

논산지역 마을상수도 수질의 수리지화학 및 통계 분석

고경석^{1*} · 안주성¹ · 석희준¹ · 이진수¹ · 김형수²

¹한국지질자원연구원, ²한국수자원공사 수자원연구원

Hydrogeochemistry and Statistical Analysis of Water Quality for Small Potable Water Supply System in Nonsan Area

Kyung-Seok Ko^{1*} · Joosung Ahn¹ · Heejun Suk¹ · Jin Soo Lee¹ · Hyeong Soo Kim²

¹Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources (KIGAM)

²Korea Institute of Water and Environment, KOWACO

ABSTRACT

This study was carried out to provide proper management plans for small portable water supply system in the Nonsan area through water quality monitoring, hydrogeochemical investigation and multivariate statistical analyses. Nonsan area is a typical rural area heavily depending on small water supply system for portable usage. Geology of the area is composed of granite dominantly along with metasedimentary rocks, gneiss and volcanic rocks. The monitoring results of small portable water supply system showed that 13-21% of groundwaters have exceeded the groundwater standard for drinking water, which is 5 to 8 times higher than the results from the whole country survey (2.5% in average). The major components exceeding the standard limits are nitrate-nitrogen, turbidity, total coliform, bacteria, fluoride and arsenic. High nitrate contamination observed at southern and northern parts of the study area seems to be caused by cultivation practices such as greenhouses. Although Ca and HCO₃ are dominant species in groundwater, concentrations of Na, Cl and NO₃ have increased at the granitic area indicating anthropogenic contamination. The groundwaters are divided into 2 groups, granite and metasedimentary rock/gneiss areas, with the second principal component presenting anthropogenic pollution by cultivation and residence from the principal components analysis. The discriminant analysis, with an error of 5.56% between initial classification and prediction on geology, can explain more clearly the geochemical characteristics of groundwaters by geology than the principal components analysis. Based on the obtained results, it is considered that the multivariate statistical analysis can be used as an effective method to analyze the integrated hydrogeochemical characteristics and to clearly discriminate variations of the groundwater quality. The research results of small potable water supply system in the study area showed that the groundwater chemistry is determined by the mixed influence of land use, soil properties, and topography which are controlled by geology. To properly control and manage small water supply systems for central and local governments, it is recommended to construct a total database system for groundwater environment including geology, land use, and topography.

Key word : Small potable water supply system, Geology, Land use, Principal components analysis, Discriminant analysis

요 약 문

본 연구는 논산지역 마을상수도를 대상으로 수질 모니터링, 수리지화학적 고찰 및 다변량 통계분석을 통하여 수질에 관한 문제점과 원인을 규명하고 타당한 관리 방안을 마련하고자 수행되었다. 논산지역은 마을상수도 이용이 많은 전형적인 농촌지역으로 지질은 화강암이 가장 넓은 면적을 차지하며 옥천대 변성퇴적암, 편마암과 화산암이 분포한다. 마을상수도의 수질 모니터링 결과 전국 평균인 2.5%보다 5-8배 높은 13-21% 정도가 수질기준을 초과하였으며 주요 오염성분은 질산성질소, 탁도, 총대장균, 일반세균, 불소 및 비소로 조사되었다. 연구지역 남쪽과 북쪽에서 높게 나타

*Corresponding author : kyungsok@kigam.re.kr

원고접수일 : 2008. 9. 18 심사일 : 2008. 9. 19 게재승인일 : 2008. 12. 26

질의 및 토의 : 2009. 2. 28 까지

나는 질산성질소 오염의 주요 원인으로서 비닐하우스 같은 시설영농의 영향이 가장 큰 것으로 나타났다. 마을상수도 수질은 Ca 와 HCO_3 가 지배적이나 화강암 지역에서는 농경지와 주거지 등의 인위적인 오염의 영향으로 Na , Cl 및 NO_3 가 증가되었다. 주성분분석 결과 주로 농경과 인위적 오염의 영향을 나타내는 주성분 2에 의하여 크게 두 개의 그룹인 화강암과 편마암 및 옥천대 지하수로 구분된다. 판별분석은 초기 지질분류와 판별분석 예측결과의 오차가 5.56%로서 주성분분석보다 더 명확하게 각 지질별 지하수 특징을 보여준다. 다변량 통계분석은 수리지화학적 특성의 종합적 분석을 가능하게 하여 지질특성에 의한 지하수 수질의 변화를 명확하게 구분할 수 있는 방법으로 사료되었다. 논산시 마을상수도 수질에 대한 연구결과는 지질에 의해 영향받는 토지이용, 토양 특성 및 지형 등이 복합적으로 작용하여 지하수 수리지화학적 특성을 결정하는 것임을 확인하였다. 따라서 향후 정부 및 지자체의 마을상수도 관리는 지질, 토지이용, 지형 및 토양 특성 등에 대한 종합적 자료 구축 및 해석이 필요하다.

주제어 : 마을상수도, 지질, 토지이용, 주성분분석, 판별분석

1. 서 언

마을상수도는 소규모 수도시설을 지칭하는 것으로 2005년까지만 해도 간이상수도 및 간이급수시설로 불리어 왔다. 이러한 소규모수도시설은 1994년 이전에는 보건복지부에서 농어촌 새마을사업으로 추진하던 것이 1994년도에 환경부로 이관되어 관리되어왔다. 환경부 (2004) 자료에 의하면 식수원으로 이용되는 소규모수도시설은 마을상수도와 간이급수시설로 전체 인구의 약 5.2%인 255만 명이 이용하는 것으로 보고되었다. 그러나 그동안의 연구 결과를 보면 환경부에서 통계로 보고된 수보다는 1.5-2배에 가까운 인구가 소규모 수도시설을 사용하는 것을 알 수 있으며 이로 미루어 보면 지하수를 수도로 이용하는 인구는 255만보다 훨씬 많을 것으로 예상된다(고경석 등, 2004, 2006). 마을상수도는 수도법에 의해 환경부가 관장하며 지자체가 자체적으로 설치·관리하도록 하거나, 농어촌정비법에 의해 농림부가 농업·생활용수 겸용 다목적 용수를 신규로 개발한 후 마을상수도로 등록하여 관리하도록 하고 있다. 미국과 일본의 간이상수도는 우리나라와는 조금 다르지만 연방정부 차원에서 관리가 이루어지고 있다(김광목, 1995a, 1995b). 2002년부터 미국 EPA에서는 소규모 급수시설에서 발생하는 비소 문제를 해결하기 위한 시범 운영 프로그램(Arsenic removal technology demonstration program)을 운영하여 적극적으로 지방 정부에 시설 개선 지침을 개발하여 보급하고 있다.

소규모 수도공급시스템의 경우 지하수나 계곡수 등 자연 상태의 물이 정수처리를 거치지 않기 때문에 오염에 취약하고 대부분 80년대 이전에 설치되어 시설이 낙후하고 전문성이 없는 주민들에 의해 시설이 관리되고 있는 것도 큰 문제점이라 할 수 있을 것이다. 2003년 환경부 보도 자료에 의하면 전국 24,474개소 간이급수시설 중 23,727개소에 대하여 각 지방자치단체가 대장균군, 일반세

균, 암모니아성질소, 탁도, 잔류염소 등 14개 항목에 대하여 수질을 조사한 결과 605곳이 먹는물 수질기준을 초과하는 것으로 조사되었다. 이는 전체의 2.5% 정도에 해당하는 것으로 대부분 강우가 집중되는 여름철에 기준을 초과하는 경우가 많은 것으로 보고되었다. 지역별로는 대전(25.7%), 인천(18.3%), 경기(13.2%), 울산(6.6%), 부산(5.4%), 광주(4.7%)가 전국 평균을 초과하나 대부분 지역은 초과율이 1% 수준으로 양호한 것으로 조사되었다. 마을상수도 시설의 취수 원수별 현황을 살펴보면 지하수가 전체의 74.5%로 대부분을 차지하며, 용천수를 포함하면 약 80% 이상의 지하수가 농어촌 수도 용수에 절대적인 역할을 하고 있다. 마을상수도의 가장 큰 문제는 시설이 노후화되어 있다는 점인데, 25년 이상(70년대 설치) 시설이 46%이며 80년대에 설치된 25년 이상 시설을 포함하면 전체의 63%이다. 2000년대 이후로 설치된 것은 전체의 11.6%에 지나지 않음을 알 수 있었다. 따라서 노후화 시설에 대한 투자를 확대하여 지속적으로 보수 관리를 하여야 수질 및 수량을 안정적으로 확보할 수 있을 것이다.

마을상수도에 대해서는 환경부에서 매년 상수도 현황을 통계연보로 조사하여 발표하고 있으며 분기별로 수질을 검사하여 그 오염 실태를 파악하고 있다. 그러나 광역상수도에 기초하여 대부분의 수도공급을 하고 있는 우리나라의 현실상 간이상수도 현황에 대한 연구는 몇몇 학술논문발표회의 자료를 제외하고는 체계적인 연구가 수행되지 못하여 연구 결과가 미미한 실정이다(김영규, 1992; 박창신 등, 2007; 이웅 등, 2001; 고경석 등, 2004; 정진우 등, 2006; 김지은 등, 2006). 따라서 마을상수도 수질에 대한 특성을 명확하게 파악하는 것이 보다 효과적인 관리에 있어 필수적으로 요구되고 있다. 특히 마을상수도 수원의 대부분을 차지하는 지하수 수질에 대한 특성을 파악하는 것이 중요하며 이를 위해서는 수질에 영향을 주는 지질, 토지이용 등의 특성에 대한 분석이 필요하다. 특히

비점오염원에 의해 발생하는 질산성질소와 같은 성분들의 공간분포 및 모니터링을 통하여 마을상수도의 관리에 필요한 요인들을 찾아내도록 하여야 한다.

본 연구에서는 마을상수도 수질의 문제점 및 그 원인을 확인하기 위해서 마을상수도 사용이 많은 논산 지역을 대상으로 선정하여 수질을 모니터링하고 수리지화학적 정보를 분석하였다. 지하수의 화학적 조성은 이러한 여러 가지 요인에 의한 영향을 복합적으로 나타내게 된다. 지하수의 수리지화학적 특징은 수질의 공간 분포와 밀접한 상관성을 가지므로 이에 대한 연구들이 활발하게 진행되어 왔다(Pitkänen et al., 1999; Reghunath et al., 2002). 수질의 공간적 분포를 지구통계기법을 이용하여 반응과정과 오염의 영향을 정량적으로 해석하는 연구들도 활발하게 이루어지고 있다(Cerón et al., 2000; Johannesson et al., 1996). 수질의 공간 분포 특성의 지질, 토지이용 등과 상관 분석을 위하여 본 연구에서는 지리정보시스템(GIS)을 이용하여 연구지역의 지하수 공간정보를 분석하였다. 또한 수리지화학적 특성의 정량적 해석을 위하여 다변량 통계분석법인 주성분분석(Principal components analysis)과 판별분석(Discriminant analysis)을 이용하여 지질 및 토지이용에 대한 수질의 특성을 연구하였다.

2. 연구지역 특성

연구지역인 논산시는 충남의 남부에 위치하고 있으며, 대전시와 충남 계룡시, 공주시, 금산군, 전북 완주군 및 익산시와 경계를 이룬다. 행정구역은 2읍 11면 2동으로서 면적은 554.82 km², 인구는 2008년 6월말 현재 130,605 명이다. 논산시의 경위도상의 위치는 동경 126° 59' 8.8"-127° 20' 7.5", 북위 36° 03' 35.9"-36° 20' 14.2" 사이를

점하고 있다. 논산의 기후는 4계절이 뚜렷한 온대성 기후로 연평균 기온은 11.8-13.0°C(1999-2007년)이며, 가장 더운 8월 평균기온은 25.2°C, 가장 추운 1월의 평균기온은 -5.4°C로 기온편차는 16.1°C이다. 연평균 강수량은 2001년 752.6 mm를 제외하고는 1999-2007년 사이에 1,073.1-1,776.8 mm 사이였다.

논산시는 대략 타원형을 이루는데 북동부는 험준한 산악 지대로서 계룡산(840m), 대둔산(878m)과 접하고 있으며 남서부는 계룡산과 대둔산에서 발원하는 논산천이 금강 본류에 유입되면서 주변에 넓은 논산평야를 형성함으로써 동고서저의 지형적 특색을 지니고 있다. 연구지역의 지형적 특징은 분포하는 지질과 지질구조에 크게 영향을 받아 지세가 형성되어 있다. 연구지역에 발달한 하천과 계곡도 지질과 지질구조선에 의해 영향을 받아 형성되어 있으며, 주하천인 논산천, 연산천, 인천천, 석성천 및 대곡천은 모두 금강수계에 속한다. 중생대 화강암이 분포하는 지역은 평야지대, 선캄브리아 변성암이 분포하는 지역은 구릉지대, 옥천층군인 변성퇴적암이 분포하는 지역은 산지 지형을 이루고 백악기 화산암이 분포하는 지역은 산릉을 이룬다(Fig. 1).

논산지역 지하수 흐름 특성을 알아보기 위하여 수위 측정이 가능한 마을상수도 지하수 관측공 73공에 대한 수위 측정을 실시하였다. 지하수의 흐름을 살펴보면 옥천층군이 분포하는 고도가 높은 동쪽에서 금강을 만나는 화강암 분포지역인 서쪽의 평야지대로 지하수의 흐름이 지배적임을 확인할 수 있었다(Fig. 2). 수계가 분리되는 동쪽 지역의 지하수가 서쪽으로 흐르는 것으로 보이는 것은 지하수 관측 자료가 적어 나타나는 현상으로 이 지역에서 실재는 동쪽으로 지하수가 흐를 것으로 판단되었다. 서북부 지역에서 지하수 흐름이 모이는 것으로 측정 당시 양수가 되고 있었던 관정들이 있기 때문에 지형적 효과보다는 양수

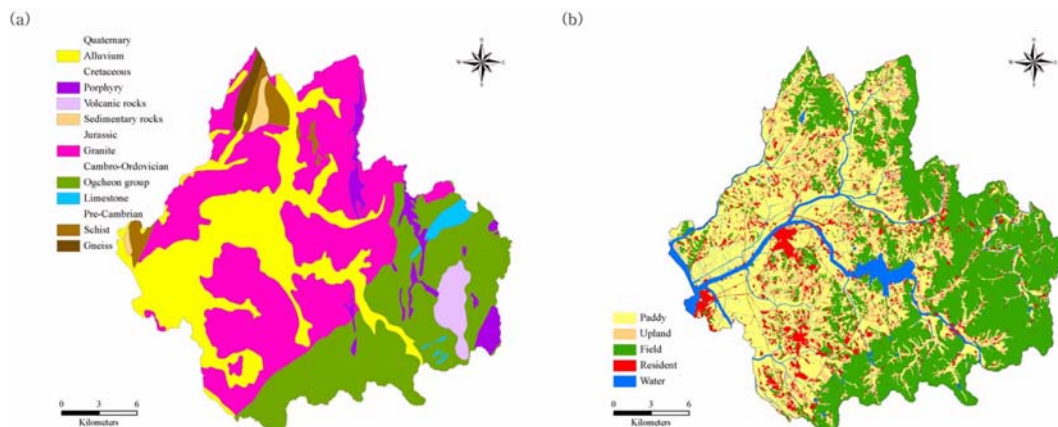


Fig. 1. (a) Geologic and (b) Land use maps of the study area.

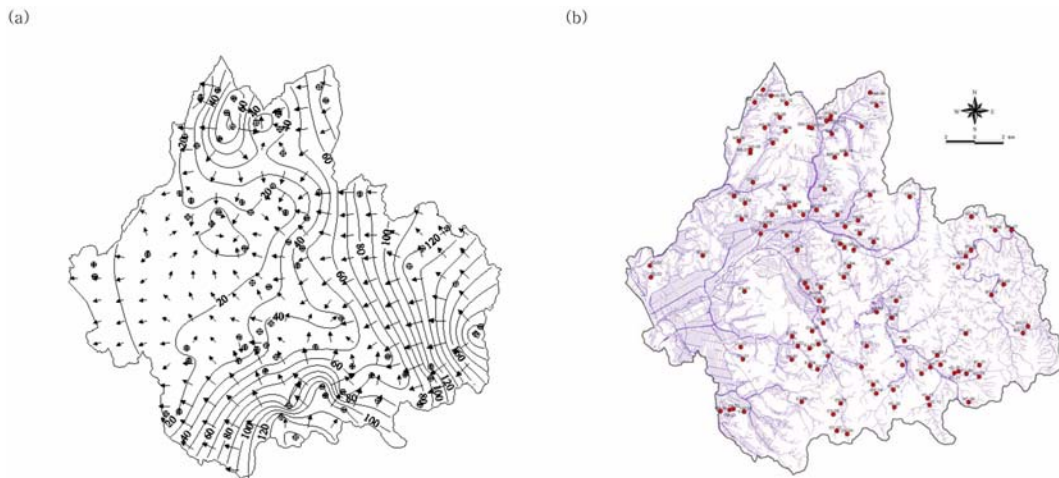


Fig. 2. (a) Groundwater flow and (b) sampling location maps of the study area.

의 영향에 의해 나타나는 현상으로 판단된다. 전체적인 지하수 흐름은 지형과 밀접한 상관성을 보이는 것으로 확인할 수 있었다.

연구지역 지질은 선캠브리아기의 변성암인 편암류 및 편마암류와 고생대 퇴적암, 중생대 화산암 및 화성암에 이르기까지 다양한 암석이 분포하고 있다(장태우와 황재하, 1980). 북부지역의 북동-남서방향의 단층에 인접하여 분포하는 선캠브리아기의 경기편마암 복합체인 변성암은 기저 호상 흑운모 편마암, 규암과 석회규산염암을 협재하는 준편마암으로 구성되어 있다. 연구 지역에서 두 번째로 넓은 분포를 보이는 옥천층군은 고생대의 변성 퇴적암으로 동남부인 가야곡면 남부, 벌곡면과 양촌면을 북동 방향으로 가로지르며 비교적 넓게 분포한다. 옥천층군은 유라기의 화강암류에 의해 관입을 받았으며, 북서측으로부터 변성사암층, 하부천매암층 및 상부천매암층으로 구분된다. 천매암층은 변질사암 남동인 벌곡면 수락리, 사정리, 신양리와 양촌면 신기리 일대에 주로 분포하며 탄질물을 협재하는 흑색 내지 암회색의 천매암과 점판암으로 구성되어 있다. 석회암층이 협재되어 있으며 천매암과 점판암층 내에 협재되어 있는 탄층을 대상으로 석탄을 채굴한 광산이 발견된다. 연구지역의 가장 넓은 부분을 차지하는 화강암은 남한 중부지역에 북동-남서방향의 대상 분포를 이루며 논산시의 면적의 반 이상을 차지하고 있다. 대부분 조립질 흑운모 화강암 내지 중립질 복운모 화강암으로 구성되어 있으며, 특히 복운모 화강암류는 편리구조를 보이는 경우가 많으며 풍화에 의해 평야지대를 이루고 있는 것이 특징이다. 연구지역에 분포하는 백악기 화산암류는 관입암맥류와 응회암류로 분류되며 암상은 상부로 갈수록 산성암석으로 변하고 화산활동의 양상은 초기의 용암류에서

후기의 쇄설화산 활동상으로 바뀐 것으로 생각된다.

토지이용도 작성을 위해 논산지역을 포함하는 국립지리원의 14개 1:25,000 토지이용도를 ArcGIS 프로그램을 이용하여 결합한 후 논산지역에 대한 지도를 추출하였다. 국립지리원의 토지이용도는 논산의 경우 총 38개의 코드로 구분되어 있었으며 토지이용에 따른 수질변화 분석 등을 위하여 다시 8개(논, 밭, 초지·임야, 인공초지, 주거지, 공업·교통시설, 점오염원, 수계)로 분류하였다. 이러한 재분류된 토지이용을 이용하여 토지이용도를 다시 작성하였으며 이는 Fig. 1(b)에 나타나 있다.

3. 연구방법

3.1. 시료 채취 및 분석

시험연구지역으로 선정된 논산지역에 대하여 관정깊이가 60 m 이상인 암반관정인 126개의 마을상수도로 이용되는 지하수 시료를 채취하여 분석을 실시하였다. 지하수 시료의 채취는 2004년 10월에서 12월에 걸쳐 126개소에서 현장조사와 시료채취를 실시하고 각 시료 채취 지점의 위치는 GPS를 이용하여 측정하였다(Fig. 2(b)). 현장 조사에서는 관정의 깊이 및 용량 등을 기록하였으며 주변 잠재 오염원 조사도 병행하여 실시하였다.

채취되는 지하수 시료는 관측정의 수리지구화학적 대표성을 나타내기 위하여 양수를 하면서 온도, 수소이온농도(pH) 및 전기전도도를 측정하여 이들이 안정된 값을 나타낸 후 시료를 채취되었다. 온도, 수소이온농도(pH) 및 전기전도도(EC)는 현장에서 pH 미터(Orion co.) 및 전기전도도 미터(Horiba co.)를 이용하여 직접 측정하였으며, 알카리도는 현장에서 메틸오렌지를 지시약으로 사용하여 적

정하거나 실험실에서 Gran 적정법을 사용하여 분석하였다 (Stumm and Morgan, 1996). 실내 분석을 위한 지하수 시료는 0.45 μm 의 멤브레인 필터로 여과한 후 양이온은 질산으로 산처리($\text{pH} < 2$)를 하였고 음이온은 냉장 보관하여 실험실로 운반되었다(Wood, 1976). 실험실로 운반된 지하수 시료는 양이온 금속원소인 Al, As, Ba, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, Si, Sr, Zn 등의 중금속 및 양이온은 초음파분무기(Ultrasonic nebuliser)가 장착된 프랑스 Jovin Ybon사의 유도결합플라즈마 원자방출분광분석기(ICP-AES, Model: Geoplasma)를 사용하여 분석하였으며, Cl^- , F^- , PO_4^{2-} , NO_2^- , NO_3^- , SO_4^{2-} 등 음이온 6개 성분은 미국 Dionex사 이온크로마토그래피(IC, Model: DX-120)를 이용하여 분석하였다. 먹는물 수질분석을 위한 시료는 채취한 즉시 냉장보관한 후 수자원공사 국제수돗물 센터에 의뢰하여 분석을 실시하였다. 수질분석은 대장균, 일반세균 등 14개 항목에 대해 수행되었다.

마을상수도 수질 모니터링 분석을 위하여 논산 수도사업소에서 분기별로 수행하는 2004년 3/4분기에서 2005년 3/4 분기의 결과를 이용하여 마을상수도의 주요 원인을 해석하였다.

3.2. 공간 분포 및 다변량 통계 분석

연구 지역 마을상수도 수질에 대한 공간 분포 특성을 고찰하여 구조적 특성이 지질, 지형 및 토지이용 등의 자연 및 인위적 특성과의 상관성을 확인하기 위하여 크리깅 기법을 이용하여 분석을 수행하였다. 공간자료의 처리기법으로 크리깅은 관심있는 지점에서 특성값을 이미 알고 있는 주위의 값들이 가중 선형조합으로 예측하는 방법으로 그 가중치는 대개 예측오차를 최소로 하면서 그 추정식이 편향되지 않도록 결정한다. 본 연구에서는 정규크리깅(ordinary kriging)을 사용하였으며(Journel and Huijbregts, 1978)에 잘 나타나 있다.

다변량통계분석은 많은 지화학 자료의 처리와 해석에 있어 매우 유용한 방법으로 사용되어 왔다(Davis, 1986; Reyment, 1997; Buccianti, 1997). 주성분 및 판별 분석은 자료의 축소를 통하여 기존 변수의 정보를 포함하는 새로운 변수를 만들어내어 표현하는 통계기법이다(Johnson and Wichern, 1992; Krankowski, 1988). 주성분 분석은 자료의 요약이나 선형 관계식을 통하여 차수(dimension)를 감소시켜 해석을 용이하게 하며, 판별분석은 두 개 이상의 모집단에서 추출된 표본들이 가지고 있는 정보들을 이용하여 이 표본들이 어느 모집단에서 추출된 것인지를 결정해 줄 수 있는 기준을 찾는 방법이다(Wilson, 2002).

본 연구에서는 시범연구지역인 논산 지역의 소규모 수도급수시설에서 지하수 성분들을 변수로 하여 다변량 통계분석인 주성분분석과 판별분석을 수행하여 수리지구화학 정보를 해석하고자 하였다. 주성분 분석과 판별분석에는 pH, electrical conductivity, Na, K, Ca, Mg, Si, Cl, NO_3 , SO_4 , HCO_3 , 및 Sr의 값이 사용되었다. 분석한 계치(DL, detection limit) 이하의 값을 가지는 각 성분은 통계처리 전에 DL/2의 값으로 대체되었으며(Stezenbach et al., 1999), 다변량 통계 분석을 위해서 통계 프로그램인 XLSTAT®을 사용하였다.

4. 연구 결과 및 토의

4.1. 마을상수도 수질 모니터링 결과

환경부의 전국 마을상수도 조사 결과에 의하면 먹는물 수질 기준을 초과하는 주요 항목은 질산성질소($\text{NO}_3\text{-N}$), 탁도와 총대장균으로 전체의 82.4%로 주로 소독처리의 미흡, 위생관리의 소홀 등에 기인하는 것으로 보고되었다(환경부, 2006). 현재 마을상수도의 수질기준 초과율은 2.5% 정도인데 대부분의 마을상수도로 이용되는 지하수는 14개 항목에 대해 수질 측정을 하고 있어 실제로 먹는물 수질 기준인 55개 항목을 수행하면 훨씬 더 많은 곳이 수질기준을 초과할 가능성이 높다.

연구지역 마을상수도 수질에 대한 2004년 3/4분기에서 2005년 3/4 분기까지의 5회간의 14개 항목의 정기 분석 항목에 대한 논산시 수도사업소의 수질 모니터링 결과를 살펴보면 약 13-21% 정도가 수질 기준을 초과하는 것이 확인되었다(Table 1; Fig. 3). 이는 전국적인 수질기준 초과율인 2.5% 보다 5-8배 정도 높은 것이다. 그러나 이러한 분석자료는 논산시의 마을상수도 수질이 타지역보다 나쁘다는 것을 의미하지는 않는다. 논산시 마을상수도의 경우 농업용 및 생활용수로 개발되어 식수로도 사용되는 것들을 모두 마을상수도로 전환 관리하였기 때문에 타지역처럼 기존의 마을상수도만 관리하는 것과는 비교 기준이 다르기 때문이다. 인근의 금산지역 연구 결과에서도 논산과 거의 유사한 결과를 보여주었으며(고경석 등, 2004) 이는 환경부의 마을상수도 관리에서 실제 식수로 이용되는 생활용수 등이 통계에 반영되지 않기 때문으로 사료된다. 마을상수도에서 질산성질소의 초과율이 차이가 나는 이유는 시료의 처리 분석과정의 문제점에도 일부 기인한다. 2006년 연구지역에서 질산성질소가 높은 25개 지역의 시료를 채취하여 분석한 결과 15개 지점에서 질산성질소가 10 mg/L을 초과하여 04년 4/4분기의 자료와 유사함을

Table 1. The monitoring results of water quality for a small water supply system in the study area.

Sampling period	Total site	Contamination site	F	NO ₃ -N	As (ppb)		Bacteria	Coliform	Turbidity	Color
			< 1.5 mg/L	< 10 mg/L	10	50	< 100	(-)	(0.5)	
'04 3/4	138	26	5	5	6	1	1	1	13	
'04 4/4	126	27	6	20	7	1				
'05 1/4	130	27		10			14	7	4	
'05 2/4	133	17	2	3			6	7	7	
'05 3/4	145	22	4	6					11	2

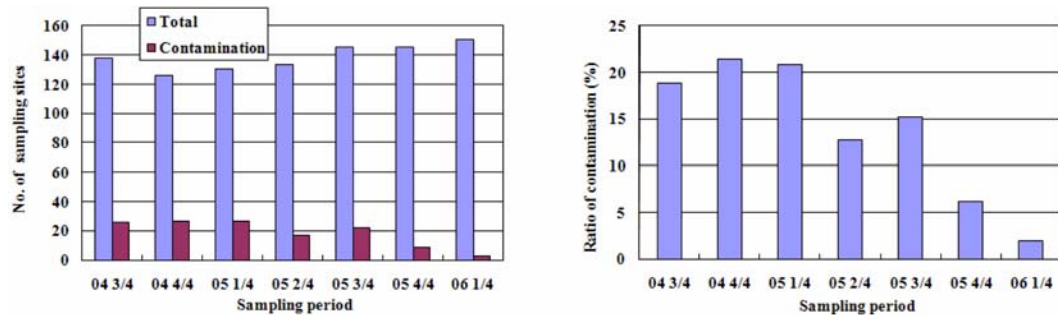


Fig. 3. The monitoring results of water quality for small water supply system in the study area.

확인할 수 있었다. 이러한 사실은 질산성질소의 오염이 비교적 지속적으로 유지되고 있음을 보여주며 따라서 보다 체계적인 관리를 통한 오염원의 제거가 필요하다.

마을상수도 수질 모니터링 결과, Table 1과 Fig. 3에서 볼 수 있는 바와 같이 주요 수질기준 초과 항목은 일반적으로 문제가 되고 있는 질산성질소, 탁도, 총대장균 및 일반세균이었으며 특징적으로 불소와 비소가 수질기준을 초과하는 것이 확인되었다. 특히 질산성질소는 04년 4/4 분기에는 수질기준을 초과하는 마을상수도가 20개소가 관측될 정도로 많이 관측되었다. 이러한 것은 논산지역이 딸기 등을 재배하는 시설영농(비닐하우스)이 많기 때문에 농경지에서 투입되는 비료에 의해 지하수가 오염될 가능성이 높기 때문이다. 수질기준 초과 항목 중 불소(F)와 비소(As)는 대부분 지질특성에 의해 발생하는 것으로 판단되며 다른 성분들과는 달리 오염 제거가 쉽지 않은 것들이다. 비소는 2011년에 먹는물 수질기준이 10 µg/L로 강화될 예정이며 04년 4/4분기 자료에 의하면 총 126개중 8개인 6% 정도가 수질기준을 초과하였다. 연구지역의 높은 비소는 모두 옥천대 지하수 관정에서 관찰되며 이는 광화대가 넓게 형성되어 있는 옥천대 암석의 특징과 상관 있는 것으로 판단된다(안주성 등, 2005, 2007).

수질 모니터링 결과 수질기준 초과 지역은 거의 동일한 마을상수도에서 반복적으로 발생하고 있었다. 전체적인 마을상수도 오염개소는 전반적으로 감소하고 있으나 질산성질소와 같이 변화가 뚜렷하지 않은 항목이 획기적으로 오

염이 감소하였다고 판단하기는 어려운 것으로 보인다. 논산지역의 경우 질산성질소 오염은 퇴비 사용량이 많아 토양 및 지하수 오염을 일으킬 가능성이 높은 딸기 등의 작물을 재배하는 시설영농(비닐하우스)이 넓게 분포하므로 쉽게 제거되기 어렵다. 대부분 질산성질소 오염의 경우 밭 지역과 거주지에서 배출되는 오염원들, 즉 화학비료, 분뇨, 축산폐수 및 생활오수 등 다양한 요인들에 의해 배출되어 지하수가 오염되기 때문에 오염원 차단이 현실적으로 매우 어려운 실정이다. 논산지역 마을상수도 수질 모니터링 결과는 일반적인 요인들 세균, 대장균, 탁도의 경우 관리를 통해 제거가 가능하지만 질산성질소의 경우는 국가적인 시스템의 구축과 비점오염원관리를 통하지 않는 한 지속적으로 마을상수도를 사용하는 국민들이 오염에 노출될 수 없음을 보여주는 사례라 할 수 있을 것이다.

소규모 수도시설이 노후화되고 문제점이 많음에도 예산 확보의 어려움으로 시설 개선은 어려운 실정이다. 현재 마을상수도 시설의 관리 주체가 지자체와 주민에 있기 때문에 지자체의 예산 확보가 되지 않으면 수도시설 개선이 거의 불가능한데 대부분의 지자체가 재정자립도가 매우 낮고 소규모 수도시설에 대한 예산은 일반회계로 편성되어 상대적으로 우선 순위가 낮아 시설 개선이 잘 이루어지지 못하는 실정이다. 아울러 소규모 수도시설에 대한 중앙정부의 예산 지원은 미미한 실정이므로 향후 시설 개선 및 관리에 대한 중앙정부 차원의 종합적 대책이 수립되어야 할 것이다.

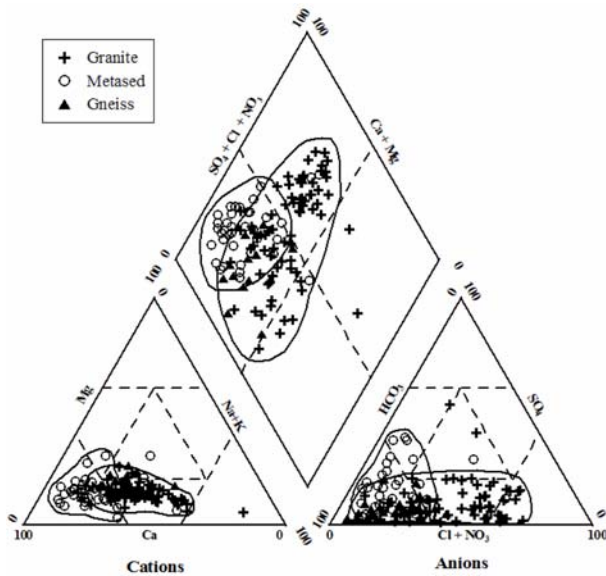


Fig. 4. Piper diagram showing groundwater chemical variations which are classified by geology.

4.2. 지하수 수리지화학 및 공간분포 특성

논산지역 마을상수도의 전체 수질 분석결과를 살펴보면 주요 양이온과 음이온의 지하수중 당량 기준으로 볼 때 Ca(27.7%)과 HCO₃(29.6%)가 가장 높은 비율을 차지하였다. 각 성분들의 함량은 양이온은 Na(14.7%), Mg(6.7%)와 K (0.9%)를 차지하였으며, 음이온은 Cl(8.8%), NO₃(6.8%)와 SO₄(4.8%)를 나타내었다. 지질별 수질 특성을 보면 화강암(n = 74) 지역의 시료들은 Cl(11.4%), NO₃(8.9%), Na(14.7%)가 옥천대 변성퇴적암(n = 37), 편마암

(n = 15) 및 전체(n = 126) 평균보다 높았다. 연구지역의 중심부를 차지하고 있는 화강암 지역에서 이들 성분의 증가는 토지이용과 밀접한 상관성을 가지는 것으로 판단된다. 화강암은 풍화에 약하여 비교적 낮은 지형을 형성하므로 논산에서 농경과 거주지가 밀집되어 있어 지하수가 오염에 취약한 특징을 가질 것으로 예측된다.

옥천대의 지하수는 Ca와 HCO₃가 지배적이며 암석내 석회질규산염(calcsilicate) 광물 성분이 많고, 방해석으로 이루어진 석회암층이 많이 발달하였기 때문이다. 방해석과 석회질규산염 광물은 물에 대한 용해도가 규산염 광물들에 비해 높아 지하수 수질에 큰 영향을 준다. 따라서 옥천대 암석의 지하수는 Ca와 HCO₃가 지배적인 성분으로 진화하는 특징을 가지게 되며 이러한 특징은 Fig. 5의 파이퍼도에서 확인할 수 있다. 논산 지역 지하수는 [Ca]-[HCO₃] 유형이 가장 많으나 인위적 오염의 영향을 많이 받는 화강암 지역의 지하수는 Cl과 NO₃가 성분의 증가에 의하여 [Ca]-[HCO₃]에서 [Ca]-[Cl+NO₃] 유형으로 변화되는 특징을 보여준다(Fig. 4). Fig. 4의 파이퍼도는 각기 다른 지질 조건에서 채취된 지하수 조성변화 특징을 잘 보여준다. Fig. 4에서 볼 수 있는 바와 같이 화강암 지역의 시료는 Cl과 NO₃의 영향으로 매우 폭넓은 조성변화를 보여주나 옥천대와 편마암지역의 시료는 비교적 넓은 변화 양상을 나타낸다. 화강암 지역에서 지하수 조성변화가 크게 나타나는 것은 화강암 지질 분포 지역이 지형이 비교적 낮고 완만하며 충적층이 많이 발달하여 오염물질의 유입이 용이한 거주지와 농경지가 넓게 분포하기 때문

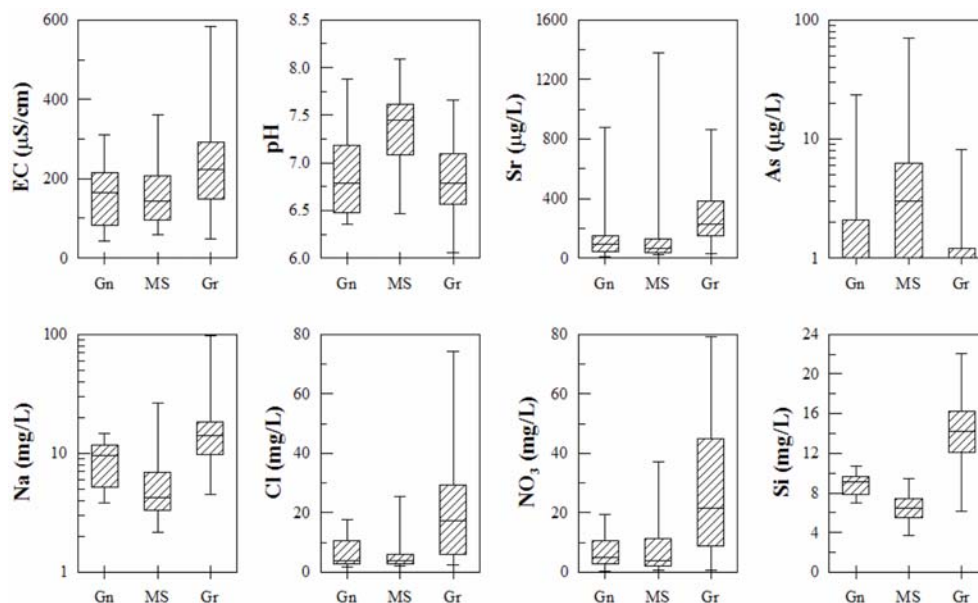


Fig. 5. Box-Whisker plots indicating groundwater chemical variations which are classified by geology.

이다(Fig. 1 토지이용도 참조). Fig. 1에서 볼 수 있는 바와 같이 토지이용과 지질 특성은 공간적으로 상호 매우 밀접한 상관성을 보여주며 지하수 수질도 이들과 밀접한 연관성을 보여주었다.

지질 특성별 지하수 성분 농도 분포는 Fig. 5의 Box-whisker도에서 확인할 수 있다. 용존성분의 총량을 나타내는 전기전도도(EC)는 화강암지역에서 높았으며 이는 인위적 오염의 영향을 나타내는 Na, Cl 및 NO_3 에 기인하는 것으로 보인다. 옥천대 변성퇴적암 지역의 Na와 Cl의 농도가 편마암과 화강암 지역보다 낮은 것은 대부분 산지로 이루어져 있어 주거지와 농경지가 많지 않아 지표로부터 오염물질의 유입 요인이 상대적으로 적기 때문이다. 수소이온농도(pH)와 비소(As)는 옥천대의 변성퇴적암에서 높은 값을 보여주고 있는데 이는 석회질규산염 광물 또는

석회암 협재와 옥천대 흑색 셰일에 많이 포함되어 있는 비소 함유 황화광물의 산화에 의한 영향으로 판단되었다.

수질의 공간 분포를 알아보기 위하여 126개의 시료에 대하여 위치 정보를 얻은 후 크리깅 기법을 이용하여 공간분포도를 작성하였다. 연구지역의 남서부는 평야지대이고 광역상수도의 보급에 의하여 시료의 분포가 조밀하지 못하여 공간분포를 나타내는데 약간의 문제가 있으나 전체적인 양상을 파악하기에는 큰 문제가 없었다. 성분별로 차이가 있으나 대체적으로 수질은 지질, 지형 및 토지이용과 밀접한 상관성을 가졌다(Fig. 6). 용존성분의 총량을 나타내는 전기전도도의 공간분포도를 살펴보면 지질, 지형 및 토지이용과 밀접한 상관성을 가진다. 남서부와 북동부의 낮은 전기전도도는 화강암 지역과는 달리 이 지질이 지질과 지형적인 차이 즉 옥천대 암석의 분포와 고도

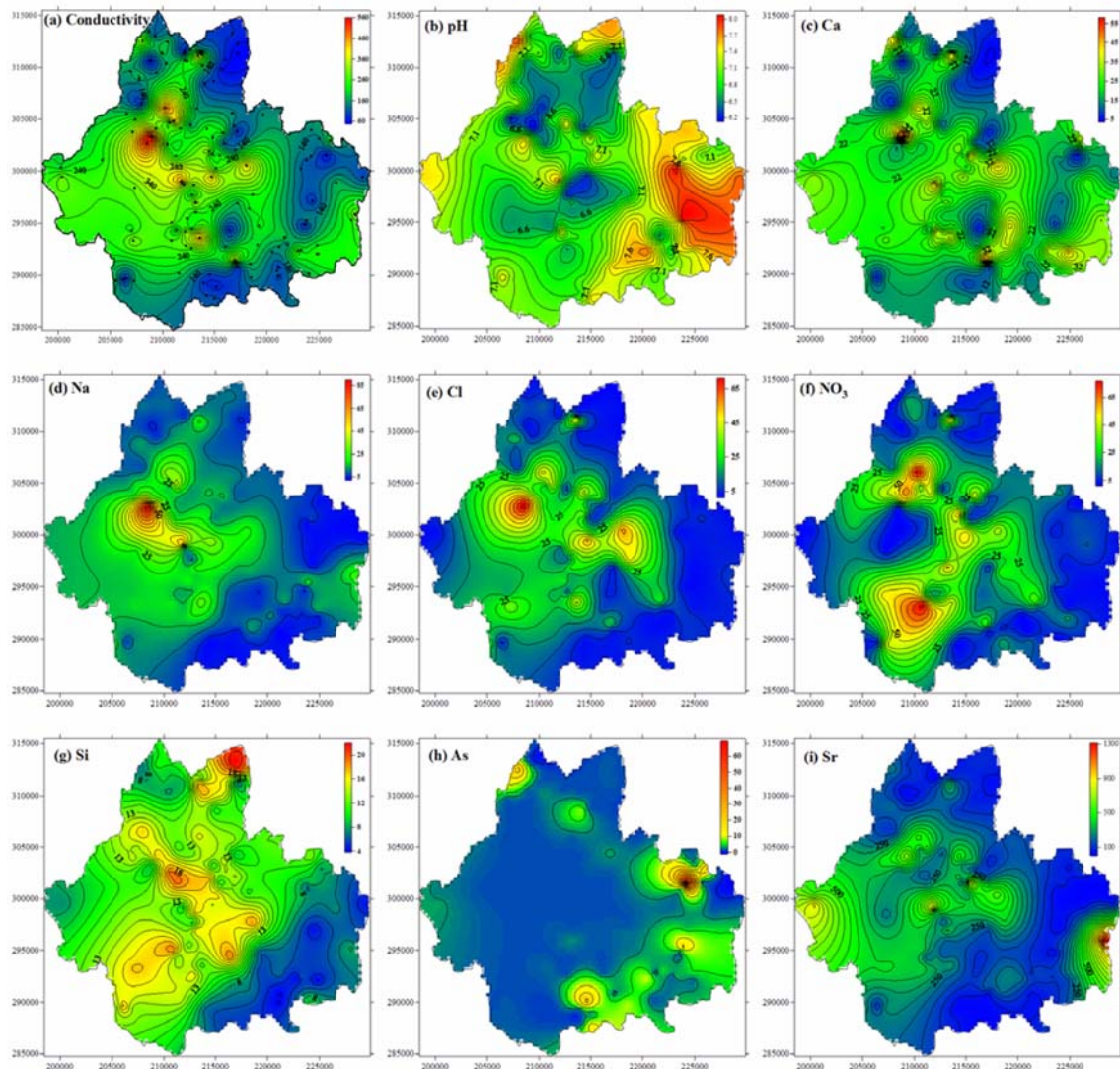


Fig. 6. Spatial distribution of groundwater components indicating the effect of geology and land use.

가 높아 농경지 및 거주지 등이 많이 형성되어 있지 못하여 오염 요인에 의한 지하수내에 용존 성분의 증가가 뚜렷하지 못하기 때문이다. 이에 반해 화강암 분포지역인 중앙부와 서부 지역은 비교적 고도가 낮고 인구가 밀집되며 농경활동이 활발한 곳으로 이에 의한 용존 성분의 증가가 발생하여 높은 값을 보여준다. Ca와 Sr은 전기전도도와 유사한 양상을 보여주나, pH는 남서부 지역에서 높은 값을 보여주는데 이는 옥천대 변성퇴적암에 협재하는 탄산염층의 존재나 소량 분포하는 석회암에 의하여 증가되는 것으로 사료된다. Na, Cl 및 NO_3 는 화강암 지역에서 높으며 그중 특히 거주지 및 농경지의 분포와 밀접한 상관성을 가지는 것을 확인할 수 있었다. NO_3 의 경우는 Na, Cl과 유사한 분포를 보이나 북쪽의 노성면과 광석면, 그리고 남쪽의 연무읍을 중심으로 높은 농도가 관찰된다. 이들 지역에서 NO_3 가 높은 것은 비료 및 퇴비 사용량이 많은 시설영농(딸기재배 비닐하우스)이 집중적으로 발달한 것이 주요 원인으로 판단된다. 규소(Si)는 남서부 지역의 변성퇴적암과 그 이외의 지역이 뚜렷하게 대비되는 양상을 보여주었다. Si는 일반적으로 암석의 풍화작용에 의해 증가하는 것으로 알려져 있으며 따라서 상대적으로 고도가 높고 풍화작용에 강한 변성퇴적암보다는 풍화에 약한 화강암이 많은 지역에서 높은 값을 가진다는 사실을 확인할 수 있었다.

4.4. 다변량 통계분석

4.4.1. 상관분석

수질성분 상호간의 상관성을 알아보기 위하여 상관분석 수행한 결과, 용존성분의 양을 나타내는 전기전도도(EC)

는 Ca, Cl, Na, Mg와 상관계수 0.75 이상의 높은 양의 상관성을 가지며, SO_4 , Cl 및 HCO_3 와도 0.60 이상의 값을 가졌다. 편마암 지역에서는 전기전도도가 Ca 및 HCO_3 와 0.97 이상이며 Na, Mg와도 0.8 이상의 양의 상관계수를 가졌다. 화강암 지대에서는 Na, Cl의 성분과 전기전도도가 각각 0.86과 0.78의 상관계수값을 보여주어 지하수 용존성분의 증가가 인위적 오염에 의한 영향임을 나타내었다. Ca, Mg, HCO_3 는 지질 특성과는 상관없이 모두 상호 양의 상관관계를 보이나, Na, Cl, NO_3 는 모두 높은 농도는 화강암 지대의 지하수 시료만이 관찰되며 상호 양의 상관성을 보여주었다. 이러한 관측 결과는 화강암 지역 지하수가 오염에 가장 취약함을 나타낸다. 일반적으로 지하수의 오염취약성은 오염물질의 부하와 지하수 위에 밀접한 상관성을 가지며 화강암 지역의 낮은 고도와 지하수위가 오염에 대한 높은 취약성을 설명하여준다. 지하수 흐름에서 화강암지역은 유출(discharge) 지역이며 연구지역에서 경작, 거주 등이 집중적으로 발달하는 지역인 점도 높은 오염취약성에 기여하는 요인이다.

4.4.2. 주성분분석

Table 2는 주성분 분석에 의해 추출된 주성분을 나타내는 고유값(eigenvalue)과 주성분간의 차이, 주성분에 의해 설명되는 총분산의 비율 등을 나타낸 것이다. 각 주성분에 대한 지하수 화학성분의 기여도는 주성분을 구성하는 벡터 성분에 의해 나타내어진다(Table 2). 주성분 분석에 의해 얻어진 초기 3개 주성분은 전체 분산의 75.2%를 설명하고 있으며, 그중 주성분 1이 49.4%로 가장 높은 비율을 차지하고 있으며 주성분 2는 14.9%, 주성분 3은

Table 2. The eigenvector components, eigenvalues, and explained variance of principal components from principal components analysis

Variables	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
EC	0.422	-0.025	-0.017	0.054	0.077
Cl	0.355	0.274	-0.001	0.184	0.264
NO_3	0.280	0.416	0.233	0.058	-0.386
SO_4	0.259	-0.219	-0.502	0.321	-0.267
HCO_3	0.256	-0.459	0.046	-0.363	0.497
Ca	0.354	-0.268	0.256	-0.204	-0.085
K	0.191	-0.069	0.533	0.582	0.106
Mg	0.343	-0.030	0.263	-0.234	-0.157
Na	0.317	0.116	-0.469	0.247	0.325
Si	0.100	0.633	-0.041	-0.365	0.293
Sr	0.307	-0.035	-0.225	-0.311	-0.472
Eigenvalue	5.432	1.633	1.205	0.905	0.557
% variance	49.4	14.9	11.0	8.2	5.1
Cumulative %	49.4	64.2	75.2	83.4	88.5

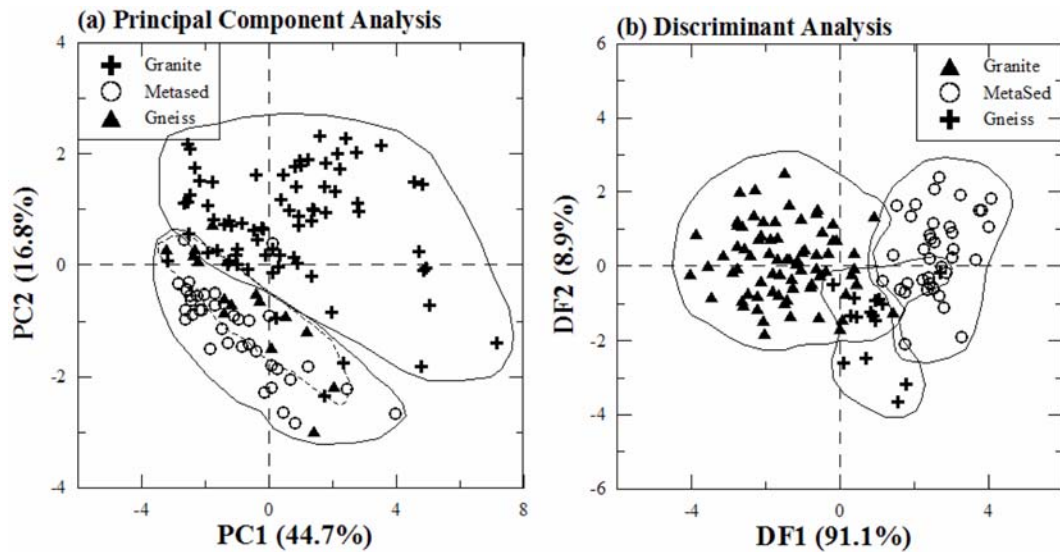


Fig. 7. The results of (a) principal components analysis (PCA) and (b) discriminant analysis (DA).

11.0%의 값을 가짐을 알 수 있었다. 주성분 분석 결과를 보면 통계분석에 사용된 지하수 인자가 많음에도 불구하고 주성분 1은 49.4%로 비교적 높으며 이는 여러 성분에 의한 지하수 화학 조성의 절반 정도를 나타내었다.

Table 2의 각 주성분의 고유벡터값에 따르면 주성분 1(PC 1)은 EC, Na, Ca, Mg, Cl, Sr에 의해 주로 영향을 받으며 모든 성분에 의해 양의 증가 요인을 가진다. 반면 주성분 2는 Si, NO₃에 의해 양의 증가 요인을, HCO₃에 의해서는 음의 감소 요인을 받았다. 주성분 3은 K에 의해서는 증가 요인을 Na, SO₄에 의해서는 감소하는 특징을 보여준다. 따라서 주성분 1은 지하수에 주로 녹아 있는 이온의 양을 결정하는 인자이고, 주성분 2는 농경이나 인위적 오염과 풍화 정도의 요인을 나타내며, 주성분 3은 여러 가지 요인이 복합적으로 반영한다.

Fig. 7(a)은 주성분 분석 결과를 나타낸 것이며 지질특성에 의해 연구지역 지하수 시료는 크게 두 개의 그룹으로 나누어진다. 변성퇴적암과 편마암 지역 시료들은 Ca, SO₄, HCO₃의 증가 요인에 밀접한 상관성을 가지며 주성분 1과 2의 관계도에서 3사분면에 집중하여 나타난다. 이 지역 시료들은 대부분 주성분 2(PC2)가 편마암 지역 일부 시료를 제외하고는 대부분 음의 값을 가진다. 편마암 지역의 지하수는 화강암과 변성퇴적암 지대의 시료들 중간 정도에 위치하고 있다. 이에 반해 화강암 지역의 지하수는 일부 시료를 제외하고는 Fig. 7에서 대부분 양의 값을 나타내는 PC2의 기여에 의하여 그래프의 상부 쪽에 주로 나타난다. 화강암 지대의 시료들은 Ca, SO₄, HCO₃의 증가에 관련된 것들과 Na, Cl, NO₃와 상관성이 있는

그룹으로 분리되는 경향을 보이나 변성퇴적암 지역의 지하수와는 뚜렷하게 구분된다.

주성분분석 결과 PC 2에 의하여 지질별 지하수 특성이 분리되는 것을 확인할 수 있었으며 변성퇴적암과 편마암 지역의 지하수는 PC1과 PC2가 음의 상관성을 가졌다. 주성분분석은 지하수 수질이 지질특성에 의해 발달되는 지형, 토지이용(농경 및 거주지 발달)과 지표로부터 오염물질의 유입을 결정하는 토양 특성과 밀접한 상관성을 정량적으로 보여줄 수 있는 기법으로 이용될 것으로 판단되었다.

4.4.3. 판별분석

지질 특성을 이용한 판별분석 결과는 3개의 지질 즉, 화강암, 변성퇴적암(옥천계) 및 편마암의 3개 그룹에 대하여 분석을 수행하였다. 판별분석 결과 얻어진 분류함수계수(classification function coefficients)는 Table 3에 나타나 있다. 판별분석에서 얻어진 판별함수(discriminant function) 1(DF1)은 고유값이 3.418이고 총 분산(total variance)의 91.1%를 설명하며 매우 높은 유의성(99.99%)을 가졌다.

판별함수 1(DF1)과 판별함수 2(DF2)에 대한 각 그룹별 점수(case score) 분포와 각 변수들의 판별함수 인자적재(factor loadings) 값은 Fig. 7(b)에 나타나 있다. Fig. 7(b)과 Table 3의 표준화된 판별함수계수로부터 판별함수 1은 전기전도도(EC), Ca, Mg, Si가 가장 중요한 판별 변수이며, 그 다음으로 As, HCO₃, Na 및 pH가 중요한 영향을 미침을 알 수 있었다. 이는 농업활동과 인간거주 등 인위적인 요인과 지질 요인이 복합적으로 지하수 수질에

Table 3. Classification and standardized discriminant function coefficients from discriminant analysis

Coefficient	Granite	Metasediment	Gneiss	DF1	DF2
Intercept	-226.71	-240.86	-217.41		
pH	61.83	65.81	61.89	0.366	0.512
EC	0.12	0.05	0.15	-1.383	-3.932
DO	-0.59	-0.32	-0.87	0.092	0.436
Cl	0.25	0.28	0.18	0.048	0.662
NO ₃	0.45	0.43	0.42	-0.086	0.197
SO ₄	-0.12	-0.10	-0.10	0.059	-0.032
HCO ₃	-0.05	-0.10	-0.02	-0.299	-0.998
Ca	-1.36	-1.01	-1.68	0.763	3.218
K	3.63	3.84	3.70	0.048	0.027
Mg	3.20	4.75	4.17	0.650	-0.054
Na	-0.78	-0.65	-1.03	0.210	1.900
Si	1.80	0.39	0.89	-0.900	0.118
Sr	-0.01	-0.02	-0.02	-0.195	-0.019
Ba	-0.03	-0.02	-0.01	0.045	-0.238
As	-0.17	0.00	-0.10	0.280	0.122

Table 4. Confusion matrix for discriminant analysis

(error = 5.56%)

	to Granite	to Metasediment	to Gneiss	Sum
From Granite	70 55.56%	1 0.79%	3 2.38%	74 58.73%
From Ogchen	0 0.00%	36 28.57%	1 0.79%	37 29.37%
From Pre-C	1 0.79%	1 0.79%	13 10.32%	15 11.90%
Sum	71 56.35%	38 30.16%	17 13.49%	126 100.00%

작용함을 확인시켜 주는 결과이다. Fig. 7(b)로부터 화강암, 변성퇴적암 및 편마암 지역의 지하수 시료는 효과적으로 분리되며 이는 앞서 주성분분석에서 언급한 바와 마찬가지로 단순히 지질에 의해 구분이 되어진다는 의미보다는 지질에 의해 발생된 지형, 토지이용 및 토양 특성이 복합적으로 작용하여 얻어지는 결과로 해석되어진다.

Table 4는 초기 지질 분류와 판별분석에 의한 예측자료가 어느 정도 오차를 보여주는지를 나타내는 혼돈 행렬(confusion matrix)이다. 판별분석 결과 전체 자료의 초기 설정값과 예측값 사이의 오차는 5.56%이며, 판별분석에 의해 예측된 자료는 화강암으로 분류되는 시료가 71개로 3개 감소하였으며 옥천계 시료는 38개로 1개 증가, 편마암은 17개로 2개 증가함을 알 수 있었다. 따라서 이러한 지질 분류에 의한 지하수조성에 대한 판별분석 결과는 수질 특성의 변화를 예측할 수 있는 기법으로 이용될 수 있을 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 수질 모니터링 분석을 통하여 지하수 수질의 공간적 특성과 확인하여 마을상수도 수질의 문제점 및 원인을 분석하였다. 2004년 3/4분기-2005년 3/4분기 5회간의 마을상수도 수질 모니터링 조사 결과를 살펴보면 약 13-21% 정도가 수질 기준을 초과하였으며 이는 환경부 전국 수질기준 평균 초과율인 2.5%를 훨씬 상회하였다. 논산 마을상수도 초과율이 높은 것은 마을상수도 통계에 반영되지 않고 식수로 이용하는 생활용수 등에 의한 것으로 판단된다. 마을상수도의 주요 수질기준 초과 항목은 일반적으로 문제가 많은 질산성질소, 탁도, 총대장균 및 일반세균이었으며 특징적으로 불소와 비소가 수질기준을 초과하는 것이 확인되었다. 연구지역에서 질산성질소 초과 마을상수도가 많이 관찰되는 것은 딸기 등을 재배하는 시설영농(비닐하우스)이 많아 농경지에서 투입되는 비

료에 의해 지하수가 오염되기 때문으로 조사되었다. 수질 기준 초과 항목 중 불소(F)와 비소(As)는 대부분 지질특성에 의해 발생되며, 특히 비소는 모두 광화대가 발달한 옥천대 암석 분포지역 지하수에서 관찰된다. 독성이 강한 비소는 2011년에 먹는물 수질기준이 $10 \mu\text{g/L}$ 을 적용시 연구지역에서 약 6% 정도가 수질기준을 초과하여 이에 대한 대책이 마련되어야 할 것으로 판단된다

다변량 통계분석법인 분석주성분분석 결과 지질특성에 의해 연구지역 지하수 시료는 주로 주성분 2에 의해 크게 두 개의 그룹 즉, 화강암 지역과 변성퇴적암 및 편마암 지역 시료로 구분된다. 화강암 지대의 시료들은 Ca , SO_4 , HCO_3 의 증가에 관련된 것들과 Na , Cl , NO_3 와 상관성이 있는 그룹으로 분리되는 경향을 보이나 변성퇴적암 및 편마암 지역의 지하수와는 뚜렷하게 구분된다. 주성분분석 결과는 지하수 수질이 지질특성에 의해 발달되는 지형, 토지이용(농경 및 거주지 발달)과 지표로부터 오염물질의 유입을 결정하는 토양 특성과 관련된 상관성을 정량적으로 표현할 수 있는 기법으로 이용될 것으로 판단되었다. 수질 특성을 이용한 판별분석 결과는 3개의 지질 즉, 화강암, 변성퇴적암(옥천계) 및 편마암의 3개 그룹에 대하여 분석을 수행하였다. 판별분석 결과 판별함수 1은 전기전도도(EC), Ca , Mg , Si 가 가장 중요한 변수이며 이는 농업활동과 인간거주 등 인위적인 요인과 지질 요인이 복합적으로 지하수 수질에 작용함을 나타내는 것이다. 판별함수의 상관관계로부터 화강암, 변성퇴적암 및 편마암 지역의 지하수 시료는 효과적으로 분리되며 이러한 결과는 앞서 주성분분석에서 언급한 바와 마찬가지로 단순히 지질에 의해 구분이 되어진다는 의미보다는 지질에 의해 발생된 지형, 토지이용 및 토양 특성이 복합적으로 작용하여 얻어지는 결과로 해석된다.

이상의 마을상수도 모니터링과 통계분석 연구 결과 연구지역의 마을상수도의 수질은 지질과 밀접한 상관성을 가지고 발달하는 토양 특성, 토지이용(거주지 및 경작지), 지형 등이 복합적으로 작용하여 그 특성이 결정되는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 특성으로부터 향후 지하수 활용 마을상수도 관리에 있어 기존의 지질, 토지이용 등에 대한 특성을 파악하는 것이 보다 효과적인 방법이 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보개발 사업의 ‘지하수활용 마을상수도 공급시

스템 및 수질 모니터링 실용화 기술 (08-6413)’ 과제의 일환으로 수행되었다.

참 고 문 헌

- 고정석, 이진수, 김용제, 2004, 농촌지역 간이상수도 수질에 대한 수리지화학적 특성: 충남 금산군 일대, 한국지하수토양환경학회 2004 추계학술발표회, p. 55-61.
- 고정석, 조성현, 이진수, 김통권, 김재곤, 오인숙, 2006, 지하수 수질과 토지이용, 토양특성 및 지질과의 정량적 통계분석, 한국지하수토양환경학회 2006년 추계학술발표회, p. 333-337.
- 김광목, 1995a, 외국의 간이상수도(I) 미국편, 국토정보 1995년 3월.
- 김광목, 1995b, 외국의 간이상수도(I) 일본 및 WHO, 국토정보 1995년 4월.
- 김영규, 1992, 일부 농촌지역 간이상수도의 운영실태와 수질에 관한 조사연구, 한국환경위생학회지, 18(2), 39-51.
- 김지은, 오정우, 강금배, 2006, 국내 마을 상수도 운영 및 수질현황 분석, 대한환경공학회 2006 추계학술연구발표회 논문집, p. 353-357.
- 박창신, 정진우, 강금배, 유만식, 2007, 마을상수도 시설개선과 지불용의액에 관한 조사연구, 대한상수도학회한국물환경학회 2007년 공동추계학술발표회 논문집, p. 340-346.
- 안주성, 고정석, 이진수, 김주용, 2005, 자연적 지하수 비소오염의 국내의 산출특성, 자원환경지질, 38(5), 547-561.
- 안주성, 고정석, 전철민, 2007, 국내 지하수의 비소 산출양상, 지하수토양환경, 12(5), 64-72.
- 이용, 박규홍, 이상수, 안진선, 2001, 농촌지역 간이상수도의 효율적인 관리를 위한 기초조사 연구: 경기도 안성시 일부지역을 중심으로, 한국물환경학회대한상수도학회 2001년 공동추계학술발표회 논문집, p. 243-246.
- 장태우, 황재하, 1980, 논산: 지질도록 설명서, 자원개발연구소.
- 정진우, 강금배, 김병두, 문만상, 한정규, 박창신, 오정우, 2006, 강릉시 마을상수도 운영실태와 수질조사 결과에 관한 연구, 한국물환경학회대한상수도학회 2006년 공동추계학술발표회 논문집, p. 645-651.
- 환경부, 2004, 2003 상수도 통계.
- 환경부, 2006, 소규모 수도시설개선 정책방향, 전국마을상수용 공공용 지하수 수질개선을 위한 산관학연민 합동 세미나 및 기술전시회, 1-10.
- Buccianti, A., 1997, Multivariate analysis to investigate Cl distribution in rocks from different settings, *Math. Geol.*, 29, 349-359.
- Cerón, J.C., Jimnez-Espionosa, R., and Pulido-Bosch, A., 2000, Numerical analysis of hydrogeochemical data: a case study (Alto Guadalentn, southeast Spain), *Appl. Geochem.*, 15, 1053-1067.

- Davis, J.C., 1986, Statistical and data analysis in geology, Wiley, 2nd ed., New York.
- Johannesson, K.H., Stezenbach, K.J., Kremer, D.K., and Hodge, V.F., 1996, Multivariate statistical analysis of arsenic and selenium concentrations in groundwaters from south-central Nevada and Death Valley, California, *J. Hydrol.*, **178**, 181-204.
- Johnson, R.A. and Wichern, D.W., 1992, Applied multivariate statistical analysis, 3rd ed., Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Journel, A.G. and Huijbregts, Ch J., 1978, Mining geostatistics, Academic Press, London.
- Krankowski, W.J., 1988, Principles of multivariate analysis: A user's perspective, Oxford Science Publ., Oxford, 563p.
- Reghunath, R., Sreedhara Murthy, T.R., and Raghavan, B.R., 2002, The utility of multivariate statistical techniques in hydro-geochemical studies: an example from Karnataka, India. *Water Res.*, **36**, 2437-2442.
- Pitkänen, P., Lofman, J., Koskinen, L., Leino-Forsman H., and Snellman, M., 1999, Application of mass-balance and flow simulation calculations to interpretation of mixing at Aspo, Sweden, *Appl. Geochem.*, **14**, 893-905.
- Reyment, R.A., 1997, Multiple group principal component analysis, *Math. Geol.*, **29**, 1-16.
- Stumm, W. and Morgan, J.J., 1996. Aquatic chemistry. 3rd ed., Wiley Interscience.
- Stezenbach, K.J., Farnham, I.M., Hodge, V.F., and Johannesson, K.H., 1999, Using multivariate statistical analysis of groundwater major cation and trace element concentration to evaluate groundwater flow in a regional aquifer, *Hydrol. Process.*, **13**, 2655-2673.
- Wilson, D.I., 2002, Derivation of the Chalk superficial deposits of the north Downs, England: an application of discriminant analysis, *Geomorphology*, **42**, 343-364.