

강변여과수 개발을 위한 낙동강 충적층 지하수의 지구화학적 특성연구

Geochemical Study on the Alluvial Aquifer System of the Nakdong River for the Estimation of River Bank Filtration

김 건 영(Geon-Young Kim)*	한국원자력연구소
고 용 권(Yong Kwon Koh)	한국원자력연구소
김 천 수(Chun Soo Kim)	한국원자력연구소
김 형 수(Hyoung-Su Kim)	한국수자원공사
김 성 이(Sung-Yi Kim)	한국원자력연구소

요약 / ABSTRACT

지하수의 인공함양특성을 해석하기 위한 기초조사로서 낙동강변의 충적층내에 부존하는 자연수의 지구화학적 특성을 연구하였다. 전체적으로 시추공 및 지표수에 대한 현장측정자료는 시기별로 큰 차이를 보이지 않는다. 연구지역의 자연수는 Ca-HCO₃형에서부터 Ca-SO₄형에 속하며 특히 미량원소로서 Mn의 함량이 매우 높게 나타나고 있다. 다중패커시스템 (Multi-packer system)에 의해 채취된 시료에 대해 심도에 따른 변화를 살펴보면 Na, Ca, Mg, HCO₃의 함량이 심도가 깊어질수록 증가하고 있고, Cl과 SO₄의 경우는 맨 하부구간인 18m에서 채취된 시료들이 시료채취시기와 관계없이 매우 낮은 값을 보인다. 미량원소의 경우 문제가 되는 Mn은 시료채취시기와 관계없이 중간 구간인 13.5m 구간에서 특히 많은 함량을 보이고 있다. 연구지역내 물시료들에 대한 산소와 수소 동위원소 및 삼중수소 함량 분석결과는 다중패커설치공 및 일반 관측공과 지표수들간에 서로 중첩되어 구분이 어렵다. 황동위원소 분석결과는 지하수내 황의 기원이 퇴적암을 구성하는 황산염광물의 용해에 의한 것으로 판단된다. 스트론튬 동위원소비는 양수정 및 그 인접공의 시료들과 강변에서 인접한 공의 시료들간에 차이는 있으나 명확하지는 않다. 질소동위원소 분석결과를 살펴보면 전반적으로 화학비료로나 토양내의 유기물로부터 유래한 것으로 해석할 수 있다.

주요어 : 강변여과수, 지구화학, 동위원소, 충적층 지하수, 낙동강, 다중패커시스템

Geochemical studies on the alluvial aquifer system near the Nakdong River were carried out for

* Corresponding author: kimgy@kaeri.re.kr

the basic investigation of the estimation of artificial recharge for the river bank filtration. In-situ data do not show any distinct difference between the pumping well and river. Most of waters belong to Ca-HCO₃ and Ca-SO₄ types and show high Mn concentration. In the borehole installed with Multi-packer (MP) system, Na, Ca, Mg, HCO₃ contents of the groundwater are increased with depth increasing. Cl and SO₄ contents of the groundwater show the lowest values at the bottom level (18m depth) and Mn content is very high at the middle level (13.5 m depth) of MP system. There is no distinct difference in the $\delta^{18}\text{O}$ and D values and tritium content between MP, borehole and surface water samples. The sulfur isotope data indicate that the possible sulfur source is dissolution of sulfate mineral from sedimentary rock. Strontium isotope ratio shows a little differences between the pumping well and observation borehole samples. Nitrogen isotope data indicate that the nitrogen of water samples is originated from fertilizer or organic materials.

Key Words : River bank filtration, Geochemistry, Isotope, Alluvial aquifer, Nakdong River, Multi-packer system

서 론

최근 국내에서는 경제성장에 따른 물 수요의 증가와 이에 따르는 지하수 오염 등의 환경분야에 대한 관심이 높아지면서 지하수 유동 및 수문 체계에 대한 이해를 높이고자 수리지질관련 및 지화학적 연구로서 지하수의 생성과정 및 물-암석 반응관계에 대한 연구들이 활발하게 수행되고 있다 (정찬호 외, 1995; 이종운 외, 1997; 윤성택 외, 1998; 이재영 외, 1998; 고용권 외, 2000; 김건영 외, 2000; Koh et al., 1998). 그러나 기존 연구들은 지하수 시료채취가 대부분 나공 (Open borehole) 상태에서 이루어졌기 때문에, 동일 시추공에서 심도에 따른 지하수의 지화학적 특성을 명확히 밝히기 어려웠다. 또한 실제 물 사용량의 대부분을 차지하고 있는 천부지하수 및 지표수에 대한 연구는 매우 드물며, 그나마 터널굴착이나, 광산폐수 및 매립지주변 지표수에 대한 연구 (유재영, 1994; 전효택, 1997; 이찬희, 1999; 차종문, 1999)에 제한되어 있을 뿐이다.

현재 국내에서는 수자원의 지속적 확보 일환으로 안정적인 수자원 확보 및 돌발적인 수질오염 사고 위험이 낮은 방법으로서 강변여과수 개발이나 지하댐 건설 등이 활발히 논의되고 있다. 이 중 강변여과수는 원수를 장기간 강변의 대수층에 체류시켜 자체 정화능력을 이용하여 원수중

의 오염물질을 상당량 저감후 취수하는 방식으로 하천변에서 깊은 우물물 형식의 집수정을 이용하거나 원수를 인공함양 시킨 후 취수하는 방법이다. 이와 같은 특정지역에 부존하는 지하수의 수질 및 유동 특성을 이해하기 위해서는 지하수 자체에 대한 연구 뿐 아니라 지하수 함양원이 되는 주변 하천수를 포함한 지표수 및 천층지하수의 수리지화학적 및 환경동위원소적 특성의 시간적, 공간적 변화양상을 체계적으로 연구해야 한다. 특히 강변여과수와 같이 하천 표류수를 하천에서 50~300m 떨어진 곳의 지질학적 지층의 정화능력을 이용하여 오염물질과 독소를 제거하여 식수로 공급하는 개념에서는 하천 표류수와 취수정사이의 층적층에서 일어날 수 있는 지화학적 및 미생물학적 반응과정이 매우 중요하며, 강수와 하천 표류수 이외의 주변 지하수의 혼입과정 또한 강변여과수 취수정 지하수의 수리지화학적 특징에 영향을 주는 중요한 요인이다.

이번 연구는 현재 강변여과수 개발을 위하여 설계조사가 진행중인 대구 달성군과 경북 고령군의 낙동강 유역을 연구대상지역으로 하여 유형별 자연수 (장기양수시험공, 관측공, 시추공, 농업용관정, 지표수 등)를 채수하고 화학분석 및 환경동위원소분석($\delta^{18}\text{O}$, δD , 삼중수소, $\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{15}\text{N}$, $^{87/86}\text{Sr}$)을 수행하였다. 특히 관측공들 중 한 곳에는 다중패커시스템을 설치하여 층적층의 심도에

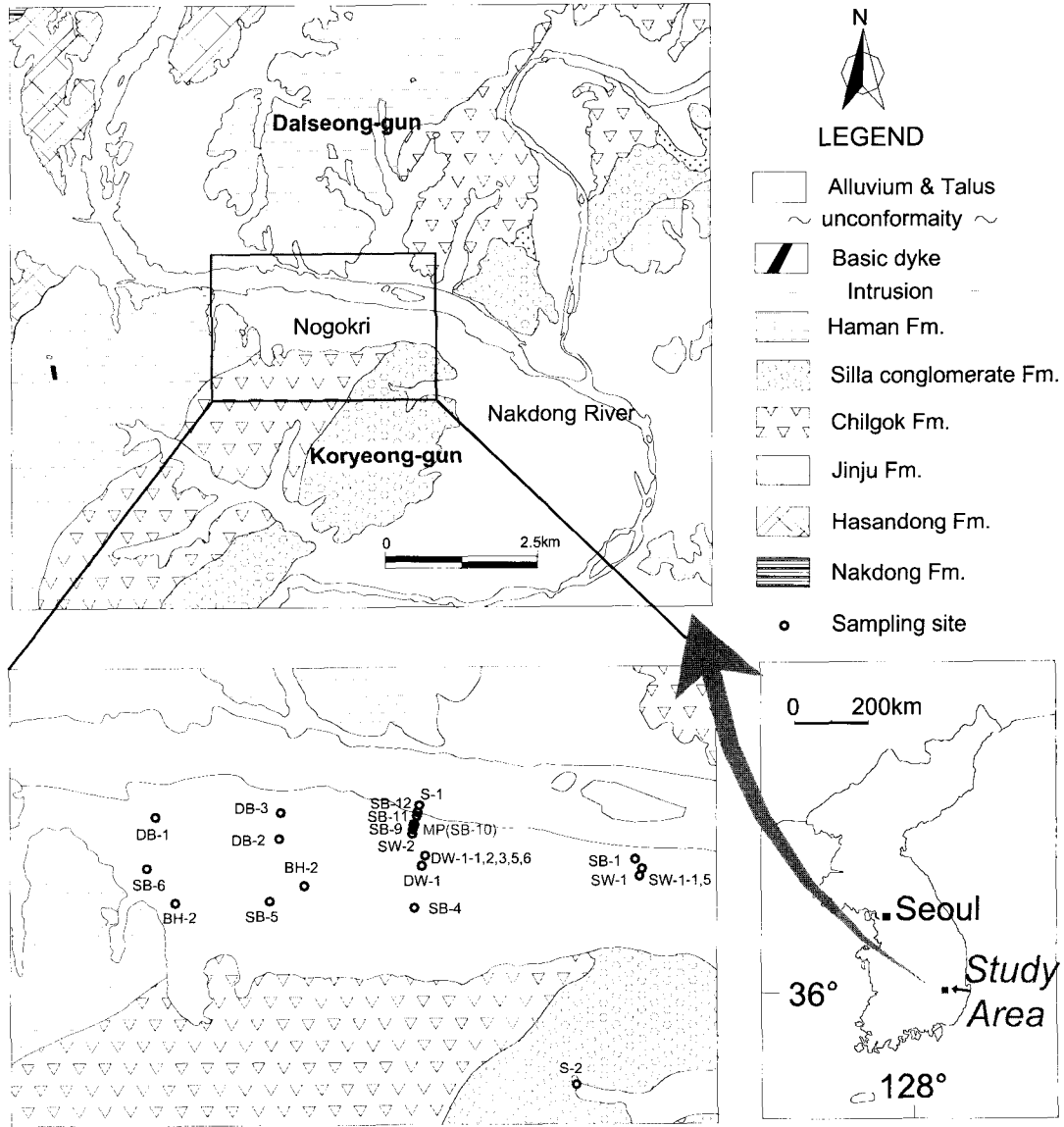


Fig. 1. Geologic map of the study area. Sampling locations are also shown.

따른 구간별 수리화학특성자료를 분석하였다. 또한 이러한 기초적인 지화학 및 동위원소 분석결과를 바탕으로 강변여과수와 같은 지하수의 인공함양특성을 해석하기 위한 동위원소기술의 적용가능성을 검토하였다.

지질 개요

연구지역의 지질은 주로 경상계 퇴적암층으로 이루어져 있으며 중생대 낙동통에 해당하는 낙동층, 하산동층, 진주층, 칠곡층과 신라통에 해당하는 신라역암층, 함안층이 서로 정합적인 관계로

분포한다. 이 밖에 제4기 충적층이 낙동강을 따르는 지역과 그 지류부근에 광범위하게 연속되는 분포를 보여주고 있다. 연구지역의 북부는 왜관도폭 (조선총독부 지질조사소, 1928), 남부는 현풍도폭 (국립지질조사소, 1970)에 해당하며 연구지역의 지질 및 암상의 기재는 주로 현풍도폭의 설명을 인용하였다 (Fig. 1).

하부로부터 낙동층은 연구지역 북서부에 소규모로 분포하며 주로 암회색의 이암, 사암, 셰일, 갈색의 역암 등으로 구성된다. 하산동층은 주로 담회색, 회색, 녹회색, 갈색의 이암, 셰일, 사암으로 구성된다. 진주층은 주로 회색, 녹회색의 사암 혹은 셰일 이암과 흑색 내지 암회색의 셰일층이 호층을 이루고, 암회색 또는 역질사암이 협재되며 하산동층과는 적색의 사암으로 구분된다. 간혹 녹회색 중립질 사암과 조립질 사암내에 석회질을 함유하고 있는 것이 있으며 현미경하에서는 석영, 장석, 방해석, 백운모 등으로 구성되며 부구성 광물로 녹니석, 전기석 등이 발견된다. 칠곡층은 암상이나 암색에 있어 하산동층과 유사하며 주로 적색의 셰일, 이암과 사암 및 사질셰일과 녹회색, 암회색의 사암, 석회암의 결핵체, 역암, 역질사암과 응회암질 사암등으로 구성된다. 그러나 상부에 가서는 응회암질의 사암이 분포하며 또한 화산암질의 역을 포함하는 역암층의 분포를 볼 수 있는데 이 역암의 역은 원마도가 매우 불량하며 분급이 잘되어 있지 않아 칠곡층의 퇴적 시기에는 화산활동의 가능성이 있는 것으로 알려져 있다. 신라역암층은 주로 갈색내지 적색의 사질역층과 역질사암으로 구성되며, 간혹 암회색의 사암, 역암이 회갈색 또는 적색사암, 사질셰일, 셰일 회색셰일 등과 실트스톤, 이회암의 결핵체가 협재된다. 함안층은 적색의 셰일, 이암, 사질셰일, 녹회색의 사암, 사질셰일, 암회색의 셰일, 이암, 실트스톤으로 구성되며 적색의 역질사암, 사질역암 등이 협재되어 있다. 이 중 강변여과수 개발을 위한 장기양수시험공이 위치한 지역은 낙동강변의 충적층이 발달한 지역으로 주변지질은 주로 신라역암층과 칠곡층 및 진주층으로 이루어져 있다.

시료채취 및 연구방법

인공함양 특성평가를 위한 동위원소기술 적용을 위하여 연구지역내에 위치한 양수정과 기존의 주변공들 및 지표수 시료들을 채취하였다. 지하수의 지화학 연구를 위해서는 자연조건에서 심도에 따라 격리된 상태에서 지하수의 시료채취가 이루어져야 한다. 이러한 지하수 시료채취를 충족시키기 위해서는 시추공에서 시료채취구간은 패커시스템을 이용하여 격리되어야 하며, 이를 위해서는 다중패커시스템을 적용하는 것이 가장 이상적이다. 국외의 경우 지하수의 유동로에 따른 지화학 특성조사를 위하여 다중패커시스템이 적용되고 있으며 (Wikberg et al., 1987; Hartten, Genau, 1995), 최근에는 환경오염 등과 관련된 지하수 수질연구 및 터널링에 의한 지하수유동체계 변화 모니터링연구 등 다중패커시스템이 확대 적용되고 있다 (Landin and Lauctes, 1995; Li et al., 1997). 국내에서도 다중패커 시스템을 이용하여 여수 북동부 화산암 지역 시추공 지하수에 대한 지화학 특성이 연구된 바 있으며 (고용권 등, 2001), 이번 연구에서는 연구지역인 낙동강변 충적층 내에서 장기양수시험공과 낙동강변을 잇는 일직선상에 시추된 관측공들을 대상으로 체계적인 시료채취를 위하여 관측공 중 기반암까지 시추된 한 공에 대해서는 다중패커시스템 (Multi-packer system)을 설치하였다.

연구지역인 대구 낙동강 유역의 강변여과수 개발을 위한 장기양수시험공 주변에는 낙동강과 일직선상에 총 4개의 관측공이 설치되어 있으며 이 중 장기양수시험공에서 약 5m 떨어진 SB-10 공에 2002년 2월 27일에 다중패커시스템을 설치하였다. SB-10공내에 패커가 설치된 심도는 이미 조사된 시추공의 지질단면에 따라 충적층내의 모래층과 자갈층, 그리고 하부 암반층을 구분할 수 있는 지하 하부 7m와 17m 구간이며, 시료를 채취할 수 있는 시료채취구가 상, 중, 하로서 각각 6m, 16.5m, 18m에 설치되어 모래층, 자갈층, 하부 암반층의 시료를 채취하였다 (Fig. 2). 또한 취수정에서의 장기양수에 의한 수위변화를 측정하기 위하여 자동수위 측정기 (Diver, DI 215)를 SB-11과 SB-12공에 설치하여 장기적인 모니터링을 병행하였다.

시료의 채취는 2002년 2월부터 2002년 5월 사

강변여과수 개발을 위한 낙동강 충적층 지하수의 지구화학적 특성연구

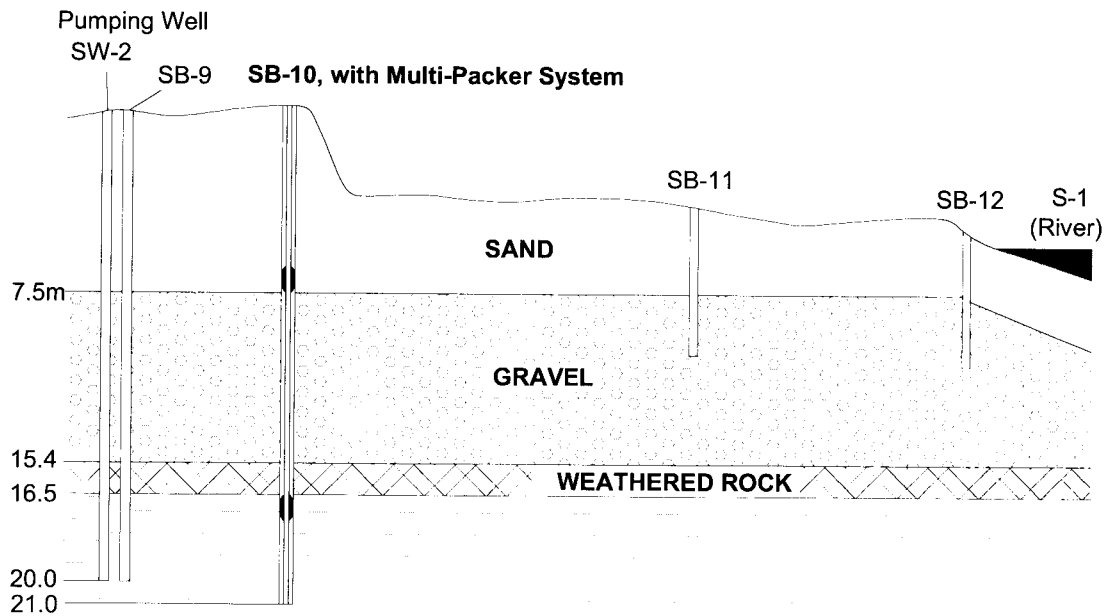


Fig. 2. Profile of the experimental site.

이에 수행되었으며 특히 다중패커시스템이 설치된 3월 이후에는 2주 간격으로 정기적인 시료채취를 수행하였다. 다중패커시스템이 설치된 SB-10 공과 양수를 위한 펌프가 설치되어 있는 농업용 관정 BH-1, BH-2공을 제외한 모든 시료채취는 나공 상태에서 수행하였다. 장기양수시험공은 2002년 4월 1일부터 2000 m³/일의 양으로 양수를 시작하였으며, 시료의 채취는 장기양수시험공 (SW-2) 및 이와 낙동강사이에 일직선상에 위치한 4곳의 관측공 (SB-9, 10, 11, 12) 및 낙동강물 등을 중심으로 체계적인 채취를 하였다. 이밖에 강변여과수 개발사업 초기의 양수시험공 (SW-1) 및 주변의 관측공 (SW-1-1, SW-1-5)과 기타 연구지역 내의 관측공과 시추공들에 대한 시료를 채취하였다 (SB, DB, DW 시료들). 또한 주변의 농업용 관정 2곳과 (BH-1, BH-2) 장기양수시험공에서 남동쪽으로 약 1.5km 떨어진 곳에 위치한 저수지의 시료도 함께 채취하였다 (Fig. 1, Table 1).

모든 시료에 대하여 온도, 수소이온농도(pH), 산화-환원전위(Eh), 전기전도도(EC), 용존산소(DO) 등의 물리화학적 특성자료가 Orion사의 pH

전극 (9107WP), Eh 전극 (9678BN), 전기전도도셀 (013010), 용존산소 (DO) 전극 (083010)의 전극을 사용하여 Multi parameter meter (Orion 1230)로 현장에서 보정한 후, 채수와 동시에 현장에서 직접 측정되었다. 알칼리도 (alkalinity)는 산중화적정법을 이용하여 현장에서 신속하게 측정하였다. 양이온, 음이온, 산소 및 수소동위원소 분석을 위하여 모든 시료는 셀룰로스 질산염 막 필터를 이용하여 0.45 μm 이하로 여과하여 물속에 존재하는 부유 물질을 제거하였으며, 이 중 양이온 분석을 위한 시료에는 유기작용과 금속 이온들의 침전이나 용기내 흡착을 막기 위해 농 질산을 첨가하여 pH를 2 이하로 유지하여 폴리에틸렌 용기에 담아 냉장 보관하여 실험실로 옮겨졌다.

시료의 주요 양이온 및 미량원소 함량은 한국기초과학지원연구원에서 유도결합플라즈마 방출분석기 (ICP-AES, Shimadzu ICPS-11000 III)와 유도결합플라즈마질량분석기 (ICP-MS, FISON PlasmaTrace)로 분석하였고 음이온은 한국원자력연구소내 이온 크로마토그래피 (Dyonex 500)를 이용하여 분석하였다. 오차범위는 상대오차 ±

Table 1. Descriptions of sampling locations.

Sample name	Description
MP (6m)	Upper part of SB-10 borehole (6m depth)
MP (13.5m)	Middle part of SB-10 borehole (13.5m depth)
MP (18m)	Lower part of SB-10 borehole (18m depth)
SW-2	Pumping well 1
SB-9	Observation borehole near pumping well 1
SB-11	Observation borehole between pumping well 1 and Nakdong river
SB-12	Observation borehole near Nakdong river
SW-1	Pumping well 2
SW-1-1	Observation borehole near pumping well 2
SW-1-5	Observation borehole near pumping well 3
SB-1	Observation borehole
SB-4	Observation borehole
SB-5	Observation borehole
SB-6	Observation borehole
DB-1	Observation borehole
DB-2	Observation borehole
DB-3	Observation borehole
DW-1	Observation borehole
DW-1-1	Observation borehole near the DW-1
DW-1-2	Observation borehole near the DW-1
DW-1-3	Observation borehole near the DW-1
DW-1-3	Observation borehole near the DW-1
DW-1-5	Observation borehole near the DW-1
DW-1-6	Observation borehole near the DW-1
BH-1	Pumping well for agriculture 1
BH-2	Pumping well for agriculture 2
S-1	Nakdong river
S-2	Ju-eul small dam

5%이다. 모든 분석치는 전하균형 (charge balance) 계산을 통하여 신뢰성을 검증하였다. 또한 장기양수시험공 (SW-2)과 주변관측공 및 SB-10 관측공에 설치된 Multi- packer system에 의해 채취된 시료와 주변 지표수의 유기물에 의한 오염도를 알아보기 위하여 용존유기탄소 (DOC) 함량을 분석하였다. 산소 및 수소 안정 동위원소 분석은 한국원자력연구소내 안정동위원소 질량분석기 (Model VG SIRA II 및 Micromass Optima)를 이용하였으며, 분석오차는 각각 $\pm 1.5\%$, 0.1% 이다. 황 동위원소 및 스트론튬 동위원소비는 각각 기초과학연구원내 안정동위원소 질량분석기 (PRISM) 및 열이온화질량분석기 (VG Sector 54-30)로 분석하였다. 질소 동위원소분석을 위한 시료에는 현장에서 $HgCl_2$ (7.3g/100ml)를 첨가하여 미생물에 의한 동위원소 분별작용을 방지하였으며 이 후 냉장보관하여 실험실로 운반되어 분석직전까지 냉동보관하였다.

분석은 서울대 농업과학생명대학내의 농업과학공동기기센터에서 안정동위원소 질량분석기 (Micromass IsoPrime with Elemental Analyser)를 이용하여 분석하였다.

연구결과 및 토의

현장측정결과

장기양수시험공과 다중패커시스템 설치공 및 주변 관측공과 지표수에 대한 현장측정 및 화학 분석결과가 각각 Table 2에 정리되었다. 다중패커시스템이 설치된 SB-10공을 제외한 대부분의 시추공 및 관측공 지하수들은 pH가 5.7 ~ 7.3으로 약산성에서 중성을 나타내고 있으며, SB-10공에서 하부의 18m 구간에서 채취된 지하수의 pH는 6.4 ~ 7.8로서 다른 시료들에 비해 약간 높은 경향을 보여준다.

점진적인 물-암석반응이 진행되면서 이동도 (mobility)가 비교적 큰 이온들 (Na, K, Ca, Mg 등과 같은 알칼리 및 알칼리토금속 원소)과 SiO_2 가 점진적으로 방출되어 pH가 높아지고 용존이온의 함량이 증가되며 따라서 전기전도도(EC)값이 높아지는 경향을 보이게 된다. 연구지역의 시료에서도 이와 같은 pH의 증가에 대한 EC의 증가 경향이 관찰된다 (Fig. 3). 그러나 pH의 증가에 따른 산화-환원 전위(Eh)나 용존산소량(DO)의 변화는 뚜렷하게 관찰되지 않는다. 이는 연구지역의 채취된 시료들이 주로 충적층 내에서 채취된 시료로서 pH의 증가경향이 지하수의 심도와 관련된 지하수의 일반적 진화경향에 의한 것이 아니기 때문인 것으로 사료된다.

전체적으로 시추공 및 지표수에 대한 측정자료는 시기별로 큰 차이를 보이지 않는다. 그러나 장기양수시험공과 낙동강사이에 설치된 관측공 시료들의 Eh값은 약 300 ~ 400mV로서 대부분 200mV 이하인 주변의 다른 시추공 및 관측공에 비해 높은 특징을 보여준다. 함께 채취된 낙동강 물의 Eh값 역시 대부분 300 ~ 400mV의 값을 보여주고 있다. 또한 양수정 및 SB-9, 10, 11, 12 시료들간에 있어서는 현장측정값들의 차이는 관찰되지 않으나 양수정인 SW-2공과 이와 바로 인

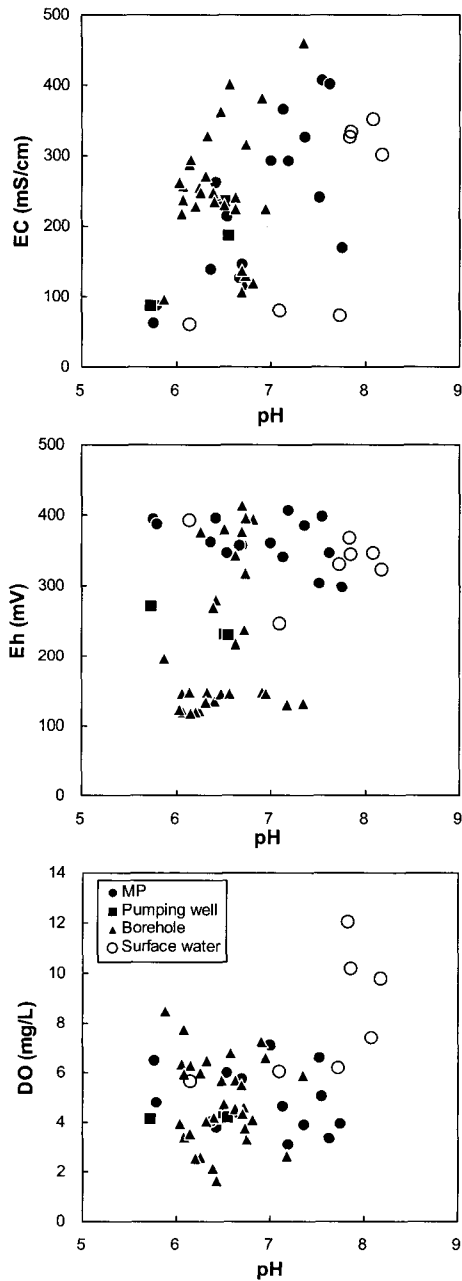


Fig. 3. Plots of pH versus electrical conductivity (EC), redox potential (Eh) and dissolved oxygen (DO) of water samples from the study area.

접한 SB-9공의 시료가 다른 강변쪽의 관측공 시료에 비해 낮은 Eh값을 보여주어 강변에서부터

양수정까지의 산화환경에서 상대적인 환원환경으로의 전이를 지시하고 있다.

EC값의 경우 2002년 4월 3일 시료부터 매우 낮아지기 시작하여 4월 19일과 5월 2일 시료에서는 급격히 낮아지고 있는 특성을 보인다. 이는 4월 1일부터 장기양수시험이 시작되어 낙동강 지표수가 유입되는 영향으로 해석할 수 있다. 하지만 같은 시기의 낙동강물의 EC값 역시 동일하게 4월 3일 시료가 상대적으로 낮고, 4월 19일과 5월 2일의 시료가 갑자기 낮아진 특성을 보인다. 이에 관하여 대구지역의 일별 강수량을 살펴보면 3월 29일에 17.5mm, 4월 16일에 18mm, 4월 30일에 28mm의 강수를 기록하였다. 따라서 관측공들에서의 4월 19일과 5월 2일의 급격한 EC값의 저하는 2~3일전 내린 강수의 직접적인 영향이며 4월 3일 시료의 상대적으로 적은 폭의 EC값 저하는 5일 전의 강수에 의한 영향에서 점차 회복되고 있는 과정으로 해석할 수 있다.

이상과 같이 낙동강으로부터의 상대적 거리에 따른 각 관측공들의 산화-환원 전위의 차이와, 각 관측공과 강변간의 EC값의 변화 또는 상대적 변화량과 강수기록과의 관계를 좀더 명확히 규명하기 위해서는 전반적 경향을 알기 위한 시료채취 이외에도 하나의 커다란 강수기록을 중심으로 한 좀더 집중적이고 체계적인 시료채취가 필요한 것으로 판단된다.

용존이온 분포특성

연구 지역의 자연수 속에 용존되어 있는 주요 이온들은 Ca, Na, SiO₂, HCO₃, SO₄ 등이고, 소량의 K, Mg, Cl, NO, F 등이 분포한다. 이밖에 미량원소로서 Fe, Mn, Sr, Zn, B, Ba 등이 존재한다. 이 중 특징적으로 Mn의 함량이 장기양수시험공 및 SB-9, 10, 11, 12공 시료에서 매우 높게 나타난다(Table 2). 이처럼 높은 Mn 함량은 강변여과수의 취수정에서 최종적으로 식수로 공급하려는 목적에 가장 큰 문제점으로 대두되고 있으며 이에 대한 기원 규명 및 처리방안이 절실히 요구되고 있다. 그러나 이번 연구의 지화학분석 결과로는 지하수의 수질에 영향을 주는 지하의 지질매질의 지화학적 특성에 의한 영향인지 산화-환원 환경의 전이에 따른 미생물작용에 의한 결과

Table 2. Physicochemical data of various kinds of waters from the Daegu area.

Sample no.	Sampling Date	Temp. (°C)	pH	Eh (mV)	EC (μS/cm)	DO (mg/L)	TDS (mg/L)	Na	K	Mg	Ca	SiO ₂	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻	
																		Dissolved constituents of major elements (mg/L)
MP																		
MP (6m)	02-3-5	10.0	7.0	360	292	7.1	185.0	12.4	4.0	4.7	24.1	21.2	13.4	13.3	91.1	0.1	0.1	
"	02-3-15	16.9	6.4	396	262	3.8	157.1	12.7	0.0	4.7	21.0	18.7	8.0	18.1	48.5	25.2	0.1	
"	02-4-4	14.3	6.5	347	214	6.0	172.0	9.6	1.0	5.9	26.8	13.3	9.1	16.5	50.8	38.7	0.1	
"	02-4-19	13.7	6.7	358	147	5.8	170.6	11.3	1.1	5.8	26.2	13.5	13.7	25.0	53.2	20.2	0.3	
"	02-5-2	21.0	5.8	395	63	6.5	114.7	6.9	0.6	3.8	16.2	11.9	10.3	20.5	36.4	7.6	0.4	
MP (13.5m)	02-3-5	13.7	7.1	341	366	4.7	284.3	16.9	3.0	8.2	35.7	24.1	12.4	21.3	160.9	0.0	0.2	
"	02-3-15	18.0	7.2	408	292	3.1	234.6	15.0	1.5	6.5	30.5	34.5	12.3	21.0	110.8	0.4	0.2	
"	02-4-3	14.6	7.5	304	241	6.6	230.4	17.4	1.6	5.8	24.6	27.9	12.8	23.0	115.7	0.0	0.2	
"	02-4-19	17.3	6.7	358	127	4.3	194.4	14.9	1.1	5.6	21.4	31.5	12.0	24.4	80.2	0.9	0.4	
"	02-5-2	16.9	5.8	388	87	4.8	179.1	12.4	0.7	5.3	18.5	32.0	13.2	25.4	69.5	0.0	0.5	
MP (18m)	02-3-5	13.0	7.5	398	408	5.1	363.7	22.4	2.3	10.2	43.8	21.9	4.7	6.6	250.9	0.0	0.2	
"	02-3-15	18.1	7.6	347	401	3.3	371.9	25.1	2.9	10.2	51.3	23.5	3.4	4.4	250.3	0.0	0.2	
"	02-4-4	18.3	7.4	386	326	3.9	320.1	23.6	1.7	9.3	42.5	23.7	4.4	5.9	208.4	0.0	0.2	
"	02-4-19	18.1	7.8	299	169	3.9	342.8	25.0	2.1	9.5	47.1	21.3	4.2	4.1	228.8	0.0	0.3	
"	02-5-2	18.6	6.4	363	139	4.1	311.8	21.6	1.5	8.5	42.3	23.1	4.7	4.5	204.9	0.0	0.3	
Shallow groundwater																		
SW-2	02-4-3	17.1	6.5	232	235	4.4	177.9	15.2	0.9	5.3	21.0	18.3	12.8	21.1	72.2	10.4	0.1	
"	02-4-19	20.2	6.6	230	187	4.2	174.9	14.1	1.0	5.2	20.9	16.8	14.7	24.0	66.6	10.3	0.3	
"	02-5-2	16.9	5.7	272	87	4.2	158.1	11.3	0.7	5.0	18.6	19.1	15.7	26.2	51.5	9.4	0.1	
SB-9	02-3-15	17.8	6.7	317	316	3.3	262.2	17.6	0.9	7.7	35.7	30.3	10.1	17.8	140.7	0.0	0.2	
"	02-4-4	18.1	6.6	218	241	4.5	188.0	15.9	0.9	5.5	19.6	22.4	12.9	24.4	82.8	2.7	0.1	
"	02-4-19	18.5	6.7	238	117	4.6	187.9	15.8	1.4	5.4	20.7	19.4	15.6	25.8	78.1	4.1	0.7	
"	02-5-2	16.6	5.9	197	96	8.5	156.1	12.8	0.9	4.7	15.4	26.3	18.0	29.3	46.9	0.3	0.3	
SB-11	02-3-15	15.6	6.4	280	245	1.7	187.8	15.1	1.0	5.4	19.5	30.8	13.7	22.2	77.7	0.2	0.2	
"	02-4-4	18.0	6.5	380	231	4.8	180.6	15.8	0.8	5.3	19.4	26.9	12.4	23.2	74.4	0.2	0.2	
"	02-4-19	15.8	6.7	376	107	4.3	189.4	15.3	1.0	5.2	19.2	25.9	13.7	25.7	79.5	0.5	0.4	
SB-12	02-3-15	14.9	6.4	269	248	2.2	185.5	15.1	0.8	5.1	19.3	25.9	13.3	22.1	81.0	0.4	0.2	
"	02-4-4	20.0	6.6	343	225	5.7	195.3	16.0	1.8	5.4	22.8	25.3	12.5	23.2	85.3	1.4	0.2	
"	02-4-19	17.2	6.8	394	119	4.1	189.8	17.4	1.2	5.7	22.1	24.5	17.9	31.2	62.2	5.4	0.3	
SW-1	02-2-19	17.3	6.3	122	255	2.6	178.4	11.7	1.2	6.2	22.3	23.7	9.2	17.3	75.3	10.5	0.1	
SW-1-1	02-2-19	13.4	6.1	146	218	6.3	197.0	10.7	1.4	10.7	20.8	23.6	8.9	19.4	91.7	9.2	0.1	
SW-1-5	02-2-19	17.3	6.2	120	229	2.6	218.8	13.3	1.3	13.3	18.5	29.0	9.0	17.6	109.0	6.9	0.1	
SB-1	02-2-19	13.2	6.4	135	235	4.2	165.4	13.1	1.2	5.0	16.8	29.8	11.1	17.5	66.3	3.4	0.2	
SB-4	02-2-19	11.9	6.9	148	382	7.2	257.5	18.5	2.0	10.9	34.5	23.0	29.2	27.9	103.9	7.0	0.2	
SB-5	02-2-19	10.7	6.5	146	362	5.7	246.5	20.0	3.6	8.2	34.4	10.5	18.2	35.0	113.2	2.7	0.2	
SB-6	02-2-19	10.3	6.6	146	401	6.8	297.1	16.7	3.4	14.9	39.5	18.3	14.8	32.4	156.5	0.0	0.2	
DB-1	02-2-19	11.0	6.1	149	287	6.3	209.3	14.5	2.8	7.6	24.8	29.1	17.2	20.4	75.6	16.6	0.1	
DB-2	02-2-19	10.4	6.3	148	328	6.5	229.8	21.2	6.2	6.2	26.8	10.7	20.2	31.2	104.4	2.2	0.2	
DB-3	02-2-19	11.5	7.0	147	225	6.6	200.5	7.4	1.2	6.9	22.2	33.8	7.4	2.4	114.7	2.2	0.8	
DW-1	02-2-19	18.1	6.3	134	271	4.1	184.5	14.9	1.7	6.2	24.0	18.1	15.7	28.5	66.5	8.4	0.2	
DW-1-1	02-2-19	19.4	6.1	121	237	5.9	153.3	14.5	1.8	4.9	19.5	18.1	17.5	27.1	40.7	8.7	0.2	
DW-1-2	02-2-19	17.4	6.1	117	256	3.4	171.4	10.3	1.0	7.1	24.7	22.2	15.9	26.3	52.6	11.0	0.1	
DW-1-3	02-2-19	19.0	6.1	119	258	7.8	172.6	14.2	1.8	5.9	23.5	16.8	15.2	28.4	58.7	7.7	0.2	
DW-1-5	02-2-19	18.8	6.1	118	294	3.6	202.4	17.3	3.1	6.5	26.8	11.6	15.3	24.9	89.2	7.1	0.3	
DW-1-6	02-2-19	18.5	6.0	123	262	3.9	175.4	15.0	1.3	6.1	22.8	18.7	16.0	28.5	59.1	7.5	0.1	
BH-1	02-2-19	15.0	7.3	132	461	5.9	337.9	21.8	1.2	0.1	52.5	25.0	2.8	2.0	231.2	0.0	0.2	
BH-2	02-2-19	15.2	7.2	131	581	2.7	437.4	19.1	1.7	26.4	58.4	20.6	21.1	17.1	271.3	0.0	0.2	
Surface water																		
S-1	02-2-19	6.9	7.9	345	334	10.2	211.3	22.7	3.1	5.9	24.7	6.5	19.5	29.8	87.0	11.5	0.2	
"	02-3-15	12.6	8.1	346	351	7.4	225.2	28.1	3.4	6.0	29.2	3.6	21.3	33.2	88.9	11.0	0.2	
"	02-4-3	16.5	8.2	323	301	9.8	245.4	27.1	3.6	5.9	30.0	1.2	18.9	33.5	115.7	8.9	0.2	
"	02-4-19	18.7	7.1	247	81	6.1	132.6	11.2	2.6	3.9	18.2	8.3	9.3	17.6	50.3	10.1	0.4	
"	02-5-2	17.7	6.1	392	61	5.7	114.8	7.2	2.7	3.4	14.8	6.4	7.7	15.2	48.5	8.3	0.5	
S-2	02-4-19	19.3	7.7	331	73	6.2	150.1	17.2	3.5	5.8	17.5	1.6	12.5	45.6	46.0	0.0	0.3	

강변여과수 개발을 위한 낙동강 충적층 지하수의 지구화학적 특성연구

Table 2. Continued.

Sample no.	Sampling Date	Al	Fe	Mn	Sr	Li	B	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Mo	Cd	Ba	Pb
		Dissolved constituents of minor elements ($\mu\text{g/L}$)															
MP																	
MP (6m)	02-3-5	9.9	15.5	52.9	211.9	1.9	10.1	0.14	1.2	4.9	0.5	43.2	0.2	0.37	0.25	124.9	<0.1
"	02-3-15	<0.5	3.0	60.1	148.2	1.0	10.1	0.38	0.8	2.6	0.9	37.3	0.1	0.15	0.29	53.6	<0.1
"	02-4-4	<1	48.4	46.7	205.2	0.4	7.9	<0.1	1.2	5.4	0.8	46.3	0.5	0.70	0.13	21.6	<0.1
"	02-4-19	<1	1.9	25.6	230.5	0.8	8.6	<0.1	1.1	2.1	1.0	38.2	0.8	0.26	0.17	37.4	<0.1
"	02-5-2	<1	6.4	2.3	136.5	0.2	10.9	0.24	0.3	2.5	0.6	22.5	0.6	0.16	0.03	14.3	<0.1
MP (13.5m)	02-3-5	5.3	11.4	1191	272.7	4.2	17.7	0.11	2.9	8.0	0.3	20.2	0.7	1.96	0.19	159.8	<0.1
"	02-3-15	25.7	56.8	1436	205.4	2.5	9.6	0.36	5.6	6.6	0.7	35.4	0.8	0.81	0.50	129.8	<0.1
"	02-4-3	4.0	23.7	996.7	205.1	1.4	15.6	<0.1	2.8	10.4	0.9	22.1	0.7	1.66	0.12	128.9	<0.1
"	02-4-19	<1	4.4	1862	200.6	1.2	7.2	<0.1	0.7	1.2	0.3	10.1	0.9	0.29	0.15	48.8	<0.1
"	02-5-2	<1	17.9	1321	178.6	0.9	6.0	0.31	0.9	3.7	0.4	18.6	0.8	0.01	0.11	37.1	<0.1
MP (18m)	02-3-5	8.0	5.2	110.8	294.6	8.0	36.8	0.36	1.1	6.8	0.2	8.4	0.3	1.57	0.13	159.9	<0.1
"	02-3-15	2.9	2.3	112.1	257.7	8.0	39.7	2.33	0.8	4.9	0.7	10.9	0.5	1.01	0.18	162.2	<0.1
"	02-4-4	1.1	2.7	77.1	266.0	5.7	32.4	<0.1	0.7	7.1	1.1	9.5	0.6	0.96	<0.1	133.7	<0.1
"	02-4-19	<1	<1	105.9	307.4	10.4	40.1	<0.1	0.5	2.7	0.5	2.9	1.0	1.04	<0.1	157.2	<0.1
"	02-5-2	<1	3.6	87.4	275.8	6.6	35.7	1.04	0.6	7.2	0.7	8.2	0.9	0.62	0.01	136.3	<0.1
Shallow groundwater																	
SW-2	02-4-3	<1	<1	368.2	151.1	0.9	10.3	<0.1	2.7	3.1	0.6	9.5	26.4	0.79	0.27	132.3	<0.1
"	02-4-19	<1	<1	585.8	172.1	1.3	11.0	<0.1	2.3	1.4	0.6	10.8	21.2	0.31	<0.1	135.7	0.10
"	02-5-2	<1	<1	333.2	158.6	0.7	9.6	0.36	2.2	4.3	0.8	20.9	17.1	0.05	0.06	107.8	<0.1
SB-9	02-3-15	<0.5	31.3	886.4	218.0	2.8	18.2	0.94	1.5	3.3	2.3	38.9	0.5	0.35	0.31	123.7	0.36
"	02-4-4	<1	<1	620.7	151.6	0.6	10.9	<0.1	2.7	4.2	1.3	30.5	27.3	1.11	1.03	150.9	<0.1
"	02-4-19	<1	<1	634.7	171.5	0.7	9.6	<0.1	2.0	3.2	2.3	25.7	17.9	0.89	0.64	161.9	<0.1
"	02-5-2	<1	<1	868.1	137.4	0.6	7.7	0.23	2.8	3.7	0.5	39.5	34.8	0.98	0.16	152.7	<0.1
SB-11	02-3-15	1.4	292.6	1309	165.2	1.7	17.8	0.21	4.6	2.4	0.9	13.2	2.5	0.36	0.33	133.5	3.55
"	02-4-4	2.9	51.0	1773	171.9	0.9	8.6	<0.1	2.7	3.6	2.2	32.3	0.7	0.50	0.99	102.9	2.97
"	02-4-19	<1	14.5	2657	178.8	0.8	8.9	<0.1	2.4	1.5	1.7	28.3	1.3	0.36	0.98	121.8	0.19
SB-12	02-3-15	0.8	351.2	1655	160.5	1.1	9.7	0.25	2.9	2.4	0.6	10.9	0.7	0.18	0.25	48.0	5.23
"	02-4-4	1.3	100.3	1168	180.0	1.0	9.4	<0.1	1.8	6.2	4.7	147.1	0.7	0.58	2.26	48.2	4.79
"	02-4-19	<1	<1	1645	198.1	0.8	10.2	<0.1	0.8	1.5	1.5	25.0	0.9	0.24	0.80	52.4	0.51
SW-1	02-2-19	23.9	42.1	400.7	232.8	0.9	23.1	0.32	0.7	5.7	4.4	25.3	0.3	0.23	0.15	51.4	0.63
SW-1-1	02-2-19	65.4	72.6	203.3	214.3	0.6	15.5	0.41	0.7	3.5	3.2	18.6	0.4	1.19	0.62	40.3	1.02
SW-1-5	02-2-19	4.2	8.6	571.5	202.2	0.6	15.7	0.21	0.8	3.3	1.7	15.7	0.3	0.67	0.67	50.4	0.17
SB-1	02-2-19	12.1	29.0	827.2	190.3	0.3	13.2	0.19	1.0	3.9	1.7	10.9	0.7	0.27	0.42	44.4	0.30
SB-4	02-2-19	52.3	57.5	75.7	287.0	0.9	16.0	0.43	0.9	9.3	2.5	34.0	1.1	0.56	0.41	52.5	0.48
SB-5	02-2-19	8.5	10.8	126.6	310.8	0.1	16.4	0.85	1.2	7.3	1.2	7.4	0.7	0.09	0.23	79.0	0.14
SB-6	02-2-19	4.5	7.8	67.8	311.7	0.2	11.0	0.49	0.7	7.3	1.2	15.6	0.7	0.05	0.26	90.9	0.37
DB-1	02-2-19	42.4	58.8	209.7	255.9	0.7	4.6	0.19	0.8	4.4	1.2	6.4	0.9	0.14	0.11	44.2	0.46
DB-2	02-2-19	15.7	17.6	3.0	228.8	0.1	18.5	0.46	0.5	5.4	1.5	5.5	0.7	0.10	0.06	93.9	<0.1
DB-3	02-2-19	2.6	0.2	1212	196.1	0.4	3.7	<0.1	1.6	6.1	0.6	11.4	17.6	4.53	0.17	63.7	0.40
DW-1	02-2-19	1.3	24.9	27.8	230.3	0.7	19.3	0.55	0.5	5.1	3.9	1036	3.0	0.09	0.63	62.3	0.39
DW-1-1	02-2-19	8.3	11.4	14.7	179.9	0.3	16.0	0.82	0.5	4.2	1.4	27.4	0.6	0.09	0.40	48.8	<0.1
DW-1-2	02-2-19	15.0	21.6	6.8	229.0	0.6	10.8	0.37	0.4	4.5	0.6	9.6	0.6	0.08	0.15	29.6	<0.1
DW-1-3	02-2-19	4.8	8.4	6.1	218.8	0.3	15.0	0.83	0.5	4.9	1.5	41.3	0.6	0.02	0.33	58.6	<0.1
DW-1-5	02-2-19	7.3	10.0	7.3	224.7	0.2	24.4	0.50	0.6	6.0	1.3	17.9	0.6	0.08	0.92	72.1	0.11
DW-1-6	02-2-19	2.3	5.3	7.9	220.8	0.2	14.8	0.65	0.4	3.9	1.2	10.6	0.6	0.03	0.17	56.8	0.27
BH-1	02-2-19	3.3	5.3	63.2	823.6	17.1	23.9	0.82	0.6	6.3	5.4	503.2	1.1	0.53	0.03	212.9	0.61
BH-2	02-2-19	0.2	26.5	55.5	1259.1	8.4	14.9	0.21	0.9	6.5	<0.1	332.3	27.6	3.16	0.05	187.2	<0.1
Surface water																	
S-1	02-2-19	4.4	5.6	53.9	243.0	0.6	24.9	0.21	0.5	6.3	0.9	3.1	0.9	1.17	0.03	32.7	0.15
"	02-3-15	5.5	7.4	96.1	214.5	0.7	28.0	0.93	0.3	4.7	1.2	2.7	1.1	0.90	0.07	37.3	0.36
"	02-4-3	7.7	4.6	10.5	217.6	0.7	25.7	<0.1	0.4	5.6	1.4	1.4	1.5	1.09	<0.1	31.9	<0.1
"	02-4-19	4.0	95.6	221.0	143.1	0.6	13.9	<0.1	0.9	1.2	1.1	4.4	6.2	0.41	<0.1	58.5	<0.1
"	02-5-2	8.0	13.9	63.7	121.3	0.3	13.6	0.13	0.3	2.9	1.2	4.3	1.8	0.14	0.01	28.5	<0.1
S-2	02-4-19	<1	0.2	7.0	141.9	0.2	30.7	<0.1	0.2	0.9	0.9	16.9	1.1	0.11	<0.1	55.2	<0.1

인지는 확실하지 않다.

기타 중금속의 함량은 대체로 낮으나 Fe나 Zn의 경우 시료에 따라 심한 차이를 보이고 있으며 이 중 Zn의 경우는 DW-1 시료에서 최대 약 2.8 mg/L까지의 높은 함량을 보이고 있다. 이밖의 연구지역 시료들의 화학적 특징으로서는 음이온으로서 HCO₃ 함량이 상대적으로 낮고, SO₄의 함량이 상대적으로 높다는 점이다. 그러나 다중패커시스템에 의해 채취된 SB-10공에서의 가장 하부 시료에서는, SO₄ 함량이 시료채취시기에 상관없이 4.1 ~ 6.6 mg/L으로서 매우 낮고 HCO₃ 함량은 205 ~ 251 mg/L로서 대부분 100 mg/L 이하인 상부 다중패커 구간이나 주변 관측공에 비해 가장 높은 값을 보이고 있다 (Table 2). 따라서 연구지역 자연수 시료에서 나타나는 상대적으로 높은 SO₄ 함량 및 낮은 HCO₃ 함량은 시료들의 채취 심도가 10m 이하이고 더구나 낙동강변에 위치한 충적층에서 채취된 시료로서 지표수의 영향을 직접적으로 받고 있음을 알 수 있다.

인위적 오염의 지표인 NO₃ 함량은 현재 양수정에서 ~10mg/L 정도의 범위를 보이고 있으며 특히 다중패커시스템이 설치된 관측공의 경우 최상부(6m)의 시료는 ~40mg/L의 높은 농도를 보여 준다. 이밖에 10mg/L 이상의 함량을 보이는 시료가 6곳이며 대부분의 관측공에서 NO₃ 함량이

소량이나마 검출되고 있는 사실은 연구지역의 대부분이 비닐하우스 등의 경작지로서 농업지역임에 기인하는 것으로 보인다. 그러나 낙동강물에서는 채취시기와 상관없이 대부분 10 mg/L 이상의 NO₃ 함량을 보이며, 같은 지표수인 연구지역 남동부에 위치한 주을저수지의 경우는 NO₃가 검출되지 않는다는 점, 또한 대부분 NO₃ 함량이 높게 나타나는 시료들이 SB-10 (다중패커시스템 상부층), SW-2, SW-1, DB-1, DW-1-2, DW-1-3 등으로서 DB-1시료를 제외하고는 모두 현재 양수되고 있는 관정이거나 그 영향을 직접 받고 있는 관측공이라는 점 등은 강변여과를 위한 강제 양수 자체가 자연수내의 NO₃의 함량을 높이는 역할을 하고 있을 가능성을 지시하고 있다. 또한 10 m 심도 이상의 다중패커 구간에서 채취된 시료와 농업용수로 개발된 지하수인 농업용 관정 2곳 모두 NO₃가 검출되지 않았다는 사실은 연구지역의 지하수 유동이 주로 충적층 상부의 공급률이 높은 모래층을 따라 일어나고 있을 가능성을 지시한다.

이와 같은 주요 용존 이온종을 대상으로 물의 유형 및 진화 양상을 규명하기 위하여 파이퍼 다이어그램을 도시하였다 (Fig. 4). 그 결과 연구지역의 시료들은 Ca-HCO₃형에서부터 Ca-SO₄형까지의 영역에 속함을 알 수 있다. 비교를 위하여

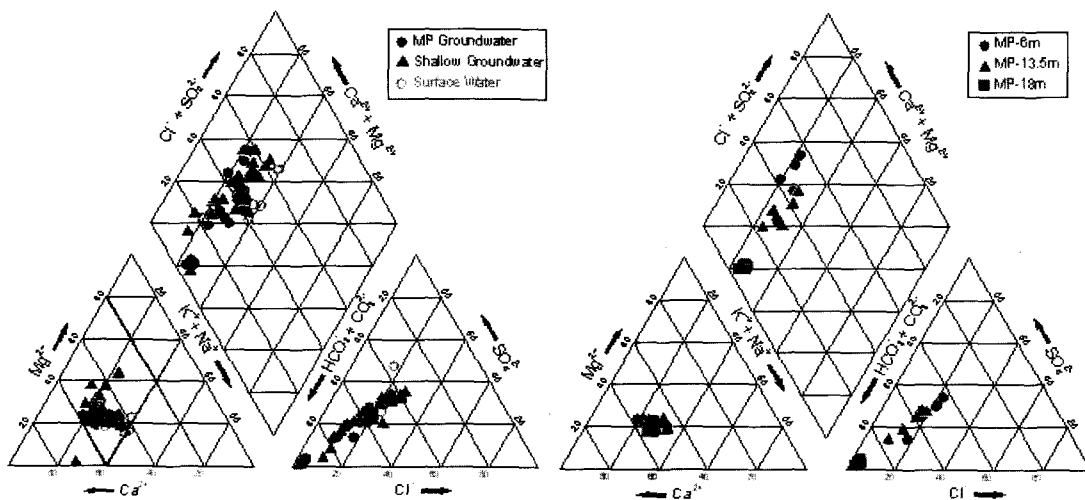


Fig. 4. Piper diagram for the water samples from the study area.

강변여과수 개발을 위한 낙동강 충적층 지하수의 지구화학적 특성연구

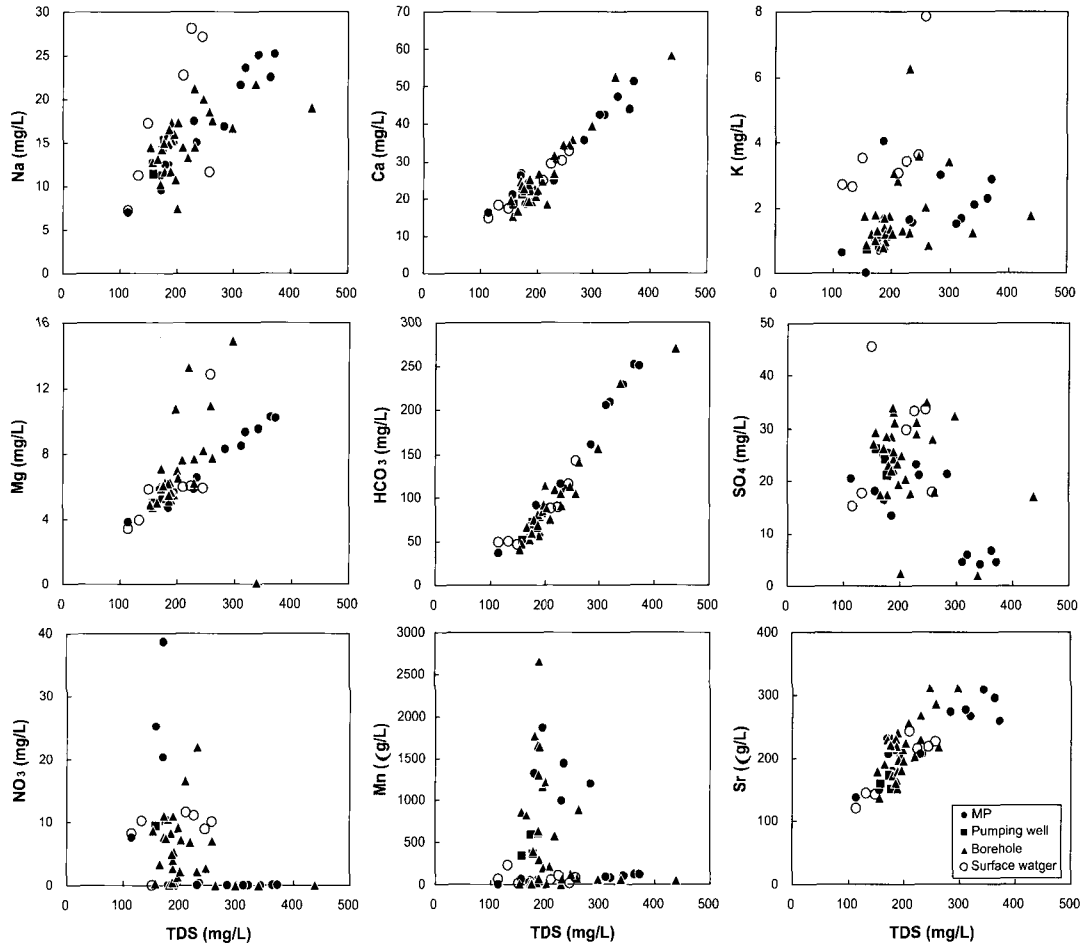


Fig. 5. Plots of TDS versus Na, Ca, K, Mg, HCO₃, SO₄, NO₃, Mn and Sr concentrations of water samples from the study area.

다중패커시스템이 설치된 SB-10공에 대한 심도별 시료를 구별하여 도시한 그림과 분석치를 살펴보면 (Fig. 4. Table 2). 다중패커시스템 설치공에서 심도에 따른 용존이온 함량의 증가와 특히 HCO₃ 함량의 증가가 명확히 관찰되며 최하부의 시료 (18m)에서 SO₄ 함량이 가장 낮은 값을 보이면서 상대적으로 심부로 갈수록 Ca-SO₄형에서 Ca-HCO₃형으로 변하고 있음을 알 수 있다. 그러나 다중패커 구간의 최하부 구간을 제외하고는 양수정 관련공이나 기타 관측공에서의 특별한 변화나 차이점은 관찰할 수 없다. 이는 연구지역에

분포하는 퇴적암내의 황화광물과의 반응에 의한 결과라기 보다는 연구지역의 자연수 시료들이 충적층내에 존재하는 시추공에서 채취되었고 채취 심도도 지표하 10m 내외이기 때문에 충분한 물-암석반응에 의한 지하수화학성분의 특성을 보여 주지 못하고 지표수와 혼합에 의한 오염 특성을 보여주고 있는 것으로 해석될 수 있다. 단지 S-2 지표수의 경우 다른 시료에 비해 신라역암층내에 존재하는 저수지 시료이기 때문에 지표수이기는 하지만 주변 기반암의 차이에 의하여 상대적으로 SO₄ 함량이 높아진 것으로 보이나 지역적

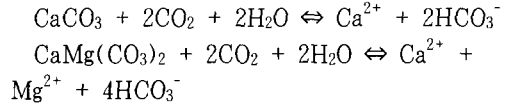
인 오염에 의한 영향도 배제할 수 없다. 또한 농업용 관정의 경우 깊은 채취심도에 의해 다른 얕은 심도의 관측공에 비해 용존이온 함량이 높으며 이는 뒤에서 설명하는 삼중수소 함량 분석결과와도 잘 일치한다.

연구지역 자연수의 시료채취시기에 따른 변화는 강수의 영향으로 5월 2일에 채취한 시료에 있어서 전반적으로 이온들의 함량이 약간 감소한 경향이 보이기는 하지만 뚜렷하지는 않다 (Table 2). 또한 Na와 Ca의 상대적 함량도 시료채취시기에 따른 변화가 거의 없다. 자연수내에 Ca 이온은 일반적으로 Ca-사장석이나 탄산염광물의 용해에 기인한다. 연구지역의 기반암이 정상계 퇴적암이기는 하지만 연구지역의 대부분을 차지하고 있는 진주층, 칠곡층의 주 구성암석이 사암, 셰일, 이암 등으로서 특별히 석회암층이 협재되거나, 탄산염광물이 풍부한 층이 보고되어 있지 않기 때문에 퇴적암내의 탄산염광물 뿐 아니라 장석에 의한 영향도 배제할 수 없다. 그러나 Mg의 함량이 일반 화강암을 기반암으로 하는 지하수보다 비교적 높으며 연구지역내 시료중에서 비교적 깊은 심도에서 채취된 시료의 경우 일반 관측공보다 Mg, Ca, HCO₃ 함량이 높은 것으로 보아 탄산염광물의 영향이 더 큰 것으로 판단된다. 그러나 이와 같이 기반암에 따른 자연수의 화학특성 변화 및 다중패커시스템 설치공에서 밝혀진 심도별 지하수 화학특성 차이 등에 대하여는 기반암이나 층적층을 구성하고 있는 지질시료에 대한 화학분석결과가 뒷받침되어야 보다 명확해질 것이다.

용존원소별 분포특성을 보다 명확히 알아보기 위하여 물-암석반응의 정도 및 지하수 진화정도를 종합적으로 나타내는 변수인 총 용존고체함량 (TDS)을 기준으로 하여 여러 수리화학적 특성의 변화를 살펴보았다 (Fig. 5). Fig. 5에서 살펴보면 Na, Ca, Mg, HCO₃ 이온이 TDS와 정의 상관관계를 보이고 있으며 K, SO₄는 명확한 관계를 보이지 않는다.

앞서서도 설명하였듯이 일반적으로 지하수내 용존되어 있는 Ca의 기원은 주로 방해석 (CaCO₃)이나 돌로마이트 (CaMg(CO₃)₂)같은 탄산염광물의 용해, 퇴적암내에 존재하는 석고 (CaSO₄·2H₂O)나 경석고 (CaSO₄), 그리고 일부

는 사장석 (CaAl₂Si₂O₈)의 용해로부터 기원된다 (Hounslow, 1995). 일반적으로 탄산염광물이 용해되면 다음과 같은 반응을 따른다 (Appelo and Postma, 1994):



상기 식을 근거로 하였을 때 연구지역의 지하수내 Ca기원이 방해석이나 돌로마이트와 같은 탄산염광물의 용해일 경우, 지하수내로 Ca, Mg 및 HCO₃가 방출되게 된다. 따라서 연구지역의 자연수 시료들에서는 Ca뿐 아니라 Mg 함량도 비교적 높게 나타나게 되며 Mg 이온 역시 TDS와 정의 관계를 명확하게 보여주게 된다. 자연수내 Mg의 주요 기원으로서 돌로마이트 뿐 아니라 운모류의 용해도 고려할 수 있다. 그러나 연구지역 지하수에 대해서는 K의 함량변화가 뚜렷하지 않다. 이는 K 함유 광물인 정장석의 용해반응이 아직 상당한 정도로 진행되지 않았음을 시사하기도 하지만 한편으로는 대부분의 K가 일라이트 등의 점토광물로 다시 침전될 수 있어서 대부분 지하수 내에서는 미량 분포하는 것이 일반적이기 때문이다. 다만 K가 TDS의 증가에 따라 체계적인 증가현상을 보이지 않는 것으로 보아, Mg가 운모류의 용해보다는 돌로마이트의 용해에 기인하는 것으로 판단된다.

용존 음이온 중에서는 HCO₃와 SO₄의 함량이 높으나 HCO₃ 함량만이 TDS와의 상관관계를 잘 보여주고 있다. 결국 물-암석반응이 진행될수록 (총 용존이온함량이 높아질수록) 용존량이 체계적으로 증감하는 대표적인 이온종은 Ca, Na, Mg 및 HCO₃ 이며, 이들 이온종의 상대적인 양적 변화에 있어서 층적층이나 기반암의 화학조성 및 광물조성이 연구지역 시료들의 화학적 특성을 제어하는 중요한 요인이 될 수 있음을 보여준다. 미량원소의 경우 앞서 설명한 바와 같이 Mn의 함량이 매우 높으며 일반적으로 Ca와 화학적 거동이 유사한 것으로 알려져 있는 Sr의 함량은 TDS와의 상관관계를 잘 보여주고 있다.

장변여과수 개발을 위한 낙동강 충적층 지하수의 지구화학적 특성연구

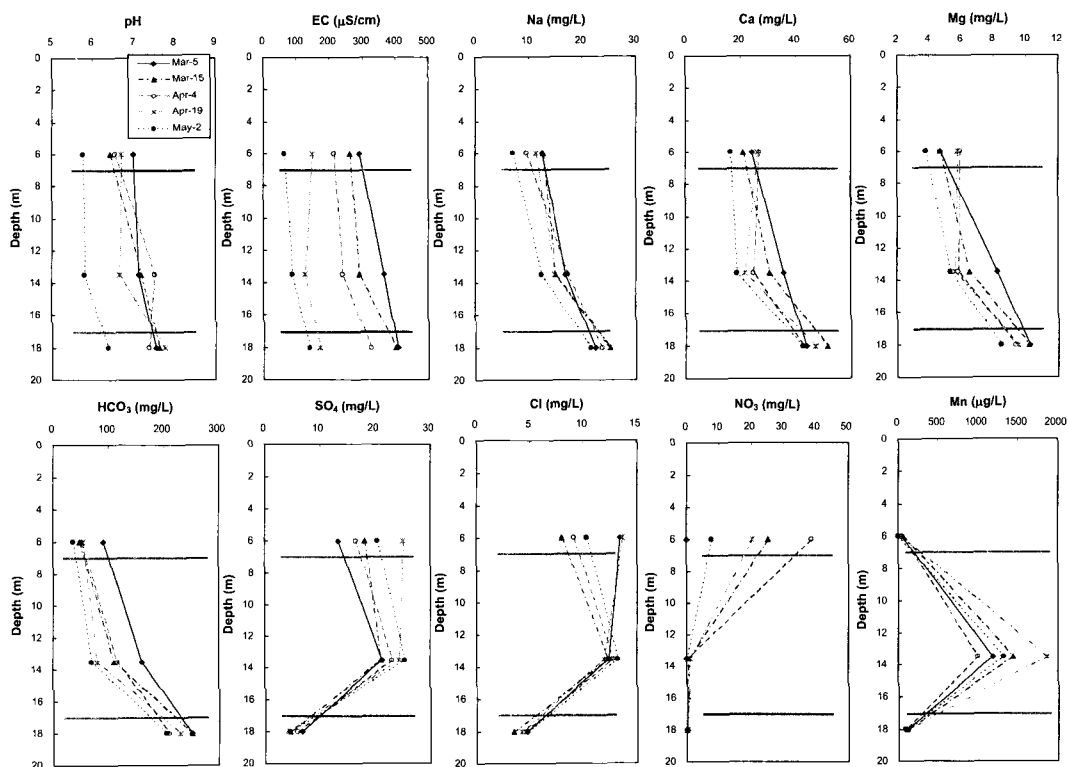


Fig. 6. Plots of pH, EC, Na, Ca, Mg, HCO₃, SO₄, Cl, NO₃ and Mn concentrations versus sampling depth.

다중패커시스템을 이용한 심도별 분석결과

장기양수시험공 (SW-2)에서 낙동강쪽으로 약 5m 떨어진 SB-10 관측공에 설치된 다중패커시스템에 의해 채취된 시료의 현장 분석 및 화학분석치에 대해 심도에 따른 변화를 도시하여 보았다 (Fig. 6).

다중패커시스템의 설치시기가 2002년 2월 27일이고 처음 시료채취날짜가 3월 5일이며 장기양수시험공의 운영시작 시기가 4월 1일임을 감안할 때 총 6회의 시료채취 중 분석결과를 아직 얻지 못한 5월 15일 시료를 제외하고 5회의 채취된 시료에 의하면 전반적으로 양수전과 양수시작시기 및 이후의 수질이 양수에 의한 뚜렷한 변화는 관찰되지 않는다. 다만 일반적인 현상으로서 pH값과 EC값이 심부로 갈수록 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 특히 EC값의 경우 초기 채취된 시

료로부터 최근에 채취된 시료까지 전 심도구간에 걸쳐서 일정하게 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 실제로 양수에 의한 현상인지 다중패커시스템 설치 후 비교적 잦은 강수에 의한 영향인지는 아직 확실하지 않다. 양이온 및 음이온의 경우 Na, Ca, Mg, HCO₃가 심도의 증가에 따라 증가하고 있으며 음이온 중 Cl과 SO₄의 경우는 맨 하부 구간인 지표하 18m에서 채취된 시료들이 시료채취 시기와 관계없이 매우 낮은 값을 보인다. 이는 맨 하부구간이 기반암에서 채취된 시료로서 상부 구간들의 충적층과는 달리 상대적으로 오염의 영향을 덜 받기 때문인 것으로 해석할 수 있으나 상부구간과 상이한 지하수 유동특성 및 물-암석반응과정에 의한 결과일 가능성도 있기 때문에 좀더 확실한 해석을 위해서는 기반암에 대한 광물학적 및 화학적 분석이 요구된다. 또한 NO₃

Table 3. Dissolved organic carbon contents of various kinds of waters from the Daegu area.

Sample No.	Sampling Date	DOC (ppm)
MP		
MP (6m)	02-4-19	0.44
MP (13.5m)	02-4-19	0.13
MP (18m)	02-4-19	0.07
Shallow groundwater		
SW-2	02-4-19	0.22
SB-9	02-4-19	2.04
SB-11	02-4-19	1.11
SB-12	02-4-19	0.79
DW-1	02-4-19	0.39
DW-1-3	02-4-19	0.46
Surface water		
S-1	02-4-19	2.30
S-2	02-4-19	3.69

함량의 경우에는 지표하 6m 지점 아래의 심도에서는 시료채취시기와 관계없이 전혀 검출되지 않는다. 미량원소의 경우 문제가 되는 Mn은 시료채취시기와 관계없이 중간구간인 13.5m 구간에서 특히 많은 함량을 보이고 있다. 이는 실제로 양수에 의한 강물의 유동이 대수층인 중간의 자갈층을 통해 이루어지고 있는 것으로 해석할 수 있으나 충적층을 구성하는 층간의 화학특성 차이에 의해서도 나타날 수 있는 현상으로서, 상부의 모래층과 중간의 자갈층, 그리고 하부의 기반암에 대한 화학분석결과가 필요하다.

용존유기탄소 분석결과

장기양수시험공 (SW-2)과 주변관측공 및 SB-10 관측공에 설치된 다중패커시스템에 의해 채취된 시료와 주변 지표수의 유기물에 의한 오염도를 알아보기 위하여 용존유기탄소 (DOC) 함량을 Table 3에 정리하였다. 분석결과에 의하면 낙동강물의 경우 2.3 ppm의 용존유기탄소 함량을 보이는데 반하여 양수정의 경우 0.22 ppm으로서 약 90% 정도 감소하고 있는 것으로 나타났다. 강변에서 가장 가까운 관측공인 SB-12관측공 시료에서 0.79 ppm으로 감소하고 있으며, 다중패커시스템에 의해 채취된 시료에서도 가장 상부 구

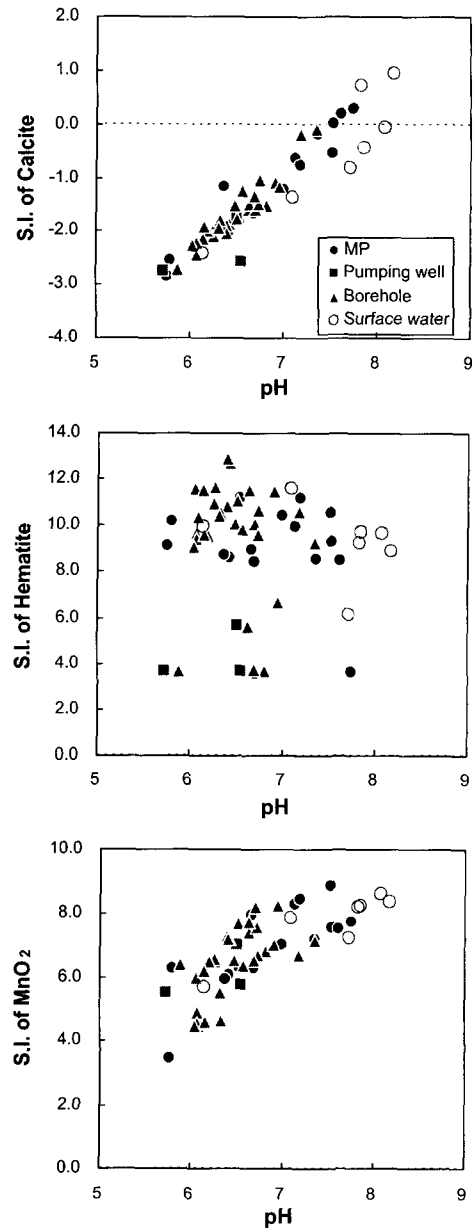


Fig. 7. Plots of pH versus saturation indices (S.I.) of calcite, hematite and MnO₂ in various kinds of waters from the study area.

간인 6m 구간에서 0.44 ppm으로서 전체적으로는 0.7 ~ 0.44 ppm의 감소된 값을 보이고 있다. 그러나 강변과 양수정 사이의 다른 관측공인 SB-9

강변여과수 개발을 위한 낙동강 충적층 지하수의 지구화학적 특성연구

Table 4. Saturation index of various kinds of waters from the Daegu area.

Sample no.	Sampling Date	Albite	Anorthite	Beide-Na	Calcite	Chlorite	Dolomite	Goethite	Hematite	Kaolinite	Micorcline	Mn ₂ O ₃	MnO ₂	Quartz
MP														
MP (6m)	02-3-5	1.56	-0.96	6.41	-1.22	-0.22	-2.68	5.35	10.44	8.90	4.21	5.73	7.04	0.87
"	02-3-15	-2.63	-8.40	-1.99	-2.02	-11.02	-4.15	4.42	8.64	2.00	-1.72	4.27	6.08	0.67
"	02-4-4	-1.91	-6.27	0.18	-1.81	-8.10	-3.77	5.70	11.18	4.00	0.16	4.48	6.29	0.57
"	02-4-19	-2.87	-8.50	-2.53	-1.67	-9.36	-3.50	4.33	8.43	1.59	-0.80	4.42	6.28	0.60
"	02-5-2	-6.69	-14.91	-8.93	-2.85	-22.73	-5.75	4.64	9.11	-3.42	-4.80	-0.84	3.49	0.41
MP (13.5m)	02-3-5	1.38	-1.23	5.32	-0.64	2.24	-1.42	5.10	9.98	7.87	3.71	8.48	8.28	0.85
"	02-3-15	2.27	0.33	6.88	-0.75	4.57	-1.64	5.70	11.20	9.07	4.29	9.04	8.44	0.94
"	02-4-3	1.49	-1.35	4.55	-0.53	4.92	-1.16	5.39	10.56	7.04	3.52	9.58	8.85	0.90
"	02-4-19	-1.80	-7.77	-1.42	-1.56	-7.90	-3.16	4.58	8.96	2.15	0.08	7.98	7.95	0.90
"	02-5-2	-5.32	-14.78	-7.75	-2.55	-21.96	-5.12	5.21	10.21	-3.03	-3.54	4.57	6.26	0.91
MP (18m)	02-3-5	1.85	-0.68	5.17	0.02	6.25	-0.09	4.78	9.33	7.59	3.80	7.03	7.58	0.82
"	02-3-15	1.21	-1.52	3.64	0.20	6.42	0.23	4.35	8.48	6.29	3.32	7.18	7.55	0.80
"	02-4-4	0.65	-2.54	2.92	-0.19	3.45	-0.50	4.39	8.56	5.75	2.54	6.50	7.21	0.78
"	02-4-19	-1.56	-6.65	-2.91	0.30	2.59	0.45	1.91	3.63	0.71	0.36	7.58	7.72	0.71
"	02-5-2	-2.79	-9.11	-3.01	-1.16	-10.96	-2.46	4.46	8.72	1.00	-0.96	4.09	5.96	0.74
Shallow groundwater														
SW-2	02-4-3	-1.41	-6.10	0.54	-1.76	-7.78	-3.59	2.95	5.69	4.14	0.38	6.10	7.01	0.67
"	02-4-19	-5.89	-14.87	-8.15	-2.58	-22.91	-5.23	1.95	3.70	-3.05	-4.02	3.60	5.76	0.63
"	02-5-2	-5.19	-13.53	-6.50	-2.74	-21.55	-5.52	1.95	3.70	-1.67	-3.36	3.13	5.52	0.69
SB-9	02-3-15	-0.52	-5.02	1.32	-1.03	-4.04	-2.18	5.42	10.64	4.48	1.19	7.30	7.57	0.87
"	02-4-4	-1.02	-5.62	0.90	-1.60	-6.00	-3.21	2.92	5.64	4.32	0.74	6.95	7.42	0.74
"	02-4-19	-2.61	-8.48	-2.76	-1.51	-8.21	-3.05	1.91	3.62	1.23	-0.66	7.30	7.59	0.67
"	02-5-2	-4.90	-13.74	-6.71	-2.71	-20.50	-5.41	1.96	3.71	-2.07	-3.04	4.70	6.39	0.83
SB-11	02-3-15	-0.04	-4.45	3.16	-1.87	-6.80	-3.78	6.46	12.70	6.13	1.82	6.62	7.20	0.92
"	02-4-4	0.37	-3.17	4.11	-1.77	-4.52	-3.56	5.63	11.06	7.02	2.08	7.51	7.71	0.82
"	02-4-19	-2.03	-8.13	-1.80	-1.59	-8.37	-3.22	5.15	10.08	1.89	-0.18	8.38	8.18	0.84
SB-12	02-3-15	-0.62	-5.39	2.11	-1.90	-8.29	-3.86	6.56	12.89	5.32	1.16	6.74	7.30	0.86
"	02-4-4	0.10	-3.34	3.33	-1.50	-3.49	-3.06	5.87	11.55	6.37	2.11	7.60	7.73	0.75
"	02-4-19	-1.74	-7.35	-1.37	-1.51	-6.39	-3.07	1.94	3.68	2.25	0.11	8.17	6.81	0.79
SW-1	02-2-19	0.53	-2.38	5.45	-1.97	-5.69	-3.97	5.57	10.93	8.33	2.56	5.14	6.47	0.78
"	02-3-2	-2.17	-7.79	-0.87	-2.09	-11.06	-4.20	5.93	11.65	2.91	-0.15	5.14	6.56	0.78
SW-1-1	02-2-19	0.29	-3.25	5.33	-2.18	-7.60	-4.15	5.92	11.60	8.25	2.49	3.84	6.00	0.85
SW-1-5	02-2-19	-0.18	-4.34	3.50	-1.98	-6.26	-3.57	4.88	9.55	6.56	1.83	5.20	6.50	0.86
SB-1	02-2-19	0.86	-2.79	5.45	-2.05	-5.77	-4.13	5.52	10.81	8.10	2.91	6.32	7.20	0.95
SB-4	02-2-19	2.36	0.51	8.00	-1.09	2.52	-2.20	5.86	11.48	10.22	4.50	5.79	7.03	0.87
SB-5	02-2-19	-0.24	-3.53	3.87	-1.51	-6.12	-3.16	5.17	10.09	7.16	2.15	4.77	6.52	0.55
SB-6	02-2-19	0.36	-3.14	4.43	-1.24	-3.64	-2.42	5.04	9.82	7.36	2.81	4.43	6.37	0.80
DB-1	02-2-19	0.80	-3.03	5.78	-2.14	-7.79	-4.30	5.90	11.54	8.43	3.22	4.14	6.20	0.99
DB-2	02-2-19	-0.65	-4.58	3.14	-1.80	-8.95	-3.77	5.39	10.52	6.56	1.95	1.02	4.66	0.56
DB-3	02-2-19	0.72	-2.85	4.34	-1.17	-1.08	-2.36	3.45	6.66	6.98	3.05	8.26	8.26	1.04
DW-1	02-2-19	-0.92	-4.92	2.12	-1.93	-7.81	-3.91	5.32	10.43	5.58	1.13	3.17	5.52	0.64
DW-1-1	02-2-19	-1.14	-5.28	2.12	-2.45	-10.28	-4.94	4.94	9.69	5.66	0.93	1.90	4.90	0.62
DW-1-2	02-2-19	-0.42	-4.01	3.75	-2.25	-8.39	-4.50	5.27	10.34	6.97	1.58	1.10	4.48	0.75
DW-1-3	02-2-19	-1.40	-5.61	1.65	-2.22	-10.40	-4.49	4.82	9.44	5.30	0.69	1.14	4.55	0.59
DW-1-5	02-2-19	-1.62	-5.55	1.34	-1.91	-9.76	-3.89	4.90	9.61	5.17	0.62	1.37	4.59	0.44
DW-1-6	02-2-19	-1.57	-6.25	1.11	-2.27	-11.23	-4.57	4.63	9.07	4.77	0.36	1.10	4.47	0.65
BH-1	02-2-19	1.43	-1.37	4.47	-0.09	-5.66	-2.37	4.73	9.24	7.01	3.10	6.27	7.17	0.84
BH-2	02-2-19	-0.22	-3.91	1.64	-0.18	2.31	-0.18	5.43	10.63	4.78	1.78	5.49	6.69	0.75
Surface water														
S-1	02-2-19	0.38	-2.13	3.12	-0.43	4.88	-1.04	4.99	9.70	6.30	2.72	7.90	8.23	0.42
"	02-3-15	-0.65	-2.63	0.99	-0.05	6.83	-0.30	4.94	9.64	4.76	1.53	8.96	8.60	0.04
"	02-4-3	-2.26	-3.52	-2.84	0.94	12.69	1.71	4.56	8.91	1.86	-0.17	8.58	8.35	-0.54
"	02-4-19	-0.66	-2.83	2.53	-1.36	-0.45	-2.83	5.88	11.57	6.13	1.70	7.80	7.86	0.29
"	02-5-2	-3.23	-7.34	-0.80	-2.42	-13.06	-4.94	5.07	9.95	3.71	-0.65	3.41	5.68	0.20
S-2	02-4-19	-5.22	-9.32	-7.21	-0.80	-1.77	-1.53	3.16	6.13	-1.62	-2.86	6.53	7.22	-0.43

와 SB-11에서는 각각 2.04 및 1.11 ppm으로서 높은 값을 나타내어 강변과 양수정 사이의 거리에 따른 일률적인 감소 경향을 보이고 있지는 않다.

광물의 포화지수

강변여과수를 개발하기 위한 장기양수시험공의 운영에 있어서 원활한 지하수의 흐름과 안정적인 수두를 유지하는 것이 필수적인데 이를 저해하는 중요한 요인 중의 하나가 양수펌프의 효율을 떨어뜨리는 광물의 침전이다. 이를 유발시키는 요인들은 생물학적 요인 및 화학적 요인이 있을 수 있다. 여기서는 지구화학적 요인들만을 고려하여 보면 용존 양이온과 음이온들의 반응에 의한 침전현상과 산화환원전위에 따른 수산화물로의 침전현상이 중요한 요인이 될 수 있다.

따라서 모든 물시료들에 대한 물리화학적 분석결과를 이용하여 광물들의 포화지수를 SOLVEQ 컴퓨터 프로그램으로 계산하였다. 그 결과 중 자연계에서 일반적인 2차적 침전광물로 알려진 광물들과 연구지역 자연수 시료에서 문제가 될 수 있는 Mn 이온종에 대한 포화지수를 Table 4에 나타내었다. 또한 방해석(calcite), 적철석(hematite), MnO₂에 대하여 이러한 광물의 침전에 가장 중요한 변수인 pH에 관해서도 도시하여 보았다 (Fig. 7). 어떤 광물의 포화지수가 0보다 큰 경우는 과포화 상태로서 침전될 가능성이 있음을 의미하고, 0보다 작은 경우에는 불포화 상태로서 용존이온 상태로 존재할 가능성이 큼을 의미한다. 또한 포화지수가 0일 경우는 그 광물이 물과 평형상태로 존재할 가능성이 큼을 의미한다 (Faure, 1991). 계산결과에 따르면 pH가 증가함에 따라 방해석의 경우는 평형상태 및 과포화 상태에 도달함을 알 수 있다. 또한 강변여과수의 개발측면에서 가장 문제가 되고있는 취수정에서의 높은 Fe, Mn 함량에 대해서 Fe의 광물종인 적철석, 침철석은 모두 과포화상태에 있어서 침전가능한 상태이며 Mn의 경우는 MnO₂와 Mn₂O₃ 이온종에 대해 모두 과포화상태에 있음을 알 수 있다. 따라서 현재 장기양수시험공 및 이와 인접한 SB-9공 시료에서 관찰되어지는 검붉은 침전물의 존재는 이들의 침전 및 이후의 공기와 의 접촉에 의한 산화에 의한 결과로 해석할 수 있

다. 그러나 일반적으로 강변여과수 개발을 위한 장기 양수시설 및 기타 지하비축기지 운영 등에서 크게 문제가 되고 있는 막힘 현상은 이러한 화학적 요인 이외에도 생물학적 요인이 매우 크게 작용하고 있는 것으로 알려져 있기 때문에 이에 의한 영향도 배제할 수 없다.

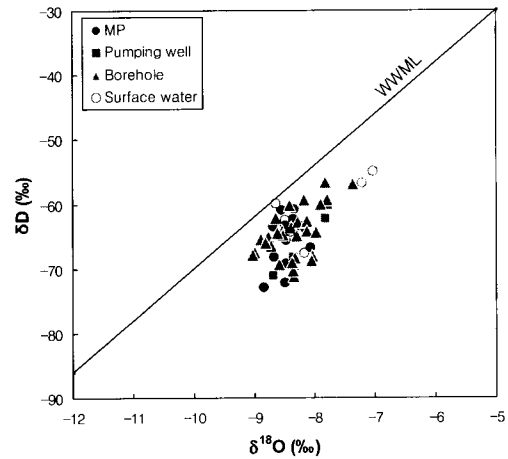


Fig. 8. δD versus $\delta^{18}O$ diagram for the water samples from the study area.

산소-수소 안정동위원소

연구지역내 물시료들에 대한 현재까지의 산소 및 수소 동위원소 분석결과가 Table 5에 제시되어 있다. 전체적으로 산소 및 수소 동위원소 결과는 다중패커시스템에 의해 심도별로 채취된 시료나 일반 주변 관측공 및 지표수간에 큰 차이를 보이지 않는다. 이들 연구지역 자연수 시료들의 분석결과에 대한 $\delta^{18}O$ 와 δD 의 분포를 Fig. 8에 나타내었다. 모든 시료들이 세계 강우 직선에 평행하게 도시되어 지표수 및 모든 지하수들이 강우 기원임을 나타내고 있다. Fig. 8에 도시되어 있듯이 다중패커시스템에 의해 심도별로 채취된 시료나 일반 주변 관측공 시료 및 지표수 시료에 대해 산소 및 수소 동위원소 값들이 서로 중첩되어 명확한 차이를 보이지 않는다. 이는 아마도 시료들이 모두 낙동강과 인접한 충적층내의 관측공에서 채취되어 지표수와 동위원소적으로 거의 동일한 경향을 보이는 것으로 판단된다. 또한 시료채취

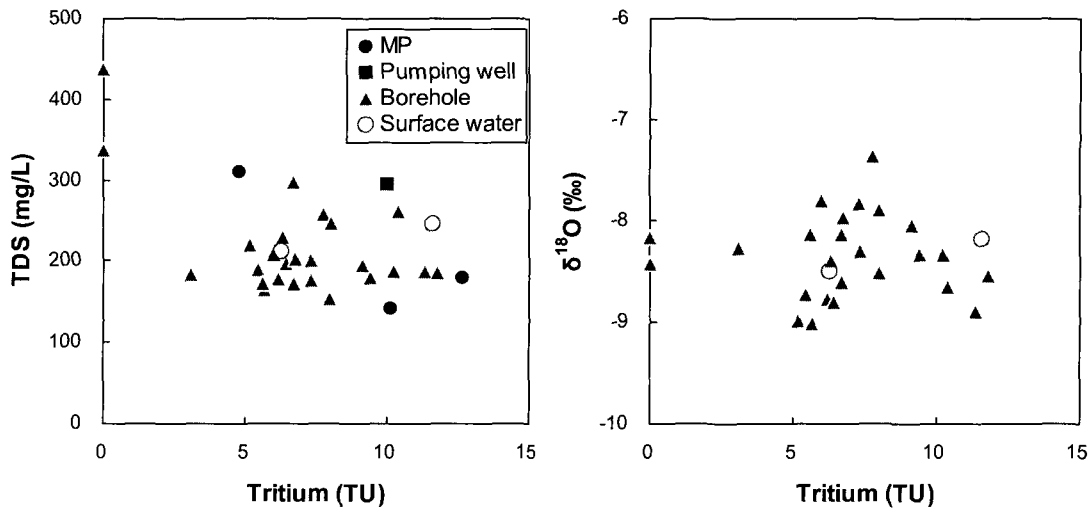


Fig. 9. Plot of tritium versus TDS and $\delta^{18}\text{O}$ for the water samples from the study area.

시기에 따라 강변으로부터 양수정간에 산소, 수소 동위원소값들의 체계적인 공간적 분포변화를 보이지 않는다. 따라서 현재까지의 분석결과로는 강변여과수 개발을 위한 장기양수에 의해 낙동강 물이 양수정으로 함양되는 특성을 추적하기에는 다소 무리가 있다. 더구나 연구지역 충적층내 지하수 시추공 및 관측공들의 심도가 각각 25m와 10m 이내로서 비교적 얕으며 충적층 자체도 상부로부터 모래층과 자갈층으로 주로 구성되어 있어서 강수에 의한 직접적인 영향을 받기가 쉽다는 점을 감안한다면 현재 보여지는 동위원소 특성은 가장 최근의 강수 사건에 의한 평균값들이 충적층 전체에 걸쳐서 나타내지고 있기 때문에 동위원소적으로 거의 동일한 경향을 보이는 것으로 판단된다.

삼중수소

지하수의 상대적인 체류시간을 나타내 주는 삼중수소에 대한 분석결과를 살펴보면 다중패커 시료들이 4.8~10.1TU, 일반 관측공 시료들이 농업용 관정 두 곳을 제외하고 3.1~12.7TU이며 지표수가 6.3~11.6TU를 보인다 (Table 5). 대부분 지표수 및 충적층 지하수 시료들이 국내에서 나타나는 강우의 삼중수소 함량 (~ 10TU) 범위에

해당하는 값을 나타내고 있으나 (김규한, 1988), 다중패커 시료 중 암반층의 가장 깊은 심도 (18m)에서 채취된 시료의 삼중수소 함량이 4.8TU를 보이며 이밖에 비교적 채수 심도가 깊은 농업용 관정 시료가 0TU값을 보인다. 이처럼 0TU에 가까운 낮은 값을 나타내는 농업용 관정 시료들은 이들 지하수의 충전시기가 주로 핵실험 이전인 1950년대 이전으로서 상대적인 체류시간이 다른 암반 지하수들에 비해 길어서 50년 이상의 것으로 추정된다. 또한 농업용관정과 비교하여 다중패커 시료 중 암반지하수에 해당하는 최하부의 시료 역시 0TU에 가까운 값을 나타낼 것으로 사료되나 상부의 천부지하수 및 지표수의 혼입에 의해 중간 정도의 값을 보이는 것으로 판단된다. 0TU에 가까운 값을 보이는 농업용 관정 및 다중패커 하부 시료를 제외하고는 연구지역 관측공의 지하수들은 삼중수소 함량이 대부분 10TU 내외로 지표수 및 천부지하수와 혼입 양상을 보인다. 또한 양수정 및 다중패커시스템이 설치된 SB-10 번공과 낙동강사이의 일련의 관측공들 (SB-9, 11, 12) 시료들의 삼중수소 함량에서 명확한 차이나 변화양상이 관찰되지 않는다. 따라서 이들 충적층 지하수와 천부지하수들은 관정 깊이가 매우 낮기 때문에 강변여과수 개발을 위한 장기 양수

뿐만 아니라 주변 지표수가 직접적으로 유입, 혼합된 영향을 받고 있는 것으로 생각할 수 있다.

강수가 지표로부터 지하로 충전된 후 지하수 유동경로를 따라 진화하게 되면 충전고도를 반영하여 심부지하수의 산소동위원소 조성은 대체로 낮은 특성을 보이게 된다. 또한 지하수가 지하 깊은 곳으로 진화하게 된다면, 상대적인 체류시간이 길어짐으로 인해 심부지하수 삼중수소 함량도 낮아지게 되고 오랜 물-암석 반응에 의해 지하수 내 용존이온 함량도 증가하게 된다. 연구 지역 충적층 지하수 및 지표수 시료들에 대한 삼중수소 함량과 산소동위원소 조성 및 TDS간의 상관관계를 도시해 보면 이러한 삼중수소 함량의 증가에 따른 산소동위원소값의 증가 및 총용존이온 함량 (TDS)의 감소경향이 명확하지 않다 (Fig. 9). 이는 연구지역내 강변여과수 개발을 위한 장기양수시험공과 주변 관측공들이 낙동강변의 광범위한 충적층 내에 속해 있으면서 그 심도가 얕아서 충적층 전반에 걸친 지표수 및 천층지하수의 혼합양상이 일반적이고, 일련의 강우사건에 대해 전체적으로 직접적인 영향을 받기 때문인 것으로 보인다.

황 및 스트론튬 동위원소

연구 지역의 자연수 시료에 대한 황 동위원소비는 2.1~4.8‰로서 (Table 5) 지하수내 황의 기원이 퇴적암을 구성하는 황산염광물의 용해에 의한 것으로 보인다. 황산염 이온 농도와 δ³⁴S와의 관계를 살펴보면 황산염의 농도가 높아질수록 황 동위원소비가 감소하는 양상을 보이고 있으나 자연수의 유형별 차이는 뚜렷하지는 않다 (Fig. 10). 일반적으로 지표수의 황산염 농도는 매우 낮지만 연구지역내의 낙동강물의 경우는 시료채취시기에 따라 15.2~33.5 mg/L (Table 2)의 매우 넓은 범위의 농도변화를 보여주며 상대적으로 깊은 심도의 다중패커 최하부 시료 및 농업용 관정을 제외하고는 모든 관측공 시료의 황산염 농도가 13.3~35.0 mg/L의 범위로서 낙동강물과 매우 유사하다. 또한, 황 동위원소 조성 역시 자연수의 유형별 차이없이 매우 유사한 값을 보이기 때문에 연구지역에서 나타나는 황산염 이온 함량과 황 동위원소비의 역비례 관계는 지하 환원환경에서의 반응

등에 의한 결과로 해석하기 보다는 연구지역 충적층내에서의 지하수와 지표수의 광범위한 혼합작용에 기인한 것으로 판단된다.

Table 5. Isotope data of various kinds of waters from the Daegu area.

Sample No.	Sampling Date	δ ¹⁸ O (‰)	δD (‰)	Tritium	δ ³⁴ S (‰)	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	δ ¹⁵ N (‰)
MP							
MP (6m)	02-3-5	-8.47	-65.6				
*	02-3-15	-8.69	-63.5				
*	02-4-4	-8.84	-72.9				
*	02-4-19	-8.67	-68.2	10.1		0.71456	2.2
*	02-5-2	-8.55	-60.9		3.2		
MP (13.5m)	02-3-5	-8.25	-63.4				
*	02-3-15	-8.45	-63.9				
*	02-4-3	-8.49	-72.2				
*	02-4-19	-8.48	-69.2	12.7		0.71459	
*	02-5-2	-8.34	-60.8				
MP (18m)	02-3-5	-8.16	-63.8				
*	02-3-15	-8.36	-62.4				
*	02-4-4	-8.50	-64.8				
*	02-4-19	-8.07	-66.7	4.8		0.71448	
*	02-5-2	-8.50	-63.3				
Shallow groundwater							
SW-2	02-4-3	-8.69	-71.1		3.7		
*	02-4-19	-8.36	-68.2	10.0		0.71455	0.8
*	02-5-2	-7.83	-62.2			2.7	
SB-9	02-3-15	-8.65	-62.2	10.4	4.6		
*	02-4-4	-8.34	-69.3	10.2			
*	02-4-19	-8.59	-69.4	12.7		0.71439	5.3
*	02-5-2	-7.80	-59.9			2.8	
SB-11	02-3-15	-8.89	-65.5	11.3	3.4		
*	02-4-4	-8.34	-71.2	9.4			
*	02-4-19	-8.33	-68.4	11.7		0.71487	
SB-12	02-3-15	-8.54	-64.2	11.8	2.8		
*	02-4-4	-8.04	-68.0	9.1			
*	02-4-19	-8.05	-68.7	11.2		0.71473	12.3
SW-1	02-2-19	-8.77	-65.0	6.2	3.4		
*	02-3-2	-8.72	-66.5	5.5	4.8		
SW-1-1	02-2-19	-8.81	-66.1	6.4			
SW-1-5	02-2-19	-8.99	-67.5	5.2			
SB-1	02-2-19	-9.02	-67.9	5.7			
SB-4	02-2-19	-7.37	-57.0	7.8			
SB-5	02-2-19	-8.52	-64.8	8.0			
SB-6	02-2-19	-8.61	-64.5	6.7			
DB-1	02-2-19	-7.80	-59.3	6.0			
DB-2	02-2-19	-8.39	-63.6	6.3			
DB-3	02-2-19	-7.83	-56.7	7.3			
DW-1	02-2-19	-8.28	-62.8	3.1			
*	02-4-19	-8.35	-70.4			0.71509	5.7
DW-1-1	02-2-19	-7.90	-60.1	8.0			
DW-1-2	02-2-19	-8.13	-62.7	5.6			
DW-1-3	02-2-19	-8.13	-64.2	6.7			
*	02-4-19	-8.37	-69.1				-2.6
DW-1-5	02-2-19	-7.97	-64.3	6.8			
DW-1-6	02-2-19	-8.30	-64.9	7.3			
BH-1	02-2-19	-8.42	-60.2	0.0			
BH-2	02-2-19	-8.17	-59.4	0.0			
Surface water							
S-1	02-2-19	-8.50	-62.5	6.3			
*	02-3-15	-8.40	-64.4		2.1		
*	02-4-3	-8.18	-67.6	11.6			
*	02-4-19	-7.21	-56.8	10.4	4.5		5.8
*	02-5-2	-6.55					
S-2	02-4-19	-7.04	-55.0				

스트론튬은 Ca 와 화학적 거동이 유사하기 때문에 스트론튬 동위원소비는 Ca의 기원을 유추하는데 이용되며 (Drever, 1997), 물-암석 반응이나 광물의 풍화작용에 대한 지화학 추적자로 이용되고 있다 (Johnson and Depallo, 1994; Bullen et al., 1996; Brantley et al., 1998; 고용권 외, 1999; 김건영 외, 2000). 본 연구에서는 유형별

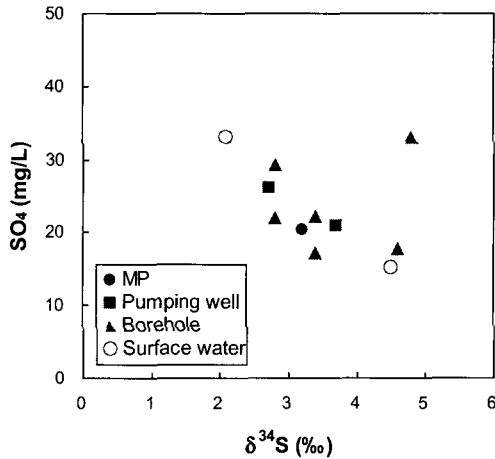


Fig. 10. Plot of SO_4 (mg/L) versus $\delta^{34}\text{S}$ (‰) of various kinds of waters from the study area.

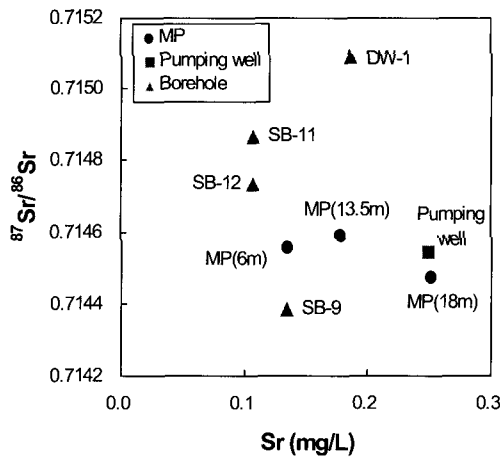


Fig. 11. Plot of Sr (mg/L) versus $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio of various kinds of waters from the study area.

자연수 시료에 대한 스트론튬 동위원소 분석을 통하여 장기양수를 통한 강변여과수 개발지역의 지하수 함양특성을 평가할 수 있는 가능성을 평가하고자 하였다. 이에 따라 분석된 스트론튬 동위원소비는 양수정 및 다중패커시스템 설치공을 포함한 주변공의 시료들은 0.714385~0.714589의 값을 보이며 강변에 인접한 관측공의 시료들은

0.714734~0.714870, 양수정에서 충적층을 벗어난 DW-1공의 시료는 0.715092의 값을 보여 명확하지는 않지만, 비교적 앞서 설명한 일반 지화학분석 자료 및 환경동위원소 분석결과들에 비해서는 유형별 구분이 가능하기 때문에(Fig. 11) 좀더 체계적인 시료채취 및 분석이 수행된다면 강변여과수 개발지역의 함양특성 및 지하수 유동체계를 해석하는데 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

질소 동위원소

지구전체에서 질소가 차지하는 비율은 0.03%이며, 이 0.03%에서 암석이 차지하는 비율은 97.76%, 대기는 2.01% 그리고 나머지는 수권과 생물권이 차지한다 (Hubner, 1986). 이러한 자연 환경에서 인간의 활동은 NO_x , NH_3 , N_2O 의 방출을 급격히 증가시켜서 육상에서 수권으로, 대기에서 지표로의 질소의 유동이 산업화와 농업활동의 증가와 더불어 급격히 증가하여 광범위한 질소순환을 야기시켰다. 이러한 질소순환 (nitrogen cycle)에서 일어나는 반응들 중 농업활동과 관련된 질산염 오염은 천부 대수층에서 일어나는 하나의 주요한 문제점이며, 지하수공급에 큰 위협을 야기한다. 서로 다른 기원의 질산염들은 동위원소적으로 특징적인 질소 및 산소 동위원소 조성을 보이기 때문에 동위원소는 여러 경우에서 질산염 오염원의 직접적인 파악의 수단을 제공한다. 또한 질산염의 생물학적인 순환 (예, 탈질산화작용)은 예견 할 수 있고 인지할 수 있는 방향에서 질소 및 산소 동위원소비를 변화시킨다. 일반적으로 질소오염원으로 알려진 화학비료 ($0 \pm 4\%$, Kendall, 1998), 축산분뇨 ($+15 \pm 5\%$, Kreitler, 1979), 토양유기물 ($+2.7 \pm 3.4\%$, Broadbent et al., 1980)에 대한 질소동위원소 조성은 각각 고유한 값을 갖고 있어 질소오염원을 동위원소를 이용하여 평가할 수 있다. 또한 지하수내 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 지하수가 유동로를 따라 유동하는 과정에서 암모니아 휘발반응 (ammonia volatilization), 질산화작용(nitrification), 탈질산화작용 (denitrification), 이온교환반응 및 식물신진대사 등의 여러 가지 반응에 의해 변화하기 때문에 질소 동위원소값을 이용하여 정량적인 오염원을 해석하는데는 매우 세심한 주의가 필요하다 (Hauck et al., 1972).

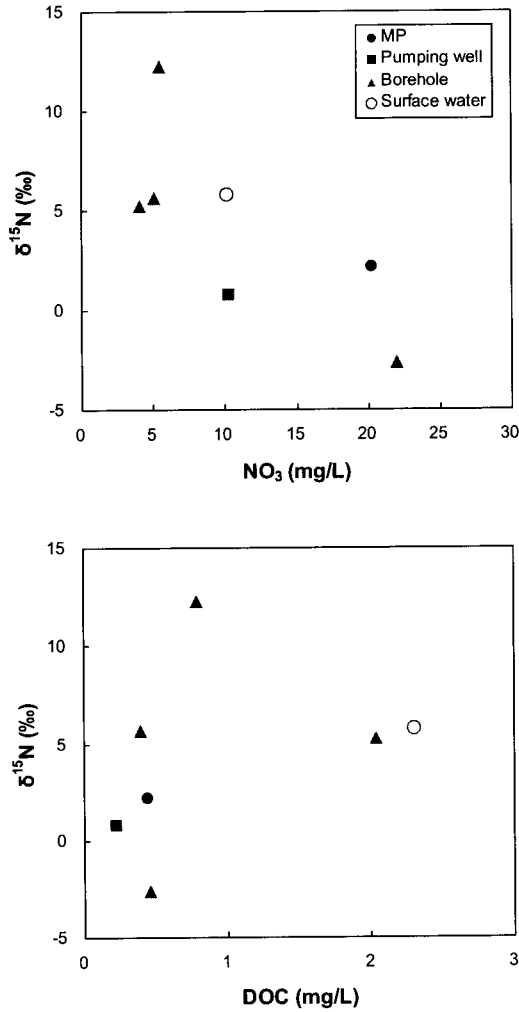


Fig. 12. Plot of $\delta^{15}\text{N}$ versus NO_3^- contents and DOC (mg/L).

이와 관련하여 연구지역내 물시료들에 대한 질소동위원소에 대한 일부 분석치가 Table 5에 제시되었다. 질소동위원소 분석결과를 살펴보면 전반적으로 NO_3^- 의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 $-2 \sim +5$ ‰로서 화학비료나 토양내의 유기물로부터 유래한 것으로 해석할 수 있으며 이는 연구지역의 충적층 및 주변지역이 비닐하우스단지나 일반 농업지역으로서 농약이나 화학비료가 많이 사용된다는 점과 비교적 일치한다. 그러나 SB-12시료는 12.3

‰로서 다른 시료들에 비해 약간 높게 나타나고 있다. 이는 유기질 질소에 의해 다소 영향받은 것으로 해석할 수도 있으나 주위에 축사 등과 같이 유기질 질소의 원인이 될만한 곳이 없기 때문에 NO_3^- 의 탈질산화반응에 의하여 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 증가되었다고 생각할 수 있다. 이러한 경향은 NO_3^- 의 농도에 대한 $\delta^{15}\text{N}$ 값을 도시하여 보았을 때 NO_3^- 의 농도가 증가함에 따라 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 감소하는 경향에 의해 명확해 진다 (Fig. 12). 그러나 NO_3^- 의 농도가 낮은 시료에 대한 분석이 이루어지지 않았기 때문에 이에 대하여는 농축과정을 포함한 시료의 전처리 등에 대한 보다 체계적인 연구가 필요하다. 또한 용존유기탄소 (DOC)의 함량과 질소동위원소 분석결과와의 관계에서도 특별한 상관관계가 관찰되지 않는다. 이는 화학비료와 토양내 유기물에 의한 $\delta^{15}\text{N}$ 값의 범위가 상당히 중첩되기 때문인 것으로 보인다.

결론

인공함양 특성평가를 위한 지화학 기초조사를 위하여 연구지역으로 영남내륙권의 고령군과 달성군의 경계에 위치한 낙동강변의 강변여과수 개발지역을 선정하였다. 연구지역내에 위치한 강변여과수 개발을 위한 양수정과 주변공들 및 지표수들에 대한 시료채취를 수행하였으며 특히 장기양수시험공과 낙동강변을 잇는 일직선상에 시추된 관측공들을 대상으로 체계적인 시료채취를 위하여 관측공중 기반암까지 시추된 한 공에 대해서는 다중패커시스템을 설치하여 심도별 시료채취 및 분석을 수행하였다.

현장측정결과는 전체적으로 시추공 및 지표수에 대한 측정자료는 시기별로 큰 차이를 보이지 않는다. 연구 지역의 자연수 속에 용존되어 있는 주요 이온들은 Ca, Na, SiO_2 , HCO_3^- , SO_4^{2-} 등이고 Ca- HCO_3^- 형에서부터 Ca- SO_4^{2-} 형까지의 영역에 속한다. 지하수내 높은 Mn 함량은 강변여과수의 취수정에서 최종적으로 식수로 공급하려는 목적에 가장 큰 문제점으로 대두되고 있으며 이에 대한 기원 규명 및 처리방안이 절실히 요구되고 있다. 인위적 오염의 지표인 NO_3^- 함량을 살펴보면

연구지역 대부분이 비닐하우스 등의 경작지이기 때문에 높은 함량을 보이며 특히 NO_3 함량이 높게 나타나는 시료들이 대부분 현재 양수되고 있는 관정이거나 그 영향을 직접 받고 있는 관측공이라는 점 등은 강변여과를 위한 장기양수 자체가 자연수내의 NO_3 의 함량을 높이는 역할을 하고 있을 가능성을 시사하고 있다.

다중패커시스템에 의해 채취된 시료의 현장 분석 및 화학분석치에 대해 심도에 따른 변화를 살펴보면 전반적으로 4월 1일부터 시작된 장기양수시험에 의한 뚜렷한 변화는 관찰되지 않지만, EC값의 경우 강수에 의한 영향을 직접적으로 받고 있다. 용존이온의 경우 Na, Ca, Mg, HCO_3 가 심도의 증가에 따라 증가하고 있으며 음이온 중 Cl과 SO_4 의 경우는 맨 하부구간인 지표하 18m에서 채취된 시료들이 시료채취 시기와 관계없이 매우 낮은 값을 보인다. 또한 NO_3 함량의 경우에는 지표하 6m 지점 아래의 심도에서는 시료채취시기와 관계없이 전혀 검출되지 않는다. 미량원소의 경우 문제가 되는 Mn은 시료채취시기와 관계없이 중간구간인 13.5m 구간에서 특히 많은 함량을 보이고 있어서 양수에 의한 강물의 유동이 중간의 자갈층을 통해 이루어지고 있는 것으로 해석할 수 있다. 이처럼 용존이온에 따른 명확한 심도별 변화를 보이기 때문에 충적층을 구성하는 지질특성별 지하수 유동특성 및 물-암석반응과정에 대한 명확한 해석을 위해서는 상부의 모래층과 중간의 자갈층, 그리고 하부의 기반암에 대한 광물학적 및 화학적 분석이 요구된다.

연구지역내 물시료들에 대한 현재까지의 산소 및 수소 동위원소 분석결과는 모든 물시료들이 세계 강우 직선에 평행하게 도시되어 지표수 및 모든 지하수들이 강우 기원임을 나타내고 있으나, 다중패커설치공 및 일반 관측공과 지표수들의 산소 및 수소 동위원소 값들은 서로 중첩되어 구분되지 않는다. 또한 시료채취 시기에 따라 강변으로부터 양수정 간에 산소, 수소 동위원소값 및 삼중수소 함량들의 체계적인 공간적 분포변화를 보이지 않는다. 이는 아마도 시료들이 모두 낙동강과 인접한 충적층내 얇은 심도의 관측공에서 채취되었으며, 충적층 자체도 상부로부터 모래층과 자갈층으로 주로 구성되어 있어서 강수에 의한

직접적인 영향을 받기 쉽기 때문에, 동위원소 특성은 가장 최근의 강수사건에 의하여 영향받은 평균값들로서 충적층 전체에 걸쳐서 동위원소적으로 유사한 값을 보이게 된 것으로 판단된다. 연구 지역의 자연수 시료에 대한 황 동위원소비는 2.1~4.8‰로서 지하수내 황의 기원이 퇴적암을 구성하는 황산염광물의 용해에 의한 것으로 보이며 자연수의 유형별 차이는 뚜렷하지는 않다. 스트론튬 동위원소비는 다른 환경동위원소 분석값에 비해 유형별 자연수들간에 구별이 되기는 하지만 명확하지는 않다. 연구지역내 물시료들에 대한 질소동위원소 분석결과에 의하면 연구지역의 충적층 지하수에 용존된 질소는 화학비료로나 토양내의 유기물로부터 유래한 것으로 해석할 수 있다.

다양한 지화학 분석 및 동위원소들의 기초분석을 수행한 결과 강변여과수 개발을 위한 장기양수시험공과 주변 관측공들의 심도가 낙동강변의 광범위한 충적층 내에 속해 있기 때문에 서로 유사한 값들을 보여서 특정한 지하수 유동특성을 유추하거나 함양특성을 해석하기 위한 추적자로 이용하는데 상당한 어려움이 있을 것으로 판단된다. 따라서 강변여과수 개발을 위한 장기적인 양수결과로서 낙동강으로부터의 상대적 거리에 따른 각 관측공들의 산화-환원 환경변화 규명 및 각 관측공과 강변간의 지화학적 분석값들의 상대적 변화량과 강수기록과의 관계를 좀더 명확히 규명하기 위해서는 전반적 경향을 알기 위한 일반적인 시료채취 이외에도 하나의 커다란 강수기록을 중심으로 한 좀더 집중적이고 체계적인 시료채취가 필요한 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 3-4-1)에 의해 수행되었으며, 부분적으로는 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발과제에 의하여 수행되었다.

참 고 문 헌

- 국립지질조사소, 1970, 한국지질도 현풍도폭 (1:50,000).
- 조선총독부 지질조사소, 1928, 왜관도폭 (1:50,000)
- 고용권, 윤성택, 김천수, 최현수, 김건영, 1999, 중원지역 탄산수의 지구화학적 진화, 자원환경지질, 32권, 5호, 469-483.
- 고용권, 김천수, 배대석, 이동익, 2000, 문경지역 심부지하수의 수리화학 및 환경동위원소 연구, 자원환경지질, 33권, 6호, 469-489.
- 고용권, 김경수, 배대석, 김천수, 한경원, 2001, 여수 북동부 화산암 지역 시추공 지하수의 지화학 특성, 자원환경지질, 34권, 3호, 255-269.
- 김건영, 고용권, 김천수, 배대석, 박맹언, 2000, 유성지역 지열수의 지구화학적 특성 연구, 지하수환경, 7권, 1호, 32-46.
- 김규한, 中井信之, 1988, 남한의 지하수 및 강수의 안정동위원소 조성, 지질학회지, 24권, 1호, 39-46.
- 유재영, 최인규, 김형수, 1994, 춘천 지역의 기반암 종류에 따른 지표수의 지구화학적 특성, 지질학회지, 30권, 3호, 307-324.
- 윤성택, 채기탁, 고용권, 김상렬, 최병영, 이병호, 김성용, 1998, 풍기지역 지하수의 수리지구 화학 및 환경동위원소 특성연구, 지하수환경, 5권, 4호, 177-191.
- 이재영, 김철호, 이인호, 고인석, 1998, 고령지역 지하수에 대한 지화학적 연구, 지하수환경, 5권, 3호, 162-170.
- 이종운, 전호택, 전용원, 1997, 국내 화강암질암내 심부지하수의 지구화학적 특성, 지하수환경, 4권, 4호, 199-211.
- 이찬희, 이현구, 조애란, 1999, 공주제일광산 수계에 분포하는 지하수, 지표수, 토양 및 퇴적물의 환경지구화학적 특성과 중금속 오염, 자원환경지질, 32권, 6호, 611-631.
- 전호택, 이희근, 이종운, 이대혁, 류동우, 오석영, 1997, 동해신광산 터널굴착공사와 관련된 지표수 및 지하수의 유동변화에 대한 조사연구(II)-수리지구화학적 고찰, 지하수환경, 4권, 1호, 27-40.
- 정찬호, 고용권, 김수진, 김천수, 1995, 삼광광산 편마암에서의 수리지구화학 및 불-암석 상호반응, 지질학회지, 31권, 2호, 91-105.
- 차종문, 김주용, 이병태, 김경웅, 1999, 광주지역 일곡 매립지 주변에서의 하천수 및 지하수 오염 모니터링, 자원환경지질, 32권, 5호, 485-493.
- Appelo, C.A.J., and Postma, D., 1994, Geochemistry, Groundwater and Pollution, Balkema, Rotterdam, 536p.
- Brantley, S.L., Chesley, J.T., and Stillings, L.L., 1998, Isotopic ratios and release rates of strontium measured from weathering feldspars, Geochim. Cosmochim. Acta, v. 62, 1493-1500.
- Broadbent, F.E., Rauschkolb, R.S., Lewis, K.A. and Chang, G.Y., 1980, Spaial variability in Nitrogen-15 and total nitrogen in some virgin and cultivated soils, Soil Sci. Soc. Amer. Jour., v. 44, 524-527.
- Bullen, T.D., Krabenhof, D.P. and Kendall, C., 1996, Kinetic and mineralogic controls on the evolution of groundwater chemistry and ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr in a sandy silicate aquifer, northern Wisconsin, USA, Geochim. Cosmochim. Acta, v. 60, 1807-1821.
- Drever, J.I., 1997, The Geochemicstry of Natural Waters, 3th ed., Prentice Hall, 436p.
- Faure, G., 1991, Principles and Application of Inorganic Geochemistry, Macmillan College Pub. Co., 626p.
- Hartten, A.S. and Genau, R.B., 1995, Deep bedrock hydrogeologic characterization through the use of multiport monitor wells, Groundwater, v. 33, 832-859.
- Hauck, R.D., Bartholomew, W.V., and Bremner, J.M., 1972, Use of variations in natural nitrogen isotope abundance for environmental studies: a questionable approach, Science, v. 177, 453-454.

- Hounslow, A.W., 1995. Water Quality Data: Analysis and Interpretation. Lewis Publishers, New York. 397p.
- Hubner, H., 1986. Isotope effects of nitrogen in the soil and biosphere. In : P. Fritz and J.-C. Fontes (Eds.), Handbook of Environmental Isotope Geochemistry : The Terrestrial Environment, Elsevier, Amsterdam, v. 2, 361-425.
- Johnson, T.M. and DePallo, D.J., 1994. Interpretation of isotopic data in groundwater-rock systems: model development to Sr isotope data from Yucca Mountain, Water Resour. Res., v. 30, 1671-1587.
- Kendell, C., 1998. Tracing Nitrogen Sources and Cycling in Catchments. In : Kendell, C and McDonnell, J. J. (Eds), Isotope Tracers in Catchment Hydrogeology, Elsevier Science, Amsterdam, 519-576.
- Koh, Y.K., Kim, C.S., Bae, D.S., and Yun, S.T., 1998. Geochemical modeling of groundwater in granitic terrain: the Yeongcheon area. Jour. Korean Soc. Groundwater Environ., v. 5, 192-202.
- Kreitler, C.W. and Browning, L.A., 1983. Nitrogen-isotope analysis of groundwater nitrate in carbonate aquifers: natural sources versus human pollution. Jour. Hydrology, v. 61, 285-301.
- Landin, B.K. and Lauctes, B., 1995. The use of the multi-packerport monitoring wells for aquifer characterization and plume delineation in a thick alluvial aquifer. Groundwater, v. 33, 832-859.
- Li, H., Horie, Y., Ishii, T., and Shimada, J., 1997. Development of an apparatus to measure groundwater qualities in situ and to sample groundwater using boreholes. Environmental Geology, v. 32, 17-22.
- Wikberg, P., Axelsen, K., and Fredlund, F., 1987. Deep groundwater chemistry, SKB Tech. Rep. 87-07, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm. 33p.
- | | |
|--------------|--------------|
| 투 고 일 | 2003년 1월 23일 |
| 심 사 일 | 2003년 1월 24일 |
| 심사완료일 | 2003년 2월 26일 |
-
- 김건영
한국원자력연구소 방사성폐기물처분연구부
305-353, 대전 유성구 덕진동 150번지
Tel: 042-868-8197
e-mail: kimgy@kaeri.re.kr
- 고용권
한국원자력연구소 방사성폐기물처분연구부
305-353, 대전 유성구 덕진동 150번지
Tel: 042-868-8159
e-mail: nykkoh@kaeri.re.kr
- 김천수
한국원자력연구소 방사성폐기물처분연구부
305-353, 대전 유성구 덕진동 150번지
Tel: 042-868-8197
e-mail: ncskim@kaeri.re.kr
- 김형수
한국수자원공사 수자원연구소
305-390, 대전광역시 유성구 전민동 462-1
Tel: 042-860-0357
e-mail: hskim@kowaco.or.kr
- 김성이
한국원자력연구소 방사성폐기물처분연구부
305-353, 대전 유성구 덕진동 150번지
Tel: 042-868-2365
e-mail: sy7052@hanmail.net

김건영, 고용권, 김천수, 김형수, 김성이