

## 절리암반에서의 시추공 투수시험을 통한 수리정수 평가에 관한 고찰

김형목, 신중호(한국지질자원연구원)

安藤賢一((株)大林組)

### 1. 서론

최근, 방사성 폐기물의 지중처분 및 이산화탄소와 같은 환경위해가스의 지중처분 등과 관련하여 지하 심부 암반에서의 수리지질학적 구조 및 특성을 파악할 필요성이 증대되고 있다. 이에 따라, 지하 심부 암반의 투수성 평가를 합리적 및 효율적으로 수행하는 것이 기술적 과제로 제기되고 있다.

기존의 정상(定常)투수시험 중의 하나인 루전(Lugeon)시험은 일정 수준의 품질을 보증하면서 비교적 용이하게 투수계수를 평가하는데 있어 유용한 수단이다. 하지만, 지하 심부에서 일반적으로 관찰되는 저투수성의 암반의 경우 안정된 수압변동 자료를 얻기 곤란하며 정상상태까지 이르는 시간이 길어진다는 문제가 발생한다. 순간수위변화시험에 해당하는 펄스시험(pulse test) 혹은 슬러그시험(slug test) 및 양수시험(pumping test)등의 투수시험에 있어서도 시추공 주변의 모암과 상이한 투수성을 띠는 스킨(skin)영역 및 균열의 연결특성에 기인한 유동차원(flow dimension) 등의 수리모델의 선정에 따라 복수의 해석해가 존재하고 상이한 수리지질학적 특성평가가 이루어질 수 있는 문제가 지적된 바 있다<sup>(1,2)</sup>.

한편, 비저류계수 등의 평가를 위해서는 복수의 시추공을 이용한 비정상 투수시험이 유용하나, 저투수성의 지하 심부 암반에 복수의 시추공을 인접하여 굴삭하는 것은 경제성 측면에서 비효율적이라 할 수 있다. 특히, 고준위 방사성 폐기물 지중처분 및 이산화탄소의 지중처분 사업의 경우, 지하 수백미터의 암반을 대상으로 하고 있기 때문에 이들 대상 심도까지의 시추공을 이용한 투수시험이 요구된다.

따라서, 본 연구에서는 지하 심부의 저투수성 암반 혹은 시추공 주변에 저투수성 스킨 영역이 존재하는 경우의 수리특성평가에 있어서 복수의 수위변동과정을 포함하는 단공식(單孔式)비정상 투수시험에 의한 투수특성평가가 중요하다고 판단하여 수치모의시험에 의해 기존의 해석방법과 비교·검토함으로써 그 적용성 및 필요성을 확인하는 것을 목적으로 하였다. 또한, 제한된 숫자의 고심도 시추공을 이용한 충분하고 정확한 정보의 획득을 목적으로 복수의 시추공 투수시험용 상세해석코드에 의한 평가결과 및 설정내용을 상호 비교·분석함으로써 시추공 투수시험을 통한 투수특성 평가에 내재되는 불확실성 및 중요영향인자를 도출해 보았다.

## 2. 본론

### 2.1 수치모의시험에 의한 단공식 투수시험에서의 수리정수 평가

#### 2.1.1 연구방법 및 내용

본 연구에서는 먼저 대상 암반의 투수성을 설정하고, 루전시험 및 비정상 투수시험에서의 모의(模擬) 원위치 데이터를 수치모의시험을 통해 작성하였다. 수치모의시험을 통해 작성된 수압변동 데이터를 이용하여 투수시험 평가해석코드를 이용한 수리정수의 평가를 수행하였다. 평가수행에 있어 기존의 루전해석 및 표준곡선해법에 의한 개별적인 수위변동과정에 대한 해석뿐만 아니라 수치해석을 통해 일련의 수위변동과정(예를들면, 펄스시험, 슬러그시험, 양수시험 및 양수후 회복시험 등)의 조합으로 구성된 비정상 시험을 동시에 최적화하는 해석도 실시하였다. 표준곡선해법에는 AQTESOLVE<sup>(3)</sup>을, 수치해석에 의한 해법에는 nSights<sup>(4)</sup>해석코드를 이용하였다.

#### 2.1.2 스킨영역이 형성된 시추공을 이용한 루전시험에 의한 투수성 평가

대상 암반에서의 루전시험시의 수압 및 유량변동을 계단식 주입/양수시험으로서 비정상 시추공 투수시험 해석코드인 nSights를 이용하여 수치적으로 재현하였다(그림 1). 시추공 주변에는 모암과 투수성이 상이한 스킨영역을 설정하였다. 모암에 관한 투수정수의 설정치 및 루전시험조건과 스킨영역에 관한 파라미터치를 표 1, 2에 각각 정리하였다.

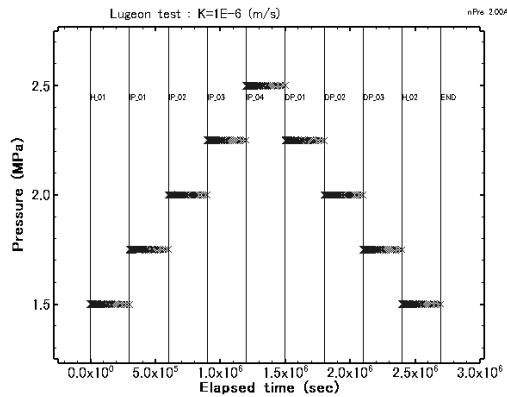


그림 1. 수치모의시험에 의한 루전시험에서의 압력변동데이터

표 1. 수치모의시험에 이용한 대상암반의 수리정수 및 시험조건

Formation permeability (m/sec)	1.0E-6
Formation specific storage (1/m)	1.0E-7
Hydrostatic pressure (MPa)	1.5
Tested interval length (m)	1.0
Borehole radius (m)	0.076
Pressure step	4 steps in both pressure increase and decrease
Max. elapsed time at each pressure step(sec)	300,000(approximately 3.5 days)
Max. pressure difference at increase/decrease (MPa)	1MPa (0.25 MPa×4 steps, total 8 steps)

표 2. 수치모의시험에 이용한 스킨영역 수리정수

Skin zone permeability (m/sec)	1E-4, 1E-5, 1E-7, 1E-8 (4 cases)
--------------------------------	----------------------------------

Skin zone specific storage (1/m)	The same with formation specific storage
Skin zone radius (cm)	5.0

시추공 주변에 스킨영역이 형성된 암반에서의 루전시험에 의한 수리정수 평가결과를 표 3에 제시하였다. 고투수성의 스킨에 의한 모암의 투수계수 평가치에의 영향은 상대적으로 작았으며, 저투수성의 스킨이 형성된 경우 투수계수 평가치는 과소평가될 수 있음을 알 수 있다. 그러나, 실제 스킨영역의 존재를 시험시의 압력변동 데이터만으로 확인하는 것은 어렵기 때문에, 얻어진 압력 데이터를 이용하여 단순히 투수성 평가를 수행하는 경우 모암의 투수성을 과소평가하여 결과적으로 구조물 건설시의 유입수량이 과소평가되거나 위험물질의 이동시간이 과대하게 평가될 가능성이 있음에 주의할 필요가 있다. 또한, 루전시험은 정상 상태에서의 평가이기 때문에 시간의존성 변수인 비저류계수 등의 추정은 불가능하다. 한편, 수치해석을 이용한 최적화 해석에서는 시간경과에 따른 압력변동 대신에 유량값을 추정변수로 설정함으로써 시간의존성 파라미터인 비저류계수를 추정하는 것도 이론적으로는 가능하다.

표 3. 루전시험에 의한 수리정수 평가 결과

	High permeable skin zone		Without skin zone	Low permeable skin zone	
Skin zone permeability (m/sec)	1.00E-04	1.00E-05	1.00E-06	1.00E-07	1.00E-08
Estimated permeability (m/sec)	1.06E-06	1.05E-06	1.00E-06	6.76E-07	1.59E-07
Error with prescribed permeability (%)	6.0	5.0	-	-32.4	-84.1

(error=(estimated-prescribed)/prescribed x 100%, prescribed permeability=1.0E-6, and positive error indicates an overestimation, negative does underestimation)

### 2.1.3 스킨영역이 형성된 시추공을 이용한 표준곡선해법에 의한 투수성의 평가

전술한 루전시험과 동일한 방법으로, 복수의 수위변동 과정의 조합으로 구성된 모의투수 시험시의 수압변동데이터를 nSights를 이용한 수치시험에 의해 생성하였다. 시추공 주위에는 모암에 비해 저투수성의 스킨영역을 설정하였다. 수위변동과정은 펄스시험(PW1) - 슬러그시험(SW) - 슬러그 시험 후의 회복시험 (SWS) - 일정유량 계단식 양수시험 (RW1-RW2-RW3) - 일정유량 양수시험 후의 회복시험 (RWS) - 펄스시험 (PW2)순으로 설정하였다. 그림 3에 모의수치시험으로 부터 얻어진 수압변동이력을 나타내었다. 한편, 시추공 주변 스킨영역에 설정한 파라미터는 표 3과 같으며, 모암의 파라미터는 루전시험시의 조건(표 1)과 동일하게 설정하였다. 표 4에는 각각의 개별수위변동과정의 해석에 이용한 해석수법을 제시하였다.

표 3. 수치모의시험에서의 입력정수

Skin zone permeability (m/sec)	1.0E-7(skin zone #1), 1.0E-8(skin zone #2)
Skin zone specific storage (1/m)	The same with formation specific storage
Skin zone radius (cm)	5.0

표 4. 표준곡선해석에서 사용한 해석수법

Hydraulic test event	Analysis method
Pulse Withdrawal test (PW)	Cooper-Bredehoeft-Papadopulos(1967) and Bouver-Rice(1976)
Slug Withdrawal test (SW)	Cooper-Bredehoeft-Papadopulos(1967)
Pumping test (RW)	Theis(1935) step-drawdown
Recovery test after slug and pumping test (SWS and RWS)	Theis(1935) recovery method

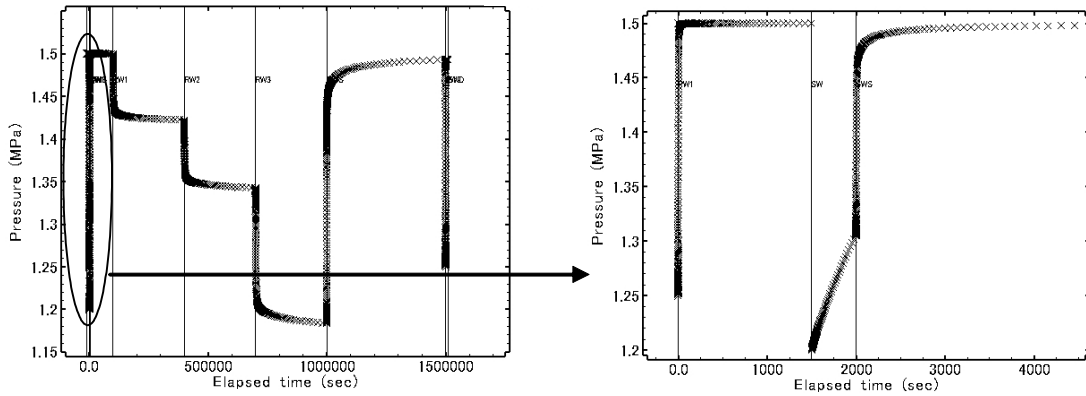


그림 3. 수치모의 시험에 의한 수압변동 데이터

개별 수위변동과정으로부터 계산된 투수계수의 평가치를 표 5에 제시하였다. 상대적으로 짧은 시간 동안의 시추공 주변 모암에서의 수압변동을 대상으로 하는 펄스 및 슬러그 시험에 의한 평가치는 시추공 주변의 저투수성의 스킨영역의 영향으로 설정치와 큰 차이를 보이며 모암의 투수성을 과소평가하는 결과를 보였다. 자연적으로 모암과 스킨영역의 투수계수의 차이가 상대적으로 큰 경우에(스킨영역 #2의 경우) 그 오차는 더욱 커짐을 확인할 수 있었다.

표 5. 표준해석수법에 의한 수리정수 평가 결과

Hydraulic test event	Without skin zone		With skin zone #1		With skin zone #2	
	conductivity (m/s)	error (%)	conductivity (m/s)	error (%)	conductivity (m/s)	error (%)
PW	9.71E-07	-2.9	6.24E-07	-37.6	1.18E-07	-88.2
PW-BR	8.64E-07	-13.6	4.09E-07	-59.1	6.87E-08	-93.1
SW	9.65E-07	-3.5	7.86E-07	-21.4	1.54E-07	-84.6
RW1	9.86E-07	-1.4	8.78E-07	-12.2	1.85E-07	-81.5
RW1-3 (step-drawdown)	1.07E-06	7.0	7.42E-07	-25.8	3.01E-07	-69.9
RWS	9.55E-07	-4.5	8.55E-07	-14.5	7.08E-07	-29.2

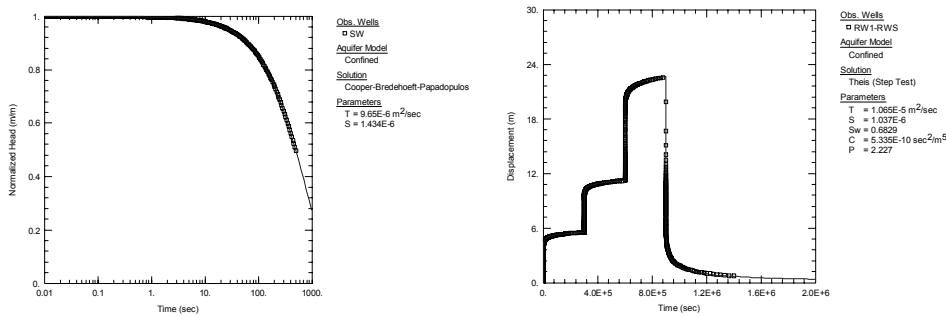
PW-BR indicates Bouver-Rice method. RW1 is analysis of RW1 only, and RW1-3 is analysis of RW1 to RW3 (prescribed hydraulic conductivity = 1.0E-6 [m/s], error=(estimated-prescribed)/prescribed x 100%, and positive error indicates an overestimation, negative does underestimation)

그림 2는 스킨영역이 존재하는 시추공을 이용한 슬러그 시험 및 계단식 양수시험의 표준

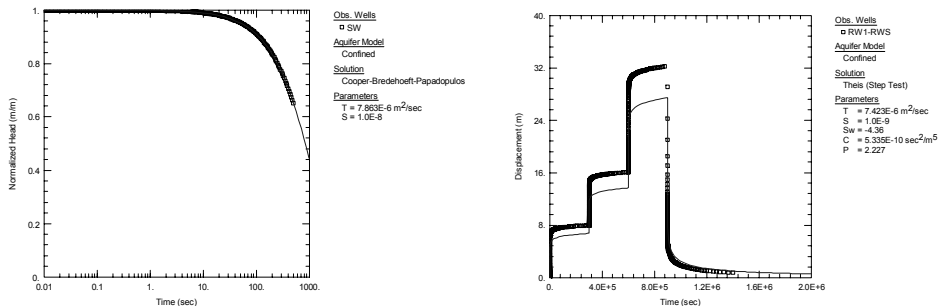
곡선해석법에 의한 결과를 나타낸다. 계단식 양수시험은 양수량을 3단계에 걸쳐 단계적으로 증가시키는 복수의 양수시험으로 구성되었다. 표준곡선해석에서는 기본적으로 개별적인 투수시험에 기초한 해석을 수행하기 때문에 그 값의 진위여부에 관계없이 시험을 통해 얻어진 압력변동에 근사된 수리정수해가 존재함을 알 수 있다(그림 2(b)의 왼쪽그림). 이 경우, 스킨영역에 의한 영향은 고려되지 않기 때문에 모암의 수리정수는 실제와는 다른 값으로 평가되게 된다.

한편, 그림 2(b)에 제시한 대로 복수의 시험으로 구성된 계단식 양수시험(그림 2(b) 오른쪽)의 경우, 표준곡선해석에 의한 최적화 결과가 서로 다른 시험을 동시에 만족시키지 못하고 계측치로부터 크게 벗어나고 있는 결과를 볼 수 있다. 이러한 오차의 원인으로 시험현장에 기인한 원인(본 연구에서는 스킨영역의 존재) 및 해석상의 오류(해석에 이용한 수리모델 및 경계조건 등)를 생각할 수 있다. 이에 복수의 수위변동과정을 조합하는 시험의 의의가 있다고 할 수 있다.

이러한 결과로부터 상대적으로 장시간에 걸쳐 시추공 주변의 광범위한 영역을 대상으로 한 양수시험시의 수압변동에 기초한 평가가 요구되며 그것이 불가능할 경우 특정의 단일시험 수위변동보다는 복수의 수위변동과정에 의한 수압변동 데이터에 기초한 투수성 평가가 수행되어야 할 것으로 생각된다.



(a) Without skin zone (dot: measured, line: simulated)



(Estimated permeability = 7.86E-7 m/sec)

(Estimated permeability = 7.42E-7 m/sec)

(b) With skin zone (dot: measured, line: simulated)

그림 2. 슬러그 시험 및 계단식 양수 시험에서의 표준곡선해석 결과

(위: 스킨영역이 형성되지 않은 경우, 아래: 스킨영역이 형성된 경우)

## 2.2 시추공 투수시험 해석에서의 불확실성의 평가

### 2.2.1 연구방법 및 내용

복수의 투수시험 해석코드에 의한 결과의 상호 비교·검토에 있어서는, 계측 데이터를 비롯한 기본적인 현장시험자료(투수시험 현장기록, 시추공 상태 기록, 코어관측기록, 시추공 텔레비전 관측기록)를 각각의 해석자에게 제공하고 그 외의 해석에 요구되는 세부적인 사항은 각 해석자가 독자적인 판단에 의해 설정함을 원칙으로 하였다. 따라서 해석자의 경험을 평가에 충분히 반영하는 것이 가능하였고, 서로 다른 모델에 의한 해석 파라미터의 설정 및 그 결과를 상호 비교함으로써 투수시험해석에 있어서의 불확실성을 파악하고 중요영향인자를 도출하였다.

### 2.2.2 시추공 투수시험 데이터

시추공 투수시험은 대상암반의 투수성을 고려하여 순간수위강하시험에 해당하는 펄스(pulse) 및 슬러그(slug) 시험과 정류량 양수시험(constant flow pumping test)등의 시험 종류 및 순서에 대한 충분한 검토를 수행한 후 실시하였다. 본 연구에서 이용한 계측수압변동 이력은 그림 3과 같다.

No. 1 시험은 펄스 시험(PW), 슬러그 시험(SW), 슬러그 시험 후 회복시험(SWS)의 순서로, No. 2 시험은 펄스시험(PW1), 슬러그시험(SW), 슬러그시험 후 회복시험(SWS), 양수시험(RW1~3), 양수시험 후 회복시험(RWS), 펄스시험(PW2)의 순으로 구성되었다.

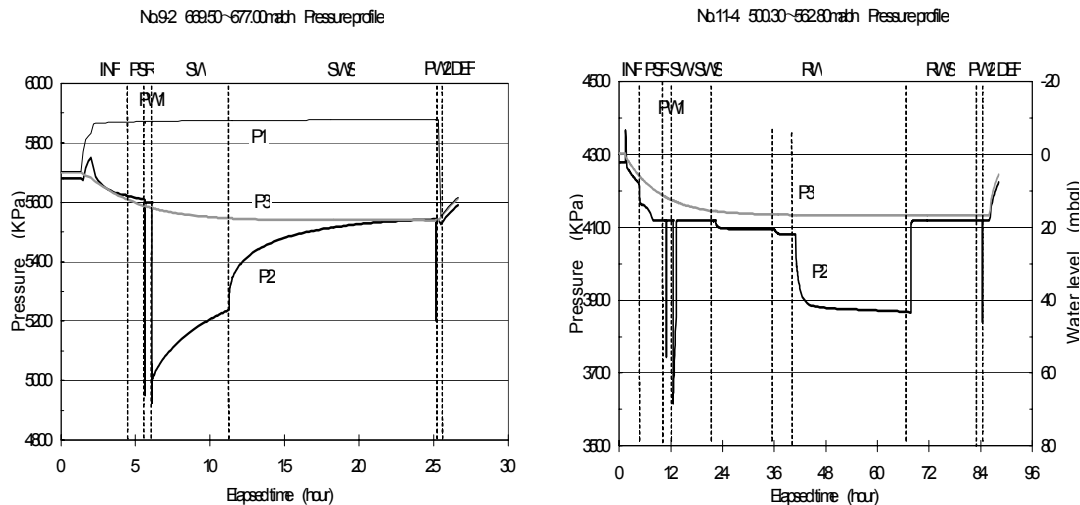


그림 3. 시추공 투수시험 데이터 (왼쪽: No 1 시험, 오른쪽: No. 2 시험)

### 2.2.3 시추공 투수시험 해석에 이용한 해석코드

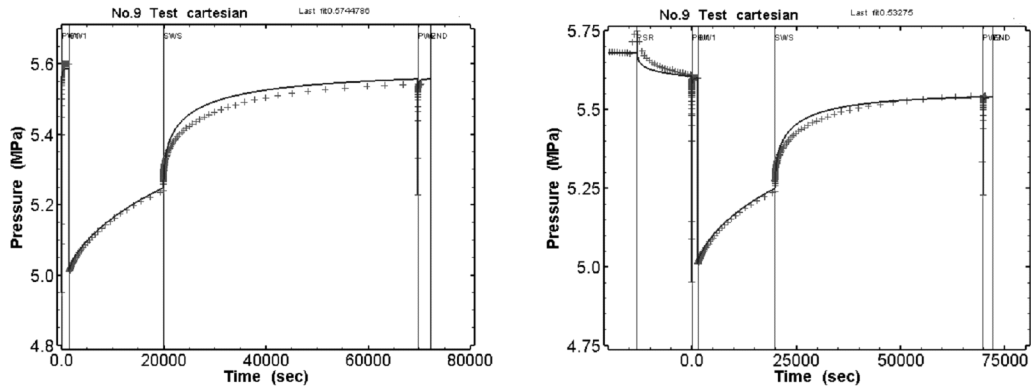
본 연구에 이용한 시추공 투수시험용 평가코드로는, 각각의 개별적인 수위변동과정(펄스, 슬러그, 양수 시험등)에서의 표준곡선해법에 의한 평가코드(AQTESOLVE)뿐만 아니라 본래는 다상유체유동 해석코드인 TOUGH2<sup>(5)</sup>와 그 역해석 코드인 ITOUGH2<sup>(6)</sup>의 조합, 전수위변동과정을 대상으로 히스토리매칭(history matching)을 이용한 수치해석코드(nSights, MULTISIM<sup>(7)</sup>)를 채택하였다. 각 해석코드의 특징을 표 6에 정리하였다.

표 6. 수리정수 평가에 사용한 해석코드의 종류 및 특징

Code	AQTESOLV	TOUGH2/ITOUGH2	nSights	MULTISIM
Parameter estimation	Type curve fitting	Multi-phase flow analysis with iterative calibration procedure	Optimization by history matching	Optimization by history matching
Diagnostic analysis	○	×	○	○
Pre-test pressure history	×	○	○	○
Flow geometry	×	○	○	○
Alternative models	×	○	○	○

## 2.2.4 수리정수 평가결과

No. 1 시험의 경우, 시험 후반부에 실시된 SWS시험에서의 회복압력이 시험 전반부에 실시된 PW의 회복압력보다 확연히 낮은 점으로부터 시추공 굴착에 이용된 굴삭수압에 의한 영향이 예상되었다 (그림 4). 모든 해석팀에서 그 영향을 고려함으로써 해석결과의 개선을 확인할 수 있었다. 그림 4는 nSights를 이용한 해석결과 예로, 굴삭수압의 영향을 고려한 SWS 후반부의 해석치가 계측치에 보다 근접함을 확인할 수 있다(그림 4 오른쪽).

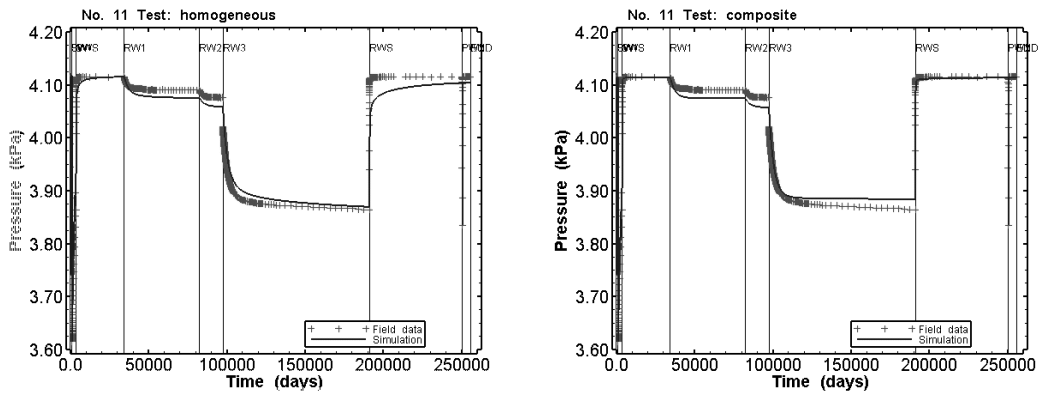


\*dot: measured, line: simulated

그림 4. No 1 시험에서의 수리정수 평가해석 결과(왼쪽: 굴삭수압의 영향을 고려하지 않음, 오른쪽: 굴삭수압의 영향을 고려함)

투수시험 해석에서 가장 일반적인 불확실성 요소로서 유동모델을 들 수 있다. 균질 암반에서는 반경방향 수평방사유동이 통상적으로 적용되지만, 질리가 발달된 균열성 암반에서는 수평방사유동을 이용한 계측데이터의 재현 및 설명이 곤란한 경우가 종종 발생된다. 여기서 주의할 점은 계측 데이터의 재현이 가능하였다 할지라도 현장상황에 부적합한 유동모델을 통해 얻어진 투수파라미터는 대상 암반의 투수특성을 크게 왜곡할 수 있다는 사실이다. 이러한 결과는 개별 수위변동 과정만을 대상으로 한 해석에서 더욱 자주 발생할 수 있다. No. 2 시험의 경우, 각 해석자의 상세설정내용은 약간 상이하였으나 추천된 최적모델로서 시추공 주변에 모암과 상이한 투수특성을 가지는 스킨영역을 가지는 복합모델(composite model)이 공통적으로 제시되었다. 한편, AQTESOLVE에서는 복합모델을 적용할 수 없었고, TOUGH2/ITOUGH2에서는 복합모델을 위한 복잡한 메쉬의 작성이 필요하였기 때문에 이를 고려하지 않았다. 복합 모델을 적용한 No. 2 시험의 해석결과 예를 그림 5에 제시하였다. 복합모델을 적용한 해석결과(그림 5 오른쪽)에서 특히 RWS 과정의 초기 압력회복거동의

개선을 확인할 수 있었다.



\*dot: measured, line: simulated

그림 5. No 2 시험에서의 수리정수 평가해석 결과(왼쪽: 수평방사모델, 오른쪽: 복합모델)

개별 수위변동 과정뿐만 아니라 투수시험에서 수행된 복수의 수위변동과정의 전체수압변동 데이터를 동시에 고려하여 투수파라미터의 평가를 수행하는 공통점을 가지는 nSights와 MULTISIM에서 이용된 복합모델은 크게 2가지 점에서 상이하였다. 첫번째는 시추공 주변의 유동모델이고, 두번째는 스킨영역의 범위이다. nSights를 이용한 해석에서는 스킨 영역 반경을 5cm로 결정론적으로 설정하고 주변 대상암반과 마찬가지로 수평반경방향 방사유동 모델을 설정하여 평가하였다. 한편, MULTISIM을 이용한 해석의 경우, 스킨 영역 내 유동을 구형유동 (spherical flow)으로 설정하고 60m의 스킨 영역반경을 해석조건으로 하였다. 이러한 차이로 인해 투수계수의 평가치는 그 차이가 다를 정도의 상이한 결과를 보여, 반경 방향의 거리에 따라 유동면적이 증가하는 구형유동모델을 적용한 해석결과에서는 상대적으로 저투수성의 결과를 보였다 (표 8).

No. 1 및 No. 2 시험에서 얻어진 전 해석모델에 의한 투수계수 평가치를 표 7 및 표 8에 제시하였다. 특히, No. 1 시험결과에서는 개별 수위변동과정을 대상으로 표준곡선해법에 의해 평가된 투수계수가 시험전체 수위변동과정을 대상으로 한 수치해석적 방법에 의해 평가된 투수계수보다 다소 높게 평가됨을 볼 수 있다. 이는 굴착수압의 영향이 고려되지 않은데 따른 수압강하량의 과대평가에 기인하는 것으로 생각된다.

표 7. No. 1 시험에서 각 해석코드에 의한 수리정수 평가 결과

Analysis code	Type of pressure drop/flow model	Estimated hydraulic conductivity
Field report	SWS	7.07E-09
AQTESOLVE	PW1	7.51E-08
	SW	2.31E-08
	SWS	3.21E-08
	PW2	6.99E-08
iTOUGH2	-	1.30E-09**



nSights	Homogeneous	5.15E-09
	Composite	4.42E-09
	General Radial Flow	5.80E-07*
Multisim	Composite	3.30E-09

(\*: maximum estimation, \*\*: minimum estimation)

표 8. No. 2 시험에서 각 해석코드에 의한 수리정수 평가 결과

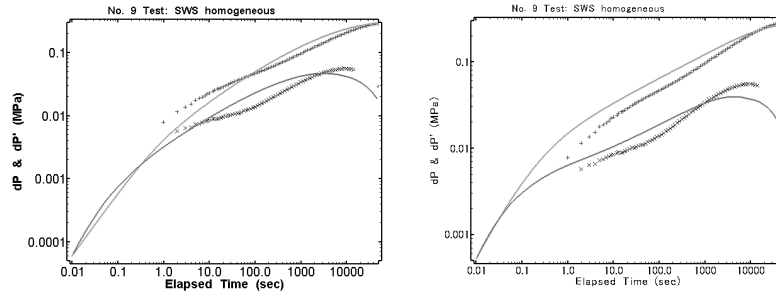
Analysis code	Type of pressure drop/flow model	Estimated Hydraulic conductivity
Field report	PW1	1.98E-08
	SW	1.71E-08
	SWS	1.97E-07
	RW1	2.10E-07
	RWS	8.26E-07
	PW2	2.03E-08
AQTESOLVE	PW1	8.93E-08
	SW	2.41E-08
	SWS	7.31E-07
	RW1	8.00E-08
	RW1-3	3.76E-08
	RWS	9.39E-07*
	PW2	7.28E-08
iTOUGH2	-	3.21E-08
nSights	Homogeneous	4.20E-08
	Composite	3.51E-07
	General Radial Flow	3.61E-09**
Multisim	Composite	1.30E-08

(\*: maximum estimation, \*\*: minimum estimation)

한편, 시추공 투수시험 평가에서는 일반적으로 수평방향 방사유동을 가정하고 있기 때문에 2.0의 결정론적 유동차원을 설정한다. 여기서는 수치해석을 이용한 역산코드인 nSights을 이용하여 유동차원을 투수파라미터와 함께 역추정해 보았다. 그 결과, No. 1 및 No. 2 시험에서의 유동차원은 각각 1.4와 3.0으로 평가되어 전술한 계측결과를 이용한 평가 결과에 근사함을 확인하였다. 또한, No. 2 시험의 압력변동량 곡선에서의 해석결과를 통해 계측치에 보다 근접한 해석결과를 얻을 수 있었다 (그림 6).

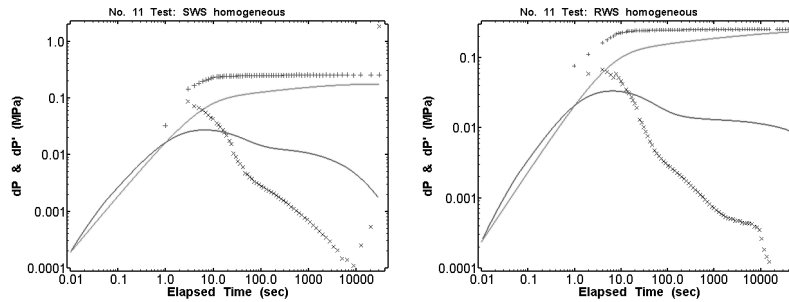
그러나, 일반 방사상 유동모델에서의 유동차원을 이용한 투수계수의 평가치(표 7 및 표 8)는 통상적인 방사유동 모델결과와 비교하여, No. 1시험에서는 고투수성의 결과를, 반대로 No. 2 시험에서는 저투수성의 결과를 보였다. 결과적으로, 불확실성을 나타내는 수리정수 평가치의 분포범위가 확대되는 결과를 가져왔다. 또한, 서로 다른 2개의 유동모델로 부터 유사한 복수의 압력 변동량 곡선이 얻어지는 결과도 볼 수 있었다(그림 6 (a) 와 (b)). 따라서 평가된 수리정수를 향후의 광역 지하수 유동해석에 이용하기 위해서는 보다 상세한 유동모델에 관한 검증이 필요할 것으로 생각된다. 또한, 유동수량 등과 같은 수압데이터와 이질적인 성격의 데이터를 이용한 검증이 추가적으로 요구된다. 그 예로서 시추공으로부터 얻어진 지질정보자료를 바탕으로 한 균열망 모델을 작성하고, 가상시추공 주변의 3차원 수치해석을 실시하여 유동 양상을 확인하고 시추공 투수해석에 이용된 유동모델의 타당성을 검증하는

방법 및 수직갱도 굴착 등에 따른 유입수량에 의한 검증방법 등이 이용될 수 있을 것으로 생각된다.



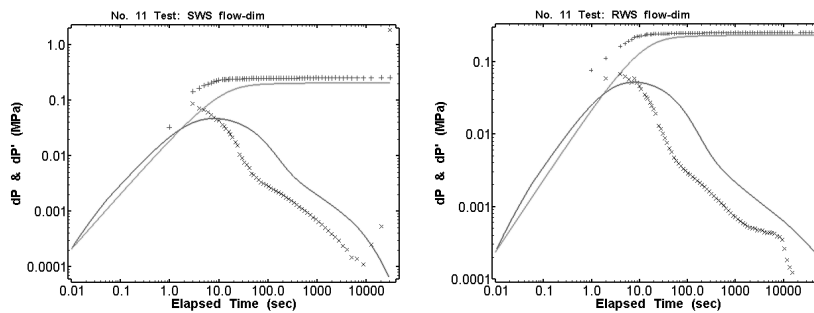
(a) No. 9 test, flow dimension: 2.0(SWS) (b) No. 9 test, flow dimension: 1.4 (SWS)

\*dot: measured, line: simulated



(c) No. 11 test, flow dimension: 2.0 (left: SWS, right: RWS)

\*dot: measured, line: simulated



(d) No. 11 test, flow dimension: 3.0 (left: SWS, right: RWS)

\*dot: measured, line: simulated

그림 6. 유동차원에 따른 해석결과의 비교

### 3. 결론

수량에 한계가 있는 고심도 시추공을 이용한 지하 심부 암반의 수리정수 평가의 효율적

인 수행을 목적으로 시추공 주변 평가대상 암반보다 저투수성의 스킨 영역이 수리정수 평가에 미치는 영향을 수치모의시험 데이터를 이용하여 검토해 보았다. 스킨 영역의 형성을 고려하지 않은 기존의 해석 방법으로는 대상 암반의 투수성을 과소평가할 수 있음을 확인하였고, 스킨 영역의 확인 방법의 일례로 복수의 수위변동과정을 포함하는 일련의 투수시험을 실시하는 것을 제안하였다.

또한, 시추공을 이용한 수리정수 추정에서의 불확실성 및 해석상의 중요영향인자를 평가하여 향후의 투수시험 설계에 활용할 목적으로 기존 시추공 투수시험 데이터를 서로 다른 해석자에 의한 복수의 해석코드를 이용하여 재평가하였다. 복수 해석모델 접근법을 통해 해석과정에서의 설정내용 및 투수시험 해석결과를 상호 비교·분석함으로써 투수파라미터 추정에서의 잠재적인 불확실성 및 해석상의 중요 영향인자를 도출하였다. 유동차원으로 대표되는 시추공 주변 유동모델의 설정이 수리정수의 평가결과에 큰 영향을 미치는 불확정성 인자임을 확인하였다.

본 연구 결과는 방사성 폐기물 지중처분 및 이산화탄소로 대표되는 환경위해가스를 심부 지층에 처분하기 위한 부지특성조사 단계에서의 조사 설계 및 평가에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 이를 바탕으로 적절히 설계된 시추공 수리시험 결과로서 얻어지는 대상 암반의 수리정수 값들은 향후의 지하수 유동 해석 등에 보다 정도 높은 입력변수로 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

## 참고문헌

1. 성현정, 김용제, 이철우, 김구영, 우남철, 균열암반에서의 양수시험자료 해석과 일반 방사상 유동모델의 적용성 연구, 자원환경지질, 38(2), pp.177-185, 2005
2. 橋本秀爾、田中達也、安藤賢一、竹内真司、三枝博光、金亨穆、単孔式の水理試験による透水特性パラメータの評価方法に関する研究、第36回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp. 417-424, 2007
3. HydroSOLVE Inc., 2003, AQTESOLV for Windows, User's Guide, Reston, VA.
4. INTERA Inc., 1996, GTFM - User Documentation: Final Description, Theoretical Development, and Software Architecture: Internal Report.
5. Pruess, K., 1991, TOUGH2 -A general Purpose Numerical Simulator for Multiphase Fluid and Head Flow, Lawrence Laboratory Report LBL-31114, Berkeley, CA.
6. Finsterle, S., 1997, ITOUGH2 user's guide, Version 3.1, Report LBNL-40400, Lawrence Laboratory Report LBL 40400, Berkeley, CA
7. Colenco Power Engineering Ltd., MULTISIM User's manual, Internal Report