT>

1. 467799	1989. 089000
2. 154435	1966. 816000
3. 162278	1903. 241000
4. 641589	1740. 032000
6. 812921	1395. 191000
10. 000000	865. 956800
14. 677990	354. 936500
21. 544350	90. 635900
31. 622780	36. 597690
46. 415890	45. 986600
68. 129200	67. 078190
100. 000000	97. 862990

146. 779900	142. 400400
215. 443500	206. 433300

2-3. 사용 방법

ZOH_INV를 실행시키면 입력 파일과 출력 파일을 물어오는데 이름을 적어주면 된다. 그러면 Zohdy의 방법을 이용하여 입력 파일의 겔보기비저항값을 야기하는 지하 비저항 모델을 결정한다.

2-4. 출력 파일

출력 파일 역시 사용자가 정의한다. 만약 이름을 OUTPUT.DAT라고 하였다면 다음과 같은 결과가 나온다.

<OUTPUT.DAT>

```

RMS Error --->      14.391160
D. =Depth, R. =Resistivity, obs. =observed, cal. =calculated
D. of model  R. of model  D. of obs.  R. of cal.  R. of obs.
  1.07003   1949.03706    1.46780   1970.95307   1989.08900
  1.48680   1914.54130    2.15444   1969.42565   1966.81600
  2.06590   1943.69561    3.16228   1934.68096   1903.24100
  2.87055   2108.58971    4.64159   1784.55329   1740.03200
  3.98862   2359.00820    6.81292   1417.77910   1395.19100
  5.54217   2245.79819   10.00000    857.44727    865.95680
  7.70082   1086.84870   14.67799    343.61453    354.93650
 10.70025    79.40361   21.54435     94.14014     90.63590
 14.86796     4.36878   31.62278     45.34048     36.59769
 20.65896     8.11950   46.41589     50.05974     45.98660
 28.70553    24.09310   68.12920     62.49779     67.07819
 39.88621    69.26378  100.00000     80.14256     97.86299
 55.42170   201.20293  146.77990    104.52116    142.40040
 77.00821   616.29556  215.44350    137.05755    206.43330

```

OUTPUT.DAT를 보면 맨 윗 줄에 해석된 모델로부터 이론적으로 계산된 값과 관측값과의 오차가 적혀있다. 그리고 이 출력 파일은 모두 5 개의 열로 이루어지는데 첫 번째 열은 해석된 모델의 값이고 두 번째 열은 해석된 모델의 비저항값이며 세 번째 열은 관측된 겉보기비저항값의 값이고 네 번째 열은 해석된 모델의 비저항값, 다섯 번째 열은 관측된 겉보기비저항값이다.

3 ESIIGRIM

3-1. 사용 목적

ESII를 통해 나온 출력 파일(3-1-4에서 LOUT.CRD)은 숫자만으로 되어 있어서 한 눈에 해석결과를 알아 보기 힘들다. 그런 이유로 그림을 그려주는 프로그램이 필요한데 이 일을 ESIIGRIM이 수행한다.

3-2. 입력 파일

입력하는 파일은 ESII의 해석결과 나온 파일이다. 앞의 예에서 LOUT.CRD가 이에 해당한다.

3-3. 사용 방법

ESIIGRIM을 실행시키면 입력 파일을 물어오는데 입력 파일을 써주면, 출력되는 도구를 물어온다. 1을 택하면 모니터에 그림을 그려주고 2를 택하면 laser printer로 출력하며 3을 택하면 확장자를 DXF로 갖는 파일을 만들어 준다. 그래픽 카드는 반드시 VGA 이상의 해상도를 갖는 카드이어야 하고, 프린터는 HP와 호환되는 laser jet이러야 하며 일반적인 ink jet으로는 출력되지 않는다. 이것은 뒤에 이용되는 모든 그래픽 프로그램에 해당한다. 그리고 y축 비저항의 범위를 물어오는데 알맞게 택하여 주면 된다.

마지막으로 코멘트를 물어오는데 이것은 다른 축점의 그래프와 혼동되지 않게 해주는 것으로 축점의 이름을 적어주면 된다. 한편 DXF 파일로 만들게 하면 마지막에 파일의 이름을 입력하라고 하는데 만들고 싶은 파일의 이름을 적어주면 된다. 이때 반드시 확장자도 함께 적어주어야 한다.

3-4. 출력 파일

ESIIGRIM은 그림을 그려주는 프로그램이기 때문에 특별한 출력 파일은 존재하지 않는다. 그림 3은 ESIIGRIM을 이용하여 만든 그래프이다. 점으로 표시된 것이 관측값이며 곡선은 계산값, 계단모양의 선은 확정된 비저항모델이다.

4 ZOH_GRIM

4-1. 사용 목적

ZOH_INV를 통해 나온 출력 파일(3-2-4에서 OUTPUT.DAT)은 숫자만으로 되어 있어서 한눈에 해석결과를 알아 보기 힘들다. 그런 이유로 그림을 그려주는 프로그램이 필요한데 이 일을 ZOH_GRIM이 수행한다.

4-2. 입력 파일

입력 파일은 ZOH_INV의 출력 파일이 이용된다. 앞의 OUTPUT.DAT를 보듯이 처음 세 줄은 읽지 않으므로 첫 세 줄은 아무 것도 써여있지 않더라도 꼭 비워두어야 한

다.

4-3. 사용 방법

ZOH_GRIM을 실행시키면 입력 파일을 물어오는데 입력 파일을 써주면, 출력되는 도구를 물어온다. 1을 택하면 모니터에 그림을 그려주고 2를 택하면 Laser Printer로 출력하며 3을 택하면 확장자를 DXF로 갖는 파일을 만들어 준다. 앞에서와 마찬가지로 VGA 이상의 해상도를 갖는 카드와 HP와 호환되는 laser jet이어야 한다. 그리고 y축 비저항의 범위를 물어오는데 알맞게 택하여 주면 된다. 마지막으로 코멘트를 물어오는데 이것은 다른 축점의 그래프와 혼동되지 않게 해주는 것으로 축점의 이름을 적어주면 된다. 한편 DXF 파일로 만들게 하면 마지막에 파일의 이름을 입력하라고 하는데 만들고 싶은 파일의 이름을 적어주면 된다. 이때 반드시 확장자도 함께 적어주어야 한다.

4-4. 출력 파일

ZOH_GRIM은 그림을 그려주는 프로그램이기 때문에 특별한 출력 파일은 존재하지 않는다. 그림 4는 ZHO_GRIM을 이용하여 만든 그래프이다. 점으로 표시된 것이 관측값이며 곡선은 계산값, 계단모양의 선은 확정된 비저항모델이다.

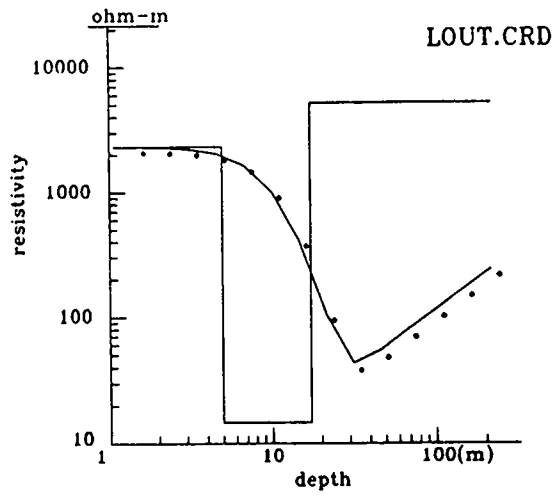


그림 3. ESI GRM의 결과 화면

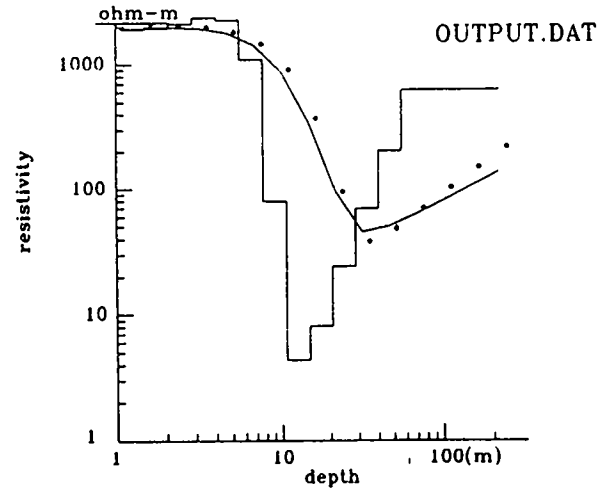


그림 4. ZOH GRM의 결과 화면