

TECHNICAL NOTES

고준위방사성폐기물 심층처분 부지조사 시 활용 가능한 국내 무결암 물성의 기본 DB 구축

최승범¹, 천대성², 정호영³, 전석원^{4*}

¹한국지질자원연구원 방사성폐기물지층처분연구단 박사후연수자, ²한국지질자원연구원 방사성폐기물지층처분연구단 책임연구원

³부경대학교 에너지자원공학과 조교수, ⁴서울대학교 에너지시스템공학부 교수

Establishment of a Basic DB of Korean Intact Rock Properties Applicable to Site Characterization for HLW Geological Disposal

Seungbeom Choi¹, Dae-Sung Cheon², Hoyoung Jeong³, and Seokwon Jeon^{4*}

¹Post Doctor Researcher, Center for HLW Geological Disposal, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²Principal Researcher, Center for HLW Geological Disposal, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

³Assistant Professor, Department of Energy Resources Engineering, Pukyong National University

⁴Professor, Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University

*Corresponding author: sjeon@snu.ac.kr

Received: April 13, 2021

Revised: April 20, 2021

Accepted: April 23, 2021

ABSTRACT

Considering the current status of Korean high-level radioactive waste (HLW) storage and the fact that siting process for the disposal of HLW usually takes a long time, it is urgent to secure relevant techniques as well as to construct fundamental database that is applicable to the siting process. The siting process is normally conducted in stages, and evaluating parameters with respect to rock mechanics are utilized in all stages. Also, considering Korean geological environments, a comprehensive database on the parameters needs to be constructed, reflecting the characteristics of candidate sites according to the rock type and regional features. In this technical note, a fundamental database on intact rock properties, as one of the evaluating parameters, is provided. Various laboratory test results were compiled and several descriptive statistics were analyzed and classified according to rock type, strength, and region. The database can be utilized in the siting process as well as in various engineering projects as a broad reference.

Keywords: High level radioactive waste repository, Site investigation, Intact rock properties, Database

초록

국내 고준위방사성폐기물 발생현황과 처분장 부지선정에 많은 시간이 소요된다는 점을 고려할 때, 관련 기술확립과 부지선정 시 활용 가능한 기반자료 구축이 시급한 실정이다. 방폐장 부지 선정은 단계별 조사 과정을 거치는 것이 일반적이며, 암반공학적 평가인자는 전 단계에 걸쳐 다양하게 활용된다. 또한, 국내 지질환경을 고려하면 다양한 암종과 지역적 특성을 반영한 폭넓은 기반자료를 구축할 필요가 있다. 본 논문은 암반공학적 평가인자 중, 무결암의 물성에 대한 기반자료를 제공하기 위한 목적으로 작성되었다. 국내에서 수행된 다양한 암석 실내시험 결과를 취합하여 이를 암종별, 강도별, 지역별로 분류하고 각



중 기술통계량을 제시하였다. 이는 향후 방폐장 부지조사뿐만 아니라 다양한 사업 수행 시, 참조자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심어: 고준위방사성폐기물 처분장, 부지조사, 무결암 물성, 데이터베이스

1. 서론

IAEA(International Atomic Energy Agency)는 체계적이고 효율적인 부지조사를 위하여 단계별 부지조사 방안을 제안하고 있다(IAEA, 1994). 이를 간략히 설명하면, 먼저 전국 규모의 조사를 수행하여 부적합 지역을 배제하고, 남은 후보지에 대한 기본조사를 수행한다. 기본조사를 통해 부지 특성화 및 적합성 평가를 수행하고 지역 주민의 수용성을 확인한 후, 추가적인 상세조사를 수행한다. 기본조사에서부터 처분장 인허가까지, 최소 30여 년 이상의 매우 장기간이 요구되는데, 스웨덴의 경우 약 40년, 핀란드의 경우 32년이 소요되었다.

국내 사용후핵연료의 누적 발생량은 2020년 4분기 기준, 경수로형 원전에서 20,053 다발, 중수로형 원전에서 474,176 다발, 연구용 원자로에서 512 다발이다(한국수력원자력, 2021, 한국원자력연구원, 2021). 발생한 사용후핵연료는 각 원전 내 임시저장시설에 보관하고 있으나, 지속적인 원전 발전 현황을 고려하면 가까운 시일 내에 임시저장시설의 포화가 예상된다. 상술한 것처럼 최종적인 처분장 건설에 많은 시간이 소요된다는 점과 국내 고준위방사성폐기물 발생 현황을 고려하면 방폐장 부지선정을 위한 조사가 조속히 수행될 필요가 있다.

2016년 산업통상자원부가 제시한 고준위방사성폐기물 단계별 관리 기본계획에 따르면, 기본조사, 부지공모, 상세조사 등 12년에 걸친 부지조사를 수행하고 최종적으로 2051년까지 처분시설을 건설하여 운영해야 한다(산업통상자원부, 2016). 부지조사를 제외하고도, 처분시설 건설허가 신청에서 운영까지 많은 시간이 소요되기 때문에 안전한 처분 및 실증을 위한 관련 기술개발이 시급한 실정이다. 2020년 한국과학기술기획평가원은 사용후핵연료 저장·처분 안전성 확보를 위한 핵심기술개발 사업 예비타당성 보고서를 발간하였다. 이를 통해 관련 기술개발의 필요성이 다시 한번 지적되었으며 그 결과, 대규모의 다부처 기술개발 사업이 추진 중에 있다(한국과학기술기획평가원, 2020). 해당 사업은 사용후핵연료의 저장 안정성 실증 및 표준화, 규제기반 구축 등 포괄적인 내용을 담고 있으며, 특히 처분시설 확보를 위한 단계별 부지적합성 평가 기술개발 및 실증 등 부지조사와 밀접한 관련이 있는 중점/세부과제를 포함하고 있다.

한편, 한국지질자원연구원은 체계적이고 효율적인 부지조사를 수행하기 위하여 단계별 조사요소 분류체계를 제안하였다(한국지질자원연구원, 2016). 이는 평가부문(aspect), 항목(item), 인자(parameter)로 구분되며 각 단계에서 요구되는 평가인자를 구체화하여 총 103개의 인자를 제시하였다(KIGAM, 2019). 이 중, 암반공학 분야의 평가항목은 불연속면, 무결암, 암반 세 가지이며, 관련 평가인자는 총 33개이다. 암반공학 관련 평가인자는 현장실험, 실내실험, 시추공/시추코어 로깅 등 다양한 방법에 의해 측정/추정될 수 있으며 광역/기본조사부터 상세조사 단계에 이르기까지 전 단계에서 활용된다. 암반공학 분야의 평가항목, 인자 목록은 Table 1과 같다(KIGAM, 2019).

Table 1. Evaluation item and corresponding parameters regarding rock mechanics and engineering

Item	Fracture	Intact rock	Rock mass
Parameter	Density	Water content	Deformation modulus
	Magnitude	Specific gravity	Poisson's ratio
	Orientation	Porosity	Tensile strength
	Aperture	Seismic velocity	Compressive strength
	Stiffness	Young's modulus	Shear strength
	Friction angle	Poisson's ratio	Rock mass classification (RQD, RMR, Q, etc.)
	Cohesion	Uniaxial compressive strength	In-situ stress
	Dilation angle	Tensile strength	Anisotropy and heterogeneity
	Joint roughness	Cohesion, internal friction angle	
	Joint compressive strength	Creep constants	
		Crack initiation/damage stress	
		Fracture toughness	
		Permeability	

국내 지질환경 중 암종의 면적을 분류하면 화성암(36%), 변성암(30%), 퇴적암(25%), 미고결층(9%)으로 구분되며, 미고결층을 제외하면 암종별 비율에 큰 차이를 보이지 않는다(KIGAM, 2019). 처분장 후보 부지 선정 시, 합리적이고 주민 수용성이 높은 결과를 도출하기 위해서는 객관적인 부지적합성 평가 기술뿐만 아니라, 다양한 암종과 그 지역적 특성을 고려한 폭넓은 기반자료를 구축하여 평가할 필요가 있다. 본 논문은 이러한 기반자료(DB) 제공을 목적으로 한 기초 작업이며, 상술한 평가항목 중 무결암 시험편에 대한 실내시험 결과를 취합/정리하였다. 수집된 무결암 물성은 암종별, 강도별, 지역별로 분류하여 그 범위와 기술 통계량을 제시하였으며, 이는 향후 연구가 진행됨에 따라 지속적으로 갱신하여 발표될 예정이다.

2. 국내 무결암 물성의 암종별 DB

Choi et al.(2020)은 부지 선정 시 고려되는 암반공학적 평가인자에 대한 국내외 사례를 보고하였다. 이는 다양한 역학적, 물리적 물성을 포함하고 있으며, 본 논문에서 취합하여 정리한 무결암 물성은 비중(specific gravity, SG), 공극률(porosity, PO), P- 파와 S-파 속도(P- and S-wave velocity, V_p , V_s), 단축압축강도(uniaxial compressive strength, UCS), 탄성계수(Young's modulus, E), 포아송비(Poisson's ratio, ν), 압열인장강도(Brazilian tensile strength, BTS), 점착력(cohesion, c), 내부마찰각(internal friction angle, ϕ)이다. 수집된 무결암 물성은 한국지질자원연구원과 서울대학교 암반공학연구실에서 수행해온 암석 실내시험 결과의 일부를 취합한 자료이다. 물성별로 데이터의 크기가 상이하여 출처에 따른 데이터 비율을 정확히 산정하기는 어려우나 본 논문에서 사용된 데이터는 대략적으로 한국지질자원연구원과 서울대학교 암반공학연구실의 자료가 4:6 정도의 비율을 이루고 있다. 또한, 대상 시험편이 취득된 심도에 대한 정보는 누락된 경우가 많아 본 논문에서 다루지 않았으나 상당수의 자료가 토목 구조물 시공/설계와 관련된 경우가 많아 비교적 천부 암반에서 취득되었을 것임을 참고할 필요가 있다. 상기 물성을 화성암(IGN), 변성암(MET), 퇴적암(SED)으로 대별하여 기술통계량을 분석한 결과는 Table 2와 같다.

Table 2. Descriptive statistics of the intact rock properties according to rock type

	<i>SG</i> (-)	<i>PO</i> (%)	<i>V_P</i> (m/s)	<i>V_S</i> (m/s)	<i>UCS</i> (MPa)	<i>E</i> (GPa)	<i>v</i> (-)	<i>BTS</i> (MPa)	<i>c</i> (MPa)	<i>φ</i> (deg)
IGN rocks										
n	480	454	562	562	780	493	493	237	274	274
Ave.	2.70	1.52	4,256	2,290	122.16	36.15	0.22	11.91	20.80	54.61
S.D.	0.11	1.60	1,251	612	69.37	17.96	0.05	5.71	9.64	4.45
CV (%)	4.12	105.27	29.41	26.76	56.79	49.68	23.53	47.94	46.35	8.14
Min	2.36	0.13	1,020	660	10.20	1.18	0.10	1.00	2.00	40.00
Max	2.97	7.51	6,930	3,910	338.00	78.59	0.36	27.00	44.90	63.00
MET rocks										
n	780	720	790	790	1,052	800	800	503	515	515
Ave.	2.71	1.11	4,257	2,308	92.91	32.64	0.21	10.89	18.55	51.21
S.D.	0.10	1.50	917	461	52.70	15.37	0.05	4.08	7.03	6.65
CV (%)	3.79	134.54	21.49	19.98	56.72	47.09	25.75	37.49	39.37	12.98
Min	2.36	0.05	1,280	910	6.12	1.20	0.10	1.00	3.00	35.00
Max	3.01	10.52	6,940	3,680	291.84	74.59	0.36	23.47	41.84	36.00
SED rocks										
n	395	343	380	380	445	358	358	245	252	252
Ave.	2.65	2.27	4,290	2,335	116.08	33.85	0.20	13.23	21.88	51.65
S.D.	0.11	2.53	1,099	528	62.36	13.77	0.05	6.09	9.13	5.23
CV (%)	4.35	111.29	25.63	22.63	53.73	40.69	25.56	46.02	41.74	10.13
Min	2.22	0.06	1,160	750	3.67	2.84	0.10	2.00	4.00	38.9
Max	2.97	17.34	6,460	3,610	343.00	77.03	0.36	31.00	45.92	67.00

n, Ave., S.D., and CV denote the number of data, average, standard deviation, and coefficient of variation, respectively

Table 2에 기재된 무결암 물성의 분포는 Fig. 1과 같다. 간격은 9~11개 수준으로 조절하였으며, 각 물성의 암종별 표본 크기가 상이하기 때문에 상대빈도로 도시하였다.

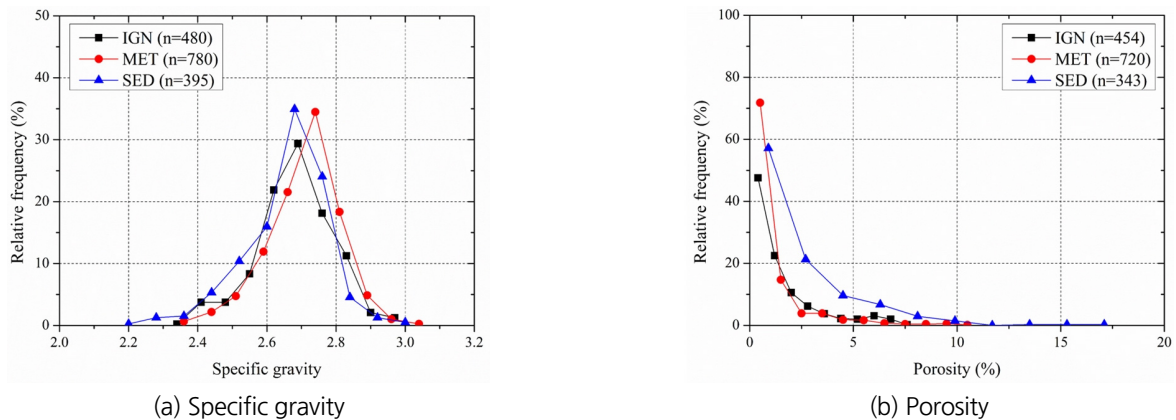


Fig. 1. Distribution of the intact rock properties for different rock types

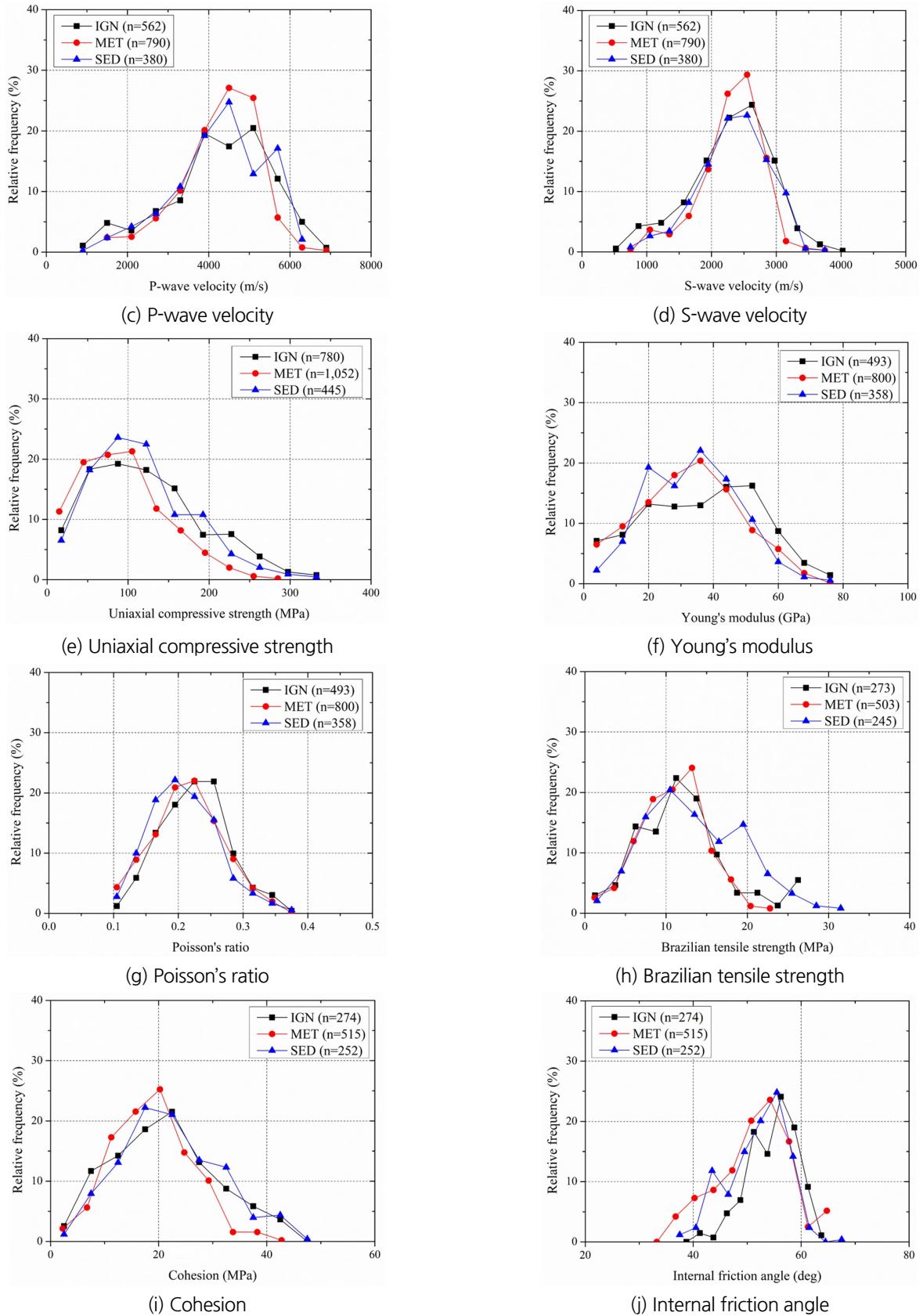


Fig. 1. Distribution of the intact rock properties for different rock types (continued)

상기 결과는 Aladejare and Wang(2017)와 비교 가능하다. 그들은 전 세계에서 보고된 135개의 논문 등을 취합해 무결암 물성에 대한 각종 통계량을 제시하였다. 화성암, 변성암, 퇴적암으로 대별하여 각종 물리적, 역학적 물성에 대한 평균, 범위, 변동계수를 보고했으며 이 중, 본 논문의 자료와 비교 가능한 물성을 Fig. 2에 도시하였다. 퇴적암의 비중, 공극률, 변성암의 내부마찰각 등을 제외하면 오차범위 내에서 각 결과가 비교 가능함을 확인할 수 있다.

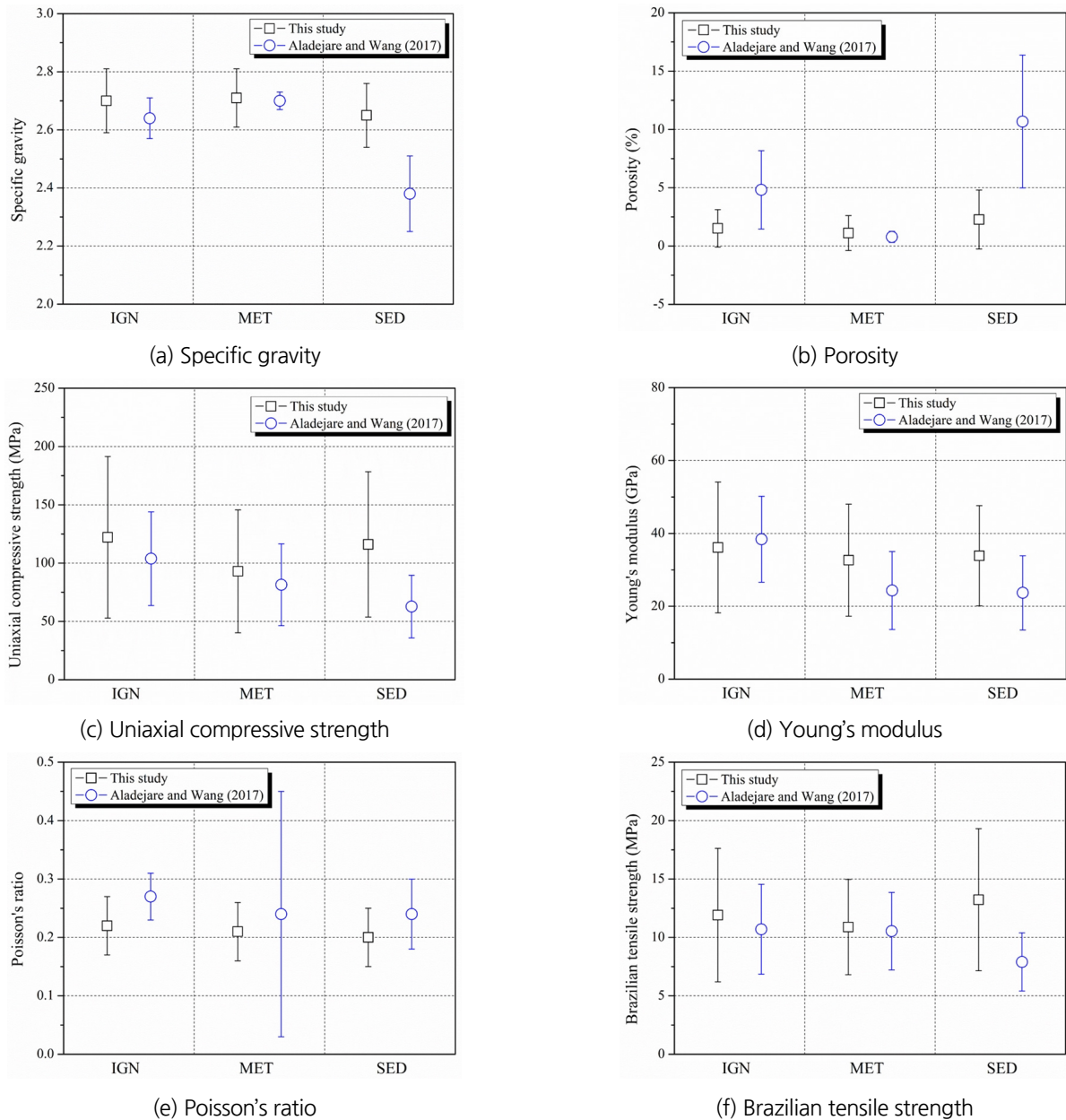


Fig. 2. Comparison of the collected intact rock properties with those of Aladejare and Wang (2017)

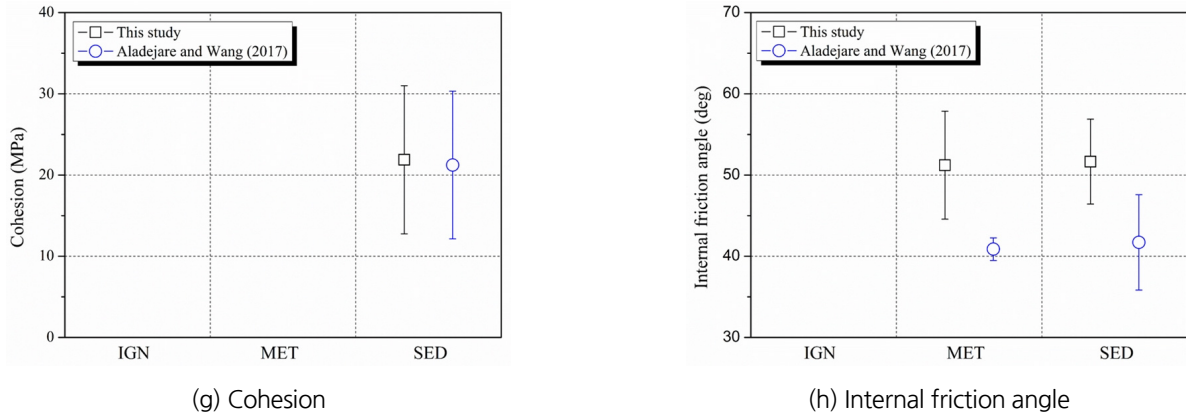


Fig. 2. Comparison of the collected intact rock properties with those of Aladejare and Wang (2017) (continued)

암종에 따른 무결암 물성 사이에 유의미한 차이가 존재하는지 여부를 확인하기 위해 일원 분산분석(one-way ANOVA)을 수행하였다. Fig. 1에서 확인할 수 있듯이, 모든 물성이 정규분포를 따른다고 볼 수는 없으나 표본의 크기가 충분히 크기 때문에 비모수적 분석이 아닌 분산분석을 적용하였다. 유의수준은 0.05, 사후 분석은 Scheffe 기준을 적용하였고 그 결과는 Table 3와 같다.

Table 3. ANOVA results on the effect of rock type

Property	Group	Ave. difference	Probability	Property	Group	Ave. difference	Probability
SG (-)	IGN-MET	-0.04	0.0000*	PO (%)	IGN-MET	0.40	0.0010*
	IGN-SED	0.01	0.1469		IGN-SED	-0.75	0.0000*
	MET-SED	0.05	0.0000*		MET-SED	-1.16	0.0000*
V_P (m/s)	IGN-MET	-1.25	0.9998	V_S (m/s)	IGN-MET	-19.25	0.8049
	IGN-SED	-34.04	0.8934		IGN-SED	-46.05	0.4243
	MET-SED	-32.79	0.8883		MET-SED	-26.80	0.7198
UCS (MPa)	IGN-MET	29.25	0.0000*	E (GPa)	IGN-MET	3.51	0.0000*
	IGN-SED	6.08	0.2420		IGN-SED	2.30	0.1139
	MET-SED	-23.17	0.0000*		MET-SED	-1.21	0.4866
ν (-)	IGN-MET	0.01	0.0012*	BTS (MPa)	IGN-MET	1.02	0.0384*
	IGN-SED	0.02	0.0000*		IGN-SED	-1.31	0.0175*
	MET-SED	0.01	0.2272		MET-SED	-2.33	0.0000*
c (MPa)	IGN-MET	2.25	0.0017*	ϕ (deg)	IGN-MET	3.40	0.0000*
	IGN-SED	-1.08	0.3435		IGN-SED	2.96	0.0000*
	MET-SED	-3.33	0.0000*		MET-SED	-0.43	0.6202

Asterisk (*) denotes the existence of statistically significant differences under 0.05 of significant level

암종에 따른 무결암 물성 차이에서 뚜렷한 경향을 확인할 수 없었다. 화성암, 변성암, 퇴적암으로 구분 시, 유의수준(0.05) 이내에서 암종의 효과가 확실히 검출된 물성은 공극률과 압열인장강도뿐이며, 탄성파 속도는 암종에 따른 차이를 전혀 보이지 않았다. 탄성계수의 경우 화성암-변성암 사이의 차이만 확인되었으며, 언급되지 않는 나머지 물성은 두 수준에서 차이를 보였다.

화성암, 변성암, 퇴적암 수준의 대부분류로는 암종 효과의 뚜렷한 경향을 확인할 수 없었기 때문에 수집된 자료를 세부적인 암종으로 재분류하였다. 표본의 크기가 충분하며 동시에 대표성이 있는 암종을 선정하였으며 이에 대한 통계량을 기술하면 Table 4와 같다.

Table 4. Descriptive statistics of the intact rock properties according to the detailed rock type

	<i>SG</i> (-)	<i>PO</i> (%)	<i>V_p</i> (m/s)	<i>V_s</i> (m/s)	<i>UCS</i> (MPa)	<i>E</i> (GPa)	<i>v</i> (-)	<i>BIS</i> (MPa)	<i>c</i> (MPa)	<i>φ</i> (deg)
Granite										
IGN	n	264	248	335	335	424	282	282	133	172
	Ave.	2.64	1.50	3,917	2,147	114.84	34.55	0.23	10.58	19.27
	S.D.	0.10	1.60	1,180	598	60.11	17.33	0.05	4.78	8.51
	CV (%)	3.83	106.98	30.13	27.86	52.35	50.15	23.78	45.20	44.17
	Min	2.36	0.13	1,020	660	10.20	1.27	0.10	1.00	2.00
	Max	2.97	7.51	6,180	3,910	284.69	72.91	0.36	25.51	41.84
	Andesite									
IGN	n	153	149	149	149	260	148	148	75	74
	Ave.	2.71	1.61	5,196	2,712	138.96	37.15	0.21	13.90	24.23
	S.D.	0.11	1.61	999	495	81.47	18.24	0.05	6.48	11.39
	CV (%)	4.22	100.53	19.23	18.24	58.62	49.09	23.74	46.59	47.01
	Min	2.37	0.17	1,600	1,140	14.00	2.80	0.11	3.00	5.00
	Max	2.87	6.60	6,930	3,790	338.00	78.59	0.35	27.00	44.90
	Gneiss									
MET	n	670	612	677	677	938	688	688	462	474
	Ave.	2.70	1.22	4,208	2,285	92.64	32.01	0.21	10.80	18.39
	S.D.	0.10	1.59	932	462	51.55	15.13	0.05	4.05	7.17
	CV (%)	3.66	129.83	22.14	20.22	55.64	47.27	25.98	37.55	38.99
	Min	2.36	0.05	1,280	910	6.12	1.20	0.10	1.00	3.00
	Max	3.01	10.52	6,940	3,680	285.00	69.48	0.36	23.47	39.00
	Schist									
MET	n	65	63	67	67	68	67	67	22	22
	Ave.	2.73	0.72	4,455	2,338	95.76	30.90	0.23	11.37	19.48
	S.D.	0.15	0.59	919	463	65.20	14.94	0.05	4.64	8.13
	CV (%)	5.45	82.03	20.63	19.80	68.09	48.33	23.16	40.80	41.75
	Min	2.38	0.05	1,770	1,100	9.18	4.61	0.13	5.10	7.14
	Max	3.00	3.00	6,130	3,350	267.35	74.59	0.33	23.00	37.76
	Sandstone									
SED	n	128	107	129	129	144	117	117	81	86
	Ave.	2.66	2.04	4,623	2,490	129.33	36.66	0.19	15.62	25.16
	S.D.	0.11	2.70	1,006	491	64.39	13.59	0.05	6.01	8.35
	CV (%)	4.13	132.61	21.75	19.74	49.79	37.07	26.62	38.45	33.20
	Min	0.24	0.18	1,530	870	3.67	2.84	0.10	2.04	9.18
	Max	2.90	17.34	6,010	3,400	292.00	72.81	0.36	31.00	42.00
	Tuff									
SED	n	95	85	85	85	105	87	87	65	67
	Ave.	2.57	4.04	4,144	2,192	117.78	26.04	0.20	10.94	18.93
	S.D.	0.10	2.47	894	441	62.71	13.17	0.05	5.75	8.26
	CV (%)	4.05	61.16	21.57	20.14	53.24	50.59	26.81	52.58	43.64
	Min	2.29	0.06	1,870	1,180	5.10	3.10	0.10	2.00	4.00
	Max	2.80	13.10	6,240	3,200	343.00	77.03	0.34	26.53	45.92

Table 4. Descriptive statistics of the intact rock properties according to the detailed rock type (continued)

	<i>SG</i> (-)	<i>PO</i> (%)	<i>V_P</i> (m/s)	<i>V_S</i> (m/s)	<i>UCS</i> (MPa)	<i>E</i> (GPa)	<i>v</i> (-)	<i>BTS</i> (MPa)	<i>c</i> (MPa)	<i>φ</i> (deg)
Shale										
	n	100	84	95	95	105	81	81	46	46
SED	Ave.	2.68	1.78	3,832	2,197	113.79	36.68	0.21	13.91	24.02
	S.D.	0.07	1.83	1,244	633	60.14	13.41	0.05	5.57	10.63
	CV (%)	2.79	102.96	32.49	28.81	52.85	36.54	22.59	40.03	44.25
	Min	2.39	0.18	1,160	750	30.61	9.70	0.10	2.04	7.14
	Max	2.97	9.79	6,290	3,610	276.00	68.70	0.32	24.49	43.88

국내 암종별 무결암의 역학적 특성은 Kim and Kim (2006), Cheon et al. (2008), Sunwoo et al. (2011) 등에 의해 보고된 바 있다. 공극률은 음지수 분포 형태, 나머지 물성은 정규 혹은 대수정규 형태로 근사 가능하며 또한, 그 범위 등에서 선행 연구에서 보고된 결과와 본 논문에서 제시된 분포, 범위가 유사함을 확인할 수 있다.

3. 국내 무결암 물성의 강도별 DB

암종에 따른 물성 분류 외에, 강도에 따른 분류가 더 유용한 경우가 있다. 예를 들어, RMR을 통한 암반분류 시, 단축압축강도가 평가 인자 중 하나로 사용되며(Bieniawski, 1989), 국내의 경우 국토교통부 건설표준품셈 등에서 단축압축강도를 활용한 암반분류를 수행할 수 있다(국토교통부, 2019). 강도를 바탕으로 무결암을 분류하는 기준은 Deer and Miller(1966), ISRM(1981) 등이 있으며, 이 중 Deer and Miller와 Bieniawski의 RMR 평가인자 분류 기준을 정리하면 Table 5와 같다.

Table 5. Engineering classifications of rock in terms of UCS

Class	Description	UCS (MPa)	
		Deer and Miller (1966)	Bieniawski (1989)
A	Very high strength	≥ 220.0	≥ 250.0
B	High strength	110.0 – 220.0	100.0 – 250.0
C	Medium strength	55.0 – 110.0	50.0 – 100.0
D	Low strength	27.5 – 55.0	25.0 – 50.0
E	Very low strength	≤ 27.5	≤ 25.0

본 논문에서 수집된 무결암 물성을 Table 5의 Bieniawski 강도 등급 기준으로 재분류하여 기술통계량을 계산하면 Table 6, Fig. 3과 같다.

Table 6. Descriptive statistics of the intact rock properties according to the strength class in RMR

	<i>SG</i> (-)	<i>PO</i> (%)	<i>V_P</i> (m/s)	<i>V_S</i> (m/s)	<i>UCS</i> (MPa)	<i>E</i> (GPa)	<i>v</i> (-)	<i>BTS</i> (MPa)	<i>c</i> (MPa)	<i>φ</i> (deg)
Class E (≤ 25.0 MPa, very low strength)										
n	89	81	92	92	135	89	89	32	27	27
Ave.	2.61	3.83	2,789	1,543	17.79	12.84	0.23	5.30	9.57	48.83
S.D.	0.14	3.22	1,144	540	5.36	11.02	0.06	4.89	6.91	5.83
CV (%)	5.50	84.09	41.03	34.98	30.11	85.84	27.66	92.34	72.23	11.94
Min	2.36	0.16	1,020	660	3.67	1.18	0.11	1.00	2.00	35.00
Max	2.90	17.34	5,400	2,750	25.00	48.12	0.36	23.47	30.61	57.20
Class D (25.0 – 50.0 MPa, low strength)										
n	197	180	204	204	303	203	203	89	99	99
Ave.	2.65	2.69	3,442	1,864	38.19	20.33	0.23	6.20	9.99	50.13
S.D.	0.14	2.49	1,161	546	7.52	12.99	0.06	3.12	4.79	5.57
CV (%)	5.13	92.74	33.74	29.28	19.69	63.87	27.14	50.29	47.92	11.10
Min	2.29	0.07	1,060	750	25.51	1.78	0.10	1.00	4.00	37.00
Max	3.01	13.10	6,940	2,999	50.00	55.17	0.36	16.33	28.57	62.10
Class C (50.0 – 100.0 MPa, medium strength)										
n	521	462	532	532	729	527	527	282	299	299
Ave.	2.69	1.38	4,137	2,251	76.03	30.78	0.21	9.72	14.91	50.85
S.D.	0.11	1.62	956	458	14.44	13.66	0.06	3.74	4.92	5.88
CV (%)	4.27	117.22	23.11	20.34	19.00	44.39	25.92	38.47	33.01	11.56
Min	2.22	0.05	1,210	720	51.00	2.74	0.10	2.00	5.00	37.00
Max	2.98	10.49	6,690	3,680	100.00	68.01	0.36	25.51	37.76	66.00
Class B (100.0 – 250.0 MPa, high strength)										
n	792	738	848	848	1,049	786	786	527	556	556
Ave.	2.69	1.07	4,624	2,497	150.64	40.92	0.20	13.56	24.16	53.33
S.D.	0.09	1.24	808	394	38.14	12.88	0.05	4.20	6.42	5.87
CV (%)	3.33	116.03	17.47	15.76	25.32	31.47	22.91	30.97	26.57	11.01
Min	2.33	0.06	1,160	1,030	101.00	6.27	0.10	4.00	3.00	36.6
Max	2.97	10.36	6,870	3,790	250.00	77.81	0.35	31.00	43.00	66.00
Class A (≥ 250.0 MPa, very high strength)										
n	44	42	44	44	61	41	41	25	26	26
Ave.	2.75	0.54	5,565	2,919	282.80	54.57	0.21	22.32	38.40	55.33
S.D.	0.08	0.39	674	362	22.71	10.71	0.05	4.53	5.89	5.01
CV (%)	2.89	71.11	12.11	12.41	8.03	19.64	21.84	20.29	15.33	9.05
Min	2.58	0.09	3,920	2,280	252.00	29.11	0.13	10.00	17.35	41.00
Max	2.96	1.40	6,930	3,910	343.00	78.59	0.35	30.00	45.92	67.00

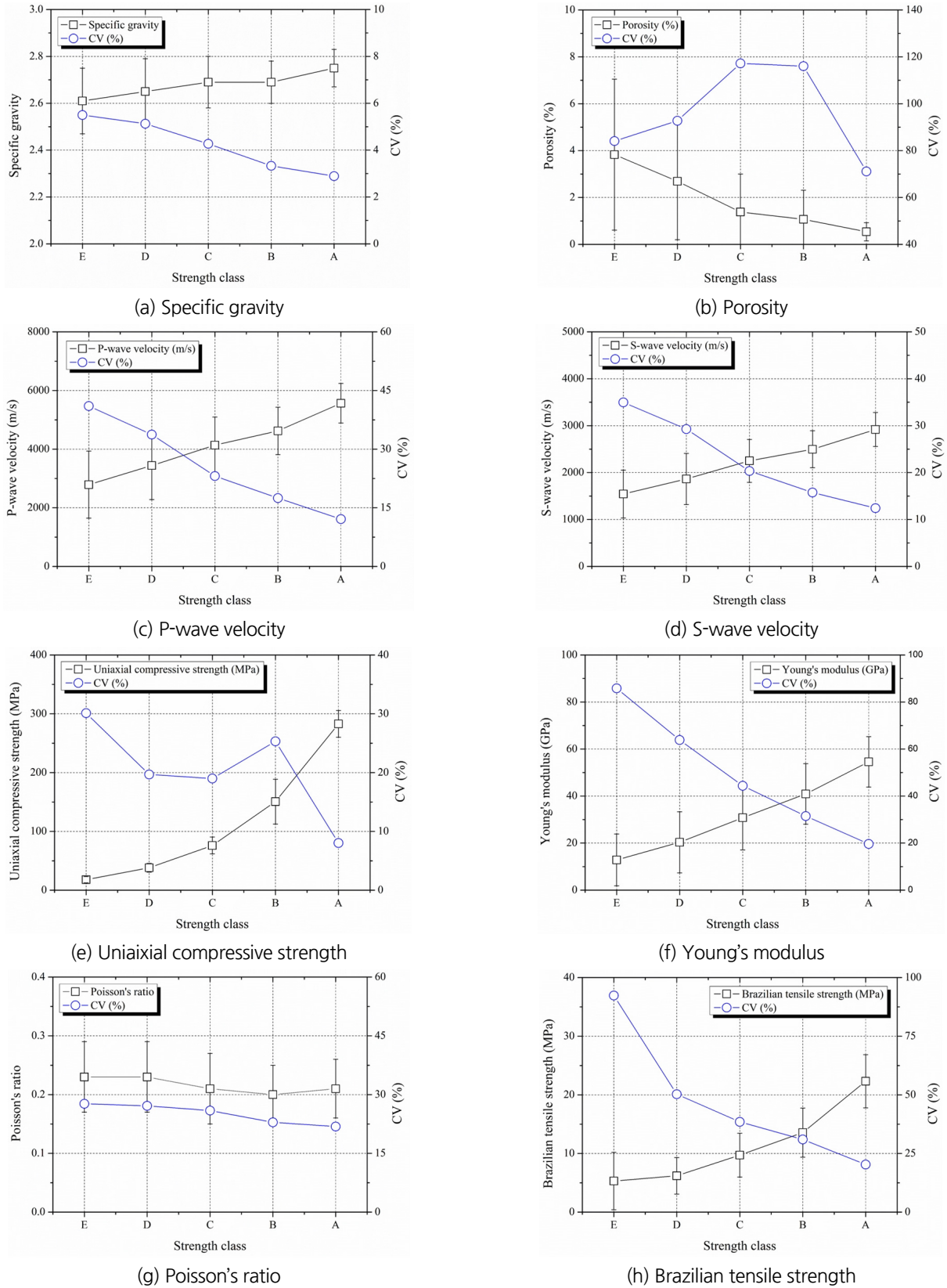


Fig. 3. Variation of the intact rock properties and CV values according to the strength class

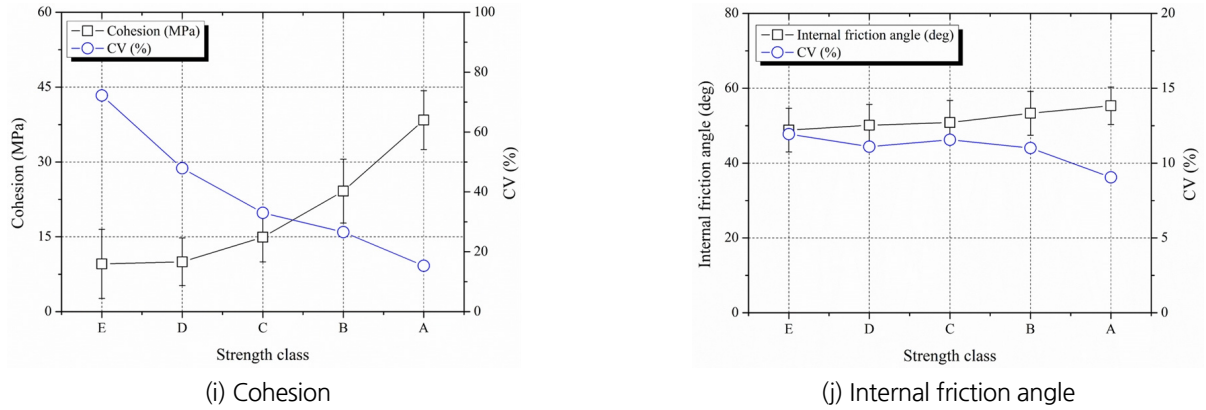


Fig. 3. Variation of the intact rock properties and CV values according to the strength class (continued)

강도 등급 기준으로 재분류한 결과, 무결암 물성 변화에서 일정한 경향을 찾을 수 있었다. 공극률, 포아송비는 강도 등급이 증가함에 따라 그 값이 감소했으며, 그 외의 물성은 일반적으로 강도 등급에 따라 증가하는 경향을 보였다. 또한, 공극률을 제외한 모든 물성은 강도 등급이 증가함에 따라 변동계수가 감소하였다. 이는 본 논문에서 수집된 기반자료들이 단축압축강도를 기준으로 일정한 상관관계가 있음을 의미한다.

4. 국내 무결암 물성의 지역별 DB

수집된 기반자료 중, 위치정보를 포함하고 있는 자료를 발췌하여 지역별로 재분류하였다. 광역시/도별로 분류하였으며, 여러 무결암 물성 중 대표성이 높다고 판단되는 단축압축강도를 기준으로 기술통계량을 계산하면 Table 7과 같다.

Table 7. Descriptive statistics of the uniaxial compressive strength according to rock type and administrative district

Admin. district	Uniaxial compressive strength (MPa)											
	Total			IGN			MED			SED		
	n	Ave.	S.D.	n	Ave.	S.D.	n	Ave.	S.D.	n	Ave.	S.D.
Seoul	318	97.72	49.18	123	107.71	48.04	191	91.60	49.31	4	83.42	30.53
Busan	76	185.22	60.94	29	199.37	64.34	-	-	-	47	176.49	57.72
Daegu	58	104.19	46.74	-	-	-	-	-	-	58	104.19	46.74
Incheon	49	72.95	38.95	11	67.90	37.02	38	74.41	39.86	-	-	-
Daejeon	16	102.87	56.67	15	107.01	56.11	1	40.82	-	-	-	-
Ulsan	24	106.72	39.84	13	127.55	39.34	-	-	-	11	82.10	23.70
Gyeonggi	152	89.53	44.81	19	108.65	50.26	128	87.86	43.33	5	56.94	41.21
Gangwon	200	94.49	56.73	64	99.68	59.56	80	81.56	56.22	56	107.05	51.06
North Chungcheong	117	95.34	58.37	15	79.18	36.37	72	92.28	51.33	30	110.78	78.31
South Chungcheong	21	68.78	34.17	3	99.67	22.85	18	63.64	33.40	-	-	-
North Jeolla	83	121.63	69.06	22	86.31	68.40	54	137.99	66.52	7	106.41	49.60
South Jeolla	338	114.60	65.49	150	140.38	71.33	131	83.22	39.85	57	118.85	66.94
North Gyeongsang	237	97.71	57.63	58	107.89	45.21	119	87.66	56.73	60	107.79	66.84
South Gyeongsang	153	123.28	61.55	55	148.00	64.08	6	92.35	48.91	92	110.51	56.24
Jeju	21	97.42	51.84	21	97.42	51.84	-	-	-	-	-	-

위치정보를 바탕으로 대표적인 강도 물성인 단축압축강도와 압열인장강도에 대한 정규 크리깅을 수행하였다. 기반이 되는 베리오그램은 구형모델을 적용하였고 한반도 내 두 강도 물성의 공간적 분포를 도시하면 Fig. 4와 같다.

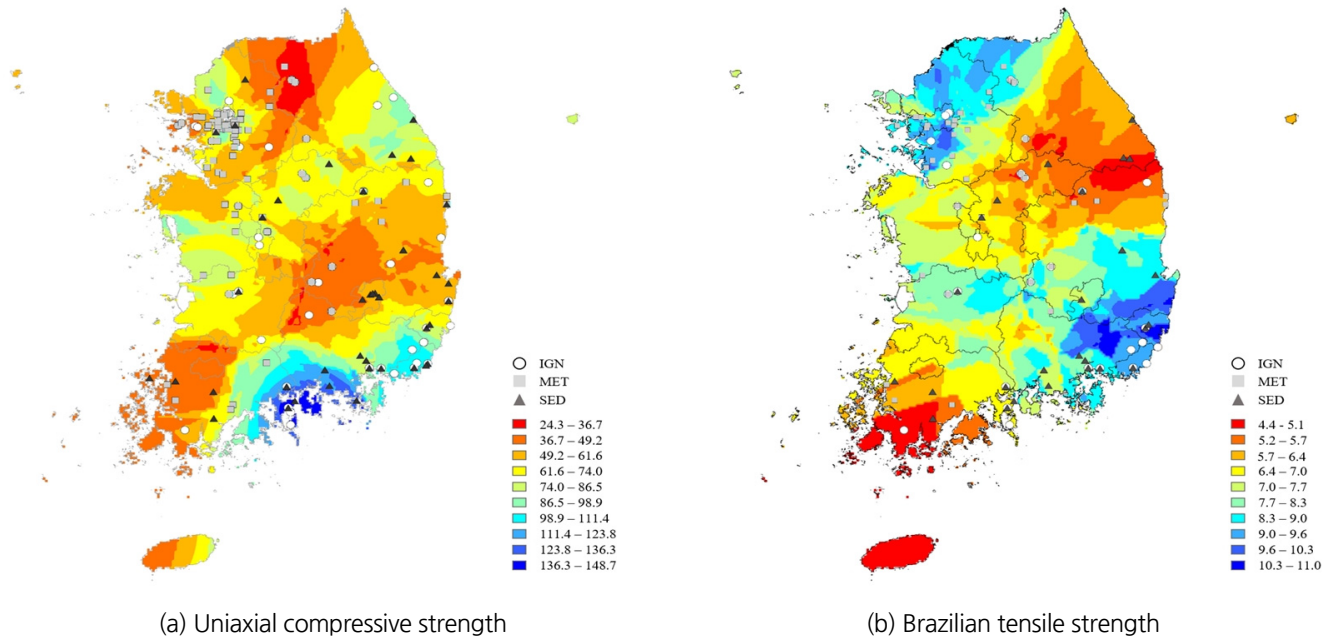


Fig. 4. Spatial distribution of the strength properties (unit: MPa)

Table 7에서 확인할 수 있듯, 지역별/암종별 표본의 크기 등에서 차이가 크며 특정 지역에 편중되는 등의 한계가 있기 때문에 단축압축강도의 공간적 분포는 참고자료로만 활용 가능할 것으로 판단된다. 또한, 단순 지역별 분류가 아닌 지체구조별 분류 및 그에 따른 분포의 차이 등 추가적인 분석이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

국내 고준위방사성폐기물 발생현황 및 최종적인 처분장 건설, 운영까지 장시간이 소요된다는 점을 고려할 때, 처분장 부지선정을 위한 연구진행이 시급히 요구된다. 부지선정 과정은 단계별로 진행되는 것이 일반적이며 광역조사부터 상세조사까지 매우 다양한 기반자료를 바탕으로 부지의 적합성을 검토한다. 본 논문은 이러한 부지선정 과정에서 참조할 수 있는 암반공학적 평가인자에 대한 기반자료를 제공하고자 작성되었다.

국내에서 수행된 실내시험결과를 취합하였으며, 그 결과 무결암의 물리적/역학적 물성 중, 다양하게 활용되는 10개의 물성(i.e. 비중, 공극률, P-파와 S-파 속도, 단축압축강도, 탄성계수, 포아송비, 압열인장강도, 점착력, 내부마찰각)에 대한 각종 기술통계량을 제시하였다. 먼저 기반자료를 화성암, 변성암, 퇴적암으로 대별하여 통계량과 그 분포를 기재했으며 추가적으로 화강암, 편마암 등 대표적인 암종에 대해 결과를 재분류하여 통계량을 제시하였다.

암종 외에 가장 대표적인 역학적 물성인 단축압축강도를 기준으로 무결암 물성을 분류하였다. 단축압축강도를 RMR의 평가 인

자 기준, 5가지 등급으로 분류하여 각 물성의 통계량을 기재하였다. 그 결과, 강도 등급에 따른 일정한 경향을 찾을 수 있었으며, 대표적으로 공극률을 제외한 모든 물성의 변동계수는 단축압축강도가 증가함에 따라 감소하는 것으로 파악되었다.

마지막으로 본 논문에서 수집된 기반자료 중, 위치정보를 포함하고 있는 자료를 발췌하여 지역별로 분류하였다. 대표적 강도 물성인 단축압축강도와 압연인장강도에 대하여 정규 크리깅을 통해 공간 분포를 도시하였다. 이는 표본의 크기 등에서 지역별 편차가 크기 때문에 참고자료로만 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

일반적으로 고준위방사성폐기물처분장은 500 m 이상 대심도에 건설하는 것을 목표로 한다. 따라서 심도에 따른 물성 DB 구축 및 그 특성 파악이 매우 중요하나 본 논문에서 수집된 DB는 심도에 관한 정보가 누락된 경우가 많아 이에 따른 분석은 수행하지 않았다. 한편, 한국지질자원연구원에서는 암중, 지체구조별로 750 m급 심부 시추공을 시추하여 다양한 현장, 실내시험을 수행 중이다(한국지질자원연구원, 2020). 본 논문에서 작성된 DB는 향후 연구 진행에 따라 기반자료로 활용될 예정이며 심도, 지체구조 등 추가적인 분석을 통하여 지속적으로 보완될 예정이다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 논문은 한국지질자원연구원 2021년 기본사업의 하나인 “HLW 심층처분을 위한 지체구조별 암중 심부 특성 연구(GP2021-002; 21-3115)” 사업의 지원을 받아 수행하였습니다.

REFERENCES

- 국토교통부, 2019, 건설공사 표준품셈.
- 산업통상자원부, 2016, 고준위방사성폐기물 관리 기본계획(안).
- 한국과학기술기획평가원, 2020, 2019년도 예비타당성조사 보고서: 사용후핵연료 저장·처분 안전성 확보를 위한 핵심기술개발 사업, 11-1721000-000464-01.
- 한국수력원자력, 2021.1.26., 2020년 4사분기 사용후핵연료 저장현황, 2021.02.01. 검색, <http://www.khnp.co.kr>
- 한국원자력연구원, 2021.1.22., 사용후핵연료 보관 현황(2020년 4분기), 2021.02.01. 검색, <http://www.kaeri.re.kr>
- 한국지질자원연구원, 2016, 사용후핵연료 처분연구관련 지질조사 방법론 개발.
- 한국지질자원연구원, 2020, HLW 심층처분을 위한 지체구조별 암중 심부 특성 연구. GP2020-002-2020. 대전, 한국.
- Aladejare, A.E. and Wang, Y., 2017, Evaluation of rock property variability. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 11.1, pp. 22-41.
- Bieniawski, Z.T., 1989, *Engineering rock mass classification*. Wiley, New York.
- Cheon, D.S., Park, E.S., Park, C., and Park, C., 2008, A basic study for mechanical properties of domestic rocks and database construction. *Tunnel & Underground Space*, 18.5, pp. 317-327.
- Choi, S., Kihm, Y.H., Kim, E., and Cheon, D.S., 2020, Rock mechanical aspects in site characterization for HLW geological disposal: Current status and case studies. *Tunnel & Underground Space*, 30.2, pp. 136-148.
- Deer, D.U. and Miller, R.P., 1966, *Engineering classification and index properties for intact rock*. Technical Report No. AFNL-TR-65-116, Air Force Weapons Laboratory, New Mexico.

- IAEA, 1994, Siting of geological disposal facilities: A safety guide. Safety series No. 111-G-4 1, IAEA, Vienna, Austria.
- ISRM Commission on classification of rocks and rock masses, 1981, Basic geotechnical description of rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 18, pp. 85-110.
- KIGAM, 2019, Development of nationwide geoenvironmental maps for HLW geological disposal. GP2017-009-2019, KIGAM, Daejeon, Korea.
- Kim, G.W. and Kim, S.J., 2006, Correlation between engineering properties of rocks in Korea. *The Journal of Engineering Geology*, 16.1, pp. 59-68.
- Sunwoo, C., Ryu, D.W., Kim, H.M., and Kim, K.S., 2011, Study on the geotechnical characteristics of granite in Korea and their correlation with rock classification method. *Tunnel & Underground Space*, 21.3, pp. 205-215.