

산성수 침수 및 하중 조건에서의 암석물성변화 연구

정재홍, 박승훈, 이승준, 유승원, 이우희, 권상기*

Variation of Rock Properties in Acidic Solution
and Loading ConditionJae Hong Chung, Seung Hun Park, Seung Jun Lee, Seungwon Yu,
Woo Hee Lee, Sangki Kwon*

Abstract This paper presents experimental results to investigate the affects of acidic solution under loading condition on rock properties. In the experiment, the variations of various rock properties including effective porosity, thermal conductivity, and etc were investigated with different pHs of solution and magnitudes of loading. The results show that the rock property change was increased with low pH under loading. It was predicted that chemical reaction rate would be increased in low pH. Below the crack initiation stress of the rock specimen, the variation of rock property change was reduced with increased loading. It could be explained with the reduced chemical reaction area by the compressional loading if there is no crack generation.

Key words Abandoned mine, Rock property, Acidic solution-loading, Effective porosity

초 록 본 연구에서는 산성수 및 하중의 화학-역학적 영향이 암석 물성에 미치는 영향을 파악하기 위한 실내 실험을 실시하였다. 실험에서는 암석시료에 pH 및 하중조건을 부여한 후, 유효 공극률을 포함한 다양한 암석 물성 변화를 측정하였다. 실험결과, 일정한 하중조건에서 암석을 침수시킨 산성수의 pH가 낮을수록 물성 변화가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 산성수의 pH가 낮을수록 암석과 산성수 사이의 화학반응 속도가 증가했기 때문으로 예측된다. 또한 일정한 pH의 산성수에 침수된 암석에서 가해진 하중이 증가함에 따라 암석물성 변화가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 균열개시응력 이하의 하중에서 발생된 압축으로 암석과 산성수 사이의 화학반응 영역이 감소했기 때문으로 여겨진다.

핵심어 폐광산, 암석물성, 산성수-하중조건, 유효공극률

1. 서 론

최근 활용 가능한 지상공간의 부족으로 지하공간 개발 및 활용의 중요성이 더욱 높아지고 있다. 특히 국토의 약 70% 이상이 산지인 국내의 경우, 사용 가능한 지상공간이 점점 부족해지기 때문에 지하공간의 활용을 위한 적극적인 노력이 필요하다(Shin, 2013). 이러한 상

황에서 2016년 현재 국내에 존재하는 약 2600여 개의 폐광산은 다양한 활용 가치를 가진 지하공간으로 주목 받고 있다.

폐광산은 일반인들이 쉽게 접할 수 없는 광업 현장의 모습을 보여줄 수 있으며, 향온성, 차광성, 방사능 차단성, 내진성 등의 지하공간이 가지는 공간적 특성을 가지고 있다. Table 1은 폐광산의 특성을 활용하여 지하공간을 활용한 국내 및 해외의 사례를 보여준다. 해외의 경우, 폐광산 지하공간이 산업, 관광, 저장, 연구 등의 다양한 목적으로 활발히 활용되어 왔으며, 이를 통해 많은 경제적 가치 창출 및 연구의 발전 등을 이룩하였다. 하지만 국내의 폐광산 지하공간은 관련 연구 및 폐광산 활용에 대한 인식 부족의 이유로 관광 및 식품

Received: Apr. 19, 2016

Revised: Jun. 2, 2016

Accepted: Jun. 2, 2016

***Corresponding Author:** Sangki Kwon

Tel) +82328607554, Fax) +82328727550

E-Mail) kwonsk@inha.ac.kr

INHA University, 100 Inha-ro, Nam-gu, Incheon, Korea

Table 1. Application cases of abandon mine(Modified from Peila & Pelizza, 1995; Park, 2008)

Country	Name of mine	Type of ore	Facility type	Case of utilization
Korea	Seongju mine	Coal	Tourism facility	Relic of coal exhibition
	Seokgongsinseong mine	Coal	Food storage facility	Storage of salted seafood
	Yungbo mine	Coal	Agricultural facility	Mushroom cultivation
	Chunpo mine	Au	Tourism facility	Sightseeing of limestone and gold mine
	Chuncheon kidney stone mine	Kidney stone	Tourism facility	Korean dry sauna
	Gahak mine	Au-Ag-Cu-Zn	Tourism and food storage facility	Cave tourist destination and storage of wine
	Seokgongseung mine	Coal	Tourism facility	Relic of coal exhibition
	Amethyst mine	Amethyst	Tourism facility	Amethyst tourist destination
Japan	Kamioka mine	Pb-Zn-Ag	Research facility	Neutrino detection experiment
	Kamasaishi mine	Fe-Cu	Research facility	Various laboratory for tests on drilling equipment, on rock mechanics monitoring devices and on explosives
	Nakatatsu mine	Pb-Zn-Ag	Waste disposal facility	Storage of fly ash
	Ohya mine	Building stone	Tourism facility	Mining historical museum
	Kellogg mine	Pb-Zn	Agricultural facility	Seedling grown under artificial light
United States	Randolph mine	Limestone	Industrial and storage facility	Steel company plant for manufacturing conveyors and tanks Concrete pipe manufacture Storage of goods
	Kansas City area mines	Limestone	Storage facility	Storage of various products
	Tower Soudan mine	Fe	Research facility	Physical research laboratory
	Germany	Asse mine	Potash and salt	Waste disposal facility
Helibroun mine		Salt	Waste disposal facility	Storage of fly-ash wastes Storage of anhydrite and clay contaminated with Hg
Sweden	Harsbacka mine	Fluorite	Storage facility	Storage of oil
	Ljunsnarberg mine	Sulfide	Storage facility	Storage of hot water
	Kirunavaara mine	Fe	Agricultural facility	Mushroom growing
	Stripa mine	Fe	Research facility	International research project on disposal of radioactive nuclear waste

저장 등의 한정된 용도를 제외하고는 거의 활용되지 못하고 방치되고 있는 실정이다(Lim et al., 2000). 보수 및 관리가 제대로 이루어지지 않은 국내 폐광산 지하공간을 활용하기 위해서는, 폐광산의 환경적 특성을 고려한 암반구조물의 안정성 평가를 위한 연구가 선행되어야 한다(Shin, 2001).

황화광물은 지각에서 흔히 산출되는 광물 중 하나로 금속광상(Pb, Zn, Fe, Au, Cu, Ni, U), 인산염 광상, coal

seam, oil shale, mineral sand가 존재하는 지역에서 풍부하게 나타나며(Bernd, 2010), 폐광산 암반에도 풍부할 것으로 예상된다. 황화광물은 암반 내에 존재할 때에는 안정적이지만, 자원개발 및 굴착 등의 작업으로 산소에 노출되면 산화반응을 통해 산성암반배수(ARD, Acid Rock Drainage)를 발생시킨다. 이로 인해 폐광산 내부 암반은 산성암반배수에 침수된 채로 지반하중을 받게 된다. 암반구조물 주변의 물성은 화학적, 역학적 영

향을 포함한 다양한 환경적 영향에 의해 변화될 수 있으며, 구조물의 안정성에도 영향을 미칠 수 있다(Martino et al., 2004, Lee et al., 2011). 이에 폐광산 지하공간의 안전한 활용을 위해서는 산성수 및 하중의 복합 영향에 의한 암석물성 변화 연구가 필요하다.

산성수 및 하중이 독립적으로 암석물성에 미치는 영향에 대한 연구는 다양한 연구자들에 의해 보고된 바 있다. Shon 등(2005)은 화강암을 일정 기간 동안 산성수에 침수시켜 용출 반응에 의한 암석의 공극률 증가, 강도 감소 및 결정 구조 파괴 등의 분석을 실시하였다. Ning 등(2003)은 산성수 침수에 의한 사암의 탄성계수 및 강도 감소를 보고하였다. Park 등(2015)은 침수 조건에서 하중 증가에 따른 암석 내 미세균열 증가에 의한 간접인장강도, 탄성파속도 및 열전도도 감소 등을 관찰하였으며, 이를 FLAC3D를 활용한 모델링에 적용하여 침수-하중 조건에서의 광주의 안정성 저하를 보고하였다.

산성수에 침수된 지하 암반의 경우, 하중에 의한 균열 발생 및 산성수에 의한 역학적 물성 변화가 발생하여 암반에 복합적으로 영향을 미칠 것으로 예상됨에도 불구하고 현재까지 국내 및 해외에서는 산성수 및 하중이 동시에 존재하는 조건에서의 암석 물성 변화 경향을 파악한 사례는 찾을 수 없었다.

본 연구에서는 산성수에 침수된 암석에 일축 압축 하중을 가하여 폐광산 내부 산성수에 침수된 심부 암석의 환경을 모사하였다. pH 및 하중조건에 따른 암석 물성을 관찰함으로써 화학·역학적 복합 영향에 의한 암석 물성 변화를 예측하였다. 이러한 연구 결과는 산성수에 침수된 심부 암반구조물의 안정성 평가를 위한 물성 기초 자료를 제공하는 데 기여할 것이다.

2. 하중 및 산성수의 영향

2.1 하중의 영향

암석 내 균열의 파괴는 가해지는 하중의 크기에 따라 축소 또는 확대되며, 이에 따라 용매(산성수)와 용질(암석) 사이의 접촉면적은 변화하게 된다. Fig. 1은 암석 시료에 압축 하중이 가해질 때 발생하는 변형률 및 균열 발생의 단계를 나타낸다. 하중과 변형률의 관계에 따라 암석 파괴 곡선은 4개의 구간으로 나눌 수 있으며, 각 단계에서 균열 형태는 다르게 나타난다. 본 연구에서 암석 시료에 가한 하중은 I, II, III 단계의 영역이며, 각 단계에서 암석 시료의 변형특성은 다음과 같다.

I 단계의 하중 영역에서는 하중이 증가함에 따라 암석 내 균열 밀착 현상이 발생한다. 또한 암석 내 광물입자

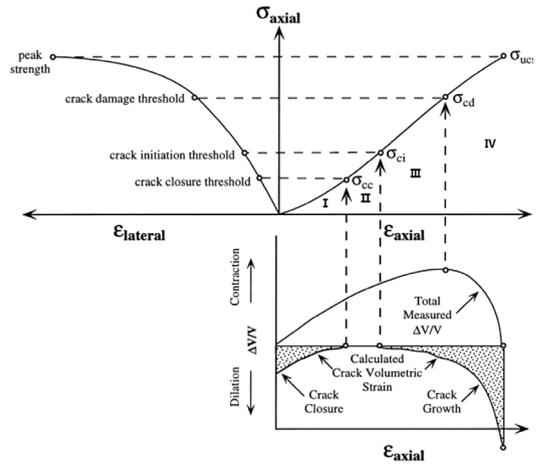


Fig. 1. Stress-strain curve showing the strain and the stages of crack development (Eberhardt et al., 1999, Charles, 1993), The axial and lateral strains were measured and the volumetric and crack volumetric strains were calculated

사이의 공극 구조파괴가 발생하여, 암석을 구성하는 입자사이의 거리가 짧아질 것으로 예상된다(Heo et al., 2014). II 단계에서는 하중 증가에 따라 암석의 변형이 선형적으로 증가하는 탄성 거동을 나타나게 된다. 또한, 하중에 의한 광물 입자의 변형에 의해 암석 시료 전체의 부피는 미세하게 감소된다. I, II 단계에서는 하중에 의해 암석 내 새로운 균열은 발생되지 않으며, 압축에 의해 암석 내 균열이 차지하는 부피는 감소하게 된다. III 단계는 균열 개시 응력(Crack initiation stress) 이상의 하중이 암석에 가해질 때 시작된다. 이 영역에서는 하중에 의해 공극 및 광물 입자의 경계면에서 미세균열이 발생하게 되며(Charles, 1993), 이는 화학적 반응을 촉진할 수 있는 접촉 면적의 확대를 의미한다. 즉, 하중의 증가에 따라 암석 내 균열의 부피는 감소했다가 균열개시 응력 이후 증가하게 되며 이는 화학적 영향에 따른 암석의 물성 변화에도 영향을 줄 것으로 예상할 수 있다.

2.2 산성수의 영향

2.2.1 암석의 화학반응

어떤 물질이 다른 물질과 상호 작용하여 화학적 성질이 변하는 화학반응은 반응하는 물질에 따라 다르게 나타난다. 암석은 여러 종류의 광물로 구성되는 비균질성 재료이기 때문에 용해, 침전, 수화, 가수분해 등의 화학반응이 동시에 복잡하게 작용하게 된다(Shon et al., 2004). 암석의 화학반응은 기본적으로 암석이 용매와 접촉되

Table 2. XRF analysis results

Number of borehole	Concentration (%)							
	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	BaO	Etc
1	41.2	29.9	14.4	6.6	4.9	1.0	0.2	1.8
2	35.5	22.8	33.9	4.7	0.1	1.0	0.1	1.9
3	68.8	14.1	9.3	3.2	2.5	0.8	0.1	1.2
Avg. Con. (%)	48.5	22.3	19.2	4.8	2.5	0.9	0.1	1.6

는 영역에서 발생하며, 암석 시료가 용액에 침수된 경우의 화학반응은 암석 시료의 겉 표면과 공극 내에서 발생할 것으로 예측된다. 화학반응이 일어나는 지점에서는 구성 성분의 변화 및 결정 조직의 손상이 발생하게 된다. 특히, 균열 첨단(Crack-tip)부분에서는 화학반응이 발생하게 되면 새로운 균열 발생으로 이어질 수 있다(Wiederhorn et al., 1973).

2.2.2 산성수의 영향

pH는 용액 내 수소이온의 농도를 나타내는 지표이다. 일반적으로 산성수는 pH가 7 미만인 수소의 농도가 높은 용액을 칭한다. 암석을 구성하는 금속 및 조암광물의 용해도는 용매의 pH가 낮은 환경에서 증가한다. 암석이 pH가 낮은 산성수에 침수되면 Fe, Ca, Al, Mg, Na, Si 등의 다양한 성분이 용해된다(Lee et al., 2014). 이러한 용해반응은 암석 내 공극을 증가시키고, 결정 구조를 파괴하며, 암석 구성 입자간의 결합력을 감소시키게 되어, 역학적 강도를 감소시킨다(Grgic et al., 2013, Xie et al., 2011).

3. 실험 방법

3.1 실험시료

본 연구에서는 금, 은, 동, 아연 등의 금속광산으로 사용되었던 국내 ○○광산에서 제공받은 암석코어를 실험에 사용하였다. 실험시료는 편암 및 석회규산염암으로 Table 2는 암석시료를 XRF(X-Ray Fluorescence) 시험을 통해 화학분석을 수행한 결과를 보여준다. 암석 내에 산성수와 반응을 하는 원소인 Ca, Fe를 포함한 CaO와 Fe₂O₃가 약 70% 포함되어 있으며, SiO₂ 성분은 약 20% 내외로 존재함을 알 수 있다. 또한, 각 시추공마다 화학성분의 차이가 관찰되며, 이는 변성암의 불균질성으로 인해 기인한 것으로 판단된다. Fig. 2는 길이 130 mm, 지름 54 mm로 실험 조건에 맞게 성형된 암석 시료를 보여준다.



Fig. 2. Rock specimen

3.2 물성측정

산성수 침수 및 하중을 가하기 전·후, 실험 시료의 유효공극률, 탄성과 속도, 열전도도, 일축압축강도, 인장강도를 KSRM(2005, 2006)에서 제시하는 표준시험방법을 통해 측정하였다. Table 3은 측정된 실험 전 초기 암석 물성 자료이다. 초기 실험 시료의 평균 공극률은 일반적인 변성암의 공극률에 가까운 0.3%로 나타났다. 건조 암석의 탄성과 속도는 평균 5015 m/s 이며, 포화된 상태에서는 14% 증가한 평균 5710 m/s 로 측정되었다. 건조 암석의 열전도도는 평균 2.97 W/m·K이며, 포화된 상태에서는 6% 증가한 3.16 W/m·K으로 나타났다. 일축압축강도는 3개의 시추공에서 각 2회씩 총 6회 측정되었으며, 평균 95.2 MPa로 측정되었다. 간접인장 시험을 통해 측정된 평균인장강도는 17.1 MPa로 일축압축강도의 약 18% 정도로 나타났다.

Table 4는 각각의 산성수 침수 및 하중조건이 부여된 한 개의 암석시료에서 실험 후 유효공극률, 간접인장강도, 건조·포화 상태의 탄성과 속도 및 열전도도를 측정 한 결과이다. 유효공극률은 pH 및 하중 조건실험 후 모든 암석 시료에서 증가하였으며 평균 0.45% 로 나타났다. 평균 탄성과 속도는 건조 상태에서 5282 m/s, 포화

Table 3. Initial properties of rock specimen

Number of borehole	Effective porosity (%)	P-wave velocity (m/s)		Thermal conductivity (W/m·K)		UCS (MPa)	Tensile strength (MPa)
		Dry	Saturated	Dry	Saturated		
1	0.19	5337	6236	3.73	3.95		
	0.35	-	-	-	-	75.6	
	0.33	5083	5640	2.81	2.99		
	0.33	5536	5658	3.10	3.16		
	0.33	5443	6028	2.89	3.09		
	0.48	5536	5658	3.03	3.13		17.4
	0.30	-	-	-	-	113.4	
	0.32	5454	5693	2.72	2.85		
	0.24	4836	6231	2.66	2.87		
2	0.10	5296	5904	2.61	2.75		
	0.16	-	-	-	-	71.9	
	0.18	4711	5403	3.38	3.55		
	0.25	4920	5325	3.23	3.37		
	0.27	-	-	-	-	116.4	
	0.24	4512	5403	3.03	3.25		16.9
	0.25	4050	5412	2.71	2.91		
	0.38	4769	5471	3.91	4.14		
3	0.19	5852	6429	3.44	3.56		
	0.40	4919	5446	2.86	3.08		
	0.40	4703	5395	2.61	2.93		
	0.53	-	-	-	-	75.2	
	0.32	4538	5379	2.61	2.78		
	0.36	5085	6160	2.74	2.91		16.9
	0.29	4712	5622	2.67	2.89		
Avg.	0.30	5015	5710	2.97	3.16	95.2	17.1

Table 4. Experiment results of acidic water and loading condition

Experimental condition		Porosity (%)			P-wave Velocity (m/s)		Thermal Conductivity (W/m·K)		Tensile Strength (MPa)	Altered pH
Loading (MPa)	pH	Before experiment	After experiment	Change rate (%)	Dry	Saturated	Dry	Saturated		
20	2	0.40	0.60	50.0	4391	5815	2.64	2.85	14.0	7.1
	3	0.36	0.42	16.7	5655	6204	2.69	2.91	14.0	-
	4	0.33	0.37	12.1	5496	6337	2.87	2.98	14.5	7.1
30	2	0.29	0.35	20.7	4487	6019	2.74	2.88	14.7	7.6
	3	0.38	0.42	10.5	6080	6670	3.90	4.04	11.5	-
	4	0.48	0.53	10.4	5584	6126	2.90	3.10	12.8	7.2
Avg.		0.37	0.44	20.1	5282	6195	2.95	3.12	13.6	7.3

* Porosity change rate was calculated from equation(1)

상태에서 6195 m/s로 측정되었다. 평균 열전도도는 건조 상태에서 2.96 W/m·K, 포화 상태에서 3.13 W/m·K

로 나타났다. 인장강도는 초기 물성 값과 비교하여 약 20% 감소한 13.6 MPa으로 나타났다.

3.3 산성수 침수 및 하중 조건

Fig. 3의 연구절차에 따라 암석 시료 준비 및 초기 물성 측정 후, 산성수 침수 및 하중조건에서의 실험을 실시하였다. 초기 물성이 측정된 암석시료는 Fig. 4와 같이 하부 절반이 산성수에 침수된 채로 Creep 시험기를 이용하여 일정한 일축 압축을 받았으며, 암석 물성이 변화되는 충분한 시간을 제공하기 위해 3일 동안 실험을 수행하였다. pH 및 하중조건 부여 후 암석 시료를 절단하여 물성 변화를 측정하였다. 이를 통해 동일한 하중을 받는 경우, 산성수에 침수에 따른 암석의 물성 변화를 파악하고자 하였다.

산성수는 HCl을 사용하였으며, Shon 등(2004)의 연구사례를 참고하여 산성수 침수를 마친 후 암석 표면에 침전된 염을 제거하기 위해 암석 시료를 증류수로 세척하였다. 실험에 사용된 수조는 실험 기간 동안 산성수와 화학반응을 하지 않고, 실험 조건의 하중을 견딜 수 있는 Stainless steel 316 재질로 제작하여 실험에 사용하였다.

Table 5는 수행된 실험의 pH 및 하중 조건을 보여준다. 실험결과 일축압축강도(100MPa)의 20%, 30%에 해당하는 20, 30MPa 하중 조건(Fig. 1의 I, II)에서는 pH2, 3, 4의 산성수에 침수된 암석 시료에서 파괴가 발생하지 않았다. 또한 일축압축강도의 40% 하중 조건에서 pH4에 침수된 암석은 파괴가 일어나지 않았으나, pH2의 산성수에 침수된 경우 일축압축강도의 40%, 50%, 60% 하중조건에서 실험 도중 암석 파괴가 발생하였다.

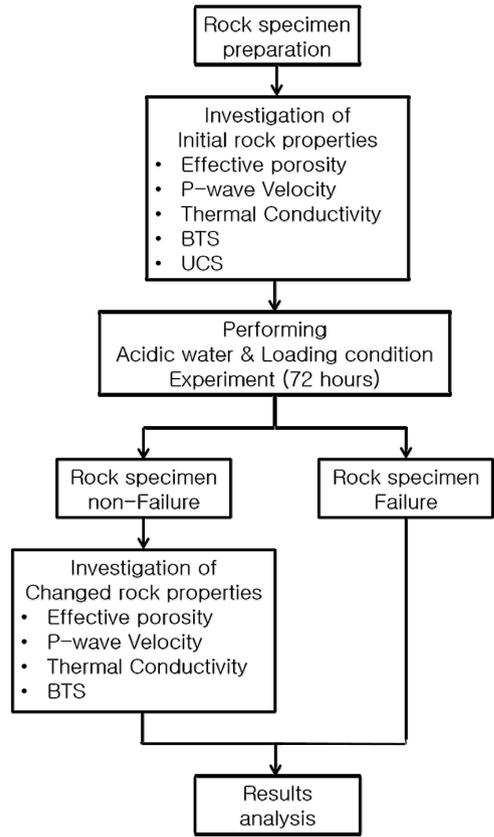
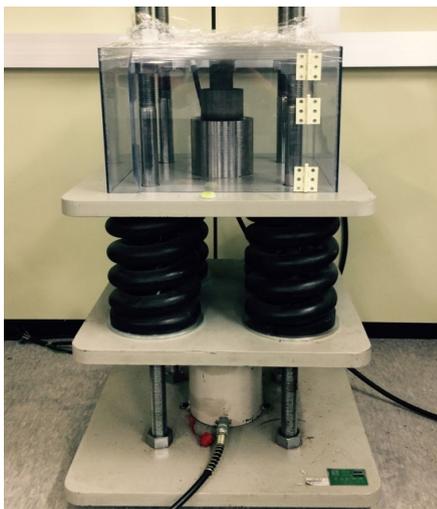
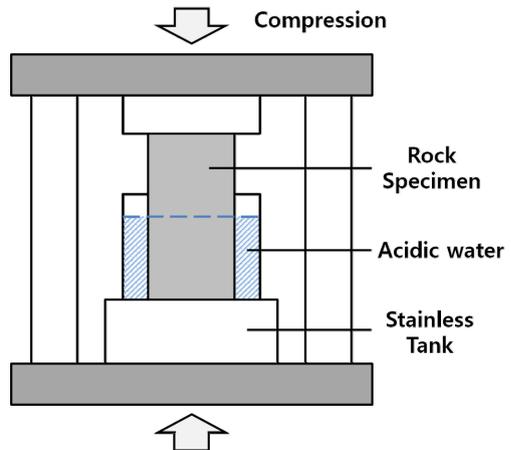


Fig. 3. Process of the laboratory tests



(a) Creep test machine



(b) Rock specimen set up

Fig. 4. Acidic solution and loading condition experiment using creep test apparatus

Table 5. Performed experimental condition

	20MPa	30MPa	40MPa	50MPa	60MPa
pH2	○	○	x	x	x
pH3	○	○	-	-	-
pH4	○	○	○	-	-

* ○: Conducted experiment without failure
 x: Rock failure

4. 암석물성변화 결과

4.1 공극률 변화

일반적으로 암석 내 공극은 입자 사이에 불규칙하게 존재한다. 암석에 하중이 가해지는 경우, 공극 부피는 변형에 의해 축소되기도 하고, 미세균열 발생에 의해 증가되기도 한다(Charles, 1993). 암석이 산성수에 침수된 경우에는 공극 내 용해 및 침전 등의 다양한 화학반응이 동시에 발생하여 공극률이 변화하게 된다(Shon et al., 2004, Woo et al., 2009).

본 연구에서는 pH 및 하중조건에 따른 암석의 유효 공극률 변화를 관찰하였다. 20 MPa 및 30 MPa의 하중에서 pH2, 3, 4의 산성수에 침수된 암석의 공극률은 Table 4의 결과와 같이 모두 증가하였다. pH 및 하중 조건에 의한 암석 공극률 변화 정도를 관찰하기 위해 식 (1)을 사용하여 공극률 변화를 계산하였다.

$$Porosity\ change\ (\%) = \frac{\phi_1 - \phi_2}{\phi_1} \times 100\% \quad (1)$$

식 (1)에서 ϕ_1 은 산성수 침수 및 하중조건실험 전 암석시료의 공극률이고, ϕ_2 는 실험 후 측정된 공극률이다. Fig. 5은 20 MPa 및 30 MPa의 일정한 하중을 받은 암석에서 침수시킨 산성수의 pH 변화에 따른 암석의 공극률 변화를 나타낸다. 산성수의 pH가 감소할수록 공극률 변화가 증가하는 것을 관찰할 수 있으며, 20 MPa의 하중 조건에서 30 MPa에 비해 상대적으로 큰 공극률 변화가 발생하였다. 이는 산성수의 pH 및 하중 조건 변화에 따라 화학반응 속도가 변했기 때문으로 판단된다.

4.2 탄성과 속도 변화

탄성과 속도는 암석의 입자자체의 성질과 내부 불연속면의 분포 및 입자결합 상태를 반영하는 암석 물성이다. 즉, 동일 광물 조성을 가지는 암석이라도 탄성과 속도는 이차적 영향에 의해 구성 입자의 결합이 치밀해지면 증가하고, 내부 미세균열이 발달하면 감소하게 된다(Kim et al., 2011, Kim et al., 2010).

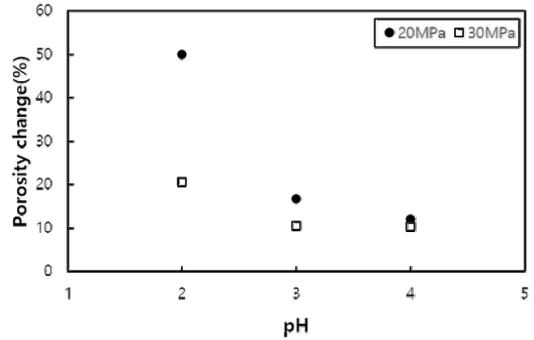


Fig. 5. Variation of porosity change with pH of acidic solution

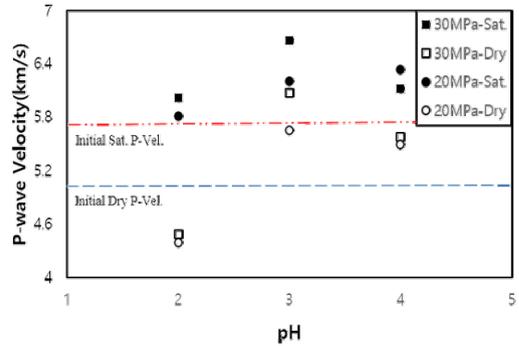


Fig. 6. Variation of P-wave velocity with pH of acidic solution

탄성과 속도는 산성수 침수 및 하중조건 실험 전·후 암석의 건조·포화 상태에서 측정하였다. 실험 후 pH 및 하중 조건이 탄성과 속도에 미치는 영향을 알기 위해 초기 물성 조사에서 측정된 암석의 평균 건조 탄성과 속도(5015 m/s)와 비교하였다. pH2의 산성수에 침수된 상태로 20 MPa 및 30 MPa의 하중을 받은 암석에서 탄성과 속도는 각각 4391 m/s, 4487 m/s로 실험 후 감소한 것을 관찰하였다. pH3의 산성수에 침수된 상태로 20 MPa 및 30 MPa의 하중을 받은 암석에서 탄성과 속도는 각각 5655 m/s, 6080 m/s로 실험 후 증가하였다. 또한 pH4의 산성수에 침수된 상태로 20 MPa 및 30 MPa의 하중을 받은 암석에서도 탄성과 속도는 5496 m/s, 5584 m/s로 증가한 것을 관찰하였다(Table 4). Fig. 6는 산성수 침수 및 하중 조건 실험 후 산성수의 pH에 따른 건조·포화 탄성과 속도를 나타낸다. 산성수의 pH가 낮아짐에 따라 탄성과 속도가 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한, 포화 시료의 탄성과 속도가 건조 시료의 탄성과 속도에 비해 평균 18% 높게 나타났다.

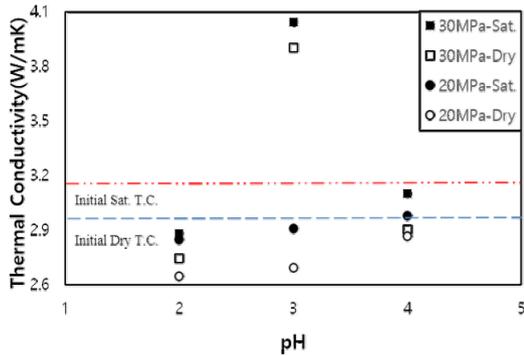


Fig. 7. Variation of thermal conductivity with pH of acidic solution

4.3 열전도도 변화

열전도도는 물질을 통한 열전달 특성을 결정하는 주요 파라미터이다. 암석의 열전도도는 구성 광물조성, 암석 조직 및 구조, 공극률 및 포화 정도에 따라 다르게 나타난다(Cho et al., 2008). 산성수 및 하중의 화학·역학적 영향을 받는 암석에서는 암석을 구성하는 입자의 구조, 결정 및 공극률이 변화되면서 열전도도에도 차이가 발생할 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 산성수 침수 및 하중조건 실험 전·후 암석 시료의 건조·포화 상태에서 열전도도를 측정하였다. 실험 후 pH 및 하중조건이 열전도도에 미치는 영향을 파악하기 위해 실험 전 암석의 평균 건조·포화 열전도도를 측정하였다. 측정된 실험 전 암석의 건조 열전도도는 2.97 W/m·K, 포화 열전도도는 3.16 W/m·K로 측정되었다. pH 및 하중조건 실험 후, 열전도도는 pH3 및 30MPa의 실험 조건을 제외한 5가지(20MPa-pH2, 3, 4 및 30MPa-pH2, 4) 실험 조건에서 초기 열전도도에 비해 감소하였다(Table 4). 실험 후 열전도도가 초기 열전도도에 비해 증가한 pH3 및 30 MPa 실험 조건의 암석 시료를 관찰한 결과, 암석시료에서 기존의 실험 시료 암질과 다른 석영 맥이 관찰되었다. 공극률이 작은 암석의 열전도도는 구성하고 있는 광물의 조성에 크게 영향을 받을 것으로 예상할 수 있다(Lee, 2007). 이에 pH3 및 30 MPa 실험 조건에 사용된 암석 시료의 경우, 광물 조성의 특이성으로 인해 다른 실험조건들과 다른 열전도도 변화 경향을 보인 것으로 판단하여, 실험 조건에 따른 물성 변화에 대한 고찰에 반영하지 않았다.

Fig. 7은 산성수 침수 및 하중조건 부여 후 pH에 따른 건조·포화 열전도도를 나타낸다. 일정한 하중이 가해진 암석에서 침수시킨 산성수의 pH가 감소됨에 따라

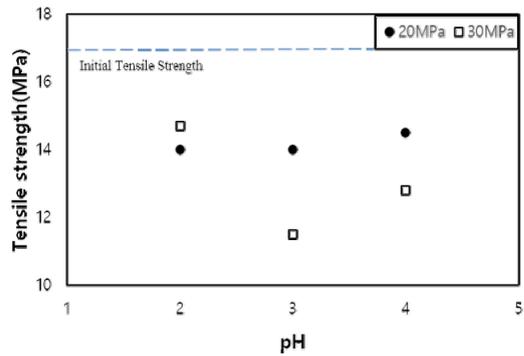


Fig. 8. Variation of tensile strength with pH of solution

열전도도가 낮아지는 경향을 관찰하였다. 또한 동일한 pH의 산성수에 침수된 암석에서 가해진 하중이 증가함에 따라 열전도도가 높아지는 것을 확인하였다. 이는 산성수의 pH 및 하중 조건 변화에 따른 화학반응 속도의 변화의 영향으로 판단된다.

4.4 간접인장강도 변화

암석은 인장강도 시험에서 균열 전파 및 암석 파괴가 거의 동시에 발생하며, 인장력에 매우 취약한 특성을 보인다. 암석 내 조건의 변화에 따른 이차적 영향에 의해 균열이 발생하는 경우 암석의 인장강도가 달라질 것이다(Heo et al., 2014, Brace, 1960). 본 연구에서 고려한 산성수 및 하중 조건에서 화학·역학적 영향에 의해 암석 내 균열이 발생한다면 인장강도도 변할 것으로 예상할 수 있다.

간접인장시험을 통해 얻어진 암석의 초기 인장강도와 산성수 및 하중 조건 실험 후 인장강도를 비교해 보았을 때, 실험 후 암석 시료의 인장강도가 약 14~32%의 범위에서 감소한 것을 관찰하였다(Table 3, Table 4). Fig. 8은 산성수에 침수된 상태로 일정한 하중을 받은 암석에서 산성수의 pH가 변화에 따른 인장강도의 변화를 보여준다. 30 MPa의 하중을 받은 암석이 pH3 및 4의 산성수에서 20 MPa의 하중을 받은 암석 보다 인장강도가 낮게 나타났다. 또한 pH2의 산성수에 침수된 암석에서는 20 MPa 하중 조건에서 30 MPa의 하중조건과 비교하여 작은 차이지만 낮은 인장강도 값을 보였다.

5. 고찰

산성수 및 하중조건이 암석에 미치는 영향을 파악하기 위해 pH 및 하중변화에 따른 암석 물성을 측정하였

다. 실험 결과, 일정한 하중이 가해진 암석에서 침수시킨 산성수의 pH가 감소함에 따라 공극률의 변화는 증가하고 탄성과 속도 및 열전도도는 감소하는 경향을 보였다(Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7). 암석과 산성수 사이에 화학반응이 발생하게 되면, 용액(산성수)과 용질(암석)사이의 물질교환이 발생되어 암석 내 공극부피가 변화하게 된다. 용액과 용매 사이의 화학반응 속도는 일정한 온도에서 분자사이의 유효 충돌 횟수와 관련된 용액 농도에 비례하여 증가하게 된다. 즉, 산성수의 pH가 감소되면 용액 내 수소이온의 농도가 증가하여 암석과 수소이온의 충돌 횟수가 증가하게 되고, 이에 따라 높아진 화학반응 속도에 의해 용출량이 증가되어 암석 내 공극부피가 증가한 것으로 판단된다. 또한, pH가 낮아짐에 따라 암석 내 공극률 변화가 증가하여 탄성과 속도 및 열전도도가 감소한 것으로 판단된다.

일정한 pH의 산성수에 침수된 암석에서는 가해진 하중 증가에 따라 공극률의 변화가 감소하고, 탄성과 속도 및 열전도도는 증가하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 균열개시 응력(Crack initiation stress) 이하의 하중에서 예상할 수 있는 변형에 의한 공극 부피의 감소가 원인으로 판단된다. 즉, 하중 증가에 따라 암석과 산성수 사이의 화학반응 면적이 감소하여 공극률 변화는 줄고 암석 내부 입자구조가 더욱 치밀해지면서 탄성과 속도 및 열전도도가 높아진 것으로 판단된다.

암석의 간접인장강도는 실험 전·후 측정된 값의 비교를 통해 pH 및 하중조건에 의해 모든 암석시료에서 감소된 것을 관찰하였다. 그러나 pH 및 하중의 변화에 따른 일정한 암석 인장강도의 변화는 나타나지 않았다(Fig. 8). 이는 화학역학적 영향에 의한 암석 인장강도의 변화가 매우 복잡하게 나타나는 것을 의미하며 향후 pH 및 하중이 강도에 미치는 영향에 대한 보다 면밀한 분석이 필요할 것으로 판단된다.

pH 및 하중 조건 실험 진행 중, pH2의 산성수에 침수된 암석에서는 40 MPa, 50 MPa 및 60 MPa의 일정한 하중이 가해질 때 파괴가 발생하였다. 또한 pH4의 산성수에 침수된 암석에 40 MPa의 일정한 하중이 가해질 때는 파괴가 발생하지 않았다(Table 5). 하중에 의한 균열개시응력은 암질, 풍화 정도 등에 따라 다양하게 나타나지만, 본 연구에서는 파괴 강도의 약 40%에 해당하는 40 MPa로 가정하였다. 암석 내 하중에 의해 균열이 발생되면, 암석과 산성수 사이의 접촉 면적이 증가된다. 이에 화학반응을 하는 신선한 암석이 지속적으로 산성수에 노출되면서 용출 속도는 증가하게 되고, 균열이 지속적으로 발전하게 된다(Liu et al., 2006, Tada et al., 1986, Gratier et al, 1999). 즉, 균열 발생이 예측되

는 하중 조건에서는 암석의 화학반응 속도가 증가하고, 내부 균열이 지속적으로 발전하여 암석파괴를 야기한 것으로 판단된다.

40 MPa의 동일하중 조건에서 pH4의 산성수에 침수된 암석은 파괴되지 않은 반면, pH2의 산성수에 침수된 암석은 파괴되었는데 이는 산성수의 pH가 낮아짐에 따라 암석의 용출량이 증가되어, 균열 발전 속도가 상대적으로 높아졌기 때문으로 판단된다.

6. 결론

본 연구는 산성수에 침수된 상태로 지반의 하중을 받고 있는 폐광산 암반의 물성 변화를 추정하기 위한 다양한 실내 실험을 수행하였다. 실험에서는 암석에 pH 및 하중 조건을 부여한 후, 조건에 따른 유효공극률, 탄성과 속도, 열전도도, 인장강도의 물성 변화를 관찰하였다. 실험을 통해 얻어진 주요 결론들은 다음과 같다.

1. 일정한 하중을 받는 암석에서 침수시킨 산성수의 pH가 감소할 때, 공극률 변화 증가, 탄성과 속도 및 열전도도가 감소하는 경향을 보였다. 이는 산성수의 pH감소에 따른 암석의 용해량 증가가 원인으로 판단된다.
2. 일정한 pH의 산성수에 침수된 암석에서 작용하는 하중이 증가함에 따라 공극률 변화 감소, 탄성과 속도 및 열전도도가 증가하는 경향을 보였다. 이는 균열개시 응력 이하의 하중 영역에서는, 하중이 증가함에 따라 암석 내 화학반응 영역 감소 및 이에 따른 암석 용해량 감소가 원인으로 판단된다.
3. 하중에 의한 균열 발생이 예상되는 하중에서 pH2의 산성수에 침수된 암석은 파괴가 발생하였고, pH4의 산성수에 침수된 암석에서는 파괴가 발생하지 않았다. 균열 발생이 가능한 하중에서는 침수시킨 산성수의 pH가 낮아짐에 따라 균열 발전 속도가 증가했기 때문으로 판단된다.
4. 국내외에서 기존 유사 연구가 없는 상황에서 하중 및 산성수에 의한 암석 물성 변화를 예비 평가하기 위해 수행된 본 연구는 몇 가지 한계점을 가진다. 보다 신뢰도 높은 연구를 위한 제안사항은 다음과 같다.
 - i. 본 실험에서는 암석을 침수시킨 초기 pH가 실험 후의 pH와 다르게 나타났다. 이는 암석의 용해과정 중 발생한 중화 반응 때문일 것으로 판단된다. 이를 통해 정성적으로 암석과 산성수 사이의 화학반응이 발생하였음을 추정할 수 있다. 하지만 실제 폐광산의 암반은 pH의 변화가 거의 없는 산성수

에 침수되어 있을 것으로 예상된다. 따라서 암석을 침수시킨 산성수의 pH가 일정하게 유지될 수 있는 장치 또는 방법을 사용한다면 산성수의 영향을 보다 명확하게 볼 수 있을 것이다.

- ii. 암석물성은 실험조건이 부여되는 기간에 따라 달라질 것이다. 본 실험에서는 다수의 실험을 위해 실험 시간을 72시간으로 고정하였지만 암석 물성의 변화 메커니즘을 파악하기 위해서는 추후 산성수 및 하중 조건의 변화와 함께 실험 시간의 경과에 따른 암석 물성 변화를 관찰하는 것도 필요하다.
- iii. 화학적 영향은 암석을 구성하는 광물입자의 성분 및 구조에 따라 다르게 나타날 것으로 예상된다. 박편 관찰을 통해 산성수 침수 및 하중조건 전·후 광물학적 정보를 비교함으로써 광물 조성에 따른 암석 물성 변화를 평가할 수 있을 것이다.
- iv. 지하수의 pH, 하중 및 시간 등의 복합적 상호작용을 종합적으로 평가하기 위해서는 모델링과의 연계가 필요하다. 실험을 통해 수리-역학-화학 모델링기법을 검증하고 검증된 모델링 기법을 다양한 조건에 적용함으로써 보다 신뢰도 높은 평가가 가능할 것이다.

본 연구를 통해 얻어진 결과는 폐광산뿐만 아니라 산성수에 침수된 다양한 지하공간 암반구조물의 물성 변화를 예측하기 위한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 산성수에 장기간 노출된 석조 문화재 및 건축물의 안정성 평가에도 활용될 수 있을 것이다.

사 사

이 논문은 2015년 정부(교육부)의 재원으로 한국창의과학재단(2015년 학부생 연구 프로그램)의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호 52114-1)

References

1. Bernd, G. Lottermoser, Cayol, 2010, Mine Waste, Springer, 3rd Edition, Springer, New York, pp. 43-50.
2. Brace, W., F., 1960, An extension of the griffith theory of fracture to rocks, Journal of Geophysical Research, Vol. 65, Issue 10, pp. 3477-3480.
3. Charles Derek Martin, 1993, The strength of massive lac du bonnet granite around underground openings, Doctor of science thesis, University of Manitoba, Canada.
4. Cho, W., J., Kwon, S., K., Choi, J., W., 2008, Thermal conductivity of granite from the KAERI underground research tunnel site, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 18, No. 3, pp. 219-225.
5. Eberhardt, E., Stead, D., Stimpson, B., 1999, Quantifying progressive pre-peak brittle fracture damage in rock during uniaxial compression, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 36, Issue 3, pp. 361-380.
6. Eberhardt, E., Stead, D., Stimpson, B., Read, R. S., 1998, Identifying crack initiation and propagation threshold in brittle rock, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 35, No. 2, pp. 222-233.
7. Gratier, J., P., Renard, F., Labaume, P., 1999, How pressure solution creep and fracturing process interact in the upper crust to make it behave in both a brittle and viscous manner, Journal of Structural Geology, Vol. 21, Issue 8-9, pp. 1189-1197.
8. Grgic, D., Giraud, A., Auvray, C., 2013, Impact of chemical weathering on micro/macro-mechanical properties of oolitic iron ore, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 64, pp. 236-245.
9. Heo, J., Lee, J., C., Seo, J., B., Park, S., H., Park, J., C., Kwon, S., K., 2014, Variation of thermal and mechanical properties of crystalline granite under saturated-loading condition, TUNNEL & UNDERGROUND SPACE, Vol. 24, No., 3, pp. 224-233.
10. Kim, J., H., Lee, M., S., Lee, M., H., Lee, J., M., Park, S., M., 2011, A study on effects of temperature for physical properties change of rocks, Journal of Petrological Society of Korea, Vol. 20, No. 3, pp. 141-149.
11. Kim, J., H., Lee, M., S., Lee, J., M., Park, S., M., 2010, Physical properties of rocks according to heating treatment, Conservation studies, Vol. 31, pp. 31-42.
12. Korean Society of Rock Mechanics, 2005, Standard test method for determination of elastic wave velocity of rock, TUNNEL & UNDERGROUND SPACE, Vol. 15, No. 4, pp. 239-242.
13. Korean Society of Rock Mechanics, 2005, Standard test method for uniaxial compressive strength of rock, TUNNEL & UNDERGROUND SPACE, Vol. 15, No. 2, pp. 85-86.
14. Korean Society of Rock Mechanics, 2006, Standard test method for indirect tensile strength of rock by the brazilian test, TUNNEL & UNDERGROUND SPACE, Vol. 16, No. 4, pp. 279-280.
15. Korean Society of Rock Mechanics, 2006, Standard test method for porosity and density of rock, TUNNEL & UNDERGROUND SPACE, Vol. 16, No. 2, pp. 95-98.
16. Lee, C. S., Kwon, S. K., Choi J. W., Jeon, S. W., 2011, An estimation of the excavation damaged zone at the KAERI underground research tunnel, Journal of Korean Society of Rock Mechanics, Vol. 21, No. 5, pp. 359-369.
17. Lee, C. W., Kim, J., Jeon, S., W., Kim, S., J., Jung, M., C., Lim, K., J., Jung, Y., U., 2014, Mine environmental engineering, Cir, Seoul, pp. 337-360.
18. Lee, Y., M., 2007, Thermal conductivity of rocks for geothermal energy utilization, Korea Society of Geothermal Energy Engineers, Vol. 3, No. 2, pp. 9-15.
19. Lim, H., U., Baek, H., Kim, C., H., 2000, Feasibility

- study on the utilization of abandoned underground excavation caverns, *Journal of Korean Society of Rock Mechanics*, Vol. 10, pp. 249-256.
20. Liu, J., Sheng, J., Polak, A., Elsworth, D., Yasuhara, H., Grader, A., 2006, A fully-coupled hydrological-mechanical-chemical model for fracture sealing and preferential opening, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 43, Issue 1, pp. 23-36.
 21. Martino, J. B., Chandler, N. A., 2004, Excavation-induced damage studies at the underground research laboratory, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 41, Issue 8, pp. 1413-1426.
 22. Min, K., B., Rutqvist, J., Elsworth, D., 2009, Chemically and mechanically mediated influences on the transport and mechanical characteristics of rock fractures, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 46, Issue 1, pp. 80-89.
 23. Ning, L., Yunming, Z., Bo, S., Gunter, S., 2003, A chemical damage model of sandstone in acid solution, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 40, No. 2, pp. 243-249.
 24. Park, J. D., Min, K. W., 2003, Variation of physical properties of rocks subject to artificial weathering, research of resources development, Vol. 17, pp. 51-60.
 25. Park, S., H., Heo, J., Lee, J. H., Park, J. C., Kwon, S., 2015, An evaluation of the influence of the rock property change under saturated-loading conditions on rock stability, *Journal of Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineer*, Vol. 52, No. 3, pp. 309-321.
 26. Park, S., Y., 2008, Application plan research of underground space developed by mining, 2nd paper contests of preventing mine damage, Mine Reclamation Corp (MIRECO).
 27. Peila, D., Pelizza, S., 1995, Civil reuse of underground mine openings: a summary of international experience, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 10, No. 2, pp. 179-191.
 28. Shin, H., S., 2001, The utilization of abandoned mine caverns for disposal of industrial wastes, *한국암반공학회 학술대회 및 세미나 자료집*, pp. 167-181.
 29. Shin, H., S., 2013, Underground space development and strategy in Korea, *TUNNEL & UNDERGROUND SPACE*, Vol. 23, No. 5, pp. 327-336.
 30. Shon, B. H., Jung, J. H., Kim, H. K., Yoo, J. G., Lee H. K., 2005, Effects of salts and acid solutions on the weathering of granite, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 27, No. 1, pp. 101-108.
 31. Son, Y. J., Kim, J. D., 2012, Mine haulage system design for reopening of yangyang iron mine using 3D modelling, *Journal of Korean Society of Rock Mechanics*, Vol. 22, No. 6, pp. 412-428.
 32. Tada, R., Siever, R., 1986, Experimental knife-edge pressure solution of halite, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 50, Issue 1, pp. 29-36.
 33. Wiederhorn S. M., Johnson H., 1973, Effect of electrolyte pH on crack propagation in glass, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 56, No. 4, pp. 192-197.
 34. Woo, I., Um, J., G., Park, H., J., 2009, Variation of geomechanical characteristics of granite and orthogneiss in wonju area due to accelerated artificial chemical weathering tests, *Journal of Korean Society of Rock Mechanics*, Vol. 19, No. 3, pp. 213-225.
 35. Xie, S., Y., Shao, J., F., Xu, W., Y., 2011, Influence of chemical degradation on mechanical behaviour of a limestone, *International Journal of Rock Mechanics*, Vol. 48, pp. 741-747.

정재홍

2015년 인하대학교 에너지자원공학과
공학사



Tel: 032-872-7551
E-mail: jaehongchung1@gmail.com
현재 인하대학교 에너지자원공학과 석
사과정

박승훈

2012년 조선대학교 에너지자원공학과
공학사
2014년 인하대학교 에너지자원공학과
공학석사



Tel: 032-872-7551
E-mail: wartrip@naver.com
현재 인하대학교 에너지자원공학과 박
사과정

이승준

Tel: 032-872-7551
E-mail: popo4816@naver.com
현재 인하대학교 에너지자원공학과 학
사과정



유승원

Tel: 032-872-7551
E-mail: h-2250@hanmail.net
현재 인하대학교 에너지자원공학과 학
사과정



이우희

Tel: 032-872-7551
E-mail: lwh5627@naver.com
현재 인하대학교 에너지자원공학과 학사
과정



권상기

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



Tel: 032-860-7554
E-mail: kwonsk@inha.ac.kr
현재 인하대학교 에너지자원공학과
부교수