

TECHNICAL NOTE

K-COIN 시험부지 특성화를 위한 암석역학 실내실험 기초 연구

최승범¹, 김태현¹, 권새하¹, 김진섭^{2*}

¹한국원자력연구원 선임연구원, ²한국원자력연구원 책임연구원

A Fundamental Study on Laboratory Experiments in Rock Mechanics for Characterizing K-COIN Test Site

Seungbeom Choi¹, Taehyun Kim¹, Saeha Kwon¹, and Jin-Seop Kim^{2*}

¹Senior Researcher, Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI)

²Principal Researcher, Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI)

*Corresponding author: kjs@kaeri.re.kr

Received: June 9, 2023

Revised: June 20, 2023

Accepted: June 26, 2023

ABSTRACT

Disposal repository for high-level radioactive waste secures its safety by means of engineered and natural barriers. The performance of these barriers should be tested and verified through various aspects in terms of short and/or long-term. KAERI has been conducting various in-situ demonstrations in KURT (KAERI Underground Research Tunnel). After completing previous experiment, a conceptual design of an improved in-situ experiment, i.e. K-COIN (KURT experiment of THMC COupled and INteraction), was established and detailed planning for the experiment is underway. Preliminary characterizations were conducted in KURT for siting a K-COIN test site. 15 boreholes with a depth of about 20 m were drilled in three research galleries in KURT and intact rock specimens were prepared for laboratory tests. Using the specimens, physical measurements, uniaxial compression, indirect tension, and triaxial compression tests were conducted. As a result, specific gravity, porosity, elastic wave velocities, uniaxial compressive strength, Young's modulus, Poisson's ratio, Brazilian tensile strength, cohesion, and internal friction angle were estimated. Statistical analyses revealed that there did not exist meaningful differences in intact rock properties according to the drilled sites and the depth. Judging from the uniaxial compressive strength, which is one of the most important properties, all the specimens were classified as very strong rock so that mechanical safety was secured in all the regions.

Keywords: K-COIN, KURT, Rock mechanics, Laboratory experiments, Preliminary site characterization

초록

고준위방사성폐기물처분장은 공학적/천연 방벽 등을 통해 처분장의 안전성을 확보한다. 이러한 안전 수단은 다양한 방법을 통해 장/단기적 성능을 평가하고 검증되어야 한다. 한국원자력연구원은 원내에 위치한 지하연구시설인 KURT를 이용해 다양한 현장 실증실험을 수행해왔다. 선행 시험 종료 후, 개선된 형태의 실증실험인 K-COIN을 수행하기 위해 개념 설계안을 도출하고 상세 실험계획을 수립 중이다. KURT 내부에 K-COIN 실험부지 선정을 위한 예비 부지조사를 수행하였다. 연구 모듈(research gallery, RG) 세 구역에 약 20 m 심도의 시추공 총 15개를 시추하여 시추코어를 확보하고 암석 실내실험에 적합



한 구간을 선정하여 무결암 시험편을 준비하였다. 준비된 시험편을 사용하여 물리적 특성 측정, 단축압축시험, 간접인장시험, 삼축압축시험을 수행했으며 이를 통해 무결암의 비중, 공극률, 탄성파 속도, 단축압축강도, 탄성계수, 포아송비, 간접인장강도, 점착력, 내부 마찰각을 측정하였다. 간단한 통계 처리를 수행한 결과, 시추 구역과 심도(상부 0~10 m, 하부 10~20 m)에 따른 무결암 물성의 차이는 크지 않은 것으로 확인되었다. 가장 대표적인 암석 물성인 단축압축강도를 바탕으로 판단하면, 모든 시추 구역과 심도에서 매우 강한 암석으로 분류되어 모든 후보 지역에서 역학적인 안전성을 확보한 것으로 판단된다.

핵심어: K-COIN, KURT, 암석역학, 실내시험, 예비 부지조사

1. 서론

고준위방사성폐기물처분장은 방사성폐기물의 위해성이 인간 생활권에 영향을 미치지 않을 수준까지 저감 되도록 충분한 기간 동안 그 안전성을 보장해야 하며, 이를 위해 다양한 안전장치를 고려하여 처분장을 설계/건설한다. 이러한 수단들은 크게 공학적 방벽(engineered barrier)과 천연 방벽(natural barrier)으로 구분할 수 있으며, 다양한 학문 분야의 여러 방법을 통해 장/단기적 성능을 평가하고 검증한다.

한국원자력연구원은 공학적 방벽의 성능을 실증하기 위해 원내에 위치한 지하연구시설인 KURT (KAERI Underground Research Tunnel)를 활용하여 각종 현장 실증 실험을 수행하였다. 2006년 KURT 1단계 시설 확보 후, 2015년 2단계 확장 공사를 수행하였으며 단계에 걸쳐 단일공 히터 테스트, 굴착손상영역(Excavation Damage Zone, EDZ) 특성화, 장기 부식 시험 등을 수행하였다(Kim et al., 2019). 특히, 2013년부터 설계하여 진행된 In-DEBS (In-situ Demonstration of Engineered Barrier System) 실험이 종료되고, 개선된 형태의 후속 실험인 K-COIN (KURT experiment of THMC COupled and INteraction)를 수행하기 위한 개념 설계안이 도출되었다. 처분 관련 연구의 선도국인 스웨덴, 핀란드, 스위스 등에서 수행된 실증실험에 대한 현황을 조사하고, In-DEBS의 보완사항을 반영하여 K-COIN 개념 설계안을 설정했으며, 이는 처분용기, 완충재, 뒷채움재, 콘크리트 플러깅 등의 제작법, 시공법, 성능 기준 등을 포함하고 있어 향후 수행될 상세 실험 내역과 실험체의 구성 및 크기 등의 세부 항목에 반영될 예정이다(Lee et al., 2022).

K-COIN 실험 수행을 위해 KURT 내부에 실험 위치를 특정해야 하며, 이를 위한 예비 지반조사를 수행하였다. 예비 조사는 시추 코어 로깅, 시추공 물리탐사, 현장 수리시험, 실내 암석시험 등으로 수행되었고, 본 기술보고에서는 그 중 암석역학 실내시험 결과에 대해 정리하였다. KURT 내부 후보 부지에 대해 시추를 수행하여 시추코어와 무결암 시험편을 획득했으며, 이에 대해 기본적인 실내 물성시험을 수행한 결과를 정리하였다. 암석역학 분야 실내시험 결과뿐만 아니라 기타 지반조사 결과를 종합하여 적합 부지를 선정할 것이며, 향후 일차 선정된 부지에 대한 상세 부지조사를 수행하여 그 결과를 보고할 예정이다.

2. 조사 개요

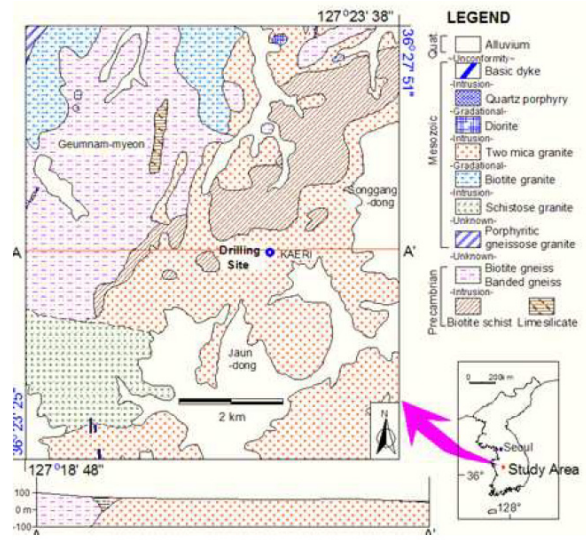
2.1 연구 지역

연구지역인 KURT 부지의 지형, 지질 조건을 간략하게 기술하면 다음과 같다. 연구지역의 서쪽으로는 고지대인 계룡산이 존재하고, 계룡산 줄기를 능선으로 공주시와 접하며, 갑천이 서남쪽에서 북동쪽으로 흐른다. 연구지역은 비교적 완만한 지형이며 남북 방향으로 반암질의 산지가 형성되어있다(Lee et al., 1980, Park et al., 1977). 또한 연구지역은 경기변성암 복합체 내에 위치하며

주로 선캠브리아기의 편마암류와 중생대의 심성암과 관입맥암류로 구성되어 있다. 선캠브리아기의 변성암류는 흑운모 편마암 및 편암으로 구분되며, 이들은 KURT 북서부에 주로 분포한다. 심성암류는 크게 시대 미상의 편상화강암과 복운모화강암으로 나뉘며, 복운모화강암이 편상화강암을 관입하고 있는 것으로 알려져 있다(Lee et al., 1980, Park et al., 1977). 상술한 지형, 지질 조건은 Fig. 1과 같다.



(a) Topographical map



(b) Geological map

Fig. 1. Geological view and condition of KURT area(Park et al., 1977)

KURT는 지표에서부터 90~150 m 심도에 위치하며, 단면은 6 m x 6 m의 마제형 터널이다. 터널 입구에서 10° 하향 경사의 직선형 진입 터널(1단계)과 종단부에 165 m의 환형 터널(2단계)로 구성되었다. 진입 터널과 환형 터널에는 총 6개의 연구 모듈 (research gallery, RG)이 구축되어 있다. 각 연구 모듈에는 각종 실증시험을 위한 다수의 시추공이 시추되었으며, 본 조사를 위해 총 15개의 장·단심도의 시추공이 신규/연장 시추되었다. KURT의 구조는 Fig. 2와 같다.

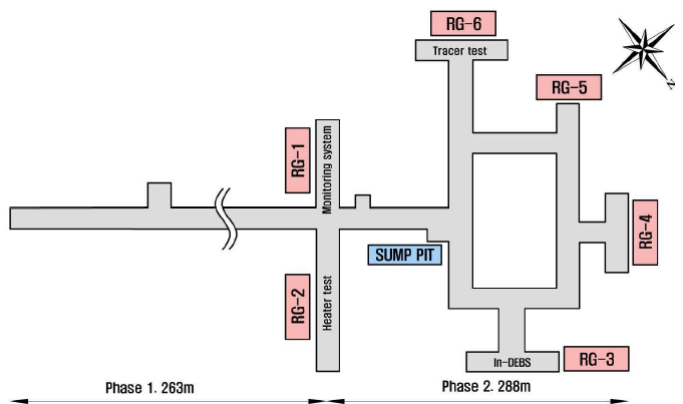
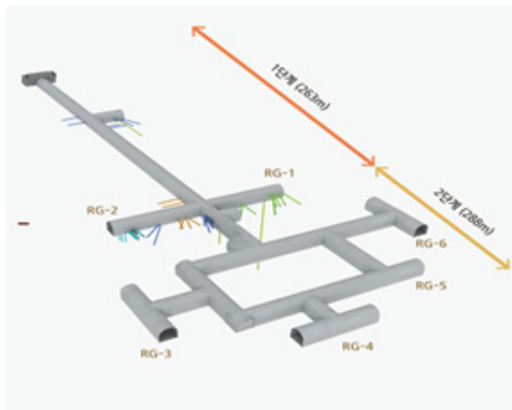


Fig. 2. A schematic view of KURT (after Lee et al., 2019)

2.2 시험 계획

예비 지반조사를 위해 KURT 내부 RG-2, RG-3, RG-4 지역에 각 11공, 2공, 2공으로 총 15공의 시추공을 시추하였으며 상세 위치는 Fig. 3과 같다. RG-2 지역 막장면 부근의 시추공(HM-1~8)들은 기존에 존재하던 심도~10 m 시추공을 20 m까지 연장 시추하여 비교적 밀집되어 있으며, 나머지 시추공들은 기존 시추공들과의 이격거리, 향후 실증 실험 시 작업 공간 등을 고려하여 배치하였다.

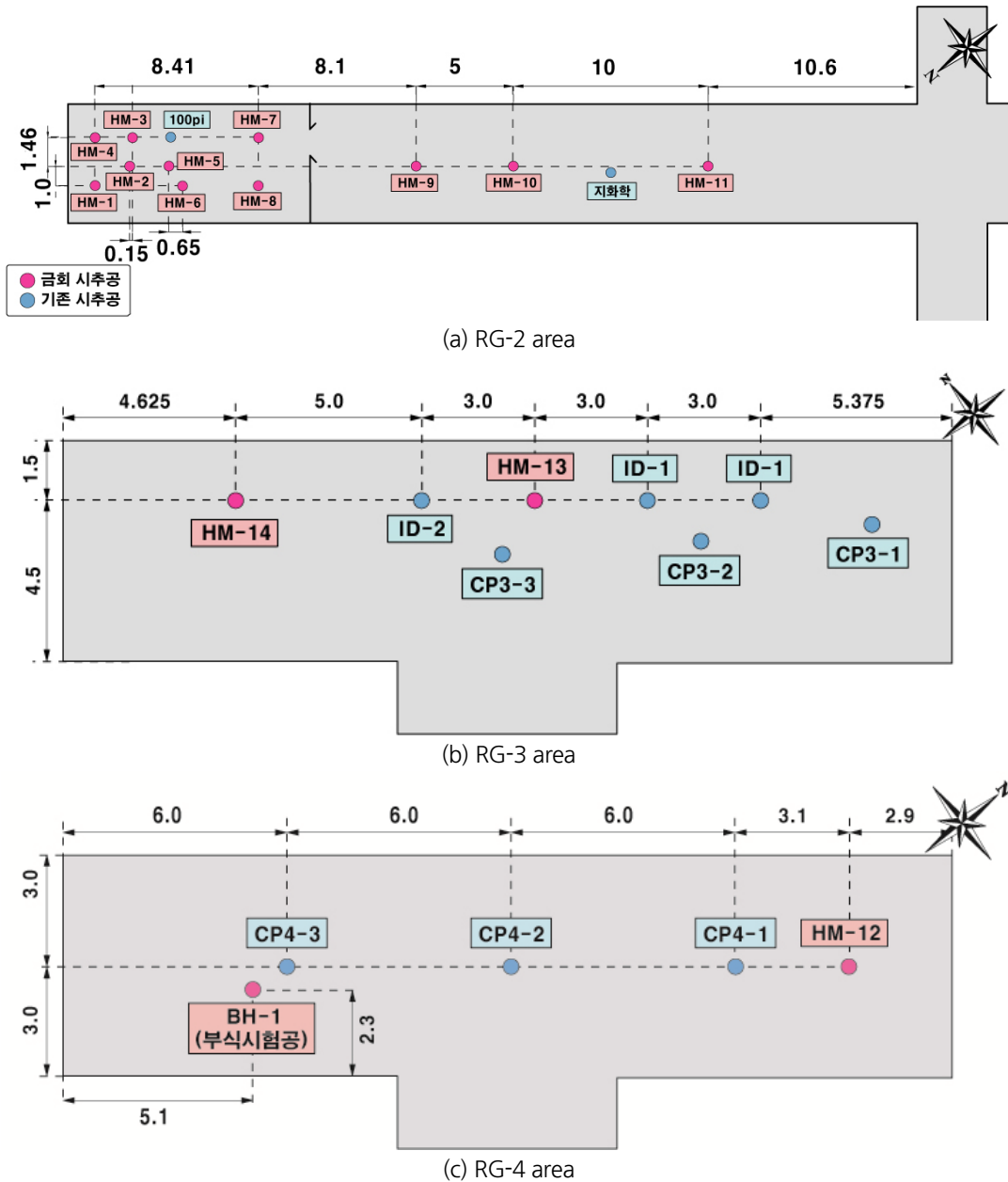


Fig. 3. Detailed locations of boreholes drilled for this study (unit: m)

이 중, BH-1 공은 부식 시험을 위한 심도 400 m의 장공이며, 나머지 HM-1~14 공은 심도 20 m 수준의 단심도이다. RG-2 지역의 HM-1, 2, 3, 5, 6은 기존에 있던 10 m 시추공을 20 m 까지 연장 시추했으며, 나머지 시추공은 20 m까지 신규 시추하였다. 시추

완료 후, 시추 코어를 확인하여 실내시험에 적합한 부분을 찾아 무결암 시험편을 제작하였다. BH-1 부식시험공은 전체 심도가 400 m이나, 다른 시추공과의 비교와 근계영역에서의 암반 평가를 위해 ~20 m 심도에서 시험편을 취득하였다. 심도는 다시 0~10 m의 상부와 10~20 m까지 하부로 나누어 시험편을 준비했으며, 코어의 상태가 불량하여 시험편 제작이 불가능한 경우는 시험 계획에서 제외하였다. 적합한 구간을 선정 후, 길이에 맞게 절단하고 가압면을 연마하여 시험편을 준비하였다.

본 조사에서 수행한 암석 실내시험은 물리적 물성 측정, 단축압축시험, 간접인장시험, 삼축압축시험이다. 물리적 특성 평가를 통해 암석의 비중(specific gravity), 공극(porosity), 탄성파 속도(P and S wave velocity)를 측정했으며, 단축압축시험을 통해 단축압축강도(uniaxial compressive strength, UCS), 탄성계수(Young's modulus), 포아송비(Poisson's ratio)를, 간접인장시험을 통해 간접인장강도(Brazilian tensile strength, BTS)를, 삼축압축시험을 통해 점착력(cohesion)과 내부 마찰각(internal friction angle)을 측정하였다. 물리적 물성 측정은 비파괴 시험이기 때문에 단축압축시험을 위해 제작한 동일 시험편을 사용하여 압축시험 전에 수행하였다. 삼축압축시험은 한 세트에 3개의 시험편으로 구성되며, 각 시험편을 서로 다른 구속압(confining pressure)에서 시험하여 관련 물성을 산정하였다. 다른 시험에 비해 요구되는 시험편의 수가 많기 때문에, 시험에 적합한 수준의 코어가 충분히 확보되지 않은 경우, 해당 구간은 시험 계획에서 제외하였다. 시험편의 크기 및 제작법은 국내외 표준시험법 기준을 준용하여 제작되었다(ISRM, 2007, KSRM, 2010).

3. 시험 결과

본 장에서는 측정된 암석 물성 시험결과를 수록하였으며, 실내시험은 국내외 공인 시험법을 기준으로 수행하였다. 수행한 시험은 비중, 공극률, 탄성파 속도 등을 포함한 물리적 물성 측정, 단축압축시험, 인장시험, 삼축압축시험이며 결과 역시 시험 종류별로 분류하여 수록하였다. 시험편 표기 마지막 L/U는 각각 하부(lower)/상부(upper)에서 취득된 시험편임을 의미한다.

3.1 물리적 물성 측정 결과

측정된 암석의 물리적 물성은 Table 1과 같다. 흡수율을 제외한 4가지 물리적 물성을 확인하면, RG-2 지역 시험결과와 분산이 가장 크게 나타났으나, 나머지 구역의 표본 수가 상대적으로 작기 때문에 RG-2 구역 지반 조건의 불균질성이 크다고 결론지을 수 없다. 시추 구역에 따른 각 물성의 분포는 Fig. 4와 같다.

Table 1. Measured physical properties and their descriptive statistics

Region	Borehole ID	Sample No.	S.G. (-)	Porosity (%)	Absorption (%)	P wave (m/s)	S wave (m/s)
RG-2	HM-1	HM-1-UCS-L	2.72	0.39	0.14	4796	2404
	HM-2	HM-2-UCS-L	2.80	0.21	0.08	6126	2749
	HM-3	HM-3-UCS-L	2.67	0.57	0.21	4163	2257
	HM-4	HM-4-UCS-U	2.70	0.53	0.20	3849	2116
		HM-4-UCS-L	2.68	0.38	0.14	5157	2471
	HM-5	HM-5-UCS-L	2.93	0.12	0.04	6539	2972
HM-6	HM-6-UCS-L	2.70	0.44	0.16	4965	2443	

Table 1. Measured physical properties and their descriptive statistics (continued)

Region	Borehole ID	Sample No.	S.G. (-)	Porosity (%)	Absorption (%)	P wave (m/s)	S wave (m/s)
RG-2	HM-7	HM-7-UCS-U	2.63	0.70	0.26	3978	2159
		HM-7-UCS-L	2.92	0.13	0.04	6424	2944
	HM-8	HM-8-UCS-U	2.68	0.38	0.14	4647	2329
		HM-8-UCS-L	2.69	0.40	0.15	4730	2334
	HM-9	HM-9-UCS-U	2.69	0.33	0.12	4649	2370
		HM-9-UCS-L	2.67	0.59	0.22	3983	2139
	HM-10	HM-10-UCS-U	2.69	0.47	0.17	4521	2313
		HM-10-UCS-L	2.64	0.62	0.24	4142	2137
	HM-11	HM-11-UCS-U	2.61	0.84	0.32	3777	1997
		HM-11-UCS-L	2.70	0.35	0.13	4938	2475
	Statistics	Average		2.71	0.44	0.16	4787.29
S.D.		0.09	0.19	0.07	834.99	269.21	
CV (%)		3.32	42.48	44.14	17.44	11.27	
RG-3	HM-13	HM-13-UCS-U	2.68	0.31	0.11	5249	2544
		HM-13-UCS-L	2.69	0.25	0.09	5618	2649
	HM-14	HM-14-UCS-U	2.63	0.49	0.18	4477	2346
		HM-14-UCS-L	2.61	0.73	0.28	4851	2404
	Statistics	Average		2.65	0.44	0.17	5048.75
S.D.		0.03	0.19	0.07	427.24	118.59	
CV (%)		1.13	42.17	43.43	8.46	4.77	
RG-4	HM-12	HM-12-UCS-U	2.63	0.43	0.16	4986	2505
		HM-12-UCS-L	2.61	0.93	0.36	4961	2464
	BH-1	BH-1-UCS-U	2.65	0.39	0.15	4844	2444
		BH-1-UCS-L	2.64	0.51	0.19	4542	2315
	Statistics	Average		2.63	0.56	0.21	4833.25
S.D.		0.01	0.22	0.08	176.49	71.04	
CV (%)		0.38	38.43	39.05	3.65	2.92	

*S.G., S.D., and CV denote specific gravity, standard deviation, and coefficient of variation, respectively

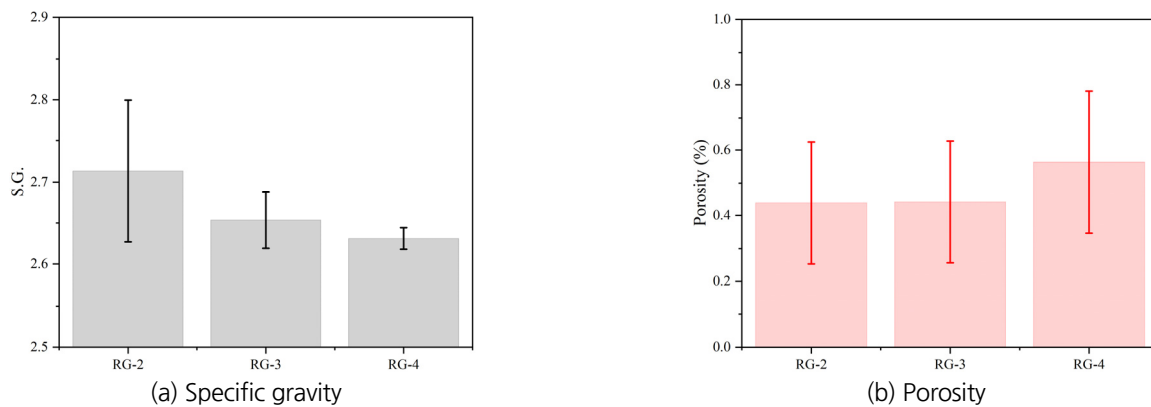


Fig. 4. Comparisons of measured physical properties according to the RG

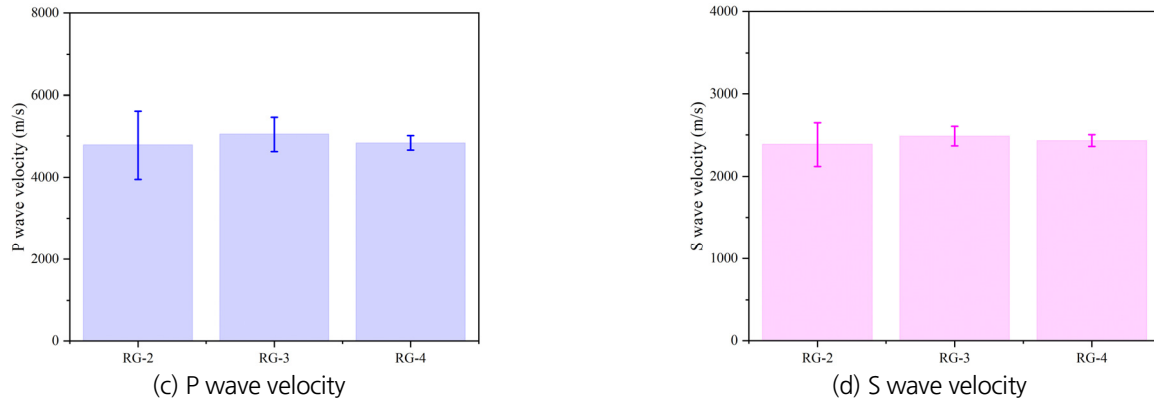


Fig. 4. Comparisons of measured physical properties according to the RG (continued)

시추 구역에 따른 결과 차이를 확인하기 위해 일원 분산분석(one way ANOVA)를 수행하였다. RG에 따른 분석을 수행했으며 유의수준 0.05를 설정하였다. 대부분이 경우 등분산 가정이 성립했으며, 표본의 크기가 다르기 때문에 사후분석은 Scheffe test를 적용하였다. 분산분석 결과는 Table 2와 같다.

Table 2. Variance analyses on physical properties using RG as an independent variable

Property	Group	Ave. difference	Prob.	Property	Group	Ave. difference	Prob.
S.G.	RG2-RG3	0.0600	0.3926	Porosity	RG2-RG3	-0.0031	0.9996
	RG3-RG4	0.0220	0.1851		RG3-RG4	-0.1225	0.5504
	RG2-RG4	0.0820	0.9224		RG2-RG4	-0.1256	0.7013
P wave	RG2-RG3	-261.46	0.8270	S wave	RG2-RG3	-96.99	0.7764
	RG3-RG4	215.50	0.9941		RG3-RG4	53.75	0.9505
	RG2-RG4	-45.96	0.9230		RG2-RG4	-43.24	0.9527

분산분석 결과, 4가지 물리적 물성은 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의미한 평균 차이를 보이지 않았다. 다만 RG-3, 4 지역의 데이터 크기가 작은 점은 감안하여야 할 것으로 판단된다. 가장 표본의 수가 큰 RG-2의 결과를 대상으로 심도에 따른 분산분석을 추가 수행하였다. 심도 10 m를 기준으로 상/하부(upper/lower)로 구별했으며 마찬가지로 유의수준 0.05, 사후분석은 Scheffe test를 적용한 일원 분산분석 결과는 Table 3와 같다. 유의수준 0.05에서 P파 속도는 심도에 따른 차이를 보였으며, S파 속도 역시 유의수준에 근접한 수준으로 평가되었다. 탄성파 속도 기준으로 판단하면, 하부의 시험편이 높은 속도를 보였으며, 따라서 강도 역시 상대적으로 높을 것으로 예상된다.

Table 3. Variance analyses on physical properties using depth as an independent variable (at RG-2 area)

Property	Group	Ave. difference	Prob.	Property	Group	Ave. difference	Prob.
S.G.	L-U	0.0695	0.1263	Porosity	L-U	-0.1598	0.1041
P wave	L-U	850.71	0.0475*	S wave	L-U	270.09	0.0515

*denotes there exists statistically meaningful difference

3.2 단축압축시험 결과

준비된 암석 시험편에 대해 단축압축시험을 수행하였으며, 이를 통해 단축압축강도, 탄성계수, 포아송 비를 산정했고 결과를 정리하면 Table 4와 같다.

Table 4. Uniaxial compression test results and their descriptive statistics

Region	Borehole ID	Sample no.	UCS (MPa)	E (GPa)	ν
RG-2	HM-1	HM-1-UCS-L	126.4	44.53	0.332
	HM-2	HM-2-UCS-L	148.4	62.31	0.297
	HM-3	HM-3-UCS-L	150.5	63.08	0.087
	HM-4	HM-4-UCS-U	134.3	36.59	0.300
		HM-4-UCS-L	131.1	43.75	0.334
	HM-5	HM-5-UCS-L	296.2	82.44	0.314
	HM-6	HM-6-UCS-L	155.7	64.82	0.314
	HM-7	HM-7-UCS-U	196.3	50.96	0.387
		HM-7-UCS-L	277.1	72.97	0.299
	HM-8	HM-8-UCS-U	183.0	57.92	0.255
		HM-8-UCS-L	136.5	56.01	0.266
HM-9	HM-9-UCS-U	154.8	54.40	0.317	
	HM-9-UCS-L	146.7	44.24	0.368	
HM-10	HM-10-UCS-U	173.6	57.67	0.259	
	HM-10-UCS-L	143.0	43.55	0.344	
HM-11	HM-11-UCS-U	180.1	54.51	0.339	
	HM-11-UCS-L	150.3	48.94	0.328	
Statistics		Average	169.7	55.22	0.302
		S.D.	46.7	11.33	0.064
		CV (%)	27.6	20.52	21.14
RG-3	HM-13	HM-13-UCS-U	152.6	54.30	0.360
		HM-13-UCS-L	136.0	59.50	0.383
	HM-14	HM-14-UCS-U	83.9	47.80	0.188
		HM-14-UCS-L	167.7	59.10	0.179
Statistics		Average	135.1	55.18	0.278
		S.D.	31.6	4.72	0.094
		CV (%)	23.4	8.56	34.02
RG-4	HM-12	HM-12-UCS-U	215.2	64.47	0.335
		HM-12-UCS-L	102.1	44.99	0.289
	BH-1	BH-1-UCS-U	16.6	12.93	0.163
		BH-1-UCS-L	153.2	61.23	0.209
Statistics		Average	156.8	56.90	0.278
		S.D.	46.2	8.52	0.052
		CV (%)	29.5	14.98	18.75

시험 결과 중 BH-1-UCS-U의 경우, 다른 시험편의 강도와 차이가 크다. 시험 종료 후, BH-1-UCS-U 시험편의 파단면 형상과 해당 시험을 제외한 나머지 단축압축강도의 평균과 유사한 HM-9-UCS-U의 파단면 형상을 비교하면 Fig. 5과 같다.

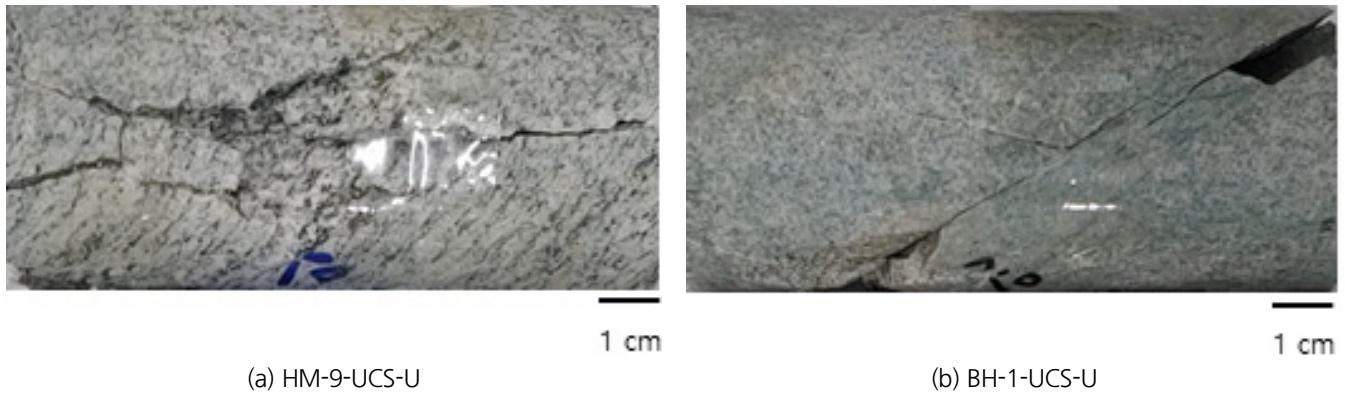


Fig. 5. Comparison of fracture surfaces after uniaxial compression tests

Fig. 5(b)와 같이 BH-1-UCS-U는 선재 균열을 따른 전단 파괴로 판단되므로, 분석 시 해당 결과는 제외하였다. 각 구역(RG)에 따른 단축압축시험 물성의 분포를 도시하면 Fig. 6과 같다.

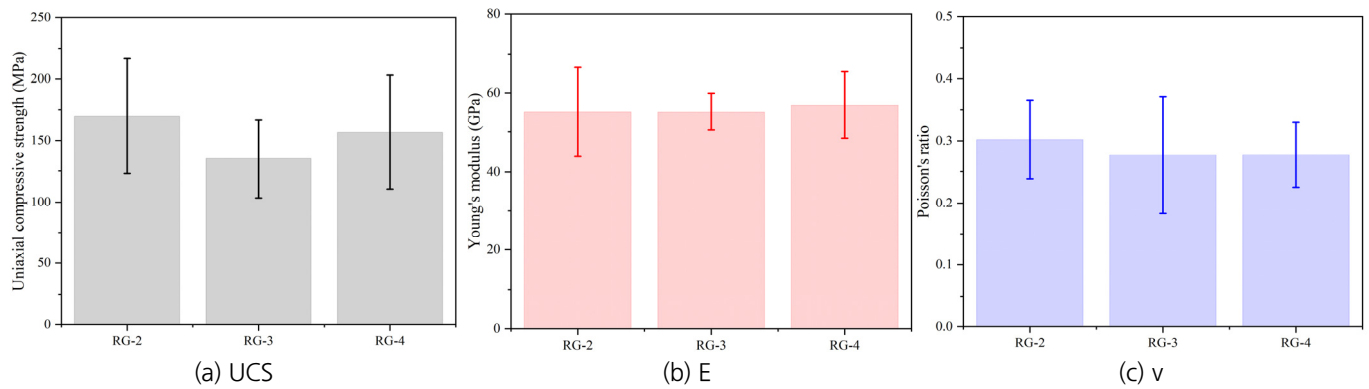


Fig. 6. Comparisons of uniaxial compression test results according to the RG

단축압축강도를 기준으로 무결암을 분류할 수 있다(Deere and Miler, 1966, ISRM, 1981, Bieniawski, 1989). 분류 기준에 따르면, 세 구역의 강도 평균은 모두 ‘very strong rock(100~250 MPa)’로 분류 가능하다. 마찬가지로 시추 구역에 따른 결과 차이를 확인하기 위해 일원 분산분석(one way ANOVA)를 수행하였다. RG에 따른 분석을 수행했으며 유의수준 0.05를 설정하였다. 대부분이 경우 등분산 가정이 성립했으며, 표본의 크기가 다르기 때문에 사후분석은 Scheffe test를 적용하였다. 분산분석 결과는 Table 5과 같다.

Table 5. Variance analyses on uniaxial compression test results using RG as an independent variable

Property	Group	Ave. difference	Prob.	Property	Group	Ave. difference	Prob.
UCS	RG2-RG3	34.5971	0.4391	E	RG2-RG3	0.0421	0.9999
	RG3-RG4	-21.7833	0.9120		RG3-RG4	-1.7217	0.9788
	RG2-RG4	12.8137	0.8368		RG2-RG4	-1.6796	0.9702
v	RG2-RG3	0.0249	0.8321				
	RG3-RG4	-1.67E-4	1.0000				
	RG2-RG4	0.0247	0.8666				

분산분석 결과, 단축압축시험을 통해 산정된 3가지 역학적 물성은 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의미한 평균 차이를 보이지 않았다. 다만 RG-3, 4 지역의 데이터 크기가 작은 점은 감안하여야 할 것으로 판단된다. 마찬가지로 가장 표본의 수가 큰 RG-2의 결과를 대상으로 심도에 따른 분산분석을 수행하였다. 심도 10 m를 기준으로 상/하부(upper/lower)로 구별했으며 마찬가지로 유의수준 0.05, 사후분석은 Scheffe test를 적용한 일원 분산분석 결과는 Table 6과 같다. 유의수준 0.05에서 심도에 따른 역학적 물성의 차이는 확인되지 않았다. 탄성과 속도를 바탕으로 예상한 것과 다르게 강도를 기준으로 보면 상부의 단축압축강도가 미세하게 높은 것을 확인할 수 있다.

Table 6. Variance analyses on uniaxial compression test results using depth as an independent variable (at RG-2 area)

Property	Group	Ave. difference	Prob.	Property	Group	Ave. difference	Prob.
UCS	L-U	-1.0864	0.9663	E	L-U	4.9589	0.4205
v	L-U	-0.0111	0.7527				

3.3 간접인장시험 결과

앞서와 마찬가지로 준비된 암석시료들에 대해 간접인장시험을 수행하였으며 그 결과는 Table 7 및 Fig. 7과 같다.

Table 7. Brazilian tensile test results and their descriptive statistics

Region	Borehole ID	Sample no.	BTS (MPa)	Region	Borehole ID	Sample no.	BTS (MPa)	
RG-2	HM-1	HM-1-BTS-L	14.67	RG-3	HM-13	HM-13-BTS-U	12.58	
	HM-2	HM-2-BTS-L	18.15			HM-13-BTS-L	14.08	
	HM-3	HM-3-BTS-L	14.01		HM-14	HM-14-BTS-U	13.20	
	HM-4	HM-4-BTS-U	11.99			HM-14-BTS-L	12.08	
		HM-4-BTS-L	12.21		Average	12.98		
	HM-5	HM-5-BTS-L	24.67		Statistics	S.D.	0.75	
	HM-6	HM-6-BTS-L	16.05		CV (%)	5.77		
	HM-7	HM-7-BTS-U	14.02		RG-3	HM-12	HM-12-BTS-U	10.38
		HM-7-BTS-L	18.38				HM-12-BTS-L	9.99
		HM-8	HM-8-BTS-U			12.75	BH-1	BH-1-BTS-U
HM-8-BTS-L			12.14	BH-1-BTS-L		14.31		

Table 7. Brazilian tensile test results and their descriptive statistics (continued)

Region	Borehole ID	Sample no.	BTS (MPa)	Region	Borehole ID	Sample no.	BTS (MPa)
RG-2	HM-9	HM-9-BTS-U	13.16	Statistics		Average	12.50
		HM-9-BTS-L	12.45			S.D.	2.35
	HM-10	HM-10-BTS-U	13.58			CV (%)	18.83
		HM-10-BTS-L	8.78				
	HM-11	HM-11-BTS-U	12.81				
		HM-11-BTS-L	14.88				
Statistics		Average	14.39				
		S.D.	3.41				
		CV (%)	23.67				

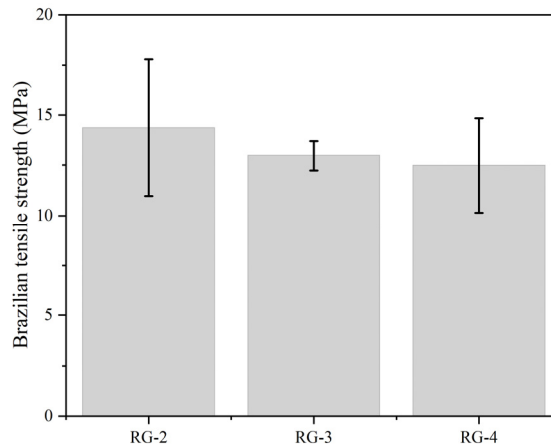


Fig. 7. Comparisons of Brazilian Tensile test results according to the RG

마찬가지로 시추 구역과 RG-2 구역 심도에 따른 일원 분산분석을 수행하였고 그 결과는 Table 8 같다. 유의수준 0.05에서 시추 구역과 RG-2 구역 심도에 따른 간접인장강도의 차이는 확인되지 않았다. 다만 분석에 사용된 표본의 크기가 작다는 점을 감안할 필요가 있다. 암석의 단축압축강도와 간접인장강도는 대체적으로 양의 상관관계를 갖는다. 식 (1)과 같이 단축압축강도와 간접인장강도의 비는 취성도(brittleness index)로 정의되며 일반적으로 10~20 사이의 값을 지닌다.

$$BI = \frac{\sigma_c}{\sigma_t} \tag{1}$$

본 조사를 위한 암석 시험편은 가능한 인접한 구간에서 취득하려 하였으며, 취득 구간의 길이가 1 m를 넘지 않는 수준이기 때문에 단축압축시험과 간접인장시험을 위한 시험편은 서로 같은 암종이며 조직 및 광물조성이 유사하다고 가정하였다. 이를 바탕으로 각 구간의 취성도를 계산하면 Table 9와 같다. 단축압축강도가 이상치(outlier)에 해당하는 BH-1-UCS-U를 제외하면, 6~20 수준의 취성도가 계산되었으며 시추구역에 따른 일반적인 경향은 보이지 않았다.

Table 8. Variance analyses on Brazilian tensile test results using RG and depth as independent variables

Property	Group	Ave. difference	Prob.	Property	Group	Ave. difference	Prob.
BTS	RG2-RG3	1.4112	0.7296	BTS	L-U	2.0747	0.2570
	RG3-RG4	0.4785	0.9776				
	RG2-RG4	1.8897	0.5712				

Table 9. Brittleness index results according to the RG and the depth

Region	Borehole ID	Depth	UCS (MPa)	BTS (MPa)	Brittleness
RG-2	HM-1	L	126.4	14.67	8.62
	HM-2	L	148.4	18.15	8.18
	HM-3	L	150.5	14.01	10.74
	HM-4	U	134.3	11.99	11.20
		L	131.1	12.21	10.74
	HM-5	L	296.2	24.67	12.01
	HM-6	L	155.7	16.05	9.70
	HM-7	U	196.3	14.02	14.00
		L	277.1	18.38	15.08
	HM-8	U	183.0	12.75	14.35
		L	136.5	12.14	11.24
HM-9	U	154.8	13.16	11.76	
	L	146.7	12.45	11.78	
HM-10	U	173.6	13.58	12.78	
	L	143.0	8.78	16.29	
HM-11	U	180.1	12.81	14.06	
	L	150.3	14.88	10.10	
RG-3	HM-13	U	152.6	12.58	12.13
		L	136.0	14.08	9.66
HM-14	U	83.9	13.20	6.36	
	L	167.7	12.08	13.88	
RG-4	HM-12	U	215.2	10.38	20.73
		L	102.1	9.99	10.22
	BH-1	U	16.6	15.35	1.08
		L	153.2	14.31	10.71

3.4 삼축압축시험 결과

삼축압축시험을 위해 한 세트에 세 번의 시험을 수행했으며 구속압은 5, 10, 15 MPa를 각각 적용하였다. 상술한 것처럼 시험편 취득 구간의 길이가 길지 않기 때문에 각 구간에 해당하는 단축압축, 삼축압축 시험편은 서로 암중, 조직, 광물 구성 면에서 유사한 시료로 가정하였고, 따라서 점착력과 내부 마찰각 계산 시, 단축압축강도 결과를 포함하여 물성을 산정하였다. Mohr-Coulomb 파괴기준식 이외에, 경험적으로 제시된 Hoek-Brown 기준식 역시 널리 활용된다. 이 기준식은 무결암뿐만 아니라 암반에도 적용 가능하며 여러 차례 수정되었으나, 1980년에 제안된 기본적인 형태는 식 (2)과 같다(Hoek and Brown, 1980).

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma'_{ci} \left(m \frac{\sigma'_3}{\sigma'_{ci}} + s \right)^a \tag{2}$$

여기서, σ'_1, σ'_3 는 최대/최소 (유효) 주응력(MPa), σ'_{ci} 는 경험식에 의해 계산된 (유효) 단축압축강도, m, s, a 는 회귀 상수로 무결암의 경우 s, a 는 각각 1, 0.5에 해당한다. 삼축압축시험 결과는 Table 10과 같다.

Table 10. Triaxial compression test results and their descriptive statistics

Region	Borehole ID	Sample no.	Cohesion (MPa)	Internal friction angle (°)	Hoek-Brown constants	
					σ_{ci}	m_i
RG-2	HM-1	HM-1-TCS-L	26.35	45.7	127.9	12.9
	HM-3	HM-3-TCS-L	22.57	56.1	144.9	28.4
	HM-4	HM-4-TCS-U	21.40	55.8	134.1	29.2
		HM-4-TCS-L	21.33	55.4	132.2	28.4
	HM-7	HM-7-TCS-L	34.95	61.2	271.5	33.7
	HM-8	HM-8-TCS-L	31.82	51.6	182.5	17.9
	HM-9	HM-9-TCS-U	31.43	47.0	159.0	13.3
		HM-9-TCS-L	24.36	53.3	144.5	22.3
	HM-10	HM-10-TCS-U	30.47	51.2	171.4	18.0
		HM-10-TCS-L	24.40	53.9	146.6	23.7
	HM-11	HM-11-TCS-U	24.75	57.4	169.0	29.0
HM-11-TCS-L		28.75	49.7	155.1	16.3	
Statistics	Average		26.48	52.43	156.37	21.68
	S.D.		4.23	4.45	37.36	6.79
	CV (%)		15.99	8.49	23.89	31.34
RG-3	HM-13	HM-13-TCS-U	26.72	50.4	147.8	17.3
RG-4	HM-12	HM-12-TCS-L	21.41	45.3	102.7	13.1

RG-2 구역 외 표본의 수가 작기 때문에 RG-2 심도에 따른 일원 분산분석만 수행하였고, 그 결과는 Table 11과 같다.

Table 11. Variance analyses on triaxial compression test results using depth as an independent variable (at RG-2 area)

Property	Group	Ave. difference	Prob.	Property	Group	Ave. difference	Prob.
c	L-U	-0.1963	0.9473	phi	L-U	0.5125	0.8604
σ_{ci}	L-U	4.7750	0.8503	m_i	L-U	0.5750	0.9007

분산분석 결과 심도에 따른 물성 차이는 확인되지 않았다. 다만 분석에 사용된 표본의 크기가 작다는 점을 감안할 필요가 있다. Fig. 8(a)와 같이 삼축압축시험 해석 시, 단축압축시험 결과를 포함하여 Hoek-Brown 파괴식을 적용하였다. 식에 포함된 σ_{ci} 는 회귀 상수에 해당하며 이를 계산하면 단축압축강도를 예측할 수 있다. 상술한 실제 시험결과와 식 (1)에 의해 예측된 단축압축강도를 비교하면 Fig. 8(b)와 같다. 그림에서 확인할 수 있듯, 단축/삼축압축 시험결과는 Hoek-Brown 파괴기준식에 의해 비교적 정확하게 모사됨을 알 수 있다.

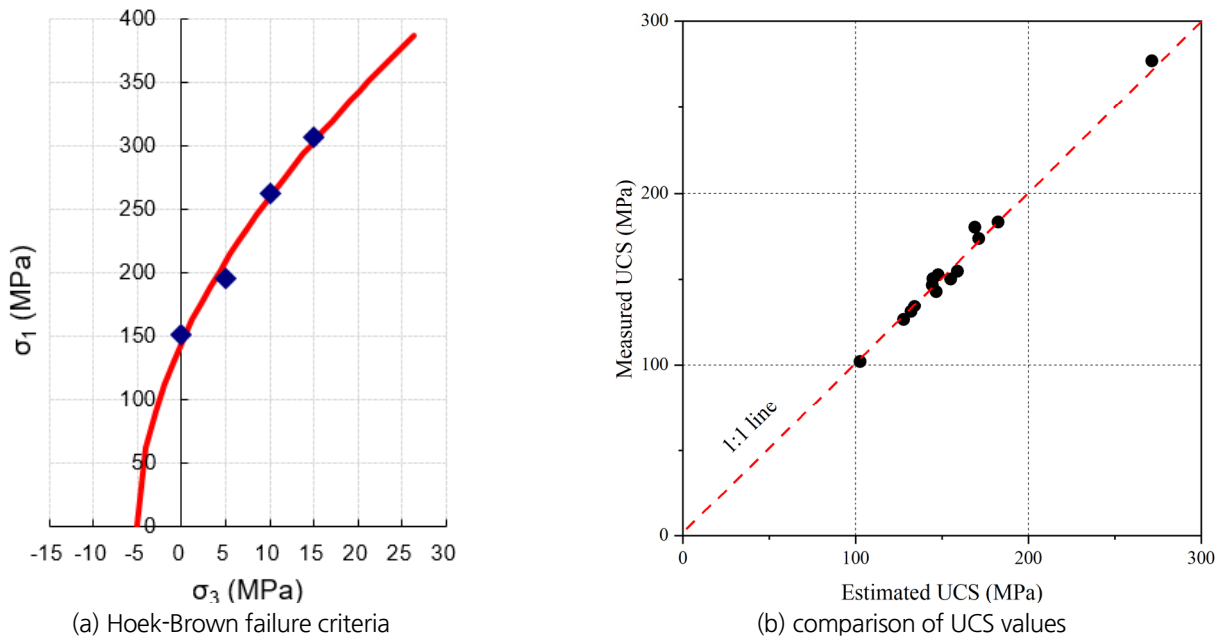


Fig. 8. Triaxial compression test results with Hoek-Brown failure criterion

3.5 요약

K-COIN 시험 부지 선정을 위해 KURT 내부에 시추공을 시추하고 암석 시험편에 대한 실내시험을 수행하였다. 시험은 크게 물리적 물성 측정, 단축압축시험, 간접인장시험, 삼축압축시험으로 계획되었고 이를 통해 무결암 시험편의 비중, 공극률, 탄성파 속도, 단축압축강도, 탄성계수, 포아송비, 간접인장강도, 점착력, 내부 마찰각을 측정하였다. 각 시험을 위한 시험편은 가능한 인접한 구간에서 취득했으므로, 시험편은 서로 같은 암종이며 조직 및 광물조성이 유사하다고 가정하였다. 이를 바탕으로 측정된 암석 물성 간 상관관계를 확인하면 Table 12, Fig. 9와 같다.

Table 12. Relationship matrix for intact rock test results in this study

	S.G.	Po	Vp	Vs	UCS	E	v	BTS	c	phi
S.G.	1	-0.7542	0.7713	0.7699	0.6175	0.5337	0.1552	0.8365	0.6239	0.4076
Po	-0.7542	1	-0.7303	-0.7380	-0.3028	-0.3385	-0.1239	-0.6360	-0.6328	-0.1473
Vp	0.7713	-0.7303	1	0.9884	0.4132	0.5068	0.1156	0.6818	0.5137	0.0474
Vs	0.7699	-0.7380	0.9884	1	0.4110	0.4980	0.0641	0.6926	0.5208	0.0149
UCS	0.6175	-0.3028	0.4132	0.4110	1	0.8353	0.3075	0.4752	0.7647	0.6150
E	0.5337	-0.3385	0.5068	0.4980	0.8353	1	0.0827	0.4833	0.6550	0.3884
v	0.1552	-0.1239	0.1156	0.0641	0.3075	0.0827	1	-0.0348	0.0624	-0.1757
BTS	0.8365	-0.6360	0.6818	0.6926	0.4752	0.4833	-0.0348	1	0.6434	0.2972
c	0.6239	-0.6328	0.5137	0.5208	0.7647	0.6550	0.0624	0.6434	1	0.0120
phi	0.4076	-0.1473	0.0474	0.0149	0.6150	0.3884	-0.1757	0.2972	0.0120	1

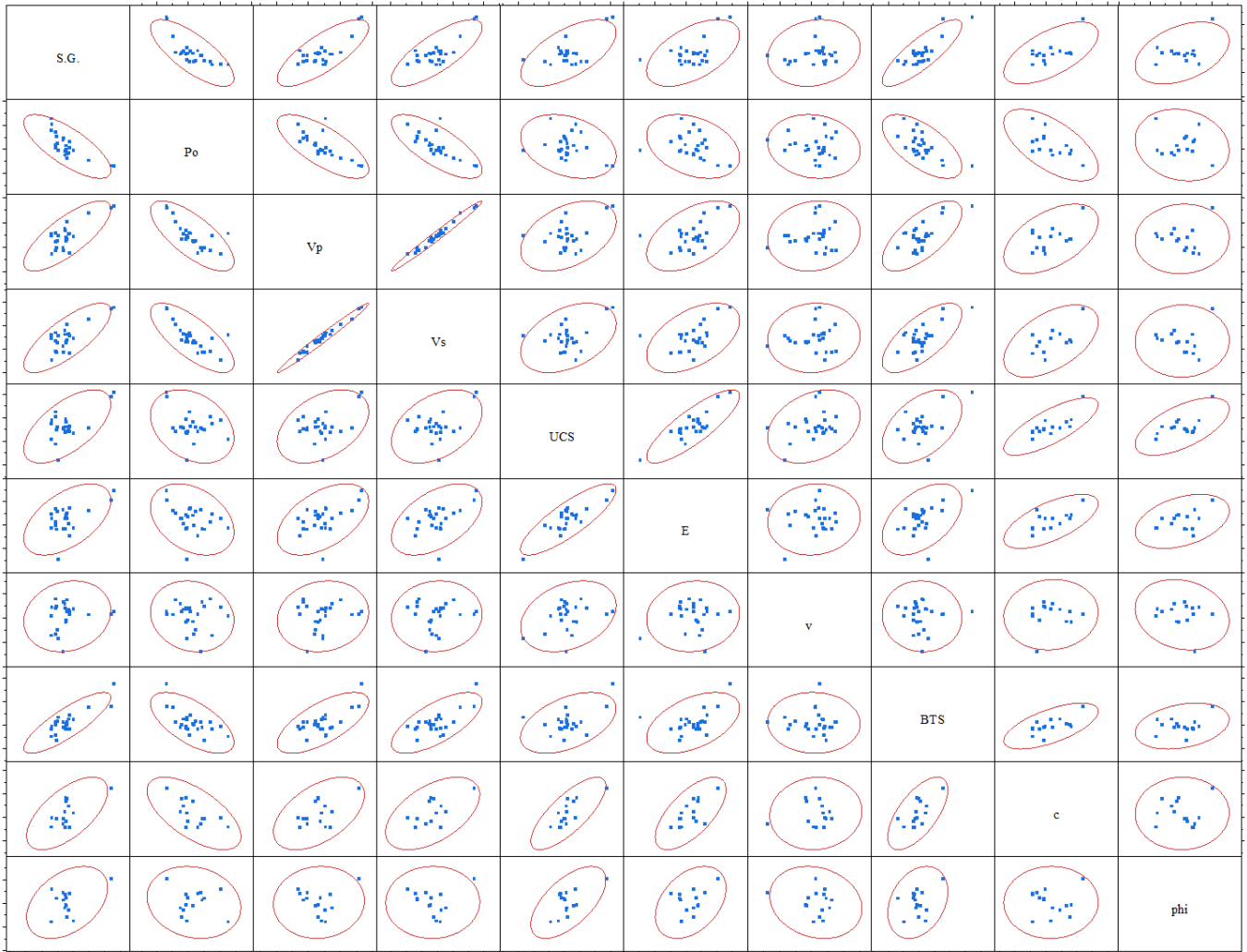


Fig. 9. Scatter plot for relationship between rock properties based on the test results

가장 대표적인 암석 물성인 단축압축강도를 기준으로 정리하면, 단축압축강도와 상관성이 높은 물성은 탄성계수(0.8353), 점착력(0.7647), 비중(0.6175) 순으로 나타났다. 공극률을 제외하면 단축압축강도는 다른 물성과 양의 상관관계를 지니며 공극률, 포아송비와의 상관성은 낮은 것으로 확인되었다.

분산분석 결과, 시추 구역에 따른 무결암 물성이 차이는 통계적으로 유의미하지 않은 것으로 확인되었다. 유의수준 0.05 수준에서 탄성과 속도 일부가 차이를 보였으나 나머지 물성은 큰 차이를 보이지 않았다. 표본의 크기가 가장 큰 RG-2 구역의 결과에 대해 심도에 따른 분산분석을 수행하였고, 결과적으로 20 m 수준의 심도까지는 심도에 따른 물성 차이를 보이지 않았다. 세 조사 구역의 단축압축강도는 RG-2(169.65 MPa), RG-4(156.83 MPa), RG-3(135.05 MPa) 순으로 측정되었으나, 강도 기준 분류법에 따르면 세 구역 모두 ‘very strong rock’으로 분류되어 구역에 관계 없이 역학적인 안정성은 모두 높을 것으로 판단된다. 각 물성치의 시추 구역에 따른 간략한 통계량만 정리하면 Table 13과 같다.

Table 13. Summary of the laboratory experiments

	RG-2	RG-3	RG-4
S.G. (-)	2.71 ± 0.09	2.65 ± 0.03	2.63 ± 0.01
Porosity (%)	0.44 ± 0.19	0.44 ± 0.19	0.56 ± 0.22
P velocity (m/s)	4787.29 ± 834.99	5048.75 ± 427.24	4833.25 ± 176.49
S velocity (m/s)	2388.77 ± 269.21	2485.75 ± 118.59	2432.00 ± 71.04
UCS (MPa)	169.65 ± 46.73	135.05 ± 31.59	156.83 ± 46.24
E (GPa)	55.22 ± 11.33	55.18 ± 4.72	56.90 ± 8.52
v (-)	0.3024 ± 0.0639	0.2775 ± 0.0944	0.2777 ± 0.0521
BTS (MPa)	14.39 ± 3.41	12.98 ± 0.75	12.50 ± 2.35
c (MPa)	24.68 ± 4.23	26.72	21.41
Internal friction angle (°)	52.43 ± 4.45	50.40	45.30

4. 결론

고준위방사성폐기물처분장은 방사성폐기물의 위해성을 충분히 저감시킬 수 있도록 다양한 방법을 통해 처분장을 설계/건설하며 이는 크게 공학적 방벽과 천연 방벽으로 구분된다. 이러한 안전 수단은 다양한 방법을 통해 장/단기적 성능을 평가하고 검증하여 그 안전성을 입증해야 한다. 한국원자력연구원은 공학적 방벽의 성능을 실증하기 위해 원내에 위치한 지하연구시설인 KURT를 활용하여 각종 현장실험을 수행하였다. 2013년부터 설계하고 진행된 In-DEBS 실험이 종료된 후, 개선된 형태의 후속 실험인 K-COIN을 수행하기 위한 개념 설계안이 도출되었다. K-COIN 실험 수행을 위해 KURT 내부에 상세 실험부지 선정은 선행해야 하며, 이를 위해 예비 지반조사를 수행하였다. 본 논문은 지반조사 내용 중, 암석 실내시험 결과를 종합하여 정리하기 위해 작성되었다.

본 지반조사를 위해 KURT 내부 RG-2~4 지역에 총 15개의 시추공을 시추하였다. 근계 영역에서의 물성 조사를 목적으로 약 ~20 m 수준의 시추공을 시추하여 암석 실내시험에 적합한 시험편을 준비하였다. 시추 구역뿐만 아니라 0~10 m의 상부와 10~20 m의 하부로 심도를 나누어 시험편을 준비했으며, 이를 활용하여 암석의 물리적 특성 측정, 단축압축시험, 간접인장시험, 삼축압축시험을 수행하였다. 각 시험결과를 통해 비중, 공극률, 탄성파 속도, 단축압축강도, 탄성계수, 포아송비, 간접인장강도, 점착력, 내부 마찰각 등의 물성을 산정하였다. 산정된 무결암 물성의 대표적 통계량을 계산했으며, 시추 구역과 심도에 따른 분산분석을 수행하였다. 분산분석 결과, 시추 구역과 심도에 따른 암석 물성의 차이는 통계적으로 유의미하지 않았다.

가장 대표적인 암석 물성인 단축압축강도를 기준으로 판단하면, 시추 구역에 관계 없이 모든 구역의 강도가 ‘very strong rock’으로 분류되어 역학적 안전성이 확보된 것으로 판단된다. 본 기술보고에서는 암석 실내시험 결과만 정리하여 작성되었으며, 함께 수

행된 현장 수리시험 및 검증 결과에 대한 연구는 추후 작성될 예정이다. 또한 예비 조사 결과를 종합하여 K-COIN 부지가 선정되면 상세 지반조사를 수행하여 결과를 보고할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 사용후핵연료관리핵심기술개발사업단(2021M2E1A1085193)의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- Bieniawski, Z.T., 1989, Engineering rock mass classification. Wiley, New York. USA.
- Deere, D. and Miller, R., 1966, Engineering classification and index properties for intact rock. Technical report No. AFNL-TR-65-116, Air Force Weapons Laboratory.
- Hoek, E. and Brown, E.T., 1980, Empirical strength criterion for rock masses. *Journal of Geotechnical Engineering*, 106, 1013-1035.
- ISRM, 1981, Basic geotechnical description of rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 18, 85-110.
- ISRM, 2007, The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006. ISRM Commission on Testing Methods.
- Kim, G.Y., Lee, J.O., Cho, W.J., and Baik, M.H., 2019, In-situ demonstration of engineering barrier system (In-DEBS) for characterization of coupled THMC behavior in KURT, *Journal of Nuclear Fuel Cycle Waste Technology*, 17, 1-14.
- KSRM, 2010, Suggested methods for rock testing. KSRM Commission on testing methods, CIR, Korea.
- 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 Waste Technology*, 17, 65-80.
- Lee, M.S., Kim, J.S., Kim, T., Hong, C.H., Choi, S., Kim, K.I., Kim, M.S., and Hong, E.S., 2022, Conceptual design of engineered barrier system for the field demonstration of THM behavior, iKSNF-SD2/1-22-SCR-06, iKSNF, Daejeon, Korea.
- Lee, S.M., Kim, H.S., and Na, K.C., 1980, Explanatory text of the geological map of Daejeon, KIGAM, Daejeon, Korea.
- Park, H.I., Lee, J.D., and Cheong, J.G., 1977, Explanatory text of the geological map of Yuseong, KIGAM, Daejeon, Korea.