

탄소중립 달성을 위한 지하수토양분야 혁신기술 및 선도연구 소개

최종복¹ · 손영규¹ · 한영수² · 권만재³ · 이승학⁴ · 백기태⁵ · 홍용석^{6*}

¹금오공과대학교 환경공학과

²충남대학교 환경공학과

³고려대학교 지구환경과학과

⁴한국과학기술연구원 물자원순환연구단

⁵전북대학교 토목환경자원에너지공학부

⁶고려대학교 환경시스템공학과

Achieving Carbon Neutrality: Technology Innovations and Research Needs in the Division of Groundwater and Soil

Jongbok Choi¹ · Younggyu Son¹ · Young-Soo Han² · Man Jae Kwon³ · Seunghak Lee⁴
Kitae Baek⁵ · Yongseok Hong^{6*}

¹Department of Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi 39177, Korea

²Department of Environmental Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

³Department of Earth and Environmental Sciences, Korea University, Seoul 02841, Korea

⁴Water Cycle Research Center, Korea Institute of Science and Technology (KIST), Seoul 02792, Korea

⁵School of Civil, Environmental, Resources and Energy Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

⁶Department of Environmental Systems Engineering, Korea University Sejong Campus, Sejong 30019, Korea

ABSTRACT

산업혁명 이후 화석연료의 광범위한 사용, 삼림 벌채, 토지사용의 변화 등과 같은 인위적 활동은 대기 중 온실가스(GHGs, greenhouse gases) 농도를 지속적으로 증가시켜 지구의 기후위기를 유발하였다. 우리나라의 경우 최근 30년 사이 평균 온도가 1.4°C 상승하였으며, 국제사회의 일원으로 책임을 다하기 위해 2016년 11월 3일 파리협정을 비준하였다. 이에 파리협정의 목표인 산업화 이전 대비 지구 평균온도 상승을 2°C 아래, 가능한 1.5°C 아래로 억제하기 위해 2050년까지 CO₂ 순 배출량을 0으로 만들어야 하며, 이를 위해 다양한 정책 마련과 함께 경제 및 사회 전반에 걸쳐 많은 노력이 경주되고 있는 실정이다. 탄소중립을 달성하기 위해서는 첫 번째로 GHGs 배출을 줄이고, 두 번째로 대기에서 CO₂ 포집을 촉진하기 위해 현재 가동되는 다양한 산업분야의 생산 시스템을 개혁하는 것이 가장 중요한 과제로 고려되고 있다. 그동안 지하수토양 관련 연구분야에서는 지속가능성(sustainability), 복원성(resilience), 녹색성장(green growth) 등과 같은 사회적 요구에 부응하여, 녹색정화(green remediation), 자연 저감(natural attenuation), 탄소포집저장(carbon capture and sequestration), 지열발전 등의 기술이 초기단계로 개발이 되고 연구가 되어 왔다. 이러한 기존 연구들은 탄소중립2050의 달성을 위해 고도화되어야 하며, 추가적으로 자연 및 인위기원 탄소배출 연구, 토양의 역할을 고려한 저탄소 토지이용 기술, 광물탄산화 등의 연구 및 기술개발이 필요하다고 판단된다. 본 논문에서는 탄소중립2050의 간단한 내용과 함께, 이를 달성하기 위한 지하수토양 분야의 혁신기술 및 선도연구를 소개하였다.

Key words : 탄소중립2050, 녹색정화, 탄소포집저장, 광물탄산화, 지열발전

주저자: 최종복, 금오공과대학교 환경공학과, 박사후연구원

공저자: 손영규, 금오공과대학교 환경공학과, 교수; 한영수, 충남대학교 환경공학과, 교수; 권만재, 고려대학교 지구환경과학과, 교수;

이승학, 한국과학기술연구원 물자원순환연구단, 책임연구원; 백기태, 전북대학교 토목환경자원에너지공학부, 교수

*교신저자: 홍용석, 고려대학교 환경시스템공학과, 교수

Email : yongseokhong@korea.ac.kr

Received : 2022. 11. 17 Reviewed : 2022. 12. 13

Accepted : 2022. 12. 29 Discussion until : 2023. 02. 30

1. 서 론

화석연료의 연소를 통한 CO₂의 과다 배출, 열대우림의 파괴, 온실효과로 인한 기후의 변화, 그리고 이로 인한 자연재난 강도 및 빈도의 증가는 전 지구적으로 기후위기가 도래하였음을 시간이 지날수록 명확하게 이야기 해주고 있다(Ripple et al., 2021). 이러한 기후위기에 대응하고자 선진국과 개도국이 모두 참여하는 ‘파리협정’을 195여 개국이 채택을 하고, 산업화 이전 대비 지구 평균온도의 상승을 2°C보다 아래로 유지하고 더 나아가 1.5°C로 억제하는 것을 목표로 하여 관련 나라들은 탄소중립을 위한 다양한 방안들을 고안하고 실천하고 있다. 우리나라도 국제사회의 노력에 동참하고 건강하고 넉넉한 미래를 만들어가기 위해 2020년 10월 28일 ‘2050 탄소중립 선언’ 및 12월 10일 ‘2050 탄소중립 비전’을 선포하였으며, ‘깨끗하게 생산된 전기수소의 활용확대’, ‘에너지 효율의 혁신적인 향상’, ‘탄소 제거 등 미래기술의 상용화’, ‘순환경제 확대’로 산업의 지속가능성 제고, ‘탄소 흡수 수단 강화’를 그 기본방향으로 설정하였다. 이러한 탄소중립 비전에서 제시하는 다양한 방향에 근거하여, 본 논문에서는 먼저 온실가스 배출에 대한 이해를 돕고자 관련 내용을 정리하였으며, 탄소포집 기술을 제시하고, 지하수 토양 복원 분야에서 기여할 수 있는 탄소중립 관련 내용을 기술하며, 마지막으로 지열발전과 관련된 내용을 제시하였다.

2. 자연 및 인위기원 온실가스의 이해

자연기원 탄소 배출에 해당하는 탄소화합물 종류는 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 일산화탄소(CO), 황화카르보닐(COS) 등이 있으며 이러한 온실가스 중 CO₂가 지구온난화에 가장 큰 비중을 차지하는데 이는 CH₄과 N₂O의 경우 지구온난화 잠재력이 CO₂에 비해 높지만 농도가 낮고 체류시간이 CO₂에 비해 짧기 때문이다. 수증기를 제외한 지구 온난화를 유발시키는 대표적인 자연기원 온실가스 종류, 농도 및 상대적 지구온난화 잠재력은 Table 1과 같다.

자연적인 탄소 순환은 지구 내에서 엄청난 양의 CO₂를

이동시킬 수 있다. 바다와 숲과 같은 지구의 일부는 CO₂를 흡수하여 수백 또는 수천 년 동안 저장할 수 있는데 이를 자연 탄소 흡수원이라고 한다. 한편, 해저 화산과 열수 분출구와 같은 자연 CO₂ 공급원을 통해 탄소를 방출할 수 있는데 지구는 이러한 자연 순환을 통해 매년 약 1000억 톤의 CO₂를 흡수하고 배출한다(IPCC, 2007). 자연적으로 생성되는 모든 CO₂ 배출량의 42.84%가 해양-대기 교환에서 발생한다. 다른 중요한 자연 공급원으로는 식물 및 동물 호흡(28.56%)과 토양 호흡 및 분해(28.56%)가 있으며(Denman et al., 2007; US DOE., 2008), 화산폭발로 소량이 생성된다(0.03%)(U.S. Geological Survey, 2014; Gerlach, 2011)(Fig. 1).

CO₂ 자연기원 배출 중 가장 큰 공급원은 해양-대기 교환으로 자연기원 CO₂ 배출량의 42.84%를 차지하는데 용해된 CO₂가 바다 표면에서 대기 중으로 배출되는데 매년 약 3,300억 톤의 CO₂가 배출된다(Denman et al., 2007; US DOE., 2008). 여러 가지 물질이 확산 과정을 통해 바다와 대기 사이를 이동하는데 CO₂가 그중 하나며 CO₂는 양방향으로 이동하기 때문에 바다는 CO₂를 방출하기도 하고 흡수하기도 한다. 한편, 식물과 동물의 호흡의 경우 자연 배출량의 28.56%를 차지한다. CO₂는 식물과 동물이 필요한 에너지를 생산하기 위해 사용하는 화학 반응의 부산물로서 이 과정에서 매년 약 2,200억 톤의 CO₂

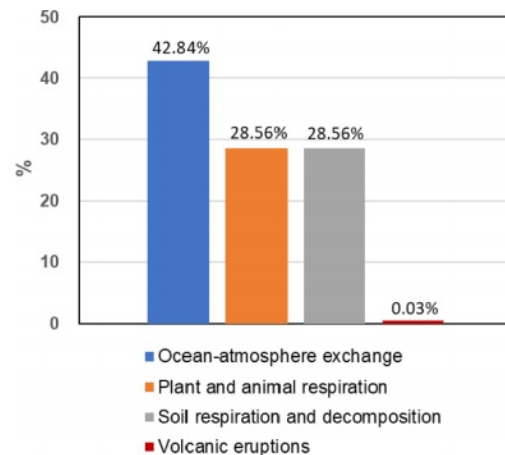


Fig. 1. The Earth's oceans, soil, plants, animals and volcanoes are all natural sources of carbon dioxide emissions (IPCC, 2007).

Table 1. Concentrations, atmospheric lifetime, and global warming potential of greenhouse gases (Univ of Michigan, 2021)

Compound	Pre-industrial concentration (ppmv)	Concentration in 2019 (ppmv)	Atmospheric lifetime (years)	100-year Global Warming Potential (GWP)
Carbon dioxide (CO ₂)	280	411	5-1000	1
Methane (CH ₄)	0.715	1.877	12	28
Nitrous oxide (N ₂ O)	0.27	0.332	121	265

가 배출된다(Denman et al., 2007; US DOE., 2008). 식물과 동물은 호흡을 사용하여 에너지를 생산하며, 이는 운동 및 성장과 같은 기본 활동에 연료를 공급하는 데 사용된다. 이 과정은 산소를 사용하여 당, 단백질 및 지방과 같은 영양소를 분해하면서 유기체가 사용할 수 있는 에너지를 방출하지만 부산물로 물과 CO_2 를 생성하기도 한다. CO_2 의 또 다른 중요한 천연 공급원은 토양 호흡과 분해로, 이는 식물과 동물의 호흡과 유사한 비율을 차지한다. 지구의 토양에 사는 많은 유기체는 호흡을 사용하여 에너지를 생성하며 그중에는 죽은 유기물을 분해하는 분해자(decomposer)가 있다. 이 두 공정 모두 부산물로 CO_2 를 방출하며 이러한 토양 유기체는 매년 약 2,200억 톤의 CO_2 를 배출한다(Denman et al., 2007; US DOE., 2008). 지중환경에서 일어나는 모든 호흡은 토양 호흡으로 간주되는데 식물 뿌리, 박테리아, 균류 및 토양 동물은 유기물(죽은 나무, 잎, 동물 등)을 분해와 호흡을 통해 생존에 필요한 에너지를 만들면서 CO_2 를 생성한다.

그밖에 소량의 CO_2 를 발생시키는 자연현상으로 자연 배

출량의 약 0.03%를 차지하는 화산 폭발을 예로 들 수 있다. 화산 폭발은 지표 아래 깊은 곳에서 마그마, 화산재, 먼지 및 가스를 방출하는데 가장 흔한 화산 가스는 수증기, CO_2 및 이산화황인데 화산 활동으로 인해 마그마가 지구의 맨틀과 지각을 통과하면서 이러한 가스를 흡수하게 되며 폭발하는 동안 가스는 대기 중으로 방출된다. 매년 화산 폭발을 통해 약 1억 5천만 톤에서 2억 6천만 톤의 CO_2 가 배출된다(U.S. Geological Survey, 2014; Gerlach, 2011). 기타 자연기원의 비화산성 CO_2 배출이 있을 수 있는데, 탄산염이 풍부한 지하수 또는 단층을 따라 CO_2 탈기 및 심부기원의 CO_2 가 토양과 대기중으로 배출될 수 있다(Burnside et al., 2013; Ham et al., 2017). 예로써, Burnside et al.(2013)이 조사한 연구지역의 경우 대수층을 통한 확산 누출보다 단층 등을 따라 더 많은 CO_2 가 방출되는 것으로 알려져 있다. 국내의 경우도 많은 탄산수가 존재하는데 이러한 탄산수 산출 지역으로부터 배출되는 자연기원의 CO_2 에 대한 관심이 필요하다.

이와 같은 전지구 규모에서 탄소의 배출과 순환은 인간

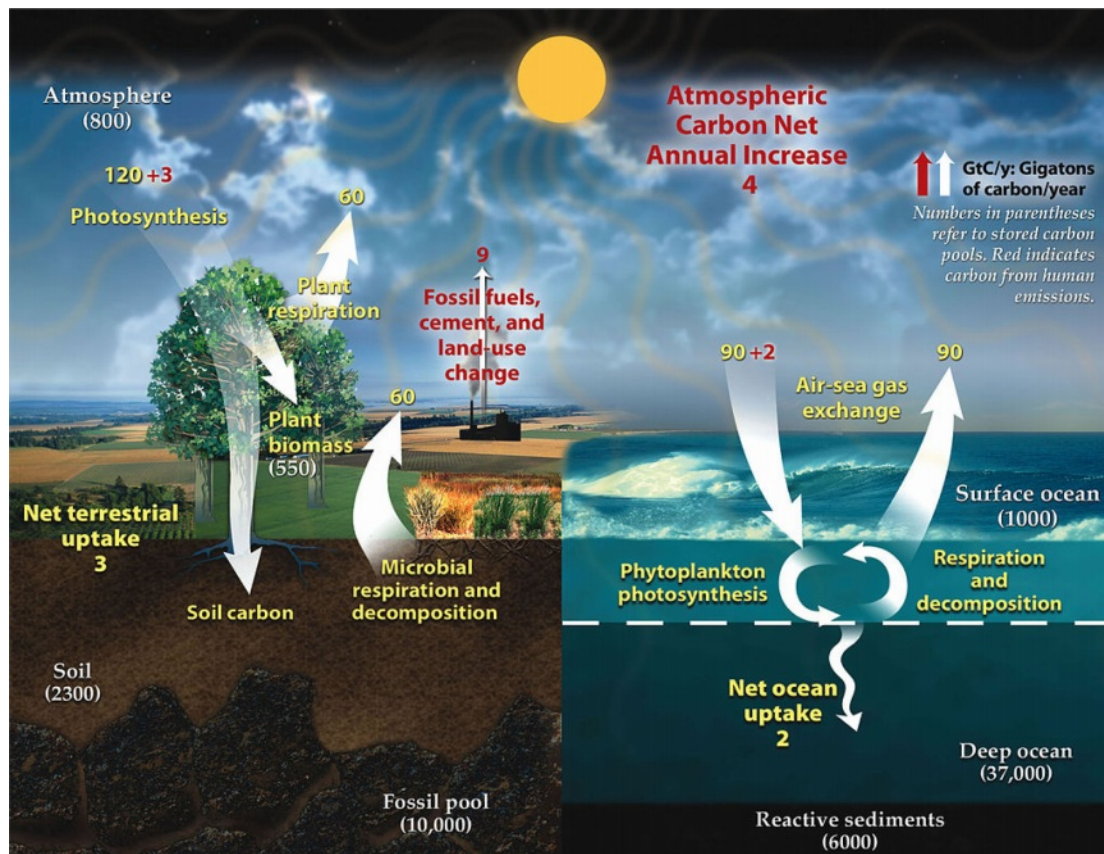


Fig. 2. Global carbon cycle in Gt(gigatons) per year (The carbon cycle, <https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle> [accessed 22.11.06]).

이 화석 연료의 연소를 통해 배출하는 탄소의 질량을 압도하고 있다. 그러나 불행하게도 인간 활동으로 인한 탄소 배출이 지구의 탄소 순환 균형을 무너뜨리고 있다. 예를 들어 Fig. 2를 보면, 지구가 가지고 있던 기존의 탄소 물질수지 균형에, 화석연료 소모로 인해 추가적인 CO₂ 배출이 일어날 때 발생할 수 있는 탄소 물질수지를 보여주고 있다. 화석연료 소모로 인해 약 9 GtC/y(gigatons of carbon per year)가 배출이 되고, 이중 약 3 GtC/y는 광합성에 의해 고정되며, 약 2 GtC/y는 해양에서 흡수하는 것으로 알려져 있다. 그리고 약 4 GtC/y가 대기 중에 잔류하며 온실효과를 유발하여 기후위기를 재촉하는 것으로 알려져 있다.

자연적인 탄소 순환의 경우 자체적으로 균형을 이룰 수 있지만 매우 오랜 시간에 걸쳐 균형을 이루게 된다. 자연기원의 CO₂는 인간이 화석연료를 태워 생산하는 CO₂의 10배에 달하는 양이다. 인류가 자연보다 10분의 1 정도의 CO₂만 배출한다면 왜 과학자들이 그토록 걱정하는가라는 의문을 가질 수 있지만 인위적으로 생성된 여분의 탄소 배출이 그동안 균형 잡힌 탄소 순환을 깨뜨리기 때문에 심각한 문제가 되고 있다. 즉, 인간은 자연적 탄소원에 더해 인위적으로 CO₂ 배출을 추가했지만 CO₂를 흡수하는 대부분의 자연 탄소 흡수원의 반응 속도를 높일 수는 없기 때문이다. 예를 들어 대기 중의 CO₂가 바다로 흡수되는 데 수세기가 걸리며, 자연적인 기작으로 바다로부터 과잉 탄소를 제거하고 평형으로 되돌리는데 10,000년 정도 더 필요하다(Moseman, 2022). 자연적인 탄소 흡수원이 CO₂를 흡수하는 이러한 느린 속도 때문에 지난 수세기 동안 인간이 배출한 CO₂의 대부분은 앞으로 몇 년 동안

대기 중에 남아 있을 것이다. 이는 인류가 당장 온실가스 배출을 중단하더라도 마찬가지이다. 따라서 인류에 의한 CO₂ 대기 축적 가속화를 이해하기 위해서는 자연기원의 CO₂ 배출과 흡수에 대해서도 심도 있는 이해가 필요하며 최대한 정확한 정량 평가를 통해 탄소 감축 목표를 세워야 할 것이다. 현재까지 알려진 자연적 인위적 배출원과 흡수원은(Table 2)와 같다.

인류 활동에 의한 CO₂ 대기 축적과 지구온난화 가속화 현상을 정확하게 파악하고 성공적인 탄소 감축 전략을 세우기 위해서는 자연기원의 CO₂ 배출과 흡수에 대한 이해가 필수적이다. 자연 배출원을 줄이거나 흡수원의 능력을 향상시키는 지구공학적인 접근법이 필요한 시점이 가까운 미래에 도래할 수도 있을 것이다. 이를 대비하기 위해서는 대륙별, 국가별, 지역별로 배출량을 가능한 한 정량적으로 평가해야 할 것이다. 아울러 자연기원별 배출 양상 및 변화는 예측이 쉽지 않기 때문에 자연기원별 누출 지점과 누출 형태, 농도, 빈도 등에 대해 체계적인 모니터링이 필요할 것으로 판단된다.

3. 지중 탄소 포집 기술 소개

인류는 매년 약 51 Gt의 온실가스를 대기 중으로 배출하고 있으며, 이렇게 추가적으로 배출된 CO₂를 적극적으로 제거하지 않으면 가까운 시일 내에 전 지구적으로 심각한 결과를 초래할 수 있다(Tutolo et al., 2021). 제철소, 발전소, 석유화학/시멘트/정유/반도체 업계 등 산업시설로부터 배출되는 인위적 기원의 CO₂ 저감 기술은 크게 세가지로 1) 포집된 CO₂를 지중환경에 주입하여 저감하

Table 2. Natural and artificial carbon sources and sinks (modified from Nielbock, M., 2018)

	Carbon sources	Carbon sinks
Natural	· Ocean-atmosphere exchange	· Oceans and lakes · Vegetation by photosynthesis · Precipitation · Soil peat formation
	· Plant and animal respiration	
	· Soil respiration and decomposition (Organic decay)	
	· Volcanoes	
	· Non-volcanic geogenic CO ₂	
	· Natural fires	
Artificial	· Fossil fuel production and combustion	· Reforestation · CO ₂ Utilization/Use methods · CO ₂ capture and storage (CCS) methods · Mineral carbonation methods
	· Deforestation by fire clearing	
	· Waste incineration	
	· Gas hydrates	
	· Waters (Groundwater)	
	· Livestock	
	· Rice farming	
	· Manure management	
	· Waste management	
	· Industrial manufacturing	

는 CO₂ 포집 및 저장기술(CO₂ capture and storage, CCS), 2) 산업부산물 또는 지중환경의 암석광물 등과 반응을 통해 저장하는 광물탄산화 기술(Mineral carbonation), 3)포집된 CO₂를 메탄올과 고분자 형태로 변화시켜 상업적으로 활용하는 기술(Utilization/Use) 등이 존재한다.

3.1. 탄소 포집 및 저장(CCS)

유엔 산하 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC)에서는 CCS를 ‘산업 및 에너지 관련 공급원으로부터 CO₂를 분리, 저장 위치로 운송, 대기로부터 장기간 격리하는 공정’으로 정의하고 있다. CCS 기술은 가장 적극적인 감축기술로써 인위적 지구 온난화를 1.5–2°C로 제한하는 파리협정의 목표를 달성하고 국가온실가스 감축목표를 달성하기 위한 주요전략으로 활용될 수 있다. 일례로 한국석유공사는 생산이 종료될 동해가스전을 저장전으로 활용하여 연간 40 만톤 규모의 CO₂를 주입하여 탄소를 저장하는 것을 목표로 하고 있다. 원유를 생산하는 국가에서는 CO₂를 주입하여 원유를 추출하는 증진석유회수를 통해 주입된 CO₂의 일부를 지하에 저장하는 경우도 있으며, 전 세계 대규모 CCS 프로젝트의 대부분은 증진석유회수(enhanced oil recovery) 방식으로 운영되고 있다. 2021년 기준 전세계 CCS 시설은 전체 135개소에 달하고 있다(Global CCS Institute, 2022).

국내 지하수토양분야에서는 탄소포집은 많이 연구되지는 않고 있으나, CO₂ 지중 저장을 위한 부지탐사기술과 저장된 CO₂ 누출감지 등에 대한 기술개발을 현재 진행하고 있다. 국내 CCS 저장소에 대한 분석결과, CO₂ 저장 유망 구조는 약 7.3 억톤 규모로 평가되고 있다(Kwon, 2021). 따라서 저장효율을 향상시킬 수 있는 지속적인 기술개발이 필요하다. 더불어 저장과정에서 지진이 발생할 수 있다는 우려를 불식시키기 위한 노력도 함께 병행될 필요가 있다. 특히 CO₂를 육상이나 해상의 심지층에 저장하는 분야가 국내에서 연구될 필요가 있다. 해외에서는 지하 지층 저장 중에서 염대수층에 CO₂를 저장하는 것은 가장 많이 활용되고 있으며, 대부분은 증진석유회수 공정과 연계하여 활용되고 있다(Aminu et al., 2017). 지중에 CO₂가 주입되면 광물표면에 흡착 되기도 하며, 탄산이 형성되어 pH가 낮아지고 광물의 용해를 촉진하게 된다. 이 과정에서 2차 광물의 침전이 일어나기도 하며, 공극의 변화가 발생하기도 한다(Akono et al., 2019). 이와 관련된 심도 있는 연구가 필요하다고 생각한다. 그리고 CO₂를 지중에 주입하게 되면 이는 초임계유체 형태가 되어 ‘층서학적 포획(Stratigraphic Trapping), 지층 내 공극 속에

고정되는 잔류 포획(Residual Trapping), 공극수 용해도에 따른 용해 포획(Solubility Trapping) 및 탄산염 광물 형성을 통한 광물 포획(Mineral Trapping)을 통해 저장될 수 있다”(Benson and Cole, 2008; Park, 2016). 그러나, 현재 진행 중인 대부분의 CCS 프로젝트는 CO₂를 퇴적 분지에 주입하고 CO₂가 지표로 이동하는 것을 방지하기 위한 층서학적 포획으로 불투과성 덮개암(Cap Rock)이 반드시 필요하다는 단점을 가지고 있다(Snæbjörnsdóttir et al., 2020). CCS 프로젝트가 가지고 있는 단점들을 극복하거나 CCS 프로젝트를 고도화하기 위한 기술개발이 필수적이다.

3.2. 광물탄산화

CO₂를 격리하기 위한 광물탄산화 기술은 지구 온난화를 줄일 수 있는 가능성을 가지고 있다. CO₂ 광물탄산화는 Ca, Mg를 포함하는 금속산화물 또는 광물과 CO₂ 기체의 탄산화 반응을 통해 열역학적으로 매우 안정한 탄산염을 형성하는 과정으로 막대한 양의 CO₂를 배출하는 국내 산업계에 충격을 완화할 수 있는 기술로 여겨지고 있다. 광물탄산화 기술은 크게 산업부산물 또는 지중환경의 암석광물을 활용하는 두가지로 구분할 수 있다(Fig. 3). 산업부산물을 이용하는 기술의 경우 중소규모의 CO₂를 저장하는데 적합하며 후자의 경우 대용량을 저장할 수 있으나 CCS와 연계된 반응으로 현장적합성을 고려해야한다.

산업부산물을 활용하는 CO₂ 광물탄산화 기술은 여전히 기초 연구 단계에 머무르고 있는데 주로 천연 규산염 광물을 이용한 연구개발을 위주로 진행하였으나, 최근 유럽, 일본을 중심으로 산업부산물(예: 폐콘크리트, 시멘트, 철강 슬래그, 폐석면)을 이용한 광물탄산화 기술 연구개발이 이루어지고 있다(Han et al., 2011). 최근 공업용 고형 폐기물인 부산석고를 활용한 광물탄산화 연구에 따르면 빠른 탄산화 속도와 높은 탄산화 반응성(95% 이상)으로 CO₂를 성공적으로 고정할 수 있는 가능성을 보여주었다(Wang et al., 2021). 국내의 경우 연간 1200만톤 이상의 CO₂를 고정화할 수 있는 산업부산물이 발생하고 있는데 이러한 산업부산물을 사용하는 광물탄산화 기술 전반에 대한 소개 및 연구개발 동향과 경제성 증대를 위한 추가 연구 개발 방향 및 전망은 이전 문헌에서 잘 정리되어 있다(Han et al., 2011; Park, 2016). 이들 문헌에 따르면 국내의 경우 CCS 이외의 탄소저감 대안기술로서의 필요성, 국내 산업 구조상 광물탄산화에 적합한 대량 산업부산물 발생 및 광물탄산화 소재의 활용(예, 건설소재, 화학제품, 시멘트 대체제)을 통한 환경 신산업 창출의 뚜렷

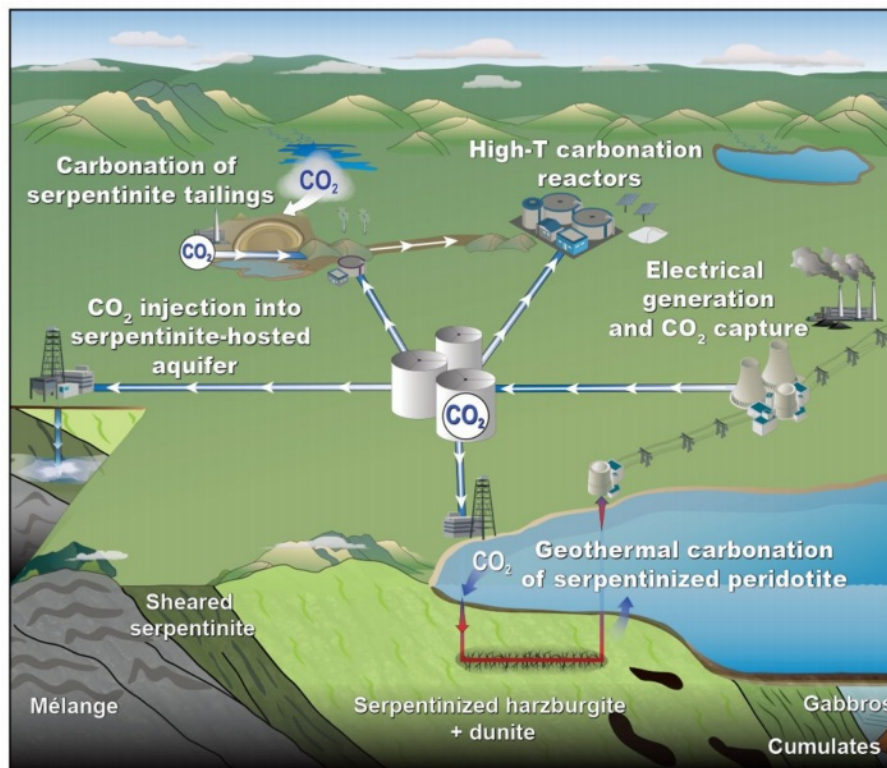


Fig. 3. Conceptual diagram of various types of mineral carbonation for CO₂ sequestration [From Power et al. (2013)]. Note that ultramafic wastes, mafic or ultramafic aquifer, and ultramafic rock may be replaceable with (considered as) serpentinite tailings, serpentinite-hosted aquifer, and serpentinized peridotite, respectively.

한 장점이 있어 기술 적용이 가능하다고 평가하였다. 그러나, CO₂ 광물탄산화 기술의 상용화를 위해서는 경제성 증대가 수반되어야 하는데 원료물질의 파쇄에 소요되는 에너지와 느린 반응속도를 촉진시킬 수 있는 기술 등에 대한 지속적인 연구개발이 필요하다.

지중환경의 암석광물을 활용하는 경우, 포획된 CO₂는 반응성 암석(예: 고철질 또는 초고철질 암석)에 주입을 통해 저장될 수 있으며, 이는 CO₂ 광물화를 유발하여 대기로 배출 없이 탄소를 영구적으로 고정할 수 있다. 현무암 및 감람암(육상 및 연안 포함)과 같은 지층을 이용한 현장 광물화는 인간에 의해 배출된 양을 줄이고 남은 만큼 충분한 탄소저장 공간을 제공하지만 실험실 기반 및 현장 기반 실험을 넘어서는 대규모 구현은 거의 이루어지지 않고 있다(Snæbjörnsdóttir et al., 2020). CO₂ 저장기술이 실제 적용가능하기 위해서는 매년 대기에서 현재 연간 배출량의 최소 1%, 약 0.5 Gt을 제거할 수 있어야 한다. CO₂ 포집과 연계된 현무암 탄산화는 이 기준을 충족시킬 수 있지만 연간 Gt 규모로 구현하려면 현무암질 지중환경 내 CO₂가 지속적이고 자유상 CO₂ 풀륨을 형성할 때까지

관정 당 CO₂ 주입 속도를 증가시켜야 한다. 최근 시뮬레이션연구에 따르면 현무암이 반응할 시간이 주어진다면 연간 Gt 규모에서도 상당한 광물 탄산화가 예상될 수 있음을 보여준다(Tutolo et al., 2021).

한편 최근 생물학적 광물탄산화 가능성에 대해 다양한 연구가 수행되었는데 생광물화의 대표적인 생성물은 Calcite, Dolomite, Siderite 등이다. Limestone을 포함한 탄산염광물에 포함된 CO₂는 총 18,000,000 GtC로써 전체 분포의 40% 이상을 차지하는 것으로 알려져 있으며 탄산염광물의 낮은 용해도는 생광물화를 통한 CO₂ 저장의 가능성을 시사한다(Salek et al., 2013). 요소분해효소(ureolysis)의 활성을 이용한 CaCO₃ 광물화는 일반적인 광물탄산화 기술과 달리 자연에서 CaCO₃ 생물형성을 모방함으로써 현장 적용성과 환경친화적인 접근법으로 여겨지고 있다(Krajewska, 2018). 요소분해효소를 이용한 생광물화 기술은 다양한 엔지니어링 분야, 특히 지반 공학, 건설 및 환경 분야에서 토양과 모래의 고형화 또는 안정화, 석재 강화 및 복원을 위한 생물 시멘트화 및 생물학적 복원 수단으로 사용될 수 있다. 콘크리트 구조물, 석재 문

화 유산 보존, 독성 금속, 방사성 핵종 및 과량 용해성 Ca^{2+} 의 폐수 및 지하수 청소, 오일 회수 향상을 위한 오일 저장소 기반암 유출을 막고, 지질학적 CO_2 격리의 밀봉재로 사용될 수 있다(Krajewska, 2018). 이 외에도 황산염 환원 미생물(Sulfate reducing bacteria, SRB)에 의한 dolomite 형성¹⁾, 철환원 미생물(iron reducing bacteria, IRB)에 의한 생광물화²⁾ 등의 연구가 진행되고 있으며, 이러한 기술을 사용할 경우, CO_2 주입이 생광물화를 위한 미생물 군집 및 활성에 미치는 영향³⁾ 등을 살펴보는 것도 중요하다.

3.3. 지중의 유기탄소 저장 능력을 활용한 탄소 격리 전략

토양 탄소(soil carbon)는 토양 내 고상 혹은 액상으로 존재하는 유기물 형태의 탄소를 가리킨다. 보다 구체적으로, 토양유기탄소는 동·식물의 잔해가 토양에 유입되어 토양 내 분해과정을 겪고 있는 형태의 탄소를, 토양무기탄소는 탄산염 광물 등에 포함된 탄소를 말한다(Rice, 2005). 특히 식물기원의 유기물의 초기 분해 속도는 식물을 구성하는 생물고분자에 영향을 받는다. 셀룰로오스나 헤미셀룰로오스보다는 리그닌이 생물학적 열적 분해가 어렵다. 따라서 이렇게 생물고분자의 구성비에 따라서 분해되는 양상이나 속도가 달라지게 된다. 토양유기물은 대략 $< 45 \mu\text{m}$ 의 크기를 가지는 용존유기물, $53 \mu\text{m}$ – 2 mm 의 크

기를 가지는 입자상 유기물, 휴머스, 그리고 난분해성 유기물로 구분할 수 있다. 용존 유기물은 수 일이면 대부분 분해되며, 입자상 유기물은 수 십년, 휴머스는 수 백년까지도 소요된다. 그러나 난분해성 유기물은 수천년이 지나도 분해가 잘 되지 않는다.

토양에서 유기물은 환원환경보다는 산화환경에서 훨씬 빨리 분해되어 CO_2 형태로 전환된다. 환원환경에서는 CO_2 보다 온실효과가 23배나 큰 CH_4 형태로 전환될 수도 있다(Mazzola et al., 2022). 따라서 토양에서 유기탄소가 안정화되어서 CO_2 나 CH_4 로 전환되지 않도록 하는 것이 토양에 탄소를 저장하기 위한 핵심 전략이다. 토양유기물이 토양에서 안정화되는 기작은 (1) 토양유기물 중에서 분해가 잘 되지 않는 물질 형태, (2) 분해자 미생물의 유기물로의 공간적 접근성 제약, (3) 유기물-광물-금속이온 사이의 상호작용으로 분류할 수 있다(Six et al., 2002). 첫 번째에 기작에 해당하는 것이 화석연료와 최근 주목받고 있는 바이오차라고 볼 수 있다(세부 내용은 이후 단락 참조). 두 번째와 세 번째 기작은 서로 밀접하게 연관되어 있으며, 유기물-광물-금속이온 결합체를 형성하여 분해자 미생물의 접근 자체를 막을 수 있고, 이 경우 분해에 수 천년이 소요될 수도 있다. 유기물-광물-금속이온 결합체에서 미생물이 유기탄소의 화학결합을 효소작용에 의해 끊을 때 굉장히 많은 양의 화학에너지가 필요하다. 따라서

¹⁾ 상온에서 dolomite의 화학적 침전은 수용액 상에서 SO_4^{2-} 가 Ca^{2+} 또는 Mg^{2+} 에 매우 강한 이온결합을 통한 반응속도 장벽(kinetic barrier)으로 인해 매우 느리게 발생한다. 그러나 황산염 환원 박테리아(SRB) 활동이 활성화되는 경우 양이온-황산염 짝 해리와 황산염 환원으로 인한 황화물(sulfide) 형성을 통해 반응속도 장벽을 극복할 수 있다. 기존 연구에 따르면 SRB가 브라질의 dolomite 침전 과염수 석호와 실험실 배양 실험 모두에서 무산소 저온 환경에서 Ca-dolomite 형성을 유도하였다(Van Lith et al., 2003; Warthmann et al., 2000). 순수 SRB 만이 Ca-dolomite와 Mg-calcite 침전을 유도했는데, 이는 탄산염 핵 생성이 SRB 세포 주변 국부적으로 변경된 미세 환경에서 발생함을 나타낸다. 그러나 모든 순수 SRB 균주가 유사한 조건에서 Ca-dolomite를 생산하는 것은 아니므로 박테리아 대사, 활성 및 광물 침전 속도가 형성된 탄산염의 유형에 영향을 미친다는 것을 보여준다(Van Lith et al., 2003; Warthmann et al., 2000). 혼한 탄산염광물인 calcium carbonate나 limestone과 비교하여 dolomite는 매우 안정하기 때문에 dolomite 생광물화는 무기 탄소의 sink와 탄소저장을 위해 사용되는 saline formations을 위한 capping 과정을 위한 CCS로 이용 가능할 것으로 여겨진다.

²⁾ 저산소 또는 환원 환경에서 철환원 미생물은 가장 흔하며 탄소, 철을 포함한 원소의 순환에 핵심적인 역할을 담당한다. 최근 연구에서 IRB의 성장에 따른 CO_2 저감 가능성을 지중 퇴적물과 ferrihydrite를 이용한 지중모사실험을 수행하였고, IRB의 활동으로 인해 발생하는 철환원 작용으로 인해 발생하는 Fe^{2+} 가 지중환경에서 CO_2 와 결합하여 siderite로 침전할 수 있음을 보고하였다(Kwon et al., 2016). 지중환경에서 철환원 반응은 매우 흔하며, 열역학적인 관점에서 철환원 반응은 황산염 환원 반응이나 메탄생성반응과 비교하여 우위에 있고 반응속도 또한 빠르기 때문에 CO_2 저감을 위한 생광물화의 또 다른 기술로써 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

³⁾ 한편 CO_2 주입에 따른 미생물의 군집 및 활성 변화는 생물학적 광물탄산화에 잠재적인 영향을 미칠 수 있다. 최근 연구에서는 CO_2 와 현무암질 암석과의 반응과 미생물 생태 영향 연구를 통해 현무암 시스템에서 CO_2 농도 상승에 따른 지하수 미생물군집과 이와 관련한 생지구화학적 특성 변화에 대해 이해하고자 하였다(Choi et al., 2022). 낮은 CO_2 (0, 3 psi) 조건과 높은 CO_2 (10 및 20 psi) 조건에서 비교하였으며 생지구화학적 모델링과 미생물군집 분석에 따르면 낮은 CO_2 조건의 미생물 군집은 메탄생성 및 황산염 환원과 함께 합성된 젖산 산화반응과 관련된 특징을 보였고 황산염 환원 및 메탄생성이 가능한 그룹이 검출되었다. 그러나 CO_2 가 높은 반응기에서는 생지구화학적 활성을 보이지 않았고, 황산염 환원 또는 메탄생성이 가능한 그룹은 관찰되지 않았으며, 배양기간동안 미생물 다양성은 줄어들었다. 이러한 연구결과는 미생물 군집구조가 CO_2 농도 구배에 따라 변화할 수 있으며, 군집 구성 및 생지구화학적 반응이 상당한 차이를 나타낼 수 있고, 현무암 풍화의 시간 척도의 경우, CO_2 의 급속한 증가에 따라 상당한 스트레스를 막을 만큼 충분히 빠르지 않을 수 있음을 보여준다.

미생물 작용에 의한 유기탄소의 CO₂로의 전환이 쉽게 일어나지 못한다. 이때 유기탄소의 안정성은 유기탄소가 토양광물이나 금속이온과의 결합 종류에 영향을 받게 된다. 또한 토양에 유기물의 농도가 높아지면 유기물 분자당 광물질의 표면과 반응할 수 있는 리간드의 양이 줄어들기 때문에 상대적으로 많은 양의 유기물이 미생물의 산화작용에 노출된다(Basille-Doelsch et al., 2020). 이로 인해 토양층의 깊이가 깊어질수록 토양탄소의 안정성에 유기물-광물 결합체의 기여도가 상대적으로 높아지게 된다. 결국 이러한 유기물-광물 결합체가 만들어지는 기작을 통해 토양에 유기물을 안정한 형태로 바꿀 수 있다(Chaopricha and Marin-Spiotta, 2014).

이러한 토양 탄소의 생지화학적반응을 바탕으로 토양 생태계(terrestrial ecosystem)에 존재하는 토양 탄소를 추산해 보면 그 양은 대기 중 탄소(800 Gt)의 약 3 배(2,300 Gt) 정도 된다(Jackson et al., 2017), 특히, 토양 유기탄소의 경우 분해속도가 느려 일정 기간 토양 내 잔류하며 대기 중 탄소농도를 조절하는 중요한 역할을 한다. 일반적으로 대기 중 탄소는 토양 내 식물의 광합성 및 바이오매스화에 의한 포획, 이후 유기물 잔해의 토양 유입 및 분해에 의한 배출로 균형을 이루고 있다(Davison et al., 2006). 하지만, 전세계적 인구증가와 그에 따른 토양의 먹거리 생산능력 향상 필요성은, 농업에서의 무분별한 농지개발 및 화학비료 사용, 축산업의 목초지 확보를 위한 벌목 등을 유도하였고, 이는 토양의 탄소 저장 역할보다 배출 역할을 증대시키는 상황을 초래하였다(Poore et al., 2018). 이에, 토양의 탄소 보유량(정확하게는 토양유기탄소 저장량) 개선 노력은 탄소 중립에 매우 효과적인 대안으로 주목받고 있다.

전통적으로 토양유기물(soil organic matter)은 토양에 수분과 양분 보유력을 제공하여 작물 생산성을 증가시키는 기능이 강조되어 왔다. 토양유기물은 토양의 구조를 개선하고, 침식을 줄여서 지하수와 지표수의 수질을 향상시키고 궁극적으로는 식량안보와 물안보에 기여해 왔다. 전통적으로 토양의 기능 측면에서만 토양유기물을 바라보던 관점에서, 지구온난화와 기후변화가 지구를 위협하면서 최근에는 전 지구적인 탄소순환에서 토양유기물의 역할이 강조되고 있다. 이러한 토양유기물에 대한 중요성으로 인해 인위적인 온실가스의 전지구적 배출을 상쇄하기 위해 매년 0.4%씩 토양유기물 총량을 증가시키자는 “4 per mille Soils for Food Security and Climate”를 프랑스 농림장관인 Stephane Le Foll이 2015년 파리기후협정에서 제안하였다(Minasny et al., 2017). 이 제안이 효과적인지

를 검토하기 위해 토양유기물이 적은 표토(30 cm)에서 매년 토양유기물을 투입하면 연간 2-3 Gt의 탄소를 저장할 수 있으며, 이 양은 인위적인 온실기체의 배출을 20-35%나 상쇄할 수 있는 양이다. 화석연료로부터 배출되는 온실기체는 매년 8.90 Gt이며, 토양 2 m 깊이까지 토양의 탄소는 2400 Gt으로 추정하고 있다. 이 비율(8.9/2400)이 0.4% 또는 4%이다. 즉 토양유기물을 증가시켜 탄소를 토양에 격리하면 화석연료의 사용으로 인한 온실가스를 상쇄할 수 있다.

이에 더하여 산림 생태계는 전세계적으로 중요한 탄소 저장고이며, 인위적인 온실가스 배출량의 45%를 흡수하여 잘 활용한다면 탄소중립에 크게 기여할 수 있다(Wang, et al., 2021). 산림에 저장된 탄소는 나무의 나이와 관리방법에 따라 달라지는데, 어린 산림은 탄소를 포획/저장하며, 오래된 산림은 흡수와 배출의 평형을 유지한다. 짧은 기간 내에 집중적으로 벌채를 실시할 경우 탄소 배출을 증가시킬 수 있다. 이에, 산림의 탄소중립 효과를 향상시키기 위한 방안으로 제시되어 온 것이 숲가꾸기(조림, afforestation)과 숲재생(재식림, reforestation)이다. 하지만, 산림업에서 제시된 기술은 토양지하수환경 분야의 중점기술과는 다소 거리가 있다고 할 수 있다. 농업에서는, 토양유기탄소의 저장을 높이기 위해, 다량의 바이오매스 투입, 토양 교란의 최소화, 토양구조 개선, 물질순환과정 강화 등을 실시해야 함을 인식하고, 토양관리방식을 개선하는 것을 목표로, 지표면 피복경작, 혼농임업, 통합적 양분관리 등을 제안해 왔다(Kim and Lee, 2005). 물론 이와 같은 토양관리방식의 개선이 토양 탄소 배출 및 저장에 미치는 영향이 정량화되어 보고된 사례는 극히 드물다.

토양탄소 저장량을 늘리기 위한 적극적인 방법으로, 기체로부터 토양으로의 물질순환과정을 가속화 혹은 강화하는 방법을 생각해 볼 수 있는데, 토양을 대상으로 하는 구체적인 기술이 제안된 사례는 극히 제한적이다. 관련된 기존 연구사례로 바이오차(biochar)를 들 수 있다(Marris, 2006; Lehmann 2007; Woo, 2013). 기존 보고에서 바이오차를 토양에 넣는 방법은, 탄소중립 관점에서 진정한 탄소 네거티브한 방법이라고 평가된 바 있다. 즉, 바이오차의 형태로 고정된 탄소는 CO₂로의 배출속도가 느려 탄소 저장의 효과가 높을 뿐 아니라, 토양 첨가시 pH 증가, 수분 보유능 증가, 이온교환능 증가 등을 통해 토양 생산능을 개량(앞서 설명한 농업 생산성을 향상)하기 때문이다. 지금까지 토양지하수환경 분야에서도 바이오차와 관련된 연구가 산발적으로 보고된 바 있으나, 이는 탄소중립 관점에서 바이오차가 가지는 고전적인 특성에 관한 연

구라기보다는, 높은 비표면적 특성을 활용하여 활성탄 대체 환경소재(주로 흡착제)로의 활용 가능성을 검토한 사례가 대부분이다. 최근의 연구사례로, 토양의 탄소 고정 효율을 향상시키기 위해, 토양 내 산화환원환경을 반복적으로 변화시키는 기법과 소위 ‘microbial carbon pump’라는 기법으로 미생물을 이용해 토양 내 탄소의 활용성을 낮추는 방안 등이 제안된 바 있다(Liang et al., 2017).

토양에 유기물을 저장하기 위한 노력의 일환으로 유기물 경작(organic farming) 또는 유기물에 의한 토양개량이 제안되었다. 그러나 이렇게 토양에 인위적으로 투입된 유기물의 상당량은 표토에서 산화되어 다시 CO_2 로 전환되며, 일부만 토양에 저장된다. 한 연구에 의하면 이러한 방식으로는 년 간 약 2.2%의 토양유기물을 증가시킬 수 있다(Leifeld and Fuhrer, 2010). 따라서 표토보다는 조금 더 심부에서 유기탄소의 격리를 도모하는 것이 보다 많은 탄소를 토양에 저장할 수 있다. 결국 50–100 cm 심도에 인위적으로 안정한 형태의 탄소를 주입하고 주입된 유기탄소가 토양광물과 보다 안정한 결합체를 형성하도록 하는 것이 토양 탄소 격리의 관건이다. 또한 농업과 산림부에서 표토의 적절한 관리를 통해 저장량은 증가하고 CO_2 로 산화되어 배출되는 양을 줄이기 위한 전략이 함께 실행되어야 한다.

4. Green, sustainable, and resilient remediation

전 세계적으로 기후변화/기후위기, 탄소중립, 신·재생에너지, 녹색성장 등과 관련된 효과적인 실질적 실천에 대한 관심이 높아지고 있으며, 국내에서도 이러한 전지구적 이슈들을 보다 적극적으로 대응하기 위하여 2022년 7월부터 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법(약칭: 탄소중립기본법)」이 시행되고 있다. 해당 법에서 “녹색성장”을 에너지와 자원을 절약하고 효율적으로 사용하여 기후변화와 환경훼손을 줄이고 청정에너지와 녹색기술의 연구개발을 통하여 새로운 성장동력을 확보하며 새로운 일자리를 창출해 나가는 등 경제와 환경이 조화를 이루는 성장으로 정의하였는데, 이러한 내용을 고려하였을 때 앞으로의 토양지하수환경 분야의 기술은 보다 친환경적이고, 지속가능한 기술(Green and Sustainable remediation, GSR)이 주를 이루어야 할 것이다. 또한, 극심한 기후변화 등의 위협에 대응할 수 있는 복원력을 갖을 수 있는 기술(Sustainable resilient remediation, SRR)이 되어야 할 것이다.

우리보다 상대적으로 앞서있는 선진국에서의 정화기술 적용에 대한 시대적 변화를 살펴보면, Fig. 4에 나타낸

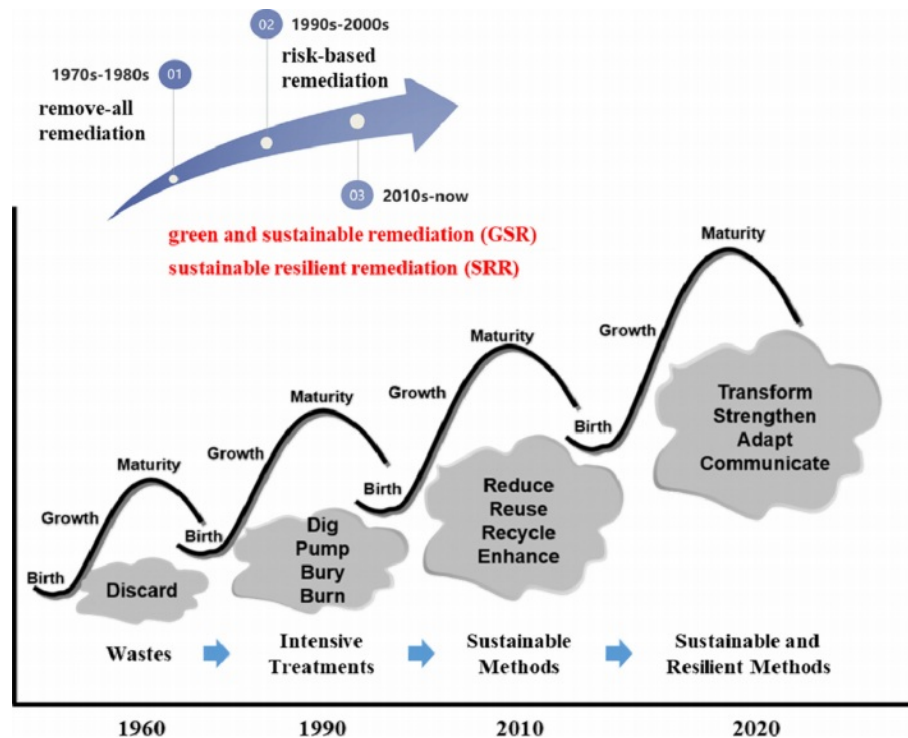


Fig. 4. Paradigm shift in soil and groundwater remediation technology (Hou and O'Connor, 2020; ITRC, 2021).

바와 같이 1970-1980년대에는 토양지하수의 모든 오염물질을 제거하는 “Remove-all remediation”의 개념을 적용하였고, 1990-2000년대까지 정화비용, 정화후 이익, 토지이용, 위해성 등을 고려한 “Risk-based remediation” 개념을 적극 고려하였다. 2010년대부터는 앞서 언급한 전지구적 이슈를 고려한 GSR 개념 및 SRR 개념이 도입되고 있는데, 2000년대 후반 미국 EPA에서는 친환경 정화기술의 핵심 요소로 에너지, 대기, 물, 생태계, 자원/폐기물, 책임감 등과 관련된 내용을 제시하기도 하였다(USEPA, 2008; Hou and O'Connor, 2020; ITRC, 2021). 국내의 경우 미국과 같은 선진국과 비교하여 정화기술의 적용 및 변화되는 정화기술 개념의 도입이 상대적으로 늦어졌으나 (Hwang and Cho, 2009), 현재 위해성 기반의 정화기술이 활발하게 적용되고 있으며, 동시에 보다 친환경적이고, 지속가능하며, 복원력을 고려한 정화기술의 개발 및 적용이 빠르게 확산되고 있다.

Green and sustainable remediation은 환경적, 경제적, 사회적 지속가능성에 대해 고려해야 하는데, 환경적 지속가능성은 사람과 주변 환경에 전주기적 영향을 최소화해야 함을 의미하며, 경제적 지속가능성은 해당 정화사업의 전주기적 비용 소요 및 이익을 고려하고, 정화사업 수행으로 인한 지역경제에 미치는 영향을 고려해야함을 의미한다. 사회적 지속가능성은 정화사업 근로자, 현장 주변 지역사회, 취약 계층 등에 대한 사회적 영향이 긍정적일 수 있게 함을 의미한다. 이상의 내용에 대한 요구는 향후 지속적으로 증가할 것으로 예상되는데, 이는 과학기술의 발달로 인한 환경오염 및 그로 인한 악영향에 대한 지식이 축적되고 있으며, 그로 인한 관심이 높아지고 있기 때문이다. 또한, 이로 인해 이해당사자들의 지속가능성 향상에 대한 요구와 새로운 사회적 규범, 제도적 장치들이 생기고 있기 때문이다(Hou and O'Connor, 2020). 회복력(Resilience)은 극단적인 날씨 현상, 해수면 상승, 산불 등의 자연재해를 예방할 수 있고, 견딜 수 있으며, 대응할 수 있는 지역사회, 지역경제, 자연환경 등의 능력을 의미한다. 회복력을 이해한다는 것은 현장의 취약성 및 사회적 취약성 모두를 이해하는 것을 의미한다(ITRC, 2021).

현재 사용되고 있는 토양지하수 정화기술 중 보다 친환경적이며, 지속가능한 기술로 인식되는 것은 식물정화공법(Phytoremediation), 자연저감공법(Natural attenuation) 등의 생물학적처리방법인데, 현재까지의 기술 수준이 정화기간, 정화범위, 정화효과 등의 측면에서 만족할만한 수준에 도달하지 못하고 있어 지속적인 관련기술 연구 및 현장적용 평가가 필요하다. 과거부터 국내 토양지하수정

화에 사용된 대부분의 기술들은 대부분 많은 에너지, 화학약품, 물 등이 소모되는 물리화학적처리방법 및 열처리방법으로 친환경성, 지속가능성, 회복력 등을 확보하기 쉽지 않은 기술들이다. 이러한 기술들은 다량의 폐기물, 폐수, 위험물질, 온실가스 등을 배출하기도 하여 이차 오염의 위험성을 항상 내포하고 있다.

미국 EPA에서는 정화기술을 보다 친환경적이며, 지속가능한 기술로 발전시키기 위하여 현재 활발하게 적용중인 정화기술들에 대한 체계적이며, 자세한 환경발자국(Environmental footprint)를 정량화하여 자원/폐기물, 에너지, 물, 공기, 주변환경 등의 항목별로 평가하는 방안(Green remediation metrics)을 제시하였다(USEPA, 2012). 정화기술의 세분 단계별 및 항목별 자원의 사용/재활용, 오염물질의 배출 등을 평가하여 신재생에너지의 사용, 자원의 회수/재이용, 오염물질 배출 저감 등의 환경발자국을 최소화할 수 있는 방안을 고려할 수 있다. 이는 위험 물질의 사용 및 생산을 최소화하거나 근본적으로 제외하고자 하는 Green chemistry(USEPA, 1996)를 토양지하수 정화기술 분야에 보다 적극적으로 도입하는 것과도 연관될 수 있다.

5. 지하수 토양환경과 지열에너지

지금까지 토양 및 지하수 매체를 직접적으로 활용하여 이산화탄소의 저감, 변환 및 저장 등을 논의하였다면, 5장에서 토양 및 지하수 매체를 열원으로 하여 이산화탄소 발생을 간접적으로 줄이는 재생 에너지로서의 역할을 논의하고자 한다. 지열에너지는 8가지 재생에너지(태양열, 태양광, 수력, 해양, 풍력, 바이오, 폐기물 및 지열) 중 한 가지로 심부의 고온 지열에너지와 천부의 저온 지열에너지로 나눌 수 있다. 본 리뷰에서는 천부 지열에너지에 국한하여 지열에너지의 활용을 토양 및 지하수 자원과 탄소중립의 효과에 연관지어 기술한다. 천부 지열에너지는 일반적으로 지하 300 m 이내의 층에 부존하는 비교적 저온의 열에너지를 활용하는 기술이다. 지하의 토양, 암반, 지하수 등의 온도는 연중 12-25°C로 일정하며, 특히 여름철 및 겨울철에는 지표 및 대기의 온도와 상당한 차이를 가진다(Lee, 2012). 본 절에서는 천부 지열에너지의 활용을 위해 일반적으로 사용하는 지열히트펌프 시스템을 소개하고, 토양 및 지하수 자원이 지니는 재생에너지로서의 가치를 토의하며, 천부 지열에너지 개발을 통해 얻을 수 있는 탄소중립 효과 및 이에 따른 환경적 영향 등을 논의하고자 한다.

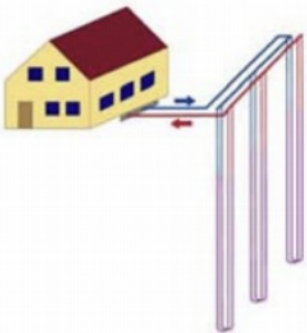
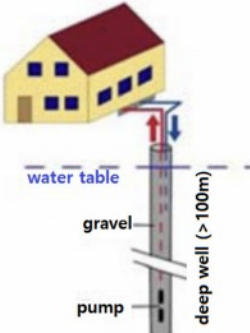
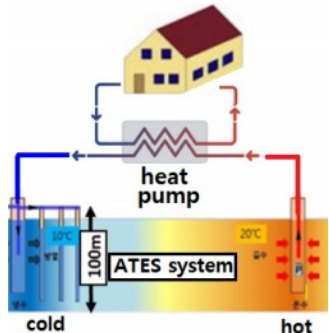
5.1. 지열냉난방 시스템의 종류

지열히트펌프 시스템(geothermal heat pump system, GHP)은 지중 열원으로 지반, 지하수, 지표수 혹은 복합 지열원을 이용하는 히트펌프 시스템 등으로 나눌 수 있으며, 순환하는 열전달 매질의 순환방식에 따라 밀폐형 및 개방형으로 나눌 수 있다. 일반적으로 밀폐형의 경우에는 열교환 유체로 물 및 부동액을 사용하여 지중에 설치된 파이프형 루프 내에서 순환시켜 지반(토양)과의 열교환을 활용하는 방식이다. 이에 비해 개방형은 지하수를 이용하여 지중에 설치한 수주지열정(standing column well, SCW)으로부터 열을 교환하는 방식이다. 개방형의 변형된 방식으로 대수층축열(aquifer thermal energy storage, ATES) 시스템이 있는데, 이는 일정한 간격으로 떨어진 두 곳에 지열정을 설치하여 하절기에는 히트펌프에서 이동시킨 온수를 대수층으로 주입시켜 뜨거운 열을 대수층에 저장하고, 동절기에는 차가운 대기로부터 냉각된 냉수를 대수층으로 주입시켜 차가운 열을 저장하는 방식이다. 이후에 뜨거운 쪽의 대수층은 동절기에 난방을 위해 사용하며, 차가운 쪽의 대수층은 하절기에 냉방을 위해 활용한다(Oh and Choi, 2012). ATES 시스템은 밀폐형이나 SCW형에 비하여 뒤늦게 국내에 도입된 기술로 아직까지 실증현장

이 많지 않으나, 앞서 언급한 두가지 시스템에 비하여 높은 열효율을 가지는 장점이 있다.

Table 3는 천부 지열에너지 활용을 위해 사용하는 세가지 종류의 시스템에 대한 개략적인 설명과 장단점을 보여 준다. 2004년 이후로 국내 지열히트펌프 시장은 급격히 성장하게 된다. 이때 설치된 지열히트펌프는 주로 밀폐형(수직 폐회로형) 지열시스템으로 비교적 시스템이 간단하고 설치 장소에 제약을 받지 않으며, 열유체가 누출되지 않는 한 주변 토양 및 지하수대수층에 오염을 일으킬 가능성이 낮다는 장점을 가진다. 그러나 밀폐형 지열공의 경우 장기적으로 지열 펌프를 운영할 경우 지중온도가 하강하여 수년 내로 성능저하가 일어난다는 단점이 있다(Lee, 2017). 개방형의 경우, 열유체로 지하수를 이용하며 밀폐형에 비하여 열교환 성능이 우수하나 지하수를 직접 사용하는 방식으로 지하수의 수질변화와 오염가능성이 단점으로 지적되고 있다(Park et al., 2013). 계절간축열 시스템은 효율면에서 가장 우수한 방식으로 수 십에서 수 백미터 간격에 냉수정과 온수정을 별도로 설치하여 한쪽에는 냉열을 다른 한쪽에는 온열을 지속적으로 넣어줌으로써 시간이 지날수록 열교환 성능이 더욱 향상될 수 있다. 그러나 계절간축열 방식은 지하수 대수층을 열저장소로

Table 3. Comparison of three types of geothermal heat exchange systems

Type	Closed loop type	Standing column well (SCW)	Aquifer thermal energy storage (ATES)
Schematic diagram			
	Kim et al. (2014)	Kim et al. (2014)	
Drilling depth of geothermal pillar	100-150 m	< 250 m	20-100 m
Capacity of geothermal energy per pillar	2-3 RT (general value)	25 RT (in case of 500m drilling)	30-50 RT (depending on an aquifer condition)
Cons and pros	<ul style="list-style-type: none"> Low energy required for pumping Relatively easy to install Wide site area required Energy efficiency decreasing with time 	<ul style="list-style-type: none"> Excellent heating performance Smaller site area required Possible problems of lowered groundwater level due to insufficient groundwater supply during long-term operation 	<ul style="list-style-type: none"> Excellent heating and cooling performance Less groundwater depletion problem due to re-injection of heat exchange water Low cost of installation due to lower drilling depth

활용하므로 설치를 위한 지질학적인 조건이 맞아야 한다는 단점이 있다. 네덜란드 등 층적층이 발달한 국가에서는 계절간축열 방식을 이용한 지열에너지 활용이 보편화되어 2017년 기준 3000여 개소 이상이 운영되고 있으나, 지질학적 구조가 복잡한 국내에서는 현재까지 계절간축열 방식을 활용한 사례가 많지 않다(Choi et al., 2021).

5.2. 지열냉난방 시스템이 환경에 미치는 영향

지열시스템의 설치에 따른 환경적 영향에 대한 우려는 크게 두 가지 측면에서 나타날 수 있다. 첫 번째는 지열공 설치를 위한 지중 공간의 시추 및 천공에 의한 오염물질의 유입 우려이며, 다른 한가지는 지열시스템의 운영에 의해 야기되는 지중 온도의 변화 및 그로 인해 야기되는 지화학적 반응이다. 첫 번째 경우를 세부적으로 나열해보면, 천공과정 및 지열공의 부실 관리에 의해 발생하는 오염물질의 유입, 히트펌프 냉매의 유출, 지중열교환루프에서 열교환 유체 누출, 그라우팅 물질에 의한 영향 등이 있을 수 있다. 두 번째 경우에는 지하수온 변화에 따른 지하수의 화학적 및 미생물의 변화, 재주입 지하수에 의한 수질오염, 지하수 사용에 따른 지반 침하 및 수량 변화, 사후 열교환 유체의 부적절한 방치, 소음 진동의 발생 등을 들 수 있다(Lee, 2012). 두 가지 경우에서 동일하게 밀폐형 지열시스템보다는 지하수를 열유체로 활용하거나 지하수의 대수층을 열저장 장소로 활용하는 개방형 및 ATEs 방식의 경우 환경에 미치는 영향에 대한 우려가 크다. 1993년 미국 뉴저지 리처드스톡턴 대학교에 설치된 대규모 밀폐형 지열히트 펌프 시스템을 4년 동안 운영한 결과 지중온도가 1°C 상승하였고, 이에 따라 지열공 주변에 총 미생물 수 증가 및 미생물 군집 변화를 보고하였다(Lee, 2012). 그러나 대부분의 연구에서 지열에너지 활용에 의해 발생하는 열적 변화의 결과로 야기되는 미생물 환경의 변화 및 지구화학적 반응의 변화는 제한적인 온도 영향 권역 내로 한정되어 광범위한 지하 환경변화를 일으키지 않는 것으로 보여진다(Kai et al., 2005; Bonte et al., 2014).

5.3. 지열냉난방 시스템 활용에 따른 탄소중립 효과

지열을 이용한 냉난방 시스템은 히트펌프의 운영에 소요되는 전기량에 비하여 높은 효율의 냉난방 효과를 얻을 수 있는 즉, COP(coefficient of performance)가 1 보다 높은 시스템이다. 일반적으로 대부분의 지열 시스템의 COP는 3 이상을 기대할 수 있으며, ATEs와 같이 냉방 효율이 우수한 방식의 경우 냉방시 COP는 10 가깝까지

지 기대할 수 있다. 그러나 지열 에너지 활용시스템의 경우, 초기 투자 비용이 많이 든다는 단점이 있어 초기 투자 비용을 회수하기 위해서는 장기간 시스템을 운영해야 하는 경우가 많다(US DOE, 2001). 그러나 히트펌프 사용에 대한 전력량 이외에 온실가스를 배출하지 않고 높은 효율을 얻을 수 있으므로, 탄소 저감의 측면에서 기존 에너지원을 사용할 때보다 유리하다. 김진성 등은 지열 냉난방시스템의 경제성과 CO₂ 발생량을 경유보일러, 도시가스 보일러, 수직 밀폐형 지열시스템 및 SCW형에 대하여 비교 분석하였다(Kim et al., 2015). 분석 결과, 지열 냉난방시스템의 초기투자비가 화석연료 사용 시스템에 비하여 약 3.2-5.9배 정도 높게 나타났으나, 에너지 비용을 1/10 이하까지도 낮출 수 있음을 보여주었다. 이러한 에너지 비용은 화석연료의 CO₂ 배출량 계산을 위해 IPCC에서 제시한 값을 활용하여 계산하여 약 70-80%의 CO₂ 배출 절감을 효과를 경유보일러의 경우에 비하여 나타냄을 추정하였다. 지열에너지 시스템의 사용에 따라 얻어지는 에너지 절감 및 CO₂ 저감 효과는 설치지역 및 운영 시기의 에너지 가격 등 다양한 요인에 의해 영향을 받으므로 한 시스템의 결과를 일반화하여 적용할 수는 없다. 그러나 지열 에너지 활용은 비교적 친환경적이며, 높은 COP를 얻을 수 있는 기술로 평가받고 있으며 특히 토양 및 지하수의 열원은 무한히 제공될 수 있으므로 기계 시스템의 사용연한을 늘린다면 탄소중립을 위한 적극적인 기술로 평가될 있다. 특히 지하수 대수층의 열저장 능력을 활용하는 ATEs 방식은 시간이 지남에 따라 열효율이 향상되는 장점이 있다. 현재까지 국내에서는 장기간 ATEs 방식의 지열냉난방 시스템을 운영한 사례가 없으므로, 연구와 투자를 통해 한국형 ATEs 시스템에서 에너지 절감 및 탄소 저감 효과를 모니터링해 볼 필요가 있다.

6. 결 론

전 세계에서 육지 면적은 149 백만 km²이며, 헥타르당 161 톤의 토양유기탄소를 평균적으로 저장하고 있다. 그래서 매년 헥타르당 0.6 톤의 탄소를 토양에 격리하면 이론적으로는 화석연료의 사용으로 인한 탄소배출을 상쇄할 수 있다. 그러나 토양에 따라 격리할 수 있는 탄소의 양이 다르며, 토양 생물상이 격리된 탄소를 탄소원으로 사용할 수도 있다. 이러한 다양한 변수가 있지만 전지구적으로 보면 매년 0.2-0.5 톤의 탄소가 토양에 격리될 수 있다. 이렇게 토양에 격리된 탄소를 토양관리를 통해서 격리된 상태가 유지되도록 해야 한다. 따라서, 지중환경을

활용하여 안정한 유기탄소의 형태로 탄소를 격리하던지 아니면 대규모로 CO₂를 배출하는 시설에서 탄소를 포집하여 이를 지중에 저장하여 탄소중립에 기여할 수 있다. 지금까지 지중환경에서 오염물질을 주로 다루었던 토양지하수분야가 탄소를 감축할 수 있는 감축기술과 저장공간으로서 영역을 확장하고 인류가 당면하고 있는 탄소중립 및 감축에 대한 기여에 보다 적극적으로 나설 필요가 있다. 이에 추가적으로 지하수토양분야에서 전통적으로 수행해 오던 정화기술 연구 및 개발 분야에서도 탄소중립에 기여하고자 지속가능성 및 회복가능성의 이론을 도입하여 고도화할 필요가 있다. 마지막으로 재생에너지로 인정받은 지열발전 관련 연구도 필요하다고 생각한다. 또한 지하수토양분야에서 탄소중립과 관련된 기초 연구 혹은 실용화 단계의 기술들을 최대한 융합하고, 실제 현장에서 융합된 신기술들의 실증화 및 상용화를 통해 현장 적용성을 키워서 국내 개발 및 보유 중인 탄소중립관련 기술들의 수준을 빠르게 향상시킬 수 있다. 지속적인 지하수토양 정화기술 연구 및 개발 기술의 고도화, 신기술들의 실증화 및 상용화를 통해서 국내 관련 연구기관과 기업들이 보유하고 있는 기술 수준 향상 및 이에 따른 글로벌 시장 경쟁력의 확보가 자연스럽게 가능할 것으로 보인다. 지속적인 연구 및 기술개발로 확보된 국내 지하수토양 관련 기술의 경쟁력은 전세계적인 탄소 중립 사회로의 전환 분위기 속에서 지하수토양환경 분야가 적극적인 역할을 할 수 있는 발판이 될 수 있다.

References

- Akono, A.T., Druhan, J.L., Davila, G., Tsotsis, T., Jessen, K., Fuchs, S., Crandall, D., Shi, Z., Dalton, L., Tkach, M.K., Goodman, A.L., Frailey, S., and Werth, C.J., 2019, A review of geochemical-mechanical impacts in geological carbon storage reservoirs, *Greenh. Gases: Sci. Technol.*, **9**(3), 474-504.
- Aminu, M.D., Nabavi, S., Rochelle, C.A., and Manovic, V., 2017, A review of developments in carbon dioxide storage, *Appl. Energy*, **208**, 1389-1419.
- Basille-Doelsch, I., Balesdent, J., and Pellerin, S., 2020, Reviews and syntheses: The mechanisms underlying carbon storage in soil, *Biogeosciences*, **17**, 5223-5242.
- Benson, S.M. and Cole, D.R., 2008, CO₂ sequestration in deep sedimentary formations. *Elements*, **4**(5), 325-331.
- Bonte, M., Stuyfzand, P.J., and Breukelen, B.M., 2014, Reactive transport modeling of thermal column experiments to investigate the impacts of aquifer thermal energy storage on groundwater quality, *Environ. Sci. Tech.*, **48**(20), 12099-12107.
- Burnside, N.M., Shipton, Z.K., Dockrill, B., and Ellam, R.M., 2013, Man-made versus natural CO₂ leakage: A 400 k.y. history of an analogue for engineered geological storage of CO₂, *Geology*, **41**(4), 471-474.
- Chaopricha, N.T. and Marin-Spiotta, E., 2014, Soil burial contributes to deep soil organic carbon storage, *Soil Biol. Biochem.*, **69**, 251-264.
- Choi, B., Park, J., Ham, B., Kirk, M.F., and Kwon, M.J., 2022, Effect of CO₂ on biogeochemical reactions and microbial community composition in bioreactors with deep groundwater and basalt, *Sci. Total Environ.*, **807**, 150803.
- Choi, H., Lee, H.J., and Shim, B.O., 2021, The influences of aquifer thermal energy storage (ATES) system on geochemical properties of groundwater. *J. Soil Groundw. Environ.*, **26**(3), 14-24.
- Davison, E.A. and Janssens, I.A., 2006, Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change, *Nature*, **440**, 165-173.
- Denman, K.L., Brasseur, G., Chidthaisong, A., Ciais, P., Cox, P.M., Dickinson, R.E., Hauglustaine, D., Heinze, C., Holland, E., Jacob, D., Lohmann, U., Ramachandran, S., da Silva Dias, P.L., Wofsy, S.C., and Zhang, X., 2007, Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Gerlach, T., 2011, Volcanic versus anthropogenic carbon dioxide, *Eos, Transactions American Geophysical Union*, **92**(24), 201-202.
- Global CCS Institute, 2022, Global Status of CCS 2021, Australia
- Ham, B., Choi, B.Y., Chae, G.T., Kirk, M.F., and Kwon, M.J., 2017, Geochemical influence on microbial communities at CO₂-leakage analog sites, *Front. Microbiol.*, **8**, 2203.
- Han, K., Rhee, C.H., and Chun, H.D., 2011, Feasibility of mineral carbonation technology as a CO₂ storage measure considering domestic industrial environment, *Korean Chem. Eng. Res.*, **49**(2), 137-150.
- Hou, D. and O'Connor, D., 2020, Chapter 2 - Green and sustainable remediation: past, present, and future developments, In: D. Hou (Ed.), *Sustainable Remediation of Contaminated Soil and Groundwater*, Butterworth-Heinemann, 2020, p.19-42.
- Hwang, S. and Cho, H., 2009, Basic research for the introduction of green remediation best management practices, Korea Environment Institute.

- IPCC, 2007, Fourth assessment report: climate change 2007, Intergovernmental Panel on Climate Change.
- ITRC, 2021, Sustainable Resilient Remediation SRR-1. Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council, SRR Team. <https://srr-1.itrcweb.org> [accessed 22.10.16.]
- Jackson, R.B., Lajtha, K., Crow, S.E., Hugelius, G., Kramer, M.G., and Pineiro, G., 2017, The ecology of soil carbon: Pools, vulnerabilities, and biotic and abiotic controls, *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, **48**, 419-445.
- Kim, D.Y. and Lee, C.H., 2005, Soil Carbon Storages and Preventing Global Warming, Korea Institute of Science and Technology Information.
- Kim, J.S., Cha, J.H., Song, S.H., and Jeong, G.C., 2014. Numerical simulations for optimal utilization of geothermal energy under groundwater-bearing conditions, *J. Eng. Geol.*, **24**(4), 487-499.
- Kim, J.S., Song, S.H., Jeong, G.C., and Cha, J.H., 2015. Analysis of economic feasibility and reductions of carbon dioxide emission of geothermal heating and cooling system using groundwater. *J. Eng. Geol.*, **25**(4), 599-612.
- Krajewska, B., 2018, Urease-aided calcium carbonate mineralization for engineering applications: A review, *J. Adv. Res.*, **13**, 59-67.
- Kwon, M.J., O'Loughlin, E.J., Boyanov, M.I., Brulc, J.M., Johnston, E.R., Kemner, K.M., and Antonopoulos, D.A., 2016, Impact of organic carbon electron donors on microbial community development under iron- and sulfate-reducing conditions. *PLoS ONE*, **11**(1), e0146689.
- Kwon, Y.K., 2021, Comprehensive evaluation of CO₂ geological storage prospect and capacity in Korea. *Conference of The Korea Organization Promoting for CCUS Development (K-CCUS)*, Seoul, November 3.
- Lee, H.S., 2012, Environmental assessment and environment-friendly using plan of geothermal energy, Korea Environment Institute.
- Lee, K.K., 2017, Final report on fusion energy utilization technology in the waterside groundwater, Ministry of Land, Infrastructure, and Transport.
- Lehmann, J., 2007, A handful of carbon, *Nature*, **447**, 143-144.
- Leifeld, J. and Fuhrer, J., 2010, Organic farming and soil carbon sequestration: What do we really know about the benefits?, *Ambio*, **39**(8), 585-599.
- Liang, C., Schimel, J.P., and Jastrow, J.D., 2017, The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage, *Nat. Microbiol.*, **2**, 17105.
- Marris, E., 2006, Black is the new green, *Nature*, **442**, 624-626.
- Mazzola, V., Perks, M. P., Smith, J., Yeluripati, J., and Xenakis, G., 2022, Assessing soil carbon dioxide and methane fluxes from a scots pine raised bog-edge-woodland, *J. Environ. Manage.*, **302**, 114061.
- Minasny, B., Malone, B.P., McBratney, A.B., Angers, D.A., Arrouays, D., Chambers, A., Chaplot, V., Chen, Z.S., Cheng, K., Das, B.S., Field, D.J., Gimona, A., Hedley, C.B., Hong, S.Y., Mandal, B., Marchant, B.P., Martin, M., McConkey, B.G., Mulder, V.L., O'Rourke, S., Richer-de-Forges, A.C., Odeh, I., Padarian, J., Paustian, K., Pan, G., Poggio, L., Savin, I., Stolbovoy, V., Stockmann, U., Sulaemans, Y., Tsui, C.C., Vågen, T.G., van Wesemael, B., and Winowiecki, L., 2017, Soil carbon 4 per mille, *Geoderma*, **292**, 59-86.
- Moseman, A., 2022, Ask MIT climate: How much carbon dioxide does the Earth naturally absorb? Climate Portal, Massachusetts Institute of Technology, <https://climate.mit.edu/ask-mit/how-much-carbon-dioxide-does-earth-naturally-absorb> [accessed 22.09.03.]
- Nielbock, M., 2018, Transforming water into acid... and back, *AstroEDU*, **4**, 1634.
- Oh, M.S. and Choi, J.M., 2012, Study on the performance of an ATEs geothermal heat pump system and economic analysis, *Korean J. Air-Cond. Refrig. Eng.*, **24**(4), 289-296.
- Park, Y., Mok, J.K., Jang, B.J., Lee, J.Y., and Park, Y.C., 2015, Influence of closed loop ground source heat pumps on groundwater: a case study, *J. Geol. Soc.*, **51**(2), 243-251.
- Ripple, W.J., Wolf, C., Newsome, T.M., Gregg, J.W., Lenton, T.M., Palomo, I., Eikelboom, J.A.J., Law, B.E., Huq, S., Duffy, P.B., and Rockström, J., 2021, World scientists' warning of a climate emergency 2021, *BioScience*, **71**(9), 894-898.
- Park, Y.J., 2016, Carbon dioxide storage and utilization using mineral carbonation, *NICE*, **34**(3), 282-286.
- Poore, J. and Nemecek, T., 2018, Reducing food's environmental impacts through producers and consumers, *Science*, **360**, 987-992.
- Power, I.M., Wilson, S.A., and Dipple, G.M., 2013, Serpentinite carbonation for CO₂ sequestration, *Elements*, **9**(2), 115-121.
- Rice, C.W., 2005, Carbon cycle in soils-dynamics and management, *Ency. Soil Environ.*, **1**, 164-170.
- Salek, S.S., Kleerebezem, R., Jonkers, H.M., Witkamp, G., and van Loosdrecht, M.C., 2013, Mineral CO₂ sequestration by environmental biotechnological processes, *Trends Biotechnol.*, **31**(3), 139-146.
- Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A., and Paustian, K., 2002, Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils, *Plant Soil*, **241**(2), 155-176.
- Snæbjörnsdóttir, S.Ó., Sigfússon, B., Marieni, C., Goldberg, D., Gíslason, S.R., and Oelkers, E.H., 2020, Carbon dioxide storage through mineral carbonation, *Nat. Rev. Earth Environ.*, **1**,

90-102.

The carbon cycle, <https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle> [accessed 22.11.06]

Tutolo, B.M., Awolayo, A.N., and Brown, C., 2021, Alkalinity generation constraints on basalt carbonation for carbon dioxide removal at the gigaton-per-year scale, *Environ. Sci. Technol.*, **55**(17), 11906-11915.

University of Michigan (Center for Sustainable Systems), 2021, Greenhouse gases factsheet, Pub. No. CSS05-21.

U.S. DOE., 2008, Carbon cycling and biosequestration: Integrating biology and climate through systems science; report from the march 2008 workshop, U.S. Department of Energy Office of Science, DOE/SC-108.

U.S. Geological Survey, 2014, Volcanic gases can be harmful to health, vegetation and infrastructure, <http://volcanoes.usgs.gov/hazards/gas/climate.php> [accessed 22.08.31]

USEPA, 1996, Basics of green chemistry, <https://www.epa.gov/greenchemistry>, [accessed 22.08.31]

USEPA, 2008, Green remediation: incorporating sustainable environmental practices into remediation of contaminated sites.

USEPA, 2012, Methodology for understanding and reducing a project's environmental footprint.

Van Lith, Y., Warthmann, R.J., Vasconcelos, C., and Mckenzie, J.A., 2003, Sulphate-reducing bacteria induce low-temperature Ca-dolomite and high Mg-calcite formation, *Geobiology*, **1**(1), 71-79.

Wang, B., Pan, Z., Cheng, H., Zhang, Z., and Cheng, F., 2021, A review of carbon dioxide sequestration by mineral carbonation of industrial byproduct gypsum, *J. Clean. Prod.*, **302**, 126930.

Wang, F., Harindintwali, J.D., Yuan, Z., Wang, M., Wang, F., Li, S., Yin, Z., Huang, L., Fu, Y., Li, L., Chang, S., Zhang, L., Rinkelebe, J., Yuan, Z., Zhu, Q., Xiang, L., Tsang, D., Xu, L., Jiang, X., Liu, J., Wei, N., Kastner, M., Zou, Y., Ok, Y.S., Shen, J., Peng, D., Zhang, W., Barcelo, D., Zhou, Y., Bai, Z., Li, B., Zhang, B., Wei, K., Cao, H., Tan, Z., Zhao, L., He, X., Zheng, J., Bolan, N., Liu, X., Huang, C., Dietmann, S., Luo, M., Sun, N., Gong, J., Gong, Y., Brahushi, F., Zhang, T., Xiao, C., Li, X., Schaffer, A., Tiedje, J.M., and Chen, J.M., 2021, Technologies and perspectives for achieving carbon neutrality, *The Innovation*, **2**(4), 100180.

Warthmann, R.J., Lith, Y.V., Vasconcelos, C., Mckenzie, J.A., and Karpoff, A.M., 2000, Bacterially induced dolomite precipitation in anoxic culture experiments, *Geology*, **28**(12), 1091-1094.

Woo, S.H., 2013, Biochar for soil carbon sequestration, *Clean Tech.*, **19**(3), 201-211.