

굴착영향영역(EDZ) 투수특성의 실험적 평가기술

김형목¹⁾, 류동우^{2)*}, 신중호³⁾

In-Situ Evaluation Technique for Hydraulic Conductivity in Excavation Disturbed Zone (EDZ)

Hyung-Mok KIM, Dong-Woo RYU, Joong-Ho SYNN

Abstract In this paper, in-situ technique for measuring hydraulic conductivity of Excavation Disturbed Zone (EDZ) in a direct way and its application to an Underground Research Laboratory (URL) site were introduced. It was understood that both the EDZ oriented test equipment as a hardware and analysis/evaluation technique as a software should be integrated for upgrading a quality of estimated EDZ hydraulic conductivity. The well-estimated EDZ hydraulic conductivity is expected to enhance a reliability of stability evaluation for caverns under groundwater table and design of a waterproof or drainage system as well as a grout system.

Key words Excavation Disturbed Zone (EDZ), In-situ borehole hydraulic test, Hydraulic conductivity

초 록 본 고에서는 공동굴착에 따른 주변 영향영역 암반의 투수 특성 변화를 간접적 방법이 아닌 직접적으로 측정 가능한 현장수리시험장비를 소개하고 국내 지하연구시설(URL) 현장실험에 적용한 결과를 수록하였다. 굴착공동 주변 수리학적 EDZ의 투수계수 측정의 정밀도 향상을 위해서는 잘 설계된 시험장비와 함께 시험결과를 분석·평가하는 기술이 통합된 시스템 개발이 필요할 것으로 생각된다. 이를 통해 지하수면 아래 건설되는 공동의 안정성 평가, 방배수 시스템 및 그라우팅 설계의 신뢰도 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심어 굴착영향영역, 현장수리시험, 투수계수

1. 서 언

공동 굴착에 따른 주변 암반의 변화양상은 굴착영향영역(Excavation Disturbed or Damaged Zone, 이하 EDZ)이라는 용어로 표현된다. EDZ 내에서는 주변 암반의 역학적 특성과 수리학적 특성이 모두 영향을 받게 되나, 그 양상이 반드시 일치하는 것은 아니다(Alheid et al., 1999).

굴착 공동 주변 수리학적 EDZ를 파악하기 위한 기존의 조사 방법으로는 물리탐사기법에 의한 추정(Rubin and Hubbard, 2005), 주입재 주입 후 시추를 통한 코어 관측(Bossart et al., 2002), 공동 주변 시추 코어를 이용한 실내 암석물성 시험결과로부터의 추정(이창수 외, 2006)

등과 같은 간접적인 측정방법이 대부분이다.

이들 간접적 측정방법 중, 물리탐사 결과의 경우 광범위한 영역의 지질학적 정보를 반영하고 있지만 이들 지질학적 특성이 수리학적 특성과 반드시 일치하지는 않는다는 문제점이 있다. 주입재 시험의 경우, 주입재 선정 및 주입 조건 결정에 어려움이 따르고 현장에서의 관측 및 시료 채취 등에 어려움이 있다. 또한, 시추 코어 시료의 암석물성 데이터를 활용하는 경우, 코어의 제약 및 수리특성과의 일반적인 상관관계를 발견하기 어려운 뿐만 아니라 암석물성값으로부터 투수계수로의 변환과정에서 많은 오차를 동반할 수도 있다. 따라서, 굴착공동 주변 암반의 수리특성의 파악을 위해서는 수리시험을 통해 직접적으로 측정하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

본 고에서는 굴착 공동 주변 EDZ의 수리학적 특성변화를 파악할 목적으로 특수설계된 소형다중패커시스템(Modular Mini-Packer System, MMPS)을 소개하고 실제 현장 적용을 통해 굴착 벽면으로부터의 거리에 따른

¹⁾ 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원

²⁾ 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원

³⁾ 한국지질자원연구원 지반안전연구부 책임연구원

* 교신저자 : dwryu@kigam.re.kr

접수일 : 2008년 4월 7일

심사 완료일 : 2008년 4월 18일

투수계수 변화양상 결과를 수록하였다.

굴착 공동 주변 수리학적 특성의 변화 양상 및 정도는 지하수면 아래 공동 굴착에 따른 지하수 유입량 및 유입 양상의 파악, 지하 에너지 비축기지 건설 등에 요구되는 수장막(water curtain) 및 플러그(plug) 설계, 방사성 폐기물의 지중 처분에서 중요시 되는 지하수 유동을 통한 핵종 누출에 대한 안정성 평가, 해저시설물 건설에 따른 방배수 시스템 및 그라우팅 설계 등에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 본 론

본 장에서는 굴착 공동 주변 EDZ의 수리학적 특성변화를 파악할 목적으로 특수 설계된 현장시험 장비를 소개하고 공동 벽면에서 굴착된 시추공을 이용하여 실시한 현장수리시험 결과를 소개한다.

2.1 현장수리시험장비

수리학적 EDZ는 굴착공동 주변 수 m 이내의 극히 제한된 영역에서 발생되기 때문에 일반적인 시추공 수리시험 장비로는 그 특성을 파악하기가 곤란하다. 특히, 굴착공동 벽면으로부터의 거리 증가에 따른 투수계수의 변화양상을 파악하기 위해서는 단구간의 시험구간을 이용한 일련의 수리시험이 요구된다.

본 고에서 소개하는 MMPS 시스템은 스위스의 NAGRA (National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste)가 방사성 폐기물 처분공동 주변 EDZ의 수리학적 특성을 파악하기 위하여 개발한 장비이다. 시스템 구성사양은 패커(packer), 시험구간(test interval), 스틸라인(steel line), 연결봉(extension rods), 제어부(control unit)

등으로 구성된다(Fig. 1). 패커의 경우, 시스템 종단부의 고정식(fixed end type)과 이동식(sliding type)의 두 가지 형태로 구성된다. 총 6개의 시험구간에 대해 수리시험이 가능하고, 고정식 패커와 시추공 종단부까지의 1개의 single packer 시험구간과 두 개의 서로 다른 패커 사이의 구간에 해당하는 5개의 double packer 시험구간으로 구성된다. single packer 시험구간은 종단부 고정식 패커와 시추공 말단부 사이의 공간으로 가변적으로 설정되며, double packer 시험구간은 10.5 cm 이다. Table 1 및 Table 2에 패커 및 시험구간 사양을 정리하였다.

스테인레스 스틸라인은 시험에 사용되는 물 혹은 가스의 유동통로로, 총 3개의 라인으로 구성되며 패커압 조정용, 시험구간 수압 조정용, 시험구간 유량 조정용의 목적으로 사용된다. 각각의 라인은 외경 40 mm, 내경 30 mm 사양으로 최대 200 bar까지의 압력에 견딜 수 있다. 이들 라인은 제어부의 압력게이지 및 유량계에

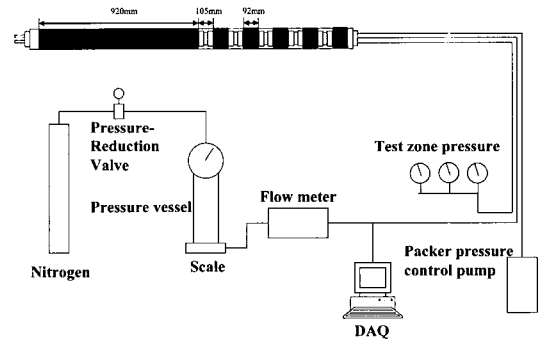


Fig. 1. Schematic diagram of the MMPS configuration

Table 1. Specification of the packers

Packer type	sliding end	fixed end
Packer diameter	48 mm	
Packer element extension material	steel reinforced natural rubber	
Packer element ends	stainless steel	
Rubber length	92 mm	920 mm
For borehole diameter	50-66 mm	
Number of packers per system	5	1

Table 2. Specification of the intervals

component	material	outer diameter (mm)	length of interval (cm)	number of int. per system
bottom interval	stainless steel	open hole	variable	1
inter-packer interval	stainless steel	48	10.5	5

연결되고 전기신호로 변환되어 기록된다. 패커압력 모니터링용 pressure transducer는 0-40 bar, 시험구간 압력 모니터링용은 0-40 bar, 유량계는 0-400 ml/min의 범위에서 사용가능하다. 연결봉은 외경 41 mm, 내경 35 mm 사양으로, 스틸라인을 보호하고 시추공 길이에 따라 추가 연결함으로써 시험구간을 조정할 수 있도록 설계되었다. 전체 시스템 구성요소 및 연결모습은 Fig. 2와 같다.

본 시스템을 이용하여 측정 가능한 투수계수의 범위는 일반적으로 $10^{-6} \sim 10^{-12}$ m/s로, 실시 가능한 수리시험은 정류량시험(constant flow rate test), 정압시험(constant pressure test), 순간충격시험(pulse test) 등으로 기본적으로는 각 구간별로 순간충격시험을 실시 후 고투수성의 시험구간에 대해 정류량 혹은 정압시험을 추가적으로 실시하게 된다. 순간충격시험은 시험구간 내에 injection 혹은 withdrawal을 통해 순간적인 압력차를 유발하고 원래 수압으로의 회복과정을 관측한다. 고투수성 압반의 경우 회복과정이 빨라 데이터 획득이 곤란하기 때문에 상대적으로 장시간 동안 일정 유량 혹은 일정 압력의 물을 injection 혹은 withdrawal 하면서 시간경과에 따른 수압변화를 관측함으로써 대상 압반의 투수특성을 파악할 수 있다.

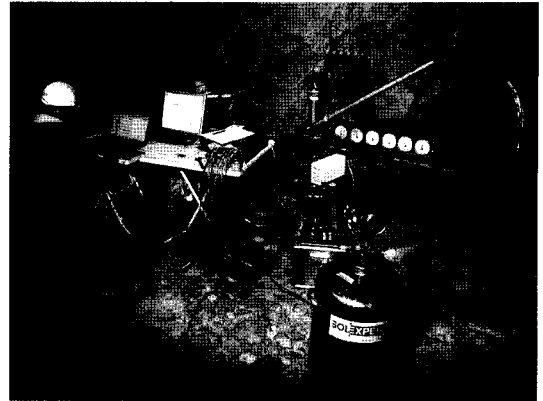


Fig. 2. Picture of the system installation

2.2 현장수리시험방법

현장수리시험은 Fig. 3과 같은 순서로 실시된다. 일반적으로 시추공 입구부터 시험구간을 설정하고 시스템을 점차로 시추공 안쪽으로 삽입해 나가면서 각 시험구간별로 순차적으로 수리시험을 실시한다. 각 시험구간별 수리시험 종류는 대상 시험구간의 정수압 및 투수성에 따라 순간충격 injection/withdrawal 시험 혹은 정류량 혹은 정수압 injection/withdrawal 시험을 실시한다.

지하수위를 확인 후 시험구간 내 포화여부에 따라 불포화 상태의 경우 패커 팽창 순서 및 시험구간 내 주입수 주입 순서를 조절함으로써 시험구간이 포화상태가 되도록 한다. 먼저, 시추공 입구부의 패커만을 팽창시켜 시스템을 고정한 후 직상부의 시험구간 내에 주입수를 주입하고, 포화상태를 확인한 후 순차적으로 시추공 안쪽의 패커를 팽창시키고 주입하는 과정을 반복함으로써 시험구간 전체를 포화상태로 조성하게 된다. 이 과정에서 시험구간 내 공기는 부력에 의해 상부 시험구간으로 이동하게 되며 최종적으로 말단부 시험구간에서는 주입수 압력에 의해 스틸라인을 통해 시스템 밖으로 밀려나오게 된다. 본 현장시험에서는 수평공(H-1) 및 경사상향공(I-2)에서 위와 같은 과정을 수행하였다.

시추공 내 시험구간을 선정하고 해석결과를 평가하기

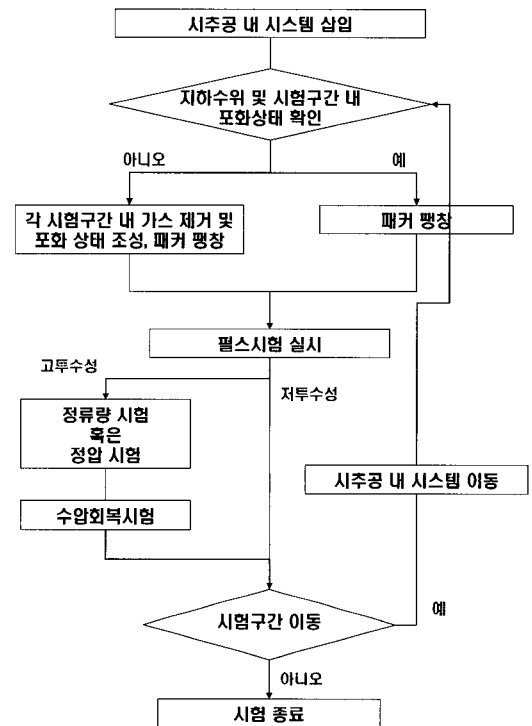


Fig. 3. Flowchart of borehole hydraulic test in EDZ

위해서는 시추코어 및 시추공벽 조사를 통해 얻어지는 절리정보가 필수적으로 요구된다. 본 현장시험에서는 수직공 및 경사하향공의 경우 텔레뷰어(BoreHole TeleViewer, BHTV)로 수평공 및 상향경사공의 경우 지하수의 부재로 시추공영상촬영(Borehole Image Processing System, BIPS)에 의한 시추공벽 조사를 실시하였다. 조사에 이용한 총 5개의 시추공 입구로부터 거리에 따른 절리빈도의 변화양상은 Fig. 4와 같다. 일반적으로 공동

벽면 주변에서 굴착에 따른 절리밀도의 급격한 증가가 예상되나 본 현장의 경우 완만한 증가 경향을 볼 수 있

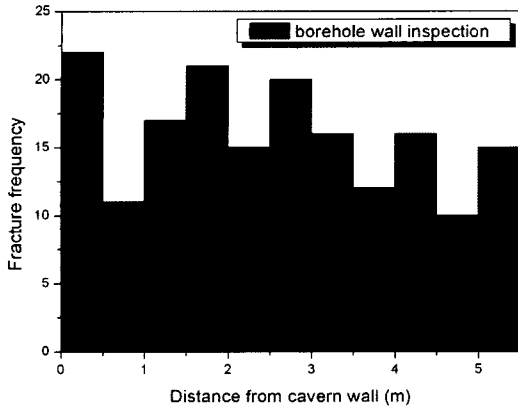


Fig. 4. Fracture frequency along the distance from cavern wall

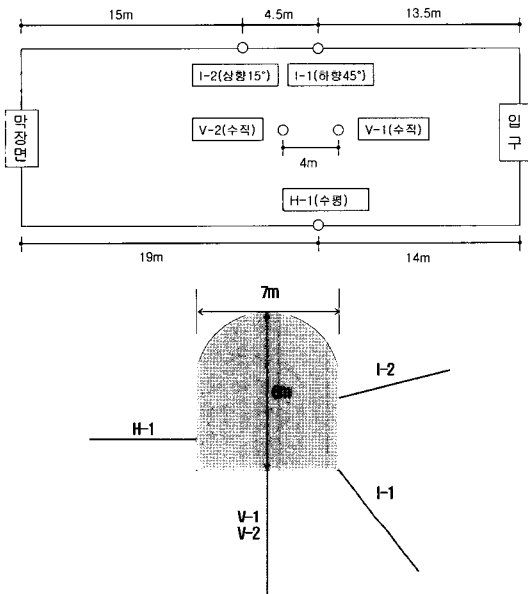


Fig. 5. Location map of tested boreholes(a): top view, (b): side view

Table 3. Specification of the tested borehole

Borehole	Drilling depth(m)	Borehole diameter (mm)	Remark
I-1	5.0	51.5	downward (45°) inclined
I-2	5.1		upward (15°) inclined
H-1	5.2		horizontal
V-1	6.6		vertical
V-2	7.3		

었다. 이는 본래 절리가 잘 발달된 현장지질조건으로 인해 신규 절리의 생성보다는 기존 절리의 변형에 굴착에 따른 영향이 상대적으로 큰 것으로 판단된다.

2.3 현장수리시험조건

현장수리시험을 위한 시추공 굴착은 회전수세식의 OP-300장비를 사용하여 실시하였으며 수리시험장비의 특성상 시추공의 직선성을 유지하는데 특히 유의하였다. 평균 시추깊이는 공동 굴착벽면으로부터 5 m 정도이며, 시추공 직경은 수리시험 장비의 패커팽창 가능범위를 고려하여 51.5 mm로 굴착되었다. 시험에 이용된 시추공의 배치 및 사양은 Fig. 5 및 Table 3과 같다.

2.4 현장수리시험결과

2.4.1 EDZ 투수특성

수리시험 데이터 해석은 크게 이론해를 이용한 표준 해석법과 수치해석에 의한 히스토리매칭으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 현장수리시험 장비의 적용성 검증 및 수리학적 EDZ의 파악을 목적으로 이론해에 근거한 표준곡선과의 비교에 의한 방법을 이용하였다. 시추공 수리시험 해석프로그램인 nSights(INTERA, 1996)의 forward 해석을 이용하여 현장투수계수 범위($10^{-12} \sim 10^{-5} \text{m/s}$)에 해당하는 투수계수값의 pulse injection 시험시의 표준곡선(시간-압력변화곡선)들을 구하고 이를 시험결과와 비교함으로써 투수계수를 추정하였다(Fig. 6). Fig. 6에서 굵은선이 시험결과를 가는 모양선이 각각의 투수계수값에서의 이론곡선을 나타낸다.

Table 4. Formation parameters used for the nSights forward modeling

Formation thickness	0.105m
Flow dimension	2.0(radial flow)
External boundary	1000m
Formation hydraulic conductivity	$10^{-12} \sim 10^{-5}$
Formation specific storage	$6.12 \times 10^{-12} \text{ m}^{-1}$

각 시추공에서의 공동벽면으로부터의 거리에 따른 투수계수 추정결과를 Fig. 7 및 Fig. 8에 정리하였다. 수평

공(H-1)의 결과를 제외하고는 시추공 입구에서 1~1.5 m 구간까지 상대적으로 고투수성의 수리학적 EDZ가 형성되어 있음을 확인할 수 있으며, 시추공 안쪽의 투수계수와 비교하여 약 10^2 - 10^3 배 정도의 증가가 관찰되었다. 수직공(V-1와 V-2)의 경우, 공동저면에 형성된 이완대 및 굴착버럭의 영향으로 시추공 입구부의 데이터 획득이 불가능하였다. 수평공(H-1)의 경우, EDZ 구간에서의 뚜렷한 투수계수의 증가양상을 볼 수 없었으나, 기술적 어려움으로 인하여 시험구간의 불포화상태가 시험결과에 영향을 미친 것으로 생각된다.

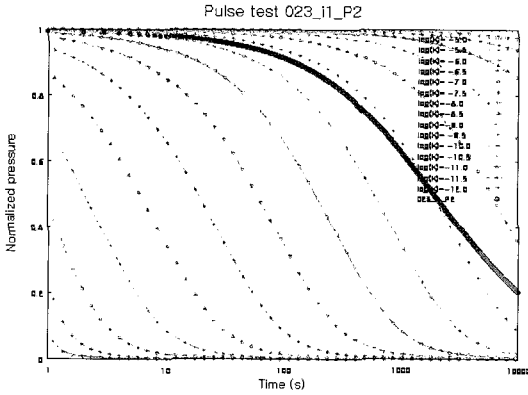


Fig. 6. Example of Hydraulic conductivity estimation by comparison with theoretical curves

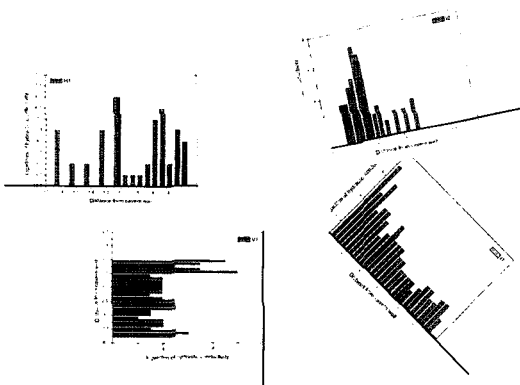


Fig. 7. Hydraulic conductivities along the distance from cavern wall at each tested borehole

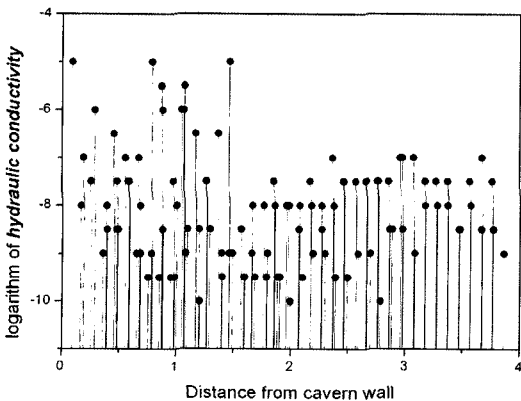


Fig. 8. Hydraulic conductivities of all the boreholes along the distance from cavern wall

2.4.2 절리투수량계수 분포

본 현장수리시험 시스템의 가장 큰 특징은 약 10 cm에 해당하는 좁은 시험구간에서의 수리시험이 가능하다는데 있다. 시험구간이 길어질 경우 시험구간 내 다수의 절리가 존재하여 수리시험을 통해 구한 투수계수를 이들 절리에 분배하는 것이 곤란하나 본 시스템에서는 하나의 절리만을 시험구간에 포함시켜 수리시험을 실시하는 것이 가능하다. 이 경우 시험구간 내 대부분의 유동은 절리를 통해 발생한다고 할 때 시험구간 투수계수를 절리에 할당하는 것이 가능할 것으로 생각된다. 일반적으로 투수량계수는 투수계수에 시험구간의 길이를 곱하여 구할 수 있으며, 이와 같은 방식으로 구한 공동주변 EDZ 내 절리투수량계수의 변화양상 및 분포는 각각 Fig. 9와 Fig. 10과 같다.

균열망 모델을 이용한 수리유동 해석에서의 불확실성 요소 중 하나인 절리투수량계수 분포 추정을 위해서는 좁은 시험구간과 많은 시험개수로 구성된 잘 설계된 수리시험이 요구되는 바, 본 시스템이 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Fig. 9의 절리투수량계수 변화양상이 공동벽면에서 거리에 따른 투수계수의 변화양상과 유사하고 절리밀도가 균등하게 분포하는 경향을 보이므로(Fig. 6) 본 현장에서의 수리학적 EDZ 내 투수계수의 증가는 신규 절리의 생성에 따른 절리망의 연결성의 증대 및 기존 절리의 투수계수의 증가 등의 복합적인 원인에 기인하는 것으로 판단된다.

3. 결론

본 고에서는 공동 굴착에 따른 응력 재분배에 기인한 굴착공동 주변 암반의 수리학적 특성변화를 직접적으로 평가할 수 있는 현장시험장비를 소개하고 실제 현장에 적용한 결과를 수록하였다.

본 시스템은 굴착 공동 주변의 극히 제한된 영역에 형성된 EDZ의 투수계수 측정에 용이하게 사용될 수 있

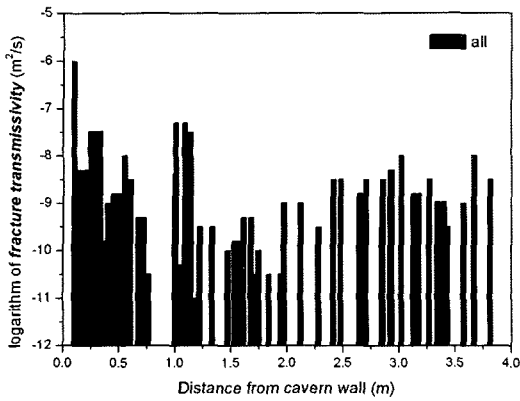


Fig. 9. Fracture transmissivity along the distance from cavern wall

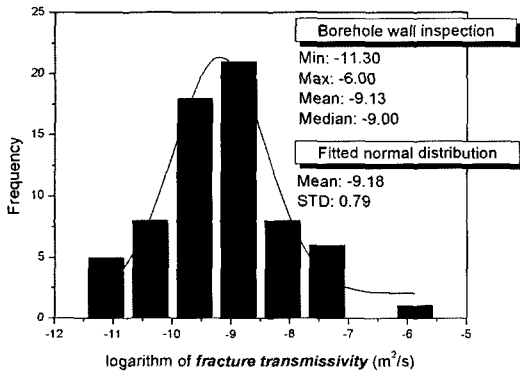


Fig. 10. Fracture transmissivity distribution within hydraulic EDZ

음을 확인하였으며 공동 벽면으로부터의 거리에 따른 투수계수의 변화양상을 파악할 수 있었다. 발파 굴착으로 이루어진 본 공동주변의 수리학적 굴착영향영역경계는 공동벽면으로부터 약1.0-1.5m 부근에서 형성된 것으로 보이며, 투수계수는 최대 약 10^2 - 10^3 배 정도까지 증가하였다.

본 시스템은 시험구간이 약 10 cm 정도로 설계되어 시험구간 내에 하나의 절리만을 포함한 수리시험을 실시할 수 있다. 따라서 수리시험결과와 시추코어 관찰 및 시추공벽 조사에서 관측되는 절리 데이터와의 통합 분석을 통해 절리투수량계수의 측정 및 그 분포를 파악할 수 있다. 이는 균열망 생성을 통한 수리해석 수행시

절리투수량계수 분포의 불확실성 저감에 크게 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

한편, 일반적으로 시추공 수리시험에서는 시추공을 중심으로 방사방향의 2차원적 유동을 가정하고 있으나 본 현장과 같이 절리가 발달된 지질조건 및 절리밀도가 상대적으로 증가하는 EDZ 내에서는 잘 연결된 균열망을 통한 3차원적 수리유동을 고려해야 할 것으로 생각된다 (Bossart et al., 2002). 따라서 수리학적 EDZ내 투수계수 추정치의 정밀도 향상을 위해서는 본 장비와 같은 하드웨어와 함께 시험결과의 평가 및 해석기술의 소프트웨어적인 보완이 필요할 것으로 판단된다. 이를 위해서는 공동 굴착면 및 시추공 조사를 통해 수집한 절리 정보를 이용하여 균열망을 형성하고, 균열망내에서의 수리유동모델을 구축하여 현장시험결과와 비교분석하는 일련의 과정을 체계화하는 것이 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 ‘고심도 지하연구실험실(URL) 구축 및 실증실험연구’의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 이창수, 전석원, 박연준, 권상기, 조원진, 서영호, 박현익, 2006, 한국원자력연구소 내 지하처분 연구시설에서의 암반손상대 평가, 한국암반공학회 창립25주년기념 특별심포지움, 15-24.
2. Alheid, H. J., Knecht, M., Boisson, J.Y., Homand, F., and Pepa, S., 1999, Comparison of in-situ hydraulic and seismic measurements in the excavation damaged zone of underground drifts, Proc. 9th Int. Congress on Rock Mech., Paris, Balkema, 1263-1266.
3. Bossart, P., Meier, P.M., Moeri, A., Trick, T., Mayor, J.C., 2002, Geological and hydraulic characterization of the excavation disturbed zone in the Opalinus Clay of the Mont Terri Rock Laboratory, Engineering Geology, 66, 19-38.
4. INTERA Inc., 1996, GTFM - User Documentation: Final Description, Theoretical Development, and Software Architecture: Internal Report.
5. Rubin, Y., Hubbard, S., Hydrogeophysics, Springer, 2005.

김형목



1997년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1999년 서울대학교 대학원 자원공학과 공
학석사
2002년 동경대학교 대학원 토목공학과 공
학박사
Tel: 042-868-3265
E-mail: kimh@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부
선임연구원

류동우



1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1996년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2000년 서울대학교 대학원 지구환경시
스템 공학부 공학박사
Tel: 042-868-3099
E-mail: dwryu@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부
선임연구원

신중호



1983년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1985년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학석사
1990년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학박사
Tel: 042-868-3242
E-mail: jhsynn@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부
책임연구원