

도시화가 빠르게 진행된 지역의 토지이용과 지하수 수질과의 관계에 대한 연구

The Study on the Relationship between Land Use and Groundwater Quality in the Rapidly Urbanized Area

안 중 기*

An, Jung Gi

Abstract

The use of land at the time of investigation of groundwater quality in the rapidly urbanized Bu-chon city is classified into 5 categories based on the change process of land use. The difference in groundwater quality according to the land use and its usage period is tested by non-parametric statistical procedures. The seven constituents of water quality with the highly frequent detection in the area for this study are used for the statistical test. The shallow groundwater quality within the areas of the same land use at the time of investigation varies significantly according to the period of land usage. The concentration of KMnO_4 consumed and hardness is significantly higher in the old residential area (of more than 20 years old) than in the younger one (of less than 10 years old). The quality of the shallow groundwater is also significantly different among the three categories with the similar period of land usage (of more than 15 years old). The concentration of $\text{NO}_3\text{-N}$, hardness and total solid is significantly higher in the residential area than in the agricultural one (namely, the area used as paddy fields 2 to 5 years ago). The median concentration of these constituents is 2.2 to 3.8 times higher in the residential area than in the agricultural one. The concentration of $\text{NO}_3\text{-N}$, KMnO_4 consumed and Cl^- is significantly higher in the industrial area than in the agricultural one. The median concentration of these constituents is 5.5 to 18 times higher in the industrial area than in the agricultural one. The concentration of KMnO_4 consumed is significantly higher in the industrial area than in the residential area. The median concentration of these constituents is 12 times higher in the industrial area than in the residential one. The spatial distribution of shallow groundwater quality in the rapidly urbanized area is closely related to the period of land usage as well as the land use, which is presumed to be attributed to the difference in the concentration and leakage rate of the contaminants leaking from damaged sewer into shallow groundwater.

keywords : groundwater quality, land use of the inner urban area, the change process of land use, the period of land usage

* 농업기반공사 제주도본부 지하수부 계장

요 지

도시화가 빠르게 진행된 부천시 지역의 수질조사 당시 토지이용을 토지이용 변화과정에 의해 세부 분류하고 토지이용과 토지이용기간에 따른 지하수 수질차이 여부를 비모수통계기법으로 검증하였다. 연구지역에서 검출빈도가 높은 7개 성분의 수질자료를 이용하였다. 수질조사 당시 토지이용이 동일한 지역에서 천부지하수 수질은 토지이용 기간에 따라 통계적으로 유의한 차이를 보인다. 20년 이상 이용된 오래된 주거지역의 과망간산칼륨소비량(이하 KMnO_4), 경도 등의 농도는 10년 정도 이용된 새로운 주거지역보다 통계적으로 유의한 정도로 높은 경향을 보인다. 천부지하수 수질은 토지이용기간이 유사한 지역에서 토지이용에 따라 유의한 차이를 보인다. 주거지역은 농경지(2~5년 전까지 논으로 이용된 지역)에 비해 $\text{NO}_3\text{-N}$, 경도, 중발산류물의 농도가 유의하게 높고 중위수는 2.2~3.8배 크게 나타난다. 공업지역은 농경지에 비해 $\text{NO}_3\text{-N}$, KMnO_4 , Cl 이온의 농도가 유의하게 높고 중위수는 5.5~18배 정도 크며, 주거지역에 비해 KMnO_4 의 농도가 유의하게 높고 중위수는 12배정도 크게 나타난다. 도시화가 빠르게 진행된 지역에서 천부지하수 수질의 공간분포는 토지이용과 함께 토지이용기간과 관계가 있으며, 이것은 손상된 하수관에서 지하수로 유입되는 오염물질 농도와 하수관의 누수율 차이에 기인한 것으로 판단된다.

핵심용어 : 지하수 수질, 도시내부의 토지이용, 토지이용 변화과정, 토지이용기간

1. 서론

우리나라 도시지역 지하수는 주택, 공장, 세차장 등에서 배출된 생활하수 및 공장폐수로 오염되어 질산성질소, 경도, 총용존고형물, 대장균군 등이 먹는물기준을 초과하는 비율이 높게 나타나고 있다(한국자원연구소, 1995; 농어촌진흥공사, 1996; 농어촌진흥공사, 1997a). 도시지역은 주택, 공장 등이 일정 지역에 밀집 분포하여 주거지역과 공업지역을 형성하므로, 도시내부의 토지이용 분포는 오염물질 종류가 비교적 유사한 점오염원들의 분포를 반영하게 되어 토지이용에 따른 지하수 수질 차이가 발생하게 된다. 따라서 토지이용과 지하수 수질과의 관계에 대한 분석은 도시지역 지하수의 수질분포특성을 파악하고 지하수오염지역을 구획하는데 필요한 기초 정보를 제공하게 된다. 현재까지 서울특별시, 부천시 지역에서 지하수 관리계획 수립을 위한 기초조사가 실시되어 지하수 수질과 잠재오염원 조사결과로 지하수 수질오염분포도를 작성하고(농어촌진흥공사, 1996; 농어촌진흥공사, 1997a) 이를 도시내부의 지하수 수질 분포상태를 분석하고 수질오염방지 및 관리대책수립을 위한 기초자료로 이용하고 있는데 토지이용과 지하수 수질과의 관계에 대한 연구는 수질오염분포도 작성 및 수질오염방지대책 수립을 위해 중요하다고 할 수 있다.

우리나라는 1970년대 후반부터 도시가 급속하게 성장하여 도시내부의 토지이용이 빠르게 변화하였기 때문에 지하수 수질과 토지이용과의 관계에 대한 연구는 도시내부의 토지이용변화과정을 고려하여야 한다. 지하수 오염물질은 저장탱크, 폐수처리시설, 하수관 등에서 누

출되어 지하수로 유입되는 시간이 비교적 길기 때문에 지하수 수질은 수질조사 당시의 토지이용보다는 그 이전의 토지이용상태를 반영할 수도 있다. 따라서 도시화가 빠르게 진행된 지역에서는 수질조사 당시의 토지이용과 함께 토지이용 변화과정을 고려하여 지하수질과 토지이용과의 관계를 연구하는 것이 필요하다.

현재까지 토지이용과 지하수 수질과의 관계에 대한 국내 연구는 농촌지역의 농업형태가 지하수질에 미치는 영향에 대한 연구(최중대 등, 1995; 정영상 등, 1997), 농업지역과 공업지역의 수질을 비교한 연구(안홍일과 전효택, 1998; 양운진, 1998)가 있지만, 도시내부의 토지이용과 수질과의 관계를 통계적으로 비교·검증한 연구가 적으며, 토지이용 변화과정을 함께 고려한 분석이 드문 실정이다. 외국의 연구는 산림, 농경지와 도시의 주거, 상업, 공업지역의 수질을 비교하여 인간활동이 지하수 수질에 미친 영향을 분석한 연구(Cain 등 1989; Gray, 1994; Yang, 1999), 도시발달에 따른 지하수 수질 변화에 대한 연구(Appleyard, 1995; Barber 등 1996) 등이 있으며, 미국의 경우 미국지질학회의 National Water Quality Assessment 프로그램에서 도시 천부지하수 수질에 영향을 주는 요인규명을 위한 Urban Land use Study가 진행되고 있다(Squillace 등, 1997; Nolan 등, 2000)

본 연구는 도시화가 빠르게 진행된 지역의 수질조사 당시의 토지이용을 토지이용 변화과정에 의해 세부적으로 재분류하여 토지가 이용된 기간에 따른 지하수 수질 차이 여부를 분석하고, 토지이용간의 지하수 수질특성을 비교하여 도시화가 급속히 진행된 지역에서 토지이

용과 지하수 수질과의 관계를 규명하고자 하였다.

2. 자료 및 연구방법

2.1 지하수 개관

연구지역은 경기도 부천시 일부 지역으로 동쪽과 남쪽은 구릉이 위치하며 중앙은 평탄지이다(그림 1). 구릉에는 흑운모호상편마암, 우백질 편마암, 흑운모화강암이 주로 분포하고 국지적으로 석회암, 산성암맥 등이 협재하며, 평탄지에는 충적층이 분포하고 있다. 부천시 지하수관리계획 기본조사 보고서(농어촌진흥공사, 1997a)로부터 부천시의 지하수 및 잠재오염원 현황을 요약하

면 다음과 같다. 미국 농부성 토양보전국의 강우 유출모형인 SCS모형으로 토지이용과 정밀토양도자료를 이용하여 10년 동안의 강우의 침투율을 산정하였다. 강우의 침투율은 년강수량의 18%로 대부분이 지하수로 함양된다고 가정할 경우 이 지역의 지하수함양량은 년평균 강수량 1,205mm의 18%인 220mm로 추정된다. 총적층이 분포하는 평탄지에서 지표로부터 암반까지의 깊이는 10~50m로 구릉에서 멀어질수록 깊이가 증가하는 경향을 보인다. 암반대수층의 투수계수는 $1.63 \times 10^{-5} \sim 7.39 \times 10^{-4}$ cm/sec이며, 지하수는 동쪽과 남쪽의 구릉으로부터 서쪽 또는 북서방향으로 흐르고 있다(그림 1). 지하수 개발이용시점은 1996년 3월말 현재 2,165개소이며

표 1. 토지이용 변화과정으로 세부 분류한 토지이용

토지이용	토지이용 세부 분류(부호)	토지이용 변화과정					
		'76년	'81년	'85년	'91년	'94년	'96년
농경지	'92~'94년에 개발된 주거지역(RE94)	RI	RI	RI	RI	RE	RE
주거지역	'76년 이전부터 주거지인 지역(RE76)	RE	RE	RE	RE	RE	RE
	'82~'85년에 개발된 주거지역(RE85)	RI	RI	RE	RE	RE	RE
공업지역	'81년 이전에 개발된 공업지역(IN81)	RI	IN	IN	IN	IN	IN
	'82~'85년에 개발된 공업지역(IN85)	RI	RI	IN	IN	IN	IN

* RE : 주거지역 IN : 공업지역 RI : 농경지

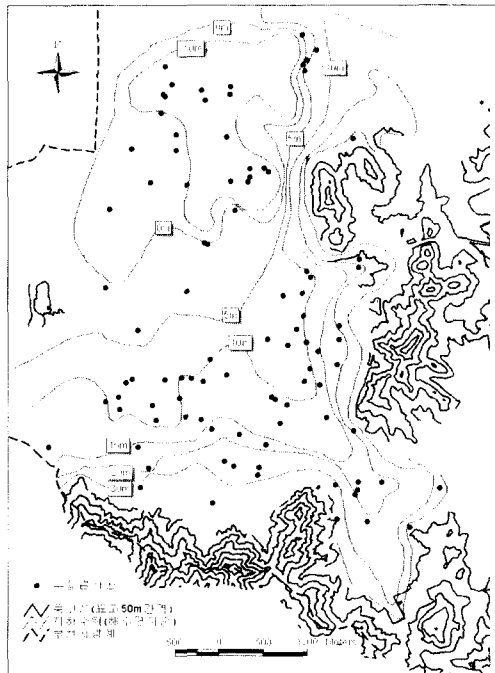


그림 1. 지하수위와 수질검사공분포
(지하수위는 농어촌진흥공사(1997a)의 자료)

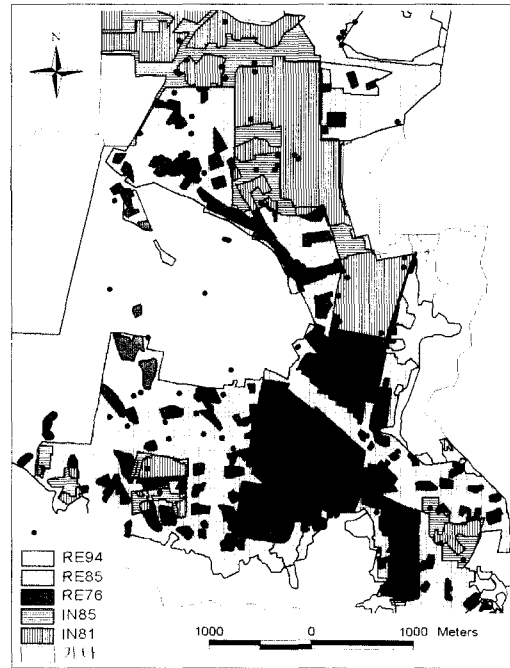


그림 2. 연구지역의 토지이용분류와 수질검사공

년간 13,932천톤의 지하수를 이용하고 있다. 1996년 당시 잠재점오염원은 폐수를 배출하는 제조업체가 315개소, 세탁소가 225개소, 세차장이 60개소 분포하였다.

2.2 토지이용분류 및 수질 자료

본 연구에서는 1996년 수질조사 당시의 토지이용을 1976~1996년까지 토지이용 변화과정에 의해 세부 분류하고 토지이용간의 수질차이를 비모수통계기법으로 비교 검정하였다. 토지이용은 1996년에 현지조사한 지형도(축척 1:5,000)로 주거지역, 공업지역, 농경지, 산림으로 분류하고, 주거지역과 공업지역은 1976년~1994년에 현지조사한 지형도(축척 1:25,000)를 이용하여 세부적으로 재분류하였다(표 1, 그림 2). 축척 1:25,000 지형도는 주거지역과 공업지역을 구분하기 어렵기 때문에 주거지역과 공업지역을 포함한 시가지와 농경지로 분류한 후 시가지는 1996년 현재 토지이용을 적용하여 주거지역과 공업지역으로 분류하였다. 주거지역은 1976년 이전부터 주거지로 이용된 지역(RE76), 1982년~1985년에 농경지가 주거지로 개발된 지역(RE85), 1992년~1994년에 농경지가 주거지로 개발된 지역(RE94)으로 분류되었다. 2~4년 전까지 농경지로 이용된 RE94지역은 수질조사 당시에 농경지의 지하수 수질상태를 유지한다고 보고 토지이용을 농경지로 분류하였다. 공업지역은 1981년 이전부터 공업지역으로 이용된 지역(IN81), 1982년~1985년에 농경지가 공업지역으로 개발된 지역(IN85)으로 분류되었다.

지하수 수질자료는 부천시 지하수관리계획 기본조사 보고서 관련자료집(농어촌진흥공사, 1997b)에 수록된 용도별(먹는물, 생활용수, 공업용수 등) 수질검사자료를 이용하였다. 수질자료는 1996년 9월~10월에 수중모터펌프를 가동하여 토출구에서 시료를 채취, 분석한 자료이다. 연구지역에서 질산성질소(NO_3^- -N), 염소이온(Cl^-), 황산이온(SO_4^{2-}), 과망간산칼륨소비량(이하 KMnO_4), 경도, 아연이온(Zn), 중발잔류물 등 7개 성분을 제외한 다른 분석항목은 검출율이 1%이하로 작기 때문에 토지이용간의 수질특성분석에는 7개 성분의 자료를 이용하였다.

2.3 통계분석방법

세부 분류한 토지이용간의 지하수 수질차이 여부에 대한 검정에는 미국 북동부 Connecticut주의 지하수 수질에 토지이용이 미친 영향을 조사한 Grey(1994)의 연구에서 이용한 비모수통계기법을 사용하였다. 모수방

법(parametric methods)은 모집단의 분포가 정확히 알려질 때에만 사용할 수 있는 반면에 비모수적 방법은 아주 작은 양의 자료에 대해서도 검정을 실시할 수 있고(이준형, 1998), 모집단의 분포유형에 관계없이 적용할 수 있는(이희연, 1989) 장점이 있다. 수질변수는 각 성분의 농도를 혼합순위(combined rank)로 치환한 후 모수적 절차에 따라 일원분류의 분산분석을 통한 F-근사검정을 실시하였다. 검정한 귀무가설은 토지이용 사이에 수질변수의 평균순위는 통계적으로 유의한 차이가 없다는 것이며 이에 대한 대립가설은 적어도 한 토지이용의 평균순위는 다른 토지이용보다 높다는 것이다. F-근사검정은 SAS프로그램의 Proc RANK와 Proc GLM을 이용하였으며(이재창과 송일송, 1990) 검정결과 유의수준 0.05에서 유의한 결과가 나타나면 Scheffe의 다중비교방법을 이용하여 어떤 토지이용에서 유의한 차이가 발생하는가를 분석하였다. 또한 토지이용별로 성분간 Spearman상관관계를 분석하여 토지이용에 따른 성분간의 상관관계 차이를 분석하였다.

수질검사공 심도가 10m~110m로 차이가 심하므로 수질검사공은 관정심도로 2개 그룹으로 분류하여 분석하였다. 이 지역의 지질주상도 자료에 의하면 암반까지의 깊이(충격층과 풍화대를 합한 두께)는 10m~50m이다(농어촌진흥공사, 1996b). 수질검사공은 이 지역 최대 암반심도인 50m를 기준으로 심도 10m~50m인 관정, 심도 50.01m~110m인 관정으로 분류하고, 상대적으로 관정심도가 얇은 전자를 천부지하수관정, 상대적으로 심도가 깊은 후자는 심부지하수관정으로 명명하였다. 세부 분류한 토지이용간의 수질검사공 심도차이 여부를 검정하기 위해 심도자료를 순위변환하여 F-근사검정을 실시하였다.

3. 결과 및 검토

3.1 통계분석결과

토지이용간의 수질검사공 심도에 대한 F-근사검정 결과 유의확률(p-value)은 천부지하수가 0.263, 심부지하수가 0.755로 수질검사공 심도는 세부 분류한 토지이용간에 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다. 따라서 토지이용간의 수질차이는 수질검사공 심도와 관계가 없는 것으로 판단된다. 토지이용간의 수질차이 여부에 대한 F-근사검정 결과 천부지하수는 7개 성분중 NO_3^- -N, Cl^- , SO_4^{2-} , KMnO_4 , 경도, 중발잔류물 등 6개 성분의 p-value가

표 2. 세부 분류한 토지이용간 수질차이에 대한 F-근사검정 결과(p-value)

심도분류	NO ₃ -N	Cl	SO ₄ ²⁻	KMnO ₄	Zn	경도	중발산류물
천부지하수(10~50m)	0.007	0.015	0.010	0.000	0.202	0.000	0.000
심부지하수(50.01~110m)	0.244	0.095	0.000	0.003	0.536	0.218	0.294

표 3. 천부지하수(심도 10~50M)의 토지이용별 수질변수의 기술통계와 그룹분류

(단위: mg/l)

토지이용	세부분류	항 목	NO ₃ -N	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	KMnO ₄ ¹	경도	Zn	중발산류물
농경지	RE94	자료갯수	7	7	7	7	7	7	7
		중위수	1.30	10.0	0.0	0.60	74	0.047	109.0
		사분위간범위	0.90	10.0	9.00	0.3	114	0.166	102.0
		그룹	A	A	A	AB	A	A	A
주거지역	RE85	자료갯수	13	13	13	13	13	13	13
		중위수	1.40	21.0	6.0	0.3	109.0	0.150	166.0
		사분위간범위	8.00	39.0	8.0	0.3	101.0	0.361	179.0
		그룹	AB	AB	AB	A	A	A	A
	RE76	자료갯수	16	16	12	16	12	12	12
		중위수	4.90	56.0	14.0	0.90	165.0	0.160	284.5
		사분위간범위	12.08	57.7	58.5	3.17	44.0	0.115	65.7
		그룹	B	AB	B	B	A	B	B
공업지역	IN81	자료갯수	7	7	-	7	-	-	-
		중위수	7.20	65.0	-	10.9	-	-	-
		사분위간범위	10.70	44.0	-	4.68	-	-	-
		그룹	B	B	-	C	-	-	-

* 그룹분류는 Scheffe의 다중비교 결과로 같은 문자가 포함되면 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의한 차이가 없음.

표 4. 심부지하수(심도 50.1~110M)의 토지이용별 수질변수의 기술통계와 그룹분류

(단위: mg/l)

토지이용	세부분류	항 목	NO ₃ -N	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	KMnO ₄	경도	Zn	중발산류물
농경지	RE94	자료갯수	8	8	8	8	8	8	8
		중위수	2.15	42.5	18.5	0.30	114.0	0.165	193.5
		사분위간범위	2.57	31.2	17.7	0.52	85.5	0.542	171.2
		그룹	A	A	AB	A	A	A	A
주거지역	RE85	자료갯수	19	19	15	19	15	19	15
		중위수	5.20	40.0	9.0	0.90	170.0	0.121	285.0
		사분위간범위	7.70	47.0	10.0	1.30	119.0	0.219	229.0
		그룹	A	A	A	AB	A	A	A
	RE76	자료갯수	20	20	10	20	10	10	10
		중위수	2.80	74.5	55.0	2.90	179.0	0.173	303.5
		사분위간범위	8.07	35.2	17.2	4.90	81.7	0.098	162.2
		그룹	A	A	B	B	A	A	A
공업지역	IN85	자료갯수	13	13	11	13	11	11	11
		중위수	5.00	71.0	15.70	1.60	178.0	0.141	297.0
		사분위간범위	10.70	27.5	13.0	1.45	121.0	0.429	203.0
		그룹	A	A	AB	AB	A	A	A
	IN81	자료갯수	14	14	6	14	6	6	6
		중위수	3.40	51.5	28.7	4.90	141.0	0.060	212.5
		사분위간범위	5.65	90.0	183.2	5.87	126.7	0.208	220.7
		그룹	A	A	B	B	A	A	A

* 그룹분류는 Scheffe의 다중비교 결과로 같은 문자가 포함되면 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의한 차이가 없음.

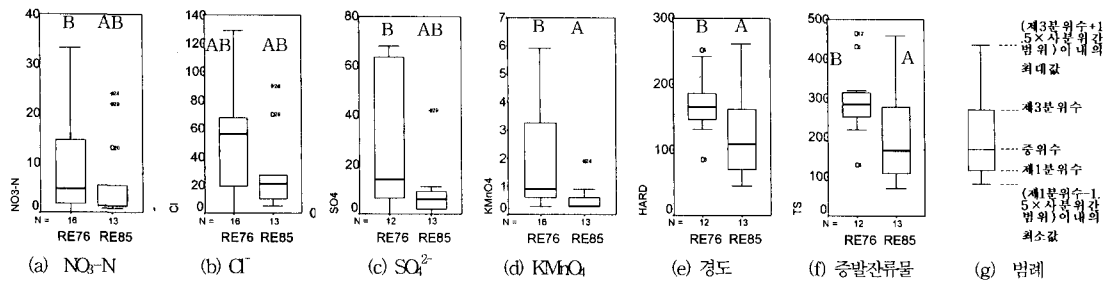


그림 3. 20년이상 이용된 주거지역(RE76)과 10년 정도 이용된 주거지역(RE85)의 천부지하수 수질 비교

0.05 미만으로(표 2) 이들 성분의 평균순위는 세부분류한 토지이용간에 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의한 차이를 보이고 있다. 심부지하수는 SO₄²⁻, KMnO₄ 등 2개 성분의 p-value가 0.05미만으로 평균순위가 토지이용간에 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의한 차이를 보인다. Scheffe의 다중비교 결과에 의한 그룹분류, 토지이용별 중위수, 사분위간범위는 표 3과 4와 같다.

3.2 토지가 이용된 기간과 지하수 수질

수질조사 당시 동일한 토지이용에서 토지이용기간에 따른 지하수 수질차이 여부를 검토하기 위해 20년 이상 이용된 주거지역(RE76)과 10년 정도 이용된 주거지역(RE85)의 천부지하수 수질을 비교하였다. 두 지역의 수질은 7개 성분중 3개 성분의 농도가 통계적으로 유의한 차이가 발생하며, 오래된 주거지역(RE76)의 수질이 최근 개발된 주거지역(RE85)보다 오염이 심한 것으로 나타난다(표 3). 오래된 주거지역의 KMnO₄, 경도, 중발산류물 등의 평균순위는 최근 개발된 지역보다 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의하게 큰 것으로 나타난다. KMnO₄의 중위수는 RE76지역이 0.9mg/l로 RE85지역(0.3mg/l)보다 3배 크며, 경도는 RE76지역이 165 mg/l로 RE85지역(109mg/l) 보다 1.5배 크게 나타난다(그림 3(d)와 3(e)). 오래된 주거지역의 NO₃-N, Cl⁻, SO₄²⁻의 사분위수(중위수, 제1분위수, 제3분위수)도 모두 RE85지역보다 크게 나타나므로 이 성분들의 농도는 통계적인 차이는 없지만 오래된 주거지역에서 높은 경향을 보인다(그림 3(a)~3(c)). 이와 유사한 경향은 외국 도시의 연구결과에서 보고된 바 있는데(Appleyard, 1995; Barber 등, 1996) 이 도시에서 NO₃-N의 농도

가 오래된 주거지역일수록 증가하는 경향을 보이고 있다. 지하수 오염이 심한 RE76지역의 NO₃-N, Cl⁻, SO₄²⁻, KMnO₄의 농도는 오염이 심하지 않은 RE85지역보다 변화 범위(range)가 크고 0에 가까운 수질검사가 많이 나타나므로(그림 3(a)~3(d)) 지하수오염이 심한 주거지역에서 지하수 수질의 공간적 변이가 더 큰 것으로 나타난다.

오염원과 오염물질 종류가 비교적 유사한 거주지역 내에서 오래된 주거지역이 생활하수의 주요 오염물질인 유기물질(KMnO₄)에 의해 심하게 오염된 것은 이 지역에서 생활하수가 지하수로 유입된 기간이 더 길고, 하수관거 노후화로 인한 파손율이 심한 관계로 생활하수 누수율이 크기 때문으로 판단되며, 자세한 원인 분석을 위해서는 하수관거의 설치년도, 누수율과 지하수 수질자료의 비교분석이 필요하다.

이 성분 중에 SO₄²⁻, Cl⁻, 경도는 생활하수의 지하수 유입과 함께 대수층 내의 광물용해로 지하수중의 농도가 증가될 수 있는 성분이다. 자연상태에서 지하수중의 SO₄²⁻ 이온은 황화광물, Cl⁻ 이온은 규산염광물에서 유래한다. 또한 가정에서 용수사용으로 SO₄²⁻ 이온은 15~30mg/l, Cl⁻ 이온은 20~50mg/l 증가한다(Metcalf와 Eddy, 1991). 주거지역 RE76의 수질자료로 분석항목간의 Spearman 상관계수를 구한 결과를 보면 NO₃-N, KMnO₄ 등과 같은 인위적 오염과 관련된 항목은 Cl⁻, 경도, 중발산류물 등과 상관계수가 0.6이상이며 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의하여 상관관계가 높은 것으로 나타나지만(표 5와 그림 6) 인위적 오염물질과 SO₄²⁻ 이온은 상관계수가 0.14미만으로 상관관계가 없는 것으로 나타난다(표 5와 그림 4). 따라서 RE76지역의 경

도, 증발잔류물의 농도가 RE85지역보다 높은 것은 주로 생활하수에 의한 오염에 의한 것으로 판단된다. 그러나 SO_4^{2-} 이온은 Cl⁻, 경도와 달리 인위적인 오염물질과 상관관계가 없고, 오염이 심하지 않은 수질검사공($NO_3-N < 5mg/l$, $KMnO_4 < 0.6mg/l$)에서 SO_4^{2-} 이온은 5~62mg/l로 변이가 큰 것을 보면(그림 4(c)) RE76지역에서 SO_4^{2-} 농도는 생활하수에 의한 오염과 함께 광물 용해와 같은 지화화학적 요인의 영향을 크게 받는 것으로 판단된다.

심부지하수의 경우 오래된 주거지역의 SO_4^{2-} 이온의 평균농위가 최근에 개발된 주거지역보다 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의하게 높지만 다른 6개 성분은 차이가 없는 것으로 나타난다(표 4). 오래된 주거지역의

SO_4^{2-} 이온과 NO_3-N , $KMnO_4$ 사이에 상관관계가 없는 것을 볼 때(표 5) SO_4^{2-} 농도가 두 지역 사이에 유의한 차이를 보이는 것은 두 지역의 생활하수에 의한 지하수오염보다는 지하지질 차이에 기인한 것으로 판단된다.

3.3 토지이용과 성분별 농도분포

수질조사 당시 토지이용이 동일한 지역에서 지하수 수질은 토지이용기간에 따라 통계적으로 유의한 차이를 보이므로 토지이용과 지하수 수질과의 관계 분석을 위해 토지이용기간이 15년 이상인 RE94, RE76, IN81 지역의 천부지하수 수질을 비교하였다.

농경지의 천부지하수는 7개 성분의 농도가 3개 토지

표 5. 주거지역(RE76) 지하수성분의 Spearman상관계수

(신명조채: 천부지하수, 고미채: 심부지하수)

성분	$KMnO_4$	NO_3-N	Cl	SO_4^{2-}	경도	증발잔류물
$KMnO_4$		0.773*	0.468	0.036	0.651*	0.658*
NO_3-N	0.131		0.628*	0.137	0.291	0.3
Cl	0.676*	0.021		0.162	0.254	0.317
SO_4^{2-}	0.033	0.089	0.113		-0.039	0.046
경도	0.272	0.110	0.728*	0.176		0.979*
증발잔류물	0.293	0.089	0.722*	0.192	0.997*	

1) * 는 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의한 상관계수(양측검정)

2) 자료수 : 천부지하수: 12개, 심부지하수: 10개

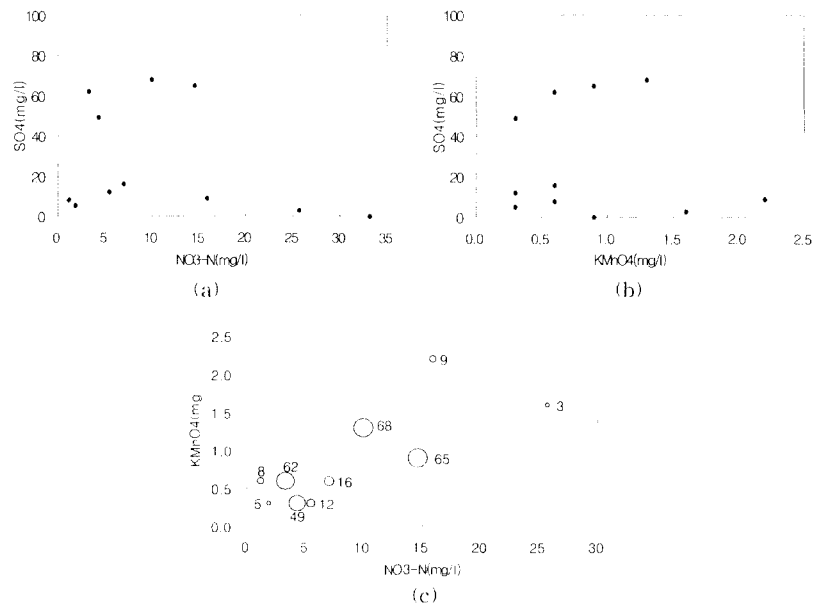


그림 4. 주거지역(RE76) 지하수의 SO_4^{2-} , NO_3-N , $KMnO_4$ 관계
(그림 (c)의 원에 첨부된 숫자는 SO_4^{2-} 이온 농도)

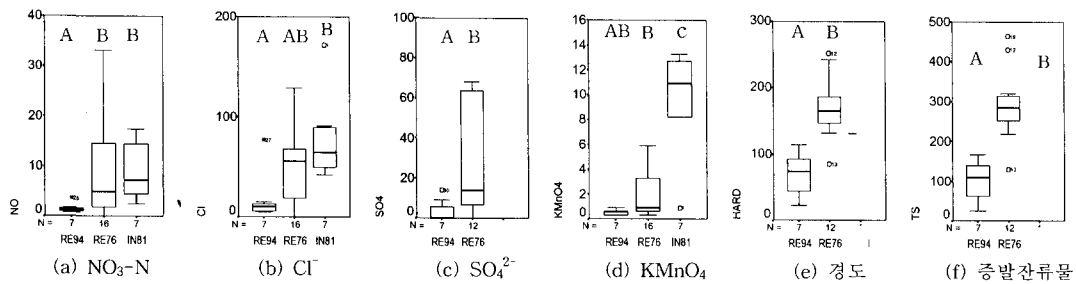


그림 5. 토지이용기간이 유사한 지역의 토지이용별 천부지하수의 수질비교(별레는 그림 3과 동일)

이용 중에서 가장 낮은 경향을 보인다(그림 5). $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 중위수가 1.30mg/l이며 0.8~3.6mg/l의 범위에 있고, KMnO_4 는 중위수가 0.6mg/l이며 0.3~0.9mg/l의 범위에 있어 두 성분의 농도는 먹는물 기준 10mg/l을 초과하지 않고 있다. 또한 다른 5개 성분도 모두 먹는물 기준을 초과하지 않아 농경지의 지하수는 3개 토지이용 중에서 가장 오염되지 않은 지하수로 나타난다.

주거지역과 농경지의 수질을 비교하면 두 지역의 수질은 뚜렷한 차이가 발생하고 있다. 주거지역은 $\text{NO}_3\text{-N}$, SO_4^{2-} , 경도, 증발잔류물 등 4개 항목의 평균순위가 농경지보다 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의하게 큰 것으로 나타난다(표 3, 그림 5). 주거지역(RE76)에서 SO_4^{2-} 이온의 농도는 인위적인 오염과 함께 광물용해와 같은 영향을 받으므로 $\text{NO}_3\text{-N}$, 경도, 증발잔류물 등 3개 성분이 생활하수에 의한 지하수오염으로 농경지에 비해 농도가 증가한 성분이다. 주거지역의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 중위수는 농경지보다 3.8배정도 크고, 경도와 증발잔류물은 약 2.2~2.6배정도 크게 나타나므로(표 3) 주거지역의 대표적인 지하수오염물질은 $\text{NO}_3\text{-N}$ 이라고 할 수 있다. 주거지역에서 Cl^- , KMnO_4 의 사분위수가 농경지보다 크므로 주거지역에서 Cl^- , KMnO_4 농도는 통계적으로 유의하지 않지만 농경지보다 높은 것으로 나타난다(그림 5).

공업지역은 농경지와 주거지역에 비해 수질 오염이 심한 것으로 나타난다. 공업지역은 수질비교에 이용한 3개 성분($\text{NO}_3\text{-N}$, Cl^- , KMnO_4)의 평균순위가 농경지보다 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의한 정도로 크게 나타난다(표 3, 그림 5). Cl^- , KMnO_4 의 평균순위는 주거지역과 농경지 사이에 유의한 차이가 없지만 공업지역과 농경지는 유의한 차이를 보이고 있다. 공업지역의 KMnO_4 의 중위수는 농경지의 18배정도, 주거지역의 12

배정도 크게 나타나고 있어 공업지역의 대표적인 오염물질은 유기물질이라고 할 수 있다(그림 5). $\text{NO}_3\text{-N}$, Cl^- 의 중위수는 농경지에 비해 각각 5.5배, 6.5배정도 크게 나타난다. SO_4^{2-} , 경도, 증발잔류물 등은 비교에 이용할 자료가 없지만, 심부지하수에서 공업지역의 중위수가 농경지보다 큰 것으로 볼 때(표 4) 천부지하수에서도 이 성분의 농도가 농경지보다 클 것으로 추정된다.

공업지역은 KMnO_4 의 평균순위가 주거지역에 비해 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의할 정도로 크며, 중위수는 12배정도 크게 나타난다(그림 5). 공업지역의 $\text{NO}_3\text{-N}$, Cl^- 의 평균순위는 주거지역과 통계적으로 유의한 차이가 없으며, 중위수도 주거지역의 1.1~1.5배 정도로 큰 차이가 없다. 이와 같이 두 지역 사이에 KMnO_4 가 큰 차이를 보이는 것은 지하수로 유입된 생활하수와 공장폐수의 유기물질 농도 차이와 관계된 것으로 보인다. 인천보건연구소가 연구지역의 주거지역에 위치한 심곡천 도시관류의 수질을 측정된 결과에 의하면 1992년부터 1995년까지 4년 동안의 평균 COD는 41.1mg/l이므로 지하수로 유입되는 생활하수중의 COD도 이와 같을 것으로 보인다. 천부지하수 수질검사공이 위치한 공업지역(IN81)에는 9개 업종 31개소 폐수배출업소가 위치하며 대부분의 폐수는 조립금속, 섬유제품, 도금업, 화학제품 4개 업종에서 배출되고 있다(농어촌진흥공사, 1997b). 4개 업종의 원폐수의 COD는 393~1,489mg/l(국립환경연구원, 1997; 국립환경연구원, 1998)로 공업지역(IN81)에서 유기물질 농도가 높은 원폐수가 발생된다. 또한 이 지역은 수질환경기준법에 의한 배출허용기준지역이 '나' 지역으로 1996년 이전 COD의 배출허용기준은 150mg/l이므로 산업체의 수질오염방지시설에서 처리된 후 하수관으로 방류되는 폐수의 COD도 주거지역보다 높을 것으로 보인다. 공업지역

표 6. 농경지(RE94) 천부지하수와 공업지역(IN81) 심부지하수의 성분간 Spearman 상관계수

(신명조채: 농경지 천부 지하수, 고덕채: 공업지역 심부지하수)

성분	KMnO ₄	NO ₃ -N	Cl	SO ₄ ²⁻	경도	증발잔류물
KMnO ₄		-0.020	0.589	0.000	0.116	-0.077
NO ₃ -N	0.377		0.130	0.732	0.509	0.509
Cl	0.696	0.829*		0.361	0.491	0.346
SO ₄ ²⁻	0.696	0.829*	1.000*		-0.020	-0.020
경도	0.232	0.086	0.257	-0.257		0.964*
증발잔류물	0.696	0.029	-0.371	-0.371	0.771	

- 1) * 는 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의한 상관관계(양수검정)
 2) 자료수 : 농경지 천부지하수는 7개, 공업지역 심부지하수는 6개

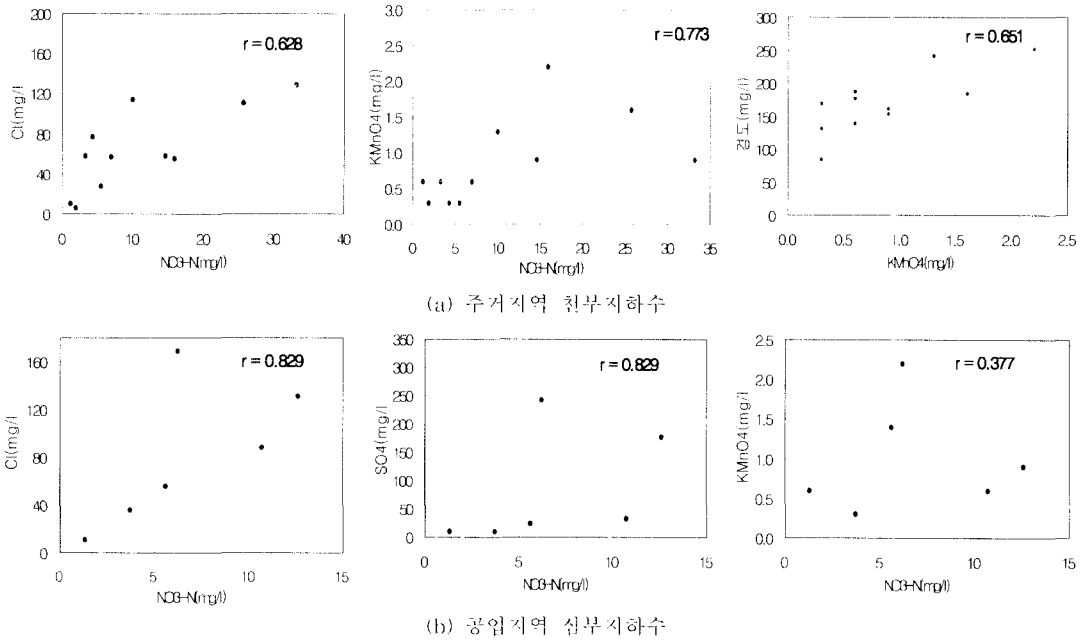


그림 6. 주거지역(RE76) 및 공업지역(IN81) 지하수의 성분간 상관관계

에서 유기물질 농도가 높은 원폐수나 방류수가 지하로 침투되어 지하수를 오염시키기 때문에 공업지역의 KMnO₄의 중위수가 주거지역에 비해 12배 이상 큰 것으로 판단된다.

심부지하수는 KMnO₄가 토지이용간에 유의수준 0.05에서 통계적인 차이를 보이지만 다른 6개 성분은 이런 차이가 없어 토지이용에 따른 수질차이가 천부지하수보다 뚜렷하지 않은 특징을 보인다(표 4). 주거지역과 공업지역의 KMnO₄의 평균순위가 농경지보다 높고 중위수는 각각 9.7배, 16.3배정도 크지만 주거지역과 공업지역 사이에는 서로 유의한 차이가 나타나지 않는다.

3.4 토지이용과 성분간 상관관계

토지이용에 따른 성분간 상관관계의 차이를 검토하기 위하여 농경지, 주거지역의 천부지하수 및 공업지역 심부지하수 자료로 6개 성분의 상관관계를 분석하였다(표 5와 표 6). 지하수 오염이 심하지 않은 농경지는 경도와 증발잔류물이 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의하고 상관계수는 0.9이상으로 상관관계가 높지만 다른 성분은 상관관계가 없는 것으로 나타난다(표 6).

주거지역의 천부지하수 경우 NO₃-N, Cl, KMnO₄, 경도, 증발잔류물은 다른 성분과 상관계수가 0.6이상이

며 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의하여 상관관계가 높은 것으로 나타난다(표 5). NO_3^- -N의 농도가 증가하면 Cl^- , KMnO_4 농도가 증가하며, KMnO_4 가 증가할수록 경도, 증발잔류물 농도가 증가하는 경향을 보인다(그림 6(a)). 주거지역에서 이 성분들 사이에 상관관계가 높은 것은 지하수가 이 성분들이 함유된 생활하수에 의해 주로 영향을 받고, 다른 종류의 오염원에서 배출된 오염물질에 의한 영향은 적게 받았기 때문으로 판단된다. NO_3^- -N은 KMnO_4 과 상관관계가 높지만, KMnO_4 와 상관관계가 높은 경도와는 유의한 상관관계가 나타나지 않고, NO_3^- -N과 상관관계가 높은 Cl^- 은 KMnO_4 , 경도와 유의한 상관관계가 나타나지 않고 있는데 이것은 생활하수에 이런 성분이 모두 함유되었지만 불포화대 및 포화대에서 이동종의 흡착, 생분해, 산화환원작용 등과 같은 지하학적 영향을 받는 정도가 성분에 따라 다른 데 기인한 것으로 보인다.

공업지역의 수질성분간 상관관계를 모든 성분의 자료가 있는 심부지하수자료로 분석하면 NO_3^- -N, Cl^- , SO_4^{2-} 등 3개 성분은 다른 성분과 상관계수가 0.8 이상이며 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의하여 상관관계가 높은 것으로 나타난다(표 6). NO_3^- -N이 증가할수록 Cl^- , SO_4^{2-} 이온이 증가하는 경향이 나타난다(그림 6(b)). 공업지역의 지하수는 주거지역과 달리 NO_3^- -N과 SO_4^{2-} 의 상관관계가 높게 나타나는데 국립환경연구원의 '98~'99년 국내화학물질유동량 통계결과에 의하면 황산이 산업체에서 사용량이 많은 물질이므로 연구지역에서도 황산이 폐수중에 질소류와 함께 포함되어 두 성분간에 상관관계가 높은 것으로 추정된다. 공업지역(IN81)에서 4개 업종의 원 폐수의 유기물질 농도가 393~1,489mg/l로 변이가 큰 점을 볼 때 지하수로 유입된 폐수의 유기물질 농도가 큰 차이를 보여 KMnO_4 가 주거지역과 달리 다른 성분과 상관관계가 없는 것으로 추정된다.

이와 같이 토지이용에 따라 성분간의 상관관계가 다른 특성을 보이고 있다. 지하수오염이 심하지 않은 농경지는 경도와 증발잔류물 외에 성분간의 상관관계가 나타나지 않는 반면 주거지역 지하수는 성분간의 상관관계가 가장 많이 나타나는데 이것은 이들 성분이 모두 함유된 생활하수에 의해 주로 오염되었기 때문으로 보인다. 공업지역은 NO_3^- -N과 Cl^- , SO_4^{2-} 이온의 상관관계가 높지만 업종에 따라 생산과정중 발생하는 원폐수의 유기물질 농도가 큰 차이를 보이는 KMnO_4 는 다른 성분간에 상관관계가 없는 특성을 보인다.

3.5 검토

도시화가 빠르게 진행된 부천시의 토지이용과 지하수 수질과의 관계를 이해하기 위해 수질조사 당시의 토지이용을 변화과정으로 세부 분류하고 토지이용간의 수질을 비교하는 방법을 이용하였다. 이런 접근 방법을 이용한 결과 연구지역의 천부지하수에서 두 가지 사실을 발견할 수 있었다. 첫째 수질조사 당시 동일한 토지이용에서도 토지이용기간에 따라 통계적으로 유의한 수질 차이가 발생한다. 둘째 토지이용간의 수질을 토지이용기간이 15~20년 이상으로 비교적 유사한 지역의 자료로 비교한 결과 농경지, 주거지역, 공업지역 사이에 수질차이가 뚜렷하게 나타나고 있다. 따라서 토지이용이 급속히 변화한 도시지역에서 지하수 수질은 토지이용과 함께 토지이용기간과 관계가 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 토지이용기간을 고려하지 않고 10년 정도 이용된 주거지역(RE81)과 농경지의 천부지하수를 비교하면 7개 성분 중에서 어떤 성분도 2개 토지이용 사이에 통계적으로 유의한 차이가 없으므로(표 3), 토지이용기간을 고려한 비교가 도시지역 수질특성을 연구할 때 중요하다고 할 수 있다.

본 연구에 사용된 수질자료는 부천시의 지하수관리 계획 수립을 위한 조사에서 구축된 기존 수질검사자료 D/B를 이용한 관계로 천부지하수의 경우 IN85지역의 자료가 없고, IN81 지역은 분석항목이 적기 때문에 공업지역에서 토지이용기간에 따른 수질차이와 일부 성분의 수질 변화 정도를 분석하지 못하였다. 또한 배경수질 자료가 없는 관계로 농경지, 공업지역, 주거지역에서의 오염물질 유입에 의한 지하수 수질의 변화 정도를 정량적으로 분석하지 못하였다. 그러나 기존 조사에 구축된 용도별(먹는물, 생활용수, 공업용수 등) 수질검사자료 D/B를 이용하여 본 연구방법으로 분석할 경우 도시지역의 지하수 수질분포 특성을 이해할 수 있다는 것을 제시하였다.

도시지역의 토지이용과 지하수 수질과의 관계를 연구할 때 토지이용별로 특정성분의 농도가 높은 원인을 분석하기 위해서는 생활하수, 공업폐수등의 관련 성분의 농도를 분석한 자료와 도시지역 지하수 수질오염과 관계가 깊은 하수관거의 누수율, 수리지질학적 자료를 이용한 종합분석이 필요하다.

4. 결론

도시화가 빠르게 진행된 지역의 수질조사 당시 도시

이용을 변화과정에 의해 세부적으로 분류하고 지하수에서 검출빈도가 높은 7개 수질항목을 선정하여 토지이용과 수질과의 관계를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 수질조사 당시에 토지이용이 동일한 지역에서 천부지하수(심도 10~50m)의 수질은 토지이용기간에 따라 통계적으로 유의한 차이를 보이는데 이것은 하수관거의 하폐수 누수율 차이에 의한 것으로 판단된다. 20년 이상 이용된 주거지역의 KMnO_4 와 경도의 평균순위는 10년 정도 이용된 주거지역보다 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의하게 높고 중위수는 1.5~3배정도 큰 경향을 보인다.
2. 천부지하수 수질은 토지이용기간이 유사한 지역에서 토지이용에 따라 통계적으로 유의한 차이를 보이는 데 이것은 지하수로 유입되는 하폐수의 오염물질 농도 차이와 관계된 것으로 판단된다. 그러나 토지이용기간이 다른 지역에서 지하수 수질은 토지이용에 따른 통계적인 차이를 보이지 않고 있다. 15년 이상된 3개 토지이용의 수질을 비교 검토한 결과 주거지역의 지하수는 오염이 심하지 않은 농경지에 비해 $\text{NO}_3\text{-N}$, 경도, 중발산류물의 농도가 유의수준 0.05에서 유의하게 높으며, 이 성분중 $\text{NO}_3\text{-N}$ 에 의한 오염이 가장 심한 것으로 나타난다. 공업지역은 농경지에 비해 $\text{NO}_3\text{-N}$, KMnO_4 , Cl^- 이온의 농도가, 주거지역에 비해 KMnO_4 의 농도가 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의하게 높으며, 이들 토지이용에 비해 유기물질에 의한 오염이 가장 심한 것으로 나타난다.
3. 15년 이상된 3개 토지이용의 수질자료로 상관관계를 분석한 결과 수질성분간 상관관계는 토지이용에 따라 다르게 나타나고 있다. 이런 상관관계의 차이는 지하수로 유입되는 오염물질의 성분간 구성이 토지이용에 따라 다른 것과 관계가 있는 것으로 추정된다.
4. 도시화가 빠르게 진행된 지역에서 지하수 수질의 공간적 분포특성은 토지이용과 함께 토지이용기간과 관계가 있으며, 이것은 오염물질 유입농도와 하수관거의 하폐수 누수율 차이에 의한 것으로 판단된다. 이런 지역에서 토지이용변화과정을 고려한 토지이용의 세부분류가 지하수 수질의 공간적 특성을 연구할 때 유용한 접근이다.

5. 심부지하수는 주거지역과 공업지역의 KMnO_4 가 농경지에 비해 통계적으로 유의한 차이가 나지만 다른 성분은 유의한 차이가 없어 토지이용에 따른 수질차이는 천부지하수에 비해 적은 것으로 나타난다.

참 고 문 헌

- 국립환경연구원 (1997). **폐수배출시설 표준 원단위 조사연구(1)**, NIER NO. 97-08-499, pp. 118-123.
- 국립환경연구원 (1998). **폐수배출시설 표준 원단위 조사연구(2)**, NIER NO. 98-08-524, pp. 19-24, pp. 146-151.
- 농어촌진흥공사 (1996). **서울특별시 지하수관리계획 기본조사보고서**, 서울시, pp. 732-737.
- 농어촌진흥공사 (1997a). **지하수관리계획 기본조사 보고서 : 부천시 지하수 오염실태와 수맥조사**, 부천시.
- 농어촌진흥공사 (1997b). **지하수관리계획 기본조사 보고서 관련자료집 : 부천시 지하수 오염실태와 수맥조사자료집**, 부천시.
- 안홍일, 전효택 (1998). "아산지역 및 구로구지역 지하수의 수리지구화학적 특성 : 다변량 자료의 통계해석." **한국자원공학회지**, 한국자원공학회, 제35권, 제6호, pp. 554-567.
- 양운진 (1998). "울산지역의 지하수 수질에 관한 통계학적 연구." **한국환경과학회지**, 한국환경과학회, 제7권, 제4호, pp. 461-466.
- 이준형 (1998). **통계분석**. 대영문화사, p. 355.
- 이세창, 송일성 (1990). **SAS비모수통계분석**. 자유아카데미, pp. 27-33.
- 이희연 (1989). **지리통계학**. 범문사, p. 216.
- 정영상, 양재의, 주영규, 이주영, 박용성, 최문헌, 최승준 (1997). "농업형태가 다른 한강 상하류 소유역의 하천수 및 농업용 지하수 수질." **한국환경농학회지**, 한국환경농학회, 제16권, 제2호, pp. 199-205.
- 최중대, 최예환, 김기성 (1995). "방목지와 초지의 지표수 및 지하수 수질 특성." **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제28권, 제3호, pp. 175-186.
- 한국자원연구소 (1995). **지하수오염방지 및 응용화 기술연구**, 과학기술처, KR-96(S)-2, pp. 275-280.

- Appleyard, S.J. (1995). "The impact of urban development on recharge and groundwater quality in a coastal aquifer near Perth, Western Australia." *Hydrogeology Journal*, International Association of Hydrogeologists, Vol. 3, No. 2, pp. 65-75.
- Barber, C., Otto, C.J., Bates, L.E. and Taylor, K.J. (1996). "Evaluation between land-use changes and groundwater quality in a water supply catchment, using GIS technology : the Gwelup wellfield." *Hydrogeology Journal*, International Association of Hydrogeologists, Vol. 4, No.1, pp. 6-19.
- Cain, D., Dennis R.H. and Stephen, E.R. (1989). "Preliminary evaluations of regional groundwater quality in relation to land use." *Ground Water*, National Ground Water Association, Vol. 27, No. 2, pp. 230-244.
- Eckhardt, D.A.V. and Stackelberg, P.E (1995). "Relation of groundwater quality to land use on Long Island, New York." *Ground Water*, National Ground Water Association, Vol. 33, No. 6, pp. 1019-1033.
- Gray, S.J. (1994). *Effects of land use on quality of water in stratified-drift aquifers in Connecticut*. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2381-b, U.S. Department of the Interior, pp. 10-14.
- Metcalf and Eddy (1991). *Wastewater engineering : treatment, disposal and reuse*, McGraw-Hill, Inc.
- Nolan, B.T. and Stoner, J.D. (2000). "Nutrients in ground waters of the conterminous United States, 1992-1995." *Environmental Science and Technology*, Vol. 34, No. 7, pp. 1156-1165.
- Squillace, P.J., Zogorski, J.S. and Price, C.V. (1997). "Urban land-use study plan for the National Water Quality Assessment, US geological survey." *Ground water in the urban environment(1) : problem, processes and management*, Edited by Chilton, J., International Association of Hydrogeologists, Rotterdam, pp. 665-670.
- Yang, Y., Lerner, D.N., Copperthwaite, N.H. and Barret, M.H. (1999). "Assesing the impact of Nottingham on groundwater using GIS." *Groundwater in the urban environment : selected city profiles*, Edited by Chilton, J., International Association of Hydrogeologists, Rotterdam, pp. 281-288.
- (논문번호:01-079/접수:2001.12.3/심사완료:2002.2.7)