

강수량 변화가 지하수함양량에 미치는 영향

이 승 현* / 배 상 근**†

The Effect of Precipitation Change to the Groundwater Recharge

Seung Hyun Lee* / Sang Keun Bae**†

요약 : 강수량변화가 도시 및 해안지역의 지하수함양량에 미치는 영향을 파악하기 위하여 부산광역시 수영구를 포함하는 광역 지하수유역에 강수량자료를 변화시켜 지하수함양량을 산정하고 강수량증감에 따른 지하수함양량의 변화특성을 분석하였다. 그 결과, 강수량 증감에 따라 지하수함양량의 증감량은 차이가 있으나 강수량과 지하수함양량의 변화 양상은 동일한 경향을 나타내었다. 강수량의 변화에 대한 지하수함양률의 변화폭이 최근으로 올수록 적어지는 경향을 나타내었다. 또한 연도가 증가함에 따라 지하수함양률이 감소하는 추세를 나타내었다. 강수량 변화 시의 지하수함양량의 전체 평균 변화율은 강수량이 10 % 증가 시에는 2.23 %, 10 % 감소 시에는 2.20 %, 20 % 증가 시에는 4.39 %, 20 % 감소 시에는 4.36 %로 강수의 변화율에 비하여 지하수함양량은 적은 변화율을 보였다. 이들 결과로부터 강수량의 변화율에 비하여 지하수함양률의 변화가 크지 않음을 알 수 있었다. 따라서 도시지역에서 강수량이 변화할 시에는 지하수함양량의 변화율이 이에 미치지 못함으로 직접유출에 미치는 영향이 그 양만큼 커지게 되어 도시홍수의 발생가능성이 지속적으로 증가하게 됨을 알 수 있었다.

핵심용어 : 지하수, 지하수함양, 강수량

Abstract : The objective of this research is to observe and to analyze how the precipitation change can affect urban area and coastal area to groundwater recharge. The variation in the precipitation data of the regional groundwater basin, which includes Busan Metropolitan City Suyeong Gu area, was to estimate the change in the groundwater recharge and to analyze the characteristic changes. Research result reflects that as the precipitation varied, there was some difference in the groundwater recharge. However, differences in the precipitation ratio and the groundwater recharge ratio were consistent. Variation in the precipitation had less impact on the groundwater recharge ratio, and the groundwater recharge ratio decreased as timeline increased. When the precipitation increased by 10 %, groundwater recharge changed by 2.23 %. Accordingly, when it decreased by 10 %, groundwater recharge changed by 2.20 %. When it increased by 20 %, groundwater recharge changed by 4.39 %, and when it decreased by 20 %, groundwater recharge changed by 4.36 %. Despite the dramatic changes in the precipitation, the changes in the groundwater recharge were minimal. From the research, we can observe that the precipitation change had a significant impact on the ratio, but it doesn't really affect the groundwater recharge. Therefore, in urban area, the changes in groundwater recharge don't conform to the changes in the precipitation, and the effect of direct runoff can increase the possible occurrence of urban flooding.

keywords : groundwater, groundwater recharge, precipitation

1. 서 론

근래에 들어 지구 온난화로 인한 기후변화가

급속도로 진행되고 있으며 세계 곳곳에서 폭염과 산불, 집중호우, 홍수, 폭설 등으로 인한 피해가 과거에 비해 급증하고 있다. 우리나라의 기온은

† Corresponding author : skbae@kmu.ac.kr

* 비회원 · 계명대학교 토목공학과 시간강사 · E-mail : sope365@kmu.ac.kr

** 정회원 · 계명대학교 토목공학과 교수 · E-mail : skbae@kmu.ac.kr

지난 100년간 1.5 °C 상승하였고 제주지역 해수면은 지난 40년간 22 cm 상승하였는데 이는 세계평균치의 2~3배 높은 수치이다. 1998년의 지리산에서 발생한 돌발홍수, 1999년의 경기북부에서의 집중호우, 2002년의 태풍 루사, 2003년의 태풍 매미, 2010년의 대규모 폭설 등으로 인하여 기록적인 인명피해와 재산피해를 경험하였다(이자원, 2010).

이러한 기후변화로부터 일어나는 문제들에 대응하기 위하여 여러 분야에 걸쳐 국내외에서 연구들이 이루어지고 있다. 국제적으로 2005년 2월 16일 교토의정서가 공식 발효되어 온실가스 감축에 대한 세계 각국의 노력이 가속화 되고 있다. 또한 IPCC보고서(2006)에 제시된 기후 변화 시나리오와 국가 온실가스 지침은 수자원 관련 연구자들의 경각심을 불러일으켰으며 이를 기반으로 장래 기후 변화에 대처하기 위한 연구들이 활발하게 이루어지고 있다. 최근 국외에서는 기후변화에 대한 적응과 대책마련에 대한 중요성이 강조되면서 기후변화의 완화와 적응의 상호관계에 대한 연구들이 이루어지고 있다(Elisabeth et al. 2009; McEvoy et al. 2006). 기후변화가 지하수에 미치는 영향에 대해서는 잘 알지 못하며(Alley et al. 1999), 지표수에 미치는 영향보다 더욱 복잡하다(Holman 2006). 지하수함양량이 지하수량과 유동에 중요한 영향을 미침으로 이에 대한 연구가 다수 있다(Vaccaro 1992; Green et al. 2007; Aguilera and Murillo 2009). Woldeamlak et al.(2007)은 기후모델을 적용하여 강수량이 건조지역과 반건조지역의 지하수함양량에 미치는 영향이 크다는 것을 규명하였고, Sandstrom(1995)은 반 건조지역에서 강수량이 15 % 감소하면 지하수함양량은 40-50 % 감소함을 밝혔다. 국내에서도 장래 기후 및 수자원 변화에 대한 대책마련을 위한 연구가 활발하게 이루어지고 있으며(김다운 등 2011; 김병식 등 2011; 김승 2008; 류문현

등 2011; 이용준 등 2008) 정부 정책에 반영하기 위한 노력들도 이루어지고 있다(김병식과 윤석영 2008; 김영란과 김갑수 2008). 이러한 국내의 연구들은 대부분 지표수에 한정되어 있다. 도시지역에서는 도시화로 인하여 불투수성이 큰 토지피복 상태로 변화하여 지하수함양이 감소함에 따라 기저유출이 감소하고 직접유출이 증가하여 홍수재해에 취약하게 되는 등 수자원관련 문제에 대한 대책이 필요하다. 지하수 수자원의 이용이 많은 도시지역이나 지역 특성상 수자원 이용에 제한을 받는 지역에서는 지하수 수자원의 확보가 대단히 중요하기 때문에 이들 지역에 대해서는 기후변화에 대비한 지하수 관련 연구가 필요하다. 특히 지하수는 일부 도서 및 해안지역에서는 유일한 수자원 공급원으로 사용되고 있어 기후변화로 인한 지하수량의 변화는 생존에 직접적인 영향을 줄 수도 있지만 이들 지역에서의 지하수 관련 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 강수량의 변화가 도시지역에서의 지하수에 미치는 영향을 파악하기 위한 기초를 제공하고 도시 및 해안지역의 수자원관련 재해를 예방하기 위한 대책을 수립하는데 기여하기 위하여 해안에 위치한 부산광역시 수영구를 포함하는 광역 지하수유역에 대하여 강수량 증감에 따른 지하수함양량의 변화 특성을 분석하였다.

2. 연구대상지역

연구대상지역은 도시화 현상이 진행되면서 지하수이용량은 증가하고 해수침투와 같은 수자원관련 재해의 가능성이 있는 도시/해안지역인 부산광역시 수영구의 광역 지하수유역으로 설정하였다(Fig. 1). 대상유역은 남천동, 수영동, 망미동, 광안동, 민락동 등의 수영구와 수영강 상류유역까지 포함하며 면적은 81.0 km²로 도시화 지역이 전체 면적의 약 40 %를 차지하고 있다.

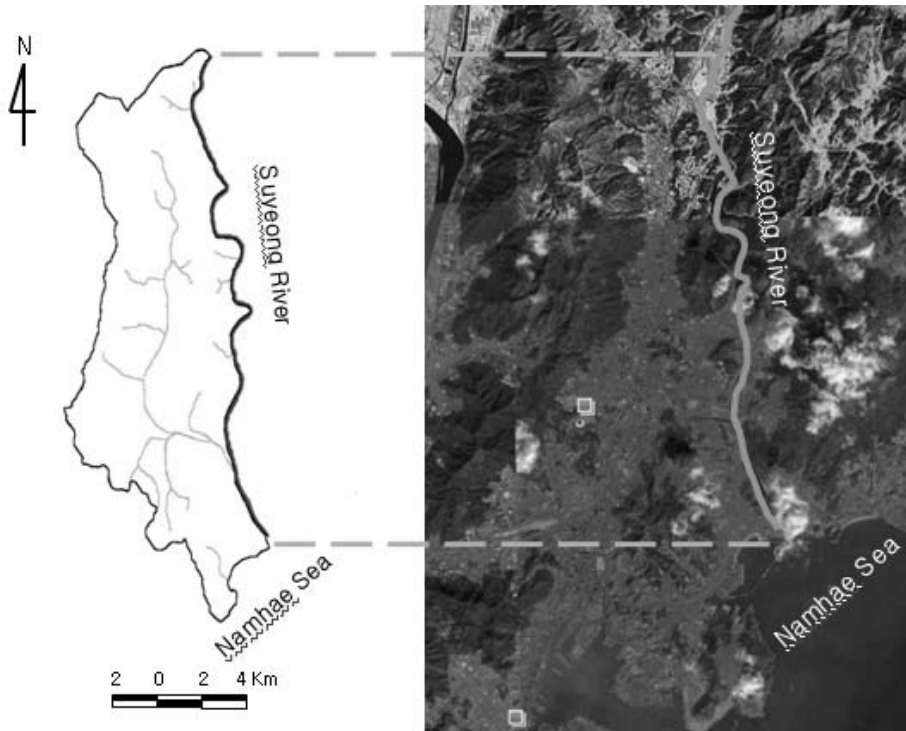


Fig. 1 Study Area

Table 1 Classification of Land cover in the Study Area

Year		1975	1980	1985	1990	1995	2000
Residential	Area(km ²)	15.07	14.06	26.24	26.99	26.45	30.86
	Rate(%)	18.6	17.4	32.4	33.3	32.7	38.1
Agricultural	Area(km ²)	24.31	26.27	11.40	12.88	14.79	10.39
	Rate(%)	30.0	32.4	14.1	15.9	18.3	12.8
Forests	Area(km ²)	39.53	39.41	42.15	39.66	38.85	38.56
	Rate(%)	48.8	48.7	52.1	49.0	48.0	47.6
Pasture	Area(km ²)	0.07	0.27	0.40	0.56	0.25	0.75
	Rate(%)	0.1	0.3	0.5	0.7	0.3	0.9
Bare Soil	Area(km ²)	1.60	0.29	0.22	0.24	0.28	0.14
	Rate(%)	2.0	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2
Water	Area(km ²)	0.39	0.67	0.56	0.65	0.35	0.28
	Rate(%)	0.5	0.8	0.7	0.8	0.4	0.3
Total	Area(km ²)	80.97	80.97	80.97	80.97	80.97	80.97
	Rate(%)	100	100	100	100	100	100

3. 연구대상지역의 토지피복 변화

대상지역에 대한 토지피복 변화를 살펴보면 1975년 이전까지는 시가화지역이 18.6 %, 농업지역이 30.0 %, 산림이 48.8 %, 초지가 0.1 %, 나지가 2.0 %, 수역이 0.5 %를 차지하고 있었으나 1980년부터 1985년까지 시가화지역이 15.0 % 증가하고 농업지역이 18.3 % 감소하는 큰 변

화가 발생하였다(이승현과 배상근 2010). 또한 1995년부터 2000년까지 시가화지역이 5.4 % 증가하고 농업지역이 5.5 % 감소하는 변화를 보였다(Table 1, Fig. 2).

반면 가장 많은 면적을 차지하고 있는 산림과 이의 초지, 나지, 수역의 면적 비율은 큰 변화가 없었다. 이러한 토지피복상태의 변화는 대상지역이 도시화가 이루어지면서 농업지역이 시가화지역으로 변화된 양상을 나타내고 있다.

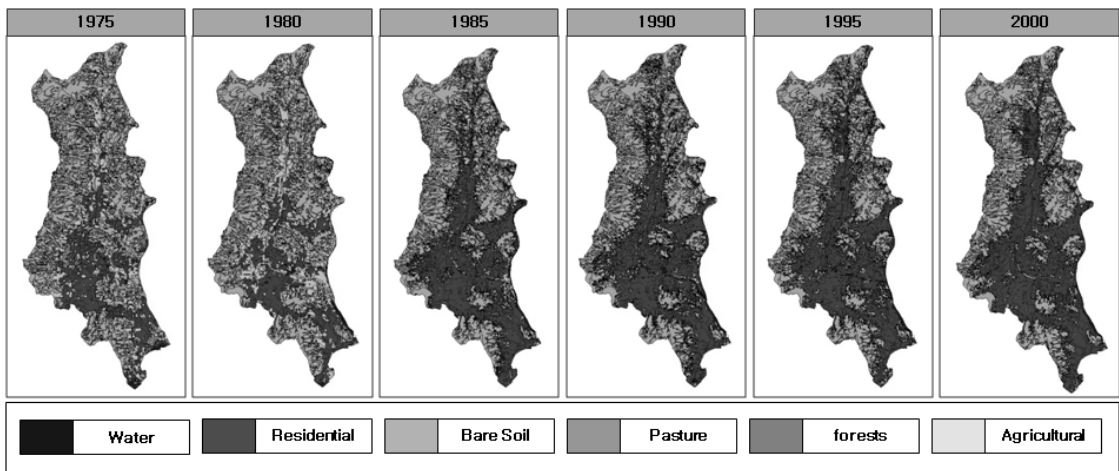


Fig. 2 Temporal Change of Land Cover in the Study Area

4. 강수량 증감에 따른 지하수함양량

Aron et al.(1977)과 Hjelmfelt(1980) 등은 실저류량 F가 강우 중 누가침투량과 같다고 하였으며 F를 다음 식(1)과 같이 유도하였다.

$$F = \frac{(P - 0.2S)S}{P + 0.8S} \quad (1)$$

여기서, S는 실제로 흙으로 흡수되는 물의 양과 흙이 최대로 저류할 수 있는 양, P는 강수량이다. S는 CN값으로 결정되어지며, CN값의 산정은 NRCS방법을 사용하여 토지피복, 수문학적 토양

군, 그리고 선행함수조건을 고려하여 결정되어진다. 각 강우사상별 침투량은 지하수함양량으로 볼 수 있으므로 식(1)을 사용하여 장기간의 침투량을 누계하고 같은 기간의 강우량과 비교하면 지하수함양률을 산정 할 수 있다(배상근 2005).

기후변화는 수문학적 영향으로 강수량이 증감하여 나타나게 된다. 따라서 본 연구에서는 강수량변화가 지하수함양량에 미치는 영향을 분석하기 위하여 연구대상지역의 47년간 강수량 자료(기상청)로부터 기존의 일 강수량을 10 %, 20 % 증감시켜 이들 변화된 강수가 연구지역에 발생하였을 시의 지하수함양량을 산정하였다. 지하수함양량 산정 시에 요구되는 CN값은 유역전체의 평균값을 사용하지 않고 토지피복 상태별로 구분하여 적용

하였다(Table 2).

Fig. 3은 강수량이 변화했을 시의 지하수함양량을 산정한 결과이다. 본 그림으로 부터 강수량이 증감할 시에 지하수함양량의 증감량에는 차이가 있으나 강수량과 지하수함양량의 변화 양상은 동일하게 나타나는 것을 알 수 있다.

Table 2 Curve Number in the Study Area(AMC-II)

Land Use	A-TYPE	B-TYPE	C-TYPE	D-TYPE
Residential	79	86	90	92
Agricultural	63	74	82	85
Forests	47	68	79	86
Pasture	50	69	79	84
Bare Soil	77	86	91	94
Water	100	100	100	100

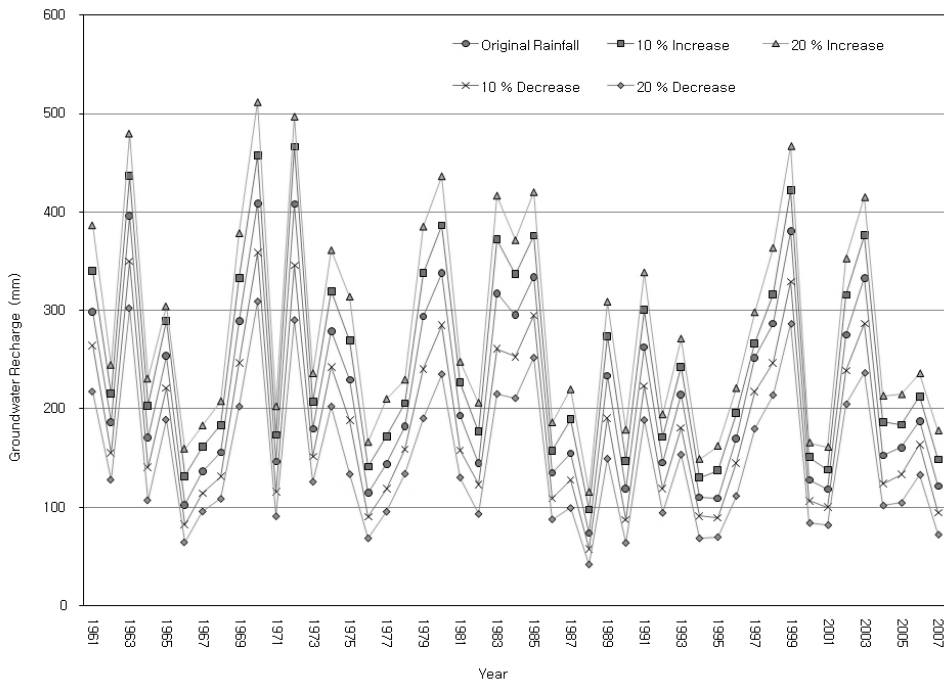


Fig. 3 Groundwater Recharge According to the Variation of Precipitation

Table 3 Ratio of Groundwater Recharge According to the Change of Precipitation

Year	1961~1970	1971~1980	1981~1990	1991~2000	2001~2007	
Groundwater Recharge (%)	Original Precipitation	15.3	15.2	13.4	12.8	11.7
	10 % Increase	16.1	16.1	14.4	13.3	12.4
	20 % Increase	16.6	16.8	15.0	13.8	12.9
	10 % Decrease	14.6	14.1	12.3	12.0	11.0
	20 % Decrease	13.6	12.8	11.1	11.1	10.0

Table 3은 기간별 강수량 증감 시의 지하수함양량의 변화를 10년 단위로 나타낸 것이다. 본 표로부터, 10년 단위로 구분된 각 기간별로 강수량이 증감함에 따라 지하수함양률도 증감하였으며 원래 강수 시의 지하수함양률과 10 %, 20 % 증감된 강수량에서의 지하수함양률의 변화폭이 최근으로 올수록 적어지는 경향을 나타내고 있다. 또한 원래 강수 시에서와 같이 연도가 증가함에 따라 지하수함양률이 감소하는 추세가 모든 강수량 증감의 경우에 대하여 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서 기후변화에 의한 강수량 변화 시 도시 지역에서는 지하수함양률이 지속적으로 감소할 것임을 예상할 수 있다.

Fig. 4는 대상지역의 강수량을 10 %, 20 % 증가 및 감소시켜 지하수함양률을 산정하고 그 결과를 원래 강수에 대비한 변화율로 나타낸 것이다. 본 그림으로부터 연도별 지하수함양률의 변화율은 강수량이 10 % 증가할 경우에는 1983년에 3.11 %로 가장 크게 증가하였고 1997년에 0.91 %로 가장 작게 증가하였다. 강수량이 20 % 증가할 경우에는 지하수함양률의 변화율이 1977년에 5.78

%로 가장 크게 증가하였고 1997년에 2.89 %로 가장 작게 증가하였다. 지하수함양률의 변화율은 강수량이 10 % 감소할 경우에는 1983년에 3.18 %로 가장 크게 감소하였고 2006년에 1.56 %로 가장 작게 감소하였으며 강수량이 20 % 감소할 경우에는 1975년에 6.24 %로 가장 크게 감소하였고 2001년에 3.11 %로 가장 작게 감소하였다.

강수량 증감 시의 전체 평균 변화율은 강수량이 10 % 증가 시에는 2.23 %, 10 % 감소 시에는 2.20 %, 20 % 증가 시에는 4.39 %, 20 % 감소 시에는 4.36 %로 강수의 변화율에 비하여 지하수함양률은 적은 변화율을 보였다. 또한 지하수함양률과 같이 강수량의 10 %, 20 % 증감 시의 지하수함양률의 변화율도 연도가 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과로부터 연구대상지역에서는 강수량의 변화에 대하여 지하수함양률의 변화가 적으며 그 정도가 향후 더욱 적어질 것으로 예상된다. 따라서 강수 시에 침투율이 지속적으로 감소하게 됨으로 직접유출량이 증가하여 도시 홍수에 의한 재해가 발생할 가능성이 크므로 이에 대한 대책의 수립이 필요함을 알 수 있다.

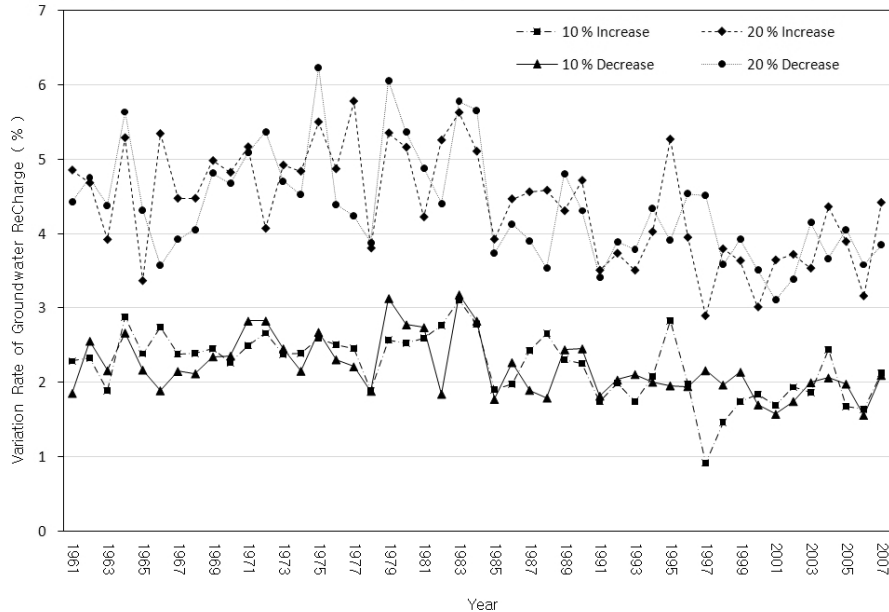


Fig. 4 Variation Rate of Groundwater Recharge According to the Change of Precipitation

5. 결론

강수량변화가 도시 및 해안지역의 지하수함양량에 미치는 영향을 파악하기 위하여 부산광역시 수영구를 포함하는 광역 지하수유역에 47년간의 강수량 자료를 변화시켜 지하수함양량을 산정하고 강수량 증감에 따른 지하수함양량의 변화특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ① 강수량 증감에 따라 지하수함양량의 증감량은 차이가 있으나 강수량과 지하수함양량의 변화 양상은 동일한 경향을 나타내었다.
- ② 10년 단위로 구분된 각 기간별로 강수량의 증감에 따라 지하수함양률이 증감하였으며 원래 강수 시의 지하수함양율과 10 %, 20 % 증감된 강수량에서의 지하수함양률의 변화폭이 최근으로 올수록 적어지는 경향을 나타내었다. 또한 원래 강수 시에서와 같이 연도가 증가함에 따라 감소하는 추세가 모든 강수량 증감의 경우에 대하여 나타났다.
- ③ 연도별 지하수함양률의 변화율은 강수량이 10 % 증가할 경우에는 1983년에 3.11 %로 가장 크게 증가하였고 1997년에 0.91 %로 가장 작게 증가하였다. 강수량이 20 % 증가할 경우에는 지하수함양률의 변화율이 1977년에 5.78 %로 가장 크게 증가하였고 1997년에 2.89 %로 가장 작게 증가하였다. 지하수함양률의 변화율은 강수량이 10 % 감소할 경우에는 1983년에 3.18 %로 가장 크게 감소하였고 2006년에 1.56 %로 가장 작게 감소하였으며 강수량이 20 % 감소할 경우에는 1975년에 6.24 %로 가장 크게 감소하였고 2001년에 3.11 %로 가장 작게 감소하였다.
- ④ 강수량 변화 시의 지하수함양률의 전체 평균 변화율은 강수량이 10 % 증가 시에는 2.23 %, 10 % 감소 시에는 2.20 %, 20 % 증가 시에는 4.39 %, 20 % 감소 시에는 4.36 %로 강수의 변화율에 비하여 지하수

함양률은 적은 변화율을 보였다.

- ⑤ 강수량의 변화율에 비하여 지하수함양률의 변화가 크지 않음을 알 수 있었다. 따라서 도시지역에서 강수량이 변화할 시에는 지하수함양률의 변화율이 이에 미치지 못함으로 직접유출에 미치는 영향이 그 양만큼 커지게 되어 도시홍수의 발생가능성이 지속적으로 증가하게 됨을 알 수 있다.

참고 문헌

1. 김다운, 정용, 박무중, 윤재영, 김상단, 최민하. 2011. 기후변화를 고려한 수자원 분야의 취약성 분석. 한국습지학회지 13(1): 25-33.
2. 김병식, 권현한, 김형수. 2011. 기후변화가 가뭄위험성에 미치는 영향 평가. 한국습지학회지 13(1): 1-11.
3. 김병식, 윤석영. 2008. 이상기후에 대비한 수자원 분야의 대응 -이상기후대비 시설기준강화 연구단의 3년 간 성과를 중심으로-. 대한토목학회지 56(2): 13-21.
4. 김승. 2008. 기후변화와 수자원의 안정적 확보 방안. 춘천물포럼.
5. 김영란, 김갑수. 2008. 기후변화에 대응한 서울시 물관리 전략. SDI 정책리포트, 서울시정개발연구원 10(0): 1-20.
6. 류문현, 장석원, 박두호. 2011. 기후변화와 가뭄: 물의 잠재가격 및 피해 추정연구. 한국습지학회지 13(2): 209-218.
7. 배상근. 2005. 지하수함양량 산정을 위한 NRCS-CN방법의 적용성. 대한토목학회논문집 25(6B): 425-430.
8. 이승현, 배상근. 2010. 도시화에 의한 장기 지하수 함양량 변화. 한국환경과학회지 19(6): 779-785.
9. 이용준, 박종윤, 박민지, 김성준. 2008. SWAT 모형을 이용한 미래 기후변화 및 토지이용 변화에 따른 안성천 유역 수문 - 수질 변화 분석 (I). 대한토목학회 논문집 28(6B): 653-663.

10. 이자원. 2010. 우리나라 기후변화와 관련된 재해에 대한 적응기법 개발 동향 연구. 국토지리학회지 44(4): 635-648.
 11. Aguilera, H., Murillo, J. 2009. The effect of possible climate change and natural groundwater recharge based on a simple model: a study of four karstic aquifers in SE Spain. *Environmental Geology*, 57(3): 963-974.
 12. Alley, W.M., Reilly, T.E., Franke, O.I. 1999. Sustainability of groundwater resources. *US Geological Survey Circular* 1186, pp. 79.
 13. Aron, G., Miller, A. and Laktos, D. 1977. Infiltration Formula Based on SCS Curve Numbers. *Journal of Irrigation and Drain. Div. ASCE* 103(IR4): 419-427.
 14. Elisabeth, M. H. and Nicole, G. 2009. Urban form and climate change: balancing adaptation and mitigation in the US and Australia. *Habitat International* 33: 238-245.
 15. Green, T.R., Bates, B.C., Charles, S.P., Fleming, P.M. 2007. Physically based simulation of potential effects of carbon dioxide altered climates on groundwater recharge. *Vadose Zone Journal* 6(3): 597-609.
 16. Hjelmfelt, A. T. 1980. Curve Number Procedures as Infiltration Method. *Journal of Hydraulic. Div. ASCE* 106(HY 6): 1107-1111.
 17. Holman, I.P. 2006. Climate change impacts on groundwater recharge - uncertainty, shortcomings, and the way forward?. *Hydrogeological Journal* 14(5): 637-647.
 18. <http://www.kma.go.kr>
 19. <http://www.wamis.go.kr/main.aspx>
 20. IPCC, 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories(IPCC 2006), IGES, Japan.
 21. McEvoy, D., Lindley, S., and Handley, J. 2006. Adaptation and mitigation in urban areas: synergies and conflicts. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* 159(4): 185-192.
 22. Sandstrom, K. 1995. Modeling the effects of rainfall variability on groundwater recharge in semi-arid Tanzania. *Nordic Hydrology* 26: 313-330.
 23. Vaccaro, J.J. 1992. Sensitivity of groundwater recharge estimates to climate variability and change, Columbia Plateau, Washington. *Journal of Geophysical Research*. 97(D3): 2821-2833.
 24. Wolderamlak, S.T., Batelaan, O., De Smedt, F. 2007. Effects of climate change on the groundwater system in the Grote-Nete catchment, Belgium. *Hydrogeological Journal* 15(5): 891-901.
- 논문접수일 : 2011년 03월 28일
 - 심사의뢰일 : 2011년 04월 04일
 - 심사완료일 : 2011년 09월 15일