

TECHNICAL NOTE

KURT 주변 암반에 대한 불연속면 분포와 암질지수 평가

최승범¹, 박경우², 이용기^{3*}

¹한국원자력연구원 선임연구원, ²한국원자력연구원 책임연구원, ³한국원자력연구원 박사후연수생

Evaluation on the Discontinuity Characteristics and Rock Quality Designations of the Rock Mass around KURT

Seungbeom Choi¹, Kyung-Woo Park², and Yong-Ki Lee^{3*}

¹Senior Researcher, Korea Atomic Energy Research Institute

²Principal Researcher, Korea Atomic Energy Research Institute

³Post doctor Researcher, Korea Atomic Energy Research Institute

*Corresponding author: yklee12@kaeri.re.kr

Received: December 7, 2022

Revised: December 12, 2022

Accepted: December 13, 2022

ABSTRACT

The safety of the disposal repository for high level radioactive waste should be guaranteed for a quite long period so that the precise evaluations are required. The site characteristics of the discontinuities are essential part of the safe repository design including engineered barrier and natural barrier systems. The discontinuities act like weak planes and at the same time, they act as flow paths so that their features should be investigated thoroughly. RQD (Rock Quality Designation) is one of the most widely applied characterizing methods due to its simplicity, however, modified designations have been proposed because RQD has some drawbacks, such as its directivity and dependence on the threshold length. This study aims to evaluate the applicability of the modified designations by applying them to the rock mass around KURT and to produce fundamental database that will be utilized in future studies.

Keywords: Discontinuity distribution, Modified rock quality designation, KURT, Applicability

초록

불연속면 분포, 수정 암질 지수 KURT, 적용성 평가방사성폐기물처분장은 장기간에 걸쳐 그 안전성이 보장되어야 하며, 따라서 정밀한 수준의 안정성 평가가 수행되어야 한다. 처분장 부지의 불연속면 특성 평가는 공학적방벽과 천연방벽을 포함한 처분장의 안전한 설계에 있어 매우 중요한 요소이다. 암반 불연속면은 역학적으로는 연약면으로 작용하며 수리적으로는 지하수 유동의 통로가 되기 때문에 그 분포와 특성에 대한 정밀한 조사가 요구된다. 다양한 불연속면 특성화 방안 중 암질지수(RQD)는 그 편이성으로 인해 널리 적용되어왔으나, 방향성이 있고, 측정 기준 길이의 영향을 받는 등 적용상의 한계가 있기 때문에, 이를 보완한 형태의 수정 암질지수들이 제안되어왔다. 본 논문은 KURT 주변 암반의 불연속면 정보를 활용하여 수정 암질지수들의 적용성을 평가하고, 동시에 해당 암반의 불연속면 특성을 평가하여 향후 연구에 활용할 수 있는 기반자료를 생성하기 위해 작성되었다.

핵심어: 불연속면 분포, 수정 암질 지수, KURT, 적용성



1. 서론

고준위방사성폐기물처분장은 방사성폐기물의 유해성이 인간 생활권에 영향을 미치지 않을 수준까지 장기간에 걸쳐 안전성을 보장할 수 있어야 한다. 이를 위해 다양한 형태의 안전장치를 마련하여 처분장을 설계/건설하며, 동시에 장기간에 걸친 조사/평가를 통해 최대한 양호한 조건의 모임을 갖는 처분장 부지를 선정한다. 처분장 부지의 모임은 여타 일반 토목 구조물 혹은 자원탐사를 목적으로 한 지반조사에 비해 현저히 높은 수준의 조사를 필요로 한다. 또한, 한 분야의 평가만으로 처분장이 요구하는 높은 수준의 안정성을 보장할 수 없기 때문에, 다학제적 조사와 평가가 필수적이며 이는 암반공학, 지질학, 수리지질학, 지화학 등의 다양한 학문 분야를 포함한다(SKB, 1998, KIGAM, 2019).

처분장으로부터 핵종이 유출된다면 이는 지하수를 매개로 암반을 통과하여 최종적으로 지표까지 이동하기 때문에, 유출의 매개가 되는 지하수뿐만 아니라 유동의 매질 역할을 하는 암반에 대한 평가가 매우 중요하다. 처분장 모임을 양호한 수준의 암반으로 가정한다면, 대부분의 수리 유동은 불연속면을 통해 발생한다(Zimmerman and Bodvarsson, 1996, Lee, 1999). 동시에 암반 불연속면은 역학적으로 연약면이며(Bandis et al., 1983), 장기간의 열 조건 등 처분장 환경을 고려할 때, 처분장의 안전성에 대한 잠재적 위해 요소이므로(Hong et al., 2021), 해당 암반의 불연속면 분포 특성뿐만 아니라 이를 반영한 열-수리-역학적 평가가 필수적이다.

암질지수(RQD, Rock Quality Designation)는 처분장뿐만 아니라 터널, 사면, 지하 구조물 등 대부분의 암반공학적 과제와 이를 위한 지반조사에 적용된다. TCR(Total Core Recovery)에서 발전된 RQD(Deere, 1963)는, 그 개념이 매우 직관적이며 조사선(scanline) 혹은 시추공 자료를 바탕으로 간편하고 저렴하게 수행할 수 있다는 장점 덕에 널리 활용되어왔다. RQD는 단독으로도 암반 평가가 가능하고(Deere, 1963), 동시에 대표적인 암반분류법인 RMR(Bieniawski, 1984)과 Q-system(Barton et al., 1974) 적용 시, 그 평가 인자의 하나로 활용된다. 또한 RQD는 암반의 수리/역학적 물성을 경험적으로 예측하는 연구에 다양하게 활용되어왔다. 예를 들어, RQD를 바탕으로 암반의 변형계수(Gardner, 1987, Zhang and Einstein, 2004), 암반의 강도(Kulhawy and Goodman, 1987, Singh et al., 1998), 암반의 수리 전도도(Ku et al., 2009, Qureshi et al., 2014) 등을 예측하는 연구가 수행되어왔다. 이러한 활용성에도 불구하고 RQD는 몇 가지 단점이 존재하며, 이를 보완하기 위해 수정된 형태의 암질지수들이 제안되고 평가 되어왔다(Sen, 1990, Palmstrom, 2005, Haftani et al., 2016, Sonmez et al., 2022).

한국원자력연구원은 원내 지하연구시설인 KURT (KAERI Underground Research Tunnel)를 활용하여 방사성폐기물처분과 관련된 다양한 연구를 수행해왔다. 공학적 방벽의 성능 평가를 비롯하여, 주변 암반에 대한 다양한 조사를 통해 암반공학, 지질학, 수리/지질학적 특성을 파악하였다. 이는 해당 암반의 불연속면 특성을 포함하며 다수의 시추조사 및 지질조사 자료를 바탕으로 수행되었다(KAERI, 2010, KAERI, 2017). 본 연구는 이러한 자료를 바탕으로 KURT 주변 암반의 불연속면 분포 특성을 평가하고 RQD를 비롯한 수정 암질지수의 적용성을 평가하기 위해 수행되었다. 이를 통해 향후 활용될 기반자료를 생성하고 암질지수와 수리역학적 암반 물성과의 상호관계 등을 파악하는 후속 연구를 수행할 계획이다.

2. 암질지수 관련 선행연구

RQD는 Deere(1963)에 의해 제안되었으며, 전체 코어 길이에 대해 100 mm 이상인 암편 길이 합이 비율로 정의된다. ASTM에 따르면 RQD 산정을 위한 시추 코어는 BQ(직경 36.5 mm)에서 PQ(직경 85 mm)까지 적용 가능하며, 최적 코어 크기는 NX(직경 54.7 mm)에서 NQ(직경 47.5 mm)이다(ASTM, 2008). 전체 코어 길이는 경우에 따라 시추 단위(drill run), 암종 변화 길이까지(a

change in formation or rock type), 관심 구간(zone of concern)까지로 결정할 수 있다. 상술한 것처럼 RQD는 직관적이며 간편한 적용성으로 인해 매우 널리 활용되어왔으나, 동시에 몇 가지 단점이 존재한다. 대표적으로, 1D 측정치이기 때문에, 측정 방향에 매우 의존적이다. Fig. 1에서 볼 수 있듯, 동일한 암반에 대해 시추 방향이 바뀌면 RQD는 90에서(Fig. 1(a)) 9까지(Fig. 1(b)) 변화한다.

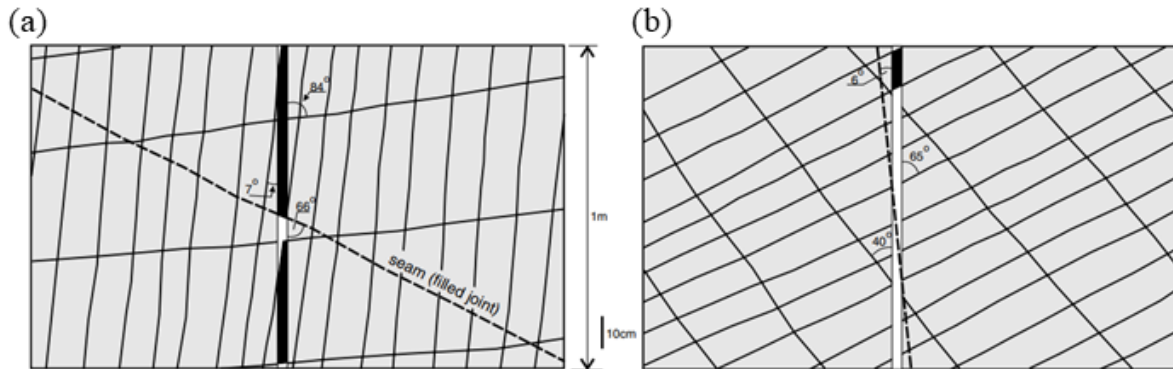


Fig. 1. An example illustrating the directivity of RQD (after Palmstrom, 2005)

또한, 100 mm로 정의된 기준 길이(threshold)에 의존적이다. 대상 암반이 양호한 경우, 100 mm를 기준으로 유효한 RQD의 적용 범위는 평균 절리 간격 0.3 m 수준이며, 이를 벗어난 범위에서는 암반 조건에 대한 분별력을 상실한다(Priest, 1993). 또한 기준 길이 이하의 암석에 대한 정보를 포함할 수 없다는 점도 단점으로 지적된다.

이러한 단점을 보완하기 위해 수정된 형태의 암질지수들이 제안되어왔다. 예를 들어, cumulative core index, CCI (Sen, 1990), weighted joint density, WJD (Palmstrom, 2005), modified RQD_{M-JWD} (Haftani et al., 2016), anisotropic index for jointing degree, AI_{jd} (Zheng et al., 2018), modified AI_{jd} (Sonmez et al., 2022) 등이 있다. 이중, WJD는 절리의 경사를 바탕으로 계산되며 식 (1)과 같다.

$$WJD = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sin \delta_i} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^N f_i \quad (1)$$

Fig. 2와 같이 δ_i 는 절리 경사(dip)의 여각이며, f_i 로 단순화하여 활용 가능하다.

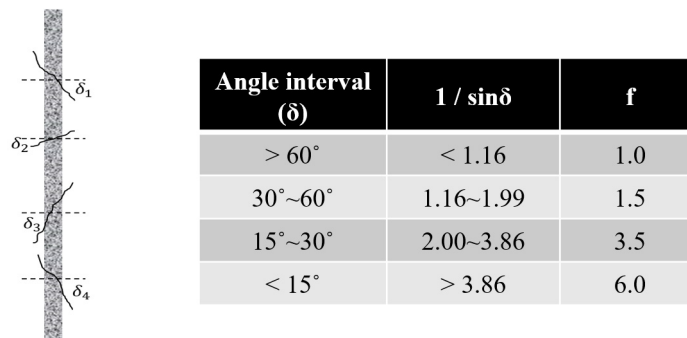


Fig. 2. Definition of δ_i and f_i (after Palmstrom, 2005)

시추/관찰 방향에 의존적인 RQD와 달리 J_v (volumetric joint count)는 방향성이 없으며, Palmstrom(2005)에 따르면 J_v 와 WJD는 사실상 등가이다. 따라서 WJD를 바탕으로 산정한 RQD_{WJD} 는 식 (2)와 같다.

$$RQD_{WJD} = 110 - 2.5 WJD \quad (2)$$

식 (2)에 따라 계산된 암질지수는 RQD의 단점 중 하나인 시추 방향성을 어느 정도 보완하였다. 그러나 파쇄대 같이 파쇄 정도가 심하거나 개별 절리의 경사를 측정하기 어려운 경우 이를 반영하기 어렵기 때문에, Haftani et al.(2016)은 파쇄대의 길이를 반영하여 식 (3)과 같은 수정안을 제시하였다.

$$RQD_{M-WJD} = RQD_{WJD} \times \left[\frac{L - L_{FZ}}{L} \right] \quad (3)$$

여기서 L_{FZ} 은 파쇄대의 길이를 의미한다.

상술한 것처럼 RQD 자체는 방향 의존적이다. 이는 단일 시추공 정보를 바탕으로 암반을 평가할 때는 큰 단점이 되지만, 다수의 시추공 정보를 활용하는 경우, 암반 불연속면 분포의 이방성을 평가하는 방안이 되기도 한다. Zheng et al.(2018)은 이러한 RQD의 특성을 이용해 일종의 암반 이방성 지수인 AI_{jd} 를 제안하였다. 음지수 분포를 기반으로 한 이론적인 TRQD는 식 (4)와 같이 계산된다(Priest and Hudson, 1976).

$$TRQD = 100e^{-t\lambda}(t\lambda + 1) \quad (4)$$

여기서 t 는 RQD 측정의 기준 길이, λ 는 절리 밀도(linear frequency)를 의미한다. 절리군 분석을 통해 복수의 절리군이 관찰된다면 절리 밀도 λ 는 $\lambda = \sum \lambda \cos \theta_i$ 로 계산되며, 이 때 θ_i 는 조사방향(조사선 혹은 시추공 방향)과 각 절리군의 수직 벡터 사이의 예각으로 정의된다. 조사 방향은 선구조로 표현할 수 있으므로, 선주향과 선경사를 변경하며 TRQD를 계산하면 방향에 따른 이방성 정도를 추정할 수 있다. Zheng et al.(2018)은 식 (5)와 같이 이방성 지수 AI_{jd} 를 정의하였다.

$$AI_{jd} = TRQD_{\max} \times \frac{TRQD_{\max} - TRQD_{\min}}{100} \quad (5)$$

AI_{jd} 는 0~100 사이의 값으로 계산되며, 값이 클수록 큰 이방성을 의미한다. 또한 $TRQD_{\max}$, $TRQD_{\min}$ 은 방향에 따라 계산되는 최대, 최소 TRQD 값이다.

Sonmez et al.(2022)은 개선된 형태의 불연속면 분포 이방성 지수를 제안하였다. 상술한 것처럼 일반적인 RQD 계산의 기준 길이는 100 mm이다. 이를 기준으로 TRQD를 도시하면, 기준 길이의 특정 범위 외에서는 절리 간격에 대한 암질지수의 변화가 미미하여 암반에 대한 변별력이 저하된다. 즉, 절리 간격이 매우 좁거나 매우 넓은 암반의 경우, 100 mm 기준의 암질지수 산정을 그대로 적용하기 어렵다. 따라서 암반 상태에 따라 서로 다른 기준 길이를 적용하는 것이 바람직하며, 이는 Harrison(1999)에 의해서도 보고된 바 있다. 복수의 절리군 정보를 바탕으로 조사 방향을 변화시키며 절리 밀도를 계산한 후, 절리 밀도의 최소값을 λ_1 로 정의하면

기준 길이 t 는 식 (6)과 같이 계산된다.

$$t = 0.1484(\lambda_i)^{-0.999} \quad (6)$$

이는 최소 밀도 방향으로 계산한 TRQD가 99%를 만족하는 기준 길이를 의미한다. 최종적으로 Sonmez et al.(2022)은 식 (7)과 같은 형태의 이방성 지수를 제안하였다.

$$AI'_{jd} = TRQD_{0.1,max} \times \frac{TRQD_{t,max} - TRQD_{t,min}}{100} \quad (7)$$

여기서 $TRQD_{t,max}$ 와 $TRQD_{t,min}$ 은 식 (6)의 기준 길이 t 에 따라 계산된 이론적 RQD의 최대, 최소값을 의미한다. 본 연구에서는 KURT 주변 암반에서 측정된 불연속면 정보에 기존의 RQD와 식 (3), (7), 두 가지 형태의 수정된 암질지수를 적용하여 불연속면 특성을 평가하였다.

3. 연구지역

3.1 KURT 주변 암반의 지질 조건

KURT 부지를 포함한 대전 유성지역은 옥천대와 경기육괴 사이로 중생대 대보화강암 저반에 위치하고 있다. 연구 지역의 기반암은 주로 선캄브리아 변성암과 옥천계에 속하는 시대 미상의 변성퇴적암, 중생대 대보화강암, 그리고 다양한 관입암맥으로 구성된다(Fig. 3(a)). 광역규모 조사 결과, 고원생대 변성암을 먼저 흑운모 화강암, 엽리상 화강암이 관입하고, 다시 세립질 흑운모 화강암, 복운모 화강암이 차례로 관입하고 있다(KAERI, 2021).

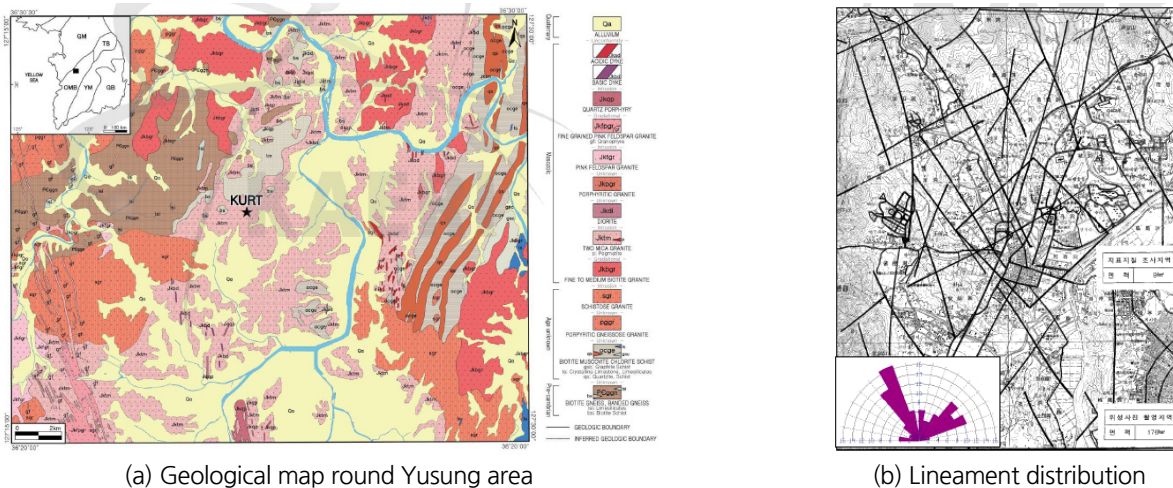


Fig. 3. Geological conditions around KURT site (after KAERI, 2017, KAERI, 2021)

항공사진 등을 이용한 광역규모의 선구조선 조사 결과, 해당 지역의 선구조는 주 방향이 N30°W이고, 이차 방향은 N50°E인 것으로 조사되었다. 그러나 선구조선 모두가 지구조를 의미하는 것이 아니며, 지하까지의 연장성을 확인할 수 없으므로 지표 및 지하에서 확인되는 절리의 방향성과 반드시 연결된다고 판단할 수 없다(KAERI, 2017).

3.2 시추공 상세 내역

KURT는 지표 90~150 m 심도에 위치하며, 단면은 6 m × 6 m의 마계형 터널이다. 터널 입구에서 10° 하향 경사의 직선형 진입 터널(1단계)과 종단부에 165 m 환형의 터널(2단계)로 구성되었다. 진입 터널과 환형 터널에는 총 6개의 연구 모듈(research gallery, RG)이 구축되어 있다. 각 연구 모듈에서 각종 실증 실험을 위한 다수의 시추공이 시추되었으며, 본 연구에서 활용한 불연속면 정보는 연구 모듈 6에 위치하며 추적자 실험을 위해 시추한 6개의 시추공, TW-1~6으로부터 측정되었다(Fig. 4). 모든 시추공은 경사 시추공이며 자세한 시추공 제원은 Table 1과 같다. 다만, TW-6 공의 경우, 시추 길이 10 m 이후의 물리검층 자료가 유실되어 활용 가능한 부분만 발췌하여 사용하였다.

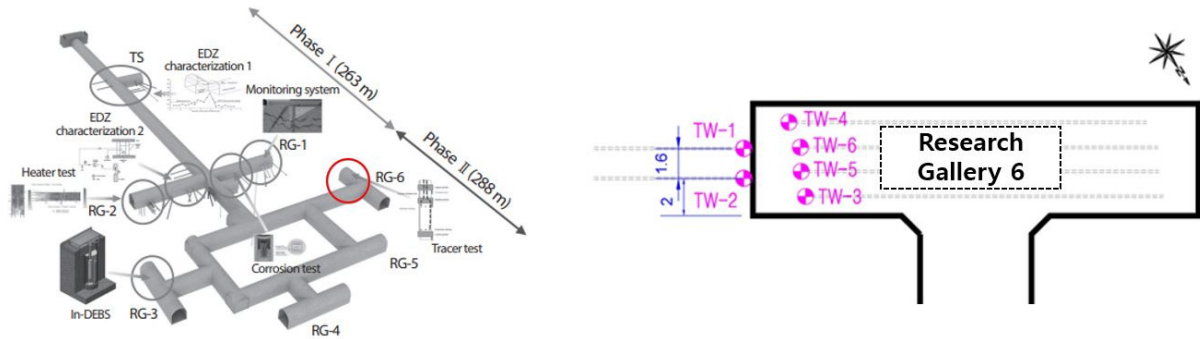


Fig. 4. Location of the boreholes (TW-1~6) used in this study (after Lee et al., 2019)

Table 1. Detailed specifications of the borehole (TW-1~6) used in this study

No.	Hole size	Length (m)	Trend	Plunge
TW-1	D = 101.6 mm (4 inch)	20.50	S56°E	20°
TW-2		20.50	S56°E	20°
TW-3		20.90	N45°W	50°
TW-4	NX	21.35	N55°W	50°
TW-5		21.30	N45°W	50°
TW-6		20.55	N55°W	50°

4. 불연속면 특성 분석 결과

4.1 절리 방향정보 및 절리군 분석

TW 시추공 6개소에 대해 물리검층을 수행했으며, 동시에 코어 로깅을 수행하여 각 시추공 불연속면의 기본적인 정보를 취득하

였다. 개별 절리의 경사/경사방향은 경사 시추공의 방향을 고려하여 보정하였다. 절리면의 방향정보는 물리검층을 통해 취득되었으며 별도의 시추 코어 로깅을 통해 추가 조사를 수행했으나, 절리의 길이와 그에 따른 연결성은 확인할 수 없다. TW 시추공은 모두 연구 모듈 6에 위치하며 공간격이 크지 않으므로 같은 절리를 중복하여 검층했을 가능성을 배제할 수 없다. 따라서 시추공의 정보를 개별적으로 분석하기보다, 전반적으로 종합하여 분석하고 그 결과를 정성적으로 파악하고자 하였다. 연구 모듈 6 지역 절리의 경사 방향과 경사 분포를 도시하면 Fig. 5와 같다.

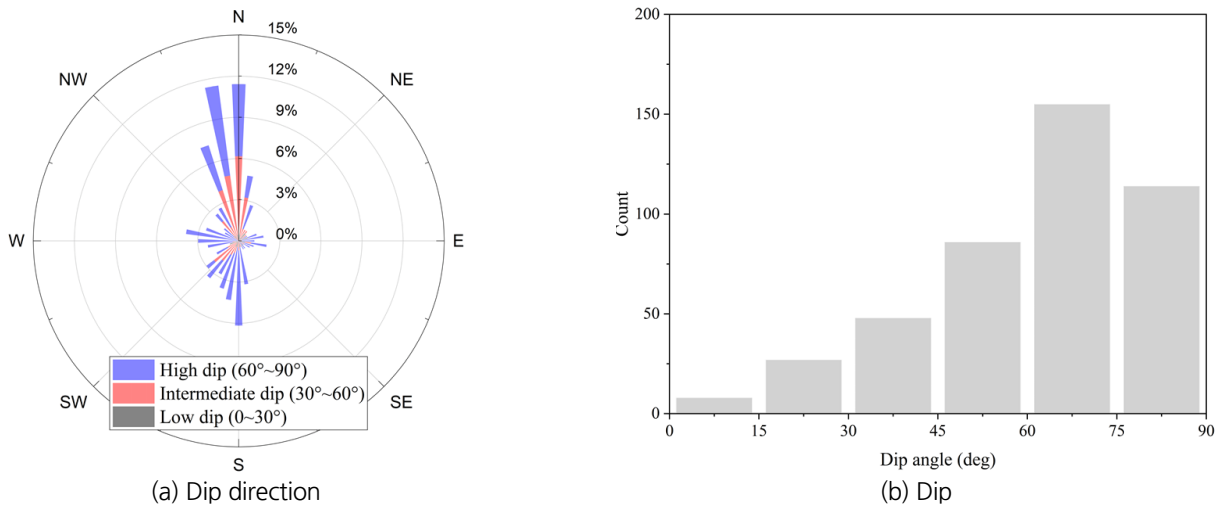


Fig. 5. Distribution of directional features of the joints in RG-6

경사방향의 분포를 바탕으로 판단하면, 연구 모듈 6 지역의 불연속면은 주향 기준 EW 방향이 가장 우세하며 그 외에 NS 주향의 불연속면도 일부 관찰되었다. 경사를 저각(0~30°), 중각(30~60°), 고각(60~90°)으로 구별하면, 고각 절리가 가장 우세하여 유체가 유동한다면 수직 방향의 유동이 가능할 것으로 판단된다. KAERI(2017)는 환형 터널 지역 확장을 위한 2단계 굴착 시, 절리 분포를 조사하기 위해 맵핑을 수행하였고, 연구 모듈 3~6 지역의 조사 자료를 종합하여 절리의 방향 특성을 보고하였다. 그 결과 주향 기준 N74°~84°W 방향이 가장 우세하며, 경사 역시 50° 이상 중/고각이 우세하다고 보고하였다. 연구 모듈 6의 자료만 분석한 본 논문의 결과와 비교하면, 경사방향 면에서 다소간 차이는 있으나 전반적인 경향은 유사한 것으로 판단된다.

측정된 절리의 방향 정보를 바탕으로 절리군 분석을 수행하였고 결과는 Fig. 6, Table 2와 같다. 검색 콘의 각을 15°로 설정하고 절리군을 분류한 결과, 연구 모듈 6 지역에는 총 3개의 절리군이 존재하는 것으로 확인되었다. 가장 많은 절리가 포함된 절리군 1은 경사방향/경사가 353°/63°이며, 절리군 2, 3은 각각 183°/75°, 275°/74°로 세 절리군이 대략 90° 경사방향 차이를 보였으며, 경사는 모두 60° 이상의 고각 절리군인 것으로 확인되었다.

Table 2. Representative direction of joint sets

Set no.	n	Dip direction	Dip
1	79	353	63
2	50	183	75
3	33	275	74

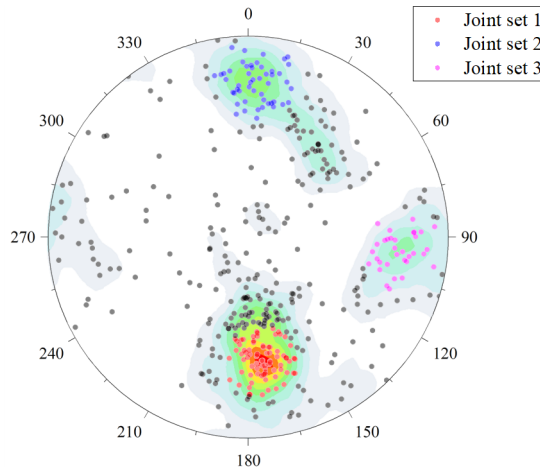


Fig. 6. Joint clustering result

4.2 절리 간격

각 시추공에서 측정된 절리의 위치를 바탕으로 절리 간격(spacing)을 계산하였고 결과는 Fig. 7과 같다. 다만 TW-6의 자료는 시추 길이 10 m 까지의 결과이다. Fig. 7은 절리군의 구분 없이 시추공에서 검출된 모든 절리를 바탕으로 한 결과이며, 대부분의 경우에서 음지수 분포 형태를 보였다. 평균 간격은 TW-1에서 0.1595 m로 가장 작았으며, TW-3에서 0.3419 m로 가장 크게 측정되었다.

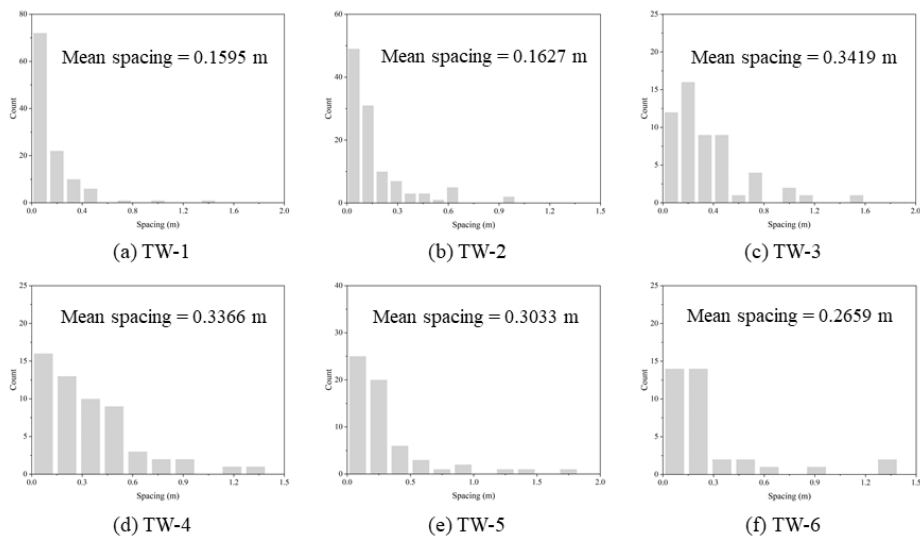


Fig. 7. Distribution of joint spacing

절리군 간격 및 절리군 수직 간격을 계산하였다. 한 시추공에서 절리군 1, 2, 3이 모두 관측된 경우는 없었다. 예를 들어, TW-1, 2 시추공에서는 절리군 1, 2만 검출되었고, TW-3~6에서는 절리군 2, 3만 검출되었다. 즉, 연구 모듈 6의 좌측 벽면부에는 절리군 1이 우세하게 분포하였으며, 모듈의 바닥부에는 절리군 2, 3이 우세하게 분포하는 것을 확인할 수 있다. 절리군의 대표 방향 및 시추공 방향을 고려하여 절리군 수직 간격을 계산하였으며 결과는 Table 3과 같다. 상술한 것처럼, TW-1~6의 시추공 위치가 가까워, 검출

된 절리의 중복 여부를 확인하기 어렵기 때문에, 절리군의 수직 간격은 각 시추공에서 측정된 절리군 간격의 평균값을 활용하였으며, TW-6의 경우, 일부 구간의 절리면 정보가 유실되었기 때문에, 평균 계산 시 제외하였다. 절리군 1의 수직 간격이 0.3124 m로 가장 작았으며, 절리군 2의 수직 간격이 1.3519 m로 가장 크게 계산되었다.

Table 3. Joint set spacing and set normal spacing (unit: m)

		TW-1	TW-2	TW-3	TW-4	TW-5	TW-6	Mean
Joint set 1	n	43	34	-	-	-	-	
	X_d	0.3760	0.5107	-	-	-	-	0.4434
	X_n	0.2649	0.3598	-	-	-	-	0.3124
Joint set 2	n	2	2	15	7	10	(8)	
	X_d	5.9433	4.6835	1.2405	2.1616	1.3542	(0.9713)	3.0766
	X_n	2.2523	1.7749	0.7613	1.1398	0.8311	(0.5122)	1.3519
Joint set 3	n	-	-	6	14	7	(2)	
	X_d	-	-	3.0512	1.1917	0.8603	(2.4463)	1.7011
	X_n	-	-	0.8000	0.3861	0.2256	(0.7925)	0.4706

X_d , X_n denote set spacing and set normal spacing, respectively.

절리군 1, 2, 3이 가장 많이 검출된 시추공은 각각 TW-1(43개), TW-3(15개), TW-4(14개)이다. 해당 시추공에서 검출된 각 절리군의 수직 간격을 도시하면 Fig. 8과 같다. 표본의 수가 많지 않지만, 전반적인 분포는 모든 절리군에서 음지수 형태를 보이는 것을 확인할 수 있다.

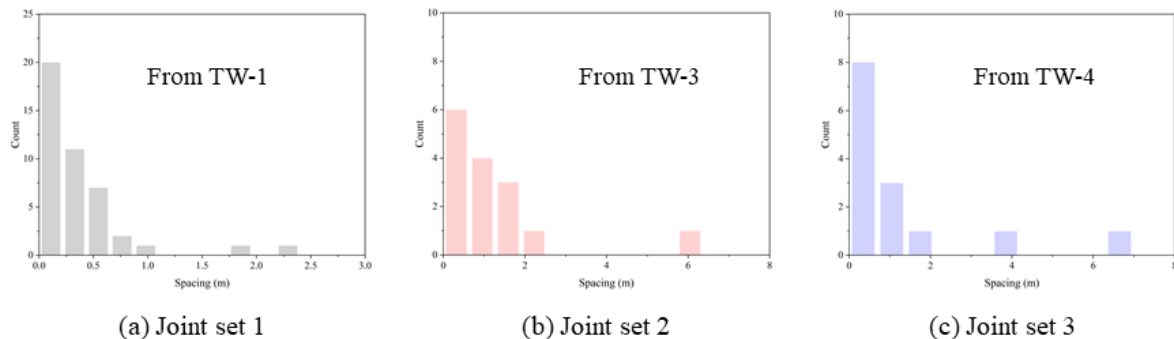


Fig. 8. Distribution of joint set normal spacing

4.3 암질지수 적용

물리검층 자료 및 코어 로깅 자료를 종합하여 암질지수를 산정하였다. 기본적인 RQD(Deere, 1963)와 식 (3)에 정의된 WJD 바탕의 수정 RQD_{M-WJD}(Haftani et al., 2016)를 적용하였다. RQD 산정 단위는 편의상 코어 박스(약 5 m)를 기준으로 산정하였으며 결과는 Fig. 9와 같다. TW-6의 경우, 물리검층 자료의 일부가 소실되어 산정 가능한 구간에 한해 RQD_{M-WJD}를 계산하였다.

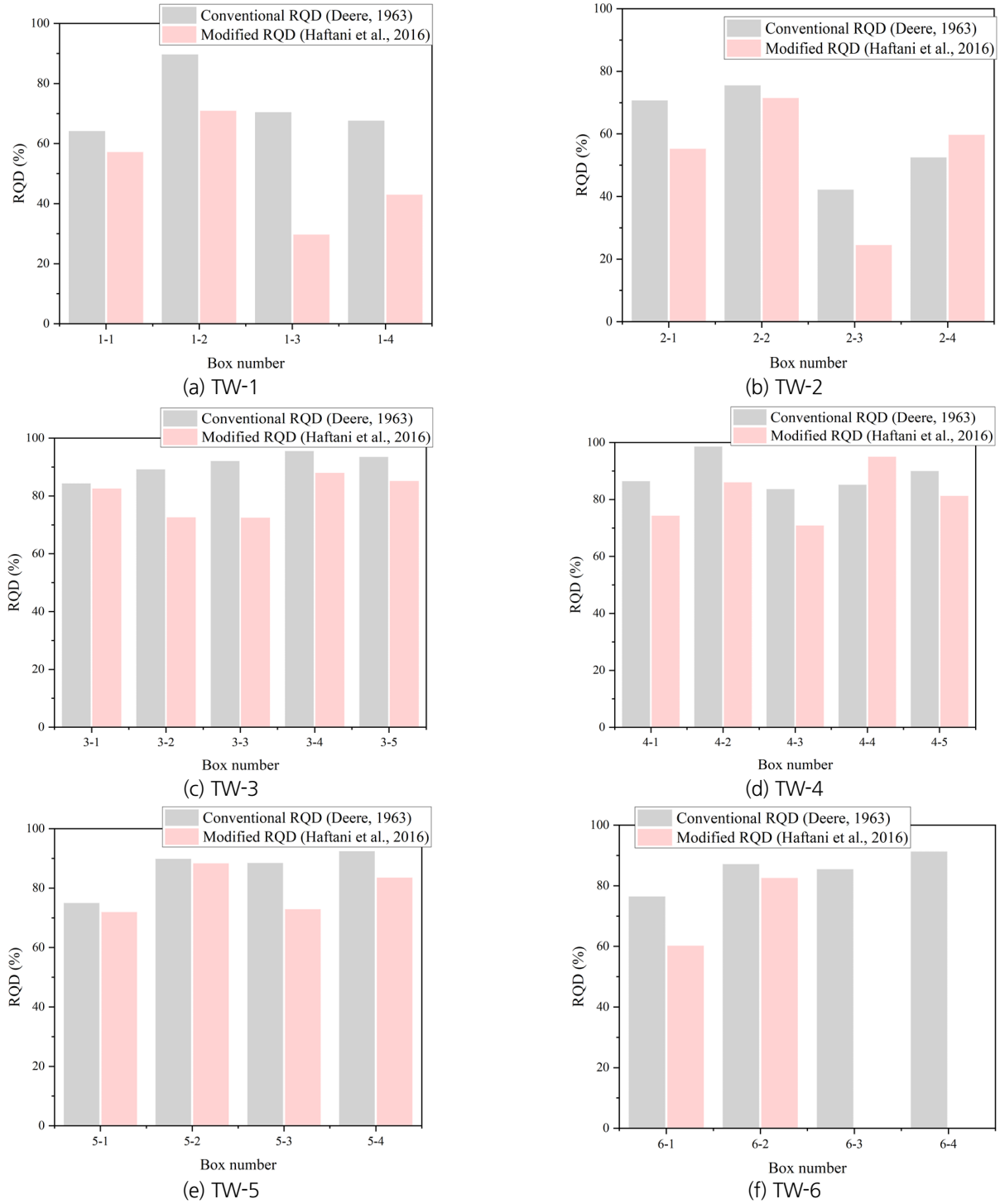


Fig. 9. RQD and modified RQD distribution around RG-6 in KURT

또한 변화율(variation)을 $\frac{|RQD - RQD_{M-WD}|}{RQD}$ 로 정의하고 각 시추공 별 암질지수에 적용하면 Table 4와 같다.

Table 4. Calculated RQD and modified RQD around RG-6 in KURT

				<i>RQD</i>	<i>RQD_{M-WJD}</i>	Variation (%)				
				<i>RQD</i>	<i>RQD_{M-WJD}</i>	Variation (%)				
TW1	Box 1	64.19	57.21	10.87	TW2	Box 1	70.75	55.28	21.87	
	Box 2	89.69	70.97	20.87		Box 2	75.57	71.56	5.31	
	Box 3	70.48	29.72	57.83		Box 3	42.26	24.55	41.91	
	Box 4	67.62	42.01	37.87		Box 4	52.54	59.78	13.78	
	Ave.	73.00	49.98	31.53		Ave.	60.28	52.79	12.42	
TW3	Box 1	84.35	82.55	2.13	TW4	Box 1	86.47	74.34	14.03	
	Box 2	89.21	72.60	18.92		Box 2	98.61	86.05	12.74	
	Box 3	92.11	72.50	21.29		Box 3	83.68	70.94	15.22	
	Box 4	95.56	88.01	7.90		Box 4	82.22	95.07	15.63	
	Box 5	93.55	85.17	8.96		Box 5	90.02	81.32	9.66	
Ave.	90.96	80.17	11.86	Ave.	88.20	81.54	7.55			
TW5	Box 1	75.03	72.01	4.03	TW6	Box 1	76.50	60.29	21.19	
	Box 2	89.93	88.40	1.70		Box 2	87.20	82.89	4.94	
	Box 3	88.50	72.97	17.55		Box 3	85.52	-	-	
	Box 4	92.45	83.69	9.48		Box 4	91.35	-	-	
	Ave.	86.48	79.27	8.34		Ave.	85.14	71.59	15.92	

RQD_{M-WJD} 에 의한 암질지수는 기본적인 RQD에 비해 감소하는 것을 확인할 수 있다. 다만 그 변화율이 상이한데, 가장 변화율이 큰 구간은 TW-1 시추공의 box 3번으로 기본 RQD에 비해 57.83% 감소했으며, 가장 변화율이 작은 구간은 TW-5 시추공의 box 2번으로 1.70% 변화율로 기본 RQD와 거의 유사한 결과를 보였다. 이 중, 변화율이 특별히 크거나 작은 경우만 보면 Fig. 10과 같다. Fig. 10(a)의 경우, 해당 구간에 TW-1에서 검출된 절리의 40%가 존재하며(46개), 다시 이 중 52%가 경사 60° 이상의 고각 절리이다. 또한 파쇄 혹은 교차 절리 등으로 인해 디스크 형태를 이루지 못하는 구간을 파쇄대로 정의했을 때, 파쇄에 따른 보정계수(식(3)의 대괄호)가 0.84 수준이다. 단순 100 mm 이상 길이로 산정한 기본 RQD에 비해, 고각 절리의 영향과 파쇄대의 영향을 반영한 RQD_{M-WJD} 는 29.72%로 크게 변화하였다.

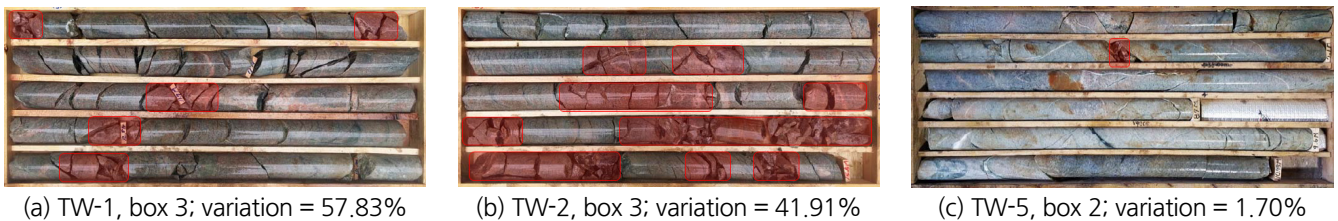

Fig. 10. Notable cases in terms of variation of RQD

Fig. 10(b) 역시 유사한 경우로, 해당 구간에 전체 절리의 32% 수준으로 절리가 밀집하여 있으며 그 중, 55%가 고각 절리로 확인되었다. 특히, Fig. 10(b)는 파쇄대에 의한 보정계수가 0.51 수준으로 크게 반영되었다. 다만 파쇄대의 영향으로 기본 RQD 역시 42.26%로 낮은 수준이었고 보정에 의해 최종적으로 24.55%까지 감소하였다. Fig. 10(c)의 경우, 해당 구간에서 검출된 절리는 대부분 고각 절리이지만 그 수가 16개로 많지 않으며 파쇄대의 영향도 크지 않아 1.70% 감소한, 기본 RQD와 거의 유사한 수치로 계산되었다.

마지막으로 주어진 검층 자료를 바탕으로 연구 모듈 6 지역의 불연속면 이방성을 평가하였다. 검층된 세 절리군의 빈도는 각각 $\lambda_1 = 3.2010 m^{-1}$, $\lambda_2 = 0.7397 m^{-1}$, $\lambda_3 = 2.1249 m^{-1}$ 이며, 식 (6)에 따라 계산한 기준 길이는 $t = 0.2006 m$ 이고, 기준 길이 0.1 m를 기준으로 계산한 $TRQD_{0.1,max}$ 은 99.88%이다. 식 (7)을 바탕으로 계산된 조사 방향에 따른 TRQD 분포는 Fig. 11과 같다.

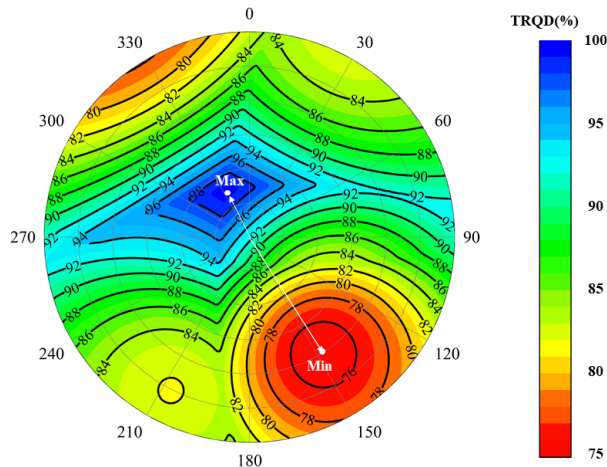


Fig. 11. TRQD distribution around RG-6 in KURT

주어진 절리군 정보를 바탕으로 계산되는 $TRQD_{t,min}$ 는 75.15%이며, 이때 조사 방향은 trend/plunge 기준 148°/28°이다. $TRQD_{t,max}$ 는 99.54%이며 이에 해당하는 조사 방향은 333°/62°이다. 식 (7)에 의해 계산되는 암반 불연속면의 이방성 지수 AI'_{jd} 는 24.36%로 Sonmez et al.(2022)에 따르면 해당 부지의 이방성은 VL(very low)로 평가되었다. TRQD는 절리군으로 분류된 절리의 간격만을 이용하므로 실제 RQD에 비해 과대 평가될 가능성이 있다. 즉, 절리군으로 분류되지 않는 랜덤 절리의 경우, 그 간격 정보가 해당 TRQD를 계산하는데 반영되지 않는다. 다만 이러한 절리의 경우, 방향성 역시 랜덤하게 분포할 것이므로 조사 방향에 따른 TRQD의 정성적인 경향에는 영향을 주지 않을 것으로 판단된다. $TRQD_{t,min}$ 방향은 TW-1, 2의 방향(124°/20°)과 유사하며 $TRQD_{t,max}$ 의 방향은 TW-3~6과 유사하다(305~315°/50°). Table 4에서 확인할 수 있듯, TW-1, 2의 암질지수와 TW-3~6의 암질지수를 비교하면 전자가 확연히 작은 것을 확인할 수 있는데, 이는 암반의 불연속면 이방성 분포와 정성적으로 일치하는 결과로 판단된다.

5. 결론

고준위방사성폐기물처분장은 장기간 동안 안전성을 보장할 수 있어야 하기 때문에, 현저히 높은 수준의 조사와 평가를 수반한다. 암반의 불연속면 분포는 처분장의 열-수리-역학적 거동에 큰 영향을 미치기 때문에 이에 대한 상세한 평가가 필수적이다. 암질지수는 적용의 편이성으로 인해 대부분의 암반공학적 과제와 이를 위한 지반조사에 적용된다. 그러나 조사 방향과 측정의 기준 길이의 영향을 받는 단점이 존재하기 때문에, 이를 보완하기 위한 수정 암질지수들이 제안되어왔다. 본 연구는 KURT 주변 암반에서 측정 한 불연속면 자료를 활용하여 부지의 불연속면 분포 특성을 평가하고 수정 암질지수의 적용성을 평가하기 위해 수행되었다.

연구에 사용된 불연속면 자료는 KURT 내부 연구 모듈 6에서 시추된 시추공 TW-1~6에서 측정되었다. 물리검층과 코어 로깅 등을 바탕으로 측정된 자료를 종합하여 분석한 결과, 연구 모듈 6 지역의 불연속면은 주향 기준 EW 방향이 가장 우세했으며 경사 60°

이상의 고각 절리 비율이 높았다. 또한, 절리군 분류를 수행한 결과, 총 3개의 절리군이 검출되었다. 절리군의 간격은 모든 시추공에서 음지수 형태의 분포를 보였으며, 절리군 수직 간격 역시 표본의 수는 작으나 전반적인 형태는 음지수 함수 형태를 보였다. 불연속면 자료에 기본적인 RQD와 WJD를 바탕으로 한 RQD_{M-WJD} , 이방성을 평가할 수 있는 AI'_{jd} 세 가지 암질 지수를 적용하였다. RQD_{M-WJD} 를 적용한 결과, 파쇄대와 고각 절리 등의 영향으로 기본 RQD에 비해 전반적으로 감소하는 경향을 확인했으며, 고각 절리가 밀집한 지역 혹은 파쇄대가 분포한 지역의 암질지수는 40~50% 이상 감소하는 경향을 보였다. RQD_{M-WJD} 은 각도에 따라 다르게 측정될 수 있는 기본 RQD의 단점을 보완하는 암질지수이나 그 적용과 활용성에 대한 추가적인 검증이 필요할 것으로 판단된다. 예를 들어, 암질지수와 해당 암반에서 측정된 역학적 혹은 수리적 물성 사이의 상관성 등의 분석이 효과적일 것으로 판단되며, 향후 KURT 부근 암반에 대한 자료를 수집하여 상관관계를 파악할 예정이다. AI'_{jd} 를 적용한 결과, 연구 모듈6 지역의 불연속면 분포는 낮은 이방성을 보였으며, TW-1~6의 암질지수 평가 결과와 정성적으로 일치하는 방향성을 보였다. 본 논문은 처분장 혹은 URL 부지의 암반 평가 시 적용할 수 있는 암질지수와 그 과정에서 참고할 수 있는 기반자료를 생성하기 위해 작성되었으며, 향후 추가 분석을 통한 연구 결과를 순차적으로 보고할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 연구는 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 고준위폐기물관리차세대핵심기술개발사업의 지원(2021M2E3A 2041312)을 받아 수행된 연구사업입니다.

REFERENCES

- ASTM, 2008, Standard test method for determining rock quality designation (RQD) of rock core. ASTM D6032-08, ASTM International, PA, USA.
- Bandis, S., Lumsden, A., and Barton, N., 1983, Fundamentals of rock joint deformation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 20(6), 249-268.
- Barton, N., Lien, R., and Lunde, J., 1974, Engineering classification of jointed rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 6, 189-236.
- Bieniawski, Z.T., 1984, *Rock mechanics design in mining and tunneling*. A.A. Balkema, Rotterdam.
- Deere, D.U., 1963, Technical description of rock cores for engineering purposes. 13th Colloquium, International Society for Rock Mechanics, Salzburg, Austria, 16-22.
- Gardner, W.S., 1987, Design of drilled piers in the Atlantic Piedmont. In: Smith R.W. editor. *Foundations and excavations in decomposed rock of the Piedmont province*. New York. ASCE.
- Haftani, M., Chehreh, H.A., Mehinrad, A., and Binazadeh, K., 2016, Practical investigation on use of weighted joint density to decrease the limitations of RQD measurements. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49, 1551-1558.
- Harrison, J.P., 1999, Selection of the threshold value in RQD assessments. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36, 673-685.
- Hong, S., Kwon, S., Min, K.B., and Ji, S.H., 2021, Effect of excavation and thermal stress on slip zone and aperture change around

- disposal hole and tunnel in fractured rock. *Tunnel and Underground Space*, 31(2), 125-144.
- KAERI, 2010, Fracture zones in deep borehole (DB-01) in KURT. KAERI/TR-4010/2010, KAERI, Daejeon, Korea.
- KAERI, 2017, Fracture distribution characteristics in KURT facility site. KAERI/TR-6981/2017, KAERI, Daejeon, Korea.
- KAERI, 2021, Lithological analysis of DB-2 borehole around KURT with depth. KAERI/TR-9012/2021, KAERI, Daejeon, Korea.
- KIGAM, 2019, Development of nationwide geoenvironmental maps for HLW geological disposal. GP2017-009-2019, KIGAM, Daejeon, Korea.
- Ku, C.Y., Hsu, S.M., Chiou, L.B., and Lin, G.F., 2009, An empirical model for estimating hydraulic conductivity of highly disturbed clastic sedimentary rocks in Taiwan. *Engineering Geology*, 109(3-4), 213-223.
- Kulhawy, F.H. and Goodman, R.E., 1987, Foundations in rock. In: Bell F.G. editor. *Ground Engineer's reference book*. Butterworths, London.
- Lee, H., 1999, A study for the mechanical and hydraulic behavior of rock joints under cyclic shear loading. Seoul National University, Doctoral dissertation.
- Lee, C., Yoon, S., Cho, W.J., Jo, Y., Lee, S., Jeon, S., and Kim, G.Y., 2019, Study on thermal, hydraulic, and mechanical properties of KURT granite and Gyeongju bentonite, *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology*, 17, 65-80.
- Palmstrom, A., 2005, Measurements of and correlations between block size and rock quality designation(RQD). *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20, 362-377.
- Priest, S.D., 1993, *Discontinuity analysis for rock engineering*. Chapman & Hill, London, UK.
- Priest, S.D., and Hudson, J.A., 1976, Discontinuity spacings in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 13(8), 135-148.
- Qureshi, M.U., Khan, K.M., Bessaih, N., Al-Mawali, K., and Al-Sadrani, K., 2014, An empirical relationship between in-situ permeability and RQD of discontinuous sedimentary rocks. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 19, 4781-4790.
- Sen, Z., 1990, Cumulative core index for rock quality evaluations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 27(2), 87-94.
- Singh, B., Goel, R.K., Mehrotra, V.K., Garg, S.K., and Allu, M.R., 1998, Effect of intermediate principal stress on strength of anisotropic rock mass. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 13(1), 71-79.
- SKB, 1998, Parameters of importance to determine during geoscientific site investigation. TR-98-02, SKB, Stockholm, Sweden.
- Sonmez, H., Ercanoglu, M., and Dagdelenler, G., 2022, A novel approach to structural anisotropy classification for jointed rock masses using theoretical rock quality designation formulation adjusted to joint spacing. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14, 329-345.
- Zhang, L., and Einstein, H.H., 2004, Using RQD to estimate the deformation modulus of rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(2), 337-341.
- Zheng, J., Yang, X., Lu, Q., Zhao, Y., Deng, J., and Ding, Z., 2018, A new perspective for the directivity of rock quality designation (RQD) and an anisotropic index for jointing degree for rock masses. *Engineering Geology*, 240, 81-94.
- Zimmerman, R., and Bodvarsson G., 1996, Hydraulic conductivity of rock fractures, *Transport in Porous Media*, 23(1), 1-30.