

지하연구시설을 이용한 오염물질 이동실험 현황 및 과제

박정균^{1)*}, 백민훈¹⁾, 최종원¹⁾

Current Status and Tasks of Contaminants Migration Experiments Using Underground Research Laboratory

Chung-Kyun Park, Min-hoon Baik and Jong-Won Choi

Abstract Research and development for disposal of contaminants including radioactive wastes in deep underground have been carried out from laboratory works. However, validation and reliability of the data from the laboratory are arguing issues because they are not obtained from real disposal situations. Underground research laboratory (URL) is not only a solution to overcome such limitations, but also a valuable facility for performance assessment as an engineering scale. However, it requires much budget, and environmental issues can give rise to social conflicts easily. Such considering points related to URL are discussed as well as current status of worldwide URLs are introduced. Furthermore study plans for solute transport in a small-scale underground research tunnel (KURT), which was authorized recently as a non-radioactive facility in Korea, also described.

Key words Underground research laboratory, Rock fracture, Disposal, Migration, Radioactive wastes

초 록 전세계적으로 방사성폐기물을 포함한 오염물질 심부처분관련연구는 실험실에서 단위현상들에 대한 관찰 및 자료측정부터 시작하지만, 이 실험자료들은 실제처분장조건을 완벽하게 구비한 상태에서 측정한 것이 아니므로 자료의 검증과 신뢰도 확보가 중요하다. 이런 부분 뿐만 아니라 공학적 규모에서 처분시스템의 성능평가를 위해 지하연구시설을 건설하여 관련연구를 진행하게 된다. 그렇지만, 지하연구시설은 많은 투자비가 든다는 점 외에 환경문제가 중요한 사회적 갈등으로 나타날 가능성이 많다. 이런 지하연구시설을 이용해 실험시 고려해야 할 사항들을 검토하고, 세계적인 연구현황과 특징들을 기술하였다. 또, 한국에서 최근 비방사능실험시설로 소규모 지하연구시설을 인허가 받고 본격적인 연구시행단계에 진입하였는데, 오염물질이동관련 연구계획들을 중심으로 소개하였다.

핵심어 지하실험시설, 암반균열, 처분, 이동, 방사성폐기물

1. 서 론

지금까지 인간이 발생시킨 오염물질은 대체로 지표생태계에서 발생해 강이나 토양투수층을 타고 생태계로 이동하였으며, 오염물질이동에 관한 연구는 주로 이들 매질과 상호작용에 관심이 모아져왔다. 그런데, 최근 원자력산업이 급부상함에 따라, 고준위 방사성폐기물과 같이 장기간 관리가 필요한 폐기물을 인간생태계와 격리시키기 위해 지하심부에 처분하는 방안에 대해 세계적으로 활발히 연구가 진행되고 있다^{1,2)}. 이러한 심지층 처

분에서 가장 큰 관건은 인간 환경에 대해 충분히 안전하다는 사실을 입증하는 것이다. 따라서 처분폐기물에서부터 이동을 억제하는 다중 방벽을 포함하여 생태 환경에 이르기까지 처분 시스템 전반에 걸친 장기적 안전성 평가가 매우 중요한 과제로 떠오르고 있다³⁾. 이러한 장기적 평가는 다중 방벽에 대한 열 및 수리 조건, 구조적 요인과 각 방벽 요소에 대한 물리 화학적 특성, 방벽간 물질 전달 등, 처분된 폐기물에서 유출될 수 있는 물질이 상호작용하여 방벽간 및 자연 환경으로 이동하는 현상을 주요 대상으로 이루어진다.

고준위폐기물처분이 이루어지는 심지층 처분환경은 매우 복잡한 지화학적 특성을 가지고 있으며 고준위핵종들 또한 복잡한 화학적 거동 특성을 가지고 있다. 방사성핵종들은 이동하는 동안에 계속 방사능 붕괴를 하

¹⁾ 한국원자력연구소 처분연구부
* 교신저자 : ckpark@kaeri.re.kr
접수일 : 2007년 1월 31일
심사 완료일 : 2007년 2월 23일

기 때문에 시간이 지남에 따라 독성이 줄어드는 특성을 가지고 있다. 그러므로, 이론적으로 방사능이 완전붕괴할 때까지 방사성핵종들을 환경과 격리시킨다면 그 이후에는 더 이상 관리할 필요성이 없다. 반감기가 수년 이내로 짧은 핵종들은 그 양이 아무리 많더라도 처분관점에서는 중요하지 않으며, 일부 악틴족들처럼 반감기가 수만년 이상에 달하는 핵종들이 주요 관심대상이 된다. 따라서 이러한 핵종들이 처분장에서 유출되어 천연방벽 및 자연환경을 따라 이동하는 현상 및 매질과의 상호작용에 의한 자연현상 등에 대한 연구는 처분 안전성을 평가하는데 핵심적인 요소이다. 각국에서는 자국의 지하매질에 대한 핵종들의 상호반응을 실험관찰하고 정량적으로 평가하는데 노력을 경주하고 있다. 실험실에서 수착(sorption), 확산(diffusion), 이동(migration) 등을 단위현상을 관찰하고, 관련매개변수 값을 측정해 왔지만, 현장조건에서 적용성이 중요하므로, 1980년대부터 캐나다 URL을 시작으로 실규모 현장실험으로 중심이 이동하고 있다. 한국에서도, 경주에 동굴처분방식으로 중저준위 방사성폐기물 처분장 건설사업이 진행되고 있어 관련연구도 활발히 진행되고 있다. 이와 관련해, 심지층 처분환경에서 오염물질 이동의 특성과 실험시설에서 고려해야할 사항, 세계주요국의 실규모시설을 이용한 연구현황 및 한국에서 연구계획에 대해 기술하고자 한다.

2. 지하매질에서 핵종이동 및 실험 특성

2.1 처분장에서 핵종이동 특성

처분 시스템의 다중 방벽을 구성하는 여러 요소 중에서도 천연 방벽인 처분장 모암의 기능이 중요하다. 즉 장기 안전성 측면에서 폐기물 고화체와 이를 보호하는 인공 방벽이 궁극적으로 그 기능을 상실하는 경우, 지

층 처분의 최후 방벽으로서 역할과 방사성물질의 이동 경로 대부분을 암반균열층이 담당하고 있기 때문이다. 암반층에서 오염물질이 이동하는 과정을 살펴보면, 암반 매질은 투수계수가 매우 낮아 지하수가 거의 이동하지 않는다고 보며, 대신 이들 매질이 포함하고 있는 불규칙한 균열들을 통해 오염물질이 주로 이동하는 것으로 이해하고 있다⁵⁾. 그림 1과 같이 오염물질은 균열에서 이류(advection)와 분산(dispersion)으로 지하수를 따라가면서, 지하매질과 상호작용을 통해 균열표면에 수착하고 암반매질 내로 확산해 들어가 지하수에 비해 이동이 지연된다. 또한, 지하학적 조건에 따라, 악틴족 핵종의 경우 다양한 화학종을 가지며, 때로는 콜로이드를 형성하거나, 암반균열 내에 존재하는 미생물의 대사작용에 포함되기도 하여, 복잡한 이동과정을 거치게 된다.

지하매질에서 방사성핵종의 이동현상을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$R_f \frac{\partial C}{\partial t} = u \nabla C + D_s \nabla^2 C + \lambda C$$

여기서, u는 속도, D_s는 분산계수, λ는 방사능붕괴상수, R_f는 지연인자(Retardation factor)로서 핵종과 지하수와 상대적인 이동속도차이를 표시하는 단위로서 다음과 같이 정의한다.

$$R_f = \frac{u_w}{u_n} = 1 + \frac{\rho}{\delta} f K_d$$

여기서, w는 지하수, n은 핵종, ρ는 비중, δ는 균열폭(aperture), f는 비표면적계수, K_d는 분배계수(distribution coefficient)이다.

$$K_d = \frac{q}{C} = \frac{\text{암반단위무게당 수착한 양}}{\text{지하수에 용해되어 있는 양}}$$

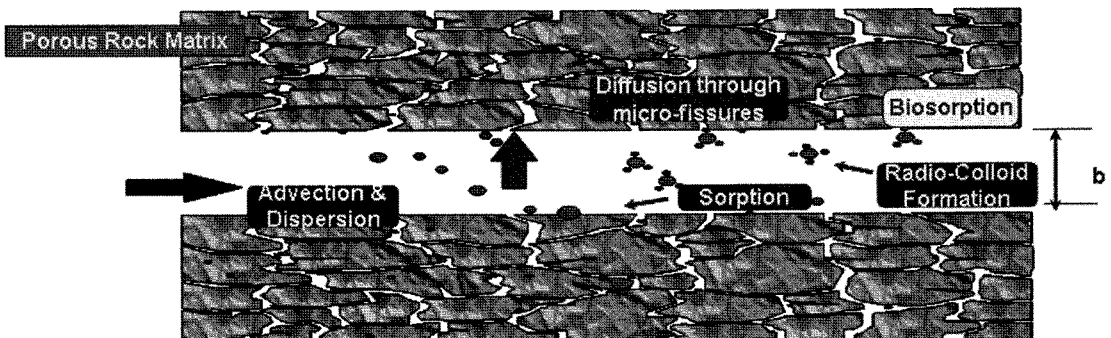


그림 1. 암반균열에서 핵종이동현상 개념도

대부분 경우, 분배계수는 실험실에서 회분식(batch)으로 측정하며, 이를 통해 지연인자를 계산한다. 현장이동 실험을 통해 핵종지연인자와 분배계수를 측정한다면 좀 더 현실적인 값을 구할 수 있고, 실험실 측정치의 타당성도 평가할 수 있다.

2.2 URL을 이용한 용질이동 실험 특성

전세계적으로 처분관련 연구는 실험실에서 소규모 단위현상들에 대한 관찰 및 자료측정부터 시작한다. 그리고 여건이 성숙하게 되면, 지하연구시설을 건설하여 관련연구를 진행하는데, 이들의 특징을 비교해 보면 표 1과 같다. 즉, 실험실에서는 관심분야별로 다양한 실험장치를 구비해 단위실험들을 수행하고, 다양한 실험환경을 조성해 매개변수들의 민감도를 분석하는 등 전범위에 걸쳐 폭넓은 연구를 수행해 처분안전성평가나 처분장설계 등에 필요한 자료를 확보한다. 그러나, 실험실 자료들은 실제 처분장 조건을 완벽하게 구비한 상태에서 측정된 것이 아니므로 자료의 검증과 신뢰도 확보가 중요하다.

이런 부분뿐만 아니라 공학적 규모에서 처분시스템의 성능평가를 위해 지하연구시설을 이용하게 된다. 지하연구시설에서는 보통 방사성폐기물처분장과 같은 지하환경을 조성해 실험하므로 측정자료가 현실적이라는 점이 가장 큰 장점이다. 그러나, URL은 많은 투자비가 든다는 점 이외에 환경문제가 중요한 사회적 갈등으로 나타날 가능성이 많다. 원자력 선진국에서는 이 문제를 실험자와 환경당국, 주민들이 과학적인 평가와 합리적

인 논의과정을 거쳐 대부분 방사성핵종을 사용해 실험하고 있다. 한국에서는 2004년도에 비방사능실험시설(cold test)로 소규모 지하연구시설(KURT)을 인허가 받았고 2006년도에 1차 건설을 완료하였다.

지하실험시설에서 연구활동을 환경에 미치는 영향을 기준으로 분류한다면, 개방계와 폐쇄계로 양분할 수 있다. 개방계는 실험장치와 실험용액이 그대로 자연과 연결된 상태로 실험하는 것인데, 두 시추공 사이 암반균열 내 이동실험(dipole test)이 대표적이다. 용액 주입구로부터 들어간 실험액은 암반균열을 타고 생태계 어느 곳으로도 이동할 수 있다. 실제 실험에서는 이런 가능성을 차단하기 위해 다양한 환경영향 차단방안을 마련하고 있다. 예를 들면 주된 지하수 두 이동경로 사이를 실험구간으로 정하고, 토출유속을 입력유속보다 빠르게 함으로써 주변 지하수들이 유출구로 모이게 하고, 반감기가 짧은 핵종을 사용하여 실험기간이 경과한 후에는 환경에 미치는 위해도가 무시되도록 하며 실험추적자량을 환경허용치 이하로 사용함으로써 문제발생요인을 차단하고 있다.

한편, 폐쇄계는 실험장치를 자연과 분리/격리한 상태로 실험하여 방사능 오염이 실험장치 내에서만 이뤄지도록 하여 자연에는 오염가능성이 생기지 않게 한다. 이상을 요약하여 실험시스템별 특징을 표 2에 정리하였다.

3. URL을 이용한 선진국의 핵종이동 실험 현황

고준위 방사성폐기물의 심지층 처분을 고려하고 있는

표 1. 지하실험시설을 이용한 용질이동실험의 장단점

	장 점	단 점
실험실 측정	<ul style="list-style-type: none"> - 실험조건 조절가능 - 세부 단위현상관찰 - 방사성핵종 사용가능 	<ul style="list-style-type: none"> - 심부지하조건 조성 난점 - 측정자료 신뢰도 미약
지하연구시설	<ul style="list-style-type: none"> - 처분조건과 유사 - 실규모/장기간 실험 - 복합이동현상 - 이동모델/기술 실증 	<ul style="list-style-type: none"> - 방사성물질 사용제한 - 실험조건 조절불가 - 고액의 연구투자비 - 복합자연현상해석 난제

표 2. 실험시스템 분류 및 특징

특 징		폐쇄계 (Closed system)	개방계 (Open system)
실험용액		<ul style="list-style-type: none"> - 환경과 독립 - 현장조건 인위적 유지 - 현장지하수 사용 - 완전회수 가능 	<ul style="list-style-type: none"> - 환경과 연결 - 거시/장기현상관찰 - 완전회수 의문
사용추적자	외 국	<ul style="list-style-type: none"> - 안정화화시료 - 방사성핵종/actinides 	<ul style="list-style-type: none"> - 안정화화시료 - 방사성핵종/actinides
	한 국	<ul style="list-style-type: none"> - 안정화화시료 - 유기염료 	<ul style="list-style-type: none"> - 안정화화시료 - 유기염료

주요 선진국에서는 고준위 방사성폐기물 처분장을 지하 심부 지층에 건설하기 위한 사전작업으로 기술 개발과 처분장 운영방안에 대한 실증 시험을 수행하기 위해 지하연구시설(URL: Underground Research Laboratory)을 운영하거나 건설을 추진하고 있다.

지하연구시설(URL)에서는 고준위폐기물 처분장의 주요 구성요소인 공학적 또는 천연방벽의 성능과 관련된 다양한 연구를 수행하며 처분장의 건설, 운영 및 폐쇄에 필요한 기술 개발과 실증시험(demonstration)을 수행한다. 이러한 다양한 실증시험에서 얻어진 각종 실험 결과에 대한 실제 처분 환경에서의 검증은 고준위 방사성폐기물 처분의 안전성을 확보하고 지역사회와 주민들로부터 처분장 운영과 처분장 안전에 대한 신뢰 확보에 중요하다. 지하연구시설은 이러한 목적을 달성하기 위해 부지조사, 시험, 기술개발, 그리고 실증 등의 순서로 수행되며, URL 건설, 운영에는 통상 20년 정도의 기간이 요구된다.

주요 원자력선진국에서 지하실험시설을 건설운영하고 있는 상황을 표 3에 요약정리하였고, 이 중에서 대표적인 시설에 대해 좀 더 소개하면 다음과 같다.

고준위 방사성폐기물 처분을 위한 지하 연구시설로는 미국의 경우 군사용 프로그램에서 발생된 고준위 방사성폐기물을 처분하기 위해 뉴멕시코주에 지하연구시설(WIPP)을 건설하여 1990년대 말까지 운영한 바 있으며, 상용원전에서 발생하는 사용후핵연료의 처분을 위하여 네바다주 Yucca Mountain에 연구 시설 건설을

1997년 4월 완료하고 그동안 부지 특성조사와 분석, 열 특성 실험, 지하수 유동 조사, 심부 지질환경 등을 포함한 실증시험 등을 수행하였으며, 현재 실증결과들을 토대로 처분장 건설을 위한 인허가 단계에 있다.

핀란드는 Oikiluoto에 위치한 중저준위 방사성폐기물 처분장 내에 지하 50미터의 소규모 지하 연구프로젝트를 추진하였으며 2001년 5월에는 의회의 승인을 받아 올킬루오토 지역을 사용후 핵연료 최종 처분부지로 선정하여 세계최초로 고준위폐기물을 사용처분할 예정이다. 현재는 이 지역에 지하연구시설을 건설하고 있다.

프랑스는 고준위 폐기물 관리에 대한 특별법에 따라 지난 15년간(1991-2006) 고준위폐기물 처분에 관한 연구를 수행해 오고 있다. 2002년부터 화강암반 층을 대상으로 지하 490 m에 지하연구시설을 건설하였으며 점토층 대상의 지하연구시설은 대상 부지 선정에 실패하여 건설을 유보하였다. 프랑스는 이들 연구 결과를 종합하여 2006년에 자국에서 고준위 폐기물 처분 타당성을 국회에 보고하였다.

이들 연구시설에서 수행하는 핵종이동관련 연구내용은 대부분 유사하므로 지금 가장 연구가 활발한 스웨덴 ÄSPÖ URL 연구내용을 중심으로 서술하고자한다. 스웨덴은 1977년 Stripa 폐철광산을 개조, 지하연구시설을 만들어 1992년까지 다양한 연구를 수행하였고 1992년부터는 Oskarshamn섬에 지하 450 m, 터널 총 길이 약 3,600 m의 지하연구시설인 ÄSPÖ URL을 건설 운영하고 있다. 현재는 2개의 지역을 대상으로 최종 처분시설

표 3. 세계 각국의 처분지하연구시설현황

국가	지하연구시설	모양	심도 (m)	진입방식
캐나다	Whiteshell URL (1984 ~)	화강암	240~420	수직갱도
미국	Busted Butte (1988~)	응회암	70	수평터널
	Yacca Mt.ESF (1997~)	응회암	300	경사로
일본	Kamaishi (1988 ~1998)	화강암	260	경사로
	Tono (1986~)	퇴적암	200	수직갱도
	Mizunami URL	화강암	(1000)	건설중
	Honorobe URL	퇴적암	(1000)	건설중
스위스	Grimsel Test site (1983)	화강암	450	수평터널
	Mt.Terri (1995~)	점토층	450	수평터널
스웨덴	Stripa (1980 ~1992)	화강암	400	화강암
	ÄSPÖ HRL (1995~)	화강암	360~410	경사로
핀란드	Oikiluoto Res.Tunnel (1992~)	화강암	200~450	경사로
	Onkalo URL	화강암	50~100	건설중
벨지움	Hades URF (1984~)	점토층 (Boom clay)	420	수직갱도
프랑스	Bure URL	점토층	230	건설중

부지 선정 작업이 순조롭게 진행 중이다. ÄSPÖ URL은 1995년에 완공한 사용후핵연료(S/F) 처분을 위한 연구시설로 그림 2와 같이 지하 500 m 깊이로 동굴을 굴착하여 실제처분과 유사한 조건에서 각종 실험 수행하고 있다. 현재 방사성핵종을 사용해서 실험할 수 있는 최상의 URL로서 선진 9개국어 공동연구형태로 다양한 방법에 참여하는 중이며 연구항목은 다음과 같다^{9,10)}.

1) 삼차원 추적자 이동실험(Tracer Retention Understanding Experiments, TRUE)

그림 2에 보이는 500 m 심도 실험시설 내에서 다양한 방향으로 시추를 하여, 암반균열분포를 종합적으로 한 다음, 서로 연결된 이동통로를 설정해 한 시추공에서 추적자를 주입하여 이동하는 양태를 다공(Multipole)에서 계속 관찰하여 3차원 흐름장(flow field)에서 수리전도도(K)와 방사성핵종 이동을 파악하는 실험이다. 이 프로젝트는 3 분야로 나누어 여러 기관에서 공동연구 형태로 추진하고 있는데, 실험실에서 암반물성, 기초입력 인자값 측정 등을 수행하는 팀, 현장에서 핵종이동 실험을 수행하는 팀, 실험을 해석하고 예측하기 위한 이동모델을 개발하는 팀으로 분반해서 연구하고 있다. 여기에는 핀란드 Posiva, 프랑스 Andra, 일본 JNC, 스웨덴 SKB 같은 기관들이 주도하고 있다. 현재, 1단계 연구(TRUE-1)가 끝나고 2단계 연구가 진행중이다(BS2, True Block scale Continuation Project)^{6,8)}.

2) 장기 암반매질내 확산실험(Long Term Diffusion Experiment, LTDE)

오염물질들이 암반균열 내를 이동할 때, 일부는 암반매질내로 확산해 들어가게 된다. 확산량은 암반의 공극

(pore)에 크게 좌우되는데 심부결정질암반의 경우 대개 0.003 수준이다. 1 m³부피 암반에서 오염물질이 공극을 통해 확산해 들어간다면 약 3 liter의 물질이 저장될 수 있다. 그러므로, 오염물질이 암반표면에 수착하지 않더라도 확산만으로도 상당한 수준으로 이동을 지연시킬 수 있으므로, 확산에 대해 정확히 평가하는 것이 중요하다. 실험은 그림 3에 사진으로 보는 것처럼 암반균열이 없는 면에 시추를 하고 그 시추공 안에 추적자를 집어넣고 장기간 확산과정이 일어나게 한다. 그 후, 정해진 시간에 시추공 주변을 크게 추출하여 추적자들이 확산한 양을 평가하여, 확산 깊이와 확산계수를 구하는 실험이다.

3) 핵종이동 미시적 측정실험(Radionuclide Retention Experiments with Chemlab.)²⁾

균열을 포함한 약 20 cm 크기 암석을 채취/가공하여 이동실험장치를 만들어서 현장시추공에 다시 삽입한 다음 현장조건에서 주로 악틴족 핵종들을 대상으로 이동실험을 수행하고 있다. 핵종과 암반균열표면과의 상호작용에 대한 미시적 관찰, 회분식으로 구한 수착및 이동자료의 검증 등에 대해 가치있는 연구결과들을 보고하고 있다. 이 실험은 스웨덴 SKB와 독일 INE가 공동연구하고 있는데, 한국도 일부 연구 분석에 참여하여 실험결과 해석에 일조하고 있다.

4) 콜로이드 이동실험(Colloid Project)⁵⁾

그림 4에 개략적으로 나타낸 바와 같이, 2.5 m 구간 간격으로 시추공을 뚫고 지하수가 이동하는 암반균열대를 찾아서 이공실험(dipole test)으로 콜로이드의 이동성과 안정성을 관찰하는 실험인데, 콜로이드 물질로

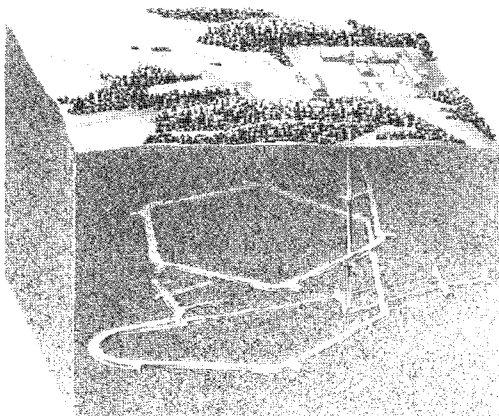


그림 2. 스웨덴 지하처분연구시설 ÄSPÖ URL 개념도

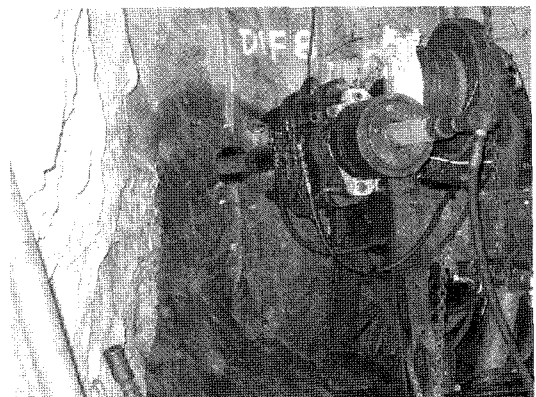


그림 3. 장기암반내 확산실험을 위한 시추 모습

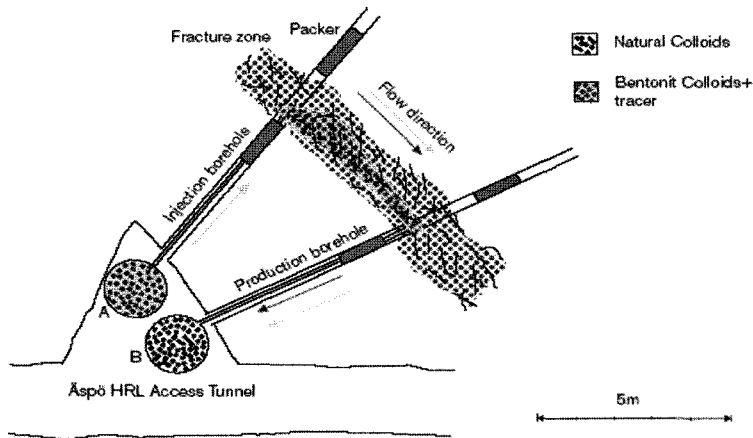


그림 4. 콜로이드 이동실험 개념도

는 심부지하조건에서 생성되는 유기물, 미생물들과 핵종착화물 들 뿐만 아니라 지하처분시 인공방벽으로 사용할 예정인 벤토나이트도 포함한다. 벤토나이트는 장기간 지하수에 접하는 동안 극미세 입자로 유출될 수 있을 뿐만 아니라, 방사성핵종들이 이 입자에 수착하여 이동할 가능성이 높으므로 이에 대한 검증이 필요하다.

5) 미생물연구(Microbe Project)

심부지하에는 혐기성 미생물이 상당수준 존재하며, 이들의 신진대사 작용에 핵종들이 포함된다. 그러므로, 이들 미생물들은 일면 핵종들을 포획하여 이동지연 효과가 있을 뿐만 아니라 반대로 포획한 핵종을 동반해 지하수 흐름을 타고 생태계로 이동해 나올 수도 있다. 그래서, 세계적으로 박테리아를 중심으로 미생물에 대한 연구가 서서히 부각되고 있으며 지하에 생존하는 미생물들의 핵종에 대한 생체이동(bio-mobilisation) 연구를 중심으로 실험하고 있다.

6) 기 타

매질 화학특성 영향실험(Matrix Fluid Chemistry)은 터널공사가 주변환경에 미치는 영향을 수리 및 수리화학 측면에서 지하수를 관찰하는 프로젝트이다. 지하수 및 핵종이동모델 개발(Task Force on Modeling of Groundwater flow and Solutes Transport)팀은 ÄSPÖ URL 실험결과 해석에 필요한 모든 이동모델을 개발하며, 각 기관이 자신의 모델로 연구한 후, 결과를 상호비교한다. 장기수리지질반응연구(Padamot: Palaeohydrogeology study)에서는 지하수 생성, 광물결정 생성과 성장, 지하수와 암반과 장기반응 등. 철산화광물 형성조건 및 균열충진 광물로서 특성 분석, 철산화광물이 핵종 수착과 지연에

미치는 영향을 연구한다. 수만년에 걸쳐 일어난 우라늄 광물의 자연조건에서 이동을 평가하는 자연유사연구(natural analogue)도 수행하고 있는데, 이 또한 초기조건 및 시간에 따른 경계조건 변화를 유추할 수밖에 없다는 단점이 있다.

4. 국내 KURT를 이용한 실험계획

우리나라는 1980년부터 1996년까지 중저준위 방사성폐기물 처분기술 및 안전성 연구를 수행하기 시작하였고, 고준위폐기물 처분에 관한 연구는 1997년에 착수하였다. 대략 2016년에 고준위폐기물 심지층저장시설 건설을 목표로 원자력연구소를 중심으로 단계별 연구 목표를 설정하고 이에 따라 연구를 진행하고 있다. 2002년까지는 국내의 자료를 종합분석해 처분개념을 수립하고 예비성능평가를 수행하였다. 또, 국내 지질에서 시추를 통해 각종 지질, 지하수자료를 확보하고, 실험실 수준에서 수착, 확산, 이동 등의 각종 실험을 수행하고 자료를 생산하여 안전성평가에 활용하였다. 실제 처분 조건은 지하 500 m 이상으로 고압환경상태로 지상조건과 많은 차이를 가지고 있어, 실제 심부조건 하에서 실험 및 자료생산이 필요하나, 국내 연구투자여건상 실험실에서 심부지하조건을 생성하기도 어렵고 정밀분석기도 확보하기 어렵다. 더욱이 실제 처분장 수준 URL은 국내에 건설하기 어려우므로, 해외 URL을 적극 활용해 적은 투자로 국내에서 필요한 연구를 수행할 필요가 있다. 그래서 연구결과로 제안할 한국형 처분 시스템의 현장실증을 위한 소규모 지하연구시설(KURT) 건설을 위하여 시설의 설계와 관련 인허가 작업을 2004년에 완료하였으며, 2005년 1단계 건설공사가 착수되어

2006년 후반부터 실험장비를 설치하고 있다. 계획하고 있는 지하연구시설에서 용질이동관련 연구내용을 소개하면 다음과 같다.

지하 지화학조건에서 현장지하수를 사용해 지화학조건 변화에 민감한 화학종들의 이동 및 암반표면수착 현상을 평가하는데 목적이 있다. 실험내용과 장치특성에 따라 다음과 같이 4가지로 나눈다.

- 가) 시추코아를 이용한 화학종 이동실험,
- 나) 1 m 규모의 시추한 균열암반 실험장치를 이용한 이동시험,
- 다) 약 3 m 규모 현장균열을 통한 이동실험(dipole test)
- 라) 현장환경에서 화학종 확산계수 및 확산길이 측정

이중 가) 나)는 모든 실험용액을 완전 회수하는 폐쇄계 실험이고, 다) 라)는 반개방계 실험이다. 그리고 지하연구시설에서 이루어지는 모든 실험에 방사성핵종을 사용되지 않는다.

1) 시추코아를 이용한 화학종 이동실험

균열암석을 시추한 후, 그림 5와 같은 실험장치를 만들어 다시 시추공에 삽입해 현장환경을 그대로 활용되 실험장치로 폐쇄계를 만들어, 온도, 압력, 지화학조건변화등을 실시간 측정할 수 있는 시스템이다. 추적자 이동실험이 끝난 후 실험장치를 다시 회수하여, 암반균열표면에 수착되어 있는 핵종들을 XRD, EPMA 등을 사용해 광물과 핵종간 반응특성을 분석할 계획이다.

2) 현장 지하수를 활용한 1 m 규모 추출암반균열에서 화학종 이동실험

1 m 규모로 추출한 균열암반에 그림 6과 같은 실험장치를 만들고 여기에 현장지하수를 연결해 균열에서 핵종이동 실험을 수행하게 된다. 이 실험은 지화학민감 화학종의 이동현상연구가 주목적으로 더불어, 화학종 이동경로 탐색, 균열표면광물과 화학종간 선택적 결합, 지화학반응이동모델(Geochemical transport model) 개

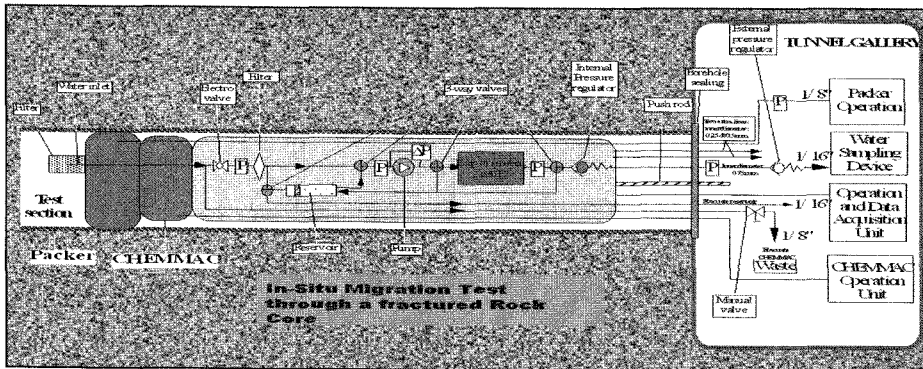


그림 5. 현장시추코아를 이용한 이동실험 개념도

experimental design for tracer tests

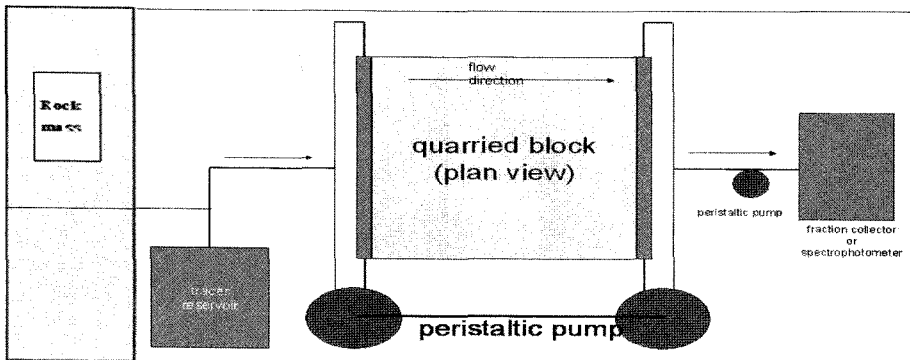


그림 6. 1 m 규모 추출암반균열에서 화학종 이동실험장치 개념도

발 및 검증, 핵종포획미생물의 대사작용 연구, 미생물 및 미세입자(nano particle)의 이동과 상호작용등을 단계적으로 연구할 계획이다^{4,7)}.

3) 약 3 m 규모 현장암반균열에서 화학종 이동실험

이 실험은 주위환경에 개방된 그림 4와 유사한 균열면에서 실험을 수행하므로, 먼저 주변 암반 균열망분포를 파악한 후에 이동구간내 수문실험 및 모델수립을 하고, 이어서 수착성 및 비수착성 추적자를 사용하여 물질이동실험을 수행할 예정이다. 또한 3차원 물질이동 모델 개발 및 검증도 중요한 연구항목이다.

4) 현장환경에서 화학종 확산계수 및 확산깊이 측정

균열이 없는 암반매질 내로 용질 확산능 및 확산깊이를 평가하는 실험으로서 그림 3과 그림 7에 나타낸 바와 같이 수개 실험조를 병렬로 설치해 실험기간에 따른 평가를 수행한다. 실험은 장기로 10년 정도를 예상하며, 중간 단계마다 일부 실험조 주변을 크게 시추해 확산한 양을 평가하게 된다. 이 실험을 통해 수착성 및 비수착성핵종간 확산특성 차이, 확산깊이의 제한치 여부, 화학종별 확산깊이 등을 측정한다. 또한, 수착성 용질의 장기간 암반표면과 화학반응 및 수착특성도 분석한다.

5. 결 론

한국처럼 원자력을 주된 에너지로 사용하는 국가에서 방사성 폐기물 처분은 중요한 국가 사회적인 환경문제이다. 그러므로 생태계와 생활환경의 보전 측면에서 안전하고 장기적인 관리를 위해서는 심도 깊은 연구가 필

요하다. 즉 처분장의 부지선정과 건설, 처분장의 폐쇄와 감시 등 기술적 실증, 환경 안전의 실증, 경제성 등 다양한 측면에서 고려해야 한다. 따라서 고준위 폐기물의 장기 안전관리를 위한 처분장의 확보와 시설의 안전성 입증을 위하여 장기적이고 체계적인 연구와 실증을 위한 계획의 수립과 추진이 요구된다. 그 중에서도, 방사성핵종이 장기간의 시간경과 동안 처분장에서 누출되어 생태계로 이동할 수 있는 가능성에 대한 연구가 핵심사항에 해당한다. 즉, 방사성핵종의 이동지연특성을 정량적으로 나타내는 수리전도도(K), 수착분배계수(K_d), 확산계수(D), 지연인자(R)등을 실험실 뿐만 아니라 현장실험으로 측정, 검증해야 한다. 국내 KURT를 활용한 현장실험자료는 앞으로 경주 중저준위 방사성폐기물 처분장 설계 및 인허가과정뿐만 아니라 향후 고준위폐기물처분에 많은 기여를 할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Almen, K and Stenberg, L., 2005, ÄSPÖ hardrock Laboratory: characterization methods and instruments, SKB/TR-05-11.
2. Kinzler B., Vejmelka, P. and Gortzen, A. 2003, Actinide migration experiment in the ÄSPÖ HRL in Sweden, FZKA 6925.
3. Smith P.A. Alexander, W.R. and McKinley, I.G., 2000, The Nagra-JNC in situ study of safety relevant radionuclide retardation in fractured crystalline rock, Nagra TR 00-09.
4. Park, C.K., Vandergraaf, T.J., Drew, D.J. and Hahn, P.S., 1997, Analysis of the migration of nonsorbing tracers in a natural fracture using a variable aperture channel model, J. of Cont. Hydrol. 26, 97-108.

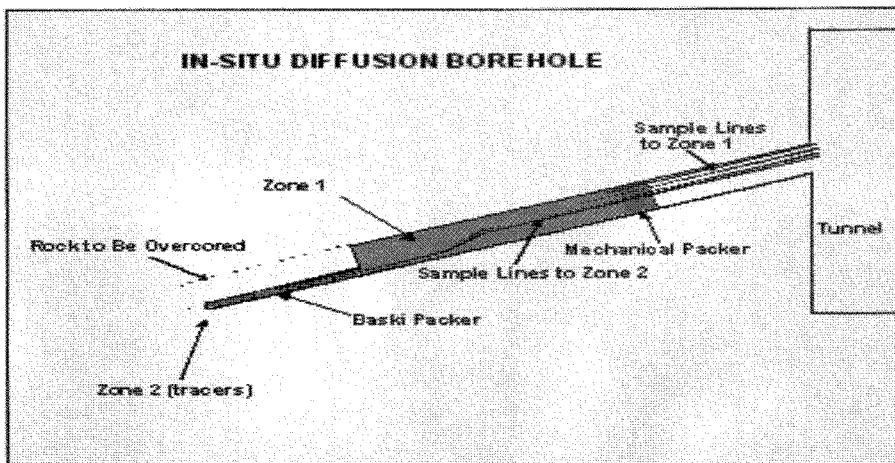


그림 7. 현장암반에서 화학종 확산실험 개념도

5. Geckeis, 1999, CRR-Task2- detailed and long-term laboratory experiments, AN99-219.
6. AERE-R-11287, 1984, Analysis of steady-state hydraulic tests in fractured rock.
7. Park, C.K, Cho,W.J., and Hahn,P.S, 2006, Transport properties of sorbing contaminants in a fractured granite under oxidizing conditions, Kor. J. Chem. Eng. 23(5), 741-746.
8. Heer, W. and Hadermann, J., 1996, Modelling radionuclide migration field experiments, Nagra TR 94-18.
9. Nagra, 2002, Grimsel test site phase V, international steering committee meeting, May 22, Interlaken, Swiss.
10. SKB, 2006, ÄSPÖ Hard rock laboratory annual report, SKB TR 06-10.

박정균



1980년 서강대학교 화학공학과 학사
 1982년 서강대학교 화학공학과 석사
 1992년 한국과학기술원 화학공학과 박사

Tel: 042-868-2851
 E-mail: ckpark@kaeri.re.kr
 현재 한국원자력연구소 방사성폐기물처분 연구부 책임연구원

백민훈



1988년 연세대학교 화학공학과 학사
 1990년 한국과학기술원 원자력공학과 석사
 1994년 한국과학기술원 원자력공학과 박사

Tel: 042-868-2089
 E-mail: mhbaik@kaeri.re.kr
 현재 한국원자력연구소 방사성폐기물처분 연구부 책임연구원

최종원



1980년 한양대학교 원자력공학과 학사
 1982년 한양대학교 원자력공학과 석사
 1992년 한양대학교 원자력공학과 박사

Tel: 042-868-8198
 E-mail: njwchoi@kaeri.re.kr
 현재 한국원자력연구소 방사성폐기물처분 연구부 부장