

수환경-P2 반응경로 모델링을 이용한 결정질암 지하수의 지구 화학적 진화경로 예측

성규열¹, 박맹언¹, 고용권², 김천수²
한국해양대학교 해양과학기술연구소

¹부경대학교 환경지질학과

²한국원자력연구소

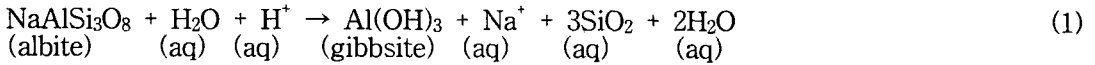
1. 서론

지하수의 기원과 진화에 대한 평가는 방사성 폐기물의 지질학적 처분시 지질학적 방벽에 대한 평가뿐만 아니라, 먹는 샘물의 효율적인 개발과 관리 등에 있어서 중요한 요소이므로 국내에서도 천부 및 심부지하수에 지구화학적 특성에 관한 연구가 활발히 진행되어 있다(박천영 등, 1999; 김남진 등, 2001; 고용권 등, 2001; 우남칠 등, 2001). 방사성 폐기물의 지질학적 처분과 관련하여 화강암이나 편마암과 같이 분포 규모가 넓고 균질성이 높은 결정질암이 처분부지로서 고려되고 있으며, 이들에 대한 수리지구화학적 연구가 진행되어 왔다(Jeong et al., 1995; 이종운 등, 1997a, b). 그러나 결정질암에서 산출되는 지하수의 물-암석 상호반응과 관련된 지하수의 지구화학적 진화와 이차 광물의 침전을 정량적으로 해석한 연구(정찬호 등, 1997; Koh et al., 1998; 박맹언 등, 2000)는 미흡한 실정이며, 처분장의 장기적인 안정성을 고려하기 위해서는 필요한 연구로 간주되고 있다.

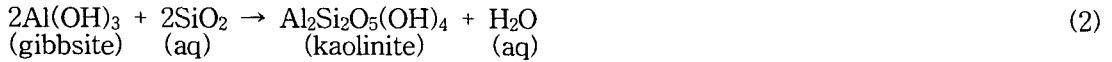
본 연구에서는 광물조성 중 장석류의 함량이 뚜렷한 차이를 보이는 결정질암인 경상남도 언양지역 화강암(알바이트>아노사이트)과 경상남도 하동지역 회장암(알바이트<아노사이트)에서 산출되는 지하수의 지구화학적 특성을 파악하고, 그 결과를 지구화학적 반응경로 모델링에 의한 진화특성과 대비하여 지하수의 진화경로를 규명함으로써 모암의 특성에 따른 심부지하수의 지구화학적 진화특성과 이차광물의 침전과정을 정량화하고자 하였다. 지구화학적 반응경로 모델링은 미국 오레곤 대학의 Reed(1982) 교수에 의해 개발된 열역학 수치모델링 프로그램 CHILLER와 SOLVEQ 및 열역학 자료 SOLTHERM 데이터를 본 연구에 적합하도록 수정·보완하여 이용하였다.

2. 결정질암 지하수의 반응경로 모델링

반응경로 모델링 결과, 반응이 진행됨에 따라 양이온의 농도는 pH의 변화에 따른 모암을 구성하는 광물들의 순차적 용해, 2차 생성광물의 침전 및 재용해 등에 의해 다양한 농도변화를 보여준다. 반응 초기 빗물-화강암 반응은 규산염광물의 용해에 의해 양이온의 농도를 증가시키며, 깃사이트, 적철석 및 망간산화물의 침전을 야기시킨다. 반응 전반에 걸친 적철석과 망간산화물의 침전은 수용액내 철이온과 망간이온의 농도를 조절한다. 알바이트의 용해에 따른 양이온의 증가와 깃사이트의 침전에 대한 반응식은 다음과 같다.



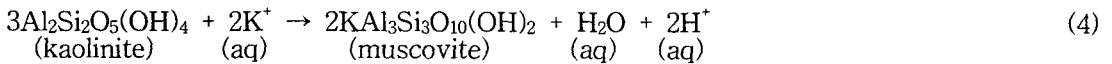
상기의 반응과 유사한 과정으로 다른 규산염광물(아노사이트, 칼리장석 등)의 용해가 일어나며 양이온의 증가와 함께 깁사이트의 침전이 발생한다. 규산염광물의 용해에 의해 수용액내 SiO₂의 양이 충분히 공급되면, 깁사이트는 SiO₂와 반응하여 카오리나이트로 교대된다.



이후 보다 많은 양의 SiO₂가 수용액내로 공급되면, 실리카(silica)의 침전이 발생한다. 수용액 내의 Mg은 녹니석의 침전이 발생할 때까지 지속적으로 증가한다. Mg은 녹니석의 침전과 함께 양이 급격히 감소하며, 녹니석의 침전은 수용액내 수소이온을 공급하여 pH의 증가를 완충시키는 역할을 한다.



칼리장석의 용해는 수용액내 K의 농도를 증가시키며, 충분한 양의 K가 수용액내로 공급되면 카오리나이트는 K와 결합하여 백운모로 일부 교대된다.



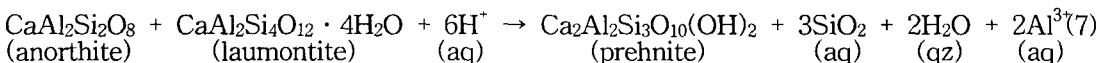
백운모는 pH의 지속적인 증가의 결과로 카오리나이트의 감소와 함께 수용액내 K의 농도 감소와 수소이온의 농도 증가를 야기한다. 백운모의 침전도 녹니석과 같이 pH의 증가를 완충시키는 역할을 한다. 이후 방해석의 침전은 수용액내에 지속적으로 증가하던 Ca와 HCO₃의 농도를 조절한다.



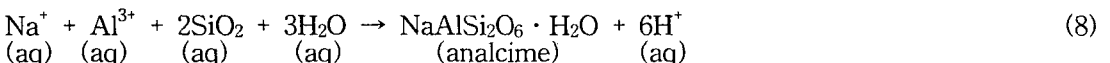
방해석의 침전은 Ca와 HCO₃의 농도뿐만 아니라, 수소이온의 농도에 대해서도 완충 작용을 하여 로몬타이트의 침전이 발생할 때까지 pH가 일정하게 유지된다. 사장석의 지속적인 용해에 의해 수용액내 다량의 Ca이온이 공급되면 카오리나이트는 로몬타이트로 교대되며, 수용액내 수소이온의 활동도를 급격히 감소시킨다.



이후 로몬타이트는 프레나이트에 의해 교대되고 수용액내 수소이온의 활동도를 더 감소시킨다.

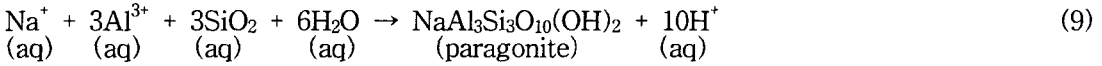


프레나이트의 침전은 방해석의 침전을 감소시키는 작용을 하며, 이후 방해석의 침전량보다 더 많은 양이 침전된다. 수용액내 Na는 사장석의 용해에 의해 지속적으로 증가하며, 아날심스의 침전과 함께 농도가 일정하게 유지된다.



아날심스의 침전은 수용액내 수소이온의 농도를 증가시켜, pH의 증가에 대한 완충작용

을 한다. 빗물-회장암의 반응에서도 빗물-화강암 반응과 동일한 침전순서를 보이지만 실리카의 침전이 없고 아날심 대신 파라고나이트가 침전된다.



3. 고찰 및 결론

오염되지 않은 지하수의 화학조성은 기반암의 종류와 구성광물의 특성에 의해 달라지며(Drever, 1997), 2차 생성광물의 침전 및 재용해 등에 의해 다양한 농도변화를 보여준다. 결정질암에서 산출되는 지하수의 pH, 전기전도도와 총용존고체함량은 심부로 가면서 증가하는 경향을 보인다. 이는 물-암석 상호반응에 의해 조암광물의 용해와 지속적인 산의 소모가 발생하기 때문이다. 그러나 녹니석, 백운모 등과 같은 2차 생성광물의 침전은 pH의 증가에 대한 완충작용을 한다. 규산염광물의 용해에 의해 수용액 내로 공급된 $\text{SiO}_{2(aq)}$ 는 카오리나이트, 일라이트, 몬모릴로나이트, 로몬타이트 등의 2차적인 점토광물의 침전에 의해 농도가 지배된다. 방해석은 다른 광물보다 용해 및 침전속도가 빠르므로(Busenbergh and Plummer, 1986), 2차 생성광물로서 방해석의 존재가 자연수내의 Ca 농도를 지배하는 주 요인이 되며, Ca-몬모릴로나이트, 로몬타이트 등의 점토광물의 침전에 의해 영향을 받기도 한다. 칼리장석과 운모류 등의 용해가 주 공급원인 K과 Mg은 각각 일라이트, 건운모 등과 몬모릴로나이트, 녹니석 등의 점토광물의 형성에 의해 농도가 조절된다. 지하수의 지구화학적 특성은 기반암의 종류와 구성광물의 특성에 의해 변화하나, 광물조성에서 뚜렷한 차이를 보이는 결정질암인 화강암과 회장암에서 산출되는 지하수의 지구화학적 특성은 전체적인 진화경로에서 뚜렷한 차이를 나타내지 않는다. 기반암의 구성광물의 특성을 반영한다면, 화강암지역은 Na이, 회장암지역은 Ca이 풍부한 지하수가 형성되어야 하나, 두 지역 모두 Na이 풍부한 지하수가 형성된다. 이는 지하수의 지구화학적 특성은 일차적으로 기반암의 종류와 구성광물의 특성에 의해 결정되지만, 심부로 진화하는 과정에서 발생하는 2차 생성광물의 침전에 의해 더 큰 영향을 받음을 반영한다.

화강암지역에서 산출되는 국내 지하수의 화학조성은 주로 Ca-HCO₃와 Na-HCO₃형에 속하며, 일부는 Ca-(Cl+SO₄) 또는 Na-(Cl+SO₄)형의 특성을 나타낸다. 회장암 지역의 용출수는 Ca-HCO₃ 형에, 심부 지하수는 Na-HCO₃ 형에 도시된다. 빗물-화강암 반응에 대한 반응경로 모델링 결과는 초기 Ca-Cl형에서 시작하여 Ca-HCO₃을 거친 후, 최종적으로 Na-HCO₃형으로 진화하는 경향을 보이고 있어, 모델링 결과가 현장자료와 매우 잘 일치되고 있음을 보여주고 있다. 빗물-회장암 반응 역시 빗물-화강암 반응에서와 유사하게 진화되는 경향을 보이며, 현장자료와 잘 일치되는 경향을 보여주고 있다.

반응경로 모델링을 이용한 결정질암 지하수의 진화경로 추정 연구는 지하수심도별 지하수의 채취, 2차 생성 광물의 감정 등을 통해 보다 많은 야외자료를 확보하고, 정확한 입력 조건 및 열역학 자료의 선정과 함께 야외조사를 통한 정확한 모델링 조건의 설정이 이루어진다면 결정질암에서 산출되는 지하수의 지구화학적 진화에 대한 정확한 예측이 가능할 것이다. 연구결과는 1) 방사성 폐기물 처분장 선정을 위한 기초 자료 제시, 2) 지질환경 특성에 따른 자연수의 지구화학적 진화 특성 정량화, 3) 오염의 예측 및 평가를 위한 적용성을 체계화하는데 활용될 수 있다.