

장심도 시추공 정밀수리시험 장비 구축

김경수* · 박경우 · 지성훈

한국원자력연구원 방사성폐기물기술개발부

The Development of Straddle Packer Hydraulic Testing Equipment to Characterize Permeability in Deep Boreholes

Kyung-Su Kim*, Kyung-Woo Park, and Sung-Hoon Ji

Radioactive Waste Technology Development Dept., Korea Atomic Energy Research Institute

현재 국내의 수리시험 장비는 적절한 장비가 갖추어지지 않은 상태로 시행되고 있기 때문에 투수성 해석 자료의 신뢰성은 그리 높다고 볼 수 없다. 본 연구는 고도의 정밀성을 요구하는 고준위폐기물의 처분기술 개발을 위해서는 무엇보다도 자연 방벽에 대한 특성 평가가 중요하므로 현행 시험 장비의 기술적 문제들을 해결하기 위한 목적으로 장심도 (1,000 m) 시추공에서 정밀한 수리시험이 가능한 장비를 성공적으로 구축하였다. 본 장비에서 가장 중요하게 반영된 기술사항은 공내 저류 효과를 최소화시키기 위하여 H-DHSIV를 장착하고, 시험 자료의 품질을 향상시키기 위하여 실시간으로 시험 구간을 포함한 3개 구간의 압력 변화자료를 취득할 수 있는 DAS를 구축한 것이다. 본 연구의 결과로 구축된 심부 시추공에서의 정밀 수리 시험 장비는 국내 현장조사 기술력의 획기적인 향상을 선도할 것이며, 방사성폐기물 처분기술 개발을 위한 연구와 부지 특성평가에 직접 적용될 것이다.

주요어 : 수리시험, 패커 시스템, 공내 투입장치, 압력 센서, 시험 구간 개폐밸브

The permeability characterization on the natural barrier for deep geological disposal of radioactive waste is very critical to evaluate total safety and performance assessment of disposal site. However, the confidence level in using previous hydraulic testing equipments consist of simple components to estimate rock mass permeability is not high enough to reflect in situ condition. The purpose of this research is to establish an advanced hydraulic testing equipment, which is applicable to deep borehole (up to 1,000 m), through the improvement of technical problems of previous packer systems. Especially, the straddle packer hydraulic testing equipment was designed to adopt both the hydraulic downhole shut-in valve(H-DHSIV) to minimize the wellbore storage effect and the real time data acquisition system to measure the pressure changes of test interval including its upper and lower parts. The results from this research lead to not only improve current technical level in the field of hydraulic testing but also provide important information to radioactive waste disposal technology development and site characterization project.

Key words : hydraulic test, straddle packer system, downhole equipment, pressure sensor, hydraulic downhole shut-in valve(H-DHSIV)

서 언

방사성폐기물 처분부지의 수리지질학적 투수성은 처분 시스템의 설계와 안전성 평가에 중요한 인자이기 때문에 신뢰성 있는 방법으로 평가하는 것이 무엇보다 중요하다. 현재 국내의 지반조사 현장에서 이루어지는 압반의 투수성

시험방법은 나공 상태에서의 간이 수리시험이나 양수시험, 또는 이중 패커(Fig. 1)를 이용한 주입/수위강하 시험 등이 적용되고 있다. 이러한 시험 방법은 적절한 장비가 갖추어지지 않은 상태로 시행되고 있기 때문에 투수성 해석 자료의 신뢰성은 그리 높다고 볼 수 없다.

현재 국내에서 일반적으로 적용되고 있는 수리시험 장

*Corresponding author: kskim@kaeri.re.kr

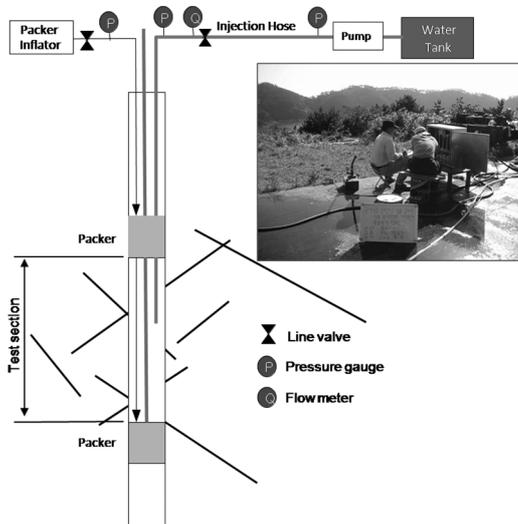


Fig. 1. A schematic example of common used hydraulic testing equipment for site investigation.

비의 문제점은 크게 (1) 시험 구간 내의 압력만을 지표에서 계측하고, (2) 시험 구간의 저류효과에 의한 영향이 크고, (3) 패커 시스템의 공내 이송수단으로 와이어라인과 PE 호스를 사용한다는 것이다. 그리고 (4) 시험 과정 중 패커 압력을 일정하게 유지하기 위해 수동으로 조절하고 있다.

첫 번째의 문제점은 시험 구간의 압력을 계측하기 위하여 지표까지 연결된 PE 호스 말단부에 라인밸브를 설치하여 밸브 폐쇄 상태에서 시험 구간의 압력을 얻고, 개방 상태에서는 호스에 부하되는 압력을 계측하고 있다. 시험 구간의 압력은 원위치 압력을 실시간으로 계측 가능하여야 함에도 지표에서 배압(back pressure)을 계측하고 있기 때문에 시험 구간에 가해지는 압력에 의하여 유체의 압축성에 영향을 미칠 수 있다. 또한 원위치 압력센서가 없게 되면 상하부 패커와 암반에서 일어 날 수 있는 누수현상을 알 수 없게 되어 잘못된 시험 결과를 얻을 수도 있다.

두 번째의 저류효과는 현행 장비의 여러 부분에서 초래되고 있는데, 먼저 shut-in 밸브가 지표에 위치하게 되면 PE 호스에서부터 시험 구간까지의 저류효과 영향이 매우 커지게 된다. 저류효과는 유체의 압축성에 비례하므로 PE 호스의 신축성에 의해서도 영향을 받을 수 있다. 또한, 시험 구간의 유체가 체적을 최대한 줄이는 것이 관건인데 상하부 패커 구간을 연결하는 스크린의 체적이 너무 작다. 저류효과를 직접적으로 설명해 주는 예는 Fig. 2와 같다. 동일한 시험 구간에 대하여 shut-in 밸브를 지표에 위치한 때와 상부 패커 직상부에 위치한 때의 시험 결과를 살펴보면,

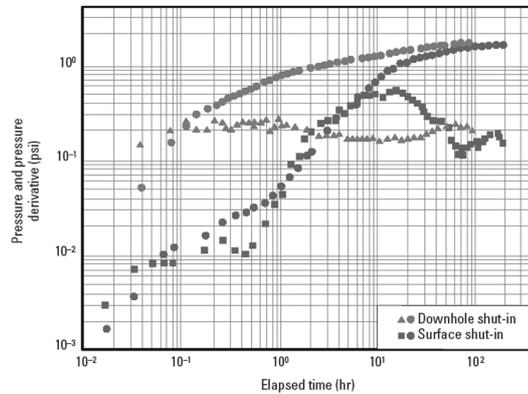


Fig. 2. Example of two well tests showing wellbore storage reduction with downhole shut-in valve (Joseph et al., 1988).

전자의 경우 공내 저류효과로 인하여 방사성흐름이 100시간 이후에 형성되지만, 후자의 경우에는 1시간 정도에서 형성됨을 알 수 있으므로 이들의 결과로부터 공내 저류효과를 효과적으로 최소화함을 알 수 있다.

세 번째의 패커 시스템 이송장치의 경우, 패커 시스템과 연결되는 튜브는 유체의 압력에 영향을 받지 않아야 하는데, 현행의 와이어라인을 이용한 PE 호스를 사용하게 되면 전체 중량이 가벼워진다는 장점은 있으나, 시험장치의 투입, 인양 과정의 안전성, 공내 사고 시 장치의 회수성, 그리고 전술한 바와 같은 유체의 압축성 등의 측면에서 시험결과와 신뢰도뿐만 아니라 시스템의 안전성 측면에서도 불리하다.

네 번째의 패커 압력 문제의 경우, 저투수성 시험 구간에서는 패커의 압력 변화에 의해 시험 결과에 직접 영향을 미칠 수 있으므로 패커의 압력에 대한 실시간 계측도 요구되고, 패커의 압력을 일정하게 유지할 수 있는 자동 압력유지 장치도 필요하다.

본 연구는 고도의 정밀성을 요구하는 고준위폐기물의 처분기술 개발을 위해서는 무엇 보다도 자연방벽에 대한 특성 평가가 중요하므로 전술한 현행 시험 장비의 기술적 문제들을 해결하기 위한 목적으로 장심도 (1,000 m) 시추공에 적용 가능한 수리시험 장비를 구축하였다.

기본 설계 요건

Straddle packer 시험 장비는 기본적으로 두 개 또는 그 이상의 팽창형 패커를 이용하여 시추공 내의 시험 구간을 격리시키게 된다. 수리시험은 시추 작업 중에 이루어질 수도 있으나 통상적으로 시추 작업이 모두 종료된 후에 시

행된다. 시추공에서 이루어지는 수리시험은 보통 수리지 질확적인 특성을 파악하기 위한 것이 주된 목적이다. 특히, 저투수성 매질 또는 방사성폐기물의 심지층 처분장과 같은 매질의 투수성을 평가하는 데는 장비의 성능이 무엇보다도 중요하다.

Bredehoeft and Papadopoulos (1980)은 펄스시험을 설명하고 그 시험 결과의 해석해를 제시하였다. Pickens et al. (1987)은 저투수성 매질에서의 수리시험에 대한 개관을 제시하였고 상세한 해석해를 제시하였다. Roberts et al. (1999)은 미국 뉴멕시코의 Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) 시설부지의 극저투수성 압염층의 지하터널에서 이루어진 수리시험 장치와 해석방법을 발표하였다. Avis et al. (2009)은 최근 정밀한 시험장비를 이용하여 캐나다 Bruce 부지 (중저준위폐기물 처분부지)에서 6개월에 걸쳐 2개의 시험공에서 47회의 수리시험을 시행하였으며, 600m 하부에 분포하는 오토비시안 저투수층의 수리전도도는 $10^{-14} \sim 10^{-13}$ m/s인 것으로 평가하였다.

전형적으로, straddle packer 시험 장치는 시험공에서 두 가지 형태의 수리시험법, 즉, 펄스시험과 순간충격시험에 유용하다. 순간충격시험에서는 시험 구간 내의 지하수체가 거의 순간적인 주입이나 배출에 반응하는 정도를 계측하게 된다. 펄스시험에서는 완벽하게 격리된 시험구간에서 순간적인 압력의 변화 (shut-in)에 반응하는 지하수압력의 변화를 기록하게 된다. 순간충격시험은 $10^{-6} \sim 10^{-9}$ m/s 범위의 수리전도도를 갖는 매질에 적합한 시험법이다. 반면에, 펄스시험은 10^{-10} m/s 이하의 저투수성 매질의 평가에 유용한 시험법이다. DST (drill-stem test) 방법은 펄스시험 다음에 순간충격시험을 시행하는 것으로 $10^{-8} \sim 10^{-10}$ m/s 범위의 수리전도도를 갖는 매질에 유용하다.

우리나라의 결정질암은 심도가 깊어질수록 수리전도도는 감소하지만 대략 저투수성 매질이라 함은 10^{-12} m/s 정도까지를 말한다. 방사성폐기물 처분 연구에서는 보다 정밀한 수리전도도 계측, 즉, 투수성 매질부터 저투수성 매질까지 정밀한 수준으로 시험 가능한 장비의 구축이 중요하다. 저투수성 암반에서의 수리시험은 쉽게 행할 수 있는 정상적인 시험 조건이 아니어서 시험 결과의 품질에 크게 영향을 줄 수 있다. 이러한 불확실성을 수반하는 조건들은 다음과 같이 시험 장비를 적절하게 설계함으로써 그 영향을 최소화시킬 수 있다.

공내 저류효과 최소화

시험 구간의 매질이 압력 변화에 반응하는 것은 매질의 물리적 성질, 압력의 크기, 그리고 공내 저류효과들의 함수

이다. 임의의 시험 구간 내 펄스시험에 있어서 저류효과는 다음의 식과 같다.

$$q_w = C_{lz} V_{lz} \frac{dP}{dt}$$

- 이때, $q_w = \text{flow rate (m}^3\text{s}^{-1}\text{)}$
- $C_{lz} = \text{test - zone compressibility (Pa}^{-1}\text{)}$
- $V_{lz} = \text{test - zone volume (m}^3\text{)}$
- $P = \text{test - zone pressure (Pa)}$
- $t = \text{time (s)}$

어떤 매질에 있어서 자료의 분석에 충분한 압력변화의 반응 데이터를 얻는데 요구되는 시간은 상기 식에서 $C_{lz}V_{lz}$ (공내 저류효과) 항과 비례함을 알 수 있다. 이 항의 값을 최소화하는 것이 장비 설계의 기본적인 목표이다. C_{lz} 는 복합적인 유체 압축성으로서, 시험장비 자체, 공내의 유체 및 시추공벽의 압반역학적인 반응과 관련된다. 단, 시험 구간 내에 자유상의 기체가 존재하는 경우 C_{lz} 가 시간 함수에 관하여 비선형 관계를 갖게 되므로 시험결과 분석이 상당히 복잡해진다. V_{lz} 는 패커 사이와 패커 내부, 그리고 시험 구간과 시험 장비 부품을 연결하는 각종 튜브 내의 유체의 체적이다.

장비 안정성 및 시험 결과의 품질

현장에서의 시험 장비의 안전성은 기본적인 요건에 해당되는 것으로, 시추공 내에 투입된 상태에서 장비가 오작동을 하는 경우 시험 장비의 제거, 고장 부위의 수리, 수리 후의 검교정, 그리고 재시험에 이르는 과정에 많은 시간과 비용을 부담하게 된다. 시추공의 붕괴 등에 의한 사고 시에도 안전하게 장비를 인양할 수 있는 장치도 마련되어야 한다.

시험 장비의 최종적인 설계 목표는 자료의 품질일 수 밖에 없으며, 시험자료는 가능한 한 정확하여야 하고, 시험에 영향을 미칠 수 있는 예상되는 간섭이 최소화야 한다. 설계에 반영되는 또 다른 중요한 고려사항은 시험이 진행되는 동안 원격으로 시험자료에 접근할 수 있어야 한다는 것이다. 이러한 기능은 외부에서 시험과정과 진행에 대한 지속적인 감독을 용이하게 해 주며 시험 도중에 시험결과 예비 분석도 가능할 수 있다. 이러한 원격 기능을 이용하여 외부의 감독관과 분석 전문가로 하여금 현장의 시험자에게 시험방법과 절차에 대한 주문을 지시할 수 있다.

기본 요건

공내 저류효과를 최소화하고 시험 장비의 안전성과 시험 결과의 품질을 확보할 수 있는 수리시험 장비는 곧 방사성

폐기물의 심지층 처분을 위한 심부 암반의 투수성 평가의 가장 핵심이 되는 것으로서, 현행의 시험 장비의 문제점을 해결할 수 있는 기본적인 설계 요건은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 최대 운용 심도: GL.-1000 m
- 시추공경: $\Phi 78-120$ mm
- 패커 시스템 이송수단: 1" 탄소강 로드
- 수리전도도 계측 범위: $10^{-5} \sim 10^{-14}$ m/sec
- 공내 저류효과 최소화: 공내 투입 장치의 상부패커 직상부에 shut-in 밸브 장착
- 압력 센서: P1(하부 패커 아래), P2(시험 구간), P3(상부 패커 위) 실시간 계측
- 시험 구간: 1 m 이상 가변 가능
- 시험 중 자료 접근 및 샘플링 간격 제어 가능한 실시간 자료취득 원격시스템
- 시험 장비의 성능 안전성 및 시험자료의 품질 신뢰성
- 수리시험
 - 시험구간의 자연상태 지하수압 계측
 - 불교란 상태의 지하수시료 채취
 - 정압 및 정률 수리시험, 순간충격시험, 펄스시험, 양수시험

상세 설계

수리시험 장비의 공내 투입 장치 (downhole equipments) 와 지상 제어 장치 (surface equipments) 부분은 기본 설계

요건을 기술적으로 만족시키도록 상세 설계하였으며, 주요 부품의 사양은 Table 1과 같다.

공내 투입 장치

공내 투입 장치는 패커 시스템, shut-in 밸브 하우징, 신호변환기 하우징, 수중펌프, 압력신호케이블, 패커튜브, shut-in 밸브튜브, 펌프케이블로 구성되며, 보다 정밀한 시험을 위한 펄스 발생장치는 추후에 추가 장치할 수 있도록 설계하였다. 시험 구간은 가변형으로 시험 설계에 따라 로드의 길이를 조정할 수 있도록 하였다.

C_L 는 딱딱한 재질의 패커를 사용하고 스테인레스 재질과 같은 강한 연결 부품을 사용함으로써 최소화될 수 있도록 하였다. 패커의 팽창압력은 주변 지하수압보다 20 MPa 까지 허용되는 제품을 사용하였다.

시험 구간 내의 V_L 를 최소화시키기 위하여 먼저, 스크린 로드의 외경을 패커 시스템의 외경과 동일한 57 mm로 하였다. 그리고 shut-in 밸브를 상부 패커의 직상부에 위치하도록 하여 패커가 완전히 팽창된 상태에서 shut-in 밸브를 닫게 되면 시험구간이 완벽하게 격리되도록 하였다. Shut-in 밸브의 개폐 원리는 Inflatable Packers International Pty Ltd에서 제작한 볼밸브를 수리적으로 작동시키는 개념을 적용하여 시험 구간 내의 압력에 변화를 주지 않도록(zero-displacement) 하였다.

압력신호변환장치 (pressure transducer)는 shut-in 밸브 하우징 상부에 위치하게 되고 시험 구간과는 스테인레스 튜브로 연결된다. 압력센서의 계측범위는 5,000 psi까지

Table 1. Flow-through and pressure specifications for selected components of the straddle packer system.

Downhole component	Nominal OD [mm]	Minimum flow-through ID [mm]	Pressure rating 101 mm hole bar [psi]
57 mm Straddle packer system with 1m test interval cap with cross-over to IPI O-Rod	57	13.8	165 [2,400]
Interval-extension Module	60	50	-
60 mm Downhole sensor housing to hold P2 (test zone pressure) and P3 (pressure above upper packer) transducers	60	14	-
60mm Zero-displacement downhole hydraulic shut-in valve	57	10	
Packer inflation line -1/4" 316L SS \times 0.049" wall thickness	6.3	3.8	
DHSIV control line - 1/4" 316L SS \times 0.049" wall thickness	6.3	3.8	
Data cable (4 22AWG twisted pair, shielded, waterblock, with Kevlar re-enforcement and polyurethane jacket)	11.2	-	
Quarzdyne pressure transducers for P2 (test zone pressure) and P3 (pressure above upper packer) transducers: 0.75" diameter 345 bar quartz transducer, resolution 0.00006% full scale	-	-	345 [5,000]
P1 Memory gauge (to measure pressure below the lower packer): high-resolution silicone-sapphire memory gauge, type Pioneer PP25, including download cable and software, resolution 0.0003% full scale	-	-	345 [5000]

가능하도록 하였다. 압력센서는 하부 패커 아래에 P1, 시험 구간은 P2, 상부 패커 위는 P3로 명하고, 이들은 실시간 계측을 위하여 컴퓨터와 연결되도록 하였다.

공내 투입 장치는 지표에서부터 스테인레스강 또는 탄소강 재질의 방수용 로드로 연결되어 시험 구간까지 투입되도록 하였고, 연결된 로드의 외부를 따라서 각종 라인(압력신호케이블, 패커튜브, shut-in 밸브튜브, 펌프 케이블 등)이 연결되게 된다. 각종 라인의 훼손과 안전성을 높이기 위하여 플라스틱 테잎 등을 사용하여 로드 에 견고하게 단속하고, 각 로드의 연결부에는 cross coupling을 장착하도록 하였다.

지상 제어 장치

선진 외국에서는 중요한 제어 장치의 대부분을 모바일랩에 장착하여 운용하고 있으나, 본 시험 장비는 비용 절감을 위하여 최소한의 DAS (data acquisition system)와 컴퓨터로 구성하였다. 공내 투입 장치와의 연결 라인은 기본적으로 스테인레스 재질을 사용하는 것으로 설계하고, 상황에 따라서 고압 PVC 튜브도 적용할 수 있도록 하였다. 패커 팽창 펌프는 물을 이용하여 설정된 압력을 자동으로 유지하도록 하였으며, 에어 컴프레서를 가압 장치로 사용하도록 하였다. 시험이 진행되는 동안 일교차에 의한 튜브 내의 압력 변화는 피할 수 없지만 그 범위가 최소화되도록 하였다.

스테인레스 재질의 패커 시스템과 지상에서부터 시험 구간까지 연결되는 탄소강 로드는 상당한 중량을 가지게 된다. 따라서, 장치의 인양과 투입 시에는 1,000 m 기준으로 적어도 40t의 중량을 허용하는 크레인을 사용하도록 하였다.

DAS는 공내 투입 장치와 대기압 및 각종 수리적 라인으로부터 압력 자료를 신호변환기를 통하여 취득하도록 한다. 사용자로 하여금 자료의 취득 시간 간격과 시험 조건을 쉽게 결정할 수 있도록 편의성이 있는 인터페이스를 마련하였다. 모든 취득 자료는 SQL 데이터베이스의 형태로 저장되며, 이들 자료는 시험 중이라도 현장 또는 원격지에서 언제든지 접근하여 추출되고, 분석될 수 있도록 하였다.

시험 장비의 기능

시스템 레이아웃

장심도 시추공에서 다양한 투수성 매질에 대한 정밀 수리시험이 가능하도록 설정한 기본 요건을 충족하는 시

스템은 상세 설계를 거쳐 Fig. 3과 같이 제작되었으며, 현장에서 안전한 운용을 위해서 대형 크레인을 이용한다 (Fig. 4). 시스템의 주요 구성 요소는 하부로부터 (1) 57 mm Straddle packer system, (2) 60 mm Downhole pressure sensor housing, (3) 60 mm Hydraulic downhole shut-in valve(H-DHSIV), (4) 60 mm Submersible pump, (5) 지표 제어 장치로 구성되며, 시스템 부분별로 상세한 기능은 다음과 같다.

57 mm Straddle packer system

패커의 외경은 57 mm 이고, 스틸 와이어로 강화된 천연 고무 재질로서 길이는 1,000 mm이다. 상부 패커의 상단 부에는 downhole sensor housing이 연결된다. 하부 패커의 하단부에는 P1 구간 압력을 계측하기 위한 플러그가 장착되어 있다. 시험 구간은 상하부 고무 패커 사이에 해당되며, 시험 구간을 변화시키면서 시험을 하게 될 경우를 대비하여 다양한 길이를 갖는 extension sub가 마련되었다. 패커의 최대 팽창 압력은 2,400 psi (165 bar) 이다.

60 mm Downhole pressure sensor housing

상부 패커 바로 위에 장착되는 downhole sensor housing은 두 개의 압력 센서를 보호할 목적으로 장착되었으며, 센서 장치가 기계적으로 매우 민감하고 충격에 약하기 때문에 가장 주의를 기울여 다루어야 할 부품이다. 내부에는 시험 구간의 압력(P2)과 상부 패커 위쪽의 압력(P3)을 측정하는 센서가 장착되어 있으며, 각각의 센서는 작은 구멍을 통하여 계측 구간과 연결되어 있다. Housing의 외경은 60 mm이고 내경은 14 mm이다.

P2와 P3 구간의 압력 센서는 Quarzdyne digital pressure transducers로서 외경은 0.75", 계측 가능한 최대압력은 345 bar (5,000 psi)이고, 오차범위는 전 계측범위에 걸쳐 0.00006%이다. 이들 압력 센서의 신호는 케이블로 연결되어 지상부의 DAS로 실시간 전송된다. 한편, 하부 패커 아래쪽의 P1 압력센서는 장치의 슬립화 문제로 DAS로 직접 연결시키지 못하였다. P1 압력센서의 데이터는 시험 종료 후에 인양하여 다운로드할 수 있도록 하였다. P1 압력센서는 high-resolution silicon-sapphire memory gauge (Pionner PP25)로서 계측 범위는 345 bar (5,000 psi)이고, 오차범위는 전 계측범위에 걸쳐 0.0003% 이다.

60 mm Hydraulic downhole shut-in valve (H-DHSIV)

H-DHSIV는 pressure sensor housing 위에 연결된다. 이

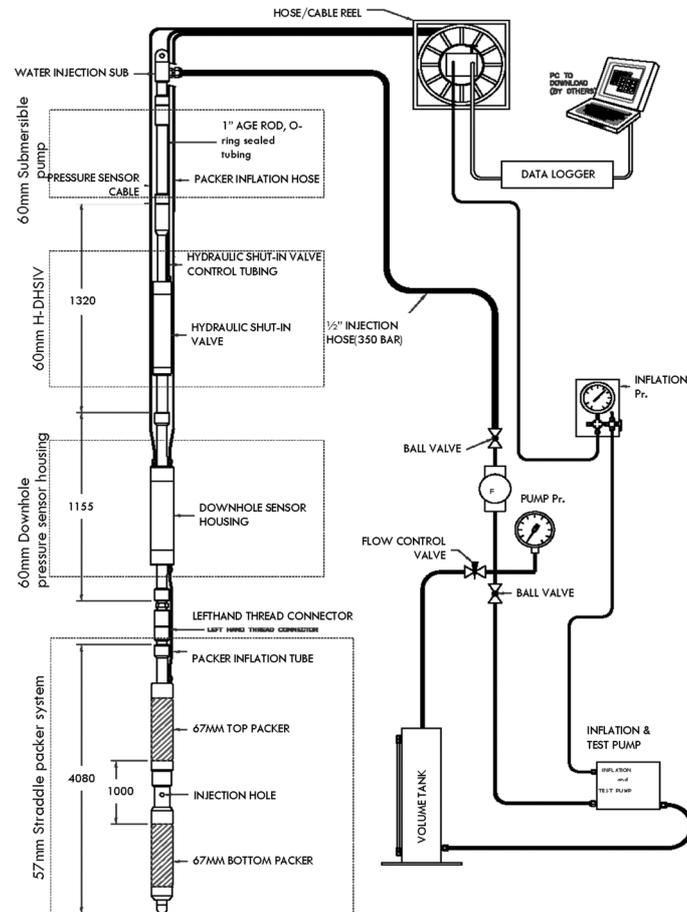


Fig. 3. System layout and major components of straddle packer system.



Fig. 4. Field operation of the straddle packer system.

장치는 공내 시험 구간을 완벽하게 격리하여 순간충격시험 및 펄스시험 과정에서 압력 변화를 주기 위한 용도로 사용된다. H-DHSIV는 볼 밸브에 의해서 개폐되도록 작동하는데 지표에서 튜브로 연결된 라인에 가해지는 수압에 의해 작동한다. 정상 압력에서는 개방상태이고, 수압이 가해지면 닫히는 구조이다. 볼 밸브를 완벽하게 폐쇄시키는데 필요한 압력은 장치가 위치하는 표고 지점에서의 정압보다 70 bar 정도 가해야 한다.

60 mm Submersible pump

소형 양수 펌프는 시험 구간의 불교란 지하수시료 샘플링, 양수시험, 순간충격시험 및 펄스시험을 위한 목적으로 장치되었다. 본 시스템에 장착된 양수 펌프는 Grundfos사의 Redi-flo II (2" environmental submersible pump)로서 스테인레스 재질의 housing 내에 장착되었다. 최대 양수를

범위는 100 ml/min~40 l/min으로 양정고가 낮을수록 양수율이 커진다.

지표 제어 장치

실시간 자료취득시스템 (DAS)는 현재 미국과 캐나다의 방사성폐기물 처분부지의 조사에 적용되는 HydroResolutions사의 시스템을 도입하였다. 이 시스템은 Ethernet I/O 서버, Quartzdyne 압력 센서와의 통신을 위한 RS-485, DAS 구동용 소프트웨어로 구성되어 있으며, 시험자는 언제든 MySQL 데이터베이스에서 자료를 추출하거나 저장할 수 있으며 데이터베이스는 원격 접속 서버에 복제될 수 있다. 컴퓨터 상에서 각종 밸브의 개폐 상태, 시험 구간의 압력, 패커 압력, 데이터 수집 빈도(시간), 시험 시작 시간 및 시험 소요 기간 등을 포함하는 모든 정보를 볼 수 있으며, 파라미터 별로 실시간 도식화가 가능하다.

패커의 팽창 및 수축, 그리고 H-DHSIV의 개폐를 위해 압력 조절장치가 장착되었으며, 이 장치는 공기 압축기와 연결되어 압력 조절 장치에서 설정한 압력에 따라 자동적으로 압력을 제공받게 된다.

패커 시스템의 이송을 위한 로드는 정밀 수리시험에 필요한 방수용 탄소강 재질의 로드를 사용하며, 각 말단부에는 누수를 방지하기 위하여 오링이 끼워져 있다. 고압용(10,000 psi)이기 때문에 수리시험 뿐만 아니라 수압파쇄 시험에도 적용 가능하고, 연결부는 평편하게 처리하여 시추공 내에서 사고의 가능성을 줄였다. 외경은 33.4 mm, 내경은 24.1 mm, 커플링 외경은 44 mm이다.

고찰 및 결론

방사성폐기물 처분부지의 지하수체계 특성, 특히, 모암의 수리전도도는 부지의 방사선적 안전성 평가에 가장 민감하게 작용한다. 본 연구를 통하여 기존의 국내 수리시험 장비의 문제점을 개선하고 암반 투수성 평가 자료의 신뢰도 향상을 위하여 장심도 시추공에서 정밀한 수리시험이 가능한 장비를 성공적으로 구축하였다.

본 장비에서 가장 중요하게 반영된 기술사항은 공내 저류효과를 최소화시키기 위하여 H-DHSIV를 장착하고, 시험 자료의 품질을 향상시키기 위하여 실시간으로 시험 구간을 포함한 3개 구간의 압력 변화자료를 취득할 수 있는 DAS를 구축한 것이다.

본 장비의 실제 현장 운용단계에서는 시험 구간의 선정이 신중하게 결정되어야 하는데, 시험 구간이 짧을수록 공내 저류효과를 저감시킬 수는 있으나 일정구간 시험법을 적용

하는 경우에는 시추공 전 구간을 시험하는데 요구되는 시험 횟수, 소요 시간, 비용 등의 요소가 증가하게 된다. 퇴적암층의 경우에는 수리특성이 각기 다른 여러 매질층에서의 복합적인 압력 반응이 허용 가능한 수준이 아닌 한 지층의 평균적인 층후가 시험 구간의 상한치가 되어야 한다. 결정질암의 경우에는 시험 전의 공내 검층을 통하여 암반 배경단열과 투수성 단열의 빈도를 고려하여 시험 구간을 설정하는 것이 바람직하다. 물론, MWCF (major water conducting feature)에 대해서는 시험 구간을 한정하여 정밀한 시험을 수행함으로써 해당 구조의 투수량계수를 얻는 것이 바람직하다.

본 장비의 본체 및 부대장비를 포함한 총 제작비용은 약 3.5억원으로 현행 국내 지반조사 현장에서 적용되고 있는 이중 패커를 이용한 전형적인 수리시험장비와 경제성 측면에서 직접 비교하는 것은 의미가 없다. 시험에 소요되는 시간은 시험 구간의 투수성 정도에 좌우되었지만 H-DHSIV의 적용으로 기존 장비에 비하여 상대적으로 짧은 시간 내에 방사상 흐름에 도달할 수 있는 이점이 있으며 정밀한 시험 자료를 얻을 수 있다는 것이 강조되어야 할 것이다.

본 장비의 설계에는 반영되지 않았으나 향후 보다 정밀한 시험을 위해 펄스 발생장치를 추가할 수 있도록 하였다. 펄스 발생장치는 시험 구간에 연결된 H-DHSIV 하우징 내에 장치되는 소형 피스톤이다. 피스톤을 밀게 되면 시험 구간 내에 거의 순간적인 압력 펄스를 생성하게 된다. 시험 구간과 피스톤의 체적을 알면 펄스의 크기로서 시험결과 분석에 중요한 변수가 되는 C_{Lz} 를 직접 계산하는데 이용될 수 있다. 마찬가지로 시험 구간의 shut-in에 앞서 피스톤을 밀어낸 상태에서 밸브를 폐쇄한 다음 피스톤을 복귀시킴으로써 펄스 제거 (pulse withdrawal) 효과를 얻을 수 있다.

본 연구의 결과로 구축된 심부 시추공에서의 정밀 수리 시험 장비는 국내 현장조사 기술력의 획기적인 향상을 선도할 것이며, 방사성폐기물 처분기술 개발을 위한 연구와 부지특성평가에 직접 적용될 것이다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 원자력연구기반확충사업-연구시설/장비구축운영분야 지원 (과제번호: 2009-0083259)으로 수행되었다.

참고문헌

Avis, J., Roberts, R. and Richard, B., 2009, Hydraulic

- testing to characterize low permeability sedimentary formations-proposed Deep Geologic Repository, Tiverton, Ontario. GeoHalifax 2009. 1356-1361.
- Bredehoeft, J. D. and Papadopoulos, S. S., 1980, A method for determining the hydraulic properties of tight formations. Water Resour. Res. 16(1), 233-238.
- Joseph, J.A., Ehlig-Economides, C.A., and Kuchuk, F.J., 1988, The role of downhole flowrate and pressure measurements in reservoir testing, SPE Paper No. 18370, 16-19.
- Pickens, J. F., Grisak, G. E., Avis, J. D., Belanger, D.W. and Thury, M., 1987, Analysis and interpretation of borehole hydraulic tests in deep boreholes: Principles, model development and applications. Water Resour Res, 23(7), 1341-1375.
- Roberts, R., Beauheim, R. L. and Domski, P. S., 1999, Hydraulic testing of Salado formation evaporites at the Waste Isolation Pilot Plant Site: Final Report. SAND98-2537. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories, 276p.

박경우

한국원자력연구원 방사성폐기물기술개발부
305-353 대전광역시 유성구 대덕대로 1045
TEL: 042-868-8893
FAX: 042-868-2064
E-mail: woosbest@kaeri.re.kr

지성훈

한국원자력연구원 방사성폐기물기술개발부
305-353 대전광역시 유성구 대덕대로 1045
TEL: 042-868-4920
FAX: 042-868-2064
E-mail: shji@kaeri.re.kr

2010년 6월 3일 원고접수, 2010년 6월 15일 게재승인

김경수

한국원자력연구원 방사성폐기물기술개발부
305-353 대전광역시 유성구 대덕대로 1045
TEL: 042-868-2365
FAX: 042-868-2064
E-mail: kskim@kaeri.re.kr