

## 보수적 지하수 개발가능량 산정 방안

정일문\* · 김남원\*\* · 이정우\*\*\* · 이정은\*\*\*\*

Chung, Il-Moon\*, Kim, Nam Won\*\*, Lee, Jeongwoo\*\*\*, Lee, Jeong Eun\*\*\*\*

### A Method of Estimating Conservative Potential Amount of Groundwater

#### ABSTRACT

By far, groundwater management has been conducted by 'safe yield' policy based on the estimation of annual average of groundwater recharge throughout the world. However, as groundwater recharge show spatiotemporal variation, dynamic analysis must be carried out to evaluate the sustainable groundwater resources. In this study, an integrated surface-groundwater model, SWAT-MODFLOW was used to compute the spatial distribution of groundwater recharge in Gyungju region. Frequency analysis is adopted to evaluate the existing values of potential amount of groundwater development which is made by the 10 year drought frequency rainfall multiplied by recharge coefficient. The conservative methods for estimating recharge rates of 10 year drought frequency in subbains are newly suggested and compared with the existing values of potential amount of groundwater development. This process will promote the limitations for existing precesses used for computing potential amount of groundwater development.

**Key words :** Groundwater recharge, Potential amount of groundwater, Frequency analysis, Conservative methods

#### 초록

지금까지 세계적으로 지하수 관리는 연간 지하수 함양량을 기반으로 한 안전채수량 정책에 의해 수행되어 왔다. 그러나 지하수 함양량은 시공간적으로 변동하므로 지속가능한 지하수자원을 평가하기 위해서는 동적 해석이 필요하다. 본 연구에서는 지표수-지하수 통합해석 모형인 SWAT-MODFLOW를 이용하여 경주지역의 지하수 함양량 공간분포를 산정하였다. 우리나라에서는 10년 빈도 갈수시 강수량에 함양계수를 곱하여 지역별 개발가능량을 산정하기에 본 연구에서는 기존 개발가능량을 평가하기 위해 빈도해석기법을 이용하였다. 소유역별 10년 빈도 갈수시의 지하수 함양량을 추정하는 보수적 방법을 제안하고 이를 기존 개발가능량과 비교하였다. 이같은 계산 절차를 통해 지하수 개발가능량을 산정하는 기존 절차의 한계를 합리적으로 제시할 수 있었다.

**검색어 :** 지하수 함양, 지하수 개발가능량, 빈도해석, 보수적 방법론

## 1. 서론

우리나라 지하수 관리의 목표는 공적자원인 지하수의 합리적인 개발이용 및 보전관리를 통해 지하수의 안정적인 수량수질을 확보하는 것이다(MOCT, 2007). 그런데 대수층은 무한대의 물공급원이 아니라 여러 가지 상황을 고려하여 최적으로 관리해야 할 대상으로 유역내의 정해진 조건에 대해서 법적, 사회적, 정치적 제약조건과 수질, 개발 및 운영비용등을 고려하여 현재 혹은 미래의 지하수

\* 정희원 · 한국건설기술연구원 연구위원 (Korea Institute of Civil and Building Technology · imchung@kict.re.kr)

\*\* 정희원 · 한국건설기술연구원 선임연구위원 (Korea Institute of Civil and Building Technology · nwkim@kict.re.kr)

\*\*\* 정희원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 수석연구위원 (Corresponding Author · Korea Institute of Civil and Building Technology · ljw2961@kict.re.kr)

\*\*\*\* 정희원 · 한국건설기술연구원 수석연구위원 (Korea Institute of Civil and Building Technology · jeus22@kict.re.kr)

Received July 21, 2014/ revised August 6, 2014/ accepted August 11, 2014

문제(고갈, 수질악화, 지반침하)를 야기하지 않는 범위에서 타당한 지하수량을 개발해야 한다(Chung and Kim, 2003).

미국에서는 지난 수십 년간 지하수 관리의 시행착오를 겪으면서, 지하수 관리의 기존방식인 안전채수량 개념의 한계를 인식하고 지속가능성의 관점에서 미래지향적인 지하수 관리방식을 채택하는 단계에 이르게 됐다. 우리나라도 선진국의 시행착오를 교훈삼아 보다 효율적인 지하수 관리방안의 개념을 도입할 필요가 있다(Chung et al., 2011).

우리나라에서는 평년 기준의 강수량을 적용하여 지하수 함양률을 산정하고, 이수안전도 측면을 고려하여 10년 빈도 갈수시 강수량을 적용하여 산정된 10년 빈도 갈수시 강수량에 함양률을 곱한 지하수 함양량을 지하수 개발가능량으로 정의하였다(MOCT, 2002). 10년 빈도 갈수시 지하수 함양량을 지하수 개발가능량으로 정의하고 있으므로 엄밀하게 지하수 함양률을 산정하기 위해서는 지하수 함양량 시계열 자료를 이용하여 빈도분석을 수행해야 한다. 그러나, 유역수문모델링을 수행하지 않는 한 지하수 함양량 시계열 자료를 관측에 의해 획득하는 것이 현실적으로 불가능하다. 따라서 실무에서는 관측이 용이한 강수량 자료를 이용하여 10년 빈도 갈수시 강수량을 산정하고 여기에 고정된 함양계수(함양률)를 곱해 간접적으로 10년 빈도 갈수시 지하수 함양량(개발가능량)을 산정하고 있다. 더욱이 이 방법에 있어서도 10년 빈도 갈수시 강수량을 산정하기 위해서 빈도분석 과정을 거쳐야 하나, 관행적으로 이를 생략하고 10년간 최저강수량을 10년 빈도 갈수시 강수량으로 사용하고 있다. 이 경우 어느 기간대의 10년을 설정하느냐에 따라 최저강수량이 크게 바뀌기 때문에 이 강수량을 사용하면 지하수 개발가능량값에 큰 차이가 발생할 수 있다.

또한, 지하수 개발가능량은 10년 빈도 갈수시 강수량에 함양계수(함양률)를 곱해 산정하고 있으나, 각종 지하수 기초조사 보고서 등 실무에서는 함양률을 곱할 때 평균치 개념의 함양률을 사용하고 있다. 즉, 10년 빈도에 해당하는 함양률이 아니라 평균 함양률을 사용함으로써 함양률이 크게 적용될 가능성이 높다.

본 연구에서는 유역수문모형인 SWAT-MODFLOW (Kim et al., 2008)를 이용하여 소유역별 함양량을 구한 후, 현재 이용되고 있는 방법론과 빈도해석을 이용한 새로운 보수적 지하수 개발가능량 산정 방법론을 비교 검토하는 방식으로 경주지역의 지하수 개발가능량을 평가하였다.

## 2. 연구 대상 지역 및 모형의 구축

### 2.1 연구 대상 유역

경주시를 남에서 북으로 관류하는 형산강 유역과 낙동강 지류의 상류 유역 및 태화강 유역의 일부를 포함한 유역을 연구의 대상지역

으로 설정하였다(Fig. 1). 전체 유역면적 1,324km<sup>2</sup>이며, 형산강 유역이 전체의 약 70%로 대부분을 차지하고 있다. 경주시를 남에서 북으로 관류하는 형산강 본류에 위치한 모아, 안강 수위관측소 지점을 지나 바다로 유출되는 출구(소유역 18번), 경주시 남서쪽에 포함된 낙동강 지류 유역의 출구(소유역 5번), 경주시 남쪽에 포함된 태화강 상류 유역의 출구(소유역 4번), 그리고 동해안에 인접한 7개 지점(소유역 1, 2, 3, 12, 13, 14, 28번) 등을 대상유역의 출구점으로 설정하였고, 모형 구동을 위해서 총 30개의 소유역으로 세분하였다.

## 2.2 SWAT-MODFLOW 모형의 구축

### 2.2.1 모형의 개요

SWAT-MODFLOW (Kim et al., 2008)는 완전연동형 지표수-지하수 통합모형으로 토지이용과 토양특성, 기상 특성 등을 반영하여 강수로부터 지표유출량, 측방유출, 지하수 유출성분을 계산하고, 토양수분, 지하수 함양, 증발산 등의 성분을 산정할 수 있다(Fig. 2). 이는 미 농무성에서 개발한 SWAT (Arnold et al., 1993) 모형과 지하수 해석에 많이 적용되고 있는 MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1988) 모형이 통합된 것으로, SWAT 모형으로부터 산정된 토양층의 함양량 및 지표수 손실량이 MODFLOW 지하수 해석모형의 함양량 조건으로 설정된다. 한편 MODFLOW 모형으로부터 산정된 지하수 유출량과 SWAT 모형으로부터 산정된 지표 및 중간유출량이 합해져서 총 유출량이 산정된다.

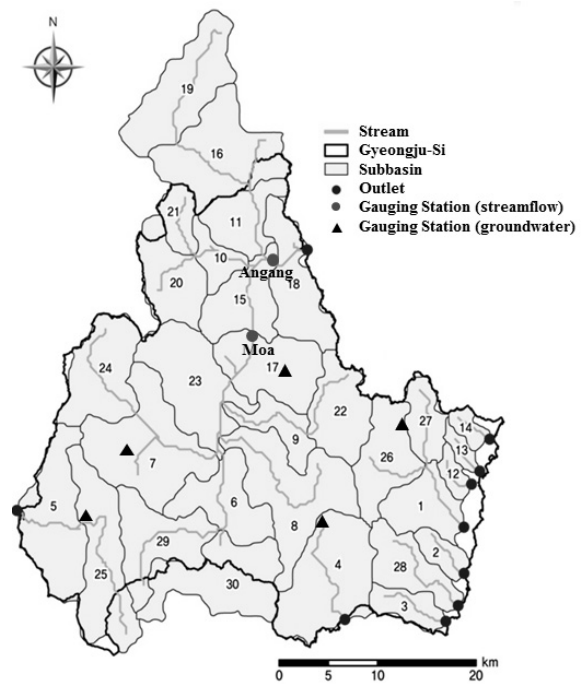


Fig. 1. Study Area and Watershed Delineation

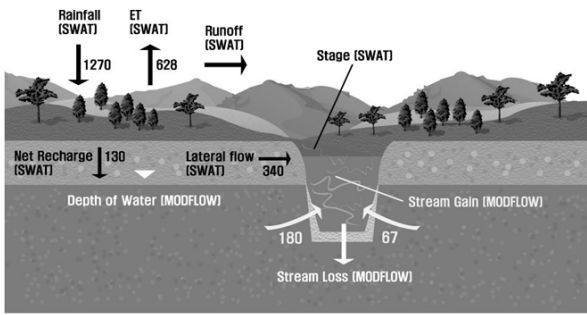


Fig. 2. Integrated Surface Water-Groundwater Model SWAT-MODFLOW (Kim et al., 2008)

### 2.2.2 수문기상정보

모의에 필요한 강우량, 기온, 풍속, 일사량, 상대습도 등의 기상자료는 대상유역 내에 위치한 포항, 울산, 영천관측소의 자료를 이용하여 2002년부터 2011년까지의 10년간의 기상자료를 구축하였다. 연평균 일사량은  $10.4\sim 15.7\text{MJ/m}^2$ 이며, 연평균 기온은  $8.2\sim 20.5^\circ\text{C}$ , 연평균 상대습도는  $50.0\sim 69.1\%$ 이고, 연평균 풍속은  $1.6\sim 2.9\text{m/s}$ 로 기록되었다. 대상유역에 영향을 미치는 강우관측소는 울산, 포항, 가사, 지동, 영천댐, 안계댐을 포함한 37개 관측소가 해당되며, 지점강우자료를 Thiessen의 가중법을 적용하여 각 유역에 해당하는 면적우량을 산정하여 입력하였다. 2002년부터 2011년까지 대상유역의 강수량은 2009년에 최저  $908.7\text{mm}$ 에서 2003년에 최대  $1912.7\text{mm}$  발생하였으며, 10년 평균치는 약  $1,259\text{mm}$ 이다. 한편, 지표수-지하수 통합모형인 SWAT-MODFLOW를 사용할 때 유출량의 보정과 검증에 위해 신뢰성 있는 장기간의 연속적인 하천유량 관측자료가 필요하다. 대상유역의 대부분을 차지하고 있는 형산강 유역 본류에 5개의 하천유량관측지점(경주2, 모아, 기계2, 안강, 부조)이 있으며, 이 중 저유량 관측자료의 품질이 비교적 양호한 하류쪽에 위치한 안강과 모아 지점을 모형의 검보정을 위한 기준점으로 설정하였다.

### 2.2.3 공간정보

모형의 지형자료를 구축하기 위해서 유역의 형상을 나타내는 수치표고모델(DEM), 유역내 토지이용상황을 나타내는 토지이용 또는 토지피복도, 그리고 토양에 대한 특성을 나타내는 토양도 등의 GIS 데이터를 필요로 한다. 본 연구에서는 모형의 계산시간, 모형결과의 정확도 등을 판단하여 30m 공간해상도를 가지는 DEM을 300m 공간해상도로 가공하여 사용하였다. 대상유역의 평균표고는 소유역별로 낮게는  $\text{El.}16.0\text{m}$ 부터 높게는  $\text{El.}567.0\text{m}$ 까지로 유역 전반적으로 기복이 비교적 심하다. 토지이용도의 경우 다양한 토지이용상태를 반영할 수 있도록 중분류(1:25,000) 토지이용도를 사용하였다. 산림지역이 약 69.3%로 가장 많이 분포하는 것으로

나타났으며, 논과 밭을 포함한 농경지가 약 22.2%, 도시지역이 약 4.7% 정도인 것으로 나타났다. 토양도는 농업과학기술원의 토양도 전산화 사업을 통해 구축된 1:25,000 축척의 정밀토양도를 사용하였다. 대상유역 내에는 89개의 토양통이 분포하고 있으며, 무등 토양통이 가장 많이 분포해있고 이어서 삼각, 고산, 대구 토양통 순이다.

### 2.2.4 지하수 정보

지하수 유동해석을 위하여 격자크기를 DEM 사이즈와 같은 300m로 하여 총  $198 \times 151$ 개의 격자망을 생성하였다. 대상지역의 수리지질을 1개의 충적층 및 1개의 투수성 암반층으로 단순화하였으며, 충적층의 경우에는 자유면 대수층으로 암반층은 피압/자유면 대수층 변환층으로 모델링을 실시하였다. 충적층 및 암반층의 공간적인 분포는 해당유역 내에 포함되는 국가지하수 관측공, 지자체 지하수 관측공, 해당지역 내 시추 및 착정 조사자료 등을 이용하여 각층의 바닥고를 크리깅 기법을 이용하여 공간적으로 분포시켰다. 모델링을 위한 대수층의 수리전도도는 충적과 암반층에 해당하는 양수시험 측정값을 이용하여 크리깅을 통해 수리전도도 분포도를 작성하여 모형의 초기 입력자료로 이용하였으며, 모형의 보정을 통해 수리전도도를 추정하였다. 모형에 입력한 각 층의 수리전도도는 충적층에 대해서는  $0.002\sim 12.14\text{m/day}$ 를, 암반층에 대해서는  $0.00001\sim 0.71\text{m/day}$ 이다. 또한 수리전도도 입력시 이방성에 관한 자료는 전무하므로 수평방향으로 수리전도도는 등방성인 것으로 가정하였다. 수직 수리전도도는 전 구간에 대해 수평수리전도도의 1/10에 해당하는 것으로 가정하여 적용하였다.

경계조건은 유역경계를 기준으로 분수령을 따라 불투수 경계로 설정하였으며, 유역 동쪽의 동해안과 맞닿은 지역은 일정수두경계(Constant head boundary)로 설정하고 그 수위는 관측 수위와 일치시켰다. 또한 하천경계는 Fig. 1의 하천망을 지하수 유출입이 발생하는 하천셀로 지정하여 설정하였다. 이 하천셀에서 시간중속 수두 경계조건을 부여하여 SWAT으로부터 일단위로 모의된 하천 수위와 MODFLOW에서 계산된 지하수위의 수위차에 따라 지하수 유출입량이 결정되도록 하였다. 경주지역 지하수기초조사사업(MOCT, 2012)을 통해 조사된 총 3,033개의 관정의 양수량을 입력하였다.

## 3. 모형의 검보정

### 3.1 지표수 유출량

SWAT-MODFLOW 모형을 대상유역에 적용할 경우, 산정된 주요 수문인자의 결과를 가용한 관측값과 비교하여 매개변수의 보정 및 모형의 검증을 실시, 모델링 결과의 타당성을 입증한다.

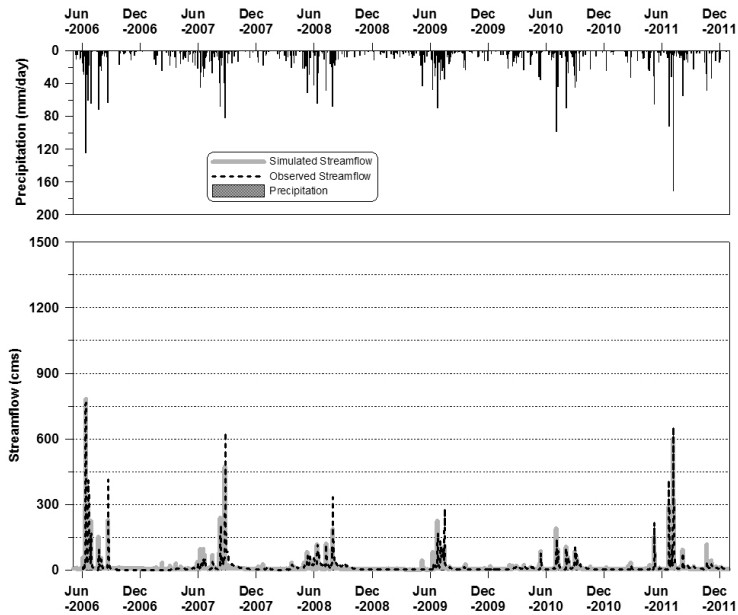


Fig. 3. Comparison of the Simulated and Observed Streamflow at Moa Gauging Point for Calibration Period of 2006 to 2011

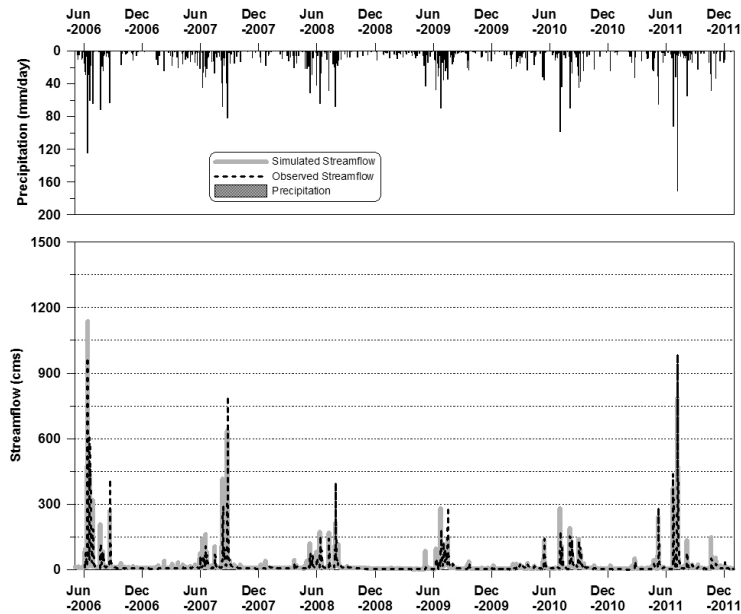


Fig. 4. Comparison of the Simulated and Observed Streamflow at Angang Gauging Point for Calibration Period of 2006 to 2011

이를 위해서 주요 지점의 하천 유출량과 지하수위의 검증을 위해서 해당되는 지점의 관측 자료와 비교하였다. 함양량은 현장 관측 자료가 전무하여 관측값과 모의값 간의 직접적인 비교가 불가능하므로 일련의 간접적인 검증 과정을 활용한다. 첫 번째 과정은 총 유출량의 검증인데, 강수로부터 증발산을 제외한 총 유출량의 모의값이 관측값과 높은 상관성을 가질 경우, 유역의 모의유출성분(지표, 중간 및 기저유출성분)에 대한 타당성을 확인할 수 있다. 이는

장기적 관점에서 기저유출량과 높은 상관성을 가지는 함양량의 정량적 타당성 또한 입증한다고 볼 수 있다.

경주지역의 지하수 함양량을 산정하기 위하여 1995년부터 2011년까지 총 17년의 일단위 수문량을 SWAT-MODFLOW 모형을 통해 모의하였다. 모의기간 중 1995년부터 2001년까지는 모델링에서 안정화가 진행되는 기간(warming up period)로 간주하여 분석에서 제외하고 나머지 10년 기간을 분석 대상으로 하였다. 또한

비교적 최근 관측 유량자료의 품질이 양호한 2006년 7월~2011년  
의 기간을 검보정 기간으로 설정 하였다. 수위관측소가 있는 모아와  
안강 지점의 관측유출량과 모의유출량을 비교하여 Figs. 3 and  
4에 나타내었다. 관측과 모의치간의 결정계수( $R^2$ )는 모아와 안강  
지점 각각 0.72, 0.75로 산정되어 모의유출량이 관측치를 잘 모사하  
였다.

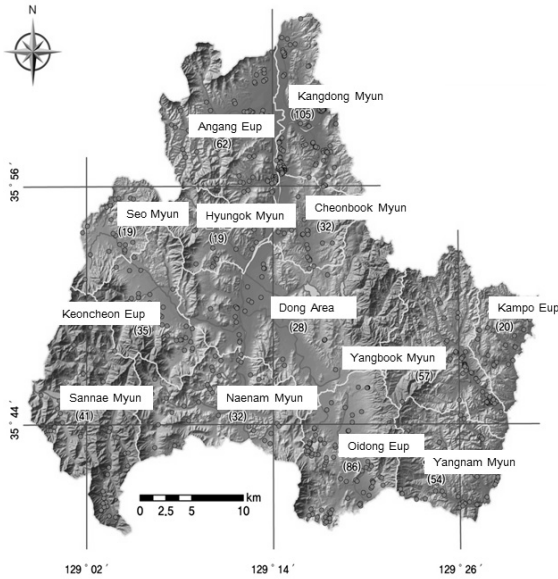


Fig. 5. Groundwater Level Observation Points

### 3.2 지하수위

지하수위의 검보정은 대수층 매개변수 자료를 변화시키면서  
보정을 수행하였다. 지하수 흐름계를 결정하는 주요 수리 특성인자  
로서 대수층의 수리전도도 및 저류계수, 하천 바닥 퇴적층의 전도계  
수, 대수층 두께, 경계조건 등이 있다. 기초조사를 통해 획득된  
시추자료와 양수시험 자료를 통하여 얻은 대수층 두께, 수리전도도  
의 자료를 크리깅 보간을 통해 생성시켰으며, 자료가 전무한 하천  
바닥 퇴적층의 전도계수와 대수층의 저류계수 값 등은 모델 보정을  
위한 매개변수로 활용되었다. 모형의 보정을 위해 국가지하수 관측  
망의 관측지하수위 자료와 경주기초조사사업에서 수행한 장주기  
관측지하수위(2011년 6월)자료를 이용하였다. Fig. 5는 지하수위  
관측지점을 도시한 것이다.

Fig. 6은 경주시 590개의 관측 지하수위와 모의 지하수위 분포의

Table 1. Statistics between Simulated and Observed Groundwater Levels

| Statistics                             | Value  |
|--|--------|
| Mean absolute error, MAE               | 18.650 |
| Relative mean absolute error, RMAE     | 0.175  |
| Root mean square error, RMSE           | 23.850 |
| Relative root mean square error, RRMSE | 0.223  |
| Correlation coefficient, R             | 0.883  |
| Determination coefficient, $R^2$       | 0.772  |

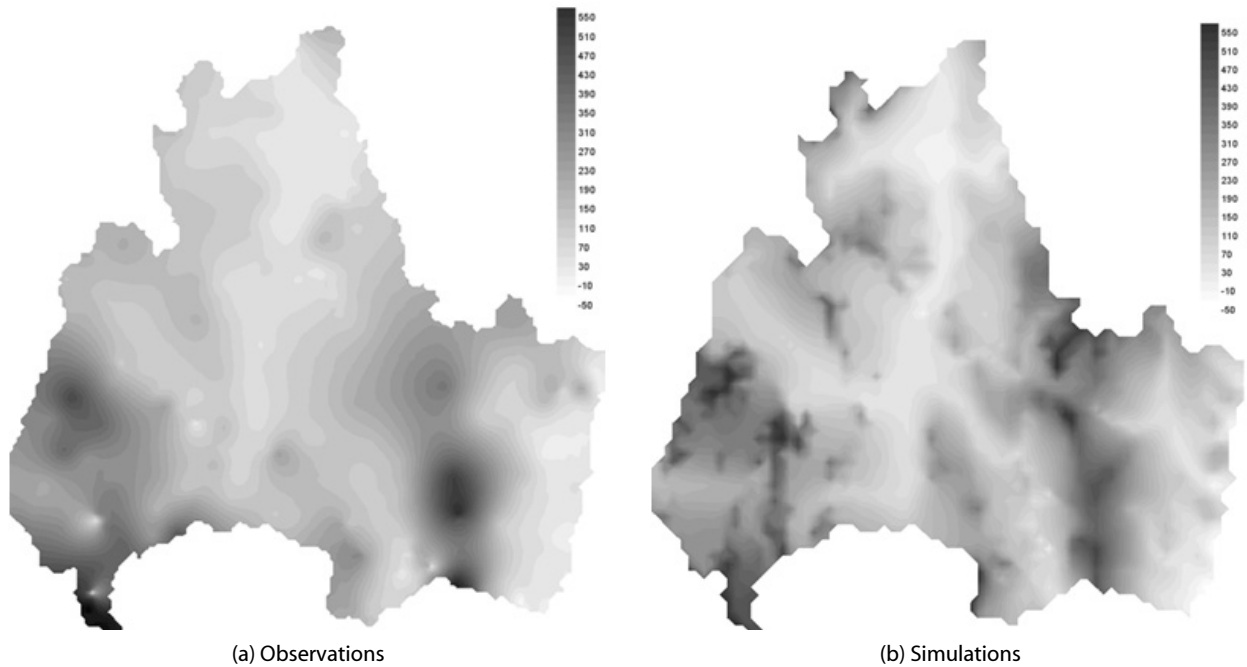


Fig. 6. Comparison of the Simulated and Observed Groundwater Levels Distributed by Kriging Method (June 2011)

보정결과의 등수위선도를 나타낸 것으로 공간적인 분포 양상을 비교적 잘 묘사하고 있는 것을 알 수 있다. Table 1은 관측 지점에서 모의된 지하수위의 통계적 타당성을 나타낸 것으로 전반적으로 양호한 적합결과를 나타내고 있다. 특히 결정계수( $R^2$ )는 0.88로 매우 높게 나타났다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 소유역별 수문성분 산정

지표수-지하수 통합모형 SWAT-MODFLOW를 경주시를 포함하는 대상유역 적용하여 증발산량, 지하수함양량, 유출량 등의 수문성분량을 산정하였다. Table 2는 2002년부터 2011년까지 10년 동안의 모의된 수문성분량을 정리한 것으로 유출물은 연평균 강수량 대비 35.1%, 증발산물은 41.0%, 그리고 함양률은 20.1%인

것으로 분석되었다. 특히 함양률은 작게는 8.9%에서 크게는 36.8%까지 소유역별로 큰 차이를 보였다. 또한 소유역 16, 19, 30을 제외한 부분이 경주시가 포함되는 소유역으로 평균적으로 20.1%보다 약간 작게 산정되었다.

##### 4.2 표준유역별 개발가능량 산정

SWAT-MODFLOW 모형은 격자단위로 함양량을 계산할 수 있어 원하는 지역별로 공간평균값을 쉽게 산정할 수 있다. Fig. 7은 연구대상유역의 격자별로 계산된 연평균 함양량을 나타낸 것으로 적색 경계로 표기된 표준유역별로 평균 함양량을 산정하였고 이를 기준으로 표준유역별 개발가능량을 산정하였다.

지하수 개발가능량은 서론에서 기술한 바와 같이 현재 실무에서 보편적으로 활용하고 있는 방법 1과 개선된 방법 3가지로 총 4가지 방법을 모두 적용하여 산정하였다.

Table 2. Simulated Annual Average Hydrological Components (2002-2011)

| Subbasins | Area (km <sup>2</sup> ) | Precipitation (mm) | Water yield (mm) | Evapotranspiration (mm) | Recharge (mm) | Recharge/precipitation (%) |
|-----------|-------------------------|--------------------|------------------|-------------------------|---------------|----------------------------|
| 1         | 40.14                   | 1,308              | 419              | 554                     | 298           | 22.8                       |
| 2         | 15.84                   | 1,223              | 404              | 523                     | 259           | 21.2                       |
| 3         | 21.69                   | 1,239              | 322              | 521                     | 355           | 28.7                       |
| 4         | 88.20                   | 1,248              | 396              | 511                     | 302           | 24.2                       |
| 5         | 77.13                   | 1,144              | 391              | 516                     | 165           | 14.4                       |
| 6         | 54.99                   | 1,264              | 389              | 515                     | 298           | 23.6                       |
| 7         | 100.26                  | 1,077              | 395              | 504                     | 130           | 12.1                       |
| 8         | 93.69                   | 1,258              | 373              | 514                     | 346           | 27.5                       |
| 9         | 29.07                   | 1,285              | 415              | 547                     | 299           | 23.3                       |
| 10        | 19.35                   | 1,187              | 580              | 471                     | 117           | 9.9                        |
| 11        | 38.70                   | 1,190              | 516              | 523                     | 136           | 11.4                       |
| 12        | 9.99                    | 1,416              | 460              | 536                     | 402           | 28.4                       |
| 13        | 7.92                    | 1,431              | 436              | 534                     | 443           | 31.0                       |
| 14        | 9.72                    | 1,431              | 327              | 537                     | 527           | 36.8                       |
| 15        | 46.98                   | 1,301              | 435              | 528                     | 310           | 23.8                       |
| 16        | 88.65                   | 1,147              | 316              | 508                     | 285           | 24.8                       |
| 17        | 64.53                   | 1,369              | 519              | 541                     | 287           | 21.0                       |
| 18        | 57.60                   | 1,375              | 410              | 560                     | 376           | 27.3                       |
| 19        | 76.05                   | 1,180              | 355              | 524                     | 213           | 18.1                       |
| 20        | 49.68                   | 1,184              | 534              | 486                     | 134           | 11.3                       |
| 21        | 20.25                   | 1,172              | 509              | 488                     | 130           | 11.1                       |
| 22        | 49.59                   | 1,410              | 600              | 547                     | 187           | 13.3                       |
| 23        | 77.85                   | 1,176              | 487              | 503                     | 162           | 13.8                       |
| 24        | 67.77                   | 1,135              | 525              | 495                     | 101           | 8.9                        |
| 25        | 79.11                   | 1,332              | 484              | 535                     | 200           | 15.0                       |
| 26        | 52.38                   | 1,368              | 459              | 553                     | 303           | 22.1                       |
| 27        | 26.19                   | 1,428              | 521              | 547                     | 331           | 23.2                       |
| 28        | 41.67                   | 1,222              | 353              | 514                     | 306           | 25.0                       |
| 29        | 60.57                   | 1,447              | 570              | 541                     | 240           | 16.6                       |
| 30        | 77.49                   | 1,528              | 710              | 525                     | 234           | 15.3                       |
| Average   | -                       | 1,270              | 445              | 521                     | 260           | 20.1                       |

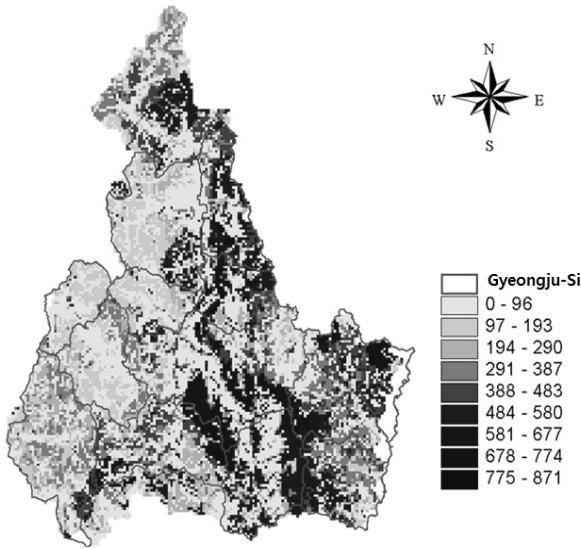


Fig. 7. Annual Groundwater Recharge in Study Watershed

방법 1 : 10년 빈도 갈수시 강수량(빈도해석 미수행) × 연평균 함양률

방법 2 : 10년 빈도 갈수시 강수량(빈도해석 수행) × 연평균 함양률

방법 3 : 10년 빈도 갈수시 강수량(빈도해석 수행) × 조정 함양률

방법 4 : 10년 빈도 갈수시 함양률(빈도해석 수행)

첫 번째 방법은 현재 실무에서 사용하고 있는 방법으로 강수량을 빈도해석하지 않고 10년 최저강수량을 택하여 연평균 함양률을 곱해 10년 빈도 갈수시 함양률을 산정하는 방법이고, 두 번째 방법은 강수량을 빈도해석함으로써 첫 번째 방법의 10년 최저강수량 대신 10년 빈도 갈수시 강수량을 적용한 방법이고, 세 번째 방법은 두 번째 방법의 연평균 함양률 대신 10년 빈도 강수량에 해당하는 함양률을 적용한 방법이며, 그리고 네 번째 방법은 함양량 시계열 자료를 모의하여 이를 빈도해석하는 방법이다. 첫 번째에서 세 번째로 갈수록 보다 보수적이고 엄격한 방법이라 할 수 있으며, 네 번째는 함양량 모의자료를 준 관측값으로 간주하고 직접 이용하였기에 가장 실제값에 근접한 방법이라 볼 수 있다.

Table 3은 방법 1을 적용한 결과로, 10년 빈도 갈수시 강수량 10년 최저 강수량 적용에 연평균 함양률을 곱해 개발가능량을 산정한 것이다. 연구대상구역의 개발가능량은 함양량 257mm/년의 약 72.7%인 187mm/년로 산정되었으며, 이는 강수량 대비 14.1%에 해당된다. 소유역별 개발가능량은 강수량 대비 6.1%에서 21.2%의 범위를 나타내었다.

다음으로 강수량과 함양량 자료에 대한 지역빈도해석을 수행하였다. 확률분포형으로는 Extreme-Type III 분포를 이용하였으며, 매개변수 추정방법으로는 Hosking (1990)의 L-moment 방법을 이용하였다. Table 4에는 저계열 빈도해석을 통하여 산정된 각 소유역별 10년 빈도 강수량과 함양량 산정 결과를 나타낸 것이다. Table 4에서 10년 빈도 함양량은 방법 4의 결과를 의미하며, 10년

Table 3. Potential Amount of Groundwater Development from Method 1

| Watershed      | Area (km <sup>2</sup> ) | Precipitation (mm) | Total water resource (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /yr) | Groundwater recharge                        |          | Potential amount of GW development          |          |
|----------------|-------------------------|--------------------|---|---|----------|---|----------|
|                |                         |                    |   | Amount (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /yr) | Rate (%) | Amount (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /yr) | Rate (%) |
| Total          | 1,324.43                | 1,258              | 1,665,756   | 322,791                                     | 19.4     | 234,197                                     | 14.1     |
| Unmun dam      | 142.33                  | 1,227              | 174,639   | 26,046                                      | 14.9     | 19,142                                      | 11.0     |
| Upper Hyungsan | 135.39                  | 1,382              | 187,109   | 37,368                                      | 20.0     | 25,794                                      | 13.8     |
| Daecheon       | 163.45                  | 1,098              | 179,468   | 19,941                                      | 11.1     | 13,175                                      | 7.3      |
| Namcheon       | 90.60                   | 1,251              | 113,341   | 29,898                                      | 26.4     | 21,356                                      | 18.8     |
| Deokdong       | 53.71                   | 1,381              | 74,174  | 9,883                                       | 13.3     | 7,054                                       | 9.5      |
| Bukcheon       | 33.94                   | 1,266              | 42,968  | 10,148                                      | 23.6     | 7,551                                       | 17.6     |
| Chilpyung      | 100.80                  | 1,181              | 119,045   | 11,290                                      | 9.5      | 7,243                                       | 6.1      |
| Gigye          | 38.15                   | 1,206              | 46,009  | 9,042                                       | 19.7     | 5,986                                       | 13.0     |
| Angang         | 177.05                  | 1,265              | 223,968   | 42,846                                      | 19.1     | 27,708                                      | 12.4     |
| Lower Hyungsan | 52.58                   | 1,358              | 71,404  | 19,349                                      | 27.1     | 14,639                                      | 20.5     |
| Dongcheon      | 85.78                   | 1,240              | 106,367   | 25,134                                      | 23.6     | 19,721                                      | 18.5     |
| Daejongcheon   | 163.85                  | 1,350              | 221,198   | 55,054                                      | 24.9     | 43,719                                      | 19.8     |
| Haseocheon     | 64.05                   | 1,217              | 77,949  | 18,831                                      | 24.2     | 15,159                                      | 19.4     |
| Suryumcheon    | 22.75                   | 1,236              | 28,119  | 7,963                                       | 28.3     | 5,950                                       | 21.2     |

Table 4. Precipitation and Recharge Rate for 10year Drought Frequency

| Watershed      | 10 year mean precipitation (mm) | 10 year frequency(mm) |          |
|----------------|---------------------------------|-----------------------|----------|
|                |                                 | Precipitation         | Recharge |
| Unmun dam      | 1,227                           | 872                   | 101      |
| Upper Hyungsan | 1,382                           | 982                   | 152      |
| Daecheon       | 1,098                           | 781                   | 68       |
| Namcheon       | 1,251                           | 890                   | 183      |
| Deokdong       | 1,381                           | 983                   | 103      |
| Bukcheon       | 1,266                           | 901                   | 166      |
| Chilpyung      | 1,181                           | 840                   | 62       |
| Gigycheon      | 1,206                           | 858                   | 131      |
| Angang         | 1,265                           | 900                   | 134      |
| Lower Hyungsan | 1,358                           | 969                   | 205      |
| Dongcheon      | 1,240                           | 884                   | 163      |
| Daejongcheon   | 1,350                           | 962                   | 187      |
| Haseocheon     | 1,217                           | 868                   | 164      |
| Suryumcheon    | 1,236                           | 878                   | 193      |

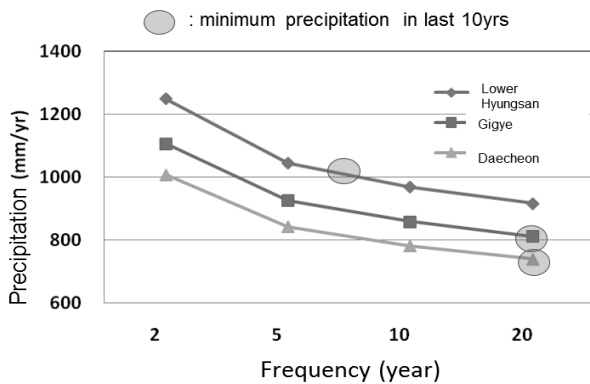


Fig. 8. Precipitation According to Frequency

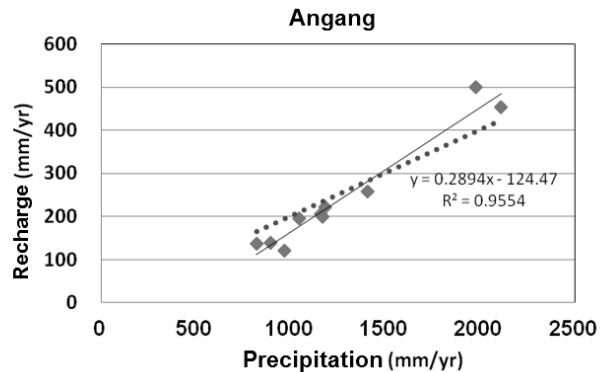
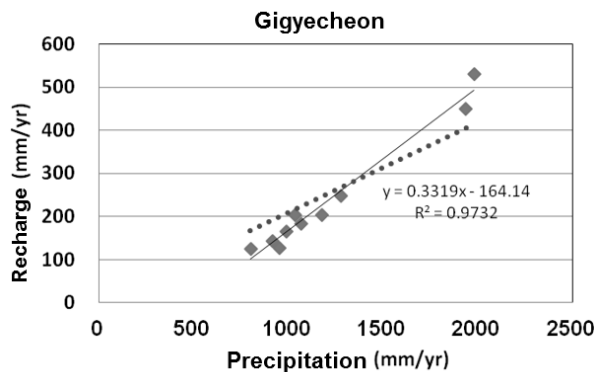


Fig. 9. Relationship between Precipitation and Recharge

빈도 강수량값은 방법 2와 방법 3으로 개발가능량을 산정할 때 이용하였다.

개발가능량은 10년빈도 강수량에 함양률을 곱해 산정하는데 관행적으로 10년 최저강수량을 사용하고 있다. 이럴 경우 10년을 어느 기간대를 설정하느냐에 따라 최저강수량이 바뀌어 개발가능량에 큰 차이가 발생할 수 있다. 이러한 차이를 줄이기 위해서는 빈도해석 과정을 거쳐야 한다. 일례로 Fig. 8과 같이 빈도해석을 통한 10년 빈도 강수량은 형산강 하류유역은 약 980mm/년, 기계천 유역은 약 860mm/년, 대천유역은 약 790mm/년이나, 10년 최저강수량은 그림에서 파란색으로 표시된 부분과 같이 빈도해석 결과 보다 크거나 작다. 형산강 하류유역의 10년 최저강수량은 5년 빈도 강수량에 해당되어 10년 빈도 강수량에 비해 크므로 개발가능량이 과다하게 산정되게 되고, 반대로 기계천 및 대천 유역은 10년 최저강수량이 20년 빈도 강수량에 해당되어 개발가능량이 과소하게 산정되는 문제가 있다. 이처럼 10년 빈도 강수량으로 10년 최저치 보다는 통계적 빈도해석을 통해 정교하게 산정해야 한다.

개발가능량은 앞선 10년 빈도강수량에 함양률을 곱해 산정하는 것으로 되어있는데, 실무(각종 지하수 기초조사 보고서)에서는 함양률을 곱할 때 평균치개념의 함양률(10년 최저강수량에 대한 함양률이 아닌 10년 평균강수량에 대한 함양률)을 사용하고 있다. 그러나, Fig. 9와 같이 강수량과 함양률 간의 관계를 도시하면 상호간의 관계가 선형적으로 변하고는 있으나, 함양률을 강수량으로 나눈 함양률의 값은 일정(함양률이 같을 경우 직선 점선으로 나타나야 함. 절편 0)하지 않다. 강수량이 작아지면 함양률 또한 작아지는 현상을 나타내고 있으며, 종축의 절편이 0이 아닌 것에서 알 수 있듯이 일정 강수량 이상에서만 함양률이 발생하는 임계조건이 존재한다.

또한 함양률에 있어서도 기계천 유역의 경우 평균함양률은 약 19.7%이지만, 강수량이 2,000mm일 때 함양률은 약 500mm로 함양률은 25%, 강수량이 1,000mm일 때의 함양률은 약 168mm로 함양률은 16.8%가 되는 등 강수량 규모에 따라 함양률이 달라지는



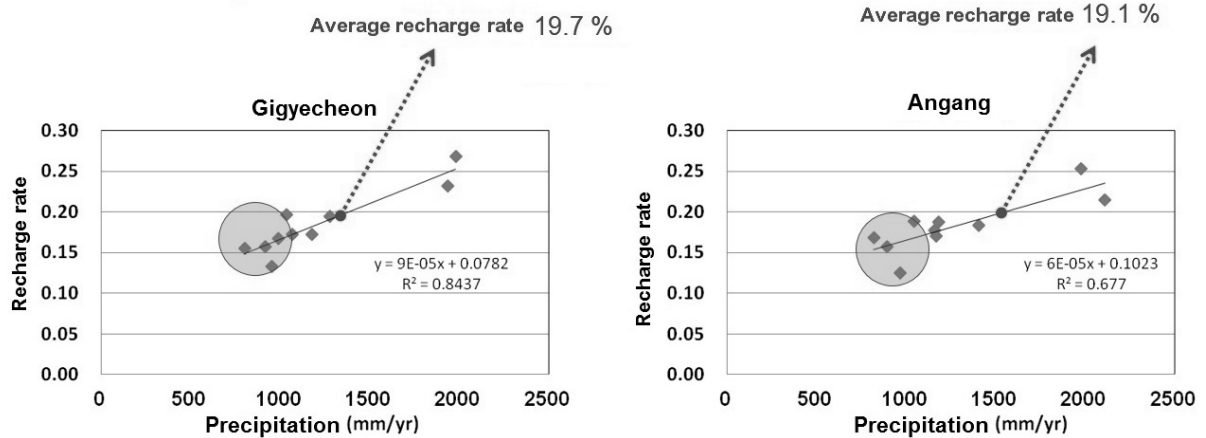


Fig. 10. Average Recharge Rate and Adjusted Recharge Rate

Table 5. Comparison of Estimation Methods

| Watershed      | Precipitation (mm) |                 |                   | Recharge rate (%) |          | Potential amount of groundwater development (mm) |          |          |          |        |     |        |
|----------------|--------------------|-----------------|-------------------|-------------------|----------|--|----------|----------|----------|--------|-----|--------|
|                | 10 year average    | 10 year minimum | 10 year frequency | average           | adjusted | method 1   | method 2 | method 3 | method 4 |        |     |        |
| Unmun dam      | 1,227              | 902             | 872               | 14.9              | 12.7     | 135  | 130      | -3.3%    | 111      | -17.8% | 101 | -24.8% |
| Upper Hyungsan | 1,382              | 954             | 982               | 20.0              | 17.7     | 190  | 195      | 2.9%     | 174      | -8.3%  | 152 | -19.9% |
| Daecheon       | 1,098              | 725             | 781               | 11.1              | 8.1      | 81   | 87       | 7.6%     | 63       | -21.7% | 68  | -16.2% |
| Namcheon       | 1,251              | 894             | 890               | 26.4              | 20.4     | 235  | 234      | -0.4%    | 182      | -22.4% | 183 | -22.3% |
| Deokdong       | 1,381              | 986             | 983               | 13.3              | 12.0     | 130  | 130      | -0.3%    | 118      | -9.7%  | 103 | -21.3% |
| Bukcheon       | 1,266              | 942             | 901               | 23.6              | 20.3     | 222  | 212      | -4.4%    | 183      | -17.6% | 166 | -25.3% |
| Chilpyung      | 1,181              | 758             | 840               | 9.5               | 8.1      | 72   | 80       | 10.8%    | 68       | -5.8%  | 62  | -14.6% |
| Gigyecheon     | 1,206              | 798             | 858               | 19.7              | 15.5     | 153  | 165      | 7.4%     | 133      | -13.1% | 131 | -14.5% |
| Angang         | 1,265              | 818             | 900               | 19.1              | 15.7     | 156  | 172      | 10.0%    | 141      | -10.0% | 134 | -14.2% |
| Lower Hyungsan | 1,358              | 1,027           | 969               | 27.1              | 23.0     | 278  | 262      | -5.7%    | 223      | -20.0% | 205 | -26.4% |
| Dongcheon      | 1,240              | 973             | 884               | 23.6              | 18.7     | 229  | 208      | -9.1%    | 165      | -28.0% | 163 | -28.8% |
| Daejongcheon   | 1,350              | 1,072           | 962               | 24.9              | 22.3     | 266  | 239      | -10.2%   | 215      | -19.4% | 187 | -29.7% |
| Haseocheon     | 1,217              | 980             | 868               | 24.2              | 20.4     | 237  | 210      | -11.4%   | 177      | -25.1% | 164 | -30.7% |
| Suryumcheon    | 1,236              | 924             | 878               | 28.3              | 21.9     | 261  | 248      | -5.0%    | 192      | -26.3% | 193 | -26.0% |
| Total          | 1,258              | 913             | 900               | 19.4              | 16.1     | 177  | 173      | -1.9%    | 145      | -17.9% | 135 | -23.6% |

특징을 나타내고 있다(Fig. 10). 따라서 기계천 유역의 빈도해석을 통한 10년 빈도 강수량 860mm에 대해서는 함양률이 더 작아지게 된다. 따라서 강우량과 함양률 간의 관계가 일정하지 않고 강우량이 작을수록 함양률 값이 작기 때문에 현행 평균함양률을 곱하게 되면 개발가능량이 크게 산정되는 문제가 있다. 따라서 방법 3에 의거 함양률을 10년 빈도강수량에 맞게 조정해서 사용해야 한다. 물론 가장 이상적인 방법은 방법 4와 같이 함양률 값 자체를 빈도해석해서 10년빈도 함양률을 산정하는 것이다.

각각의 방법별로 개발가능량을 산정해서 Table 5에 비교하여 나타내었다. Table 5에서와 같이 빈도해석을 통한 10년 빈도강수량

을 산정한 방법 2와 현행 관행(방법 1)간의 개발가능량 산정 결과는 유역전체에 대해 평균적으로는 큰 차이를 보이고 있지 않지만, 소유역별로는 큰 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다. 조정함양률을 사용한 방법 3의 경우는 방법 1에 비해 소유역별로 작게는 8.3% 부터 크게는 28% 만큼, 전체적으로는 약 17.9%만큼 작게 산정되는 것을 확인할 수 있다. 방법 3의 결과는 가장 이상적인 방법인 함양률 자체를 빈도해석한 결과인 방법 4와 큰 차이를 보이고 있지 않다. 방법 4을 참값으로 간주하면, 방법 3이 가장 근접한 결과를 보이고 있어 개발가능량 산정 방법의 방법 3의 개선효과가 가장 우수한 것으로 판단된다.

## 5. 결론

현재 우리나라에서는 통상 10년 빈도 갈수시의 연간 지하수 함양량을 개발가능량으로 정의하고 있다. 그리고 실무에서는 연평균 함양률을 산정하여 이를 최근 10년간의 최저강수량과 곱해서 개발가능량을 산정하고 있다. 하지만, 일반적으로 강수량이 적은 경우 함양률이 적어지는데 그 관계가 선형에 가까울지라도 절편값(함양량 발생 임계 강수량 존재)을 가지기 때문에 강수량이 매우 작은 갈수년인 경우에는 함양률이 평균치보다 작게 산정된다. 따라서 함양률은 연 평균값이 아닌 10년 빈도강수량에 맞게 다시 조정해서 사용해야 한다. 따라서 본 연구에서는 현행 실무에서 적용하고 있는 개발가능량 산정 방법보다 더 보수적이고 엄격한 방법을 제시하고 기존 방법에 의한 결과와 비교를 수행하였다. 경주지역을 대상으로 개발가능량 산정 방식 4가지를 적용한 결과, 빈도해석을 수행한 경우와 그렇지 않은 경우, 소유역별 편차가 크게 나타나 강수량의 빈도해석이 개발가능량 산정에 중요한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 강수량에 따라 함양률이 달라지므로 함양률을 결정할 때 조정함양률을 사용하는 것이 실제 빈도별 함양량에 근접하는 결과를 산정하는 것을 알 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부의 “경주지역 지하수 기초조사”사업의 일환으로 조사된 자료를 기반으로 하였으며, 국토교통부의 물관리 연구사업 “수변충적층 지하수위복원기술(11기술혁신 C05-2)”의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- Arnold, J. G. and Allen, P. M. (1999). “Automated methods for estimating baseflow and groundwater recharge from streamflow records.” *J. American Water Resour. Assoc.*, Vol. 35, No. 2, pp. 411-424.
- Chung and Kim (2003). “A method of an efficient management of groundwater resources.” *Nature Conservation*, Vol. 121, pp. 37-42 (in Korean).
- Chung, I. M. and Kim, N. W. (2011). “Method of advancing groundwater management in Korea.” *Magazine of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 2, pp. 10-14 (in Korean with English Abstract).
- Hosking, J. R. M. (1990). “L-moment: Analysis and Estimation of Distribution using Linear Combination of Order Statistics.” *Journal of Royal Statistical Society*, Series B. 52, pp. 105-124.
- Kim, N. W., Chung, I. M., Won, Y. S. and Arnold, J. G. (2008). “Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model.” *J. of Hydrology*, Vol. 356, pp. 1-16.
- McDonald, M. G. and A. W. Harbaugh. (1988). *A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model*, U.S. Geological Survey Techniques of Water Resources Investigations Report Book 6, Chapter A1, p. 528.
- Ministry of Construction and Transportation (2002). *Report on basic plan of groundwater management*.
- Ministry of Construction and Transportation (2007). *Report on basic plan of groundwater management*.
- Ministry of Construction and Transportation (2012). *A basic report on the groundwater investigation in Gyungju region*.