

碩士學位論文

서귀지역의 강수량 변화에 따른  
함양률 산정과 지하수위 변동  
특성

The image features a large, faint watermark of the Jeju National University logo in the background. The logo is circular, containing a stylized flame or leaf design in blue, green, and purple. The text 'JEJU NATIONAL UNIVERSITY 1952' is written around the top half of the circle, and '제주대학교' is written around the bottom half. In the center of the logo, there is a smaller emblem with 'JEJU 1952' below it.

濟州大學校 大學院

環境工學科

白 東 明

2009年 12月

# 서귀지역의 강수량 변화에 따른 함양률 산정과 지하수위 변동 특성

指導教授 甘 相 奎

白 東 明

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2009年 12月

白東明의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 李 起 浩 印

委 員 趙 恩 一 印

委 員 甘 相 奎 印

濟州大學校 大學院

2009年 12月

# A Study on the Groundwater Level Fluctuation and the Recharge Rate in relation to Precipitation at Seogwi Area

Dong-Myoung Baek

(Supervised by professor Sang-Kyu Kam)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for  
the degree of Master of Engineering

2009. 12

This thesis has been examined and approved.

Thesis director, Ki-Ho Lee, Prof. of Environmental Engineering

Thesis director, Eun-Il Cho, Prof. of Environmental Engineering

Thesis director, Sang-Kyu Kam, Prof. of Environmental Engineering

*December, 2009*

Department of Environmental Engineering

GRADUATE SCHOOL

CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 목 차

summary .....	vi
<b>I. 서론</b> .....	<b>1</b>
<b>II. 이론적 배경</b> .....	<b>3</b>
1. 지형·지질 및 지하수 부존특성 .....	3
1) 지형 .....	3
2) 지질 .....	4
3) 지하수 부존특성 .....	5
2. 지하수위 변동에 관한 종래 연구 .....	8
3. 기후변화에 따른 강수량 변화에 관한 종래 연구 .....	10
4. 지하수 함양률 산정법 이론 및 개요 .....	12
1) WTF법(지하수위 변동법) .....	12
2) 지하수위 강하곡선법 .....	15
3) 자연배수율 산정 방법 .....	19
5. 통계분석 기법 .....	21
1) 사분위수범위 .....	21
2) 상자도표 .....	21
<b>III. 연구방법</b> .....	<b>23</b>
1. 자료수집방법 및 현황 .....	23
2. 자료해석방법 .....	24
<b>IV. 연구결과</b> .....	<b>26</b>
1. 강수 변동 특성 .....	26
1) 연강수량 변동추이 .....	26

2) 일강수량 변동추이 .....	27
3) 계절별 강수 특성 변동 추이 .....	29
2. 지하수위 변동특성 .....	34
3. 지하수위 변동 곡선을 이용한 함양률 산정 .....	38
1) 지하수위 강하곡선법을 이용한 함양률 산정 .....	38
2) WTF법을 이용한 함양률 산정 .....	39
 V. 결론 .....	 52
VI. 참고문헌 .....	54



# List of Figures

Fig. 1. The map of Jeju Island. ....	3
Fig. 2. Schematic diagram of groundwater. ....	5
Fig. 3. Distribution map of groundwater in Jeju Island. ....	7
Fig. 4. The location of study area. ....	23
Fig. 5. The variation of annual precipitation in Seogwipo(1961~2008). ....	25
Fig. 6. The comparison of variability in annual precipitation(A:1961~1984, B:1985~2008). ....	27
Fig. 7. The variation of daily precipitation in Seogwipo(1961~2008). ....	27
Fig. 8. The comparison of variability in the number of raining days exceeding 40 mm per day. ....	28
Fig. 9. The seasonal change of precipitation(1961~2008). ....	29
Fig. 10. The seasonal comparison of variability in annual precipitation(A:1961 ~1984, B:1985~2008). ....	30
Fig. 11. The seasonal change of number of raining days(1961~2008). ....	31
Fig. 12. The seasonal comparison of variability in annual number of raining days(A:1961~1984, B:1985~2008). ....	32
Fig. 13. The seasonal change of annual seepage days(1961~2008). ....	33
Fig. 14. The seasonal comparison of variability in annual seepage days(A:1961 ~1984, B:1985~2008). ....	33
Fig. 15. The change of groundwater level related to precipitation at Sinrye region. ....	35
Fig. 16. The change of groundwater level related to precipitation at Yongheung region. ....	35
Fig. 17. The change of groundwater level related to precipitation at Topyeong 1 region. ....	36

Fig. 18. The change of groundwater level related to precipitation at Topyeong  
2 region. .... 36



# List of Tables

Table 1. Correlation of variance between C numerical value and $\delta$ numerical value .....	19
Table 2. Study area explanation .....	24
Table 3. The statistics of groundwater wells in precedent studies .....	24
Table 4. The variability in raining days ratio according to ranges of daily precipitation.....	28
Table 5. Result of the groundwater level of sampling point .....	37
Table 6. Recharge rate estimated by analysing the groundwater level hydrograph .....	39
Table 7. The calculation of specific yields( $S_y$ ) using the groundwater level hydrograph .....	40
Table 8. Recharge rate estimated by WTF(Yongheung) .....	42
Table 9. Recharge rate estimated by WTF(Topyeong2) .....	43
Table 10. Recharge rate estimated by WTF(Topyeong1) .....	44
Table 11. Recharge rate estimated by WTF(Sinrye) .....	45
Table 12. Recharge rate estimated by WTF(Yongheung : drainage rate considered) .....	47
Table 13. Recharge rate estimated by WTF(Topyeong 2 : drainage rate considered) .....	48
Table 14. Recharge rate estimated by WTF(Topyeong 1 : drainage rate considered) .....	49
Table 15. Recharge rate estimated by WTF(Sinrye : drainage rate consider) .....	50
Table 16. The Regional Recharge Rate with application of Water Balance Analysis.....	51

## Summary

The climate changes such as global warming result in inevitably affecting hydrological variables and it is necessary to conduct long-term research on qualities of climate variables through the statistical analysis on observation data. In addition, the change of water resources in relation to the variability of precipitation has increasingly intensified the change between the field and the region, which altogether needs water resources.

Therefore, with the purpose of preserving groundwater, one of the most valuable resources in Jeju Island, this study is focused on changes of precipitation, respective values of specific yield at sampling points and its recharge rate with analysis on precipitation data provided by the Seogwipo Weather Station and groundwater level data observed by the Institute of Environmental Resource Research.

1. According to the analysis on precipitation data provided by Seogwipo Weather Station, the amount of precipitation has shown an increase with a decrease of the number of raining days and, therefore, the rainfall intensity has been keeping on growing. In addition, it is analyzed that all seasons has shown an increase of amount of precipitation while autumn has seen a widest range of precipitation.

2. In terms of groundwater level changes, the summer season where most of precipitation during the year takes place displays an upward trend in the groundwater level while the winter season with relatively less precipitation does a downward trend, which is periodically cycled. All the tube wells

within the studied regions demonstrate a similar type of groundwater level variation curve.

3. The respective values of specific yield calculated through the Drawdown Curve Method are as follows: Yongheung 0.021, Topyeong 2 0.092, Topyeong 1 0.043 and Sinrye 0.032. With the application of those values and WTF Method, respective values of averaged groundwater recharge rate are as follows: Yongheung 25.1%, Topyeong 2 38.1%, Topyeong 1 34.5% and Sinrye 28.4%.

4. In the case of considering drainage rate which could be neglected in the calculation of groundwater recharge rate through the WTF Method, the respective values of the averaged rate are as follows: Yongheung 37.0%, Topyeong 2 55.8%, Topyeong 1 48.4% and Sinrye 44.2%.

5. The drainage rate during the studied period has remained at the level of averaged 14.8% of the actual precipitation. As the consideration of drainage rate has explained a 30 % increase in value of groundwater recharge rate, the drainage rate should be taken into consideration with the aim of valuation of groundwater recharge rate.

6. This calculation of groundwater recharge rate, with drainage rate under consideration, has shown values similar to those derived from the precedent studies, which is deemed to enable the calculation of specific yield and groundwater recharge rate for respective tube wells and be also used as fundamental data in estimating optimal development level in association with hydrologic alteration as well as in maintaining groundwater.

## I. 서론

산업혁명 이후 과학기술의 급진적인 발전과 산업화로 인류의 삶의 질은 급속도로 향상된 반면, 생태계의 파괴와 환경 악화로 인한 피해가 급증하고 있다. 화석연료의 연소로 인한 이산화탄소 등 온실가스의 대기 중 농도 증가로 인한 지구온난화는 지구 곳곳의 기후를 변화시킴으로써, 인류사회와 자연생태계에 영향을 미치고 있다.<sup>1)</sup> 이러한 온실가스 증가로 인한 기후변화는 미래의 물수지 혹은 물순환 과정이 과거와 다른 패턴으로 변화할 수 있다<sup>2~4)</sup>는 것을 의미하며, 물순환 과정의 변화는 곧 강수량, 증발산량, 지표수 유출, 토양 함수량 등이 달라지는 것을 의미하는 것으로 미래의 수자원의 변동뿐만 아니라 홍수와 가뭄 또한 극심해질 것으로 보고되고 있다.<sup>3~6)</sup>

제주도는 풍부한 지하수자원을 가지고 있는 동시에 오염에 취약한 지질구조, 해안과 인구밀집 지역에서의 지하수 자원의 과잉개발 및 해수침투 등 수자원 확보 측면에서 여러 가지 문제들을 가지고 있다. 따라서 제주도는 수자원의 대부분을 지하수에 의존할 수 밖에 없으므로 지하수자원을 보존하면서 동시에 개발량을 수요량에 충족시켜야 한다. 이에 제주도 지하수자원을 ‘지속가능한 개발량’ 측면에서 평가하고 그 양을 적극적으로 증대시키는 기술의 개발은 수자원확보 측면에서 경제적인 중요성을 지닌다.<sup>7)</sup> 이러한 지하수 개발 가능량 산정을 위하여 함양량의 예측은 매우 중요한 의미를 갖으며, 미래의 물수지 혹은 물순환 과정의 변화에 대비하기 위해서도 꼭 필요하다.<sup>8)</sup>

지하수 함양(ground water recharge)이란 지하수면에 도달하여 대수층의 저유량을 증가시키는 수직적인 물의 흐름으로서 침투(infiltration), 배수(drainage), 재분포(redistribution)과정을 통해 지표면에 가해진 수리적인 스트레스를 해소하고 평형상태로 돌아가려고 하는 자연현상으로 이해할 수 있다.<sup>9)</sup> 지하수 함양량을 손쉽게 얻기 위한 방법으로 ‘지하수 함양률’이라는 개념을 활용하고 있으며 이는 전체 강수량 중 함양량이 차지하는 비를 의미한다. 지하수 함양률은 일반적으로 강수량, 강우패턴, 기후, 지형, 지표특성, 비포화대의

수리/함수특성 및 지하수면의 심도 등 다양한 요인에 의해 결정되는 것으로 알려져 있으며 시간에 종속되는 함수로 일정 지역에 있어 그 대표값을 결정하는 것은 매우 어려운 것으로 알려져 있다. 이러한 지하수 함양률 산정을 위한 방법으로는 WTF법, Darcian 방법, 기저유출 분리법, 수문성분 분리법, 지하수위 강하 곡선법으로 분류할 수 있다.<sup>8)</sup>

지하수 함양률 산정 방법 중 강우 시 발생하는 지하수위 상승량과 대수층의 비산출률을 이용하여 지하수 함양량을 추정하는<sup>9)</sup> WTF법(Water Table Fluctuation Method, 지하수위 변동법)은 지하수위가 강수에 빠른 반응을 보이는 천부 지하수에서 단기간의 강수사례별로 함양률을 산정하는 데에 가장 잘 적용될 수 있고, 이 결과들을 종합하여 장기적으로 기후변화 및 지표피복 변화에 대해 지하수위와 함양률이 변동되는 양상을 연구하기에 유용한 방법이며,<sup>10, 11)</sup> 최와 안<sup>12)</sup>이 제안한 지하수위 강하곡선법은 무강우시 지하수위 최대 강하량과 1개월 강하량의 비율로 정의되는 지하수위 강하율과 지하수 함양률 사이에 직접적인 비례관계가 있음을 전제로 한 방법으로 국내에서 많이 사용되어 왔다.<sup>13)</sup>

또한 지하수위를 이용한 함양률의 산정은 관측 자료 획득의 편의성에 있으며, 최근 자동수위 계측기의 개발과 보급으로 장기적인 지하수위 변동 자료를 쉽게 획득할 수 있어 WTF법과 지하수위 강하곡선법을 이용한 함양률 산정이 가능하다.

따라서 본 연구는 제주특별자치도 서귀지역의 강수 변동성 추이를 밝히고, 강수 변동성에 따른 함양률 산정과 지하수위 변동 특성을 파악하여 적정 개발량 산정과 지하수 관리의 기초자료로 활용코자 한다.

## II. 이론적 배경

### 1. 지형·지질 및 지하수 부존특성

#### 1) 지형

제주도는 지리적으로 한반도 내륙의 목포에서 약 145km(91마일), 부산에서 약 268km(168마일) 떨어진 동경  $126^{\circ} 08' 45'' \sim 126^{\circ} 58' 15''$ , 북위  $33^{\circ} 06' 23'' \sim 34^{\circ} 00' 00''$ 에 위치하고, 부속도서를 제외한 면적은 약 1,828  $\text{km}^2$ 로 전 국토면적의 1.8%를 차지하는 국내 최대의 섬이다. 또 Fig. 1과 같이 형태상 타원의 화산섬으로 제3기말 플라이오세에서부터 제4기에 이르는 동안 화산활동에 의해서 형성되었으며, 이러한 화산활동은 유사시대(AD 1002, 1004, 1445, 1570년)까지도 화산폭발이나 지진과 같은 화산활동의 기록을 가지고 있으나 현재는 그 징후가 없는 것으로 여겨지는 휴화산이다. 제주도는 화산체로서 화산지형의 특색을 잘 보여 주고 있으며, 침식유희단계에서 유년기에 해당하여 화산 원지형이 많이 보존되어 있다. 평면도 상의 모양은 장축의 길이 73km, 단축의 길이 31km인 타원체이고, 장축의 방향은  $N70^{\circ}E$ 로서 한반도의 남해안의 방향과 나란하며, 이는 산동지세와도 일치한다.<sup>15)</sup>



Fig. 1. The map of Jeju Island.

## 2) 지질

제주도는 소규모 화산체인 약 360여개의 분석구와 응회구들이 제주도 전역에 걸쳐 분포하여 화산지대의 독특한 경관을 형성하며, 한라산을 정점으로 비교적 경사가 급한 지형을 이루는 지역과 해안지역에서도 곳자왈 지역에서의 아아 용암류의 다양한 화산암 구조를 관찰할 수 있다. 하천의 유로 연장이 짧고, 투수성이 매우 높은 지질특성으로 인해 평상시의 강우는 대부분 지하로 침투되고, 풍수기에도 집중강우시의 1~2일을 제외하고는 대부분의 하천이 건천이어서 용천의 하류 근처를 제외하면 평상시 지속적인 하천 유출수를 관찰할 수 없다.

투수성 지질이란 강수의 지하유입이 주변의 다른 지역보다 매우 높은 지질구조 또는 지질매체가 분포된 지점을 의미하며 제주도 지질의 특징이다. 제주도 지질의 현무암류, 안산암류, 조면암류 등의 화산암류와 화산기원의 퇴적암류로 구성되어 있는데, 이중 현무암질 화산분출에 의해 형성된 용암류와 쇄설물 또는 용암류의 유동에 의해 형성된 화산쇄설성 퇴적물들이 대부분이다. 현무암은 보통 3m 내외의 암층으로 구성되어 있고, 각 암층 사이에 화산쇄설층이 협재되어 있다. 현무암 내에는 용암류의 유동과 냉각시 형성된 균열과 수직 절리가 발달되어 강우의 수직유동을 쉽게 하며, 화산쇄설층은 제주도 지하수의 이동통로 역할을 한다.

또한 제주도의 토양은 전용적 밀도가 낮고 유효토심이 얇은 지역이 넓고, 토양이 분포되지 않은 지역이 많기 때문에 강수가 지하로 함양되기 쉬운 지질조건을 가지고 있다. 특히 토양으로 피복되지 않은 일부지역에 화산활동으로 형성된 용암류나 화산쇄설물 또는 화산쇄설성 퇴적물들이 지표에 직접 노출된 지역은 다른 지역에 비해 투수성이 높고, 용암류 분포지역에서도 용암동굴이 발달된 지역과 절리대가 집중된 부분 그리고 용암류와 용암류사이에 협재된 화산쇄설층의 단면이 노출된 지역 등은 다른 지역에 비해 상대적으로 투수성이 매우 높은 지역으로 분류할 수 있다.<sup>16)</sup> 이로 인하여 제주도의 지하수 함양률은 내륙지방 평균 18% 보다 높은 44.1%를 기록하고 있으며, 이것은 제주도의 수문지질학적 특성에서 비롯되고 있다고 할 수 있다.<sup>17, 18)</sup>

### 3) 지하수 부존특성

지하수의 부존형태는 지하수를 포함하고 있는 지층의 형상(形狀)이나 성상(性狀)에 의해 결정지워지며, 지층의 투수도는 그 지층을 구성하는 입자간의 간극의 다소(함수성)과 간극의 크기(투수성)에 의해 결정되어진다. 지층은 투수도에 따라 투수층(permeable layer)과 불투수층(impermeable layer)으로 구분할 수 있으며, 불투수층 중에서도 점토의 경우처럼 간극율은 크지만 투수성이 나쁜 것을 난투수층(aquiclude)이라 부르고, 굳어있는 지층의 경우처럼 간극율이 작고 투수성도 나쁜 것을 비투수층(aquifuge)으로 구분한다.<sup>19)</sup>

제주도는 지하수를 담-염수 경계면의 형성 및 변동특성, 서귀포층의 분포상태, 지하수의 수리경사, 지하수위의 분포 및 변동특성, 지하수의 수질, 지하 지질분포 등을 고려하여 기저지하수, 준기저지하수(상부 및 하부준기저지하수), 상위지하수, 기반암지하수의 4가지 형태로 분류하고 있다.

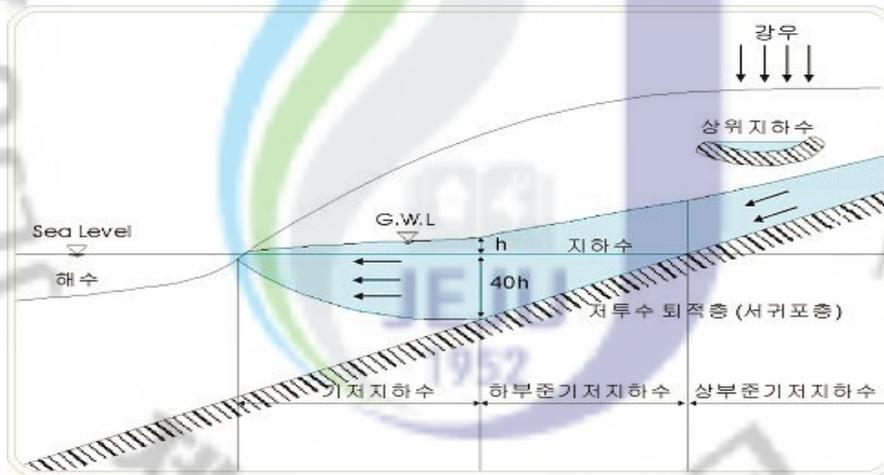


Fig. 2. Schematic diagram of groundwater.<sup>14)</sup>

상위지하수(High-level Groundwater)는 지표면에 내린 강수가 중력에 의해 투수성 지층을 통해 지표하부로 침투하다가 불투수성 암석층이나 점토층과 같은 저투수성 지층을 만나 더 이상 하부로 침투하지 못하고 저투수층을 따라 이동하거나 저투수층 상부에 고여 있는 일종의 부유지하수(perched water)를 말한다. 상위지하수는 비포화대 내에 불연속적으로 분포하여 다른 대수층과 수리적으로 연결되지 않는 지하수로 정의할 수 있으며, 해수와 직접적으로 접

축하지 않아 대체적으로 수질이 양호한 반면, 그 대수층의 분포가 불연속적이고 국지적으로 분포하며 규모가 크지 않은 관계로 강수에 따른 담수체의 변화가 심하고 계절적 유량과 수위변화가 심하게 나타나는 특징이 있다.

기저지하수(Basal Groundwater)는 해수와 담수와의 비중 차이에 의해 담수체가 해수 상부에 렌즈상으로 부존하고 있는 지하수를 말하며, 대체로 동부지역에 광범위하게 분포한다. 기저지하수는 상부지하수와 달리 렌즈상의 담수체 상하부가 항상 유동상태에 있으며 담수체의 수축에 따라 해수와의 경계면이 수평적, 수직적 운동이 일어난다.

해수와 담수의 밀도차이에 의한 정역학적인 관계를 정의하는 원리를 「기벤-헤르쯔버그의 법칙(Ghyben-Herzberg Principle)」라고 하며, 기벤-헤르쯔버그의 법칙은 아래와 같은 식으로 표시한다.

$$Z = \frac{\rho_w}{\rho_s - \rho_w} \times h$$

Z : 해수면 아래의 담-염수 경계면까지의 깊이(m)

h : 해수면 위의 지하수면의 높이(m)

$\rho_w$  : 담수의 밀도(kg/m<sup>3</sup>),  $\rho_s$  : 해수의 밀도(kg/m<sup>3</sup>)

→ 담수와 염수가 서로 정적인 상태로 가정

→ Z : h =  $\rho_w : (\rho_s - \rho_w)$

일반적으로 담수의 밀도는 1.000g/cm<sup>3</sup>이고, 해수의 밀도는 1.025g/cm<sup>3</sup> 이므로 기벤-헤르쯔버그의 법칙에 의하면 해수면 아래 담수 지하수체의 두께는 해수면 상부 지하수위 높이의 40배, 즉 Z = 40h (G-H Ratio)가 되어 담수 지하수체는 해수면 상부 지하수위 높이의 40배에 해당하는 깊이까지 부존하는 것을 의미한다. 그러나 제주도에서 수직적인 전기전도도 측정을 통한 담염수 경계면 조사 결과에 의하면 G-H Ratio가 평균 1:20으로 나타나 담수렌즈가 이론적인 비율보다 훨씬 얇게 형성되어 있는 것으로 조사된바 있다.

준기저지하수(Parabasal Groundwater)는 담수 지하수체의 하부가 저투수성 퇴적층인 서귀포층에 의해 해수와의 직접적인 접촉이 차단되어

Ghyben-Herzberg 법칙이 적용되지 않는 지하수체를 의미한다. 즉, 서귀포층이 평균 해수면 상부에 위치하는 경우 상부 준기저지하수로, 평균 해수면 하부에 위치하는 경우 하부 준기저지하수로 분류한다.

기반암지하수(Basement Groundwater)는 시대미상의 미교결퇴적층(U층), 서귀포층과 같은 저투수성 퇴적층 하부에 위치하는 화강암, 용결응회암등의 기반암내에 발달된 파쇄대나 절리 등의 유효공극 내에 부존하는 강우 기원의 심부지하수로 정의한다.

이상과 같이 제주도에서는 지하수의 부존형태를 기저지하수, 준기저지하수, 상위지하수, 기반암지하수 등으로 구분하고, 지하수위 자료 분석을 통한 담·염수 경계면 검토, 시추주상도 자료를 이용한 서귀포층의 분포 분석 등을 실시하여 각 부존형태별로 부존지역의 경계를 설정하여 지하수관리를 위한 기초도면으로 활용하고자 제주도가시 제2004-36호로 고시하여 관리하고 있다.<sup>14)</sup>

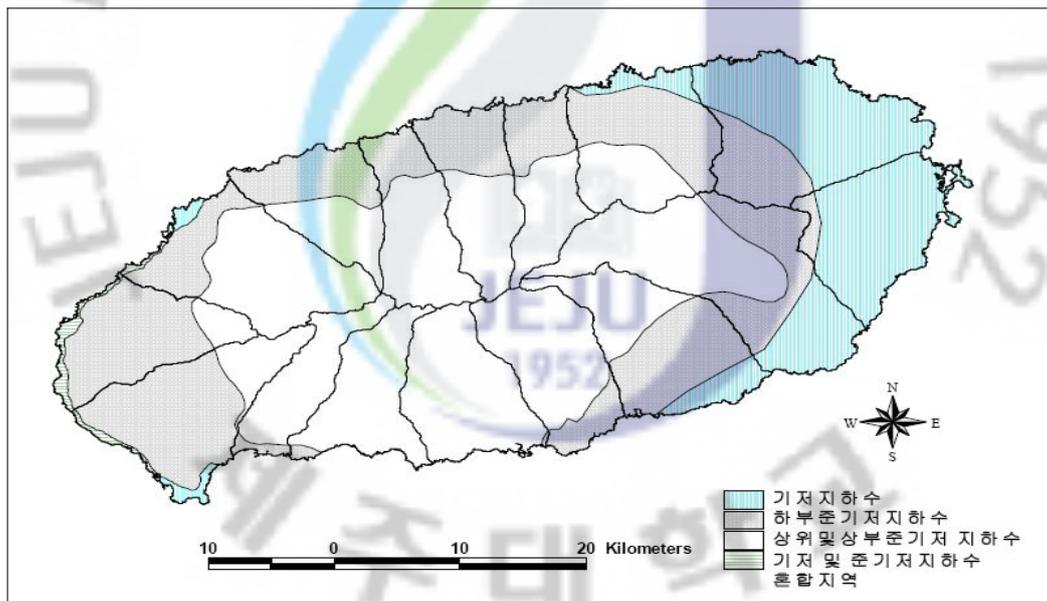


Fig. 3. Distribution map of groundwater in Jeju Island.<sup>14)</sup>

## 2. 지하수위 변동에 관한 종래 연구

지표수 저수지와 마찬가지로 대수층(지하수 저수지) 내에 저유된 지하수 저수량이 계절별 또는 시기별로 어떻게 변하는가를 파악하는 것은 매우 중요하다. 지진파의 충격이나 자동차가 지나갈 때의 진동에 의해서 지하수위는 순간적으로 변화하기도 하고, 장기적으로 발생하고 있는 기후변화에 따라 지하수위는 변동한다.

지하수위의 변동, 즉 지하저수지 내에서 지하수 저유량의 변화는 관측정에서 지하수위를 계속 측정함으로써 알아낼 수 있다. 지하수위의 측정빈도는 이용목적과 관측한 수위변동의 특성에 따라 결정되어야 한다. 만일 연속적인 수위변동자료를 요하는 경우는 자동기록계(recording gage)를 관측정에 설치하여 지하수위의 변화를 측정해야 하고, 그렇지 않은 경우에는 스틸테이프나 기타 수위측정기를 이용하여 주기적으로 지하수위를 측정한다.

지하수위의 변화는 대수층 내에 부존된 지하수 저유량의 변화를 나타내는 것으로서, 대수층 내에 저유된 지하수량은 대수층 내로의 물의 함양과 대수층으로부터 지하수의 배출상태에 따라 변한다. 만일 함양량이 배출량보다 많을 때에는 저수량이 증가함과 동시에 지하수위는 상승하고, 그 반대의 경우는 지하수위가 서서히 내려가게 된다. 실제적으로 자연상태하에서 지하저수지 내로 함양은 주로 강우에 의해 발생되므로 계절변화에 따라 매일 또는 매년 지하수위는 변하게 된다. 반면에 강우에 의한 함양이 상당히 적은 기간 동안에는 지하수위는 서서히 하강한다.<sup>20)</sup>

제주도의 지하수위 분포는 대체로 지형효과가 반영되어 한라산을 중심으로 방사상의 유선방향을 보인다. 제주도의 북부지역과 남부지역 및 고지대에서는 등수위선의 간격이 조밀하여 동수구배가 큰 반면에 서부지역과 동부지역 및 저지대에서는 등수위선의 간격이 넓어 동수구배가 작아지는 특징을 나타낸다.<sup>16)</sup> 지하수위는 강우량, 조석, 대기압, 바람, 지진, 증발산량, 양수량 등의 요인에 의해 지속적으로 변화하고 있으며, 그 변화는 수년 또는 그 이상의 기간을 주기로 하는 영년변화와 강우량 및 조석에 기인하는 계절적 또는 단주기 변화로 구분할 수 있다.<sup>16, 18)</sup>

제주도 지하수 수위는 강우량이 많은 하절기(5월에서 10월)에 상승하고 비강수일수가 많은 동절기(11월에서 이듬해 4월)에는 하강하는 계절적인 변동을 반복하고 있다. 수위변동을 지역별로 살펴보면, 강우지배형(남부지역), 조석지배형(동부지역), 강우 및 조석 혼합형(서부 및 북부지역)으로 구분할 수 있다.<sup>16)</sup>

고 등<sup>21, 22)</sup> 및 박 등<sup>18)</sup>은 강우와 조석에 의한 지하수위 변동에 관한 연구를 실시하였으며, 그 결과 제주도의 지하수는 주로 강우와 조석요인에 의해 수위가 변동한다는 사실을 규명하였다. 고 등<sup>23)</sup>은 제주도 동부지역의 지하지질구조와 지하수위 및 수질특성에 관한 연구를 실시하여 동부지역 지하수의 고염분 원인을 수문지질구조적인 관점에서 해석하였으며, 윤과 박<sup>24)</sup>은 제주도 지하수의 개발현황과 지역별 수위 및 수질 변화 특성에 관한 연구를 실시하여 조석간만의 변화가 지하수위의 변화에 미치는 범위를 설정하고, 수질 오염이 심화되고 있음을 규명하였고, 고<sup>19)</sup>는 지하수위자료 해석을 실시하여 지하수위 변동특성에 따라 강우량의 영향을 받는 지역, 조석의 영향을 받는 유형 및 강우량과 조석의 영향을 복합적으로 받는 유형으로 구분하였다.

2000년대에 들어서 이와 함<sup>25)</sup>은 제주도 중산간 지역의 지하수위 변동 특성에 관한 연구를 실시하여 지하수 함양지역 심부지하수체의 지하수위 변동특성과 강우에 의한 수위반응 및 함양률에 대하여 조사하였고, 김 등<sup>26)</sup>은 제주도 지하수 관리수위 설정에 관한 연구를 실시하여 지하수 관리를 위한 각 단계별로 관리수위(안)을 제시하였다. 이 등<sup>27)</sup>은 제주도의 지하수 관측망 자료를 이용한 지하수위 및 전기전도도 변화 해석에 관한 연구를 실시하였으며, 강 등<sup>28)</sup>은 제주도 지역의 해안선에서 이격거리에 따른 지하수위 변동특성에 관한 연구를 실시하여 제주도 지역의 지하수위는 표고와 강우에 의해 지배적인 영향을 받고 있으며 해안선에서의 이격거리에 따른 변동이 발생함을 보고하였다. 또한 김 등<sup>29)</sup>은 기준수위 관측정 확대 지정 방안으로서 지하수의 적정관리를 위한 단계별 수위설정 방안을 보고하였다.

### 3. 기후변화에 따른 강수량 변화에 관한 종래 연구

기후변화란 자연적 또는 인위적 요인에 의하여 현재의 기후가 점차 변화하는 것을 의미한다. 이것은 인간활동에 의한 온실효과와 화산활동에 의한 자연적 영향을 포함하는 자연계의 평균 기후변동을 뜻한다. 최근들어 세계 곳곳에서 예기치 못한 기후변화와 이상기상 현상은 기후계를 구성하는 각 성분들의 변화 또는 상호작용에 의한 것이다.<sup>30)</sup> 지금까지 기후변동은 자연과학 분야의 과제로 취급하여 왔으나 오늘날은 세계적으로 인구가 급증하고 산업 생산 활동이 대규모화 하는 등 인간 활동이 계속 증가하고 있어서 자연적 요인보다도 인위적 요인을 더 중요시하게 되었다.<sup>31)</sup>

세계적으로 기후변화가 진행되고 있다는 것은 많은 연구에 의해 기정사실화 되었으며, 최근에는 기후변화에 대한 각 분야별 진단기술 개발과 기후모델의 불확실성을 줄이기 위한 연구와 더불어 기후변화의 영향평가 및 대응에 관한 연구들이 활발히 진행되고 있다.<sup>4)</sup>

우리나라의 기후변화에 대한 연구로 최와 문<sup>32)</sup>은 여름철 일 강우강도가 증가하는 경향임을 보고하였으며, 기<sup>33)</sup>는 우리나라의 평균기온은 1.5°C 상승하여 전지구적인 온난화 추세를 상회하고 있는 것으로 보고하였다. 또한 최<sup>34)</sup>는 남부지방의 연강수일수는 뚜렷한 감소현상이 나타나는 반면 연강수량은 약한 증가현상을 보여 강수일수당 강수량을 보여주는 강수강도는 뚜렷하게 증가하였음을 보고하였다. 이<sup>35)</sup>는 우리나라의 미래 지상온도는 현재에 비하여 1.5°C 상승하고, 강수량은 0.2mm/day 만큼 감소하며, 지상온도는 모든 계절에 상승하고, 강수는 초여름을 제외한 모든 계절에 감소, 미래의 연평균 강수량이 감소함에도 불구하고, 강수강도는 증가하고, 집중호우 일수는 증가함을 보고하였다. 또 박 등<sup>36)</sup>은 기온과 강수특성을 고려하여 남한의 기후지역을 3군집으로 구분함이 최적임을 밝혀 장기예보구역의 세분화를 위한 기반 자료를 마련하였다.

제주지역의 기온 및 강수의 변동으로 유와 방<sup>37)</sup>, 김 등<sup>38)</sup>, 김 등<sup>39)</sup>은 제주도 남동부 지역이 가장 집중호우가 많이 발생하며, 종관적 규모(저기압, 태풍 등)에 의한 예상 강수보다 훨씬 많은 집중호우가 내리고, 강수량의 변동은 기온

의 변화경향과 비교해 편차가 심하게 나타났다. 또한 태풍 및 장마의 영향을 받는 여름에 강수량이 가장 많으며, 강수일수는 감소하고 호우일수는 증가하는 경향을 보이고 있어 결과적으로 강수강도는 증가하였다.

현재 진행되고 있는 지구 온난화 현상은 미래의 기후현상과 물순환 과정에 큰 변화를 불러일으킬 것으로 예견되고 있다.<sup>40, 41)</sup> 특히 물순환 과정의 변화는 곧 강수량, 증발산량, 지표수 유출, 토양 함수량 등이 달라지는 것을 의미하는 것으로 미래 수자원의 변동뿐만 아니라 홍수와 가뭄 또한 극심해질 것으로 보고되고 있다.<sup>42~45)</sup>

수자원의 운영·관리 및 계획은 수문요소들의 정상시계열(Stationary time series)이라는 가정 하에서 설계, 운영되고 있어<sup>46)</sup> 급격한 기후변화가 예상될 경우 효과적인 수자원활용을 위해서는 모든 수자원관리시스템의 재 고찰이 요구된다<sup>47)</sup>. 이와 관련하여 미국을 비롯한 EU, 일본 등지에서는 매년 많은 연구 성과가 발표되고 있으며, 국내에서도 서 등<sup>40)</sup>과 안 등<sup>43)</sup>, 김 등<sup>48)</sup> 등의 연구 성과가 있다. 이렇듯 기후변화에 따른 물순환 과정의 변동이 예상되고 있지만 유역의 물순환 기구는 상이한 수문지형·지질적 차이 그리고 복잡하고 다양한 요인들에 의해 좌우되므로 물순환 과정에 대한 정확한 파악을 더욱 어렵게 하고 있다<sup>42)</sup>.

#### 4. 지하수 함양률 산정법 이론 및 개요

지역단위의 지하수 이용계획을 수립코자 할 때 안전채수량(safe yield)범위 내에서 지하수 개발가능량을 검토하여야 한다. 안전채수량은 지하수역의 주어진 조건하에서 지하수를 양수할 때 부정적 영향이 발생하지 않는 범위 안에서 항구적으로 양수·이용할 수 있는 채수량이라고 정의된다. 부정적 영향이 생기지 않게 하기 위해서는 지하수의 함양과 배출이 평형이 되도록 연간 함양량 한도에서 연간 취수량을 제한하여야 한다.<sup>12)</sup>

지하수 함양률은 지형, 강수량, 강수강도, 강수시간, 식생, 토양의 수리특성, 토양의 불균질성, 지하수면의 심도 등 다양한 요인에 의하여 달라지므로 이를 정확하게 추정하는 것은 매우 어려운 것으로 인식되고 있다. 우물에서 관측되는 지하수위의 변동은 대수층의 저유량 변화를 의미하며, 강수에 의한 지하수 함양과 대수층에서의 지하수 흐름에 의한 기저유출에 의하여 상승과 하강을 반복한다. 이와 같이 자연 상태에서 대수층의 저유량은 지속적으로 변하는 비평형 상태에 있으나, 주기적으로 반복되는 강우 특성에 의하여 대수층은 지하수 함양과 기저유출의 균형을 통하여 동적인 평형 상태를 유지한다. 따라서 대수층의 지하수위 변동은 동적 평형 상태를 유지하기 위한 대수층의 반응으로 이해될 수 있다.<sup>9)</sup>

일반적으로 지하수 함양률 산정에 널리 사용하고 있는 방법으로는 WTF법, 수문성분 분리법, Darcian 방법, 기저유출 분리법, 지하수위 강하 곡선법으로 분류할 수 있다.<sup>8)</sup> 본 연구에서는 장기 지하수위 측정자료를 활용한 함양률 산정을 위하여 지하수위 강하곡선법과 WTF법을 사용하였다.

##### 1) WTF법(Water Table Fluctuation Method, 지하수위 변동법)

WTF법은 Meinzer<sup>49)</sup>에 의해 처음으로 개발된 방법으로 강우에 의해 반등되는 지하수위와 대수층의 비산출률을 이용하여, 대수층으로 들어온 물의 양을 간접적으로 산정하여 함양률을 추정하는 방법으로 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$R_i = S_y \times \Delta h_i \quad (1)$$

$R_i$  : 지하수 함양량 [L]

$S_y$  : 비산출율 [-]

$\Delta h_i$  : 유효 강우에 따른 지하수위 변이량 [L]

강우가 발생할 때, 대수층은 이에 반응하여 지하수위를 증가시킨다. 이때 증가된 지하수위를 통해 대수층으로 유입된 물의 양을 파악할 수 있으며, 이를 정확히 산정하기 위해 비산출률이 필요하다. 비산출률이란 암석의 부피 대비 중력에 의해 배수되는 물의 부피의 비율을 나타내며, 증가된 지하수위 증가량에 비산출률을 곱함으로써 지하수 함양량을 산정할 수 있다.<sup>50)</sup> 이러한 방법은 함양은 짧은 시간에 이루어지며, 함양 기간동안 기저유출이나 증발산, 수평적인 흐름이 없거나 아주 작다고 가정한 경우에만 성립할 수 있다.<sup>13)</sup>

포화대 연구에 기반한 WTF법은 물리적 방법에 속한다. 이러한 포화대 기반 방법은 다른 방법들이 유출이나 잠재적 함양(drainage or potential recharge)을 측정하는 것에 비해 실제 강수가 지하수면에 도달하는 참 함양(actual recharge)을 측정하는 것이기에 더 정확하다.<sup>11)</sup>

WTF법의 수식을 유도한 방법은 Bear<sup>51)</sup>에 의해 강우시 유역의 특성에 따라 강우량의 일정부분이 지하에 함양된다는 가정하에 강우량과 함양량의 관계를 다음 식과 같이 설정할 수 있다.

$$R = \alpha A(P - P_0) \quad (2)$$

$R$  : 지하수 함양량

$\alpha$  : 지하수함양계수 또는 함양률

$A$  : 함양지역 면적

$P$  : 함양지역에 내린 강우량

$P_0$  : 지하수침투가 시작되는 강우량

같은 지역에서 어떤 시점에서 선행기간중 강우량  $P_1$ 에 의한 함양량이  $R_1$ 이었고, 일정기간경과 후 그 기간의 강우량  $P_2$ 에 의한 함양량이  $R_2$ 라면 (2)식에

서

$$R_1 = \alpha A(P_1 - P_0), R_2 = \alpha A(P_2 - P_0)$$

가 되고, 이들 함양량의 차이는 (3)식과 같이 된다.

$$R_1 - R_2 = \alpha A(P_1 - P_2), \text{ 즉 } \Delta R = \alpha A \Delta P \quad (3)$$

여기서  $P_1$ 기간의  $P_0$ 와  $P_2$ 기간의  $P_0$ 는 같지 않을 수도 있으나 평균 개념으로 볼 때 그 차이가 없다고 가정한다.

한편 지하수함양량이 증가하여 자유면대수층지역에서 지하수위가  $\Delta h (= h_2 - h_1)$  만큼 상승하였을 때에는 (4)식이 성립된다.

$$\begin{aligned} \alpha \cdot A \cdot \Delta P &= A \cdot \Delta h \cdot S_y \\ \alpha &= \frac{\Delta h}{\Delta P} S_y = \frac{h_1 - h_2}{P_1 - P_2} S_y \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $S_y$ 는 대수층의 비산출률(specific yield)이고,  $h$ 는 지하수의 수리수두이다. 즉 어떤 시점을 기준으로 전후기간의 지하수수두 ( $h_1, h_2$ )를 알고 있고 해당기간 동안의 강우량  $P_1$ 과  $P_2$ 를 알면 지하수 함양률  $\alpha$ 는 (4)식을 이용하여 추정할 수 있다.<sup>12)</sup> (4)식은 지하수면에 도달한 물이 즉시 저유량을 증가시키고, 함양 기작이 일어나는 동안에는 기저유출이나 증발산, 수평적인 흐름이 없거나 아주 작다고 가정한다. 이러한 가정은 함양이 짧은 시간(몇 시간 혹은 몇 일 이내)에 이루어질 경우에만 성립 될 수 있다.<sup>13)</sup>

문과 우<sup>52)</sup>는 Bear<sup>51)</sup>가 제안한 이 식을 수정하여 식(5)를 제안하였다.

$$\alpha = \frac{\Delta h}{\Sigma P} \times S_y \quad (5)$$

여기서  $\Sigma P$ 는 함양기간의 누적강수량이다. Bear<sup>51)</sup>는 두 시점의 강수량 차이를 사용하였으나 문과 우<sup>52)</sup>는 이를 수정하여 최대 강수기간동안 내린 강수량의 총합에 의해 지하수위가 상승한다는 개념을 도입하였다.<sup>13)</sup>

지하수위 변동법의 장점으로는 관측자료 획득시 점차적으로 발달되는 자동수위 측정장비의 개발과 보급으로 인하여 장기적인 지하수위 변동 자료를 쉽게 확보할 수 있다는 점에서 함양량을 산정하는데 매우 유용하게 사용할 수 있다. 하지만 이 방법으로 함양량을 산정할 경우 비산출률(specific yield) 값에 많은 불확실성이 내포되어 있고, 함양 이외에 지하수위를 변동시키는 요인, 즉 자연적 요인 및 인위적 요인들에 의한 수위 변동을 명확히 구분해내기 어려운 단점이 있다.<sup>11, 50)</sup> 또한 개념적으로 지하수의 수평적인 흐름을 고려하지 않기 때문에 순수한 함양에 의한 수위 변동 산정에 오차가 있을 수 있고, 경사도가 높은 지역이나 지하수 배출지역 등에서는 적용에 제한을 받기 때문에 공간적인 변이성이 크다.<sup>9)</sup>

## 2) 지하수위 강하곡선법

최와 안<sup>12)</sup>에 의해 제안된 지하수위 강하곡선법은 무강우시 지하수위 최대강하량과 1개월 강하량의 비율로 정의되는 지하수위 강하율과 지하수 함양률 사이에 직접적인 비례관계가 있음을 기본 개념으로 한 방법으로 장기간 지하수위 일일관측을 시행하여 지하수함양률을 구할 수 있을 뿐 아니라, 대수층 비산출률도 구할 수 있다.<sup>53)</sup>

지하수위 강하곡선법은 Bear<sup>51)</sup>가 제안한 (4)식에서 기간을 30일로 취하고 이전 1개월은 우기로, 이후 1개월은 가뭄기간으로 가정하여  $P_2=0$ ,  $h_1-h_2=s_{30}$ (월수위강하량)을 (4)식에 대입하면 (6)식과 같이 된다.

$$\alpha = \frac{s_{30}}{P_1} S_y \quad (6)$$

한편 유역 내 대수층의 지하수포장량 (V)은 대수층 면적을 (A), 대수층의 수리수두(h, 지하수포화층 두께)와  $S_y$ 를 곱한 값이다. 즉  $V=A \cdot h \cdot S_y$ 이다. 강우

에 의해 지하로 함양된 지하수는 지하수포장량을 증가시키게 되나 무강우기간에는 포장량 중 일부가 기저유출과 증발산으로 손실된다. 이때의 하천기저유출량(base flow)은 (7)식과 같이 표현할 수 있다.

$$Q = Q_0 \cdot e^{-bt} \quad (7)$$

$Q_0$  : 기준시점( $t=0$ )에서 최대 기저유출량

$Q$  :  $t$  시간경과 후 기저유출량

$b$  : 기저유출 감수계수

그러므로 유역 내에 다른 함양원이 없고 지하수를 채수하지 않는 경우, 지하수포장량의 변화율은 다음과 같이 기저유출량과 증발산량(ET)의 합과 같다.

$$-\frac{dV}{dt} = AS_y \frac{dh}{dt} = Q_0 e^{-bt} + ET \quad (8)$$

여기서 증발산량은 기저유출량에 비하여 작은 값이 될 것으로 예상되는데, Jacob은 지하수위가 지표에서 1.0~1.5 m 이상되면 지하수로부터의 증발산은 무시할 수 있다고 하였다(이를 고엽심도라 한다). 이 경우 (8)식에서  $ET=0$ 이다. 이때 (8)식은 (9)식과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q_0}{AS_y} e^{-kt} \quad (9)$$

(9)식은 시간경과에 따른 지하수위변화의 감소를 나타내므로 여기서  $k$ 를 지하수위감수계수라고 정의하면  $ET=0$  일 때  $k=b$ 가 되고,  $ET>0$ 이면  $k$ 은  $b$ 보다 약간 큰 값이 될 것이다. 이때 (9)식에서  $t=0$ 일 때  $h=h_1$ 이라 하고,  $t=t_2$ 일 때  $h=h_2$ 라 하면 지하수위강하량  $s=h_1-h_2$ 는 (10)식과 같이 표현할 수 있다.

$$\int_{h_1}^{h_2} dh = \frac{-Q_0}{AS_y} \int_0^t e^{-kt} \quad h_2 - h_1 = \frac{-Q_0}{AS_y} (1 - e^{-kt})$$

$$s = \frac{Q_0}{AS_y} \frac{1}{k} (1 - e^{-kt}) \quad (10)$$

장기간 무강우가 지속될 때, 즉  $t \rightarrow \infty$  일 때 지하수위강하량 ( $h_2 - h_1$ )은 최대 수위강하량( $s_m$ )이 되고, (10)식에서  $e^{-kt} \cdot Q = 0$ 가 되기 때문에 ( $t \rightarrow \infty$  이므로) 다음과 같이 된다.

$$s_m = \frac{Q_0}{AS_y} \frac{1}{k} (e^{-kt} \approx 0)$$

이 식을 (10)식에 다시 대입시키면

$$s = s_m (1 - e^{-kt}) \quad \therefore s = s_m - s_m e^{-kt} \quad (11)$$

한편 1개월간 무강우시 지하수위의 월강하량 (6)식에서  $s_{30} = \frac{\alpha P_1}{S_y}$ 가 되므로 최대수위강하량 ( $s_m$ )과 월간강하량 ( $s_{30}$ )의 비를 지하수위강하율 ( $\gamma$ )이라 하면

$$\gamma = \frac{s_{30}}{s_m} \text{ (단, } 0 < \gamma \leq 1 \text{)}, \quad s_m = \frac{s_{30}}{\gamma}$$

$$\therefore s_m = \frac{Q_0}{AS_y} \frac{1}{k} = \frac{s_{30}}{\gamma} = \frac{\alpha P_1}{\gamma S_y} \text{ ((6)식 참조)} \quad (12)$$

이 되어 지하수위감수계수 ( $k$ )와 지하수함양률 ( $a$ )의 관계는 상기식에서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{1}{k} = \frac{\alpha}{\gamma} \frac{AP_1}{Q_0} \quad (13)$$

여기서  $P_1$ 은 풍수기의 월강우량으로서  $AP_1$ 은 대상구역의 강수총량( $m^3$ )이며,  $Q_0$ 는 유량( $m^3/일$ )이므로  $\frac{AP_1}{Q_0}$ 의 단위는 시간단위(day)가 된다. 지금  $\frac{AP_1}{Q_0} = T$ 라 하면  $T$ 는 풍수기의 총 강수량이 기저유출로 배수되는 기간을 나타내며 (13)식은 (14)식과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{1}{k} = \frac{\alpha}{\gamma} T \quad \therefore \alpha = \frac{\gamma}{kT} \quad (14)$$

한편 (11)식에서 ( $s = s_m - s_m e^{-kt}$  이고  $e^{kt} = \frac{s_m}{s_m - s}$ )이 되므로 상기식의 양변에 대수를 취하면

$$kt = \ln \frac{s_m}{s_m - s} \quad (15)$$

$s \rightarrow s_m$ 일 때  $t \rightarrow T$ 가 될 것이나  $\ln$ 의 속성상 ( $s_m - s > 0$ 인 매우 작은 값을 선정하여야 한다. 만약  $0 < \delta < 0.1$ 인 임의의 상수  $\delta$ 를 취하면  $s_m - s = \delta \cdot s_m$ 이 될 때  $t$ 를  $T$ 로 잡으면  $kT$ 는 다음과 같이 일정한 값을 갖는다.

$$kT = \ln \frac{s_m}{\delta \cdot s_m} = \ln \frac{1}{\delta}$$

이 때 (14)식을 위식에 대입하면 다음과 같이 된다. 여기서  $C = \frac{1}{\ln(\frac{\delta}{1})}$ 이다.

$$\alpha = \frac{1}{\ln(1/\delta)} \gamma = C \frac{s_{30}}{s_m} \quad (16)$$

가장 적절한  $\delta$ 의 값은 실제 함양률이 어느 쪽에 접근하는가에 따라서 결정된다.  $\delta$ 가 0.001~0.1 범위일 때 (16)식의 C값을 계산해 보면 Table 1과 같이  $\delta$ 값이 100배 증가하더라도 C값의 변화는 3배 정도밖에 되지 않는다. 따라서  $\delta$  값 선정에 따른 함양률 계산의 오차는 그리 크지 않다.

한편 제주도의 경우 분포지질이 다공질인 화산암류로 구성되어 있어, 여러 기관에서 지하수 함양률을 조사한 결과 44.1%, 42.8% 등 40%를 상회하는 비교적 높은 함양률을 보이고 있어 이를 합리적으로 반영하기 위해서는  $\delta$ 가 0.1로 설정하였다. 따라서 C값은 통상 0.434을 이용하는 것이 합리적일 것이다.<sup>14)</sup>

Table 1. Correlation of variance between C numerical value and  $\delta$  numerical value

$\delta$	0.001	0.005	0.01	0.02	0.1
C	0.1448	0.1887	0.2171	0.2556	0.4342

따라서 지하수 함양률 (a)는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\alpha = \frac{s_{30}}{s_m} \times 0.434 = 0.434 \times \gamma \quad (17)$$

$s_m$  : 년 중 최대수위강하량

$s_{30}$  : 무강수지속일수 30일 동안의 수위강하량

### 3) 자연배수율(drainage rate) 산정 방법

지하수는 자연상태에서 끊임없이 수두가 낮은 방향으로 흘러가면서 지하수위는 점차적으로 낮아지게 된다. 이러한 자연적인 지하수의 배출 기작은 강우에 의해 함양이 되는 순간에도 진행되며, 결과적으로 강수로부터 함양되는 실

질적인 함양률을 평가하기 위해서는 이 부분도 고려하여야 한다. 이때 자연적으로 지하수위가 낮아지는 부분을 자연배수율(drainage rate)이라 한다.<sup>54)</sup>

$$D = \frac{(h_1 - h_2)}{\Delta t} \quad (18)$$

D : 자연배수율,  $h_1$  : 초기수위,  $h_2$  : 24시간 후의 수위, t : 관측시간

자연배수율은 속도의 개념으로 단위시간 동안 외부의 충격이 없는 조건에서 자연적으로 발생하는 수위강하로 계산된다. 단위시간은 보통 1일 주기에 의한 교란을 가장 덜 받도록 하기 위해 하루에 자연적으로 수위강하가 일어나는 정도를 기준으로 한다. 하지만 자연배수율은 계절적 차이와 수두에 의한 차이를 보인다. 즉 지하수의 이동은 수리경사도에 의해 영향을 받는데, 수리경사도는 수두의 차이에 따라서 변하게 된다. 따라서 집중적으로 지하수의 함양이 발생하는 계절과 이때 상승된 수두에 의한 자연배수율은 상대적으로 지하수의 함양이 낮게 발생하는 계절에 비해서 크게 나타날 것이다. 그러므로 하나의 평균 자연배수율을 적용하여 함양량을 산정할 경우에는 총 함양량에서는 큰 차이를 보이지 않겠지만 실시간의 함양량의 값에는 많은 오류를 가질 수 있게 된다.

이 식을 통해 함양량을 산정하기 위해서는 다음의 3가지 조건을 충족시켜야 한다. 첫째, 강우에 의해 수위 반등치가 0보다 커야한다. 하지만 수위 반등치가 0보다 작더라도 지하수 함양기간에 포함된다면 drainage값은 적용되어야만 한다. 둘째, 강우에 의한 수위 증가만을 함양으로 계산되어야 한다. 셋째, Lisse 효과는 함양에서 제외되어야 한다. Lisse 효과(포획공기 효과)는 대기압과 지하수압이 평형을 이루다가 강우강도가 높은 강우로 인해 지표가 순간적으로 포화가 되면서, 지하수면과 지표포화대 사이에 공기가 갇히게 되어 발생된다.<sup>55)</sup>

## 5. 통계분석 기법

SPSS(Statistical Package for the Social Sciences)는 1969년 사회과학 분야의 데이터 분석을 위한 프로그램으로 처음 발표되었다.<sup>56)</sup> SPSS는 광범위한 분야에 대한 데이터 입력, 데이터 관리 및 조사 분석을 목적으로 만들어진 프로그램으로서 SAS(Statistical Analysis System)와 더불어 사회과학분야의 자료 분석에 가장 많이 사용되는 통계프로그램이다. 현재 SPSS는 이름에 명시되었듯이 경영학, 경제학, 사회학, 관광학, 심리학 등 사회과학분야의 조사 분석에 가장 많이 사용되고 있으며, 물리학과 의학 등의 자연과학에도 많이 사용되고 있다.<sup>57)</sup>

### 1) 사분위수범위

k분위수란 데이터를 오름차순으로 정렬해서 k개로 나누었을 때 그 중 몇 번째에 위치한 데이터인지 알려주는 것으로 k개가 100이면 백분위수(percentile), k가 10이면 십분위수(decile), k가 4이면 사분위수(quartile) 등으로 부른다. 일사분위수는 제일 작은 값에서부터 25%에 해당하는 관찰값이므로 25백분위수이고, 삼사분위수는 75%에 해당하는 관찰값이므로 75백분위수이며, 이사분위수는 중위수(median)이다.

일사분위수와 삼사분위수 사이의 거리를 사분위수범위라고 부른다. 일사분위수를 Q1, 삼사분위수를 Q3이라 할 때, 사분위수범위(inter quartile range)  $IQR=Q3-Q1$ 이다. 이는 분포의 양 끝에 있는 값들을 제외하고 가운데 부분을 이루는 절반(50%)이 얼마나 넓은 구간에 펼쳐져 있는가를 나타낸 것으로, 대부분의 케이스가 가운데 모여 있고 일부 이상점이 있는 변수들의 퍼진 정도를 비교하기 위해 많이 쓰인다.

### 2) 상자도표

상자도표(box plot)는 연속형변수의 중위수와 일사분위수, 삼사분위수, 최대값, 최소값 등을 한 눈에 볼 수 있게 정리한 그림이다. 일사분위수(Q1)와 중위수(Q2), 삼사분위수(Q3)의 위치를 서로 평행하게 표시하고, 세 선을 이어서 상자모양을 만든데서 상자도표라는 이름이 붙었다.

일사분위수와 삼사분위수 밖으로는  $\perp$  모양과  $\dashv$  모양으로 최소값과 최대값을 그려 넣는데, 최소값과 최대값의 표시가 마치 상자에 수염이 난 것 같아서 상자수염도표(box-whisker plot)라고도 한다. 평행하는 선들 사이에는 각각 전체의 약 25%의 케이스가 분포되어 있으므로 그 거리가 멀면 넓게 퍼진 것이고, 거리가 가까우면 밀집해 있는 것이다.  $\dashv$  나  $\perp$ 의 길이 안에도 각각 25% 정도의 케이스가 들어 있기 때문에 그 길이가 길면 케이스가 넓게 퍼져 있는 것이고, 짧으면 데이터가 밀집되어 있는 것이다.

이상점을 판단하는 기준은 일사분위수와 삼사분위수에서 1단위척도( $1.5 \times IQR$ ) 이상 벗어나면 '이상값'이라고 하고  $\circ$ 로 표시하고, 2단위척도 이상 벗어나면 '극단값'이라고 하고 \*로 표시하며, 이상점이 있는 경우 이상점의 위치를  $\circ$ 나 \*로 표시하고 그 케이스번호를 적어준다. 변수의 분포를 파악할 수 있으며, 집단 간의 분포의 차이를 비교하는데 특히 유용하다.<sup>58)</sup>





Table 2. Study area explanation

	Study area
A	Yongheung
B	Sinrye
C	Topyeong 1
D	Topyeong 2
E	Seogwipo Weather Station

연구지역의 관측정 가운데 표고가 가장 높은 토평2 관측정이 평균수위 177.06 m로 가장 크고, 표고가 가장 낮은 토평1 관측정이 평균수위 3.55 m로 가장 낮게 형성되었으며, 나머지 관측정은 용흥 40.02 m, 신례 44.46 m를 나타냈다. 또한 관측정의 표고와는 상관없이 지하수위 변동폭은 용흥 지점이 21.60 m로 가장 높게 나타나 용흥 지점이 강우에 의한 영향을 가장 크게 받고 있는 것으로 보이며, 신례와 토평1, 토평2는 각각 16.14 m, 11.83 m, 6.52 m의 변동폭을 나타내었다(Table 3).

Table 3. The statistics of groundwater wells in precedent studies<sup>29)</sup>

Well	Elevation (m)	Well depth (m)	Groundwater Level(m)			
			Ave.	Max.	Min.	Amp.
Yongheung	128.49	-6.51	40.02	53.3	31.70	21.60
Sinrye	103.07	-6.93	44.46	53.45	37.31	16.14
Topyeong 1	36.00	-49.00	3.55	12.87	1.04	11.83
Topyeong 2	217.80	87.80	177.06	181.2	174.67	6.52

\* Ave. : Average, Max. : Maximum, Min. : Minimum, Amp. : Amplitude

## 2. 자료해석방법

서귀포 기상대에서 관측된 강수자료를 이용하여 강수량 추정을 시작한 1961

년부터 1984년(A)과 최대강수량이 나타난 1985년부터 2008년(B)로 기간을 나누어 A기간과 B기간 동안의 강수량, 강수일수, 하천유출일수 등의 변동성을 비교하기 위해 광범위한 분야에 대한 데이터 관리 및 조사 분석을 목적으로 만들어진 SPSS를 이용하여 통계분석을 실시하였다. 또한 환경자원연구원에서 관리하고 있는 지하수위 관측망 자료를 이용하여 함양률을 산정하기 위해 강수량자료와 마찬가지로 SPSS를 이용하여 통계분석을 하였으며, 이와 함께 함양률 산정법인 지하수위 강하곡선법, WTF법(지하수위 변동법)을 이용하여 함양률을 산정하였다. 또 WTF법 이용시 배제될 수 있는 자연배수에 관한 영향을 고려하기 위하여 자연배수율을 산출하여 함양률을 산정, 기존 연구<sup>14)</sup>에서 도출되어진 함양률과 비교·분석하였다.

참고로 장기 관측망 자료를 이용한 지하수위 강하곡선법 이용 방법은 첫째, 지하수위 자료에서 최고수위와 최저수위를 읽어 지하수 최대 수위강하량( $S_m$ )을 구한다. 둘째, 일별 지하수위 자료를 이용하여 수위변동곡선을 작도한다. 셋째, 수위변동곡선에서 수위가 상승하는 부분은 제외하고 수위가 강하하는 구간들을 서로 평행 이동하여 몇 개의 강하곡선이 서로 연결되거나 또는 중첩되도록 작도한다. 넷째, 작도된 수위변동곡선에서 각 시간별 지하수위를 이용하여 수위강하량을 계산한다. 다섯째, 지하수 최대 수위강하량에서 수위강하량을 감한 후 이를 지수함수로 도표화하여 기울기와 관계식을 구한후 식(17)을 이용하여 함양률을 계산한다.<sup>59)</sup> 단 함양률 산정시 신뢰성을 확보하기 위하여 결정계수( $R^2$ )가 0.950 미만은 결과에서 제외하여 분석하였다. 이와 함께 WTF법 이용 방법은 필요한 각 관정의 비산출률 값의 산출을 위하여 지하수위 강하곡선법을 이용하여 산정하였으며, 산정된 각 관정의 비산출률을 문과 우<sup>52)</sup>에 의하여 수정된 식(5)에 적용, 계산하여 함양률을 산정하였다.

## IV. 연구결과

### 1. 강수 변동 특성

#### 1) 연강수량 변동추이

연구지역의 강수량 변동추이 특성을 파악하기 위하여 서귀포 기상대에서 관측된 자료를 분석한 결과 강수량 측정을 시작한 1961년부터 2008년까지의 연평균 강수량은 1823.6 mm, 최소 강수량은 1984년도에 1145.8 mm, 최대 강수량은 1985년도에 3244.3 mm로 나타나 다우년과 과우년의 차이가 2098.5 mm (과우년의 2.8배)에 이를 정도로 매우 큰 차이가 나타나, 김 등<sup>38)</sup>에서와 같이 발생하는 강수의 변동성이 크다는 연구결과와 비슷하게 나타났다(Fig. 5).

또한 강수량 측정을 시작한 1961년부터 1984년(A)과 최대강수량이 나타난 1985년부터 2008년(B) 동안에 발생한 강수량 변동성을 비교 한 결과 A기간 동안의 평균 강수량은 1688.5 mm, 중위수 1716.9 mm, 최대강수량 2241.3 mm, 최소강수량 1145.8 mm로 나타났으며, 이상점으로 나타난 1985년과 1999년을 제외한 B기간 동안의 평균 강수량은 1854.3 mm, 중위수 1804.8 mm, 최대강수량 2398.6 mm, 최소강수량 1368.5 mm로 나타났다. A기간과 B기간 동안의 발생 강수량 변동성을 비교해 본 결과 B기간이 A기간보다 평균 165.8 mm의 강수량이 증가하였고, 사분위수범위에서 강수량 변동성도 더 크게 나타나고 있는 것으로 분석되었다(Fig. 6). 이러한 강수량의 증가는 우리나라에서 발생하고 있는 기후변화의 결과로 강수량이 증가하는 추이<sup>34)</sup>와 비슷하다.

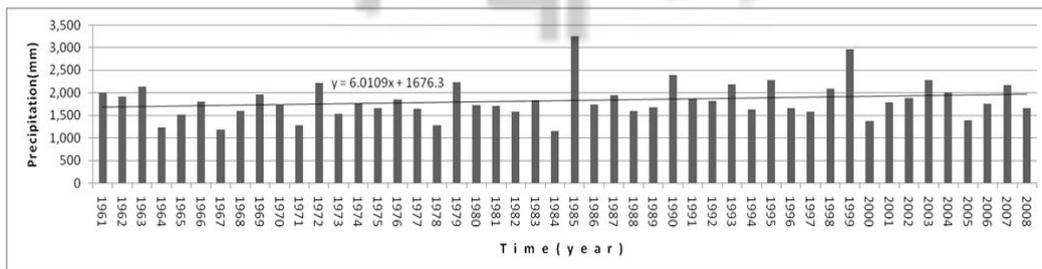


Fig. 5. The variation of annual precipitation in Seogwipo(1961~2008).

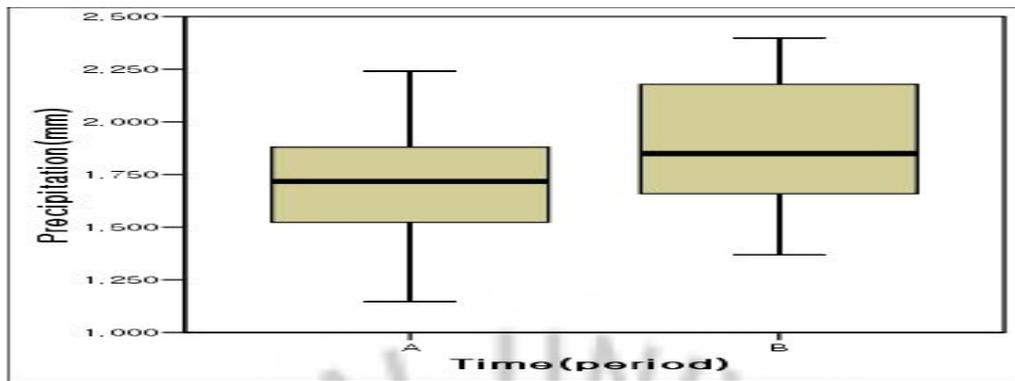


Fig. 6. The comparison of variability in annual precipitation(A:1961~1984, B:1985~2008).

## 2) 일강수량 변동추이

연강수량 증가로 인해 발생하는 서귀 지역의 일강수량과 강수일수(0.1 mm 이상)의 변동추이를 파악하기 위하여 서귀포 기상대에서 관측된 자료를 분석하였다. 그 결과 1995년 7월 2일 일강수량이 365.5 mm가 기록되어 일강수량 가운데 최고치를 기록하였고, 강수일수는 감소하는 추이를 보였으며, 최대 연강수일수는 1980년 149일, 최소 연강수일수는 1994년 99일을 기록하고 있는 것으로 나타나 최대 50일의 차이가 났다.(Fig. 7)

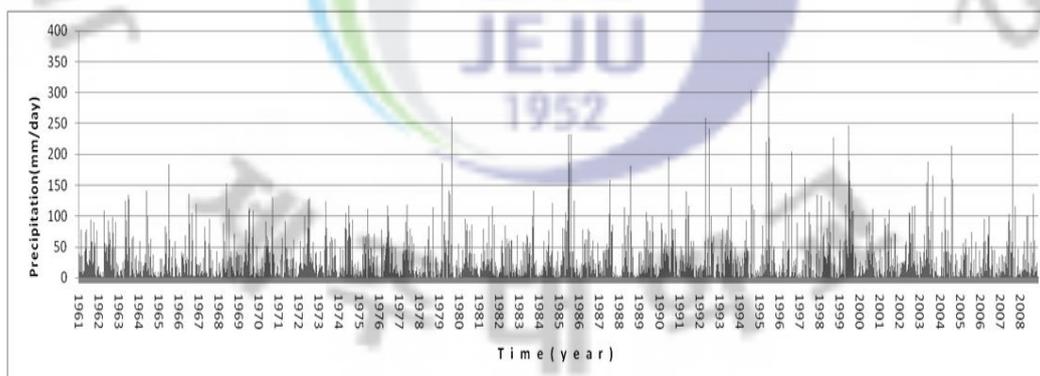


Fig. 7. The variation of daily precipitation in Seogwipo(1961~2008).

또한 Table 4에서 보는 바와 같이 전체 일강수량중 5 mm이하의 강수일이 52.8%로 나타나, 50% 이상이 일강수량 5 mm이하에서 발생하고 있는 것으로

분석되었다. 또한 최대 연강수량을 기록한 1985년을 기점으로 A기간에는 40 mm 이하의 강수일이 90.8%를 차지하였으나, B기간에는 88.6%를 차지하여 발생하는 일강수량이 40 mm 미만에서의 연강수일 비율은 감소하는 경향을 보이고, 40 mm 이상의 연강수일 비율은 증가하는 추이로 나타났으며, 이에 따라 연강수량 증가에 전체 강수일의 약 10%를 차지하는 일강수량 40 mm 이상의 강수가 영향을 주는 것으로 판단되며, 강우강도가 증가하였음을 알 수 있다.

Table 4. The variability in raining days ratio according to ranges of daily precipitation

	Total(%)	A(%)	B(%)
0.1≤P≤5	52.8	54.4	51.2
5<P≤10	12.8	12.8	12.7
10<P≤20	13.5	12.9	14.0
20<P≤40	10.7	10.7	10.7
40<P≤80	7.3	6.8	7.8
80<P	2.9	2.3	3.6

※ Total : 1961~2008, A : 1961~1984, B : 1985~2008

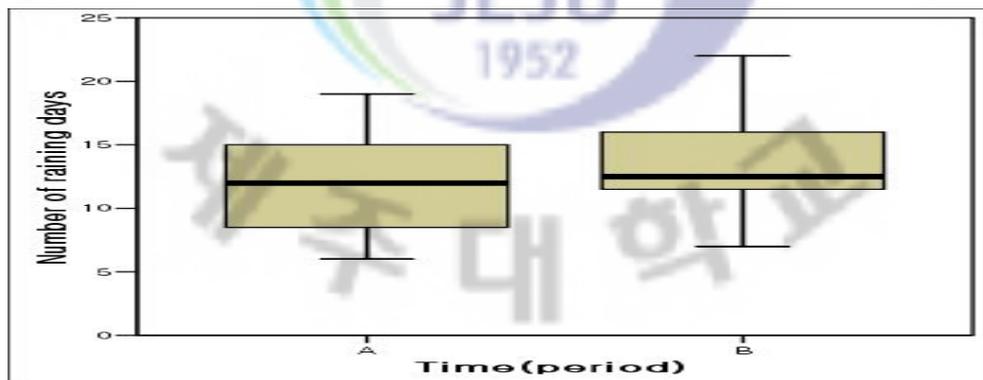


Fig. 8. The comparison of variability in the number of raining days exceeding 40 mm per day.

일강수량 40 mm를 초과한 강수일의 변동성 비교(Fig. 8)를 파악하기 위하

여 자료 분석한 결과, A기간 동안의 최대 강수일은 19일, 평균 강수일 12일, 중위수 12일, 최소 강수일 6일로 나타났으며, B기간 동안에는 이상점으로 나타난 1985년과 1999년을 제외한 최대 강수일은 22일, 평균 강수일 13일, 중위수 12일, 최소 강수일 7일로 나타났고, 사분위수 범위에서 강수일의 분포 범위는 작아지고, 최대-최소 범위는 더 크게 변동하는 것으로 분석되었다.

### 3) 계절별 강수 패턴 변동추이

강수 패턴의 계절별 변동추이를 파악하기 위하여 강수량 측정을 시작한 1961년부터 1984년까지의 A기간과 최대강수량이 나타난 1985년부터 2008년까지의 B기간으로 나누어 강수량, 강수일수, 하천유출일수(40 mm/day이상)를 중심으로 분석하였다.

계절별 강수량은 사계절 모두 증가하고 있는 것으로 분석되어 강수량의 증가가 사계절에서 모두 발생하고 있는 것으로 보이며, 분석기간 동안의 연강수량의 최대값과 최소값의 차를 분석한 결과 봄 614.6 mm, 여름 1596.4 mm, 가을 618.7 mm, 겨울 323.5 mm를 보여 여름의 변동폭이 가장 큰 것으로 나타났다(Fig. 9).

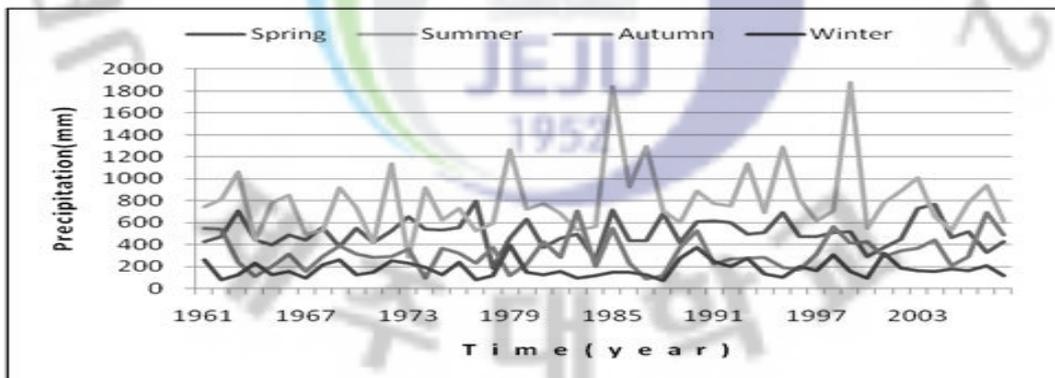


Fig. 9. The seasonal change of precipitation(1961~2008).

또한 A기간과 B기간 동안 계절별 발생한 연강수량 변동성을 비교(Fig. 10)해 본 결과 봄은 이상점으로 나타난 1977년과 1978년을 제외한 A기간 동안의 평균 강수량은 490.6 mm, 중위수 479.2 mm, 최대강수량 711.8 mm, 최소강수

량 259.2 mm로 나타났으며, B기간 동안의 평균 강수량은 523.7 mm, 중위수 504.3 mm, 최대강수량 765.3 mm, 최소강수량 294.6 mm로 나타났으며, 사분위수범위는 B기간이 넓게 나타나 봄철 연강수량 변동성이 사분위수범위에서 더 크게 나타나는 것으로 분석되었다.

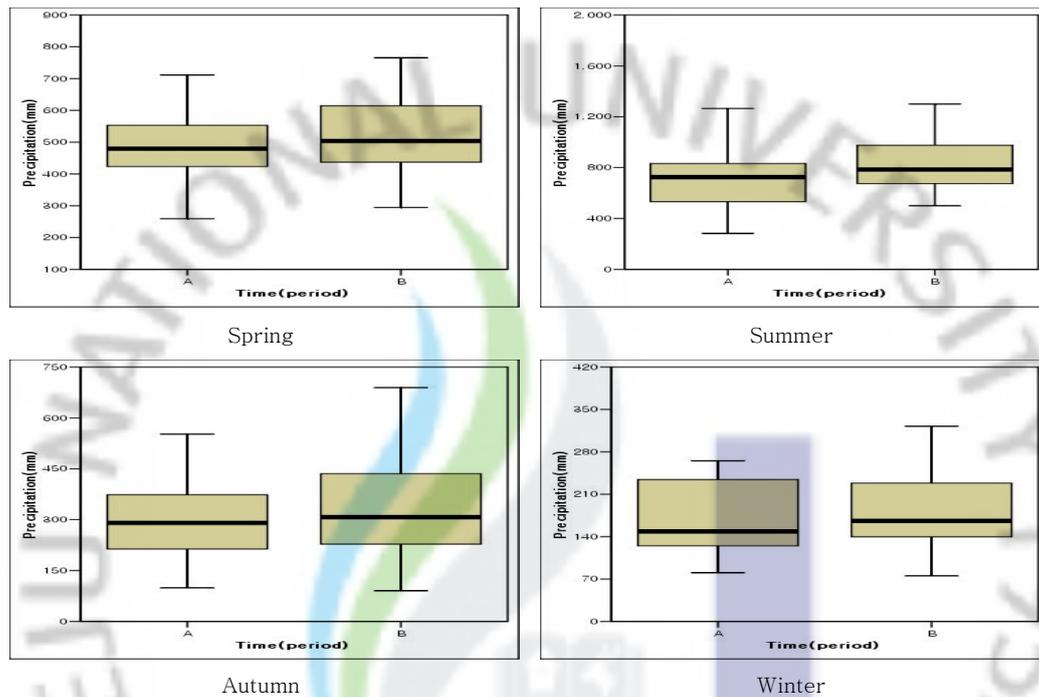


Fig. 10. The seasonal comparison of variability in annual precipitation(A:1961~1984, B:1985~2008).

여름은 A기간 동안의 평균 강수량은 715.3 mm, 중위수 726.3 mm 최대강수량 1265.2 mm, 최소강수량 283.9 mm로 나타났으며, B기간 동안 이상점으로 나타난 1985년과 1999년을 제외한 평균 강수량은 818.3 mm, 중위수 782.4 mm, 최대강수량 1300.5 mm, 최소강수량 534.5 mm로 나타났다. 사분위수범위는 비슷하게 나타났으나 B기간 동안 중위수 아래 부분에서 밀집하는 양상으로 변동하였으며, 최대강수량에서 최소강수량까지의 차이는 A기간이 더 크게 나타나는 것으로 분석되어 최대-최소 변동성은 줄어드는 것으로 분석되었다.

가을은 A기간 동안 이상점으로 나타난 1983년을 제외한 평균 강수량은 292.0 mm, 중위수 289.1 mm, 최대강수량 552.1 mm, 최소강수량 98.8 mm로

나타났으며, B기간 동안의 평균 강수량은 340.6 mm, 중위수 307.4 mm, 최대 강수량 689.3 mm, 최소강수량 90.7 mm로 나타났다. 사분위수범위와 최대강수량에서 최소강수량까지의 차이 모두 B기간이 크게 나타나, 강수량의 변동성이 모든 범위에서 가장 크게 변동한 것으로 분석되었다.

겨울은 A기간 동안 이상점으로 나타난 1979년을 제외한 평균 강수량은 163.3 mm, 중위수 146.5 mm, 최대강수량 265.5 mm, 최소강수량 80.6 mm로 나타났다으며, B기간 동안 이상점으로 나타난 1990년을 제외한 평균강수량은 181.2 mm, 중위수 163.7 mm, 최대강수량 322.4 mm, 최소강수량 75.2 mm로 나타났다. A기간 동안의 사분위수범위가 더 넓게 나타나 B기간 동안보다 더 크게 강수량이 변동하였으나, 최대강수량에서 최소강수량까지의 차이는 B기간이 더 크게 강수량이 변동하여 사분위수범위에서는 강수량 변동성은 줄어들고 최대-최소에서의 변동성이 크게 나타났다.

계절별 연강수일수 변동추이는 여름을 제외한 봄, 가을, 겨울 모두 감소하는 것으로 분석되었으며, 평균 연강수일수는 봄 32.2일, 여름 41.8일, 가을 24.6일, 겨울 28.3일로 나타났다. 또한 분석기간 동안의 연강수일수의 최대값과 최소값의 차를 분석한 결과 봄 23일, 여름 27일, 가을 22일, 겨울 22일을 보여 여름의 변동성이 가장 큰 것으로 나타났다(Fig. 11).

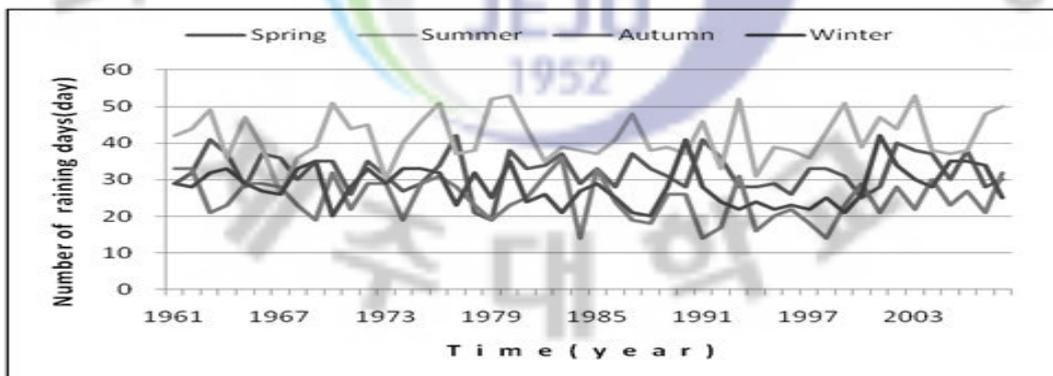


Fig. 11. The seasonal change of number of raining days(1961~2008).

또한 A기간과 B기간 동안에 계절별 발생한 연강수일수 변동성을 비교(Fig. 12)해 본 결과 사계절 모두 사분위수범위에서 B기간이 더 넓게 분포하여 강수

일수 변동성이 더 커진 것으로 나타났으며, 중위수 아래에 강수일수가 더 밀집한 형태를 나타냈다. 또 겨울을 제외한 봄, 여름, 가을에서 최대값에서 최소값까지의 분포 범위는 줄어드는 것으로 분석되었다.

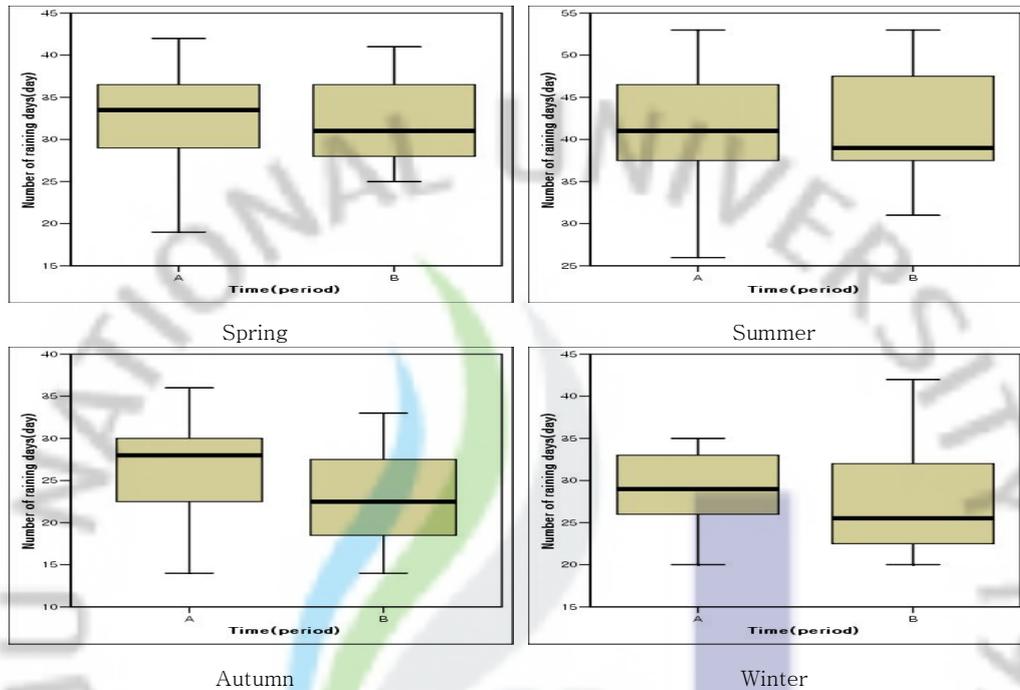


Fig. 12. The seasonal comparison of variability in annual number of raining days(A:1961~1984, B:1985~2008).

지하수 함양량에 영향을 줄 수 있는 하천유출이 일어나는 일강수량 40 mm 이상 일수의 변동추이를 분석하였다(Fig. 13). 계절별 연평균 하천유출일수는 사계절 모두 증가하는 것으로 분석되었으며, 분석기간 동안의 평균 하천유출 일수는 봄 4.1일, 여름 6.4일, 가을 2.0일 겨울 0.7일로 나타났고, 최대값과 최소값의 차를 분석한 결과 봄 7.0일, 여름 13.0일, 가을 6.0일, 겨울은 2.0일로 나타나 여름의 변동성이 가장 크게 나타나는 것으로 분석되었다.

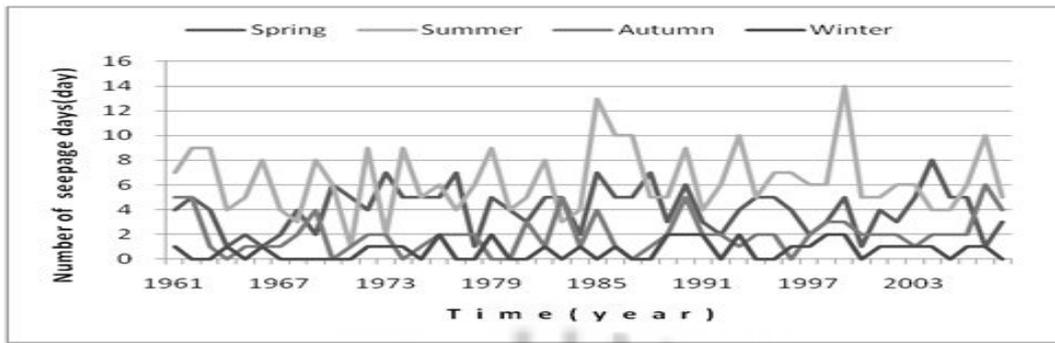


Fig. 13. The seasonal change of annual seepage days(1961~2008).

A기간과 B기간 동안에 계절별 발생한 연하천유출일수 변동성을 비교(Fig 14) 분석 한 결과 중위수는 모두 B기간이 A기간보다 크게 나타났으며, B기간 동안 겨울을 제외한 봄, 여름, 가을에 최대값에서 최소값까지의 분포 범위는 크게 나타나 하천유출일수 변동성이 커진 것으로 분석되었다. 또 사분위수범위에서 봄은 변동성이 작아지고, 여름과 가을은 비슷, 겨울은 커진 것으로 분석되었다.

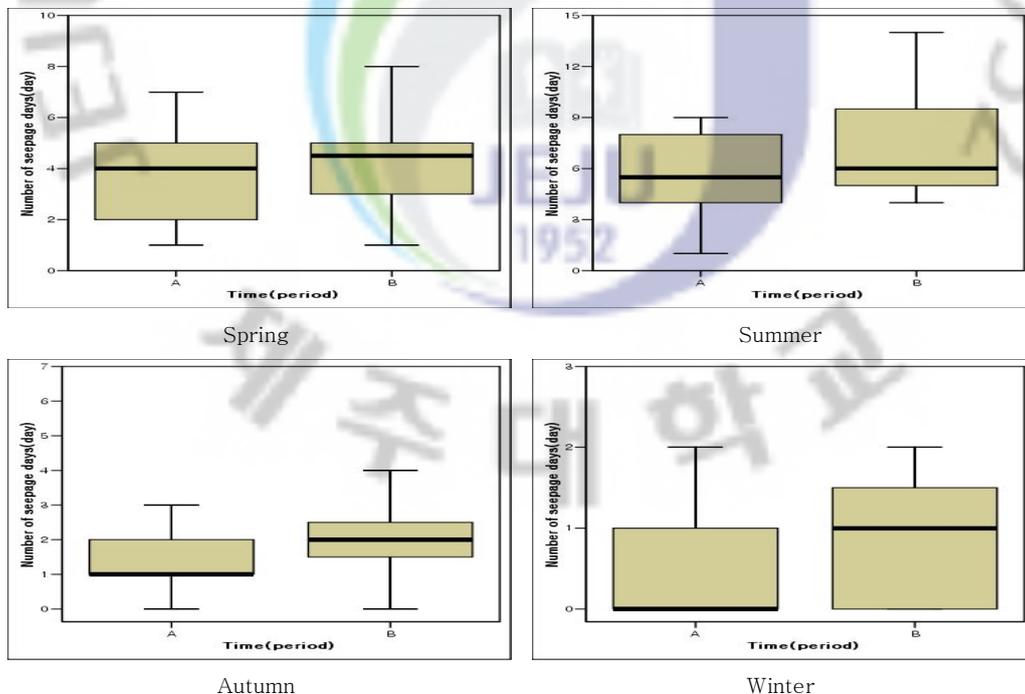


Fig. 14. The seasonal comparison of variability in annual seepage days(A:1961~1984, B:1985~2008).

## 2. 지하수위 변동특성

연구지역인 4개소에 대한 수위자료와 기상청 관측 1개 기상대에서 관측된 강수량 자료를 근거로 2001년 1월에서 2008년 12월까지 최근 8년간의 강수량과 지하수위 변화를 관정별로 구분하여 분석하였다(Fig 15~18).

그 결과 제주도 지질 특성에 의하여 지하수의 수위변화특성중 하나인 강수에 의한 수위 변화가 두드러지며, 연구지점의 지하수위 변동은 약간의 차이는 있으나 관정의 위치와 표고에 상관없이 비슷한 유형의 변동을 보여 제주도 지하수위의 계절적인 변동이 해안가에서의 이격거리에 관계없이 유사하게 나타난다는 강 등<sup>28)</sup>의 연구와 일치하는 것으로 나타났다. 또한 지하수위의 변동이 강수량이 많은 하절기를 중심으로 상승하고 강수량이 상대적으로 적은 동절기에 하강하는 계절적인 변동을 반복하는 것으로 나타나 박<sup>16)</sup>의 연구결과와 일치하였다.

지하수위의 연최고수두는 여름철 장마와 태풍 등으로 인해 발생하는 다량의 강수량으로 인하여 일어나는 지하수위의 상승이 끝나는 시점에 대부분 발생하였으며, 연최저수두는 강수량이 많아지기 시작하는 시점 전에 대부분 발생하였다. 이러한 결과는 제주도 지질 특성 중 하나인 투수성 지질에 의하여 여름철에 발생하는 다량의 강수량으로 인해 지하수위의 상승이 일어나 연최고수두가 발생하며, 연최저수두는 정 등<sup>60)</sup>에서와 같이 겨울 동안에 내리는 비는 일 강수량으로 보아 대부분 여름에 내리는 비보다 양이 적고, 토양이 동결되어 투수가 방해됨에 따라 강수가 토양 내부로 침투하지 못하기 때문에 자연배수 등에 의한 지속적인 지하수위의 하강으로 인해 발생하는 것으로 사료된다.

조사기간 동안의 변동폭은 신례 9.22m, 토평1 9.64m, 토평2 4.47m, 용흥 17.28m로 나타나 용흥관측정이 다른 관측정에 비해 강수에 의한 영향을 많이 받고 그 외 관측정은 상대적으로 적게 받고 있는 것으로 보인다. 또한 연최고수두는 강수량이 비교적 많았던 2007년에 전체적으로 높게 나타났으며 지하수위 변동폭은 4개 지점 모두 강수량이 적었던 2005년에 가장 낮은 변동폭을 보이는 것으로 분석되었다(Table 5).

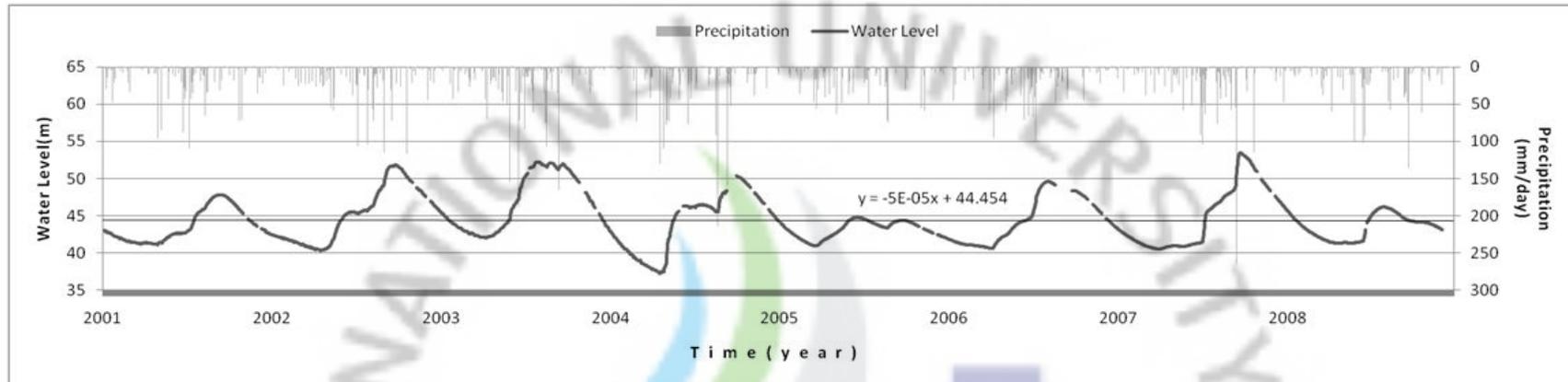


Fig. 15. The change of groundwater level related to precipitation at Sinrye region.

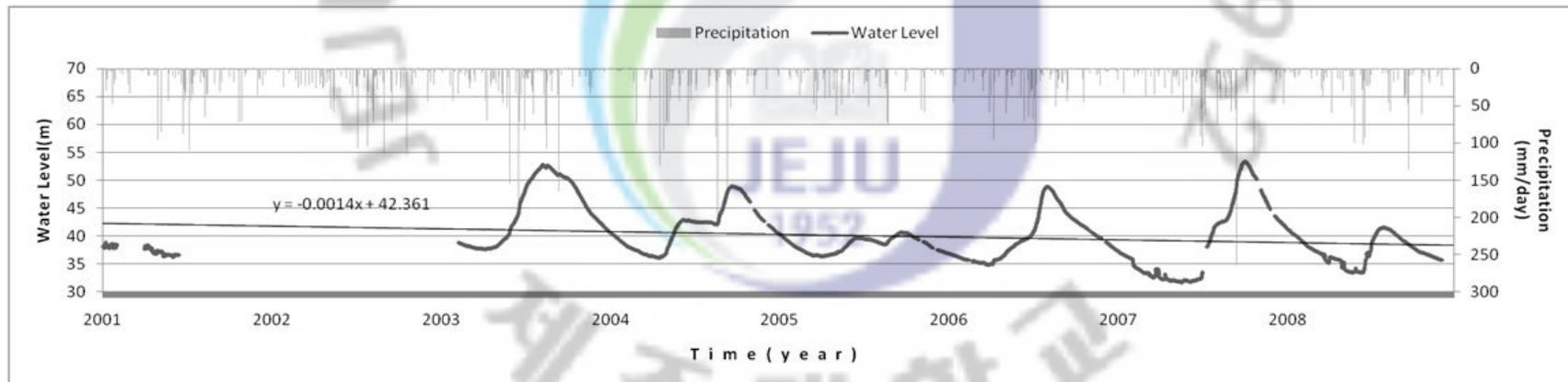


Fig. 16. The change of groundwater level related to precipitation at Yongheung region.

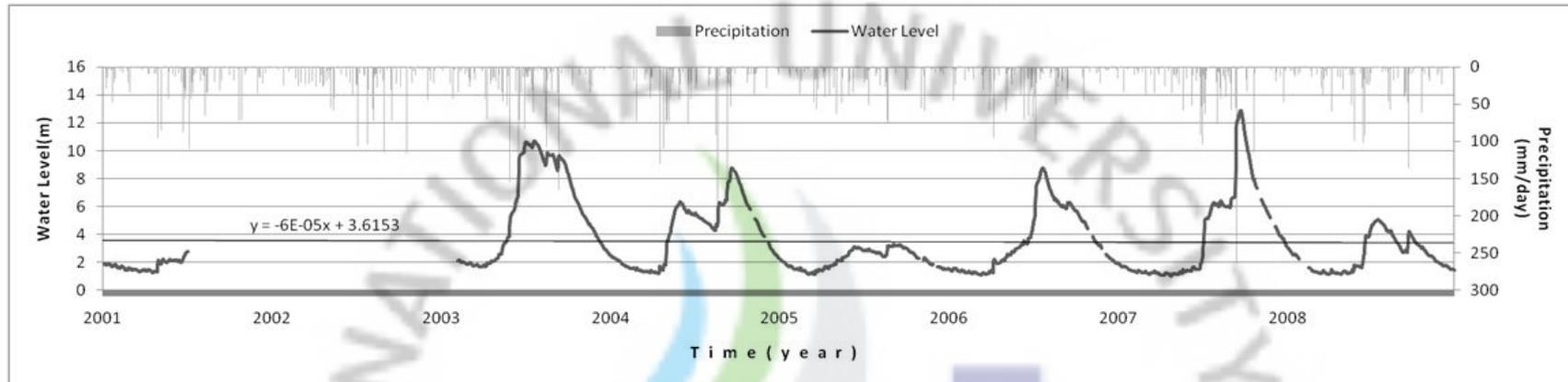


Fig. 17. The change of groundwater level related to precipitation at Topyeong 1 region.

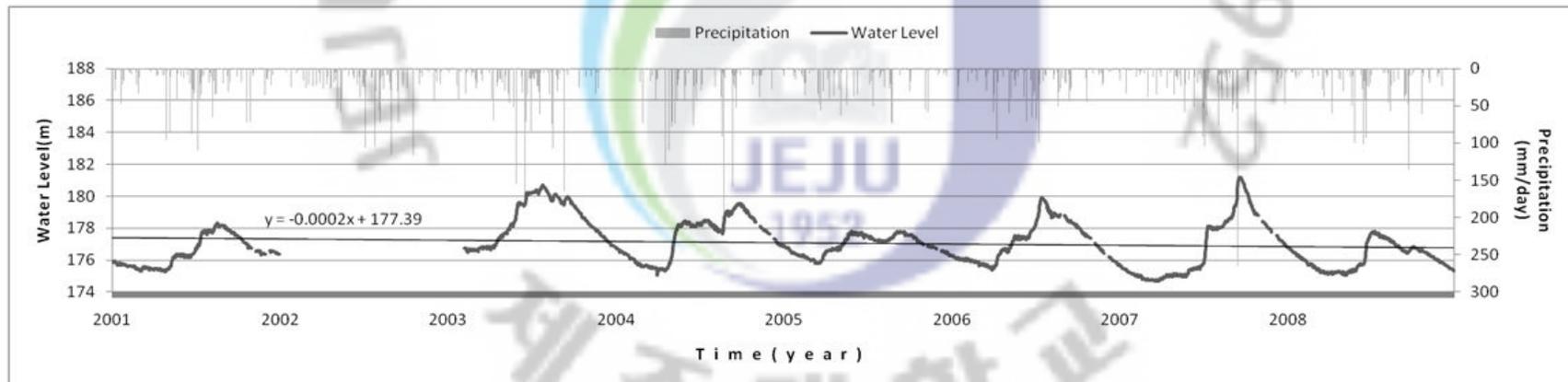


Fig. 18. The change of groundwater level related to precipitation at Topyeong 2 region.

Table 5. Result of the groundwater level of sampling point

		2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Sinrye	Ave.	43.65	45.13	46.69	43.83	43.19	44.19	44.71	43.60
	Max.	47.83	51.82	52.24	50.35	44.79	49.60	53.45	46.18
	Min.	41.11	40.36	42.06	37.31	40.97	40.66	40.54	41.31
	Amp.	6.72	11.46	10.18	13.04	3.82	8.94	12.91	4.87
Topyeong 1	Ave.	-	-	5.62	4.13	2.24	3.62	3.93	2.56
	Max.	-	-	10.70	8.74	3.34	8.77	12.87	5.05
	Min.	-	-	1.68	1.22	1.15	1.11	1.04	1.16
	Amp.	-	-	9.02	7.52	2.19	7.66	11.83	3.89
Topyeong 2	Ave.	-	-	178.46	177.42	176.95	177.15	176.72	176.19
	Max.	-	-	180.72	179.56	177.82	179.90	181.19	177.81
	Min.	-	-	176.48	175.04	175.77	175.37	174.67	175.03
	Amp.	-	-	4.24	4.52	2.05	4.53	6.52	2.78
Yongheung	Ave.	-	-	44.46	41.52	38.17	39.85	38.98	37.60
	Max.	-	-	52.73	48.90	40.64	48.82	53.30	41.75
	Min.	-	-	37.64	36.07	36.32	34.80	31.70	33.41
	Amp.	-	-	15.09	12.83	4.32	14.02	21.60	8.34
Precipitation(mm)		1782.1	1877.2	2280.1	2018.0	1390.6	1757.6	2166.5	1661.4

\* Ave. : Average, Max. : Maximum, Min. : Minimum, Amp. : Amplitude

### 3. 지하수위 변동 곡선을 이용한 함양률 산정

#### 1) 지하수위 강하곡선법을 이용한 함양률 산정

지하수위 강하곡선법을 이용하여 산정한 각 연구 지점에서의 연도별 함양률을 Table 6에 나타내었다. 평균 함양률은 최대 37.2%, 최소 23.9%로 분석되었으며 관정별로 최대 13.3%의 차이가 났다. 관정 표고별로는 표고가 가장 높은 곳에 위치한 토평2와 가장 낮은 곳에 위치한 토평1 관정의 평균 함양률이 다른 두 관정에 비하여 높게 분석되어 고도별로 함양률의 차이가 나타나는 것으로 분석되었다. 또한 각 관정에서의 연도별 함양률 변동을 보면 용흥에서는 최대 30.3%, 최소 22.3%으로 8.0%의 차이가 났으며, 토평2는 최대 40.5%, 최소 32.2%으로 8.3%, 토평1은 최대 41.2%, 최소 27.3%으로 13.9%, 신례는 최대 26.8%, 최소 17.4%로 9.4%의 차이가 나타나 토평1, 신례 순으로 함양률이 크게 변동한 것으로 분석되었다.

이와 같은 연구결과는 연도별 강수량, 강수기간, 강우강도, 선행강수량 등의 인자가 복합적으로 지하수위에 영향을 미치기 때문인 것으로 판단되며, 연구 지점별 함양률에서의 차이는 지점별 지질 특성, 개발심도, 해발 표고에 따른 차이로 인한 결과로 사료된다.

#### 2) WTF법을 이용한 함양률 산정

지하수위는 강수량에 따라 민감하게 반응하며, 일시에 다량의 강수가 내린 것보다 소량씩 연속적인 강수가 지하수위에 미치는 영향이 더 뚜렷하다.<sup>53)</sup> 그러나 기후변화로 인해 강수량은 증가하고 강수일수는 감소하여 결과적으로 강우강도의 증가, 집중호우의 발생 등으로 인하여 지하수 함양률에 영향을 줄 것으로 판단된다. 따라서 강우사상별로 함양률을 산정할 수 있는 비산출률을 이용한 WTF(지하수위 변동법)법을 이용하여 함양률 변화를 분석하였다.

본 연구에서는 비산출률의 측정치가 없으므로 앞서 자료해석방법에서 설명한 바와 같이 대수층 비산출률을 구할 수 있는 지하수위 강하곡선법에서 식(6)와 식(5)을 응용하여 연구 지점별 비산출률을 구하여 함양률을 산정하였다. 응용방법으로는 식(6)에서 함양률은 지하수위 강하곡선법에서 산정된 함양률

Table 6. Recharge rate estimated by analysing the groundwater level hydrograph

Study area	Year	R <sup>2</sup>	k	s <sub>m</sub> (m)	s <sub>30</sub> (m)	s <sub>30</sub> /s <sub>m</sub>	α(%)	Ave.(α)
Yongheung	2003	0.997	0.024	17.115	8.784	0.513	22.3	27.5
	2004	0.909	0.029	13.220	7.681	0.581	25.2	
	2005	0.977	0.040	6.2057	4.337	0.699	30.3	
	2006	0.978	0.036	18.065	11.930	0.660	28.6	
	2007	0.980	0.036	20.826	13.754	0.660	28.6	
Topyeong 2	2003	0.996	0.045	5.9762	4.427	0.741	32.2	37.2
	2004	0.996	0.084	4.1437	3.810	0.919	39.9	
	2005	0.975	0.090	2.7172	2.535	0.933	40.5	
	2006	0.952	0.053	5.3999	4.299	0.796	34.5	
	2007	0.984	0.077	6.7977	6.123	0.901	39.1	
Topyeong 1	2003	0.992	0.033	9.8417	6.185	0.628	27.3	36.5
	2004	0.963	0.061	8.3721	7.029	0.840	36.5	
	2005	0.988	0.078	2.4426	2.207	0.904	39.2	
	2006	0.996	0.071	8.3179	7.329	0.881	38.2	
	2007	0.994	0.100	13.318	12.655	0.950	41.2	
Sinrye	2003	0.947	0.016	15.329	5.844	0.381	16.5	23.9
	2004	0.963	0.030	9.8407	5.840	0.593	25.7	
	2005	0.980	0.032	4.3247	2.669	0.617	26.8	
	2006	0.976	0.017	9.3009	3.716	0.400	17.4	
	2007	0.962	0.030	12.683	7.526	0.593	25.7	

을 적용하고,  $s_{30} = \Delta h$ ,  $P_1 = \Sigma P$ 로 대입하여 Table 7에서와 같이 비산출률을 산정하였다.

비산출률을 산정한 결과는 용흥 0.021, 토평2 0.092, 토평1 0.043, 신례 0.032이며 산정시 지하수위 강하율과 지하수 함양률 사이에 직접적인 비례관계를 적용하기 위하여 지하수위 변동곡선에서 수위 상승과 하강의 비례 정도가 가장 잘 나타나는 2003년, 2006년, 2007년을 중심으로 산정하였다.

Table 7. The calculation of specific yields( $S_y$ ) using the groundwater level hydrograph

Study area	Year	$S_y$	Ave. ( $S_y$ )
Yongheung	2003	0.023	0.021
	2004	-	
	2005	0.058	
	2006	0.022	
	2007	0.019	
Topyeong 2	2003	0.104	0.092
	2004	0.154	
	2005	0.180	
	2006	0.078	
	2007	0.095	
Topyeong 1	2003	0.031	0.043
	2004	0.079	
	2005	0.181	
	2006	0.045	
	2007	0.054	
Sinrye	2003	-	0.032
	2004	0.033	
	2005	0.033	
	2006	0.019	
	2007	0.031	

WTF법을 이용하여 2003년부터(신례는 2001년부터) 2008년까지의 함양률을 산정한 결과는 Table 8~11과 같이 분석되었다. 각 기간은 지하수위가 지속적으로 상승이 일어나는 기간을 선택하였으며, 상승기간 동안 발생한 강수일 비율, 총강수량, 총강수 시간을 통하여 평균 강우강도를 산출하여 함께 나타내었다.

그 결과 16개 수역중 중서귀 수역에 속하는 용흥 관정의 평균 함양률은 25.1%로 나타났으며 각 기간별 함양률은 최대 40.1%, 최소 18.5%로 나타나 각 기간별 강수 특성에 따라 21.5%의 차이를 보이는 것으로 분석되었다. 또

동서귀에 속하는 토평2, 토평1, 신례 관정의 평균 함양률은 각각 38.1%, 34.5%, 28.8%로 나타나 토평2 관정의 평균 함양률이 가장 높고, 토평1, 신례 순으로 분석되었다. 이와 함께 토평2의 각 기간별 함양률은 최대 49.4%, 최소 28.6%로 20.8%의 차이, 토평1은 최대 59.2%, 최소 21.6%로 37.6%의 차이, 신례 관정(2003년부터 2008년까지)은 최대 42.7%, 최소 20.5%로 22.2%의 차이를 나타내는 것으로 분석되었으며, 관정 표고가 가장 낮은 토평1의 함양률 변동이 가장 크고, 표고가 가장 높은 토평2의 함양률 변동이 가장 낮게 나타나 표고가 높아질수록 함양률의 변동은 작아지는 것으로 분석되었다.

중서귀에 속하는 용흥에서 지하수위 상승 기간동안의 평균 강우강도는 최대 5.0, 최소 2.9로 2.1의 차이를 보였으며, 강우강도가 낮고 강수일 비율이 높을수록 함양률은 높게 분석되었다. 또한 동서귀에 속하는 지점의 평균 강우강도는 4.5의 차이를 보이고, 지점별로 토평2는 최대 4.9, 최소 2.9로 2.0의 차이, 토평1은 최대 7.3, 최소 2.8로 4.5의 차이, 신례(2003년부터 2008년까지)는 최대 4.7, 최소 2.8로 1.9의 차이를 보여 토평1이 가장 큰 차이를 보였다. 또 토평2는 평균 강우강도가 3.9일 때 함양률이 49.4%, 토평1은 평균 강우강도가 7.3일 때 59.2%, 신례는 3.3일 때 42.7%로 높게 산정되어 동서귀 지역은 중서귀에 비해 높은 강우강도의 영향에 강한 반응을 보이는 것으로 분석되었다.

Table 8. Recharge rate estimated by WTF(Yongheung)

Year	Date (period)	Ratio of raining days (%)	Precipitation (mm)	Precipitation time (hr)	Rainfall intensity (mm/hr)	$\Delta h$ (m)	Recharge rate (%)	Ave. (a)
2003	4. 6~8. 20	50.4	1,563.7	464	3.4	15.01	20.2	25.1
2004	4. 17~6. 9	42.6	670.8	206	3.3	6.80	21.3	
	8. 17~9. 23	61.1	696.2	139	5.0	6.80	20.5	
2005	4. 5~6. 21	25.6	365.9	103	3.6	3.22	18.5	
	8. 19~9. 23	33.3	209.5	64	3.3	2.13	21.4	
2006	3. 31~8. 4	40.9	1,067.8	369	2.9	14.02	27.6	
2007	6. 13~10. 7	51.3	1,423.3	375	3.8	21.38	31.5	
2008	6. 14~7. 26	67.4	418.3	145	2.9	7.98	40.1	

Table 9. Recharge rate estimated by WTF(Topyeong 2)

Year	Date (period)	Ratio of raining days (%)	Precipitation (mm)	Precipitation time (hr)	Rainfall intensity (mm/hr)	$\Delta h$ (m)	Recharge rate (%)	Ave. (a)
2003	4. 5~7. 27	52.6	1,309.8	409	3.2	4.07	28.6	38.1
2004	4. 17~6. 2	44.7	663.3	194	3.4	3.12	43.3	
	8. 20~9. 26	50.0	549.2	111	4.9	1.93	32.3	
2005	3. 19~5. 29	30.6	378.3	96	3.9	2.03	49.4	
	8. 13~9. 5	29.2	198.7	52	3.8	0.67	31.0	
2006	3. 30~7. 17	41.8	1,024.8	345	3.0	4.53	40.7	
2007	5. 21~9. 19	49.2	1,520.6	412	3.7	6.27	37.9	
2008	5. 11~7. 12	57.1	605.7	212	2.9	2.74	41.6	

Table 10. Recharge rate estimated by WTF(Topyeong 1)

Year	Date (period)	Ratio of raining days (%)	Precipitation (mm)	Precipitation time (hr)	Rainfall intensity (mm/hr)	$\Delta h$ (m)	Recharge rate (%)	Ave. (a)
2003	4. 17~7. 4	49.4	979.0	294	3.3	8.70	38.2	34.5
2004	4. 17~5. 31	46.7	663.3	194	3.4	5.13	33.3	
	8. 17~9. 21	61.1	696.2	139	5.0	4.48	27.7	
2005	4.30~6.14	26.1	258.9	73	3.5	1.30	21.6	
2006	5. 5~7. 26	45.8	782.0	280	2.8	6.65	36.6	
2007	5. 23~8. 14	48.8	912.1	309	3.0	5.22	24.6	
	9. 4~9. 26	52.2	503.6	69	7.3	6.93	59.2	
2008	6. 14~7. 19	72.2	415.6	140	3.0	3.41	35.3	

Table 11. Recharge rate estimated by WTF(Sinrye)

Year	Date (period)	Ratio of raining days (%)	Precipitation (mm)	Precipitation time (hr)	Rainfall intensity (mm/hr)	$\Delta h$ (m)	Recharge rate (%)	Ave. (a)
2001	5. 6~6. 3	31.0	157.9	75	2.1	1.25	25.3	29.8
	6. 19~9. 12	51.2	802.1	292	2.7	5.22	20.8	
2002	4. 22~6. 26	47.0	346.5	157	2.2	5.17	47.7	28.3
	7. 5~9. 25	45.8	831.4	263	3.2	6.55	25.2	
2003	4. 11~7. 31	52.7	1,271.3	403	3.2	10.16	25.6	28.3
2004	4. 18~6. 15	39.0	670.8	206	3.3	8.96	42.7	
	8. 19~10. 1	52.2	576.2	122	4.7	4.86	27.0	
2005	3. 21~6. 17	29.2	471.0	120	3.9	3.82	26.0	28.3
	8. 23~9. 23	31.3	162.0	49	3.3	1.04	20.5	
2006	4. 9~8. 6	40.0	967.8	342	2.8	8.94	29.6	28.3
2007	5. 23~9. 26	49.6	1,525.2	417	3.7	12.59	26.4	
2008	5. 28~8. 2	55.2	539.4	193	2.8	4.87	28.9	28.3

자연배수율 산정을 위해서는 강우시 자연적으로 배출되는 양을 결정하는 것이 정확하나, 강우에 의해 지하수위가 상승하면서 자연적인 배수에 따른 수위 강하를 결정하는데에는 어려움이 있다. 따라서 강우에 의한 실제 함양 수위는 자연배수에 의한 수위감소분과 강우에 의한 수위증가분을 합친 값이 된다. 따라서 강우가 끝나고 나서 최대수위를 기준으로 자연배수에 의해 수위가 강하되는 양을 산정하는 것이 가장 보수적이면서 자연적인 지하수위 강하에 대해 보완하는 방법이다.<sup>51)</sup>

일반적으로 김 등<sup>29)</sup>의 연구에 의하면 제주도 지하수의 하강곡선은 최고수위가 나타난 후 매우 가파르게 하강하는 구간, 수위하강이 비교적 가파른 구간, 최저수위가 나타나는 비교적 완만한 하강이 지속되는 구간으로 구분할 수 있다. 따라서 자연배수율을 산정함에 있어서 세 구간을 모두 고려하기 위하여 연도별 최대수위를 기준으로 최저수위가 나타나는 구간까지의 자연배수에 의한 평균 수위 강하량을 구하여 연도별 자연배수율을 산정하고 이에 따라 함양률을 산정하였다.

그 결과 자연배수율에 의한 함양률( $R_1$ ) 변동성을 보면 용흥 최대 14.7%, 최소 7.1%로 7.6%의 차이, 토평2는 최대 23.6%, 최소 13.4%로 10.2%의 차이, 토평1은 최대 26.9%, 최소 9.2%로 17.7%의 차이, 신례(2003년부터 2007년까지)는 최대 17.1%, 최소 9.5%로 7.6%의 차이로 나타나 저지대에 위치한 토평1의 자연배수율에 의한 함양률 변동이 가장 크게 나타났다. 또 함양률( $R_2$ )은 자연배수율을 배제하였을때와 비교시 용흥은 11.9%, 토평2 17.7%, 토평1 13.9%, 신례 15.8%로 분석되어 평균 14.8%에 해당하는 함양률이 증가하였으며, 변동성은 용흥 최대 50.2%, 최소 27.6%로 22.6% 차이, 토평2 최대 72.1%, 최소 45.5%로 26.6% 차이, 토평1 최대 72.5%, 최소 30.8%로 41.7% 차이, 신례(2003년부터 2008년까지) 최대 58.2%, 최소 32.6%로 25.6% 차이를 나타내 저지대에 위치한 토평1 관정이 가장 큰 변동성을 보였다. 이러한 자연배수율에 의한 함양률( $R_1$ )은 연구기간 동안 실제 강수의 평균 14.8%에 해당하며, 자연배수율을 고려시 함양률 자체에 대해서 약 30%의 영향력을 보이는 것으로 분석되어 강수현상에 의해 발생하는 지하수 함양률 평가시에는 자연배수에 의한 함양률을 고려해 주어야 할 것으로 판단된다.

Table 12. Recharge rate estimated by WTF(Yongheung : drainage rate considered)

Year	Date (period)	Drainage rate (m/day)	Study duration (day)	$\Delta h$ (m)	Recharge rate ( $R_1$ , %)	Ave. ( $R_1$ )	Recharge rate ( $R_2$ , %)	Ave. ( $R_2$ )
2003	4. 6~8. 20	0.067	137	9.18	12.3	11.9	32.5	37.0
2004	4. 17~6. 9	0.065	54	3.51	11.0		32.3	
	8. 17~9. 23	0.065	36	2.34	7.1		27.6	
2005	4. 5~6. 21	0.031	78	2.42	13.9		32.4	
	8. 19~9. 23	0.031	36	1.12	11.2		32.5	
2006	3. 31~8. 4	0.059	127	7.49	14.7		42.3	
2007	6. 13~10. 7	0.085	117	9.95	14.7		46.2	
2008	6. 14~7. 26	0.047	43	2.02	10.1		50.2	

Table 13. Recharge rate estimated by WTF(Topyeong 2 : drainage rate considered)

Year	Date (period)	Drainage rate (m/day)	Study duration (day)	$\Delta h$ (m)	Recharge rate (R <sub>1</sub> , %)	Ave. (R <sub>1</sub> )	Recharge rate (R <sub>2</sub> , %)	Ave. (R <sub>2</sub> )
2003	4. 5~7. 27	0.023	114	2.62	18.4	17.7	47.0	55.8
2004	4. 17~6. 2	0.022	47	1.03	14.3		57.6	
	8. 20~9. 26	0.022	38	0.84	14.0		46.3	
2005	3. 19~5. 29	0.013	72	0.94	22.8		72.1	
	8. 13~9. 5	0.013	24	0.31	14.4		45.5	
2006	3. 30~7. 17	0.021	110	2.31	20.7		61.4	
2007	5. 21~9. 19	0.032	122	3.90	23.6		61.6	
2008	5. 11~7. 12	0.014	63	0.88	13.4		55.0	

Table 14. Recharge rate estimated by WTF(Topyeong 1 : drainage rate considered)

Year	Date (period)	Drainage rate (m/day)	Study duration (day)	$\Delta h$ (m)	Recharge rate ( $R_1$ , %)	Ave. ( $R_1$ )	Recharge rate ( $R_2$ , %)	Ave. ( $R_2$ )
2003	4. 17~7. 4	0.039	79	3.08	13.5	13.9	51.7	48.4
2004	4. 17~5. 31	0.042	45	1.89	12.3		45.5	
	8. 17~9. 21	0.042	36	1.51	9.3		37.0	
2005	4.30~6.14	0.012	46	0.55	9.2		30.8	
2006	5. 5~7. 26	0.033	83	2.74	15.1		51.6	
2007	5. 23~8. 14	0.068	84	5.71	26.9		51.5	
	9. 4~9. 26	0.068	23	1.56	13.4		72.5	
2008	6. 14~7. 19	0.031	36	1.12	11.5		46.8	

Table 15. Recharge rate estimated by WTF(Sinrye : drainage rate considered)

Year	Date (period)	Drainage rate (m/day)	Study duration (day)	$\Delta h$ (m)	Recharge rate ( $R_1$ , %)	Ave. ( $R_1$ )	Recharge rate ( $R_2$ , %)	Ave. ( $R_2$ )
2001	5. 6~6. 3	0.035	29	1.02	20.6	20.2	45.9	50.0
	6. 19~9. 12	0.035	86	3.01	12.0		32.8	
2002	4. 22~6. 26	0.052	66	3.43	31.7		79.4	
	7. 5~9. 25	0.052	83	4.32	16.6	41.8		
2003	4. 11~7. 31	0.057	112	6.38	16.1	13.8	41.6	42.2
2004	4. 18~6. 15	0.055	59	3.25	15.5		58.2	
	8. 19~10. 1	0.055	44	2.42	13.4		40.4	
2005	3. 21~6. 17	0.019	89	1.69	11.5		37.4	
	8. 23~9. 23	0.019	32	0.61	12.0		32.6	
2006	4. 9~8. 6	0.043	120	5.16	17.1		46.6	
2007	5. 23~9. 26	0.059	127	7.49	15.7		42.1	
2008	5. 28~8. 2	0.024	67	1.61	9.5		38.4	

Table 16. The Regional Recharge Rate with application of Water Balance Analysis<sup>14)</sup>

	East Seogwi	Middle Seogwi
Common year	41.3	39.8
The rain most plentifully year	31.8	35.7
The rain most few year	41.5	38.1
1993	43.2	41.3
2002	38.5	39.8

이와 같이 자연배수율을 고려하여 산정한 함양률(중서귀 37.0%, 동서귀 49.0%)은 Table 16에서와 같이 기존 연구에서 산정된 함양률과 비슷한 결과를 보여 장기 지하수위 측정자료를 이용한 관정별 비산출률 산정과 함양률 산정의 적용이 가능할 것으로 판단되며, 수문 변화에 따른 적정 개발량 산정과 지하수 관리의 기초 자료로 활용 가능할 것으로 판단된다.

## V. 결론

서귀지역의 강수량 변화에 따른 함양률 산정과 지하수위의 변동 특성을 파악하기 위하여 서귀포 기상대에서 관측된 강수 자료와 환경자원연구원에서 관리하고 있는 지하수위 관측망 자료를 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 강수량 측정을 시작한 1961년부터 1984년(A)과 최대강수량이 나타난 1985년부터 2008년(B) 동안의 강수 사례를 비교분석 한 결과 연구지역의 연강수량은 증가하는 추이를 보이고 있으며, 사분위수범위에서 변동성은 커지는 것으로 분석되었다. 또한 강수량은 증가하고 강수일수는 감소함에 따라 강우강도는 증가하고 있는 것으로 분석되었다.
2. 모든 계절에서 강수량이 증가하고 있는 것으로 분석되어 연강수량 증가가 모든 계절에서 나타나는 것으로 보이며, 강수량 변동성은 가을이 가장 크게 나타나는 것으로 분석되었다. 또한 강수일수 역시 사분위수범위에서 변동성이 크게 나타나는 것으로 분석되었다.
3. 2003년부터 2007년까지의 지하수위 강하곡선법을 이용(신뢰도 확보를 위하여 결정계수 0.950 미만은 제외)한 각 관정별 평균 함양률 산정 결과는 용흥 27.5%, 토평2 37.2%, 토평1 36.5%, 신례 23.9%로 나타났으며, 이 결과를 이용한 각 지점별 비산출률 산출 결과는 용흥 0.021, 토평2 0.092, 토평1 0.043, 신례 0.032로 산정되었다.
4. 이렇게 산정된 비산출률 값과 WTF법을 이용한 기간별 강수 사례에 의한 함양률 산정 결과는 용흥 18.5~40.1%, 토평2 28.6~49.4%, 토평1 21.6~59.2%, 신례 20.5~47.7%의 변화를 보였으며, 평균 함양률은 용흥 25.1%, 토평2 38.1%, 토평1 34.5%, 신례 28.4%로 분석되었다.

5. WTF법을 이용한 함양률 산정시 무시될 수 있는 자연배수율을 고려한 기간별 강수 사례에 의한 함양률 산정 결과는 용흥 27.6~50.2%, 토평2 45.5~72.1%, 토평1 30.8~72.5%, 신례 32.6~79.4의 변화를 보였으며, 평균 함양률은 용흥 37.0%, 토평2 55.8%, 토평1 48.4%, 신례 44.2%로 분석되었다.

6. 지속적인 지하수의 유동과정을 고려한 자연배수율은 연구기간 동안 실제 강수의 평균 14.8%에 해당하며, 자연배수율을 고려시 함양률 자체에 대해서 약 30%의 영향력을 보이므로 강수현상에 의해 발생하는 지하수 함양률 평가시에는 자연배수에 의한 함양률을 고려해야 할 것으로 판단된다.

7. 이러한 자연배수율을 고려한 함양률 산정은 기존 연구에서 산정된 함양률과 비슷한 결과를 보여 장기 지하수위 측정자료를 이용한 관정별 비산출률 산정과 함양률 산정의 적용이 가능할 것으로 판단되며, 수문 변화에 따른 적정 개발량 산정과 지하수 관리의 기초자료로 활용 가능할 것으로 판단된다.

## VI. 참고문헌

1. 박인권, “권원태 기상청 기후연구실장 초청 특강-기후변화의 과학적 이해: 현황과 전망”, 국토, 281(-), 106~110(2005).
2. Trenberth, K. E., “Conceptual framework for changes of extremes of the hydrological cycle with climate change.”, *Climatic Change*, 42, 327~339(1999).
3. 안재현, 유철상, 윤용남, “GCM결과를 이용한 지구온난화에 따른 대청댐 유역의 수문환경 변화 분석”, 한국수자원학회 논문집, 34(4), 335~345(2000).
4. 배덕효, “기후변화와 국토관리;기후변화가 수자원에 미치는 영향과 과제”, 국토, 281(-), 32~38(2005).
5. Change, L.H., Hunsaker, C.T., and Draves, J.D., “Recent research on effects of climate change on water resources”, *Water Resources Bulletin*, 28(2), 273~286(1992).
6. 김병식, 김형수, 서병하, “기후변화가 수자원에 미치는 영향과 평가”, 자연과 문명의 조화(구 토목), 53(4), 30~42(2005).
7. 서정아, “제주도 지역 지하수 흐름 모델 개발”, 공주대학교 석사학위논문(2009).
8. 조진욱, “지하수위 변동 예측 및 비포화대 함수 모델을 이용한 지하수 함양을 산정 연구”, 경북대학교 석사학위논문(2009).
9. 구민호, 이대하, “지하수위 변동법에 의한 지하수 함양량 산정의 수치해석적분석”, 지질학회지, 38(3), 407~420(2002).
10. Scanlon, B. R. and Cook, P. G., “Theme issue on groundwater recharge”, *Hydrogeology Journal*, 10, 3~4(2002).
11. Scanlon, B. R., Healy, R. W. and Cook, P. G., “Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge”, *Hydrogeology Journal*, 10, 18~39(2002).

12. 최병수, 안중기, “지역단위 지하수 자연함양율 산정방법 연구”, 지하수환경, 5(2), 57~65(1998).
13. 최인혁, “광릉 소유역 내 원두부 지역 수문순환에 대한 지하수의 기여도 분석”, 연세대학교 석사학위논문(2006).
14. 제주도, “제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사(Ⅲ)”, 한국수자원공사 (2003).
15. 김일중, “단면도 분석을 통한 제주도의 지형 연구”, 동국대학교 석사학위 논문(2002).
16. 박현주, “서귀포지역 수자원의 보전 오염관리 및 효율적 이용에 관한 연구”, 동아대학교 박사학위논문(2008).
17. 강병남, “제주도 지하수의 고도별·지역별 수질특성”, 제주대학교 석사학위 논문(2000).
18. 박원배, 양성기, 고기원, “제주도 지하수의 수위변동에 관한 연구”, 한국환경과학회지, 3(4), 333~348(1994).
19. 고기원, “제주도의 지하수 부존특성과 서귀포층의 수문지질학적 관련성”, 부산대학교 박사학위논문(1997).
20. 한정상, “지하수환경과 오염”, 박영사(1999).
21. 고기원, 박원배, 김호원, 채종일, “제주도의 지하지질구조와 지하수위 변동과의 관계(Ⅰ)-강우에 의한 지하수위 변동-(요약)”, 지질학회지, 28(5), 540(1992a).
22. 고기원, 양성기, 박원배, 감상규, “제주도의 지하지질구조와 지하수위 변동과의 관계(Ⅱ)-조석에 의한 지하수위 변동-(요약)”, 지질학회지, 28(5), 540~541(1992b).
23. 고기원, 박원배, 고용구, 김성홍, 오상실, 윤 선, “제주도 동부지역의 지하지질구조와 지하수위 변동 및 수질특성에 관한 연구”, 제주도보건환경연구원보, 3(-), 15~43(1992).
24. 윤정수, 박상운, “제주도 지하수의 지역별 수질특성과 수위변화”, 제주도연구, 11(-), 175~232(1994).
25. 이용두, 함진규, “제주도 중산간 지역의 지하수위 변동 특성”, 환경연구논

문집:제주대, 8(-), 101~114(2000).

26. 김지욱, 고기원, 원종호, 한 찬, “제주도 지하수 관리수위 설정에 관한 연구”, 한국지하수토양환경학회지, 10(2), 12~19(2005).
27. 이진용, 이규상, 송성호, “제주도의 지하수 관측망 자료를 이용한 지하수위 및 전기전도도 변화 해석”, 한국지구과학회지, 28(7), 925~935(2007).
28. 강동환, 양성일, 김태영, 박현주, 권병혁, “제주도 지역의 해안선에서 이격 거리에 따른 지하수위 변동특성”, 지질공학, 18(2), 167~176(2008).
29. 김기표, 김봉석, 박윤석, 강봉래, 문덕철, “기준수위 관측정 확대 지정 방안 연구”, 제주특별자치도환경자원연구월보, 1(-), 243~258(2008).
30. 신재기, “한국의 기후변화와 담수 수환경관리”, 한국수자원학회, 39~54(2005).
31. 홍성길, “대기온실기체의 증가와 기후변화의 가능성”, 화학공업과 기술, 13(4), 354~360(1995).
32. 최영진, 문자연, “한국의 여름철 일 강우강도 변화 경향”, 한국기상학회 학술대회 논문집, 339~341(2000).
33. 기상청, “한국의 기후변화”, 기술노트(2002).
34. 최영은, “Trends in daily precipitation events and their extremes in the southern region of Korea”, 환경영향평가, 11(2), 189~203(2002).
35. 이동규, “기후변화에 의한 한반도 기후와 유출량의 변화”, 대한설비공학회, 37(1), 8~12(2008).
36. 박창용, 최영은, 문자연, 윤원태, “기온과 강수특성을 고려한 남한의 기후 지역구분”, 대한지리학회지, 44(1), 1~16(2009).
37. 유종인, 방익찬, “제주지방의 집중호우 경향 분석”, 제주대 해양연구논문집, 21(-), 113~123(1997).
38. 김성수, 강민협, 최홍연, “제주도 기온 및 강수의 변동과 변화의 관측”, 환경연구논문집:제주대, 29(2), 35~45(2005).
39. 김성수, 장승민, 백희정, 최홍연, 권원태, “제주지역 기온과 강수량의 변동 특성”, 한국지구과학회지, 27(2), 188~197(2006).
40. 서용원, 이승현, 김영오, 이동률, “대청댐 운영에 대한 기후변화 영향평가”,

- 대한토목학회 논문집, **20**(7), 427~430(2000).
41. Ludwing, W., Serrat, P., Cesmat L., and Garcia-Esteves, J., "Evaluating the impact of the recent temperature increase on the hydrology of the Têt River(Southern France)", *Journal of hydrology*, **289**(-), 204~221(2004).
  42. 김병식, 김형수, 서병하, "기후변화가 수자원에 미치는 영향과 평가", *자연과 문명의 조화(구 토목)*, **53**(4), 30~42(2005).
  43. 안재현, 유철상, 윤용남, "GCM결과를 이용한 지구온난화에 따른 대청댐 유역의 수문환경 변화 분석", *한국수자원학회 논문집*, **34**(4), 335~345(2001).
  44. Change, L.H., Hunsaker, C.T., and Draves, J.D., "Recent research on effects of climate change on water resources", *Water Resources Bulletin*, **28**(2), 273~286(1992).
  45. Yang, H.K., "Impact of climate change on hydrological disasters", *Journal of The Korean Geomorphological Association*, **13**(3), 45~54(2006).
  46. Lettenmaier D.P. and Burges, S.J., "Climate change : detection and its impact on hydrologic design", *Journal of the Korean Meteorological Society*, **28**(2), 125~132(1978).
  47. 김영오, "기후변화를 고려한 수자원관리 기법", *토목*, **47**(5), 29~33(1999).
  48. 김병식, 김형수, 서병하, 김남원, "기후변화가 용담댐 유역의 유출에 미치는 영향", *한국수자원학회 논문집*, **37**(3), 185~193(2004).
  49. Meinzer O.E., "The occurrence of groundwater in the United States with a discussion of principles", *US Geological Survey Water-Supply*, paper 489, 321(1923).
  50. Healy, R.W. and Cook, P.G., "Using groundwater levels to estimate recharge", *Hydrogeology Journal*, **10**(-), 91~109(2002).
  51. 이상덕, "광릉 소유역 내 원두부 지역의 지하수 함양량 산정과 지하수위 변동 분석", 연세대학교 석사학위논문(2007).

52. 문상기, 우남철, “누적 강수량과 지하수위 곡선을 이용한 지하수 함양량 추정 기법”, 한국지하수토양환경학회지, **6**(1), 33~43(2001).
53. 최병수, “자유면 대수층지역에서 지하수위 변동자료 해석에 의한 대수층 특성연구”, 농공기술, **51**(-), 3~13(1996).
54. Crosbie R.S., Binning P. and Kalma J.D., “A time series approach to inferring groundwater recharge using the water table fluctuation method”, *Water Resources Research*, **41**(-), (2005).
55. Weeks E.P., “The Lisse Effect Revisited”, *Ground Water*, **40**(6), 652~656(2002).
56. 채서일, 김선철, 최수호, (SPSS WIN을 이용한)통계분석, 학현사(2002).
57. 이훈영, (이훈영 교수의) SPSS를 이용한 데이터 분석, 청람(2008).
58. 정영해, 김순홍, 양철호, 염시창, 조지현, 오미영, 정애리, 김파랑, “(SPSS 12.0)통계자료분석”, 한국사회조사연구소(2005).
59. 김규범, 이명재, 김정우, 이진용, 이강근, “수위강하곡선을 이용한 함양량 추정기법의 국가 지하수 관측소 지하수위 자료에의 적용성 평가”, 지질공학, **14**(3), 313~323(2004).
60. 정영상, 권영기, 임형식, 하상건, 양재의, “강원도 경사지 토양 유실 예측용 신USLE의 적용을 위한 강수 인자와 토양 침식성 인자의 검토”, 한국토양비료학회, **32**(1), 31~38(1999).

## 감사의 글

대학원을 들어온지 5년만에 드디어 졸업을 합니다. 다른 사람들은 보통 2년만에 끝나는 석사 생활을 저는 5년이라는 시간을 보냈네요. 대학원 생활을 하면서 참 많은 일을 겪은거 같습니다. 남들은 평생에 한번 경험하기도 힘든 일도 경험해 보고 선후배들과 많이 다투기도 하고 그래서 멀어진 사람도 있고 대학원 들어와서 더 가까워진 사람도 있고.. 연애라는 것도 해보고... 참 많은 일들이 그동안 있었던거 같습니다. 이제는 이 모든 시간들을 추억으로 남기고 졸업을 합니다. 그래서 제가 그동안 말 못했던 분들에게 조금이나마 감사의 마음을 전하고자 합니다.

먼저 철 없는 저를 지금까지도 믿어주시는 부모님께 사랑하고 존경한다고 말하고 싶습니다. 언제나 고생하시는 부모님을 생각하면 죄송스러운 마음이 들지만, 표현을 잘 하지 못하는 성격이라서 평소에 따뜻한 말 한마디도 제대로 한적 없는거 같습니다. 정말 죄송합니다. 앞으로 점점 나아지는 모습 보여드릴거구요 언제나 건강하고 행복하게 오랫동안 함께 생활할 수 있었으면 좋겠습니다. 그리고 형과 동생..... 이제 둘다 결혼을 해서 나만 빼고는 새로운 가족을 이루었기 때문에 형은 빨리 이쁜 조카 선물해 주면 고맙겠고. ㅎㅎ 동생은 오빠들 제끼고 가장 먼저 가정을 꾸려 이쁜 우리 승유를 선물해 주어서 정말 고마워... 승유 때문에 집에 웃음이 끊이지 않는거 같애. 지금처럼 건강하게 자라야 할텐데... 잘 키우길 바란다. 그리고 나도 형과 동생한테 남 부끄럽지 않은 동생이 되도록 노력할게..

또 지난 5년이라는 시간동안 제 학업의 버팀목이 되어주신 이용두 교수님께 감사의 마음을 전하고 싶습니다. 많이 부족한 저를 지금까지 이끌어주시고 가르쳐 주셔서 지금이라도 졸업을 할 수 있게 된거 같습니다. 정말 죄송스럽고 감사합니다. 건강 조심하시고 복잡한 일이 하루빨리 해결되시길 바랍니다.. 그리고 많이 부족한 논문을 세심한 검토와 충고로 완성해 주신 감상규 교수님, 이기호 교수님, 조은일 교수님께 감사의 마음을 전하며, 많은 가르침과 조언을 해주신 허목 교수님, 허철규 교수님께 진심으로 감사의 마음을 전합니다. 부디 항상 행복하시고 건강하셔서 오랫동안 강단에서 강의 하시는 모습을 뵈었으면 좋겠습니다.

이제 제가 논문 쓰는데 많은 걱정과 질책, 조언을 해주신 선후배 그리고 친구들에게 감사의 마음을 전해야겠네요. 먼저 가까운 곳에 있는 사람부터... 항상 같이 밥 먹어주고 논문 잘 되어가는지 체크 해 주신 강경호 조교 선생님. 정말 감사합니다. 제가 포기하지 않고 끝까지

지 논문을 완성 할 수 있었던 가장 큰 힘이었던거 같아요. 그리고 김경연 조교 선생님..... 그리고 현재 센터에서 열심히 일하고 있는 선영이, 우리 실험실의 일당백 재호, 논문을 쓰는 동안 편의를 봐주신 김병현 선생님, 송승혁 선생님, 김현정 선생님 감사드립니다. 이번에 아쉽게 같이 졸업하지 못하는 시범이형, 수미도 다음에는 마무리 잘 해서 꼭 졸업하기 바랍니다. 처음 생긴 기상대학원에서 열심히 생활하는 양기호. 너도 다음에는 꼭 마무리 잘해서 졸업하길 바래..

언제나 함께하고 있는 나의 친구 마왕 형건, 응큼 태완, 궁시경 유경, 결혼을 해서 잘 살고 있는 정일, 정화, 곤정, 경자, 솔로 패밀리 수범, 경진, 진우, 민석, 순실, 명희, 진숙 등도 정말 감사합니다. 그리고 실험실 생활을 하면서 많은 추억을 함께한 선배님이신 고인범 선배님, 오재영 선배님, 고창성 선배님, 김현희 선배님, 송희경 선배님, 신우석 선배님, 홍성민 선배님, 고득영 선배님, 강봉권 선배님, 그리고 몇일 후에 결혼을 하는 한승훈 선배님, 그리고 경봉, 세미, 정훈, 성운, 상운이, 대학원 생활을 함에 있어서 많은 격려와 조언을 해주신 김형철 선배님, 김길성 선배님, 마지막까지 논문 내용에 아낌 없는 조언을 해주신 강진영 박사님께 깊은 감사의 마음을 전합니다.

끝으로 한결같이 옆에서 잔소리 아닌 잔소리를 해준 창수, 멀리서나마 응원해주신 혜영, 근무 잘하고 있는 지윤이 등 모두 감사합니다. 부디 모두 행복하고 좋은 일들만 함께 하길 바랍니다.

새로운 출발을 앞둔 시점에서.....

백 동 명