

부산 지역 지하수 수질의 통계적 분석 - 민방위비상급수를 중심으로 -

김민경[†]·최성화·정재은·윤나나·한상민·이경심
수질보전과

Statistical Analysis of Groundwater Quality in Busan - Focused on Minbangwii-emergency water -

Min-Kyeong Kim[†], Seung-Hwa Choi, Jae-Eun Jung, Na-Na Yun, Sang-Min Han and Kyung-Sim Lee

Water Preservation Division

Abstract

In urban area Minbangwii-emergency water is near groundwater which citizens can drink and use. It is kind of groundwater supplied in the facility for provision against the emergency of water supply. It is important and difficult to preserve ground water against pollution in urban area. The objective analysis of groundwater quality is prerequisite to conserve groundwater. For this study the quality of Minbangwii-emergency water was analyzed from 2004 to 2009. To make clear the ground water quality geostatistical analysis(correlation test, T-test, Chi-Square Test, ANOVA test, cluster analysis and factor analysis) was used. In the results of the correlation test Fe is highest positively correlated with turbidity to 0.892. Total solids is correlated with hardness to 0.806. In ANOVA test, groundwater in commercial area and sedimentary rock zone and shallow groundwater indicates the higher level in Total solids, Hardness, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃-N. In the rainy month the number of Standard Plate Count and detection rate of Total Coliforms are higher than in the dry month. Factor analysis indicates that 3 factors are accounted for groundwater quality. Cluster analysis which is analyzed by the score of factor analysis classifies groundwater quality into three groups.

Keywords : Groundwater, Water quality, Geostatistical analysis

서 론

생활 수준이 높아질수록 양질의 물 수요는 증가하고 있어, 양질의 물을 확보하는 것이 중요한 과제임에 틀림없다. 이에 반해 도시화로 인한 인구 집중, 각종 산업시설과 교통량의 증가로 자연환경의 자정 능력은 약해지고 있어 양질의 물을 충분히 확보하는 것은 날로 어려워지고 있다¹⁾. 또한 지표수와 더불어 수자원의 한 축을 이루는 지하수 자원의 중요성과 효율성은 증가되고 있으나, 적극적인 지표의 개발로 양질의 지하수 보존은 더욱 어려운 상황이다²⁾. 양질의 지하수 보존을 위해서는 먼저 정확한 지하수 조사를 실시하고 이를 통한 객관적인 지하수 실태를 파악하여 지하수 관리를 해야 한다²⁾.

사람들의 음용수 이용 형태에 관한 한 조사에 의하면, 수도물을 끓여서 마신다가 58%로 가장 높고, 수도물을 정수기에서

통과시켜 음용한다 18%, 수도물을 그대로 마신다 9%, 지하수를 마신다 7%, 약수를 마신다 5%, 판매생수를 마신다 3% 순으로 나타나, 수도물을 마시는 비율이 85%로 가장 높게 나타났다. 지하수를 음용수로 사용하는 인구는 7%로 나타났으며³⁾, 최근 지표수의 오염 증가에 따라 음용수로서의 지하수에 관한 관심 역시 커지고 있는 것이 현실이다⁴⁾.

음용수로서 지하수에 대한 관심이 커진 가운데, 주변에서 가장 손쉽게 이용할 수 있는 지하수가 바로 민방위비상급수시설이다. 민방위비상급수시설이란 원래 전쟁, 풍수해, 수원지 파괴 등으로 상수도 공급이 중단될 시 최소한의 음용수 및 생활용수를 안정적으로 공급하기 위해서 관리하고 있는 지하수 시설이다⁵⁾. 현재 부산 지역에는 음용 목적의 민방위비상급수시설 502개소가 운용 중에 있으며 위치 분포를 살펴보면 365개소가 주거지역에 위치하고 있어 일반 시민들이 가장 가까워서 무상으

[†]Corresponding author. E-mail : kmink@korea.kr
Tel : +82-51-757-7504, Fax : +82-51-759-2964

로 제공받을 수 있는 지하수라고 할 수 있다. 최근 웰빙 열풍으로 깨끗하면서 시원한 자연의 물을 마시려는 인구가 증가하였고, 고지대 일부지역 민방위비상급수는 약수 등으로 인식되어 더욱 이용자가 늘고 있는 것으로 판단된다. 따라서 지역 지하수 수질 특성을 제대로 이해하고 양질의 지하수 수질 보존을 위한 노력이 필요하다.

지하수법 제 2조에 따르면 지하수란 “지하의 지층이나 암석 사이의 빈틈을 채우고 있거나 흐르는 물”로 정의되어 있다. 대부분의 지하수는 강수 기원이며, 강수에 의해 지표에 떨어진 물의 일부가 토양층을 침투하여 중력에 의해 지하로 이동하면서 지질매체 내의 공극을 채워 형성된다. 이렇게 생성된 지하수는 중력에 의해 위치에너지가 높은 지역에서 낮은 지역으로 암석의 공극이나 균열을 따라 이동한다²⁾. 지질을 매체로 하는 지하수는 주변의 지질 환경의 특성과 관련이 있으며, 따라서 지하수의 수질 특성은 지표 지질, 층적층의 물리화학적 특성, 지하수의 순환 형태와 같은 수문/수리 환경, 토지 이용 현황, 연안지역에서의 해수침투 등 복합적인 요인들에 영향을 받게 된다⁶⁾. 광역적이면서 특히 지하수 부존의 배경 특성이 다양한 경우에는 변수 대 변수의 분석에 기초한 경향성(상관성)만을 가지고 지하수 수질의 공간적·시간적 변화 경향을 파악한다는 것은 지극히 어려운 일이다⁶⁾. 다변량 통계분석(Multivariate statistical analysis)과 지구통계기법(geostatistical methods)은 지하수의 화학 성분 자료를 이용하여 반응 과정과 오염의 영향을 정량적으로 해석하는 방법으로 이에 대한 연구들이 최근 들어 활발하게 이루어지고 있다⁷⁾. 지구통계 기법은 공간적 또는 시간적으로 분포하는 물리화학적 현상이나 자료의 분석에 적용할 수 있는 통계의 한 분야이다. 이는 시·공간적 자료를 수집하여 이들의 분포 특성과 상관관계를 분석하여 신뢰할만한 결론을 이끌어내는 방법으로 지하수 수위 분포 및 지층의 불균질 특성 분포, 환경 시료 표본으로부터 오염물의 전파 및 이동의 분포 등이 그 적용 사례이다⁷⁾. 또한 수질·지화학 정보를 주 성분 분석 등을 이용하여 지하수 수질의 공간적 분포와 시간적 변화 특징을 연구하는 방법인 다변량 통계분석(Multivariate statistical analysis)기법 또한 국내외적으로 활발히 이용되고 있다.

본 연구에서는 부산지역 시민들이 손쉽게 응용할 수 있는 지하수인 민방위비상급수를 대상으로 T-검정(T-test), 카이제곱검정(Chi-Square Test), 분산분석(ANOVA test; Analysis of variance), 요인분석(Factor analysis), 군집분석(Cluster analysis) 등 통계 기법(Statistical analysis)을 이용하여 지하수 수질에 미치는 변수들 사이의 상관성을 종합적으로 분석하여 부산 지역 민방위비상급수의 수질 특성을 유기적으로 이해하는 것이 목적이다. 또한, 지하수 수질 이해와 관리에 관한 기초 자료를 제공하여 시설 관리에 도움을 주고자 한다.

자연 환경

지형과 지질

부산의 산계는 북쪽의 용천산, 백운산, 철마산들과 금정산이 수영강 유역을 형성하고 있으며, 백양산, 구덕산, 승학산으로 연결된 산계는 북동-남서방향의 단층운동에 의해 포항 부근에서 분기하여 부산지방에 와서 고도를 낮추면서 대한해협으로 들어가는 지형으로 낙동강 유역을 형성하고 있다. 서쪽은 봉화산을 경계로 낙동강과 서낙동강 주변에 넓게 김해평야가 자리 잡고 있으며, 동남쪽은 엄광산, 황령산, 일광산, 월음산 등이 발달 분포하여 좌광천 유역, 일광천 유역, 송정천 유역등을 형성하고 있다²⁾.

또한, 부산 지역은 지리적으로 해양과 접하고 있으며 지질학적으로도 해양까지 연장되는 양산, 동래 및 일광단층 등 북북동-남남서 방향의 단층대가 잘 발달하고 있어 내륙 깊은 곳까지 해수 유입의 개연성이 높은 지역이다³⁾.

부산 지역의 지질은 양산단층대를 경계로 하여 동측에 경상분지를 구성하는 백악기 퇴적암류와 경상분지의 남동부지역에 분포한 하부의 중성화산암류와 상부의 산성화산암류가 분포하고 있다. 양산 단층대 이동지역에는 퇴적 분지의 발달이 있어 퇴적암류들과 화산암류들의 분포를 보여 준다²⁾.

Fig. 1은 한국자원지질연구원의 지질정보시스템에서 제공하고 있는 5만지질도이다⁹⁾. 그림에서 노란색은 층적층을 나타내고 있으며, 보라색은 안산암질, 분홍색의 khgr은 각섬석 화강암, kbgr은 흑운모 화강암, 살구색의 krh는 유문암질, krt는 유문암질 응회암, 연두색은 다대포층을 나타낸다. 기장군 일대에는 유문암 및 유문암질 응회암이 분포하고 있고, 민락동 해안을 따라 소규모로 분포하기도 한다. 세일 및 사암으로 구성된 다대포층은 부산 동남해안의 일광면 일대와 사하구, 영도구 일대에 부분적으로 분포하고 있다. 관입암류로는 각섬석화강암이 동래구와 금정구 일원에 비교적 넓게 분포하며, 흑운모 화강암이 해안가 지역으로 도처에 소규모 발달 분포한다. 제4기 층적층이 상기 지층들을 부정합적으로 피복하며 평야지대를 이루고 있다²⁾.

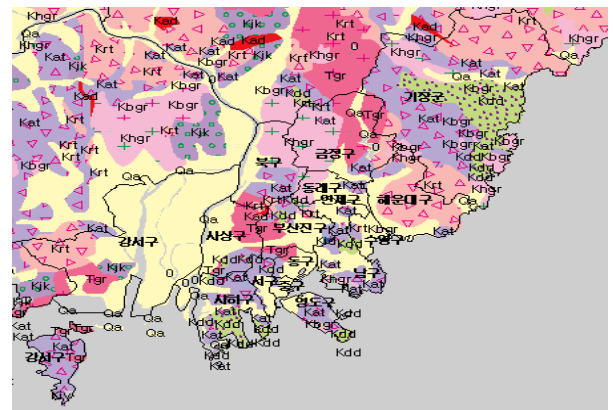


Fig. 1. Geological map in Busan area.

강수량과 토양

부산지방기상청 관측 자료¹⁰⁾에 따르면 2004년부터 2009년까지 월 강수량은 Fig. 2와 같으며, 6월~9월까지 집중적으로 강우가 내리고 있음을 알 수 있었다. 강수는 대기와 지표, 지층에 존재하는 물질들과 물리화학적으로 반응하면서 암반이 위치해 지하수까지 이어주는 매체의 역할과 함께 지하수 수량을 증가시키는 작용도 하기 때문에 지하수 특성과 관련이 있게 된다.

부산 지역의 토양은 대체적으로 배수가 양호한 토양군을 전체적으로 분포하고 있으며, 낙동강과 서낙동강 유역에는 배수가 대체로 불량한 토양군, 수영강과 좌공천 유역에는 배수가 대체로 양호한 토양군이 분포되어 있으며, 배수가 대단히 불량한 토양은 부산 전역에 걸쳐 소규모로 분포하고 있다²⁾.

재료 및 방법

연구 대상

부산광역시의 민방위업무 추진계획에 따르면, 민방위비상급수의 수질 관리를 위하여 용도별로 수질 검사를 하도록 규정되어 있다. 부산 지역에서는 본원과 상수도사업본부 수질연구소에서 분석을 담당하고 있으며, 이들 결과를 본 연구의 연구 대상으로 하였다. 부산지역 민방위비상급수 중 먹는물 용도로 운영되고 있는 시설은 502개소이며 여기서 2004년부터 2009년에 걸쳐 결측치가 존재하지 않는 377개 지점을 본 연구의 대상 지점으로 하였다. 검사 주기 및 항목은 분기 1회 일반세균, 총대장균군, 분원성대장균군, 암모니아성질소, 질산성질소, 과망간산칼륨소비량, 증발잔류물을 조사하였으며, 매년 소독부산물을 제외한 46개 항목을 분석하였다. 분석방법은 먹는물공정시험기준을 따랐으며, Fig. 3에 시료 채취 지점을 나타내었다. Fig. 3에서 파란색은 주거지역에, 분홍색은 상업지역, 검정색은 공업지역, 녹색은 공업지역에 위치한 시설이다.

연구 방법

부산지역 지하수 수질의 특성을 이해하고자 2004년부터 2009년까지 민방위비상급수 377개 지점에 대한 수질 분석 결과를 이용하였다. 또한, 각 지점별 지질, 토지 이용계획에 따른 용도 지역, 심도와 월 강수량을 파악하였다. 지질은 한국지질자원연구소 홈페이지⁹⁾에 나타난 5만 지질도를 이용하여 파악하였으며, 용도지역은 부산광역시에서 구축한 도시정보시스템을 이용하였다. 시설별 심도는 관할 구청의 민방위비상급수시설 관리대장을 이용하였으며, 월 강수량은 기상청 홈페이지¹⁰⁾를 이용하였다. 각 지점에 대한 지리 정보를 수집한 후, 이러한 지하수의 지화학적 정보에 대하여 T-검정, 카이제곱검정, 분산분석을 하였고 이를 통하여 지하수의 지화학적 요인들이 수질에 영향을 미치는지 살펴보았다. 또한, 다변량 통계분석인 요인분석을 통하여 많은 변수를 몇 가지의 공통적인 성분인 인자(factor)들로 묶어서 변수들의 성질을 간결한 형태로 기술하고자 하였다. 요인분석에서 산출된 요인특점으로 군집분석을 하여 377개 지점들을 몇 가지로 유형화하였다. 본 연구에서 사용된 여러 통계 기법들은 통계 프로그램인 SPSS 12.0K를 이용하였다.

T-검정(T-test)과 카이제곱검정(Chi-square test)

T-검정이란 두 모집단의 평균의 차이 유무를 판단하는 통계적 검정 방법으로 “두 모집단의 평균 간의 차이는 없다”라는 귀무가설과 “두 모집단의 평균 간에 차이가 있다”라는 대립 가설 중에 하나를 선택하는 통계적 검정 방법이다. 카이제곱검정은 두 범주형 변수가 서로 상관이 있는지 독립이지를 판단하는 통계적 검정방법이다. 즉, 두 변수가 독립이 아니라면, 두 집단 간에 차이가 있다고 말할 수 있다¹¹⁾. 본 연구에서는 T-검정과 카이제곱검정을 통하여 건기 및 우기에 따라 심부 및 천부 지하수에 따라 지하수 수질에 차이가 있는 지를 살펴보았다.

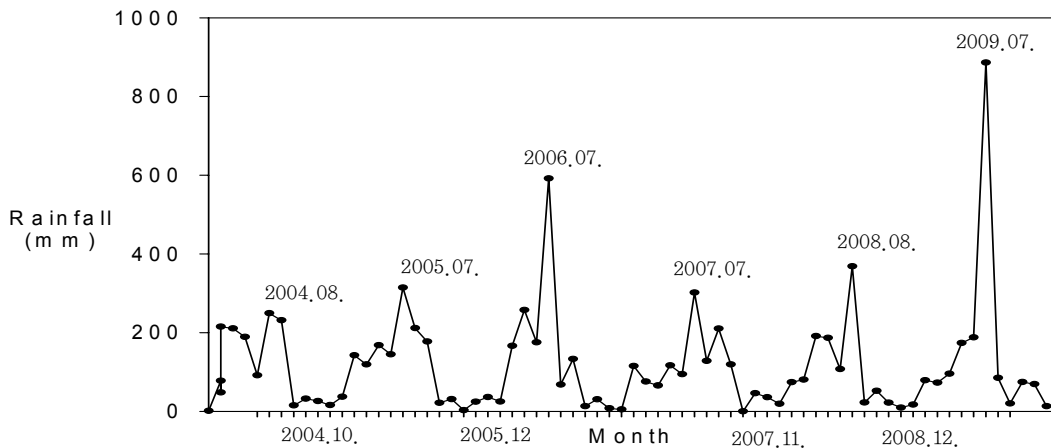


Fig. 2. Variation of the monthly rainfall in Busan.

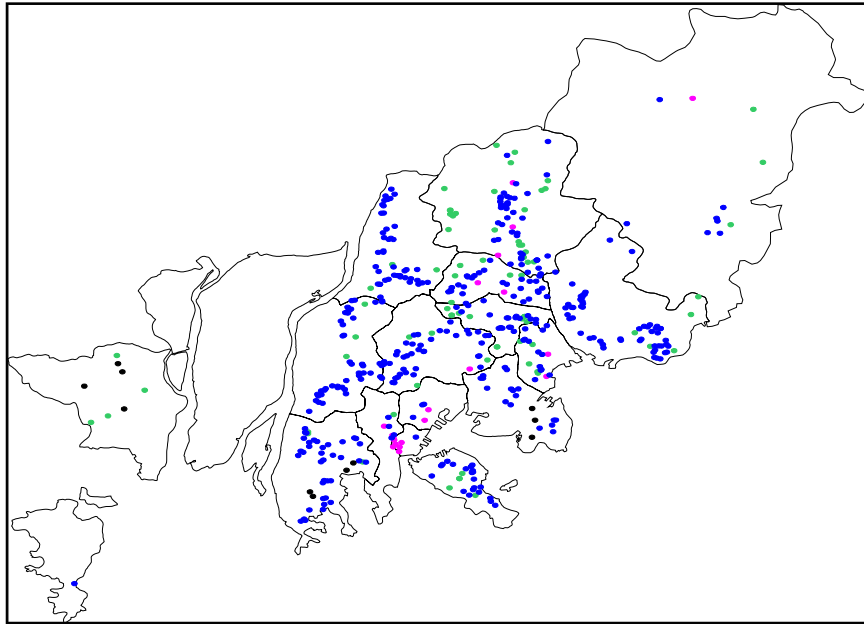


Fig. 3. Distribution of Minbangwii-emergency water supply in Busan.

분산분석(Analysis of Variance: ANOVA)

두 집단에서 나온 자료가 동일한 분포를 갖는가를 검정하는 T-검정을 확장하여, k개의 표본들이 같은 분포를 갖는가를 검정하는 것을 분산분석이라고 할 수 있다. 분산분석은 독립변수를 몇 개의 수준 또는 범주로 나누고 각 수준에 따라 나누어진 집단 간의 평균차를 검정하는 것이다. 즉, 독립변수의 수준에 따라 나누어진 각 집단의 평균 간의 차이가 통계적으로 유의한지를 검정하는 것이다¹¹⁾. 본 연구에서는 지하수 수질에 영향을 미치는 요소들 중에서 용도지역과 지질을 독립변수로 하여 독립변수에 따라 나누어진 각 지하수 수질 집단의 평균 차이가 있는지를 살펴보았다.

주성분 분석(Principal Component Analysis)

주성분 분석(PCA)은 지하수의 화학 조성을 평가하는데 있어 널리 사용되어 왔다. 주성분 분석은 자료의 요약이나 선형 관계식을 통하여 차수(dimension)를 감소시켜 해석을 용이하게 하는데 그 목적을 가지고 있다. 주성분 분석은 여러 개의 양적 변수들 사이의 분산-공분산 관계를 이용하여 이 변수들의 선형 결합으로 표시되는 주성분을 찾고 이 중에서 전체 분산을 설명하는데 중요한 m개(보통 2~3개)의 주성분으로 전체 변동(variance)의 대부분을 설명하고자 하는 다변량 통계분석법이다¹²⁾. 본 연구에서 주성분 분석은 수소이온농도(pH), 질산성질소($\text{NO}_3\text{-N}$), 염소이온(Cl^-), 불소이온(F^-), 황산이온(SO_4^{2-}), 철(Fe), 탁도, 경도, 증발잔류물이 변수로서 사용되었다. 본 연구에서 주성분 분석은 요인 분석을 위하여 사용하였다.

요인분석(Factor Analysis)

요인분석은 많은 변수의 상호관련성을 소수의 기본적인 요인(factor)으로 집약하는 방법의 하나로 전체 변수에 공통적인 요인이 있다고 가정하고 이 요인을 찾아내어 각 변수가 어느 정도 영향을 받고 있는지 그 정도를 산출하기도 하고 그 집단의 특성이 무엇인가를 기술하려는 통계 분석방법이다. 요인 분석의 결과인 요인적재값(factor loading)의 추적으로 많은 수의 변수들 속에 숨어 있는 일련의 요인들을 찾아낸다. 요인적재값으로부터 고유값(eigenvalue)을 나타낼 수 있으며, 이는 변수 속에 담겨진 정보가 어떤 요인에 의하여 어느 정도 표현될 수 있는가를 말해주는 비율이다¹²⁾. 본 연구에서는 인자 분석 시 주성분 분석방법을 이용하였으며, 인자추출에서 고유값 1.0 보다 큰 인자만을 선택하였고 Varimax방식으로 회전시켰다.

군집분석(Cluster Analysis)

군집분석이란 많은 객체들을 일정한 속성에 따라 몇 개의 군집(cluster)으로 분류하여, 같은 군집에 속한 객체들의 유사성과 서로 다른 군집에 속한 객체간의 상이성을 규명하고자 하는 통계분석법이다. 본 연구에서는 비계층적 군집화 방법에서 K-평균 군집분석법을 이용하였으며, K-평균 군집분석법은 군집화의 각 단계가 끝나면서 발생하는 오류를 계산하여 오류가 발생하지 않는 방향으로 군집화를 계속해 나가는 특징을 가진다.

결과 및 고찰

지하수 수질 항목 특성

먼저, 지하수 수질 항목들 간의 상호변화 관계를 알아보기 위하여 상관분석을 실시하였다. 일반적으로 유수분야에 대해서는 상관관계가 극이 낮은 경향을 보이고 있으며¹⁾, 본 연구 자료의 상관관계 역시 매우 높은 상관을 보여주지는 못하고 있었다. Table 1은 수질 항목간 상관관계를 나타낸 표이다. 통계상으로 유의하다고 보여주는 관계를 살펴보면, 가장 높은 상관관계를 보이는 항목은 철과 탁도($r=0.892$)로 나타났으며, 다음으로 높은 상관관계를 나타내는 항목은 경도와 증발잔류물($r=0.806$)로 분석되었다. 경도, 증발잔류물, 음이온인 염소이온과 황산이온 항목은 상관성이 비교적 높게 나타났다. 지하수 중 통상 탁도는 없으나, 철분 등이 많은 경우 양수 후 산화되어 탁도를 유발하는 것으로 보고되고 있다²⁾. 증발잔류물은 시료 중에 용해되어 있거나 현탁되어 있는 물질의 총 합을 의미하며, 탄산염, 중탄산염, 칼슘, 마그네슘, 나트륨, 칼륨, 황산염, 염화물 등이 증발잔류물을 형성한다. 또한 경도는 수중에 함유된 칼슘과 마그네슘의 농도를 탄산칼슘의 농도(mg/L)로 나타내고 있어⁴⁾, 증발잔류물과 경도, 염을 형성하는 음이온들 간에는 비교

적 높은 상관성이 나타나게 된다.

다음으로 연도별 지하수 수질 특성 변화를 알아보고자 연도별로 수질 변화 추이를 살펴보았다. Fig. 4는 각 항목에 대하여 연도별 평균을 나타낸 그래프이다. 경도, 증발잔류물, 황산이온, 염소이온, 불소, 질산성질소는 연도별로 큰 차이를 나타내지 않았다. Fig. 4에서 최소값과 최대값의 차이는 경도는 16 mg/L, 증발잔류물은 12 mg/L, 황산이온 7 mg/L, 염소이온 8 mg/L, 질산성질소 0.8 mg/L를 나타내었다. 아연은 0.104 mg/L, 보론은 0.012 mg/L, 구리는 0.021 mg/L, 철은 0.127 mg/L, 망간은 0.027 mg/L로 나타났다.

Fig. 4에서 총대장균군과 분원성대장균군의 검출률을 살펴보면, 총대장균군은 10 ~ 32%, 분원성대장균군은 1.2 ~ 9.9%의 검출률을 나타내었다. 연도별로 살펴보면, 2006년도와 2009년도에 총대장균군의 검출률이 높아진 경향을 나타내고 있다. 일반적으로 강수에 의한 전수 유입이 일시적으로 미생물을 증가시키는 경향이 있다고 알려져 있다. 따라서 2006년도와 2009년도 강우량이 다소 높아진 점을 감안하여 강수에 의해 2006년도와 2009년도에 총대장균군의 검출률이 다소 증가하였다고 판단된다.

Table 1. Correlation matrix of ground water in Busan

Variable	NO ₃ -N	Hardness	Cl ⁻	Total Solids	SO ₄ ²⁻	F ⁻	B	Cu	Zn	Fe	Mn	Turbidity	pH
NO ₃ -N	1.000												
Hardness	0.314 **	1.000											
Cl ⁻	0.287 **	<u>0.616</u> **	1.000										
Total Solids	0.307 **	<u>0.806</u> **	<u>0.708</u> **	1.000									
SO ₄ ²⁻	0.052 *	<u>0.615</u> **	<u>0.449</u> **	<u>0.625</u> **	1.000								
F ⁻	-0.126 **	0.030	0.024	0.026	0.137 *	1.000							
B	-0.052 *	0.131	0.163	0.151	0.263 **	0.196 **	1.000						
Cu	0.036	0.064 **	0.098	0.077	0.028	-0.066 **	-0.031	1.000					
Zn	0.089 **	0.034	0.034	0.020	-0.008	-0.031	-0.017	0.115 **	1.000				
Fe	-0.002	0.077 **	0.079 **	0.063 **	0.052 *	0.001	0.030	0.106 **	0.039	1.000			
Mn	-0.065 **	0.083 **	0.054 **	0.058 **	0.081 **	0.032	-0.001	-0.013	0.000	0.047 *	1.000		
Turbidity	-0.027	0.007	0.036	0.006	0.025	-0.015	-0.017	0.081 **	0.030	<u>0.892</u> **	0.033	1.000	
pH	-0.122 **	0.024	-0.048	-0.043	0.020	0.127 **	0.094 **	-0.059 **	-0.033	-0.005	-0.005	-0.019	1.000

** Correlation is significant at the 0.01 level, * Correlation is significant at the 0.05 level

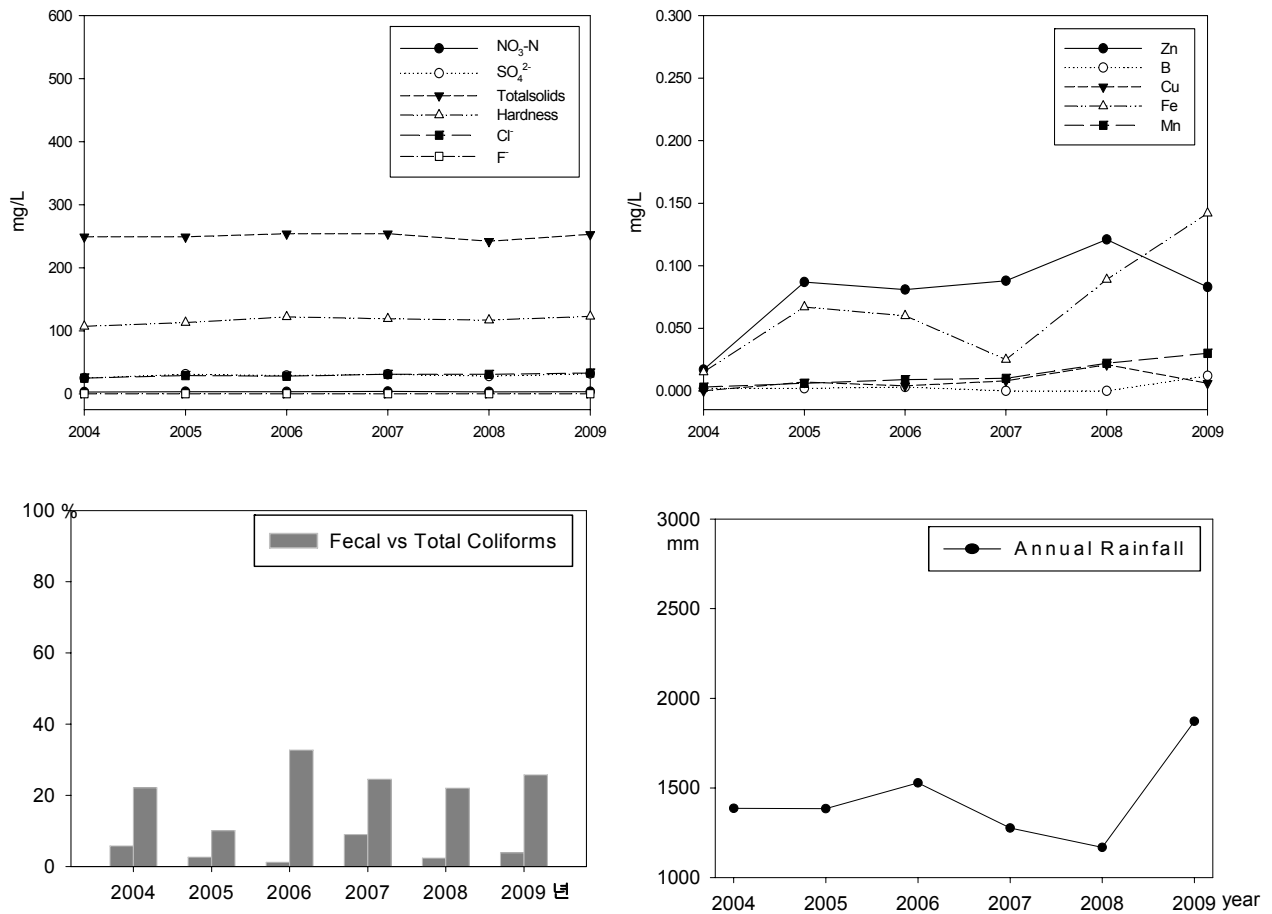


Fig. 4. Annual variation of ground water quality.

건기 및 우기에 따른 지하수 수질 변화 특성

건기 또는 우기에 따라 지하수의 수질 특성 변화를 나타내는 지 여부를 살펴보기 위하여 독립표본 T-검정과 교차분석을 실시하였다. 분석 방법은 월 강수량이 50 mm 이하일 때를 건기, 150 mm 이상일 때를 우기로 설정한 후, 두 차례에 걸쳐 동일 지점에서 채취한 시료의 주성분 원소에 대하여 독립표본 T-검정(Independent-sample T-test)을 실시하였다. 또한 총대장균군과 분원성대장균군에 대하여서는 카이제곱검정을 실시하였다. 사용한 귀무가설은 '건기 및 우기에 따른 시료 집단의 수질 항목 결과는 통계적으로 어떠한 변화 양상을 보이지 않고 모두 동일하다' 이다.

먼저 총대장균군과 분원성대장균군의 카이제곱 검정 결과, 유의확률 모두 0.000으로 신뢰수준 99.5% 하에서 유의수준 0.05보다 작기 때문에 귀무가설이 기각되어 '총대장균군과 분원성대장균군은 건기와 우기에 따라 차이가 있다' 는 결론을 얻었다. 건기 및 우기의 총대장균군과 분원성대장균군의 결과는 Fig. 5와 같으며, 건기 시 총대장균군의 검출률 평균은 22%, 우기시에는 29%로 나타났으며, 분원성대장균군은 건기시 2%,

우기시에는 5%로 나타나 우기에 총대장균군과 분원성대장균군의 검출률이 상승하는 것으로 나타났다. 독립표본 T-검정을 한 결과, 일반세균은 건기일 때 평균 69 CFU/mL, 우기일 때 평균 186 CFU/mL 로 나타나 우기일 때 일반세균의 집락수가 높은 것으로 나타났다. 이러한 차이는 통계적으로 유의하였다($t=-5.742, p<.000$). 또한 수소이온농도는 건기일 때 평균 7.3, 우기일 때 7.0으로 나타났으며, 수소이온농도의 차이 역시 통계적으로 유의하였다($t=8.639, p<.000$). 그 외 나머지 항목에 대하여서는 차이를 나타내지 않았다.

총대장균군과 분원성대장균군, 일반세균의 경우에는 강수 오염원에 의해 미생물이 일시적으로 증가한다고 알려져 있으며, 본 연구 결과에서도 비슷한 추이를 확인할 수 있었다. 지하수의 경우, 오염지시원소인 NO_3-N, Cl^-, SO_4^{2-} 와 같은 항목은 강수에 의한 차이를 나타내지 않는 것으로 알려져 있으며¹⁵⁾, 본 연구에서도 NO_3-N, Cl^-, SO_4^{2-} 와 같은 항목은 강수에 의한 차이를 나타내지는 않고 있었다. 그러나 강수에 의한 오염물질 농도 변화를 좀 더 정확히 이해하기 위해서는 채수 일자를 파악하여 강수 유입 시간을 고려한 분석이 필요할 것으로 판단된다.

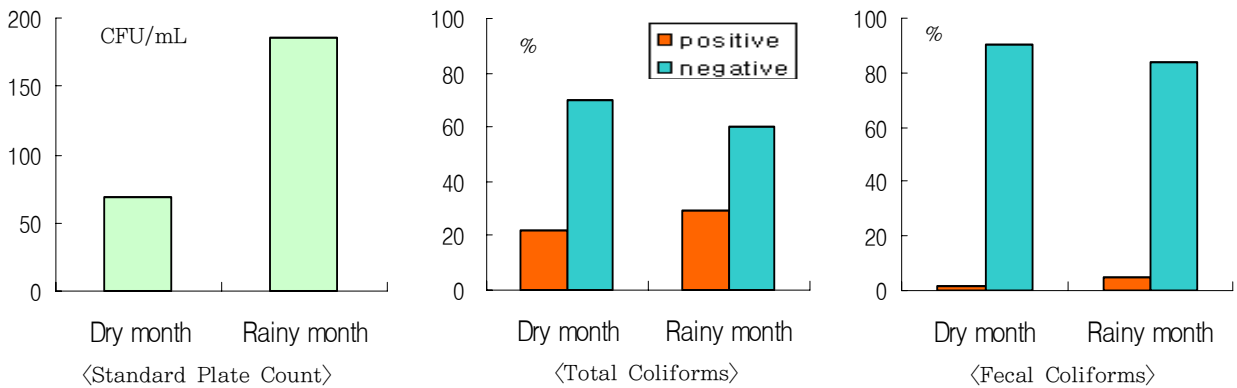


Fig. 5. Average standard colony count and detection rate of total coliforms and fecal coliforms in the dry and rainy month.

위치에 따른 지하수 수질 변화 특성

토지 이용도가 지하수 수질에 영향을 미치는지 살펴보기 위하여 용도 지역 별로 지하수 수질 항목에 차이를 나타내는지 분석해 보았다. 토지이용계획상 용도지역은 주거지역, 상업지역, 공업지역, 녹지지역으로 나누어져 있다. 용도지역은 토지 이용 정도와 관계가 있으며 도시화에 따른 토지이용의 변화는 기존 지하수의 충전 기작과 함께 지하수의 수질에도 영향을 미친다. 지하수의 오염은 지표 오염원이 지하로 이동하여 일어나기 때문에, 지하수 오염 연구에 있어서 잠재 오염원의 파악, 즉 토지 이용의 구분은 중요하다. 물론 지하 지질의 물리화학적, 미생물학적 등 여러 요인에 의해서 지하수의 오염은 영향을 받지만, 가장 중요한 요인은 지표 오염원의 종류, 농도, 크기 등일 것이다.

2004년~2009년까지 부산 지역 민방위비상급수 수질 검사 결과에 대하여 일원배치 분산분석(ANOVA)을 수행하였다. 귀무가설은 ‘용도지역별 시료 집단은 통계적으로 어떠한 변화양상을 보이지 않고 모두 동일하다’ 이다. 이러한 가설을 바탕으로 분산분석을 실시하였으며, 그 결과는 Table 2와 같다. 결과를 살펴보면, pH, NO₃-N, 경도, Cl⁻, SO₄²⁻, 증발잔류물, 보론에 관하여 유의확률 0.000으로 신뢰수준 95%에서 유의수준 0.005 보다 작아 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 조사되었다. 용도지역별 수질에 대한 상자 도표를 Fig. 6에 나타내었다. 용도지역별 지하수 수질의 평균을 살펴보면, 상업지역은 증발잔류물 337 mg/L, 경도 155 mg/L, 황산이온 33 mg/L, 염소이온 56mg/L, 질산성질소 4.0 mg/L로 나타났으며, 반면 녹지지역은 증발잔류물 200 mg/L, 경도 88 mg/L, 황산이온 22 mg/L, 염 소이온 18 mg/L, 질산성질소 2.3 mg/L로 나타났다. 이는 토지이용도가 높은 상업지역에서 증발잔류물, 경도, 황산이온, 염소이온, 질산성질소 함량이 다른 지역보다 더 높게 존재하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 반면 F⁻, Fe, Mn과 같이 지질의 영향을 받는 수질 항목의 경우에는 용도 지역별로 차이가 없음을 확인할 수 있었다.

다음은 수문지질단위별로 지하수 수질 항목에 차이를 나타내는지 알아보려고 하였다. 지하수 특성을 고려하여 지질을 세분

하는 단위를 수문지질단위(hydrogeologic unit)라 하는 데 “지하수관리 기본계획(2002, 건설교통부)”에서는 총적층층을 포함하여 국내의 지층을 8개의 수문 지질단위로 구분한 바 있으며, 이 분류 기준에 의해 부산시에는 Table 3과 같이 미고결 퇴적물, 관입화성암, 화산암류 및 쇄설성 퇴적암의 4가지 수문 지질단위가 분포하고 있다²⁾.

수문지질단위별로 지하수 수질에 차이를 나타내는지 알아보기 위하여 부산지역 민방위비상급수 2004년~2009년 수질 분석 결과를 대상으로 일원배치 분산분석을 수행하였다. 귀무가설은 ‘수문지질단위별 시료 집단은 통계적으로 어떠한 변화양상을 보이지 않고 모두 동일하다’이며, 결과는 Table 4와 같이 pH, NO₃-N, 경도, Cl⁻, SO₄²⁻, 증발잔류물, 보론에 관하여 유의한 것으로 나타났다. Fig. 7은 수문지질단위별 지하수 수질을 상자도표로 나타낸 그림이며, A는 미고결퇴적암, B는 관입화성암, C는 비다공질 화산암, D는 쇄설성 퇴적암을 나타낸다. 수문지질단위별 수질 항목 평균값을 살펴보면 쇄설성 퇴적암은 증발잔류물 295 mg/L, 경도 153 mg/L, 황산이온 43 mg/L, 염소이온 36 mg/L를 나타내어 다른 지역보다 다소 높은 수준을 나타내고 있다. 일반적으로 지하수는 암석 내의 공극을 통하여 이동하는 동안 암석과 장기간 접촉하게 되므로 지하수의 특성은 암석을 구성하는 성분들과 밀접하게 연관되어 있다. 퇴적암 중 세일에는 알루미늄, 칼슘, 나트륨 등의 무기질이 많이 함유되어 있으며, 양이온이나 음이온은 퇴적암에서 쉽게 용해되는 성분이 많다⁶⁾. 화강암과 유문암은 용존 성분농도가 사암이나 실트암, 점토암보다 낮은 것으로 알려져 있으며, 이와 마찬가지로 Fig. 7을 살펴보면, B와 C에서는 다소 낮은 수준을 A와 D에서는 다소 높은 수준을 나타내고 있는 것으로 나타났다. 불소의 경우, 관입 화성암 지질에서 평균값이 0.17 mg/L로 나타났으며, 미고결 퇴적물은 0.10 mg/L, 비다공질 화산암은 0.05 mg/L, 쇄설성 퇴적암은 0.03 mg/L로 나타나 화성암 지질에서 불소의 농도가 높게 나타나는 것으로 나타났다. 이는 불소 농도가 변성암>화성암>complex rock>>화산암>퇴적암 순으로 나타난다는 연구와 일치하는 것으로 나타났다¹⁷⁾.

Table 2. ANOVA results for major contents by land use type in Busan

	pH	F ⁻	NO ³ -N	Hardness	Cl ⁻	Total Solids	SO ₄ ²⁻	B	Fe	Mn	Cu
F	17.202	3.761	24.102	41.437	69.735	44.110	14.565	6.913	0.963	0.447	5.112
F probability	0.000	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.409	0.719	0.002

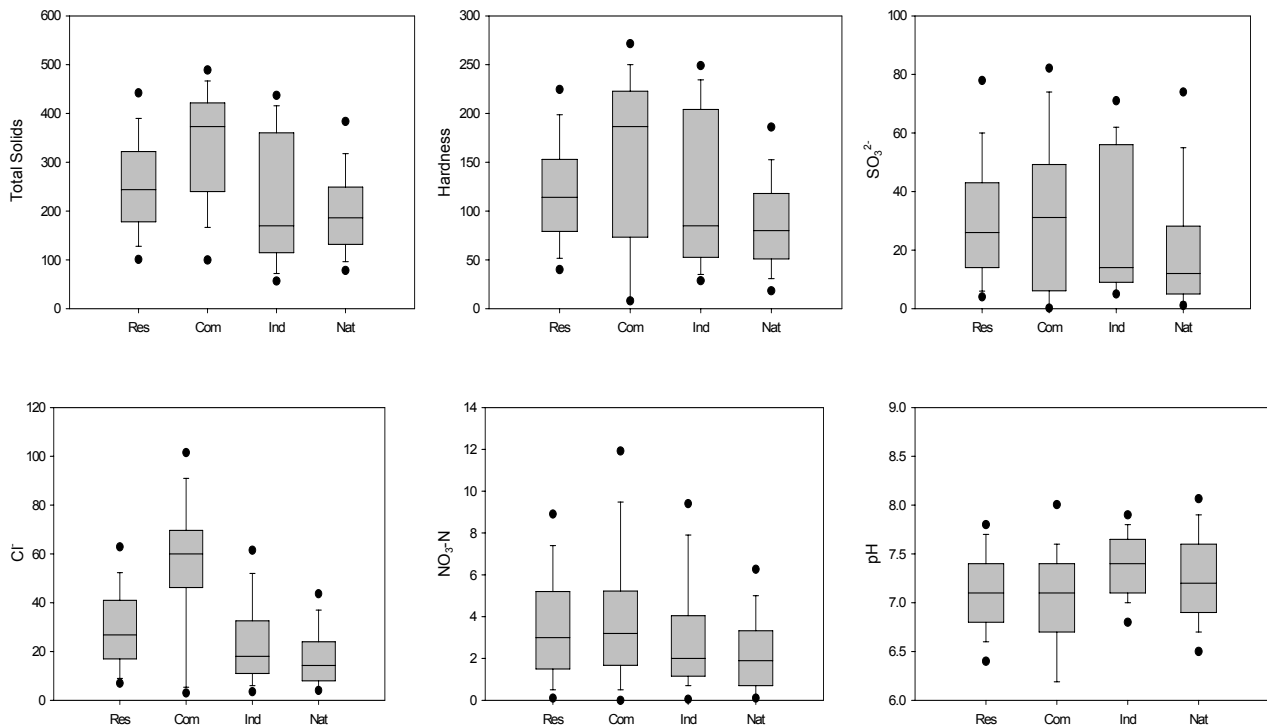


Fig. 6. Box plots of major contents by land use type in Busan.

Table 3. Hydrogeologic unit and rock floor in Busan area

Hydrogeologic unit	Rock floor	Area(km ²)
Alluvium	Cray, Silt, Sand Gravel	334
Intruded granite	Intermediated bides / Granite porphyry Adamellite / Biotite granite / Granodiorite porphyry/	119
Nonporous volcanic rock	Breccia tuff / Rhyolitic tuff / Andestic tuff / Rhyolitic rock / Andecites /	280
Clastic sediment	Shale	29

Table 4. ANOVA results for major contents by hydrogeology unit in Busan

	pH	F ⁻	NO ³ -N	Hardness	Cl ⁻	Total Solids	SO ₄ ²⁻	B	Fe	Mn	Cu
F	15.006	29.961	7.605	59.315	40.696	55.577	22.189	19.018	2.846	1.387	5.734
F probability	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.036	0.245	0.001

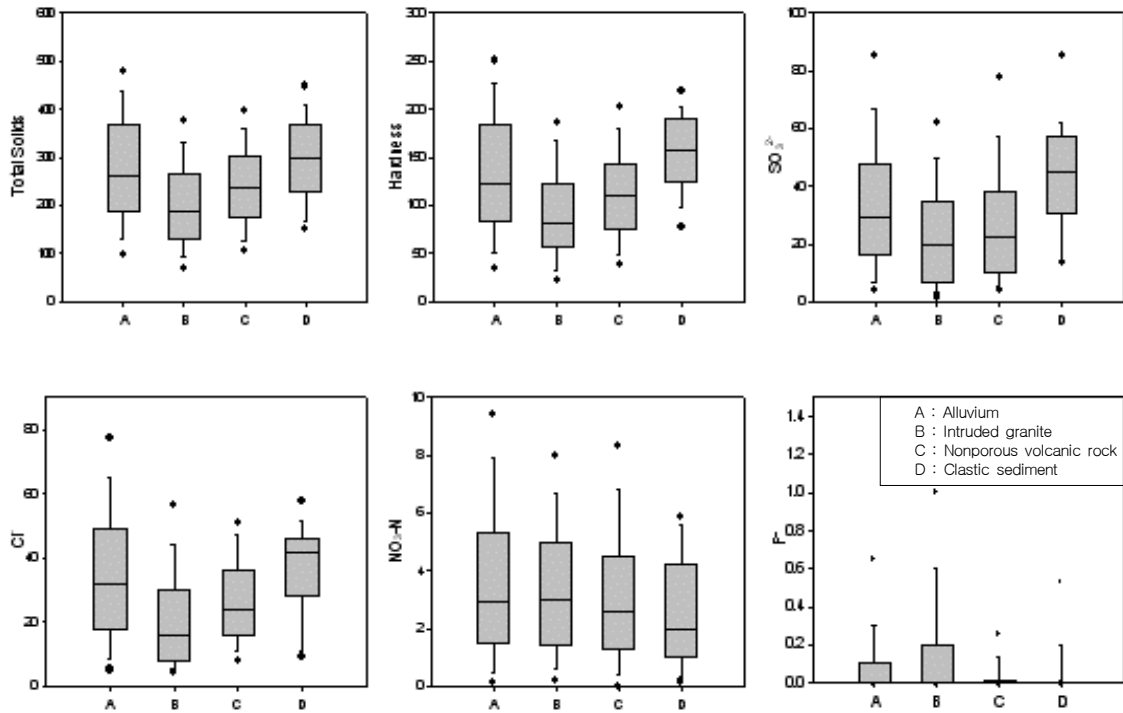


Fig. 7. Box plots of major contents by hydrogeology unit in Busan.

심도에 따른 지하수 수질 변화 특성

본 연구의 대상 시설수의 지하수 심도 분포는 Fig. 8과 같으며 민방위비상급수의 지하수 심도는 대체로 50 ~ 200 m 인 것으로 나타났다. 부산지역 개발심도가 대부분 50 m 이하이기 때문에 50 m를 기준으로 심도가 50 m 이하인 지하수를 천부지하수, 그 이상을 심부지하수로 나누고 천부지하수와 심부지하수간에 수질 특성에 차이를 나타내는지 살펴보았다.

천부지하수와 심부지하수에 대한 주성분 함량 특성을 비교하였으며, 천부지하수와 심부지하수의 주성분 함량 차이를 조사하기 위하여 독립표본 T-검정을 실시하였다. 결과는 Table 5와 같이 나타났으며, 증발잔류물, 경도, 염소이온, 황산이온, 질산성질소에 대하여 통계적으로 유의한 차이를 나타냈다. 천부지하수의 수질 항목 평균값은 증발잔류물 316 mg/L, 경도 163 mg/L, 염소이온 42 mg/L, 질산성질소 4.4 mg/L를 나타내었으며, 심부지하수는 증발잔류물 247 mg/L, 경도 116 mg/L, 염소

이온 29 mg/L, 질산성질소 3.3 mg/L를 나타냈다. 따라서 천부지하수의 증발잔류물, 경도, 염소이온, 질산성질소 수준이 심부지하수 보다 다소 높게 나타남을 알 수 있었다. 천부지하수는 주로 충적층에 따라 산출되며, 따라서 지표층과 가까이 있는 천부지하수가 지표 오염원의 영향을 더 많이 받고 있는 것으로 판단되었다.

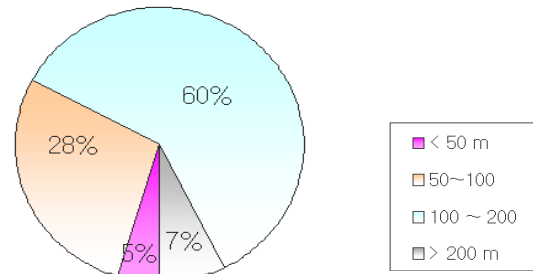


Fig. 8. Distribution of ground water according to depth in Busan.

Table 5. T-Test results for major contents by depth of ground water in Busan

	pH	F ⁻	NO ₃ -N	Hardness	Cl ⁻	Total Solids	SO ₄ ²⁻	B	Fe	Mn	Cu
t	-0.752	-1.543	2.868	7.947	3.928	6.987	1.553	-0.246	-0.453	-0.320	1.787
t probability	0.452	0.123	0.004	0.000	0.000	0.000	0.120	0.806	0.651	0.749	0.074

지하수 수질에 영향을 미치는 요소 선정

지하수의 수질에 영향을 미치는 요소와 기여도를 정량적으로 산정하기 위하여 요인분석 기법을 이용하였다. 요인분석 시 추출하는 요소의 개수가 많을수록 설명력은 높아질 수 있지만, 인자 분석을 하는 기본 목적을 상실하는 단점이 있으므로, 적절한 인자의 수를 결정하는 것은 중요하다. 지하수 수질에 영향을 주는 인자를 분석하기 위하여 2009년 민방위비상급수 수질검사 결과를 대상으로 주성분 분석법을 이용, 고유값(eigenvalue) 1 이상인 값을 기준으로 하여 인자를 추출하였다. 인자 추출 결과는 Table 6과 Fig. 9에 나타내었으며, 주요한 3개의 인자가 추출되었고 누적기여율은 69.0 %로 나타났다. 민방위비상급수의 지하수 수질에 영향을 미치는 인자 중 제일 큰 영향을 주는 제1요인의 고유치는 3.058로서 기여율은 34.0 %를 차지하였으며 여기에 속하는 항목은 증발잔류물, 경도, 황산이온, 염소이온으로 나타났으며, 다음으로 제 2요인은 고유치 1.884로서 기여율은 20.9 %를 차지하였으며 여기에 속하는 항목은 철과 탁도로

나타났다. 다음으로 제 3요인은 고유치 1.270으로 기여율은 14.1 %를 차지하였으며, 여기에 속하는 항목은 불소와 pH로 나타났다. 각 요인에 속하는 항목들은 수질항목들 사이의 상관관계 분석에서도 서로 밀접한 상관성이 있는 것으로 조사되었다. 제 1 요인은 증발잔류물, 경도, 황산이온, 염소이온으로 이들 항목은 앞서 살펴본 결과에 따르면, 지질과 심도, 토지 이용도가 이들 항목과 관련이 있는 것으로 나타나 제 1 요인은 지하수의 무기물질과 오염 정도에 영향을 받는 것으로 판단된다. 다음으로 제 2 요인은 철과 탁도로써 지하수내의 용존 철은 환원상태의 대수층에서 철수산화물 또는 철산화물의 환원 반응이 발생하면서 농도가 증가하기도 한다. 따라서 제 2 요인은 지하수의 산화 환원상태와 관련이 있는 것으로 판단하였다. 제 3 요인은 불소와 pH로서 불소는 앞서 살펴본 결과에서 화강암 지질에서 높게 나타난다는 결과를 토대로 지질과 관련된 항목으로 판단하였다.

Table 6. Initial eigenvalues of factors extracted from factor(Left) and Varimax rotated factor loadings(Right)

Component	Eigenvalue	%Variance	%Cumulative Variance	Variable	factor 1	factor 2	factor 3
1	3.058	33.981	33.981	F	0.122	-0.016	0.691
2	1.884	20.934	54.915	NO ₃ -N	0.357	-0.050	-0.591
3	1.270	14.113	69.028	Hardness	0.896	0.015	-0.043
4	.889	9.876	78.904	pH	0.016	-0.021	0.618
5	.804	8.939	87.842	TotalSolids	0.921	0.008	-0.085
6	.494	5.493	93.336	Fe	0.061	0.970	-0.002
7	.319	3.546	96.882	Turbidity	-0.002	0.973	-0.009
8	.176	1.956	98.839	SO ₄ ²⁻	0.768	0.023	0.226
9	.105	1.161	100.000	Cl ⁻	0.803	0.041	-0.129

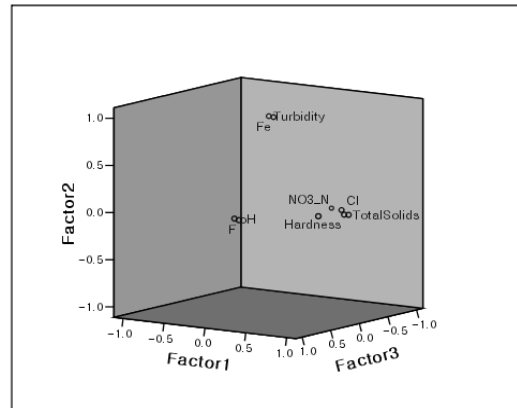
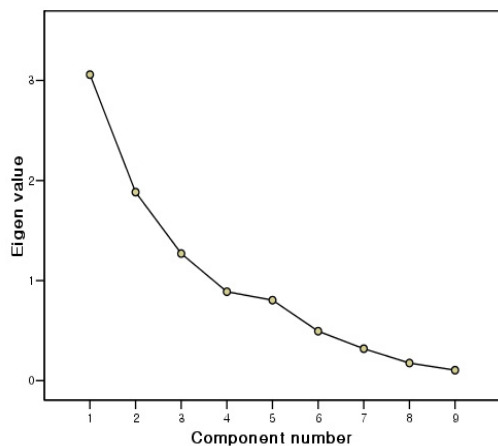


Fig. 9. Scree plot(Left) and Factor loading after varimax rotation for variables(Right).

요인분석 결과를 이용한 군집분석

요인 분석의 결과 추출된 요인의 요인 점수를 이용하여 군집 분석을 실시한 결과 군집의 수는 모두 4개의 군집으로 분류되었다. 군집별 수질 항목 평균은 Table 7과 같으며, 각 군집별 지리적 위치는 Fig. 10에 색깔별로 나타내었다. 먼저 초록색 지점은 168개로 나타났으며, 증발잔류물과 경도, 염소이온, 황산이온, 질산성질소, 불소, 철, 탁도가 낮은 지점으로 수질이 가장 양호한 그룹이었다. 대체적으로 강서구, 북구와 금정구, 해운대, 영도구에 일부 분포하고 있으며, 토지 이용도가 낮은 지역에 주로 위치하고 있다. 다음으로 검정색 지점은 34개로 증발잔류물과 경도, 염소이온, 황산이온, 질산성질소가 낮고 불소가 다소 검출되는 지역으로 주로 화강암 지질에 위치한 시설들이다. 초록색 지점과 주로 인접하게 위치하고 있었으며, 금정구와 부산진구 일부 지역에 분포하고 있다. 파란색 지점은 101개로 나타났으며 증발잔류물과 경도, 염소이온, 황산이온, 질산성질소가 다소 높게 나타나고 있는 지점이다. 마지막으로 분홍색 지점은 74개 지점으로 증발잔류물과 경도 등이 그룹 중 가장 높게 나타나고 있는 그룹으로 토지이용도가 높은 지역에 대체적으로 위치하고 있다.

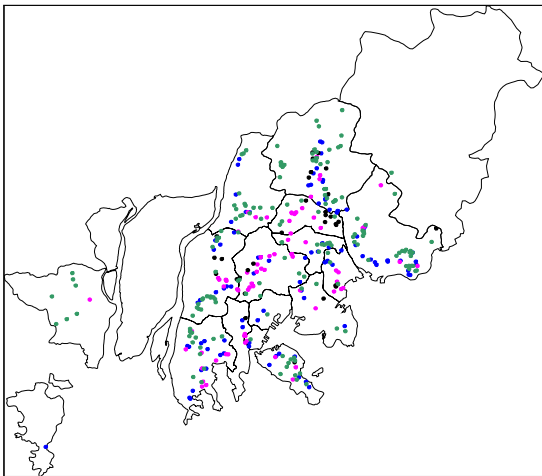


Fig. 10. Distribution of sampling site according to group from cluster analysis.

민방위비상급수의 수질 관리 제언

민방위비상급수시설은 유사시 주민에게 양질의 지하수를 공급하고 주민이 쉽게 활용할 수 있도록 유도하는 것을 그 목적으로 하고 있다. 따라서 지하수 자원 보호를 위한 무분별한 개발을 지양하고 신규시설 설치 시 완벽한 오염 방지시설을 갖추도록 하고 있으며, 매 분기마다 수질 분석을 통하여 오염여부를 판단하여 음용으로 부적합할 시에는 생활용수로 용도변경 내지는 폐공하도록 하고 있다.

먼저 새로운 시설을 지정할 시에는 토지 이용도와 지질, 심도 등을 종합적으로 고려하여 양호한 수질이 나타날 수 있는 지점을 선정하여 개발하여야 하며, 지정된 시설에 대하여서는 규칙적인 수질 분석으로 오염 여부를 모니터링 해야 한다. 2004년부터 2009년까지 주요 항목에 대한 수질 추이를 파악한 결과, 대부분의 지점에서 수질 결과는 안정적인 모습을 보여주고 있었으며, 미생물 항목이 월간수량에 영향을 받고 있는 것으로 나타났다. 따라서 우기 때에는 반드시 끊어 음용하도록 하여야 할 것이다.

평상시 주민에게 개방되는 민방위비상급수는 분기별 수질검사 결과를 구군 홈페이지나 반사회보, 구 홍보지에 홍보하고, 특히 군집분석에서 다른 지점보다 더욱 양호한 수질로 나타난 지점들에 대해서는 좀 더 적극적인 홍보가 필요할 것으로 보인다.

또한, 본 연구에서는 증발잔류물, 경도, 염소이온, 황산이온, 질산성질소, 불소, 철과 같은 지하수 수질 항목과 수질 항목에 영향을 주는 여러 요인들 중 지질, 용도지역, 심도의 관계를 살펴보았다. 따라서 각 지점의 지하수 수질이 어떠한 요인에 영향을 받을 수 있는지 판단해 봄으로써 개별 민방위비상급수 수질 이해에 도움을 줄 것으로 사료된다. 또한 군집분석으로 나타난 결과를 토대로 개별 민방위비상급수가 전체 민방위비상급수 중에서 어느 정도의 수질을 나타내고 있는지를 판단할 수 있을 것으로 보인다.

Table 7. Mean value according to cluster from cluster analysis

(unit : mg/L)

	F ⁻	NO ₃ -N	Cl ⁻	Total Solids	SO ₄ ²⁻	Fe
Green sites	ND	2.4	18	171	18	0.074
Black sites	0.60	1.2	21	228	39	0.085
Blue sites	ND	5.8	39	294	31	0.115
Pink sites	0.19	3.9	63	397	67	0.155

결 론

참 고 문 헌

부산지역 지하수 수질 특성을 이해하기 위하여 민방위비상급수 377개소를 대상으로 T-test, 카이제곱검정, ANOVA, 요인 분석, 군집분석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 2004년부터 2009년까지 민방위비상급수 수질 분석 결과, 증발잔류물, 경도, 황산이온, 염소이온, 질산성질소는 대체적으로 비슷한 수준을 유지하고 있었으며, 총대장균군은 2006년과 2009년도에 다소 검출률이 높았으며, 이는 강우에 의한 영향인 것으로 판단된다.

2. 지하수 수질 항목 간 상관관계를 살펴본 결과, 철과 탁도에서 높은 상관관계가 나타났으며, 다음으로 경도와 증발잔류물이 높은 것으로 나타났다. 증발잔류물과 경도, 염소이온, 황산이온의 상관성은 높은 것으로 나타났으나, 다른 중금속 등의 항목에서는 상관성이 극히 낮게 나타났다.

3. 월 강수량에 따라 지하수 수질에 차이가 있는지를 살펴보기 위하여 T검정과 카이제곱검정을 실시한 결과, 대부분의 이화학 항목에 대해서는 차이를 나타내지 않았고, 미생물 항목에서 우기 때 일반세균수가 증가하고, 총대장균군의 검출률이 상승하는 것을 확인할 수 있었다.

4. 토지 이용도가 높은 상업지역에 위치한 지하수, 미교결 퇴적암, 쇄설성 퇴적암에 위치한 지하수, 심도 50 m 이하의 천부지하수는 증발잔류물, 경도, 황산이온, 염소이온, 질산성 질소가 다소 높게 나타나는 것으로 나타났다. 관입화성암 지질에 위치한 지하수는 불소 수준이 다른 지역보다 높은 수준을 나타냈다.

5. 지하수 수질에 변수로 작용하는 항목들을 묶어보기 위하여 요인 분석을 한 결과 3가지의 주요한 요인을 확인할 수 있었으며, 제 1 요인은 증발잔류물, 경도, 황산이온, 염소이온으로 나타났으며 이는 지하수의 무기물질과 오염도와 관련되고 제 2 요인은 철과 탁도로 지하수의 산화환원 환경과, 제 3 요인은 불소와 수소이온농도로서 지질과 관계된 것으로 판단되었다.

6. 민방위비상급수를 지점별로 그룹화하기 위하여 요인 분석 결과 얻어진 요인 득점으로 군집분석을 실시하여 4개의 그룹으로 나눌 수 있었으며, 그 결과 토지 이용도가 낮은 지역에서는 대체적으로 수질이 양호한 것으로 나타났다.

7. 부산 지역 대부분의 민방위비상급수는 비교적 안정적인 수질을 유지하고 있었으나, 미생물 항목이 강우에 의한 영향을 크게 받고 있는 것으로 나타나, 우기에는 반드시 지하수를 끊어 음용하도록 하여야 하며, 더욱 세심한 지하수 관리를 요한다고 판단하였다.

1. 임중호, 최미영, “안산시 지하수에 대한 특성과 인자분석”, 지리학연구지, 38(3), pp.307~318(2004).
2. 부산광역시, 한국수자원공사, 부산광역시 지하수관리계획보고서(2003).
3. 양수인, 이해운, 박귀남, 배주순, 박송인, 허남철, “약수에 관한 도민 인식 조사”, 대한상하수도학회-한국물환경학회추계학술발표회 논문집(2005).
4. 임현철, “토지이용도별 울산지역 지하수의 수질특성”, 지구물리, 8(3), pp.145~152(2005).
5. 부산광역시, 2009년도 민방위업무 추진계획(2009).
6. 김남진, 윤성택, 김형수, 정경문, 김규범, “지구통계 기법을 활용한 울진 지역 천부 지하수의 수질 및 수리지구화학특성 해석”, 자원환경지질, 34(2), pp.175~192(2001).
7. 고경석, 김용제, 고동찬, 이광식, 이승구, 강철희, 성현정, 박원배, “주성분분석과 지구통계법을 이용한 제주도 지하수의 수리지화학 특성 연구”, 자원환경지질, 38(4), pp.435~450(2005).
8. 오병주, 조병욱, 문상호, 임무택, “부산 동래지역 암반 대수층으로의 해수유입”, 지질학회지, 37(3), pp.407~420(2001).
9. 한국지질지원연구소 홈페이지, <http://geoinfo.kigam.re.kr>
10. 기상청 홈페이지, <http://www.kma.go.kr>
11. 원태연, 정성원, 한글 SPSS 12K 통계조사분석, SPSS 아카데미(2005).
12. 고경석, 이진수, 김용제, “무주~금산지역 균열암반 지하수의 수리지화학 특성 및 다변량 통계 분석”, KIGAM Bulletin, 7(3), pp.28~41(2003).
13. 부산광역시 수질연구소, “상수도 수질용어 해설집”, (2008)
14. 국립환경과학원, “먹는물공정시험방법” (2007).
15. 안홍일, 전효택, “아산지역 및 구로구지역 지하수의 수리지구화학적 특성: 다변량 자료의 통계해석”, 한국자원공학회지, 35, pp.554~567(1998).
16. 박병윤, 천경아, 이동훈, 최충렬, 최정, 김진호, “대구시 지하수의 수질특성”, 한국환경과학회지, 8(6), pp.685~690 (1999).
17. Gi-Tak Chae, Seong-Taek Yun, Bernhard Mayer, Kyoung-Ho Kim, Seong-Yong Kim, Jang-Soon Kwon, Kangjoo Kim, Yong-Kwon Koh, “Fluorine geochemistry in bedrock groundwater of South Korea”, Science of the Total Environment, 385, pp.272~283(2007).