

3차원 흐름모델을 이용한 지하저수지의 관리에 대한 연구 A Study of the Management of Groundwater Reservoir by Numerical Three Dimensional Flow Model

신 방 웅 (Shin, Bang Woong)
김 희 성 (Kim, Hee Sung)

충북대학교 토목공학과
농어촌 진흥 공사

요약/Abstract

지하 저수지를 효과적으로 관리하기 위하여는 지표·지하 수문 특성, 대수층계의 수리지질 특성, 차수벽의 차수 기능을 기본 설계 단계부터 계획적으로 분석 검토하여야 한다.

본 연구에서는 국내 최초로 건설된 경북 이안 지하 저수지의 기능을 분석하기 위하여 3차원 유한 차분 흐름 모델을 이용하였다. 지하댐 건설 후의 정류모의와 부정류모의를 구축하였으며 그 결과 각 조건에 따른 지하 수문계의 물수지를 결정하고 안전 채수량을 제시하였다.

모의 결과 지하수위의 계절적 변동에 영향을 주는 주요인의 하나로 관개용수의 지하침투 현상이 규명되었다. 관개용수로부터의 함양량은 5, 6월에는 4.3mm/d, 7, 8월에는 1.7mm/d이다. 유역 산지로부터 대수층내로의 함양량은 0.04m³/s로서 연중 일정하며 1984년 댐의 종단면을 통한 지하수 유출량이 0.002m³/s일 때 관개 기간인 7, 8월 두달간 최적 양수량은 254000m³이었으나, 1993년 댐의 종단면을 통한 지하수 유출량은 0.013m³/s로서 차수벽의 기능은 상실되었다. 지하댐의 차수기능을 보장하지 않을 경우 관개 기간내에서의 최적 양수량은 93,000m³이 된다.

At the initial stage of the underground reservoir design one should thoroughly consider surface and sub-surface hydrology, hydrogeologic characteristics of aquifer system, and the function of cut - off wall because it is linked to the effective management.

In this study, three dimensional finite difference model was applied to analyse the function of an underground reservoir at Kyungbuk Province.

The steady and unsteady state conditions after construction of the underground dam were simulated through the model, and from these results the groundwater budget and the safe yield were determined.

The model simulation indicates the infiltration of irrigation water to be one of the major factors of seasonal fluctuation of groundwater level. The recharge rates of irrigation water were estimated as 4.3mm/d during May and June, and 1.7mm/d during July and August.

Groundwater recharge from the watershed area estimated to about 0.04m³/s, almost consistent through

the year. In 1984, groundwater discharge through the transverse section of the dam was $0.002\text{m}^3/\text{s}$ and the optimum yield for two months (July and August) was 254000m^3 , however, the discharge became $0.013\text{m}^3/\text{s}$ in 1993, implying the failure of cut-off function.

Without appropriate supplement of the cut-off wall, optimum yield during the irrigation period would be $93,000\text{m}^3$.

서론

이안 대수층의 수문 지질학적 특성

우리 나라 연간 총 강우량은 $1267\text{억}\text{m}^3$ 이며 1993년 현재 국내의 수자원 이용량은 하천으로부터 직접 취수량 $164\text{억}\text{m}^3$ 과 다목적 댐으로부터의 이용량 $126\text{억}\text{m}^3$ 및 지하수 이용량 $19\text{억}\text{m}^3$ 을 합한 $309\text{억}\text{m}^3$ 으로서 자원 이용률은 24.4%에 불과하다.

최근에는 국민 생활 수준의 향상과 산업의 고도화로 용수 수요량의 대폭적인 증가가 예상되나 지표수 자원 개발은 용수수요의 지역별 편중으로 인해 하천 유역별 용수 공급이 곤란하며 댐 개발적지의 감소와 수몰 보상비의 상승, 지역사회와의 반발 등으로 인해 한계점에 도달하였다. 또한 1992년 이후 근래의 가뭄까지 지하수 개발의 필요성이 대두됨으로서 지하수 자원을 수자원 개발 계획의 일환으로 재평가하기에 이르렀으며 점원인 관정 개발과 함께 다량 취수가 가능한 지하저수지의 효용성에 대한 관심이 증대되고 있다.

본 연구에서는 지하저수지 대수층의 최적 관리를 위한 안전 채수량을 산정하기 위하여 1982년 국내에서 처음 건설된 경북 이안 지하저수지를 선정하였다.

기상학적 인자에 의한 유역 내 지표수문 분석과 조사공에 의한 지층분석, 투수시험, 토질시험을 시행하였고 기설관정에 대한 대수성 시험을 시행하여 대수층의 공학적 특성을 파악하고 수리특성인자를 도출하였다.

상기 결과를 이용하여 3차원 유한차분흐름모델 (McDonald and Harbaugh, 1993)을 선정 지하댐 건설 후의 정상류 모의와 비정상류모의를 구축하였다. 또한 각각의 모의는 대수층의 수리상수에 대한 민감도를 분석하여 최적수리상수를 추정하였으며 기설관정에 대한 지하수위를 측정하여 검증하였다.

예측 모의에서는 검증된 수리상수와 관측한 지하수위에 의해 들수지를 결정하고 대수층의 최적 관리를 위한 안전 채수량을 산정 하였다.

유역 개황

지형

연구 지역은 경북 상주군 이안면(북위 $128^{\circ}06'00'' \sim 128^{\circ}09'40''$, 동경 $36^{\circ}34'00'' \sim 36^{\circ}38'00''$)에 위치하며 타원형의 집수구역으로 둘러 쌓여있는 분지 지역이다(그림 1).

산계는 이안천 지류를 경계로 하여 서부와 동부로 나누어지며 북고 남저의 산계로서 북부 고지들의 지릉들은 급경사를 이루고 있는 반면에 남부는 EL. 100m이하의 완만한 산릉과 비교적 넓은 충적평야가 발달되어 있다.

본 역의 유일한 하천은 중앙을 관통하는 이안천 지류이다. 본 지류는 EL.671m의 수정봉등으로부터 발원된 소계곡류들로 인하여 수지상으로 발달되어 있으나 지류 전구간 약 6.2km중 90%인 5.6km가 강우량이 가장 많은 7~8월에만 일시적으로 지표수가 유출될 뿐 연중 대부분의 기간은 건천을 이루고 있는바 이는 하상 퇴적물이 투수성이 양호한 역 및 조사로 이루어져 강우시 일시적으로 유하되는 지표수를 제외하고는 평상시에 기저유량만 복류수 형태로 유하되고 있기 때문이다.

지질

연구 지역의 대부분은 편마암, 편암 같은 시대미상의 변성암과 백악기 알카리 화강암이 주로 분포한다(그림 1). 연구 지역내 가장 고가의 암석은 조선 누층군의 석회암이다. 조선 누층군의 퇴적은 선캠브리아 분지상에 해퇴가 일어난 기간인 캄브리아기 초기에서 오르도비스기 중기까지 일어났다. 석회질 해양성 퇴적물은 심해저에 퇴적되었고 대석회암층으로 알려져 있다.

이 석회암은 연구 지역의 동부에 광범위하게 분포되어 있고 백악기 화강암과 접촉되어 있다. 해안 퇴적물로 구성된 평안계는 삼첩기초에 퇴적되었고 뒤

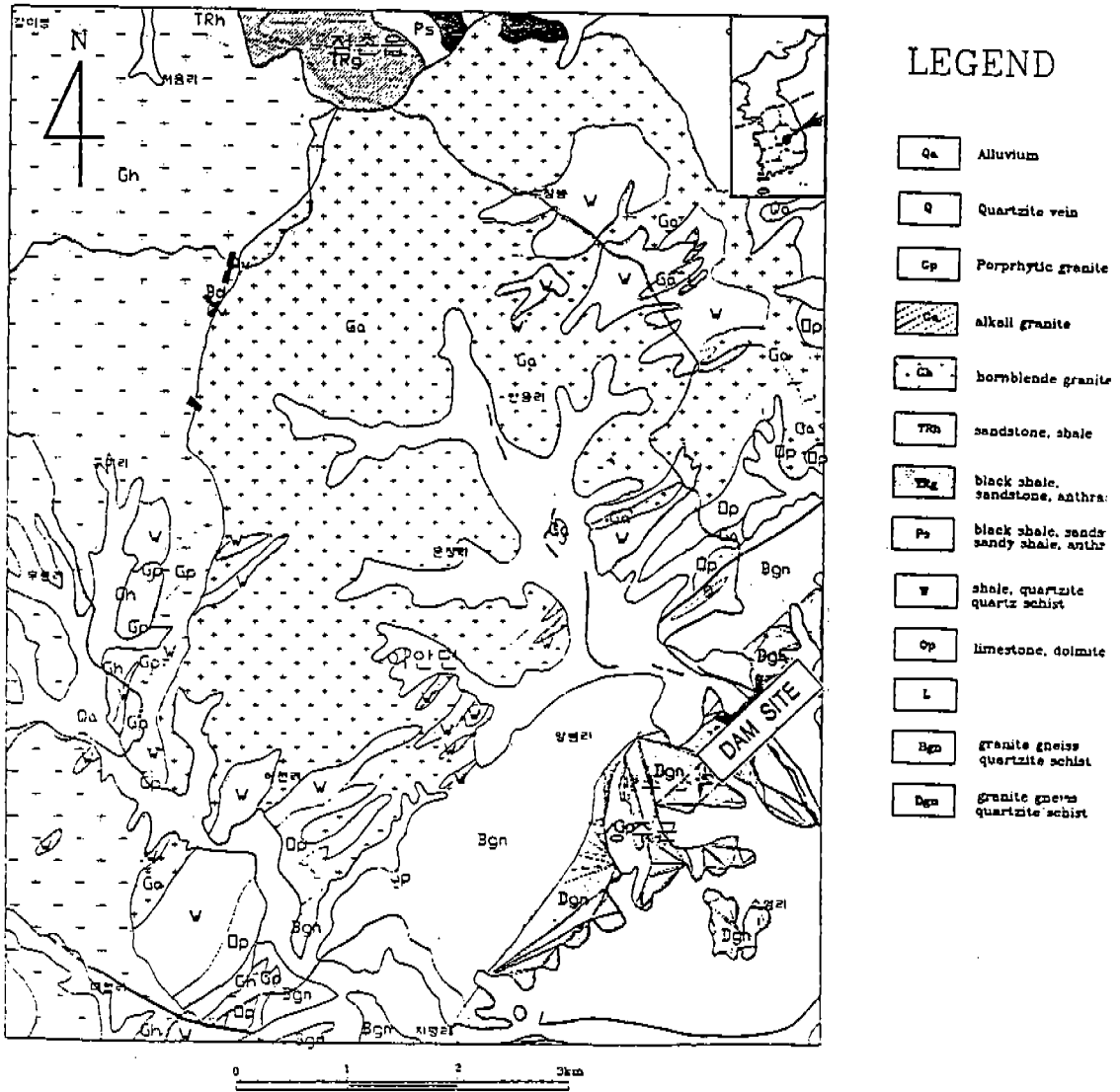


Fig. 1 Location map of lan groundwater reservoir.

따라 형성된 비해성 기원의 퇴적암인(정창희, 1987) 평안계는 조선계를 부정합으로 덮고 연구 지역 북쪽에 노두가 광범위하게 산출된다. 삼척기 중기에 송림 변동으로 불리우는 지구조 운동은 한국의 북부에 영향을 주었고 그 결과 화강암질 심성암의 관입이 있었다.

한반도의 지사층 가장 격렬한 지구조활동을 한 기간은 중생대이다. 한반도의 남부에 형성된 대규모 백악기 분지는 비 해양성 퇴적물이며 화산 쇄설암과

화산암이 축적되어 있다(김옥준, 1987).

연구 지역 주변은 고기암에 존재하는 약간의 암맥 또는 맥의 존재를 제외하고는 분지 형성 후에 지구조 운동의 증거는 발견할 수 없다. 제 4기에는 풍화와 침식작용이 저지대에 충적층을 이루었다.

지질과 지하수

연구지역의 대부분을 차지하는 알카리화강암은 관입활동후 제한된 구조운동으로 불연속면의 연결성이

결여되어 있어 암반내의 지하수 흐름은 미미하다. 이 암반이 분포된 지역에 설치된 조사공에 의하면 각지층의 발달 심도는 지표로부터 토사층 0.4m, 사·사력·전석층 4.5m, 풍화대층 7.6m, 기반암층 7.6m이다.

풍화대층은 전형적인 화강암 풍화형이며 하부로 갈수록 치밀하다. 지하댐 설치지역에 분포하는 대가산 편마암에 설치된 조사공에 의하면 풍화대층의 평균두께가 화강암 풍화대층 보다 작은 0.8~5.0m이다. 풍화대층은 풍화에 의해 형성된 점토 광물의 영향으로 100m³/d 이하의 산출량을 갖는다.

알카리 화강암 분포 지역에 발달된 풍화대층 상부의 층적층(두께 5.1m)은 화강암의 풍화 산물로 다량의 점토광물을 함유하며 급격한 경사와 짧은 하천으로 10~100cm의 직경을 갖는 다양한 크기의 암편을 함유한다.

편마암 분포 지역의 층적층후는 약 4.0m이며 높은 수리전도도와 500~1000m³/d의 양수량을 갖는다.

이안대수층의 수리상수

Cooper와 Jacob(1946)은 우물함수층 u가 매우 작은 경우에 수위강하량을 나타내는 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$S = \frac{0.183Q}{T} \log \frac{2.25Tt}{r^2S} \tag{3}$$

여기서 S=h₀-h로서 수위 강하량을 나타내고, r는 양수정으로부터 떨어진 거리, t는 양수시간을 나타낸다.

상기 식 (3)으로 부터 투수량계수(T)와 저류계수(S)를 산정할 수 있다.

$$T = \frac{2.3Q}{4\pi \cdot \Delta S} \tag{4}$$

여기서 Q는 양수량이고, ΔS는 대수 눈금 비율이 10이 되는 임의의 두 시간 사이의 수위강하의 변화로 나타나는 시간-수위 강하 그래프의 경사를 나타낸다.

또 저류계수는 수위강하선과 횡축과의 교점을 이용하여 식(3)으로 부터 유도된 다음 식을 이용하면 쉽게 구할 수 있다.

$$S = \frac{2.25Tt_0}{r^2} \tag{5}$$

여기서 t₀는 수위강하량이 0일때의 시간을 나타낸다.

본 연구에서는 12공의 양수시험을 통하여 얻은 수위자료를 편대수 방안지에 도시하여 얻은 수위강하곡선을 이용하여, 식(4)와 식(5)로 부터 투수량계수

Table 1. Pumping test data(R. D. C., 1982)

| Well No. | Elv.(m) | Depth of well(m) | SWL(m) | PWL(m) | Discharge (m ³ /d) | Transmissivity (m ² /s) | Storage coefficient |
|----------|---------|------------------|--------|--------|-------------------------------|------------------------------------|---------------------|
| T- 1 | 116.88 | 2.73 | 1.65 | 2.36 | 79 | 5.77E-04 | 0.206 |
| T- 5 | 105.88 | 5.19 | 4.31 | 4.84 | 192 | 1.62E-03 | 0.321 |
| T- 8 | 99.94 | 4.24 | 3.66 | 4.03 | 157 | 2.07E-03 | 0.259 |
| T- 9 | 98.00 | 4.77 | 3.94 | 4.57 | 63 | 8.34E-04 | 0.234 |
| T-10 | 95.00 | 5.20 | 3.72 | 4.93 | 691 | 3.99E-03 | 0.115 |
| T-12 | 91.12 | 3.00 | 2.25 | 2.53 | 432 | 9.15E-03 | 0.617 |
| T-13 | 82.81 | 2.72 | 1.69 | 2.09 | 428 | 7.54E-03 | 0.436 |
| T-14 | 71.16 | 4.81 | 2.42 | 4.52 | 392 | 1.19E-03 | 0.121 |
| T-15 | 87.90 | 3.60 | 1.29 | 3.11 | 308 | 1.02E-03 | 0.136 |
| T-16 | 75.70 | 10.0 | 0.91 | 1.30 | 738 | 2.23E-02 | |
| T-17 | 79.82 | 9.60 | 1.62 | 3.24 | 967 | 3.15E-03 | |
| T-18 | 93.45 | 13.0 | 1.93 | 6.83 | 38 | - | |
| T-19 | 88.00 | 6.50 | 0.70 | 1.20 | 864 | 2.61E-02 | |
| Mean | 91.19 | 5.80 | 2.31 | 3.50 | 411 | 6.12E-03 | |

SWL : Depth to static water level in meter
 PWL : Depth to pumping water level in meter

와 저류계수를 산정하고 그 결과를 표 1에 나타내었다.

수문 분석

지하댐 건설전의 물수지 상황을 파악하기 위하여 분석대상기간을 1982.4.1~1983.3.1로 하였다.

지표지질 조사결과 연구지역 유역 내에서는 외부로부터의 지표수 유입량과 지하수 유입량은 없는 것으로 하여 식(1)에 의해 분석을 하였다.

$$P = R_o + E + G_o + \Delta s \quad (1)$$

$$\Delta s = \Delta Ws + \Delta M + \mu \Delta H \quad (2)$$

- P : 강우량
- R_o : 지표수유출량
- E : 증발산량
- G_o : 지하수유출량
- ΔWs : 지표수 변화량(지표에서의 저류 변화량)
- ΔM : 불포화대의 토양수분 변화량
- Δs : 저류량변화
- μ : 지하수위 변화부분의 유효공극률
- ΔH : 지하수위변화량

강우량

수 개소의 강우량관측점을 유역 내에 설치하여 산악 효과가 고려된 등우량선법으로 평균 강우량을 산정하는 것이 바람직하나 연구 지역에 대한 강우량 실측자료가 없어 최기 관측소인 문경측후소의 자료를 이용하였다. 연평균 강우량은 1,103mm이며 최소 693.9mm 최대 1,384mm의 범위 내에서 변화하고 있다.

유역면적은 21.3km²이며 물수지 분석 대상기간에서의 강우량은 731.8mm로서 수자원의 총량은 15,587,340m³이다.

지표수 유출량

지표수 연간 유출량을 산정하기 위하여 梣山의 월간유량공식

$$C = \sqrt{R^2 + (138.6f + 10.2)^2} - 138.6f + E$$

이용하여 계산한 결과 연간 유출량은 364.88mm(7,771,944m³)로 산출 되었으나 계산치의 객관적인 신뢰성이 약하여 본 연구에서는 지표수 유출량을 미지수로 하여 전체 물수지식으로부터 산정한 결과 8,273,697m³이 되었다.

증발산

연구지역 내의 지표수 유출량과 지하침투 손실량의 실측치가 없어 과거 낙동강 유역에서의 증발산 검토 예 중에서 본 지구와 가장 가까운 문경 지구에 대한 분석치를 이용하였다. 이 분석치는 10년간의 관측치를 토대로 하여 Thornthwaite법, Penman법, Morton법등 세방법을 통해 낙동강 유역에서의 증발산량을 산출한 것으로서, Morton법에 의한 것이 가장 오차가 적어, 본 연구에서는 보정된 Morton의 증발산량을 기초로 하여 산출된 평균 증발산계수 0.42를 적용, 연간 증발산량을 307.35mm(6,546,555m³)로 하였으며 평균 증발산계수의 신뢰도는 낙동강수계 전체에 대한 평균 증발산계수의 변화계수가 0.32로 계산됨에 따라 적당한 것으로 판단하였다.

지하수 유출량

유역의 최하류부에 위치한 유출부의 대수층 단면을 통하여 유출되는 양과 생활용수 및 농업용수로 사용되는 지하수 양수량의 합이다.

(1) 유역내의 최하류부를 통한 유출량

본 유역의 최하류부 유출부의 폭은 232m, 평균 대수층후 1.8m, 평균 투수계수 4.329 × 10⁻³m/s, 지하수 동수구배 9.13 × 10⁻³로서 총 유출량은 188,232m³이다.

여기에서 폭은 지상의 거리가 가장 짧은 협곡부의 폭으로서 차수벽이 위치한다. 이러한 차수벽 축선을 따른 시추조사공에서 모집된 자료로부터 작성된 유출 단면의 면적을 심도로 나누어 평균 심도를 구하고 실측된 지점에서의 지하수위를 산술 평균하여 평균 심도에서 평균 지하수위를 감하여 대수층의 평균 심도로 하였다.

(2) 연간 지하수 양수량

지하수 양수량에 대한 실측치가 없으므로 지하수를 생활용수로하는 인구('83경북 상주 통계연보)에 경북지구의 1인당 급수 소비량('83 한국통계연감 : 경제기획원 조사통계국)을 곱하여 연간 지하수 양수량(3,205인 × 210l/d × 365일 × 10⁻³m³)을 산출하였다.

농업용수는 인력관정에 의해 관개되고 있는 329.1ha의 경지면적에 대한 소비수량계산에 의해 산정하였으나 기설관정에 의해 필요수량을 충족 시킬 수 없으므로 유역내 기설관정의 양수능력에 의해 계산되었다. 필요수량 계산은 Blaney & Criddle식에 의하여 엽수면 증발산량을 계산하였으며 순별 주간시간 백분율은 본 지구와 위도가 거의 같은 청주의 기록을 사용하였고 본담 썬레용수는 140mm로 보았으며

소비수량계수의 KC값은 신포종 값을 사용하였다. 연간 지하수 양수량은 생활용수(245,663m³) + 농업용수(206,900m³) = 452,563m³으로 추정하였다.

지하수 저류량의 변화

저류량의 변화는 물수지 기간이 길게 되면 불포화대의 토양성분변화량 및 지표수 저류변화량은 다른 항에 비하여 매우 작게 되므로 무시할 수 있으며 결국 식(2)는 $\Delta S = \mu \Delta H$ 에 근접하게 된다.

(1) 지하수위의 변화

조사공으로 부터 관측된 1년간의 관측 자료에 의하면 유역전체의 연간 지하수위 평균 변화량은 0.52m로 나타났으나 표준편차가 0.56m를 보여, 이 평균치를 적용하는 대신, 변화량의 대표치가 0.21~0.66m의 범위에 속하므로 이 범위의 산술평균치인 0.44m를 지하수위 변화량으로 판단하였다.

이상으로부터 저류량의 변화는 $0.1 \times 0.44m = 0.044m$ 가 되며 유역내 총저류 변화량은 지구내 총적층 분포면적의 실측치 287.03ha로부터 126,293m³으로 산출되었다.

(2) 유효 공극률

유역내 수개 지점에서 채취한 시료의 80% 이상이 실트질 중사-실트질 세사로 구성되어 있으며 Kazmi(1961)에 의한 입경과 비산출률 비교표에 의하면 해당 공극률은 0.1이 된다. 유역내 전체총적층의 상부지층은 분포지질의 구성성분상 큰 변화를 보이지 않아 이 유효공극률을 총적층 내에서 평균 개념의 대표치로 선정하였다. 이상으로부터 저류량의 변화는 0.044m가 되며 유역 내 총 저류변화량은 지구내 총적층 분포면적의 실측치 287.03ha로부터 $287.03ha \times 0.044m = 126.293m^3$ 이 된다.

물수지 분석 결과

이상의 검토 결과로 물수지식을 이용하여 유역전체에 대한 연간 물수지도를 작성한 것은 그림 2와 같다.

이에 의하면 연 강우량이 731.8mm일때는 지하수 저류량은 126,293m³이 증가하게 되며 평균치에 해당하는 강우가 계속 될때는 연간 저류량은 계속 증가될 것이다.

그러나 지표수의 유출 상황에 변동을 줄수있는 요인이 발생되면 이러한 물수지 상황이 크게 변화할 수 있으므로 변동 발생인자가 생겼거나 예상되면 이를 전제로한 물수지상황을 재검토해야만 할 것이다.

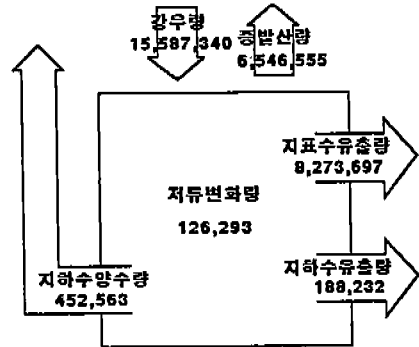


Fig. 2 Water balance(m³)

지하수의 모델링

개념 모델

개념 모델은 지하수 흐름계 및 흐름 특성을 회화적으로 형상화한 것으로 흐름계의 특징을 크게 희석시키지 않는 범위 내에서 단순화시키며 수학적모델 중 해석적 또는 수치적 모델의 적용을 위한 예비단계의 모델로 이용된다.

연구 지역의 지하수 흐름영역은 주대수층인 총적대수층계에 3차원적 지질구조를 포함하고 있으며 그 외곽 경계부는 산지로 되어있어 타원형의 독립된 집수구역을 이룬다. 또한 총적 대수층계는 하나의 자유면 대수층이지만 총적층에 의한 풍화대층의 영향을 알기 위하여 두개의 층으로 구분하였다. 그림 3과 같이 지하수 흐름 체계를 기본적으로 중요한 특징을 살리면서도 가능한 한 단순화하기 위하여 총적층 하부 풍화대층으로의 수직흐름을 수직적으로 균질한 2차원 흐름으로 가정하였다.

수학적 모델의 지배식

본 연구에서 사용된 수치모델은 지하수 흐름 방정식에 기초를 둔 것이다. 정상상태 하에서는 포화된 대수층의 단위 체적 안으로 유입되는 물의 양은 유출되는 양과 같으며 등방성이고 균질한 대수층을 통한 지하수 흐름은 다음 식으로 표현할 수 있다. (Jacob, 1950; Wang and Anderson, 1982)

$$\nabla^2 h = \frac{w(x, y, z)}{k} \tag{6}$$

h : 수두(L)

k : 수리 전도도(L/T)

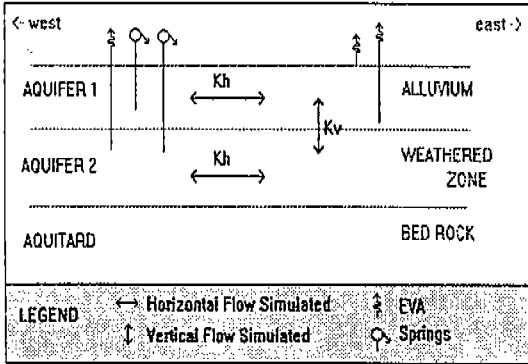


Fig. 3 Conceptual model of an aquifer system.

$w(x, y, z)$: 점 (x, y, z) 에서 단위 체적당 단위 시간의 유출입량

비정상 조건하에서는 유출량은 유입량과 저류량의 변화를 합한 것으로 보면 흐름식은 다음과 같다. (Wang and Anderson, 1982)

$$\frac{\delta h}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta z^2} = \frac{S_s}{k} \delta h \delta t + \frac{w(x, y, z)}{k} \quad (7)$$

S_s : 저류 계수 (L^{-1})

k : 수리전도도 (L/T)

비균질, 이방성 대수층에서 좌표상의 x, y, z 축을 수리전도도 성분배에 일치시키면 상기 식은 다음 식이 된다. (Trescott et al, 1976)

$$\frac{\delta}{\delta x} (k_{xx} \frac{\delta h}{\delta x}) + \frac{\delta}{\delta y} (k_{yy} \frac{\delta h}{\delta y}) + \frac{\delta}{\delta z} (k_{zz} \frac{\delta h}{\delta z}) = S_s \frac{\delta h}{\delta t} + w(x, y, z, t) \quad (8)$$

k_{xx}, k_{yy}, k_{zz} : 각방향의 수리 전도도 (L/T)

상기 식은 지하수흐름의 수학적 모델이 되며 단위 유출입량과 대수층 경계에서의 수두로 구성된다.

모의 방법

본 연구에서 수치 모델은 정상류 모의와 비정상류 모의로 구성된다. 정상류 모델은 시간에 따른 변화를 계산할 수 없는 모델이며 비정상류 모델은 시간적인 변화를 지정된 시간 간격마다 계산하는 모델이다. 대수층의 지하수 흐름 특성을 알기 위해서는 정상류 모델의 지하수 흐름 편미분 방정식을 경계조건과 초기조건에 맞게 풀어야 한다. 수치 모델에서 시간이

경과하여도 수두가 일정한 초기 조건은 향후 대수층 계의 지하수 활동을 예견하는데 필수적인 것이다. 그러나 실제로 지하수두는 시간이 경과하면 변동을 한다. 일반적으로 대수층 심도보다 수두 변화량이 작다면 어떤 시간에서의 수두는 모의에 요구되는 초기 조건으로 간주할 수 있다 (Freeze and Cherry, 1979). 상기 정류 모의 결과에 의해 다양한 조건에서의 지하수두 분포를 예측할 수 있는데 이는 비정상 조건에 의해 모의하여야 한다. 각 모의는 최적 수리상수 추정과 검증의 과정을 거쳐야 한다.

본 연구에서는 지하댐 건설 후의 정상류 모의를 구축한 후 검증된 수리상수와 수두 및 비정상 조건으로 비정상류 모의와 예측모의를 구축하였다.

실제로 현장시험에 의한 대수층 수리상수는 전 구간 적용에 한계가 있기 때문에 부분적으로 수리상수의 개략치를 입력하였다. 또한 최적 수리상수 추정을 위하여는 시행착오를 반복하여 모델 출력 자료가 현장시험에 의한 대수층 수리상수와 일치할 때까지 계속하였다.

정상류모의

정상류모의에서 첫 단계는 모의 지역에 격자망을 설계하고 각 격자 안에 경계조건, 초기지하수두, 대수층 두께 및 수리상수를 부여하는 것이다. 격자망은 21×32 개의 격자로 되어있고 각 격자의 간격은 50 ~ 200m까지 다양하다. 지하댐 위치에서의 격자 간격은 댐 건설후의 지하수위 변화를 정밀하게 검토하기 위하여 간격을 작게 하였다.

경계조건

모의된 지역의 산지는 총 유역면적(21.3Km^2)의 86% (18.4Km^2)를 차지하며 석영과 점토광물로 구성된 풍화대로 피복 되어 있다. 산지 풍화대층의 평균 깊이는 약 4m이다. 이 층에서는 다량의 물을 공급할 수 있는 저류 능력이 있으며 또한 관개기 전에 강우에 의한 소량의 침투량을 제외하고는 연구 지역의 유일한 공급 수원이다.

그림 4와 같이 대상 지역의 경계조건 으로서는 산록대와 충적층 사이의 물리적인 경계를 설정하기 위해 일정 수위 경계와 변수위경계를, 유역의 출구인 지하댐 위치 부근의 결절질 암이 노출된 곳은 불투수성 경계를 선택하였다. 지하댐 위치 부근의 변수위 경계는 댐 건설후 수두의 변동에 따라 경계면에서의 수두도 변화한다. 이는 각 격자 외곽에 수두의 변동

이 없는 한점이 존재 한다는 가정하에 이루어진다. (Wilson & Gerhart, 1982). 본 연구에서 이 점은 유역내 산록의 한 점(EL.120m)이다.

지하수 함양량

충적 대수층계로 물을 공급하는 공급수원은 비관개기에 산지의 풍화대층으로부터 유입되는 양과 지

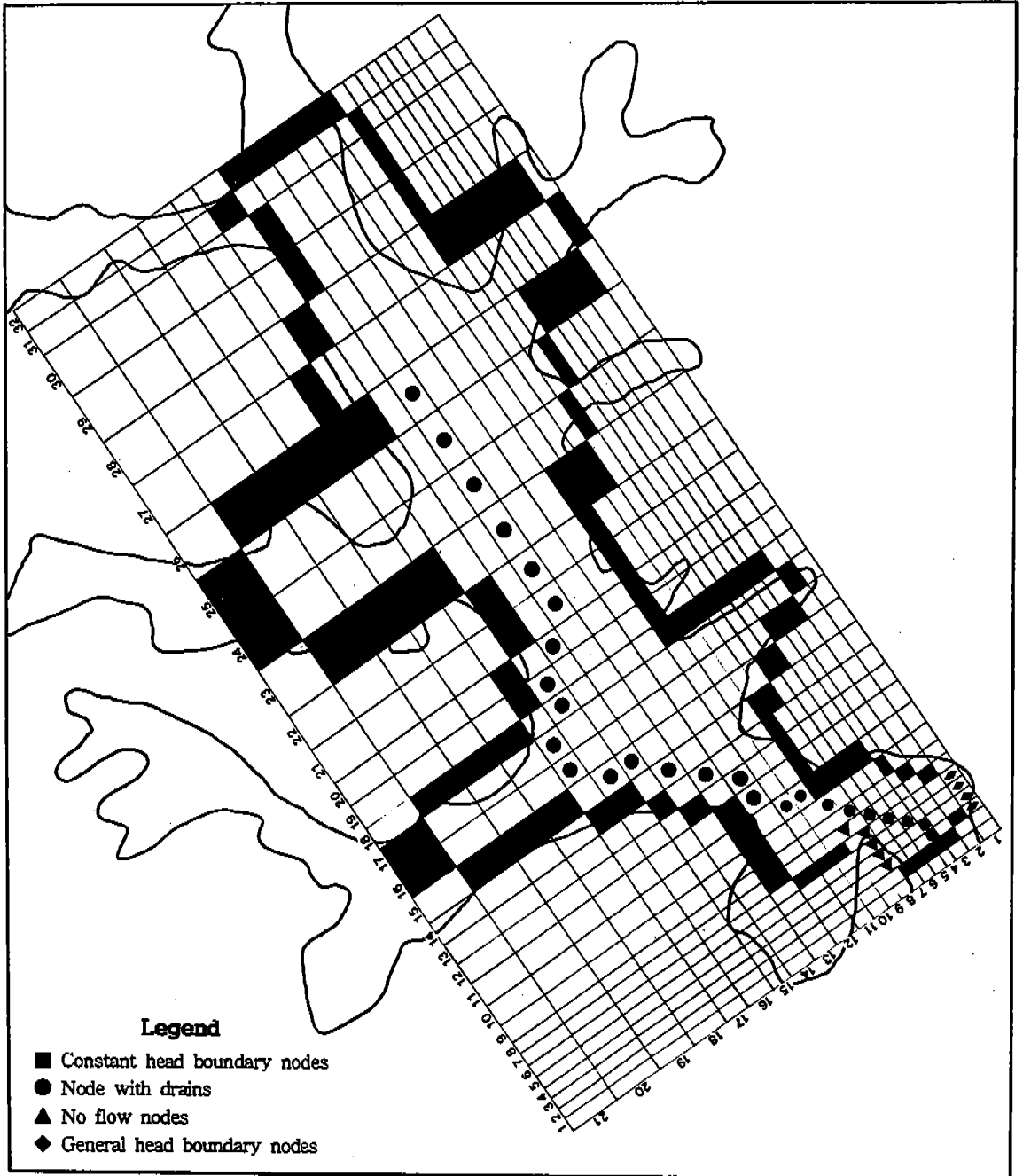


Fig. 4 Grid design

반으로 유입되는 강수의 침투량이다. 1984년 4월 26일 관측공으로부터 관측된 지하수위는 관개기전에 측정된 것이기 때문에 그 시점에서의 침투량은 지하수 유입량이라 할 수 있다.

지하수의 수직흐름

본 연구에서의 층적 대수층계는 하나의 자유면 대수층이지만 층적층에 의한 풍화대층의 영향을 알기 위하여 두개의 층으로 분류하였다. 층적층과 그 하부의 풍화대층의 수직 투수계수는 양층에서의 동시 수위변동을 따르는 Mcdonald model에 의해 허용된 최대값(0.001m/s)을 선택하였다.

최적수리상수 추정과 검증

정상류모의에서 층적 대수층의 투수계수에 대해 최적수리상수 추정을 하였다. 풍화대층의 투수계수는 기원암이 하나의 화성암이므로 일정하다. 초기 투수계수의 값은 펌프테스트의 분석결과이며 관측된 수두분포와 가능한 한 접근시켜 재생하였다. 또한 검증을 위하여 그림 5와 같이 관측값과 모의한 값을 접근시켰으며 투수 계수에 대한 민감도 분석을 위하여 투수계수에 0.5배, 2배한 값을 적용시켜 계산한 결과는 그림 6과 같다.

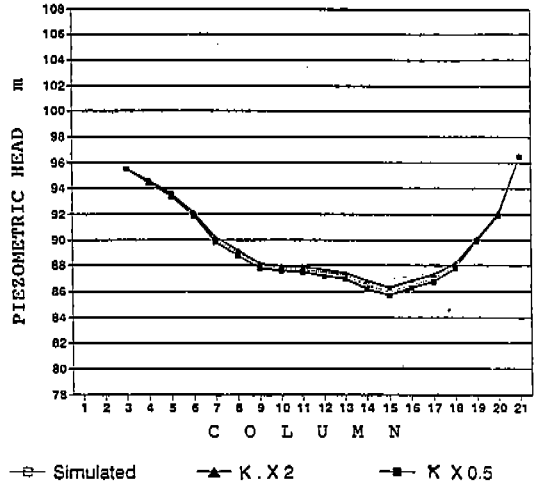


Fig. 6 Hydraulic conductivity sensitivity analyses.

모의 결과 및 고찰

표 2의 물 수지표에 의하면 지하댐을 통한 유출량은 0.002m³/s이고 하천을 통한 유출량은 0.042m³/s이다. 이는 지하댐의 차수 효과로서 0.042m³/s는 월류량이다.

Table 2. Steady state water balance

| Desc | steady state | |
|---------------|--------------|---------|
| | Inflow | Outflow |
| Storage | — | — |
| Constant herd | 0.42 | 0.002 |
| General head | — | — |
| Recharge | 0.002 | — |
| EVT | — | — |
| Drain | — | 0.042 |
| Total | 0.044 | 0.044 |

비정상류모의

본 연구 지역에서 지하수위의 변동은 주로 관개용수의 침투량에 의한 것이므로 오랜 기간의 지하수위 변화 폭보다는 계절적 지하수위 변화 폭이 크다.

또한 연평균강우량 1103mm는 충분한 보충수원이 된다. 비정상류 모의는 검증된 정상류 모의 결과에 기초를 두고 지하수체의 변화에 영향을 주는 요인을 검증하기 위하여 다음과 같은 비정상 조건을 가정하

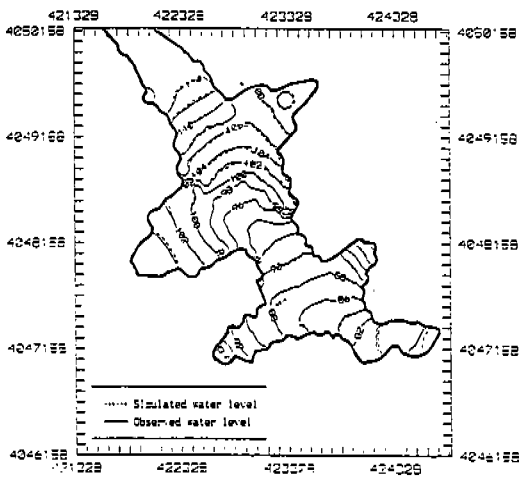


Fig. 5 Simulated vs observed water level at the end of the steady state.

였다.

(1) 연구 지역의 연 강우량은 매년 1월에 전년도 1월과 같은 수위를 유지하는데 충분하게 공급 된다.

(2) 관개기간 동안 관개용수로부터의 함양은 5월에서 9월까지 계속된다.

상기 조건에 의한 비정상류 입력 자료는 표 3에 요약되어 있다.

Table 3. Summary of input parameters

| Seasons | Pre-irrigation season | Earlier irrigation season | Late irrigation season | Post irrigation season |
|---------|---|---|---|---|
| Months | Jan.-Apr. | May-Jun. | Jul.-Aug. | Sep.-Dec. |
| Inflow | - Recharge from mountain area - Recharge from rainfall | - Recharge from mountain area - Recharge from irrigation water | - Recharge from mountain area - Recharge from irrigation water | - Recharge from mountain area - Recharge from rainfall |
| Outflow | - Subsurface outflow | - Subsurface outflow | - Subsurface outflow - Groundwater pumping | - Subsurface outflow |

최적수리상수 추정과 검증

정상류모의에서의 같은 방법으로 저류계수에 대해 최적상수추정을 하였다. 표 4와 같이 모의수위와 관

측수위는 근접하며 저류계수에 대한 민감도 분석을 위하여 모의된 저류계수에 0.5배, 2배한 값을 적용시켜 계산한 결과는 그림 7과 같다.

Table 4. Simulated vs observed water level

단위 : m

| 관측정 | GRID No. | '84. 4 | | '84. 6 | | '84. 8 | | '84. 12 | |
|-----|----------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|---------|----------|
| | | 관 측 | 모 의 | 관 측 | 모 의 | 관 측 | 모 의 | 관 측 | 모 의 |
| T 1 | 14/30 | 114.12 | 114.059 | 114.21 | 114.110 | 113.76 | 113.987 | 114.15 | 114.048 |
| T 2 | 13/29 | 111.41 | 111.228 | 111.35 | 111.296 | 111.23 | 111.146 | 111.21 | 111.211 |
| T 3 | 12/27 | 104.69 | 104.692 | 104.82 | 104.791 | 104.61 | 104.596 | 104.66 | 104.663 |
| T 4 | 12/26 | 102.21 | 102.179 | 102.53 | 102.281 | 102.11 | 102.084 | 102.16 | 102.1509 |
| T 5 | 14/26 | 101.91 | 101.896 | 102.15 | 101.982 | 101.90 | 101.807 | 101.91 | 101.873 |
| T 6 | 13/25 | 97.62 | 97.567 | 97.75 | 97.674 | 97.49 | 97.470 | 97.61 | 97.534 |
| T 7 | 12/25 | 98.91 | 98.893 | 98.85 | 98.989 | 98.90 | 98.800 | 98.91 | 98.866 |
| T 8 | 13/24 | 95.81 | 95.750 | 95.91 | 95.861 | 95.66 | 95.653 | 95.81 | 95.714 |
| T 9 | 14/23 | 93.61 | 83.585 | 93.71 | 93.699 | 93.51 | 93.492 | 93.62 | 93.546 |
| T10 | 13/22 | 92.21 | 92.192 | 92.30 | 92.306 | 92.10 | 92.100 | 92.21 | 92.152 |
| T11 | 12/19 | 89.21 | 89.176 | 89.20 | 89.288 | 89.21 | 89.086 | 89.25 | 89.136 |
| T12 | 14/20 | 90.10 | 89.882 | 90.10 | 90.095 | 90.11 | 89.892 | 90.15 | 89.942 |
| T13 | 12/11 | 82.13 | 82.132 | 82.21 | 82.207 | 82.15 | 82.060 | 82.11 | 82.106 |
| T14 | 2/3 | 77.6 | 77.541 | 77.55 | 77.551 | 77.63 | 77.519 | 77.54 | 77.540 |
| T15 | 12/15 | 86.2 | 86.236 | 86.34 | 85.340 | 86.23 | 86.143 | 86.21 | 86.202 |
| T16 | 3/3 | 77.4 | 77.443 | 77.45 | 77.447 | 77.45 | 77.434 | 77.44 | 77.443 |
| T17 | 5/5 | 78.2 | 78.163 | 78.16 | 78.163 | 78.21 | 78.163 | 78.17 | 78.163 |
| T18 | 6/17 | 91.7 | 91.663 | 91.71 | 91.710 | 91.59 | 91.594 | 91.81 | 91.654 |
| T19 | 14/17 | 87.23 | 87.167 | 87.28 | 87.276 | 87.12 | 87.078 | 87.12 | 87.127 |

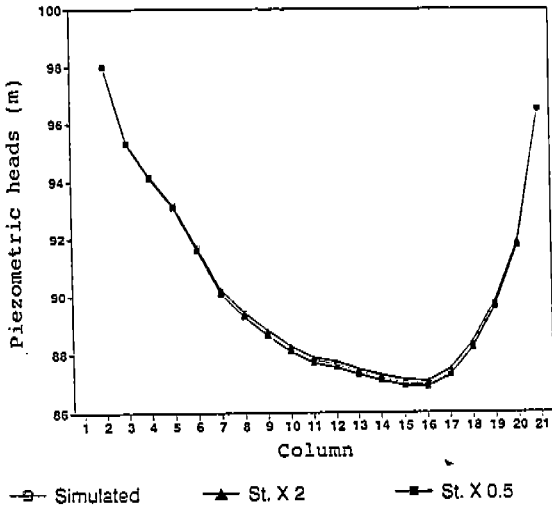


Fig. 7 Simulated storage coefficient sensitivity analyses..

모의결과 및 고찰

댐 건설로 차단된 지하수의 대부분은 하천을 통하여 지하수의 형태로 연구지역의 외곽으로 배출된다. 표 5의 물수지에 의하면 유역 내로의 유입량은 관개기인 5월 이후부터 증가하다가 관개기가 끝나는 계절인 9월 이후에는 관개기전과 같은 양이 유입된다. 또한 대수층으로의 함양량은 관개기인 5월 부터 증가하나 7월 이후에는 증발산량의 증가로 인하여 감소된다.

예측모의

구축된 모델로 총적 대수층의 안전 채수량을 산출하였다. 안전 채수량은 펌핑에 의하여 낮아진 수위가 관개기간후에 관개기간전의 수위로 회복될 수 있는 총지하수의 양수량을 말한다. 이 모의는 지하댐 건설 후 4개의 집수정을 동시에 일정량을 펌핑하여 수행하였다. 펌핑 모의후에 4개월간의 관개기간 마지막의 회복수위와 관개기전의 수위를 비교하였다. 총적

Table 5. Transient state water balance

단위 : m³/s

| Desc | Transient state | | | | | | | |
|---------------|---------------------|---------|---------------|---------|---------------|---------|---------------------|---------|
| | 1, 2, 3, 4 Month | | 5, 6 Month | | 7, 8 Month | | 9,10,11,12 Month | |
| | Inflow | Outflow | Inflow | Outflow | Inflow | Outflow | Inflow | Outflow |
| Storage | - | - | - | - | 0.011 | 0.001 | - | 0.002 |
| Constant herd | 0.041 | 0.001 | 0.040 | 0.001 | 0.043 | 0.002 | 0.041 | 0.001 |
| General head | 0.001 | - | 0.001 | - | 0.001 | - | 0.001 | - |
| Recharge | 0.002 | - | 0.011 | - | 0.005 | - | 0.003 | - |
| EVT | - | - | - | 0.006 | - | 0.018 | - | - |
| Drain | - | 0.043 | - | 0.045 | - | 0.039 | - | 0.042 |
| Total | 0.044 | 0.044 | 0.052 | 0.052 | 0.060 | 0.060 | 0.045 | 0.045 |

대수층으로부터 이용가능수량의 판단과 함께 집수정의 최대 채수량의 계산도 수행되었다. 관정에서의 최대채수량은 최대수위 강하량에 따라 결정된다. 또한 최대 수위 강하량을 결정 하므로서 관정을 가장 효율적으로 사용할 수 있다.

안전 채수량의 모의

안전 채수량의 결정은 대수층 관리에 필수 불가결한 것이다. 연구 지역에서 지하수 펌핑은 관개기 (7, 8월)에만 집중적으로 시행된다. 그러므로 본 연구에

서는 이 기간에 대수층을 최적 관리하고 과잉 양수를 방지하여 대수층의 파괴를 막기 위하여 지하수 이용가능량을 파악하였다.

댐 건설후 차수벽의 투수도에 따라 조건별로 모의한 결과 차수벽의 투수계수가 $3.92 \times 10^{-7} \text{m/s}$ (1984) 일때는 4개의 집수정으로부터 $184,460 \text{m}^3$ ($3024 \text{m}^3/\text{d}$)을, 기설관정으로부터 $69,335 \text{m}^3$ ($1,136 \text{m}^3/\text{d}$)을 양수 하였을때 인접 격자에서는 0.93m의 수위 강하가 일어난다. 또한 차수벽의 투수계수가 $5 \times 10^{-4} \text{m/s}$ (1993)일때는 $93,000 \text{m}^3$ 을 양수하였을때 0.89m의

수위강하가 일어나며 관개기간이 끝난후 4개월간 (9,10,11,12월)에 댐주위의 지하수위는 회복되고 연구지역의 중앙부에는 관개기간 전 수위와 10cm 정도의 변화를 보여준다.

이러한 모의 결과는 적절한 대수층 관리의 하한선을 제시해 줄 수 있다.

결 론

1. 이안 대수층계는 제4기 충적층과 박층의 백악기 화강암 풍화대층으로 구성된다. 유역 산지로부터의 함양량은 연중 일정하며(1.3백만 m^3 : 0.04 m^3/s), 댐건설후 지하수위가 상승하여도 변동이 없다.
2. 대수층계로 함양되는 관개용수의 효과를 연구하였고 침투량은 모델을 구축하여 결정하였다. 관개용수로부터의 함양량이 5~6월에는 4.3mm/d, 7~8월에는 1.7mm/d이다. 관개용수의 침투는 지하수위의 계절적 변동에 영향을 주는 중요한 인자이다.
3. 댐 건설후 7~8월 두달간 최적 양수량은 254,000 m^3 이었으나 댐의 차수기능 저하로 인해 댐의 투수계수가 $5 \times 10^{-4}m/s$ 일 때는 93,000 m^3 이다.
4. 1984년 댐위치의 종단면을 통한 지하수 유출량은 0.002 m^3/s 이며, 댐건설로 인해 지하수위가 상승하여 댐 상류 1.2Km까지 영향권을 형성하면서 평형을 이루었으나, 1993년의 지하수 유출량은 댐의 차수기능 저하로 0.025 m^3/s 이 된다.

참 고 문 헌

1. McDonald, M., G., and Harbaugh, A., Q., "A Modular Three dimensional Finite Difference Ground-Water Flow Model", U. S. Geological Survey, Open File Report 83-875, 1984, pp. 528.
2. Chow, "Handbook of Applied Hydrology", 1964, Chap. 13.9-13.32.
3. R., Allan Freeze and John A., Cherry, "Ground water", 1979, pp.63-67.
4. Wang, H., F., and Anderson, M., P., "Introduction to Groundwater Modeling W. H. Freeman and Company, San Francisco, 1982, pp.19-112.
5. 농업진흥공사, "이안 지하댐 事後評價調査 報告

書", 1985.

6. 김형식, "한국의 지질(선캠브리아기 지질)", 교학사, 1987, pp.17-47.
7. 정창희, "한국의 지질(제4기 지질)", 교학사, 1987, pp.49-156.
8. Walton, C., W., "Practical Aspects of Groundwater Modeling", National Water Well Association. Columbus, Ohio.
9. Jacob, 1950.
10. R., Allen Freeze and John A., Cherry, "Ground Water", Prentice Hall, 1986, pp.63-67.
11. Thornthwaite, C., W., "An Approach Toward a Rational Classification of Climate", Geographic Review, Vol.38, 1946, pp.55-94.
12. Blaney, H., F., and Criddle, W., D., "Determining Water Requirements in Irrigation Areas from Climatological and Irrigation Data, U. S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service Technical Paper 96.
13. Wilson, W., E., and Gerhart, J., M., "Simulated Effects of Groundwater Development on the Piezometric Surface of the Floridan Aquifer, West central Florida", USGS Prof. Paper 1217, 1982, pp.74

신방응

충북대학교 토목공학과

충북 청주시 개신동 산48번지 (우 361-763)

TEL : 0431) 61-2379

FAX : 0431) 275-2377

김희성

농어촌진흥공사 지하수사업처

경기도 의왕시 포일동 487 (우 430-600)

TEL : 0343) 20-3516

FAX : 0343) 21-2433