단위유역 단위의 지하수 관리기법 현장적용성 검토 (함평군 중심으로)

정찬덕^{1*} · 송인성²

¹한국농어촌공사 환경지질처, ²전남대학교 경영대 지역개발학과

Field Applications on Groundwater Management Scheme of Subwatershed Unit in Hampyeong-Gun

Chan Duck Jung^{1*} and In sung Song²

¹Office of Environmental Geology, Korea Rural Community Corporation

²Department of Regional Development, Chonnam National University

Until now, research achievements of groundwater such as groundwater to depth distribution, usage, the available amount of development, water quality have been written in the watershed units(25~250km²). However, complex topography and geology, and the rivers of our country does not fit. And a clear management standards have not been able to present measures in groundwater quantity, water quality management such as rainfall, groundwater, utilization, water quality, pollution, etc. Therefore, in this study, the classification criterion of subwatershed unit(2.5~25km²), which is suitable for topography and geology of Korea, for rainfall-rating, groundwater level-rating, groundwater pollution-rating, groundwater quality-rating presented and proved its efficiency by applying in Hampyeong-Gun area.

Key words : groundwater, GIS, subwatershed, groundwater quantity, water quality

지금까지의 지하수 수위분포, 이용현황, 개발가능량, 수질현황 등 지하수조사 성과물은 복잡한 우리나라 지형지세 및 수계형태와 달리 넓은 규모(25~250 km²)의 유역(basin) 단위로 작성되어 왔을 뿐만 아니라 수량, 수질관리에 있어서 무엇보다도 중요한 강수량, 지하수위, 이용량, 수질, 오염 등에 대한 명확한 관리기준과 대책을 제시하지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 GIS를 활용하여 우리나라에 적합한 단위유역(subwatershed) 단위의 강우등급, 수위등급, 이용등급, 오염등급, 수질등급에 대한 분류기준(안)을 제시하고 함평군을 대상으로 시범적으로 적용해봄으로써 그 효율성을 검증하였다.

주요어 : 지하수, GIS, 단위유역, 수량, 수질

1. 서 론

최근 들어 범세계적 문제인 기후변화는 우리나라도 예외일 수 없어 지난 10여 년간 가뭄, 홍수 등이 과거보다 훨씬 빈번하게 발생되고 있고, 1960년대 이후부터 경제발전을 위한 정부주도의 산업정책 추진으로 인해 각종 화학물질, 유류, 중금속 등 오염물질이 많이 배출되고 있다. 또한 이들 오염원으로부터 직접적으로 영향을 받을 수밖에 없는 지표수와 달리 이들 오염원

으로부터 훨씬 더 안전한 지하수에 대한 국민적 관심은 더욱 높아지고 있다. 이에 아직까지 지표수보다는 청정하다고 인식되고 있는 소중한 지하수의 수량과 수질을 보전·관리하고 지속적으로 개발·이용하기 위하여 다양한 연구가 수행되어 왔다.

지하수 유동특성을 고려한 지하수 흐름의 알고리즘을 분석하여 단순화한 지하수관리모델에 관한 연구(Kim, 2003; Reilly, T.E. and Harbaugh, A.W., 2004; Ahlfeld *et al.*, 2005, Gannett *et al.*, 2012),

*Corresponding author: duckiangel@ekr.or.kr

수문지질학적 특성을 분석한 지하수관리시스템 개발 모델링에 관한 연구(Kim and Lee, 1999; Sloto, R.A. and Buxton, D.E., 2005; Jeong *et al.*, 2011), GIS 기반의 지하수오염취약성 분석을 위한 관리시스템 구현에 관한 연구(Chon and Ahn, 1998; Lee and Lee, 2003; Lee, 2003; Lee, 2005), 그리고 지하수관리 의사결정모형 개발에 관한 연구(Lee, 2001; Son *et al.*, 2002; Lee *et al.*, 2002; Han *et al.*, 2000; Seo *et al.*, 2005; Lee and Lee, 2011) 등을 수행하였고, 서울, 강릉, 천안, 순천, 고양, 서천, 동두천, 무안 등 일부 지자체에서도 업무특성에 맞게 GIS 기반 정보관리시스템을 구축해 왔다.

그러나 지금까지 수행된 조사와 연구는 대부분 행정 구역 단위 또는 소유역(Watershed) 단위의 조사들로서 복잡한 우리나라 지형 및 수계와는 맞지 않는 넓은 규모(25-250km², 읍·면 또는 시·군 단위의 면적)의 유역조사로서 주민 등 이해관계자가 의사결정에 참여하는 것은 거의 불가능하며 전문가 위주의 난해하고 복잡한 분석법과 연구방법이 그대로 반영되어 활용성 낮은 성과물을 작성하는데 그치고 있다. 또한 GIS (Geographic Information System) 기반 관리모델 등 컴퓨터 기술발달로 GUI(Graphic User Interface) 환경과 대용량 공간데이터(Spatial Data)의 처리속도는 향상됐으나, 전문기술을 보유해야만 이해할 수 있는 전문가 위주의 복잡하고 매우 어려운 관리모델들로서 이들 지하수관리시스템을 실제로 활용하여 결과를 도출하기에는 너무 복잡하고 어려운 게 현실이다.

이 밖에도 지하수관리를 위해선 지하수 유동 특성에 대한 정확한 분석이 요구되는데, 주로 활용되는 MODFLOW, MODPATH, MT3D, GMS, SWOT 등 지하수유동 모델링 프로그램 종류도 매우 다양하며 입력해야 할 인자가 너무 많고 전문가 이외에는 운용이 쉽지 않은 프로그램들이다.

위와 같이 지금까지의 지하수관리 방법은 전문가를 위한, 전문가만이 운용할 수 있는 연구프로젝트 형태의 연구 성과물들을 활용함으로 인해 많은 문제점을 드러내고 있다. 왜냐하면 우리나라의 실질적인 지하수 관리 주체는 지자체이나, 비전문가인 지자체 지하수 업무담당자 1~2명이 전문가가 작성한 복잡한 형태의 조사·연구성과물을 이해하여 지역주민이 공감할 수 있는 지하수관리계획을 수립하고 관리하기에는 현실적으로 불가능하기 때문이다. 일례(一例)로 지하수 개발가능량 대비 이용량이 100%를 초과한 지자체가 21개소나 있음에도 불구하고 현재까지 2곳만이 지하수보전구

역으로 지정되어 있다(Jung *et al.*, 2012).

따라서 소중한 지하수 자원의 효율적 관리를 위해서는 전문가 위주의 조사 성과물에서 탈피하여 사용자 편의성을 크게 증대한 누구나 쉽게 활용할 수 있고 우리나라 지형 특성에 적합한 단위유역(Subwatershed) 단위의 관리등급을 제시하고 현장에 적용해봄으로써 보다 쉽고 활용성 높은 관리방안을 제시하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 대상지역 선정

본 연구지역인 함평군은 북쪽에는 풍화에 강한 화산암류가 주로 분포하여 비교적 높은 산지로 구성되어 있고, 남쪽으로 내려올수록 상대적으로 풍화에 약한 퇴적암류, 화강암류 및 백악기 퇴적암류 등으로 구성된 넓은 평야지대가 저지대를 형성하고 있다. 수계는 북쪽에서 남쪽으로 흘러 영산강으로 유입되는 함평천, 학교천, 고막원천 등이 주를 이루며, 작은 소하천은 지역 내에서 발원하여 함평천 등으로 합류되는 짧은 하천들로 구성되어 있다(Fig. 1).

수계의 발달특성은 이 지역의 지형과 지질구조를 그대로 반영하며 발달해 있어 단위유역 단위의 지하수관리모델을 적용하기에 최적의 입지조건을 갖추고 있다(Fig. 2)

강수량은 1990년 이후 관측소 폐지로 관측자료 취득이 어려워 인근 목포 기상관측소의 기상자료(2002~2011)를 활용하였다. 연구지역의 지난 10년간 연평균 강수량은 1,232.1mm로서 우리나라 연평균 강수량(1,277.4mm, 1978~2007)에 비해 크게 적지 않은 양을 나타냈다(Table 1).

지하수 개발공수는 2011년 말 기준 14,309공이 개발되어 이용되고 있고, 이용량은 46,117천m³, 개발밀도는 36.4공/km²이다. 이는 전남지역 평균 이용량(25,653천m³)보다 약 1.8배 높으며, 개발밀도도 전남평균 19.2공/km²보다 약 1.9배 높은 수치를 보이고 있다.

또한 함평군은 지하수기초조사와 농촌지하수관리조사가 최근에 완료되었고 수치지형도, 토양도, 지질도 등의 수치지도가 구축되어 있어 다양한 기초자료 취득이 가능하고, 또한 392.8km²의 넓은 면적에 2명의 지하수업무 담당자가 관리하고 있어 어느 지역보다도 단위유역 단위의 쉬운 관리모델이 필요한 지역이라고 할 수 있다. 또한 정밀한 모델링을 수행하기 위한 충분한 기초자료를 획득하기 어려워 자료의 정확도 및 정밀도 확보와 새로운 지하수관리모델의 효율성 검증에 위해

Fig. 1. The Study Area in Hampyeong-gun.

기존에 지하수 개발·이용 현황, 잠재오염원 현황 등 지하수관련 조사가 완료되고 GIS 기본도의 구축 완료되어 새로운 관리모델의 효율성 검증에 최적지로 판단되어 연구 대상지역으로 선정하였다.

2.2. 데이터베이스 구축

연구에 사용된 주제도는 최근에 가장 보편적으로 사용하고 있는 ESRI의 ArcGIS를 활용하였으며, 지하수 관리에 있어서 수량과 수질에 영향을 미치는 유역, 하천, 지형, 지질, 토양, 토지이용, 주택, 도시, 인구밀도, 강수량, 오염원 등 영향인자들의 특성을 속성값으로 작성하고 코드화하여 데이터베이스를 구축하였다.

모든 주제도의 좌표계는 세계측지계(GRS80)로 통일하여 작성하였고 기존 동경측지계로 작성된 위치정보는 세계측지계에 의한 위경도로 변경하였다. 연구에 필요한 GIS 기본주제도는 국가지리정보체계(NGIS)의 국가기본도 표준의 분류방법 및 체계를 따랐으며, 국립지리원의 수치지형도, 토지이용도, 농촌진흥청의 토양도, 한국지질자원연구원의 수치지질도 등으로서 관련 기관에서 최신자료를 제공받아 활용하였으며, 단위유역도는 자체 제작하였다(Fig. 3).

Fig. 2. Topography map in Hampyeong-gun.

Fig. 3. The major GIS data model of Groundwater management.

모든 지리정보는 NGIS와의 연계를 위해 국내표준을 준수하여 제작하였다. 또한 모든 공간DB는 DXF형식의 수치지도를 가장 보편적으로 사용하고 있는 GIS 프로그램인 ArcGIS를 활용해 주곡선(레이어 7111)과 계곡선(레이어 7114)만을 추출하여 Shape 파일형태로 변

Table 1. Annual rainfall during the last 40 year period in study area

										(unit : mm)
by year	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981
rainfall	1,751.1	789.8	1,388.3	1,041.7	852.2	786.9	1,023.9	1,067.6	1,441.8	1,408.6
by year	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991
rainfall	843.5	927.5	1,098.9	1,736.8	1,271.1	1,350.1	665.3	1,381.3	1,134.7	1,194.1
by year	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
rainfall	743.6	1,130.9	717	613.2	1,040.9	1,126.4	1,507.7	1,535	1,176.7	945.9
by year	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
rainfall	1,162.2	1,687	1,483.3	1,002.7	1,288.3	1,350.6	960.5	1,088.4	1,335.7	982.0

Table 2. GIS spatial database construction list

	Layer	Scale	Format	Source
Base Map	Digital map	1:25,000	dxg	NGII ¹⁾
	Geologic map	1:25,000	shp	KIGAM ²⁾
	Political map	1:1,000	shp	NGII
	Subwatershed map	1:25,000	shp	Self-produced
	Soil map	1:50,000	shp	RDA ³⁾
	Land use map	1:50,000	shp	NGII
	Stream network map	1:25,000	shp	MOLIT ⁴⁾
Location Map	Well	1:5,000	shp	Self-produced
	Pollution	1:5,000	shp	Self-produced
Rating Map	Rainfall	1:5,000	shp	Self-produced
	Utilization	1:5,000	shp	Self-produced
	Pollution	1:5,000	shp	Self-produced
	Groundwater level	1:5,000	shp	Self-produced
	Water quality	1:5,000	shp	Self-produced

* ¹⁾NGII : National Geographic Information Institute

²⁾KIGAM : Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

³⁾RDA : Rural development Administration

⁴⁾MOLOT : Ministry of Land, Infrastructure and Transport

환하여 작성하였다(Table 2).

2.3. 단위유역 추출

지금까지의 지하수관리를 위한 유역구분은 댐과 같은 수자원개발, 홍수방지, 수질관리 차원에서 넓은 규모의 수계유역을 구분하여 관리계획을 수립하여 왔으나, 이들 유역단위의 규모를 보면 매우 복잡한 지형지세와 수계를 형성하고 있는 우리나라 유역에는 적합하지 않다. 소유역 단위의 면적만 보더라도 면(面) 단위에서 한 개 시군의 면적에 해당하는 매우 넓은 면적이다. 따라서 이와 같이 넓은 규모의 유역단위 관리는 미국, 유럽 등 면적이 넓고 지형지세 및 수계 규모가

큰 국가에 적용하기에는 적합할 수 있으나, 우리나라에 그대로 적용한다는 것은 현실적으로 그 실효성이 부족하다고 볼 수 있다. Choi(2004)도 우리나라에 가장 효율적인 유역관리 단위는 지역주민의 이해증진과 참여를 통한 유역관리의 실효성을 제고하기 위해서는 소유역(watershed) 및 단위유역(subwatershed) 단위가 가장 현실적이라고 주장한 바 있다. 무엇보다도 규모가 작고 관리범위가 명확하여 지역주민 등 이해관계자들이 함께 참여하여 자신들의 의견을 개진할 수 있어 현실적인 관리가 가능하다고 할 수 있다(Table 3).

본 연구지역인 함평군의 단위유역도는 ArcGIS를 이용하여 국립지리원에서 제작한 1:5,000 수치지형도에서

Table 3. General classification of the watershed

Basin Unit	Scale(km ²)	Impervious Surface	Case
Catchment	0.15~1.5	Very Strong	BMP, Site plan
Subwatershed	2.5~25	Strong	River classification and management
Watershed	25~250	General	Watershed-base zoning
Subbasin	250~2,500	Weak	Basin plan
Basin	2,500~25,000	Very Weak	Basin plan

* source : reconstruct contents of the water resources management through the integrated river basin(Choi, 2004)

Table 4. The subwatershed classification of the study area

Basin name	HP000	HP001	HP002	HP003	HP004	HP005	HP006	HP007	HP008	HP009
Area(km ²)	21.3	11.9	15.1	11.8	29.4	12.6	44.3	20.0	13.2	38.9
Basin name	HP010	HP011	HP012	HP013	HP014	HP015	HP017	HP018	HP019	HP020
Area(km ²)	25.8	16.0	26.3	4.8	11.9	10.1	21.5	32.8	10.1	14.8

Fig. 4. The Subwatershed map in study area.

주곡선(7111)과 계곡선(7114)만을 추출하여 DEM을 생성한 후 단위유역 경계를 추출하여 총 20개 단위유역으로 구분하였고 함평군의 이니셜을 본따 "HP"로 유역 이름을 명명하였다(Table 4, Fig. 4).

2.4. 관리등급 분류

강우등급 분류

강우에 의해 지하수위가 변화한다는 것은 많은 연구

자들(Koo and Lee, 2002; Yang *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2010; Yang and Kim, 2011; Kim and Lee, 2012)에 의해 입증된 사실이다. 따라서 복잡한 함양량 산정보다는 강수량 변화를 등급으로 분류하여 관리함으로써 보다 쉽게 관리가 가능하며, 예년보다 현저히 낮아질 경우 이에 대한 지하수량 확보대책을 마련해 둘 수 있을 것이다.

본 연구지역의 강수량은 단위유역별 강수량 측정치가 부족하여 목포기상청에서 관측한 지난 40년간(1971-2011) 연평균 강수량자료를 활용하였다. 연구지역의 연평균 강수량은 1,150.8mm로서 최소 613.2mm, 최대 1,751.1mm를 보여 변화폭이 큰 것으로 나타났으며, 가뭄이 심했던 8개년(1973년, 1976년, 1977년, 1982년, 1988년, 1992년, 1994년, 1995년)의 강수량은 예년평균의 53%-74% 수준에 머물렀고 최근 10여 년은 평년보다 34mm 정도 증가한 것으로 나타났다(Fig. 5).

강수량에 대한 등급을 분류하기 위하여 지난 40년간의 강수량에 대한 도수분포(Frequency Distribution) 그래프를 작성해본 결과, 도수분포 특징은 쌍봉분포(bimodal distribution)로서 1,039-1,182mm 범위의 빈도수가 10으로 가장 높았다. 강우등급 구분은 최소값+표준편차(906mm) 이하의 경우를 매우 부족(4등급), 최소값+2표준편차(1,198mm) 이하를 부족(3등급), 최소값+3표준편차(1,491mm) 이하를 풍부(2등급), 1,491mm 이상을 매우 풍부(1등급)으로 구분하였다(Table 5, Fig. 6). 강우가 많았던 해는 함양률도 더 높은 것으로

Fig. 5. Annual average precipitation graph in Mokpo(1972-2011).

Table 5. The classification criterion of rainfall-rating in study area

Rainfall(mm)	Rating	Description	Management Policy(Item)
less than 906	4	Very Low	Extracting limit and Artificial recharge
906 to 1,198	3	Low	water quantity secure and effort
1,198 to 1,491	2	Rich	Sustainable development and utilization
more than 1,491	1	Very rich	Groundwater Conservation and management

Fig. 6. Frequency distribution graph of annual average precipitation in Mokpo(1972-2011).

보아 향후 더 많은 기상관측 자료를 확보하여 보다 정확한 강우등급을 구분해야 할 것으로 판단된다.

수위등급 분류

지하수위는 해발고도 또는 지표면으로부터 지하수면까지의 거리로 표시한다.

강수량에 따라 지하수위가 변화하면 해당구역의 지하수 함양량 변화에 직접적인 관계가 있음은 1990년대 이후 많은 연구자들에 의하여 연구되어 왔다. 지하수위 변동에 가장 영향을 미치는 요인은 강우량으로 밝혀졌으며(Park *et al.*, 1994; Go, 1997), 지하수위 강하곡선을 이용하여 함양량을 산정하는 방법에 대한 연구는 Choi and Ahn(1998)에 의해 개발되어 Kim *et al.*(2004), Kim *et al.*(2006) 등에 의해 수행되었다. 이는 무강우시 지하수위 최대강하량과 1개월 강하량의 비율로 정의되는 지하수위 강하율과 지하수 함양률 사이에 직접적인 비례관계가 있음을 기본 개념으로 한다.

또한 지하수위 변동법은 Theis(1937)에 의해 제시되었는데, 강우시 발생하는 지하수위 상승과 대수층의 비산출률을 이용하여 지하수 함양량을 산출하는 방법으로서 이후 Goes(1999)와 Ketchum *et al.*(2000), Koo *et al.*(2000), Moon and Woo(2001), Koo and Lee(2002), Yang *et al.*(2007) 등 많은 연구자들에 의하여 꾸준히 연구되어 왔다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 연구지역인 함평군에 위치해 있는 국가 지하수관측소의 최근 3년간 지하수위 관측자료를 분석한 결과 지난 수년간 2m 이내의 수위 변위를 보이는 것으로 분석됨에 따라 지하수 관측일보(2011) 자료를 토대로 지하수위 등급을 부여하기 위하

Fig. 7. Groundwater level variation graph during last three years in study area.

여 영산강 권역에 설치된 37개 관측소의 총 444개 수위 변위값에 대한 도수분포를 작성해보았다(Fig. 8).

도수분포 특징은 편향된 정규분포(normal distribution)로서 평균 0.5649m, 최대 0.5649m이며, 0.42m 이내의 범위에서 가장 높은 빈도수를 보였다. 또한 0.42m와 0.84m 범위에서 급격히 낮은 빈도수를 나타내는 경향을 보였다. 또한 2.1m 범위 이후부터 빈도의 분포 패턴이 바뀌는 것으로 나타났다. 따라서 빈도수가 가

Fig. 8. Frequency distribution graph of groundwater level variation in study area.

Table 6. The classification criterion of groundwater level-rating in study area

G.W.L(m)	Rating	Description	Management Policy(Item)
less than 0.42	1	Safe level	Storage and preservation
0.42 to 0.84	2	Appropriate level	Continuous monitoring
0.84 to 2.10	3	Concern level	Drought measure establishment
more than 2.10	4	Emergency level	Groundwater development and utilization limit, Permit clear etc.

장 많은 0.42m 미만의 경우를 안심수준(1등급)을 부여하고, 0.84m 미만일 경우를 적정수준(2등급), 2.1m 미만일 경우는 우려수준(3등급), 2.1m 이상일 경우는 대책수준(4등급)을 부여하였다(Table 6).

오염등급 분류

1988년 지방자치체 실시 이후 농어촌 지역경제 개발이 활발하게 추진되어 각종 신규 시설물의 인·허가권이 자치단체로 이양되어 숙박업소, 음식점, 휴양지, 유원지, 축산단지, 공장, 각종 매립장 등 수자원 측면에서 다양한 오염원들이 적절한 환경영향 검토를 받지 않은 채 설립되는 경우가 증가되고 있다(MAFRA and KRC, 2002). 특히 지하수는 한 번 오염되면 정화처리에 소요되는 비용과 기간이 막대하게 소요되므로 지하수 보전관리를 위해서 신규 오염유발 시설물에 대한 인·허가시 지하수오염 타당성을 검토하여야 한다. 그러나 지하수 환경에 영향을 미치는 오염원은 그 종류와 범위가 광범위하기 때문에 선진국에서는 오염물질 유발이 예상되는 시설물의 신규 허가를 위한 위치 선정 시 미국 EPA의 Aller *et al.*(1987)가 개발한 지하수 오염취약성도(DRASTIC)를 기본적으로 검토하며, 이에 따라 오염유발 가능 시설물은 오염취약성이 낮은 곳으로 유도하고, 부득이 취약성이 높은 지역에 시설

물을 설치할 경우, 정화처리시설 및 오염물질 관리 등 환경기준을 엄격하게 적용하고 있다.

각종 오염원으로부터 지하수를 보호하기 위한 오염가능성 평가방법은 매우 다양하나, 최근 가장 많이 활용하고 있는 방법이 DRASTIC 지수이다. 이에 대한 연구는 Lee *et al.*(1996), Cho(1999), MAFRA and KRC(2000), Yoon *et al.*(2001), Cho *et al.*(2004), Ha(2005), Jeong *et al.*(2010) 등의 연구자들에 의해 분석되어 왔다.

DRASTIC Potential은 다음과 같은 식에 의해서 구해진다.

$$\text{DRASTIC Potential} = D_R D_W + R_R R_W + A_R A_W + S_R S_W + T_R T_W + I_R I_W + C_R C_W$$

여기서 R : 등급(rating), w : 가중치(weight)

DRASTIC 지수는 지하수 오염에 대한 취약성과 민감성을 상대 평가하는 것으로서 오염지역은 확인할 수 없으나 더 높은 오염 가능성을 가진 지역을 확인할 수 있다. 일반적으로 농업기반공사의 연구보고서(2000)에 따르면, 우리나라에서의 DRASTIC 지수는 23~226의 범위에 있으며, 농업지역에서 농약에 의한 오염가능성을 고려할 경우에는 DRASTIC 지수는 23~256의 범

Fig. 9. A fundamental concept of DRASTIC MAP.

위를 갖는다. DRASTIC 지수는 그 수치가 높을수록 지하수 오염 가능성도 상대적으로 높고, 반대로 지수 값이 낮으면 지하수 오염 가능성이 낮다는 것을 의미한다. 그러나 DRASTIC은 지하수 전문가를 위한 평가 방법으로 7가지 영향인자들에 대한 폭넓은 이해를 요구하는 매우 어려운 분석방법이다(Fig. 9).

따라서 본 연구에서는 기존의 전문가용 DRASTIC MAP을 DRASTIC 지수에 따라 오염등급을 부여함으로써 일반인도 이해하기 쉬운 오염취약성 등급도를 작성하였다. 일반적인 오염취약성 평가방법은 높음, 보통, 낮음 등으로 구분하여 점수와 가중치를 부여한 후 각

인자별 총점을 구하거나 중첩을 통해 오염취약성 정도를 나타내나, 본 연구에서는 합평균에 대한 지하수 오염취약성 지수의 도수분포를 도시해봄으로써 오염지수를 4개 등급으로 구분하여 분석하였다. 각 영향인자별 면적비율 등급을 중첩하여 합산한 결과 연구지역의 DRASTIC 지수값을 계산하였고 ArcGIS에서 총 17,029개의 DRASTIC 지수값들의 히스토그램을 작성해봄으로써 빈도분포를 파악해보았다. 도수분포 특징은 정규분포(normal distribution)로 평균값 125점이 가장 높은 빈도수를 보였으며, 135점에서 급격히 낮은 빈도수를 나타내는 경향을 보였다(Fig. 10).

따라서 빈도수가 갑자기 증가하는 99 이하의 경우를 안심수준(1등급)을 부여하고, 117 이하의 경우를 안심수준(2등급), 급격히 빈도수가 증가하는 135 이하의 경우는 우려수준(3등급), 그리고 135 이상일 경우는 대책수준(4등급)을 부여하였다(Table 7).

수질등급 분류

지하수의 수질개선과 오염방지를 위한 수질등급화를 통해 관리할 필요성에 대한 연구는 MC(2000), Kim *et al.*(2001), Lee and Lee(2006), KEI(2007), Lee *et al.*(2005), Yoon *et al.*(2008), ME(2009), Kim *et al.*(2010) 등에 의해 수행되어 왔으나, 현행 우리나라 지하수 수질관리는 지하수 이용 목적(먹는물, 음용수, 생활용수, 농업용수, 공업용수 등)에 따라 9개 부처 14

Fig. 10. Frequency distribution graph of DRASTIC Index in study area.

Table 7. The Classification criterion of groundwater pollution-rating in study area

DRASTIC Index	Rating	Description	Management Policy(Item)
less than 99	1	Safe level	Development of drinking water, conservation zone specify etc.
100 to 117	2	Interest level	Trace contaminants, Prevent the spread of contamination etc.
118 to 135	3	Concerns level	Installation restrictions, monitoring
more than 135	4	Measures level	Administrative action etc.

개 법률에 따라 동일한 지하수에 대하여 수질기준, 검사주기, 검사기관 등을 각각 달리 규정하고 있어 전국적인 수질관리에 애로가 많다. 또한 현행 수질성적서의 적합, 부적합 결과만으로 해당지역의 수질상태를 대변하고 관리할 수가 없다. 왜냐하면 부적합의 경우 어떤 항목에서 기준치보다 얼마나 더 초과하였으며, 부적합 원인은 무엇인지 오염 원인이 규명되기 전에는 수질상태를 표현하기 어렵기 때문이다. 또한 생활용으로 지하수를 개발·이용 중에 어떤 원인으로 인해 수질기준을 초과하여 부적합으로 판정될 시 농업용으로 용도전환하면 수질개선이나 오염정화를 위한 적절한 조치를 취하지 않아도 되는 법적인 허점을 안고 있다. 따라서 명확하고 통일된 하나의 수질관리 기준을 마련할 필요가 있다.

우리나라 환경정책기본법 제12조의 [별표] 환경기준에 따르면 수질등급은 7등급으로 구분하여 관리하고 있다. 그러나 이는 대기, 지표수, 해수에 국한되어 있고 지하수분야의 수질 환경기준은 「먹는물관리법」 제5조 및 「수도법」 제26조에 따라 환경부령으로 정하는 수질기준을 적용하도록 되어있다. 지하수 오염평가기 수질기준 초과항목에 한해 항목별로 수질기준의 25% 이상 50% 미만은 1등급, 수질기준의 50% 이상 75% 미만은 2등급, 수질기준의 75% 이상 100% 미만은 3등급, 그리고 수질기준을 초과하면 4등급을 부여하여 오염도를 평가하도록 지침(ME, 2011)을 마련한 바 있다.

본 연구에서는 국내 먹는물 수질기준과 환경부의 지하수 오염등급기준을 단위유역 단위로 적용하고 수질자료 취득의 어려움으로 인해 환경부의 수질측정망 운영결과 수질기준을 초과한 주요항목에 대해서만 4등급으로 구분하여 등급을 부여해 보았다(Table 8).

3. 결과 및 고찰

지하수관리는 유역관리, 수량관리, 수질관리가 가장 중요하기 때문에 유역관리는 우리나라 복잡한 지형지세와 수계특성과 가장 적합하고 지역주민 등 이해관계자의 참여가 가능한 단위유역(subwatershed) 단위의

유역관리가 필요하다. 연구지역인 함평군은 2.5~25km² 규모의 21개 단위유역으로 구분하였다.

수량관리를 위해서는 함양량 변화와 가장 상관관계가 높고 측정하기 쉬운 강수량, 지하수위 및 지하수 이용량에 대한 관리가 우선되어야 한다. 따라서 연구지역에 대한 강수량에 대한 변화를 알아보기 위해 목포기상청의 지난 40년간(1972-2011)의 연평균 강수량 자료의 도수분포 그래프를 작성하여 1,491mm 이상을 1등급(매우 풍부), 1,198-1,491mm는 2등급(풍부), 906-1,198mm는 3등급(부족), 그리고 906mm 미만은 4등급(매우 부족)으로 구분하였다.

지하수위 등급은 영산강 권역에 설치된 37개 관측소의 총 444개 지하수위 변위값에 대한 분석결과 빈도수가 가장 많은 0.42m 미만의 경우를 안심수준(1등급)을 부여하고, 0.84m 미만일 경우를 적정수준(2등급), 2.1m 미만일 경우는 우려수준(3등급), 2.1m 이상일 경우는 대책수준(4등급)을 부여하였다.

이용량 등급은 지하수개발가능량 대비 이용량으로 분류기준을 마련하여 지하수개발가능 안전율(60%)을 감안했을 때를 보통수준(30-60%)으로 보고 초과수준(60-90%), 과다수준(90% 이상), 적정수준(30% 이하) 등 4등급으로 구분하였다.

수질관리를 위해서는 해당 유역내 지하수의 수질상태와 오염가능성에 대한 평가가 이루어져야 한다. 따라서 연구지역의 오염관리를 위한 관리등급은 미국 EPA(1987)에서 개발한 지하수오염 가능성 평가시스템을 국내에 적합하게 변형한 DRASTIC 지수를 작성하여 연구지역내 17,029개 DRASTIC 지수값들의 빈도수를 파악해 본 결과 빈도수가 갑자기 증가하는 99 이하의 경우를 안심수준(1등급)을 부여하고, 117 이하의 경우를 안심수준(2등급), 급격히 빈도수가 증가하는 135 이하의 경우는 우려수준(3등급), 그리고 135 이상일 경우는 대책수준(4등급)을 부여하였다.

수질등급은 환경부(2011)의 지하수 오염등급 기준을 준용해 수질기준의 25% 이상 50% 미만은 청정수질(1등급), 수질기준의 50% 이상 75% 미만은 적정수질(2등급), 수질기준의 75% 이상 100% 미만은 일반수질(3

Table 8. The Classification criterion of groundwater quality-rating in study area

Water quality range	Rate	Description	Management Policy(Item)
more than 25% less than 50%	1	Clean	Conservation zoning
more than 50% less than 75%	2	Appropriate	Efforts to improve
more than 75% less than 100%	3	General	Improvement of water quality
more than water standard	4	Contaminate	Identify pollution sources, Purification etc.

등급), 그리고 수질기준을 초과하면 오염수질(4등급)을 부여하였다.

Fig. 11의 (a)에서 보는 바와 같이 지금까지의 지하수관리모델은 현장에서 조사한 자료를 크리깅(Kriging) 기법을 통해 행정구역별로 골고루 격자단위(50×50m 또는 100×100m)로 추정한 산출결과만을 제시하고 있어 과잉양수로 수위가 저하되어 수량부족 초래 또는 수질오염이 우려될 시 적절한 행정규제나 관리조치를 추진할 때 근거로 삼을 수 있는 적정기준으로 활용하기에는 그 범위 및 경계가 모호하고 기초자료의 정밀도와 해상도에 따른 공간적 부정확성이 좌우되어 신뢰도 확보가 어려울 뿐만 아니라 지역의 지하수관리계획 수립 및 행정조치 의사결정을 위한 근거자료로 활용하기에는 모호한 부분이 많아 실효성 있는 관리정책을 추진할 수 없었다. 또한 전문 기술력을 활용한 공간분석 등 전문가가 아니면 이해하기 어렵고 속성자료를 별도로 추출해야하는 등 번거로운 점이 한 두 가지가 아니다.

본 연구에서 새로 제시한 관리모델(b)의 경우는 기존모델(a)과 같은 문제점을 해결하고 실효성 있는 지하수관리정책 추진으로 실질적인 지하수관리 업무에 활용하기 위하여 기존의 행정구역 단위의 관리방안 개선하여 지역주민 등 이해관계자가 직접 참여할 수 있도록 단위유역별 관리등급을 제시하였다. 본 연구에서 새롭게 제시한 관리모델의 주요 장점을 보면 다음과 같다.

- 지하수위, 수질 등 항목별 변화값을 등급화하여 작성이 쉬움
- 일반인 등 비전문가도 쉽게 이해할 수 있음
- 단위유역별로 작성되어 지역주민 등 이해관계자의 참여 가능
- 단위유역 단위로 작성되어 지역의 수계 및 지하수

환경과 연계 가능

- 지하수 관측자료만 보더라도 쉽게 관리등급을 알 수 있음
- 간단한 교육 및 홍보로도 지하수에 대한 인식 전환 및 선입견 해소 가능 등

이러한 관리등급을 부여하는 방식의 새로운 지하수 관리모델을 시범지역에 적용한 성과물과 기존 관리모델과의 이해도, 활용성 가능성 등 선호도조사를 실시하였다. 선호도조사는 기존모델(모델1)과 새로운 관리모델(모델2)의 성과물에 대한 평가기준(이해도, 선호도, 신뢰성, 효율성, 만족도)을 작성하여 실질적인 지하수 관리 주체인 전라남도 전체 시·군(22개) 지하수업무 담당자(과거 지하수업무를 담당했거나 현재 담당하고 있는)와 한국농어촌공사 지하수업무 담당자를 대상으로 간단한 설문조사를 통해 실시하였다.

설문조사는 2013년 5월 10일부터 5월 21일까지 2주간에 걸쳐 조사비용 절감과 신속한 조사를 위해 이메일, 전화 및 직접조사를 병행하여 실시하였으며, 두 모델을 비교하여 이해하기 쉽고 활용성 높은 선호도 등을 조사하는 관계로 양자택일형(dichotomy questions)의 문제점인 한쪽으로 치우침을 방지하기 위해 “모르겠다” 항목을 추가하여 조사하였다(Table 9).

설문조사 결과 모델(1)을 선택한 비율이 평균 12.5%, 모델(2)를 선택한 비율은 평균 83.1%로서 새로운 관리모델인 모델(2)를 6.65배 더 선호하고 쉽게 이해하는 것으로 나타났다. 사용자가 쉽게 이해할 수 있는 정도를 파악하기 위한 “이해도” 평가에서는 모델(1)을 선택한 비율이 12.5%(4명), 모델(2)는 84.4%(27명), 모르겠다는 답변이 3.1%(1명)로 나타났다. 또한 지하수 관리계획 수립 등의 의사결정을 위해 선호하는 성과물을 선택하는 “선호도” 조사에서는 모델(1)이 6.3%(2명),

(a) Existing Model(Raster type)

(b) New Model by subwatershed

Fig. 11. Comparison of groundwater management (a) Existing model and (b) New model divided by subwatershed.

Table 9. The evaluation standard of survey

Evaluation standard	Question	Answer		
		Model 1	Model 2	Unknown
Understanding	Which is easier?	☐	☐	☐
Preference	Which is prefer?	☐	☐	☐
Reliability	Which is reliable?	☐	☐	☐
Effectiveness	Which is effective?	☐	☐	☐
Satisfaction	Which is satisfactory?	☐	☐	☐

Table 10. The result of survey

Question	Model(1)		Model(2)		Unknown		No. Res.
	Ans.	rate(%)	Ans.	rate(%)	Ans.	rate(%)	
1	4	12.5	27	84.4	1	3.1	32
2	2	6.3	29	90.6	1	3.1	32
3	8	25.0	22	68.8	2	6.3	32
4	6	18.8	25	78.1	1	3.1	32
5	0	0.0	30	93.8	2	6.3	32
Total/Ave.	20	12.5	133	83.1	7	4.4	160

모델(2)가 93.6%(29명), 모르겠다는 답변은 3.1%(1명)으로 나타났다. 그리고 조사성과물 내용에 대한 신뢰도를 평가하기 위한 “신뢰성” 평가에서는 모델(1)을 선택한 사람이 25%(8명)로 다소 높게 나타났으며, 모델(2)가 신뢰가 간다는 사람은 68.8%(22명), 모르겠다는 6.3%(2명)로 조사되었다. 이는 지하수 조사과정과 조사내용, 분석방법 등에 대한 정확한 인지가 부족한 상태에서 답변하는 것으로 판단되며 지속적 홍보와 교육을 통해 개선해 나가야 할 것이다.

두 모델 중 바로 활용이 가능하겠는지 성과물의 “효율성” 평가 항목에서는 18.8%(6명)가 모델(1)을 선택했으며, 78.1%(25명)는 모델(2)을 선택하였고 모르겠다는 3.1%(1명)을 보였다. 마지막으로 전반적으로 두 모델 중 어느 성과물이 더 만족스러운지 “만족도” 평가에서는 모델(2)가 93.8%(30명)로 가장 많았고 아직 모르겠다는 답변도 6.3%(2명)로 나타났다(Table 10).

위와 같은 설문조사 결과를 종합해보면 전반적으로 관리등급으로 구분된 새로운 관리모델인 모델(2)가 기존의 모델(1)보다 이해하기 쉽고, 지하수관리 의사결정 활용에 더 선호하는 성과물이며, 더 신뢰가 가는 것이라고 볼 수 있다. 특히, 이해도와 활용성 측면에서 기존모델보다 6.75배나 높게 나타난 것으로 보아 그 효율성 검증뿐 만아니라 비전문가도 손쉽게 지하수관리가 가능함을 확인하였다.

4. 결 론

연구지역의 강우등급은 강수량에 따라 크게 좌우하는데 유역별 또는 인근 관측소가 없어 인근 목포기상청의 연평균 강수량자료(1972-2011)를 토대로 작성하였으며, 2011년 연평균 강수량은 982mm로서 3등급(부

Fig. 12. Rainfall rating map by subwatershed.

측)에 해당하였다(Fig. 12).

지하수의 수위등급은 하천주변지역이 낮게 나타났고, 수위변화가 큰 지역은 산간지역 및 지하수관정 개소수가 많은 지역에서 두드러지게 나타났다. 4등급으로 분류한 2.1m 이상의 수위변화를 보이는 단위유역은 HP003, HP006, HP007, HP008, HP010, HP019로서, 이들 지역은 양수량 규제, 과다양수 제한, 인공함양 등 적정수위 이내로 유도하는 적절한 법적, 행정적

조치를 취해야 할 유역으로 판단된다(Fig. 13).

지하수 오염등급은 축사와 주유소, 주거지 등 오염물질 배출업소가 많은 HP001, HP005, HP006, HP017 단위유역이 DRASTIC 지수 135 이상의 4등급으로 높게 나타났다. 이들 지역은 폐수 등 오염물질 배출억제를 위하여 환경개선부담금 부과, 수질개선부담금 부과, 시설개선 명령, 허가취소, 벌금부과 등 오염물질 배출기준 이내로 유도하는 적절한 법적, 행정적

Fig. 13. Groundwater level rating map by subwatershed.

Fig. 15. EC rating map by subwatershed.

Fig. 14. Groundwater pollution rating map by subwatershed.

Fig. 16. $\text{NO}_3\text{-N}$ rating map by subwatershed.

Fig. 17. Cl⁻ rating map by subwatershed.

Fig. 19. General bacteria rating map by subwatershed.

Fig. 18. As rating map by subwatershed.

관리대책을 추진해나가면 될 것이다.

그러나 정확한 관리등급을 구분하기 위해서는 해당 지역의 장기적으로 관측된 많은 모니터링 자료와 기초 자료의 축적이 선행되어야 할 것이다. 향후 대상지역에 대한 보다 정밀한 조사를 지속적으로 실시하여 단위유역 단위의 경계 확정과 지하수위, 수질, 오염 등 각 항목별 관리등급의 범위를 보다 명확히 정립하고 이에 따른 관리대책을 구체화한다면, 지하수관리대책 수립 등 보다 나은 지하수관리를 위한 의사결정지원이 가능할 것으로 판단된다.

사 사

본 논문에 활용된 많은 기초자료를 제공해주신 한국농어촌공사 관계자 여러분과 논문을 심사하고 부족한 점을 지적해 주신 편집위원과 심사위원께 감사드립니다.

참고문헌

- Ahlfeld, D.P., Barlow, P.M. and Mulligan, A.E. (2005) GWM-A ground-water management process for the U.S. Geological Survey modular ground-water model (MODFLOW 2000): U.S. Geological Survey Open-File Report 2005-1072, p.124.
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J.H., Petty, R.J. and Hackett, G. (1987) DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. Prepared for U.S.EPA, Office of

조치를 취하여 지하수오염을 방지해야 할 것이다 (Fig. 14).

지하수의 수질등급은 관리해야할 항목별로 등급을 산정하였다. 이온농도의 지시인자 역할을 하는 전기전도도(Electrical Conductivity; EC)는 2~3등급(228~803 μ S/cm)으로 다소 높은 수질등급을 보이는 것으로 나타났다(Fig. 15-19). 위와 같이 등급분류 기준에 따라 취수제한이나, 개발이용 제한, 인공함양, 오염정화, 지속적 모니터링, 보전구역 지정 등 등급에 맞는 적절한

- Research and Development, Ada, OK. National Water Well Association, Dublin, OH. EPA-600/2-87-035.
- Cho, S.B. (1999) A Study on the Evaluation of Groundwater Contamination Potential using GIS in Pyeongtaek City Gyeonggi Province, Journal of the Korean Society of Groundwater Environment, 6(2), p.87-94.
- Cho, S.B., Son, H.U. and Lee, K.W. (2004) A Study on the Prediction of Groundwater Contamination using GIS, Journal of the Korea Spatial Information Society, 12(2), p.17-28.
- Choi, B.S. and Ahn, J.G. (1998) A Study on the Estimation of Regional Groundwater Recharge Ratio, Journal of the Korean Society of Groundwater Environment, 5(2), p.57-65.
- Choi, J.Y. (2004) Water Resources Management through the Integrated River Basin, Journal of Korea Water Resources Association, v.37, n.3, p.21-28.
- Chon, H.T. and Ahn, H.I. (1998) Evaluation of Groundwater Contamination Potential using GIS, Journal of the Korean Society of Groundwater Environment, v.5, n.3, p.129-140.
- Gannett, M.W., Wagner, B.J., and Lite, K.E., Jr. (2012) Groundwater simulation and management models for the upper Klamath Basin, Oregon and California: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2012-5062, p.92.
- Go, K.W. (1997) Characteristics of the groundwater and hydrogeologic implications of the Seoguipo formation in Cheju Island, Pusan National University doctoral dissertation.
- Goes, B.J.M. (1999) Estimate of shallow groundwater recharge in the Hadejia-Nguru Wetlands, semi-arid northeastern Nigeria, Hydrogeology Journal, v.7, p.294-304.
- Goyang City (2009) The Report of Groundwater Information Management System in Goyang City.
- Ha, S.R. (2005) Stainable Management Methods of Pollution load for the development of Water Pollution Total Management Systems, Journal of Korea Water Resources Association, v.38, n.3, p.53-61.
- Han, G.E., Park, I.G., Gwon, H.D., Jung, C.Y. and Son, J.H. (2000) The Resrarch on Construction of the Groundwater Management System Using, Journal of the Korean Society of Soil and Groundwater Environment, Spring Conference Presentations.
- Jeong, S.H., Kim, K.J. and Sim, C.B. (2011) Water-well Management Data Modeling using UML 2.0 based in u-GIS Environment, Journal of the Korea Electronics and Telecommunications, v.6, n.4, p.523-531.
- Jeong, T.K., Choi, B.W. and Kang, M.A. (2010) Important Environmental Factor on Groundwater Pollution, The Korean Society of Engineering Geology 2010 Spring Conference Presentations, p.145-149.
- Jung, C.D., Kim, Y.B., Park, K.Y., and Park, S.J. (2012) Efficient Management Method of Groundwater in Farming and Fishing Villages, J. Soil & Groundwater Env., v.17(4), p.81-90.
- Ketchum, J.N., Donovan, J.J. and Avery, W.H. (2000) Recharge characteristics of a phreatic aquifer as determined by storage accumulation, Hydrogeology Journal, v.8, p.579-593.
- Kim, G.B. and Lee, S.H. (2012), Applicability of logistic regression model of groundwater levels to drought forecast. Journal of the Geological Society of Korea. v.48, n.3, p.275-284
- Kim, G.B., Choi, D.H., Yoon, P.S. and Kim, K.Y. (2010) Trends of Groundwater Quality in the Areas with a High Possibility of Pollution, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, v.11, n.3, p.5.
- Kim, G.B., Lee, M.J., Kim, J.U., Lee, J.Y. and Lee, K.K. (2004) Evaluation of Estimating Groundwater Recharge Using Water level Data Obtained from the National Groundwater Monitoring Stations, Journal of The Korean Society of Engineering Geology, v.14, n.3, p.313-323.
- Kim, M.I., Kim, J.H., Jang, J.H., Jang, K.S., Seok, H.J. and Kim H.S. (2006) A Study on Waterbasin Estimation of Groundwater Recharge using Water-table Fluctuations and Water Balance Method, 2006 the Korean Society of Soil and Groundwater Environment, Spring Conference Presentations, p.350-354.
- Kim, M.K. (2003) Articles : Development of the GIS Based Pre-and Post-Processing Tool for the Visual MODFLOW Groundwater Flow Modeling, Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, v.6, n.2, p.65-79.
- Kim, Y.J., Lee, S.M., Won, J.S. and Lee S.B. (2001) A Study on Designation and Management of Groundwater Conservation Area Using Groundwater Classification Map, Journal of the Korean Society of Soil and Groundwater Environment, v.6, n.4, p.97-112.
- Kim, Y.Y. and Lee, K.K. (1999) Hydrogeological Properties Around Han River from Water Level Data, Journal of the Korean Society of Groundwater Environment, v.6, n.1, p.33-41.
- Koo, M.H. and Lee, D.H. (2002) A numerical Analysis of the Water Level Fluctuation Method for Quantifying Groundwater Recharge. Journal of the Geological Society of Korea. v.38, n.3, p.407-420.
- Koo, M.H., Kim, H.S. and Ahn, K.H. (2000) The Analysis of Long-term observing data of Groundwater level and Temperature, The Korean Society of Engineering Geology 2000 Spring Conference Presentations, p.55-61.
- Korea Environment Institute (2007) Policy direction for re-establishing groundwater quality and cleanup standards.
- Lee, B.H., Kim, Y.B., Sul, M.K. Song, Y.K. and Song, M.Y. (2002) Development and Research of Groundwater Management System using GIS, The Korean Society of Engineering Geology 2002 Spring Conference Presentations, p.235-248.
- Lee, H.J. and Lee, H.R. (2003) Implementation of Contamination Vulnerability Evaluation System of Groundwater based on GIS, Korean Society For Internet Information Spring Conference Presentations, v.4, n.1, p.249-252.
- Lee, H.R. (2003) Implementation of Management System for Contamination Vulnerability Calibration of the Ground Water by an Object-oriented Geographic Data Model, Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, v.6, n.2, p.101-112.
- Lee, J.B. (2005) A Study on the Model of Vulnerability Evaluation at Groundwater Well using Pattern Anal-

- ysis based on Object Oriented Spatial Data Model, Doctoral degree Thesis.
- Lee, J.S., Goo, K.S., Cho, S.H., Kim, J.G. and Kim T.K. (2005) The Study on the relationship between Groundwater Quality, Geology, Landuse and Soil Characteristics : GIS and Statistical Approaches, The Geological Society of Korea Spring Conference Presentations.
- Lee, J.Y. and Lee, M.J. (2006) Current Status and Challenges of Domestic Groundwater Quantity and Water Quality Monitoring project, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, v.7, n.4, p.60-67.
- Lee, M.J. and Lee, J.H. (2011) Coupled Model Development between Groundwater Recharge Quantity and Climate Change Using GIS, Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, 14(3), n.52, p.36-51.
- Lee, S.H., Choi, S.Y. and Bae, S.K. (2010) Analysis of Groundwater Recharge According to Increase and Decrease of Rainfall, The Korea Water Resources Association Spring Conference Presentations.
- Lee, S.M. (2001) A Study of Developing Decision Support Model for Groundwater Management in Seoul Metropolitan Area using Geographic Information System, Doctoral degree Thesis.
- Lee, S.R. and Kim, Y.J. (1996) Analysis of Groundwater Pollution Potential and Risk using DRASTIC System, Journal of the Korea Spatial Information Society, v.4, n.1, p.1-11.
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Korea Agricultural and Rural Infrastructure Corporation (2000) Regional Assessment and Mapping of Groundwater Vulnerability to Contamination for Aquifers in Korea.
- Ministry of Construction (2000) The improvement research report related groundwater.
- Ministry of Environment (2005) The Comprehensive Plan of Groundwater Quality Conservation, p.298-300.
- Ministry of Environment (2009) Commentary Groundwater Quality standards.
- Ministry of Environment (2011) Groundwater Quality Monitoring Network Report, p.1-9.
- Moon, S.G. and Woo, N.C. (2001) Estimation of Groundwater Recharge Ratio Using Cumulative Precipitation and Water-level Change, Journal of the Korean Society of Soil and Groundwater Environment, v.6, p.33-43.
- Park, W.B., Yang, S.K. and Koh, G.W. (1994) Study on the Fluctuations of Groundwater Levels in Cheju Island, Korea, Journal of the Korean Environmental Sciences Society, v.3, n.4, p.333-348.
- Reilly, T.E. and Harbaugh, A.W. (2004) Guidelines for evaluating ground-water flow models, U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2004-5038, p.30.
- Seo, J.M., Lee, C.H. and Kim, S.K. (2005) A Development of Underground Water Management System Using an Analytic Model, Journal of the Korea Society of Computer Information, 10(4), n.36, p.57-63.
- Sloto, R.A. and Buxton, D.E. (2005) Water budgets for selected watersheds in the Delaware River Basin, eastern Pennsylvania and western New Jersey: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5113, p.37.
- Son, J.H., Ahn, J.K. and Jeong, S.Y. (2002) A Study on the Constructions of Groundwater Management System, Korea Spatial Information Society Autumn Conference Presentations.
- The Report of Groundwater Information Management System(Seoul, 2000, Gangneung, 2005, Cheonan, 2005, Seochon, 2009, Suncheon, 2007, Dongducheon, 2009, Muan, 2010).
- Theis, C.V. (1937) Amount of ground-water recharge in the Southern High Planes. Transactions American Geophysical Union, 18, p.564-568.
- Yang, J.S. and Kim, N.K. (2011) The Correlation Between the Moving of Precipitation and Groundwater Level in Korea, The Journal of the Korean Society of Civil Engineers, v.31, n.3B, p.265-276.
- Yang, J.S., Ahn, T.Y., Park, J.H. and Park, C.K. (2007) The Correlation between the Precipitation considering Critical Infiltration and Groundwater Level in Kum River Watershed 2007 Korean Society of Civil Engineers Conference Presentations, p. 1926-1929.
- Yoon, P.S., Choi, D.H., Kim, K.B., Kim, H.S. and Kim, C.S. (2008) A Study on the Variation of Groundwater Quality using Data for the Groundwater Quality Monitoring Network and the National Groundwater Monitoring Network, The Geological Society of Korea Autumn Conference Presentations.
- Yoon, S.Y. and Jeong, I.M. (2001) Groundwater Development and Conservation Plans, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, v.2, n.2, p.49-51.

2013년 6월 7일 원고접수, 2013년 9월 7일 1차수정,
2013년 12월 21일 게재승인