

한국원자력연구원 내 지하연구시설에서의 굴착손상영역 평가

이창수¹⁾, 권상기²⁾, 최종원³⁾, 전석원^{1)*}

An Estimation of the Excavation Damaged Zone at the KAERI Underground Research Tunnel

Changsoo Lee, Sangki Kwon, Jong won Choi, Seokwon Jeon

Abstract In this study, physical, mechanical, and thermal properties of rock samples were investigated to estimate the Excavation Damaged Zone (EDZ) developed during the construction of the KAERI Underground Research Tunnel. The average porosity in the EDZ was increased by about 140%. The average wave velocity, Young's modulus, and uniaxial compressive strength in the EDZ were decreased by about 11, 37, and 16%, respectively. And the thermal conductivity in the EDZ was decreased by about 20%. From the laboratory tests, the EDZ size could be estimated to be around 1.1-2.4 m.

Key words Excavation damaged zone, Underground research tunnel, Rock properties, Thermal conductivity

초 록 본 연구에서는 굴착 전·후에 채취한 암석시료들에 대해 물리적, 역학적 그리고 열적 물성을 조사하여, KAERI Underground Research Tunnel(KURT)의 건설로 인해 발생된 굴착손상영역(EDZ)을 정량적으로 평가하고자 하였다. 굴착손상영역에서 공극률은 약 140% 정도 증가하였고, 탄성파속도, 탄성계수, 그리고 일축압축강도는 각각 약 11, 37, 그리고 16% 정도 감소하였다. 또한 굴착손상영역에서의 열전도도는 약 20% 정도 감소하였다. 암석물성변화를 이용하여 KURT 굴착손상영역의 범위를 판단한 결과 약 1.1-2.4 m로 나타났다.

핵심어 굴착손상영역, 지하처분연구시설, 암석 물성, 열전도도

1. 서 론

일반적으로 암반손상영역(Disturbed Rock Zone, DRZ)은 역학적, 열적, 수리적 그리고 화학적 과정을 포함한 다양한 과정에 의해 터널 주변의 암반이 원래의 암반과 다른 특성을 나타내는 영역을 의미한다(Martino and Chandler, 2004). 이러한 영역들의 범위와 형상은 주로 굴착방법, 공동의 형상, 공동의 크기, 암반 강도 그리고 현지응력에 좌우된다(Martin 외, 1999). 특히 발파나 TBM과 같이 굴착방법에 의한 영향을 크게 고려하는 경우에는 암반손상영역보다는 굴착손상영역(Excavation

Disturbed or Damged Zone, EDZ)이라고 표현된다(Fairhurst, 1999; Stephansson, 1999). 여기서 교란(disturbance)은 굴착이전보다 응력이 상당히 변화된 영역으로 일반적으로 고려되며, 손상(damage)은 일반적으로 파괴와 암반 특성의 감소가 나타나는 더 제한적인 영역이다.

이러한 굴착손상영역은 특히 심도가 깊을수록 그리고 현지응력이 클수록 그 영향이 크게 나타나게 된다. 이렇게 발생된 굴착손상영역은 지하공동 주변에 열, 수리, 역학적 인 암반 물성에 심각한 영향을 미치게 된다(Malmgren 외, 2007). 특히 지하 약 500 m에 건설되는 고준위 방사성 폐기물 처분장과 같은 구조물에서의 구조적인 안정성은 특히나 중요한데, 굴착손상영역으로 인한 암석물성의 변화는 고준위 방사성 폐기물 처분장의 안정성에 크게 영향을 미치게 된다. 특히, 지하수위가 존재하는 경우에는 역학적 하중의 재분배로 인해 간극의 변화가 예상되며 기존의 불연속면과 새로 생성된 불연속면을 통해 수리유동의 변화가 일어날 것으로 예상된다. Tsang et al(2005)은 새로운 균열의 발생 및 기존 균열의 성장

¹⁾ 서울대학교 에너지시스템공학부

²⁾ 인하대학교 에너지자원공학과

³⁾ 한국원자력연구원

* 교신저자 : sjeon@snu.ac.kr

접수일 : 2011년 9월 27일

심사 완료일 : 2011년 10월 16일

게재 확정일 : 2011년 10월 17일

으로 인해 암반의 투수계수가 수 백~수 천배 증가하는 것으로 보고 하였으며, 이러한 투수계수의 변화는 고준위 방사성 폐기물 처분장 주변의 지하수 유동에 영향을 미치게 되어 인공방벽(engineered barrier system) 및 자연방벽(natural barrier system)에 잠재적인 위험요소를 갖게 한다고 보고된 바 있다(Hou, 2003). 이러한 굴착손상영역의 발생으로 인한 투수계수의 변화는 인공방벽과 유해한 화학성분과의 접촉 확률을 높이게 되어 전체적인 처분시스템의 안정성을 위협할 수 있다. 또한 암석의 열전도도, 열팽창계수, 그리고 비열과 같은 열적 물성의 변화는 처분시스템에서의 전체적인 온도 분포와 완충재의 최대온도에 영향을 미치는 것으로 나타나고 있다(Kwon and Cho, 2008). 이러한 이유로 미국, 일본, 스웨덴, 캐나다, 프랑스, 스위스, 벨기에와 같은 여러 선진 국가에서 지하처분 연구시설을 건설하고, 현장 및 실험실 시험을 통해 굴착손상영역의 특성 파악 및 그 범위를 정량적으로 판단하고자 하는 연구들이 수행되었다(Sugihara 외, 1993; Sato 외, 2000; Bäckblom and Martin, 1999; Simmons and Baumgartner, 1994; Emsley 외, 1997; Bossart 외, 2002; Bossart 외, 2004; Tsang 외, 2005). 하지만 수행된 기존의 연구들에서는 실험실 시험 및 현장시험을 통해 굴착손상영역이 암석 및 암반의 수리, 역학적인 물성에 미치는 영향에 대해 주로 연구를 하였다.

이에 본 연구에서는 지하처분연구시설(KAERI Underground Research Tunnel, KURT)의 건설로 인해 발생된 굴착손상영역(EDZ)에서 채취한 암석시료들을 이용하여 기존 연구와 비슷한 방법인 암석의 물리적 그리고 역학적인 물성 변화를 파악함으로써 굴착손상영역의 범위를 정량적으로 평가하고자 하였다. 또한 본 연구에서는 암석의 열적 물성인 열전도도의 변화를 이용하여 평가한 굴착손상영역의 범위를 수리적 그리고 역학적인 물성 변화로 평가한 굴착손상영역의 범위와 비교하였다.

2. KAERI Underground Research Tunnel

지하처분연구시설(KURT)은 고준위폐기물처분 연구와 관련된 현장실증시험을 위해 2006년 11월에 완공된 한국원자력연구원 내 지하 터널로 180 m 길이의 진입 터널(access tunnel)과 45 m와 30 m 길이의 연구 모듈(research module), 그리고 8 m 길이의 회차구간(turning shelter) 및 터널로 유입되는 지하수를 모아 외부로 배출하기 위한 저수조(sump pit)로 이루어져 있다(조원진 외, 2004). Fig. 1에 나타난 바와 같이 터널의 단면은

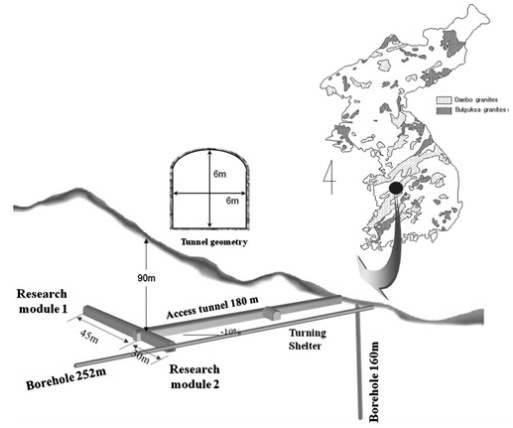


Fig. 1. Schematic drawing of the KURT (after Kwon 외, 2008)

6 m × 6 m이며 터널 방향은 산 정상부를 향하게 함으로써 짧은 진입터널로 심도를 효과적으로 확보하였으며, 하향 10% 경사를 주어 심도를 추가적으로 확보할 수 있도록 설계되었다. 진입 터널 끝 부분에서의 최대 심도는 지표면에서 약 90 m로서 진입터널의 양 끝단에 좌우로 굴착된 연구모듈은 비교적 양질의 암반에 위치하고 있다. 풍화와 절리의 발달로 인해 암질이 불량한 터널 입구부 40 m 구간은 30 cm 두께의 콘크리트 라이닝이 설치되어 있으며, 나머지 터널 구간은 록볼트와 숏크리트로 보강되어 있다. 터널 내 일부 관심 구간은 벽면을 노출시켜 필요 시 암반을 관찰할 수 있도록 함으로써 현장시험 설계 및 위치선정에 도움이 될 수 있도록 되어 있다.

3. 굴착손상영역에서의 암석물성

Fig. 2에 나타나 있는 borehole 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9에서 획득한 암석코어를 이용하여 굴착 전, 후의 암석물성을 비교함으로써 굴착손상영역을 정량적으로 평가하고자 하였다. 발파 전의 암석 코어는 Fig. 2에 나타나 있는 stage 1까지 굴착이 진행이 된 시점에서 turning shelter의 벽면에서부터 경사공을 시추하여 획득하였으며, 발파 후의 암석 코어는 stage 2까지 굴착이 이루어진 시점에서 경사공을 시추하여 획득하였다. 또한 터널 벽면 거리는 Fig. 3에서 나타나 있는 두 개의 Z값 중, 작은 값으로 정의하였다. 굴착에 의한 영향은 벽면거리가 짧은 곳에서 더 많이 받을 것으로 예상되기 때문에 작은 값으로 벽면거리를 정의하였다. 획득된 암석코어를 이용하여 총 87개의 암석 시편을 성형하여 공극률을 측정

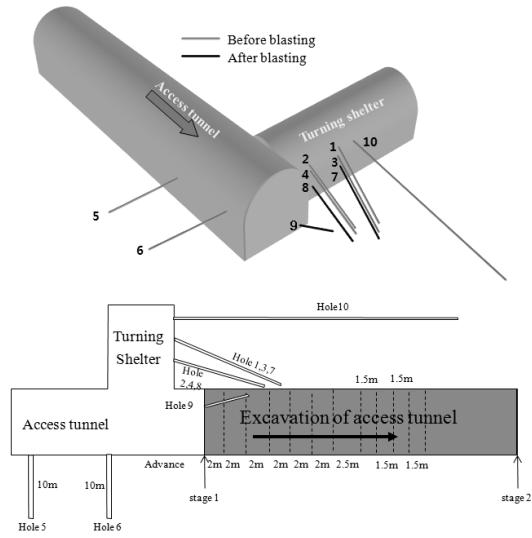


Fig. 2. The turning shelter and the boreholes that were drilled for the EDZ study (after Kwon 외, 2008)

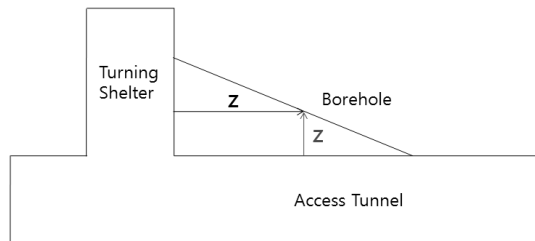


Fig. 3. Calculation of the distance from the wall

하였다. 암석의 역학적 물성변화를 살펴보기 위해서 32개의 암석시편에 대해 탄성파속도를 측정하고 일축압축시험을 수행하였으며, 암석의 열적 물성변화를 살펴보기 위해 55개의 암석시편에 대해 열전도도시험을 수행하였다.

Fig. 4는 벽면거리에 따른 암석 물성변화의 일반적인 경향을 나타낸 것이다(Kwon 외, 2009). 세 영역 중 zone 1은 발파에 의해 영향을 받은 영역으로 정의되고 zone

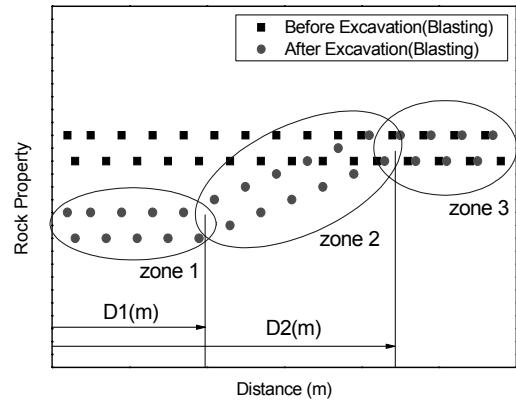


Fig. 4. General result type of the laboratory tests (after Kwon 외, 2009)

3은 초기의 암석 물성을 그대로 가지며 발파에 의해 영향을 받지 않은 영역으로 정의된다(Kwon 외, 2009). 또한 zone 2는 zone 1보다는 작은 영향을 받은 영역으로 zone 1과 zone 3사이의 중간 영역으로 정의된다(Kwon 외, 2009). 본 연구에서는 Kwon 외(2009)와 마찬가지로 발파에 의한 굴착손상영역의 범위를 D2로 정의하고자 한다.

3.1 암석의 물리적 물성 및 역학적 특성

3.1.1 공극률

공극률은 암석의 건조질량과 진공오븐에서 24시간 이상 수증 포화시킨 포화질량 그리고 시료의 부피를 이용하여 구하였다. 암석시편에 대한 공극률의 평균값을 각각 발파 전, 후로 구분하여 Table 1에 정리하였다. 공극률의 경우 발파에 의해 영향을 받은 것으로 나타났으며(Table 1), 그 영향 범위는 벽면거리가 약 2.4 m 지점까지인 것으로 판단된다(Fig. 5). 벽면거리가 2.4 m 보다 큰 발파 후의 암석 시편에 대해 추가적인 실험을 수행한다면 좀 더 정확한 영향 범위를 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 1. Mechanical properties of rock specimens obtained before and after blasting

	Before blasting	After blasting
Porosity (%)	1.00	2.41
P wave velocity (m/s)	4471	3948
S wave velocity (m/s)	2117	1882
Young's modulus (GPa)	53.9	32.3
Uniaxial compressive strength (MPa)	100.4	82.7
Poisson's ratio (-)	0.21	0.22

3.1.2 탄성과속도

일본 Oyo사의 sonic viewer model-5228을 이용하여 32개의 암석시편에 대해 탄성과 속도를 측정하였다. 발파 후의 탄성과 속도가 발파 전의 탄성과 속도보다 낮게

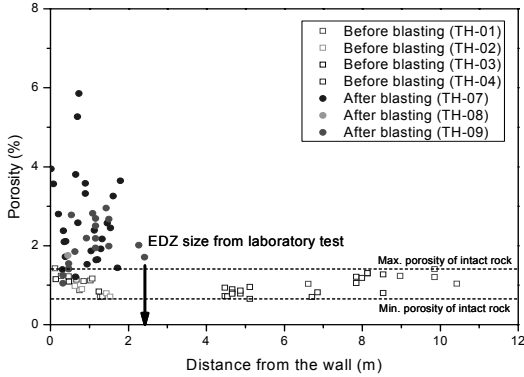
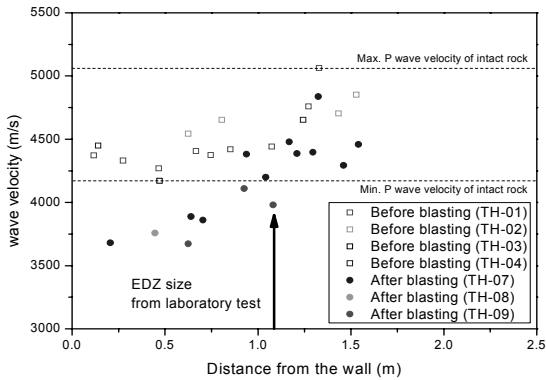


Fig. 5. The porosity change from the laboratory tests

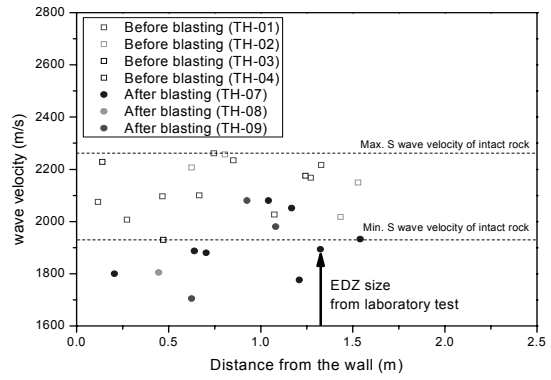
나타난 것으로 볼 때, 탄성과 속도는 발파에 의해 영향을 받은 것으로 판단된다(Table 1). 굴착손상영역이 탄성과 속도에 미친 영향 범위를 측정하기 위해 벽면거리에 따른 탄성과 속도를 Fig. 6에 나타내었다. 그 결과, P파 속도의 경우 벽면거리가 약 1.1 m 지점까지 영향을 받은 것으로 판단되고(Fig 6(a)), S파 속도의 경우 벽면거리가 약 1.3 m 지점까지 영향을 받은 것으로 판단된다(Fig. 6(b)). 각각의 경우에 대해 발파에 의한 굴착 전의 탄성과 속도와 굴착손상영역에서의 평균 탄성과 속도를 Table 1에 정리하였다. 굴착손상영역에서의 암석 시편에 대한 P파와 S 파는 약 11% 정도 감소한 것으로 나타났다.

3.1.3 일축압축강도시험

일축압축시험에서 측정, 기록된 응력-축방향 변형률 곡선을 구한 후 강도의 50% 수준 근방에서의 선형구간의 기울기로 탄성계수와 포아송 비를 구하였다. 벽면거리에 따른 탄성계수와 일축압축강도를 도시한 Fig. 7을

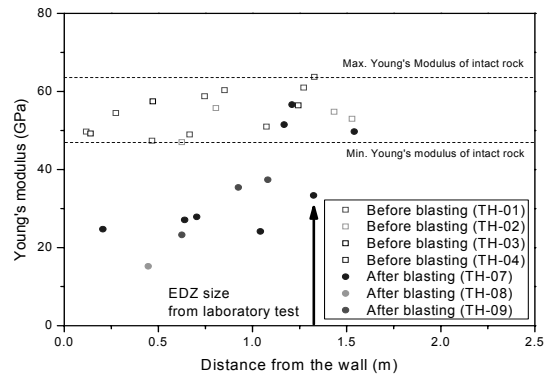


(a) Change of P wave velocity

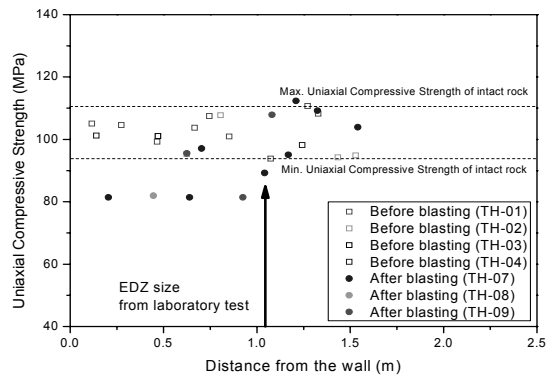


(b) Change of S wave velocity

Fig. 6. The P and S wave velocity change from the laboratory tests

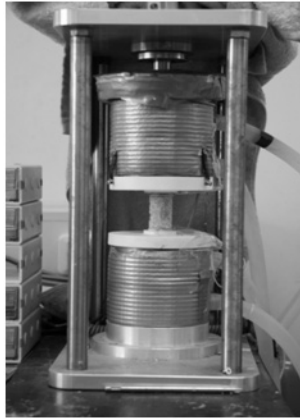


(a) Change of Young's modulus (after Kwon et al., 2008)

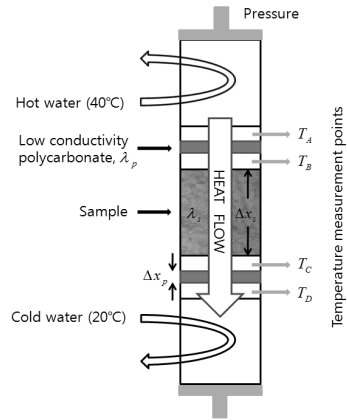


(b) Change of uniaxial compressive strength

Fig. 7. The porosity change from the laboratory tests



(a) The divided bar test equipment used in this study (made by KIGAM)



(b) A typical divided-bar apparatus

Fig. 8. The device used for the thermal conductivity tests

살펴보면, 탄성계수 및 일축압축강도는 발파에 의해 영향을 받아 암석물성이 변화한 것으로 나타났다. 탄성계수의 경우 벽면거리가 약 1.3 m 지점까지 영향을 받은 것으로 나타났으며(Fig. 7(a)), 일축압축강도의 경우 벽면거리가 약 1.1 m 지점까지 영향을 받은 것으로 판단된다(Fig. 7(b)). 암석시편에 대한 일축압축시험 결과의 평균값을 각각 발파 전, 후로 구분하여 Table 1에 정리하였다. 발파로 인한 굴착으로 인해 탄성계수는 약 37% 감소하였으며, 일축압축강도는 약 16% 정도 감소하였다. 반면, 포아송 비는 발파에 의한 영향을 거의 받지 않은 것으로 나타났다(Table 1).

3.2 열적 물성변화

3.2.1 열전도도 시험장치

본 연구에서는 암석의 열전도도를 한국지질자원연구원에서 만든 divided-bar 시험 장치를 이용하여 측정하였다(Fig. 8(a)). 25.4 mm 직경의 시험시편을 따라서 좋은 열 접촉을 보장할 만큼의 충분히 작은 유지압을 작용시키기 위해 5 kg의 추를 이용하였다. 암석의 열전도도 측정을 위해 시험장치의 맨 윗부분과 아랫부분은 각각 40도와 20도로 일정하게 유지하면서 암석 시편이 열적 평형상태에 도달할 때 까지 충분한 시간을 주었다. 암석 시편이 열적 평형상태에 도달하면 Fig 8(b)에서 나타나 있는 T_A , T_B , T_C , 그리고 T_D 에서의 온도를 측정하여 접촉저항을 고려한 식 (1)을 이용하여 암석의 열전도도를 구하였다.

$$\frac{\Delta x_s}{\lambda_s} = \frac{\Delta T_s}{(\Delta T_1 + \Delta T_2)} \times \frac{1}{C} R \quad (1)$$

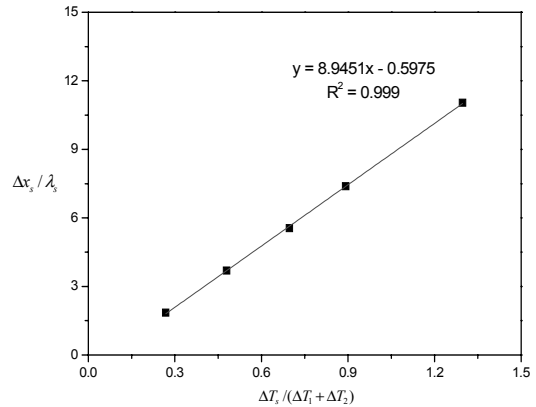


Fig. 9. Results of thermal conductivity tests for the calibration

여기서 λ_s 는 암석시편의 열전도도이고, Δx_s 는 암석시편의 길이, ΔT_s 는 암석시편에서의 온도차($T_B - T_C$), ΔT_1 는 상부 폴리카보네이트에서의 온도차($T_A - T_B$), 그리고 ΔT_2 는 하부 폴리카보네이트에서의 온도차($T_C - T_D$)이다.

식 (1)은 1차 함수로서, 다양한 길이의 폴리카보네이트에 대한 열전도도시험으로부터 상수 C' 와 R 을 구할 수 있다. 본 연구에서는 5개의 서로 다른 길이의 폴리카보네이트를 이용하여 열전도도시험을 수행하였으며, 그 결과를 이용하여 1차 직선으로 회귀한 결과 C' 와 R 을 각각 8.9451과 0.5975로 구하였다(Fig. 9).

3.2.2 열전도도 시험 결과

Fig. 2에 나타나 있는 turning shelter 구간에서 회수

Table 2. Results of thermal conductivity tests conducted at underground research laboratories

Country	Underground research tunnel	Rock type	Thermal conductivity (W/mK)	Reference
Korea	KURT	Granite	Mean ¹ : 3.03 (Std. : 0.15)	In this study
			Mean ² : 2.43 (Std. : 0.36)	In this study
Japan	Kamaishi mines	Granite	Mean : 2.6	Rutqvist 외(1999)
Canada	URL	Lac du Bonnet granite	Mean : 3.49 (Std. : 0.35)	Simmons and Baumgartner(1994) Katsube and Hume(1987) Jackson 외(1989)
Sweden	HRL	Äspö diorite	Mean ³ : 2.6 (Std. : 0.17)	Sundberg and Innova(2003)
Switzerland	Mont Terri	Opalinus clay	Mean ⁴ : 2.04 (Std. : 0.23)	Nagra(2001) Mügler 외(2006)
			Mean : 1.26 (Std. : 0.11)	Nagra(2001) Mügler 외(2006)
	Grimsel	Grimsel granodiorite	Mean : 2.55 (Std. : 0.13)	Schärli and Rybach(1984)
Finland	Olkiluoto Research Tunnel	Granite	Mean : 2.91 (Std. : 0.51)	Kukkonen 외(2011)
USA	Yucca Mountain	Tuff	Mean : 1.50 (Std. : 0.44)	Brodsky 외(1997)
	WIPP	Argillaceous salt	Mean : 3.93 (Std. : 1.54)	Sweet and McCreight(1980)

Mean¹ is thermal conductivity of rock specimens obtained before blasting.
 Mean² is thermal conductivity of rock specimens obtained after blasting.
 Mean³ is thermal conductivity parallel to the bedding plane.
 Mean⁴ is thermal conductivity perpendicular to the bedding plane.

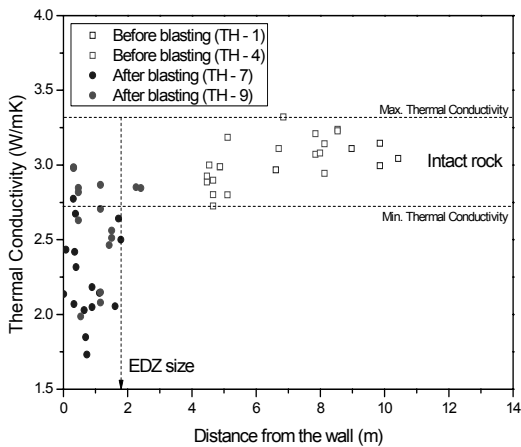


Fig. 10. Relationship between thermal conductivity and distance from the wall

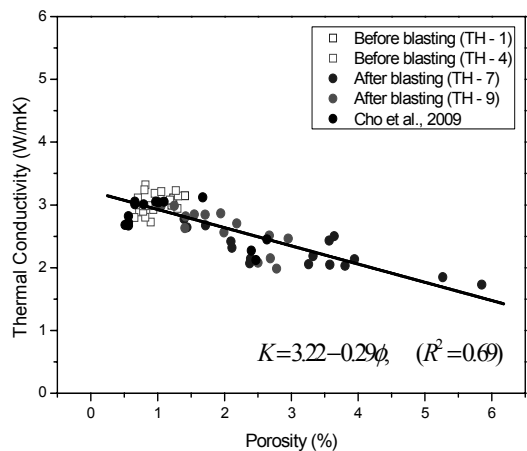


Fig. 11. Results of thermal conductivity tests for the calibration

한 암석 코어를 이용하여 총 55회의 열전도도 시험을 수행하였으며 그 결과를 세계 각국의 지하처분연구시설에서 수행한 열전도도 결과와 함께 Table 2에 나타내

었다. Fig. 10은 터널 벽면거리에 따른 굴착 전, 후의 열전도도 변화를 나타낸 것이다. 굴착 전의 암석의 열전도도는 2.73~3.32 W/mK로 나타났으며, 평균값은 3.03

Table 3. Results of thermal conductivity tests conducted at underground research laboratories

Test site	Rock type	Test	Excavation method	EDZ size (m)	Reference
Stripa (Sweden)	Granite	Hydraulic conductivity test	Drill and blast drift	0.3 (in the wall) 1.2 (in the floor)	Gray (1993) Börgesson 외 (1992)
Äspö (Sweden)	Granite	P-wave velocity Hydraulic conductivity test Acoustic emission	TBM drift	0.03	Emsley 외 (1997) Bäckblom (2008) Chandler 외 (1996, 2002)
			Drill and blast drift	0.3 (in the wall) 0.8 (in the floor)	
		Porosity change	TBM drift	0.02	Autio 외 (2005)
		Fracture characterization Geophysical logging Borehole inspection Vibration measurements Hydraulic testing	Normal blasting	1.5 - 2.1 (in the floor)*	Pusch and Stanfors (1992) SKB (1999)
Careful blasting	1.0 - 1.7 (in the floor)*				
Kamaishi mine (Japan)	Granodiorite	P-wave velocity	Mechanical excavation	0.8	Matsui 외 (1998, 2003)
			Blasting	1.4	
Tono mine (Japan)	Sedimentary rock	P-wave velocity Seismic tomography Hydraulic conductivity	Mechanical excavation	0.3	Sugihara 외 (1993) Kamemura and Sugihara (1993) Sato 외 (2000)
			Blasting	0.8	
URL (Canada)	Granite	Hydraulic conductivity test	Drill and blast drift	0.3	Chandler et al. (1996)
		Source location of micro-seismic event Ultrasonic velocity		0.75	Carlson and Young (1993) Read and Martin (1996)
		Seismic refraction survey		0.25 - 0.78	Chandler 외 (2002)
Olkiluoto (Finland)	Tonalite	¹⁴ C-PMMA and He-gas methods	TBM drift	0.02 - 0.04	Autio (1996) Autio 외 (2006) Bäckblom and Martin (1999)
Grimsel Test Site (Switzerland)	Grimsel-Granodiorite	Permeability test	Drill and blast drift	2.0	Bäckblom (2008) Marschall 외 (1999)
		Wave velocity	TBM drift	0.5	
Mont Terri Rock Laboratory (Switzerland)	Opalinus Clay	Visualisation of the fracture network	Drill and blast drift Roadheader	2.0	Bossart 외 (2002, 2004)
		Pneumatic and hydraulic characterisation		0.5 - 0.7	
		Observations from field mapping		0.2 - 1.5	
KURT (Korea)	Granite	Rock core observation	Blasting	2.0	Kwon 외 (2009)
		Goodman jack test		2.3	
		Porosity		2.4	
		Wave velocity		1.1 (P wave velocity) 1.3 (S wave velocity)	In this study
		Young's modulus		1.3	
		Uniaxial compressive strength		1.1	
		Thermal conductivity		1.8	

* EDZ size in the wall and roof was considerably smaller, 0.3 - 0.7.

W/mK 이고 표준편차는 0.15로 나타났다. 반면 굴착 후의 열전도도는 1.73~2.99 W/mK 로 나타났으며, 평균값은 2.43 W/mK 이고 표준편차는 0.36으로 나타났다. 굴착 전, 후의 열전도도를 살펴본 결과, 평균값을 기준으로 열전도도가 약 20% 정도 감소한 것으로 나타났으며, 그 변화 범위는 약 1.8 m 인 것으로 판단된다.

3.2.3 암석의 열전도도와 공극률의 상관관계

일반적으로 암석의 열전도도는 암석의 공극률이 증가할수록 감소하는 것으로 보고된다(Thomas 외, 1973; Maqsood 외, 2004; Cho 외, 2009). 상온에서의 0.03 W/mK 인 공극의 열전도도에 비해, 화강암의 주요 광물의 열전도도는 상온에서 약 1.6~7.7 W/mK 로 훨씬 더 크기 때문에 공극률의 증가는 암석의 열전도도의 감소로 나타나게 된다(Horai, 1971). Fig. 11에 잘 나타나 있듯이, 그러한 경향은 본 연구에서도 확연히 드러났다. 본 연구에서 수행된 암석의 열전도도(K)와 공극률(ϕ)의 상관관계를 Thomas 외(1973)와 같이 1차 직선으로 회귀한 결과 식 (2)와 같이 나타났으며, 결정계수(R^2)는 0.686으로 나타났다.

$$K = 3.22 - 0.29\phi \quad (2)$$

Fig. 5, Fig 10, 그리고 Fig. 11의 결과를 종합하여 보면, 발파로 인한 발파 충격과 응력의 재분배는 미세균열의 발생과 기존 균열의 확장을 발생시키고 이로 인해 공극률이 변화하게 되고, 이러한 공극률의 변화가 열전도도의 감소를 야기한 것으로 판단된다.

3.3 결과정리

발파 전·후의 획득한 암석의 물성변화를 이용하여, KURT 굴착손상영역의 범위를 정량적으로 평가하였다. 그 결과를 Table 3에 지하처분연구시설에서 수행된 현장 시험의 결과뿐만 아니라 세계 각국에서 측정된 굴착손상영역의 범위와도 비교하여 정리하였다. 현장에서 획득한 암석 코어의 RQD값을 비교한 결과로부터 구한 굴착손상영역의 범위는 약 2 m 정도로 나타났으며 Goodman jack 시험의 결과로 구한 굴착손상범위는 약 2.3 m 인 것으로 나타나있다(Table 3). 본 연구에서 수행한 실험실 시험으로부터 구한 굴착손상영역은 1.1 - 2.4 m 정도로 현장시험결과와 비슷하게 나타났다. 또한 Table 3에 나타나 있는 세계 각국의 지하연구시설에서 수행된 결과를 살펴보면 암종과 굴착방법에 따라 굴착손상영역의 범위는 다양하게 나타나고 있다. 암종과 굴착방법이 같은 캐나다와 스웨덴의 결과를 비교하여 살펴보았

을 때, 캐나다의 손상영역 범위보다는 크게 나타났고 스웨덴의 손상영역 범위와는 비슷하게 나타남을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 KURT의 건설로 인해 발생된 굴착손상영역(EDZ)에 대해 정량적으로 평가하고자 KURT에서 획득한 암석의 물리적, 역학적, 그리고 열적 물성 변화를 살펴보았다. 발파 전·후의 암석의 물성 변화를 살펴본 결과, 암석의 비중과 포아송 비는 발파 전·후에 큰 차이가 없었으나 공극률, 탄성파 속도, 탄성계수, 일축 압축강도, 그리고 열전도도의 경우에는 큰 차이를 보였다. 공극률의 경우, 굴착 전의 공극률에 비해 발파에 의한 굴착 후의 공극률이 약 140% 정도 증가한 것을 알 수 있었으며, 굴착손상영역의 범위는 약 2.4 m 인 것으로 판단되었다. P파 속도, S파 속도, 탄성계수, 그리고 일축압축강도의 경우, 약 11~37% 정도 감소한 것으로 나타났으며, 굴착손상영역의 범위는 1.1~1.3 m 인 것으로 나타났다. 또한 굴착손상영역에서의 열전도도는 굴착 전의 열전도도와 비교했을 때, 약 20% 정도 적게 나타남을 알 수 있었으며 그 영향 범위는 약 1.8 m 인 것으로 나타났다. 이러한 열전도도의 변화는 굴착으로 인한 발파 충격과 응력의 재분배로 인해 미세균열의 발생과 기존 균열의 확장을 발생시키며 이로 인해 공극률이 변화하게 되고, 공극률의 변화가 열전도도의 감소를 야기한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 원자력 연구개발 중장기 계획사업의 일환인 공학적 방벽 성능실증기술개발 과제(53324-11)로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 조원진, 박정화, 권상기, 2004, 소규모 지하처분연구시설 기본설계, KAERI/TR-2769/2004.
2. Autio, J., 1996, Characterization of the excavation disturbance caused by boring of the experimental full scale deposition holes in the research tunnel at Olkilouto. Posiva-96-09, Posiva, Helsinki.
3. Autio, J., T. Hjerpe, M. Siitai-Kauppi, 2005, Porosity, diffusivity and permeability of EDZ in crystalline rock and effect on the migration in a KBS-3 type repository. In EU, 2005. Impact of excavation disturbed or damaged zone (EDZ) on the performance of radioactive waste

- geological repositories. Proc. European Commission Cluster Conference and Workshop. pp. 149-155.
4. Autio, J., P. Gribi, L. Johnson, P. Marschall, 2006, Effect of excavation damaged zone on gas migration in a KBS-3H type repository at Olkilouo. *Physics and Chemistry of the earth* Vol. 31, pp. 649-653.
 5. Bäckblom, G., 2008, Excavation damaged and disturbance in crystalline rock - Results from experiments and analyses. SKB Technical report TR 08-08, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
 6. Bäckblom, G., C. D. Martin, 1999, Recent experiments in hard rocks to study the excavation response: Implications for the performance of a nuclear waste geological repository. *Tunnelling and Underground Space Technology*. Vol. 14, No. 3, pp. 377-394.
 7. Börgesson, L., R. Pusch, A. Fredricksson, H. Hökmark, O. Karland, R. Sandén, 1992, Final report of zones disturbed by blasting and stress release. Stripa Project 92-08, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
 8. Bossart, P., P. M. Meier, A. Moeri, T. Tric, J. Mayor, 2002, Geological and hydraulic characterisation of the excavation disturbed zone in Opalinus Clay of the Mont Terri Rock Laboratory. *Eng. Geol.* Vol. 66, pp. 19-38.
 9. Bossart, P., T. Tric, P. M. Meier, J. Mayor, 2004, Structural and hydrogeological characterisation of the excavation-disturbed zone in the Opalinus Clay (Mont Terri Project, Switzerland). *Applied Clay Science*. Vol. 26, pp. 429-448.
 10. Brodsky, N. S., M. Riggins, J. Connolly, 1997, Thermal expansion, thermal conductivity, and heat capacity measurements at Yucca mountain, Nevada. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 34, No. 3-4, pp. 40.
 11. Carlson, S. R., R. P. Young, 1993, Acoustic emission and ultrasonic velocity study of excavation-induced microcrack damage at the underground research laboratory. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 30, No. 7, pp. 901-907.
 12. Chandler, N. A., E. T. Kozak, C. D. Martin, 1996, Connected pathways in the EDZ and the potential for flow along tunnels. In: Martino, J. B., Martin, C. D., (eds), 1996: *Designing the Excavation Disturbed Zone for a nuclear repository in hard rock*. Proc. Can. Nucl. Soc. Sep 20, 1996, Winnipeg, Canada, Canadian Nuclear Society, Toronto.
 13. Chandler, N. A., A. Courmut, D. A. Dixon, C. Fairhurst, F. Hansen, M. Gray, K. Hara, Y. Ishijima, E. Kozak, J. Martino, K. Matsumoto, G. McCrank, Y. Sugita, P. Thompson, J. Tillerson, B. Vignal, 2002, The five-year report of the Tunnel Sealing Experiment: An interntional project of AECL, JNC, ANDRA and WIPP. Atomic Energy of Canada Limited Report AECL-12727. Chalk River, Canada.
 14. Cho, W. J., S. Kwon, J. W. Choi, 2009, The thermal conductivity for granite with various water contents. *Eng. Geol.* Vol. 107, pp. 167-171.
 15. Emsley, S., O. Sllson, L. Seinberg, H. J. Alheid, S. Falls, 1997, ZEDEX - a study of damage and disturbance from tunnel excavation by blasting and tunnel boring. SKB Technical Report TR 97-30, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
 16. Fairhurst, C., 1999, Rock mechanics and nuclear waste repositories, Proceedings of the International Workshop on the Rock Mechanics of Nuclear Waste Repositories, American Rock Mechanics Association. pp 1-44.
 17. Gray, M., 1993, OECD/NEA International Stripa Project 1980-1992. Overview III, Engineered Barriers. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
 18. Horai, K., 1971, Thermal conductivity of rock-forming minerals. *J. Geophys. Res.* Vol. 76, pp. 1278-1308.
 19. Hou, Z., 2003, Mechanical and hydraulic behavior of rock salt in the excavation disturbed zone around underground facilities. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 40, NO. 5, pp. 725-738.
 20. Jackson, R., J. S. O. Lau, A. Annor, 1989, Mechanical, thermomechanical, and joint properties of rock samples from the site of AECL's Underground Research Laboratory, Lac du Bonnet, Manitoba. Proceedings of the 42nd Canadian Geotechnical Conference on Materials. Winnipeg, pp. 41-49.
 21. Kamemura, K., K. Sugihara, 1993, In-situ tests and numerical analysis of excavation disturbed zone around a drift in Neogene sedimentary rock. In: *Assessment and Prevention of Failure Phenimina in Rock Engineeing*. Balkema, Rotterdam. pp. 301-307.
 22. Katsube, T. J., J. P. Hume, 1987, Geotechnical studies at Whiteshell Research Area (RA-3). Canada Centre for Mineral and Energy Technology, Mining Research Laboratories Divisional Report, MRL 87-52 (INT).
 23. Kukkonen, I., L. Kiverkäs, S. Vuoriainen, M. Kääriä, 2011, Thermal properties of rocks in Olkilouo: Results of laboratory measurements 1994-2010. Posiva Oy, Working Report 2011-77.
 24. Kwon, S., W. J. Cho, 2008, The influence of an excavation damaged zone on the thermal-mechanical and hydro-mechanical behaviors of an underground excavation. *Eng. Geol.* Vol. 101, pp. 110-123.
 25. Kwon, S., C. S. Lee, S. J. Cho, S. W. Jeon, W. J. Cho, 2009, An investigation of the excavation damaged zone at the KAERI underground research tunnel. *Tunnel and Underground Space Technology*. Vol. 24, pp. 1-13.
 26. Malmgren, L., D. Saiang, J. Töyrä, A. Bodare, 2007, The excavation disturbed zone (EDZ) at Kiirunavaara mine. *Eng. Geol.* Vol. 61, pp. 1-15.
 27. Maqsood, A., I. H. Gul, M. A. Rehman, 2004, Thermal transport properties of granites in the temperature range 253-333K. *J. Phys. D Appl. Phys.* Vol. 37, pp. 1405-1409.
 28. Marschall, P., E. Fein, H. Kull, G. W. Lanyon, L. Liedtke, H. Müller-Lyda, Shao, 1999, Conclusions of the Tunnel Near-Field Programme (CTN). Nagra Technical Report 99-07, Nagra, Wettingen, Switzerland.
 29. Martin, C. D., P. K. Kaiser, D. R. McCreath, 1999. Hoek-Brown parameters for predicting the depth of

- brittle failure around tunnels, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 36, No. 1, pp. 136-151.
30. Martino, J. B., N. A. Chandler, 2004, Excavation-induced damage studies at the underground research laboratory. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 41, No. 8, pp. 1413-1426.
 31. Matsui, H., T. Sato, K. Sugihara, T. Kikuchi, 1998, Overview of the EDE(Excavation Disturbance Experiment)-II at Kamaishi mine. Kamaishi Int. Workshop Proc. 24-25 Aug. 1998. PNCTN7413 98-023. JNC, Tokyo.
 32. Matsui, H., K. Sugihara, T. Sato, 2003, In-situ experiments on excavation disturbance in JNC's Geoscientific Research Programme. Impact of the excavation disturbed or damaged zone (EDZ) on the performance of radioactive waste geological repositories. Proceedings European Commission CLUSTER Conference and Workshop on EDZ in Radioactive Waste Geological Repositories. ENRESA.
 33. Mügler, C., M. Filippi, Ph. Montarnal, J. -M. Martinez, Y. Wileveau, 2006, Determination of the thermal conductivity of opalinus clay via simulation of experiments performed at the Mont Terri underground laboratory. Journal of Applied Geophysics. Vol. 58, pp. 112-129.
 34. Nagra, 2001, Sondierbohrung Benken-Untersuchungsbericht. Nagra Interim Report NTB 00-01.
 35. Pusch, R., R. Stanfors, 1992, The zone of disturbance around blasted tunnels at depth. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 29, No. 5, pp. 447-456.
 36. Read, R. S., C. D. Martin, 1996, Technical summary of AECL's Mine-By Experiment. Phase 1: Excavation Responses. AECL-11311, CoG-95-171. AECL, Pinawa, Canada.
 37. Rutqvist, J., J. Noorishad, C. -F. Tsang, 1999, Coupled thermohydromechanical analysis of a heater test in unsaturated clay and fractured rock at Kamaishi mine. SKI report. ISSN 1104-1374.
 38. Sato, T., T. Kikuchi, K. Sugihara, 2000, In-situ experiments on an excavation disturbed zone induced by mechanical excavation in Neogene sedimentary rock at Tono mine, Central Japan. Eng. Geol. Vol. 56, pp. 97-108.
 39. Schärli, U., L. Rybach, 1984, On the thermal conductivity of low-porosity crystalline rocks. Tectonophysics. Vol. 103, pp. 307-313.
 40. Simmons, G. R., P. Baumgartner, 1994, The disposal of Canada's nuclear fuel waste: engineering for a disposal facility. AECL Research. AECL-10715.
 41. SKB, 1999, SR 97 - Deep repository for spent nuclear fuel. SR 97 - Post-closure safety. Main report - Vol. I, Vol. II and Summary. SKB Technical Report TR-99-06. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
 42. Stephansson, O., 1999, Rock mechanics and rock engineering of spent nuclear fuel and radioactive waste repositories in Sweden, Proceedings of the International Workshop on the Rock Mechanics of Nuclear Waste Repositories. American Rock Mechanics Association. pp. 205-227.
 43. Sugihara, K., H. Yoshioka, H. Matsui, T. Sato, 1993, Preliminary results of a study on the responses of sedimentary rocks to shaft excavation. Eng. Geol. Vol. 35, pp. 223-228.
 44. Sundberg, J., G. Innova, 2003, Thermal properties at Äspö HRL, analysis of distribution and scale factors. SKB Report R-03-17, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
 45. Sweet, J. N., J. E. McCreight, 1980, Thermal properties measurements on rocksalt samples from the site of the proposed waste isolation pilot. SAND80-0709, Sandia National Laboratory, Albuquerque, NM.
 46. Thomas, Jr. J., R. R. Frost, R. Robert, R. D. Harvey, 1973, Thermal conductivity of carbonate rocks. Eng. Geo. Vol. 7, No. 1, pp. 3-12.
 47. Tsang, C. -F., F. Bemier, C. Davies, 2005, Geohydromechanical processes in the excavation damaged zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays-in the context of radioactive waste disposal. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 42, No. 1, pp. 109-125.

이 창 수

2004년 서울대학교 공과대학 지구환경
시스템공학부 공학사
2007년 서울대학교 공과대학 에너지시
스템공학부 박사수료

Tel: 02-880-9304
E-mail: cslee@snu.ac.kr
현재 서울대학교 공과대학 에너지시스
템공학부 석박사 통합과정



권 상 기

1987년 서울대학교 자원공학과 공학사
1989년 서울대학교 자원공학과 공학석사
1996년 University of Missouri-Rolla,
Mining Eng. 공학박사

Tel: 032-860-1554
E-mail: kwonsk@inha.ac.kr
현재 인하대학교 공과대학 에너지자원
공학과 부교수



최 종 원

1984년 한양대학교 공과대학 원자력 공
학과 공학사
1986년 한양대학교 대학원 원자력 공학
과 공학석사
1992년 한양대학교 대학원 원자력 공학
과 공학박사

Tel: 042-868-2041
E-mail: njwchoi@kaeri.re.kr
현재 한국원자력연구원 방사성폐기물
기술개발부 책임연구원



전 석 원

1987년 서울대학교 공과대학 자원공학
과 공학사
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
1996년 미국 아리조나 주립대학 공학박사

Tel: 02-880-8807
E-mail: sjeon@snu.ac.kr
현재 서울대학교 공과대학 에너지시스
템공학부 교수

