

동해신광산 터널굴착공사와 관련된 지표수 및 지하수의 유동변화에 대한 조사연구 (II)–수리지구화학적 고찰

A Study on the Variation of the Surface and Groundwater Flow System Related to the Tunnel Excavation in DONGHAE Mine Area (II)– Hydrogeochemical Consideration

전효택(Hyo-Tack Chon)* · 이희근(Hi-Keun Lee)* · 이종운(Jong-Un Lee)*
이대혁(Dae-Hyeok Lee)* · 류동우(Dong-Woo Ryu)* · 오석영(Seok-Young Oh)*

요약 : 화강암과 석회암으로 구성된 동해 터널굴착지역 주변에 대한 수리지구화학적 연구를 수행한 결과, 채수한 자연수 시료는 그 화학적 특성에 따라 화강암 지역의 물(그룹 1)과 석회암 지역의 물(그룹 2)로 구분 가능하였다. 이러한 구분은 군집분석을 통하여 통계적으로 확인되며, 동일 지점에서 채수된 터널용출수는 채수시기에 따라 각각 그룹 1 및 2에 속하는 것으로 나타났다. 요인분석 결과 그룹 1은 사장석이 카올리나이트로 풍화되는 반응, 그룹 2는 방해석의 용해 반응에 의하여 각각의 화학적 특성이 결정된다. 터널용출수가 시기에 따라 상이한 특징을 보이는 이유는 두 차례의 채수시기 도중에 수행된 화강암 지역의 누수 대에 대한 방수작업이 효과적으로 작용하여 지하수 유동체계를 변화시켰기 때문으로 판단된다. 한편 열역학적 조사 결과 터널용출수는 다른 자연수 시료에 비하여 대수층의 조암광물과 상호 반응을 더욱 많이 거친 것으로 보인다. 질량평형에 기초한 계산을 통하여 터널용출수에 대한 두 그룹 물의 혼합율 및 물-암석반응이 정량적으로 도출되었으며 이 결과는 통계적 및 열역학적 조사 결과와 잘 일치한다.

Abstract : The hydrogeochemical study on the 15 natural waters was carried out in the vicinity of tunnel excavation site of Donghae largely composed of granite and limestone. The water samples can be classified based on their chemical characteristics into two groups; waters draining in the granitic region(group 1) and the limestone region(group 2). This classification was also confirmed by statistical examination through cluster analysis, and the tunnel seepage waters collected at the same site appear to be included in group 1 and 2 by their sampling period, respectively. According to factor analysis, the waters of group 1 are mainly represented by the weathering of plagioclase to kaolinite and those of group 2 are characterized by the dissolution of calcite. Different properties of the tunnel seepage waters are thought to be resulted from the effective waterproofing processes conducted during the sampling interval to the surface and subsurface leakage zones at the granitic region, which contributed to the change of groundwater flow system. However both the tunnel seepage waters seem to have thermodynamically interacted with rock-forming minerals in their wallrocks. The mixing ratio of the waters from two groups and water-rock interactions are evaluated quantitatively for the tunnel seepage waters through the mass balance approach, and the results are identical with the previous conclusions in this study.

서 론

강원도 동해시에 위치한 석회석 운반터널의 굴착공사와 관련하여 주변 지표수 및 지하수의 유동변화를 수문학 및 암반수리학적 측면에서 연구한 결과는 제1보에서 밝힌 바 있다(이희근 등, 1995). 제2보가 되는 이 논문은 동일한 지역의 지표수 및 지하수에 대하여 제1보의 연구와 동시에 수행한 수리지구화학

적 연구 결과를 다룬 것이다.

연구대상인 소위 신광산터널은 석회석 자원의 신속한 운반을 목적으로 하는 일반적인 필요성에서 착공한 '고전적' 개념의 지하공동시설이라고 할 수 있다. 그러나 가까운 미래에는 쾌적한 지상주거환경을 구축하기 위한 보다 '적극적'인 지하공간 건설이 일반화될 것이며 현재 이를 안정적으로 건설하고 운영하기 위한 암반공학적인 연구가 매우 활발히 이루어지고 있다. 이처럼 향후 지하에 수용될 시설로서는 운수교통, 통신전력, 수도, 개스 등 인프라시설과 주차장, 농수산물 창고 및 물류센터, 폐

*서울대학교 자원공학과(Department of Mineral and Petroleum Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

기시설, 하수처리시설, 발전소, 각종 비축시설 및 군사시설 등을 들 수 있다.

지하공간 건설의 횟수가 증가함에 따라 거의 반드시 붕착하게 되어 문제점으로 부각되고 있는 것은 예상하지 않은 지하수의 용출이다. 지하수의 용출은 공기를 연장시키고 방수 등에 필요한 추가의 비용을 지불하게 하며 특히 인근에 지표수 및 지하수를 생활용수로 사용하는 부락이 있는 경우 수자원 고갈 등에 의한 민원을 야기시킨다. 이에 대해 수리지질학적인 이론을 적용하여 지하수 유동을 예측하고 암반의 역학적 안정성을 파악하며 방수기술을 향상시키는 등 암반공학 및 지질공학 분야에서는 그간 괄목할만한 성장을 보여 왔다. 그러나 현재 대부분의 공사현장에서는 수리지구화학적 연구를 통한 지하수의 화학적 특성 파악은 전혀 고려하고 있지 않는 실정이다.

지하수의 지구화학적인 특성 즉, 함양(recharge)에서 배수(discharge)에 이르는 경로 중의 산-염기반응, 광물용해 및 침전반응, 칙화합물 형성반응, 흡착 및 탈착반응, 이온교환반응, 산화-환원반응, 가수분해, 동위원소 반응 등의 과정을 파악함으로써 연구목적에 따라 수리지질학적 연구 결과와 상호보완하는 효과를 볼 수 있다. 또한 지하수의 수질을 파악하여야만 현장에서 발생하는 어려움을 효과적으로 극복할 수 있는 분야도 있다. 지하 공사 현장에 투입된 고가의 장비를 보호하기 위한 작업장 내 금속성 시설물의 부식 촉진 가능성 파악(Lloyd and Heathcote, 1985), 시멘트 그라우팅 및 속크리트 타설에 의한 강알칼리성 배출수 형성과 이에 따른 관(pipe) 또는 펌프 등의 scaling 현상 발생 예측(Dietzel et al., 1992), 현장 배출수의 환경관련 법규 기준치 초과 여부 규명 등이 이에 속한다고 할 수 있다.

이 연구에서는 터널굴착 및 이에 따른 방수작업에 의한 터널

용출수의 수리지구화학적 특성 변화 여부를 파악하여 유로의 변화가 있었음을 밝히고 방수작업이 지하수 유동 시스템에 효과적으로 작용하였음을 규명하고자 하는 목적으로 수행되었다.

지질개요

지형 및 터널구조, 출수구간과 문제점 등에 대하여는 제1보(이희근 등, 1995)의 1장~3장에 자세히 기술하였다. 다만 지하수의 지구화학적 특성은 주변 대수층 암석의 조암광물과 장기간에 걸쳐 반응한 결과이므로 주변 지질에 대한 자세한 기재가 필요하나 제1보에서는 다소 미흡한 점이 있다고 판단되므로 여기서는 이를 좀더 보완하였다.

연구지역의 수계는 작은 지류가 선음산 사면 해발 약 750 m 지점에서 발원하여 내미로리 석탄마을까지 단일수계를 형성하다 석탄마을에서 다른 지류와 합류, 동쪽으로 향하여 오십천으로 유입되는 구조를 보이고 있다. 연구대상인 집수역을 형성하는 지질은 천은사를 기점으로 하여 서측 상류지역에 분포하는 화강암체(삼화화강암)와 동측인 하류 내미로리 유역에 분포하는 퇴적암층군의 두 부분으로 대별된다(Figure 1; 태백산지구지하자원조사단, 1962).

퇴적암층군은 지질구조의 교란없이 삼화화강암과의 경계부에서 멀어질수록 퇴적순서에 따라 상위지층에 의해 정합으로 피복되어 있다. 이들은 연구지역에서 남북방향의 주향을 보이며 풍총층을 제외하고 다른 층들은 약 0.5 km 내외의 좁은 폭으로 대상으로 분포한다.

최하위 지층인 선캠브리아기의 태백산통은 흑운모편마암 및 편암으로 구성되어 있다. 그 상위지층인 캠브리아기의 장산층

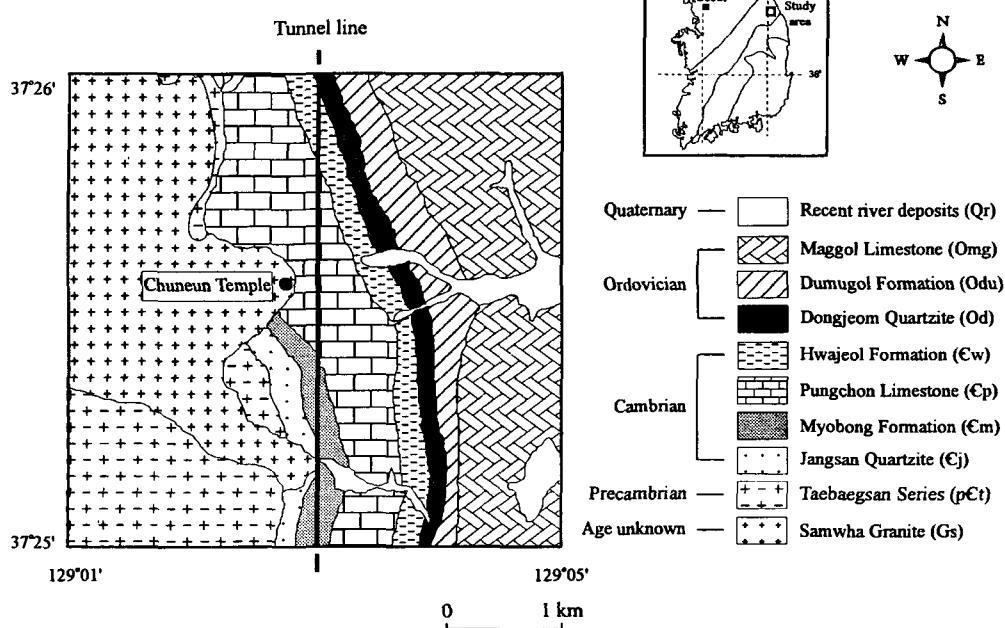


Figure 1. Geologic map of the study area.

은 유백색 규암으로 이루어져 있으며 때로는 역질의 구조를 보이기도 한다. 녹회색 점판암, 흑색세일 및 백색 석회암으로 구성된 묘봉층은 이를 정합으로 덮고 있으며 장산층과 함께 소위 양덕층군을 형성한다(이종혁 등, 1992). 캠브리아기의 풍촌층은 묘봉층을 정합으로 덮고 있으며 주를 이루는 유백색, 암회색, 담홍색의 괴상석회암 외에 돌로마이트질 석회암, 역질석회암 및 층리가 발달한 석회암으로 구성되어 있다. 이는 소위 대석회암층군의 기저부를 형성하는데, 다른 층에 비하여 지표에서의 분포폭이 넓고 지표지질도상으로 터널은 이 층내에 위치하게 되므로 터널배출수의 지구화학적 특성에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다. 캠브리아기의 화질층은 충식석회암, 녹회색 이암 및 회색 세일로 구성된다. 오도비스기의 동점층은 주로 석영을 주성분으로 하는 암회색, 암갈색 및 담홍색의 사암이며 상부로 갈수록 석회질 성분이 우세하게 나타난다. 동점층을 정합으로 덮고 있는 두무꼴층은 주로 암회색 내지 담회색의 석회질 이암, 돌로마이트질 이암, 역암, 세일 등으로 구성되며 연구지역에서는 주로 회색의 충식석회암으로 나타난다. 오도비스기의 막골층은 주로 암회색 내지 담회색의 석회암, 돌로마이트질 석회암 및 돌로마이트로 되어 있다.

지질시대가 명확하지 않은 삼화화강암은 세립질의 흑운모화강암으로서 집수역의 북서쪽에 퇴적암층군을 후기에 관입하여 분포한다.

터널은 지표지질도상으로 풍촌층 내에 위치하나 지하에서는 삼화화강암체 내에 위치하고 있다. 화강암 자체는 불투수층으로 인식되나 대부분 절리 및 열곡이 존재하기 마련이고 이러한 균열을 따라 지하수의 활발한 이동이 예상된다. 반면 석회암은 투수율이 커서 일반적으로 대수층으로 작용하므로 비록 터널이 화강암체 내에 위치하더라도 터널용출수에 많은 영향을 미칠 수 있는 것으로 판단된다.

시료채취 및 분석

1994년 5월과 1995년 2월의 두 차례에 걸쳐 연구지역에 대하여 2공의 시추코어 암석시료 및 지표수, 천부지하수, 터널용출수, 시추공 지하수, 터널배출수 침전지 시료 등 총 15개의 자연수 시료를 채취하였다(Figure 2). 지표수 시료 중 SW-1,2, 터널배출수 침전지 시료(SET-1,2) 및 터널용출수 시료(MW-1,2)는 동일 지점에서 각 채수시기별로 2회 채수하였다.

암석코어 시료는 암상의 변화를 파악한 후 각 암상에 대하여 박편을 제작, 편광현미경하에서 조암광물과 조직을 관찰하였으며 또한 마노로 제작된 ball mill을 사용, 200 mesh 이하로 미분쇄하여 $Cu\kappa\alpha$ target과 Ni filter를 사용한 X선회절분석을 수행하였다.

지표수 시료는 연구지역 내 하천을 대상으로, 천부지하수 시료는 우물, 관정, 샘 등을 대상으로, 터널용출수 시료는 터널에서 용출되는 지점을 대상으로 하여, 각 지점에서 폴리에틸렌 시료용기에 2 l 이상 채수하였다. 특히 이온분석용 시료는 수동펌프를 이용, 동일 압력하에서 0.45 μm -pore 크기의 cellulose nitrate membrane filter에 통과시켜 부유물질을 제거하였으며 시간경과에 따라 시료용기 벽면에 양이온이 흡착되는 것을 방지

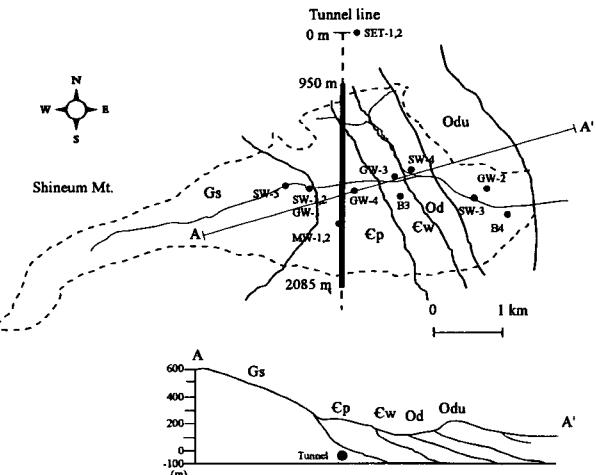


Figure 2. The schematic geological maps of plan and vertical section and sampling locations for Donghae area. Dashed line represents water-dividing line. Geological abbreviations are the same as in Figure 1. The location of Chuneun Temple is identical with the sampling site for SW-1,2 and GW-1.

하기 위하여 양이온 분석용 시료에는 농질산을 가해 pH를 2 이하로 조정하였다. 시료채수 이후 분석까지 모든 운반 및 저장은 아이스박스와 냉장고를 이용하여 저온상태를 유지하였다.

수소이온농도(pH), 산화환원전위(Eh), 온도, 전기전도도 등의 지하수 성분은 현장에서 채수 즉시 Orion사의 SA720 pH/ion meter와 conductivity meter Model 124를 이용하여 측정하였으며 총용존물질(TDS : total dissolved solids)은 증발법에 의한 직접 측정 대신 화학분석 결과 결정된 각 용존물질 함량의 합으로 표현하였다. 화학적 성분 중 Al, Si와 양이온(B, Ba, Ca, Cu, Fe, Mg, Mn, Sr)의 정량분석은 Shimadzu사의 inductively coupled plasma atomic emission spectrophotometer (ICP-AES)로, 또한 K, Li, Na는 Perkin-Elmer사의 atomic absorption spectrometer(AAS)로, 음이온(Br^- , Cl^- , F^- , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-})의 분석은 ion chromatography Model Dionex 4550i를 이용하였다. 페놀프탈레인 용액과 메틸레드-브롬크레졸그린 혼합용액을 이용하여 적정, alkalinity를 측정한 후 계산에 의해 HCO_3^- 및 CO_3^{2-} 함량을 얻었다. 물시료 중 1994년 5월에 채수한 1차 시료에 대하여는 한국원자력연구소의 mass spectrometer Model VG-SIRA2를 이용하여 안정동위원소인 ^{18}O 와 중수소를 분석하였다. 이상의 모든 지표수와 지하수 시료 채수에서 분석에 걸치는 과정은 Greenberg et al.(1992)을 참조하였다.

암석코어 시료의 광물기재

주로 강수에서 비롯되어 대수층으로 함양되는 지하수는 심부로 가며 주변의 지질매체와 다양한 물-암석반응을 거친에 따라 독특한 수리지구화학적 특성을 획득한다. 따라서 대수층 기반암 및 그 조암광물을 파악하는 것은 현재 나타나고 있는 수질 특성의 원인을 규명하는데 있어 매우 중요하다. 주변 구성광물

Table 1. Mineralographic results through microscopic and X-ray diffraction analyses for rock core samples. The essential minerals are indicated in bold-face type.

Core No.3	
Sampling Depth	Minerals
1~4 m	Quartz>Plagioclase
5~11 m	Quartz>Phlogopite>Orthoclase>Diopsid
14~17 m	Grossular>Orthoclase
17~23 m	Orthoclase>Grossular>Quartz>Phlogopite
26~32 m	Chlorite>Orthoclase>Quartz>Phlogopite
32~38 m	Calcite
41~44 m	Calcite>Brucite>Dolomite
Core No.4	
Sampling Depth	Minerals
4~5 m	Calcite
8~20 m	Calcite>Grossular>Dolomite
23~26 m	Phlogopite>Plagioclase>Grossular
26~29 m	Grossular>Calcite>Quartz
32~35 m	Calcite>Quartz>Phlogopite>Orthoclase
41~44 m	Calcite>Phlogopite

에서 비롯된 용존이온이 주도적인 심부지하수 외에 지표수에서도 기반암 종류에 따른 지구화학적 특성이 잘 나타나고 있다(유재영 등, 1994).

시추공은 천은사 부근 터널 직상부에서 2개(1, 2번 시추공) 및 하류 내미로리에서 2개(3, 4번 시추공)를 시추할 계획이었으나 현장 사정상 터널 직상부에서는 연구 기간 내에 시추를 하지 못하였다.

3번 시추공은 지표지질도상으로 화절층에 위치한다(Figure 2). 암석광물학적 조사 결과 약 30 m 심도까지 석영, K-장석, 사장석 등이 나타나며 이외에 금운모, Ca-석류석, 녹니석, 투휘석 등의 lime-silicate 광물이 존재한다. 이처럼 Ca 및 Mg가 풍부한 환경에서 생성된 변성광물이 발견된 점으로 미루어 후기에 관입한 삼화화강암에 의하여 불순한 석회암 또는 돌로마이트가 변질작용을 받은 것으로 판단된다. 약 30 m 이하의 심도에서는 방해석, 수활석, 백운석 등이 존재한다(Table 1). 4번 시추공은 지표지질도상으로 두무골층에 위치한다(Figure 2). 약 23~26 m를 제외하고는 모두 방해석이 주구성광물로 존재하며 이외에 Ca-석류석, 백운석, 금운모, 사장석, 석영, K-장석 등이 존재한다(Table 1).

구성광물상으로는 두 시추코어가 유사하나 3번 시추코어에서는 석영, 금운모 및 장석류가 주구성광물로 나타나는데 반해 4번 시추코어에서는 방해석이 주구성광물로 나타나고 다른 광물들은 대체로 미량으로 함유되어 있는 점에서 차이를 보인다. 따라서 4번 시추코어는 약한 변성을 받기는 하였으나 원래의 성질이 대부분 보존되어 있는 석회암인 것으로 판단된다.

석영은 연구지역에서 주, 부구성광물로 나타나고 있으나 물과의 반응속도가 매우 느리므로 실제로 용해에 의하여 용액 중으로 $\text{SiO}_{2(\text{aq})}$ 를 공급할 가능성은 없다. 방해석은 환경변화에 매우 민감하여 동역학적으로 반응속도가 매우 빠르므로 특히 석회암 지역에서 CO_2 와 반응하여 용존 Ca 및 HCO_3^- 의 주공급

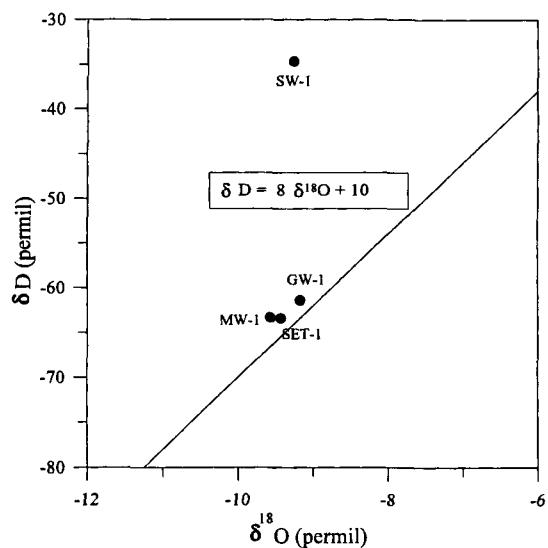


Figure 3. Oxygen-18 and deuterium compositions of some water samples. Solid line is the world-wide meteoric water line.

원으로 작용할 것이다. 이에 반해 같은 탄산염광물인 백운석은 방해석과 동일하게 조화용해(congruent solution)를 하나 그 속도가 방해석에 비하여 매우 느리고(Drever, 1988) 연구지역에서 그 함유량이 많지 않으므로 Ca^{2+} , Mg^{2+} 및 HCO_3^- 의 주공급원은 되지 못할 것으로 생각된다. 비조화용해(incongruent solution)를 하는 장석류는 반응속도도 빠를 뿐더러 화강암 및 3번 시추코어의 조암광물로 존재하여 그 함유량도 매우 크므로 카올리나이트로 풍화되며 용액 중으로 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} 등을 공급할 수 있다. 이외에 반응속도와 함유량으로 판단할 때 연구지역의 삼화화강암에 나타나는 흑운모를 비롯하여 시추코어 암석시료에서 나타난 금운모, Ca-석류석, 녹니석 등이 물-암석반응을 통해 용액 중으로 양이온을 공급하는 광물이 될 수 있다.

한편 암석코어 시료의 광물감정시는 발견되지 않았으나 삼화화강암과 퇴적암층군의 경계부에 철광상의 위치가 기록된 것으로 보아(태백산지구지하자원조사단, 1962) 황화물이 존재할 가능성이 높으며 용존 SO_4^{2-} 는 물과 이들의 반응에 의하여 비롯되었을 가능성이 높다.

자연수 시료의 분석결과 및 물리·화학적 특성에 의한 분류

일부 자연수 시료에 대한 산소 및 수소동위원소 측정 결과, 터널용출수인 MW-1의 $\delta^{18}\text{O}$ 와 δD 는 world-wide meteoric water line($\delta\text{D}=8\delta^{18}\text{O}+10$)에 근접하여 도시되므로(Figure 3) 천수기원이며 암석과의 동위원소 교환반응의 가능성은 극히 제한적이다. Figure 3에 나타난 SW-1의 경우 다른 시료에 비해 매우 다른 안정동위원소값을 보이나, 이는 지표수 시료로써 shift의 원인을 제공할만한 합리적인 기제가 없고 또한 그 차이가 너무 크므로 분석상의 오류에 의한 것으로 판단된다.

각 자연수의 물리·화학적 분석결과를 살펴보면(Table 2) 지

Table 2. The physical and chemical constituents of each water sample.

	Sample	pH	Eh (mV)	Temp (°C)	Cond ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	SiO_2 (mg/l)	Al (mg/l)	B (mg/l)	Ba (mg/l)	Cu (mg/l)	Fe (mg/l)
Surface water	SW-1	6.44	295	13.5	42	1.36	nd	1.83	0.38	6.53	nd	nd	nd	nd	nd
	SW-2	8.41	57	3.2	36	nd	0.65	2.13	0.35	6.30	nd	nd	nd	nd	nd
	SW-3	8.22	89	3.2	278	44.17	4.95	3.18	1.25	9.04	1.96	nd	nd	nd	nd
	SW-4	8.38	51	1.8	321	49.76	8.67	2.24	0.80	8.19	2.21	nd	nd	nd	nd
	SW-5	8.69	75	0.6	37	nd	0.66	2.12	0.39	5.57	nd	nd	nd	nd	nd
Shallow ground- water	GW-1	6.58	350	17.8	95	1.27	nd	1.93	1.71	6.72	nd	nd	nd	nd	nd
	GW-2	7.82	116	9.0	435	76.18	3.52	3.21	0.99	20.69	3.43	nd	nd	nd	nd
	GW-3	7.91	92	12.2	238	38.74	3.89	2.66	0.56	6.76	1.71	nd	nd	nd	nd
	GW-4	8.34	89	10.9	324	43.61	9.94	3.06	3.55	9.30	1.94	0.03	nd	nd	nd
Groundwater from borehole	B3	9.65	53	12.3	121	12.91	1.22	5.05	1.48	12.14	0.53	nd	nd	nd	0.06
	B4	7.71	52	12.0	250	37.87	3.77	4.22	1.55	15.23	1.68	nd	nd	nd	0.02
Tunnel seepage water	MW-1	8.25	158	17.9	138	15.73	nd	8.19	0.29	18.10	0.97	nd	nd	nd	nd
	MW-2	8.07	-73	15.2	304	43.77	2.04	12.75	0.70	16.99	1.96	nd	nd	nd	nd
Settling pond water	SET-1	6.08	214	18.4	190	24.47	nd	6.42	1.04	13.48	1.71	0.02	nd	nd	nd
	SET-2	11.18	-55	12.9	552	42.23	0.33	22.40	5.60	28.81	2.51	nd	tr	nd	nd
	Sample	Li (mg/l)	Mn (mg/l)	Sr (mg/l)	F (mg/l)	Cl (mg/l)	NO_2 (mg/l)	Br (mg/l)	NO_3 (mg/l)	PO_4 (mg/l)	SO_4 (mg/l)	HCO_3 (mg/l)	CO_3 (mg/l)	TDS (mg/l)	
Surface water	SW-1	nd	nd	nd	0.25	3.53	nd	nd	1.33	nd	4.42	11.68	nd	31	
	SW-2	nd	nd	nd	0.14	4.78	nd	nd	2.05	nd	4.19	4.64	nd	25	
	SW-3	nd	nd	0.01	nd	7.00	nd	nd	10.84	nd	9.35	122.85	nd	215	
	SW-4	nd	nd	0.01	nd	6.03	0.47	nd	11.24	nd	12.32	152.99	nd	255	
	SW-5	nd	nd	nd	0.03	4.48	nd	nd	1.73	nd	3.94	4.64	nd	24	
Shallow ground- water	GW-1	nd	nd	nd	0.25	2.86	nd	nd	1.26	nd	3.57	14.01	nd	34	
	GW-2	nd	nd	0.05	nd	6.62	nd	nd	0.94	nd	10.33	229.48	nd	355	
	GW-3	nd	nd	0.01	nd	4.95	nd	nd	4.54	0.18	6.20	115.90	nd	186	
	GW-4	0.01	nd	0.04	0.01	3.48	0.02	nd	5.39	nd	5.65	166.90	nd	253	
Groundwater from borehole	B3	0.02	nd	nd	0.37	7.26	0.02	0.03	0.64	nd	8.43	18.55	6.84	76	
	B4	0.03	0.34	0.03	nd	13.26	0.02	0.02	9.56	nd	6.15	99.68	nd	193	
Tunnel seepage water	MW-1	nd	nd	nd	1.87	4.75	nd	nd	0.25	nd	5.94	53.71	nd	110	
	MW-2	0.06	nd	0.04	2.27	6.13	nd	0.03	8.89	nd	8.80	129.81	nd	234	
Settling pond water	SET-1	nd	0.02	nd	0.81	7.68	nd	nd	3.06	nd	48.88	22.18	nd	130	
	SET-2	0.10	nd	0.09	3.56	17.05	0.36	0.05	3.57	0.07	14.92	nd	22.80	189	

nd : not determined, tr : trace amount.

표수와 천부지하수 시료는 크게 SW-1, 2, 5, GW-1(그룹 1)과 SW-3, 4, GW-2, 3, 4(그룹 2)의 두 그룹으로 분류됨을 알 수 있다. 이러한 분류는 전기전도도의 차이에 의해 잘 표현되는데 즉, 그룹 1의 경우 전기전도도는 36~95 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 범위를 보이나 그룹 2에서는 238~435 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로서 두 그룹간에 큰 차이를 보이며 그룹 2의 경우가 더욱 많은 용존물질을 함유하고 있음을 알 수 있다. 반면 pH는 두 그룹을 구분하기 보다는 채수 시기에 따른 차이를 보이고 있다. 초여름(5월)에 채수한 GW-1과 SW-1의 pH는 6.58 및 6.44인데 반해 같은 그룹 1에 대하여 겨울(2월)에 채수한 시료의 pH는 각각 8.41 및 8.69의 값을 보인다. 모두 겨울에 채수한 그룹 2의 pH는 7.91~8.38의 범위를 갖는다. 이처럼 채수시기에 따라 다른 pH를 나타내는 이유에 대한 정확한 설명을 하기는 어려우나 이는 아마도 토양층 중의 유

기산 발생량 및 미생물의 활동에 기인한 CO_2 함량이 겨울에 비해 초여름에 더욱 크기 때문일 것으로 추측된다. 이러한 가정은 역시 5월에 채수한 MW-1의 pH가 8.25로서 약알칼리성을 나타내고 있는 사실로서 입증되는데 터널용출수인 MW-1은 토양층을 통과한 지하수가 상대적으로 오랜 기간 동안 암반층을 통과하며 주변 광물과 반응하여 수소이온을 소모한 후이기 때문이다.

두 그룹의 각각에 해당하는 시료를 채수위치별로 살펴보면 (Figure 2) 그룹 1은 화강암 및 그 주변부에, 그룹 2는 석회암층에 위치하는 것을 알 수 있다. 지하수 및 지표수에서 나타나는 물리·화학적 특징은 대수층을 구성하는 암석과의 반응의 결과로서 각 그룹은 연구지역의 대수층을 구성하는 두 가지 유형의 지질 - 즉 집수역의 서측에 위치하는 화강암과 동측에 위치하는

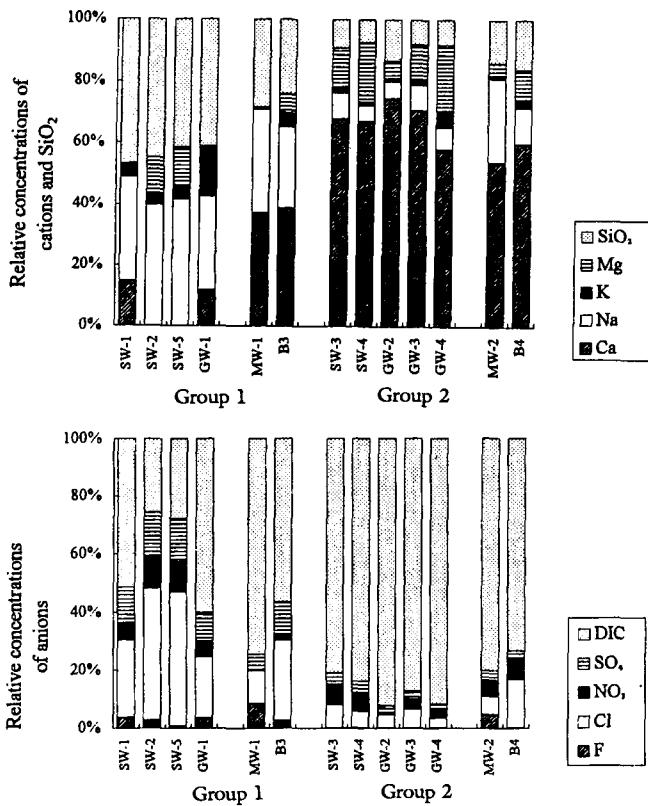


Figure 4. Chemical composition presented as the relative concentrations of dissolved constituents for the water samples. DIC(dissolved inorganic carbon) means the sum of bicarbonate and carbonate ion concentrations.

석회암에서 각각 비롯되었음을 짐작하게 한다. 주 · 부성분인 Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , $\text{SiO}_{2(\text{aq})}$, F^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , alkalinity에 대한 t-test 결과 절대함량에 있어 두 그룹간에 차이를 보이는 용존물질 중 그룹 1에서 부화되는 것으로는 F^- 를, 그룹 2에서 부화되는 것으로는 Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} 및 HCO_3^- 를 들 수 있다.

그룹 1이 그룹 2에 비해 전기전도도 및 TDS가 작으므로 구분이 가능한 것은 앞에서 밝힌 바와 같으며 또한 다수의 용존물질이 절대함량에 있어 두 그룹간에 차이를 보이는 것도 확인하였다. 그러나 각 시료의 수리지구화학적 특징 및 용존이온의 기원을 설명하는데 있어 절대함량보다는 TDS 구성비로 고찰하는 것이 더욱 효과적일 경우가 많다. 그룹간 차이가 TDS 구성비에 있어서도 나타나는지 살펴보기 위하여 모든 시료에 대해 각 양이온 및 $\text{SiO}_{2(\text{aq})}$ 의 몰농도를 전체 양이온 함량에 대한 백분율로 나타낸 결과(Figure 4), 그룹 1은 그룹 2에 비하여 Na^+ , K^+ 와 $\text{SiO}_{2(\text{aq})}$ 의 비가 높고 Ca^{2+} 비가 낮은 특징을 보인다. 이는 그룹 1의 용존 양이온 조성은 화강암의 조암광물인 사장석 등의 알루미늄규산염 광물로부터 주로 비롯된 반면(Eq.1) 그룹 2의 조성은 대부분이 방해석의 용해에서 비롯되었음을 나타낸다(Eq.2).

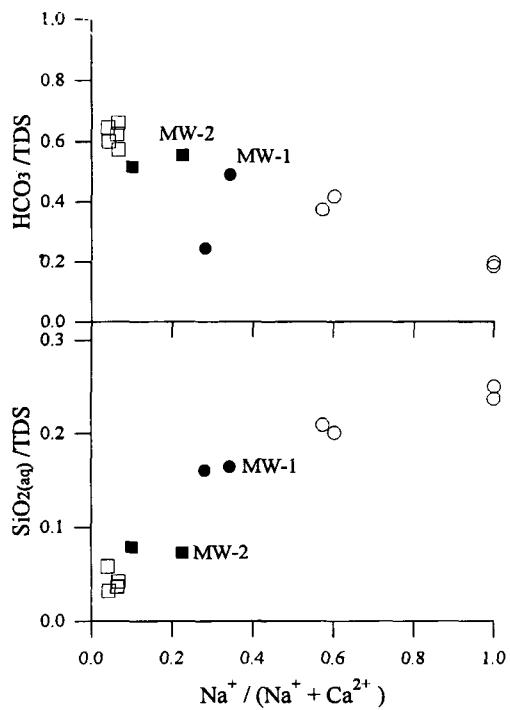
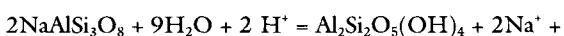
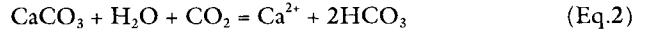


Figure 5. The ratios of dissolved silica and bicarbonate ion concentrations to TDS plotted against $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ ratios for the water samples. ○: Group 1, ●: B3, MW-1, □: Group 2, ■: B4, MW-2.



용존 양이온의 대부분을 차지하고 있는 Na^+ 와 Ca^{2+} 에 대하여 Na^+ 가 차지하는 함량비가 높을수록 방해석보다는 사장석과 반응한 정도가 큰 것이며 Figure 5에 나타나듯이 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 비가 작은 그룹 2는 그룹 1에 비해 $\text{HCO}_3^- / \text{TDS}$ 비가 높고 $\text{SiO}_{2(\text{aq})} / \text{TDS}$ 비가 낮아 석회암 지역에서 비롯된 자연수의 특성을 잘 반영한다.

음이온의 경우(Figure 4), 그룹 2는 그룹 1에 비하여 용존무기탄소(DIC : dissolved inorganic carbon - HCO_3^- 및 CO_3^{2-}) 함량비가 매우 높으므로 탄산염광물의 용해가 큰 비중을 차지하고 있음을 알 수 있다. 한 가지 특이한 점은 그룹 1의 각 시료에서만 F^- 가 검출되고 있는 점으로서 F^- 는 화강암 및 화강편마암 지역의 심부지하수에서 주로 높은 함량을 보이고 있는 것으로 알려져 있다.

각 시료의 당량을 Piper's diagram에 나타낸 결과(Figure 6), 그룹 1은 non-carbonate alkali 영역에 분포하는데 반해 그룹 2는 carbonate hardness 영역에 분포하고 있어 상호간에 구별이 된다.

한편 터널배출수 침전지 시료는 원래의 자연적인 화학특성이 소멸된 상태일 것으로 판단하여 Figure 4 이하 모든 연구과정에 서는 제외하였다. 연구의 성격상 법정 배출수 허용기준 항목에 해당되는 미량성분을 모두 분석할 필요가 없었으나 분석된 항목을 수질환경보전법시행령 제8조 '가' 지역의 오염물질 배출허

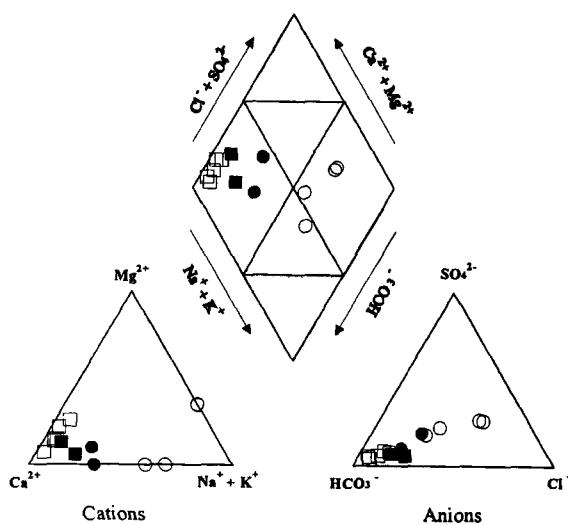


Figure 6. Chemical classification of water samples plotted on the Piper's diagram. ○ : Group 1, ● : B3, MW-1, □ : Group 2, ■ : B4, MW-2

용기준과 비교하여 보면 용해성철(기준치 10 mg/l 이하), 구리(기준치 3 mg/l 이하), 용해성망간(기준치 10 mg/l 이하), 플루오르(기준치 15 mg/l 이하) 함유량은 모두 기준치 이하로 나타났으며 다만 수소이온농도(기준치 5.8~8.6)만이 기준치를 초과한 것으로 나타났다. 또한 지하수법에 명시된 생활용수, 농업용수 및 공업용수로 사용할 수 있는 지하수 수질기준과 비교하여도 수소이온농도를 제외한 질산성질소와 염소이온은 각 기준에 크게 못 미치는 것으로 나타났다.

통계처리에 의한 분류 및 특성 규명

터널용출수는 화강암과 퇴적암층군과의 경계부에 위치하므로 지질만으로는 어느 그룹에 속할지 파악할 수 없고, 시추공 지하수는 다른 천부지하수 시료에 비하여 다소 심부에서 비롯되므로 독특하게 나타나는 특성을 배제할 수 없다. 앞 장에서 제시하였던 각종 그림 및 표에 의하면 MW-1 및 B3은 그룹 1에, MW-2 및 B4는 그룹 2에 속하는 것으로 판단된다. 하지만 이러한 판단은 다소 적관적인 것이라 할 수 있으며 따라서 이러한 구분이 통계적으로 유의한지의 여부와 앞 장에서 제시하였던 두 그룹의 구분이 과연 유효한지를 살펴보기 위하여 각 시료의 주성분 및 부성분인 Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , $\text{SiO}_{2(\text{aq})}$, F^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , alkalinity의 함량을 표준화한 후 이를 독립변수로 하여 군집분석(cluster analysis)을 수행하였다.

군집분석의 유사성은 유clideanian 제곱거리로 측정하였으며 군집방식은 평균기준결합방식을 택하였다. 독립변수에서는 전기전도도를 제외하였는데 이는 이미 두 그룹을 확인해 구별해 주는 것으로 나타났고 이를 독립변수로 투입할 경우 다른 변수가 결과에 미칠 수 있는 영향을 감소시키기 때문이다. 따라서 군집분석 결과 두 그룹이 유의하게 구분된다면 이는 용존물질의 총함량이 아닌 총용존물질을 구성하는 화학적 조성에 의하

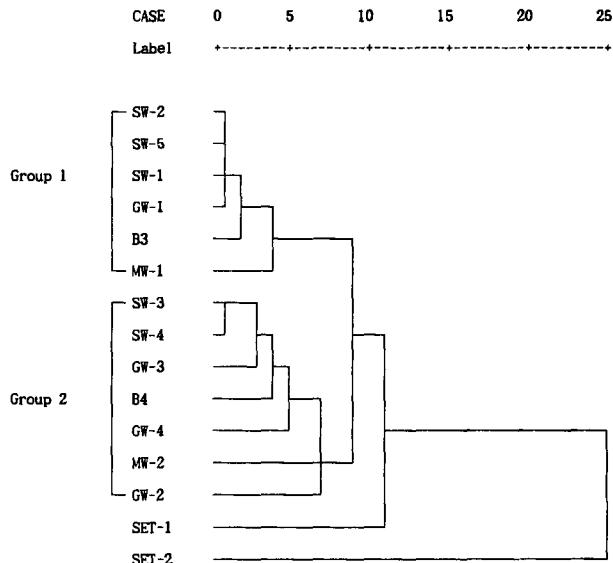


Figure 7. Dendrogram based on the cluster analysis for the water samples. B3 and MW-1 are clustered in group 1, and B4 and MW-2 are in group 2, respectively.

여 구분이 가능함을 나타내는 것이라 할 수 있다.

군집분석 결과(Figure 7), 그룹 1과 그룹 2가 효과적으로 구분되는 것으로 나타났다. 또한 연구의 관심이 되는 터널용출수인 MW의 경우 동일지점임에도 불구하고 5월에 채수한 MW-1은 B3과 함께 그룹 1에, 2월에 채수한 MW-2는 B4와 함께 그룹 2에 속하는 것으로 나타났다. 이는 MW-1의 경우 화강암 지역에서 비롯된 물의 영향을, MW-2의 경우 석회암층을 통과한 물의 영향을 더욱 많이 받고 있음을 말해준다. 또한 화절층의 시료인 B3이 그룹 1에 둑인 원인은 암석코어 시료의 광물기재에서 살펴 보았듯이 대부분의 주성광물이 방해석이 아니라 석영, 장석류, 운모 및 lime-silicate 광물로서 화강암과 유사한 광물조성을 갖고 있기 때문인 것으로 판단된다.

터널용출수와 같은 지하수의 경우 계절 및 기상환경에 크게 좌우되지 않고 거의 동일한 화학적 조성을 나타내는 것이 일반적이나 이처럼 시기에 따른 화학조성상의 변이를 보인 가장 큰 원인은 1차 및 2차 채수시기 동안에 회사측에서 실시한 대규모의 그라우트 타설 때문으로 판단된다. 즉 대규모 그라우트 타설 전에 채수한 MW-1은 그룹 1 즉 화강암지역을 통과한 물이 주로 용출된 데 반하여 그라우트 타설 후인 MW-2는 유로가 변하여 화강암 유역의 물보다는 석회암층을 통과한 물이 주로 배수되고 있는 것으로 판단되며 천은사 주변 화강암 지역의 계곡과 쇄대로부터의 지표수 유입이 방수작업에 의하여 효과적으로 억제되고 있음을 나타낸다.

그룹 1 및 2에서 나타나는 특성이 과연 집수역 대수층 암석의 어떠한 요인에 의하여 영향을 받는 것인지, 또한 암석 외에 다른 요인이 화학조성에 영향을 미치고 있는지 알아보기 위하여 각 그룹에 대하여 요인분석(factor analysis)을 실시하였다. 요인분석은 변수들 간의 상관관계를 이용하여 서로 유사한 변수들끼리 묶어주는 방법으로서 주로 자료의 복잡성을 줄이고 몇 개의 요인으로 정보를 요약하려는 목적으로 사용된다. 군집

분석 결과를 바탕으로 그룹 1에는 MW-1 및 B3을, 그룹 2에는 MW-2 및 B4를 포함시켰으며, 독립변수는 주성분 및 부성분인 Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , $\text{SiO}_{2(\text{aq})}$, F^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , alkalinity의 함량으로 하였다. 요인추출모델은 PCA(principal component analysis) 방식을, 요인수 결정은 1 이상의 아이겐값(eigenvalue)을 택하는 것으로 하였으며 varimax 직각회전방식을 택하였다.

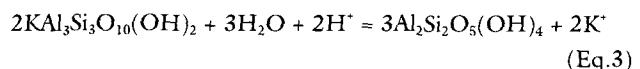
그룹 1의 요인분석 결과(Table 3), 요인 1은 alkalinity, $\text{SiO}_{2(\text{aq})}$, Na^+ , F^- , NO_3^- , Ca^{2+} 함량으로, 요인 2는 Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} 함량으로, 요인 3은 K^+ 함량으로 대표된다.

요인 1을 구성하는 각 물질들 간의 상관계수는 매우 높게 나타나며(Table 4), 이는 화강암의 조암광물인 사장석이 카올리나 이트로 풍화되는 반응으로 설명된다. 일반적으로 화강암질암에서 풍화용액의 초기 조성에는 K-장석보다 사장석이 더욱 영향을 미치며 따라서 Ca와 Na 용탈은 K 용탈에 선행하는 것으로 보고되고 있다(Nesbitt and Young, 1984). CO_2 는 물과 결합하여 H_2CO_3 를 형성하며 이는 사장석의 용해에 필요한 수소이온을 공급하는 동시에 HCO_3^- 를 발생시킨다. 또한 F는 그 정확한

기원은 규명되지 않았으나 화강암질암의 심부지하수에서 부화되는 것으로 알려져 있다. 한편 NO_3^- 는 사장석의 용해와 관련 없는 지표 오염물질로서 다른 이온들과 강한 음의 상관관계를 보이고 있으며, 이는 지하수가 심부로 가며 반응이 진행되어 용탈이온의 함량이 커질수록 상대적으로 오염되지 않은 지하수와 혼합, 희석됨을 의미한다. 요인 1의 아이겐값은 약 6.39로서 3개의 변수 중 가장 큰 값을 나타내므로 전체 분산을 설명하는데 있어 가장 중요한 요인이다.

요인 2를 구성하는 이온 중 Mg^{2+} - Cl^- , Cl^- - SO_4^{2-} 간의 상관관계는 높게 나타나나 Mg^{2+} - SO_4^{2-} 간의 상관관계는 상대적으로 낮게 나타난다(Table 4). 따라서 그룹 1의 Cl^- 은 두 가지 원인에 의해 물 속으로 유입되는 것으로 여겨지며 이는 첫째, Mg^{2+} 와 함께 흑운모의 풍화에 의해 물 속으로 공급되는 것과 둘째, SO_4^{2-} 가 지표 오염물질인 Cl^- 과 같이 유입되었거나 또는 Cl^- 이 특정한 원인에 의해 황화물의 용해에 의해 공급된 SO_4^{2-} 와 함께 거동하는 것으로 판단된다. 특히 Cl^- 이 지표에서 유입된 오염물질일 경우 NO_3^- 와 다른 기원인 것으로 나타났다. 한편 SO_4^{2-} 는 요인 1에 대해서도 높게 적재되어 있는 특징을 보인다.

요인 3은 K^+ 에 의해 조절되며 이것이 K-장석의 풍화반응을 나타낸다면 $\text{SiO}_{2(\text{aq})}$ 함량과 양의 상관관계를 나타내야 하나 실제로 매우 낮은 상관계수(-0.055)를 보이는 점을 감안하면 이는 Eq.3과 같은 백운모의 풍화반응으로 설명될 수 있다.



요인 1의 전체자료의 분산설명도는 63.9%, 요인 2는 24.1%, 요인 3은 10.4%로서 이들 3개의 요인으로서 설명되어질 수 있는 전체 분산은 98.4%에 달하며, 3개의 요인에 의해 각 변수의 분산이 설명될 수 있는 정도를 나타내는 communality도 SO_4^{2-} 에서 가장 낮은 0.9570을 보이며 나머지 변수들은 모두 그 이상으로 높게 나타난다.

그룹 2의 요인분석 결과(Table 5), 요인 1은 alkalinity, Ca^{2+} , NO_3^- 함량으로, 요인 2는 Mg^{2+} , Na^+ , $\text{SiO}_{2(\text{aq})}$, Cl^- 함량으로, 요인 3은 SO_4^{2-} , K^+ 함량으로 대표된다.

요인 1을 구성하는 이온 중 alkalinity- Ca^{2+} 간의 상관계수는 0.928로서 높게 나타나며(Table 6) 이는 석회암층 내에서의 방해석 용해(Eq.2)를 의미한다. 그룹 1의 요인분석 결과 중

Table 3. Varimax factor matrix of chemical constituents and factor scores for the water samples in group 1 from Donghae mine area.

Variable	Factor			Communality
	1	2	3	
Alkalinity	0.993			0.9999
$\text{SiO}_{2(\text{aq})}$	0.984			0.9933
Na^+	0.964			0.9835
F	0.949			0.9862
NO_3^-	-0.940			0.9614
Ca^{2+}	0.934			0.9998
Mg^{2+}		0.963		0.9781
Cl^-		0.954		0.9993
SO_4^{2-}	0.579	0.756		0.9570
K ⁺			0.984	0.9837
Eigenvalues	6.39	2.41	1.04	
Percent of variance explained by factor	63.9	24.1	10.4	
Cumulative percent of variance	63.9	88.0	98.4	

*Factor loadings less than 0.4 are omitted.

Table 4. The matrix of correlation coefficients among the chemical constituents for the water samples in group 1 from Donghae mine area.

	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	$\text{SiO}_{2(\text{aq})}$	F	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Alkalinity
Ca^{2+}	1.000									
Mg^{2+}	0.146	1.000								
Na^+	0.956	-0.000	1.000							
K^+	0.104	0.217	-0.105	1.000						
$\text{SiO}_{2(\text{aq})}$	0.964	-0.058	0.993	-0.055	1.000					
F	0.801	-0.381	0.919	-0.252	0.929	1.000				
Cl^-	0.610	0.858	0.476	0.117	0.436	0.106	1.000			
NO_3^-	-0.931	0.110	-0.871	-0.228	-0.904	-0.794	-0.355	1.000		
SO_4^{2-}	0.825	0.598	0.654	0.272	0.655	0.339	0.897	-0.690	1.000	
Alkalinity	0.967	-0.103	0.972	0.043	0.990	0.913	0.393	-0.954	0.661	1.000

가장 설명력이 큰 요인 1이 사장석 풍화를, 그룹 2에서 가장 설명력이 큰 요인 1이 방해석 용해를 각각 의미하는 사실은 화학조성 및 군집분석 결과에서 드러난 사실과 일치하는 것이다. NO_3^- 는 Ca^{2+} 및 alkalinity와 미약한 음의 상관관계를 나타내고 있어 그룹 1과 마찬가지로 지표에서 유입된 오염물질의 회석작용으로 해석된다. 한편 요인 2에 가장 높게 적재되는 $\text{SiO}_{2(\text{aq})}$ 의 경우 요인 1에도 높게 적재되어 있으며 Ca^{2+} 와 가장 높은 상관관계를 보이는데 이는 함유량이 적은 사장석의 풍화에 의한 것이라기보다는 주·부구성광물로 존재하는 Ca-석류석($\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$)의 용해에 의한 것으로 판단된다. 석류석의 경우 풍화에 의한 변질산물의 핵형성(nucleation) 속도는 느리나 용액 확산통로(diffusion avenue)는 개방된 상태를 유지하므로 빠른 화학적 풍화속도를 갖는 것으로 알려져 있다(Eggerton, 1986). 요인 1의 아이겐값은 약 3.08로서 그룹 2에서는 가장 크나 그룹 1의 요인 1에 비하면 매우 낮은 값을 보인다.

요인 2를 구성하는 각 물질들간의 상관계수는 모두 0.6을 넘지 않는 약한 상관관계를 보임으로써 단일 반응에 의하여 요인 1이 설명되지는 않는다. Mg^{2+} 의 경우 방해석 중에 치환되어 들어

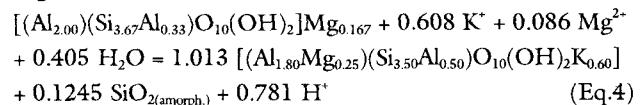
Table 5. Varimax factor matrix of chemical constituents and factor scores for the water samples in group 2 from Donghae mine area.

Variable	Factor			Com-munality
	1	2	3	
Alkalinity	0.936			0.9841
Ca^{2+}	0.904			0.9748
NO_3^-	-0.844			0.8293
Mg^{2+}		-0.927		0.8767
Na^+		0.686		0.4753
$\text{SiO}_{2(\text{aq})}$	0.638	0.682		0.8748
Cl^-		0.595		0.4326
SO_4^{2-}			0.957	0.9671
K^+		-0.497	-0.707	0.7560
Eigenvalues	3.08	2.58	1.50	
Percent of variance explained by factor	34.2	28.7	16.7	
Cumulative percent of variance	34.2	63.0	79.7	

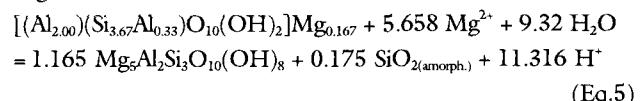
*Factor loadings less than 0.4 are omitted.

갈 수 있고 또한 백운석이 구성광물로 나타나기는 하나 Ca^{2+} 및 alkalinity와 전혀 상관관계를 보이지 않으므로 이들의 용해에 의해 용액 중으로 유입되지는 않는 것으로 나타났다. Mg^{2+} 는 약 하기는 하나 $\text{SiO}_{2(\text{aq})}$ 와 음의 상관관계가 있고 같은 요인에 속하지는 않으나 K^+ 와 양의 상관관계를 보이고 있어 퇴적암층군의 이질퇴적암 내에서 다음과 같은 Mg -몬모릴로나이트 반응을 거친 것으로 생각된다(Faure, 1991).

Mg-montmorillonite - Illite



Mg-montmorillonite - Chlorite



Na^+ 와 Cl^- 의 경우, communality가 각각 0.4753 및 0.4326으로서(Table 5) 각 요인들이 변수의 50%도 설명을 못 하고 있으므로 거동에 대한 해석을 하기가 어렵다. 단지 두 이온 사이의 상관계수가 매우 낮으므로 Na^+ 가 지표 오염물질에서 비롯되었을 가능성은 회박하다.

요인 3을 형성하는 SO_4^{2-} 와 K^+ 는 약한 음의 상관관계를 보이기는 하나 이들이 한 요인을 구성하는 원인을 명확하게 규명하기는 매우 어렵다. 가능한 원인으로는 자연적인 지구화학적 반응보다는 그라우트의 재료인 시멘트의 용해를 들 수 있다. Dietzel et al.(1992)에 의한 연구 결과에 의하면 터널 벽면에 타설한 시멘트의 용해로 형성된 강알칼리성의 터널배출수에서 SO_4^{2-} 는 결핍되고 K^+ 는 부화되는 현상을 보인 바 있다. 1차 채수 후에 연구지역에 대한 대규모의 그라우팅 작업이 있었던 점을 감안하면 이러한 해석이 설득력을 지닌다고 하겠다. 그러나 현장에서 실제로 측정된 pH가 강알칼리성이 아닌 점, 국내의 일부 지하공동에서 배출되는 강알칼리성의 삼출수에서는 K^+ 뿐만 아니라 SO_4^{2-} 의 함량도 같이 증가한 점(전효택과 전계택, 1995a, 1995b) 등 단순히 시멘트 용해의 영향으로 단정하기에는 어려운 점이 발견되어 이에 대해서는 추가적인 연구가 있어야 할 것이다.

그룹 2에서는 요인 1이 전체 분산의 34.2%, 요인 2가 28.7%, 요인 3이 16.7%를 설명하므로써 3개 요인으로 전체 분산의 79.7%를 설명할 수 있다.

Table 6. The matrix of correlation coefficients among the chemical constituents for the water samples in group 2 from Donghae mine area.

	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	$\text{SiO}_{2(\text{aq})}$	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Alkalinity
Ca^{2+}	1.000								
Mg^{2+}	-0.091	1.000							
Na^+	-0.151	-0.547	1.000						
K^+	-0.152	0.663	-0.232	1.000					
$\text{SiO}_{2(\text{aq})}$	0.615	-0.577	0.469	-0.156	1.000				
Cl^-	-0.157	-0.422	0.037	-0.191	0.377	1.000			
NO_3^-	-0.603	0.146	0.176	-0.120	-0.379	0.336	1.000		
SO_4^{2-}	0.563	0.044	-0.012	-0.515	0.160	-0.102	0.234	1.000	
Alkalinity	0.928	0.192	-0.196	0.147	0.464	-0.407	-0.677	0.418	1.000

열역학적 고찰

군집분석 결과, MW-1은 그룹 1에, MW-2는 그룹 2에 속하는 것으로 나타났지만 이들이 각 그룹 내의 다른 지표수 및 지하수 시료와 동일한 화학조성을 가지고 있지는 않은 것으로 나타난다. 즉 용존이온의 화학적 조성을 살펴보면(Figure 4) 그룹 1에서 MW-1 및 B3 등의 다소 심부에서 채수한 지하수는 다른 시료에 비하여 TDS 중 Ca^{2+} 가 보다 부화된 특징을 보이고 그룹 2에서도 MW-2는 Na^+ 및 F^- 가 다소 부화된 특징을 보이는 등 터널용출수는 그룹 1과 그룹 2의 중간적인 성격을 띠어 용출되기 전까지 화강암 지역과 석회암 지역 물의 혼합 또는/그리고 상대적으로 장기간에 걸친 주변 모암과의 반응이 있었음을 나타낸다.

두 그룹의 각 시료들에 대하여 주어진 환경에서 열역학적으로 안정한 광물상을 파악하기 위하여 광물상안정도에 도시하였다(Figure 8). 화강암과 물-암석반응을 겪은 그룹 1과 석회암층 중의 탄산염광물과 주로 반응한 그룹 2를 함께 상안정도에 도시하는데 무리가 있기는 하나, 그룹 2의 경우도 $\text{SiO}_{2(\text{aq})}$ 함량이 높고, MW-2는 화강암체를 통과한 시료이며, 석회암층 내에 이암, 역암, 사암, 세일 등의 점토광물이 풍부한 층이 협재되어 있으므로 광물상안정도를 적용하는데 의미가 있을 것으로 판단된다.

Figure 8의 열역학적 자료는 Helgeson(1969)을 기초로 하였으나 $\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 계 중 백운모의 자료는 Nesbitt(1977)을 사용하였고 다소 반정량적인 것으로 여겨지는 Na^+ , Ca^+ , Mg^+ -스메타이트와 카올린라이트의 평형경계는 이들 외에 이종운 등(1996)이 경북 영천지역에 대한 연구에서 제안한 평

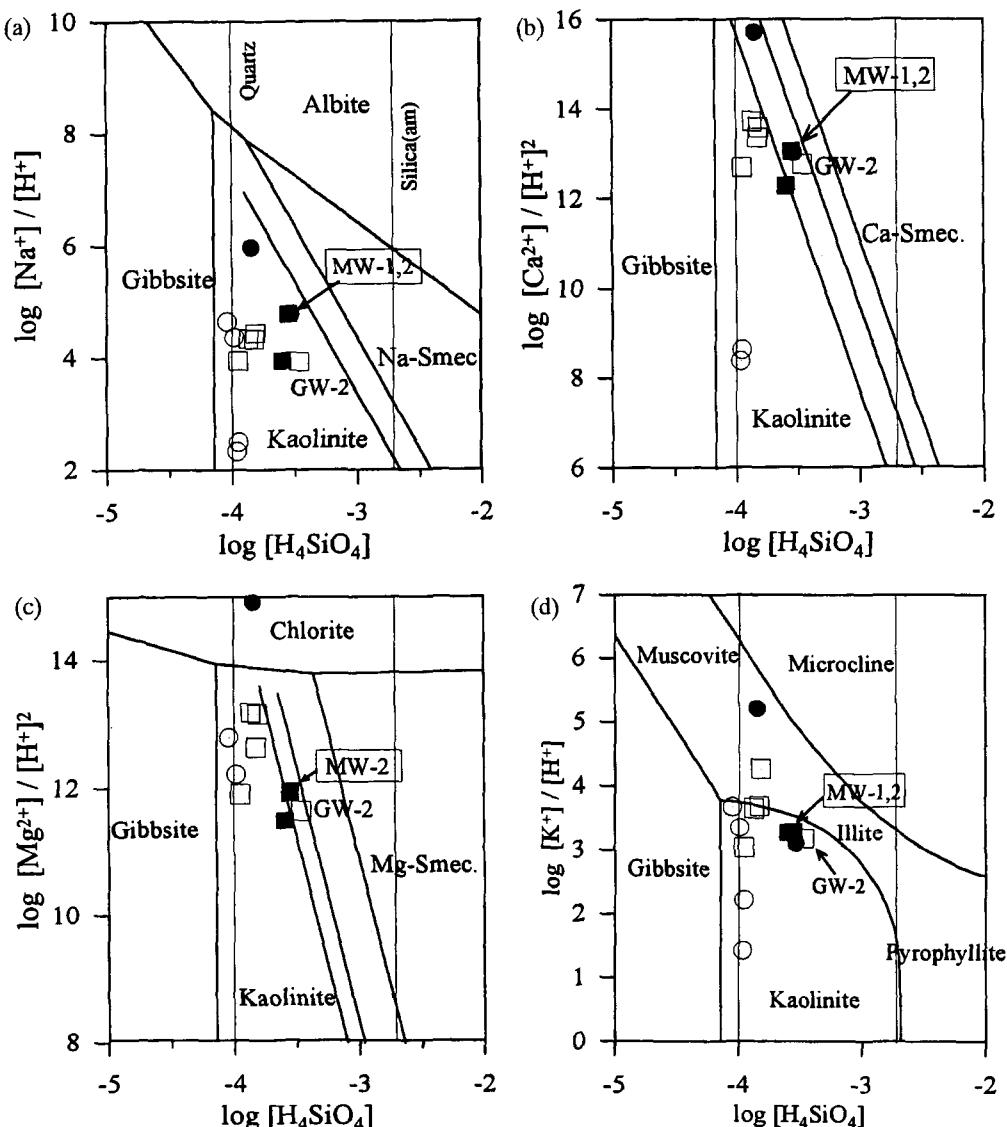


Figure 8. Stability diagrams in the (a) Na-, (b) Ca-, (c) Mg-, and (d) K-systems for the water samples. The boundaries between kaolinite and smectites are from various sources; (a) Lee *et al.*(1996), and Helgeson(1969) and Nesbitt(1977), (b) and (c) Helgeson (1969), Lee *et al.*(1996) and Nesbitt(1977) from the left to the right. The quartz and amorphous silica saturation lines shown in (a) also apply to (b), (c) and (d). The symbols in this figure have the same meanings as in Figure 6.

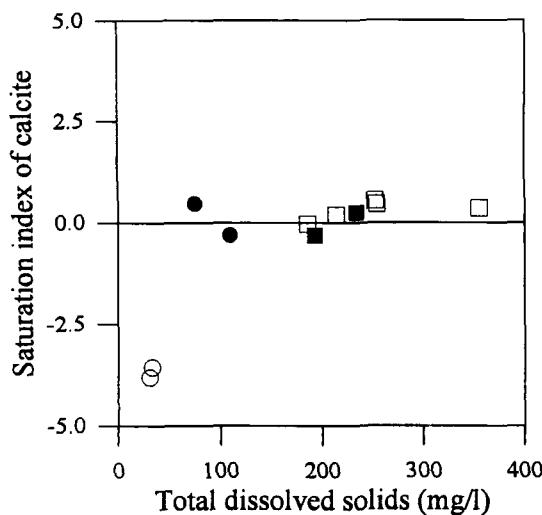


Figure 9. Saturation index of calcite with total dissolved solids for the water samples (○ : Group 1, ● : B3, MW-1, □ : Group 2, ■ : B4, MW-2).

형상수를 기초로 하여 도시하였다. $\text{Na}_2\text{O}\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 계 (Figure 8(a))에서는 모든 시료가 카올리나이트 안정영역에 위치하여 Na-알루미늄규산염 광물이 존재한다면 점차 카올리나이트로 전환되어 갈 것임을 알 수 있다. MW-1과 MW-2는 화학적 조성이 다소 다름에도 불구하고 상안정도에서는 동일위치에 도시되며, GW-2, B3과 함께 Na-스멕타이트와의 평형경계에 근접한 모습을 보인다. $\text{CaO}\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 계 (Figure 8(b))에서도 대부분의 시료가 카올리나이트 안정영역에 위치하나 MW-1, MW-2, GW-2, B3은 스멕타이트 안정영역 (Helgeson, 1969) 또는 스멕타이트와의 평형경계 주변(이종운 등, 1996)에 위치하여 Ca-스멕타이트가 형성될 가능성이 있음을 알 수 있다. MW-1과 MW-2는 Ca-계에서도 거의 동일한 위치에 도시되는 모습을 보인다. 그러나 Ca-계에서는 pH에 대한 Ca^{2+} 함량이 일정수준을 넘어서면 방해석 침전이 우선적으로 발생하므로 WATEQ4F 프로그램(Ball and Nordstrom, 1991)을 통하여 방해석 포화지수를 구한 후 용해 및 침전여부를 살펴 보았다(Figure 9). 그룹 1에서는 B3을 제외한 모든 시료가 불포화상태에 있으므로 방해석 용해가 발생하나 그룹 2에서는 B4와 GW-3을 제외한 모든 시료가 미약한 과포화상태에 있어 방해석 침전이 발생한다. 방해석에 대하여 불포화상태에 있는 대부분의 시료는 모두 카올리나이트 안정영역에 있으므로 연구지역의 Ca-계에서 안정한 광물은 카올리나이트 및 방해석인 것으로 판단된다. $\text{MgO}\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 계 (Figure 8(c))에서도 녹니석 안정영역에 있는 B3을 제외한 대부분의 시료가 카올리나이트 안정영역에 위치하나 Helgeson(1969)과 이종운 등(1996)에 의하면 MW-2와 GW-2는 Mg-스멕타이트 생성이 가능한 것으로 나타났다. $\text{K}_2\text{O}\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 계 (Figure 8(d))에서는 MW-1 및 MW-2를 비롯한 대부분의 그룹 2 시료와 일부 그룹 1 시료가 카올리나이트와 일라이트의 평형경계에 위치하고 있어 일라이트 형성이 가능한 것으로 나타났다.

물-암석반응을 많이 거친 심부지하수일수록 카올리나이트-

스멕타이트 평형경계에 위치하게 되는 것으로 여겨지며 따라서 그 화학적 조성에 있어 다소 차이가 남에도 불구하고 두 개의 터널용출수는 Na-, Ca-, Mg-, K-계에서 모두 평형경계에 근접한 동일위치에 놓여짐에 따라 다른 물에 비하여 상당한 물-암석반응을 겪은 것으로 판단된다. 평형 열역학적인 측면에서 볼 때 터널용출수의 환경에서 안정한 광물은 카올리나이트, 방해석, Mg-스멕타이트 및 일라이트 등인 것으로 나타났다. 물의 연령측정을 하지는 않았으나 이러한 결과는 터널굴착에 따라 심부에 갑자기 압력이 개방되었어도 지표수나 천부의 지하수가 빠른 속도로 터널내로 유입, 현재 용출되고 있지는 않음을 말해준다.

한편, 시추공 시료인 B3 및 천부지하수로 분류하였던 샘 시료인 GW-2는 모든 계의 상안정도상에서 터널용출수와 유사한 거동을 보이고 있다. 이러한 사실은 이 두 지하수가 다른 지하수에 비하여 상당한 물-암석반응을 겪은 물임을 나타낸다.

질량평형 모델링

질량평형식에 기초한 NETPATH(Plummer et al., 1991) 프로그램을 이용하여 지표수에서 터널용출수로 이동하는 과정 중의 반응을 모델링하였다. 터널용출수는 그 채수시기에 따라 각각 MW-1은 그룹 1에, MW-2는 그룹 2에 속하는 것으로 나타났으나 이는 각 터널용출수가 자신이 속해 있는 그룹 내의 지표수 및 지하수에서만 비롯되었다는 의미는 아니다. 터널용출수는 각 그룹 내의 다른 시료에 비해 물-암석반응을 더욱 많이 거친 것으로 나타났으며 또한 집수역이 작아 두 그룹의 물이 일정 비율로 혼합되어 용출되었을 가능성이 크므로, 이러한 모델링은 정량적인 질량평형의 측면에서 터널용출수의 화학적 조성에 대한 설명이 가능한가와 지질이 상이한 두 지역의 물이 어느 정도의 비율로 혼합되었는지를 파악하려는 목적을 갖고 있다.

그룹 1의 지표수를 대표하는 시료는 SW-2로, 그룹 2는 SW-3으로 하였으며 이들이 함양되어 일정 비율로 혼합되고 물-암석반응을 거쳐 터널용출수 MW-1, MW-2로 배수되는 경로를 가정하였다.

Table 7에는 모델링에 사용한 원소(constraints)와 광물상(phase) 및 광물조성(stoichiometry)을 나타내었다. 미량원소의 경우 대부분이 검출한계 이하로 나타나고 분석의 부정확성을 고려하여 주성분 및 부성분원소만을 모델링에 투입하였고 광물상은 광물기재 결과를 참조로 하여 선택하였다. 일반적으로 이 프로그램의 결과는 가능한 모든 모델을 제시하므로 수 개에서 수십 개의 모델을 도출한다. 따라서 Schramke et al.(1996)의 방법을 원용, 지질매체와의 반응성이 미약한 NO_3^- 와 Cl^- 은 단지 두 그룹의 혼합율에 의해서만 그 함량이 결정되는 것으로 하여 가장 적합한 모델을 선정하였다.

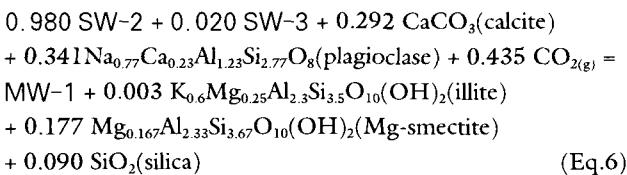
MW-1을 설명하기 위하여 SW-2와 SW-3이 혼합되어 반응을 한 후 용출되는 경로를 설정하였을 때 총 5개의 모델이 도출되었다. 각 모델에 의하면 MW-1에 대한 그룹 1의 혼합율은 최소 약 12%에서 최대 약 98%까지 다양하게 나타났으나(Table 8) 이 중에서 MW-1의 NO_3^- 및 Cl^- 함량과 가장 근접한 결과를 제

Table 7. Constraints and phases used in mass balance modeling for Donghae mine area.

C	Ca	Na	Si	K	Mg	Al	Constraints
							Phases
Precipitation or dissolution			Precipitation only		Dissolution only		
Calcite (F)*	CaCO ₃	illite	K _{0.6} Mg _{0.25} Al _{2.3} Si _{3.5} O ₁₀ (OH) ₂	plagioclase	Na _{0.77} Ca _{0.23} Al _{1.23} Si _{2.77} O ₈		
CO _{2(g)} (F)				K-feldspar	KAlSi ₃ O ₈		
kaolinite	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄			dolomite	CaMg(CO ₃) ₂		
Ca-smectite	Ca _{0.167} Al _{2.33} Si _{3.67} O ₁₀ (OH) ₂			chlorite	Mg ₅ Al ₂ Si ₃ O ₁₀ (OH) ⁸		
Mg-smectite	Mg _{0.167} Al _{2.33} Si _{3.67} O ₁₀ (OH) ₂			phlogopite	KMg ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂		
silica	SiO ₂			grossular	Ca ₃ Al ₂ (SiO ₄) ₃		

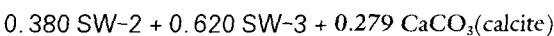
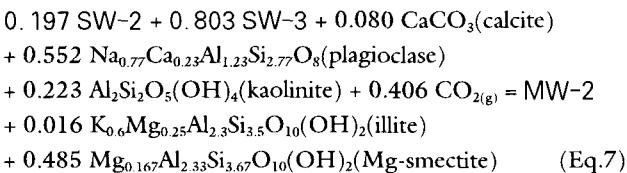
* (F) : phases forced in models.

시한 모델은 그룹 1의 혼합율이 약 98%인 4번 모델인 것으로 나타났다. 4번 모델에 의하면 SW-2 및 SW-3이 혼합되어 MW-1의 화학조성을 형성하기까지는 Eq.6과 같은 반응을 한다. Eq.6에서 SW-2, SW-3 및 MW-1의 항은 혼합율(%)을, 나머지 항은 mmol/l의 단위를 갖는다.

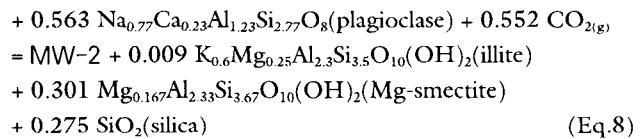


4번 모델이 분석된 결과와 가장 잘 부합하는 것으로 나타났으나, NO₃⁻ 함량에 있어 MW-1에서 실제로 분석된 값은 0.25 mg/l인데 반하여 계산된 함량은 2.23 mg/l로서 분석값과 다소 차이를 보이고 있다. 이러한 원인으로는 음이온교환반응 등의 지질학적인 기제에 의한 sink, 미생물의 활동에 기인한 소모, 희석작용, 분석의 부정확성 등을 들 수 있겠으나 정확한 원인을 규명하기는 어렵다. 그러나 다른 모델을 택하였을 경우 최소 2.75 mg/l에서 최대 9.79 mg/l의 NO₃⁻ 함량이 계산되므로 4번 모델이 가장 적합한 것으로 판단된다. 4번 모델을 택하였을 경우 Cl⁻ 함량의 계산값은 4.83 mg/l이며 측정값은 4.75 mg/l로 근사하게 표현된다.

MW-2의 설명을 가능하게 하는 모델은 총 22개가 도출되었다. MW-2에 대한 그룹 2의 혼합율은 최소 약 28%에서 최대 약 91%까지 나타났으나(Table 8) 이 중에서 MW-2의 NO₃⁻ 함량에 가장 근접한 결과는 그룹 2의 혼합율이 약 80%인 17번 모델, Cl⁻ 함량에 가장 근접한 결과는 그룹 2의 혼합율이 약 62%인 20번 모델인 것으로 나타났다. 17번과 20번 모델은 각각 Eq.7 및 8의 반응을 한다.

**Table 8.** The mixing ratio in models obtained by mass balance modeling for MW-1 and MW-2. The models that provide the best fit to the measured data are indicated in bold-face type.

Model No.	Initial samples	NO ₃ ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)
Measured values at sample MW-1		0.25	4.75
	SW-2 SW-3		
1	80.9% 19.1%	3.73	5.21
2	92.0% 8.0%	2.75	4.96
3	12.0% 88.0%	9.79	6.73
4	98.0% 2.0%	2.23	4.83
5	66.7% 33.3%	4.98	5.52
Measured values at sample MW-2		8.89	6.13
	SW-2 SW-3		
1, 2, 4, 5	67.7% 32.3%	4.89	5.50
3	8.8% 91.2%	10.06	6.80
6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 18, 19, 21, 22	61.1% 38.9%	5.47	5.64
13, 14, 15, 16	71.9% 28.1%	4.52	5.40
17	19.7% 80.3%	9.11	6.56
20	38.0% 62.0%	7.50	6.16



이러한 접근방법의 사용에는 실제로 관여하는 중요한 반응이나 구성요소를 투입시키지 못할 위험이 있기는 하지만 현재 관찰되는 물과 광물의 화학조성으로부터 정량적인 반응의 경로를 유추할 수 있다는 점에서 매우 효과적이라 하겠다.

질량평형 모델링 결과, MW-1은 화강암 지역을 통과한 물로 표현되는 그룹 1의 혼합율이 약 98%로 대부분을 차지하고 MW-2는 석회암 지역을 통과한 물로 표현되는 그룹 2의 혼합율이 약 62~80%로 많은 부분을 차지하는 것으로 나타나 화학조성 차이 및 군집분석 결과와 일치한다. 또한 단순한 혼합에 의해서가 아니라 다양한 광물과 장기간에 걸친 추가의 반응을 한 후 용출되는 것으로 나타났으며 이러한 반응은 요인분석 및 열

역학적 고찰의 결과와 잘 일치한다.

사, 신교화 실장께 감사드린다.

결 론

강원도 동해시에 위치한 석회석 운반터널의 굴착공사와 관련, 주변 지역의 지표수 및 지하수에 대한 수리지구화학적 연구 결과는 다음과 같다.

1. 연구지역의 지표수 및 지하수는 화강암 지역으로부터 비롯된 그룹 1과 퇴적암층군의 석회암 지역의 영향을 받은 그룹 2로 분류될 수 있다. 전기전도도에서 그룹 1은 $36\sim95 \mu\text{S}/\text{cm}$, 그룹 2는 $238\sim435 \mu\text{S}/\text{cm}$ 의 범위를 보여 잘 구분된다. TDS 구성비로 그룹 1은 Na^+ , K^+ , $\text{SiO}_{2(\text{aq})}$ 및 F^- 의 구성비가 높아 화강암질암의 장석류 용해에 의해 주로 규정되고, 그룹 2는 Ca^{2+} 및 $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ 비가 높아 방해석의 용해가 주도적으로 영향을 미치고 있음을 나타낸다.

2. 군집분석 결과 그룹별 구분이 매우 효과적임을 확인하였으며 심부의 지하수인 MW-1 및 B3은 그룹 1에, MW-2 및 B4는 그룹 2에 각각 속하는 모습을 보인다. 동일 지점에서 채수한 두 터널용출수가 시기별로 다른 그룹에 속하는 것은 두 채수시기의 사이에 수행된 대규모의 그라우팅 작업이 그 원인으로 주로 화강암 지역에서 비롯되어 터널 내로 배수되던 지하수의 유로가 크게 변하였음을 말해준다. 요인분석 결과 그룹 1은 각각 사장석, 흑운모 및 백운모 풍화의 3개 요인으로 표현되며 이는 화강암을 대수층으로 갖는 지하수의 특징을 나타내고, 그룹 2는 방해석 및 Ca-석류석의 용해, 이질퇴적암 내에서 점토광물간의 반응 및 시멘트 용해의 3개 요인으로 압축된다.

3. 열역학적인 고찰 결과, 화학적 조성에 있어 다소 차이가 남에도 불구하고 두 개의 터널용출수는 다른 물에 비하여 상당한 물-암석반응을 겪은 것으로 판단되며 따라서 터널굴착에 따라 심부에 갑자기 압력이 개방되었어도 지표수나 천부의 지하수가 빠른 속도로 터널내로 유입되고 있지는 않는 것으로 나타났다. 열역학적인 측면에서 터널용출수의 환경에서 안정한 광물은 카울리나이트, 방해석, Mg-스멕타이트 및 일라이트 등이다.

4. 질량평형 모델링 결과, MW-1은 그룹 1의 혼합율이 약 98%로 대부분을 차지하고 MW-2는 그룹 2의 혼합율이 약 62%~80%로 많은 부분을 차지하는 것으로 나타나 화학조성 차이 및 군집분석 결과와 일치한다. 또한 단순한 혼합에 의해서가 아니라 장기간에 걸친 물-암석반응을 한 후 용출되는 것으로 나타났으며 정량적으로 가능한 반응은 그룹 1에서 1개, 그룹 2에서 2개를 각각 도출하였고 도출된 반응은 요인분석 및 열역학적 고찰의 결과와 잘 일치한다.

사 사

이 연구를 지원하여 주신 한국과학재단 지정 전략광물자원연구센터 및 쌍용양회(주), 그리고 시료채취와 자료획득에 많은 도움을 주신 쌍용자원개발(주)의 故 김성범 사장과 정성화 이

참고문헌

- 유재영, 최인규, 김형수, 1994, 춘천 지역의 기반암 종류에 따른 지표수의 지구화학적 특성, *지질학회지*, 30, p.307-324.
이종운, 김선준, 전용원, 1996, 영천도수터널 주변 지하수의 수리지구화학, *한국자원공학회지*, 33, p.210-224.
이종혁, 원종관, 박수익, 1992, 강원도 태백 일대의 지구조 및 암석학적 연구, *KOSEF 88-1113-01*, 한국과학재단, 402p.
이희근, 전효택, 이종운, 이대혁, 류동우, 오석영, 1995, 동해신광산 터널굴착공사와 관련된 지표수 및 지하수의 유동변화에 대한 조사연구(I) - 수문학 및 암반수리학적 접근을 중심으로, 터널과 지하공간, 5, p.347-362.
전효택, 전계택, 1995a, L-1E 비축기지의 효율적 관리를 위한 지하수의 이화학분석, 미생물학 분석 및 Break Point 산정 연구, 서울대학교 공과대학 부설 에너지·자원신기술연구소, 78p.
전효택, 전계택, 1995b, U-1 E 비축기지 주변 지하수의 화학조성과 Break Point 산정을 위한 미생물학적 연구, 서울대학교 공과대학 부설 에너지·자원신기술연구소, 73p.
태백산지구지하자원조사단, 1962, 태백산지구지질도 삼척도폭, 대한지질학회.
Ball, J.W. and Nordstrom, D.K., 1991, User's manual for WATEQ4F, with revised thermodynamic data base and test cases for calculating speciation of minor, trace and redox elements in natural waters, U.S. Geol. Surv. Open File Rep. 91-183, 189p.
Dietzel, M., Usdowski, E. and Hoefs, J., 1992, Chemical and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ - and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -isotope evolution of alkaline waters and the precipitation of calcite, *Applied Geochemistry*, 7, p.177-184.
Drever, J.I., 1988, *The geochemistry of natural waters*, 2nd Ed., Prentice Hall, New Jersey, 437p.
Eggerton, R.A., 1986, The relation between crystal structure and silicate weathering rates, in Colman, S.M. and Dethier, D.P., Eds., *Rates of chemical weathering of rocks and minerals*, Academic Press, Florida, p.21-40.
Faure, G., 1991, *Principles and applications of inorganic geochemistry*, Macmillan, New York, 626p.
Greenberg, A.E., Clesceri, L.S. and Eaton, A.D., Eds., 1992, *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 18th Ed., American Public Health Association, Washington DC, 1010p.
Helgeson, H.C., 1969, Thermodynamics of hydrothermal systems at elevated temperatures and pressures, *Amer. J. Sci.*, 267, p. 729-804.
Lloyd, J.W. and Heathcote, J.A., 1985, *Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater*, Clarendon Press, Oxford, 296p.
Nesbitt, H.W., 1977, Estimation of the thermodynamic properties of Na-, Ca- and Mg-beidellites, *Canadian Mineralogist*, 15, p.22-30.
Nesbitt, H.W. and Young, G.M., 1984, Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on ther-

modynamic and kinetic considerations, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 48, p.1523-1534.

Plummer L.N., Prestemon, E.C. and Parkhurst, D.L., 1991, An interactive code (NETPATH) for modeling NET geochemical reactions along a flow PATH, U.S. Geol. Surv. Water-Reso-

urces Investigations Report, 91-4078, p.1-41.

Schramke, J.A., Murphy, E.M. and Wood, B.D., 1996, The use of geochemical mass-balance and mixing models to determine groundwater sources, *Applied Geochemistry*, 11, p.523-539.