Review

Rock Mechanics Site Characterization for HLW Disposal Facilities

Jeong-Gi Um¹, Seung Gyu Hyun^{2,*}

¹Dept. of Energy Resources Engineering, Pukyong National University

²Dept. of Nuclear Safety Research, Korea Institute of Nuclear Safety

*Corresponding author : mgodo@kins.re.kr

ARTICLE INFORMATION

Manuscript received 25 January 2022

Received in revised form 10 February 2022

Manuscript accepted 14 February 2022

Available online 28 February 2022

DOI : <http://dx.doi.org/10.9719/EEG.2022.55.1.1>

Research Highlights

- To review essential parameters related to rock mechanics and thermal properties of the HLW disposal site.
- To explore technical backgrounds of the site descriptive model through the cases of SKB and Posiva.
- To provide a basic guideline for developing rock mechanics site investigation and site evaluation program.

ABSTRACT

The mechanical and thermal properties of the rock masses can affect the performance associated with both the isolating and retarding capacities of radioactive materials within the deep geological disposal system for High-Level Radioactive Waste (HLW). In this study, the essential parameters for the site descriptive model (SDM) related to the rock mechanics and thermal properties of the HLW disposal facilities site were reviewed, and the technical background was explored through the cases of the preceding site descriptive models developed by SKB (Swedish Nuclear and Fuel Management Company), Sweden and Posiva, Finland. SKB and Posiva studied parameters essential for the investigation and evaluation of mechanical and thermal properties, and derived a rock mechanics site descriptive model for safety evaluation and construction of the HLW disposal facilities. The rock mechanics SDM includes the results obtained from investigation and evaluation of the strength and deformability of intact rocks, fractures, and fractured rock masses, as well as the geometry of large-scaled deformation zones, the small-scaled fracture network system, thermal properties of rocks, and the in situ stress distribution of the disposal site. In addition, the site descriptive model should provide the sensitivity analysis results for the input parameters, and present the results obtained from evaluation of uncertainty.

Keywords: high-level radioactive waste, rock mechanics, site characterization, fractured rock mass, site descriptive model

Citation: Um, J.-G., Hyun, S.G. (2022) Rock Mechanics Site Characterization for HLW Disposal Facilities. Korea Economic and Environmental Geology, v.55, p.1-17, doi:10.9719/EEG2022.55.1.1.

해설

고준위방사성폐기물 처분시설 부지에 대한 암반역학 부지특성화

엄정기¹ · 현승규^{2,*}

¹부경대학교 에너지자원공학과

²한국원자력안전기술원 원자력안전연구실

*책임저자 : mgodo@kins.re.kr

요 약

암반의 역학적 및 열적 특성은 고준위방사성폐기물(high-level radioactive waste; HLW) 심지층 처분시스템 내 방사성 물질의 격리 및 이동 지연 능력과 관련된 성능에 영향을 미칠 수 있다. 이 연구는 HLW 처분시설 부지의 암반역학적 및 열적 특성과 관련된 부지설명모델에 필수적인 항목을 고찰하고 스웨덴과 핀란드의 선행 부지설명모델 사례를 통한 기술적 배경을 논의하였다. 스웨덴 SKB (Swedish Nuclear and Fuel Management Company)와 핀란드 Posiva는 암반역학적 및 열적 특성 조사·평가에 필수적인 항목을 제시하고 부지의 안전성 분석과 처분시설의 건설을 위한 암반역학 부지설명모델을 도출하였다. 암반역학 부지설명모델은 처분시설 부지 내 응력 분포와 더불어 신선암, 절리, 절리성 암반에 대한 강도 및 변형특성과 대규모 변형대의 기하학적 구조, 소규모 불연속면의 연결망 구조 및 암석의 열적 특성에 대한 조사·평가 결과를 포함한다. 또한, 암반역학 부지설명모델은 입력변수에 대한 민감도 분석결과와 입력변수의 불확실성에 대한 평가 결과를 제시하여야 한다.

주요어 : 고준위방사성폐기물, 암반역학, 부지특성화, 절리성 암반, 부지설명모델

1. 서 론

고준위방사성폐기물(HLW) 심지층 처분시설을 위한 부지선정, 건설 및 운영과 관련하여 부지특성화는 처분부지 지역의 안정성 및 적합성 평가에 필요한 광범위한 기반 데이터를 제공하는 데에 목적이 있다. 부지에 대한 조사·평가는 지질학, 암반역학, 수리지질학, 수리지화학 및 지표 생태계를 포함하는 부지설명모델(site descriptive model; SDM)을 구축하는 방식으로 수행된다. SDM은 HLW 처분부지에 대한 이해를 위해 필수적이며 이후 수행되는 부지의 안전성 평가와 더불어 처분시설의 배치 계획 및 설계에 활용된다. IAEA(2011a)는 처분시설 부지특성화가 부지의 현재 상태 및 자연변화에 따른 미래에 대한 이해를 제공할 수 있을 정도로 수행되어야 함을 요구하고 있다. 우리나라의 현행 원자력안전법 시행규칙은 방사성폐기물 처분시설의 건설 및 운영 허가와 관련하여 방사선환경영향평가서 및 안전성분석보고서 작성을 요구하고 있으며 부지특성화와 관련하여 상세한 요건은 중·저준위방사성폐기물에 대한 원자력안전위원회 고시가 규정되어 있다. 그러나 HLW 처분시설에 대한 부지특성화와 관련하여 상세한 요건은 아직 마련되지 못한 실정이다. IAEA(2011b)의 부지조사 및 특성화 지침은 심지층 특성 규명을 위한 실내 및 현장시험을 비롯하여 시추, 물

리탐사, 지질조사를 포함하는 부지특성화를 위한 조사 및 해석모델 등의 심지층 특성에 대한 평가방법이 적절하게 제시되어야 함을 요구하고 있다.

절리성 암반(fractured rock mass)의 역학적 특성은 방사성폐기물 처분시스템 내 방사성물질의 격리 및 이동 지연과 관련된 장단기적 성능에 지대한 영향을 미친다(SK B, 2001). 자연상에서 암반의 역학적 시스템은 대부분 정적 평형상태를 유지하고 있다. 이러한 정적 평형은 터널 및 지하공간과 관련된 굴착 또는 역학적 특성의 변화로 교란되며 이로 인한 응력 조건의 재분배는 암반의 변형 및 파괴를 유발할 수 있다. 역학적인 교란은 수직 구, 운영 및 건설 터널, 처분공 등을 포함하는 전반적인 지하 처분시설 주위의 전체 암반에서 다양한 규모로 발생하여 처분시설의 안전성에 영향을 미칠 수 있다(SK B, 2001). 역학적 평형상태 변화의 주요인은 심지층 처분시설의 건설 단계에 수행되는 암반 굴착이다. 시공에 따른 암반 굴착은 공동 주위의 현지응력(in situ stresses)을 교란하며, 이로 인해 형성된 유도응력(induced stresses)에 따른 암반의 변형은 처분시설 주위 암반의 건전성을 심각하게 악화시킬 수 있다. 이러한 역학적 특성의 변화 과정은 심부의 취성암반에서 공벽으로부터 암석슬랩이 점진적으로 떨어져 나오는 스폴링(spalling) 형태로 빈번히 발생한다(Hoek et al., 1995). 처분시설의 장단기 안전성

과 관련된 주요 고려 사항은 처분공 형상의 변화에 따른 완충재(buffer)와 처분용기(canister)의 손상 발생 가능성, 절리 및 파쇄대를 따라 나타나는 광범위한 변형 발생 가능성 또는 새로 형성되는 절리에 의해 천연방벽 성능의 저하 가능성 등을 들 수 있다. 또한, 공극압의 변화, 뒤채움재(backfill material)에 의한 팽창압, 모암의 열팽창, 지진의 영향, 광범위한 기후변화 등과 같은 다양한 하중 변화가 공학방벽 및 천연방벽에 미치는 영향을 평가할 수 있는 시나리오가 고려되어야 한다. 더불어 처분시설의 장기안전성 평가와 관련하여 암반의 역학적 특성이 오랜 시간 동안 풍화·변질로 인하여 변화될 수 있다는 점도 간과할 수 없다(SKB, 2001).

신선암(intact rocks)과 개별 절리(fractures or discontinuities)의 강도 및 변형특성은 응력-변형 관계와 파괴기준으로 설명할 수 있으며 부지에 대한 조사·평가 단계에서 회수된 암석 코어 시료로부터 암석역학시험을 통하여 결정할 수 있다. 절리성 암반의 역학적 특성은 신선암의 물성과 절리의 기하학적 및 역학적 특성에 의해 좌우된다. Fig. 1은 규모 종속적 암반의 강도 및 변형특성을 보여준다. 암반의 규모가 네 개 이상의 절리군(fracture set)을 포함할 정도로 충분히 크고 더불어 각 절리군의 역학적 특성이 서로 유사하다면 암반은 등방성 물질로 취급할 수도 있다. 이와 같은 암반의 역학적 특성은 암반분류법(rock mass classification system)을 이용하여 추정할 수 있지만, 절리군의 개수가 세 개 이하로 줄어들수록 암반의 이방성이

증대되며 역학적 특성 규명과 관련된 일반화된 보편적 방법론을 바로 적용하기 어렵다(SKB, 2001).

절리성 암반의 역학적 특성은 신선암, 절리, 암반, 변형대 등에 대한 다양한 규모의 암반역학 SDM을 통하여 제시되어야 한다. 암반역학 SDM은 처분부지에 대한 암반역학 특성의 분포 및 변화와 더불어 현지응력을 포함한다. 또한, 암반역학 SDM은 처분시설 건설의 용이성 관점에서 암질을 기술해야 한다. 암반역학 SDM을 구축하기 위한 조사·평가 항목은 현지응력을 비롯하여 신선암, 절리, 그리고 신선암과 절리를 포함한 암반과 관련된 암반역학적 및 열적 인자를 포함한다. 이와 같은 암반역학적 및 열적 인자는 다양한 연구 결과로부터 해석되어야 하며 지질학, 수리지질학 등 다른 분야로부터의 정보도 필요할 수 있다. HLW 처분시설 부지의 암반역학적 특성을 반영한 삼차원 암반역학 SDM은 광역적, 국지적 및 부지규모의 응력 모델을 포함해야 한다. 초기부지조사, 상세부지조사, 상세부지특성화, 운영단계에 이르는 단계별 SDM은 모델의 유효성 평가를 통하여 주기적인 개정이 필요하며 이에 대한 품질관리 및 품질보증 절차가 확립되어야 한다. 이 연구는 해외의 선행 SDM 사례를 통하여 고준위방사성폐기물 처분시설 부지의 암반역학적 특성과 관련하여 조사·평가에 필수적인 항목을 고찰하고 이를 기초로 고준위방사성폐기물 처분시설 부지특성 보고서 작성지침 고시(안) 개발과 관련하여 암반역학적 특성 인자들에 대한 기술적 배경을 검토하였다.

Fig. 1. Scale dependent strength and deformability (SKB, 2001).

2. 신선암의 역학적 특성

신선암의 변형은 외부에서 새로운 응력이 작용하거나 기존에 작용하던 응력의 분포 및 크기의 변화에 따른 암반의 역학적 상태 변화로 발생한다. 변형률(strain, ϵ)은 미소 단위 수준에서 암석의 단위 길이당 발생하는 변위(displacement)로 정의할 수 있으며 암석의 파괴 특성은 응력-변형률 관계로부터 파악할 수 있다. 암석에 응력이 재하 될 때 응력증가에 따라 변형률이 선형적으로 증가하고 이후 응력 제하에 의해 변형률이 초기 상태로 회복하는 경우의 암석 변형은 탄성변형으로 취급할 수 있다. 이 구간에서 응력-변형률의 비가 신선암의 탄성계수인 영률(Young's modulus, E)이다. 암석에 가해지는 응력이 특정 수준을 상회하는 경우 응력이 제거되어도 초기 상태로 완전히 회복하지 못하고 영구적인 변형을 유지하는데, 이러한 변형을 소성변형으로 정의할 수 있다. 신선암은 소성변형이 시작되는 항복점을 기점으로 탄소성 거동을 나타내는 경우가 대부분이다. 암석이 항복응력 이상으로 재하되어 파괴에 이르면 이때의 응력이 파괴강도(σ_p) 이

다(Brady and Brown, 1993).

신선암에 대한 일축압축시험은 신선암의 탄성계수와 포아송비(ν)를 평가할 수 있으며 삼축압축시험은 Mohr-Coulomb 파괴포락선에 의한 점착력(c)과 내부마찰각(Φ), 또는, Hoek-Brown 파괴포락선에 의한 Hoek-Brown 상수 m_i 를 추정할 수 있다(ISRM, 1978a; Bieniawski and Bernede, 1979; Hoek et al., 1995). 인장강도(σ_t)는 직접인장시험 또는 간접인장시험을 통하여 측정할 수 있다(ISRM, 1978b). 이와 같은 암석역학시험은 국제암반공학회(ISRM), 미국 재료시험학회(ASTM), 한국암반공학회 등에서 마련한 표

준시험 기준에 따라 수행하며 암반의 불균질성을 고려하여 충분한 수량의 시험이 계획되어야 한다.

HLW 처분시설과 관련된 예로서, 핀란드 Onkalo 시험터널에서 수행한 Posiva(2012a)의 부지설명모델에 포함된 VGN(veined gneiss), DGN(diatexitic gneiss), MGN(mica gneiss), TGG(tonalitic-granitic gneiss), PGR(pegmatitic granite) 신선암의 강도 분포가 Fig. 2에 나타나 있다. Onkalo 시험터널에서 지름 38 ~ 62 mm의 코어시료를 사용하여 수행된 실내 암석역학시험은 신선암의 강도 및 변형특성을 추정하기 위한 가장 신뢰할 수 있는 수단이지만, 처분시

Fig. 2. Distribution of (a) uniaxial compressive strength, (b) crack initiation strength and (c) indirect tensile strength of main rock types in Olkiluoto, Finland (Posiva, 2012a).

Table 1. Strength and deformability of Olkiluoto gneisses (GN) and pegmatite granite (PGR) at Onkalo tunnel, Finland (POPSIVA, 2012b)

Parameter	Rock type	Mean value	Standard deviation	95% conf. limits	Number of samples
Young's modulus, E (GPa)	GN	60	10	31/81	109
	PGR	60	8	47 / 73	13
Poisson's ratio, ν (mm/mm)	GN	0.25	0.04	0.15/0.33	109
	PGR	0.29	0.06	0.14/0.34	13
Uniaxial compressive strength, UCS (MPa)	GN	108	26	58/161	94
	PGR	102	27	56/146	13
Crack damage stress, σ_{CD} (MPa)	GN	99	26	51/153	84
	PGR	85	17	56/113	13
Crack initiation stress, σ_{CI} (MPa)	GN	52	12	34/83	85
	PGR	57	12	35/77	12
Indirect tensile strength, $\sigma_{T,i}$ (MPa)	GN	12.1	2.9	6.6/17.4	98
	PGR	8.9	2.1	4.6/12.0	51
Direct tensile strength, $\sigma_{T,D}$ (MPa)	GN	7.6	1.5	5.9/10.3	18
	PGR	-	-	-	0
Mode I fracture toughness, K_{IC}^* Chevron bend, (MPa ^{1/2})	GN	2.29	0.57	1.43/3.01	9
	PGR	1.58	0.2	1.39/1.77	3
Mode I fracture toughness, K_{IC}^* Brazilian disk experiment, (MPa ^{1/2})	GN	1.58	0.51	0.96/2.39	9
	PGR	1.12	0.1	1.02/1.21	3
Mode II fracture toughness, K_{IIIC}^* Punch-through with conf. (MPa ^{1/2})	GN	3.47	0.39	2.87/4.04	9
	PGR	3.30	0.47	2.89/3.77	3

설 부지를 포함하는 전체 평가 대상 영역에 대하여 사용 가능한 시료가 제한적이므로 실내시험 결과는 지질학 및 지구물리학 데이터와 함께 해석되었다(Posiva, 2012a). Onkalo 시험터널에 분포하는 암종은 편마암과 화강암 계열인데, -350 m ~ -450 m의 심도에 분포하는 4종의 편마암 계열 구성비는 VGN(50%), DGN(14%), TGG(5%), MGN(7%)이며 화강암 계열 구성비는 PGR(22%) 이다. Fig. 2의 일축압축시험 결과는 일축압축강도(USC) 및 균열개시강도(CI)와 암종 간에 유의미한 상관성을 지시하지만, 값의 분포가 비교적 큰 범위를 형성하는 것을 알 수 있다. USC의 중앙값은 95 MPa(DGN)에서 111 MPa(VGN) 범위이며 CI의 중앙값은 48 MPa(MGN)에서 58 MPa(PGR) 범위이다. 간접인장강도 역시 암종에 따라 다르게 나타났는데, 간접인장강도는 화강암류(평균 9.1 MPa)가 변성암류(11.4 ~ 14.4 MPa)보다 뚜렷하게 낮게 평가되었다. Posiva는 암반역학 SDM을 위하여 모든 시험·측정값에 대하여 데이터베이스를 구축하였지만 SDM에서 모든 편마암류는 Olkiluoto 편마암(GN)으로 통일하고 화강암(PGR)만 다른 유형으로 분류하였다. GN과 PGR의 강도 및 변형 파라미터가 Table 1에 요약되어 있는데, 신선암의 일반적인 물성 외에 파괴인성(fracture toughness)도 수록하였다(Posiva, 2012b).

Fig. 3은 스웨덴 Forsmark 지역의 결정질 화강암류에

대한 일축압축시험, 삼축압축시험, 인장시험에 의해 도출된 Hoek-Brown 및 Mohr-Coulomb 파괴포락선을 보여준다(SK, 2007a). 삼축압축시험을 위한 구속압(σ_3)의 범위는 2 ~ 20 MPa이며 구속압이 1 MPa 증가할 때 σ_1 은 대략 10 MPa 정도 증가 되었음을 알 수 있다. Table 2 및 Table 3은 각각 Forsmark 지역의 화강암류에 대한 Hoek-Brown 및 Mohr-Coulomb 파괴기준에 의한 강도정수를 수록하였다. Hoek-Brown 상수 m_i 는 암종에 따라 13 ~ 46의 범위를 갖는다. Mohr-Coulomb 파괴기준에 의한 점

Fig. 3. Hoek-Brown and Mohr-Coulomb failure envelopes for main rock types in Forsmark, Sweden (SKB, 2007a).

Table 2. Estimated Hoek-Brown strength parameters from rock domain RFM029 at Forsmark, Sweden (SKB, 2007a)

Fracture domain	Rock type	Number of samples	Min. strength ¹		Mean strength		Max. strength ²	
			UCS (MPa)	m_i	UCS (MPa)	m_i	UCS (MPa)	m_i
FFM01	Granite to granodiorite, metamorphic, medium grained	86	149	31	225	28	299	26
FFM01	Granite, granodiorite and tonalite, metamorphic, fine-to medium-grained	4	136	50	165	46	194	42
FFM01	Pegmatite, pegmatitic granite	15	165	19	227	18	289	17
FFM03	Granite to granodiorite, metamorphic, medium grained	25	196	29	221	28	246	28
FFM03	Tonalite to granodiorite, metamorphic	8	142	13	151	13	160	13

¹ Lower envelope, 95% probability.

² Upper envelope, 95% probability.

Table 3. Estimated Mohr-Coulomb strength parameters from rock domain RFM029 at Forsmark, Sweden (SKB, 2007a)

Fracture domain	Rock type	Number of samples	Min. strength ¹		Mean strength		Max. strength ²	
			C (MPa)	Φ (°)	C (MPa)	Φ (°)	C (MPa)	Φ (°)
FFM01	Granite to granodiorite, metamorphic, medium grained	86	19	59	28	60	36	61
FFM01	Granite, granodiorite and tonalite, metamorphic, fine to medium grained	4	17	62	19	63	22	63
FFM01	Pegmatite, pegmatitic granite	15	24	55	33	56	42	56
FFM03	Granite to granodiorite, metamorphic, medium grained	25	24	60	27	60	30	61
FFM03	Tonalite to granodiorite, metamorphic	8	24	51	25	51	26	51

¹ Lower envelope, 95% probability.

² Upper envelope, 95% probability.

Fig. 4. Distribution of (a) Young's modulus and (b) Poisson's ratio of main rock types at Forsmark, Sweden (SKB, 2007a)

착력은 17 ~ 42 MPa 범위로, 내부마찰각은 $51^{\circ} \sim 63^{\circ}$ 범위로 평가되었다. Fig. 4는 Forsmark 지역의 화강암류에서 측정된 탄성계수와 포아송비를 도시한 것인데, 파라미터 모두 통계적 변동성(variability)을 갖는 것을 알 수 있다.

Forsmark(SKB, 2007a)와 Onkalo의 사례에서 신선암의 암반역학 조사·평가 항목은 일축압축강도, 균열개시강도, 인장강도, Hoek-Brown 상수 m_i , Mohr-Coulomb 파괴기준에 의한 점착력, 내부마찰각 등의 강도 파라미터와 탄성계수, 포아송비 등의 변형 파라미터로 요약할 수 있다. 또한, 미세균열 모델에 필요한 파괴인성(mode I & II)에 대한 시험 결과도 포함된다. 상기한 모든 조사·평가 항목은 시료의 대표성, 시험 및 평가방법의 한계에 의해 변동성을 수반한다. 이는 암반역학 특성의 조사·평가 항목에 대하여 불확실성(uncertainty)과 변동성을 평가하고 이를 관리하는 것이 필수적임을 시사한다.

3. 절리성 암반의 역학적 특성

절리성 암반은 절리가 교차하여 형성된 암석 블록(신선암)의 집합체이다. 따라서 절리성 암반의 강도 및 변형특성을 이해하기 위해서는 암석 블록의 경계면으로 취급할 수 있는 절리의 강도 및 변형특성에 대한 조사 및 평가가 필요하다. 절리의 강도를 좌우하는 요소로 절리의 거칠기(JRC), 절리벽면강도(JCS), 풍화도, 충전물, 지하수 상태 등을 들 수 있으며 이들 요소에 의하여 절리의 최대전단강도(τ_p), 잔류전단강도(τ_r), 절리마찰각(Φ_f), 절리점착력(c_f), 절리수직강성(JKN), 절리전단강성(JKS) 등의 강도 및 변형특성이 결정된다. 절리의 강도 특성은 경사시험(tilt test) 및 직접전단시험(direct shear test)으로, 변형특성은 직접전단시험을 통하여 평가할 수 있다. Table 4

는 스웨덴 Forsmark 지역의 절리에 대한 직접전단시험 결과로부터 평가된 강도 특성을 요약하였다(SK, 2007a). 또한, Table 5는 직접전단시험에 의해 평가된 절리의 변형특성을 요약한 것이다(SK, 2007a). 절리의 강도 및 변형특성은 앞의 신선암에서와 같이 변동성을 수반하며 통계적 불확실성이 내재되었음을 알 수 있다.

절리성 암반의 강도 및 변형특성에 대한 평가는 앞에서 논의한 신선암과 절리의 강도 및 변형특성을 함께 고려해야 하는데, 이는 신선암과 절리의 상호작용으로 발생하는 역학적인 특성을 복합적으로 해석해야 하는 어려움이 따른다. 현재까지 절리성 암반의 강도 및 변형특성을 결정하는 방법은 크게 직접적인 방법과 간접적인 방법으로 발전하였다(Ryu et al., 2020). 직접적인 방법은 실내시험과 현장시험을 들 수 있는데, 미세균열이 주로 분포하는 소규모의 코어 시료로부터 얻을 수 있는 실내시험 결과는 현장규모에서 수행한 변형시험의 결과와 유의미한 차이를 보이는 경우가 대부분이다(Ryu et al., 2020). 절리성 암반의 현실적인 역학적 거동을 이해하기 위한 연구는 이론적으로 유의미한 응력 수준에서 절리를 포함하는 대규모 암반에 대한 시험을 필요로 한다(Ryu and Um, 2020). 대표적인 현장변형시험에는 공내팽창계시험(borehole dilatometer test), 평판재하시험(plate bearing test) 등이 있다.

간접적인 추정법은 RMR(rock mass rating), GSI(geological strength index), Q 등의 암반분류 지수와 강도 및 변형특성 간의 경험적 상관관계를 이용하는 방법이 주를 이룬다. Fig. 5는 스웨덴 Forsmark 지역의 시추공에서 5m 간격으로 평가한 Q 및 RMR 지수를 보여주는 삼차원 블록 다이어그램인데, 전반적으로 처분부지의 암질 상태가 매우 양호(청색, 보라색)함을 알 수 있다(SK, 2007a). Fig. 6

Table 4. Summary of strength properties from direct shear tests for the fracture domains at Forsmark, Sweden (SKB, 2007a)

Fracture domain	Peak friction (°)	Peak cohesion (MPa)	Residual friction (°)	Residual cohesion (MPa)
	mean/std. dev.	mean/std. dev.	mean/std. dev.	mean/std. dev.
	min - max uncertainty of μ	min - max uncertainty of μ	min - max uncertainty of μ	min - max uncertainty of μ
FFM01	36.6/2.9	0.8/0.3	34.9/3.4	0.3/0.2
	29.3 - 42.0	0.2 - 1.3	27.9 - 41.9	0.1 - 0.8
	±2.9%	±13.7%	±3.6%	±24.3%
FFM02	36.4/2.5	0.5/0.4	34.8/7.3	0.4/0.6
	34.4 - 40.0	0.2 - 1.0	24.1 - 40.3	0.1 - 1.3
	±6.7%	±78.4%	±20.6%	±147.0%
FFM03	37.0/1.7	0.6/0.2	34.2/6.2	0.5/0.4
	34.2 - 39.0	0.3 - 0.9	25.7 - 41.5	0.2 - 1.1
	±3.0%	±21.8%	±11.8%	±52.3%
FFM04	32.0/3.3	0.9/0.4	32.2/2.5	0.3/0.1
	28.5 - 35.0	0.6 - 1.4	29.6 - 34.6	0.2 - 0.4
	±11.7%	±50.3%	±8.8%	±37.7%
FFM05	37.0/1.8	0.8/0.2	34.3/3.0	0.4/0.1
	35.7 - 38.2	0.7 - 0.9	32.2 - 36.4	0.4 - 0.5
	±6.7%	±34.7%	±12.1%	±34.7%
DZ	35.3/2.4	0.8/0.5	34.8/2.0	0.3/0.2
	32.5 - 38.4	0.0 - 1.7	30.3 - 36.8	0.0 - 0.6
	±4.2%	±38.7%	±3.6%	±41.3%

Note: The uncertainty of the mean is quantified for a 95% confidence interval. Minimum and maximum truncation values are based on the observed min. and max. for the tested population.

Table 5. Summary of deformability properties from direct shear tests for the fracture domains at Forsmark, Sweden (SKB, 2007a)

Fracture domain	Normal stiffness, K_n (GPa/m)	Shear stiffness, $K_{S0.5}$ (GPa/m)	Shear stiffness, $K_{S5.0}$ (GPa/m)	Shear stiffness, $K_{S20.0}$ (GPa/m)
	mean/std. dev.	mean/std. dev.	mean/std. dev.	mean/std. dev.
	min - max uncertainty of μ	min - max uncertainty of μ	min - max uncertainty of μ	min - max uncertainty of μ
FFM01	656/396	10/6	26/9	34/10
	159 - 1,833	1 - 23	7 - 46	18 - 52
	±22.0%	±21.8%	±12.6%	±10.7%
FFM02	248/165	8/4	26/4	33/8
	115 - 483	4 - 12	21 - 31	25 - 41
	±65.2%	±49.0%	±15.1%	±23.8%
FFM03	293/193	8/4	31/7	35/10
	152 - 734	4 - 15	23 - 43	20 - 49
	±43.0%	±32.7%	±14.8%	±18.7%
FFM04	1,385/283	8/6	16/5	23/5
	1,072 - 1,624	1 - 12	12 - 22	18 - 29
	±23.1%	±84.9%	±35.4%	±24.6%
FFM05	599/57	6/3	20/7	25/2
	559 - 639	4 - 8	14 - 25	23 - 26
	±13.2%	±69.3%	±48.5%	±11.2%
DZ	662/729	12/10	26/9	31/8
	167 - 2,445	3 - 35	7 - 41	19 - 44
	±68.3%	±51.7%	±21.5%	±16.0%

Note: The uncertainty of the mean is quantified for a 95% confidence interval. Minimum and maximum truncation values are based on the observed min. and max. for the tested population.

Fig. 5. Estimated Q and RMR values from Forsmark, Sweden (SKB, 2007a).

Fig. 6. Histogram of GSI values estimated from Olkiluoto, Finland; (a) top part ($Z > -125\text{m}$) and (b) bottom part ($Z < -125\text{m}$) (Posiva, 2012b).

은 핀란드 Olkiluoto 지역에서 시추공 검층, 터널 맵핑 등의 다양한 데이터를 사용하여 GSI에 의한 암반분류 결과를 도식한 것으로(Posiva, 2012b), EL. -125 m 를 기준으로 천부보다 심부에서 GSI 값이 더욱 크게 평가되어 암질 상태가 더욱 양호함을 지시한다. Table 6은 암반분류지수에 의해 평가된 Forsmark 지역 내 절리성 암반에 대한 강도 및 변형특성을 요약하였다(SK B, 2007a). 여기서, 암반의 변형계수(E_m) 및 포아송비(ν_m)는 RMR 지수를 통하여 추정되었으며, GSI 지수와 Hoek-Brown 파괴기준을 통하여 절리성 암반에 대한 등가의 일축압축강도

(UCS_m), 인장강도(T_m), 마찰각(Φ_m), 점착력(c_m) 등의 Mohr-Coulomb 강도정수가 결정되었다. Forsmark의 초기 부지설명모델(SDM v1.2)에 보고된 암반의 강도 및 변형특성은 추후 개정을 통한 부지설명모델(SDM v2.2)의 결과와 비교적 큰 차이가 없지만, SDM의 주기적인 개정은 모델변수의 유효성 검증 측면에서 필수적인 부분이라 판단된다.

최근 전산 소프트웨어 및 하드웨어의 발달과 더불어 절리의 기하학적 속성 및 신선암과 절리의 상호작용을 고려하여 절리성 암반의 강도 및 변형특성을 파악할 수 있는 수치해석기법의 적용 사례가 증가하는 추세이다. Fig. 7은

Table 6. Comparison of the results from SDM 1.2 and modelling stage 2.2 for the rock mass outside deformation zones in domain RFM029 (SKB, 2007a)

Rock mass parameter	Forsmark v1.2			Forsmark v2.2		
	min	mean/std dev	max	min	mean/std dev	max
Q*	7	370 [86]	2,133	2	363 [100]	2,133
RMR	73	87/6	98	71	87/6	98
E _m (GPa)	37	69/10	75	34	69/10	76
V _m	0.12	0.22/0.03	0.27	0.11	0.22/0.03	0.30
UCS _m (H-B) (MPa)	18	80/29	153	23	84/28	153
Φ _m (°)	40	49/2	51	32	49/2	52
c _m (MPa)	15	25/4	35	12	26/4	35
UCS _m (M-C) (MPa)	63	134/26	196	44	138/25	196
T _m (MPa)	0.3	2/1	5	0.5	2/1	5

* Mode values are shown in brackets.

Fig. 7. Generated DFN model for diorite in Forsmark, Sweden (SKB, 2002a).

스웨덴 Forsmark 지역의 Äspö Hard Rock Laboratory(HRL)에서 지하 450 m 심도 부근의 시추공(KAS02) 절리 데이터를 사용하여 추계론적으로 구현한 삼차원 불연속절리망(discrete fracture network; DFN)의 이차원 단면이다. 이처럼 평가 대상 영역의 암중에 따라 절리성 암반을 모

사한 DFN에 대하여 개별요소법(discrete element method; DEM)을 적용하여 강도 및 변형특성을 평가한 결과가 Table 7에 수록되어 있다(SK, 2002b). 수치해석의 입력 데이터로 사용되는 신선암 및 절리의 강도 및 변형특성에 관련된 항목은 앞에서 논의한 바와 같으며 수치해석

Table 7. Estimated strength and deformability of fractured rock mass at Forsmark, Sweden (SKB, 2002b)

Lithology	Rock mass strength			Rock mass modulus			Poisson's ratio		
	mean (MPa)	5/95 percentiles (MPa)	cov	mean (GPa)	5/95 percentiles (MPa)	cov	mean	5/95 percentiles (MPa)	cov
Äspö diorite	140.1	83 - 198	0.25	37.2	25 - 49	0.20	0.34	0.28 - 0.42	0.15
Småland granite	124.3	73 - 175	0.25	42.0	28 - 56	0.20	0.32	0.28 - 0.40	0.15
Fine grained granite	114.4	68 - 161	0.25	36.4	24 - 48	0.20	0.31	0.28 - 0.39	0.15
Mixed lithology	75.0	44 - 106	0.25	36.4	24 - 48	0.20	0.32	0.28 - 0.39	0.15

Note: cov = coefficient of variation.

Table 8. Inter relationships between V_p , E_m and Q_c (Barton, 2002)

Q_c	0.001	0.01	0.1	1.0	10	100	1000
V_p	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5 km/s
E_m	1.0	2.2	4.6	10	21.5	46.4	100 GPa

Fig. 8. Maximum and minimum P-wave velocities with respect to depth of the borehole KMF01A (SKB, 2003).

의 경계조건으로 현지응력에 대한 데이터가 필요하다.

처분시설은 지진 또는 발파진동에 영향을 받을 수 있다. 이에 따른 암반의 거동을 평가하기 위해서는 현장에 대한 P파 및 S파의 속도와 같은 동탄성상수에 대한 정보가 필요하다. 또한, P파 속도는 암반에 대해 간접적인 변형계수 추정에 활용할 수 있다(Posiva, 2018). Fig. 8은 Forsmark 부지의 시추공 KMF01A에서 심도에 따라 측정된 최대 및 최소 P파 속도(V_p)를 보여준다(SK, 2003). Barton(2002)은 시추코어 로깅을 통하여 분석한 암반분류지수 Q_c 와 V_p 및 E_m 의 관계를 Table 8과 같이 제시한 바 있다.

4. 현지응력(원위치 초기응력)

현지응력은 심지층 처분시설이 위치하는 암반에 작용하는 지각 응력이다. 지하 암반에 작용하는 응력은 주로 중력과 관련된 암반의 상재 하중에 의한 수직 방향과 조구조 운동과 관련된 압축, 인장, 마찰 등에 의한 수평 방향으로 형성된다. 이처럼 지중의 임의 심도에서 자연 상태의 암반에 형성된 현지응력은 건설터널, 운영터널, 처

Fig. 9. Direction of maximum horizontal stress around Forsmark, Sweden (modified from www.world-stress-map.org).

분터널 및 처분공 등의 지하공동(underground opening) 시스템의 굴착에 의한 인공적 암반경계조건의 변화에 따른 암반의 반응을 해석할 때 초기 경계조건으로 이용된다. 암반 굴착의 방향, 제원, 형태 등에 관한 공학적 판단은 현지응력의 크기와 방향에 따라 영향을 받을 수 있으므로 현지응력에 대한 확고한 이해는 처분시설에 대한 안정성 및 적합성 제고를 위하여 매우 중요하다.

전 세계의 현지응력 현황은 World Stress Map(www.world-stress-map.org)을 참고하여 확인할 수 있다. World Stress Map에 포함된 데이터들은 주로 진앙 분석, 화산배열, 단층운동을 파악하기 위한 지질학적 관찰 등과 같은 다양한 방법들로부터 도출되었다. World Stress Map에 기록된 현지응력 데이터 중에서 암반역학 분야에서 일반적으로 사용되는 현지응력 측정법을 통해 보고된 것은 5% 미만이다. Fig. 9는 Forsmark 지역 및 스웨덴의 현지응력 데이터를 World Stress Map에서 발췌한 도면이다. 스웨덴에서 응력의 크기를 제어하는 주요 메커니즘은 알프스

와 대서양 중앙해령의 형성과 관련 있는데, 이로 인한 응력장은 최대 주응력 방향이 NW-SE 경향을 가지며 유럽 북서부의 대부분 지역에서 유사하다. 이처럼 응력장의 방향이 주로 지각판의 상대적 움직임에 영향을 받지만, 스웨덴과 덴마크 사이에 발달한 Tornquist 변형대와 같은 광역적 연약대에 의해서도 영향을 받은 것으로 알려져 있다. Tornquist 변형대의 주향은 스웨덴 중부 및 남부에서 관찰된 최대 주응력의 방향과 평행하다. 이와 같은 현지응력의 크기를 결정하는 메커니즘은 더욱 복잡하지만, 지각 최상부 수 km 내에서 응력의 크기는 깊이에 따른 증가가 일반적인 패턴이다. 특정 위치의 심도에서 현지응력의 크기는 보편적으로 암반역학 응력 측정법을 통하여 평가되어야 한다.

암반역학 분야에서 현지응력에 대한 조사·평가는 주로 수압파쇄법, 오버코어링법, CSIR 삼축셀법 등의 측정방법을 사용하며 그 외 간접적인 관찰을 이용한 방법이나 수치해석을 보조적인 도구로 활용하기도 한다. Fig. 10은

Fig. 10. Recommended stress gradients for Forsmark area (SKB, 2007b).

Forsmark 지역에서 오버코어링법, 수압파쇄법을 통하여 측정된 수평응력모델인데, 심도에 따른 수평응력은 큰 분

(a)

(b)

(c)

Fig. 11. Estimated in-situ stresses at Olkiluoto, Finland; (a) magnitude of maximum horizontal stress, (b) magnitude of minimum horizontal stress and (c) direction of maximum horizontal stress (Posiva, 2012a).

산의 범위를 나타냈다. 핀란드의 Olkiluoto 부지에서도 1990년부터 약 20년 동안 수압파쇄법, 오버코어링법, 코어디스킹법, AE(acoustic emission) 등 다양한 방법을 적용하여 현지응력에 대한 조사·평가가 수행되었다. 또한, 현장에 분포하는 절리에 의한 응력 측정값의 오류를 파악하기 위하여 삼차원 개별요소법에 의한 수치해석도 수행된 바 있다(Posiva, 2018). Fig. 11은 핀란드의 Onkalo 터널 주위의 현지응력 크기 및 방향에 대한 현지응력 측정결과를 보여주는데, 측정방법에 따라 결과의 차이가 유의미함을 알 수 있다. 현지응력 평가 결과의 신뢰도는 측정지와 현장의 복잡성에 따라 달라질 수 있다. 주 단열대 부근에서 현지응력의 크기와 방향은 측정 지점에 따라 다르게 평가될 수 있으며, 단열대 내부에서 평균 응력에 대한 예측은 더욱 불확실하고 변동성은 증대될 수 있다. 따라서 현지응력 추정에는 불확실성과 변동성에 대한 정량적 평가가 포함되어야 할 것으로 판단된다. 또한, 스웨덴과 핀란드의 사례에서 알 수 있듯이 현지응력은 한 가지 측정법에 따라 결정할 수 없으며 측정방법 간에 결과의 차이가 유의미하므로 다양한 조건과 자료를 통합하여 결정되어야 한다.

5. 변형대의 기하구조 및 DFN 모델

일반적으로 대규모 단층 및 전단대 등의 변형대는 확정적(deterministic) 선구조(linear structure)로 취급할 수 있다. 취성변형 이력이 있는 변형대는 단열대(fracture zone)로 칭하기도 한다. 반면에 상대적으로 크기가 작은 소규모 단층 및 절리와 같이 기하학적 변동성이 큰 불연속면의 기하학적 속성은 확정적으로 해석하기 어려우므로 추계론적 과정(stochastic process) 또는 확률론적 기법을 통하여 연구하는 것이 국제적인 추세이다. 공학적 판단에 있어서 소규모의 절리는 개개의 특성보다 전체적인 분포특성이 더욱 중요시될 수 있지만, 대규모의 변형대는 개별적 특성이 중요한 요소로 작용한다. 이는 암반의 안정성이 신선암 및 소규모 절리의 수리적 및 역학적 특성에 의해서도 좌우되지만, 변형대의 존재가 암반의 건전성에 결정적인 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 따라서 처분부지에 분포하는 변형대의 기하학적 및 역학적 특성 대한 확고한 이해는 HLW 처분시설과 관련된 터널 및 지하공간의 효과적인 설계, 건설 및 유지관리에 있어서 매우 중요하다. 일반적으로 신선암에 비하여 낮은 강도와 높은 수리전도 특성을 갖는 변형대는 수리적 및 역학적으로 많은 결함을 지니며 암반 투수성의 증가 및 강도 저하의 주요인으로 작용할 수 있다. 따라서 변형대의 상

Fig. 12. 3-D conceptual model for a brittle deformation zone at Forsmark, Sweden (SKB, 2007c).

태 및 분포양상을 반영한 열-수리-역학 연계해석은 처분 시설에 대한 안전성 분석의 핵심과정 중 하나이다.

스웨덴의 SKB는 Forsmark 지역에 대하여 길이 1000m 이상의 변형대를 대상으로 기하학적 구조에 대한 확정적 모델을 수립하였다. Fig. 12는 Forsmark 부지에 발달한 취성 변형대의 기하학적 구조에 대한 개념모델인데, 변형대의 기하학적 구조 모델을 도출하기 위하여 사용된 시추공 및 지표조사 자료는 다음과 같이 요약할 수 있다(SKB, 2007c).

- 모든 시추공에 대한 개별적인 해석 결과
- 시추공 및 시험굴 굴착면에 나타난 암석 변질대
- 시추공 및 시험굴 굴착면에서 조사된 절리 특성
- 탄성과 굴절 자료의 저속도 이상대
- 레이더 투과 감소가 관찰되는 레이더 이상대

Fig. 13은 Forsmark의 광역모델 내의 변형대 기하구조에 대한 최종 삼차원 모델인데, 붉은색은 고경사의 변형대로 지표에서 10km 이상 연장된다. 초록색과 베이지색은 길이 3 ~ 10 km의 고경사 변형대이다. 또한, 청색과 주황색은 저각의 경사를 이루는 변형대이다. SKB는 변형대의 기하학적 모델을 수립하고 더불어 지질학적 해석 데이터를 체계적으로 관리하기 위하여 CAD 기반의 가시화 시스템(rock visualization system)을 개발하였다(SKB, 2002c).

소규모의 절리 및 변형대에 대한 DFN을 구현함에 있어서 자연상의 실제 암반과 동일한 DFN을 구현하는 것은 거의 불가능하다. 이는 소규모 절리 및 변형대를 형

Fig. 13. 3-D model of the deformation zone at Forsmark, Sweden (SKB, 2007c).

성하는 절리망 시스템의 변동성 및 불확실성에 기인한다. 따라서 관련 분야의 연구자들은 절리성 암반을 형성하는 소규모 절리 및 변형대의 기하학적 요소들에 대한 확률 분포에 대한 분석을 통하여 삼차원 DFN 모델을 체계론적으로 구현하는 방법론 개발에 주안점을 두었다(SK, 2004).

HLW 처분부지의 절리에 대한 일반적인 조사항목은 절리의 방향성, 간격, 길이(영속성), 간극, 충전물, 거칠기 등을 들 수 있으며 블록형태, 블록크기 분포, 절리면의 상태 등에 대한 평가도 추가되어야 한다(ISRM, 1978c). 스웨덴 SKB는 Forsmark 지역에서 시추공영상검층 및 노

두조사를 통하여 절리의 기하학적 속성 분석을 위한 현장데이터를 취득하였으며 투수계수와 관련된 절리 간극의 크기도 평가한 바 있다(SK, 2004).

DFN은 지질 또는 응력 조건의 공간적 변화에 따라 다양하게 형성된다. 따라서 암반 내에서 절리시스템의 변화 양상을 반영하는 동질절리영역(homogeneous fracture domain)의 설정이 선행 되어야하며, 구분된 절리영역에 대한 DFN 해석이 개별적으로 이루어져야 한다. Fig. 14는 스웨덴 Forsmark의 SDM에서 절리영역을 구분한 예를 보여준다(SK, 2007d). DFN을 구성하기 위한 첫 단계는 방향성 분석을 통하여 절리군을 구분하고 각 절리군의 변동성을 포함한 방향 분포를 평가하는 것이다. Fig. 15는 노두의 절리데이터에 대한 방향성분석을 통하여 절리군을 구분한 예이다. 절리의 방향성 분석에 의한 절리군 구분이 완료되면 DFN의 통계적 특성을 설명하기 위해 개별 절리군에 대하여 절리의 길이 및 빈도 등의 기하학적 속성에 대한 분석이 수행된다. 도출된 기하학적 속성의 확률분포를 바탕으로 추계론적으로 모사된 DFN은 부지에 발달한 절리의 기하학적 특성을 잘 반영하는지에 대한 타당성 여부가 반드시 검증되어야 한다(SK, 2002a).

6. 암석의 열적 특성

HLW에 의해 생성되는 열은 공학적 및 천연방벽을 비롯하여 운영터널과 주위 모암에 이르기까지 처분시스템 전반에 걸쳐 온도의 증가를 초래할 수 있다. 따라서 개별 처분용기의 뒤편재로 활용되는 벤토나이트 완충재

(a)

(b)

Fig. 14. Fracture domain delineated from Forsmark, Sweden; (a) 2-D and (b) 3-D (SKB, 2007d).

Fig. 15. Examples of fracture survey at a outcrop of Forsmark, Sweden: (a) fracture outcrop mapping and (b) final fitted fracture sets (SKB, 2007d).

의 장기 밀봉 성능과 역학적 기능을 보증하기 위한 최대 벤토나이트 온도가 설계 요구 사항에 반영되어야 한다. 안전성 평가와 관련된 요건은 처분용기를 서로 가까이 배치하지 않도록 규정하고 있다. 반면에 처분용기 사이의 거리가 불필요하게 이격될 경우 지중저장 시스템의 규모 증가와 조사 영역의 확장에 따른 비용의 증대가 초래될 수 있다. 온도 기준을 충족시키는 데 필요한 최소

처분용기 간격을 결정하기 위하여 처분용기 규모에서 암반의 열적 특성 및 이의 공간적 변화에 대한 평가가 필수적이다. 스웨덴 SKB는 최종부지 선정과정에서 Laxemar와 Forsmark 부지 중 처분용기에 대한 온도 기준(100 °C 미만)을 적용할 때 처분터널 간격(40 m)을 변경하지 않고 처분공의 간격을 6 m 이내로 제시한 바 있다(SKB, 2009). 처분시설을 위한 부지특성화의 일환으로 조사·평가 되

Table 9. Measured thermal conductivity (W/(m·K)) at Forsmark, Sweden (SKB, 2008)

Rock code	Rock name	Mean	St. dev.	Max	Min	No. of samples
101057	Granite to granodiorite, metamorphic, medium-grained	3.68	0.17	4.01	3.25	74 ¹
101056	Granodiorite, metamorphic	3.04	0.09	3.20	2.98	5
101054	Tonalite to granodiorite, metamorphic	2.73	0.19	2.94	2.45	5
101051	Granite, granodiorite and tonalite, metamorphic, fine- to medium-grained	2.85	0.26	3.39	2.46	12
101058	Granite, metamorphic, aplitic	3.85	0.13	4.06	3.68	12 ²
101061	Pegmatite, pegmatitic granite	3.33	0.20	3.50	3.07	4
102017	Amphibolite	2.33	0.10	2.48	2.21	12
111058	Granite, fine- to medium-grained	3.47	0.17	3.62	3.22	5
103076	Felsic to intermediate volcanic rock, metamorphic	2.54		2.99	2.09	2
101033	Diorite, quartz diorite and gabbro, metamorphic	2.28				1

¹Includes four oxidised samples. ²Both altered and unaltered samples included.

Table 10. Measured thermal expansion (m/(m·K)) at Forsmark, Sweden (SKB, 2008)

Rock code	Rock name	Mean	St. dev.	Min	Max	No. of samples
101057	Granite to granodiorite	$7.7 \cdot 10^{-6}$	$2.2 \cdot 10^{-6}$	$2.1 \cdot 10^{-6}$	$1.5 \cdot 10^{-5}$	56
101056	Granodiorite	$8.1 \cdot 10^{-6}$	$3.4 \cdot 10^{-6}$	$5.2 \cdot 10^{-6}$	$1.4 \cdot 10^{-5}$	6
101054	Tonalite to granodiorite	$7.2 \cdot 10^{-6}$		$5.3 \cdot 10^{-6}$	$8.2 \cdot 10^{-5}$	3
101051	Granite, granodiorite and tonalite	$7.8 \cdot 10^{-6}$	$1.2 \cdot 10^{-6}$	$6.5 \cdot 10^{-6}$	$1.0 \cdot 10^{-5}$	6
101058	Granite, aplitic	$7.5 \cdot 10^{-6}$		$6.9 \cdot 10^{-6}$	$8.0 \cdot 10^{-5}$	3

Fig. 16. Distribution of thermal conductivity with respect to depth at Forsmark, Sweden (SKB, 2008).

어야할 암석의 열적 특성은 열전도도, 열용량, 열팽창계수, 지하수의 온도 및 온도경사 등을 들 수 있다(SKB, 2008). Table 9와 Table 10은 각각 Forsmark 지역의 다양한 암종을 대상으로 실온에서 측정한 열전도도와 열팽창계수이다. 또한, Fig. 16은 Forsmark 지역에서 심도에 따른 열전도도의 분포를 보여준다. 암석의 밀도와 열전도도 및 열용량 간의 관계에 대한 정립은 시추공의 밀도 데이터를 활용한 열적 특성의 공간적 상관구조 분석에 유용하게 이용될 수 있다.

7. 토의 및 결론

암반역학 부지특성화에 의한 부지설명모델은 최종 HLW 처분시설의 신뢰성을 평가하는 데 필요한 광범위한 데이터를 제공할 수 있도록 도출되어야 한다. 부지조사로부터 얻어진 데이터는 전체 부지설명모델을 구축하기 위한 분석 및 해석에 활용되는데, 부지설명모델은 지질학, 암반역학, 열적 특성, 수리지질학, 수리지구화학 및 지표 생태계와 관련된 전 분야의 모델로 구성된다. 이들 중 암반역학 부지설명모델의 핵심요소인 암반의 역학적 및 열적 특성은 부지조사 단계에서 직접 평가되거나 합리적으로 추정되어야 한다. 암반역학 부지특성화는 처분시설 초기 단계의 굴착과 암석의 장기적 변질까지 고려한 암반의 장단기 안정성을 예측하는 데 있어서 필수적이다. 암반역학 부지설명모델은 신선암, 절리, 변형대, 절리성 암반에 대한 강도 및 변형과 같은 암반의 역학적 특성의 분포와 현지응력에 대한 정보를 제공해야 한다. 이러한

역학적 특성에 대한 평가는 경험적 관계를 적용하거나 수치해석에 의한 이론적 접근을 통해 수행할 수 있는데, 이론적 접근의 핵심은 절리의 기하학적 속성 및 신선암과 절리의 강도정수와 같이 현장에서 조사·평가된 데이터 또는 수치모델링에 의해 암반의 역학적 특성을 규명하는 것이다.

HLW 처분시설을 위한 암반역학 부지특성화는 관련 기관 또는 전문학회에서 보고한 표준방법 또는 해석기법에 따라 수행할 수 있지만, 단순히 표준방법을 적용하는 것보다 목적에 따른 데이터의 필요성과 목적에 요구되는 데이터의 정밀성에 관련된 부지특성화의 품질에 대한 요건 수립이 더욱 중요할 수 있다. 따라서 품질관리(quality control) 체계를 정립하고 이를 규제할 수 있는 제도적 장치의 마련이 시급하다. 이 연구는 HLW 심지층 처분시설의 설계·건설 및 안전성 평가와 관련된 HLW 처분시설 부지특성 보고서 작성지침 고시(안) 개발을 위하여 스웨덴 SKB와 핀란드 Posiva에서 수행된 심지층 처분시설의 기술배경을 바탕으로 암반역학 및 열적 특성 분야의 조사·평가에 필수적인 항목을 논의하였다. HLW 처분시설 부지특성 보고서 작성지침 고시(안) 개발을 위한 암반역학 및 열적 특성에 대한 조사·평가 항목은 현지응력을 비롯하여 신선암, 절리, 그리고 신선암과 절리를 포함한 절리성 암반과 관련된 암반역학적 및 열적 인자를 포함하며 세부적인 사항은 다음과 같다.

1. 신선암은 일축압축강도, 균열개시강도, 인장강도, Hoek-Brown 상수 m_i , Mohr-Coulomb 파괴기준에 의한 점착력 및 내부마찰각, 파괴인성(mode 1 & 2) 등의 강

도정수와 탄성계수, 포아송비 등의 변형특성이 조사·평가되어야 한다.

2. 절리에 대한 암반역학 조사항목은 절리면 거칠기, 절리벽면강도, 풍화도, 충전물, 지하수 상태 등이며 이를 기초로 절리의 최대전단강도, 잔류전단강도, 절리마찰각, 절리점착력, 절리수직강성, 절리전단강성 등의 강도 및 변형특성이 평가되어야 한다.

3. 절리성 암반의 강도 및 변형특성에 대한 평가를 위하여 RMR, GSI, Q 등의 암반분류 지수가 결정되어야 하며 이들을 활용한 경험적 방법 또는 수치해석 기법을 통하여 절리성 암반의 변형계수, 포아송비, 일축압축강도, 인장강도, 마찰각, 점착력, Hoek-Brown 상수 m_b , s 및 a 등이 평가되어야 한다. 또한, 동적 응력에 의한 암반의 거동을 평가하기 위하여 암반의 탄성과 속도가 측정되어야 한다.

4. 현지응력의 크기 및 방향에 대한 통합응력측정 결과가 제시되어야 하며 처분시설 부지 및 주위에 분포하는 대규모 변형대에 대한 기하학적 구조가 시추 및 지표조사를 통하여 평가되어야 한다.

5. 시추공 영상검층 및 노출암반에 대한 페이스 맵핑을 통하여 절리의 상태(간극, 충전물, 거칠기)가 조사되어야 하며, 절리의 속성(방향성, 영속성, 체적빈도)에 대한 통계적 분석을 통하여 타당성이 검증된 DFN이 도출되어야 한다.

6. 암석(암반)의 열적 특성과 관련하여 열전도도, 열용량, 열팽창계수, 지하수의 온도 및 온도경사 등이 측정·평가되어야 한다.

7. 부지의 암반역학적 특성을 포괄하는 삼차원 암반역학 부지설명모델이 제시되어야하며 모델은 광역적, 국지적 및 부지규모의 응력 모델을 포함하여야 한다. 또한, 모델별 입력변수에 대한 민감도 분석결과 및 모델 수립에 이용된 입력변수와 모델의 불확실성에 대한 평가 결과를 제시하여야 한다.

8. 처분시설에 대한 건설 및 운영 기간의 안전성과 폐쇄 후의 장기안전성에 관련된 모니터링 계획 및 절차가 제시되어야 하며 초기부지조사, 상세부지조사, 상세부지특성화, 운영단계에 이르는 모든 조사·평가의 방법 및 결과와 관련된 원데이터(raw data) 및 보고서는 DB화를 통하여 보존하고 투명하게 관리되어야 한다.

사 사

이 연구는 원자력안전재단의 지원을 받아 수행되었다(NSRM 1805020-0421-CG100).

References

- Barton, N. (2002). Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v.39, p.185-216. doi: 10.1016/S1365-1609(02)00011-4
- Bieniawski, Z.T. and Bernede, M.J. (1979) Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials: Part 1. Suggested method for determining deformability of rock materials in uniaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v.16, p.138-140. doi: 10.1016/0148-9062(79)91451-7
- Brady, B.H.G. and Brown, E.T. (1993) *Rock mechanics: for underground mining*, 2nd ed., Chapman & Hall, 571p.
- Hoek, E., Kaiser, P.K. and Bawden, W.F. (1995) *Support of underground excavations in hard rock*, A.A. Balkema, Rotterdam, 215p.
- IAEA (2011a) *Disposal of radioactive waste: specific safety requirements*. No. SSR-5, Vienna, Austria, 104p.
- IAEA (2011b) *Geological disposal facilities for radioactive waste: specific safety guide*, No. SSG-14, Vienna, Austria, 62p.
- ISRM (1978a) Suggested methods for determining strength of rock materials in triaxial compression, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v.15, p.47-51. doi: 10.1016/0148-9062(78)91677-7
- ISRM (1978b) Suggested methods for determining tensile strength of rock materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v.15, p.99-103. doi: 10.1016/0148-9062(78)90003-7
- ISRM (1978c) Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v.15, p.319-368. doi: 10.1016/0148-9062(78)91472-9
- Posiva (2012a) *Olkiluoto site description 2011*. Posiva 2011-02, Posiva OY, Eurajoki, Finland, 1029p.
- Posiva (2012b) *ONKALO rock mechanics model (RMM) version 2.0*. WR 2012-07, Posiva OY, Olkiluoto, Finland, 94p.
- Posiva (2018) *Rock mechanics parametrization of fractures and brittle deformation zones of ONKALO based on the mapping data – synthesis*. Posiva 2018-01, Posiva OY, Eurajoki, Finland, 208p.
- Ryu, S. J. and Um, J. G. (2020) Effect of joint geometry on anisotropic deformability of jointed rock masses. *Econ. Environ. Geol.*, v.53, p.271-285. doi: 10.9719/EEG.2020.53.3.271
- Ryu, S. J., Um, J. G. and Park, J. Y. (2020) Estimation of strength and deformation modulus of the 3-D DFN system using the distinct element method. *Tunnel and Underground Space*, v.30, p.15-28. doi: 10.7474/TUS.2020.30.1.015
- SKB (2001) *Site investigations: Investigation methods and general execution programme*. TR-01-29, SKB, Stockholm, Sweden, 264p.
- SKB (2002a) *Fracture network models in three dimensions for four 30m cubes located at a depth region of 380-500m at Äspö HRL*. IPR-02-12. SKB, Stockholm, Sweden, 134p.
- SKB (2002b) *Estimation of rock mass strength and deformation in three dimensions for four 30m cubes located at a depth region of*

- 380-500m at Äspö HRL. IPR-02-11, SKB, Stockholm, Sweden, 81p.
- SKB (2002c) Site investigations: Strategy for rock mechanics site descriptive model. TR-02-01. SKB, Stockholm, Sweden, 155p.
- SKB (2003) Forsmark site investigation: Borehole: KFM01A, Determination of P-wave velocity, transverse borehole core. IPR-03-38, SKB, Stockholm, Sweden, 28p.
- SKB (2004) Preliminary site description: Forsmark area - version 1.1. R-04-15, SKB, Stockholm, Sweden, 523p.
- SKB (2007a) Rock mechanics Forsmark: Site descriptive modelling: Forsmark stage 2.2. R-07-31, SKB, Stockholm, Sweden, 277p.
- SKB (2007b) Quantifying in situ stress magnitudes and orientations for Forsmark: Forsmark stage 2.2. R-07-26, SKB, Stockholm, Sweden, 95p.
- SKB (2007c) Geology Forsmark: Site descriptive modelling: Forsmark stage 2.2. R-07-45, SKB, Stockholm, Sweden, 224p.
- SKB (2007d) Statistical geological discrete fracture network model: Forsmark modelling stage 2.2. R-07-46, SKB, Stockholm, Sweden, 139p.
- SKB (2008) Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase: SDM – Site Forsmark. TR-08-05, SKB, Stockholm, Sweden, 545p.
- SKB (2009) Strategy for thermal dimensioning of the final repository for spent nuclear fuel. R-09-04, SKB Stockholm, Sweden, 95p.