

인공함양 지역 클로킹 가능성 평가를 위한 충적층 토양 특성에 관한 예비 연구

Preliminary Study on Alluvial Soil Characteristics for Clogging Possibility in Groundwater Artificial Recharge Area

황 정¹ Hwang, Jeong
최 명 락² Choi, Myoung-Rak
김 규 범³ Kim, Gyoo-Bum

Abstract

Artificial recharge systems have been employed to solve drought problems due to global climate change. Despite the increased usage, the applications of artificial recharge systems are limited by clogging problems, which reduce recharge rates. In this study, the soil texture and mineral characteristics of alluvial soil in a planned artificial recharge system area were investigated to evaluate the possibility of chemical clogging during the injection of stream water. The primary minerals contained in the clastic particles are quartz, K-feldspar, plagioclase, and biotite, and the secondary minerals filling the pore space are illite, kaolinite and Fe-oxide. The fact that carbonate and sulfate are observed as secondary minerals in the pore space suggests that chemical clogging has not occurred by the interaction between the groundwater and surface water in the study area. Thus, monitoring soil properties, e.g., the formation and growth of secondary minerals in the pore space, is required to investigate the possibility of chemical clogging in artificial recharge systems.

요 지

전 지구적 기후변화에 따른 용수 확보 방안으로 인공함양 기법이 활용되고 있다. 함양률을 감소시키는 클로킹 문제는 인공함양 기법의 활용에 큰 장애가 되고 있다. 이 연구는 하천수 주입 과정에서 발생할 가능성이 있는 클로킹 평가를 위한 기초자료를 확보하기 위해 인공함양 예정 지역 충적층의 토양 조직과 광물 특성을 분석하였다. 충적층 쇄설성 입자의 주요 구성 광물은 석영, 정장석, 사장석, 흑운모 등이며, 공극을 충전하는 주요 2차 광물은 일라이트, 카오린나이트, Fe-산화광물이다. 2차 광물로서 탄산염 혹은 황산염 광물의 산출이 없는 것은 인공함양 실험 전인 연구 지역 충적층에서는 지하수와 지표수 간의 반응에 의한 화학적 클로킹은 발생하지 않았음을 시사한다. 인공함양 실험과 관련된 화학적 클로킹에 대한 평가를 위해 대수층 내 공극에서 2차 광물의 생성과 성장과 같은 충적층의 토양 특성에 대한 모니터링이 필요하다.

Keywords : Artificial recharge, Clogging, Secondary mineral, Soil property

1 정회원, 대전대학교 재난안전공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Disaster Prevention Engrg., Daejeon Univ., Tel: +82-42-280-2572, Fax: +82-42-280-2576, jeongha@dju.kr, Corresponding author, 교신저자)

2 비회원, 대전대학교 일반대학원 방재학과 (Dept. of Disaster Prevention Engrg., Daejeon Univ.)

3 정회원, 대전대학교 재난안전공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Disaster Prevention Engrg., Daejeon Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2024년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2024 by the Korean Geotechnical Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

지하수를 포함하는 지층을 대수층이라고 하는데, 일반적으로 많은 양의 지하수를 포함하는 대수층은 호수 및 하천 하류에서 모래나 자갈로 구성된 충적층, 1차 공극이 잘 발달한 석회암, 사암, 역암, 그리고 2차 공극인 균열이나 절리가 발달한 암석 등이 대표적이다. 최근에는 가뭄 발생 지역에서 용수 확보 방안으로 대수층 내 물을 저장하는 다양한 기법들이 연구 및 개발되고 있다. 이중 MAR(Managed aquifer recharge)에 의한 인공함양 기법은 가뭄 발생 지역에서의 중요한 용수 확보 수단으로 적용되고 있으며, 전 세계적으로 그 활용이 증대될 것으로 보인다(Zhang et al., 2020). 인공함양 지역에서 하천수의 주입과 저장 과정에서 충전물에 의한 대수층 내 공극의 감소로 발생하는 클로깅에 대한 체계적인 연구의 필요성이 대두되고 있다. 클로깅은 대수층 내 미립분에 의한 물리적 막힘 및 지하수 내 용존이온에 의한 화학적 막힘 현상 등을 말한다. 인공함양 지역에서 클로깅은 함양 원수, 대수층 매질 및 기존 지하수 등의 상호 물리적, 화학적, 그리고 생물학적 기작에 의하여 발생한다(Rinck-Pfeiffer et al., 2000; Pyne, 2005; Maliva, 2020). 이중 함양 원수와 대수층 매질 간의 산화-환원 환경의 변화는 다양한 화학적 반응을 발생시켜 대수층 공극 내 탄산칼슘, 석고, 인산염, 철, 망간 등의 2차 광물을 침전시킨다. 침전된 2차 광물들은 함양 원수의 주입과 배출 과정에서 반복적으로 작용하여 대수층의 지하수 저장 능력과 투수성을 점진적으로 감소시킨다(Pyne, 2005).

최근 인공함양 기법이 활발히 이용됨에 따라, 인공함양 시 클로깅의 발생 가능성과 범위에 대한 예측, 발생 원인에 대한 평가에 관한 연구 등이 활발히 이루어지고 있다(Hwang et al., 2021; Kim et al., 2021). 국내에서 클로깅에 대한 연구로는 철-망간 산화물에 의한 클로깅 제거 효과(Kim et al., 2010; Kim et al., 2012), 지하수 관정에서 나타나는 클로깅 발생 물질(Choo et al., 2012), 그리고 클로깅 발생의 원인과 효과(Kim et al., 2013a; Kim et al., 2017) 등이 있다. 그러나 대수층 내 클로깅을 야기하는 2차 광물에 대한 산출상태와 화학조성 등과 관련된 발생 물질 규명에 관한 연구는 아직 없는 실정이다. 화학적 클로깅(chemical clogging)은 Ca-탄산염 및 황산염, 그리고 Fe-산화 및 수산화 광물의 침전에 의해 주로 발생한다. 이러한 화학적 클로깅의 발생에는 매우 긴 시간이 소요되기 때문에 화학적 클로깅의 발생 기작은 아직

잘 규명되지 않고 있다(Martin, 2013). 이 연구는 국내 소하천 유역에서 지하수 인공함양을 실시하는 과정에서 발생할 가능성이 있는 클로깅 평가를 위한 기초자료를 확보하기 위해 인공함양 예정 지역의 토양 조직과 광물 특성을 분석하였다. 이 연구에서는 홍성군 갈산면에 존재하는 1차 수계를 대상으로 충적층 퇴적물 토양의 광물 및 지구화학적 특성을 파악하여 인공함양 사업을 수행할 때 추후 발생할 수 있는 하천수의 유입과 유출에 따른 토양의 조직과 광물 변화 판단의 기준을 제공하고자 한다.

2. 연구지역의 지형과 지질

연구지역은 충청남도 홍성군 갈산면 운곡리 일대 지역으로서 1 : 50,000 홍성도폭(Lee and Kim, 1963)의 북서부 지역에 해당한다. 연구지역을 구성하는 지질은 선캄브리아의 화강암질 변성암류와 시대미상의 변성퇴적암류와 페름기의 퇴적암류로 구성된다. 변성암인 화강편마암과 편상화강암은 화강암류에서 변성된 암석들로서 서로 단층으로 접하고 있으나 선후관계는 불명하다. 연구지역 외곽 북서측에는 월현리층으로 불리는 선캄브리아 시대의 변성 퇴적암류와 페름기로 추정되는 무량리층의 퇴적암류가 분포한다. 연구지역 운곡리의 하천은 선캄브리아 시대의 변성암으로 이루어진 산계에서 발원하여 서남측으로 흘러가며, 구릉성 지형으로 인해 제4기의 충적층 발달이 현저하다(Fig. 1). 화강암과 유사한 화강편마암과 엽리구조가 발달하는 편상화강암으로 구성된 화강암질 변성암은 연구지역 충적층 퇴적물의 주요 공급원이다. 충적층 퇴적물을 구성하는 자갈은 원마도가 매우 낮은 상태로 산출되며, 주변 모암인 변성암과 이를 관입한 백악기의 흑운모 화강암으로 구성되며, 페름기의 무량리층으로 추정되는 세일도 발견된다. 연구지역 충적층 토양은 조립의 모래와 자갈이 섞여 있고 모암인 화강암질 조직이 입자에 남아있는 화강풍화토(Weathered granite soil)의 특성을 갖고 있어 토양 입자 내 간극이 잘 발달한 특성이 있다(Kim et al., 2013b; Choi et al., 2015).

3. 실험 방법

3.1 시료 채취

충적층 퇴적물의 특성을 조사하기 위하여 실시된 시

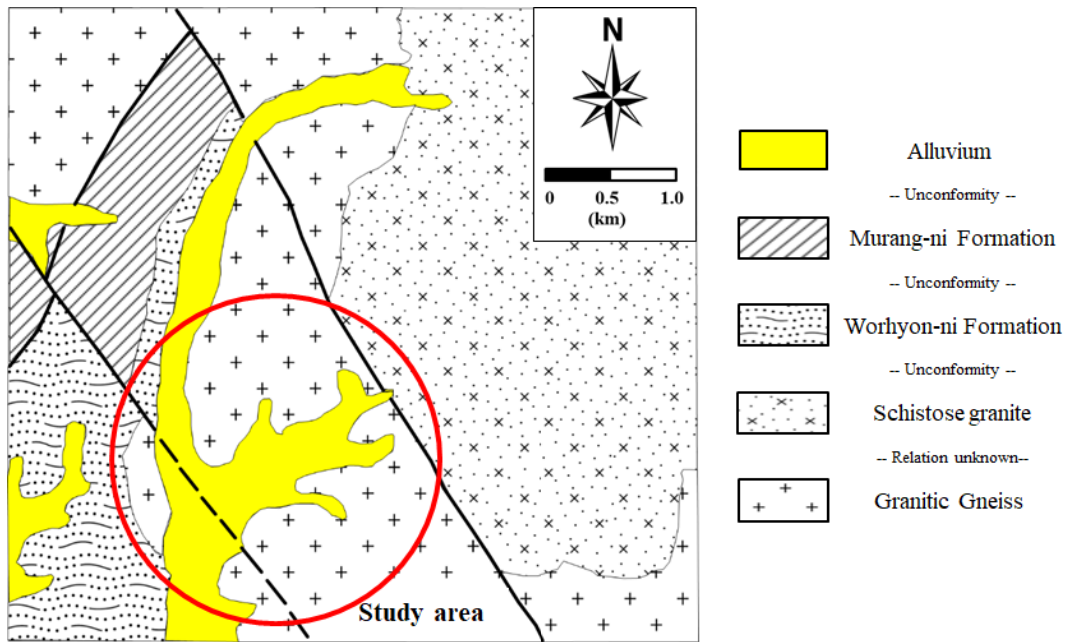


Fig. 1. Geological map of the study area (modified from Lee and Kim, 1963)

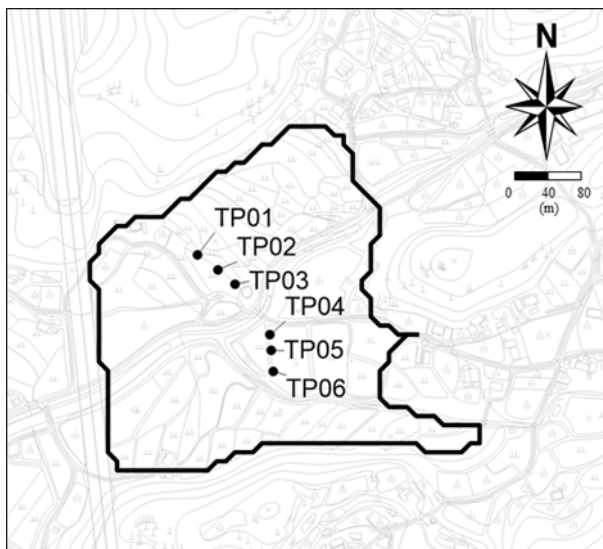


Fig. 2. Location of core sampling sites in the study area

추 시료의 채취는 주입정 설치 예정 위치를 중심으로 북측과 남측의 각각 3개 지점에서 수행되었다(Fig. 2). 시추 시료는 지표에서부터 심도 5m까지 각 1m 간격으로 6개 지점에서 총 30개의 시료를 채취하였다. 총적층 퇴적물 시료는 황동 재질의 채취용 관을 사용하여 오염을 방지하여 채취하였다. 분석용 시료는 대표성을 높이기 위하여 채취된 시료에서 4분법을 적용하여 하나의 복합시료로 만들었다.

3.2 광물 및 화학조성 분석

총적층 퇴적물의 주요 구성 광물과 그 구성 비율을 파악하기 위해 현미경 관찰과 XRD 분석을 수행하였다. XRD 분석용 시료는 채취된 퇴적물을 50°C에서 건조한 후 10 μm 이하 입도로 분쇄하여 제작하였고, 분석은 기초과학연구원(Korea Basic Science Institute, KBSI)에서 Rigaku사 Dmax 2400의 다목적 X-선 회절분석기를 이용하여 실시하였다. 채취된 총적층 퇴적물과 주변 암석의 화학분석은 캐나다의 Activation Laboratories에서 유도결합플라즈마 방출 및 질량분광분석으로 실시하였다.

3.3 토양 조직 분석

인공함양 실시과정에서 클로킹 평가를 위한 기초자료를 확보하기 위해 인공함양 지역의 토양 조직과 광물 특성을 분석하였다. 총 8개 지점에서 불교란 토양 코어 시료(undisturbed soil core sample)로 채취된 분석용 토양 시료를 100°C에서 2일 동안 건조시킨 후 실내에서 2일 동안 자연 건조시켰다. 토양의 조직 관찰을 위해서 불교란 토양에 대한 편광 및 전자 현미경 관찰을 수행하였다. 이를 위해 건조된 불교란 토양 시료를 진공 용기에서 액상의 epoxy를 주입하여 교결된 시료에 대하여 16개의 연마박편을 제작하였다(Fig. 3). 불교란 토양 시

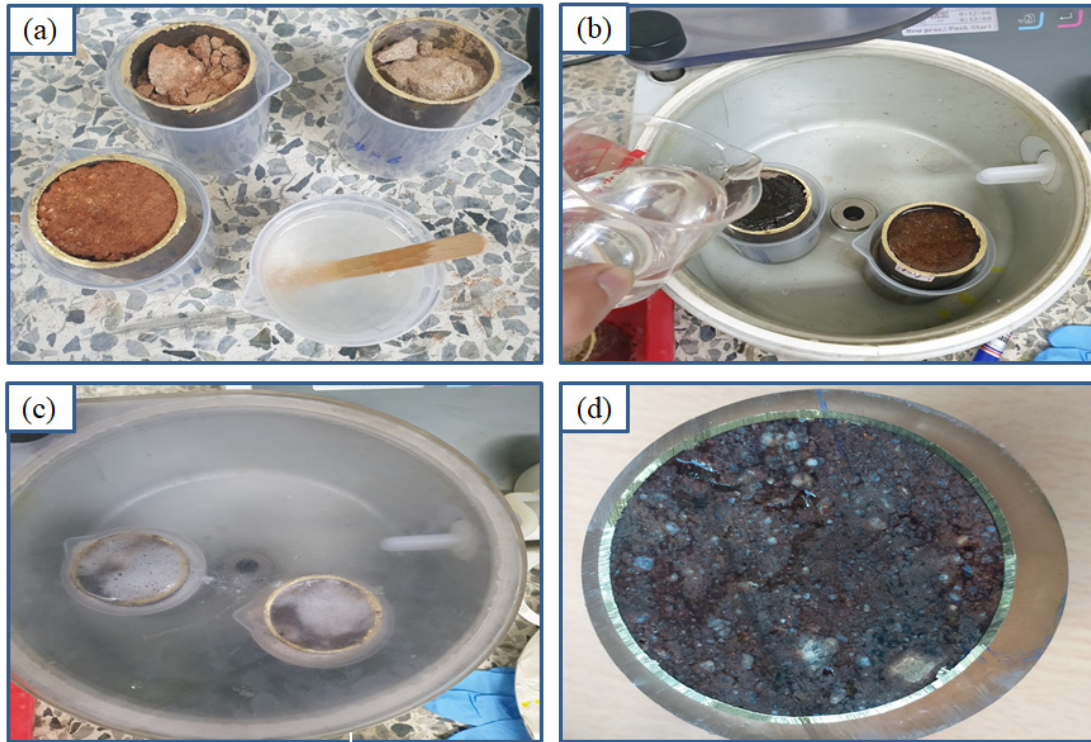


Fig. 3. Core molding process from undisturbed soil sample: (a) Preparing epoxy and undisturbed core soil sample (b) Filling epoxy inside the soil sample (c) Pumping to remove air inside the soil sample (d) Cutting solidified soil sample

료에서 제작된 연마박편에 대하여 편광현미경 관찰과 전자현미분석을 수행하였다. 토양 시료의 조직과 광물 관찰은 편광현미경의 최저 배율인 40배와 중간 배율인 100배에서 개방니콜과 직교니콜에서 각각 수행되었다. 전자현미분석은 기초과학지원연구원에서 FE-SEM(field emission scanning electron microscope, Hitachi S-4800)을 이용하여 수행하였다. FE-SEM에는 EDS(energy dispersive X-ray spectroscopy)와 BSE(backscatter electron image)의 detector (X-max 50mm², Oxford)가 장착되어 있다. 분석 조건은 가속전압은 15kV, 빔 출력은 10nA, 빔사이즈는 5~200nm이다. 광물의 화학조성 분석은 제작된 연마박편 표면을 탄소 코팅한 후 EDS로 수행되었다.

4. 결과 및 고찰

4.1 총적층 퇴적물의 광물 구성 특성

퇴적물의 주요 구성 광물과 그 구성 비율을 파악하기 위해 XRD 분석을 수행하였다. 채취된 퇴적물과 주변 암석 시료의 주요 구성 광물은 석영(quartz), 정장석(K-feldspar), 사장석(plagioclase), 흑운모(biotite), 일라이트(illite)이며 기타의 광물로 철산화물(Fe-oxide), 각섬석(amphibole),

녹니석(chlorite) 등이 일부의 시료에서 산출된다. 퇴적물과 주변 암석의 주요 구성광물인 석영(quartz), 정장석(K-feldspar), 사장석(plagioclase)의 상대적 구성 비율을 Q-A-P 삼각도에 표시하면 Fig. 4와 같다. 삼각도에서 퇴적물의 주요 공급원인 주변 모암에서 퇴적물로 가면서

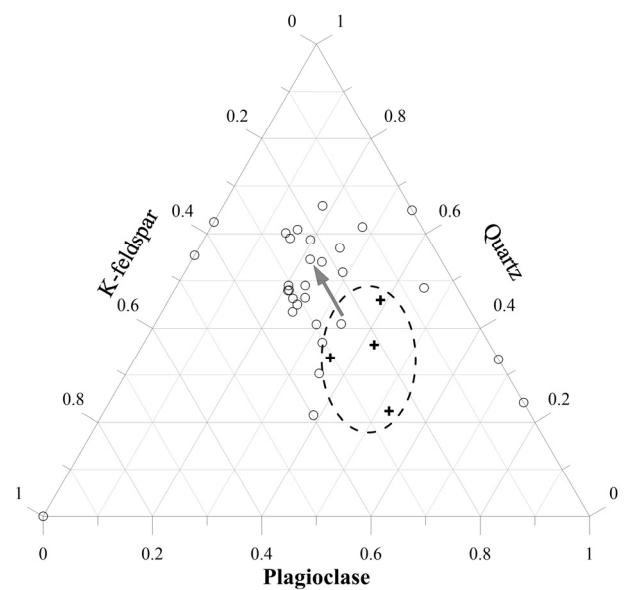


Fig. 4. Q-A-P triangular diagram showing mineral composition of soil and rock (○: soil, +: rock)

석영과 정장석 함량은 증가하고, 사장석 함량은 감소하는 변화 경향을 보인다. 이러한 변화 경향은 사장석의 풍화 저항도가 석영과 정장석에 비해 낮음에 기인한다.

층적층 퇴적물에 대한 현미경 관찰을 통해 구성 입자와 광물의 산출상태를 파악하고자 하였다. 현미경 관찰은 주입정 설치가 예상되는 지점에서 가장 가까운 양쪽 지점에 위치하는 3번과 4번 시추공 지점 시료를 대상으로 수행하였다. 주요 층적층 퇴적물의 주요 구성 입자는 주변 암석에서 기원한 쇄설성 광물 입자들이다. 쇄설성 광물 입자는 석영, 정장석 및 변질 사장석으로 구성되며, 입자 사이에는 세립의 흑운모와 일라이트가 풍화물로 침착되어 산출된다. 쇄설성 입자 사이의 공극에는 카오린라이트(kaolinite)와 Fe-산화물이 산출된다. 쇄설성 입자 사이에 세립의 흑운모와 일라이트 풍화물이 다량으로 침착된 경우에는 퇴적물의 색이 담회색을 그리고 풍화물이 소량으로 침착된 경우에는 담회색을 띤다.

4.2 층적층 퇴적물의 화학조성 특성

퇴적물과 주변 암석의 화학분석 결과는 Fig. 5와 같다. 주원소 함량 특성에서 SiO₂는 46.97~80.57wt.%로서 가장 높은 함량을 보이고, Al₂O₃는 18.24~10.14wt.%, K₂O는 1.87~6.83wt.%, Na₂O함량은 0.13~4.52wt.% 범위를 보인다. Fe₂O₃는 0.89~13.83wt.%의 비교적 넓은 함량 범위를 보인다. 퇴적물 토양의 SiO₂와 Al₂O₃ 함량은 부의 상관관계를 보이며 주변 모암에 대해 상대적으로 높은 SiO₂ 함량과 낮은 Al₂O₃ 함량 특성을 보인다(Fig. 5-a). 이러한 특성은 모암의 주요 구성 광물인 흑운모와 사장석의 풍화작용에 기인한다. 반면에 주변 모암보다 낮은 SiO₂ 함량과 높은 Al₂O₃ 함량 특성을 보이는 토양은 높은 흑운모 함량에 기인한다. 퇴적물 토양의 SiO₂와 CaO+Na₂O 함량, 그리고 SiO₂와 K₂O 함량은 특정한 상관관계를 보이지 않으며 퇴적물 토양의 CaO+Na₂O 함량

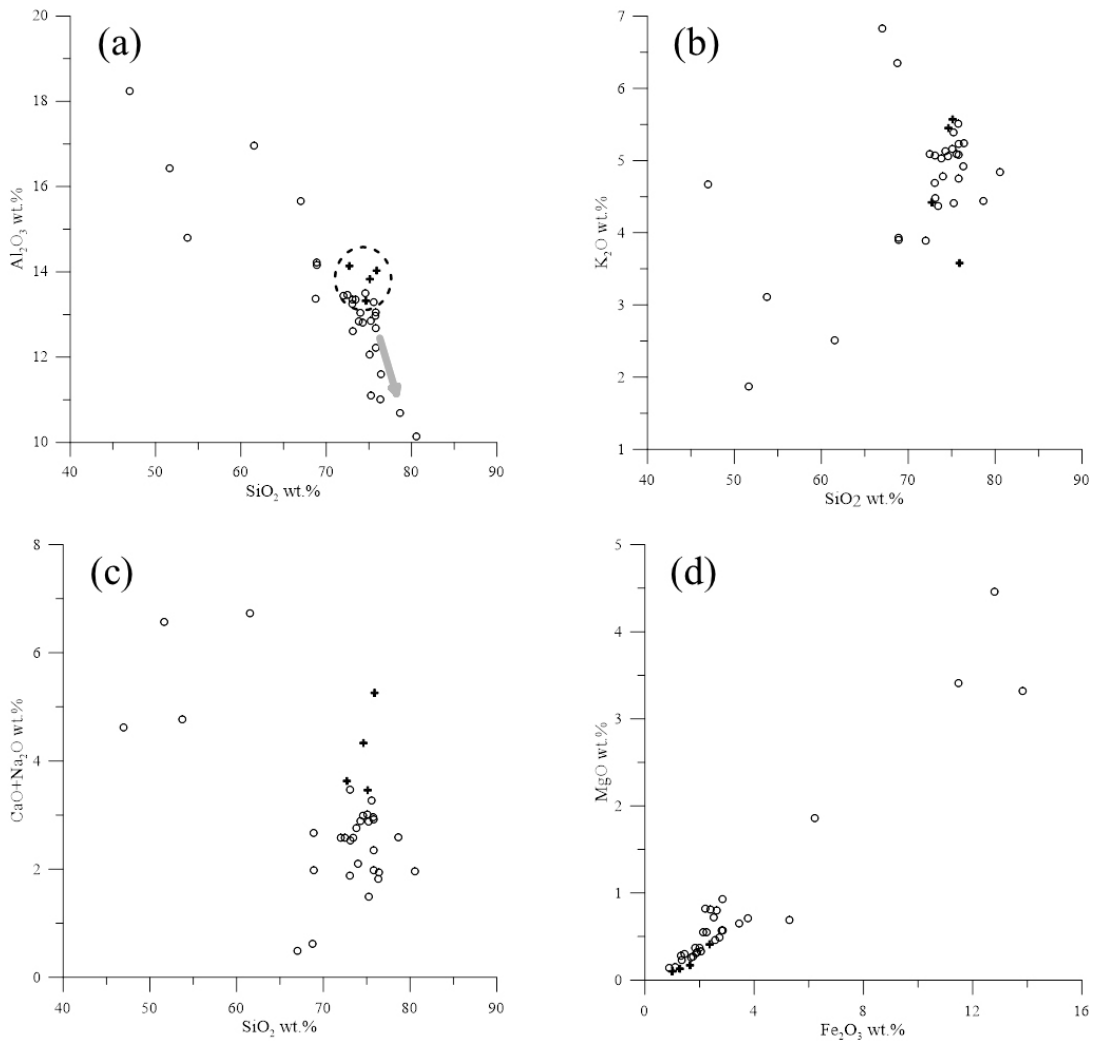


Fig. 5. Variation diagram showing the correlation between each chemical component in soil and rock. See Fig. 4 for symbols

은 주변 모암에 비해 낮은 특성을 보이는데 이러한 특성은 사장석의 풍화특성에 기인한다(Fig. 5-b, c). 퇴적물 토양의 K_2O 함량이 $CaO+Na_2O$ 함량 특성에서와는 달리 주변 모암과 유사한 범위를 갖는데 이러한 특성은 사장석에 비해 정장석의 상대적으로 느린 풍화 속도성에 기인한다. 퇴적물 내 전체 철 함량은 $FeO + Fe_2O_3$ 함량으로 표기되어야 하지만 대기 중 산소로 인해 광물 산화가 용이하여 FeO 함량보다는 Fe_2O_3 함량이 높은 특징이 있다(Ryu et al., 2015). 따라서 본 연구에서는 전체 철 함량($FeO + Fe_2O_3$)을 편의상 Fe_2O_3 로 표시한다. 퇴적물 토양 내 Fe-함량은 퇴적물 토양의 Fe_2O_3 와 MgO 함량은 정의 상관관계를 보이며 주변 모암에 대해 상대적으로 높은 Fe_2O_3 와 MgO 함량 특성을 보인다(Fig. 5-d). 이러한 특성은 모암의 주요 구성 광물 중 Fe_2O_3 와 MgO 를 주성분 원소로 포함하는 흑운모의 풍화작용에 기인한다.

4.3 총적층 퇴적물의 조직 특성

총적층 퇴적물의 광물 조성 및 산출상태를 보다 정량적으로 추적하기 위해 불교란 퇴적물 코어 시료로부터 제작된 연마 박편에 대한 편광 및 전자 현미경 연구를

수행하였다. 전자현미분석은 편광현미경의 개방니콜에서 관찰된 광물조성과 조직에 대하여 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 BSE(후방산란전자영상)에 의한 광물 구성과 조직을 관찰하고, SEM-EDS spectrum에 의한 광물 감정과 화학조성 연구를 수행하였다. 퇴적물의 조직 관찰에서 공극은 편광현미경의 개방니콜에서는 무색 혹은 백색으로 그리고 BSE에서는 흑색으로 관찰된다(Fig. 6). 퇴적물을 구성하는 쇄설성 광물 입자는 주로 석영, 정장석, 사장석으로 구성되며, 소량의 흑운모와 각섬석이 관찰된다. 일반적으로 정장석은 풍화 변질적인 반면 사장석은 심하게 풍화 변질 되었으며, 흑운모는 벽개 방향을 따라 열린 갈색 혹은 노란색의 일라이트로 변질되거나 미세 균열대를 따라 철산화물로 변질되었다. 이들 쇄설성 입자 사이는 원형 혹은 불규칙한 모양의 공극으로 관찰되며, 쇄설성 입자와 공극의 사이에는 풍화 변질물인 흑색의 일라이트와 풍화 생성물인 갈색의 카오린나이트가 기질 물질로 채우고 있다(Fig. 6-a). 또한 석영과 정장석으로 구성된 쇄설성 광물 입자 사이에는 풍화 변질물인 갈색의 일라이트와 풍화 생성물인 철산화물이 기질 물질로 채우고 있다. 풍화물이 채워지지 않은 부분은 공극으로 관찰되는데, 공극 내부에는 황갈색(yellowish brown)의 일라이트가 관찰된다(Fig. 6-b).

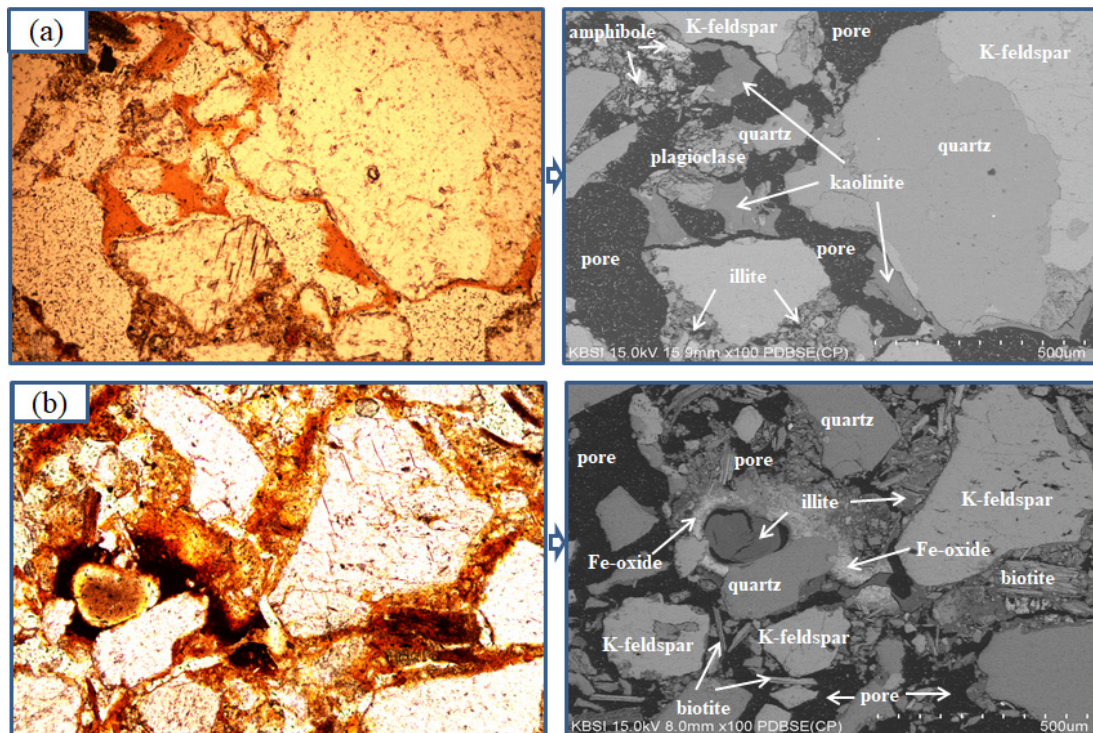


Fig. 6. Microphotograph of polarizing microscope and BEI of electron microscope showing the mineralogy and texture of soil sample. (a) The secondary mineral of illite and kaolinite filled pore space (b) The secondary mineral of illite and Fe-oxide filled pore space

EDS spectrum 분석 결과 충전층 퇴적물을 구성하는 주요 쇄설성 광물은 석영, 정장석, 사장석이며, 이들 입자의 연변과 공극을 채우는 광물은 주로 흑운모와 점토 광물이며 소량의 Fe-산화광물이 관찰된다. 흑운모와 점토광물은 K, Fe, Mg의 상대적 함량과 Al/Si 비에 따라 흑운모, 일라이트, 카오린나이트로 구분된다(Fig. 7). 흑운모와 일라이트의 EDX spectrum은 서로 유사한 패턴을 보이지만 Fe, K, Mg 원소 함량의 차이가 있다. 흑운모는 일라이트에 비해 상대적으로 비록 높은 Fe, K, Mg 함량을 갖는다(Fig. 7-a). 일라이트는 카오린나이트에 비해 높은 Fe, K, Mg 함량을 갖는데(Fig. 7-b), 특히 카오린나이트는 Al peak가 Si peak 보다 더 높은 특성을 갖는다(Fig. 7-c). 불투명 광물로 관찰되는 Fe-산화물은 EDS spectrum 분석 결과 Mn을 포함하고 카오린나이트와 함께 산출됨을 보여준다(Fig. 7-d). Fe-산화물은 기존의 적철석과 자철석과는 다른 Fe-O 비를 보이고 있어 침철석(geothite)로 추정되며, Ti peak가 관찰되는 것으로 보아 흑운모의 변질에서 유래된 것으로 추정된다.

4.4 클로킹 평가

충전층 쇄설성 입자의 주요 구성 광물은 석영, 정장석, 사장석, 흑운모이며, 주요 2차 광물은 녹니석, 일라이트, 카오린나이트, Fe-산화광물이다. 이 중 일라이트와 카오린나이트가 가장 중요한 2차 광물로서 쇄설성 입자

경계와 공극을 채우는 기질 물질로 산출된다. 카오린나이트는 공극의 중심에서 등극계 2차적으로 성장하는 조직 특성을 보이는데 이는 그 기원이 외부에서 유입된 것이 아닌 쇄설성 광물의 풍화에 의한 내부 기원의 카오린나이트임을 시사한다. 화학적 클로킹에서는 하천수와 지하수 간의 반응에 따른 pH의 변화로 다양한 2차 광물이 생성되어 침전되며, 대표적인 2차 광물로는 Ca-탄산염 혹은 황산염 광물, 그리고 Fe-산화 혹은 수화 광물이다(Martin, 2013; Majkic-Dursun et al., 2015). 연구 지역의 충전층 토양의 공극에서는 주로 일라이트, 그리고 소량의 카오린나이트와 Fe-수화광물이 2차 충전물로 산출되지만 방해석이나 석고와 같은 Ca-탄산염 혹은 황산염 광물의 산출은 확인되지 않는다. 이는 인공함양 실증 실험 전인 연구지역 충전층에서는 지하수와 지표수 간의 반응에 의한 화학적 클로킹은 아직 발생하지 않은 것임을 시사한다. 향후 연구지역 인공함양 실험과 관련된 화학적 클로킹 발생에 대한 평가를 위해 대수층 내 공극에서 2차 광물의 생성과 침전 현황과 같은 충전층의 특성에 대한 지속적인 모니터링이 필요하다.

5. 요약 및 결론

이 연구는 인공함양 예정 지역에서 충전층 퇴적물 토양 특성을 파악하여 인공함양 이후 발생할 수 있는 화학적 클로킹 평가를 위한 기초자료를 제공하고자 수행되

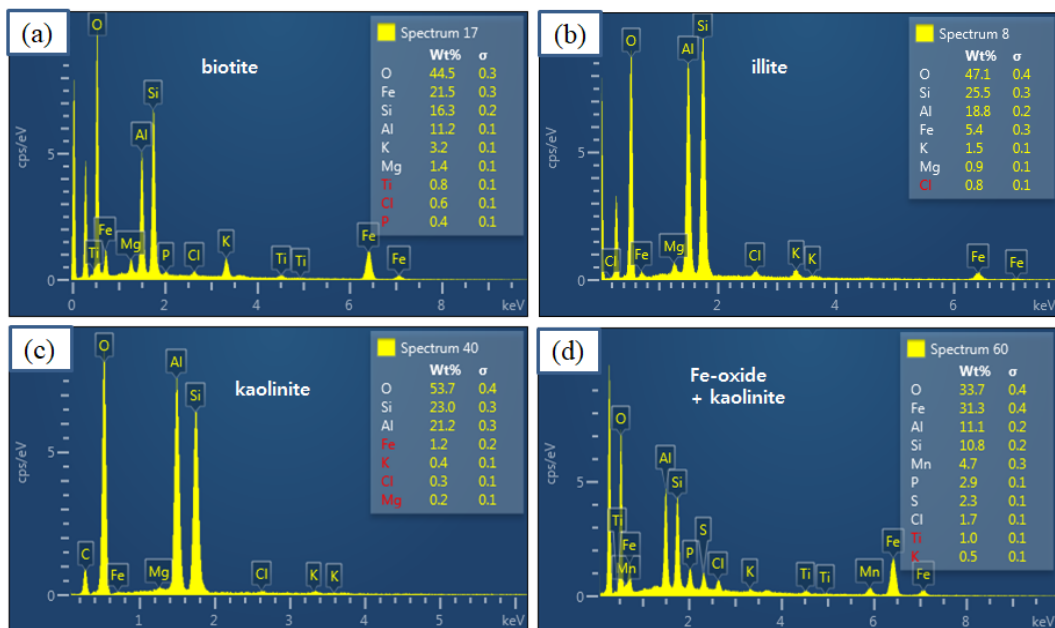


Fig. 7. The SEM-EDS spectrum showing the chemistry of biotite (a), illite (b), kaolinite (c), and mixture of Fe-oxide and kaolinite (d) occurred in pore space as secondary mineral

었다. 이를 위해 층적층 퇴적물 토양의 조직과 광물, 그리고 화학적 특성 연구를 진행하였고, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 층적층 토양의 쇄설성 광물 입자는 석영, 정장석 및 변질 사장석으로 구성되며, 입자 사이에는 세립의 흑운모와 일라이트가 풍화물로 침착되어 산출된다.
- (2) 층적층 토양의 화학적 특성에서 SiO₂는 46.97~80.57wt.%로서 가장 높은 함량을 보이고, Al₂O₃는 18.24~10.14wt.%, K₂O는 1.87~6.83wt.%, Na₂O는 0.13~4.52wt.% 범위를 보인다. Fe₂O₃는 0.89~13.83wt.%의 비교적 넓은 함량 범위를 보인다.
- (3) 층적층 토양의 조직에서 공극을 채우는 2차 광물은 주로 일라이트와 카오린나이트이며, 소량의 Fe-산화물이 산출되기도 한다.
- (4) 토양의 공극 충전물로서 Ca-탄산염 혹은 황산염 광물의 산출은 확인되지 않아 연구지역 층적층에서 지하수와 지표수 간의 반응에 의한 화학적 클로킹은 아직 발생하지 않은 것으로 판단된다.
- (5) 인공함양 실험과 관련된 클로킹 평가를 위해 공극 내 2차 광물의 생성과 침전 현황에 대한 지속적인 모니터링이 필요하다.

감사의 글

이 연구는 2023년도 대전대학교 학술연구비의 지원을 받았다.

참고문헌 (References)

1. Choo, C.O., Hamm, S.Y., Lee, J.H., Lee, C.M., Choo, Y.W., Han, S.J., Kim, M.J., and Cho, H.N. (2012), "Characterization and Formation Mechanisms of Clogging Materials in Groundwater Wells, Mt. Geumjeong Area, Busan, Korea", *The Journal of Engineering Geology*, Vol.22, pp.67-81. (in Korean with English abstract)
2. Choi, G.M., Yune, C.Y., and Ma, S.J. (2015), "A Physical Model Test on the Behavior of Shield-tunnel Lining According to Drainage Conditions in Weathered Granite Soil", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.31, pp.71-82. (in Korean with English abstract)
3. Hwang, C.I., Choi, M.R., Han, I.Y., Hong J.W., and Kim, G.B. (2021), "Analysis on the Physical-chemical Clogging Possibility in the Groundwater Artificial Recharge Area", *Journal of the Geological Society of Korea*, Vol.57, pp.841-853. (in Korean with English abstract)
4. Kim, G.B., Kim, B.W., and Kim, S.Y. (2010), "Improvement of

- Well Efficiency through Well Development in a Pumping Well", *Journal of Soil and Groundwater Environment*, Vol.15, pp.39-49. (in Korean with English abstract)
5. Kim, B.W., Kim, G.B., and Kim, G.Y. (2012), "Change of Hydraulic Characteristics due to Well Drilling and Well Development in an Unconsolidated Aquifer", *The Journal of Engineering Geology*, Vol.22, pp.27-37. (in Korean with English abstract)
6. Kim, G.B., Shin, S.H., Kim, B.W., and Park, J.H. (2013a), "Geochemical Characteristics of Groundwater during the Constant and Step-drawdown Pumping Tests at the River Bank Filtration Site", *Journal of the Korean GEO-environmental Society*, Vol.14, pp.11-21. (in Korean with English abstract)
7. Kim, J.H., Jeong, S.S., and Bae, D.H. (2013b), "Predicting Rainfall Infiltration-Groundwater Flow Based on GIS for a Landslide Analysis", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.29, pp.75-89. (in Korean with English abstract)
8. Kim, G.B., Lee, C.H., and Oh, D.H. (2017), "Cause of Groundwater Yield Reduction in a Collector Well Considering Sediment's Composition and Hydrogeochemical Characteristics", *The Journal of Engineering Geology*, Vol.27, pp.439-449. (in Korean with English abstract)
9. Kim, G.B., Hwang, C.I., and Choi, M.R. (2021), "Assessment of the Need and Potential for Groundwater Artificial Recharge based on the Water Supply, Water Demand, and Aquifer Properties in a Water Shortage Region of South Korea", *Environmental Earth Sciences*, Vol.80, <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09445-5>.
10. Maliva, R.G. (2020), Clogging. In: Anthropogenic Aquifer Recharge. Springer Hydrogeology, Springer, Cham, https://doi.org/10.1007/978-3-030-11084-0_11.
11. Lee, C.H. and Kim, S.S. (1963), Explanatory Text of the Geological Map of Hong Song Sheet (1:50,000). *Geological survey of Korea*, Korea, 33p.
12. Majkic-Dursun, B., Petkovic, A., and Dimkic, M. (2015), "The Effect of Iron Oxidation in the Groundwater of the Alluvial Aquifer of the VelikaMorava River, Serbia, on the Clogging of Water Supply Wells", *Journal of the Serbian Chemical Society*, Vol.80, pp.947-957.
13. Martin, R. (2013), "Clogging Issues Associated with Managed Aquifer Recharge Methods", *IAH Commission on Managing Aquifer Recharge*, Australia, 213p.
14. Pyne, R.D.G. (2005), Aquifer Storage and Recovery: A Guide to Groundwater Recharge through Wells, ASR Press, Florida, USA.
15. Rinck-Pfeiffer, S., Ragusa, S., Sztajnbock, P., and Vandeveld, T. (2000), "Interrelationships between Biological, Chemical, and Physical Processes as an Analog to Clogging in Aquifer Storage and Recovery (ASR) Wells", *Water Research*, Vol.34, pp.2110-2118.
16. Ryu, B.H., Baek, Y., Kim, Y.S., and Chang, I. (2015), "Basic Study for a Korean Lunar Simulant (KLS-1) Development", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.31, pp.53-63. (in Korean with English abstract)
17. Zhang, H., Xu, Y., and Kanyerere, T. (2020), "A Review of The Managed Aquifer Recharge: Historical Development, Current Situation and Perspectives", *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, pp.118-119, <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102887>.

Received : January 11th, 2024

Revised : February 2nd, 2024

Accepted : February 4th, 2024