

도시화에 의한 장기 지하수 함양량 변화

이승현 · 배상근*

계명대학교 토목공학과

(2010년 3월 10일 접수; 2010년 4월 13일 수정; 2010년 5월 17일 채택)

Long-Term Trend of Groundwater Recharge According to Urbanization

Seung Hyun Lee, Sang Keun Bae *

Department of Civil Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

(Manuscript received 10 March, 2010; revised 13 April, 2010; accepted 17 May, 2010)

Abstract

To solve a problem of water supply on urban areas, groundwater recharge has to be assessed not only for evaluating the possibility of groundwater development but also for identifying a sustainable aquifer system for water resource development. The assessment of groundwater recharge has been challenged since the land use has been changed constantly. In this study, the groundwater recharge and its ratio were assessed from 1961 to 2007 in Su-yeong-gu, Busan, South Korea by analyzing precipitation, land use, and soil characteristics. For land use analysis, the urbanization change was considered. The land use areas for the residential, agricultural, forest, pasture, bare soil, and water in 1975 occupy 18.6 %, 30.0%, 48.8%, 0.1%, 2.0%, and 0.5% of total area, respectively. The land use ratios were sharply changed from 1980 to 1985; the agricultural area was decreased to 18.3%, and the residential area was increased to 15.0%. From 1995 to 2000, the agricultural area was decreased to 5.5%, and the residential area was increased to 5.4%. The annual averages of precipitation, groundwater recharge, and its ratio were 1509.3 mm, 216.0 mm, and 14.3% respectively. The largest amount of the groundwater recharge showed in 1970 as 408.9 mm, comparing to 2138.1 mm of annual rainfall. Also, the greatest ratio of the groundwater recharge was 19.8% in 1984 with 1492.6 mm of annual rainfall. The lowest amount and ratio of the groundwater recharge were 71.9 mm and 8.0% in 1988, relative to 901.5 mm of annual precipitation. As a result, it is concluded that rainfall has increased, whereas groundwater recharge has decreased between 1961 and 2007.

Key Words : Groundwater, Groundwater recharge, Urbanization, Land use

1. 서론

좁은 국토에 인구가 많은 우리나라는 1980년 이후 급속한 산업성장과 함께 도시화 현상이 이루어지기

시작했다. 산업성장으로 인한 국민소득의 증대와 생활수준의 향상은 우리에게 보다 여유롭고 한층 상승된 삶의 질적 향상을 안겨주었지만 근래에 와서 이러한 급속한 경제발전으로 인한 여러 가지 사회문제와 환경오염 등의 문제점들이 드러나고 있으며 수자원 공급의 문제 역시 도시화로 인한 문제점의 일부라 할 수 있다. 특히 가뭄 시 하천의 상류와 하류지역간의 수자원 확보를 위한 노력은 물분쟁으로까지 이어지고

*Corresponding Author : Sang-Keun Bae, Department of Civil Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea
Phone: +82-53-580-5295
E-mail: skbae@kmu.ac.kr

있고 인구가 밀집한 도시지역은 그 피해가 경우에 따라 더욱 커질 수도 있다.

이러한 도시화 지역의 수자원 공급의 문제를 해결하기 위해서 많은 노력이 이루어지고 있으나 최근 기상이변과 같은 문제점들로 인하여 용수 공급은 안정적이지 못한 실정이다. 기후적 영향을 적게 받는 지하수의 경우는 비교적 지속적이고 안정적인 수자원으로 많이 이용되고 있으나 이 또한 관리적인 측면의 여러 가지 문제점으로 인하여 어려움을 겪고 있다. 특히 도시지역과 같이 지하수이용량이 많은 지역은 지하수개발에 대한 명확한 체계가 이루어지지 않으면 과잉양수로 인한 지하수위 저하로 용수부족, 지하수질 악화 등과 같은 지하수 재해를 일으킬 수 있으며 해안지역일 경우 해수침투로 인하여 그 피해가 광범위하고 장기적으로 확산될 수 있다. 따라서 향후 미래의 수자원 공급의 중요한 대체로써 이용가능한 지하수는 개발에 앞서 개발가능량 평가가 필요하고 이를 위해 지하수량에 영향을 미치는 요소를 고려한 지하수함양량 산정이 반드시 필요하다.

지하수함양량은 지역의 토양특성과 토지피복상태에 의한 영향을 받는다(배, 2002). 지역의 토양특성은 단기간에 변화하지 않으나 토지피복상태는 비교적 자주 변화하며 특히 도시화 현상으로 인하여 최근 30년 사이 급격하게 변화하였다. 이는 곧 지하수함양량에도 변화가 있다는 것을 의미하지만 지하수 개발 및 이용·관리의 척도로 이용되고 있는 자료에는 이런 내용을 반영하고 있지 않으며 주기적인 평가도 이루어지지 않는다면 향후 많은 문제점들이 발생할 수 있다. 토양특성과 토지피복상태를 반영한 지하수함양량 산정의 대표적인 기법은 NRCS-CN방법으로 그에 대한 연구는 지속적으로 이루어지고 있다. 배(2005)는 우리나라 지하수함양량 산정을 위한 NRCS-CN방법의 적용성을 검토하였다. 배와 이(2004)는 위천유역을 대상으로 이와 배(2004)는 평창강유역을 대상으로 지하수함양량을 산정하였다. 김 등(2006)은 우리나라 서남해 도서지역에 대하여 지하수함양량을 산정하고 그 결과를 토대로 지하수해안유출량을 산정하였다. 안 등(2008)은 울산광역시 중곡천-보은천 지역을 대상으로 직접유출량 산정에 SCS-CN방법을 적용한 물수지 분석과 수리지질 분석을 통하여 지하수함양량을 산정

하였고 김 등(2008)은 울산광역시 연양지역을 대상으로 직접유출량 산정에 SCS-CN방법을 적용한 물수지 분석과 수리지질분석을 통하여 지하수 저류 변화량을 산정하고 지질과의 관련성을 분석하였다. 하지만 이러한 연구들은 토지이용상태의 변화를 고려하지 않고 단기간에 대한 연구가 대부분이다. 하 등(2009)에 의하여 제주도의 토지이용변화에 따른 직접유출량 변화 추정에 대한 연구가 이루어졌으나 장기적으로 지역의 토지피복상태의 변화를 반영한 지하수함양량의 산정에 대한 연구는 찾아보기 어렵다.

본 연구에서는 지하철 등 대규모 지하구조물에 의한 지하수유출량이 대량 발생하고 있고 온천개발 등으로 지하수이용량이 많아 염수침입이 일어나고 있는 등 지하수 문제가 발생하고 있어 지하수 적정개발량 평가가 필요하며 도시화에 따라 지하수함양량의 변화가 나타나고 있는 부산광역시 수영구 일대를 대상으로 토지피복변화에 따른 지하수함양량을 산정하고 분석하였다.

2. 연구대상유역 개관

본 연구대상유역은 지하수이용량이 많은 도심지역이며 해수침투 피해와 같은 지하수재해의 가능성이 있는 해안지역인 부산광역시 수영구 일대를 포함하는 지하수의 광역 유동계를 포함하는 지역이다(Fig. 1). 대상유역은 남천동, 수영동, 망미동, 광안동, 민락동

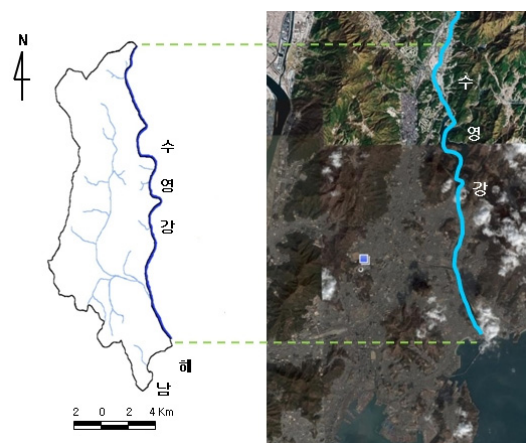


Fig. 1. Study area.

등의 수영구와 수영강 상류유역까지 포함하는 면적 81.0 km²의 지역으로서 서쪽으로는 금련산이 위치하고, 광안리해수욕장을 포함하는 해안선으로 남해와 접해 있다.

연구대상지역으로 선정된 부산광역시 수영구 일대는 도시화가 진행되어 포장지역이 넓게 분포하고 있고 수영구 내에는 수백공의 우물과 온천공을 개발하여 생활용(3,760 m³/day), 공업용(45 m³/day), 농·어업용(60 m³/day), 기타(378 m³/day)로 총 4,243 m³/day의 지하수를 이용하고 있으며 지하철과 전력구를 통하여 2,057 m³/day의 지하수가 유출하고 있다.

3. 연구대상지역의 수문학적토양군

수문학적토양군은 흙의 종류에 따라 구분되는 토양통을 배수능력을 기준으로 배수가 매우 양호한 A, 대체로 양호한 B, 대체로 불량한 C, 매우 불량한 D의 네가지로 구분한 것으로 지하수함양량 산정에 있어 매우 중요한 요소 중 하나이다.

농업과학기술원에서 제공받은 연구대상지역의 정밀토양도를 이용하여 토양인자를 토양통으로 구분하고 수문학적토양군으로 분류한 결과는 Table 1과 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 보느냐와 같이 대상지역의 토양은 대단히 복잡하게 구성되어 있음을 알 수 있다.

수문학적토양군은 D군이 36.37 km²인 44.9%로

약 절반의 면적을 차지하고 있으며 A군과 B이 각각 21.82 km², 19.01 km²인 26.9%, 23.5%를 차지하며 C군은 3.77 km²인 4.7%로 가장 적은 면적을 차지하고 있음을 나타내고 있다(Table 1).

Table 1. Hydrologic soil groups

Hydrologic Soil Group	Area(km ²)	Rate(%)
A	21.82	26.9
B	19.01	23.5
C	3.77	4.7
D	36.37	44.9
Total	80.97	100.0

4. 연구대상지역의 토지피복 변화

Table 2와 Fig.3은 국가수자원관리종합시스템(WAMIS)에서 제공받은 연구대상지역의 토지피복도를 이용하여 1975년부터 2000년까지 5년 간격으로 토지피복 변화를 나타낸 것이다.

본 표에서 연구대상지역은 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 변화

Table 2. 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

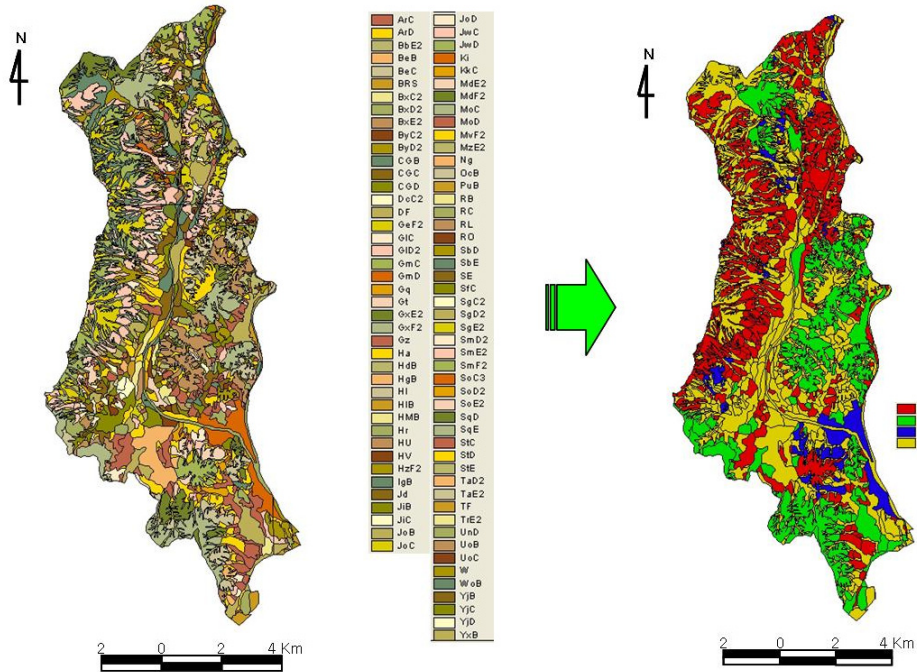


Fig. 2. (a) Soil characteristics and (b) hydrologic soil groups.

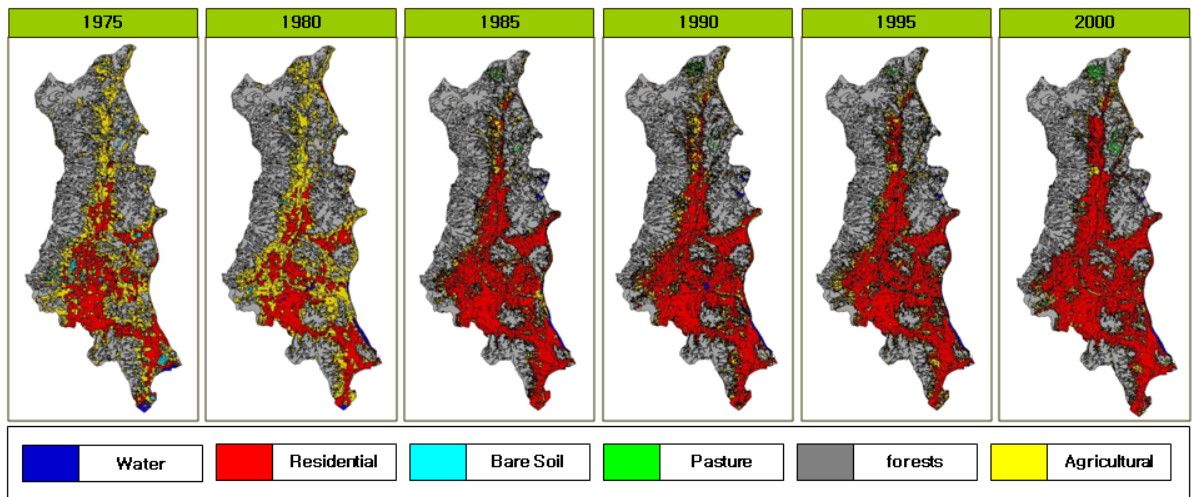


Fig. 3. Temporal change of land cover.

가 생겼다. 또한 1995년부터 2000년까지 시가화지역이 5.4%증가하고 농업지역이 5.5% 감소하는 변화를

보였다. 반면 가장 많은 면적을 차지하고 있는 산림과 그외

초지, 나지, 수역의 면적 비율은 큰 변화가 없었다. 이러한 토지피복상태의 변화는 대상지역이 도시화가 이루어지면서 농업지역이 시가지지역으로 변화된 양상을 나타내는 것으로 판단된다.

5. 토지피복 변화에 따른 지하수함양량 및 함양률 산정

본 연구에서는 유출량과 토양의 관련자료를 이용하여 강우와 유출의 관계식을 유도한 유출량 산정방법인 NRCS-CN방법에서 실지류량을 강우 중 누가침투량과 동일하게 인자들을 적용하여 지하수함양량 및 함양률을 산정하였다(배, 2005).

본 연구에 적용된 강우량은 부산관측소(기상청)의 1961년~2007년까지 47년간의 강우자료를 이용하였으며 연도별 강우량은 Fig. 4와 같다. 대상지역의 강우

량은 1988년에 901.5 mm로 가장 적게 나타났고 1999년에 2396.1 mm로 가장 많이 나타났으며 47년간의 연평균 강우량은 1509.3 mm로 나타났다. 연구대상지역은 연도가 증가함에 따라 강우량이 증가하는 추세를 나타냈다.

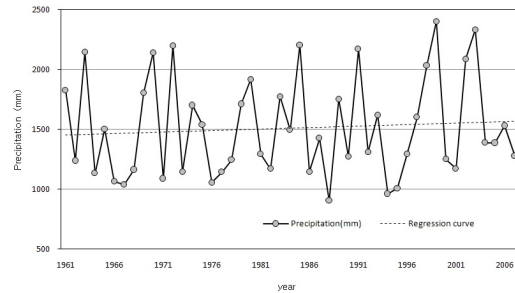


Fig. 4. Long-term trend of precipitation in the study area.

Table 3. Groundwater recharge

Year	Precipitation (mm)	Recharge (mm)	Recharge Rate (%)	Year	Precipitation (mm)	Recharge (mm)	Recharge Rate (%)
1961	1821.8	298.3	16.4	1985	2200.5	335.7	15.3
1962	1235.4	186.7	15.1	1986	1143.4	136.3	11.9
1963	2143.0	396.1	18.5	1987	1422.9	155.0	10.9
1964	1130.6	170.8	15.1	1988	901.5	71.9	8.0
1965	1498.4	253.7	16.9	1989	1750.1	234.7	13.4
1966	1062.0	102.4	9.7	1990	1270.9	118.9	9.4
1967	1036.9	136.5	13.2	1991	2167.1	265.7	12.3
1968	1161.7	155.7	13.4	1992	1308.9	148.1	11.3
1969	1800.4	289.0	16.1	1993	1615.3	216.2	13.4
1970	2138.1	408.9	19.1	1994	959.9	110.5	11.5
1971	1087.3	146.3	13.5	1995	1005.7	110.3	11.0
1972	2195.5	408.0	18.6	1996	1289.6	170.8	13.2
1973	1143.1	179.7	15.7	1997	1598.1	253.1	15.8
1974	1698.0	279.2	16.4	1998	2028.8	288.5	14.2
1975	1536.1	229.5	14.9	1999	2396.7	380.6	15.9
1976	1051.9	114.7	10.9	2000	1248.5	126.4	10.1
1977	1142.2	143.9	12.6	2001	1171.3	120.5	10.3
1978	1241.9	182.8	14.7	2002	2085.2	280.2	13.4
1979	1708.3	293.9	17.2	2003	2328.0	336.7	14.5
1980	1913.3	339.0	17.7	2004	1386.5	153.4	11.1
1981	1289.9	193.3	15.0	2005	1384.9	161.9	11.7
1982	1168.1	144.7	12.4	2006	1528.3	188.3	12.3
1983	1770.2	317.3	17.9	2007	1276.5	123.2	9.7
1984	1492.6	295.3	19.8	Average	1509.3	216.0	14.3

강우량 자료와 1975년부터 2000년까지 5년 간격으로 구분된 토지피복도를 고려하여 NRCS-CN방법을 이용하여 지하수함양량 및 함양률을 산정한 결과는 Table 3과 같다.

본 표에서 보는바와 같이 연구대상지역의 평균 강우량은 1509.3 mm이고 지하수평균함양량은 216.0 mm이며 지하수평균함양률은 14.3%로 나타났다. 연최대함양량은 강우량이 2138.1 mm인 1970년에 408.9 mm이며 연최대함양률은 강우량이 1492.6 mm인 1984년에 19.8%이다. 연최소함양량은 강우량이 901.5 mm인 1988년에 71.9 mm이며 연최소함양률은 같은해에 8.0%로 나타났다.

Fig. 5에 연도별 지하수함양량과 추세선이 나타나 있다. 본 그림에 의하면 지하수함양량의 주기적 특성이 미미하며 연도의 증가에 따라 강우량은 증가하였으나 지하수함양량은 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 토지피복변화에서 알 수 있듯이 도시화 현상으로 인한 불투수지역의 증가가 가장 큰 영향으로 판단된다.

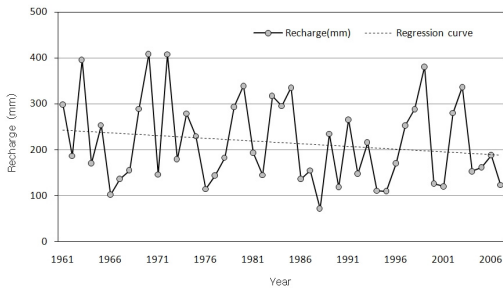


Fig. 5. Long-term trend of groundwater recharge in the study area.

6. 고찰

Fig. 6은 대상지역의 5년 간격으로 구분된 토지피복도에서 각 토지피복상태의 변화를 나타낸 것이다. 대상지역의 토지이용상태는 농업지역이 시가화지역으로 변화하는 것이 대부분이며 이외 산림지역, 초지, 나지, 수역의 변화는 미미하였다. 따라서 농업지역의 감소가 대상지역의 도시화지역으로 변화한 것을 알

수 있다. 위 그림에서 1980년까지 시가화지역은 대상 지역 전체면적의 약 18%에 해당하는 면적이었으나 1985년 이후 급격하게 증가하여 약 32%에 해당하는 면적으로 나타났다. 반면 농업지역은 1980년까지 대

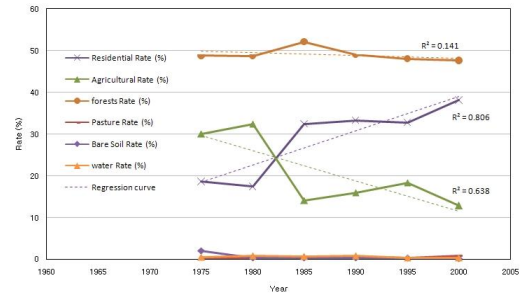


Fig. 6. Trend of land cover changes.

상지역 전체면적의 약 32%에 해당하는 면적이었으나 1985년 이후 급격하게 감소하여 약 14%에 해당하는 면적으로 나타났다. 이후 2000년에 다시 시가화지역은 약 5% 증가하고 농업지역은 약 5% 감소하는 모습을 나타내었다.

대상지역의 토지피복변화를 고려하여 지하수함양량의 변화를 살펴보면 10% ~ 20% 변화를 보이던 지하수함양량이 시가화지역이 급격하게 증가한 1985년 이후 크게 감소한 것을 알 수 있다.

7. 결론

도시지역인 부산광역시 수영구 유역 일대를 1961년~2007년까지의 기상청 강우량 자료와 토지피복도의 분석을 통한 토지피복상태의 변화를 반영하고 지하수함양량 및 함양률을 산정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ① 연구대상지역의 토지피복변화는 1980년~1985년에 시가화지역이 15.0% 증가하고 농업지역이 18.3% 감소하는 가장 큰 변화가 있었으며 1995년~2000년에 시가화지역이 5.4% 증가하고 농업지역이 5.5% 감소하는 변화가 있었다. 농업지역에서 시가화지역으로의 변화가 가장 크게 나타났다.

- ② 연구대상지역의 평균 강우량은 1509.3 mm이고 지하수평균함양량은 216.0 mm이며 지하수평균함양률은 14.3%로 나타났다. 연최대함양량은 강우량이 2138.1 mm인 1970년에 408.9 mm이며 연최대함양률은 강우량이 1492.6 mm인 1984년에 19.8%이다. 연최소함양량은 강우량이 901.5 mm인 1988년에 71.9 mm이며 연최소함양률은 같은해에 8.0%로 나타났다.
- ③ 연구대상지역은 지하수함양량의 주기적 특성이 미미하며 연도의 증가에 따라 강우량은 증가하였으나 지하수함양량은 감소하는 경향을 나타내었다. 대상지역의 토지피복변화를 고려하여 지하수함양량의 변화를 살펴보면 10% ~ 20% 변화를 보이던 지하수함양량이 시가지지역이 급격하게 증가한 1985년 이후 크게 감소하는 것으로 나타났다.
- ④ 본 연구결과는 도시화 현상으로 토지피복상태가 지속적으로 변하는 도시지역의 지하수 개발가능량 평가에 활용되고 대상지역의 지하수개발 및 관리에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단의 연구비지원에(3-3-3) 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 김남훈, 함세영, 김태용, 정재열, 안정훈, 전향탁, 김형수, 2008, 울산광역시 연양지역의 지하수 저류 변화량 산정 및 지질과의 관련성, 대한지질공학회지, 18(3), 263-276.
- 김용호, 이승현, 배상근, 2006, 도서지역 지하수해안유출량의 평가, 공동추계학술발표회논문집, 한국물환경학회, 1115-1118.
- 배상근, 2002, 지하수함양량 산정방법에 대한 고찰, 한국수자원학회지, 35(3), 50-59.
- 배상근, 이승현, 2004, 소유역의 강수에 의한 지하수함양량 산정, 한국수자원학회논문집, 37(5), 397-406.
- 배상근, 2005, 지하수함양량 산정을 위한 NRCS-CN방법의 적용성, 대한토목학회지, 25(6B), 425-430.
- 안정훈, 함세영, 이정환, 김남훈, 양대복, 황지광, 2008, 물수지 및 수리지질 분석을 통한 울산광역시 중괘천-보은천 지역의 지하수 함양량 산정, 대한자원환경지질학회지, 41(4), 427-442.
- 이승현, 배상근, 2004, SCS-CN방법을 이용한 평창강 유역의 강수 함양량 산정, 한국환경과학회지, 13(2), 1033-1040.
- 하규철, 박원배, 문덕철, 2009, 제주도 토지이용변화에 따른 직접유출량 변화 추정, 대한자원환경지질학회지, 42(4), 343-356.
- http://www.kma.go.kr/weather/observation/past_table.jsp.
- <http://www.wamis.go.kr/main.aspx>.